

# 処分場近傍における地下水流動解析

1992年6月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and Nuclear  
Fuel Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation) 1992

## 処分場近傍における地下水流動解析

仲島 邦彦\*，畑中耕一郎  
梅木 博之\*\*，佐々木憲明\*\*  
石川 博久

### 要 旨

本解析では、人工バリア及び周辺岩盤から構成されるニアフィールドの地下水流れについて、動水勾配、岩盤の透水係数をパラメータとして感度解析を行い、ニアフィールドにおける流れの状態、緩衝材中の地下水流量、ニアフィールドの物質移動メカニズムについての評価を行った。

解析の結果、同じ動水勾配の条件で得られた流れの形態については、岩盤の透水係数の変化に応じた顕著な変化は見られなかった。また、岩盤の透水係数は変化させず、動水勾配を変化させた場合の流れの形態は、動水勾配の大きさ及び方向に応じた変化を示した。計算結果で整理すると以下の結論が得られた。1) ニアフィールドの地下水流れは透水係数の変化よりも動水勾配の変化に大きく影響される。2) 緩衝材中を流れる地下水の流量は、解析条件に係わらず $10^{-2}$ ～ $10^{-3}$  (cm<sup>3</sup>/y) のオーダーと非常に小さく、岩盤中の地下水流量に比べて無視しうる。3) 核種の移動メカニズムについては、緩衝材中のペクレ数は岩盤中のそれに比べて小さいことから、緩衝材中では拡散現象が支配的である。

---

東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

\*原子力システム(株)

\*\*本社 環境技術開発推進本部 処分研究グループ

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 地下水流動の支配方程式 .....	1
3. 解 析 .....	4
3.1 解析対象 .....	4
3.2 初期条件及び境界条件 .....	5
3.3 解析ケース及び水理パラメータ .....	6
3.4 緩衝材中の物質移動メカニズムに関する検討 .....	7
4. 解析結果 .....	7
5. 考 察 .....	9
6. 結 論 .....	10
参考文献 .....	12
APPENDIX A Nagraによるニアフィールド水理解析 .....	77
APPENDIX B SKBによる岩盤および緩衝材中の地下水流れ解析 .....	82
APPENDIX C Chambréらによる埋設固化体周辺の地下水流れ解析 .....	86

## 図 表 目 次

図3.1.1-1	横置き固化体半径方向断面図（解析領域）	.....	13
図3.1.1-2	横置き固化体半径方向断面図（解析モデル）	.....	14
図3.1.2-1	横置き固化体中心軸方向断面図（解析領域）	.....	15
図3.1.2-2	横置き固化体中心軸方向断面図（解析モデル）	.....	16
図4.1-1	case01（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 17
図4.1-2	case01（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 18
図4.1-3	case01（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 19
図4.2-1	case02（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 20
図4.2-2	case02（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 21
図4.2-3	case02（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 22
図4.3-1	case03（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 23
図4.3-2	case03（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 24
図4.3-3	case03（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 25
図4.4-1	case04（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 26
図4.4-2	case04（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 27
図4.4-3	case04（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 28
図4.5-1	case05（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 29
図4.5-2	case05（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 30
図4.5-3	case05（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 31
図4.6-1	case06（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 32
図4.6-2	case06（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 33
図4.6-3	case06（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 34
図4.7-1	case07（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 35
図4.7-2	case07（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 36
図4.7-3	case07（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 37
図4.8-1	case08（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 38
図4.8-2	case08（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 39
図4.8-3	case08（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 40
図4.9-1	case09（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 41
図4.9-2	case09（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 固化体近傍	..... 42
図4.9-3	case09（固化体半径方向断面モデル）解析結果	— 解析領域全体	..... 43

図4.10-1	case10 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	44
図4.10-2	case10 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	45
図4.10-3	case10 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	46
図4.11-1	case11 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	47
図4.11-2	case11 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	48
図4.11-3	case11 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	49
図4.12-1	case12 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	50
図4.12-2	case12 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	51
図4.12-3	case12 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	52
図4.13-1	case13 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	53
図4.13-2	case13 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	54
図4.13-3	case13 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	55
図4.14-1	case14 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	56
図4.14-2	case14 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	57
図4.14-3	case14 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	58
図4.15-1	case15 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	59
図4.15-2	case15 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	60
図4.15-3	case15 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	61
図4.16-1	case16 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	62
図4.16-2	case16 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	63
図4.16-3	case16 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	64
図4.17-1	case17 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	65
図4.17-2	case17 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	66
図4.17-3	case17 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	67
図4.18-1	case18 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	68
図4.18-2	case18 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 固化体近傍	69
図4.18-3	case18 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果	— 解析領域全体	70
図4.19	ペクレ数の場所的变化 (固化体半径方向断面モデル) — $(i_x, i_z) = (0.35, 0.01)$		71
図4.20	ペクレ数の場所的变化 (固化体半径方向断面モデル) — $(i_x, i_z) = (0.05, 0.01)$		72
図4.21	ペクレ数の場所的变化 (固化体半径方向断面モデル) — $(i_x, i_z) = (0.60, 0.01)$		73

図4.22	ペクレ数の場所的变化 (固化体中心軸方向断面モデル) - $(i_x, i_z) = (0.35, 0.01)$ .....	74
図4.23	ペクレ数の場所的变化 (固化体中心軸方向断面モデル) - $(i_x, i_z) = (0.05, 0.01)$ .....	75
図4.24	ペクレ数の場所的变化 (固化体中心軸方向断面モデル) - $(i_x, i_z) = (0.60, 0.01)$ .....	76

## 1 はじめに

本解析は、地層処分システム性能評価のための重要なファクターである地下水の流れに着目し、処分場近傍の地下水理解析を実施することにより、その領域での地下水流動状態、緩衝材中の地下水量、及び、この地下水流動の場における固化体から浸出した核種の移動メカニズムについて検討を行なうことを目的としている。解析としては、ガラス固化体及びオーバーバックを不透水性媒体、緩衝材及び周辺岩盤を透水性媒体と考え、これらより構成される処分場及びその周辺領域（ニアフィールド）の地下水理解析を実施したものである。解析には2次元地下水理解析コード「FEMWATER」<sup>(1)</sup>を使用した。

透水性媒体中の地下水流速（断面平均流速）は、ダルシー則が成り立つという仮定のもとに媒体自身のもつ透水係数と媒体に作用する動水勾配の積により決定される。そこで本解析では処分場及びその周辺領域の地下水流れを規定するパラメータとして透水係数と動水勾配の2つを選んだ。透水係数に関しては、緩衝材、岩盤中の緩み領域、岩盤の領域について実測値をもとにそれぞれ設定し、動水勾配に関しては、我が国の代表的地形（山岳部、丘陵部、平野部）を解析対象モデルとして行なわれた、広域的地下水理解析から得られた結果をもとに設定した。解析はそれぞれの領域の透水係数及び動水勾配をパラメトリックに変化させることにより実施した。解析対象としては、処分場を構成する固化体に対して半径方向に断面をとった場合と中心軸方向に断面をとった場合の2通りを考えた。

以上の条件設定のもとで解析を行なうことにより、処分場近傍の地下水流動状態、緩衝材中の地下水量を把握することができた。さらに、ベクレ数を導入することにより、解析により得られた地下水流動の場において、固化体から浸出した核種の移動メカニズムについて検討を行い、ニアフィールドの核種移行計算を行う上での知見が得られた。

## 2 地下水流動の支配方程式<sup>(2)</sup>

ここでは、地下水で飽和された透水性媒体を考える。この媒体中における地下水の流速は媒体の異方性を考慮すると2次元の場合、(2.1)、(2.2)式に示すダルシー則によって表される。

$$v_x = -K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} - K_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$v_z = -K_{zx} \frac{\partial H}{\partial x} - K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.2)$$



ここで、

- $v_i$  : 地下水流速(L/T)
- $K_y$  : 透水係数(L/T)
- H : 全水頭(L)
- x : x方向(水平方向)の座標(L)
- z : z方向(鉛直方向)の座標(L)

また、地下水の連続の式は(2.3)式により表される。

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + Q \quad (2.3)$$

ここで、

- $\rho$  : 地下水密度(M/L<sup>3</sup>)
- Q : 地下水の湧き出し量あるいは吸い込み量(M/L<sup>3</sup>T)
- n : 有効空隙率(-)

地下水及び媒体が非圧縮性流体であると仮定でき、さらに地下水の湧き出しあるいは吸い込みがない場合、(2.3)式は(2.4)式のように簡単化される。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

さて、(2.1)、(2.2)式を(2.3)式に代入し、変形整理することにより非定常地下水流動の支配方程式として(2.5)式が得られる。

$$F \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho} \quad (2.5)$$

$$F = \alpha + \beta n \quad (2.6)$$

$$H = h + z \quad (2.7)$$

ここで、

- h : 圧力水頭(L)
- $K_y$  : 透水係数(L/T)
- t : 時間(T)

$$\alpha = \partial n / \partial h : \text{媒体の圧縮率 (1/L)}$$

$$\beta = \partial \rho / (\rho \partial h) : \text{地下水の圧縮率 (1/L)}$$

非定常地下水流動の支配方程式(2.5)は、地下水及び媒体が非圧縮性であること及び、媒体の透水性に関する等方性を仮定すると、地下水の湧き出しあるいは吸い込みがない場合、(2.8)式で示されるラプラスの方程式に帰着する。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.8)$$

$$\Phi = KH \quad (2.9)$$

ここで、 $K$  : 等方性媒体の透水係数(L/T)

このとき、(2.8)式で示される関数 $\Phi$ は速度ポテンシャルであり、

$$v_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$v_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2.11)$$

なる性質をもつ。また、流れ関数 $\Psi$ は、

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = v_z \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = -v_x \quad (2.13)$$

として定義される。

$$\Psi = \text{const} \quad (2.14)$$

なる曲線は流線を表し、この曲線上の任意の点において、その接点の方向はその瞬間の流線ベクトル

の方向と一致する。(2.12)、(2.13)式は2次元の場合の定常非圧縮性地下水の連続の方程式(2.4)をおのずと満たす。

(2.10)～(2.13)式により速度成分 $v_x$ 、 $v_z$ は速度ポテンシャル $\Phi$ 、流れ関数 $\Psi$ に関して、

$$v_x = -\frac{\partial\Phi}{\partial x} = -\frac{\partial\Psi}{\partial z} \quad (2.15)$$

$$v_z = -\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{\partial\Psi}{\partial x} \quad (2.16)$$

なる関係を満たす。これらの2式を整理すると、

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = -\frac{\partial\Psi}{\partial x} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{\partial\Psi}{\partial z} \quad (2.18)$$

となる。二つの関数 $\Phi$ 、 $\Psi$ が満たす(2.17)、(2.18)式の関係はコーシー・リーマンの関係式と呼ばれ、 $\Phi=\text{const}$ の曲線と $\Psi=\text{const}$ の曲線が直交する条件である。

本解析では、緩衝材、岩盤中の緩み領域、岩盤の領域から構成される処分場近傍の地下水流れを、湧き出し及び吸い込みのない定常状態であると仮定し、岩盤の透水係数をパラメトリックに変化させることにより、(2.8)式により速度ポテンシャル分布、(2.10)、(2.11)式により流速分布を計算し、処分場近傍の地下水理状態の概略的把握を行なった。さらに、得られた流速分布から(2.17)、(2.18)式で示されるコーシー・リーマンの関係式を用い、流れ関数分布を計算し、地下水流れの経路の変化、緩衝材中を流れる地下水流量の評価を行なった。

### 3 解析

#### 3.1 解析対象

解析対象として固化体が水平方向に平行に置かれた場合(固化体横置きケース)を考えた。図3.1.1及び図3.1.2に本解析で使用した処分場近傍の鉛直断面図及び解析モデルを示す。図3.1.1は横置き固化体の半径方向断面を示しており、図3.1.2は中心軸方向断面を示している。これらの解析領域において、白色部分はガラス固化体とオーバーバック、緑色部分は緩衝材、黄色部分は緩み領域、茶

色部分は岩盤を示している。図中にも示してあるように、オーバーバックの半径、緩衝材及び緩み領域の厚さは以下の通りである。

オーバーバックの半径	: 52 cm
緩衝材の厚さ	: 98 cm
緩み領域の厚さ	: 150 cm

### 3.2 初期条件及び境界条件

本解析は地下水流動の定常性を仮定しているため初期条件の設定は必要ない。そこで、ここでは本解析で設定した境界条件について説明する。

水理解析では通常、全水頭を解析領域の境界に設定して解析を行なう。しかしながら、処分場の設置位置として考えられている地表面下1000m付近の場所では全水頭値がわかっている場合は少なくとも動水勾配、地下水流速というような相対的な値が予測されているにすぎない。そこで本解析では、地下深部の水理特性の代表値として動水勾配を選び、この動水勾配を生じるように境界における全水頭値を導出した。この境界条件の設定に際しては、日本の代表的地形をモデル化して実施した広域地下水流動解析から得られる地表面下1000m付近で生じる水平方向と鉛直方向の動水勾配 ( $i_x$ 、 $i_z$ ) の範囲をカバーするように以下に示す3つの組み合わせを選んだ。

$$(i_x, i_z) = (0.35, 0.01)、(0.05, 0.01)、(0.60, 0.01)$$

ここで、

$$i_x = \frac{\Delta H_x}{l_x}, \quad i_z = \frac{\Delta H_z}{l_z}$$

$\Delta H_x$ : x方向の左右境界の水頭差 (L)

$\Delta H_z$ : z方向の上下境界の水頭差 (L)

$l_x$ : x方向の解析領域長さ (L)

$l_z$ : z方向の解析領域長さ (L)

これら3つのx方向及びz方向の動水勾配の組み合わせをもとに、図3.1.1と図3.1.2で示している解析対象における左右及び上下の境界で固定水頭をそれぞれ算出し境界条件とした。

動水勾配 (0.35, 0.01), (0.60, 0.01) は日本の地形を山岳部、丘陵部、平野部に分けてモデル化した時の、山岳部の斜面勾配を保守性を考慮して比較的大きめに設定 (40%, 60%) した場合の、断層を有する地形モデルを用いた広域地下水流動解析により得られる動水勾配である。また動水勾配 (0.05,

0.01) は処分場を設置する際に、地形が期待しうる性能を満たしていると考えた場合に得られる動水勾配である。

### 3.3 解析ケース及び水理パラメータ

解析ケース及び水理パラメータを表3.3.1に示す。解析ケースとして18ケース考えた。Case1～9は半径方向断面についての解析ケースであり、Case10～Case18は中心軸方向断面についての解析ケースである。解析に際しては、岩盤の透水係数のみ変化させ、処分坑道掘削にともない生じると予想される処分孔周辺の岩盤の緩みの効果は反映させず、岩盤と緩み領域の透水係数を同じにした。

緩衝材の透水係数は、動燃においてクニゲルV1について実施された、乾燥密度が $1.8 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ のときの代表値 $1 \times 10^{-11} \text{ (cm/s)}$ を採用した<sup>(3)</sup>。また、岩盤の透水係数については、種々の地質環境を想定し、 $10^{-4} \sim 10^{-8} \text{ (cm/s)}$ の範囲を考えることにした<sup>(4),(5)</sup>。

表3.3.1 解析ケース及び水理パラメータ

	動水勾配 (-) ( $i_1, i_2$ )	空隙率 (-)			透水係数 (cm/s)			解析対象 モデル
		緩衝材	緩み領域	岩盤	緩衝材	緩み領域	岩盤	
case01	(0.35, 0.01)	0.3	0.01	0.01	1e-11	1.0e-04	1.0e-04	固化体半径 方向断面 ケース
case02					1e-11	1.0e-06	1.0e-06	
case03					1e-11	1.0e-08	1.0e-08	
case04	(0.05, 0.01)	0.3	0.01	0.01	1e-11	1.0e-04	1.0e-04	
case05					1e-11	1.0e-06	1.0e-06	
case06					1e-11	1.0e-08	1.0e-08	
case07	(0.60, 0.01)	0.3	0.01	0.01	1e-11	1.0e-04	1.0e-04	
case08					1e-11	1.0e-06	1.0e-06	
case09					1e-11	1.0e-08	1.0e-08	
case10	(0.35, 0.01)	0.3	0.01	0.01	1e-11	1.0e-04	1.0e-04	固化体中心 軸方向断面 ケース
case11					1e-11	1.0e-06	1.0e-06	
case12					1e-11	1.0e-08	1.0e-08	
case13	(0.05, 0.01)	0.3	0.01	0.01	1e-11	1.0e-04	1.0e-04	
case14					1e-11	1.0e-06	1.0e-06	
case15					1e-11	1.0e-08	1.0e-08	
case16	(0.60, 0.01)	0.3	0.01	0.01	1e-11	1.0e-04	1.0e-04	
case17					1e-11	1.0e-06	1.0e-06	
case18					1e-11	1.0e-08	1.0e-08	

### 3.4 緩衝材中の物質移動メカニズムに関する検討

ニアフィールドの水理解析に基づき、この領域での物質移動メカニズムに関する検討を行なった。これは本解析で得られたニアフィールドでの地下水流れの場合において、物質移動が移流支配であるか拡散支配であるかを判断するための検討であり、人工バリア中の核種移行におけるモデル化の基礎情報を与えるものである。この検討では、判断を行なうための指標として(3.4.1)式で示されるペクレ数(P<sub>e</sub>)を採用した。

$$P_e = \frac{vL}{D_e} \quad (3.4.1)$$

ここで、

v : 地下水流速 (L/T)  
L : 代表長さ (L)  
D<sub>e</sub> : 実効拡散係数 (L<sup>2</sup>/T)

ペクレ数(P<sub>e</sub>)は(3.4.1)式に示されるように、移流効果と拡散効果の比で示される無次元数であり、移流効果が卓越するとペクレ数は大きくなり、拡散効果が卓越するとペクレ数は小さくなる。代表長さLに関しては、本解析ではオーバーバックの直径L=104 (cm)を採用した。また、実効拡散係数は実測データをもとに表3.4.1に示す値を用いた。

表3.4.1 実効拡散係数

	実効拡散係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	1.0e-06
緩み領域	1.0e-07
岩盤	1.0e-07

## 4 解析結果

図4.1～図4.9に図3.1.1に示す固化体半径方向断面モデルを使用した解析結果を、また図4.10～図4.18に図3.1.2に示す固化体中心軸方向断面モデルを使用した解析結果をそれぞれ示す。各解析結果はそれぞれ人工バリア近傍及び解析領域全体の全水頭分布、流速分布、流れ関数分布からなっている。

表4.1は、各ケース毎に地下水が1年間に緩衝材中を通過する量(地下水流量)を算出した結果を示している。なお、FEMWATERによる解析は断面2次元領域で実施しているため、表4.1に示した流

量は単位幅あたりの流量として表現している。表4.2は、各ケースにおける解析領域での全地下水流量を算出した結果を示している。なお、ここで算出した地下水流量についても表4.1と同様に単位幅あたりの流量として表現している。

図4.19～図4.21と図4.22～図4.24はそれぞれ固化体半径方向断面モデルと固化体中心軸方向断面モデルを使用した場合の岩盤中及び緩衝材中のバクレ数(P)の変化を示している。図4.19～図4.21の固化体半径方向断面モデルを使用した場合は緩衝材中を通る流線に沿ってバクレ数を算出しており、図4.22～図4.24の固化体中心軸方向断面モデルを使用した場合は図中に示しているA-A'断面に沿ってバクレ数を算出している。バクレ数の算出に使用した代表長さについては、ここではオーバーバックの直径を選んでいる。それぞれの図中のk1は岩盤の透水係数を表しており、表3.3.1に示される岩盤の透水係数をk1として変化させた場合のバクレ数の変化に対応している。

表4.1 緩衝材中の地下水年間流量

半径方向断面 ケース	緩衝材の地下水年間 流量(cm**2/y)	中心軸方向断面 ケース	緩衝材の地下水年間 流量(CM**2/y)
Case1	4.836e-02	Case10	2.440e-02
Case2	4.836e-02	Case11	2.440e-02
Case3	4.833e-02	Case12	2.440e-02
Case4	7.210e-03	Case13	3.694e-03
Case5	7.210e-03	Case14	3.694e-03
Case6	7.200e-03	Case15	3.693e-03
Case7	8.603e-02	Case16	4.179e-02
Case8	8.603e-02	Case17	4.179e-02
Case9	8.603e-02	Case18	4.179e-02

表4.2 解析領域中の地下水年間流量

半径方向断面 ケース	解析領域中の地下水年間 流量(cm <sup>3</sup> /y)	中心軸方向断面 ケース	解析領域中の地下水年間 流量(cm <sup>3</sup> /y)
Case1	4.093e+06	Case10	3.359e+06
Case2	4.093e+04	Case11	3.359e+04
Case3	4.093e+02	Case12	3.359e+02
Case4	6.764e+05	Case13	5.203e+05
Case5	6.764e+03	Case14	5.203e+03
Case6	6.764e+01	Case15	5.207e+01
Case7	6.887e+06	Case16	5.727e+06
Case8	6.887e+04	Case17	5.727e+04
Case9	6.891e+02	Case18	5.727e+02

## 5 考察

図4.1～図4.18に示される固化体半径方向断面モデル及び固化体中心軸方向断面モデルにおける流れの形態について、それぞれ表3.3.1に示されるケース毎の比較を行うと、同じ動水勾配の組み合わせを用いた解析では、岩盤の透水係数が大きくなるにしたがって、流速は速くなっているが全水頭分布、流れ関数分布の形状には殆ど変化がみられない。つまり、流速ベクトルの方向については、岩盤の透水係数の変化に比べて大きな変化は見られなかったが、流速ベクトルの大きさについては、岩盤の透水係数の変化に対応した変化を示している。これは緩衝材の透水係数が $1e-11$ (cm/s)と岩盤の透水係数 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ (cm/s)に比べて非常に小さく、緩衝材中の地下水の流れは岩盤中のそれに比べて無視できるため、領域全体の流れの形態は大きく変化しないものと考えられる。また、同じ岩盤の透水係数で動水勾配の異なる計算結果について比較すると、本解析で使用した鉛直方向の動水勾配は全ケース0.01と同一であるが、水平方向の動水勾配が大きくなるにしたがって流れの形態が水平方向に近づきかつ領域全体あるいは緩衝材中を流れる流量が大きくなった。断層、破砕帯等を有さない均質性の高い地層に関しては鉛直方向に比べて水平方向の動水勾配が卓越すると考えられるため、本解析結果はニアフィールドを流れる地下水に関して水平方向の動水勾配を評価していくことの重要性を示しているものと考えられる。

表4.1及び表4.2はそれぞれ各ケースの地下水流動解析結果をもとに算出した緩衝材中の流量及び解



析領域全体の流量である。緩衝材中を流れる地下水の流量に関しては、解析条件に係わらず $10^2 \sim 10^3(\text{cm}^2/\text{y})$ のオーダーと非常に小さく、岩盤中の地下水全流量 ( $10^1 \sim 10^6$ のオーダー) に比べて無視しうるものと考えられる。各ケースにおいて共通な解析対象モデルについては、岩盤の透水係数及び動水勾配の変化にしたがって解析領域での全地下水流量が変化することが示されている。固化体半径方向断面ケースと固化体中心軸方向断面ケースの比較を試みると、それぞれに設定を行なった岩盤の透水係数と緩衝材の透水係数が同じ場合、固化体半径方向断面ケースの地下水流量は固化体中心軸方向断面ケースのそれに比べて高い値を示したが、オーダーでは一致していた。これは、解析対象モデルの違いによって地下水が透水性の低い領域(緩衝材)を通過する面積の大きさが違ってき、それによる影響が現われているものと考えられる。さらに、各ケースにおいて解析対象モデルおよび動水勾配を共通とした場合、岩盤の透水係数の変化に伴った緩衝材中の地下水流量に着目すると、殆ど値の変化が見られない。また、全ケースにおいて、最も地下水流量が多い場合でも $8.603\text{e-}02(\text{cm}^2/\text{y})$ と非常に少ないことわかる。これは、緩衝材の透水係数が $1\text{e-}11(\text{cm/s})$ と岩盤の透水係数に比べて非常に小さく、析領域中の地下水流量は岩盤領域に集中し緩衝材を回避して通るためであると考えられる。

図4.19～図4.24は固化体半径方向断面ケース及び固化体中心軸方向断面ケースに対応させ、各ケースにおける地下水流速分布に基づいて計算した、ペクレ数(P)の場所的変化を示している。これらの図から、いずれのケースにおいても動水勾配及び岩盤の透水係数が変化に係わらず、緩衝材中のペクレ数(P)は $10^3$ のオーダーと岩盤中のそれに比べ十分小さいことがわかった。したがって、緩衝材中での物質移動メカニズムは拡散現象が支配的であることが示され、緩衝材中に存在する核種は拡散支配で周辺岩盤へ向かって移行するものと考えられる。

## 6 結論

本解析では、人工バリア及び周辺岩盤から構成されるニアフィールドの地下水流れについて、動水勾配、岩盤の透水係数をパラメータとして感度解析を行い、ニアフィールドにおける流れの状態、緩衝材中の地下水流量、ニアフィールドの物質移動メカニズムについての評価を行なった。動水勾配は日本の代表的地形をモデル化して行なった広域地下水流動解析結果から想定される範囲をカバーできるように設定した。また緩衝材の透水係数は動燃その他の実測データをもとに緩衝材を $1\text{e-}11(\text{cm/s})$ と設定し、岩盤については代表値として $1.0\text{e-}6(\text{cm/s})$ を選びその前後に2オーダーづつ変化させることにより設定した。

計算の結果、それぞれ同じ動水勾配のもとで得られた地下水流れの形態については、岩盤の透水係数に比べて大きな変化は見られなかった。これは緩衝材の透水係数が $10^{-11}(\text{cm/s})$ と非常に小さく、緩

衝材中を流れる地下水流量が岩盤中のそれに比べて無視できるためと考えられる。また、同じ岩盤の透水係数で動水勾配の異なる計算の結果について比較すると、本解析で使用した鉛直方向の動水勾配は全ケース0.01と同一であるが、水平方向の動水勾配が大きくなるにつれて流れの形態が水平方向流れに近づきかつ領域全体あるいは緩衝材中を流れる流量が大きくなった。断層、破碎帯を有さない均質性の高い地層に関しては鉛直方向に比べて水平方向の動水勾配が卓越すると考えられるため、本解析はニアフィールドを流れる地下水に関して水平方向の動水勾配を評価していくことの重要性を示しているものと考えられる。

緩衝材中を流れる地下水の流量に関しては、解析条件に係わらず、 $10^2 \sim 10^3 (\text{cm}^2/\text{y})$ のオーダーと非常に小さく、岩盤中の地下水流量 $10^1 \sim 10^6 (\text{cm}^2/\text{y})$ に比べて無視しうることが示された。また、ニアフィールドの地下水流速分布に基づき、ペクレ数(Pe)を計算することにより、動水勾配及び岩盤の透水係数が変化しても緩衝材中のペクレ数(Pe)は岩盤中のそれに比べて小さいことが示された。これより、緩衝材中での核種の挙動は拡散現象が支配的であることが示された。

今後、緩衝材中への地下水の再冠水、緩衝材の地下水への流出、岩盤の不均質性、地下水の密度変化等、ニアフィールドの流れの場に影響を与える因子を抽出、整理し、モデル化及び解析に反映させる予定である。

参考文献

- (1) Yeh, G.T., Ward, D.S., FEMWATER : A FINITE ELEMENT MODEL OF WATER FLOW THROUGH SATURATED-UNSATURATED POROUS MEDIA, ORNL-5567, 1980.
- (2) 日野幹男、明解 水理学、丸善、1983.
- (3) 鈴木、他、「緩衝材の特性試験 (I)」、動燃事業団技術資料、PNC TN8410 92-057、1992.
- (4) 福田和寛、他、「花崗岩盤における巨視的透水係数の評価」、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp26~30、1992.
- (5) 青山、他、「深部岩盤の透水性評価手法とその適用性」、地下空間利用シンポジウム1989、pp149~154、土木学会、1989.

