

地質環境データ解析・可視化システムにおける 地下水流動解析コードの高度化

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2001年2月

日揮株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合には、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松字4番地49

核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division.,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

地質環境データ解析・可視化システムにおける地下水流動解析コードの高度化
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

池田孝夫¹

吉田英爾¹

要 旨

地質環境データ解析・可視化システム(GEOMASS)は、ボーリングをはじめとする多種多様なデータにもとづき地質構造を解析・モデル化し、その結果を3次元的に可視化するとともに、更に水理学的な情報を付加して地下水流動解析に至る作業を包括的に支援するソフトウェアパッケージであり、平成9年度の開発以降、東濃地科学センター周辺の地質構造/水理地質構造理解のための諸研究、ならびに瑞浪市に計画されている超深地層研究所計画に関連したモデル構築において多くの成果を収めている。

本システムを構成する主要なソフトウェアのうち地下水流動解析コードにおいては、解析対象を多孔質媒体と亀裂性媒体の両者の特徴を兼ね備えたハイブリッドとして評価することが可能であり、昨年度の作業で評価対象を飽和地下水流動解析から不飽和地下水流動解析へと拡張するとともに、立坑掘削影響解析を行うための内部境界条件設定機能を追加し、超深地層研究所計画への対応が図られた。一方、超深地層研究所計画用地及びその周辺における地質調査やモデル構築に伴う理解の増進によって、この地域の地下水流動を評価する上で重要と考えられる水理学的な特徴が把握されてきたこと、コードの使用を通じて幾つかの機能の必要性が指摘されたことに対応して、引き続き解析コードを高度化する必要性が認識された。

そこで、本年度の作業では、以下の事項を中心にコードを高度化し、超深地層研究所計画に関連したモデル構築/地下水流動解析への本システムの適用性を高めた。

- ・ 透水異方性を考慮するための機能の導入
- ・ 亀裂分布推定機能の追加
- ・ 亀裂情報の出力機能の導入

本報告書は、日揮株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。
機構担当部課室：東濃地科学センター 地層科学研究グループ

¹ 日揮株式会社

- ・ 亀裂交差部の透水性設定機能の追加
- ・ 不均質透水係数場の設定機能の追加

また、これらの機能を確認するための試解析として、個別の機能を確認するための比較的単純な解析と、超深地層研究所計画用地を中心とした場（サイトスケール：約 4km×6km）を対象に、追加された機能を総合的に取り入れた飽和定常地下水流動解析を行い、解析コードの適用性を確認するとともに、サイトスケールの定常地下水流動解析として一つのモデル計算を提供した。加えて、揚水試験の模擬解析について幾つかの試解析を行い、解析の方向性を提示した。

さらに、本システム利用のサポートとして、東濃地科学センターにおける 2 回の実地支援とインターネットを主体としたリモート支援を行った。この中で、本システムの活用を通じて地質／水理地質調査から地質構造／水理地質構造モデル化、さらに地下水流動解析の実施から各種調査へのフィードバックに至る一連の作業を効果的に進めるための作業を支援し、さらにこれら作業の方法論の構築について助言した。

これらの作業から、長期揚水試験の精緻なモデル化には改善すべき幾つかの事項が残っているものの、本システムの活用により各種のモデル化及び解析を効果的に進めるための体制を整えることができた。超深地層研究所計画を含む今後の地層科学研究に、本システムが活用されることが望まれる。

Enhancement of Groundwater flow analysis code of Geological Modeling Analysis and
Simulation Software (GEOMASS)

Hideji Yoshida and Takao Ikeda²

Abstract

GEOMASS is a software package that supports analysis and modeling of geological structure, 3-D visualization of the model, development of groundwater flow model and the analysis by effectively utilizing various kinds of data including those from boreholes. GEOMASS was developed in fiscal year 1997 and have got good result in many studies not only to understand the geology and hydrogeology around the Tono Geoscience Center but also to develop geological and hydrogeological mode of the MIU site in Mizunami City.

The groundwater water flow code of GEOMASS is capable of ground water analysis in the “hybrid medium” that represents two of completely deferent water flow characteristics simultaneously, namely porous medium and fractured medium. In fiscal Year 1999, the code was expanded its capability from saturated groundwater flow analysis to saturated-unsaturated analysis and also to deal with complex internal boundary condition to simulate shaft sinking in the MIU project. On the other hand, recent studies of geotechnical investigation and modeling activities on the MIU site indicate there exist some important hydrogeological features to be modeled in the groundwater flow analysis.

In this context, in this fiscal year, the groundwater flow analysis code of GEOMASS is enhanced its capability to deal with above mentioned “hydrogeologically impotent features” in the flow analysis. The major improvements that have been made are as follows.

- enhancement of the function to take anisotropy into account
- introduction of additional fracture distribution features to DDfs

This work was performed by JGC Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency

JNC Liaison : Geoscience Research Execution Group, Tono Geoscience Center

² JGC Corporation

- introduction of the new capability to output the additional information on DDFs
- introduction of function to set the enhanced permeability at cross section of fractures
- introduction of function to input heterogeneous permeability field generated by third party software

In this study, two series of test calculations were carried to check the enhanced capabilities; one is simple calculations to check every function individually and the other is groundwater flow analysis of the site-scale (4km×6km) in the MIU site. In the latter calculations, enhanced capabilities of the code are used comprehensively in the saturated analysis, indicating the good capabilities of the code. And the models developed in the latter calculations gave good example model to analyze hydrogeology in the site scale. Also, pumping test was analyzed by the code in this study.

With regards to the support activity of this project, specialists visited Tono Geoscience Center twice, and remote support was provided via the internet etc. In this supports, systematic way of geo-science activities starting with geotechnical, hydrogeological investigations followed by development of geological, hydrogeological model, groundwater flow analysis and ending off by feeding back those result to the geotechnical, hydrogeological investigations was advanced.

As a conclusion of this study, even if there still exist some points to be improved for the detailed modeling of the Long-term Pumping Test, it is confirmed that GEPMASS can provide effective support in the geo-science activities including modeling and analysis. It is strongly recommended to utilize this system in the future geo-science activities including MIU project.

目 次

1. はじめに	1
2. 地下水流動解析コードの理論的背景	3
2.1 Frac-Affinity ネットワーク構築手法の概要	3
2.1.1 Frac-Affinity ネットワークの基本的考え方	3
2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの作成	6
2.1.3 解析メッシュの統合	9
2.1.4 境界条件の設定	12
2.1.5 孤立部分の削除	13
2.2 岩盤基質部	14
2.2.1 要素分割	16
2.2.2 水理特性の生成	18
2.2.3 フラクタル透水係数場の生成	18
2.2.4 透水係数値のインポート	23
2.2.5 岩盤基質部に対する Frac-Affinity ネットワークの構築	23
2.3 決定論的亀裂	25
2.3.1 概要	25
2.3.2 要素分割	26
2.3.3 物理特性の設定	27
2.3.4 決定論的亀裂ネットワークの構築	28
2.4 確率論的亀裂	29
2.4.1 概要	29
2.4.2 亀裂位置	31
2.4.3 亀裂の大きさ及び形状	31
2.4.4 亀裂の向き	32
2.4.5 透水係数	35
2.5 亀裂交差部での透水性設定機能	36
2.5.1 交差部の認識	36
2.5.2 亀裂交差部の水理学的特性の設定	37
2.5.3 Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い	37
2.6 立坑掘削モデルの構築	39
2.6.1 概要	39
2.6.2 立坑掘削により影響を受ける節点の抽出	40
2.6.3 立坑掘削に伴うレグの修正	41

2.6.4	修正部分を抽出するためのアルゴリズム	43
2.6.5	アルゴリズムの実行	45
2.6.6	地下水流動解析の実施	46
2.7	試錐孔部の取り扱い	47
2.7.1	試錐孔部の裾切り	47
2.7.2	岩盤基質部への試錐孔部のリンク	48
2.7.3	決定論的亀裂または確率論的亀裂への試錐孔部のリンク	49
2.7.4	試錐孔部および交差部の特性	49
2.8	地下水流動解析モデル	52
2.8.1	水分貯留モデル	54
2.8.2	点および境界条件	55
2.8.3	圧力変換	58
2.9	数値解析手法	59
2.9.1	定常状態地下水流動解析	59
2.9.2	非定常状態地下水流動解析	63
2.10	出力結果	64
2.10.1	流速	64
2.10.2	水収支	65
2.10.3	飽和度	66
2.10.4	フラックス	66
2.10.5	流路及びパーティクル	66
2.10.6	確率論的亀裂情報	67
3.	地下水流動解析コード並びにユーザインタフェースの改良	68
3.1	亀裂交差部の透水性設定機能の追加	68
3.1.1	交差部の認識	68
3.1.2	亀裂交差部の水理学的特性の設定	69
3.1.3	入力例	70
3.1.4	Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い	72
3.2	亀裂分布推定機能の追加	74
3.3	亀裂情報の出力機能の導入	75
3.4	透水異方性を考慮するための機能の導入	76
3.4.1	岩盤基質部の透水係数の異方性	76
3.4.2	亀裂透水係数の異方性	77
3.5	不均質透水係数場の設定機能の追加	80

4.	解析コードの検証	83
4.1	新規機能の動作確認	83
4.1.1	亀裂交差部の透水性の設定機能の確認	83
4.1.2	亀裂分布の推定機能の確認	83
4.1.3	確率情報の出力機能の確認	83
4.1.4	岩盤基質部の透水異方性を設定する機能の確認	83
4.1.5	決定論的亀裂の透水異方性を設定する機能の確認	84
4.1.6	確率論的亀裂の透水異方性を設定する機能の確認	84
4.1.7	透水係数場の取り込む機能の確認	84
4.2	サイトスケールでの基本ケースの水理地質構造モデルの構築	84
4.2.1	基本ケースモデル	84
4.2.2	代替モデルの構築	92
4.2.3	サイトスケールの水理地質構造モデルの解析結果のまとめ	103
4.3	揚水試験のモデルの構築	104
4.3.1	揚水試験の概要	104
4.3.2	Frac-Affinity による揚水試験	111
4.3.3	MIU サイトにおける長期揚水試験プログラムへの Frac-Affinity の適用	121
5.	可視化システム利用のサポート	131
5.1	第1回サポート	131
5.1.1	可視化システム利用のサポートの目的並びに全体計画の確認	131
5.1.2	地下水流動解析結果の不確実性評価に関する検討	138
5.1.3	地質調査計画全般に関する検討	141
5.1.4	物理探査に関する検討	144
5.1.5	高透水性ゾーンに関する検討	145
5.1.6	水理学的な観測に関する検討	146
5.1.7	地質構造モデルの改良（更新）に関するサポート	148
5.2	第2回サポート	150
5.2.1	Frac-Affinity ver 2.1 のインストールと動作確認	150
5.2.2	地質環境特性調査に関する状況の確認	150
5.2.3	地質環境特性調査に関する検討	151
5.2.4	地質環境データ解析・可視化システムを用いた基本ケース水理地質構造モデルの構築	152
5.2.5	複合的モデリングプロジェクトの運営に関する検討	152
5.2.6	モデルのレビュー	153
5.2.7	月吉断層上盤側の断層に関する検討	154

5.2.8	その他の検討	155
5.2.9	Frac-Affinity ver2.1 における揚水試験のモデル化の可能性に関する検討	156
6.	まとめ	157
	参考文献	158
	付録1 DYLAN タイムステッピングソルバーで用いられているアルゴリズム	

図リスト

図 2.1	Frac-Affinity ネットワークで節点およびレグに割り当てられる諸特性	4
図 2.2	岩盤基質部の幾何特性	4
図 2.3	亀裂の特性についての幾何特性	5
図 2.4	確率論的亀裂に対する解析メッシュの概念図	8
図 2.5	統合前における解析メッシュ (Frac-Affinity ネットワーク) の構造	10
図 2.6	統合後の解析メッシュ (Frac-Affinity ネットワーク) の構造	11
図 2.7	統合前の諸特性の割り当て	11
図 2.8	統合後の諸特性の割り当て	12
図 2.9	FRAC-AFFINITY が扱う構造ブロックの概念図	14
図 2.10	簡略化したモデル領域の構造ブロックの分解図	15
図 2.11	Frac-Affinity による側方境界面と上下境界面の設定	15
図 2.12	地質構造ブロックの配置と各軸方向の最大・最小値 (control point) との関係	16
図 2.13	部分的な詳細メッシュの設定例	17
図 2.14	フラクタルスケーリング則により透水係数の不均質場を設定する領域の概念図	19
図 2.15	相関長を考慮したバリオグラムの例	22
図 2.16	中点置換法によるメッシュの詳細化	22
図 2.17	岩盤基質部の要素分割と Frac-Affinity ネットワークの概念図	24
図 2.18	局所的に細密度が異なるセル間での連結部	25
図 2.19	決定論的亀裂に対する解析メッシュ (Frac-Affinity ネットワーク) の概念図	27
図 2.20	構造ブロックを包含する直方体内に設定された確率論的亀裂の例	30
図 2.21	南方から見た傾斜角度 60°、走向 90°の確率論的亀裂	33
図 2.22	上から見た傾斜角度 60°、走向 90°の確率論的亀裂	34
図 2.23	回転角度 15°の確率論的亀裂	34
図 2.24	亀裂の交差のバリエーションに関する概念図	37
図 2.25	既存の Frac-Affinity におけるネットワークの統合例	38
図 2.26	“ENHANCED_CONDUCTIVITY”が指定された場合の Frac-Affinity ネットワークの統合例	39
図 2.27	立坑掘削における Frac-Affinity ネットワーク修正の概念図	40
図 2.28	内部の節点が外部の節点よりも高い位置に存在する場合の Frac-Affinity ネットワークの修正	42
図 2.29	内部の節点が外部の節点よりも低い位置に存在する場合の Frac-Affinity ネットワークの修正	43
図 2.30	立坑掘削を反映させるための Frac-Affinity ネットワークの修正例	45

図 2.31	試錐孔の節点を岩盤基質部ネットワークに連結するためのリンク	48
図 2.32	岩盤基質部、決定論的亀裂または確率論的亀裂ネットワークへ試錐孔節点を連結するための代表的なリンク設定	50
図 2.33	van Genuchten モデルで与えられる飽和度と透水係数の関係の例	55
図 2.34	涵養量により境界条件を定義する場合の概念図	57
図 3.1	亀裂の交差のバリエーションに関する概念図	69
図 3.2	既存の Frac-Affinity におけるネットワークの統合例	73
図 3.3	“ENHANCED_CONDUCTIVITY”が指定された場合の Frac-Affinity ネットワークの統合例	73
図 3.4	確率論的亀裂における水平・垂直方向の概念	78
図 3.5	決定論的亀裂における水平・垂直方向の概念	78
図 4.1	試錐孔 MIU-2 における水頭分布の推算方法による比較	86
図 4.2	サイトスケール領域の基本ケースの地下水流動モデルに用いた地質構造モデル	89
図 4.3	地下水流動解析結果	90
図 4.4	地下水流動解析結果	91
図 4.5	HWDZ を考慮しない代替モデル計算結果	93
図 4.6	堆積層の表示をより正確にした代替モデルからの解析結果	95
図 4.7	代替的な要素分割パラメータを伴う代替モデルからの解析結果	97
図 4.8	側面全てで地形に応じた水頭条件を与えた代替モデルからの解析結果	98
図 4.9	月吉断層に異方的な透水係数を割り当てた代替モデル解析結果	99
図 4.10	月吉断層上盤側にある土岐花崗岩上部において確率論的亀裂として WCFZs を表現したサイトスケールの地質構造モデル	101
図 4.11	確率論的亀裂として WCFZs を表現した代替モデルでの解析結果	102
図 4.12	観測井の貯水の影響	106
図 4.13	井戸における非定常圧力応答に対する温度の影響	108
図 4.14	Frac-Affinity の不規則なネットワークにおける試錐孔の表現	110
図 4.15	反復入力（実線）及び非反復入力（点線）による境界条件の時間変化の設定例	114
図 4.16	揚水試験及び回復試験の解析解及び数値解析結果の比較	116
図 4.17	MIU-2 試錐孔の上部セクションでの一定水頭試験の例（/PT_BC/CNT_H_02）	117
図 4.18	不飽和を考慮した揚水試験中の解析結果	118
図 4.19	揚水点における水頭変化	119
図 4.20	有効区間（active interval）から種々の距離にある節点での応答	120
図 4.21	揚水井の深度方向の水頭プロファイル	120
図 4.22	MIU-1 でのクロスホール応答の例	128

図 4.23	MIU-2-1 セクションで実施された揚水試験中の MIU-2 及び MIU-1 試錐孔間でのクロスホール応答の例	128
図 4.24	試験中の揚水試錐孔における応答例	129
図 4.25	試錐孔 MIU-2 の 100 m より上の部分での一定水頭試験（実線）及び MIU-3 及び MIU-1 におけるクロスホール応答例	129
図 5.1	MIU-2 の水頭分布	134
図 5.2	El Berrocal における試錐孔の配置	143
図 5.3	Sellafield におけるクラスター状の試錐孔の配置例	144
図 5.4	水理地質構造モデル構築に関する複合的モデリングプロジェクトにおけるレポートの体系	153
図 5.5	UKセラフィールドサイトにおける Nirex の調査期間中に開発された断層 F2 および付随構造に対する 3次元断層構造のスケッチ	155

表リスト

表 2.1	立坑掘削に伴う Frac-Affinity ネットワークの修正のためのアルゴリズム	44
表 2.2	$Ax = b$ を解くための粗行列アルゴリズム	61
表 3.1	亀裂交差部の透水性を増加させる場合の決定論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット	71
表 3.2	亀裂交差部の透水性を増加させる場合の確率論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット	71
表 3.3	確率論的亀裂設定のための入力ファイルのフォーマット	74
表 3.4	走向と傾斜をサンプリングする母集団を定義するファイルのフォーマット	75
表 3.5	岩盤基質部の透水係数を設定する入力ファイルフォーマット	77
表 3.6	決定論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット	79
表 3.7	決定論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット	80
表 3.8	透水係数場を取り込むためのファイルフォーマット	80
表 3.9	透水係数場を取り込むためのファイルにおける透水係数値の順序を決めるアルゴリズム	81
表 3.10	岩盤基質部の透水係数入力ファイルフォーマット	82
表 4.1	基本ケースモデルの水収支	91
表 4.2	試錐孔ファイルのキーワード及びファイルフォーマット	112
表 4.3	試錐孔セクション bhs_1 の境界条件の設定	113
表 4.4	theis_test_input の解析条件	115
表 4.5	不飽和ケース (unsat_case.zip) のパラメータ設定	118
表 4.6	Base Case モデルで実施されたシミュレーション	123
表 4.7	試錐孔セクション名と区間座標	126
表 5.1	MIU-2 に設置されたプローブの位置と Horner 法により推定した水頭値	138

1. はじめに

地層科学研究においては、ボーリングをはじめとする多種多様のデータに基づき地質構造を解析・モデル化し、その結果を3次元的に可視化するとともに、これらの情報に基づき透水係数場を推定して地下水流動解析を行うことが重要である。そこで、これらの評価・検討を支援するシステムとして、各種地質データの解析を支援する Land Mark、地質構造モデルの構築を支援する EarthVision、透水係数場を推定し地下水流動解析を行う Frac-Affinity から構成される「地質環境データ解析・可視化システム」を平成9年度に開発している。

本システムを構成する主要なソフトウェアのうち地下水流動解析コードにおいては、解析対象を多孔質媒体と亀裂性媒体の両者の特徴を兼ね備えたハイブリッドとして評価することが可能であり、昨年度の作業で評価対象を飽和地下水流動解析から不飽和地下水流動解析へと拡張するとともに、立坑掘削影響解析を行うための内部境界条件設定機能を追加し、超深地層研究所計画への対応が図られた。一方、超深地層研究所計画用地及びその周辺における地質調査やモデル構築に伴う理解の増進によって、この地域の地下水流動を評価する上で重要と考えられる水理学的な特徴が把握されてきたこと、コードの使用を通じて幾つかの機能の必要性が指摘されたことに対応して、引き続き解析コードを高度化する必要性が認識された。

そこで、本年度の作業では、以下の事項を中心にコードを高度化し、超深地層研究所計画に関連したモデル構築／地下水流動解析への本システムの適用性を高めることとした。

- ・ 透水異方性を考慮するための機能の導入
- ・ 亀裂分布推定機能の追加
- ・ 亀裂情報の出力機能の導入
- ・ 亀裂交差部の透水性設定機能の追加
- ・ 不均質透水係数場の設定機能の追加

また、これらの機能を確認するための試解析として、個別の機能を確認するための比較的単純な解析と、超深地層研究所計画用地を中心とした場（サイトスケール：約 4km×6km）を対象に、追加された機能を総合的に取り入れた飽和定常地下水流動解析を行い、解析コードの適用性を確認するとともに、サイトスケールの定常地下水流動解析として一つのモデル計算を提供した。加えて、揚水試験の模擬解析について幾つかの試解析を行い、解析の方向性を提示した。

さらに、本システム利用のサポートとして、東濃地科学センターにおける2回の実地支援とインターネットを主体としたリモート支援を行った。この中で、本システムの活用を通じて地

質／水理地質調査から地質構造／水理地質構造モデル化、さらに地下水流動解析の実施から各種調査へのフィードバックに至る一連の作業を効果的に進めるための作業を支援し、さらにこれら作業の方法論の構築について助言した。

以上の事項について本報告書では、まず2章で解析コードを開発／高度化する際の理論的な背景を示し、続いて3章に、新たに追加または高度化された機能の概要をまとめる。また4章には、これら追加／高度化された機能の確認を目的に実施した試解析の設定及び計算結果を示す。さらに5章では、長期揚水試験を解析するための検討結果を含め、可視化システム利用のサポートとして実施した各種支援の内容をまとめることとする。

2. 地下水流動解析コードの理論的背景

2.1 Frac-Affinity ネットワーク構築手法の概要

Frac-Affinity では岩盤基質部、決定論的亀裂及び確率論的亀裂の重ね合わせを表現するために、Frac-Affinity ネットワークと呼ばれる差分メッシュを構築する。具体的には岩盤基質部、決定論的亀裂及び確率論的亀裂のそれぞれについて直方体あるいは四辺形を基本とした解析メッシュを個別に作成し、順次これらを一つのメッシュに統合してハイブリッド媒体に対する Frac-Affinity ネットワークを構築する。

なお昨年度の改良において、Frac-Affinity は立坑掘削を模擬する際に内部境界条件が時間変化することに対応し、Frac-Affinity ネットワークの構築手法についても改良を加えている。これは、立坑掘削の影響を地下水流動解析で評価するためには、内部境界面の形状や適用される境界条件の時間の変化に加えて、掘削により取り除かれる岩盤を表現する解析メッシュについて、空洞部分をメッシュが迂回するように逐次更新する必要性が生じたことによる。

本節では、Frac-Affinity ネットワークの構築方法を概説するとともに、次節以降で、岩盤基質部、決定論的亀裂、確率論的亀裂、立坑モデル及び試錐孔の取り扱いや設定方法を個別に述べる。

2.1.1 Frac-Affinity ネットワークの基本的考え方

Frac-Affinity ネットワークは、節点 (node) と節点をつなぐレグ (leg) から構成される。一つの節点には任意の数のレグが接合可能であり、節点及びレグに対して評価対象の透水係数や空隙率等の物性値が割り当てられる。概念図を図 2.1 に示す。

図 2.1 に示した様に、透水性や空隙率等の物理特性は節点に、長さや断面積等の幾何学形状に関する情報はレグに割り当てられる。例外的に、体積は節点に割り当てられる。なお、各レグには地下水の流向を表現するために「向き」が定義されている。

また、図 2.1 に示したように、レグは概念的に中央で分割されており、さらに分割したそれぞれの部分は節点に近い「近接部分」と、その先の分割部分までの「遠方部分」から構成される。これらの概念は、岩盤基質部、決定論的及び確率論的亀裂のそれぞれに対して別個に生成された解析メッシュを統合する際に、個々の解析メッシュが表現していた水理特性を保存するために重要なものとなる。

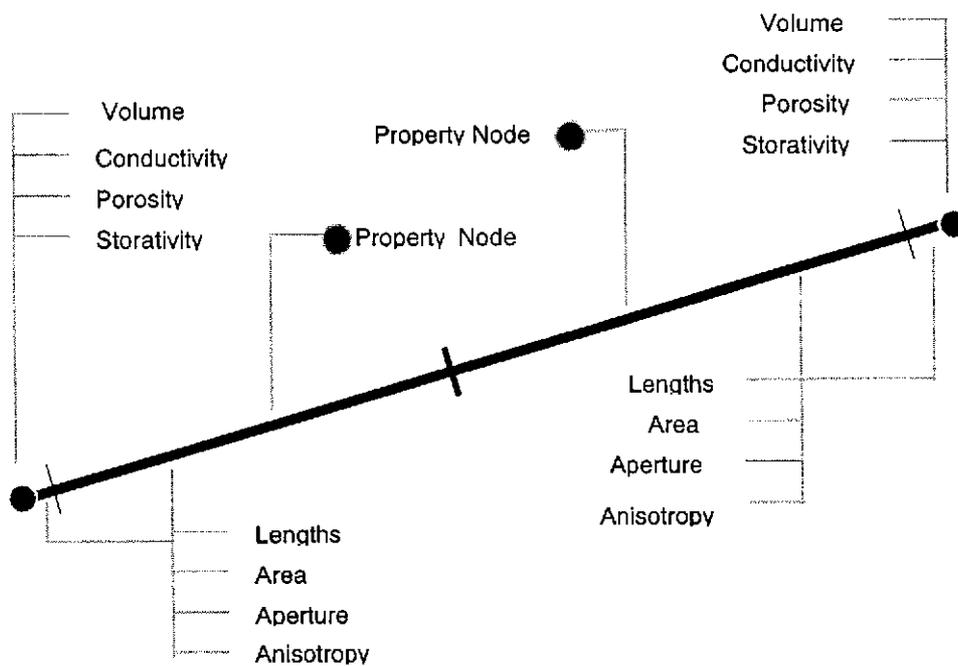


図 2.1 Frac-Affinity ネットワークで節点およびレグに割り当てられる諸特性

図 2.2 及び 2.3 に、岩盤基質部と亀裂の特性についての幾何学データを示す。

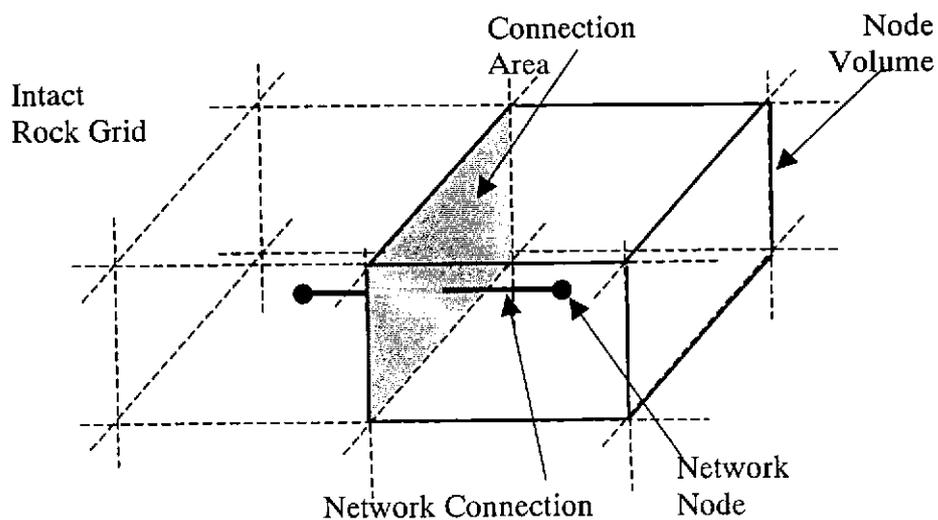


図 2.2 岩盤基質部の幾何学的特性の表現

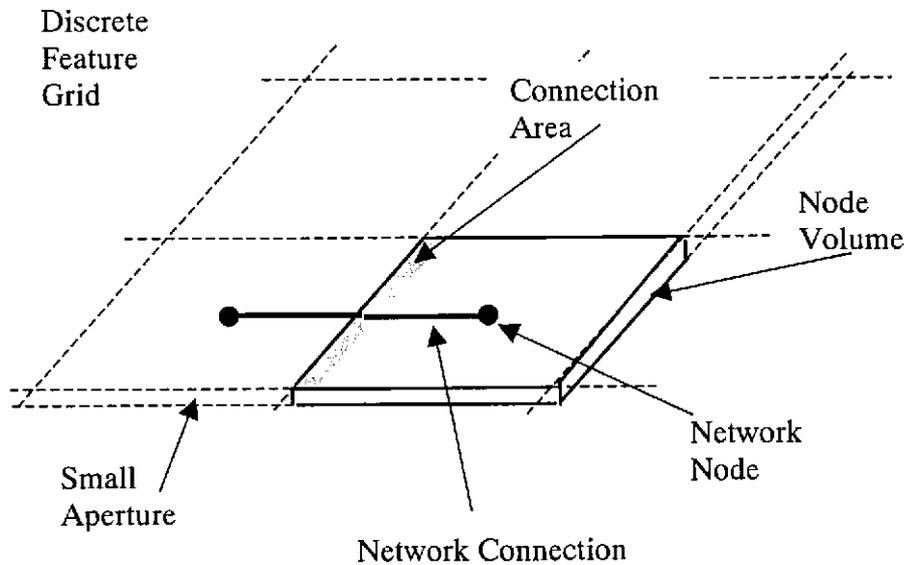


図 2.3 亀裂の特性についての幾何学的特性の表現

まず連結部データについて記述する。各セクション (near および far) は長さをもつ。far-section については、これは連結の中心部までの実際の距離になる。near-section の長さは常に小さく、0 または亀裂開口幅の半分である。ネットワークを作ると、near-section の長さは 0 になる。また、near-section および far-section は同じ面積および開口幅をもつ。面積は連結部の断面積であり、要素の幾何構造に合わせて設定され、節点を含むセルの連結部に垂直な方向の断面積である。開口幅は亀裂に対してのみ用いられ、単純に亀裂の開口幅である。半連結部のデータに関する最後の項目は「特性節点」である。「特性節点」は連結部の far-section の物理特性に対してどの節点の特性を用いるかを規定するために作成された概念である。はじめはこの特性節点は常に半連結部の端点の節点であるが、ネットワークが統合される際に変わる場合がある。

各レグ (leg) には各方向の異方性のファクターが保存されている。亀裂に対しては面内の値であるが、岩盤基質に対しては、x、y、z 方向の異方性のファクターとなる。亀裂と交差した後は、near-section の異方性は亀裂に関する通常の異方性となる。

各節点に関連するデータは、節点を作成し、ネットワークを統合した時にその節点が変わされない場合に設定される。体積はネットワークを作成するために用いた要素のセル体積である。亀裂については、体積は要素セルの面積×開口幅である。岩盤基質部の節点の体積には、実際には亀裂である部分も多少含んでいる可能性がある。しかしながら、亀裂に小さな開口幅を仮

定することで、このことは重要ではなくなる。試錐孔については、新しい節点が増えられたときに、岩盤基質部の体積を再設定する。透水係数、空隙率、比貯留率の概念は一般的なものである。

地下水流動計算では、各連結部の重要な特性は全体的な透水量係数である。透水量係数[m²/s]に水頭差[m]を乗じることによって流量[m³/s]が求まる。透水量係数は基本的に、面積×透水係数／長さで求まる。多数の連結部については、個々の透水量係数を結合しなければならない。多数の連結部の透水抵抗性（透水量係数の逆数）は、個々の透水抵抗性の合計であり、したがって全体的な透水量係数 C は次式から算出される。

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{l_i}{A_i k_i}$$

ここで、l：長さ、A：面積、k：連結部の各部分（全部で4つ）の透水係数である。ただし、ある部分の長さを0に設定するとこの式は無効になることに注意する必要がある（その部分が無限大の透水量係数である場合でも）。

その他の連結部の特性として、移行時間の算出がある。下方の連結部を通過する移行時間は基本的に長さ／流速で求められ、長さ×面積×空隙率／流量と等しい。流量は連結部の内部で一定であるので、移行時間は次式から得られる。

$$\tau = \frac{\sum_i l_i A_i \theta_i}{Q}$$

ここで、l：長さ、A：面積、 θ ：個々の連結部の空隙率、Q：地下水流量である。

これら2式では、連結部中の各部分で用いられている節点の特性（空隙率および透水量係数）は、端部の節点（near-section について）および特性節点（far-section について）の特性である。

2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの作成

Frac-Affinity では岩盤基質部、決定論亀裂及び確率論的亀裂のそれぞれに対して解析メッシュである Frac-Affinity ネットワークを個別に生成し、ついでこれを統合してハイブリッド媒体に対する Frac-Affinity ネットワークを構築する。

(1) 岩盤基質部

岩盤基質部に対する Frac-Affinity ネットワークは3次元の矩形メッシュで構築される。具体的には、まず岩盤基質部を直方体の要素に分割し、ついで注目する要素の全体が解析領域から外れる要素を取り除いた上で、残った要素の中心に節点を設ける。また、解析領域の外縁部に存在する要素については、解析領域の外表面に対応する要素表面の中心（重心）に境界節点と呼ばれる特別な節点を設ける。さらに、隣接する節点を格子状にレグで結合するとともに、ハーフコネクションと呼ばれる特別なレグによって境界節点とその境界節点が属する要素の重心に設けられた節点とを結合することにより、岩盤基質部に対する解析メッシュの第1次近似を作成する。以上の作業から明らかのように、この第1次近似として作成された解析メッシュは、直方体要素の集合体で解析領域を表現しており、その形状はあくまでも近似的なものである。実際の解析で使用する解析メッシュでは、領域形状をより厳密に表現することが必要であり、そのための調整が岩盤基質部に対する Frac-Affinity ネットワークに亀裂構造を表現するネットワークを統合した後に行われる。

(2) 亀裂

Frac-Affinity では、亀裂構造は2次元構造として表現される。決定論的亀裂については亀裂構造を x - y 平面に投影し、各 (x,y) 座標における高さ (z) の関数として幾何学形状を設定する。また確率論的亀裂については完全な平面として取り扱う。これらの亀裂構造のうち決定論的亀裂については、岩盤基質部と全く同様の方法により解析メッシュを構築するが、確率論的亀裂については、後述するように形状が長方形に限定されていることから境界節点を使用せずに解析メッシュを構築する。

決定論的亀裂

決定論的亀裂に対する解析メッシュは、その構造が2次元であることを除き岩盤基質部の解析メッシュと同様の方法で構築する。具体的には、まず亀裂を四辺形要素により分割し、要素全体が亀裂の範囲外となる要素を除く各要素の中心（重心）に節点を設置する。亀裂の外縁部に位置する要素については、岩盤基質部での取り扱いと同様に境界節点を外周に設置する。ついで、隣接する節点及び境界節点と境界節点が属する要素を代表する節点とを、レグあるいはハーフコネクションと呼ばれる特別なレグにより連結し、決定論的亀裂に対する解析メッシュの1次近似とする。岩盤基質部に対するメッシュと同様に、この段階では決定論的亀裂は四辺形で表現される要素の集合体として近似されている。形状等の修正は、岩盤基質部と亀裂構造のそれぞれを表現する解析メッシュを統合した後に行う。

なお、個々の確率論的亀裂に対して解析メッシュを構築する段階では、確率論的亀裂に対して境界節点が設置されることはないが、確率論的亀裂の解析メッシュを他の解析メッシュに統合して幾何学形状等を調整する際には、必要に応じて境界節点が追加される。

また、確率論的亀裂が立坑や坑道等の内部構築物（内部境界）と交差する場合には、坑道表面の境界条件を亀裂にも確実に適用するために坑道と亀裂との交差を解析メッシュの交差として確実に表現する必要がある。そこで Frac-Affinity では、このような場合、亀裂を表現する解析メッシュの中から直近の節点を抽出し坑道の中心線上に移動する作業を行うこととしている。

2.1.3 解析メッシュの統合

上記手順により岩盤基質部、決定論的亀裂及び確率論的亀裂のそれぞれに対して構築された解析メッシュは、最終的に一つの Frac-Affinity ネットワークに統合されて地下水流動解析に使用される。具体的には、解析メッシュの節点数を最小限に押さえるため、岩盤基質部の解析メッシュに対して決定論的亀裂及び確率論的亀裂を順次個別に統合することにより Frac-Affinity ネットワークを構築する。この作業は、基本的に岩盤基質部に対する 3 次元の解析メッシュに亀裂を表現する 2 次元のメッシュを統合する作業の繰り返しであり、以下の手順で実施される。

- ① 岩盤基質部に対する 3 次元の解析メッシュを構成するレグの中から、亀裂を表現する 2 次元構造と交差するものを抽出する
- ② 抽出されたレグのそれぞれについて、亀裂を表現する解析メッシュを構成する節点の中から直近のものを抽出する
- ③ 抽出されたレグを 2 分割し、分割端を②で抽出された亀裂上直近の節点に接合する
- ④ 上記の変更に対応し、解析メッシュ上に表現されている解析対象の諸特性を修正する

このうち、①から③の作業を 2 次元で概念的に示したものが、図 2.5 と図 2.6 である。図 2.5 と図 2.6 では、Frac-Affinity による 3 次元メッシュと 2 次元のメッシュの統合を、2 次元の解析メッシュに 1 次元の亀裂構造を統合する作業として概念的に示した。図 2.5 では、岩盤基質部に対する（もしくは、岩盤基質部に対する解析メッシュに既に幾つかの亀裂構造を統合した）2 次元の解析メッシュを構成するレグのうち 3 本のレグが亀裂を表現する 1 次元の解析メッシュと交差しており、統合後は図 2.6 に示すメッシュが作成される。この作業ではメッシュの統合により新たな接点が設置されることはなく、また岩盤基質部及び亀裂を表現する接点の移動の必要もない点に特徴がある。一方、この方法では亀裂交差部の位置が正確にモデル化されないことから、亀裂交差部で透水係数を上昇させる場合には本手法は不適切である。そこで、Frac-Affinity では、亀裂交差部において透水係数を上昇させる場合には、別の手法により

Frac-Affinity ネットワークを統合している。本法については 3.1 節で取り扱う。

解析メッシュのネットワーク構造の変更引き続き、Frac-Affinity は上記④の作業により、解析対象の諸特性を適切に保存させる。図 2.7 と図 2.8 に作業概念を示す。図 2.7 では、2 つの節点 A (特性 A を有する) と節点 B (特性 B を有する) を結ぶレグの B 寄りの位置でレグが亀裂と交差している。この場合、レグに割り当てられる長さや表面積等の情報は、亀裂と元のレグとの位置関係によって、図 2.8 に示すように再配分することが必要である。すなわち、特性 B の区間が、レグの分割によって不必要に短縮されないように、分割後の 2 つのレグに割り当てられる。また、亀裂を代表する節点に接合されているレグについては、亀裂の開口幅の $1/2$ が近接部分の長さとして与えられる。

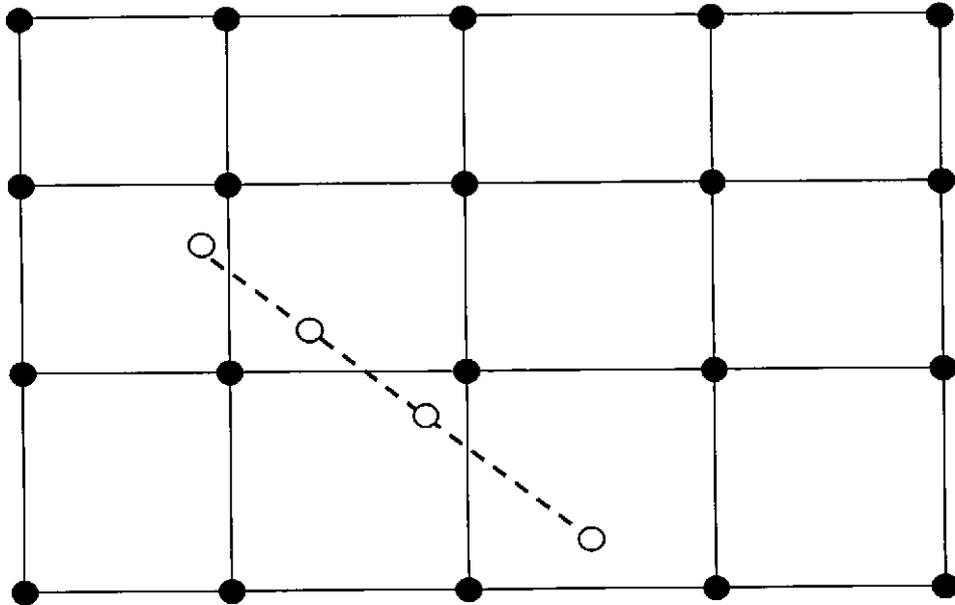


図 2.5 統合前における解析メッシュ (Frac-Affinity ネットワーク) の構造

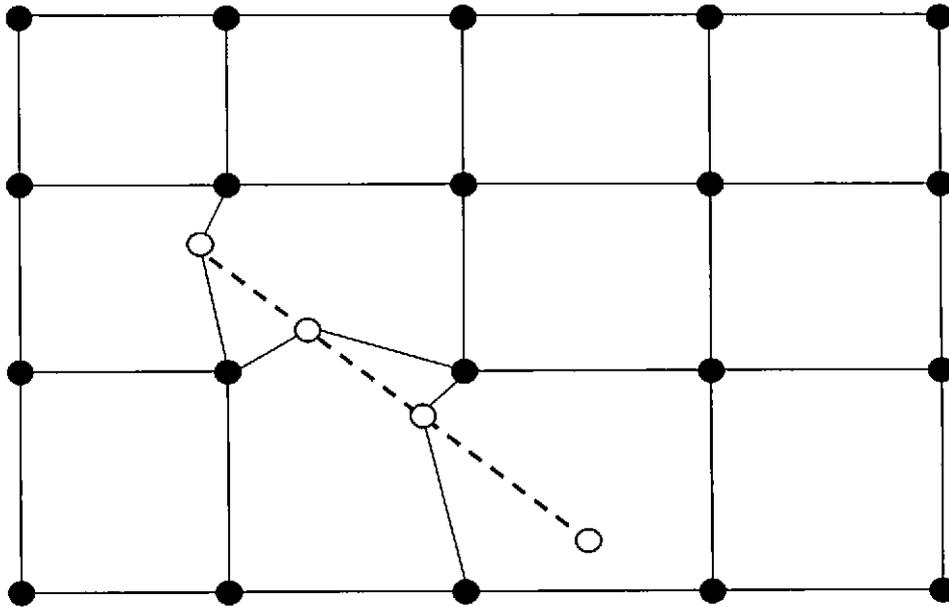


図 2.6 統合後の解析メッシュ (Frac-Affinity ネットワーク) の構造

なお、以上の作業により、ある 2 つの節点が複数の経路で連結される可能性が生じる。しかし、このことによって解析上の問題が生じることはなく、むしろ 2 つの経路を一つに統合する作業の方が困難であることから、Frac-Affinity では 2 つ以上の経路をそのまま解析で使用する事とする。

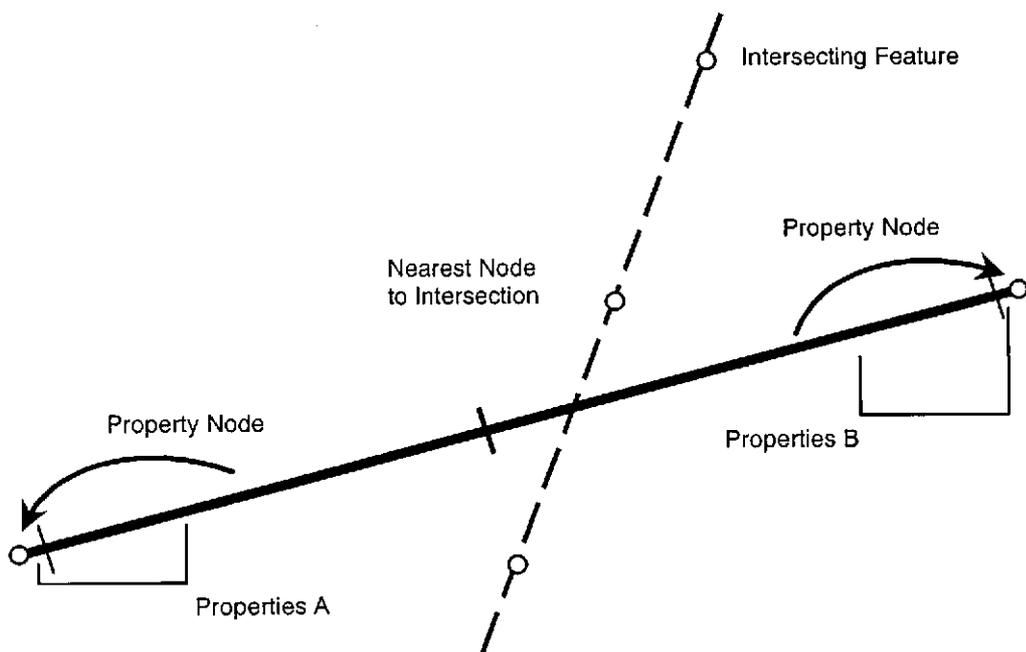


図 2.7 統合前の諸特性の割り当て

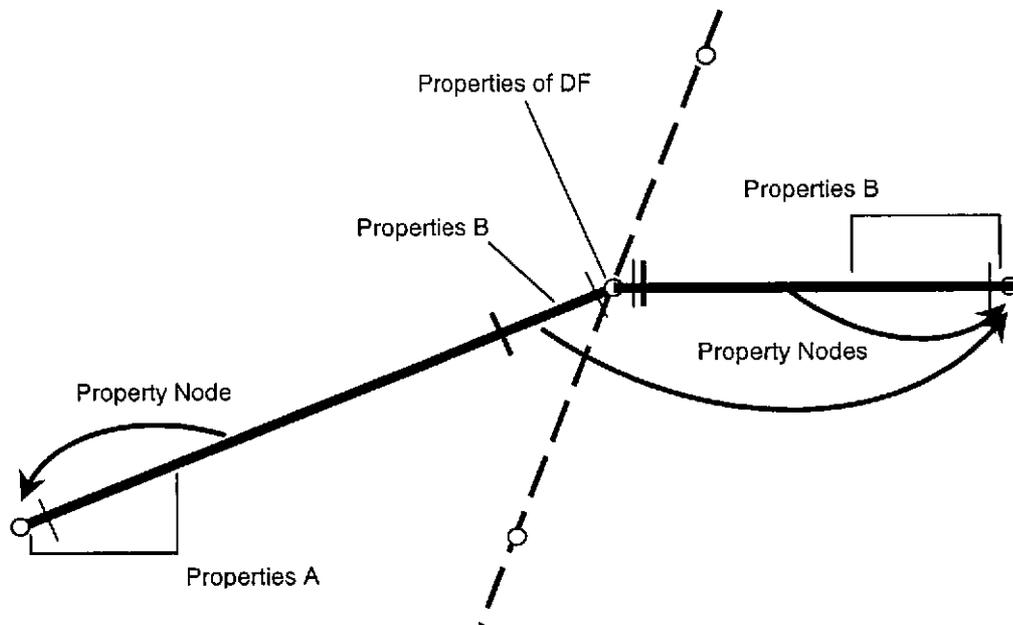


図 2.8 統合後の諸特性の割り当て

新たな特性は既にそこにある連結部に影響を及ぼし、連結部を横切るので、ネットワークはその順序に左右される。特に、後から加えられた特性は、最終的なネットワーク中に連続的な特性を形成する傾向がある。一方、低透水性である場合には、より効果的に止水部として機能する。これは Frac-Affinity の特徴をコントロールするには非常に便利であるが、既知の地質環境を参照するか、もしくは特定の概念モデルを調査するように適用されなければならない。

2.1.4 境界条件の設定

境界節点が正確に位置決めされていれば、正確な境界条件値を割り当てることは簡単である。

連結部がモデル領域境界と交差するところではすべて、境界節点が必要である。したがって、まずどの連結部が境界を交差するかを決定し、それからその連結部を境界節点への半連結部と取り替えなければならない。いくつかのケースでは、連結部はすでに境界節点で終わっており、そのケースでは連結部は簡単に移動される。そうでないケースでは、境界節点を作成し、新しく半連結部を作成し、古い連結部を削除する。

まずどの節点が内側にあり、どの節点がモデル領域の外側にあるかを定めることによって、どの連結部が境界と交差しているかが決まる。それから全ての連結部がチェックされる。境界節点の位置は、交差する連結部を繰り返し 2 等分することによって決定する。このプロセスに

おいては、EarthVision の要素は、各要素セル内での補間を用いている。それによって、あらゆる要素点における必要な z 座標をもった連続面が得られる。

古い節点は削除されるので、連結していないネットワーク部分もある。これらについては次項で取扱う。モデル領域内にある境界節点は切り捨てられる。このような節点は、全領域を交差しない決定論的亀裂の端部で発生する。

上述のアルゴリズムは、連結部の元々の属性にかかわらずネットワーク中の全ての連結部に適用される。したがって亀裂は、岩盤マトリクスと同様に、境界に適切に連結されている。

境界条件は、Frac-Affinity ネットワークの端点に設置される境界節点で設定される。このため、2.1.3 項で述べた解析メッシュの統合後に、解析領域の形状を正確に表現するように境界節点の位置が修正される。

2.1.5 孤立部分の削除

Frac-Affinity ネットワークは岩盤基質部と亀裂構造のそれぞれに対して構築した解析メッシュの統合により構築されることから、場合によってはメッシュのある部分から孤立する可能性がある。特に確率論的亀裂については、その大きさも確率分布に従って設定されることから、条件によっては岩盤基質部や他の亀裂構造に対して一切の交差が存在しない亀裂が設定される可能性がある。このようなメッシュの孤立部分は、他の部分の影響を受けることもなく、また他の部分に影響を与えることもないことから、解析上は意味を持たないメッシュとなる。したがって、計算効率の面からはこのような孤立部分をあらかじめ抽出し、計算対象から除外することが望ましい。具体的には、解析領域の表面を示す境界節点から見て孤立しているメッシュ部分が存在すれば、これを計算から除外する必要がある。

