

# TRU廃棄物処分システムに関する大空洞長期挙動の検討

－非線形粘弾性モデルによる二次元解析－

(研究報告)

2001年6月

核燃料サイクル開発機構  
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、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

Inquiries 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

# TRU 廃棄物処分システムに関する大空洞長期挙動の検討

## — 非線形粘弾性モデルによる二次元解析 —

(研究報告)

青柳孝義\*\*\*、佐原史浩\*、三原守弘\*\*

奥津一夫\*\*\*、前田宗宏\*\*\*

### 要旨

TRU 廃棄物は高レベル放射性廃棄物と比較して発生量が多いものの、そのほとんどが非発熱性の廃棄体であるため、高埋設密度での処分が可能である。そのため、地下深部の大空洞処分施設による集合埋設が経済的観点から合理的と考えられている。このような TRU 廃棄物の特徴を考慮して、TRU 廃棄物を埋設する処分坑道の断面形状や人工バリア材の構成を設計した場合、岩盤の長期にわたるクリープ変形が人工バリア材に過度の負荷を与え、処分システムに影響を及ぼす可能性が考えられる。

本研究では、非線形粘弾性モデルを用いて岩盤の長期クリープ変形量の解析を行い、クリープ量を算出するとともに、人工バリア材への影響検討を行った。ここで、岩盤物性値については、地層処分研究開発第2次取りまとめの物性値を用い、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤を検討対象とした。

検討結果として、結晶質岩系岩盤では、経過時間 100 万年においても岩盤のクリープ変形は発生しない結果となった。一方、堆積岩系岩盤では、経過時間 100 万年において 80~90mm のクリープ変形が生じる結果となった。また、その時の緩衝材に生じる厚さの減少量は、最大で 45mm 程度となることが示された。今回の検討結果からは、この程度の岩盤クリープ変形や緩衝材厚さの減少量であれば、緩衝材に考慮される余裕しろの範囲でカバーできるものであると考えられることから、岩盤の長期にわたるクリープ変形は処分システムに大きく影響を及ぼすものではないと判断できた。

本報告書は、平成 10 年度に実施した鹿島建設株式会社への委託研究の成果に対して、使用した非線形粘弾性モデルについての解説等を加えるとともに、研究内容を再度とりまとめたものである。

\* 株式会社小堀鐸二研究所

\*\* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分材料研究グループ

\*\*\* 鹿島建設株式会社

Long-term Effect of Creep Displacement of Host-rock on  
Stability of Engineered Barrier System for TRU Waste  
— Two-dimensional Analysis by the Non-linear Viscoelasticity Model —

Takayoshi Aoyagi\*\*\*, Fumihiro Sahara\*, Morihiro Mihara\*\*  
Kazuo Okutu\*\*\*, Munehiro Maeda\*\*\*

Abstract

In the disposal concept of TRU waste, concentrated disposal of wastes forms in large cross-section underground cavities is envisaged, because most of TRU waste is no-heat producing in spite of large generated volume as compared with HLW.

In the design of engineered barrier system based on large cross-section cavities, it is necessary to consider the long-term mechanical process such as creep displacement of the host rock from the viewpoint of the stability of engineered barrier system.

In this study, the long-term creep displacement of the host rock was calculated using the non-linear viscoelasticity model and the effects on the stability of engineered barrier system was evaluated.

As a result, in the disposal concept of crystalline rock, no creep displacement occurred at the time after 1 million year. On the other hand, in the disposal concept of sedimentary rock, creep displacement of 80~90mm occurred at the time after 1 million year. Also, in this calculation, a maximum reduction of 45mm concerned with the thickness of buffer material was estimated. But these values resulted within allowance of design values.

Therefore, these results show that the effects of the creep displacement on the stability of engineered barrier system would not be significant.

---

\* : Kobori Research Complex INC.

\*\* : Materials Research Group Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

\*\*\* : KAJIMA Corporation

## 目 次

1 はじめに	1
2 本検討で用いた非線形粘弾性モデル	2
2.1 粘弾性挙動／モデルについて	2
2.2 大久保モデルについて	3
2.3 一軸圧縮応力下における大久保モデルの構成方程式と パラメータ $m$ 、 $n_0$ について	4
2.4 三軸圧縮応力下における大久保モデルの構成方程式および諸式について	9
3 非線形粘弾性モデル(大久保モデル)による解析	11
3.1 岩盤物性値	11
3.2 検討方法	12
3.3 検討断面	13
3.4 解析ケース	14
3.5 解析条件	14
3.6 解析結果及び考察	20
4 おわりに	41
謝 辞	43
参考文献	43
付録-1	付-1(44)
付録-2	付-2(48)
付録-3	付-3(97)
付録-4	付-4(114)
付録-5	付-5(133)
付録-6	付-6(182)

## 1 はじめに

TRU 廃棄物は高レベル放射性廃棄物と比較して発生量が多いものの、そのほとんどが非発熱性の廃棄体であるため、高埋設密度での処分が可能である。そのため、地下深部の大空洞処分施設による集合埋設が経済的観点から合理的と考えられている。このような TRU 廃棄物の特徴を考慮して、TRU 廃棄物処分概念検討書<sup>1)</sup>では、結晶質岩系岩盤及び堆積岩系岩盤についてそれぞれの処分施設概念図を提案している。

この処分施設の主要部分である処分坑道周辺の岩盤は、坑道の掘削に伴い初期の地山応力が解放される。これにより周辺岩盤の応力場は影響を受け、それに応じた変位が発生する。施設の設計は、このような応力場、変位に基づいて行われる。しかし、この時の応力場、変位は、場の力学的な釣り合いから求められるもので、時間依存性は考慮されていない。実際のトンネル等の変形は時間とともに増大すること<sup>2)</sup>、いわゆる応力一定下で変形が増大するクリープ変形であることが知られている。しかし、どの程度のクリープ変形が長期間において発生するかはこれまで検討されてなく、性能評価上、人工バリア材等にどのような影響を及ぼすか評価しておく必要がある。

本報告書は、この岩盤の長期クリープ変形量を非線形粘弾性モデルを用いて解析を行い、クリープ量を算出するとともに、人工バリア材への影響検討を行った。ここで人工バリアとは、放射性核種の外部への移行を妨げる障壁のこととし、廃棄体、構造躯体、緩衝材、埋戻し材、支保工のことを言い、本検討では人工バリア材で最も重要な役割を持つと考えられる緩衝材への影響を検討した。

なお、処分坑道の断面形状や人工バリアの構成ならびに処分深度に関しては、TRU 廃棄物処分概念検討書<sup>1)</sup>において考慮されているものを適用する。

## 2 本検討で用いた非線形粘弾性モデル

坑道の長期力学的安定性を検討するためには、岩盤の時間に依存した挙動、すなわち粘弾性挙動を考慮した検討が必要である。本検討では、大久保らが提案した、非線形粘弾性挙動および強度破壊点以降の挙動を数値解析的に表現可能なモデル(以下、大久保モデル<sup>3)</sup>)を用いて、岩盤クリープ挙動を検討する。

### 2.1 粘弾性挙動／モデルについて

弾性論や塑性論では、基本的に時間の影響を考慮していない。しかしながら、クリープ(一定応力のもとで時間と共に歪みが徐々に増加していく現象)のような現象について時間の影響を考慮しなければならない材料もある。このような材料の時間に依存した力学的挙動を粘弾性挙動といい、これをモデル化したものが粘弾性モデルである。

粘弾性モデルは、線形粘弾性モデルと非線形粘弾性モデルに大別される。前者の線形粘弾性モデルの力学的模型の例(Voigt 模型)を図-2.1 に示す。

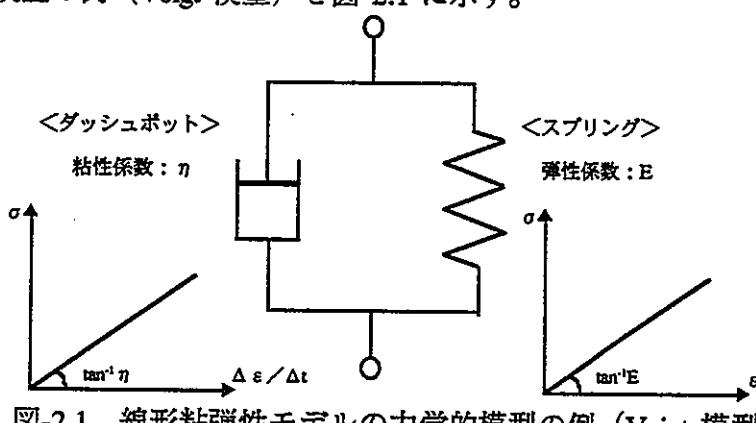


図-2.1 線形粘弾性モデルの力学的模型の例 (Voigt 模型)

図-2.1 の Voigt 模型はスプリングとダッシュポットが並列に組み合わされたものであり、ここでスプリングとは線形弾性バネ、ダッシュポットとは、式(2.1)に示すとおり応力が歪み速度に比例することを示す機構であり、比例定数  $\eta$  は粘性係数である。

$$\sigma^v = \eta \cdot (\Delta \epsilon / \Delta t) \quad (\sigma^v: \text{ダッシュポットの応力}) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.1)}$$

従ってこの模型全体の構成方程式は式(2.2)のように表され、定数係数の線形微分方程式となる。すなわち、変動パラメータ(ここでは  $\sigma$  と  $\epsilon$ )が一次元の形で表されている。

$$\sigma = E \epsilon + \eta \cdot (\Delta \epsilon / \Delta t) \quad (\sigma: \text{モデル全体(材料)の応力}) \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.2)}$$

この式(2.2)のように物理定数  $E$ 、 $\eta$  等が応力や歪みレベルによらず一定のものとして扱った場合のように、構成方程式が線形微分方程式で表されるモデルを線形粘弾性モデルという。逆に物理定数自体が応力、歪み等の関数で表され、変動パラメータが一次元で表せないようなモデル

を非線形粘弾性モデルという。なお、式(2.2)のように応力、歪み、および時間の相互関係を表す方程式を構成方程式といふ。.

## 2.2 大久保モデルについて

岩石は非線形粘弾性挙動を示す材料である。例えば、通常の岩石が圧縮荷重を受けて変形するときは図-2.2に模式的に示すように、歪み( $\epsilon$ )が増加すると共に応力-歪み曲線の勾配が徐々に緩やかになって応力の最大値(ピーク強度)に達し、その後歪みが増加するにつれて応力が減少していくという挙動を示す。またクリープについては図-2.3に模式的に示すように、載荷後歪み速度( $d\epsilon/dt$ )が減少し(1次クリープ)、その後歪み速度がほぼ一定となり(2次クリープ)、ある時間を過ぎると歪み速度が急激していく(3次クリープ)といった挙動を示す。このときの歪みと時間の関係は図-2.4に示すとおりであり、3次クリープ時に歪みが急増し、最終的に破壊に至る。この他、一軸圧縮試験の載荷速度が大きいほどピーク強度が大きくなること<sup>4)</sup>等も含め、このような岩石の挙動は線形粘弾性モデルでは表現出来ない。

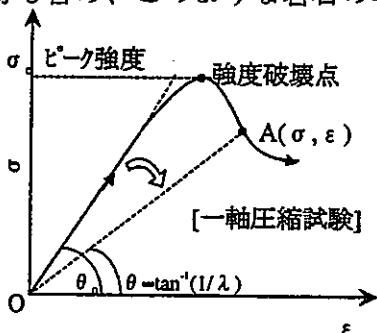


図-2.2 応力-歪み曲線

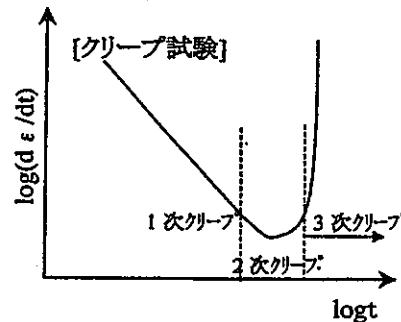


図-2.3 歪み速度-時間関係

岩盤クリープ挙動に関して提案されている多くの構成方程式は線形粘弾性モデルであり、そのほとんどが、1次クリープ、及び2次クリープまでしか取り扱う事が出来ない。多くの岩盤の場合は1次、2次、3次クリープが順に現れるが、3次クリープを含めた上

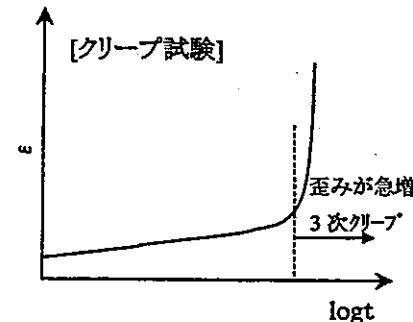


図-2.4 歪み-時間関係

述のような非線形粘弾性挙動を解析的に扱うことができるものはほとんどないのが現状である。さらに、岩種によってはクリープ変形による坑道周辺岩盤の歪みは坑道径の数10%になり、歪みが強度破壊点を超える状態となることも予想されるが、強度破壊点以降の範囲まで適用できるモデルも少ない。

上記のような現象・挙動を表現するために、物理定数  $m$ 、 $n_0$  を導入した指數型の構成方程式

が大久保モデルである。本モデルは、コンプライアンス可変型のモデルであり、応力を受ける岩盤の各要素のコンプライアンス( $\lambda$ :ひずみ( $\epsilon$ )応力( $\sigma$ )、弾性係数(E)の逆数 ( $\lambda = 1/E$ )に相当)が、一軸圧縮試験等の結果から得られる物性パラメータ  $m$ 、 $n_0$  に応じて、時間の経過とともに増加してゆくと仮定したモデルである。(詳細は次節以降参照) このモデルを用いると、例えば図-2.2(一軸圧縮試験結果の模式図)の原点OとA点を結ぶ破線の傾きの逆数  $1/\tan \theta$  がコンプライアンス ( $\lambda$ ) に相当し、上記の仮定のごとくコンプライアンスが増加していくことで、 $\tan \theta$  が減少、つまり A 点が応力-歪み曲線上を右側にシフトしていくことが表現される。このモデルは基礎的なデータに基づき強度破壊点以降の挙動を再現したもので、有限要素法により、各要素のコンプライアンスを順次増加させた繰り返し計算を行うことによって、比較的簡単に時間に依存した挙動をシミュレートすることができる。

以下、大久保モデルの特徴をまとめる。

- ・3次クリープを表現できる。
  - ・構成方程式が簡単なため、有限要素法（FEM）によるプログラム等に取り込みやすい。
  - ・定歪み速度試験（歪み速度一定）、クリープ試験（応力一定）等の特殊条件において解析解を持つため、簡単な場合には数値計算結果のチェックが出来る。（次節参照）
  - ・6つのパラメータを用いるが、いづれも一般的な岩盤試験により取得できる。（2.4 参照）
  - ・ $m$ 、 $n_0$ の2つのパラメータの選定により強度破壊点以降の応力低下が著しいものからほとんどないものまで、軟岩から硬岩まで広範囲に適用できる。（次節参照）
  - ・歪み硬化は未考慮のため、1次クリープ領域の歪み速度が低下する現象は表現できない。  
(図-2.3 参照)
  - ・岩盤が不連続体として挙動し始める時刻以降の大きな変形に対しては適用できない。

### 2.3 一軸圧縮応力下における大久保モデルの構成方程式とパラメータ $m$ , $n$ について

大久保らは、一軸圧縮応力下においてコンプライアンス ( $\lambda$ ) の時間変化は次式で表されると仮定した。

( $\lambda$ :コンプライアンス、 $t$ :時間、A:定数、 $\sigma$ :応力)

$m$ ,  $n_0$ : 岩盤物性パラメータ  $-\infty < m < +\infty$   $1 \leq n_0 < +\infty$ )

前述のとおり、この式は実験結果に基づいて提案されたものであり、強度破壊点以降の挙動、3次クリープを表現しうるものである。ここで、(1)定歪み速度試験（一軸圧縮試験）、(2)クリ

一軸試験についての大久保モデルの解析解を求め、強度破壊点以降の挙動等を表現出来ることを確認した上で、パラメータ  $m$ 、 $n_0$  の物理的意味について言及する。

### (1) 定歪み速度試験（一軸圧縮試験）の解析解

歪み速度を  $d\epsilon/dt = C$  とすると、

これを式(2.3)に代入し、整理すると、

$$\lambda^{n0-m} d\lambda = A \cdot C^{n0} \cdot t^{n0} dt$$

$t=0$  の時  $\lambda = \lambda_0$  (初期コンプライアンス) とし、上式を積分すると次式が得られる。

$$\lambda = \{(n_0-m+1)/(n_0+1) \cdot A \cdot C^{n_0} \cdot t^{n_0+1} + \lambda_0^{n_0-m+1}\}^{-1/(n_0-m+1)} \quad \dots \quad \text{式(2.5)}$$

この式(2.5)が定歪み速度試験の解析解であり、各時間におけるコンプライアンスの値が分かるので、式(2.4)の関係より応力-歪み曲線が書ける。ただし、この解析解は  $m \neq n_0 + 1$  の場合の解であり、 $m = n_0 + 1$  場合は別の解析解となる。<sup>5)</sup> 図-2.5 は、表-2.1 に示した条件における応力-歪み曲線を示したものであり、表-2.1 各定数の設定条件

表-2.1 各定数の設定条件

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
C	s <sup>-1</sup>			0.0001		
$\sigma_c$	MPa			20		
E	MPa			4000		
$\lambda_0$ (=1/E)	MPa <sup>-1</sup>			0.00025		
r <sub>0</sub>	—			20		
m	—	1	3	5	10	20

メータ  $m$  が強度破壊点以降の応力-歪み曲線の傾きを決める定数であることが分かり、 $m$  が大きいほど強度破壊点以降の応力の低下が急激になる。

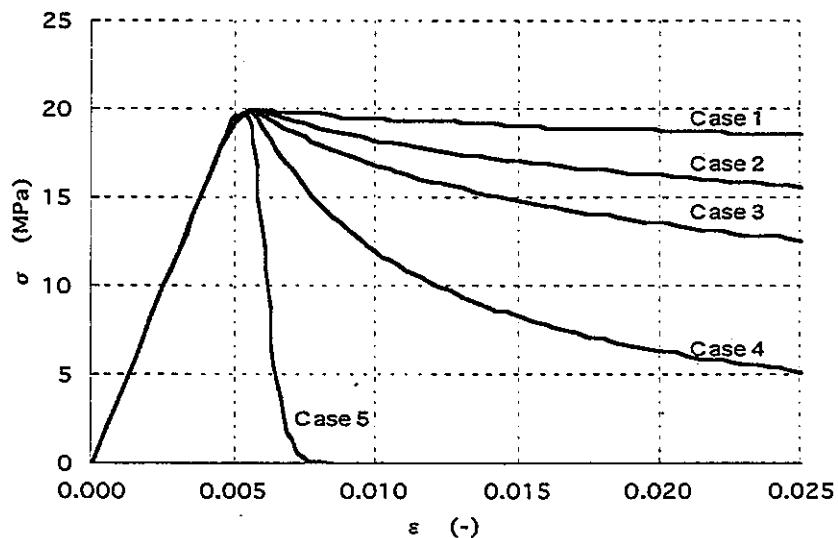


図-2.5 応力-歪み曲線

一方、破壊強度点における応力、コンプライアンス、時間をそれぞれ  $\sigma_c$ 、 $\lambda_c$ 、 $t_c$  とおくと、式(2.5)より、

$$\lambda_c = \left\{ (n_0-m+1)/(n_0+1) \cdot A \cdot C^{n_0} \cdot t_c^{m0+1} + \lambda_0^{n0-m+1} \right\}^{-1/(m0-m+1)} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.6)}$$

また式(2.4)より、

$$\sigma_c = (1/\lambda_c) \cdot C t_c \quad \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.7)}$$

また式(2.4)の両辺を時間で微分すると、

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d(1/\lambda)}{dt} C_t + (1/\lambda) \cdot \frac{dC}{dt} = -\lambda^{-2} \cdot \frac{d\lambda}{dt} C_t + \lambda^{-1} \cdot C$$

破壊強度点においては  $d\sigma/dt = 0$  なので、

$$(d\sigma/dt)_{t=t_c} = -\lambda_c^{-2} \cdot (d\lambda/dt)_{t=t_c} \cdot C t_c + \lambda_c^{-1} \cdot C = 0$$

$$t_c = \lambda_c / (d\lambda/dt) \quad t_{c-t_c} = \lambda_c / (A \cdot \sigma_c^{m0} \cdot \lambda_c^m) \quad (\because \text{式(2.3)})$$

$$t_c = \sigma_c^{-m} \cdot \lambda_c^{1-m} / A \quad \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.8)}$$

式(2.6)、式(2.7)、式(2.8)より  $t_c$ 、 $\lambda_c$  を消去すると、

$$\sigma_c = (C/A)^{1/(n_0+1)} \cdot (m/(n_0+1))^{m/(n_0+1) \times (n_0-m+1)} \cdot \lambda_0^{-m/(n_0+1)} \quad \dots \quad \text{式(2.9)}$$

式(2.9)よりピーク強度 (=強度破壊点における応力)  $\sigma_c$  が歪み速度  $C$  の  $1/(n_0+1)$  乗に比例することがわかる。すなわち  $n_0$  は定歪み速度試験におけるピーク強度の歪み速度依存性を表すパラメータであることが分かる。つまり  $n_0$  が小さいほど歪み速度の増加に対するピーク強度の増加割合が大きい。

また式(2.9)を A について整理すると式(2.10)のようになり、定数 A はある歪み速度 C で行った定歪み速度試験（一軸圧縮試験）で得られたピーク強度  $\sigma_p$  より求められる定数であることが分かる。

$$A = \left( \frac{m}{(n_p + 1)} \right)^{m'(n_0 - m + l)} \cdot \lambda_0^{-m} \cdot \sigma_{\varepsilon}^{-(n_0 + l)} \cdot C \quad (> 0) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.10)}$$

## (2) クリープ試験の解析解

載荷応力（クリープ応力）を  $\sigma = \sigma_0$  とすると、式(2.3)より

$$\lambda^{-m} d\lambda = A \cdot \sigma_{\lambda^0}^{(n)} dt$$

$t = 0$  の時  $\lambda = \lambda_0$  とし、上式を積分すると次式が得られる。

$$\lambda = \left\{ (1-m) \cdot A \cdot \sigma_0^{m0} \cdot t + \lambda_0^{1-m} \right\}^{-1/(1-m)} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \text{式(2.11)}$$

式(2.11)がクリープ試験の解析解であり、 $\lambda = \varepsilon / \sigma_0$  の関係より  $\varepsilon - t$  関係が分かる。ただしこの解析解は  $m \neq 1$  の場合の解であり、 $m=1$  の場合は別の解析解となる。<sup>5)</sup>

式(2.11)を  $t$  について整理すると、

$$t = (\lambda^{1-m} - \lambda_0^{1-m}) / \{(1-m) \cdot A \cdot \sigma_0^{m0}\}$$

ここで歪みが無限大になり、材料が完全に破壊してしまう時間（以下、寿命）を考えると、  
 $\epsilon \rightarrow +\infty$  の時  $\lambda = \epsilon / \sigma_0$  より  $\lambda \rightarrow +\infty$  であり、 $m > 1$  の場合  $\lambda^{1-m} \rightarrow 0$  となるので、このときの  
 寿命  $t_f$  は式(2.12)のように表される。

逆にこれより  $m < 1$  の場合は寿命  $t_f$  は存在せず、3次クリープが発生しないような材料の挙動を示すことになる。<sup>5)</sup>

ある岩盤について、つまり定歪み速度試験等で大久保モデルに必要な6つのパラメータ（表-2.5）が定められた場合（このとき式(2.10)より  $A$  も定値）、式(2.12)よりその岩盤の寿命  $t_f$  はクリープ試験の載荷応力  $\sigma_0$  の  $n_0$ 乗に反比例することが分かる。すなわち  $n_0$  が大きい岩盤ほど応力の変化に対する寿命の変化率が大きい。図-2.6 は表-2.2 の 4 ケースについての歪み-時間曲線であり、 $n_0$  が大きいほどクリープ試験における寿命が載荷応力の差異によって大きく変化することが分かる。これより  $n_0$  はクリープ試験における寿命の応力依存性を表すパラメータであると言える。

表-2.2 各定数の設定条件

		Case1(a)	Case1(b)	Case2(a)	Case2(b)
$\sigma_c$	MPa		20 (C=0.0001s <sup>-1</sup> )		
$\sigma_0$	MPa	15	18	15	18
E	MPa		4000		
$\lambda_0$ (=1/E)	MPa <sup>-1</sup>		0.00025		
$n_0$	—	5		20	
m	—		5		

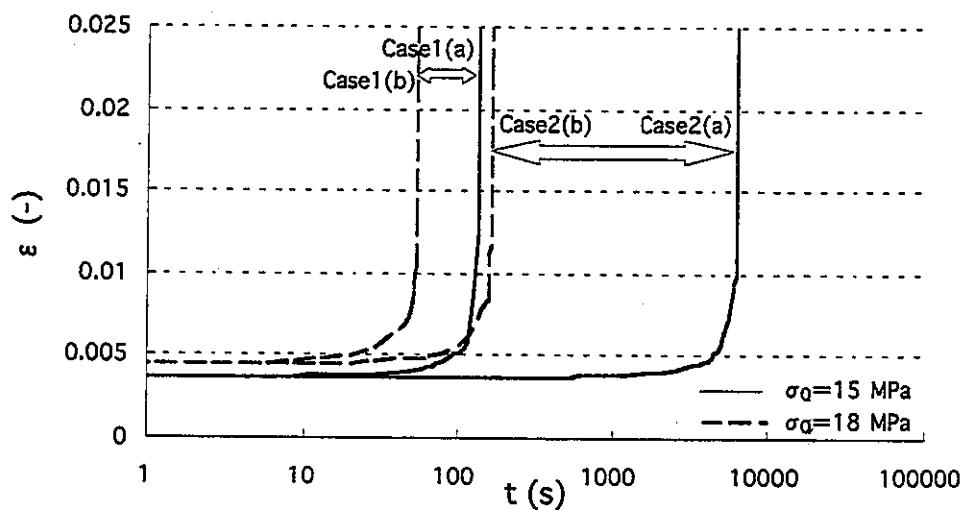


図-2.6 歪み-時間曲線（クリープ試験）

また  $n_0$  を固定し、表-2.3 に示す 5 ケースの  $m$  についての歪み-時間曲線を図-2.7 に示す。歪み増加の変曲点はいずれのケースも同じくらいの時間に現れているが、 $m$  の値が大きいほどその後の歪み増加が急激になっている。これは図-2.5 の  $m$  が大きいほどピーク強度以降の応力低下が急激となることと対応している。

表-2.3 各定数の設定条件

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
$\sigma_c$	MPa		20	( $C=0.0001\text{s}^{-1}$ )		
$\sigma_0$	MPa			15		
$E$	MPa			4000		
$\lambda_0 (=1/E)$	MPa <sup>-1</sup>			0.00025		
$n_0$	—		1.1	3	5	10
$m$	—			20		20

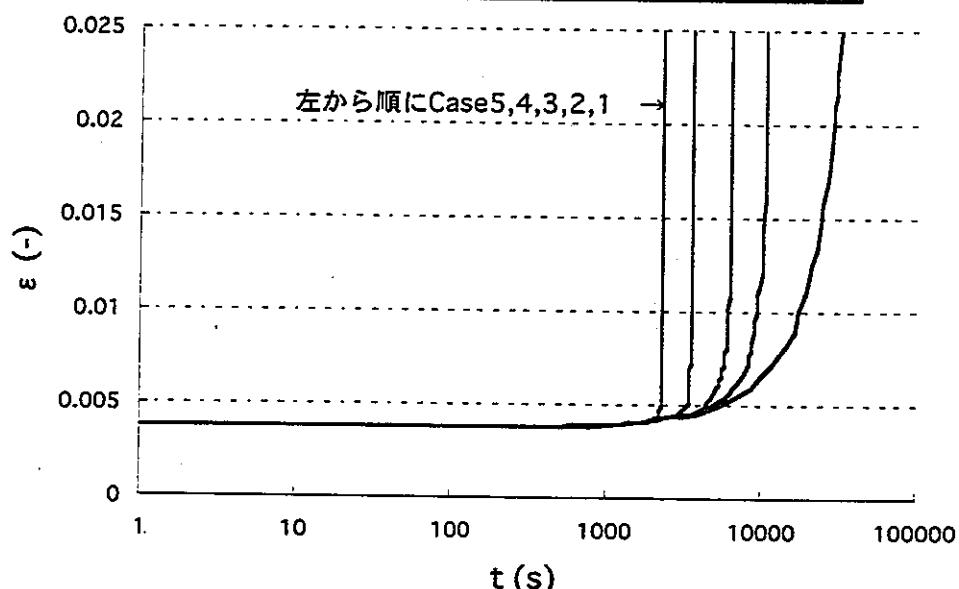


図-2.7 歪み-時間曲線（クリープ試験）

以上の内容を踏まえ、パラメータ  $m$ 、 $n_0$  の物理的な意味、内容を表-2.4 にまとめる。

表-2.4 物性パラメータ  $m$ 、 $n_0$ 

物性パラメータ	意味・内容
$m$ (-)	ピーク強度以降の応力-歪み曲線の傾きを決める岩盤物性パラメータ： $m$ が大きいほどピーク強度以降の応力の低下が急激となる。
$n_0$ (-)	定歪み速度試験におけるピーク強度の歪み速度依存性やクリープ試験における寿命の応力依存性を決めるパラメータ： $n_0$ が小さいほど載荷速度がピーク強度に及ぼす影響が大きく、 $n_0$ が大きいほど載荷応力が寿命に及ぼす影響が大きい。

## 2.4 三軸圧縮応力下における大久保モデルの構成方程式および諸式について

式(2.3)を三軸圧縮応力下に拡張したものが式(2.13)である。

$\lambda^*$ ( $=\lambda/\lambda_0$ )、 $\Delta\sigma^*$ ( $=\Delta\sigma/\Delta\sigma_0$ )、 $\Delta\varepsilon^*$ ( $=\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_0$ )は、初期コンプライアンス  $\lambda_0$ 、強度(破壊差応力)  $\Delta\sigma_0$ 、および  $\Delta\varepsilon_0 = \lambda_0 \Delta\sigma_0$  にて正規化したコンプライアンス、差応力、差ひずみを表す。  
 $t_0$  は、一軸圧縮強度試験でひずみが  $\Delta\varepsilon_0$  となるまでの所要時間を表す。(通常 120 秒<sup>6)</sup>)

図-2.8 に  $\lambda_0$ 、 $\Delta\sigma^*$ 、 $\Delta\sigma_0$ 、 $\Delta\varepsilon_0$  および  $\Delta\varepsilon^*$  の関係を示す。

一軸圧縮応力下ではコンプライアンスの変化速度は応力の  $n_0$  乗に比例するとしたが、三軸圧

縮応力下では差応

力  $\Delta \sigma$  を強度(破壊差応力)  $\Delta \sigma_0$  で除した  $\Delta \sigma^*$  の  $n$  乗に比例するとしている。また計算上の便宜性を考え、無次元

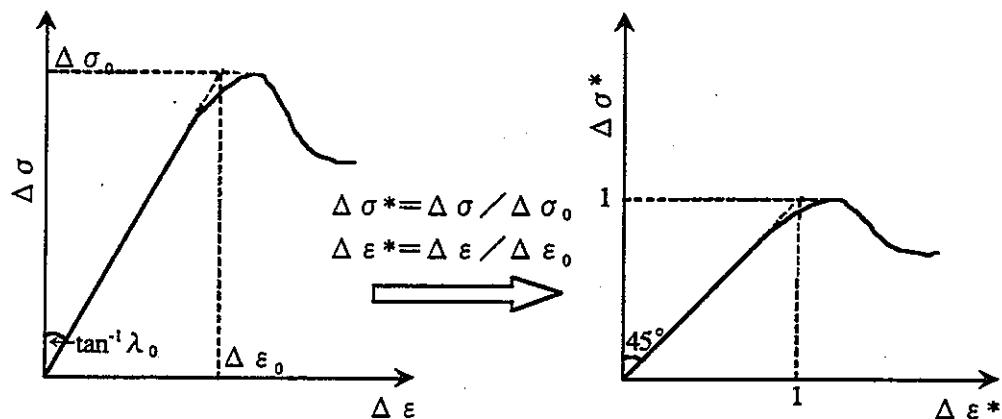


図-2.8 記号の説明図

前述の  $n_0$  は一軸圧縮応力下に限定された  $n$  の値であり、三軸圧縮応力下の  $n$  と  $n_0$  の間には下記の近似式の関係が実験結果より得られている。<sup>3)</sup>

また破壊条件には Janach の式を用い、 $\sigma_c$  を一軸圧縮強度、 $\sigma_t$  を一軸引張強度、 $\sigma_3$  を周圧とすれば次のように書ける。

解析上必要となるポアソン比 $\nu$ は、破壊の進行にともなうポアソン比の増加を次式で仮定する。 $\nu_0$ は、弾性領域で求めたポアソン比である。

大久保らは式(2.13)～式(2.18)をFEMに取り込み、軟弱な岩盤内に掘削された坑道周辺岩盤の変形の時間依存性挙動を解析し実測値と比較することによって、坑道周辺岩盤の時間依存性の変形を比較的容易にしかも定量的に表すことができることを示している。<sup>6)</sup>ここで、大久保

モデルを用いた解析に必要な岩石の物性データは以下の 6つであり、その項目と取得方法について表-2.5 に示す。

表-2.5 入力物性データと取得方法

入力パラメータ	取得方法
一軸圧縮強度 $\sigma_c$ (MPa)	一軸圧縮試験より
一軸引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	一軸引張試験または圧裂引張試験より
初期コンプライアンス $\lambda_0$ (MPa <sup>-1</sup> )	一軸圧縮試験より*)
弾性領域のボアソン比 $\nu_0$ (-)	一軸圧縮試験より
パラメータ $m(-)^{?}$	一軸圧縮試験, 一軸引張試験, 圧裂引張試験
パラメータ $n_0(-)^{?}$	より

\*) 初期コンプライアンス  $\lambda_0$ は解析結果に大きく影響するため、

設定には注意が必要である。

### 3 非線形粘弾性モデル(大久保モデル)による解析

本検討では、地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>8)</sup>の岩盤物性値を用いて大久保モデルを用いた岩盤クリープ解析検討を行った。また周辺岩盤の変形についてだけでなく、岩盤のクリープ変形による処分坑道あるいは人工バリアへの影響検討を行った。

#### 3.1 岩盤物性値

解析で使用する岩盤物性値を表-3.1に示す。岩種については、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤に区分する。この結晶質岩系岩盤は地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>8)</sup>におけるHRケース(結晶質岩酸性岩の平均的な物性)，堆積岩系岩盤は同様にSR-Bケース(処分深度500m程度を想定した場合の比較的硬めな物性)に対応する。

大久保モデルのパラメータm及びn<sub>0</sub>は、定歪速度試験(一軸圧縮試験等)などから求められるものである。いずれか一種類の試験から求めることが可能であるが、精度を要する場合は複数の試験をおこなってクロスチェックすることが望ましい。以下に記す岩盤の一般的な性質と大久保らによる研究成果<sup>3)4)5)7)9)</sup>を総合的に判断してm及びn<sub>0</sub>を設定した。なお、これらパラメータの設定にあたっては、大久保教授の御指導を賜った。

一般に、比較的硬い結晶質岩系岩盤より軟らかい堆積岩系岩盤の方が、クリープしやすい。したがって、n<sub>0</sub>の値については、結晶質岩系岩盤より堆積岩系岩盤を小さく設定すべきである。n<sub>0</sub>の値は、湿潤状態の結晶質岩系岩盤(花崗岩、安山岩)で30~40、同様に堆積岩系岩盤(凝灰岩)で20~40程度の値を示す試験結果が得られている。<sup>7)</sup>また一般に、結晶質岩系岩盤の方がピーク強度後の応力低下が著しいため、mの値は、堆積岩系岩盤より結晶質岩系岩盤を大きく設定すべきである。

表-3.1 岩盤物性値

	単位	結晶質岩系岩盤	堆積岩系岩盤
一軸圧縮強度	MPa	115	20
一軸引張強度	MPa	8	2.8
弾性係数	MPa	37,000	4,000
ボアソン比	-	0.25	0.30
m	-	20	5
n <sub>0</sub>	-	30	20
飽和密度	Mg/m <sup>3</sup>	2.67	2.35

### 3.2 検討方法

岩盤のクリープ変形を表現する構成方程式として前述の大久保モデルを適用し、2次元有限要素法(平面ひずみ)により解析を行う。本解析に用いた解析コード(プログラム)は、鹿島建設にて開発した有限要素法による構造解析プログラムに、大久保モデルを組み込んで改良したものである。さらに、解析コードが正しく大久保モデルを解いているかに関しては、手計算による結果と一致することを確認している。その検証結果と大久保教授より提供をうけた解析プログラムを付録-1に示す。

また、対象岩盤は結晶質岩系岩盤及び堆積岩系岩盤の2種類とし、検討は以下に記す2ステップで実施する。

#### (1)STEP1 (予備的解析)

内容物を単一の物性でモデル化し、中に物を詰めた場合のクリープ変形の影響を感度解析的に確認する。

#### (2)STEP2

処分坑道内を処分概念に則して緩衝材、埋戻し材及び廃棄体部（緩衝材内部）等でモデル化し、岩盤クリープによる緩衝材厚さの変化に着目した解析を実施する。ここで、緩衝材は柔らかく、その内部の廃棄体部は硬くという構成を基本ケースとする。また、廃棄体部等の物性の影響を感度解析的に確認する。

### 3.3 検討断面

#### (1) STEP1

STEP1における検討断面は、TRU廃棄物処分概念検討書<sup>1)</sup>に基づき、結晶質岩系岩盤及び堆積岩系岩盤に対して図-3.1に示すとおりとする。結晶質岩系岩盤では、緩衝材の設置が考えられている廃棄体グループ1及び2の断面を対象とする。

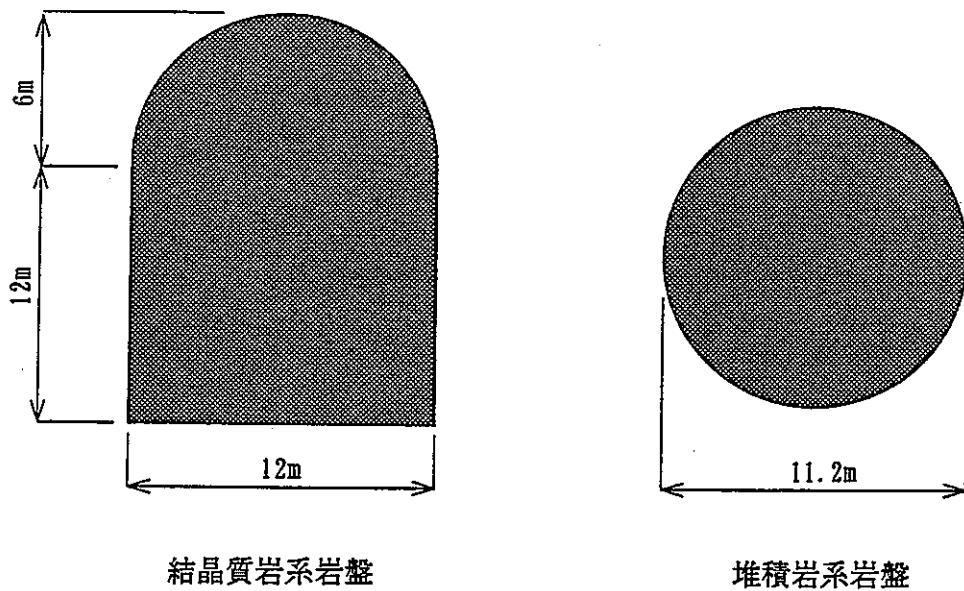


図-3.1 STEP1 の検討断面形状

#### (2) STEP2

STEP2における検討断面は、図-3.2に示すとおりである。TRU廃棄物処分概念検討書<sup>1)</sup>の処分空洞断面には緩衝材に施工余裕代が考慮されているが、性能評価上は1mとして考えていることから本検討では実質的な緩衝材1mを考慮する。したがって検討断面の廃棄体部の断面積が、レイアウト検討用の処分空洞断面より若干大きくなる。

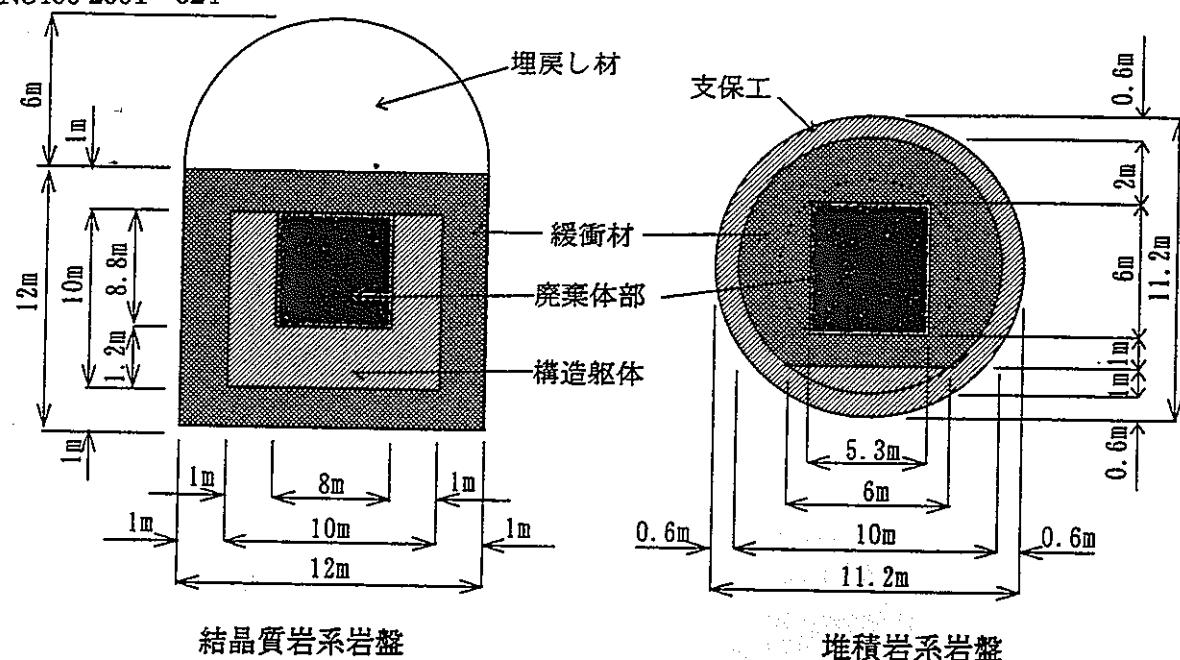


図-3.2 STEP2 の検討断面形状

### 3.4 解析ケース

#### (1)STEP1

STEP1 では内容物の弾性係数を 0~100MPa の間で各岩盤に対して 4 ケース、全 8 ケース設定する。

#### (2)STEP2

STEP2 の解析ケースは、以下に記すように各岩盤に対して 2 ケース、全 4 ケースとする。() 内は、ケース No. を示し、“A”は結晶質岩系岩盤、“B”は堆積岩系岩盤を示す。

- 結晶質岩系岩盤

- ①基本ケース(A2-1)

- ②廃棄体部の弾性係数を緩衝材と同じ値にした場合(A2-2)

- 堆積岩系岩盤

- ①基本ケース(B2-1)

- ②廃棄体部の弾性係数を緩衝材と同じ値にした場合(B2-2)

### 3.5 解析条件

#### (1)処分深度

結晶質岩系岩盤、堆積岩系岩盤ともに 500m とする。

## (2) 側圧係数

側圧係数は、地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>8)</sup>と同様に次式に従うものとして、深度500mにおいて1.1とする。

$$K = 163/h + 0.74$$

ここに、K：側圧係数(–), h：処分深度(m)

## (3) 人工バリア物性値

## a. STEP1

表-3.2にSTEP1の各解析ケースにおいて適用する人工バリアの物性値を整理する。

弾性係数は、0～100MPaの間で桁で感度解析的に設定した値である。100MPaという弾性係数は、緩衝材の仕様として検討された乾燥密度1.8g/cm<sup>3</sup>のペントナイト単体(クニゲルV1)の飽和時における値に相当する<sup>10)</sup>。また、ポアソン比に関しては、既存の研究例<sup>10)</sup>を参考にペントナイトに対する値を適用したものである。

## b. STEP2

表-3.3にSTEP2の各解析ケースにおいて適用する人工バリアの物性値を整理する。支保工を除いて基本ケース(A2-1、B2-1)で設定されている物性値は、本研究と平行して実施されているTRU廃棄物処分概念検討書<sup>11)</sup>において採用されている値である。具体的には、以下のとおりである。

緩衝材の弾性係数は、ケイ砂混合(30wt%)ペントナイト(クニゲルV1)の飽和時における試験結果を基に設定した値<sup>8)</sup>である。ポアソン比に関しては、STEP1と同様である。廃棄体部の弾性係数及びポアソン比は、廃棄体パッケージ1個あたりに含まれる鉄筋コンクリート、モルタル(無筋コンクリート)及び廃棄体容器の体積割合により加重平均で算定された値である(表-3.4参照)。埋戻し材の弾性係数及びポアソン比は、TRU廃棄物処分概念検討書<sup>11)</sup>において設定されている上部埋戻し材の値(ペントナイト混合土)を適用したものである。構造躯体の弾性係数及びポアソン比は、コンクリートの設計基準強度を40MPaとしてコンクリート標準示方書(設計編)<sup>12)</sup>に基づき設定した値である。なお、堆積岩系岩盤における支保工については、長期の支保効果を見込むことが困難なため、仮に緩衝材と同様の弾性係数を適用した。

また、廃棄体部及び構造躯体の物性として基本ケース(A2-1、B2-1)の値を適用した場合に緩衝材厚さの減少量が最も大きくなると考えられるが、その影響を確認するために緩衝材と同じ弾性係数とした場合でも解析を行うこととする(A2-2、B2-2)。

表-3.2 STEP1における内容物の物性値

	ケース No.			
	A1-0、B1-0	A1-1、B1-1	A1-2、B1-2	A1-3、B1-3
弹性係数(MPa)	0	1	10	100
ポアソン比	-	0.4	0.4	0.4

表-3.3 STEP2における人工バリアの物性値

	ケース No.				
	A2-1	A2-2	B2-1	B2-2	
緩衝材 (ヘントナイト)	弹性係数(MPa)	3	3	3	3
	ポアソン比	0.4	0.4	0.4	0.4
廃棄体部 (表-3.4 参照)	弹性係数(MPa)	32,300	3	32,300	3
	ポアソン比	0.184	0.184	0.184	0.184
埋戻し材 (ヘントナイト混合土)	弹性係数(MPa)	7.5	7.5	-	-
	ポアソン比	0.4	0.4	-	-
構造躯体 (鉄筋コンクリート)	弹性係数(MPa)	31,000	3	-	-
	ポアソン比	0.2	0.2	-	-
支保工 (鉄筋コンクリート)	弹性係数(MPa)	-	-	3	3
	ポアソン比	-	-	0.2	0.2

表-3.4 廃棄体部の物性値

項目	鉄筋コンクリート		モルタル		廃棄体容器		加重 平均
	物性値	体積(m <sup>3</sup> )	物性値	体積(m <sup>3</sup> )	物性値	体積(m <sup>3</sup> )	
弹性係数(MPa)	36,000	0.854	25,000	0.675	200,000	0.0105	32,300
ポアソン比	0.17	0.854	0.20	0.675	0.30	0.0105	0.184

### (5) 解析モデル図

図-3.3(結晶質岩系岩盤)及び図-3.4(堆積岩系岩盤)に解析モデル図を示す。これらの図は処分坑道の対称性を考慮したモデルとした。

解析モデルの領域は、コンプライアンスの変化領域に対して余裕のあるものでなければならない。したがって、解析モデルの領域は、コンプライアンスの変化領域に影響する岩盤の物性値や解析対象時間によって異なったものとなり、一義的には決定できない。そこで本検討では、コンプライアンスの変化領域が解析領域の 1/3 程度以下となることを解析領域の妥当性判断の目安とした。実際にコンプライアンスの変化領域は、1/3 よりも十分小さな領域であった。なお、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤では、若干解析領域に相違があるが、計算プログラム上の制約等(節点数、要素数)を考慮して試行錯誤した結果であり特別な意味はない。

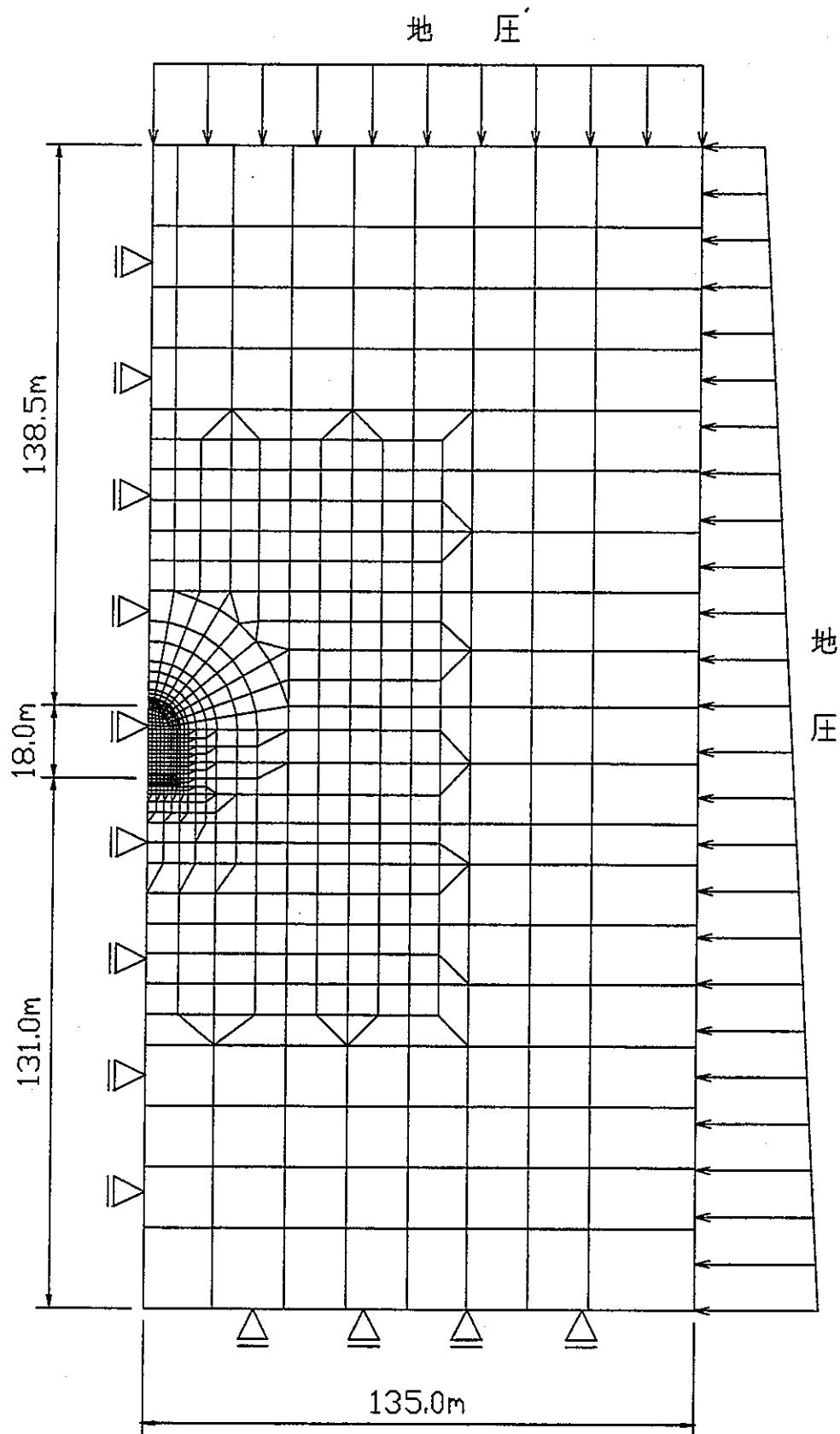


図-3.3 解析モデル図(結晶質岩系岩盤)

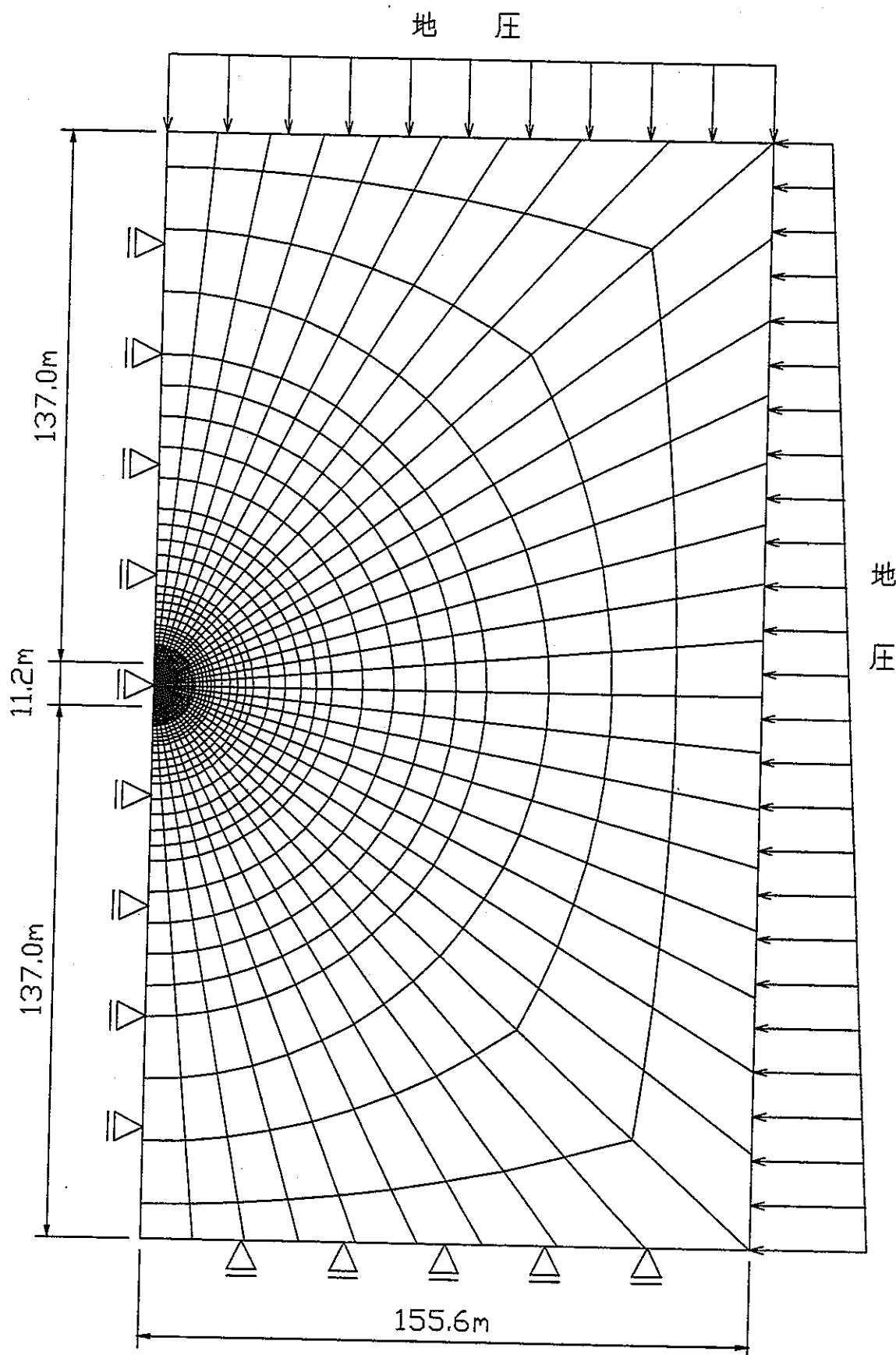


図-3.4 解析モデル図(堆積岩系岩盤)

### 3.6 解析結果及び考察

#### 3.6.1 STEP1

##### (1) 岩盤クリープ変位の経時変化

処分坑道の天端中央に着目し、0～100万年に至る岩盤のクリープ変形量の経時変化を表-3.5(結晶質岩系岩盤)及び表-3.6(堆積岩系岩盤)に示す。また、図-3.5(結晶質岩系岩盤)及び図-3.6(堆積岩系岩盤)に、岩盤クリープ変位の経時変化図を示す。

解析結果より、本検討において対象としている結晶質岩系岩盤では、岩盤のクリープ変形は生じないと判断される。一方、堆積岩系岩盤では、処分空洞内部の剛性(弾性係数)に応じたクリープ変形を生じ、内部の弾性係数が大きいほどクリープ変形を抑える効果があることが明らかとなった。ただし、内部の弾性係数が1MPa程度では、内部が空洞の場合とほぼ同等のクリープ変形を生じ、クリープ変形を抑える効果があまり無いことが分かった。また、内部の弾性係数が100MPa程度になると、かなりクリープ変形を抑える効果があることが分かった。

なお、付録-2に結晶質岩系岩盤では時間1秒、100年、及び100万年、堆積岩系岩盤では時間1秒、1年、100年、1万年及び100万年における周辺岩盤の変形図を示す。

##### (2) コンプライアンス比図

図-3.7～3.14に時間100万年におけるコンプライアンス比図(初期コンプライアンスに対する着目時間におけるコンプライアンスの比)を示す。コンプライアンスとは、弾性係数の逆数のことであるが、コンプライアンスが増加(弾性係数が低下)することは、応力を負担する岩盤の能力が減少していることを表すものである。

結晶質岩系岩盤では、岩盤クリープが発生しなかったため当然のことながらどのケースにおいてもコンプライアンス比図に変化は見られない。

一方、堆積岩系岩盤では、処分空洞内部の剛性(弾性係数)に応じてコンプライアンス比の変化領域が異なっている。内部の弾性係数が大きいほどコンプライアンス比の変化領域が小さくなっている。これは、前述の岩盤クリープ変位の発生の程度に対応する。また、最もコンプライアンス比が変化したB1-0ケースにおいて、その変化領域は処分坑道の外側に水平方向に1D(D:処分坑道の外径)程度、鉛直方向に1D～1.5D程度であった。したがって、本検討において設定した解析モデル領域は十分であったと判断される。

なお、付録-4に結晶質岩系岩盤では時間1秒、100年及び100万年、堆積岩系岩盤では時間1秒、1年、100年、1万年及び100万年におけるコンプライアンス比図を示す。

表-3.5 クリープ変位量の経時変化(結晶質岩系岩盤:STEP1)

時間 (年)	天端中央のクリープ変位量(mm)			
	A1-0 (E=0MPa)	A1-1 (E=1MPa)	A1-2 (E=10MPa)	A1-3 (E=100MPa)
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	0.0	0.0	0.0	0.0
1万	0.0	0.0	0.0	0.0
10万	0.0	0.0	0.0	0.0
100万	0.0	0.0	0.0	0.0

表-3.6 クリープ変位量の経時変化(堆積岩系岩盤:STEP1)

時間 (年)	天端中央のクリープ変位量(mm)			
	B1-0 (E=0MPa)	B1-1 (E=1MPa)	B1-2 (E=10MPa)	B1-3 (E=100MPa)
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	12.8	12.5	10.4	2.3
10	18.1	17.7	14.5	3.4
100	25.2	24.6	19.9	4.7
1000	34.9	33.9	26.8	6.3
1万	49.0	47.3	35.9	8.3
10万	68.4	65.4	47.4	10.5
100万	96.4	90.9	61.8	13.1

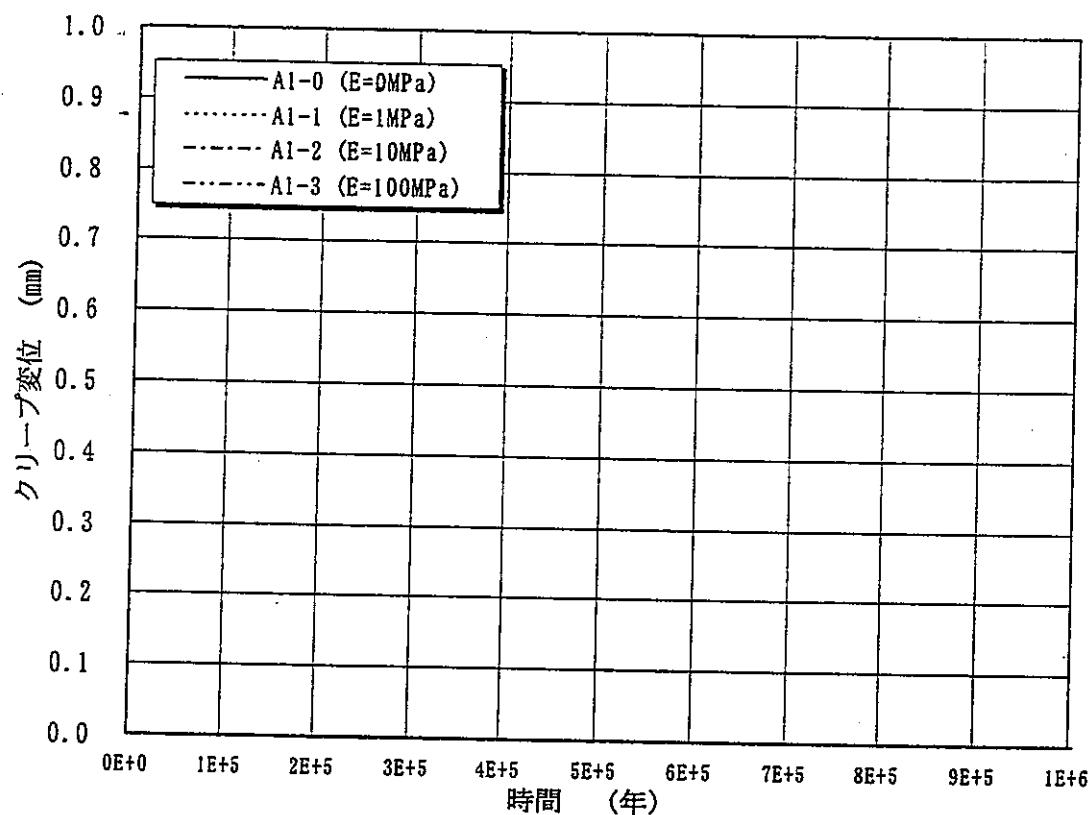


図-3.5 天端中央のクリープ変位量の経時変化図(結晶質岩系岩盤:STEP1)

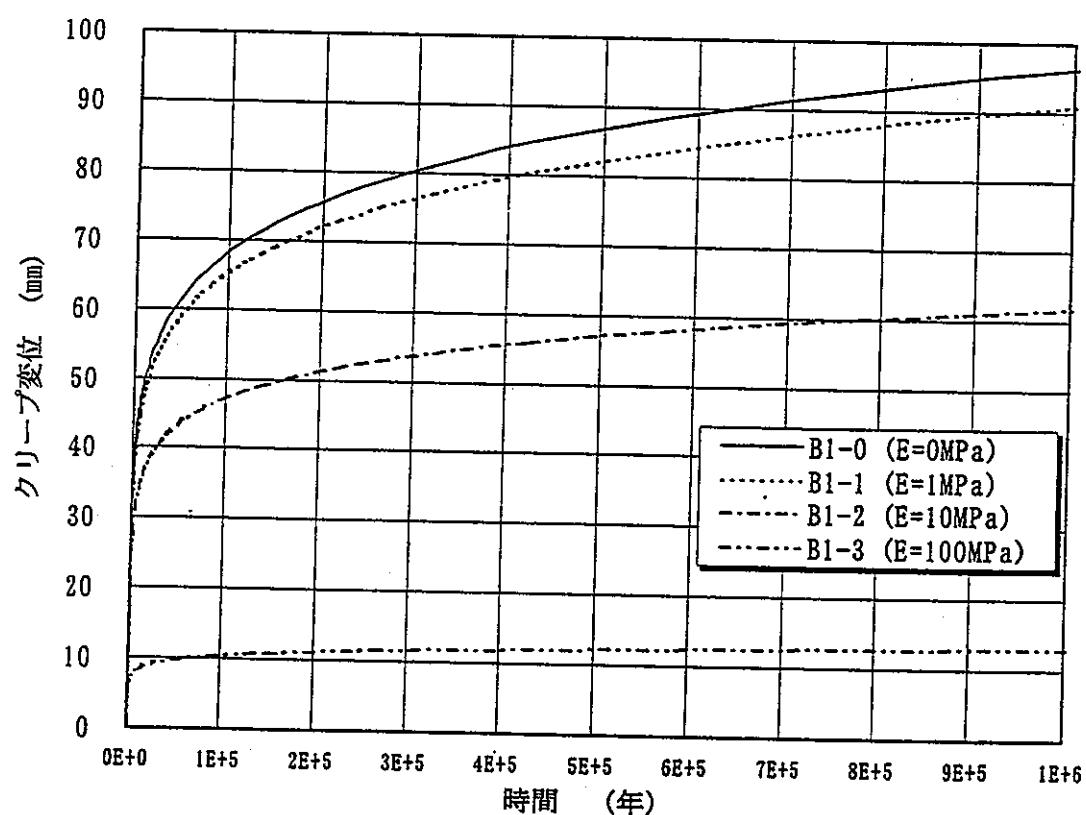


図-3.6 天端中央のクリープ変位量の経時変化図(堆積岩系岩盤:STEP1)

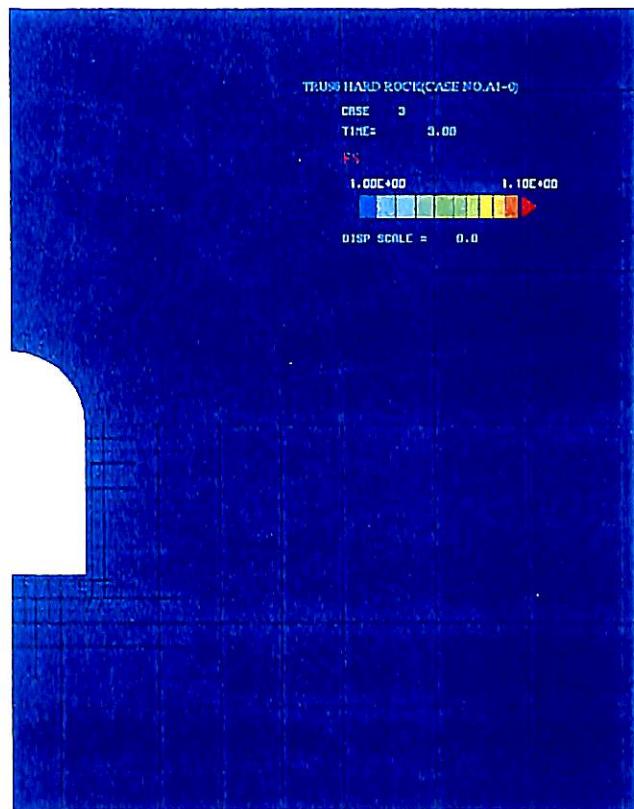


図-3.7 コンプライアンス比図（結晶質岩系岩盤：A1-0、時間 100 万年）

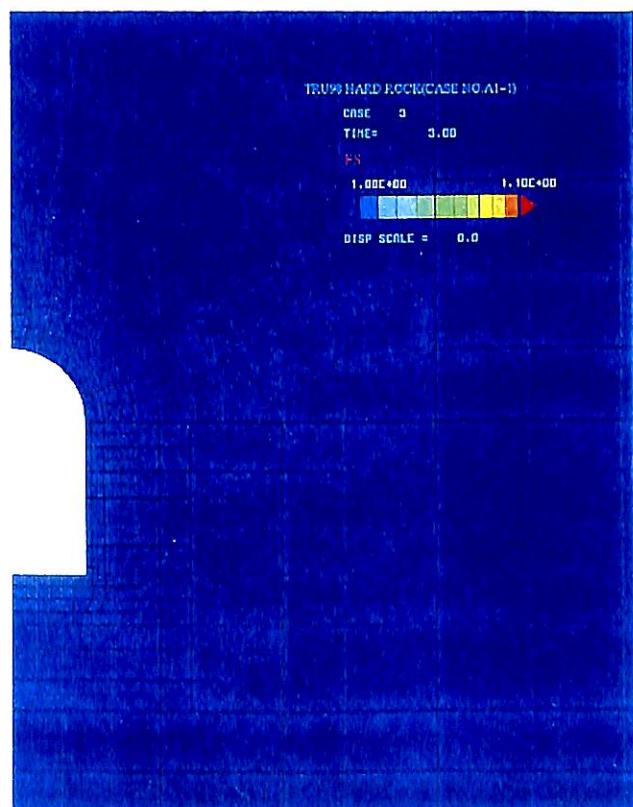


図-3.8 コンプライアンス比図（結晶質岩系岩盤：A1-1、時間 100 万年）

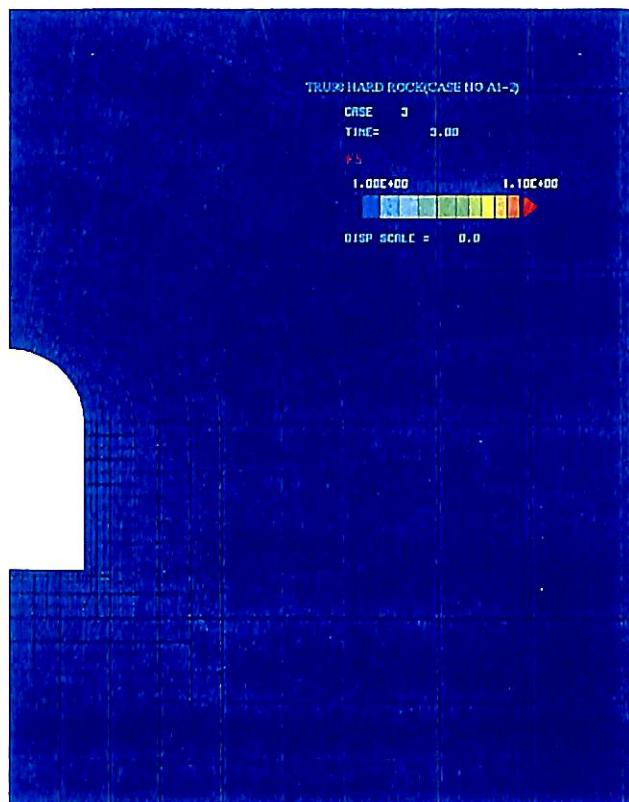


図-3.9 コンプライアンス比図（結晶質岩系岩盤：A1-2、時間 100 万年）

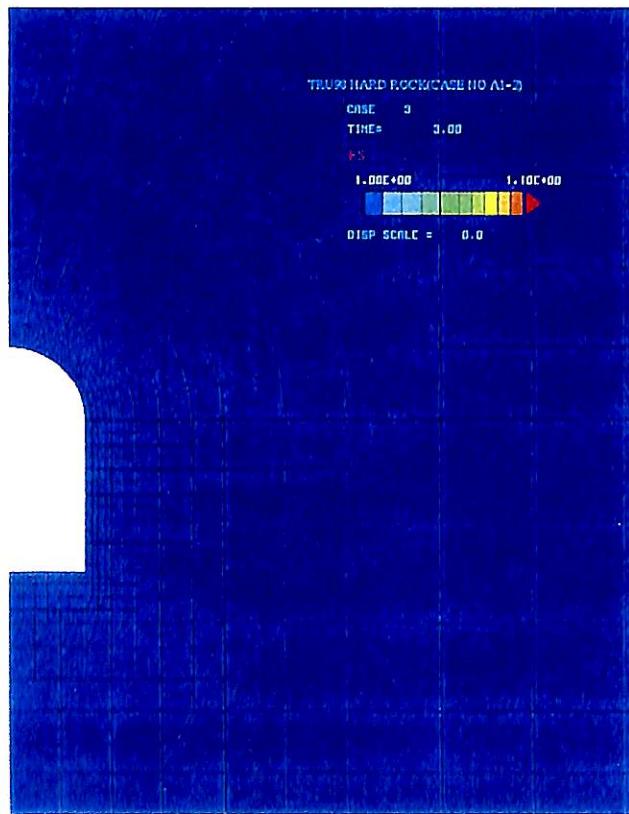


図-3.10 コンプライアンス比図（結晶質岩系岩盤：A1-3、時間 100 万年）

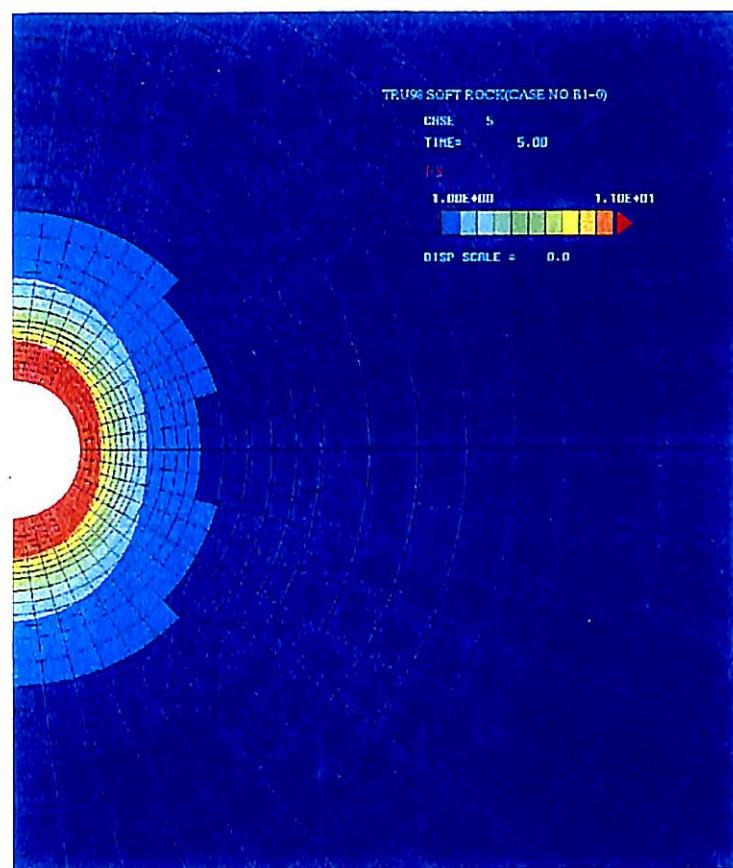


図-3.11 コンプライアンス比図（堆積岩系岩盤：B1-0、時間 100 万年）

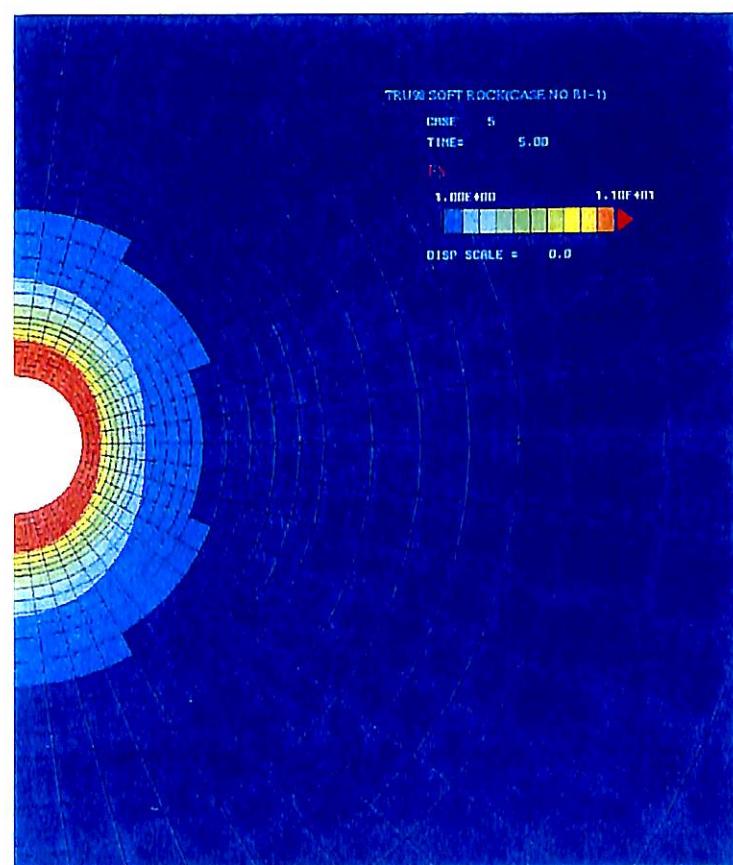


図-3.12 コンプライアンス比図（堆積岩系岩盤：B1-1、時間 100 万年）

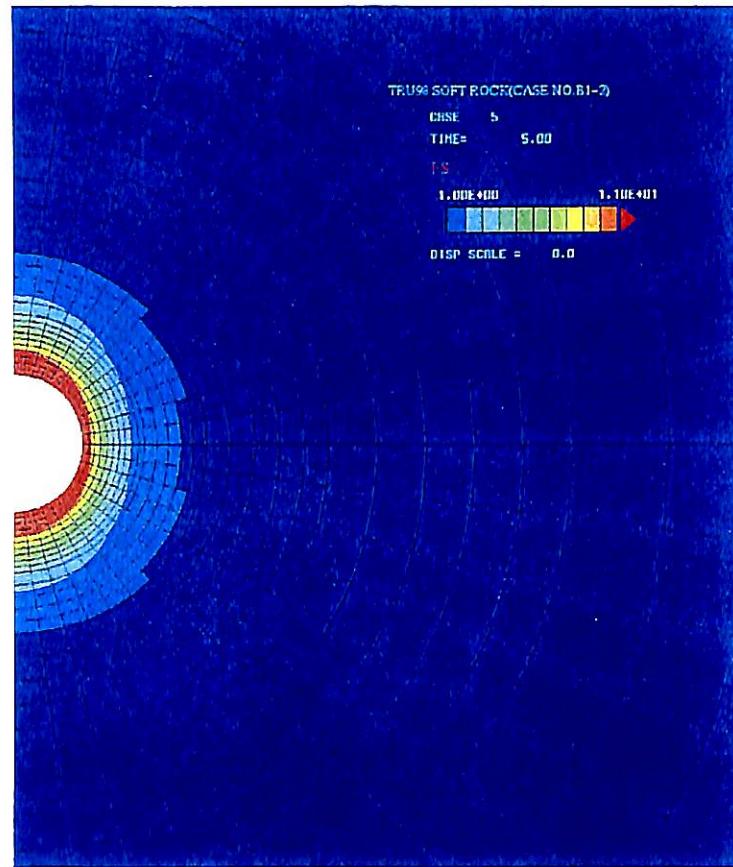


図-3.13 コンプライアンス比図（堆積岩系岩盤：B1-2、時間 100 万年）

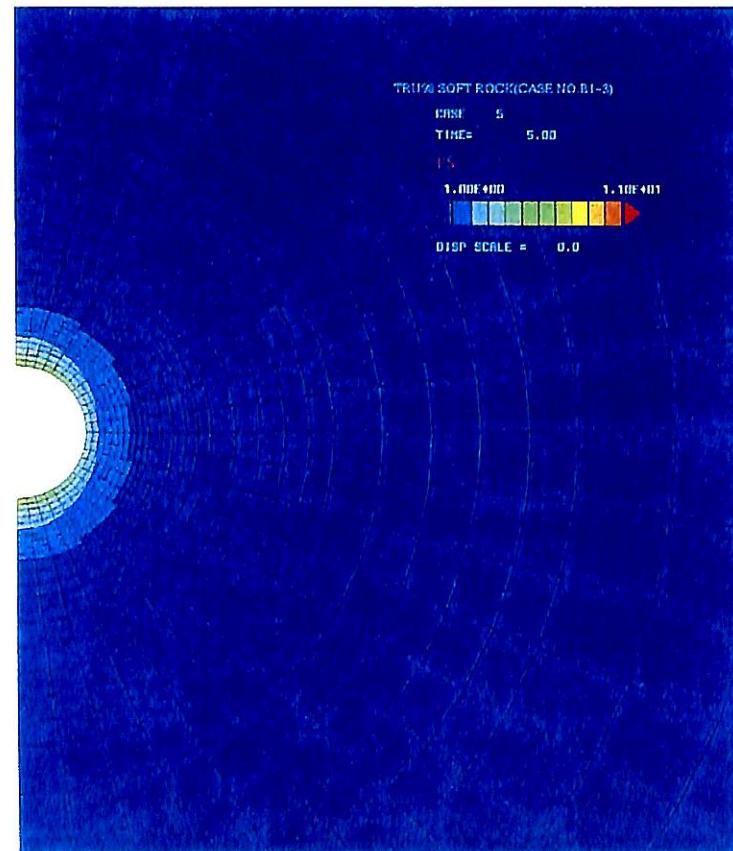


図-3.14 コンプライアンス比図（堆積岩系岩盤：B1-3、時間 100 万年）

### (3)応力の経時変化

図-3.15～図-3.22 は、処分坑道の天端中央から上方の要素に着目した応力分担の経時変化を表示したものである。横軸は、中心から各要素までの距離( $r$ )を処分坑道の半径( $r_0$  : 結晶質岩系岩盤では 6.0m、堆積岩系岩盤では 5.6m)で除すことにより正規化した値を示し、縦軸には各要素における X 方向及び Y 方向の応力を示す。

結晶質岩系岩盤では、コンプライアンスの変化が生じないため応力の再分配も生じない。応力の分布は、解析対象時間内において一定である。

一方、堆積岩系岩盤では、処分空洞内部の剛性(弾性係数)に応じてコンプライアンスの変化が生じるため、応力の再分配も生じている。掘削直後(時間 1 秒)は、処分坑道天端直近部で分担していた応力(X 方向)が、次第に上方へ(図では右側へ)最大値を移行させている。これは、処分坑道に近い岩盤から順にコンプライアンスが増加(弾性係数が低下)し、応力を負担できなくなっているためである。基本的に処分坑道内部の剛性が増加するほど、応力の再分配領域は小さくなり、B1-3 ケースになるとその傾向が顕著に把握できる。

なお、付録-5 に結晶質岩系岩盤では時間 1 秒、100 年及び 100 万年、堆積岩系岩盤では時間 1 秒、1 年、100 年、1 万年及び 100 万年における周辺岩盤の応力図を示す。

