

東濃鉦山における初期応力状態の評価解析

平成 13 年 3 月

核燃料サイクル開発機構
東濃地科学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 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

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

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

要旨

三次元的な応力状態評価研究の一環として、東濃鉱山において4本の鉛直ボーリング孔を用いてAE法と水圧破碎法による初期応力測定を実施した。その結果から、地形、岩盤物性や地質境界などの地質構造および断層は、初期応力状態に影響を与えている可能性があることが示された。そして、それらの要因（地形、地質構造、断層）が初期応力状態に及ぼしている影響を評価するために、三次元的な応力状態の評価解析を行なった。解析モデルおよび解析ケースは、それらの要因を考慮しつつ異なる境界条件を与えて構築し、解析結果は一般化された計測データと比較した。そして、最も適合する解析結果を選定し、それぞれの要因が初期応力状態に与える影響について評価した。

それらの結果を以下に示す。

- 1) 地形の影響は、最大標高差の2.5倍程度の深度まで達している。
- 2) 複雑な地質境界は、初期応力状態に大きな影響を及ぼす。しかし、その影響範囲はさほど広くない。
- 3) 断層の影響は、断層の方向と水平最大主応力の方向に依存する。
- 4) これらの結果をまとめると、それらの要因（地形、地質構造、断層）は、東濃鉱山の初期応力状態に複合的に影響を与えている。断層の影響は、比較的大きく、断層の近傍40mあたりまでは鉛直応力値と水平応力値ともに低下が見られた。断層下盤の応力値は上盤に比べてかなり小さくなっている。
- 5) 今回用いた初期応力状態の評価解析は、ボーリング孔から得られた、限られたデータを用いて、ある程度広い範囲の三次元的な応力状態を評価する一つの有効な方法であることが示された。

The analytical estimation of three-dimensional initial stress state at Tono mine

Nobuyuki MAEDA, Hiroya MATSUI

Abstract

Initial stress measurements using both Acoustic Emission and hydrofracturing methods were performed in four surface boreholes drilled at Tono mine, as a part of the study to evaluate the three-dimensional stress state. The results indicated that topography, geological structure, such as sedimentary layers and contacts, and faults could influence the initial stress state.

Analytical estimation of the three-dimensional stress state was mainly carried out to estimate the influence of these factors (topography, geological structure and fault) on the initial stress state. The model considered these factors with different boundary conditions and the results of the simulation were compared to the measured stresses normalized by the overburden. Then the best solution was chosen and the influence of each factor on the initial stress state was assessed.

The main conclusions are as follows:

- 1) The influence of topography disappears at 2.5 times depth of maximum elevation difference.
- 2) A complex boundary shape between each sedimentary layer has a large but localized influence on the initial stress state.
- 3) The influence of a fault depends on the orientation of the fault relative to the direction of the maximum horizontal stress.
- 4) The summarized results show that these factors have a combined influence on the initial stress state in Tono mine. The influence of the fault is relatively significant. The magnitude of the vertical and horizontal stresses decreases within about 40m of the fault. The magnitude of stresses in the footwall is smaller than in the hanging wall of the fault.
- 5) The adapted analytical estimation is useful to estimate the three dimensional regional stress states using limited data from boreholes.

*Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)

目 次

1 . はじめに	1
2 . 目的	1
3 . 地質概要	1
4 . 初期応力測定の概要	4
4.1 初期応力測定方法の概要	4
4.2 初期応力測定結果の概要	4
5 . 解析・評価方法	8
5.1 初期応力状態に影響を及ぼしていると考えられる要因	8
5.2 解析モデル	8
5.3 岩盤物性値	11
5.4 境界条件	11
5.5 解析ケース	11
5.6 評価方法	12
6 . 解析結果の評価	13
6.1 地表ボーリング孔における測定結果について	13
6.2 解析結果の評価	17
7 . 考察	25
7.1 初期応力状態に影響を及ぼしていると考えられる要因の影響について	25
7.2 東濃鉦山領域の初期応力状態について	27
8 . まとめ	28

図表一覧

第3章

表 3.1.1	各ボーリング孔の地質	1
図 3.1.1	東濃鉦山周辺の地形概要	2
図 3.1.2	東濃鉦山の地質概要	2
図 3.1.3	各ボーリング孔の配置	3
図 3.1.4	各ボーリング孔の地質	3

第4章

図 4.2.1	鉛直方向の応力値 (AE 法)	5
図 4.2.2	水平面内の主応力値 (水圧破碎法)	6
図 4.2.3	水平面内の最大主応力方向 (水圧破碎法)	7

第5章

図 5.2.1	解析対象領域	9
図 5.2.2	解析対象断面	9
図 5.2.3	南北断面の解析モデル (A-A'断面)	10
図 5.2.4	東西断面の解析モデル (B-B'断面)	10
表 5.3.1	岩盤物性値	11
表 5.5.1	南北断面の解析ケース	11
表 5.5.2	東西断面の解析ケース	12
表 5.6.1	評価基準	12

第6章

表 6.1.1(a)	鉛直方向の応力値 (1)	13
表 6.1.1(b)	鉛直方向の応力値 (2)	13
表 6.1.2(a)	水平面内の主応力状態 (1)	13
表 6.1.2(b)	水平面内の主応力状態 (2)	14
表 6.1.3	各ボーリング孔における地層ごとの初期応力状態	14
図 6.1.1	鉛直方向応力値の一般化 (南北断面)	15
図 6.1.2	水平方向応力値の一般化 (南北断面)	15
図 6.1.3	鉛直方向応力値の一般化 (東西断面)	16
図 6.1.4	水平方向応力値の一般化 (東西断面)	16
表 6.2.1	解析結果の評価	18

図 6.2.1	鉛直方向応力値の比較（南北断面）	18
図 6.2.2	水平方向応力値の比較（南北断面）	18
図 6.2.3	主応力線図（南北断面：南北・4）	19
図 6.2.4	鉛直応力分布図（南北断面：南北・4）	20
図 6.2.5	水平応力分布図（南北断面：南北・4）	20
表 6.2.2	解析結果の評価	21
図 6.2.6	鉛直方向応力値の比較（東西断面）	22
図 6.2.7	水平方向応力値の比較（東西断面）	22
図 6.2.8	主応力線図（東西断面：東西・4）	23
図 6.2.9	鉛直応力分布図（東西断面：東西・4）	24
図 6.2.10	水平応力分布図（東西断面：東西・4）	24

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターは、地層科学研究の一環として、岐阜県土岐市にある東濃鉱山およびその周辺領域を対象に、岩盤の初期応力状態の評価手法に関する研究を実施している。これまでに、東濃鉱山において地表から掘削した4本の鉛直ボーリング孔を用いて初期応力測定を実施し、得られた結果を基に東濃鉱山を含む領域の三次元的な初期応力状態について評価した。本報告では、評価された初期応力状態をもとに東濃鉱山の現在の初期応力状態に影響を及ぼしている要因を想定し、それらをモデル化して有限要素法による二次元解析を行ない、それぞれの要因の影響度合いを解析的に評価するとともに、解析により推定された東濃鉱山を含む領域の初期応力状態について述べる。

2. 目的

東濃鉱山の地表から掘削した鉛直ボーリング孔を用いて実施した初期応力測定（AE法、水圧破砕法）の結果を検証データとして、東濃鉱山を含む領域の堆積岩部（深度約200m）の初期応力状態に影響を及ぼしていると考えられる要因を考慮した二次元解析を行ない、それらの要因の影響度を評価するとともに東濃鉱山における現在の初期応力状態の特徴を把握する。

3. 地質概要

東濃鉱山は、岐阜県土岐市の標高約300mのなだらかな丘陵地に位置している（図3.1.1）。周辺の地質は、基盤をなす中生代～古第三紀の花崗岩とそれを被覆する新第三紀の瑞浪層群（明世累層、土岐夾炭累層）と新第三紀～第四紀の瀬戸層群から構成されている。また、この地域には月吉断層（N90°E60°S）と呼ばれる逆断層（地質断層）が存在しており、東濃鉱山の坑道内でその断層が確認されている。東濃鉱山の地質概要を図3.1.2に、初期応力測定を実施したボーリング孔の配置を図3.1.3に、各ボーリング孔の地質を図3.1.4に示す。また、各ボーリング孔の地質を標高でまとめたものを表3.1.1に示す。

表 3.1.1 各ボーリング孔の地質

	98SE-01 号孔	TM-2 号孔	TM-1 号孔	99SE-02 号孔
孔口標高	264m	255m	288m	285m
瀬戸層	242.6～264m	240.5～255m	270～288m	270.8～285m
明世累層	220.2～242.6m	224.5～240.5m	228.7～270m	198～270.8m
土岐夾炭累層	154.7～220.2m	160.6～224.5m	100～228.7m	132.3～198m
花崗岩	～154.7m	～160.6m	～100m	～132.3m
月吉断層	交差せず	129m	158m	230m