そこで Frac-Affinity では、境界節点のそれぞれから順にレグをたどり、何らかの経路により境界からたどり着くことが可能な節点を逐次マーキングし、全ての境界節点からこの作業を行ってもマーキングされない節点をメッシュの孤立部分として抽出する。そして、この作業により抽出された解析メッシュの孤立部分は削除され、以降の解析からは除外される。

2.2 岩盤基質部

Frac-Affinity における岩盤基質部とは、地質構造において多孔質媒体として取り扱うことが可能な部分を指しており、その形状や配置は EarthVision で構築される地質構造モデルで定義される。層序構造や断層構造等によって定義される構造ブロックの概念を図 2.9 及び図 2.10 に示す。Frac-Affinity が使用する構造ブロックに関する情報は、基本的に EarthVision からのエクスポートファイルによって定義されており [Dynamic Graphics, 1997]、解析領域の基盤となる岩盤基質部の形状や配置を定義することにより、Frac-Affinity の解析対象領域の全体像を設定する。

Frac-Affinity では、図 2.11 に示すように、側面境界を任意の鉛直面で表現するとともに、任意の(x,y)座標における上端境界及び下端境界を定義することで解析領域を設定する。また定義された岩盤基質部について、次の手順により解析メッシュを生成する。

- ① 岩盤基質部の要素分割によるメッシュ構造の生成
- ② 各要素への物理特性の割り付け
- ③ Frac-Affinity ネットワークの生成

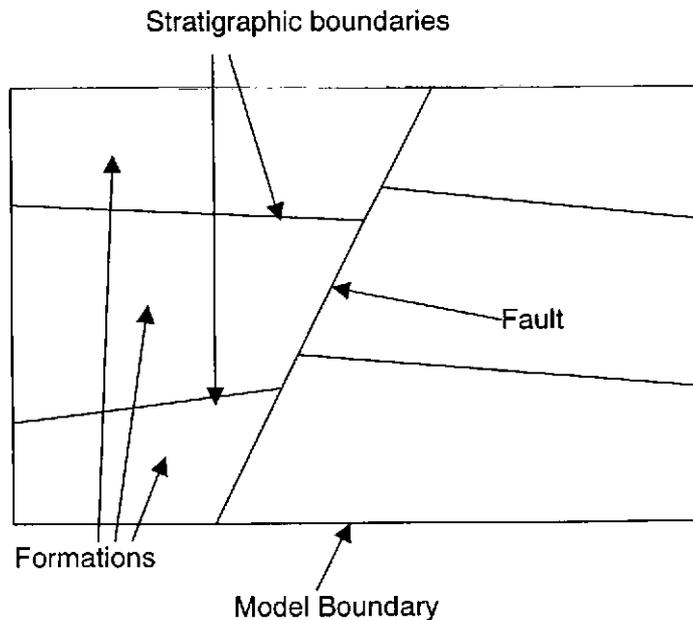


図 2.9 FRAC-AFFINITY が扱う構造ブロックの概念図

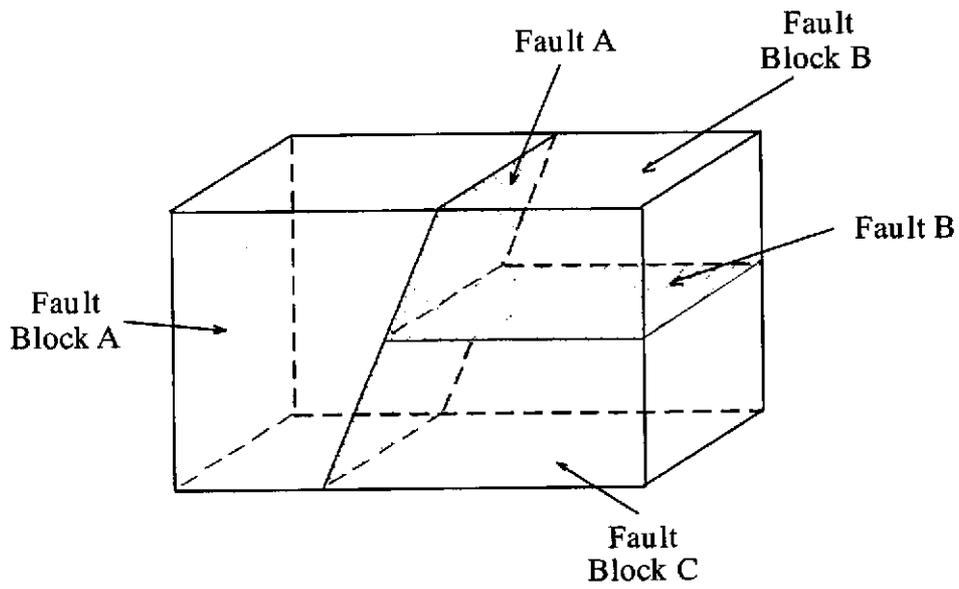


図 2.10 モデル領域における構造ブロックの概念図

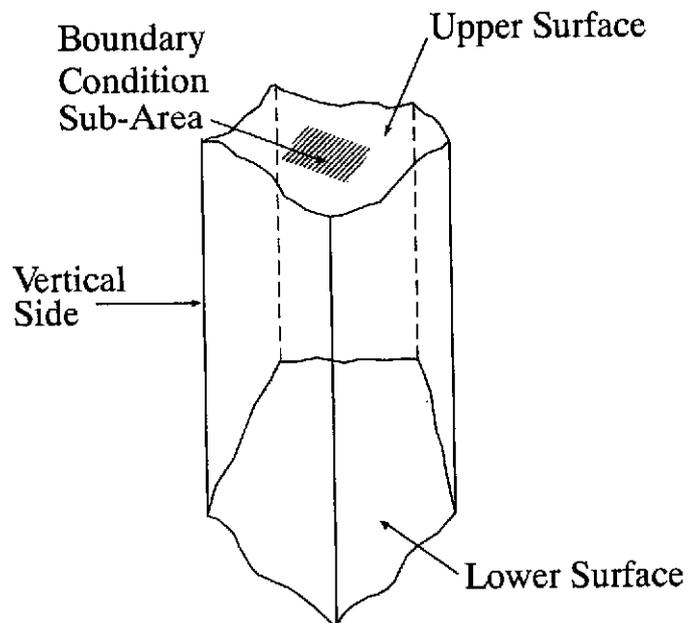


図 2.11 Frac-Affinity による側方境界面と上下境界面の概念図

2.2.1 要素分割

Frac-Affinity では、岩盤基質部を直方体の要素に分割することによりメッシュ構造を設定する。この直方体の各面は x 、 y 、及び z の各軸に平行な面で構成されており、岩盤基質部は各軸に平行な矩形面で分割された直方体要素の集合体として分割される。この作業にあたっては、図 2.12 に示すように、まず地質構造ブロックの各軸方向の最大値と最小値 (Control Point) を認識し、ついで、以下の設定に従い岩盤基質部を要素へ分割する。

- ・ 各構造ブロックに割り当てられるべき最低の要素 (節点) 数
- ・ 各軸方向の要素の大きさ

なお、Frac-Affinity では過度に詳細な、あるいは極端に縦横比の偏った要素への分割を回避するため、 x 、 y 及び z 方向における解析領域と大きさと、分割された要素のそれぞれの方向の長さとの比について、全ての軸方向に共通なパラメータ (Resolution Parameter, 0 から 1 の範囲) を設定し、これを前述の比の下限值に用いることとしている。

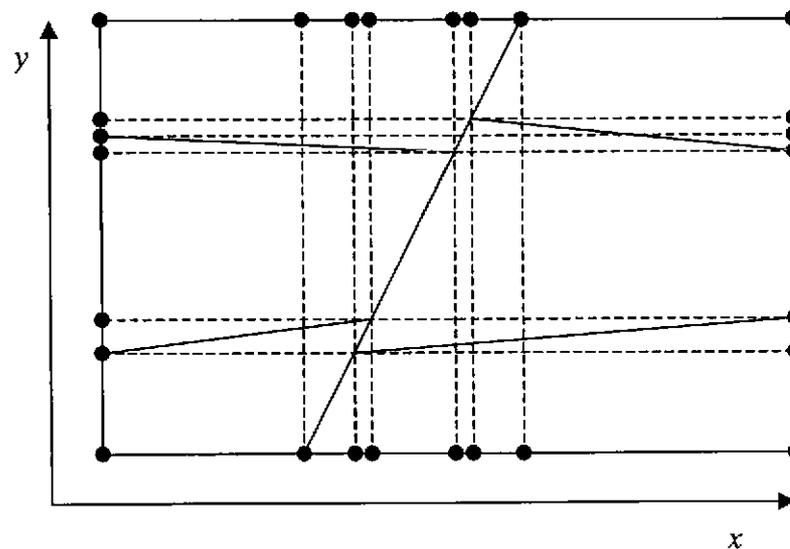


図 2.12 地質構造ブロックの配置と各軸方向の最大・最小値 (control point) との関係

また、今回のコードの拡張では、特定の領域を指定してメッシュサイズを変化させるための改良を行った。この機能は、特に坑道等の人工構築物の周囲におけるメッシュの詳細化に役立つものと期待される。具体的には、図 2.13 に示すように、詳細メッシュを使用する領域を包含する直方体の領域に対して軸方向別に改めてメッシュサイズを指定することにより、この領域を x 、 y 及び z 方向に投影した領域のメッシュ解像度を調整することができる。Frac-Affinity ver2.1 では、ハイブリッド媒体モデルへの試錐孔の取り入れに関連したメッシュの詳細化が有効で、2.5 節で検討する。なお、岩盤基質部に関する解析メッシュは x 、 y 及び z 軸に平行な矩形構造であることから、非常に薄い領域が座標軸に対して斜めに存在する場合には、注目する領域内でメッシュの連続性が失われる可能性があることに留意する必要がある。特に、注目する領域の厚さよりも、その軸方向の位置の変動が大きな場合には、この様な不具合が生じる可能性が高く、この部分が高透水性（すなわち水みちを形成する）あるいは低透水性（遮水部として働く）部となっている場合には、メッシュの不連続性にかかわる問題が顕在化する恐れがある。したがって、この様な構造は領域内でメッシュの連続性が保証される決定論的亀裂としてモデル化することが適切であり、メッシュ生成においては両者の適切な使い分けが重要である。

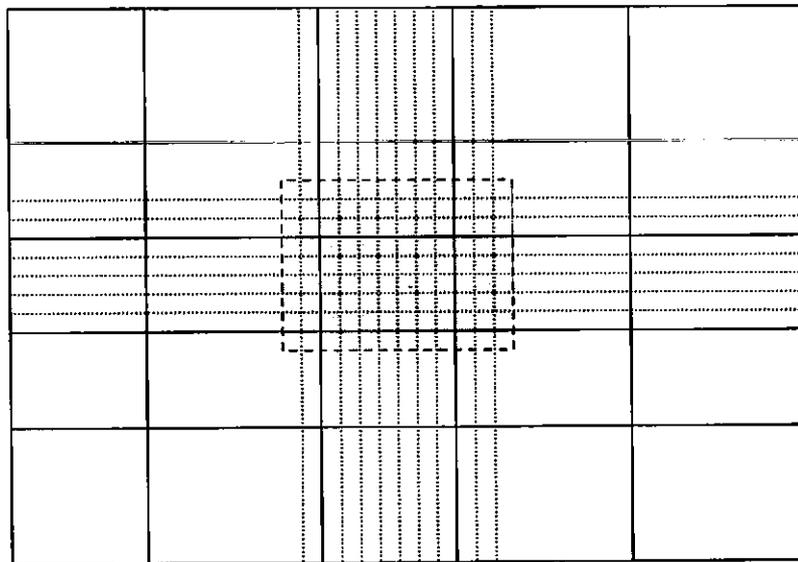


図 2.13 部分的な詳細メッシュの設定例（灰色に着色した部分が本来の詳細メッシュ設定領域であるが、メッシュが矩形構造を持つことから、その外側の領域でもメッシュが詳細化させる）

2.2.2 水理特性の生成

岩盤基質部の解析メッシュとして幾何学形状が設定された Frac-Affinity ネットワークには、引き続き物理特性が設定される。Frac-Affinity は EarthVision の出力によって、自動的に節点及びレグの属性（地質構造のどのブロックの部分に節点及びレグが所属しているか）を判断することから、ブロック内で均質な物理特性を与える場合には、単純に節点とレグにあらかじめ設定された物性値が付与される。一方、Frac-Affinity では岩盤基質部の透水係数をフラクタルスケールリング則により不均質に設定することが可能であり、この場合には以下の手順により不均質場を生成する。

不均質な透水係数場を作成し、ファイルから透水係数を読み込むための方法が、Frac-Affinity には2つある。これらの方法については、2.2.3 及び 2.2.4 項で検討する。

どちらのケースでも、異方性は指定できる。異方性のファクターは不均質ではなく、そのため各セルに対して非常に簡単に割り当てることが可能である。セルの値は、生成されたネットワークの連結部に用いる。各ネットワークの連結部は、各端部での節点は異なるゾーンから発生しているという事実を反映して、各端部での異方性のファクターは異なるものとなる。

2.2.3 フラクタル透水係数場の生成

まず、フラクタルスケールリング則による透水係数の不均質場は、地質構造単位ごとに生成することが合理的であると考えられる。したがって、不均質な透水係数場を設定する領域の広がり認識することが必要となる。また、地質構造ブロックの形状は不規則であり、さらにブロック内においても場所により解析メッシュのサイズが変化している可能性があることから、岩盤基質部の解析メッシュに対して直接フラクタルスケールリング則を適用し不均質場を設定することは困難である。

そこで Frac-Affinity では、解析メッシュである Frac-Affinity ネットワークの他に、x、y、z の軸方向にそれぞれ一定の間隔で領域を分割する整形メッシュを別途用意する。そして、この整形メッシュ上にフラクタルスケールリング則により透水係数の不均質場を生成し、整形メッシュ上に設定された透水係数から解析メッシュへ透水係数を算出する。なお、後述するように不均質場生成のためのメッシュが解析メッシュよりも詳細であることが望ましい。以上の作業は次のようにまとめられる。

- ① 透水係数の不均質場を設定する領域を完全に包含する直方体の設定
- ② 設定された直方体を対象とした、透水係数の不均質場生成のための整形メッシュの構

築と、構築されたメッシュへの透水係数の設定

③ 設定された透水係数にもとづく、解析メッシュへの透水係数の割り付け

このうち②の作業については、中点置換法により透水係数の不均質場を設定する。次節ではこの手法の概要を述べる。

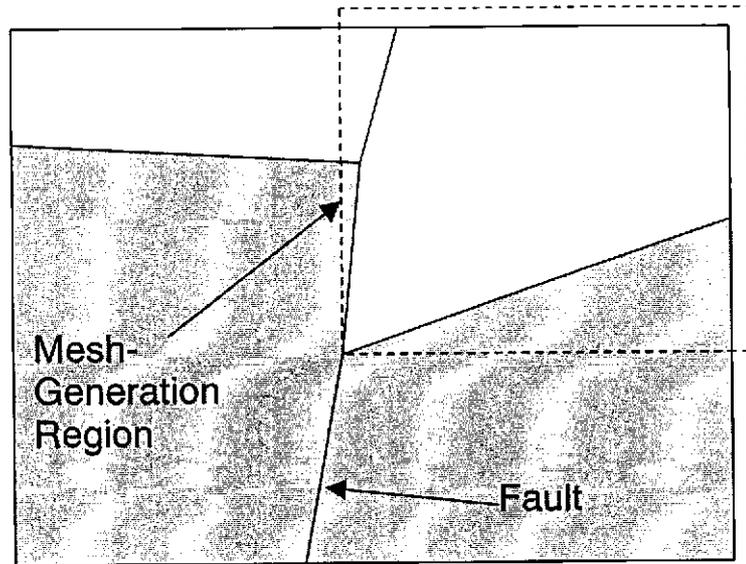


図 2.14 フラクタルスケーリング則により透水係数の不均質場を設定する領域の概念図

(1) 中点置換法

中点置換法は2次元メッシュ上に比較的容易にフラクタル場を生成するための手法として良く知られている[Press W. H., et al., 1992]。Frac-Affinityではこの手法を3次元化し、さらに試錐孔等での実測値によるコンディショニングが可能な手法に拡張している。また、透水係数の異方性については、相関長をx、y及びz方向に個別に設定することにより、高透水部分の連続性の変化として表現することが可能となっている。

まず簡単のため、等方的な不均質場を考える。等方性を仮定した場合にはバリオグラム $\gamma(h)$ は、次式により定義される。

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2} \left(\psi(x) - \psi(x-h) \right)^2 \right) = ah^{2p}$$

ここで、 $\psi(\mathbf{x})$ は透水係数、 \mathbf{h} は位置ベクトル（大きさ h ）、 p はHurst係数、 a は定数である。Hurst係数は場のフラクタル次元 D に関連した係数であり、 n 次元の空間において、 $p = n + 1 - D$ の関係で表現される。この定義によれば、3次元領域のフラクタル次元は3~4の範囲で与えられる。

上の式では等方性を仮定しているが、位置ベクトル \mathbf{h} にスケーリングファクターを導入することで、次式に示す異方性を考慮したバリオグラムへ拡張される。

$$\gamma(h) = a \left[\left(\frac{h_x}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{h_y}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{h_z}{\delta} \right)^2 \right]^p$$

ここで、 α 、 β 、 δ は各軸方向のスケーリングファクターである。定数 a は物理的には意味を持たないことから、各スケーリングファクターが等しい時は、上式は等方的な場におけるバリオグラムとなる。

方向ごとに相関長が一定であり、また領域全体で分散が一定であると仮定すると、両対数グラフ上に図 2.15 に示すバリオグラムを求めることができる。すなわち相関長（この場合 h_0 ）より大きな距離においては、バリオグラムは領域全体の分散 σ に相当する値で一定となる。さらに x 方向について、バリオグラムが一定値となる点を考えると次式を得る。

$$\ln \sigma = \ln a + 2p(\ln h_x^0 - \ln \alpha)$$

物理的には係数 a は意味を持たないことから、これを σ と等しくおくことにより $h^0 = \alpha$ の結論を得る。また、同様に β と δ についても y 、 z 方向の相関長で代表させることが可能である。このように、フラクタルの異方性は、各方向の相関長の変化として表現することが可能である。

以上の議論は一つのフラクタル次元と分散および軸方向毎に一定で定義された相関長を前提としており、Frac-Affinityでは次式によってスケーリングされた座標系に対して、中点置換法を適用していることを示している。

$$h' = (h_x / h_x^0, h_y / h_y^0, h_z / h_z^0)$$

このことは、Frac-Affinityではスケーリングを施した場に対して等方的な場を推定することにより、実座標に対しては異方性を考慮した場を推定していることを示している。

中点置換法の原理は、フラクタルスケーリング則を満足するように、より細かいメッシュに対して繰り返し物理量を設定するものである。新たな物理量の設定は、前の段階で推定された周囲の物理量の平均にランダムな値を加算して導出する。このランダム成分は、メッシュの大きさに対応する分散を持つガウス分布からランダムサンプリングにより算出される。さらに、Frac-Affinity では調査結果にもとづくコンディショニングのための改良が加えられている。

簡単のため、透水係数推定のためのメッシュの分割数が x 、 y 、 z 方向で等しいものと仮定する。透水係数の推定は、まず、領域全体を一つのメッシュと見なし、その 8 つの頂点に対して、領域全体の平均値及び分散に等しい平均値と分散を有するガウス分布からランダムサンプリングにより透水係数を設定することから始める。ついで、このメッシュを x 、 y 及び z 方向に 2 分割し、分割後のメッシュにおける各要素の頂点に対して、透水係数を設定する。この作業は、図 2.16 に示したように、メッシュの重心、メッシュの辺、メッシュの面の 3 段階で行われる。まず、図 2.16(a) に示したメッシュの重心に対する透水係数は、周囲 8 つの頂点の透水係数の平均値に、(2.1) 式で求めた σ' を分散とする正規分布からランダムサンプリングにより求めた偏差を加えることによって求められる。

$$\sigma' = \begin{cases} \sigma h^p & \text{if } h < 1 \\ \sigma & \text{if } h \geq 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで、 h はもとのメッシュの頂点から新たに透水係数を設定するメッシュの重心までの距離をスケーリングファクターで割り戻した値である。なお、この場合、スケーリング後の不均質場は等方的であり、相関長は 1 となる。

引き続き、同様の考え方により、図 2.16(b) に示すメッシュの辺を 2 分割する点に対して透水係数を設定する。この場合、先ほどと同様に、辺の両端の透水係数の平均値に (2.1) 式で求めた σ' を分散とする正規分布からランダムサンプリングにより求めた偏差を加えて、辺を等分割する点の透水係数とする。その際、 h は着目する辺の端点から新たに透水係数を設定した点までの距離(辺の長さの半分)をスケーリングファクターで割り戻した値とする。さらに、図 2.16(c) に示した各面の中心に対して同様の方法により透水係数を割り付ける。この場合、注目している面の 4 つの頂点の透水係数から平均値を求め、これにランダム成分を加えることとなる。

以上がコンディショニングを行わない場合の透水係数場の設定方法であるが、コンディショニングデータを活用する場合には、引き続き以下の作業が必要となる。まず、新たに透水係数を設定した点について、透水係数を設定する際に平均値を算出するために使用したデータ点よりも近い位置にコンディショニングデータが存在するかどうかをチェックする。もし、この条件を満たすコンディショニングデータが存在しなければ、特別な作業は必要ない。一方、この

条件を満たすコンディショニングデータが存在する場合には、前段で使用した平均値の代わりにコンディショニング点での透水係数を用いることとし、またコンディショニング点と透水係数を設定しようとしている点との距離から (2.1) 式の h を求め、ランダム成分をコンディショニングデータに加算して透水係数とする。

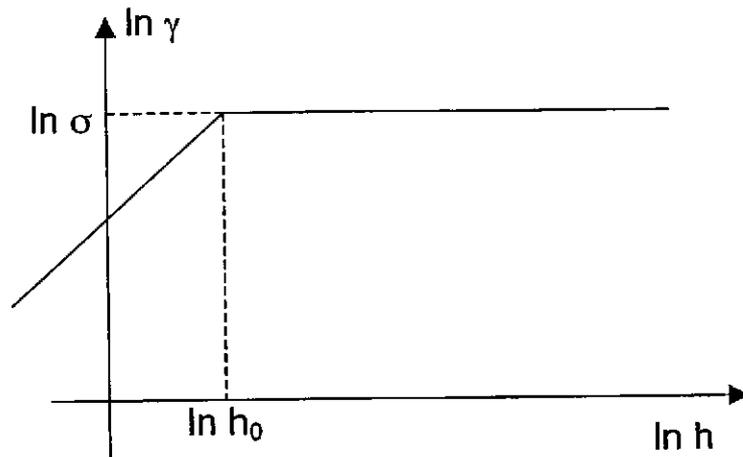


図 2.15 相関長を考慮したバリオグラムの例

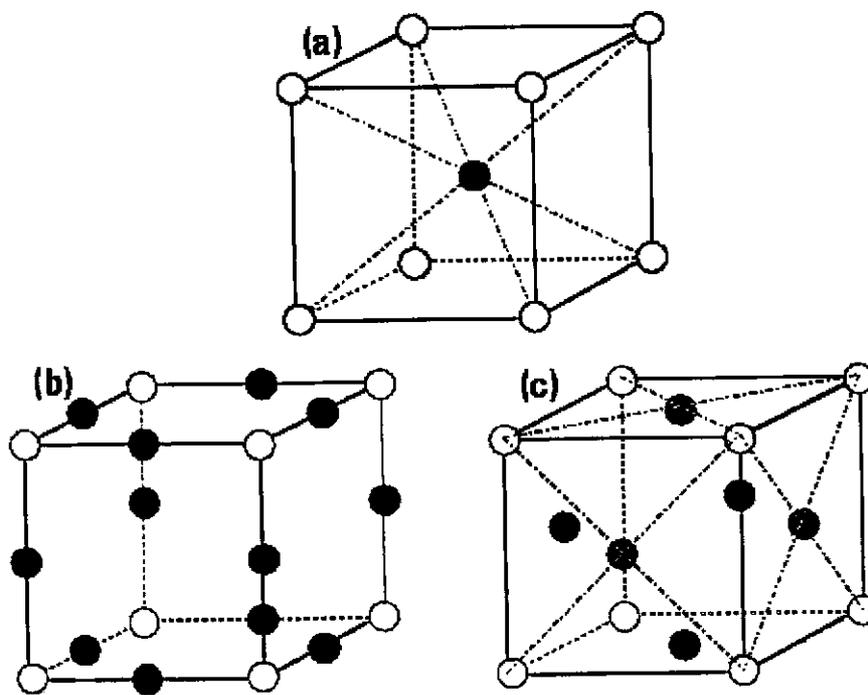


図 2.16 中点置換法による透水係数場メッシュの詳細化

(2) 解析メッシュへの透水係数の設定

透水係数の不均質場を設定するための整形メッシュ上に設定された透水係数場を地下水流動解析で使用するためには、生成した透水係数場を不整形な岩盤基質部に対する解析メッシュへ割り付ける必要がある。このため Frac-Affinity では、岩盤基質部を分割する要素内に重心が存在する整形メッシュを抽出し、抽出されたメッシュに設定された透水係数の対数平均値により着目する要素の透水係数としている。

一方、要素内に整形メッシュの重心が存在しない場合には、最寄りの整形メッシュに割り当てられた透水係数によりその要素の透水係数を代表させることとなる。この場合は、幾つかの要素に対して同一の透水係数が割り当てられることも考えられることから、整形メッシュの大きさは解析メッシュの要素分割の大きさにより小さく設定することが重要である。

2.2.4 透水係数値のインポート

透水係数データのインポートは次の考え方に従っている。

ユーザー指定ファイルは、位置と透水係数の常用対数値が記述されたファイルであり、したがって Frac-Affinity は各セルに対して、セルの中心に最も近い点を求め、その値をモデルで使用する。この作業はセルレベルで行われるため、セルの部分的な改良によって、用いられた値が変更することはない。単一セル内の全ての節点は、同じ値を用いることとなる。

2.2.5 岩盤基質部に対する Frac-Affinity ネットワークの構築

要素を作成し、物理特性を要素内にあるセルに割り当てたら、ハイブリッド媒体を作成する準備のために、要素をネットワークへと変換する。

まず、部分的な詳細化がない場合の手法について検討する。そして、セルを局所的に詳細化したより複雑な状況について検討する。

(1) 詳細化していないセル

以上の作業により、岩盤基質部の直方体要素への分割と各要素の透水係数が用意される。Frac-Affinity では、これらの情報にもとづき 2.1 節で述べた手順により節点及びレグを設定し、解析に必要な物理量を与える。また、境界面の位置を特定して境界部に境界面に対応する要素表面の重心に境界節点を設ける。以上の作業により、解析領域の全体形状を直方体の集合体と

して近似した岩盤基質部に対する Frac-Affinity ネットワークが構築される。図 2.17 に接点、境界接点及びレグにより構築される Frac-Affinity ネットワークを概念的に示す。

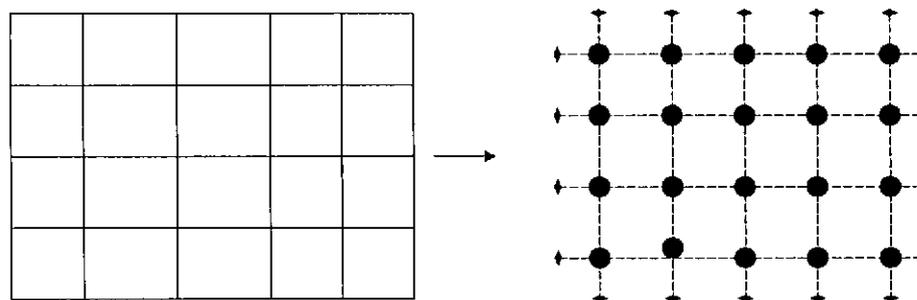


図 2.17 岩盤基質部の要素分割と Frac-Affinity ネットワークの概念図

(2) 局所的に詳細化したセル

Frac-Affinity ネットワークの局所的な詳細化の機能が使用される場合には、影響を受けるセルはセルサイズ以下のネットワーク要素間隔を有することとなるので、セル内にサブネットワークが生成される。

各方向ごとに、ユーザーが指定したネットワークサイズを満足するようなネットワーク節点数を選ぶ。節点はほぼ中心に均等に配分される。

1 節点であれば 1/2 間隔となり、2 節点であれば 1/4、3/4 間隔で、各セルが同じ細密度である場合、等しいサイズとなる。

セル内では、全ての節点は要素セルから特性を取り込むので、全節点が同じ透水係数をもつ。

隣接したセルがある 1 方向で同じ節点数を有する場合、連結作業は 1 対 1 を基本として行われる。節点数が変わるような場所では、より大きな節点数がいくつの連結部があるかを決めている。

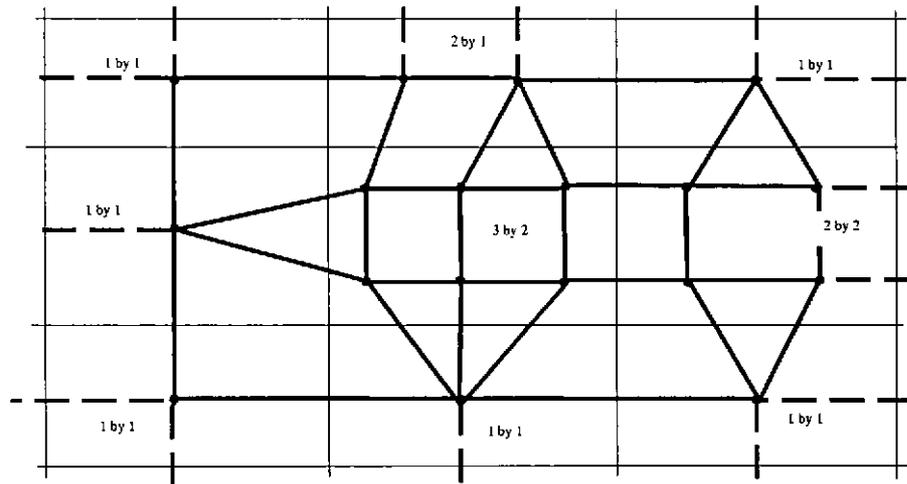


図 2.18 局所的に細密度が異なるセル間での連結部

2.3 決定論的亀裂

2.3.1 概要

Frac-Affinity における決定論的亀裂 (Deterministic Discrete Features; DDFs) とは、地下水流動において 2 次元的な広がりを持つ特異領域のうち、比較的大規模な構造で、各種の試験・調査によりその存在や形状あるいは水理学的な特性が決定論的、かつ個別に設定することが合理的と考えられるものを指す。DDFs として最も一般的に想定される地質構造は断層であるが、これ以外のあらゆる 2 次元的な構造 (例えば割れ目、割れ目帯、岩脈等) についても、決定論的なモデル化が適切である限り使用することができる。EarthVision では、これらの構造は 2 次元的な構造をもつ「面」として認識され、面を定義する情報が EarthVision から Frac-Affinity にエクスポートファイルにより出力することができる。なお、EarthVision からは全ての面構造について情報が出力されるが、地下水流動解析上の重要度にもとづき必要な取捨選択を行った上で Frac-Affinity に DDFs として取り込むことが適切である。

DDFs に関して EarthVision から Frac-Affinity に出力される情報は、(x, y) 座標とその座標における DDF の標高の組であり、1 つの (x, y) 座標に対して 1 つの標高が定義されていなければならない。したがって、Frac-Affinity で DDFs として定義される面は、ごく僅かであっても傾斜していることが必要となる。ここで EarthVision は、エクスポートファイルを出力する際に、面の位置を指定する座標が解析領域の外側に存在するものの面が継続した場合に当該位置に面が延長され得ることを示す「仮想的な点」か、あるいは実際に解析領域内に存在する座標であり、モデル上「有効な点」であるかを示すフラグを同時に出力する。なお、Frac-Affinity では

EarthVision の 3D グリッドに対応する機能が存在しない。これは、これらの機能が EarthVision で主として褶曲や岩塩ドームのモデル化に用いられることによる。

EarthVision からの出力にもとづき Frac-Affinity で構築される決定論的亀裂に対する Frac-Affinity ネットワークの構築方法は、岩盤基質部に対する手法と基本的に同様である。すなわち、要素への分割により解析メッシュ構造を確定した後に解析メッシュへの諸特性を設定する。

2.3.2 要素分割

Frac-Affinity において決定論的亀裂を表現するために構築されるメッシュ構造は、EarthVision が面要素を定義するために使用している格子構造（グリッド）とは別に、Frac-Affinity の内部によって再度定義される。したがって、EarthVision からの出力ファイルでは面を定義するグリッド間隔は EarthVision によって管理されて任意に設定することはできないが、Frac-Affinity ネットワークでは水理解析の目的に照らし合わせて必要な解像度や計算容量などの観点から、メッシュ詳細度を任意に設定することが可能である。

EarthVision の面要素は、各 x-y 位置での標高（z 座標）を定義している。中間点での面位置を見つけるために、Frac-Affinity では、EarthVision 要素点に EarthVision の値を与える、双線形補間を用いている。

Frac-Affinity の要素は、x-y 面内に直線要素として構築される。要素間隔を選択する際には、面の傾斜が考慮される。x 方向でのユーザー指定要素サイズは、隣接した要素線間の面に沿った最大距離を限定するために用いられる。x、y 方向の要素間隔は、最大サイズ、最小数、解像度パラメータを指定することで、ユーザーが管理する。

Frac-Affinity では、四辺形の集合体により決定論的亀裂の幾何学形状を表現する。すなわち、これらの四辺形が決定論的亀裂を分割する要素となる。亀裂が曲面により構成されている場合には四辺形の集合体で曲面を近似することとなる。この様子を 1 次元の亀裂（1 次元の亀裂を 2 次元空間上で定義する）について示したものが図 2.18 である。

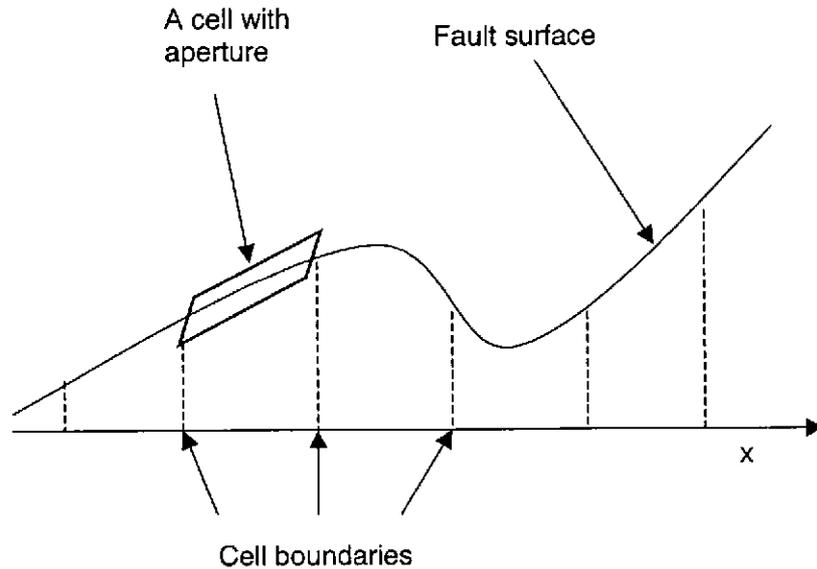


図 2.19 決定論的亀裂に対する解析メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)の概念図

従って、Frac-Affinity の要素が EarthVision の面に厳密に従っているかどうかは、選択した要素分割パラメータに依存する。用いられる節点は常に面上にある。

具体的には、まず注目する決定論的亀裂について、メッシュ化する際の x 軸、 y 軸方向の分割の大きさを指定する。ついで指定された間隔ごとに決定論的亀裂を (x,y) 平面上に投影し、各 (x,y) 座標における亀裂の標高 (z 座標) により亀裂位置を定義する。最後に隣接する 4 つの座標によって定義される四辺形を分割要素として各四辺形の重心に節点を設け、節点を結合するレグを格子状に配置してメッシュ構造を作成する。また境界の形状は、岩盤基質部に対するメッシュと同様に境界節点を設けることにより表現する。

2.3.3 物理特性の設定

岩盤基質部と同様に、決定論的亀裂についても透水係数をフラクタルスケーリング則により不均質に設定することができる (空隙率と比貯留係数は亀裂の全領域で一定である)。

透水係数のインポートについては、前章で検討した。決定論的亀裂についても同様であり、各節点に用いられている最寄りのファイル位置を伴う。

透水係数が均一な決定論的亀裂については、単一の値を全ての特性節点にあてはめる。

異方的な透水係数が指定された場合は、面内及び垂直方向についての異方性のファクターが用いられる。ネットワーク内の連結部は、全て面内の値が用いられる。決定論的亀裂ネットワークをハイブリッド媒体ネットワークに結び付けるときのみ、垂直方向の値が用いられる。その際には、決定論的亀裂を交差するあらゆる連結部に対して、決定論的亀裂の開口幅の半分の値が当てはめられる。

フラクタルスケーリング則により透水係数の不均質場を設定する場合には、岩盤基質部と同様の手法により透水係数を設定することとなる。すなわち、フラクタル場生成のための整形メッシュを別途用意し、このメッシュ上に不均質な透水係数場を設定した後に解析メッシュに透水係数を割り付けることとなる。決定論的亀裂に関しては、決定論的亀裂面に異方性はないため、フラクタル透水係数場を適用することは簡単である。また、交差部に通常の異方性を用いることは、記録された透水係数値をもった固有の節点と常に関連している。

2.3.4 決定論的亀裂ネットワークの構築

決定論的亀裂に対する Frac-Affinity ネットワークにおける物理特性の表現は、岩盤基質部と基本的に同一である。すなわち、各要素の重心に配置された節点で空隙率、透水係数及び比貯留係数を表現し、節点を接合するレグで節点間の距離とそのレグが代表している断面積を表現する。ただし、決定論的亀裂に対する Frac-Affinity ネットワークでは、レグに亀裂開口幅に関する情報が設定されるという点で岩盤基質部との相違が存在する。セルの重心位置 (x,y,z) は、グリッドセルの角の (x,y,z) 座標からの線形補間により算出される。

開口幅及び通常の異方性の値は、各節点及び連結部に保存されていない。代わりに、節点及び連結部と関連する決定論的亀裂は、この様な情報を後で再度取り出せるように、記録されている。

2.4 確率論的亀裂

2.4.1 概要

Frac-Affinity における確率論的亀裂 (SDFs) とは、その存在や位置、大きさ、あるいは透水性等を確率密度関数を用いて確率的に設定することが適切と考えられる平面構造を指す。具体的には、決定論的亀裂でモデル化されることが適切と考えられる断層等の比較的大規模な平面構造よりもスケールの小さな亀裂 (群) について、その特性を試錐孔、坑道面あるいは地表での調査により観察し、統計的な特徴を確率密度分布関数により SDFs として表現することが適切であると考えられる。

確率論的亀裂については、平面構造の存在や広がりについて大きな不確実性が存在する。したがって、個々の亀裂の幾何学形状を精密にモデル化することは現実的ではないと考えられる。そこで Frac-Affinity では、確率論的亀裂を全て平面で表現できるものとし、その形状は矩形 (長方形) とする。矩形亀裂に代わる代替形状については、楕円形や多角形等の形状が考えられる。しかし、亀裂の連結性が極端に低い場合を除いて、全ての亀裂を矩形で近似することの影響が大きくなることはないと考えられることから、本仮定により地下水流動解析の合理性が失われる可能性は低いものと考えられる。

確率論的亀裂については、設定された統計情報にもとづき Frac-Affinity が個々の亀裂の配置や幾何学形状、水理特性等を設定する。これらの作業は基本的に構造ブロックごとに行う。このため Frac-Affinity では、まず確率論的亀裂を生成する構造ブロックの広がりについて、岩盤基質部に対してフラクタルスケールリング則により不均質場を生成する際に対象領域全体を包含する直方体を定義したのと同様の方法により、構造ブロック全体を包含する直方体を仮設定する。ついで、図 2.19 に示すように、仮設定された領域に対して亀裂を配置する。その際、亀裂の大きさと向きも設定する。なお、地下水流動解析上重要な問題となる亀裂の連結性は亀裂の密度、大きさ、向きに強く依存する。亀裂密度が極端に低い場合や亀裂の向きが特定の方向に偏在している場合には、亀裂の連続性は著しく低下することとなる。

前述のように、個々の確率論的亀裂に対して Frac-Affinity が設定した解析メッシュは、確率論的亀裂に対して構築した Frac-Affinity ネットワークをその他のネットワーク (岩盤基質部及びこれに決定論的亀裂のネットワークを統合したもの) に統合して地下水流動解析に使用される。したがって、確率論的亀裂が地下水流動解析において有意な存在となるためには、確率論的亀裂に対して構築した Frac-Affinity ネットワークが他の解析メッシュと交差し、交差部で Frac-Affinity ネットワークの他の部分と適切に連結されている必要がある。このことは、岩盤基質部を表現するための Frac-Affinity ネットワークのメッシュサイズに対して、確率論的亀裂が

少なくとも同程度の大きさを持つように配慮する必要があることを示している。ハイブリッド媒体による地下水流動解析では、岩盤基質部に対するメッシュサイズよりも小さなスケールの亀裂については、これを多孔質媒体近似により表現される水理特性（すなわち岩体基質部の特性）として評価することが適切であり、上記の制限は地下水流動解析で亀裂構造として表現すべき最小スケールを、メッシュサイズの観点から明確化しているものと理解される。

ここで、確率論的亀裂の配置は、亀裂を生成する構造ブロックを包含する直方体の全領域に対して亀裂の重心を仮配置した後、亀裂の重心がブロック内に存在するものを抽出することにより決定される。その際、抽出作業は亀裂の重心に対して行うことから、図 2.19 に示したように亀裂の重心がブロック内にある限り、その先端部分がブロック外へ到達している亀裂も抽出される。したがって、Frac-Affinity では、ある構造ブロックに対して生成された確率論的亀裂がそのブロック内に限定されている必要はない。つまり、確率論的亀裂の一部は注目している構造ブロックの境界を越えて複数の構造ブロックを横断する亀裂として存在する可能性がある。

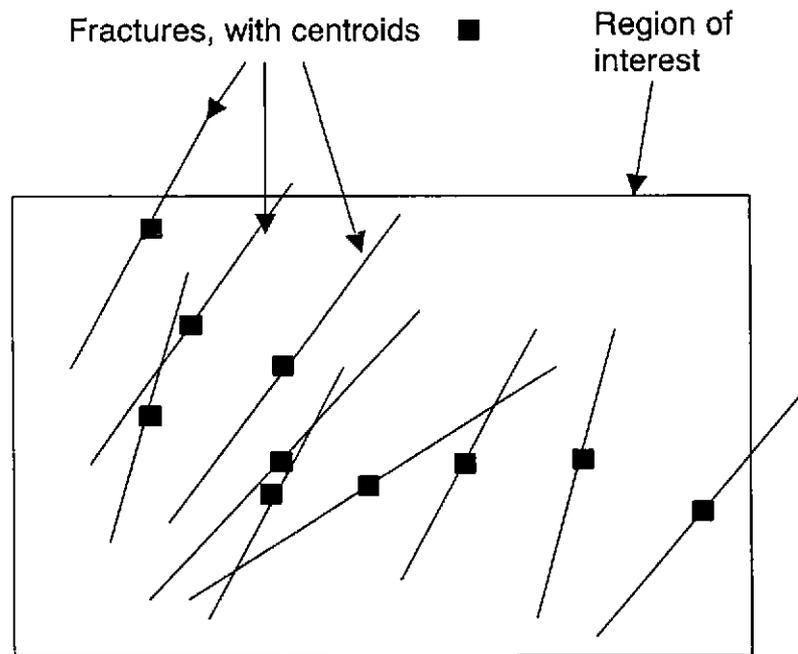


図 2.20 構造ブロックを包含する直方体内に設定された確率論的亀裂の例
(亀裂の重心がブロック内にある限り、その先端が他のブロックに到達していても良い。
ただし、全解析領域の外部にまで到達した亀裂は解析領域の表面でうち切られる)

実現象において確率論的亀裂が当該構造ブロックの内部に留まるのか、あるいは Frac-Affinity

での取り扱いの様に構造ブロックの境界を越えて他のブロックへも連続しているのかは、地質の履歴に依存するものと考えられる。この確率論的亀裂の他の構造ブロックへの連続性の問題は、Frac-Affinityにおける将来的な課題の一つと考えられる。なお、亀裂の重心が当該ブロックの内部に存在する場合においても、亀裂の先端が解析対象領域の外部まで達した場合には、亀裂を解析領域表面で打ち切る様に形状を修正する。したがって、この場合（確率論的亀裂が解析領域の境界面に到達した場合）に限り確率論的亀裂が矩形以外の形状となる可能性がある。

以上の作業により亀裂の位置が設定される。また、位置や大きさが設定された亀裂は、2.1.3節にて述べた方法で物理特性を設定し、確率論的亀裂に対する Frac-Affinity ネットワークへ変換される。Frac-Affinity では、一つの構造ブロックに対し、複数の亀裂群を設けることが可能である。この場合には、Frac-Affinity は必要な回数上記作業を繰り返し、設定された亀裂群をブロック内に設定する。

確率論的亀裂に対する Frac-Affinity ネットワークは、岩盤基質部や決定論的亀裂に対する Frac-Affinity ネットワークよりも直接的に取り扱うものである。中間要素は生成されない。代わりに、直線ネットワークが確率論的亀裂上に直接生成される。このネットワークは亀裂の端点節点を持っており、ユーザーが指定する最大グリッドサイズを満たす程度の内側節点が必要である。その間隔は各方向で一様であり、図 2.2 に一例を示す。

2.4.2 亀裂位置

Frac-Affinity においては、確率論的亀裂の位置は一様分布により設定する。また、必要に応じて指定した位置に指定した大きさの亀裂を生成することができる。このうち後者の機能は、決定論的な構造として取り扱うには小さすぎる平面構造や、EarthVision 等で構築する地質構造モデル上に表現するには存在が不確かな平面構造を地下水流動解析で試行的にモデリングし、その影響を感度解析的に評価する上で有効なものである。

2.4.3 亀裂の大きさ及び形状

亀裂の大きさ及び形状については、Frac-Affinity では以下の3つの分布が利用可能である。なお、適切な亀裂密度を決めるために反復的な検討を行うことが推奨される。

- (1) 一辺の長さが一様分布となる矩形亀裂 (Uniform Rectangles)

矩形の長辺と短辺のそれぞれに最大値と最小値を指定し、この間で一辺の長さを一様分布からサンプリングする。

(2) 一辺の長さがべき乗則分布となる矩形亀裂 (Power Law Rectangles)

矩形の長辺の長さを、次式を用いてべき乗則分布からサンプリングする。

$$f(L) = \frac{b-1}{L_{\min}} \left(\frac{L_{\min}}{L} \right)^b, \quad L_{\max} > L \geq L_{\min}, \quad b > 1$$

ここで L_{\min} と L_{\max} はそれぞれ最小長さ と 最大長さ、 b はある定数であり、この3つを指定することにより長辺の長さを設定する。短辺の長さについては、これを長辺とは独立にサンプリングした場合には非常に長く、かつ幅の狭い亀裂が生成される可能性があることから、長辺の長さに対する短辺の長さの比を設定し、設定した範囲内で一様分布からサンプリングする。

(3) 一辺の長さがべき乗則分布となる正方形亀裂 (Power-Law Square Fracture)

一辺の長さがべき乗則分布となる矩形亀裂において、長辺と短辺の長さの比を1に固定して、全ての亀裂を正方形とする。

2.4.4 亀裂の向き

Frac-Affinity では、亀裂の向きを分布形で与える場合には、一様分布と Fischer 分布が利用できる。また、亀裂の向きを記述したデータを母集団にランダムサンプリングにより設定することも可能である。この方法については、3.2 節で取り扱う。

亀裂の走向及び傾斜は、共に確率論的亀裂がある平面の傾きを指定する。重心位置を一定の位置に置き、回転角度によって、確率論的亀裂の主軸が平面内で回転するようにする。全ての角度は度で指定する。

これら傾斜を可視化するために、確率論的亀裂が正方形要素を伴っているような平面を描くことから始める。1組の線は水平であり、別の組は最も急傾斜となるようにする。

傾斜角度は、急傾斜している線が水平になるような角度である。これは、平面に対する垂線を垂直線を伴って作るのと同じ角度である。

走向は北からの方向であり、上から見るとこれら急傾斜している線を有している。

これを図示するために、傾斜角度 60° 、走向 90° （すなわち東）の平面を示す。急傾斜している線は、下向き矢印の太線である。水平線は矢印無しの細線である。図 2.21 に、南方から見た平面を示す（水平線はこの方向からは見えない）。

