

断層活動に伴う周辺地下水挙動の変化に関する解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年3月

佐藤工業株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター 技術開発課

断層活動に伴う周辺地下水挙動の変化に関する解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年3月

佐藤工業株式会社

断層活動に伴う周辺地下水挙動の変化に関する解析

古屋和夫*, 伊東守**, 児玉敏雄**

要 旨

本資料は、兵庫県南部地震（1995年1月17日）の発生直後、淡路島北西部で観測された野島断層近傍での地下水挙動の変化について、応力・浸透連成解析を行った結果をまとめたものである。

兵庫県南部地震の発生直後、淡路島北西部では、湧水量の増加や断層近傍での湧水の発生、あるいは山間部での地下水位の低下が観測され、その後、湧水は次第に減少あるいは停止していることが確認されている。このような現象の原因として、断層活動による地殻応力の変化や地震動によって生じた、地盤の急激な体積変化による過剰間隙水圧の上昇・下降の可能性が考えられる。

本解析では、このような考えに基づき、断層活動に伴う周辺地下水挙動の変化について、応力・浸透連成解析を行い、以下の結果を得た。

- ① 全水頭分布の時間変化より、地震後、断層部付近において、過剰間隙水圧が急激に上昇し、時間とともに消散していく現象が数値的に再現された。全水頭のピークは断層部 EL-300~500m 付近において発生し、その値は 55~63m 程度であった。
- ② 断層部からの湧水量のピークは、地震直後~13 日程度で出現する。また、流量は、降雨を考慮しない場合 $0.014\sim0.037 \text{m}^3/\text{day}$ となり、降雨を考慮した場合 $0.027\sim1.180 \text{m}^3/\text{day}$ となった。
- ③ 解析対象地域の地下水環境に対する降雨の影響は大きく、継続的な降雨により、地下水の全水頭分布が大きく変化する。降雨を考慮しない場合、湧水量の最大ピークが 8.5 日であるのに対して、降雨を考慮した場合、ピークが地震直後に発生する。
- ④ 断層幅を変更（粘土化帯幅 10m, 破碎帯幅 10m から粘土化帯幅 1m, 破碎帯幅 20m に変更）した場合の解析の結果、湧水量には若干の差異はみられるものの、全体的に大きな相違は認められない。
- ⑤ 断層の粘土化帯の透水係数を小さく設定した場合 ($1.0\times10^{-9} \text{cm/sec}$)、断層を境に東西の全水頭分布は不連続となり、その差は 40m~70m 程度となる。

本報告書は、佐藤工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：08C1123

事業団担当部課室：東濃地科学センター

地質安定性研究室研究員（石丸恒存）

* 佐藤工業株式会社 佐藤総合研究所

** 佐藤工業株式会社 中央技術研究所土木研究部

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC ZJ7705 97 - 001
MARCH, 1997

Analytical Study on the Change of Groundwater Environment
by Activity of Fault

Kazuo Furuya*
Mamoru Itoh **
Toshio Kodama**

Abstract

This report presents the result of two-dimensional stress and seepage flow coupling analysis of groundwater environment around Nojima fault after Hyogoken-Nanbu earthquake (January 17, 1995).

At Hyogoken-Nanbu earthquake, much groundwater flowed out at surface and the groundwater level has rised in many places of north part of Awaji island, and the groundwater level have decreased in mountainous areas. Afterwards, the flow of groundwater have decreased gradually or ceased. These phenomena are considered to result from the increase of excess pore water pressure by volume change of the rock mass by activity of fault.

Based on this consideration, it is considered that these phenomena are analysed by two-dimensional stress and seepage flow coupling analysis method.

The phenomena of increase of excess pore water pressure by volume change of the rocks after earthquake, and their decrease afterwards are simulated by numerical analysis.

The flow peaks of groundwater at the surface of the Nojima fault are recognized within 13 days after earthquake. The flows in case of no rain fall is 0.014 - 0.037 m³/day, while the flows in case of rain fall is 0.027 - 1.180 m³/day.

The much influence of rain fall on groundwater environment are recognized. The flow peak of groundwater is recognized soon after earthquake with rain fall, meanwhile the peak in the case of no rain fall is about 8.5 days after earthquake.

On the other hand, the width of fault does not have much influence on the environment of groundwater.

The distribution of total hydraulic head shows uncertainty along the fault in the case of low permeability (1.0×10^{-9} cm/sec) of clay zone of fault. The differences of total hydraulic head between east and west sides are about 40-70m.

Work performed by Sato Kogyo Co.,Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC:Tono Geoscience Center,

Neotectonics Research Section
(Kohson Ishimaru)

* Sato Kogyo Co., Ltd., Sato Research Institute

** Sato Kogyo Co., Ltd., Engineering Research Institute

目 次

1. 解析の概要	1
1.1 件名	1
1.2 目的	1
1.3 解析位置	1
1.4 実施期間	1
1.5 実施項目	1
1.6 担当者	2
2. 地形・地質概要	4
2.1 地形概要	4
2.2 地質概要	4
2.2.1 花崗岩類	4
2.2.2 神戸層群	4
2.2.3 大阪層群	5
2.2.4 段丘堆積層	5
2.2.5 沖積層	5
2.3 活断層	5
3. 地下水流動解析	8
3.1 地下水挙動のモデル化	8
3.2 解析内容	8
3.2.1 解析方法	8
3.2.2 解析断面	8
3.2.3 解析モデル	8
3.2.4 物性値の設定	10
3.2.5 境界条件・初期条件	11
3.2.6 解析ケース	14
3.3 解析結果	15
3.3.1 地震後の地下水流动	15
3.3.2 降雨の影響の検討	19
3.3.3 断層幅の影響の検討	20
3.3.4 断層の透水係数の影響の検討	21
3.4 まとめ	23
4. 今後の課題	145
5. 参考文献	146
附資料-1 応力・浸透連成解析プログラムUNICOUPLの概要	148
附資料-2 貯留係数の考え方	154

図 目 次

図 1-1	解析断面 位置図	3
図 2-1	兵庫県南部地震(1995年)後に発生した淡路島北部 で生じた地下水の変化分布	7
図 2-2	地震後に生じた湧水および自噴量が増加した湧水の地震後の湧水変化	7
図 3-1	解析モデル	10
図 3-2	不飽和浸透特性	11
図 3-3	ジョイント要素を用いた解析モデル	13
図 3-4	断層の変形解析結果	13
図 3-5	野島平林における応力値の深さ分布	16
図 3-6	断層地表部湧水量の時間変化(CASE1~5)	25
図 3-7	断層地表部湧水量の時間変化(CASE6~9)	26
図 3-8	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE1)	27
図 3-9	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE1)	28
図 3-10	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE1)	29
図 3-11	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE1)	30
図 3-12	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE1)	31
図 3-13	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE1)	32
図 3-14	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE1)	33
図 3-15	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE1)	34
図 3-16	流速ベクトル(CASE1)	35
図 3-17	全水頭の空間分布(CASE1)	37
図 3-18	全水頭の時間変化(CASE1)	38
図 3-19	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE2)	39
図 3-20	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE2)	40
図 3-21	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE2)	41
図 3-22	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE2)	42
図 3-23	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE2)	43
図 3-24	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE2)	44
図 3-25	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE2)	45
図 3-26	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE2)	46
図 3-27	全水頭分布(地震直後, CASE2)	47
図 3-28	全水頭分布(1日後, CASE2)	48
図 3-29	全水頭分布(30日後, CASE2)	49
図 3-30	全水頭分布(60日後, CASE2)	50
図 3-31	全水頭分布(90日後, CASE2)	51
図 3-32	流速ベクトル(CASE2)	52

図 3-32	流速ベクトル(CASE2)	53
図 3-33	全水頭の空間分布(CASE2)	54
図 3-34	全水頭の時間変化(CASE2)	55
図 3-35	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE3)	56
図 3-36	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE3)	57
図 3-37	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE3)	58
図 3-38	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE3)	59
図 3-39	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE3)	60
図 3-40	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE3)	61
図 3-41	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE3)	62
図 3-42	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE3)	63
図 3-43	流速ベクトル(CASE3)	64
図 3-43	流速ベクトル(CASE3)	65
図 3-44	全水頭の空間分布(CASE3)	66
図 3-45	全水頭の時間変化(CASE3)	67
図 3-46	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE4)	68
図 3-47	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE4)	69
図 3-48	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE4)	70
図 3-49	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE4)	71
図 3-50	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE4)	72
図 3-51	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE4)	73
図 3-52	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE4)	74
図 3-53	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE4)	75
図 3-54	流速ベクトル(CASE4)	76
図 3-54	流速ベクトル(CASE4)	77
図 3-55	全水頭の空間分布(CASE4)	78
図 3-56	全水頭の時間変化(CASE4)	79
図 3-57	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE5)	80
図 3-58	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE5)	81
図 3-59	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE5)	82
図 3-60	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE5)	83
図 3-61	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE5)	84
図 3-62	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE5)	85
図 3-63	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE5)	86
図 3-64	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE5)	87
図 3-65	流速ベクトル(CASE5)	88
図 3-65	流速ベクトル(CASE5)	89
図 3-66	全水頭の空間分布(CASE5)	90
図 3-67	全水頭の時間変化(CASE5)	91

図 3-68	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE6)	92
図 3-69	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE6)	93
図 3-70	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE6)	94
図 3-71	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE6)	95
図 3-72	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE6)	96
図 3-73	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE6)	97
図 3-74	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE6)	98
図 3-75	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE6)	99
図 3-76	全水頭分布(地震直後, CASE6)	100
図 3-77	全水頭分布(1日後, CASE6)	101
図 3-78	全水頭分布(30日後, CASE6)	102
図 3-79	全水頭分布(60日後, CASE6)	103
図 3-80	全水頭分布(90日後, CASE6)	104
図 3-81	流速ベクトル(CASE6)	105
図 3-81	流速ベクトル(CASE6)	106
図 3-82	全水頭の空間分布(CASE6)	107
図 3-83	全水頭の時間変化(CASE6)	108
図 3-84	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE7)	109
図 3-85	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE7)	110
図 3-86	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE7)	111
図 3-87	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE7)	112
図 3-88	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE7)	113
図 3-89	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE7)	114
図 3-90	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE7)	115
図 3-91	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE7)	116
図 3-92	流速ベクトル(CASE7)	117
図 3-92	流速ベクトル(CASE7)	118
図 3-93	全水頭の空間分布(CASE7)	119
図 3-94	全水頭の時間変化(CASE7)	120
図 3-95	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE8)	121
図 3-96	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE8)	122
図 3-97	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE8)	123
図 3-98	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE8)	124
図 3-99	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE8)	125
図 3-100	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE8)	126
図 3-101	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE8)	127
図 3-102	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE8)	128
図 3-103	流速ベクトル(CASE8)	129
図 3-103	流速ベクトル(CASE8)	130

図 3-104	全水頭の空間分布(CASE8)	131
図 3-105	全水頭の時間変化(CASE8)	132
図 3-106	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE9)	133
図 3-107	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE9)	134
図 3-108	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE9)	135
図 3-109	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後, CASE9)	136
図 3-110	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60日後, CASE9)	137
図 3-111	変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90日後, CASE9)	138
図 3-112	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE9)	139
図 3-113	主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE9)	140
図 3-114	流速ベクトル(CASE9)	141
図 3-114	流速ベクトル(CASE9)	142
図 3-115	全水頭の空間分布(CASE9)	143
図 3-116	全水頭の時間変化(CASE9)	144

表 目 次

表 1-1	実施項目と数量.....	1
表 3-1	野島断層の周辺地下水に関する主な既往調査.....	9
表 3-2	岩盤物性.....	10
表 3-3	解析ケース.....	14
表 3-4	地殻応力測定結果.....	16
表 3-5	湧水量のピーク.....	18
表 3-6	解析結果.....	24

1. 解析の概要

1.1 件名

断層活動に伴う周辺地下水挙動の変化に関する解析

1.2 目的

断層活動による断層周辺の地下水環境の変化を把握することは、地質環境の長期安定性を考える上で重要である。

兵庫県南部地震（1995年1月17日）の発生直後、淡路島北西部では、湧水量の増加や断層近傍での湧水の発生、あるいは山間部での地下水位の低下が観測された。また、その後、湧水は次第に減少あるいは停止していることが確認されている。

このような現象の原因として、断層活動による地殻応力の変化や地震動によって生じた、地盤の急激な体積変化による過剰間隙水圧の上昇・下降の可能性が考えられる。

本解析では、このような考えに基づき、断層活動に伴う周辺地下水挙動の変化に関する解析を行うものである。

1.3 解析位置

本解析を行う解析断面は、兵庫県淡路島野島平林地区に位置する地質調査所の調査用井（野島平林 700m 孔）を通り、野島断層に直交する断面 7km とした。解析断面の位置を図 1-1 に示す。

1.4 実施期間

平成 8 年 11 月 14 日～平成 9 年 3 月 7 日

1.5 実施項目

本解析の項目および数量は、表 1-1 に示すとおりである。

表 1-1 実施項目と数量

調査項目	調査数量
地下水流动解析作業	
水質地質解析モデルの構築	1 式
境界条件・初期条件の設定	1 式
地盤物性値の設定	1 式
地下水流动解析作業	1 式
解析結果の検討	1 式
報告書の作成	1 式

1.6 担当者

技術責任者 古屋 和夫
伊東 守
児玉 敏雄



図 1-1 解析断面 位置図

2. 地形・地質概要

2.1 地形概要

淡路島は、長さ約40km、幅約5~20kmの島で、その地形は、北東~南西方向に直線的に延びる脊梁山地と東北東~西南西方向に延びる諭鶴羽山地によって骨組みができており、それらの山地の周囲に丘陵・台地・低地が発達している。

本解析の対象地域は、淡路島北部にあたり、北東~南西方向に延びる山地が発達している。山地の北部から中部にかけて高度200~300mで定高性のある平らな尾根が連なっている。山地の周囲には、丘陵および台地が発達している。丘陵は、東海岸で標高100m以下、西海岸で標高200m以下に分布している。丘陵を構成する堆積物を不整合に覆って段丘堆積物が広範囲に発達しており、段丘堆積物の分布と一致している。また、海岸沿いには、低地が細長く分布している。

2.2 地質概要

本解析の対象地域である淡路島北部には、白亜紀の花崗岩類、第三紀の神戸層群、第三紀鮮新世以降の大坂層群、第四紀の段丘堆積物および沖積層が分布する（中島ほか、1986；藤田ほか、1984；水野ほか、1990；皆川ほか、1995；活断層研究会、1991）。これらの地層の分布は、地形によく反映され、白亜紀花崗岩類は脊梁山地を構成し、神戸層群や大阪層群は、脊梁山地の上面や縁に分布し、緩斜面を構成している。段丘堆積物は高位、中位、および低位の3段が認められ、主に海岸沿いに分布している。沖積層は河川や海の現世堆積物で、河川や海岸に沿った狭い地域に分布している。

以下に、各地層の概要を述べる。

2.2.1 花崗岩類

花崗岩類は、白亜紀領家帯に属しており、淡路島北部の基盤岩として脊梁山地を構成している。花崗岩類は、花崗閃緑岩、花崗岩、アPLIT、ペグマタイトなどの様々な岩石から構成されている。また、ひん岩や花崗斑岩の岩脈類に貫かれており、それら岩脈の幅は一般には1~3mであるが、まれに幅50m以上のものが確認されている。これらの花崗岩類は、全域において破碎変形を受け、マサ化による表層風化が進んでいる。

2.2.2 神戸層群

神戸層群は、淡路島北部および神戸市西部の白川地区を中心に分布する半固結~固結した第三紀堆積岩である。

淡路島北部の神戸層群は、岩屋累層と呼ばれ（池辺編、1961），半固結~固結の砂岩、礫岩および泥岩からなり、主に塊状の砂岩が卓越する。本層群は、主に、野島断層および浅野断層の西側、ならびに楠本断層の東側に分

布する。本層は、浦川以北の脊梁山地にも花崗岩類を不整合に覆って分布する。水野ほか（1990）によれば、神戸層群の厚さは脊梁山地上で100m前後である。

神戸層群は、西海岸側の浅野断層近傍で海側に約10~20°の傾斜を示し、野島断層の西側では30~70°で急傾斜している。また、脊梁山地では、大阪湾側へ約10°傾斜し、東海岸側の楠本断層の東側では15~30°前後南東に傾斜している。

2.2.3 大阪層群

大阪層群は、野島断層および浅野断層の西側、ならびに東海岸の仮屋付近、脊梁山地の舟木周辺に分布している。本層群は基盤とは不整合や断層で接し、一般に海側に向かってより新しい地層が分布している。淡路島北部での大阪層群の厚さは、最大で400m以上に及ぶ。

本層群は、富島累層および仮屋累層の2つに区分される。これらの地層は、大阪層群の下部にあたり、新第三紀鮮新世の堆積物と考えられている（市原、1993）。富島累層は、淡水成のシルトー粘土層、砂層、および、礫層からなり、全体として礫層が優勢である。また、仮屋累層は、富島累層に整合に重なり、粘土層と砂層の互層を主体とし、上部で砂層あるいは礫層が発達する。大阪層群は、西海岸では神戸層群と同様に、西側へ傾斜しており、脊梁山地では大阪湾側へ10°前後傾斜している。東海岸では、東側へ緩傾斜している。

2.2.4 段丘堆積層

段丘堆積層は、西海岸の野島断層および浅野断層の西側に広く分布する。また、東海岸の東浦町白山付近にも点在する。本層は、段丘面の比高、開析の程度、風化の程度などにより、高位・中位・低位段丘層の3層に区分され、各層とも層厚10m前後で、中～巨礫サイズの亜角～角礫からなる（市原、1993）。本層は、大阪層群を不整合に覆う。

2.2.5 沖積層

沖積層は仮屋付近の浦川の河口付近に広く分布している。砂礫層を主体とし、シルト・粘土層を狭む（市原、1993）。

2.3 活断層

淡路島北部地域には、5本の活断層、すなわち、西海岸の野島断層、浅野断層、脊梁山地の中持断層、東海岸の楠本断層、東浦断層が分布している。このうち、野島断層は1995年の兵庫県南部地震で活動した活断層であることが明らかとなっている。

野島断層は、淡路島北西端において、海拔高度200~300mの山地と海拔80m以下に分布する丘陵・台地の境界に発達している。北淡町江崎から野島

にかけて N60° E 方向にはほぼ一直線に延びる長さ約 7km の断層崖を形成している。野島断層が活断層であることは兵庫県南部地震以前から指摘され、既存の文献では野島断層は東側に高角度で傾斜し、東側が相対的に 300m 隆起していると考えられている。野島平林地区に位置する地質調査所の調査用井（野島平林 700m 孔）の調査によると、野島断層の傾斜角は 84° であることが確認されている（伊藤ほか, 1996a, 1996b）。また、断層粘土を含む断層破碎帯は 30m 程度であることが確認されている。

兵庫県南部地震に伴う野島断層沿いの変位量については、多数の調査が行われている。断層の中央部である野島平林付近において最も大きな変位を示しており、水平変位（右ずれ）2.0～2.1m、鉛直変位（東側隆起）1.0～1.4m が観察されている（栗田ほか, 1996）。

また、兵庫県南部地震に伴い、淡路島北部全域において、湧水の新たな自噴や、自噴量の増大が観察された（佐藤ほか, 1995a, 1995b, 1996；渡辺ほか, 1995）。図 2-1, 2 は、佐藤ほか（1995b）の調査による湧水の発生状況を示したものである。湧水の新たな自噴や自噴量の増大は、特に活断層上や、花崗岩類と第三紀層との境界上で顕著である。また、地震に伴う自噴量変化に関して、ほとんどの湧水が、地震直後に自噴を開始し、数日後には自噴量が増大し、その後数カ月かけて減少している傾向が見られた。

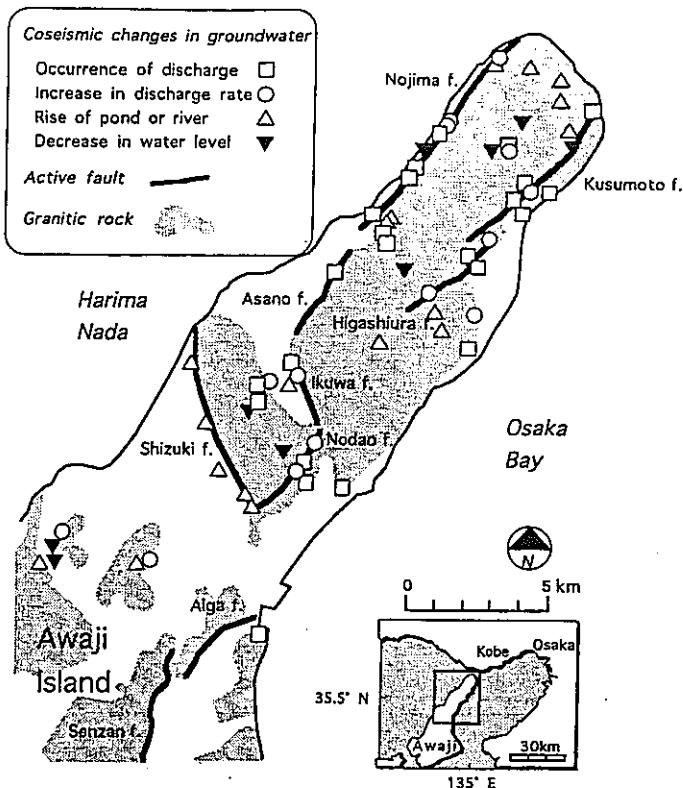


図 2-1 兵庫県南部地震(1995年)後に発生した淡路島北部で生じた地下水の変化分布(佐藤ほか, 1995b)

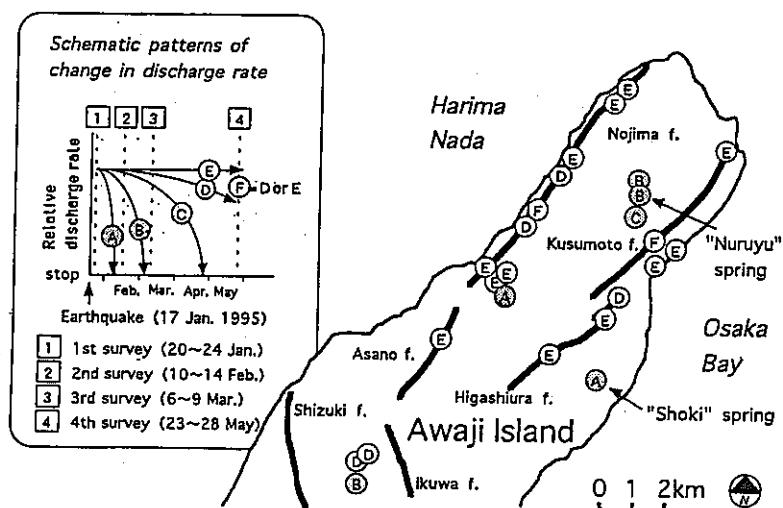


図 2-2 地震後に生じた湧水および自噴量が増加した湧水の地震後の湧水変化(佐藤ほか, 1995b)

- A: 第2回調査(1996年2月10~14日)までに自噴が停止したもの
- B: 第3回調査(1996年3月6~9日)までに自噴が停止したもの
- C: 第4回調査(1996年5月23~28日)までに自噴が停止したもの
- D: 第4回調査(1996年5月23~28日)までに、明らかに自噴が減少したもの
- E: 第4回調査(1996年5月23~28日)までに、自噴量がほとんど変化しないもの
- F: 第4回調査(1996年5月23~28日)において、自噴していたもの

3. 地下水流動解析

3.1 地下水流動のモデル化

野島断層の周辺地下水の調査は、地震後、地質調査所を中心として行われている。主な文献を整理し、それらの所見を表3-1に示す。調査結果によると、湧水の発生原因は明確にされていないが、以下のような事実が示されている。

- ①地震後湧出した地下水は、花崗岩中に含まれていた間隙水であった可能性が高く、湧水箇所は、断層上や花崗岩類と第三紀層の境界付近に多く位置している。
- ②湧水量は地震直後または地震後数日でピークを示し、その数ヶ月後に減少あるいは停止している。

これらのことから、断層周辺の湧水は、地震力によって生じた断層付近の地盤の急激な体積変化による過剰間隙水圧の上昇がもたらしたものである可能性が一つの要因として考えられる。

したがって、本検討においては、地震による断層周辺地盤の過剰間隙水圧の発生・消散を力学的、水理学的にモデル化し検討を行う。

3.2 解析内容

3.2.1 解析方法

二次元応力・浸透連成解析プログラム UNICOUPLによる非定常解析を行う（附資料-1参照）。解析手順は以下の通りである。

- [Step1] 自重による初期応力解析
- [Step2] 地震を想定した強制変位の載荷（2秒間）
- [Step3] 地震後の応力・間隙水圧の緩和計算（～90日後）

3.2.2 解析断面

解析対象は、野島断層（平林地区）に直交し、淡路島を横断する東西断面とする（図1-1参照）。

3.2.3 解析モデル

解析モデルを図3-1に示す。解析領域は幅7,000m、深さ3,000mとし、図のように地質を区分し、岩盤および断層を多孔質・弾性体としてモデル化した。

断層は、粘土化帯および破碎帯の厚さを各々10mとして、モデル化した。領域は、総節点数3,378、総要素数1,103で分割されている。

表 3-1 野島断層の周辺地下水に関する主な既往調査

	内 容	文献番号	参 考 文 献
現象の解釈	<ul style="list-style-type: none"> ・「どうして大量に湧水が生じたのか？」という疑問ははっきりと解明されていない。 ・野島断層のずれは少なくとも深さ 10km に及んでいると考えられる。このずれによって基盤岩中に歪変化が生じ、かなり深い範囲において間隙水圧が上昇し、地下水を湧出させる圧力源となった。 ・噴砂現象は、大量の湧水のきっかけになったかもしれないが、根本的な原因は大きな力が地下の岩盤に加わったためである。 	[1] [1] [1]	<p>[1]佐藤努ほか：1995 年兵庫県南部地震後に生じた淡路島の湧水、地質ニュース 496 号, pp. 61-66, 1995.</p> <p>[2]佐藤努ほか：湧水量から推定される沈降量—1995 年兵庫県南部地震による淡路島の湧水—、日本地震学会講演 1996 年度秋季大会, P106, 1996.</p>
分布	<ul style="list-style-type: none"> ・震源から 20km 以内で震災の地下水文への影響が大きい。 ・震源から 300km 以上離れた地域にも水位への影響が認められている。 	[4] [1]	<p>[3]木口努ほか：ハイドロフォン V S P による野島断層の透水性評価、物理探査学会, 第 94 回学術講演会講演論文集, pp. 44-47, 1996.</p>
湧水箇所	<ul style="list-style-type: none"> ・湧水は基本的に活断層付近に集中している。 ・淡路島北部の湧水は、そのほとんどが花崗岩類の分布する地域で生じ、それ以外の地域からはほとんど湧出していない。 ・湧水が生じたり湧水量が増加した場所は、主に活断層上や花崗岩類と周辺の地層（大阪層群や神戸層群などの第三紀層）との境界に位置する。 ・間隙水圧の上昇は、地表付近の堆積層よりも深い場所に分布する基盤岩において顕著であった。 ・湧水によっては、花崗岩地域の地下水に特徴的なフッ素化イオンが比較的高濃度で含まれているものもある。よって、湧水の大部分は、花崗岩中に含まれていた間隙水であったと考えてよい。 ・湧水は、淡路島北部全域でみられ、主要化学成分濃度の分析結果によると、湧水の主要化学組成はよく類似しており、野島断層付近で生じた湧水のみが特異であるということではなかった。 	[4] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [5]	<p>[4]渡辺紹裕ほか：阪神・淡路大震災による淡路島北部の水環境の変化、農業土木学会誌, Vol. 63, No. 11, pp. 1161-1166, 1995.</p> <p>[5]佐藤努ほか：1995 年兵庫県南部地震に伴う地下水の変化—淡路島で生じた湧水—、地震予知連絡会会報, 第 54 卷, pp. 732-734, 1995.</p>
時間変化	<ul style="list-style-type: none"> ・湧水量の合計は、1995 年 5 月 5,400m³/day が 1996 年 4 月に 50% に減少した。 ・湧水の多くは、1995 年 5 月末までに停止している。 ・地震に伴う自噴量変化に関して、ほとんどの湧水で「地震直後に勢いよく自噴を開始し、翌日には自噴量が減って一定量に落ち着き、それから数ヶ月かけて徐々に減少（幾つかは停止）した」という傾向がみられ、地震後徐々に自噴量を増したものはない。 ・浅井戸（5~6m）の水枯れは、震災後ほぼ半月以内で生じている。 	[2] [4] [5] [4]	
透水性	・野島断層の透水係数は 100md(1×10^{-4} cm/sec) のオーダーである。	[3]	

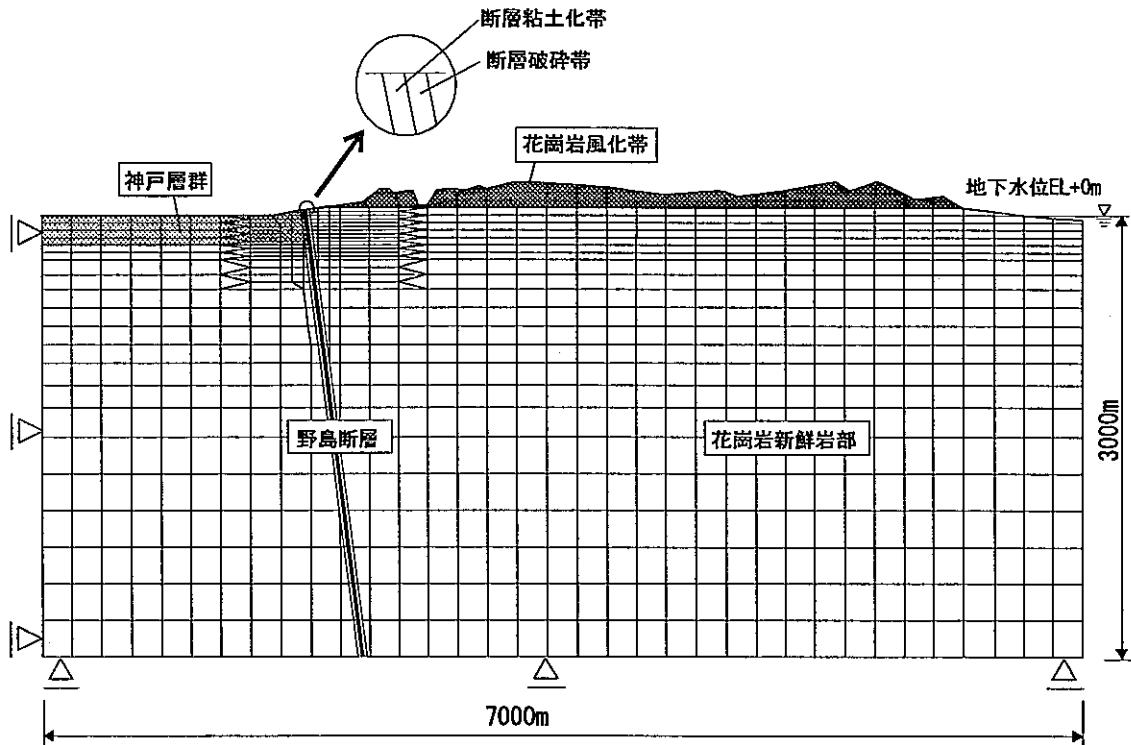


図 3-1 解析モデル

3.2.4 物性値の設定

(1) 岩盤・断層部の物性値

解析モデルの各地質の物性値については、それぞれ、単位体積重量、弾性係数、ポアソン比、透水係数、初期間隙率を設定した（表 3-2）。

花崗岩新鮮部、および、花崗岩風化部、野島断層（粘土化帯、破碎帯）の物性値については、野島断層の調査用井（野島平林 700m 孔；深度 750m）を用いた検層結果（伊藤ほか, 1996a；木口ほか, 1996），および、佐藤ほか(1992), 三木ほか(1984), 吉中ほか(1988), 柳澤ほか(1992), 今井ほか(1992), 石井ほか(1983)などの既存文献に基づき設定した。

神戸層の物性値については、高橋ほか(1989)の神戸層の物理的特性に関する論文、および、上記の既存文献に基づき設定した。

表 3-2 岩盤物性

岩盤	単位体積重量 (kg/m ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	透水係数 (cm/sec)	初期間隙率 (%)
花崗岩新鮮部	2,700	10,000	0.25	1×10^{-5}	0.3
花崗岩風化部	2,700	2,000	0.25	1×10^{-4}	25.0
神戸層	2,200	1,000	0.30	1×10^{-5}	3.0
野島 断層	粘土化帯	2,200	100	0.40	1×10^{-4}
	破碎帶	2,400	300	0.40	1×10^{-4}
					25.0

(2) 不飽和浸透特性

本検討における浸透流解析では、飽和一不飽和解析手法を用いているため、地盤の不飽和特性を設定する必要がある。本解析では、花崗岩新鮮部の不飽和特性として、今井ほか（1992）が設定した花崗岩の不飽和特性曲線を用いることとした（図3-2）。また、神戸層、花崗岩風化部、断層粘土化帯および断層破碎帯についても、花崗岩新鮮部の値をそのまま用いることとした。

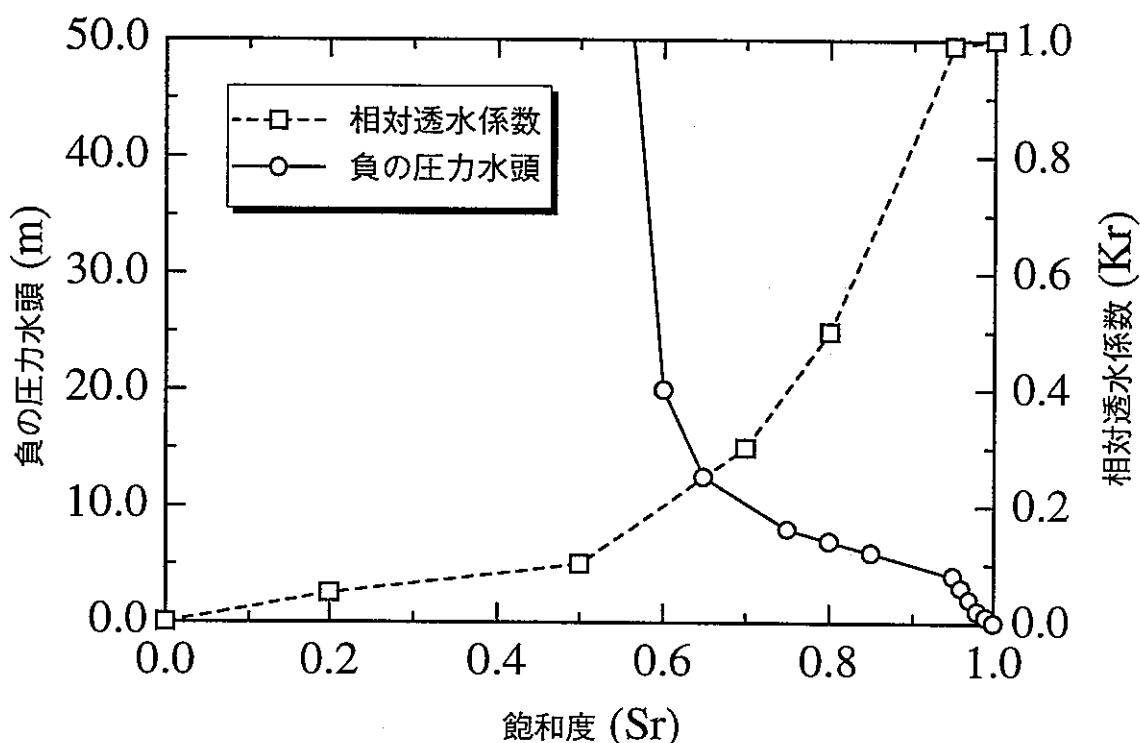


図3-2 不飽和浸透特性

(3) 貯留係数の考え方

一般に、浸透流解析においては貯留率を定数として扱うが、実際には地盤の変形により間隙率が変化し、その結果貯留率も変化する。

本解析では、応力変形解析により求められる変形量から貯留率を算定し、それに基づいて浸透流解析を行う（付資料-2 参照）。

3.2.5 境界条件・初期条件

(1) 地殻の水平変位量の推定

野島平林地区においては、断層の東側隆起1~1.4mが認められている（栗田ら、1996）。本解析では、断層部をジョイント要素でモデル化した有効応力解析を行うことにより、断層地表部の相対変位が1.4mとなる

のような水平方向の地殻変位を求めた。

図3-3に水平変位計算用の解析モデル図を示す。地層のモデル化および物性値は、断層部を除いて、3.2.4で示したものと同様である。断層部はジョイント要素でモデル化しているが、その際、要素の垂直ばね定数として花崗岩新鮮部の弾性係数、せん断ばね定数として粘土化帯と破碎帯の弾性係数の平均値を用いた。

力学的境界条件は、西側境界で水平変位固定、下側境界は断層部より西側を鉛直変位固定、東側をフリーとした。また、東側境界では、水平変位を与える、これをパラメータとした。

水理学的境界条件は、地表を浸出面の扱いとし、側方境界で定水位条件（透水）、下方境界は不透水条件とした。初期条件として地下水水面を基準点（海岸線）に設定した。

以上の条件により弾性解析を実施した。その結果、断層部での相対変位1.4mを再現する水平変位は0.2mとなった（図3-4参照）。

(2) 応力・浸透連成解析

① 境界条件

力学的境界条件は、西側境界で水平変位固定、下側境界は断層部より西側を鉛直変位固定、東側をフリーとした。また、東側境界では、(1)の検討で得られた水平変位0.2mを2秒間かけて載荷する。

水理学的境界条件は、地表を浸出面の扱いとし、側方境界で定水位条件（透水）、下端部は不透水条件とした。初期条件として地下水水面を基準点（海岸線）に設定した。

② 初期条件

力学的には、自重による初期応力状態を初期条件とした。水理学的初期条件としては、地下水水面を基準点（海岸線）に設定した。

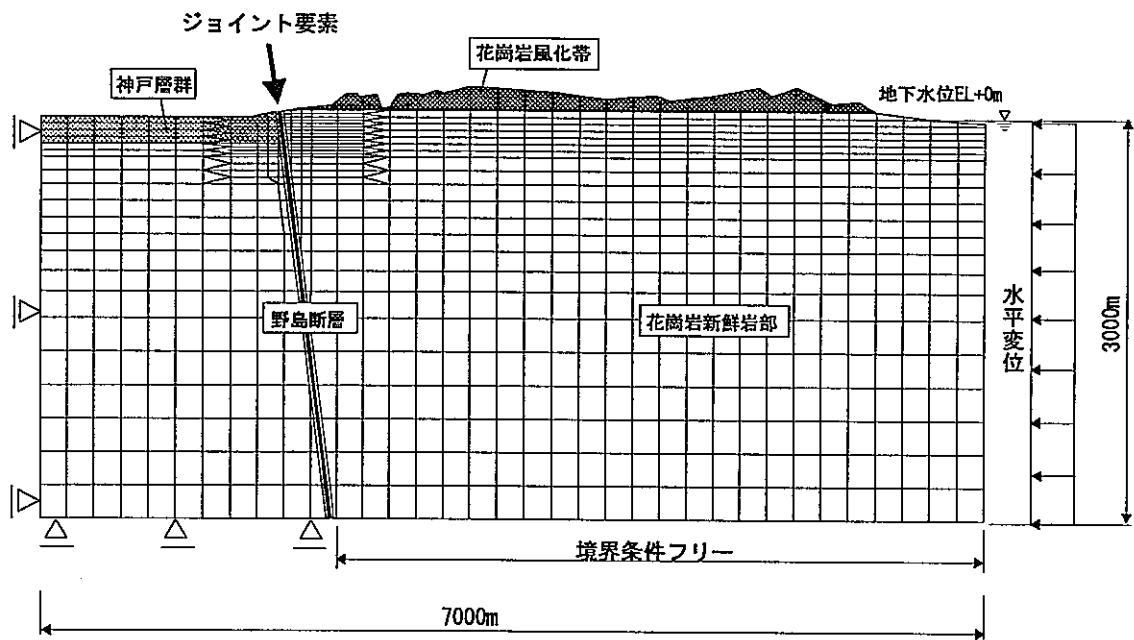


図 3-3 ジョイント要素を用いた解析モデル

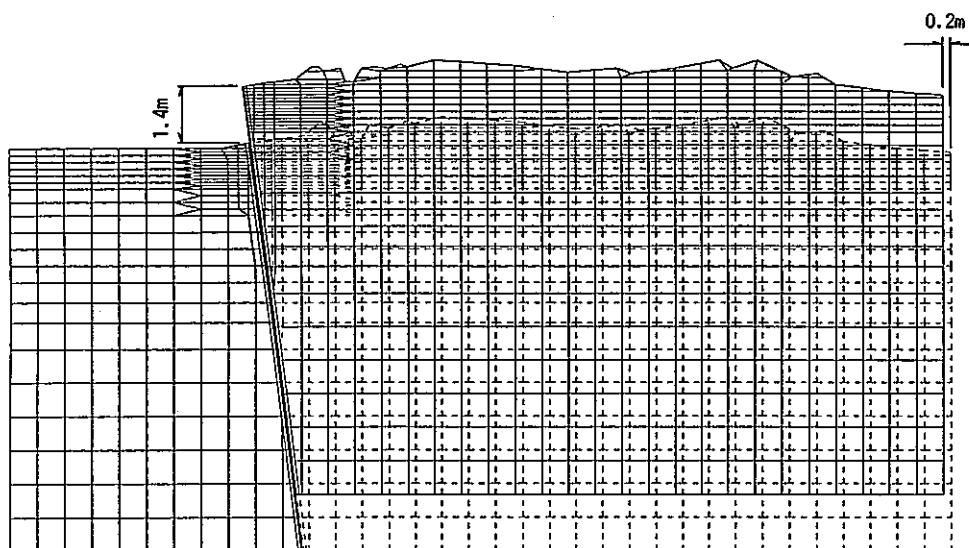


図 3-4 断層の変形解析結果

③ 降雨の条件

降雨を考慮する場合の解析では、雨が降り続いている状態（涵養量 0.57mm/日の定常状態）で地震が起こったという想定のもと、地震後3ヶ月後まで涵養量 0.57mm/日の流量を地表面で与える。

3.2.6 解析ケース

本解析では、次のような手順により、表3-3に示す解析ケースについて解析した。

① 弹性係数および透水係数のパラメータスタディ (CASE1~5)

断層部からの湧水量が地震発生数日後に最大値を示し、その後減少したとの観察結果がある。そこで、第一に、適切な断層の粘土化帯および破碎帯の弾性係数と透水係数を設定し、パラメータスタディを行い、観測結果に最も適合する上記物性値を選定する。なお、これらの解析では、降雨の影響は考慮しない。

その結果、後述するように、観測結果に最も適合する解析ケースとしては、CASE2であることがわかった。

② 降雨の影響の検討 (CASE6)

①の結果により得られた適切な物性値 (CASE2) を用いて、降雨を考慮した場合の解析を行う。

③ 断層幅の影響の検討 (CASE7)

CASE6の条件を基本とし、断層の粘土化帯および破碎帯の幅をそれぞれ1.0m, 20.0mに変更した場合の解析を行った。

④ 断層の透水係数の影響の検討 (CASE8, 9)

断層の粘土化帯の透水係数を 1×10^{-9} cm/secに変更した場合

(CASE8)，および、さらに、CASE8の条件でにおいて地震前後の破碎帯の透水係数を変更した ($1\times 10^{-7}\rightarrow 1\times 10^{-3}$ cm/sec) 場合 (CASE9) の解析を行った。

表 3-3 解析ケース

CASE	弹性係数(MPa)		透水係数(cm/sec.)		降雨 考慮	備 考
	断層部 粘土化帯	断層部 破碎帯	断層部 粘土化帯	断層部 破碎帯		
1	50	100	1×10^{-4}	1×10^{-4}	無	弹性係数パラメータスタディ①
2	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	無	弹性係数パラメータスタディ②
3	500	1500	1×10^{-4}	1×10^{-4}	無	弹性係数パラメータスタディ③
4	100	300	1×10^{-5}	1×10^{-4}	無	透水係数パラメータスタディ①
5	500	1500	1×10^{-5}	1×10^{-4}	無	透水係数パラメータスタディ②
6	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	有	CASE2の条件で降雨考慮
7	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	有	CASE6の条件で粘土化帯幅1m, 破碎帯20mに変更
8	100	300	1×10^{-9}	1×10^{-3}	有	CASE6の条件で断層の透水係数変更
9	100	300	1×10^{-9}	*	有	CASE8の条件で地震前後の破碎帯の透水係数変更 (*: $1\times 10^{-7}\rightarrow 1\times 10^{-3}$)

3.3 解析結果

3.3.1 地震後の地下水流动

(1) 変形、応力および全水頭分布

降雨を考慮しない場合(CASE1～CASE5)における初期応力状態(地震前)、地震直後(2秒後)、1日後、30日後、60日後、90日後の地殻の変形、有効応力の主応力ベクトルおよび全水頭分布を下表の図に示す。

CASE	図番号
1	図3-8～図3-15
2	図3-19～図3-31
3	図3-35～図3-42
4	図3-46～図3-53
5	図3-57～図3-64

① 地殻の変形

CASE1において、地震発生時間2秒の間に水平変位0.2mを与えた結果、地震直後(2秒後)の断層地表部の鉛直変位は全ケースを通じて約0.09m(隆起)となり、日数の経過とともに減少し、90日後約0.07mとなっている。また、CASE2～CASE5においても同様の結果が得られている。

地盤の変形が時間とともに緩和していく理由は、地震直後に急激に増加した地盤内部の間隙水圧が、時間の経過とともに消散していくためであると考えられる。

なお、地下水流动解析では、断層の不連續性をジョイント要素等でモデル化していないため、断層部の相対的な鉛直ずれは表現されていない。

② 地殻の応力

図3-5に、CASE1の90日後の地盤応力の計算結果および既往の野島断層近傍の地殻応力の計測結果を示す。

淡路島の野島断層近傍の応力状態については、地質調査所、防災科学技術研究所が、それぞれ育波および平林において行っている。それらの測定結果は、表3-4のとおりである。

表 3-4 地殻応力測定結果

測定場所	測定方法	測定深度(m)	測定結果(水平面内主応力)		測定者
			最大主応力(Mpa)	最小主応力(Mpa)	
育波	AE法	640	23	18	地質調査所
	DSCA法	640	18	11	
平林	水圧破碎法	600	25	16	防災科学技術研究所
		1,200	27~44	20~24	

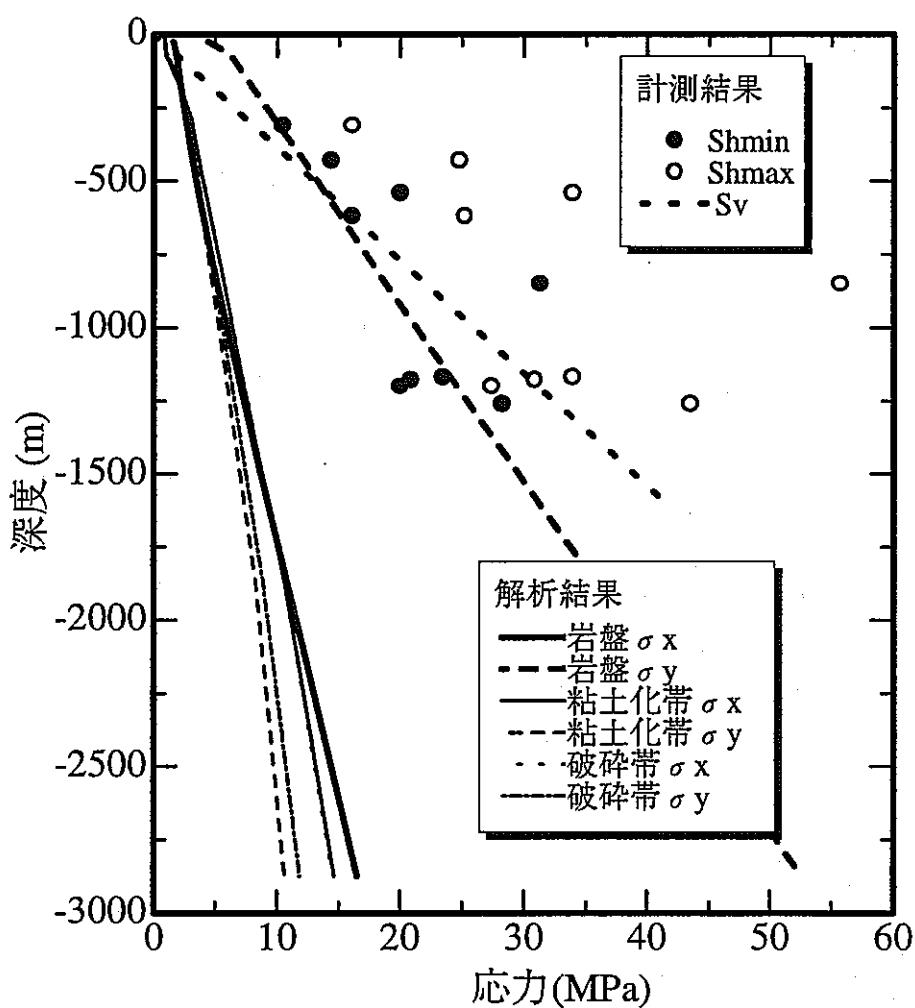


図 3-5 野島平林における応力値の深さ分布

花崗岩新鮮部の鉛直応力の解析値は、計測結果に近い値となっている。断層部の鉛直応力、水平応力および岩盤部の水平応力の解析値は計測値に比べて低い値を示している。この理由は、断層部の剛性や周辺岩盤の実際の応力分布が十分に考慮されていないためであると考えられる。

③ 全水頭分布

CASE1～CASE5において、全水頭分布の時間変化より、地震後断層部付近で過剰間隙水圧が急激に上昇し、時間とともに消散していく様子が認められる。また、全水頭のピークは断層部 EL-300～500m 付近において発生し、その値は 55～63m 程度となっている（図 3-14, 図 3-25, 図 3-41, 図 3-52, 図 3-63）。CASE1～CASE3 は、断層部の弾性係数が順に大きく設定されているが、弾性係数が大きいほど過剰間隙水圧のピークは大きくなることがわかる。

（2）断層部の流速分布

CASE1～CASE5における1日後、30日後、60日後、90日後の地下水流速ベクトルを下表の図に示す。

CASE	図番号
1	図 3-16
2	図 3-32
3	図 3-43
4	図 3-54
5	図 3-65

これらの図より、地震後1日で、圧縮された断層部から周辺地盤および断層部上方への地下水の流動がみられる。また、日数の経過とともに断層深部の地下水が上方に向かって流動している様子がわかる。

（3）全水頭の空間分布および時間変化

CASE1～CASE5におけるEL-150m, EL-500m 断面の全水頭の時間変化およびEL+0m (A 断面), 断層沿い (B 断面), ポーリング孔沿い (C 断面) の主な節点における全水頭の時間変化を下表の図に示す。

CASE	図番号
1	図 3-17, 図 3-18
2	図 3-33, 図 3-34
3	図 3-44, 図 3-45
4	図 3-55, 図 3-56
5	図 3-66, 図 3-67

(a) 全水頭の空間分布

CASE1～CASE5において以下のような傾向がみられる。

- ・EL-150m, EL-500m断面とともに断層部において過剰間隙水圧の集中がみられ、時間とともに圧力が低下していく様子がわかる。
- ・地震直後および1日後の全水頭は、EL-150mにおいて断層部を境に東側が西側に比べて大きな値を示している。これは、EL-150mにおいて西側に存在している神戸層の弾性係数(1,000MPa)と東側の花崗岩新鮮部の弾性係数(10,000MPa)の差に起因するものと考えられる。

(b) 全水頭の時間変化

CASE1～CASE5において以下のような傾向がみられる。

- ・EL+0m(A断面)の節点では、全水頭は数日で緩やかに上昇し、その後一定の値を保っている。
- ・断層沿い(B断面)では、EL+0mの節点を除く節点で、地震直後全水頭のピークがみられ、その後圧力の値は時間の経過とともに減衰していく傾向にある。
- ・ボーリング孔沿い(C断面)では、EL+0mを除く節点で、B断面と同様の圧力変化を示すが、ピークの値は断層部(B断面)に比べ、小さくなっている。

(4) 断層部からの湧水量

CASE1～CASE5における断層部湧水量の時間変化を図3-6に示す。

表3-5 湧水量のピーク

CASE	弾性係数(MPa)		透水係数(cm/sec)		湧水量のピーク	
	粘土化帯	破碎帯	粘土化帯	破碎帯	流量(m ³ /day)	経過日数
1	50	100	1×10^{-4}	1×10^{-4}	0.037	9.5
2	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	0.032	8.5
3	500	1500	1×10^{-4}	1×10^{-4}	0.025	8.3
4	100	300	1×10^{-5}	1×10^{-4}	0.018	13.0
5	500	1500	1×10^{-5}	1×10^{-4}	0.014	13.0

(*湧水量は断層部3節点の合計)

- ・湧水量のピークは、地震直後と地震後数日後にみられる。地震直後に現れる最初のピークは、地表面付近の地下水が瞬時に流出したもので、その後、断層深部の地下水が間隙水圧の急激な上昇により噴出し、最大ピーク値を示すものと考えられる。
- ・湧水量の最大ピークは、CASE2, CASE3においてそれぞれ8.5日, 8.3日となり、観測結果に近い値となっている。その他のケースにおいて

ても、湧水量の最大ピークは、9.5日から13日となり、その後、時間の経過とともに減衰している。これらの結果および断層部の性状を考慮すると、CASE2の値が妥当であると考えられる。

- ・粘土化帯の透水係数のみが異なる2組のケース(CASE2, 4およびCASE3, 5)の解析結果より、粘土化帯の透水係数が小さいほど、湧水量は小さくなり、ピークは遅れる傾向にあることがわかる。
- ・湧水量のピークには、弾性係数が小さいほど、または初期間隙率が大きいほど遅れる傾向がみられる。

(5) まとめ

- ・全水頭分布の時間変化より、地震後断層部付近で過剰間隙水圧が急激に上昇し、時間とともに消散していく現象が再現された。
- ・全水頭のピークは断層部 EL-300~500m 付近において発生し、その値はほぼ 55~63m 程度となった。
- ・断層部の弾性係数のパラメータスタディにより、弾性係数が大きいほど過剰間隙水圧のピークは大きくなることがわかった。
- ・弾性係数のパラメータスタディにより、湧水量のピークは、8~13 日程度で出現することがわかった。観測値との比較、断層部の性状を考慮すると、CASE2の値が妥当であると考えられる。

3.3.2 降雨の影響の検討

CASE2の条件のもとで、降雨を考慮した場合(CASE6)の解析結果を図 3-68~3-83 に示す。

(1) 全水頭分布

全水頭の分布(図 3-68~3-80)をみると、降雨を考慮した場合には、降雨を考慮しない場合(CASE2)に比べて、明らかな差異が認められる。降雨を考慮した解析では、断層部東側山地部を中心とし、雨水の涵養による全水頭分布への影響がみられる。全水頭の最大値は、山地部地表面で約 110m となっている。

(2) 断層部の流速分布

流速分布の時間変化を図 3-81 に示す。

- ・地震直後および1日後においては、断層部を上昇する流れが CASE2 と同様にみられる。
- ・地震後、時間の経過とともに(30, 60, 90 日後)，地震によって発生した間隙水圧が消散し、涵養による下向きの流速が卓越してくる傾向がみられる。

(3) 全水頭の空間分布および時間変化

CASE6 における全水頭の空間分布および時間変化を、図 3-82, 3-83

に示す。

(a) 全水頭の空間分布

- ・全体的に雨水の涵養による全水頭の増加が顕著に現れている。断層部の間隙水圧の増加の影響は、EL-500mにおいて、地震直後から1日後にかけてみられるが、その大きさは小さい。
- ・EL-150mにおいて断層部を境に東側が西側に比べて、全水頭が大きくなっている傾向は、CASE2と同様に現れている。

(b) 全水頭の時間変化

- ・EL+0m (A断面) の節点では、そのレベルより上の涵養水相当の初期水頭を有しており、地震後2日程度で、断層からの湧水量に相当する水頭の低下が生じ、その後一定の値を保っている。
- ・断層沿い (B断面) では、全ての節点で、地震直後全水頭のピークがみられ、その後全水頭の値は時間の経過とともに減衰していく傾向にある。
- ・ボーリング孔沿い (C断面) では、全ての節点で、B断面と同様の水頭の変化を示すが、ピークの値は断層部に比べ小さくなっている。

(4) 断層部からの湧水量

CASE6における断層部からの湧水量を図3-7に示す。

- ・湧水量のピークは、地震直後と地震後数日後にみられる。この原因是、降雨を考慮しない場合と同様に、地震直後に現れる最初のピークは、地表面付近の地下水が瞬時に流出したもので、その後、断層深部の地下水が間隙水圧の急激な上昇により噴出し、最大ピーク値を示すからであると考えられる。
- ・湧水量の最大ピークは、地震直後で $0.567\text{m}^3/\text{day}$ となり、次のピークは、2.25日後で、 $0.090\text{ m}^3/\text{day}$ となっている。

(5) まとめ

解析対象地域の地下水環境に対する降雨の影響は大きく、継続的な降雨により、地下の全水頭分布が大きく変化することがわかった。降雨を考慮しない場合、湧水量の最大ピークが8.5日であるのに対して、降雨を考慮した場合、ピークが地震直後にくることがわかった。

また、地震後数日間の湧水量の最大ピークは、降雨を考慮しない場合の約18倍となっている。

3.3.3 断層幅の影響の検討

CASE6の条件のもとで、断層の幅を、粘土化帯幅1m、破碎帯幅20mに変更した(CASE7)。解析結果を図3-84～3-94に示す。

(1) 全水頭分布

全水頭の分布（図 3-84～3-91）を CASE6 の結果と比較すると、断層の幅を変更したことによる顕著な差異はみられない。

(2) 断層部の流速分布

流速分布の時間変化を図 3-92 に示す。断層の幅を変更したことによる大きな差異はみられない。

(3) 全水頭の空間分布および時間変化

CASE7 における全水頭の空間分布および時間変化を図 3-93, 3-94 に示す。

(a) 全水頭の空間分布

CASE6 の結果と比べて、大きな差異は認められない。

(b) 全水頭の時間変化

全水頭の変化の傾向は、CASE6 の結果と同様であるが、全水頭の値は、CASE6 と比べて若干小さくなっている。

(4) 断層部からの湧水量

CASE7 における断層部からの湧水量を図 3-7 に示す。

- ・湧水量のピークは、CASE6 と同様、地震直後と地震後数日後にみられる。
- ・湧水量の最大ピークは、地震直後で $0.474 \text{m}^3/\text{day}$ となり、次のピークは、1.88 日後で、 $0.108 \text{ m}^3/\text{day}$ となっている。
- ・断層部に全体からの湧水量（3 節点の合計値）と、破碎帯からの湧水量（2 節点の合計値）はほぼ等しい。この理由は、粘土化帯の幅が 1m と小さく、流量が少ないと考えられる。

(5) まとめ

断層の厚さを、粘土化帯幅 1m、破碎帯幅 20m に変更した解析を実施した。その結果、CASE6（粘土化帯幅 10m、破碎帯幅 10m）と比べて、湧水量には若干の差異はみられるものの、全体的に大きな相違は認められないことがわかった。

3.3.4 断層の透水係数の影響の検討

CASE6 の条件（粘土化帯の透水係数： $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 、破碎帯の透水係数： $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ ）のうちで、断層の透水係数を以下のように変化させた解析を行った。

CASE8：粘土化帯の透水係数： $1 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$,

破碎帯の透水係数 : $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$

CASE9：粘土化帯の透水係数： $1 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$,

破碎帯の透水係数 : $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ (地震前)
 $\rightarrow 1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (地震後)

図 3-95~3-116 に CASE8, CASE9 の結果を示す。

(1) 全水頭分布

全水頭の分布を図 3-95~3-102 および図 3-106~3-113 に示す。

CASE8, 9 ともに以下のような傾向がみられる。

- ・ CASE6 と同様に、断層部東側山地部を中心に、雨水の涵養による全水頭の分布がみられ、全水頭の最大値は、山地部地表面で約 110m (CASE8), 120m (CASE9) となっている。
- ・ 断層を境に東西の全水頭分布は不連続となっている。この理由は、粘土化帯の透水係数が小さく、実質的に不透水ゾーンとなっているためである。

(2) 断層部の流速分布

断層部の流速分布を図 3-103 および図 3-114 に示す。

- ・ CASE8 では、断層破碎帯の透水係数が、地震前後を通して $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ と、CASE6 に比べて 1 オーダー大きいため、断層に沿った上向きの地下水流速が卓越している。
- ・ CASE9 では、断層破碎帯の透水係数は、地震前において小さく ($1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$)、地震後大きくなるため ($1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)、CASE8 に比べて断層に沿った流速が小さくなっている。この理由は、定常の全水頭計算時の破碎帯の透水係数が CASE8 に比べて小さくなっているためであると考えられる。

(3) 全水頭の空間分布および時間変化

CASE8, CASE9 の全水頭の空間分布および時間変化を図 3-104, 105 および図 3-115, 3-116 に示す。

(a) 全水頭の空間分布

- ・ CASE8 では、断層部を境に東西両側で 40m (EL-150m) ~ 50m (EL-500m) の全水頭の不連続性がみられる。
- ・ CASE9 では、断層部を境に東西両側で 60m (EL-150m) ~ 70m (EL-500m) の全水頭の不連続性がみられる。
- ・ 東西両側の全水頭の差が CASE8 と CASE9 とで異なる理由は、地震前の破碎帯の透水係数の違いに起因するものと考えられる。