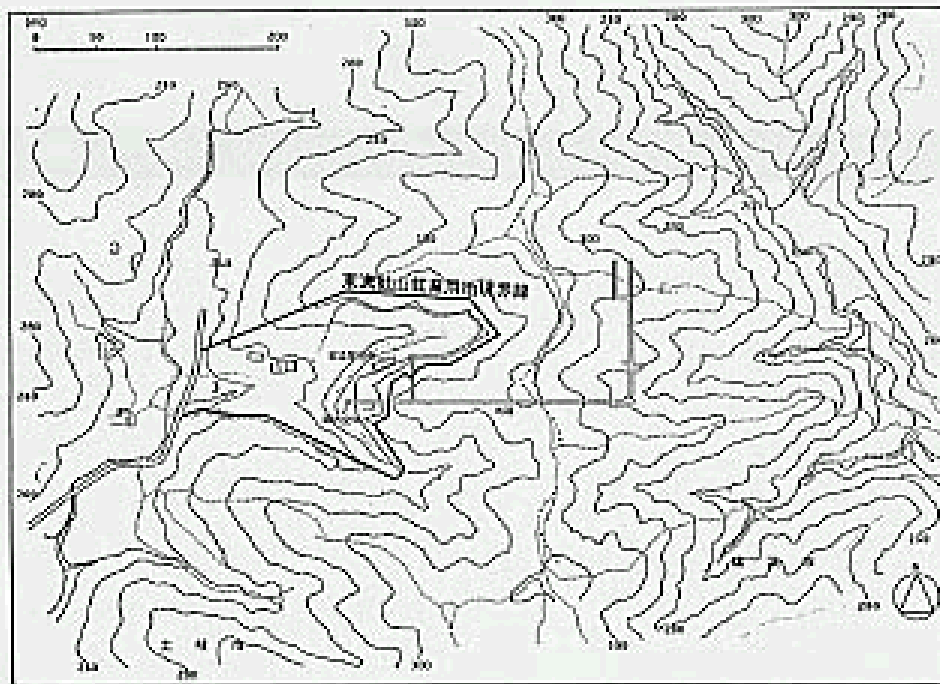


図 3.1.1 東湯釜山周辺の地形概要

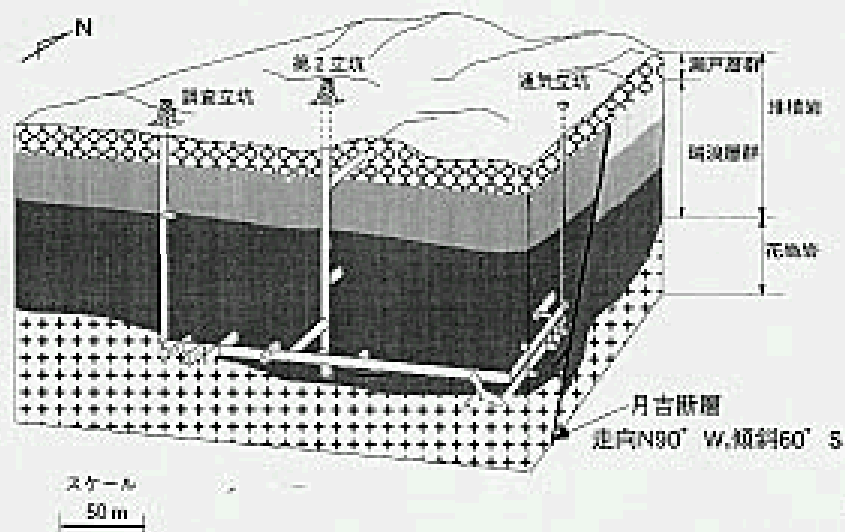


図 3.1.2 東湯釜山の地質概要

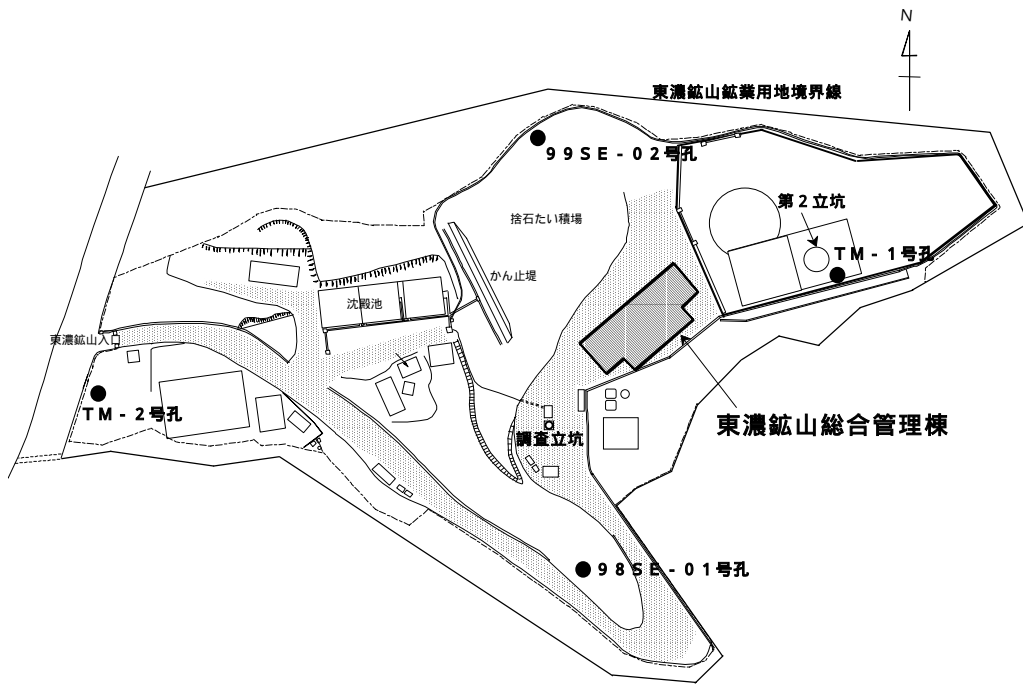


図 3.1.3 各ボーリング孔の配置

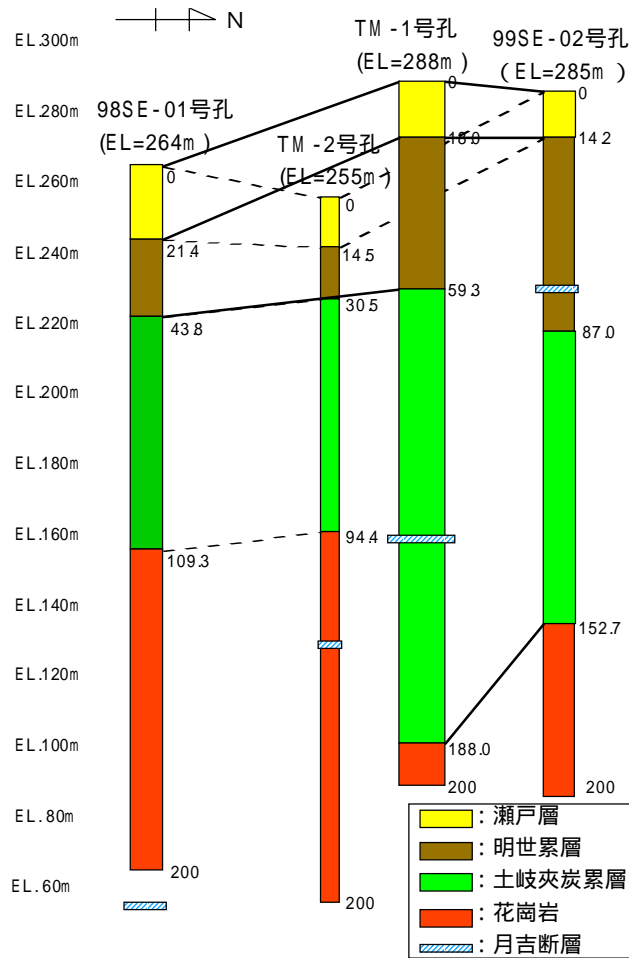


図 3.1.4 各ボーリング孔の地質

4．初期応力測定の概要

4.1 初期応力測定方法の概要

初期応力は、AE 法と水圧破砕法を用いて測定し、4 本すべてのボーリング孔において同一の測定方法を用いた。採取された岩石コアを用いて供試体を作成し、AE 法により鉛直方向の応力値を求めた。掘削が完了したボーリング孔を用いて、水圧破砕法により水平面内の主応力状態(水平面内の最大・最小主応力値、水平面内の最大主応力方向)を求めた。それぞれの測定方法の概要を以下に述べる。

Acoustic Emission 法 (AE 法): カイザー効果¹⁾(物体に荷重を加えるとき、過去に受けた最大の荷重値に達するまで AE がほとんど発生しないという現象)を利用し、物体が変形や破壊するときに発生する弾性波 (AE) を測定し、AE 発生数の急増点から载荷軸方向の応力値を推定する方法である²⁾。本研究においては、同種の岩石試料を用いた予備試験によって、精度良く AE を計測できる計測条件 (AE 信号の振幅の増幅率としきい値) をあらかじめ設定しておき、その計測条件を用いて AE 試験を実施し、AE を検出し始めた時の荷重値から载荷方向の岩盤の応力値を求める方法を用いた。³⁾

水圧破砕法: ボーリング孔内において、ダブルパッカーによって密閉区間を確保し、その区間内に水を圧入し岩盤に水圧を作用させることで、岩盤内にき裂を生じさせる。そのときの水圧変化と発生したき裂の方向から、ボーリング孔軸に直交する面内の二次元主応力状態を推定する方法である⁴⁾。

4.2 初期応力測定結果の概要

4 本のボーリング孔において実施した初期応力測定の結果⁵⁾⁶⁾⁷⁾について、AE 法によって求めた鉛直方向の応力値を図 4.2.1 に、水圧破砕法によって求めた水平面内の主応力値および最大主応力方向を図 4.2.2 および図 4.2.3 に示す。それらの結果から東濃鉱山を含む領域での初期応力状態を総合的に評価すると、概ね次のようであると考えられる。

- ・鉛直方向応力値は、土被りと単位体積重量から推定される土被り圧とほぼ等しい。
- ・水平最大主応力値は、水平最小主応力値の 1.5 ~ 2.0 倍程度である。
- ・水平最小主応力値は、概ね鉛直方向の応力値に等しい。
- ・水平最大主応力方向は、堆積岩では概ね N-S 方向、花崗岩では概ね N30 ~ 45 ° W である。

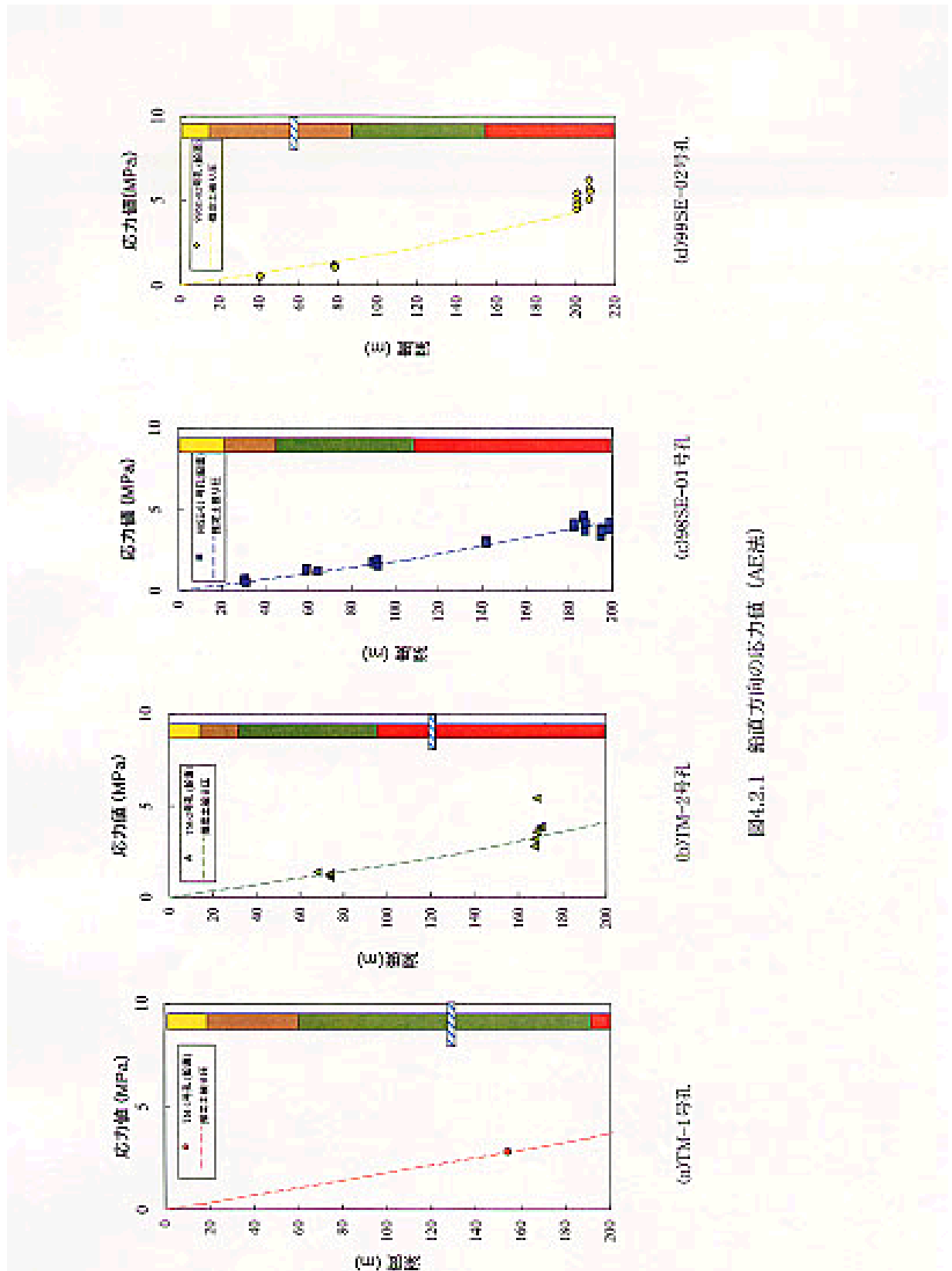
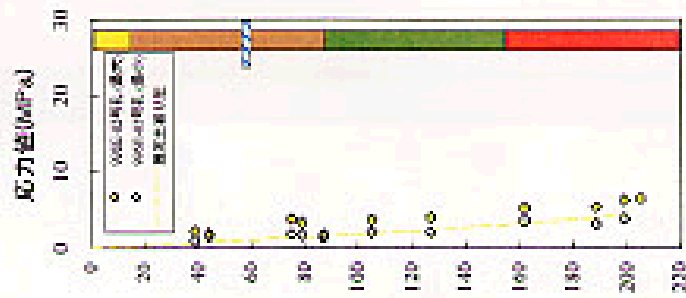
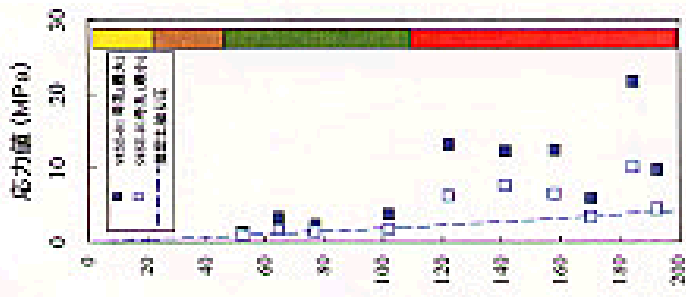


