.

地質環境データ解析·可視化システム 解析コードの拡張

図書室

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年2月

日揮株式会社

本資料は、サイクル機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、 その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払って下さい。この資 料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要とし ますので、下記にお問い合せ下さい。 〒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

地質環境データ解析・可視化システム解析コードの改良(Ⅱ) (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。しかし、上記ソフトウエアのうち地下水流動解析を行う Frac-Affinity は、解析対象 が飽和解析に限定されていたことから、超深地層研究所の建設に対応してコードを飽和・ 不飽和解析に拡張することが必要となっていた。

そこで本業務では、昨年度の検討を通じてコード拡張の理論的可能性が明らかにされた のを受け、ソルバー等の改良により Frac-Affinity を飽和不飽和解析に拡張するとともに、 超深地層研究所に関連する地下水流動解析の中で実施時期の観点から最も優先順位が高い と考えられる、立抗掘削の影響評価解析に必要なコードの改良を行った。主なコードの改 良点は次の通りである。

- ・ コードの飽和不飽和解析への拡張
- ・ ソルバーの改良による解析可能最大接点数の向上
- ・ 入出カインタフェースの改良、具体的には主として以下の事項
 - ― 飽和不飽和解析に対応した入力項目の追加
 - ― 差分メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)や流速ベクトルの可視化
 - ー エラー情報の充実
- ・ 飽和不飽和解析に対応した境界条件(自由浸出、涵養)の追加

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

- ・ 立抗掘削を模擬するための内部境界の形状や境界条件の経時変化を取り扱う機能
 の追加
- ・ 差分メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)構築方法の改良と、部分的に差分メッシュの密度を調整する機能の追加

これに加えて、飽和・不飽和地下水流動解析に対して拡張した Frac-Affinity により、立 坑掘削の影響解析を含む一連の試解析の実施し、Frac-Affinityの飽和・不飽和解析、特に立 坑掘削の影響の評価に対する基本的な適用性を確認した。

また、「地質環境データ解析・可視化システム」では、Land Mark、Earth Vision ならびに Frac-Affinity の有機的な活用により、一貫した地層科学研究の支援が可能であることから、 地質構造や水理地質構造を適切かつ効果的にモデル化するため専門家によるサポートを実 施した。このため、東濃地科学センターにおける3回のサポートを通じて広域および MIU スケールの地質構造概念モデルの開発を支援するとともに、準広域及び MIU スケールの水 理地質構造モデルを開発し飽和地下水流動解析を行った。さらに、本年度の各種モデリン グの成果および問題点にもとづき、次年度以降の課題を明らかにした。

Improvement of Geological Modeling Analysis and Simulation Software (GEOMASS)

Hideji Yoshida and Takao Ikeda1

Abstract

In the Geo-Science study, it is impotent to analyze and model geological structure based on various kinds of and lot mount of data such as those of come from bore hole excavation, which are to be followed by visualization in 3D and hydraulic analysis. GEOMASS is a integrated software system composed of Land Mark for analysis of raw data, Earth Vision for modeling of geological structures and visualization of various kinds of 3 dimensional data and Frac-Affinity for hydraulic analysis, and is developed for JNC in 1997/1998. After the developments, the necessity of modification of Frac-Affinity, which is originally capable only for saturated analysis, to unsaturated analysis was recognized because the code should be applicable for construction of the URL related analysis such as shaft excavation. In this context, the theoretical background for the extension was studied in 1998/1999.

In this Fiscal year (1999/2000), Frac-Affinity was extended to be capable saturated-unsaturated analysis based on the achievements of last fiscal year, and many additional modification for the shaft excavation analysis were carried out listed below.

Enhancement of basic applicability of the code for saturated-unsaturated analysis Improvement of solver to increase the maximum number of node to deal with Improvement of the interface of the code such as,

- addition of input items correspond to saturated-unsaturated analysis
- visualization of Frac-Affinity network and flow vector
- improvement of error information

Addition of boundary conditions correspond to saturated-unsaturated analysis such as free seepage surface and recharge to ground surface.

1 JGC Corporation

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

JNC Liaison : Geoscience Research Execution Group, Tono Geoscience Center

Addition of capability for time dependent internal boundary figure and boundary condition to model shaft excavation

Improvement of construction methodology of Frac-Affinity network and addition of capability to adjust density of the network at specified region

After the extension of the code, series of test cases including shaft excavation were carried out and the capability of the code was confirmed.

GEOMASS could provide an integrated environment to support geo-science activity by using Land Mark, Earth Vision and Frac-Affinity. For more efficient usage of the system, consultations by specialist were conducted three times at Tono Geo-science Center. Through those consultation activities, two scales of geological structural model and hydraulic model are constructed. Those modeling were refereed by test cases of the extended Frac-Affinity. After the consultation, items to be tackled in the future were summarized.

目 次

2. Frac-Affinity ネットワークの構築	1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2. Frac-Affinity ネットワーク 構築手法の概要 2.1.1 Frac-Affinity ネットワーク 構築手法の概要 2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの基本的考え方 2.1.2 Frac-Affinity ネットワークのの基本的考え方 2.1.2 Frac-Affinity ネットワークのの作成 (1) 岩盤基質部 (2) 龟裂 2.1.3 解析メッシュの統合 2.1.4 境界条件の設定 1 2.1.5 独立部分の削除 2.1.6 解析メッシュの年成に関する注意事項 1 2.2 岩盤基質部 1 2.2.1 要素分割 1 2.2.2 フラクタル透水係数場の生成 (1) 中点置換法 1 2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定 2 2.3 採定論的龟裂 2.3.1 概 要 2.3.3 物理特性の設定 2 2.4 確率論的龟裂 2 2.4 確率論的龟裂 2 2.4 確認会 2 2.4.1 概 要 2 2.4.3 龟裂の大きさ及び形状 2 2.4.3 龟裂の大きさ及び形状 2 2 2 2.4.3 龟裂の大きさ及び形状 2 2 2 2		
2.1 Frac-Affinity ネットワーク構築手法の概要 2.1.1 Frac-Affinity ネットワークの基本的考え方 2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの年成 2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの作成 (1) 岩盤基質部 2.1.3 解析メッシュの統合 2.1.4 境界条件の設定 1 2.1.5 独立部分の削除 1 2.1.6 解析メッシュの生成に関する注意事項 1 2.1.7 要素分割 1 2.2 岩盤基質部 1 2.2.1 要素分割 1 2.2.2 フラクタル透水係数場の生成 1 2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定 2 2.3 解析メッシュへの透水係数の設定 2 2.3.1 概 要 2 2.3.3 物理特性の設定 2 2.4 確率論的龟裂 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 龟裂位置 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 龟裂位置 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 龟裂位置 2 2.4.1 概 要 2 2.4.1 概 要 2 2.4.1 極 二 2 2.4	2. Frac-Affinity ネットワークの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
2.1.1 Frac-Affinity ネットワークの基本的考え方	2.1 Frac-Affinity ネットワーク構築手法の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの作成 (1) 岩盤基質部 (2) 亀裂 (2) 亀裂 2.1.3 解析メッシュの統合 (2) 2.1.4 境界条件の設定 (1) 2.1.5 独立部分の削除 (1) 2.1.6 解析メッシュの生成に関する注意事項 (1) 2.1.6 解析メッシュの生成に関する注意事項 (1) 2.1.7 要素分割 (1) 2.2 岩盤基質部 (1) 2.2.1 要素分割 (1) 2.2.2 フラクタル透水係数場の生成 (1) (1) 中点置換法 (1) 2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定 (2) 2.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築 (2) 2.3.1 概 要 (2) 2.3.3 物理特性の設定 (2) 2.4 確率論的亀裂 (2) 2.4.1 概 要 (2) 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状 (2) (1) 一辺の長さがへき乗則分布となる短形亀裂(Power Law Rectangles) (2) (2) 一辺の長さがへき乗則分布となる短形亀裂(Power Law Rectangles) (2)	2.1.1 Frac-Affinity ネットワークの基本的考え方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
(1) 岩盤基質部・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.1.2 Frac-Affinity ネットワークの作成 ・・・・・	5
(2) 亀裂・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(1) 岩盤基質部・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
2.1.3 解析メッシュの統合・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(2) 亀裂	6
2.1.4 境界条件の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.1.3 解析メッシュの統合・・・・・	7
2.1.5 独立部分の削除・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.1.4 境界条件の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
2.1.6 解析メッシュの生成に関する注意事項・ 1 2.2 岩盤基質部 1 2.2.1 要素分割・ 1 2.2.2 フラクタル透水係数場の生成 1 (1) 中点置換法 1 2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定 2 2.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築 2 2.3 決定論的亀裂 2 2.3.1 概 要 2 2.3.3 物理特性の設定 2 2.4 確率論的亀裂 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ 2 2.4.1 個式 2 2.4.1 個式 2 2.4.1 個式 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ <td< td=""><td>2.1.5 独立部分の削除・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</td><td>11</td></td<>	2.1.5 独立部分の削除・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
2.2 岩盤基質部 1 2.2.1 要素分割 1 2.2.2 フラクタル透水係数場の生成 1 2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定 1 2.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築 2 2.3 決定論的亀裂 2 2.3.1 概 要 2 2.3.2 要素分割 2 2.3.3 物理特性の設定 2 2.4 確率論的亀裂 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ 2 2.1 一辺の長さが一様分布となる短形亀裂(Uniform Rectangles) 2 2.1 一辺の長さがべき乗則分布となる短形亀裂(Power Law Rectangles) 2	2.1.6 解析メッシュの生成に関する注意事項・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
2.2.1 要素分割・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.2 岩盤基質部	13
2.2.2 フラクタル透水係数場の生成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.2.1 要素分割・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
(1) 中点置換法12.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定22.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築22.3 決定論的亀裂22.3.1 概 要22.3.2 要素分割22.3.3 物理特性の設定22.4 確率論的亀裂22.4.1 概 要22.4.2 亀裂位置22.4.3 亀裂の大きさ及び形状22.4.3 龟裂の大きさ及び形状22.4.3 龟裂の大きさ及び形状22.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4.4	2.2.2 フラクタル透水係数場の生成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定・ 2 2.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築・ 2 2.3 決定論的亀裂・ 2 2.3.1 概要・ 2 2.3.2 要素分割・ 2 2.3.3 物理特性の設定・ 2 2.4 確率論的亀裂・ 2 2.4 確率論的亀裂・ 2 2.4.1 概要・ 2 2.4.2 亀裂位置・ 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・ 2 2.4.3 龟裂の大きさ及び形状・ 2 2.4.3 0 2 2.4.3 0 2 2.4.3 0 2 2.4.3 0 2 2.4.3 0 2 2.4.3 0 2 2.4.3 0 2 2.4.4.4 2 2.4.5 2 <tr< td=""><td>(1) 中点置換法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</td><td>17</td></tr<>	(1) 中点置換法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
2.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築 2 2.3 決定論的亀裂 2 2.3.1 概 要 2 2.3.2 要素分割 2 2.3.3 物理特性の設定 2 2.3.3 物理特性の設定 2 2.4 確率論的亀裂 2 2.4.1 概 要 2 2.4.2 亀裂位置 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状 2 2.4.3 亀裂の大きさ及び形式 2 2.4.3 亀裂の大きさる気短形亀裂(Uniform Rectangles) 2 2.4.3 亀裂の大きさる気気形亀裂(Power Law Rectangles) 2 2.4.3 亀裂の支きが 2 2 2.4.4.4 2 2 2.4.5 2 2 2.4.6 2 2	2.2.3 解析メッシュへの透水係数の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
2.3 決定論的亀裂・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.2.4 岩盤基質部に対する Arac-Affinity ネットワーク構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
2.3.1 概 要	2.3 決定論的亀裂	23
2.3.2 要素分割・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.3.1 概 要	23
 2.3.3 物理特性の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.3.2 要素分割・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
 2.4 確率論的亀裂・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.3.3 物理特性の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
 2.4.1 概 要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.4 確率論的亀裂	26
 2.4.2 亀裂位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.4.1 概 要	26
 2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.4.2 亀裂位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
 (1) 一辺の長さが一様分布となる短形亀裂(Uniform Rectangles) ・・・・・・ 2 (2) 一辺の長さがべき乗則分布となる短形亀裂(Power Law Rectangles) ・・・・・ 2 	2.4.3 亀裂の大きさ及び形状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
(2) 一辺の長さがべき乗則分布となる短形亀裂(Power Law Rectangles) ····· 2	(1) 一辺の長さが一様分布となる短形亀裂(Uniform Rectangles) ······	28
	(2) 一辺の長さがべき乗則分布となる短形亀裂(Power Law Rectangles)	28

(3)	一辺の長さがべき乗則分布となる正方形亀裂(Power-Law Square Facture)・	29
2.4.4	亀裂の方向・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
(1)	ー様分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
(2)	Fischer 分布 ······	29
2.4.5	透水係数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
(1)	ー様分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
(2)	裾切りされた正規分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
3. 数值	計算手法の改良・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
3.1 飽	和地下水流動解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
3.1.1	非定常地下水流動解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
3.1.2	定常地下水流動解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
3.1.3	計算可能な総節点数増大のための拡張・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
(1)	共役勾配法(CG 法) · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	33
(2)	プレコンディションイング行列・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
(3)	試計算の結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
3.2 箆	和・不飽和地下水流動解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
3.2.1	Richard's の方程式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
3.2.2	不飽和特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
3.2.3	定常地下水流動解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
3.2.4	非定常地下水流動解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
4. 入力	データ作成手法の改良・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
4.1 호	広堀削による Frac-Affinity ネットワークの更新作業の概要・・・・・・・・・・	41
4.2 <u>1</u>	Z坑掘削により影響を受ける節点の抽出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
4.3 <u>ゴ</u>	Σ坑掘削に伴うレグの修正・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	44
4.3.1	内部の節点が高い位置に存在する場合・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	44
4.3.2	2 内部の節点が低い位置に存在する場合・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	45
4.4	冬正部分を抽出するためのアルゴリズム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46
4.5 J	アルゴリズムの実行 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49

4.6 地下水流動解析の実施 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
5. ユーザインタフェイスの改良・・・・・・	51
5.1 Frac-Affinity の改良履歴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
5.1.1 ver.1.0 から ver.1.2 への改良点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
5.1.2 ver.1.2 から ver.1.2.4 への改良点 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	52
5.1.3 ver.2.4 から ver.2.0 への改良点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52
5.1.4 ver.2.0 から ver.2.0.1 への改良点 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	52
5.2 立坑の掘削に関する入力・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
5.2.1 深度や坑道長が変化しない坑道の入力・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
5.2.2 深度が時間変化する立坑の入力・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
5.3 不飽和特性の入力 ・・・・・	55
5.3.1 岩盤基質部・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
5.3.2 決定論的亀裂・・・・・・	56
5.3.3 確率論的亀裂・・・・・・	57
5.4 境界条件の設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
5.4.1 流束の指定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	61
5.4.2 水頭の指定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	62
5.4.3 サクションの指定・・・・・・	62
5.4.4 涵養量の指定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	62
6. コードの拡張と適用性の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	63
6.1 試解析の目的と解析ケースの構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	63
6.2 解析条件	64
6.2.1 基本ケース・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	65
(1) 解析モデルの基本構成及び飽和特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	65
(2) 不飽和特性	69
(3) 立坑の掘削深度の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
(4) 境界条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
(5) その他の解析条件・・・・・	71

6.2.2 代替ケース・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
(1) 不均質場ケース(ケース A-1) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
(2) 代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
(3) 支保工設置ケース(ケース B-1) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	73
(4) 詳細解析メッシュケース(ケース B-2) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	73
(5) 涵養を伴う自由浸出綿ケース(ケース B-3) ・・・・・・・・・・・・・・・・・	74
6.3 基本ケースの解析結果 ・・・・・	75
6.3.1 解析条件の可視化・・・・・	75
6.3.2 解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	79
6.4 代替ケースの解析結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	85
6.4.1 不均質場ケース(ケース A-1) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	85
6.4.2 代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	87
6.4.3 支保工設置ケース(ケース B-1) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	89
6.4.4 詳細解析メッシュケース(ケース B-2) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	91
6.4.5 涵養を伴う自由浸出前ケース(ケース B-3) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	92
6.5 試解析のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	94
7.Frac-Affinity の拡張に関する今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	95
7.1 Frac-Affinity を用いた地下水流動解析の間点から重要な知見 ・・・・・・・・・	95
7.2 透水性の異方性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96
7.2.1 岩盤基質部の異方性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96
7.2.2 亀裂の異方性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96
7.2.3 Frac-Affinity への導入 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	98
7.3 亀裂交差部の取り扱い・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9 9
7.3.1 交差部の認識・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
7.3.1 交差部の認識・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99 100
 7.3.1 交差部の認識・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99 100 100
 7.3.1 交差部の認識・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99 100 100 102
 7.3.1 交差部の認識・・・・・・ 7.3.2 交差部の水理学的特性の設定・・・・・・ 7.3.3 Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱い・・・・・ 7.3.4 Frac-Affinity への導入・・・・・ 7.4 その他の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・ 	99 100 100 102 103

7.4.2	長期的な課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	103	
8. 可視(とシステムの利用に関するサポート・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	104	
8.1 概	要 ·····	104	
8.2 地	質構造モデルの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	105	
8.2.1	広域スケールの地質構造モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	105	
(1)	地質構造把握のための3次元地質構造モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	106	
(2)	地下水流解析のための3次元地質構造モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	109	
8.2.2	MIU スケールモデル ・・・・・	110	
8.2.3	地質構造モデルの開発に関する今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	114	
8.3 水	理地質構造モデルの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	117	
8.3.1	背景及び目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	117	
8.3.2	地下水流解析コード・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118	
8.3.3	水理地質構造をモデルするための概念モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118	
(1)	準広域スケール・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118	
(2)	MIU スケール ・・・・・	118	
8.3.4	数値解析モデルの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	122	
(1)	地質学的特性および水理地質パラメータ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	122	
(2)	要素分割・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	125	
(3)	境界条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	127	
(4)	地下水流動解析の実施・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	128	
8.3.5	解析結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	131	
(1)	地表面で水頭を固定した場合の解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	131	
(2)	地表面で涵養域と放出域を指定した場合の解析結果・・・・・・・・・・・	132	
8.3.6	地下水流動解析のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	140	
8.4 牲	性調査並びに不確実性の取り扱いに関する検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	141	
8.5 P	「視化システム利用のサポートに関する結論と今後の課題 ・・・・・・・・・	147	
8.5.1	地質構造モデルの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	147	
8.5.2	, 水理地質構造モデルの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	148	
8.5.3	地質調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	149	

	8.5.4	今後	の調	題	•••	• • •	• • •	••	•••	•••	••	•••	• • •	 ••	•••	••	•••	• • •	••	••	•••	• • •	•••	• •	• • •	••	149
9.	まと	め・・・	• • •			• • •	• • •	••	• • •	•••	••	••		 •••	•••	••		•••	••	••	•••	• • •	•••	• •	• • •	••	151
10	,参考	行文献		• • • •	•••	• • •	• • •	••	••	•••	••	•••	•••	 •••	•••	• •	•••		••	••					•••		152

添付資料1 代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2)の確率論的亀裂の 設定に使用した入力ファイル

図リスト

図 1-1	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により	
	作成されるハイブリッド媒体の概念図 ・・・・・・・・・・・・・・・	3
図 2.1.1-1	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 ••••••••••••••••	5
図 2.1.2-2	確率論的亀裂に対する解析メッシュの概念図 ・・・・・・・・・・・	7
図 2.1.3-1	統合前における解析メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)の構造・・	9
図 2.1.3-2	統合後における解析メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)の構造・・	9
図 2.1.3-3	統合前の諸特性の割り当て ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
図 2.1.3-4	統合後の諸特性の割り当て ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
図 2.2-1	FRAC-AFFINITY が扱う構造ブロックの概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
図 2.2-2	簡略化したモデル領域の構造ブロックの分解図 ・・・・・・・・・・	14
図 2.2.3	Frac-Affinity による側方境界面と上下境界面の設定 ・・・・・・・・・	14
図 2.2.1-1	地質構造ブロックの配置と各軸方向の最大・最少値(control point)との	
	関係 ·····	15
図 2.2.1-2	部分的な詳細メッシュの設定例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
図 2.2.2-1	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	ξ.
	の概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
🖾 2.2.2-2	相関長を考慮したバリオグラムの例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
図 2.2.2-3	中点置換法によるメッシュの詳細化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
図 2.2.4-1	岩盤基質部の要素分割と Frac-Affinity ネットワークの概念図・・・・・	22
図 2.3.2-1	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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
図 2.4.1-1	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	27
図 2.4.4-1	確率論的亀裂の走向及び傾斜の設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
図 3.2.2-1	van Genuchten モデルによる圧力水頭と飽和度の関係の設定例・・・・	38
図 3.2.2-2	van Genuchten モデルによる飽和度と透水係数の関係の設定例・・・・	38

🖾 4.1-1	立坑掘削に伴う Frac-Affinity ネットワークの修正に関する概念図・	41
図 4.3.1-1	立坑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 ・・・・・	44
図 4.3-1-2	立坑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 ・・・・・	45
团 4.4-1	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・	48
図 6.2.1-1	試解析のための地質構造モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66
図 6.2.1-2	不飽和特性(相対透水係数と飽和度)の設定 ・・・・・・・・・・・	69
図 6.2.1-3	不飽和特性(サクションと飽和度) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	69
図 6.2.1-4	立坑の掘削及び支保工の設置に関する設定 ・・・・・・・・・・・・・	70
図 6.2.2-1	涵養を伴う自由浸出面に関する試解析(ケース B-3)の解析大系	
	(断面図)及び境界条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	74
図 6.3.1-1	Frac-Affinityの出力により Earth Vision 上で確率論的亀裂を	
	可視化した結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
図 6.3.1-2	Frac-Affinity からの出力により Frac-Affinity ネットワークを	
	地質構造に重ねて可視化した結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	77
図 6.3.1-3	Frac-Affinity からの出力により Frac-Affinity ネットワーク上に	
	透水性の不均質性を可視化した結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	78
図 6.3.2-1	解析開始時(立坑の掘削開始前)の立坑を含む鉛直断面における	
	水頭分布 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	81
🗵 6.3.2-2	解析終了時(立坑の掘削終了時)の立坑を含む鉛直断面における	
	水頭分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	82
図 6.3.2-3	解析終了時(立坑掘削終了時)の立坑を含む鉛直断面における	
	流束ベクトル分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	83
図 6.3.2-4	基本ケースにおける立坑への湧水量の積算値 ・・・・・・・・・・・	84
🗵 6.4.1-1	不均質場ケース(ケース A-1)で設定された透水係数場の不均質場	85
図 6.4.1-2	不均質場ケース(ケース A-1)における立坑掘削終了時の水頭分布	86
図 6.4.2-1	代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2)で設定された	

確率論的亀裂の配置及び形状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	87
	~.