(b) 全水頭の時間変化

- ・ CASE8 と CASE9 の結果を比較すると、地震直後のピークに 20m 程度の差がみられるが、定性的な挙動は、CASE6 とほぼ同様である。

(4) 断層部からの湧水量

- ・ CASE8, CASE9 とともに湧水量のピークはひとつで、地震直後にみられる。破碎帯の透水係数が小さい場合(CASE6など)では、ピークが二つみられている。理由の一つとして、破碎帯の透水係数が1オーダー大きいために、断層深部の地下水が連続して流出することが考えられる。
- ・ CASE8 のピーク流量は $1.18\text{m}^3/\text{day}$ で地震直後に現れており、その後約 $0.5 \text{ m}^3/\text{day}$ の一定値をとっている。減衰した流量が零にならない理由の一つとして、CASE6 に比べて破碎帯の透水係数が、1オーダー大きいため、雨水の涵養による地下水が断層に定常的に供給されることが考えられる。
- ・ CASE9 のピーク流量は $0.027\text{m}^3/\text{day}$ で3日後に現れており、その後約 $0.025\text{m}^3/\text{day}$ の一定値をとっている。
- ・ CASE9 は CASE8 と比べて地震直後の湧水量のピークが、小さくなっている。この理由は、地震前の透水係数が CASE8 に比べて小さいため、地震直後の湧水量のピークが抑えられているためであると考えられる。

(5) まとめ

- ・ CASE8, CASE9において、断層を境に東西の全水頭分布は不連続となり、その差は $40\text{m} \sim 70\text{m}$ 程度となる。この理由は、粘土化帯の透水係数が小さいため、粘土化帯は実質的に不透水ゾーンとなっているためであると考えられる。
- ・ CASE8, CASE9ともに湧水量のピークはひとつで、地震直後にみられ、その後流量は緩やかに減少し、一定値をとる。この理由は、破碎帯の透水係数が、比較的大きいため、雨水の涵養による地下水が断層を連続的に通り湧出するためであると考えられる。

3.4 まとめ

本検討によって得られた主な知見を以下に示す。

- ① 全水頭分布の時間変化より、地震後断層部付近で過剰間隙水圧が急激に上昇し、時間とともに消散していく現象が数値的に再現された。全水頭のピークは断層部 EL-300～500m 付近において発生し、その値は $55 \sim 63\text{m}$ 程度であった。
- ② 断層部からの湧水量のピークは、地震直後～13日程度で出現することがわかった。また、流量は、降雨を考慮しない場合 $0.014 \sim 0.037\text{m}^3/\text{day}$ となり、降雨を考慮した場合 $0.027 \sim 1.180\text{m}^3/\text{day}$ となつた(表3-6参照)。
- ③ 解析対象地域の地下水環境に対する降雨の影響は大きく、継続的な降雨により、地下水の全水頭分布が大きく変化することがわかった。

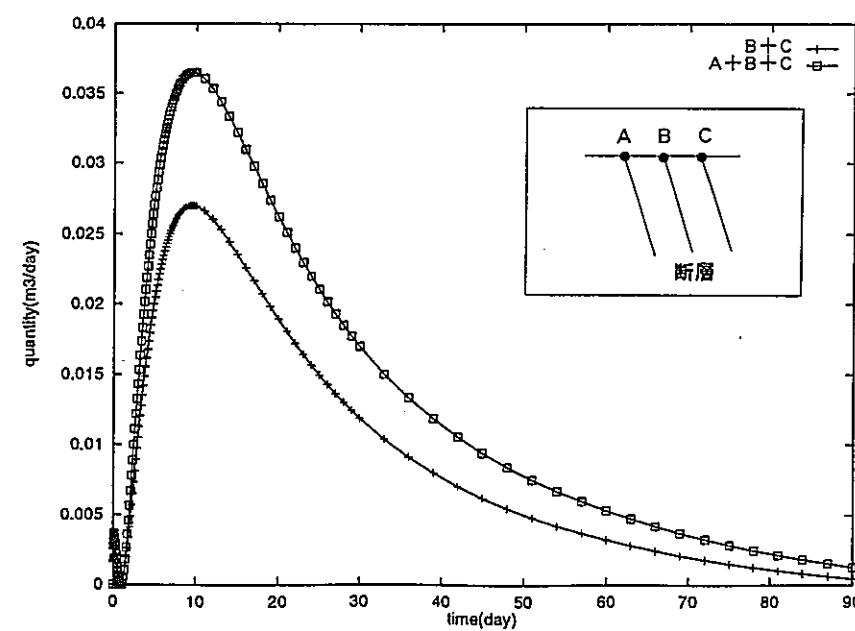
降雨を考慮しない場合、湧水量の最大ピークが 8.5 日であるのに対して、降雨を考慮した場合、ピークが地震直後にくることがわかった。また、地震後数日間の湧水量の最大ピークは、降雨を考慮しない場合の約 18 倍となった。

- ④ 断層の幅を変更した場合（粘土化帯幅 10m、破碎帯幅 10m から粘土化帯幅 1m、破碎帯幅 20m）の解析を行い断層幅の影響を検討した。その結果、湧水量には若干の差異はみられるものの、全体的に大きな相違は認められなかったことがわかった。
- ⑤ 断層の粘土化帯の透水係数を小さく設定した場合 (1.0×10^{-9} cm/sec)，断層を境に東西の全水頭分布は不連続となり、その差は 40m~70m 程度となることがわかった。

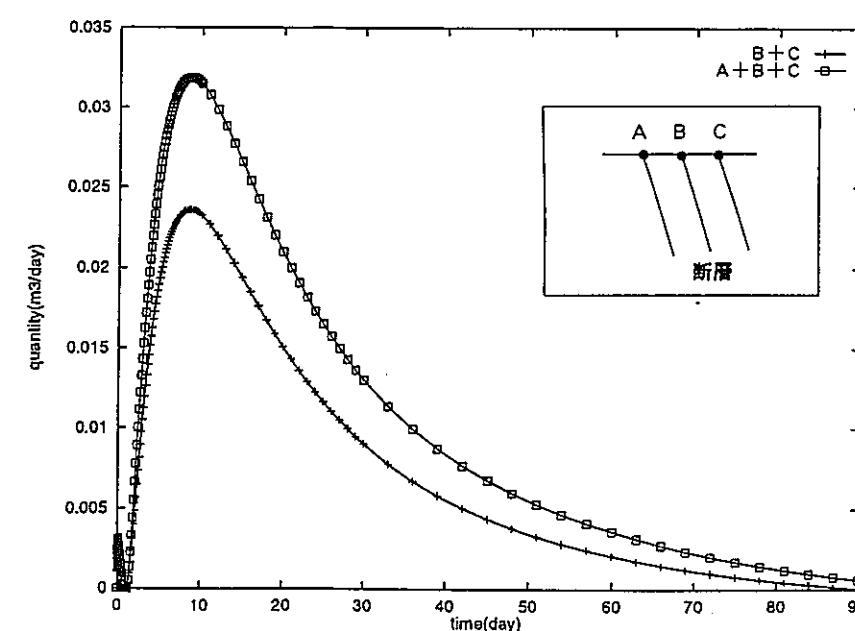
表 3-6 解析結果

CASE	弾性係数(MPa)		透水係数(cm/sec.)		降雨 考慮	湧水量のピーク	
	断層部 粘土化帯	断層部 破碎帯	断層部 粘土化帯	断層部 破碎帯		流量(m ³ /day)	経過日数
1	50	100	1×10^{-4}	1×10^{-4}	無	0.037	9.5
2	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	無	0.032	8.5
3	500	1500	1×10^{-4}	1×10^{-4}	無	0.025	8.3
4	100	300	1×10^{-5}	1×10^{-4}	無	0.018	13.0
5	500	1500	1×10^{-5}	1×10^{-4}	無	0.014	13.0
6	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	有	0.567	地震直後
7	100	300	1×10^{-4}	1×10^{-4}	有	0.474	地震直後
8	100	300	1×10^{-9}	1×10^{-3}	有	1.180	地震直後
9	100	300	1×10^{-9}	*	有	0.027	3.0

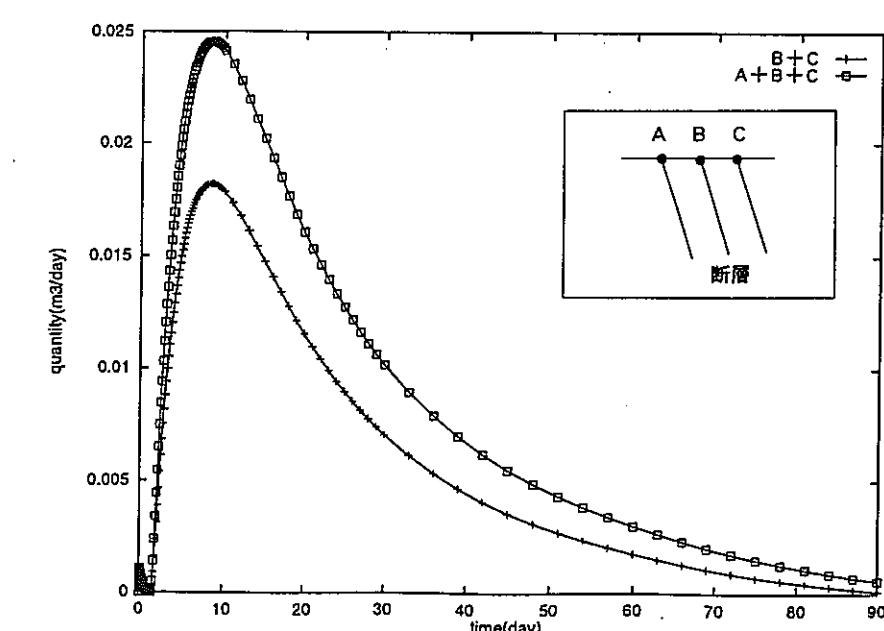
(*: $1 \times 10^{-7} \rightarrow 1 \times 10^{-3}$)



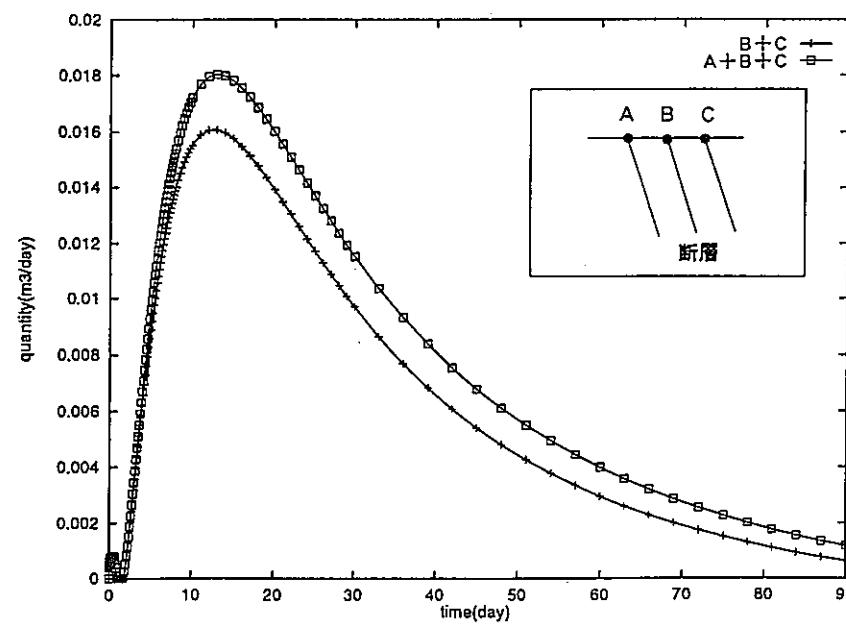
CASE1



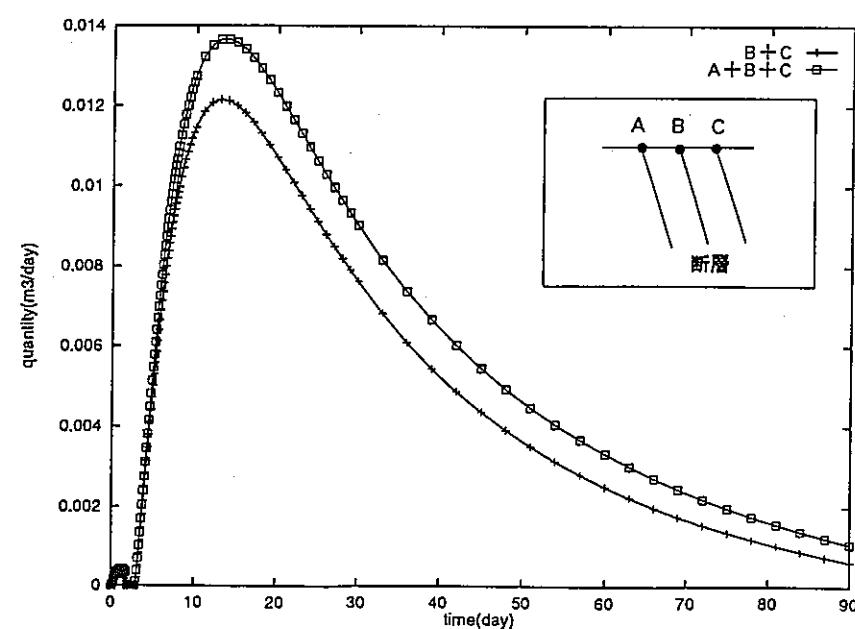
CASE2



CASE3

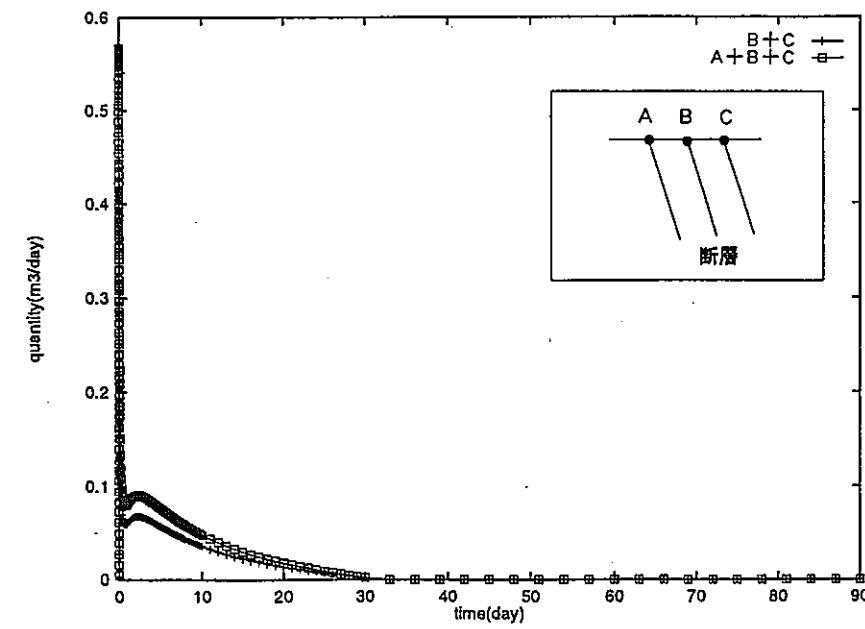


CASE4

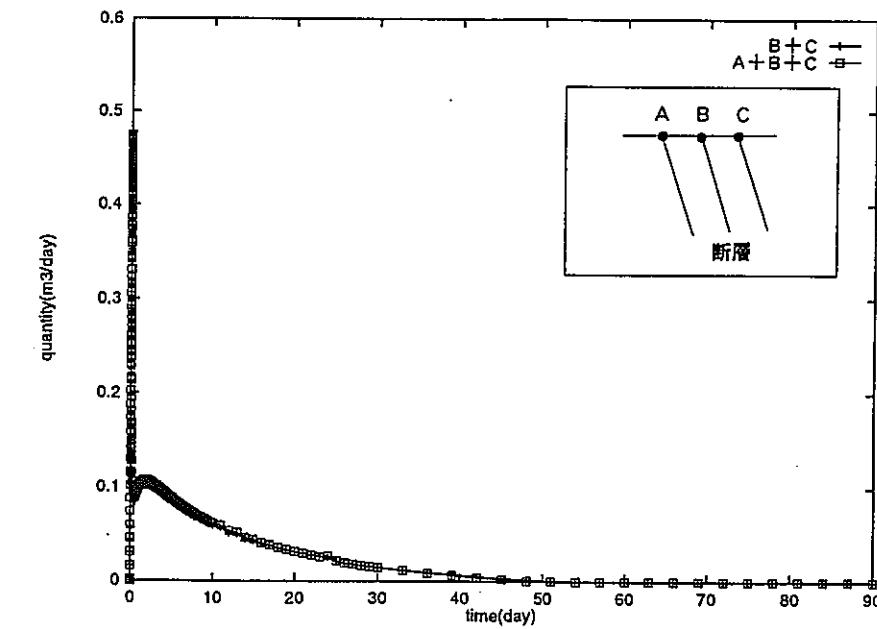


CASE5

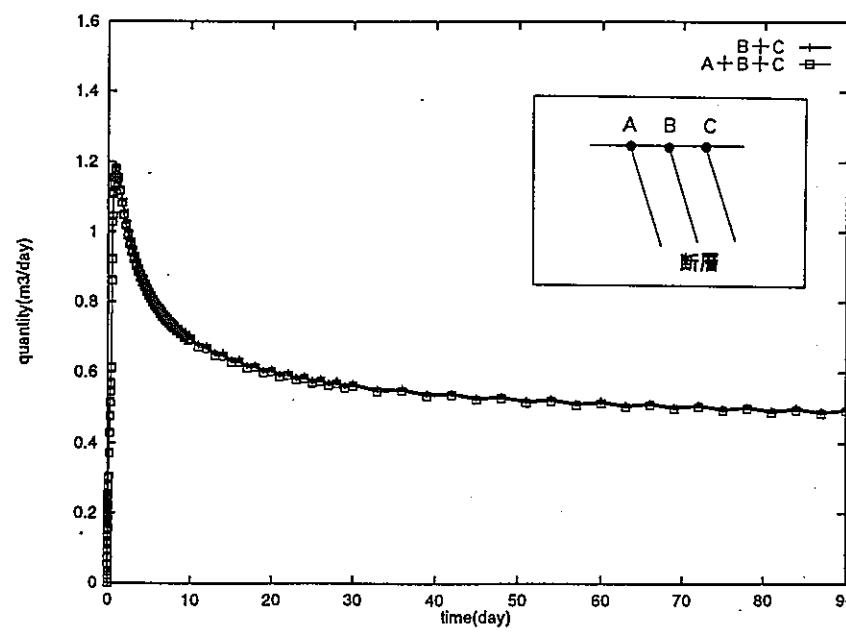
図 3-6 断層地表部湧水量の時間変化(CASE1~5)



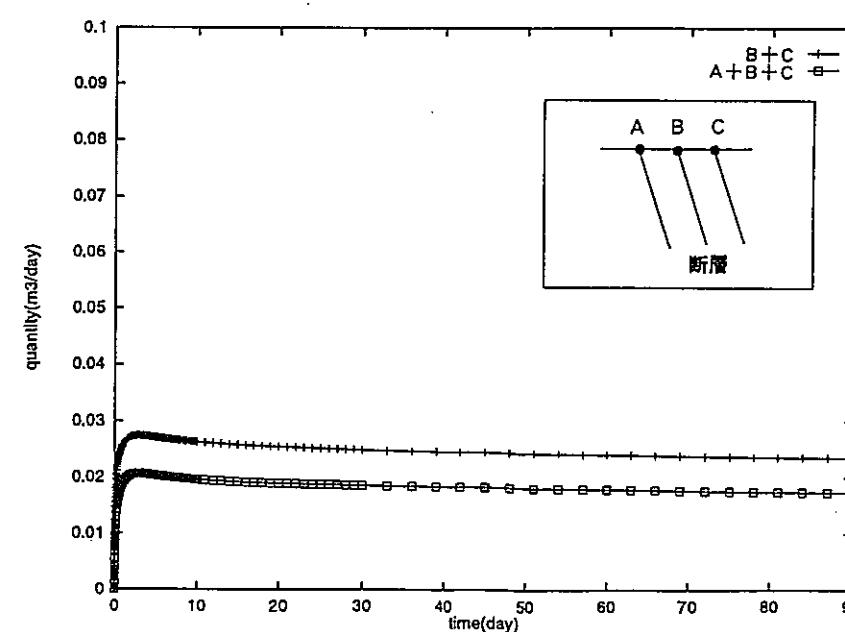
CASE6



CASE7

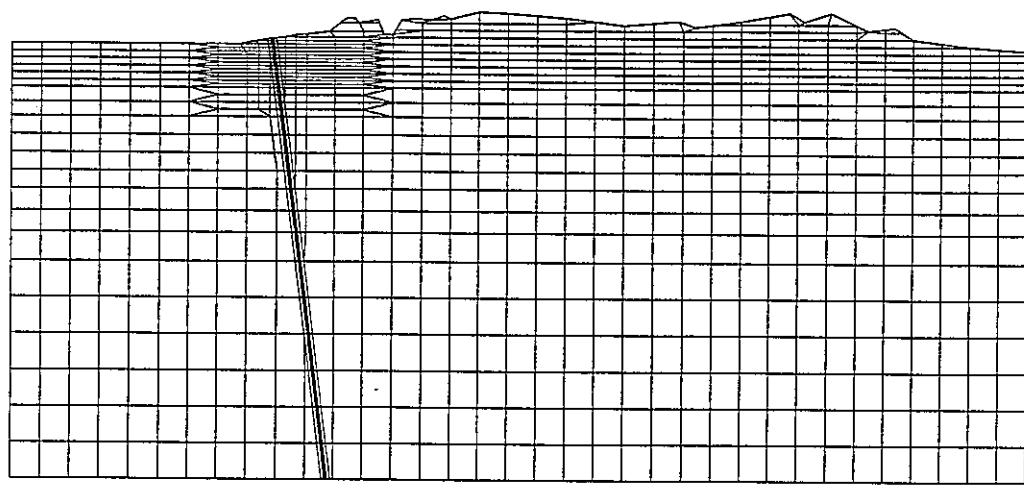


CASE8



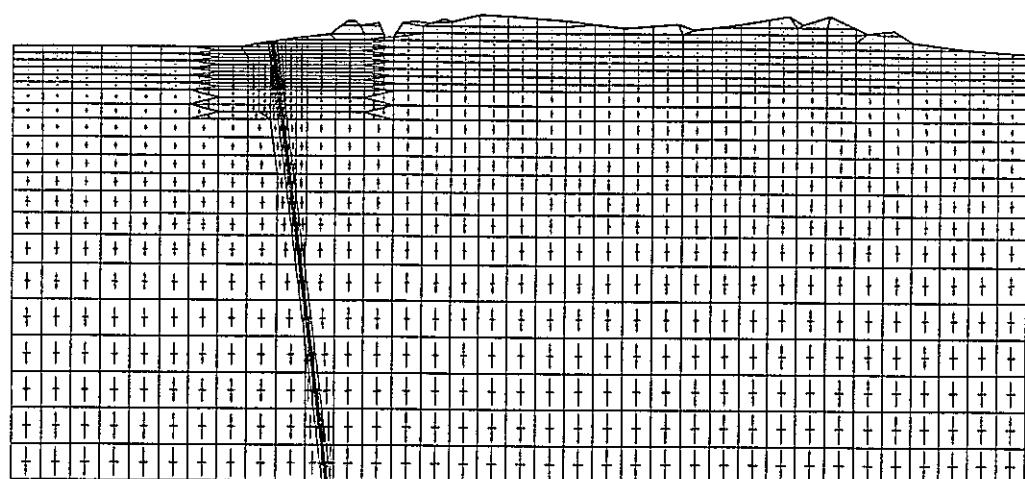
CASE9

図 3-7 断層地表部湧水量の時間変化(CASE6~9)



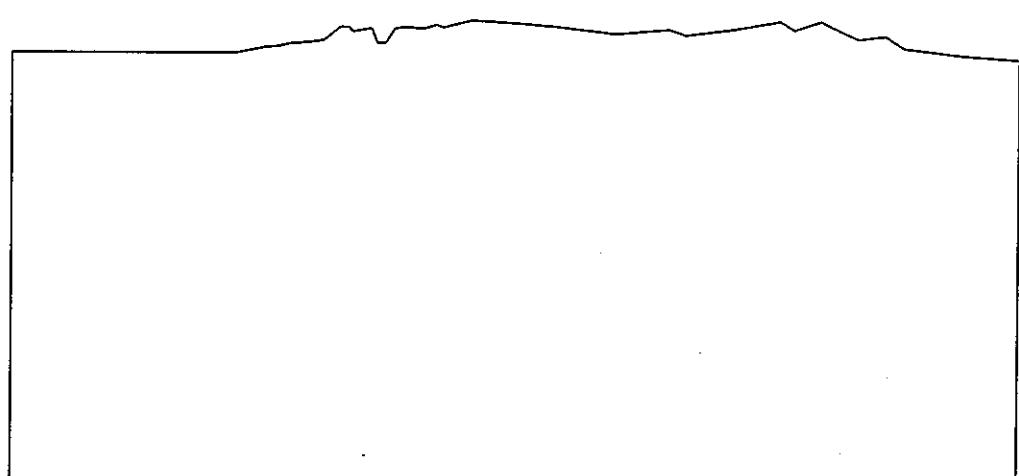
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : 1.0×10^4 t/m²

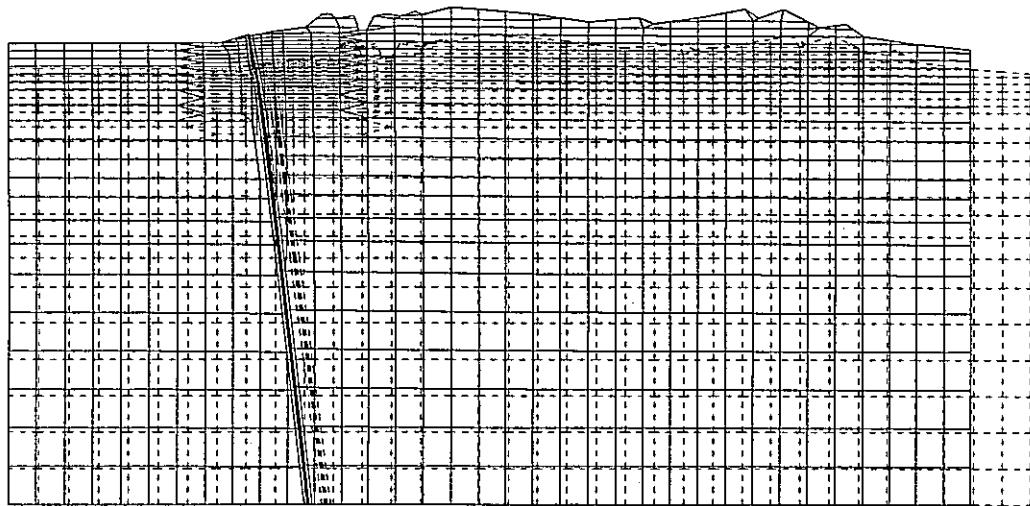


(c) 全水頭分布

単位: m

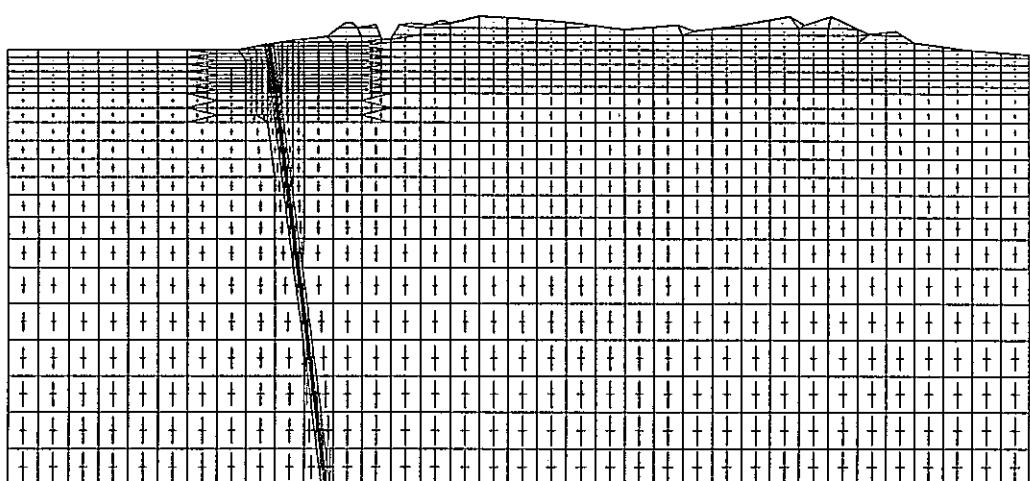
0 1000 2000m

図 3-8 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE1)



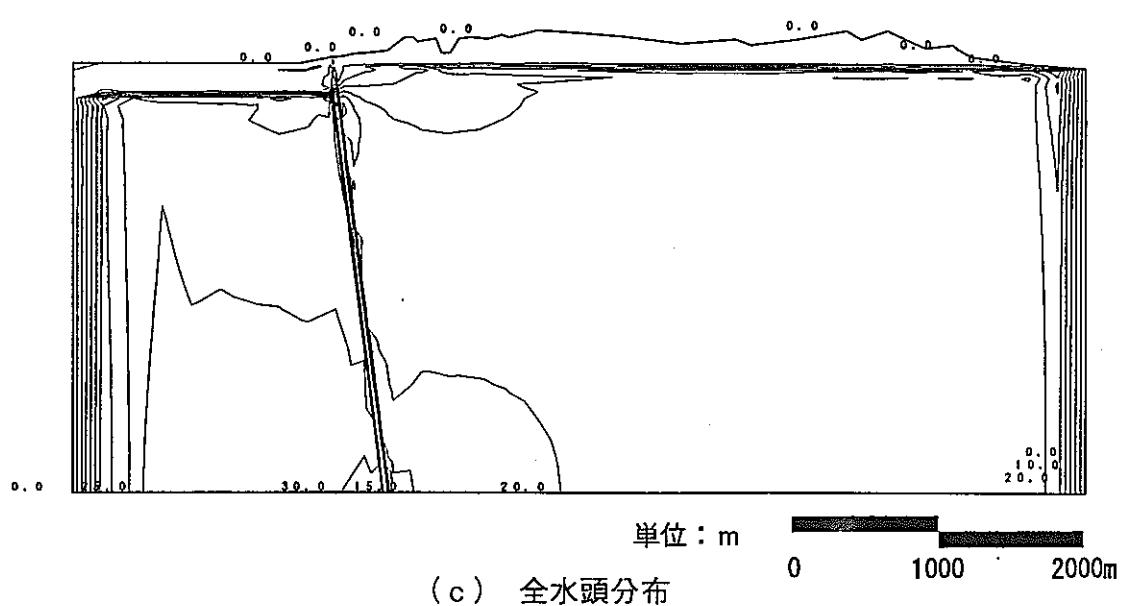
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

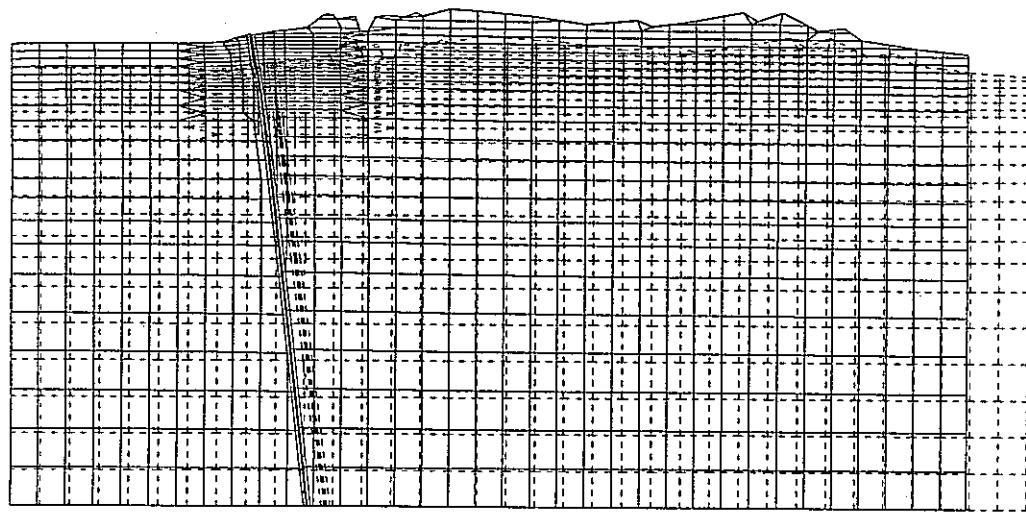


(c) 全水頭分布

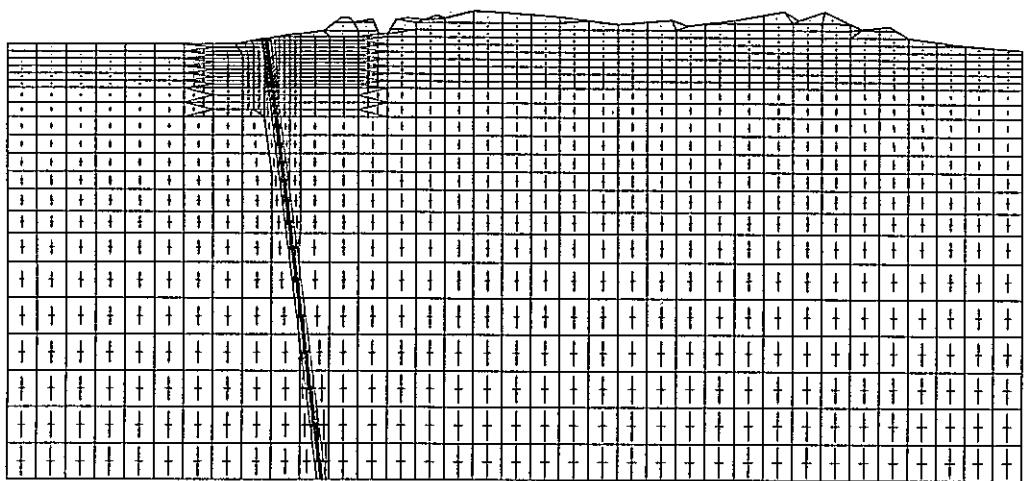
単位 : m

0 1000 2000m

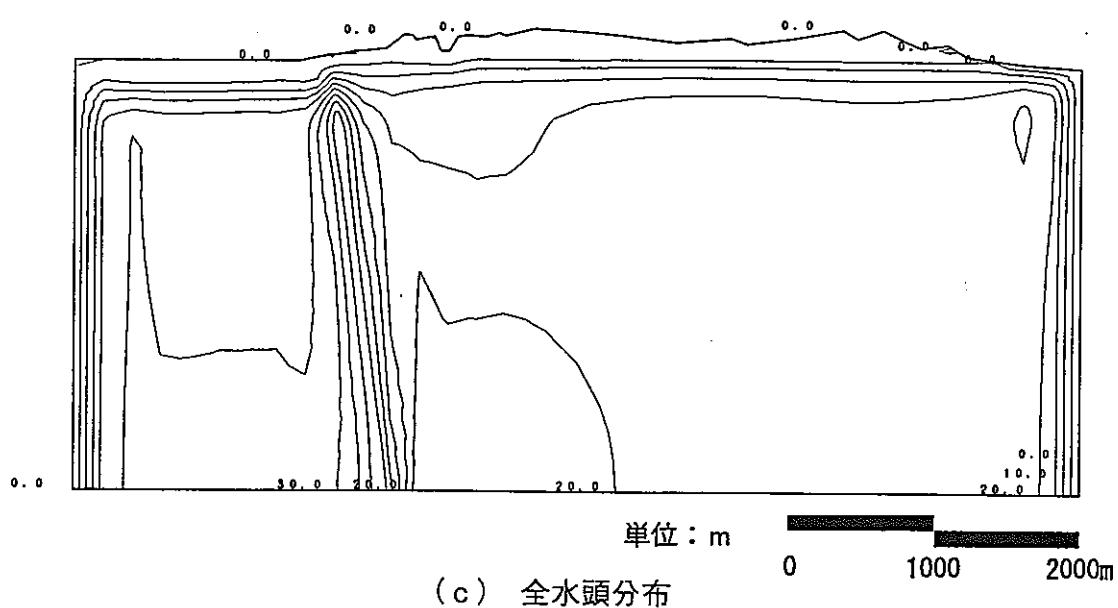
図 3-9 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE1)



(a) 変形図 :0.2m

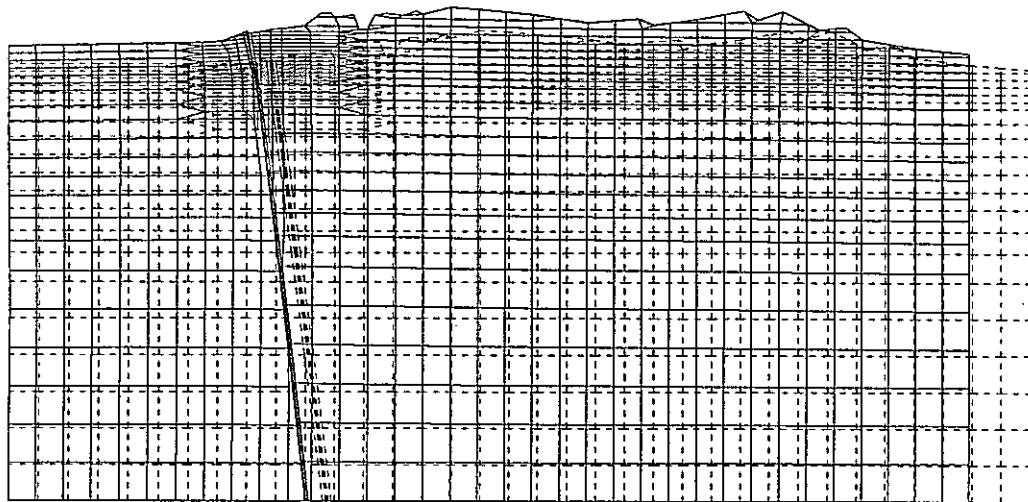


(b) 主応力(有効応力)ベクトル :1.0×10⁴ t/m²



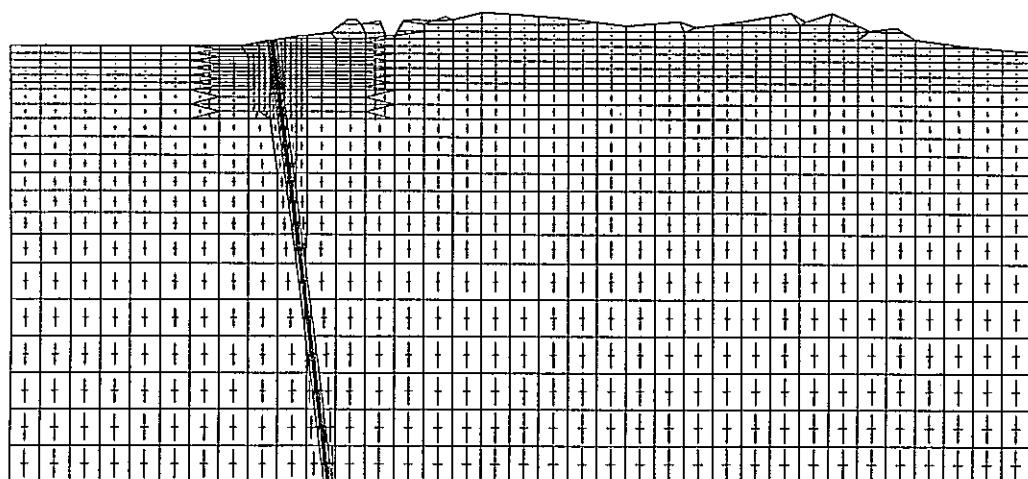
(c) 全水頭分布

図 3-10 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE1)



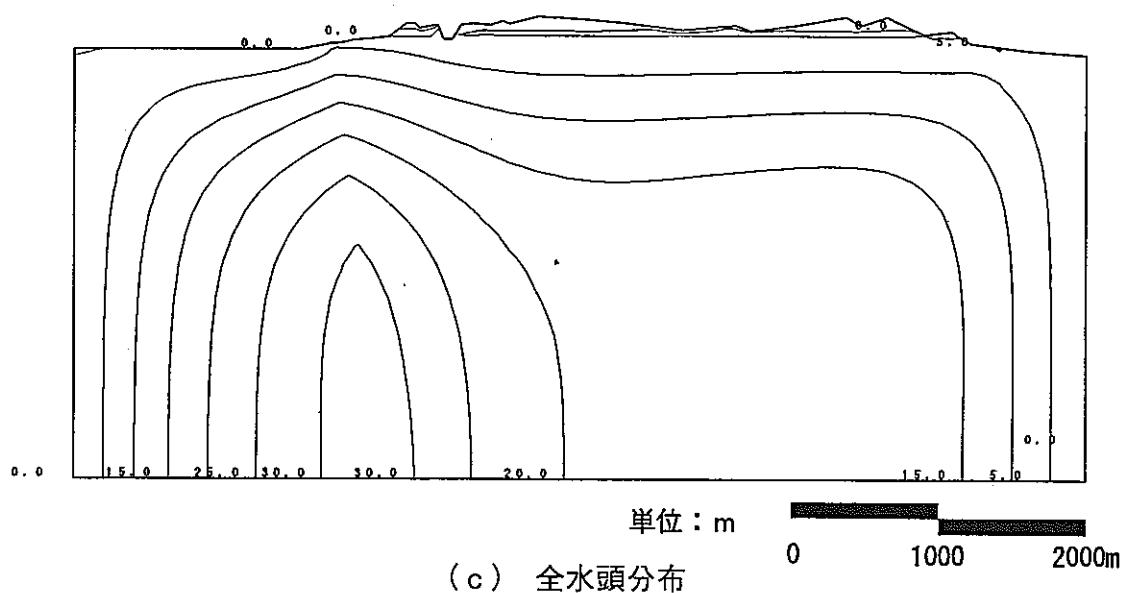
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

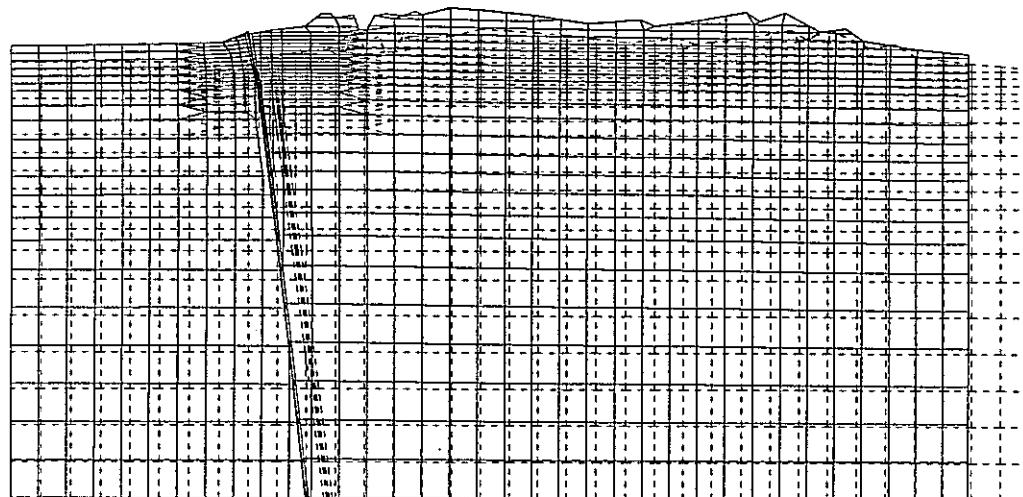


(c) 全水頭分布

単位 : m

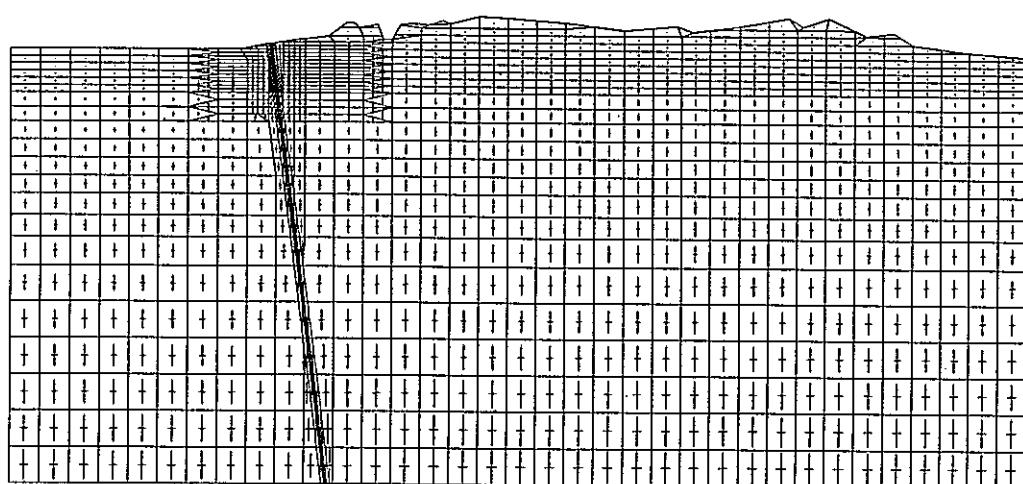
0 1000 2000m

図 3-11 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後,CASE1)



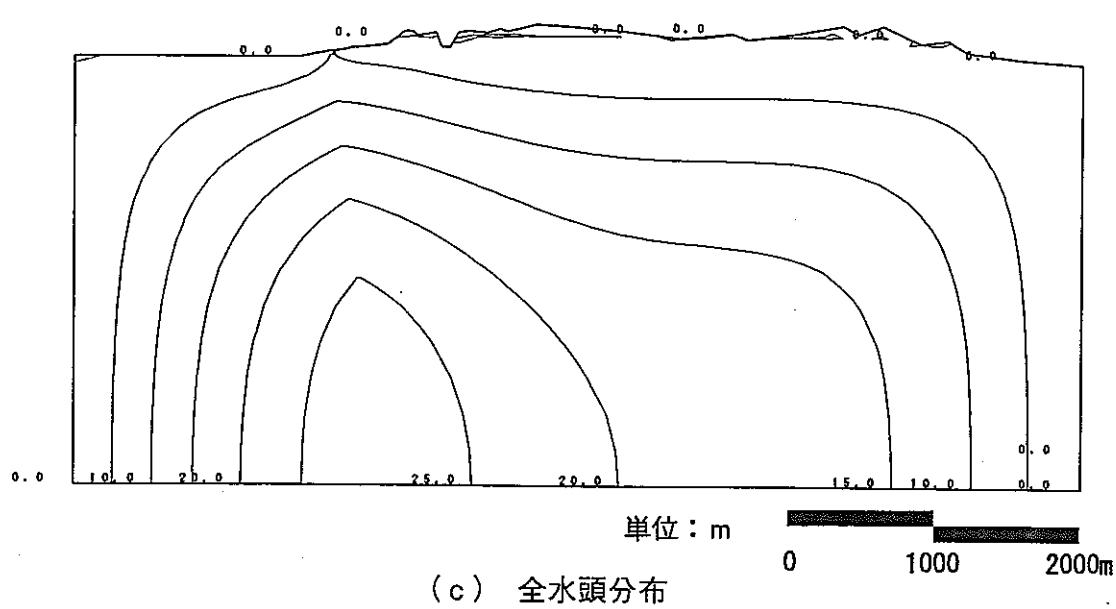
(a) 変形図

— : 0.2m



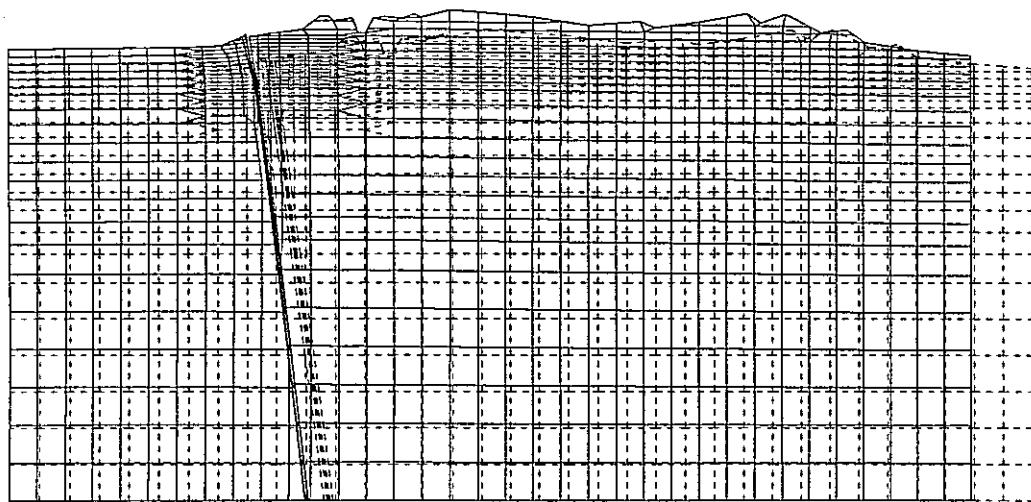
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$



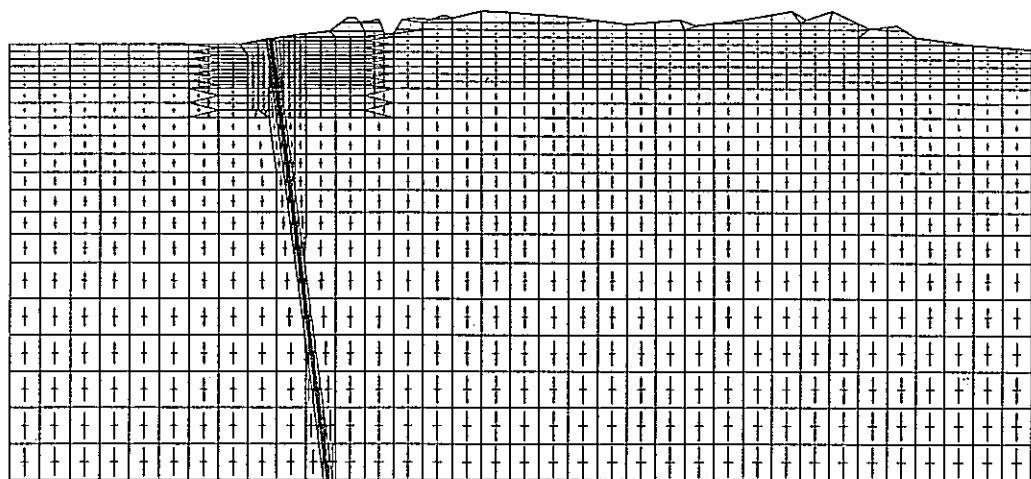
(c) 全水頭分布

図 3-12 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後,CASE1)



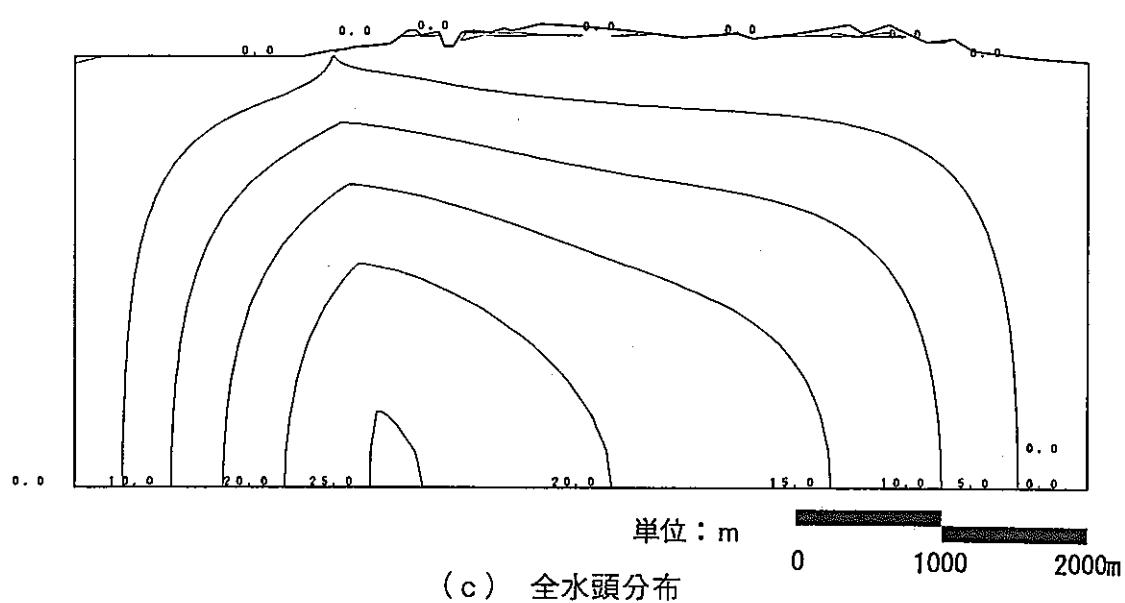
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

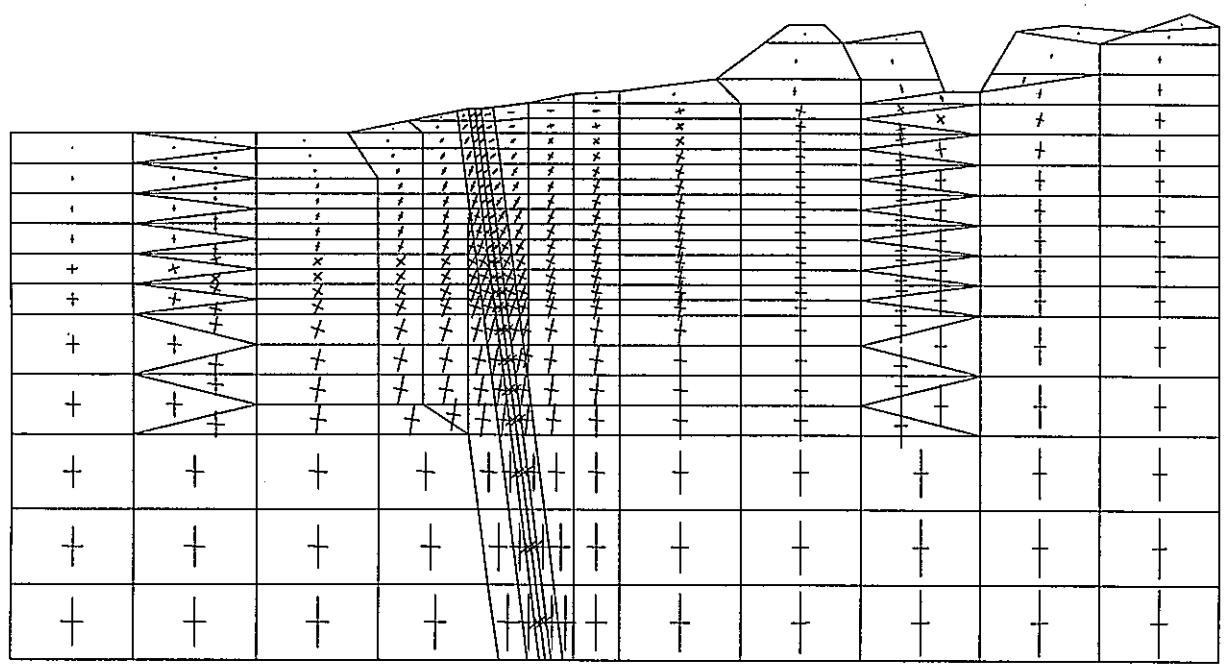


(c) 全水頭分布

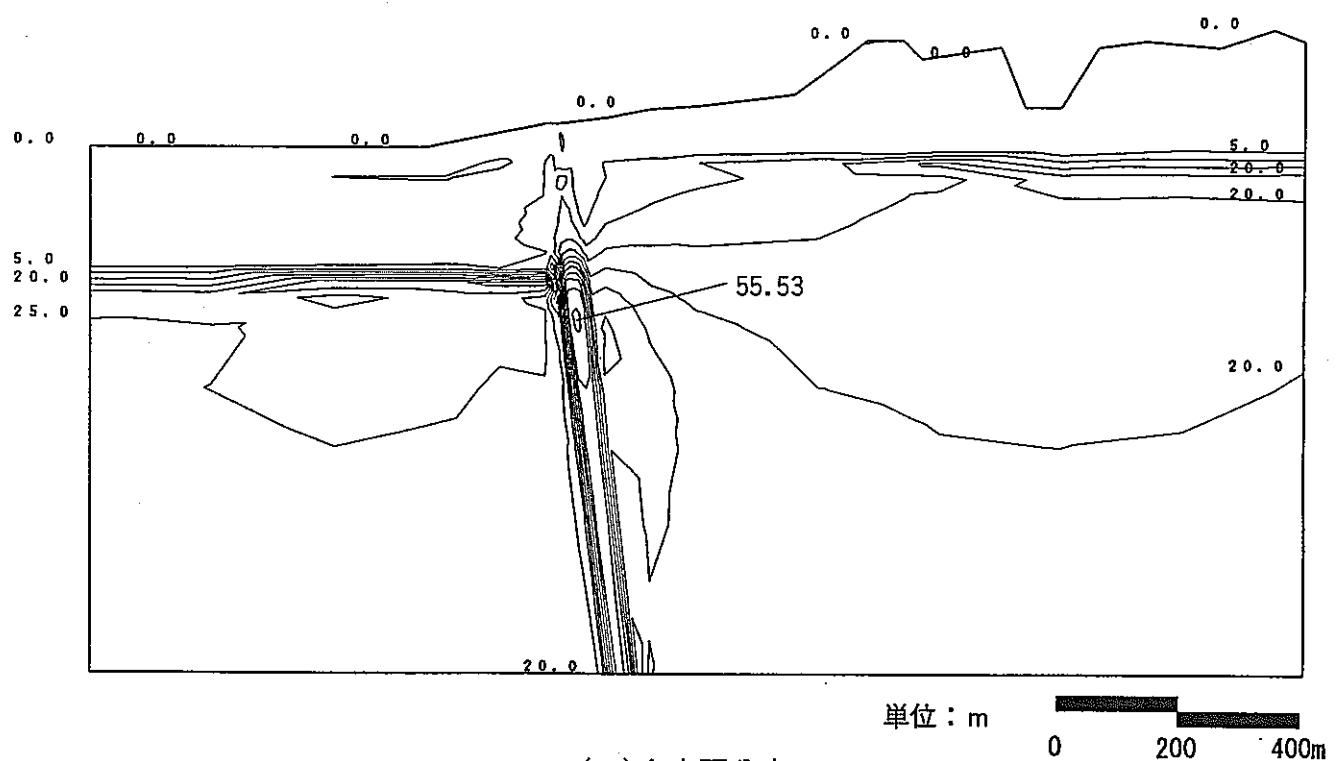
単位: m

0 1000 2000m

図 3-13 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後,CASE1)

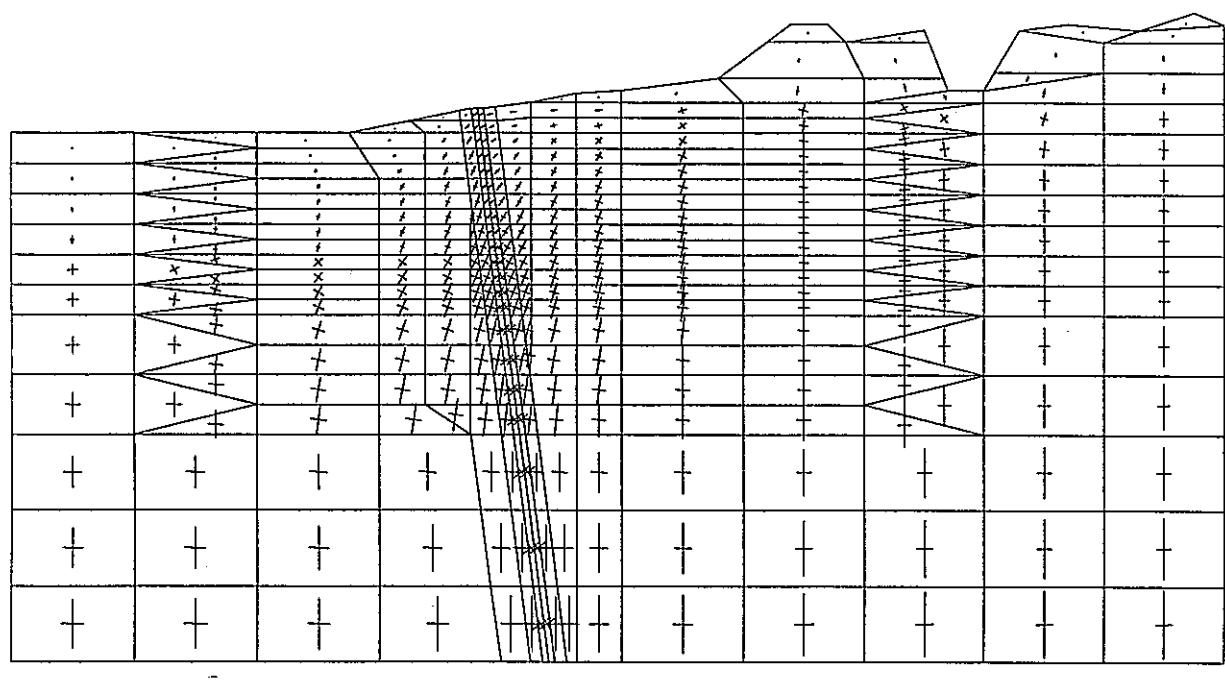


(a) 主応力(有効応力)ベクトル



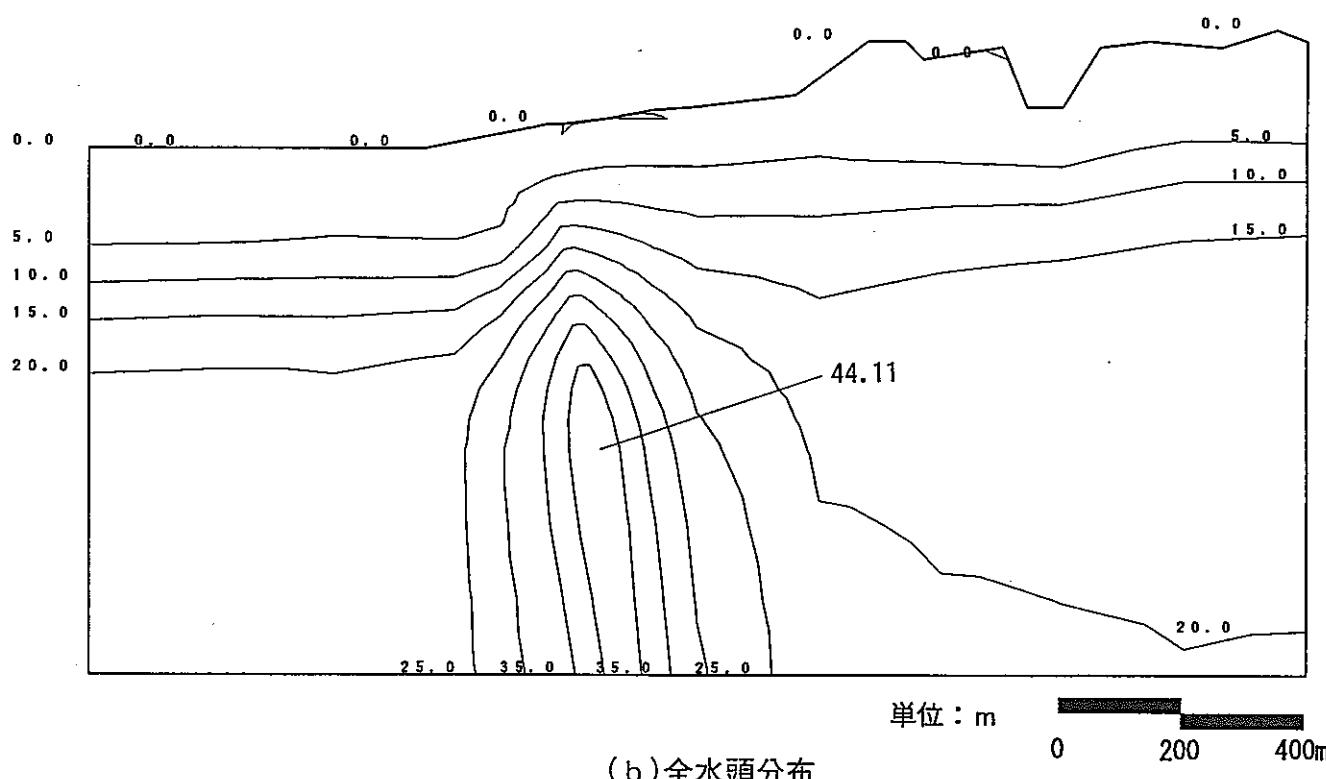
(b) 全水頭分布

図 3-14 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE1)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