図4.2.1 鉛直方向の応力値 (AE法)



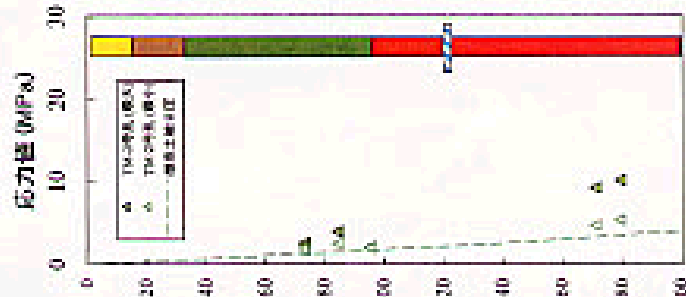
(a) 距離

(d)1995E-02号孔



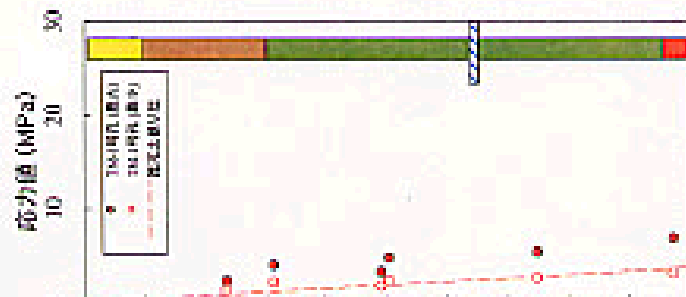
(b) 距離

(c)1988E-01号孔



(c) 距離

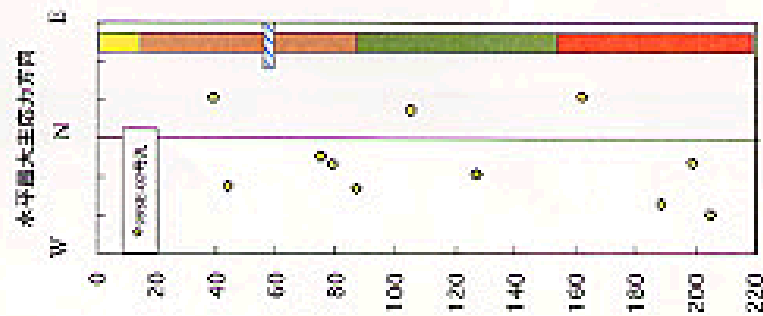
(b)TMM-2号孔



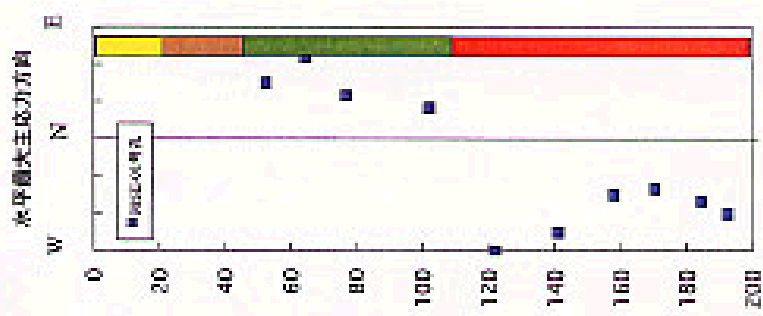
(d) 距離

(a)TMM-1号孔

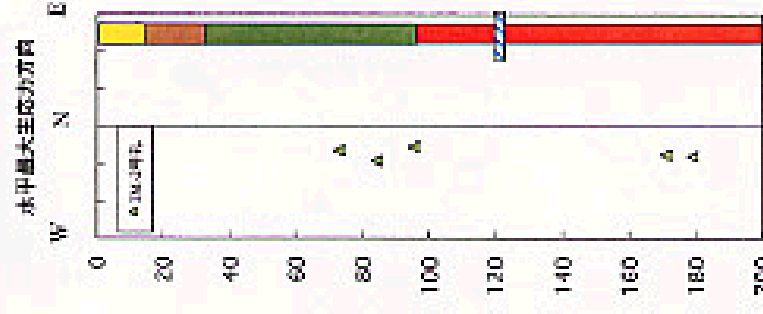
図4.2.2 水平面内の主応力値（水圧差法）



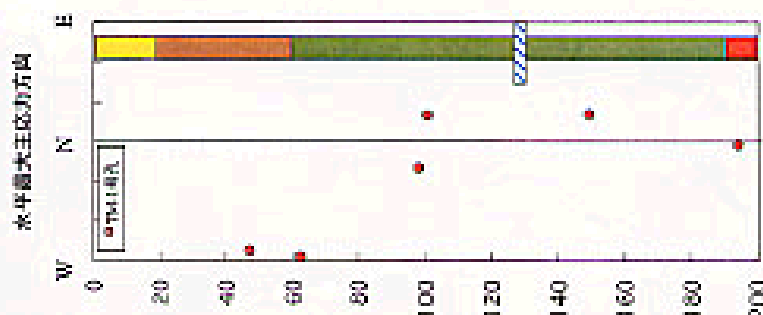
(a)HRSE-02号孔



(b)HRSE-01号孔



(c)TM-3号孔



(d)TM-1号孔

図4.2.3 水平面内の最大主応力方向（水圧破砕法）

5 . 解析・評価方法

最初に、東濃鉱山での初期応力測定結果から評価された初期応力状態をもとに現在の初期応力状態に影響を及ぼしている要因を想定し、それらを考慮して解析領域や解析断面、地質構造や岩盤物性値、境界条件などを設定した。このとき、解析断面の鉛直境界面の境界条件を変化させて、解析ケースを設定した。次に、解析コードとして「2D・ : ソフトブレーン社製」を用いて、各解析ケースごとに二次元弾性解析を行った。そして、それらの解析で得られた結果と測定結果とを比較し、設定した評価基準に基づいて測定結果と適合する解析結果を選定し、その結果が東濃鉱山の現在の初期応力状態を表現していると評価した。

5.1 初期応力状態に影響を及ぼしていると考えられる要因

東濃鉱山は標高約 300m のなだらかな丘陵地に位置していること、評価の対象となる堆積岩は地表～深度 200m 程度までの比較的浅い所に分布しているため、地形が初期応力状態に影響を与えていると想定した。また、石田⁸⁾らは岩盤の剛性が初期応力分布に影響を与えている可能性を指摘しており、この観点から堆積岩部の地質構造が初期応力状態と関連している可能性があると考えた。さらに、対象領域内に存在する月吉断層のような大規模な不連続構造は初期応力状態に影響を及ぼしている可能性があると考えた。以上のことから、東濃鉱山を含む領域の初期応力状態に影響を与えている要因として次の3つのものを想定した。

- ・ 地形
- ・ 地質構造
- ・ 断層

5.2 解析モデル

東濃鉱山では、これまでに地表から掘削した4本の鉛直ボーリング孔、第2立坑第一計測坑道および北延 NATM 坑道で初期応力測定を実施しており、それらを含む範囲を解析対象領域として設定した(図 5.2.1 参照)。その領域の中で、地表から掘削した4本の鉛直ボーリング孔を含む二つの鉛直断面(A-A': 南北方向断面、B-B': 東西方向断面)を解析対象断面とした(図 5.2.2 参照)。具体的には、南北断面は 99SE-02 号孔と 98SE-01 号孔を含む南北方向 400m で深度約 300m の範囲であり、東西断面は TM-1 号孔と TM-2 号孔を含む東西方向 650m で深度約 400m の範囲である。地質構造は、瀬戸層、生依累層、明世累層、土岐夾炭累層、花崗岩の5つの岩種から構成されるものとし、月吉断層(走向: ほぼ東西、傾斜: 約 60° 南落ち)を考慮した。月吉断層は、解析の都合上連続体としてモデル化し、弾性係数を著しく低下させることによって弱層(層厚: 1m)として表現した。各解析断面のモデルを図 5.2.3~4 に示す。南北断面の要素数は約 900 個、節点数は約 2800 個であり、東西断面の要素数は約 1400 個、節点数は約 4500 個であった。