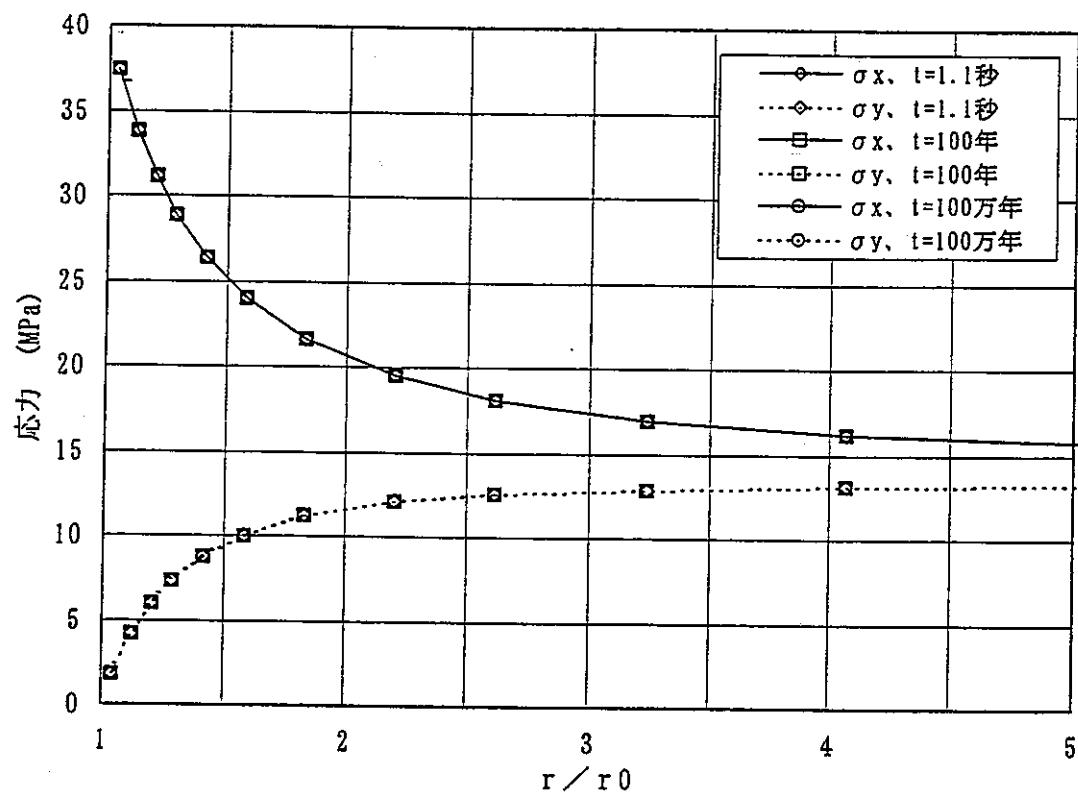


図-3.15 応力分布の経時変化(結晶質岩系岩盤:A1-0)

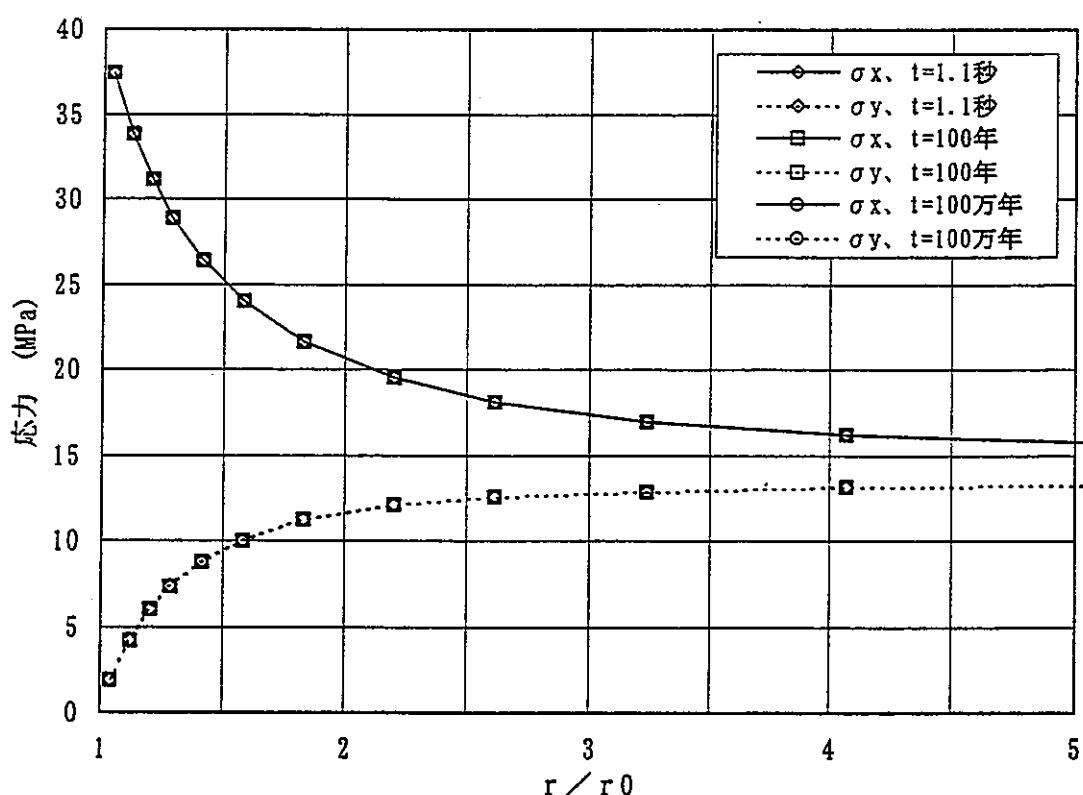


図-3.16 応力分布の経時変化(結晶質岩系岩盤:A1-1)

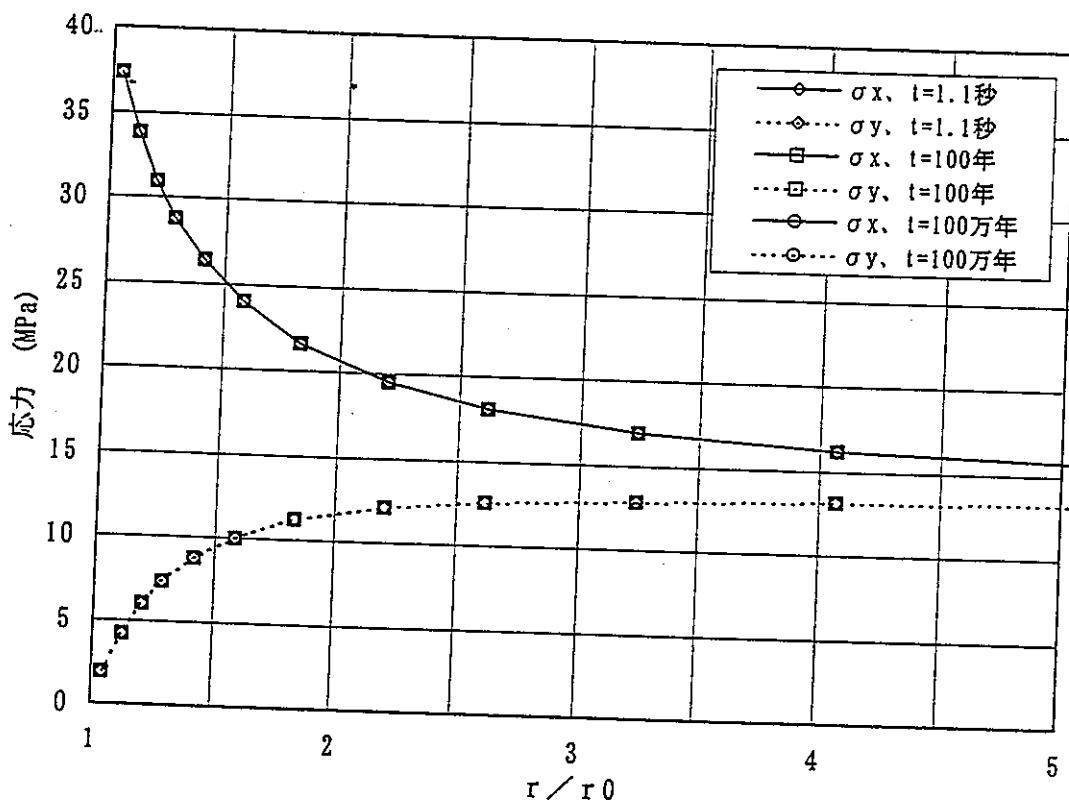


図-3.17 応力分布の経時変化(結晶質岩系岩盤:A1-2)

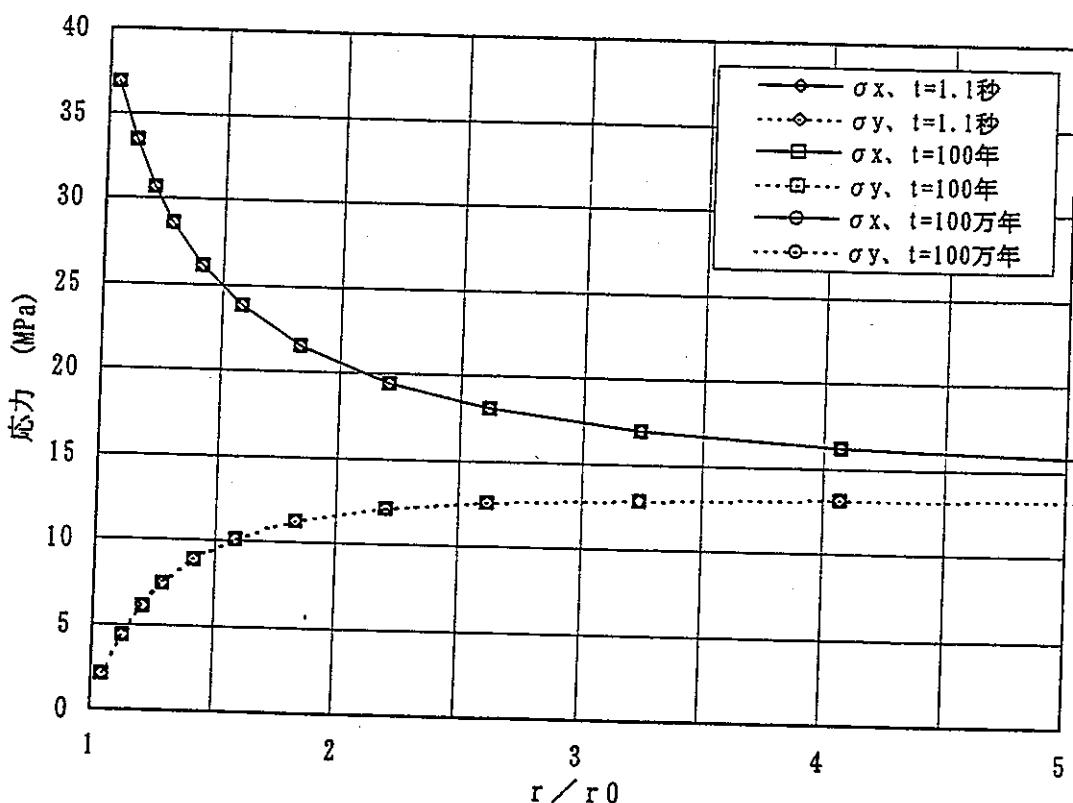


図-3.18 応力分布の経時変化(結晶質岩系岩盤:A1-3)

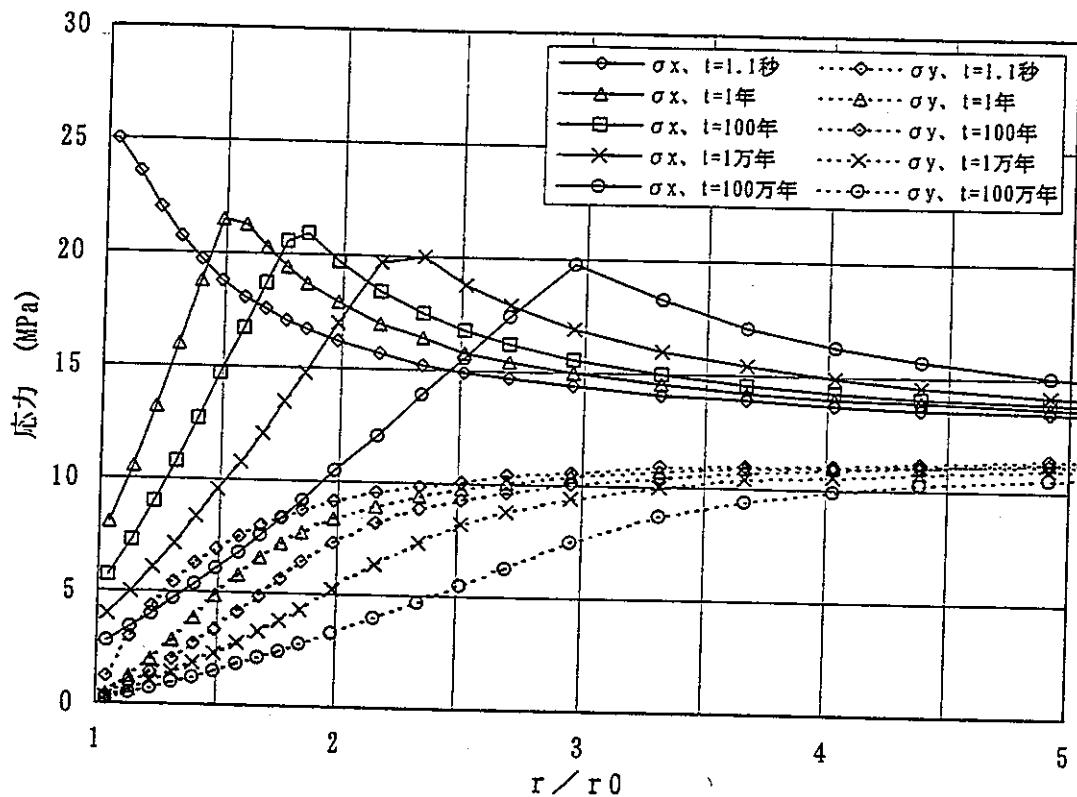


図-3.19 応力分布の経時変化(堆積岩系岩盤:B1-0)

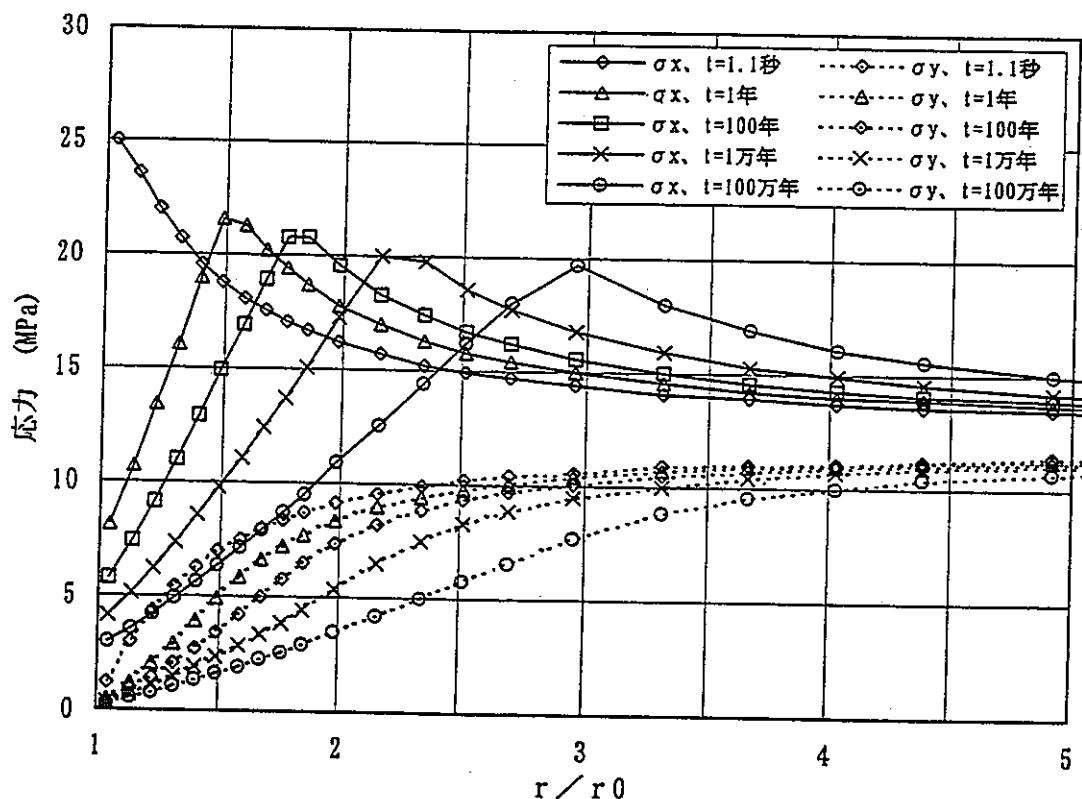


図-3.20 応力分布の経時変化(堆積岩系岩盤:B1-1)

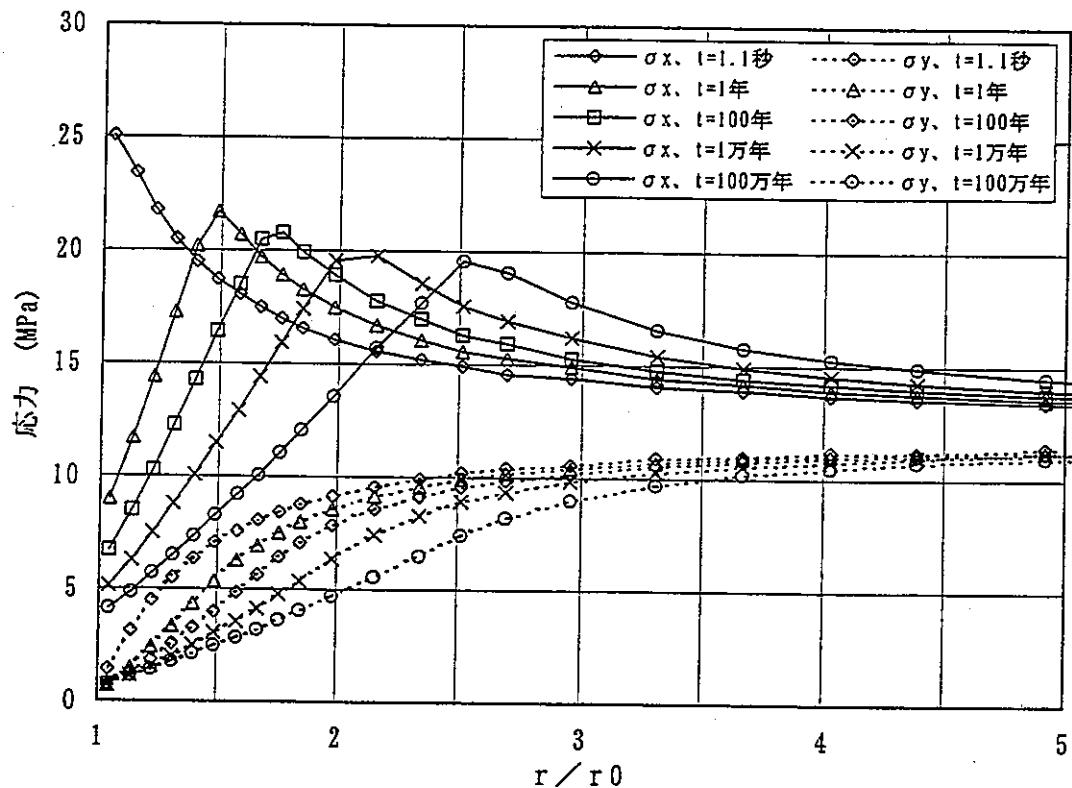


図-3.21 応力分布の経時変化(堆積岩系岩盤:B1-2)

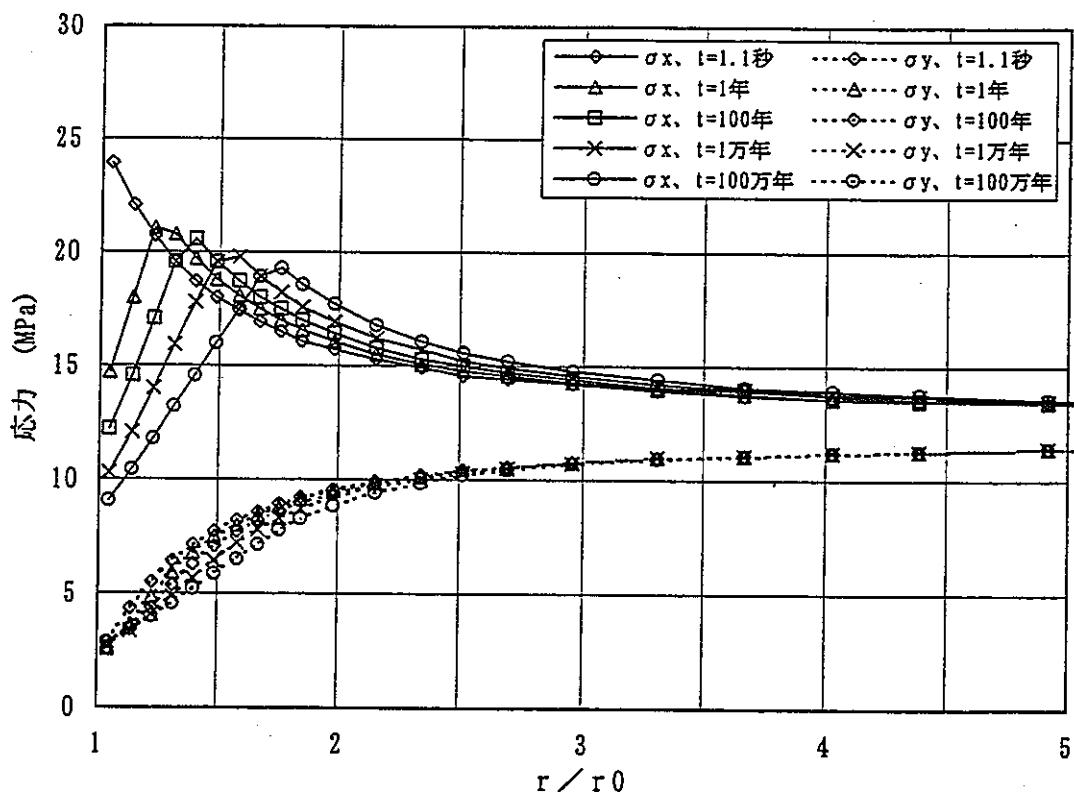


図-3.22 応力分布の経時変化(堆積岩系岩盤:B1-3)

### 3.6.2 STEP2

#### (1) 岩盤クリープ変位の経時変化

処分坑道の天端中央に着目し、0～100万年に至る岩盤のクリープ変形量の経時変化を表-3.7(結晶質岩系岩盤)及び表-3.8(堆積岩系岩盤)に示す。図-3.23(結晶質岩系岩盤)及び図-3.24(堆積岩系岩盤)には、岩盤のクリープ変位の経時変化図を示す。

STEP1 の解析結果からも明らかかなように、本検討において対象としている結晶質岩系岩盤では、岩盤のクリープ変形は生じないと判断される。

一方、堆積岩系岩盤では、岩盤のクリープ変形は、廃棄体部の弾性係数として初期剛性を考慮した場合(B2-1 ケース)の方が、それを緩衝材と同等とみなした場合(B2-2 ケース)と比較して小さくなることが明らかとなった。ただし、その差はあまり大きなものではない。また、STEP1における内部が空の状態の結果(B1-0 ケース)と比較しても、岩盤のクリープ変形量の低減効果は少ない。

なお、付録-2 に結晶質岩系岩盤では時間 1 秒、100 年及び 100 万年、堆積岩系岩盤では時間 1 秒、1 年、100 年、1 万年及び 100 万年における周辺岩盤の変形図を示す。

#### (2) 緩衝材厚さ減少量の経時変化

図-3.25～3.26 は、岩盤のクリープ変形が発生する堆積岩系岩盤に対し、岩盤のクリープ変形に伴い生ずる緩衝材厚さの減少量に着目して経時変化を示したものである。図中には、上部中央(①)、側部中央(②)及び下部中央(③)における変位量を示した。

緩衝材厚さの減少量に着目して解析結果を整理したところ、B2-1 ケースにおける時間 100 万年で最大 5cm 弱の減少量が得られた。B2-1 ケースと B2-2 ケースの結果を比較すると、前者の方が緩衝材の変位量としては大きなものとなっている。これは B2-1 ケースの場合、緩衝材は弾性係数の大きい材料に挟まれており、ひずみが集中するのに対して、B2-2 ケースでは、ひずみが緩衝材、廃棄体部及び支保工に分散したためである。この結果は当初の予想を裏付けるものである。

なお、付録-3 に結晶質岩系岩盤では時間 1 秒、100 年及び 100 万年、堆積岩系岩盤では時間 1 秒、1 年、100 年、1 万年及び 100 万年における処分坑道内の変形図を示す。

表-3.7 クリープ変形量の経時変化(結晶質岩系岩盤:STEP2)

時間 (年)	天端中央のクリープ変位量(mm)	
	A2-1 (廃棄体部:初期剛性)	A2-2 (廃棄体部:緩衝材相当剛性)
0	0.0	0.0
1	0.0	0.0
10	0.0	0.0
100	0.0	0.0
1000	0.0	0.0
1万	0.0	0.0
10万	0.0	0.0
100万	0.0	0.0

表-3.8 クリープ変形量の経時変化(堆積岩系岩盤:STEP2)

時間 (年)	天端中央のクリープ変位量(mm)	
	B2-1 (廃棄体部:初期剛性)	B2-2 (廃棄体部:緩衝材相当剛性)
0	0.0	0.0
1	11.9	12.4
10	16.8	17.4
100	23.2	24.2
1000	31.7	33.3
1万	43.6	46.2
10万	59.1	63.5
100万	80.2	87.7

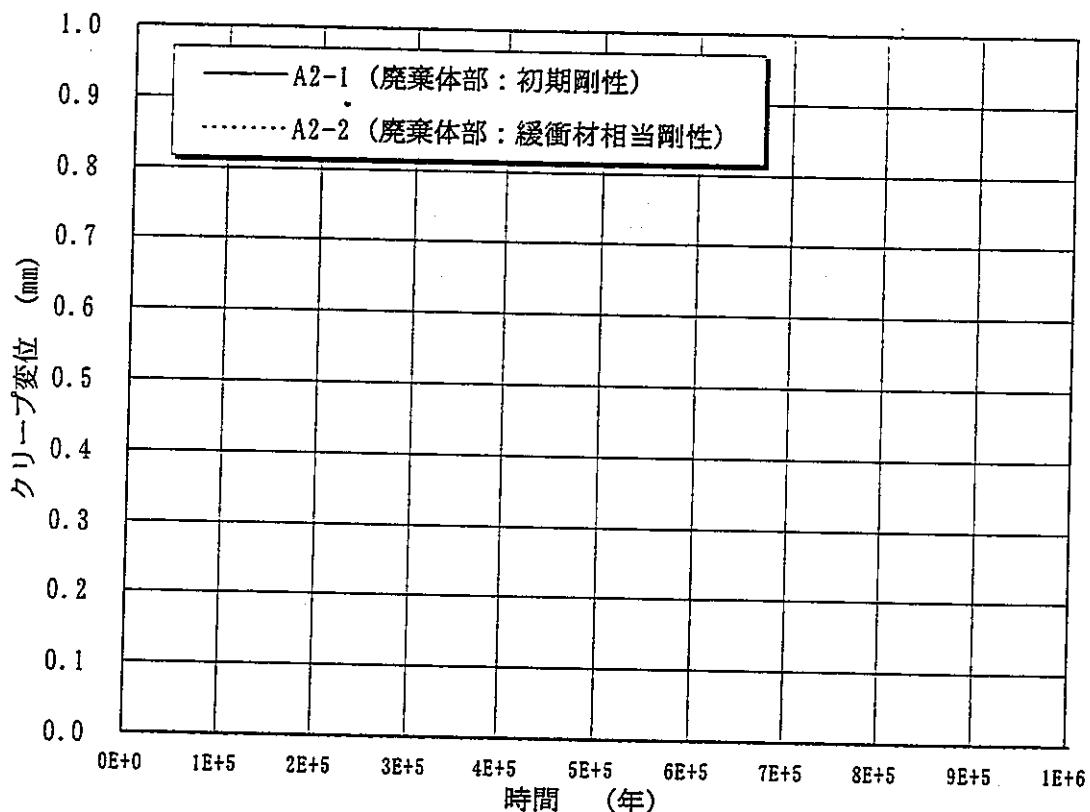


図-3.23 天端中央のクリープ変形量の経時変化図(結晶質岩系岩盤:STEP2)

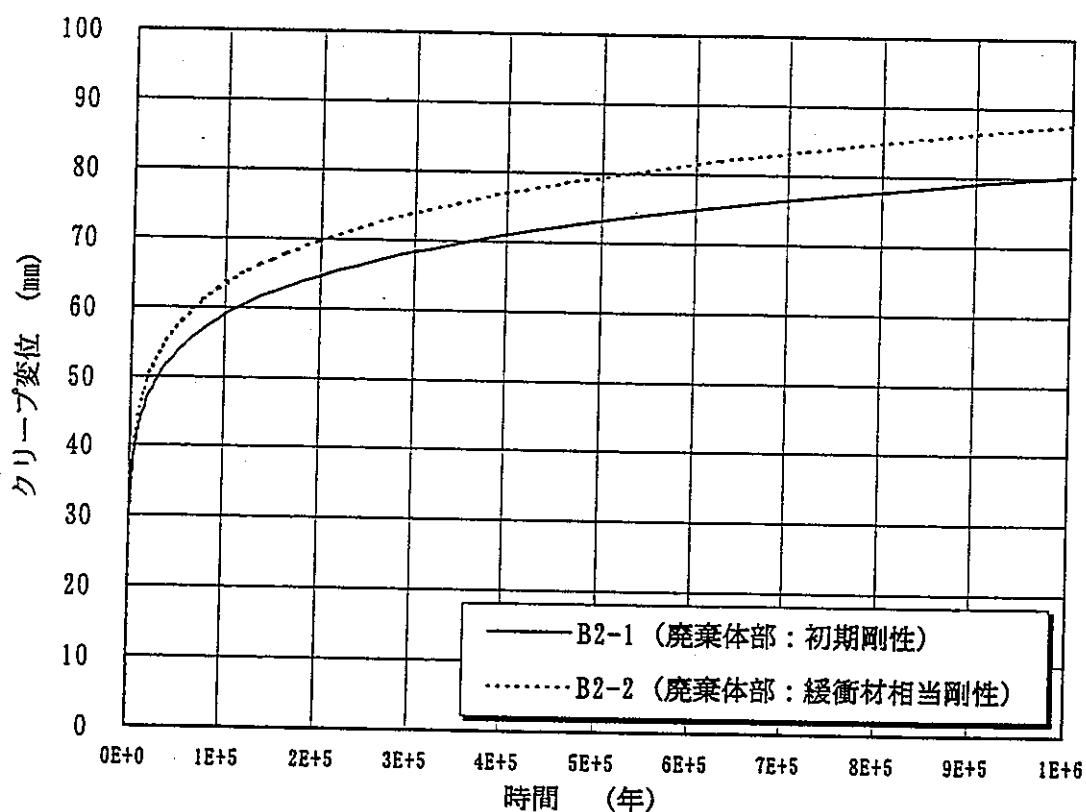


図-3.24 天端中央のクリープ変形量の経時変化図(堆積岩系岩盤:STEP2)

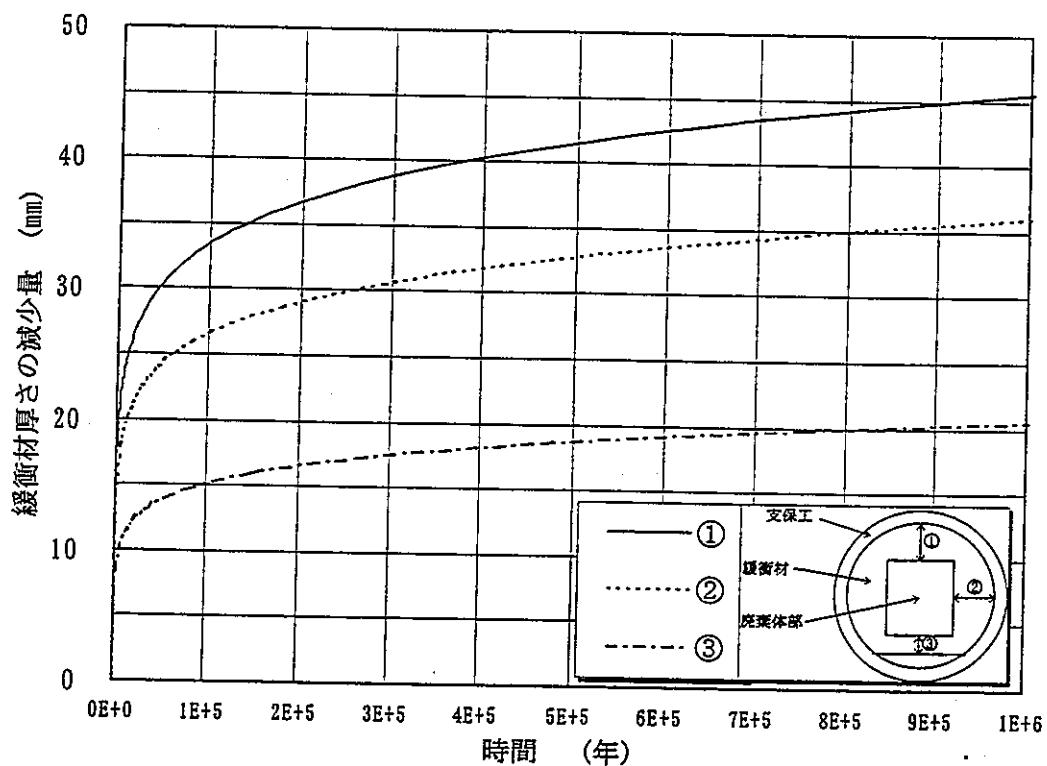


図-3.25 緩衝材厚さの減少量の経時変化図(堆積岩系岩盤:B2-1 ケース)

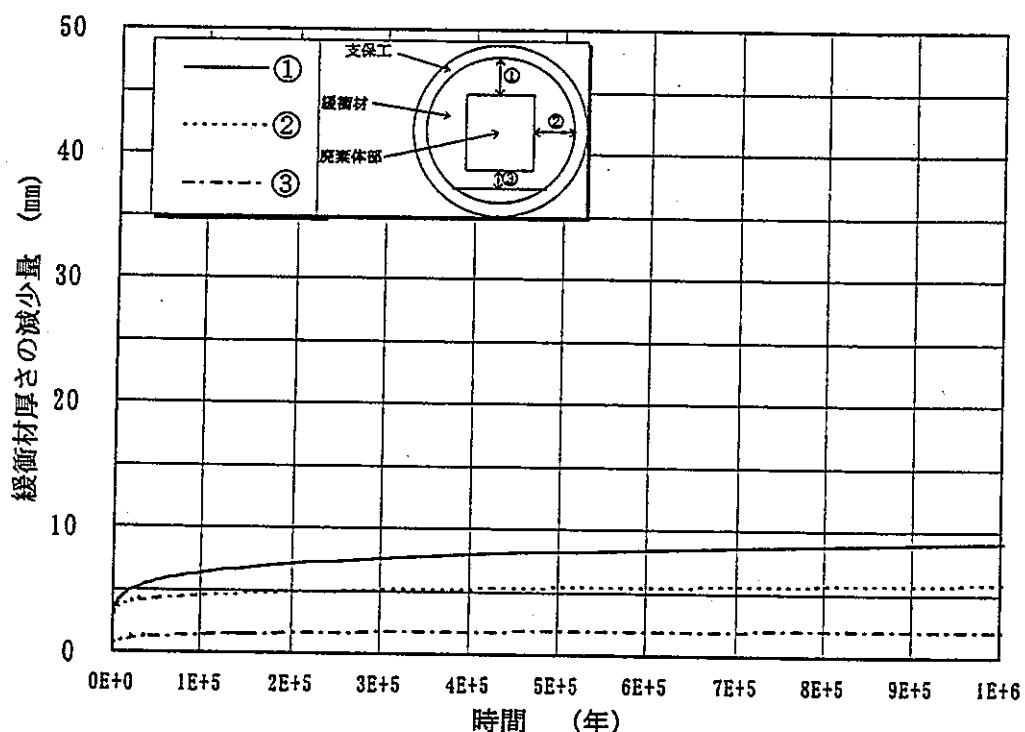


図-3.26 緩衝材厚さの減少量の経時変化図(堆積岩系岩盤:B2-2 ケース)

### (3)コンプライアンス比図

図-3.27～図-3.30 に時間 100 万年におけるコンプライアンス比図（初期コンプライアンスに対する着目時間におけるコンプライアンスの比）を示す。

結晶質岩系岩盤では、岩盤クリープが発生しないため当然のことながらどのケースにおいてもコンプライアンス比図に変化は見られない。

一方、堆積岩系岩盤では、廃棄体部の剛性(弾性係数)に応じてコンプライアンス比の変化領域が若干異なっている。これは、前述の岩盤クリープ変位の発生の程度に対応しており、岩盤クリープの変位量が若干大きい B2-2 ケースの方がコンプライアンス比の変化領域も僅かに大きくなっている。

なお、付録-4 に結晶質岩系岩盤では時間 1 秒、100 年及び 100 万年、堆積岩系岩盤では時間 1 秒、1 年、100 年、1 万年、100 万年におけるコンプライアンス比図を示す。

### (4)応力の経時変化

図-3.31～図-3.34 は、処分坑道の天端中央から上方の要素に着目した応力分担の経時変化を表示したものである。横軸は、中心から各要素までの距離を処分坑道の半径（結晶質岩系岩盤では 6.0m、堆積岩系岩盤では 5.6m）で除すことにより正規化した値を示し、縦軸には各要素における X 方向および Y 方向の応力を示す。

結晶質岩系岩盤では、コンプライアンスの変化が生じないため応力の再分配も生じない。応力の分布は、解析対象時間内において一定である。

一方、堆積岩系岩盤では、コンプライアンスの変化が生じるため、応力の再分配も生じている。掘削直後(時間 1 秒)は、処分坑道天端直近部で分担していた応力(X 方向)が、次第に上方へ(図では右側へ)最大値を移行させている。これは、処分坑道に近い岩盤から順にコンプライアンスが増加(弾性係数が低下)し、応力を負担できなくなっているためである。解析ケースによる差異は、顕著に現れていない。

なお、付録-5 に結晶質岩系岩盤では時間 1 秒、100 年及び 100 万年、堆積岩系岩盤では時間 1 秒、1 年、100 年、1 万年及び 100 万年における周辺岩盤の応力図を示す。

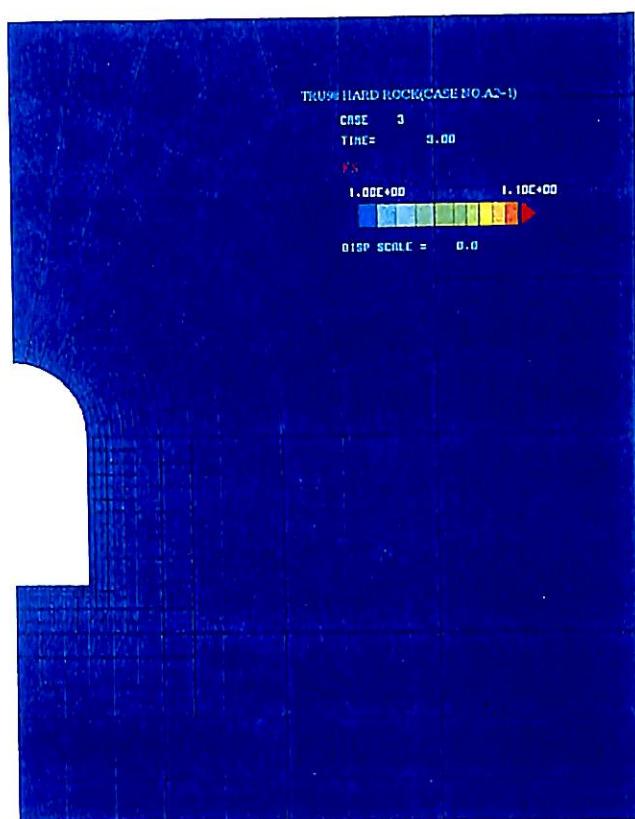


図-3.27 コンプライアンス比図（結晶質岩系岩盤：A2-1、時間 100 万年）

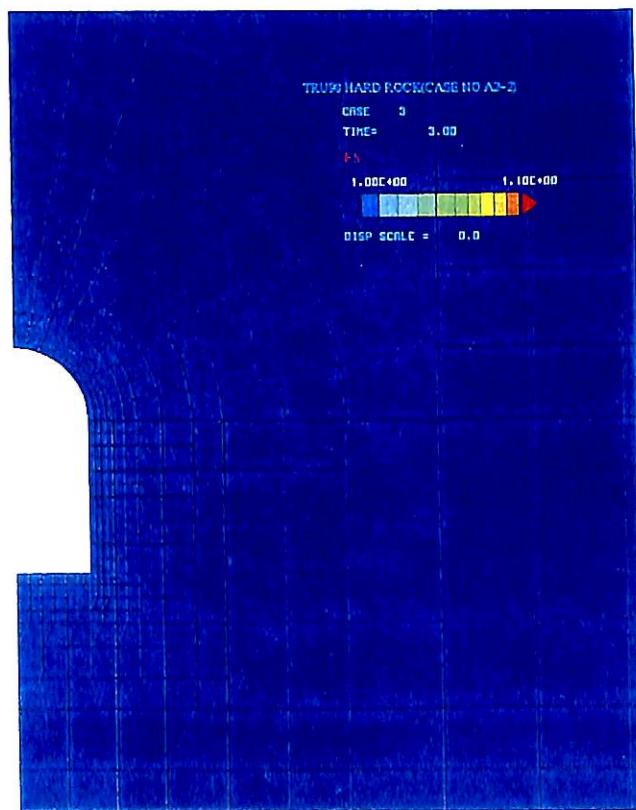


図-3.28 コンプライアンス比図（結晶質岩系岩盤：A2-2、時間 100 万年）

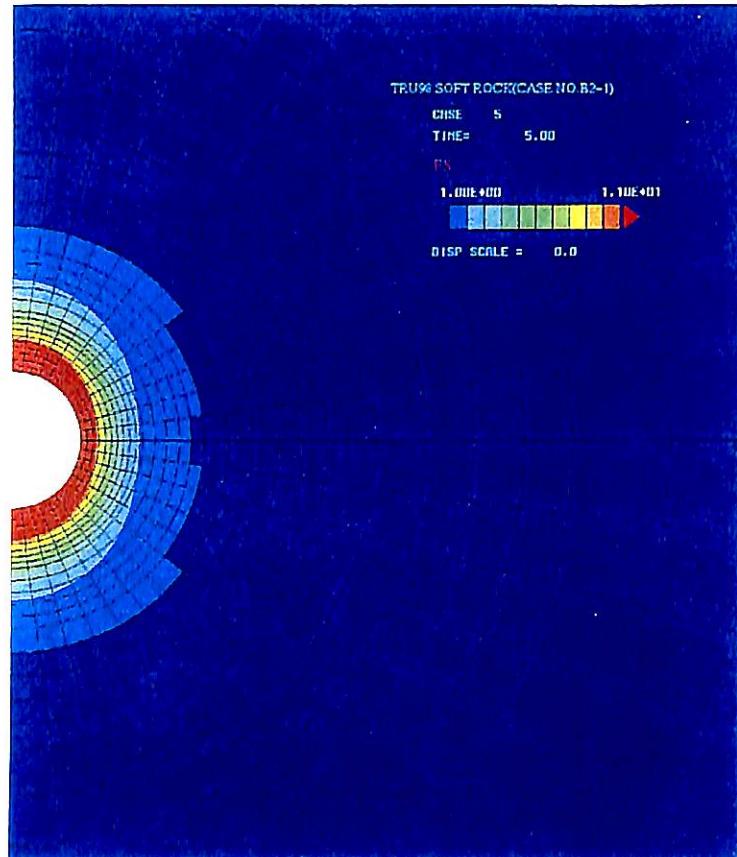


図-3.29 コンプライアンス比図（堆積岩系岩盤：B2-1、時間 100 万年）

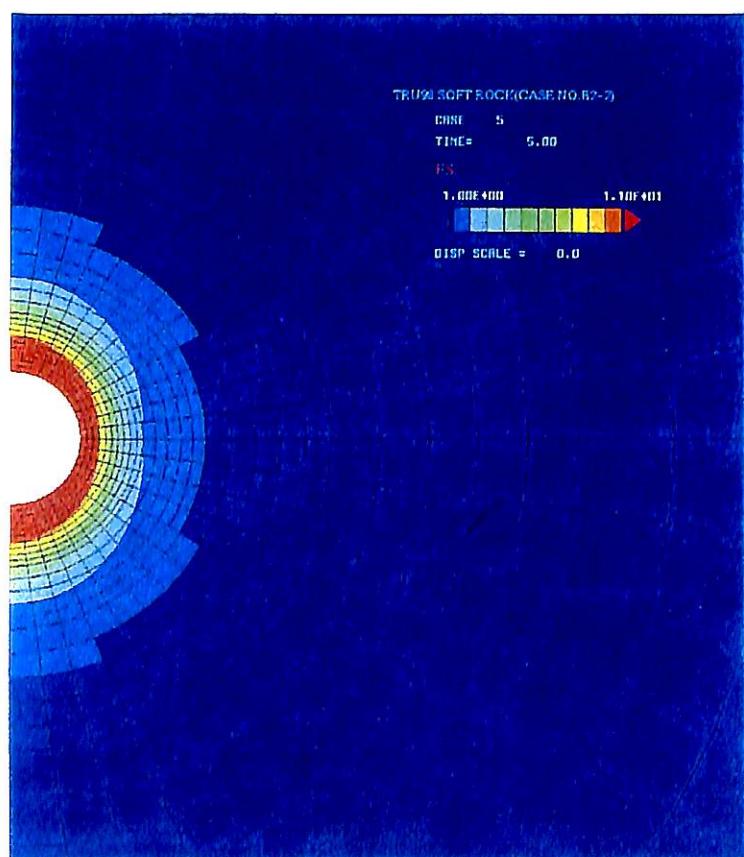


図-3.30 コンプライアンス比図（堆積岩系岩盤：B2-2、時間 100 万年）

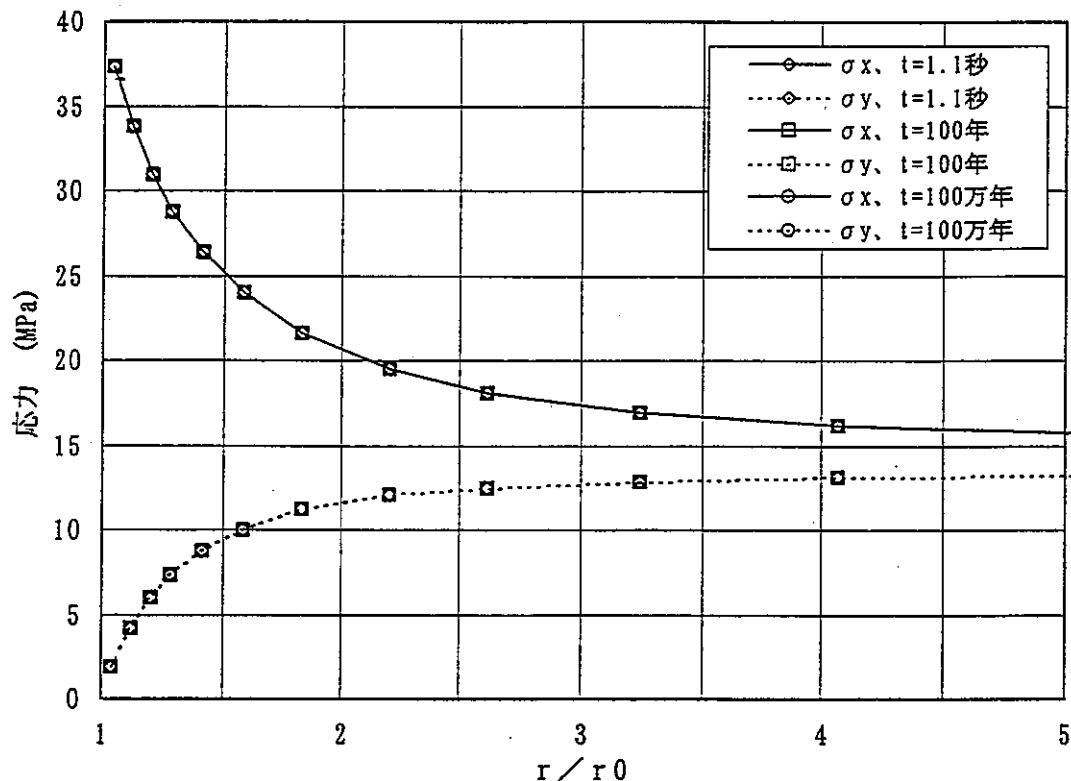


図-3.31 応力分布の経時変化(結晶質岩系岩盤:A2-1)

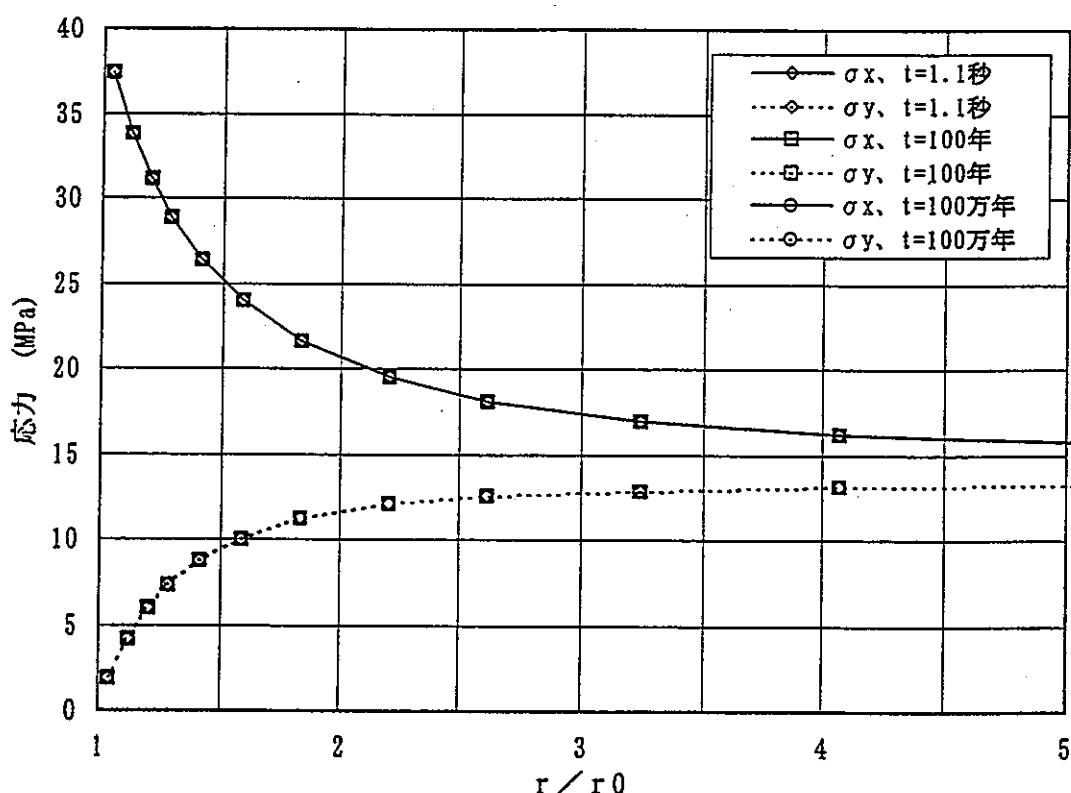


図-3.32 応力分布の経時変化(結晶質岩系岩盤:A2-2)

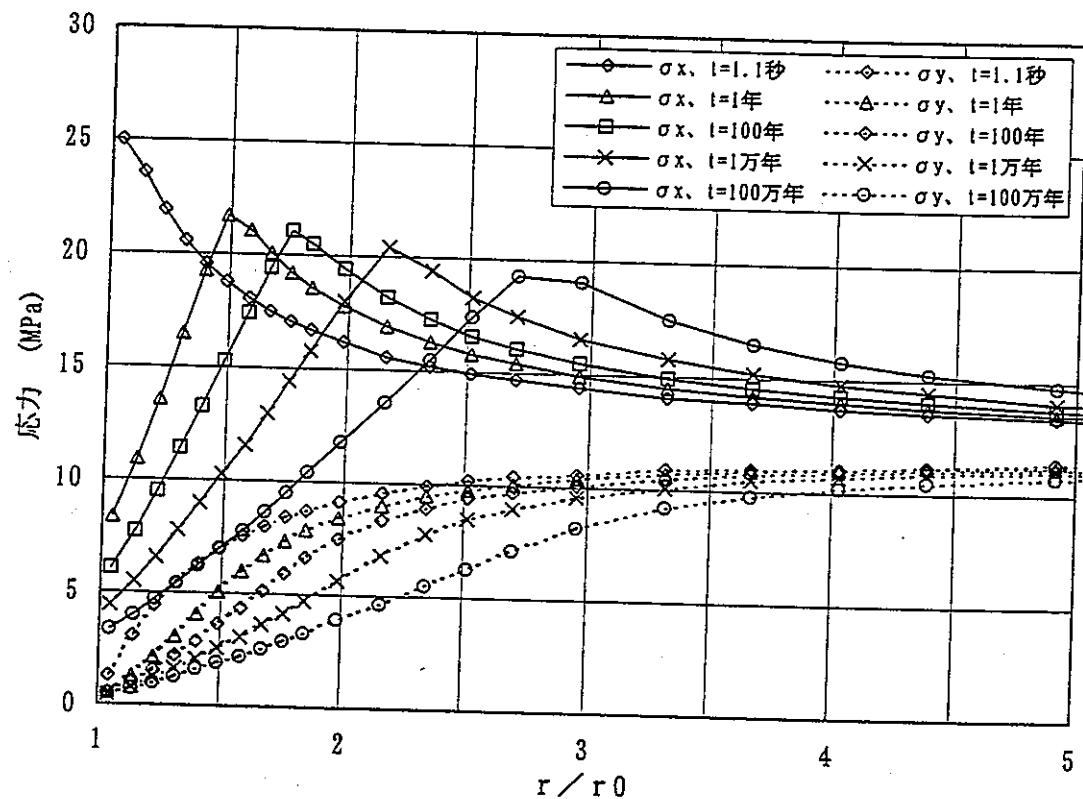


図-3.33 応力分布の経時変化(堆積岩系岩盤:B2-1)

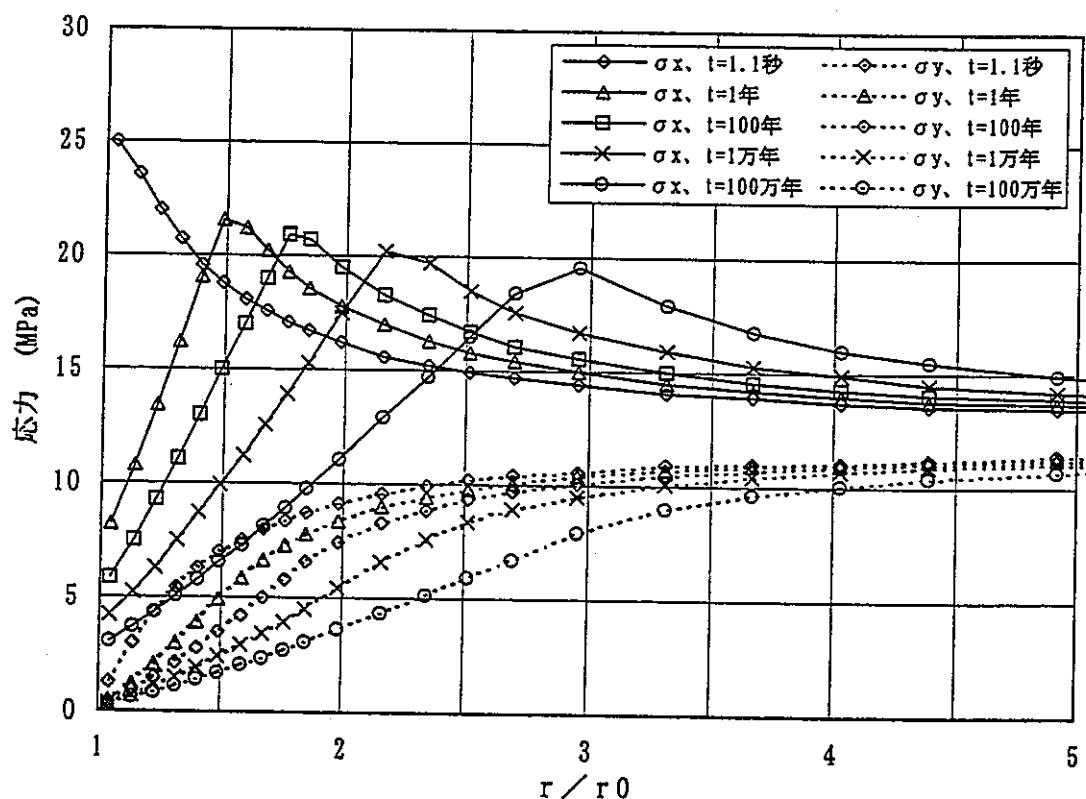


図-3.34 応力分布の経時変化(堆積岩系岩盤:B2-2)

#### 4 おわりに

本検討において対象とした結晶質岩系岩盤では、時間 100 万年においても岩盤のクリープ変形は発生しない。したがって、人工バリア、特に緩衝材に対する影響は無いと判断される。

堆積岩系岩盤では、内容物を単一の物性でモデル化した STEP1 の解析において処分坑道内部の剛性(弾性係数)に応じて岩盤のクリープ変形に差異が生じることが明らかとなった。内部に 100MPa 程度の弾性係数が見込めれば本検討において対象とした堆積岩系岩盤では、時間 100 万年で 10mm 強程度とかなり小さな岩盤クリープ変形に抑えられることが明らかとなった。

STEP2 の人工バリア構成を考慮した解析においては、80~90mm の岩盤クリープ変形が生じることが明らかとなった。また、その時の緩衝材に生じる厚さの減少量は、最大でも 45mm 程度であった。この程度の岩盤クリープ変形や緩衝材厚さの減少量であれば、緩衝材に考慮される余裕しろの範囲(20cm 程度)でカバーできるものと考えられ、緩衝材厚さとして 1m を確保できるものと判断される。

図-3.35 は、処分坑道内部の弾性係数と岩盤のクリープ変位の関係を時間 100 万年において整理したものである。また、STEP2 の結果においては、緩衝材の弾性係数に基づきプロットした。この図から、詳細な人工バリア構成をモデル化した STEP2 の結果が、処分坑道内部に緩衝材の弾性係数を均一に定義した STEP1 の結果上にプロットされていることがわかる。よって、岩盤のクリープ変位は、詳細な人工バリア構成をモデル化せずとも、処分坑道内部に緩衝材の弾性係数を均一に定義することで大略把握できることが明らかとなった。

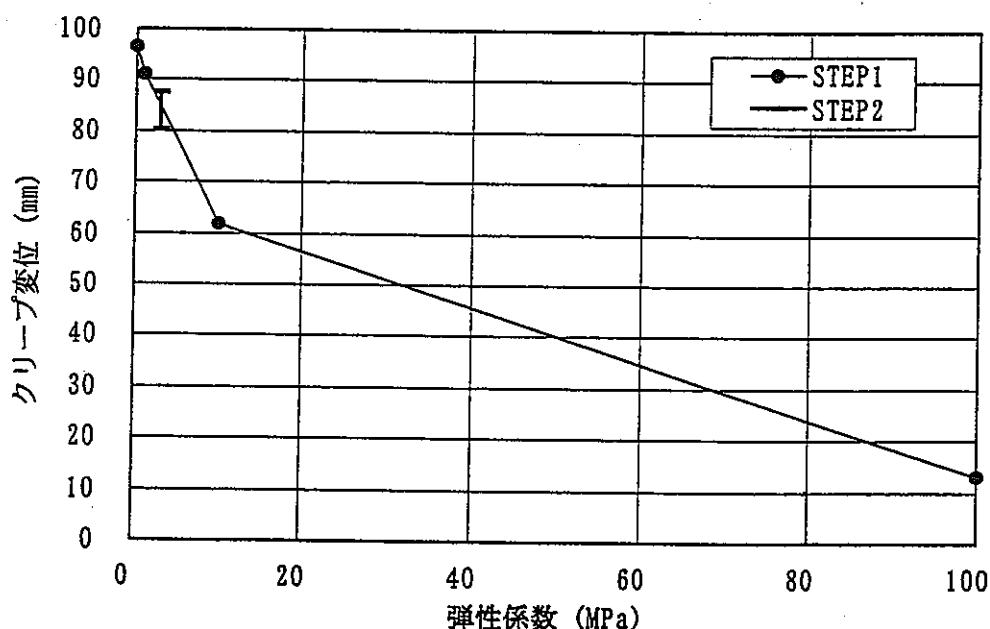


図-3.35 弾性係数と岩盤クリープ変位の関係(堆積岩系岩盤、時間 100 万年)

本検討では、処分坑道の内容物として線形弾性体あるいは空として解析を行った。結果としては保守的であるとも言えるが、内容物の体積圧縮に伴う剛性の増加を取り込むことによってより現実に近いと考えられる解析が可能となる。そのためには、内容物、特に緩衝材の体積圧縮に伴う剛性の増加をどのようにモデル化するかが課題となる。また、内容物の剛性増加を考慮できるように解析プログラムを改良する必要もある。

大久保モデルのパラメータ  $m, n_0$  に関して、今回の解析では既存の知見に基づき設定した。今後は、より具体的なサイトが選定された場合を想定し、実岩盤を対象にした試験によるパラメータ設定技術の獲得が課題となる。また信頼できるデータ( $m, n_0$ )の積み重ねといったことも重要なテーマと考えられる。

### 謝 辞

本研究を実施するに当たっては、東京大学の大久保教授殿や鹿島建設株式会社の多数の方々に多大な御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1)共同作業チーム：“TRU 廃棄物処分概念検討書”,JNC TY1400 2000-001,(2000)
- 2)土木学会：“大規模地下空洞の情報化施工”,p21～24,(1996)
- 3)大久保誠介、他：“非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション”,日本鉱業誌,vol103,[1191],p293～296,(1987)
- 4)大久保誠介、他：“一軸圧縮応力下における時間依存性挙動”,日本鉱業会誌,vol103, [1189] , p177～181,(1987)
- 5)大久保誠介：“コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討”,資源・素材学会誌,vol108, p601～606,(1992)
- 6)緒方義弘、他：“粘弾性的挙動を示す岩盤坑道掘削に伴う時間依存性変形のシミュレーション”,資源と素材,vol110,p1082～1088,(1994)
- 7)大久保誠介、他：“コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”,資源と素材,vol113, p561～564,(1997)
- 8)核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ-”,JNC TN1400 99-022,pIII-15-17,(1999)
- 9)大久保誠介、他：“非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション”,資源と素材,vol109,p209～214,(1993)
- 10)動力炉・核燃料開発事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 一平成3年度”,PNC TN1410 92-081,(1992)
- 11)土木学会：平成8年度制定 コンクリート標準示方書 設計編,1版,丸善,(1996)

## 付録-1 解析コードの検証

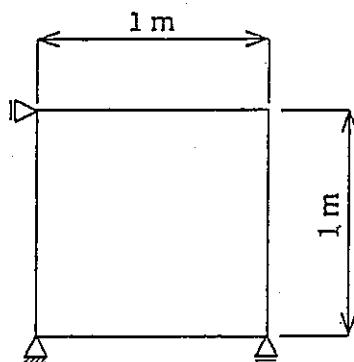
## 1 はじめに

使用した解析コードは、鹿島建設（株）所有の有限要素法による構造解析コードにコンプライアンス可変型構成方程式(大久保モデル)を組み込んだものである。ここでは、この解析コードが正常にコンプライアンス可変型構成方程式を解いているかを後述の方法により確認するとともに、大久保教授より受領したコンプライアンス可変型構成方程式のコアとなる部分のプログラムを示す。

## 2 方法

本検討に使用した解析コードによる結果と式(2.1)～式(2.6)を手計算によって解いた値を比較し、両者の一致を確認することで解析コードの検証とした。計算結果の比較対象は、コンプライアンス可変型構成方程式の特色である強度破壊点以降の領域における応力-ひずみ曲線の形状とした。

モデルは、単純化のため1要素モデル(付図-1.1)とし、付表-1.1に示す初期物性を与えた。時間刻みは、1秒とした。また、計算にあたっては、ひずみ速度を $0.01/t_0(1/s)$ 、 $t_0=120s$ と設定することにより行った。



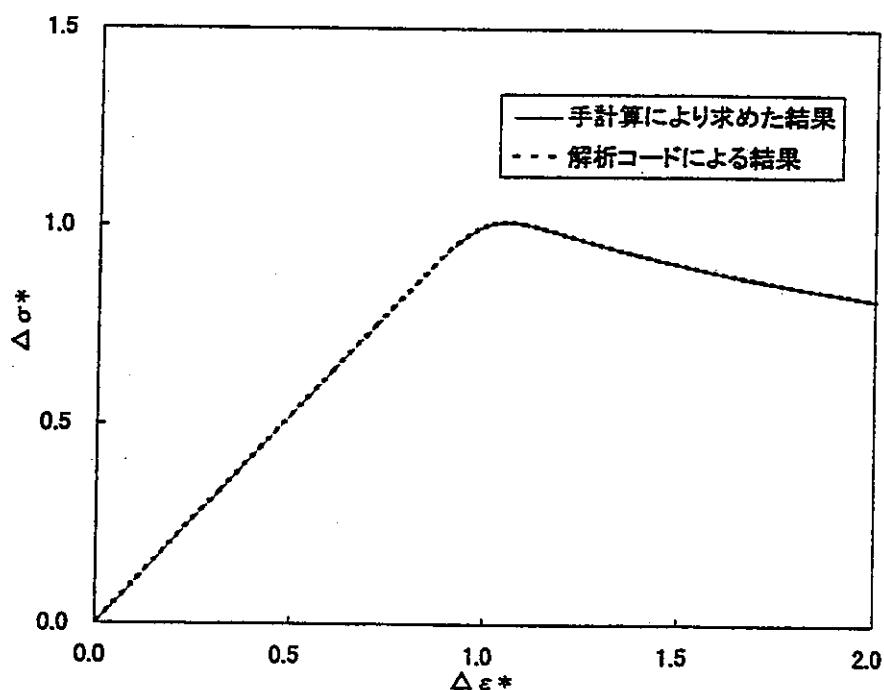
付図-1.1 解析モデル

付表-1.1 初期物性

パラメータ	物性値
一軸圧縮強度(MPa)	20.0
一軸引張強度(MPa)	2.0
弾性係数(MPa)	2000
ポアソン比	0.2
m	5
n <sub>0</sub>	20

### 3. 結果及び評価

付図-1.1 に両計算方法により求められた応力-ひずみ曲線を示す。両者は一致しており、本検討に使用した解析コードは、正常にコンプライアンス可変型構成方程式を解いていると判断される。なお、付図-1.2 は、初期の強度及びひずみにより正規化した値によりグラフ化している。



注:  $\Delta \sigma^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_e$ ,  $\Delta \varepsilon^* = \varepsilon / \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0$ : 弾性歪

付図-1.2 計算結果の比較

## 4. 解析プログラム

```

C ****
DO 20 I=1,NELT
      S1=MIN(PRSTR(1,I),PRSTR(2,I),PRSTR(3,I))
      S3=MAX(PRSTR(1,I),PRSTR(2,I),PRSTR(3,I))
      S1=-S1
      S3=-S3
C
      TEMP2=1.0+S3/TENSTG(I)
      IF(TEMP2.LT.0.0001) TEMP2=0.0001
      TEMP=CONSTG(I)*SQRT(TEMP2)-S3
      IF(S3.GT.0.0) THEN
          RN=TEMP/CONSTG(I)+RNO
      ELSE
          RN=RNO
      END IF
      SEVRTY=(S1-S3)/TEMP
C
      C=OLDYNG(I)/YOUNG(I)
      SC=SEVRTY*C** (RM/RN)
      IF(SC.LT.0.2) SC=0.2
      IF(SC.GT.5.0) SC=5.0
      A=(RM/(RN+1.0))** (RM/(RN-RM+1.0)) / 120.0
      DC=A*SC**RN*DT
      IF(DC.GT.0.2) DC=0.2
      C=C+DC
      IF(C.GT.100.0) C=100.0
      P01(I)=0.5-0.3/C
      YOUNG(I)=OLDYNG(I)/C
20     CONTINUE
      RETURN

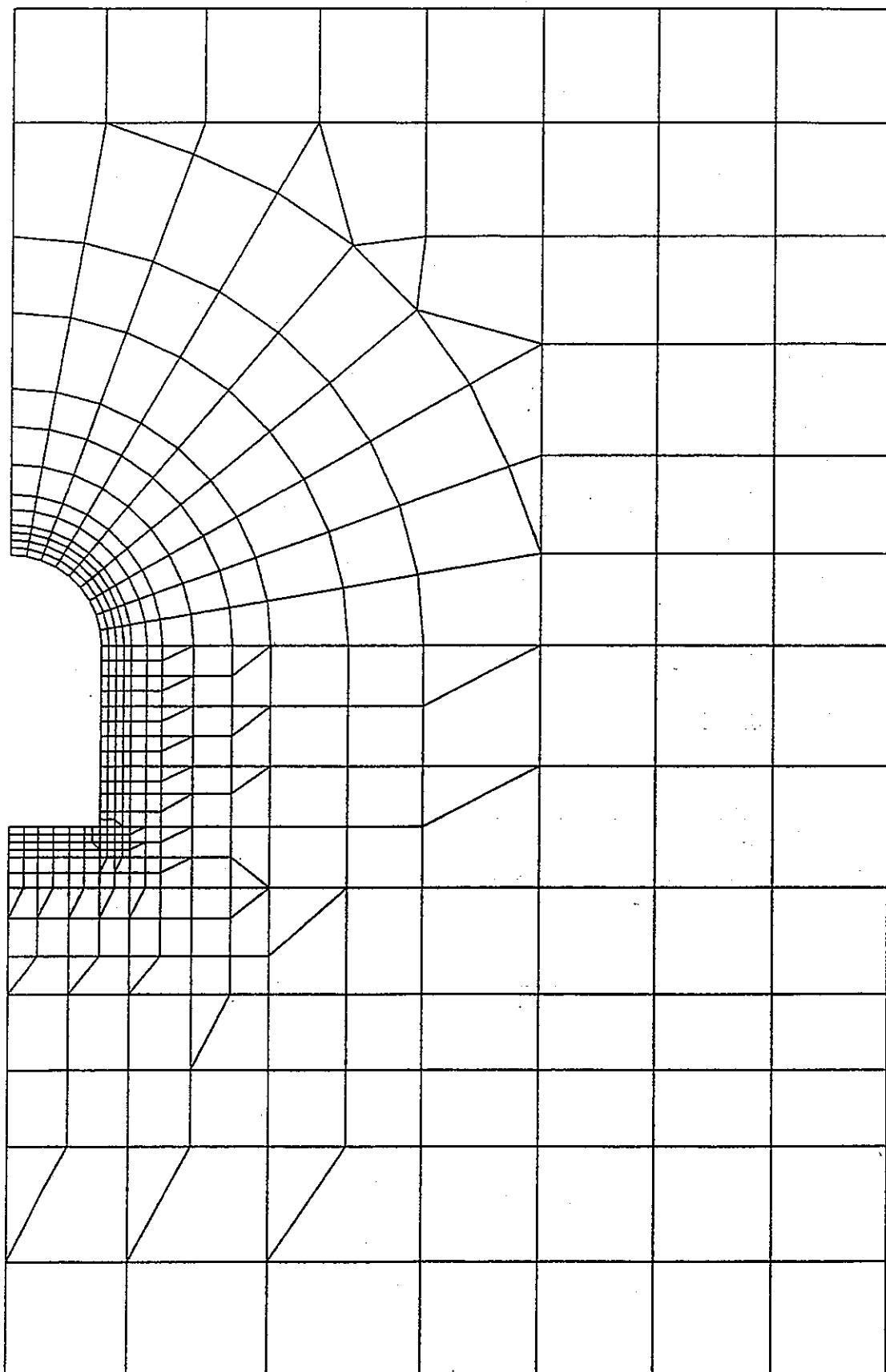
```

ここに、CONSTG : 一軸圧縮強度  
 TENSTG : 一軸引張強度  
 OLDP01 : 初期弾性係数  
 YOUNG : 弾性係数  
 P01 : ボアソン比  
 RNO : バラメータ n<sub>0</sub>  
 RM : バラメータ m  
 PRSTR : 主応力  
 DT : 時間刻み  
 NELT : 要素数

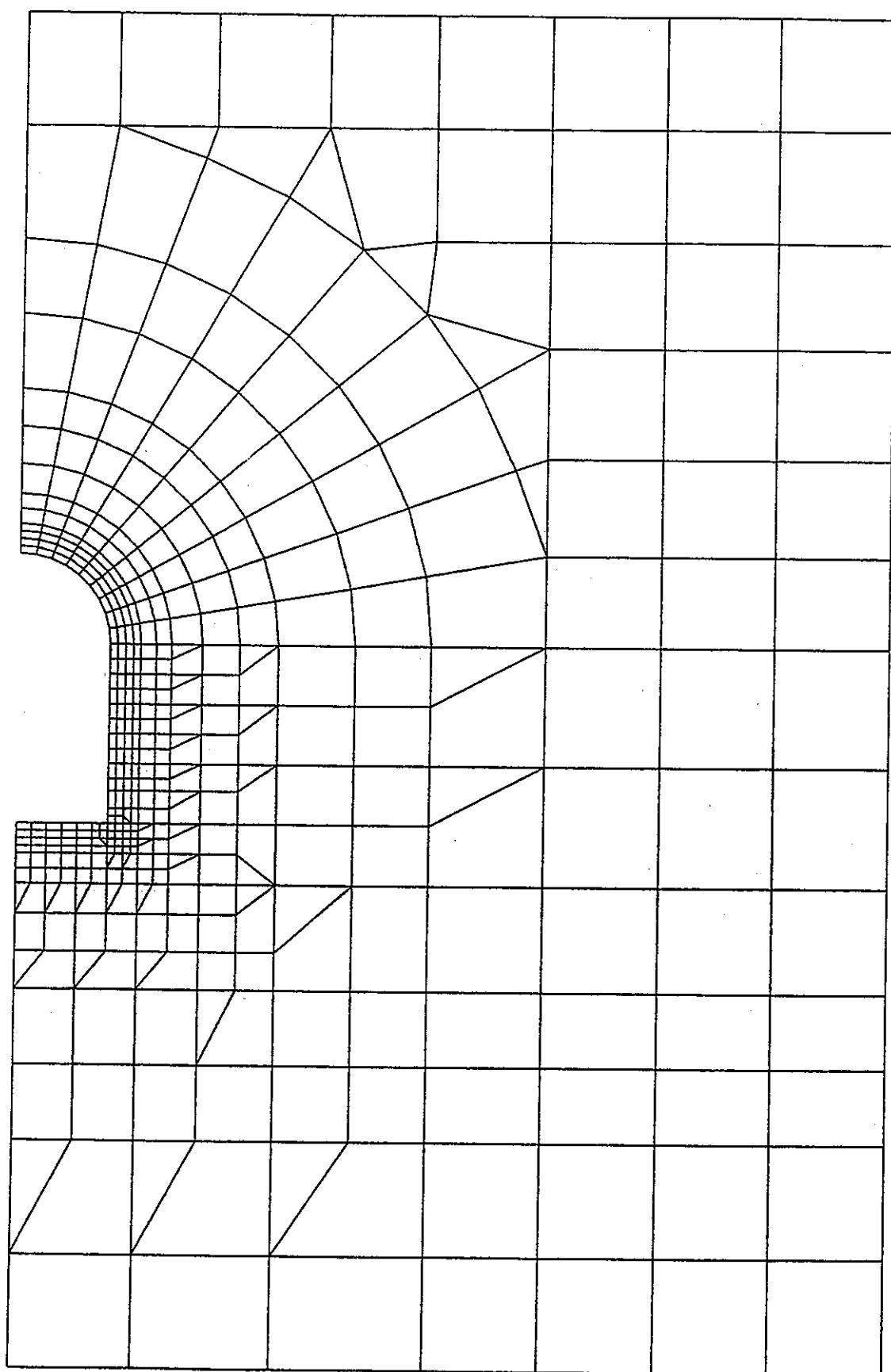
補足：上記プログラムは、初期ボアソン比が 0.2 に限定されるため、一般化するためには、最後から 4 行目を以下のように変更する必要がある。ここでは、仮に初期ボアソン比を表わす変数を"OLDP01"とした。

$$P01=0.5- (0.5-OLDP01) /C$$

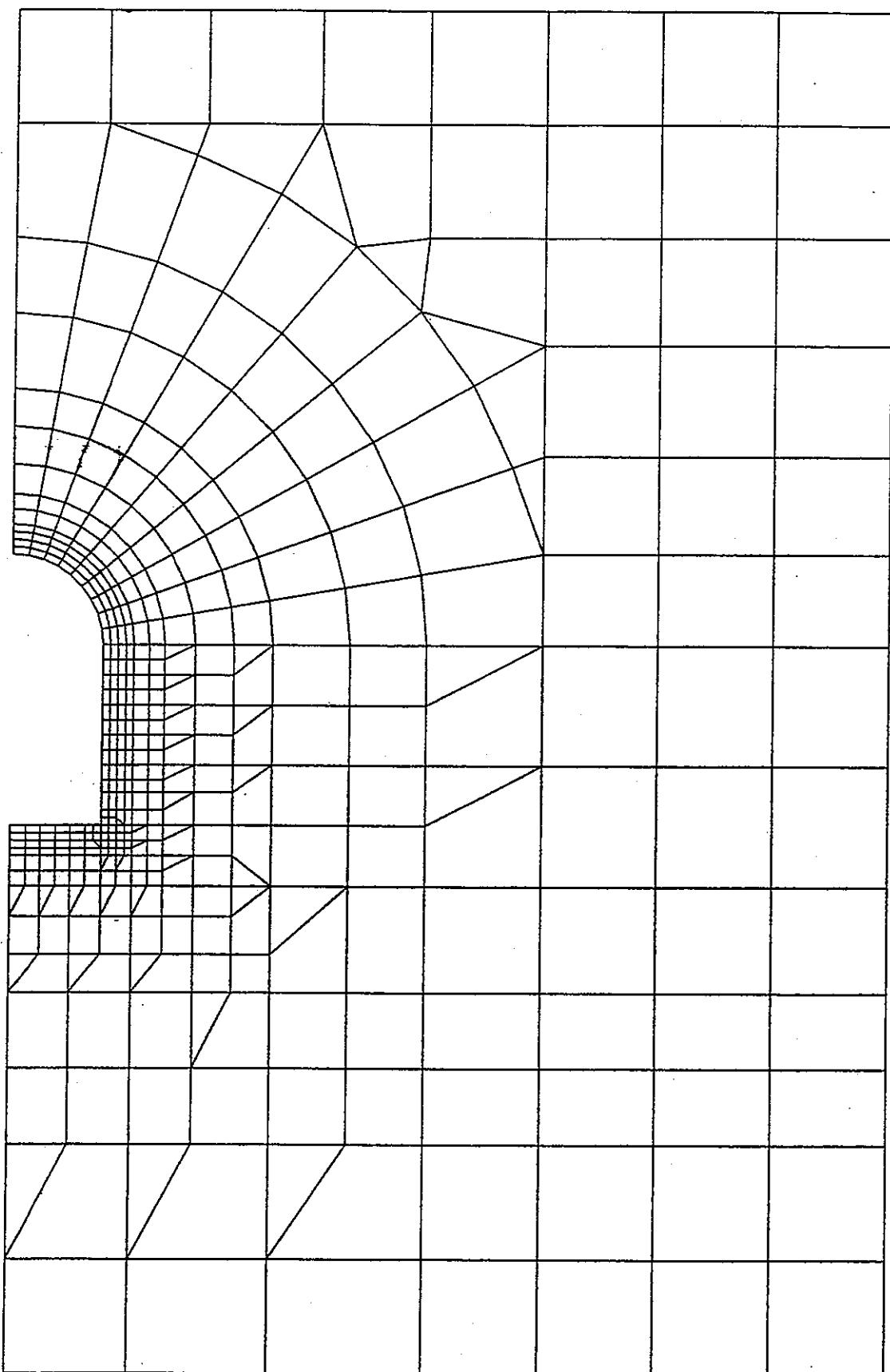
付録-2 周辺岩盤変形図



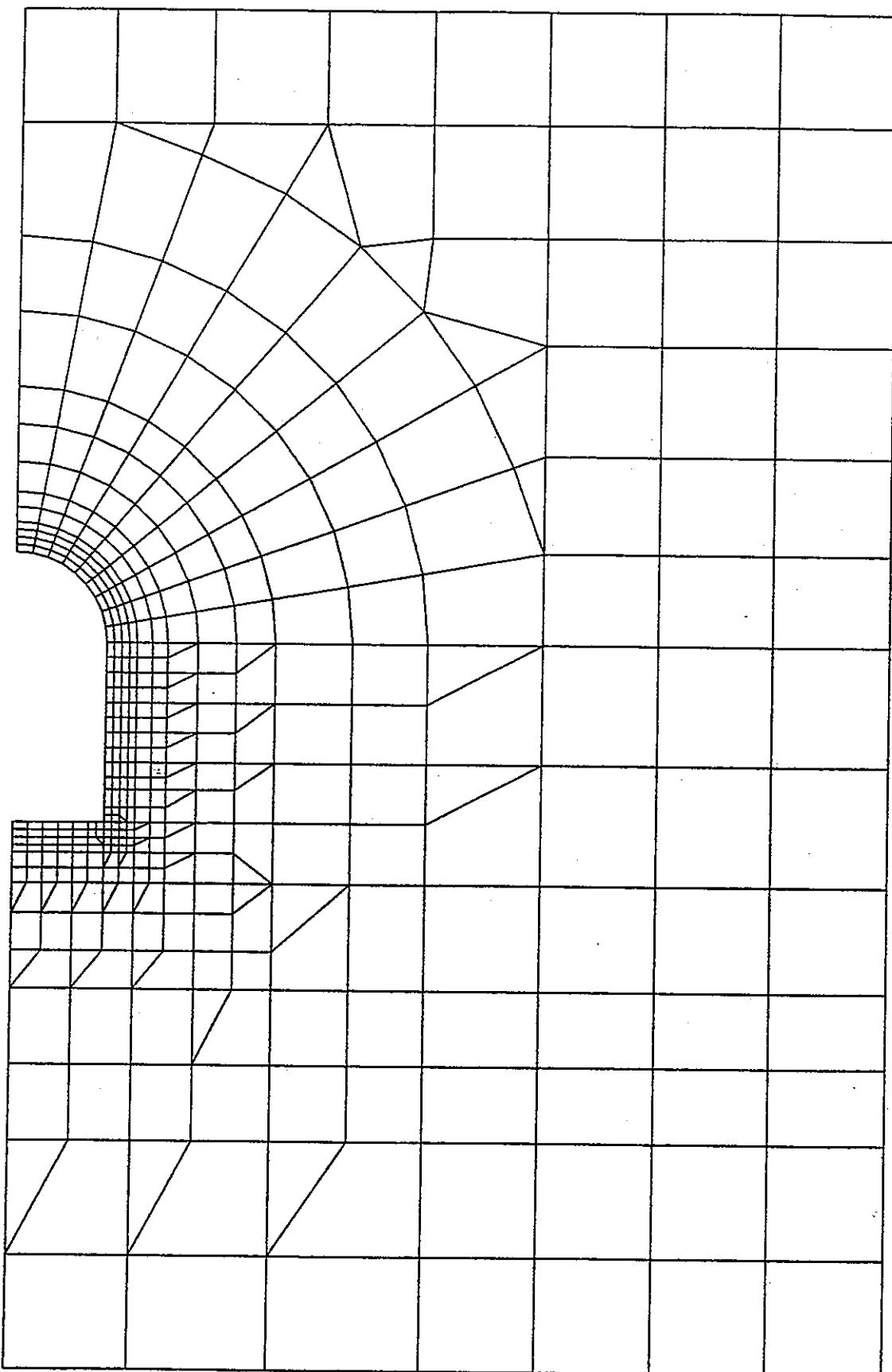
付図-2.1 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1 - 0 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