- 図 6.4.3-1 支保工設置ケース(ケース B-1)における解析終了時(立坑掘削 終了時)の水頭分布 ・・・・・ 89
- 図 6.4.4-1 詳細解析メッシュケース(ケース B-2)における解析終了時(立坑 掘削終了時)の水頭分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 91

- 図 7.2.2-1 確率論的亀裂における水平・垂直方向の概念 ・・・・・・・・・・・ 97
- 図 7.2.2-2 決定論的亀裂における水平・垂直方向の概念 ······ 97
- 図 7.3.1-1 2つの亀裂の交差に関する概念図 ・・・・・・・・・・・・・・・ 100
- 図 7.3.3-1 現行の Frac-Affinity による Frac-Affinity ネットワークの統合例・・・ 101
- 図 7.3.3-2 Frac-Affinity ネットワークの統合方法の改良案 ······ 102
- 図 8.2.1-1 地質構造把握のための広域スケール 3 次元地質構造モデル・・・・・ 108
- 図 8.2.1-2 地下水流動解析のための広域スケール 3 次元地質構造モデル・・・・ 110
- 図 8.2.2-1 MIU スケールの 3 次元地質構造モデル ······ 113
- 図 8.3.3-1 地下水流動解析のための準広域スケール 3 次元地質構造モデル・・ 120
- 図 8.3.3-2 MIU スケールの 3 次元地質構造モデル(図 8.2.2-1 に同じ) ······ 121
- 図 8.3.5-1 準広域スケールモデルの解析結果と測定結果との比較(MIU-2号孔 における水頭分布、TAGSACによる解析結果もあわせて示した) 133
- 図 8.3.5-2 MIU スケールモデルの解析結果と測定結果との比較(MIU-2 号孔に

おける水頭分布、TAGSACによる解析結果もあわせて示した) ·· 134

図 8.3.5-3a 準広域スケールモデル(REGQ99_THW_Tsu12_N
--

- の解析結果(水頭分布) ······ 135 図 8.3.5-3b 準広域スケールモデル(REGQ99_THW_Tsu12_NoFlow) の解析結果(水頭分布) ····· 136

- 図 8.4-2 処分場の建設における評価フロー ・・・・・・・・・・・・ 146

表リスト

表 3.1.3-1	Ax=b を解くための粗行列アルゴリズム ・・・・・・・・・・・	33
表 3.1.3-2	ソルバーの性能確認のために実施した試計算に要した時間 ・・・・・	35
表 4.4-1	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 ・・・・・	47
表 5.2.2-1	深度が時間変化する立坑に関する入力ファイルのフォーマット・・	54
表 5.3.1-1	岩盤基質部の不飽和特性を設定する入力ファイルのフォーマット	55
表 5.3.1-2	線形補完により不飽和特性を指定する場合の入力フォーマット・・	55
表 5.3.1-3	van Genuchten モデルにより不飽和特性を指定する場合の	
	入力フォーマット ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	56
表 5.3.2-1	決定論的亀裂と不飽和特性の対応関係を指定する入力ファイルの	
	フォーマット ・・・・・	57
表 5.3.3-1	確率論的亀裂の不飽和特性を設定する入力ファイルのフォーマット	57
表 5.4-1	境界条件設定のための入力ファイルのフォーマット ・・・・・	58
表 5.4-2	境界条件設定のための入力ファイルの例 ・・・・・・・・・・・・・・	60
表 6.2.1-1	基本ケースにおける岩盤基質部の透水性の設定 ・・・・・・・・・・	67
表 6.2.1-2	基本ケースにおける決定論的亀裂及び確率論的亀裂の透水性の設定	67
表 6.2.1-3	基本ケースにおける確率論的亀裂の配置等に関する設定 ・・・・・・	68
表 6.2.1-4	基本ケースにおける要素分割のためのパラメータの設定 ・・・・・・	71
表 6.2.1-5	基本ケースにおける Frac-Affinity ネットワーク構築のための	
	パラメータ設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
表 6.2.2-1	不均質場ケース(ケース A-1)でフラクタルスケーリング則により	
	不均質場を設定するためのパラメータ ・・・・・・・・・・・・・・・・	72
表 8.2.1-1	広域スケールの地質構造モデルにおいて存在を考慮した層序・断層	106

表 8.2.2-1 MIU スケールの地質構造モデルにおいて存在を考慮した地層と断層 111

(xv)

- 表 8.3.4-1 準広域スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値 123
- 表 8.3.4-2 MIU スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値
- 表 8.3.4-3 MIU スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値 (亀裂の特性) ・・・・・ 124
- 表 8.3.4-4 MIU スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値 (亀裂の幾何学情報) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 125

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[8]、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。しかし、上記ソフトウエアのうち地下水流動解析を行う Frac-Affinity は、解析対象 が飽和解析に限定されていたことから、超深地層研究所の建設に対応してコードを飽和・ 不飽和解析に拡張することが必要となっていた。

そこで本業務では、昨年度の検討を通じてコード拡張の理論的可能性が明らかにされた のを受け、ソルバー等の改良により Frac-Affinity を飽和不飽和解析に拡張するとともに、 超深地層研究所に関連する地下水流動解析の中で実施時期の観点から最も優先順位が高い と考えられる、立抗掘削の影響評価解析に必要なコードの改良を行った。主なコードの改 良点は次の通りである。

- ・ コードの飽和不飽和解析への拡張
- ・ ソルバーの改良による解析可能最大接点数の向上
- 入出力インタフェースの改良、具体的には主として以下の事項
 - ― 飽和不飽和解析に対応した入力項目の追加
 - ー 差分メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)や流速ベクトルの可視化
 - ― エラー情報の充実
- ・ 飽和不飽和解析に対応した境界条件(自由浸出、涵養)の追加
 立抗掘削を模擬するための内部境界の形状や境界条件の経時変化を取り扱う機能の追加
- ・ 差分メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)構築方法の改良と、部分的に差分メッシュの密度を調整する機能の追加

これに加えて、飽和・不飽和地下水流動解析に対して拡張した Frac-Affinity により、立 坑掘削の影響解析を含む一連の試解析の実施し、Frac-Affinity の飽和・不飽和解析、特に立 坑掘削の影響の評価に対する基本的な適用性を確認した。

また、「地質環境データ解析・可視化システム」では、Land Mark、Earth Vision ならびに Frac-Affinityの有機的な活用により、一貫した地層科学研究の支援が可能であることから、 地質構造や水理地質構造を適切かつ効果的にモデル化するため専門家によるサポートを実施した。このため、東濃地科学センターにおける3回のサポートを通じて広域および MIU スケールの地質構造概念モデルの開発を支援するとともに、準広域及び MIU スケールの水 理地質構造モデルを開発し飽和地下水流動解析を行った。さらに、本年度の各種モデリン グの成果および問題点にもとづき、次年度以降の課題を明らかにした。

以上が本年度の成果の概要であるが、具体的な検討成果の記述に先立ち Frac-Affinity の 最大の特徴であるハイブリッド媒体[9]の概要を以下にまとめる。

ハイブリッド媒体の基本的な考え方は、岩盤の水理学的な特性を2つの成分、すなわち 「岩盤基質部」と「亀裂的な構造」の両者の和として表現することにある(図 1-1 参照)。 このうち岩盤基質部とは、その水理学的な特性が多孔質媒体によって近似可能な部分を指 し、内部に解析メッシュの空間スケールよりも十分に小さな微少亀裂のみが存在する部分 を指している。一方、亀裂的な構造とは、ある水理学的特徴(例えば高透水性、あるいは 低透水性等)が面的に広がっている部分を指し、一般的には断層や割れ目に対応する。こ の亀裂的な構造は、これらの存在や位置、水理学的な特徴等を各種の調査結果からどの様 に特定できるかという観点から、「決定論的亀裂」(DDFs)と「確率論的亀裂」(SDFs)に 区別される。一般に、決定論的亀裂は比較的大規模な面的広がりを持つ構造に対応し、そ の形状や水理学的特徴が各種の調査により一定の精度で決定論的に捉えることができると 考えられる。一方、確率論的亀裂は比較的規模が小さい亀裂の集合であり、統計的指標に より位置や水理学的な特徴が整理される亀裂群と考えられる。Frac-Affinity ではこれら3つ の要素、すなわち多孔質媒体近似により表現される「岩盤基質部」と亀裂的な構造として 表現される「決定論的亀裂」(DDFs)及び「確率論的亀裂」(SDFs)をそれぞれ個別に設定 し、ついで Frac-Affinity ネットワークと呼ばれる一つの解析メッシュにこれら3つの要素 を統合して地下水流動解析を実施する。

ハイブリッド媒体による地下水流動解析の長所は次のようにまとめることができる。多 孔質媒体近似による評価においては、卓越流路あるいは移行経路となりうる断層や亀裂を 必要な頻度と精度で表現することが難しい。また、亀裂媒体による解析手法においては、 岩盤基質部の多孔質的な地下水の移動が無視されることから評価結果が亀裂の連続性のみ に支配されることとなる[10,11,12]。この場合、亀裂の連続部を卓越して移行する地下水の 移行時間は、非現実的な値を与える(短時間で移動する)傾向がある。これに対してハイ ブリッド媒体を用いた地下水流動解析では、亀裂の不連続部においても多孔質近似により 地下水が岩盤基質部を移動することから、亀裂が完全に連続していない部分においても着 目する亀裂から次の亀裂へ流れが連続する状況を表現することが可能となる。現実の地下 水流動を考えれば、多孔質媒体あるいは亀裂ネットワークのみにより地下水が移動してい ると考えるのは非現実的であり、ハイブリッド媒体的な状況を考えることが現実的であろうと推定される。実際、ハイブリッド媒体による地下水流動解析においては、全体としては亀裂内の地下水の移行が卓越する[13]ものの、地下水の移行時間の観点からは亀裂の不連続部における移行時間が支配的な状況を正しく評価できることから、岩盤中の物質移行を評価する際に際に重要となる破過時間を現実的に評価できる可能性がある。なお、Frac-Affinity におけるハイブリッド媒体(Frac-Affinity ネットワーク)の生成方法については2章で詳しく述べる。



図 1-1 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により作成されるハイブリ ッド媒体の概念図

2. Frac-Affinity ネットワークの構築

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。

Frac-Affinityの拡張にあたっては、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た。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が生じたことによる。

ここでは、まず 2.1 節で、Frac-Affinity ネットワークの構築方法を概説するとともに、2.2 節以降で岩盤基質部、決定論的亀裂及び確率論的亀裂の取り扱いや設定方法を個別に述べる。

2.1 Frac-Affinity ネットワーク構築手法の概要

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 2.1.1-1 に示す。

図 2.1.1-1 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 2.1.1-1 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ノードに近い「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 2.1.1-1 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

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なように、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ことと なる。

(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、2次元であることを除いて岩盤基質部に対する 解析メッシュと同様の方法で構築する。すなわち、四辺形の要素により亀裂を分割し、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。

確率論的亀裂

確率論的亀裂は平面により表現される。Frac-Affinity では亀裂密度、大きさ、向き等の設 定情報に従って亀裂を確率論的に生成し、これをメッシュ化する。メッシュ化にあたって は、まず、確率的に生成された亀裂のうち亀裂全体が生成の対象領域を外れるものを除外 し、ついで、残った亀裂について図 2.1.2-1 に示す様に節点とレグを設ける。確率論的亀裂 は基本的に長方形であり、図に示すように外周部に直接節点を配置することにより境界節 点を設けることなく解析メッシュを生成する。

ただし、亀裂の一部が解析領域からはみ出す場合には、部分を亀裂から切り取ることが

必要となる。図 2.1.2-1 に点線により解析領域で「切り取られた」確率論的亀裂の例を示す。 この場合、レグ両端の節点がともに解析領域の外側に位置するレグをまず取り除き、つい でレグにより他の節点に結合していない節点を取り除くことにより、図 2.1.2-1 に黒丸と実 線で示した解析メッシュを構築する。



図 2.1.2-1 確率論的亀裂に対する解析メッシュの概念図

なお、ここで述べた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、この様な場 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。

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。本業務では、解析メッシュの節点数を最小限に押さえることを主な目 的として、既存の Frac-Affinity での統合プロセスを改良し、岩盤基質部の解析メッシュに 決定論的亀裂及び確率論的亀裂を1つずつ個別に統合することにより Frac-Affinity ネット ワークを構築する手法を開発した。

上記作業は、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2.1.3-1と図2.1.3-2であ る。これらの図では、Frac-Affinityによる3次元のメッシュ構造に2次元のメッシュを統合 する作業を、2次元のメッシュに1次元の亀裂構造を統合する作業として示した。図2.1.3-1 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2.1.3-2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。

解析メッシュのネットワーク構造の変更に引き続き、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2.1.3-3と図2.1.3-4に作業の概念を示す。図2.1.3-3 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2.1.3-4に示すように再配分される必要 がある。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ることがない 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 2.1.3-1 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 2.1.3-2 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 で使用することとする。



図 2.1.3-4 統合後の諸特性の割り当て

2.1.4 境界条件の設定

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 節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が他の部分 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。この様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様な孤立部分をあら かじめ抽出し、計算対象が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。

2.1.6 解析メッシュの生成に関する注意事項

上述の手法により構築される Frac-Affinity ネットワークは、複数の解析メッシュ、すな わち岩盤基質部、決定論的亀裂及び確率論的亀裂のそれぞれに対して生成された解析メッ シュの統合により構築されるという点で、既往の地下水流動解析で使用されている解析メ ッシュとは大きく異なる特徴を持っている。このため、Frac-Affinity ネットワークの構築に おいては、従来の解析メッシュの構築作業とは異なる幾つかの注意事項が存在する。具体 的には次の点に配慮が必要である。

- ・ Frac-Affinity ネットワークでは、「亀裂の交差」は認識されない
- ・ 亀裂統合の順序によって、Frac-Affinity ネットワークの特性が変化する可能性があ

なお、Frac-Affinity ネットワーク上では亀裂の交差位置が厳密な意味で正確に表現されな い点に関しては、将来的に Frac-Affinity において亀裂の交差部を特殊な領域として設定す る(例えば高透水性領域として取り扱う)機能を追加する場合、その影響を十分に検討す る必要がある。また、亀裂統合の順序がもたらす影響については、メッシュ統合の最初の 段階で岩盤基質部に重ね合わされたメッシュ構造がその後の重ね合わせの作業により徐々 に変形する可能性があることに対応しており、これを解析条件の微調整に意図的に活用で きる可能性もあるが、現状では解析メッシュ生成における留意事項として認識することが 必要である。 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 2.2-1 及び 図 2.2-2 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 からのエキスポート・ファイル[8]によって定義されており、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 2.2-3 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 2.2-1 FRAC-AFFINITY が扱う構造ブロックの概念図



図 2.2-2 簡略化したモデル領域の構造ブロックの分解図



図 2.2-3 Frac-Affinity による側方境界面と上下境界面の設定

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へ分割される。この作業にあたって は、図 2.2.1-1 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値に用いることとしている。



図 2.2.1-1 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 2.2.1-2 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。なお、岩盤基質部に関する解析メッシュは x、y 及び z の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 2.2.1-2 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 フラクタル透水係数場の生成

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に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。

まず、フラクタルスケーリング則による透水係数の不均質場は、地質構造単位毎に生成 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領域広 がりを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は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。

(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[7]。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 γ(h)は、次式により定義される。

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

ここで、 $\psi(\mathbf{x})$ は透水係数、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 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。

方向毎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 2.2.2-2 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_o)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。

$$ln\sigma = lna + 2p(lnh_x^0 - ln\alpha)$$

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h⁰ = α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、透水計数を設 定する。この作業は、図 2.2.2-3 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 2.2.2-3(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。

$$\sigma' = \begin{cases} \sigma h^p & \text{if } h < 1 \\ \sigma & \text{if } h \ge 1 \end{cases}$$

$$(2.1)$$

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 2.2.2-3(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 2.2.2-3(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する場合には、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計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 2.2.2-1 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



図 2.2.2-2 相関長を考慮したバリオグラムの例



図 2.2.2-3 中点置換法によるメッシュの詳細化

2.2.3 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に別途用意した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する。

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も小さく設定することが重要 である。

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

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 2.2.4-1 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 2.2.4-1 岩盤基質部の要素分割と Frac-Affinity ネットワークの概念図

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 次元的な広がりを有する特異領域のうち、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 にエキスポート・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。なお EarthVision は、エキ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。また、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、FracAffinity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ネットワークでは地下水流動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。

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2.3.2-1 である。要素分割のための具体的な作業は、次の手順で行われる。



図 2.3.2-1 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

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毎に決定論的亀裂を(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、岩体基質部 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均質(亀裂の全領域で一定) である)。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。

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当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するものとし、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としては、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毎に行 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 2.4.1-1 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、亀裂の重心に対して抽出作業を行うことから、図 2.4.1-1 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 2.4.1-1 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、地質が持つ過去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における今後の課題の一つと考えられる。な お、亀裂の重心が当該ブ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、 2.1.2 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。

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。

(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。

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{min}} \left(\frac{r_{min}}{r}\right)^{b}, \qquad r_{max} > r \ge r_{min}, \ b > 1$$

ここで rmin と rmax 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 亀裂の方向

亀裂の方向については、Frac-Affinity では一様分布と Fischer 分布が利用できる。亀裂方 向の分布は、亀裂媒体の連続性に大きく影響する重要なパラメータである。

(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。

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

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。



図 2.4.4-1 確率論的亀裂の走向及び傾斜の設定

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。

(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値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。 3. 数値計算手法の改良

本業務では、Frac-Affinity の数値計算手法の改良として、Frac-Affinity を飽和地下水流動 解析から不和・不飽和地下水流動解析への拡張するための検討を行うとともに、これまで の Frac-Affinity における数値解析上の制限、特に取り扱い可能な最大節点数に関する上限 の緩和するための方策を検討し、Frac-Affinity ver.2 のソルバー開発に反映させた。以下で は Frac-Affinity ver.2 のソルバーの開発・改良について、定常解析と非定常解析の支配方程 式と数値解法の観点から概要をまとめる。

3.1 飽和地下水流動解析

3.1.1 非定常地下水流動解析

飽和地下水流動解析で標準的に使用される偏微分方程式は拡散方程式の一種であり、次 式で与えられる。

$$s\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla h) + q \tag{3.1}$$

ここで、未知の変数は水頭 h であり、これ以外の変数は透水係数 k、比貯留率 s 及びソース とシンクを表す q である。透水係数 k は時間と空間に依存するが水頭には依存しない。

(3.1) 式を支配方程式とした場合、境界条件として水頭あるいはフラックスを固定する こととなる。Frac-Affinity ver.2.0 では、固定水頭($h = h_0$)、固定フラックス($k\nabla h \cdot n = f_0$) に加え、上部境界におい地標高に応じた境界条件(h = z)を指定することができる。また、 状況によって自動的に固定水頭条件と固定フラックス条件を使い分ける混合境界条件を (3.1) 式に対して使用することも可能である。

Frac-Affinity では、解析メッシュである Frac-Affinity ネットワーク上に(3.1) 式を差分形式に展開する。簡単のためソース/シンク項を省略し、ある節点 i について支配方程式を差分形式に展開すると次式が得られる。

$$s\frac{\partial h_i}{\partial t} = \frac{1}{V_i}\sum_{\text{conn}\,i-j}A_{i,j}k_{i,j}(h_i - h_j)/d_{i,j}$$

ここで、Viは節点iに代表される部分の体積であり、Ai,j、di,j、ki,jは、それぞれ節点i

と節点 j を連結しているレグの断面積、長さ及び透水係数(複数の経路が存在する場合に はそれらの透水係数の係数の調和平均)である。この様に(3.1)式を差分形式で表現する と、矩形により構成される整形な解析メッシュを考えた場合には h の値を周囲との調和平 均により逐次更新する作業を数学的に表現する式が、より一般的には、レグにより接合さ れている周囲の全ての接点からの流体フラックスの総和に基づき、注目する接点における h を更新する式が導出されることとなる。Frac-Affinity では、この差分方程式を可変次、後退 差分、予測子 – 修正子法により各時間ステップに対して変数値を更新して解を求めている [6]。

3.1.2 定常地下水流動解析

定常地下水流動解析の支配方程式は、(3.1)式の左辺(時間微分項)を0として(3.2)式 で与えられる。

$$0 = \nabla \cdot (k \nabla h) + q \tag{3.2}$$

上式を差分形式で離散化すると、水頭hに関する線形代数方程式を得る。

$$0 = \frac{1}{V_i} \sum_{\text{conni-j}} A_{i,j} k_{i,j} (h_i - h_j) / d_{i,j}$$

なお、Frac-Affinity ver.1(飽和地下水流動のみを対象とした初期のバージョン)では、共 役勾配法に解を求めていたが[7]、総節点数が 20,000 を越える計算については解析に必要な メモリと計算時間が急速に増大することから、現実的な Frac-Affinity ver.1 の総節点数の上 限は約 20,000 節点となっていた。

3.1.3 計算可能な総節点数増大のための拡張

解析可能節点数の上限については、Frac-Affinity ver.1 での事例から、経験的に線形ソル バーの限界により総節点数が制限されていることが明らかとなっていた。この傾向は定常 解析において特に顕著であった。そこで本業務では、以下の検討から、対称共役勾配法を 導入することで解析可能接点数の増大を図ることとした。

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、与えられた行列の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。

(1) 共役勾配法(CG法)

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 3.1.3-1 で与えられる。

表 3.1.3-1 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 $i = 1, 2, \dots$
$z = M^{-1}r$ r
$ \rho_{oid} = \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\ < \varepsilon \ b\ $

(2) プレコンディショニング行列

前節の行列Aは、その対称性から次式で表現することが可能である。

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

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。

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

ここで、A と M とで低次の固有値がを一致させるため、対角行列 B を M と A の列の和が 等しくなるように選択する。なお w は単位ベクトルである。

$$Mw = Aw \Rightarrow (\mathbf{B} + L\mathbf{B}^{-1}L^{T})w = Dw$$

便宜上、 $\gamma = L^{T}w$ によりベクトル γ を定義する。 $\gamma_{k} = \sum_{s < k} L_{sk}$ とすると、B,が次式により算出される。

$$\mathbf{B}_r = D_r - \sum_{k < r} L_{rk} \gamma_k / \mathbf{B}_k$$

(3) 試計算の結果

フラクタルスケーリング則により不均質に透水係数を設定した岩盤基質部について、上述の計算手法により試解析を行った。解析はメモリ容量 128MB、CPU のクロックスピード 450MHz の計算機により実施した。許容誤差 ε を 1e-6 とした場合の各解析の計算時間を表 3.1.3-2 にまとめる。表 3.1.3-2 から、現実的な時間内に収束解が求められていることが確認 できる。

ここで、プレコンディショニング時に D の代わりに B を用いることが非常に重要である。 例えば、総節点数が 27,000 節点のケースでは、D による計算では解が収束しなかった。ま た透水係数を均質に設定した場合には、行列 D の使用により解の収束に必要な反復回数が

グリッド	節点数	反復回数	計算時間 [s]	計算時間/節点数 [ms]
15 x 15 x 15	3375	54	1.2	0.36
15 x 15 x 30	6750	87	4.2	0.62
 15 x 30 x 30	13500	118	11.8	0.87
30 x 30 x 30	27000	109	22.5	0.83
30 x 30 x 60	54000	177	75.0	1.39
30 x 60 x 60	108000	247	210.3	1.95
45 x 60 x 60	162000	220	277.8	1.71

表 3.1.3-2 ソルバーの性能確認のために実施した試計算に要した時間

3.2 飽和·不飽和地下水流動解析

3.2.1 Richard's の方程式

飽和・不飽和地下水流動解析の支配方程式については、昨年度の検討のなかで(3.3)式 に示す Richard's の方程式の使用が妥当であることを示した[1]。Richard's の式は、系内の気 相(例えば空気)の圧力が至るところで一定であると仮定できる場合に、不飽和領域を含 む地下水流動を比較的簡便に表現することが可能であり、(3.1)式に示した飽和地下水流 動解析における支配方程式との類似性も高い。

また昨年度の検討では、Richard's の方程式の具体的な表現として、圧力水頭を顕わに取り扱う圧力による表現、飽和度を顕わに取り扱う飽和度による表現ならびに両者を複合的 に使用する複合形式による表現等が存在することを整理するとともに、飽和領域と不飽和 領域が同時に存在する場合の解析可能性や数値解析における質量保存の観点から、Frac-Affinityの飽和・不飽和地下水流動解析では(3.3)式で表現される複合形式の Richard's の 方程式が最も適していることを明らかにした[1]。

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} = \nabla \cdot \left[K(h) \nabla (h+z) \right]$$
(3.3)

ここで、φは空隙率、sは飽和度、hは圧力水頭、K(h)は圧力水頭(または飽和度)に依存 する透水係数、zは鉛直方向の座標である。

さらに、昨年度の検討では、(3.3) 式の透水係数 K(h) がh に対して強い非線形性示すこ 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[1]。この Pressure Transform 法では、圧力水頭の代 わりに、圧力水頭(と場合によっては岩盤のパラメータ入)に依存する変換のための変数 $f = f(h, \lambda)$ を導入する。この変数f は次の微分方程式により与えられる。

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial h} \nabla h + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \nabla \lambda$$
(3.4)

(3.4) 式により、 ∇h の代わりに f の関数を用いることによって(3.3) 式は次式のように 表現される。

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D(h) \nabla f \right) + \frac{\partial K}{\partial z} - \nabla \cdot \left(D(h) \frac{\partial f}{\partial \lambda} \nabla \lambda \right)$$

ここで、 $D(h) = (\partial f / \partial h)^{-1} K(h)$ である。したがって、適切な関数 $f(p, \lambda)$ を導入すること により (3.3) 式における K(h)の強い非線形性を緩和し、数値的解を比較的容易に求める ことが可能となる。昨年度の検討では、このための変換として Pan and Wierenga による Pt ベースの変換[2,3]が適切であることを示した。この変換は次式で与えられる。

$$f = P_t = \begin{cases} h, & h \ge 0, \\ \frac{h}{1 + \beta h}, & h < 0. \end{cases}$$

なお、,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[2]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。

3.2.2 不飽和特性

(3.3) 式では、圧力水頭(不飽和領域ではサクション)と飽和度、透水係数と飽和度の 関係をそれぞれ設定する必要がある。Frac-Affinity ver.2 では、Van Genuchten モデルあるい は線形補完による任意曲線の近似により、これらの関係を設定することができる。なお、 これらの設定方法及び設定内容の詳細はユーザーマニュアル[5]に示した。