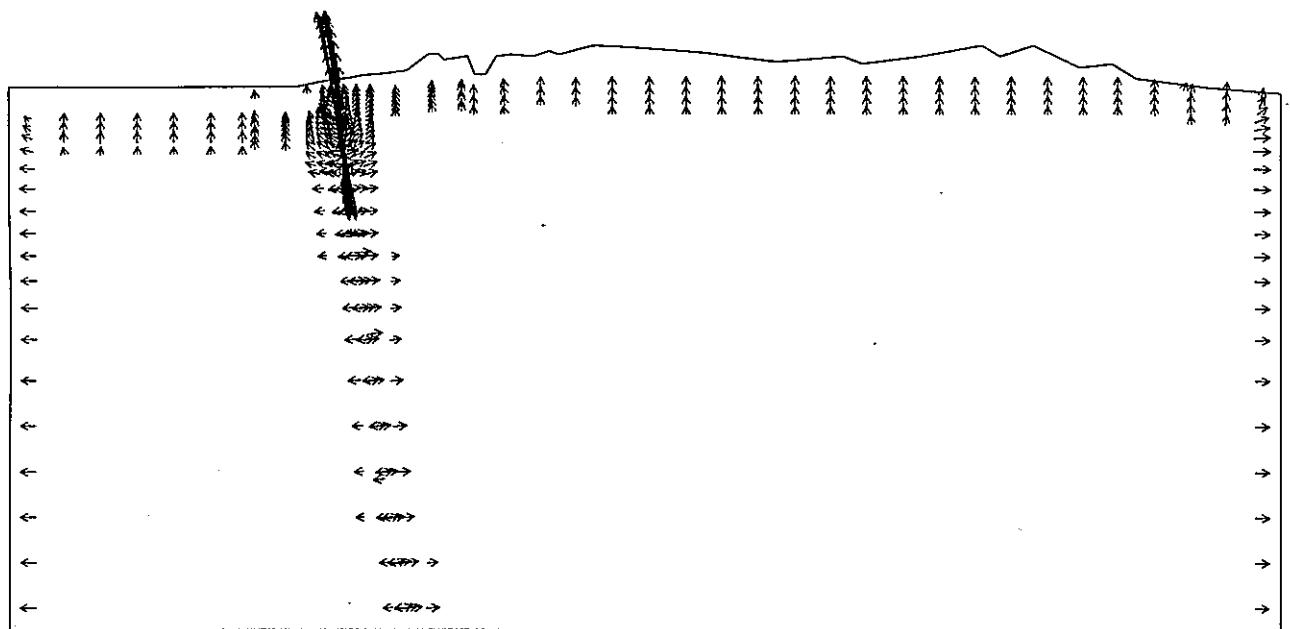


(b) 全水頭分布

単位: m

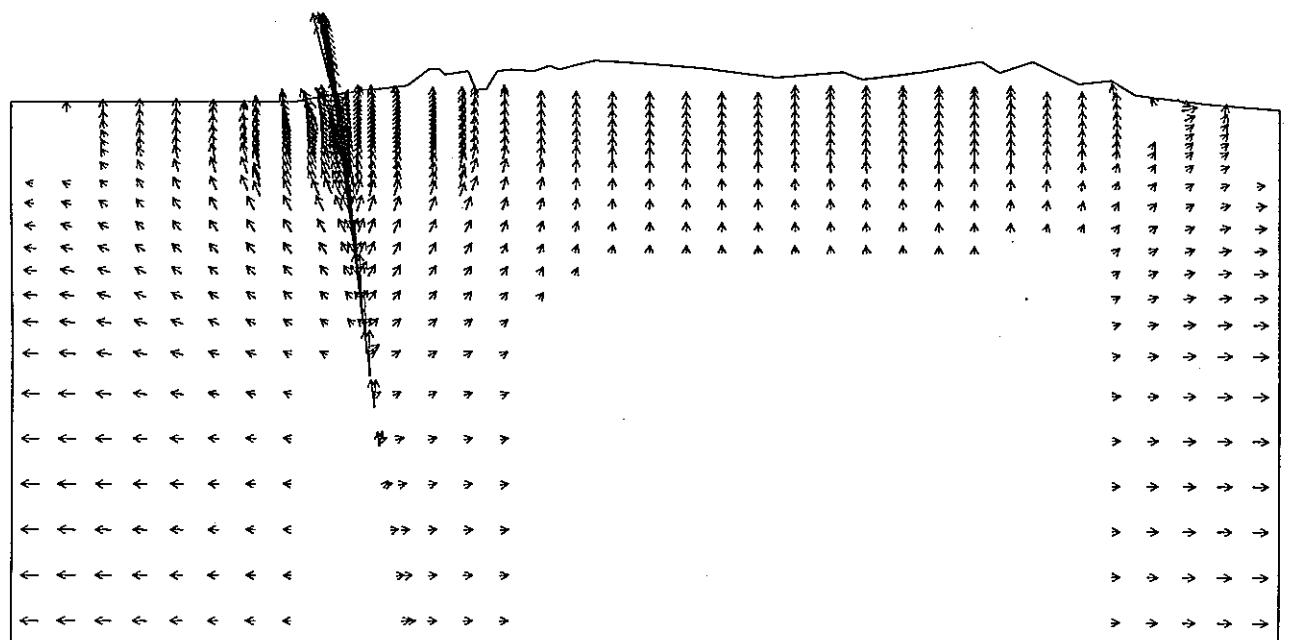
0 200 400m

図 3-15 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE1)



(a) 1日後

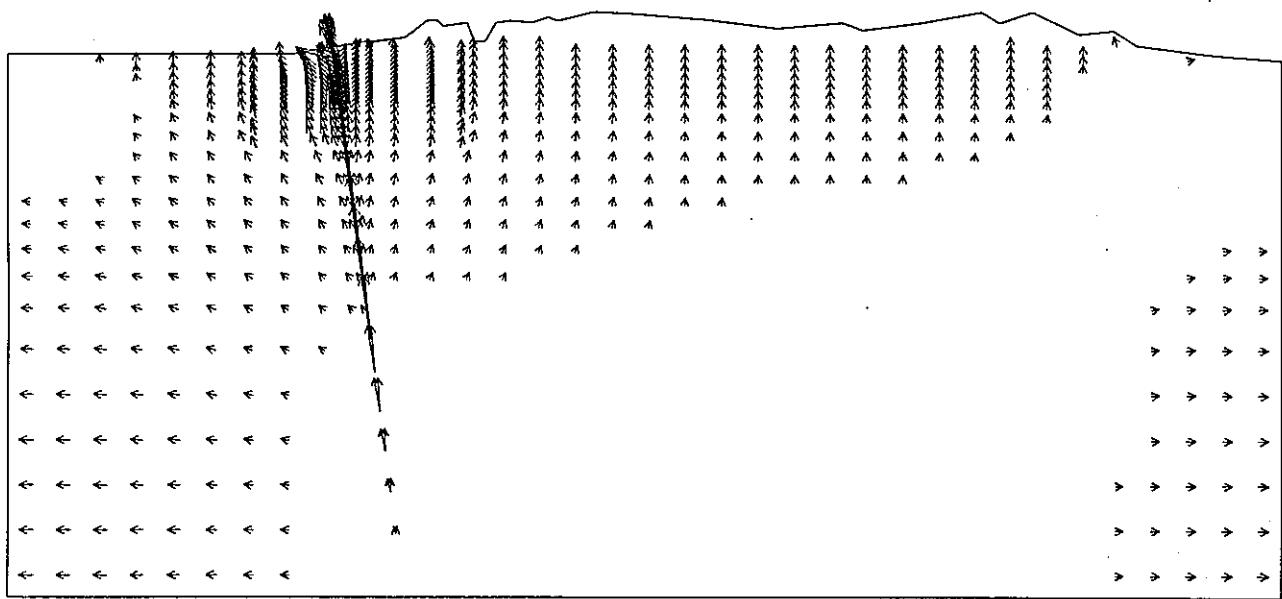
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



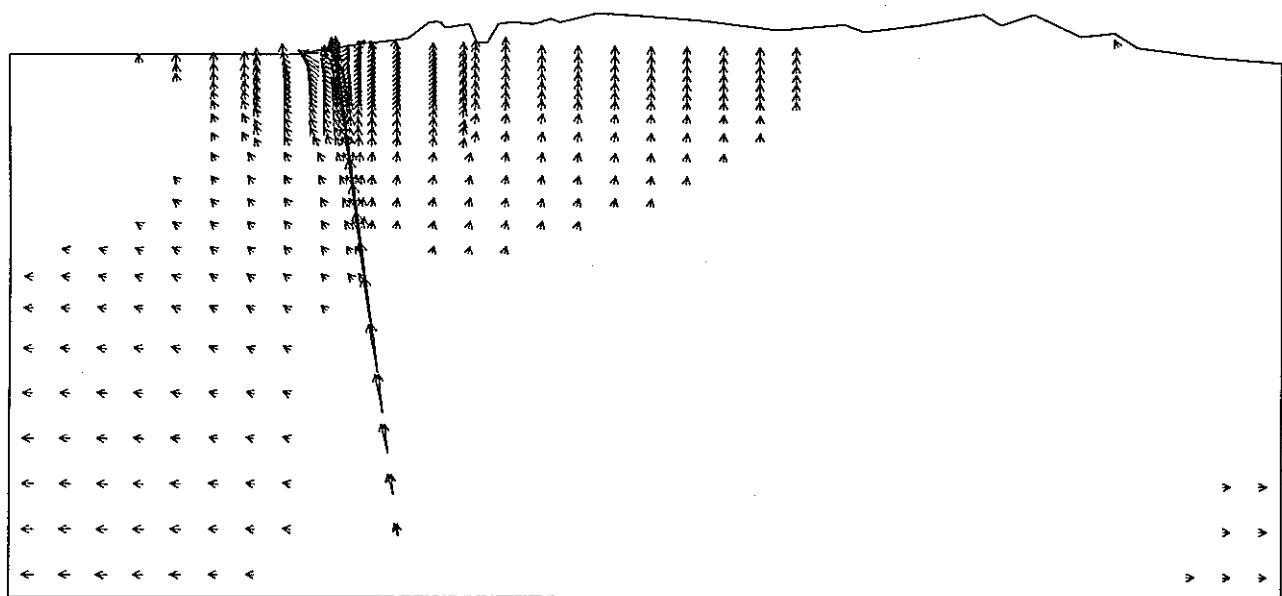
(b) 30日後

$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-16 流速ベクトル(CASE1)

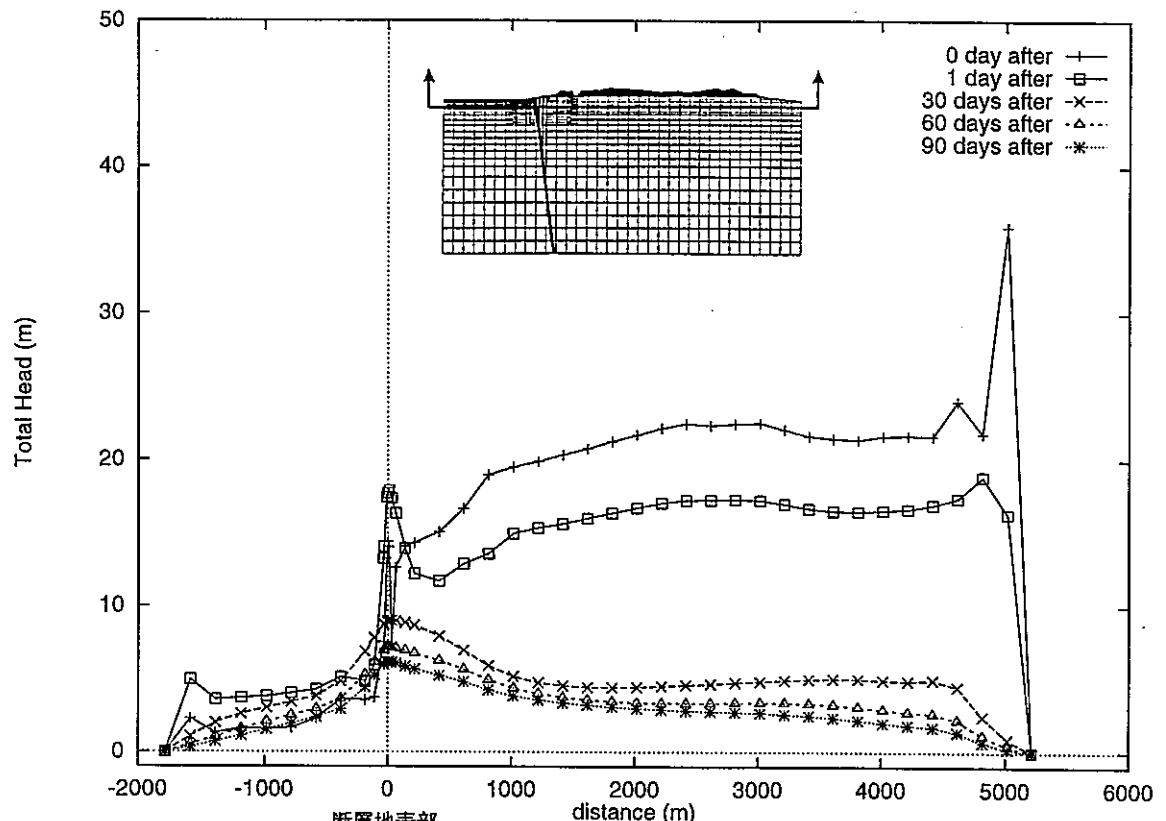


(c) 60 日後



(d) 90 日後

図 3-16 流速ベクトル(CASE1)



(a) EL-150m

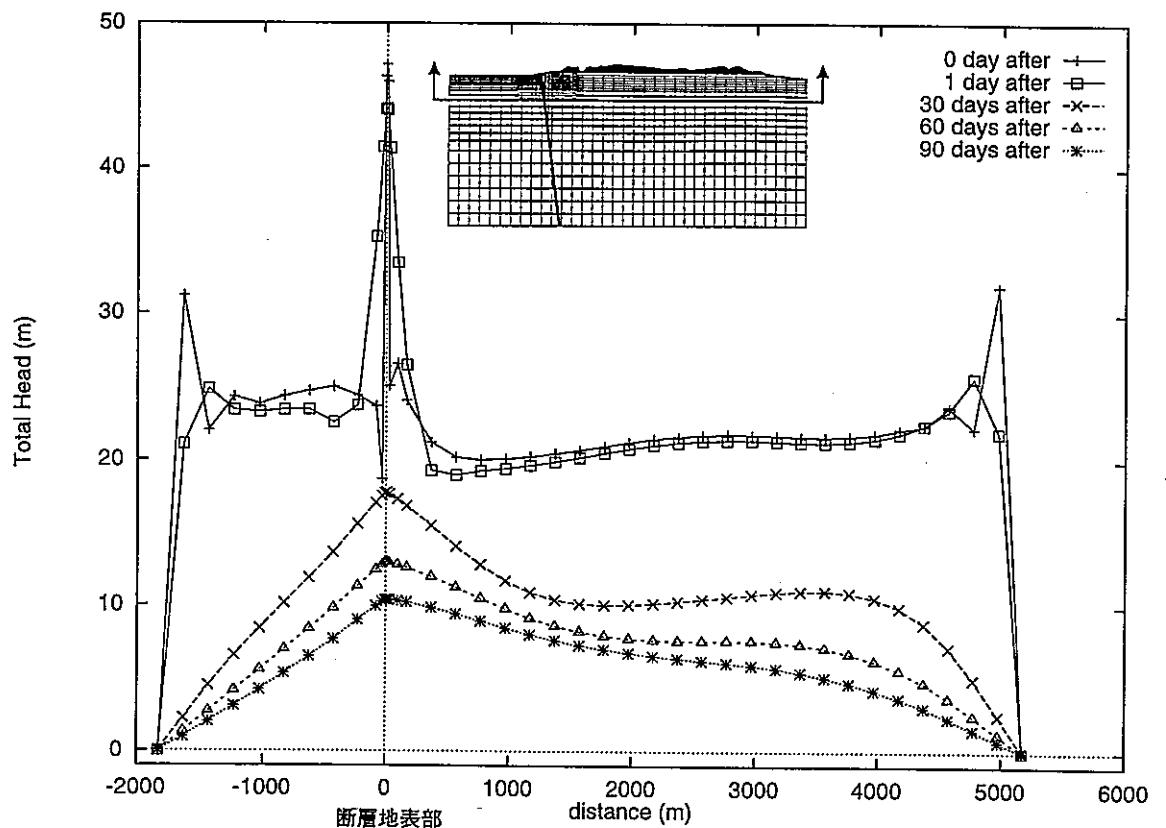
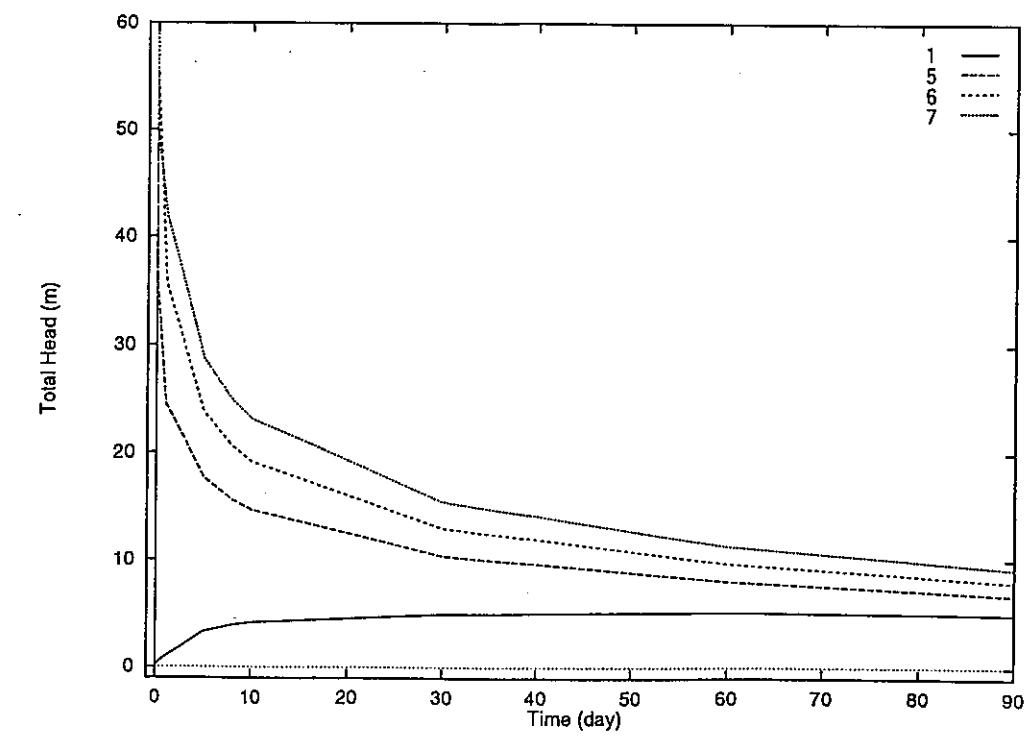
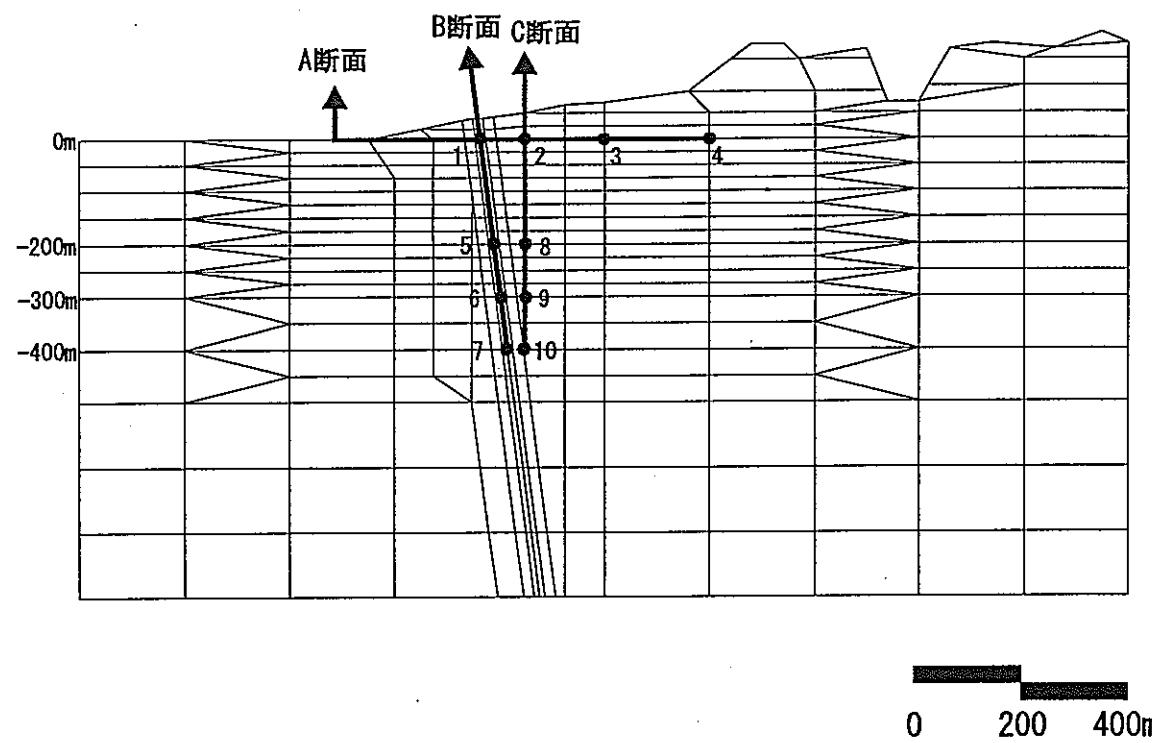
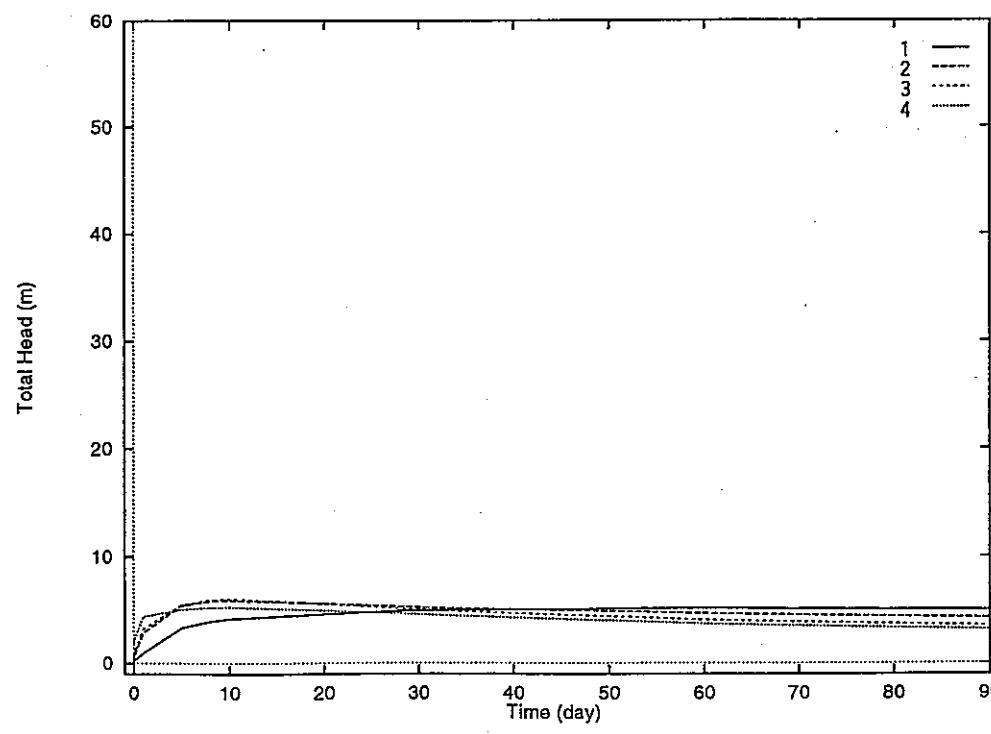


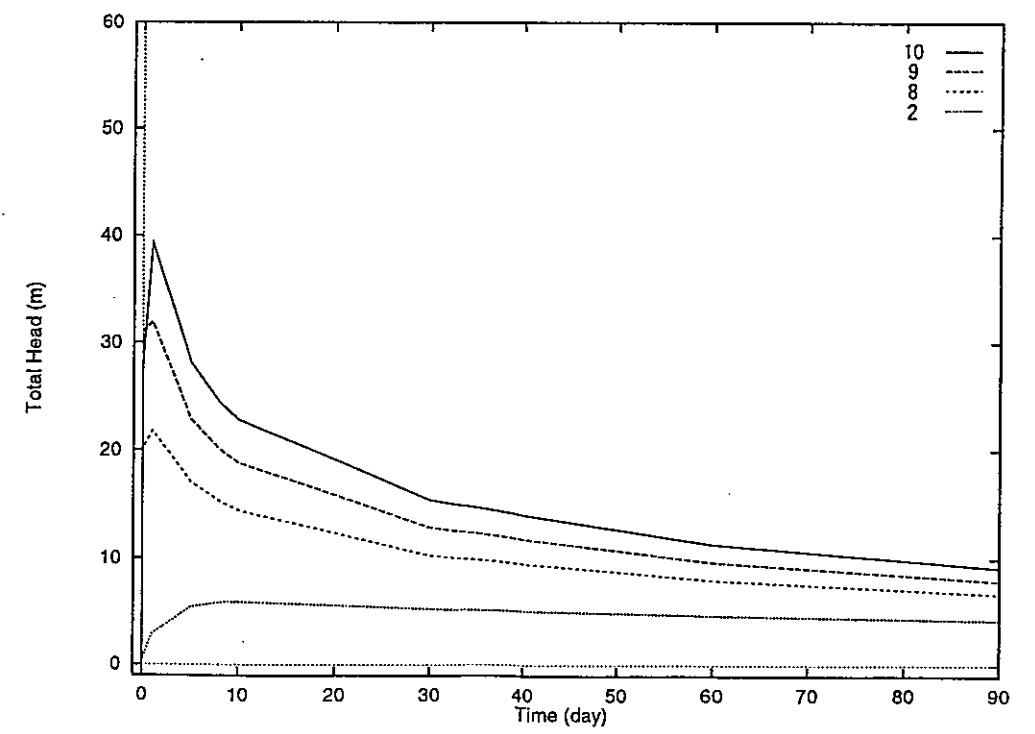
図 3-17 全水頭の空間分布(CASE1)



(b) B断面

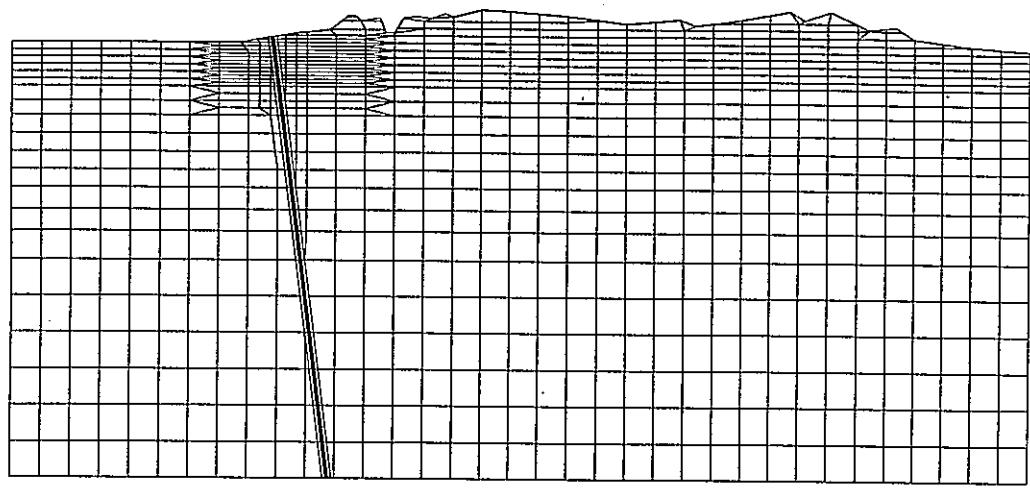


(a) A断面



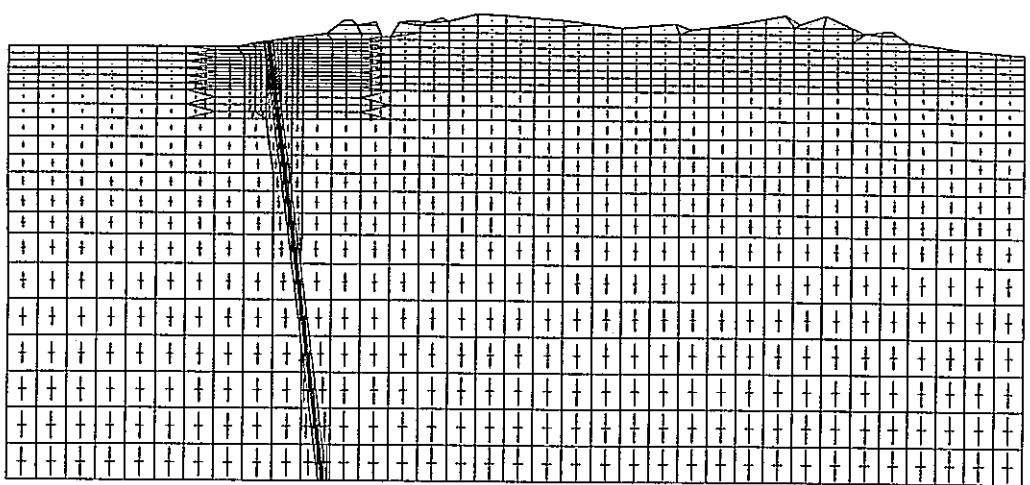
(c) C断面

図 3-18 全水頭の時間変化(CASE1)



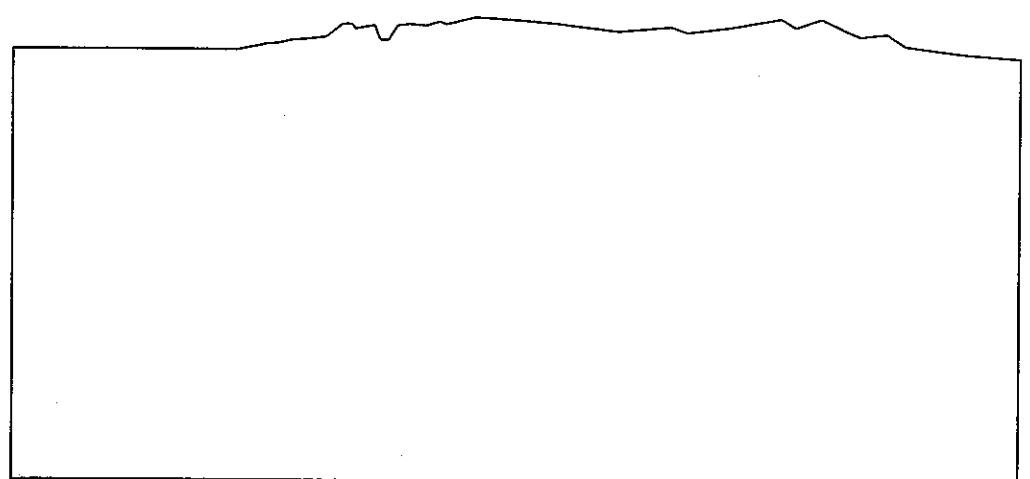
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

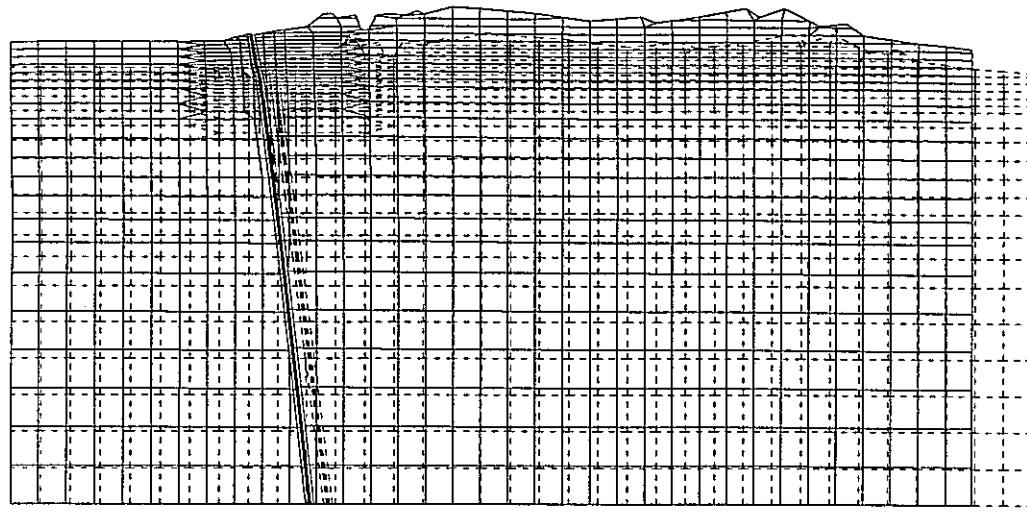


単位: m

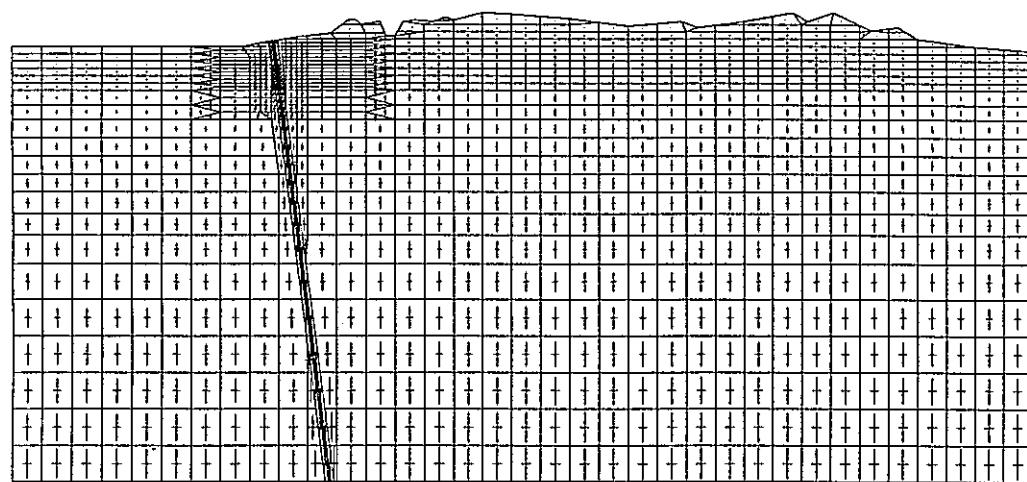
0 1000 2000m

(c) 全水頭分布

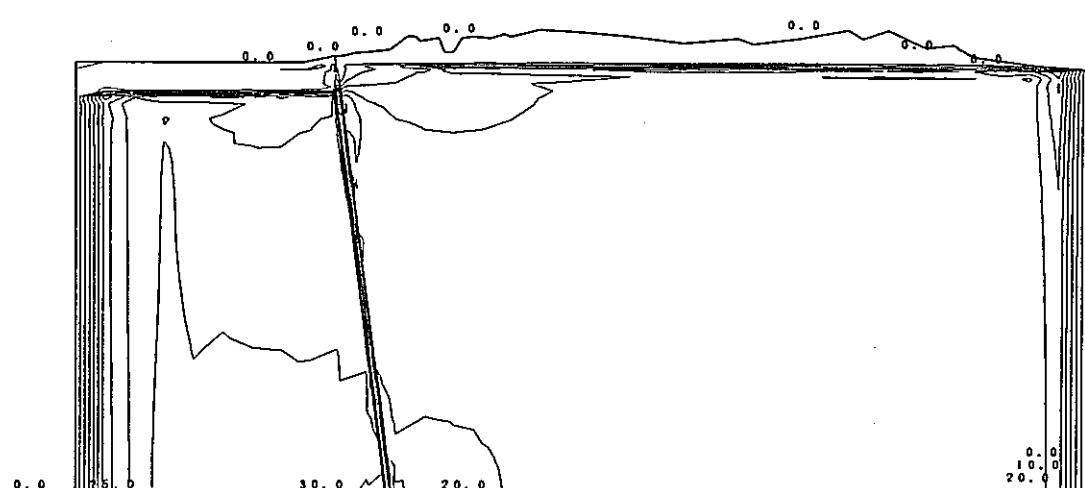
図 3-19 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE2)



(a) 変形図 :0.2m

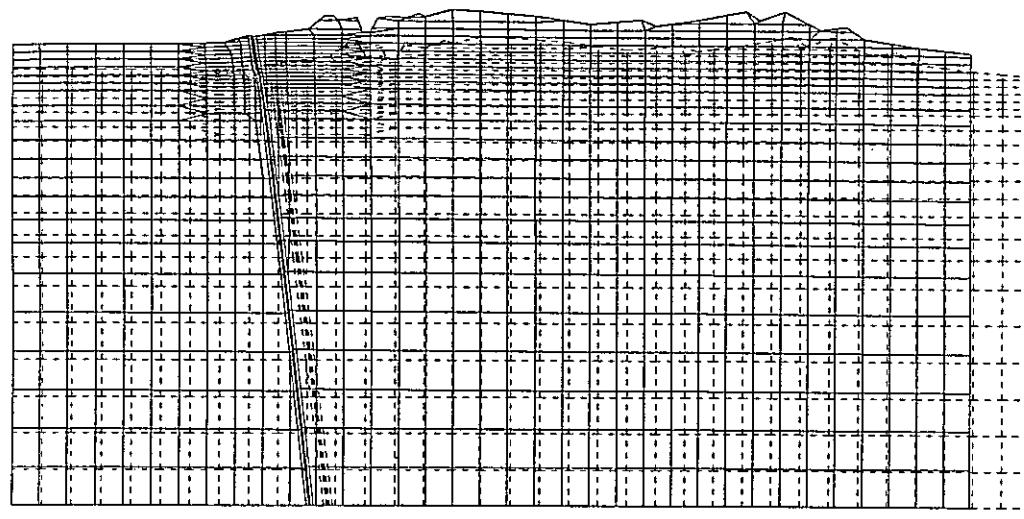


(b) 主応力(有効応力)ベクトル :1.0×10⁴ t/m²

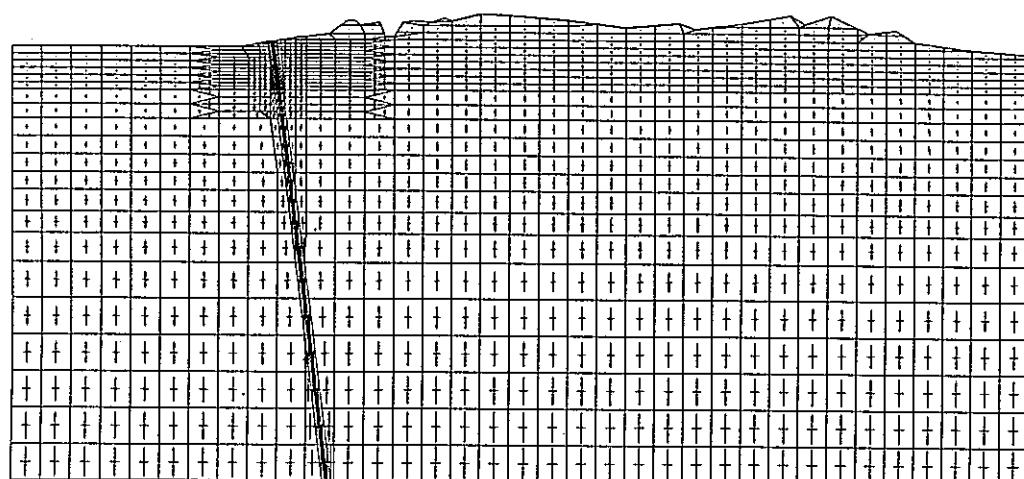


単位: m 0 1000 2000m
(c) 全水頭分布

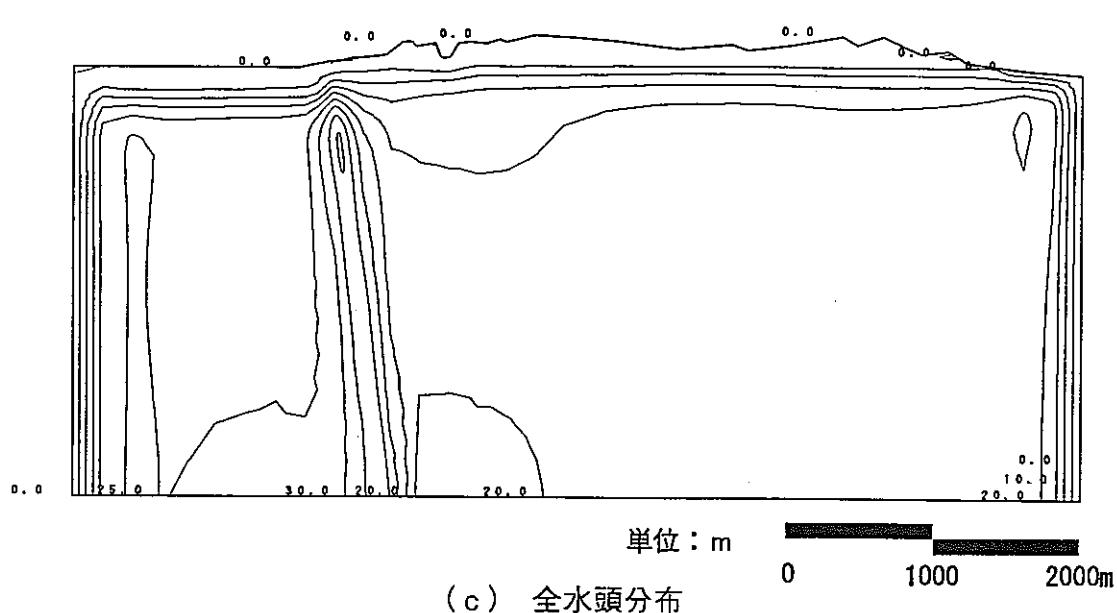
図 3-20 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE2)



(a) 変形図

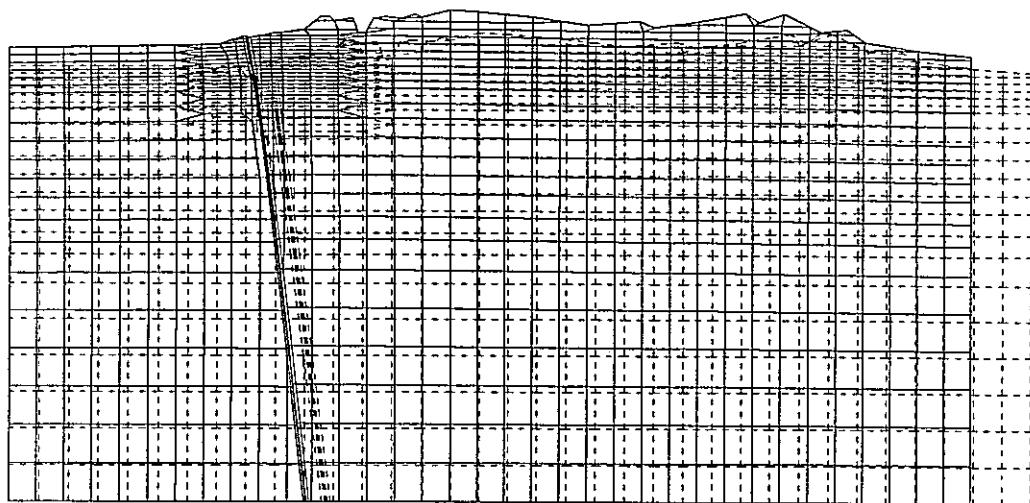


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



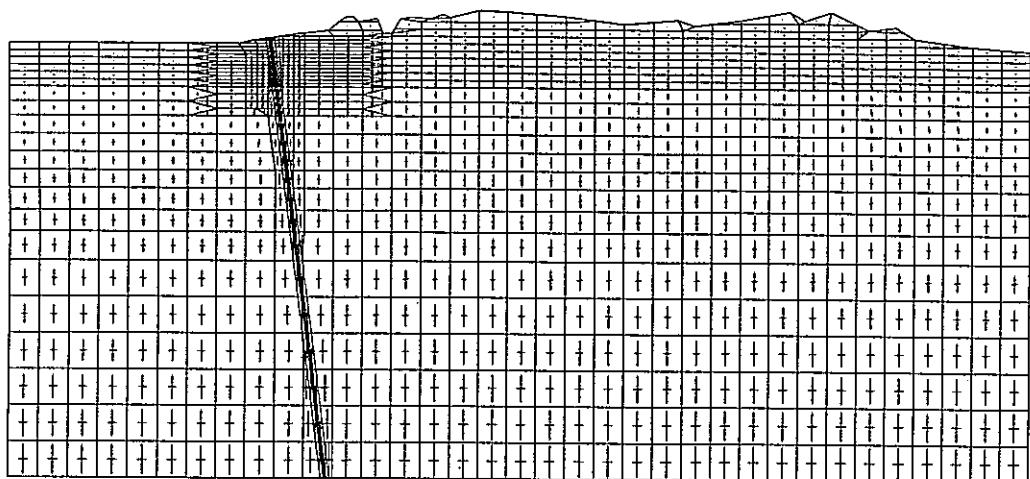
(c) 全水頭分布

図 3-21 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE2)

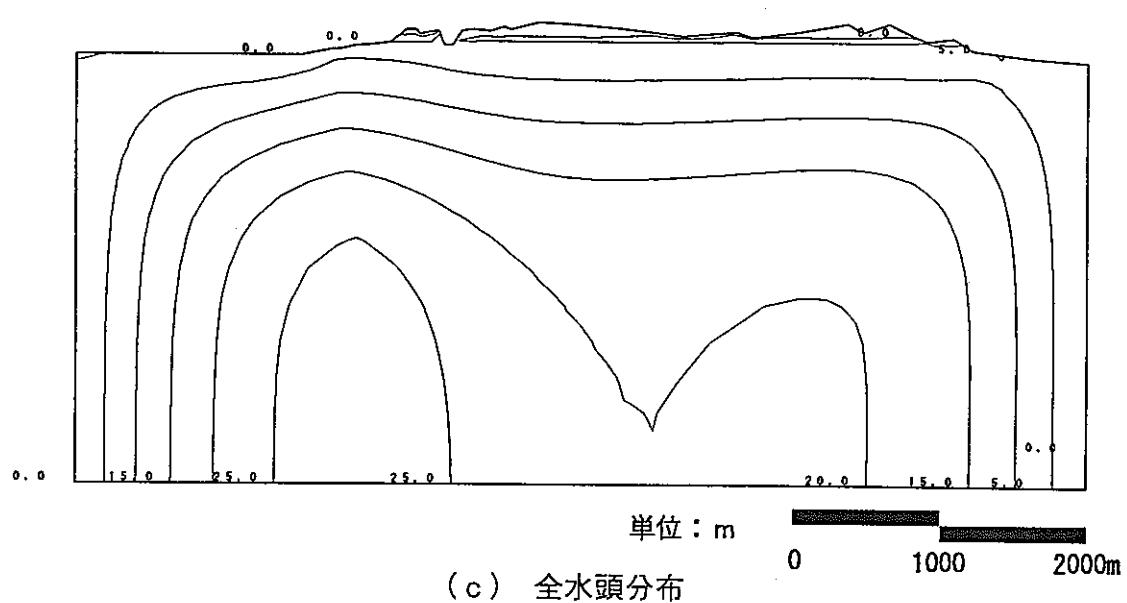


(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル — : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

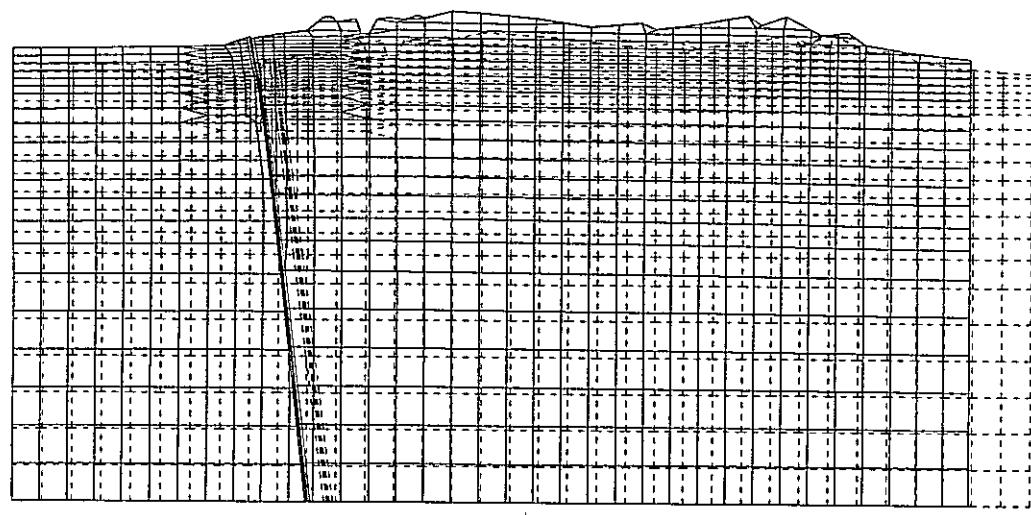


(c) 全水頭分布

単位 : m

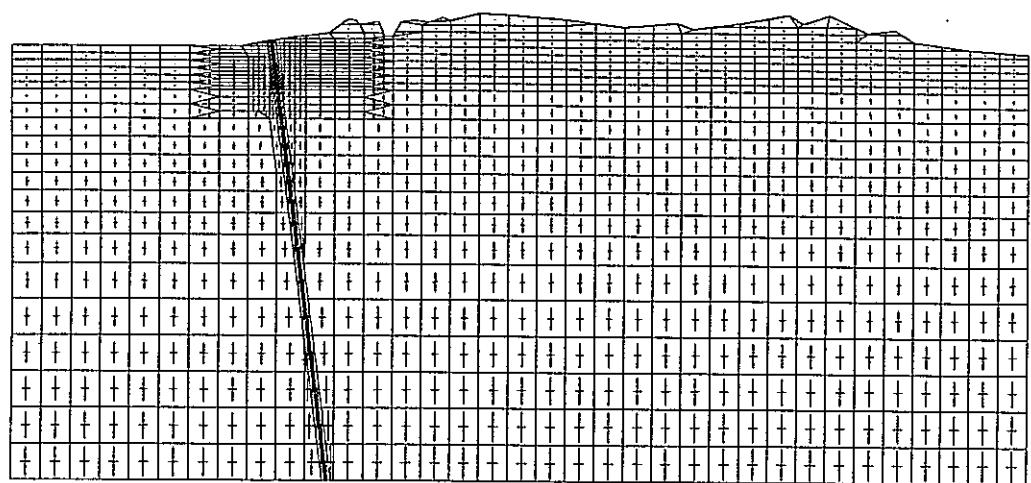
— : 2000m

図 3-22 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE2)



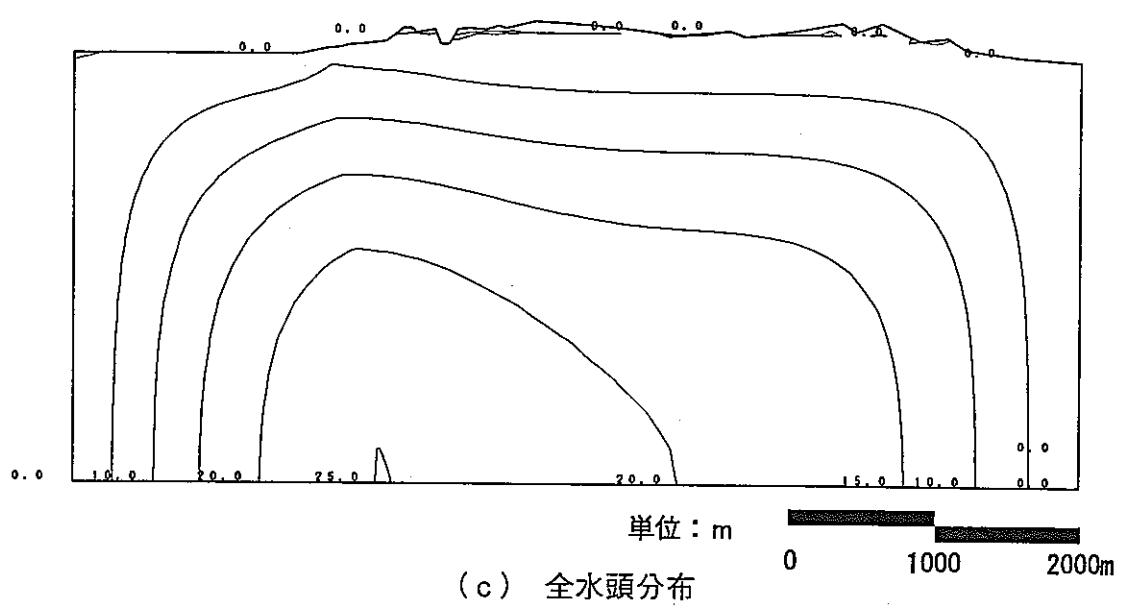
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

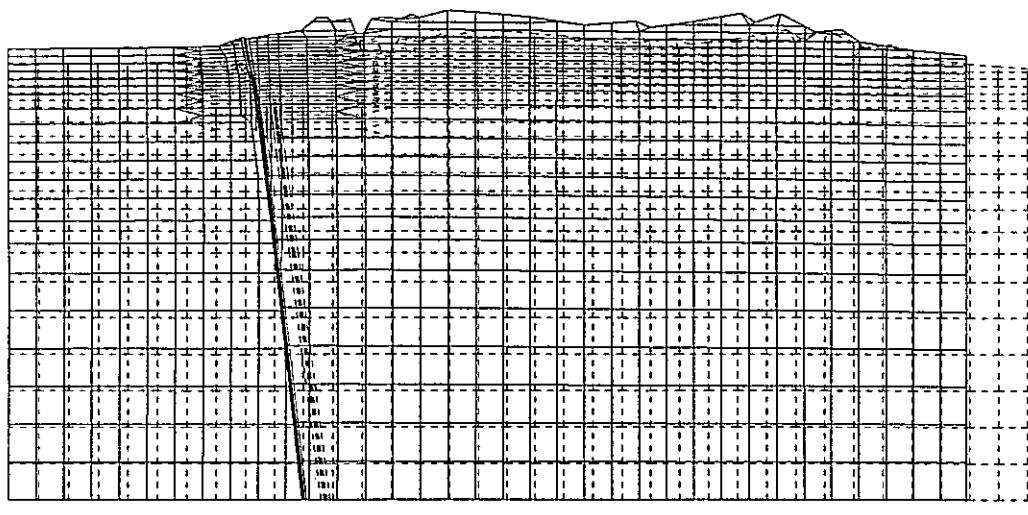


(c) 全水頭分布

単位 : m

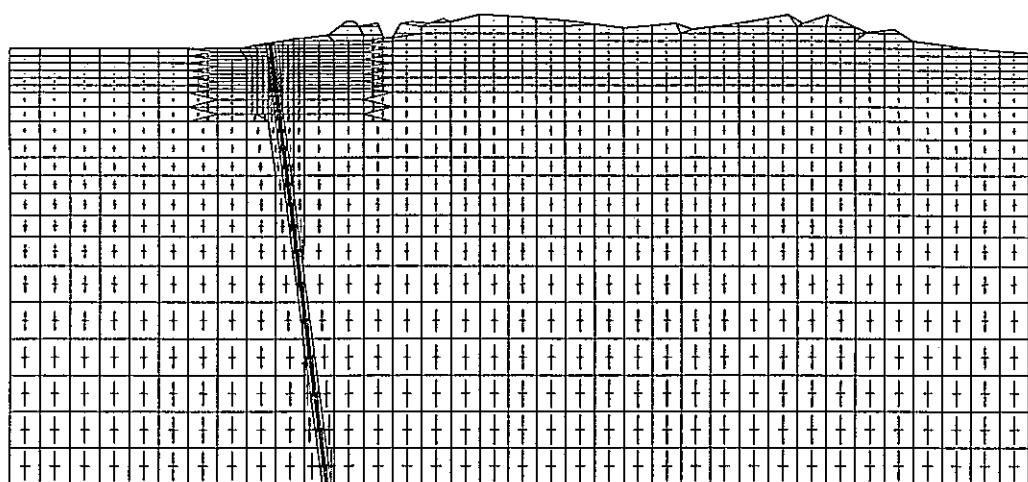
0 1000 2000m

図 3-23 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE2)



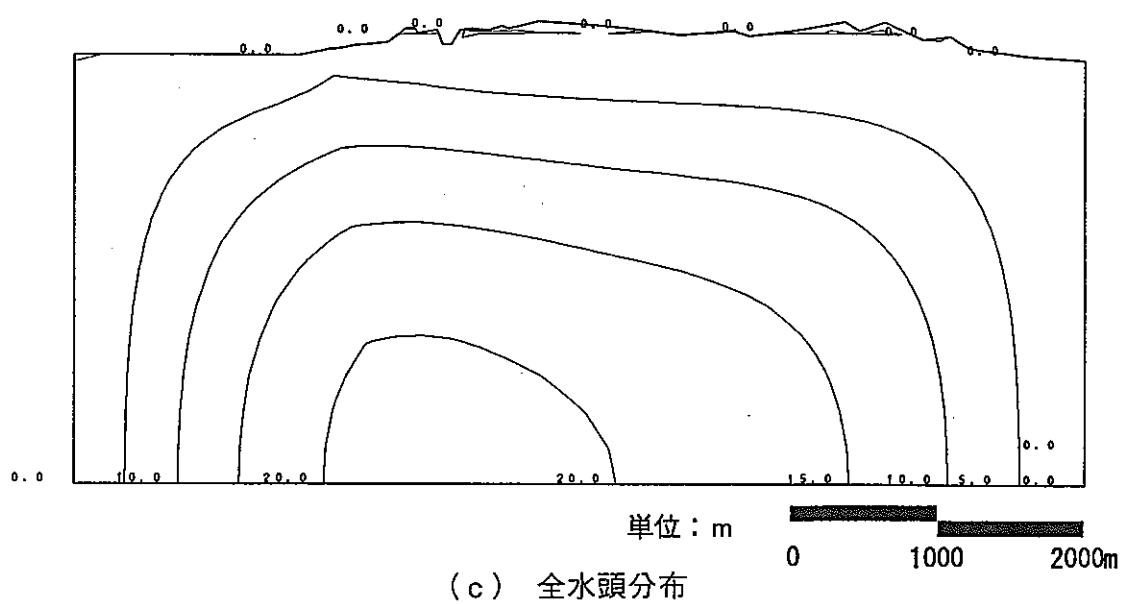
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