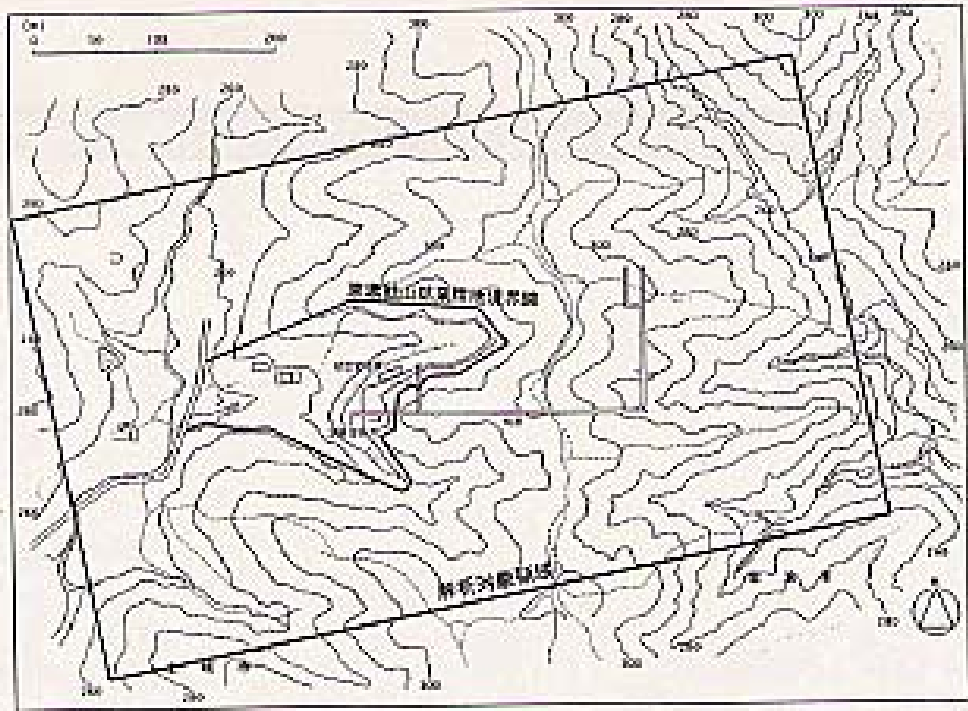


图 5.2.1 解析对象領域

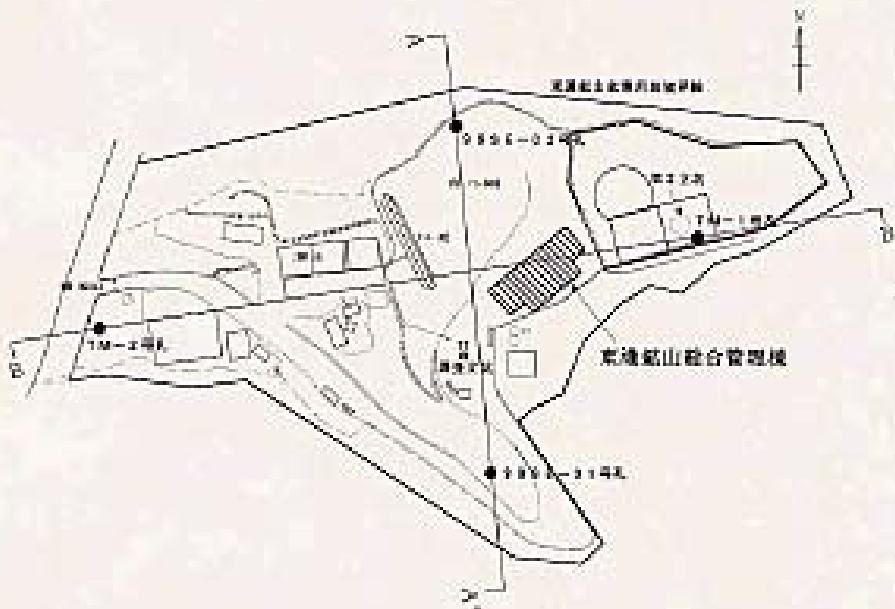


图 5.2.2 解析対象断面

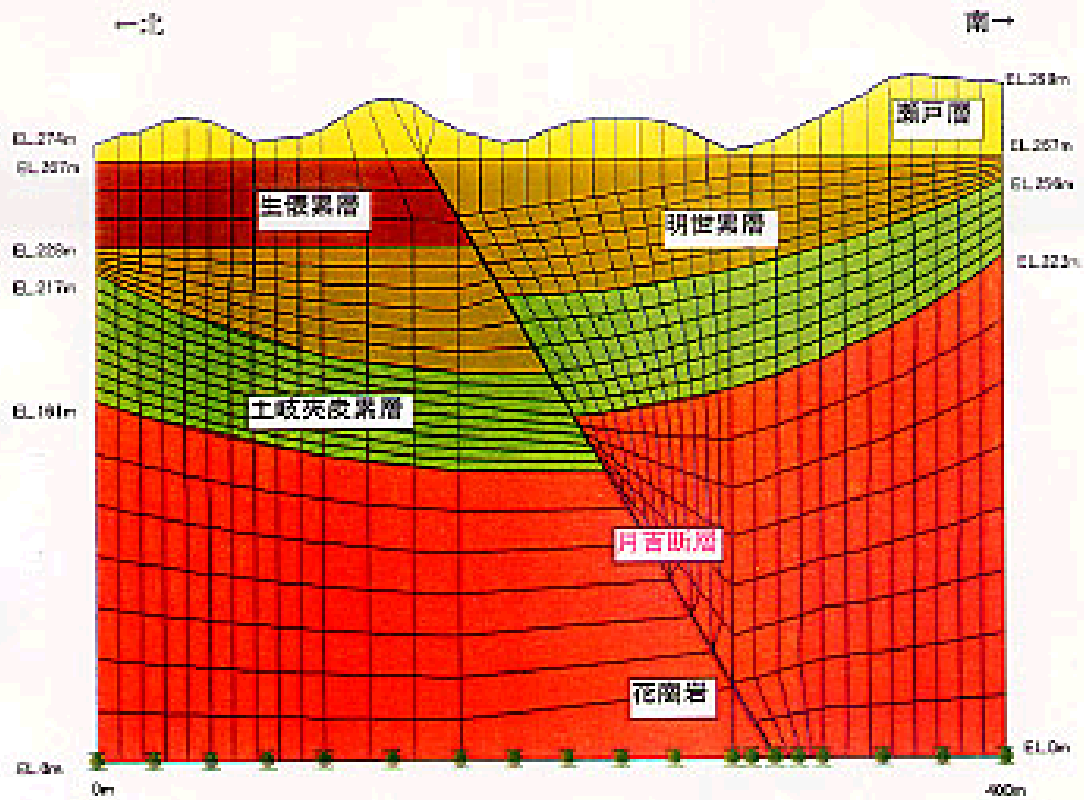


図5.2.3 南北断面の解析モデル(A-A'断面)

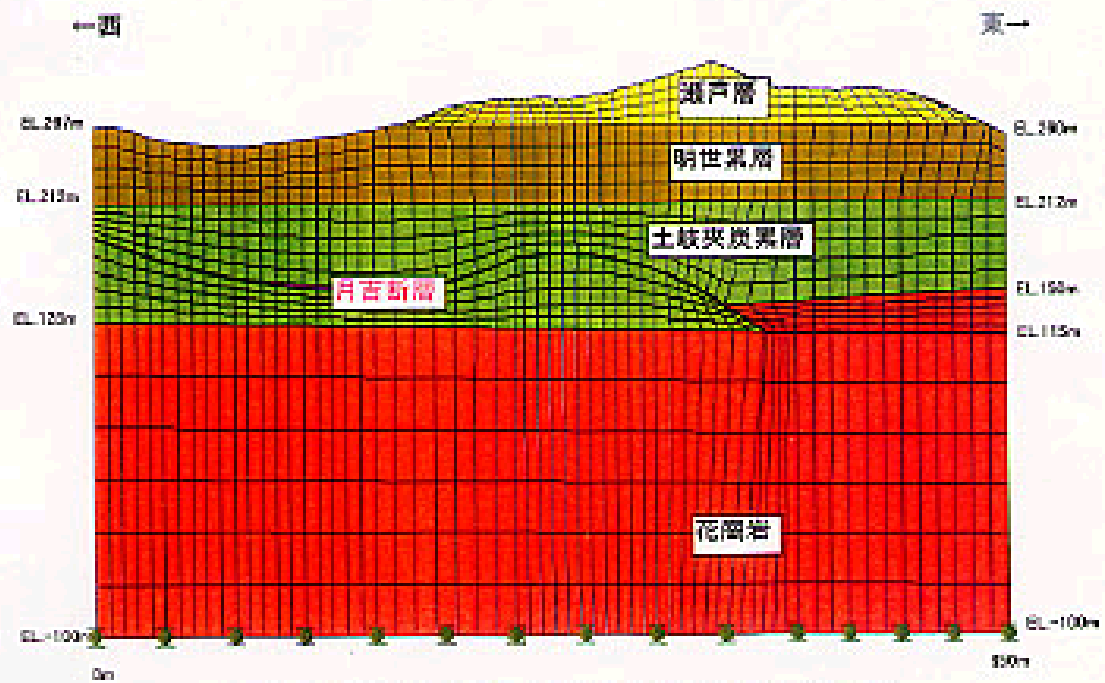


図5.2.4 東西断面の解析モデル(B-B'断面)

5.3 岩盤物性値

解析に用いた岩盤物性値は、既存報告書⁹⁾¹⁰⁾を参考に設定した。ただし、瀬戸層については試験結果が無く、便宜的に生俵累層と同じ物性値を用いた。花崗岩については、不連続面の影響を考慮するため、原位置 P 波速度検層結果に基づき算出した動弾性係数を用いた。また、月吉断層の弾性係数は、土岐夾炭累層よりも 2 桁程度低い値と仮定した。それぞれの地層の岩盤物性値を表 5.3.1 に示す。

表 5.3.1 岩盤物性値

	弾性係数	ポアソン比	単位体積重量
	(tf/m ²)		(t/m ³)
瀬戸層	100,000	0.3	1.8
生俵累層	100,000	0.3	1.8
明世累層	265,200	0.3	1.88
土岐夾炭累層	193,800	0.3	1.94
花崗岩	2,655,000	0.38	2.6
月吉断層	2,000	0.3	1.8

5.4 境界条件

各解析ケースにおいて境界条件は若干異なるが、全ての解析において地表面は自由変形境界とした。水平方向応力を土被り圧と側圧係数 (K) を用いて与える場合 (解析ケース：南北・ 1 ~ 6、東西・ 1 ~ 6) では、下端境界面は鉛直方向拘束でそのうち 1 点だけ完全拘束とし、両端境界面は自由変形境界とした。初期応力測定によって得られた水平方向応力分布に相当する応力値を土被り圧と側圧係数 (K) から算出した応力値を用いて与える場合 (解析ケース：南北・ 7、東西・ 7) では、下端境界面は鉛直方向拘束でそのうち 1 点だけ完全拘束とし、両端境界面は自由変形境界として相当外力 (土被り圧と側圧係数により生じる応力値に相当する値を線形分布荷重として) を与えた。

5.5 解析ケース

解析ケースは、水平方向応力の境界条件を変えることにより設定した。岩盤物性は、すべての解析において同値を用いた。南北断面と東西断面の解析ケースを表 5.5.1 ~ 2 に示す。

なお、本解析でのケース 7 以外の場合は、解析領域内での任意点の側圧係数は、各ケース毎に設定した値となる。

表 5.5.1 南北断面の解析ケース

解析ケース	水平方向応力
南北・ 1	K=0 (2D- が任意に設定)
南北・ 2	K=1.0
南北・ 3	K=1.25
南北・ 4	K=1.5
南北・ 5	K=1.75
南北・ 6	K=2.0
南北・ 7	K=1.5 相当 (北側境界において) K=1.5 相当 (堆積岩) K=2.0 相当 (南側境界における花崗岩)

表 5.5.2 東西断面の解析ケース

解析ケース	水平方向応力
東西・1	K=0 (2D- が任意に設定)
東西・2	K=1.0
東西・3	K=1.25
東西・4	K=1.5
東西・5	K=1.75
東西・6	K=2.0
東西・7	K=1.5 相当 (堆積岩) K=2.0 相当 (花崗岩)

5.6 評価方法

解析結果の評価は、解析により得られた応力値と地表ボーリング孔での測定で得られた鉛直方向および水平方向の応力値とを各ボーリング孔ごとに任意の深度で比較することによって行った。具体的な方法を次に示す。

計測結果について、各ボーリング孔において孔内の地質ごとに深度と応力値（鉛直方向・水平方向）および水平最大主応力方向の関係を求める。

解析結果について、解析断面内のボーリング孔位置に相当する地点（各要素のガウス点）の応力値（鉛直方向、水平方向）を深度方向で整理する。

上記 で求めた関係に基づいて、各ボーリング孔ごとに上記 で用いた深度と同じ深度での応力値（鉛直方向・水平方向）を算定する。

各ボーリング孔ごとに上記 と で求めたそれぞれの方向の応力値について、次式によりそれらの差を求める。

$$\text{誤差}(\%) = (\text{計測結果} \cdot \text{解析結果}) / \text{計測結果} \times 100$$

各ボーリング孔ごとにそれぞれの比較点における誤差について、全比較点数に対する評価基準値以内の誤差である点数の割合を求め、表 5.6.1 に示す評価基準により解析結果の妥当性について評価する。

それらの評価結果から各ボーリング孔の評価を行ない、最終的に総合評価を行なう。このとき、低い方の評価を採用することとする。

表 5.6.1 評価基準

評価	評価基準
A	誤差 10%以内が 90%以上
B	誤差 10%以内が 80%以上、誤差 20%以内が 90%以上
C	誤差 10%以内が 70%以上、誤差 20%以内が 80%以上、誤差 30%以内が 90%以上
D	誤差 20%以内が 70%以上、誤差 30%以内が 80%以上
E	誤差 30%以内が 70%以上
×	上記以外、() 内の数字は、誤差 30%以内の点数の割合を示す。

6. 解析結果の評価

6.1 地表ボーリング孔における測定結果について

地表ボーリング孔における測定結果^{11)~17)}について、鉛直方向の応力値および水平面内の主応力状態を孔別にまとめたものを表 6.1.1(a)~(b)および表 6.1.2(a)~(b)に示す。

表 6.1.1(a) 鉛直方向の応力値 (1)

99SE-02 号孔		98SE-01 号孔	
標高 (m)	鉛直方向応力値 (tf/m ²)	標高 (m)	鉛直方向応力値 (tf/m ²)
245	53	234	62
207	116	204	125
85	500	174	176
78	573	124	311
.	.	84	425
.	.	64	383

表 6.1.1(b) 鉛直方向の応力値 (2)

TM-2 号孔		TM-1 号孔	
標高 (m)	鉛直方向応力値 (tf/m ²)	標高 (m)	鉛直方向応力値 (tf/m ²)
185	120	133	287
85	387	.	.