Van Genuchten モデルは次式により表される[4]。

$$s' = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} 1 & \text{for } h \ge 0, \\ \left[\frac{1}{1 + (A|h|)^B}\right]^c & \text{for } h < 0, \end{cases}$$
(3.5)

$$K(s') = K_{\text{sat}}s'^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - s'^{\frac{1}{C}} \right)^{c} \right\}^{2}, \qquad (3.6)$$

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 3.2.2-1 及び図 3.2.2-2 に示す。



図 3.2.2-1 van Genuchten モデルによる圧力水頭と飽和度の関係の設定例



図 3.2.2-2 van Genuchten モデルによる飽和度と透水係数の関係の設定例

3.2.3 定常地下水流動解析

飽和・不飽和問題に対する定常地下水流動解析は、(3.3)式において左辺の時間微分項 を0とおくことにより、次式で与えられる。

$$0 = \nabla \cdot \left[K(h) \nabla (h+z) \right] \tag{3.7}$$

(3.7)式は、飽和地下水流動の定常状態の式に類似しているが、前述のようにKはhに 対して非線形であり、線形問題を解くための数値解上の手法を直接適用することはできな い。昨年度、不和・不飽和地下水流動の支配方程式に関する検討(支配方程式、表現形式 及びPt ベースの方程式の変換等)においてソルバーのプロトタイプを作成し、その際、非 線形問題を解くための線形計算の繰り返し部分に Picard 反復法を採用した[1]。この Picard 反復法は比較的小さな時間ステップを使用する非定常流解析に適しており、支配方程式の 数学的な解析可能性を検討する際にはこの様な限界は問題とならなかった。しかし、これ までの経験から、Frac-Affinity での解析の様に時間ステップが大きく変化する問題において は Newton 反復法の適用性が高いものと判断された。そこで、本業務において Frac-Affinity を飽和・不飽和地下水流動へ拡張するにあたっては、定常状態に対する支配方程式を差分 化して求められる非線形代数方程式系を取り扱うソルバーに Newton 法を採用することと した。

ここで、(3.7) 式の *K(h)*の非線形性がもたらす問題に一つに Jacobian の非対称性がある。 この非対称性により、線形問題を対象とする前述の Newton 反復法を直接使用することがで きないという問題が生じる。また、方程式の非線形性を有することの二つ目の問題として、 解が必ずしも一意に収束しないという問題が存在する。この二つ目の問題は、例えば Van Genuchten モデル、すなわち (3.5) と (3.6) 式により媒体の不飽和特性を定義すると飽和 度が小さい領域ではサクションが非常に大きくなるとともに透水係数が低下することと関 連している。Van Genuchten パラメータ *B*を2としたときには、飽和度の十分小さい領域に おける透水係数は、サクション *h* に対して 4.5 乗のオーダーで急激に減少する。これは、 ある領域で飽和度が低下した時に、その部分でサクションが増大するとともに透水係数が 極端に低下して、(3.5) 式から不連続な解が求められる可能性が有ることを示している。

この状況は、物理的には不飽和領域に囲まれた特定の部分に水分が孤立して存在することを示しており、場合によっては物理的にも想定可能なものであるが、多くの場合、より連続的に物理量が変化する解を求めることが適切である。したがって Newton 反復法で連続的な解を求めるために、飽和度の小さな領域における透水係数の急速な減少を方程式の上で緩和することが必要となる。

そこで本業務では(3.5)式に s⁴³を乗じて(3.8)式から連続的な解を求めることとした。 ここで、s は飽和度である。これにより飽和度が非常に低い場合でも、透水係数の減少を s⁴⁵を乗じることによって相殺されることから、(3.8)式では連続的な解を求めることが可 能である。

$$0 = s^{-4.5} \nabla \cdot \left[K(h) \nabla (h+z) \right]$$
(3.8)

なお、Frac-Affinityでは一つの不飽和特性を解析対象の全ての領域に適用することも可能 であるが、必要に応じて領域ごとに異なる不飽和特性を与えることも可能である。また上 記の式の変換は、一般的に設定される不飽和特性に対して数値解法上の一定の効果を持っ ているものと考えられる。

3.2.4 非定常地下水流動解析

非定常地下水流動解析では、不飽和領域については Richard's の方程式を Pt ベースの変換 により数値解に適した形式に書き直した式を、飽和領域については貯留係数を考慮した飽 和地下水流動方程式を解くこととなる。飽和領域と不飽和領域の区別は Frac-Affinity が自 動的に判断する。

非定常流地下水流動解析の初期条件は、既に実施した非定常流地下水流動解析の結果を 引き継ぐか、あるいは定常地下水流動解析の結果により与えることができる。初期状態に おいて境界面を含めて系全体が飽和していることが確実である場合には、非定常飽和・不 飽和地下水流動解析の初期条件として飽和地下水流動計算の結果を用いることも可能であ る。ただし、境界面における透水係数の設定方法が飽和地下水流動解析と飽和・不飽和地 下水流動解析とで同一ではないことから、境界面上で不飽和条件が想定される場合には、 飽和地下水流動解析により非定常飽和・不飽和地下水流動解析の初期条件を設定すると問 題を生じる可能性がある。

数値計算法については、昨年度の検討では単純化のために考慮されていなかった貯留係 数を不飽和領域の方程式に加えることで、飽和解析と同じ数値計算法を飽和・不飽和解析 で用いることが可能となった。具体的には前述の可変タイムステップ、可変次、後退差分、 予測子-修正子法により飽和地下水流動解析と飽和・不飽和地下水流動解析の両者を解析 することが可能となった[6]。また、昨年度問題となったタイムステップの制御については、 既存の他のソルバーで採用されている手法の活用により大幅な改善を得ることができた。

4. 入力データ作成手法の改良

4章では、入力データ作成手法の改良として、Frac-Affinity において立坑の掘削を解析メ ッシュである Frac-Affinity ネットワーク上に表現するための改良について述べる。なお、 立坑掘削の入力条件の指定方法等については5章及びユーザーガイド[5]に詳しく示した。

4.1 立坑掘削による Frac-Affinity ネットワークの更新作業の概要

Frac-Affinity ver.2 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 4.1-1 に示す。図 4.1-1 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 4.1-1 立坑掘削に伴う Frac-Affinity ネットワークの修正に関する概念図 (●は節点、 ◆は境界節点を示す)

図 4.1-1 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 正し、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、解析終了時までに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。 4.2 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[5]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、この様な修正作業には、取り除かれる節点や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する立坑深度を時間変化させることが可能である。

4.3 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。

4.3.1 内部の節点が高い位置に存在する場合

図 4.3.1-1 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 4.3.1-1 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。図 4.3.1-1 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 4.3.1-1 立坑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

4.3.2 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 4.3.1-2 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 4.3.1-2 立坑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

4.4 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 4.4-1 に示す。表 4.4-1 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常に存在する。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。

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

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 4.4-1 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の適用した例を示す。