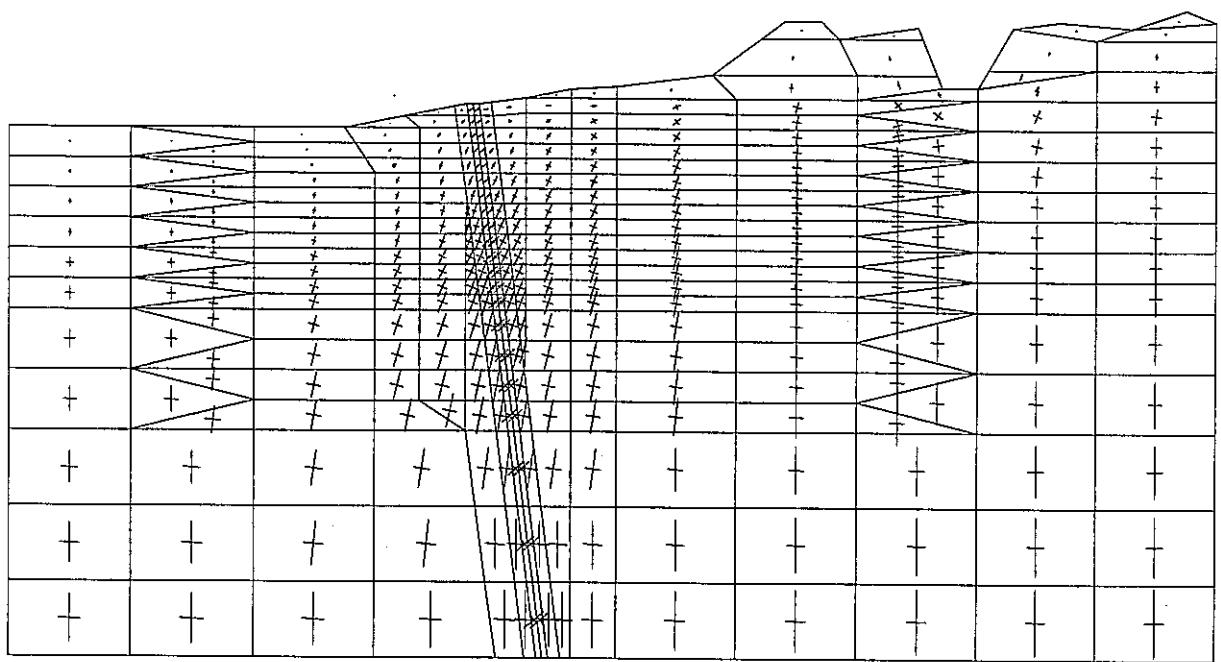


(c) 全水頭分布

単位 : m

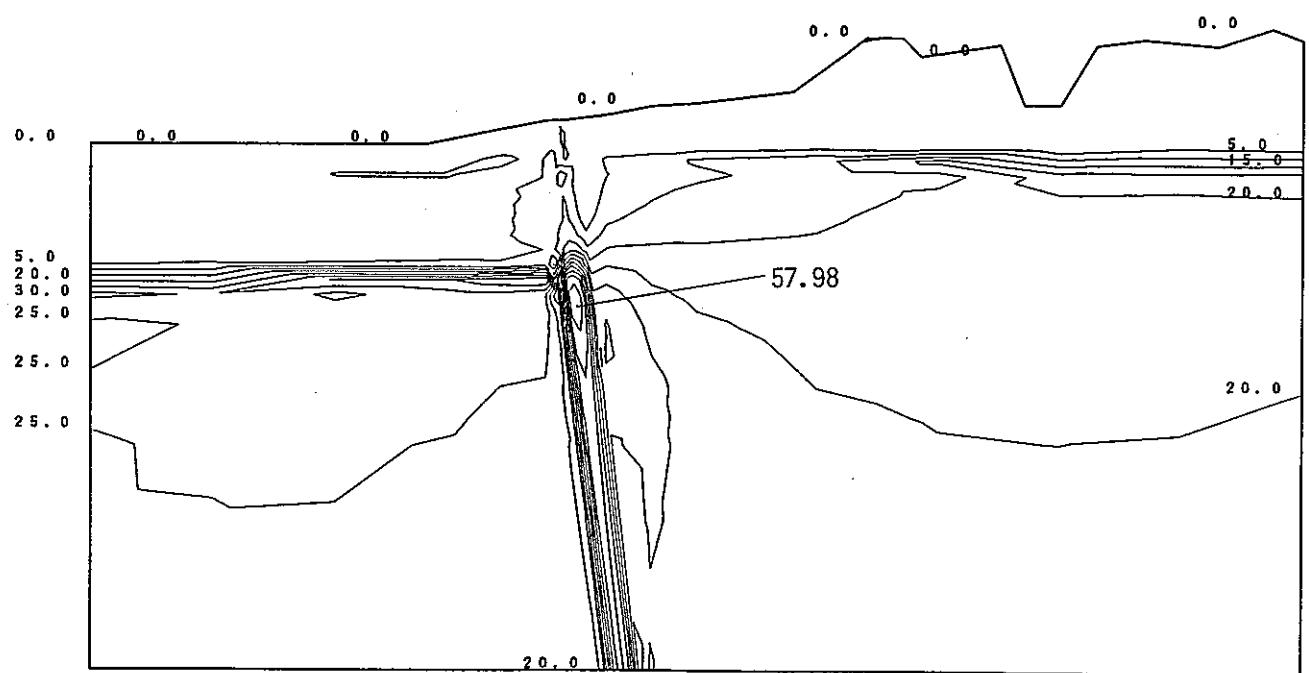
0 1000 2000m

図 3-24 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE2)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

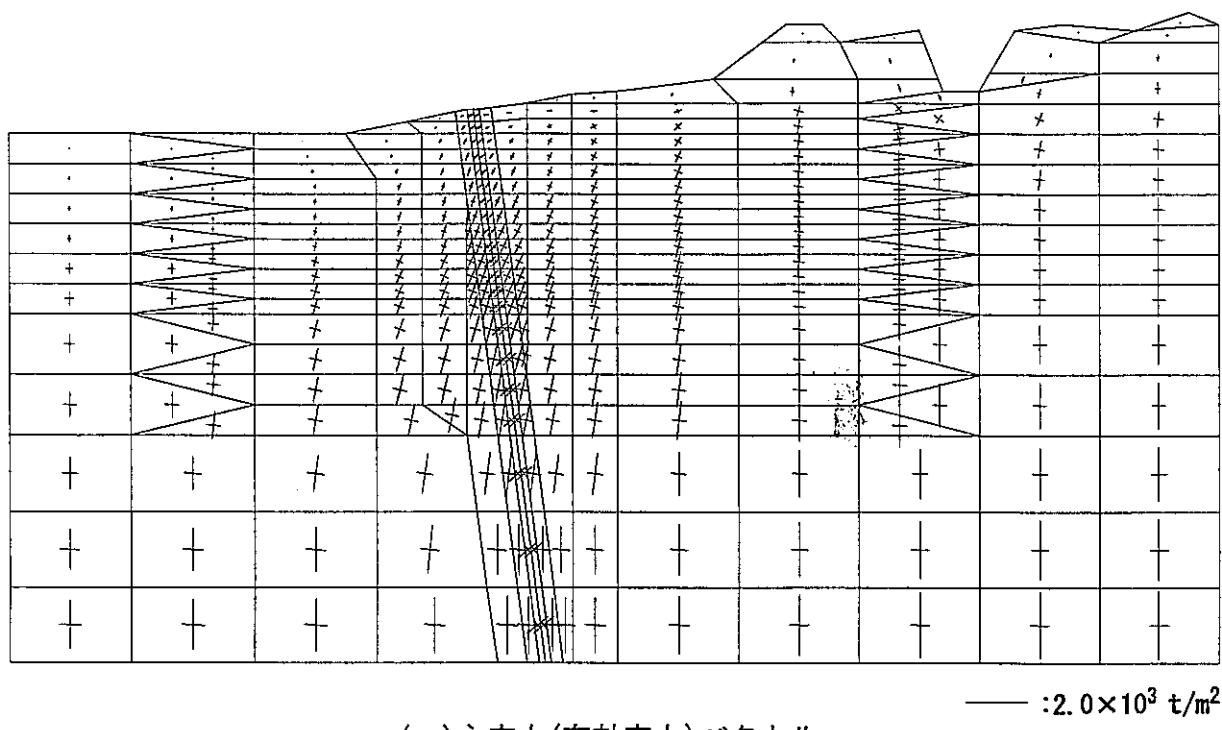


(b) 全水頭分布

単位: m

0 200 400m

図 3-25 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE2)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

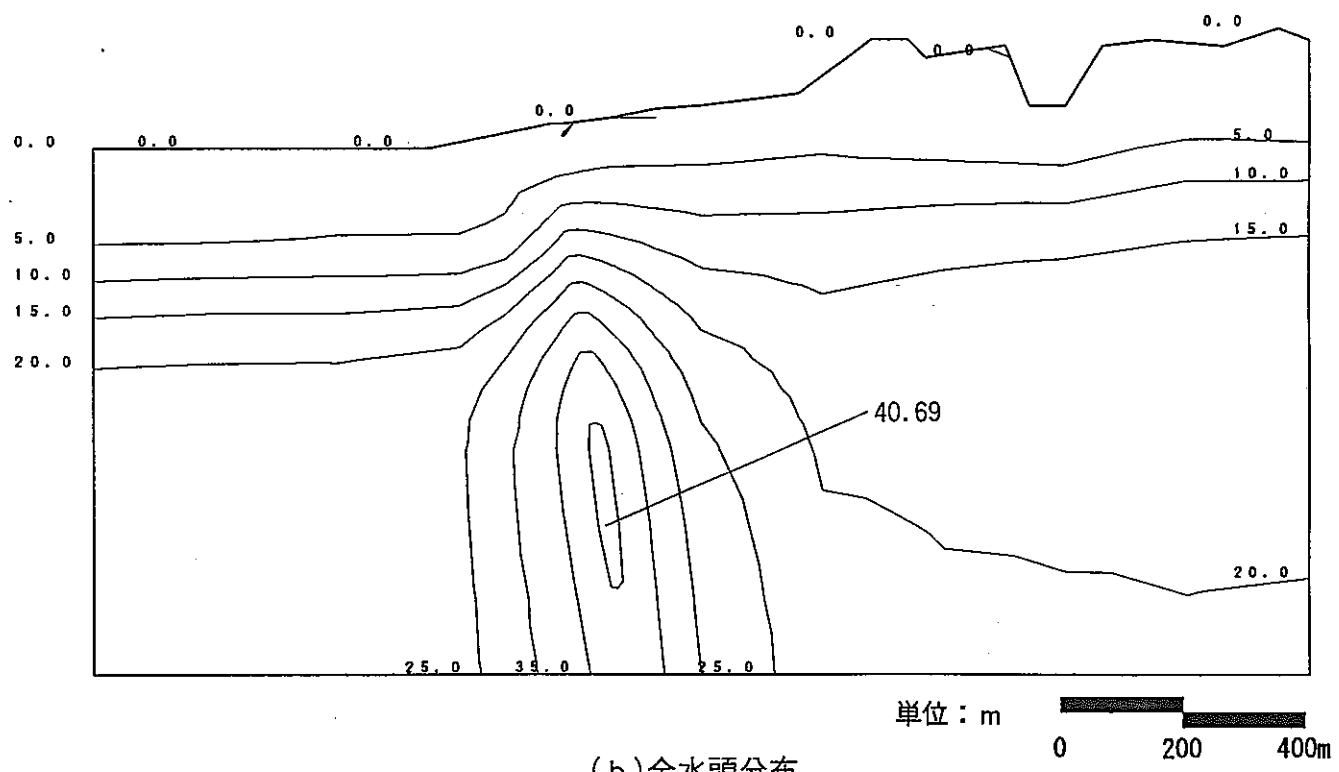


図 3-26 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE2)

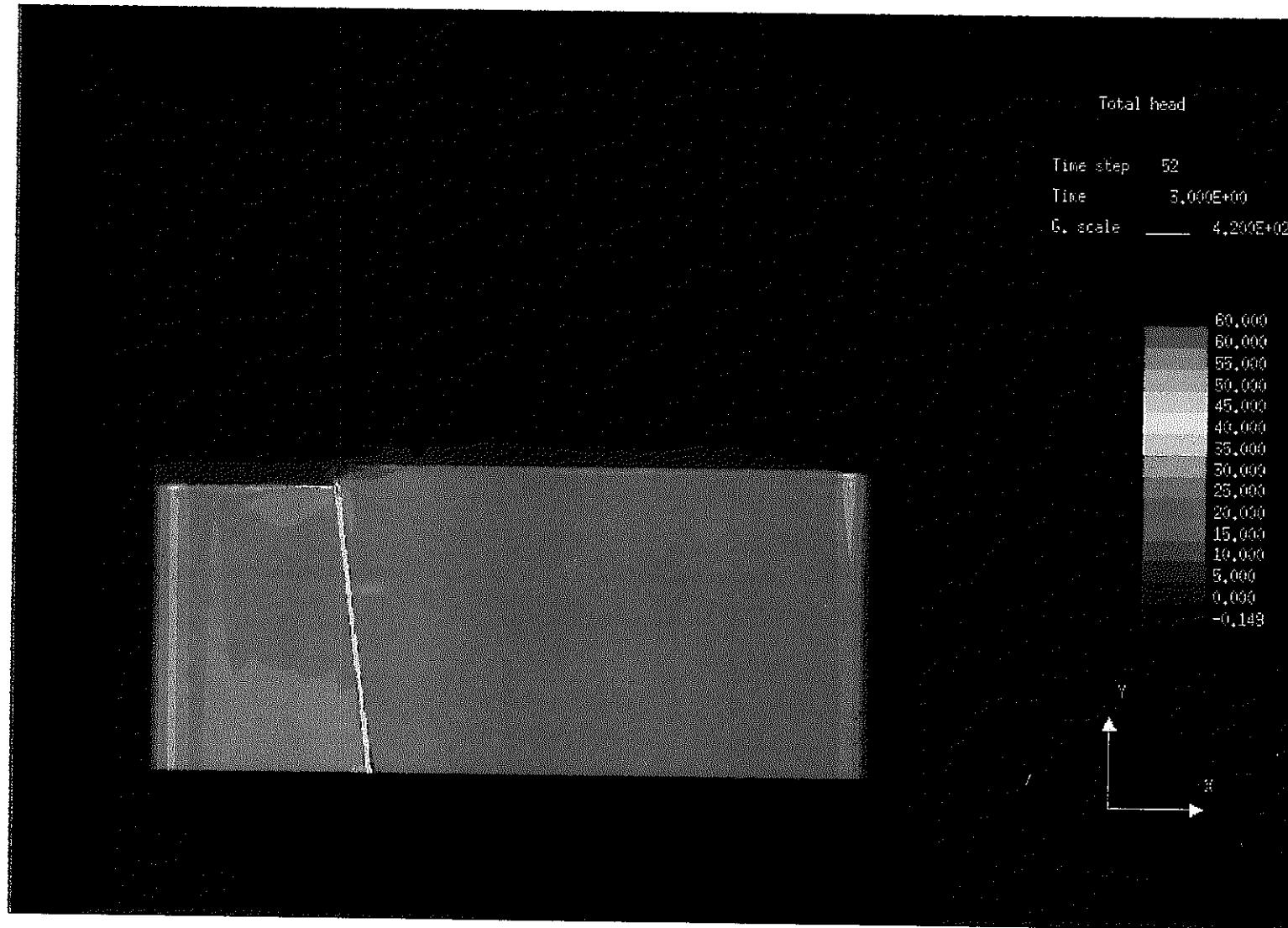


図 3-27 全水頭分布(地震直後,CASE2)

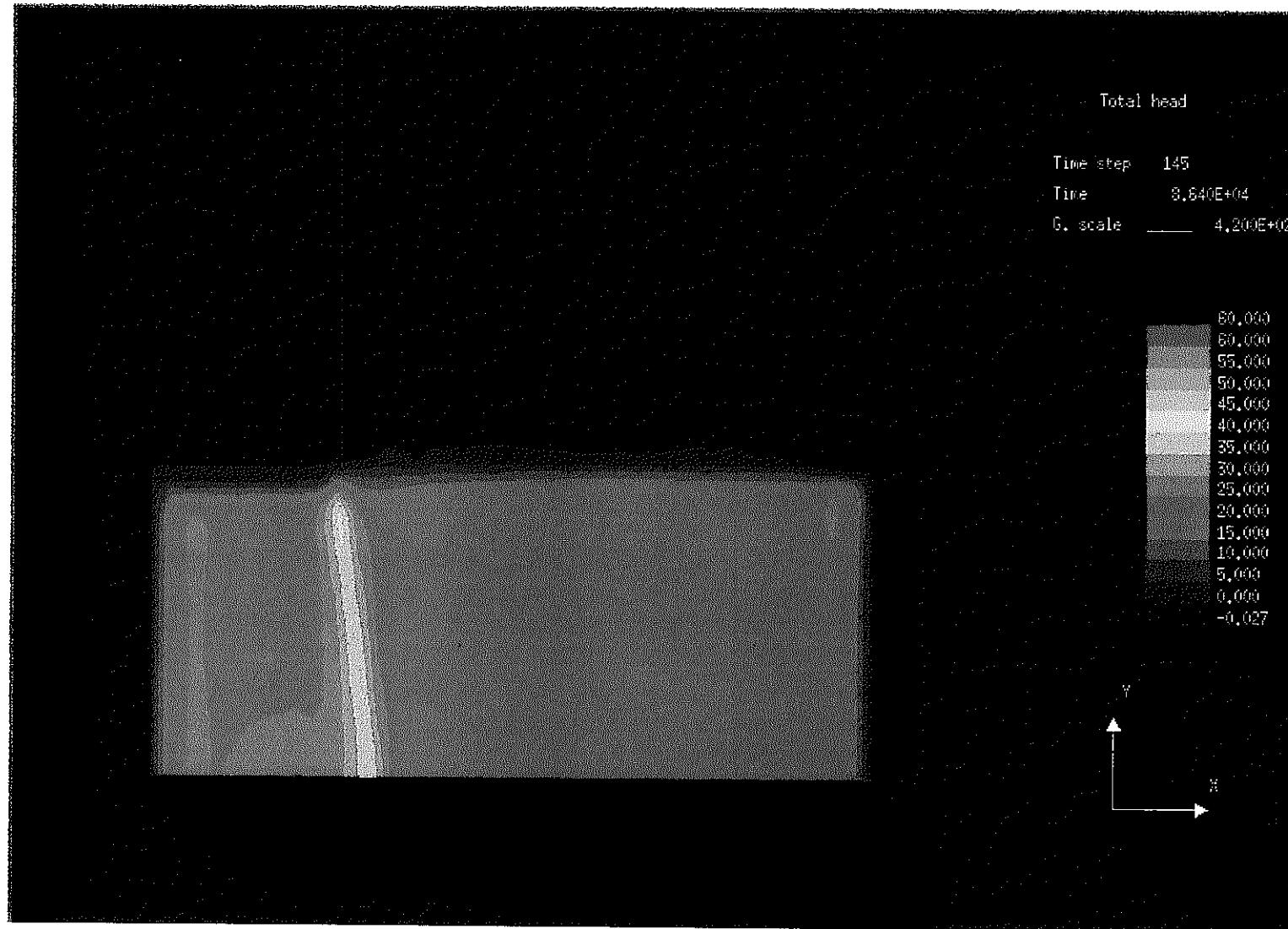


図 3-28 全水頭分布(1日後,CASE2)

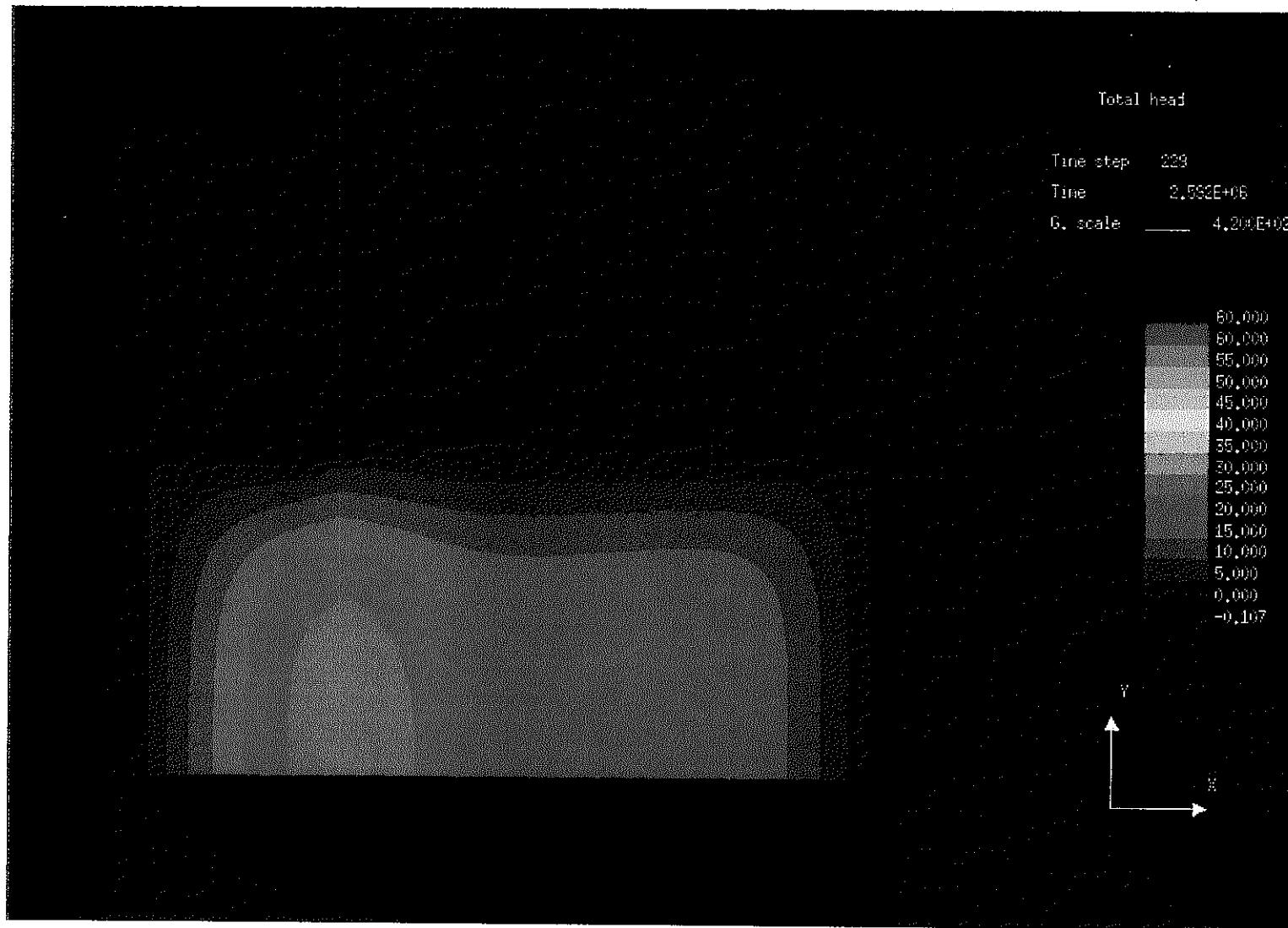


図 3-29 全水頭分布(30 日後,CASE2)

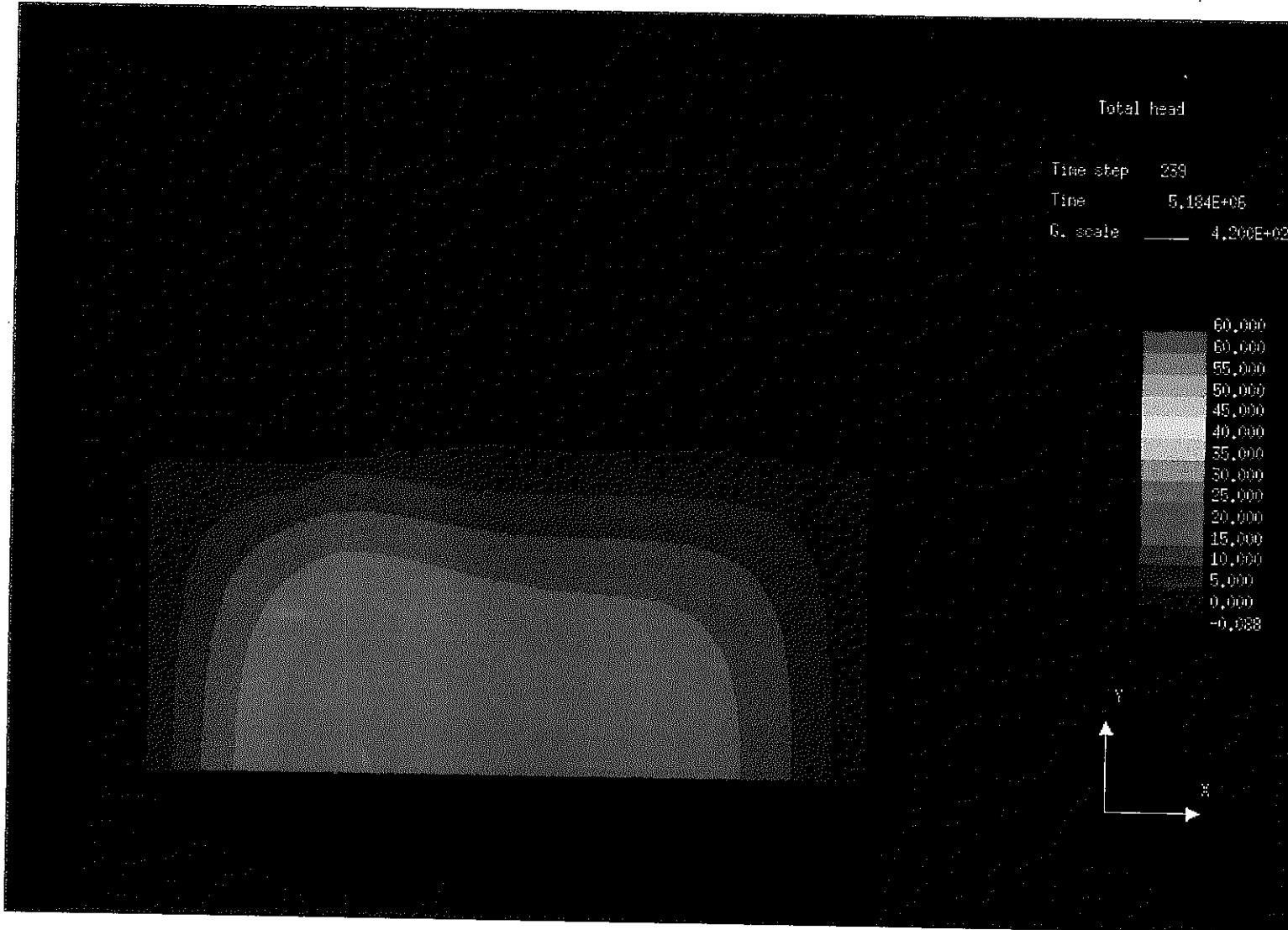


図 3-30 全水頭分布(60 日後,CASE2)

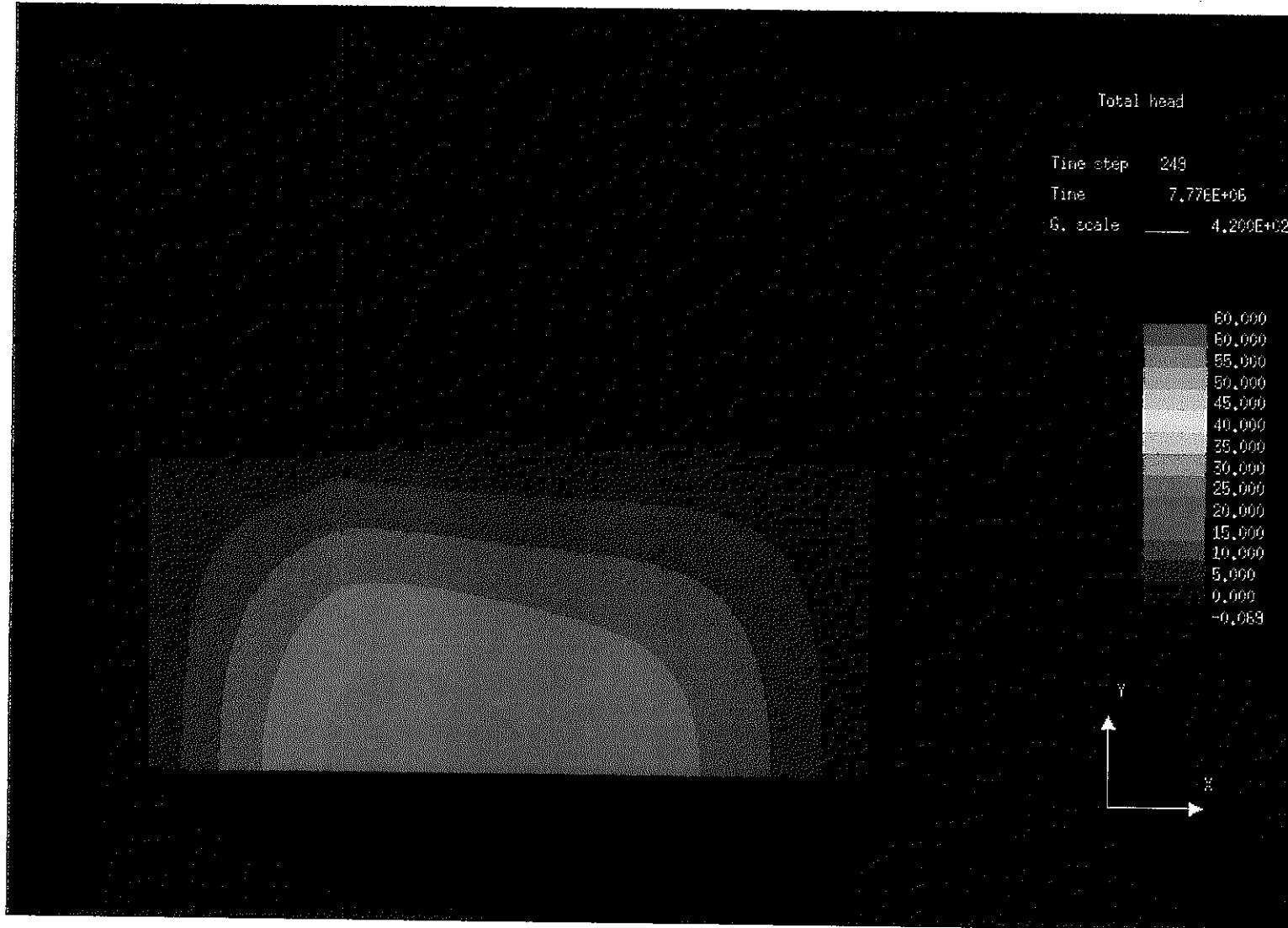
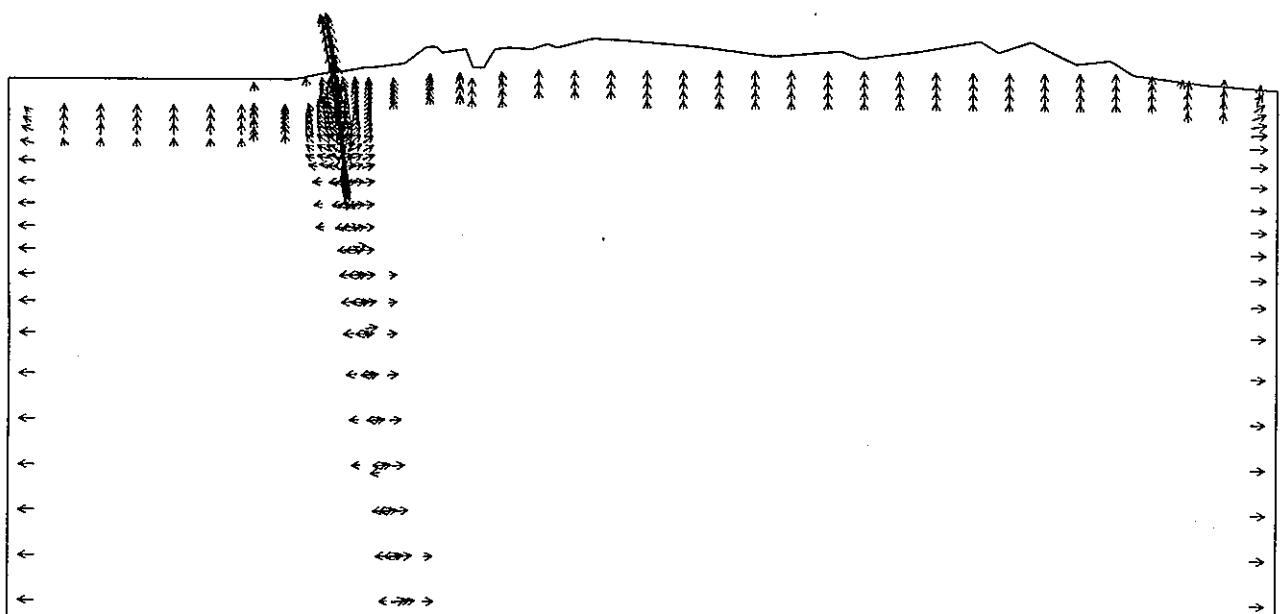
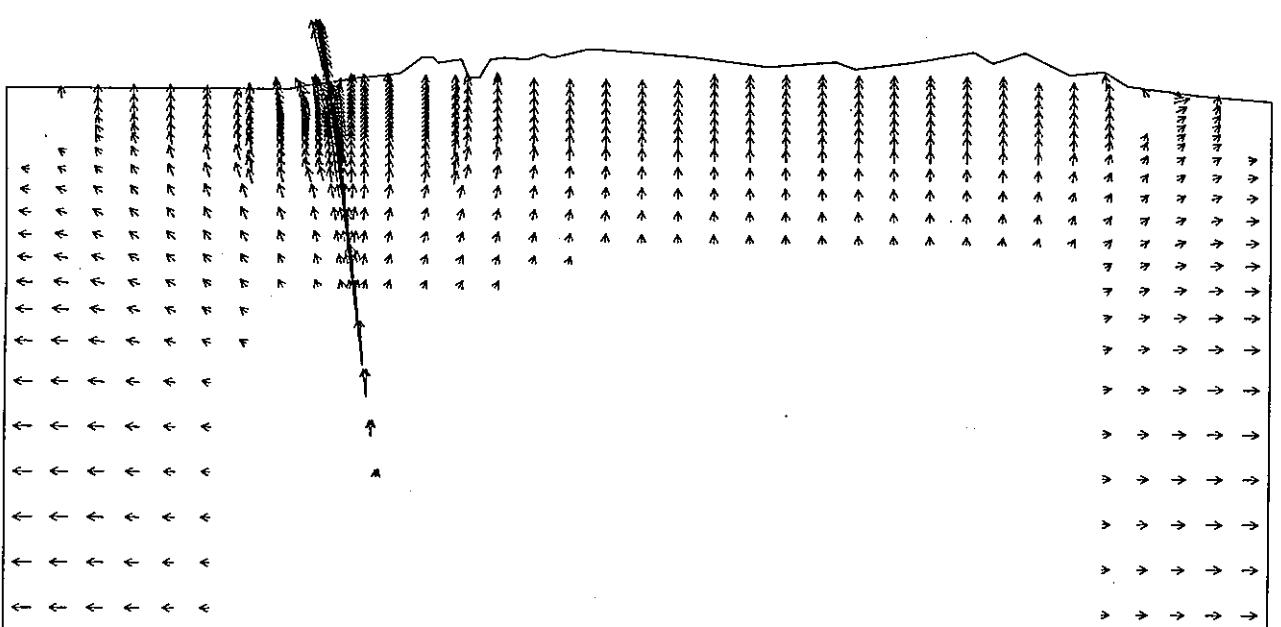


図 3-31 全水頭分布(90 日後, CASE2)



(a) 1日後

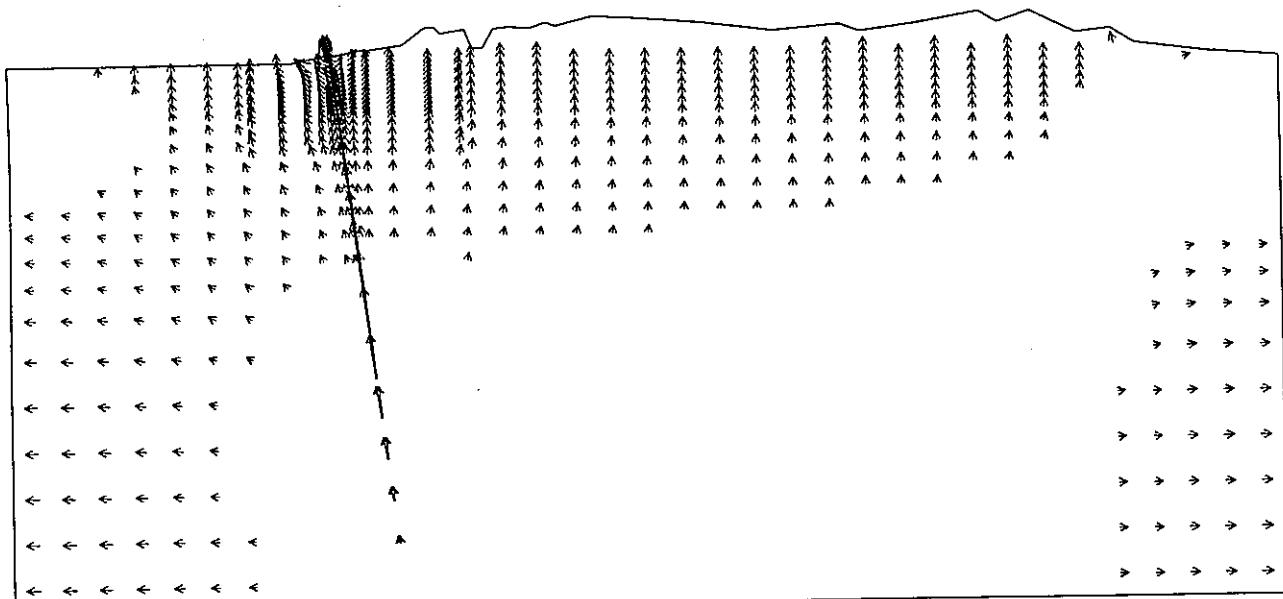
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(b) 30日後

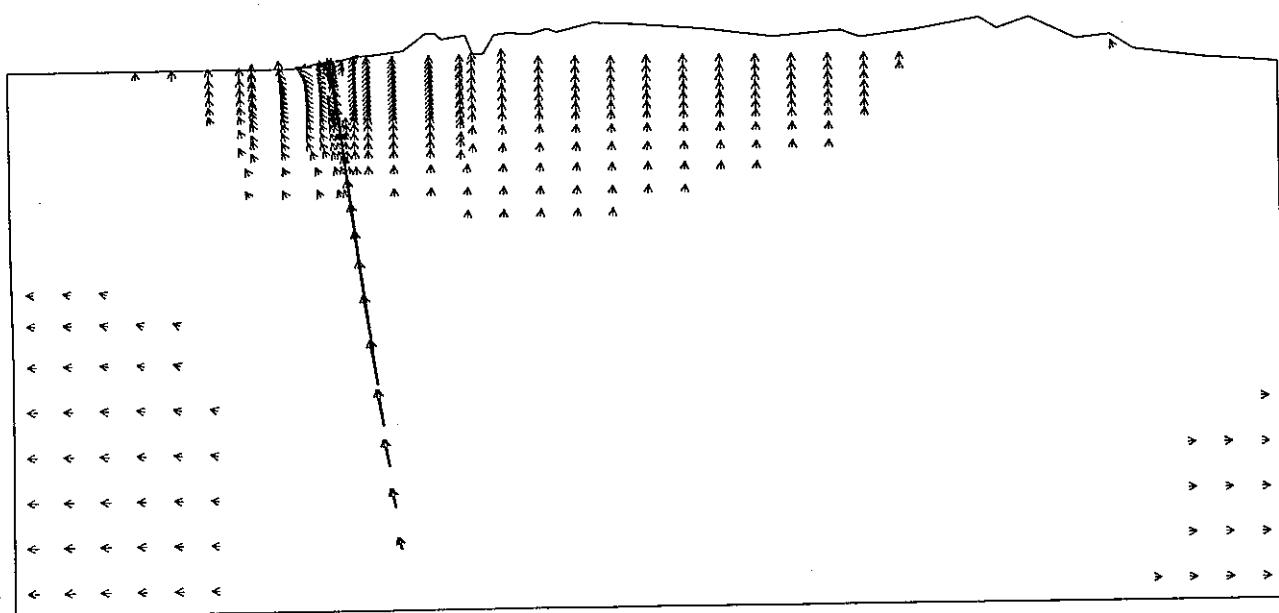
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-32 流速ベクトル(CASE2)



(c) 60 日後

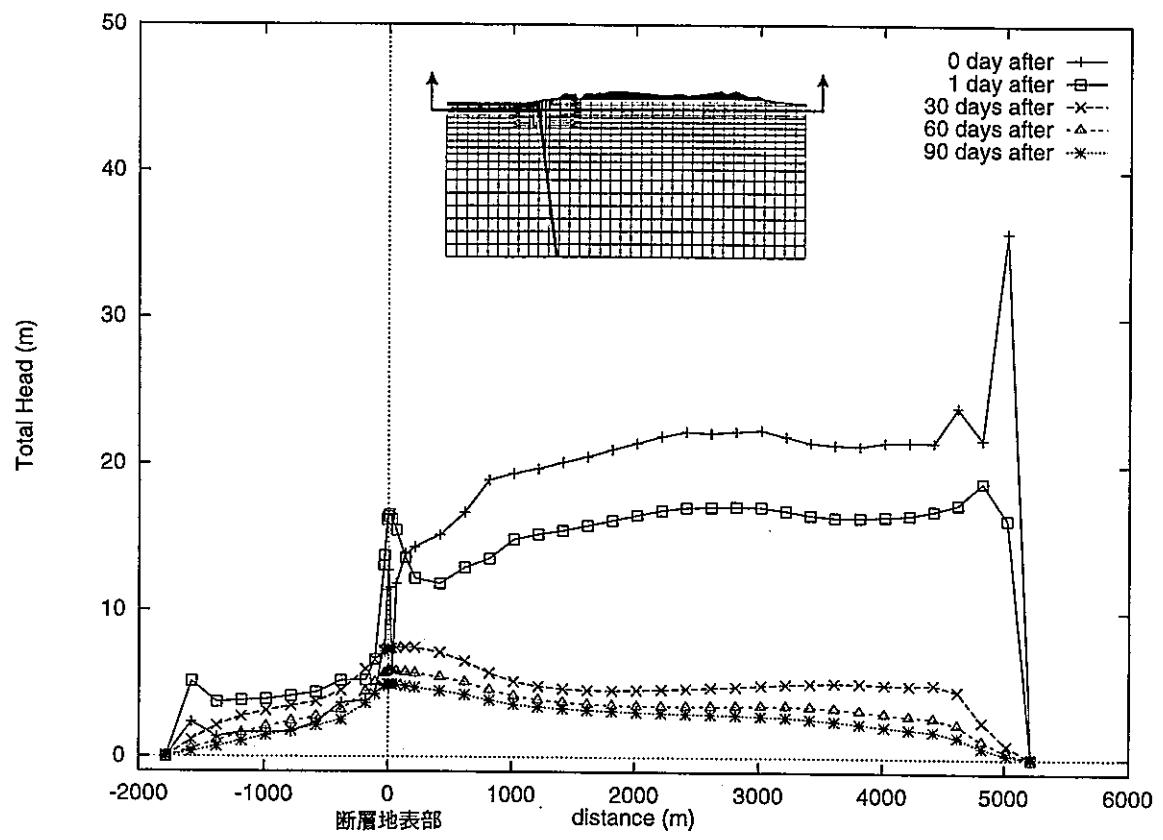
← : 1.0×10^{-8} m/sec



(d) 90 日後

← : 1.0×10^{-8} m/sec

図 3-32 流速ベクトル(CASE2)



(a) EL-150m

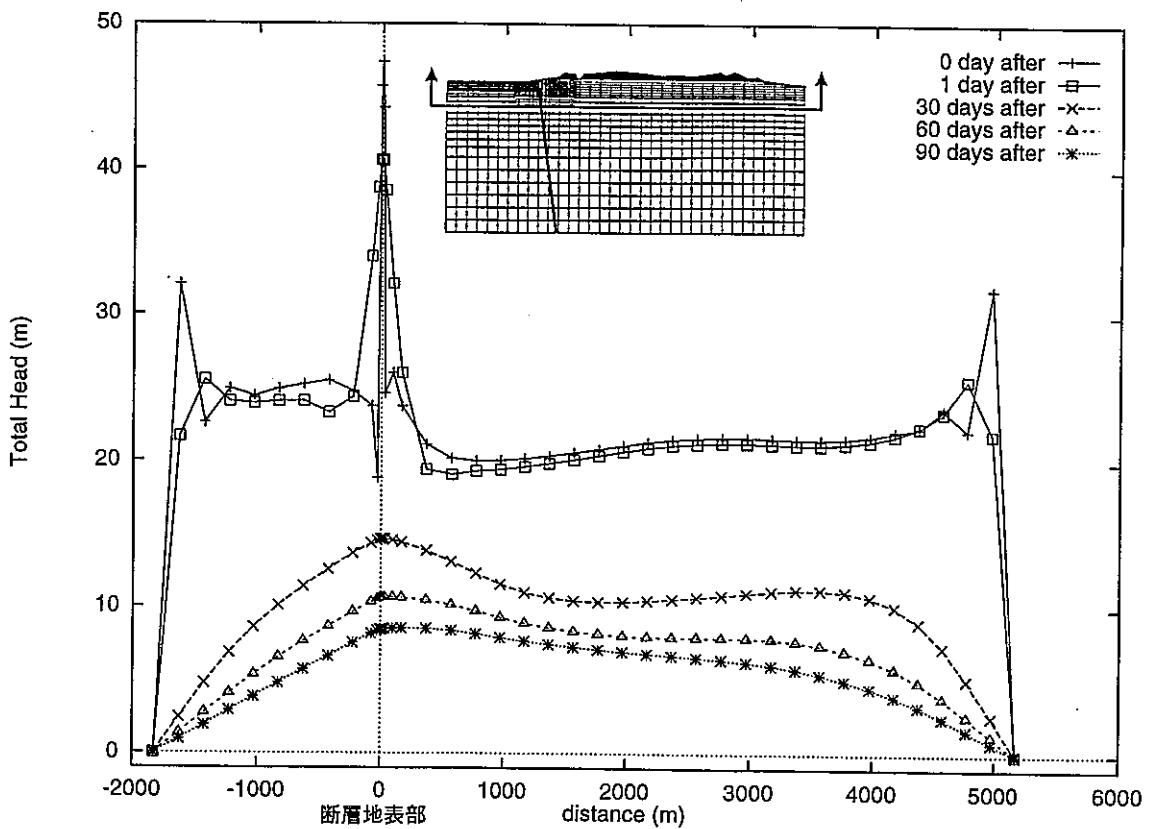
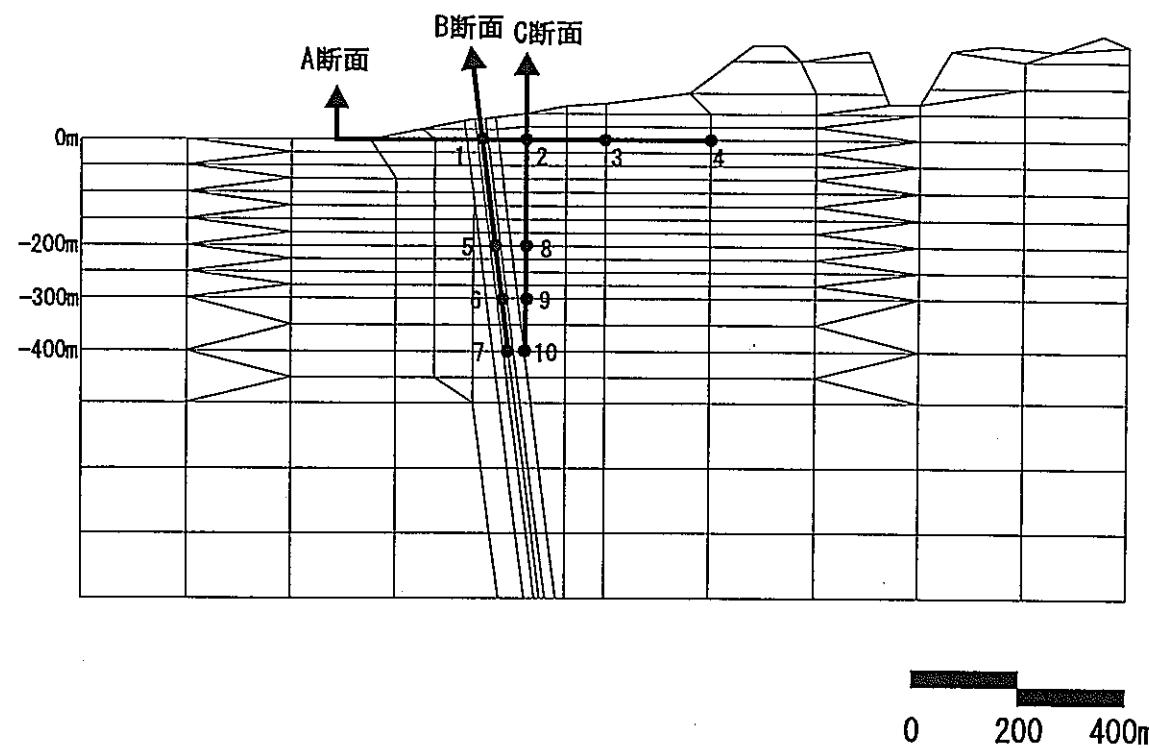
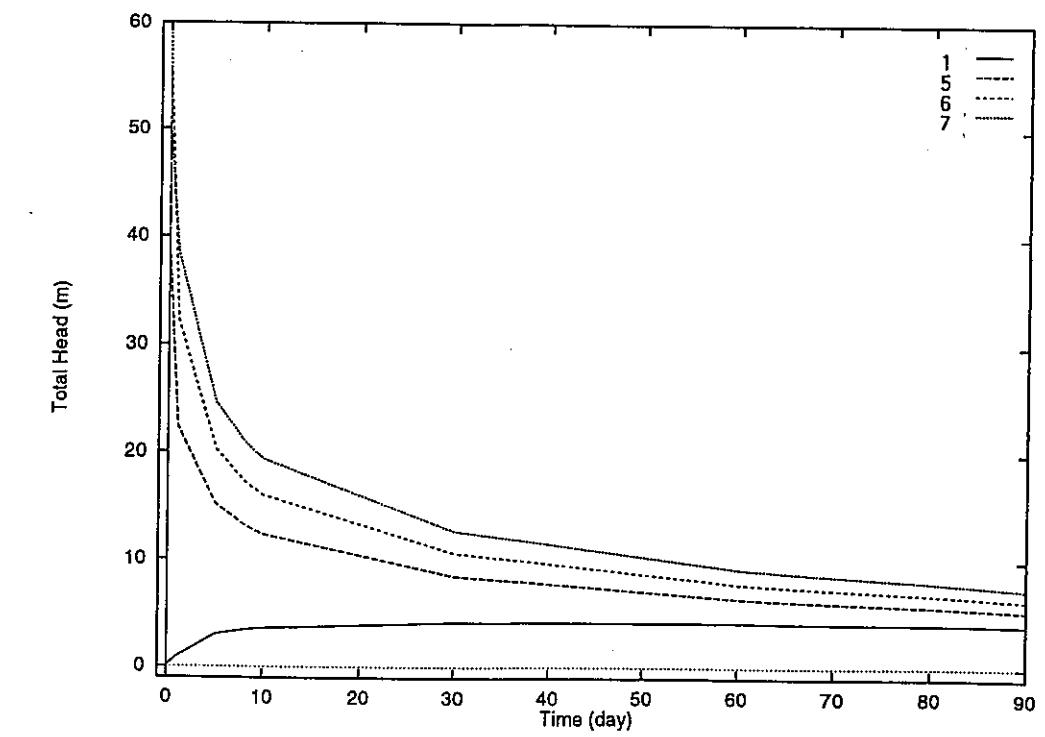


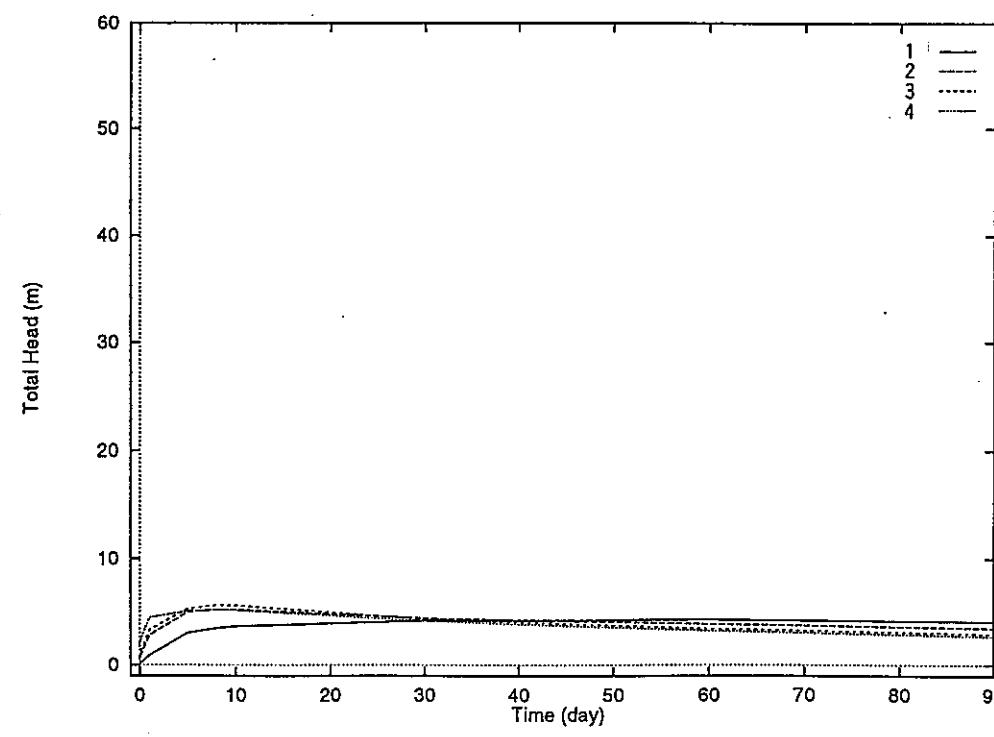
図 3-33 全水頭の空間分布(CASE2)



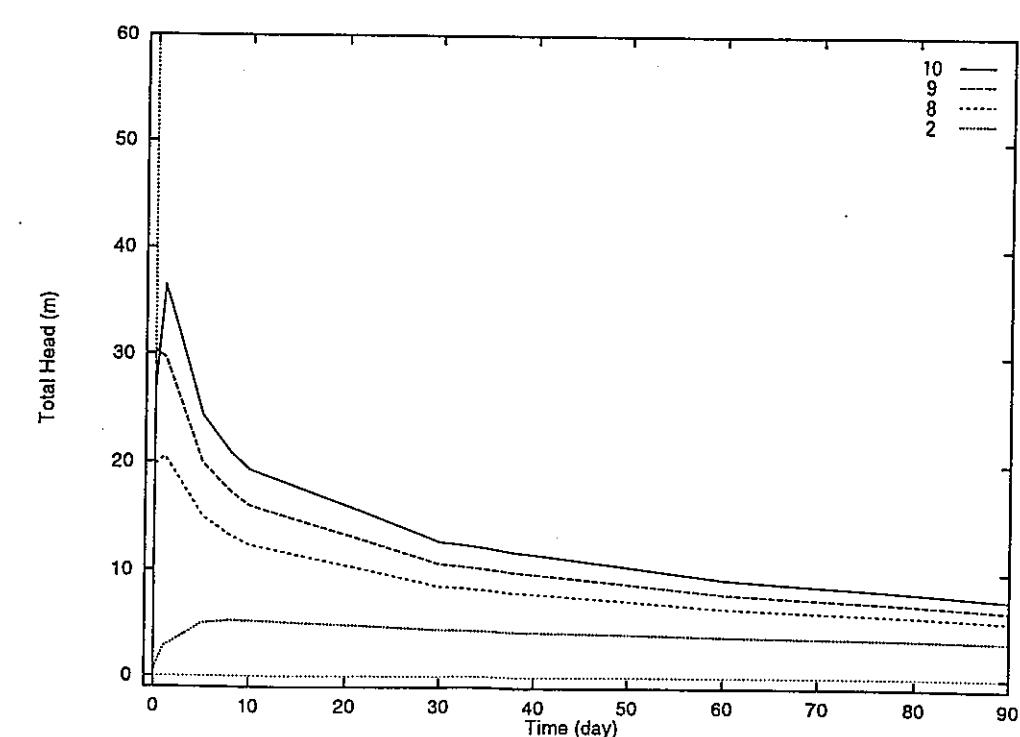
(a) A断面



(b) B断面

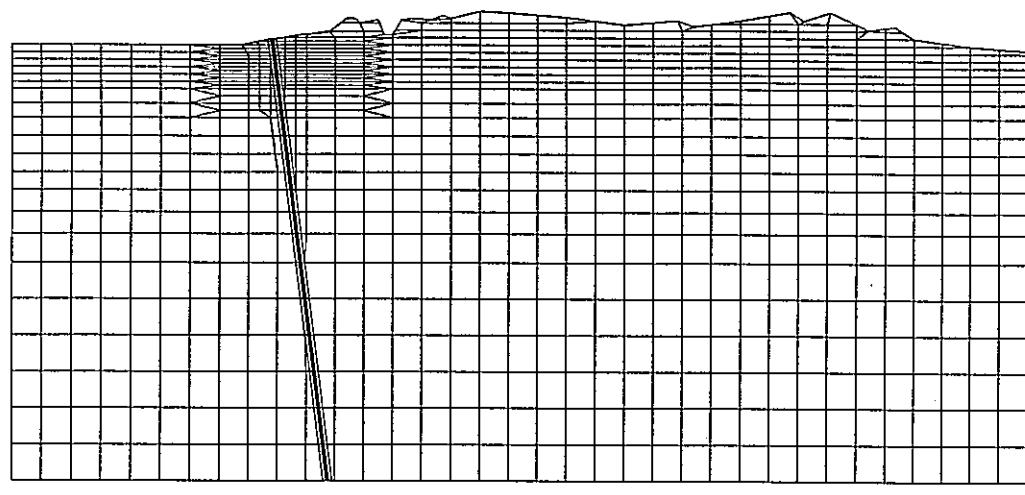


(a) A断面



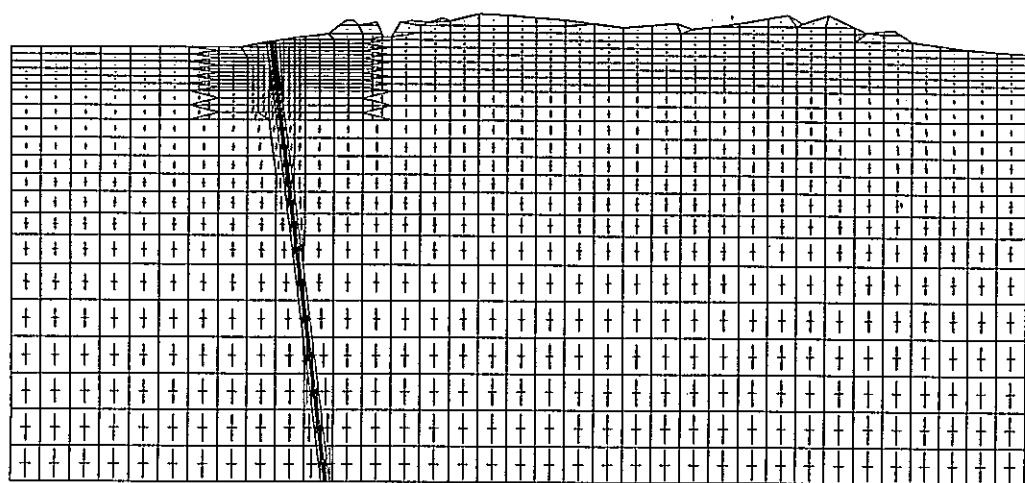
(c) C断面

図 3-34 全水頭の時間変化(CASE2)