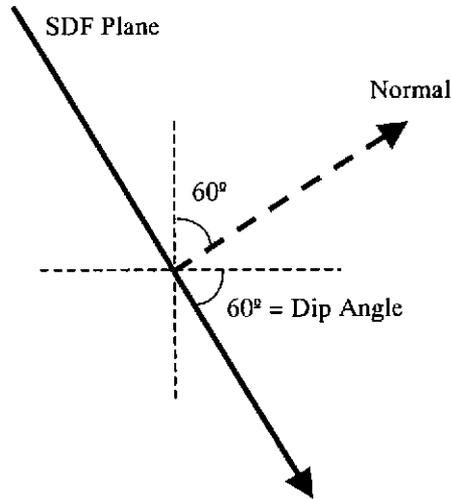


図 2.21 南方から見た傾斜角度 60° 、走向 90° の確率論的亀裂

図 2.22 に、上から見た平面を示す（線の傾斜はこの角度からは見えない）。

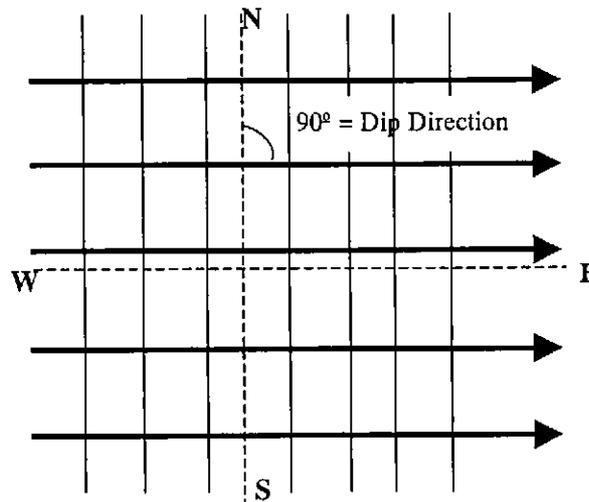


図 2.22 上から見た傾斜角度 60° 、走向 90° の確率論的亀裂

回転角度は、最も急な傾斜線に関して、確率論的亀裂がどういう方向を向いているかを指定する。確率論的亀裂の長さは、おおまかに下がった走向となるように設定するが、 $-45^\circ \sim 45^\circ$ の間での無作為な角度を、回転角にする。図 2.22 に、回転角度 15° で、前もって指定した平面上の確率論的亀裂を示す。確率論的亀裂は垂線の下方に見える。

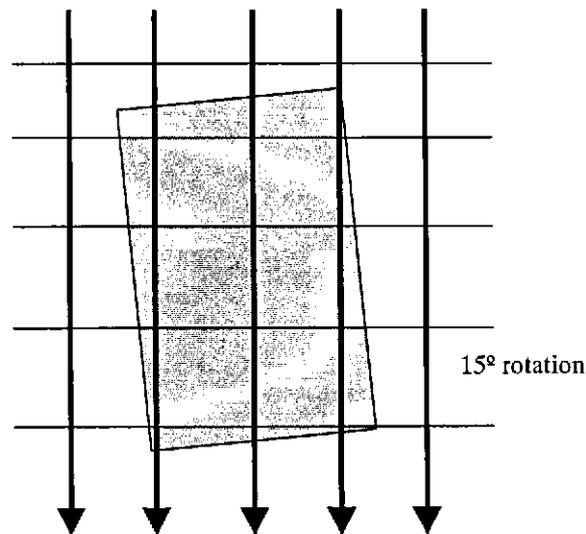


図 2.23 回転角度 15° の確率論的亀裂(平面に対して垂線の下方にみえる)

(1) 一様分布

亀裂の走向と傾斜のそれぞれについて最大値と最小値を設定し、この範囲内で一様分布から個々の亀裂の走向と傾斜をサンプリングする。

(2) Fischer 分布

次式で表現される Fischer 分布により亀裂の走向と傾斜を与える。ここで θ は主軸からの傾きを示しており、係数 κ を指定することで亀裂角度の分散を調整する。

$$f(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \theta).$$

ここで、係数 κ は正の定数であり、花崗岩に対しては 10 が最も一般的に使用される。

(3) 入力ファイルからの確率論的亀裂方向のサンプリング

確率論的亀裂方向がファイルからサンプリングされる場合、ユーザーは直接亀裂の傾斜と走向を指定する。これら情報が読み込まれ、無作為にサンプリングされる。

2.4.5 透水係数

Frac-Affinity では、一様分布と裾切りされた正規分布により透水係数分布を設定できる。なお、これらの分布は透水係数の常用対数に対する分布である点に注意を要する。

さらに、各確率論的亀裂設定に対して屈曲度が指定され、また異方性のファクターを与えることが可能である。異方性のファクターは決定論的亀裂と同じように用いられ、確率論的亀裂内で用いられる面内の値と、連結部が確率論的亀裂を交差する場合に用いられる標準値とを伴っている。屈曲度は面内での透水係数を減じるために用いられる（より長い経路の影響をシミュレートするために）。

(1) 一様分布

指定された最大値と最小値に対して一様分布により透水係数分布を設定する。なお、この設定は、透水係数の常用対数に対するものであるため、実際の透水係数分布は対数一様分布となる。

(2) 裾切りされた正規分布

透水係数の対数値を正規分布からサンプリングする。正規分布は数学的には正と負の無限大に広がる分布であることから、裾切り値を別途設定し、その範囲内で正規分布からサンプリングする。したがって、正規分布により透水係数を設定するためには、透水係数の対数について平均値、標準偏差及び上下限值を設定する必要がある。なお、サンプリングは透水係数の常用対数に対して行われることから、実際の透水係数分布は対数正規分布となる。

2.5 亀裂交差部での透水性設定機能

これまでの研究から、亀裂の交差部に沿って、卓越した流路が生じるような状況の存在が示唆されていることから、Frac-Affinity においても亀裂の交差部を透水係数の増加領域として表現する機能を追加した。具体的には、この様な状況を Frac-Affinity ネットワークで表現するため、以下に示すステップを順に検討し、コードの改良に反映させた。

- ・ 亀裂交差部の認識
- ・ 亀裂交差部の水理学的特性の設定
- ・ Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い

2.5.1 交差部の認識

有限の広がりを持つ矩形平面によって表現される確率論的亀裂の場合には、亀裂の交差部を数学的に認識することは容易である。交差部は直線であり、2つの亀裂の面内に存在する。交差部が亀裂を完全に横断する場合、一方の先端が亀裂の先まで達し、他の先端は亀裂内部に包含される場合、交差部が一方の亀裂内に包含される場合があり得る。図 2.24 に概念図を示す。

実際の解析では、複数の亀裂が一つの亀裂を交差する場合や、複数の交差部がさらに交差する可能性もあることから、これら全ての場合に対応できる手法を開発することが必要である。なお、決定論的亀裂については、全体としては曲率をもった2次元構造をとる場合でも解析モデル上は、小さな平面要素の集合として表現されることから、モデル上では確率論的亀裂と同時に取り扱うことができる。現行の Frac-Affinity では、確率論的亀裂の交差部を逐一認識する代わりに、確率論的亀裂を個々の要素に分割し、確率論的亀裂を Frac-Affinity ネットワークに統合する際には、ある要素を別の要素に接合する。

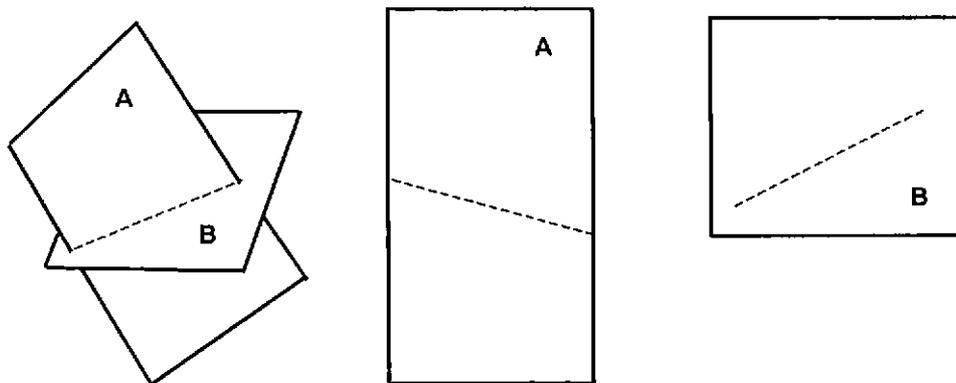


図 2.24 亀裂の交差のバリエーションに関する概念図

2.5.2 亀裂交差部の水理学的特性の設定

亀裂交差部の水理学的特性としては、交差している亀裂の透水係数に比べて透水性が高く、交差部が卓越流路となっている可能性を表現できることが重要である。そこで Frac-Affinity では、ユーザーが亀裂に対して任意に設定できる増倍係数（Enhancement Factor）によって亀裂交差部の透水係数の上昇を定義することとした。その際、交差している亀裂のそれぞれから導出される透水係数のうち大きいものを、交差部の透水係数とした。したがって、透水係数 k_1 、 k_2 、増倍係数 f_1 、 f_2 とすると、交差部の透水係数は次式によって与えられる。

$$K = \max(f_1 * k_1, f_2 * k_2)$$

高透水係数を設定するには、決定論的亀裂の透水係数入力ファイル、または確率論的亀裂の透水係数入力ファイル（もしくは両方）に、キーワード“ENHANCEMENT_CONDUCTIVITY”の行を追加する。高透水係数は、どちらの入力ファイルにキーワードが定義されていても、決定論的亀裂と確率論的亀裂の両方に適用されることとなる。

2.5.3 Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い

前述のように、既存の Frac-Affinity では、亀裂の交差部を直接認識することなく、亀裂を表現する Frac-Affinity ネットワークを一つ一つ既存のネットワークへ統合することから、解析上の亀裂の交差部が本来の交差位置から外れる可能性がある。具体的には、一切の節点を移動させずに節点間を接合するレグの配置を最寄りの節点を順に結ぶように修正することにより、岩盤基質部を中心とした既存のネットワークへ亀裂を表現するネットワークが統合される。

この作業を 3 次元で図示することは困難であるが、例示的に図 2.24 に示した亀裂 A と亀裂 B のそれぞれについて生成した Frac-Affinity ネットワークを 1 つのネットワークに統合する場合を図示すると、図 2.25 となる。図 2.25 では、亀裂 A を岩盤基質部（あるいは岩盤基質部にあらかじめ統合されていた亀裂）のネットワークに見立て、これに対して亀裂 B を後から統合している。図から、現行の手法では亀裂 A を示すネットワークは、破線で示した実際の交差部を経由することなく、亀裂 B を表現している節点の中から最寄りの節点を経由する様に修正されていることがわかる。

この問題に対して、入力ファイルで“ENHANCED_CONDUCTIVITY”が指定された場合には、亀裂 B を統合する前に、あらかじめ亀裂交差部に節点を設け、亀裂 A のレグの配置を修正する際に交差線上に設けられた節点を経由するように修正する。これにより、亀裂 A と亀裂 B を表現するネットワークは、実際の亀裂交差部に設置された節点を経由して接合されることが保証

される。この修正後の手法により亀裂 A と亀裂 B を統合した場合の統合後のネットワークを図 2.26 に示す。この場合、亀裂 A、亀裂 B は破線で示した交差線上で適切に結合されている。

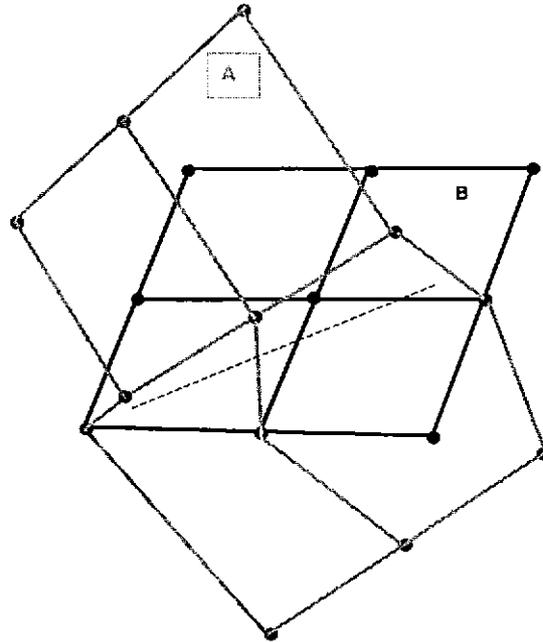


図 2.25 これまでの Frac-Affinity におけるネットワークの統合例
(図 2.24 の亀裂 B を亀裂 A に統合した場合)

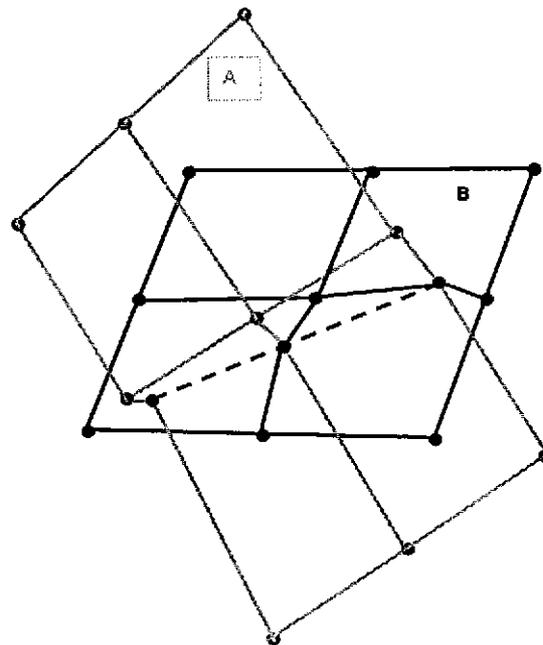


図 2.26 “ENHANCED_CONDUCTIVITY”が指定された場合の Frac-Affinity ネットワークの統合例
(図 2.24 の亀裂 B を亀裂 A に統合した場合)

2.6 立坑掘削モデルの構築

本節では、Frac-Affinity において、立坑掘削の手順を数値的に実施する方法について述べる。これは本研究で必要とされている事項であり、計算コード上特に取り扱いが難しい問題である。よって、妥当な数値による表示に、多少特別な注意をむけている。まず、立坑掘削の背景を示し、要素分割アルゴリズムの詳細とモデル構築方法を説明する。

2.6.1 概要

Frac-Affinity Ver 2.1 では、一つの鉛直な円筒形をした坑道について、深度の時間変化を含めて解析内で表現することができる。また、形状が時間に対して変化しない坑道（鉛直及び水平）については、1つの解析で複数の坑道を設置することが可能である。このうち、Frac-Affinity で立坑深度の時間変化を考慮した解析を行うためには、立坑深度の増大に合わせて解析メッシュである Frac-Affinity ネットワークに修正を加え、坑道表面に対応した内部境界面を新たに設定することが必要である。概念図を図 2.27 に示す。図 2.27 において●及び◆は解析開始時（掘削開始以前の状態）に配置された節点及び境界節点を、節点を接続する実線は解析開始時のレグの配置を示している。また、図の中央に実線で示された長方形は現在の立坑の掘削深度を、破線で示された長方形は最終的な立坑の掘削深度を示している。

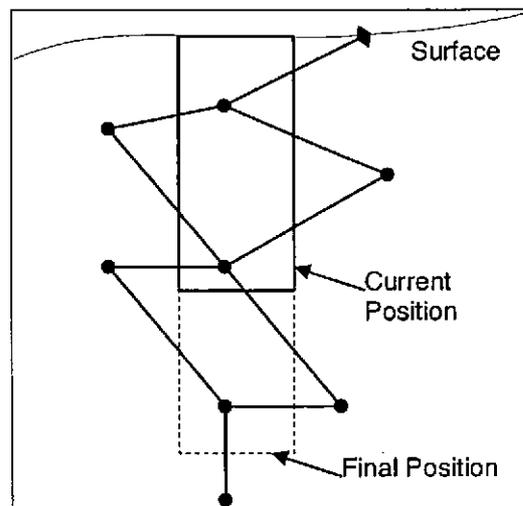


図 2.27 立坑掘削における Frac-Affinity ネットワーク修正の概念図

(●は節点、◆は境界節点を示す)

図 2.27 から、現時点では実線で示された長方形の岩盤は既に解析領域から取り除かれており、この領域内に存在する節点を取り除くとともに、この領域を横切るレグを適切に修正すること

により立坑の掘削により新たに生じた内部境界面を Frac-Affinity ネットワーク上に表現する必要があることがわかる。また、解析終了時まで破線で示した深度まで立坑の掘削が進むことに対応して、以後の解析において破線内部の節点とこの領域を横切るレグについても同様の措置が必要となることがわかる。

2.6.2 立坑掘削により影響を受ける節点の抽出

Frac-Affinity ネットワークは、岩盤基質部、決定論的亀裂及び確率論的亀裂を統合的に表現する解析メッシュであり複雑な 3 次元構造を持っていることから、その構築には相当量の計算が必要となる。したがって、地下水流動解析を現実的な計算時間で実行するためには、立坑掘削による Frac-Affinity ネットワーク更新のために必要となる作業を最小化することが重要である。このため Frac-Affinity では、地下水流動解析を始める以前に立坑掘削の影響を受ける節点に関してできる限り多くの情報を収集し、これにもとづき解析の進行に合わせて動的にネットワークを更新することとしている。また、Frac-Affinity は非定常解析で使用する時間ステップをソルバーが自動的に最適化することから、解析の進行と立坑の掘削深度の設定を常に比較し、Frac-Affinity ネットワークの更新作業を行っている。

Frac-Affinity ネットワークを構成する節点のうち立坑の掘削に伴って影響を受ける節点は、最終的な掘削深度に立坑が到達した時点で立坑が占める領域内に存在する節点である。したがって、立坑深度の時間変化に対応した Frac-Affinity ネットワークを構築するため、まず、解析のいずれかの段階で立坑の掘削により取り除かれる節点を抽出する。これにより、動的な更新が必要となるレグについても、抽出された節点に接合を持つレグとして同時に抽出されることとなる。立坑掘削深度の時間変化に関する設定条件から、任意の時間における立坑の深度は既知であるので（時間に関する区分的線形関数として定義される。詳しくはユーザーリファレンスを参照のこと）、抽出された節点がどの時点で立坑の内側となるかは簡単に割り出すことが可能である。節点が立坑内に取り込まれた時点で、節点は取り除かれ（解析上、無効とされる）、これに接合されているレグについても修正が加えられる。ただし、このような作業には、取り除かれる節点及びレグの幾何学的な形状と立坑との位置関係により、後述する幾つかのバリエーションが存在することに注意する必要がある。

掘削された立坑の表面については、大気開放条件（圧力水頭=0）を含む数種類の境界条件から選択して適用することが可能であり、これに加えて、一度設定した境界条件を掘削後の支保工の設置を想定した不透水境界に変更することができる。この立坑表面の不透水境界への変更時間の設定は、立坑の掘削深度のモデル化と同様の方法により設定することができる。つまり、支保工の設置深度を時間に関する区分的線形関数として不透水境界を適用して、立坑深度を時間変化させることが可能である。

2.6.3 立坑掘削に伴うレグの修正

立坑掘削に伴うレグの修正においては、取り除かれる節点及びレグの幾何学的な形状と立坑との位置関係により複数のバリエーションが存在する。

(1) 内部の節点が高い位置に存在する場合

図 2.28 に、立坑の内部に存在する節点が、外部の節点よりも高い位置に存在する場合の概念図を示す。この場合には、図から明らかなように、まず立坑の掘削領域の内側に存在する節点が掘削領域に取り込まれることとなる。この節点は掘削領域に取り込まれた時点で Frac-Affinity ネットワークから取り除かれ、代わりに図 2.28 で◆で示した境界節点が坑道表面に設置される。取り除かれた節点と外部の節点を結んでいたレグについては、この境界節点と外側の節点を結ぶレグとして再定義される。また、図 2.28 に Time 2 から Time 3 への変化として示したように、更なる坑道の掘削に伴い境界節点の位置は適宜修正されることとなる。

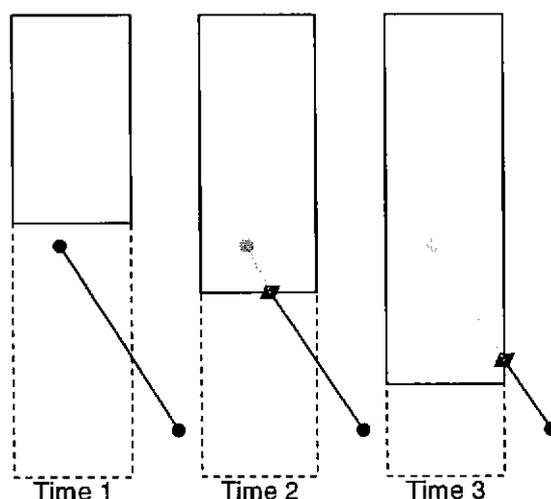


図 2.28 内部の節点が外部の節点よりも高い位置に存在する場合の Frac-Affinity ネットワークの修正

(2) 内部の節点が低い位置に存在する場合

掘削領域の外側に存在する節点が掘削領域の内側に存在する節点よりも高い標高にある場合は、図 2.29 に示すように、より複雑な Frac-Affinity ネットワークの修正が必要となる。

この場合、立坑の表面が立坑の内部に設置された節点に到達する前に、立坑の表面がレグと交差する。これによりレグは2つの部分に分割され、既存の2つの節点と坑道表面に新たに設置される2つの境界節点とを結ぶレグとして再設定される。この境界節点のうち一方は立坑側壁で静止し、もう一方は坑道の掘削につれて立坑掘削面（下側境界面）を掘削領域の内部に設置された節点に向かって移動する。そして、立坑掘削面がこの節点に到達した時点で、節点及び節点と境界節点を結ぶレグが Frac-Affinity ネットワークから取り除かれる。

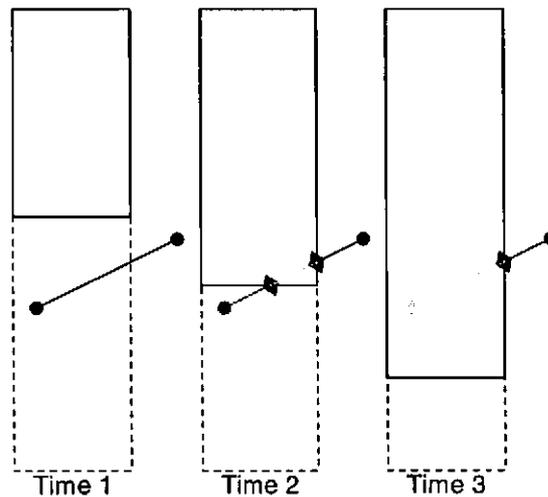


図 2.29 内部の節点が外部の節点よりも低い位置に存在する場合の Frac-Affinity ネットワークの修正

2.6.4 修正部分を抽出するためのアルゴリズム

立坑の掘削に伴う坑道深度の時間変化に対応するための Frac-Affinity ネットワークの修正作業を、アルゴリズムとして具体化したものを表 2.1 に示す。表 2.1 に示したアルゴリズムは掘削領域の形状によらず適用することができる。立坑の掘削に伴って新たに設置される境界節点の位置は節点の幾何学的な配置に依存するが、以下の手法で比較的簡単に計算できる。

まず、新たに設置される境界節点は、立坑の内側に設置された節点と立坑の外側に設置された節点を結ぶ直線上に存在する。また、立坑の形状とレグとの位置関係から、立坑表面が注目

するレグに初めて接して境界節点が最初に設置されるべき座標（始点）と、この境界節点が立坑の掘削に伴い移動して最終的に定置されることとなる座標（終点）が比較的簡単に計算できる。したがって、時間 t における境界節点の座標は、上記の始点と終点の座標を用いて内分点の座標を与える次式で表現される。

$$X(t) = \alpha X_{\text{start}} + (1 - \alpha) X_{\text{end}}, \quad \alpha = \frac{Z - Z_{\text{start}}}{Z_{\text{end}} - Z_{\text{start}}}$$

表 2.1 立坑掘削に伴う Frac-Affinity ネットワークの修正のためのアルゴリズム

```

List all i-nodes that will enter the shaft during
excavation and set inactive times;

FOR each i-node (I) get a list of connections
{
  FOR each connection to other Node J
  {
    IF ( Node J is inside shaft and
        inactive time for J > inactive time for I )
    {
      Add new b-node at position of node I;
      Add inactive conn C from new b-node to J;
      Set C active time to be node I inactive time;
      Set C inactive time to inactive time for J;
      Calculate b-node position history;
    }
    ELSE IF ( Node I Excavated First(Case2) )
    {
      Add new b-node at position of node I;
      Add inactive conn C from new b-node to J;
      Set C active time to be node I inactive time;
      Set C inactive time to DBL_MAX;
      Set current conn inactive time to be C active time
      Calculate b-node position history;
    }
    ELSE IF ( Connection excavated first(Case1) )
    {
      Add 2 new b-nodes at initial intersection of
        shaft and connection;
      Add inactive conn C1 from 1st b-node to J;
      Add inactive conn C2 from 2nd b-node to I;
      Set each C1, C2 active time to be b-node
        excavation time;
      Set current conn inactive time to be C1 active time
      Set each conn inactive time to be DBL_MAX;
      Calculate b-node position history;
    }
  }
}
)

```

ここで、 $z(t)$ は立坑の掘削深度、 z_{start} 、 z_{end} は始点および終点の鉛直 (z) 座標である。また、パラメータ α は、0 から 1 の値を取る変数である。なお、始点において坑道側面に設置された境界節点は、坑道の掘削に対して位置が変化しないことから、この場合には $z_{start}=z_{end}$ となる。

図 2.30 に、実際の Frac-Affinity ネットワークを想定して、やや複雑なメッシュ構造に対して上記アルゴリズムを適用した例を示す。

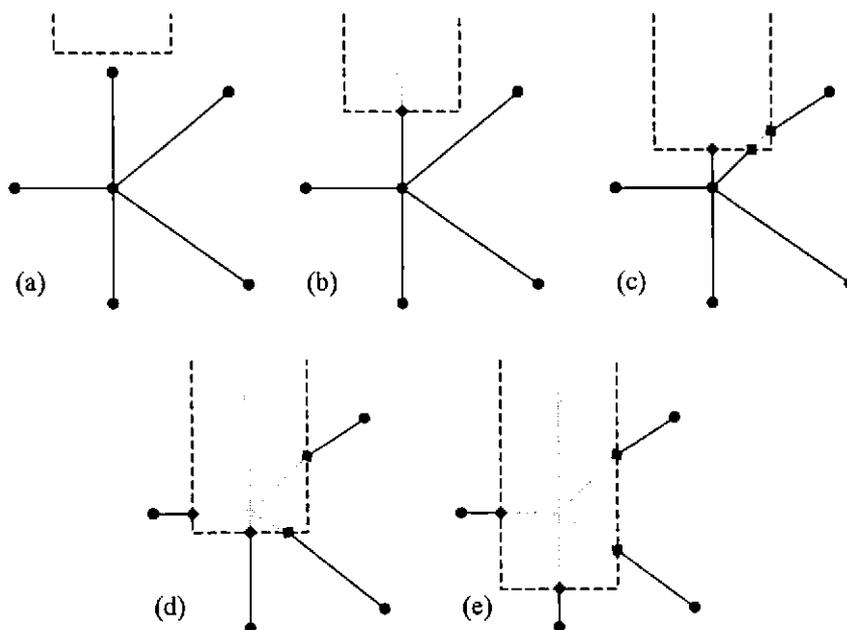


図 2.30 立坑掘削を反映させるための Frac-Affinity ネットワークの修正例
 (●は節点、◆は境界節点、実線はレグを示す。また灰色で示したものは、
 取り除かれた節点とレグを示す)

2.6.5 アルゴリズムの実行

前述のアルゴリズムを実行するためには、以下の情報が必要となる。これらの情報は解析の実施に先立ち計算される。立坑が鉛直な円筒形でモデル化されることから、これらの計算は比較的容易である。

- ① 注目する節点が立坑掘削により取り除かれる領域内にあるか？
 立坑掘削により取り除かれる領域内に節点が存在するのであれば、その節点について正を返す。

② 注目するレグは掘削領域と交差するか？

立坑掘削により取り除かれる領域とレグが交差するのであれば、そのレグについて正を返すとともに、交差位置を求める。なお、ここで正が与えられるレグとは、レグが結合する2つの節点うちの少なくとも1つが掘削領域内に存在しているレグであり、この様な節点は①の作業により抽出されている。

③ 節点が掘削されるのはいつか？

節点が立坑の掘削により取り除かれる時間を算出する。

④ 与えられた深度において掘削領域がいつライニングされるか？

これは立坑への支保工の設置を模擬する時間を指定する。

2.6.6 地下水流動解析の実施

解析の実施に先立ち前述の処理が一度実行されれば、地下水流動解析の進行に合わせて Frac-Affinity ネットワークを更新していくことは比較的容易である。ソルバーが管理する解析のための時間ステップと、その累積によって与えられる解析上の経過時間にもとづき節点とレグの数値解析上の有効／無効が判断される。また、立坑表面の境界接点における流量の総和を取ることにより立坑に対する全湧出量を算出し、さらにこの全湧出量を時間に対して累積することで立坑に対する累積湧出量を算出する。

Frac-Affinity においては、数値解析の都合上、Frac-Affinity を構成する節点の数は保存されている必要がある。これは、解析において節点1つに対して1つの方程式が対応していること、またソルバーからの要求事項として、解析を通じて方程式の数が一定でなければならないことによる。したがって、前節までの既述では、立坑の掘削に伴い節点やレグを「取り除く」あるいは「設置する」との表現を用いたが、数値解析上の取り扱いとしては節点やレグを完全に取り除く、あるいは新たに設置する代わりに、これら要素の数値解析上の有効性を判断し、無効とされた節点には全て一定の水頭が与えられるとともに、これらの節点に結合しているレグの影響が無くなるような処理を行うことにより立坑掘削に対応する解析を行うこととしている。以上の作業により、数値計算の効率を保ちつつ、かつ水理解析の全体を通じて方程式の数（すなわち総節点数）を保存しながら、Frac-Affinity ネットワーク上に立坑の掘削を表現することが可能となっている。

2.7 試錐孔部の取り扱い

Frac-Affinity における試錐孔の扱いは、立坑や坑道の扱いとは考え方が異なる。試錐孔は小さ

い区域とみなされており、純粹に鉛直または水平である必要はない。試錐孔部は水理的に孤立しており、Frac-Affinity におけるモデルの基盤となる部分である。

試錐孔部の基本的な幾何構造は、(恐らく 1 本の) 直線からなる中心線を伴う、半径が一様な円筒形である。

Frac-Affinity ネットワークへ試錐孔部を加えるには、以下のような数ステップが必要となる。

- ・ 試錐孔部の裾切り
- ・ 岩盤基質部への試錐孔部のリンク
- ・ 決定論的亀裂及び確率論的亀裂への試錐孔部のリンク
- ・ 試錐孔への特性の割り当ておよび交差部のリンク

以下の各項で、上記ステップについて述べる。試錐孔部に適用される境界条件については、別途扱うこととする。

2.7.1 試錐孔部の裾切り

各試錐孔部はその全長に沿って節点を割り当てることで裾切りされる。次に、試錐孔に沿って地下水が流れるように、これら節点を共に連結させる (もしユーザーが、これら連結部が削除されているケースにおいて、非透水性の試錐孔を指定しなければ)。連結する前に、試錐孔部分は完全にモデル領域内にあるように裾切りされる。

ユーザーは節点間の最大の分離点となる要素サイズを指定する。いずれにせよ、試錐孔が貫通する各岩盤基質部セル (もしセルが部分的に細密化されているならなおさら) に対して、および試錐孔が交差する決定論的亀裂及び確率論的亀裂に対して、一つの節点が生成される。こうして、試錐孔が系の残りの部分と適切にリンクしていることを確実にする。

試錐孔に沿った連結部は試錐孔半径によって示される幾何領域を有しており、節点の分離点からそれら連結部の長さを設定する。さらに、節点の体積は幾何構造から得られ、亀裂開口幅の倍の試錐孔領域に相当する小体積の決定論的亀裂および確率論的亀裂に対する節点を伴う。

2.7.2 岩盤基質部への試錐孔部のリンク

試錐孔部が裾切りされたのなら、各節点は (試錐孔部端部での節点を除いて)、岩盤基質部、決定論的亀裂または確率論的亀裂に連結される。ここで、節点は本質的に決定論的亀裂と確率

論的亀裂の交差部に加えられていることを思い出す必要がある。これら節点は関連する決定論的亀裂または確率論的亀裂に連結しており、残りは岩盤基質部に連結しているということである（いくらかでもあれば）。

基本的な手法は各節点を4つの岩盤基質部節点にリンクすることである。その目的は、最寄りの周辺節点にリンクすることである。鉛直試錐孔で、部分的な細密化のない、簡単な幾何構造に対しては、簡単である。図 2.31 に、加えられたリンクを示す。これらリンクは一つではない可能性があることに注意が必要である（後述を参照）。

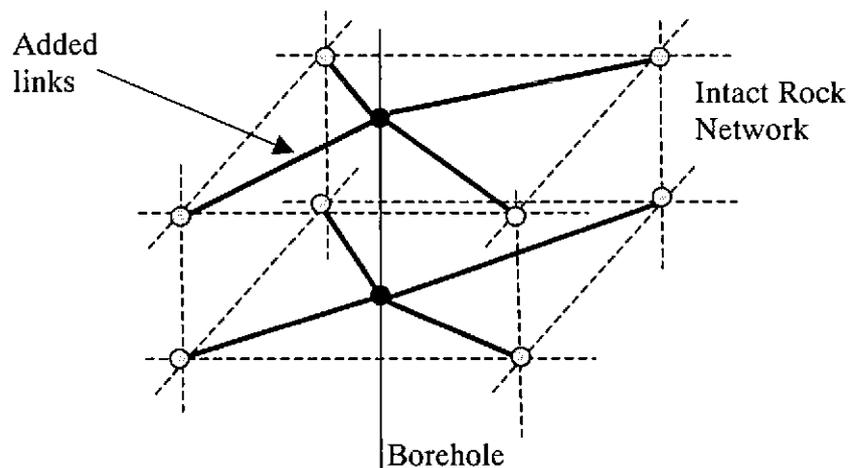


図 2.31 試錐孔の節点を岩盤基質部ネットワークに連結するためのリンク(単純な場合)

一般的な状況を扱うためには、4つの象限の各々において最も近い節点となるようにリンクする4つの節点を確認する。象限は試錐孔の主方向に従って選択される。鉛直またはほぼ鉛直な試錐孔部に対しては、象限は(正の x 、正の y)、(正の x 、負の y)、(負の x 、正の y)、(負の x 、負の y) である。ほとんど水平な試錐孔部に対しては、 x と z または y と z で定義される象限が用いられる。

レグによってリンクする節点を決めたら、連結部の全長に沿って新しい節点を挿入することで、そのリンクは一連の連結部に分けられる。ユーザーがこのためのパラメータを制御する。まず、試錐孔に最も近い長さを指定する。増加因子 (growth factor) (ある連結部の長さとの割合) は、リンク上で連結部が最大数となるように指定する。最大数を優先すると、増加因子 (growth factor) はあまりに小さくなる。

これら連結部に割り当てる面積や新しい節点に対する体積に関する問題が残っている。これについては 2.7.4 項で取り扱う。透水係数データは、リンクされた岩盤基質部の節点から選ばれる。

2.7.3 決定論的亀裂または確率論的亀裂への試錐孔部のリンク

決定論的亀裂または確率論的亀裂へのリンクプロセスは、上述のプロセスと非常に似ている。試錐孔の節点は交差部に置かれることとなる。概して、上述の調査方法は、関連する亀裂的な構造上の節点に限定されており、4 つの周辺節点を検出することである。もし試錐孔部が亀裂的な構造端部の近くを交差するなら、特定の方向に節点がない可能性がある。その様なケースでは、リンクが 4 つより少ない簡単なものになる。

2.7.4 試錐孔部および交差部の特性

試錐孔内にある連結部に対して、まだ割り当てられていない項目は透水係数である。ここでの透水係数は岩盤の値と比べて大きくなるだろう。管内での Poiseuille 流れを仮定するなら、有効透水係数は、 $\frac{\rho g}{8\mu} r^2$ で与えられる[de Marsily, 1986]。Frac-Affinity では、ユーザーは半径の二乗を乗じたファクターを指定することが可能である。初期設定は 1.25×10^6 であり、SI 単位で表す。これは半径 3 cm の試錐孔に対して、透水係数は 1125 m/s となる。

ネットワークの残りの部分への連結部については、透水係数データは連結部となった節点から得られる。これらレグが試錐孔周辺の岩盤（または、試錐孔周辺の決定論的亀裂もしくは確率論的亀裂）を表しているためである。連結部に面積を割り当て、新しい節点に体積を割り当てる際に、多くのことを考慮しなければならない。

体積は、二重計算を避けるため、連結部となった節点の体積から引かれたものとなる。面積については、幾何面積は試錐孔からの距離とともに増加するので、各連結部ごとに適切な平均面積を見つけ出されれば好都合である。また、連結節点が試錐孔に近ければ、その影響が増すということを認識することも重要であり、各リンクに割り当てられる試錐孔周辺の割合を反映している。

図 2.32 に典型的な状況を示す。

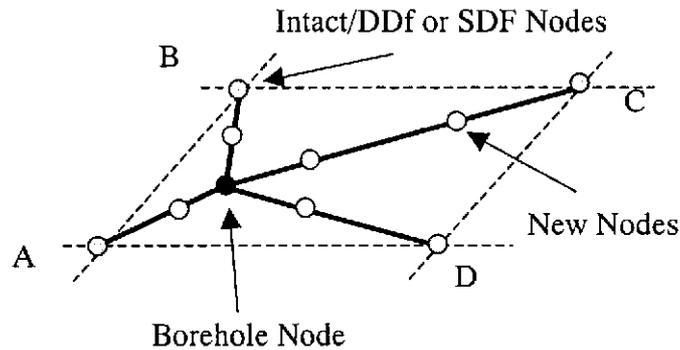


図 2.32 岩盤基質部、決定論的亀裂または確率論的亀裂ネットワークへ試錐孔節点を連結するための代表的なリンク設定

連結部 A は他の連結部よりももっと周辺に割り当てられるべきであり、連結部 C が最小となることは明らかである。また、その割合は各節点によって表される岩体積にも依存するであろう。Frac-Affinity では、数回の試験後、試錐孔周辺の割合を割り当てるために用いる方式は、体積の平方根および試錐孔からの距離の反二乗に準じて、各リンクの割合を割り当てることとした。

次に、節点の体積をその状況の幾何構造から割り当てる（放射幾何構造と表示された試錐孔長さを考慮して）。これら体積は前から存在する節点の体積から差し引かれたものである。

連結部に割り当てられた面積は、連結部に沿った幾何面積の調和平均である（実際、連結部の 2 つの部分には別々の平均を有する）。このことは単に幾何的な根拠で正しいと判断され得るが、また試錐孔から離れて低下する正確な描写を確実にするものでもある。

固定水頭 H_0 の長い試錐孔について検討する。定常状態では、水頭は対数で低下する。実際は次式の通りとなる。

$$H = H_0 - \frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{r}{r_{bh}}$$

ここで、 Q は試錐孔からの地下水流量（単位長さあたりの）、 K は透水係数、 r_{bh} は試錐孔半径で

ある。

試錐孔の長さ B を表している試錐孔節点から長さ L の等間隔の 4 つの連結部について検討する。各連結部の地下水流量は $1/4$ ずつとすべきである。こうするため、そして連結部の端部で正確な水頭とするため、次式が成立する面積 A を見つけ出すことが必要である。

$$\frac{A}{L} \frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{L}{r_{bh}} = \frac{QB}{4}$$

ここで、

$$A = B \frac{\pi}{2} \frac{L}{\ln L / r_{bh}} \quad (2.2)$$

である。調和平均面積は下式から算出される。

$$\bar{A} = \frac{1}{\frac{1}{L} \int_{r_{bh}}^L \frac{2}{B\pi r} dr}$$

上式は評価され得るものであり、(2.2) 式で導かれるのと正確に同じ面積であることがわかる。

したがって、(2.2) 式が Frac-Affinity 中で用いられ、適切な割合の 2π に置き換えられた $\frac{\pi}{2}$ 因子を伴う。

2.8 地下水流動解析モデル

ここまでは、任意の特性を有する“連結部”によって連結している、節点からなるネットワークに複雑な幾何構造を取り入れることについて検討した。物理モデルが構築されれば、同モデルは地下水流動を表す連立方程式を解く際に用いられる。本章では、飽和・不飽和地下水流動式について取り扱う。次章では Frac-Affinity 内でこれら式を解くための手法を取り扱う。

飽和地下水流動式は次式で与えられる。

$$\sigma \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + q \quad (2.3)$$

ここで、

h : 水頭 [m]

σ : 比貯留率 [m⁻¹]

t : 時間 [s]

K : 透水係数 [m/s]

q : ソース [m³/s/m³]

不飽和地下水流動式には様々な式があるが、本研究では、貯留係数を含んだ次式で表現される複合形式の Richard's の式を選択した。

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} + \sigma \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot [K(p) \nabla (p + z)] \quad (2.4)$$

ここで、

ϕ : 空隙率

s : 飽和度

p : 圧力水頭 (=h-z) [m]

$K(p)$: 圧力水頭（または飽和度）に依存する透水係数 [m/s]

z : 鉛直方向の座標 [m]

完全に飽和状態にないときは、貯留係数の項はなく、それは圧力水頭が負の場合である。この挙動を取り込むために、新しい変数 ς を導入することが便利であり、次式で書ける。

$$\varsigma = \phi s + \sigma p (p \geq 0)$$

$$s = \phi s(p < 0)$$

よって、次式となる。

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \nabla \cdot [K(p) \nabla (p + z)] \quad (2.5)$$

(2.5) 式の透水係数 $K(p)$ が p に対して強い非線形性を示すことから、この影響を緩和するため Pressure Transform 法を使用し、これにより不飽和領域、特に不飽和領域と飽和領域境界近傍における圧力水頭の大きな勾配を少ない計算量で正確に求めることが可能であることを示した。

飽和・不飽和問題に対する定常地下水流動解析は、時間微分項を 0 とおくことにより与えられる。

Frac-Affinity では、その領域は未構築のネットワークとして離散化されている。ネットワーク節点は、水頭および飽和度を有する空間領域を表し、節点間の連結部は地下水経路を表している。このネットワークは、支配方程式の差分打ち切りに等しい。

したがって、Frac-Affinity ネットワークにおいて支配方程式を再公式化する。空間微分は空間差分で近似される（連結部端部にある節点間で）。

よって、ネットワークにおける飽和地下水流動の支配方程式は次式となる。

$$\sigma_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \frac{1}{V_i} \sum_{\text{conni-j}} A_{i,j} K_{i,j} (h_j - h_i) / d_{i,j} + q_i \quad (2.6)$$

ここで、 i および j は節点である。連結部の透水量係数によって、次式のように書かれる。

$$\sigma_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \frac{1}{V_i} \sum_{\text{conni-j}} C_{i,j} (h_j - h_i) + q_i \quad (2.7)$$

上式の物理的説明は明らかである。右辺は節点への合計流入量（単位体積あたりの）を表し、貯留係数によって決まる水頭の上昇により釣り合いをとる。

定常状態は、全ての節点での流入量が正味 0 である状況に該当する。

不飽和地下水流動に対しても同様であり、節点の式は次式となる。

$$\phi_i \frac{\partial s_i}{\partial t} + \sigma_i \frac{\partial p_i}{\partial t} = \frac{1}{V_i} \sum_{\text{conni-j}} C_{i,j}(p_i, p_j) (p_j - p_i + z_j - z_i) + q_i \quad (2.8)$$

ここで、圧力水頭 p と飽和度 s とには別の関係があり、節点の圧力水頭が与えられた透水量係数を導く（実際は、飽和度に依存する）。これらの関係は van Genuchten の式を用いるかもしくはユーザー指定が可能であり、次項で検討する。

2.8.1 水分貯留モデル

(2.5) 式では、圧力水頭（不飽和領域ではサクション）と飽和度の関係と、透水係数と飽和度との関係を定義する必要がある。Frac-Affinity ver.2 では、この定義のため Van Genuchten モデルの使用と、線形補完による任意曲線の近似が可能である。なお、これらの定義及び使用法についてはユーザーマニュアルに示した。

Van Genuchten モデルは次式により表される[van Genuchten, 1980]。

$$s = \begin{cases} 1(p \geq 0) \\ \left[\frac{1}{1 + (A|p|)^B} \right]^C (p < 0) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\frac{k(s)}{k_{sat}} = s^2 \left\{ 1 - \left(1 - s^{\frac{1}{C}} \right)^2 \right\} \quad (2.10)$$

ここで、 A [L^{-1}]と B は媒体の種類に応じて設定されるパラメータで、 $C = 1 - 1/B$ である。van Genuchten モデルにより定義される不飽和特性の例を図 2.33 に示す。

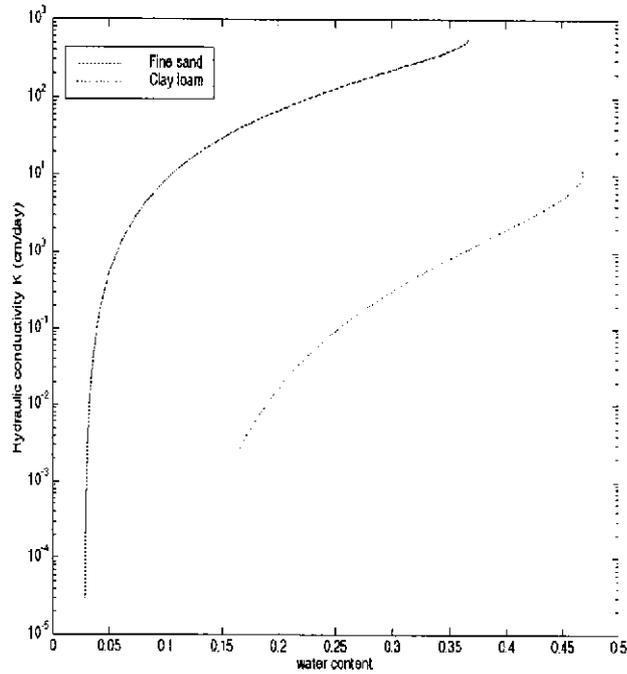


図 2.33 van Genuchten モデルで与えられる飽和度と透水係数の関係の例

ネットワークの離散化においては、圧力水頭、したがって節点端部での飽和度が与えられた各連結部に対して透水量係数を導くことが必要である。飽和度が暗に節点間で変化するならば、適切な平均が不明確となる。Frac-Affinity においては、完全に飽和した透水量係数を取り込み、2つの節点飽和度に対するスケーリングファクターの調和平均によってスケーリングする、簡易な手法を用いた。

2.8.2 点および境界条件

支配方程式の他に、系を完全に指定するために境界条件が必要である。また、内部ソースまたは固定水頭条件も必要となる可能性があり、試錐孔はこれら追加条件を有することとなる。これらについて本節で検討する。

点および境界条件は、指定された区分的線形関数によって時間依存可能となる。試錐孔水頭条件の特別なケースを除いては、後述のように、時間関数は与えられた時間範囲外では一定と仮定する。定常状態の計算では時間 0 の値を用いる。時間依存値は不連続が可能である（時間が様々な値で繰り返されるなら）。非定常ソルバーがこの不連続性を識別し、そのどちらの側面の時間間隔に対しても個別に解いている。

境界条件は全境界に適用可能であるか、または多角形によって制限可能である（上部および下部境界に対して）。多角形が指定された場合、多角形内に x および y 座標を伴った境界節点のみが条件に与えられる。

境界節点に境界条件が与えられないときは、フラックス 0 とする。こうすることで、この位置でその境界を通過して地下水が流れることは不可能となる。

(1) ポイントソースおよび水頭条件

ポイントソース条件は指定された位置に最も近い境界節点に付与される。これはあらゆる特性上、もしくは岩盤基質部中の節点である可能性があり、そのためこの種の条件は通常の使用にとってはむしろ不十分なものである。（試錐孔セクションがより優れた手法を提供する。）

指定された流速（ポイントソースはモデルへの地下水流動に対して正である）は、節点の水収支に加えられる（(2.6) および (2.8) 式中の q_i は節点の体積で割った地下水流量である）。

またポイント水頭条件は、指定された位置に最も近い節点にも付与される。この節点に対する式は、指定された値に水頭を設定すればよい。マトリクスの対称性が保存されている定常状態の計算に対しては、連結節点の成分も変更される。ここで注意点として、節点での水頭の指定によって、系への地下水の流入または流出を考慮することになる。水収支レポートでは生じる地下水流量を示している。

(2) 境界水頭条件（地形に応じた条件を含む）

境界水頭条件は、境界上の各節点に水頭を設定する。境界水頭条件には下記の 2 つのタイプがある。

- ・ 全節点と同じ値を有する水頭条件（時間依存の可能性はあるとはいえ）
- ・ 節点の値が、全ての時間に対して、地表高さ（ z 座標）に固定される地形に応じた条件

地表面に対しては、地形に応じた条件は地表での大気圧に一致するので、飽和条件に相当する。側面境界に対しては、地形に応じた条件は、地表面での z 座標に対して、列の全節点を設定する。こうすることで、どんな鉛直成分も強要することなく、境界を通過する地下水流動を考慮することとなる。

(3) 境界フラックス条件

境界フラックス条件は、境界上の各節点にある地下水流動を設定する。Frac-Affinity では、正の境界フラックスはモデル領域からの地下水流動を表す。フラックスは単位面積あたりの地下水流量として指定されるので、境界節点への連結部の面積は、各境界節点に対する地下水流動の算出に用いられる。

(4) 境界涵養量条件

境界涵養量条件は、飽和・不飽和条件でそれぞれに作用する。どちらのケースでも、地表面での利用を目的としている。

飽和条件の場合、涵養量条件は、多少の地下水流動が追加されるという点を除いて、地形に応じた条件と同じである。指定された涵養量はモデルへの追加フラックスとなる（そのため、連結部の面積に比例する。）。実行方法を図 2.34 に示す。

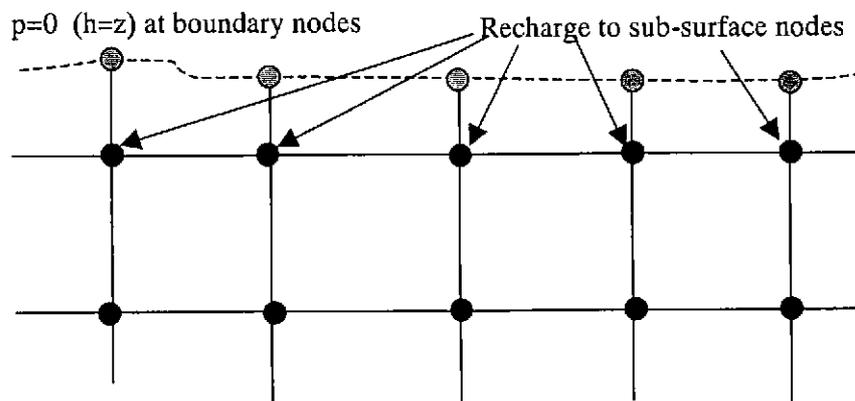


図 2.34 涵養量により境界条件を定義する場合の概念図

したがって、その影響は、まさに地表面下での一組のポイントソースを伴った地形に応じた条件を有するということである。涵養は直ちに地表面を通じて流出する可能性があり、深部系での合計流量に追加することは保証されない。