表 4.4-1 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
  ſ
    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;
    }
  }
}
```



図 4.4-1 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)

4.5 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 析の実施に先立ってあらかじめ計算される。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。

- 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。
- 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。
- 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。

4.6 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を構成する接点の数は保存さ れている必要がある。これは、解析において接点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、立坑の掘削に伴い接点やレグを 「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 接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、無効とされた接点には全て一定の水頭が与えられるとともに、これ らの接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。 5. ユーザインタフェイスの改良

本章では、本業務において実施した Frac-Affinity の改良のうち、ユーザインタフェース 部分の改良に関連して以下の事項を中心に概説する。

- ・ 立坑掘削を表現するための改良
- ・ 不飽和特性の取り扱いに関する改良
- ・ 境界条件として涵養を伴う自由浸出面を設定するための拡張

なお、平成9年度の Frac-Affinity ver.1 の開発以降、ver.1.2、ver.1.2.4 及び ver.2.0 がリリ ースされており、このうち本業務では中間的なリリースも含め ver.1.2.4 以降のバージョン を開発をしている。ここでは、これらのバージョンアップを整理するため、次の各バージ ョンアップについて改良の概要をまとめることとする。

- ・ Frac-Affinity ver.1 から ver.1.2
- ・ 同 ver.1.2 から ver1.2.4
- ・ 同 ver1.2.4 から ver.2.0
- ・ 同 ver.2.0 から ver.2.0.1

なお、Frac-Affinity ver.2.0.1 における Frac-Affinity インタフェースの詳細については、ユ ーザーガイド[5]に詳しく示した。

5.1 Frac-Affinity の改良履歴

Frac-Affinity のバージョンアップについて、各バージョンアップの内容はそれぞれ次の通りである。

5.1.1 ver.1.0 から ver.1.2 への改良点

- ・ 確率論的 亀裂の 方向分布の 追加
- ・ 確率論的亀裂の大きさおよび形状分布の追加
- 確率論的亀裂の透水係数分布の追加。
- ・ 決定論的亀裂と確率論的亀裂の境界における水理学的取り扱いの改良
- ・ 他の部分から孤立している亀裂の抽出方法の改良
- 確率論的亀裂の交差部に関するモデル化の改良
- ・ ソルバーの改良

- ・ インタフェースの改良
- ・ EarthVision とのインタフェースの改良
- 5.1.2 ver.1.2 から ver.1.2.4 への改良点
 - 取り扱い可能な最大節点数の増加(ソルバーの改良)
 - 下部境界および上部境界を複数の領域に分割し、それぞれに対して異なる境界条件を指定できる機能の追加
 - ・ 既に実施した他の解析結果にもとづき境界条件を設定する機能の追加
 - ・ Frac-Affinity ネットワークや流束ベクトルを可視化するため、Frac-Affinity インタ ーフェイスから可視化情報を出力する機能の追加
- 5.1.3 ver.1.2.4 から ver.2.0 への改良点
 - ・ **飽和**・不飽和地下水流動解析を行うための機能の追加(ソルバー及びインタフェ ースの改良)
 - ・ 取り扱い可能な最大節点数の増加(ソルバーの改良)
 - ・ 深度が時間変化する立坑掘削をモデル化する機能の追加
 - ・ Frac-Affinity ネットワークを指定領域(直方体によって定義する)で詳細に設定す る機能の追加

5.1.4 ver.2.0 から ver.2.0.1 への改良点

- 涵養を伴う自由浸出面により境界条件を指定する機能の追加
- ・ 乱数発生のためのシーズを指定する機能の追加

5.2 立坑の掘削に関する入力

Frac-Affinity ver.2.0 以降では、4 章にて述べた概念にもとづき立坑の掘削を深度の時間変 化を含めてモデル化することができる。モデル化における立坑の形状は円筒形であり、立 坑深度の時間変化については、任意の時点の立坑深度を指定するとともに、その間の深度 を Frac-Affinity が線形補完することにより算出される。この様な深度が時間変化する坑道 は解析領域内に 1 つに限って設けることが可能である。また、ver.2.0 以降の Frac-Affinity では ver.2.0 以前の Frac-Affinity で使用できた深度や坑道長が変化しない立坑及び水平坑道 についても引き続き解析で使用することができる。これらの立坑及び水平坑道は、鉛直あ るいは水平な円筒形によって解析領域内にモデル化される。また、1 つの解析で複数の坑 道及び水平坑道を解析領域内に設けることができる。

5.2.1 深度や坑道長が変化しない坑道の入力

深度や坑道長が変化しない坑道のうち、水平坑道については、解析領域を定義する入力 ファイルにおいてキーワード"GALLERY"により指定する。これらの坑道については、 (x, y, z) 座標系において始点(x_gs, y_gs, z_g)と終点(x_ge, y_ge, z_g)を指定するこ とにより、指定された2点を中心線が通る水平な円筒形により解析領域内にモデル化され る。複数の水平坑道をモデル化する場合には、キーワード"GALLERY"の入力を再度入力し、 2番目以降の水平坑道の位置や形状を同様の方法で入力する。

同様に、解析領域を定義する入力ファイルにおいてキーワード"SHAFT"により始点 (x_gs,y_gs,z_g) と終点(x_ge,y_ge,z_g)を指定することによって、これら2点を中心 線が通る鉛直な円筒形として解析領域内に立坑をモデル化することができる。水平坑道と 同様に、キーワード"SHAFT"を始点と終点の座標とともに繰り返し入力することで、複数 の立坑を解析領域内にモデル化することができる。

5.2.2 深度が時間変化する立坑の入力

深度が時間変化する立坑については、解析領域を定義する入力ファイルにおいてキーワード"ExcavationModel"により、掘削や支保工の設置に関する入力データを既述したファイルを指定する。指定された入力ファイルでは、任意の時点における立坑の深度を指定し、 指定された時点以外の立坑の深度については Frac-Affinity が線形補完により算出する。

掘削された坑道表面への支保の設置についても、立坑の掘削深度の設定と同様の方法で 指定する。すなわち、任意の時点における支保工の設置深度を指定するとともに、指定さ れた時点以外の設置深度を線形補完により算出する。入力ファイルのフォーマットを表 5.2.2-1 に示す。

Name	User-defined		
	(Suggested Name: shaft_name.1ai)		
Format	Geometry x y z radius		
	Depth $z_1 z_2 z_3 z_N$		
	Time $t_1 t_2 t_3 \dots t_N$		
	Lining		
	z_1_top z_1_bot t_1_start t_1_end		
	z_2_top z_2_bot t_2_start t_2_end		
	NT (NT 1 (4 NT charact 4 NT can al		
	z_N_top z_N_bot t_N_start t_N_ena		

表 5.2.2-1 深度が時間変化する立坑に関する入力ファイルのフォーマット

表 5.2.2-1 に示したように、深度が時間変化する立坑に関する入力ファイルでは、まずモ デル化する立坑の (x,y) 座標、立坑の最終深度及び坑道半径を指定する。ついで、"Depth" と"Time"の後に引き続いて記述される数値により、各時刻における立坑の深度を指定する。 なお、最終深度よりも大きな深度が設定された場合には無視される。また、深さと時刻の 数は同じでなければならない。

支保工の設置については、支保工を設置する区間(Z_N_top と Z_N_bot の間)と同区間 における支保工の施工開始時刻と施工終了時刻を入力する。施工開始時刻と終了時刻につ いては、複数の施工区間で同一の時間帯を指定することも可能である。施工の順序や施工 に必要な期間等に従って上記の指定を複数回入力することにより、複雑な工程もモデル化 することが可能である。支保工の設置については重複も許されるが、この場合は 2 回目以 降の支保工の設置による境界条件の変化は生じないものと見なされる。また、支保工が立 坑の最終深度に達した時点で立坑の底面についても支保工が設置されたものと見なされる。 なお、支保工の設置深度が掘削深度を上回った場合にはエラーとなるので注意が必要であ る。

立坑表面における境界条件は、デフォルトとして掘削時に大気開放、支保工の設置後に は不透水境界が設定される。ただし、これらの境界条件については、5.4 節に示す一般的な 境界条件の入力方法に従う記述により個別の指定を行うことで、他の境界条件の使用も可 能である。
5.3 不飽和特性の入力

5.3.1 岩盤基質部

岩盤基質部の不飽和特性は、不飽和特性を具体的に指定する入力ファイルと、指定され た不飽和特性と岩盤基質部ブロックとの対応関係を指定した入力ファイルにより設定する。 指定された不飽和特性と岩盤基質部ブロックとの対応関係を指定する入力ファイルには、 表 5.3.1-1 の形式で必要な対応関係を記述する。また、具体的な不飽和特性の設定は、線形 近似により設定するか van Genuchten を使用するかに応じて、表 5.3.1-2 または表 5.3.1-3 の 形式で指定する。

表 5.3.1-1 岩盤基質部の不飽和特性を設定する入力ファイルのフォーマット

Name	User-defined
	(Suggested Name:
	projectname_rock_wrm_tn.fai)
Format	zone_name_1 wrmfile_1
	zone_name_N wrmfile_N

実際の不飽和特性の入力では、次に示す Frac-Affinity インタフェースからの指示に従い、 指定された不飽和特性と岩盤基質部ブロックとの対応関係を示したファイル名(表 5.3.1-1 に相当)を入力する。

Name Intact Rock Zone - WRM file :

線形近似により飽和度と相対透水係数の関係及び飽和度とサクションの関係を指定する 場合には、キーワード WRMSatCondP により表 5.3.1-2 の形式で入力ファイルを作成する。

表 5.3.1-2 線形補完により不飽和特性を指定する場合の入力フォーマット

Name	User-defined
	(Suggested Name: none)
Format	WRMSatCondP
	$ N_s N_a$
	$Cond_1 Cond_2 \dots Cond_{N_a}$
	$Sat_1 Sat_2 \dots Sat_{Na}$
	$Sat_1 Sat_2 \dots Sat_{Ns}$
	$P_1 \dot{P}_2 \dots \dot{P}_{Ns}$

表 5.3.1-2 に示した入力ファイル 2 行目の N_sは、3 行目および 4 行目でのデータ数を指定 するものであり、N_qは5 行目および 6 行目のデータ数を指定すものである。3 行目および 4 行目は、N_s点で指定した相対透水係数と飽和度の関係を示しており、Frac-Affinity はこの値 にもとづき指定された点以外における相対透水係数と飽和度の関係を線形補完により算出 する。なお、相対透水係数値は 0 以上でなければならない。5 行目および 6 行目では、N_s 点で飽和度とサクションの関係を指定しており、これ以外の点においては線形補完により 両者の関係が定義される。なお、サクションは、圧力水頭を負の値で入力する。

一方、(3.5) 式と(3.6) 式により不飽和特性を van Genuchten モデルにより定義する場合 には、表 5.3.1-3 の形式によって van Genuchten パラメータを指定する(3.2.2 項参照)。この ファイルでは van Genuchten モデルの使用を意味するキーワード"WRMVanGen"に続いて、 (3.5) 式と(3.6) 式のパラメータAを指定する。なお、(3.5) 式と(3.6) 式のパラメータ B については、Frac-Affinity では2が設定されている。

表 5.3.1-3 van Genuchten モデルにより不飽和特性を指定する場合の入力フォーマット

Name	User-defined (Suggested Name: none)
Format	WRMVanGen
	Parameter_A

5.3.2 決定論的亀裂

決定論的亀裂の不飽和特性は、岩盤基質部と同様の方法で設定する。すなわち、

次に示す Frac-Affinity からの指示に従い、決定論的亀裂と適用される不飽和特性の対応 関係を既述したファイル名を入力する。これにより、指定された対応関係に従って決定論 的亀裂に不飽和特性が与えられる。

Name DDF Feature - WRM file :

この入力ファイルのフォーマットを表 5.3.2-1 に示す。一方、具体的な不飽和特性の設定 は、岩盤基質部と同様の方法を用いる。すなわち、表 5.3.1-2 または 5.3.1-3 の形式で、線形 補完または van Genuchten モデルにより設定することができる。

表 5.3.2-1 決定論的亀裂と不飽和特性の対応関係を指定する入力ファイルのフォーマット

Name	User-defined (Suggested Name: projectname_ddf_wrm_tn.fai)
Format	feature_name_1 wrmfile_1
	feature_name_N wrmfile_N

5.3.3 確率論的亀裂

確率論的亀裂の不飽和特性は、次に示す Frac-Affinity からの指示に従って,

表 5.3.3-1 の形式で確率論的亀裂の不飽和特性を既述したファイル名を入力する。確率論 的亀裂については、全ての亀裂に対して同一の不飽和特性が適用される。

Name SDF Feature - WRM file :

確率論的亀裂の不飽和特性の設定では、全ての亀裂で同一の不飽和特性が使用されることを示すキーワード"ALLSDFs"が使用される。具体的な不飽和特性の設定は、岩盤基質部や決定論的亀裂に対する方法と同一でる。なお、表 5.3.1-2 または 5.3.1-3 の形式で線形補完または van Genuchten モデルにより設定することができる。

表 5.3.3-1 確率論的亀裂の不飽和特性を設定する入力ファイルのフォーマット

Name	User-defined (Suggested Name: projectname_sdf_wrm_tn.fai)
Format	ALLSDFs wrmfile

5.4 境界条件の設定

Frac-Affinity では境界条件として、

- 流束
- · 水頭
- ・ サクション
- · 涵養量(自由浸出面)

を指定することができる。このうち、自由浸出面による境界条件の設定は、本業務において Frac-Affinity を飽和・不飽和地下水流動解析に拡張したことに伴い新たに導入されたものである。

これらの境界条件は、次に示す Frac-Affinity からの指示より入力ファイル名を指定する ことにより入力する。

name Boundary Condition file :

入力ファイルの書式を表 5.4-1 に示す。また入力ファイルの例を表 5.4-2 に示す。

Name	User-defined
	(Suggested Name :
	projectname_flow_bounds.fai)
Format	HEAD_FILE
	file_location
	face_name_1
	ALL
	FLUX
l	ml
	flux_1
	face_name_2
	ALL
	FLUX
	m2
	time_1 flux_1
	time_2 flux_2

表 5.4-1 境界条件設定のための入力ファイルのフォーマット(1/2)

表 5.4-1 境界条件設定のための入力ファイルのフォーマット(2/2)

Name	User-defined
	(Suggested Name :
	projectname flow bounds.fai)
	face name 3
	x_3 y_3 z_3
	••••••
	x_n3 y_n3 z_n3
	FLUX
	m2
	time 1 flux 1
	time_1 hux_1
	une_2 nux_2
	face_name_4
	ALL
	HEAD
	m4
	head 4
	nead_4
	face_name_5
	ALL
	HEAD
	m5
	time 1 head 1
	time_1 head_2
	time_z neau_z
	face_name_6
	пб
	x_6 y_6 z_6
	χη δνη δ χη δ
	me
	time_1 head_1
	time_2 head_2
	face_name_7
	ALL
	HEAD
	TOPOGRAPHIC
	6 O
	lace_name_8
	ALL
	HEAD
	USE_FILE
1	face name 9
	x_y y_y z_y
	x_n9 y_n9 z_n9
	HEAD
	USE FILE

表 5.4-2 境界条件設定のための入力ファイルの例:(REGQ99_flow_bounds.fai)

TOP	
ALL	
FLUX	
1	
-3.24e-9	
ONE	
ALL	
HEAD	
1	
140	
TWO	
ALL	
HEAD	
TOPOGRAPHIC	
ТОР	
24	
6615.138574032	-68850.9103331
6518.835977409	-69341.9928023
6702.50552514	-69656.8548841
7043.606113784	-70024.1939796
7142.797960652	-70173.6733308
6488.021129815	-71234.577563
5124.593425097	-70567.3682607
4185.452993553	-70915.2731725
3960.749501591	-69821.811034
4415.024141505	-69821.811034
4530.819637954	-69554.5906576
4325.950682699	-69198.2968224
4406.116795625	-69127.0380554
4584.263713238	-69340.8143565
4842.576743778	-69438.7951612
5270.12934605	69278.4629353
5760.033369487	-68957.7984836
6214.308009401	-68200.6740838
6686.397341077	-67416.8276463
7135.239478833	-66573.859924
7246.238712116	-66780.0013573
6837.822221048	-67390.1056086
6855.63691281	-67710.7700603
6588.41653639	-68191.7667379
HEAD	
TOPOGRAPHIC	

境界条件は以下に示す各領域について設定可能である。

- ・ 解析対象の形状を定義する入力ファイルにおいてキーワード"TOP"と"BOTTOM" により指定される解析上部境界及び下部境界
- ・ 解析対象の形状を定義する入力ファイルにおいてキーワード"FACES"によって指 定される側面境界
- ・ 解析対象の形状を定義する入力ファイルにおいてキーワード"GALLERY" と"SHAFT"によって指定される水平坑道と立坑の表面
- ・ 解析対象の形状を定義する入力ファイルにおいてキーワード"ExcavationModel"に よって指定される解析時間内において掘削される立坑表面

表 5.4-1 に示したように、境界条件を設定する表面の指定に続いて、キーワード"ALL"を 既述した場合には、指定された表面の全体にわたって記述された境界条件が適用される。 また、解析領域の上部境界と下部境界については、表 5.4-2 に示したように、(x,y)座標 を数列として示すことにより境界面の一部分を抽出し、その他の部分とは異なる境界条件 を設定することが可能である。なお、これらの入力ファイルにおいて特定の境界条件が指 定されなかった境界面については、デフォルトとして不透水境界条件が設定される。

5.4.1 流束の指定

境界条件として流束を指定する場合には、モデル領域に対して外向きを正としてキーワード"FLUX"により指定する。境界条件の設定にあたっては、解析時間を1と2に分割し、時間1と時間2のそれぞれに流束を指定することができる。全解析を通じて一定の流束を使用する場合には"FLUX"の次の行に1を、時間1と時間2に異なる流束を指定する場合には2を記述する。

時間1と時間2に異なる流束を指定した場合、時間1までは時間1に対して設定された 流束が、時間2以降は時間2に対して設定された流束が解析で使用される。時間1と時間2 の間では、時間に対して流束が直線的に変化する様に線形補完が行われる。また、境界条 件を指定する境界面ごとに個別に時間1と時間2を設定するとができる。

なお、飽和・不飽和地下水流動解析で境界面でモデル領域外への大きな流束を指定する 場合には、境界近傍で不飽和領域が形成される可能性がある。この場合、一般に不飽和領 域の透水係数が小さなものであることから、解析を進める上でエラーが生じる可能性があ ることに十分留意する必要がある。 5.4.2 水頭の指定

境界条件として水頭を指定する場合には、キーワード"HEAD"を使用する。設定値として は、指定された面で一定水頭、地形(標高)に応じた水頭、及び他の解析結果の参照によ る設定が可能である。なお、境界条件を水頭値で設定する場合、一定水頭の使用がデフォ ルトとして設定されており、この場合、キーワード"HEAD"に引き続いて設定値を記述する。 また、水頭による境界条件の設定においても、流束の指定と同様に時間1と時間2に区分 した境界条件を設定することが可能である。この場合の取り扱いは、流束を指定した場合 と同様であり、時間1と時間2の間では水頭値が線形補完により設定する。

5.4.3 サクションの指定

サクションは立坑や水平坑道等の内部境界条件に対して使用されることを想定している が、これ以外の境界面に対しても使用できる。また、深度が時間変化する立坑の掘削表面 に対しても使用可能である。サクションの指定方法は、流束及び水頭の指定と同様である。 なお、サクションを指定する場合には、正の値で入力する。

5.4.4 涵養量の指定

涵養量による境界条件は、基本的に解析領域の上部境界に対して適用されることを想定 したものであるが、これ以外の境界面に対して使用することも可能である。涵養量の指定 方法は流束や水頭、サクションを指定する場合と同様である。ただし涵養量による境界条 件の設定では、流束により設定する場合とは逆に解析領域の内向きを正とする。飽和地下 水流動解析でこの涵養による境界条件を使用する場合には、地下水面が地表面に一致して いるものとして境界面極近傍の水頭勾配から涵養/流出を判断し解析を行う。飽和・不飽 和解析の場合には、境界面が飽和している場合には流出が、不飽和となっている場合には 涵養が生じるものとして境界条件を設定する。 6. コードの拡張と適用性の評価

6.1 試解析の目的と解析ケースの構成

Frac-Affinityの試解析において動作の確認が必要な項目は、本業務の実施内容から以下のようにまとめることができる。

- 飽和・不飽和地下水流動解析の解析可能性の確認
- ② 20,000 以上の接点により構成される大規模な Frac-Affinity ネットワークによる解 析可能性の確認
- ③ 深度が時間変化する立坑掘削をモデル化する機能の確認
- ④ Frac-Affinity ネットワークや流束ベクトルを可視化するための情報を Frac-Affinity インターフェイスから出力する機能の確認
- ⑤ 既に実施した他の解析結果にもとづき境界条件を設定する機能の確認
- ⑥ 深度が時間変化する立坑掘削について、立坑への支保工の設置をモデル化する機能の確認
- ⑦ Frac-Affinity ネットワークを指定領域で細密化する機能の確認
- ⑧ 涵養を伴う自由浸出面により境界条件を指定する機能の確認
- ⑨ 下部境界および上部境界を複数の領域に分割し、それぞれに対して異なる境界条件を指定する機能の確認

そこで、本業務では、試解析として以下の基本ケースと代替ケースを設定することとした。

- 基本ケース; 上記①から⑤を考慮した試解析
- ・ 代替ケースA; 基本ケースに対して場の不均質性の設定を変更した試解析
 - ケース A-1; 不均質場ケース
 - ー ケースA-2; 代替的な確率論的亀裂ケース
- ・ 代替ケースB; 基本ケースに対して⑥~⑧の要素を加味した試解析
 - ケース B-1; 支保工設置ケース
 - ケース B-2; 詳細解析メッシュケース
 - ー ケース B-3; 涵養を伴う自由浸出面ケース

なお、前記⑨については、8 章にて述べる可視化システム利用のサポートの中で作動を確認した。

6.2 解析条件

試解析では、次の理由から可視化システム利用のサポートで開発した地質構造モデル及 び水理地質構造モデルを参考に、超深地層研究所計画における立坑の掘削を MIU スケール でモデル化することとした。

- 本業務は、立坑掘削の水理学的影響を Frac-Affinity で評価するために必要な改良 を行うことを目的としており、このためには超深地層研究所計画において立坑の 掘削が計画されている地域を対象に試解析を実施することが適切であると考えら れること
- 同地域の水理地質構造モデルとしては、可視化システム利用のサポートにおいて
 準広域スケール(約 5.8×4.2 km の多角形領域、-3,000 mbOD まで)及び MIU ス
 ケールモデル(1,250×800 m の領域、-1,000 mbOD まで)の飽和水理地質構造モ
 デルを開発しており、試解析では、これらの成果の活用が望まれること
- 試解析においては Frac-Affinity の最大の特徴であるハイブリッド媒体を使用する ことが望ましく、試計算のスケールとしては確率論的亀裂をモデル化する観点から MIU スケールの方が適切であると考えられること

ただし、涵養を伴う自由浸出面のモデル化に関する機能を確認するケース A-3 については、 この境界条件を適切がモデル化されているを確実に確認するため、複雑な地質構造モデル を使用する一連の試解析とは別に、比較的単純な解析モデルを用いて試解析を行うことと した。 6.2.1 基本ケース

(1) 解析モデルの基本構成及び飽和特性

基本ケースにおける水理地質構造モデルについては、可視化システム利用のサポートで 開発した MIU スケールの地質構造モデル及び水理地質構造モデルにもとづき、以下の地質 及び地質構造から構成されるモデルを使用することとした。

- 優白質花崗岩
- ・ 黒雲母花崗岩上部割れ目帯、割れ目低密度帯及び下部割れ目帯
- ・ 月吉断層上盤側および下盤側の割れ目帯
- 風化土岐花崗岩と土岐夾炭累層の基底礫部から構成される、土岐花崗岩と堆積岩との間の高透水性ゾーン
- 土岐亜炭支持層、明世累層および瀬戸層群から構成される堆積岩
- 月吉断層

これらの要素のうち月吉断層については決定論的亀裂として、月吉断層以外の要素は構造 ブロックとして表現されるものとした。図 6.2.1-1 に試解析で使用した地質構造モデルを示 す。

また、基本ケースにおいては、風化帯を除く花崗岩部分(月吉断層の破砕帯を含む)に 確率論的亀裂として考慮すべき比較的規模の小さな亀裂が存在することを仮定した。

- ・ 重心の位置、 一様分布
- 形状; 一辺の長さが一様分布となる矩形
- 方向 一様分布
- 透水係数; 一様分布

ただし、現在までのところ、原位置で取得されたデータにもとづいて確率論的亀裂を現 実的にモデル化することは困難であり、本試解析では高透水性部分で確率論的亀裂の亀裂 頻度を大きく設定すること等により原位置の亀裂状態を定性的に再現するに留めた。

以上の考え方にもとづき基本ケースとして設定した飽和水理特性を表 6.2.1-1 ~表 6.2.1-3 に 示す。



図 6.2.1-1 試解析のための地質構造モデル

地層	透水係数 [m/s]	空隙率 [-]	比貯留率 [1/m]
優白質花崗岩	1e-10	0.0125	1e-09
黒雲母花崗岩割れ目帯	1e-10	0.0175	1e-10
黒雲母花崗岩割れ目低密度帯	5e-12	0.0125	1e-10
月吉断層上盤側の割れ目帯	1e-10	0.0125	1e-09
月吉断層下盤側の割れ目帯	5e-08	0.0125	1e-09
高透水性ゾーン	1e-06	0.3000	1e-08
堆積岩	5e-08	0.4880	5e-08

表 6.2.1-1 基本ケースにおける岩盤基質部の透水性の設定

表 6.2.1-2 基本ケースにおける決定論的亀裂及び確率論的亀裂の透水性の設定

亀裂/ゾーン	透水係数 [m/s]	空隙率 [-]	比貯留率 [1/m]	龟 裂開口幅 [m]
月吉断層	1e-12	0.10	1e-12	5.10e-06
優白質花崗岩	1e-06	0.10	1e-07	5.10e-03
黒雲母花崗岩割れ目帯	5e-07	0.10	1e-07	1.61e-03
黒雲母花崗岩割れ目低密度帯	1e-10	0.10	1e-07	5.10e-03
月吉断層上盤側の割れ目帯	5e-09	0.10	1e-07	3.16e-04
月吉断層下盤側の割れ目帯	1e-07	0.10	1e-07	1.61e-03

※ 確率論的亀裂の屈曲度については、全ての亀裂で1を用いた。

亀裂セット	最小 傾斜角	最大 傾斜角	最小 方位角	最大 方位角	密度* [៣ ⁻³]
	16	32	244	276	0.0011
優白質花崗岩 2	77	81	358	004	0.0011
優白質花崗岩 3	43	56	152	162	0.0011
黒雲母花崗岩割れ目帯1	70	81	332	352	0.0300
	7	14	138	160	0.0300
黒雲母花崗岩割れ目帯 3	27	32	018	026	0.0300
黒雲母花崗岩割れ目低密度帯 1	76	79	308	313	0.0011
黒雲母花崗岩割れ目低密度帯 2	45	68	128	165	0.0011
 月吉断層上盤側割れ目帯 1	76	86	350	010	0.0077
月吉断層下盤側割れ目帯 1	16	32	244	276	0.0300
月吉断層下盤側割れ目帯 2	77	81	358	004	0.0300
 月吉断層下盤側割れ目帯 3	43	56	152	162	0.0300

表 6.2.1-3 基本ケースにおける確率論的亀裂の配置等に関する設定

(2) 不飽和特性

試解析で使用する不飽和特性については、既往の研究での設定値[16]を使用することとした。試解析で使用した相対透水係数と飽和度の関係及び水分特性曲線(サクションと飽和度の関係)を図 6.2.1-2 と図 6.2.1-3 にそれぞれ示す。



図 6.2.1-2 不飽和特性(相対透水係数と飽和度)の設定



図 6.2.1-3 不飽和特性(サクションと飽和度)の設定

(3) 立坑の掘削深度の設定

立坑の掘削深度の設定については、既往の研究における設定値[16]に基づき設定した。設定した立坑深度の時間変化を図 6.2.1-4 に示す。なお、図 6.2.1-4 には支保工設置深度の時間 変化も標記した。この設定は、ケース B-1 で立坑表面への支保工の設置(この場合、坑道 表面は止水されるものとした)で有効となるものとした。



図 6.2.1-4 立坑の掘削及び支保工の設置に関する設定

(4) 境界条件

基本ケースにおける境界条件の設定を表 6.2.1-4 に示す。

境界面	設定条件
上部境界(地表面)	地表の標高に応じた水頭
下部境界(基底面)	不透水境界
側面境界	可視化システムのサポート(8章にて後述)で実施した準 広域飽和解析の結果にもとづき設定
掘削後の立坑内壁面	不飽和状態にあるものとしてサクションを-5mで固定

表 6.2.1-4 基本ケースにおける要素分割のためのパラメータの設定

(5) その他の解析条件

基本ケースにおける Frac-Affinity ネットワークの構築に関する設定を表 6.2.1-5 に示す。

表 6.2.1-5 基本ケースにおける Frac-Affinity ネットワーク構築のためのパラメータ設定

構成要素	グリッドサイズ(m)	最小節点数	解像度 (Resolution Parameter)
岩盤基質部	200	2	0.01
決定論的亀裂	200	1	0.01
確率論的亀裂	50	_	0.5

6.2.2 代替ケース

(1) 不均質場ケース (ケース A-1)

ケース A-1 では、各岩盤基質部と月吉断層の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ものとした。不均質場の設定に使用したパラメータを表 6.2.2-1 に示 す。

表 6.2.2-1 不均質場ケース(ケース A-1)でフラクタルスケーリング則により不均質場を設定 するためのパラメータ

计负码标	透水係数(m/s)		次元	相関長. (m)	メッシュサイズ (m)
八 家 殿 马	平均	分散 (log)	(-)	(x,y,z)	(x,y,z)
月吉断層	1e-12	2.0	3.8	50,50,50	50,50,50
優白質花崗岩	1e-10	1.0	3.5	50,50,50	50,50,100
月吉断層下盤側割れ目帯	1e-10	0.5	3.5	100,100,100	50,50,50
月吉断層下盤側割れ目低密度帯	5e-10	2.0	3.5	100,100,100	50,50,50
月吉断層上盤側の割れ目帯	1e-10	1.0	3.5	50,50,100	50,50,50
月吉断層下盤側の割れ目帯	5e-08	1.5	3.5	50,50,10	50,50,50
 高透水係数ゾーン	1e-06	2.0	3.8	25,25,25	50,50,50
堆積岩	1e-08	2.0	3.7	25,25,25	50,50 50

(2) 代替的な確率論的亀裂ケース (ケース A-2)

ケース A-2 では、確率論的亀裂の設定に関して、基本ケースで使用した設定条件を含め て設定可能な全ての分布関数を使用して解析を行った。ケース A-2 で確率論的亀裂を設定 に使用した入力ファイルを添付資料1に示す。 (3) 支保工設置ケース(ケース B-1)

ケース B-1 では、立坑の掘削後、比較的速やかに支保工が設置されることを想定して解 析を行った。掘削の工程については、基本ケースと同様に 100mを 1 つの区間として段階 的に掘削を進めることとし、次の区間の掘削作業の開始と同時に 1 つ前の 100m 区間全体 に支保工が設置されるものとした。支保工の設置深度の時間変化は図 6.2.1.4 に示した通り に設定した。なお、支保工の設置後は立坑表面が止水されるものと考え、支保工設置以前 は大気開放、設置後は不透水境界して立坑表面を取り扱うものとした。

(4) 詳細解析メッシュケース (ケース B-2)

ケース B-2 では、Frac-Affinity ネットワークを指定領域で細密化する機能を確認するため、 基本ケースのネットワークを立坑の近傍と地表近傍で細密化することとした。具体的には、 立坑の近傍と地表近傍でネットワークを細密化する範囲として、以下の領域を指定するこ ととした。

- ・ 立坑の周辺領域;
- x-min: 5428
- x-max: 5528
- y-min: -68578
- y-max: -68478
- z-min: -100
- z-max: 0
- grid spacing: $25 \times 25 \times 100$ (x, y, z)
- ・ 地表の近傍
- x-min: 5428
- x-max: 5528
- y-min: -68578
- y-max: -68478
- z-min: 100
- z-max: 300
- grid spacing: $100 \times 100 \times 25$ (x, y, z)

(5) 涵養を伴う自由浸出面ケース(ケース B-3)

涵養を伴う自由浸出面を使用した試解析については、設定した境界条件が解析に適切に 反映されていることを確実に確認するため、基本ケースや代替ケースで使用した MIU スケ ールの地質構造モデルにもとづく現実的な解析体系とは別に、単純な解析体系を設定して 試解析を行うこととした。

このため、解析体系については、図 6.2.2-1 を断面とする奥行きを持った 3 次元構造を使用することとし、境界条件については図 6.2.2-1 の右側境界で 275m、左側境界で 210mとした(全水頭)。また、下側境界は不透水境界とし、上側境界のうち標高が全水頭より高い部分(右側斜面で 275m 以上、左側斜面で 210m 以上の部分)は自由浸出面とした。自由浸出面に対する涵養量は 10⁻¹²m/s とした。



図 6.2.2-1 涵養を伴う自由浸出面に関する試解析(ケース B-3)の解析体系(断面図)及び 境界条件

6.3 基本ケースの解析結果

6.3.1 解析条件の可視化

試解析を実施する前に、Frac-Affinityの拡張内容の一部である可視化機能(EarthVision による可視化のための情報を出力する機能)を確認するため、基本ケースにおける設定条件を EarthVision により可視化した。この結果を図 6.3.1-1~図 6.3.2-3 に示す。

図 6.3.1-1 は、基本ケースで設定された確率論的亀裂を EarthVision により可視化した結果 である。図 6.3.1-1 では確率論的亀裂が赤の矩形によって表示されているが、この図から Frac-Affinity の機能により EarthVision 上で確率論的亀裂の密度、大きさ、向き等が視覚的 に認識できることがわかる。

同様に、図 6.3.1-2 と図 6.3.1-3 は Frac-Affinity ネットワークを EarthVision により可視化 した結果である。これらの図では、Frac-Affinity ネットワークを構成する節点を球で、レグ を黄色い線分で、レグの中点を八面体で表示した。図 6.3.1-2 では、地質構造モデルが Frac-Affinity ネットワークに重ね合わせて表示されており、この図から地質構造と解析ネッ トワークとの位置関係を容易に認識できることがわかる。また、図 6.3.1-3 では、Frac-Affinity ネットワークのレグに設定した透水性を八面体の色によって表示した。この図から、ネッ トワーク構造と透水係数の設定の関係を視覚的に認識できることがわかる。



図 6.3.1-1 Frac-Affinityの出力によりEarthVision上で確率論的亀裂を可視化した結果



図 6.3.1-2 Frac-Affinityからの出力によりFrac-Affinityネットワークを地質構造に重ねて可 視化した結果 (青は節点、赤はレグを示す)



図 6.3.1-3 Frac-Affinity からの出力により Frac-Affinity ネットワーク上に透水性の不均質 性を可視化した結果 (白は節点、それ以外の色はレグを示す。レグは透水性 により塗り分けられている)

6.3.2 解析結果

立坑を含む鉛直断面における水頭分布を図 6.3.2-1 と図 6.3.2-2 に示す。基本ケースでは立 坑の掘削開始を時間 0 として、立坑の深度が 1000mに達して掘削が終了するまでを評価し ており、図 6.3.2-1 は時間 0 (立坑掘削開始時)の水頭分布、図 6.3.2-2 は解析終了時(立坑 掘削終了時)の水頭分布である。

まず、立坑掘削開始時点の水頭分布を表示した図 6.3.2-1 から、立坑掘削の影響が存在し ない地層本来の水理学的条件が保存されている状態では、全体的な傾向として地標高の高 い図の右側から左に向かって水頭が分布していることがわかる。一方、図 6.3.2-2 は掘削終 了時の水頭分布であり、立坑の掘削により水理学的な場が攪乱されている様子が見て取れ る。基本ケースでは支保工の設置は考慮されていないことから、図 6.3.2-2 では掘削された 立坑の周囲において、立坑の深度によらず水頭値が減少している部分が存在する。しかし、 図 6.3.2-2 に示された掘削影響領域は全体として不連続であり、非常に大きな局在性を示し ている。この点については、次のような理由が考えられる。

図 6.3.2-2 に示した結果は、正方形で示した各節点で Frac-Affinity が算出した水頭値にも とづき、EarthVision の補完機能により 3 次元領域のある断面全体の水頭分布として表示し たものである。したがって、基本ケースで算出された「正確な解析結果」は、各節点上に 表示された値であり、図 6.3.2-2 では四角形を塗りつぶす色により表現されている。すなわ ち、図 6.3.2-2 に示された 2 次元の面としての表示に着目した場合、立坑を含む鉛直断面に おいても立坑掘削の影響領域(すなわち水頭分布が低下した領域)が不連続となる(立坑 のごく近傍でも水頭が低下しない領域がある)との結果が表示されているが、各節点の評 価結果(四角の色)に着目した場合には、立坑に対応した節点上では概ね当該深度におけ る大気開放条件に近い評価結果が得られており、Frac-Affinity による解析結果としては、概 ね連続して坑道の周囲に掘削影響領域が存在していことが示されている。

したがって、図 6.3.2-2 に示された掘削影響領域の局在性は、Frac-Affinity の解析結果を EarthVision により可視化する際に解析結果の僅かな変動が EarthVision により増大されたも のであると推察される。特に、今回の試解析では解析領域内に局所的な不飽和領域が存在 することから、解析結果(全水頭)の勾配の局所的な変動によって上述の可視化上の問題 が顕在化されたものと考えられる。この点に留意して、図 6.3.2-2 にもとづき掘削影響の到 達範囲について検討すると、立坑の位置から横方向に 2~3 節点の範囲では立坑の掘削に伴 う水頭値の低下が見られるものの、その範囲の外側では立坑掘削の影響は顕著ではないも の結論づけられる。なお、Frac-Affinity の計算結果にもある程度の変動が存在するが、これ は、各構造ブロック内の基質部の透水性が均質であることを考慮すると、基本的には確率 論的亀裂の存在による局所的な透水性の変動が原因であるものと推定される。

次に、図 6.3.2-3 に解析終了時点(立坑掘削終了時)における流束ベクトルを示す。図か ら、立坑の周囲でベクトルの向きが乱れており、立坑掘削の影響が確認できること、ただ しその範囲は立坑周囲の数節点程度の領域内であり、この結果は図 6.3.2-2 に示した水頭分 布と整合的なものであることが確認できる。

最後に、図 6.3.2-4 に掘削された立坑への湧水量の積算値を示す。基本ケースでは支保工 の設置は考慮しないこととから、掘削深度の増大に対応して基本的に湧水量は増加する(積 算値の勾配が徐々に大きくなる)。図 6.3.2-4 では、500 日経過時点を境として湧水量が増加 しており、その後の累積湧水量が直線的に増加していることを考慮すると、500 日経過時 点で立坑が湧水点を通過していること、及び湧水の大部分がこの湧水点からの寄与となっ ていることが確認できる。なお、立坑掘削終了時(2.23e+08 秒=約 2500 日経過時点)まで の立坑への全湧水量は 6.75e+06 m³となった。また、立坑への平均湧水率は 0.03 m³s⁻¹とな った。



図 6.3.2-1 解析開始時(立坑の掘削開始前)の立坑を含む鉛直断面における水頭分布 (実線は地質構造を示す)



図 6.3.2-2 解析終了時(立坑掘削終了時)の立坑を含む鉛直断面における水頭分布(実線 は地質構造を示す)



図 6.3.2-3 解析終了時(立坑掘削終了時)の立坑を含む鉛直断面における流東ベクトル分 布(矢印の始点となっている正方形は流東を求めた節点を、実線は地質構造を 示す)



図 6.3.2-4 基本ケースにおける立坑への湧水量の積算値

6.4 代替ケースの解析結果

6.4.1 不均質場ケース (ケース A-1)

不均質場ケース(ケース A-1)で設定した透水係数の不均質場を図 6.4.1-1 に示す。また、 解析終了時(立坑掘削終了時)の水頭分布を図 6.4.1-2 に示す。これらの図から透水係数場 の不均質性と水頭分布の変化との関係を厳密に対応づけることは困難であるが、図 6.4.1-2 と図 6.3.2-2 との比較から、透水係数場の不均質性の影響によって基本ケースと不均質場ケ ースでは水頭分布に相違が生じていることが確認される。



図 6.4.1-1 不均質場ケース(ケース A-1)で設定された透水係数場の不均質場 (実線は地 質構造を示す)



図 6.4.1-2 不均質場ケース(ケース A-1)における立坑掘削終了時の水頭分布(黒線は地 質構造を示す)

6.4.2 代替的な確率論的亀裂ケース (ケース A-2)

代替的な確率論的亀裂ケースとして、添付資料1の入力データに従って設定した確率論 的亀裂を可視化した結果を図 6.4.2-1 に示す。また、解析終了時(立坑掘削終了時)の水頭 分布を図 6.4.2-2 示す。ケース A-1 と同様に、図 6.4.2-2 と図 6.3.2-2 との比較から、確率論 的亀裂の設定を変化させた影響を確認することができる。一方、図 6.4.1-2 と図 6.4.2-2 との 比較から、今回の代替ケースの設定では、確率論的亀裂を変化よりも、基質部の透水性を 不均質に設定する影響がより大きいことが確認される。



図 6.4.2-1 代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2)で設定された確率論的亀裂の配置 及び形状



図 6.4.2-2 代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2)における解析終了時の水頭分布 (黒線は地質構造を示す)

6.4.3 支保工設置ケース(ケース B-1)

支保工設置ケース(ケース B-1)の解析結果を図 6.4.3-1 と図 6.4.3-2 に示す。このケース では、図 6.2.1-4 に示したスケジュールに従って掘削された立坑に順次支保を設置すること を想定しており、立坑への湧水は最深部の最大 100m 区間に限定されることとなる。図 6.4.3-1 は解析終了時(立坑掘削終了時)の水頭分布であるが、この図からも立坑の掘削に 伴う水頭分布の擾乱は坑道最深部の周囲に限定されていること、また、既に支保を設置し た部分、特に支保の設置後に十分な時間が経過した坑道の上部においては、水頭分布が立 坑の掘削以前の状態に回復していることが確認される。



図 6.4.3-1 支保工設置ケース(ケース B-1)における解析終了時(立坑掘削終了時)の水頭 分布(黒線は地質構造を示す)

図 6.4.3-2 は立坑への湧水量の積算値である。この図から、基本ケースで大規模な湧水点 の存在が確認された深度 300m 付近では、ケース B-1 でも大量の湧水が生じていることが わかる。ただし、本ケースでは次の 100m 区間の掘削を開始する時点で以前の区間を止水 していることから、深度 400m~500m の区間へ掘削が到達した時点で立坑への湧水率は急 激に低下している。また、本ケースでは支保の設置により実質的には区間毎の湧水量を個 別に評価していることから、基本ケースにおける湧水量のグラフでは判別が困難であった 深度 1000m 付近の湧水点についても容易に判別することができる。なお、本ケースでは解 析終了時(2.23e+08 秒=約 2500 日経過時点)までの湧水量の積算値は 1.16e+06 m³、立坑 への平均湧水率は 0.005 m³s⁻¹であった。



図 6.4.3-2 支保工設置ケース(ケース B-1)における立坑への累積湧水量の時間変化
6.4.4 詳細解析メッシュケース (ケース B-2)

詳細解析メッシュケース(ケース B-2)の解析結果を図 6.4.4-1 に示す。図 6.4.4-1 では、 解析結果(水頭分布)に加えてこの断面に存在する節点を四角形により表示していること から、立坑の周囲と地表の近傍で節点が細密に設置されている様子も確認できる。この解 析結果(図 6.4.4-1)と基本ケースの解析結果(図 6.3.2-2)比較により、Frac-Affinity ネッ トワークの詳細化の効果を読み取ることができる。だたし、今回の解析条件では、月吉断 層の周囲等で解析結果に相違が認められるものの、2つの解析は概ね同じ結果となった。



図 6.4.4-1 詳細解析メッシュケース(ケース B-2)における解析終了時(立坑掘削終了時) の水頭分布(黒線は地質構造を示す)

6.4.5 涵養を伴う自由浸出面ケース(ケース B-3)

涵養を伴う自由浸出面ケース(ケース B-3)の飽和度、水頭及び流速分布の分布を図 6.4.5-1 ~図 6.5.4-3 にそれぞれ示す。

まず、飽和度の分布を示した図 6.4.5-1 から、解析領域の上部に不飽和領域が存在してい ること、不飽和領域の範囲は、境界条件として涵養を伴う自由浸出面を定義した面によっ て縫絡される領域にほぼ対応していることが確認できる。不飽和領域の内部では地下水面 の深度に対応して、地下水面からの距離が大きくなるほど飽和度が低下する様子が示され ている。