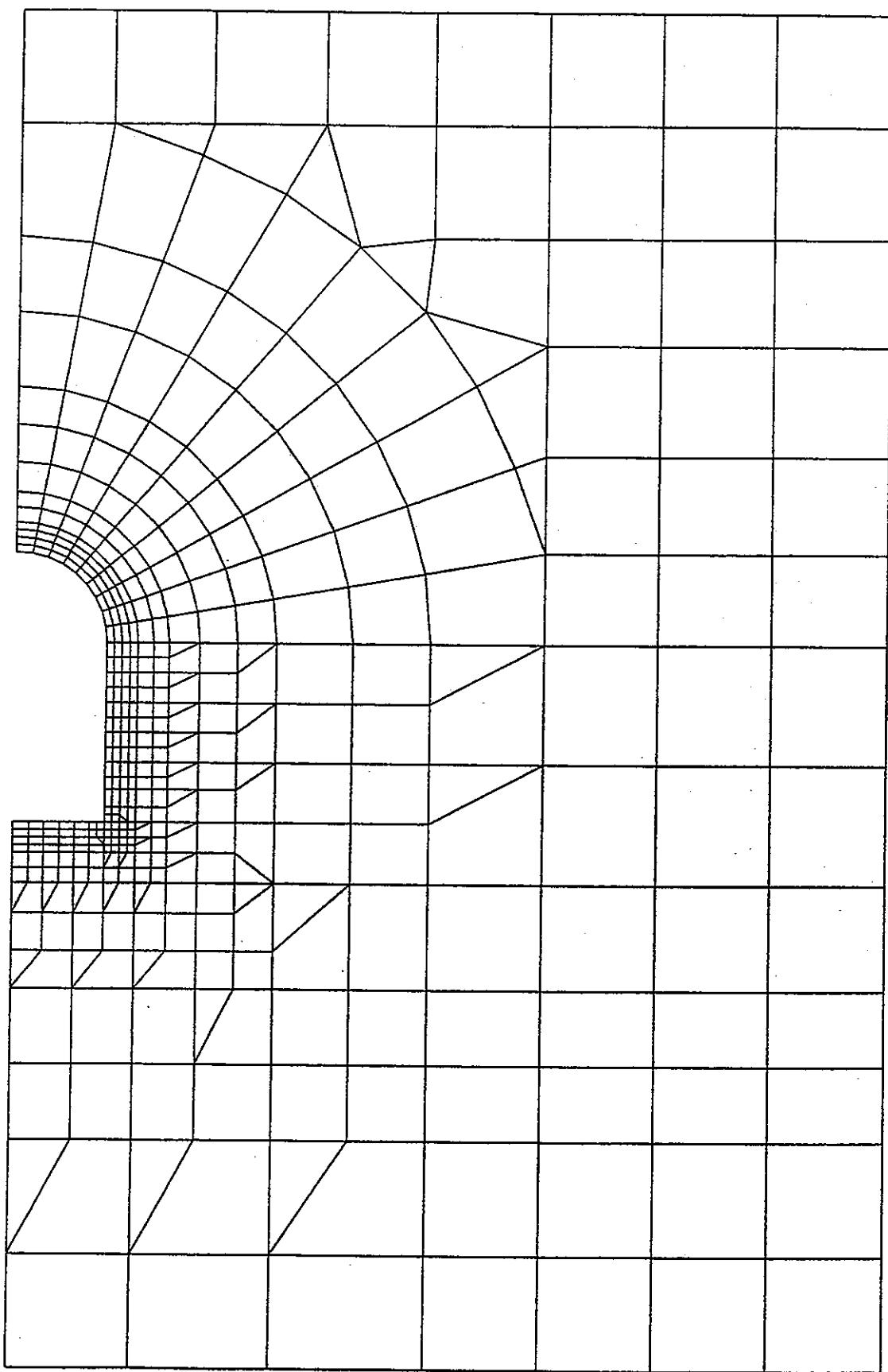
付図-2.2 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-0 ケース、時間 100 年、S=1/400）



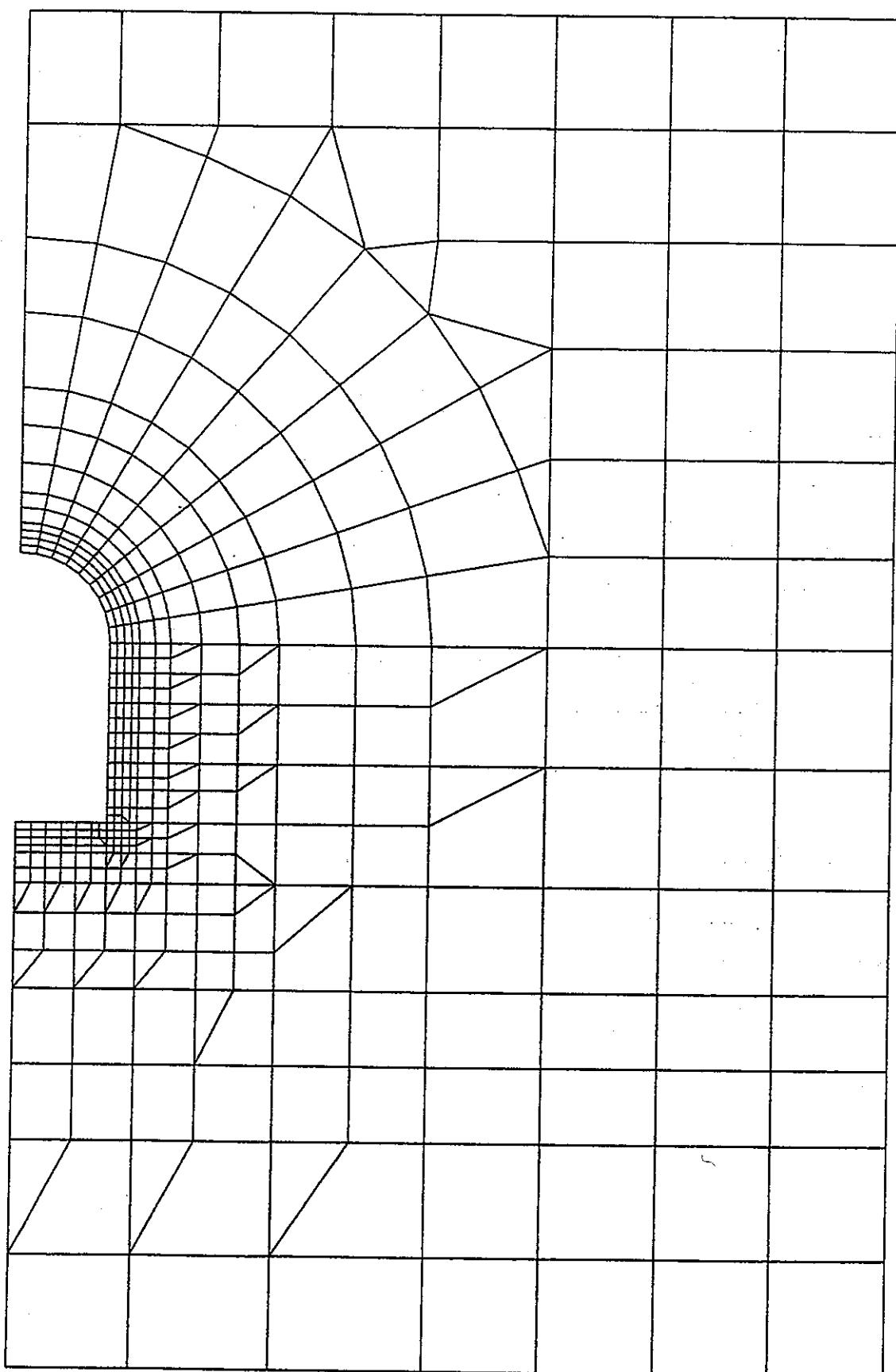
付図-2.3 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1 - 0 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



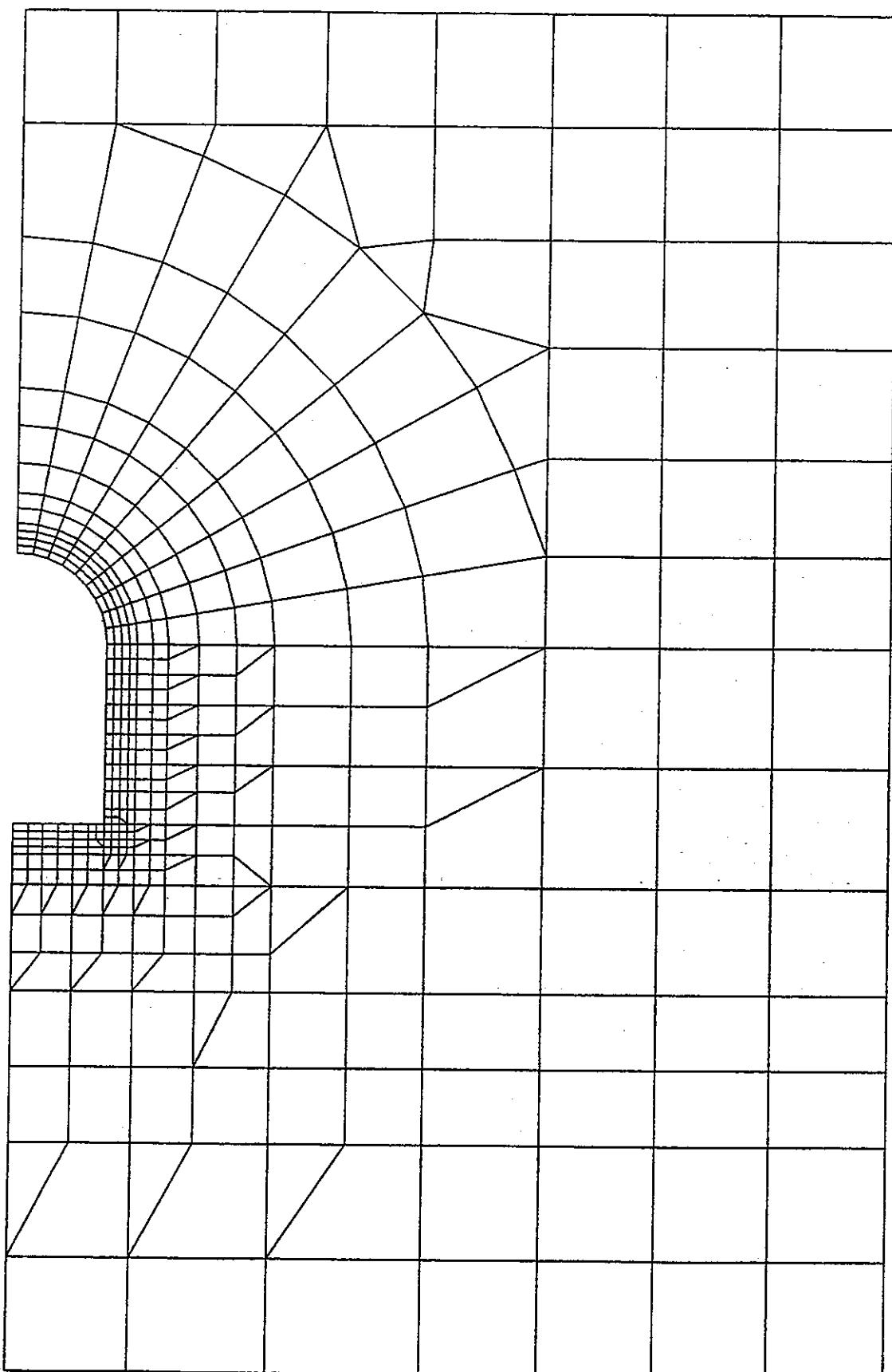
付図-2.4 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-1 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



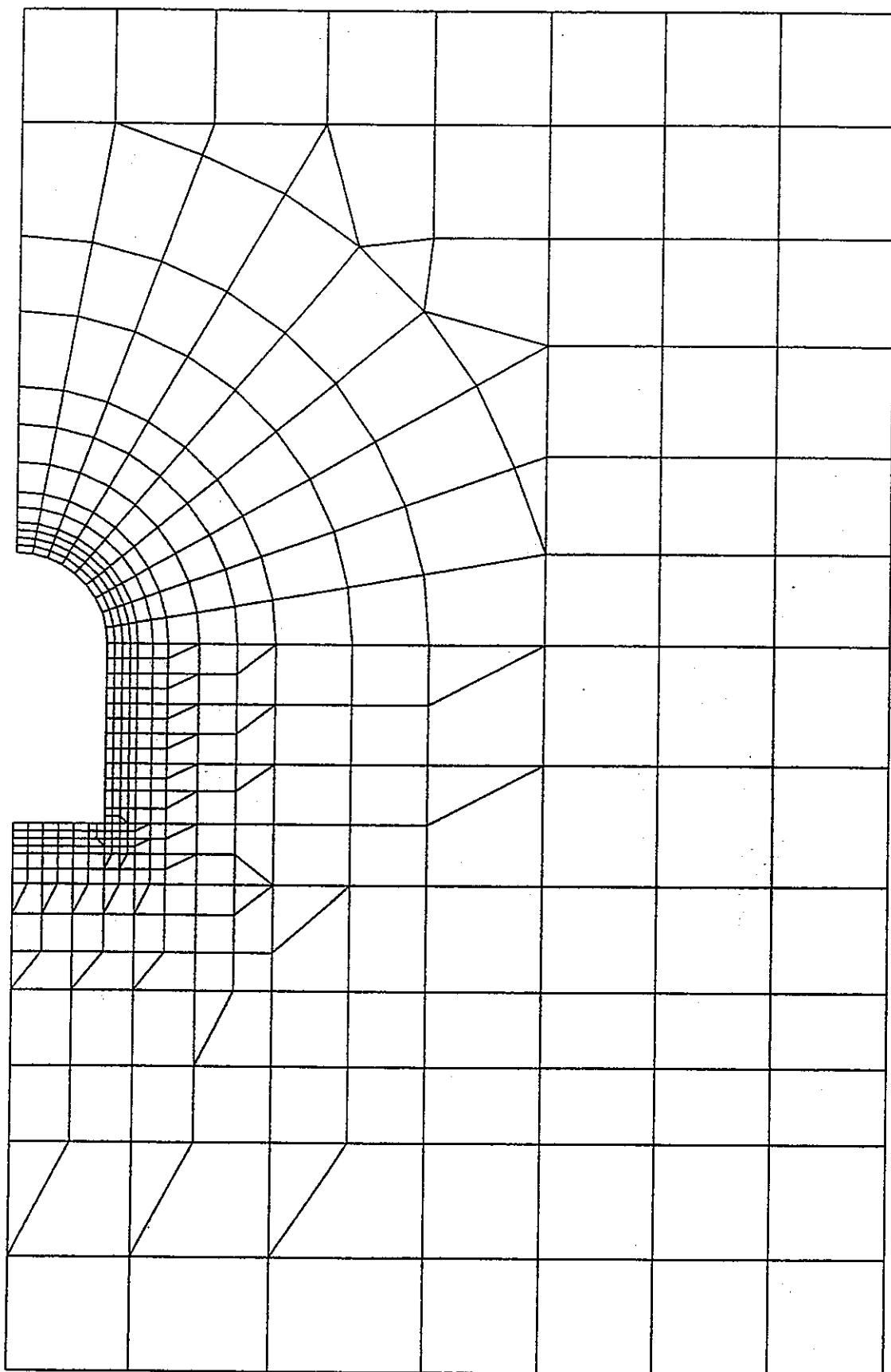
付図-2.5 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-1 ケース、時間 100 年、S=1/400）



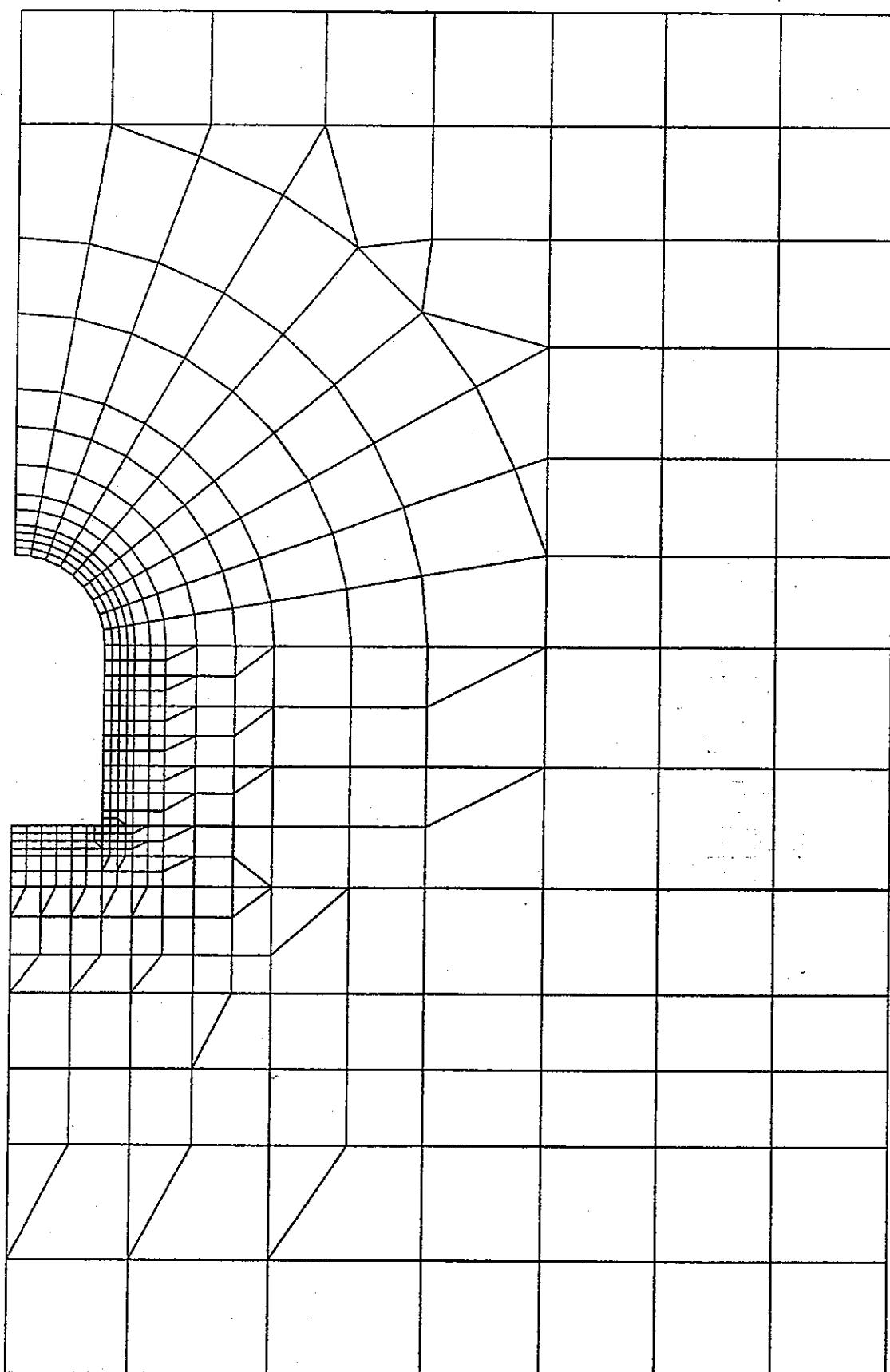
付図-2.6 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-1 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



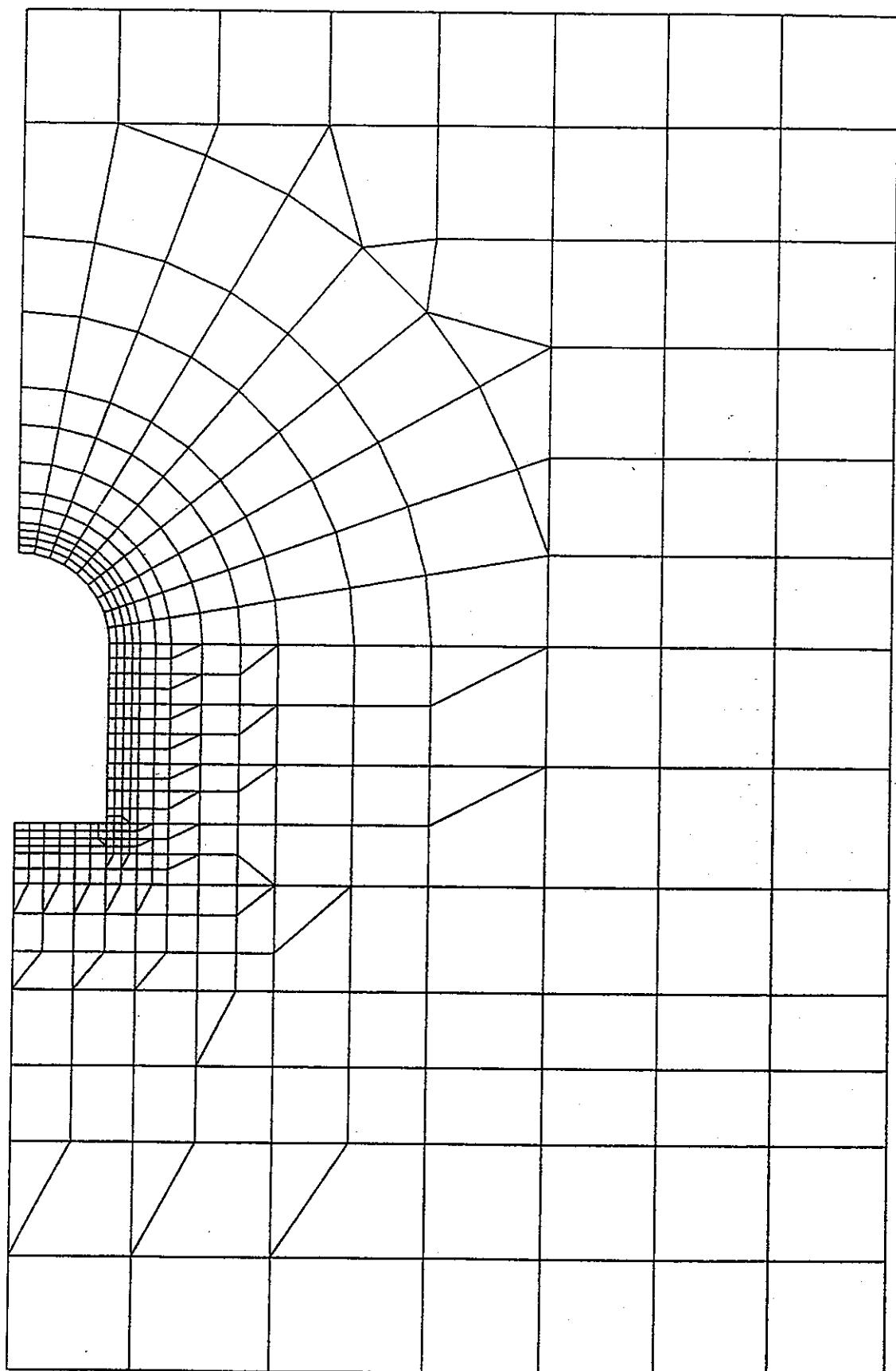
付図-2.7 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1 - 2 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



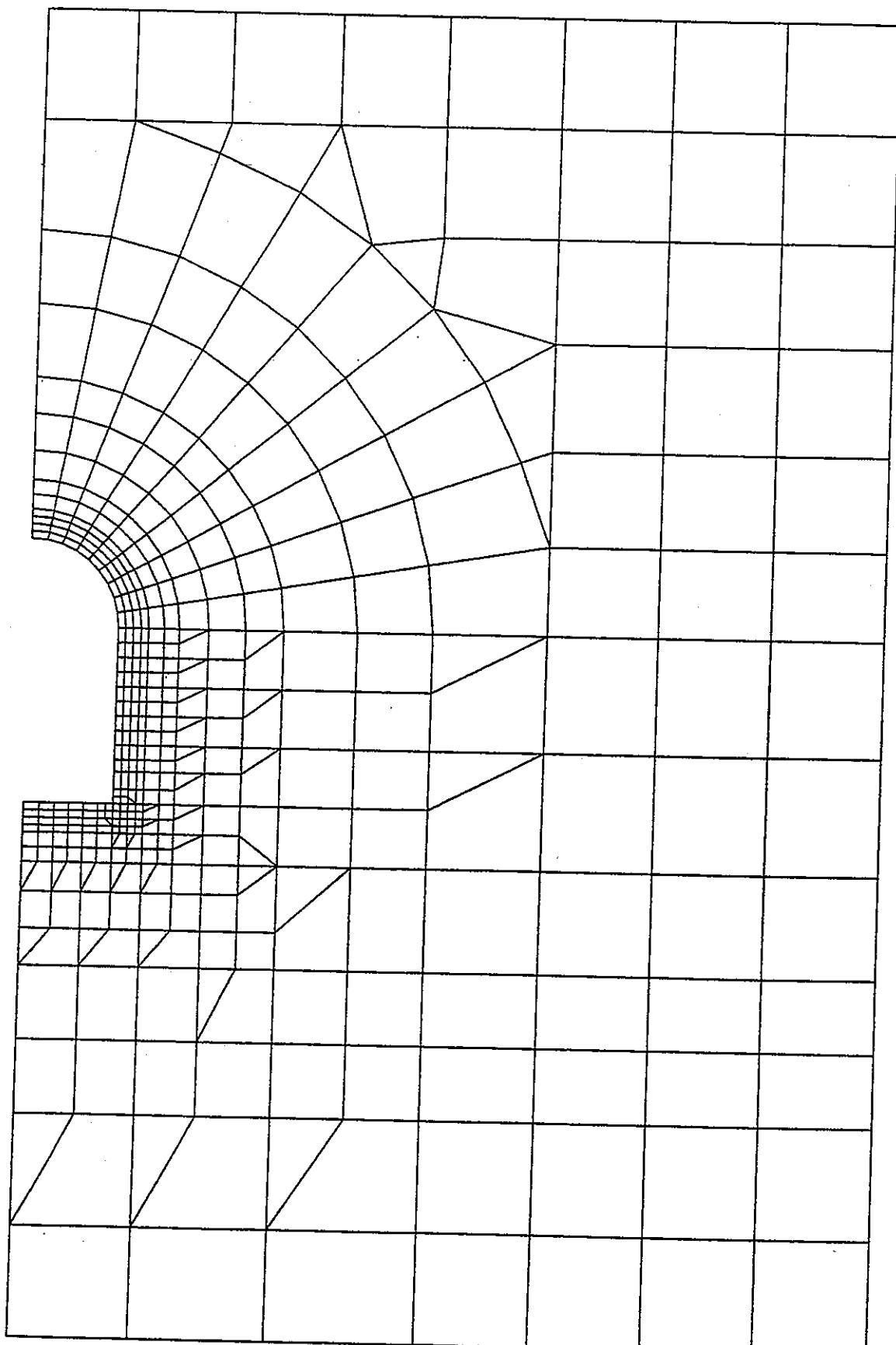
付図-2.8 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-2 ケース、時間 100 年、S=1/400）



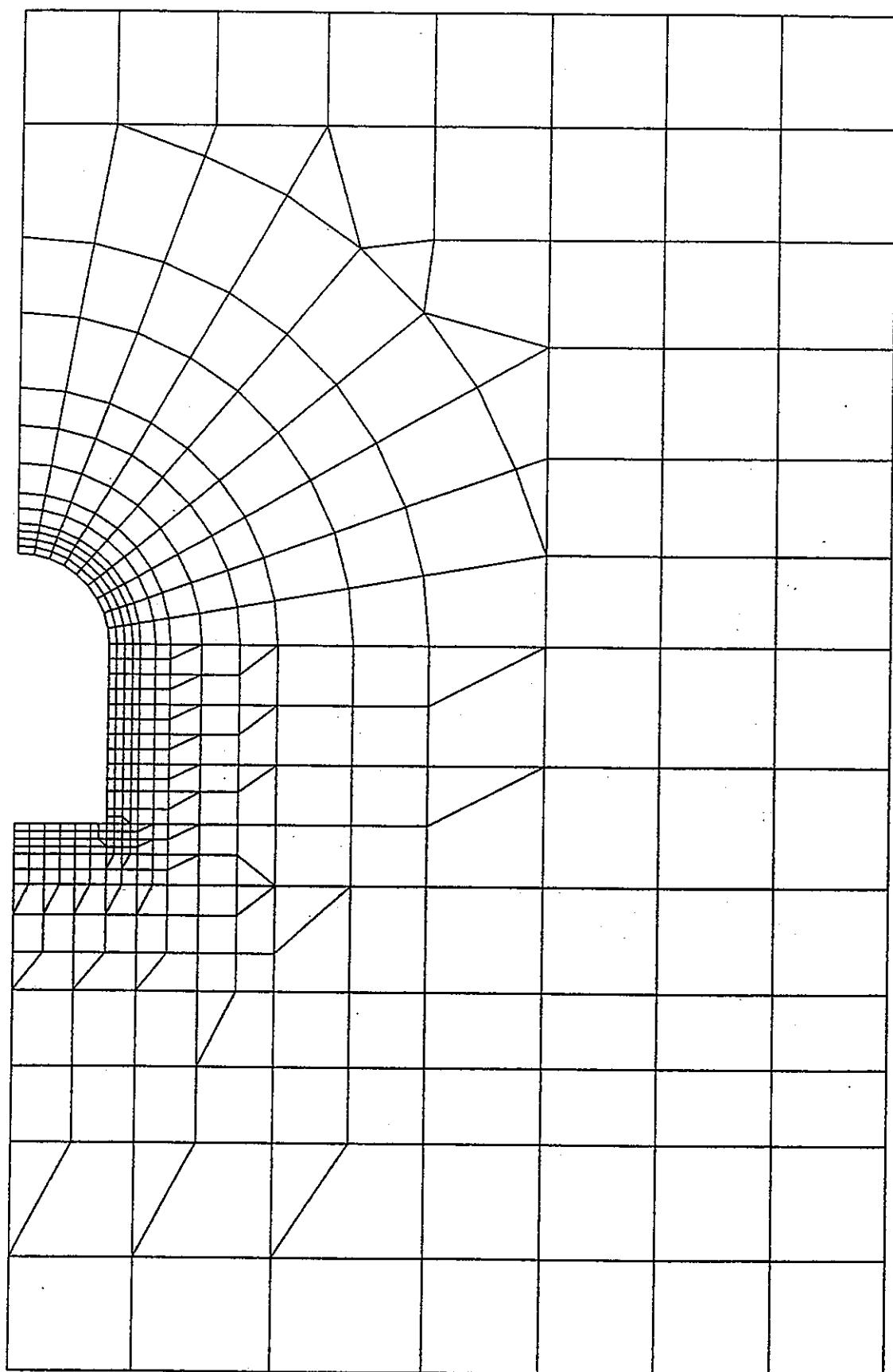
付図-2.9 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-2 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



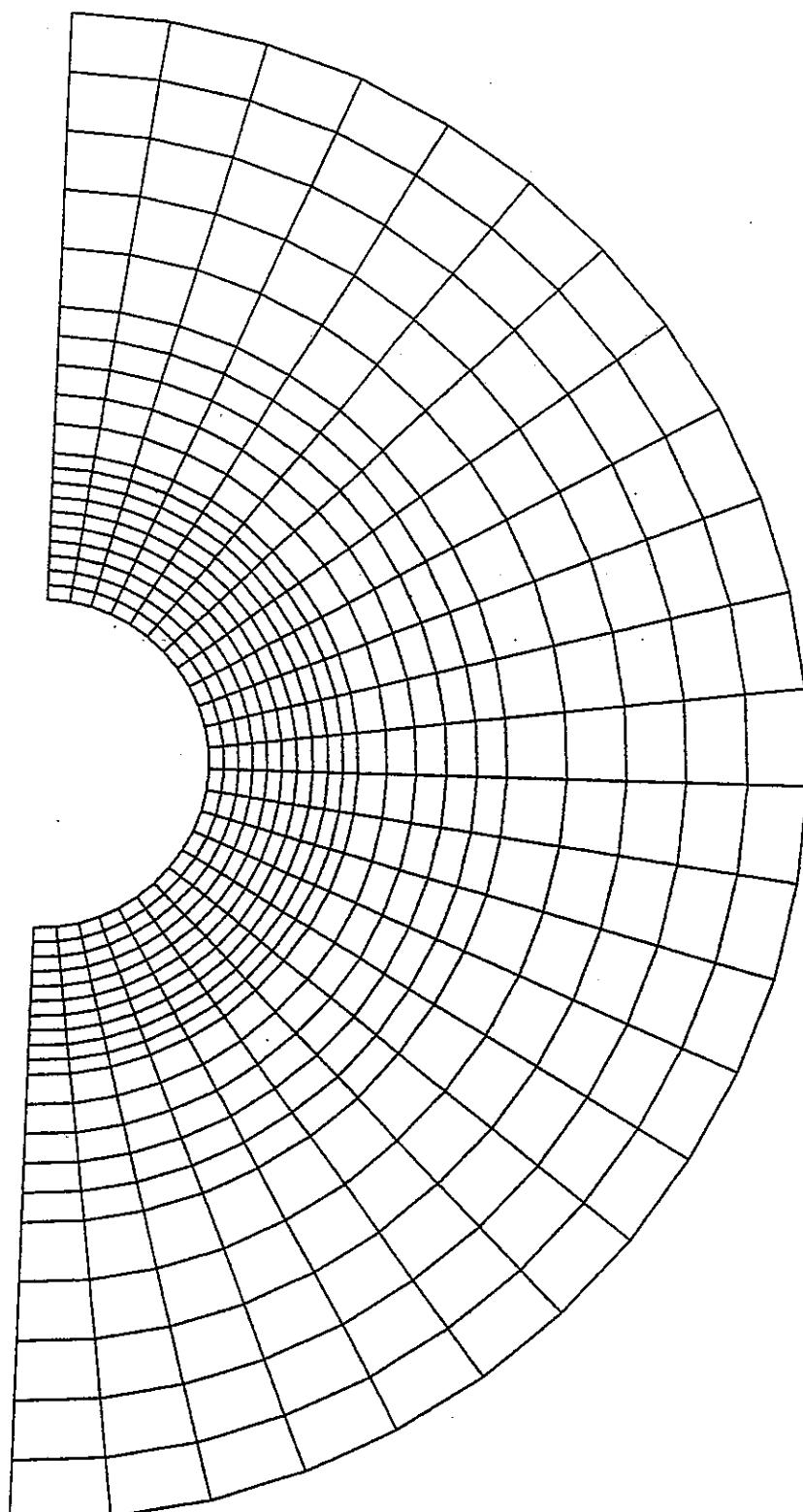
付図-2.10 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1 - 3 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



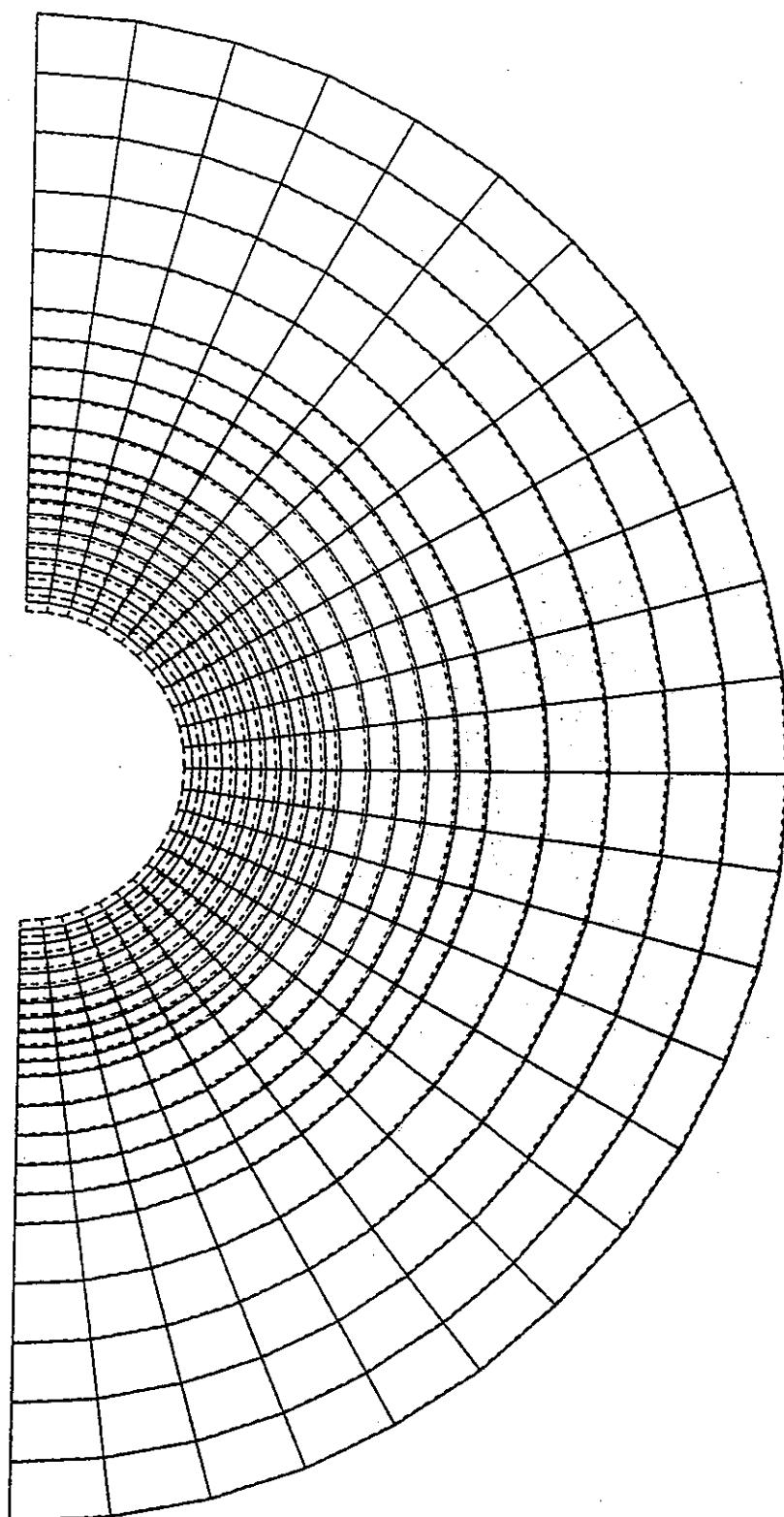
付図-2.11 周辺岩盤変形図 (結晶質岩系岩盤 : A 1 - 3 ケース、時間 100 年、S=1/400)



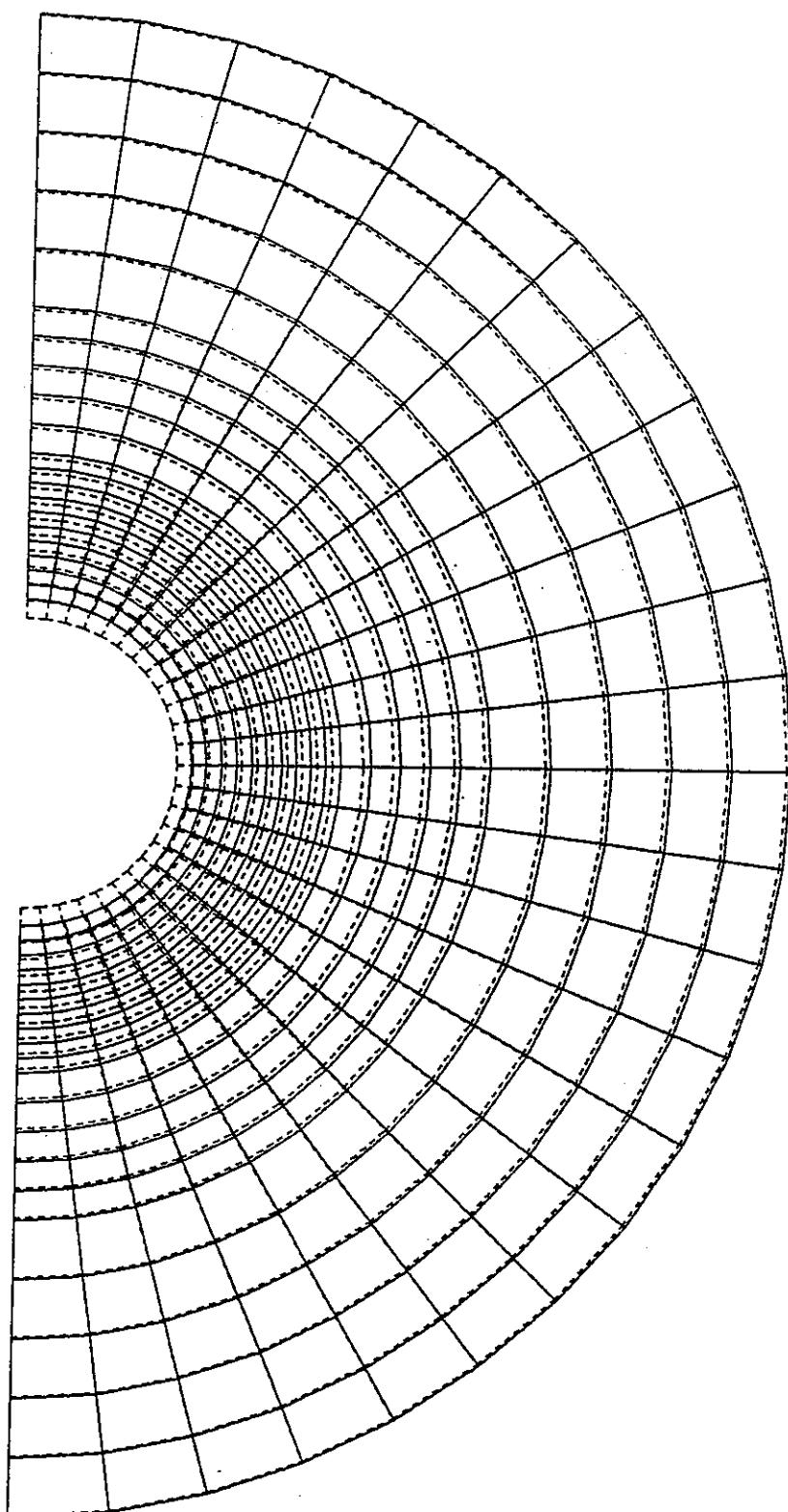
付図-2.12 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 1-3 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



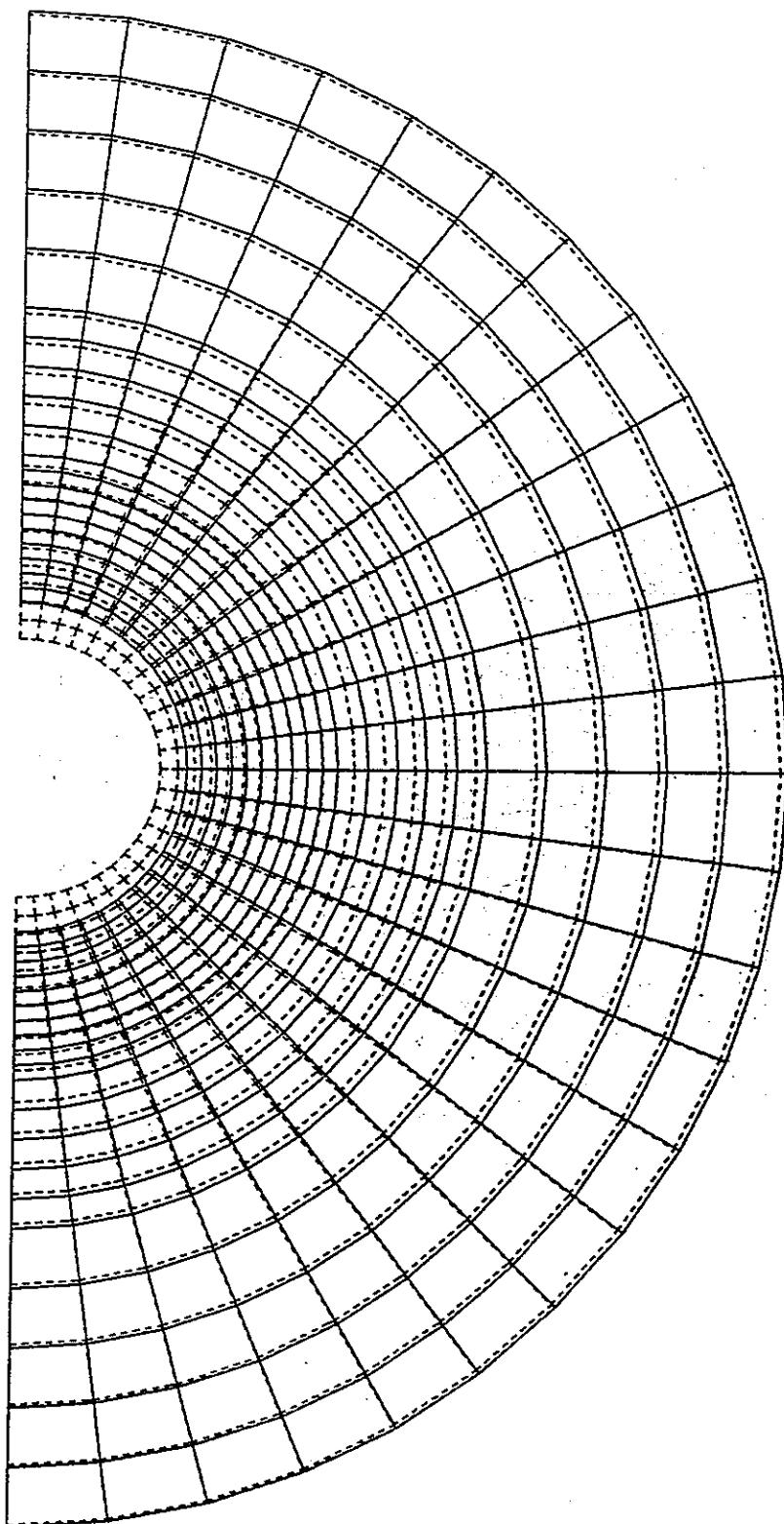
付図-2.13 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 1 秒、S=1/250）



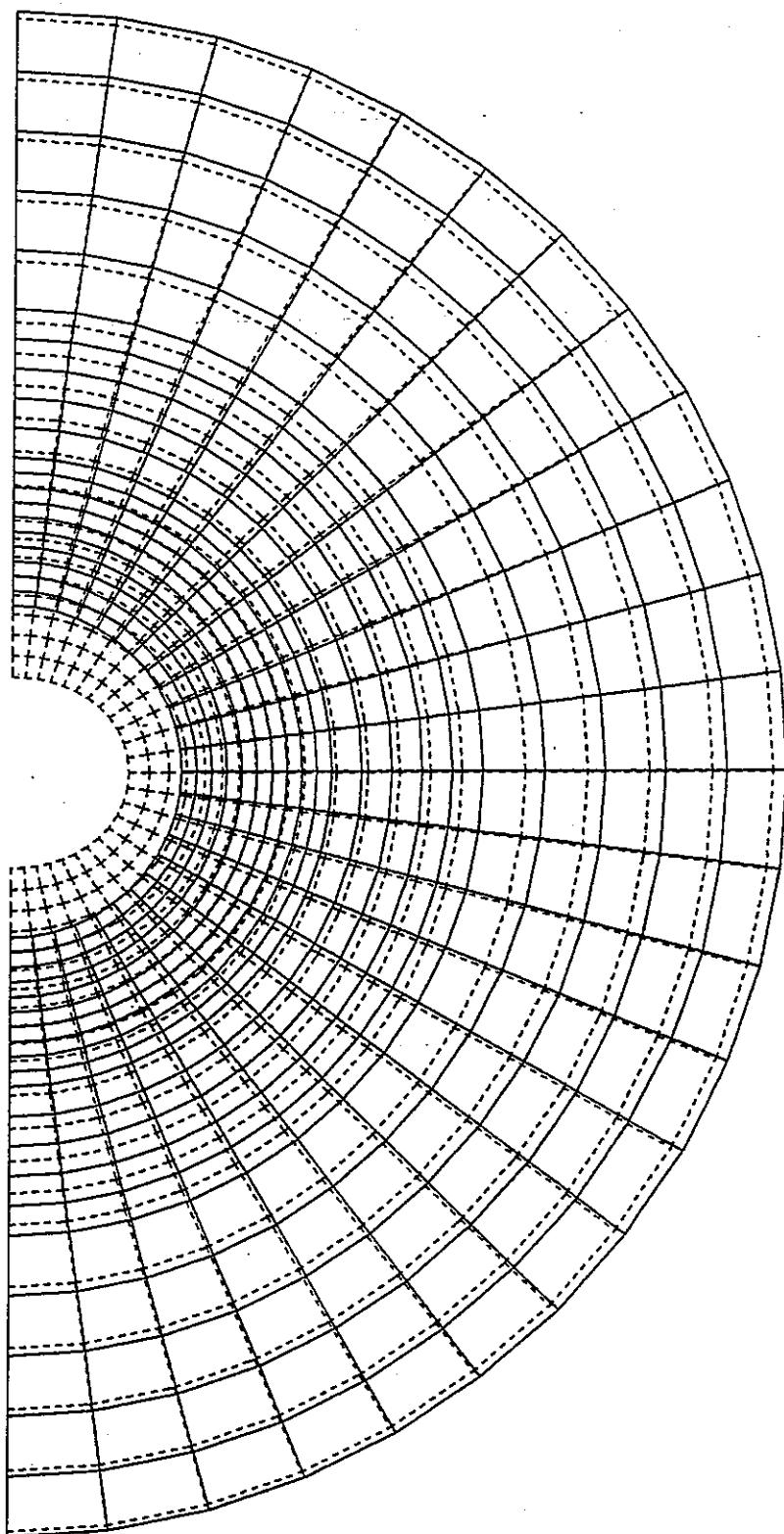
付図-2.14 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 1 年、S=1/250）



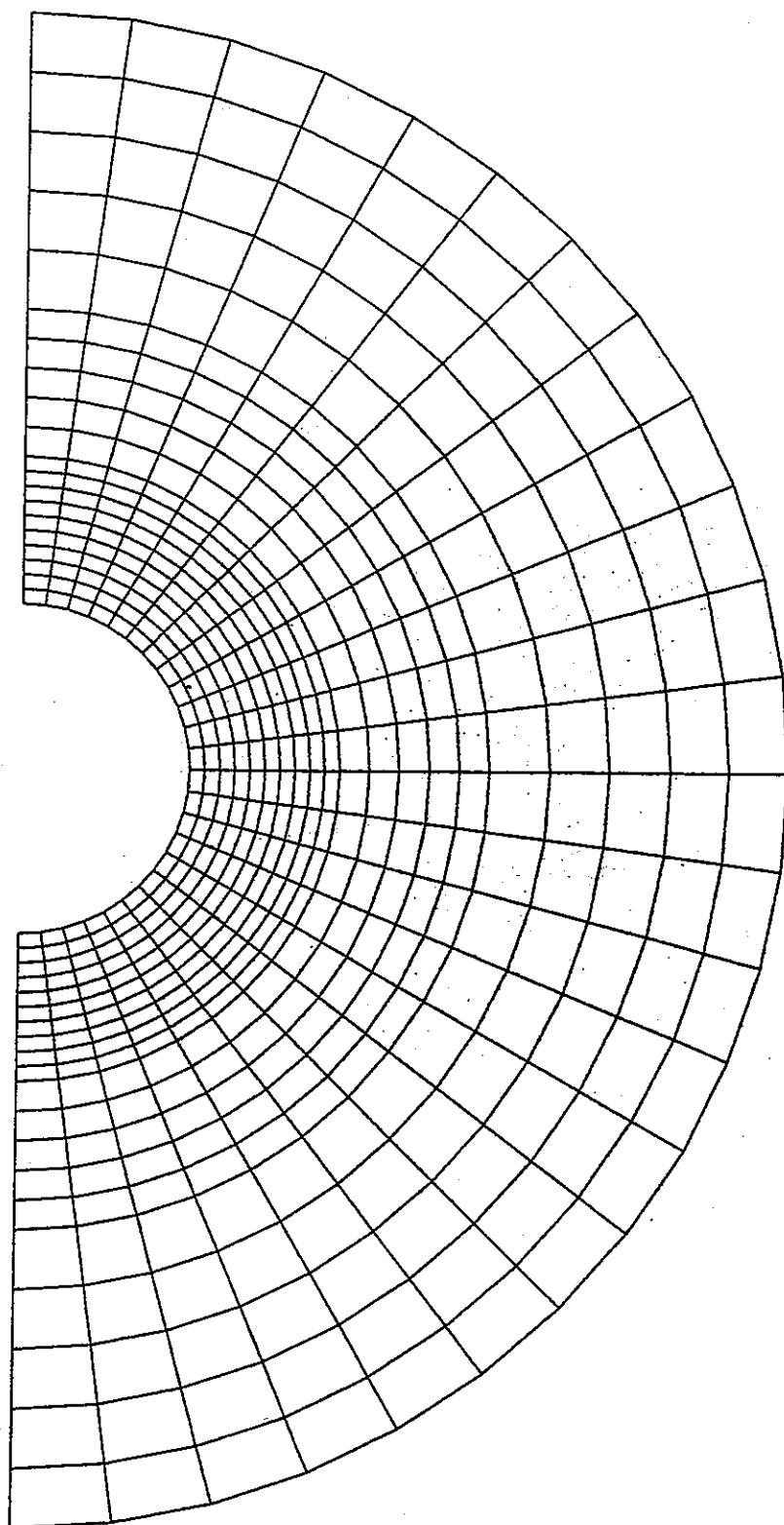
付図-2.15 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 100 年、S=1/250）



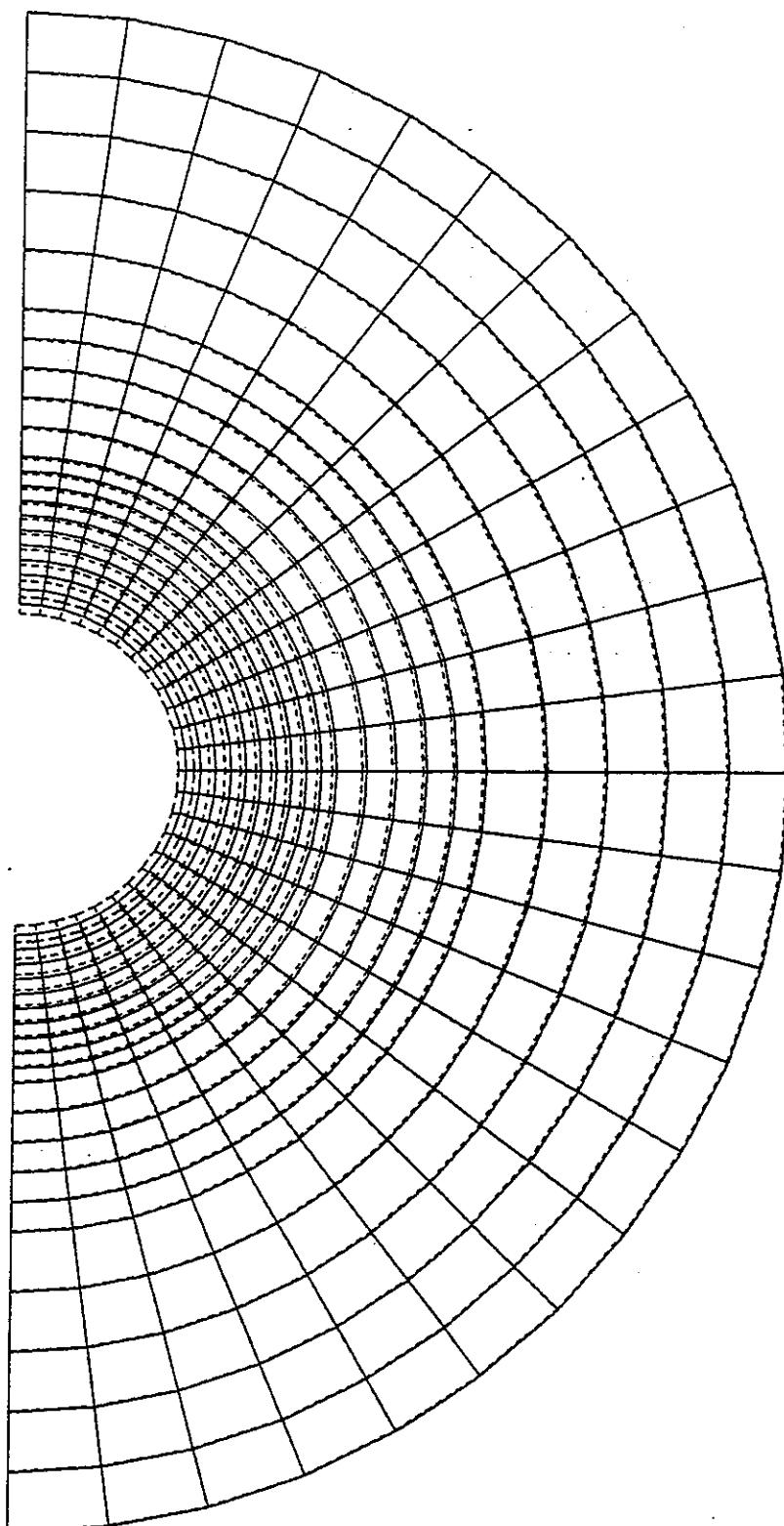
付図-2.16 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 1 万年、S=1/250）



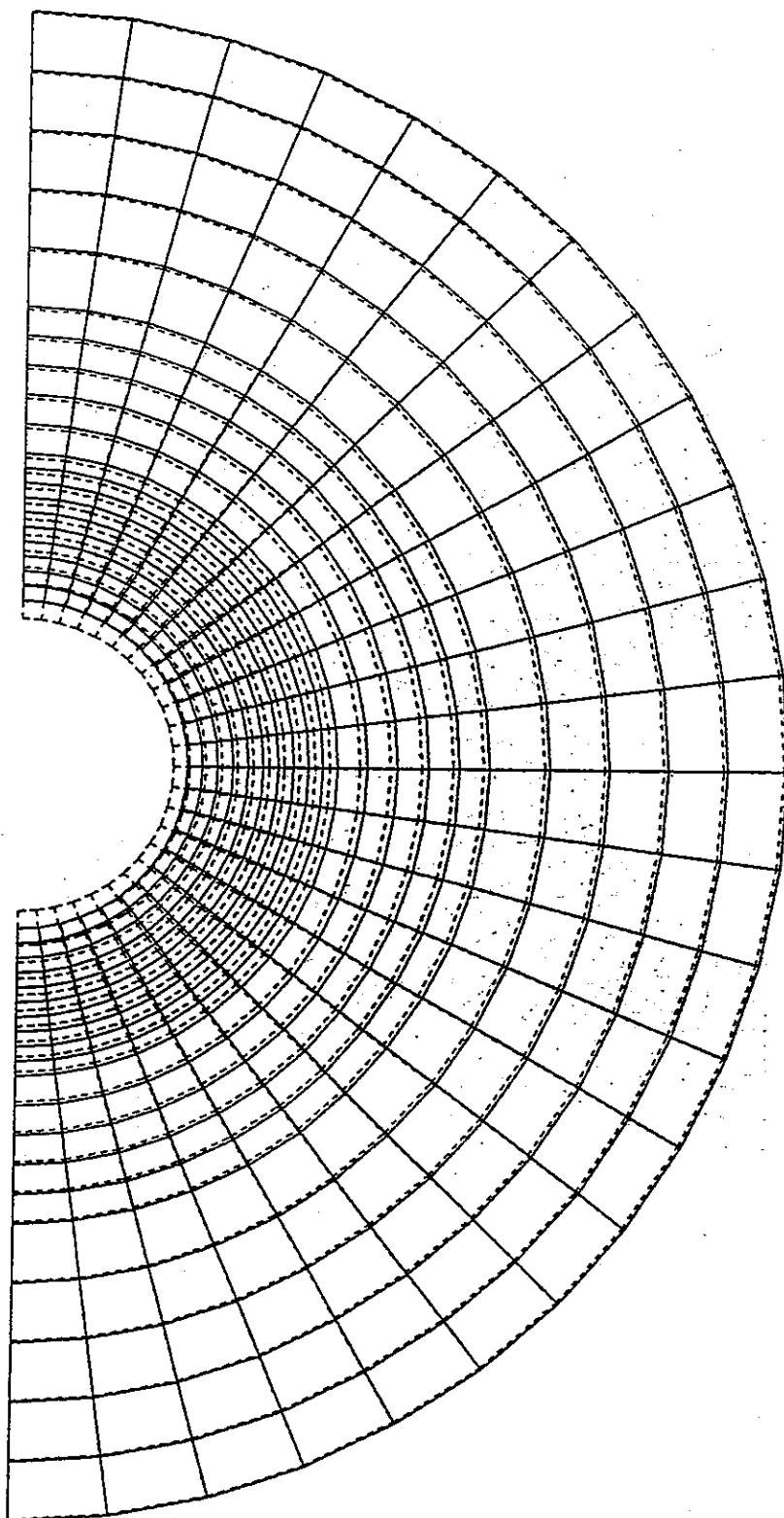
付図-2.17 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



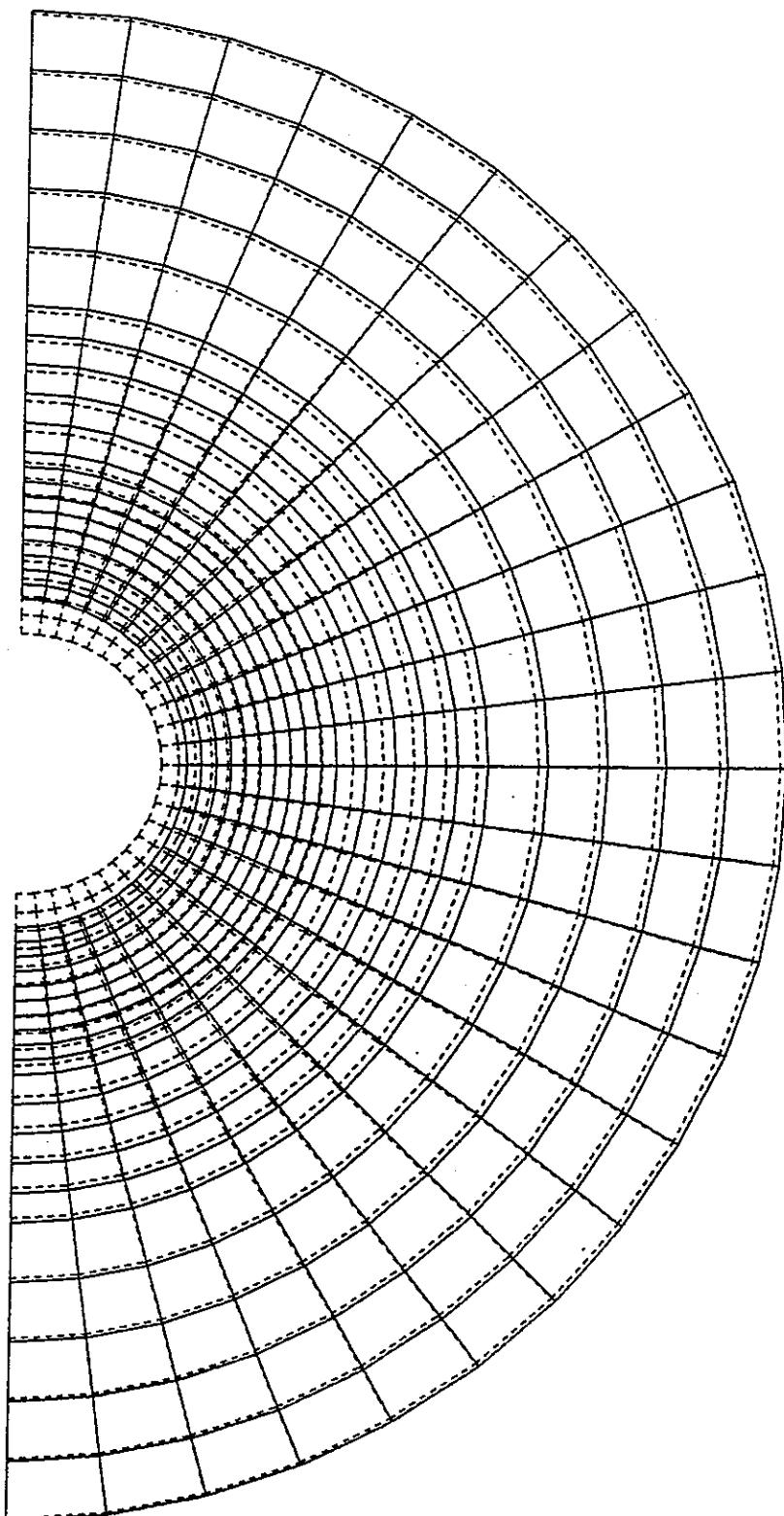
付図-2.18 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間 1 秒、S=1/250）



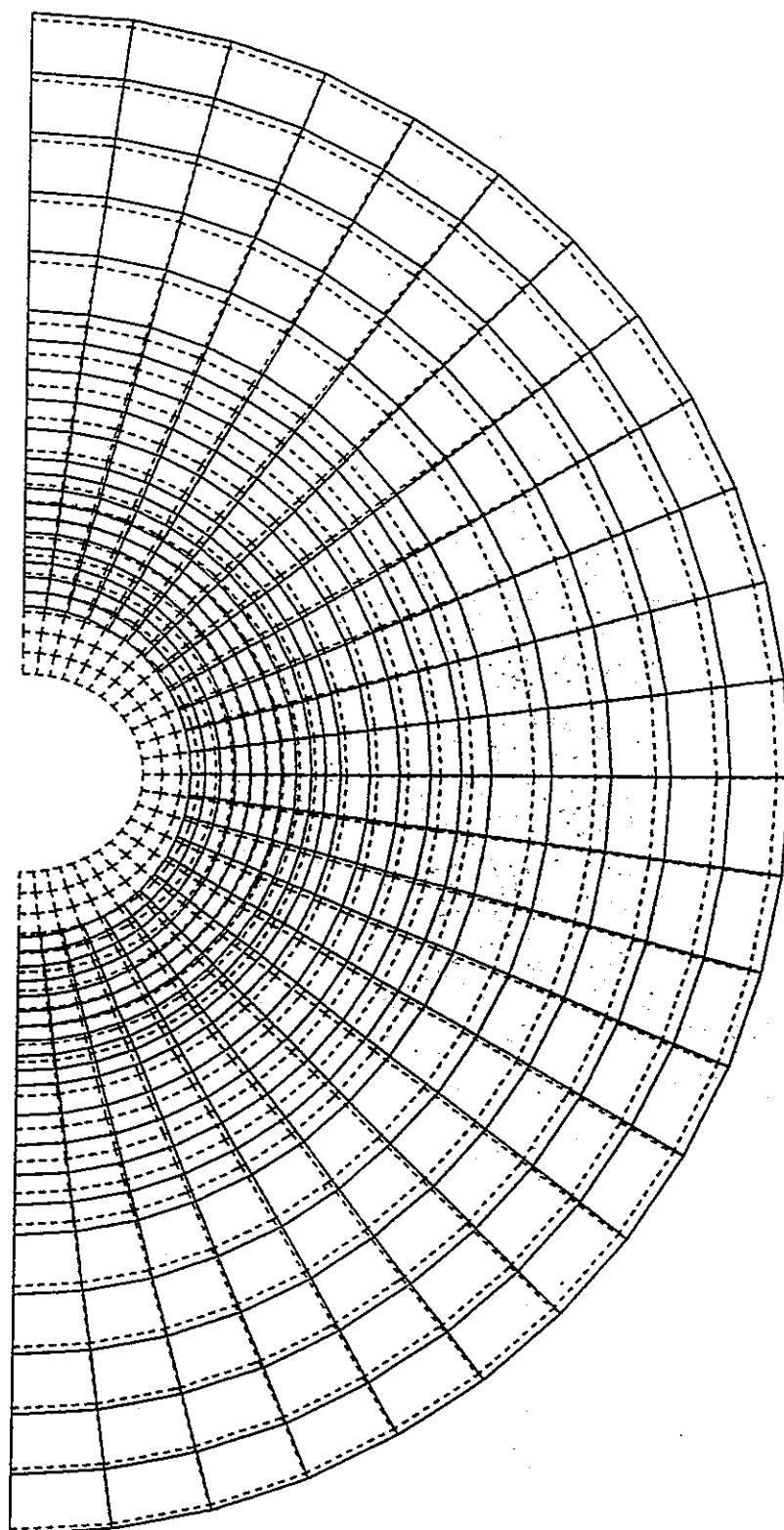
付図-2.19 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 1 ケース、時間 1 年、S=1/250）



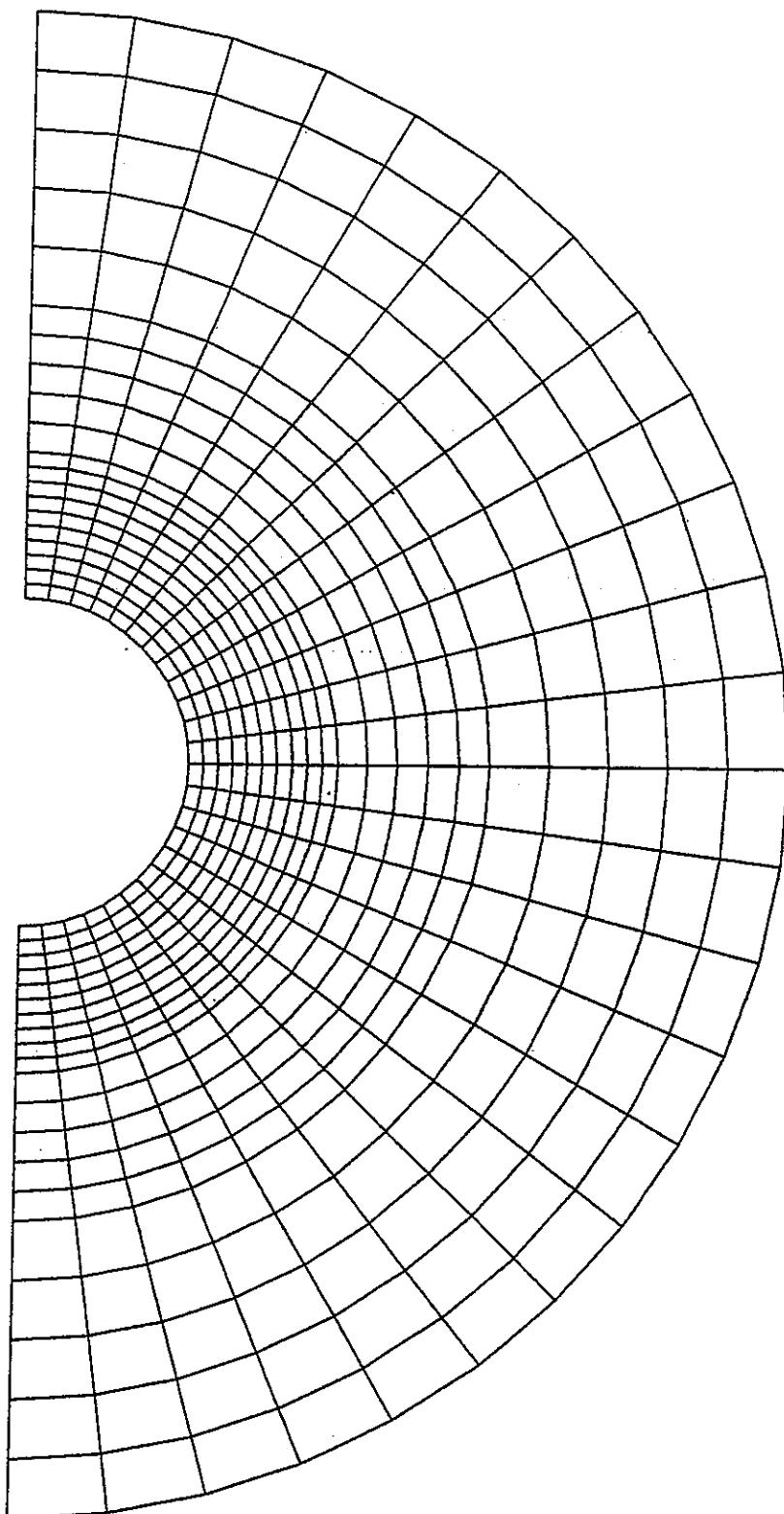
付図-2.20 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 1 ケース、時間 100 年、S=1/250）



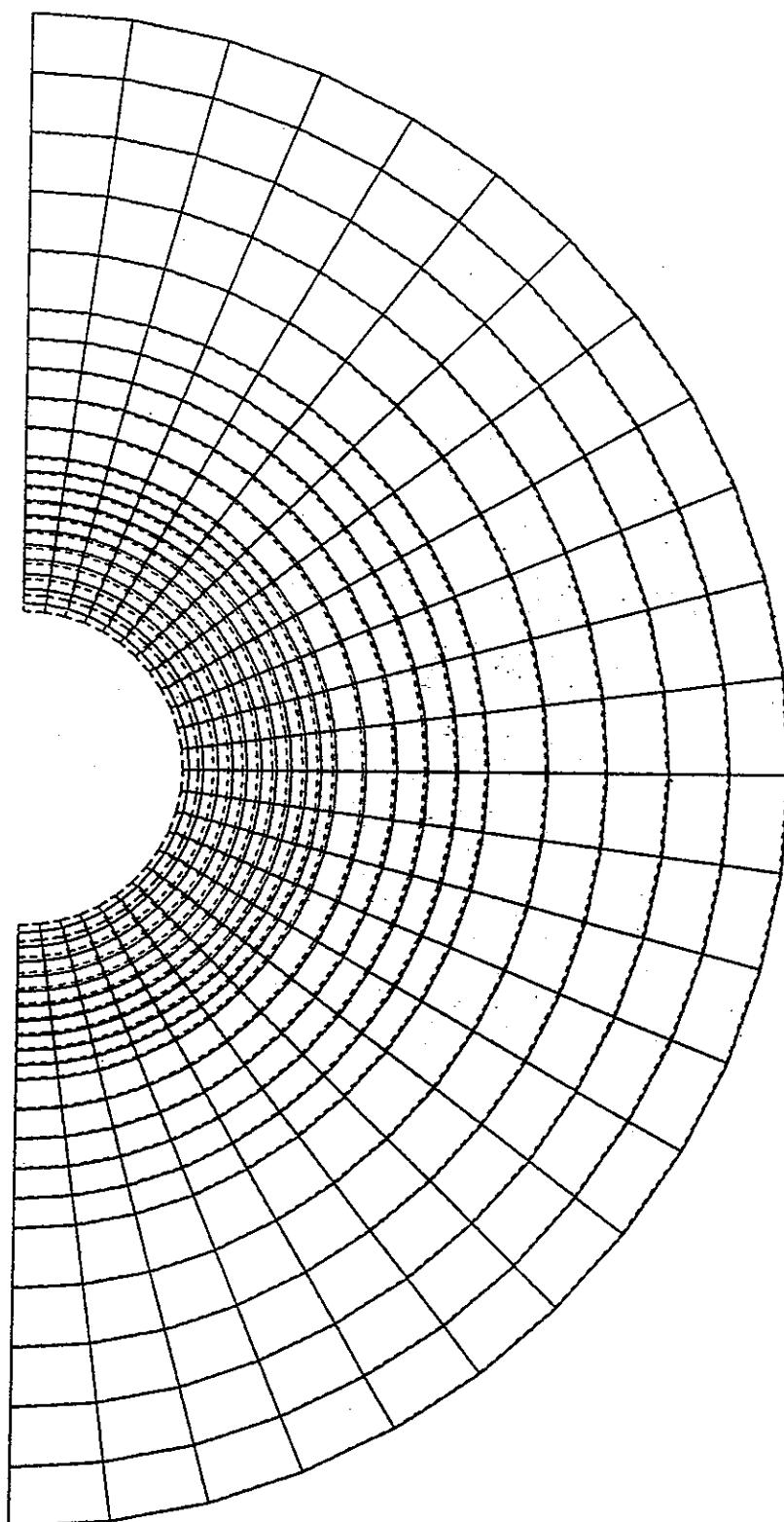
付図-2.21 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 1 ケース、時間 1 万年、S=1/250）



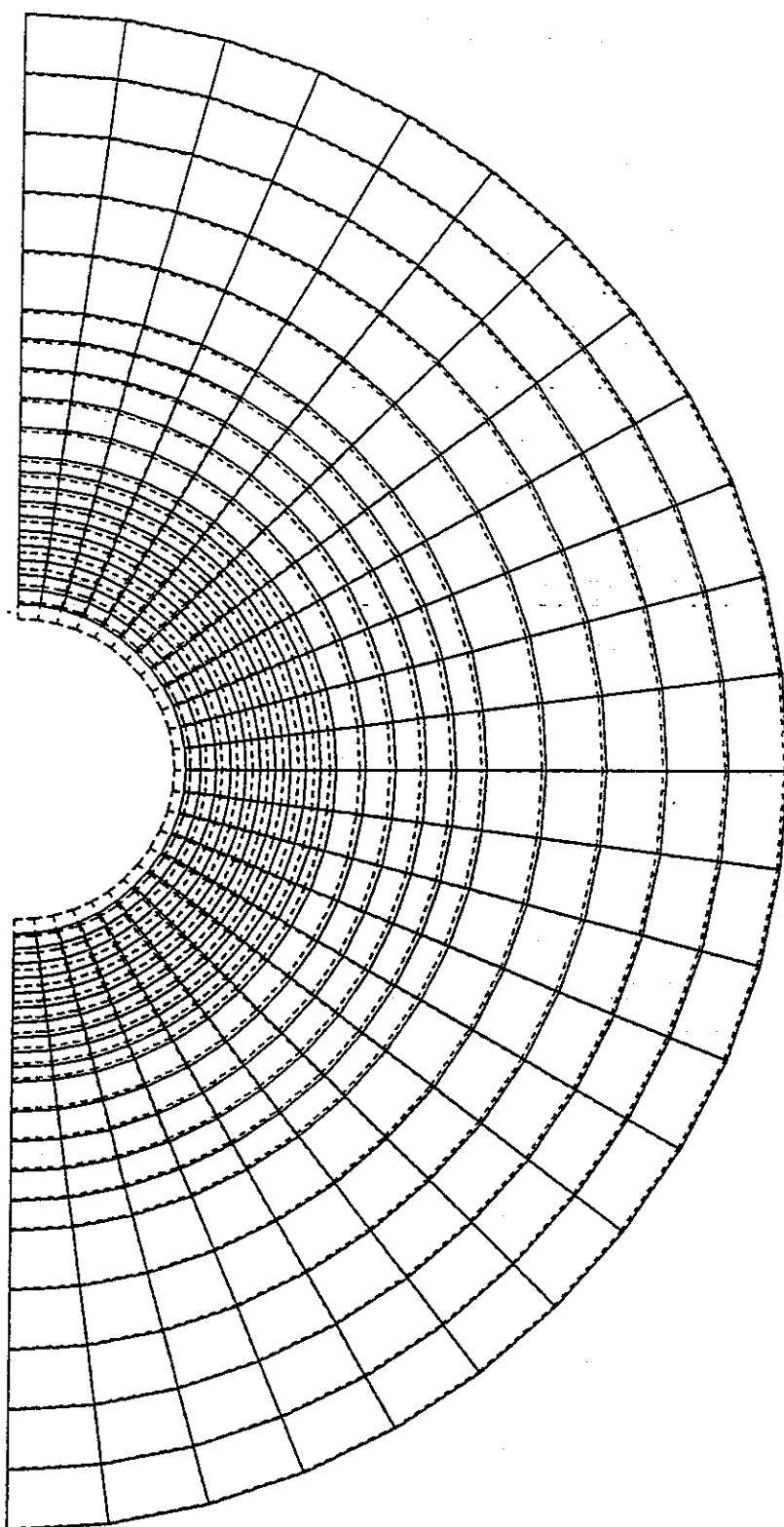
付図-2.22 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



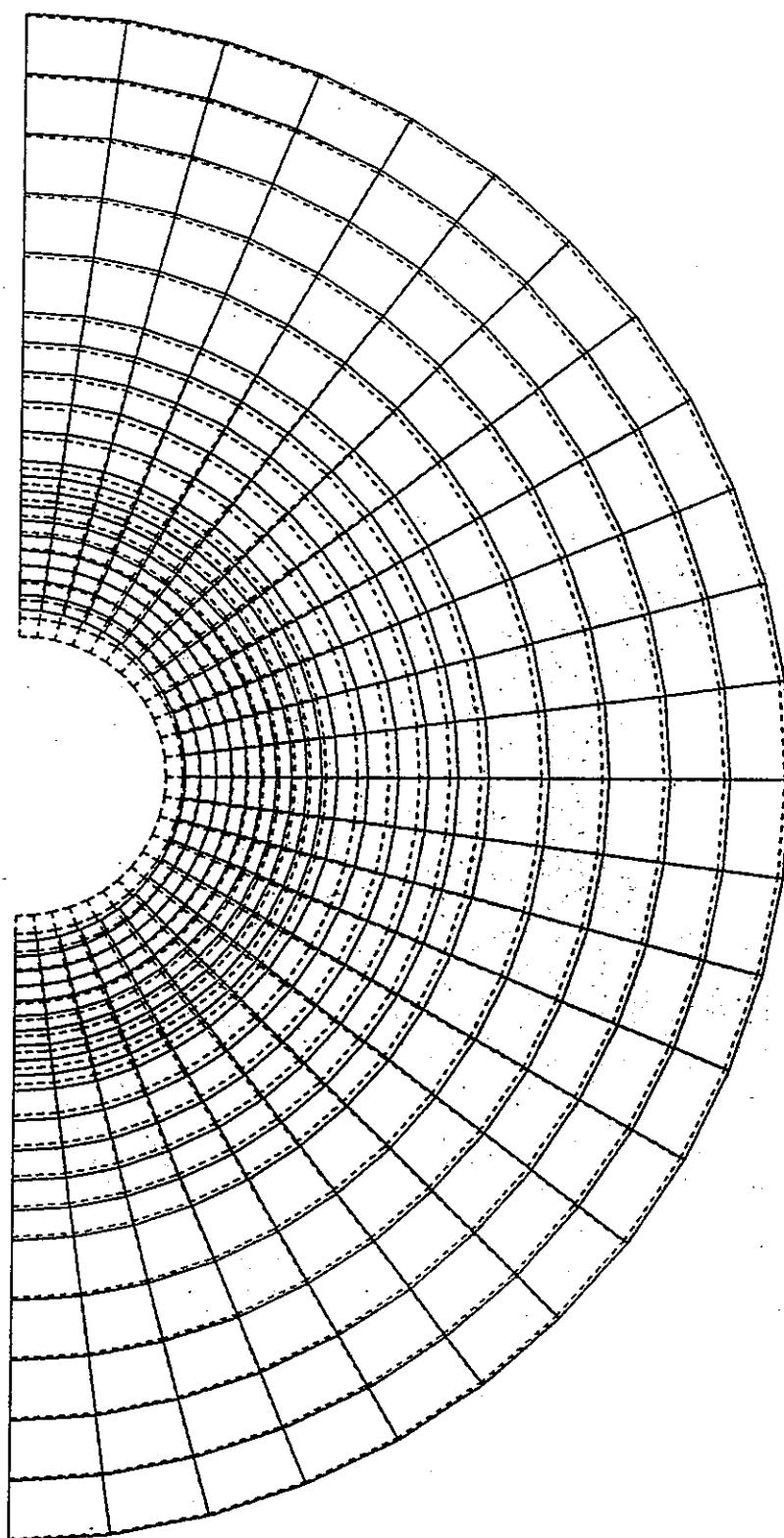
付図-2.23 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1-2 ケース、時間 1秒、S=1/250）