2.8.3 圧力変換

透水係数 $K(p)$ の極めて非線形な依存性とは、通常圧力解には非常に急な圧力勾配を、特に飽

和／不飽和境界近傍で含むことである。この利用法に取り組むために、圧力変換手法を、解の変数における勾配の険しさを減じるために用いる。

圧力水頭に代わって、圧力水頭に依存する変換変数を指定し $f = f(p)$ 、 f を微分することで次式が得られる。

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial p} \nabla p$$

次式に示すように、(2.4) 式中の ∇p の発生を置き換えることが可能である。

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} + \sigma \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot (D(p) \nabla f) + \frac{\partial K}{\partial z}$$

ここで、 $D(h) = (\partial f / \partial p)^{-1} K(p)$ である。この目的は、非線形性を取り扱いやすいような適切な関数 $f(p)$ を選択することである。

実際に用いた変換は、Pan and Wierenga [Pan and Wierenga, 1995 ; Pan and Wierwnga, 1997] の P_t ベースの変換である。

$$f = P_t = \begin{cases} p (p \geq 0) \\ \frac{p}{1 + \beta p} (p < 0) \end{cases}$$

なお、 P_t 変換のための変数 β については、 1 m^{-1} から -10 m^{-1} の範囲の値が仮定されているものの、既往の研究 [Pan and Wierenga, 1995] によれば変換性能は β の設定にほとんど依存しないことが示されており、同研究では β を 3 m^{-1} とすることが推奨されている。

節点の式という点では、この変換はその透水量係数により一層のスケーリングファクターを与えており、多少飽和度依存を無効にしている。これを飽和度依存と統合し、統合結果の調和平均を用いる。 z 座標項には変換された透水係数がないので、飽和度の影響のみが原因となっている値が保持されることとなる。

節点の式にこの全てを考慮すると次式が得られる。

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{1}{V_i} \sum_{conni-j} \mu_{i,j} C_{i,j} (f_j - f_i) + v_{i,j} C_{i,j} (z_j - z_i) + q_i \quad (2.11)$$

ここで、

$$\frac{1}{\mu_{i,j}} = \frac{1}{2} \left(\left[\frac{\partial f}{\partial p} \frac{K_{sat}}{K(p)} \right]_i + \left[\frac{\partial f}{\partial p} \frac{K_{sat}}{K(p)} \right]_j \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{v_{i,j}} = \frac{1}{2} \left(\left[\frac{K_{sat}}{K(p)} \right]_i + \left[\frac{K_{sat}}{K(p)} \right]_j \right) \quad (2.13)$$

2.9 数値解析手法

ここでは、地下水流動式を解くために用いる手法について検討する。

2.9.1 定常状態地下水流動解析

定常状態地下水流動解析は、平衡状態にある系を表しているのので、それ自体役立つものである。また、Frac-Affinity 内では非定常解析の初期条件を得るためにも用いられている。

Frac-Affinity 中で定常状態解析を行うために用いる基本的な手法は、反復法である。残差（局所的に平衡状態でない地下水流動）が十分に小さくなるまで、最初の推測が徐々に細密化される。飽和・不飽和地下水流動解析に用いられる手法は多少異なっている。なぜならば、飽和地下水流動系は線形であるが、不飽和系は非線形であるためである（飽和度における透水量係数依存のため）。

どちらのケースとも、場合によって多数の連立方程式が必要となる（(2.7) 式または 0 時間導関数を伴った (2.7) 式）。飽和解析の場合は、線形性とはただ一つの線形連立方程式を解く必要があるということの意味する。不飽和解析の場合は、反復法は解く式を細密化するが、各段階で線形を考慮しなければならない。

定常状態の場合、式は対称的であり、用いられるアルゴリズムはより能率的なものである。Frac-Affinity で用いられている手法について以下で検討する。

(1) 対称線形方程式の反復解

対称共役勾配法を使用するためには、数値解析のための行列が対称でなければならない。実際、Frac-Affinity ver.1 においては対称共役勾配法の採用は見送られたものの、Frac-Affinity が数値解析のために生成する行列は対称行列であり、Frac-Affinity における対称共役勾配法の採用について最も根本的レベルの問題が生じないことは明らかであった。検討の結果、対称共役勾配法の採用により、全体的な傾向として取り扱い可能な節点数と必要な計算時間の両者について 10 倍程度の改善が見込まれることが明らかとなった。具体的には、総節点数が 100,000 を越える場合においても計算条件によっては数分のオーダーで収束解を求めることが可能であった。

なお Frac-Affinity ver.2 では、対称共役勾配法として標準事前調整共役勾配法（standard pre-conditioned Conjugate Gradient Method）を採用することとした。また、LU 分解法等の手法を使用することなく、与えられた行列を単純に分解することにより行列のプレコンディショニングを行うこととした。

共役勾配法の計算アルゴリズムには様々なものが存在する。ここに示したアルゴリズムは、プレコンディショニングされた行列を対称成分に分解せずに計算を行う点で単純性に優れている。対称行列 A に関して $Ax = b$ を解くためのアルゴリズムは、対称なプレコンディショニング行列 M を用いて表 2.2 で与えられる。

表 2.2 $Ax = b$ を解くための粗行列アルゴリズム

```

Start with
   $x = 0$ 
   $r = b (= b - Ax)$ 
Iterate, for  $i=1,2,\dots$ 
   $z = M^{-1}r$ 
   $\rho_{old} = \rho$ 
   $\rho = r^T z$ 
  if  $i=1$  then
     $p = z$ 
  otherwise
     $\beta = \rho / \rho_{old}$ 
     $p = z + \beta p$ 
   $q = Ap$ 
   $\alpha = \rho / p^T q$ 
   $x = x + \alpha p$ 
   $r = r - \alpha q$ 
Loop until  $\|r\| < \epsilon \|b\|$ 

```

プレコンディショニング行列に対しては、次式で表される。

$$A = L + D + L^T$$

ここで、 D は対角行列、 L は下三角行列である。次に、 A の近似として次式が成立するような M を選択する。

$$M = (L + D)D^{-1}(D + L^T)$$

このアルゴリズムでは、 M の逆行列が必要であるが、これは下式のように非常に簡単なものである。

$$M^{-1} = (L^T + D)^{-1}D(D + L)^{-1}$$

ここで、下・上三角行列の反転および元の行列の対角行列による乗算が必要であり、これらは全て容易に行える。

100 ステップ後ごとに行われる反復による細密化は非常に簡単である。上記と同じ記号を用いて、下式を解くことで、近似値 x_n を新しい x_{n+1} に更新する。

$$Dx_{n+1} = b - (L + L^T)x_n$$

これを 100 回繰り返す。反復による細密化ステップと共役勾配ステップの総合効果は、それらのどちらかの個別効果よりも、効果的に機能する。

(2) 非線形方程式の反復解

不飽和地下水流動モデルの場合、透水量係数は飽和度に依存し、飽和度は圧力水頭に依存する。一般的には、これは解こうとしている系が下式であることを意味する。

$$A(x)x = b(x)$$

Frac-Affinity で用いられている手法は、Picard 法と Newton 法の組み合わせによってこれを解くものであった。Picard 反復法は Newton 反復法よりも安易であるが、完全に収束しない可能性がある。

Picard ステップは、下式を解くことで、 x_n を x_{n+1} へと細密化する。

$$A(x_n)x_{n+1} = b(x_n)$$

ここで、 x_{n+1} においては線形かつ対称であるので、飽和解析の場合と同じ方法で解くことが可能である。これはより大きな反復法の枠組みの一部にすぎないので、線形解は各ステップで完全に収束する必要はない。収束するように、各ステップを x 中で推奨される変化が生じるように少しばかり改良し、(非線形問題の) 最小残差の方向を捜し求める。

Newton ステップは、4 ステップに 1 回、もしくは Picard ステップが発散した後に行われる。

Newton ステップには、 A および b の導関数の算出が必要となる。新しい解は次式で与えられる。

$$x_{n+1} = x_n - [b'(x_n) - A'(x_n)x_n - A(x_n)]^{-1} [b(x_n) - A(x_n)x_n]$$

これは非対称行列の反転が必要で、最小残差反復法の枠組みで行われる。この場合もやはり、これはさらに大きな反復の一部にすぎないので、完全な収束は必要ない。

2.9.2 非定常状態地下水流動解析

非定常状態の場合、貯留係数の影響は、その系を通じて変化が広まっていく時間スケールを決定する際に、最も重要である。極めて小さな貯留係数は非常に急速な非定常流を与えることになるので、避けることが不可欠である。Frac-Affinity では、貯留係数をユーザー指定の時間スケールにあわせることで、極めて小さな貯留係数を排除している。ユーザー指定の時間スケールはどんな時間スケールよりも短いものであるべきである。

(1) 急速な非定常流

(2.7) 式は系における各節点の応答に対して自然な時間スケールを与えている。これはタイムステッピングアルゴリズムにとって重要である。時間スケールは、下式のように、時間導関数の係数と節点水頭の割合で簡単に与えられる。

$$\tau_i = \frac{\sigma_i V_i}{\sum_{conni-j} C_{i,j}} \quad (2.14)$$

節点特性が極めて変わり易い系に対しては、いくつかの節点は他の節点よりもかなり短い時間スケールを有することが可能である。これは、逆に、タイムステッピングアルゴリズムの挙動に影響を及ぼし得る。ただ一つの節点の非定常挙動を追跡する間に、タイムステップは満足いかないほど小さくなる可能性があることがわかった。このためにとり得る手法には以下の 2 つがある。

- ・ その近接節点と平衡にあるものとして、急速に変化している節点を扱う。
- ・ 非定常流の流速を落とすように節点の貯留係数を修正する。

最初のオプションには多少の利点があるが、その特性における時間依存の可能性によって複雑であり、計算中に節点の状況の変化が必要となる可能性がある。

Frac-Affinity では、2 番目の手法を採用している。ユーザー指定の時間スケールが用いられて

おり、貯留係数はこれが妨害された節点において増加する。指定されたよりも大きな時間スケールでの結果には影響を及ぼさない。一般的に、選択された時間スケールは数年以上の計算に対して1日、または数時間以上の計算に対して数秒である。

(2) タイムステッピングソルバー

Frac-Affinity では飽和・不飽和の両ケースとも DYLAN タイムステッピングソルバーを用いている。DYLAN は可変次数の予測子修正子法であり、Byrne and Hindmarsh [1975] が発表したアルゴリズムに基づくものである。DYLAN の概要を付録 1 に示す。

Frac-Affinity では代数変数と微分変数の両方を用いている。飽和のケースでは、節点の水頭は通常微分変数として扱われる。点として扱われる節点（ここでは、水頭は時間関数で与えられる）と貯留係数が 0 の節点（ここでは、時間導関数 0 である）は例外である。不飽和地下水流動のケースでは、 α 及び f についての節点の値が計算される（2.8 節参照）。ここで、 α は微分式で、 f は代数式である。

ヤコビ行列の逆行列は汎用の疎行列で処理される。部分的な LU 分解が生成され、DYLAN が用いている Newton 法の各反復に適用される。

2.10 出力結果

Frac-Affinity の主要な出力結果は水頭であり、その単位は m で表される。本節では、以下に示すその他の各種出力結果が何に対応するのかについて述べる。

- ・ 流速
- ・ 水収支
- ・ 飽和度
- ・ フラックス
- ・ 流路及びパーティクル
- ・ 確率論的亀裂データ

2.10.1 流速

各節点での流速がレポートされるので、流速はある節点と連結しているレグ (leg) の平均である。したがって、流速の計算結果は全流速場に対して局所的に近似したものとなる。

計算ではダルシー流速について流速を重み付けした平均を用いる。したがって、レポートされる節点 i での流速の x 成分は次式により算出される。

$$\bar{v}_i^{(x)} = \frac{\sum_j |Q_{ij}| v_{ij} (x_j - x_i) / l_{ij}}{\sum_j |Q_{ij}|}$$

y 及び z 成分についても同じように算出される。ここで、 Q_{ij} は i から j への流量、 l_{ij} は i から j への距離、 x_i は節点 i の x 座標である。

2.10.2 水収支

水収支レポートは、各モニタ出力時間ごとに、FALog ファイルに書き込まれる。これはその時点での瞬間的な状態をレポートしている。定常・非定常、及び飽和・不飽和ケースのフォーマットは基本的に全て同じであるが、ケースによっては記入されない情報もある。

節点の体積、空隙率、及び飽和度を用いて、系での全水量がレポートされる。全水量は流量（体積／単位時間、 m^3/s ）の内訳の後に続く。全水量は“境界”で示され、外側及び内側の物理的境界を含むが、貯留係数の影響も含む。

表の各列ごとに、モデル内への流入量及びモデル外からの流出量が別々に示される。また、正味の流量もレポートされる。これら流量は任意の境界との連結部における流量を合計することで、簡単に算出される。

ポイント節点に対しては、指定の流量がレポートされるか、または指定の水頭条件に対して算出された流量がレポートされる。

試錐孔セクションについては、同様に、指定の流量がレポートされるか、または指定の水頭条件に対して算出された流量がレポートされる。

非定常のケースでは、貯留係数への流量及び貯留係数からの流量がレポートされる。これら流量は、各節点における非ゼロの正味の流量から推論される。点及び試錐孔の場合、流量は最初のうちは貯留係数の一因となる。この影響が減少する流量は貯留係数の時間スケールによって決まり、データにより示されるか、ユーザーが指定する。

最終的な合計量は、厳密な計算においてはゼロとなる。定常状態の計算では、非ゼロ値は、

解が完全に収束していないことを意味している。非定常計算では、丸め誤差により、合計はゼロとはならない。それは局所的な非ゼロの正味の流速は貯留効果があるものと解釈されるためである。

2.10.3 飽和度

Frac-Affinity によってレポートされる飽和度は、0~1 の範囲にある。ユーザー指定の WRM ファイルがゼロ圧力に相当する 1 以下の飽和度をもつならば、最大飽和度をコントロールすることとなる。Van Genuchten では、この最大値が 1 である。

2.10.4 フラックス

フラックス面が指定された場合、Frac-Affinity ではその面を通過する全流量を算出する。

したがって、その面を交差する全ての連結部が完全に含まれ、それには計上されている流量が示されており、レポートされる値は正味の流量である。

2.10.5 流路及びパーティクル

流路及びパーティクルとも、非収着パーティクルが通るネットワーク中における推定流速を用いている。これらの相違は節点における挙動である。両ケースとも、定常または非定常での地下水流動場が用いられる。非定常のケースでは、あたかも流速場が前のステップで固定されたかのように、パーティクルの位置は各タイムステップ後に更新される。

流路については、パーティクルは、特定の節点からの最大流量を有する、外側からの流れがある連結部を追う。2 つの連結部が同じ流量を有するような場所では、選択される連結部は予測不可能である。

パーティクルについては、各パーティクルが外側からの流れがある連結部からランダムに選択する。ここで、その確率は流量に比例する。これは各節点で完全に混合しているという仮定に一致している。

どちらのケースでも、パーティクルが外側からの流れがない連結部（通常、境界節点、ポイント節点、または試錐孔節点）を有する節点に到達した際に、パーティクルトラックは終了する。

2.10.6 確率論的亀裂情報

書き込まれる確率論的亀裂情報は、先の記述と一致している。ここでは、再度この情報を要約する。

重心座標 : x, y, z	これらは確率論的亀裂を生成するために用いられる座標であり、その打ち切り形 (truncated shape) の重心ではない。
傾斜角度	水平以下の角度で
傾斜方向	北からの角度で
回転角度	角度で
長さ	確率論的亀裂の生成長さ、すなわち下方に傾斜した確率論的亀裂の大きさ
幅	確率論的亀裂の生成幅、すなわち傾斜部を横切る確率論的亀裂の大きさ
透水係数	Log10 の値
空隙率	
屈曲度	透水係数のスケール調整に用いられる
貯留係数	
開口幅	
異方性、平面内と垂直	確率論的亀裂と亀裂を通過する leg に対する値
増倍係数	増倍する交差部の透水係数に対するスケールリングファクター

3. 地下水流動解析コード並びにユーザインタフェースの改良

2章で述べた考え方にもとづき、本業務では地下水流動解析コード Frac-Affinity 及びそのインタフェース部分について、以下の5つの項目を中心とする改良を行った。

- ・ 亀裂交差部の透水性設定機能の追加
- ・ 亀裂分布推定機能の追加
- ・ 亀裂情報の出力機能の導入
- ・ 透水異方性を考慮するための機能の導入
- ・ 不均質透水係数場の設定機能の追加

そこで本章では Frac-Affinity 及びユーザインタフェースに導入された新規の機能について、その概要をまとめる。なお、コードの使用法の詳細は別冊のユーザマニュアルを参照のこと。

3.1 亀裂交差部の透水性設定機能の追加

本機能はこれまでの研究から、亀裂の交差部に沿って、卓越した流路が生じるような状況の存在が示唆されていることから [Hestir and Long, 1990; Schelkes et al., 1998; Ho and Wilson, 1999]、Frac-Affinity においても亀裂の交差部を透水係数の増加領域として表現する機能を追加するものである。具体的には、この様な状況を Frac-Affinity ネットワークで表現するため、以下に示すステップを順に検討し、コードの改良に反映させた。

- ・ 亀裂交差部の認識
- ・ 亀裂交差部の水理学的特性の設定
- ・ Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い

3.1.1 交差部の認識

ある面積を有する矩形の平面によって表現される確率論的亀裂の場合には、亀裂の交差部を数学的に認識することは容易である。交差部は直線であり、2つの亀裂の面内に存在する。ただし、交差部が亀裂を完全に横断する場合、一方の先端が亀裂の先まで達し、他の先端は亀裂内部に包含される場合、交差部が一方の亀裂内に包含される場合があり得ることに注意を要する。図3.1に概念図を示す。

実際の解析では、複数の亀裂が一つの亀裂を交差する場合や、複数の交差部がさらに交差する可能性もあることから、これら全ての場合に対応できる手法を開発することが必要である。

なお、決定論的亀裂については、巨視的には曲面として表現することが許されているが、解析モデル上ではこのような曲面は小さな平面要素の集合として表現されることから、確率論的亀裂と同時に扱うことができる。

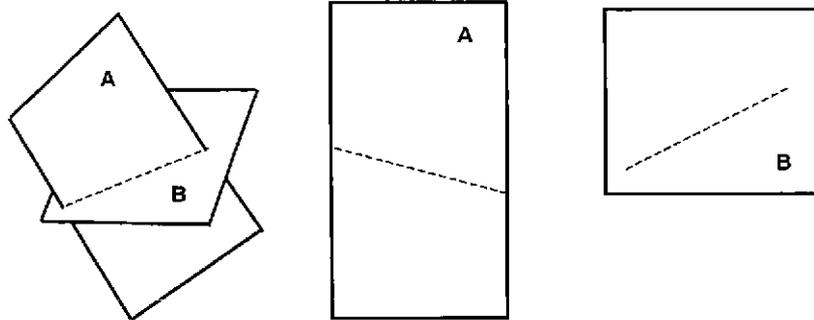


図 3.1 亀裂の交差のバリエーションに関する概念図

3.1.2 亀裂交差部の水理学的特性の設定

亀裂交差部の水理学的特性としては、交差している亀裂の透水係数に比べて透水性が高く、交差部が卓越流路となっている可能性を表現できることが重要である。そこで Frac-Affinity では、ユーザが亀裂に対して任意に設定できる増倍係数（Enhancement Factor）によって亀裂交差部の透水係数の上昇を定義することとした。その際、交差している亀裂のそれぞれから導出される透水係数のうち、大きなもので交差部の透水係数を与えるものとした。したがって、透水係数 k_1 、 k_2 、増倍係数 f_1 、 f_2 とすると、交差部 “i” の透水係数は次式によって与えられる。

$$K_i = \max(f_1 * k_1, f_2 * k_2) \quad (3.1)$$

これらの係数は、キーワード “ENHANCEMENT_FACTOR” を用いて、決定論的亀裂及び確率論的亀裂の透水係数の定義の部分で定義する。このキーワードの使用法を表 3.1 及び 3.2 に示す。キーワード “ENHANCEMENT_FACTOR” がいない場合は、増倍係数は 1 と設定される。また、解析上は増倍係数を 1 より小さく設定することで、交差部の透水性を低く設定することも可能である。

さらに、増倍係数 0 を指定することにより、交差部を止水部として設定することも可能である。具体的には (3.1) 式で 2 つの積のうちのどちらかが 0 の場合（どちらかの亀裂について増

倍係数を0とした場合)、交差部の透水係数は0となる。

なお、交差部の長さや体積は幾何学的に導出できる。交差部の面積は、亀裂開口幅と亀裂の交角を考慮して、亀裂の幾何特性から導出される。

3.1.3 入力例

高透水係数を設定するには、決定論的亀裂の透水係数入力ファイル、または確率論的亀裂の透水係数入力ファイル（もしくは両方）に、キーワード“ENHANCED_CONDUCTIVITY”の行を追加し、さらに“ENHANCEMENT_FACTOR”行で増倍係数を設定する。この“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を使用した場合の入力ファイルのフォーマットを、表 3.1 および表 3.2 に示す。

ここで、“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を指定した場合としない場合とでは、亀裂の交差部における Frac-Affinity ネットワークの設定が必ずしも同一とならないことから、“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を指定して増倍係数を1とした場合と、“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を指定せずに亀裂交差部を特別な部分として考慮しない場合とでは、入力上は同一の状態を示しているが、数値解析上は厳密に同一とはならないことに注意する必要がある。なお、決定論的亀裂と確率論的亀裂に対するキーワード“ENHANCED_CONDUCTIVITY”の適用と、透水性を増大させる亀裂交差部の関係は次の通りである。

- ・決定論的亀裂に対してキーワード“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を指定した場合には、決定論的亀裂と決定論的亀裂との交差部について透水係数の上昇に対応した Frac-Affinity ネットワークが構築される。
- ・確率論的亀裂に対してキーワード“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を指定した場合には、確率論的亀裂と確率論的亀裂との交差部について透水係数の上昇に対応した Frac-Affinity ネットワークが構築される。
- ・決定論的亀裂及び確率論的亀裂の両方に対してキーワード“ENHANCED_CONDUCTIVITY”を指定した場合には、全ての交差部について透水係数の上昇に対応した Frac-Affinity ネットワークが構築される。

表 3.1 亀裂交差部の透水性を増加させる場合の決定論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット

Filename	User-defined (Suggested - <i>name_ddf_cond_tn.fai</i>)
Format	<p>ENHANCED_CONDUCTIVITY</p> <p><i>feature_name_1</i></p> <p>ENHANCEMENT_FACTOR <i>f</i></p> <p>FRACTAL</p> <p>ANISOTROPY <i>a_i a_n</i></p> <p>MEAN <i>mean</i></p> <p>VARIANCE <i>variance</i></p> <p>DIMENSION <i>dimension</i></p> <p>CORRELATION <i>h_x h_y h_z</i></p> <p>MESH_SIZE <i>delta_x delta_y delta_z</i></p> <p>APERTURE <i>aperture</i></p> <p>.....</p> <p><i>feature_name_N</i></p> <p>ENHANCEMENT_FACTOR <i>f</i></p> <p>UNIFORM</p> <p>ANISOTROPY <i>a_i a_n</i></p> <p>VALUE <i>value</i></p> <p>APERTURE <i>aperture</i></p> <p>CONDITIONING_DATA</p> <p><i>name_1</i></p> <p>.....</p> <p><i>name_M</i></p>

表 3.2 亀裂交差部の透水性を増加させる場合の確率論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット

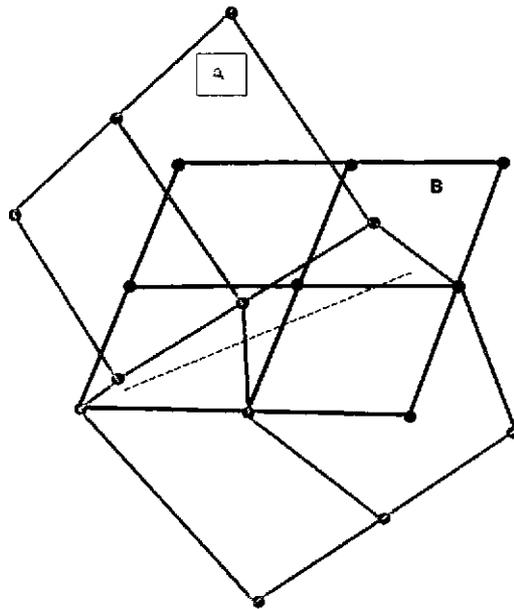
FileName	(Suggested - <i>name_sdf_tn.fai</i>)
Format	<p>ENHANCED_CONDUCTIVITY</p> <p><i>Time</i></p> <p><i>ZoneName1</i></p> <p>ENHANCEMENT_FACTOR <i>f</i></p> <p><i>FeatureDist Parm</i>s</p> <p><i>OrientationDist Parm</i>s</p> <p><i>ShapeDist Parm</i>s</p> <p>tortuosity aperture</p> <p><i>ConductivityDist Parm</i>s</p> <p>ANISOTROPY <i>a_i a_n</i></p> <p><i>porosity storage</i></p> <p>.....</p>

3.1.4 Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い

前述のように、これまでの Frac-Affinity では、亀裂の交差部を直接認識するのではなく、亀裂を表現する Frac-Affinity ネットワークを一つ一つ既存のネットワークへ統合する。これは具体的には、節点を移動させずに節点間を接合するレグの配置を最寄りの節点を順に結ぶように修正することにより、岩盤基質部を中心とした既存のネットワークへ亀裂を表現するネットワークが統合される。したがって、解析上の亀裂の交差部が本来の交差位置から外れる可能性がある。

この作業を 3 次元で図示することは困難であるが、例示的に図 3.1 に示した亀裂 A と亀裂 B のそれぞれについて生成した Frac-Affinity ネットワークを 1 つのネットワークに統合する場合を図示すると、図 3.2 となる。図 3.2 では、亀裂 A を岩盤基質部（あるいは岩盤基質部にあらかじめ統合されていた亀裂）のネットワークに見立て、これに対して亀裂 B を後から統合している。図から、現行の手法では亀裂 A を示すネットワークは、破線で示した実際の交差部を経由することなく、亀裂 B を表現している節点の中から最寄りの節点を経由する様に修正されていることがわかる。

しかし、このようは手法で 2 つの亀裂を 1 つの Frac-Affinity ネットワークへ統合することについては、亀裂の面内を地下水が選択的に流れる場合には、大きな問題を生じない（面としての透水性は、このような作業によって大きく変化することはない）のに対して、亀裂交差部の高透水性が評価結果に影響をおよぼすような場合（すなわち、“ENHANCED_CONDUCTIVITY”が指定された場合）には、この問題が顕在化する恐れがある。そこで、新たな Frac-Affinity では、入力ファイルで“ENHANCED_CONDUCTIVITY”が指定された場合には、亀裂 B を統合する前に、あらかじめ亀裂交差部に節点を設け、亀裂 A のレグの配置を修正する際に交差線上に設けられた節点を経由するように修正する。これにより、亀裂 A と亀裂 B を表現するネットワークは、実際の亀裂交差部に設置された節点を経由して接合されることが保証される。この修正後の手法により亀裂 A と亀裂 B を統合した場合の統合後のネットワークを図 3.3 に示す。この場合、亀裂 A、亀裂 B は破線で示した交差線上で適切に結合されている。



----- “実際の” 交差点

図 3.2 これまでの Frac-Affinity におけるネットワークの統合例
 (図 3.1 の亀裂 B を亀裂 A に統合した場合)

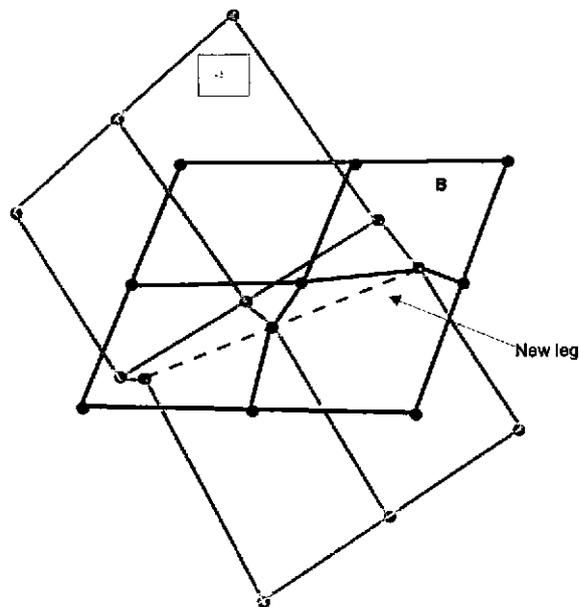


図 3.3 “ENHANCED_CONDUCTIVITY” が指定された場合の Frac-Affinity ネットワークの統合例
 (図 3.1 の亀裂 B を亀裂 A に統合した場合)

3.2 亀裂分布推定機能の追加

確率論的亀裂の走向と傾斜の分布を、観測データに基づき直接的に設定するためには、観測データによって作成された走向と傾斜に関するデータを母集団として、これからランダムサンプリングにより確率論的亀裂の走向と傾斜を設定することが現実的である。この方法により確率論的亀裂の角度を与える場合には、キーワード“DATA_SET”を指定し、母集団を定義するデータファイル名を記述する。表 3.3 に、キーワード“DATA_SET”を使用して確率論的亀裂の角度を設定するための入力ファイルを記述するためのフォーマットを示す。

表 3.3 確率論的亀裂設定のための入力ファイルのフォーマット

Keyword	Parameters
UNIFORM	min_da, max_da, min_dd, max_dd
FISHER	dip_angle, dip_dirn, kappa
DATA_SET	<i>filename</i>

“DATA_SET”により指定されたファイルにより、確率論的亀裂の走向と傾斜に関する母集団を与えるファイルのフォーマットは、表 3.4 に示すフォーマットを用いる。スペース、タブ、またはコンマが区切りを示す。パラメータの範囲は基本的には以下の通りである。

- ・ 傾斜については、水平下向きを正に $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$
- ・ 走向については、北向きを 0 として $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$

ただし、Frac-Affinity は $-360^{\circ} \sim 360^{\circ}$ の値を設定可能であり、また最大角度よりも大きい最小角度の設定も可能である（例えば、 $340^{\circ} \sim 020^{\circ}$ ）。また、コメント行は#で始まる。なお、この手法を用いれば、実測値に加え、例えば他のコードで作成した亀裂の方向分布やステレオネットのデータにもとづき Frac-Affinity の亀裂情報を設定することが可能である。

表 3.4 走向と傾斜をサンプリングする母集団を定義するファイルのフォーマット

DipAngle1	DipDirection1
DipAngle2	DipDirection2
DipAngle3	DipDirection3
DipAngle4	DipDirection4
...	

3.3 亀裂情報の出力機能の導入

確率論的亀裂設定に関する情報の出力のための機能については、ステレオネット上に Frac-Affinity での設定をプロットすることが重要である。しかしながら、今回の改良ではより汎用性を高め、確率論的亀裂に関する全ての利用可能な情報が出力できるように改良することとした。具体的には、Frac-Affinity で設定された個々の確率論的亀裂について、以下の情報を出力することとした。

- ・ 重心の位置
- ・ 傾斜
- ・ 走向
- ・ 回転角度
- ・ 亀裂長さ
- ・ 亀裂幅
- ・ 透水係数
- ・ 空隙率
- ・ 屈曲度
- ・ 比貯留係数
- ・ 開口幅
- ・ 異方性
- ・ 増倍係数 (enhancement factor)

Frac-Affinity では、これらの情報を、“SDF_Data.faout” という名前のファイルに出力する。このファイルは、Frac-Affinity インターフェイスを介して、Frac-Affinity ディレクトリに出力される。これらデータは、Excel 等での後処理を想定し、一列あたり一つの亀裂情報となるような、行/列フォーマットで書き込まれる。各データ項目はコンマで区切り、ファイルの 1 行目に各

列のデータが記述される。

3.4 透水異方性を考慮するための機能の導入

3.4.1 岩盤基質部の透水係数の異方性

既存の Frac-Affinity において、岩盤基質部内で異方性をモデル化するための方法としては、フラクタル透水係数分布に異方的な相関関数を指定することができる。ただしこの方法では、透水性の異方性は確率的な表現となることから、異方性をより確実にコントロールする方法として透水係数をテンソル化することとした。

透水係数テンソルは、x、y、z 軸に沿った、主方向での透水係数値によって定義される。すなわち、一つの透水係数 k と 3 つのファクター a_x 、 a_y 、 a_z を設定し適切な方向での透水係数を得るために、これらファクターを透水係数に乗じる。 $a_x=a_y$ と設定することにより、垂直方向と水平方向の 2 つの成分により透水係数を設定することができる。なお、これらファクターは 1 つのゾーン内では空間的に変動せず一定の値をとるものとする。

本設定は、岩盤基質部の透水係数を設定する入力ファイル（表 3.5）に、新しいキーワード“ANISOTROPY”の追加により実行される。具体的には入力ファイルに次の行を追加する。

ANISOTROPY	a_x	a_y	a_z
------------	-------	-------	-------

キーワード“ANISOTROPY”は、キーワード“FRACTAL”、“UNIFORM”（または“IMPORT”）の直後に使用する。 a_x 、 a_y 、 a_z が、x、y、z の各方向での異方性のファクター¹である。キーワード“ANISOTROPY”が省略された場合は、全ての異方性のファクターが均一であると仮定される。“FRACTAL”及び“IMPORT”に対して、 a_x 、 a_y 、 a_z を指定した場合には、各軸方向の透水係数成分が a_x 、 a_y 、 a_z に応じて増減されることとなる。

¹ 異方性のファクターは十進法で与える。すなわち K が 10^{-7} 、異方性のファクターが 100（または 10^2 ）ならば、透水係数は 10^{-5} となる。

表 3.5 岩盤基質部の透水係数を設定する入力ファイルフォーマット

Name	User-defined (Suggested - <i>name_rock_cond_tn.fai</i>)
Format	<pre> zone_name_1 FRACTAL ANISOTROPY a_x a_y a_z MEAN mean VARIANCE variance DIMENSION dimension CORRELATION h_x h_y h_z MESH_SIZE delta_x delta_y delta_z zone_name_2 UNIFORM ANISOTROPY a_x a_y a_z VALUE value CONDITIONING_DATA name_1 name_M </pre>

3.4.2 亀裂透水係数の異方性

岩盤基質部の異方性は x、y、z の主軸方向別に指定されるが、同様の手法を亀裂の透水性に異方性を導入する場合には、亀裂別に主軸の方向を設定する必要がある。また、図 3.4 と図 3.5 に示したように、確率論的亀裂は平板でモデル化されることから亀裂全体を通じて一つの主軸を使用することができるが、決定論的亀裂は曲面である可能性があることから、異方性の主軸の局所的な変化にも対応する必要が生じる。

ここで、今回の Frac-Affinity の改良では原位置で取得される亀裂の透水性に関する情報としては、亀裂面内の異方性については一般に入手が困難であることも考慮して、亀裂の水理特性が亀裂面内で等方的であるものと仮定することとした。すなわち、亀裂の水理特性に関する異方性は、亀裂面に平行な方向での透水係数と、亀裂面に垂直な方向での透水係数の 2 つの値によって定義する。したがって、これら 2 つの透水係数は、透水係数値と 2 つの増倍率（異方性のファクター）を指定することで、岩盤基質部の場合と同様に設定することができる。なお、1 つの決定論的亀裂、あるいは 1 組の確率論的亀裂のセットに対して 1 組の増倍係数を設定する

ことが可能である。

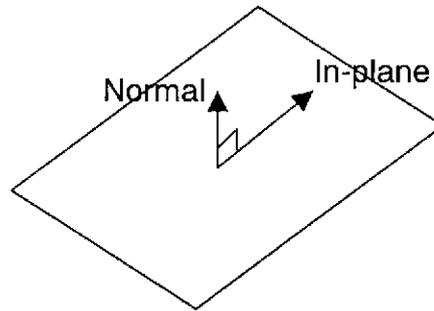


図 3.4 確率論的亀裂における水平・垂直方向の概念

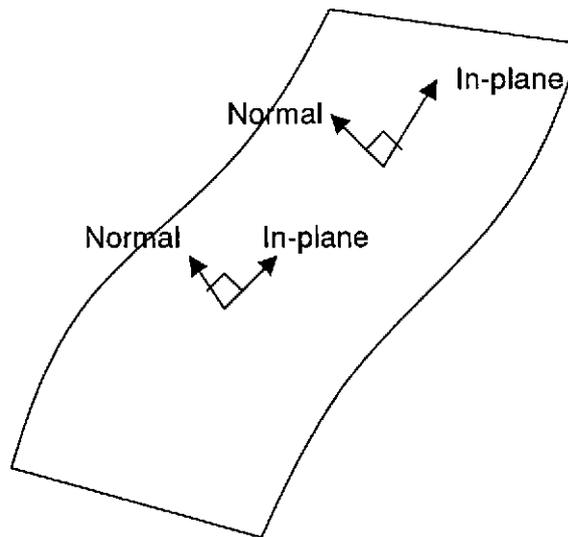


図 3.5 決定論的亀裂における水平・垂直方向の概念

決定論的亀裂については、決定論的亀裂に関する入力ファイルに新しいキーワード“ANISOTROPY”を追加することで(表 3.6)、実行される。キーワードは下記のように使用する。

ANISOTROPY a_1 a_n

“ANISOTROPY” キーワードは、キーワード “FRACTAL”、“UNIFORM”（または “IMPORT”）の直後に使用する。パラメータ a_i 、 a_n は水平・垂直方向の増倍係数（異方性のファクター）である。“ANISOTROPY” キーワードが省略された場合は、全ての異方性のファクターが均一であると仮定される。

確率論的亀裂分布についても、決定論的亀裂の場合と同様のフォーマットにより、確率論的亀裂設定のための入力ファイル（表 3.7）の最後にキーワード “ANISOTROPY” を設定することで、異方性を考慮することができる。

表 3.6 決定論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット

Name	User-defined (Suggested - <i>name_ddd_cond_tn.fai</i>)
Format	<pre> <i>feature_name_1</i> FRACTAL ANISOTROPY <i>a_i a_n</i> MEAN <i>mean</i> VARIANCE <i>variance</i> DIMENSION <i>dimension</i> CORRELATION <i>h_x h_y h_z</i> MESH_SIZE <i>delta_x delta_y delta_z</i> APERTURE <i>aperture</i> <i>feature_name_N</i> UNIFORM ANISOTROPY <i>a_i a_n</i> VALUE <i>value</i> APERTURE <i>aperture</i> CONDITIONING_DATA <i>name_1</i> <i>name_M</i> </pre>

表 3.7 決定論的亀裂の透水係数入力ファイルフォーマット

FileName	User defined (Suggested - <i>name_sdf_t.n.fai</i>)
Format	<i>ZoneName1</i> <i>FeatureDist Parm</i> <i>OrientationDist Parm</i> <i>ShapeDist Parm</i> tortuosity aperture <i>ConductivityDist Parm</i> ANISOTROPY <i>a_i a_n</i> <i>porosity storage</i> <i>ZoneName2</i>

3.5 不均質透水係数場の設定機能の追加

これまでの Frac-Affinity では、フラクタルスケーリング則により岩盤基質部の透水係数を不均質に設定することができた。この推定方法は、東濃地域におけるウランの濃集部を地下水流動と物質移動の観点から半定量的に説明するなど、これまでに多くの成果を上げてきているが、不均質場の推定手法はこれ以外にも多くの手法が存在し、これらを適切に地下水流動解析に取り入れることが重要となっていた。そこで今回の改良では、特定の透水係数場の推定方法を取り込むのではなく、他のコード等によって用意された透水係数場を Frac-Affinity に取り込む機能を追加することにより、解析で使用できる不均質場の種類に関して、Frac-Affinity の汎用性を高めることとした。

Frac-Affinity への入力データとしては、直方格子上に透水係数場を定義したファイルを用意するものとし、具体的には表 3.8 の形式を用いることとした。

表 3.8 透水係数場を取り込むためのファイルフォーマット

Xmin Xmax Ymin Ymax Zmin Zmax
ni nj nk
k_0_0_0 k_1_0_0 k_2_0_0 ...

ここで、1行目に記述される Xmin、Xmax 等の値は、この透水係数を与えている領域の最大値と最小値であり、2行目の nj、ny、nz はそれぞれ x,y,z 軸方向のセル数である。この領域の大きさとセル数からセルの大きさが計算される。また、3行目以降は各セルに与えられた透水係数を順に並べたものであり、透水係数値の並び順は表 3.9 に示したアルゴリズムに対応している。これらのデータの区切り子としては、スペース、タブ及びカンマを使用することができる。

表 3.9 透水係数場を取り込むためのファイルにおける透水係数値の順序を決めるアルゴリズム

```
for (k=0; k< nk; k++)
{
  for (j=0; j< nj; j++)
  {
    for (i=0; i< ni; i++)
    {
      aFile << aLogCond[i][j][k] << " ";
    }
  }
}
```

この様な方法により、長方形のセル単位に設定された透水係数が Frac-Affinity に入力されると、Frac-Affinity はフラクタルスケーリング則によって不均質場を設定するのと同じ手法により、これを Frac-Affinity ネットワークへ展開する。すなわち、予め用意した透水係数のセルの大きさが Frac-Affinity ネットワークのメッシュスケールより大きな場合には、近隣の透水係数値に基づき補間により着目するセルの透水係数を割り当てる。また、セルの大きさが小さな場合には Frac-Affinity ネットワーク 1 点が代表する領域の透水係数値を平均して、対応する透水係数を定義する（アップ・スケーリング）。

このように、外部で用意された透水係数場を取り込む場合を含む場合には、岩盤基質部の透水性を入力する際に、キーワード"IMPORT"を使用する。このためのフォーマットを表 3.10 に示す。表に示してあるように、キーワード"IMPORT"はゾーンに対して指定する。したがって、異なるゾーンには異なる透水係数場を取り込むことが可能である。また、複数のゾーンで同一の透水係数入力データを共用することも可能である。なお、入力データが指定されたゾーンの透水係数を設定するためには、入力データファイルで Xmin、Xmax 等で指定された領域に包含されることが必要であるが、この様な入力データの整合性についてはユーザインタフェースではなく、Frac-Affinity が確認することとなる。したがって、透水係数入力データを記述したファ

イルについては、格納場所をフルパスで入力するか、ユーザインタフェースのホームディレクトリに保存しておく必要がある。

表 3.10 岩盤基質部の透水係数入力ファイルフォーマット

Name	User-defined (Suggested - <i>name_rock_cond_tn.fai</i>)
Format	<pre> <i>zone_name_1</i> IMPORT <i>filename</i> ANISOTROPY <i>a_x a_y a_z</i> <i>zone_name_2</i> UNIFORM ANISOTROPY <i>a_x a_y a_z</i> VALUE <i>value</i> CONDITIONING_DATA <i>name_1</i> <i>name_M</i> </pre>

4. 解析コードの検証

4.1 新規機能の動作確認

本年度実施した Frac-Affinity の改良点に関する作動確認のために、新規の機能を個別に確認することを目的とした一連の試計算を行った。このため、MIU サイトに対するサイトスケールの水理地質構造モデルに対して基本となるモデルを構築し（4.2.1 項の基本ケースモデル）、これに対して 4.1.1 項から 4.1.6 項に記述した内容のモデルの改良を行い、各ケースで適切な評価結果が求められていることを確認した。

4.1.1 亀裂交差部の透水性の設定機能の確認

亀裂交差部の透水性の設定機能については、月吉断層の上盤側にある土岐花崗岩上部における確率論的亀裂モデルを作成することで検証を行った。この確率論的亀裂モデルは、高透水性の亀裂部（WCFZs）を代表するものであり、WCFZs の表現には 3 組の亀裂セットが存在することとし、このうち 2 組は鉛直で、1 組は水平であるものと考えた。

このような特性を表すために、北南および東西方向の鉛直な確率論的亀裂設定、水平な確率論的亀裂設定を作成した。WCFZs は透水係数 1×10^{-10} m/s とし、WCFZs 間の交差部は増倍係数（enhancement factor）を 10 とした。

4.1.2 亀裂分布の推定機能の確認

入力ファイルから確率論的亀裂の走向をサンプリングする可能性を検証するためのデータセットを試錐孔 MIU-1、MIU-2 および AN-1 からの亀裂情報を統合して作成し、サンプリングのための母集団を定義した。このファイルは 9,046 個の亀裂情報により構成された。

4.1.3 亀裂情報の出力機能の確認

この改良点については、4.1.1、4.1.2 および 4.1.6 項で述べる解析からの出力を分析することで検証を行った。

4.1.4 岩盤基質部の透水異方性を設定する機能の確認

透水係数に異方性を有する岩盤基質部を表現する機能については、異方的な堆積層表土を定義することで検証を行った。全体的な透水係数は、異方性因子が 10（x 方向）、10（y 方向）、

0.1 (z方向) であり、 1×10^{-8} m/s と定義した。

4.1.5 決定論的亀裂の透水異方性を設定する機能の確認

月吉断層の透水性を、透水係数 1×10^{-10} m/s、異方性のファクター10 (平面内)、0.01 (交差面) として定義した。

4.1.6 確率論的亀裂の透水異方性を設定する機能の確認

高透水性部の検証のための基本ケースモデルを、地下水流動方向により高い透水系性を有する、異方的な透水係数を定義するように変更した。具体的には3組の確率論的亀裂を設定し、全ての亀裂セットで透水係数を 1×10^{-9} m/s。北南方向、東西方向、水平方向の異方性のファクターをそれぞれ10 (平面内)、0.1 (交差面)、0.1 (平面内)、10 (交差面)、10 (平面内)、0.1 (交差面) とした。

4.1.7 透水係数場の取り込む機能の確認

透水係数場の取り込む機能の確認については、97,060個の節点をもつ、MIUサイトスケールモデルと同じ領域を対象とするFrac-Affinityネットワークを構築し、これに4.2節の基本ケースモデルの透水係数場をインポートすることによって確認した。

4.2 サイトスケールでの基本ケースの水理地質構造モデルの構築

前節の個別機能の確認に加え、MIUサイトを対象とするサイトスケールでの定常状態の地下水流動モデルを構築し、高度化されたコードの全体的な適用性を確認した。なお、解析結果と実測値との比較としては、MIU-2の水頭値を用いることとした。なお、これら一連の解析は今後のMIUサイトにおける地層科学研究に対するGEOMASSシステムの適用性を示すとともに、現状における主として水理地質構造に関するモデリング上の問題点について有用な情報を引き出すことを目的としており、このような観点から、最も適切と判断されるサイトスケールでのモデリングを行うこととした。

4.2.1 基本ケースモデル

(1) MIU-2における水頭の推定

MIUサイトにおけるサイトスケールモデルの構築は、この場所において水理地質情報が比較

的少なく、またこれらデータに不確実性が存在すると考えられることから、現状では困難な課題であった。例えば、5.1.1 項で言及するように、水圧モニタリングデータの解析では、水頭推定値に数 10m の不確実性が存在する可能性がある。したがって、現状では水理地質構造モデル（解析結果）と実測値とは、例えば水頭分布について定性的に比較ができるにすぎない。

MIU-2 データとして利用可能なものの概要を図 4.1 に示す。前述のように、算出法によって水頭の推定値に大きな差がある。-200 m AOD より上部や、月吉断層下部（すなわち、-670 m AOD より以下）でこの差は特に顕著であるが、水頭の推定値に関する下記の定性的な特徴は、水理地質構造モデル構築の成功判定基準とみなすことができる。

- ・ 月吉断層の上下において水頭に大きな不連続が存在する。具体的には月吉断層の上盤側におけるスラグ試験と揚水試験の両方から得られた水頭の推定値は、約 205 m である。月吉断層の下盤側では、水頭の推定値は、225 m～240 m である。
- ・ スラグ試験データに基づく水頭の推定値は、試錐孔 MIU-2 において 2 つの傾向によって特徴付けられる。1 つは土岐花崗岩層において深度が増すにつれて、約 211 m からほぼ 203 m まで水頭の低下する傾向が見られることである。ただしポンピング試験や MP モニタリング結果に基づく推定値では、この傾向が見られないことに注意を要する。もう 1 つの傾向は、堆積層と土岐花崗岩風化部を通過する水頭値の急激な低下がみられることである。なお前者の傾向については、揚水試験データや MP モニタリング結果に基づく推定値では、この傾向が見られないことに注意を要する。