図 6.4.5-2 は水頭分布である。飽和領域内では左右両端の境界条件の設定が場を支配して おり、右から左に向かって徐々に水頭が低下している様子が示されている。一方、不飽和 領域内においては水頭は水平に分布しており、この領域では地表からの涵養水が地下水面 に向かって流下している状態が推定される。実際、図 6.4.5-3 に示した流速ベクトル(図 6.4.5-3 では、図 6.4.5-1 及び図 6.4.5-2 に対して左右が反転していることに注意が必要)で は、飽和領域内では側面境界条件として高水頭値を指定した側から低水頭値を設定した側 に地下水が移動しており、不飽和領域内では地表から地下水面に向かう地下水の移動が示 されていることがわかる。



図 6.4.5-1 涵養を伴う自由浸出面を用いた試解析(ケース B-3)で求められた飽和度分布



図 6.4.5-2 涵養を伴う自由浸出面を用いた試解析(ケース B-3)で求められた水頭分布



図 6.4.5-3 涵養を伴う自由浸出面を用いた試解析(ケース B-3)で求められた流束分布

6.5 試解析のまとめ

本章では、一連の試解析により、Frac-Affinityによる飽和・不飽和地下水流動解析の解析 可能性と入力条件の設定機能、可視化機能を確認するとともに、飽和・不飽和解析として 合理的と考えられる結果が求められていることを確認した。また、立坑深度及び支保工設 置深度の時間変化を取り入れた解析が Frac-Affinity により実施可能であることが確認され た。今後はこれらの機能を活用し、超深地層研究所計画を含む東濃地域の地下水流動解析 に Frac-Affinity を積極的に活用することが望まれる。なお、Frac-Affinityの拡張に関連した 今後の課題については、7章にて検討する。 7 Frac-Affinityの拡張に関する今後の課題

Frac-Affinity は可視化システムの他のコード、特に EarthVision との連携により柔軟で効率的な地下水流動解析の実施を可能にするものであり、今回の拡張により、飽和・不飽和解析や立坑の掘削影響解析への対応が図られた。一方、超深地層研究所計画の進展に伴う 東濃地域の水理・地質学的な知見の増大に伴い、地下水流動解析において重要な新たな事象の存在が明らかになりつつある。そこで、本章では、これらの知見を Frac-Affinity による地下水流動解析に反映させる観点から今後の課題を抽出する。

7.1 Frac-Affinity を用いた地下水流動解析の間点から重要な知見

東濃地域における地下水流動解析において重要となる最新の水理学的知見としては、以 下の項目が指摘されている。

- ① 透水係数への異方性の導入
- ② 亀裂交差部を高透水部として取り扱う機能の追加

このうち①については、超深地層研究所計画の計画用地とその周辺の大部分が堆積岩に覆 われており、堆積岩は水平方向と垂直方向で透水性が異なるとの見解があることに対応し ている。また、②については、超深地層研究所計画で先行的に掘削された試錘孔での観察 結果から、亀裂交差部における透水性が亀裂の他の部分よりも高くなる可能性が示唆され ていることと、東濃地域を対象とした研究以外においても同様の見解を示す研究が存在す ることに対応したものである。

なお、これらの課題に関連して、地下水流動解析においては以下のことに十分留意する ことが重要である。まず、東濃地域を対象とする場合に限らず、地下水流動解析の正否は 使用するデータの質に負うところが大きい。具体的には、実験室規模の試験により岩盤の 不飽和特性を把握するとともに、フィールドスケールの試験、例えば詳細な試錐孔調査や 野外における長期の観察により解析で使用するデータの質を向上させることが非常に重要 である。また、一般論として、原位置等におけるデータの取得の際に解析におけるデータ の利用方法を十分認識して作業を実施することが、解析の実施にあたってはデータの取得 方法や特徴さらにその困難さを認識することが重要である。さらに、Frac-Affinityの機能を 高度化する一方で、実際の解析では、単純な体系からモデルの複雑度や精密度を上げたモ デルへ展開することにより、地下水流動解析の整合性を全体として確保することに十分留 意すべきである。 7.2 透水性の異方性

7.2.1 岩盤基質部の異方性

岩盤基質部における透水性の異方性については、現在の Frac-Affinity ver.2.0.1 では、フラ クタル・スケーリング則により透水係数を不均質に設定する際に、相関長を方向別に指定 し、高透水性領域の連続性を調整することによって解析条件に反映することができる。た だし、この方法では異方性を直接的に制御することは困難であり、また、透水係数を均質 に設定する場合には透水係数に異方性を導入することができない。

したがって、岩盤基質部の透水性の異方性をより直接的に設定するためには、現在はス カラーで定義されている透水係数をテンソル化することが必要と考えられる。ただし、岩 盤基質部の透水係数テンソルの設定については、使用するテンソルの複雑さの度合いによ って幾つかのオプションがあり、実際の解析における設定可能性を勘案して適切なレベル でテンソルを導入することが重要である。

岩盤基質部の異方性を表現する上で最も簡単な形式は、岩盤基質部内での鉛直および水 平方向を区別し、透水係数を方向別に割り当てることである。これは鉛直と水平方向のそ れぞれに透水係数を設定するか、一つの透水係数と方向別のファクターとして設定するこ とにより指定することが可能である。より複雑な方法としては、水平方向をxとyに分離 し、x、y、zの主軸別に透水係数を指定する方法が考えられる。さらに、設定の自由度が最 も高い複雑なテンソルを使用するレベルでは、(対称)テンソルの成分として kxx、kyy、 kzz、kxy、kyz 及び kxz を指定することが考えられる。

これら設定方法のうち、解析条件の設定におけるデータの利用性を考慮すれば x、y、z の主軸別に透水係数を個別に設定する方法が最も現実的であると考えられる。具体的には、 一つの透水係数 k と 3 つのファクターax、ay、az を用いて設定することが適切である。ま た、この方法では、フラクタル・スケーリング則により不均質に透水係数場を設定する際 にも、透水係数の異方性をより直接的で制御可能な方法で導入することが可能である。

7.2.2 亀裂の異方性

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、亀裂の透水性に異方性を 導入する場合には、亀裂別に主軸となる方向を設定する必要がある。また、図 7.2.2-1 と図 7.2.2-2 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により構成されている可能性 があることから、異方性の主軸が局所的に変化する可能性がある。



図 7.2.2-1 確率論的亀裂における水平・垂直方向の概念



図 7.2.2-2 決定論的亀裂における水平・垂直方向の概念

ここで、亀裂の水理特性が亀裂面内で等方的であるもの仮定すると、亀裂の水理特性に 関する異方性は、亀裂面に平行な方向における透水係数と亀裂面に垂直な方向における透 水係数の2つの値によって定義することができる。この2つの透水係数の設定については、 岩盤基質部の場合と同様に2つの方法がある。一つは2つの透水係数を全く独立なものと して個別に設定する方法であり、もう一つはある基準となる透水係数に水平、垂直の各フ ァクターを乗じることによりに2つの透水係数を求める方法である。

後者の方法は、基準となる透水係数を不均質に設定可能な点で、フラクタル・スケーリ ング則によって設定された不均質場に対する親和性も高い。この場合、フラクタル・スケ ーリング則によって基準となる透水係数を与え、これに水平、垂直の各ファクターを乗じ ることによりに2つの透水係数を求めることが適当である。なお、確率論的亀裂に対して 透水係数の異方性を定義する際、亀裂の一つ一つに確率論的に異方性を設定することは、 設定の根拠となる情報の利用可能性から現実できではないと考えられる。したがって、確 率論的亀裂の異方性は、一つの亀裂セットに対して共通なものとして定義することが適切 である。

7.2.3 Frac-Affinity への導入

岩盤基質部に対して x、y、z 方向の異方性を導入する場合、Frac-Affinity ネットワークを 構成する節点に方向別の透水係数を設定する必要がある。また亀裂に対して亀裂面に垂直 と平行の方向別に透水係数を設定する場合には、2 つの情報を接点に設定する必要がある。 したがって、Frac-Affinity ネットワークの構築においては、これらの3 つ(亀裂においては 2 つ)の情報にもとづき、接点につながるレグの向きを考慮して、レグが表現する隣接す る接点との透水性を割り当てる必要がある。これらの改良は必要となるメモリの容量並び に数値解析上のソルバーの負荷をわずかに増大させるものと考えらるが、本質的な問題と なることは考えにくい。したがって、今後の作業において Frac-Affinity に異方性を導入す ることは比較的容易であると考えられる。 7.3 亀裂交差部の取り扱い

Frac-Affinity において亀裂交差部を亀裂の他の部分から区別して透水性を定義するためには、以下に示す項目について順に検討することが必要でなる。

- 交差部の認識に関する問題
- 交差部の水理学的特性の設定に関する問題
- ・ Frac-Affinity ネットワークにおける交差部の取り扱いに関する問題

なお、単純化のため、以下の検討では平板によって表現される確率論的亀裂の交差部を対象とする。ただし、同様の手法は、曲面により構成される可能性がある決定論的亀裂についても適用可能である。

7.3.1 交差部の認識

現行の Frac-Affinity ver.2.0.1 では、2 章で述べた方法により、確率論的亀裂を表現する Frac-Affinity ネットワークを岩盤基質部を表現するネットワークに統合する際に、同時に他 の亀裂を表現するネットワークとも適切に接合し、Frac-Affinity ネットワーク全体としての 整合性を確保している。したがって、複数の確率論的亀裂がある場所で交差する場合、 Frac-Affinity ネットワークによって表現される交差位置は近似的なもとなっている。また、 現行の Frac-Affinity には亀裂の交差部を特別な位置として認識する機能はなく、単に多数 のレグが一つの節点に集中する位置として表現されている。そこで、Frac-Affinity において 亀裂交差部に他の部分とは異なる設定を行うためには、まず亀裂の交差を Frac-Affinity が 認識することが必要となる。

ただし、確率論的亀裂は有限の広がりを持つ矩形平面によって表現されることから、注 目する 2 つの亀裂間の交差の有無や、交差する場合の位置は容易に計算できる。すなわち 交差部は直線であり、必ず 2 つの亀裂の面内に存在する。その一方で、亀裂の大きさや位 置関係によっては図 7.3.1-1 に示すように交差部が亀裂を完全に横断する場合、一方の先端 は亀裂の先までと達するものの他の先端は亀裂内部に留まる場合、あるいは交差部が亀裂 面何留まる場合が存在する。さらに、複数の亀裂が一つの亀裂交差する場合や、複数の交 差部がさらに交差することも考えられる。したがって、解析で亀裂の交差部を亀裂の他の 部分と区別して取り扱う場合には、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。



図 7.3.1-1 2つの亀裂の交差に関する概念図

7.3.2 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の設定については、交差部が高透水性であり、卓越流露となっている可能性を表現できるものでなければならない。この観点からは、亀裂交差部の透水係数を亀裂の他の部分とは別途に指定できることが必要であり、これに加えて、亀裂交 差部からどの程度の広がりで指定された透水係数を適用するかを指定できることが望ましいと考えられる。これらの値を指定する際には、亀裂の他の部分とは全く独立に指定する 方法と、交差している亀裂の特性にもとづき算出する方法が考えられることから、実際の 地質・水理学的知見に基づき適切な方法を選択する必要がある。

7.3.3 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、現行の Frac-Affinity ver.2.0.1 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、2 章で述べたように、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、岩盤基質部を主体とする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。

具体例として、図 7.3.1-1 に示した亀裂 A と亀裂 B の交差に対して、現行の Frac-Affinity が行う作業を図 7.3.3-1 に示す。図 7.3.3-1 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 ら統合する場合を想定している。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。

この問題については幾つかの対応方法が考えられるが、現行のネットワーク統合の手法 に対する修正量という観点では、次の手法が適切であると考えられる。すなわち、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。この場合、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 7.3.3-2 に示す。図から、亀裂 A、亀裂 B は破線で示した交差線上で適切に結合さ れていることが確認できる





図 7.3.3-2 Frac-Affinity ネットワークの統合方法の改良案 (図 7.3.2-1 の亀裂 B を亀裂 A に統合する場合)

7.3.4 Frac-Affinity への導入

上記の修正によって Frac-Affinity ネットワーク上に亀裂交差部を実際の位置に表現する ことが可能であり、ネットワーク構築の数値解析については特に修正すべき点は存在しな い。ただし、亀裂交差部に節点を追加する本手法の導入により、ネットワークの節点数が 増加するため、全ての亀裂交差部についてこの手法を適用すべきか、あるいは指定した部 分についてのみ適用すべきであるかを検討する必要がある。多数の亀裂が一つの亀裂を交 差する場合の本手法の適用性についても検討が必要となる部分が存在するが、本質的な問 題は存在しないものと考えられる。また、決定論的亀裂を本手法で取り扱う場合には、決 定論的亀裂が平面ではないことに起因する複雑さ存在するが、やはり本質的な問題は存在 しないものと考えられる。 7.4 その他の課題

これまでに述べた異方性の導入と亀裂交差部の取り扱いに加えて、今後の超深地層研究 所計画に関連して、Frac-Affinityに関する短期、長期の課題として、それぞれ以下の項目が 考えられる。

7.4.1 短期的な課題

短期的な課題としては、今後数年の超深地層研究所の建設開始以前、あるいは立坑の掘 削段階で必要となる機能を挙げることができる。具体的には以下の項目が考えられる。

- 確率論的亀裂の設定方法の拡張
- 複雑な形状(例えば、らせん坑道など)の坑道を表現する機能の追加
- ・ 揚水試験や孔間試験に対応した内側および外側境界条件の開発(揚水試験に対応 した流束固定の内側境界条件の導入を含む)
- ・ 種々の空間スケールに対応した Frac-Affinity の適用方法の検討
- 数値解析手法、特に不飽和地下水流動解析への適用性と時間ステップの制御に関する改良
- EarthVision ver 6 の Geologic Structure Builder の変更に対応したエキスポート・アル ゴリズムの更新
- ・ 岩盤基質部に対するグリッドの細密化機能の高度化

7.4.2 長期的な課題

Frac-Affinity を超深地層研究所の研究計画に関連する諸解析、なかでも地下深部の研究エリアでの各種研究の実施を考慮した場合、長期的な課題として以下の項目か挙げられる。

- ・ 自動的なキャリブレーション機能の導入
- 物質移行解析への拡張。これには移流、分散、化学反応およびマトリクス拡散を 評価する機能がオプションとして考えられる
- ・ 密度流に対する拡張
- ・ 飽和・不飽和地下水流動解析をより厳密な2相流として評価するための高度化

8. 可視化システムの利用に関するサポート

8.1 概要

現在、東濃地域では超深地層研究所の研究計画に従い、地質調査並びに水理地質調査 が精力的に進められている。また、これらの調査結果にもとづき、広域スケール(超深 地層研究所予定地を中心とした約10×10 km の範囲)、MIU スケール(同じく約400×600 m の範囲)を含む、幾つかのスケールの地質構造モデル及び水理地質構造モデルの開発 が重要な課題となっている。そこで、本業務では、可視化システムの活用により、以下 に示す事項を適切かつ効率的に進めるため、専門家によるサポートを行った。

- EarthVision を用いた地質構造のモデル化
- ・ Frac-Affinity を用いた水理地質構造のモデル化と地下水流動解析の実施
- EarthVision による地下水流動解析の結果の可視化

具体的には以下の作業を実施した。

- 東濃地科学センターへの専門家の一時的な駐在による可視化システムの活用の支援。特に、以下の事項に関する助言
 - 地質構造及び水理地質構造のモデリングのための地質学的・水理学的な 解釈に関する支援。これには測定データの精度等の解釈に関する支援を 含む
 - 地質学的・水理学的な解釈を、可視化システムの活用により地質構造モデル及び水理地質構造モデルとして具体化・可視化する際の技術指導
 - 可視化システムにより地下水流動解析を行う上での技術指導
 - 可視化システムを高度利用するための今後の研究計画に対する助言
- ② インターネット等を活用したリモートサポート。具体的な内容は①に同じ
- ③ 専門家による水理地質構造モデルのモデル化。後述するように、水理地質構造 モデルの開発については、地科学センターによるモデル開発と専門家によるモデル開発を平行して実施した

以下では、まず、地質構造モデルの開発に関するサポートの成果を取りまとめ、つい で水理地質構造のモデル開発並びに地下水流動解析の結果を示す。なお、地質構造モデ ルの開発に関しては、上記①及び②の作業によって共同で開発されたモデルを中心に、 水理地質構造モデルの開発に関しては、上記③(専門家によるモデル開発)の成果を中 心に記述することとする。 8.2 地質構造モデルの開発

今回の地質構造のモデル開発では、以下に示す項目を目的に作業を進めた。

- 地質構造に関する理解を促進するため、現状の知見に基づき、また必要に応じて現状の知見に解釈を加えて地質構造をモデル化すること。また、モデル化の 結果を可視化すること
- 水理地質構造モデルの開発のため、解析前提となる地質構造に関する情報を地 下水流動解析に提供すること

モデル化のスケールについては、地下水流動解析のスケール等を勘案して、以下の2 つのスケールを対象に作業を進めることとした。

- 広域スケール: 超深地層研究所予定地を中心とした 12.24×12.17 km×3,000 mbOD の範囲
- ② MIU スケール:
 超深地層研究所予定地を中心とした 800×1,250 m×1,000 mbOD の範囲

なお、水理地質構造をモデル化し地下水流動解析を行うためには、広域スケールの地 質構造モデルを一部簡略化したモデルの開発が必要となった。そこで、広域スケールの 地質構造モデルについては、地質構造に関する理解を詳細に表現した「地質構造把握の ための3次元地質構造モデル:3D geological interpretation model」と、地下水流動の枠組 みを与えるためにモデルを修正・簡略化した「地下水流動解析のための3次元地質構造 モデル:3D geological framework model」を構築することとした。

8.2.1 広域スケールの地質構造モデル

広域スケールの地質構造モデルについては、超深地層研究所予定地を中心とする 12.24×12.17 km×3,000 mbOD の範囲をモデル化することとした。モデル開発にあたって は、この領域の主要な地質・地質構造として、表 8.2.1-1 に示す 8 つの地層と 7 つの断 層を考慮することとした。

表 8.2.1-1 広域スケールの地質構造モデルにおいて存在を考慮した層序・断層

地 層	断層
 ・濃飛流紋岩 ・美濃帯 ・土岐花崗岩健岩部 ・土岐花崗岩風化部 ・土岐花崗岩風化部 ・瑞浪層群の土岐夾炭累層 ・瑞浪層群の明世累層 ・瑞浪層群の生俵累層 ・瀬戸層群 	 月吉断層 山田断層 次月断層 次日断層 肥田断層 和合北断層 和石断層 ・柄石断層 ・話坂断層

(1) 地質構造把握のための3次元地質構造モデル

開発された広域スケールの3次元地質構造モデル(地質構造把握のための3次元地質 構造モデル)を図8.2.1-1に示す。

図 8.2.1-1 に示したように、領域の北東部に存在する濃飛流紋岩については、濃飛流 紋岩と土岐花崗岩とがほぼ鉛直な傾斜面で接しているものと考えた。また、美濃帯と土 岐花崗岩の美濃帯との境界面は、土岐花崗岩の西側で北から南に傾斜して接している部 分を除いて、ほぼ鉛直な面であるものと考えた。土岐花崗岩の西側の傾斜は DH-6 号孔 で取得されたデータに基づき設定した。

土岐花崗岩、濃飛流紋岩および美濃帯の上部境界となる不整合面については、以下の データに基づき設定した。

- ・ 試錐孔での調査結果
- ・ 東濃地域の地質図に示された露頭
- ・ 既往の研究に示されたコンター図[14]

また、これらのデータの解釈あたっては、以下の方針にもとづき作業を進めた。

- 不整合面に関する最も信頼できるデータは試錐孔および露頭からの情報とする。したがって、これらの情報が利用可能な場合にはこれを利用する。
- ② ただし、試錐孔での調査記録の一部には信頼性に疑問が残るものも存在する。 特に、ウラン探鉱用の試錐孔で取得された観測データについては文書の記録の

みが利用できることから、その記述には誤記が存在する恐れがある。したがっ て、ウラン探鉱用の試錐孔で取得されたデータを使用する場合には、この様な データの不確実性に留意して EarthVision フォーマットの電子情報に変換する (全てのデータを機械的に電子化しモデル化で使用した場合には、開発された モデルの妥当性を評価する段階で混乱が生じる恐れがある)。

- ③ 試錐孔の調査結果がほとんど存在しない、あるいは露頭に関するデータが存在しない領域では地質構造のコンター図を使用する。なお、EarthVision でのグリッディング(位置決め)の作業性を考慮し、デジタル化に先立ちコンター間隔を修正することが望ましい。
- ④ 地質構造を構成する2次元構造のグリッディングについては、EarthVisionのモデリング機能を用いる方法と、作業者が手作業により構築する方法が存在するが、EarthVisionのHorizon Gridderにより自動的にグリッディングを行う場合には、その結果が必ずしも完全ではないことに十分留意する必要がある。また、Horizon Gridderを使用する場合には、変位に関する情報を確認するため、Sequence Fileを出力することが望ましい。手作業によるグリッディングについては、correction source grid法、またはデータセットの情報を単一のファイルにまとめることにより不整合面をグリッディングすることができる。これらの手作業によるグリッディングでは離散データファイル(scattered data file)を編集することが必要であることから、分割したブロックに近接した断層ブロック中に存在データと、断層を横切って変位が生じている位置に近い場所に存在する離散化データを削除する必要がある。この2つのグリッディングのうち、修正ソースグリッド法(correction source grid method)の使用が好ましいと思われる。
- ⑤ グリッディングの過程よりも、グリッディングの結果の妥当性を尊重すべきである。特に、グリッディングの結果に不自然な「くぼみ」が生じている場合には、詳細な検討が必要である。

土岐花崗岩風化部については、モデル化に必要なデータが不足していることから、不 整合面の下に一定の厚さで存在するものと想定した。風化部の厚さについては、厚さの 評価に利用可能なデータから平均値を求め、これに1標準偏差を加えて43mとした。

瑞浪層群を構成する土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層、および瀬戸層群については、 モデル化の当初の段階では個別にモデル化することを試みた。しかしながら、作業時間 の制限や利用なデータが不足していることから、全ての境界面の作成は困難と判断し、 瑞浪層群及び瀬戸層群は一括してモデル化することとした。ただし、今後開発される広 域スケールの地質構造モデルでは、準広域スケール(約 4.2×5.8 km²の領域)のモデル においてこれらの層序構造を個別に表現した研究事例が存在する様に、瑞浪層群及び瀬 戸層群を構成する層序構造を個別に表現した地質構造モデルの作成が重要であると考 えられる。今後の研究における優先順位としては、瀬戸層群の詳細なモデル化に取り組 むことが重要である考える。また、瀬戸層群のモデル化にあたっては、試錐孔と露頭に おける瀬戸層群下面についての調査結果と、瀬戸層群底面が傾斜した平面状の不整合面 であるということを示す地質学的な知見を反映して境界面を設定することが適切であ ると推察される。



図 8.2.1-1 地質構造把握のための広域スケール 3 次元地質構造モデル

(2) 地下水流動解析のための3次元地質構造モデル

地下水流動解析を目的とした広域スケールの地質構造モデルについては、後述する準 広域スケール(超深地層研究所を中心とし、局所的な地下水流動系が関連している範 囲;4.2x5.8 kmの多角形の領域)の地下水流動解析に必要な地質構造を与えることが必 要である。そこで、Frac-Affinityの取り扱い可能節点数が本サポートで当初使用してい た Frac-Affinity ver 1.2 で約 20,000 節点以下、改良を加えた ver 1.2.4 で約 40,000 節点以 下であることに対応し、図 8.2.1-1 の地質構造を簡略化した地下水流動解析のための広 域スケール3次元地質構造モデルを開発することとした。このため、地質構造把握のた めの広域スケール3次元地質構造モデルから、準広域スケールのモデル領域内に存在す る地質及び地質構造を抽出し、更に断層構造についても地下水流動解析の観点から適切 に簡略化することとした。具体的には以下の作業を行った。

まず、濃飛流紋岩と美濃帯は地下水流動解析で準広域スケールとしてモデル化する領 域の完全に外側に存在することから、モデル上は他の岩体と区別せず土岐花崗岩として 表現することとした。また、水理地質構造モデルでは月吉断層を除く全ての断層の影響 を考慮しないことから(これらの断層は超深地層研究所計画用地の近傍における地下水 流動には影響を及ぼすことはないと思われる)、地下水流動解析のための地質構造モデ ルには月吉断層を除く全ての断層を標記しないこととした。結果として、地下水流動解 析のための広域スケール3次元地質構造モデルは、土岐花崗岩健岩部、土岐花崗岩風化 部、堆積層(瑞浪層群と瀬戸層群)、及び月吉断層から構成されることとなった。

なお、サポートで利用した Frac-Affinity ver 1.2 は飽和地下水流動のための解析コード であることから、実際には地表近傍の一部で不飽和領域が存在すると考えられる解析対 象をモデル化するためには、モデル上の地表面を地下水面により定義することが必要と なった。そこで、次式により地標高から地下水面の位置を算出し、モデル上の地表面を 設定することとした。

H = 0.8619Z + 18.5

(8.1)

ここで、Hは地下水面の標高、Zは地表面標高である。



図 8.2.1-2 地下水流動解析のための広域スケール 3 次元地質構造モデル

8.2.2 MIU スケールモデル

MIU スケールの地質構造モデルでは 800×1,250 m、深さ 1,000 mbOD までの領域をモ デル化することとした。当初は、より小さな、超深地層研究所の敷地境界を包含する長 方形領域でモデル化することを検討した。しかし、この場の水理地質構造を適切にモデ ル化するためには、月吉断層の露頭を含めてモデル化することが適切であると推察され たことから、当初の想定よりも領域を北側に拡大してモデル化することとした。

モデル開発にあたっては、この領域の主要な地質・地質構造として、表 8.2.2-1 に示 す9つの地質・地質構造を考慮することとした。なお、MIU スケールの地質構造の理 解並びに地下水流動解析観点からは、特定部分に着目して地質構造を詳細に把握するた めの3次元地質構造モデルや、一部を簡略した3次元地質構造モデルの必要性は存在し ないものと判断されたことから、MIU スケールにおける地質構造モデルについては汎 用のモデルのみを作成することとした。

表 8.2.2-1 MIU スケールの地質構造モデルにおいて存在を考慮した地層と断層

 ・ 優白質花崗岩 ・ 高透水性黒雲母花崗岩 ・ 低透水性黒雲母花崗岩 ・ 低透水性黒雲母花崗岩 ・ 月吉断層上盤側の割れ目帯 	僧
 ・月吉断層下盤側の割れ目帯 ・土岐花崗岩風化部 ・瑞浪層群の土岐夾炭累層 ・瑞浪層群の明世累層 ・瀬戸層群 	与断層

開発した MIU スケールの 3 次元地質構造モデルを図 8.2.2-1 に示す。図 8.2.2-1 に示し たように、MIU スケールにおける 3 次元地質構造モデルでは基本的に表 8.2.1-1 に示し た地質及び断層構造を個別に表現することとしたが、例外的に以下の取り扱いを行った。 なお、今後の研究では、花崗岩風化部、土岐夾炭累層の基底礫部、土岐夾炭累層、明世 層群、瀬戸層群を個別に取り扱った MIU スケールの地質構造モデルの開発を検討すべ きであると考える。

・ 土岐花崗岩風化部と土岐夾炭累層の基底礫部を一括して表現する。

・ 全ての瑞浪層群と瀬戸層群を一括して表現する。

この様な地質・地質構造の区分に従い、個々の地質構造は以下の考え方に従いモデル化した。

まず、優白質花崗岩の上面の標高については、4本の試錐孔での調査結果から決定す ることとした。ただし、4本の試錘孔のうち3本の試錘孔は月吉断層の上盤側で、残る 1本は下盤側で境界面と交差しており、これら4本の試錘孔のデータを同時に使用する ためには、断層による変位を一旦、差し引きすることが必要である。そこで今回のモデ ル化では、月吉断層の活動による変位を 30m と考え、断層の下盤側での標高データを 30m 上昇させた後、2D Minimum Tension Algorithm により優白質花崗岩の上面の標高を 算出し、さらに月吉断層下盤側で算出された標高面を 30m低く修正して月吉断層下盤 側の優白質花崗岩の上面を求めた。 黒雲母花崗岩割れ目低密度帯の形状については現時点では不明確な点が多く残され ていることから、以下に示す考え方に従いモデル化することとした。

- ・ 低透水性黒雲母花崗岩の位置は MIU-2 号孔での観測結果により決定する。
- ・ 低透水性黒雲母花崗岩は水平に分布しており、月吉断層を境に鉛直に 30m 変 位する。

土岐花崗岩風化部と土岐夾炭累層の基底礫部については、次の理由により一括して表現することとした。

- ・ これら 2 つの地層はともに厚さが比較的小さく、水理解析において Frac-Affinity ネットワーク上に個別にモデル化するにためは、相当の節点数が必要 となること。
- 現段階では2つの地層の透水係数が同程度であると推定されること。

なお、花崗岩風化部と土岐夾炭累層の基底礫部を一括して取り扱う際の上部境界及び下 部境界については、いずれも層厚に関するコンター図(thickness contour maps)にもと づいて決定した。

Water Conducting Fracture Zones (WCFZs) については MIU 試錐孔でその存在が確認 されており、地質構造モデルにおける取り扱いが問題となった。検討の結果、WCFZs は次の理由により、EarthVision による決定論的なモデル化の対象から除外することとし た。

- WCFZs は必要に応じて Frac-Affinity において確率論的にモデル化することが 可能であること
- WCFZs を決定論的にモデル化する場合、断層との交差部を除きモデル全体を 横断する様にモデル化する以外に方策がない可能性があること。すなわち WCFZs の存在範囲に関するデータが存在しないため、WCFZs を決定論的に取 り扱った場合、モデルに大きなバイアスが生じる可能性があること。
- 同様に、WCFZsを決定論的にモデル化する場合、WCFZsが発見された試錐孔で
 で亀裂密度が最大となり、試錐孔から離れるに従って亀裂密度が減少する様に
 モデル化することとなり、地質構造モデルが全体として非現実的なものとなる
 可能性があること。
- ・ WCFZs の可視化が必要な場合には、試錐孔に関する離散データの可視化機能

により亀裂の向き等を試錐孔に沿って可視化することが適切であると考えられること。



図 8.2.2−1 MIU スケールの 3 次元地質構造モデル

8.2.3 地質構造モデルの開発に関する今後の課題

本サポートを通じて明らかになった今後の課題の一つに、モデル開発フローの明文化 が挙げられる。具体的には実施計画諸等の報告書の作成、データの編成方法、モデル化 に用いるワークステーションおよびモデルの保管場所の編成方法等を明確化すること が必要であると考えられる。特に、モデル開発の実施計画書では、作業の開始に先立っ て以下の項目を記述するべきである。

- ・ モデル開発の目的
- ・ 以前のモデル開発、及び将来の計画との関連性
- ・ モデル開発の工程
- モデル開発に利用可能なデータ
- モデル化の対象とする地質及び地質構造の一覧
- 構築されたモデルに関する他研究での利用計画

モデル開発に使用するデータについては、モデル開発の開始時点で利用するデータを ー組のデータセットとして確定し、モデル開発の期間中に新たなデータの取得があった 場合でも確定したデータセットを変更しないことが重要である。例えば、Nirex が実施 した性能評価プログラムにおいては、モデル化に使用するデータは作業期間を通じて確 定され、新たなデータがデータセットに編入されることはなかった。Nirex 95 で使用さ れたデータは 1,993 年 12 月の時点で確定されたものであり、Nirex 97 は 1,995 年の時点 で確定されたデータを使用している。これらは、性能評価におけるデータの採用に先立 ち、取得されたデータに分析を加えるための時間を考慮した措置である。超深地層研究 所計画に関連する開発においては、Nirex が採用した長期のリードタイムを取る必要性 は低いと考えられるが、少なくともモデル開発の作業を開始した以降は、当初の目的に 従いモデル開発が終了するまでの間、入力データに変更を加えないことが重要である。 したがって、超深地層研究所計画に関連して計画されているモデル開発で使用する、必 要な検討を加えた、一貫性のある地質調査データセットを早急に作成することが重要で ある。

可視化システムを活用したモデル開発の観点からは、EarthVision で利用可能なフォー マットに留意しつつ情報を電子化し、データセットを構築することが重要である。また、 今回のモデル開発では多くの困難に直面したが、その多くはデータの利用に不可欠な付 属情報の入手が困難であったが原因であった。特に、この傾向は、ウラン探鉱に関連し たデータで散見された。今後、各種のモデル開発を反復的に実施する必要があることを 考慮すると、研究活動全体の効率を向上させるためにも、必要な検討により一貫性を確 保したデータセットに準備が必要である。

さらに、モデル化の全体的な手順の問題に関連し、地質構造モデルを構築するワーク ステーションの体系化が大切である。具体的な方策としては、例えば以下のことが考え られる。

プロジェクトディレクトリは判別可能な名前とし、数年たっても判別可能なもにすべきである。このため、プロジェクトの内容、目的、あるいは時間に関連した名前でディレクトリーを作成すべきである。例えば、今回の広域モデルの開発に関する作業は、ディレクトリ"JNC_REGIONAL2"とそのサブディレクトリーで実施した。ただし、このディレクトリーの意味は担当者の記憶に依存している。こらに対して、今回の作業内容を以下のプロジェクトディレクトリに保存することが考えられる。

- REG_QSCI99

- MIU_QSCI99

これらの名前は常に識別可能である。なぜならば、QSCI によって判別可能な 組織が 1999 年度に実施したモデル開発はただ一つであり、また、2 つのスケ ールでのモデル以外は存在しないからである。

 構築されたモデルについては、関連する全ファイルを適切な場所(例えば、 DATやCDのような媒体、ワークステーションの特定場所)に、圧縮・記録し、 保存するとともに、プロジェクトファイルの最終版をワークステーション上で 圧縮せずに保存することが望ましい。これには、グリッドの離散データファイ ル、最終的な地質構造モデルで使用したグリッド、シーケンスファイル及び特 定の断面に関連するファイル等が含まれる。保存すべき記録内容の詳細は、構 築されたモデルに依存する。

プロジェクトファイルとディレクトリとの体系化に加えて、一連の標準的なプレゼン テーションファイルを用意することが望ましい。これらのファイルは開発したモデルの プレゼンテーション、あるいは公開の際に活用することができる。具体的には試錐孔の 位置、各種の調査結果あるいは各ポリゴン(MIU サイト境界等)等を可視化しておく ことが考えられる。様々なプロジェクトに共通な標準的プレゼンテーションファイルを 作成しておくことにより、超深地層研究所計画で構築されたモデルに対する第3者の理 解が向上し、結果としてプロジェクトに対する信頼性の向上に寄与できるものと期待さ れる。 なお、本サポートでは、地質構造モデルを構築するための作業時間が全般に不足した。 この様に、地質構造モデルの開発に利用可能な時間が限られている場合には、 EarthVision が持つ地質モデルの自動作成機能(例えば、Workflow Manager, Horizon Gridder)の活用が効果的である。ただし、これらの自動作成機能により開発されたモデ ルの妥当性については、十分に検討する必要がある。 8.3 水理地質構造モデルの開発

8.3.1 背景及び目的

水理地質構造のモデル開発にあたっては、次の2点を目標に作業を進めることとした。

- 水理地質構造モデルの開発並びに地下水流動解析を可視化システム上で実施 することにより、地下深部の地質構造モデルや水理地質構造モデルを開発する 上で、可視化システムが統合的な開発環境を提供できることを確認する
- ② 超深地層研究所の予定地とその周辺に関する現有の水理学的な知見に基づき、 立坑掘削の影響を評価するために必要な水理地質構造モデルを構築する。

そこで、今回のモデリングでは、次の2つのスケールで水理地質構造モデルを開発す ることとした。

- ・ MIU スケールモデル
- ・ 準広域スケールモデル

このうち、MIU スケールモデルは MIU スケールの地質構造モデルと同一の範囲を対象 領域としたモデルであり、超深地層研究所計画に関連する地質調査の多くの部分が実施 される領域を詳細な精度で表現するためのモデルと位置付けられる。一方、準広域モデ ルは、TAGSAC により立坑掘削影響を評価した[16]ところ、MIU スケールの対象領域を 越えて掘削影響が伝播する可能性が示されたことから、立坑掘削の影響を評価するため に必要なスケールとして設定するものである。

水理地質構造モデルの開発では、モデル化の妥当性を地下水流動によって確認し、評価結果にもとづいて水理地質構造モデルに改良を加えることが重要であり、地質構造モ デルのモデル開発と比較して反復性の高い作業が必要となる。したがって、水理地質構 造モデルの開発については、専門家の滞在中に全ての作業を実施することは実質的に不可能であり、リモートサポートについても、これによって必要な全ての情報を伝達する ことは非現実的であると判断された。そこで、水理地質構造モデルに関する専門家によ るモデル開発のサポートとしては、地科学センターと専門家グループとで並行的にモデ ル開発を進め、作業がおおよそ終了した段階で専門家グループによるモデリングの成果 を地科学センターへ報告し、地科学センターにおけるモデリングの成果と必要な比較を 行っていただくこととした。なお、これ以降の内容は、専門家グループによるモデリン グの成果の概要をまとめたものである。 8.3.2 地下水流動解析コード

解析では、飽和地下水流動解析の為の解析コード Frac-Affinity ver.1.2 あるいは同 ver.1.2.4 を使用した。解析はパーソナルコンピュータ(450 MHz, 196 Mbytes, Windows NT 4.0)および(233 MHz, 96 Mbytes, Windows NT 4.0)により実施した。

8.3.3 水理地質構造をモデルするための概念モデル

(1) 準広域スケール

準広域スケールのモデル化の対象領域は、TAGSAC による立坑掘削影響の評価結果 を参考に、次のように境界条件を合理的に設定できる位置を設定し、広域スケールの地 質構造モデルから切り出した。

- 超深地層研究所周辺における深さは 5,000 m までの地下水流動は 30km²の範囲
 一つの流動系を構成する。また、深さ 2,000 m までの地下水流動については局
 所的な地下水流動系によって周囲と切り離して考えることが可能である
- 北、東、西側境界は尾根(分水嶺)により適切な境界を設定することが可能である
- ・ 南側境界は土岐川により適切な境界を設定することが可能である

準広域スケールモデルの対象領域の地質構造モデルを図 8.3.3-1 に示す。なお、この 領域の平均的な涵養量は 0.28 mm/day と算出されている。

準広域スケールの水理地質構造モデルでは、モデルのスケールを考慮して図 8.3.3-1 に示した土岐花崗岩健岩部、土岐花崗岩風化部並びに堆積岩の水理学的特性は均質なも のと考えた。また、月吉断層は決定論的な亀裂構造としてモデル化することとし、この スケールでは確率論的亀裂はモデル化しないこととした。

(2) MIU スケール

MIU サイトスケールの地下水流動解析については、準広域スケールの解析結果を用いて設定することが可能であることから、MIU スケールの地質構造モデルと同一の領域を対象に水理地質構造モデルを開発することとした。対象となる地質構造モデルを図8.3.3-2 に示す。

MIU スケールの水理地質構造モデルの開発では、図 8.3.3-2 に示した地質構造の区分、

並びにこの領域の水理学的特徴を次のように捉えることとした。なお、各地質構造を構成する岩体基質部と月吉断層は水理学的に均質で等方的であるものと考えた。

- ・ 優白質花崗岩、黒雲母花崗岩割れ目帯、黒雲母花崗岩割れ目低密度帯、月吉断 層上盤側の割れ目帯、月吉断層下盤側の割れ目帯、花崗岩風化部、土岐夾炭累 層の基底礫部、および表層堆積岩から構成される。
- ・ 月吉断層は Frac-Affinity の決定論的な亀裂として表現する。
- ・ WCFZs は Frac-Affinity の確率論的な亀裂として表現する。

ここで、WCFZs の存在や特性に関する理解、並びにこの理解を導出する際の測定結 果の処理について、幾つかの問題点が認識された。これらは次のようにまとめられる。

- ・ WCFZs の存在は、主として試錐孔を利用した物理検層の結果を総合的に判断 して推定したものであるが、これに対して整合的な透水試験の結果が得られて いるのは MIU-2 号孔の深さ約 220 m の位置のみである。
- ・物理検層により確認された WCFZs は、水理学的見地から重要な特性(高透水 性部)に一致していない可能性がある。これは、より長い区間に対して行われ たシングルパッカー試験よりもダブルパッカー試験結果の方が低い透水性を 示したこととも一致する。しかしながら、この様な理解は地科学センターが解 釈するところの試験結果の整理とは必ずしも整合的ではなく、結果としてシン グルパッカー試験の結果処理を見直す必要性が示唆されることとなる。
- WCFZs の調査手法の検証を目的に、何らかの試錐孔試験を行うことが有益であると考えられる。具体的には、例えば隣接する6.5m区間を対象に連続的なダブルパッカー試験を行うことが考えられる。この様な試験により、WCFZsが実際に卓越的な流路となっているのか、あるいは物理検層からは確認できないその他の卓越流路が存在する可能性があるのかを検証できる可能性がある。
- 上記のような問題点があるものの、今回のモデル開発ではWCFZs を確率論的 な亀裂としてモデル上に表現することとし、水理学的特性は MIU 試錐孔での 調査結果にもとづき設定することとする。一方、花崗岩基質部の水理特性は広 域スケールで実施された試錐孔でのダブルパッカー試験結果(MIU 試錐孔に おける WCFZs 試験と同じ 6.5 m 間隔で行われた)から設定するものとする。 したがって、今回のモデル開発では、岩盤基質部の水理特性と確率論的な亀裂 の水理特性を異なる場所で調査された結果にもとづき設定していることに留 意する必要がある。今後も同様の方法で水理特性を設定する場合には、広域ス ケールの対象領域で取得したデータを MIU スケールのモデル化で使用するこ との妥当性について、慎重に検討する必要がある。

- WCFZs の長さや幅は現状では不明である。しかしながら、水理地質構造モデ ルで確率論的亀裂を設定するための統計的な入力条件は岩相毎に異なってい るものと想定した。したがって、亀裂の大きさを代表するスケールは、岩相の 変化に関する代表長さ(例えば 100 m)よりも小さなものと考えた。また、 WCFZs の厚さは 1~5 m であることから、WCFZs の厚さと長さの比を 1:10 と すると、WCFZs の長さは 10~50 m と推定された。
- ・ 亀裂の確率論的な特徴を求めるために、詳細な亀裂解析を行うことも可能であったが、今回のモデル開発では亀裂データセット全体が WCFZs の代表的な方向を表していることを仮定した。しかし、この様な仮定の妥当性は高いとは言えず、妥当性の確認には WCFZs 内に存在する亀裂の詳細な解析が必要である。現段階では WCFZs 内の亀裂の方向を定義することは不可能であり、この問題は今後の課題として残された。



図 8.3.3-1 地下水流動解析のための準広域スケール 3 次元地質構造モデル



図 8.3.3-2 MIU スケールの 3 次元地質構造モデル(図 8.2.2-1 に同じ)

8.3.4 数値解析モデルの開発

(1) 地質学的特性および水理地質パラメータ

準広域スケールの地下水流動解析で使用した入力パラメータを表 8.3.4-1 に、MIU ス ケールの地下水流動解析で使用した入力パラメータを表 8.3.4-2~8.3.4-4 に示す。

これらの設定のうち、準広域スケールの地下水流動解析で使用した入力パラメータに ついては、ほぼ同じ領域を評価対象としている TAGSAC による地下水流動解析での設 定値を参考に設定した。一方、MIU スケールのでの設定値は今回のサポートを通じて 検討の結果設定することとした。結果として、これら二組のパラメータセット間には、 地質構造モデルの詳細度が異なることに起因する相違に加えて、パラメータ設定の際に 使用した元データの相違に起因する不一致が存在することとなった。この不一致は、具 体的には次のようにまとめられる。なお、表に示した月吉断層の透水係数については、 後述するように感度解析を実施した。

- 準広域スケールモデルでは、花崗岩風化部の透水係数を1×10⁻⁷ [m/s]とした(
 表8.3.4-1)。一方、MIUスケールモデルでは高透水係数ゾーンの値を1×10⁶ [m/s]
 とした(表8.3.4-2)。
- ・ 準広域スケールモデルでは、土岐花崗岩健岩部の透水係数を 1×10[°] [m/s]とした(表 8.3.4-1)。一方、MIU スケールモデルでは、化土岐花崗岩健岩部を構成 する全ての要素(優白質花崗岩、黒雲母花崗岩、月吉断層割れ目帯)を 1×10[°] [m/s]以下の値とした(月吉断層の下盤側の割れ目帯を除く)(表 8.3.4-2)。
- ・ 準広域スケールモデルでは、堆積岩の空隙率を 30%とした(表 8.3.4-1)。一方、 MIU スケールモデルでは堆積岩の空隙率を 48.8%とした(表 8.3.4-2)。
- 準広域スケールモデルでは土岐花崗岩の空隙率を10%とした(表 8.3.4-1)。一 方、MIU スケールモデルでは土岐花崗岩を構成する全ての要素(優白質花崗 岩、黒雲母花崗岩、月吉断層割れ目帯)の空隙率は、1.75 または1.25%であっ た(表 8.3.4-2)。

確率論的な亀裂については、MIU スケールのモデリングでのみ考慮した。具体的に は、以下の設定により確率論的亀裂をモデル化した。

- ・ 亀裂の方向: 一様分布
- · 龟裂透水係数: 一様分布

亀裂密度については、1次元密度の測定値(表 8.3.4-4)を確率論的な亀裂の平均面積 で除して、3次元亀裂密度に変換した。ただし、これは近似的な評価手法であり、次の ような問題がある。

- 確率論的亀裂の面積は Frac-Affinity 内で確率的に定義されることから、解析で 使用される平均値を正確に特定することはできない。ここでは単純に、確率論 的な亀裂の平均面積を平均長さ×平均幅(すなわち、30 m×30 m = 900 m²)と して算出した。
- 試錐孔と亀裂の傾斜角との関係によっては、確率論的な亀裂の1次元密度が正確に評価されていない可能性がある。すなわち、亀裂の統計情報で示されている傾斜角の大きな亀裂の数は実際の分布よりも少ない可能性がある。この現象は通常 Terzaghi 法による修正で解消できるが、今回のモデル開発ではこの様な修正は実施していない。

なお今回のモデル開発では亀裂の屈曲度は全て1とした。これは、確率論的な亀裂の 形状を平板と見なしたことを示している。

表 8.3.4-1 準	「広域スケールの水理地質構造モデルにおけるパラ	ラメータの設定値
-------------	-------------------------	----------

地層	透水係数 [m/s]	空隙率 [%]	比貯留率 [1/m]
土岐花崗岩健岩部	1e-09	0.1000	1e-07
土岐花崗岩風化部	1e-07	0.3000	1e-05
	5e-08	0. 3000	1e-05