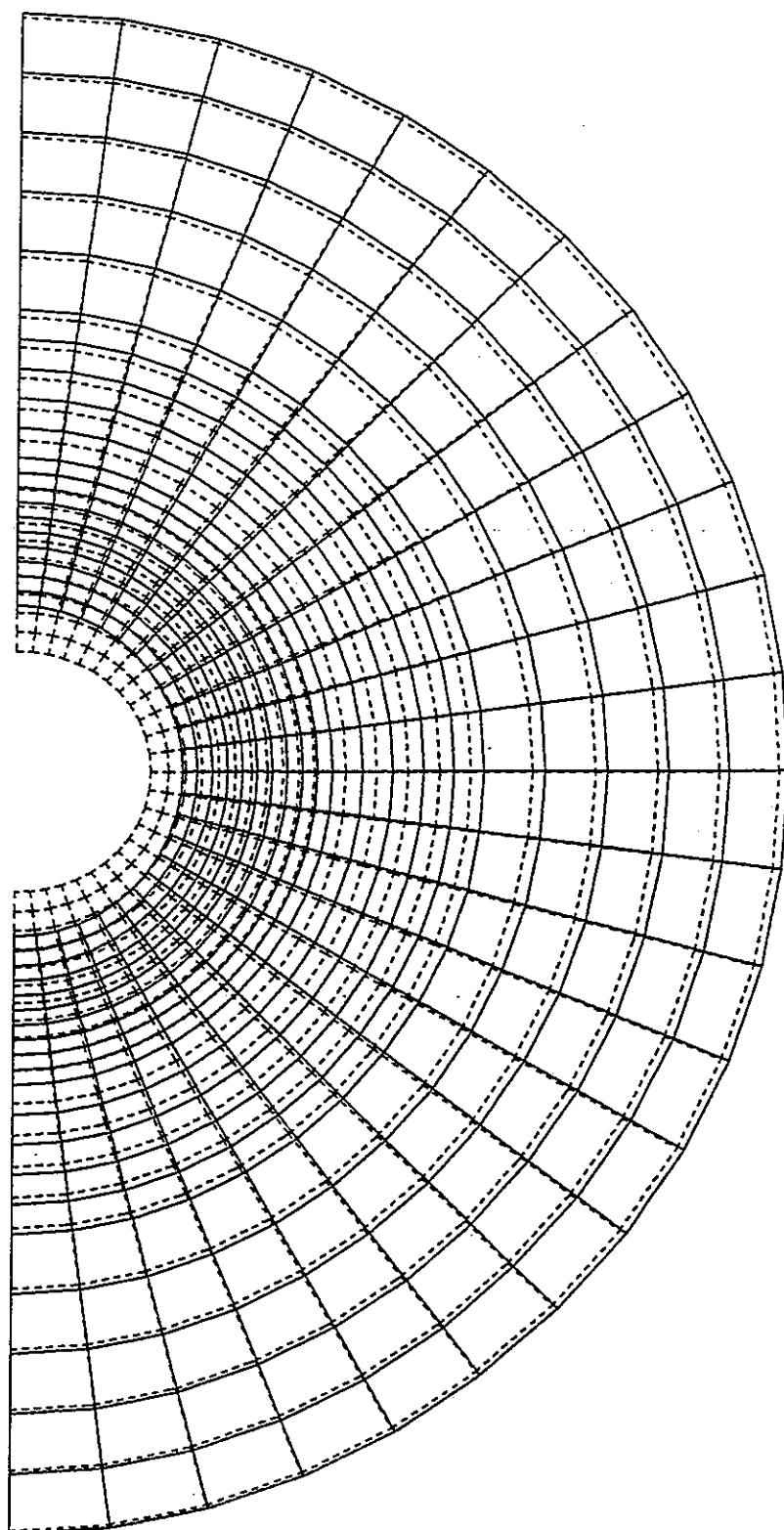
付図-2.24 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 2 ケース、時間 1 年、S=1/250）



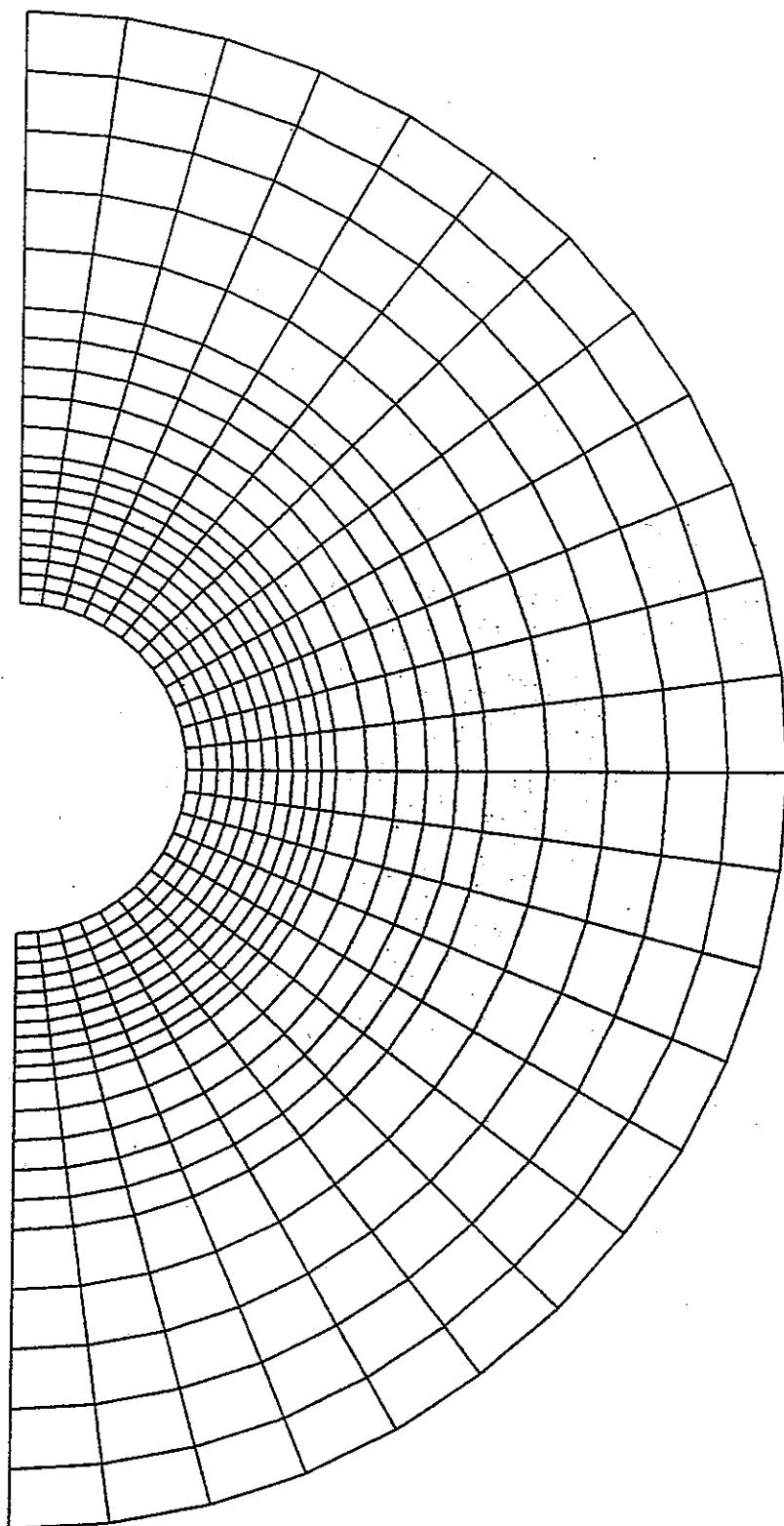
付図-2.25 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 2 ケース、時間 100 年、S=1/250）



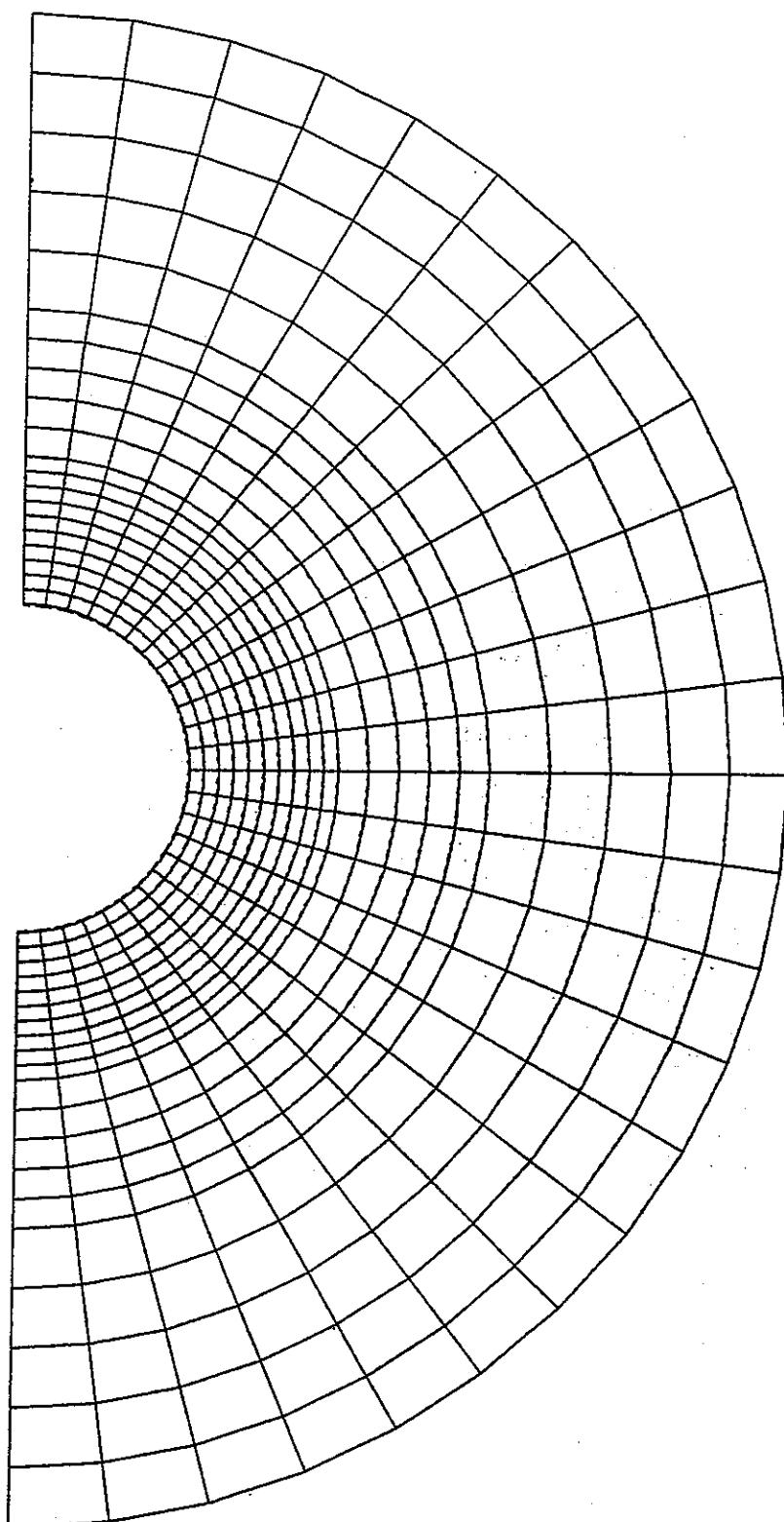
付図-2.26 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 2 ケース、時間 1 万年、S=1/250）



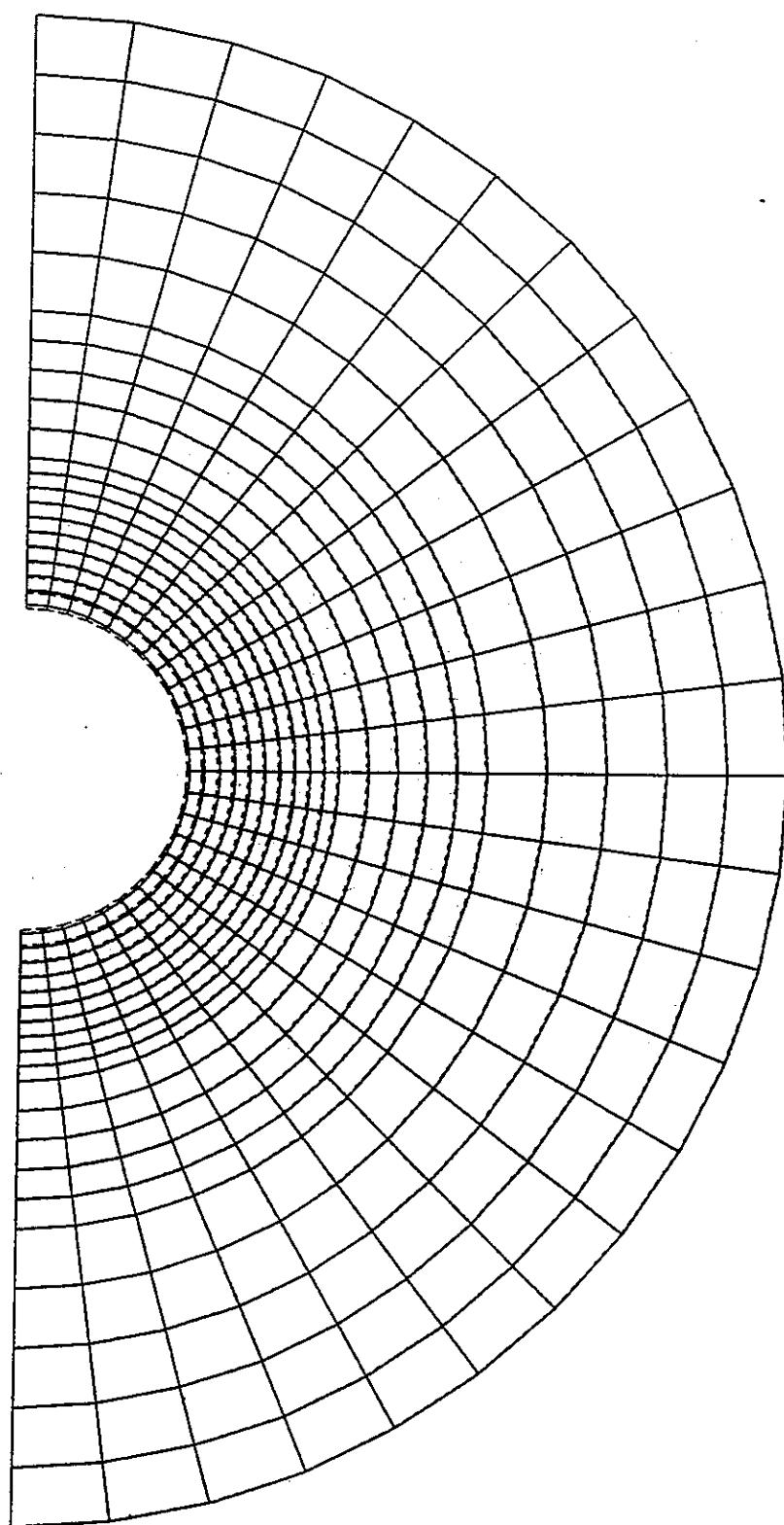
付図-2.27 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 2 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



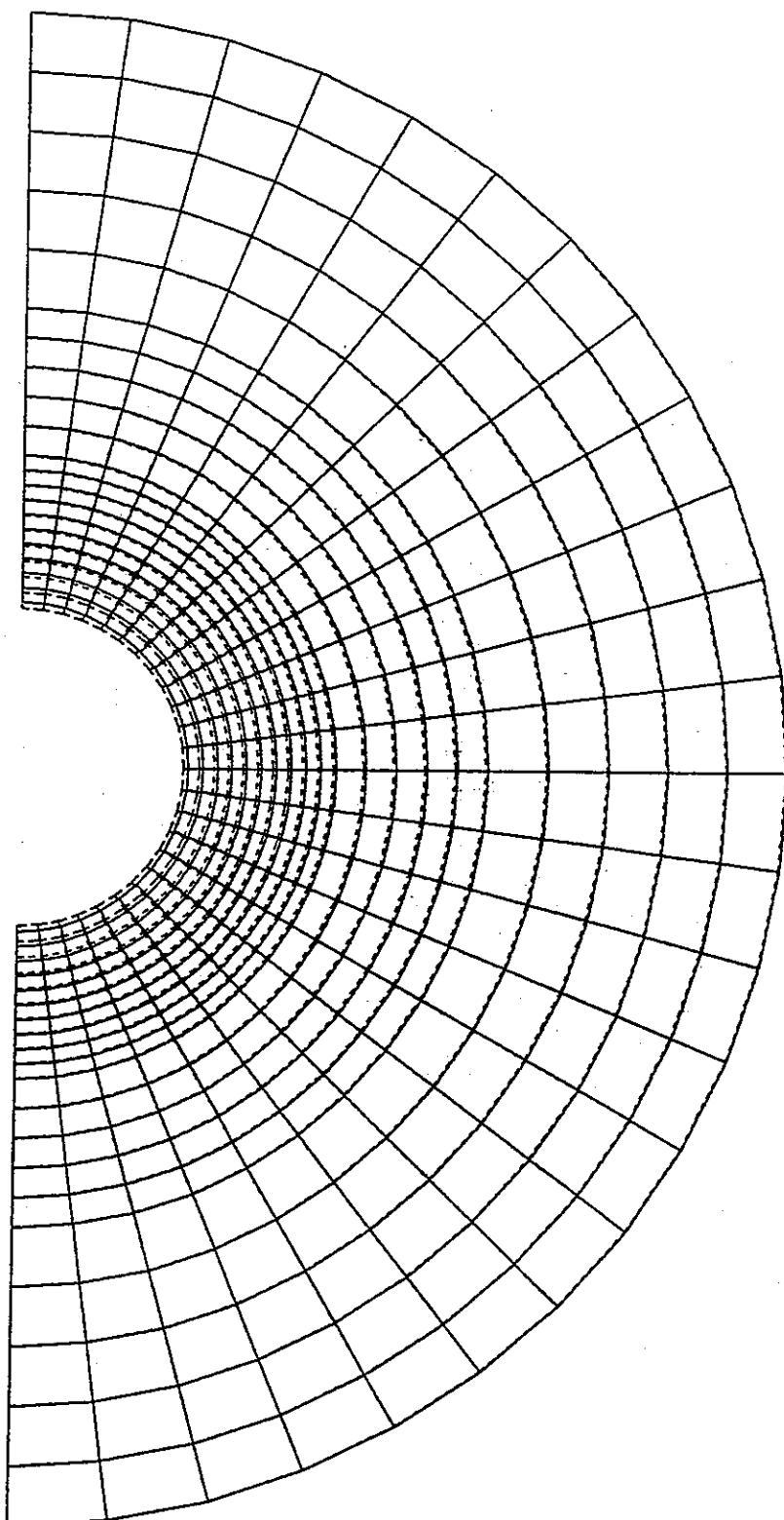
付図-2.28 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間1秒、S=1/250）



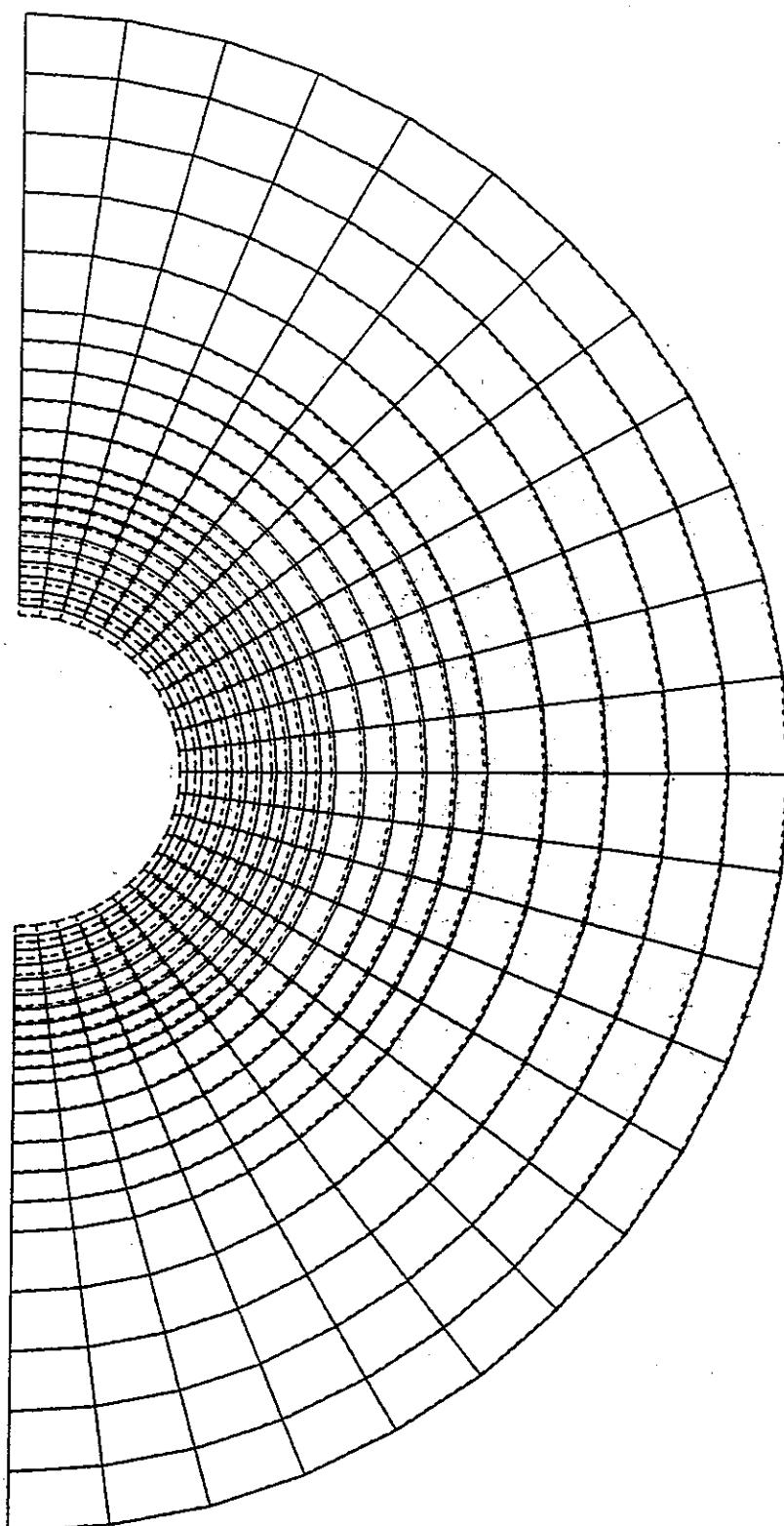
付図-2.29 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間1年、S=1/250）



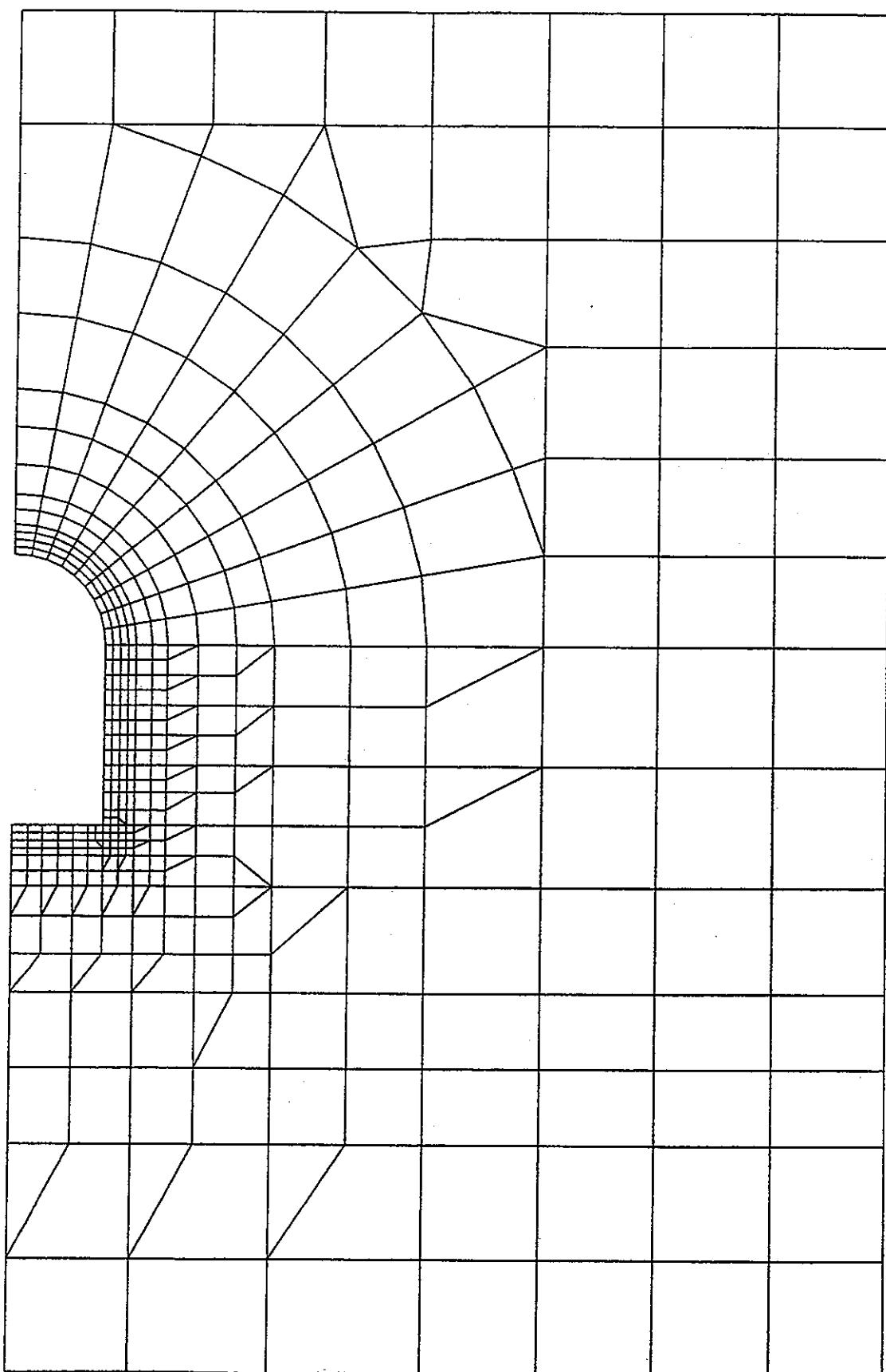
付図-2.30 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 100 年、S=1/250）



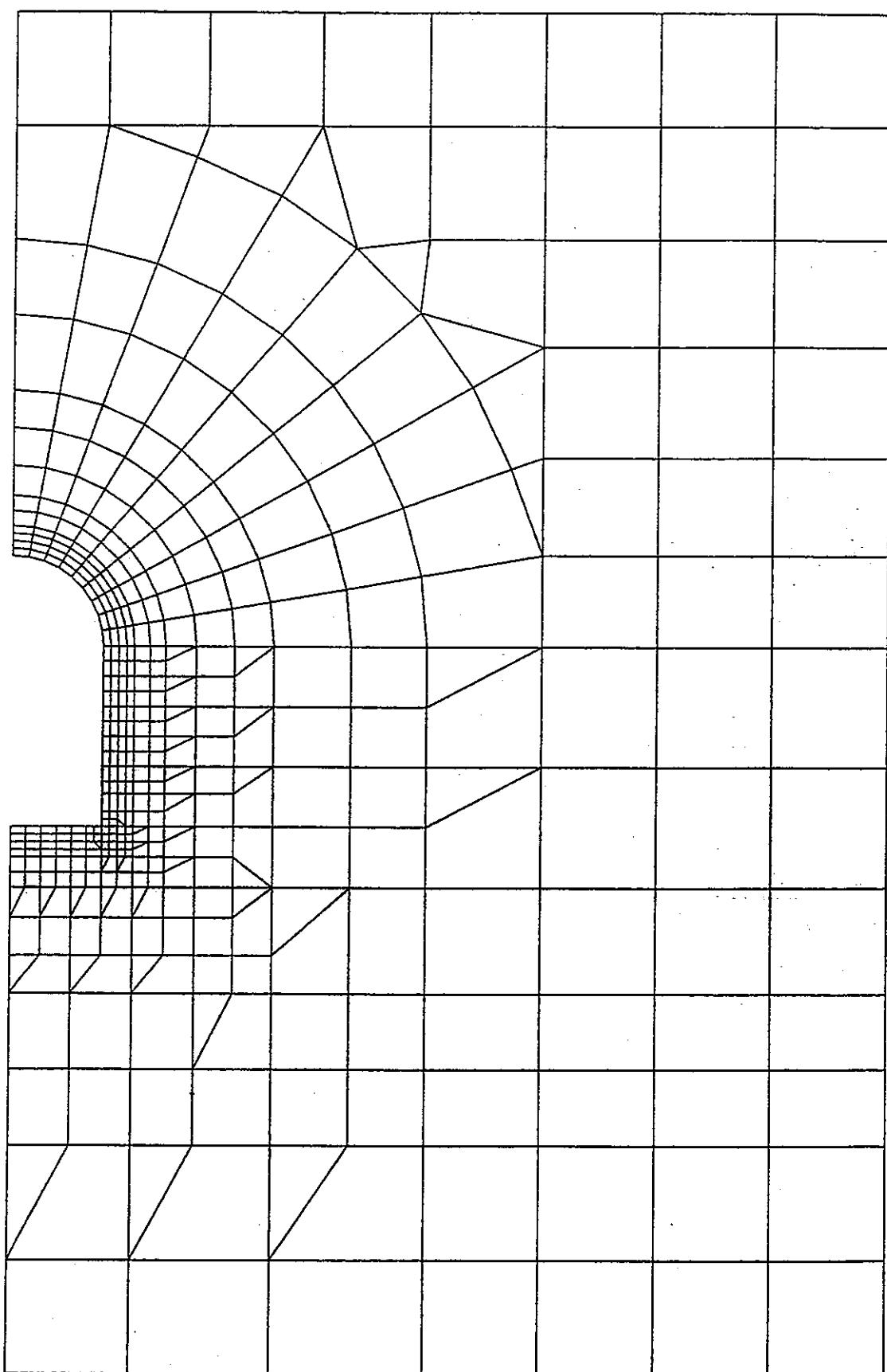
付図-2.31 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 1 万年、S=1/250）



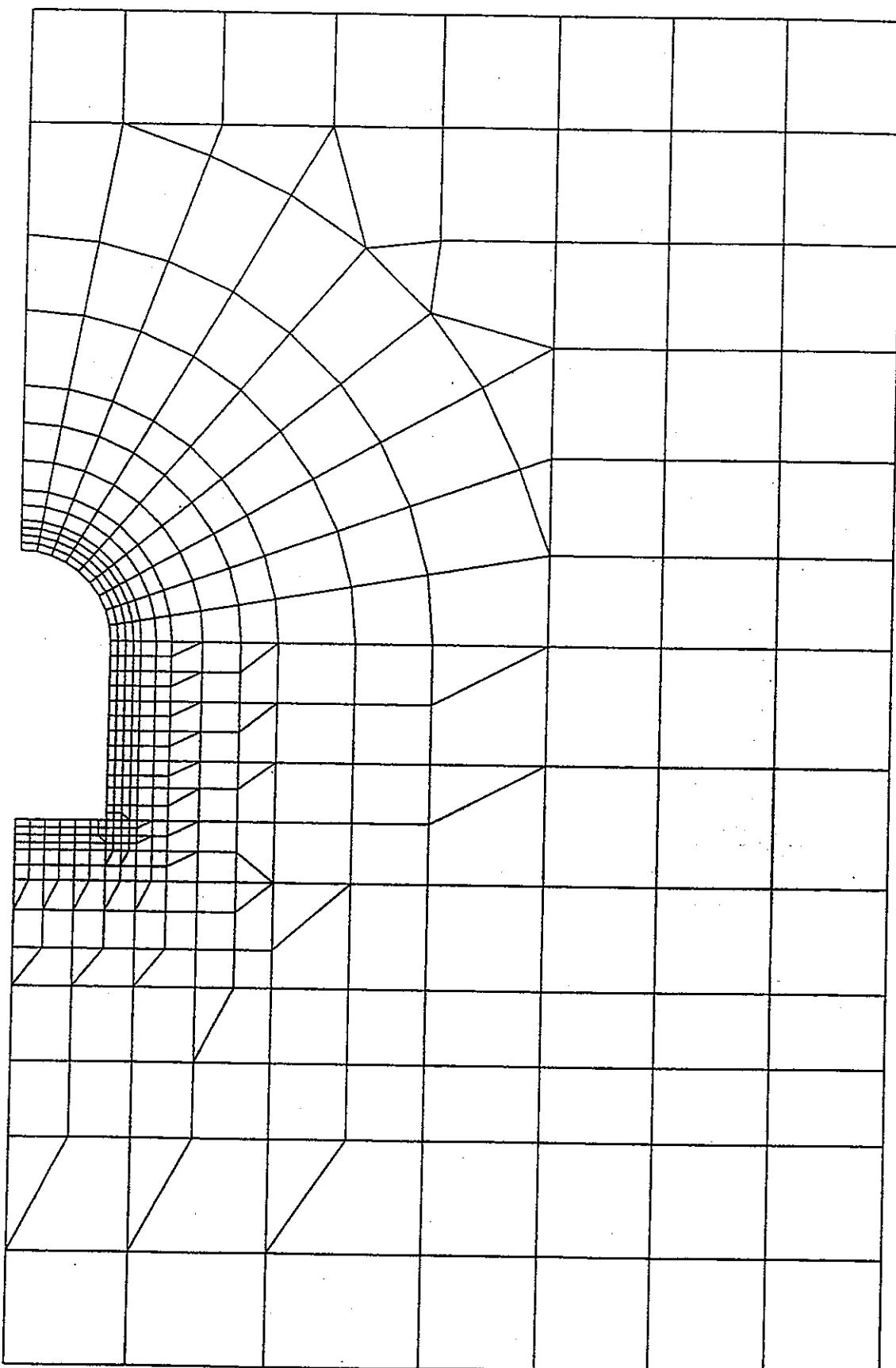
付図-2.32 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 100 万年、 $S=1/250$ ）

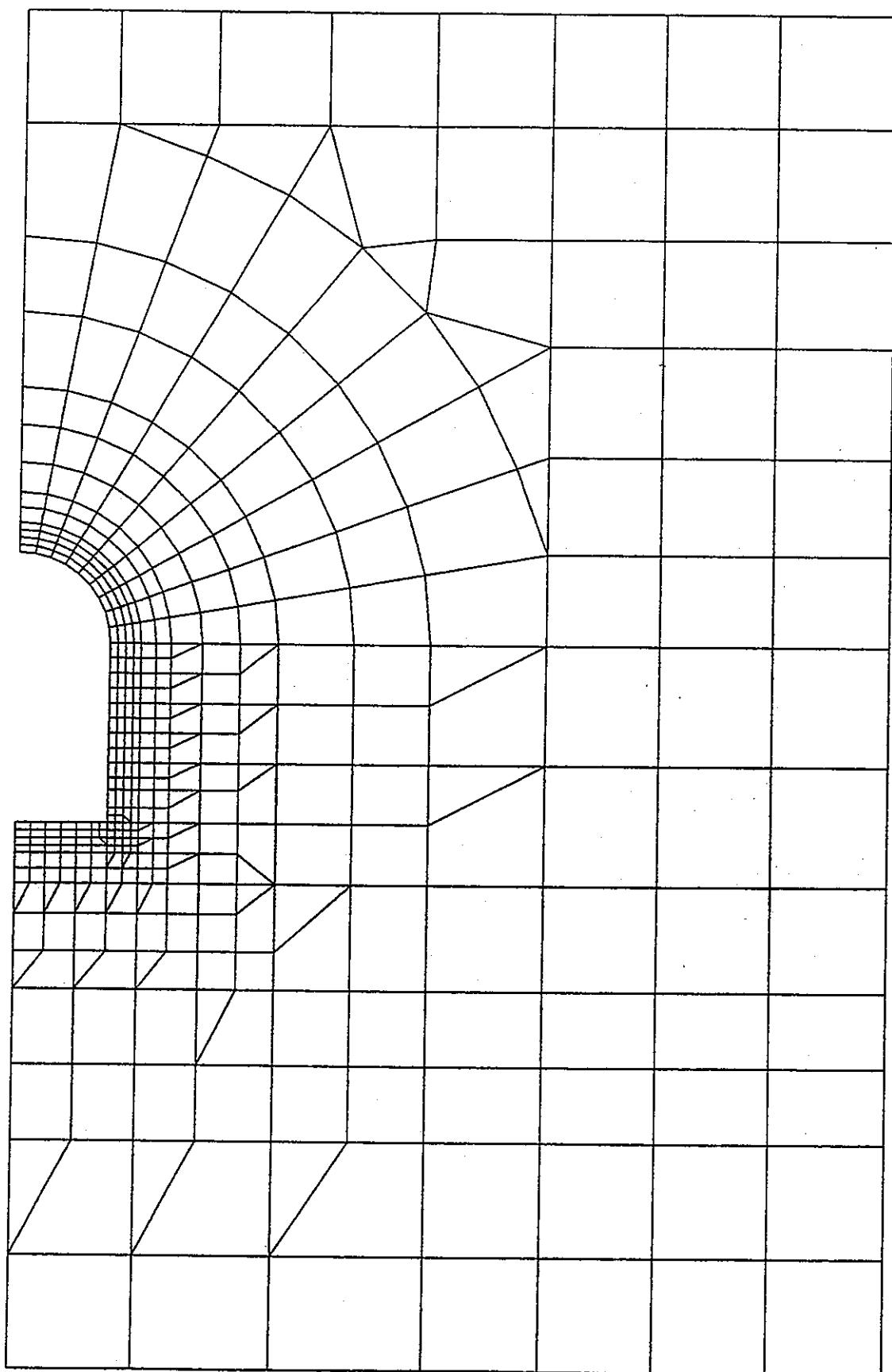


付図-2.33 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 1 秒、S=1/400）

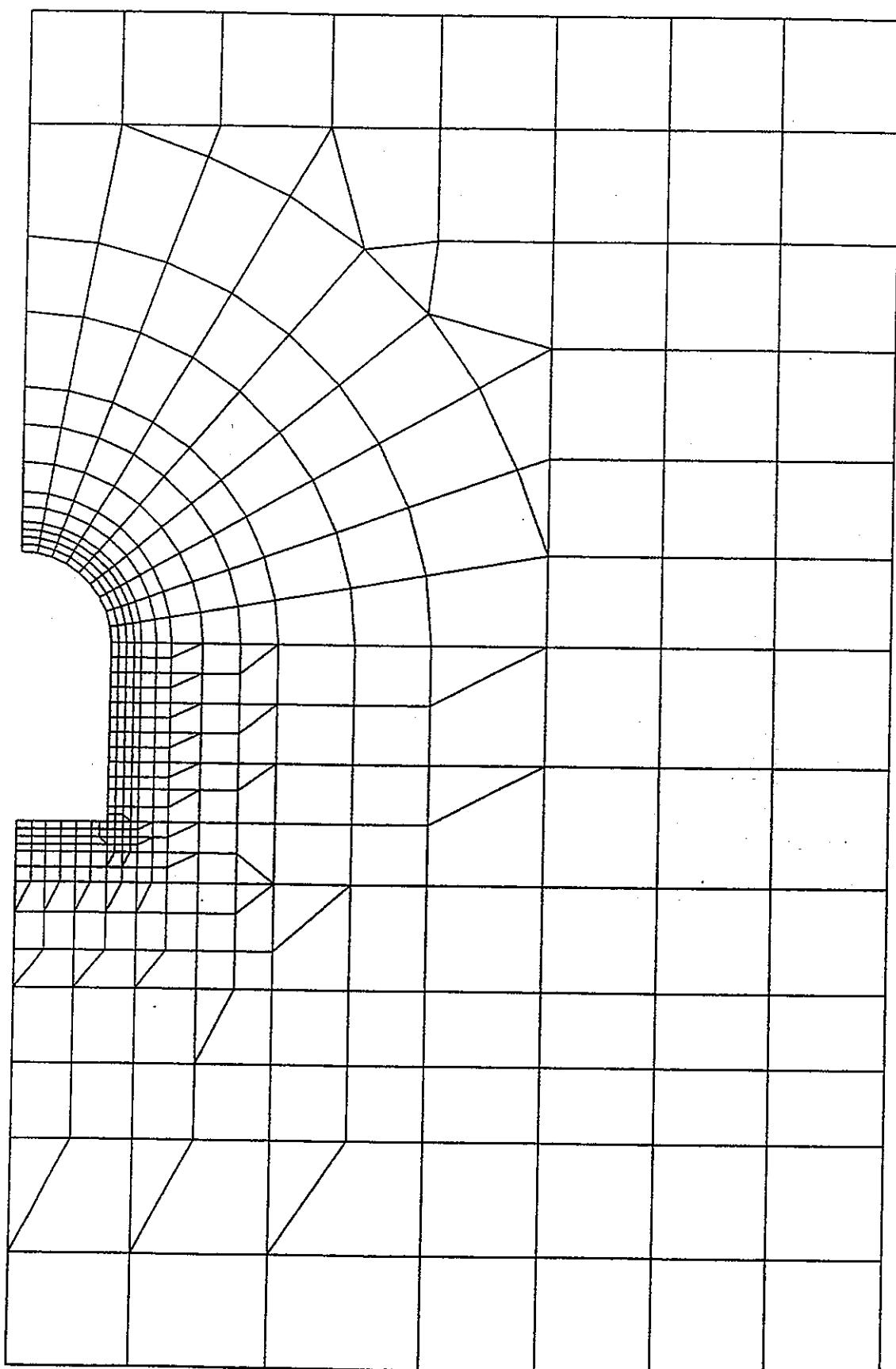


付図-2.34 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 100 年、S=1/400）

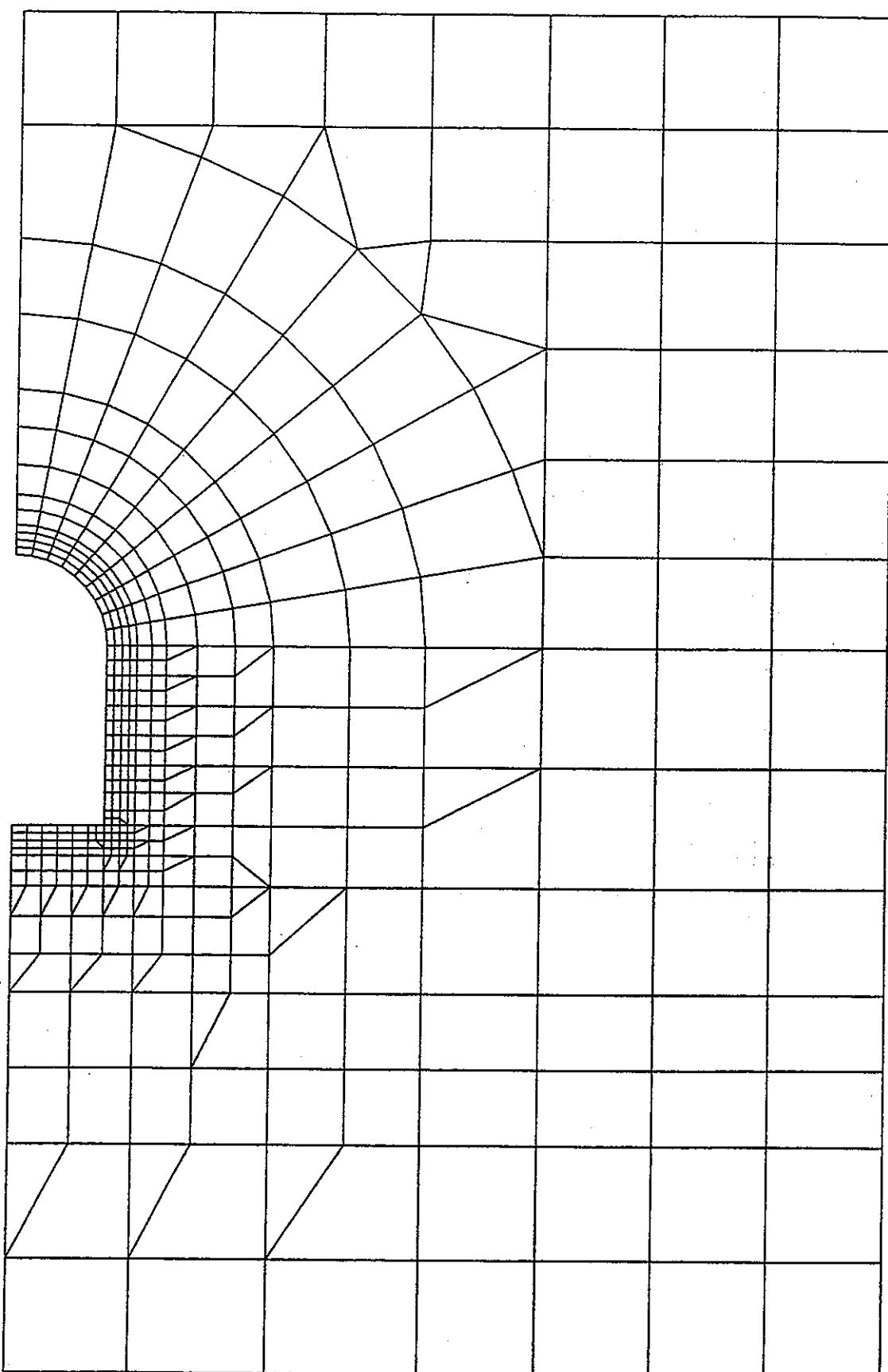
付図-2.35 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 100 万年、 $S=1/400$ ）



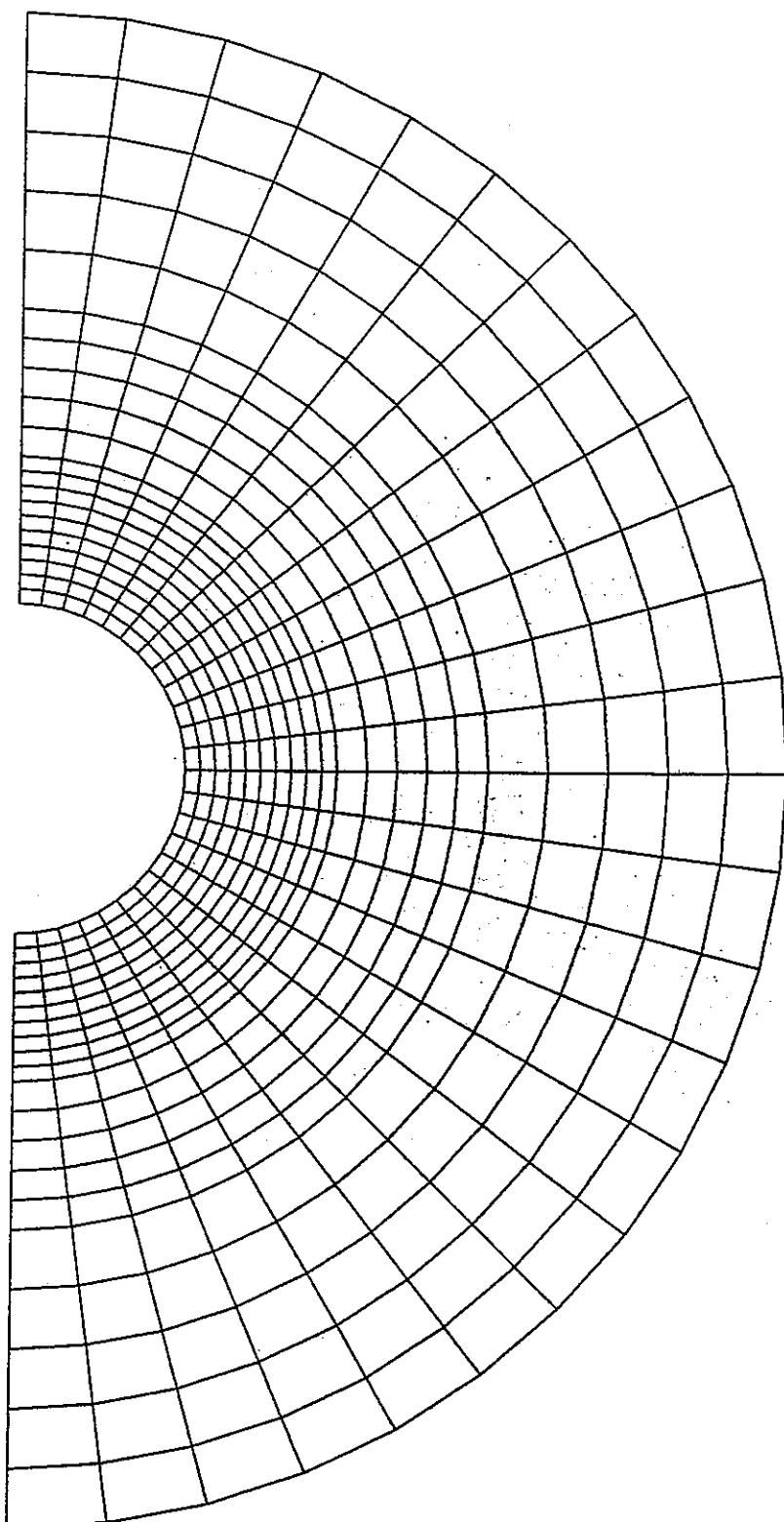
付図-2.36 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



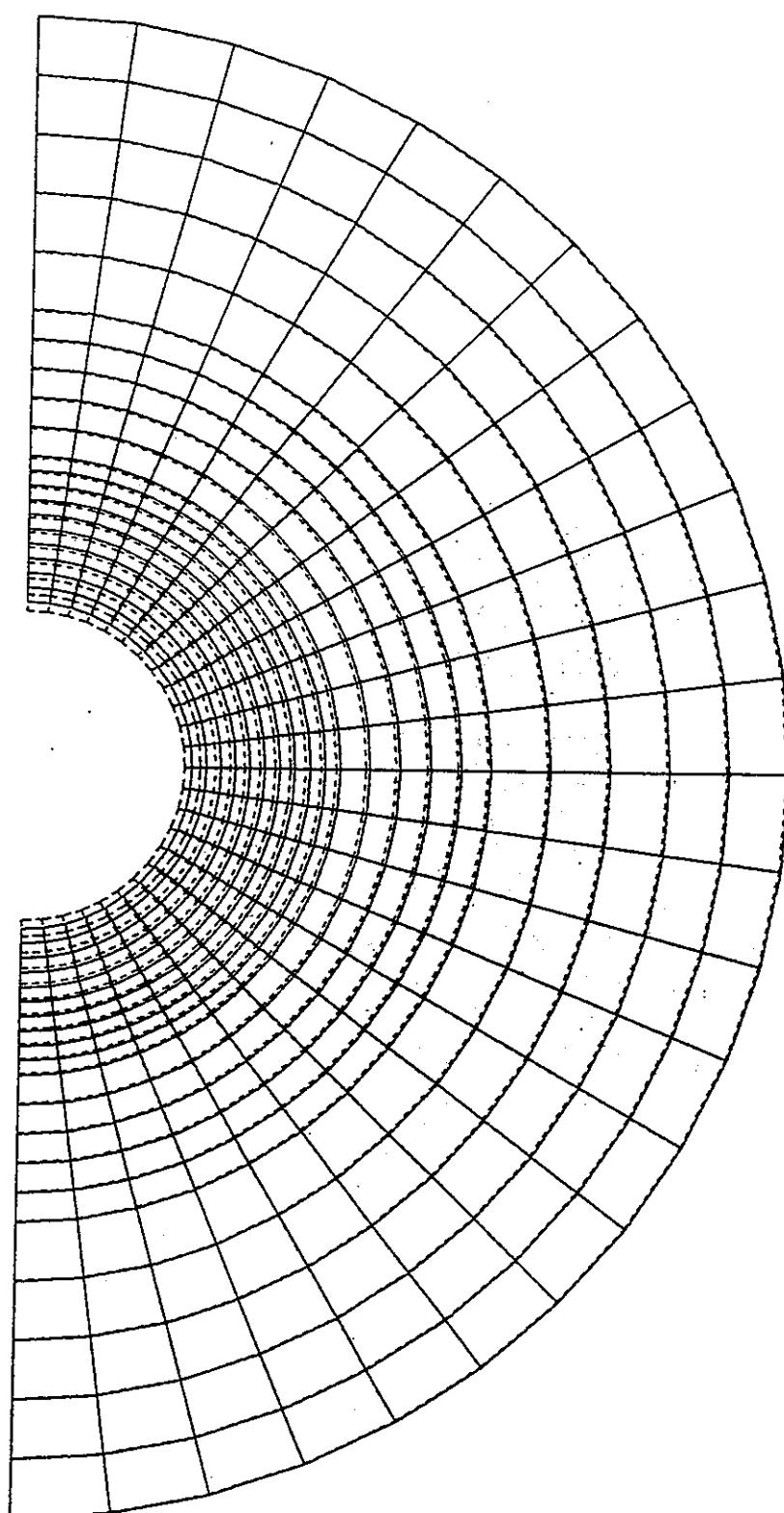
付図-2.37 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 100 年、S=1/400）



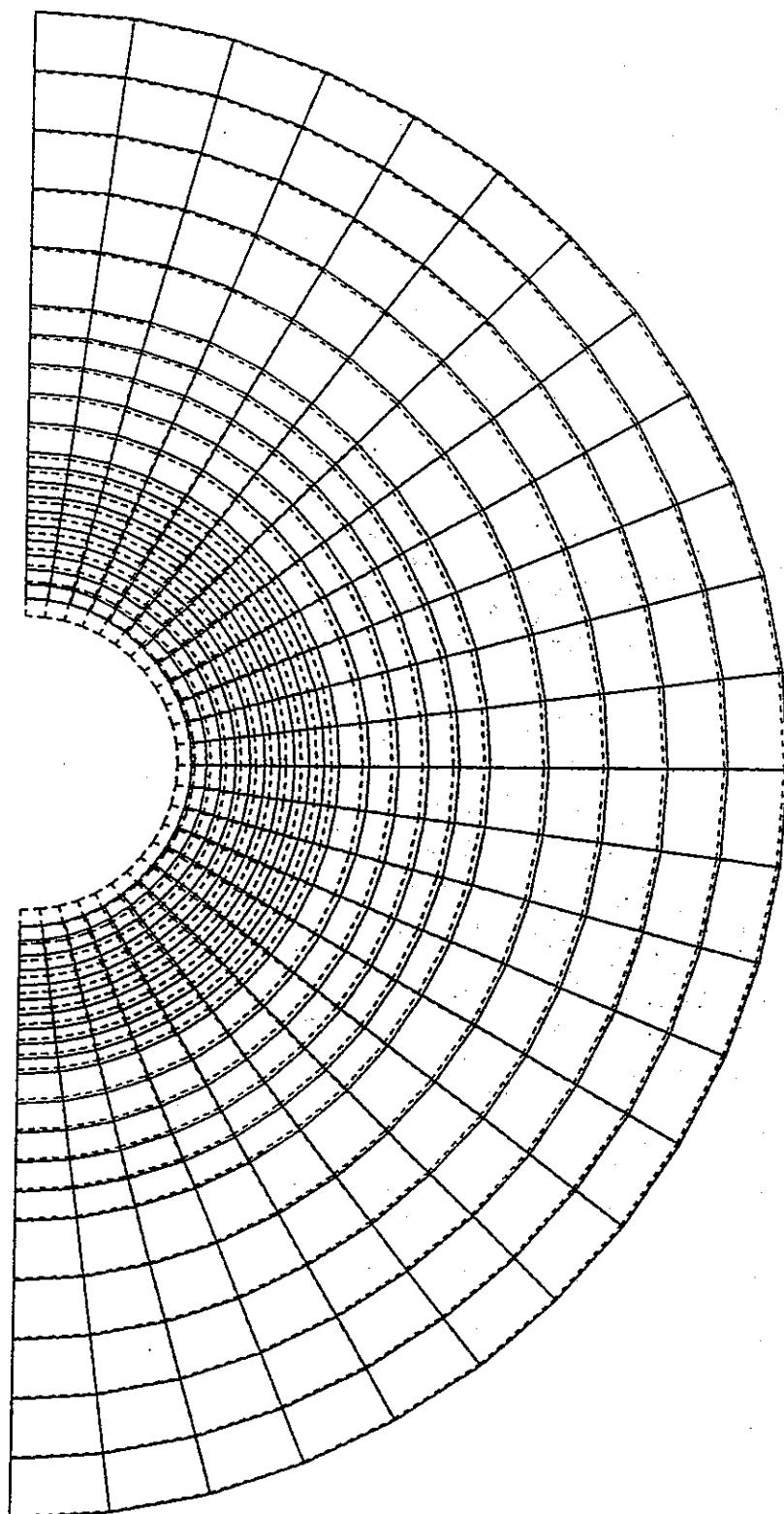
付図-2.38 周辺岩盤変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



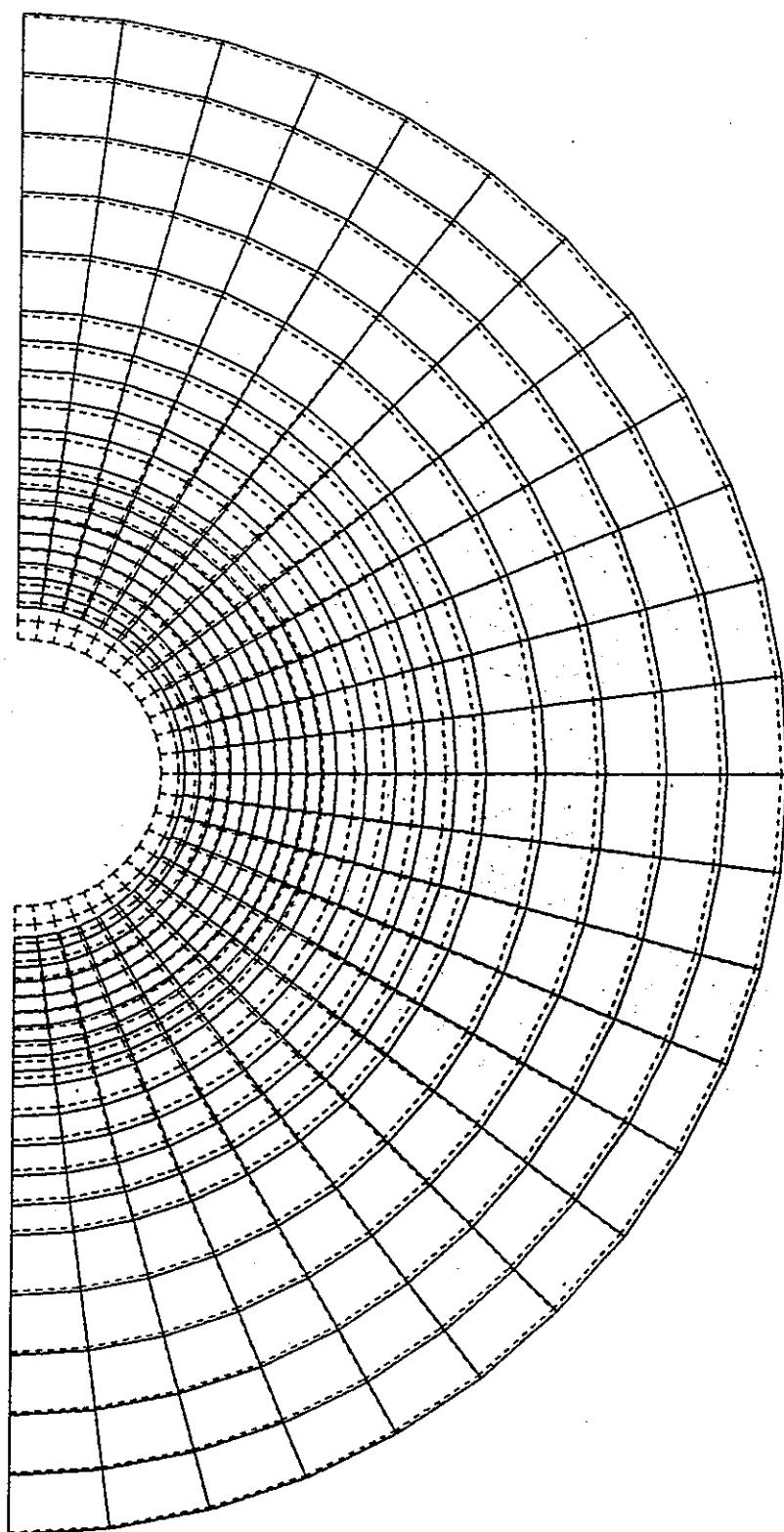
付図-2.39 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 1 秒、S=1/250）



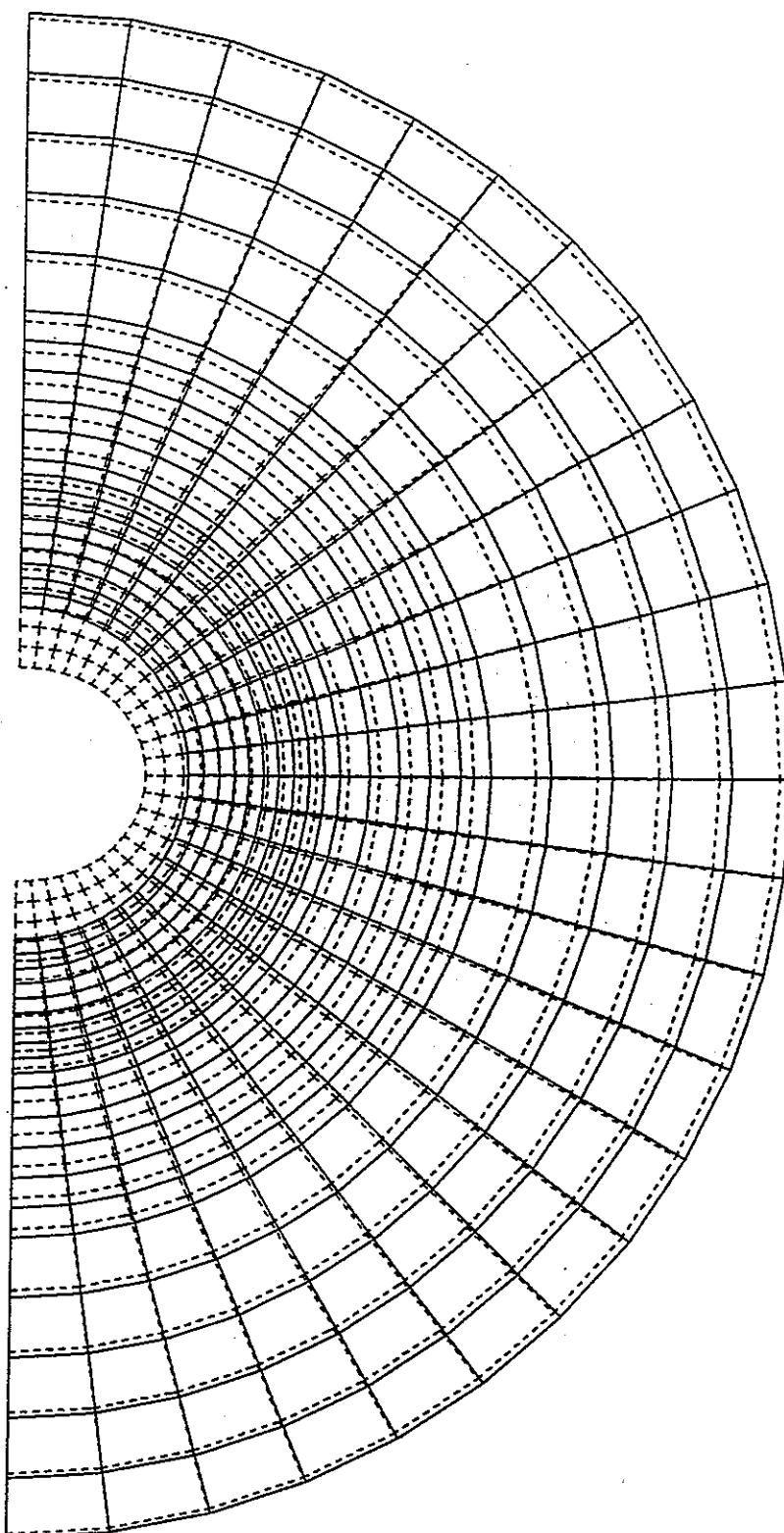
付図-2.40 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 1 ケース、時間 1 年、S=1/250）



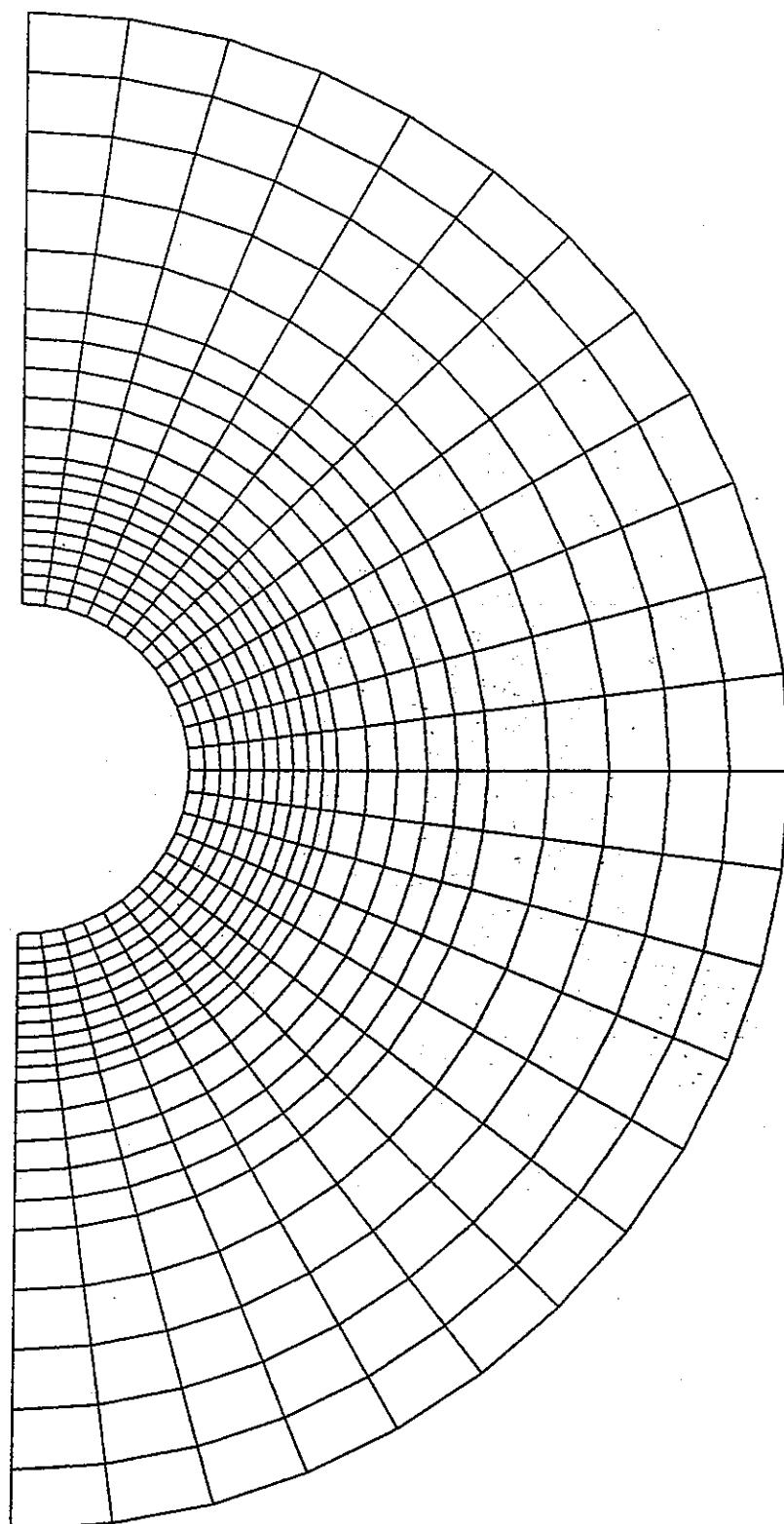
付図-2.41 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 100 年、 $S=1/250$ ）。



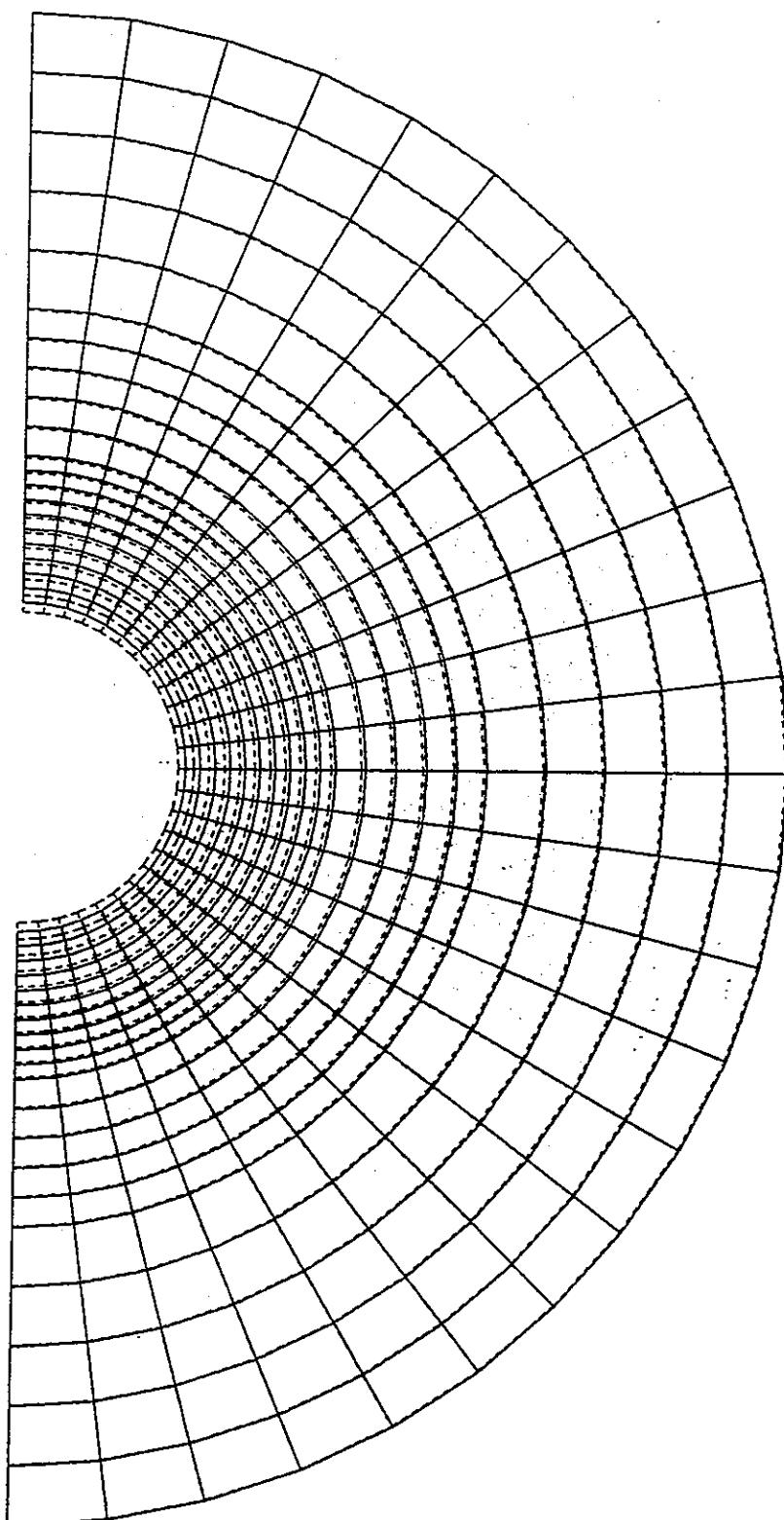
付図-2.42 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 1 ケース、時間 1 万年、S=1/250）



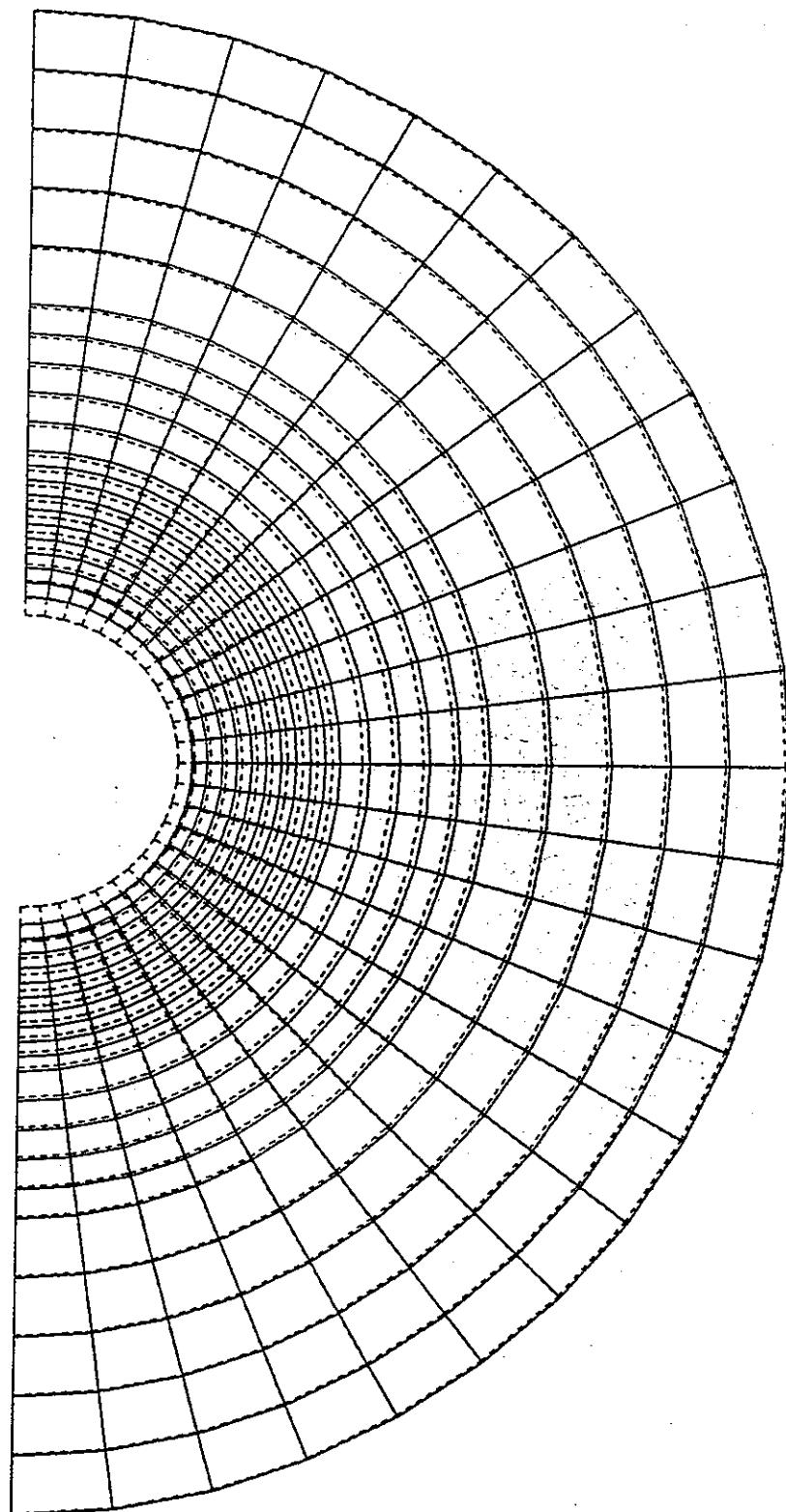
付図-2.43 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 1 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



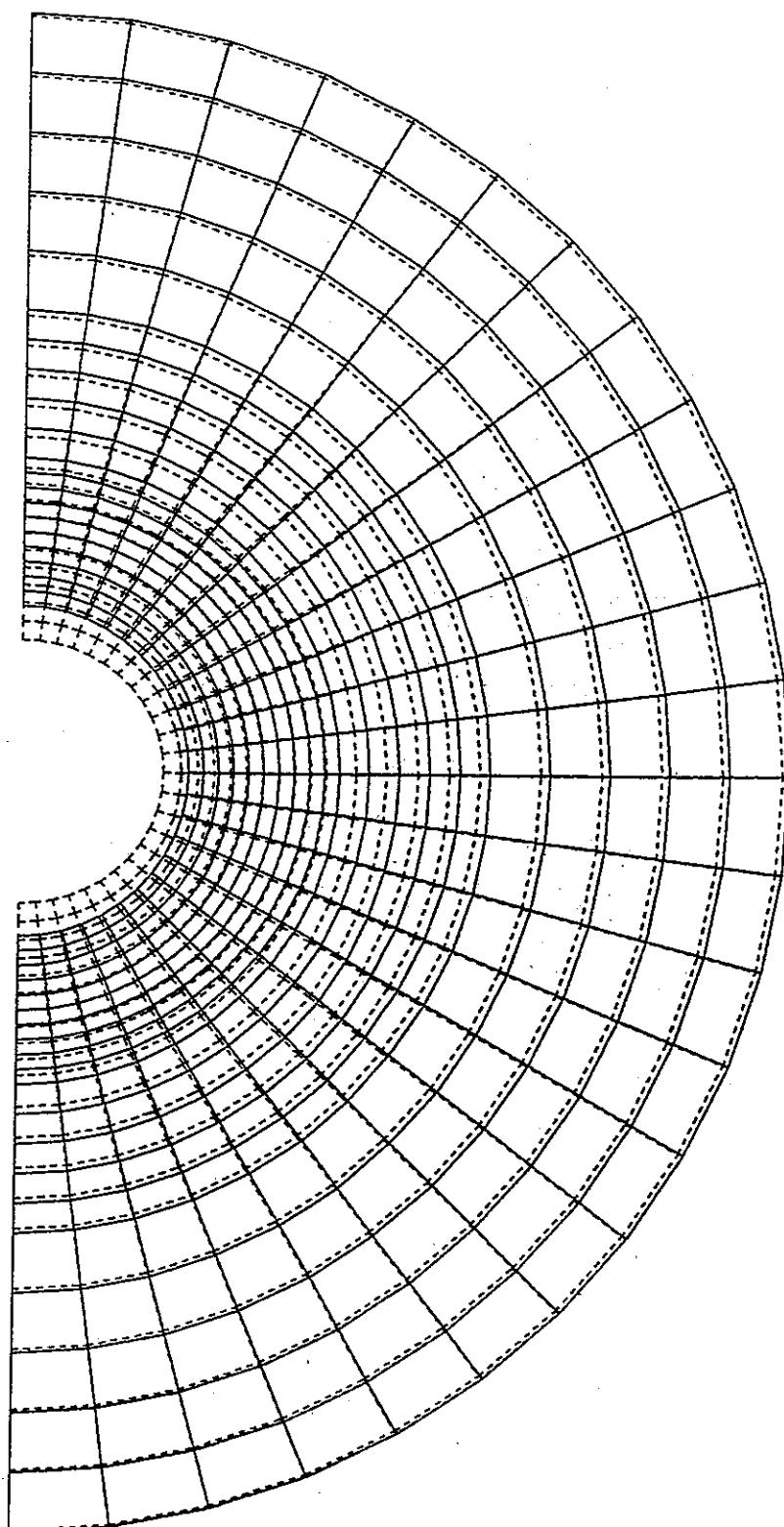
付図-2.44 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 1 秒、S=1/250）



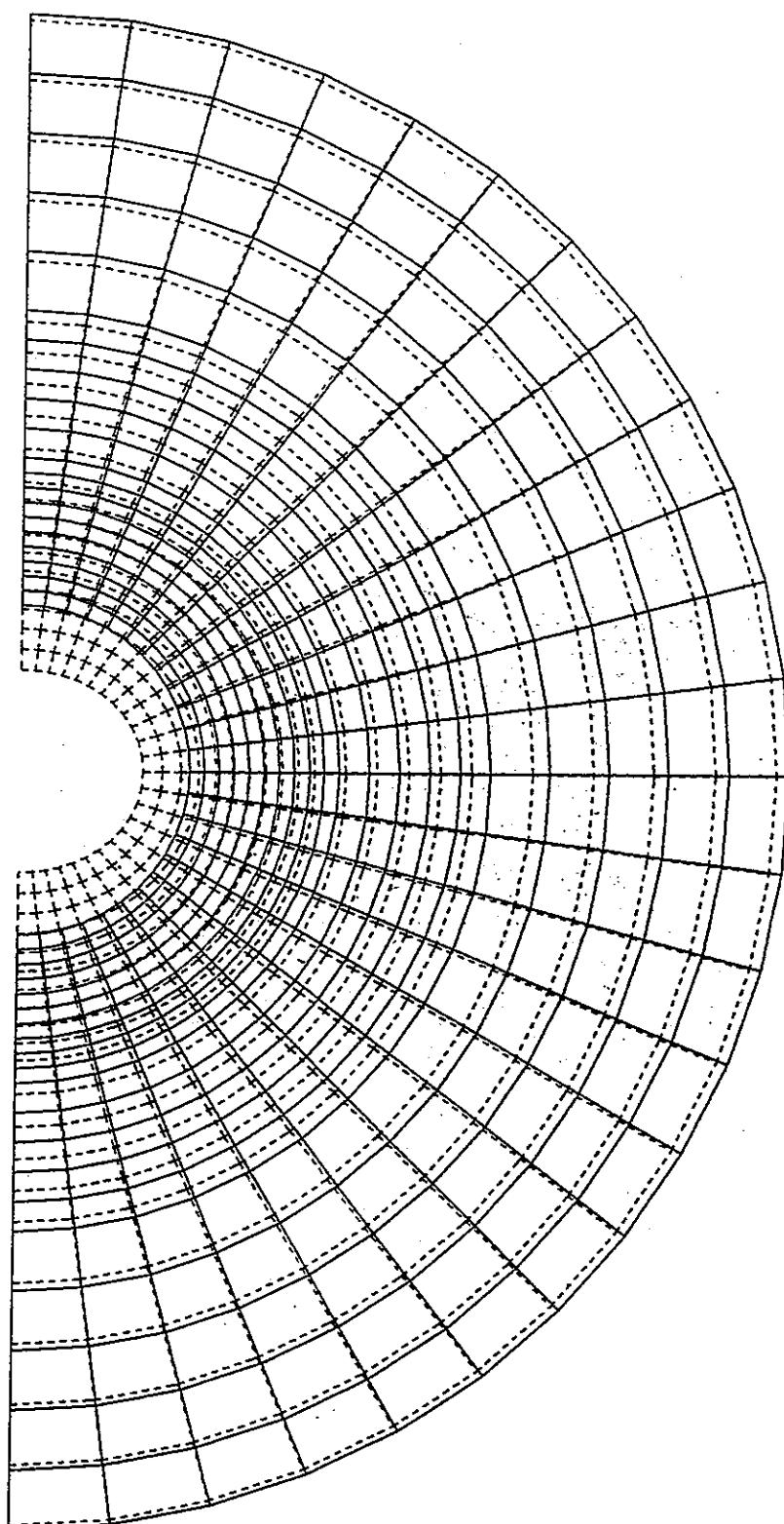
付図-2.45 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間1年、S=1/250）