表 6.1.2(a) 水平面内の主応力状態 (1)

99SE-02 号孔				98SE-01 号孔			
標高 (m)	H (tf/m ²)	h (tf/m ²)	H	標高 (m)	H (tf/m ²)	h (tf/m ²)	H
241	224	102	N32 ° E	217.7	143	102	N45 ° E
236	194	153	N37 ° W	205.5	337	173	N65 ° E
205	388	184	N14 ° W	193	245	143	N35 ° E
201	337	173	N20 ° W	168	326	194	N27 ° E
193	184	143	N39 ° W	148	1275	632	N90 ° W
175	377	214	N22 ° E	129	1163	765	N73 ° W
153	408	214	N28 ° W	112.2	1163	673	N46 ° W
118	541	367	N33 ° E	99.7	490	347	N43 ° W
91.5	551	326	N51 ° W	85.8	2060	1030	N51 ° W
81	643	398	N19 ° W	77.5	847	459	N61 ° W
75	663	459	N59 ° W

H : 水平最大主応力値、 h : 水平最小主応力値、 H : 水平最大主応力方向

表 6.1.2(b) 水平面内の主応力状態 (2)

TM-2 号孔				TM-1 号孔			
標高 (m)	H (tf/m ²)	h (tf/m ²)	H	標高 (m)	H (tf/m ²)	h (tf/m ²)	H
182	255	184	N19 ° W	240	228	124	N82 ° W
170.5	408	255	N28 ° W	224.5	390	210	N87 ° W
159.6	204	204	N16 ° W	189	279	170	N20 ° W
84	949	479	N23 ° W	137.6	447	267	N21 ° E
75.9	1040	551	N24 ° W	94.8	1272	559	N11 ° W
73	826	449	N82 ° W	92.7	547	312	N2 ° W
70	1030	520	N34 ° W

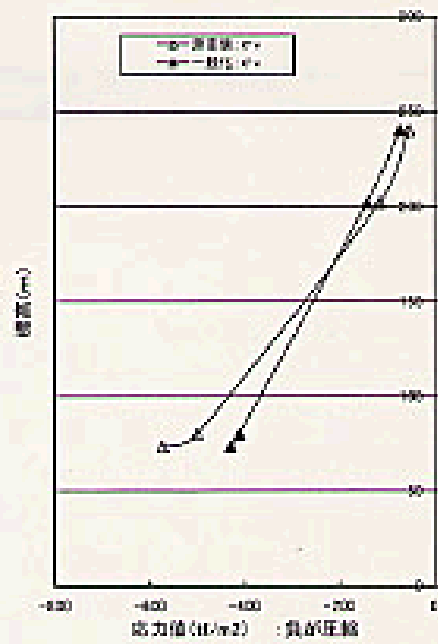
H : 水平最大主応力値、 h : 水平最小主応力値、 H : 水平最大主応力方向

それらの測定結果を総合的に評価し、各ボーリング孔における深度と水平面内主応力値および最大主応力方向との関係を地層別に求めた。それらを表 6.1.3 に示す。これによると、各ボーリング孔とも鉛直方向応力値は、概ね単位体積重量と土被りから推定される土被り圧に等しい。水平最大主応力値は、堆積岩では概ね鉛直方向の応力値の 1.5 倍程度であり、花崗岩では概ね 2 倍程度である。水平最小主応力値は、概ね鉛直方向の応力値と等しい。水平最大主応力方向は、多少のばらつきはあるものの、堆積岩では概ね N-S 方向であり、花崗岩では概ね N30 ° W ~ N45 ° W とみなすことができる。

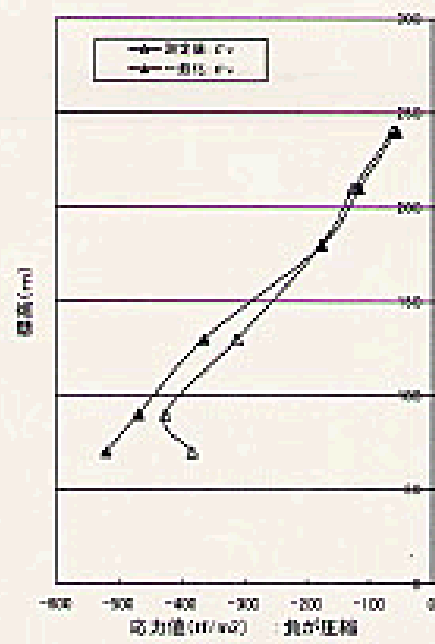
表 6.1.3 各ボーリング孔における地層ごとの初期応力状態

		99SE-02 号孔	98SE-01 号孔	TM-2 号孔	TM-1 号孔
鉛直方向応力値 (v)		x H	x H	x H	x H
水平最大 主応力値 (H)	明世累層	1.5 x v	1.5 x v	1.5 x v	1.5 x v
	土岐夾炭累層				
	花崗岩	1.5 x v	2 x v	2 x v	2 x v
水平最小主応力値 (h)		x H	x H	x H	x H
水平最大 主応力方向 (H)	明世累層	N30 ° W	.	.	N90 ° W
	土岐夾炭累層	N30 ° W	N30 ° E	N30 ° W	N-S
	花崗岩	N45 ° W	N45 ° W	N30 ° W	N30 ° W

本報告では、鉛直応力が各ボーリング孔ともほぼ土被り圧に等しいことを利用し、各ボーリング孔で測定された地層ごとの初期応力状態を再現できる鉛直応力と水平方向の関係を、各ボーリング孔ごと設定した (表 6.1.3)。そして、それらの関係に基づいて測定結果が得られている深度の応力値を算定し、測定値と共に図 6.1.1 ~ 6.1.4 に示した。ここで、表 6.1.3 に基づいて設定した応力値を一般化した測定結果と呼ぶこととする。

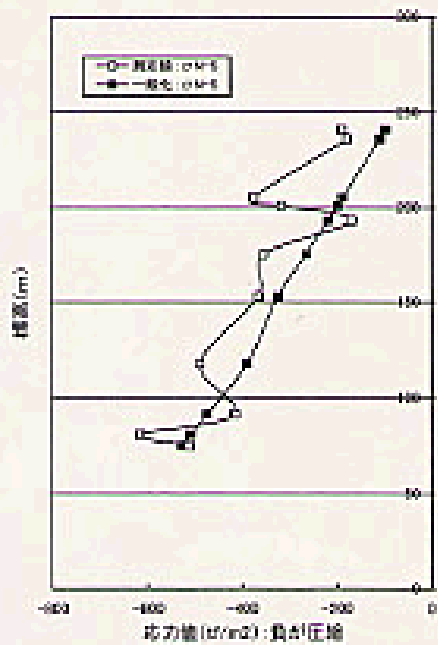


(a) 98SE-02号孔

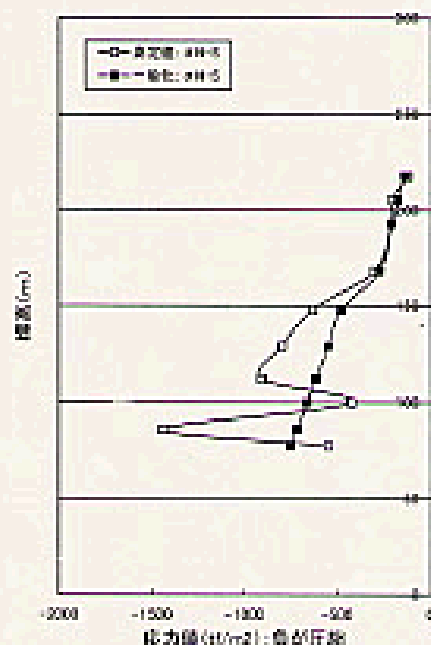


(b) 98SE-01号孔

図6.1.1 鉛直方向応力値の一般化（南北断面）

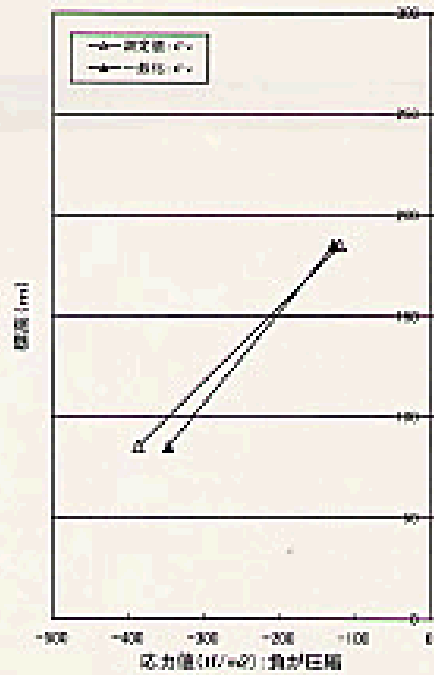


(a) 98SE-02号孔

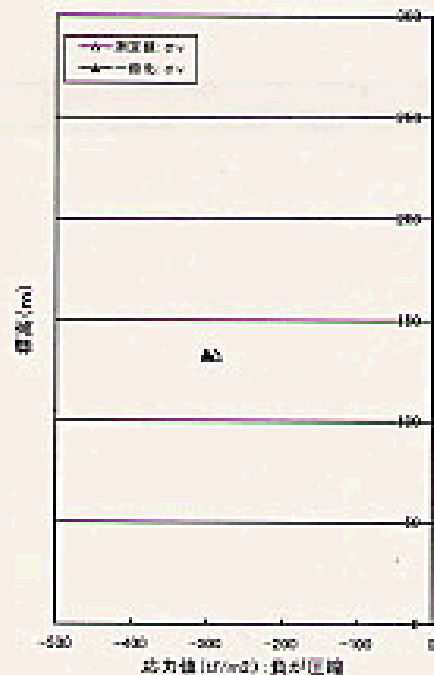


(b) 98SE-01号孔

図6.1.2 水平方向応力値の一般化（南北断面）

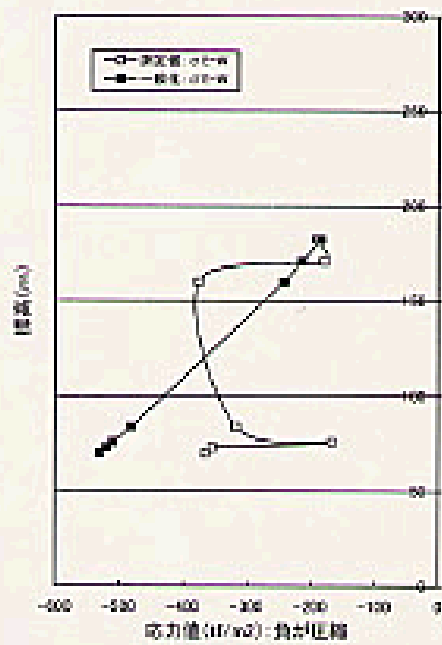


(a) TM-2号孔

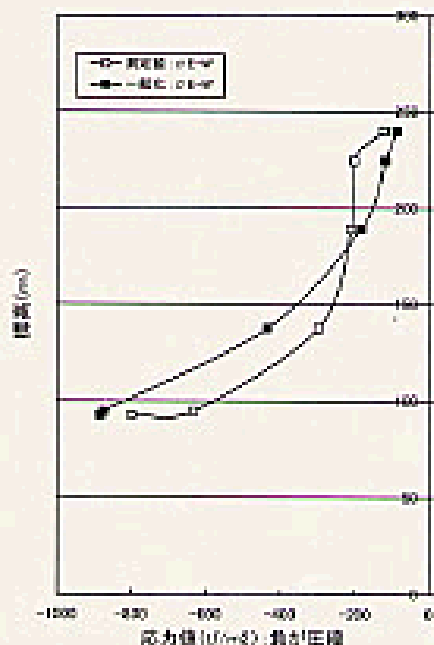


(b) TM-1号孔

図6.1.3 鉛直方向応力値の一般化（東西断面）



(a) TM-2号孔



(b) TM-1号孔

図6.1.4 水平方向応力値の一般化（東西断面）

6.2 解析結果の評価

a)南北断面

設定した解析ケースごとに解析を行ない、前述した評価基準に基づいて解析結果の評価を行った。その結果を表 6.2.1 に示す。それぞれのボーリング孔について解析結果の妥当性を評価すると、99SE-02 号孔については 4 つの解析ケースで、98SE-01 号孔でも 2 つの解析ケースで解析結果が妥当であるという結果が得られた。南北・4 ではそれぞれ D、E の評価であり、総合評価も E 評価であり、全解析ケースの中で測定結果を最も良く表現していると判断した。この解析ケース（南北・4）について、一般化した測定結果と解析結果を各ボーリング孔ごとに図 6.2.1～2 に、主応力線図を図 6.2.3 に、応力分布図を図 6.2.4～5 に示す。