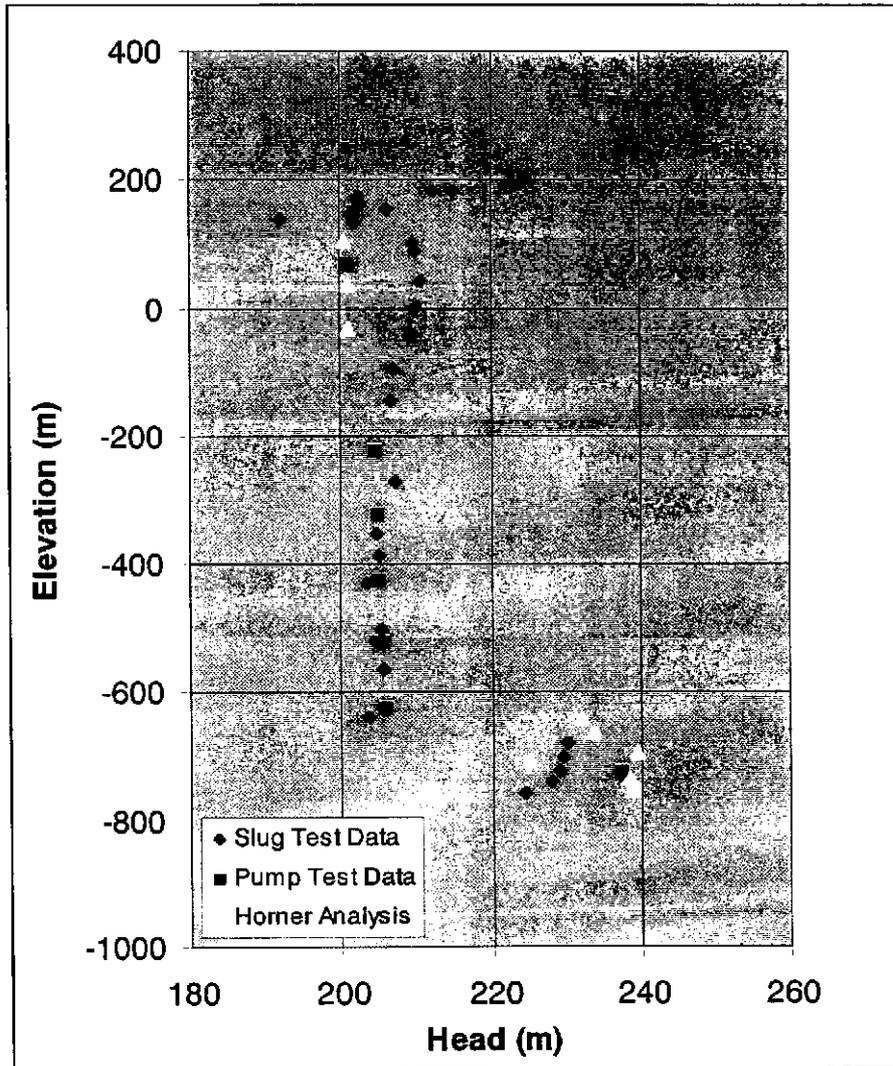


図 4.1 試錐孔 MIU-2 における水頭分布の推算方法による比較

(2) 基本ケースモデルの構築コンセプト

基本ケースモデルを構築するにあたっては、できうる限り単純なモデルを構築すべく以下のような条件を用いた。

- ・ 境界条件：サイトスケール領域の境界は、これまでのモデリングに従い、南部境界を土岐川（約 140 mAOD）とし、東部境界、北部境界、西部境界を地形に従った設定とした。広域スケールの地下水流動モデルによれば、東濃地域全域ではほぼ北南方向に流れる地下水流動の存在を示している。
- ・ 地質構造：東濃地域には複数の断層が存在する。しかしながら、水理地質学的観点から重要と思われる断層は、月吉断層のみである。月吉断層には上盤側と下盤側に厚く断層に伴う割れ目帯が存在する。MIU スケールのモデリング土岐花崗岩でのいくつかの岩相の存在を図示することができるが、これらをサイトスケールに単純に当てはめることは現実的ではない。土岐花崗岩上部層は、かなり風化しており、水理地質学的に重要であると考えられている。土岐花崗岩風化層上部の堆積層は異方性があり、透水性が高い層と低い層が交層を成している。

このような地質構造に関する理解にもとづき、基本ケースにおいては土岐花崗岩層、土岐花崗岩風化部、堆積層に層序構造を簡略化した。また、試錐孔 MIU-2 における月吉断層上盤側で見られる低水頭を再現するため、月吉断層上盤側の断層に伴う割れ目帯（HWDZ）をモデリングすることとした。

- ・ 透水係数：各地層の透水係数は、以下のとおり設定することとした。
 - 月吉断層： $1 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$
 - 瀬戸層群： $1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$
 - 生俵累層： $1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$
 - 明世累層： $1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$
 - 上部土岐夾炭累層： $5 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$
 - 下部土岐夾炭累層： $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$
 - 風化花崗岩： $1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$
 - 土岐花崗岩： $1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$

(3) モデル構築

以下の設定により地質環境データ解析・可視化システムを用いて水理地質構造モデルを構築した。

- ・ 地下水流動解析：モデル領域を完全に飽和した系として扱った。

- ・ 地質構造：地質構造を図 4.2 に示す。前述のように地質・地質構造は、土岐花崗岩、土岐花崗岩風化部、堆積層、月吉断層上盤側の断層に伴う割れ目帯（HWDZ）とする。なお、HWDZ と土岐花崗岩風化部の厚さを 2 倍として、Frac-Affinity ネットワークの要素分割が非常に細くなることを回避した。これにより、計算時間の短縮が可能となった。
- ・ モデル領域：モデルの領域については、既往の TAGSAC による解析モデルにおいて使用している 9 つの鉛直面を側面境界とする多角形の領域を用いることとした。底面は、- 3000 mAOD である。上部境界については、下式に従い地下水面を定義することとした。

$$E_{wt} = 0.86 E_{topo} + 18.5$$

ここで、 E_{wt} は地下水の推定標高 E_{topo} は地表の標高である。

- ・ 精度：計算のトレランスは 1×10^{-3} とする。これによって、反復 300 回以内、5 分以内で解答を得ることが可能となる。
- ・ 水理パラメータ：各地層の透水係数と空隙率は、以下のように設定した。
 - 月吉断層： $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$, 0.3
 - 土岐花崗岩： $1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$, 0.1
 - 土岐花崗岩風化部： $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$, 0.3
 - 堆積層： $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$, 0.3
 - 断層に伴う割れ目帯（HWDZ）： $1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$, 0.3

なお、今回はパーティクルトラッキングによる評価は行っていないことから、空隙率の設定値は計算結果に影響を与えない。透水係数は、試錐孔 MIU-2 における水頭分布によって校正をした値である。

- ・ 要素分割パラメータ：要素間隔は、全方向とも 100 m に設定した。岩盤基質部に対しては、節点の最低数を 4 に、解像度を 0.01 に設定して層厚の薄い部分に対する連結性を確実にした。断層に伴う割れ目帯と土岐花崗岩風化部を表すために物理的な層厚を使用した場合には、これらの数値の修正が必要となるかもしれない（今回は前述の様にこれらの層の厚さを 2 倍にしている）。なお、キーワード“FORCE”を使って試錐孔 MIU-2 近くに節点を設置した。基本ケースモデルで生成した節点の数は、97881 個となった。
- ・ 境界条件：地表面は地形に応じた水頭とし、底面は不透水境界（no-flux）としてモデルを構築した。2 つの直線により表現される南部境界に沿って 140 mAOD の一定水頭を使って土岐川を表した。ほぼ北南方向の地下水流動を表すために、北部境界は地形に応じた水頭とし、東・西境界を不透水境界とした。

(4) 解析結果

サイトスケール領域の基本ケース地下水流動モデルについての結果を図4.3および図4.4に示す。また、基本ケースモデルの水収支を表4.1に示す。表4.1から本解析において十分な精度でマスバランスが取れていることが確認できる。また、図4.3に示したように、解析結果は試錐孔MIU-2における水頭分布と比較的良好一致を示す。特に、月吉断層上盤側下部の土岐花崗岩中の水頭、および月吉断層全域を横切る水頭の急激な上昇を良く再現している。

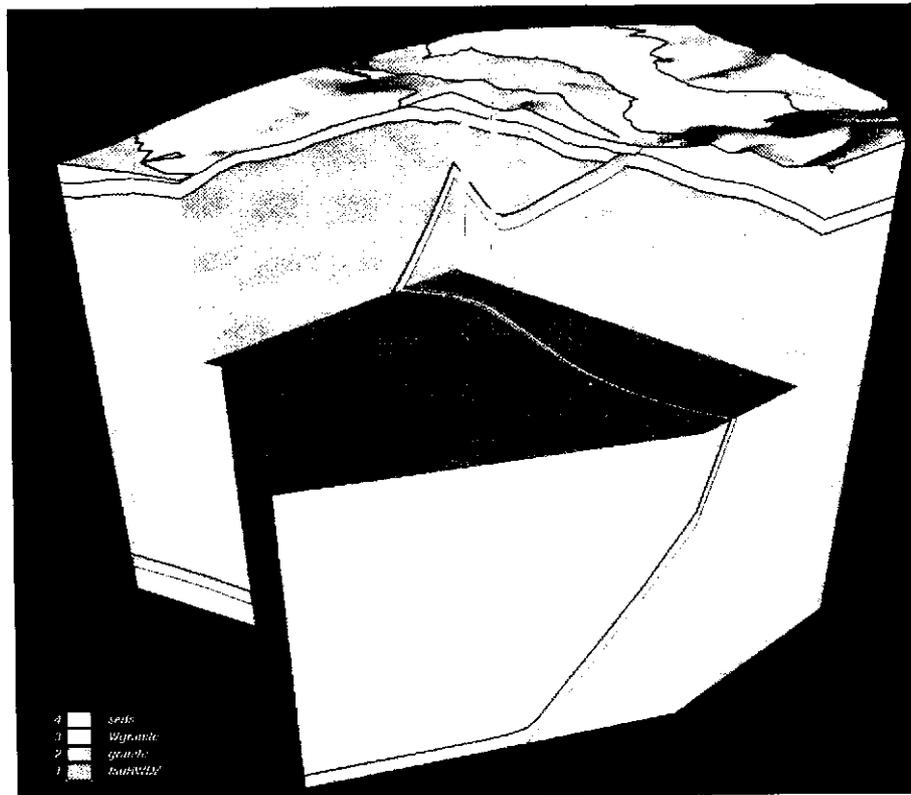


図 4.2 サイトスケール領域の基本ケースの地下水流動モデルに用いた地質構造モデル

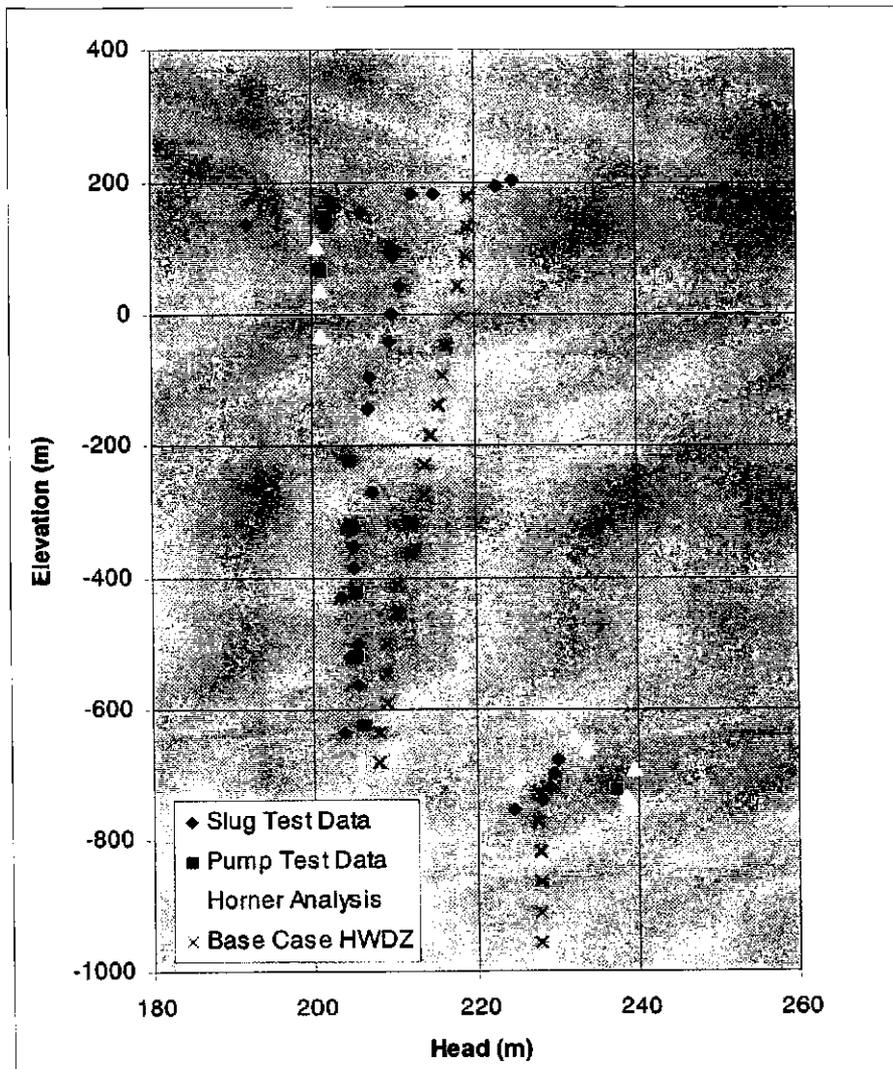


図 4.3 地下水流動解析結果 (Frac-Affinity によって算出した水頭と MIU-2 で推定される水頭を表示)

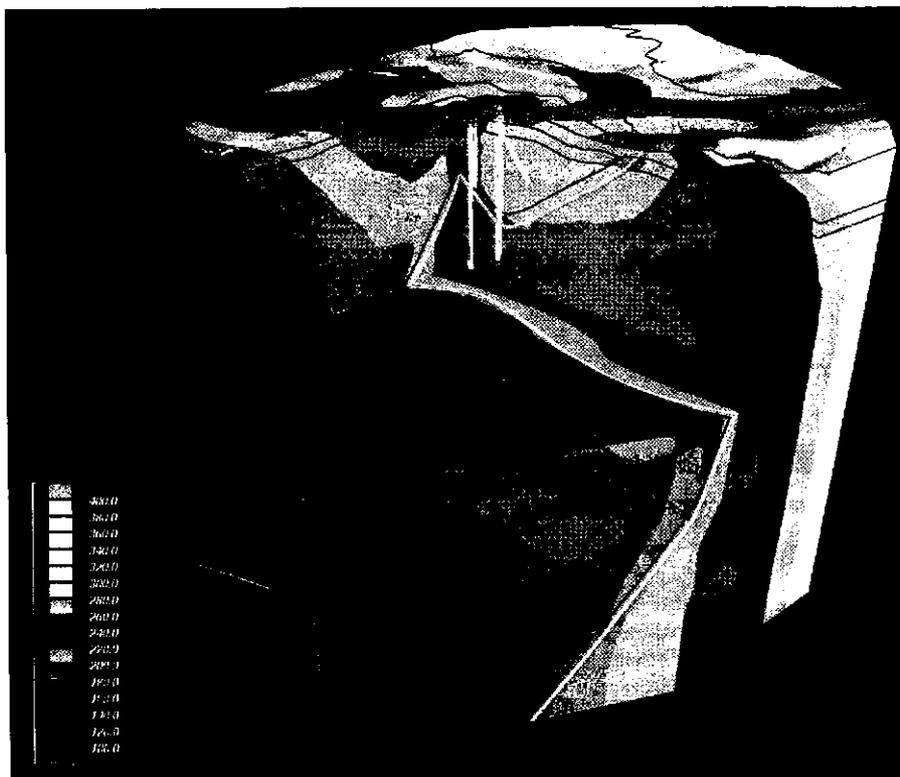


図 4.4 地下水流動解析結果 (EarthVision による 3 次元圧力水頭分布)

表 4.1 基本ケースモデルの水収支
(解析体系への単位時間当たり全流入量で規格化した値)

境界	流入	流出	正味の流出
8	0	0	0
底部	0	0	0
上部	9.362E-01	8.576E-01	-7.853E-02
7	0	0	0
9	0	0	0
1	6.048E-05	5.288E-02	5.282E-02
6	3.322E-02	2.128E-02	-1.194E-02
2	0	5.346E-02	5.346E-02
3	0	0	0
5	3.054E-02	1.473E-02	-1.581E-02
4	0	0	0
合計	1.000E+00	1.000E+00	-1.915E-06

※ 有効桁数の関係で、流入量の合計から流出量の合計を差し引いた値と、正味の流出量の合計とは一致しない。

4.2.2 代替モデルの構築

基本モデルの構築に引き続き Frac-Affinity の性能を確認するとともに、MIU サイトにおける今後のモデル構築を目的に、多数の代替水理地質構造モデルを構築した。

(1) 月吉断層上盤側の断層に伴う割れ目帯 (HWDZ) をモデル化しない代替モデル

地質構造モデルから断層に伴う割れ目帯 (HWDZ) を取り除き HWDZ の影響について検討した。

評価結果を図 4.5 に示す。同図から月吉断層の上盤側で水頭が 225m で一定となっており、上下方向には流れのない状態が求められていることがわかる。また、これらの水頭は、月吉断層上盤側での推定水頭値よりも約 20 m 高く、加えてこれらの水頭は、基本ケースモデルで計算した水頭よりも同じ程度高い値となっている。すなわち、この代替モデルは試錐孔 MIU-2 における実測値を良く表現しているとは言い難い。

すなわち、この代替モデルから得た結論として、月吉断層上盤側における高透水性の存在が、この領域 (断層上盤側) での水頭の低下の原因となっていることが考えられる。月吉断層上盤側で確認されている断層に伴う割れ目帯がこのような地質学的特徴に相当する可能性がある。

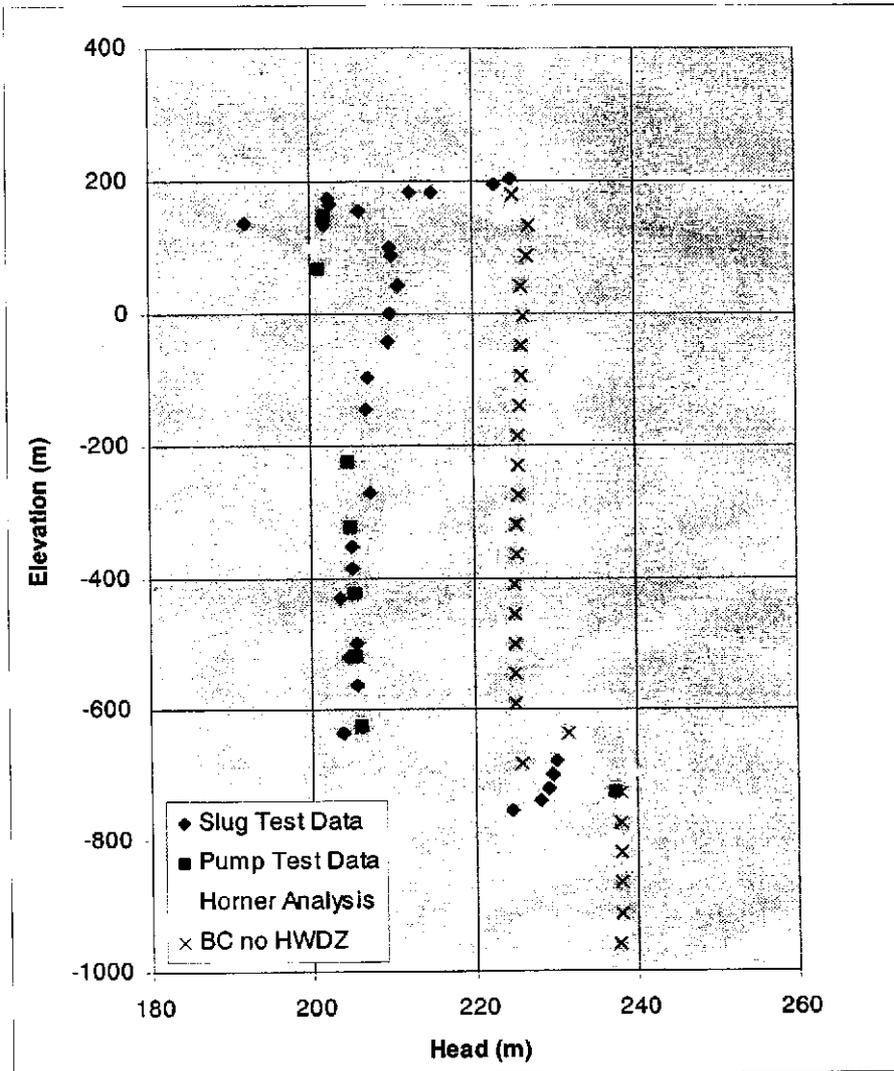


図 4.5 断層に伴う割れ目帯を考慮しない代替モデルの計算結果

(2) 堆積岩部分に関する代替モデル

基本ケースモデルでは、堆積層を1つのブロックと見なして単純化した。しかしながら、堆積層は透水係数が高い層と低い層が交互に重なる構造を持っており、また、基本ケースモデルの結果(水頭)は試錐孔の上部においてMIU-2における実測値と最も大きな誤差を生じていた。そこで、以下に示す代替モデルを構築し、その効果を検討した。

- 水平方向の透水係数を $1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ に設定し、垂直方向の透水係数を $1 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$ に設定し、堆積岩部分に異方性を導入したケース
- 堆積部分の透水係数を $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ に設定した低透水性ケース

- ・ 堆積層上部（生俵累層と明世累層）の透水係数を $1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ に設定し、下部（土岐亜炭支持層）の透水係数を $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ に設定したケース
- ・ 土岐花崗岩風化部の透水係数を $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ に設定したケース

これらの代替モデル群から得た解析結果と MIU-2 での水頭の実測値を図 4.6 に示す。同図から堆積岩領域に異方性を導入したモデルと、堆積岩領域を低透水性と評価したモデルの計算結果はほぼ同じであることがわかる。これは、垂直方向の透水性を低減すると、その効果として全体的な透水性が下がるためであると予想される。なお、これらの結果の方が基本ケースよりも試錐孔 MIU-2 での水頭推定値との誤差が改善される傾向にある（図 4.3）。一方、透水係数が一様でないモデルで求められた試錐孔 MIU-2 での水頭実測値は、モデル上部で基本ケースの場合よりもわずかに高く、この部分の値との誤差が大きくなる。また、花崗岩風化部を低透水性としてモデル化した場合の評価結果は、土岐花崗岩での実測された水頭値を良く再現していることがわかる。

これから分かるように、試錐孔上部で水頭が低下している原因としては、低透水性の堆積層が“閉じ込め層”としてふるまっていることが考えられる。また、ここでの結論として花崗岩風化部は高透水性と判断することが適切であると考えられる。しかし、ここでの代替モデル構築の目的は、花崗岩風化部が必ず低透水性部であることを示唆することではなく、モデル上部にある連続的な低透水性部の影響を示すことにある。このことを勘案すると、本代替ケース群による解析の結果として、モデル上部の解析結果を実測値により近づけるためには堆積岩部分の地質構造のモデル化について更なる検討が必要であると判断される。

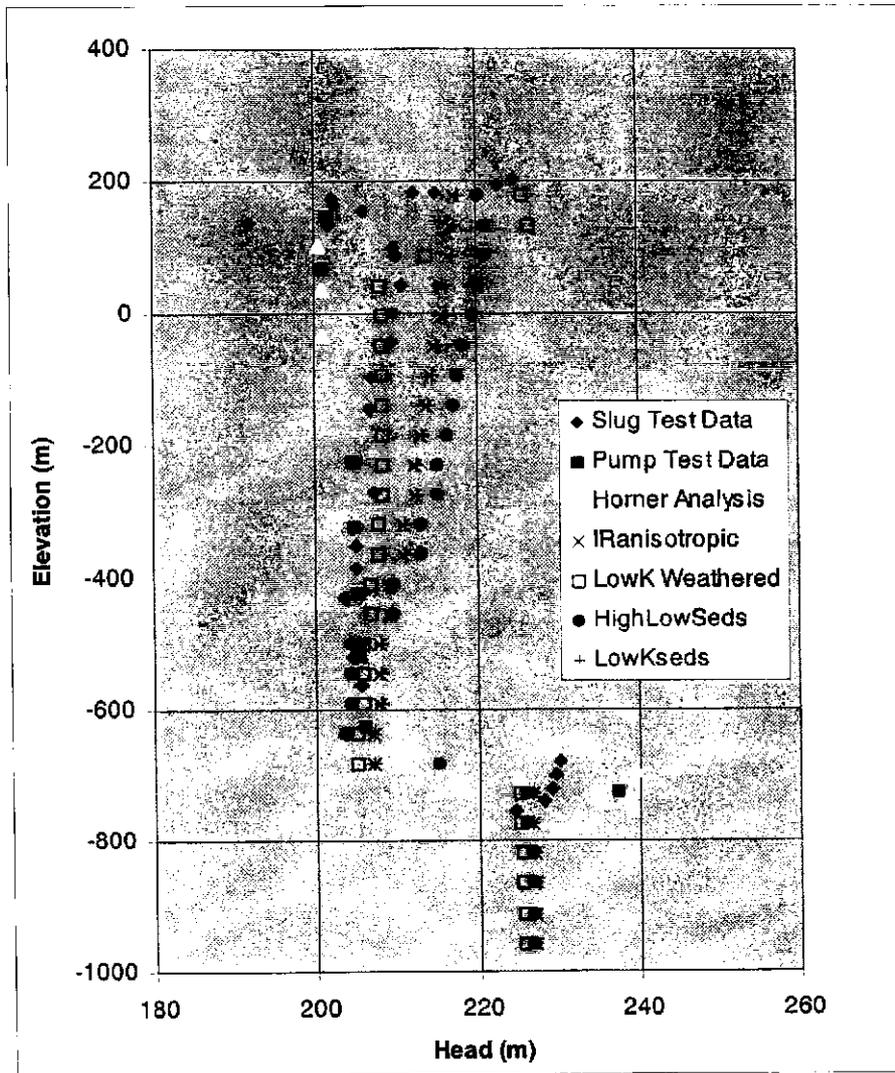


図 4.6 堆積層のモデルを詳細化した代替モデルにおける解析結果

注：基本ケースモデルとの相異は次の通り。

- ・ IRanisotropic, 堆積層の水平方向の透水係数を $1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ 、鉛直方向の透水係数を $1 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$ に設定したケース
- ・ LowK Weathered, 土岐花崗岩風化部の、透水係数を $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ としたケース
- ・ HighLowSeds, 上部層群（生俵累層および明世累層）の透水係数を $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ 、下部層群（土岐夾炭累層）の透水係数を $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ に設定したケース
- ・ LowKseds, 堆積層の透水係数を $1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ に設定したケース

(3) 要素分割の影響を検討するための代替モデル

ここでは試錐孔 MIU-2 での水頭の計算に必要となる要素分割の詳細度を検討するため、3 種類の代替モデルを構築して検討を行った。具体的には以下のケースについて検討を加えた。

- ・ 要素間隔を 100 m から 200 m に広げたケース
- ・ 要素間隔の詳細度（すなわち、節点間の最小間隔）を 0.001 としたケース。要素間隔がさらに細かくすることでモデル上部の層厚の薄い地質構造をより詳細に表現できると予想される。
- ・ 地層ユニットあたりの節点の最低数を 4 から 8 に増やし、解像度を 0.001 のままとしたケース。上記ケースと同様にモデル上部の層厚の薄い地質構造をより詳細に表現できると予想される。

これらの代替モデルの結果を図 4.7 に示す。まず、要素をより大きく設定したケースでは MIU-2 での水頭計算値と水頭推定値との間の誤差が大きくなる。一方、解像度を 0.001 にすると、解析結果は基本ケースモデルと良く一致する。しかし、このモデルの節点の数は、基本ケースの 2 倍以上（基本ケース 97881 個に対して 205723 個の節点が存在する）となることから、このように余分な計算コストのメリットはないと結論付けられる。

さらに、節点の最低数を 8 に設定した（解像度は 0.001 に設定）モデルでは、節点の数が 599222 個となった。このケースではモデル計算のために、コンピュータの仮想メモリの設定値を変更する必要があった。節点の最低数を 8 に設定したモデルの結果の方が、MIU-2 での水頭推定値との誤差がやや小さくなる（図 4.7）が、これに伴う計算量の増加を考慮すると、このような詳細な要素分割のメリットはないものと判断される。

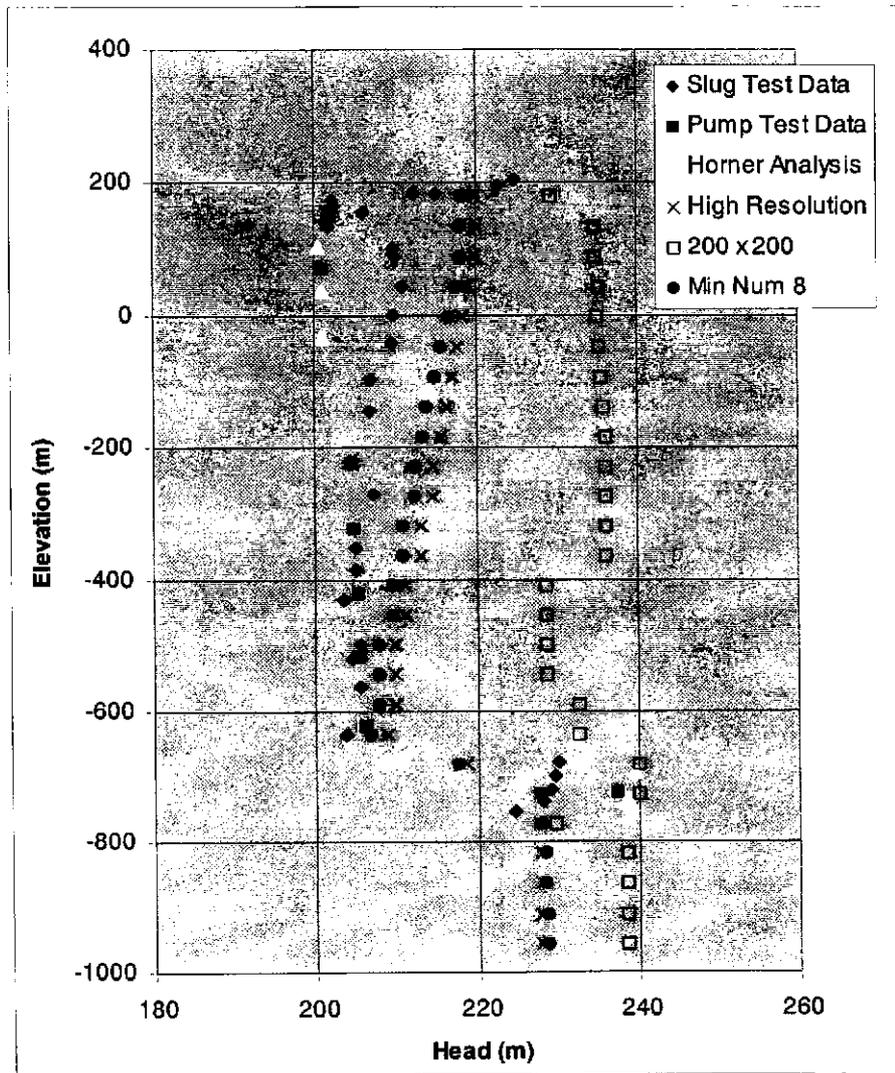


図 4.7 代替的な要素分割パラメータを伴う代替モデルからの解析結果

- ・ 200×200, 要素間隔を全方向で 200 m まで増加させたケース
- ・ High Resolution, 解像度を 0.01 から 0.001 に減らしたケース
- ・ Min Num 8, 節点の最小数を 8 に増やしたケース (解像度は 0.001 のままで)

(4) 境界条件を変更した代替モデル

ここでは、全ての側面境界を地表の標高に応じて設定した代替モデルを実行した。なお、土岐川が境界条件を与えるモデルの南端部に沿った2つの側面における境界条件は、基本ケースと同じ一定水頭140 mのままとした。この代替モデルに対する結果を図4.8に示す。このモデルの水頭計算値とMIU-2の水頭推定値との間には大きな誤差が生じており、基本ケースにおいて良い一致を示していることがわかる。

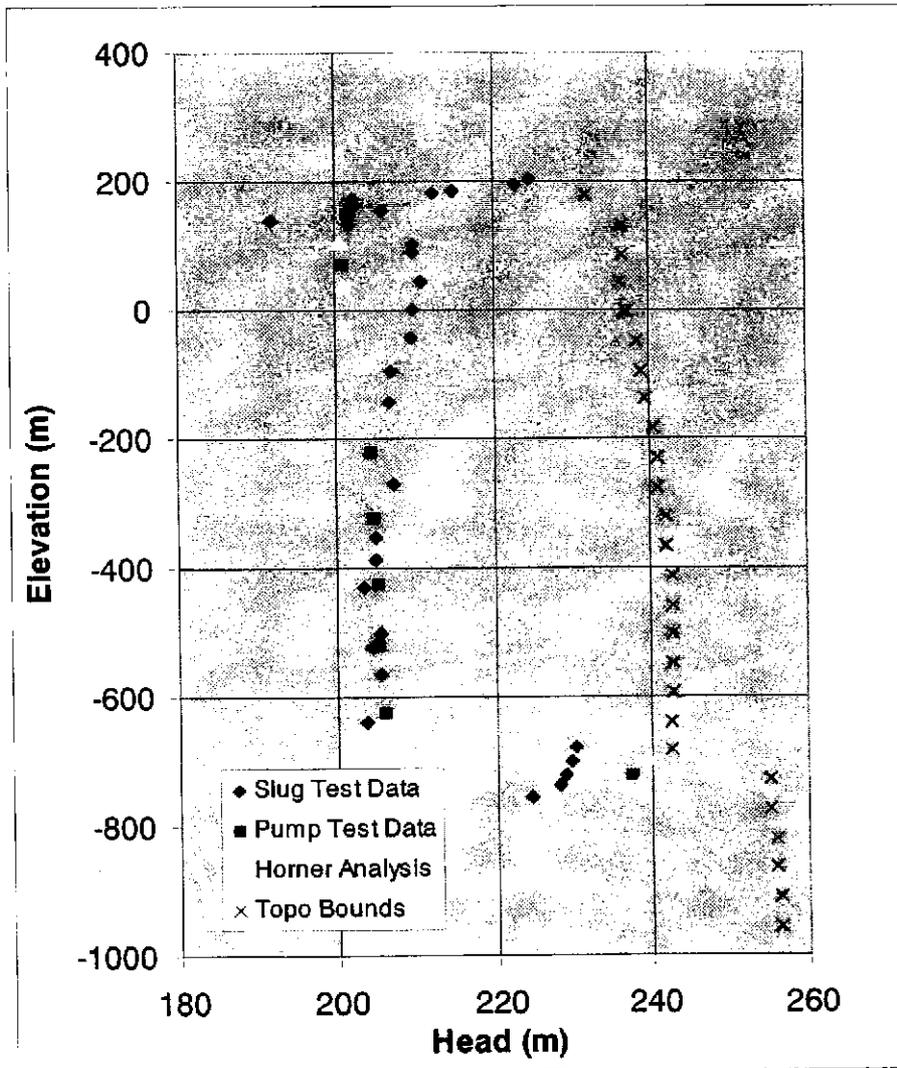


図 4.8 側面全てで地形に応じた水頭を与えた代替モデルの解析結果

(5) 月吉断層への透水異方性を導入した代替モデル

月吉断層は透水性に異方性を有すると考えられており、断層内では透水係数が高く ($1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$)、断層交差部の方が透水係数が低い ($1 \times 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$)。したがって、透水係数の異方性が月吉断層の水理学的な特徴に与える影響を調べるため、代替モデルを構築した。具体的には月吉断層の透水係数を、 $1 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$ に設定し、スケーリングファクターを 10 (断層内方向) と 0.01 (断層交差方向) とした。

このモデルの MIU-2 における水頭値の解析結果を図 4.9 に示す。この結果は、基本ケースモデルの結果と一致する (図 4.3)。これは、今回のモデルに対しては、異方的な透水係数を月吉断層に割り当てても効果がないことを示している。

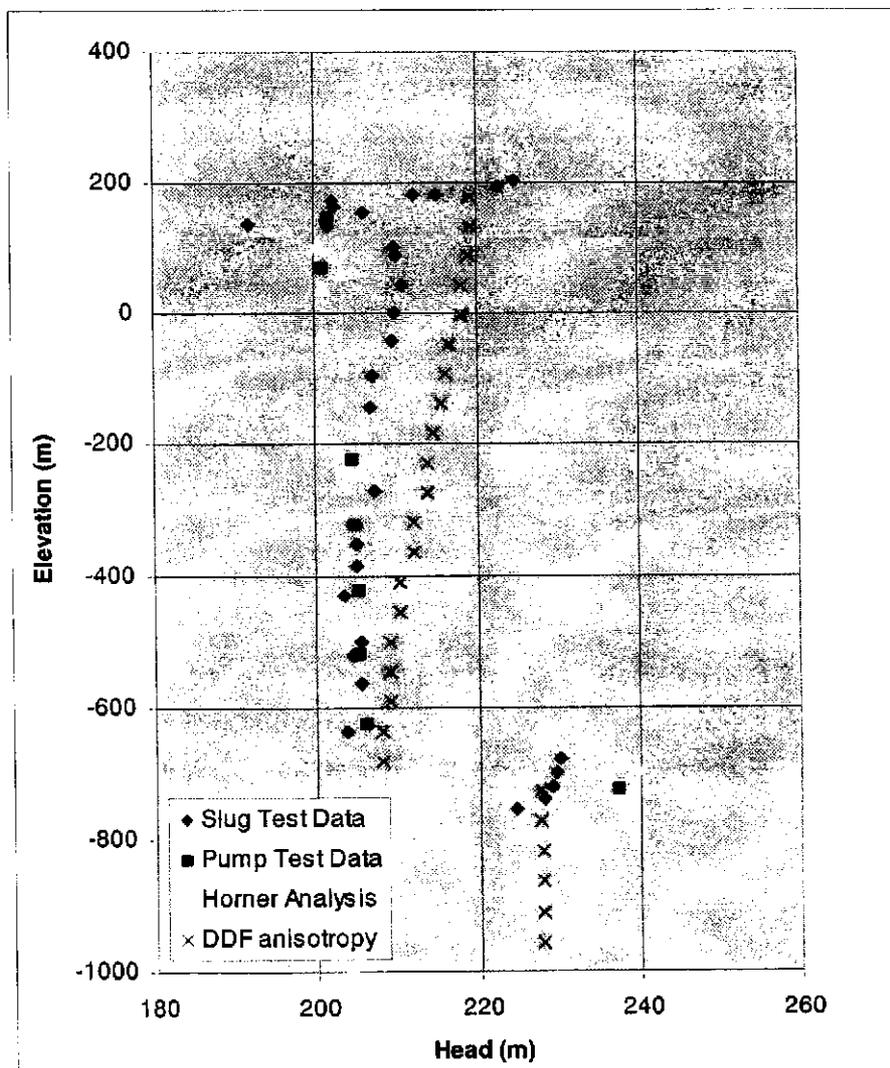


図 4.9 月吉断層に異方的な透水係数を割り当てた代替モデル(透水係数は $1 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$ 、スケーリングファクターは断層方向に 10、断層交差方向に 0.01)の解析結果

(6) 確率論的亀裂の設定に関する代替モデル

土岐花崗岩は亀裂の多い花崗岩体で、この領域の地下水流動はこれらの亀裂によって支配されていると考えられる。特に、WCFZ とその交差部が水理学的に重要であると考えられる (5.1.5 項)。そこで、Frac-Affinity モデルへの WCFZ 導入を検討するために 2 つの代替モデルを構築した。まず、高透水性の確率論的亀裂の導入に関する影響を調べるためのモデルを構築し、次に、確率論的亀裂の交差部を高透水性に設定したモデルを構築した。

ここでの代替モデルにおいては確率論的亀裂として、3 つのセット (2 つはほぼ鉛直、1 つはほぼ水平) の WCFZ をモデル化することとした。基本ケースモデルの特定の部分にのみ確率論的亀裂を導入できるようにするため、土岐花崗岩中に上部ゾーンを設定し、このゾーンのみ確率論的亀裂を定義した。このゾーンの下限は -200 mAOD とし、月吉断層上盤側にのみ WCFZ を想定することとした。この地質構造モデルを図 4.10 に示す。水理地質構造モデルを定義するために、以下のパラメータを使用した。

- ・ 走向の分布：以下の範囲に対して、均一分布により 3 セットの確率論的亀裂を設定した。
 - 傾斜が 85-89°、走向が 340-020°
 - 傾斜が 85-89°、走向が 080-100°
 - 傾斜が 0-5°、走向が 000-360°
- ・ 透水係数：月吉断層上盤側にある土岐花崗岩上部層の岩盤基質部の透水係数を $1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ から $1 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$ に低下させた。確率論的亀裂の透水係数は $1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ に設定した。
- ・ 確率論的亀裂密度：確率論的亀裂密度を繰り返し推定して、MIU 試錐孔内の WCFZ 密度測定値と一致する様に値を設定した (5.1.5 項)。3次元密度を $1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-3}$ とすると、MIU 試錐孔の長さ 200 m 内に交差する確率論的亀裂が 2 つ見られた。これが MIU 試錐孔でのおおよその WCFZ 密度に相当する (すなわち、試錐孔の長さ 1,000 m 以内には 10 個の WCFZ が存在することになる)。

2 つ目の代替モデルでは、確率論的亀裂の交差部で透水係数を上昇させることにより、亀裂交差部の透水係数を $1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ に設定した。2 つのモデルから得た結果を図 4.11 に示す。この 2 つの解析では水頭値は同じ値となり、基本ケースモデルよりも実測値との差がわずかに小さくなっていることが確認された。

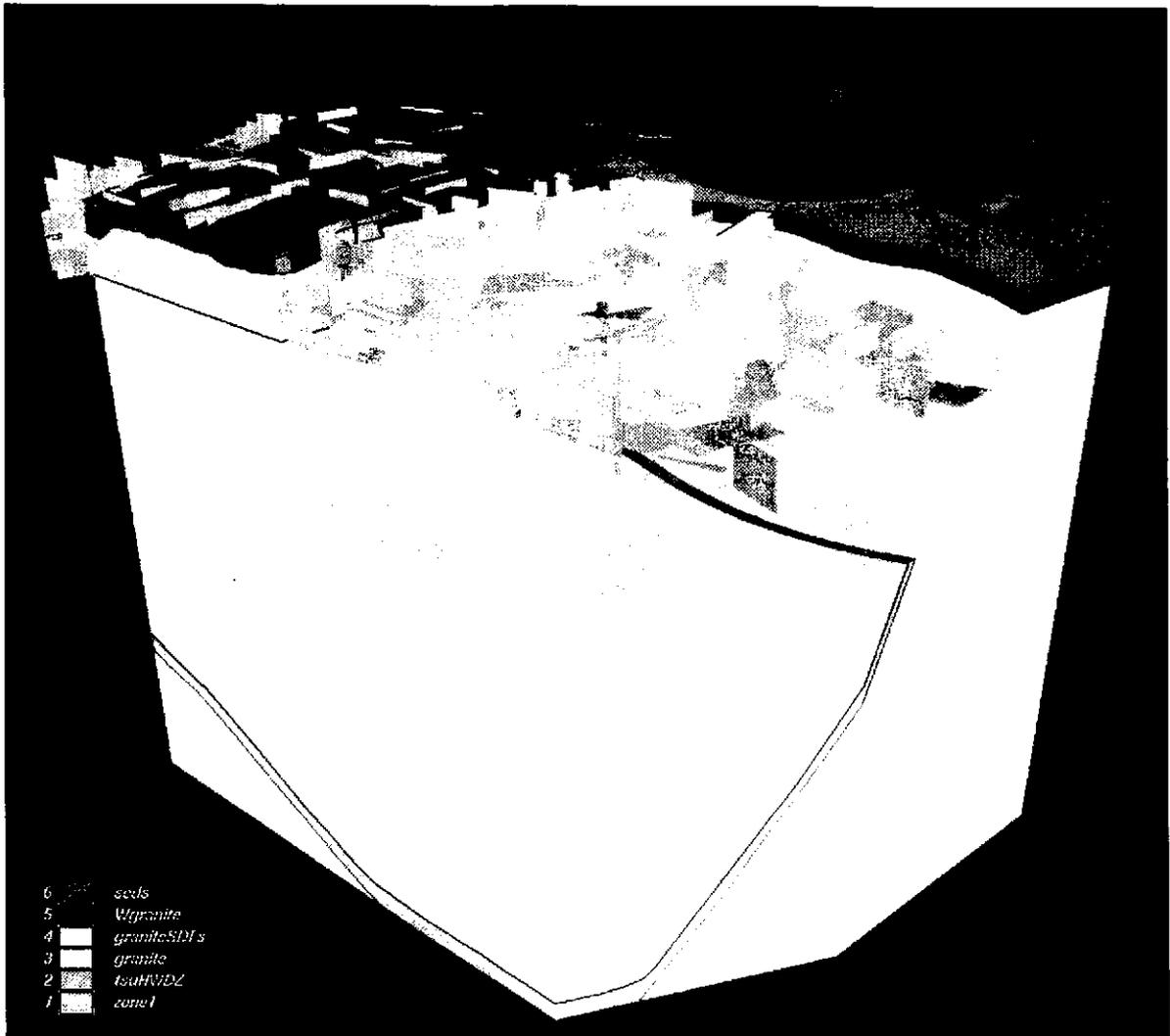


図 4.10 月吉断層上盤側にある土岐花崗岩上部において確率論的亀裂としてWCFZsを表現したサイトスケールの地質構造モデル

注：確率論的亀裂は graniteSDFs と表記されたゾーンに作成され、-200 m AOD を下限とした。WCFZs は、ほぼ鉛直な 2 つの亀裂セット（一つは北-南向きで、もう一つは東-西向き）とほぼ水平な 1 つの亀裂セットで表示された。モデル化された SDFs は 860 個となった。これらは地質構造モデル中に可視化されている。

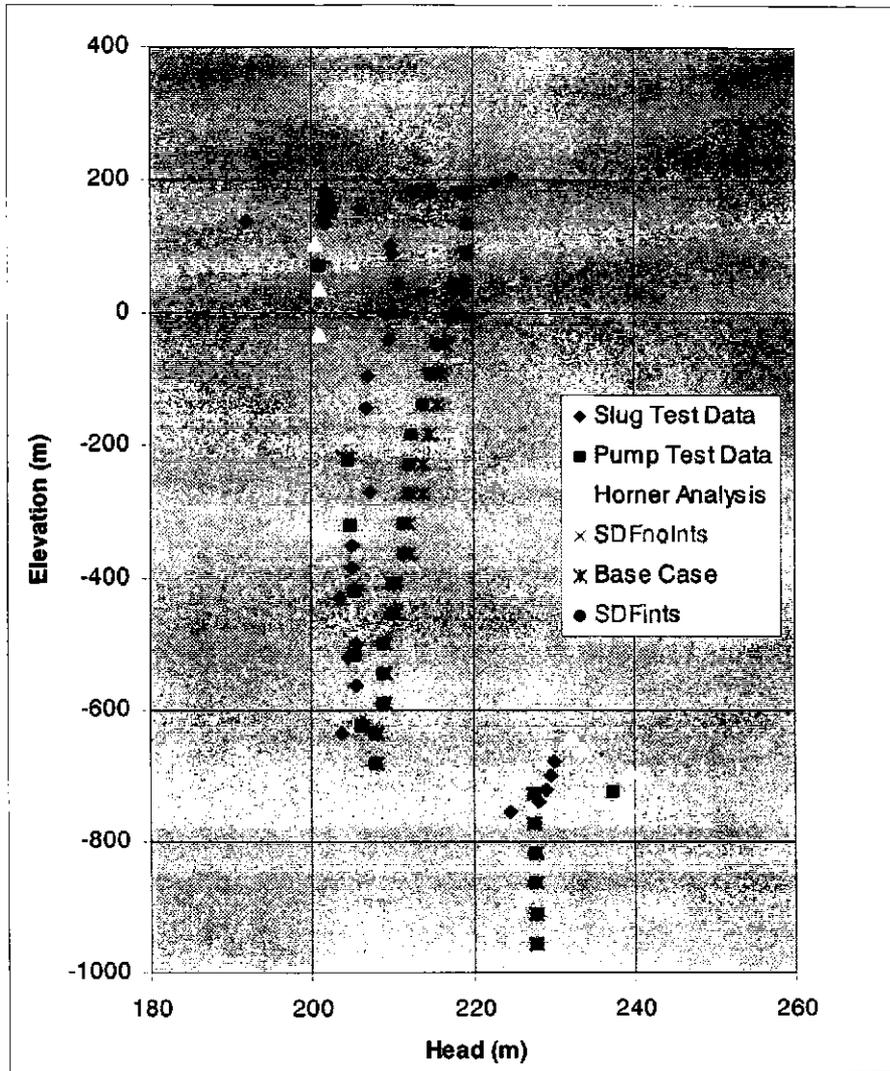


図 4.11 確率論的亀裂により WCFZs を表現した代替モデルでの解析結果
(MIU-2 における水頭分布の比較)

注：2つの代替モデルによる解析は全く同じ結果となった。

- SDFnoimts, 透水係数が $1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ の確率論的亀裂をモデルに導入したケース
- SDFints, 上記に加え確率論的亀裂の交差部に透水係数 $1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ を割り当てたケース

4.2.3 サイトスケールの水理地質構造モデルの解析結果のまとめ

本節で述べた水理地質構造モデルと解析結果から、地質環境データ解析・可視化システムは、サイトスケールでの定常状態水理地質構造モデルの構築に役立つ柔軟なツールであり妥当な評価結果を与えていることがわかる。特に試錐孔深部において、MIU-2 の計算値と実測データとの差が過去の評価例よりも小さくなっていることが確認された。

また、一連の代替モデルを使用した解析から以下の結論を得ることができた。

- ・ 月吉断層上盤側で水頭が低くなる条件としては、高透水性を有する地質学的特徴（恐らく断層に伴う割れ目帯）の存在が必要となる。
- ・ 月吉断層で見られる水頭の不連続は、同断層の透水係数を低く設定することでモデル化することができる。
- ・ 堆積層や土岐花崗岩上部層で実測されている水頭の低下を再現するためには、モデル領域の上部に低透水性の“閉じ込め層”が存在することが重要である可能性がある。
- ・ サイトスケールの水理地質構造モデルの構築では、境界条件の設定が非常に重要である。
- ・ サイトスケールの水理地質構造モデルの構築においては、今回のレベルの地質構造モデルに基づく地下水流動解析で、一定の精度の解析が可能であることが確認されたが、実測値とのより良い一致のためには、より精度の高い地質構造モデルの活用が必要となる可能性がある。