付図-2.46 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 100 年、S=1/250）

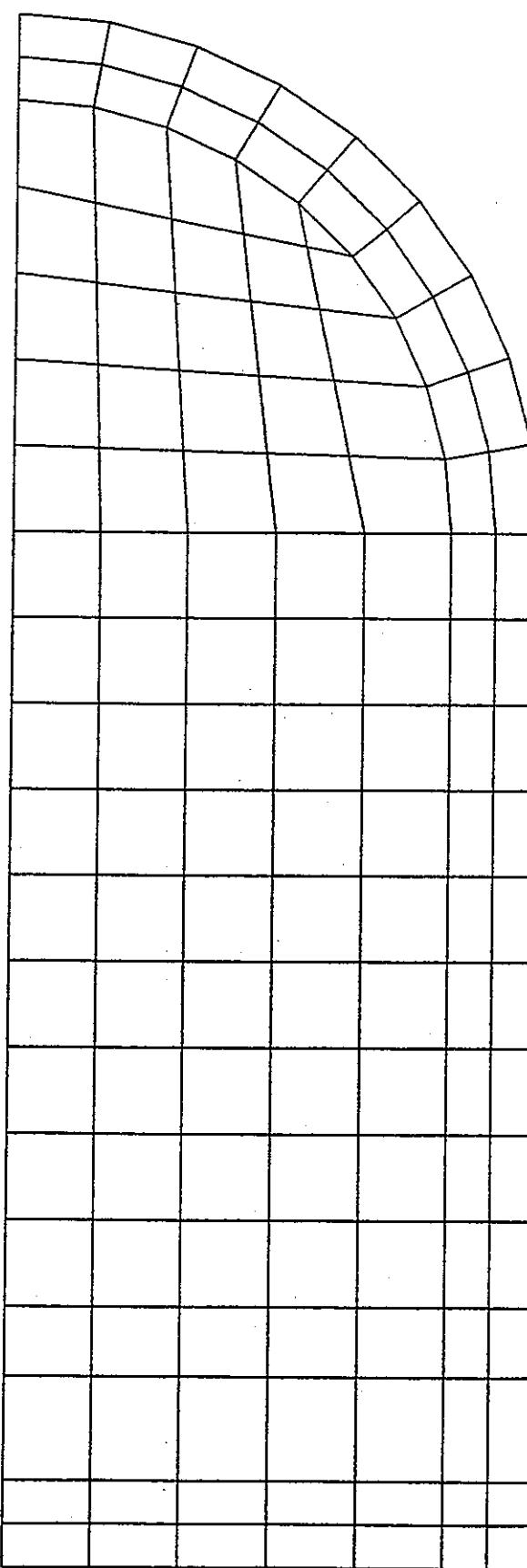


付図-2.47 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 1 万年、S=1/250）

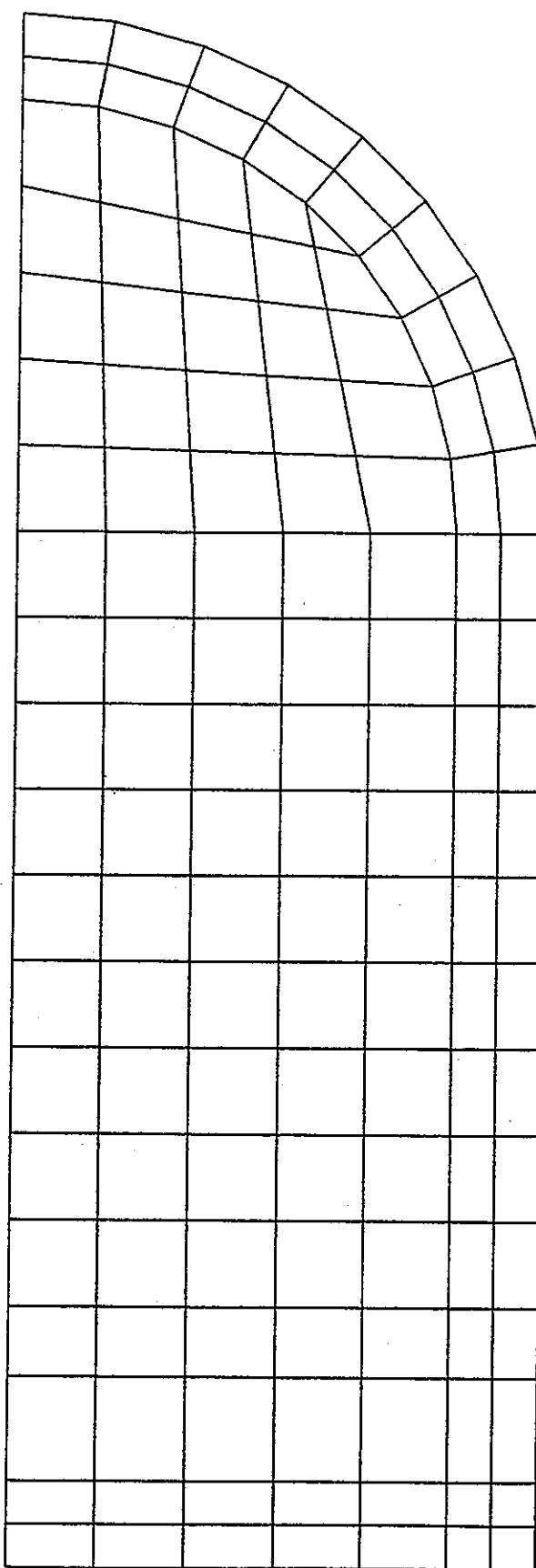


付図-2.48 周辺岩盤変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 2 ケース、時間 100 万年、S=1/250）

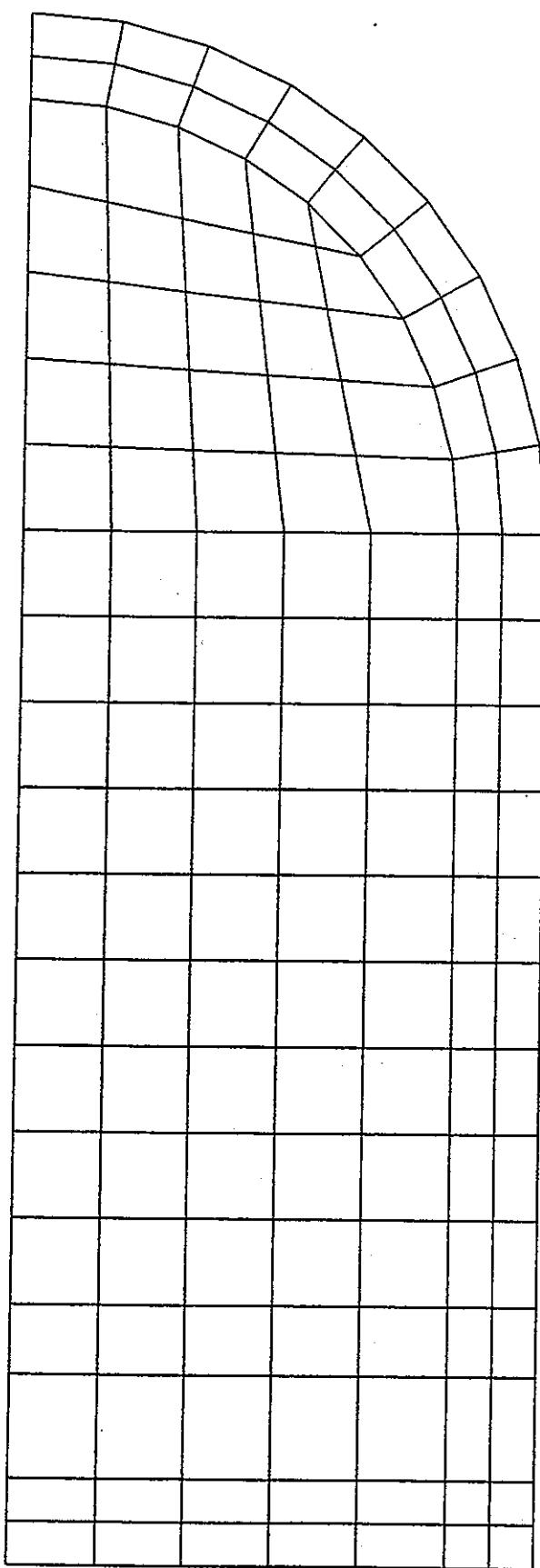
付録-3 処分坑道内変形図



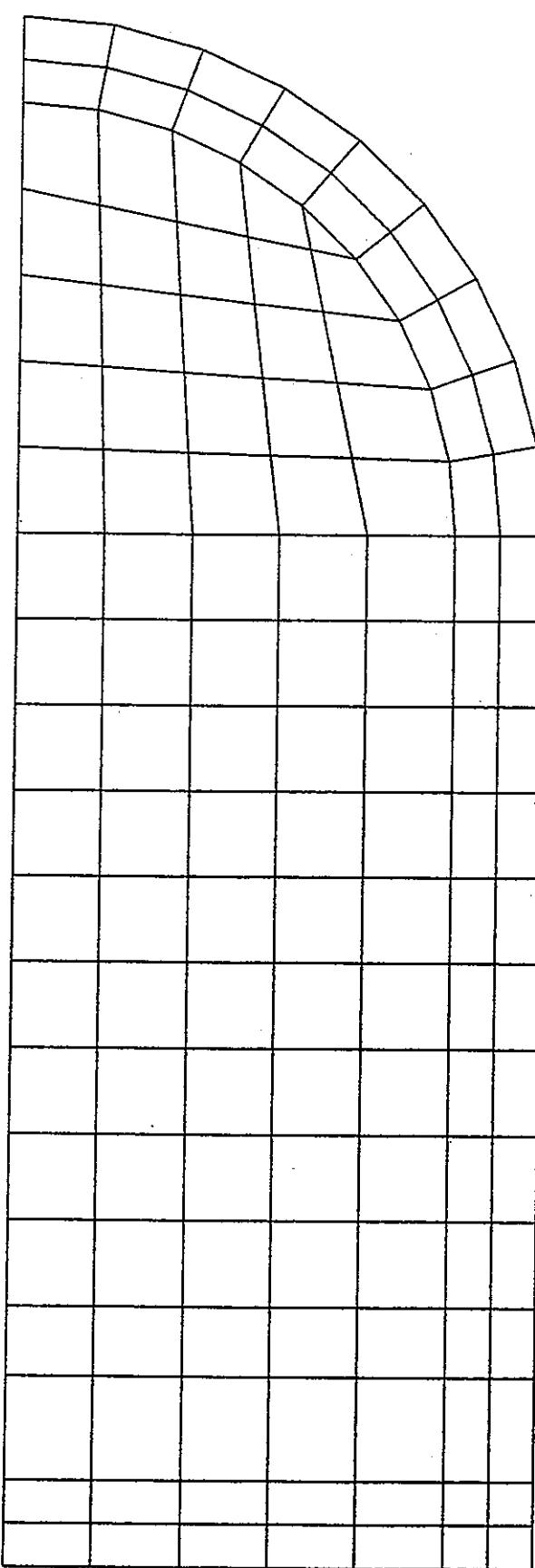
付図-3.1 処分坑道内変形図（結晶質岩系岩盤：A 2 - 1 ケース、時間 1 秒、S=1/80）



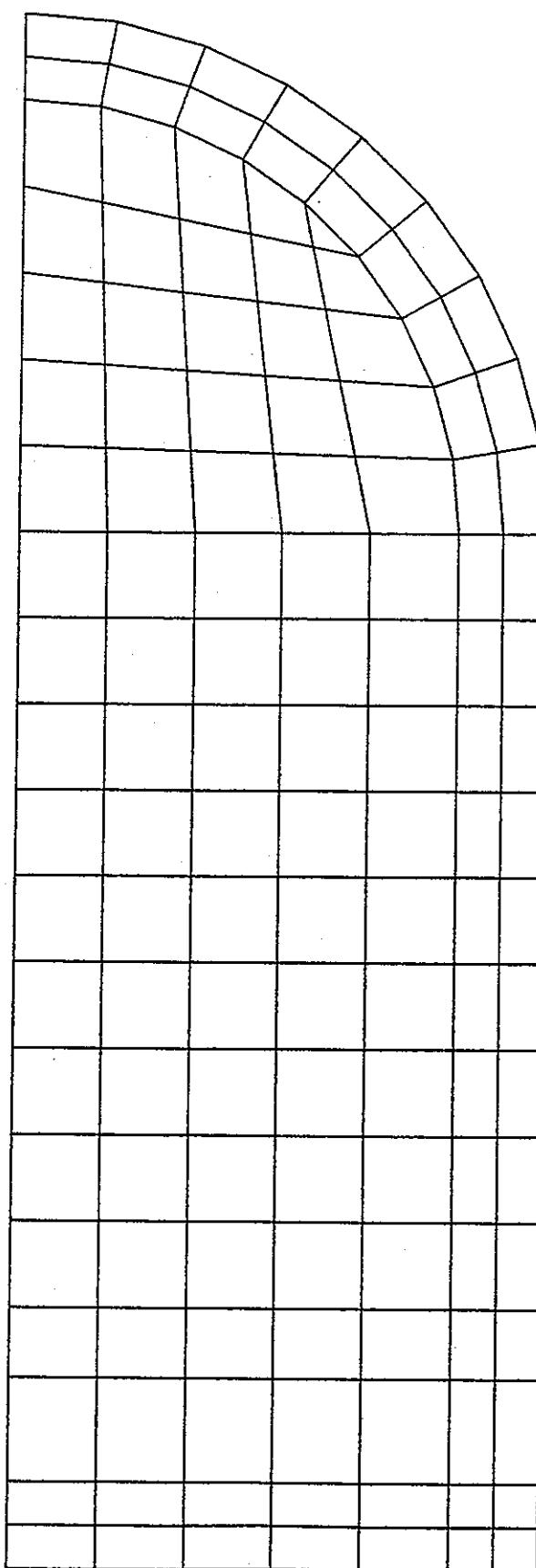
付図-3.2 処分坑道内変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 100 年、S=1/80）



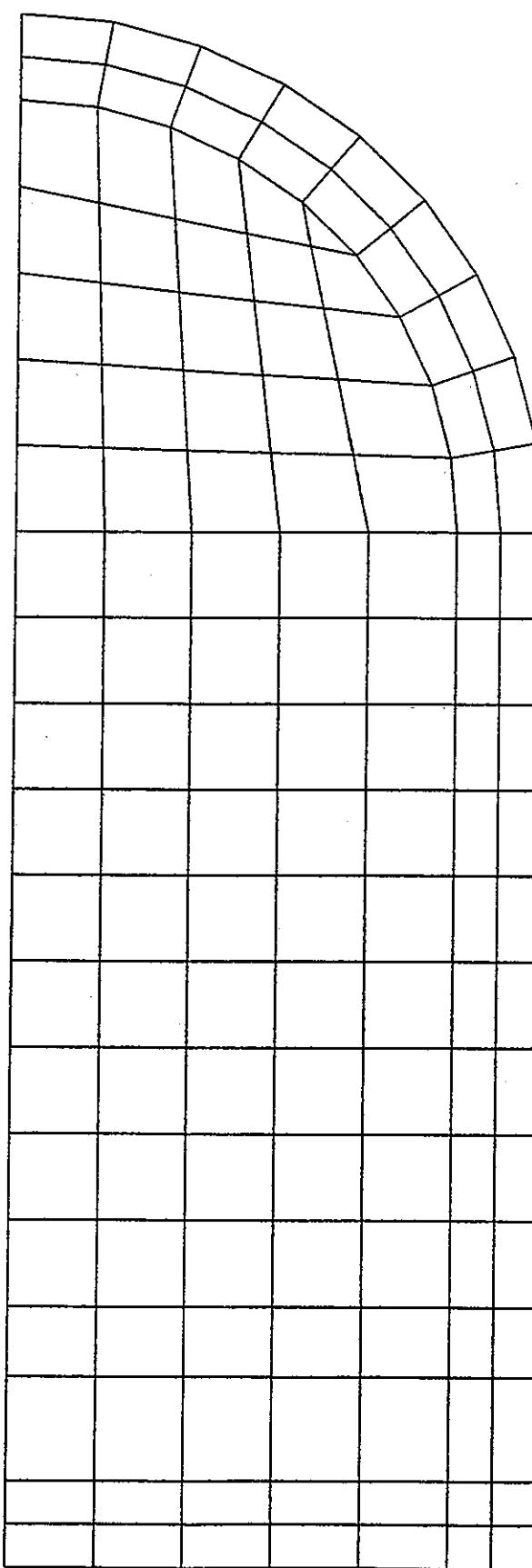
付図-3.3 処分坑道内変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 100 万年、S=1/80）



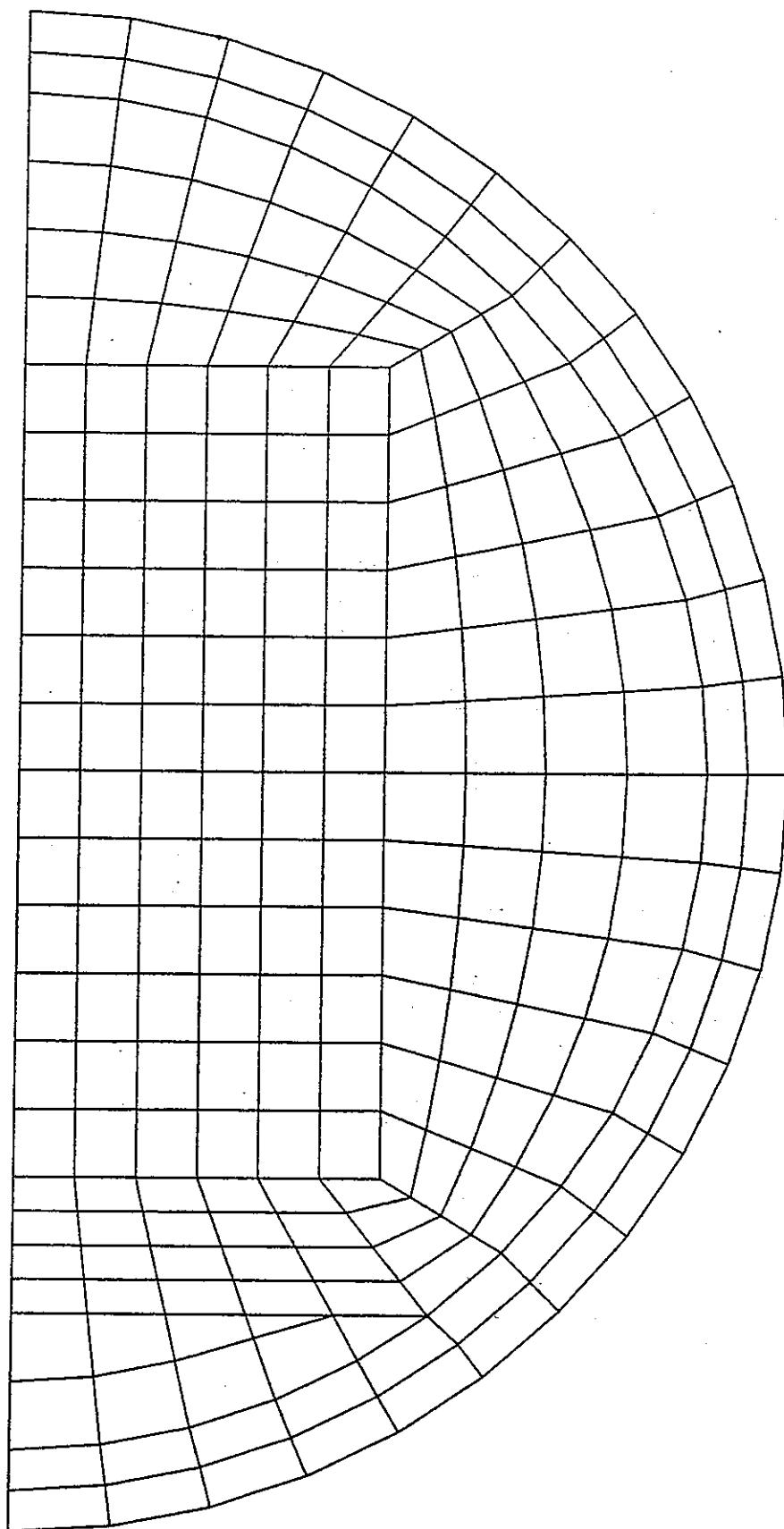
付図-3.4 処分坑道内変形図（結晶質岩系岩盤：A.2-2 ケース、時間1秒、S=1/80）



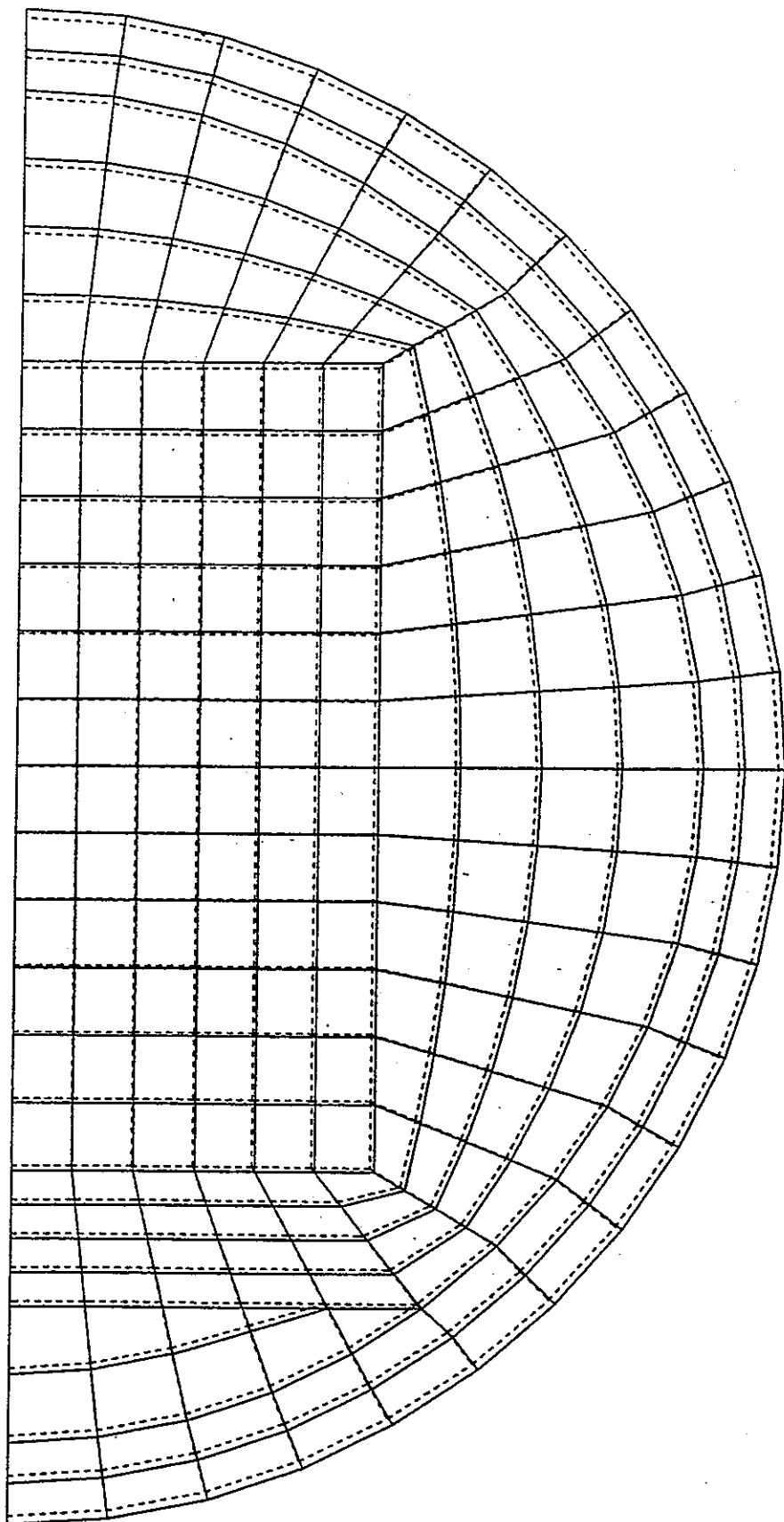
付図-3.5 処分坑道内変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 100 年、S=1/80）



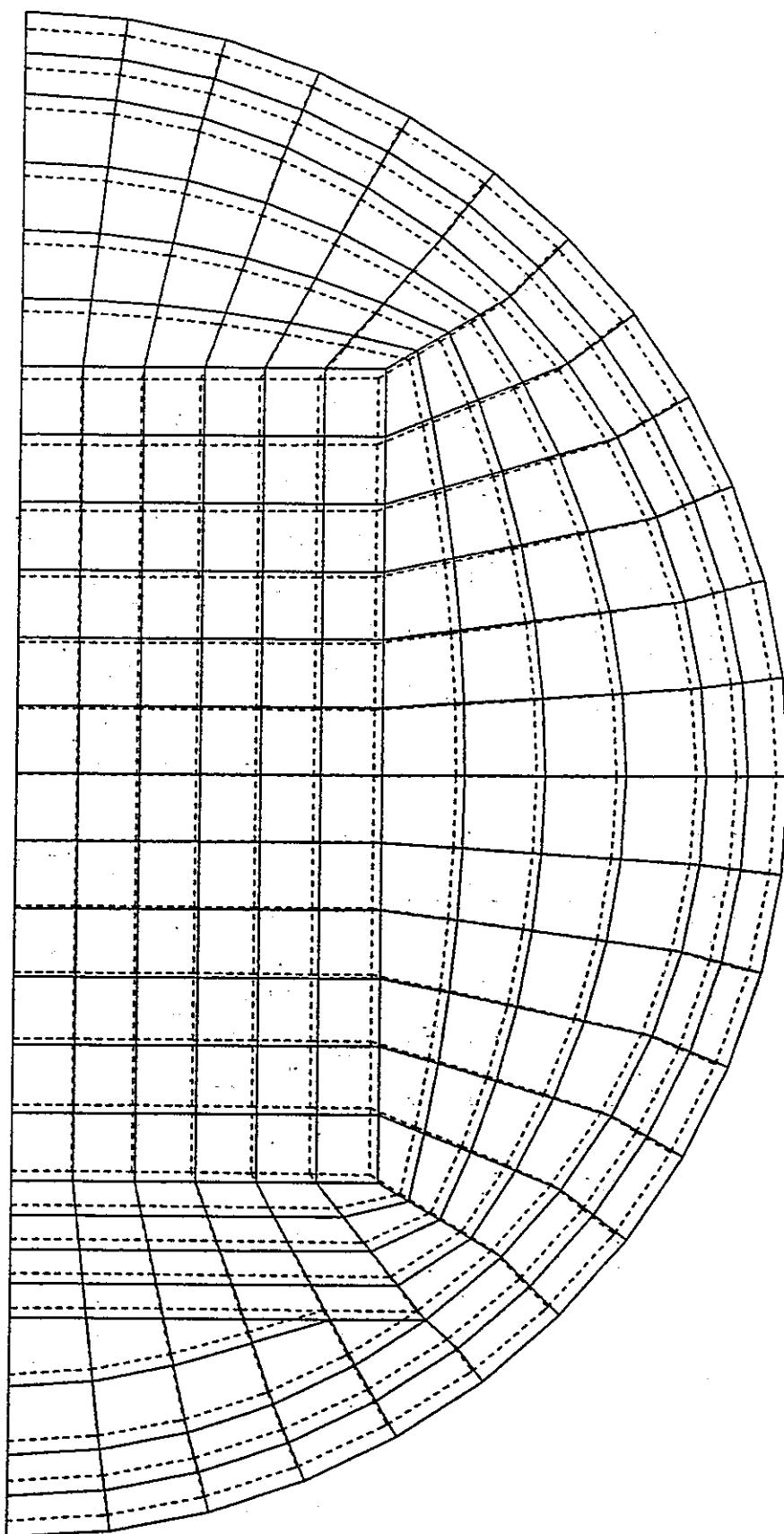
付図-3.6 剤分坑道内変形図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 100 万年、S=1/80）



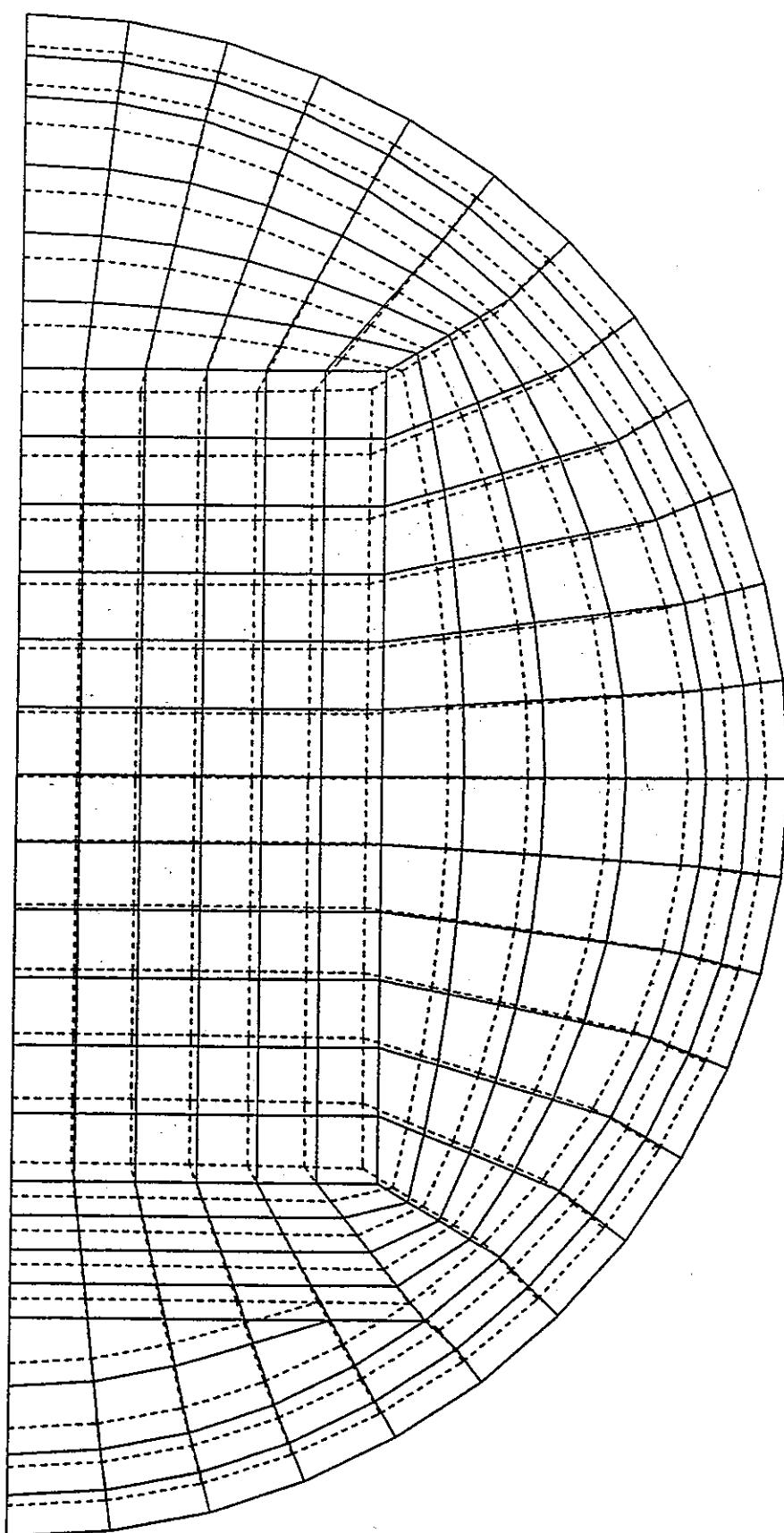
付図-3.7 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 1 ケース、時間 1 秒、S=1/50）



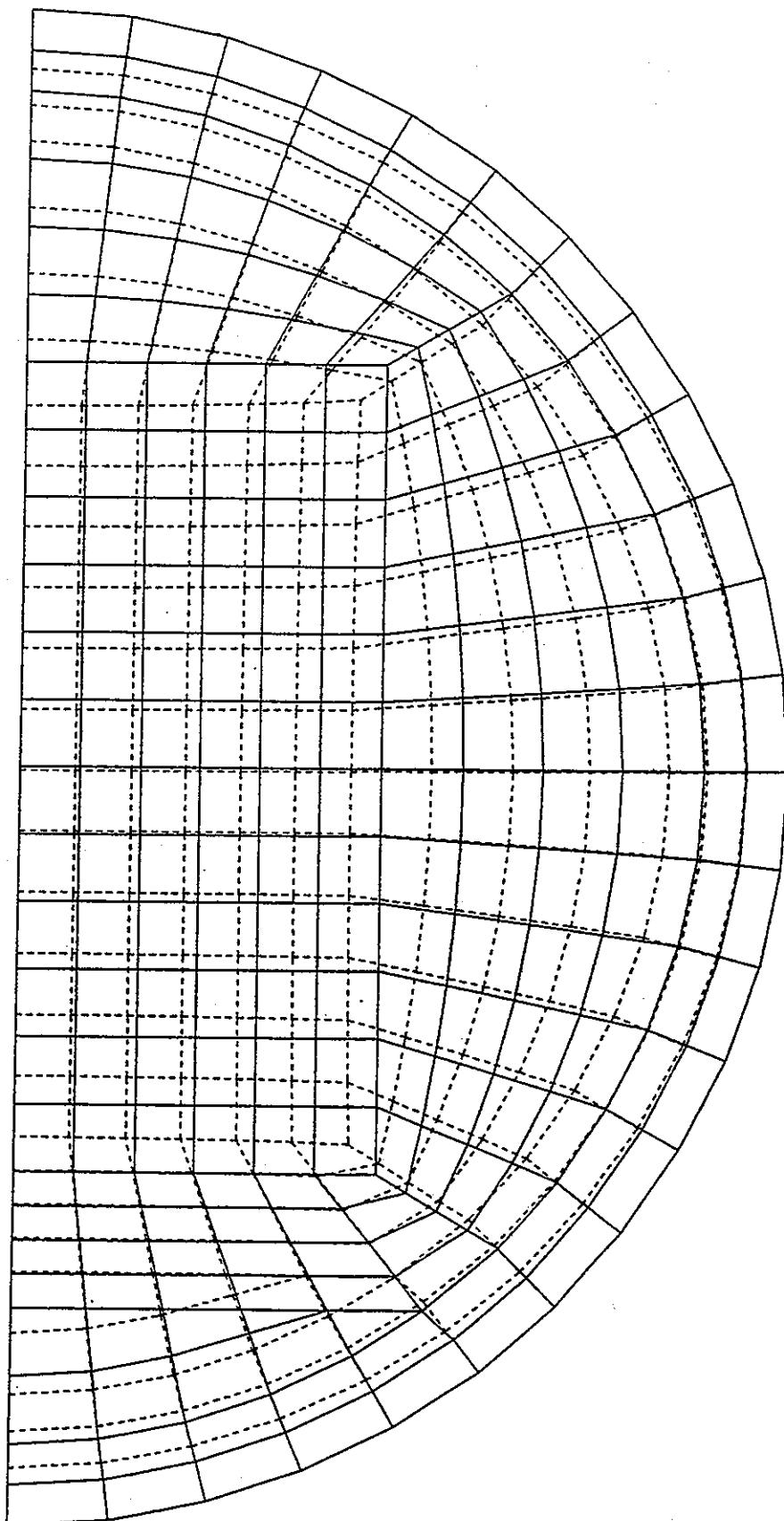
付図-3.8 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 1 年、S=1/50）



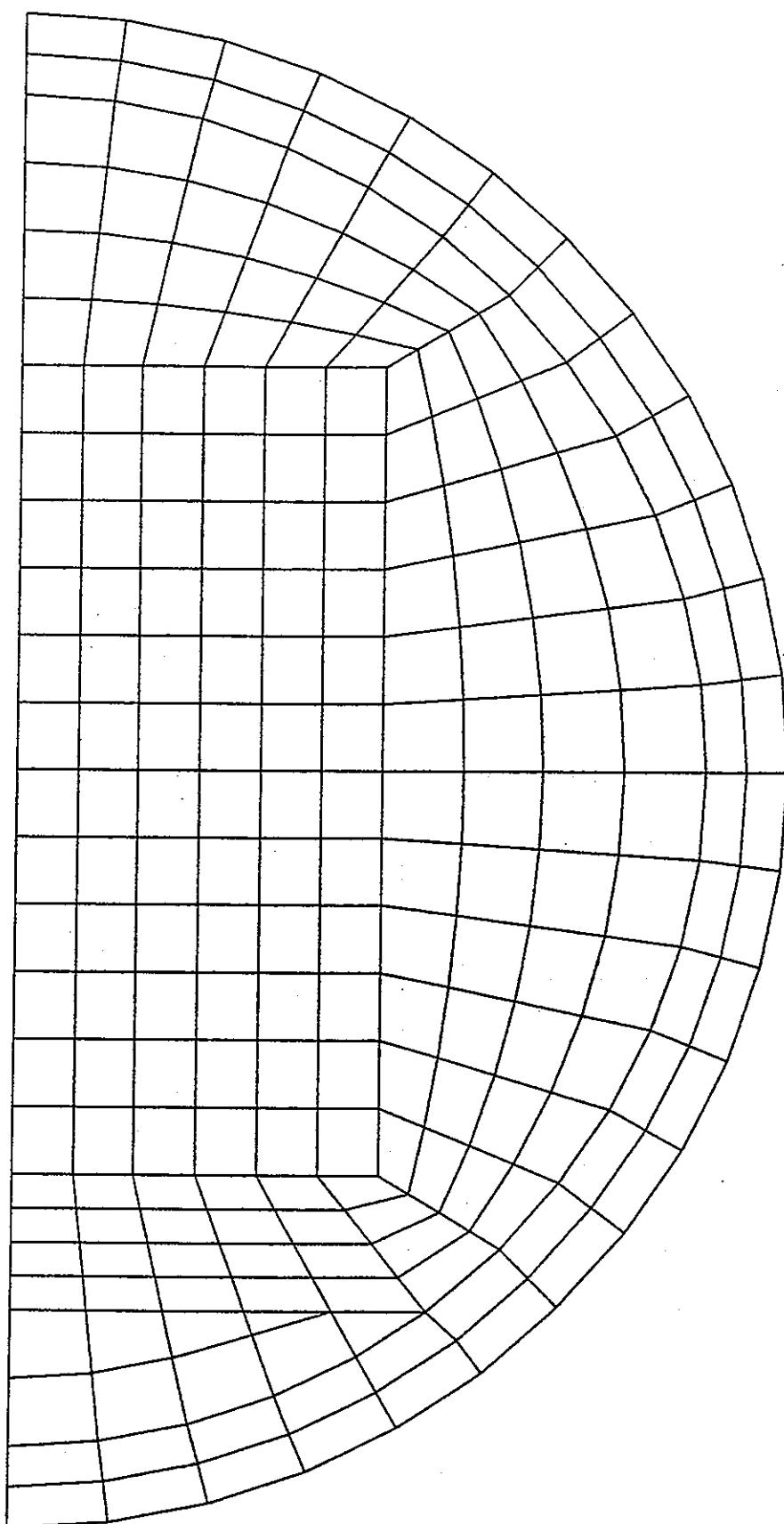
付図-3.9 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 1 ケース、時間 100 年、S=1/50）



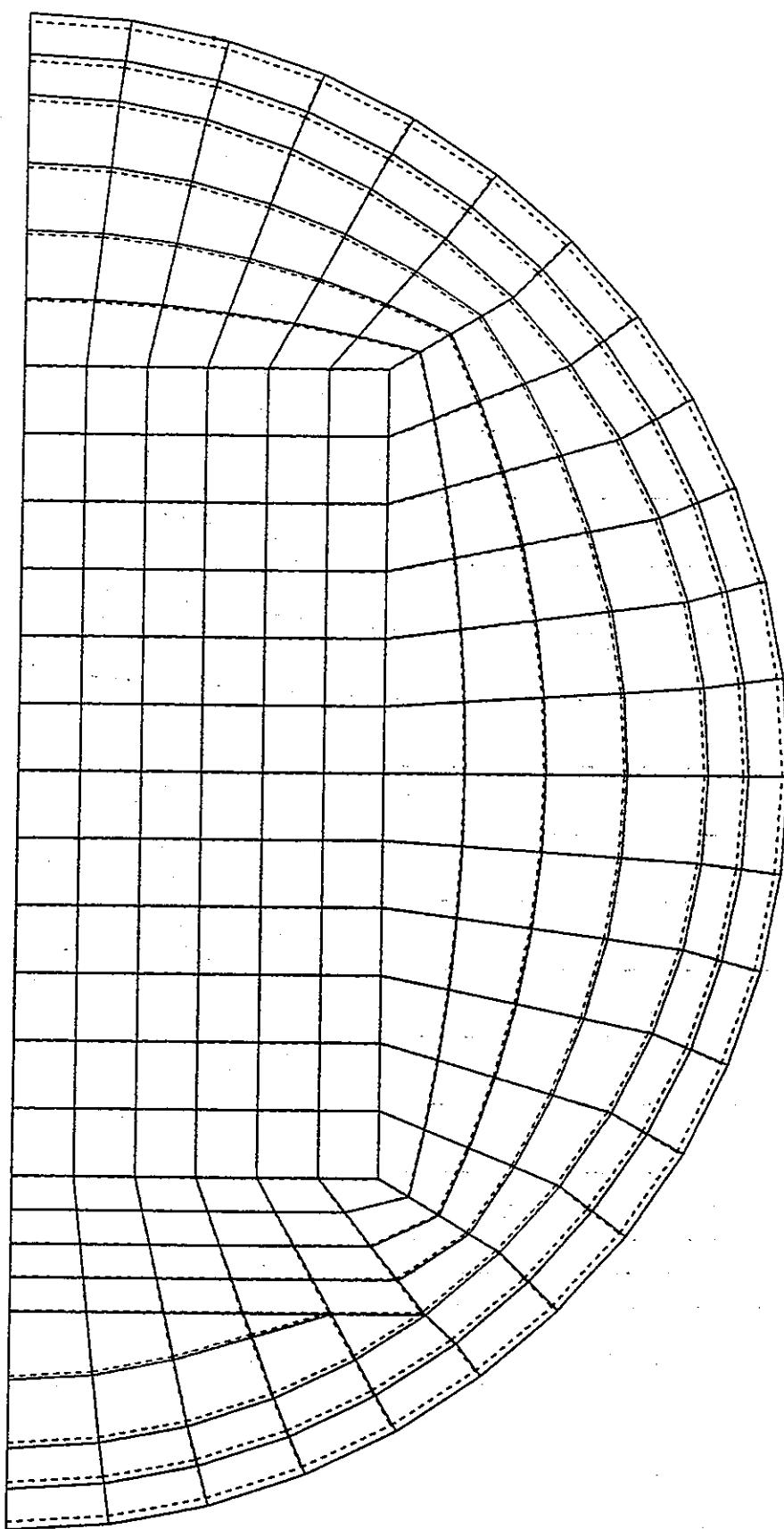
付図-3.10 処分坑道内変形図 (堆積岩系岩盤: B 2 - 1 ケース、時間 1 万年、S=1/50)



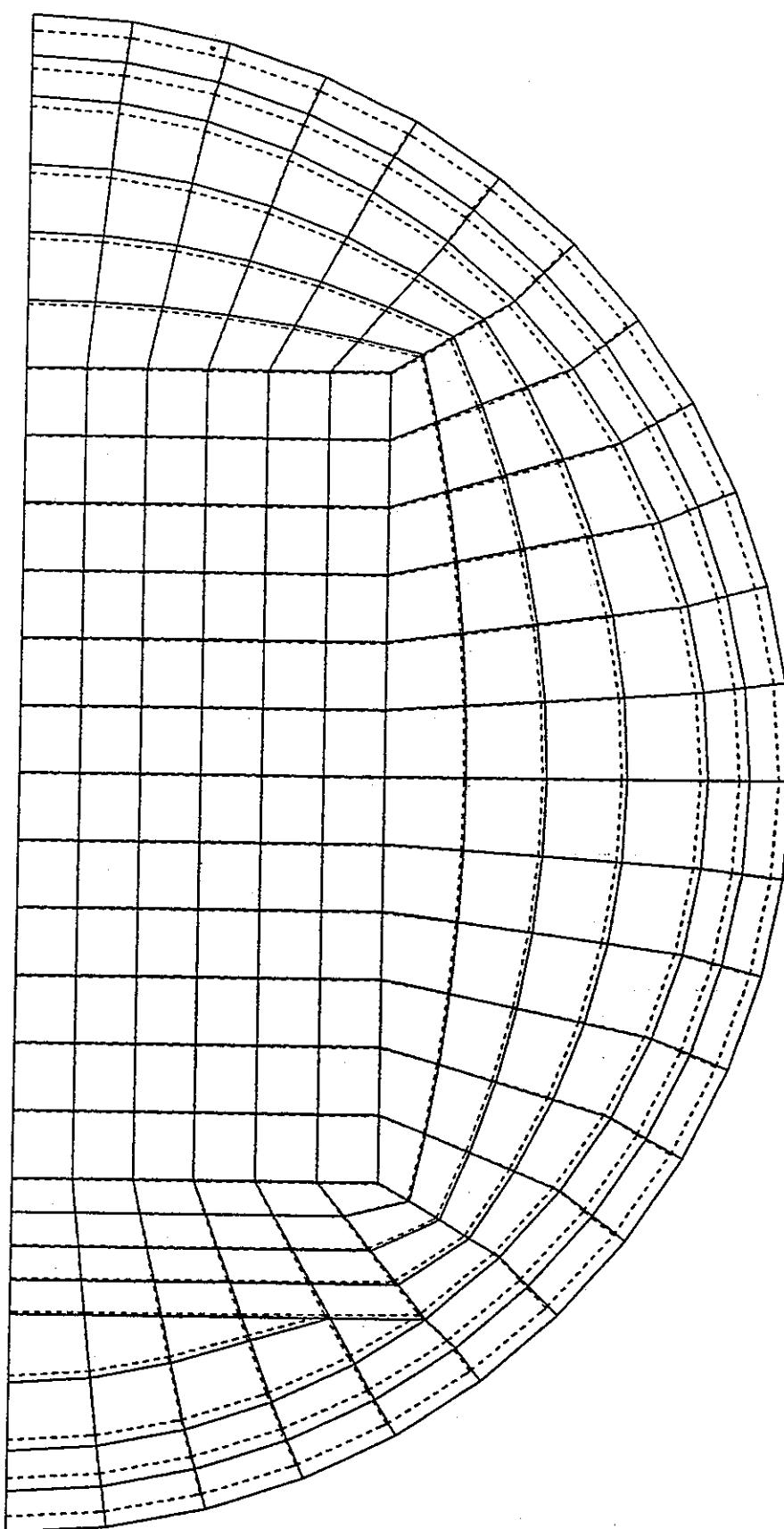
付図-3.11 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 1 ケース、時間 100 万年、S=1/50）



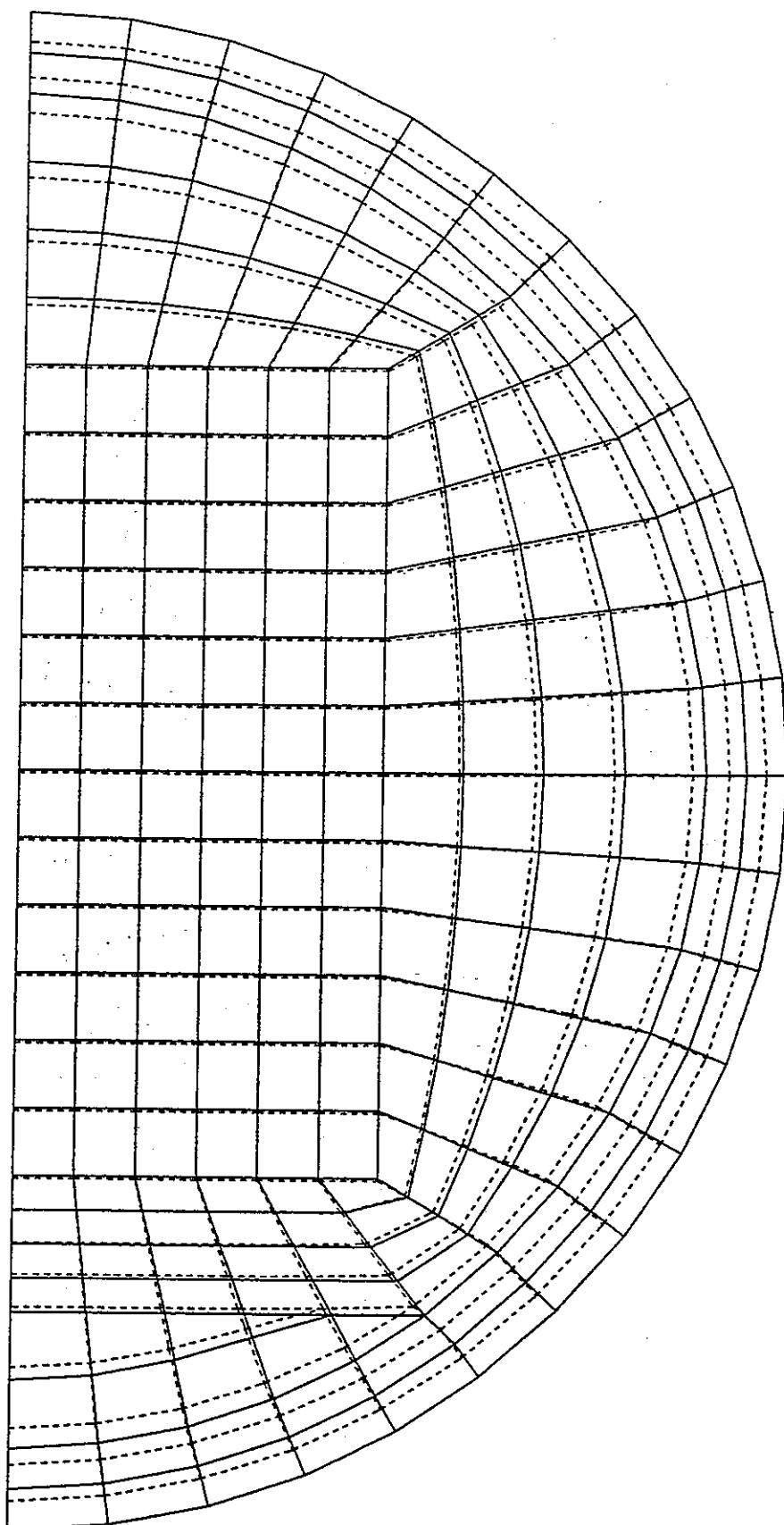
付図-3.12 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 1 秒、S=1/50）



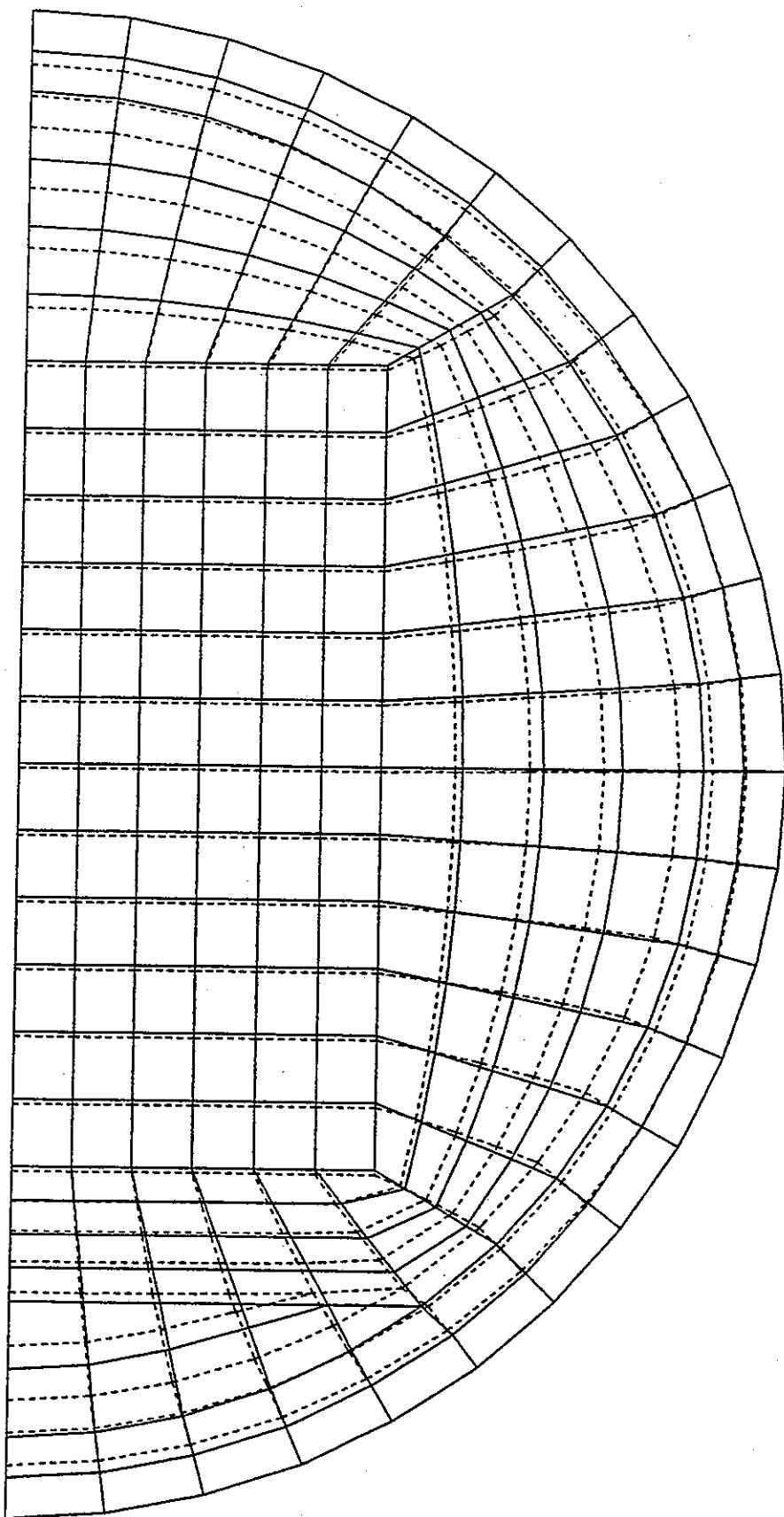
付図-3.13 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 2 ケース、時間 1 年、S=1/50）



付図-3.14 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 100 年、S=1/50）

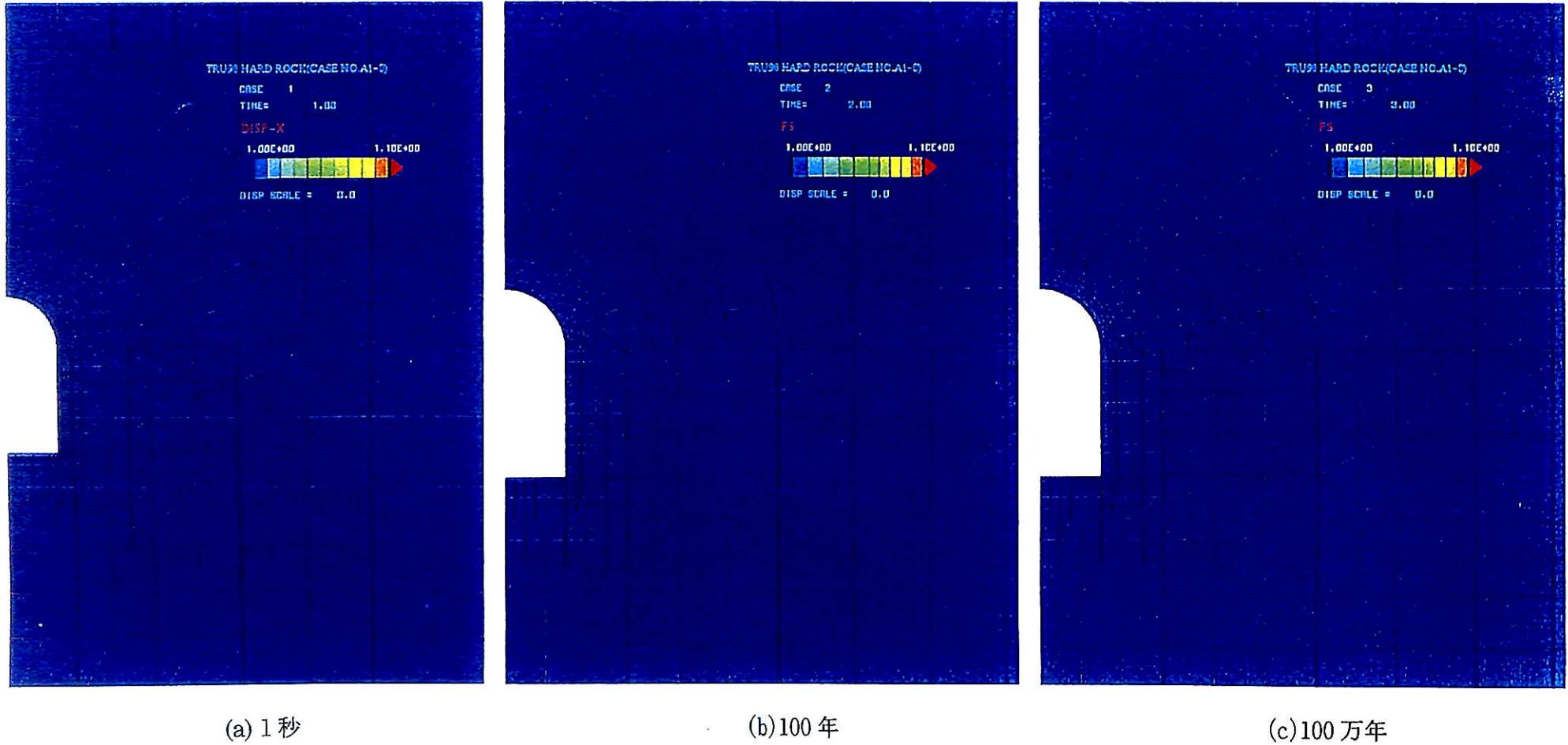


付図-3.15 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2 - 2 ケース、時間1万年、S=1/50）

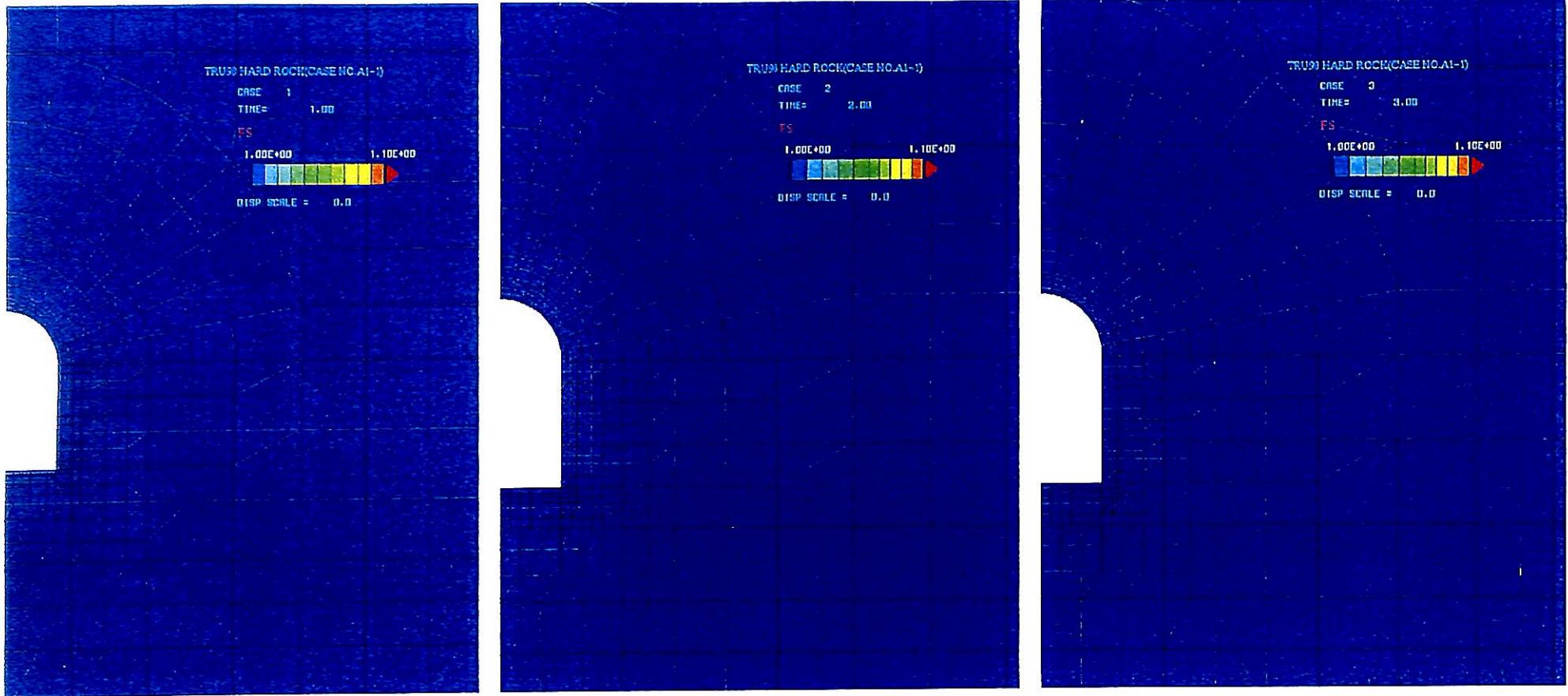


付図-3.16 処分坑道内変形図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 100 万年、S=1/50）

付録-4 コンプライアンス比図



付図-4.1 コンプライアンス比図（結晶質岩：A 1 - 0 ケース）

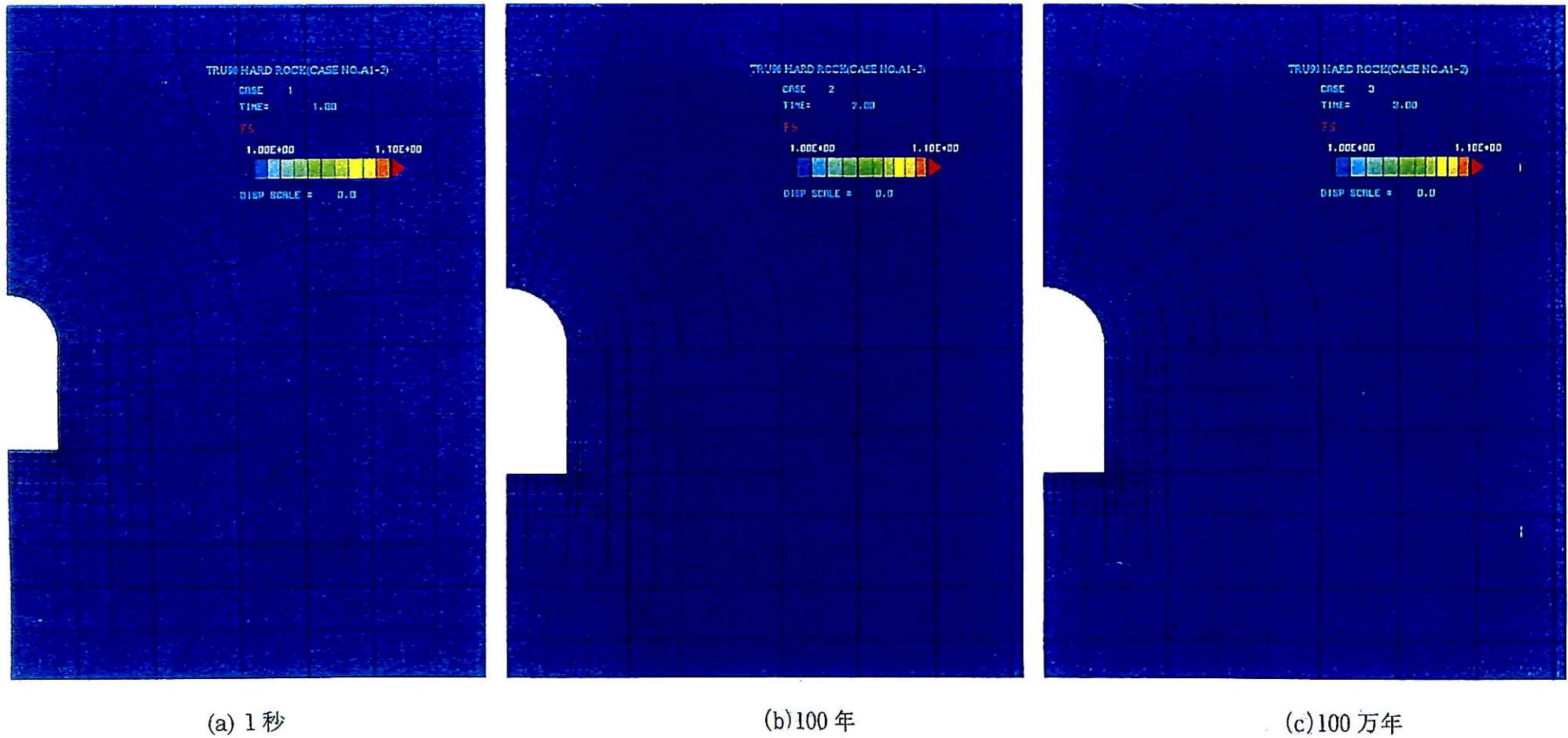


(a) 1秒

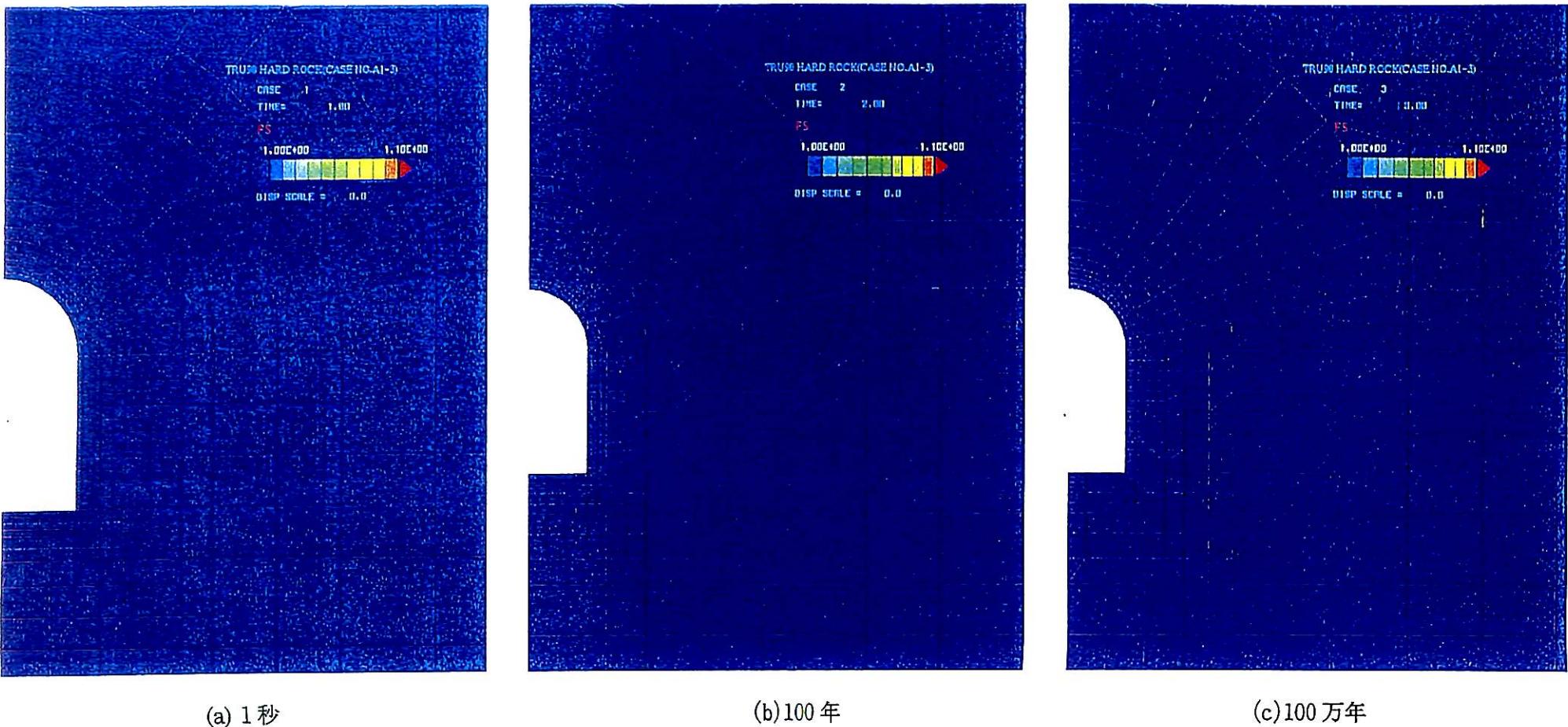
(b) 100 年

(c) 100 万年

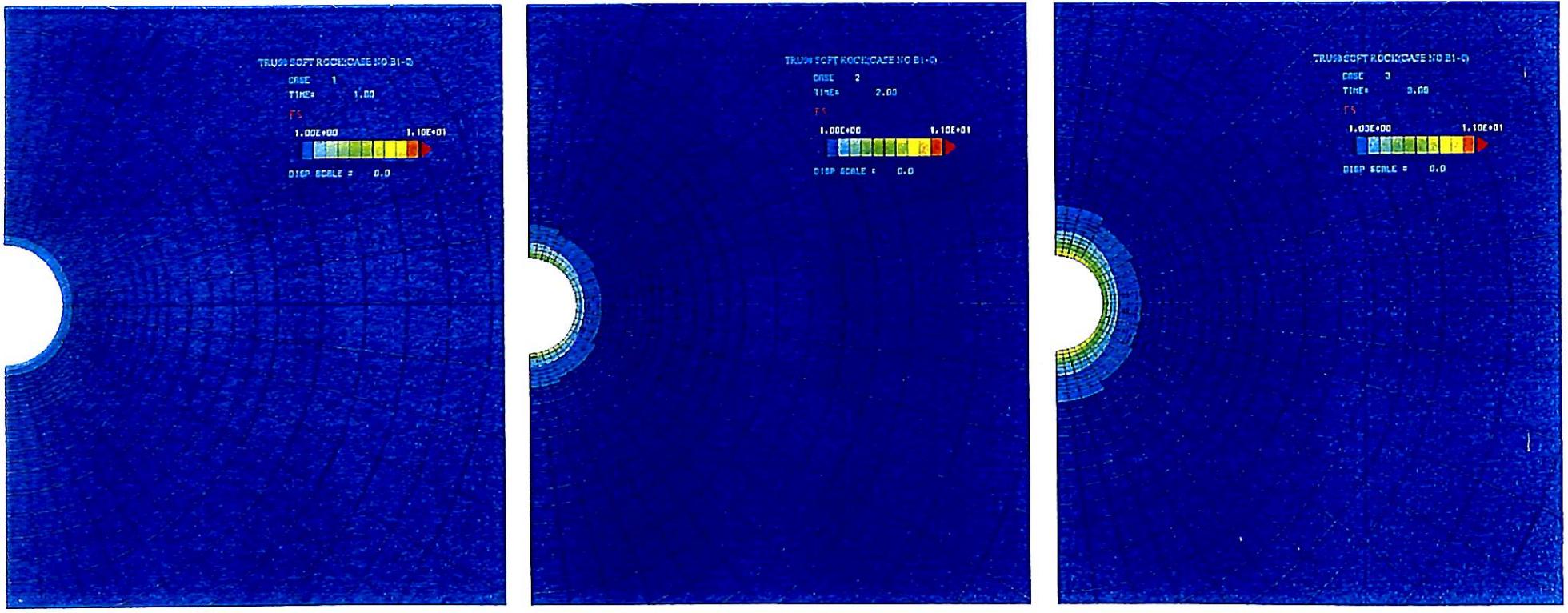
付図-4.2 コンプライアンス比図（結晶質岩：A 1-1 ケース）



付図-4.3 コンプライアンス比図（結晶質岩：A 1-2 ケース）



付図-4.4 コンプライアンス比図（結晶質岩：A 1 – 3 ケース）

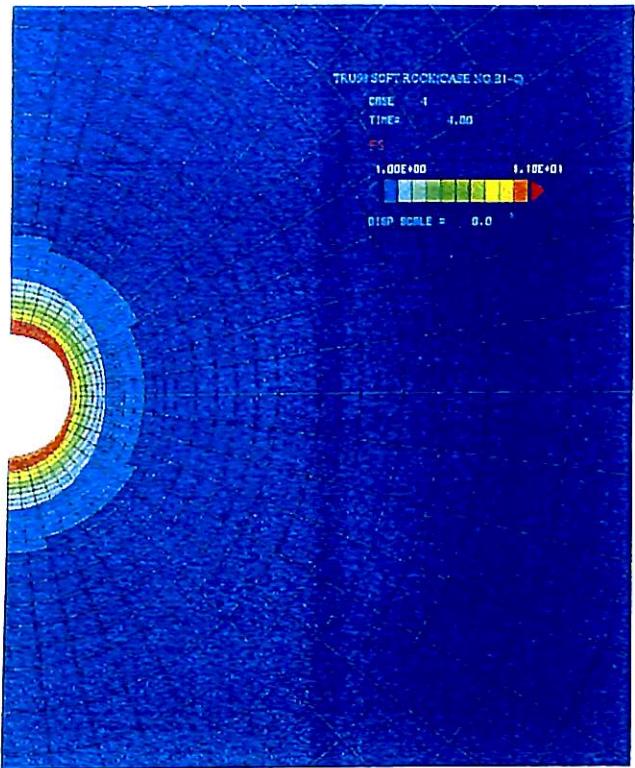


(a) 1秒

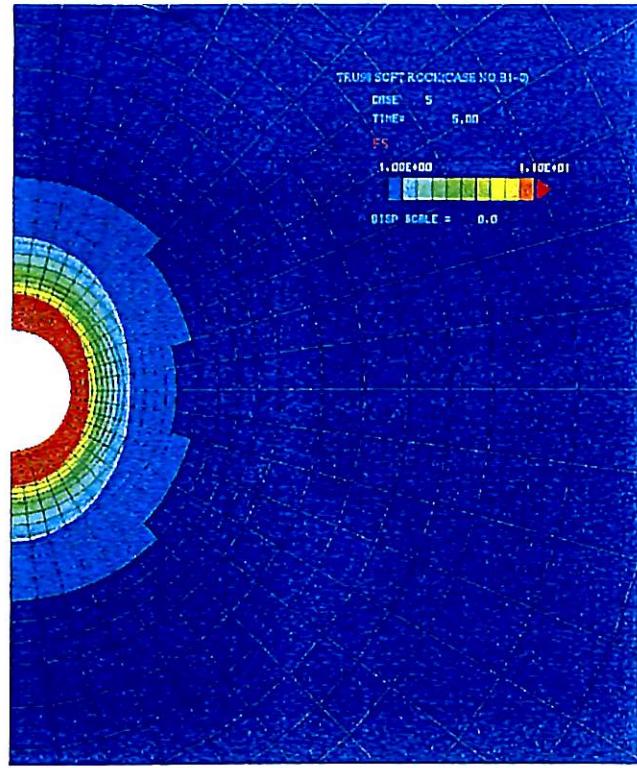
(b) 1年

(c) 100年

付図-4.5 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-0 ケース）

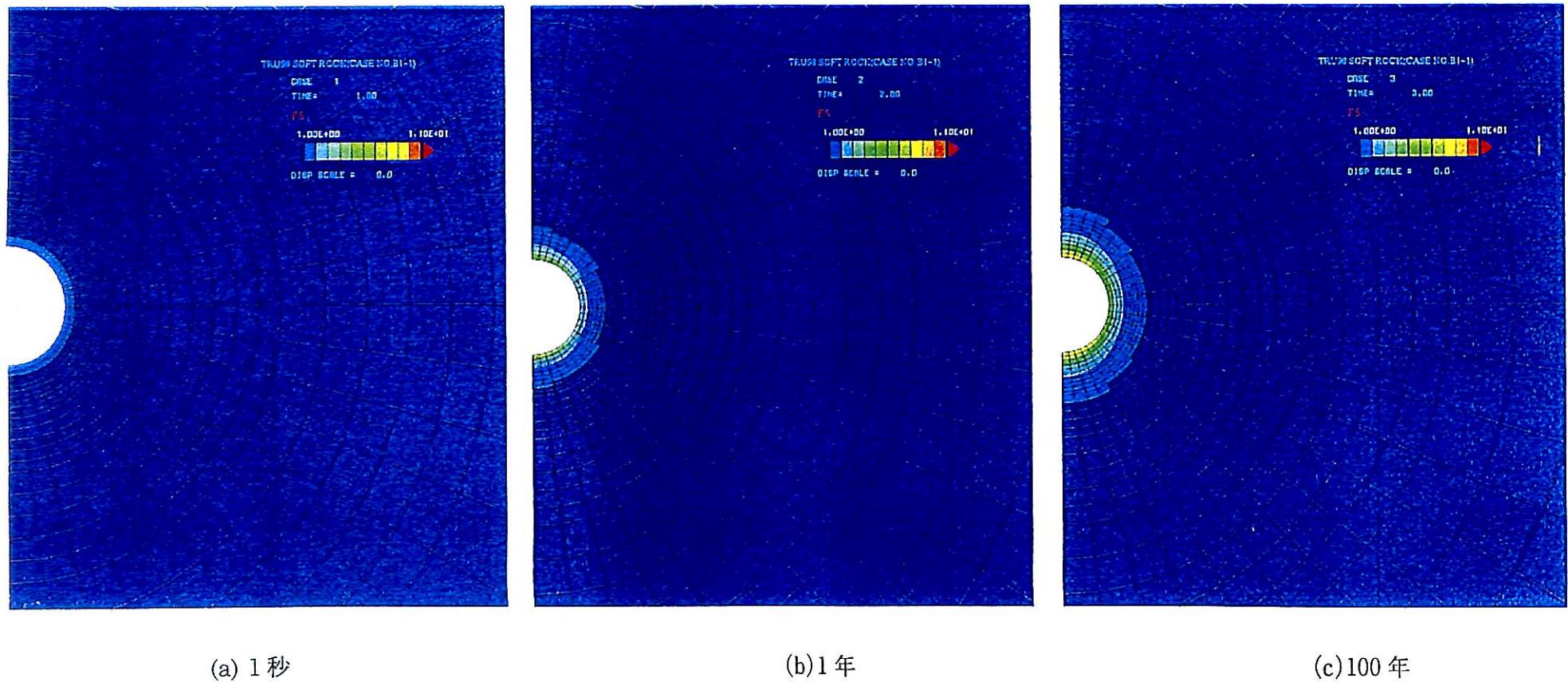


(d) 1万年

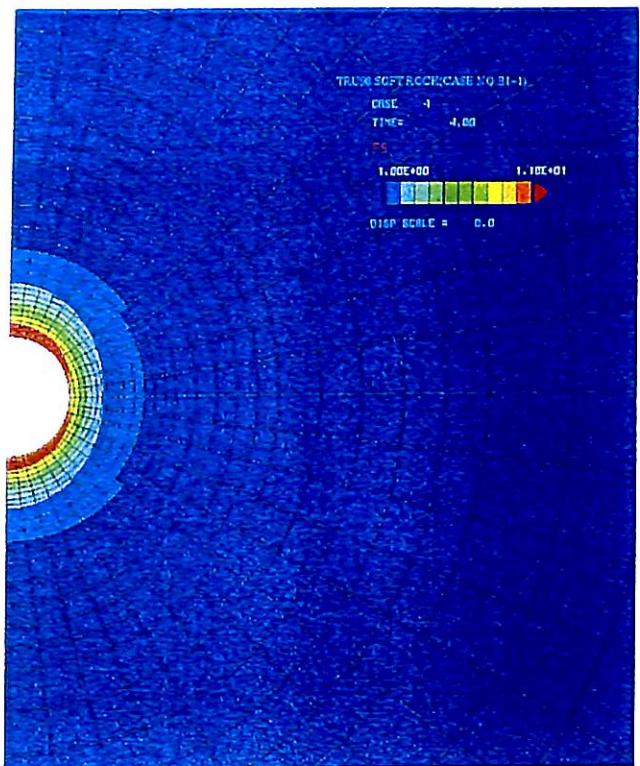


(e) 100万年

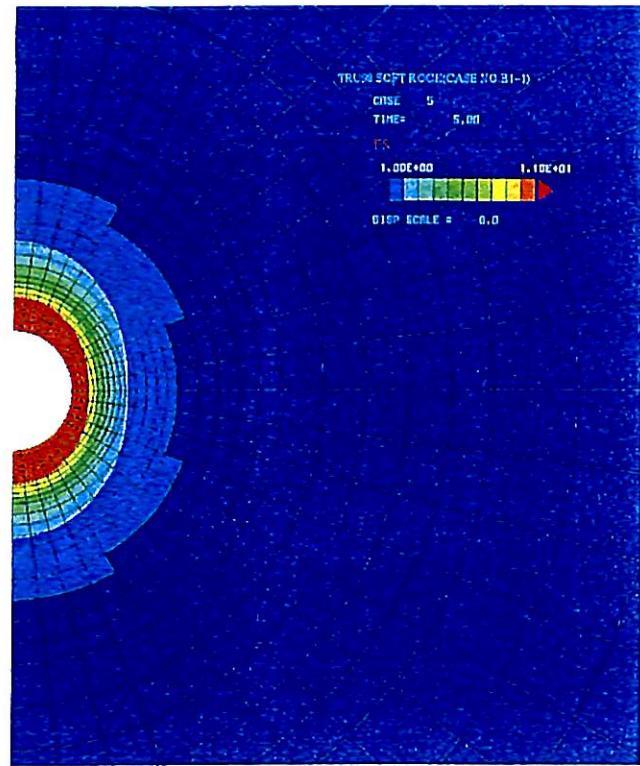
付図-4.6 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-0 ケース）