表 6.2.1 解析結果の評価

解析ケース	判定結果						総合評価
	99SE-02 号孔			98SE-01 号孔			
	v	N-S	評価	v	N-S	評価	
南北・1	E	× (0%)	×	E	× (0%)	×	×
南北・2	D	× (6%)	×	× (63%)	× (60%)	×	×
南北・3	D	E	E	E	E	E	E
南北・4	D	D	D	E	E	E	E
南北・5	D	C	D	E	× (33%)	×	×
南北・6	D	E	E	E	× (31%)	×	×
南北・7	D	× (31%)	×	× (53%)	× (25%)	×	×

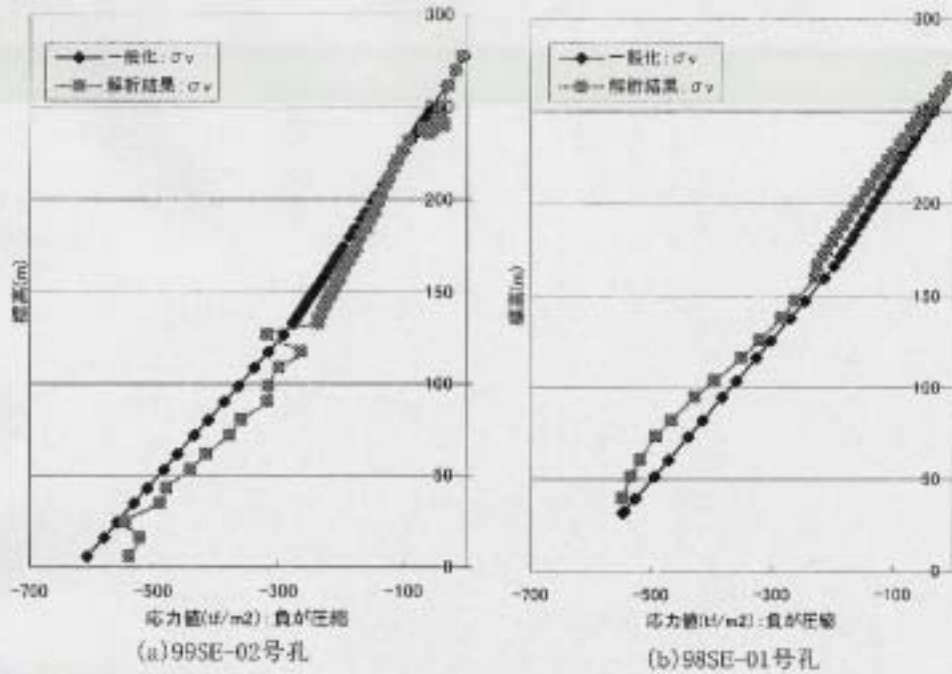


図6.2.1 鉛直方向応力値の比較(南北断面-4)

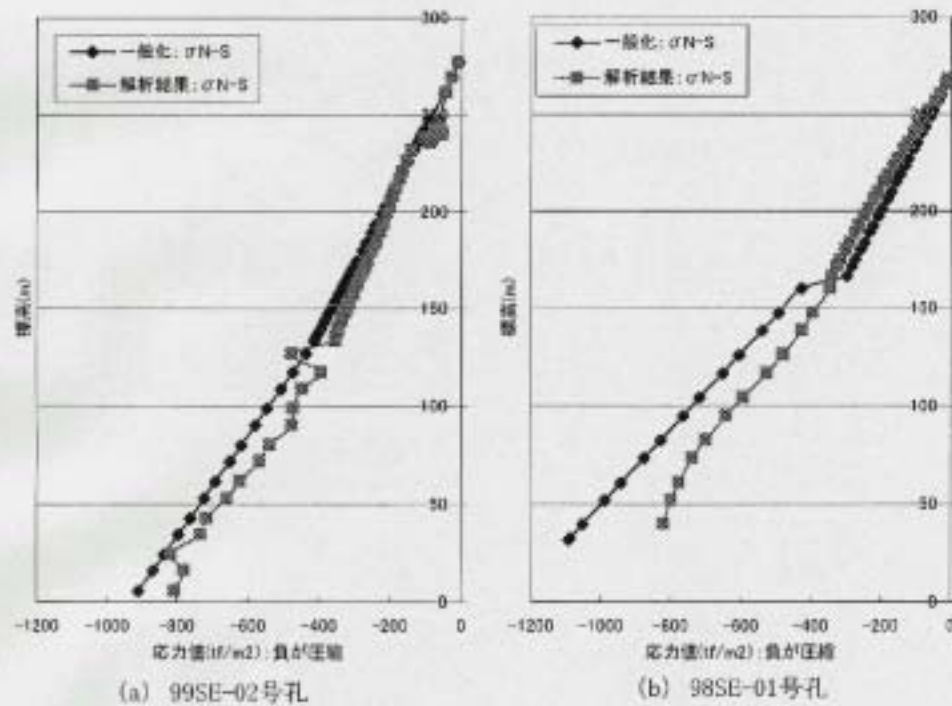


図6.2.2 水平方向応力値の比較(南北断面-4)

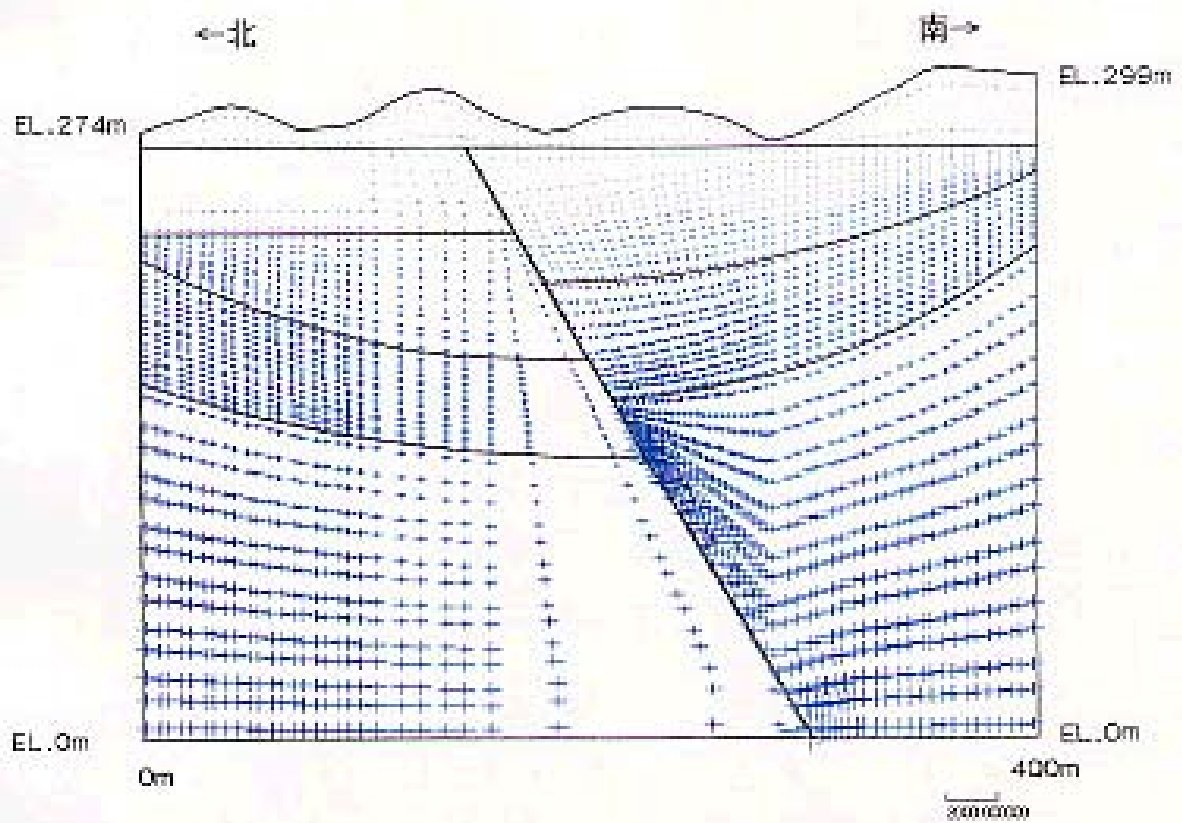


图6.2.3 主应力线图(南北断面:南北-4)

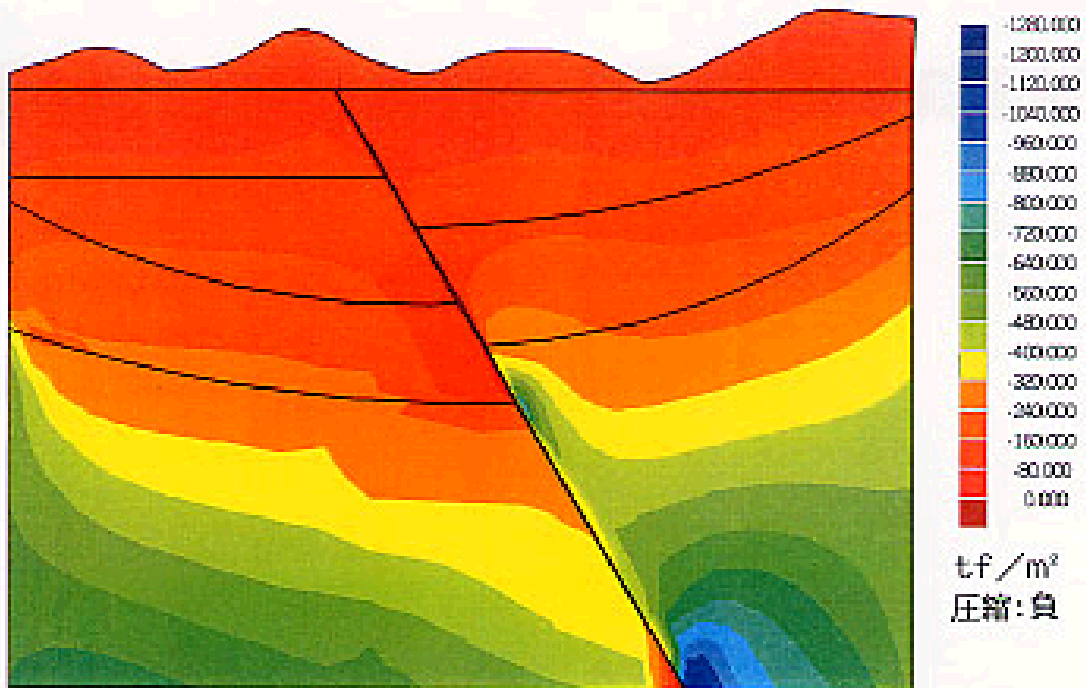


图6.2.4 铅直应力分布图(南北断面:南北-4)