本節で述べたモデル構築において実証されているように、地質環境データ解析・可視化システムは、各種概念モデルが水理地質学的計算結果に与える影響を迅速に調べる能力に優れている。これを効率的に行うには、水理地質構造モデルの基礎となる一連の信頼できる地質学的な解釈を明らかにする必要がある。そのためには検証済みの地質データベースの開発が必要となる。特に、モデルの上部構造について幅広い様々な解釈によって、モデルのこの部分で発生する水頭の急激な変化についてさらに綿密な調査が可能となるであろう。

4.3 揚水試験のモデルの構築

MIU サイトにおいては、超深地層研究所計画の一環としてサイト内の試錐孔を用いた長期揚水試験（Long-term Pumping Test : LPT）が計画されており、これに対する評価手法の構築が緊急の課題となっている。

そこでここでは、まず揚水試験を数値モデルで考慮する際の制限事項や手順に重点をおき、低透水性媒体及び一定の透水性を有する媒体における揚水試験の特徴をとりまとめる。次に、いくつかの例と共に、このような揚水試験を評価するツールとしての Frac-Affinity の詳細について記述する。そして最後に、Frac-Affinity を MIU サイトに適用し、既存の試錐孔のセクションのいくつかの部分から揚水試験を行った場合について解析を行い結果を示すこととする。

4.3.1 揚水試験の概要

揚水試験は、帯水層や地層の水理学的特徴を推定するために用いられる古典的手法である。一般に、揚水試験は給水に用いるような帯水層において実施される。したがって、通常透水係数は流速と同じくらい高くなる ($>10^{-5}$ m/s)。揚水試験は通常、流速一定であり、井戸及び近くの観測点中の水位レベルの変化が測定される。被圧帯水層においては水位は地表面上にあり、一定水頭試験が容易に実行可能である。このような条件では、水位に代わって流量が観測されることとなる。

高透水性帯水層での揚水試験は、多少の対策が必要であるとはいえ、実行は容易である。一方、低透水性地層または非常に不均質な帯水層（通常前者も同様に不均質である）での揚水試験にあたっては、“通常の”帯水層では無視し得るいくつかの問題を考慮する必要がある。以下に、これらの各問題について検討する。

(1) 複合媒体における揚水試験の特徴

- 異なるスケールでの不均質性の表示

自然は不均質である。しかしながら、多くの検討においては、時には暗黙のうちに対象とする研究領域を均質であると仮定していることがある。揚水試験の結果から水理学的知見を収集する場合においては、均質層に適用した方法を不均質層に適用したときに、多少の矛盾が生じる可能性がある。Meier 等 [1998] は、不均質層におけるヤコブ法の適用性に関するレビューにおいて、不均質層で実施された揚水試験において、複数の観測点で観測された水位降下曲線 (drawdown curve) を一つずつ解釈していくと、等しい透水量係数 T 値に対して算出される貯留係数 S が数桁に及ぶ可能性があることを指摘している。これに先立つ Ptak and Teusch [1994] の観測結果においても、 S の推測値は、ほとんど観測点間の“連結性”に依存しており、揚水井に適用された古典的なヤコブ法により有効な T 値を精密に見積もることになるということが示されている。

- 局所的な試錐孔の影響

目的とする井戸の水位降下曲線の解釈は、通常、周囲の井戸 (well-bore) の貯留係数 (S_w) とスキニング効果の両方の影響を受ける。井戸 (well-bore) の貯留係数の影響とは、試験に伴い、帯水層からではなく井戸のシリンダから直接流出する水量である。この影響は、時間に対する log-log プロットで、1:1 の傾きとして現れる。このような影響がある場合は、この影響を考慮することが重要であり、これを考慮しない場合には帯水層の貯留係数を過大評価することとなる。観測点における貯留係数の影響は頻度は低いが同じくらい重要である (図 4.12)。Carrera 等 [1996] は、この影響は結果として、帯水層の圧力に対する観測点の応答の遅れとなる、と記している。この影響は次のような関係で表すことができる。

$$W_D = d_D \cdot \alpha \quad (4.1)$$

ここで、

d_D : 距離 (r/r_c)。 r は揚水井の距離、 r_c は井戸 (wellbore) の半径

α : 貯留係数 (S/S_w)。 S は帯水層の貯留係数、 S_w は井戸 (wellbore) の貯留係数である。

この影響は $W_D < 0.1$ の場合顕著となり、1 以上の値に対しては無視し得るようになる。さらに、この影響は長い時間に分散する傾向にある。この影響が無視された場合、その層の貯留係数が同様に過大評価され、透水量係数が過小評価される可能性がある ($Q=10^{-3}$ に対して 1 桁)。

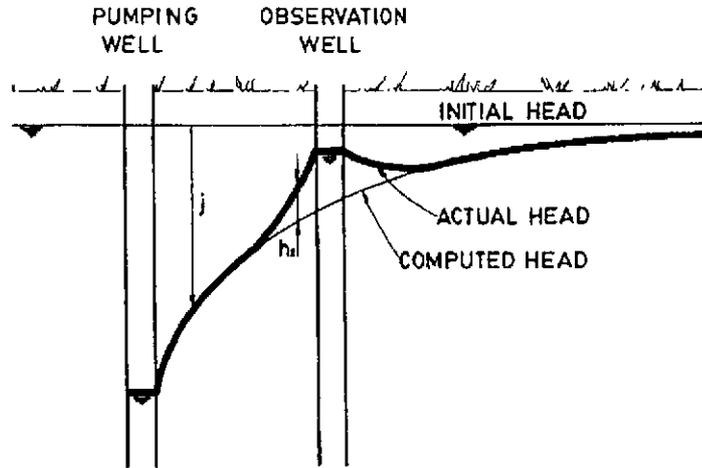


図 4.12 観測井の貯水の影響[Carrera et al., 1996]

井戸の孔壁は多くの理由により、変質あるいは損傷を受ける可能性がある。この場合、この損傷を受けたゾーン（この領域はスキンと呼ばれることも多い）の透水係数は、もとの状態と比較して変化している可能性がある。この影響は低透水性媒体で重要であり、短期間の試験ではさらに顕在化する可能性が高まる。

このスキン効果は、何らかの水理学的影響を有する厚さが非常に小さい領域としてモデル化するか、あるいは、壁周辺の正確な寸法を考慮することで評価される。前者は van Everdingen [1953] 以来の検討課題であり、この場合、定常状態における壁周辺の水頭変化は次式で表される。

$$\Delta h_w = \frac{Q}{2\pi b K_{sk}} \ln \frac{r_w}{r_{sk}} \quad (4.2)$$

ここで、 K_{sk} はスキンの透水係数、 r_{sk} はスキンの厚さ、 r_w は井戸の半径、 b は帯水層の厚さである。フォーメーションパラメータ (formation parameter) で (4.2) 式を書きかえると以下のようなになる。

$$\Delta h_w = \frac{Q}{2\pi T} \sigma \quad (4.3)$$

ここで σ はいわゆるスキンファクターである。

$$\sigma = \frac{K_f}{K_{sk}} \ln \frac{r_w}{r_{sk}} \quad (4.4)$$

他の解析式ではスキンを有限厚さとして扱っている [Moench and Hsieh, 1985 ; Earlougher, 1977]。

- 水頭の影響

揚水試験は水頭の時間変化にもとづき結果が整理される。一般に自然状態における水頭は不明であることから、何らかの仮定が必要となる。最も良く利用される仮定は、初期の水頭と試験中の水頭との差により水位の降下を見積もることである [Carrera et al., 1996]。

$$s(x,t) = h_0(x) - h_w(x,t) \quad (4.5)$$

このような近似は、 $h_w(x,t) - h_0(x)$ が s に比べて小さいときにおいては、妥当である。通常の帯水層では、ほとんどのケースでこのような状態が現実的であると言える。しかしながら、低透水性の媒体では、天然状態における水頭の変動が試験によって生じる変動を上回る可能性がある [Neuzil, 1986, 1993]。

- 揚水量の変動の影響

揚水試験中の実際の揚水量は厳密には変動が生じる。このような揚水量の変動は、通常の帯水層を対象とする試験では問題とはならないことが示されているが、低透水性層においてはこの影響が顕在化する可能性がある。現実的には、ランダムな揚水量の変動については平均流量の5%以内であれば大きな問題を生じないものと判断される。一方、傾向をもって流量が変化する場合は、流量の平均化による単純化が困難であり、このような状況では、流量を区分的なステップ関数で近似する、あるいは解析コードの機能として揚水量を時間関数として扱うことが可能である場合には、そのような機能を活用することが必要となる可能性がある。なお、Frac-Affinity ではこのような解析が可能である。

- 熱の影響

一般に、地下水の温度は地層の温度と平衡であると仮定される。一方、地層の温度は、地熱勾配にしたがって、深度とともに増加することから地下深部の地温は通常地表における温度よりも高い。揚水試験で使用される水あるいは、掘削の際に使用される水は通常地表水の温度であり、一般に地表温度よりもさらに低い。そこで、このような低温の水が地下の比較的高温の領域に注入されると、次式で表現される水の熱膨張により圧力変化が生じる可能性がある [Pickens et al., 1987]。

$$\Delta P = C_T \cdot \Delta T / C_W \quad (4.6)$$

ここで ΔP は圧力差、 C_T は水の熱膨張係数、 ΔT は温度差、 C_W は水の圧縮係数である。文献によれば、この影響は低透水性の領域（ ΔP はゆっくりと緩和されることから厳密には水頭拡散率が低い領域）で温度差の大きな水が試験で使用する場合に顕在化する可能性がある。図 4.13 に、このような温度差の影響が顕在化した場合のパルス試験（pulse test）結果を示す。

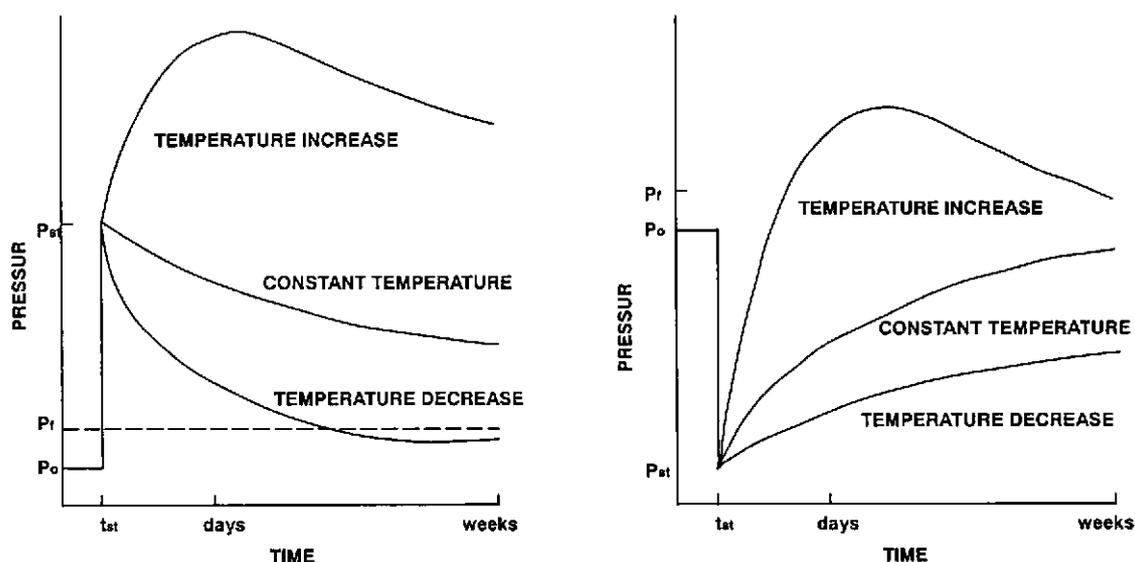


図 4.13 井戸における非定常圧力応答に対するの温度の影響 [Pickens et al, 1987]

(2) 水理試験の解析

Renthall [1963] が述べているように、Theis [1935] による非平衡式の開発は地下水流動解析分野における重大な進歩であり、Wenzel [1936] はその式を水理地質学者にとって実際的なツールを開発したと考えられる。これ以降、多くの場合、これらの式を用いて測定された水位の時間変化にもとづいて、まず、無次元数を導出し、さらに必要な水理学的パラメータが算出されてきた。この様な手法は十分に確立されたものであり、多くの水理学者によって今もパラメータ値の算出に用いられている。なお、様々な状況に対応する水理学的定式化については Vadu [1998] の文献を参照されたい。

一方、石油採掘の分野においては別の発展をたどってきた。実際、汲み上げ井戸（油井）に関する文献の大部分は、石油に関連する文献である。Earlougher [1977] は自身の書物を改訂し

ているが、その中で水理地質学の分野の最も重要な進歩の一つに微分を用いた解析の概念に加えて、井戸に関連した研究の進展をあげている。

- 数値解析法の利用

数値解析法は揚水試験の解析にも使用することが可能である。場合によっては、すなわち問題に対する解析解が存在しない場合、同種の問題を取り扱うための唯一の方法となる。数値解析法の適切な利用には、問題の性質（概念モデル）と地下水流動についての微分方程式を解くための数値解析手法に関する基本法則の両方を理解することが必要であるが、ここでは特に数値解析に関する技術的側面に着目することとする。

まず、揚水試験の評価対象は、揚水が行われる試錐孔の周囲の水頭変化である。したがって、揚水部の周辺で解析グリッドを細密化することが必要となる。これは、具体的には予想される円錐状の水位降下に比例するものとなる。

揚水部分は通常、地層の一部である節点へと割り当てられる。このような設定は、着目する帯水層を一体のもののみなし、帯水層全体に対する影響の評価を目的とする場合には適切なものとなる。しかしながら、揚水部分における水位降下を適切に表示するには井戸を表す追加的な節点が必要となる可能性がある。さらに、観測孔自身の持つ貯留係数の影響を受けるような場合には、さらに特別な配慮が必要となる [Carrera et al., 1996]。

上述の観測孔内の貯留の影響は、ダミーの節点、もしくは新たな節点を加えることで、表現することが可能である。次項で述べるように、この機能は Frac-Affinity で使用することができる。

以上の検討をふまえ、以下の観点から、試験に関連する試錐孔を明示的にモデル化する必要があることがわかる。

- 揚水時の正確な水位降下の理解。井戸周辺の要素 (element) は、井戸の半径と同程度の大きさとするべきである。ただし、多数の節点が必要とされるので、現実性の面で問題がある。
- 試錐孔が貯水効果を示す場合の揚水部分周辺の試錐孔での正確な水位降下の推定。
- 動水勾配の影響。通常、試錐孔及び井戸は鉛直であるので、鉛直方向の動水勾配が重要である。しかしながら、花崗岩については Martínez 等 [1999] が示しているように、あらゆる方向の動水勾配が重要となる可能性がある。
- 井戸でのサンプリング中に誘発される様々な混合現象（地球化学的調査ならびにトレ

一サ試験に関連して)。

Frac-Affinity において試錐孔を明示的にモデリングすることが必要な場合は、2章で述べた方法により、これを解析に組み入れることが可能である。図 4.14 は Frac-Affinity において試錐孔部がどのように取り扱われているかを説明したものである。

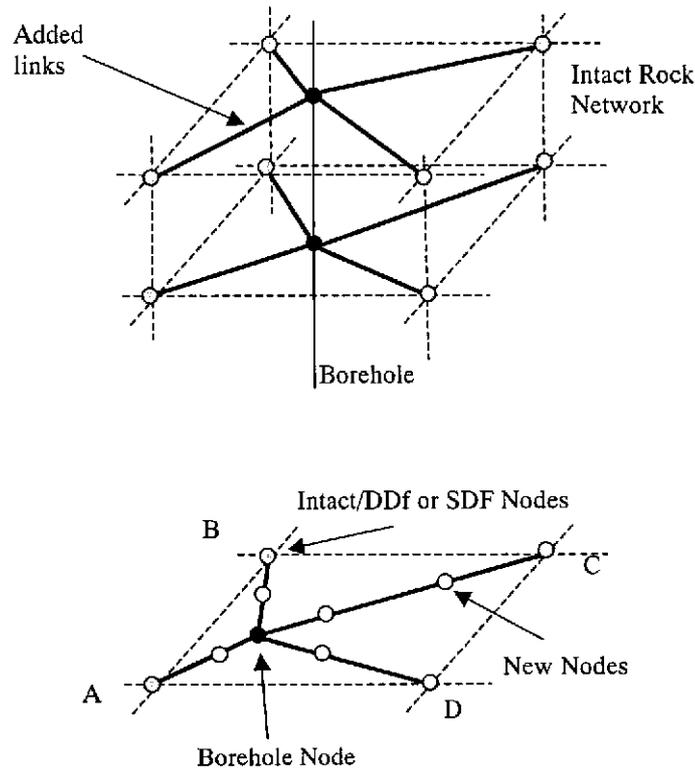


図 4.14 Frac-Affinity の不規則なネットワークにおける試錐孔の表現

不規則なネットワークは、不規則な領域を取り扱うときや、種々の細密化がその領域を横切って必要とされるときに都合がよい。しかしながら、非常に長い三角形のネットワークが形成された場合には、これが解析上の誤差を生じる可能性がある [Carrera et al., 1996]。

4.3.2 Frac-Affinity による揚水試験

前項では揚水試験に関する基本的な事項を整理するとともに、数値解析法による揚水試験のモデル構築に関する問題を明らかにした。本項では、揚水試験に対する Frac-Affinity の具体的な活用法と適用性を検討する。

(1) 目的

前項では、解析モデルが揚水試験のモデル化にあたって取り扱わなければならない状況や特徴を確認した。他の地下水流動解析コードと同様に Frac-Affinity においては、このような水理地質学的問題に対処するために、一定の操作が必要となる。具体的には、Frac-Affinity の機能のうち、以下の機能の活用が必要となる。

- ・ 試錐孔ファイルの活用
- ・ 境界条件の設定
- ・ 数値解析の制御
- ・ 要素の詳細度の設定

(2) 特徴

- ・ 井戸 (well bore) の表示

試錐孔ファイルは model_domain ファイル中で指定される新しいファイルである。新しい Frac-Affinity では、井戸または観測井に対する比体積を表す領域のレグ及び節点を有する。ファイルフォーマットを表 4.2 に示す。

表 4.2 試錐孔ファイルのキーワード及びファイルフォーマット

```
[GRID_SIZE size]
[CONDUCTIVITY_FACTOR factor]
[SSC value]
BH_SECTION name
  [GRID_SIZE size]
  [CONDUCTIVITY_FACTOR factor]
  [NON_CONDUCTING]
  [FIRST_LENGTH length]
  [GROWTH_FACTOR factor]
  [MAX_NUMBER num]
  RADIUS radius
  X1 Y1 Z1
  X2 Y2 Z2
  ...
  XN YN ZN
BH_SECTION next_name
```

GRID_SIZE は試錐孔のレグのサイズを制御しており、FIRST_LENGTH 及び GROWTH_FACTOR は領域（岩または亀裂構造）へ試錐孔節点を連結するように作成された特別なレグを参照している。これら 3 つのキーワードの組み合わせが不適切な場合には、正確な解の算出に必要な節点が膨大なものとなる可能性がある。これは MAX_NUMBER パラメータによって防ぐことができる。このパラメータは作成される特別な節点の最大数を制御する。原則として、試錐孔は孤立した試錐孔セクションとして扱われるが、開放された試錐孔として用いることも可能である。また、領域中の座標で定義できる任意の構造を与えることも可能である。さらに、試錐孔レグは比貯留係数をもつので、井戸の貯留効果を適切に表すことができる。

全てのキーワードにはデフォルト値が与えられている。特に、CONDUCTIVITY_FACTOR には注意を払うべきである。デフォルト値は開放された試錐孔中の流体に対する透水量係数であり、S.I.単位にすると 1.25×10^6 m/s である。これは、試錐孔レグのある側から反対の側へとほとんど瞬時に水頭の変化を伝達することが可能な値である。結果的に、水理地質領域におけるショートカットの表示が可能となる。一方、CONDUCTIVITY_FACTOR を小さくすると、結果として試錐孔に対応する透水量係数が減少することとなり、結果として試錐孔の影響は小さくなる。極端な例として、試錐孔に地層と等しい透水量係数を与える場合には、地下水の揚水は下部節点に集中することとなり、その影響はある点からの揚水条件となる。また、このような場合には、周囲からの集水がある点に集中することから、揚水は減少することとなる。

なお、このような試錐孔への低透水性の設定は計算上有利となる可能性がある。これは特に、試錐孔のセクション数が大きいときや、領域の透水係数の範囲、問題の大きさ、もしくはその両方が大きい場合に好都合である可能性がある。したがって、試錐孔の連続性の影響が重要であるようなセクションに対してのみ、試錐孔ファイルを用いることが好ましい。例えば、観測のための試錐孔が解析に影響を及ぼすことは希である。したがって、特に試錐孔に沿った方向の動水勾配が無視し得る場合においては、観測部のモデリングとしてモニタリングポイントを設けることが適切である。

- 境界条件の設定

境界条件としては、試錐孔部に対してフラックスまたは水頭によって内側境界を与えることが可能である。表 4.3 に境界条件設定のための入力ファイルの一部の例を示す。

表 4.3 試錐孔セクション bhs_1 の境界条件の設定

```

.
.
bhs_1 (name of borehole section)
FLUX or HEAD
4      (number of steps to follow)
0      0.001 (time, value)
1e6    0.001
1e6    0
1e9    0
.
.

```

試錐孔のセクション名は試錐孔ファイルでの名前と一致していなければならない。ユーザーガイドで示したように、キーワード FLUX であるが、流量の次元は $L^3 \cdot T^{-1}$ である。原則として、正の流量は系への水の注入を、負の値は抽出を表わす。キーワード HEAD は、固定水頭境界を使用する場合に用いる。HEAD 条件も FLUX 条件も、定常状態のシミュレーションにおいて、単一値として規定できる。この場合、ステップ数は 1 である。

なお、これら境界条件の設定にあたっては、これら境界条件の時間変化に対するモデル化の具体的内容に注意する必要がある。例えば、表 4.3 では時間 1e6 が 2 回入力されているが、これは、時間 1e6 において瞬時に境界条件が変化する設定であることを示している。一方、ある時間に対する境界条件の設定が 1 回のみ（すなわち 1 行）入力される場合には、図 4.15 に点線で示したように、前後の設定値との間で線形補間を行い、時間に対して徐々に変化する境界条件が設定されることとなる。

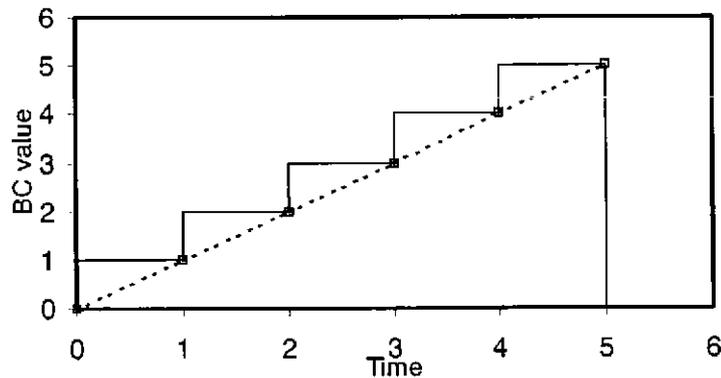


図 4.15 反復入力(実線)及び非反復入力(点線)による境界条件の時間変化の設定例

図 4.15 に示したように、Frac-Affinity では様々なタイプの変動をモデル化することができることがわかる。

- 要素の詳細度の設定

前述のように、揚水で想定される揚水孔近傍における水頭変化に対応した要素分割が必要である。Frac-Affinity における要素分割は、キーワード LOCAL_REFINEMENT によって、このような要求に対応することが可能である。さらに、試錐孔ファイルのキーワードによって作成される特別な節点により、着目する領域において適切な解を得るために必要な詳細度で要素に分割することができる。ただし解析者は一般に、過度に細密化された要素を作成する傾向があることから、その詳細度の程度は計算時間との兼ね合いで決定することが求められる。

- 数値解析の制御

STORATIVITY_TIME_SCALE は非定常問題の数値解を求めるにあたって、その妥当性（精度）を制御するファクターである。解析に求められる精度と計算時間の関係を考慮して、適切な値を設定する必要がある。

(3) 例題演習

Frac-Affinity は、様々な媒体における揚水試験の評価に対して、試錐孔に多様な境界条件を設定することにより、柔軟に対応することができる。原則として、水頭値ならびにフラックスの設定として以下の事項を提供することが可能である。

- 解析期間中一定
- 解析のある時間区分において一定
- 時間に対して線形に変化
- ある時間区分において、時間に対して線形に変化

以下ではこれらの機能を使って Frac-Affinity による揚水試験の例題演習を行う。

- 揚水及び回復

代表的な揚水試験及び回復試験についての解析解との比較を行った。表 4.4 は、入力ファイルセット *theis_test_input.zip* で用いられているパラメータセットを示したものである。

表 4.4 this_test_input の解析条件

Domain	1000×500×500 m
Borehole	Centered; fully penetrating
Flowrate	$10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
K	Isotropic; $8 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
S	$2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
External BC	No flow

図 4.16 に解析結果を示す。同図から Frac-Affinity の解析結果は十分な精度で解析解と一致していることがわかる。この例題以降、本節での例題演習の解析条件は解析解と比較することができないが、図 4.16 の結果から Frac-Affinity の解析結果に対して一定の信頼性が期待されることがわかる。

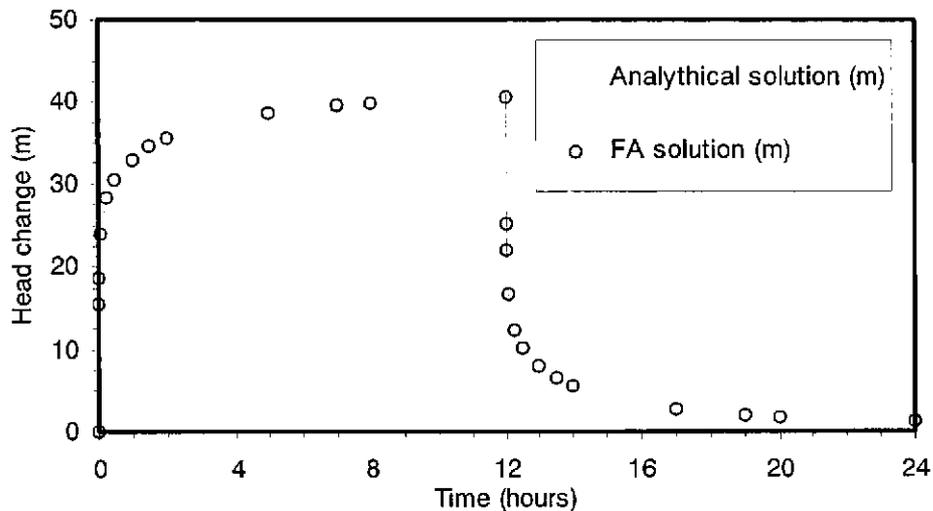


図 4.16 揚水試験及び回復試験の解析解及び数値解析結果の比較
(MARIAJ-IV[Carbonell et al., 1997]を解析解と解析条件を使用)

- 一定水頭試験

前述のように、一定水頭試験は被圧部を対象とする揚水試験において特に有用である。なお、一連の一定水頭試験は MIU サイトスケールモデル (Base Case Model) で行った。これらの結果は次項にゆずるが、ここでは、結果の一例を示すとともに、コードの性能を明らかにする。図 4.17 に、MIU-2 試錐孔の最上部セクションに一定水頭（流出）を適用した結果を示す。この解

析では、最上部セクションの定常状態における水頭値 215m に対して、解析の最初の 1 日 (86400 秒) の期間において一定水頭 190m を与え、その後は再び元の条件に戻した時の結果である。

一定水頭の解析結果の評価は困難な課題である。一般的な考察として、STORATIVITY_TIME_SCALE ファクターの設定が解析の初期のフェーズにおける解析結果に著しく影響を及ぼすであろう。原則として、この設定値が大きくなれば、解析時間は短縮される傾向にあるが、解析の初期のフェーズ、すなわち、流量が急速に変化する期間における解析については、このキーワードを適切に選択しないと、水収支等に誤差を生じる結果となる可能性がある。なお、解析の目的が長期の解析結果である場合には、STORATIVITY_TIME_SCALE に大きな値を設定することにより、一定の誤差を許容した結果を求めることも考えられる。

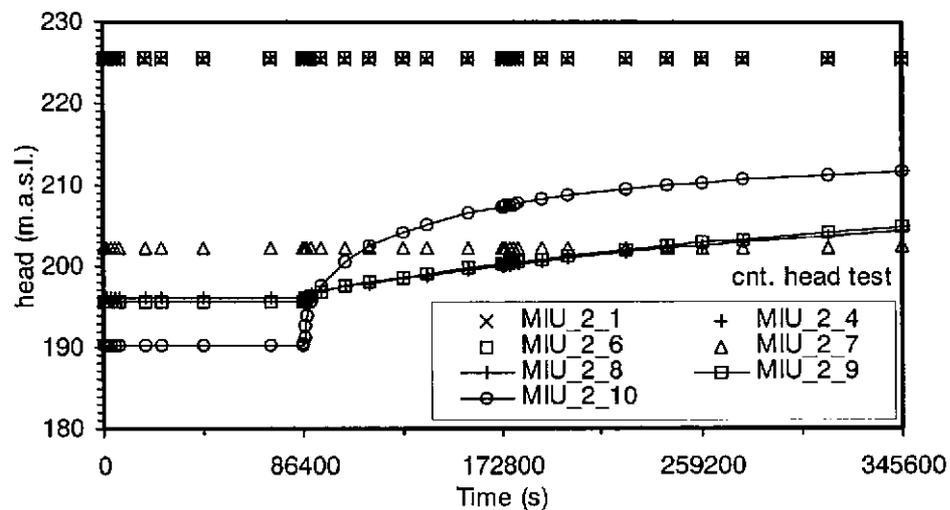


図 4.17 MIU-2 試錐孔の上部セクションでの一定水頭試験の例(/PT_BC/CNT_H.02)

注：下部のセクションでは有意反応は見られない。

- 特殊な例：飽和状態の変化 (*unsat_case.zip*)

被圧帯水層で揚水試験を行い、やがて水頭が被圧帯水層の上部境界に達し、さらに下がり続ける場合には、被圧帯水層で不飽和領域が形成される。また、不圧帯水層で揚水試験を行う場合には、有効間隙率は、初期の地下水面と試験後の地下水面との間の不飽和化した領域からもたらされる水の量で算出される。多くの場合、この不飽和の影響は解析に大きな誤差をもたらすことはなく、無視することが可能である。しかしながら、場合によっては、ある領域がどのように不飽和となり、あるいは再飽和するかが問題となることも考えられる。

ここで Frac-Affinity では、前述のように、Richard の式にしたがって不飽和地下水流動を評価する。不飽和領域における相対的な透水性を表すために用いられるモデルとしては、van Genuchten の式及びユーザーが定義する形式で与えることができる。以下では、不飽和が見込まれている領域での揚水試験の検討例を示す。表 4.5 に解析条件を、図 4.18～4.22 にその結果を示す。

不飽和領域の存在を考慮する飽和－不飽和解析においては、不飽和域において透水係数が指数関数的に変化することに留意しなければならない。van Genuchten 式のパラメータの使用に適切さを欠いたり、不確定な空隙率や透水係数値を用いたりすると、解析の収束が悪化したり、不安定な結果をもたらす可能性がある。したがって、van Genuchten 式のパラメータ値について解析毎にパラメータを変更するのではなく、あらかじめ文献調査を行い、これに従って van Genuchten パラメータを設定することが強く推奨される。この考え方にしたがって、ここではグリムゼル（スイス）の花崗岩に対する値として Kull 等 [1991] が発表した値（これらは適度な透水性岩盤に対する値として整合性を有すると考えられる）を用いることとした。

表 4.5 飽和－不飽和解析 (*unsat_case.zip*) のパラメータ設定

領域	1000 × 500 × 500 m
試錐孔	中心にある; 完全に貫通
流量 (一定ステップ)	0 to 3600 s 0
	3600 to 18000 s $-1.667 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$
	18000 to 43200 s $-1.667 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
	43200 to 86400 s 0
K	異方的; 10^{-7} m/s
S	10^{-5} m^{-1}
Φ (*)	10^{-2}
Van Genuchten パラメータ (*)	A = 10 m^{-1} B = 1.49
CONDUCTIVITY_FACTOR	$1.25 \cdot 10^6$
外側境界条件	不透水境界 (no-flux)

(*) Kull et al. [1991]

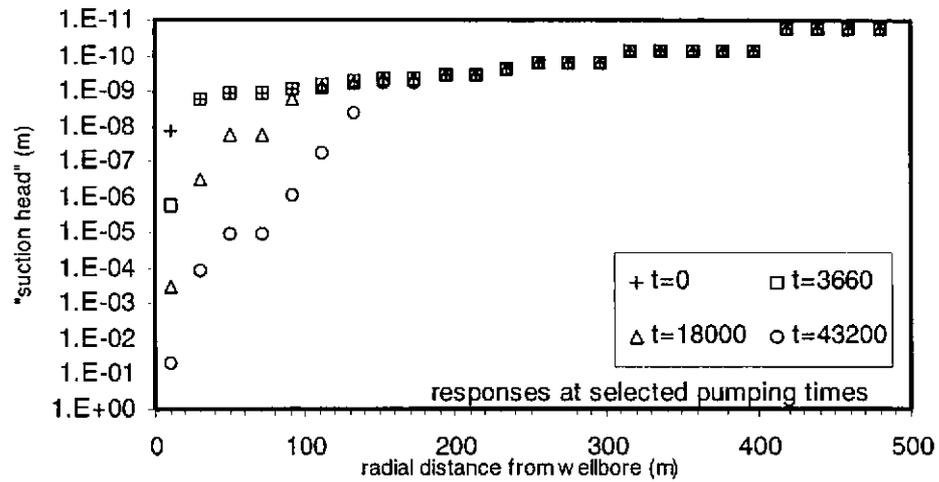


図 4.18 不飽和を考慮した揚水試験中の解析結果

図 4.18 は解析結果を解析開始直後から揚水が終了する半日後までの 4 つの時点について揚水孔からの距離に対してサクションを整理したものである。まず、時間 0 の結果から高透水性を有する揚水孔の直近の位置において、サクションがわずかに増加し、この部分で不飽和化が生じていることがわかる。この不飽和領域はその後、徐々に広がり 12 時間後（43200 秒後）では揚水孔から 150m 程度の範囲まで影響が及んでいることがわかる。

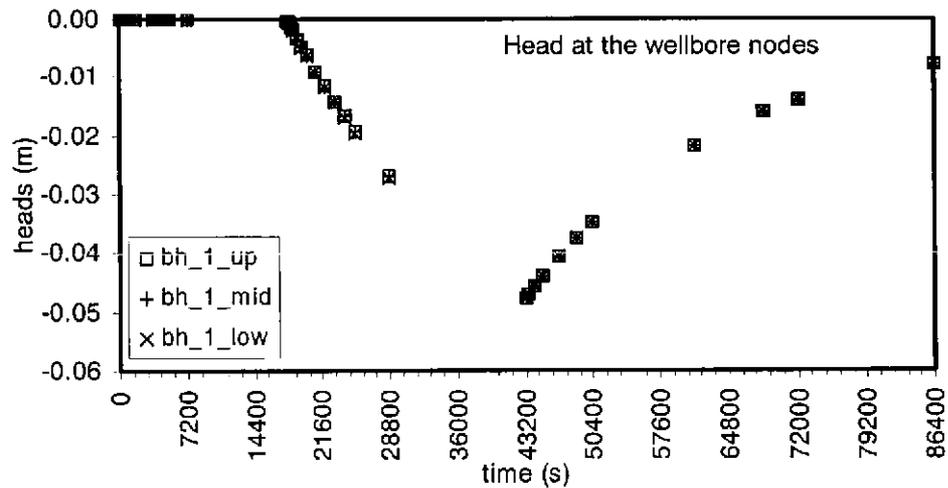


図 4.19 揚水点における水頭変化

揚水点における水頭変化（実際にはサクションの変化）は、図 4.19 に示したように、揚水孔

の中央部ではかなり大きくなる。ここでは6時間後からサクシオンは顕著に減少し始め、揚水が停止した後12時間経過後も完全に再飽和しない。この影響は揚水孔からの距離が大きくなるほど大きくなっている。図4.20は、およそ10 mの距離では、再飽和は実際に遅いことを示している。さらに、30 m及び50 mの地点においては、地下水の再飽和への時定数はより大きくなっている。この結果は、一般的に考えられる結果と整合的ではなく、今回の解析ではサクシオンの低下と岩体の低透水性が相互に作用することにより、このような結果が導かれた可能性が指摘される。

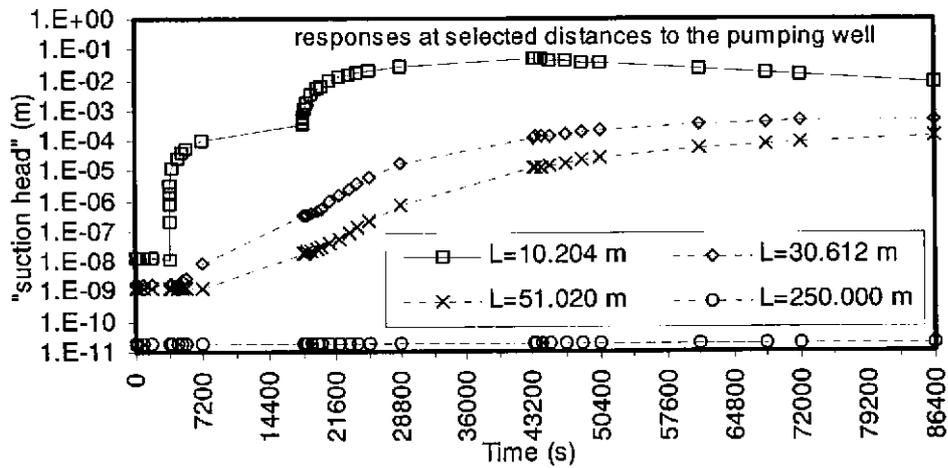


図 4.20 有効区間 (active interval) から種々の距離にある節点での応答

最後に、図4.21は揚水孔に沿った水頭プロファイルの時間変化を示している。同図では、節点底部から揚水が始まっていることの影響が示されている。すなわち、下部節点はずっと不飽和となり(1秒後)、その後圧力が“試錐孔”に沿って平衡に達し、その結果として水頭フロントが平行に広がっていることがわかる。

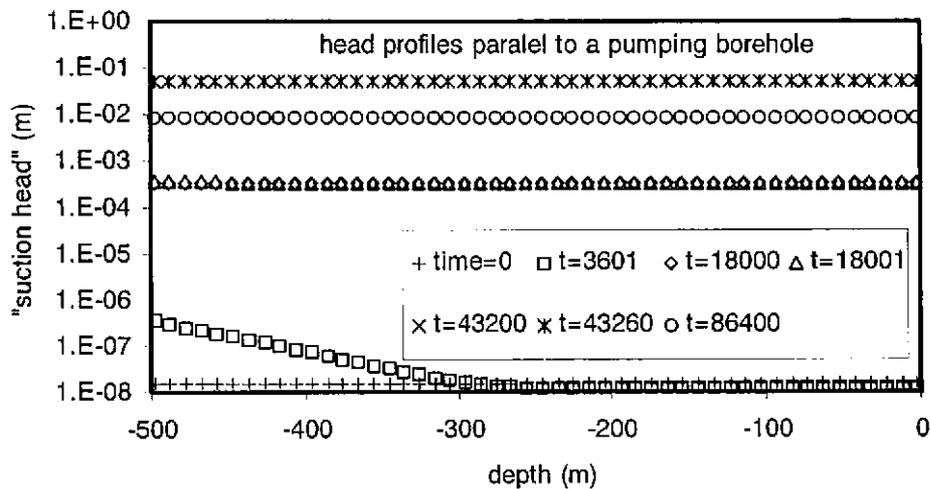


図 4.21 揚水井の深度方向の水頭分布

4.3.3 MIU サイトにおける長期揚水試験プログラムへの Frac-Affinity の適用

本項では、MIU サイトにおける長期揚水試験（LPT）プログラムを念頭に、Frac-Affinity の揚水試験の模擬解析に対する適用性について検討する。最初に、長期揚水試験の目的とこの試験で実施される可能性があるタスクを再確認し、ついで、揚水試験のモデル構築のために Frac-Affinity 活用法を検討する。最後に、具体的なシミュレーション例を示し検討を加える。

(1) 長期揚水試験（LPT）の背景

LPT プログラムの目的は、MIU サイトの水理地質構造を正確に特徴付けようとする水理パラメータを取得し、サイトの水理地質構造モデルに改良を加えることである。言い換えると、揚水試験の解釈は計算コードの性能を試験することとなる。

このような目的をより具体的なものへ展開すると LPT の成果から、LPT に使用する試錐孔の近傍に計画されている超深地層研究所の立坑掘削の影響をシミュレートすることが可能である。また、立坑の建設中における地下水の流入量の様な工学的計算の精度の向上が期待される。なお、LPT の対象領域の中の比較的深度の浅い部分、すなわち、堆積層を対象とした検討ではあるが、本検討で対象とした領域近傍で同様の解析が行われている [Yanagizawa et al., 1995]。

(2) LPT における Frac-Affinity の活用

Frac-Affinity は、揚水試験を含む地下水流動解析を行うための強力なツールである。

Frac-Affinity はほとんどあらゆるタイプの地質媒体をシミュレーションすることが可能であり、概念モデルにもとづき数値モデルを比較的簡便に構築することが可能である。

基本的に、必要な程度に単純化された概念モデルは、十分なデータで裏付けられていない複雑なモデルよりもロバスト性に優れている。したがって、LPT に対する地下水流動解析の実施にあたっては下記に示すタスクを実施することが有益であり、Frac-Affinity による揚水試験の解析に先立ってリストに記載された特性を予測すべきである。

- ・ 試験前後の水頭の傾向
- ・ 水理学的な地質境界の存在を検知し、あるいは複雑な地下水流動モデルを検証するために設定されるべき揚水圧力の時間変化
- ・ 試験の揚水圧力の時間変化に対応した試験部のコア観察の整理
- ・ 簡単な概念モデルによる応答性の予測
- ・ クロスホール応答の予測

(3) 計算例

LPT の模擬解析における Frac-Affinity の適用性を検討するために、一連の試解析を実施した。これらの試解析は以下のように分類される。

- ・ 一定水頭解析
- ・ 一定流量解析
- ・ MIU-2 試錐孔における統合的な一定流量シミュレーション

これらの境界条件と水理パラメータを組み合わせることで、合計 25 の解析を行った。これら解析については電子ファイルに記録されており、その要約を表 4.6 に示した。

解析の一貫性を確保するため、解析では最新の Base Case モデルを使用した。すなわち、地質構造に加えて、パラメータ、断層に伴う割れ目帯、及び外側境界条件も全ての解析で同じ値を使用した。

MIU-2 をモデル化した試錐孔セクションでは、全てのケースで内側境界条件を設定できる領域 (active zone) として設定した。これらセクションは実際の配置で用いられるか (表 4.7 参照)、もしくはもっと長い区間をシミュレーションするように結合されている (表 4.6 参照)。当初は、観測セクションはコード中で試錐孔区間としてシミュレーションされていた。すなわち、試錐孔が実際の物理現象にしたがってモデル化されていた。しかしながら、これでは試錐孔近傍で

適切な細密度を有するものの、それ以外の部分では非常に大きな要素が形成されることとなった。そこで、節点数を再配分し、観測セクションにセクションの中心座標を与え、単一点(Monitor Point)として解析を行うこととした。なお、この場合においても全てのケースにおいて(4.1)式で表される条件を満たしている。

最後に、試錐孔においてパッカーが設置されていない区間については線としてモデル化し、現状において掘削が完了している試錐孔のみを考慮した。

表 4.6 Base Case モデルで実施されたシミュレーション: (a) 応答に関して

ケース名	有効区間 (active interval)	流量-水頭ステップ(時間/ m ³ /s;m.a.s.l.)	有効区間 での最大 s	応答	有効地層セクション
PUMP_01	MIU_2_1	0.5 d / 2 · 10 ⁻⁶ 0.5 d / 0	60 m	MIU_1_1 = 5 m MIU_1_2 = 5 m MIU_1_3 = 1 m MIU_1_4 = 1 m MIU_2_2 = 50 m MIU_2_3 = 40 m MIU_2_4 = 30 m MIU_2_5 = 20 m MIU_2_6 = 10 m	中粒優白色花崗岩
PUMP_02	MIU2_long (-100 to -788 m.a.s.l.)	1 w / 5 · 10 ⁻⁵ 1 w / 0	30 m		断層に伴う割れ目帯 中粒優白色花崗岩
PUMP_08	MIU2_long (-100 to -788 m.a.s.l.)	1 d / 2 · 10 ⁻⁴ 1 d / 0	7 m		断層に伴う割れ目帯 中粒優白色花崗岩
FIN_01	MIU2_long(-100 to -788 m.a.s.l.)	1 w / 2 · 10 ⁻³ 1 w / 0	30-60 m	MIU_1_1 = 5 m MIU_1_2 = 5 m MIU_1_3 = 1 m MIU_1_4 = 1 m	断層に伴う割れ目帯 中粒優白色花崗岩
FIN_04	MIU_2_1	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	20 m	MIU_2_2 < 1 m MIU_2_3 < 1 m	中粒黒雲母花崗岩
FIN_04_01	MIU_2_1	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	60 m	MIU_2_2 = 2 m MIU_2_3 = 2 m MIU_2_4 = 0.7 m MIU_2_5 = 0.2 m	中粒黒雲母花崗岩
MIU_2_2	MIU_2_2	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	247 m	MIU_2_1 = 3 m MIU_2_3 = 10.4 m MIU_2_4 = 3 m MIU_2_5 = 0.5 m	中粒黒雲母花崗岩
MIU_2_3	MIU_2_3	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	205 m	MIU_2_1 = 2 m MIU_2_2 = 9 m MIU_2_4 = 2 m MIU_2_5 = 0.5 m	中粒黒雲母花崗岩
MIU_2_4	MIU_2_4	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	68 m	MIU_2_1 = 0.7 m MIU_2_2 = 1 m MIU_2_3 = 1 m MIU_2_5 = 3.5 m	中粒黒雲母花崗岩
MIU_2_5	MIU_2_5	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	0.2 m		中粒黒雲母花崗岩
MIU_2_5_01	MIU_2_5	1 d / 5 · 10 ⁻⁵ 1 d / 1.10 ⁻⁴ 2 d / 0	21 m	MIU_2_1 = 1.5 m MIU_2_2 = 3.5 m MIU_2_3 = 3.5 m MIU_2_4 = 11 m MIU_2_6 = 1.5 m	中粒黒雲母花崗岩
MIU_2_6	MIU_2_6	1 d / 5 · 10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	< 0.1 m		月吉断層
MIU_2_6_01	MIU_2_6	1 d / 5 · 10 ⁻⁵ 1 d / 1.10 ⁻⁴ 2 d / 0	1.5 m		月吉断層

ケース名	有効区間 (active interval)	流量-水頭ス テップ(時間/ m ³ /s;m.a.s.l.)	有効区間 での最大 s	応答	有効地層セクション
MIU_2_7	MIU_2_7	1 d / 5·10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	<0.1 m		断層に伴う割れ目帯
MIU_2_7_01	MIU_2_7	1 d / 5·10 ⁻⁵ 1 d / 1.10 ⁻⁴ 2 d / 0	0.25 m		断層に伴う割れ目帯
MIU_2_7_02	MIU_2_7	1 d / 5·10 ⁻⁵ 1 d / 1.10 ⁻⁴ 1 d / 2.10 ⁻⁴ 1 d / 4.10 ⁻⁴ 1 d / 8.10 ⁻⁴ 5 d / 1.6·10 ⁻³ 10 d / 3.2·10 ⁻³	6 m	MIU_1_pt5 =0.1 m MIU_1_pt6 =0.5 m MIU_1_pt7 =0.5 m	断層に伴う割れ目帯
MIU_2_8	MIU_2_8	1 d / 5·10 ⁻⁷ 1d / 1.10 ⁻⁶ 2d / 0	175 m	MIU_2_9 = 169 m	中粒優白色花崗岩
MIU_2_9	MIU_2_9	1 d / 5·10 ⁻⁷ 1 d / 1.10 ⁻⁶ 2 d / 0	98 m	MIU_2_8 = 98 m MIU_1_pt1 = 0.04 m	中粒優白色花崗岩
MIU_2_10	MIU_2_10	1 d / 5·10 ⁻⁷ 1d / 1.10 ⁻⁶ 2d / 0	0 m		中粒優白色花崗岩
Miu_2_10_01	MIU_2_10	1 d / 5·10 ⁻⁵ 1 d / 1.10 ⁻⁴ 1 d / 2.10 ⁻⁴ 1 d / 4.10 ⁻⁴ 1 d / 8.10 ⁻⁴ 5 d / 1.6·10 ⁻³ 10d / 3.2·10 ⁻³	0.5 m		中粒優白色花崗岩
CNT_H_01	MIU2_2_L	1 d H =155 3 d recovery	(imposed head)	MIU_1 and MIU_3 uppermost intervals	MIU2_2_L は 215 ~ 0 m.a.s.l.に影響。 MIU2_1_L は 0 ~ -778 m. a.s.l.に影響。
CNT_H_02	MIU2_2_L	1 d H =155 1 d Q = 0.16 2 d recovery	(imposed head)	MIU_1 and MIU_3 uppermost intervals	MIU2_2_L は 215 ~ 0 m.a.s.l.に影響。
CNT_H_02_01	MIU2_2_L	1 d H =155 1 d Q = 0.16 2 d recovery	(imposed head)	MIU_1 and MIU_3 uppermost intervals	MIU2_2_L は 215 ~ 0 m.a.s.l.に影響。
CNT_H_03	MIU2_2_L	1 d H =155 1 d Q = 0.16 2 d recovery	(imposed head)	MIU_1 and MIU_3 uppermost intervals	MIU2_2_L は 215 ~ 0 m.a.s.l.に影響。
CNT_H_03_01	MIU2_2_L	1 d H =155 1 d Q = 0.16 2 d recovery	(imposed head)	MIU_1 and MIU_3 uppermost intervals	MIU2_2_L は 215 ~ 0 m.a.s.l.に影響。