付図-4.7 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-1 ケース）

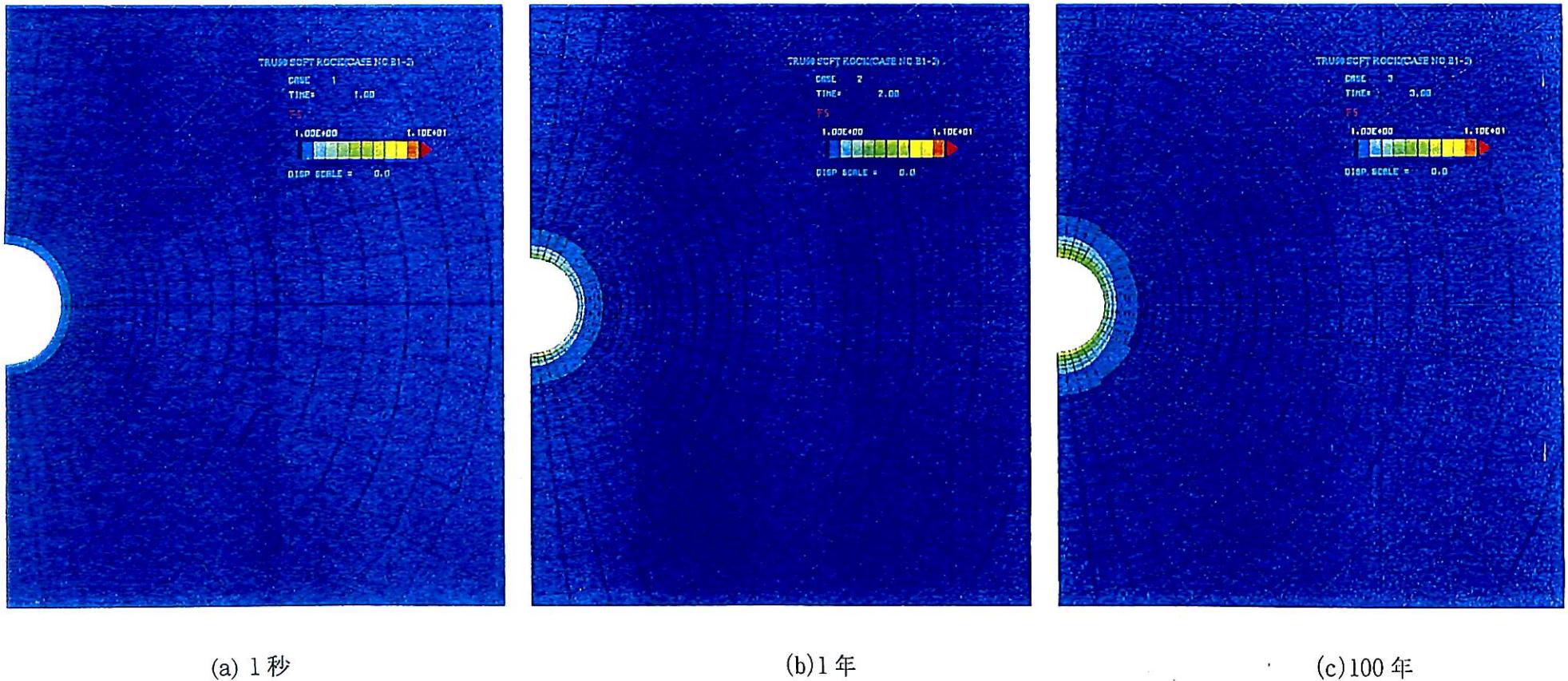


(d) 1万年

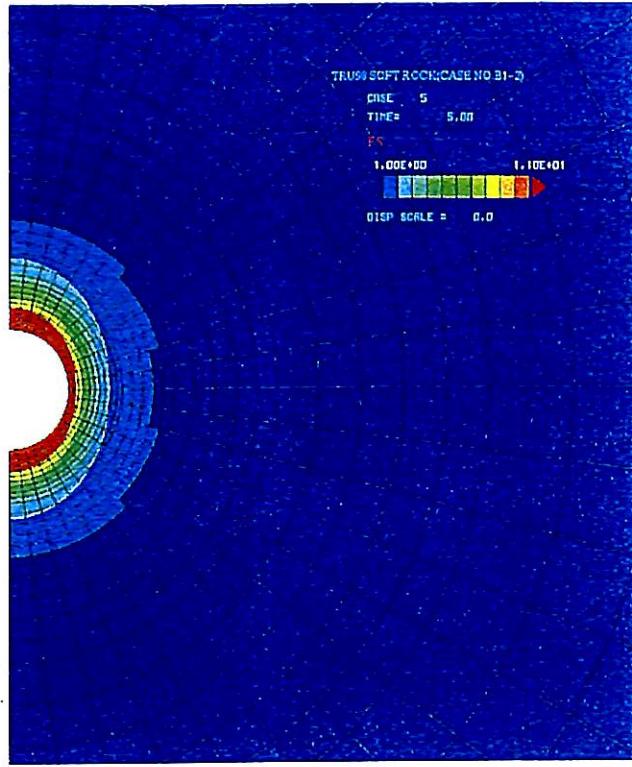
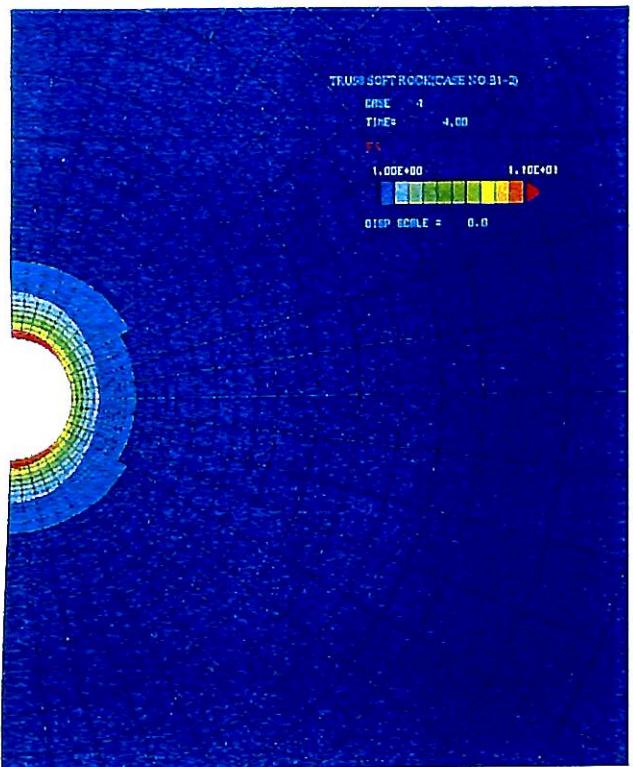


(e) 100万年

付図-4.8 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-1 ケース）



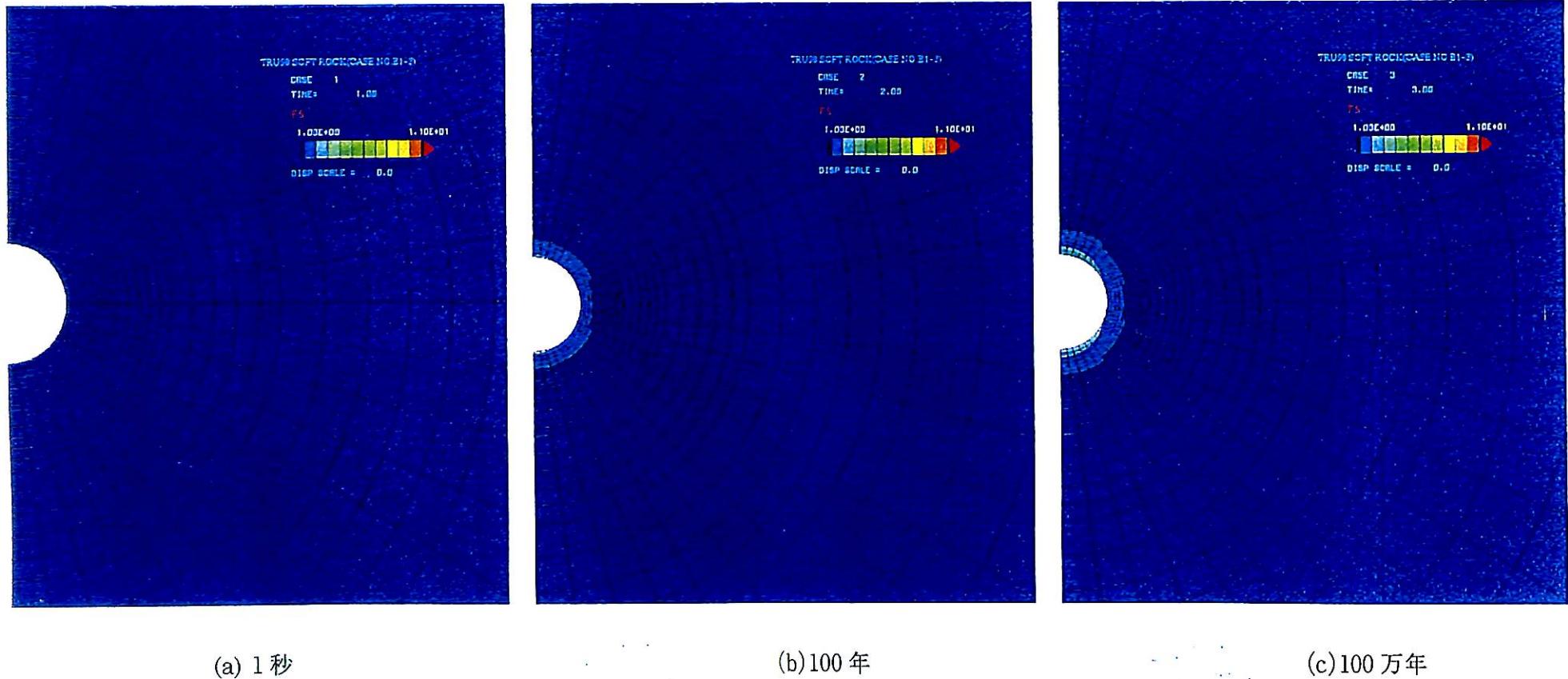
付図-4.9 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-2 ケース）



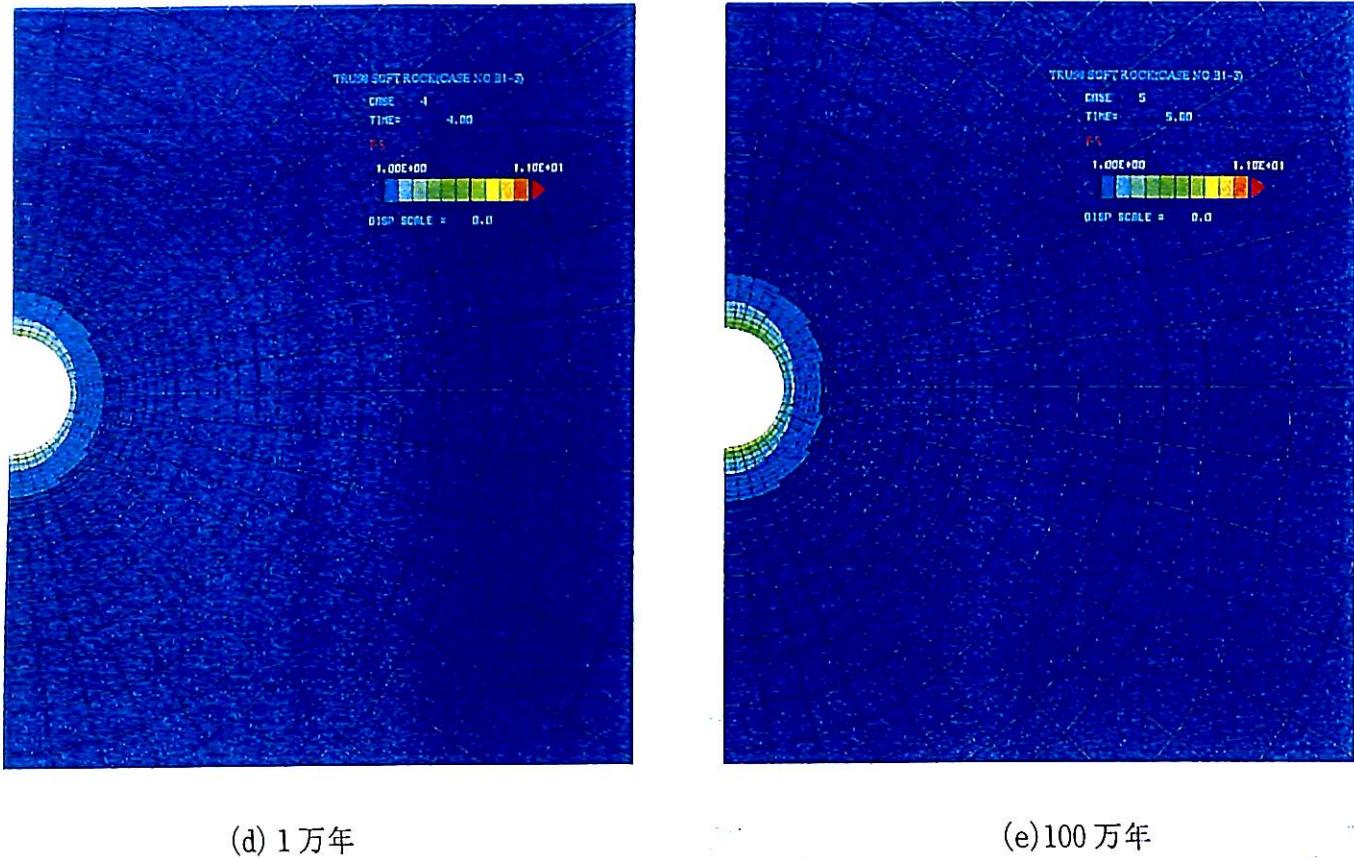
(d) 1万年

(e) 100万年

付図-4.10 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-2 ケース）



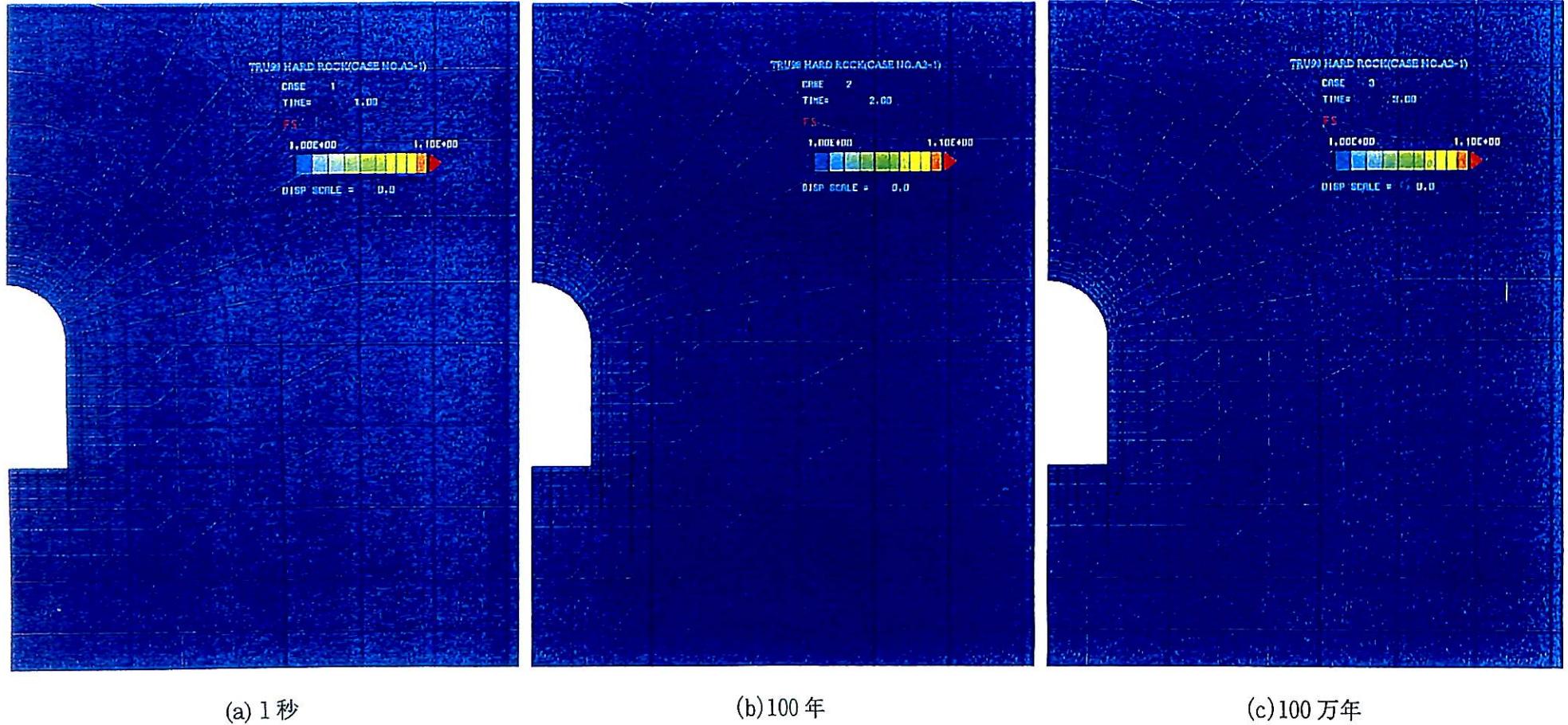
付図-4.11 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-3 ケース）



(d) 1万年

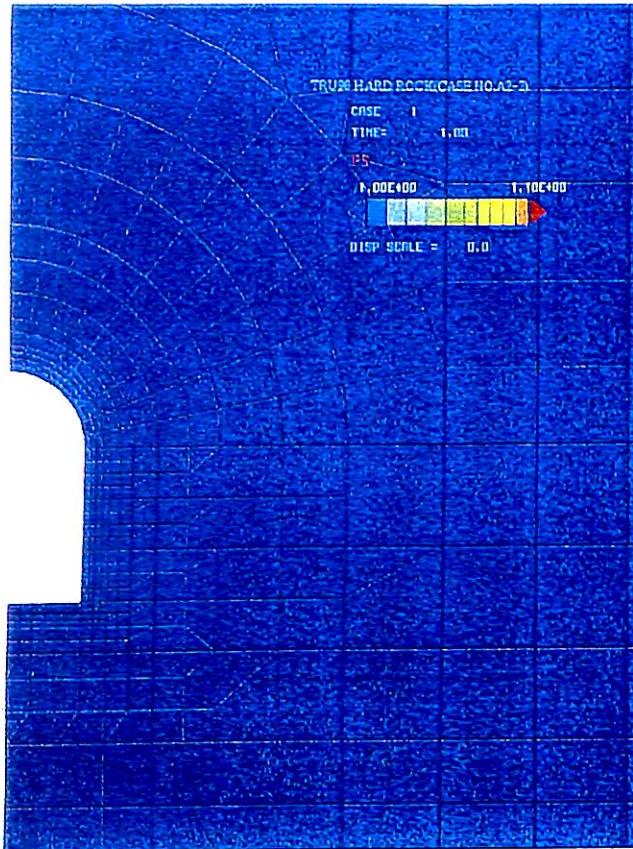
(e) 100万年

付図-4.12 コンプライアンス比図（堆積岩：B 1-3 ケース）

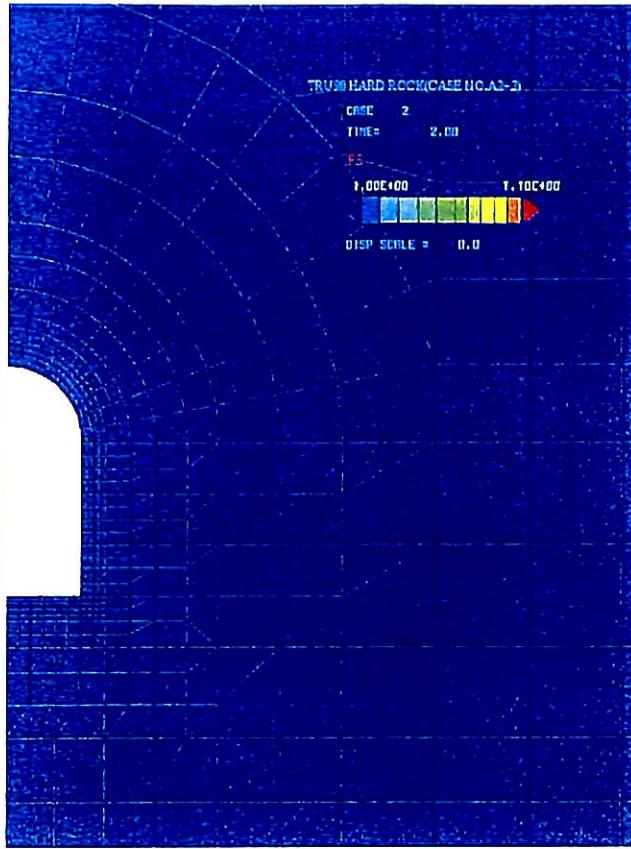


付図-4.13 コンプライアンス比図（結晶質岩：A 2-1 ケース）

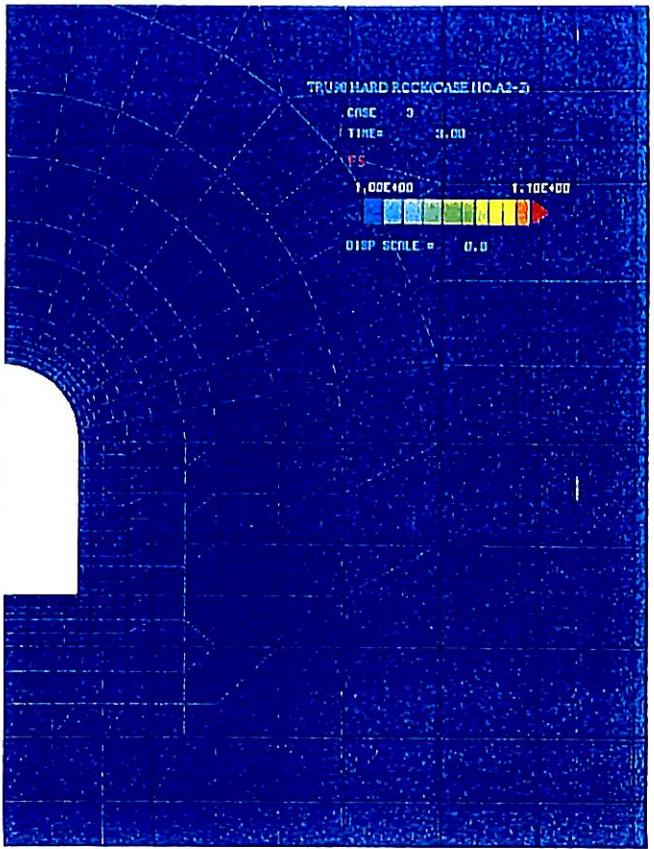
付-4 (128)



(a) 1秒

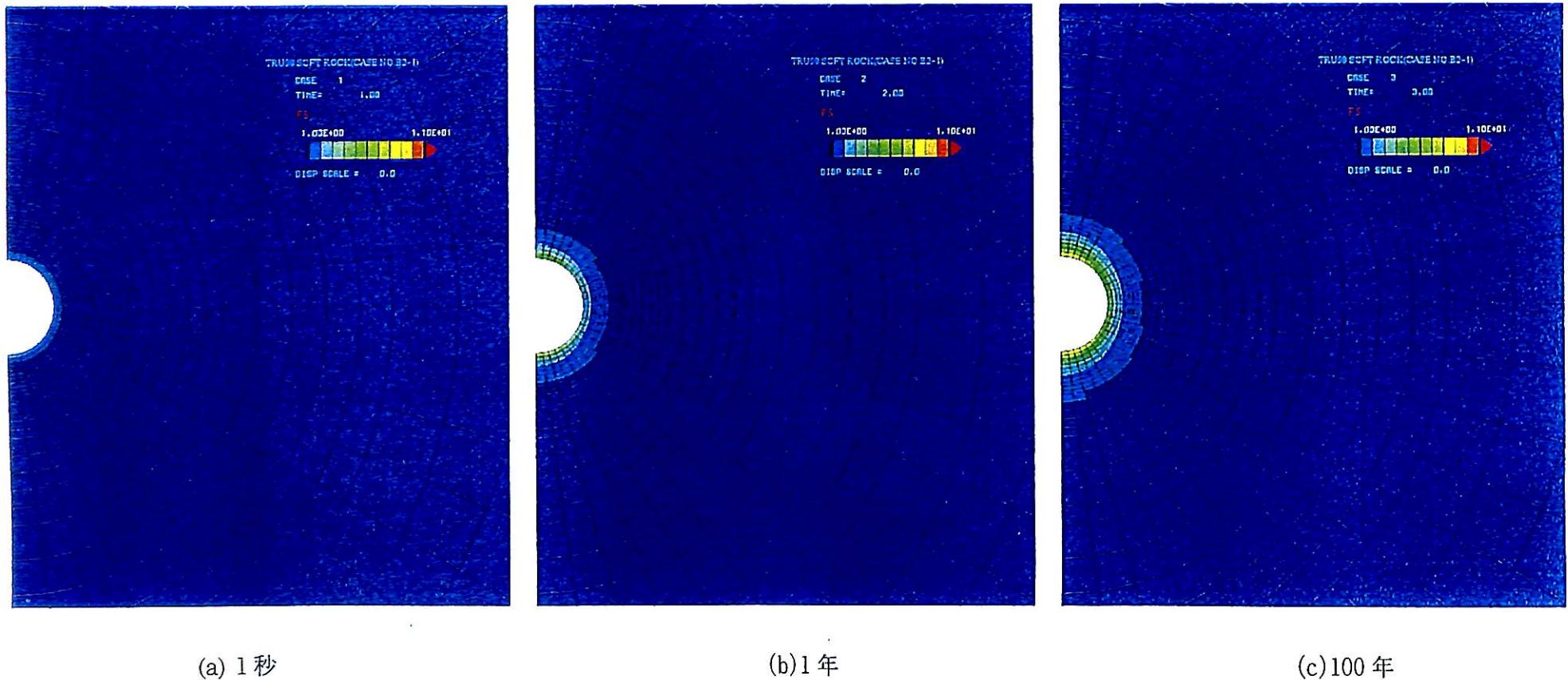


(b) 100年

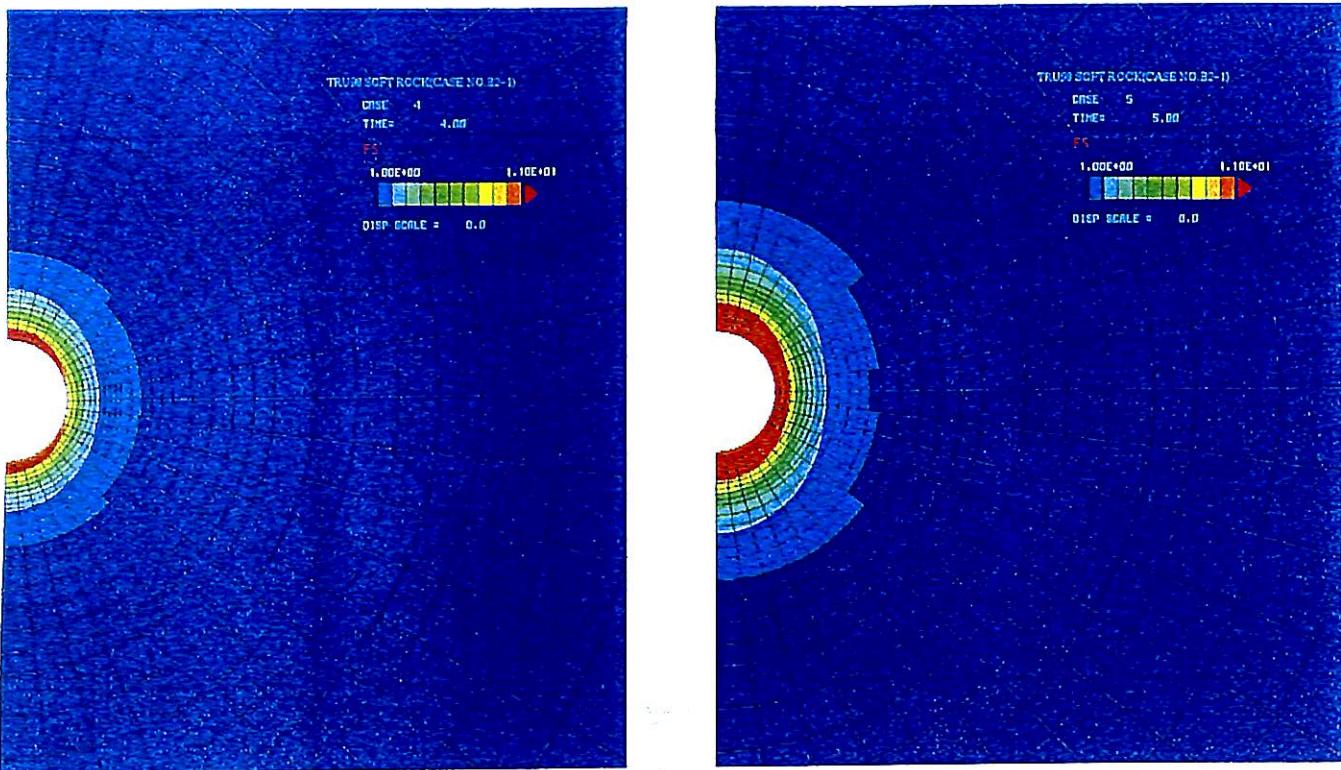


(c) 100万年

付図-4.14 コンプライアンス比図（結晶質岩：A 2-2 ケース）



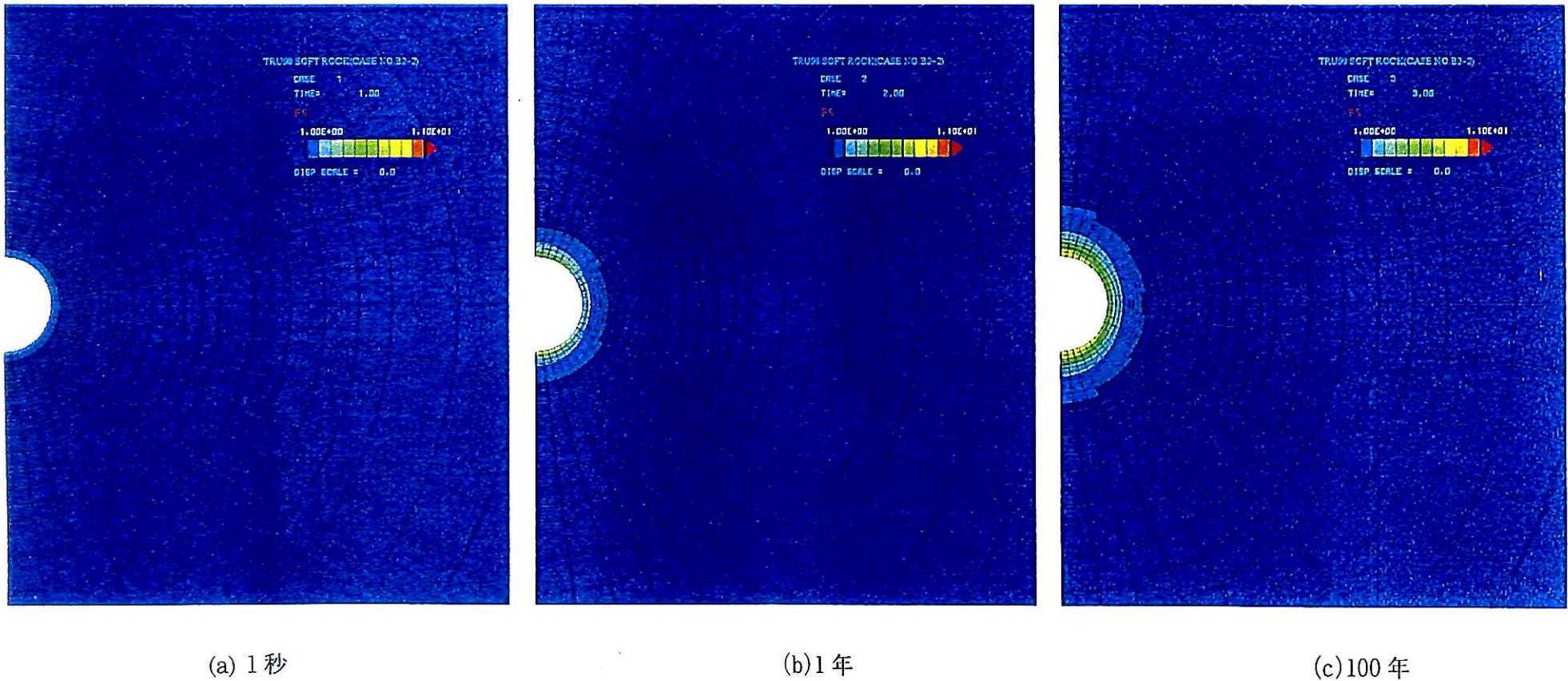
付図-4.15 コンプライアンス比図（堆積岩：B 2-1 ケース）



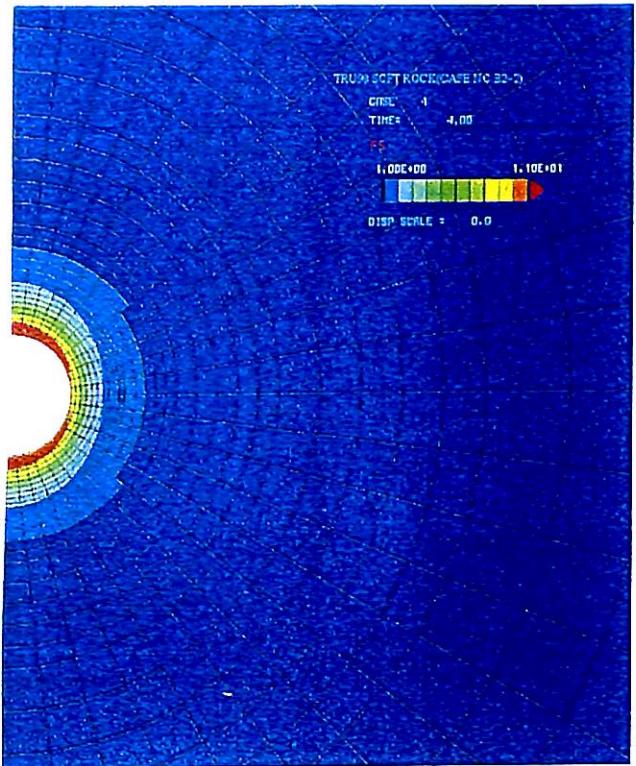
(d) 1万年

(e) 100万年

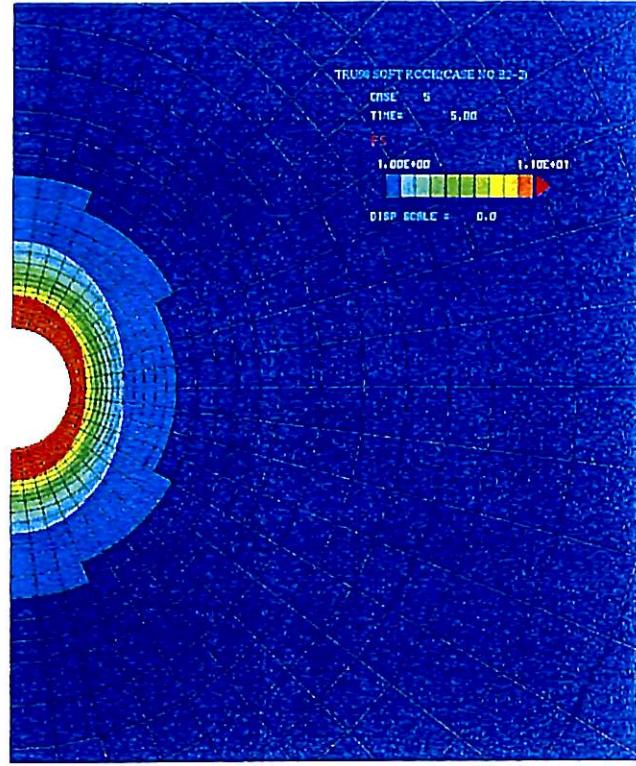
付図-4.16 コンプライアンス比図（堆積岩：B 2-1 ケース）



付図-4.17 コンプライアンス比図（堆積岩：B 2-2 ケース）



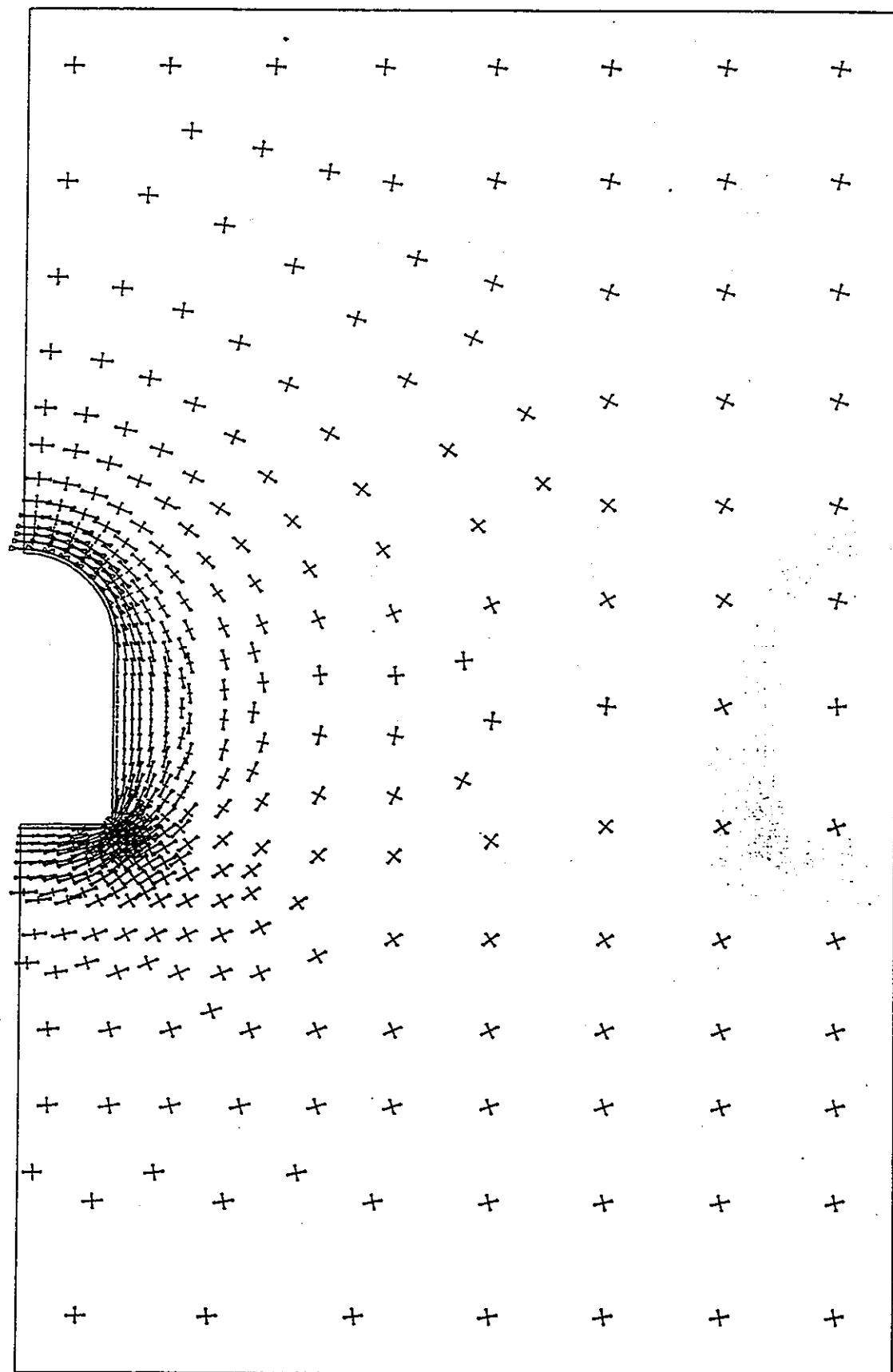
(d) 1万年



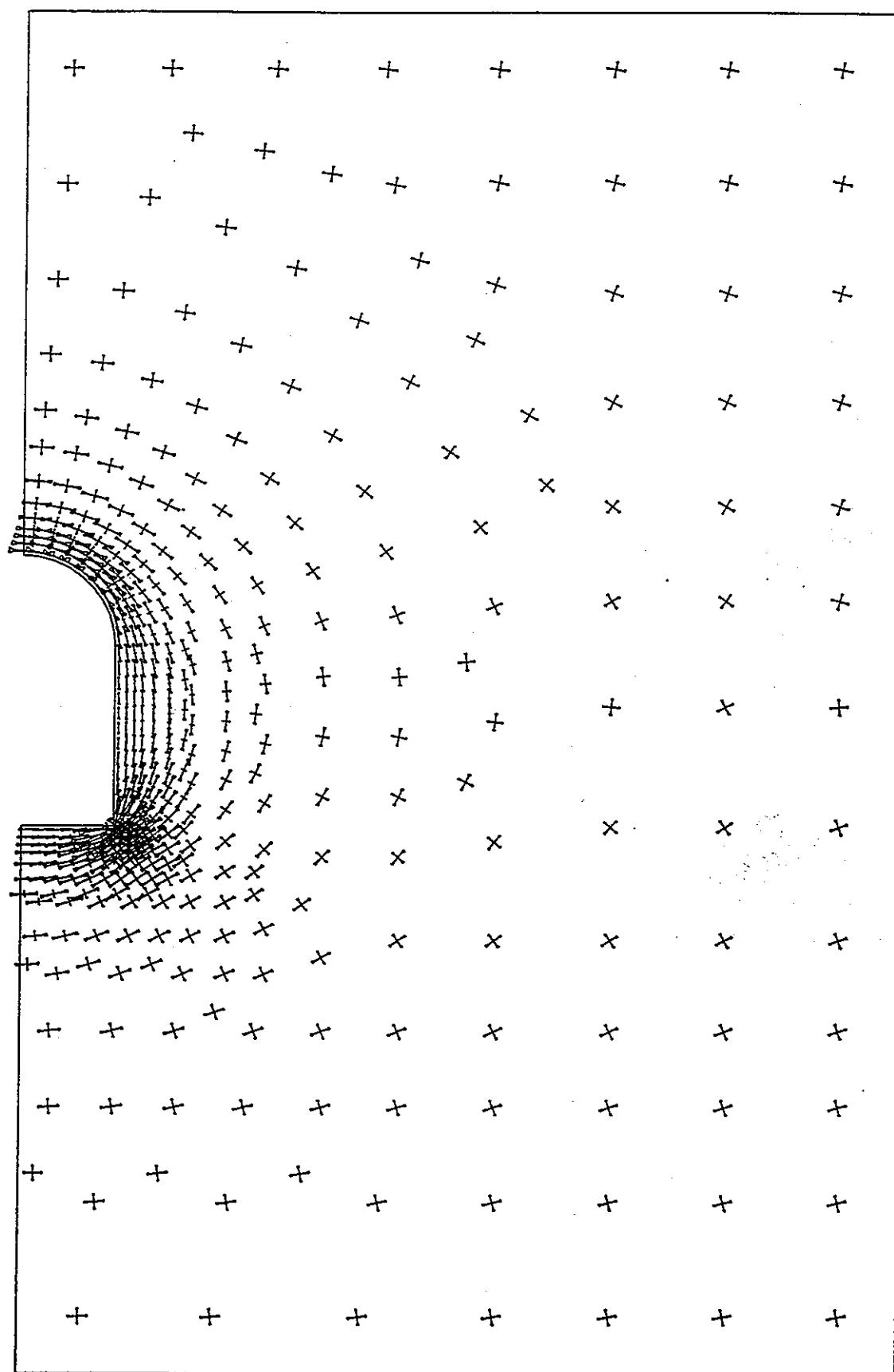
(e) 100万年

付図-4.18 コンプライアンス比図（堆積岩：B 2-2 ケース）

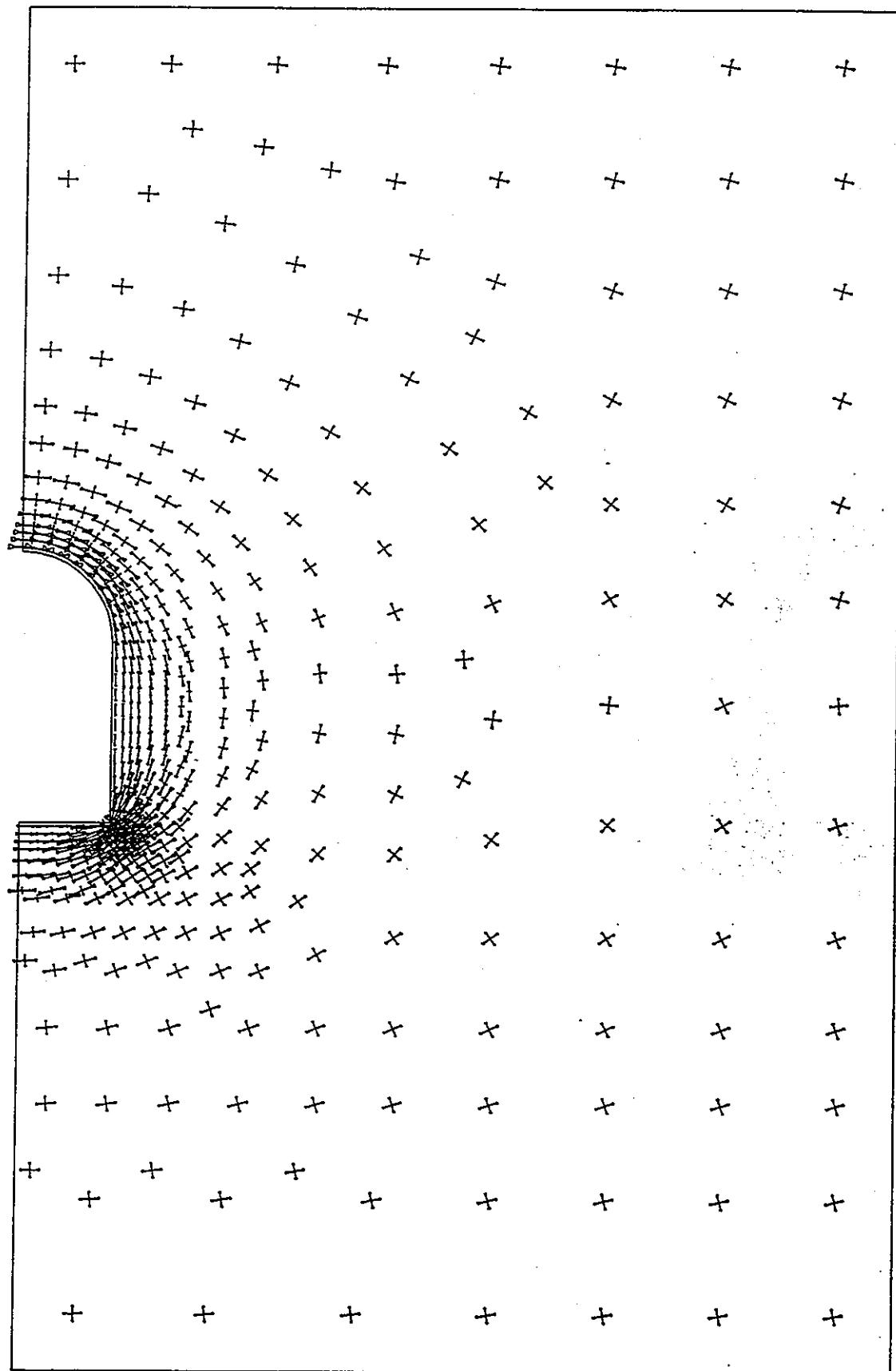
付録-5 周辺岩盤応力図



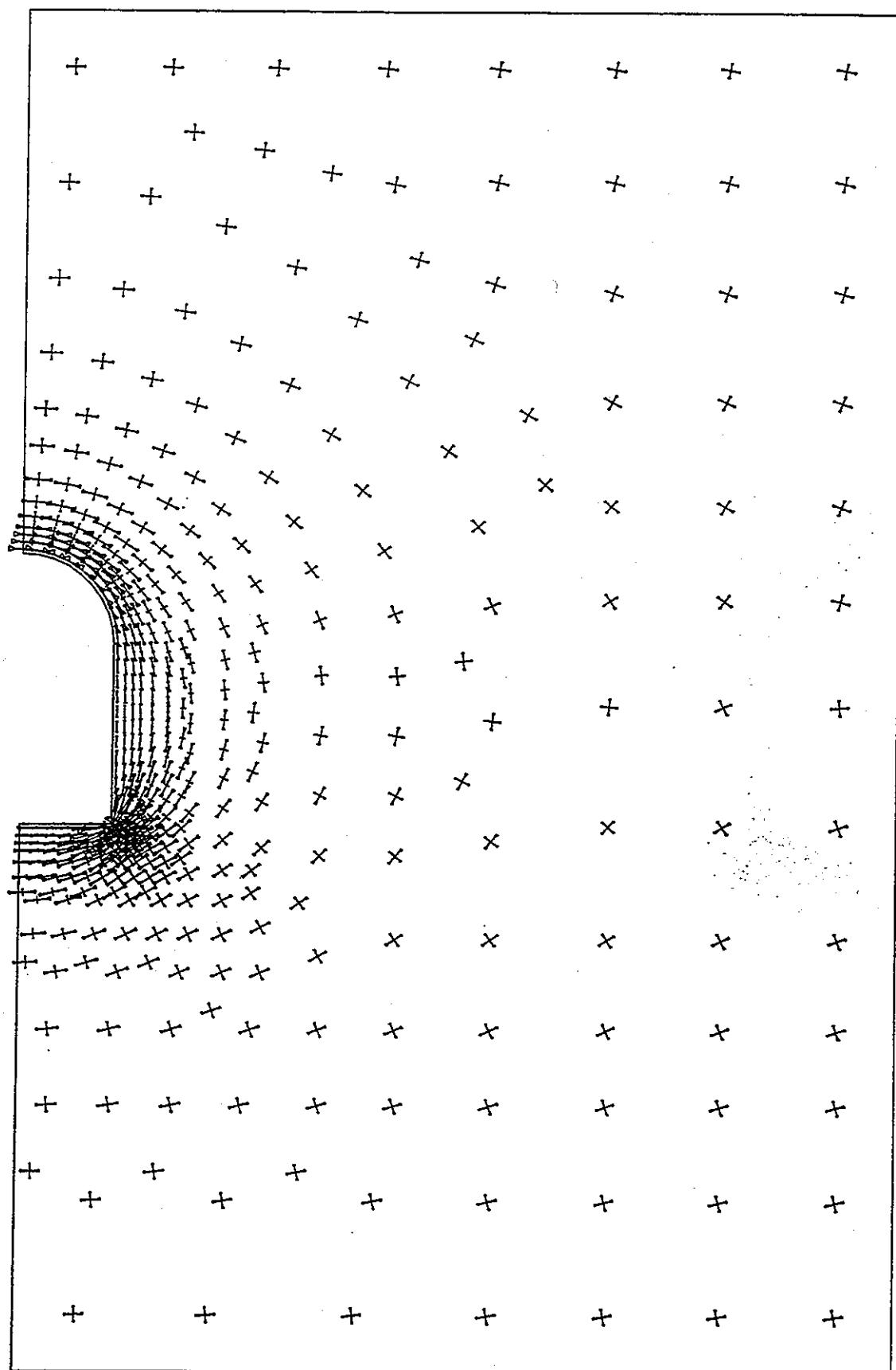
付図-5.1 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-0 ケース、時間1秒、S=1/400）



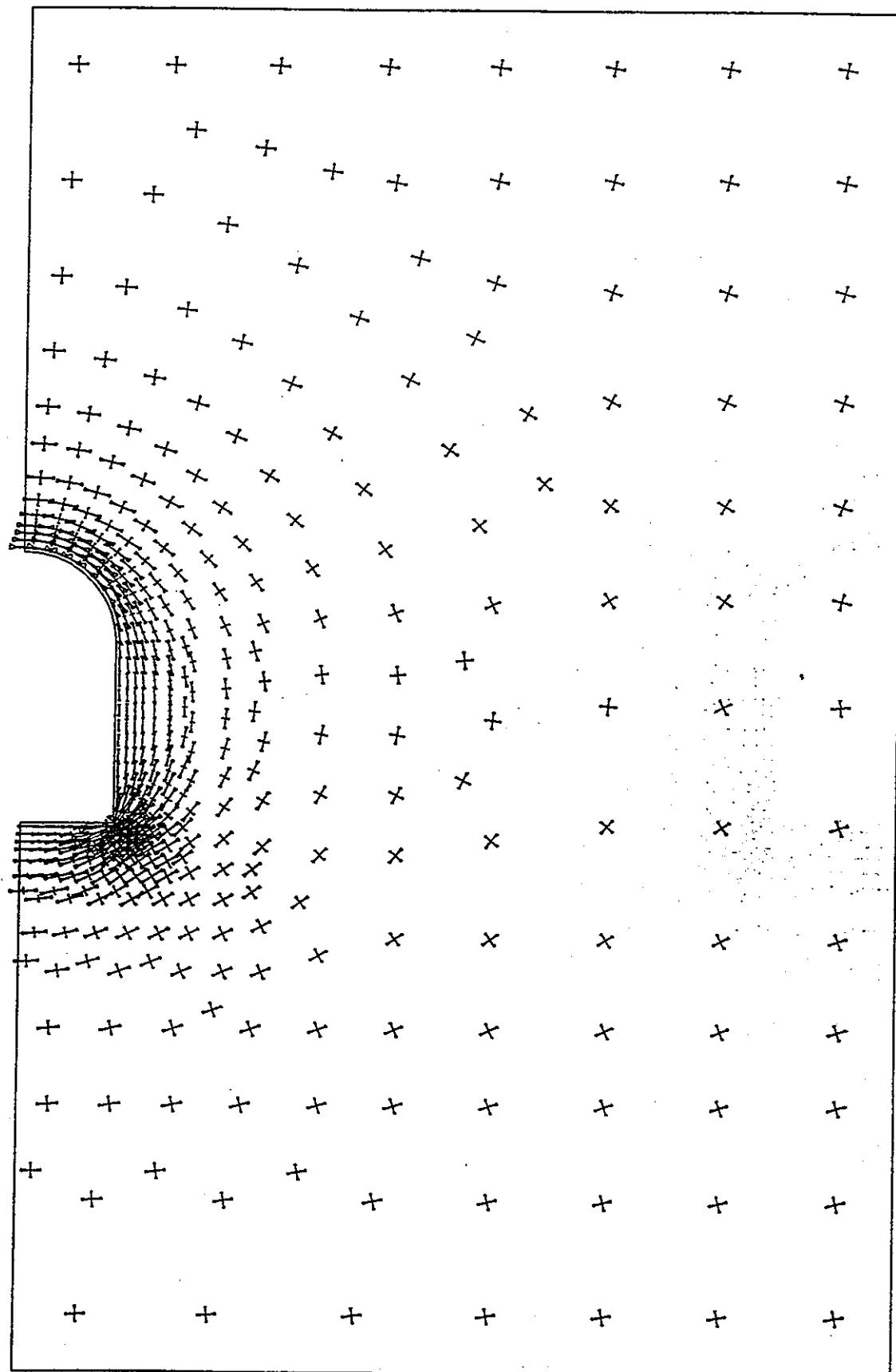
付図-5.2 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-0 ケース、時間 100 年、S=1/400）



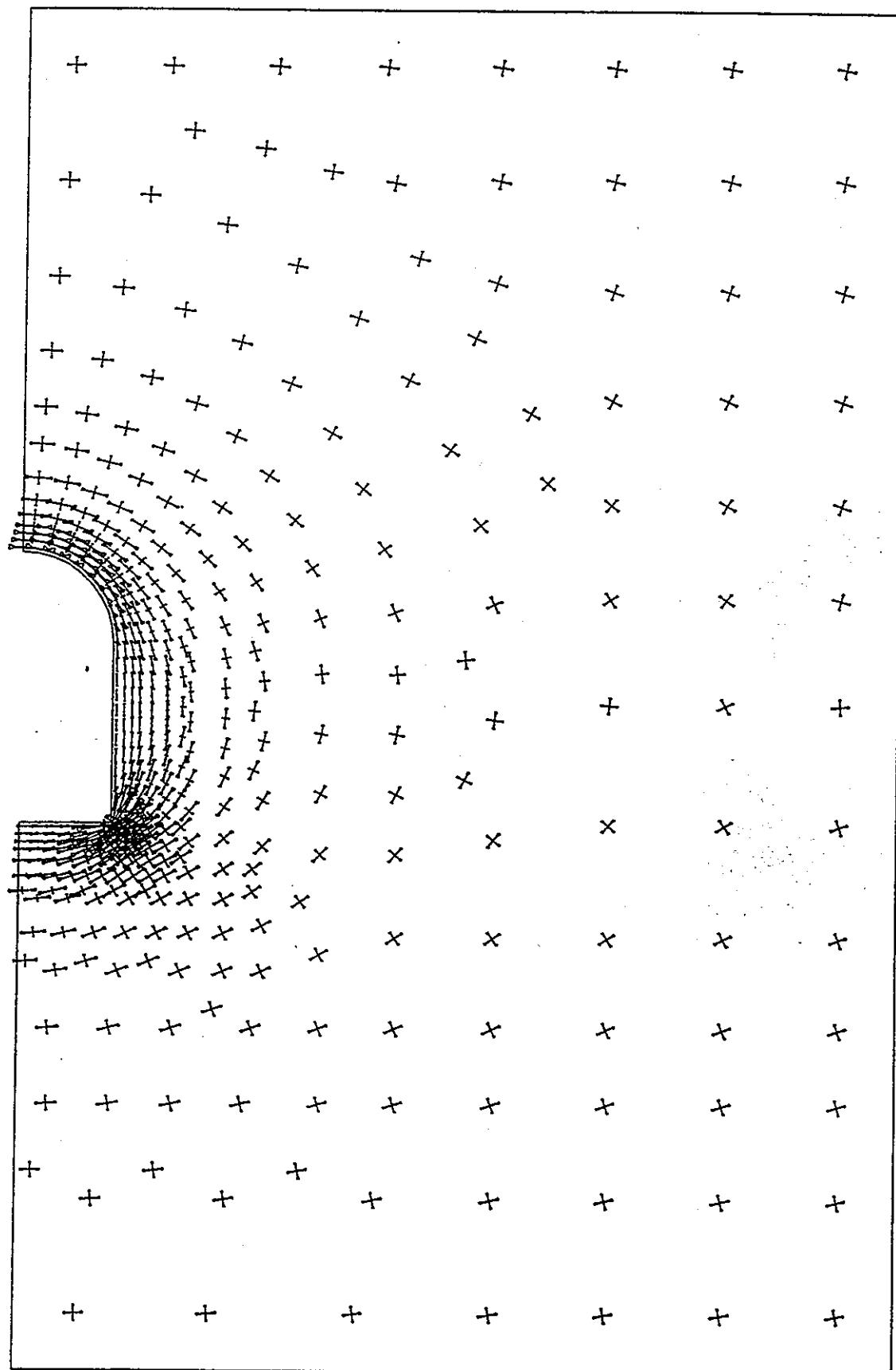
付図-5.3 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A1-0 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



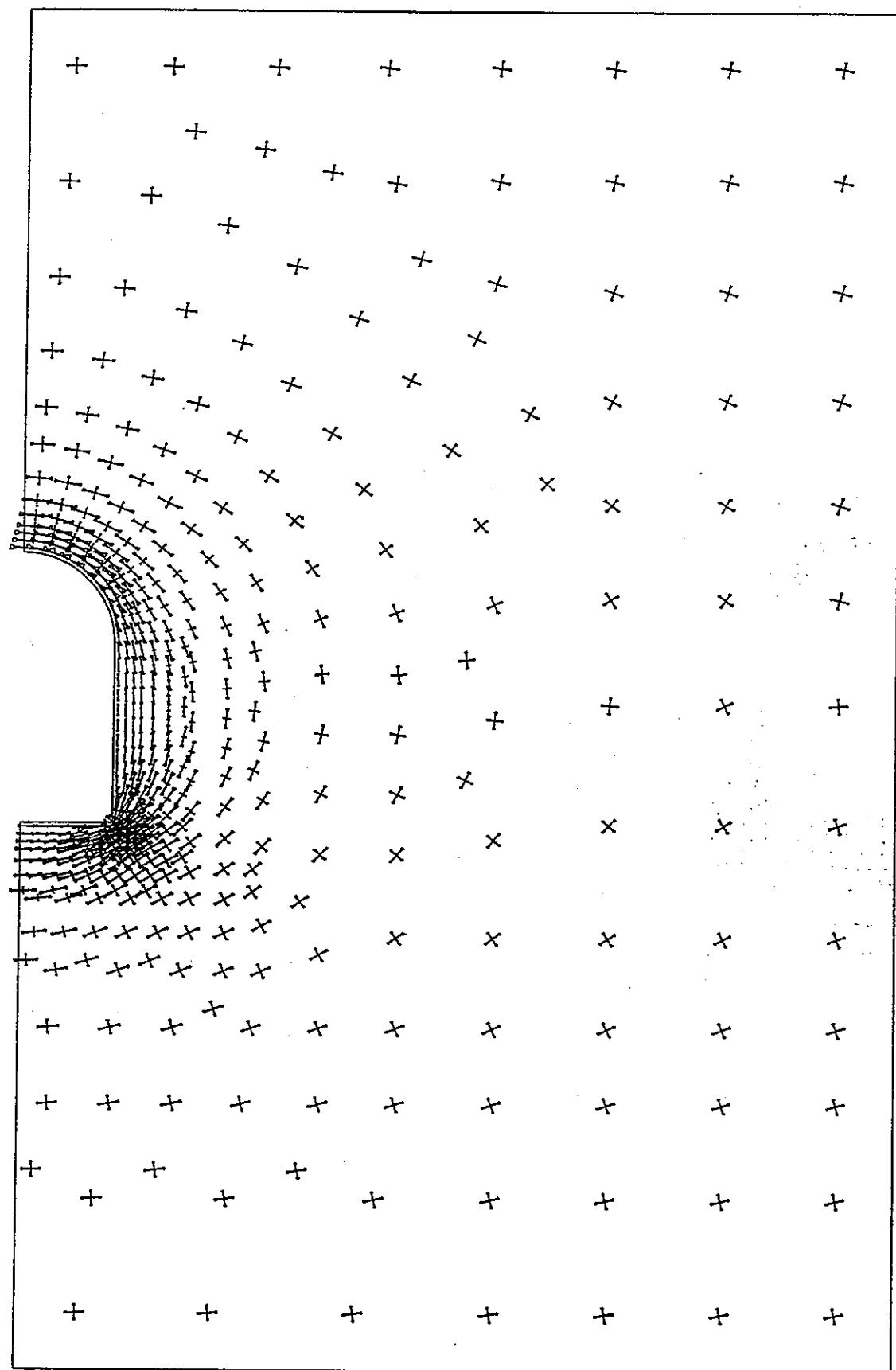
付図-5.4 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A1-1ケース、時間1秒、S=1/400）



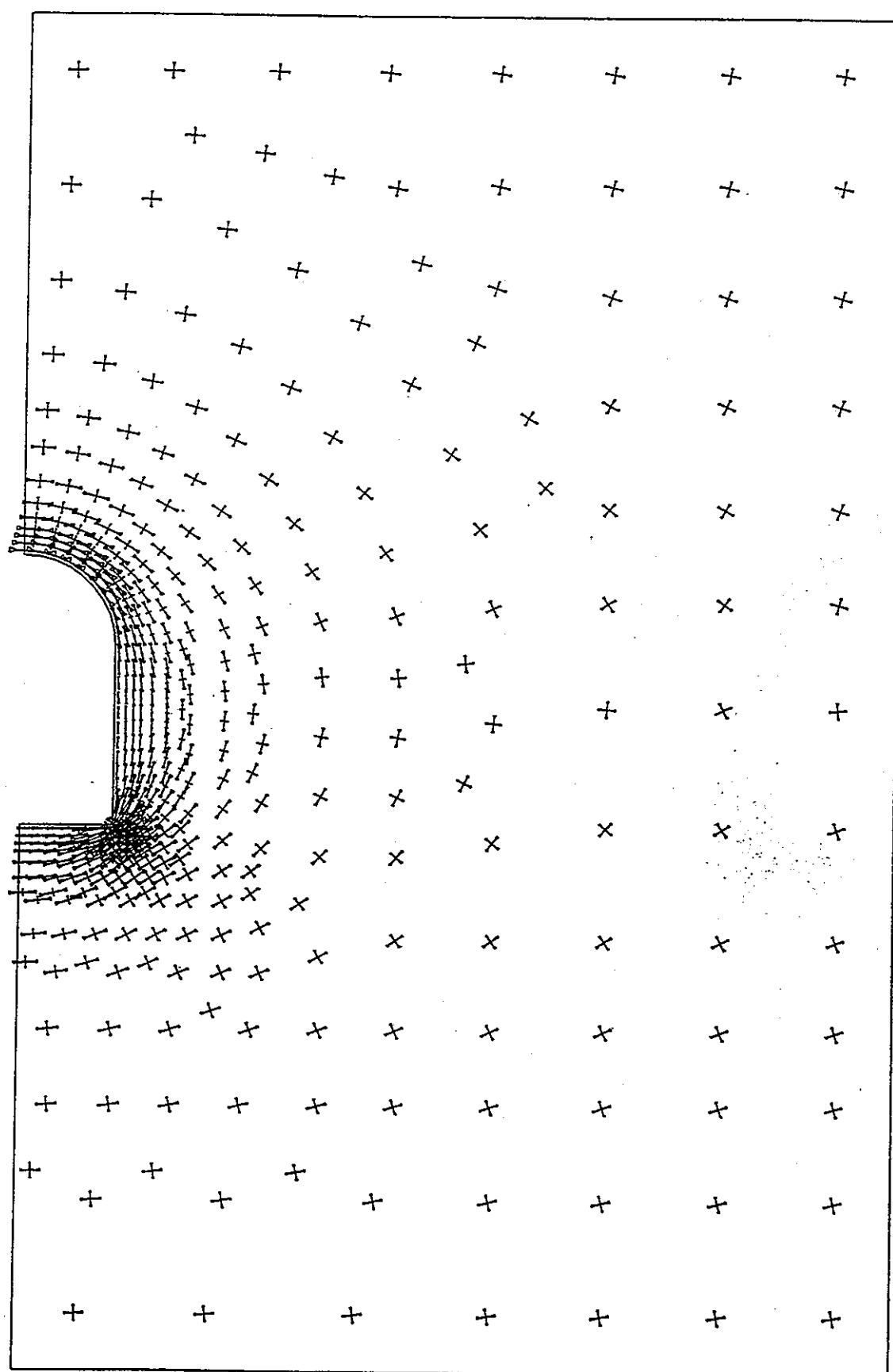
付図-5.5 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-1 ケース、時間 100 年、S=1/400）



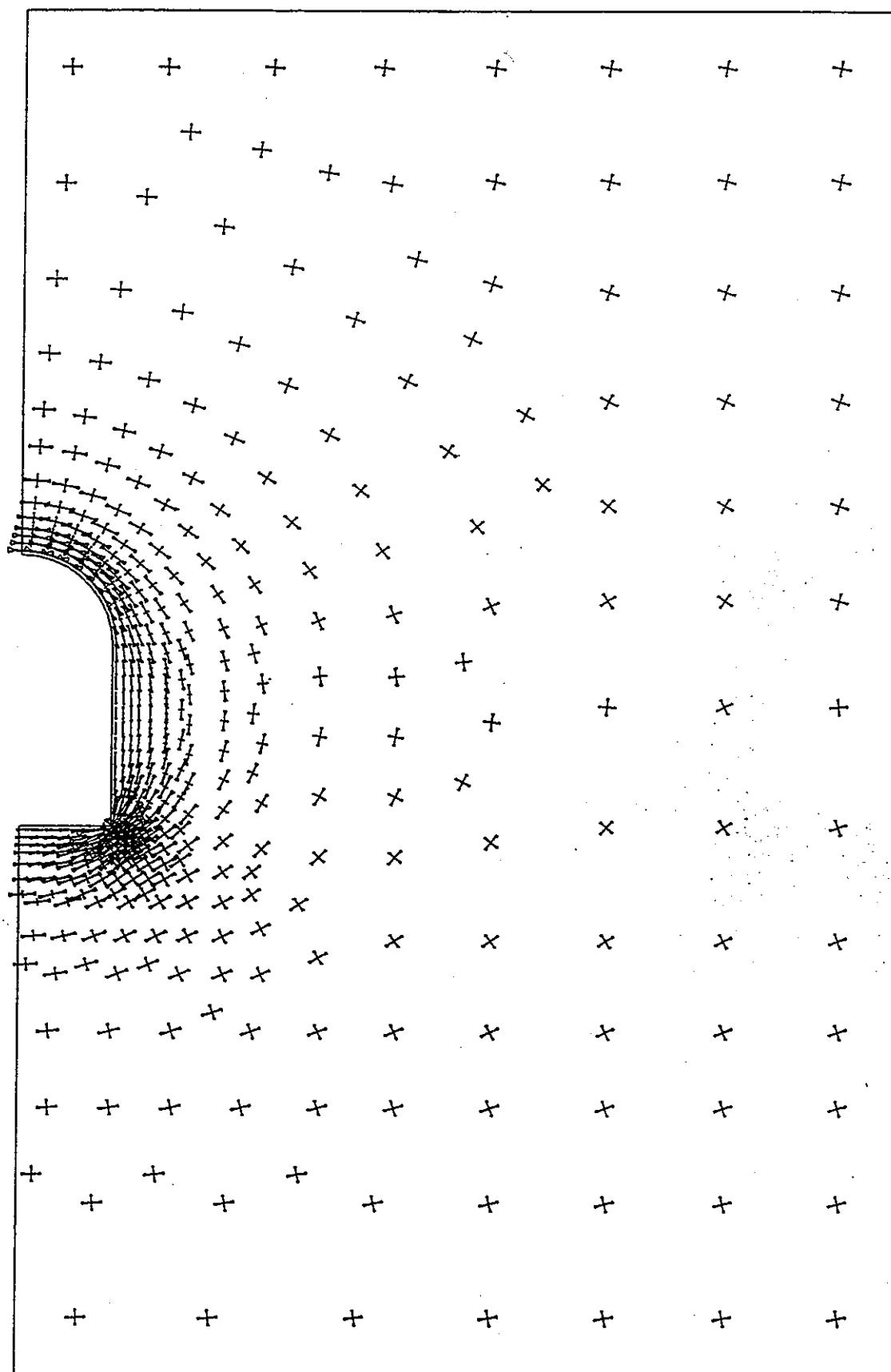
付図-5.6 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-1 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



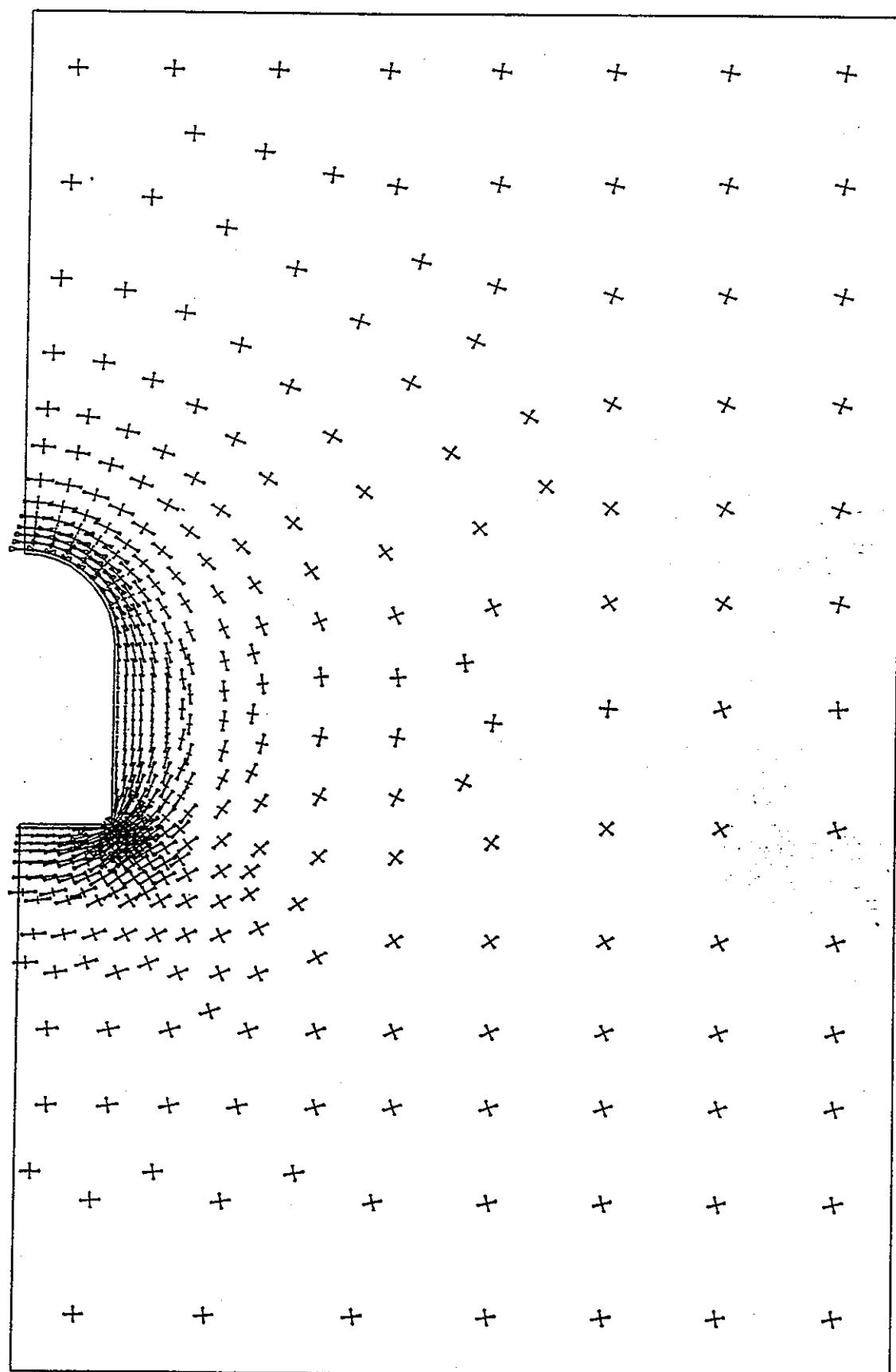
付図-5.7 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-2 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



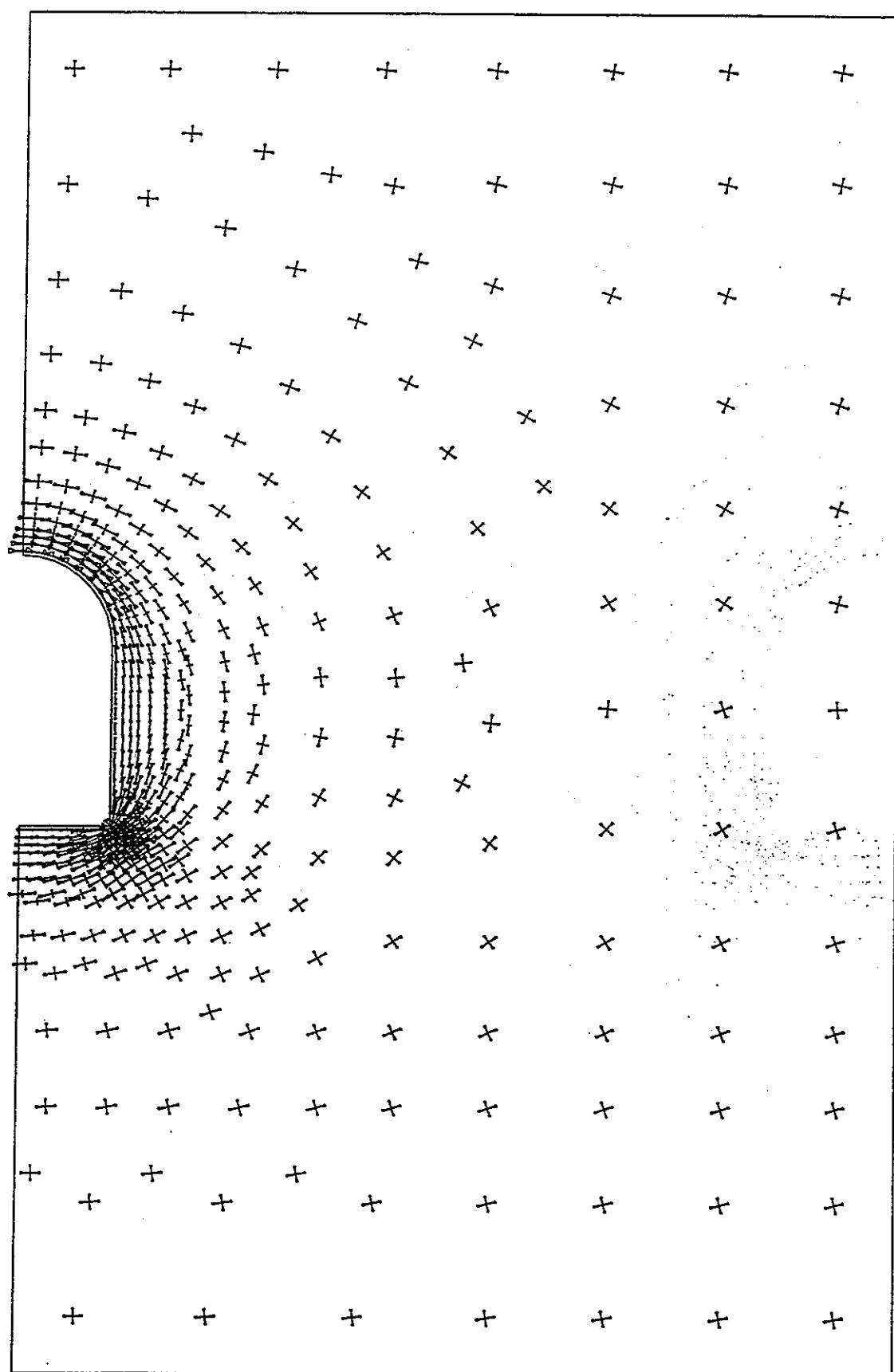
付図-5.8 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1 - 2 ケース、時間 100 年、S=1/400）



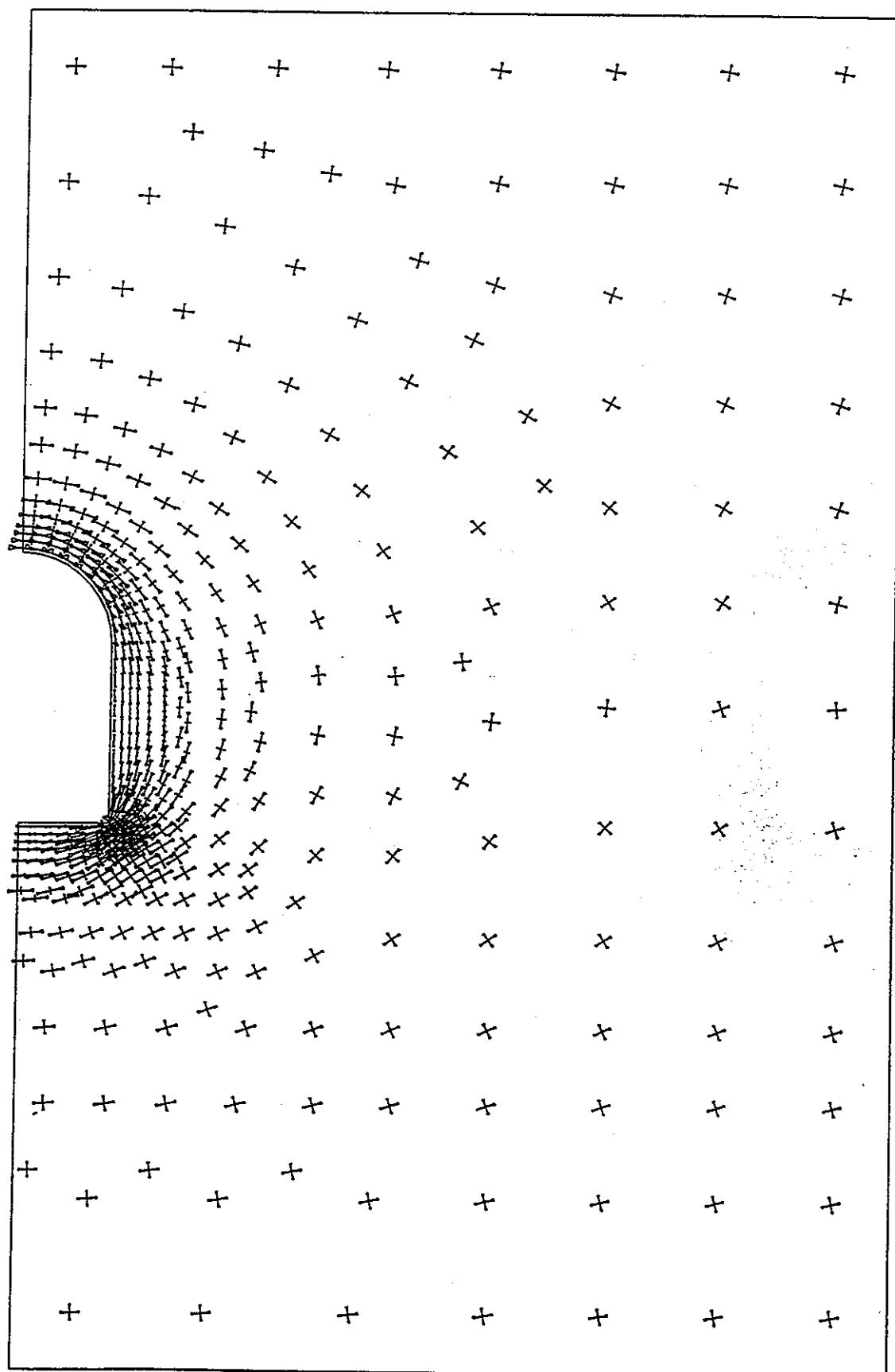
付図-5.9 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-2ケース、時間 100 万年、S=1/400）



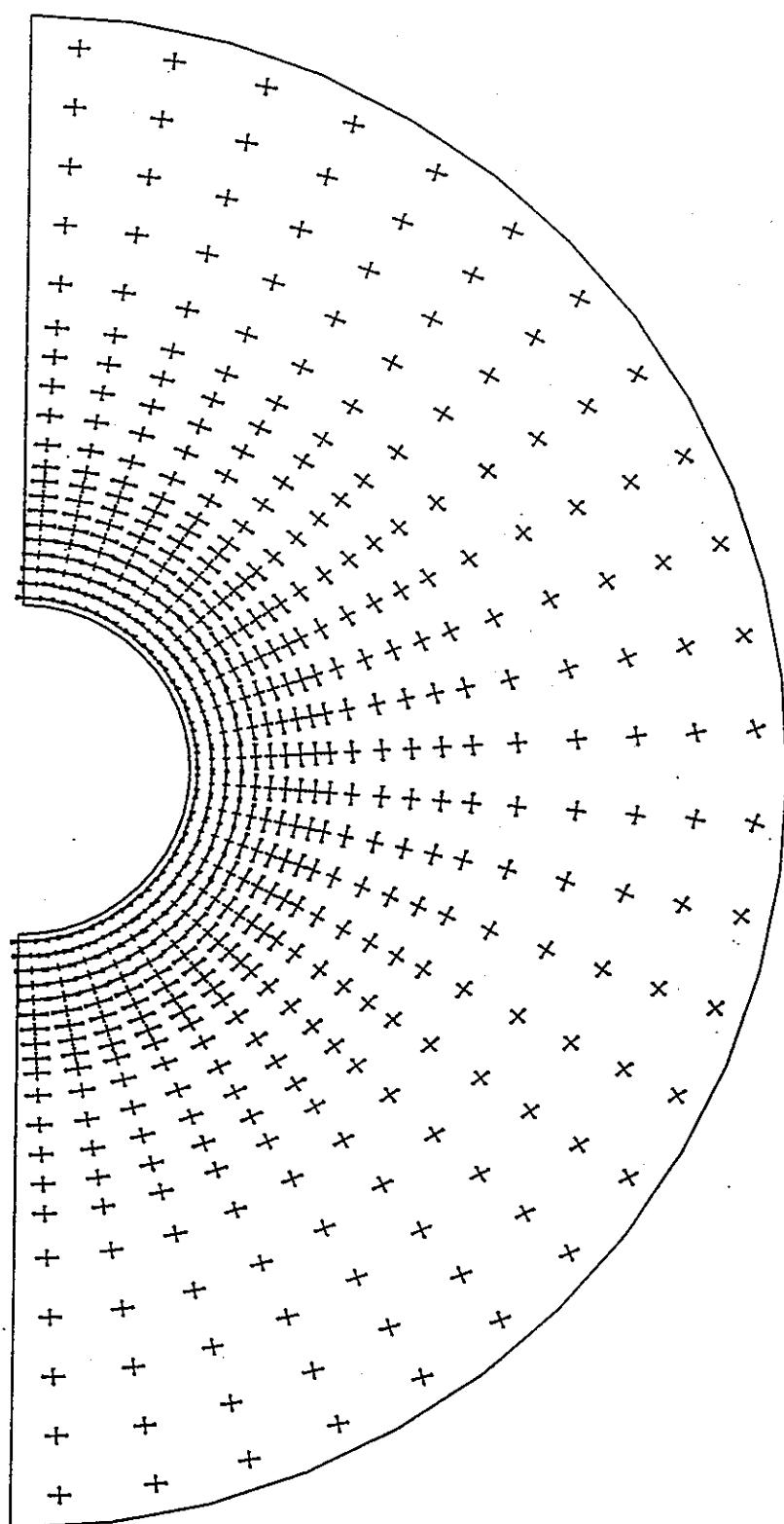
付図-5.10 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-3 ケース、時間 1 秒、S=1/400）