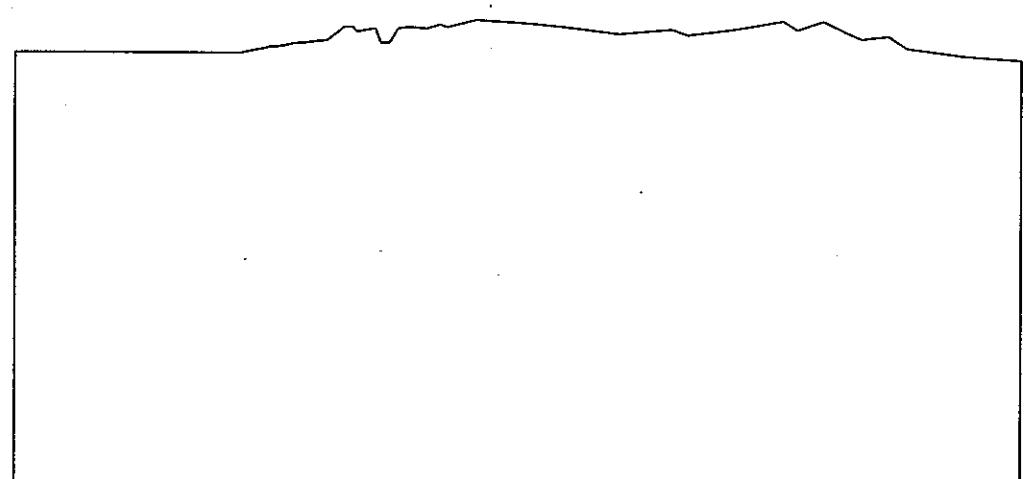
(a) 変形図

→ : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

→ : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

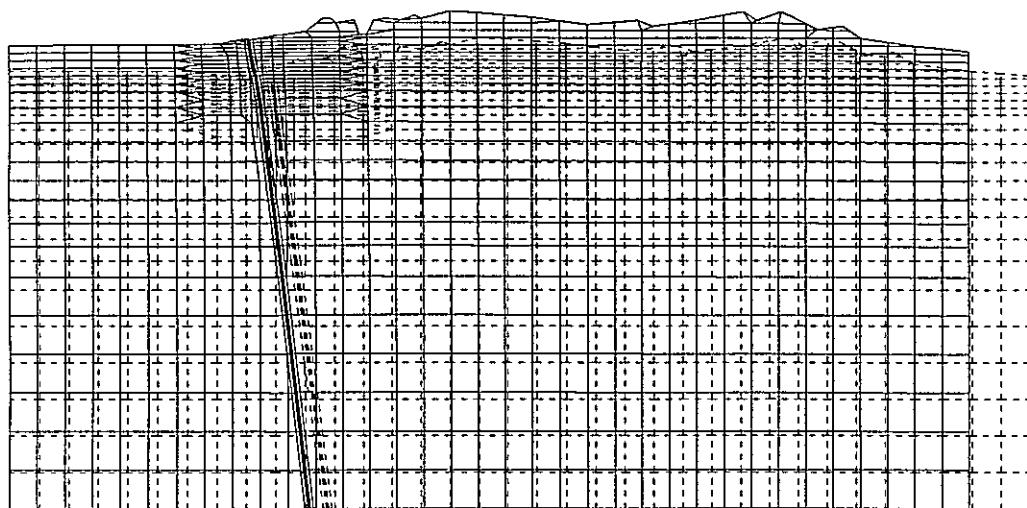


(c) 全水頭分布

単位: m

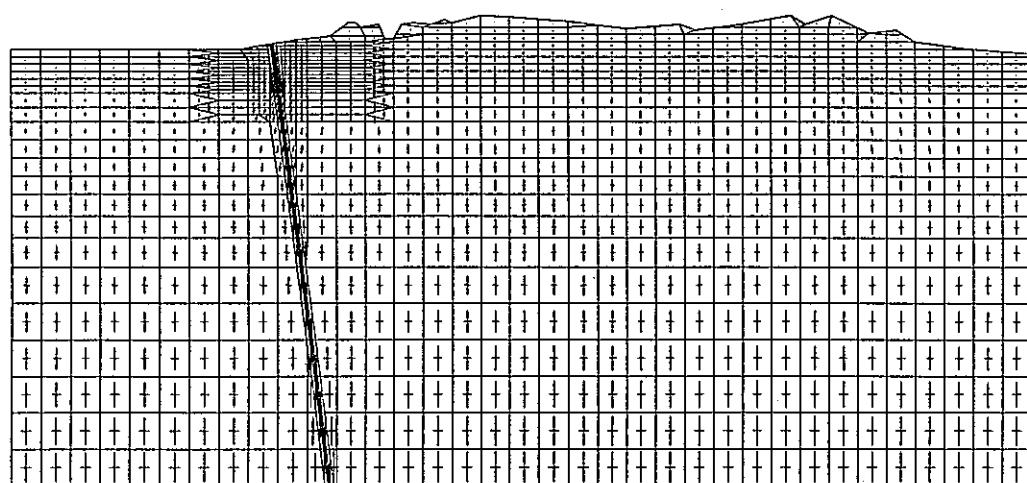
0 1000 2000m

図 3-35 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE3)



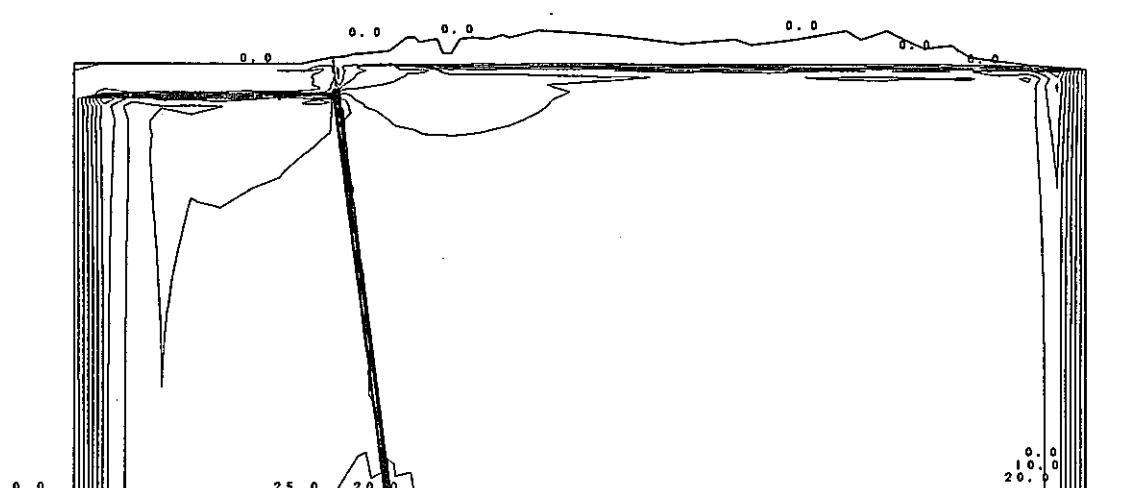
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

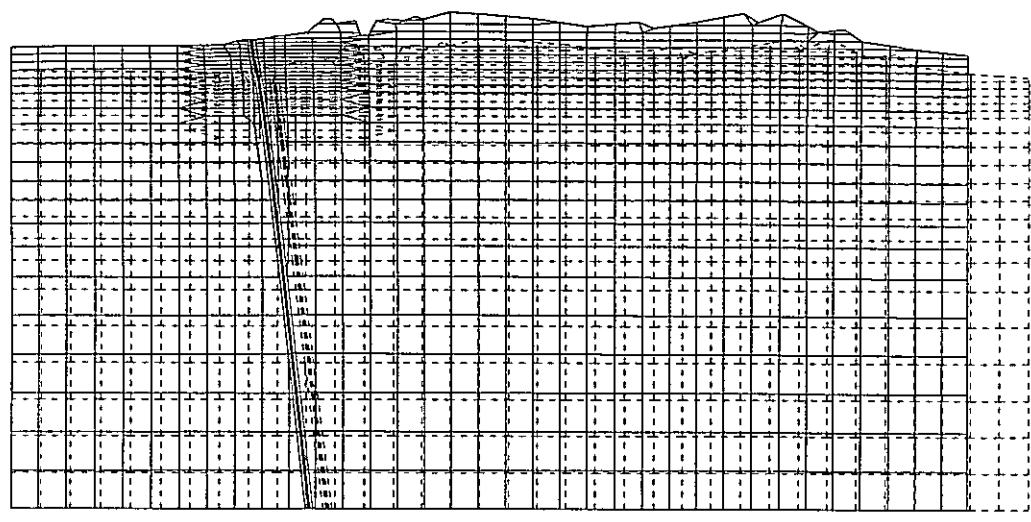


(c) 全水頭分布

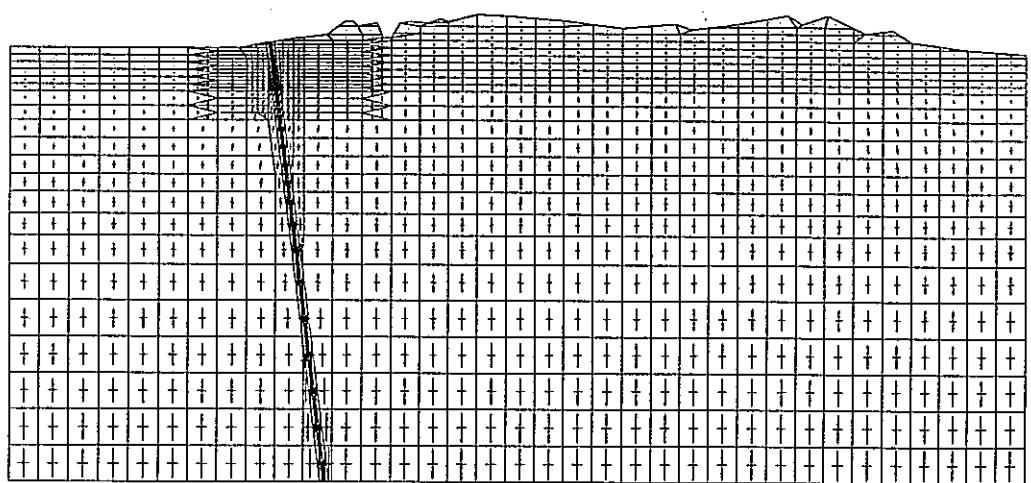
単位: m

0 1000 2000

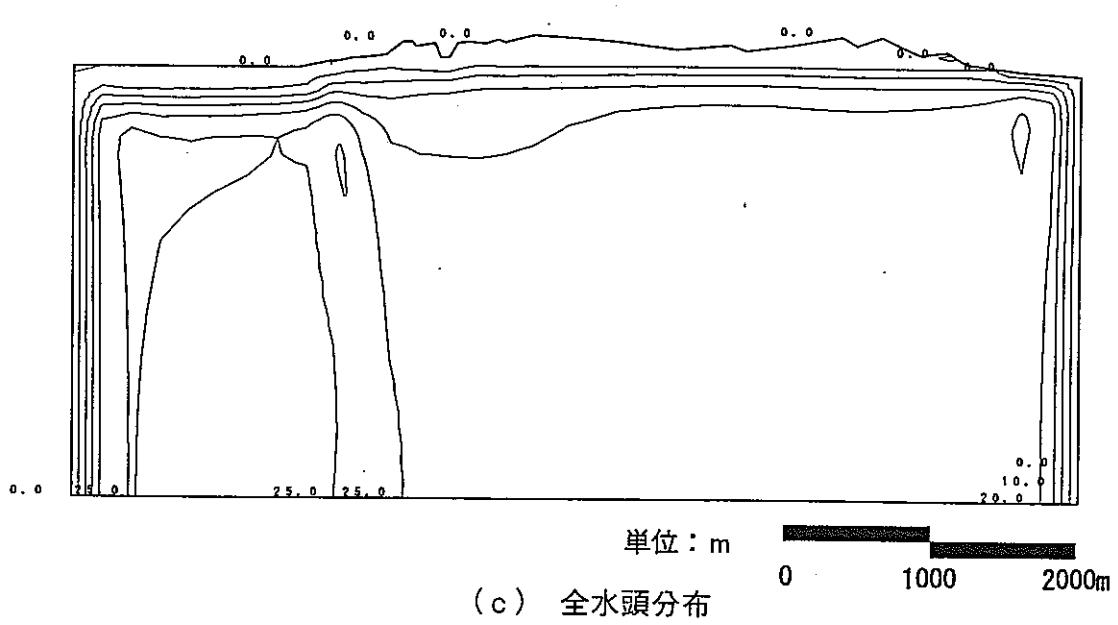
図 3-36 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE3)



(a) 変形図

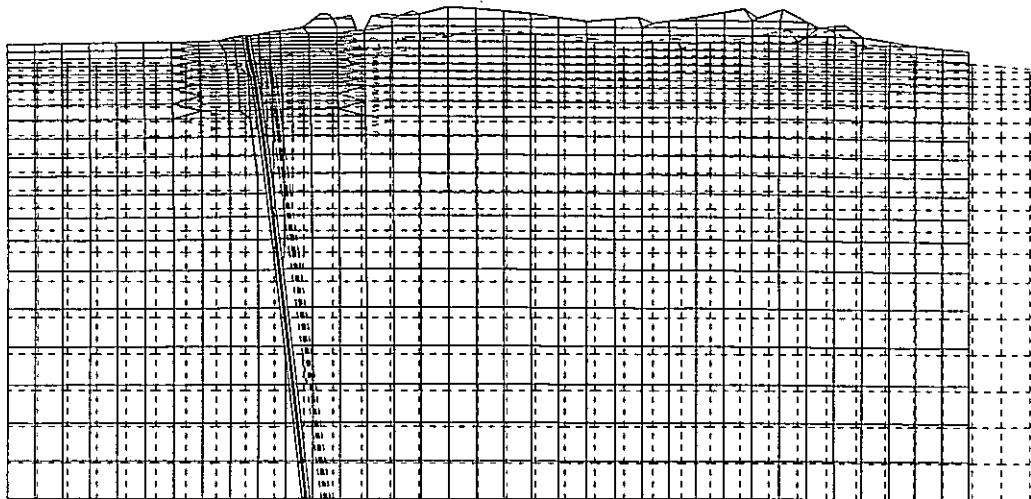


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



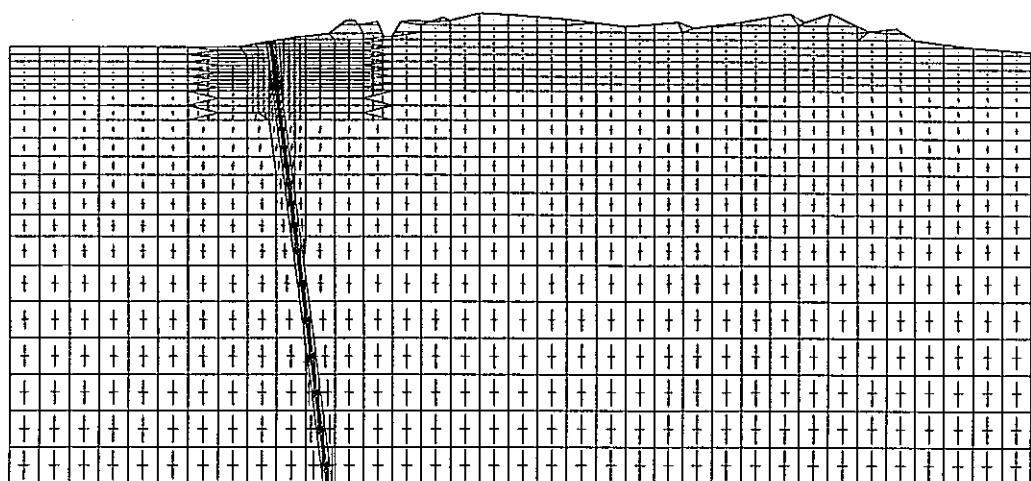
(c) 全水頭分布

図 3-37 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE3)



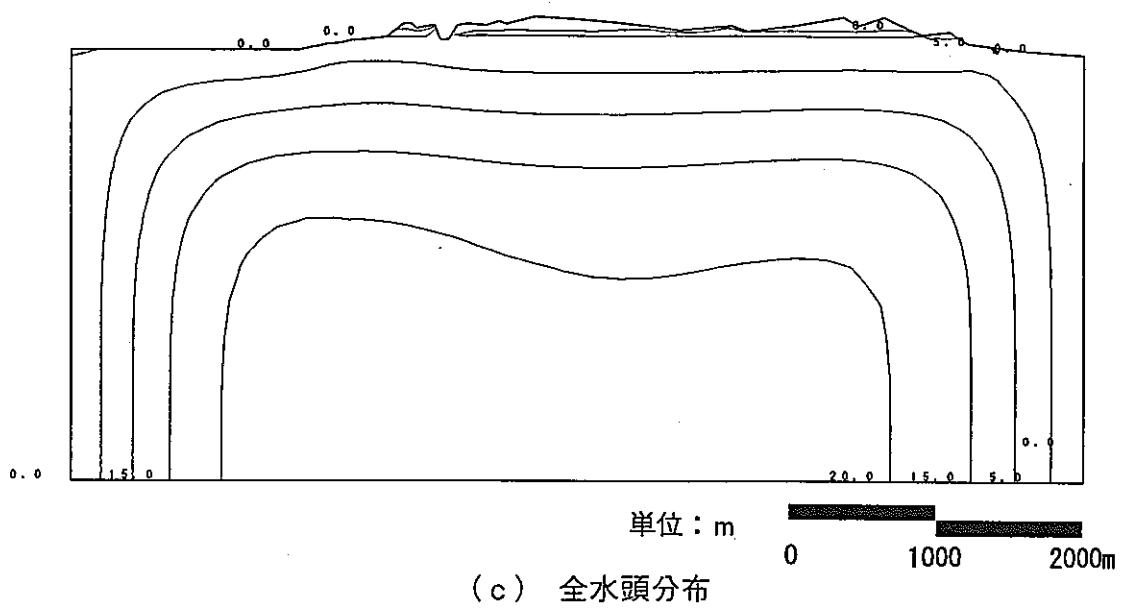
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

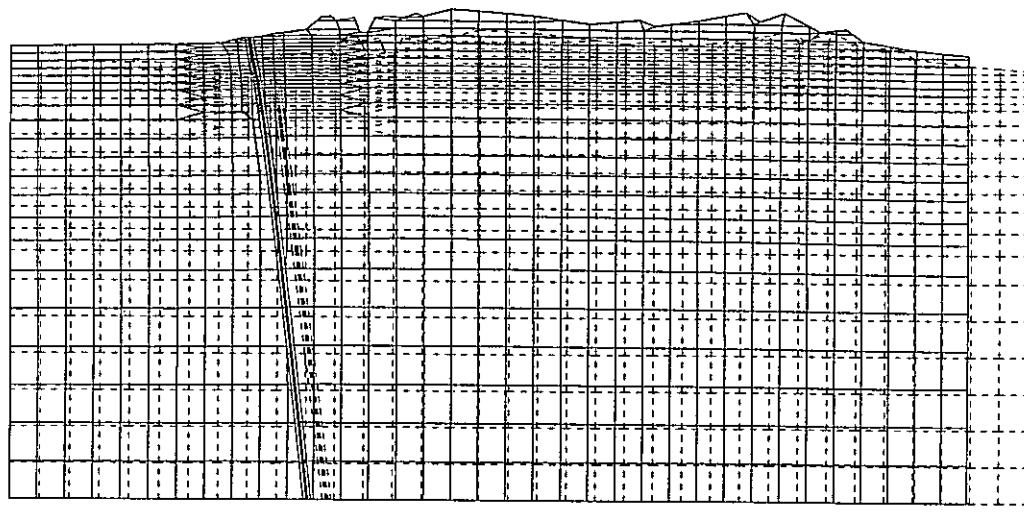


(c) 全水頭分布

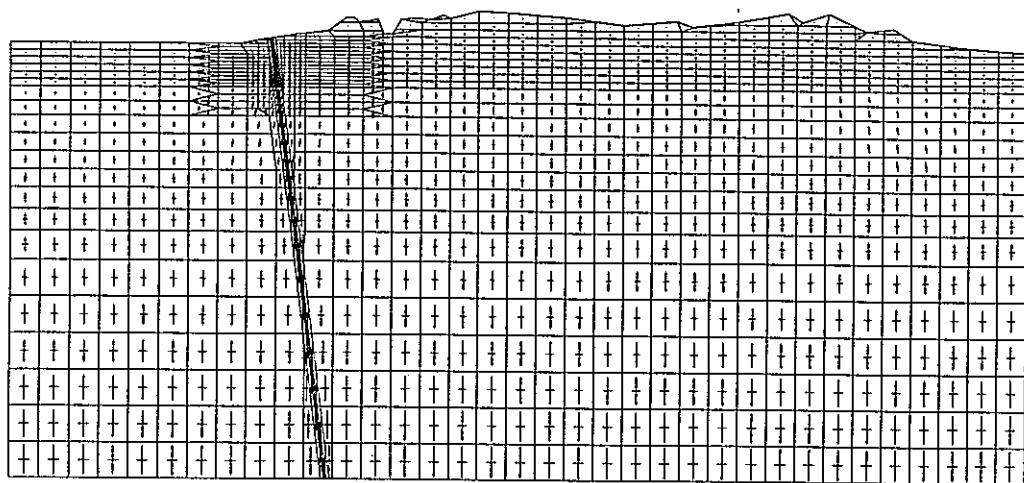
単位: m

0 1000 2000m

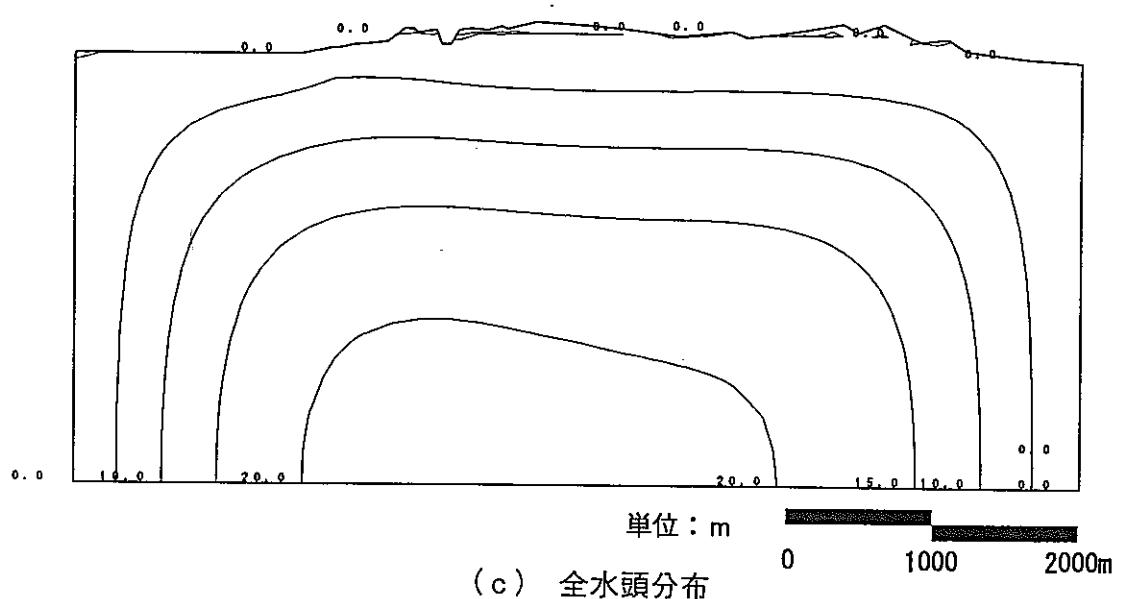
図 3-38 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE3)



(a) 変形図

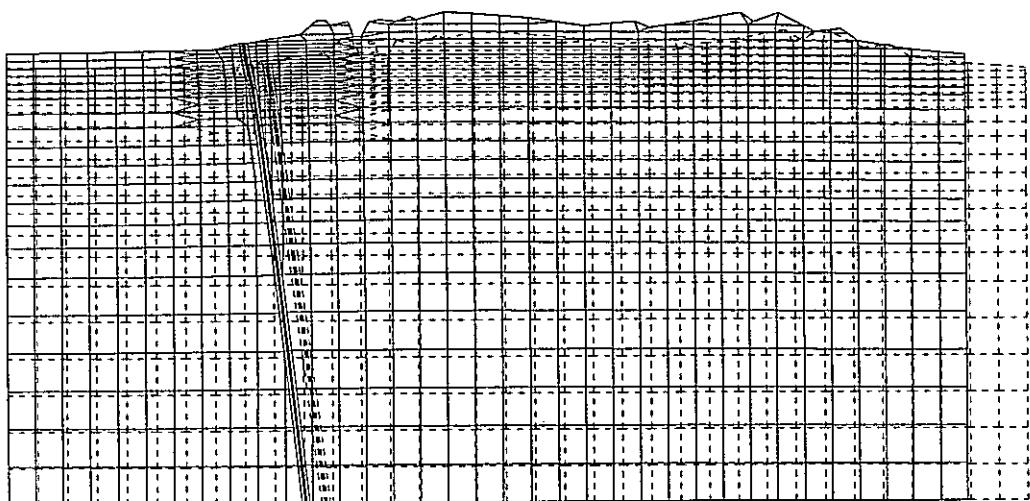


(b) 主応力(有効応力)ベクトル

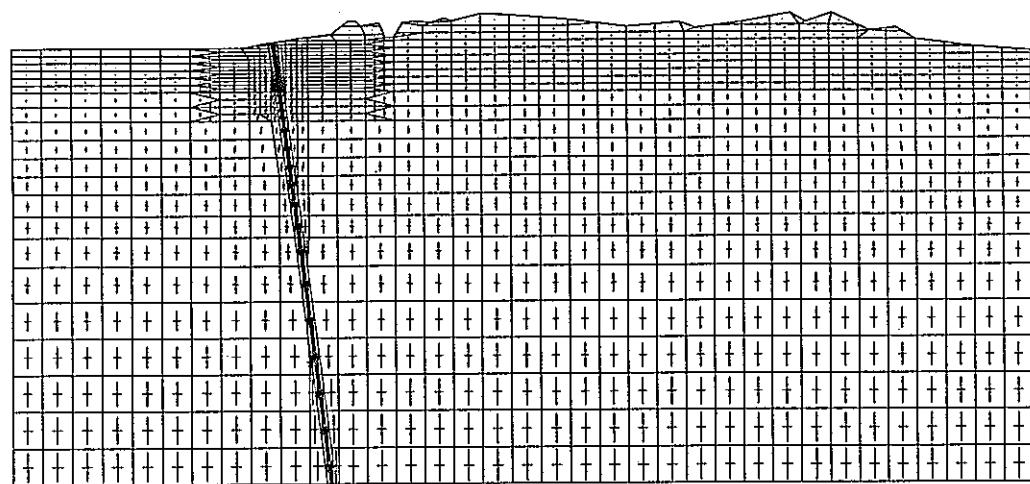


(c) 全水頭分布

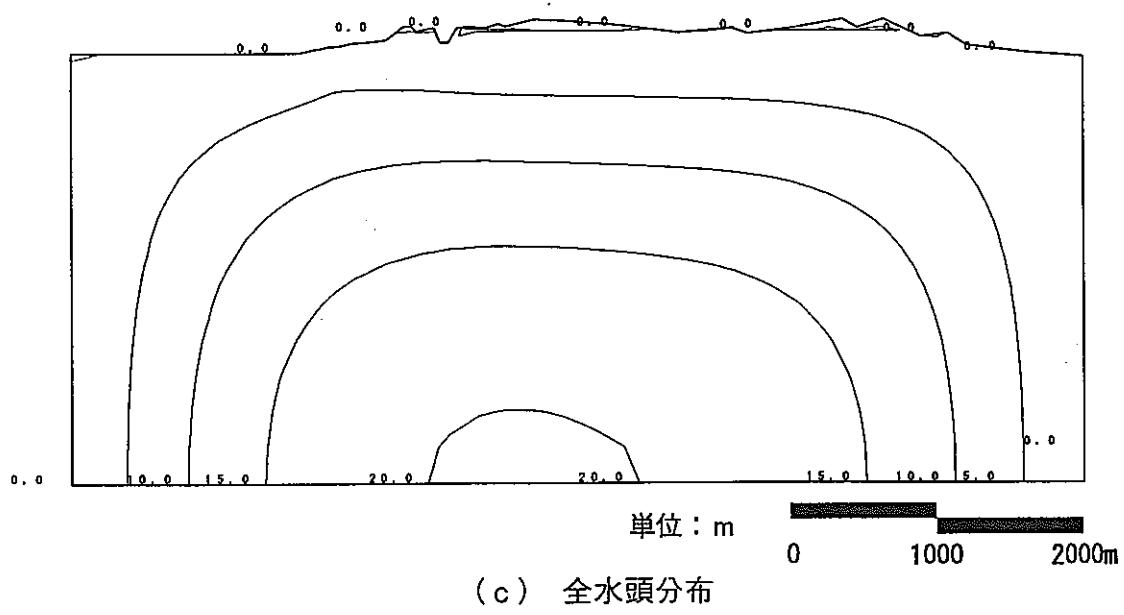
図 3-39 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE3)



(a) 変形図

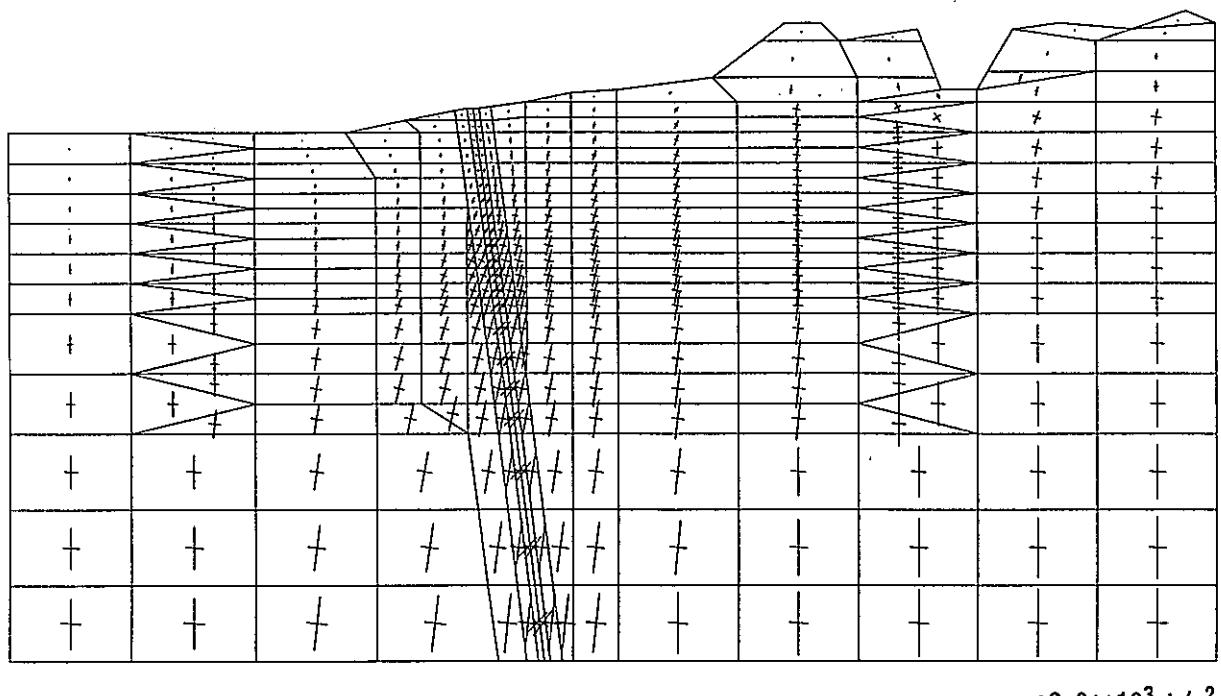


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



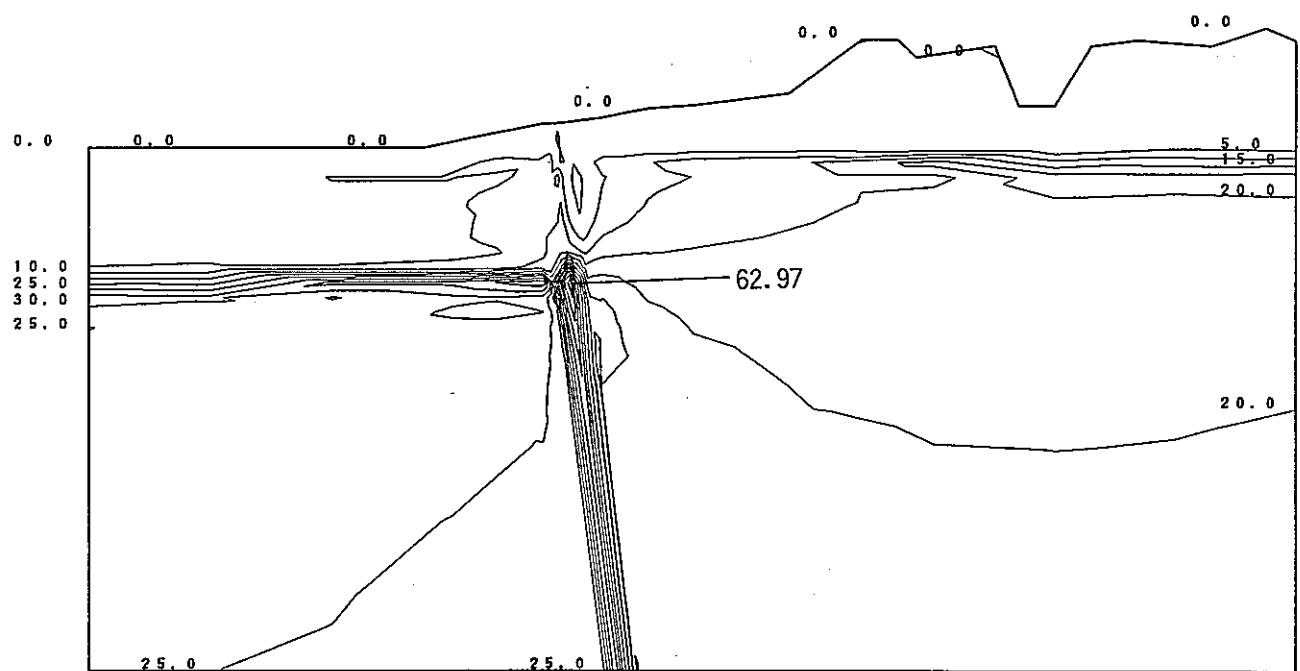
(c) 全水頭分布

図 3-40 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE3)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

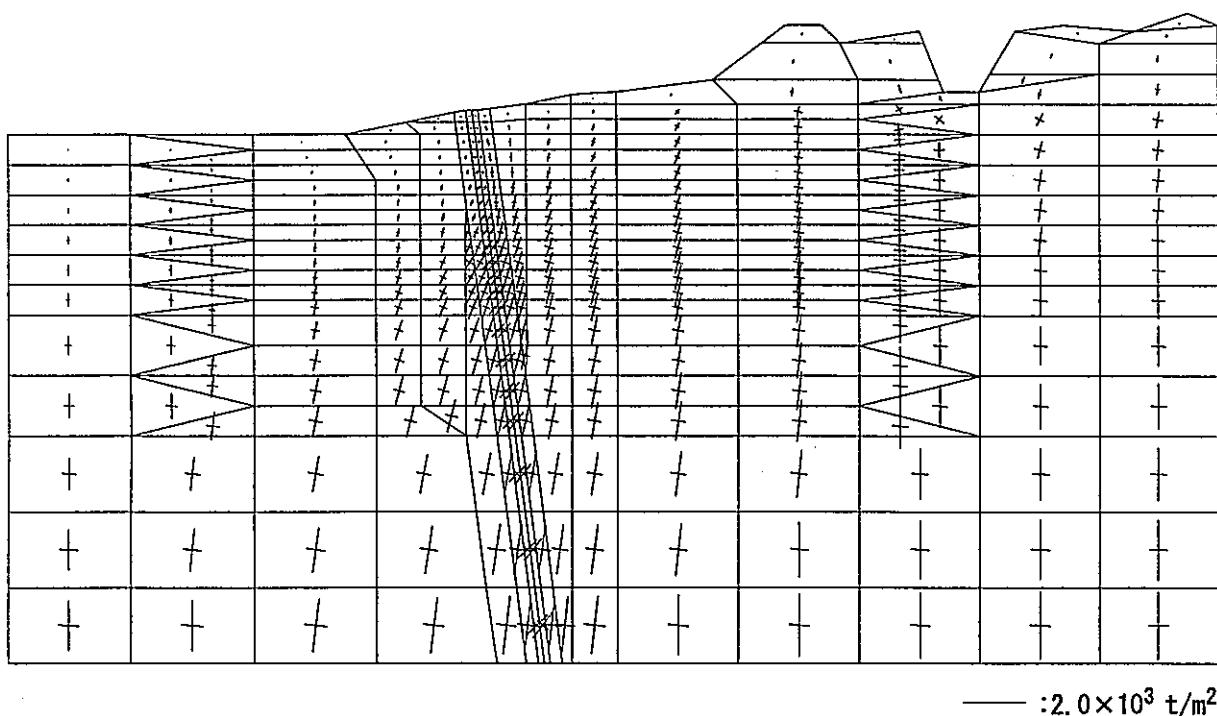


(b) 全水頭分布

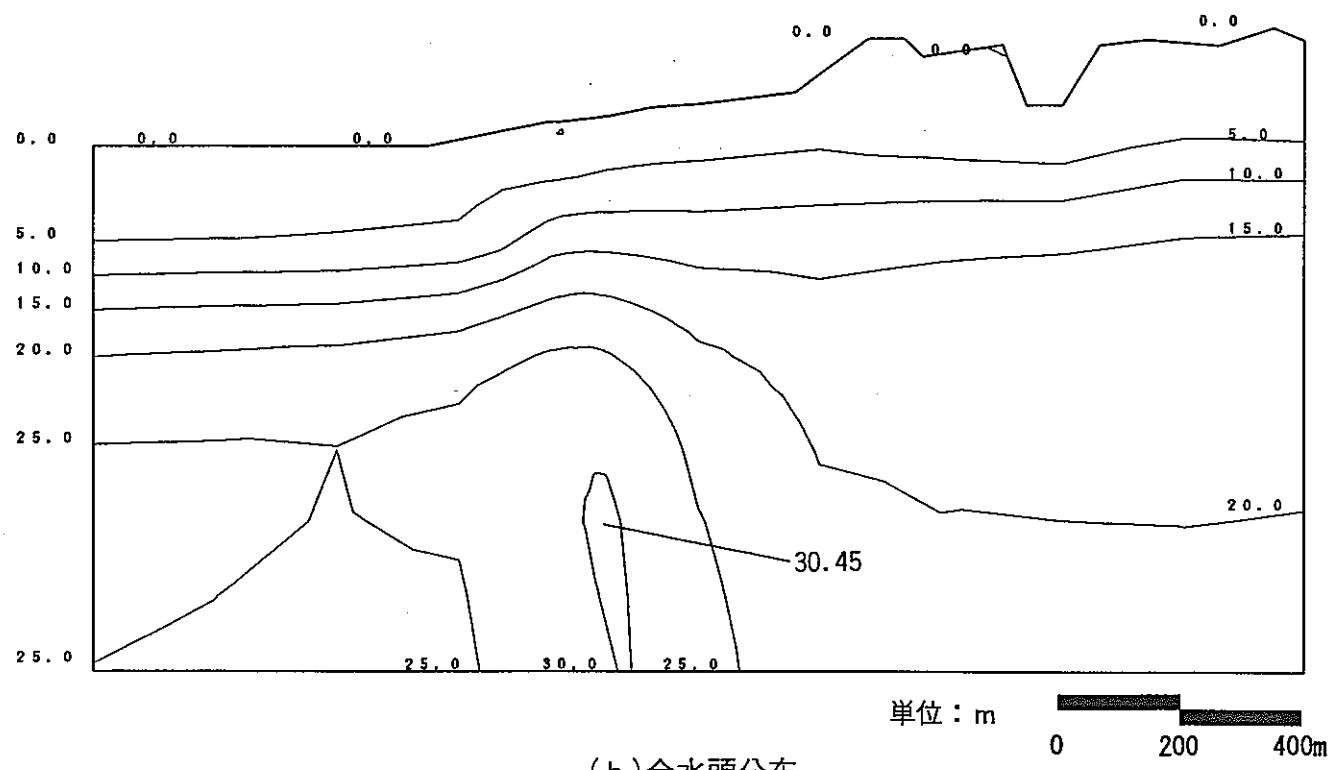
単位: m

0 200 400m

図 3-41 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後,CASE3)

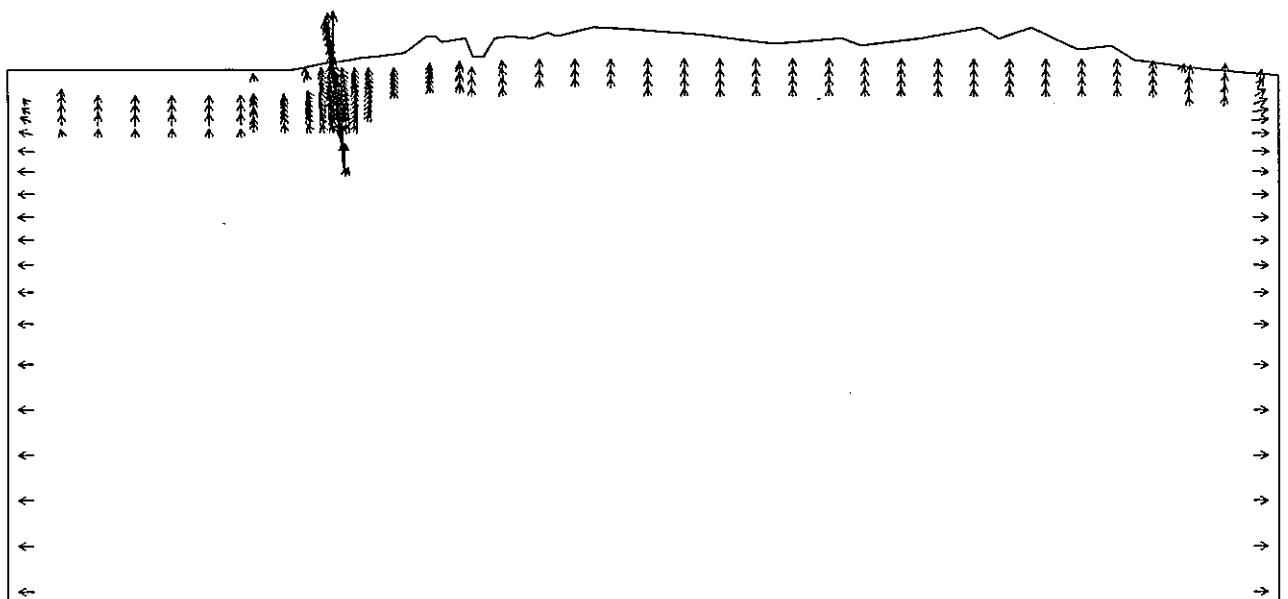


(a) 主応力(有効応力)ベクトル



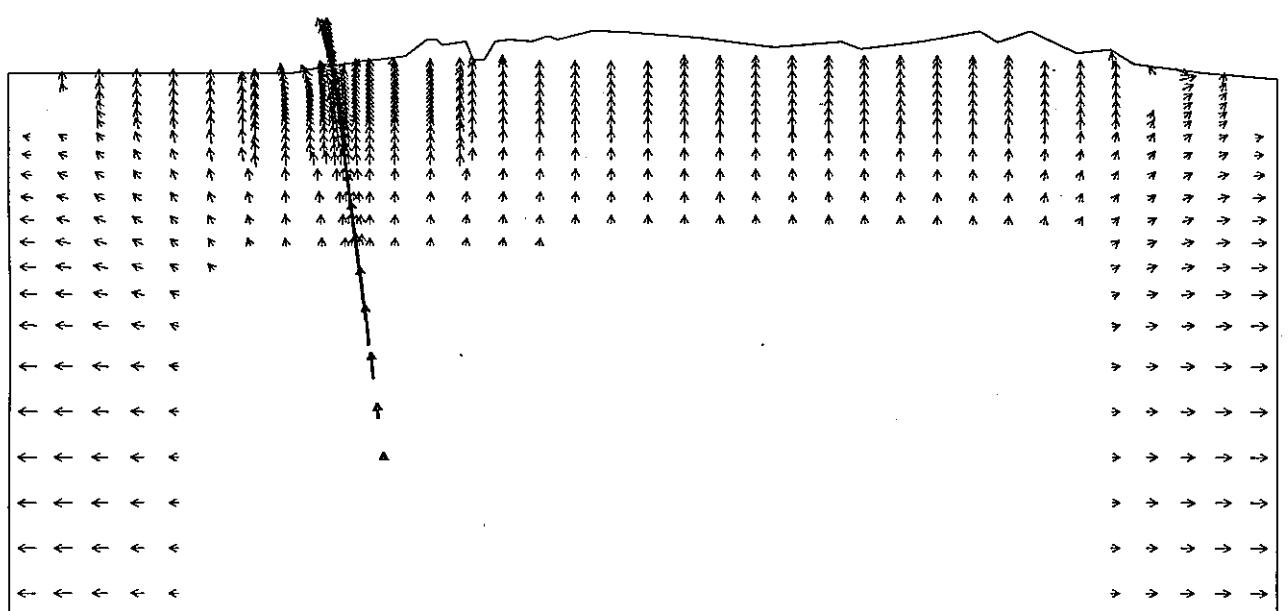
(b) 全水頭分布

図 3-42 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE3)



(a) 1日後

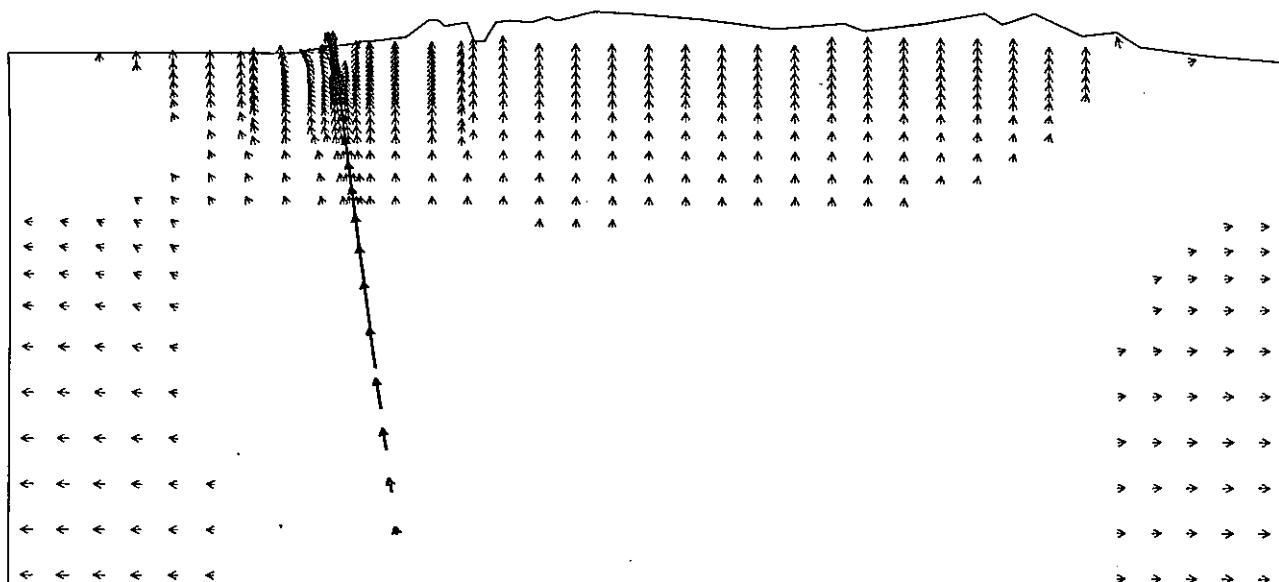
← : 5.0×10^{-8} m/sec



(b) 30日後

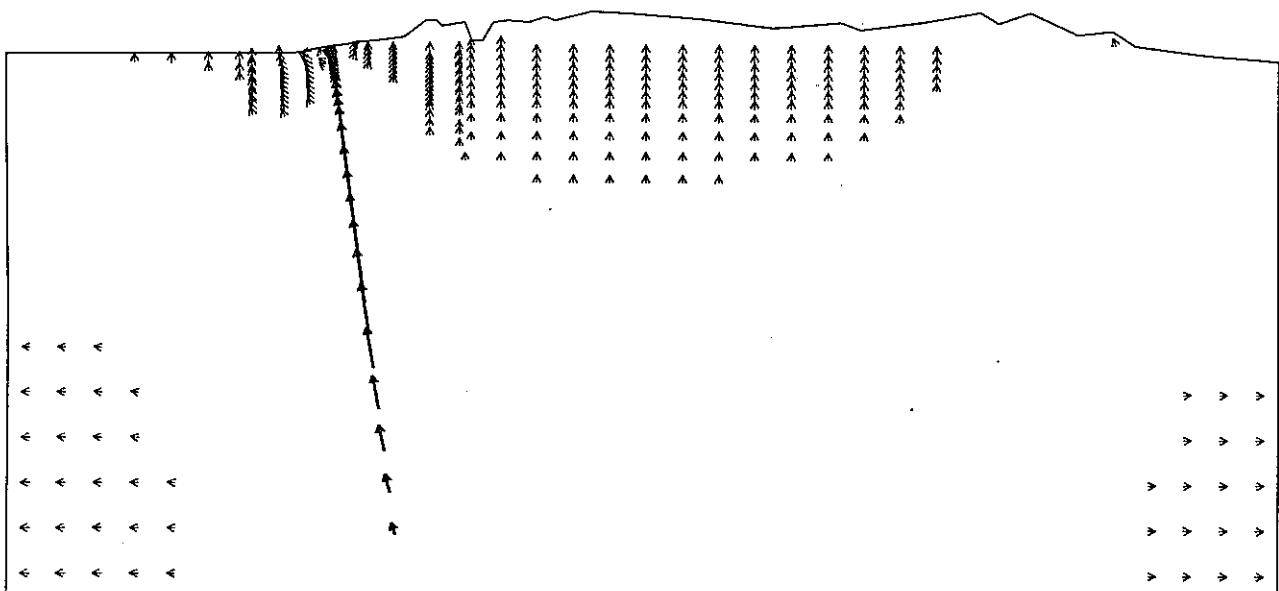
← : 1.0×10^{-8} m/sec

図 3-43 流速ベクトル(CASE3)



(c) 60 日後

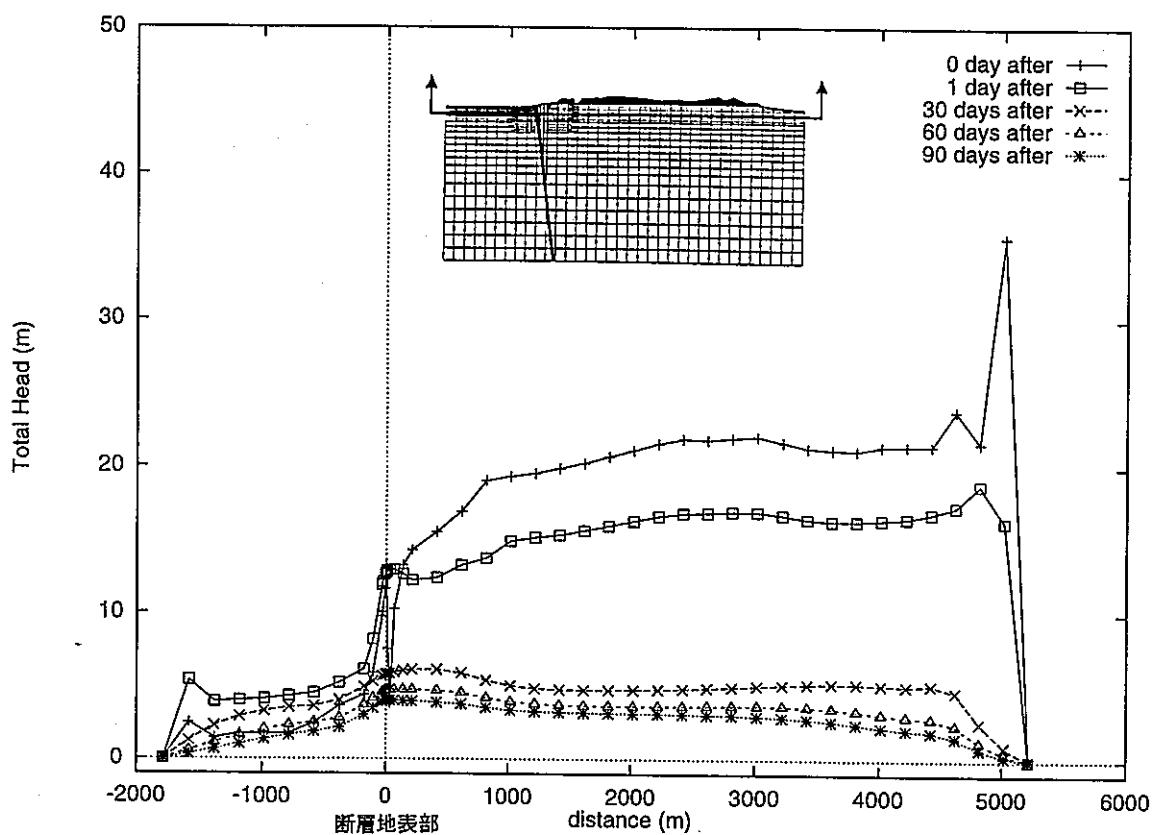
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



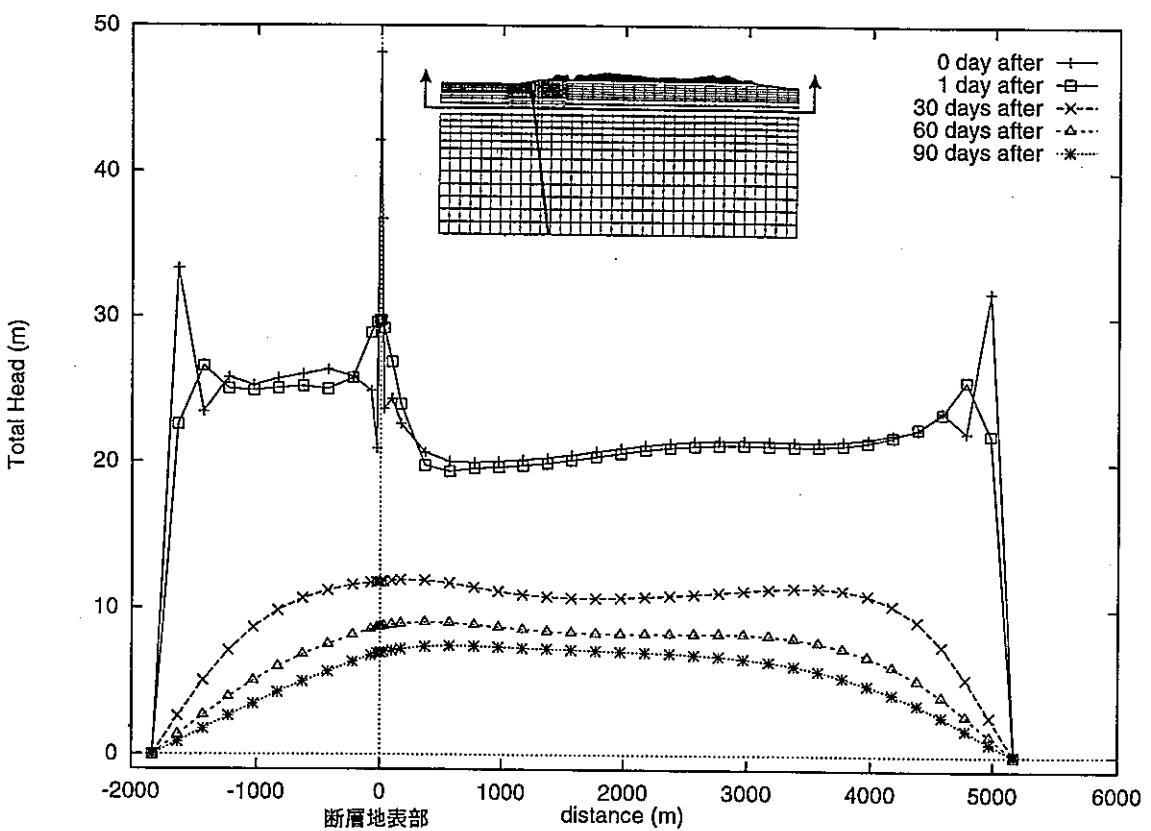
(d) 90 日後

$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-43 流速ベクトル(CASE3)

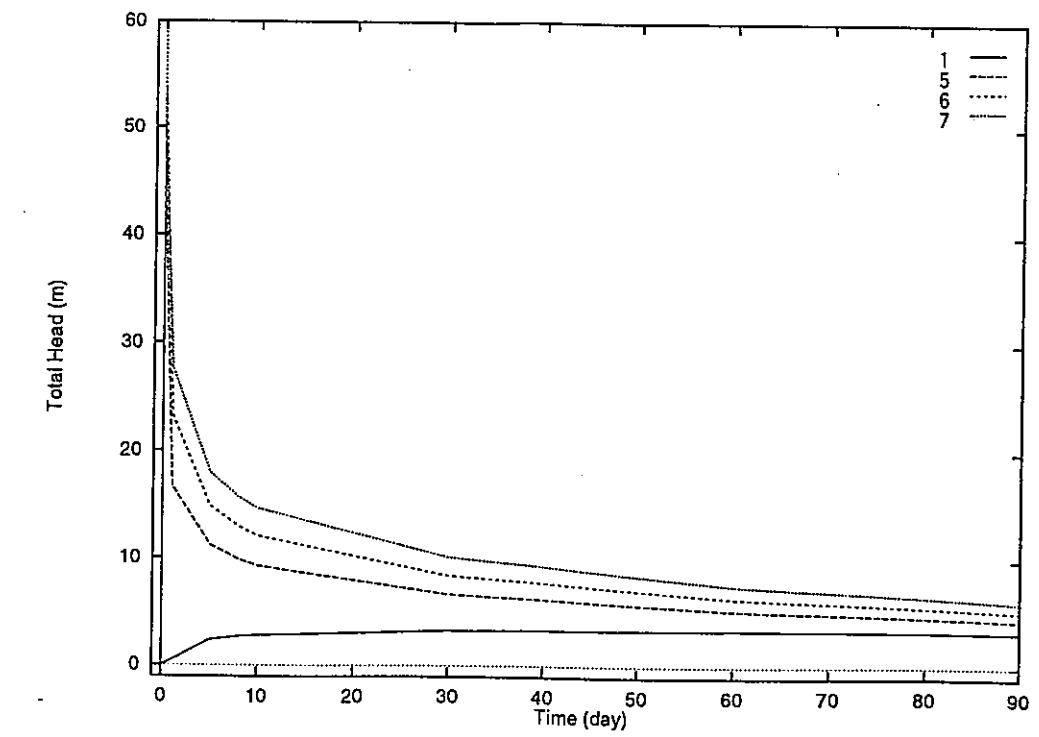
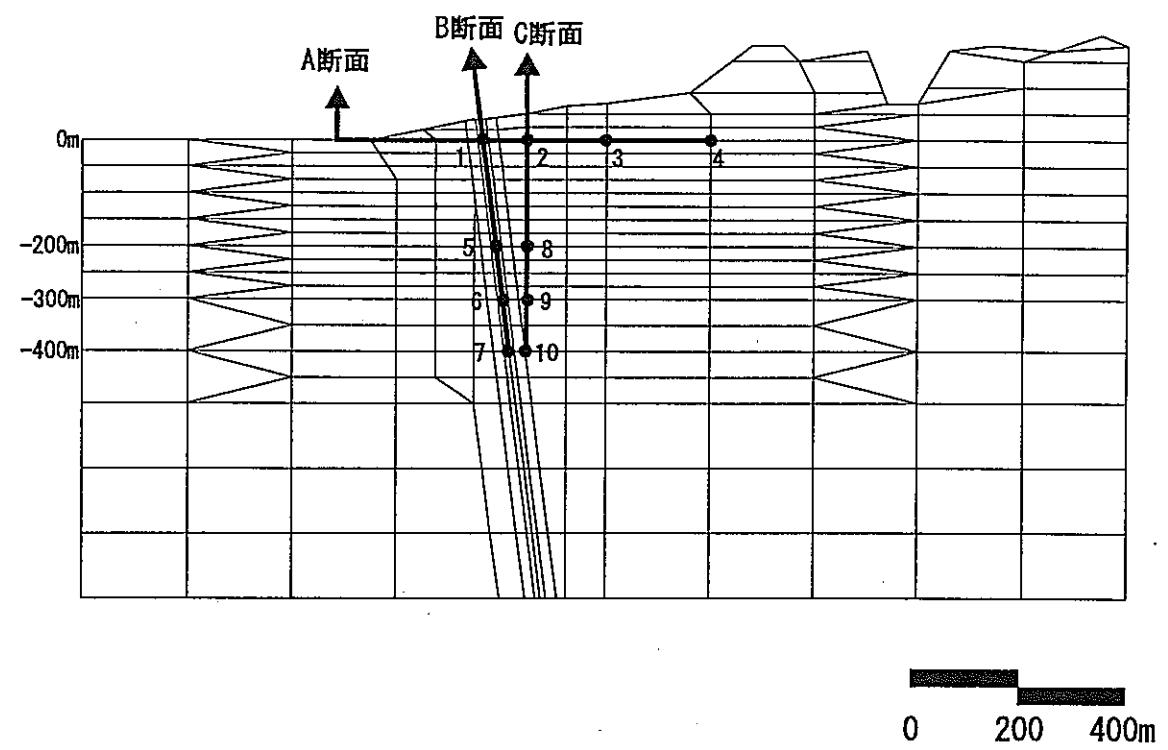