表 4.6 Base Case モデルで実施されたシミュレーション: (b) 数値解法上の設定

ケース名	COND_FACT	TOL.	TIME_STEP_TOL.	STO_TIME_SCALE	備考
PUMP_01	1	10^{-7}	10^{-5}	10^{-1}	
PUMP_02	1	10^{-7}	10^{-5}	10^{-1}	非常に弱い応答
PUMP_08	$1.25 \cdot 10^3$	10^{-12}	10^{-6}	10^{-1}	有効区間外で非常に弱い応答
FIN_01	$1.25 \cdot 10^3$	10^{-12}	10^{-6}	10^{-1}	AN_1 及び MIU_3 における深部セクションで弱い応答
FIN_04	$1.25 \cdot 10^3$	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	試験孔容量の影響。部分的回復収束(?)
FIN_04_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	速やかな初期応答。Total recovery.
MIU_2_2	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	
MIU_2_3	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	
MIU_2_4	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	
MIU_2_5	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	高 K 区間。応答は観測されず。
MIU_2_5_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	収束しにくい
MIU_2_6	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	あまりに低流量
MIU_2_6_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	収束しにくい
MIU_2_7	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	あまりに低流量
MIU_2_7_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	低流量: excellent curve
MIU_2_7_02	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	
MIU_2_8	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	
MIU_2_9	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	有効区間及び応答区間は正確な挙動を示す。MIU_3_pt2 でのわずかな応答
MIU_2_10	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	あまりに低流量
Miu_2_10_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	MIU_2_8、9 及び MIU_1、MIU_3 の上部セクションでのわずかな応答
CNT_H_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	60 m に相当する水頭変化。物質収支からの非常に高い流量。ほとんどの点で応答
CNT_H_02	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	水頭と流量の組み合わせ。高流量が得られる($0.165873 \text{ m}^3/\text{s}$)
CNT_H_02_01	0.1	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	種々のステップ。同じ結果。水収支がフラックス条件及び水頭条件を加える。
CNT_H_03	$1.25 \cdot 10^6$	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	水頭と流量の組み合わせ。高流量が得られる($0.167365 \text{ m}^3/\text{s}$)
CNT_H_03_01	$1.25 \cdot 10^6$	10^{-12}	10^{-7}	10^{-1}	流量に従って高応答

表 4.7 試錐孔セクション名と区間座標(水平・垂直)

MIU_1_1			MIU_2_7			AN_1_12		
5.488.826	-68.629.358	-789.926	5.433.295	-68.552.402	661.745	-68.877.342	5.454.717	-233.62
5.488.826	-68.629.358	-754.226	5.433.295	-68.552.402	-644.945	-68.877.342	5.454.717	-183.62
MIU_1_2			MIU_2_8			AN_1_13		
5.488.826	-68.629.358	-751.126	5.433.295	-68.552.402	-48.445	-68.877.342	5.454.717	-183.62
5.488.826	-68.629.358	-731.326	5.433.295	-68.552.402	-32.645	-68.877.342	5.454.717	-133.62
MIU_1_3			MIU_2_9			AN_1_14		
5.488.826	-68.629.358	-703.426	5.433.295	-68.552.402	-31.745	-68.877.342	5.454.717	-133.62
5.488.826	-68.629.358	-652.126	5.433.295	-68.552.402	34.955	-68.877.342	5.454.717	-83.62
MIU_1_4			MIU_2_10			AN_1_15		
5.488.826	-68.629.358	-649.026	5.433.295	-68.552.402	85.555	-68.877.342	5.454.717	-65.12
5.488.826	-68.629.358	-615.826	5.433.295	-68.552.402	102.355	-68.877.342	5.454.717	-61.12
MIU_1_5			AN_1_1			AN_1_16		
5.488.826	-68.629.358	-247.026	-68.877.342	5.454.717	-793.82	-68.877.342	5.454.717	-61.12
5.488.826	-68.629.358	-237.826	-68.877.342	5.454.717	-733.62	-68.877.342	5.454.717	-33.62
MIU_1_6			AN_1_2			AN_1_17		
5.488.826	-68.629.358	-169.526	-68.877.342	5.454.717	-733.62	-68.877.342	5.454.717	-33.62
5.488.826	-68.629.358	-157.326	-68.877.342	5.454.717	-683.62	-68.877.342	5.454.717	16.38
MIU_1_7			AN_1_3			AN_1_18		
5.488.826	-68.629.358	-128.026	-68.877.342	5.454.717	-683.62	-68.877.342	5.454.717	16.38
5.488.826	-68.629.358	-108.326	-68.877.342	5.454.717	-633.62	-68.877.342	5.454.717	66.38
MIU_1_8			AN_1_4			AN_1_19		
5.488.826	-68.629.358	-40.526	-68.877.342	5.454.717	-633.62	-68.877.342	5.454.717	66.38
5.488.826	-68.629.358	-13.326	-68.877.342	5.454.717	-583.62	-68.877.342	5.454.717	116.38
MIU_1_9			AN_1_5			AN_1_20		
5.488.826	-68.629.358	16.474	-68.877.342	5.454.717	-583.62	-68.877.342	5.454.717	116.38
5.488.826	-68.629.358	26.174	-68.877.342	5.454.717	-533.62	-68.877.342	5.454.717	166.38
MIU_2_1			AN_1_6			AN_3_1		
5.433.295	-68.552.402	-788.245	-68.877.342	5.454.717	-483.62	-68.875.849	5.490.414	-89.91
5.433.295	-68.552.402	-757.045	-68.877.342	5.454.717	-433.62	-68.875.849	5.490.414	-80.91
MIU_2_2			AN_1_7			AN_3_2		
5.433.295	-68.552.402	-756.145	-68.877.342	5.454.717	-433.62	-68.875.849	5.490.414	-59.91
5.433.295	-68.552.402	-747.845	-68.877.342	5.454.717	-383.62	-68.875.849	5.490.414	-40.41
MIU_2_3			AN_1_8			AN_3_3		
5.433.295	-68.552.402	-746.945	-68.877.342	5.454.717	-383.62	-68.875.849	5.490.414	55.59
5.433.295	-68.552.402	-737.045	-68.877.342	5.454.717	-335.62	-68.875.849	5.490.414	65.59

表 4.7 試錐孔セクション名と区間座標(水平・垂直)(続き)

MIU_2_4			AN_1_9			AN_3_4		
5.433.295	-68.552.402	-736.145	-68.877.342	5.454.717	-335.62	-68.875.849	5.490.414	84.09
5.433.295	-68.552.402	-708.345	-68.877.342	5.454.717	-328.62	-68.875.849	5.490.414	96.09
MIU_2_5			AN_1_10			AN_3_5		
5.433.295	-68.552.402	-707.445	-68.877.342	5.454.717	-328.62	-68.875.849	5.490.414	111.09
5.433.295	-68.552.402	-695.945	-68.877.342	5.454.717	-288.62	-68.875.849	5.490.414	120.09
MIU_2_6			AN_1_11					
5.433.295	-68.552.402	-693.545	-68.877.342	5.454.717	-283.62			
5.433.295	-68.552.402	-664.145	-68.877.342	5.454.717	-233.62			

ここまでの解析条件の設定にしたがい実施した解析結果について、代表的なものを図 4.22 から図 4.25 に示し、以下に解説を加える。

まず、MIU-2 での揚水に対する応答は、水理地質構造モデルの設定に従って、領域全域に拡張する。一方、月吉断層が極めて低透水性として扱われるため (10^{-12} m/s)、水頭変化に対する物理的バリアとして作用する。これは、MIU-2 での重大な水位降下に比べて、MIU-1 及び MIU-3 での応答が通常弱い理由を説明している。結果として、主な水頭変化が同じ試錐孔中の近隣セクションで観測される。図 4.22 は長期揚水試験のシミュレーションにおいてクロスホール応答が限定的であることを示唆している。

一方、断層の上盤側、下盤側を問わず断層の同じ側にあるセクションの応答については、図 4.23 のようにクロスホール応答が観測されている。図 4.23 じゃ MIU-2 試錐孔の下部で行われた試験結果であり、水頭変化が近くの試錐孔に伝播して行く様子を示している。同様に、図 4.24 に代表的なシングルホール応答を示す。ここで、AN 試錐孔はシミュレーションされたほとんどの試験に対して重要な応答を示していないことに注意すべきである。

また、一度大きな擾乱が生じると、その後も長期にわたって影響が生じていることも確認された。1 例として、図 4.25 に MIU-2 上部 (100 m より上) で行われた一定水頭試験に対する MIU-1 と MIU-2 のクロスホール応答の例を示す。

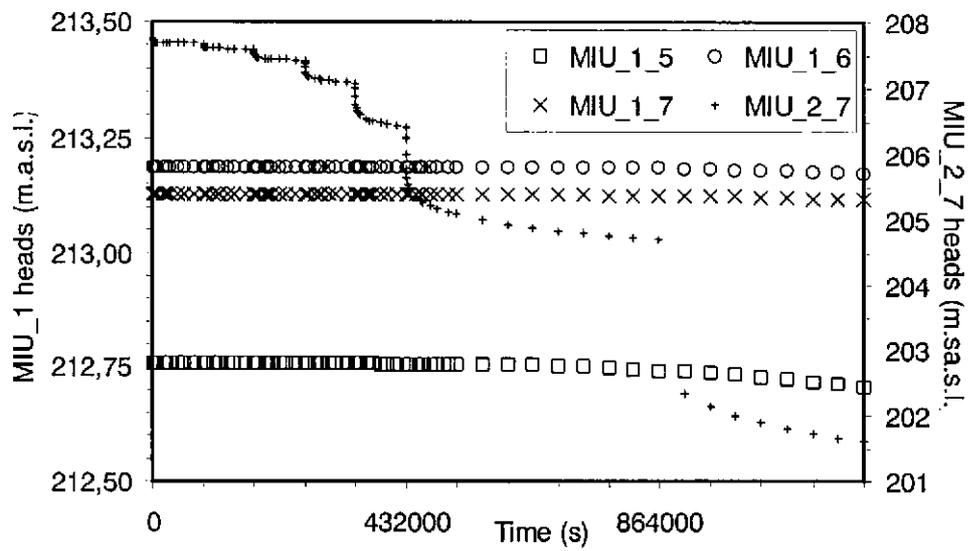


図 4.22 MIU-1 でのクロスホール応答の例

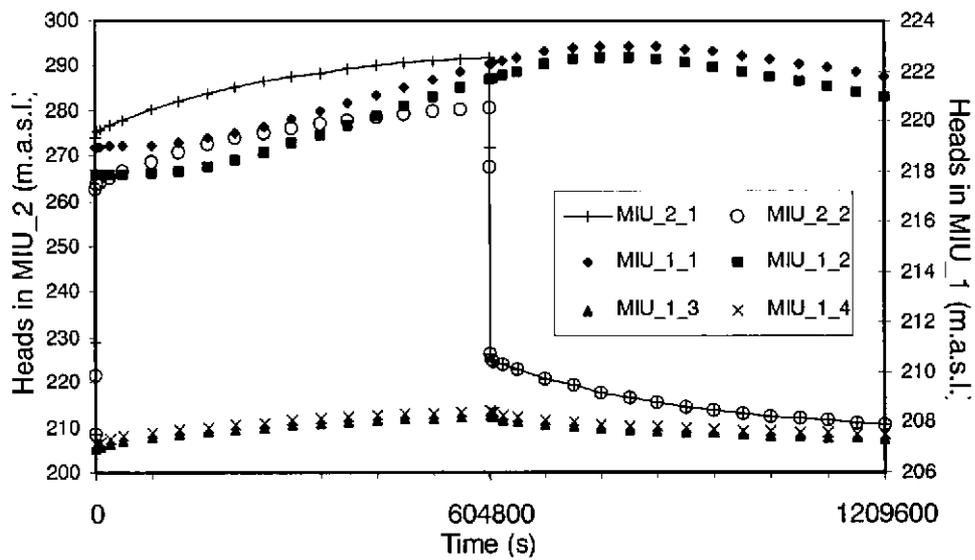


図 4.23 MIU-2-1 セクションで実施された揚水試験中の MIU-2 及び MIU-1 試錐孔間でのクロスホール応答の例

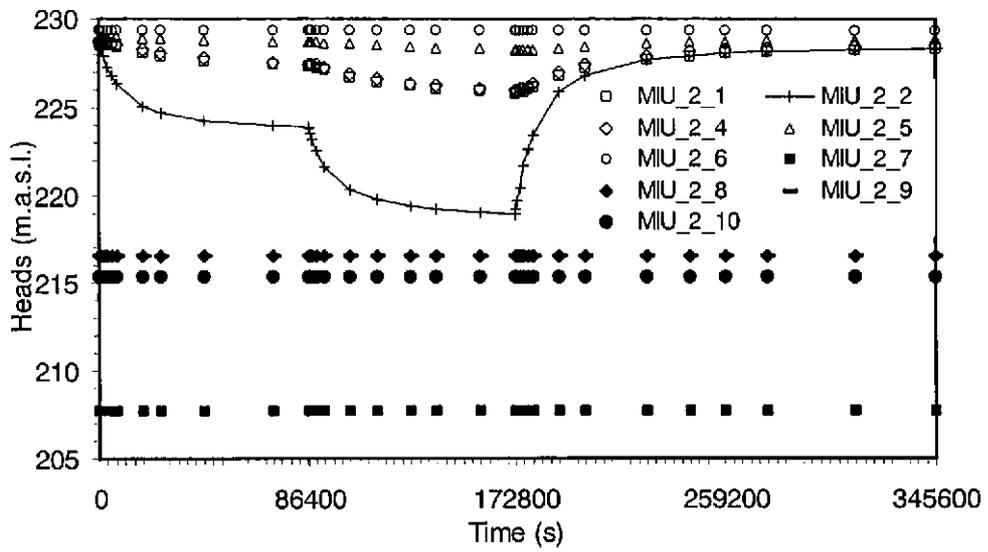


図 4.24 試験中の揚水試験錐孔における応答例

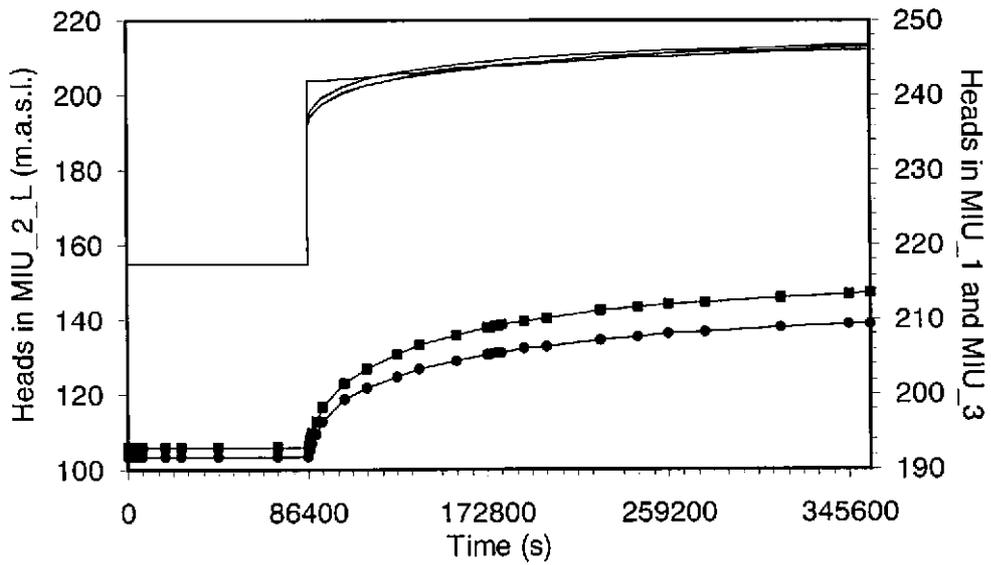


図 4.25 試験錐孔 MIU-2 の 100 m より上の部分での一定水頭試験(実線)及び MIU-3 及び MIU-1 におけるクロスホール応答例(■、●)

Base Case モデルを用いた、MIU-2 の全セクションでの系統的な一連の試験結果から、Frac-Affinity による LPT の基本的な解析可能性が確認されたものの、解析の精度向上の余地も残されており、このためには水理地質構造モデルの改良が必要であると考えられる。一方、これらの系統的な解析により、Frac-Affinity におけるモデルや数値解析に関する諸設定の変化が解析結果にどのような影響を与えるかを検討できることが示された。例えば、CONDUCTIVITY_FACTOR の設定値の変化に対して最終的な水位の低下量の変化は大きくないことが確認された。

5. 可視化システム利用のサポート

可視化システム利用のサポートについては、2回の東濃地科学センターでの実地支援に加えて、インターネット等を活用したりリモートサポートを実施した。以下では、2回の実施支援におけるディスカッション並びにその成果を中心に可視化システム利用のサポートの成果をまとめる。なお、特に第1回のサポートの実施以降、現時点までの超深地層研究所計画ならびに付帯する研究の進展により、サポート時の検討内容が一部で現状と整合性を欠くものも存在するが、本報告書ではサポートの記録としての整合性を重視し、サポート実施時の議論にもとづいて記述することとする。

5.1 第1回サポート

第1回サポートは、平成12年11月13日（月）から11月16日（木）に実施した。作業の主な項目は次の通りである。

- ・ 可視化システム利用のサポートの目的並びに全体計画の確認
- ・ 地下水流動解析の複合的モデリングプロジェクトに関する検討
- ・ 超深地層研究所計画に関連する地質調査計画全般に関する検討
- ・ 物理探査に関する検討
- ・ 高透水性ゾーンに関する検討
- ・ 水理学的な観測に関する検討
- ・ 地質構造モデルの改良（更新）に関するサポート

5.1.1 可視化システム利用のサポートの目的並びに全体計画の確認

(1) 背景

超深地層研究所計画における、地表ならびに少数の試錐孔を主体とする調査段階における地質構造モデル及び水理地質構造モデルの構築においては、次の7つの観点から研究を勧めることが重要である。

- ① 地質及び地質構造としてモデル化すべき対象の抽出
- ② モデル構築に必要なデータの特定
- ③ モデル構築に求められる精度の特定
- ④ 必要な地下水流動評価手法の種類特定
- ⑤ 水理地質構造モデルで表現すべき特性の特定

- ⑥ 地下水流動解析の適切な境界条件の設定
- ⑦ データやモデルに内在する不確実性の特定

①、②、③、⑥、⑦については、様々なデータセットを用いた感度解析によって検討することができる。④、⑤は、モデル指向性の高い問題であり、例えば5.1.2項で記述する地下水流動解析の複合的モデリングプロジェクトを通じて検討する必要がある。現時点における地下水流動解析では、次の段階における地質及び水理地質調査に対して適切な予測を与えることが最も重要である。また、地下水流動解析の複合的モデリングプロジェクトからは、以下の事項について検討が進められることとなっている。

- ・ 地下水流速の3次元分布
- ・ 任意に設定されるソースポイントからの地下水の移行経路
- ・ 上記ソースポイントに対応する放出点
- ・ 上記の地下水流動に関する地下水移行時間

(2) コメント

前項で述べた全体計画における目標は、非常に一般的なものであり、特に水理地質構造の把握においては、地下水流動解析とこれに必要な水理地質構造のモデル構築が評価目的に依存して大きく変化するものであることを考えると、評価の目的を個別、具体的に設定することが重要である。

そこで、進められている超深地層研究所計画においては、地質構造及び水理地質構造の調査、モデル構築における一般的な技術の開発が重要であることを考えあわせると、モデル構築の方法論の検討が大きな課題であることは明らかである。系統的なモデル構築、すなわち地質環境を推定する方法論の構築が、構築されたモデルの正否を科学的に判断する数少ない方法であることを考えると、その重要性は十分に認識される必要がある。

ここで、現在実施が検討されている感度解析の成果をより確実なものとするためには、信頼性のあるデータセットの作成が必要である。すなわち、地下水流動解析のキャリブレーションに使用される主要なデータは深堀りの試錐孔で観測された水頭値であるが、このうちMIU-1及びMIU-2でパルス試験により測定された水頭値は揚水試験の終了後もなく実施されたものであり、したがって揚水試験により擾乱を受けた状態を観測している可能性が高いことを留意する必要がある。

なお、これら試錐孔での水頭については、現在、MPシステムにより、いくつかの区間で測定

が継続されている。これら試錐孔での水頭値は、揚水試験の擾乱から回復しつつあることを示しており、Horner Plots を用いて擾乱前の状態を予測することができる（MP システムにより測定された値は過渡的なものである）。この方法により MIU-2 の実測データから擾乱前の水頭値を推定した結果、これまでの値と 10 m 程度の相違が確認された（図 5.1 及び表 5.1）。

水頭値の算出は水理地質構造を理解し水理地質構造モデルを構築するために、非常に重要な情報であり、慎重な検討のもと実施される必要がある。図 5.1b は、試錐孔底部での地層が被圧されている、すなわち測定された水頭値は地形によって与えられた水頭を上回っていることを示している。これら値が異常であるかどうかを明らかにするために、水頭値と静水圧との比較を行った（動水勾配を図 5.1c に示した）。上部地層の水頭（実際には圧力）はわずかに静水圧以下である一方で、底部の水頭はわずかに静水圧を上回っている。どちらも大きな差ではなく、異常圧力（Neuzil の概念を用いると、静水圧が 1000 kPa を超える場合、1995）とはみなされない。

最後に図 5.1d に、MIU-2 試錐孔についてのこれまでの推定結果と今回の推定結果とを合わせて示す。

MIU-3 で観測された水頭値については、信頼性が高いと考えられるが、ここでも月吉断層を横切って MIU-2 を通過する試錐孔内の流れの影響を受けている可能性がある。したがってこの場合にも、キャリブレーションデータセットの選定には注意深い考察が必要であり、現段階では、DH 試錐孔からのデータの信頼性が十分あるものとみなしてデータを使用するか、MP システムの測定データに基づき擾乱を受ける以前の状態を推定するかのいずれかを選択する必要がある。

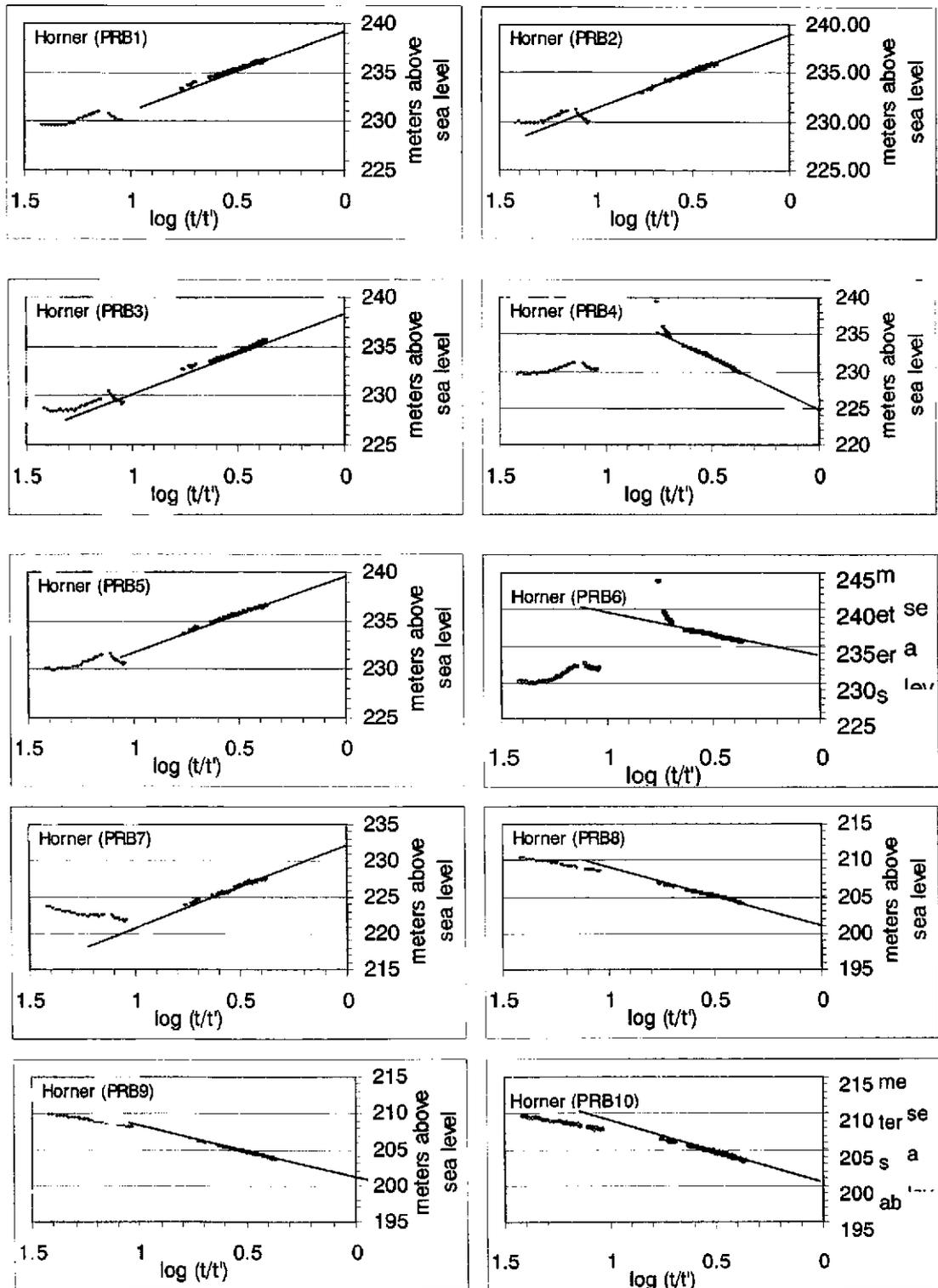


図 5.1a) MIU-2 の水頭分布 (所定の間隔ごとに Horner 法による推定)

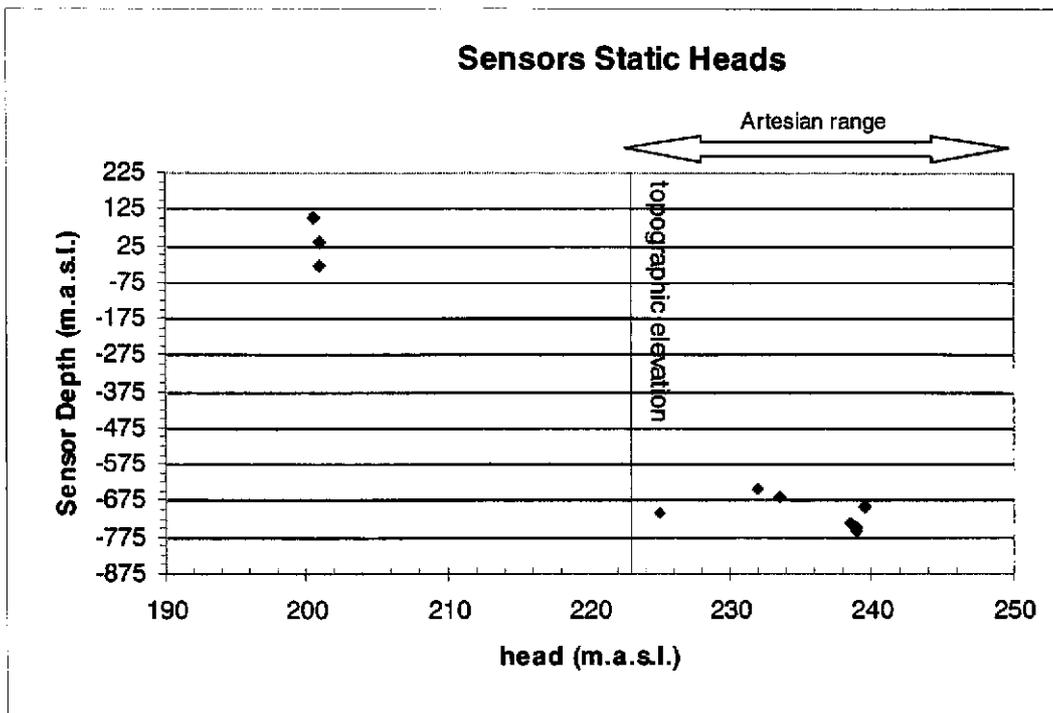


図 5.1b) MIU-2 の水頭分布

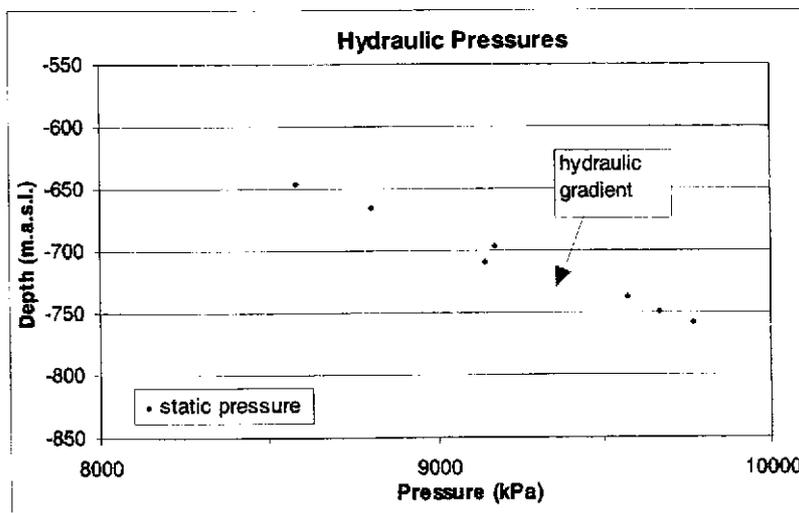
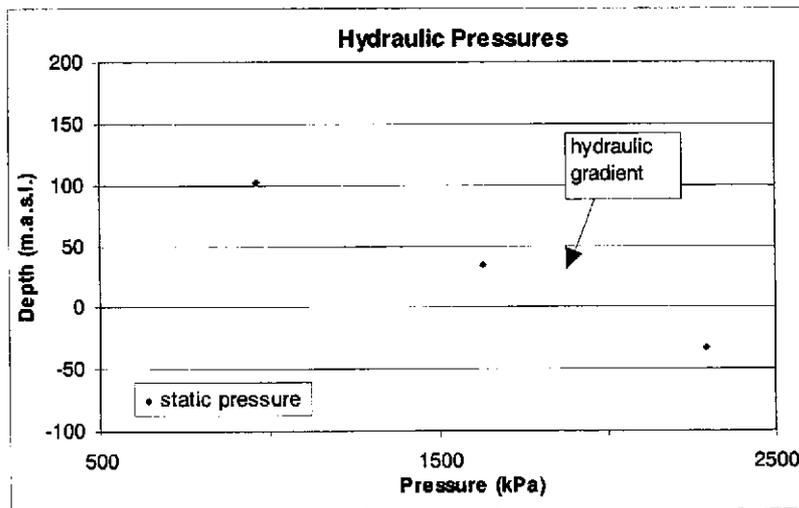
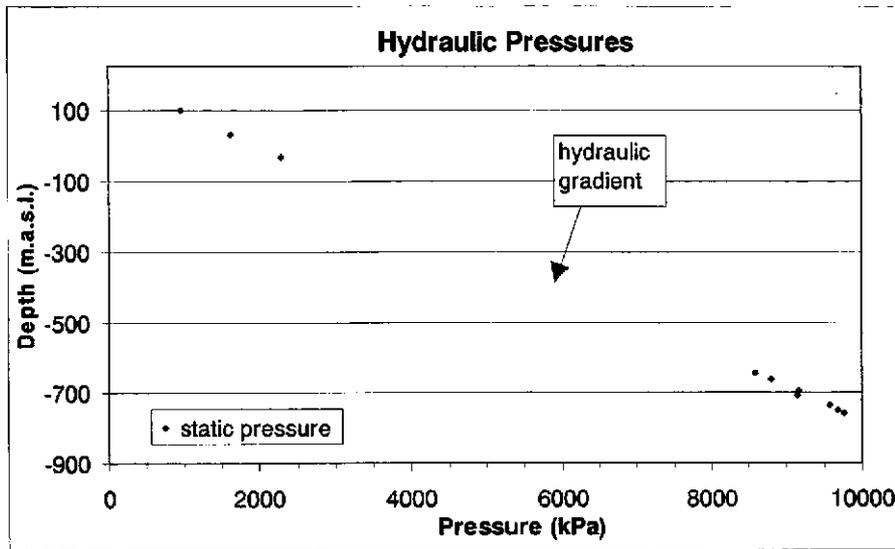


図 5.1c) MIU-2 の水頭分布

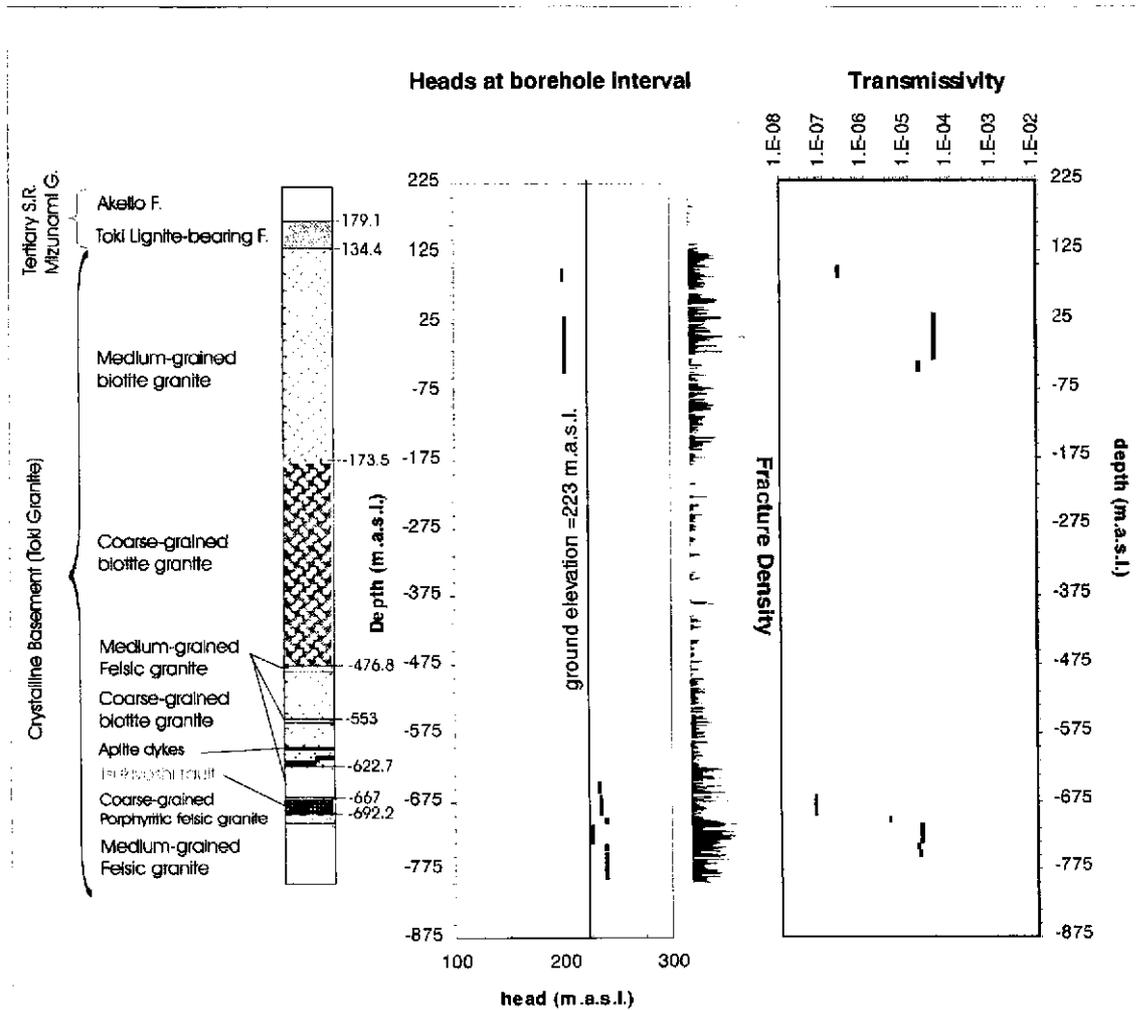


図 5.1d) MIU-2 の水頭分布

(地層、水頭推定値、亀裂密度、及びこれまでの方法で推定された透水量係数値の相関図)

表 5.1 MIU-2 に設置されたプローブの位置と Horner 法により推定した水頭値

センサ位置	試錐孔ゾーン No.	測定深度 (m)			間隔 (m)	測定ポート深度 (m)	パッカーの中間点深度 (m)	水頭測定値 (m.a.s.l.)
			-					
プローブ 10	23	121.4	-	138.2	16.8	121.6	120.1	200.5
プローブ 9	21	188.8	-	255.5	66.7	189.0	187.5	201
プローブ 8	20	256.4	-	272.2	15.8	256.6	255.1	201
プローブ 7	9	868.7	-	885.5	16.8	868.9	867.4	232
プローブ 6	7	887.9	-	917.3	29.4	888.2	886.6	233.5
プローブ 5	5	919.7	-	931.2	11.5	920.0	918.4	239.5
プローブ 4	4	932.1	-	959.9	27.8	932.3	930.8	225
プローブ 3	3	960.8	-	970.7	9.9	961.0	959.5	238.5
プローブ 2	2	971.6	-	979.9	8.3	971.8	970.3	239
プローブ 1	1	980.8	-	1012.0	31.2	981.0	979.5	239

5.1.2 地下水流動解析結果の不確実性評価に関する検討

(1) 比較演習で用いる計算コード

この複合的モデリングプロジェクトとは、サイトスケール領域 (4×6 km) を対象に、以下の5つの計算コードで、定常状態地下水流動解析を行い、比較するものである。

- ・ Frac-Affinity 及び TAGSAC (JNC)
- ・ TOUGH2 (Lawrence Berkeley National Laboratory)
- ・ 等価不均質連続体モデル (大成建設)
- ・ 決定論的亀裂ネットワークモデル (埼玉大学)
- ・ 亀裂連続モデル (有限要素ハイブリッド媒体モデル) (Sandia National Laboratory)

(2) データ設定

各計算コードでのモデル構築にあたっては、同じデータ設定を用いることとした。モデル構築に必要なデータは、以下の項目と考えている。

- ・ 地形：20 m メッシュの地勢図 (DTM)
- ・ 亀裂情報：ボアホールテレビ及び検層データ
- ・ 地質情報：地表図，コアマッピング，検層データ，地震データ
- ・ 水理データ：水理試験結果

- ・ 気象データ：降水量，蒸発量，河川流量
- ・ 地下水面：深度の浅い試錐孔により測定

次のデータはキャリブレーションに用いる。

- ・ 水頭分布：MP 測定結果及び水理試験結果

(3) モデル構築手法

本研究では、サイトスケールでのモデル構築に、Frac-Affinity 及び TAGSAC を用いる予定であるが、様々な代替ケースの構築を行うためには、作業性が Frac-Affinity において優れていることから Frac-Affinity を主な解析コードとして利用する可能性が高い。ただし、この場合においても地質構造モデルには、確率論的な特徴を導入せずに、岩盤マトリクス及び決定論的な亀裂によってモデルを構築することが適切であると考えられる。

なお、用いられる地質構造モデルに関して、以下の2つの重要な問題が残っている。

- ① 堆積岩を適切にモデル化するために必要な地層の詳細度
- ② 飽和または不飽和解析を用いたモデルの構築（地表面に必要な境界条件の設定方法にも関連する。）

堆積層はモデル厚さに比べて比較的薄い（モデル厚さが 3,140 m 以上であるのに対し、堆積層は 0 - 300 m である。）。このため堆積層が一つの領域としてモデル化される可能性がある。しかしながら、堆積層は土岐夾炭累層上部及び明世累層の低透水性の地層とそれらの基底部での高透水性の礫岩から構成されており、1つの領域として取り扱うには不均質性が高い。なお、試錐孔 MIU-1 及び MIU-2 での水頭モニタリング結果から、上部数 10 m で水頭が急激に低下していることがわかっている。なお、現在のところ、黒雲母花崗岩上部に存在すると思われる高透水部はモデル化しないことが適切であると考えられる。

(4) コメント

過去 30 年間に、東濃地域で集められた多量のデータが存在するが、今回の複合的モデリングプロジェクトの期間中に、これら全てのデータの検証を行うことは現実的ではない。したがって、データ設定方法にはかなりの注意が必要となる。すなわち、データの信頼性に十分留意してモデル化を進めることが必要である。例えば、水頭データ（キャリブレーションに使用）の信頼性については、前述した通りである。

当面の課題としては計算コードの比較演習に際して、演習者自身が水頭プロファイルを定義できるように実際のモニタリングデータを提供するか、もしくは解釈済みの水頭プロファイルを提供するかを決定することが重要である。実測データを受取った場合は、モデル構築手法を直接比較するよりは水理試験結果の解釈を中心に検討が進められることとなる。一方、解釈の済んだデータが提供される場合には、その信頼性や整合性が問題となる。すなわち、水理地質条件が異なる状態（非擾乱状態及び擾乱状態）の水頭プロファイルが集められていることに対して何らかの解答を用意することが求められる。また、最も信頼できると思われる最新の情報は、MP モニタリング情報であるが、試錐孔の全長をカバーしていない。

以上のことから、複合的モデリングプロジェクトにおいては MP によるデータを最も重要なデータとして位置付け、これに加えて MIU 試錐孔、AN 試錐孔、DH 試錐孔での実測データを提供することが適切であると考えられる。これにより、複合的モデリングプロジェクトにおける評価結果の信頼性が増大するとともに、ロバスト性の向上も期待される。また、揚水試験及びパルス試験から得られる情報は、試錐孔における水頭の傾向を示すものであることから、これら情報も提供されるべきである。しかしながら、これらデータにはかなりの不確実性が存在すること、水頭プロファイルの傾向をモデル化することが必要であり、測定値そのものをモデル化することは重要ではないことを同時に情報として提供する必要がある。

複合的モデリングプロジェクトのうちパーティクルトラッキングによる項目については、さらに検討を行う必要がある。パーティクルが全く移動しない、モデル外へ直接流出する、あるいは想定していた流出域以外の境界から外部へ流出する可能性を十分検討する必要がある。特に亀裂構造ネットワークを用いたモデルではソースポイントの相違によって、流路が大きく変化する可能性があることに留意しなければならない。

なお、モデル構築の中心は深部の水理地質条件を解析することであり、地下水面の移動を評価することではない。したがって地下水位に関する情報は、キャリブレーションデータセットよりも、モデル構築のためのデータとして、提供されることが適切であると考えられる。

最後にモデルの構築にあたっては本報告書でベースケースとして説明したモデルに基づいて、非常に簡単な概念モデルからモデル構築を始めることが望ましい。MIU-2 との比較によって実測値を解析結果の整合性を確認し、次の段階として様々な概念モデル（すなわち、堆積層の表示の改良）、様々なモデル構築手法（すなわち、不飽和モデルの構築）、及び様々なパラメータ表示に関する影響を試験することが重要である。

5.1.3 地質調査計画全般に関する検討

(1) MIU プロジェクトの現状

ここでは、まず MIU プロジェクトの現状を確認する。

- ・ 立坑掘削 (Shaft Sinking)：土岐花崗岩を通過する立坑掘削について工程を確認した。
- ・ MIU-3：MP システムは現在 MIU-3 に設置中であり、10 月または 11 月までに設置が完了すると想定される。
- ・ MIU-4：試錐孔 MIU-4 の掘削は、現在のところ遅れている。
- ・ MIU-5：MIU-5 は予算化されており、掘削位置としては、現在深試錐孔が掘削されていない MIU サイトの南部が考えられている。
- ・ 地下水面モニタリング：2～3 本の試錐孔が地下水面のモニタリングのために MIU サイトに掘削された。
- ・ 反射法地震探査：反射法地震探査が MIU サイトで行われた。
- ・ 長期揚水試験 (LPT)：実施が計画されている。詳しくは 4.3 節を参照のこと。

(2) コメント

現在のところ、MIU サイトの南に MIU-5 を設置する計画が進められているが MIU-5 の位置を決定する際には、まず MIU-5 においてどのような情報を取得するかについて優先順位を明確に示すことが重要である。

MIU-5 の位置に関する代替案は、立坑の近く（すなわち、MIU-2 の近く）に MIU-5 を掘削することである。その結果、試錐孔のクラスター (MIU-2 及び MIU-5) が形成され、数 10 m 離れた試錐孔間の補間と、約 100 m 離れた試錐孔間の補間とを比較できるようになる。実際に、立坑の掘削に先立って、不慮の地質状態によって立坑建設に悪影響がないことを保証するためにも、しばしば立坑位置に試錐孔が掘削される。

これまでの例を見ても、サイト調査期間中試錐孔クラスターが掘削される（例えば、El Berrocal 試錐孔、図 5.2、Sellafield RCF, RCM, PRZ 試錐孔、図 5.3）。この様な試錐孔クラスターによって、地質環境が 100m といった大きな距離に対して補間を行った場合よりも不均質であることが確認されることがある。

また、MIU サイトでの調査によって回答を用意すべき大きな問題の一つは、“どれだけデータを収集すれば十分なデータが集められたと言えるのか？” という問題である。MIU-5 が MIU-2

の近くに掘削されれば、1本の試錐孔のみから予測された立坑位置の地質や水理地質特性の予測結果と2本の試錐孔からの予測結果との比較が可能である。この様な比較により、前述の問題に対処するにあたって、有用な情報が少なからず提供されることが期待される。

なお、MIUサイトの南側については試錐孔 AN-1（1,000 m 深さ）が既に存在しており、これの活用により例えば、長期揚水試験や立坑掘削時の MIU サイト南側の水理地質学的影響を測定でき可能性にも配慮すべきである。

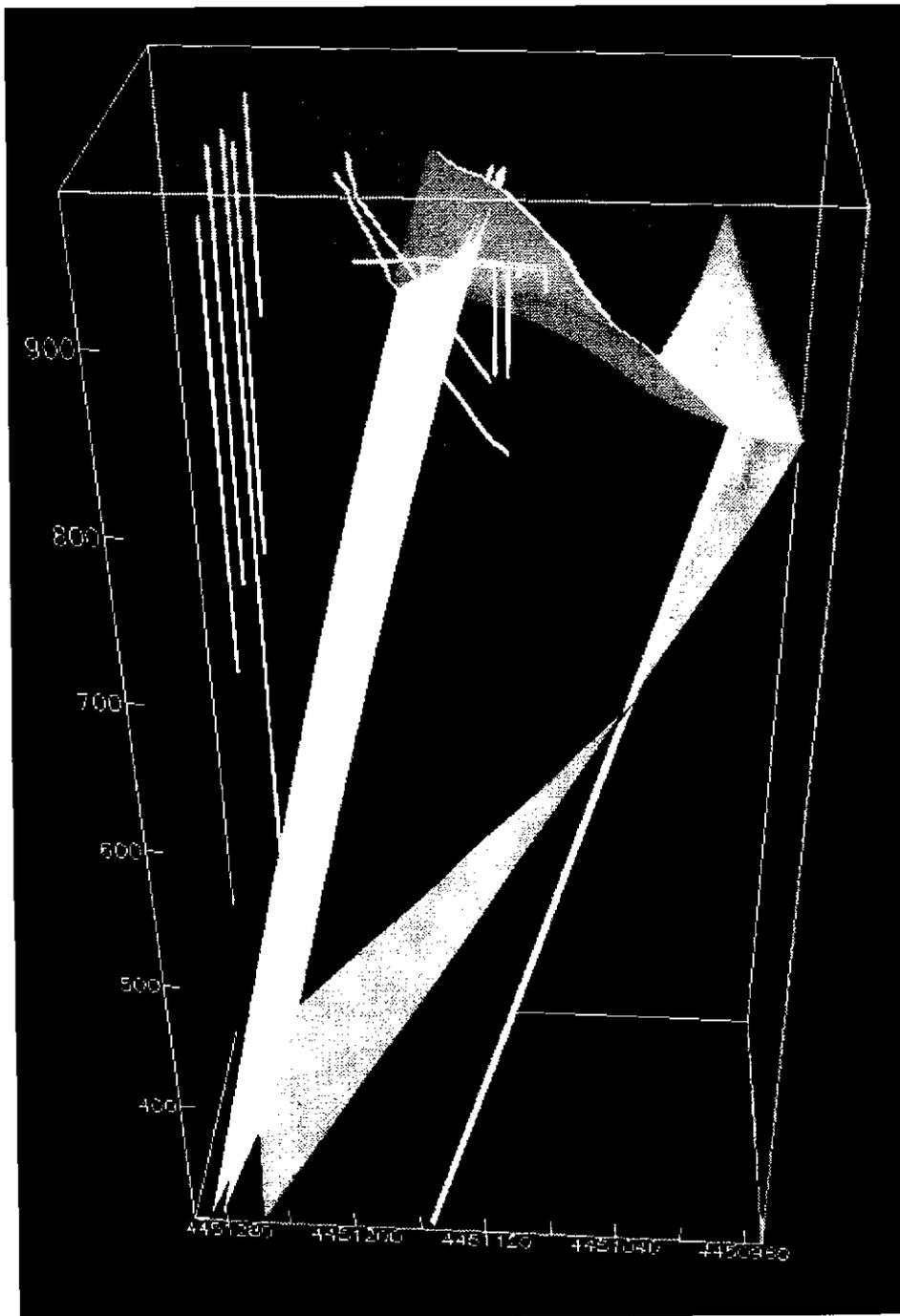


図 5.2 El Berrocal における試錐孔の配置

注：多様なスケールでの地質データを収集するため、クラスター状に試錐孔が掘削された。

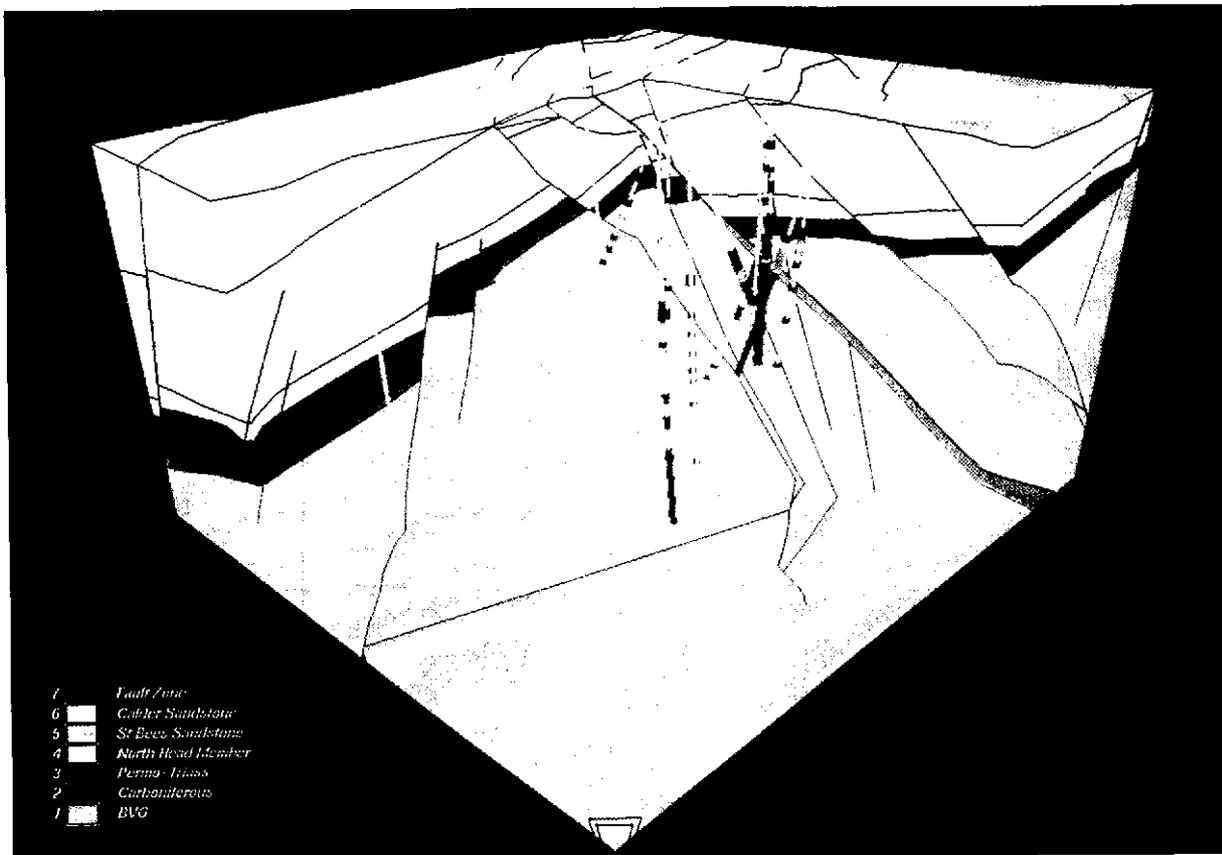


図 5.3 Sellafield におけるクラスター状の試錐孔の配置例
 注：6本の試錐孔が立坑の数 10 m 以内に掘削されている。

5.1.4 物理探査に関する検討

(1) 調査方法及び調査結果

MIU サイト領域及び東濃領域では、多くの地球物理学的調査が実施されている。これには以下の調査を含んでいる。

- ・ 反射法地震探査：2本の測線に沿って探査が行われている、1本は北-南方向に MIU サイトの谷部を通過し、もう1本は東-西方向である。反射法地震探査は、引っ張り方向に不整合面をオフセットしている幾つかの断層の推定に用いられていた。
- ・ VSP 法探査：多くのオフセット VSP が、MIU サイト試錐孔周辺で使用された。