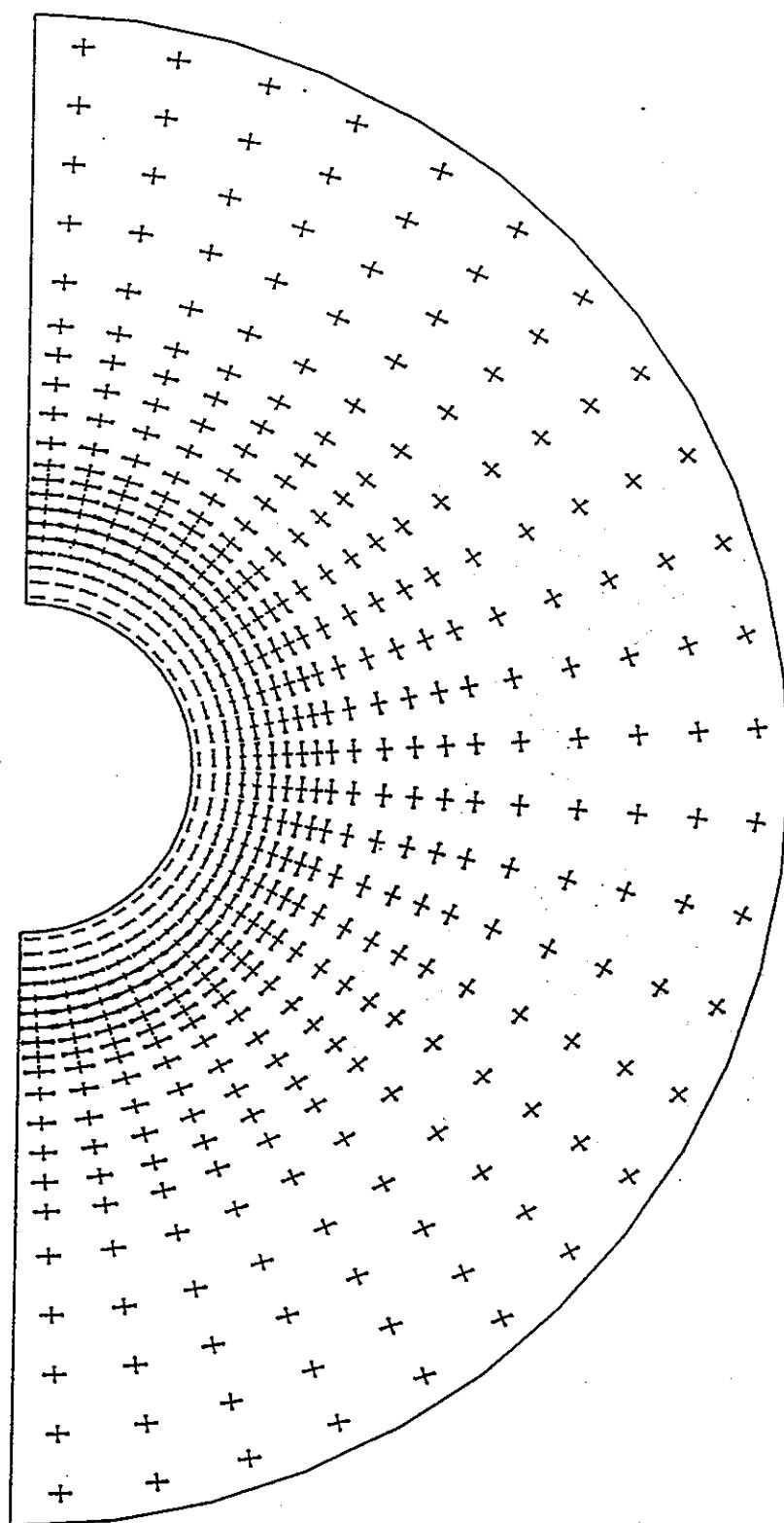
付図-5.11 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-3 ケース、時間 100 年、S=1/400）



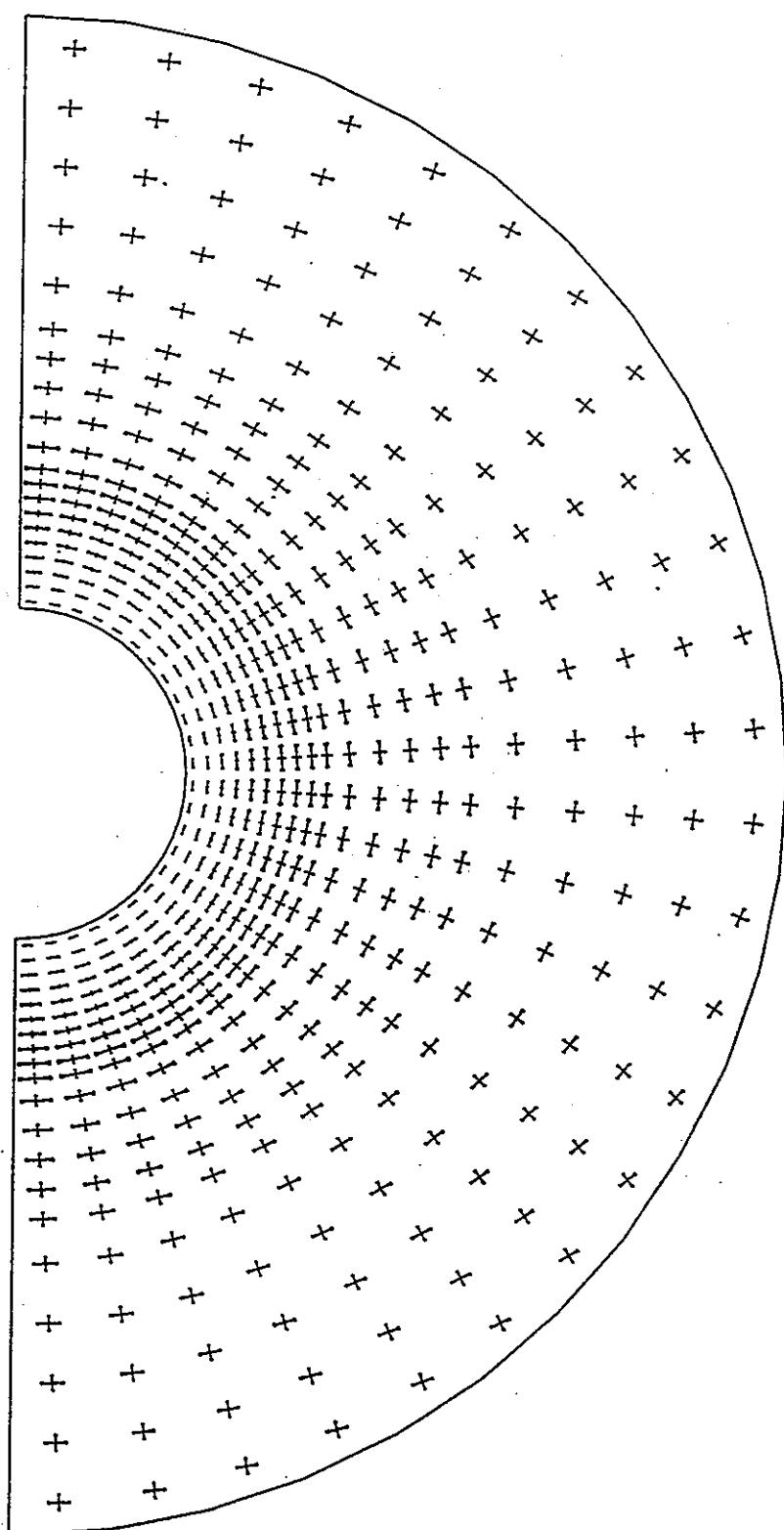
付図-5.12 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 1-3 ケース、時間 100 万年、S=1/400）



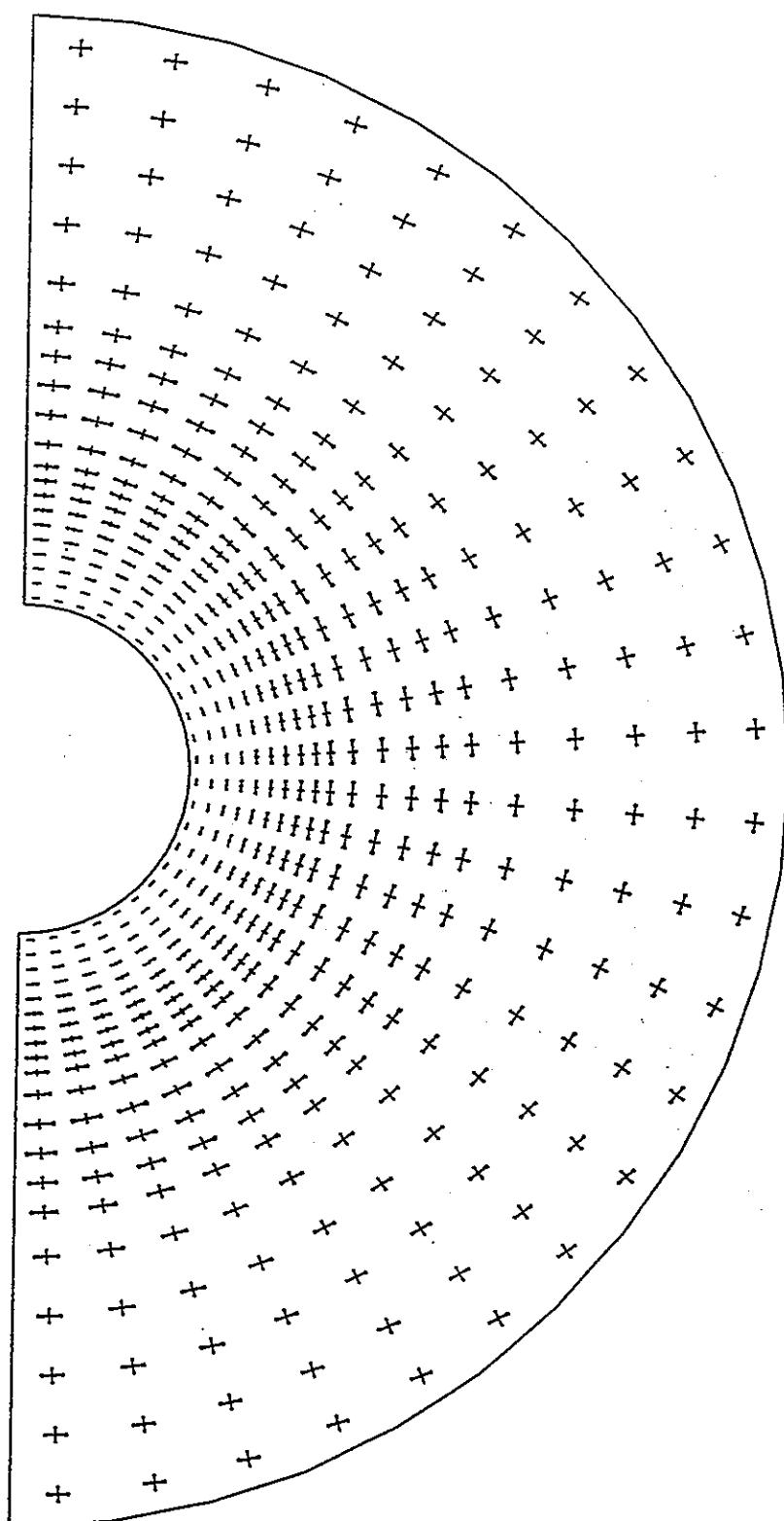
付図-5.13 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-0 ケース、時間1秒、S=1/250）



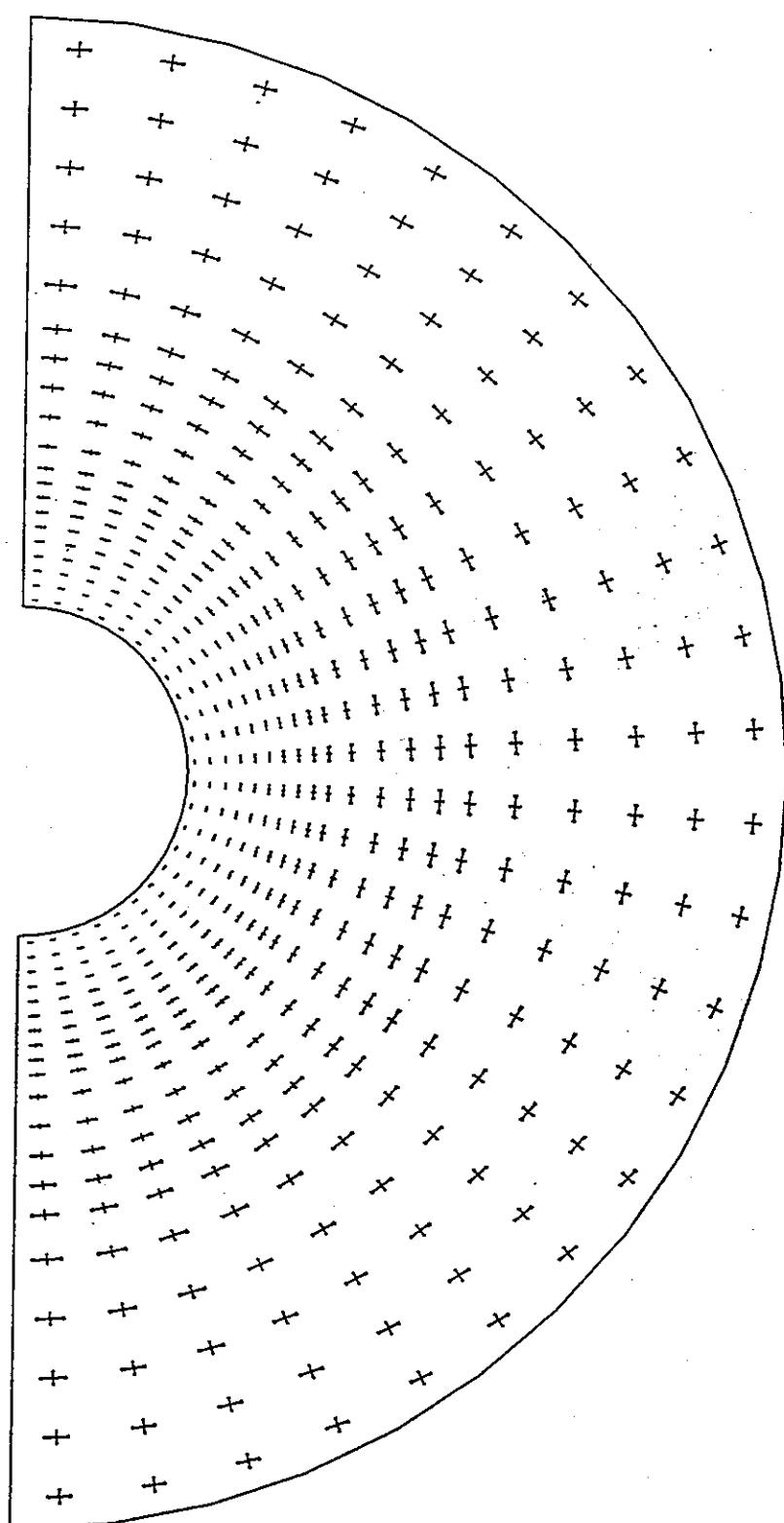
付図-5.14 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間1年、S=1/250）



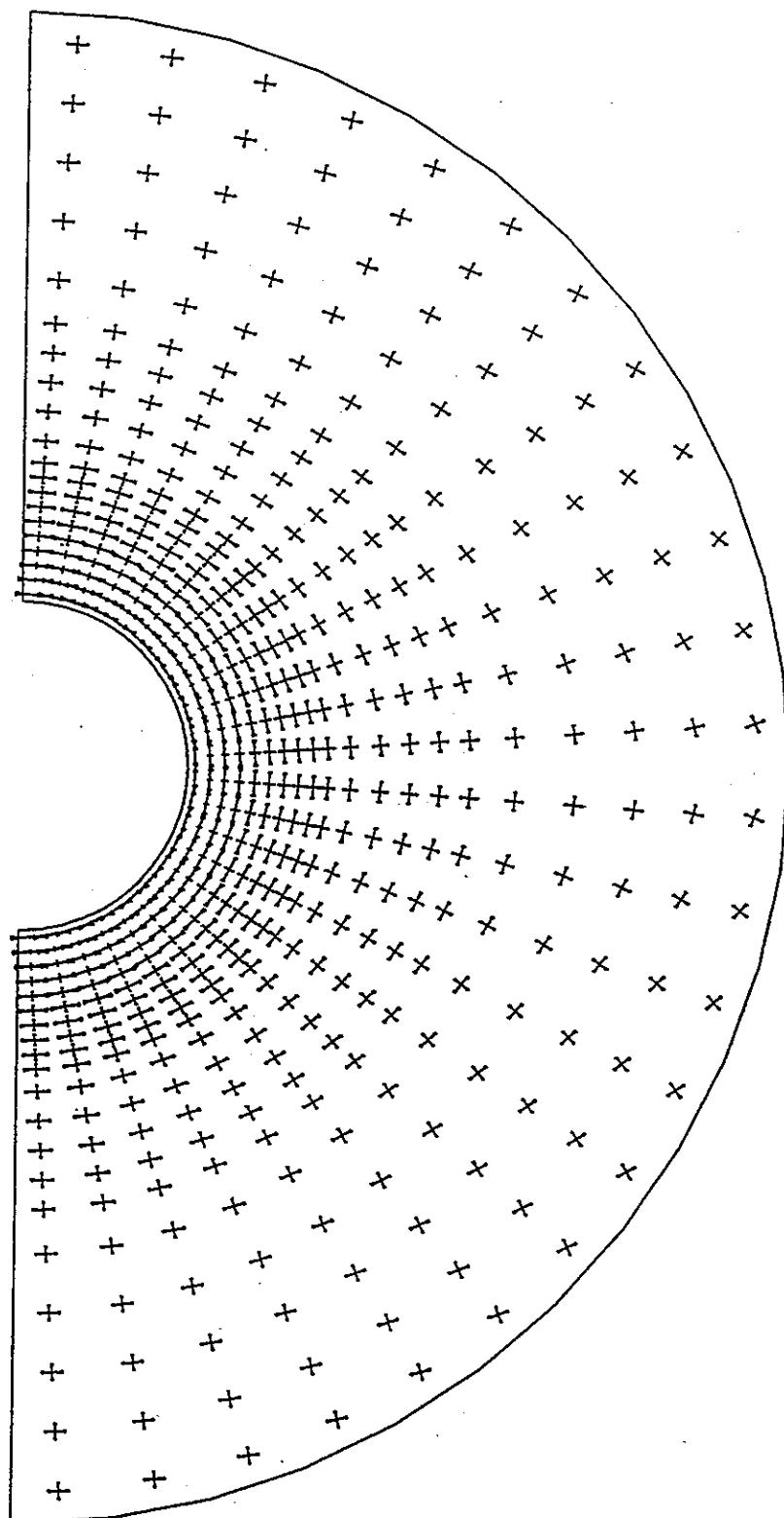
付図-5.15 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 100 年、S=1/250）



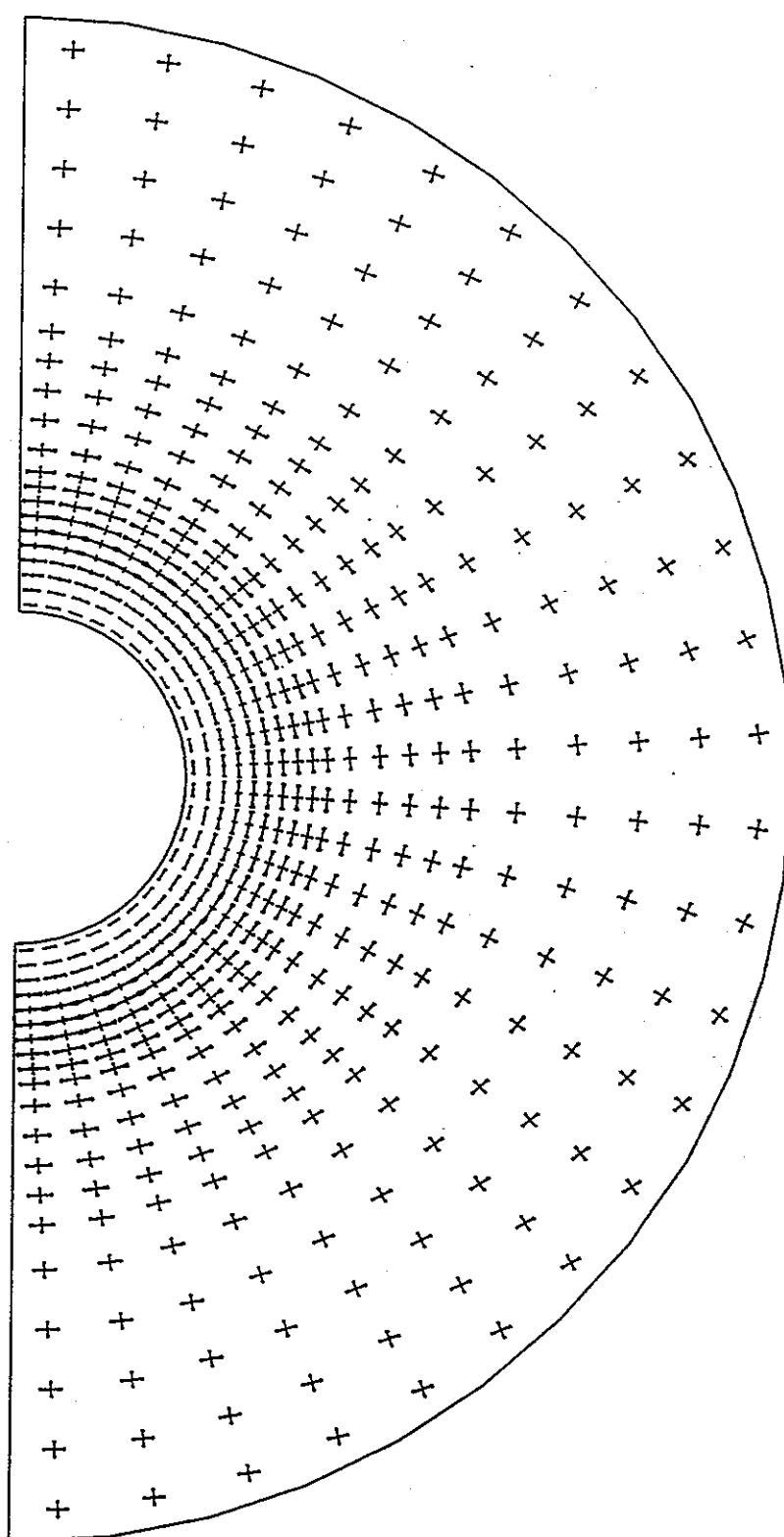
付図-5.16 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-0 ケース、時間1万年、S=1/250）



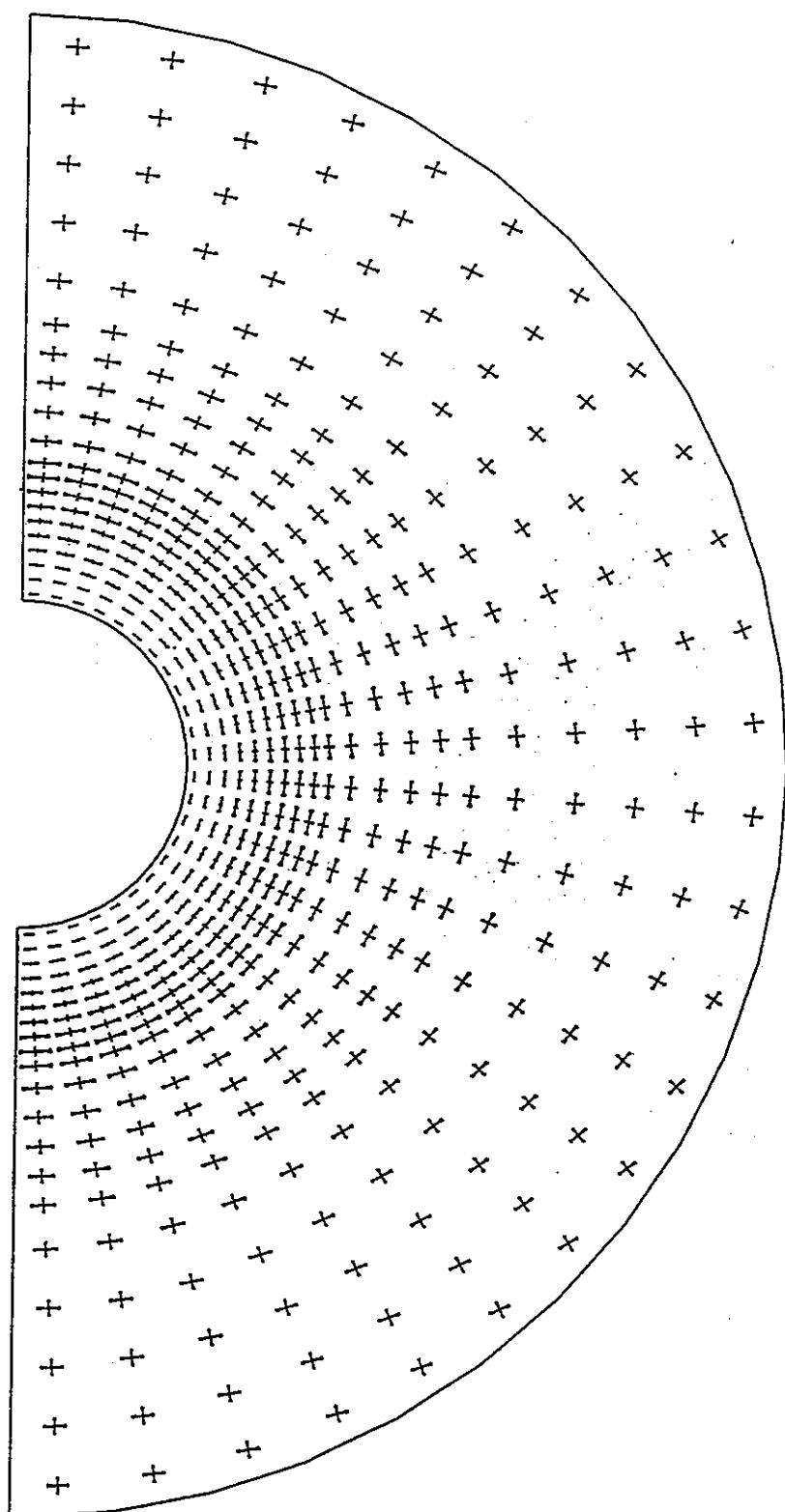
付図-5.17 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 0 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



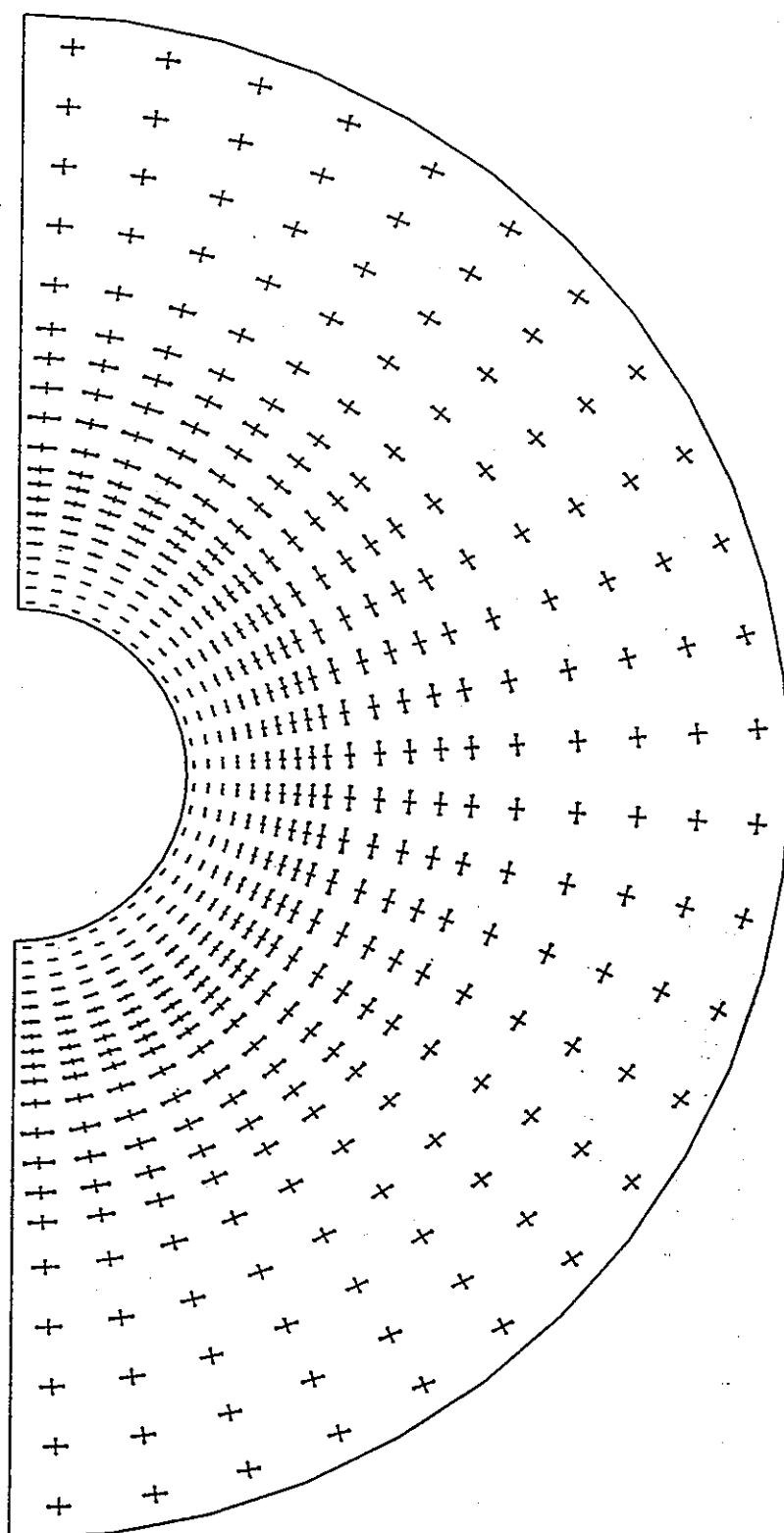
付図-5.18 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間1秒、S=1/250）



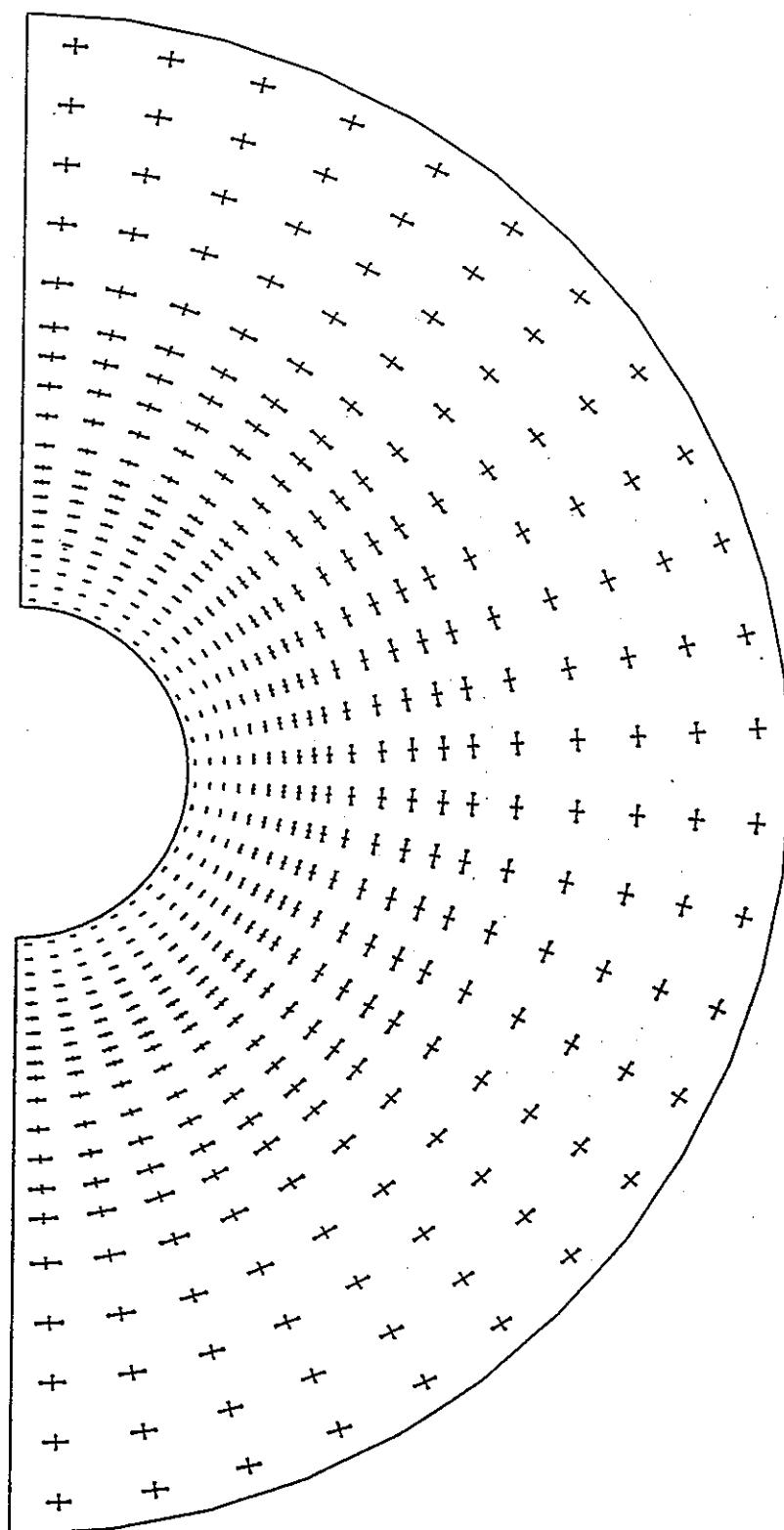
付図-5.19 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間1年、S=1/250）

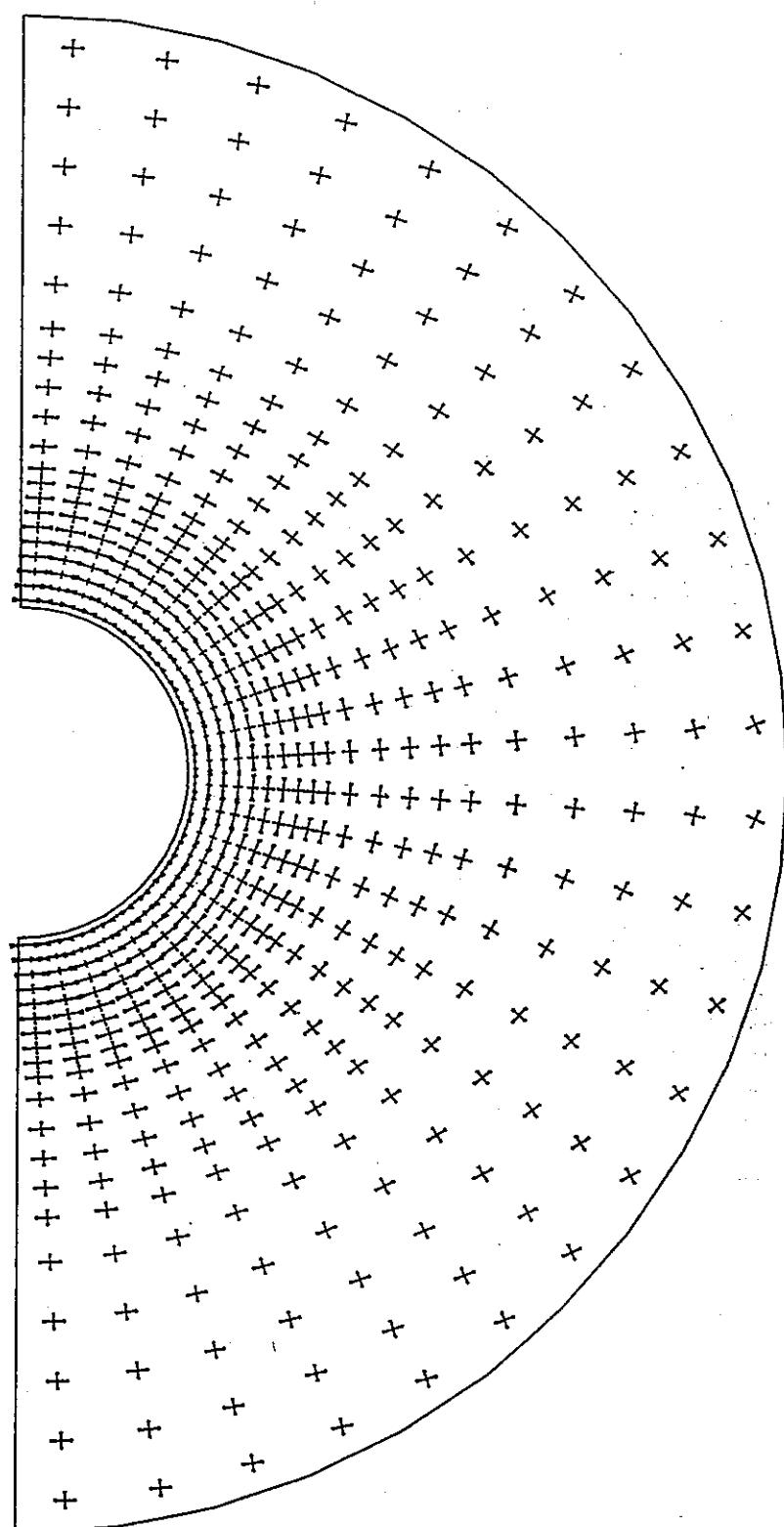


付図-5.20 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間 100 年、S=1/250）

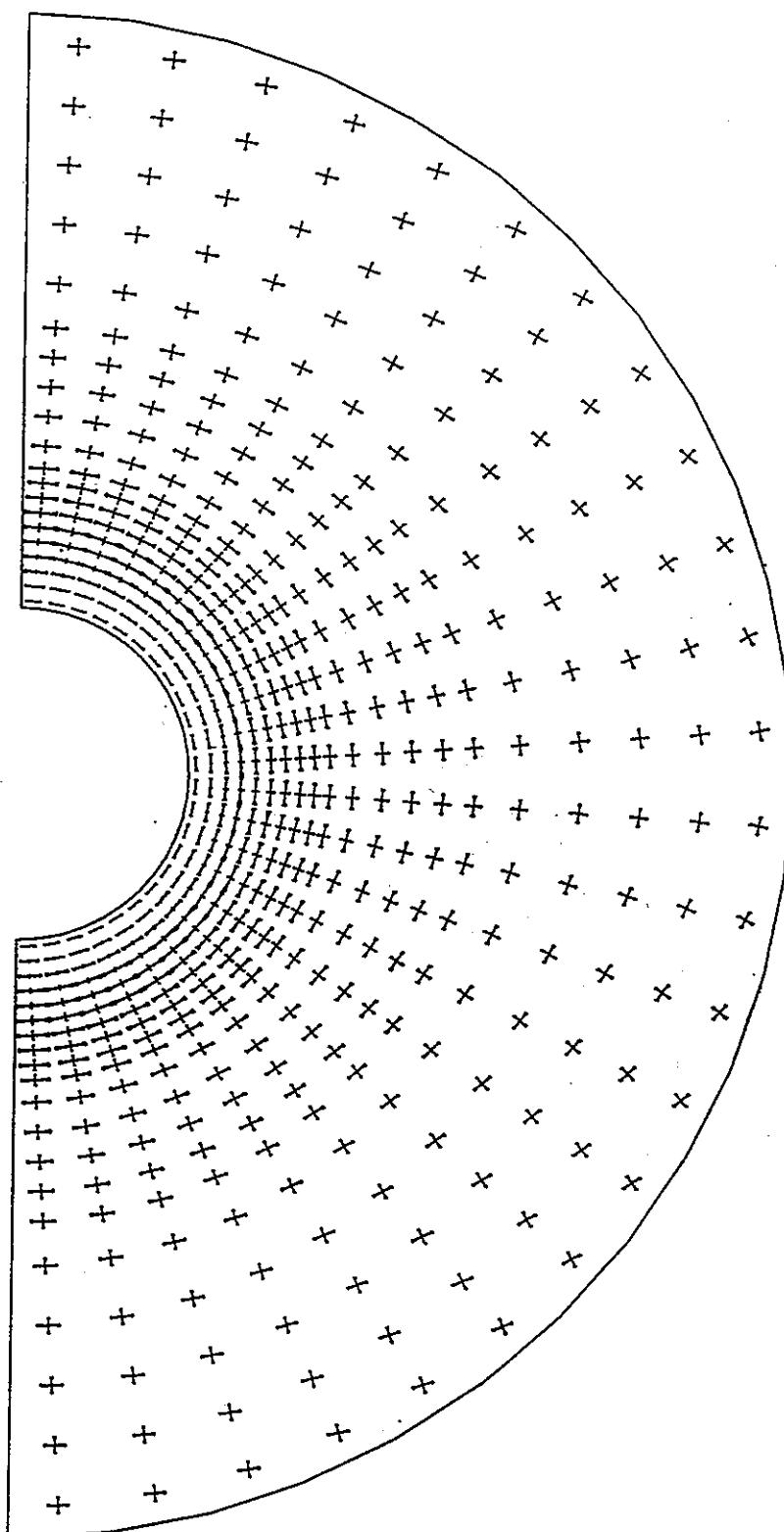


付図-5.21 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間 1 万年、S=1/250）

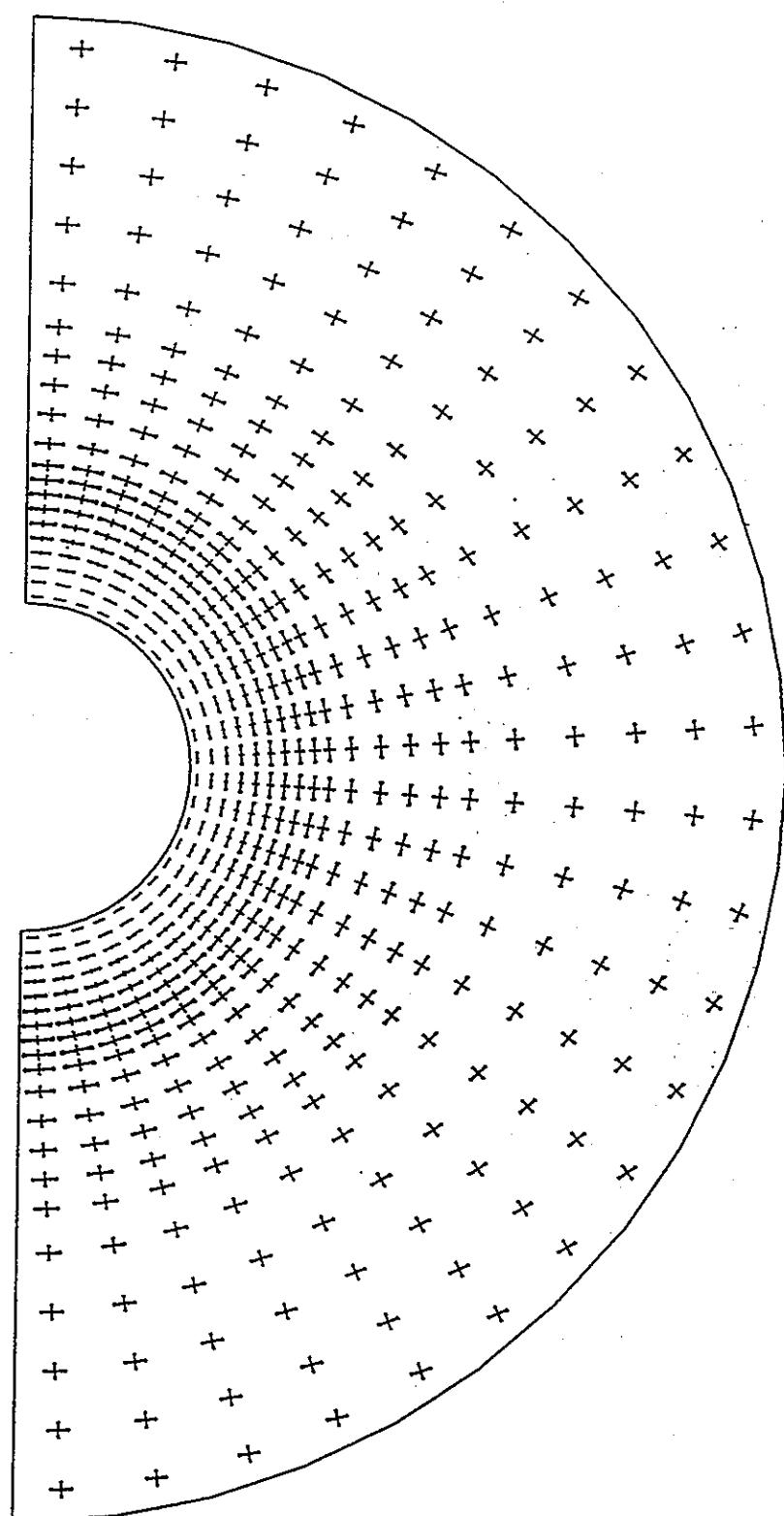
付図-5.22 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-1 ケース、時間 100 万年、 $S=1/250$ ）



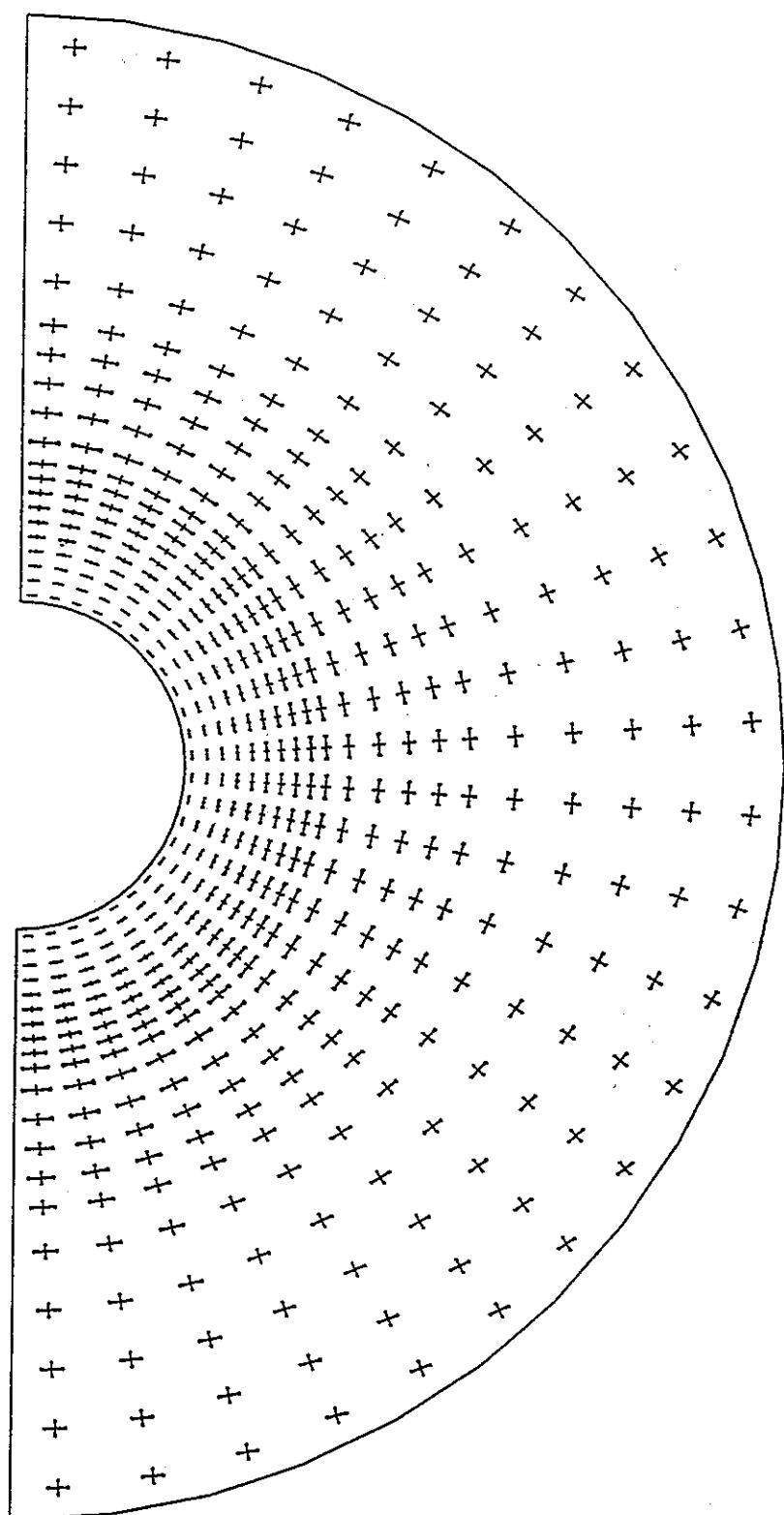
付図-5.23 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-2 ケース、時間 1 秒、S=1/250）



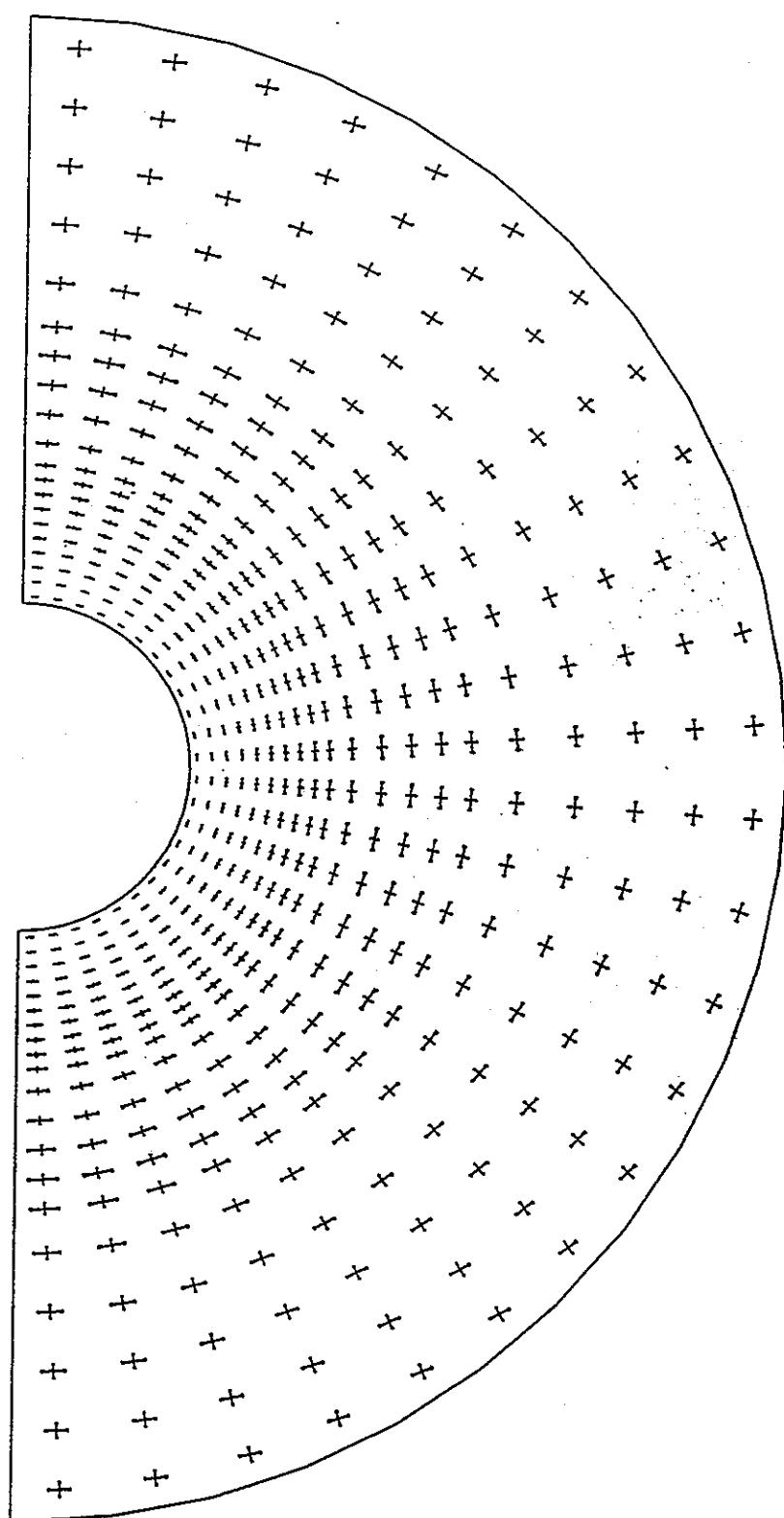
付図-5.24 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 2 ケース、時間 1 年、S=1/250）



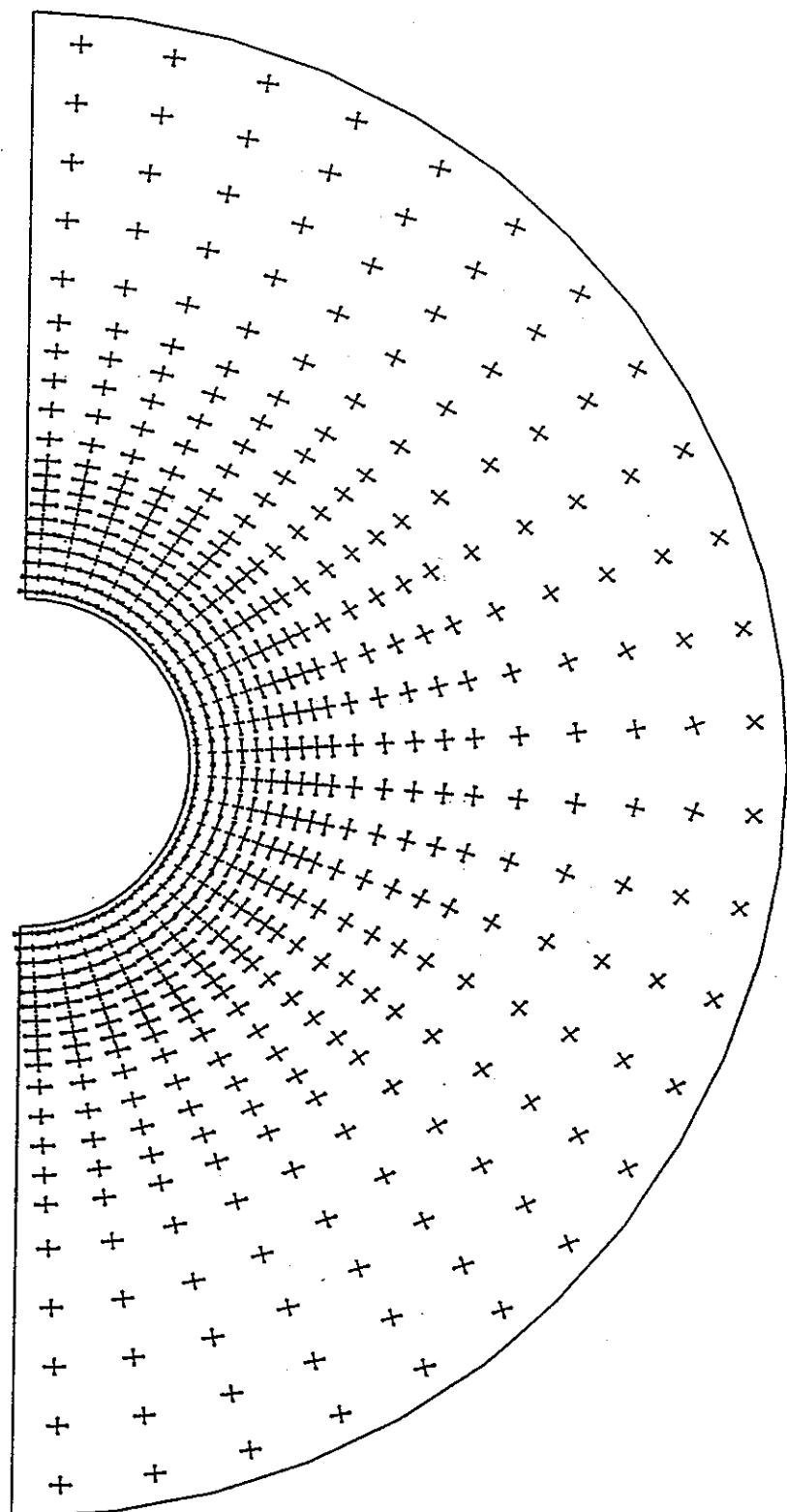
付図-5.25 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 2 ケース、時間 100 年、S=1/250）



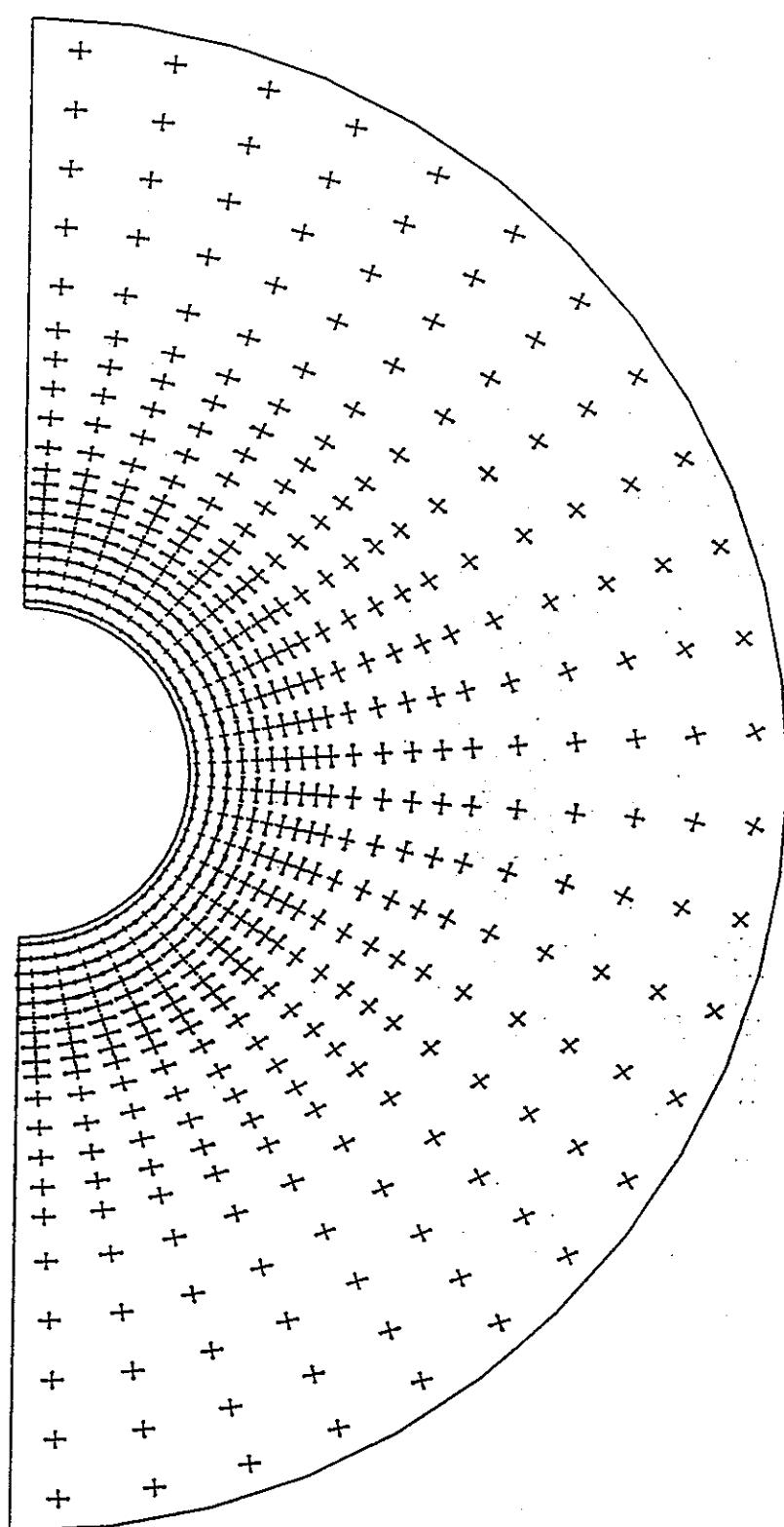
付図-5.26 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-2 ケース、時間1万年、S=1/250）



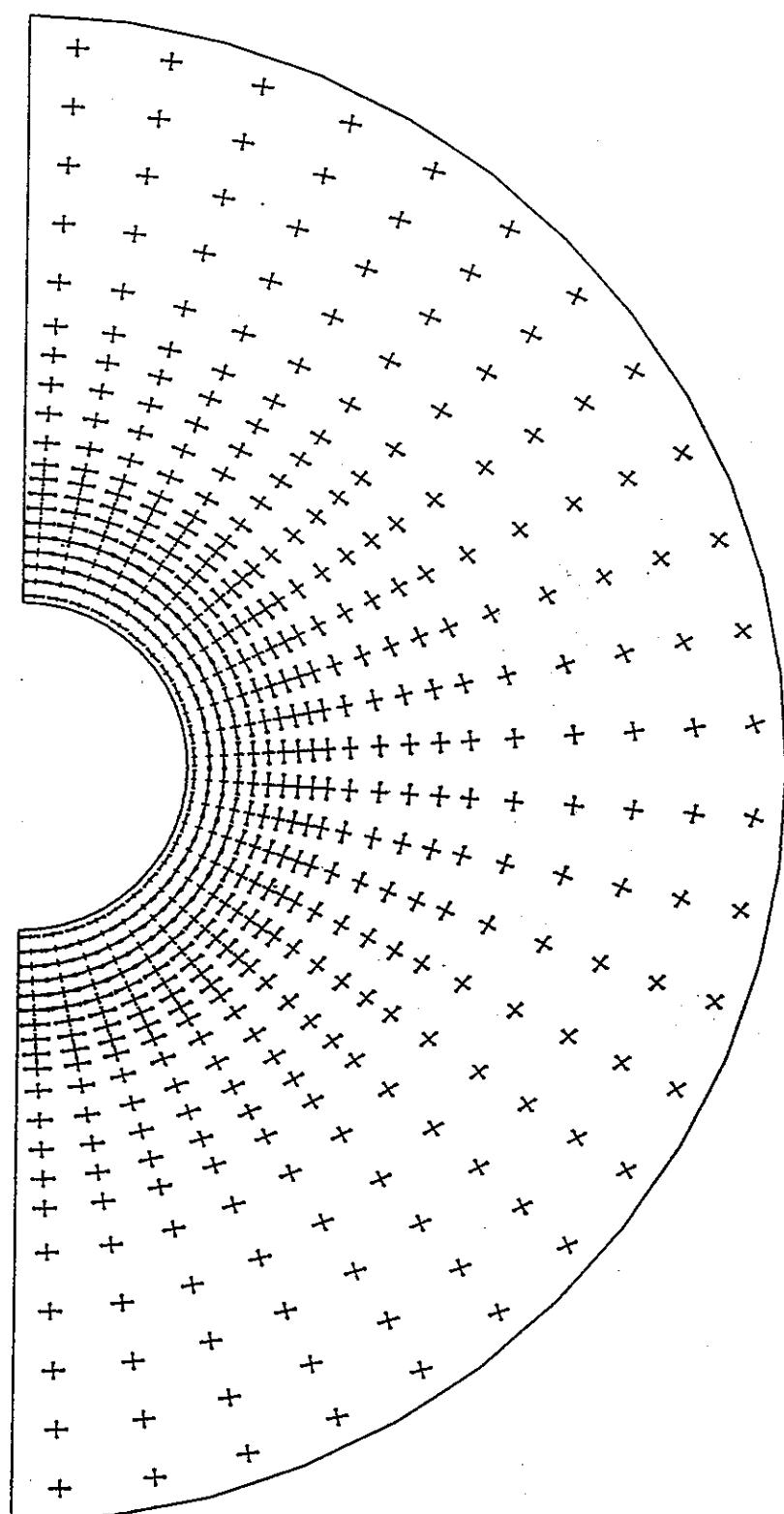
付図-5.27 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1-2 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



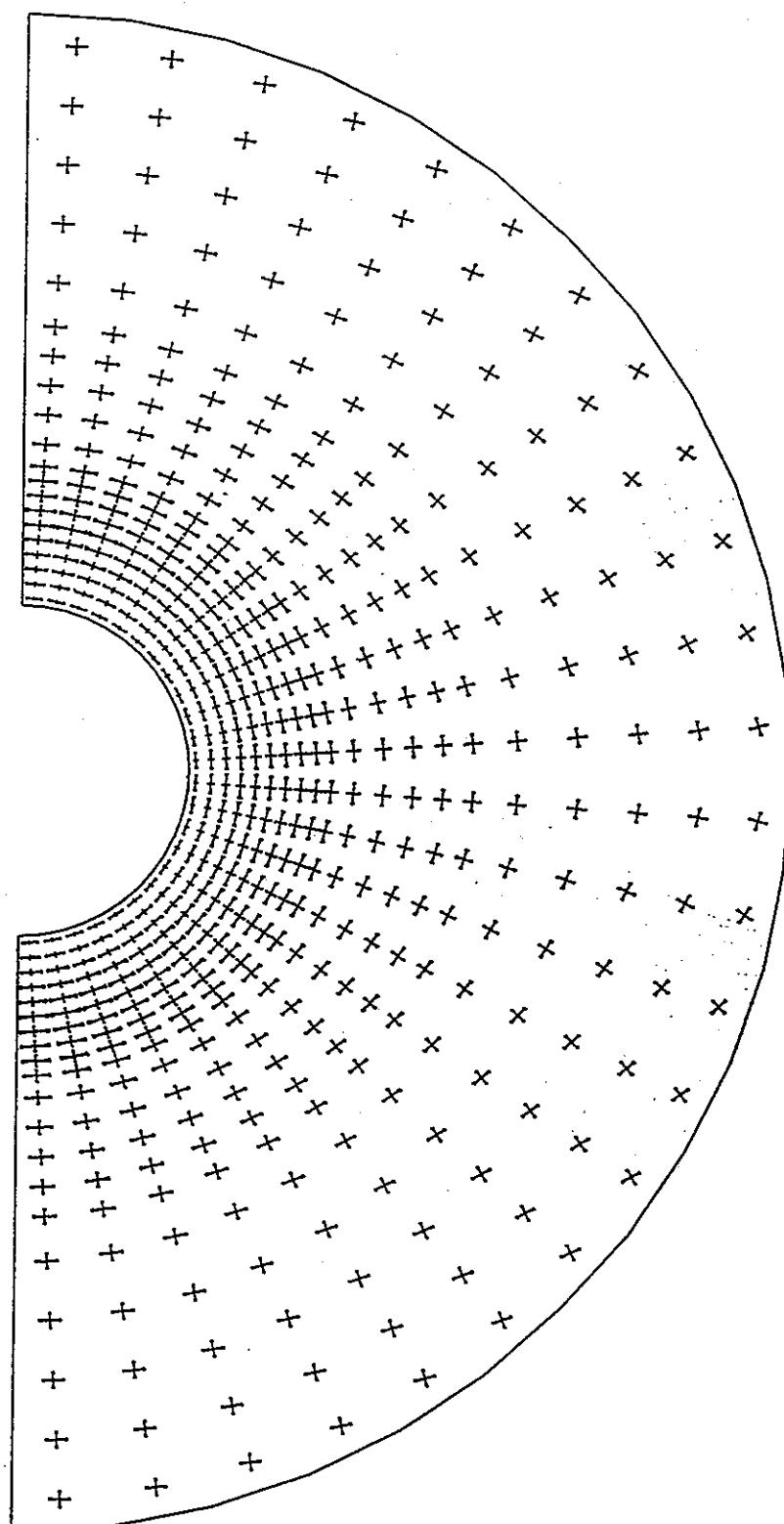
付図-5.28 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 1 秒、S=1/250）



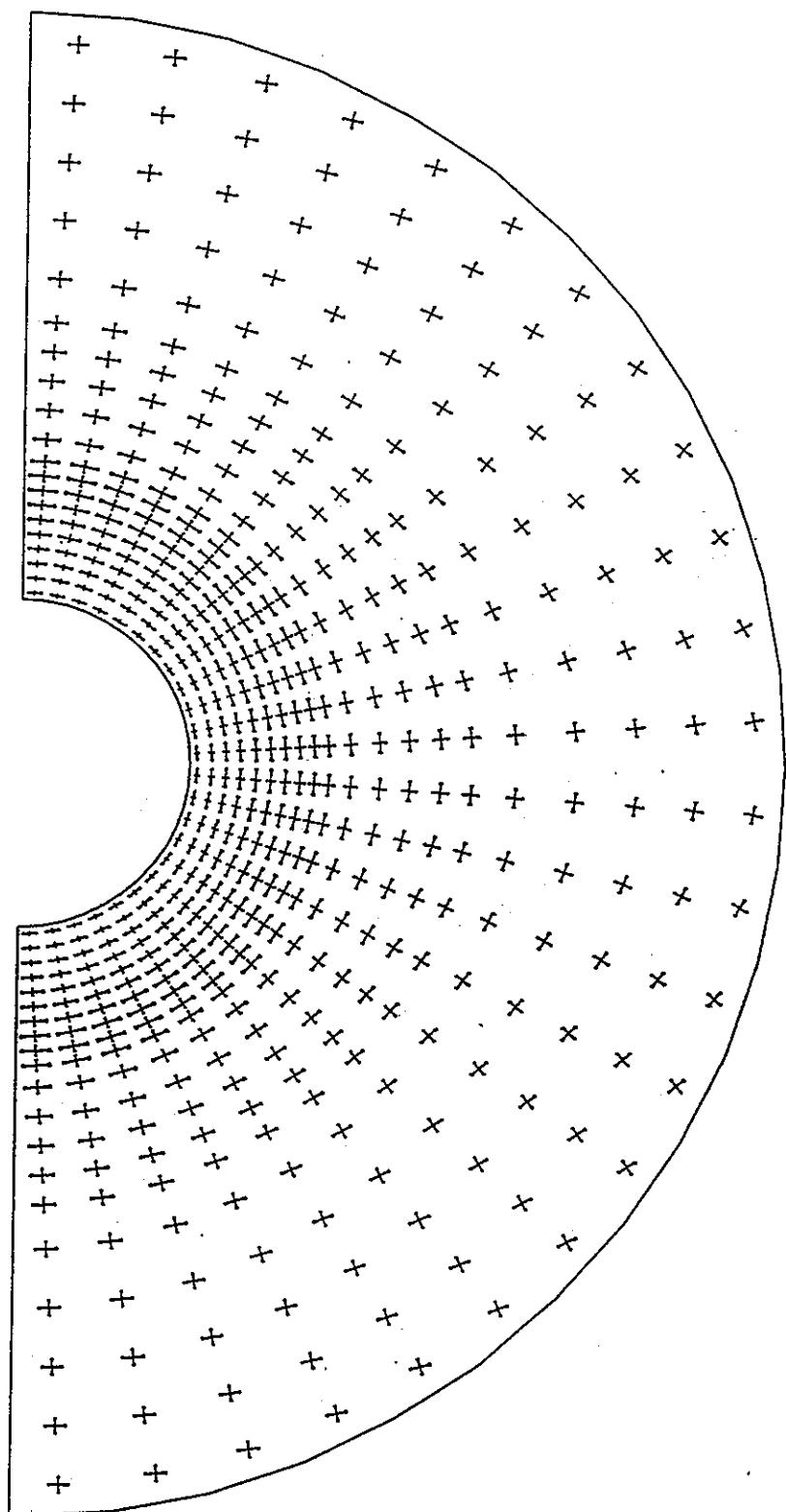
付図-5.29 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 1 年、S=1/250）



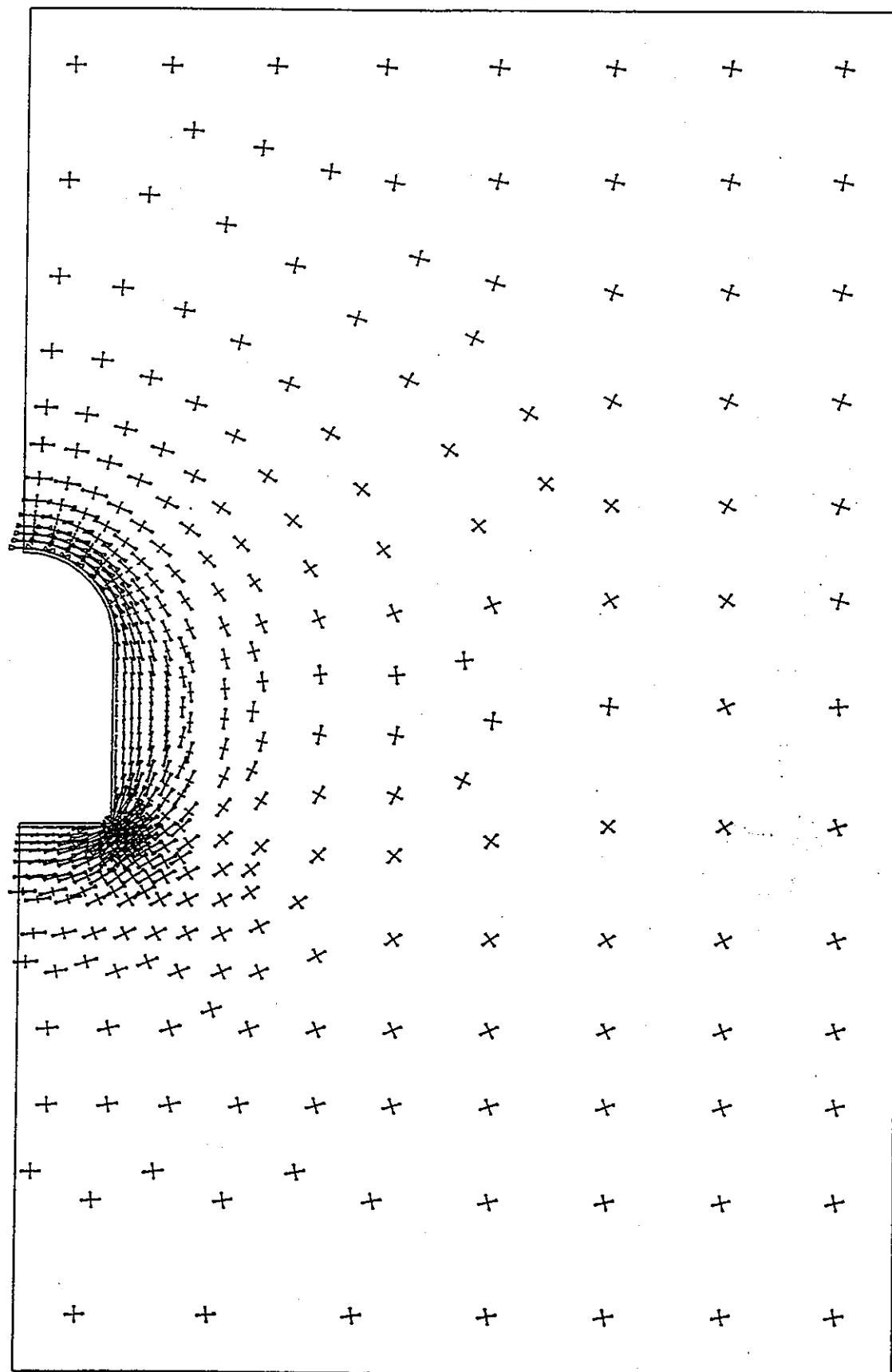
付図-5.30 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 100 年、S=1/250）



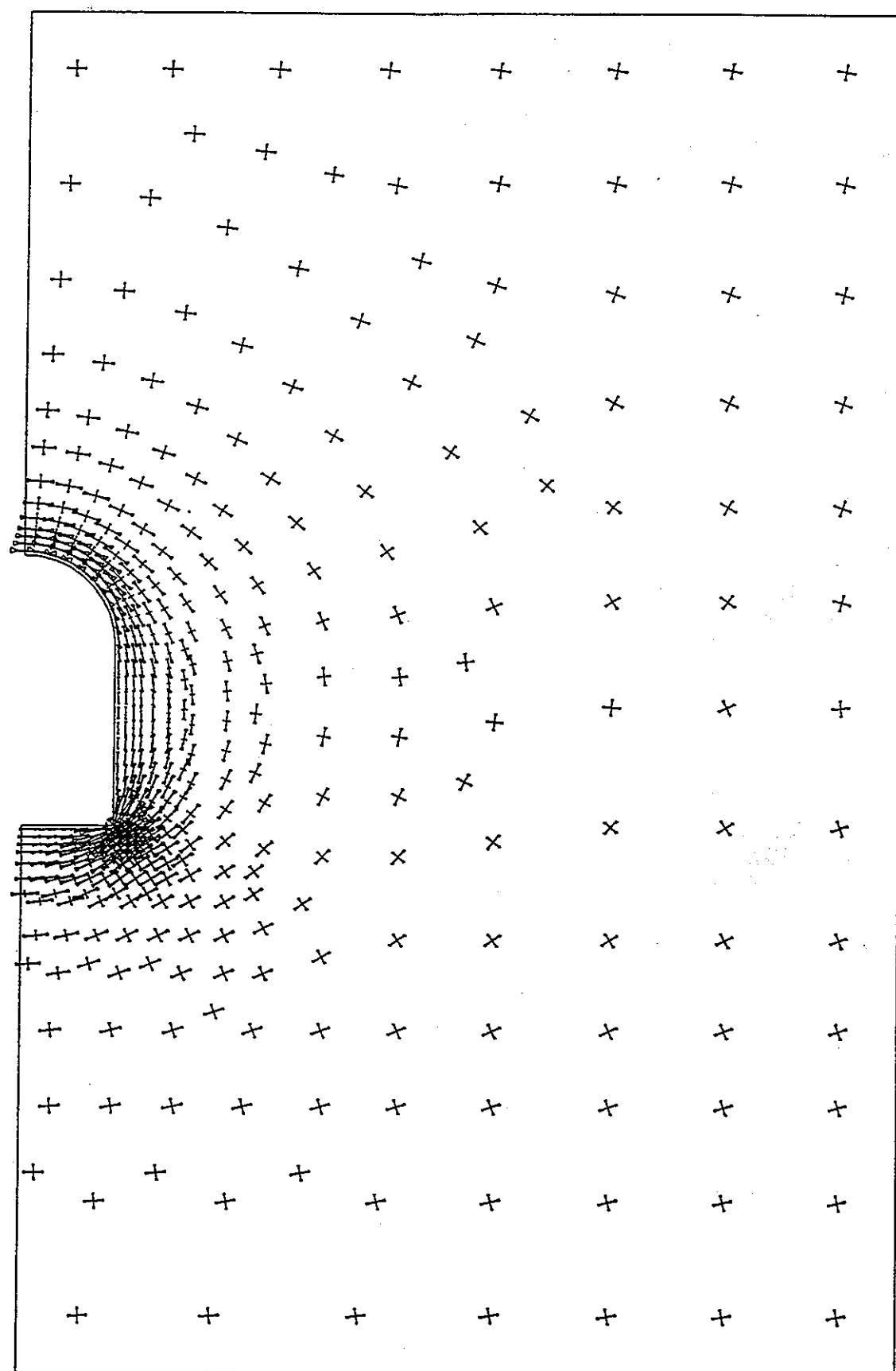
付図-5.31 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 1 万年、S=1/250）



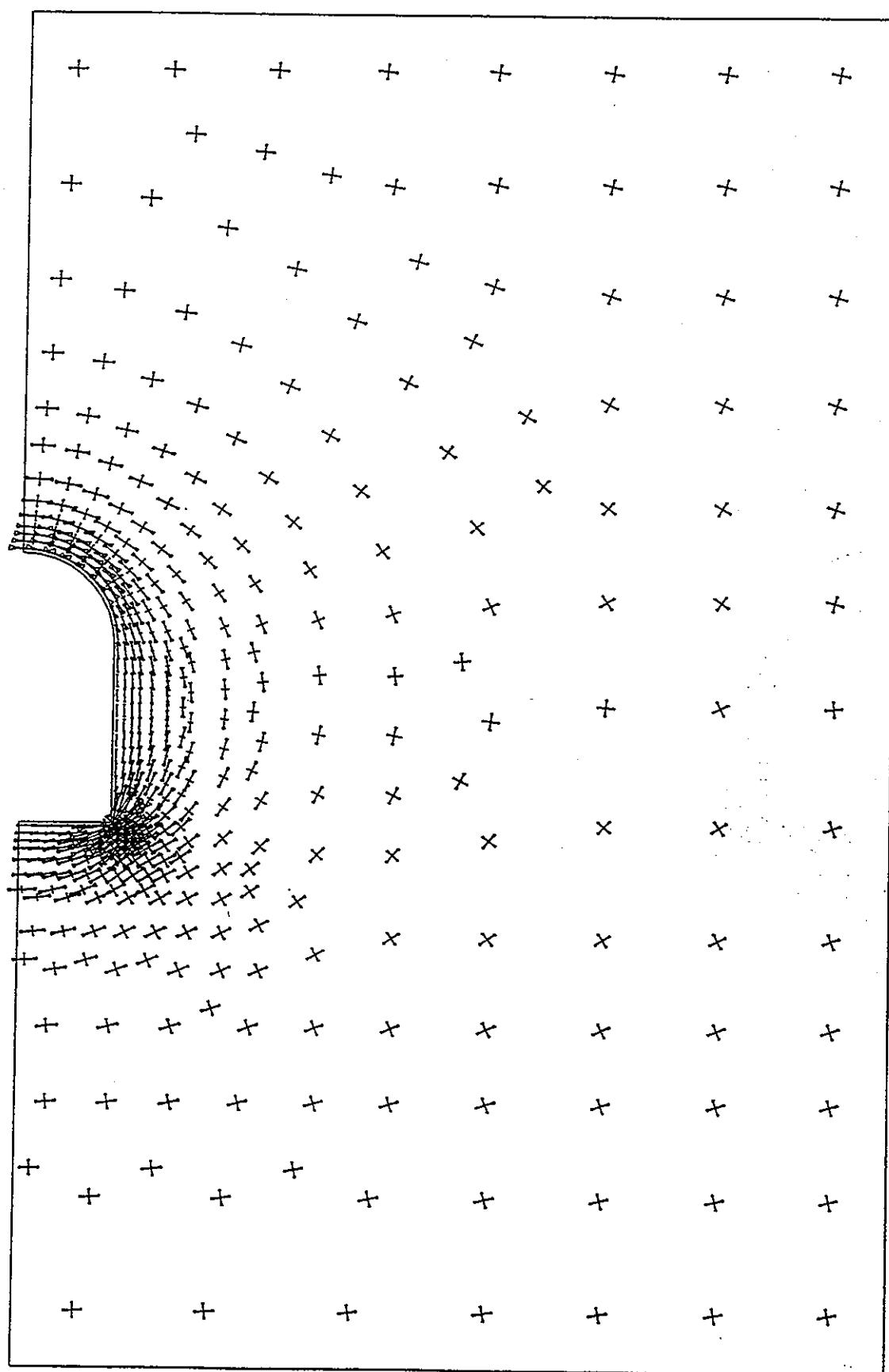
付図-5.32 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 1 - 3 ケース、時間 100 万年、S=1/250）