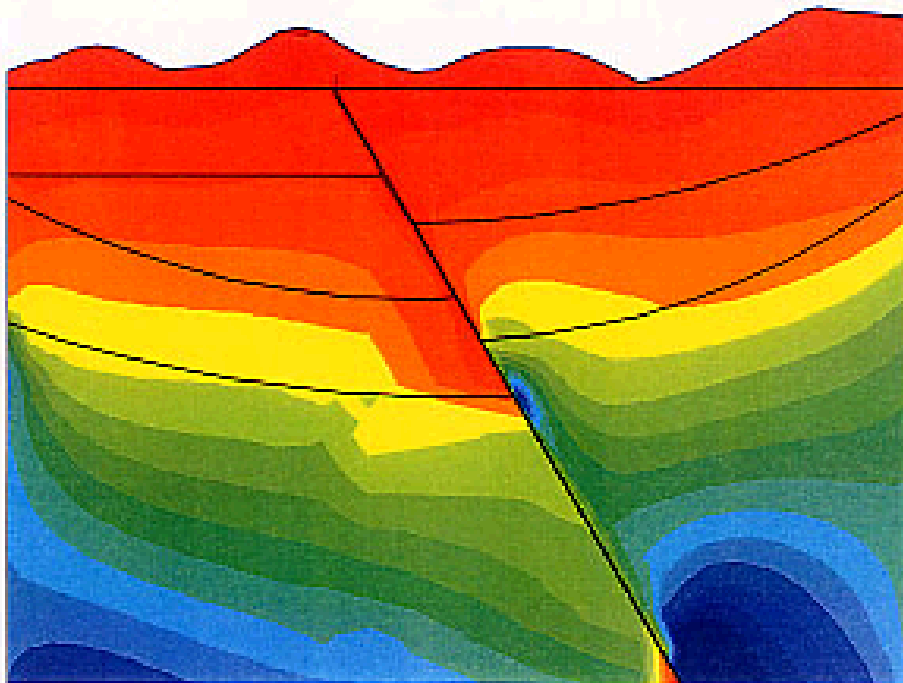


图6.2.5 水平应力分布图(南北断面:南北-4)

b)東西断面

設定した解析ケースごとに解析を実施し、前述した評価基準に基づいて解析結果の評価を行った。その結果を表 6.2.2 に示す。南北断面と同様にそれぞれのボーリング孔について解析結果の妥当性を評価すると、TM-2 号孔については 3 つの解析ケースで、TM-1 号孔では 4 つの解析ケースで測定結果と一致するという結果が得られた。最も評価結果が良かった解析ケース（東西・4）について、一般化した測定結果と解析結果を各ボーリング孔ごとに図 6.2.6～7 に、主応力線図を図 6.2.8 に、応力分布図を図 6.2.9～10 に示す。

表 6.2.2 解析結果の評価

解析ケース	判定結果						総合評価
	TM-2 号孔			TM-1 号孔			
	v	N-S	評価	v	N-S	評価	
東西・1	A	× (0%)	×	C	× (45%)	×	×
東西・2	A	× (0%)	×	A	× (0%)	×	×
東西・3	A	E	E	A	E	E	E
東西・4	A	C	C	A	D	D	D
東西・5	A	D	D	A	D	D	D
東西・6	A	× (39%)	×	A	E	E	×
東西・7	A	× (39%)	×	C	× (45%)	×	×

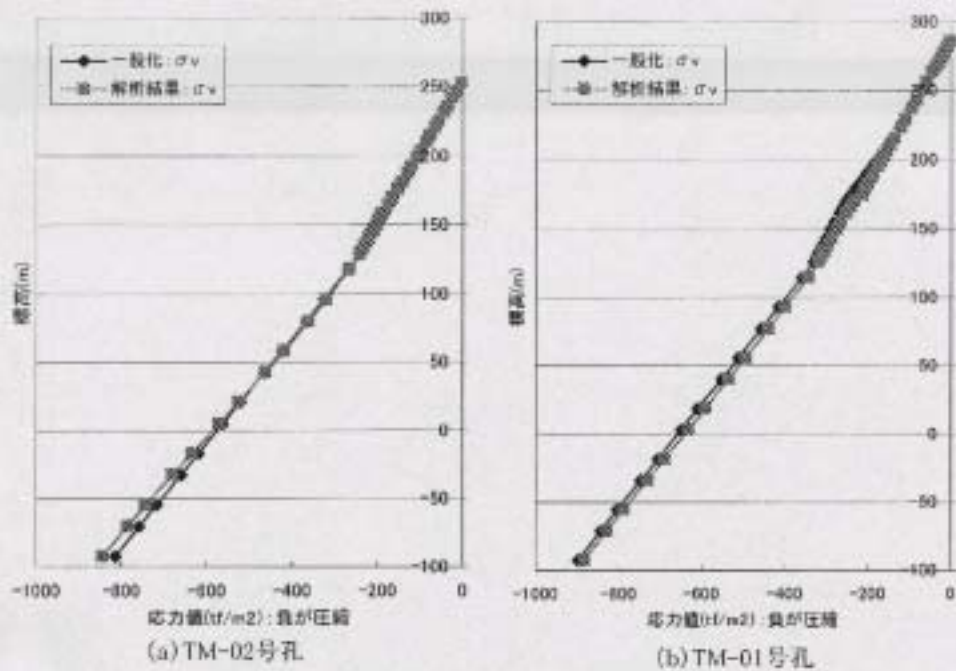


図6.2.6 鉛直方向応力値の比較(東西断面-4)

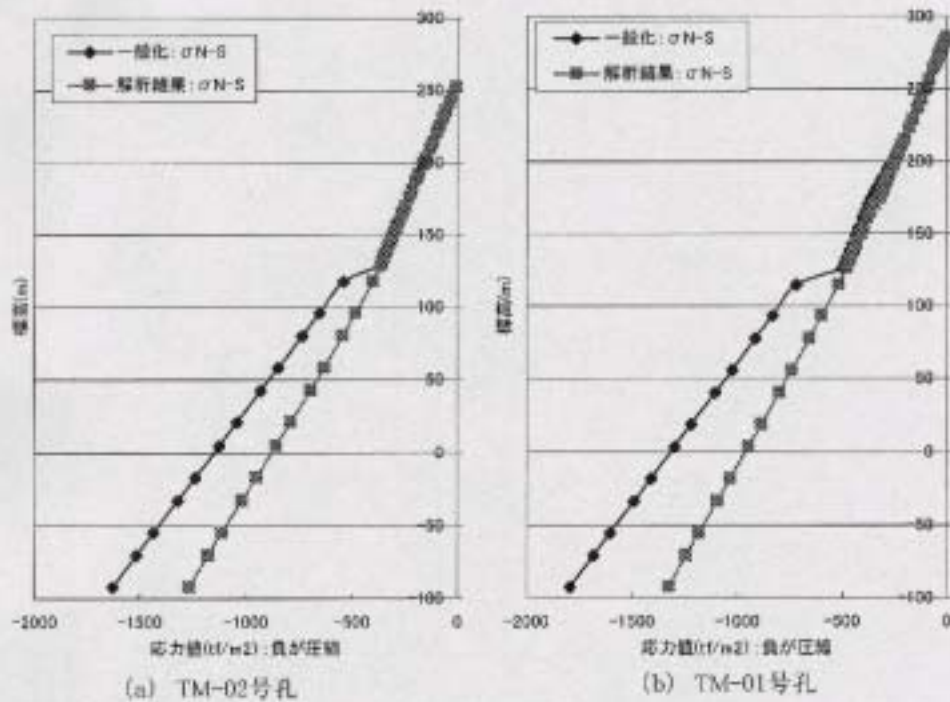


図6.2.7 水平方向応力値の比較(東西断面-4)

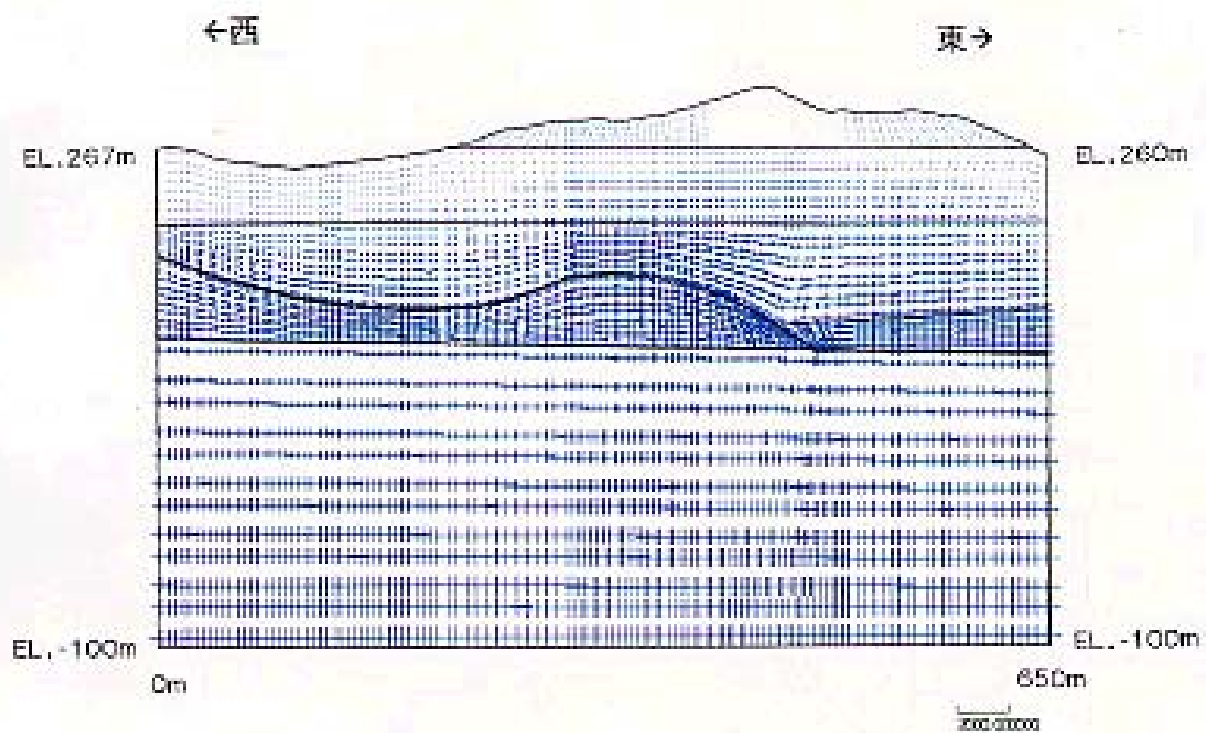


図6.2.8 主応力線図(東西断面:東西-4)

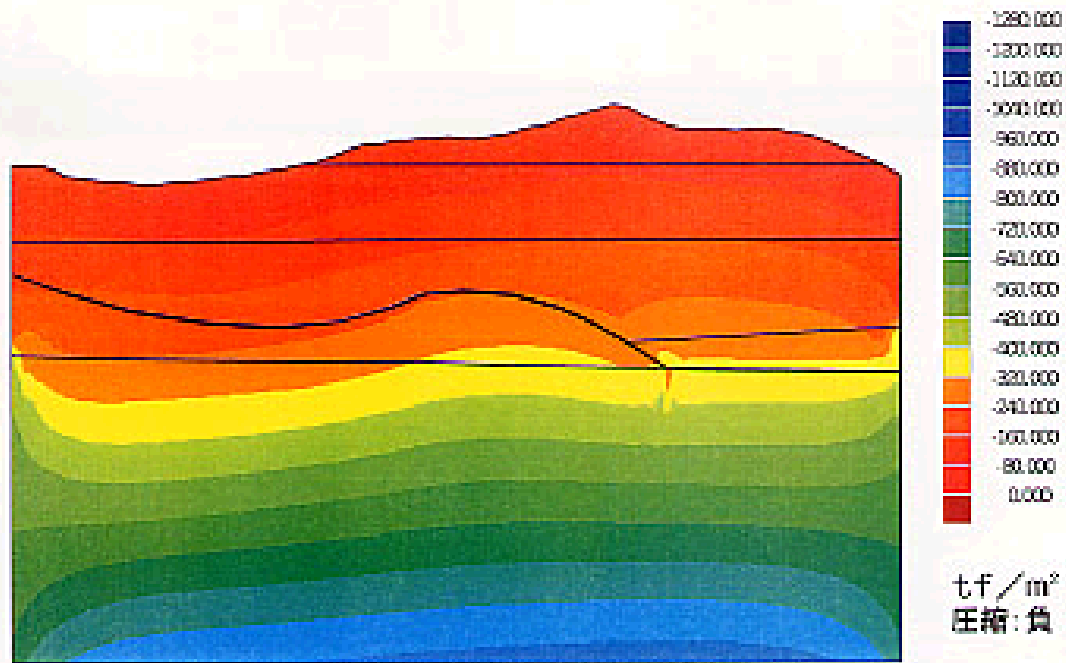


圖6.2.9 鉛直應力分布圖(東西断面:東西-4)