- ・ 広域的な物理探査：空中探査（空中電磁探査、空中磁気探査、空中放射能探査ならびに VLF）及び地上電磁探査が行われている。強度の γ 線異常及び抵抗異常は、土岐花崗岩の露頭に一致する。地上電磁探査データが、不整合面の深度分布図の作成に用いられた。

(2) コメント

引っ張り断層が不整合面をオフセットしているとの解釈は、月吉断層を収縮構造と解釈することと矛盾している。引っ張り断層の解釈は、東濃地域のテクトニクスの時間的変化に関する概念モデルによって説明すべきである。例えば、断層は月吉断層の反転によって収縮後の引っ張り事象に関連している可能性がある。もし現実的な概念モデルが構築不可能ならば、断層の移動が実際に引っ張り系であるかを確認するための、地震探査の測線の見直しを検討すべきである。

地上電磁探査報によるデータは、不整合面の深度を決める際に有効であると思われる。したがって、この情報は、地質環境調査の初期のフェーズで特に有効な技術である可能性がある。ただし、このような調査結果については EarthVision において、試錐孔からのデータと比較することによりデータの校正を行うことが必要である。

5.1.5 高透水性ゾーンに関する検討

(1) WCFZ 特性の進展

土岐花崗岩の上部、高透水性を有する黒雲母の岩相では、3つの亀裂セット、すなわち2つの鉛直方向の亀裂群と1つのほぼ水平な亀裂群によって解釈されると考えられている。鉛直方向に発達した亀裂群は冷却節理であると思われる。約400 m下に生じる低角度の亀裂は、応力解放とWCFZsに関連していると考えられる。WCFZsとの交差部は高透水性であると考えられておりMIU試錐孔コア検層は1 mあたり約10個の亀裂が記録されている。

中性子検層、密度検層、及びキャリパー検層の結果を統合的に解析した結果、WCFZsは存在するものと考えられている。WCFZsは高角度の亀裂帯が低角度の亀裂帯と交差している場所に生じると考えられる。WCFZsの水理地質学的な重要性は、試錐孔中の温度や流体検層、及び掘削中の流体損失を記録することで考査された。

将来的には、WCFZsの3次元幾何構造を検討するために、MIU試錐孔間でトモグラフィーを行うことも計画されている。ただし、このためには、試錐孔に設置されたMPシステムを一旦

撤去することが必要となる。

(2) コメント

MP モニタリングシステムを撤去する場合には、MIU サイトでの水理地質学的条件が擾乱を受けることから、これから元の状態にもどるまで MIU 試錐孔での観測を延期するかもしれない。最近行われた Sellafield にある深堀りの試錐孔からの Westbay MP システムの撤去では、撤去の作業中に多くのパッカーが破損する結果となっている。

したがって、トモグラフィーの実施については、その重要性を考慮することが必要である。すなわちトモグラフィーによって中断されることとなる継続的な水理地質情報の収集の重要性と試錐孔からの MP システム撤去作業中に MP システムが破損する可能性、さらにトモグラフィーには水理地質構造モデルを決定する大きな依り所を期待することは多くの場合は困難であることを考慮して、今後の研究計画を策定することが重要である。

地球物理学的方法によって確認された WCFZs と考えられている亀裂帯の水理地質学的な徴候を系統的に表示することを推奨する。このためには、試錐孔総括シートに流体損失欄を加えることが含まれる。

5.1.6 水理学的な観測に関する検討

(1) 孔間水理試験

試錐孔 MIU-2 と試錐孔 MIU-3 との孔間水理試験は、2000 年 2 月に行われた。その目的は以下の通りであった。

- ・ 月吉断層周辺の連続性と透水量係数を把握すること。
- ・ 単孔試験から求められる透水量係数と干渉試験から求められる透水量係数とを比較すること。
- ・ 月吉断層を横切る平面の透水量係数と平面内の透水量係数との相違を調査すること。

試験方法は次の通りであった。

- ① 揚水流量を決めるための予備的な揚水試験。
- ② -779~-804 mbgl (metres below ground level) 区間からの揚水 (4 日間、120 l/hr)。

- ③ 注入試験（シヌソイダル試験）。
- ④ 試錐孔全体から揚水（4日間、480 l/hr）。
- ⑤ 回復状況の測定。

この試験では、下盤側破碎帯に設置された5つのプローブ、断層に設置された1つのプローブ、上盤側破碎帯に設置された1つのプローブ、及び試錐孔の上部300 mの区間に設置された3つのプローブによりモニタリングを行った。なお、シヌソイダル試験中、データロガーは記録を取っていなかったことから、この間の試験結果は不明である。また、上盤側のプローブの結果と下盤側のプローブの結果とが類似していることから、上盤側にあるセクションを分離しているパッカーが正しく膨張しておらず、漏水が生じていた可能性が示唆されている。

この干渉試験に関する透水量係数の推定は、ヤコブの直線法（Jacob Straight-Line Method）を用いて行われた。試験から得られた最も重要な結論は、下盤側破碎帯は多孔質媒体の性質を示していると言う点であろう。また、計算された透水量係数は、単孔式試験と同じ結果を示しており、透水量係数の算出法としてのこの方法の適合性が実証された。

(2) 長期揚水試験計画

MIU サイトにおける長期揚水試験（LPT）の実施が計画しており、近く、試験計画に関して、Nagra とのミーティングが開催される。長期揚水試験は2001年後半に行われる予定で、3ヶ月間実行する計画である。

LPTの目的は次の通りである。

- ・ MIU サイトスケールで観測された WCFZs の連結性を理解すること。
- ・ 地下水流動シミュレーションとの比較のためのデータを導出すること。

現在のところ、全試錐孔、各パッカー区間月吉断層の上部ならびに同じく月吉断層の下部のそれぞれからの揚水を行うことが計画されている。

(3) コメント

パッカーの設置位置を再度確認するとともに、パッカー圧力を定期的にチェックすることが重要である。

長期揚水試験については正確な計画が立案されていない段階であることから、以下のコメン

トは計画や試験構想において役立つ可能性のある提案と見なされる。

現在、水頭データは妥当な計測器によって計画的に収集されているのに対し、透水係数データの信頼性は高くない。MIU-2 試錐孔には大きな MP の空白区間が存在し、この区間では MP からの情報が存在しない。したがって、まず試錐孔中間部のデータを収集すること、これによりサイトの水理地質特性を正確に知ることが重要である。パッカー区間をあまり細分化する必要はなく、100 m 間隔で十分であると考えられる。以上の点について今後の試錐孔での計測事項として検討されることが望まれる。

試験期間に関しては、今後とも水理地質構造モデルの改良がさらに進められることを前提に、まず、試錐孔の全区間を用いた試験を実施することを推奨する。すなわち、単孔式試験をまず行い、ついで干渉試験を実施することが望まれる。パッカーで区切られたある区間を対象とした単孔水理試験は、揚水試験が実施に関して透水性の部分を識別するのに役立つ。試錐孔近くの領域がもたらす影響を正確に識別するために、様々な揚水速度や様々な持続時間で試験を行うことが望まれる。

孔間水理試験はシステムに強い擾乱を与えるので、試験を実施する際には、完全に計測機器を準備した試錐孔を予め用意することが重要である。試験数については、単孔水理試験の結果と試験計画の制限事項（主に予算）から決まる。これら試験の目的は多様である。一般に、水理地質特性に固有の特徴、例えば地下水流動場の幾何構造、地層中での不均質性の存在、既知の擾乱範囲等の特徴を把握することが可能なように試験計画が組み立てられ、試験結果により予測に用いられたモデルに改良が加えられることとなる。

5.1.7 地質構造モデルの改良（更新）に関するサポート

(1) モデルの構築

これまで、MIU サイト及びサイトスケールの地質構造モデルが構築されており、そこでは、最も細密なスケールでモデルの構築が試みられている。MIU サイトモデルについては2つのモデルが構築されており、そのうち1つはMIU 試錐孔からのデータのみに基づいて、もう1つはウラン探鉱データも活用したモデルとなっている。これらモデルは、MIU-4 の掘削に関する地質特性の予測に用いられている。

(2) コメント

これらモデルにおける瀬戸層群のモデル化では、瀬戸層群底面を平面としてモデル化するこ

とにより改良される可能性がある。このようなモデルの変更により試錐孔情報とモデルがより良い一致を見るようになる。また明世累層上部は地質の不整合面（瀬戸層群底面）と現在の堆積表面（層位上の沖積層）の両者に対応することから、モデル化の対象としては不適切な層位であると思われる。

次のステップとしては MIU-4 における各地層あるいは岩体の境界面の深度を、系統的かつ一貫した方法で予測することが重要である。これには、予測方法の開発や予測プロトコルの確立が含まれる。

また、試錐孔で測定あるいは観測された諸データを EarthVision によって地質構造モデルとともに可視化することが望まれる。例えば、試錐孔位置における地層を色付きの棒により可視化する計算された水頭値を表示する、あるいは地球化学の評価結果を表示することは有益であると考えられる。さらに、EarthVision は、構築したモデルを Windows NT で動作する PC 上で閲覧するモジュールを作成する機能があることから、これを積極的に活用し、例えば多機関との情報の共有に EarthVision による可視化情報を活用することが望まれる。

5.2 第2回サポート

第2回サポートは、平成13年2月19日（月）から2月22日（木）に実施した。主な作業項目は次の通りである。

- ・ Frac-Affinity ver 2.1 のインストール
- ・ 地下環境特性調査に関する検討
- ・ 地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの構築

以下に、第2回サポートの主要な成果をとりまとめる。

5.2.1 Frac-Affinity ver 2.1 のインストールと動作確認

Frac-Affinity ver2.1 をインストールするとともに本報告書に記載した各種の試解析の実施を通じて動作確認を行った。これには、亀裂交差部の透水性設定機能の追加、亀裂分布推定機能の追加、亀裂情報の出力機能の導入、透水異方性を考慮するための機能の導入、不均質透水係数場の設定機能の追加が含まれる。さらに、Frac-Affinity ver2.1 の開発にあたっては、以下の項目についても改良を加えたことからこれらについてもその概要について説明した。

- ・ 地質構造モデルのエクスポート機能の改良
- ・ ハイブリッドモデルの改良
- ・ ソルバーの改良
- ・ 各種条件設定の時間変化に関する改良
- ・ 出力情報の追加
- ・ Frac-Affinity インターフェイスの改良

なお、Frac-Affinity ver2.1 の開発に関する理論的背景およびユーザーマニュアルの概要は、それぞれ2章と3章を参照のこと。

5.2.2 地質環境特性調査に関する状況の確認

超深地層研究所計画に関連する研究活動について、最新の状況を確認した。具体的には超深地層研究所計画に対する新たな予定表が作成されたこと、MP システムが MIU-3 に設置されたこと、MIU-4 において試錐孔の掘削が遅れており（488mabh）でドリルビットがスタックして

いることを¹⁾確認した。また、MIU-5の掘削が長期揚水試験(LPT)後に行われる可能性が示された。さらに立坑掘削に関するモニタリングのために、浅い試錐孔を利用する可能性について検討した。このため試錐孔は、MIUサイトから短距離、中距離、長距離に存在している。それぞれ次のように活用することが可能である。

- ・ MIUサイト中の試錐孔は、短距離での応答をモニタリングするために用いることが可能である(<500m)。
- ・ 東濃鉦山周辺の試錐孔は、中距離での応答をモニタリングするために用いることが可能である(500m-2km)。
- ・ 広域試錐孔(DH試錐孔)は、長距離での応答をモニタリングするために用いることが可能である(>2km)。

なお、MIU-4での水理試験の目的は、風化花崗岩を掘削する前の段階において、土岐夾炭累層の基底礫部に関する試験を行うことであることが確認された。

5.2.3 地質環境特性調査に関する検討

第1回サポートでの検討も参考に以下の点について、議論した結果として以下の点を確認した。

- ・ 地質環境の予測に関するプロトコル：MIU-4の掘削前においては不整合面の位置を保守的に予測することでモデル上の対応を図っていた。しかしながら、立坑の掘削に際しては事前に何を予測するべきか、また予測の結果の妥当性の判断に注意深く考察することが重要である。
- ・ MIU-5の位置：MIU-5を、MIUサイトの南側に掘削することにより、この領域における水理地質学的知見ならびに地球化学的知見の収集が図られる予定となっている。立坑の掘削影響をモニタリングするために、MIU-5を立坑位置に掘削することは現在のところ考えられていない。しかしながら、提案されている立坑位置に近接してMIU-5を配置することで、現在よりも小さいスケールでの岩盤の不均質性の評価が可能となり、様々なスケールの地質情報がある場合とない場合の予測を対比することが可能となる。MIU-5の位置の選定にあたってはこのことの重要性を再度吟味することが重要であると考えられる。
- ・ 単純なモデルの構築：各種のモデル構築においては、まず単純なモデルの構築からス

¹⁾ Nirexは、セラフィールドにある試錐孔Borehole1に関して同じ問題を抱えていることが指摘される。

タートすることが重要であることを確認した。ここで、単純なモデルとはモデル構築者がモデル化しようとしている最も重要な水理地質学的特徴のみを取り入れたものである。例えば基本ケースモデル（4.2.1 項）では、試錐孔 MIU-2 における水頭プロフィールの予測に重点を置いたので、月吉断層上盤側の変質帯(WCFZs)をモデル化した。下盤側の破碎帯は除外することとした。

5.2.4 地質環境データ解析・可視化システムを用いた基本ケース水理地質モデルの構築

地質環境データ解析・可視化システムを用いたサイトスケール領域（4×6km）のモデルに基づき検討を行った（4.2 節）。具体的には、このモデル構築によって、モデル構築の動機となっている幾つかの疑問を検討するために地質環境データ解析・可視化システムをどのように使用できるかを示した。ここでは、「地質構造把握のための地質構造モデル（geological interpretation model）」と「地下水流動解析のための地質構造モデル（geological framework model）」を以下のように分類し検討を行った。なお、検討の結果については 4.2.3 項に示した。

- ・ 「地質構造把握のための地質構造モデル（geological interpretation model）」は、3次元で地質構造に関する理解を詳細に表現した地質構造モデルである。
- ・ 「地下水流動解析のための地質構造モデル（geological framework model）」は、水理地質構造モデルを構築するための3次元地質構造モデルである。つまり、このモデルは EarthVision を用いて構築されるが、現状の地質構造に関する理解を正しく反映した地質構造モデルではなく水理地質構造モデルの枠組みを可視化したものである。

5.2.5 複合的モデリングプロジェクトの運営に関する検討

複合的モデリングプロジェクトの運営については、まず一定の様式で参加者が資料を作成する重要性を再確認し、その1つの案として図 5.4 の構造を検討した。このための具体的な方法としては、例えば報告書の導入部にあたる部分を共通なものとしてあらかじめ作成し、これを参加者に配布することが考えられる。しかしながら、複合的モデリングプロジェクトは概に参加者が個別作業を開始しており、このようなアプローチを取ることは現実的ではない。したがって、ここでは代替案としてレポートのフォーマットと参加者に共有されるべき目次構成を伝達して報告書の作成を依頼することが重要である。今後（例えば立坑の掘削時）とも同様な比較のためのプロジェクトが実施される場合にはここでの議論を参考に予測の対象（指標）や結果の提示方法を予め決定しておくことが重要である。

これに加えて、水理地質構造モデル構築の複合的モデリングプロジェクトに関する資料として幾つかの文書を作成することが必要である（図 5.4）。その他の必要なレポートとは、データ

ベースの概要、結果の統合に関する資料である。データベースの概要は例えば、レポート作成の負担を軽くするため、モデル構築レポートの付録として添付することが考えられる。モデル構築結果の統合には、水理地質構造モデル構築の複合的モデリングプロジェクトで使用された計算コードによる解析結果の妥当性の判断と今回の計算条件における相対的な順位付けに関する情報が含まれるべきである。

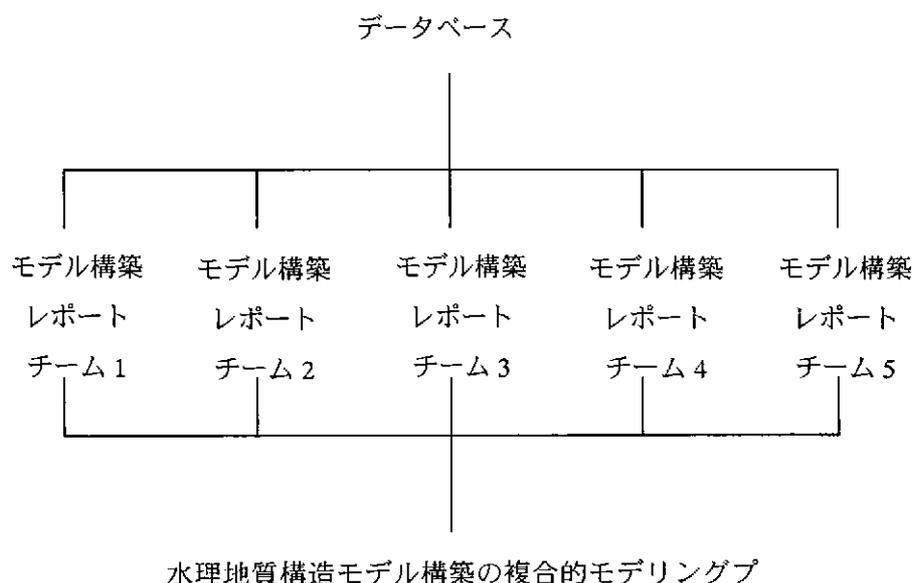


図 5.4 水理地質構造モデル構築に関する複合的モデリングプロジェクトにおけるレポートの体系(案)
注：チーム数は実際のチーム数ではない。データベースレポートは、モデル構築レポートおよび統合レポートと統合されることもありうる。

5.2.6 モデルのレビュー

地質環境データ解析・可視化システムを用いたモデル構築のレビューおよび新たなモデルおよび解釈を明らかにした。行った作業は以下の通りである。

- ・ 最新の EarthVision (ver5.1)のインストール
- ・ サイトスケール領域の地質構造モデルについての再検討。水理地質構造モデル構築の複合的モデリングプロジェクトのための地質構造モデルの構築状況を確認した。5つの断層と付随する破砕帯を含んだ複雑なモデルが構築されている。較正されたデータセットに対するこれら水理学的領域の影響を評価することと、またこのために、これらの領域のうち1つを順に抽出し、抽出されたもののみをモデル化した Frac-Affinityモデルを順に構築することを提案した。

- ・ サイトスケールモデルを修正した。EarthVision 上に構築されたモデルに対して以下の修正を行った。
 - 地下水面は東濃鉦山の水位低下を反映するように修正した。この修正のために次のような2つの方法が考えられた。
 - 要素分割の修正。EarthVision で使用可能な Correction Gridding 法を用いて、測定値で地下水面計算値を修正する。
 - マニュアルデータ入力。東濃鉦山近くでの地下水面標高の計算値を除去し、これらデータを測定値と交換する。
 - 上部破碎帯基底部 (Base Upper Fracture Zone) をスムージングする方法について検討し、比較を行った。この面をスムージングするために次のような2つの方法が考えられた。
 - グラフィックエディターでコンターを編集し、要素を再計算する。
 - グラフィックエディターで利用可能な自動スムージングアルゴリズムを利用する。
- ・ サイトスケールのモデル構築のための概念モデルについて検討し、決定論的亀裂で境界を定義する薄い領域 (風化花崗岩および断層破碎帯) を有する新しいモデルを構築した。モデルの構成は以下の通りである。
 - 土岐花崗岩
 - 上部破碎帯 (堆積層の厚さに依存した厚さでモデル化)
 - 風化花崗岩
 - 堆積層
 - 月吉断層
 - 破碎帯上盤側
 - 破碎帯下盤側
 - 東濃鉦山
- ・ 新しい地下水流動解析のための地質構造モデルをエクスポートし、Frac-Affinity の入力ファイルを作成した。
- ・ 水頭予測に関する東濃鉦山の影響を、いくつかの代替モデルと要素分割の最適化によって検討した。

5.2.7 月吉断層上盤側の断層に関する検討

月吉断層上盤側に広く存在する可能性が指摘されている幾つかの断層についてその存在を示唆するデータと断層の向きについて検討した。さらに、MIU 試錐孔での応力測定の結果を確認した。これを受け以下のような検討が行われた。

- ・ 月吉断層周辺での断層に関する小さなスケールの観測結果を広域の文脈で解釈することが必要である。
- ・ 地質環境特性調査において、コア観察に基づいた3次元の亀裂構造の理解を図示化し、あるいはこれを概念モデル化しさらにこれに基づいて月吉断層の3次元構造に対する概念モデルを構築することが必要である（図 5.5）。このモデルは、以降のモデリング作業、例えば水理地質構造モデルを構築する際においても断層の幾何構造に関する概念的表現を定義する際に役立つものである。

ここで詳細な概念モデルの構築は、セラフィールドプロジェクトにおいても批判にさらされていた。しかしながら、この様な批判はプロセスモデルに対して主になされるべきである。すなわちプロセスモデル（水理地質または水理化学モデル構築のような）は動的なプロセスを調査するモデルであるのに対して、地質構造モデルは地質の3次元構造を調査するものであり、したがって、詳細な概念的描写が、サイト特性調査中に進展した説明を伝達するために用意されるべきである。

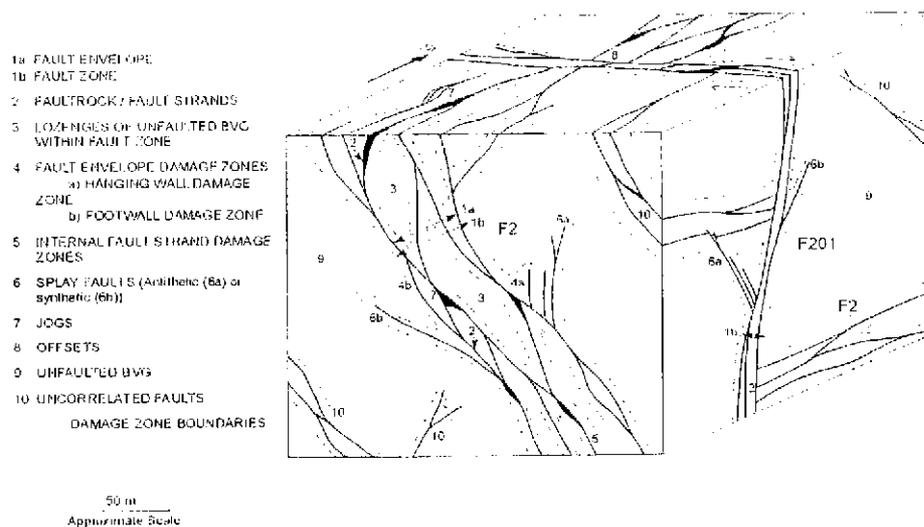


図 5.5 UK セラフィールドサイトにおける Nirex の調査期間中に構築された断層 F2 および付随構造に対する 3 次元断層構造のスケッチ [Nirex, 1997]

5.2.8 その他の検討

月吉断層のマッピングを検討し、マッピングされた断層地表面の痕跡は、およそ 30 年前の亜炭探査中に行われた堆積層傾斜解析の結果であることを確認した。

5.2.9 Frac-Affinity ver2.1 における揚水試験のモデル化の可能性に関する検討

また、試錐孔モデルを導入することによる、Frac-Affinity を用いた揚水試験のモデル化の可能性について検討を行い、揚水試験のモデル化において、岩盤中と試錐孔に沿っての透水係数がかなり異なる場合の地下水流動解の収束が問題となる可能性があることを確認した。

6. まとめ

本年度の作業では、以下の事項を中心にコードを高度化し、超深地層研究所計画に関連したモデル構築／地下水流動解析への本システムの適用性を高めた。

- ・ 透水異方性を考慮するための機能の導入
- ・ 亀裂分布推定機能の追加
- ・ 亀裂情報の出力機能の導入
- ・ 亀裂交差部の透水性設定機能の追加
- ・ 不均質透水係数場の設定機能の追加

また、これらの機能を確認するための試解析として、個別の機能を確認するための比較的単純な解析と、超深地層研究所計画用地を中心とした場（サイトスケール：約 4km×6km）を対象に、追加された機能を総合的に取り入れた飽和定常地下水流動解析を行い、解析コードの適用性を確認するとともに、サイトスケールの定常地下水流動解析として一つのモデル計算を提供した。加えて、揚水試験の模擬解析について幾つかの試解析を行い、解析の方向性を提示した。

さらに、本システム利用のサポートとして、東濃地科学センターにおける 2 回の実地支援とインターネットを主体としたリモート支援を行った。この中で、本システムの活用を通じて地質／水理地質調査から地質構造／水理地質構造モデル化、さらに地下水流動解析の実施から各種調査へのフィードバックに至る一連の作業を効果的に進めるための作業を支援し、さらにこれら作業の方法論の構築について助言した。

これらの作業から、長期揚水試験の精緻なモデル化には改善すべき幾つかの事項が残っているものの、本システムの活用により各種のモデル化及び解析を効果的に進めるための体制を整えることができた。超深地層研究所計画を含む今後の地層科学研究に、本システムが活用されることが望まれる。

参考文献

Batu, V. (1998) Aquifer hydraulics. John Wiley and sons, 727 p, New York.

Byrne G. D. and A.C. Hindmarsh, "A Polyalgorithm for the Numerical Solution of Differential-Algebraic Equations", ACM Trans. Math. Software 1, pp71-96, 1975.

Carbonell, J.A, A. Pérez-Paricio and J. Carrera (1997) MariaJ_IV A code for automatic calibration of pumping test. Analytical and numerical models for 2D and 3Dmedia.. User's guide. ETSECCPB, UPC Barcelona, 102 pp.

Carrera, J.; L. Vives; P. Tume; M. Saaltink; G. Galarza; J. Guimerà and M. Medina (1996) Interpretation of field tests in low permeability fractured media. Recent experiences. in J. Gottlieb and P. Duchateau (eds) Parameter identification and inverse problems in hydrology, geology and ecology. Water Sci. and Tech. Libr. (23) 53-70 Kluwer Ac. Pub., Dordrecht. ISBN 0-7923-4089-2.

Dynamic Graphics, 1997. EarthVision User Guide, Alameda, California, U.S.

de Marsily G., Quantitative Hydrogeology, Academic Press, 1986.

Earlougher, R.C. (1977) Advances in well test analysis. Society of petroleum engineers, monograph vol. 5, Henry L. Doherty series, 264 p.

Hestir, K. and J.C.S. Long, Analytical expressions for the permeability of random two-dimensional Poisson fractured networks based on regular lattice percolation and equivalent media theories. J. Geophys. Res. 95 (B13) 21565-21581, 1990.

Ho, C. and M.L. Wilson (1999) Calculation of discrete fracture flow paths in dual-continuum models. Dynamics of fluids in fractured rocks, concepts and recent advances, in honor of Paul a. Witherspoon, February 10-12, Berkeley, p.194-197

Kull, H., W. Brewitz and K. Klarr (1991) Grimsel Test Site: Ventilation test in-situ experiment for determination of permeability in crystalline rock. NTB 91-02E, NAGRA Technical report, Wettingen, Switzerland, 120p.

Martínez-landa, L., J. Carrera, J. Guimerà, E. Vázquez-Suñé, L. Vives, P. Meier and T. Fiertz (1999) Methodology for the hydraulic characterisation of a granitic block, MODEL CARE'99, Zurich, Switzerland.

Meier, P., J. Carrera and X. Sánchez-Vila (1998) An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous formations. *Water Resources Research*, 34 (5) 1011-1025.

Moench, A. And P.A. Hsieh (1985) Analysis of slug test in wells with a finite thickness skin . *International Congress on the Hydrogeology of Rocks of Low Permeability*, Tucson, Arizona, USA IAH Memories, 17: 17-29.

Neuzil, C.E. (1986) Groundwater Flow in Low-Permeability Environments. *Water Resources Research*, vol. 22 no. 8, pp.1163-1195

Neuzil, C.E. (1993) Low Fluid Pressure Within the Pierre Shale: A Transient Response to Erosion. *Water Resource Research*, vol. 29 no. 7, pp. 2007-2020

Neuzil, C.E. (1995) Abnormal pressures as hydrodynamic phenomena. *American Journal of Science*, vol 295, 742-786

Nirex, 1997. *Sellafield Geological and Hydrogeological Investigations. The Hydrogeology of the Sellafield Area: 1997 Update.* Nirex Science Report No. S/97/008.

Pan L. and P. Wierenga, "*A transformed pressure head-based approach to solve Richards' equation for variably saturated soils*", *Water Resour. Res.*, 31(4), 925-931, 1995.

Pan L. and P. Wierenga, "*Improving numerical modelling of two-dimensional water flow in variably saturated, heterogeneous porous media*", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61(2), 335-346, 1997.

Pickens, J.F., G.E. Grisak, J.D. Davis, D.W. Belanger and M. Thury (1987) Analysis and interpretation of borehole hydraulic tests in deep boreholes: Principles, model development and applications. *Water Resources Research*, 23 (7) 1341-1375

Press W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, *Numerical Recipes – The Art of*

Scientific Computing, Cambridge University Press, 1992.

Ptak, T., and G. Teusch (1994) A comparison of investigation methods for the prediction of flow and transport in highly heterogeneous formations. in Dracos, T. and F. Stauffer (eds) Transport and reactive processes in aquifers, A.A. Balkema, Brookfield, Vt.

Renthall, R. (ed) (1963) Methods for determining permeability, transmissibility and drawdown. Ground water well hydraulics, USGS water supply paper 1536-I, 341 p. Washington.

Schelkes, K., H. Klinge, F. Schildknecht and J.R. Weber (1998) Water conducting features in a geologic system consisting of a salt dome and overlying unconsolidated sediments. Geotrap project, Workshop proceedings Barcelona, Spain, 10-12 June, NEA, p.145-159

van Everdingen, A.F. (1953) The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. Transactions of the American Institute of Mining, metallurgy and petroleum engineering, 198:171-176.

van Genuchten M., "*A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*", Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898, 1980.

Wenzell, L.K. (1936) The Thiem method for determining permeability in water bearing materials and its application to the determination of specific yield, results of investigations in the Platte River Valley, Nebr.: . USGS Water supply paper, 679-A, 57 p. Washington.

Yanagizawa, K., H. Imai, K. Furuya and M. Nishigaki (1995) The effects of a shaft excavation experiment on the hydrology of the Tono research field, Japan. Journal of Hydrology, 171, 165-190.

付録 1

付録 1 : DYLAN タイムステッピングソルバーで用いられているアルゴリズム

DYLAN は、常微分方程式 (ODEs) 系及び代数方程式系を解くための C++パッケージである。DYLAN はこれまで作成されてきた多くの計算コードで用いられている。Byrne 及び Hindmarsh の解析手法をベースにしているが、DYLAN で用いられているアルゴリズムは、詳細ににおいて相違がある。付録 1 は、用いられているタイムステッピングアルゴリズムの詳細を報告するものである。

1. はじめに

DYLAN は、これまで開発された様々なアプリケーションで用いられてきた、C++サブルーチンを収集したものである。本付録ではこれらアルゴリズムを詳しく説明する。

2. 方程式

DYLAN は連立方程式及び連立微分方程式を解くことを対象としている。差分もしくは有限要素法を用いて偏微分方程式を離散化すると、これら式から偏微分方程式の解が得られる。この様な状況で現れる式の形式は一般形ではないが、指数が 0 または 1 であるという利点を有する。系の指数 (index system) (指数は複雑さの指標である) が高くなると、同じ解析手法では対応できず、実質的に解くことは不可能であるため、このことは重要である。

DYLAN が取り組む式の基本形は初期値問題である。

$$\begin{aligned}m(x, y, t)\dot{x} &= f(x, y, t) \\ 0 &= g(x, y, t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

初期条件は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}x(t_0) &= x_0 \\ y(t_0) &= y_0\end{aligned}\tag{2.2}$$

ここで、次式を満足するものと仮定している。

$$0 = g(x_0, y_0, t_0)\tag{2.3}$$

変数 x 及び y は両方ともベクトルで、例えば、有限差分計算での節点の値を示す。

矛盾のない初期条件での計算は、(2.3) 式を満足しており、DYLAN パッケージの一部であり、それについては後述する。

必要なのは、時間 $t_0 < t < t_{max}$ の範囲で x と y を計算することである。アルゴリズムでは、関数は連続であり、対象領域内では十分に微分可能であると仮定している。

変数 x は微分変数、変数 y は代数変数と呼びならわされている。マトリクス m は有限要素質量マトリクス (finite-element mass matrix) があるような状況を網羅するよう含められているが、差分計算での単位行列であると解釈することができる。

ここで提示した検討の大半では、変数 x と y の区別は重要でない。したがって、便宜上、共通の変数を u と記し、その系を考慮する。

$$M(u,t)\dot{u} = F(u,t) \quad (2.4)$$

ここで、 M のいくつかの行は、代数変数に相当し、 0 である。

3. 方程式の解法

3.1 タイムステッピング

用いられている基本的な解析手法はタイムステッピングである。本研究では単調増加の時間セットで一連の結果を出そうと計画している。これら時間セットはアルゴリズムの一部として決められている。これら時間を t_0, t_1, t_2, \dots 、(近似) 解を u_0, u_1, u_2, \dots 、タイムステップを h_1, h_2, \dots で表す。ここで、 $t_n + h_{n+1} = t_{n+1}$ である。

DYLAN は、Byrne and Hindmarsh [1975] にならって、可変次数、可変タイムステップ後進差分式を用いている。この公式は精度管理のために予測子-修正子解析手法を用いている。したがって、各ステップにおいて、アルゴリズムは下記のとおりでなければならない。

- ステップの終わりに解を予測しなければならない。
- その予測を校正しなければならない。
- 誤差を決定し、ステップを採択するかどうか決めなければならない。
- 次のステップ (もしくは、誤差が受け入れられない場合は、再度設定したステップ) のタイムステップを決定しなければならない。
- 新しいステップの手順を決定しなければならない。

そのうえ、ユーザに折り返し報告するために多数の結果が取り込まれている。これはしばしば予定出力時間で行われる。DYLAN はこの点に関して仮定はしておらず、単にうまくいったステップ内での結果に対しての補間が利用できるにすぎない。この補間は実のところアルゴリズムの基本部分であり、最初に示すこととする。

3.2 多項式の補間とノルトジーク (Nordsieck) 配列

アルゴリズムは、その次数が解法の進捗によって変化するような多項式を補間するという考えを基礎としている。どの段階での次数も k と表示され、1~5 の間にある（次数が 0 と考えられる最初のステップを除く）。各段階での目的は、最も遅い時間での計算値を持ち、新しい時間において矛盾のない導関数を生成するような多項式の補間を行うことである。したがって、 t_n までのステップングにおいては、次数 k の多項式 π_n を探す。

$$\pi_n(t_{n-i}) = u_{n-i} \quad \text{for } 0 \leq i \leq k \quad (3.1)$$

$$M(u_n, t_n) \dot{u}_n = F(u_n, t_n) \quad \text{with } \dot{u}_n = \dot{\pi}_n(t_n) \quad (3.2)$$

ここで、ひとたび u_n がわかれば、(3.1) 式は多項式を決定するのに十分であるので、(3.2) 式は u_n を決める式であることに注意が必要である。

多項式中で t のべき係数を保存するのではなくて、ノルトジーク (Nordsieck) 配列が用いられる [Nordsieck, 1962]。これは最も遅い時間点についての多項式を展開することで得られる。

$$\pi_n(t_n + \mu h_n) = Z_n^{(0)} + \mu Z_n^{(1)} + \mu^2 Z_n^{(2)} + \dots + \mu^k Z_n^{(k)} \quad (3.3)$$

$$Z_n^{(r)} = \frac{h_n^r u_n^{(r)}}{r!} \quad (3.4)$$

その列に Z ベクトルを有する配列は、ノルトジーク配列と呼ばれている。この配列は明らかに、 $0 \sim -1$ の間で μ を設定することで、最後のステップでの時間まで補間する際に便利であるが、予測段階での外挿にも便利である。ノルトジーク配列の最初の 2 列は、最後の時間での解及び導関数 (scaled derivative) である。

3.3 予測子

解における一般点 (general point) においては、時間 t_{n-1} までの解を評価し、多項式の補間 π_{n-1} もしくは等価なノルトジーク配列 Z_{n-1} が得られており、次の時間 t_n での結果を算出しようとする。

これは2段階で行われ、まず予測が行われる（解 u_n というよりむしろ多項式 π_n の補間について）。これは t_n においてその後 (3.1) 式及び (3.2) 式を確実にみたすように“修正”される。

予測子（ $\hat{\cdot}$ で表示）は、単に、最後のステップでの補間多項式である。

$$\hat{\pi}_n = \pi_{n-1} \quad (3.5)$$

後述のように、あらゆるステップで用いられる次数 k は、先のステップで用いられたよりも大きいので、これは既に (3.1) 式の条件を満足している。解に関しては、これは先の多項式の補間をまさに必要としており、新たな時間までの外挿に用いている。

3.4 修正子

多項式を修正するために、やむを得ず前の k 時間で 0 である多項式を加え、そのため (3.1) 式の条件がみたされたままとなる。次数 k の多項式を探しているのが、これが因数の自由度を除いたところまでの修正を決定する。これはアルゴリズムにとって非常に重要である。導関数における修正はその値での既知の因数倍の修正であるという意味である。それゆえ下式が書ける。

$$\pi_n = \hat{\pi}_n + e_n p_n \quad (3.6)$$

ここで、 p_n は t_n で 1、前の k 時間で 0 である多項式であり、具体的には下式となる。

$$p_n = \prod_{r=1}^k \frac{(t - t_{n-r})}{(t_n - t_{n-r})} \quad (3.7)$$

その結果以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} u_n &= \hat{u}_n + e_n \\ \dot{u}_n &= \hat{\dot{u}}_n + \theta_n e_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで、 θ_n は一定で、下式で表される。

$$\theta_n = \dot{p}_n(t_n) = \sum_{r=1}^k \frac{1}{(t_n - t_{n-r})} \quad (3.9)$$

e_n に対して解くべき非線形方程式を得るために、(3.2) 式に (3.8) 式に代入する。

$$M(\hat{u}_n + e_n, t_n)(\hat{u}_n + \theta_n e_n) = F(\hat{u}_n + e_n, t_n) \quad (3.10)$$

実際には、 θ_n で割り、下式のように表すと便利である。

$$\Phi(e_n) = M(\hat{u}_n + e_n, t_n)(\Delta_n \hat{u}_n + e_n) - \Delta_n F(\hat{u}_n + e_n, t_n) = 0 \quad (3.11)$$

ここで、

$$\Delta_n = \frac{1}{\theta_n} \quad (3.12)$$

である。

3.5 完全な陰解法の (fully implicit) タイムステップとの関係

上記検討はむしろ概念的なものであり、より簡単な考えと関係づけると便利である。絶えず用いる次数 1 の方法で、全ての変数を微分とし、 M を単位行列とするならば、解析手法は次式を解くことに帰着する。

$$\dot{u} = F(u, t)$$

t_{n-1} では、多項式は下式のようなになるであろう。

$$\pi_{n-1} = u_{n-1} + (t - t_{n-1})\dot{u}_{n-1}$$

ここで、

$$\dot{u}_{n-1} = F(u_{n-1}, t_{n-1})$$

である。その結果下式となる。

$$\begin{aligned} \hat{u}_n &= u_{n-1} + h_n \dot{u}_{n-1} \\ \hat{\dot{u}}_n &= \dot{u}_{n-1} \end{aligned}$$

次に、下式となる。

$$\Delta_n = h_n$$

解く式は下式となる。

$$\Phi(e_n) = (h_n \hat{u}_n + e_n) - h_n F(\hat{u}_n + e_n, t_n) = 0$$

上式をよりなじみのある項で並べ替えると下式のようなになる。

$$(u_n - u_{n-1}) = h_n F(u_n, t_n)$$

上式は単に標準的な完全陰解法である。

3.6 Newton 反復法

(3.11) 式は一般に非線形であるので、いくつかの反復手法によって解かなければならない。DYLAN ソルバーは Newton 反復法を用いているが、それらの再計算費用を減ずるために旧式のヤコビ行列式を再利用しようとしている。これは疑似 Newton 法として知られている。

e_n に対して近似 e_n^l と仮定すると、新たな近似が得られ、全 Newton ステップにおいては次式の様になる。

$$e_n^{l+1} - e_n^l = \delta e_n^l = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial e_n} \right)^{-1} \Phi(e_n^l) \quad (3.13)$$

ここで、ヤコビ行列式は下式で与えられる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial e} = \frac{\partial M}{\partial u} e + \Delta_n \frac{\partial M}{\partial u} \hat{u}_n + M - \Delta_n \frac{\partial F}{\partial u} \quad (3.14)$$

修正の初期推測は 0 である。Newton または疑似 Newton ステップは、修正子の変化 δe_n が小さくなるまで繰り返される。変化の大きさは加重 2 乗平均を用いて判断する。

$$\|v\| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i v_i)^2} \quad (3.15)$$

ここで、加重値は種々成分の自然尺度となるように選択する。

反復の収束を判断するためのアルゴリズムは以下の通りである。

- 最初の反復では、変化のノルム $\|\delta e_n^0\|$ を蓄積し、 $\rho = 100/101$ とする。
- 後の反復では、ノルム $\|\delta e_n^l\|$ を計算し、 $\rho = \left[\frac{\|\delta e_n^l\|}{\|\delta e_n^0\|} \right]^{\frac{1}{l}}$ を設定する。
- $\rho > 0.9$ で、最初の反復でなければ、この反復は収束しない。
- $\rho < 0.9$ ならば、 $\mu = \frac{\rho}{1-\rho} \|\delta e_n^l\|$ を求める。
- $\rho < 0.3$ ならば、反復は収束する。さもなければ別の反復を行う。

反復はある最大数に到達した後でも終了する。最新のヤコビ行列式が用いられていれば、その反復は新しいヤコビ行列式によって再び試みられるが、そうでなければタイムステップは棄却される（2 因数までの減少が試みられる）。ヤコビ行列式の成分はたいてい解析的に決められている。

3.7 誤差の決定

用いられている誤差推定値（error estimate）は、DYLAN は正確に Byrne and Hindmarsh によって導き出されたものである。

式を示す前に、いくつか追加の記号を紹介する必要がある。多項式 p_n は、修正ステップ（correction step）で用いられ、(3.7) 式で定義されている。これをノルトジーク配列の形式で書くならば、その配列の列はただ一つの値であり、 $l_0(k)$ 、 $l_1(k)$ 等で示す。ここで、 k は多項式が次数 k であることを思い起こさせるものである。

誤差ベクトル（error vector） $E_n(k)$ を次式で算出する。

$$E_n(k) = \frac{-1}{l_1(k)} \left[1 + \prod_{r=2}^{r=k} \left(\frac{t_n - t_{n-r}}{t_{n-1} - t_{n-r}} \right) \right]^{-1} e_n \quad (3.16)$$

次に、ノルムを算出する。

$$D_k = \|E_n(k)\| \quad (3.17)$$

これを誤差の許容差 (error tolerance) ε と比較し、 $D_k < \varepsilon$ であれば、そのステップは受け入れられる。いずれにせよ、推奨されるタイムステップのスケーリングは次式によって与えられる。

$$\eta_k = \left(\frac{\varepsilon}{D_k} \right)^{\frac{1}{k+1}} \quad (3.18)$$

3.8 次数の管理

次のステップで、アルゴリズムの次数 k を変更するかどうか決定するために、 k がさらに高位数もしくは下位数であるならば、Byrne and Hindmarsh と同じ式を用いて、DYLAN では誤差の推定値を算出している。

$$D_{k \pm 1} = \|E_n(k \pm 1)\| \quad (3.19)$$

ここで、下記の通りである。

$$E_n(k-1) = \frac{-1}{l_1(k-1)} \left[\prod_{r=1}^{r=k} \left(\frac{t_n - t_{n-r}}{t_n - t_{n-1}} \right) \right]^{-1} Z_n^{(k)} \quad (3.20)$$

$$E_n(k+1) = \frac{-1/(k+2)}{l_1(k+1)} \left[1 + \prod_{r=2}^{r=k} \left(\frac{t_n - t_{n-r}}{t_{n-1} - t_{n-r}} \right) \right]^{-1} \left(\frac{t_n - t_{n-k-1}}{t_n - t_{n-1}} \right) (e_n - Q_n e_{n-1}) \quad (3.21)$$

ここで、 Q_n は先のタイムステップから得られる一定の大きさであり、Byrne and Hindmarsh で与えられている。

これら式が示すタイムステップファクタが、ステップが変化しないままのファクタよりも大きいならば、次のステップは修正した回数で行われることとなる。

3.9 代数方程式の改良

代数方程式が存在するとき、それら代数方程式の関係は (2.1) 式の関数 g によって定義される。これまで定義を行った解析手法においては、代数変数は微分変数と一緒に決められ、各ステップでの反復手法を必要としている。これは確かな解析手法であるが、解こうとしている問題が、 x と t が与えられたら、 $g(x,y,t)=0$ を満足するような y を決定する方法についての特別な知識が必要な状況では、役に立たない方法である。

DYLAN はこの方法で算出される代数変数の改良を考慮している。これは計算中の種々のポイントにおいて用いることが可能である。例えば、矛盾のない初期条件の算出の前に、予測子に対して、各反復後に修正子に対して、収束後の修正子に対して。どれが用いられるかは、取り組んでいる問題のタイプに依存する。例えば、改良が費用がかかるものであるなら、毎反復後に適用すべきではない。

3.10 初期条件

矛盾のない初期値設定を見つけるために、DYLAN は、対応する y 変数を見つけるための既知の微分変数設定に対して、(2.1) 式から g 式を解く。

代数変数のみを別にすれば、これは単純にそのタイムステップでと同じ Newton 反復法を用いている。したがって、次式で表される反復スキームが収束するまで実施される。

$$y_0^{i+1} - y_0^i = \delta y_0^i = - \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} g(x_0, y_0^i, t_0) \quad (3.22)$$

参考文献

Byrne G. D. and A.C. Hindmarsh, "A Polyalgorithm for the Numerical Solution of Differential-Algebraic Equations", ACM Trans. Math. Software 1, pp71-96, 1975.