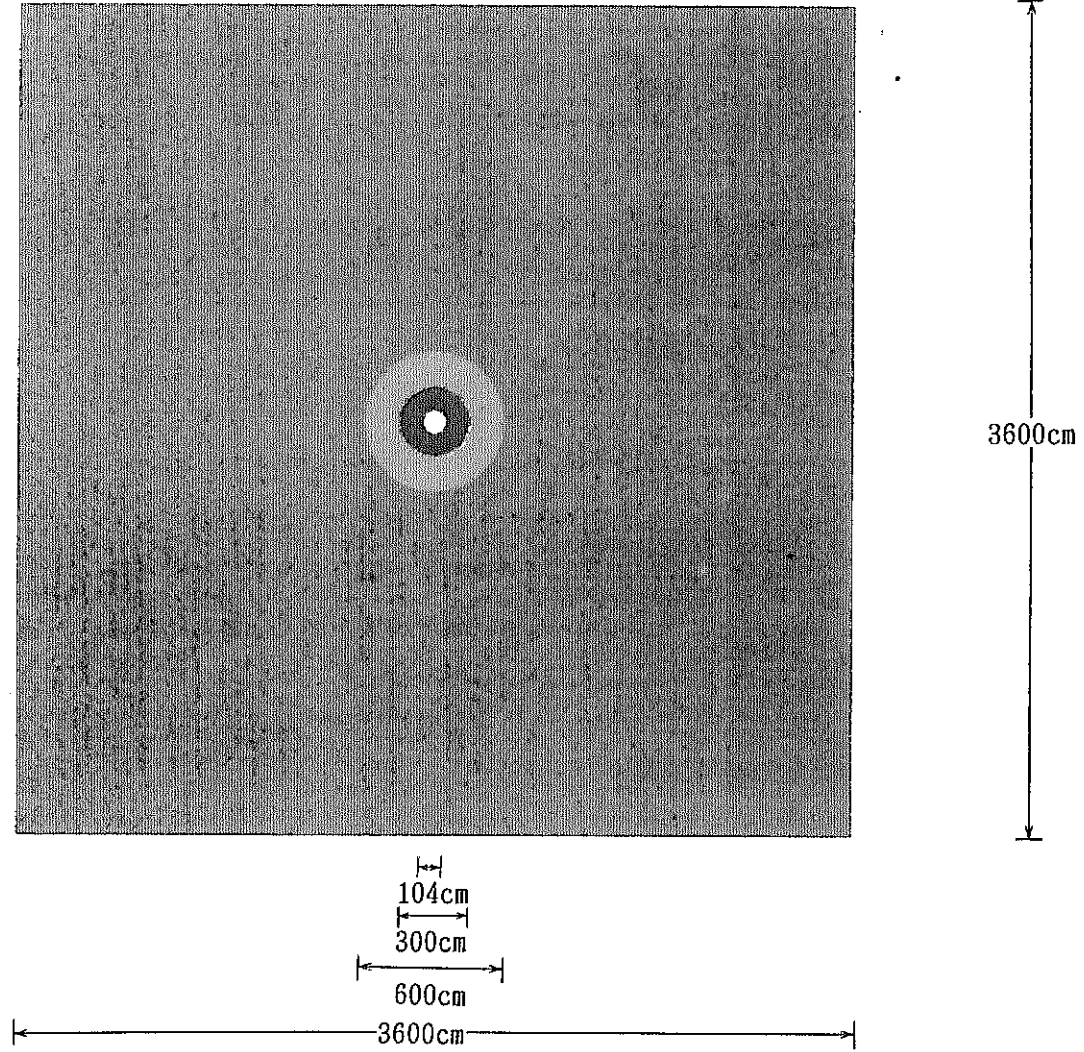


图3.1.1-1 横置き固化体半径方向断面図 (解析領域)

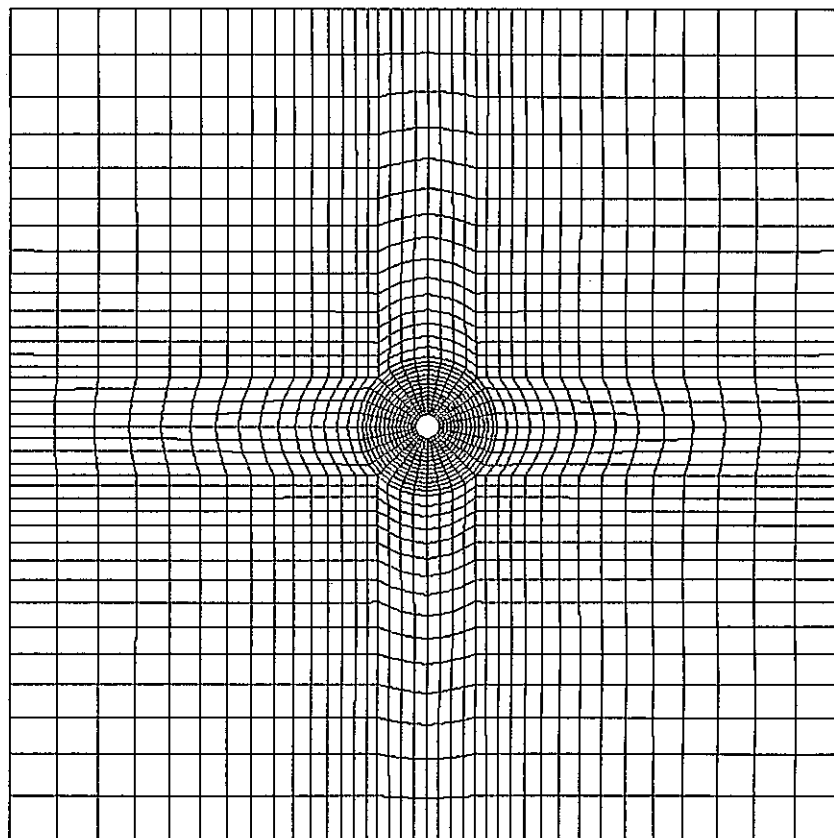


図3.1.1-2 横置き固化体半径方向断面図 (解析モデル)

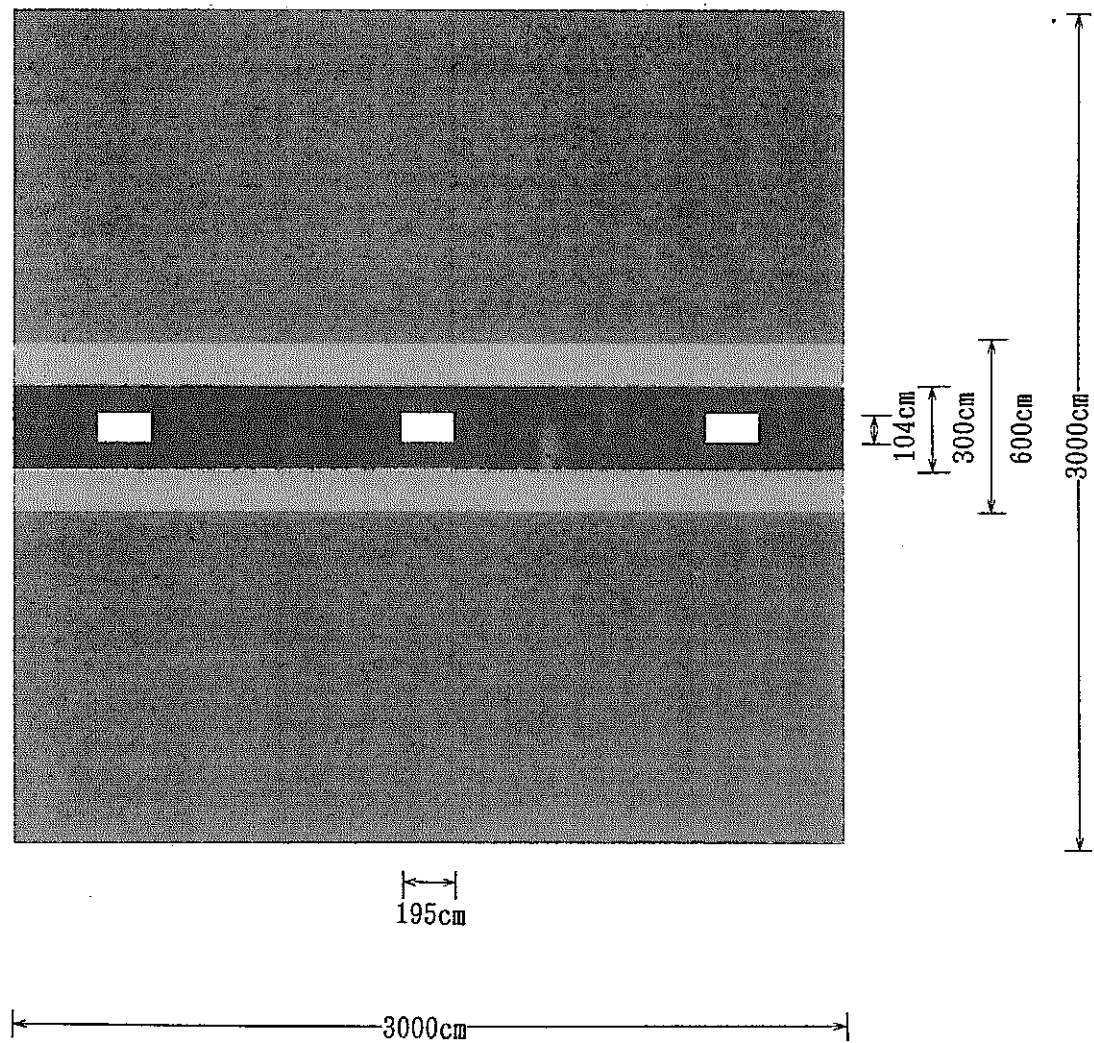


図3.1.2-1 横置き固化体中心軸方向断面図(解析領域)

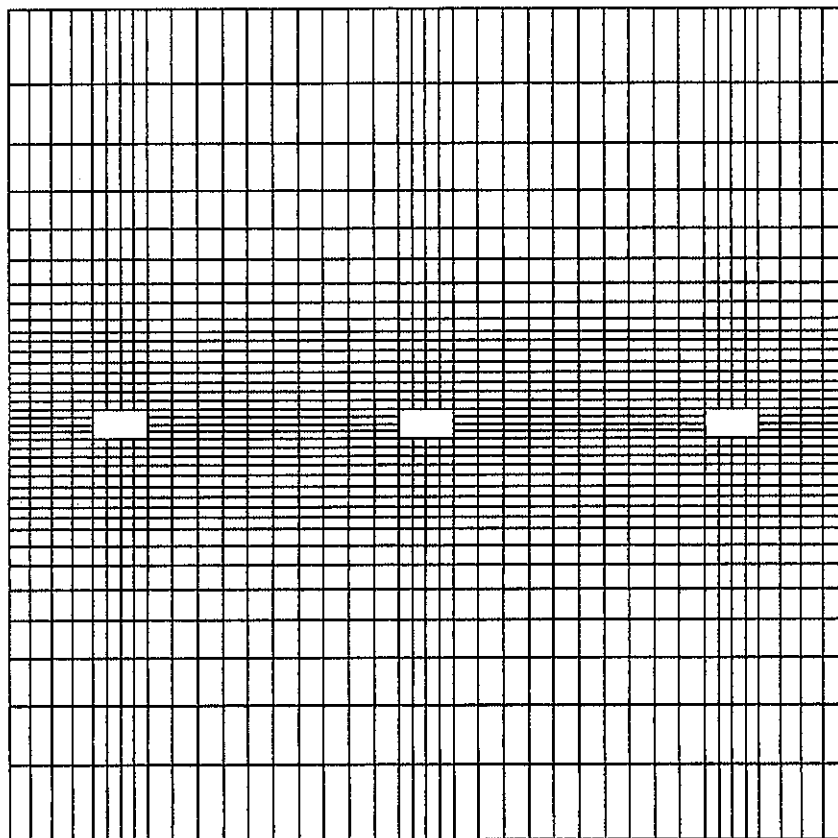
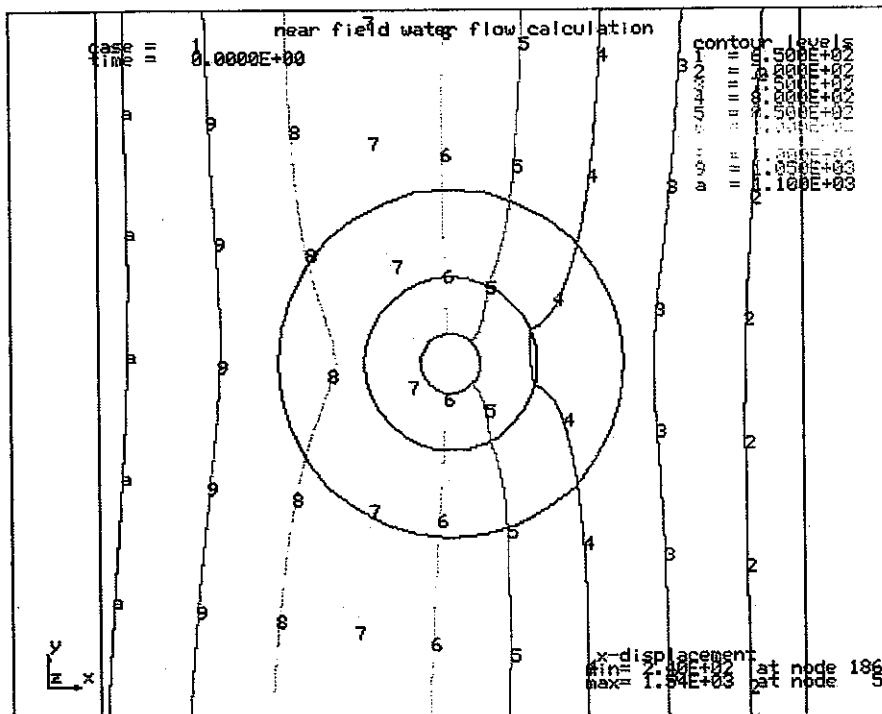


図3.1.2-2 横置き固化体中心軸方向断面図(解析モデル)

	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-04
岩体	0.01	1.0E-04

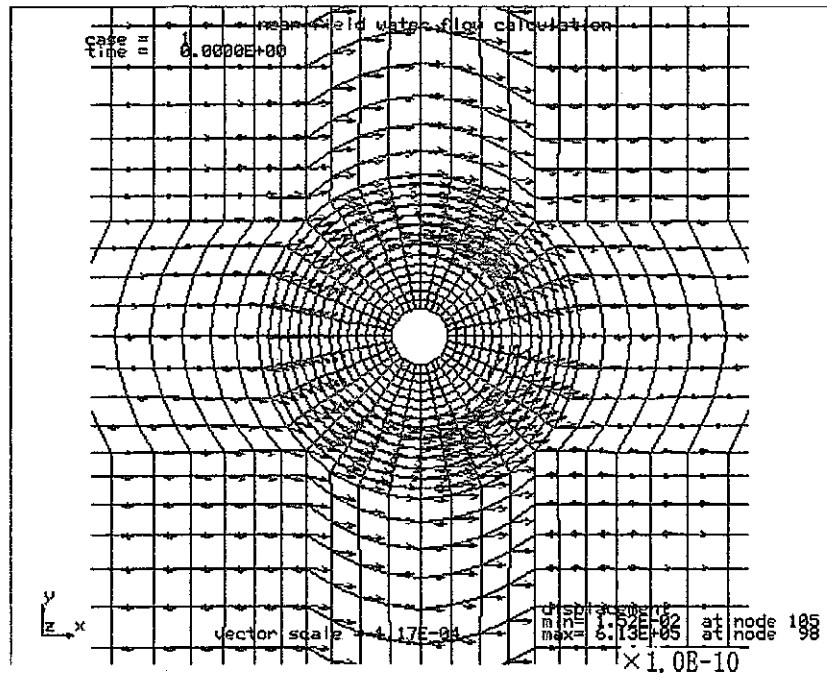
$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.35$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$



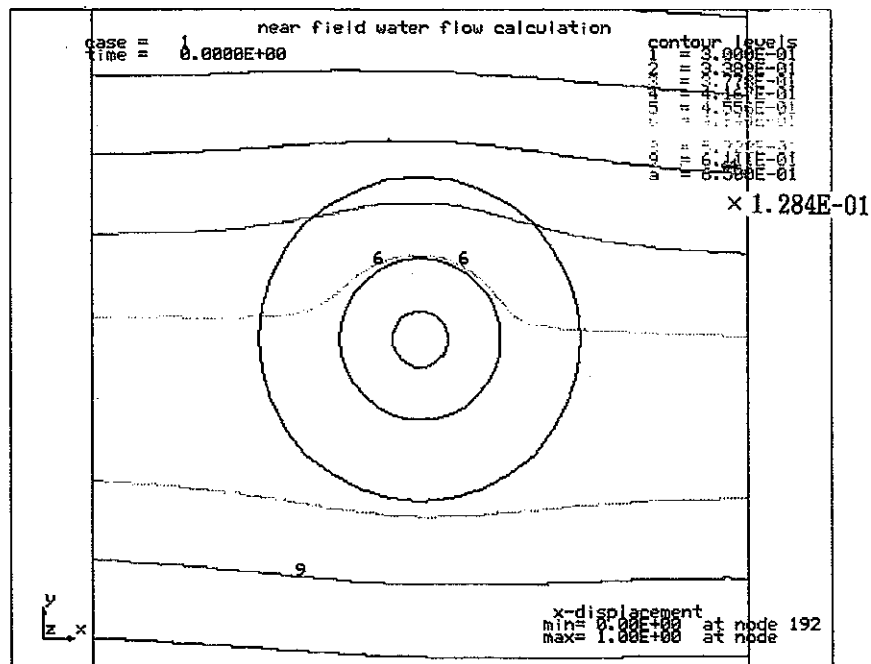
全水頭分布図

図4.1-1 case01 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍





流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.1-2 case01 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

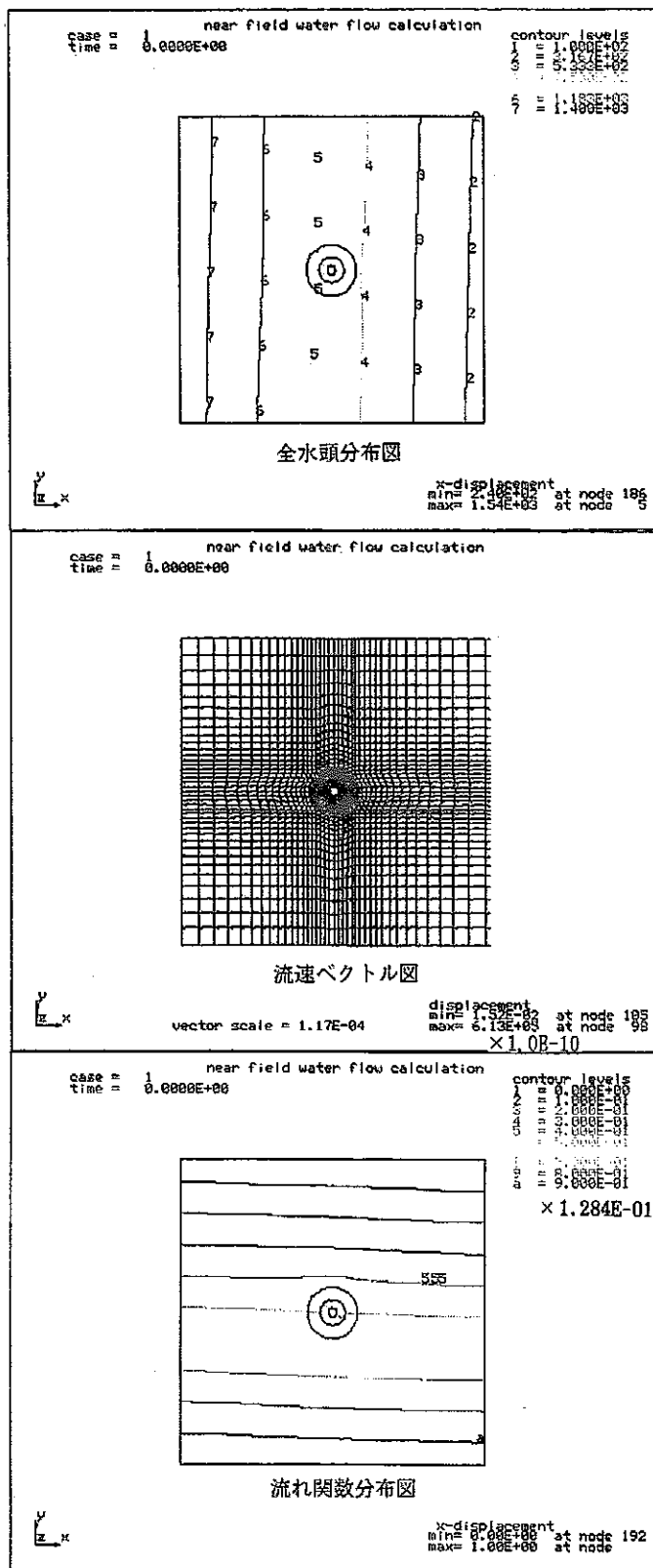
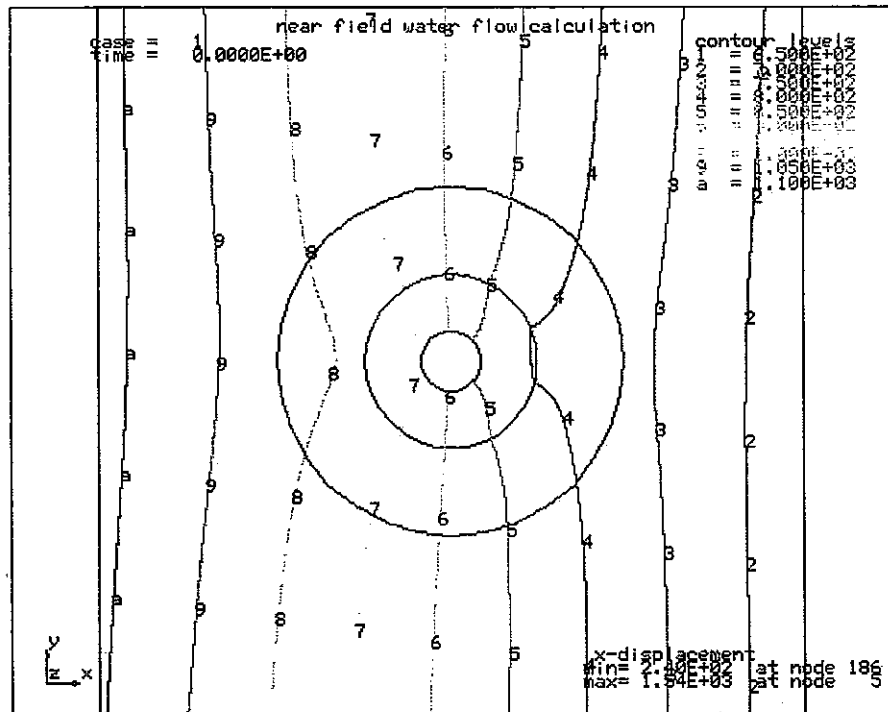


図4.1-3 case01 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 - 解析領域全体

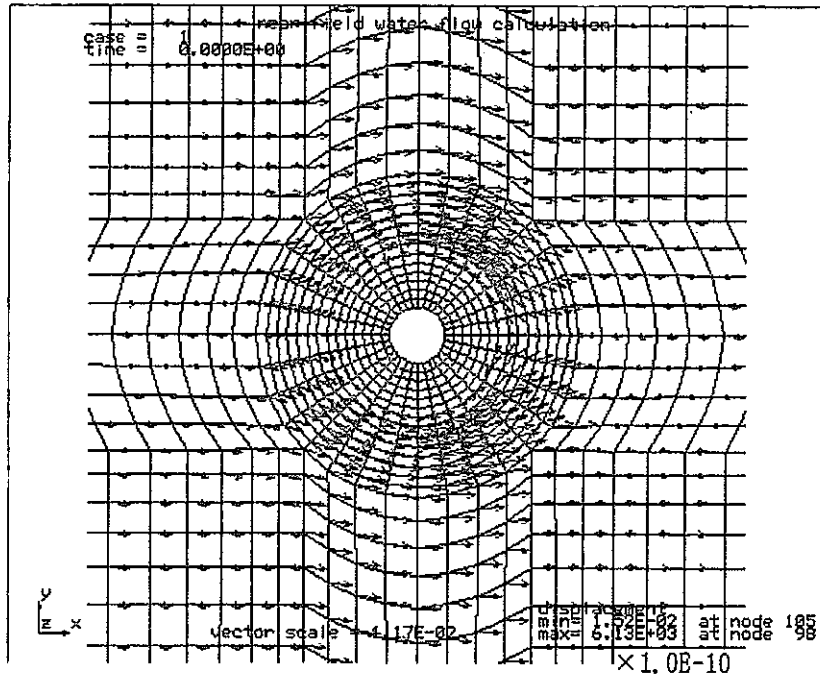
	空隙率 (-)	透水係数 (cmf/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-06
岩体	0.01	1.0E-06

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.35$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

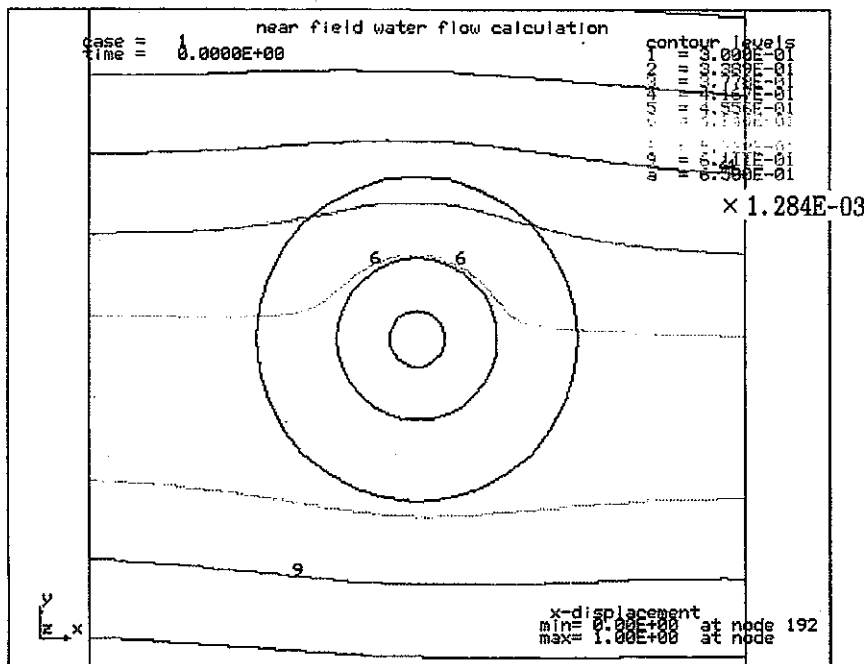


全水頭分布図

図4.2-1 case02 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.2-2 case02 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

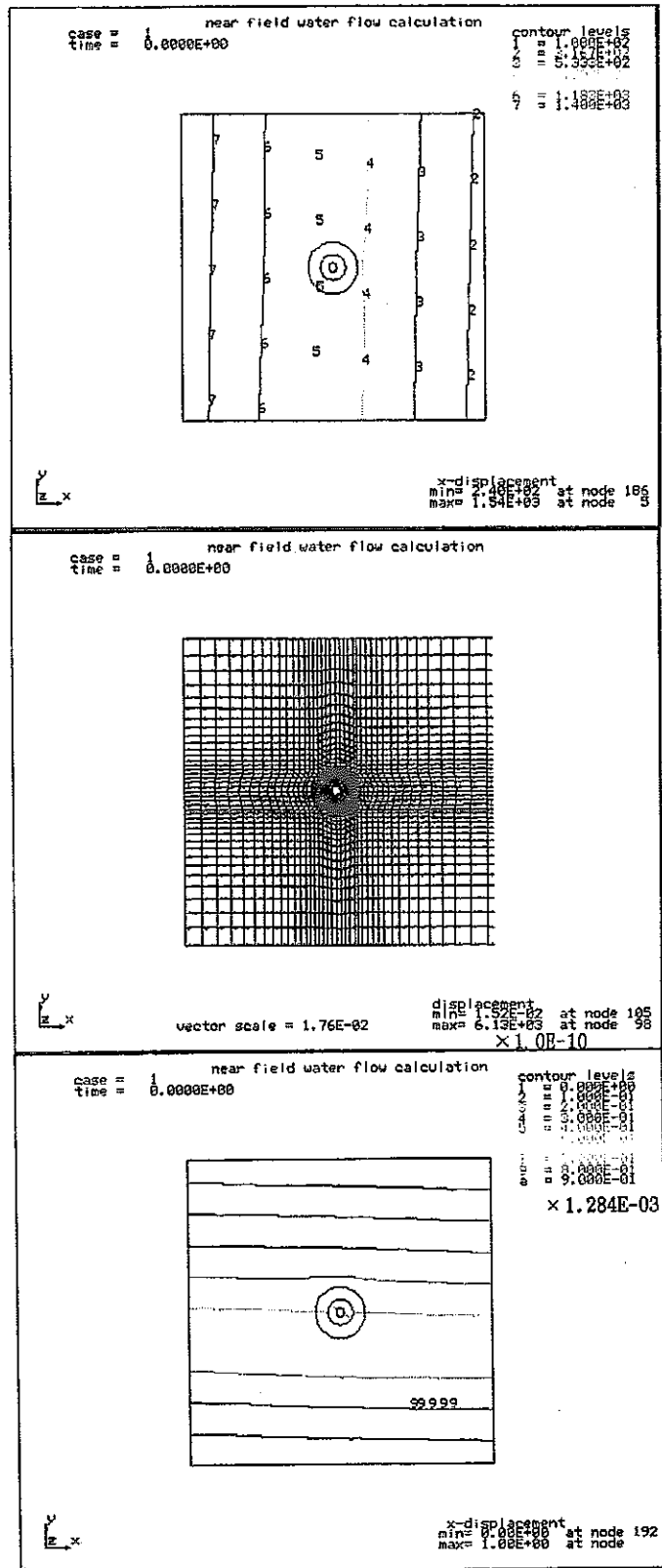
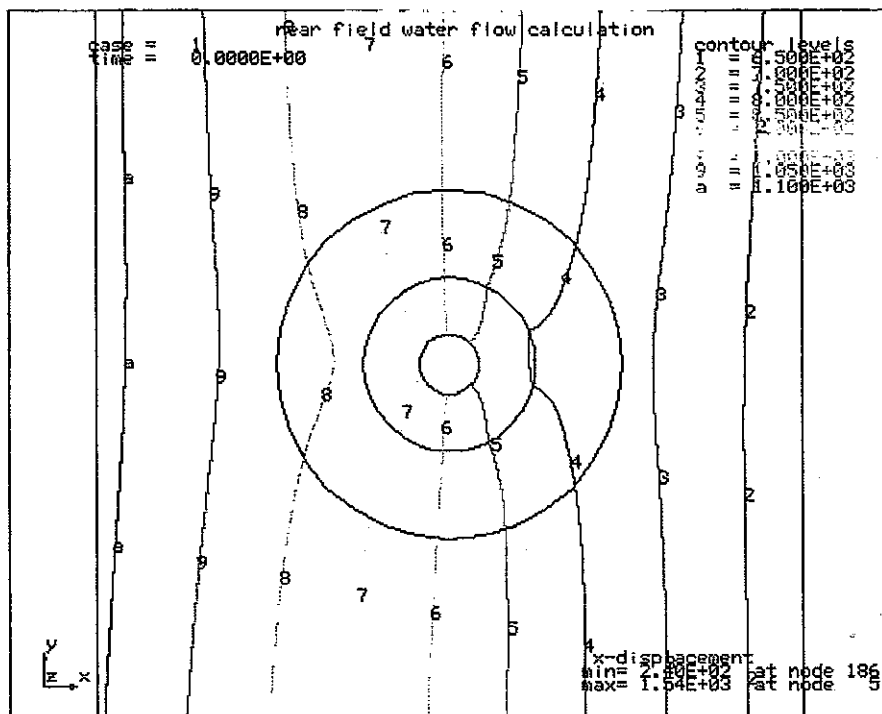


図4.2-3 case02 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

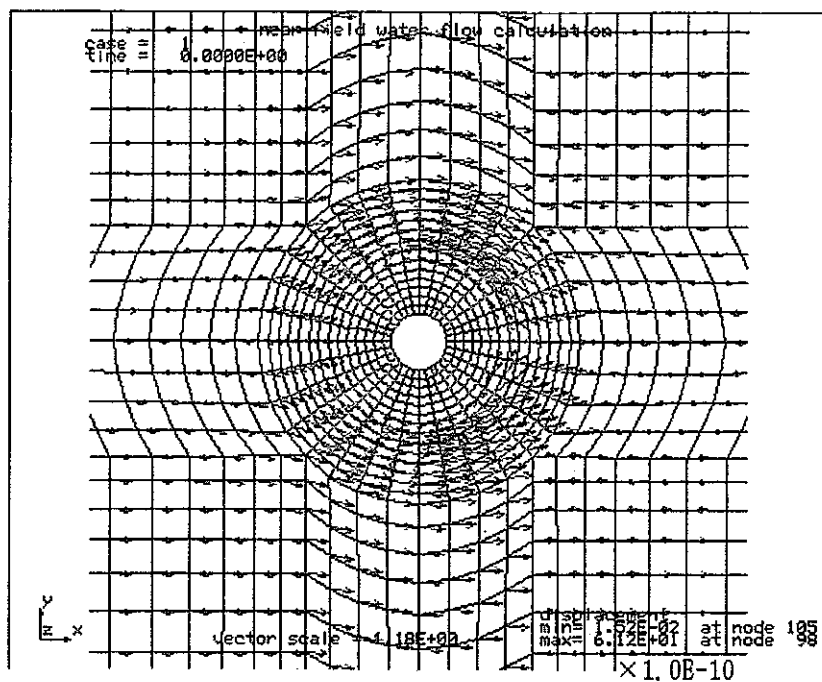
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-08
岩体	0.01	1.0E-08

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.35, i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

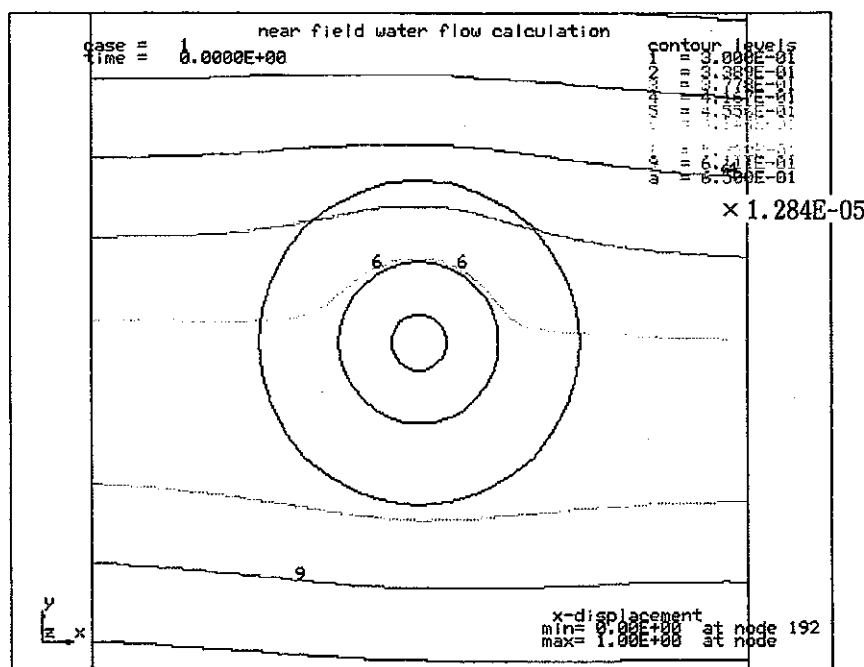


全水頭分布図

図4.3-1 case03 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.3-2 case03 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍

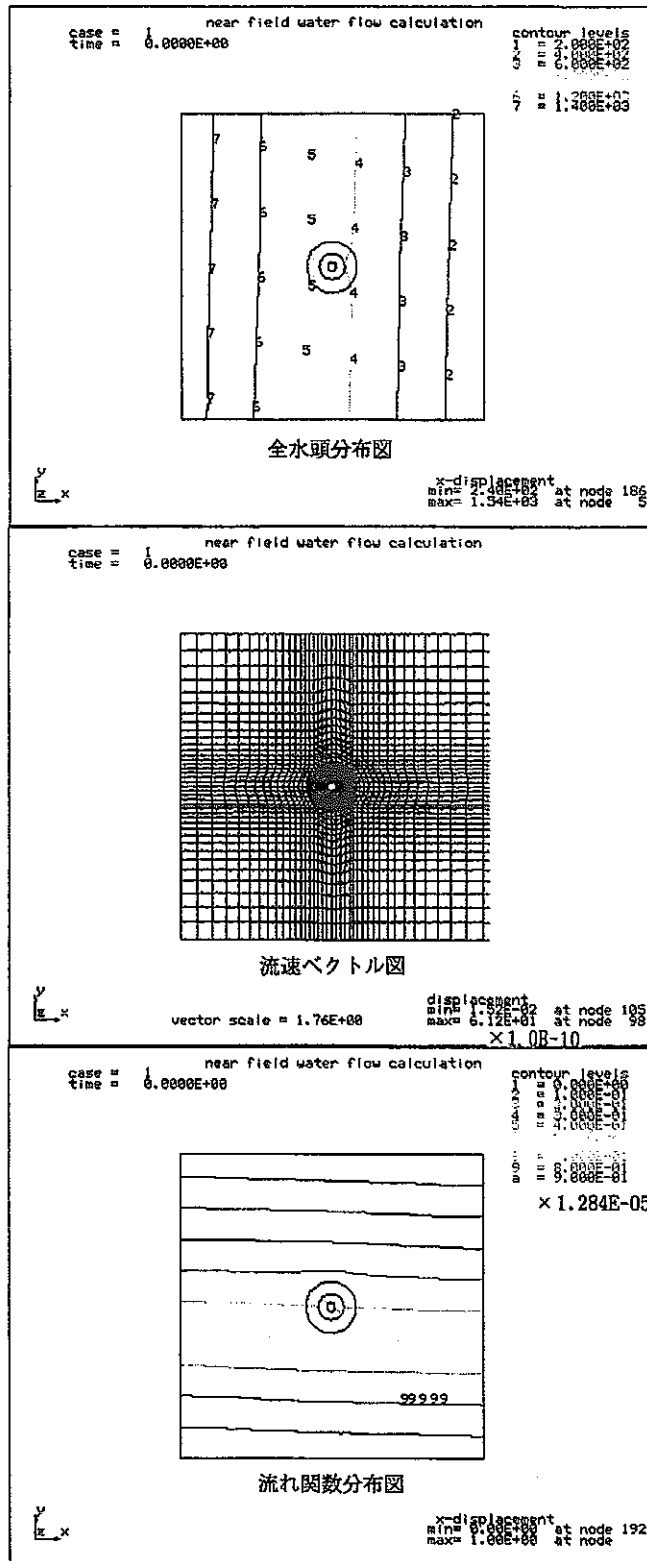
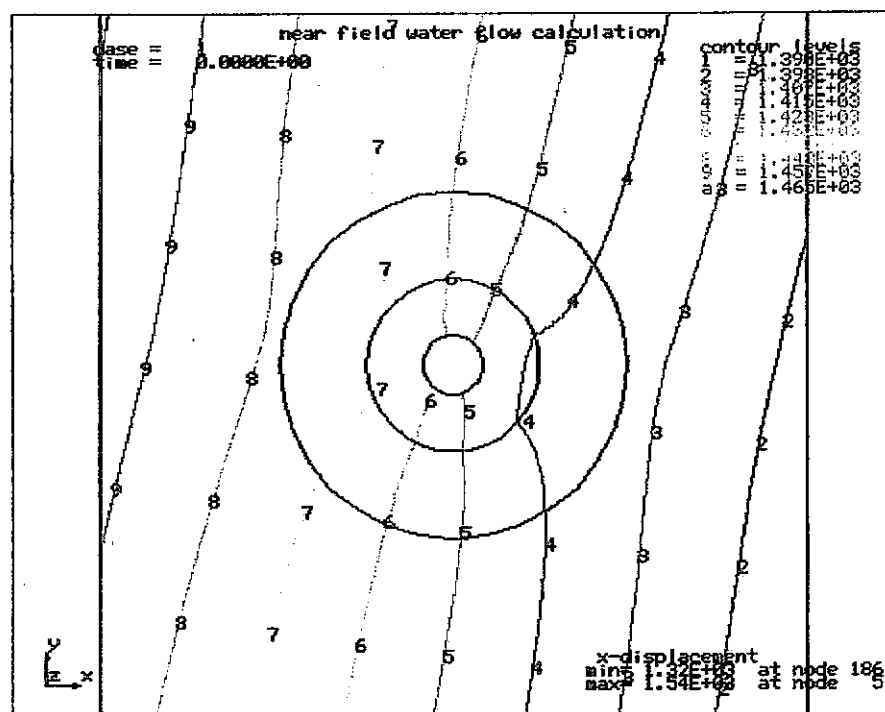


図4.3-3 case03 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体



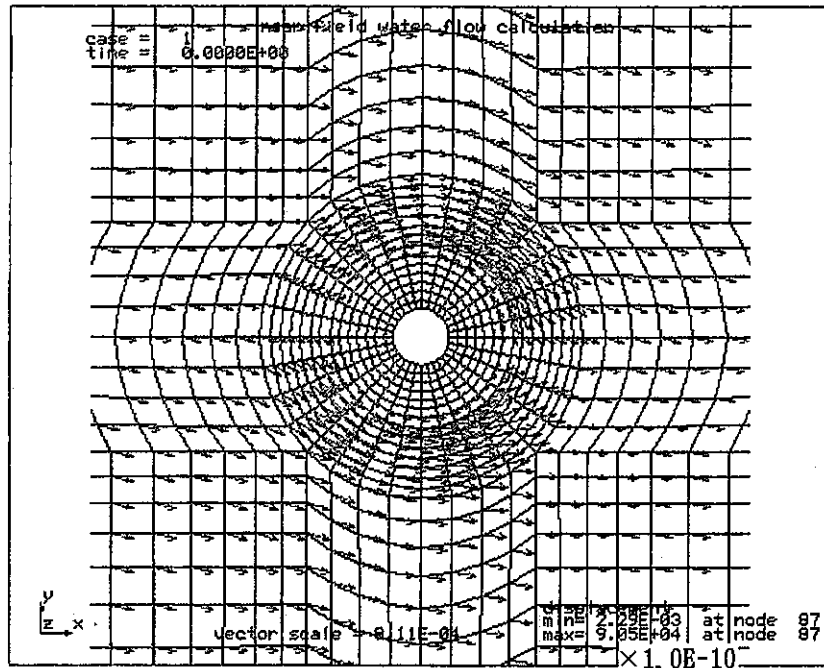
	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-04
岩体	0.01	1.0E-04

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.05$   $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

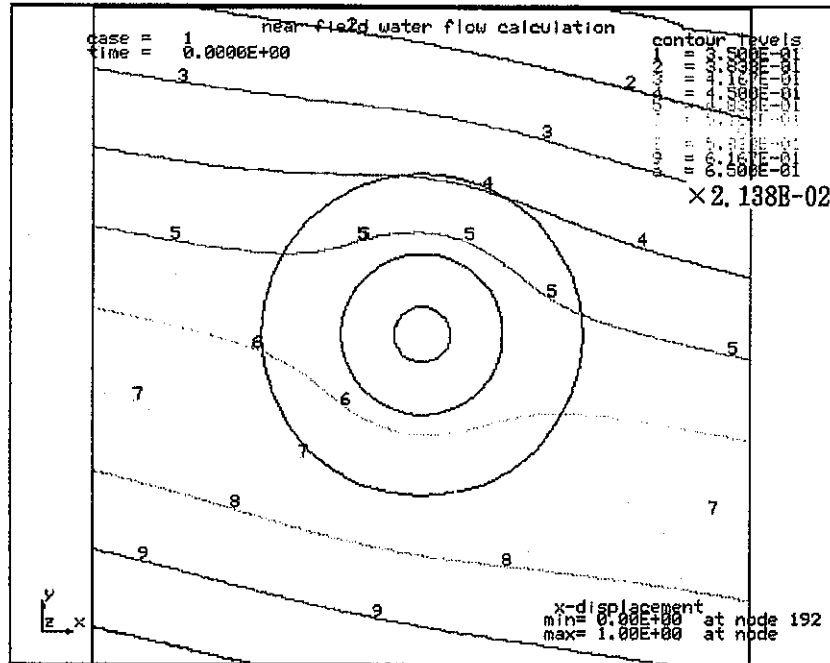


全水頭分布図

図4.4-1 case04 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.4-2 case04 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

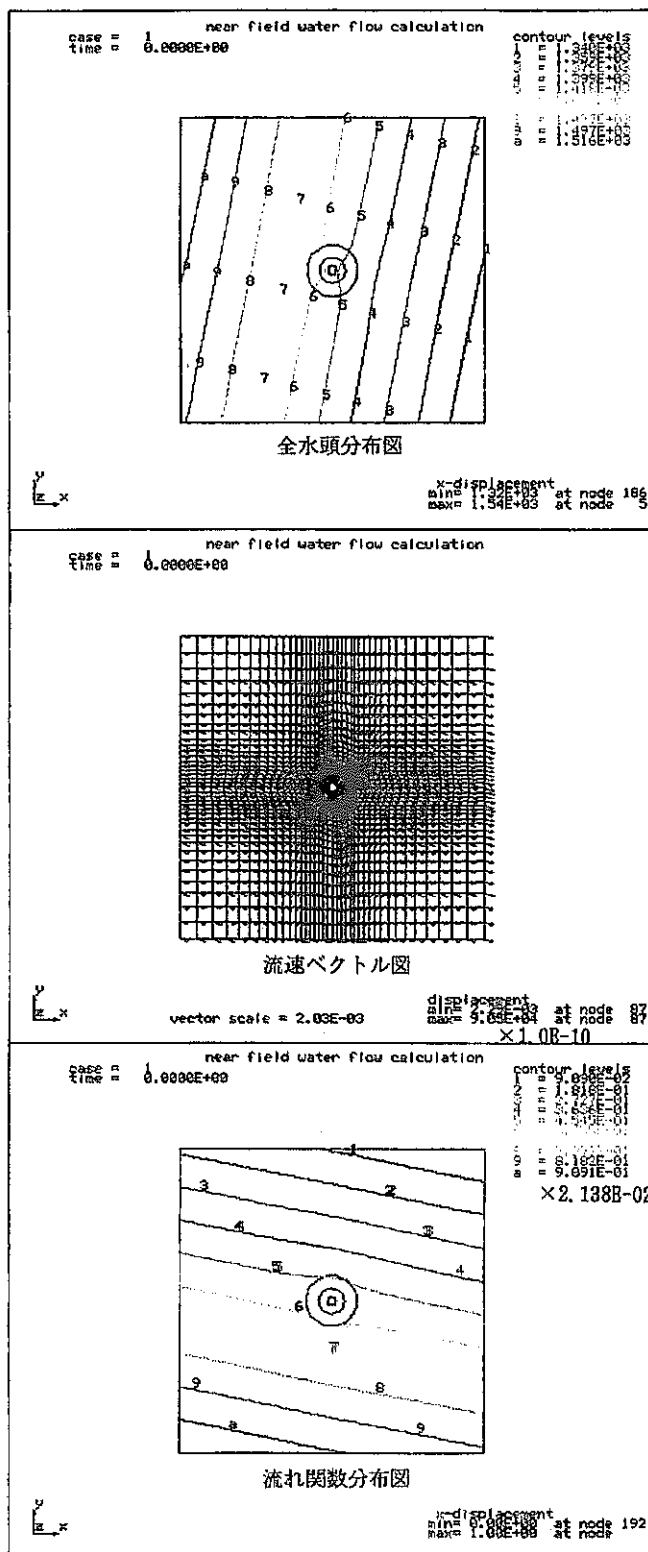
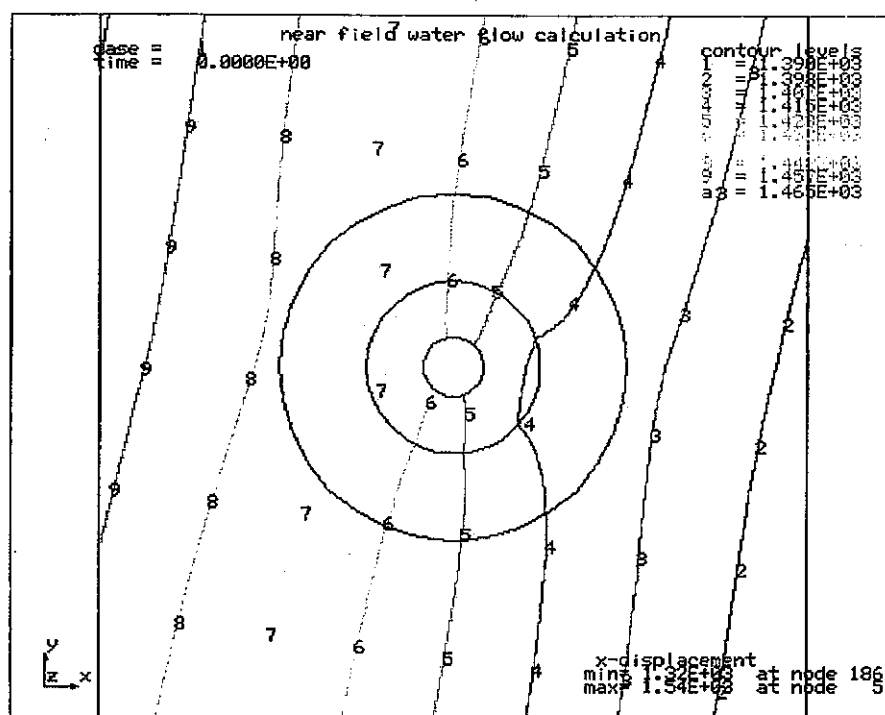


図4.4-3 case04 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

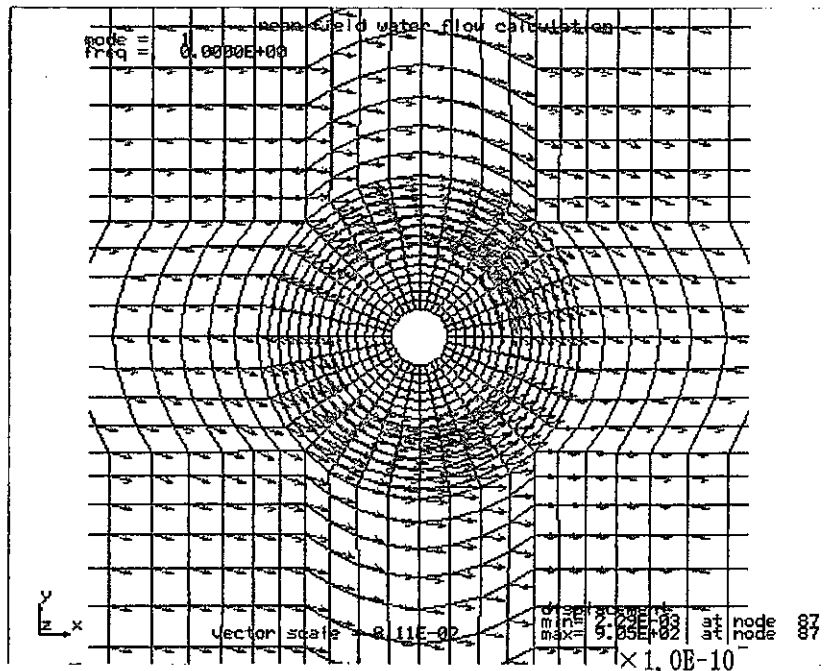
	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-06
岩体	0.01	1.0E-06

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.05$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

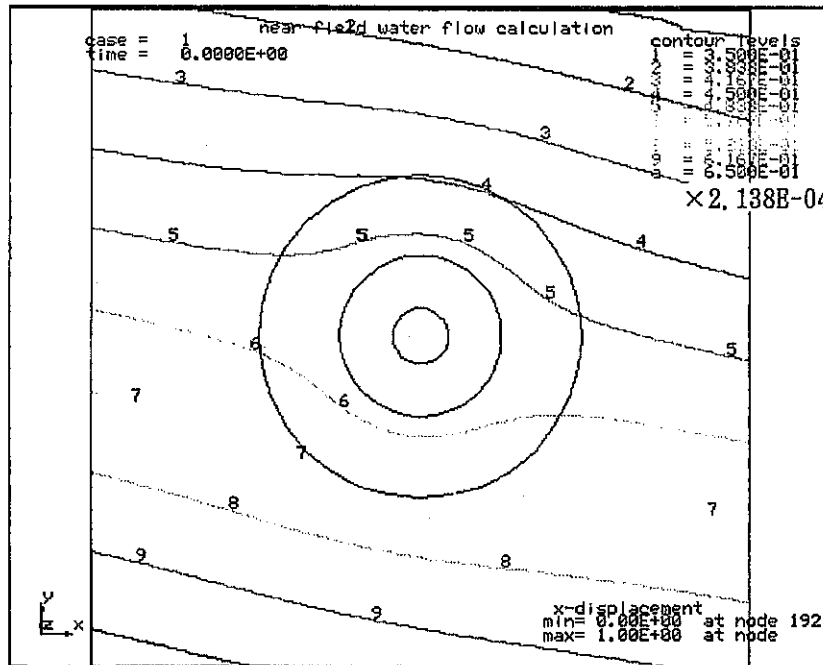


全水頭分布図

図4.5-1 case05 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.5-2 case05 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 一 固化体近傍

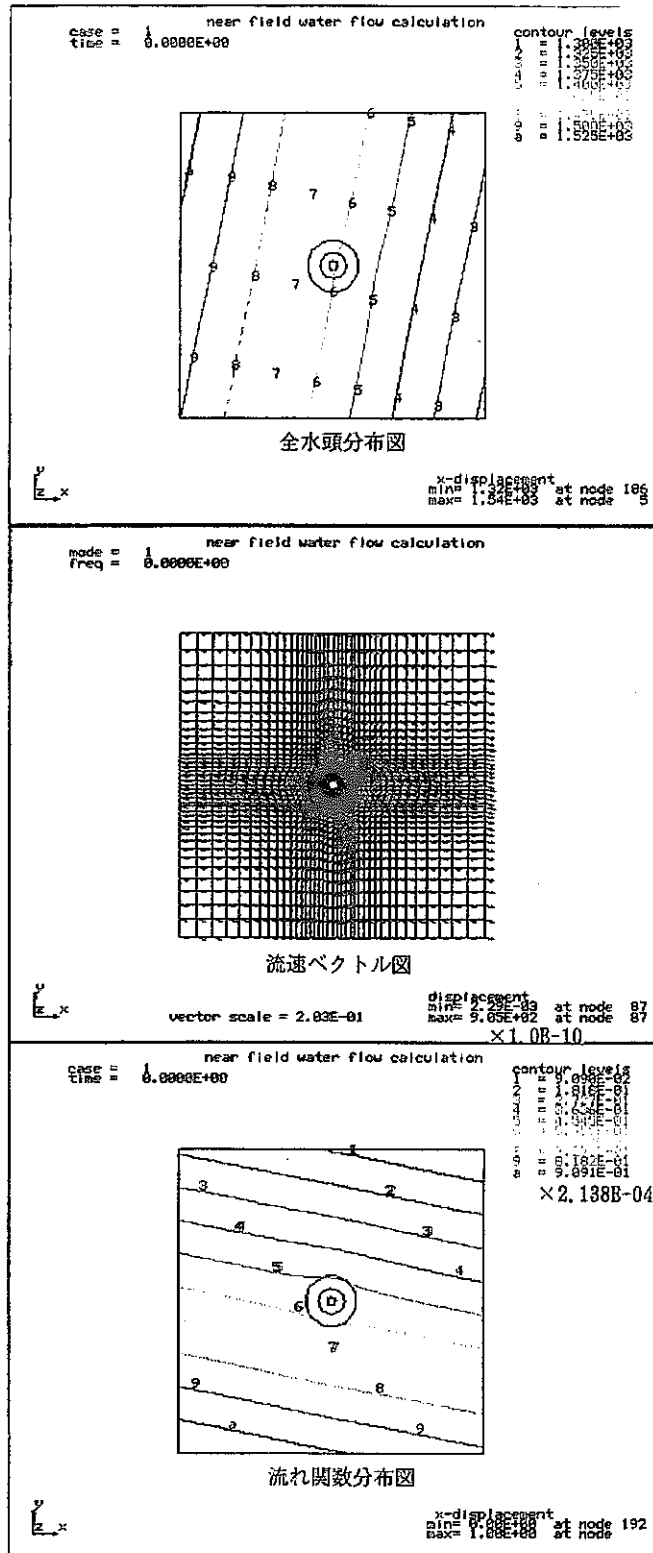
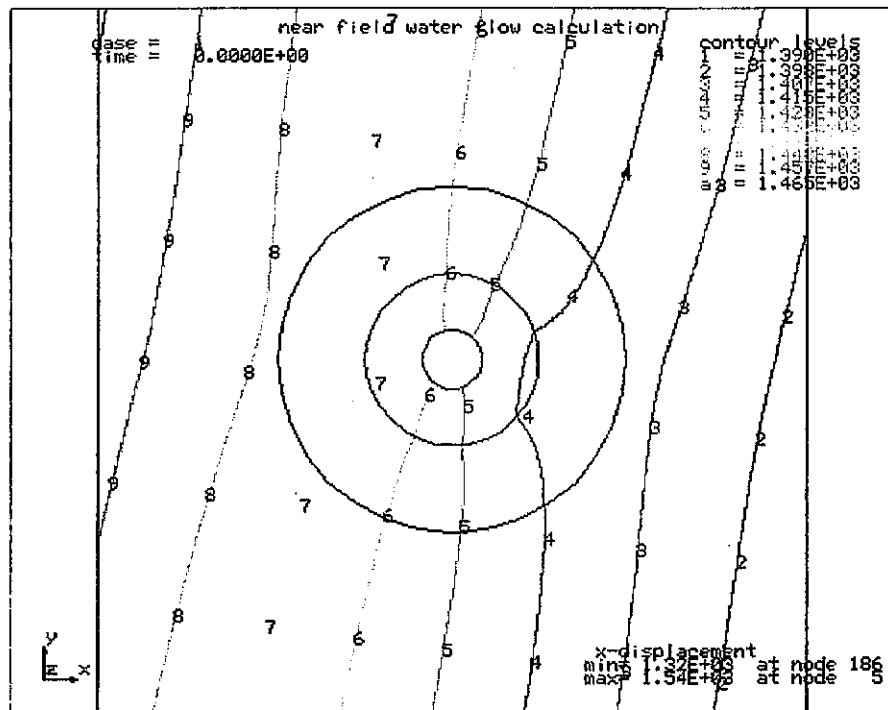


図4.5-3 case05 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

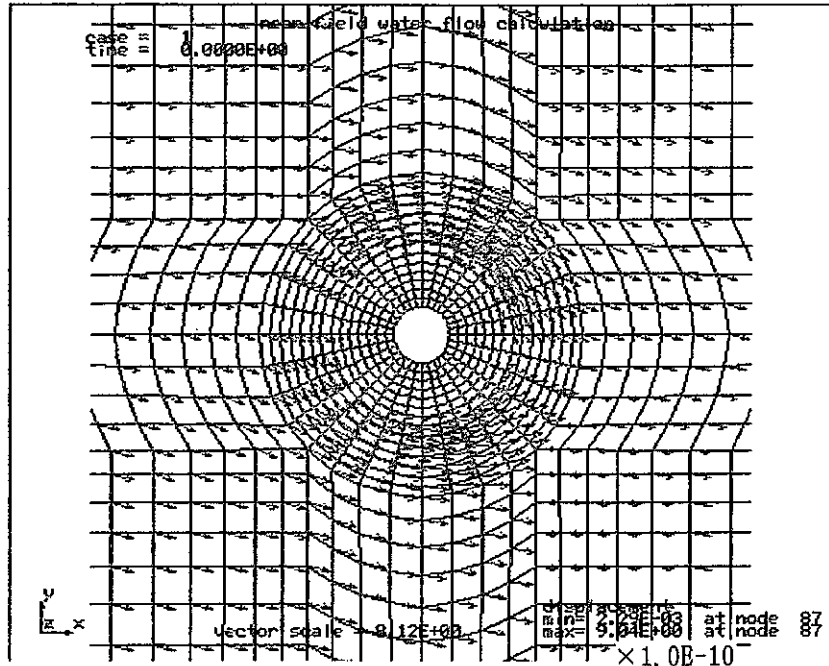
	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-08
岩体	0.01	1.0E-08

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.05$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

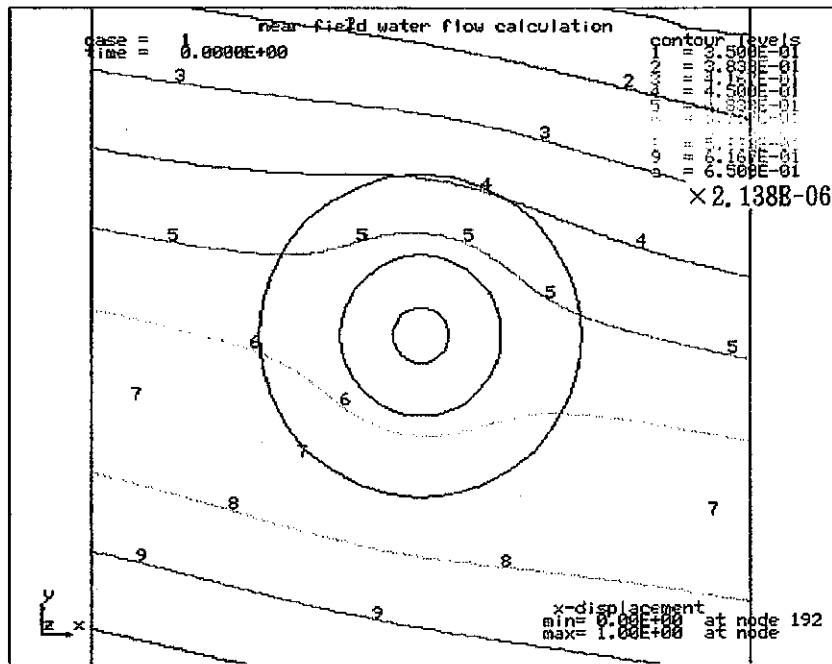


全水頭分布図

図4.6-1 case06 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.6-2 case06 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



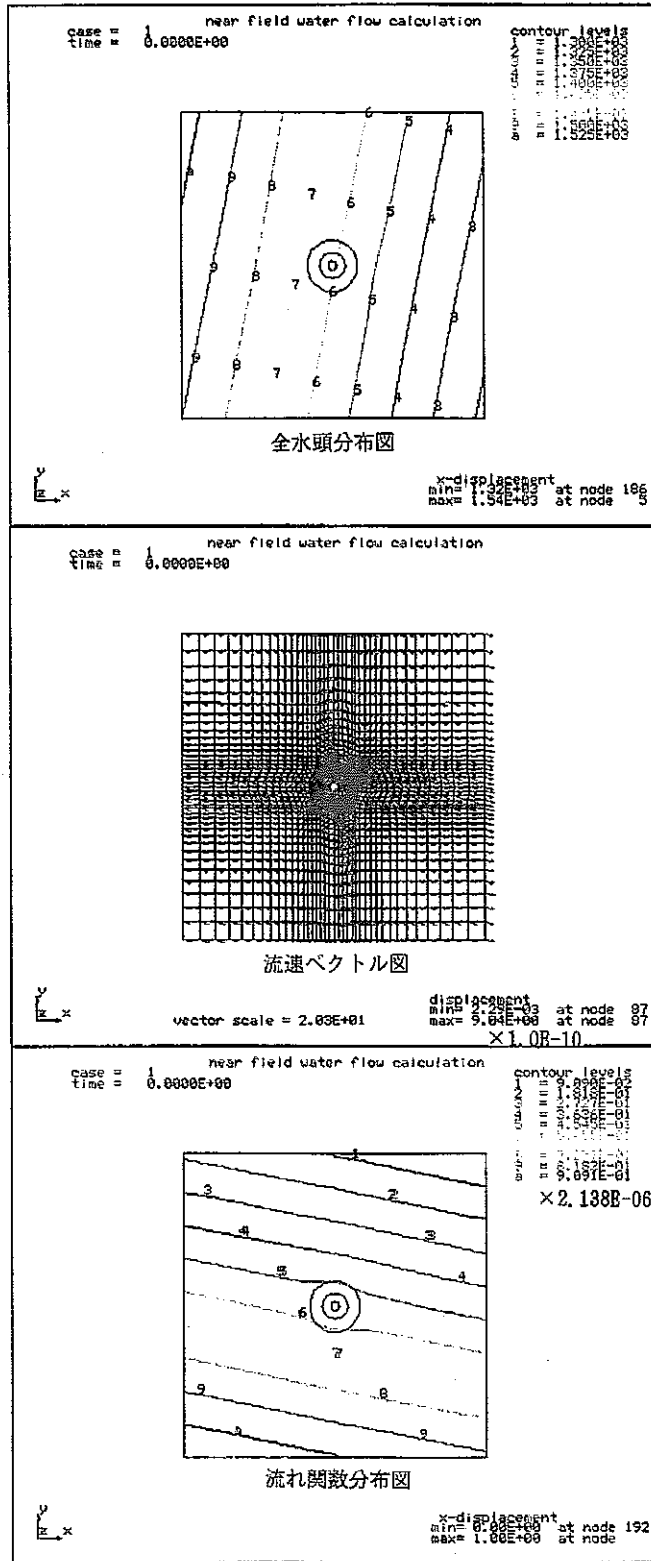
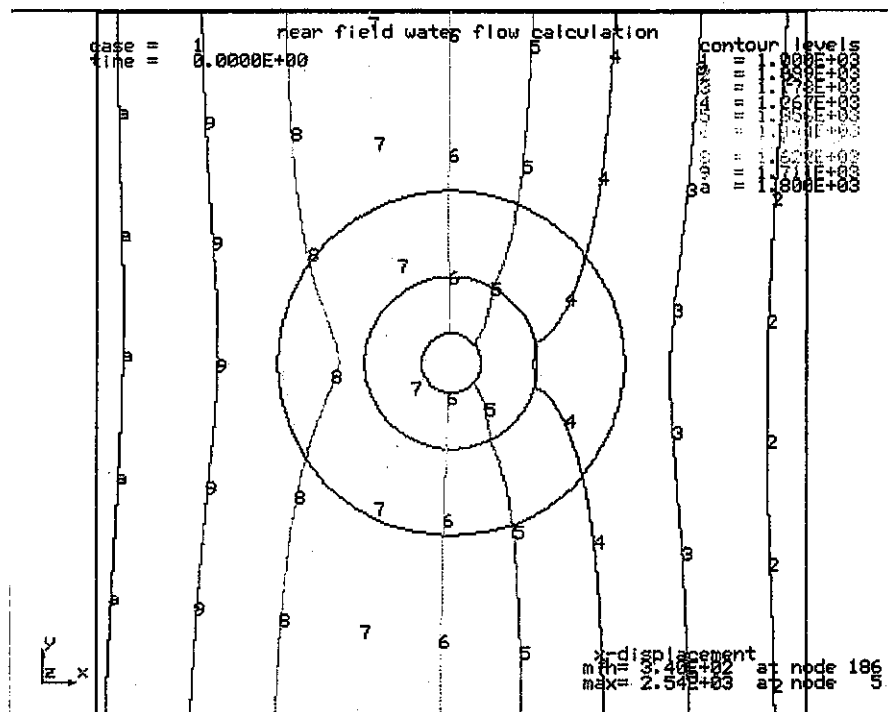


図4.6-3 case06 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

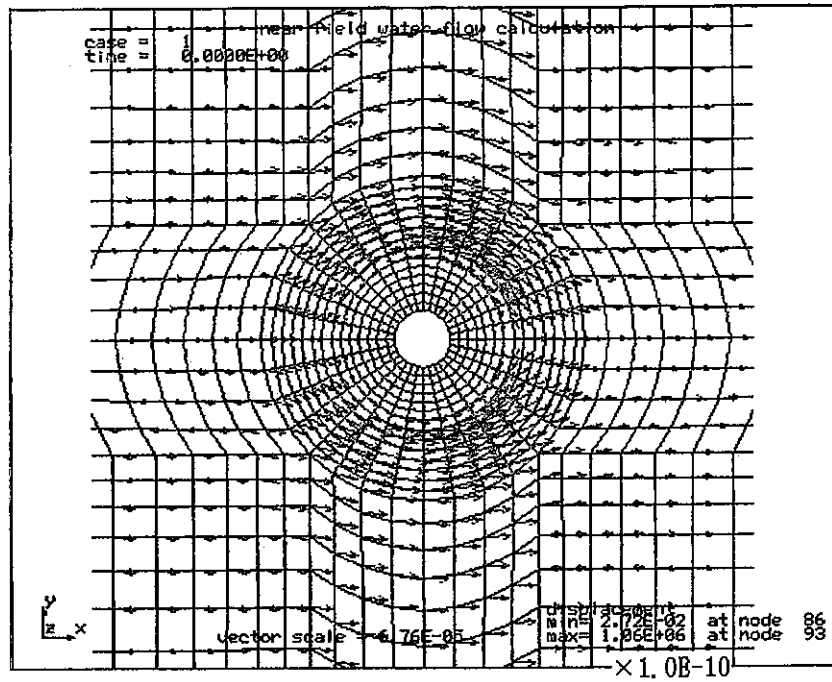
	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-04
岩体	0.01	1.0E-04

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.60$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