月吉断層	1e-09	0.1000	1e-12

地層	透水係数 [m/s]	空隙率	比貯留率 [1/m]
優白質花崗岩	1e-10	0.0125	1e-09
	1e-10	0.0175	1e-10
黒雲母花崗岩割れ目低密度帯	5e-12	0.0125	1e-10
月吉断層上盤側の割れ目帯	1e-10	0.0125	1e-09
	5e-08	0.0125	1e-09
	1e-06	0.3000	1e-08
表層堆積岩	5e-08	0.4880	5e-08

表 8.3.4-2 MIU スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値(岩盤基質部)

表 8.3.4-3 MIU スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値(亀裂の特性)

亀裂/ゾーン	透水係数 [m/s]	空隙率 [ێ]	比貯留率 [1/m]	亀裂開口 幅*〔四〕
月吉断層	1e-09**	0.10	1e-12	***
優 白質花崗岩	1e-06	0.10	1e-07	5.10e-03
高透水性黒雲母花崗岩	5e-07	0.10	1e-07	1.61e-03
低透水性黒雲母花崗岩	1e-10	0.10	1e-07	5.10e-03
月吉断層上盤側の割れ目帯	5e-09	0.10	1e-07	3.16e-04
月吉断層下盤側の割れ目帯	1e-07	0.10	1e-07	1.61e-03

注: 各地層に示した値は WCFZs に対する値である。また、確率論的な亀裂の特性の屈 曲度は1とした

*: 開口幅は式 $a = 2\sqrt{6.5k}$ を基に算出した。ここで、aは開口幅、kは透水係数である

**: 月吉断層の透水係数は断層に沿った測定値であると思われる。この値は断層を横切 る流れに対する止水効果を反映するよう、後に水理地質モデルで変更された

***: 開口幅は Frac-Affinity Ver 1.2 では決定論的な亀裂の特性には必要ない

亀裂セット	最小傾斜 角度	最大傾斜 角度	最小傾斜 方位角	最大傾斜 方位角	密度* [1/m]
優白質花崗岩 1	16	32	244	276	0.0011
優白質花崗岩 2	77	81	358	004	0.0011
優白質花崗岩 3	43	56	152	162	0.0011
高透水性黒雲母花崗岩 」	70	81	332	352	0.0300
高透水性黒雲母花崗岩 2	7	14	138	160	0.0300
高透水性黑雲母花崗岩 3	27	32	018	026	0.0300
低透水性黑雲母花崗岩 1	76	79	308	313	0.0011
低透水性黒雲母花崗岩 2	45	68	128	165	0.0011
 割れ目帯 Ⅲ 1	76	86	350	010	0.0077
割れ目帯 FW 1	16	32	244	276	0.0300
=== 割れ目帯 F₩ 2	77	81	358	004	0.0300
割れ目帯 FW 3	43	56	152	162	0.0300

表 8.3.4-4 MIU スケールの水理地質構造モデルにおけるパラメータの設定値(亀裂の 幾何学情報)

注: 亀裂サイズ(長さおよび幅)は本文中で述べた方法により設定した。

*: 1次元の密度であり、Frac-Affinity に入力するための決定論的な亀裂の特性についての密度は、試錐孔調査結果から算出された1次元密度を決定論的な亀裂の特性の平均面積で除して求めた。

(2) 要素分割

今回の地下水流動解析で使用した Frac-Affinity が解析で使用できる総節点数は、モデ ル開発の当初使用していた Frac-Affinity ver 1.2 で約 20,000 節点、モデル開発の中間段階 でリリースされたバージョンで約 40,000 節点であった。この制約内において、準広域 スケール及び MIU スケールの解析メッシュ (Frac-Affinity ネットワーク)を次のように 作成した。

準広域スケールモデル

準広域スケールモデルの解析メッシュの作成においては、Frac-Affinity ver 1.2 の制限 である 20,000 節点以下の節点数で解析メッシュを作成するため、モデル対象領域内に 存在する東濃鉱山のモデル化は見合わせた。その上で、準広域スケールモデルでの節点 数が、岩盤基質部に対するメッシュの節点数が 20,000 節点以下となるように調整した。 入力条件として 200×200×100 m (x, y, z) の大きさで要素分割を行う様に指定した結 果、(18,270 節点となると予想された)、地層およびモデル化の領域が矩形でないことか ら 20,286 節点のからなる解析メッシュが作成された。

ここで、上述の作業により解析メッシュを作成する際に、花崗岩風化部が全解析領域 の厚さと比較して極端に薄く、形状も不規則であることが問題となった。これにより、 花崗岩風化部においては、節点の横方向の連続性が失われることとなった。そこで以下 の対策を採ることとした。

- ・ x 方向のメッシュサイズを 250 m に増加させる
- y方向のメッシュサイズを、北-南方向の連結性を改善するため 125m に減少さ
 せる
- z方向のメッシュサイズを200mに増加させる
- z方向のメッシュサイズの増大に対応し、各地質に割り当てられる最小節点数
 を2とする
- ・ 花崗岩風化部の厚さを倍(86 m)に増加させ、風化部の全体としての透水性を 保存するため風化部の透水係数を 1/2 倍とする

月吉断層については、岩盤基質部をモデル化するための間隔とほぼ同じ間隔で節点を 設けることとし、200×200 m の間隔で節点を設けることとした。以上の作業に加えて境 界形状に関する処理等を行い、モデルの総節点数は 16,762 となった。さらにこのモデ ル化の終了後、約 40,000 万節点まで対応可能な Frac-Affinity Ver 1.2.4 の使用開始に伴い、 ゾーンの最小節点数を4まで増加させ、グリッド間隔を 125×125×200 m (x, y, z) に 変更した。この結果、総節点数は 39,319 となった。

MIU スケールモデル

MIU スケールモデルの岩盤基質部のメッシュサイズは、当初、岩盤基質部に対して
10,000 節点以下となるように設定した。このため、50×50×50 m (x, y, z) のメッシュ サイズを使用することにより、総節点数 11,200 のメッシュが構築されるものと予想し たところ、実際には 9,493 節点であった。この相違はモデルの鉛直範囲を過剰に見積っ たことが主な原因であった。また、月吉断層をモデル化には、岩盤基質部に対するメッ シュ作成の設定に整合的な値として、50×50 m のメッシュサイズを使用した。この段階 で、解析メッシュの総節点数は、11,224 節点となった。

Frac-Affinity では、既に存在する解析メッシュ(岩盤基質部に決定論的亀裂を加えた 解析メッシュ)に対して、確実に確率論的な亀裂を表現するメッシュが結合される様に、 一定以上の大きさで確率論的な亀裂の大きさを設定することが必要となる。そこで、今 回の MIU スケールのモデル開発では、岩盤基質部に対する解析メッシュサイズを 50×50×50 m としたことから、確率論的な亀裂の大きさを当初想定していた 10~50 m か ら 50~100 m に変更することとした。また、亀裂長さおよび亀裂幅を変更したことから、 変更後の平均面積 5,625 m³(75 m×75 m)に基づいて 3 次元亀裂密度を修正した。確率 論的な亀裂を追加後、解析メッシュの総節点数は 22,256 節点となった。Frac-Affinity Ver 1.2.4 使用時には、各ゾーンの最小節点数を 4 に増加させたことから、節点数は 36,446 に増加した。

(3) 境界条件

準広域スケールモデル

サポートにおける地下水流動解析では、飽和解析のためのコードを用いて、地表面からの涵養を考慮した解析を実施することを目指している。そこで、準広域スケールの地下水流動解析では以下の条件により境界条件を設定することとした。

- 南側の境界条件は一定水頭140mとする。これは土岐川の標高とほぼ等しい値である
- ・ 北、東、西側の境界条件は地標高に応じた水頭とする
- 地表面の境界条件は、(8.1)式により算出される地下水面を境界面として、地標 高に応じた水頭とする

これに加えて、以下のような2つの代替的な境界条件を用いた評価も実施した。

側面境界で不透水境界の不透水境界を与える。この解析条件は、解析モデルの
 側面境界における水頭の影響を評価するために設定した

② 地表面において一定涵養量と地形に応じた固定水頭を部分的に使い分ける。この解析条件では、地下水の涵養域と流出域を事前に推定・設定し、その場合の影響を調査した。基本的に地表面の標高の高い部分には一定涵養量を与え涵養域とし、低い部分は放出が生じるように標高に応じた固定水頭条件を与えた

このうち②の条件は、TAGSAC を用いた飽和・不飽和地下水流動解析で、解析領域内 に涵養域と放出域が表現されていることを意識したものであり、涵養域と放出域の境界 条件の使い分けは、主として地形(標高)にもとづき与条件として設定した。したがっ て、②の境界条件に基づく解析は、あくまで例示的に実施したものであることに留意す る必要がある。なお、涵養量の変動の影響を検討するため、涵養量を2桁小さく設定し た解析も実施した(0.28 mm/day に対応する-3.24×10⁻⁹から-3.24×10⁻¹¹ [m/s]に変更)。

MIU スケールモデル

MIU スケールモデルの境界条件は次のように設定した。

- ・ 地表面は地形に応じた水頭
- 最下部では不透水境界
- ・ 東西南北境界は準広域スケールモデルから算出された水頭条件
- (4) 地下水流動解析の実施

以上の設定により解析された各評価ケースには、それぞれ容易に判別できるように名 前を付けた。また、入力ファイルについても同様の整理を行った。

- REGO99: 準広域スケールにおけるモデル
- MIUQ99: MIU スケールのモデル
- THW: 花崗岩風化部の厚さを実際の2倍に設定したモデル
- Tsu:月吉断層の透水係数。この後に 09, 10, 11, 12 を付記する。それぞれ月吉断層の透水係数が 1×10-9 [m/s], 1×10-10 [m/s], 1×10-11 [m/s],1×10-12 [m/s]であることを示す
- NoFlow: モデルの東西境界条件を不透水境界としたモデル

rec: 地表面の多角形部分に設定した涵養量の条件。この後に 09, 11 を付記 し、それぞれ涵養量が-3.24×10-9, -3.24×10-11 であることを示す

今回の水理地質構造のモデル化で重要な位置を占めると考えられる月吉断層の水理

学的な特性については、既往の研究から止水性の高い構造となっていることが示されて いる。しかしながら、測定により求められた透水係数値は、準広域スケールモデルの土 岐花崗岩健岩部の透水係数に等しい 1×10⁹ [m/s]である(表 8.3.4-1)。したがって、透水 係数の測定値は断層に沿った流れに対する値であり、既往の研究で指摘されている断層 の遮水性は、断層と交差する向きの流れが、断層破砕帯を充填する厚い粘土層により遮 断されていることにより生じていると想定するのが妥当である。その一方で、月吉断層 の影響を確認するためには感度解析により、月吉断層の透水係数の影響を把握すること が重要である。

そこで、今回の地下水流動解析では、月吉断層の透水係数を段階的に変化させて、試 錐孔(MIU2 号孔)で観測された水頭との比較により月吉断層の適切な透水係数を調査・ 設定することとした。このため、月吉断層の透水係数を 1×10⁻⁹~1×10⁻¹² [m/s]の間で 1 桁 ずつ変化させた一連の解析を行うこととした。以下に準広域スケールと MIU スケール の解析ケースを示す。

準広域スケールモデル

- REGQ99_THW_Tsu9:
 月吉断層の透水係数を 1×10⁹ [m/s]、側面および上部境界には地形に応じた水
 頭値を設定し、花崗岩風化部の厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた
- REGQ99_THW_Tsu10:
 月吉断層の透水係数を1×10⁻¹⁰ [m/s]、側面および上部境界には地形に応じた水 頭値を設定し、花崗岩風化部の厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた
- REGQ99_THW_Tsu11:
 月吉断層の透水係数を1×10⁻¹¹ [m/s]、側面および上部境界には地形に応じた水
 頭値を設定し、花崗岩風化部の厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた
- REGQ99_THW_Tsu12:
 月吉断層の透水係数を1×10⁻¹² [m/s]、側面および上部境界には地形に応じた水 頭値を設定し、花崗岩風化部の厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた
- REGQ99_THW_Tsu12_NoFlow:
 月吉断層の透水係数を1×10⁻¹² [m/s]、側面および上部境界は地形に応じた水頭 値を設定し、花崗岩風化部の厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた

さらに、領域により一定涵養量と地形に応じた固定水頭を使い分ける場合として、以 下のような条件で解析を行った。

- REGQ99_THW_Tsu12_NoFlow_rec09:
 月吉断層の透水係数を 1×10-12 [m/s]、上部境界は涵養域と推定される領域で涵 養量一定(3.24×10-9 [m/s])他の領域で固定水頭、東西境界は不透水境界、風 化ゾーンの厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた
- REGQ99_THW_Tsu12_NoFlow_rec11:
 月吉断層の透水係数を1×10-12 [m/s]、上部境界は涵養域と推定される領域で涵 養量一定(3.24×10-11 [m/s])、他の領域で固定水頭、モデルの東西境界は不透 水境界、風化ゾーンの厚さを2倍とした地質構造モデルを用いた

MIU スケールモデル

MIU スケールモデルでは以下のようなモデル計算を実行した。

- MIUQ99_Tsu10:
 月吉断層の透水係数を 1×10-10 [m/s]とした。
- MIUQ99_Tsu11:
 月吉断層の透水係数を1×10-11 [m/s]とした。
- MIUQ99_Tsu12:
 月吉断層の透水係数を 1×10-12 [m/s]とした。
- MIUQ99_Tsu12_NoFlow:
 月吉断層の透水係数を1×10-12 [m/s]とした。このモデルの境界条件は、東西側面の境界条件を不透水境界として解析した準広域スケールモデルの結果から設定した。

これらの解析の境界条件は、同条件の広域スケールモデルの結果から Frac-Affinity Ver 1.2.4 のユーティリティーにより直接入力した。また、月吉断層の透水係数を 1×10[°] [m/s] としたモデルについては、明らかに透水係数が高すぎることから MIU スケールでの解 析ケースから除くこととした。 8.3.5 解析結果と考察

(1) 地表面で水頭を固定した場合の解析結果

図 8.3.5-1 と図 8.3.5-2 に準広域スケールと MIU スケールにおける MIU-2 号孔におけ る解析結果を実測値と比較して表示した。このうち図 8.3.5-1 には、比較のために TAGSAC で MIU-1 号孔に対して求められた解析結果も表示してある。また、図 8.3.5-3 と図 8.3.5-4 は、準広域スケールと MIU スケールの解析結果を 3 次元の水頭分布として 可視化したものである。

図 8.3.5-1 から、準広域スケールにおける MIU-2 号孔に対する解析結果は、TAGSAC で求められた MIU-1 号孔に対する解析結果に非常良く一致していることが確認できる。 すなわち、地表面で涵養を伴う自由浸出面を設定した TAGSAC による解析結果は、地 表水面の標高に応じた水頭値を設定した Frac-Affinity での解析結果に非常に良く一致し ている。例えば、Frac-Affinity による解析と TAGSAC による解析の両方において-2,000 mbOD における水頭値の計算結果は約 250 m で一致している。なお、地表の極近傍にお ける解析結果は実測データに近い値を示しているが、これは、地表面境界で設定されて いる固定水頭境界条件の影響であると考えられる。

図 8.3.5-1 から、全ての準広域スケールの解析で月吉断層(標高約-680 m の位置)の 位置で水頭値が変動するとの結果が求められていることがわかる。この変動は、月吉断 層の透水係数を 1×10⁻¹² [m/s]としたときに最大となった。しかしながら、ケース REGQ99_THW_Tsu12 においても水頭の変動幅(10 m)は試錐孔調査結果による変化量 (20 m)の1/2 にすぎず、いずれの解析結果も実測値の再現という観点からは課題を残 している。また、TAGSAC による解析を含め、求められた水頭が全体的に高い値を示 している点についても今後の検討が必要である。これらの現象については、現段階で明 確な原因を特定することは困難であるが、側面の境界条件として地形に応じた水頭値を 設定した場合よりも不透水境界を設定した場合に実測値に近づく傾向があることから、 境界条件の設定に関連した現象である可能性が高いと推察される。

図 8.3.5-2 に MIU スケールモデルでの解析結果を示した。この図から、MIU スケール の地下水流動解析で求められた水頭分布は、準広域スケールモデル上部の結果と基本的 に同一の傾向を持っていることがわかる。2つの解析の相違点としては、準広域スケー ルでは存在していた月吉断層周囲の水頭値の急激な変化が、MIU スケールでは存在し ないことが挙げられる。この原因についても現段階では確定的なことは不明であるが、 境界条件の設定方法の影響を受けている可能性が指摘される。また、MIU スケールモ デルと準広域スケールモデルとでは、水理地質構造モデルを開発する際に使用した地質 構造モデルの詳細度等が異なっている(例えば、MIU スケールモデルでは割れ目帯を モデルに含んでいる)ことから、このことが原因となって解析結果に幾つかの相違点が 生じている可能性も考えられる。

MIU スケールモデルの境界条件は、同一条件(例えば、月吉断層に対して同じ透水 係数設定したケース)の準広域スケールでの解析結果から直接引用している。したがっ て、MIU スケールにおいても断層上盤側において解析により求められた水頭が実測値 よりも高くなっているが、これは準広域スケールの解析結果が境界条件を通じて MIU スケールの解析結果に影響を及ぼしているものと考えられる。また、MIU スケールモ デルの解析結果に関する特徴として、水頭分布に幾つかの細かな変動が存在することが 挙げられる。これは、MIU スケールの解析では確率論的亀裂についてもモデル化して おり、その影響が水頭分布に現れたものと考えられる。

(2) 地表面で涵養域と放出域を指定した場合の解析結果

準広域スケールにおいて地表面で涵養域と放出域を指定した場合の解析結果を図 8.3.5-5 に示す。なお、前述のようにこの解析における涵養域と放出域の指定はあくまで 主観的なものであり、解析は例示的な位置付けで実施されたことに十分留意する必要が ある。

涵養量として TAGSAC での解析を含め既往の研究で一般に用いられている値(0.28 mm/day に対応する-3.24×10⁹[m/s])を使用した場合の評価結果は、試錐孔での測定結果を大きく上回る水頭が求められた(水頭値が 500~700 m となった)。一方、涵養量を-3.24×10-11 [m/s]に設定したケースについては、図 8.3.5-5 に示したように月吉断層下盤 側および土岐花崗岩の上部において実測値と良好な一致を示した。ただし、依然として 月吉断層上盤側の土岐花崗岩における評価結果は測定値と 20 m 程度異なっており、その原因としては次のような可能性が推察される。

- ・ 地質構造モデルにおける土岐花崗岩の不確実性と、それに付随した水理地質構 造パラメータの不確実性。
- 準広域スケールモデルに存在する月吉断層以外の断層を除外した影響。特に除 外した断層が高透水性の割れ目帯である場合には、これらが卓越流路となって 付近の水頭が低下する可能瀬がある。
- ・ 境界条件の不確実性。



図 8.3.5-1 準広域スケールモデルの解析結果と測定結果との比較 (MIU-2 号孔にお ける水頭分布、TAGSAC による解析結果もあわせて示した)



図 8.3.5-2 MIU スケールモデルの解析結果と測定結果との比較 (MIU-2 号孔における 水頭分布、TAGSAC による解析結果もあわせて示した)



図 8.3.5-3a 準広域スケールモデル(REGQ99_THW_Tsu12_NoFlow)の解析結果(水頭分布)



図 8.3.5-3b 準広域スケールモデル(REGQ99_THW_Tsu12_NoFlow)の解析結果(水頭分布)



図 8.3.5-4a MIU スケールモデル(MIUQ99_THW_Tsu12_NoFlow)の解析結果(水頭分布)



図 8.3.5-4b MIU スケールモデル(MIUQ99_THW_Tsu12_NoFlow)の解析結果(水頭分布)



図 8.3.5-5 準広域スケールモデルの解析結果(多角形で定義された2つの領域での涵 養量を3.24×10-11 [m/s]に設定したケース)と測定結果との比較 (MIU-2 における水頭分布)

8.3.6 地下水流動解析のまとめ

解析結果と実測結果の比較からも明らかなように、現在のところ地下水流動解析の入 カデータには大きな不確実性が存在することから、試錘孔における観測結果を十分な精 度で説明する解析結果を導出するには多くの課題を残している。しかし、EarthVision と Frac-Affinity を主体とする可視化システムの活用により、地質構造モデルの開発から、 水理地質構造モデルの開発、更に地下水流動解析の実施に至る一連の過程を適切、かつ 効果的に進めることができたものと考える。特に、地下水流動解析の観点からは以下の 事項が示されたと考える。

- ・ EarthVision の地質構造モデルにもとづき、Frac-Affinity により比較的簡便に地 下水流動解析が実施可能であることが確認された。
- Frac-Affinityの解析結果はTAGSACでの結果と良好な一致を示した。
- ・ 確率論的な亀裂の影響を水頭分布の変動として捉えることができた。
- 大きな領域を対象とする地下水流動解析の結果にもとづき、小領域を対象とする簡便に詳細モデルに反映できることが確認された。
- また、個々の解析結果からは以下のことが明らかになった。
 - 東西境界の境界条件として、地形に応じた水頭値を指定するより、不透水境界
 を設定する方が、より現実的であると思われる
 - 水理地質構造モデルに用いたデータ、特に透水係数(岩盤基質部の透水係数お よびモデル中の個々の亀裂に対する透水係数)には大きな不確実性が存在する
 - 水理地質構造の概念モデルの開発、水理地質パラメータの設定、および最も適切な境界条件の決定のため、今後とも精力的な調査が望まれる

8.4 特性調査並びに不確実性の取り扱いに関する検討

本節では、可視化システム利用のサポートを通じて明らかとなった超深地層研究所計 画に関連する地質調査に関する気づき事項をまとめるとともに、モデル化に伴う不確実 性の取り扱いについて検討する。

各種の地質調査に関する気づき事項としては、まず、調査が完了している MIU-2 号 孔が超深地層研究所内の水頭分布へ影響をもたらしている可能性が指摘される。MIU-2 号孔は、止水性を有すると考えられる月吉断層と交差しており、掘削後、現在までの約 1年の間、開口されたまま放置されている。また、MIU-2 号孔と AN-3 号孔との間で地 下水流動に連結性があることが確認されている。したがって、MIU-3 号孔における測定 は、MIU-2 号孔の掘削による月吉断層下盤側の領域で水頭が低下した状態を計測してい る可能性ある。MIU-2 号孔については、月吉断層との公差部にパッカーを挿入する計画 があるが、このことを考慮しても超深地層研究所内での水頭分布が MIU-4 号孔の掘削 開始時点までに再平衡に達することは考えにくい。今後の水理地質構造モデルの開発に あたっては、この影響を考慮することが重要である。

また、MIU-4 号孔の観測において、これまでの試錘孔の掘削の影響を回避することが 不可能であるならば、MIU-4 に引き続き MIU-5 号孔を掘削し、その際、既存の試錘孔 の影響を可能な限り少なくすることが重要であると考える。MIU-5 号孔の掘削が可能で ある場合には、できる限り早期に計画を具体化し、試錘孔位置を決定する際に既存の試 錘孔の影響が最小化できる場所を選定するべきである。

さらに、今後の地質調査の立案にあたっては、計画全体を体系化することが重要であ る。試錐孔での観測は、その他の地質調査活動(例えば、露頭での亀裂分布のマッピン グ)やモデル開発と連携して進められることが望ましい。この様な各種研究活動の連携 を強化し計画全体を体系化することにより、データ解析、モデル化、さらに不確実性に 対する考え方について、現段階における研究成果を次の段階の研究に適切に反映するこ とが可能になると思われる。

超深地層研究所計画ので実施が検討されている長期揚水試験(Long Term Pumping Test)に関しては、月吉断層下盤側および断層を交差する様に試験位置を設定することが重要である。前述のように MIU-4 号孔の掘削により超深地層研究所の近傍における 水頭の分布は、既に擾乱を受けているものと推定される。したがって、月吉断層の上盤 側について擾乱を受ける前の水理地質学的状態を観測するためには、MIU-5 号孔を掘削 し、かつ MIU-5 号孔の掘削までに水理学的平衡状態に回帰している場合に限られる。 これらの試験の必要性については、今後、慎重に検討する必要があると考えられる。その際、超深地層研究所の立坑掘削開始以前に取得すべきデータの内容と、その時点で必要な地質環境条件の理解の程度を十分に検討することが重要である。

MIU サイトを対象に作成した地質構造モデルおよび水理地質構造モデルには、現状では非常に大きい不確実性が存在していると言わざるを得ない。この不確実性は、概念モデルの不確実性(例えば主要な水みち、すなわち WCFZs のモデル化)とパラメータについての不確実性(例えば透水係数の設定)に大別される。現在のところ、超深地層研究所計画に関連し、不確実性を定量化するための反復的なモデリングを含む全体的な作業フローが確立されていないことから、これらの不確実性を定量的に把握することは困難である。

地質構造および水理地質構造モデルの開発における不確実性の取り扱いについては、 地質調査手法を体系化するとともに調査結果の評価手法を確立することによって、また、 予測解析とその後の測定のプロセスを反復的に実施することによって、何らかの回答を 用意できる可能性がある。これは、Nirex が Sellafield でのサイト特性調査に採用した手 法であり、超深地層研究所計画においても同様の方向性が一部の研究計画で示されてい る。例えば、MIU-4 号孔に関する実施計画[15]では、地質環境の予測や予測手法の開発 に関する多くの既述が存在する。この様なアプローチは、超深地層研究所計画で取り組 むべき最も大きな課題の1つである「どれだけデータを集めれば十分と言えるのか」と 言う問題に回答を与えうるものであり、Sellafield においても不確実性評価のために使用 されたアプローチである。

MIU-4 号孔に関する実施計画 [15]ではいくつかの予測が示されているが、どのよう な予測をすべきであるか、あるいは予測における不確実性や予測結果の評価方法等に関 する詳細な検討は見られない。MIU-4 号孔について、体系的な予測結果を提示し(これ は立坑の建設前に実施する必要がある)、また包括的な文書(水理地質構造および水化 学的な要素についての予測を含めることが望ましい)を作成することが必要である。立 坑の掘削以前の段階では、詳細な予測を行うためのデータが限られていることも事実で あるが、正式な手続きによって制定された体系的な調査の手順にもとづいた予測解析が 実行されない場合には、新たな地質調査の結果にもとづいて地質環境の理解を増進させ、 地質環境の理解に内在する不確実性を低減させることは困難である。

この様に、不確実性の評価のためには、超深地層研究所での実施が予定されている地 表からの調査活動について、予測とその評価の方法を体系的に示した文書を作成するこ とが重要である。これは、不確実性を取り扱うための手法の基本を示すものとなる。こ の文書は超深地層研究所に特化したものであり、試錐孔や立坑の掘削に先だって解析に より予測すべき地質環境条件、解析で使用するモデルとコード、コードの使用法と適切 な誤差の見積もり、さらに評価結果に対する達成度の評価法等を既述する必要がある。 また、この次の各段では、地質調査の各段階で取り組むべき鍵となる不確実性(例えば、 WCFZs のモデル化)を確認し、これらの不確実性に対処する方策を検討することが必 要となる。そのためには、予測の手順、評価指標及び評価方法を公式な手順にもとづき 準備する必要がある。

Nirex が RCF のフェーズ 1 の科学研究プログラムにおいて採用した評価フローを図 8.4-1 に示す。このフローは、図 8.4-1 では上流から下流への 1 つの流れとして示されて いるが、本質的に調査計画の立案やモデルの評価に必要な指標などの更新に合わせて、 反復的に実施されるべきものである。なお、図 8.4-1 は特定のモデルに関する信頼性の 増進に着目したものであり、より一般的な性能評価の不確実全体に対しては、例えば図 8.4-2 に示したフローの適用が考えられる。

超深地層研究所計画での研究成果を将来の処分場の建設に反映させるためには、超深 地層研究所計画で作成された調査手順を一般化することが重要である。この作業では、 データの収集、モデリング(予測)、モデルの評価及び更なる調査が必要なデータの抽 出により構成される反復的なサイト特性調査活動を、段階的な作業として定義づけるこ とによって、「サイト特性調査として十分なデータが収集されたこと」を示す手法を提 示する必要がある。

作業手順の策定にあたっては、地層科学研究で作成されるモデルがそれぞれ異なった 属性を有しており、その研究におけるモデルの重要性を認識することが重要である。こ れは、例えば地質構造モデルは3次元の構造を表現する幾何学形状モデルであるのに対 し、水理地質構造モデルは地下の動的なプロセス(地下水流動)を表現するプロセスモ デルである。地質構造モデルの妥当性は、良く知られた地質学的な特徴、特に地質構造 をどれだけ正確に表現しているかにより確認することができる。例えば、ソフトウエア 3D Move では地質構造の時間変化を表現することが可能であり、これにより現在の 3 次元構造の妥当性を検討することができる。プロセスモデルの妥当性の確認はさらに困 難な問題であり、多くの場合、構築されたモデルに関する信頼性(confidence)の向上 という観点から論じられることとなる。具体的には、観測データによるブラインドテス トにより確認されるのが一般的である。

上記のようなモデルの特性の相違に加えて、モデル化の重要性についても配慮するこ とが重要である。例えば、地質構造の理解が各種モデル開発において重要な役割を果た すことは明らかであるが、対象領域に存在する全ての亀裂を正確にモデル化することは 現実的ではなく、重要性も高いとは考えられない。この様に、モデル開発あたっては、 モデル化の目的を常に意識しながら作業を進めることが重要である。

現在のところ、超深地層研究所の地質学的/水理地質学的モデリングを進める際の最 も大きな不確実性は WCFZs に関連した不確実性である。前述のように、物理検層によ って存在が確認されている WCFZs が実際に主要な地下水移行経路となっているかにつ いては、これを直接的に証明するデータは存在しないものと考えられる。この問題につ いては、前述の様に、連続的な試錐孔試験の実施等に代表される体系的な水理試験の実 施が急務であると考えられる。

現在、試錐孔の表面以外に WCFZs の走向、傾斜、亀裂の長さや開口幅と言った幾何 形状に関する情報は存在しない。この問題に対しては、以下の2つの調査が有効と考え られることから、今後、実施を検討すべきである。まず1つは、地表踏査による露頭に おける亀裂特性調査であり、これにより、例えば低透水性黒雲母花崗岩の亀裂特性に関 する情報を収集できる可能性がある。より広範な調査を行うため、可能であれば表面土 壌を掘削して調査を行うことが望ましい。地表面の亀裂調査(マッピング)の結果につ いては、フラクタルスケーリング則の適用によってより大きなケールにも適用できる可 能性がある。また、これらの調査の結果は、地下水流動のモデル化のための入力データ に半定量的な裏付けを与える可能性もある。2 つめ方法は、試錐孔周辺の WCFZs の特 性を物理検層によりを決定論的に明らかにするものである。弾性波トモグラフィー、レ ーダートモグラフィー、鉛直弾性波プロファイル(VSP)等の方法が候補となる。特に、 walk away VSPs の活用が期待される。



図 8.4-1 RCF における不確実性評価のためのフロー



図 8.4-2 処分場の建設における評価フロー

8.5 可視化システム利用のサポートに関する結論と今後の課題

本節では可視化システム利用のサポートを通じて明らかとなった主な結論と、今後の モデル開発及び地質調査に関する課題を示す。以下に、地質構造モデルの開発、水理地 質構造モデルの開発、地質調査並びに今後の課題の観点から検討する。

8.5.1 地質構造モデルの開発

- 検討しているスケールに対して、地質構造把握のための3次元地質構造モデル と地下水流動解析のための3次元地質構造モデルを作成すべきである。まず、 地質構造把握のための3次元地質構造モデルを作成し、次に地下水流動解析の ための3次元地質構造モデルを導出するのが一般的である。必要に応じて、複 数の地下水流動解析のための3次元地質構造モデルを同じ3次元地質構造モデ ルから作成することも考えられる。
- モデル開発の成果を確かなものとするためには、信頼性の高いデータセットの 準備が不可欠である。特に、超深地層研究所周辺ではウラン探鉱や地層科学研 究の成果として膨大なデータが利用可能であり、これを効果的に活用するため に質の高いデータセットとして整備することが重要である。
- ・ 地質構造モデル、特に地質構造把握のための3次元地質構造モデルについて、
 標準的な可視化情報を作成し、多くの研究者が容易に利用できる状態で保存することが望ましい。可視化の対象としては、3次元地質構造モデル、試錐孔の
 位置と調査結果、試錐孔試験とサンプリングの場所、および試錐孔から得られたデータ(例えば、WCFZsの方位)などが考えられる。
- ・地質構造モデルを開発する際には、これまでの地質学的な解釈や専門家の地質 学的/水理地質学的な知見の活用が重要である。これらの経験や知見は EarthVisionの自動ルーチンの出力よりも優先されるべきであり、地質構造モデ ルの開発に適切に反映させることが適切である。EarthVisionの自動ルーチンは 超深地層研究所計画予定地周辺においても概ね妥当なモデリングを行うもの と考えられるが、手作業によるモデリングがより良い結果をもたらす可能性も 存在する。自動、手動のどちらの方法を使用するかは、作業できる時間、 EarthVisionの使用経験およびモデルに要求される精度とのバランスを考慮し て決定する必要がある。
- モデル化対象領域のスケールは、立坑の掘削に対する TAGSAC による水理地 質構造モデルの結果、および詳細モデルの開発に利用できるデータを勘案して 考慮する必要がある。
- 土岐花崗岩における相分布については、更に調査を行う必要があると考えられ

る。分布状況の設定にあたっては、サイト特性調査データにもとづき慎重に検 討する必要がある。

- モデル開発を行う際には計画書を作成することが重要である。また水理地質構造モデルの開発が計画されている場合には、両者について同時に計画書を作成することが望ましい。
- 地質構造モデルの開発で使用されるデータは、作業開始までに収集・整理されている必要がある。
- モデル開発から数年が経過した時点においても、開発したモデルに容易アクセスできる必要がある。このため、各種ファイル名の設定には細心の注意を払う必要がある。一般に、プロジェクトのディレクトリには入力データと最終モデルが保存されている必要がある。
- 開発したモデルについては、その結果を文書で保存するとともに、作業の概要
 と使用したデータについても適切に記録することが重要である。

8.5.2 水理地質構造モデルの開発

- ・ WCFZs については、地質学的、水理地質学的な問題として早急に取り組む必要があり、亀裂の統計的な特徴の把握が必要である。この問題は、土岐花崗岩中の地下水流動をモデリングする際の最重要課題と考えられる。
- 水理地質構造モデルの結果については、適切な分析を加えた上で、試錘孔等を 含めた標準化された形式で3次元地質構造モデルとして EarthVision で可視化 することが望ましい。この可視化により、研究者間での成果の共有が促進され るものと期待される。
- 水理地質構造モデルに使用する水理特性(例えば透水係数)については、スケールの大小に係わらず、1つの領域には1つの値を設定する必要がある。
- ・ 地質構造をモデリングする際に、スケールの異なるモデル間においてモデリン グの解像度を変更する場合には、その影響について検討する必要がある。例え ば、本サポートでは準広域スケールモデルと MIU スケールモデルとで土岐花 崗岩風化部の厚さが同一ではなかった。また、準広域スケールモデルでは風化 部と土岐夾炭累層の基底礫部が一括して表現されている。この地質構造の変更 の影響については今後の課題である。
- 月吉断層が準広域スケールモデルの端部に達していることに関連して次の観点から追加的な地下水流動解析を実施する必要があるものと考えられる。
 - 側面に地形に応じた水頭値を指定する代わりに不透水境界を設定する際の影響の評価
 - 全体的なメッシュ分割の大きさを変化させた場合の影響の評価

- 断層を薄い層として設定し、解析を行う影響の評価
- 確率論的な亀裂を含むハイブリッド媒体モデルに対して、全体的な特性をより 大きな一つのメッシュで表現するアップスケーリング(upscaling)を検討する べきである。
- 水理地質構造モデルの進捗度をまとめた文書を作成すべきである。作成にあたっては、地質構造モデルの進捗度をまとめた文書との連携に留意する必要がある。これらの文書は、超深地層研究所計画の進捗を記録する重要な文書となる。

8.5.3 地質調査

- 土岐花崗岩中の主要な地下水移行経路の位置及び範囲を、精力的な試錐孔試験
 により確認する必要がある。
- ・ 地質調査計画の立案に際しては、試錐孔での観測、地表面でのマッピング、物 理検層、モデル化、およびこれらの検討結果の評価を体系的に取り扱う必要が ある。
- 現在のところ、土岐花崗岩の透水係数は DH シリーズの試錘孔で得られたデー タにもとづいて設定している。このデータの超深地層研究所近傍の土岐花崗岩 に対する適用性については、今後、確認する必要があると考える。場合によっ ては、信頼性の高いデータを新たに収集する必要がある。
- 8.5.4 今後の課題

今後の課題として、以下の事項が考えられる。これらの事項は速やかに取り組む必要 があると考えられる。

- ・ 解析及び解析結果の評価方法の開発と適用性の検討。
- ・ 広域スケールおよび MIU スケールにおける地質構造把握のための 3 次元地質 構造モデルの開発。
- 地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの開発に必要なデータについて、検 証済みのデータセットを作成すること。この問題は、モデル開発全体における 位置付けから、できる限り速やかに取り組む必要がある。
- 超深地層研究所計画に関連した地質構造モデルおよび水理地質構造モデルに
 関するモデル化の進捗状況の文書化及びその準備。
- ・ 試錐孔の掘削、調査およびデータ解析計画の立案。
- その他の地質調査活動(例えば、地表面での亀裂マッピング)。
- ・ WCFZs の特性把握のための調査と、土岐花崗岩の亀裂の少ない部分との比較

による WCFZs の水理地質学的特性の明確化。

- 土岐花崗岩内における卓越流露の位置や広がりを把握するための厳格な試錘
 孔透水試験の実施。
- ・ 超深地層研究所計画に関連して計画されている様々なモデリング活動や試錘 抗調査、地表踏査、物理探査等のデータ取得とを統合的に進めるための計画の 立案。
- ・ 立坑掘削による水理地質学的影響を現実的にモデル化するための、立坑表面に おける境界条件の詳細な検討。立坑掘削の担当部署との連携が重要である。

9. まとめ

本研究では Frac-Affinity を飽和不飽和解析に拡張するとともに、超深地層研究所に関連 した解析のうち、実施時期の観点から最も優先順位が高いと考えられる立抗掘削の模擬解 析を行うための改良を行った。具体的には、主として以下の示す項目についてコードの改 良を行うとともに、立抗掘削の模擬を含めた一連の試解析を行った。

- ・ コードの飽和・不飽和解析への拡張
- ・ ソルバーの改良による解析可能最大節点数の向上
- ・ 入出カインタフェースの改良
 - ― 飽和・不飽和解析に対応した入力項目の追加
 - ― 差分メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)や流束ベクトルの可視化
 - ー エラー情報の充実、等
- ・ 飽和・不飽和解析に対応した境界条件(自由浸出、涵養)の追加
- ・ 立抗掘削を模擬するための内部境界の形状や境界条件の経時変化を取り扱う機能の追加
- ・ 差分メッシュ(Frac-Affinity ネットワーク)構築方法の改良と、部分的に差分メッシュの密度を調整する機能の追加

これらの拡張および試解析の結果から、飽和不飽和に拡張された Frac-Affinity により、立 抗掘削を対象とした地下水流動解析をおここなうことが可能となった。

一方、地質環境データ解析・可視化システムでは、Land Mark、EarthVision ならびに Frac-Affinity の有機的な活用により、一貫した地層科学研究の支援が可能であることから、 これをより効果的に進めるため専門家によるサポートを実施した。このため、3回のサポ ートを通じて EarthVision を用いた広域スケールおよび MIU スケールの地質構造モデルの 構築を支援するとともに、Frac-Affinity により広域スケールと準広域スケールにおける水理 モデルを構築し飽和地下水流動解析を行った。これらの成果は、飽和・不飽和地下水流動 に拡張した Frac-Affinity の試解析に適切に反映された。また、本年度の各種モデリングの 成果および問題点にもとづき、次年度以降の課題を明らかにした。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構,"地質環境データ解析・可視化システム 解析コードの改良",サイクル 機構契約業務報告書,JNCTJ744099-011,1999
- [2] L. Pan 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.
- [3] L. Pan and P. Wierenga, "Improving numerical modeling of two-dimensional water flow in variably saturated, heterogeneous porous media", Soil Sci. Soc. Am. J., 61(2), 335-346, 1997.
- [4] M. van Genuchten, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898, 1980.
- [5] 日揮株式会社、"FrancAffinity Version 2 ユーザガイド", 2000
- [6] G D. Byme and A.C. Hindmarsh, "A Polyalgorithm for the Numerical Solution of Differential-Algebraic Equations", ACM Trans. Math. Software 1, pp71-96, 1975.
- [7] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, Numerical Recipes The Art of scientific Computing, Cambridge University Press, 1992.
- [8] Earth Vision User Guide, Dynamic Graphics, Alameda, California, U.S.
- [9] J. Garrera, L. Vives; P. Turne; M. Saaltink; G. Galarza; J. Guimera and A. Medina, Interpretation of field tests in low permeability fractured media. Recent experiences. In: Duchatean, (ed) Parameter identification and inverse problems in hydrogeology, geology and ecology. Water Sci. and Tech. Library, 23:53-70 Kluwer Ac. Press, 1996.
- [10] J. C. S. Long, H. K. Endo, K. Karasaki, L. Pyrak, P. MacLean and P.A. Witherspoon, Hydrological behaviour of fracture networks. Hydrol. of rocks of low permeability, IAH Conf, Vol. XVII, 449-462, 1985
- [11] P. C. Robinson Connectivity of Fracture Systems A Percolation Theory Approach, J. Phys. A. 16, p605, 1981
- [12] P. C. Cacas, E. Ledoux; G de Marsily; A. Barbreau; P. Calmelld; B. Guilland and R. Margritta, Modeling fracture flow with stochastic discrete fracture network: Calibration and validation 2. The transport model. Water Resour. Res. 26(3) 491-500, 1990
- [13] H. Abelin, L. Birgersson, H. Widen, T. Agren, L. Moreno and I. Neretnieks, Channeling experiments in crystalline fractured rocks. J. Cont. Hydrol. 15:129, 1994.
- [14] Katayama, N, Kubo, K and Hirono, S, Genesis of uranium deposits of the Tono mine, Japan. IAEA Proceedings, IAEA-SM-183/11, 437-452, 1974.
- [15] Ota,K, Nakano,K, Metcalfe,R, Ikeda,K, Goto,J, Amano,K, Takeuchi,S, Hama,K and Matsui,H., Working Programme for MIU-4 Borehole Investigations. JNC Report JNC TN7410 99-007, 1999.
- [16] 核燃料サイクル開発機構, "超深地層研究所計画 年度報告書(平成11年度)", サイクル機構技 術報告書, JNCTJ7410 2001-003, 2000(執筆中)

添付資料1

代替的な確率論的亀裂ケース(ケース A-2)の 確率論的亀裂の設定に使用した入力ファイル

0 tsukiHWDZ RANDOM 1.37e-06 UNIFORM 76 86 -10 10 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 3.16e-04 UNIFORM -9 -8 0.1 1e-07 Felsic RANDOM 1.96e-07 UNIFORM 16 32 -116 -84 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 5.1e-03 UNIFORM -6 -6 0.1 1e-07 Felsic RANDOM 1.96e-07 UNIFORM 77 81 -2 4 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 5.1e-03 UNIFORM -6 -6 0.1 1e-07 Felsic RANDOM 1.96e-07 UNIFORM 43 56 152 162 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 5.1e-03 UNIFORM -6 -6 0.1 1e-07 BiotiteLWR RANDOM 5.33e-07 UNIFORM 70 81 -28 -8 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 1.61e-03 UNIFORM -9 -6 0.1 1e-07 **BiotiteLWR** RANDOM 5.33e-07 UNIFORM 7 14 138 160 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 1.61e-03 UNIFORM -9 -6 0.1 1e-07 **BiotiteLWR** RANDOM 5.33e-07 UNIFORM 27 32 18 26 UN1FORM-RECT 50 100 50 100 1 1.61e-03 UNIFORM -9 -6