(a) EL-150m

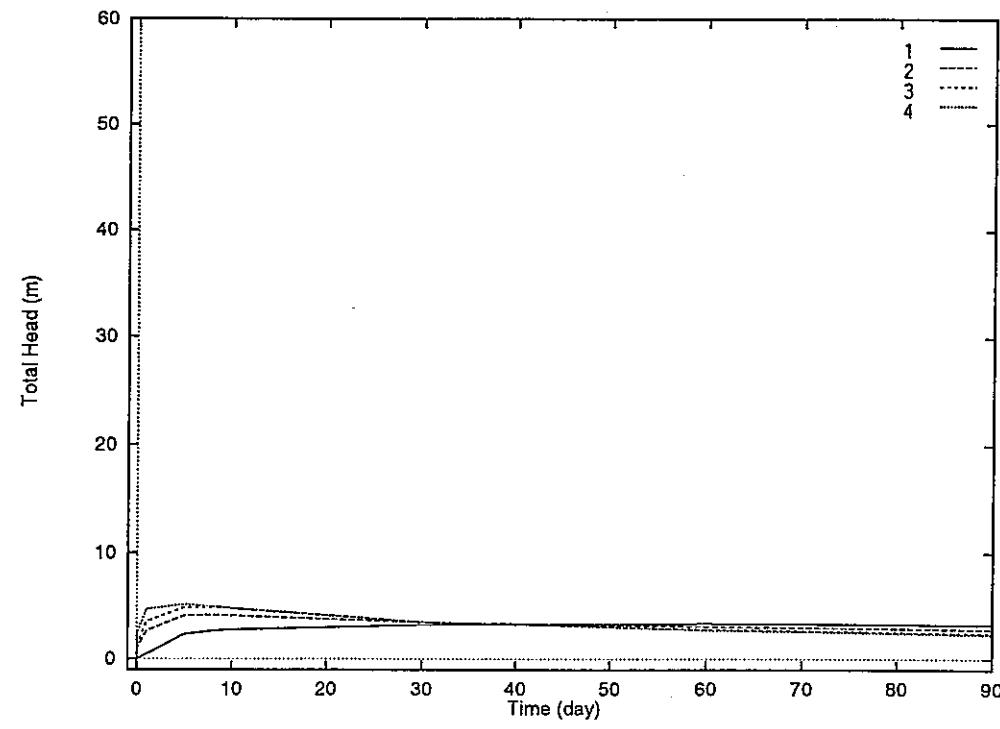


(b) EL-500m

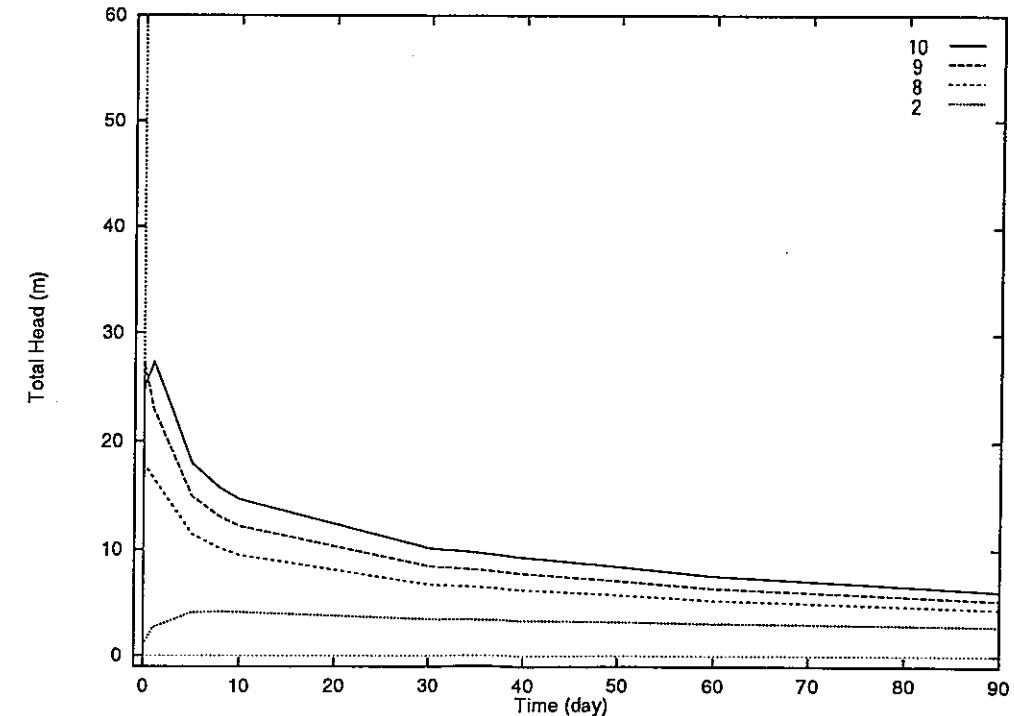
図 3-44 全水頭の空間分布(CASE3)



(b) B断面

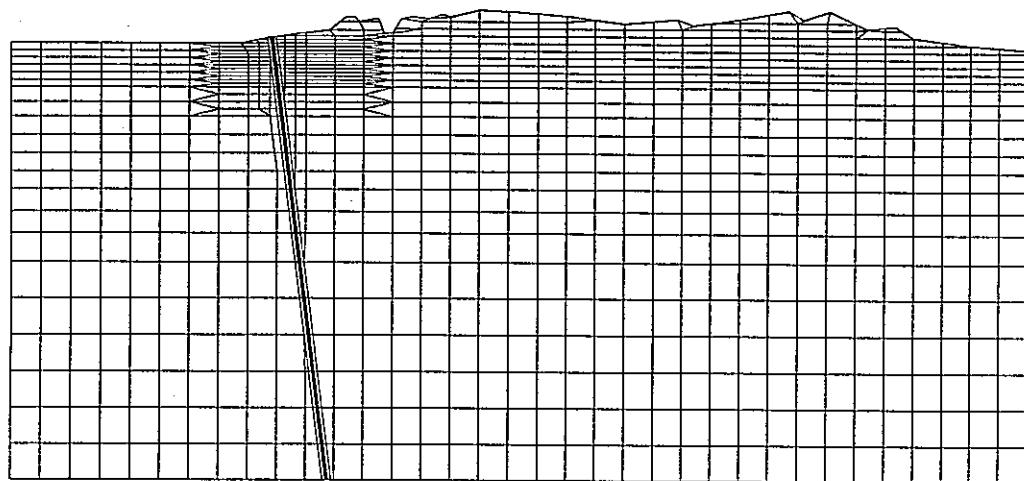


(a) A断面



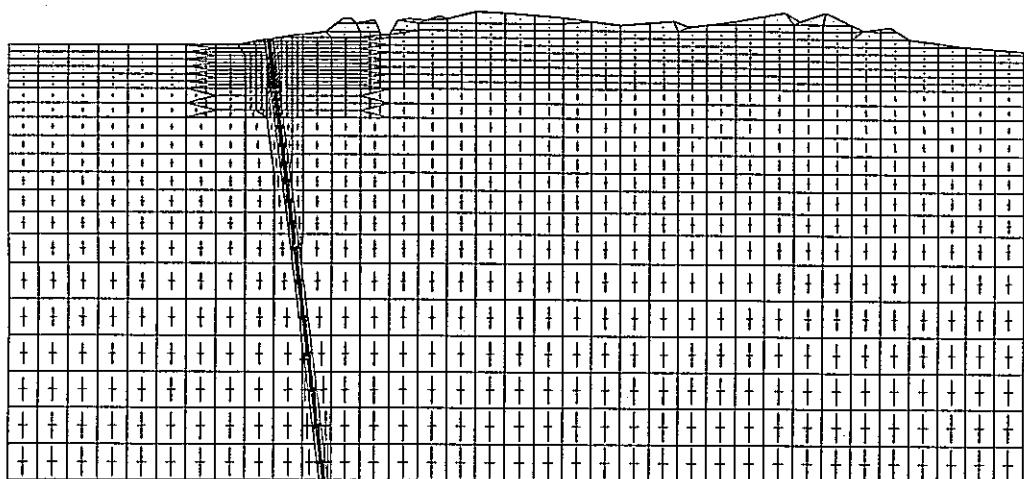
(c) C断面

図 3-45 全水頭の時間変化(CASE3)



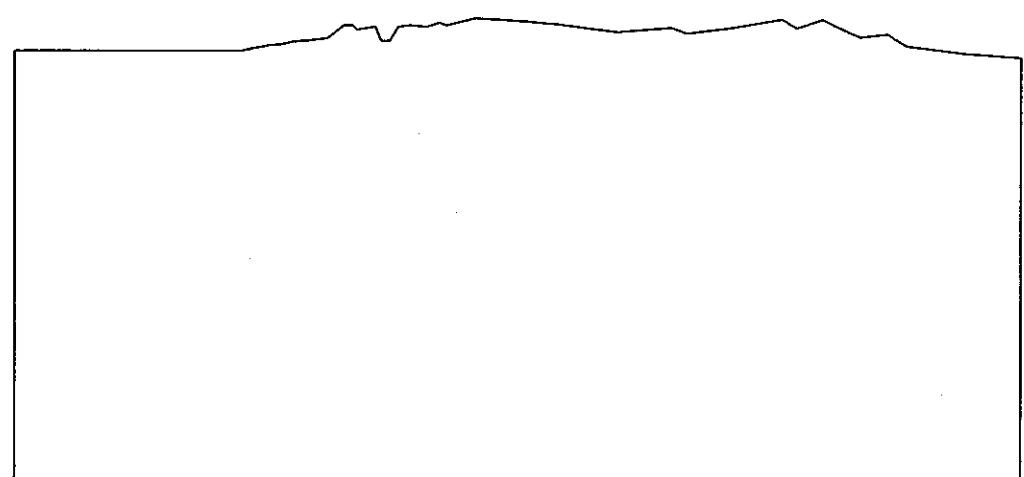
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

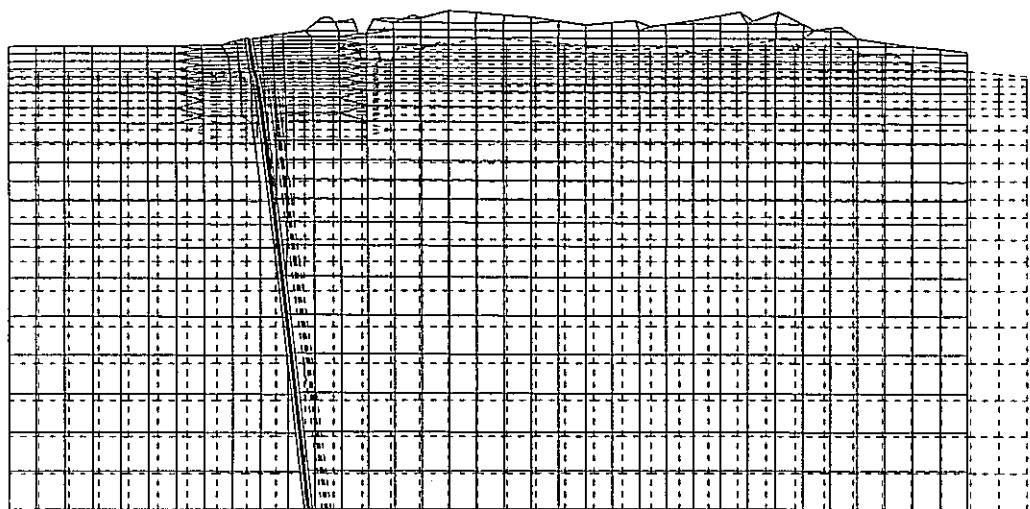


(c) 全水頭分布

単位: m

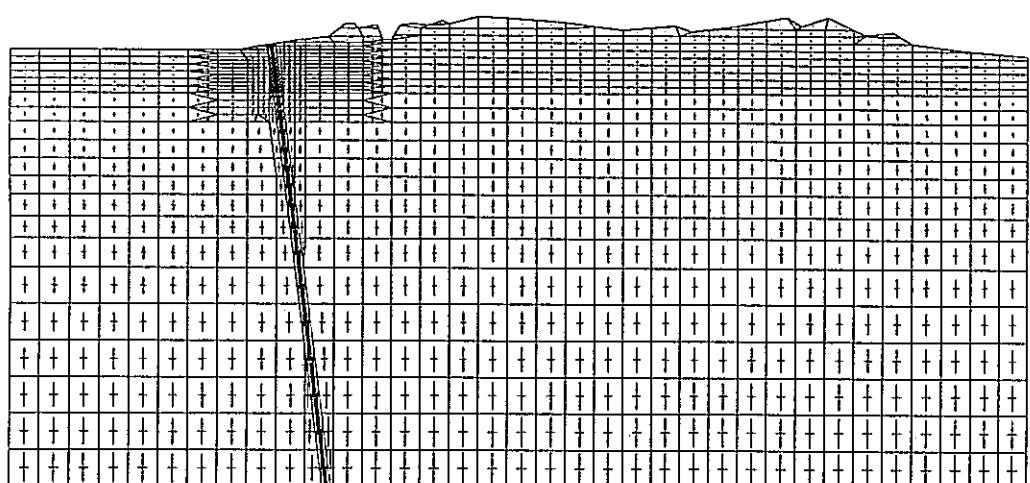
0 1000 2000m

図 3-46 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE4)



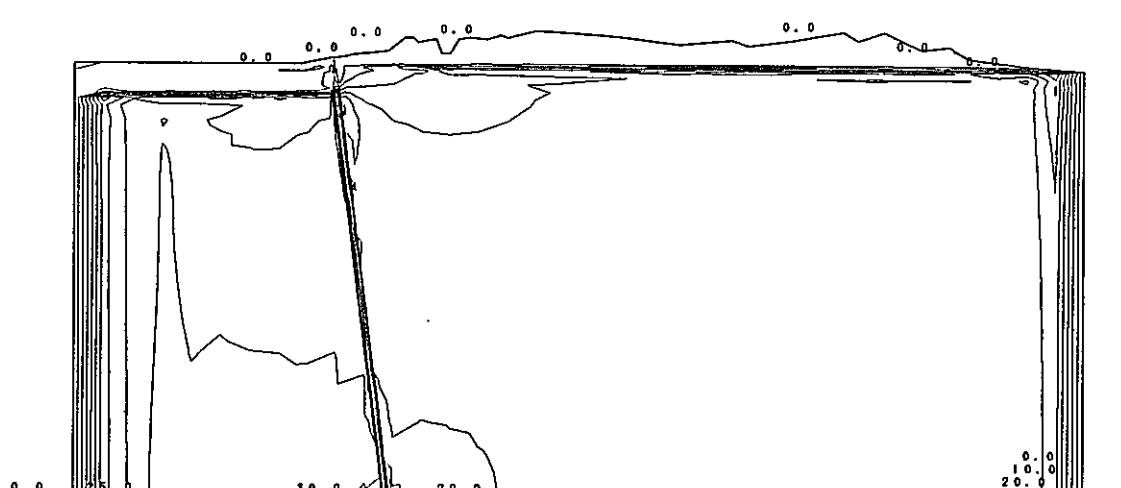
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

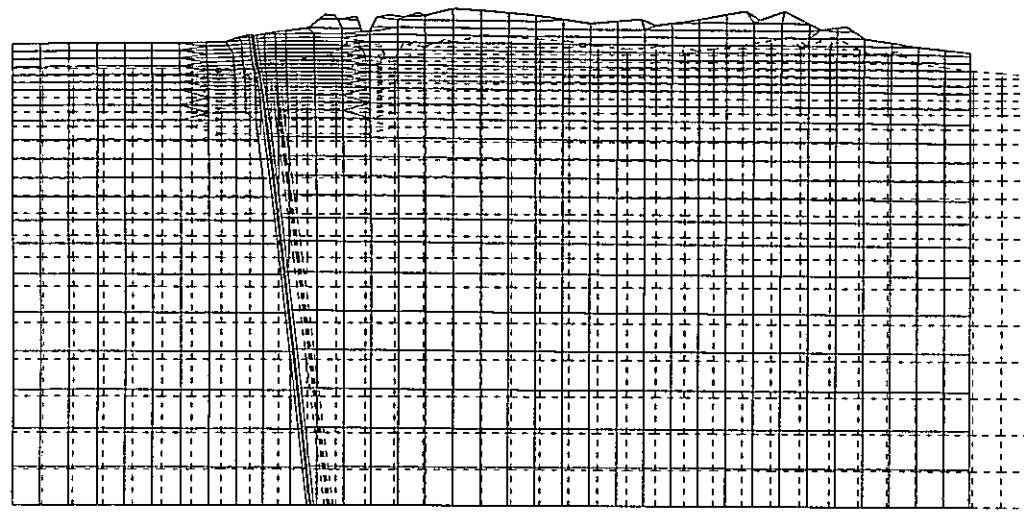


(c) 全水頭分布

単位: m

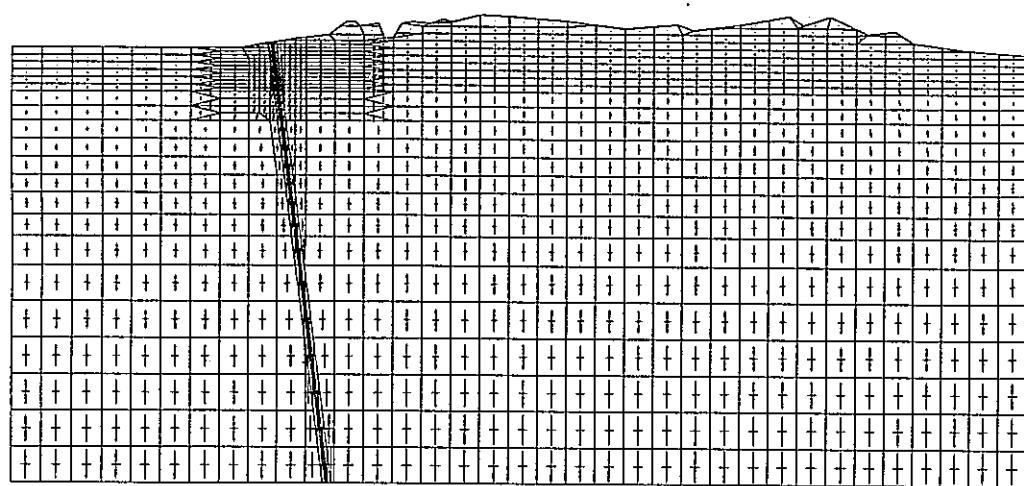
0 1000 2000m

図 3-47 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE4)



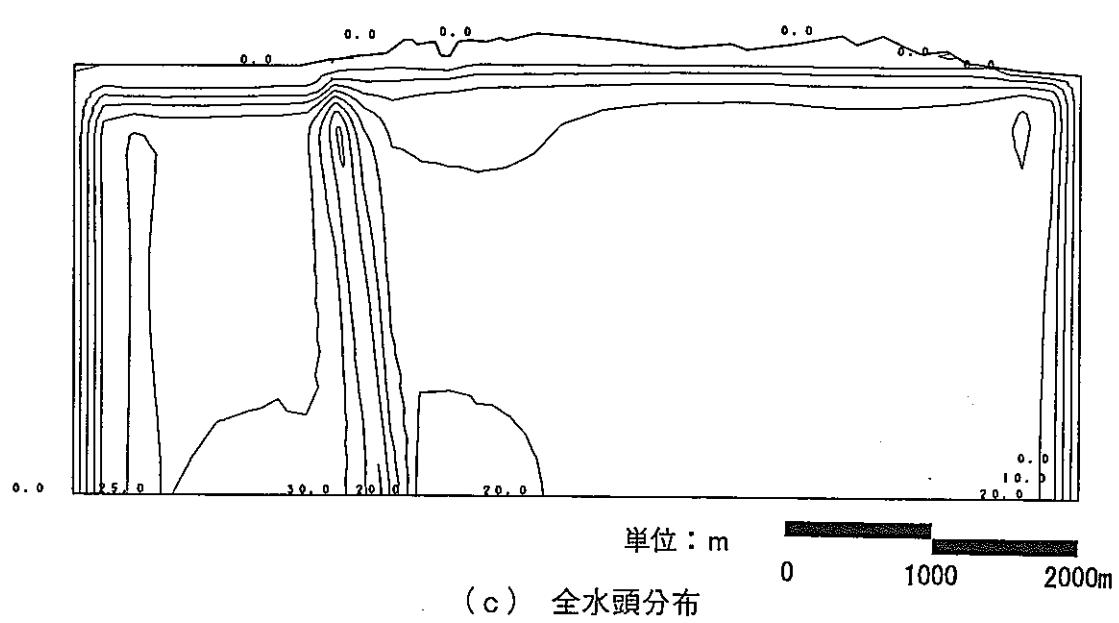
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

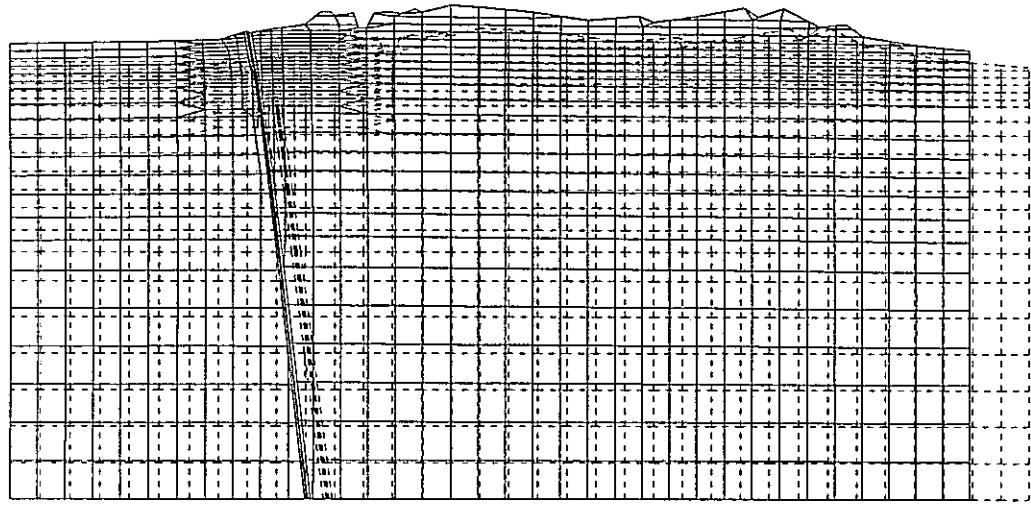


(c) 全水頭分布

単位 : m

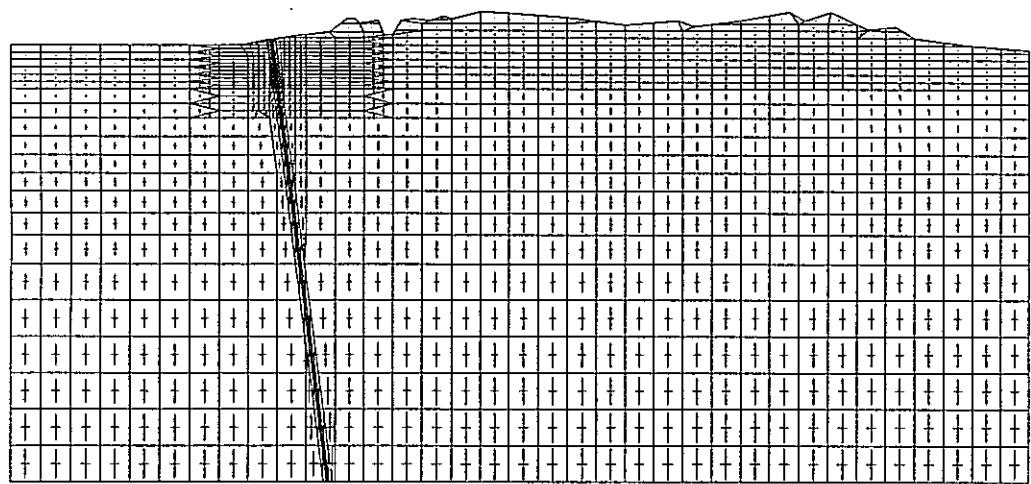
0 1000 2000m

図 3-48 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE4)



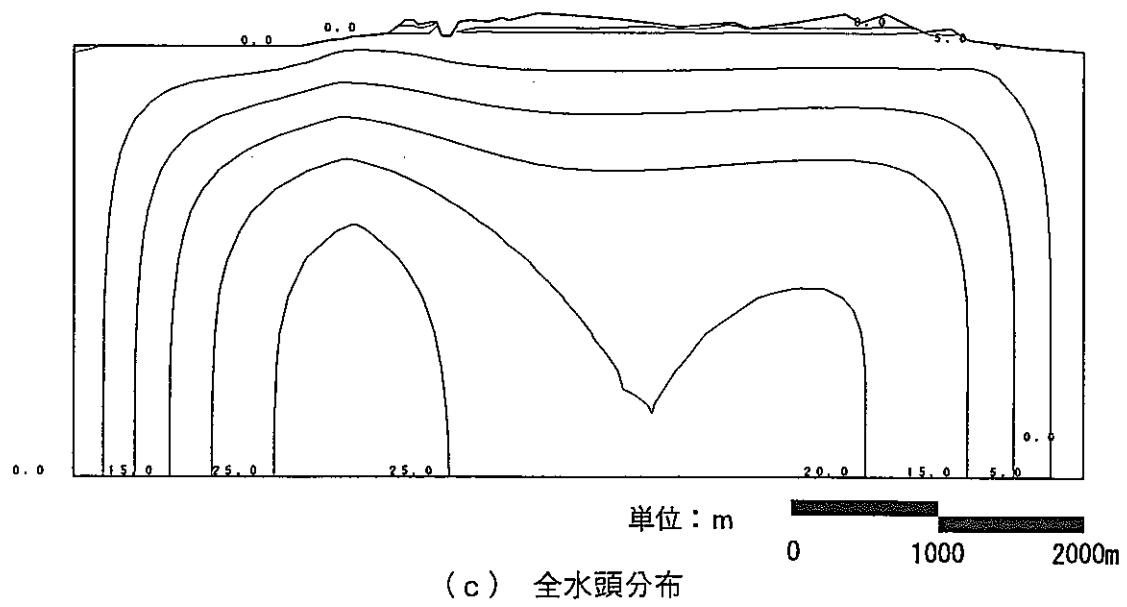
(a) 変形図

— : 0.2m



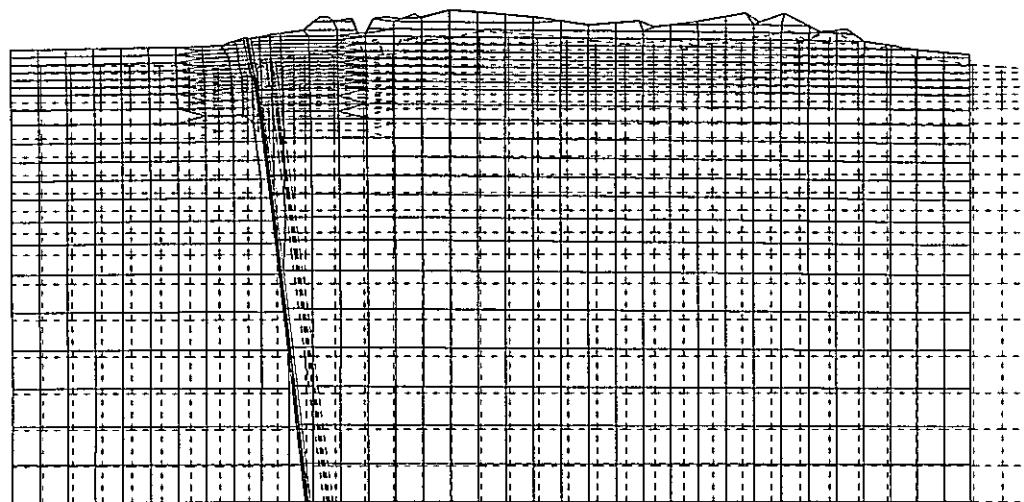
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

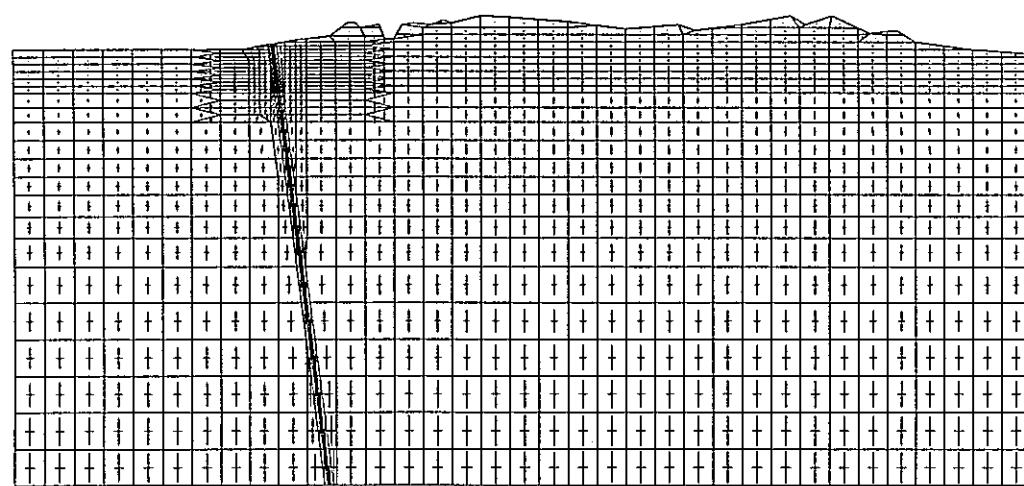


(c) 全水頭分布

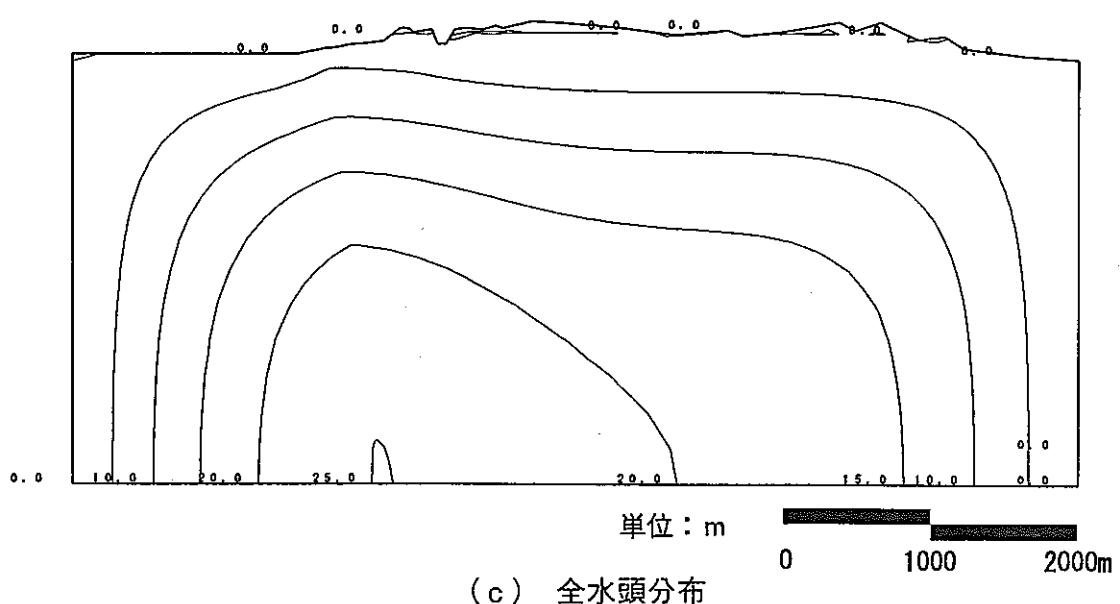
図 3-49 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE4)



(a) 変形図 — : 0.2m

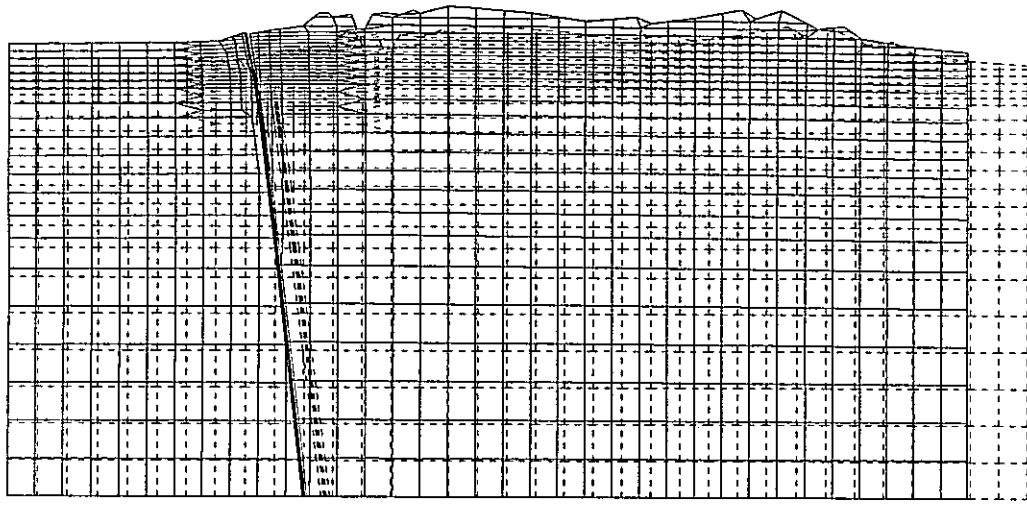


(b) 主応力(有効応力)ベクトル — : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

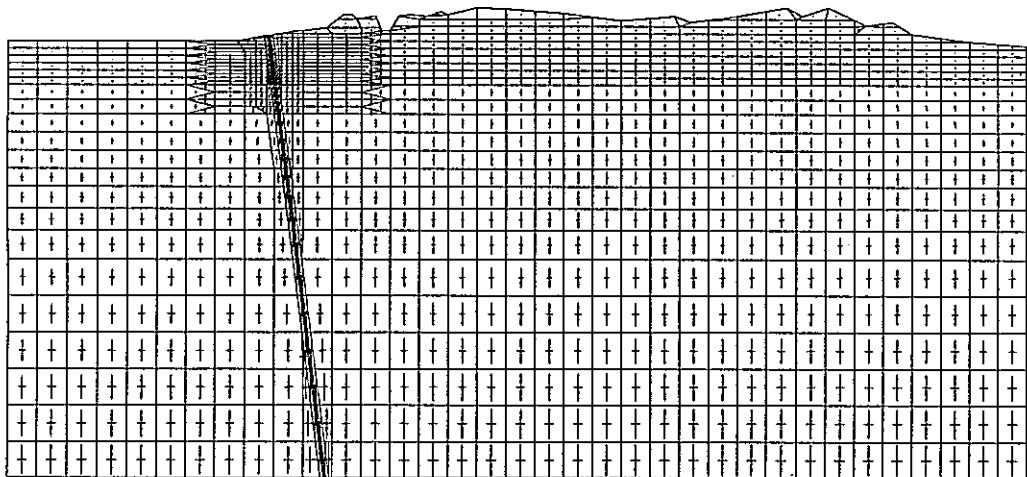


(c) 全水頭分布

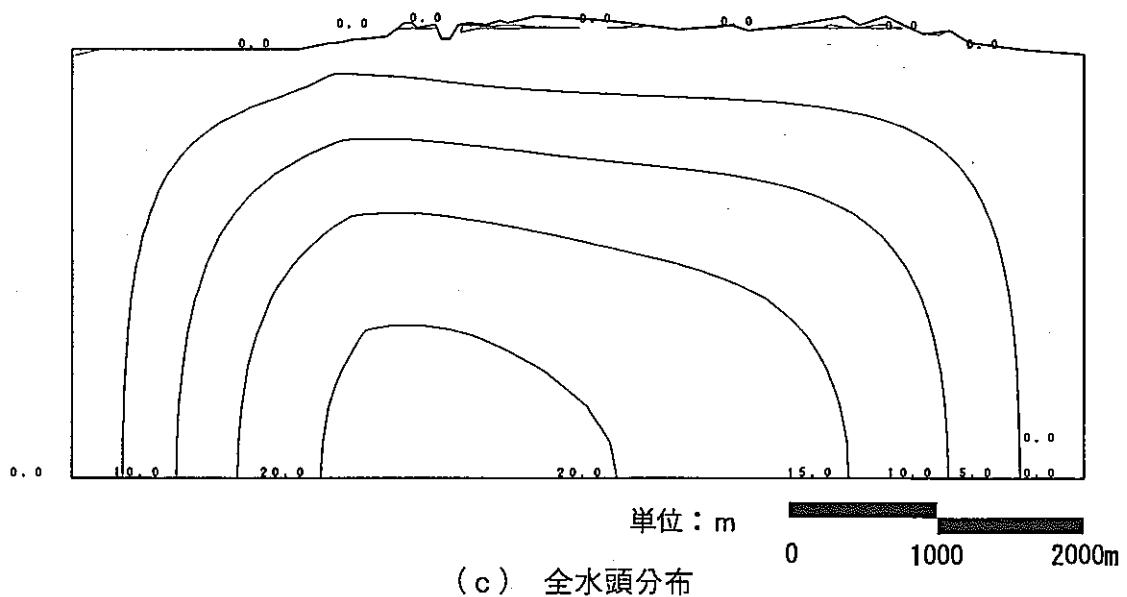
図 3-50 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE4)



(a) 変形図

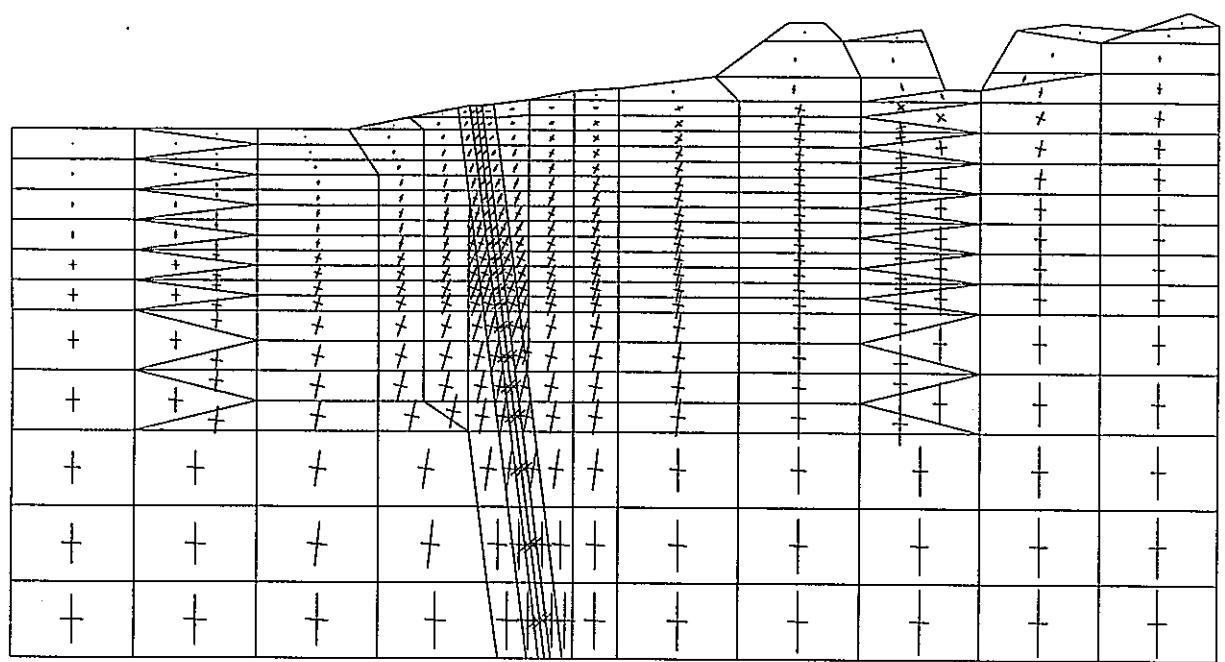


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



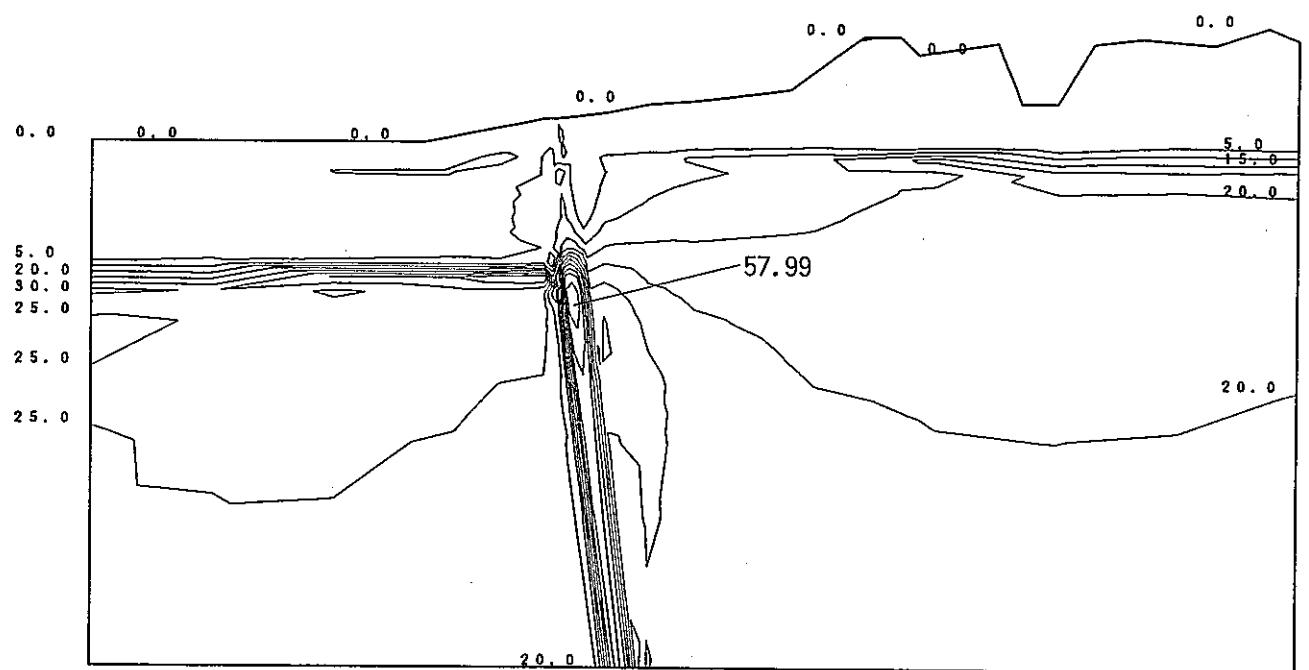
(c) 全水頭分布

図 3-51 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE4)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

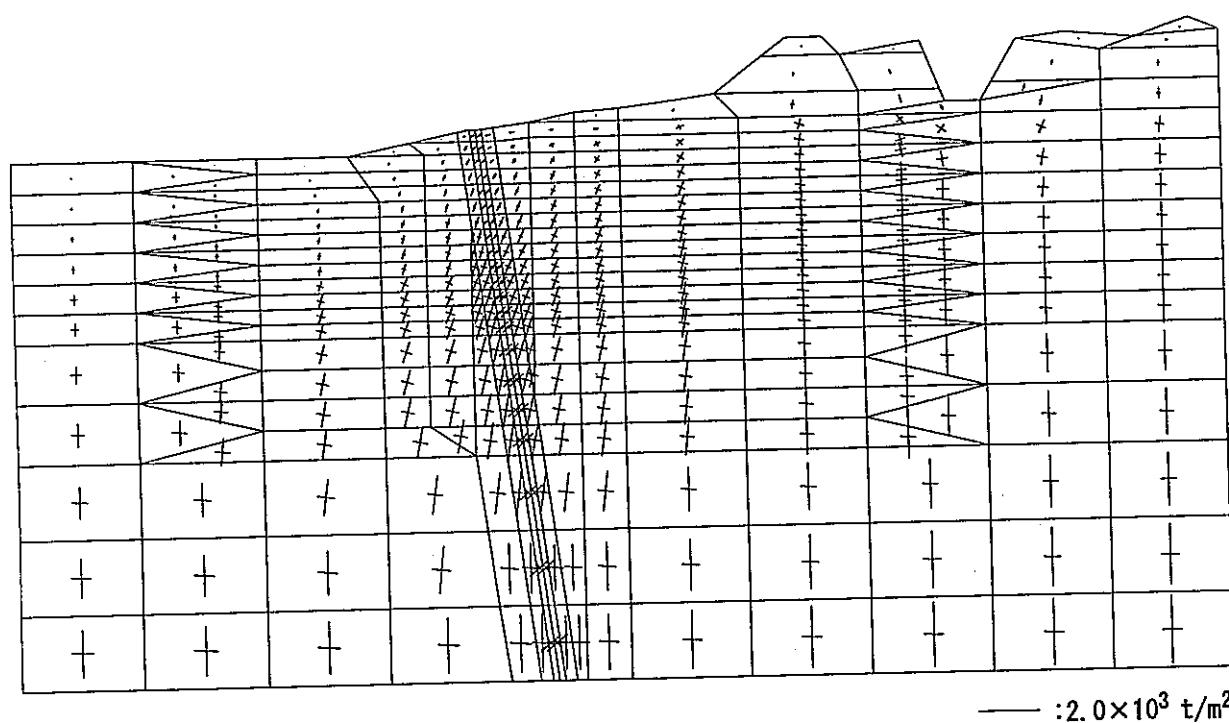


(b) 全水頭分布

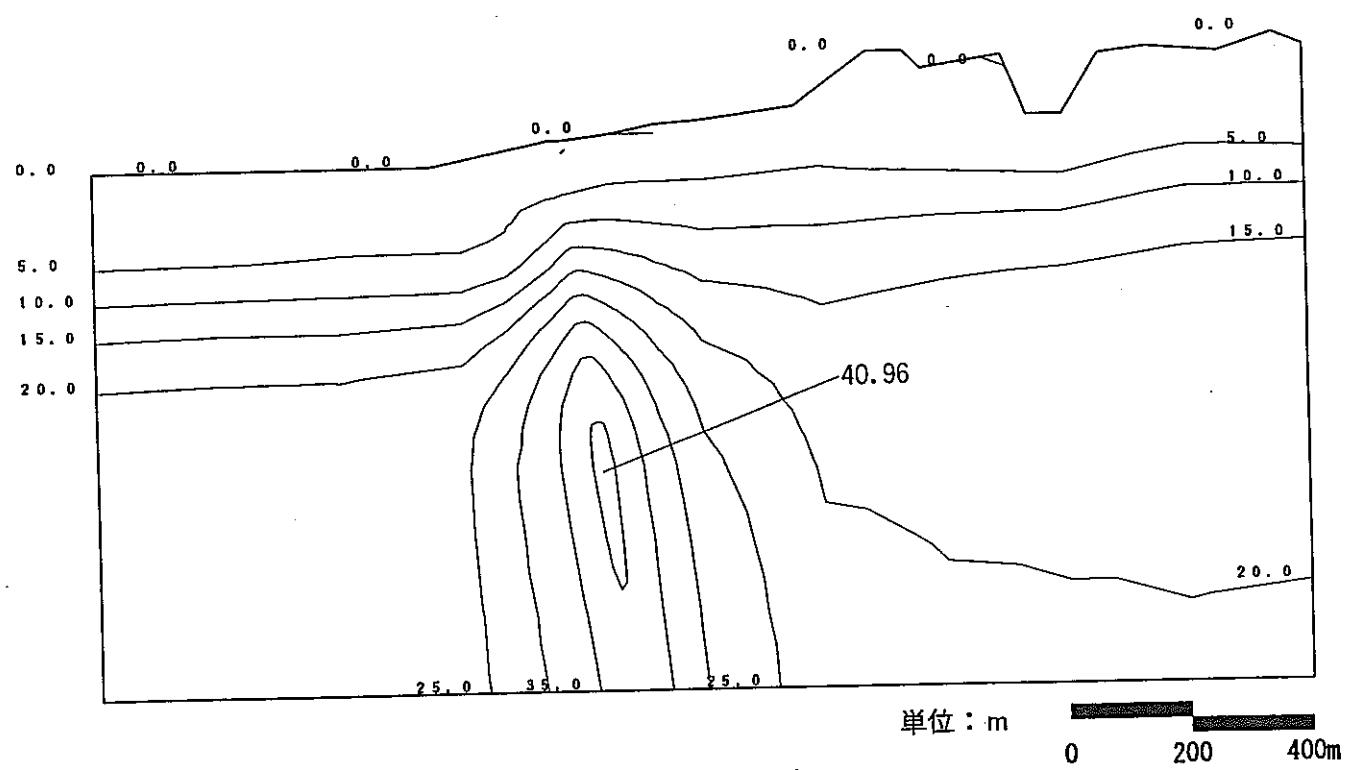
単位: m

0 200 400m

図 3-52 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後,CASE4)

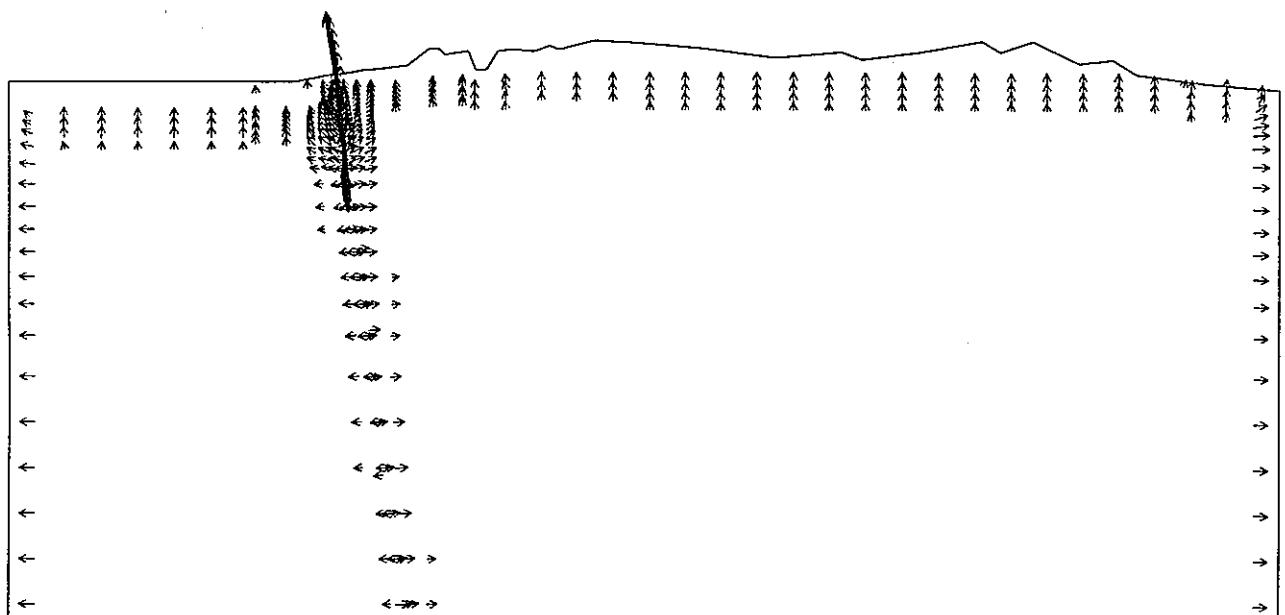


(a) 主応力(有効応力)ベクトル



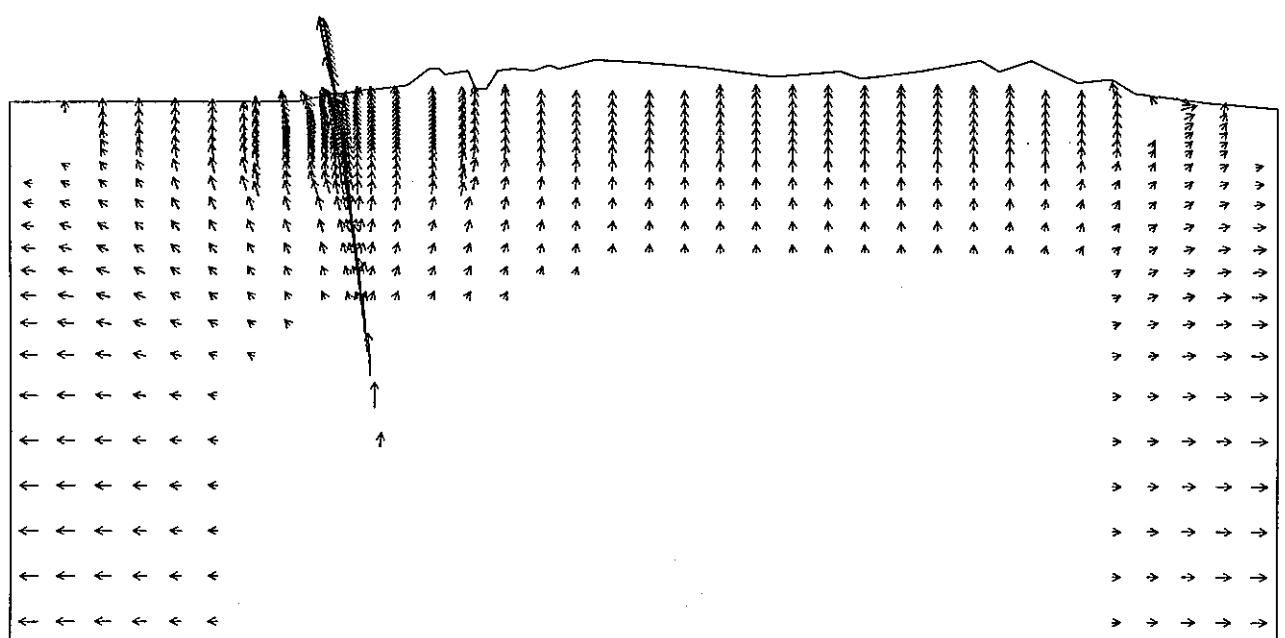
(b) 全水頭分布

図 3-53 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE4)



(a) 1日後

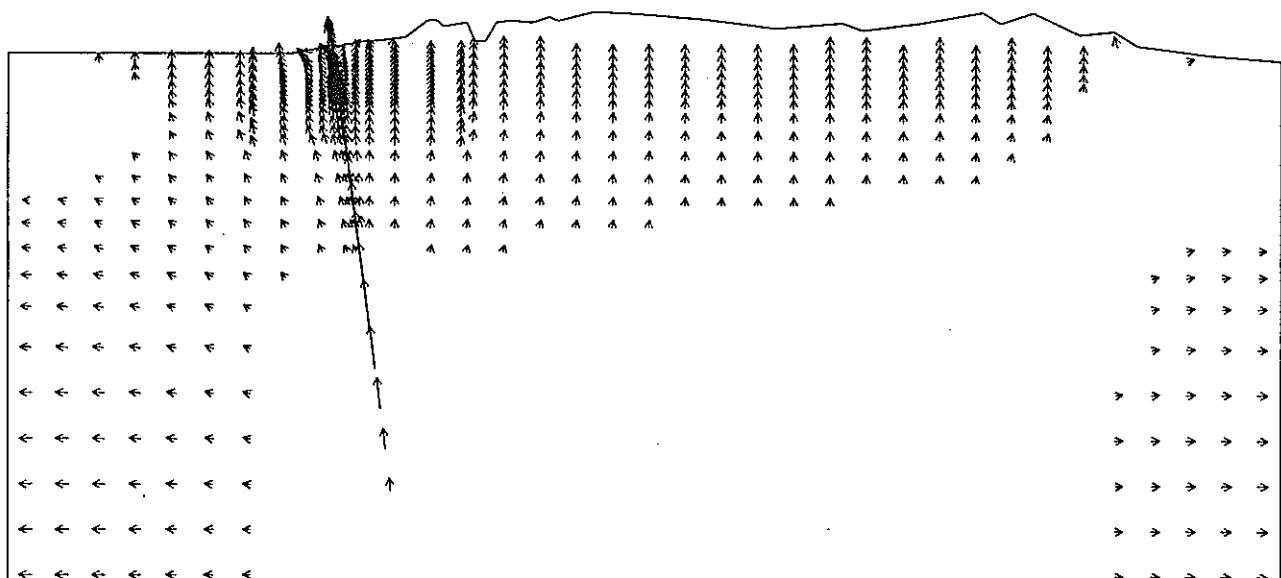
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(b) 30日後

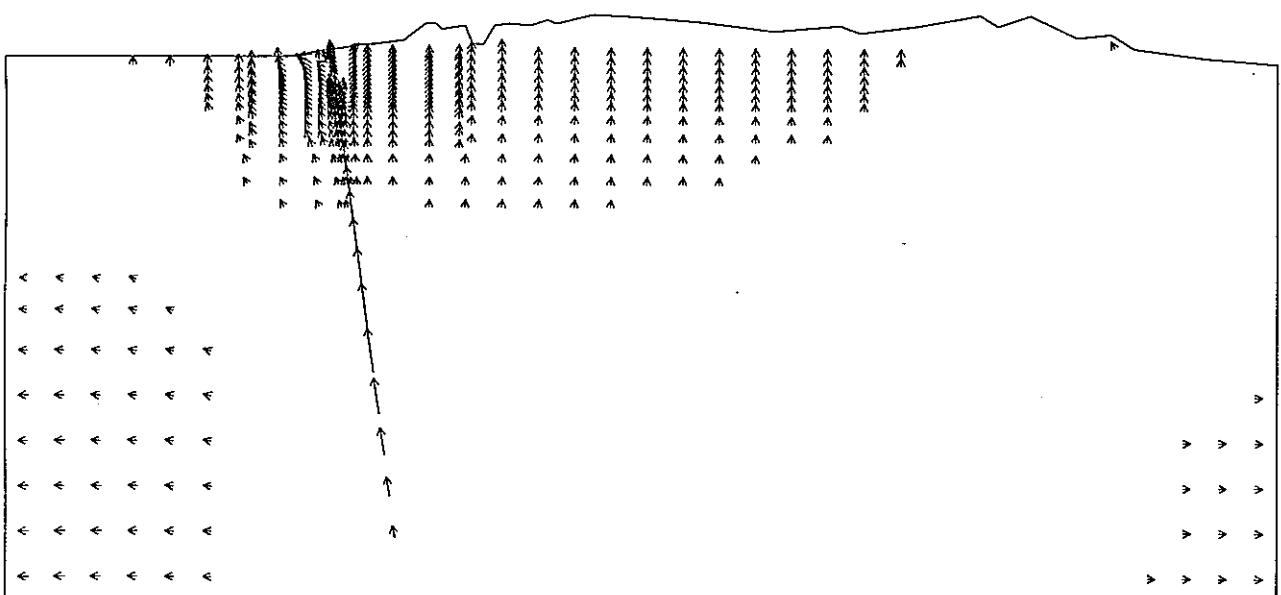
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-54 流速ベクトル(CASE4)



(c) 60 日後

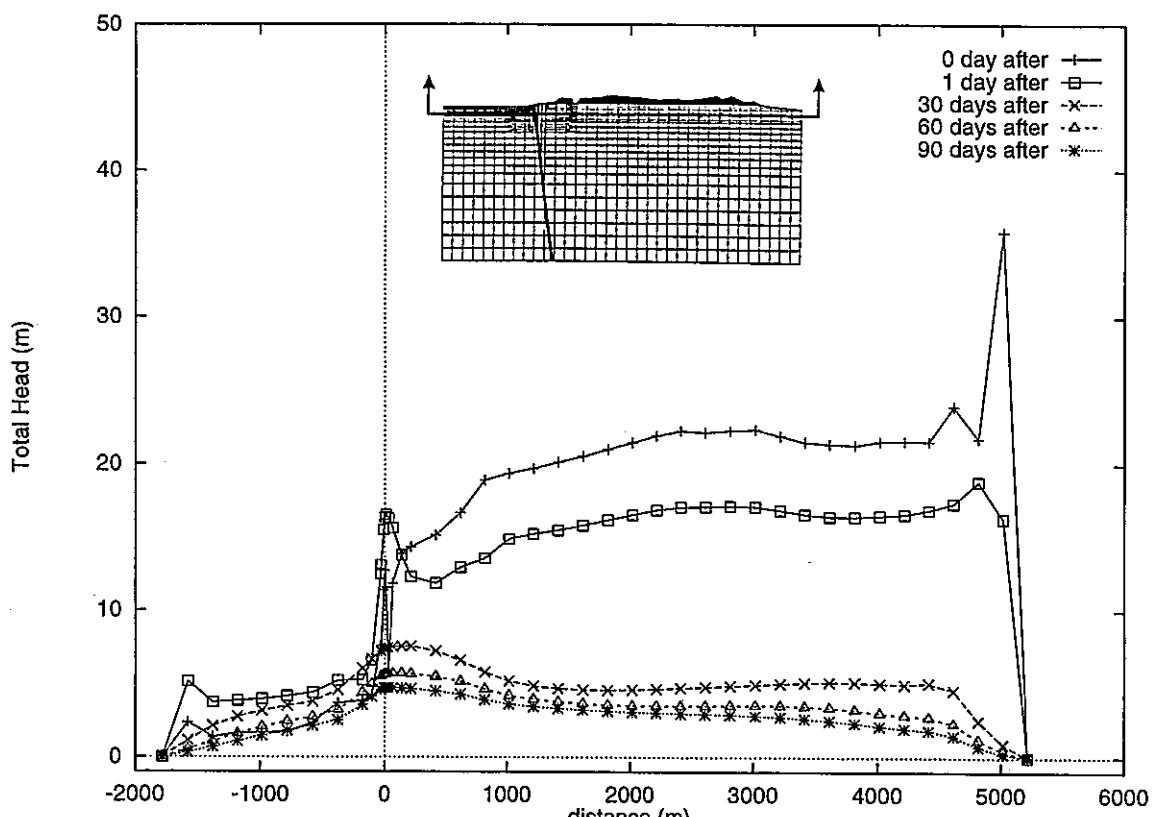
← : 1.0×10^{-8} m/sec



(d) 90 日後

← : 1.0×10^{-8} m/sec

図 3-54 流速ベクトル(CASE4)