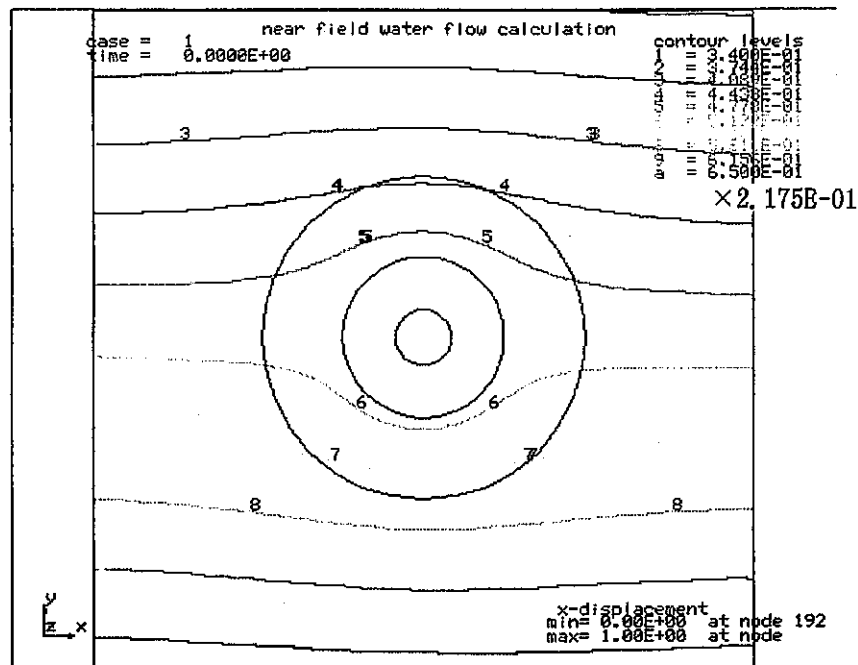


全水頭分布図

図4.7-1 case07 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.7-2 case07 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

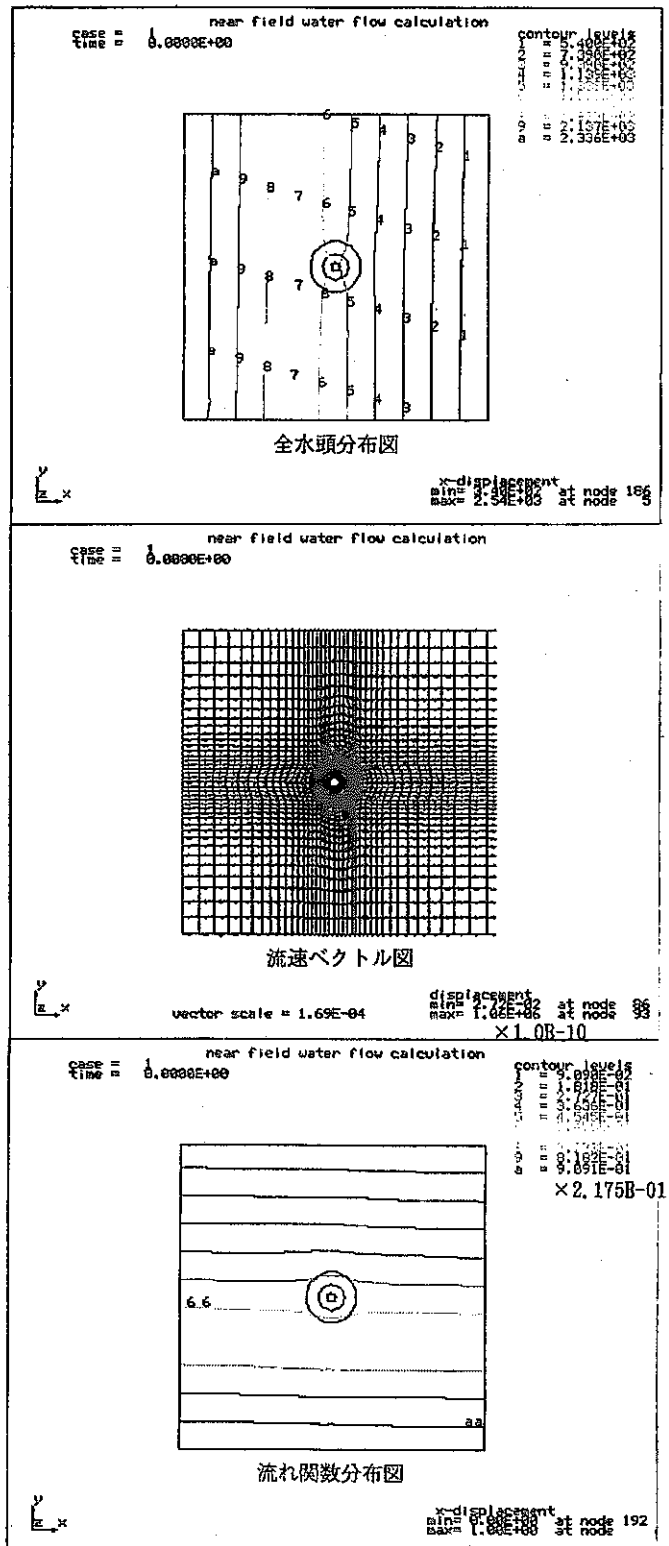
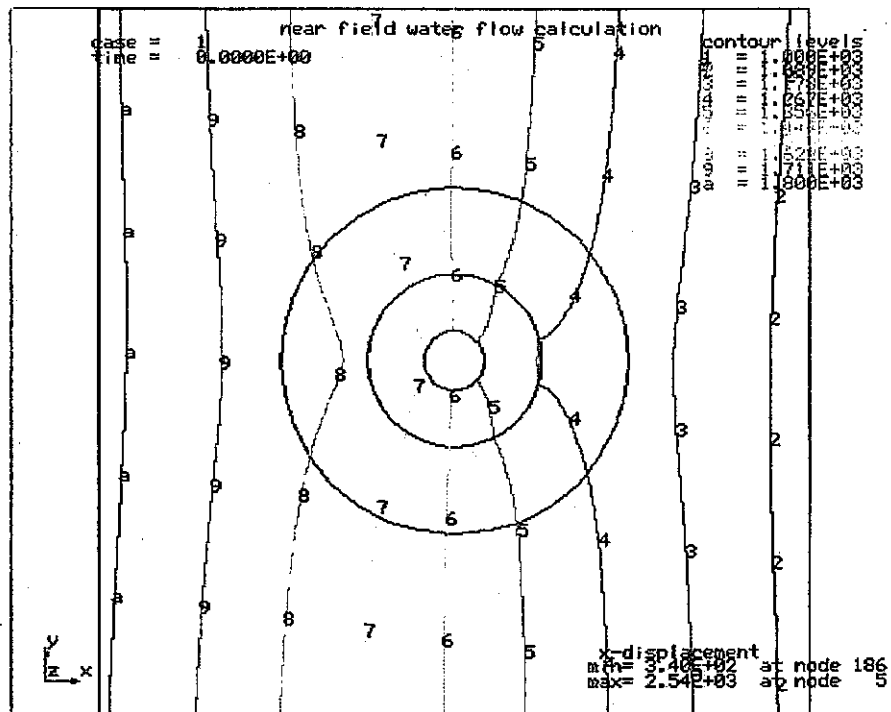


図4.7-3 case07 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

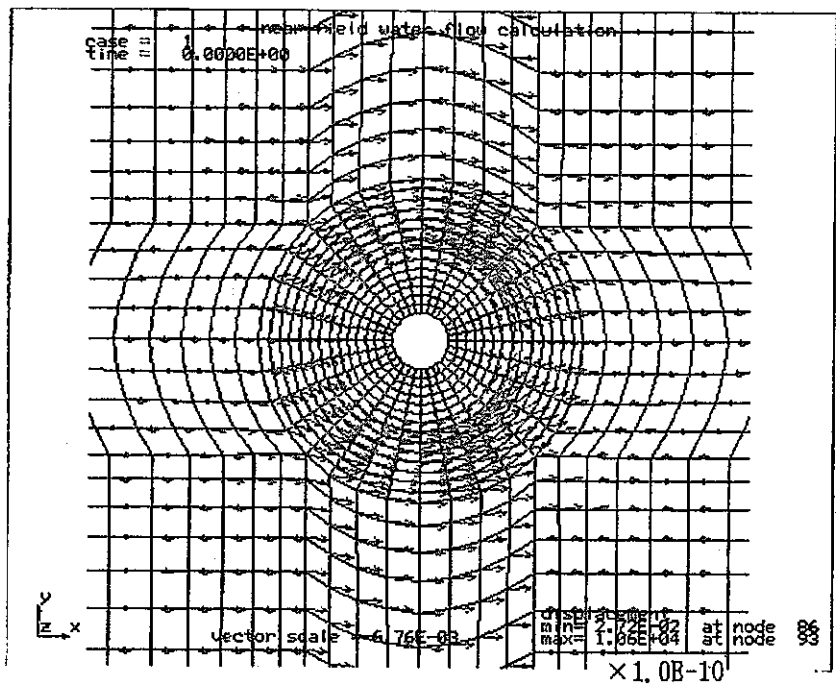
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-06
岩体	0.01	1.0E-06

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.60$   $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

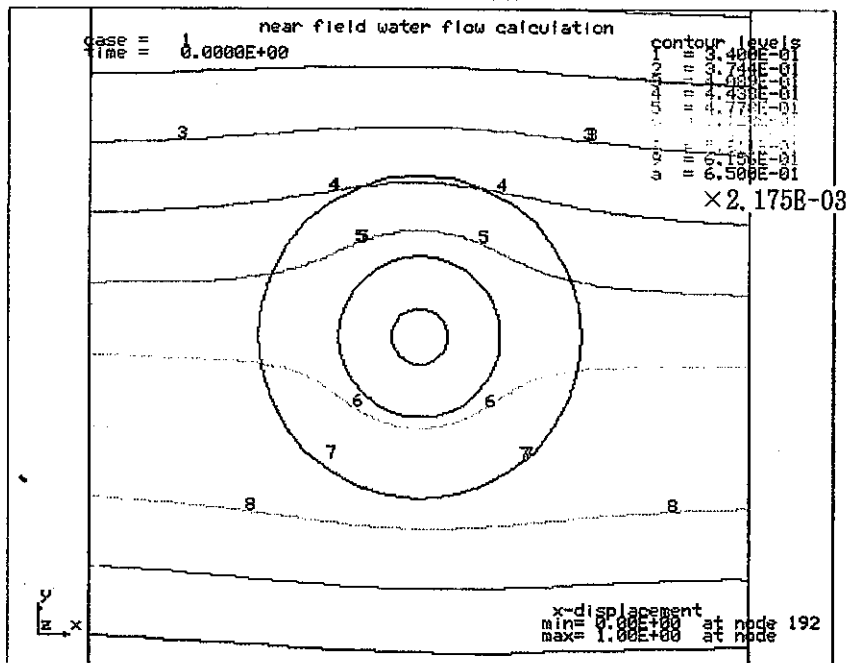


全水頭分布図

図4.8-1 case08 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.8-2 case08 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

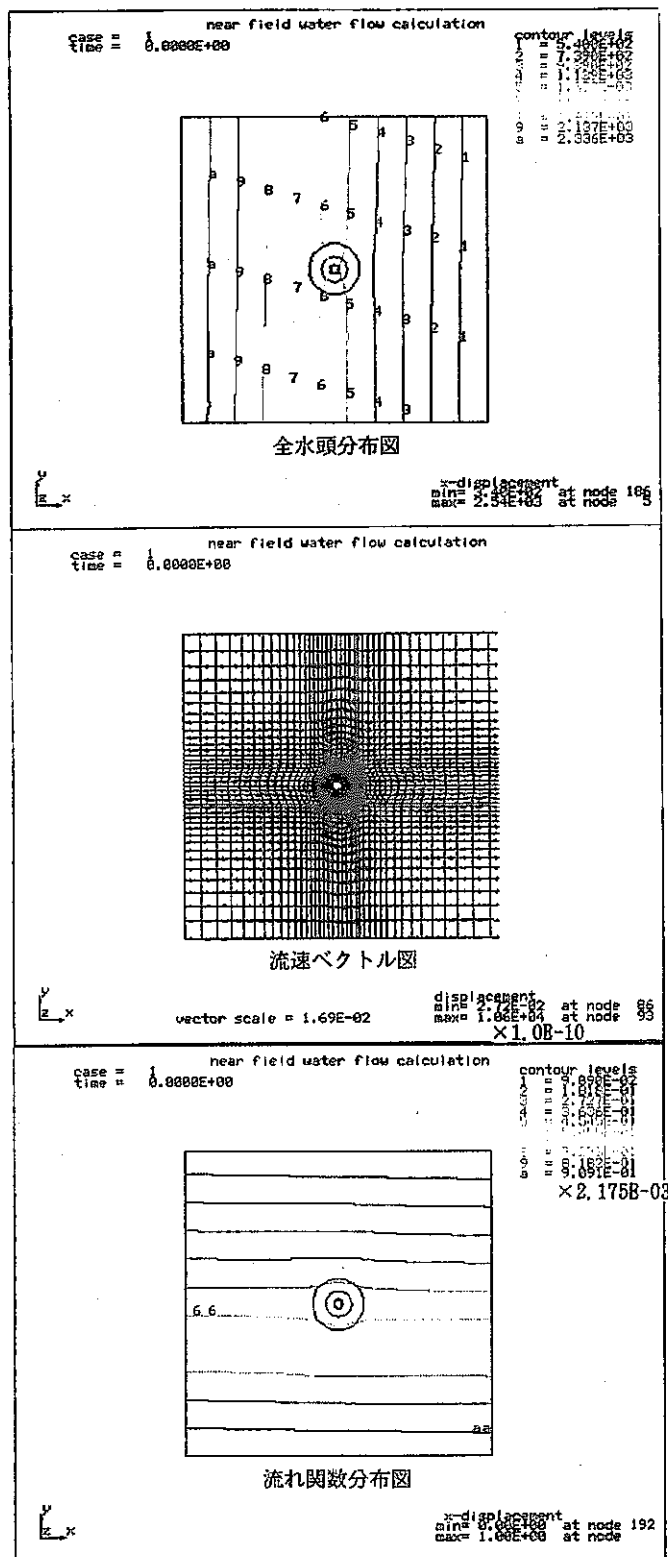
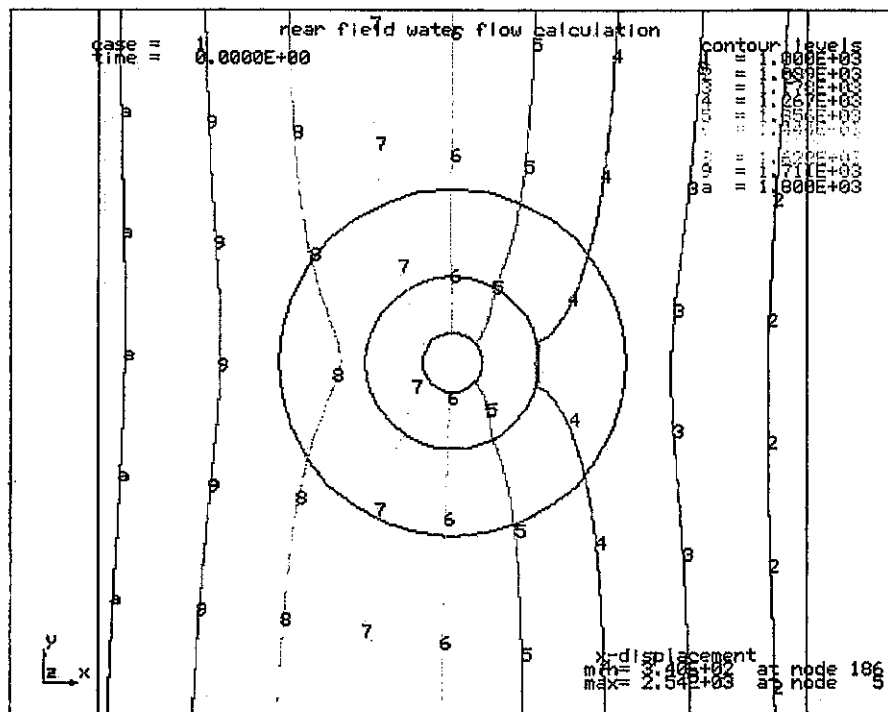


図4.8-3 case08 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-08
岩体	0.01	1.0E-08

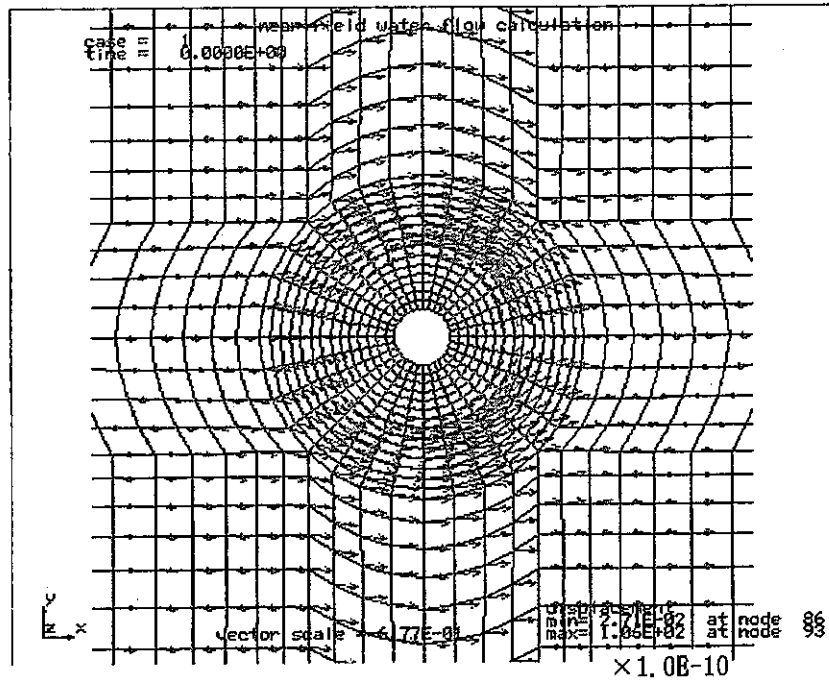
$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.60$   $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$



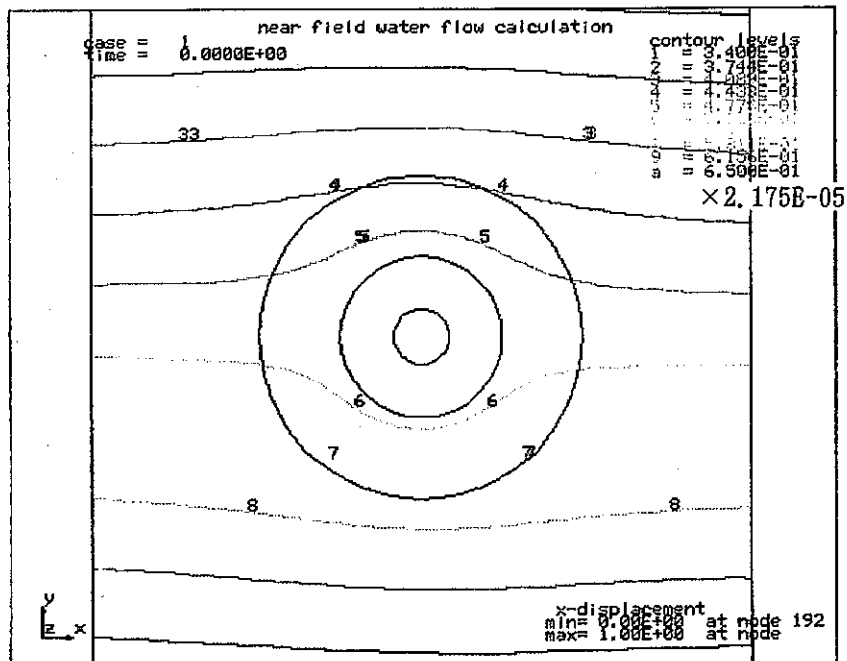
全水頭分布図

図4.9-1 case09 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍





流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.9-2 case09 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍

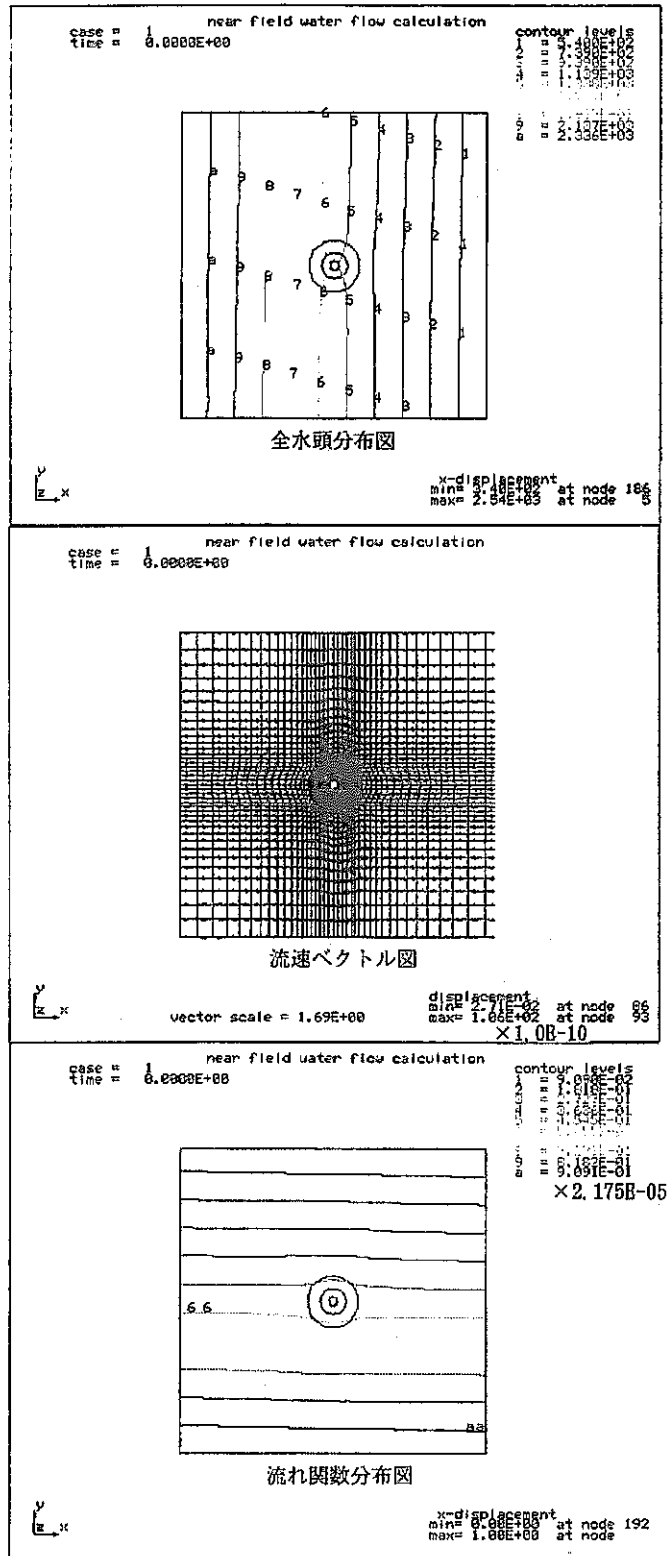
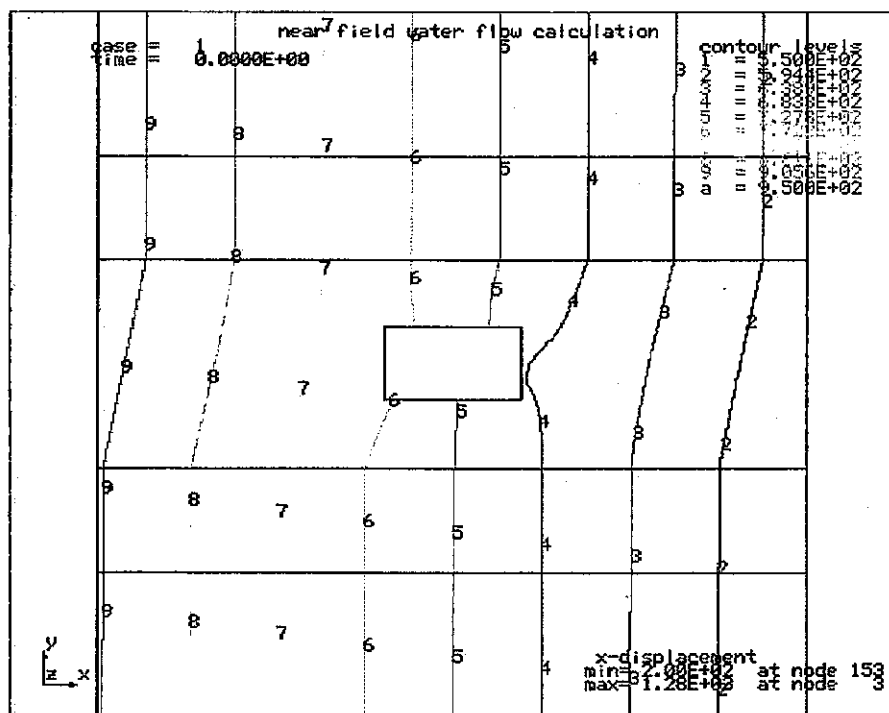


図4.9-3 case09 (固化体半径方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

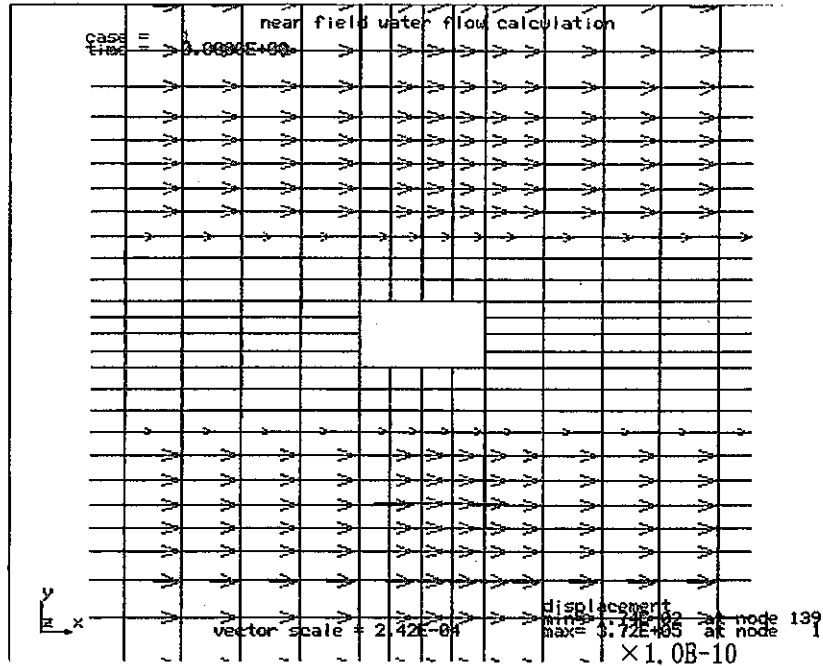
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-04
岩体	0.01	1.0E-04

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.35$   $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

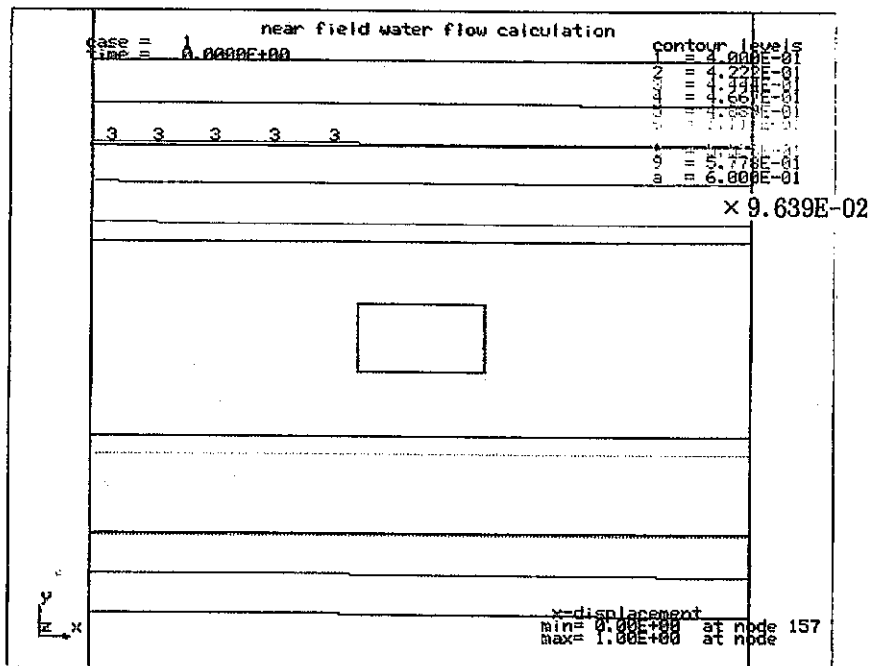


全水頭分布図

図4.10-1 case10 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.10-2 case10 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

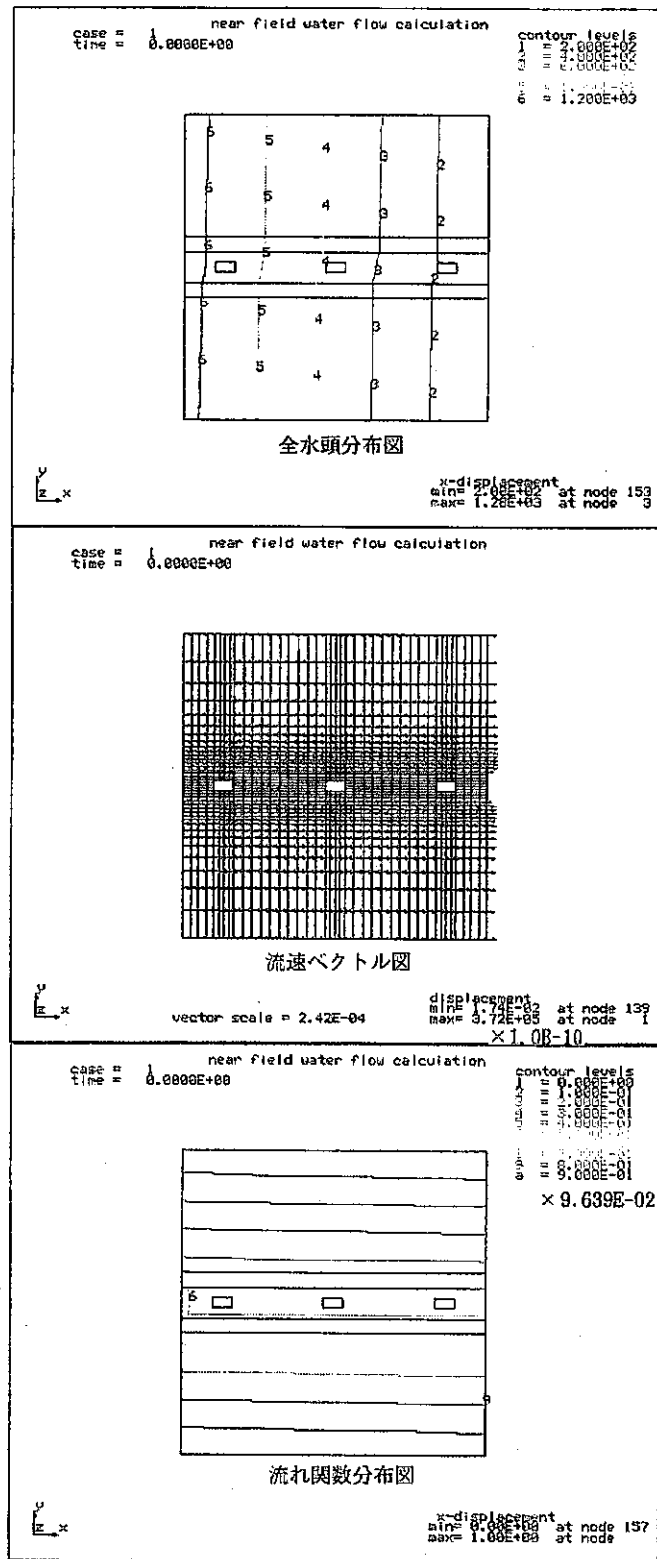
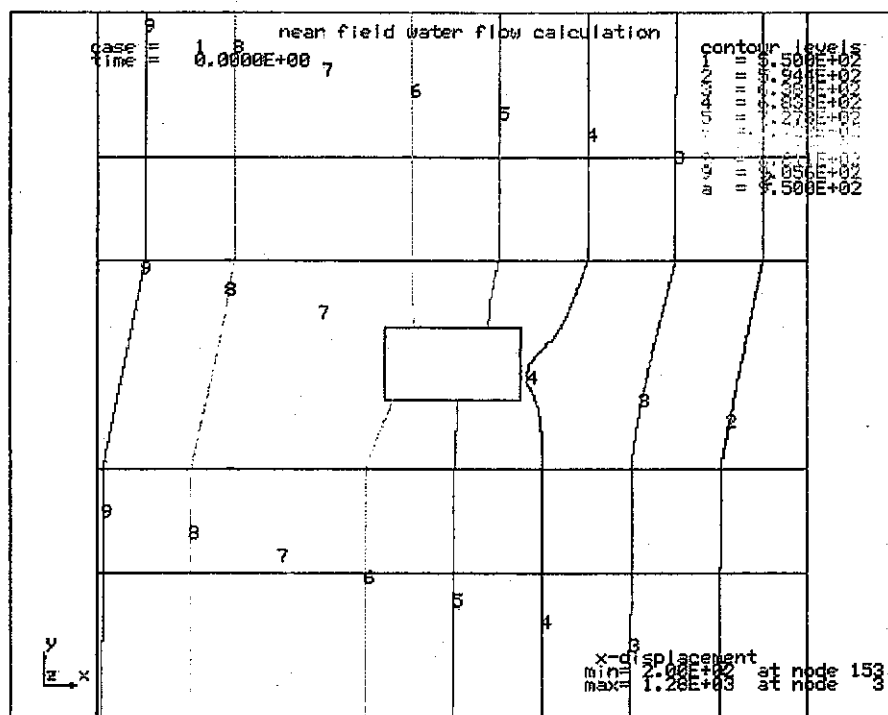