```
0.1 1e-07
BioLowK
RANDOM 1.96e-07
UNIFORM 76 79 -52 -47
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -11 -9
0.1 1e-07
BioLowK
RANDOM 1.96e-07
UNIFORM 45 68 128 165
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -11 -9
0.1 1e-07
BiotiteUP
RANDOM 5.33e-07
FISHER 75 -18 10
POWER-RECT 50 100 2 50 100
1 1.61e-03
TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6
0.1 1e-07
BiotiteUP
RANDOM 5.33e-07
FISHER 10 149 10
POWER-SQUARE 50 100 2
1 1.61e-03
TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6
0.1 1e-07
BiotiteUP
RANDOM 5.33e-07
UNIFORM 27 32 18 26
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 1.61e-03
UNIFORM -9 -6
0.1 1e-07
tsukiFWDZ
RANDOM 5.33e-07
UNIFORM 16 32 -116 -84
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 1.61e-03
UNIFORM -8 -6
0.1 1e-07
tsukiFWDZ
RANDOM 5.33e-07
UNIFORM 77 81 -2 4
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 1.61e-03
```

UNIFORM -8 -6 0.1 1e-07 tsukiFWDZ RANDOM 5.33e-07 UNIFORM 43 56 152 162 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 1.61e-03 UNIFORM -8 -6 0.1 1e-07 tsukiFWDZ FIXED 5433.29 -68552.4 -754.805 UNIFORM 43 56 152 162 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 1.61e-03 UNIFORM -8 -6 0.1 1e-07 tsukiHWDZ FIXED 5433, 29 -68552.4 -675.605 UN1FORM 76 86 -10 10 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 3.16e-04 UNIFORM -9 -8 0.1 1e-07 tsukiHWDZ FIXED 5433.29 -68552.4 -633.365 UNIFORM 76 86 -10 10 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 3.16e-04 UNIFORM -9 -8 0.1 1e-07 tsukiHWDZ FIXED 5488.83 -68629.4 -777.649 UNIFORM 76 86 -10 10 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 3.16e-04 UNIFORM -9 -8 0.1 1e-07 tsukiHWDZ FIXED 5488.83 -68629.4 -760.052 UNIFORM 76 86 -10 10 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 3.16e-04 UNIFORM -9 -8 0.1 1e-07 tsukiHWDZ FIXED 5488.83 -68629.4 -738.936 UNIFORM 76 86 -10 10 UNIFORM-RECT 50 100 50 100