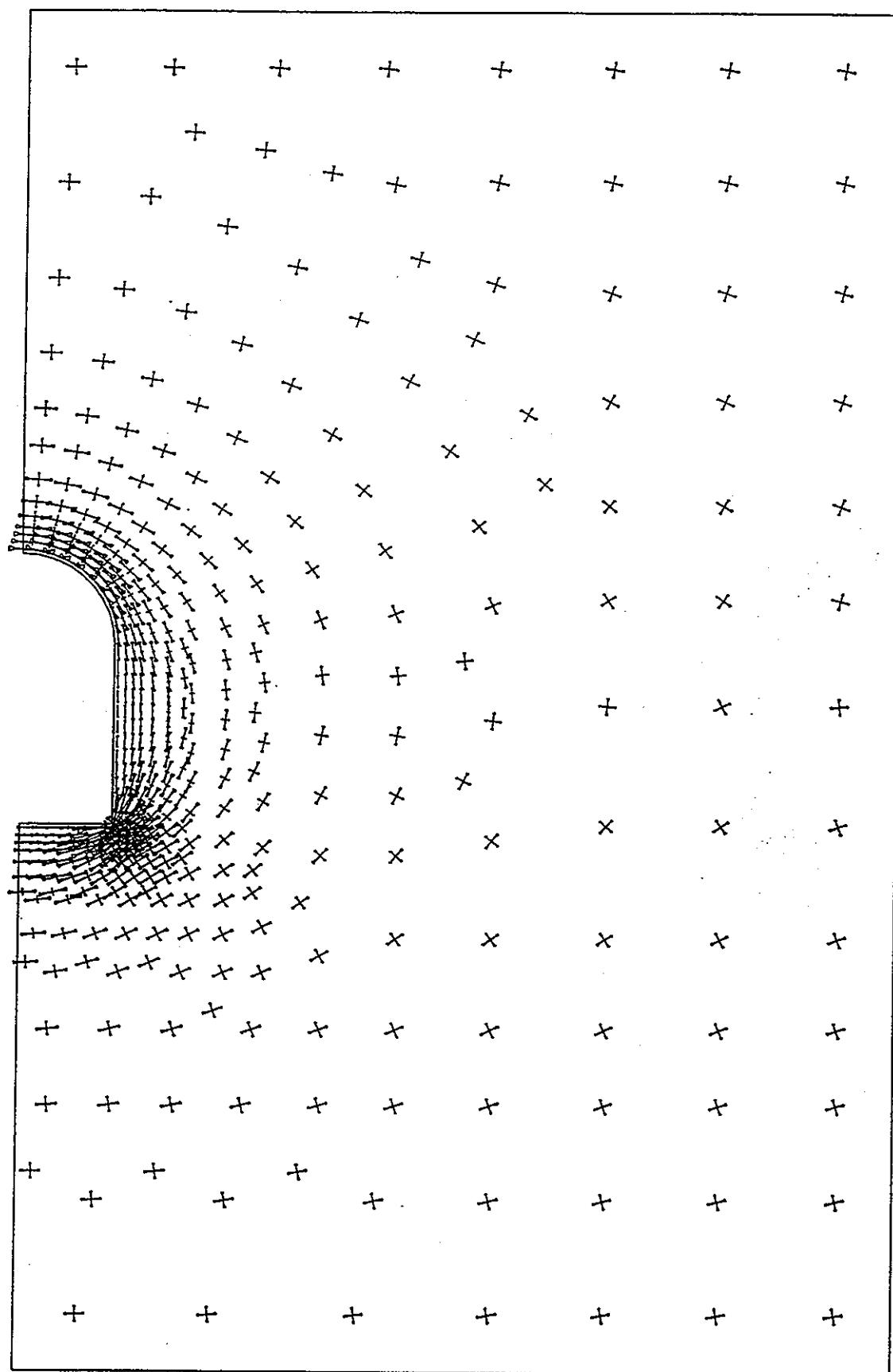


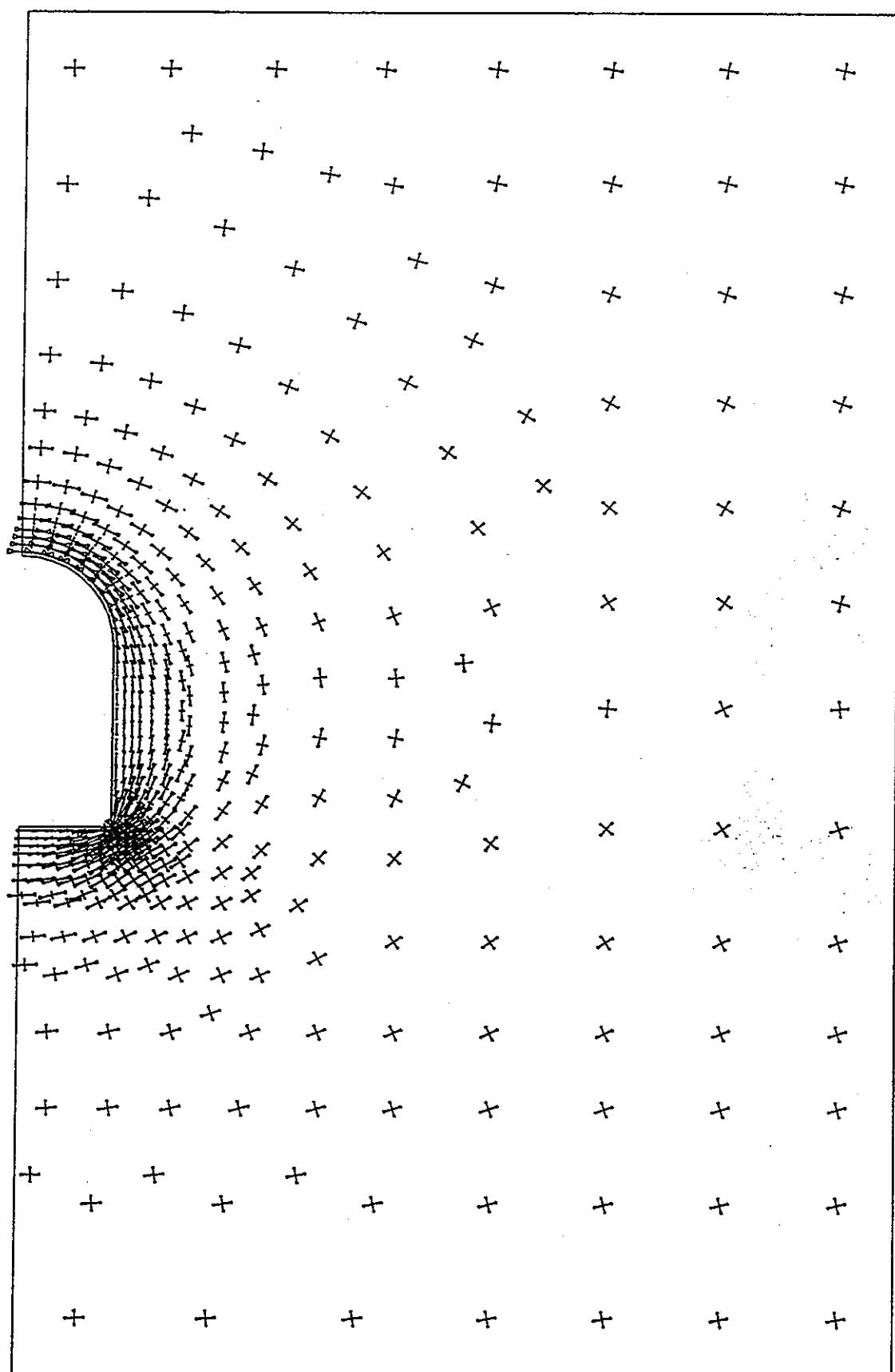
付図-5.33 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間1秒、S=1/400）

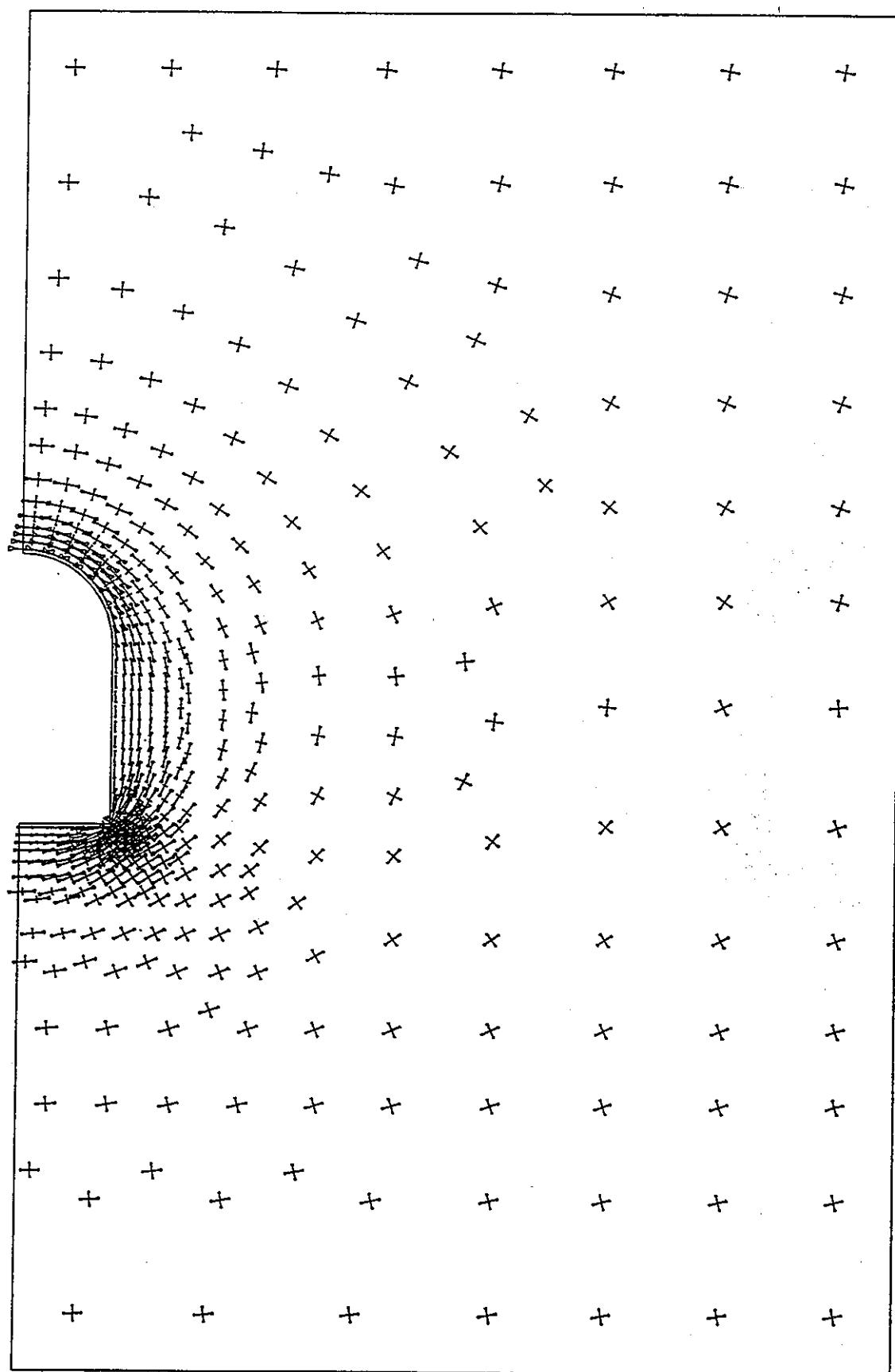


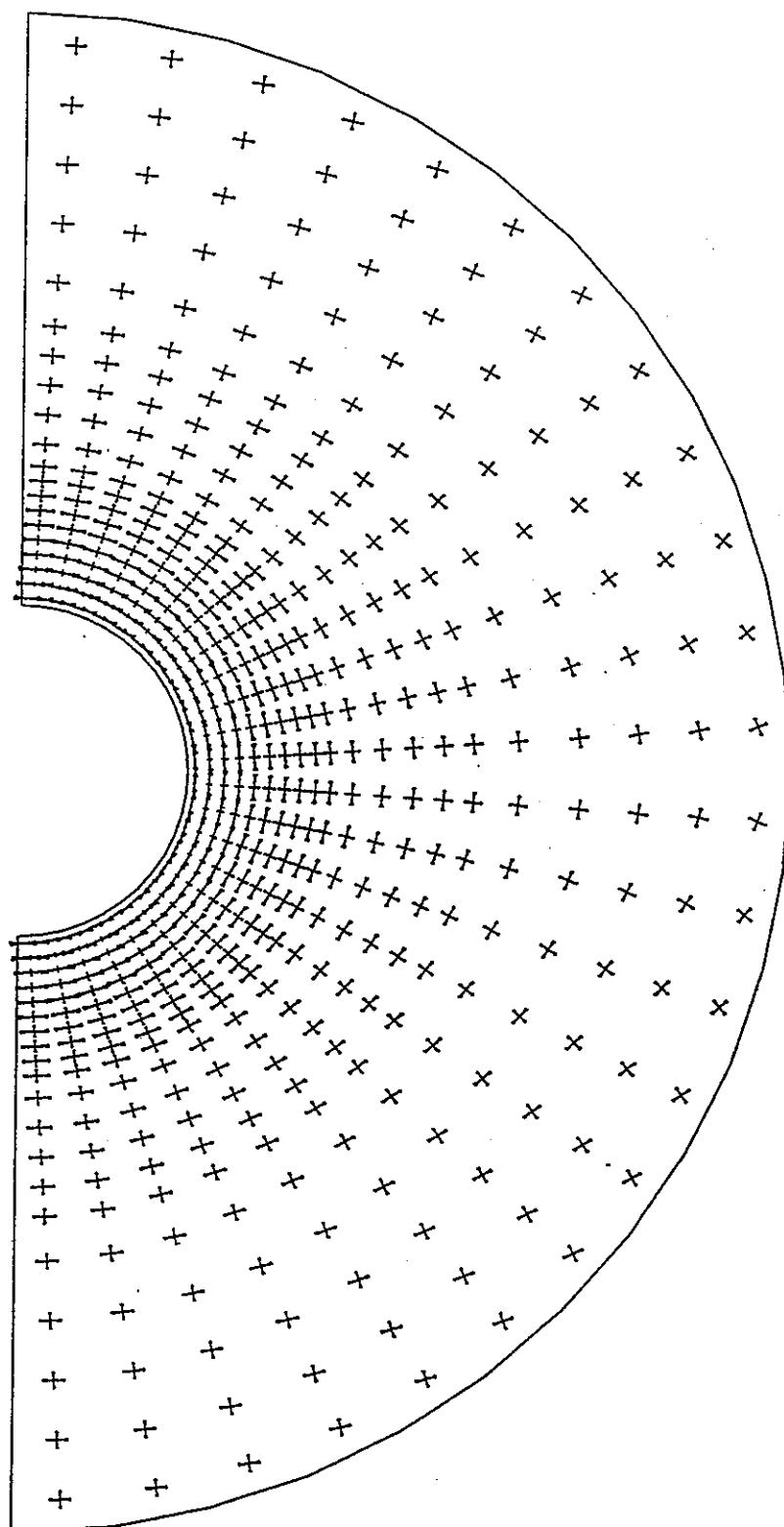
付図-5.34 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 100 年、S=1/400）

付図-5.35 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 2-1 ケース、時間 100 万年、 $S=1/400$ ）

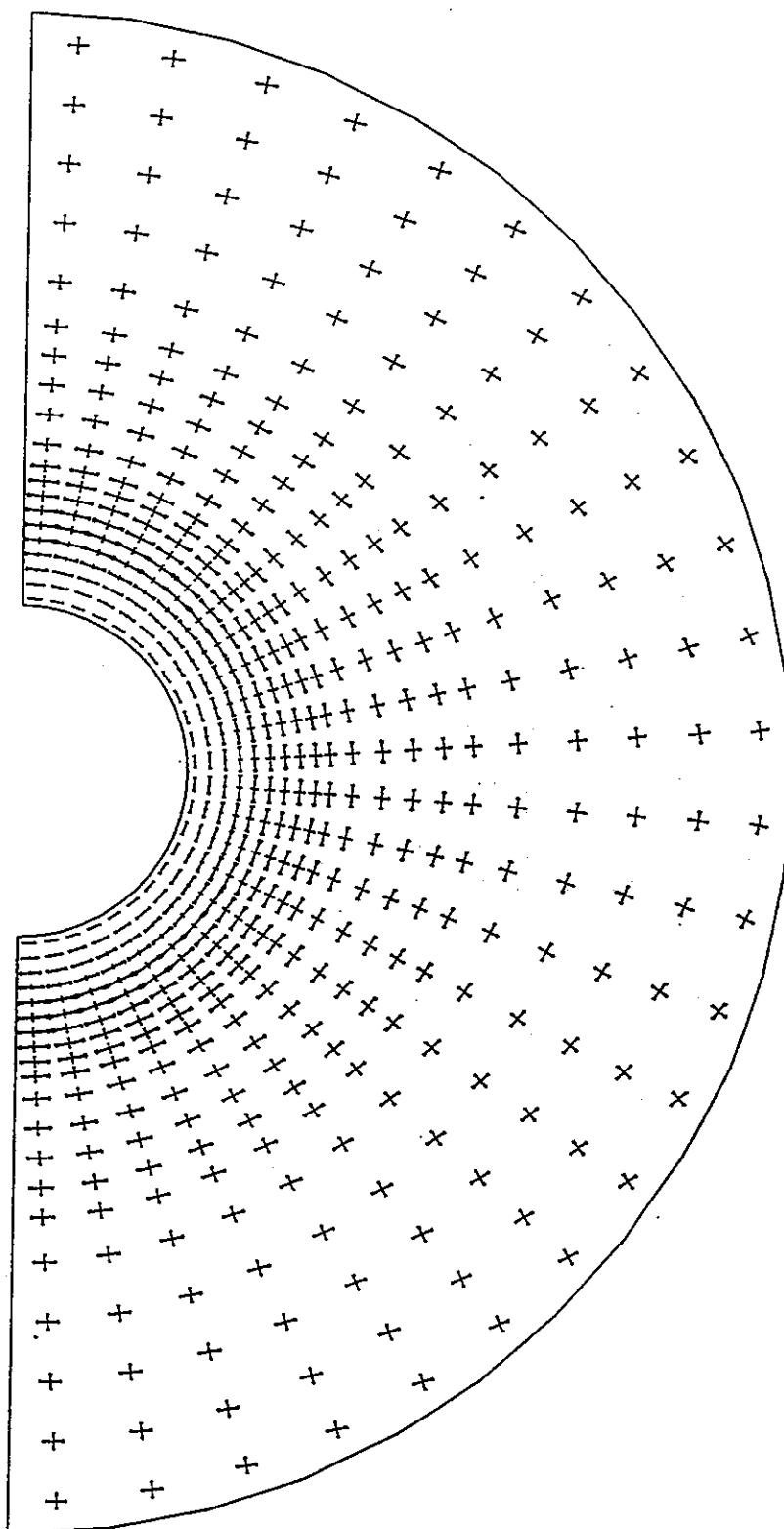
付図-5.36. 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 1 秒、 $S=1/400$ ）

付図-5.37 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 100 年、 $S=1/400$ ）

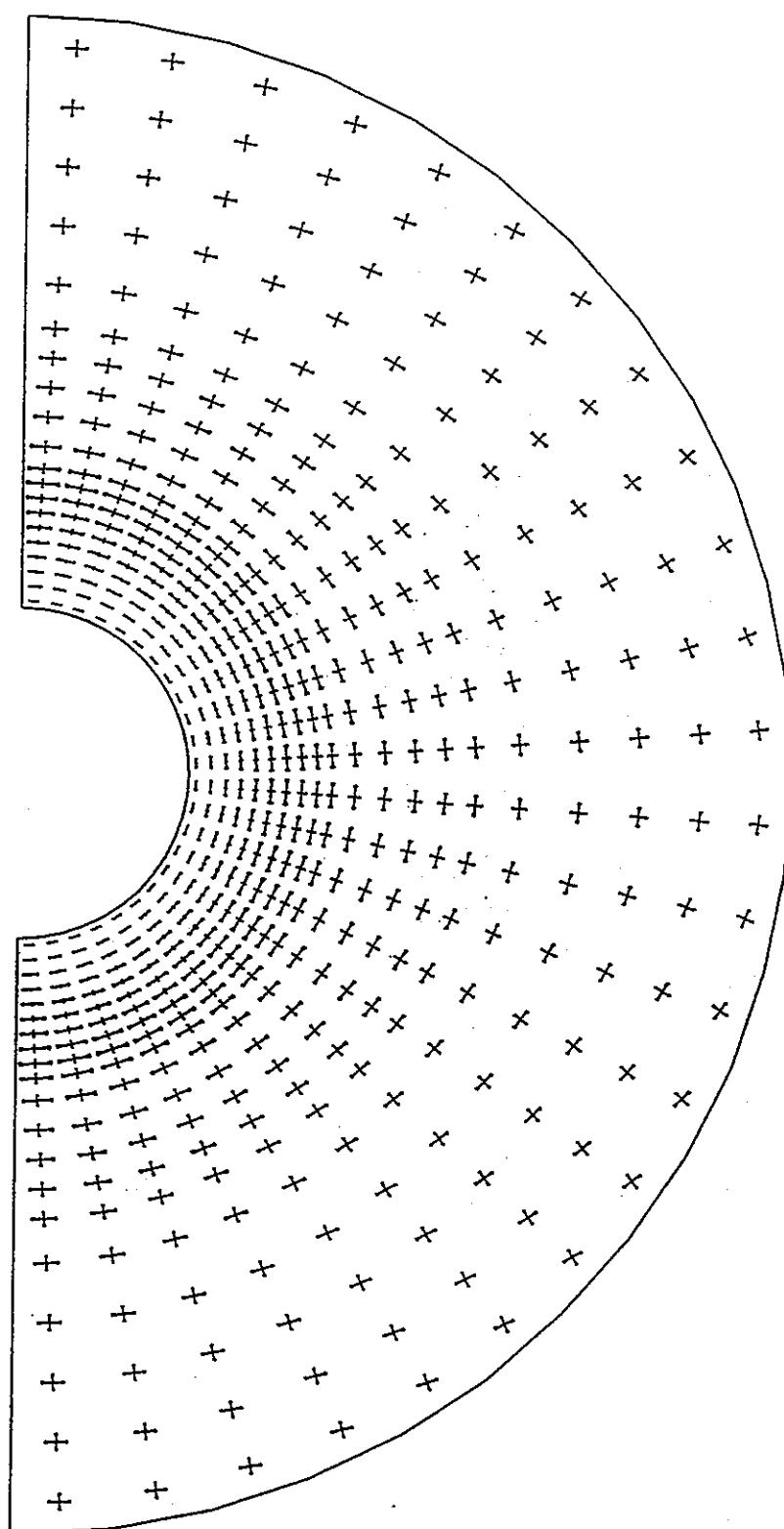
付図-5.38 周辺岩盤応力図（結晶質岩系岩盤：A 2-2 ケース、時間 100 万年、 $S=1/400$ ）



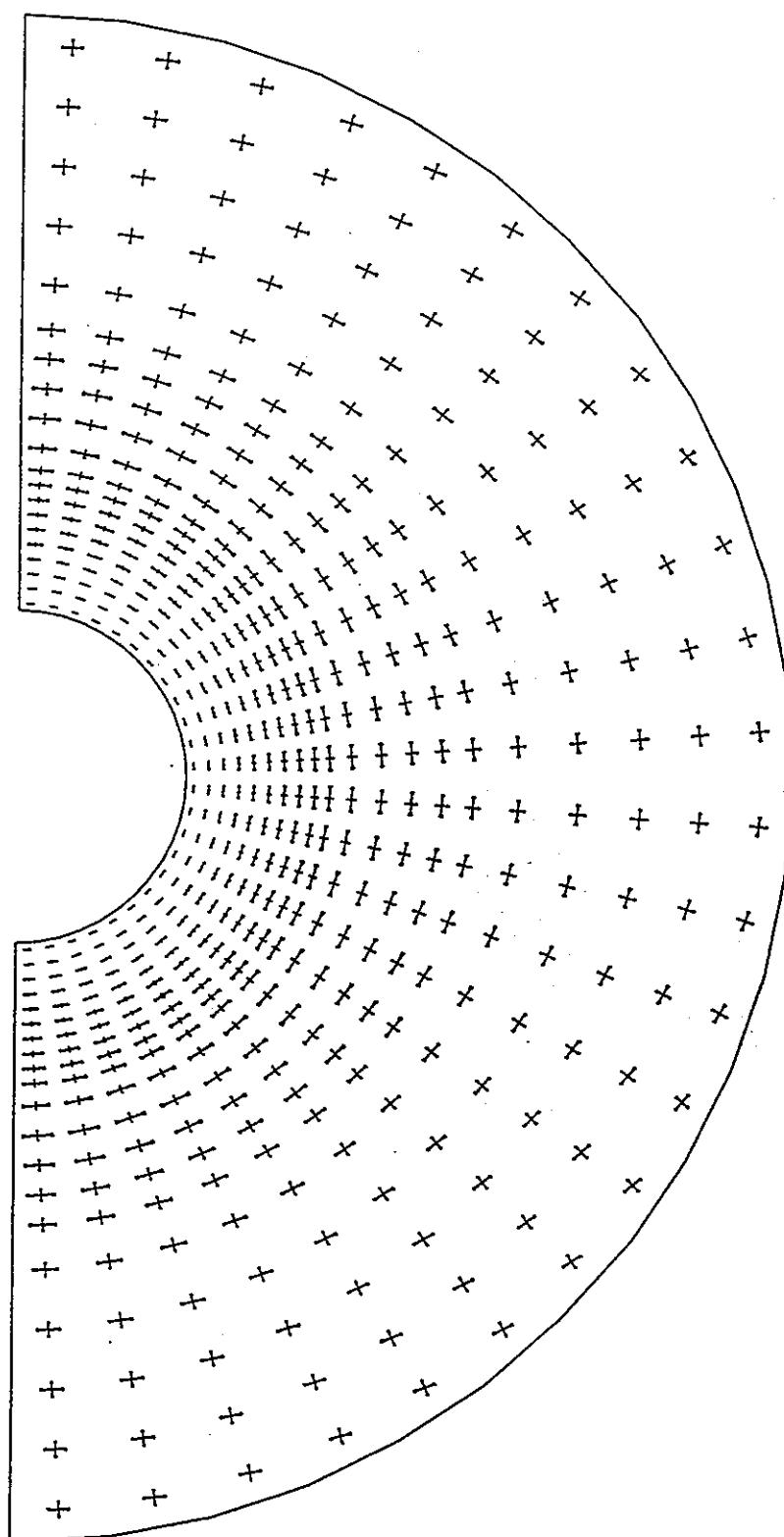
付図-5.39 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 1 秒、S=1/250）

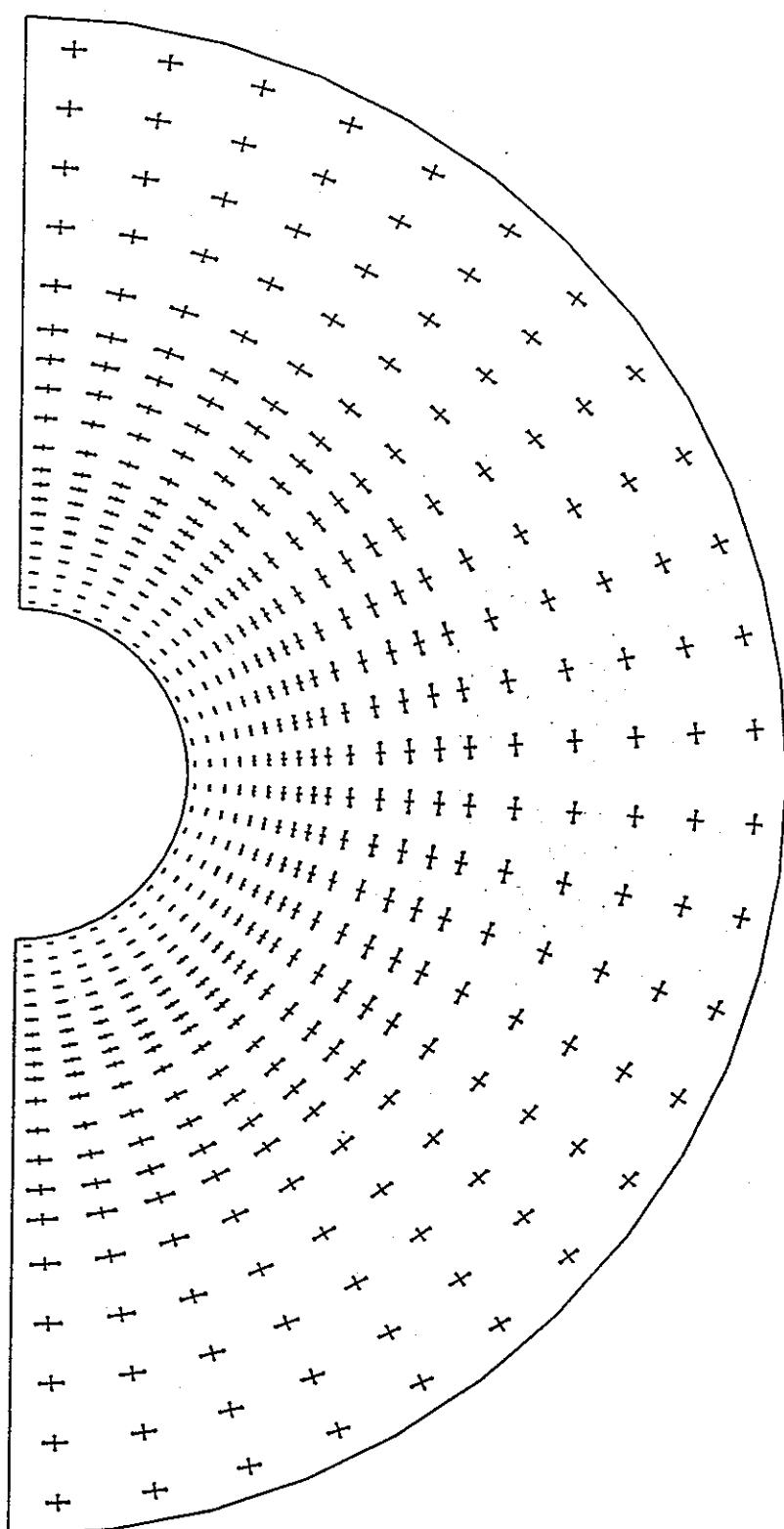


付図-5.40 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間1年、S=1/250）

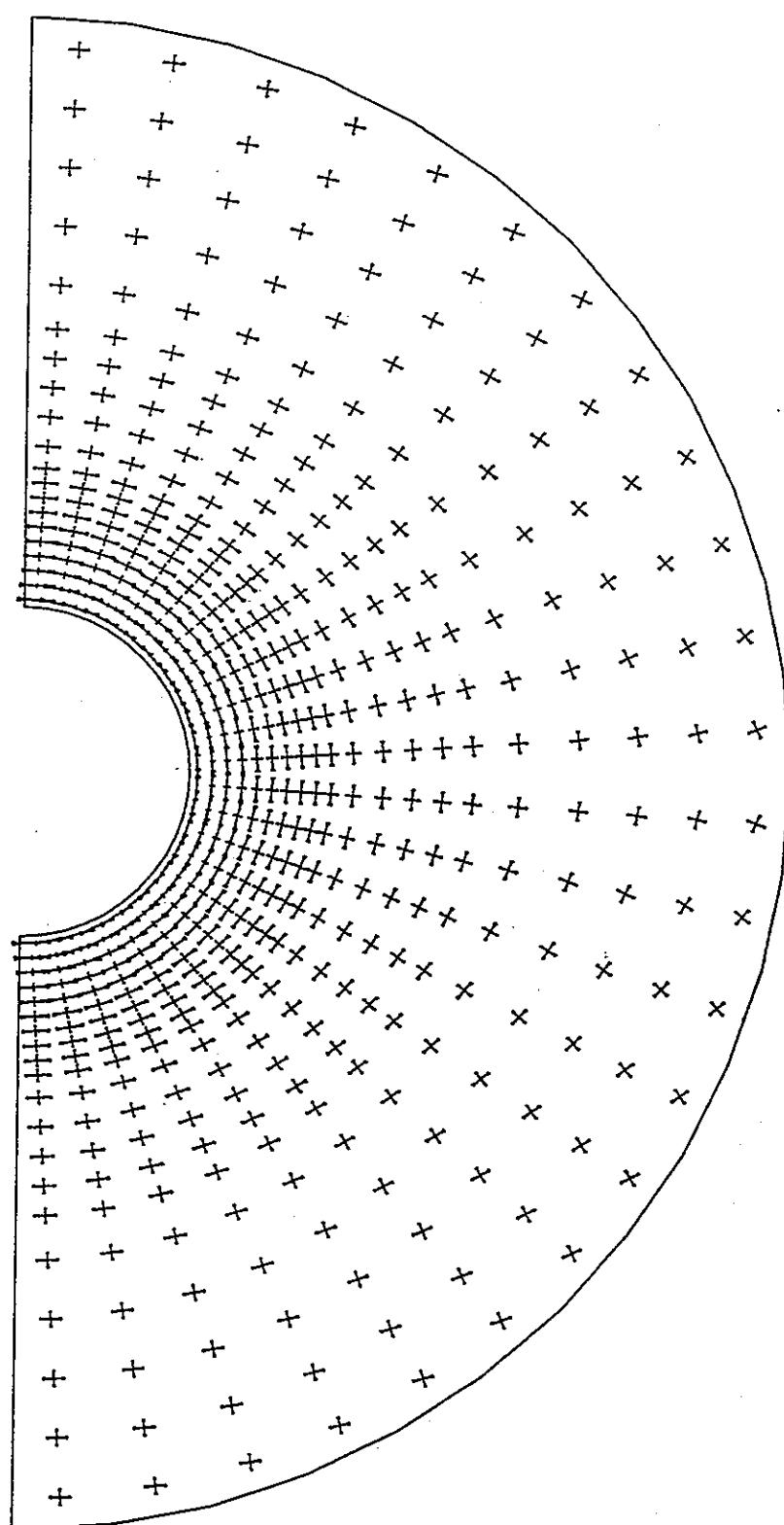


付図-5.41 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 100 年、S=1/250）

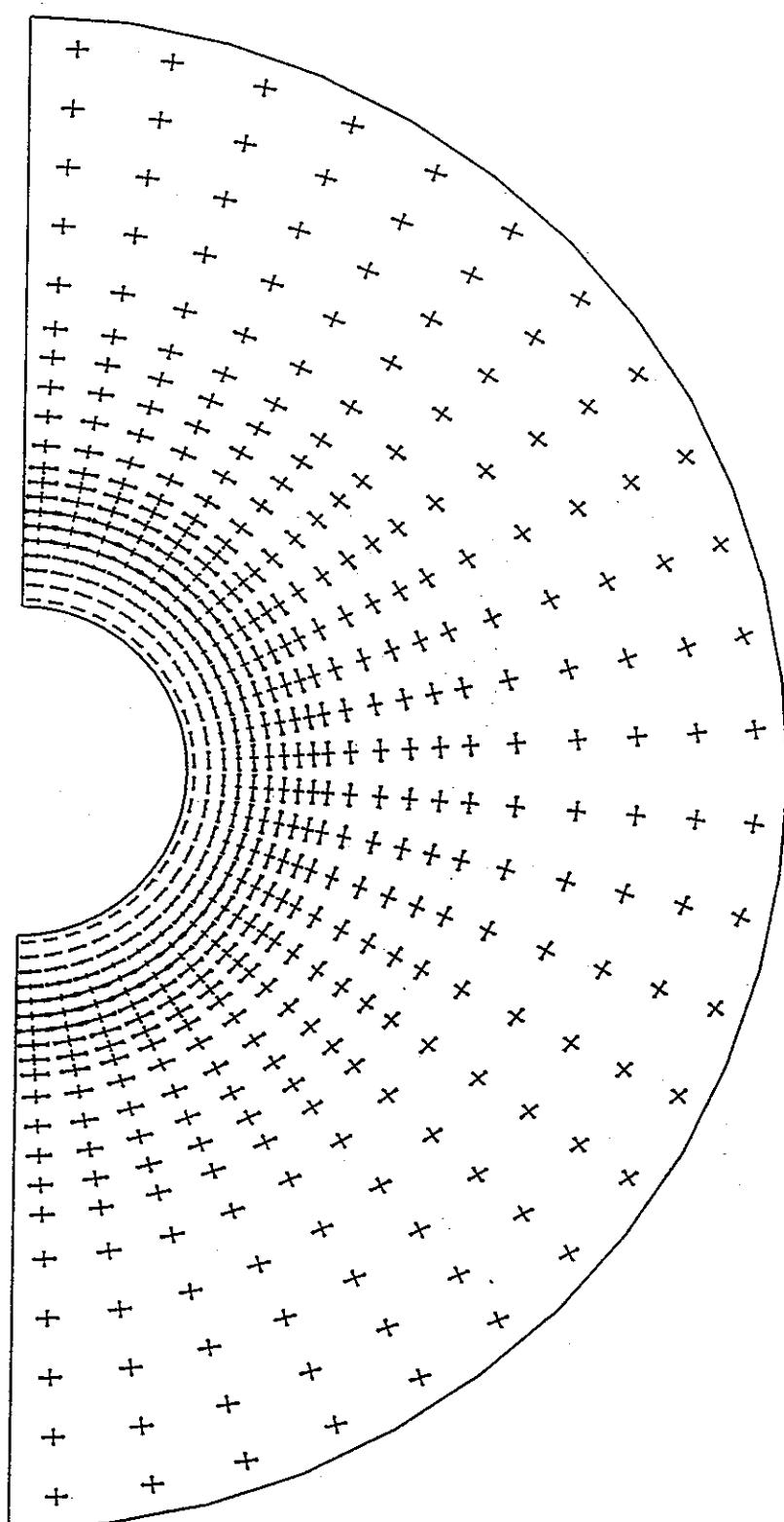
付図-5.42 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 1 万年、 $S=1/250$ ）



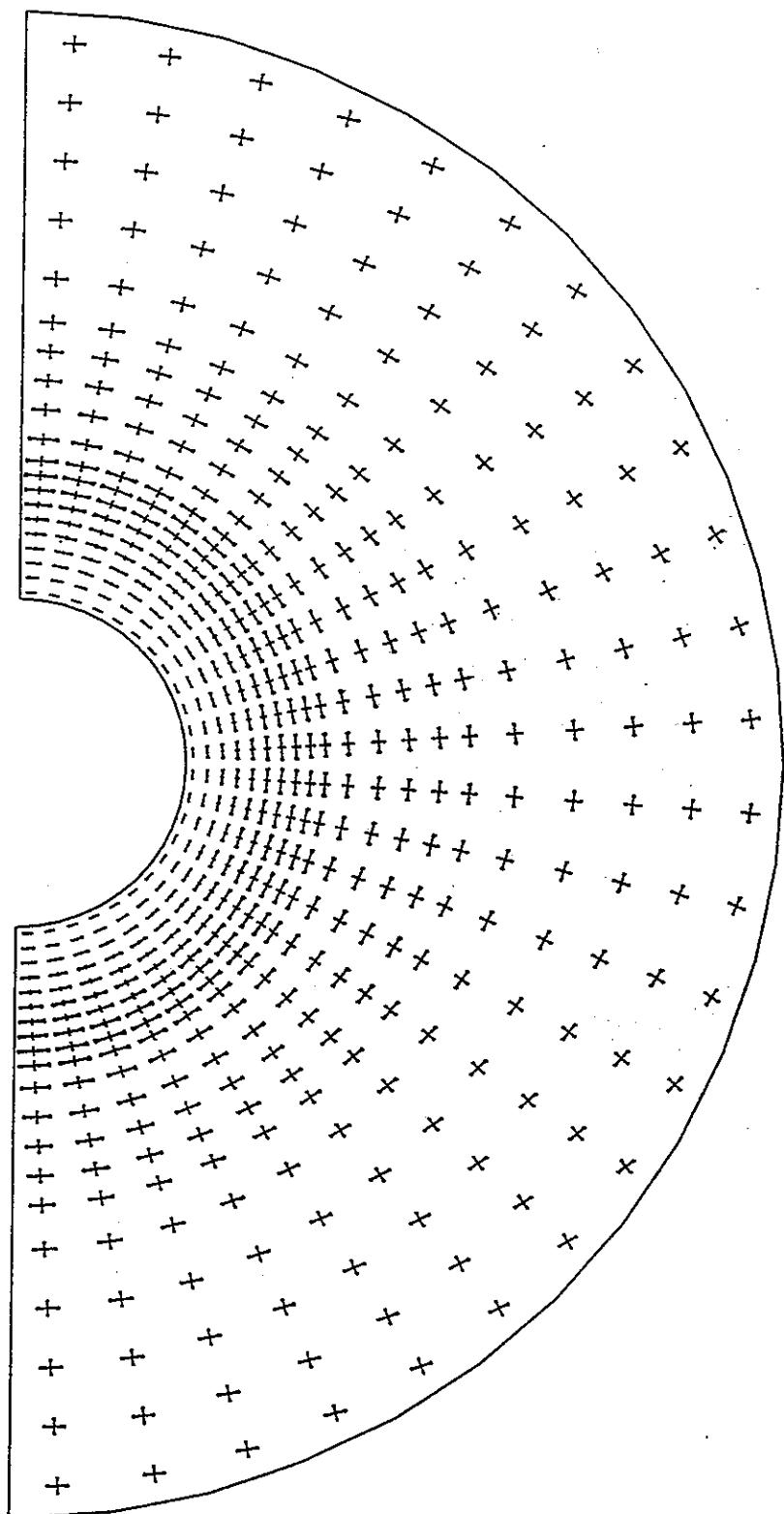
付図-5.43 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-1 ケース、時間 100 万年、S=1/250）



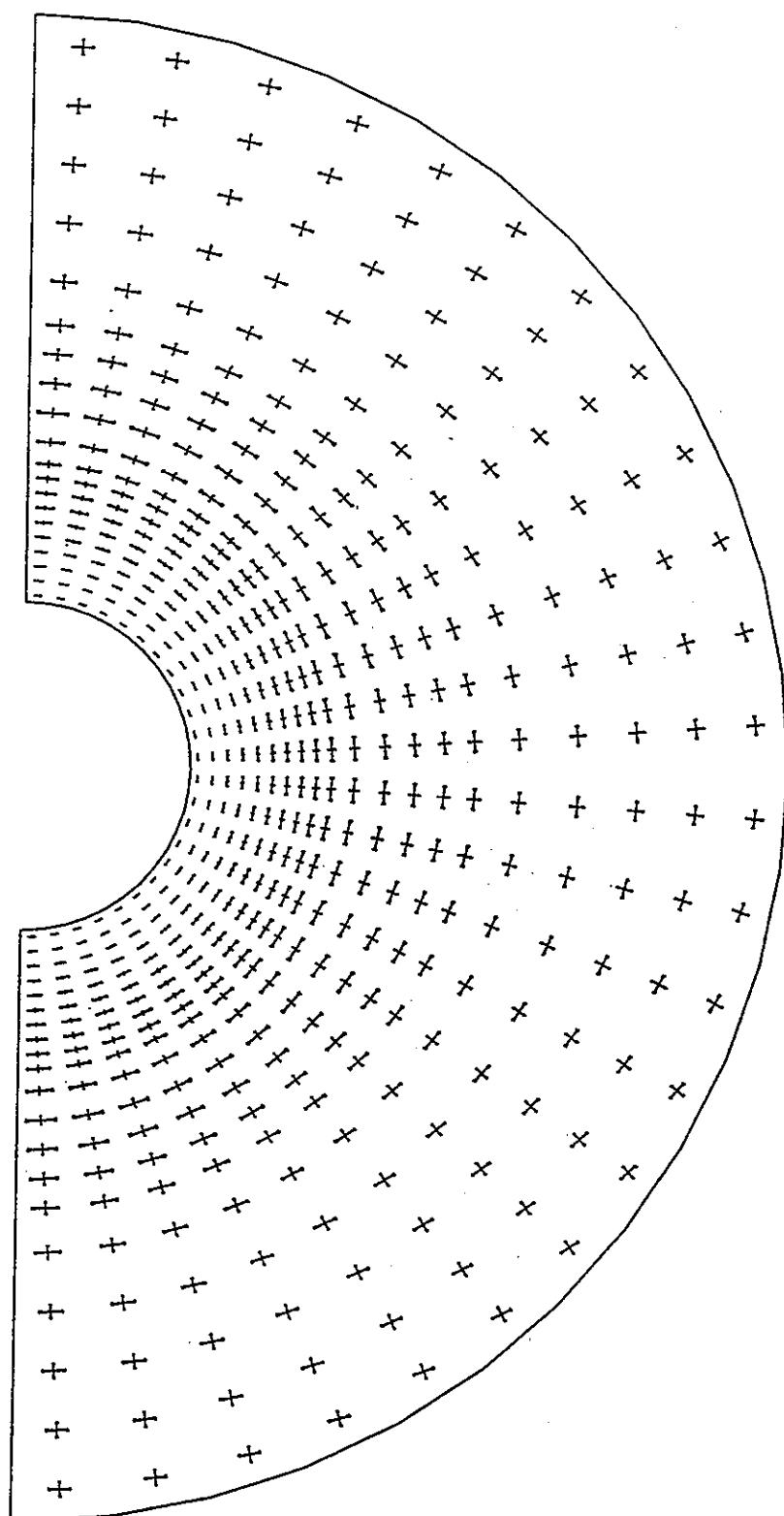
付図-5.44 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間1秒、S=1/250）



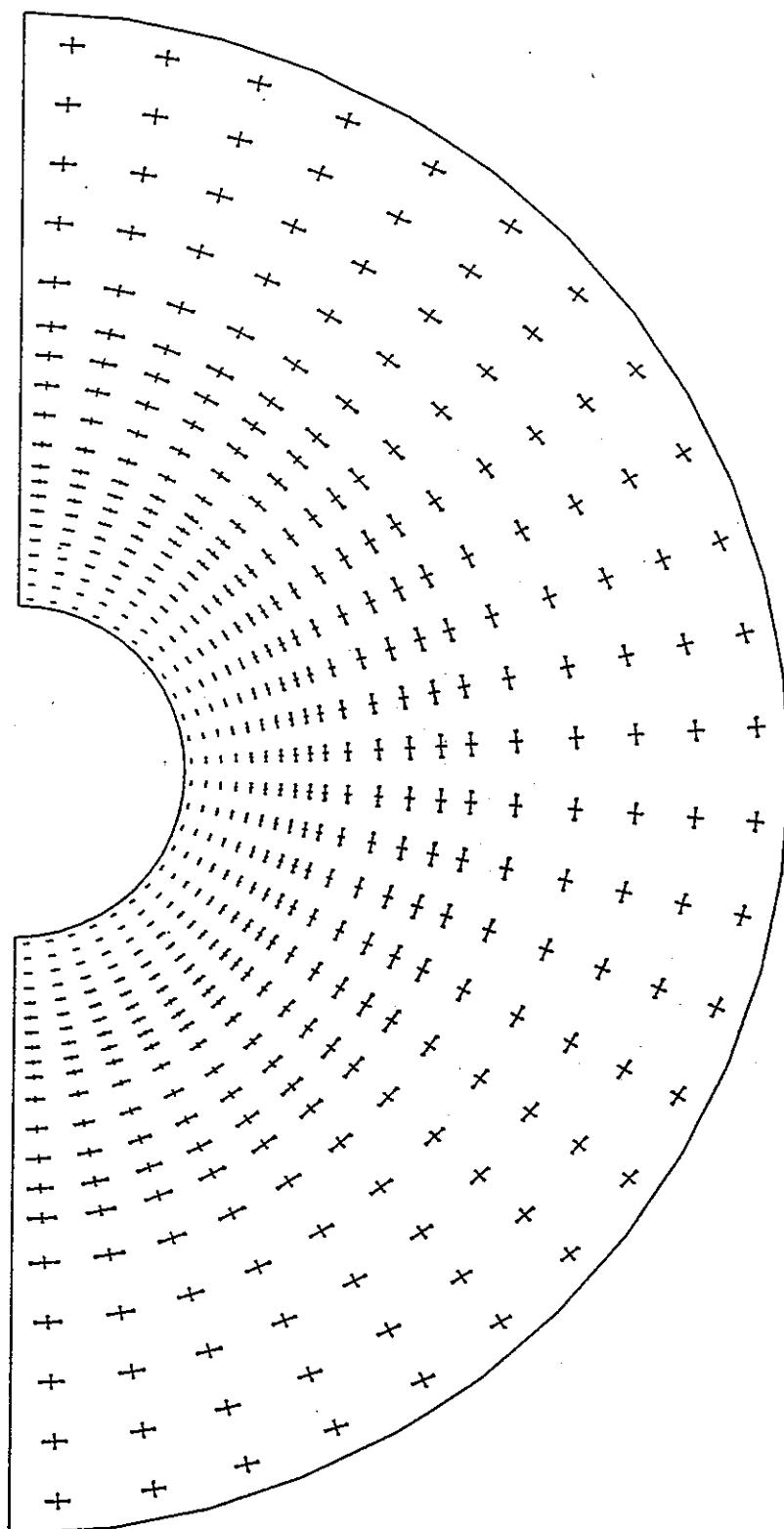
付図-5.45 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 1 年、S=1/250）



付図-5.46 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 100 年、S=1/250）



付図-5.47 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間1万年、S=1/250）



付図-5.48 周辺岩盤応力図（堆積岩系岩盤：B 2-2 ケース、時間 100 万年、S=1/250）

付録-6 有限要素法による構造解析コード  
の検証

本資料は、本検討で用いた解析コードの基盤となる有限要素法による構造解析コードの検証についてまとめたものである。

## 1. 概 要

有限要素法による構造解析コードにより弾性解析を行い、解析結果と理論解とを比較する。解析モデルは土木解析で用いられる基本モデルの片持梁、平板載荷、円坑掘削とする。

## 2. 検 証（解析結果と理論解の比較）

### 2.1 片持梁

解析モデル図を図-1に示す。

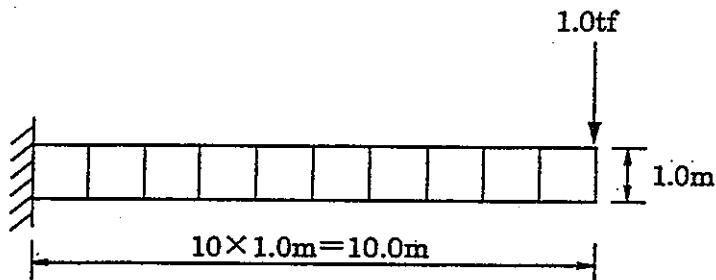


図-1 モデル図（片持梁）

理論解を以下に示す。

$$w = \frac{pl^3}{6EI} \left\{ 2 - 3 \frac{x}{l} + \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right\}$$

ここに、  $w$  : たわみ (m)

$E$  : 弹性係数 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )

$I$  : 断面2次モーメント ( $\text{m}^4$ )

$p$  : 荷重 ( $\text{tf}$ )

$\ell$  : 梁長 (m)

$x$  : 荷重点からの距離 (m)

※理論解ではせん断変形を考慮していない。

物 性 表

$E : 2.35E+6 \text{ tf/m}^2$

$v : 0.0$

\*せん断剛性低減積分考慮

出典「構造力学公式集」（土木学会）

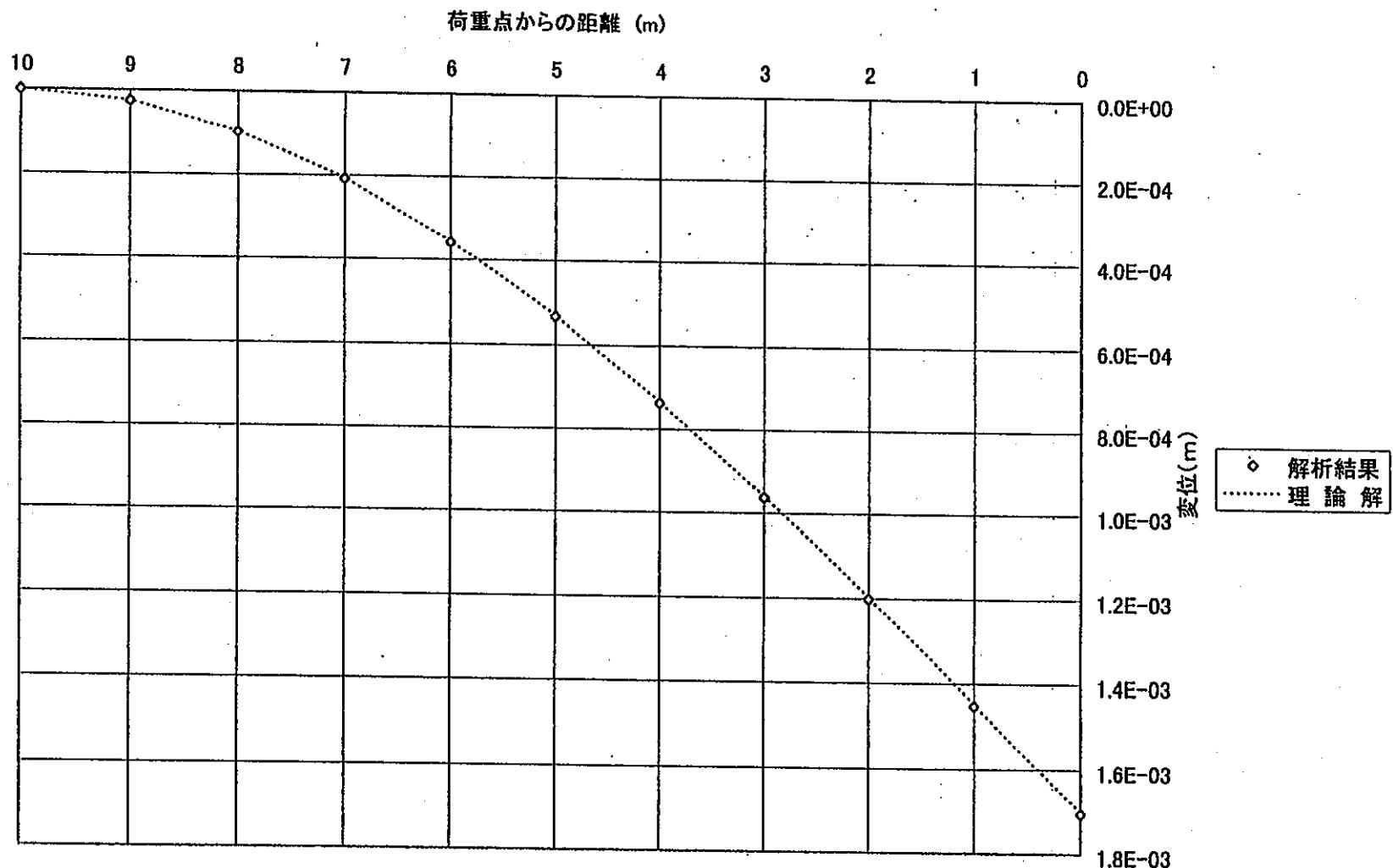


図-2 解析結果と理論解の比較（片持梁）

## 2.2 平板載荷

解析モデルを図-3に示す。

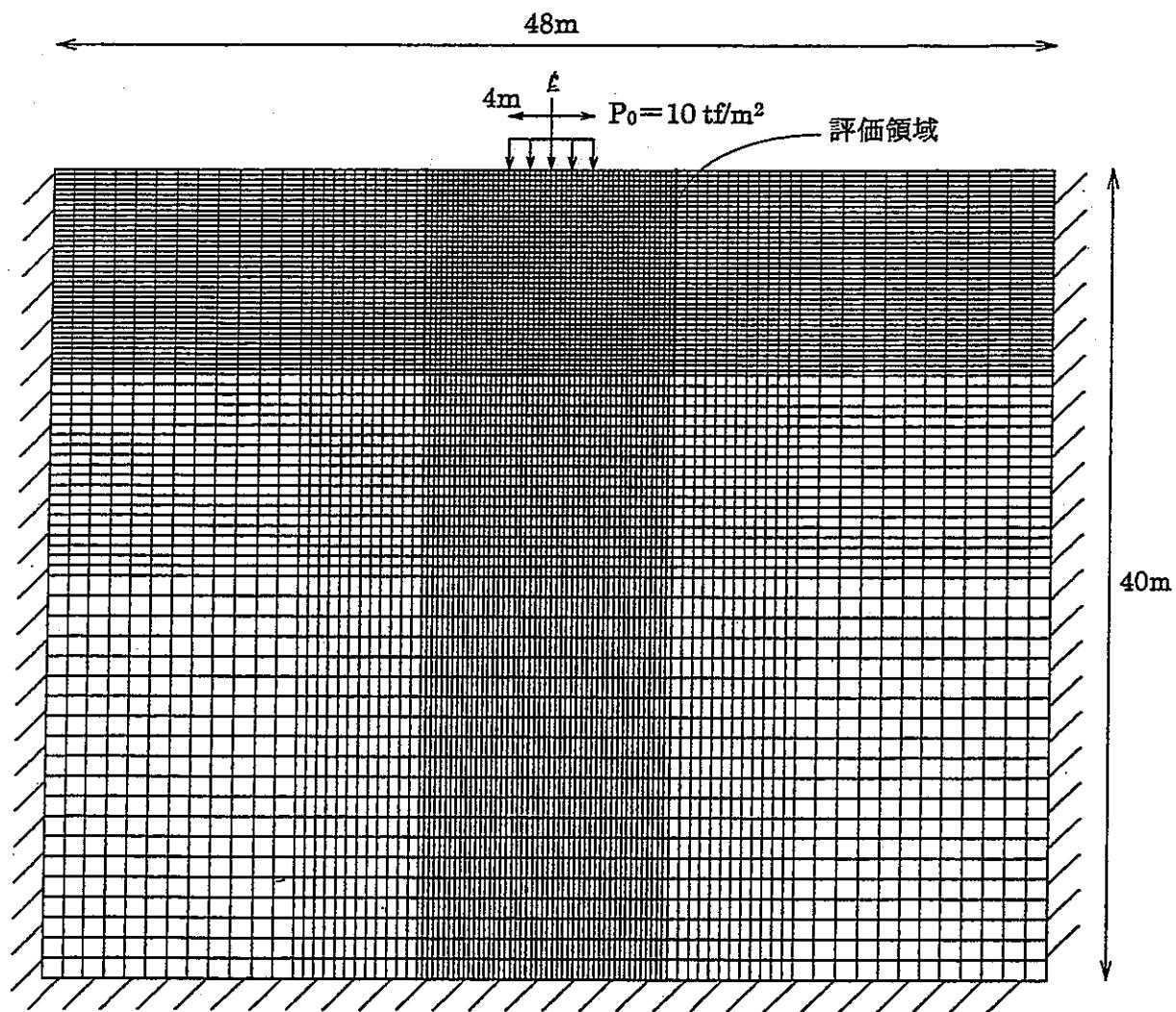


図-3 解析モデル（平板載荷）

物性表

E : 10,000	tf / m <sup>2</sup>
v :	0.33

理論解を以下に示す。

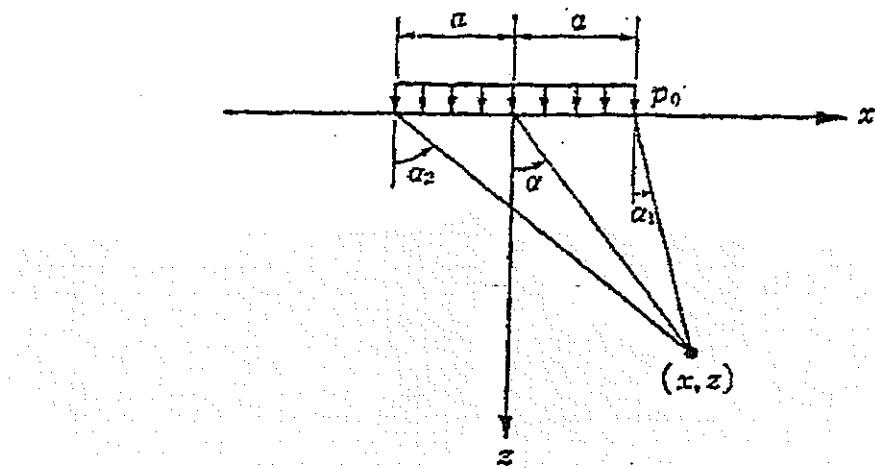
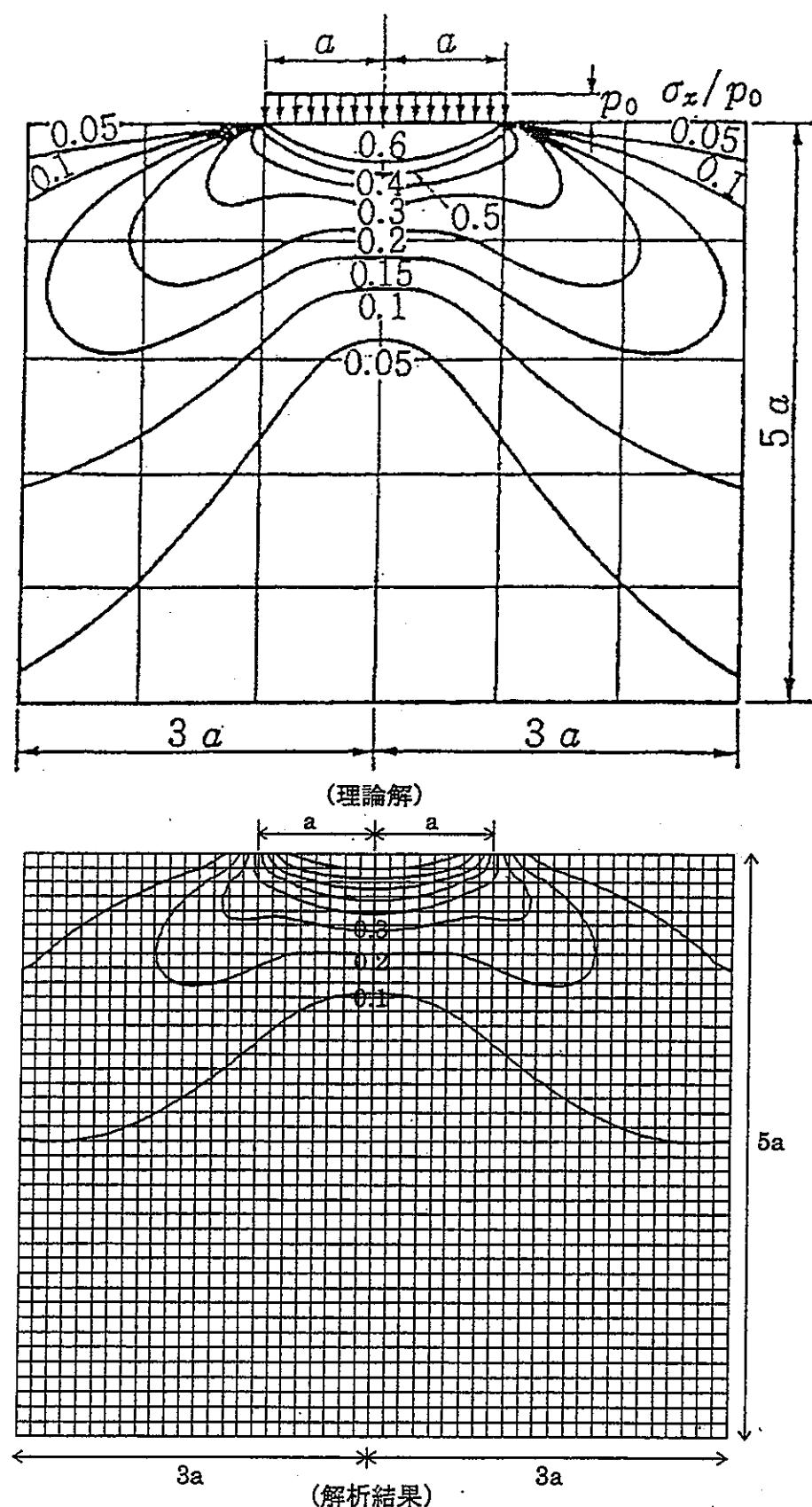


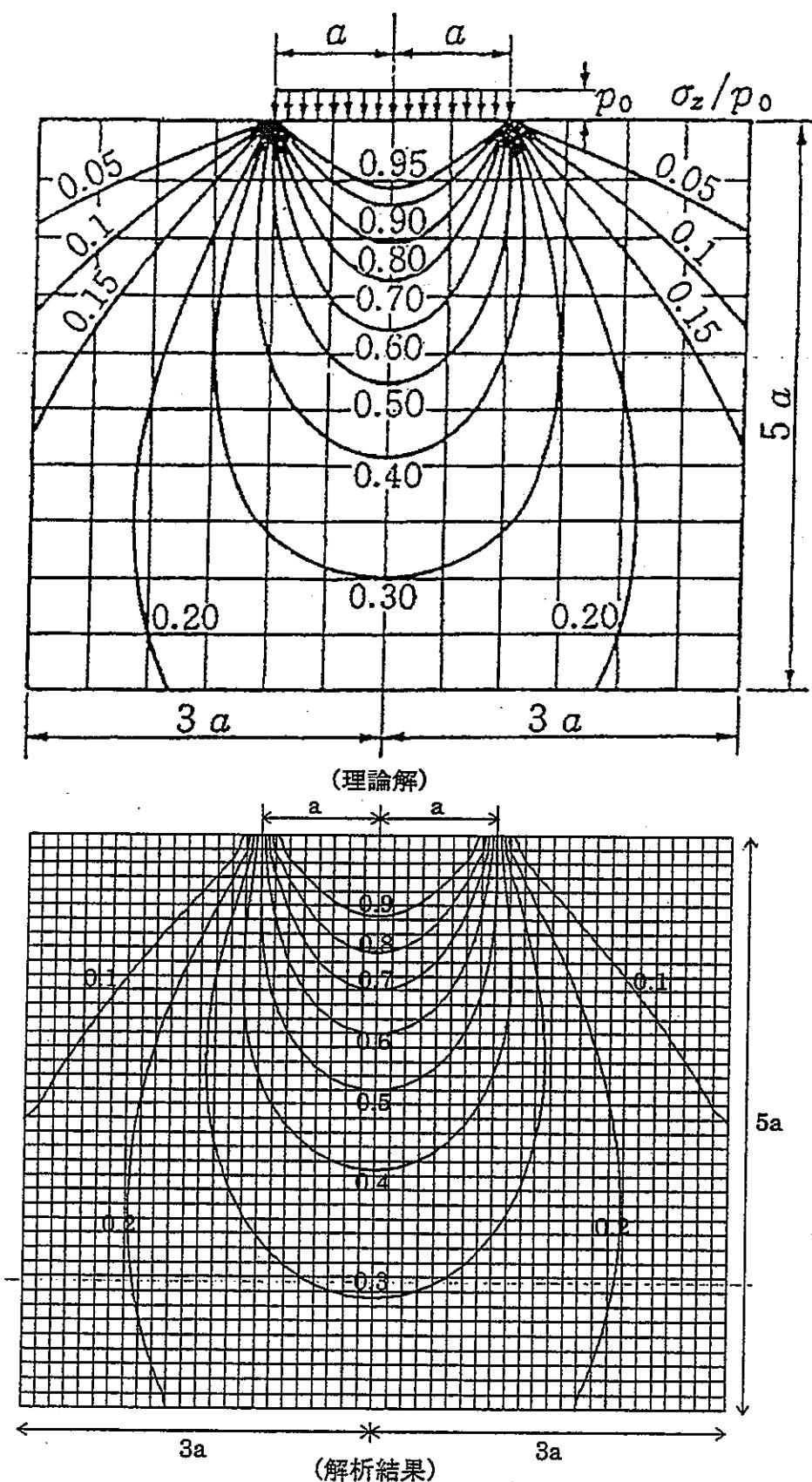
図4 平板載荷の理論モデル

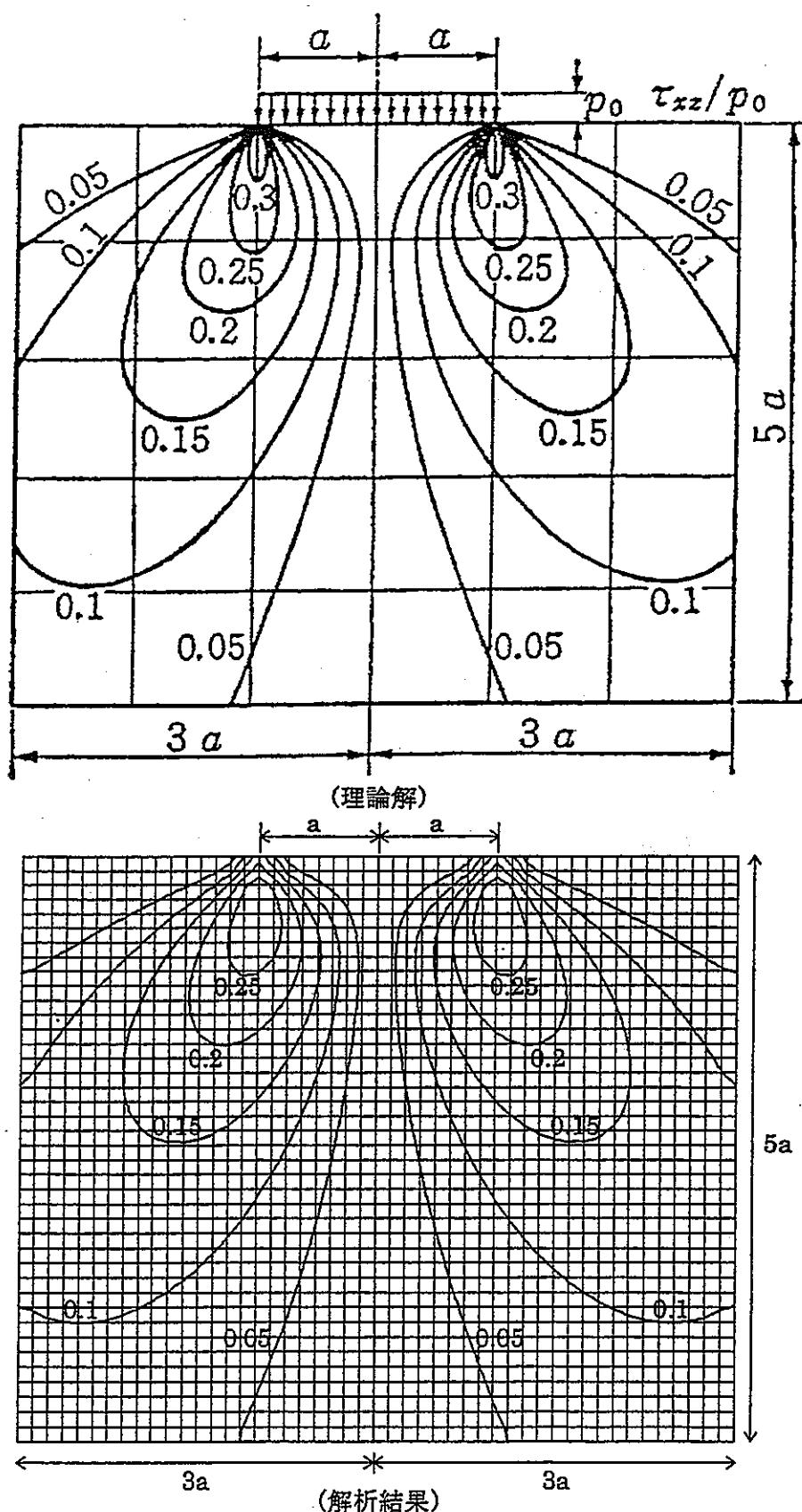
$$\left. \begin{array}{l} \sigma_z \\ \sigma_x \end{array} \right\} = \frac{p_0}{2\pi} [2(\alpha_2 - \alpha_1) \mp \sin 2\alpha_1 \pm \sin 2\alpha_2]$$

$$\tau_{xz} = \frac{p_0}{2\pi} [\cos 2\alpha_1 - \cos 2\alpha_2]$$

出典「新体系土木工学 19 土の力学(IV)－応力分散・安定・変形－」(土木学会編)

図-5.1  $\sigma_x/P_0$ のコンター図の比較

図-5.2  $\sigma_y/P_0$  のコンター図の比較

図-5.3  $\tau_{xy}/P_0$  のコンター図の比較

### 2.3 円坑掘削

解析モデルを図-6 に示す。

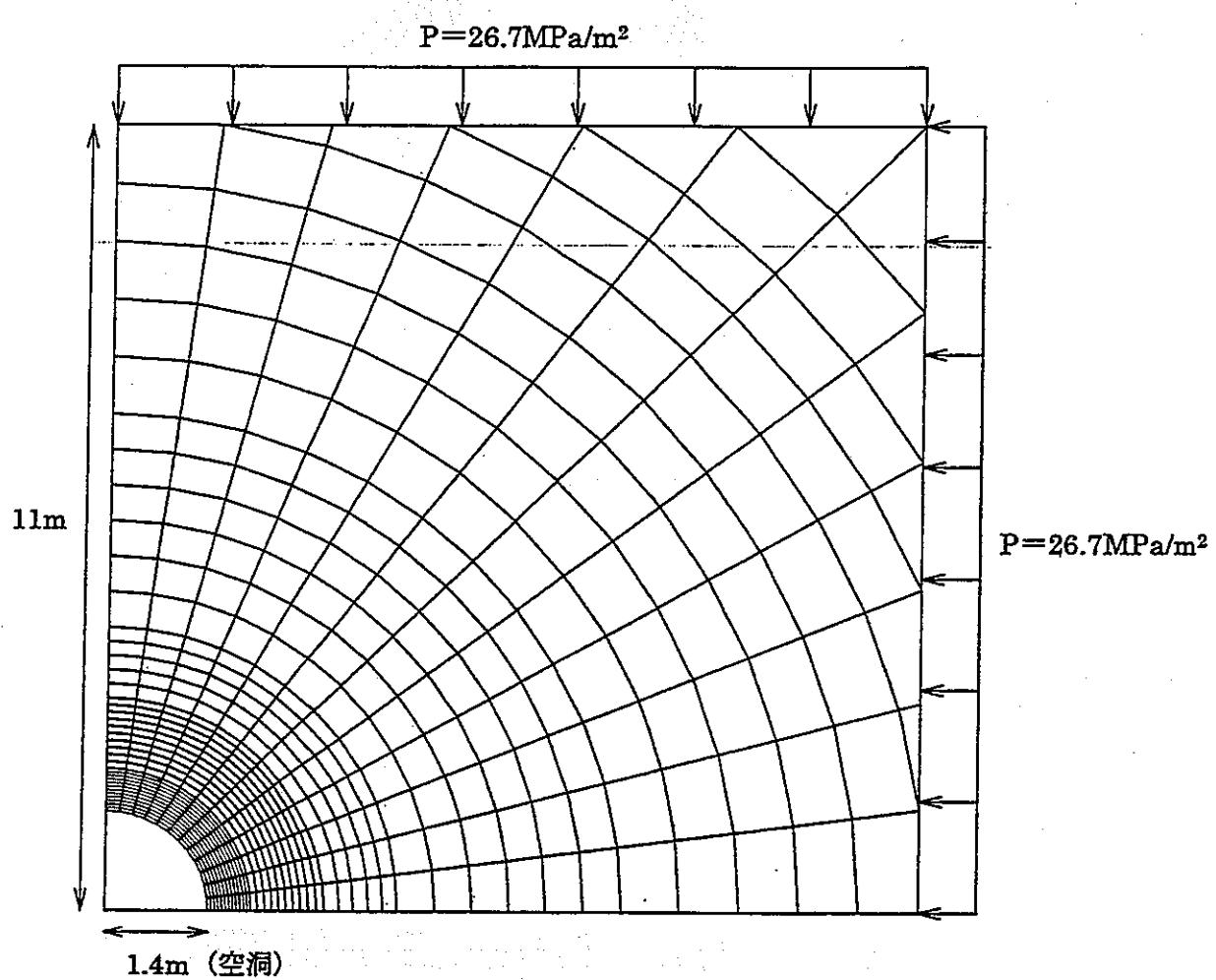


図-6 モデル図（円坑掘削）

物性表

E : 37000.0	MPa
v : 0.25	

理論解を以下に示す。

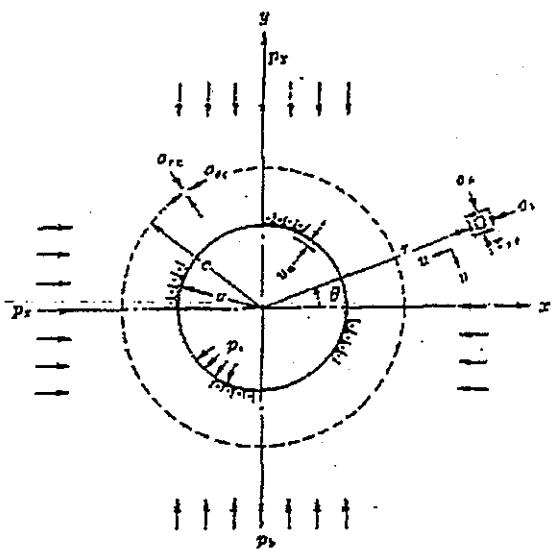


図-7 円坑掘削時の理論モデル

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(p_x + p_y) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left[ \frac{1}{2}(p_x - p_y) \left( 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] + p_i \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(p_x + p_y) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \left[ \frac{1}{2}(p_x - p_y) \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] - p_i \frac{a^2}{r^2}$$

ここに、 $\sigma_r$  : 半径方向応力

$\sigma_\theta$  : 円周方向応力

$p_x$  : 初期地山応力 (水平方向)

$p_y$  : 初期地山応力 (鉛直方向)

$p_i$  : 支保内圧

$r$  : トンネル中心からの距離

$a$  : トンネル半径

$\theta$  : 水平方向からの角度

出典：「土木技術者のための岩盤力学」（土木学会編）

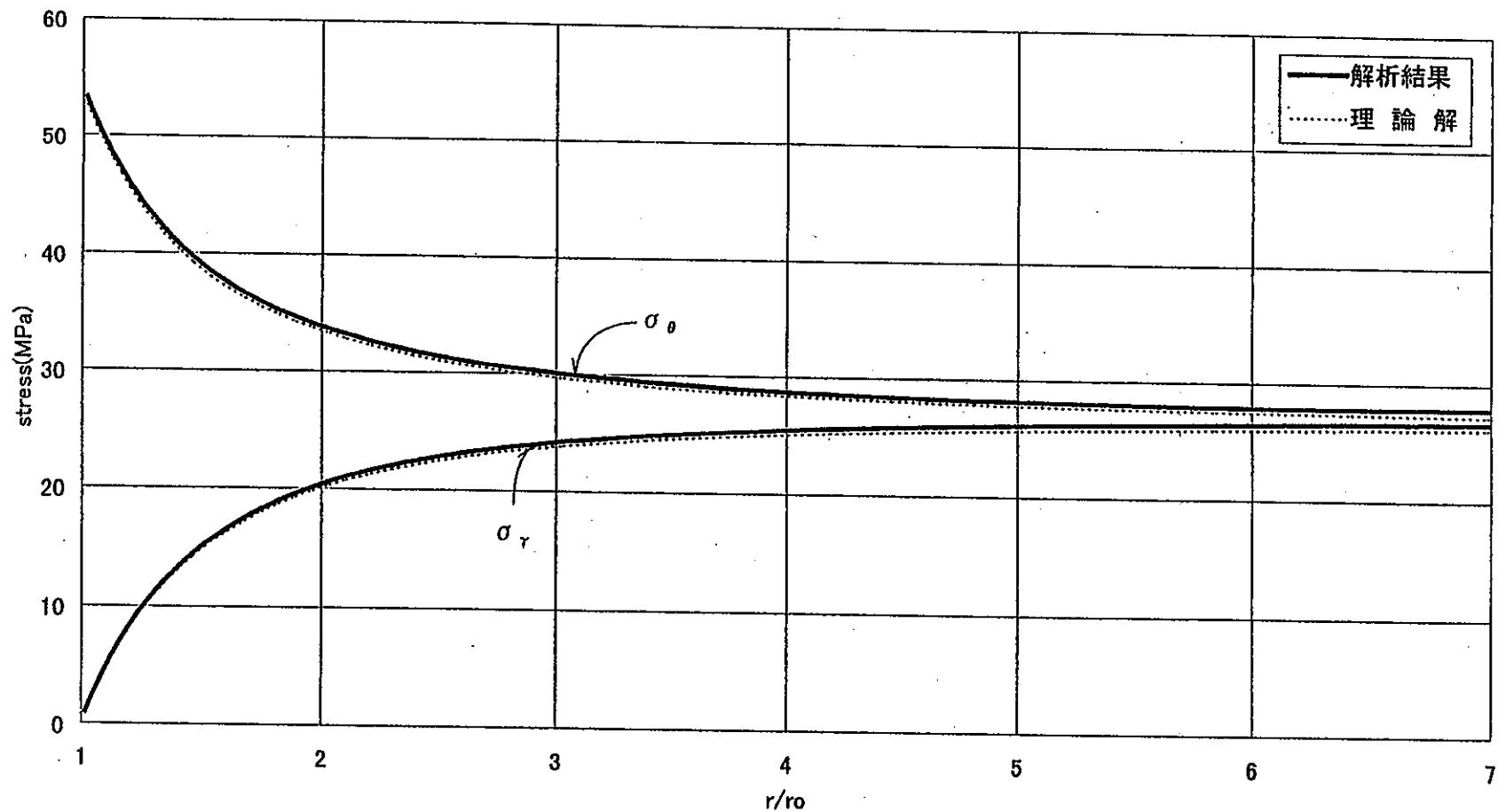


図-8 解析結果と理論解の比較（円坑掘削）