図4.10-3 case10 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

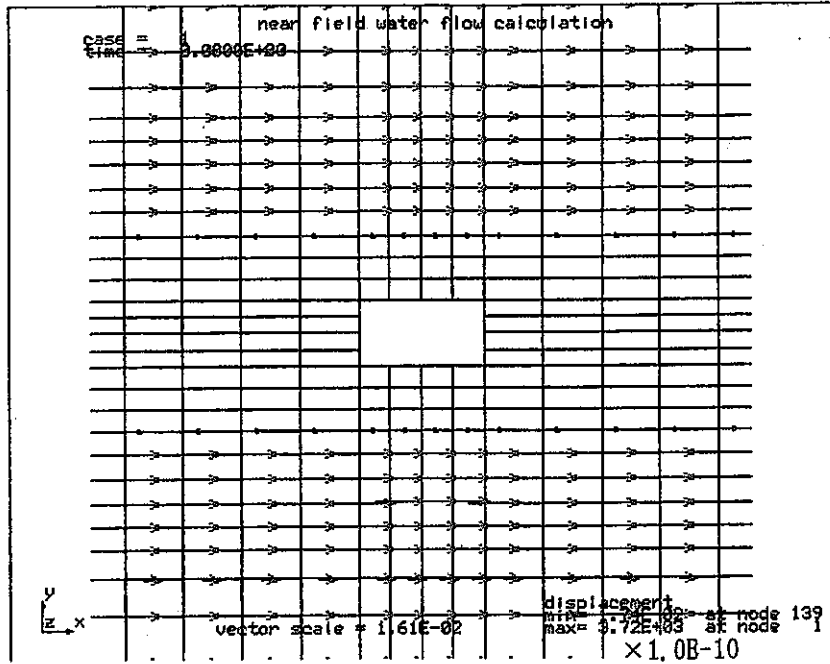
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-06
岩体	0.01	1.0E-06

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.35$   $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

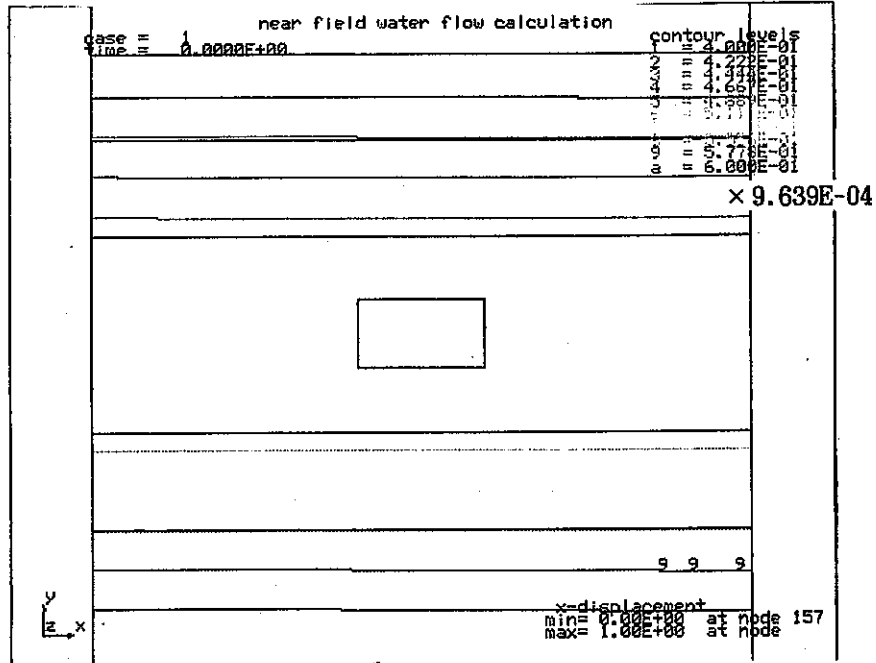


全水頭分布図

図4.11-1 case11 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.11-2 case11 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

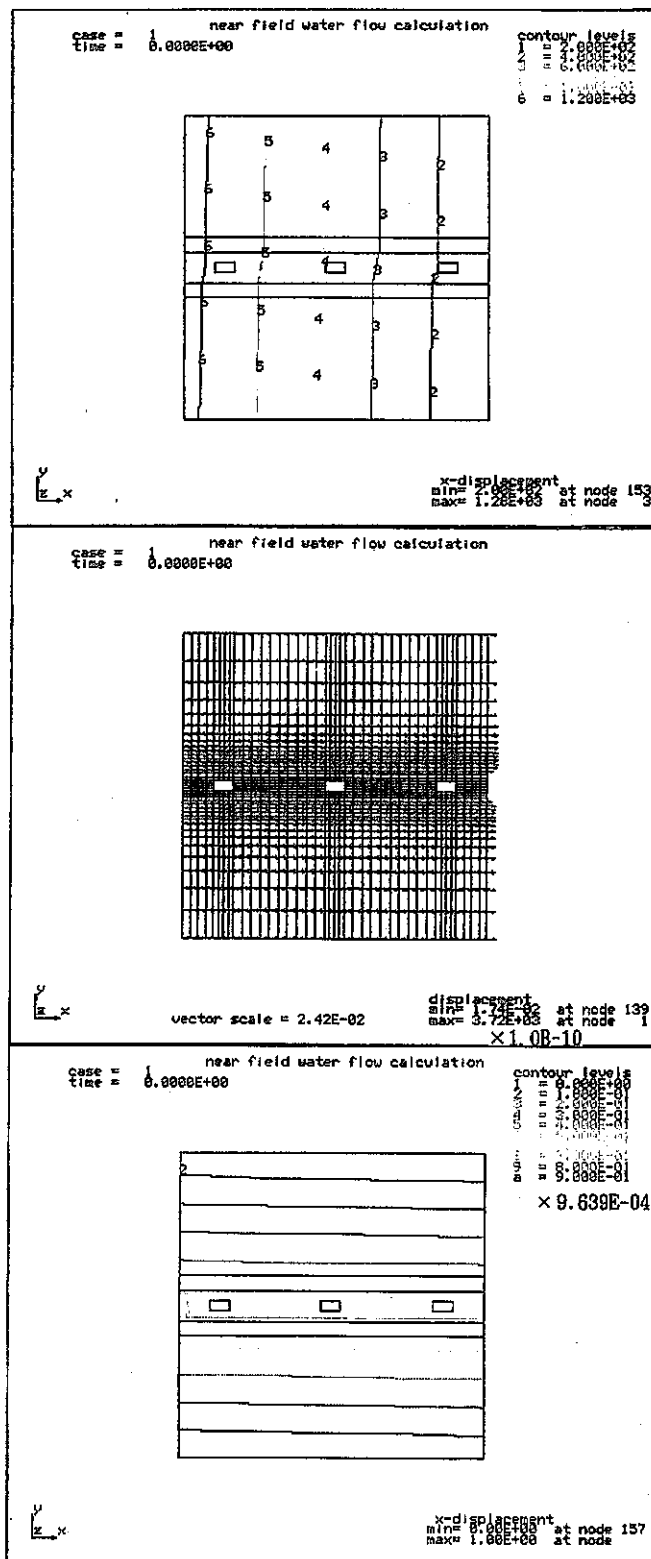
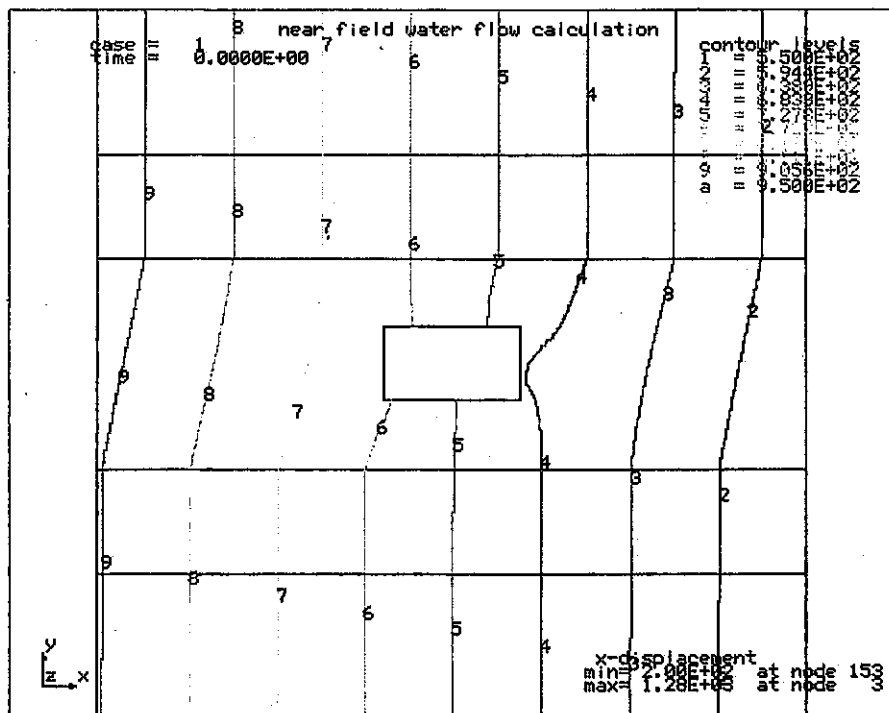


図4.11-3 case11 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体



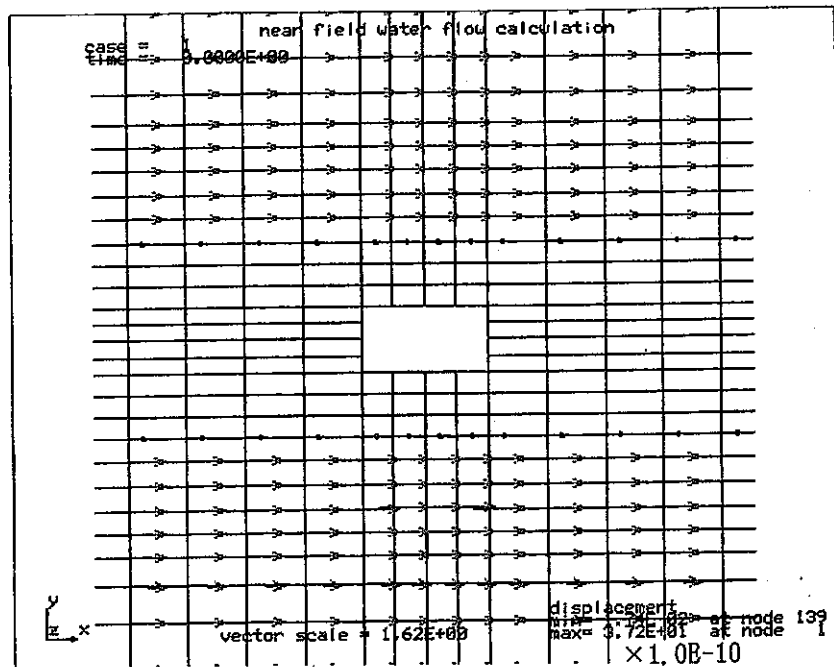
	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-08
岩体	0.01	1.0E-08

$i_x = \Delta H_x / L_x = 0.35$ ,  $i_z = \Delta H_z / L_z = 0.01$

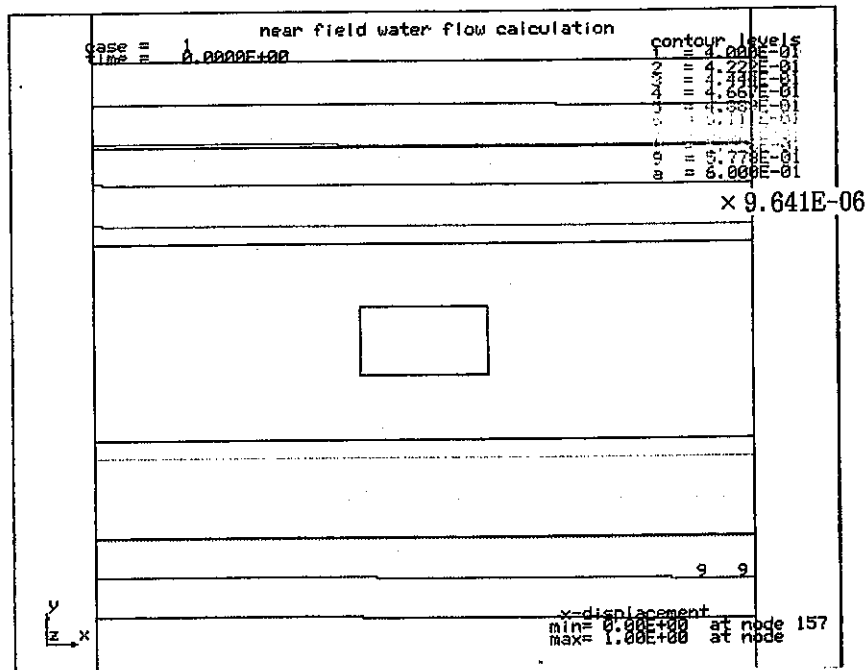


全水頭分布図

図4.12-1 case12 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.12-2 case12 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍

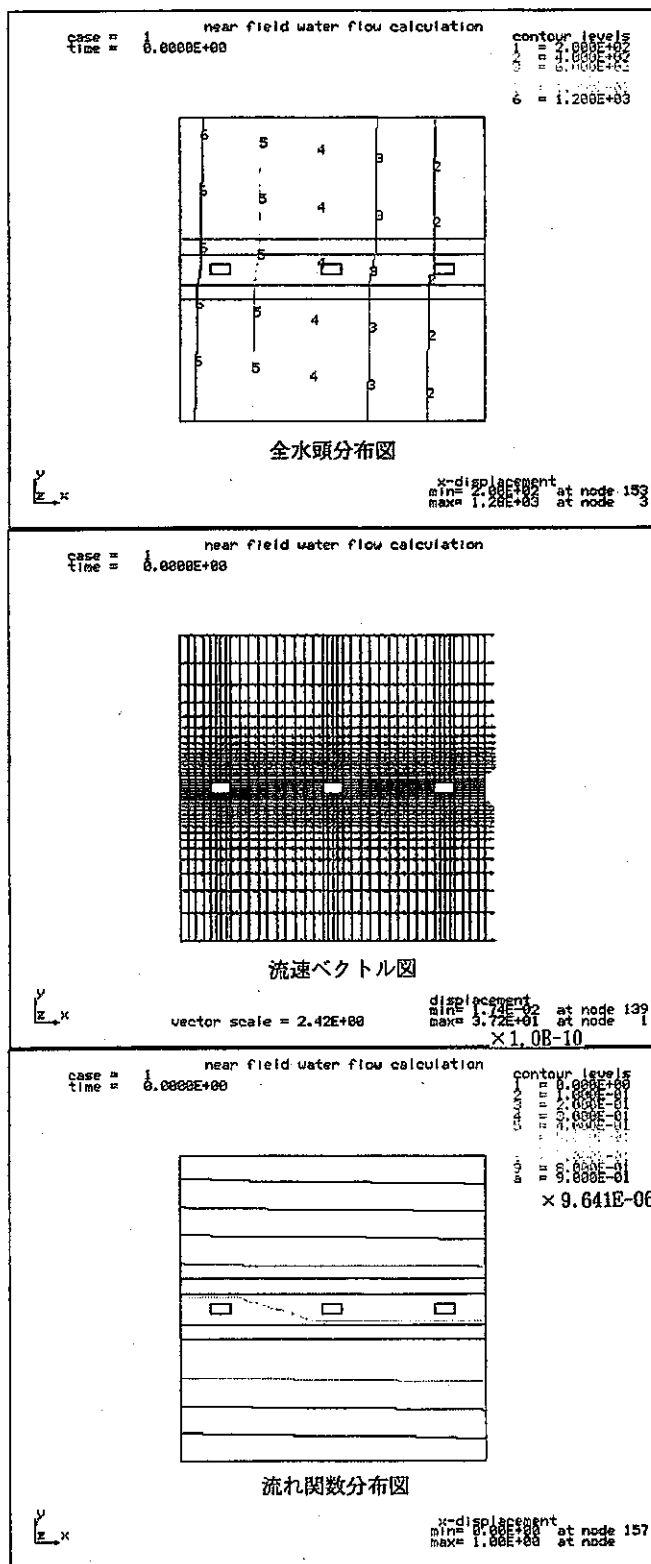
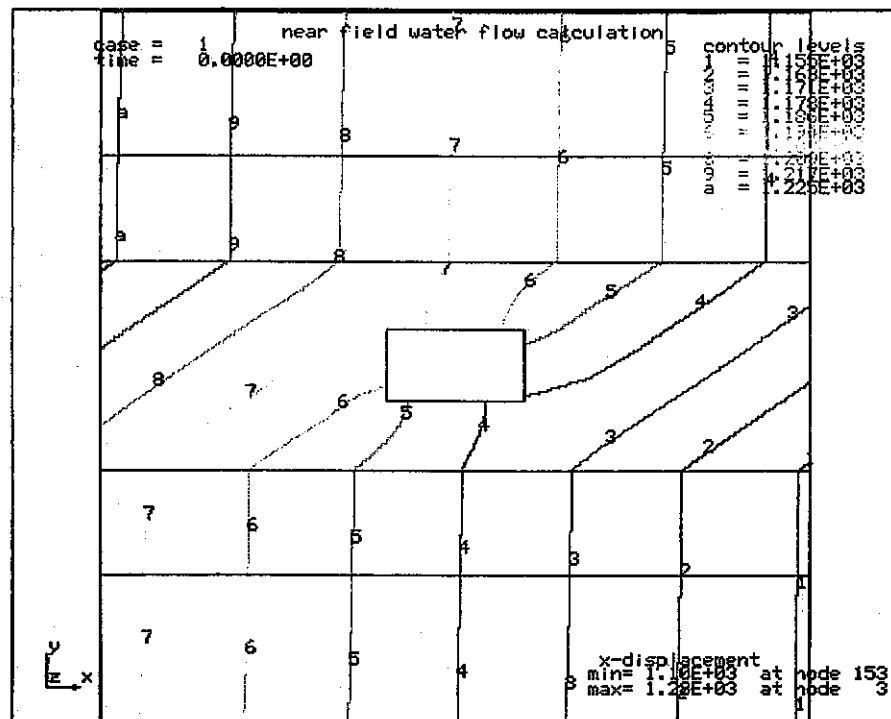


図4.12-3 case12 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

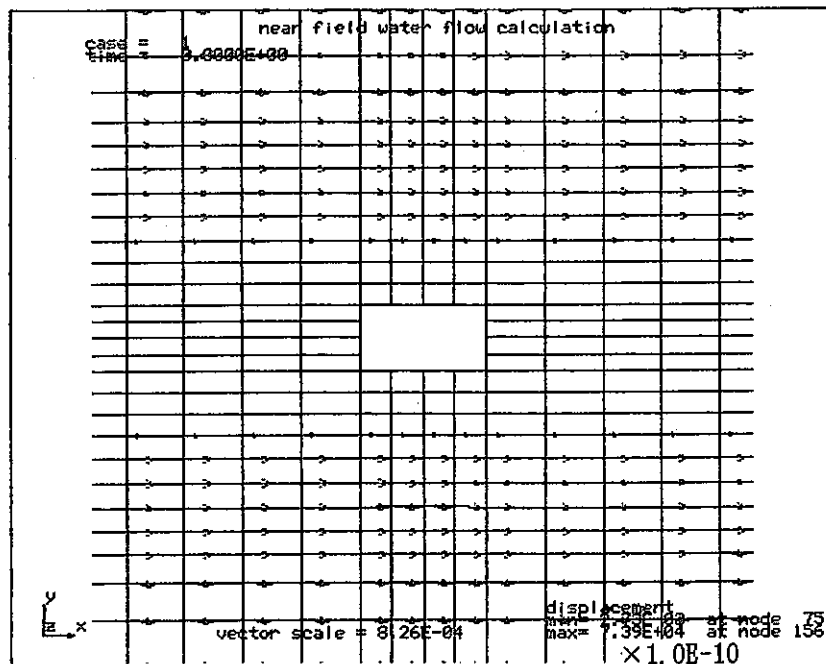
	空隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-04
岩体	0.01	1.0E-04

$i_x = \Delta H_x / L_x = 0.05$ ,  $i_z = \Delta H_z / L_z = 0.01$

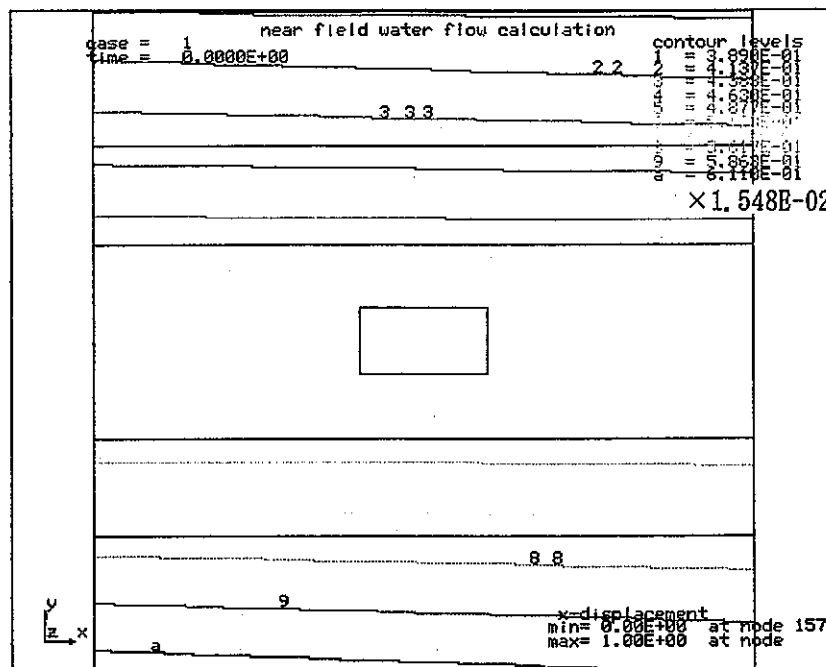


全水頭分布図

図4.13-1 case13 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.13-2 case13 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

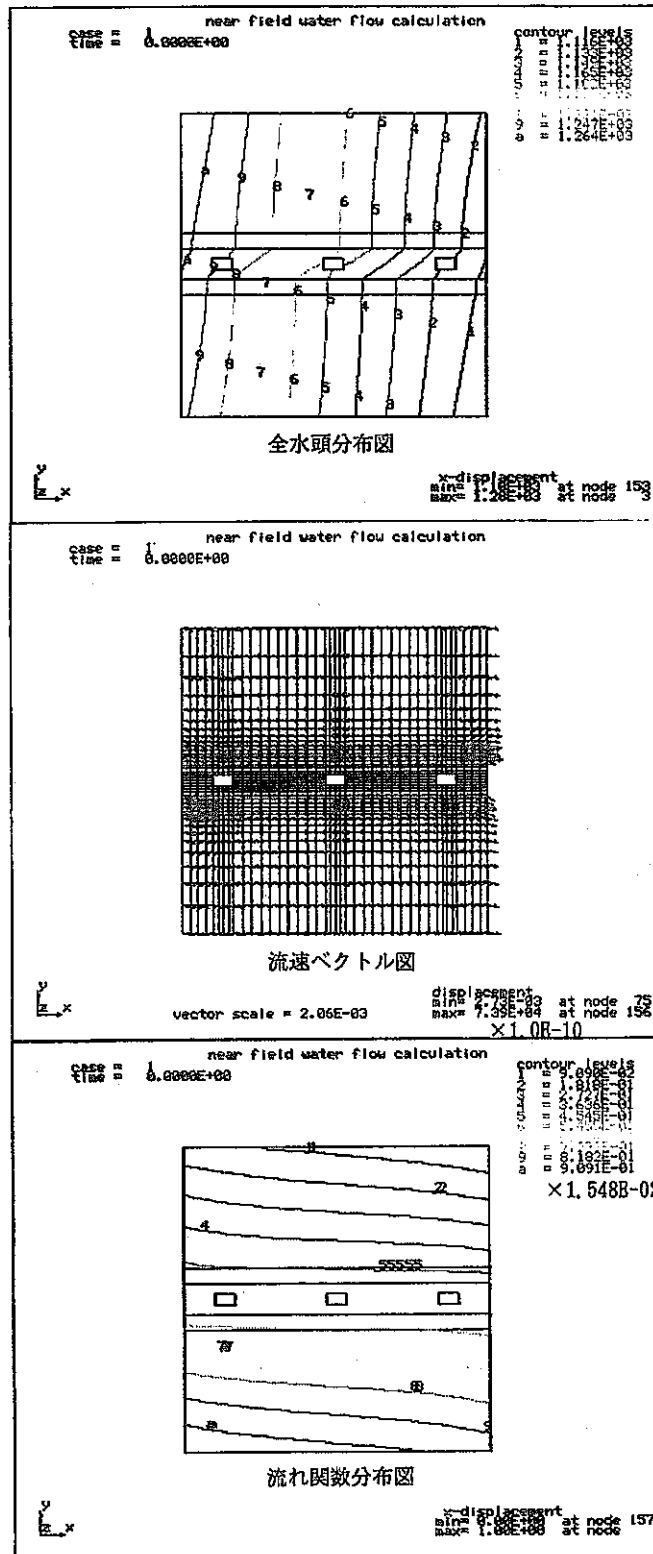
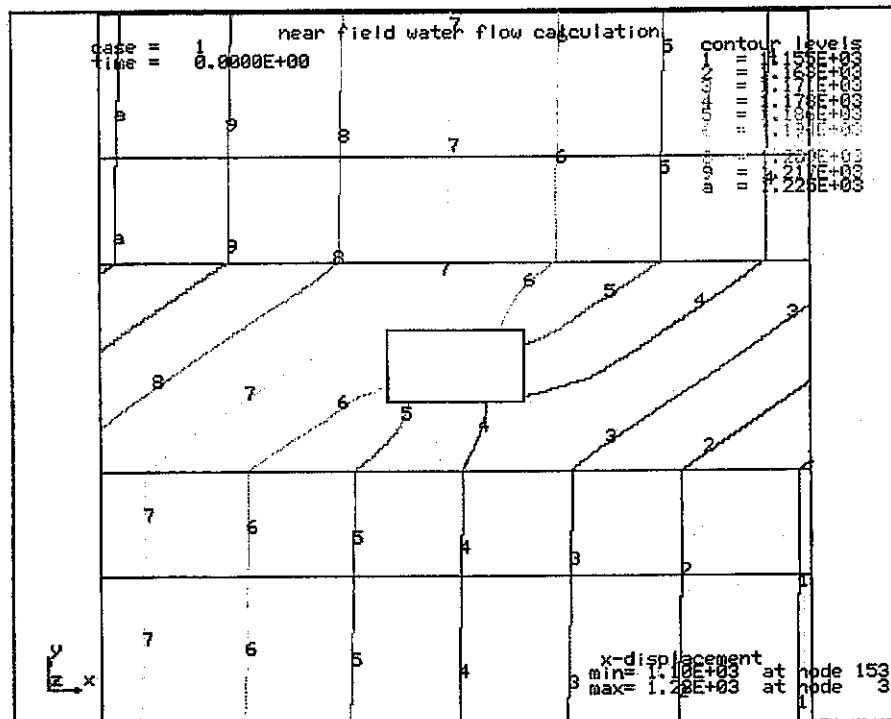


図4.13-3 case13 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

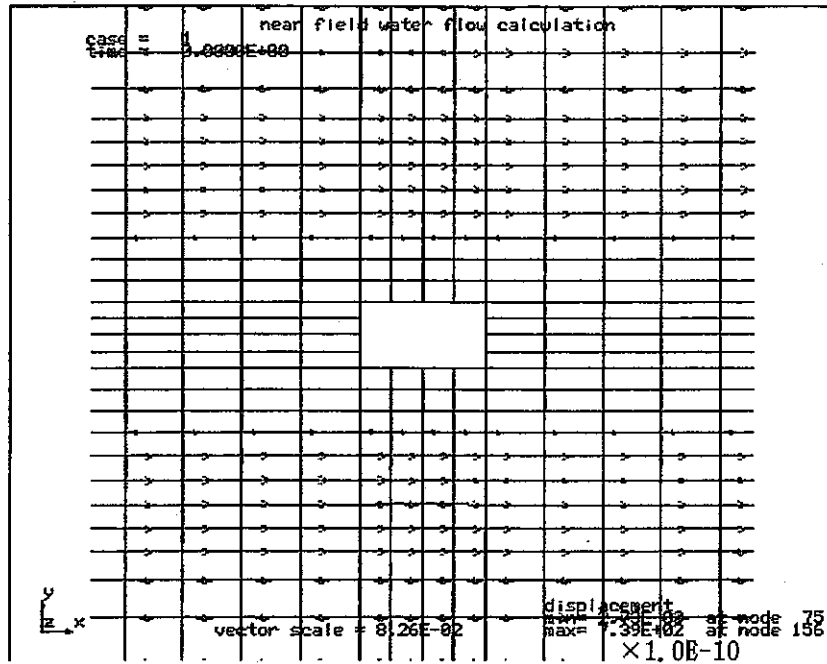
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-06
岩体	0.01	1.0E-06

$i_x = \Delta H_x / A_x = 0.05$ ,  $i_z = \Delta H_z / A_z = 0.01$

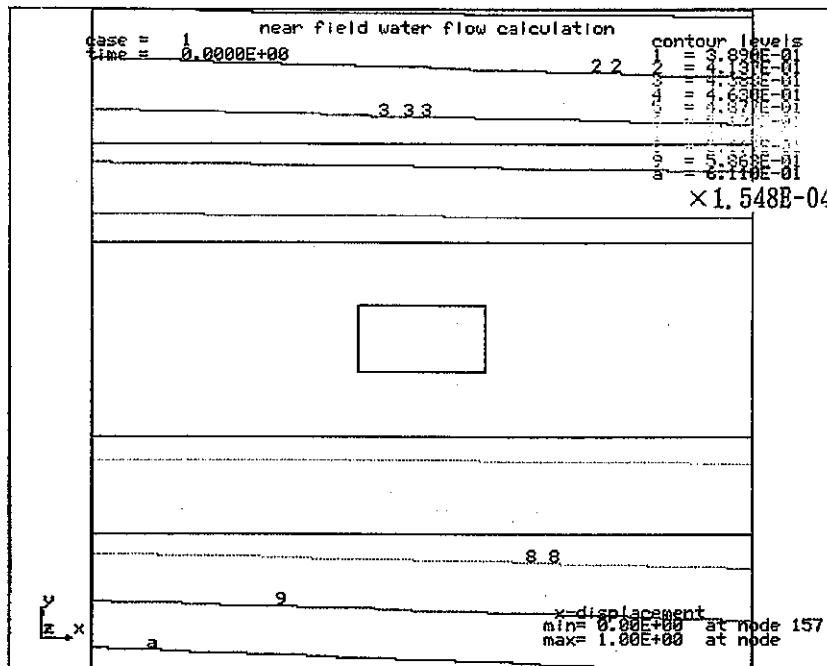


全水頭分布図

図4.14-1 case14 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.14-2 case14 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