```
1 3.16e-04
UNIFORM -9 -8
0.1 1e-07
Felsic
FIXED 5488.83 -68629.4 -689.667
UNIFORM 16 32 -116 -84
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -6 -6
0.1 1e-07
Felsic
FIXED 5488.83 -68629.4 -661.512
UNIFORM 16 32 -116 -84
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -6 -6
0.1 1e-07
Felsic
FIXED 5488.83 -68629.4 -617.52
UNIFORM 16 32 -116 -84
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -6 -6
0.1 1e-07
BiotiteLWR
FIXED 5433.29 -68552.4 -518.965
UNIFORM 70 81 -28 -8
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 1.61e-03
UNIFORM -9 -6
0.1 1e-07
BioLowK
RANDOM 5433.29 -68552.4 -499.605
UNIFORM 76 79 -52 -47
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -11 -9
0.1 1e-07
BioLowK
RANDOM 5433.29 -68552.4 -385.205
UNIFORM 76 79 -52 -47
UNIFORM-RECT 50 100 50 100
1 5.1e-03
UNIFORM -11 -9
0.1 1e-07
 BioLowK
 RANDOM 5433.29 -68552.4 -274.325
 UNIFORM 76 79 -52 -47
```

UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 5.1e-03 UNIFORM -11 -9 0.1 1e-07 BioLowK RANDOM 5433.29 -68552.4 -186.325 UNIFORM 76 79 -52 -47 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 5.1e-03 UNIFORM -11 -9 0.1 1e-07 BioLowK RANDOM 5488.83 -68629.4 -239.195 UNIFORM 76 79 -52 -47 UNIFORM-RECT 50 100 50 100 1 5.1e-03 UNIFORM -11 -9 0.1 1e-07 **BiotiteUP** FIXED 5433.29 -68552.4 -140.565 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 BiotiteUP FIXED 5433.29 -68552.4 -91.285 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 **BiotiteUP** FIXED 5433.29 -68552.4 -26.165 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 BiotiteUP FIXED 5433.29 -68552.4 -1.525 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 BiotiteUP FIXED 5433.29 -68552.4 88.235

FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 BiotiteUP FIXED 5488.83 -68629.4 -160.011 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 **BiotiteUP** FIXED 5488.83 -68629.4 -119.539 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 BiotiteUP FIXED 5488.83 -68629.4 -31.556 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07 BiotiteUP FIXED 5488.83 -68629.4 15.954 FISHER 75 -18 10 POWER-RECT 50 100 2 50 100 1 1.61e-03 TRUNCATED-NORMAL -7.3 1 -9 -6 0.1 1e-07