(a) EL-150m

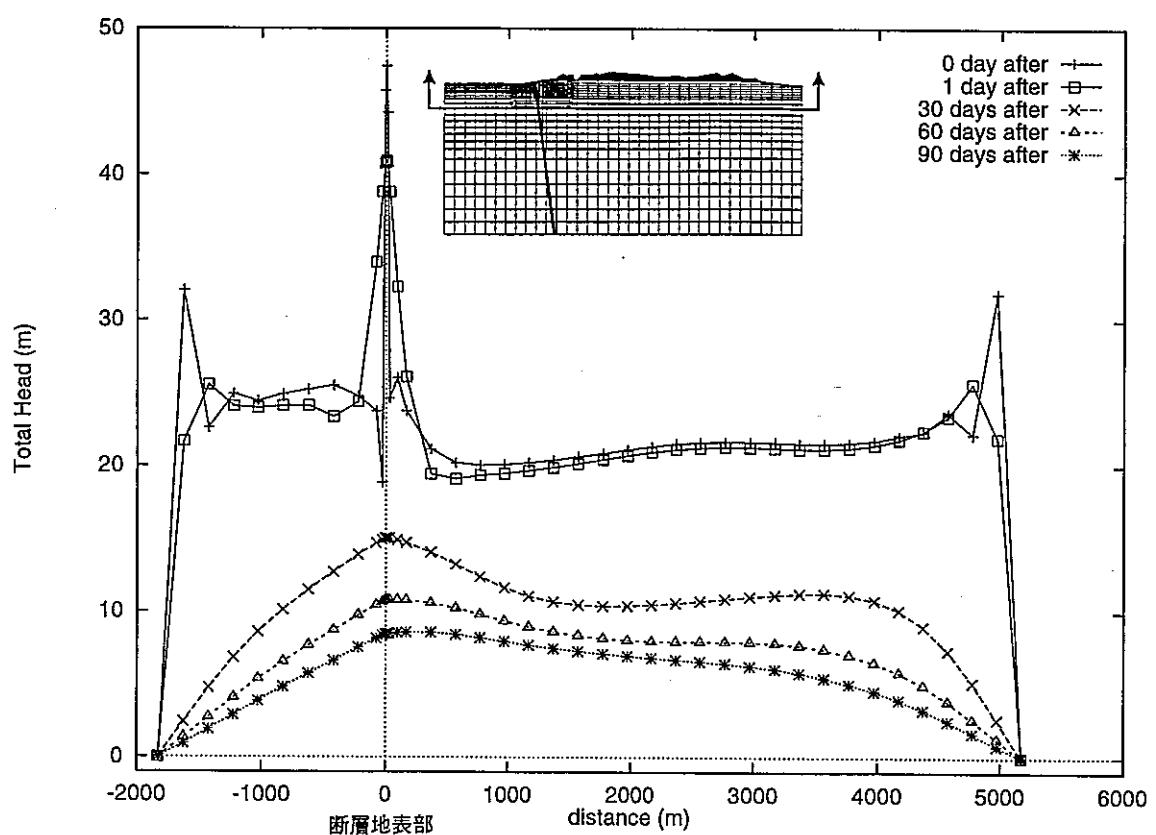


図 3-55 全水頭の空間分布(CASE4)

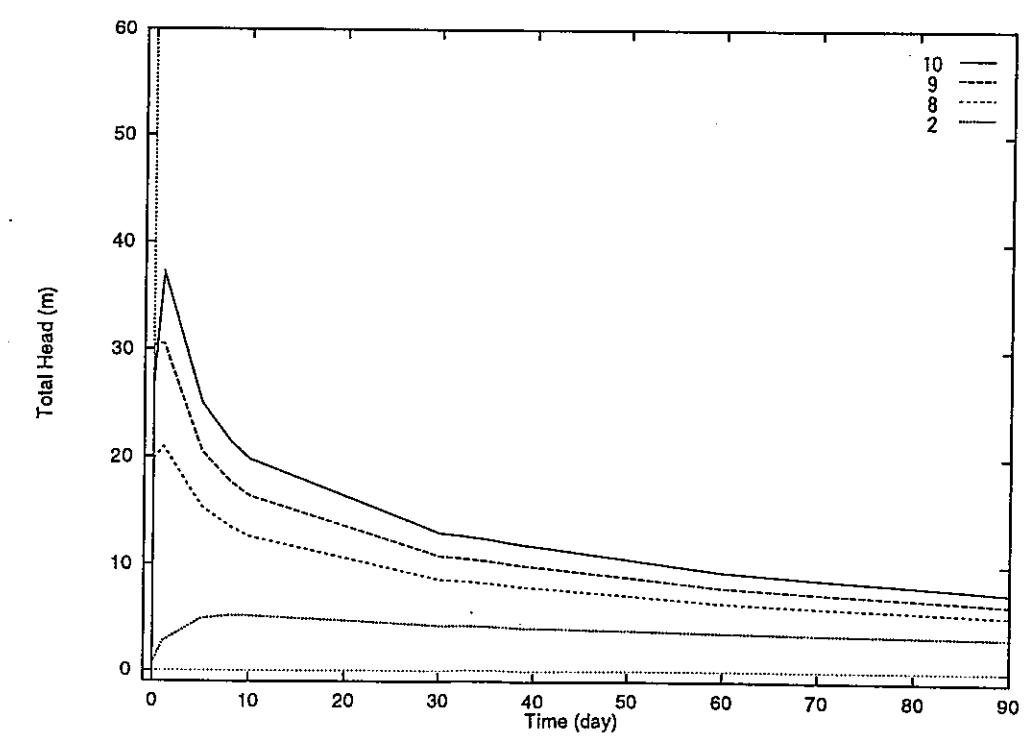
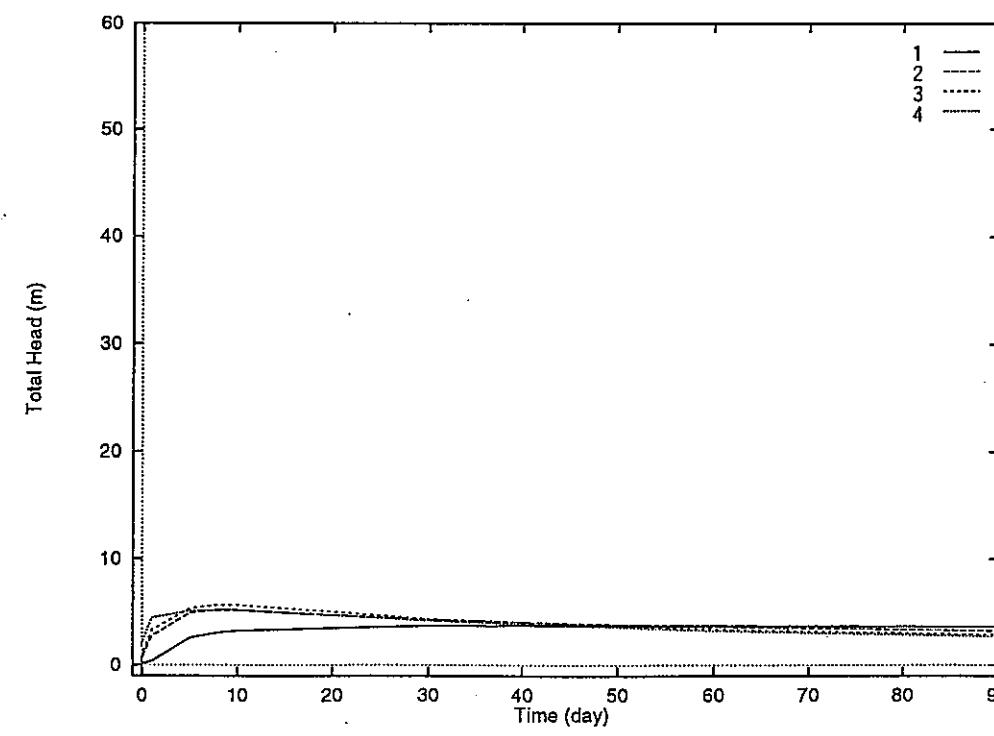
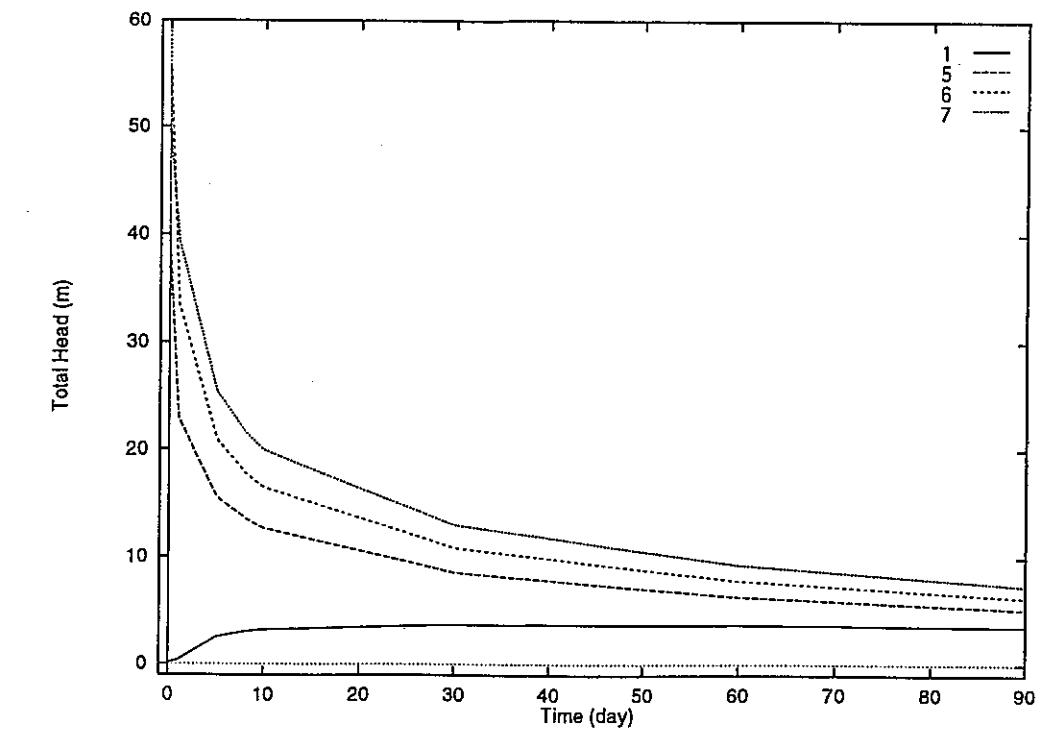
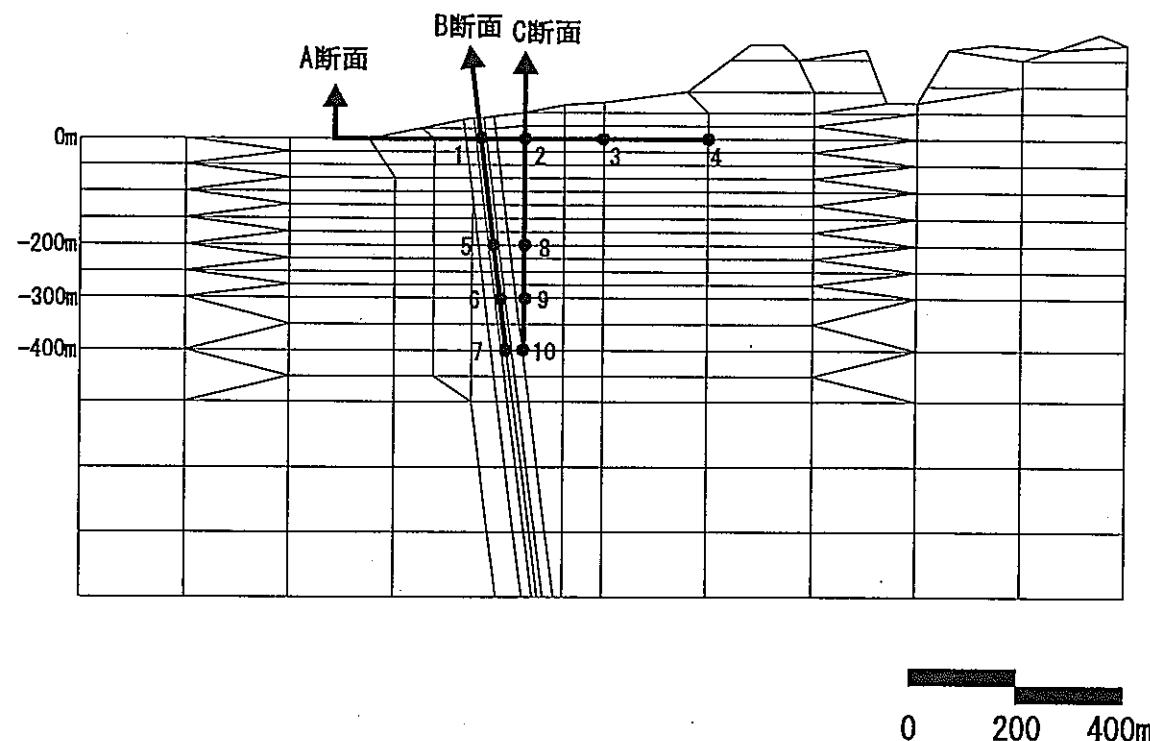
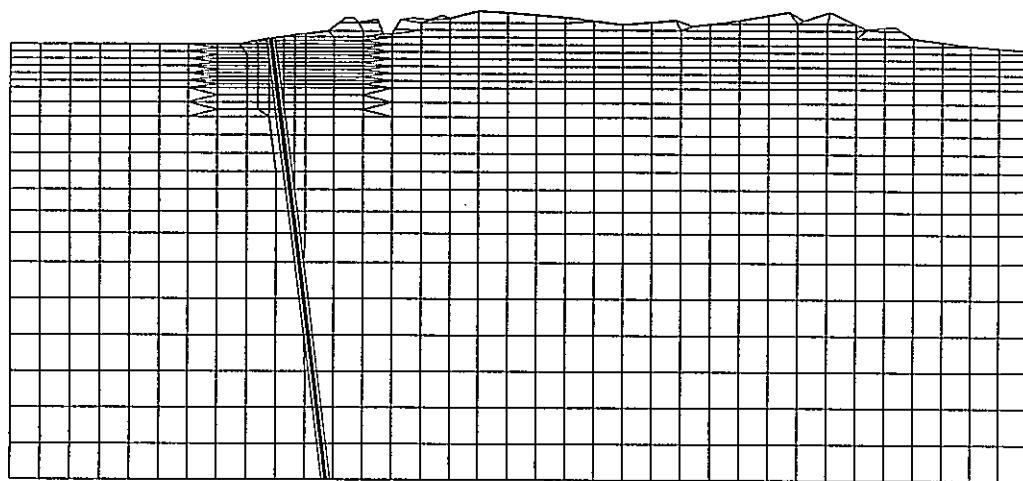
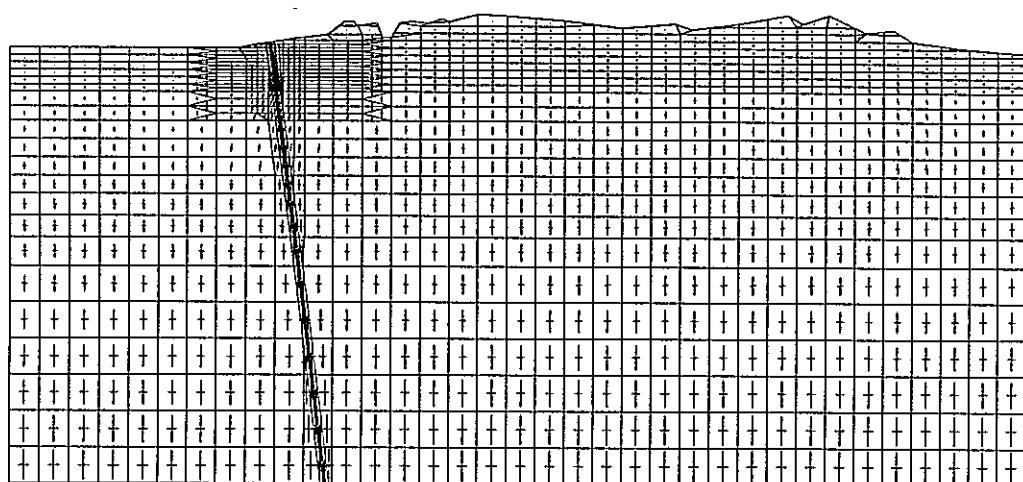


図 3-56 全水頭の時間変化(CASE4)

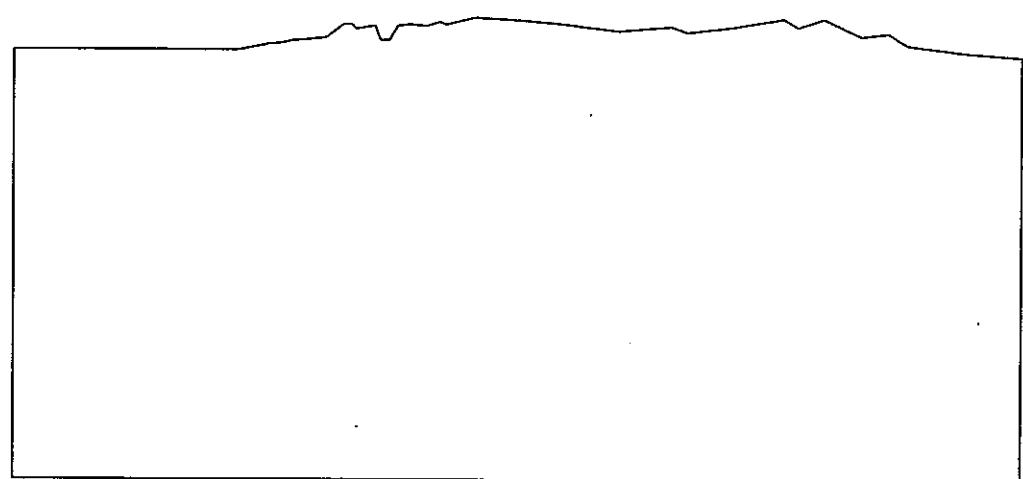


(a) 変形図

↑ : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル
—— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

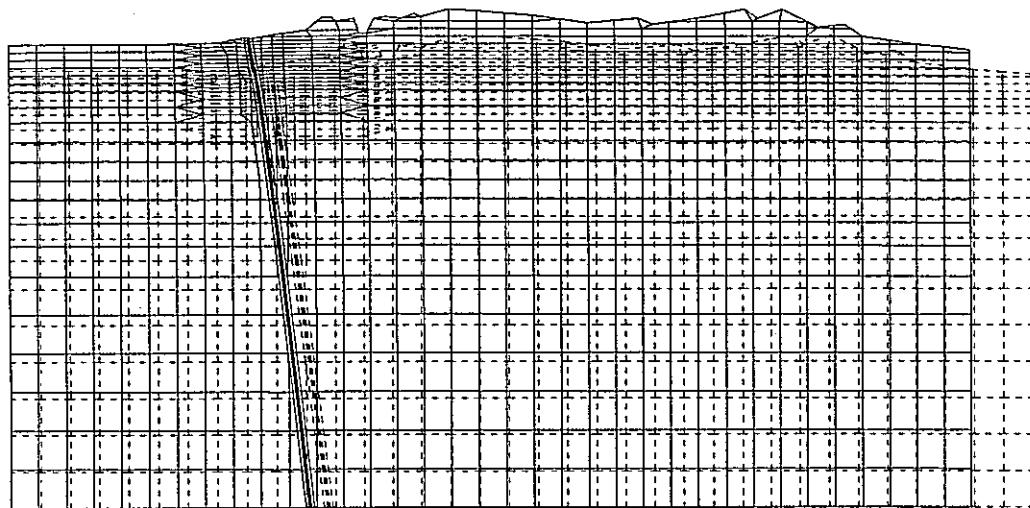


(c) 全水頭分布

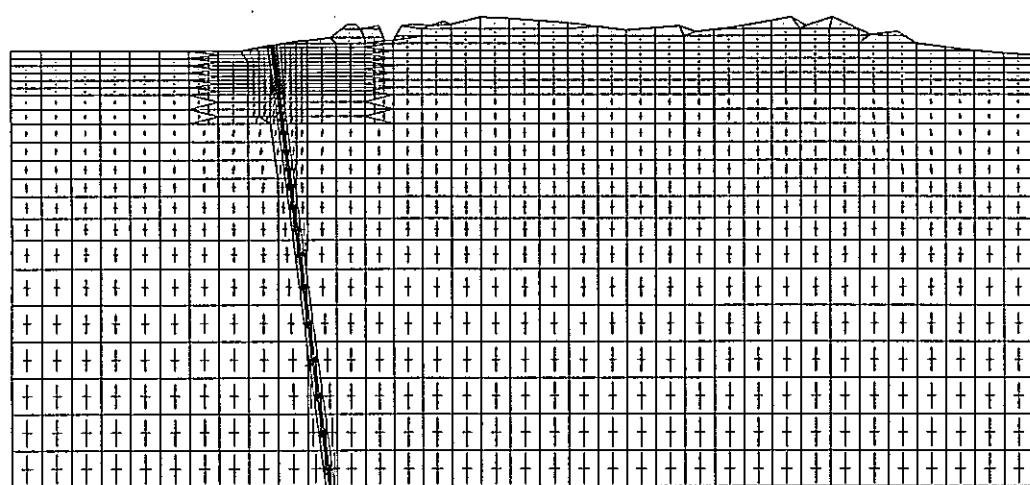
単位: m

0 1000 2000m

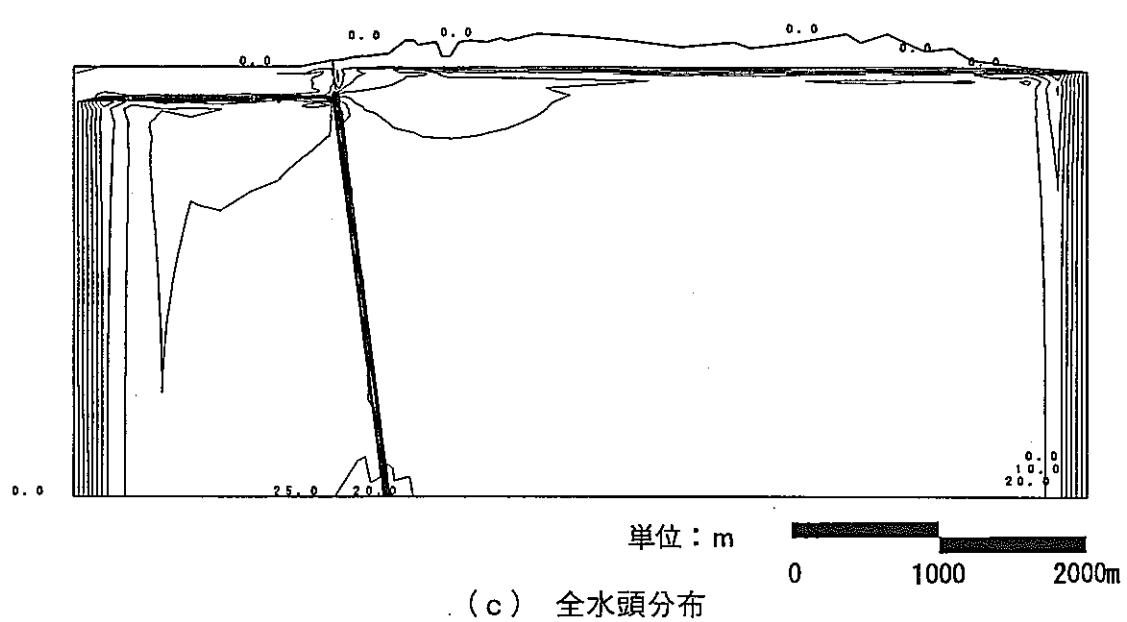
図 3-57 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE5)



(a) 変形図
— : 0.2m

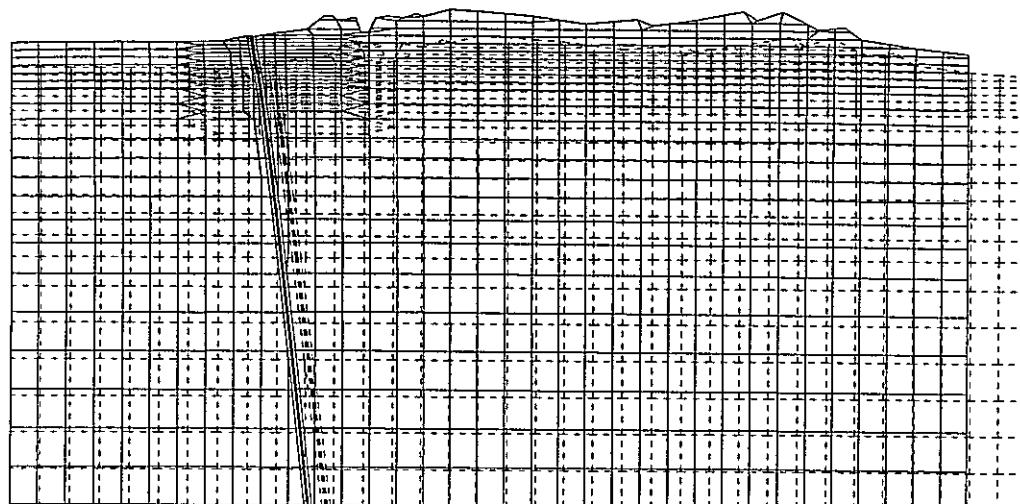


(b) 主応力(有効応力)ベクトル
— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

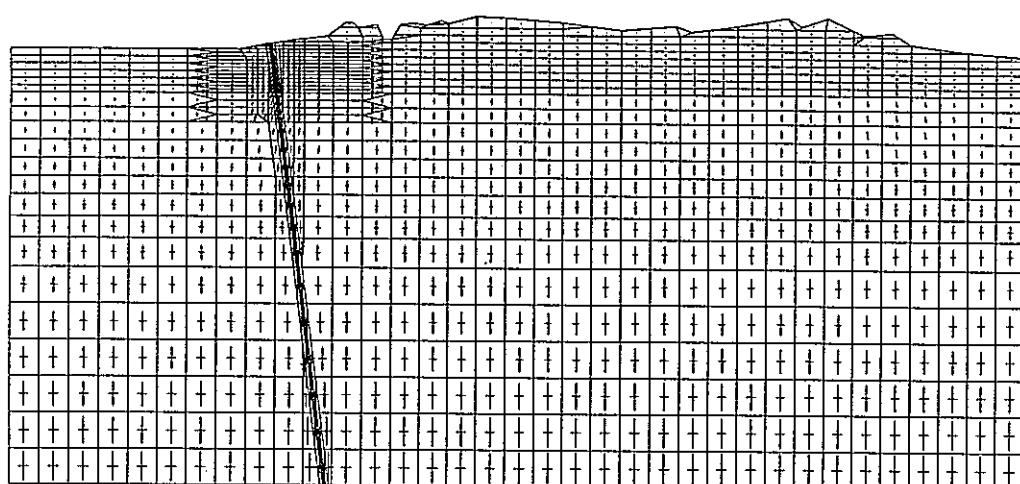


(c) 全水頭分布

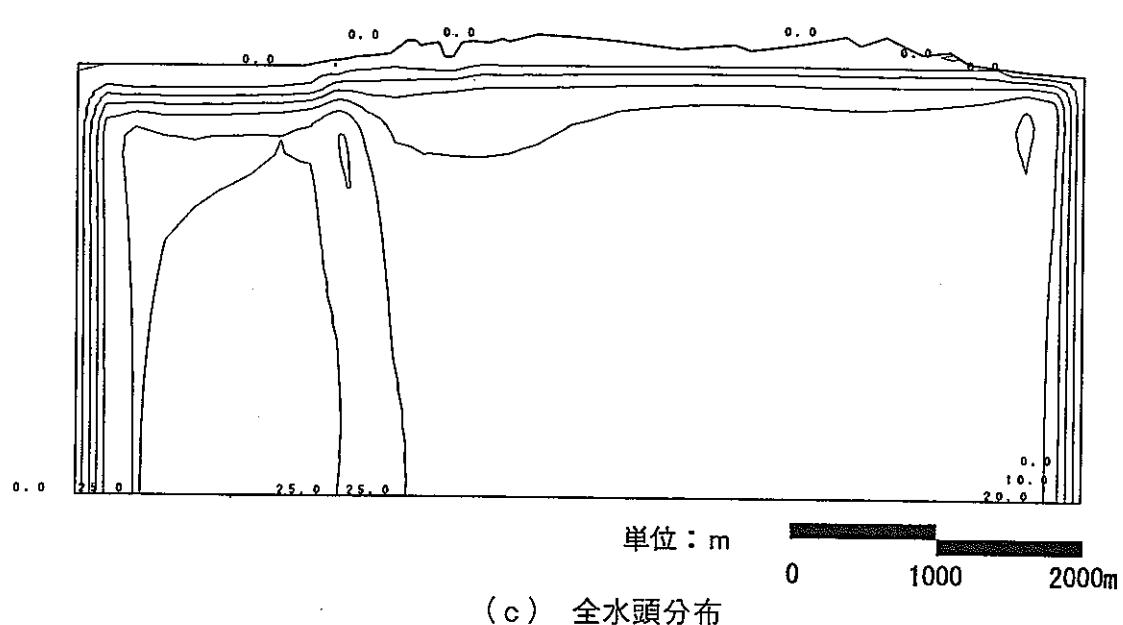
図 3-58 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE5)



(a) 変形図

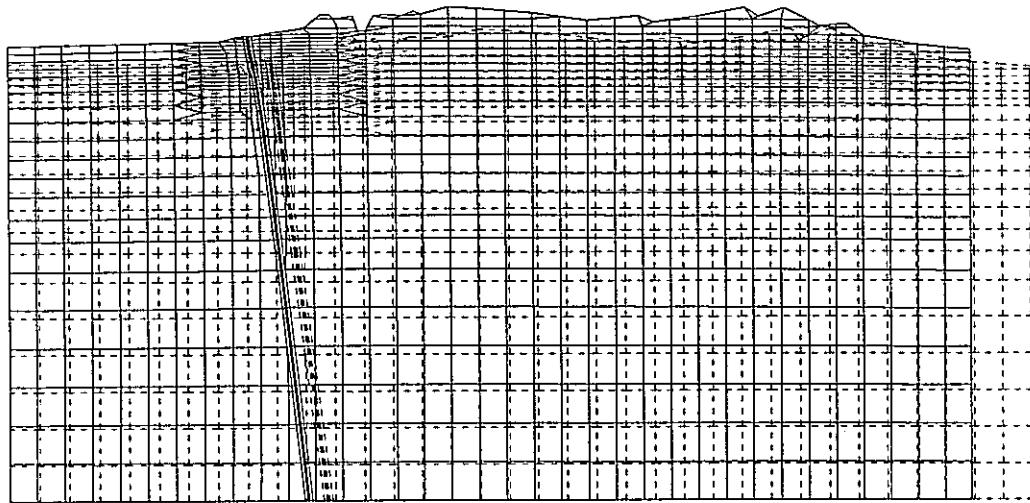


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



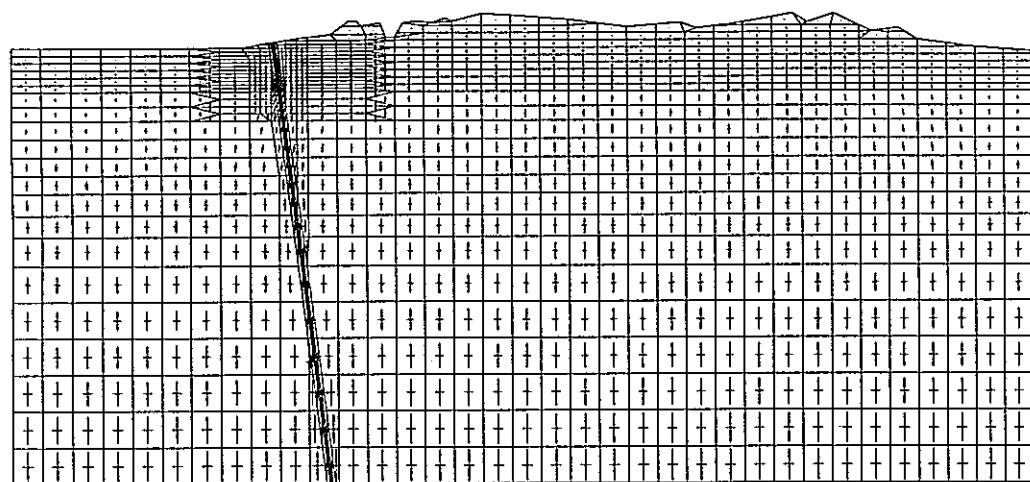
(c) 全水頭分布

図 3-59 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE5)



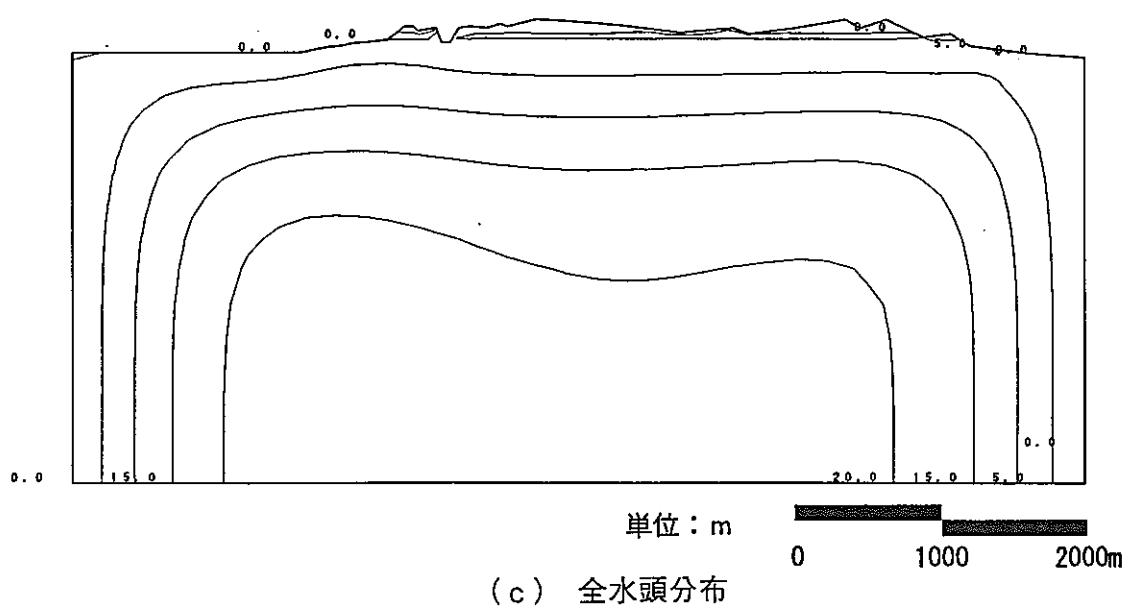
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

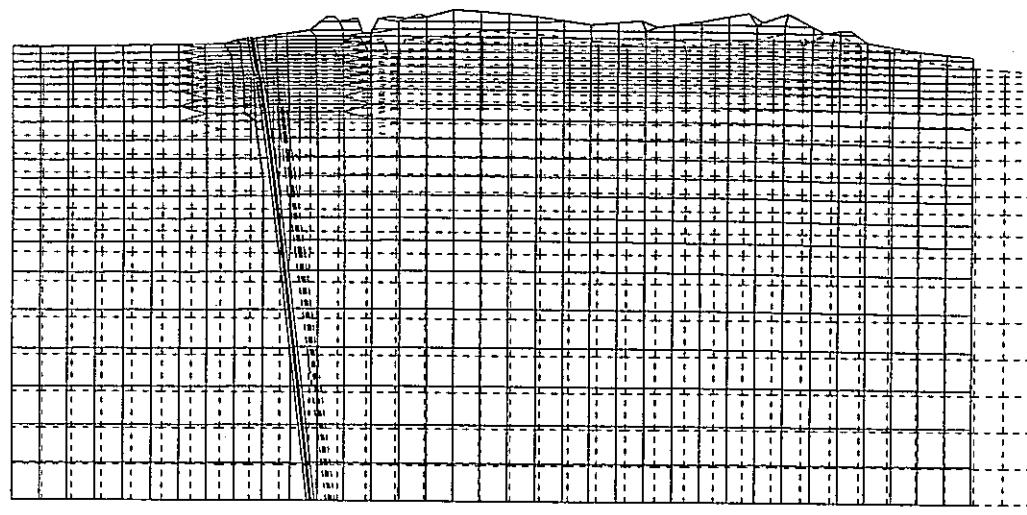


(c) 全水頭分布

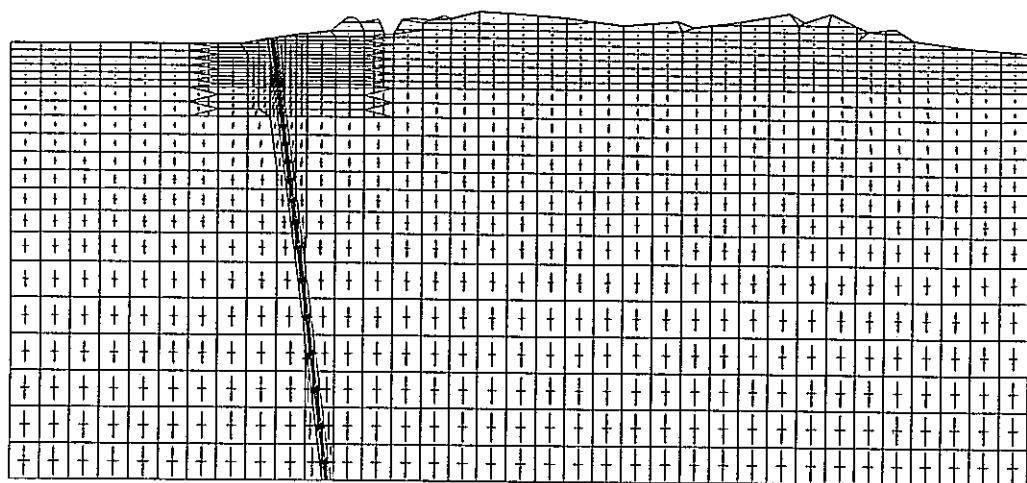
単位 : m

0 1000 2000m

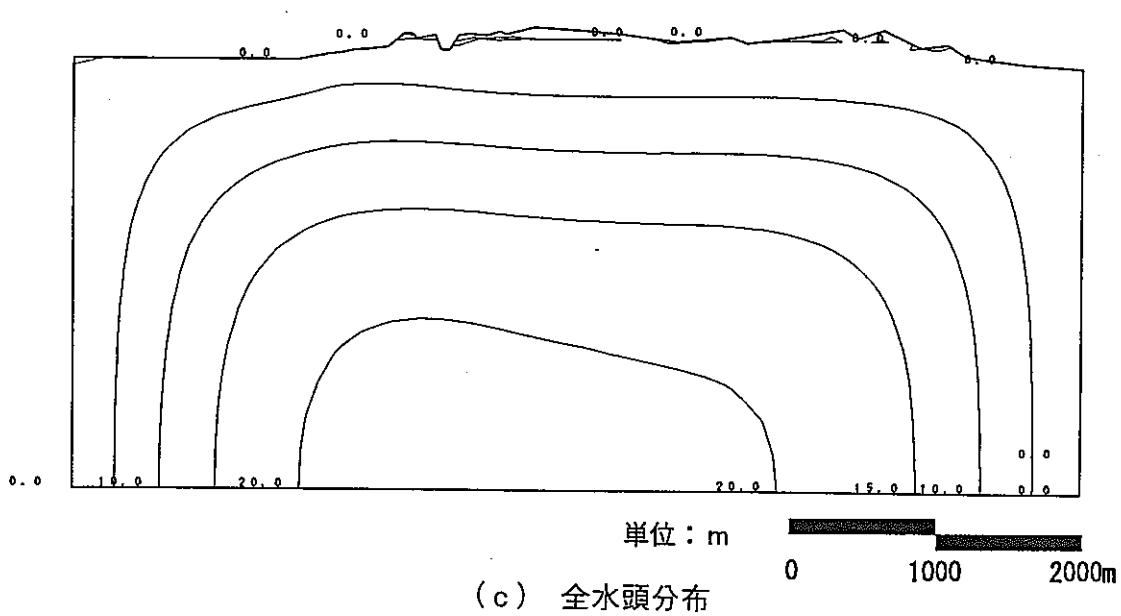
図 3-60 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE5)



(a) 変形図

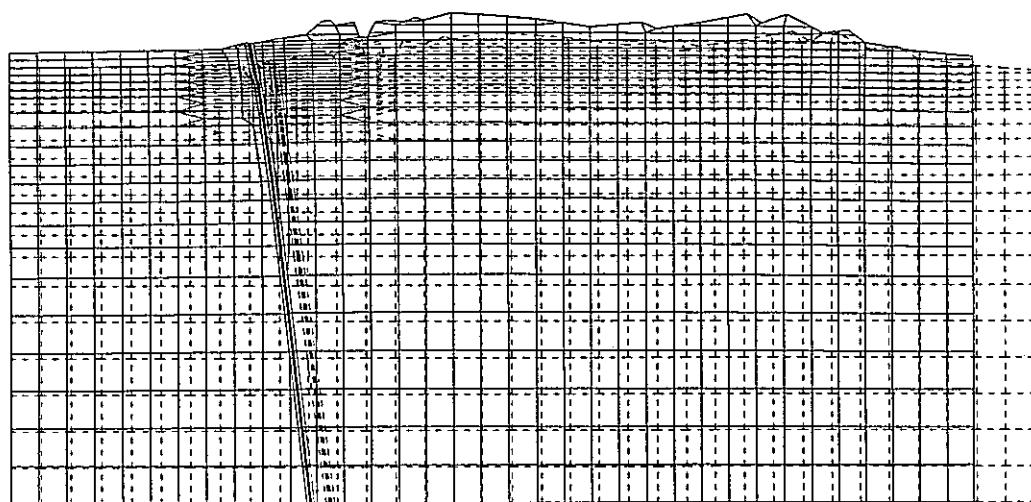


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



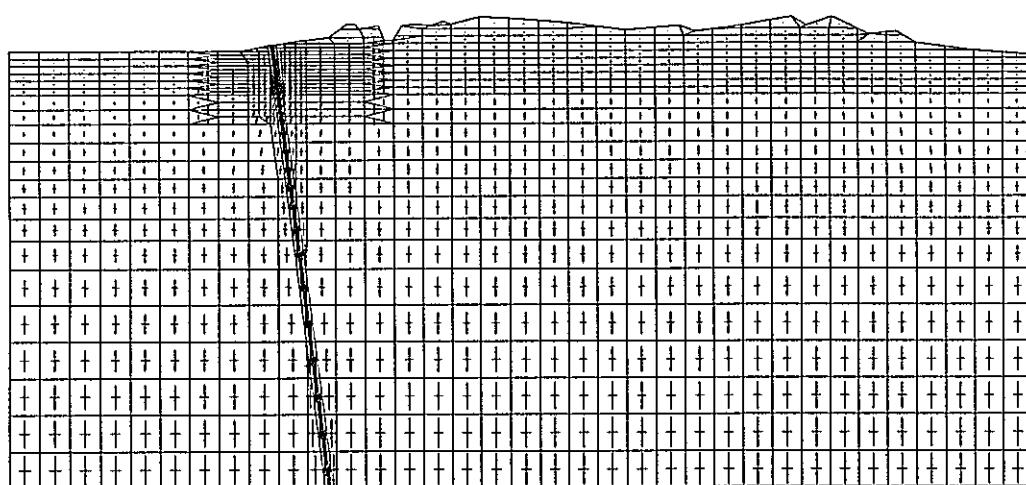
(c) 全水頭分布

図 3-61 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE5)



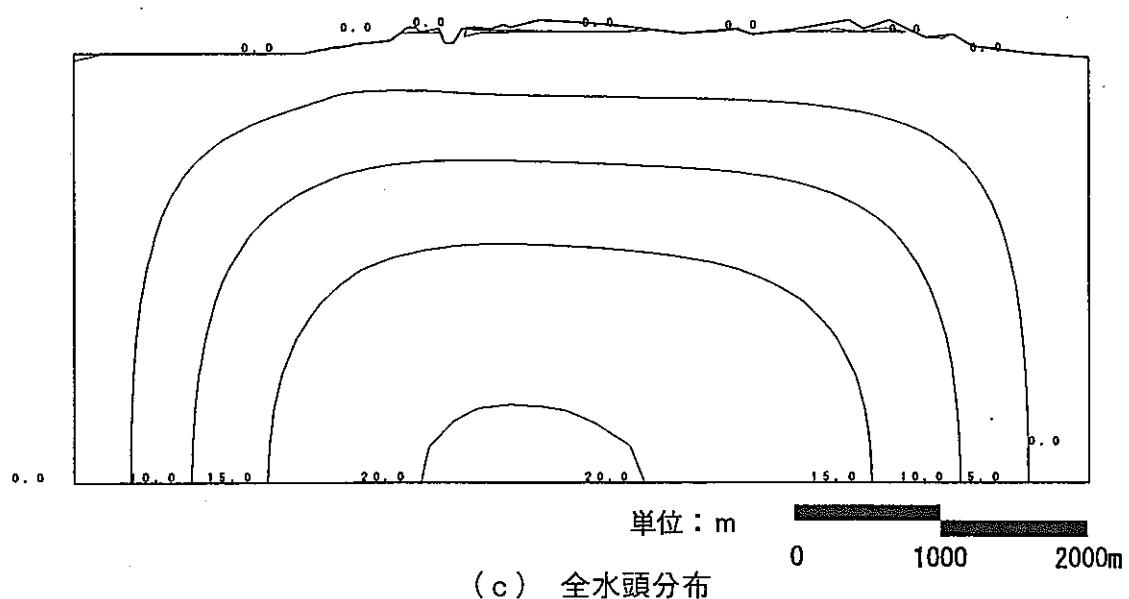
(a) 変形図

— : 0.2m



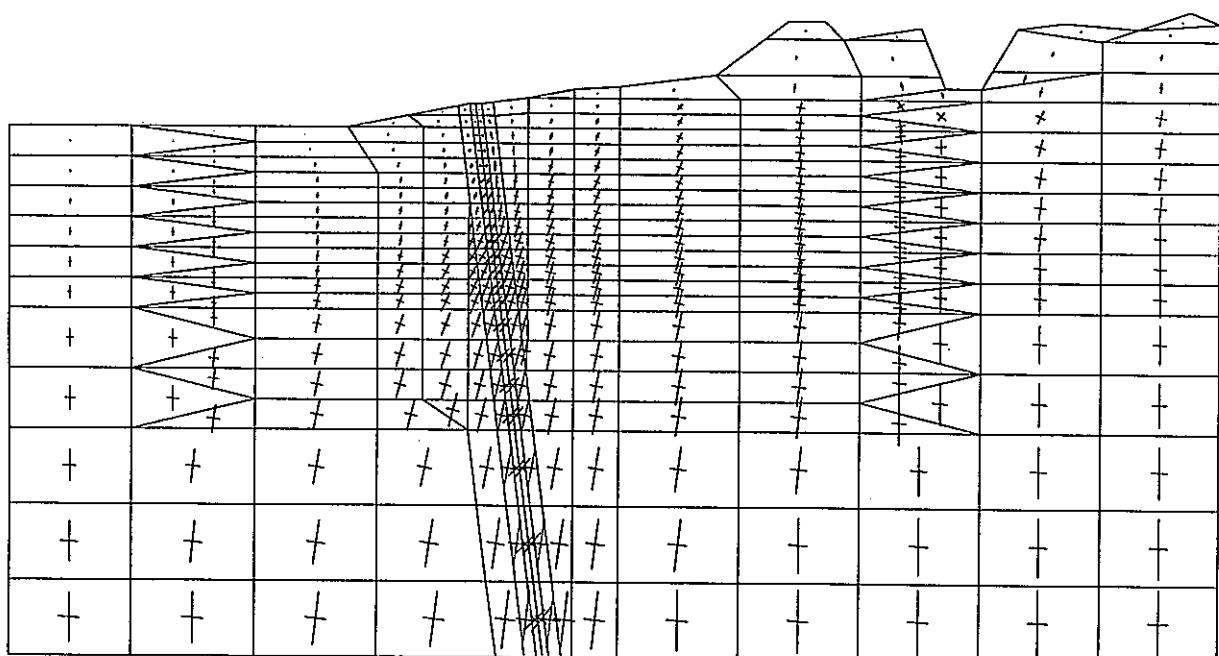
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

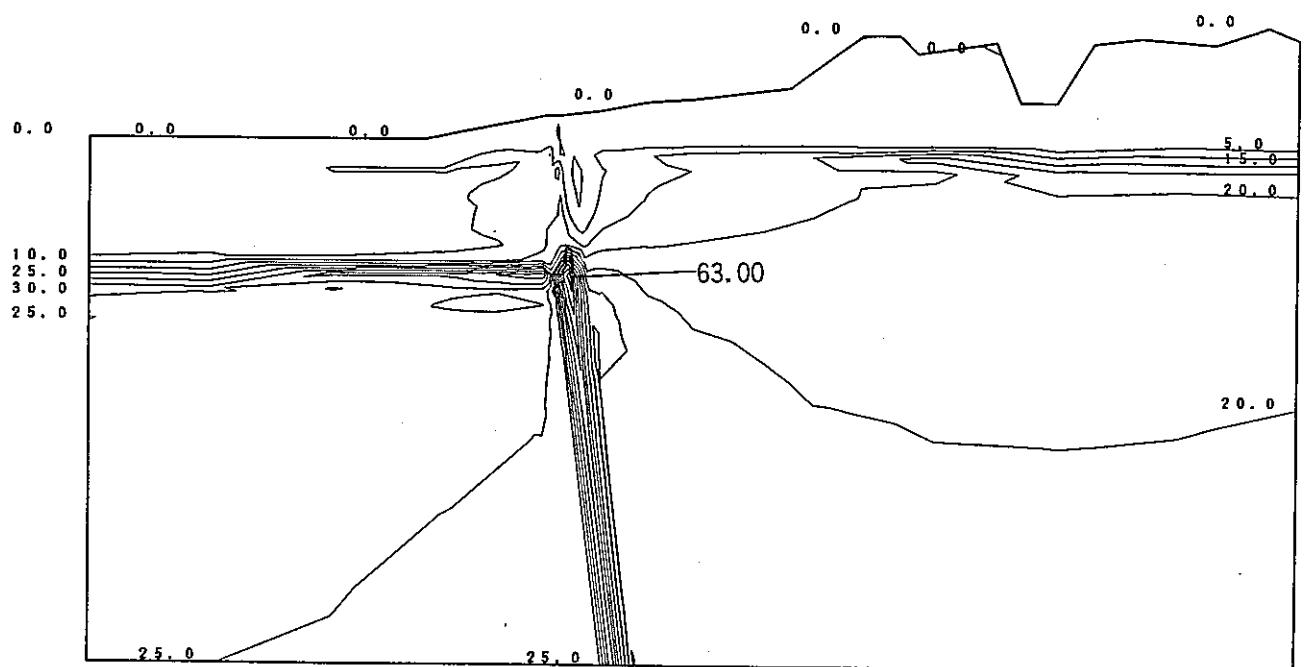


(c) 全水頭分布

図 3-62 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE5)

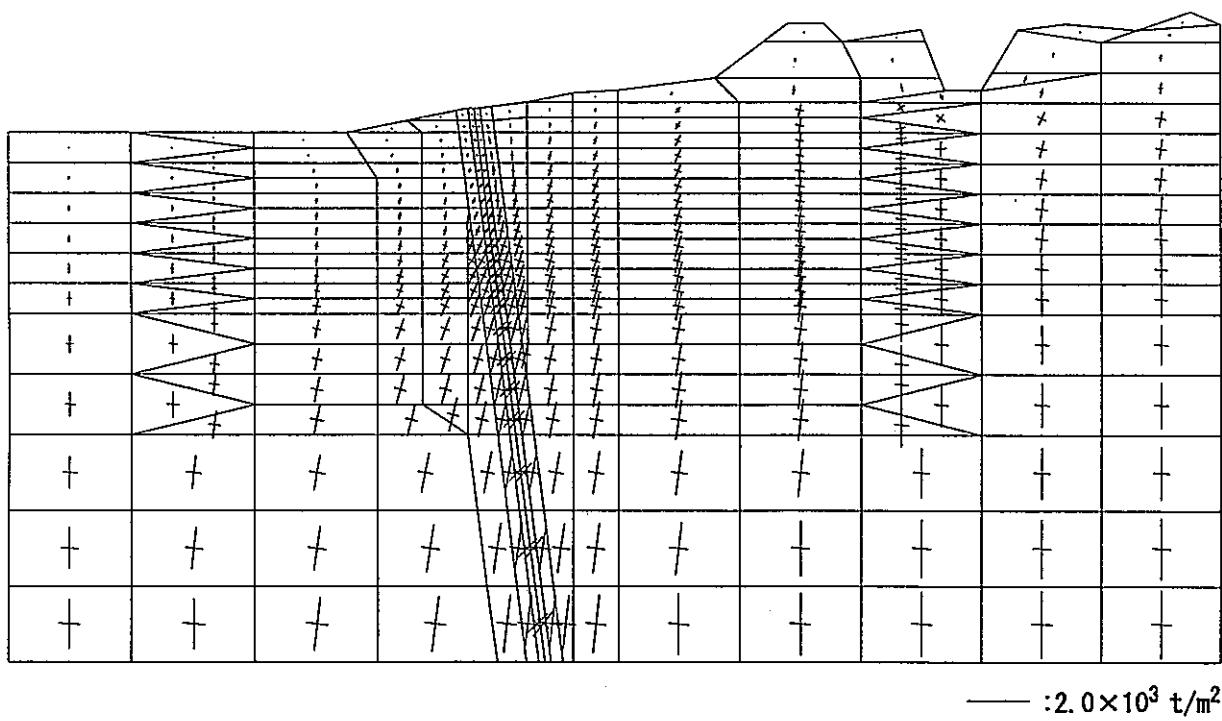


(a) 主応力(有効応力)ベクトル
— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$



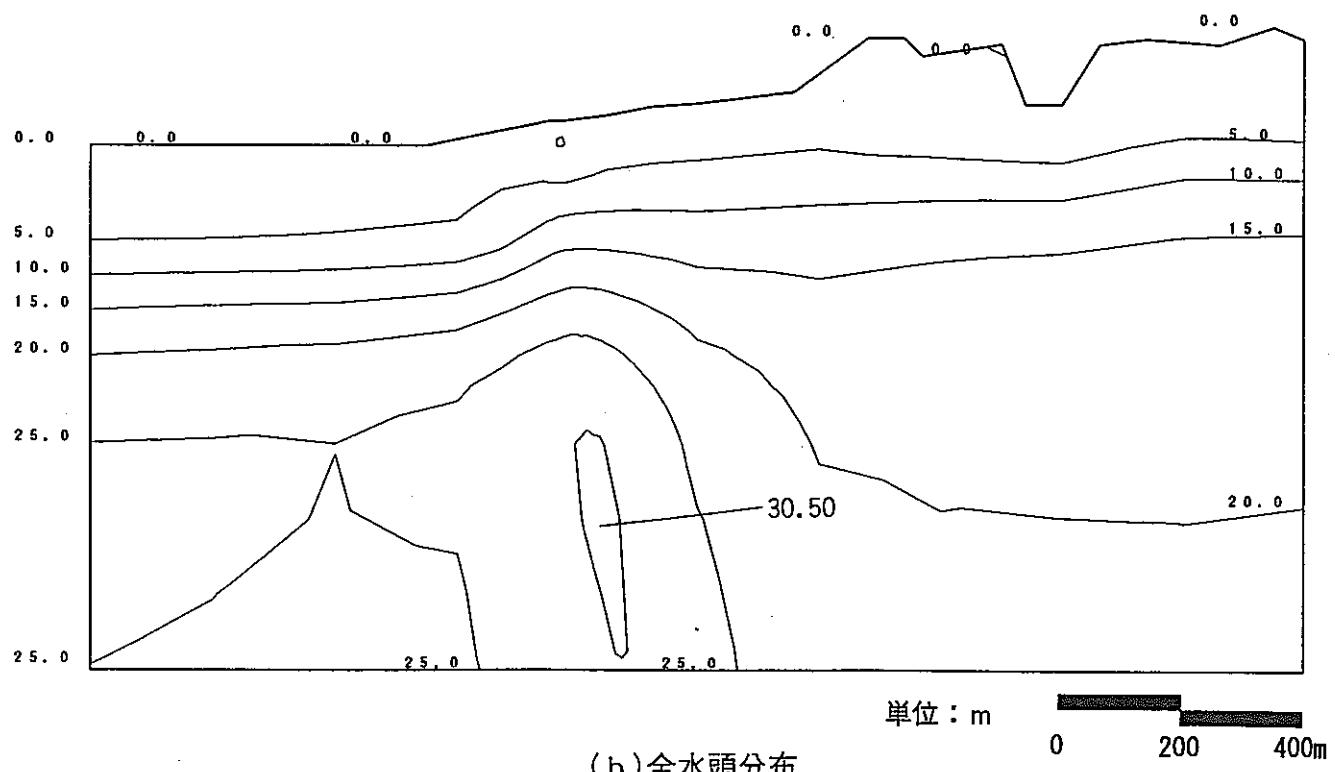
(b) 全水頭分布

図 3-63 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE5)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

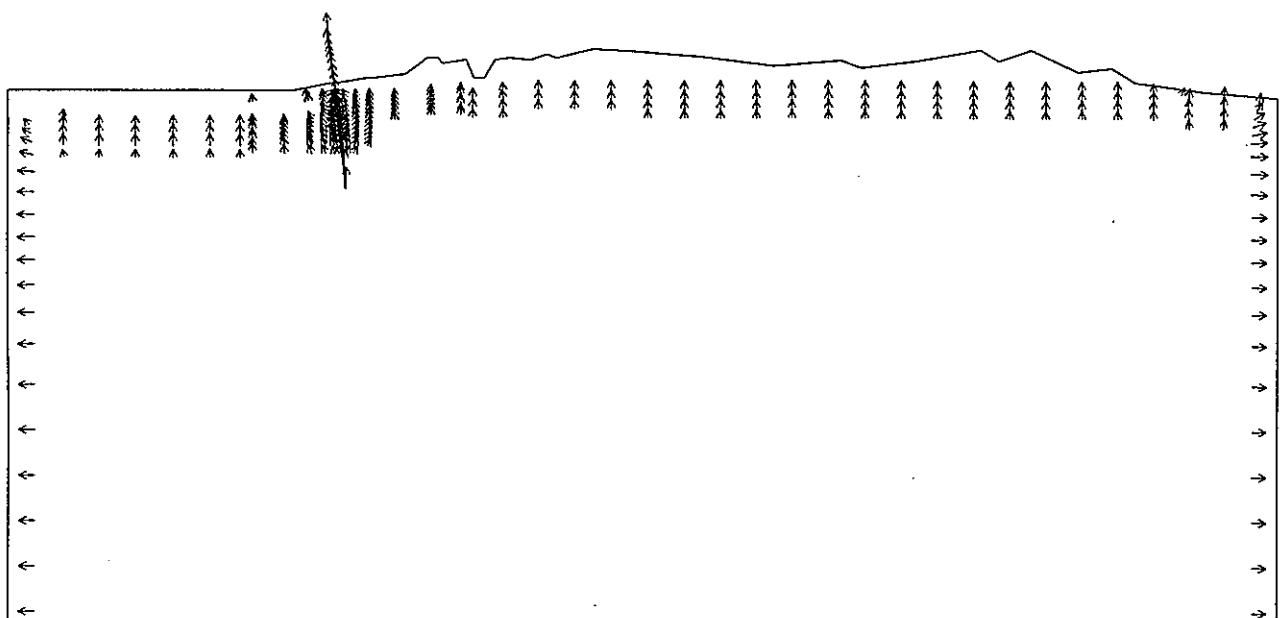


(b) 全水頭分布

単位 : m

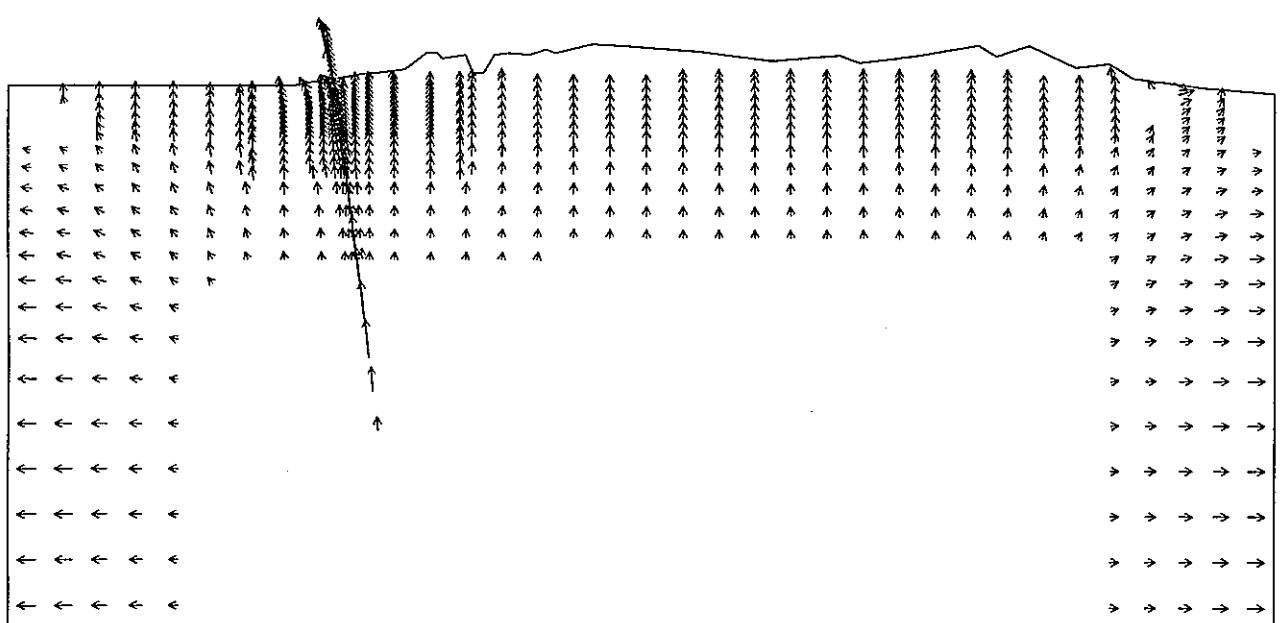
0 200 400m

図 3-64 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE5)