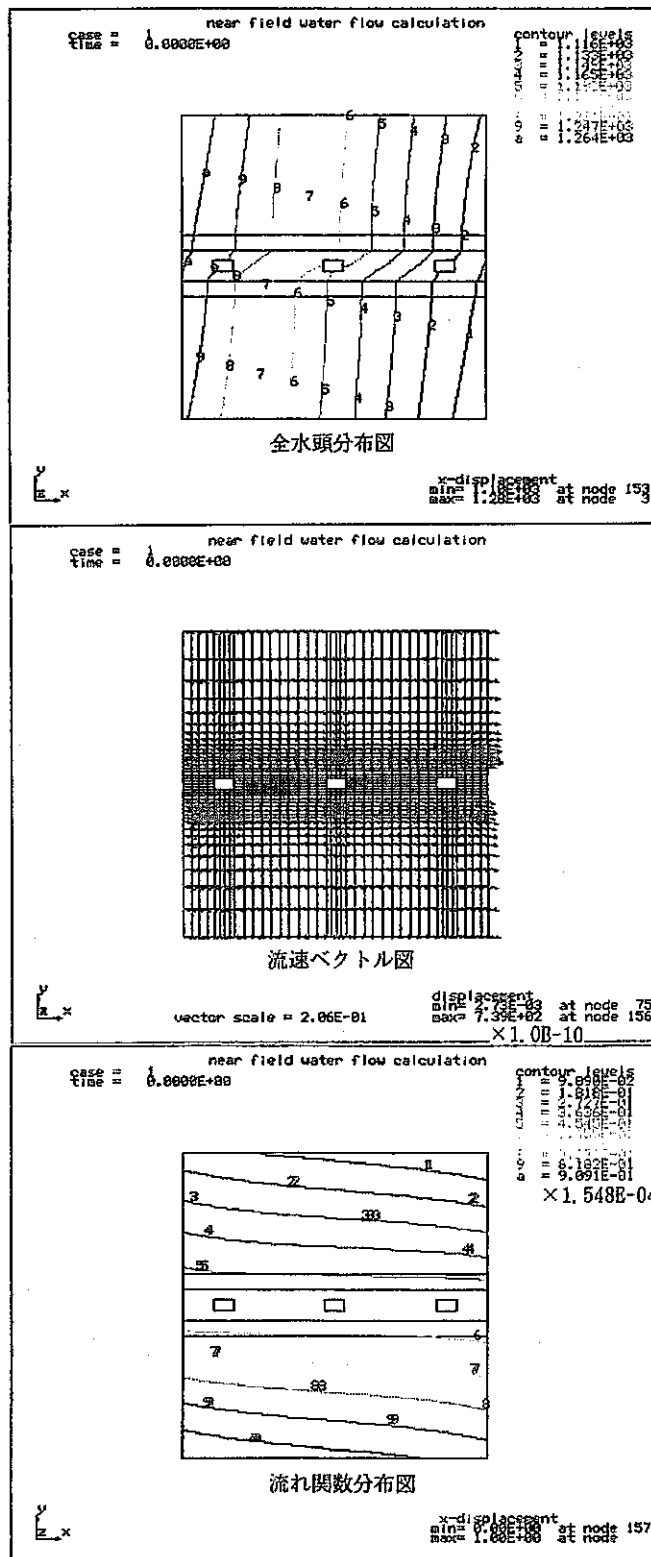
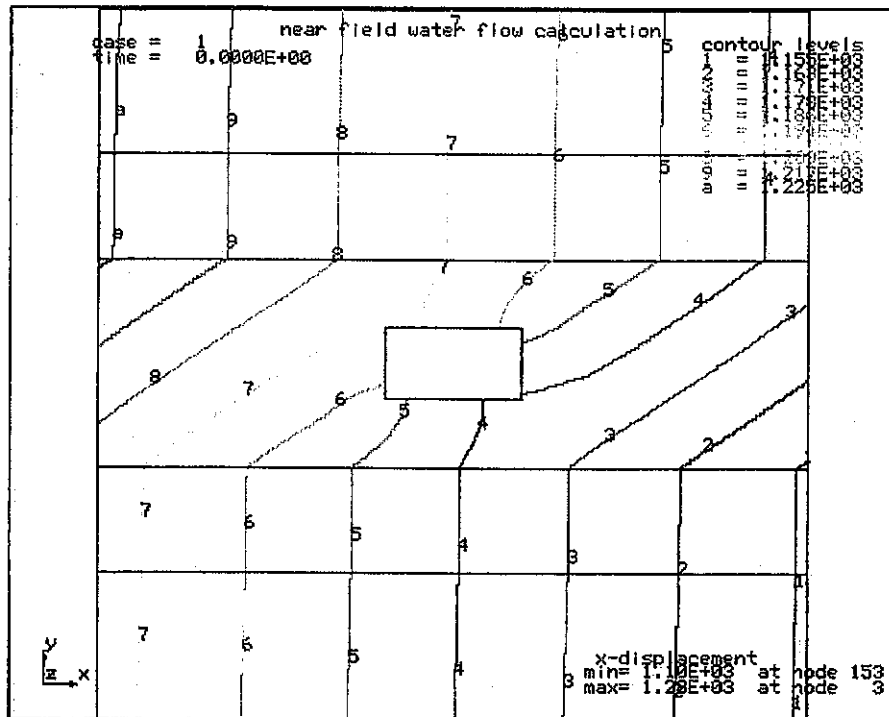


図4.14-3 case14 (固体体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

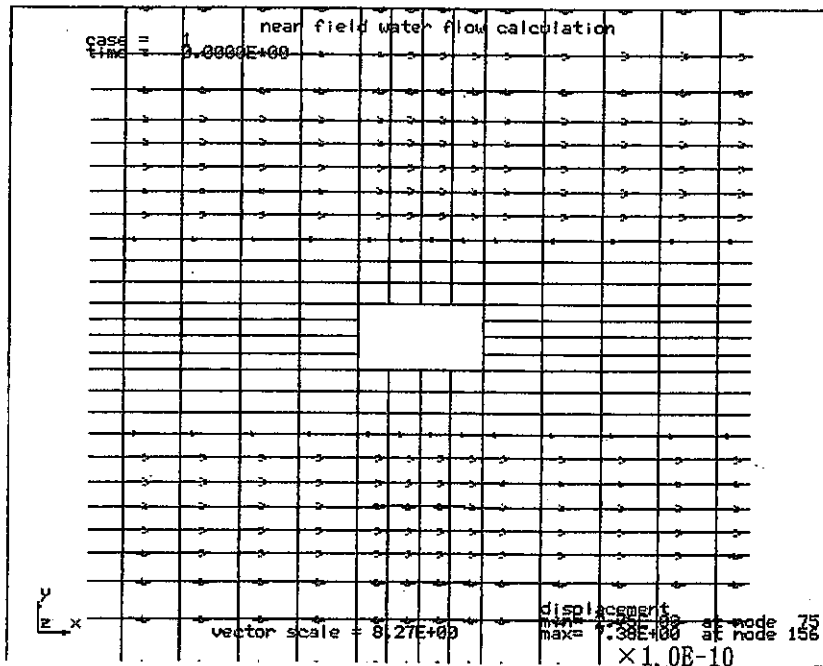
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-08
岩体	0.01	1.0E-08

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.05$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

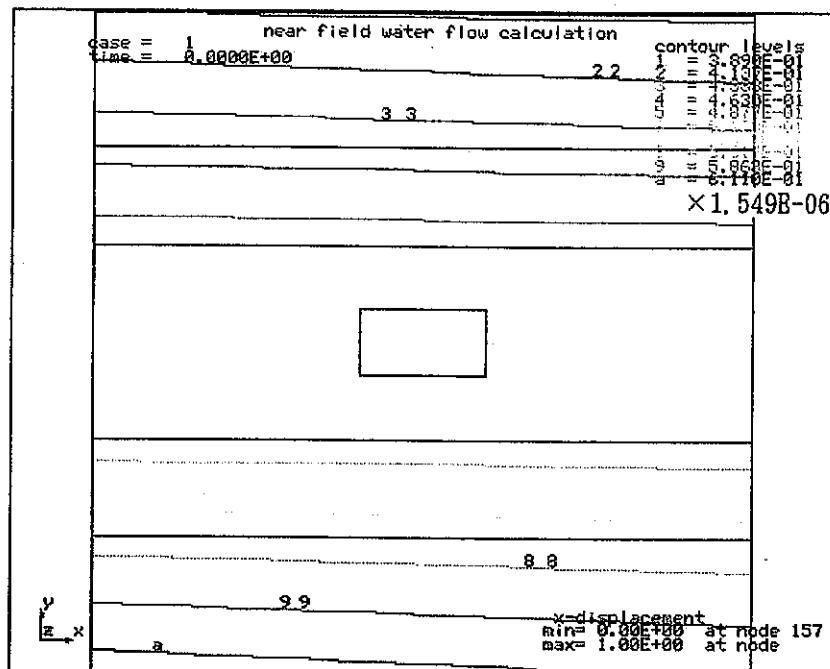


全水頭分布図

図4.15-1 case15 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 一 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.15-2 case15 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

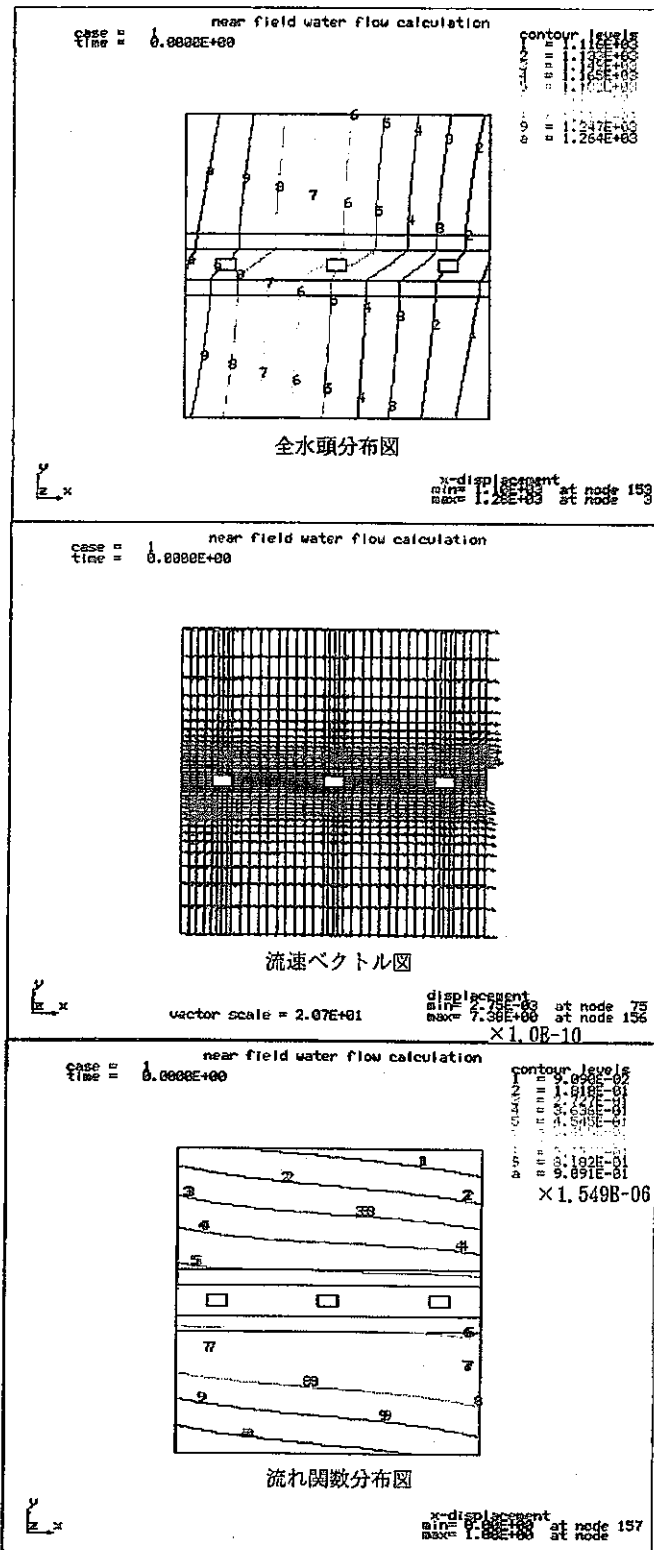
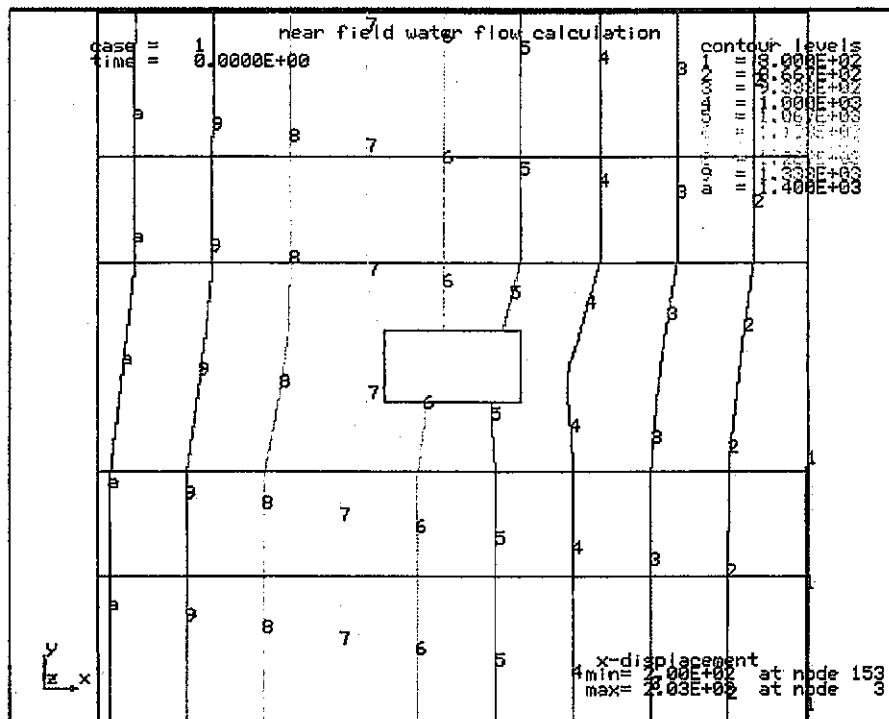


図4.15-3 case15 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

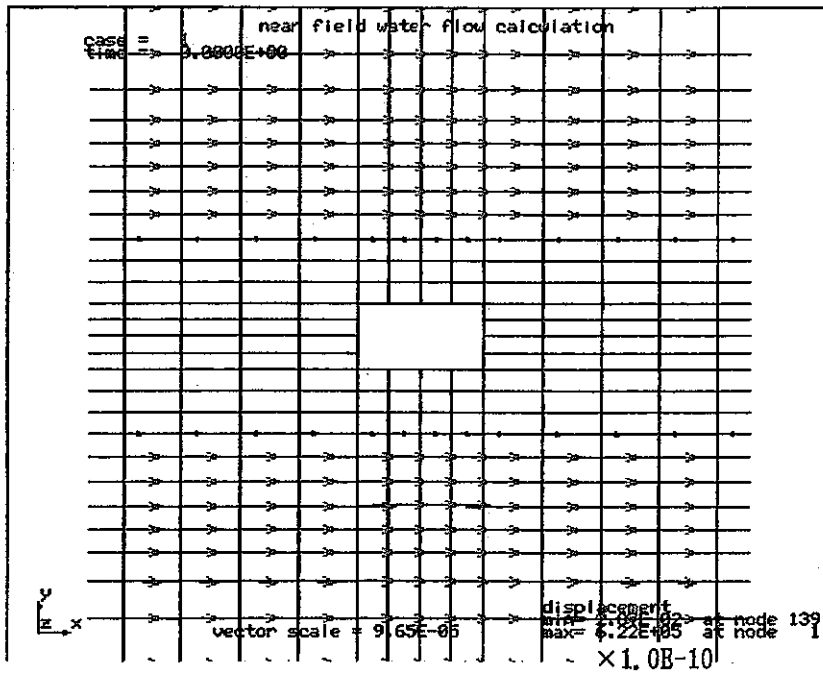
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-04
岩体	0.01	1.0E-04

$i_x = \Delta H_x / l_x = 0.60$ ,  $i_z = \Delta H_z / l_z = 0.01$

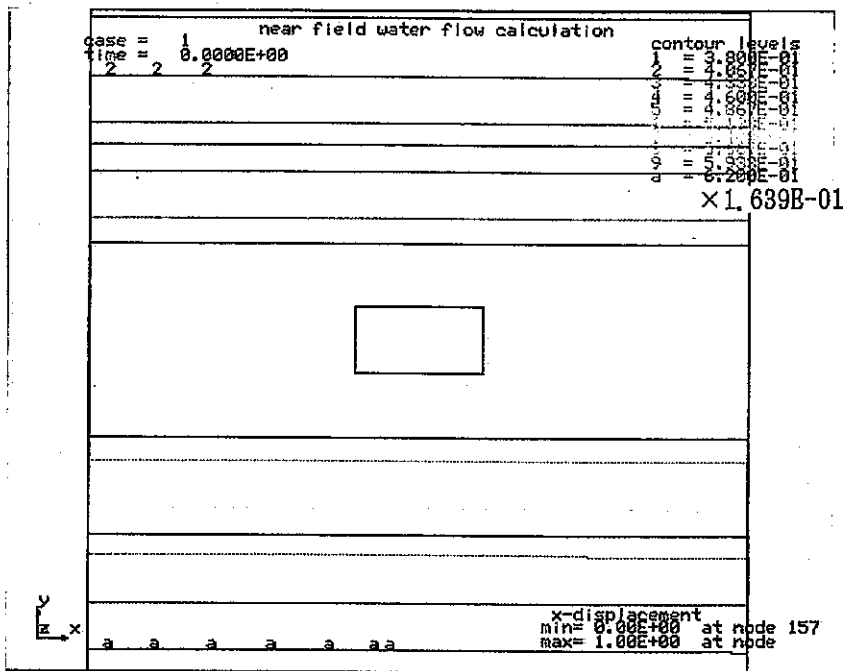


全水頭分布図

図4.16-1 case16 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.16-2 case16 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍

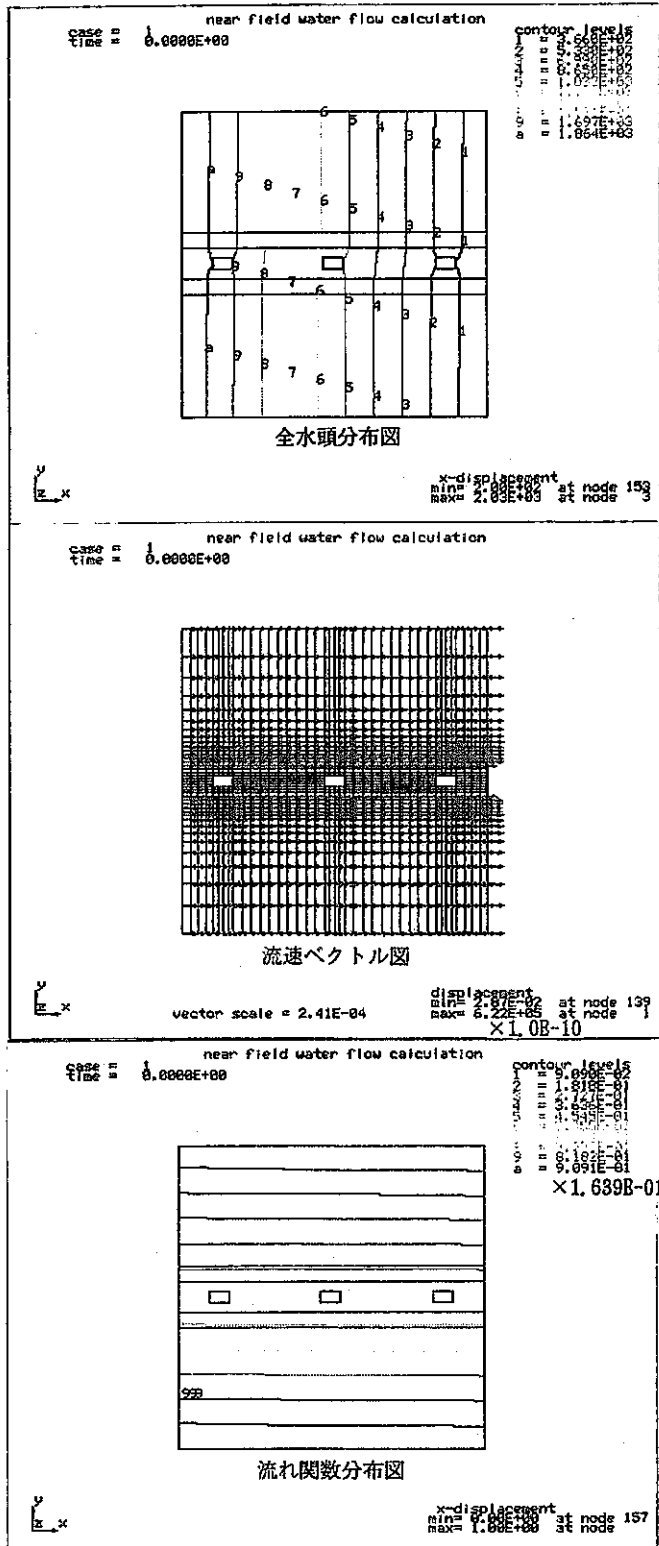
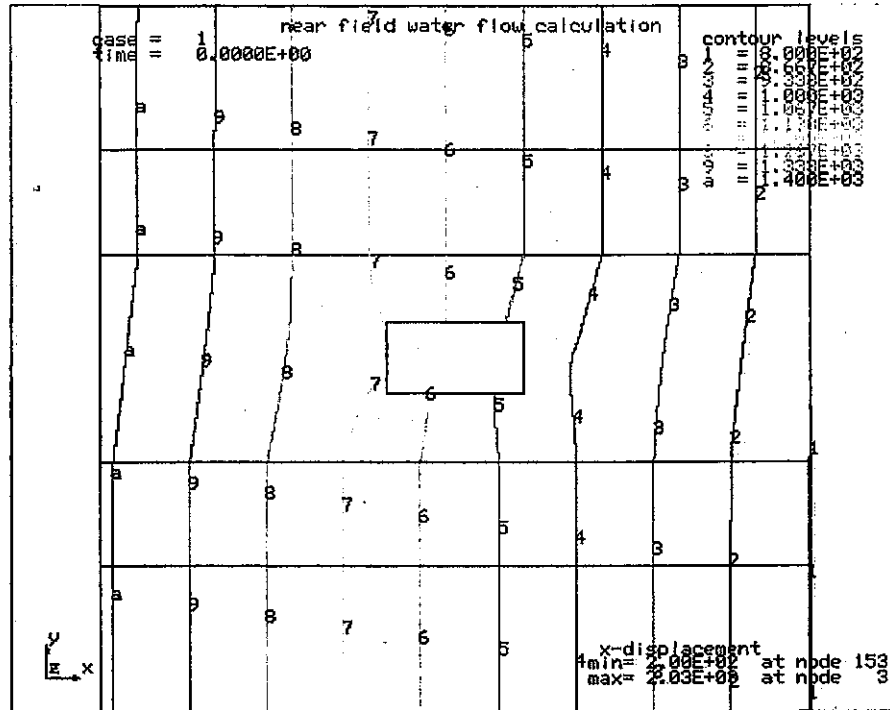


図4.16-3 case16 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-06
岩体	0.01	1.0E-06

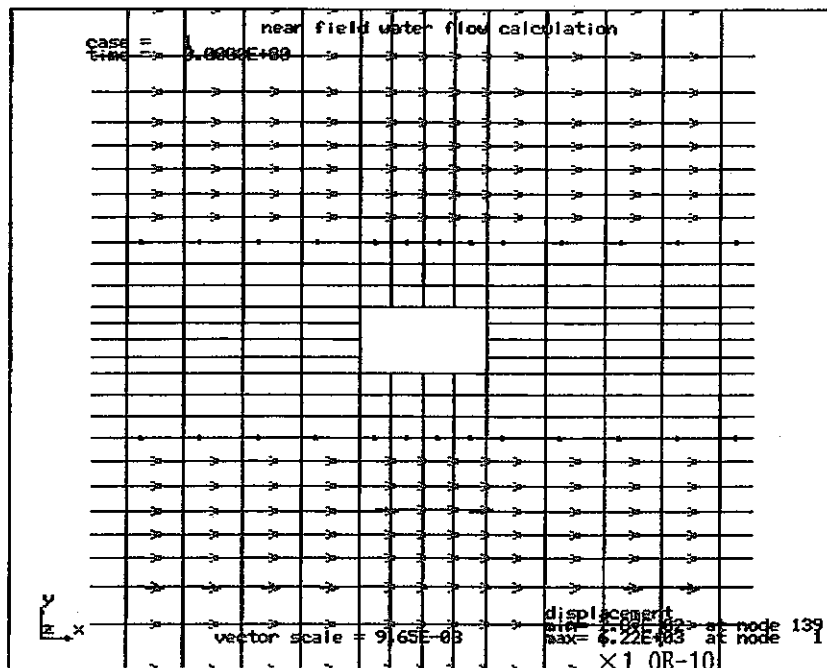
$i_x = \Delta H_x / L_x = 0.60$ ,  $i_z = \Delta H_z / L_z = 0.01$



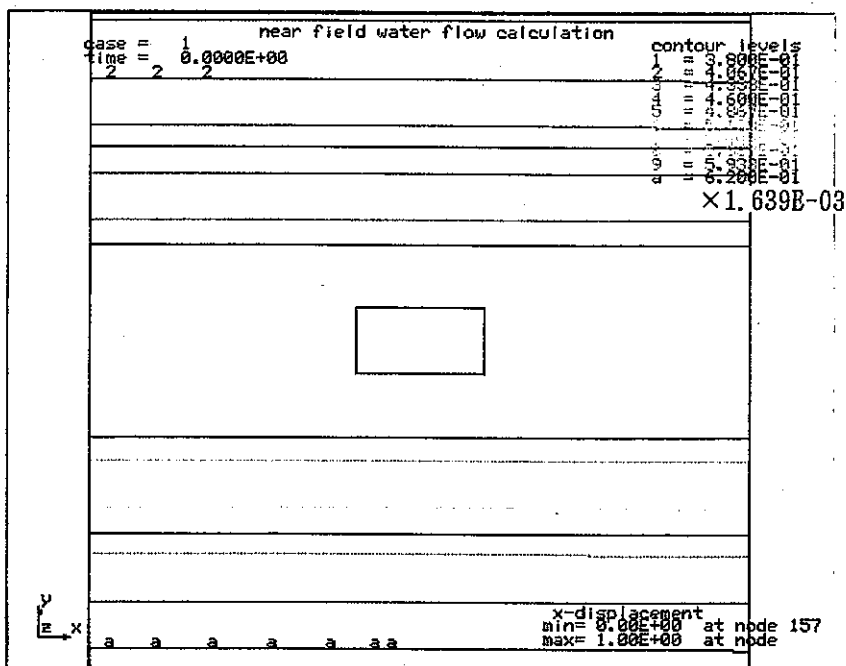
全水頭分布図

図4.17-1 case17 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍





流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.17-2 case17 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍

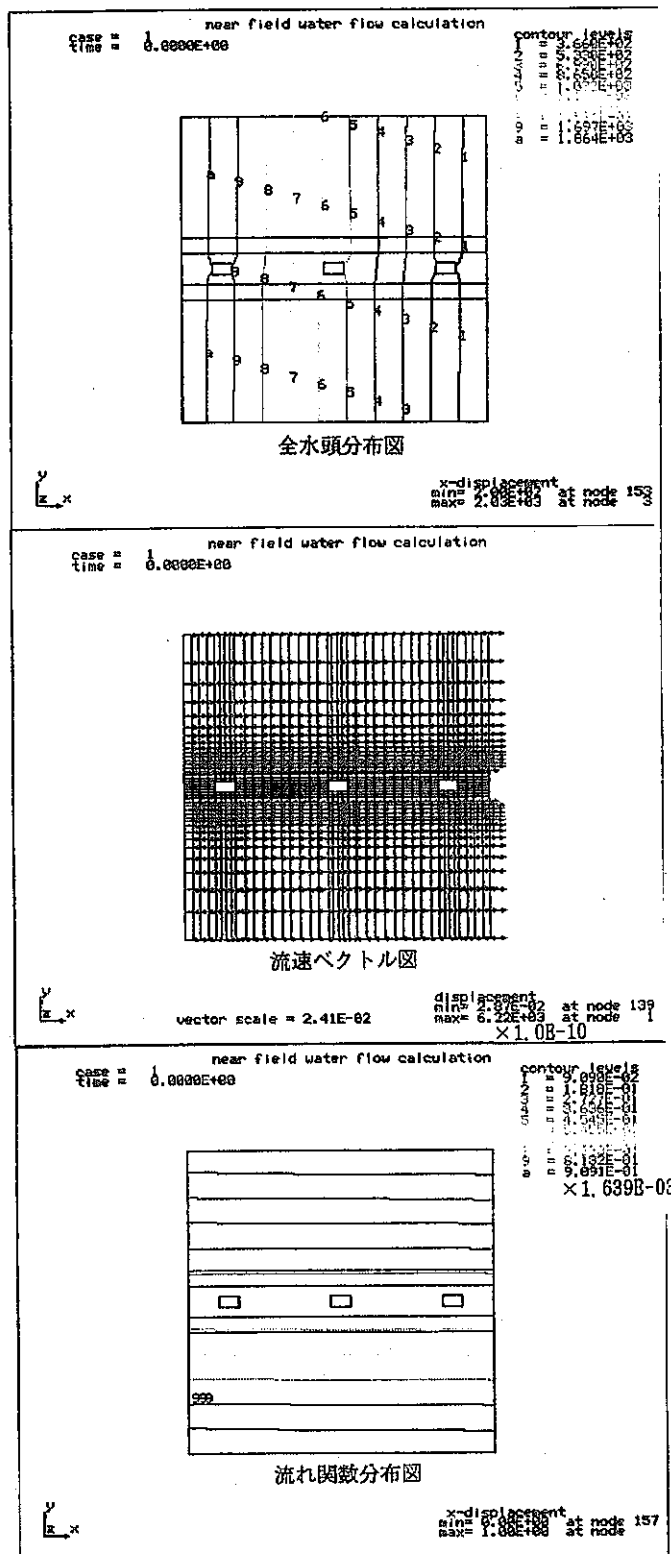
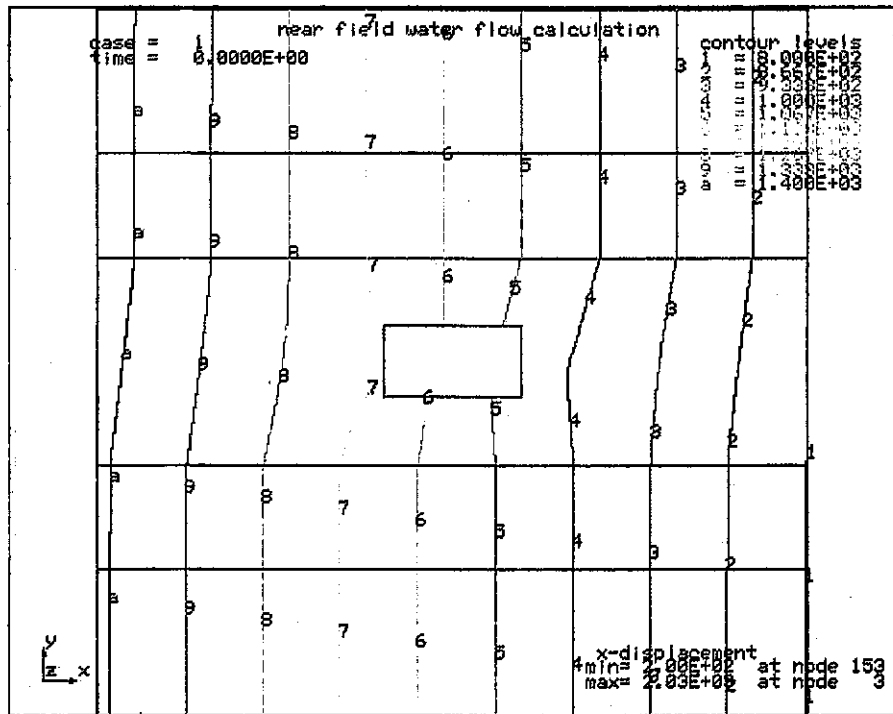