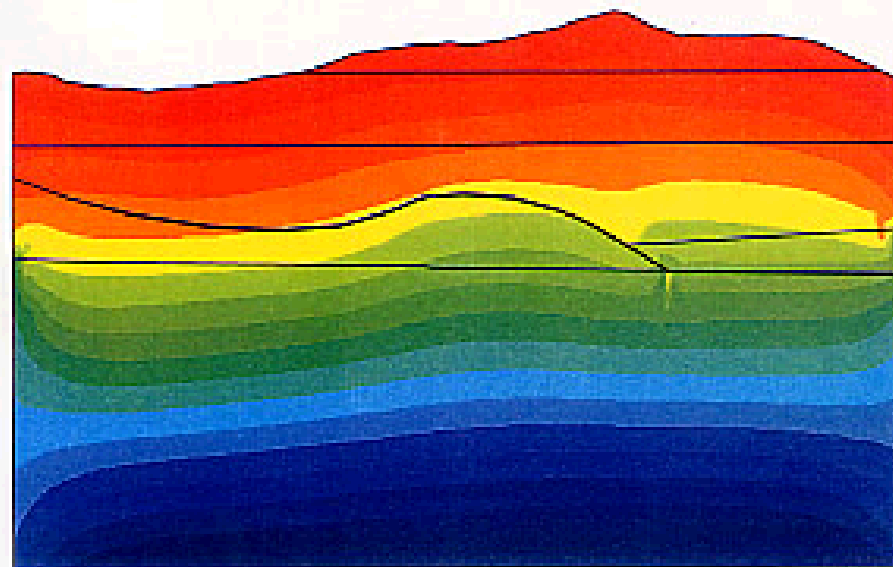


圖6.2.10 水平應力分布圖(東西断面:東西-4)

7. 考察

7.1 初期応力状態に影響を及ぼしていると考えられる要因の影響について

地表から掘削したボーリング孔を用いて実施した初期応力測定の結果から、東濃鉱山を含む領域の堆積岩部の初期応力状態に影響を及ぼしていると考えられる要因として、地形・地質構造・断層を想定した。そして、それらを考慮した二次元解析を行ない、東濃鉱山領域の初期応力状態を評価することができた。それらの結果に基づいて、想定した要因が初期応力状態に及ぼす影響について評価した。

a) 地形の影響について

南北断面での地表面の標高は 274 ~ 303m であり、最大標高差は 29m である。応力分布図(図 6.2.4 ~ 5)において、解析領域の境界や断層の影響が少ないと考えられるところ(境界と断層の中間部)での応力分布を見ると、地表近傍では、地表面の形状に類似した応力分布が得られているが、深さ 80m 程度で、ほぼ水平な応力分布が得られており、地表面の影響が無くなっていると考えられる。

東西断面での地表面の標高は 253 ~ 312m であり、最大標高差は 59m である。南北断面と同様に応力分布図(図 6.2.9 ~ 10)において、境界や断層の影響が少ないと考えられるところ(境界や断層の中間部)での応力分布を見ると、地表から深さ 400m 程度まで地表面の形状に類似した応力分布が得られている。この場合、地表面の影響範囲は最大標高差の 6 倍以上ということになる。しかし、南北断面での影響範囲は最大標高差の約 2.5 倍程度であり、同様の条件で解析しているにもかかわらず 2 倍以上の違いがあり、それらは矛盾した結果であると考えられる。そこで、東西断面の右側の応力分布に注目すると、深さ 150 ~ 200m 程度で、ほぼ水平な応力分布が得られており、地表面の影響が無くなっていると考えられる。この場合の影響範囲は、最大標高差の約 2.5 ~ 3 倍となっており、南北断面での影響範囲と同等である。東西断面においては、堆積岩と花崗岩の地層境界はほぼ水平であるが、断層の分布が地表面の形状と比較的類似しており、その分布形状がそれ以深の応力分布に影響を与えたものであると推定できる。また、断層がほぼ水平なところでは、それ以深の応力分布はほぼ一様であることもそのことを裏付けていると考えられる。

これらの結果から、地表面の形状が初期応力状態に与える影響としては、地表面の最大標高差の 2.5 倍程度であるといえる。

b) 地質構造の影響について

地質構造の影響としては、地層の分布状況による影響とそれぞれの地層における物性によるものが考えられる。

南北断面では、断層の影響によるものと考えられる応力の変化が大きく、地質構造による影響を推定することは容易でないが、応力分布図(図 6.2.4 ~ 5)において、花崗岩部では地層の境界線に沿った応力コンターが見られることから、地層の単位体積重量が初期応力分布に影響

を与えているものと考えられる。

東西断面では、地質構造が概ね水平であり、地質構造による影響は小さいと考えられる。しかし、応力分布図（図 6.2.9～10）において、上盤の底部付近に存在する花崗岩では、堆積岩との境界が鋭角となる部分があり、それらの岩盤物性が 1 桁程度異なることから、この付近で、局所的に応力の擾乱が生じたものと考えられる。また、その部分は断層と隣接しており、断層の影響をも含んだ応力の変化であると解釈すべきである。

これらの結果から、地質構造が初期応力状態に与える影響としては、巨視的には地層の分布およびそれらの物性値が影響し、複雑な地質構造の場合は、その地質境界の影響は大きい、その影響範囲はさほど広くないと考えられる。

c)断層の影響について

南北断面では、応力分布図（図 6.2.4～5）において断層近傍の応力分布を見ると、鉛直応力分布と水平応力分布ともに断層近傍しかも堆積岩と花崗岩の境界部分付近での応力の変化がかなり顕著である。断層上盤側では圧縮応力が増加し、下盤側では圧縮応力が減少する傾向が見られる。鉛直応力については、水平断面で見ると断層に近づくとつれて圧縮応力が減少する傾向があり、下盤側の方が上盤側よりも応力の減少が顕著であり、その影響範囲としては、下盤側で 15～60m 程度で、上盤側で 5～40m 程度である。鉛直断面で見ても同様の傾向であり、その影響範囲は下盤側で 80～130m 程度で、上盤側で 30～60m 程度である。水平応力についても、鉛直応力の分布と同様の傾向を示しており、その影響範囲もほぼ等しいと言える。

東西断面では、応力分布図（図 6.2.9～10）において、断層近傍の応力分布を見ると、鉛直応力分布と水平応力分布ともに、南北断面で見られたような断層近傍での顕著な応力の変化が見られない。しかし、地表の影響のところでも述べたように、深度 150m 程度より深い部分の水平方向に一樣でない応力分布は、断層の影響であると考えられる。また、断層の形状がなめらかでないところの近傍では、応力の擾乱が見られるが、その影響範囲は小さい。

このように南北方向と東西方向の解析において、断層の影響が極端に異なるのは、断層の形状というよりも荷重の载荷方向に対する断層の位置（方向）が影響していると考えられる。すなわち、载荷方向に垂直もしくは平行な断層の場合はその影響は小さく、载荷方向に対して 40～50° 程度の角度を持つ断層の場合はその影響は極めて大きいと考えられる。

これらの結果から、断層が応力状態に与える影響はかなりあり、その影響の度合いは、応力方向と断層の位置関係に依存すると考えられる。

7.2 東濃鉾山領域の初期応力状態について

a)南北断面内の初期応力状態について

鉛直方向の初期応力については、全体的には土被り圧に相当する応力が作用し、それらが地表面・地質構造や月吉断層により、複合的に擾乱されているという応力分布が得られた。地表面の影響は、深さ 70m 程度までであり、地表面形状に類似した応力分布を生じさせている。月吉断層は、近傍の応力状態に大きな擾乱を与えており、断層の近傍 40m あたりまでは応力値の低下が見られ、断層下盤側の応力値は上盤側に比べてかなり小さくなっていることが推定される。水平方向の初期応力は、鉛直方向の応力分布と同じような傾向を示しており、下盤側の応力値が上盤側に比べて小さい傾向があった。

b)東西断面内の初期応力状態について

鉛直方向の初期応力については、全体的には土被り圧に相当する応力が作用し、それらが地表面・地質構造や月吉断層により、若干影響を受けているという応力分布が得られた。地表面の影響は、深さ 150～200m 程度であり、月吉断層の影響は、南北断面ほど小さくなく、断層の形状が不連続になっている部分での局所的な応力の擾乱が見られるだけである。水平方向の初期応力についても、鉛直方向の応力分布と同様の傾向を示していた。

8.まとめ

東濃鉦山において地表から掘削した4本の鉛直ボーリング孔を用いて実施した初期応力測定（AE法、水圧破碎法）の結果に基づいて、初期応力状態に影響を及ぼす要因を想定し、それらを考慮して東濃鉦山を含む領域の南北断面および東西断面で二次元解析を実施し、東濃鉦山を含む比較的広い領域での初期応力状態について評価した。

その結果、当初想定した地表面、地質構造、断層の三つの要因は、東濃鉦山の初期応力状態に影響を及ぼしていることがわかった。東濃鉦山の初期応力状態については、鉛直方向の初期応力は全体的には土被り圧に相当する応力が作用し、それらが地表面・地質構造や月吉断層により、複合的に擾乱されているという応力分布が得られた。その擾乱の程度は、南北断面の方が顕著であり、特に、断層下盤側の応力値は上盤側に比べてかなり小さくなっていた。水平方向の初期応力は、鉛直方向の応力分布と同じような傾向を示していた。

一連の解析・評価を通して、今回用いた初期応力状態の評価手法は、ボーリング孔で得られたポイントデータを用いてある程度広い範囲の初期応力状態を評価する一つの有効な方法であることが示されたと考える。

参考文献

- 1) J.Kaiser (1953): Untersuchungen uber das auftreten gerauschen beim zugversuch, Archiv fur das Eisenhüttenwesen, Vol.24, pp.43 ~ 45
- 2) 石田毅 (1995): 岩盤破壊音の科学、近未来社、PP.52 ~ 57
- 3) 核燃料サイクル開発機構(1998): 98SE-01 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定、JNC TJ7400 99-001
- 4) 初期地圧測定法の現状と課題 (1992): 土木学会
- 5) Maeda, N., Sato, T., Matsui, H. and Sugihara, K. (1999): Estimation of applicability of stress measurement methods and three dimensional stress state In soft sedimentary rock, Proceeding of THE '99 JAPAN-KOREA JIONT SYMPOSIUM ON ROCK ENGINEERING, PP. 277 ~ 284
- 6) 核燃料サイクル開発機構(2000): 99SE-02 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定、JNC TJ7430 2000-002
- 7) 核燃料サイクル開発機構 (2000): 99SE-02 孔における水圧破砕法による初期応力測定、JNC TJ7430 2000-001
- 8) 石田毅、金川忠 (1987): 地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響、地震、第 2 号、第 40 巻、pp.329-339
- 9) 動力炉・核燃料開発事業団 (1992): 堆積岩地山における立坑周りの力学的・水理学的な特性変化、PNC TN7410 92-046
- 10) 核燃料サイクル開発機構 (1998): 立坑掘削予定地点における試錐調査 (MIU-1 号孔)、JNC TJ7440 98-001
- 11) 佐藤稔紀、杉原弘造他 (1994): 水圧破砕法と AE 法による深度別初期応力測定・東濃鉾山の軟岩における測定を例にして・、資源・素材学会平成 6 年度春季大会
- 12) 動力炉・核燃料開発事業団 (1998): TM-2 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定、PNC TJ7201 98-001
- 13) 動力炉・核燃料開発事業団 (1998): TM-2 孔における水圧破砕法による初期応力測定、PNC TJ7401 98-001
- 14) 核燃料サイクル開発機構 (1999): 98SE-01 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定、JNC TJ7400 99-001
- 15) 核燃料サイクル開発機構 (1999): 98SE-01 孔における水圧破砕法による初期応力測定、JNC TJ7400 99-004
- 16) 核燃料サイクル開発機構 (2000): 99SE-02 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定、JNC TJ7430 2000-002
- 17) 核燃料サイクル開発機構 (2000): 99SE-02 孔における水圧破砕法による初期応力測定、JNC TJ7430 2000-001