図4.17-3 case17 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 解析領域全体

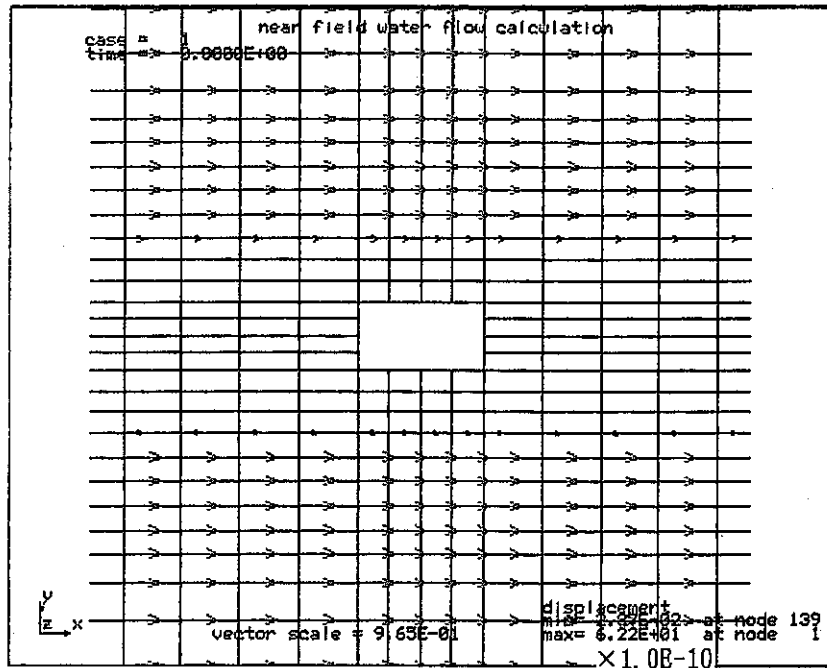
	空隙率 (-)	透水係数 (cm <sup>2</sup> /s)
緩衝材	0.3	1.0E-11
緩み領域	0.01	1.0E-08
岩体	0.01	1.0E-08

$i_x = \Delta H_x / A_x = 0.60$ ,  $i_z = \Delta H_z / A_z = 0.01$

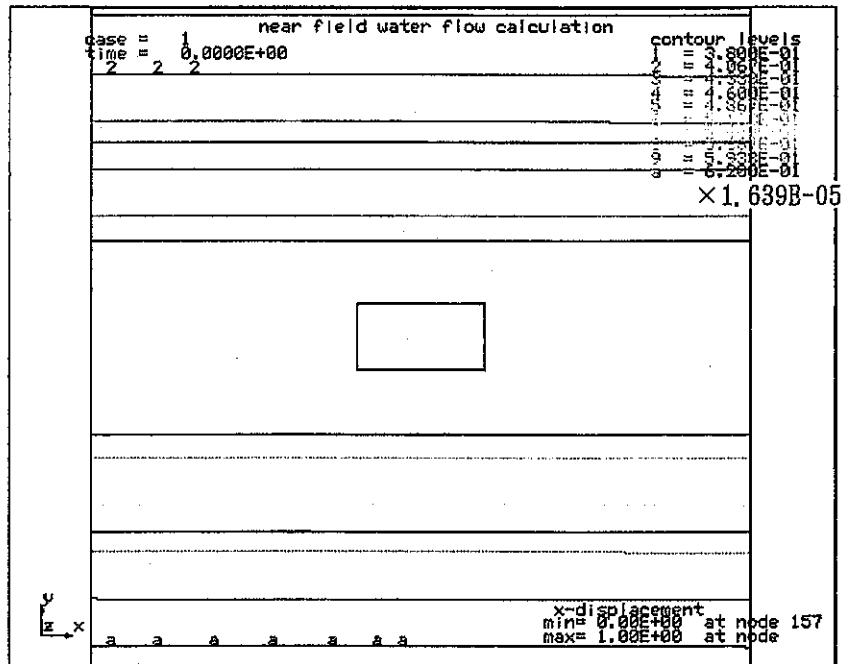


全水頭分布図

図4.18-1 case18 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 — 固化体近傍



流速ベクトル図



流れ関数分布図

図4.18-2 case18 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 - 固化体近傍

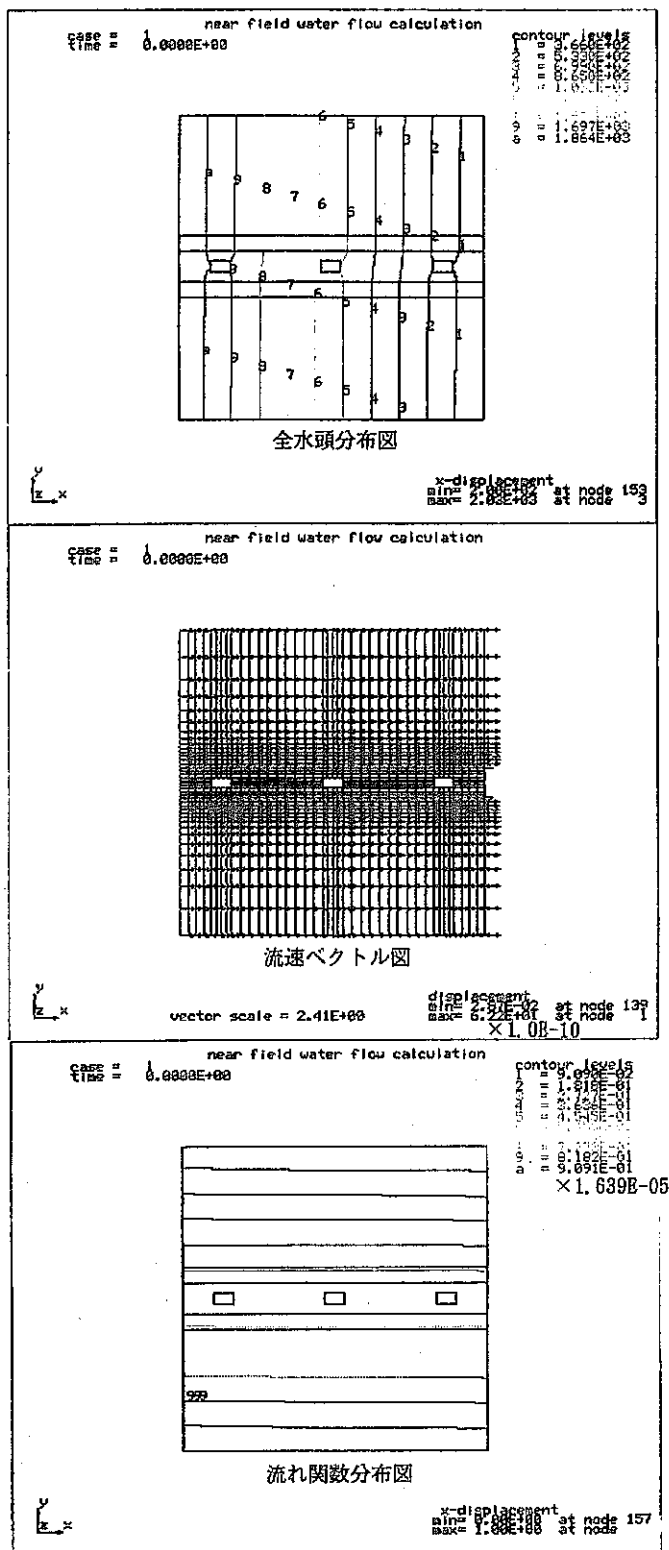


図4.18-3 case18 (固化体中心軸方向断面モデル) 解析結果 一 解析領域全体

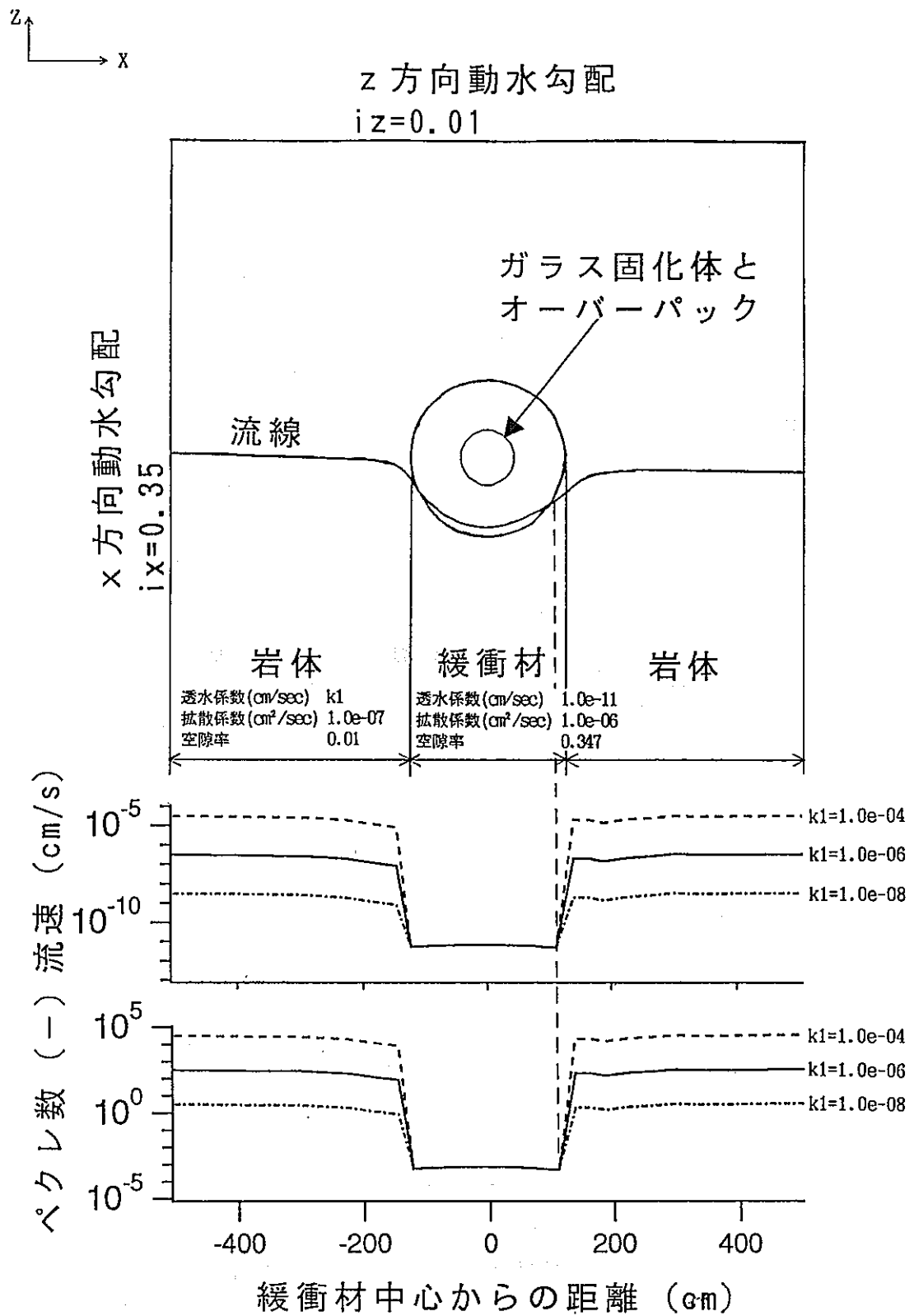


図4.19 ペクレ数の場所的变化 (固化体半径方向断面モデル) —  $(i_x, i_z) = (0.35, 0.01)$

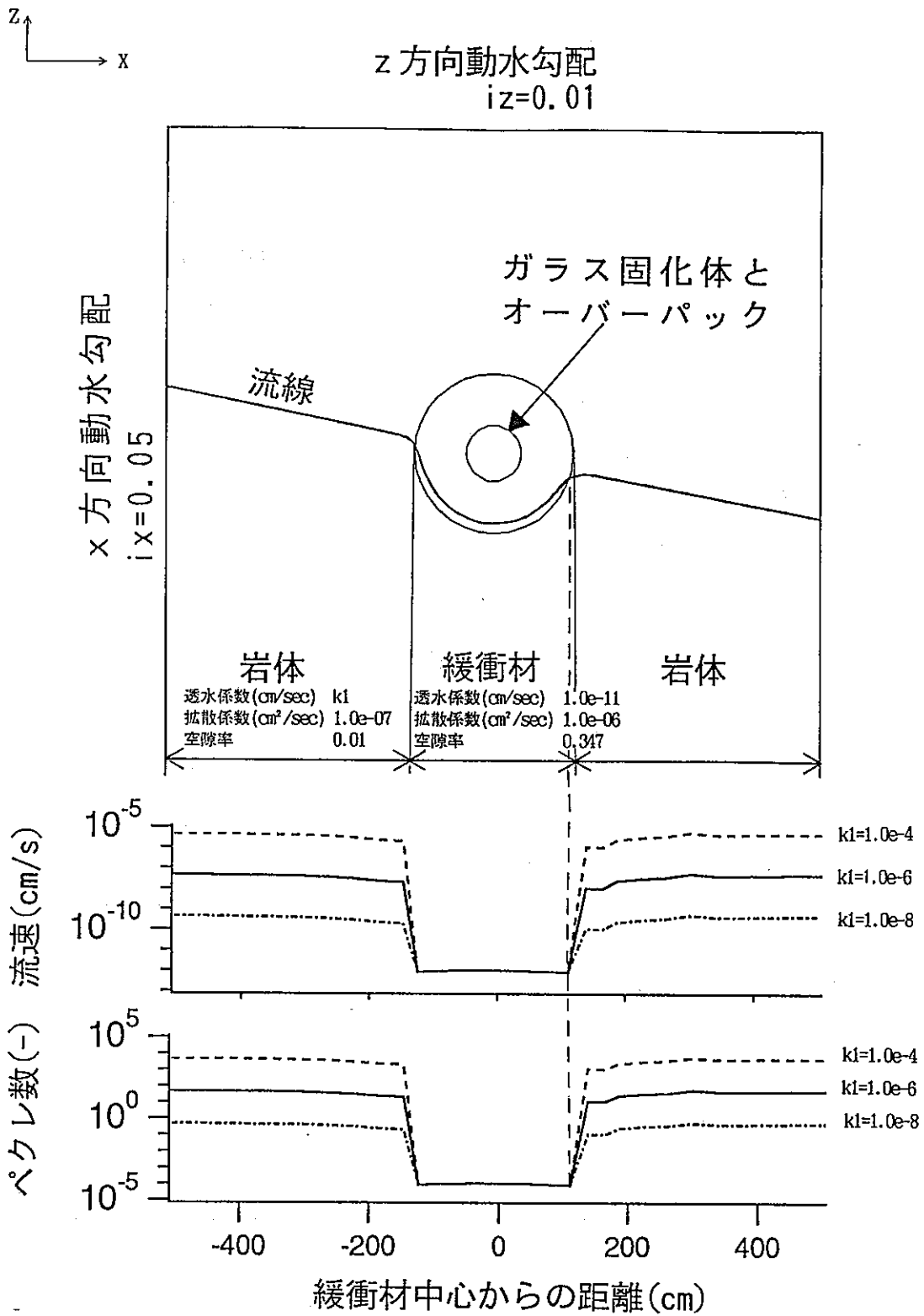


図4.20 ペクレ数の場所的变化 (固化体半径方向断面モデル) - ( $i_x, i_z$ ) = (0.05, 0.01)

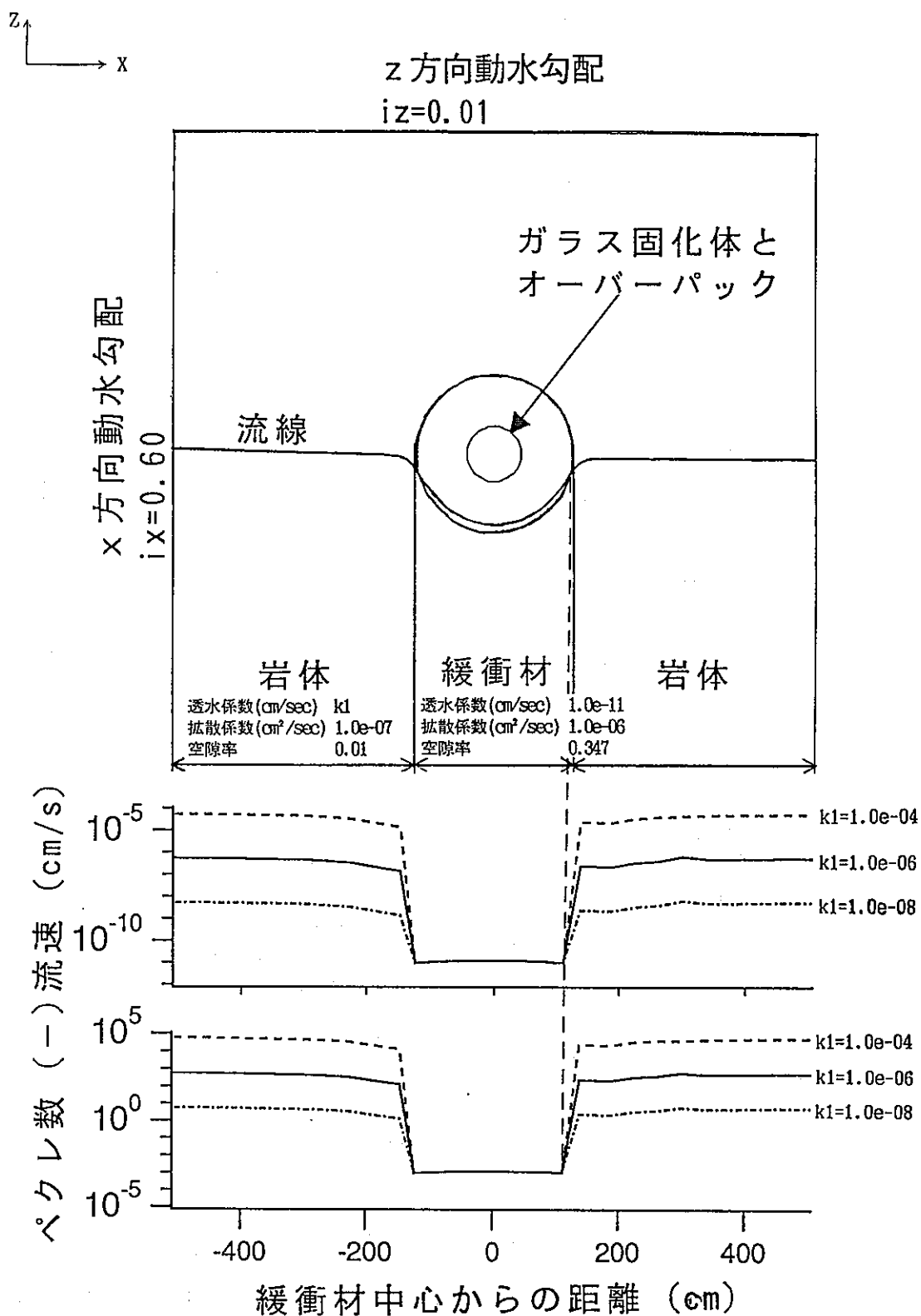


図4.21 ペクレ数の場所的变化 (固化体半径方向断面モデル) - ( $i_x, i_z$ ) = (0.60, 0.01)



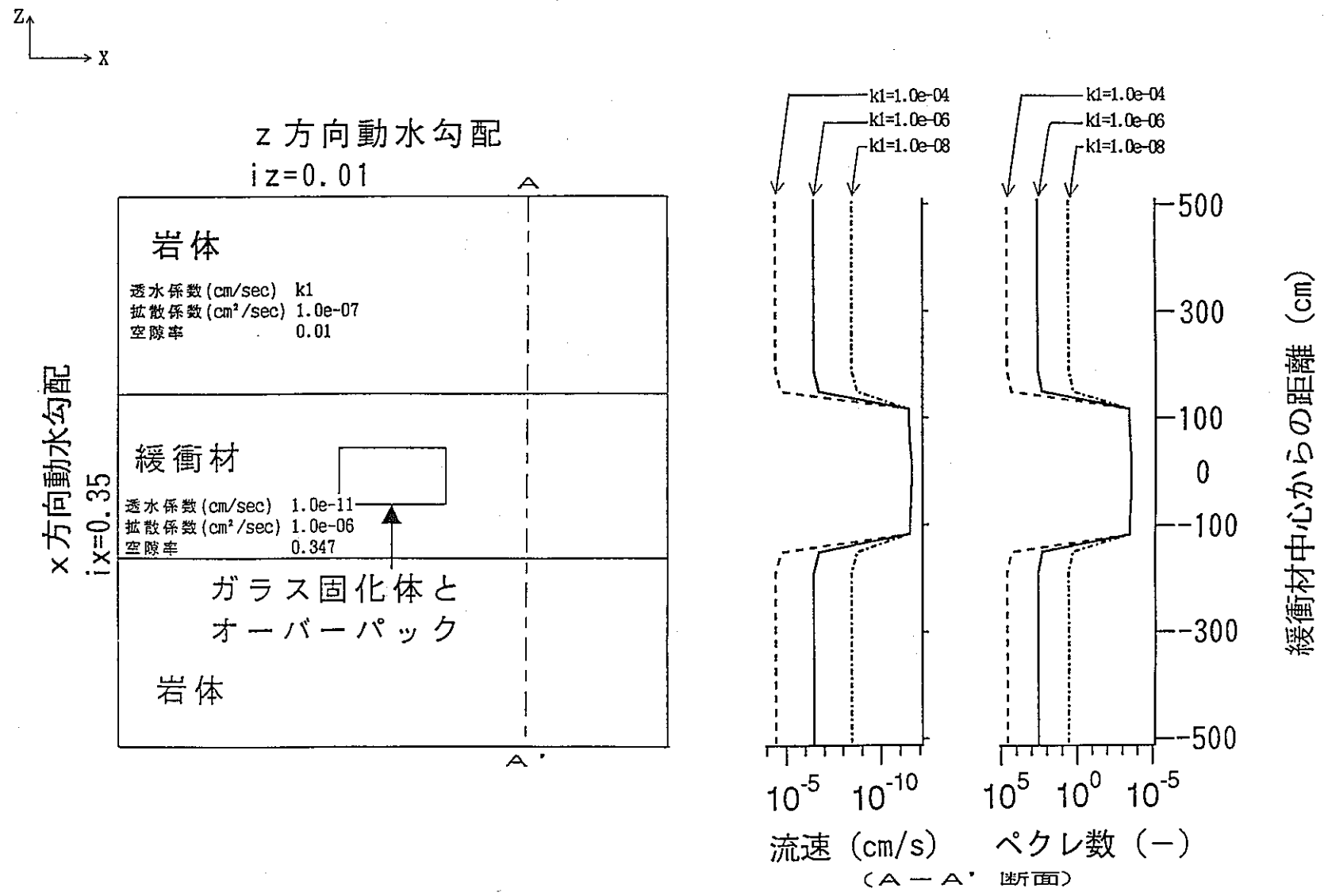
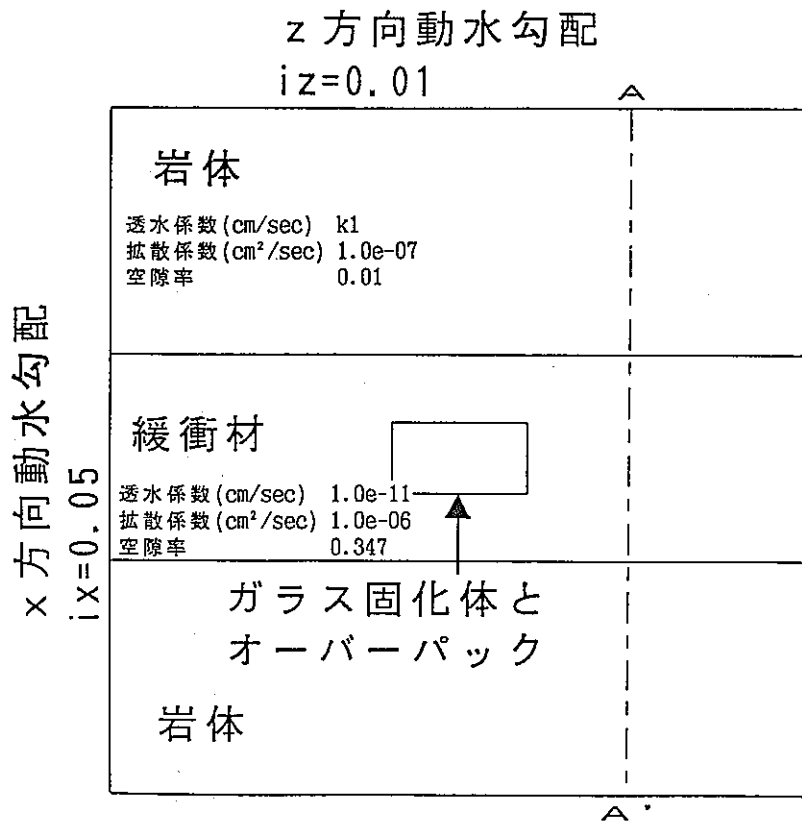
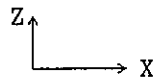


図4.22 ペクレ数の場所的变化 (固化体中心軸方向断面モデル) - ( $i_x, i_z$ ) = (0.35, 0.01)



x 方向動水勾配  
 $i_x = 0.05$

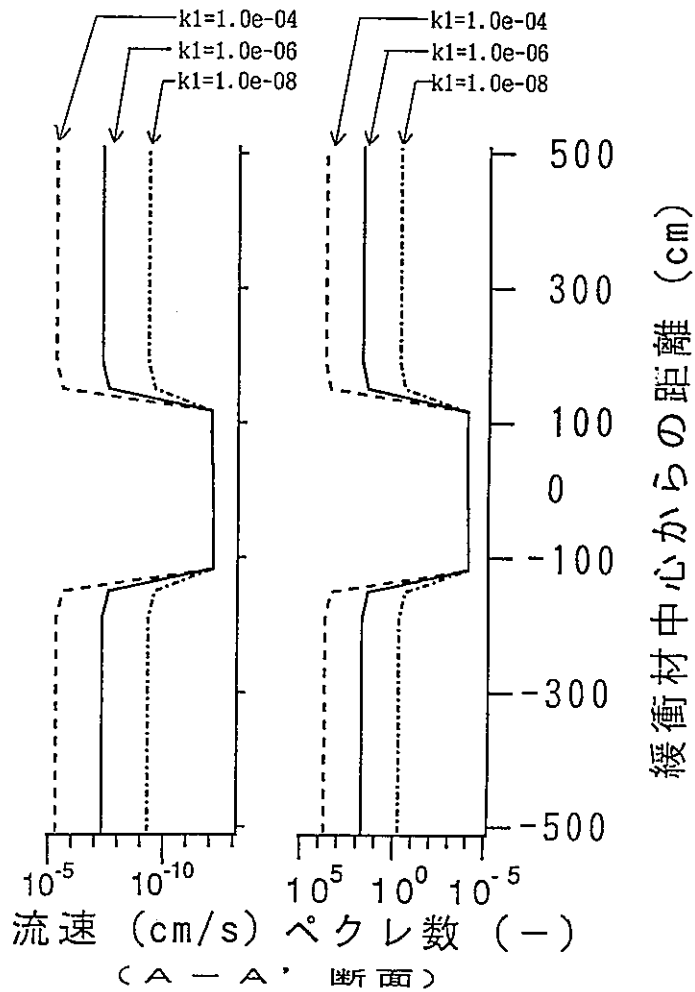
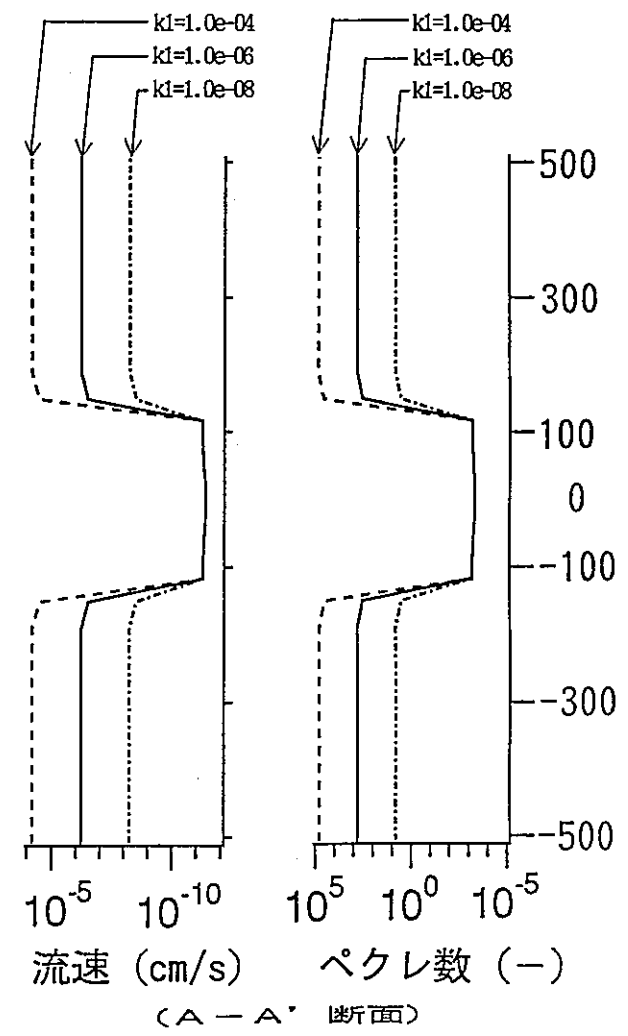
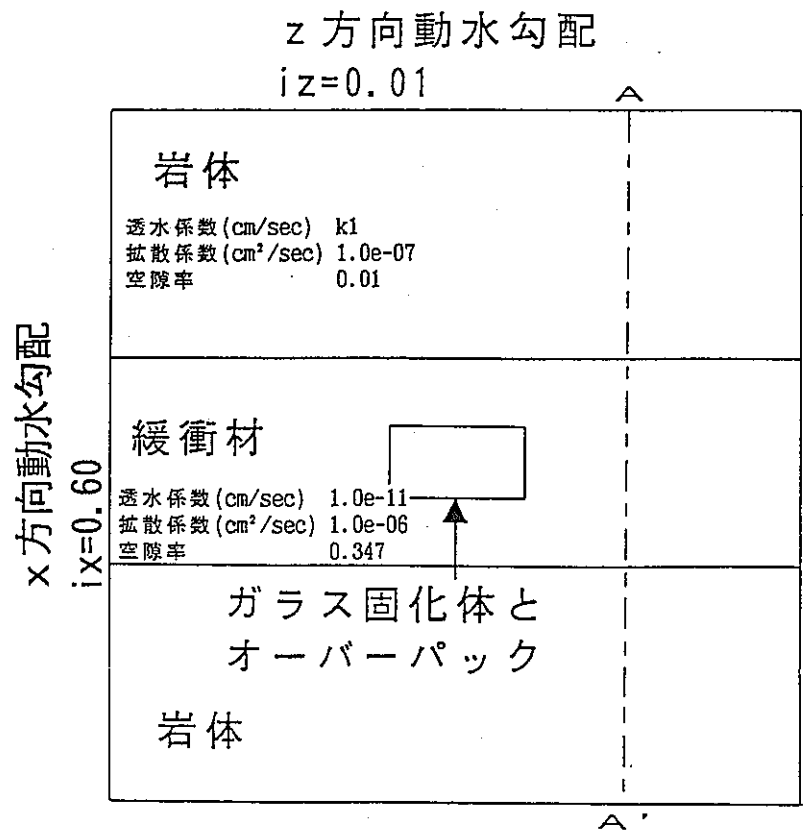


図4.23 ペクレ数の場所的变化 (固化体中心軸方向断面モデル) -  $(i_x, i_z) = (0.05, 0.01)$



緩衝材中心からの距離 (cm)

図4.24 ペクレ数の場所的变化 (固化体中心軸方向断面モデル) - ( $i_x, i_z$ ) = (0.60, 0.01)

## APPENDIX A

Nagraによるニアフィールド水理解析  
( NGB 85-09 : 10.3 Near-field hydrology )

## 1. ニアフィールド水理解析

処分場周辺あるいは処分場内の地下水流れの詳細解析は簡易モデルでは取り扱うことができない。そこで本報告書 (NTB 85-09) では階層的モデリング手法が採用された。つまり、広域的水理解析から出発し、徐々に領域を細かくし、それに従って詳細な情報を取り込んでいく手法である。従って、広域的水理解析では基本的に降雨と流出に関連づけて地下水流れのシステムを計算した。これは同じ領域内のより詳しい地形情報をもつ、より小さいスケールの局所モデルによる解析を行なう際の境界条件を与える。さらに、この局所モデルはニアフィールド水理モデルに対する境界条件を与える。

ニアフィールドモデルでは、小規模スケールの不均質性が詳細に考慮されねばならない。つまり、カキライト層及びベグマタイトやアルバイトで構成される岩脈のような大規模な透水性破砕ゾーンが評価されねばならない。ニアフィールドにおいて変化する透水係数は詳細な地質情報のみで決定されるのではなく、処分場システムそれ自身にも影響を受ける。透水係数が $10^{-11} \sim 10^{-12}$  (m/s) の結晶質母岩内のベントナイトで満たされたトンネルでは透水係数が $10^{-13}$  (m/s) 以下の低透水性領域が生じる。図A.1に示されるように、この影響により、地下水はトンネルを迂回するように流れる。また、トンネル周辺岩盤においては、トンネル掘削中に生じる応力開放によって、高透水性領域が生じる (図A.2)。この透水係数の相違のために、ベントナイト中を流れる地下水流量は周辺母岩と比べて非常に小さいものとなる。

## 2. 概念モデル

図A.3は、緩み領域を考慮したニアフィールド水理の概念図である。結晶質母岩においては、地質学的、水理学的調査から水平なプレート内には高透水性の岩脈や破砕帯が頻繁に存在していることがわかっている。これらの破砕帯の頻度や大きさは処分場の深さを想定した位置まで掘り下げたボアホール調査によって予測された。

局所的な水理モデルにおいて、仮定された母岩の平均透水係数は $10^{-11}$  (m/s) である。この値は天然岩体 (透水係数:  $10^{-12}$  (m/s)) 内で1mの幅および $10^{-10}$ と $1.25 \times 10^{-9}$  (m/s) の透水係数をもった破砕帯が75m間隔で生じているという仮定に基づいている。これら全ての透水係数値は原位置試験から得られたデータを保守的にまとめたものである。

処分トンネルは上で述べた高透水性領域に近似的に垂直に延びていると仮定している。しかしながら、この仮定は、水理学的なニアフィールドの概念に関しては本質的なことではない。トンネルは掘削により生じた緩みの影響を受けた透水性が増加した領域によって囲まれている。この問題については、次節で議論する。

### 3. トンネル掘削の影響 ----- 緩み領域

トンネルの壁面から外側に広がっている岩盤は、内部の掘削領域に向かうにしたがって緩みが大きくなっていく。その結果、トンネル周辺の応力場はトンネルの周方向に応力の増加を生じ、半径方向に応力の減少を生じたものとなる。純粋な弾性解析では緩みは主に半径方向に生じることを示したが、弾組成解析ではトンネル壁面の極近傍においてかなり等方的な緩みを生じるという結果が得られた。2つの手法はともに軸方向透水係数が緩みを生じない岩盤に対して1～2オーダー増加することを示した。

応力解放は岩盤中に存在する亀裂や微細な亀裂を開き、より透水性の高い水みちのネットワークをつくるものと考えられる。トンネル軸に交差する方向をもつ亀裂はそれほど影響を受けないが、トンネル壁面の接線と同じ方向をもつ亀裂は大きな変化を受けるであろう。地下水を保持している亀裂は、応力開放の影響を受けていない場合、岩盤内に広く分布しており、局所的な地下水のアクセスしか受けない。このことは、応力解放により緩み領域を生じ、亀裂が開いた場合も同様である。保守的な仮定として応力解放は亀裂のネットワークを広げると考える。この仮定により、トンネル坑道の接戦方向及び軸方向の透水係数はトンネル壁面から最初の0.5mで2オーダー、さらに1.5mの間に1オーダー、次の2mで3ファクターの増加を生じる。

この問題に関しては更なる研究が必要であり、変化した特性の直接測定がグリムゼル研究施設における試験によってなされている。

ベントナイトの膨潤圧が応力解放効果を和らげる可能性は現在保守的に無視されている。その結果、緩み領域の増加した透水係数は処分場トンネルの全長に沿って母岩中の局所流れとなる。この地下水流れの分布については次節で述べる。

### 4. ニアフィールドにおける地下水流れの分布

圧縮ベントナイトの透水係数が非常に小さいために、ベントナイト中ではほとんど流れが生じない。さらに、ベントナイトは地下水が岩盤、破砕帯、緩み領域を中のみを流れるように母岩とのシールの役割を果たす。局所モデルによる解析の結果、処分場領域の動水勾配は1.2%であり、流れのベクトルは水平面に対して $17^{\circ}$ ～ $70^{\circ}$ の広い範囲の方向を持っている。平均透水係数 $10^{-11}$  (m/s)を考えるとこの場合、処分場と小さい角度をなすベクトル方向の流量は $1.34$  ( $\text{m}^3/\text{a}$ )、大きい角度をなすベクトル方向の流量は $4.2$  ( $\text{m}^3/\text{a}$ )となった。1キャニスター、1年あたりの流量としてリッターで換算するとそれぞれ0.23と.71になる。これらの数値は、処分場を通過した全流量がキャニスターと接触すると仮定した場合の数値である。

単純な流量計算を行なってみると、処分場に到達する地下水のうち、83%は高透水性のカキライト層、7%は $10^{-10}$  (m/s)の破砕帯、10%は純粋な岩盤を通過することが予想された。この条件はキャニスター間の距離すなわち拡散距離、地下水を有している岩盤領域を増加させて安全性を高めるために使用される。

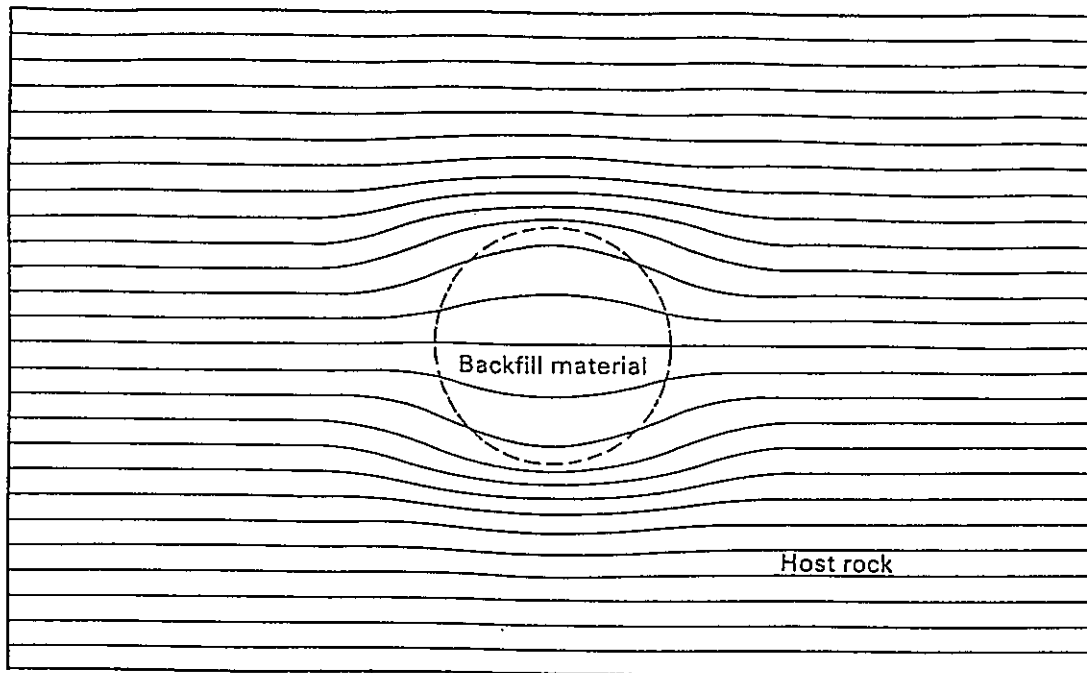
トンネル周辺の緩み領域により影響を受けた地下水流れの変化は透水係数に依存している。前節で使用した極端な値としてのトンネルに沿った流量は4mの半径方向の幅を考えて $1.15 \times 10^9$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )となった。しかしながら、8mの幅を考えると高透水性のカキライト層を考慮せねばならず、流量

として $10^{-8}$  (m<sup>3</sup>/s) となり、カキライト層を通過した地下水が緩み領域へ流入するものと考えられる。しかしながら、カキライト間の岩盤を通過する地下水は全流量の10%であり、この地下水もまたチャンネルを通過して緩み領域に流れ込む。

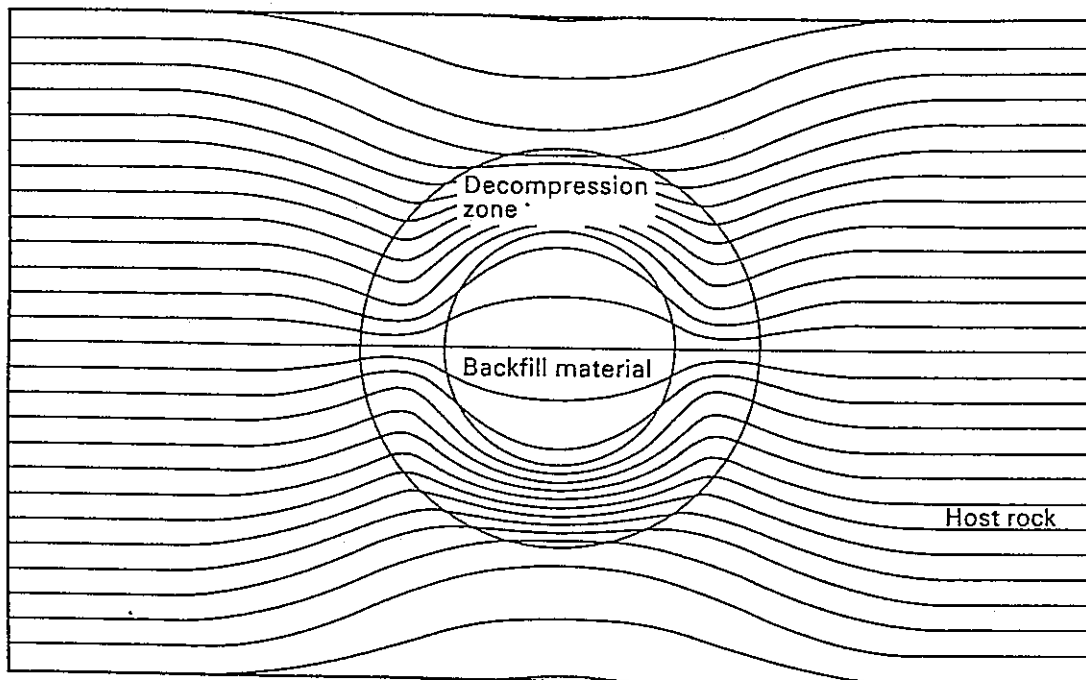
各領域を通過する正確な流量は異なる水みちを考慮したネットワークモデルにより評価されるべきであるが、形状及び水理パラメータの持つ不確実性のために適切なモデル化は行なわれていない。定性的にわかることは、処分場の領域を通過した地下水は高透水性を持つカキライト層に大きく規定され、極端な場合、流れの10~20%はトンネル壁面に沿って浸透する。

#### 参考文献

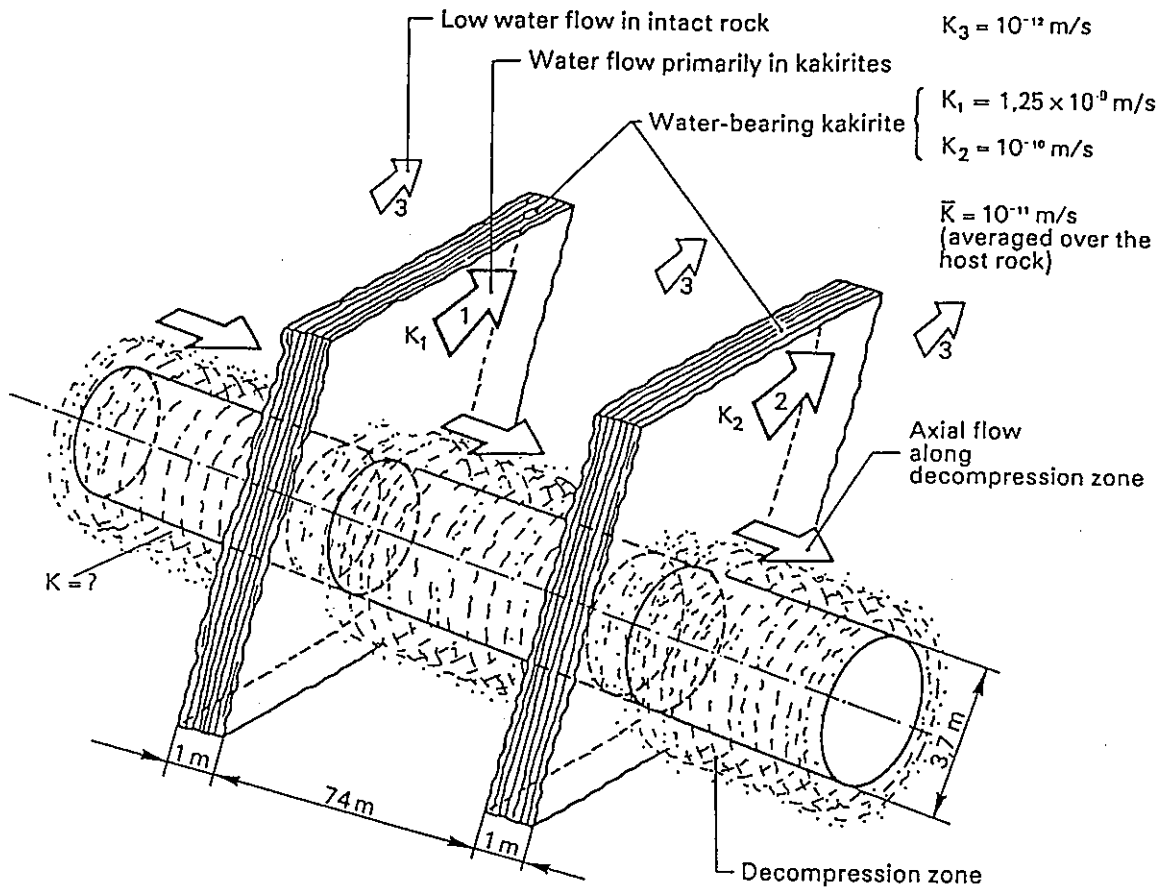
Nagra、NUCLEAR WASTE MANAGEMNT IN SWITZERLAND : FEASIBILITY STUDIES AND SAFTY ANALYSIS、PROJECT GEWAHR 1985、PROJECT REPORT NGB 85-09、1985.



図A.1 低透水性ベントナイトが充填された処分孔周辺の地下水流れ



図A.2 高透水性緩み領域を有する低透水性ベントナイトが充填された処分孔周辺の地下水流れ



図A.3 ニアフィールド水理モデル



## APPENDIX B

### SKBによる岩盤及び緩衝材中の地下水流れ解析 (KBS-3 : 20.3 GROUNDWATER IN ROCK AND BUFFER)

#### 1. 概 論

処分場から放出された放射性物質に対する人間の被ばくに至るまでの一連の事象は、キャニスタの性能劣化、使用済み燃料の溶解、地層中の核種移行及び生物圏での核種の分散からなる。核種が生物圏へ放出されるまでのすべてのプロセスは岩盤中の地下水の流量とその移行経路に大きく依存する。地下水中に溶解した核種がキャニスタと使用済み燃料に影響を及ぼす可能性はキャニスタ周辺のベントナイト緩衝材に制限されている。

地下水流れは以下の主題のもとに取り扱われる。

- 岩盤中の地下水流れ
- ベントナイト緩衝材の機能
- まとめ

#### 2. 岩盤中の地下水流れ

原位置調査から得られた地質学的及び水理学的データをもとに、岩盤中の地下水流れについての3次元モデル計算を実施した。

岩盤中の地下水流れは、

- 原位置の地形
- 岩盤や破砕帯の透水係数
- 破砕帯の形状

により決定される。

モデル計算は地下水流れの経路と同様に研究サイトの異なる場所における地下水流れの情報を提供する。

最終処分場の位置として想定されている地層深部の岩盤中の地下水流量の計算値をまとめると表B.1のようになる。モデル化を行なったサイトは、Kamlunge、Fjallveden、Gidea、Finnsjonの4研究サイトである。

地下水流量は全てのケースで非常に小さい。しかしながら、Finnsjonのケースに関しては、他のサイトに比べて大きな値が得られている。Finnsjonサイトは比較的に大きい地下水流量をもつ領域を説明するために他のサイトと一緒に示した。また、最大流量1 (liter/(m<sup>2</sup>y)) はキャニスタの腐食速度計算に使用された。

#### 使用済み燃料の熱流束の影響

地下水流れは、動水勾配により影響を受け、最終処分場内あるいはその周辺岩盤は熱の影響を受ける。周辺岩盤の温度変化は処分場内の温度勾配を大きくし、典型的な処分場の形状と熱流束を用いた

伝熱計算では処分場から地表面への地下水移行時間に関して境界の影響のみが示された。地下水流れに関する熱の影響は処分直後にキャニスタが破損したときのみ重要なものとなる。処分後ある時点において、キャニスタは腐食により貫通したとき、処分場の温度は自然の状態に戻っている。

### 氷河の影響

スウェーデンの岩盤は数多くの氷河サイクルを受けてきたので、もう一つの氷河作用を受けても深部岩盤の透水係数は大きく変化しない。スウェーデンの大部分の領域における氷河作用で引き起こされた侵食はたかだか数十メートルである。氷河作用が生じているとき、岩盤中の動水勾配及びそれによって生じる地下水流速は減少する。しかしながら、氷河作用が生じていないときは、比較的短い期間に上昇した動水勾配と地下水流速がおそらく氷河前部で生じるであろう。つまり、氷河作用は最終処分場の機能に関しては境界の影響のみをもつことが予想される。

### 3. ベントナイト緩衝材の機能

銅製キャニスタと処分孔壁面間の空間には圧縮ベントナイト粘土が充填される。処分孔とトンネルの近傍の岩盤は発破や掘削の影響を受けているので、緩衝材の領域周辺に局所的に透水性の増加や亀裂頻度の増加がみられる。これは、地下水流れの流線がある程度まで処分孔に向かって引き込まれ、それが密になるということである。しかしながら、ベントナイトは岩盤中に不透水の円筒を構成し、処分孔中を地下水が通過するのを防ぐ役割があり、その結果、流線が処分孔から押しだされることになる。そのときの処分孔周辺の流線形状を図B.1に示す。

緩衝材は低透水性であるのでキャニスタと岩盤間の領域中に地下水が流れるのを防ぐ。それゆえに、ベントナイト緩衝材中を移行する水溶性物質の移行は拡散に支配される。これは、キャニスタとキャニスタの腐食及び燃料の溶解を遅らせる地下水間の物質の交換を制限する。緩衝材中の移行速度を決定する因子を以下に示す。

- 緩衝材の厚さ
- 腐食生成物あるいは放射性核種の拡散係数
- 緩衝材中の物質の濃度勾配
- ベントナイト近傍の地下水濃度境界層における輸送抵抗

### データと結果

次に緩衝材中でキャニスタと反応する地下水の計算に使用したデータを示す。

飽和ベントナイトの密度	2.1 t/m <sup>3</sup>
定常状態における拡散係数	
水	2.0×10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s
ベントナイト	4.0×10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s
処分孔を横断する透水性亀裂の間隔	1 m
平均亀裂開口幅	0.1 mm

ベントナイトの亀裂内への流出は生じないと仮定している。初期地下水流量 $U_0$  (liter/m<sup>2</sup>y) を与えると、等価な地下水流量 $Q_{eq}$  (liter/canister·y) が計算でき、これは一年あたりに緩衝作用によるキャニスタからあるいはキャニスタへの化学的な交換が起こり得る水量を表している。表B.2にここで規定された条件下での $U_0$ と $Q_{eq}$ の値を示す。

緩衝材中の外側に向かったの核種移行の初期段階で、濃度プロファイルが生じる。これは、個

々の物質の緩衝材中の吸着による遅延に起因するそれぞれの移行速度で生じる。緩衝材の外側に核種が到達する時間を計算した。ここでは、その時間は外側での濃度が内側濃度の5%に達したときの時間として定義した。この核種到達時間は、遅延に制限がある核分裂生成物の場合、10～500年の間であり、遅延効果の大きいアクチニドは数万年のオーダーであった。緩衝材中の核種の移行時間はまず第一にキャニスタの初期破損のケースにおいて重要となる。

#### 考 察

ベントナイト緩衝材中の大部分の移行抵抗はベントナイト表面近傍の安定した地下水中の拡散境界層に起因する。緩衝材中を地下水流れが生じない限り、緩衝材中の内側へ向かっての腐食生成物の移行と外側に向かっての核種の移行がそれぞれベントナイトの厚さと拡散定数に対する誘因である。もし緩衝材が処分孔につながる亀裂中に流出すると、かなり大きな移行抵抗が得られる。重要なことは、ベントナイト緩衝材が超長期にわたりその特性を保持しうることが期待できるかである。100℃以下の温度のとき、スメクタイト鉱物の支配的な割合は化学的には100年以上そのままである。緩衝材の最大温度は、キャニスタの残余熱出力と高圧縮ベントナイトの熱伝導率によって決定される。キャニスタに閉じ込められている使用済み燃料の量は制限があるので炉取り出し後40年の残余熱出力はキャニスタ1本あたり850W以下である。つまり、緩衝材の最大温度は約80℃となる。

緩衝材の機械的安定性の必要条件は、大量のベントナイトが岩盤中の亀裂中に流出しないことである。処分孔につながっている亀裂（開口幅0.5mm以下）では、亀裂内に詰まっているベントナイトによる地下水移行に対する障害物や亀裂面での摩擦により緩衝材の流出は数10cm以上進まない。流出したベントナイトの外側部分は、地下水による侵食により粘土粒子が失われるという問題があるが、地下水中で十分に安定であるゲルを形成する。

キャニスタに耐えうるベントナイトの容量は材質の密度の関数である。高密度 $1.5\text{t/m}^3$ の場合でさえ、ベントナイトの容量は、超長期に亘ってもベントナイト中のキャニスタは沈下しない。

#### 4. まとめ

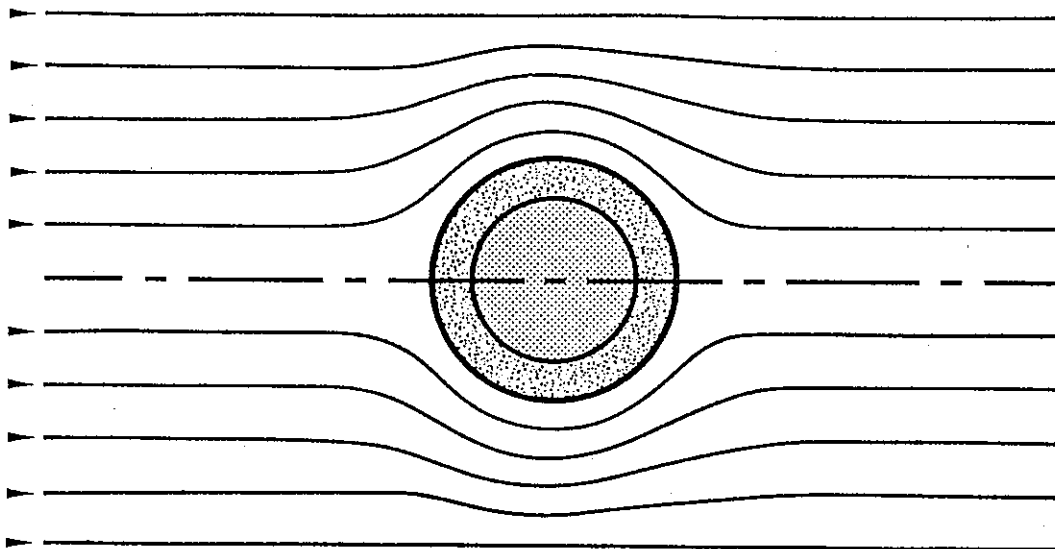
適切に選定された処分場周辺の岩盤中の地下水流量は $0.002 \sim 0.06$  (liter/ $\text{m}^2\text{y}$ ) の範囲内にあることが推定された。 $0.1$  (liter/ $\text{m}^2\text{y}$ ) の流量はFinnsjon以外で解析されたすべての地域で最も悪い位置にキャニスタを設置したときの悲観的な値である。地下水からキャニスタへ向かう腐食生成物の移行とキャニスタが破損している場合のキャニスタからの放射性核種の移行は処分孔内の緩衝材に制限される。地下水流量が $0.1$  (liter/ $\text{m}^2\text{y}$ ) の場合、等価な水の量 $0.6$  (liter/y) はキャニスタと化学的に反応する。また、 $1$  (liter/y) の地下水流量に対応する等価な地下水量は $1.6$  (liter/y) となる。

#### 参考文献

SKBF/KBS, Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3, IV Safety, 1983.

表B.1 各調査サイトにおける処分場深さでの地下水流量の計算値

Site	Range $l/(m^2 \cdot year)$	Typical value over repository $l/(m^2 \cdot year)$
Kamlunge	0.003-0.06	0.02
Fjällveden	0.002-0.05	0.03
Gideå	0.004-0.02	0.01
Finnsjön	0.2 -1	0.7



図B.1 処分孔周辺の地下水流れに対する流線図

表B.2 岩盤中の異なる地下水流量に対する $Q_{eq}$ 値

Groundwater flow in the rock $U_0 \ l/(m^2 \cdot year)$	Equivalent flow per canister $Q_{eq} \ l/(canister \cdot year)$
0.01	0.19
0.03	0.32
0.1	0.57
0.3	0.94
1	1.57
3	2.41

## APPENDIX C

Chambreらによる埋設固化体周辺の地下水流れ解析  
(Flow of Groundwater Around Buried Waste)

ChambreやAnderssonらによる固化体周辺の埋め戻し材や岩盤周辺への固化体からの核種移行解析では、地下水に溶解した核種移行について、埋め戻し材中の地下水流れはないと仮定した拡散移流モデルが考慮された。地層処分場内の地下水流れは非常に緩慢であると予想されるので核種の放出は分子拡散により支配されると考えられるが、核種放出に対して埋め戻し材中の地下水流れの可能性を評価するために固化体周辺の埋め戻し材と岩盤中の地下水の局所的な流れを解析することが必要である。ここでは、球状あるいは円筒状の固化体周辺の埋め戻し材及び多孔質岩盤中の定常状態の流線、等ポテンシャル線、流速を予測するためにChambreにより展開されたポテンシャル流れの理論を用いていくつかの結果を示している。固化体を透水性としたケースについてはここでは述べていない。

固化体及び埋め戻し材を設置することにより流れが乱されるまで、地下水は岩盤中を一定のポテンシャル勾配の影響下で次元方向に流れる。流れは埋め戻し材と固化体を設置するために建設された円筒形処分孔の軸に垂直方向に流れる。固化体と埋め戻し材が十分に長い場合、乱された流れは円筒の軸に垂直な平面内で2次元になり、岩盤の透水係数に対する埋め戻し材の透水係数の比 $\alpha$ に局所的に依存する。図C.1は埋め戻し材の厚さを $b=0.25$  (m)、固化体の半径を $r_0=0.25$  (m)としたときの $\alpha$ が0.1と10の場合の流線を示している。流れ関数の値は任意に定めている。埋め戻し材と岩盤の接触している部分の流線の屈折に注目すべきである。隣り合った流線どうしは流管を形成しており、各流管の断面には等流量が流れる。

埋め戻し材の透水係数が小さい場合(図C.1(a))、流管は埋め戻し材中で広がっており、ダルシー流速は減少しており、周辺岩盤中でダルシー流速が局所的に増加していることがわかる。図C.1(b)に示されるように、埋め戻し材の透水係数が岩盤の透水係数より大きいときは埋め戻し材中では流管は狭くなり、流速は増加する。

埋め戻し材をその断面にわたって積分することにより、円筒単位長さ当たりに埋め戻し材中を流れる流量 $\dot{Q}_b$ は(C.1)式のようになる。

$$\dot{Q}_b = 4U(r_0 + b) \left[ 1 - \frac{s^2 + 1}{(s^2 - 1)\alpha + (s^2 + 1)} \right] \quad \text{m}^3/\text{y-m} \quad (\text{C.1})$$

ここで、  
 $U$  : 一様流速  
 $r_0$  : 固化体半径  
 $b$  : 埋め戻し材の厚さ  
 $s$  :  $1 + b/r_0$

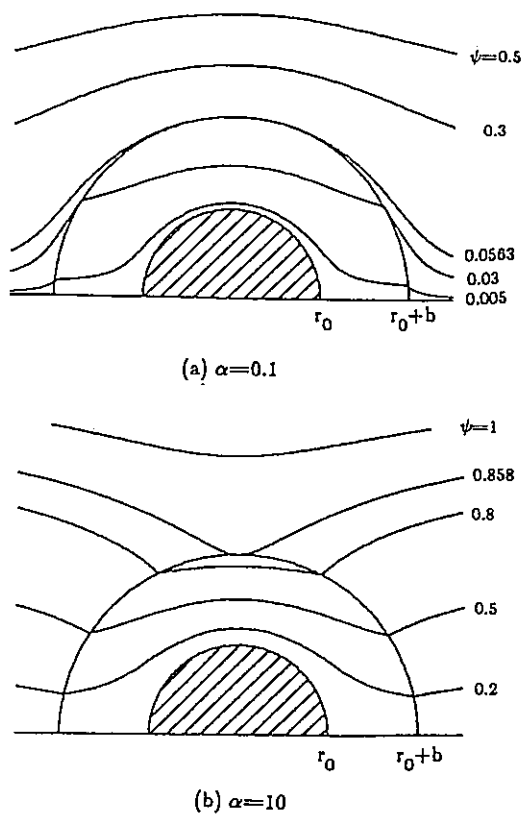
図C.2は $U=1$  m/yのときの透水係数比 $\alpha$ の関数としての $\dot{Q}_b$ を示している。 $\dot{Q}_b$ は $\alpha=0$ のとき0から $\alpha$ が無限大方向に大きくなるにつれて $2$  m<sup>3</sup>/y-mまで増加する。処分孔が空の場合、すなわち $r_0=0$ 、 $\alpha$ が無限大 $\infty$ の場合のダルシー流速は方程式(C.1)に示されるように一様流速の2倍になる。このことはNeretnieksによって示された。

固化体と埋め戻し材に乱されない流線は直線になる。乱されている流れの領域は、乱されていない流線から1%以上離れている全ての流線を含む領域として定義される。Chambreの理論によると、岩盤と埋め戻し材中の全ての乱された領域の流量に対する埋め戻し材中の流量は図C.2に示されるように、透水係数の比の関数として計算される。 $\alpha=5/3$ のとき、流線は埋め戻し材中のみに曲がり込み、乱された流量の比は1になる。

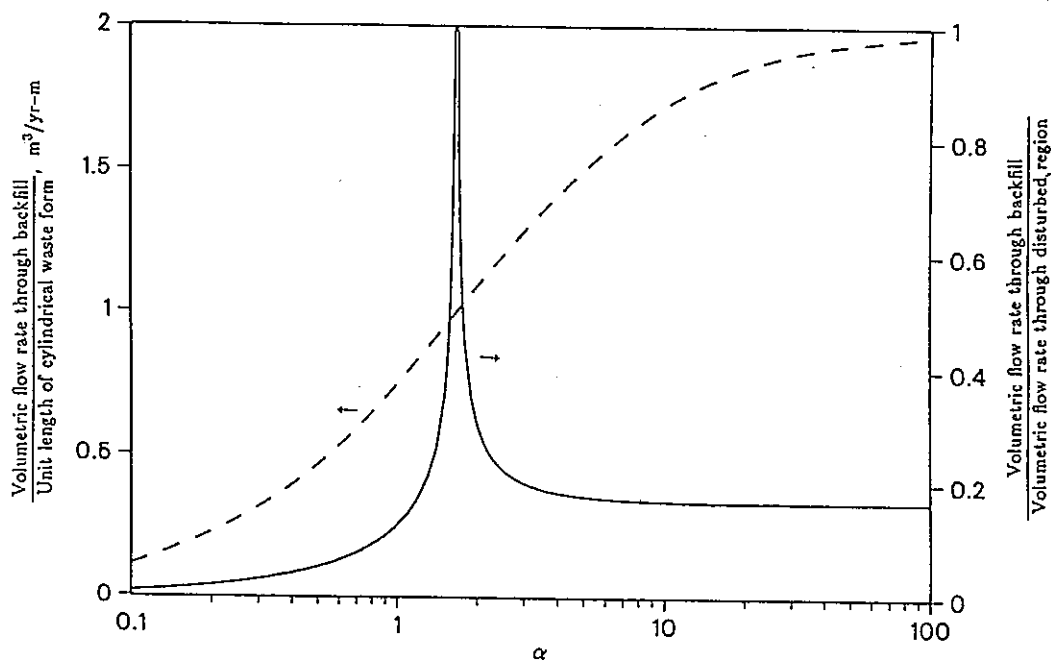
局所流れの場のこれらの解析解は、埋め戻し材を通して岩盤中へ地下水中に溶解した核種の拡散移流方程式を解くために使用された。

#### 参考文献

Chambre, P. L., C. H. Kang, and T. H. Pigford, Flow of Groundwater Around Buried Waste, *Trans. Am. Nuc. Soc.*, 52, 77, 1986.



図C.1  $\alpha=0.1$ 、 $10$  のときの流線



図C.2  $U = 1 \text{ m/y}$  のときの埋め戻し材中と岩盤中の流量