(a) 1日後

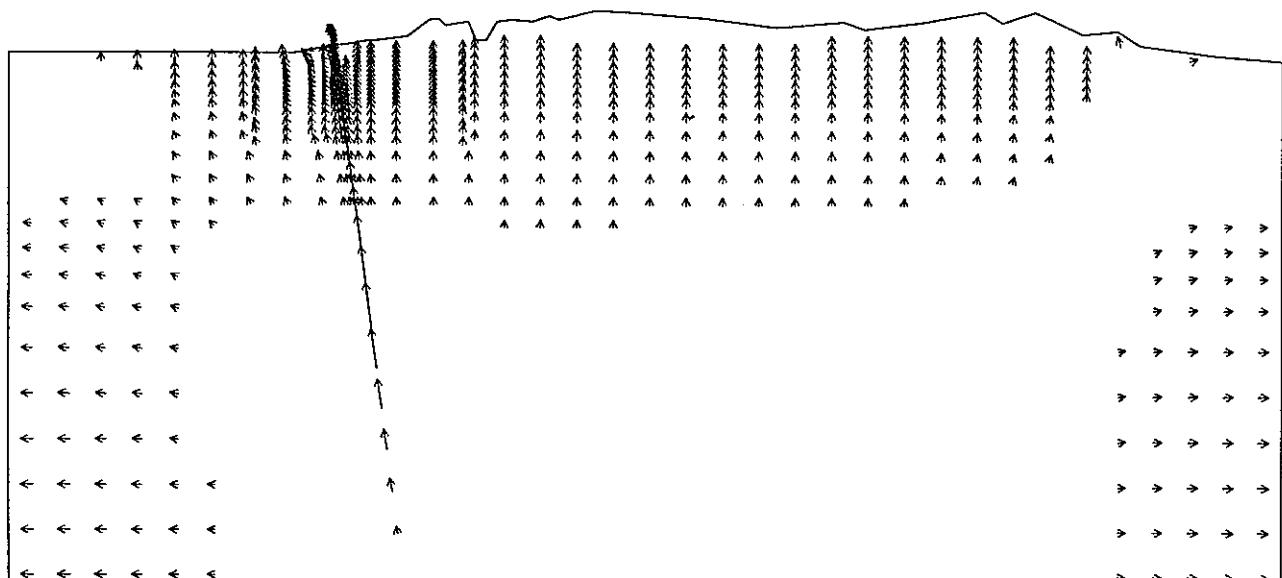
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(b) 30日後

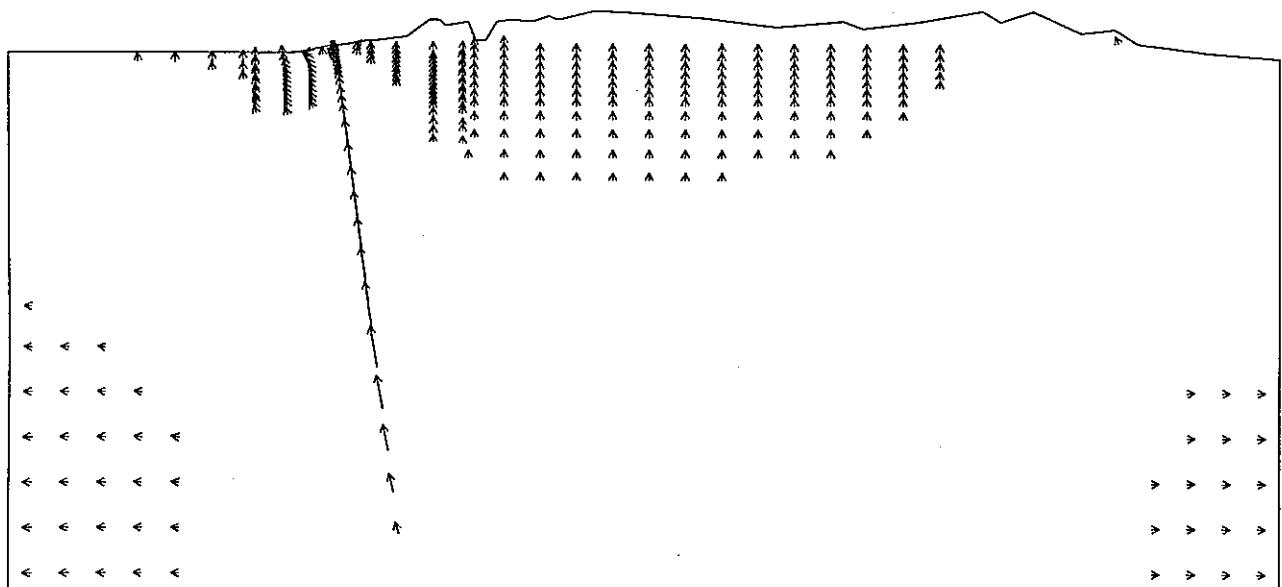
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-65 流速ベクトル(CASE5)



(c) 60 日後

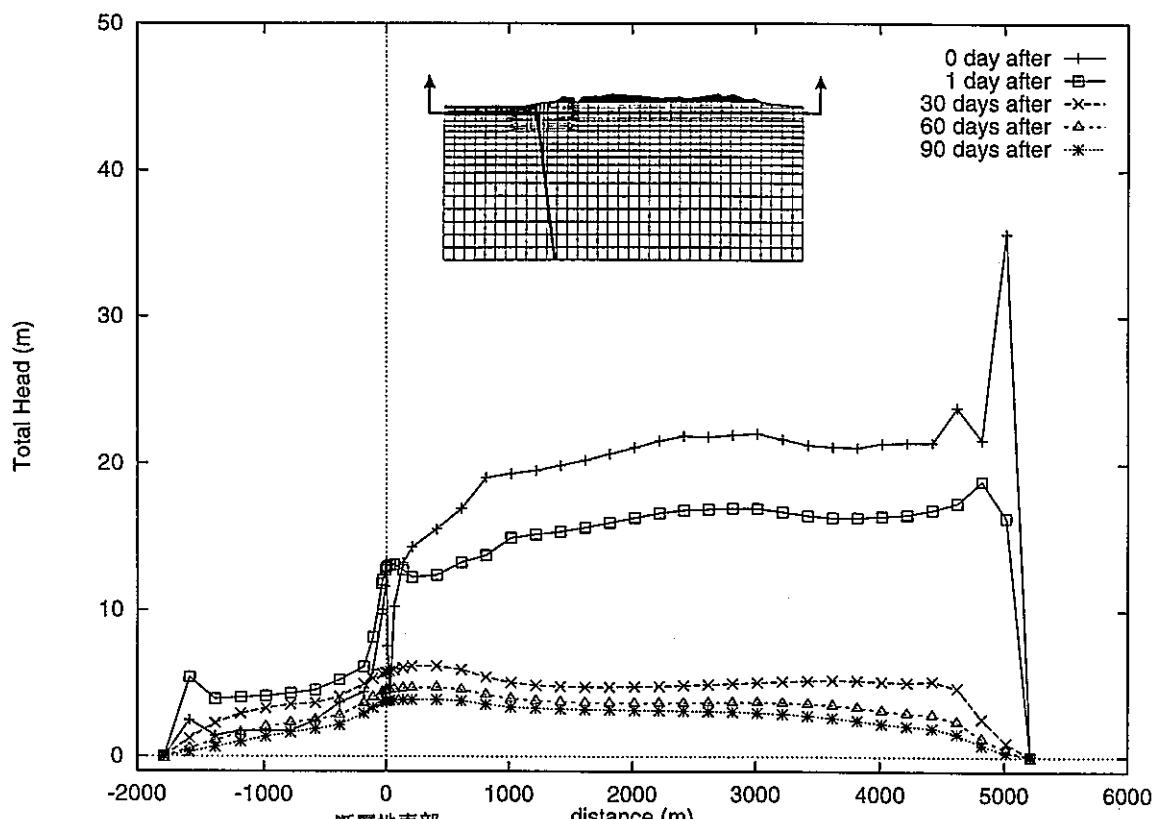
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



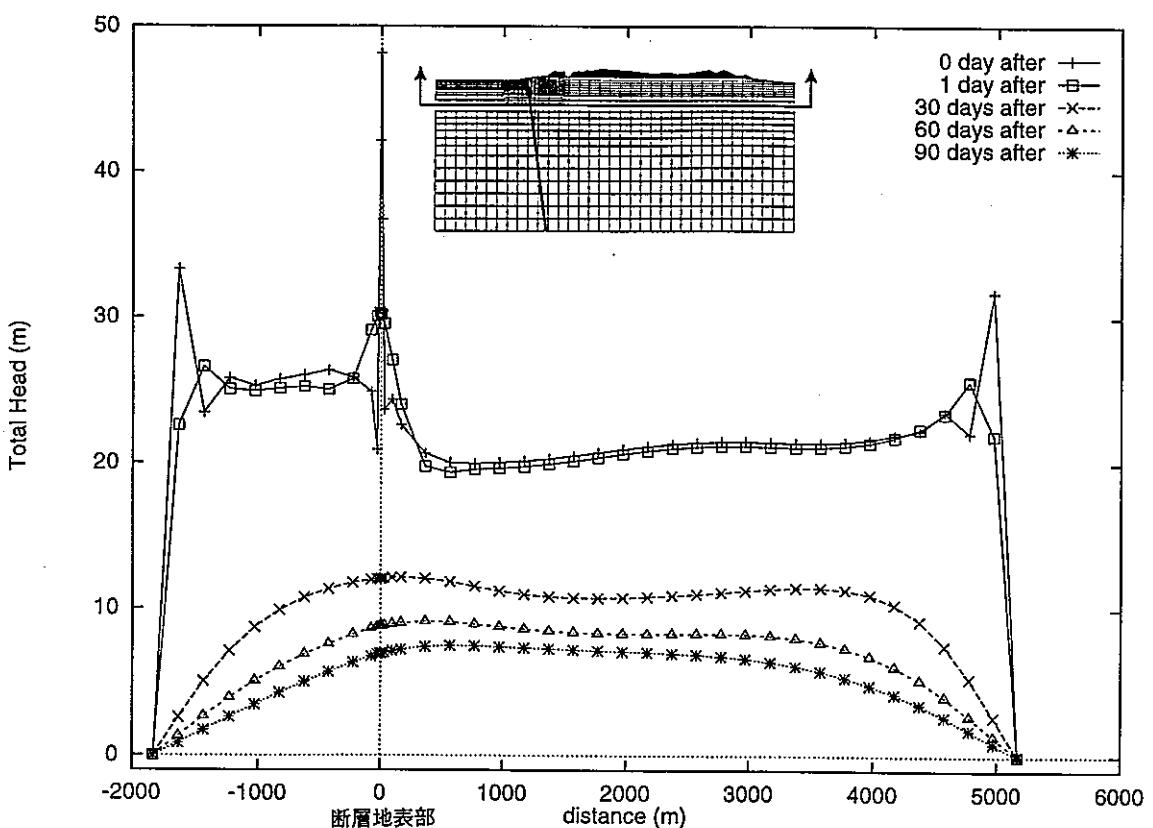
(d) 90 日後

$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-65 流速ベクトル(CASE5)



(a) EL-150m



(b) EL-500m

図 3-66 全水頭の空間分布(CASE5)

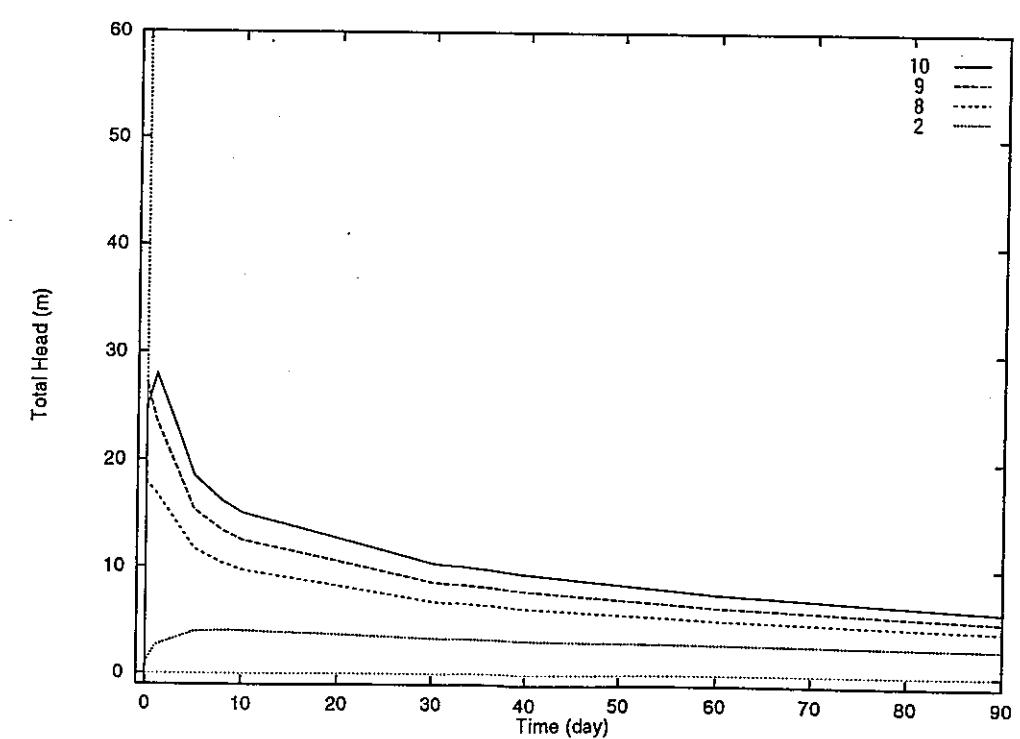
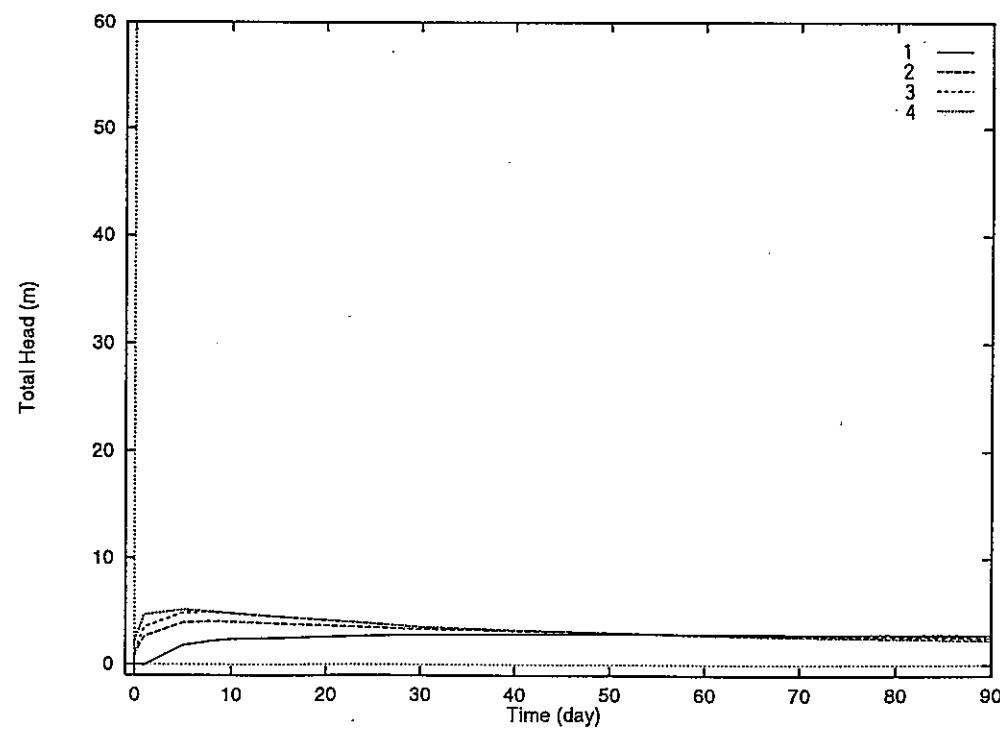
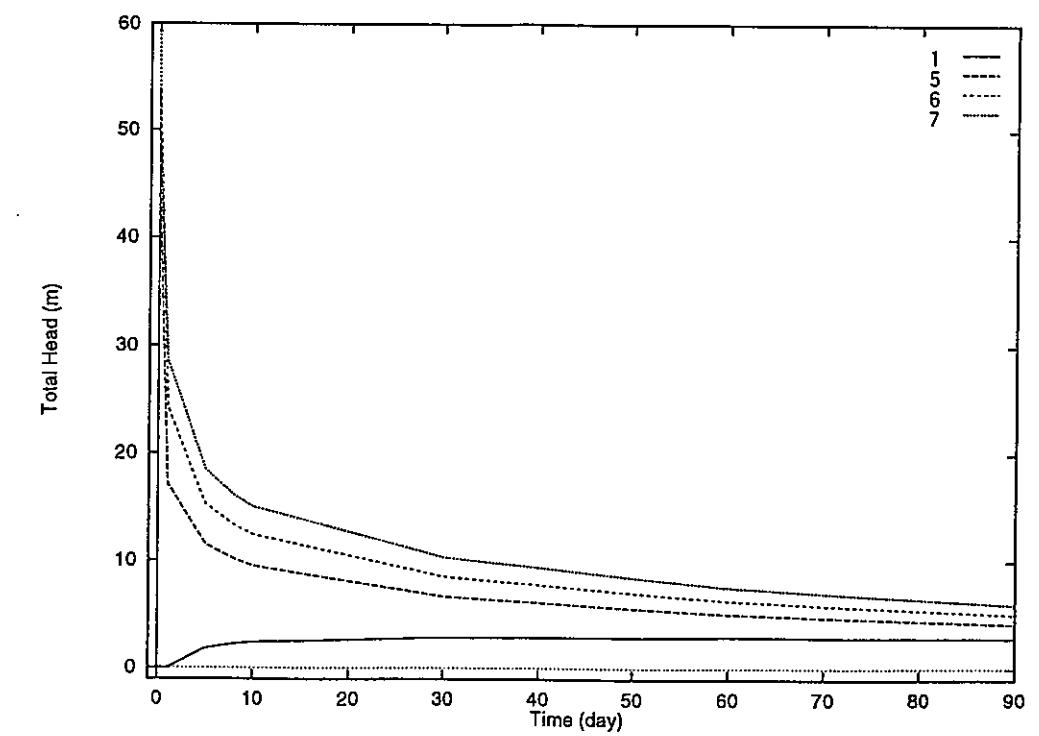
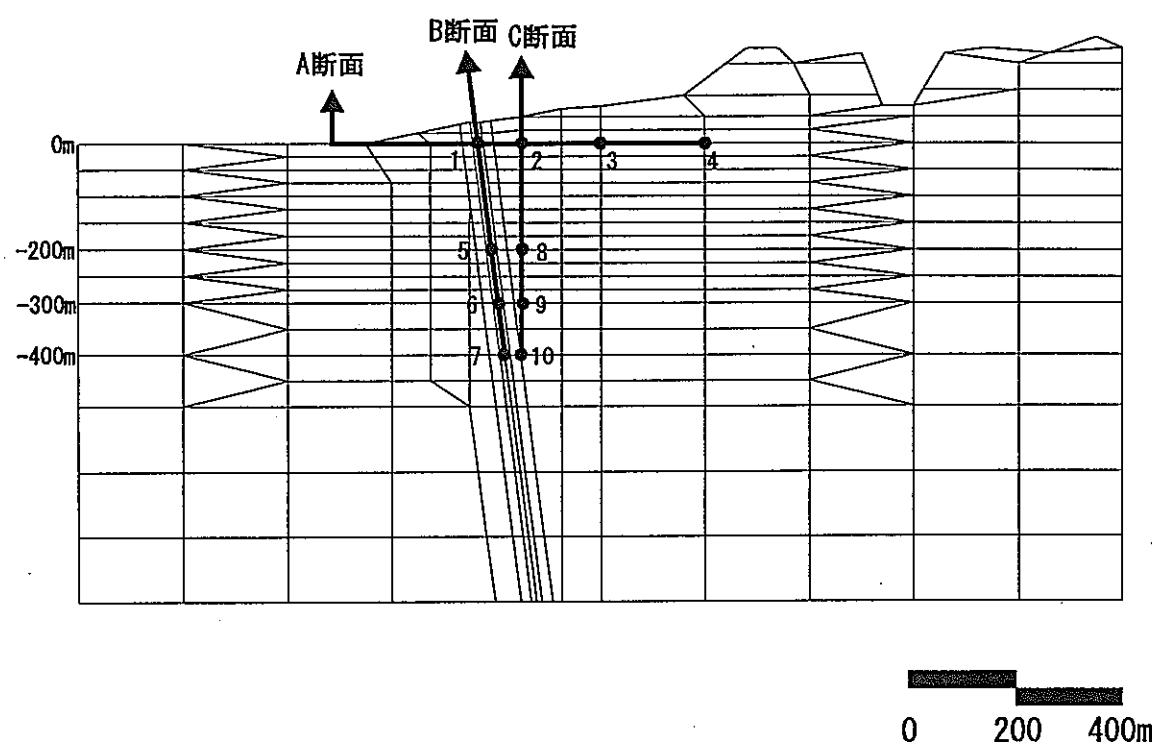
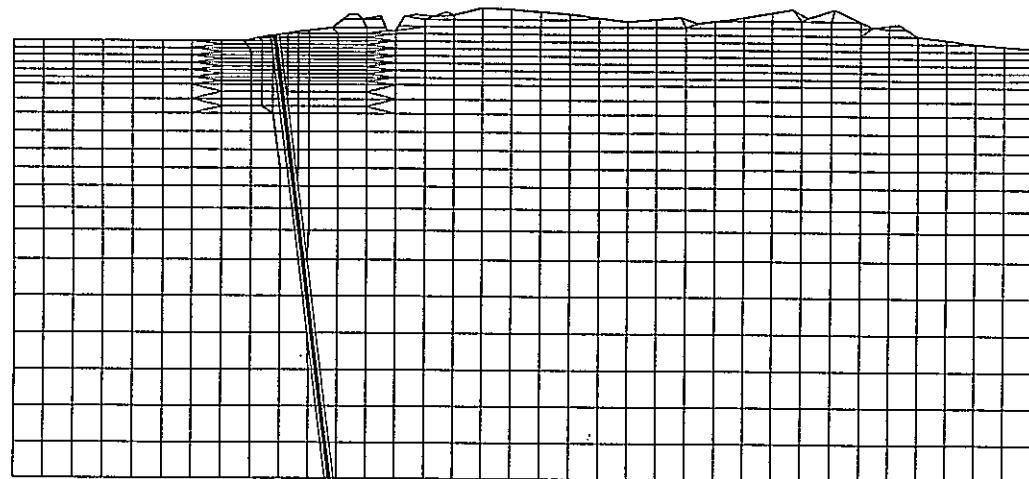
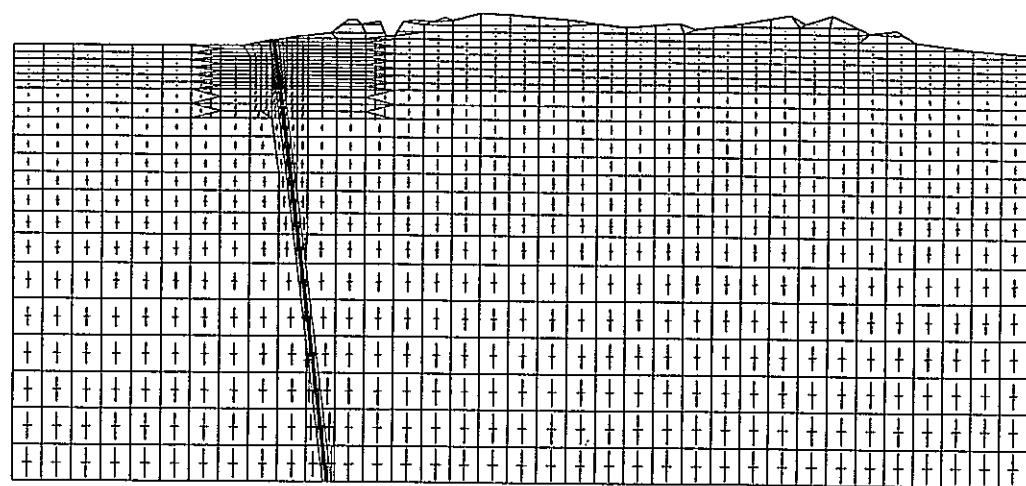


図 3-67 全水頭の時間変化(CASE5)



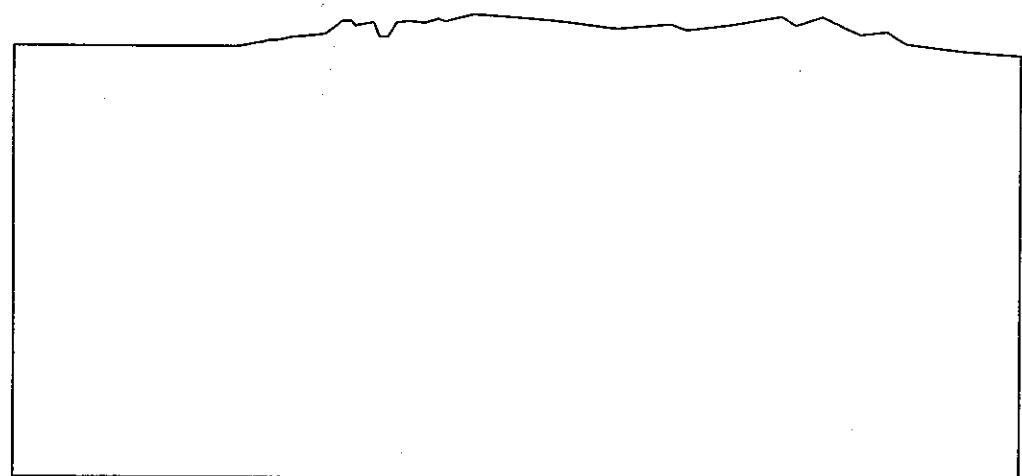
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

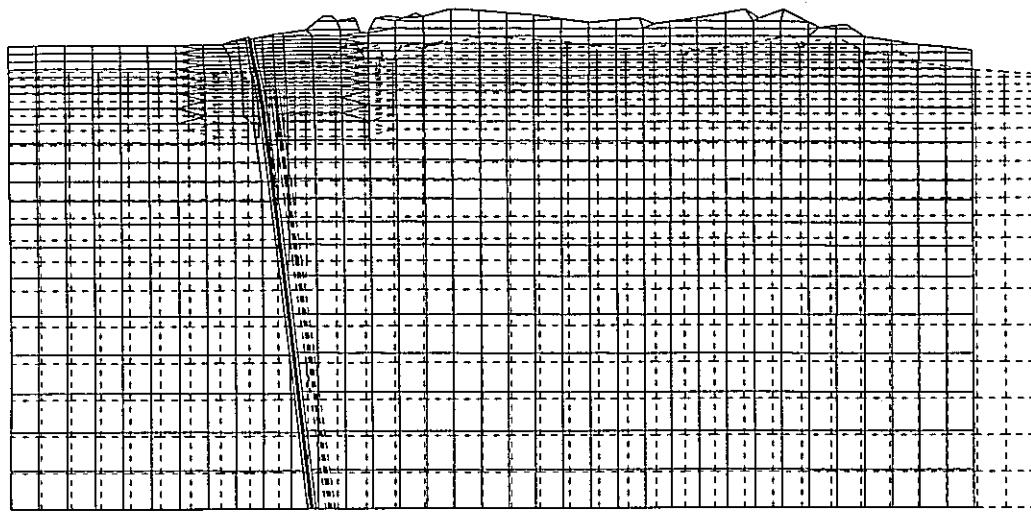


単位: m

0 1000 2000m

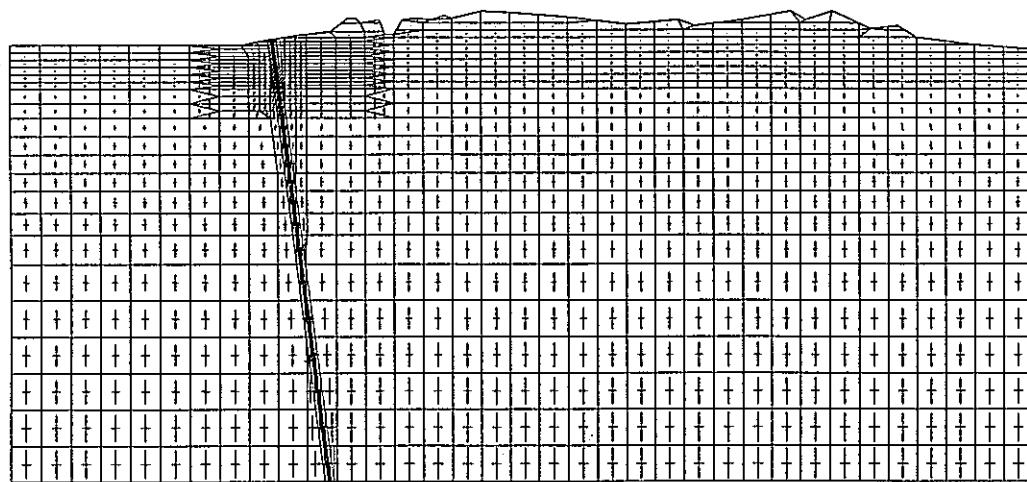
(c) 全水頭分布

図 3-68 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE6)



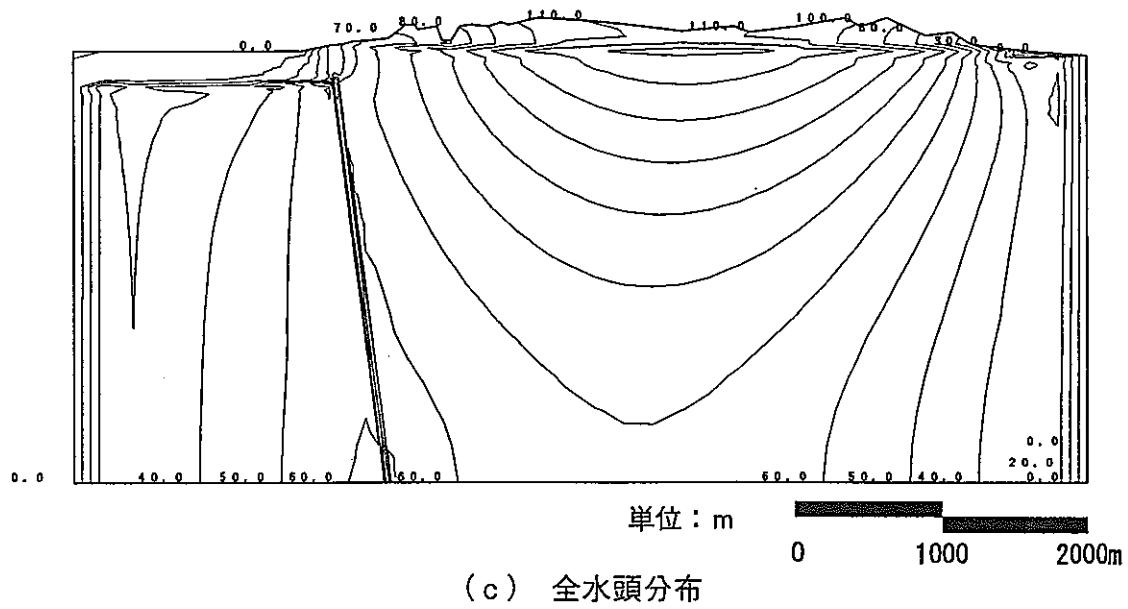
(a) 変形図

— : 0.2m



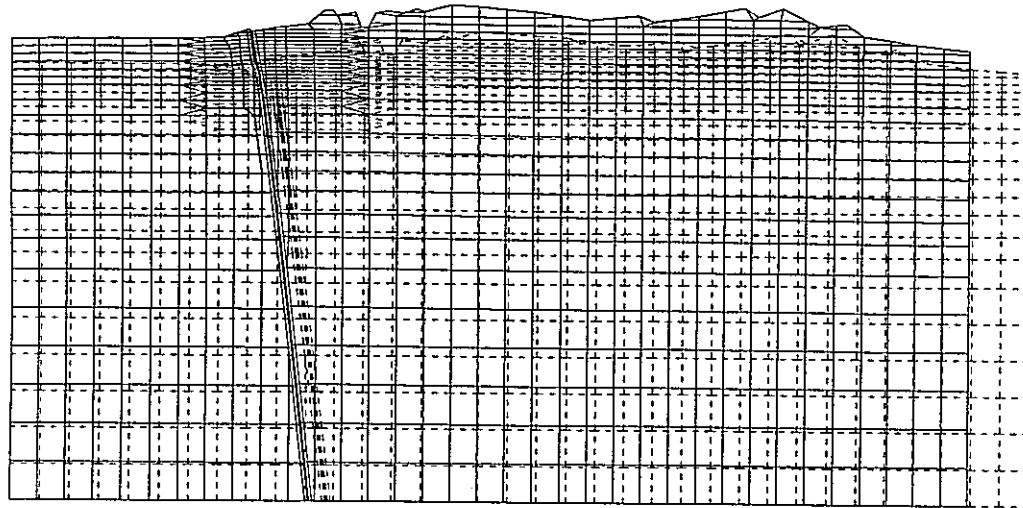
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$



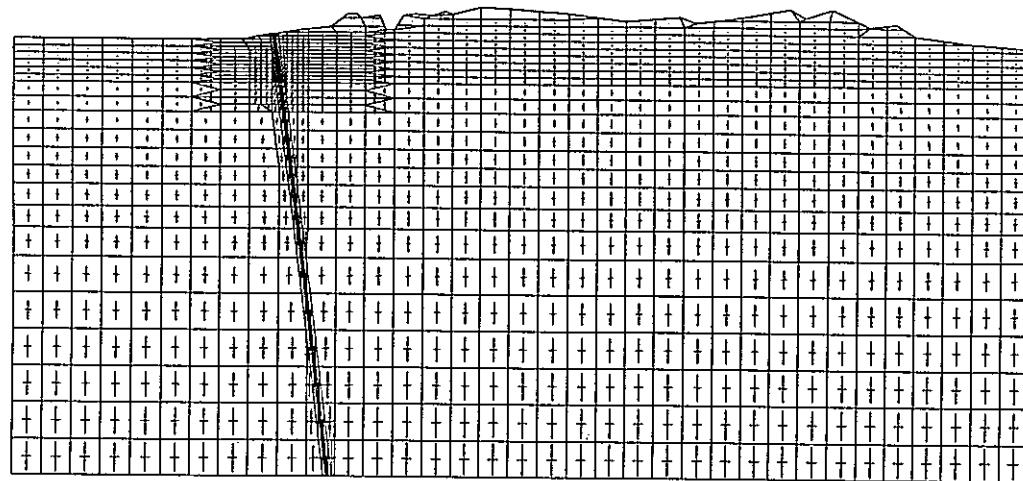
(c) 全水頭分布

図 3-69 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE6)



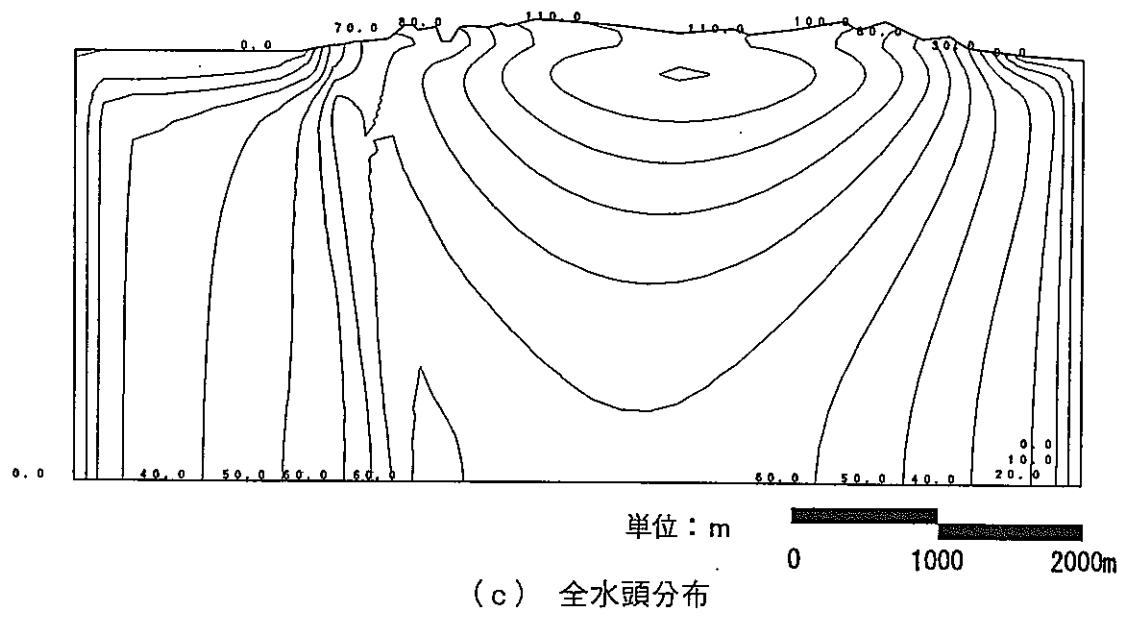
(a) 変形図

→ : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

→ : 1.0×10^4 t/m²

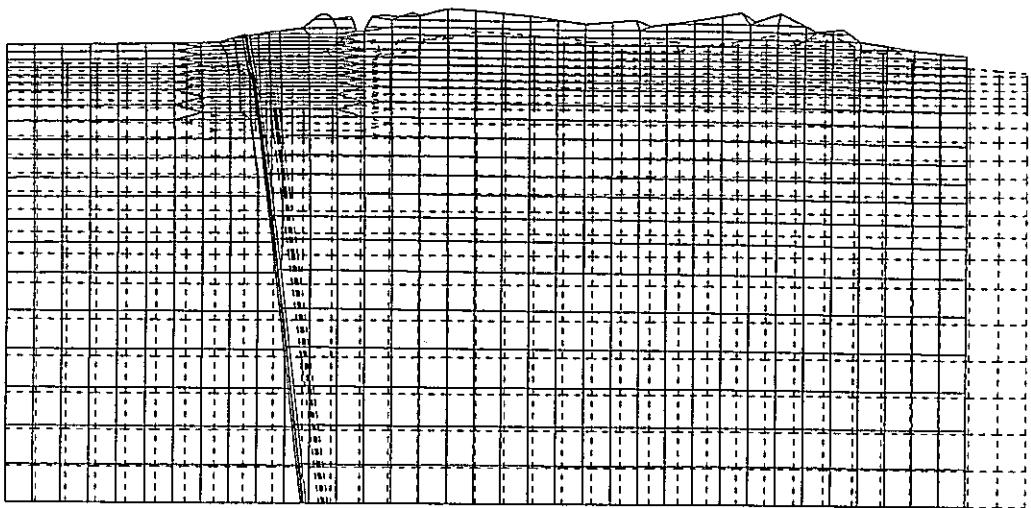


(c) 全水頭分布

単位: m

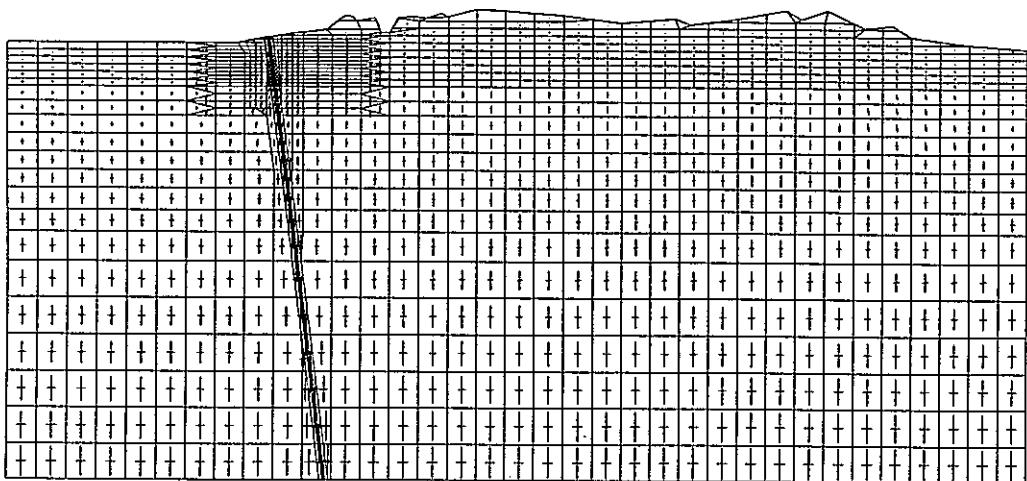
0 1000 2000m

図 3-70 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE6)



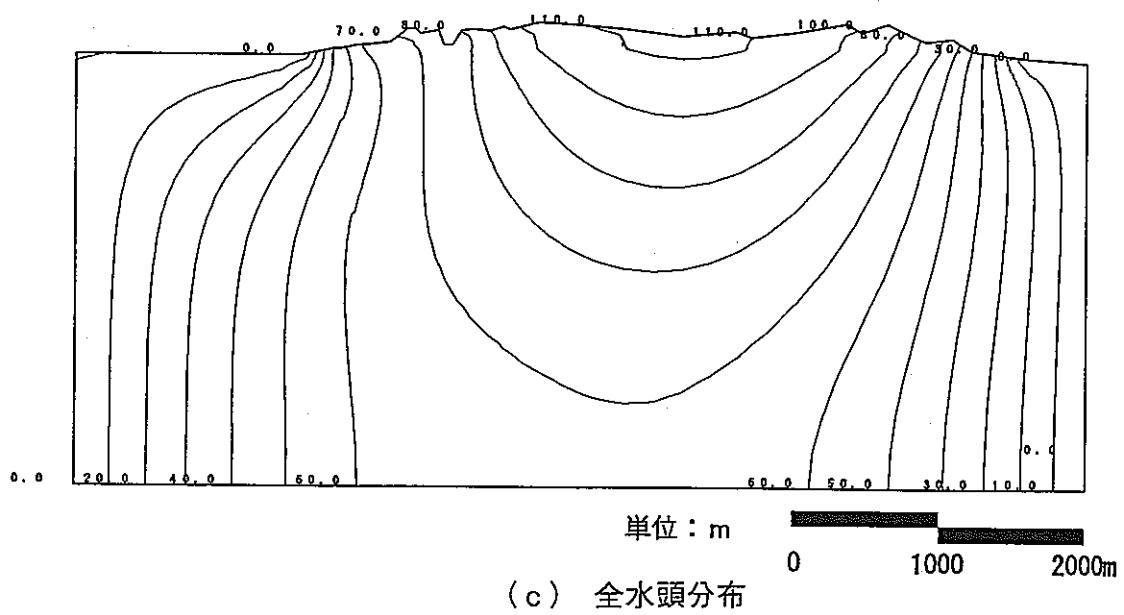
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

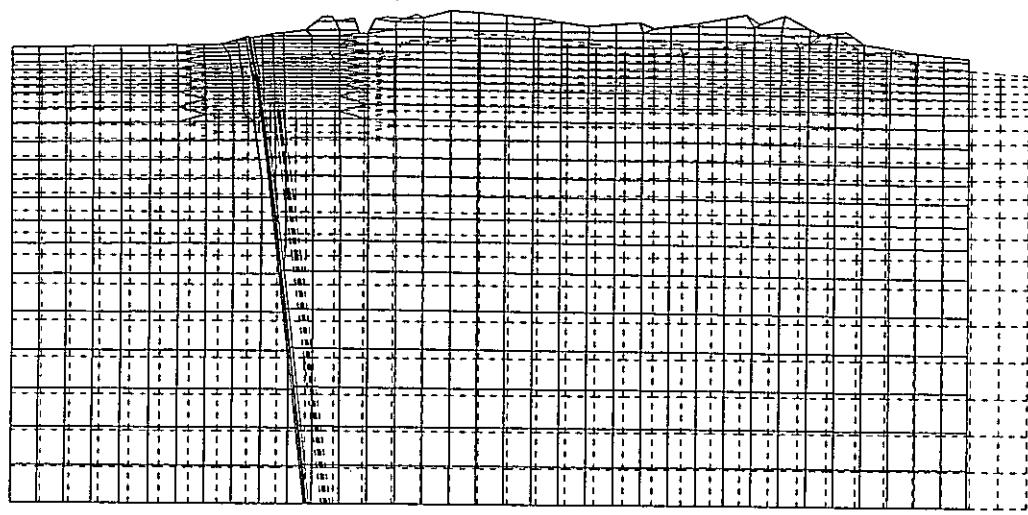


(c) 全水頭分布

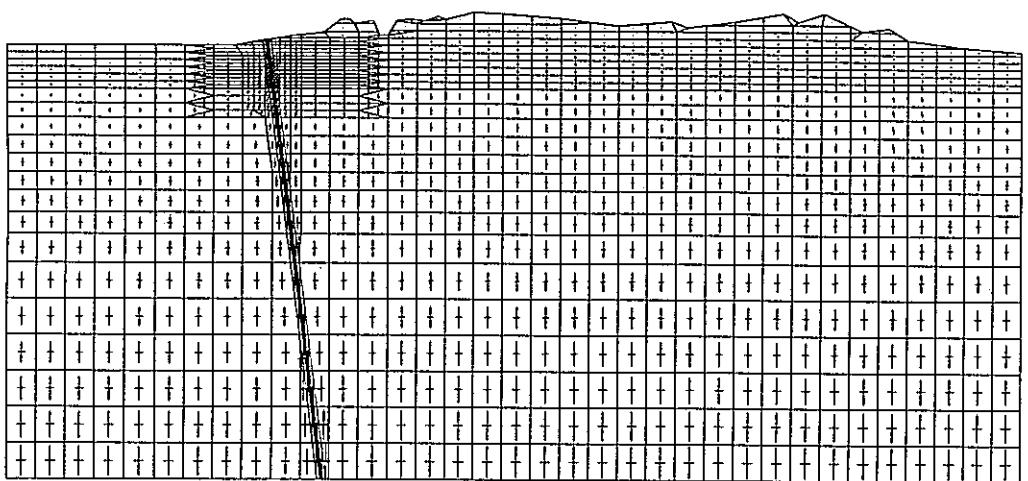
単位 : m

0 1000 2000m

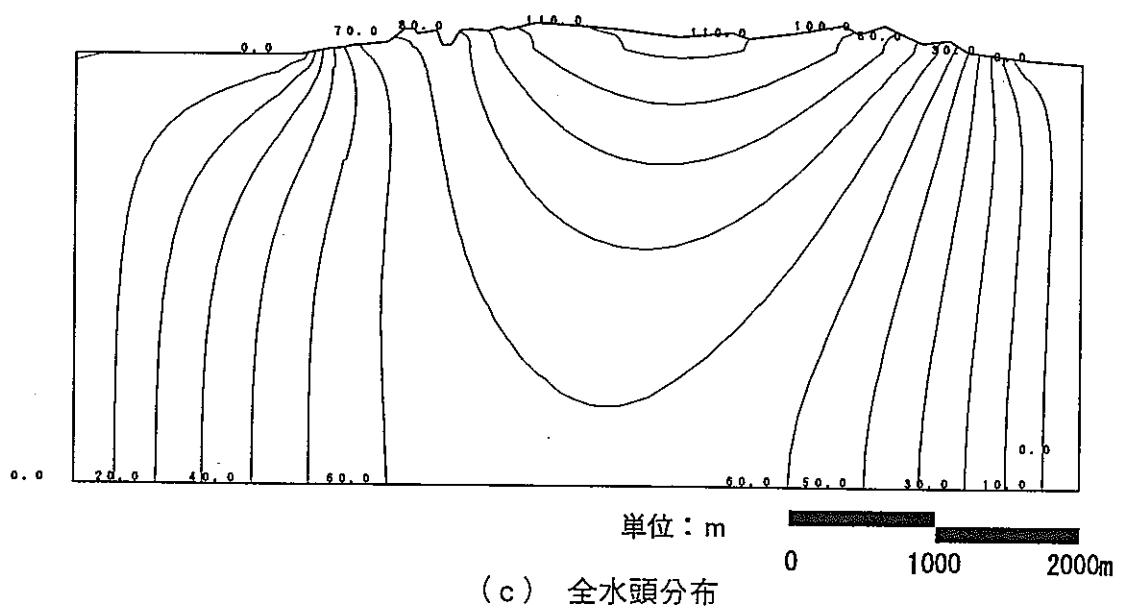
図 3-71 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE6)



(a) 変形図 :0.2m

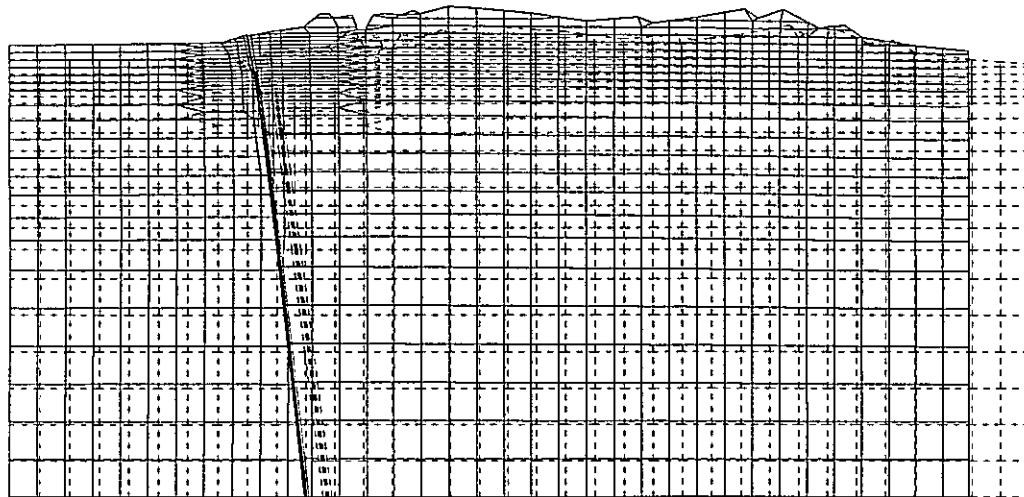


(b) 主応力(有効応力)ベクトル :1.0×10⁴ t/m²



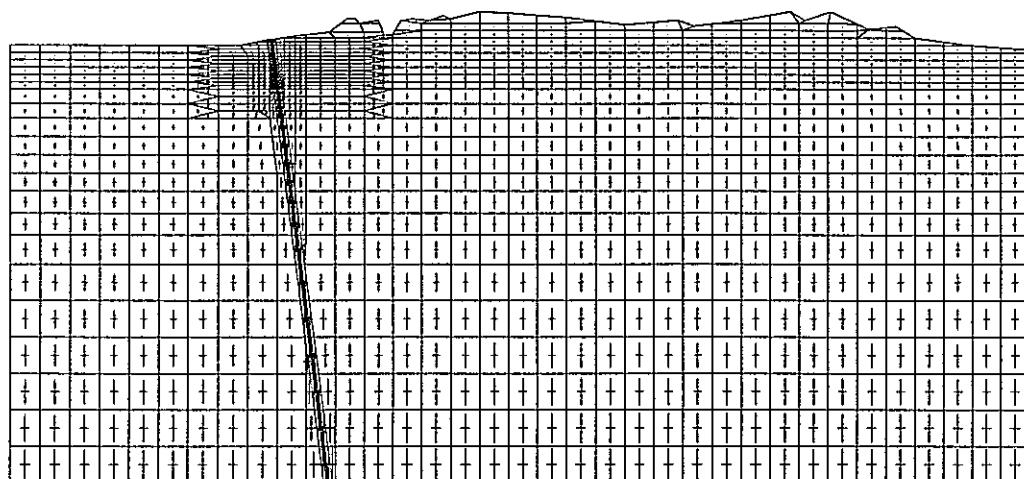
(c) 全水頭分布

図 3-72 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE6)



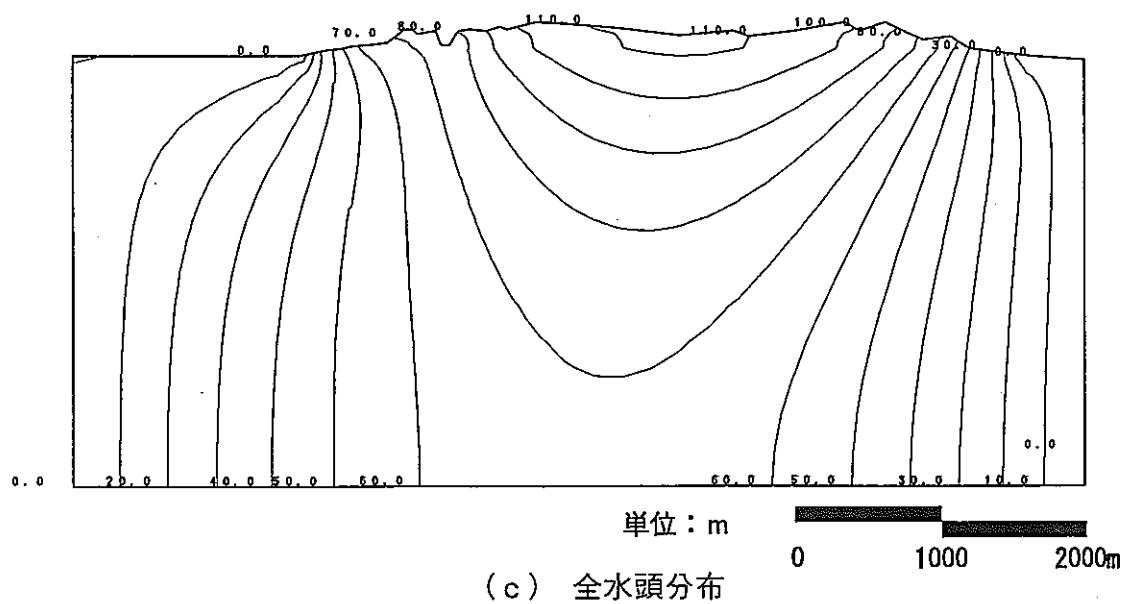
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

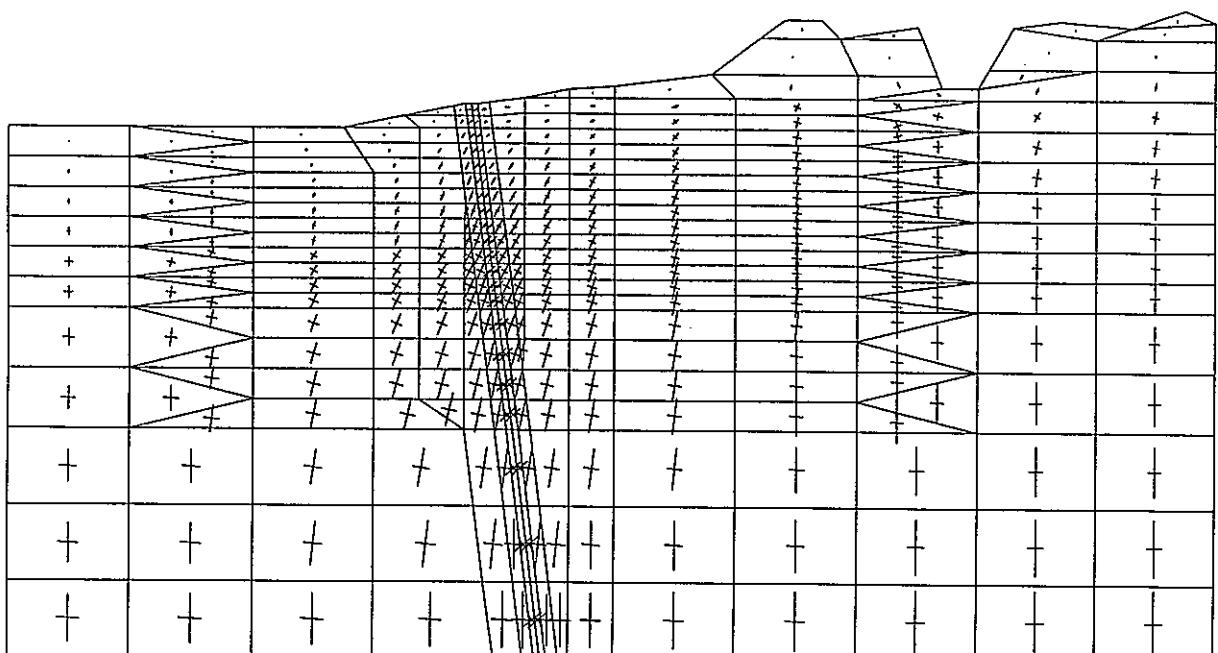


(c) 全水頭分布

単位 : m

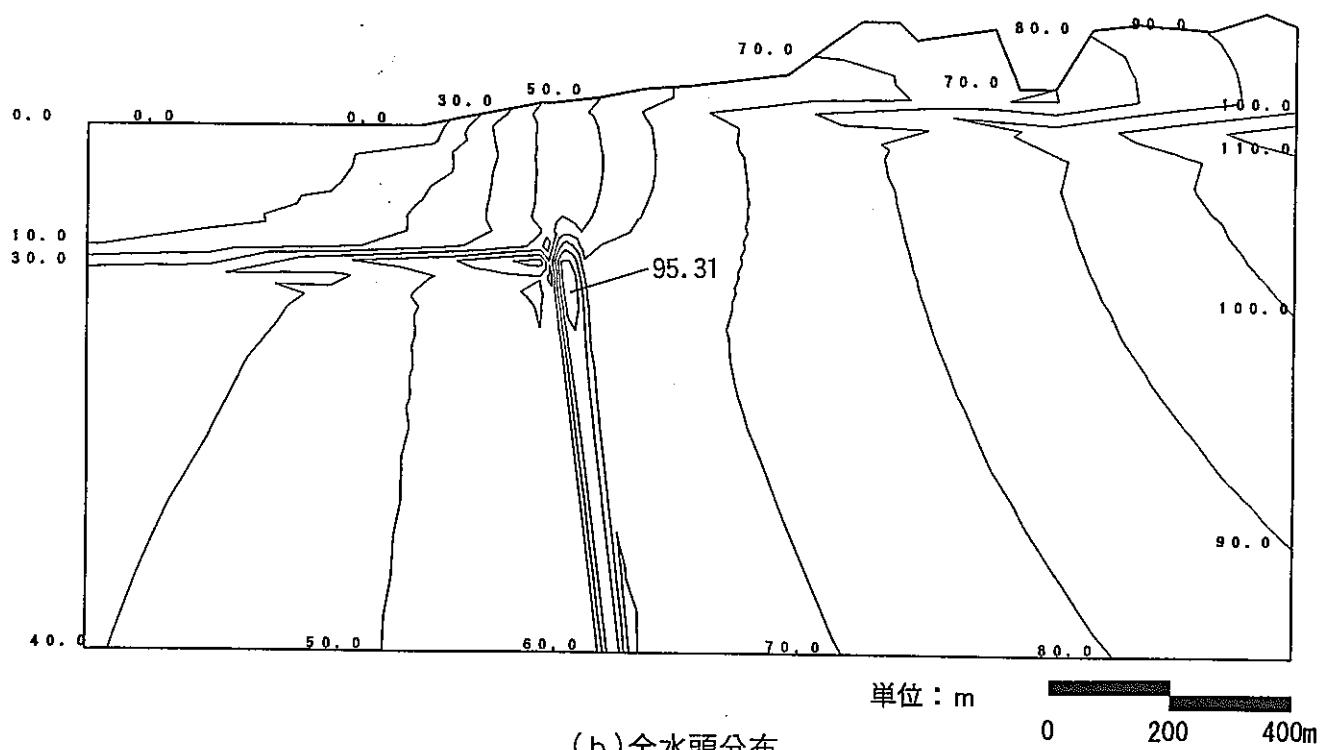
0 1000 2000m

図 3-73 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE6)



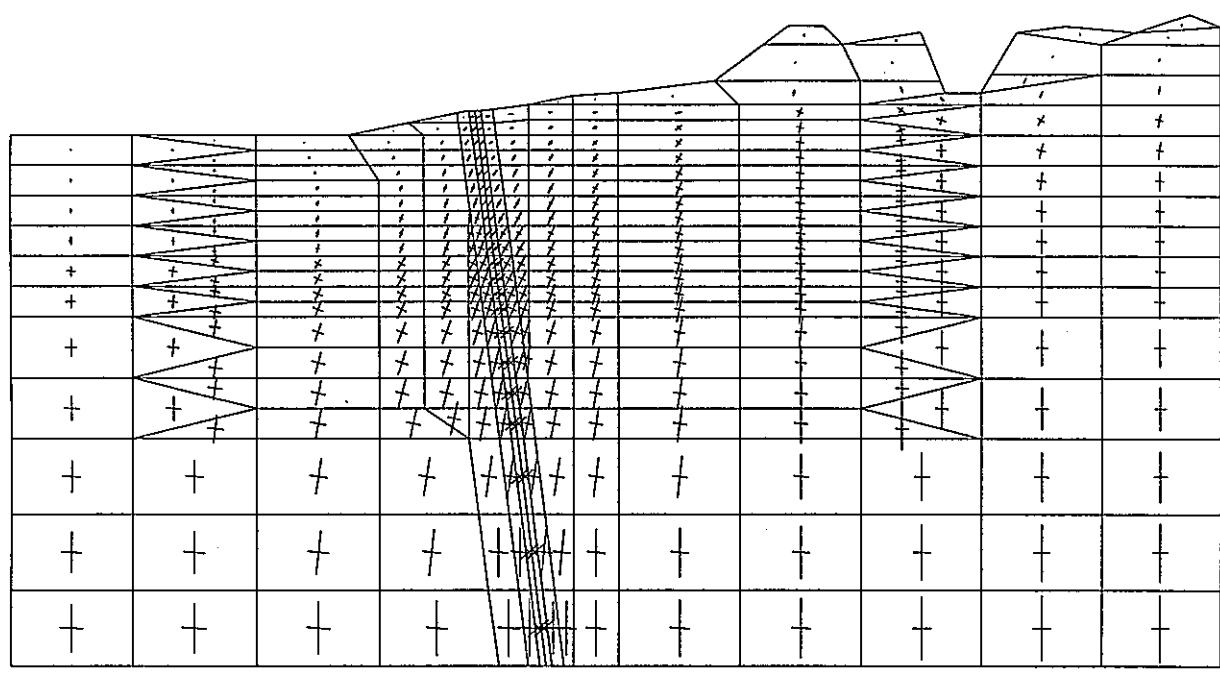
(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$



(b) 全水頭分布

図 3-74 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE6)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

—— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

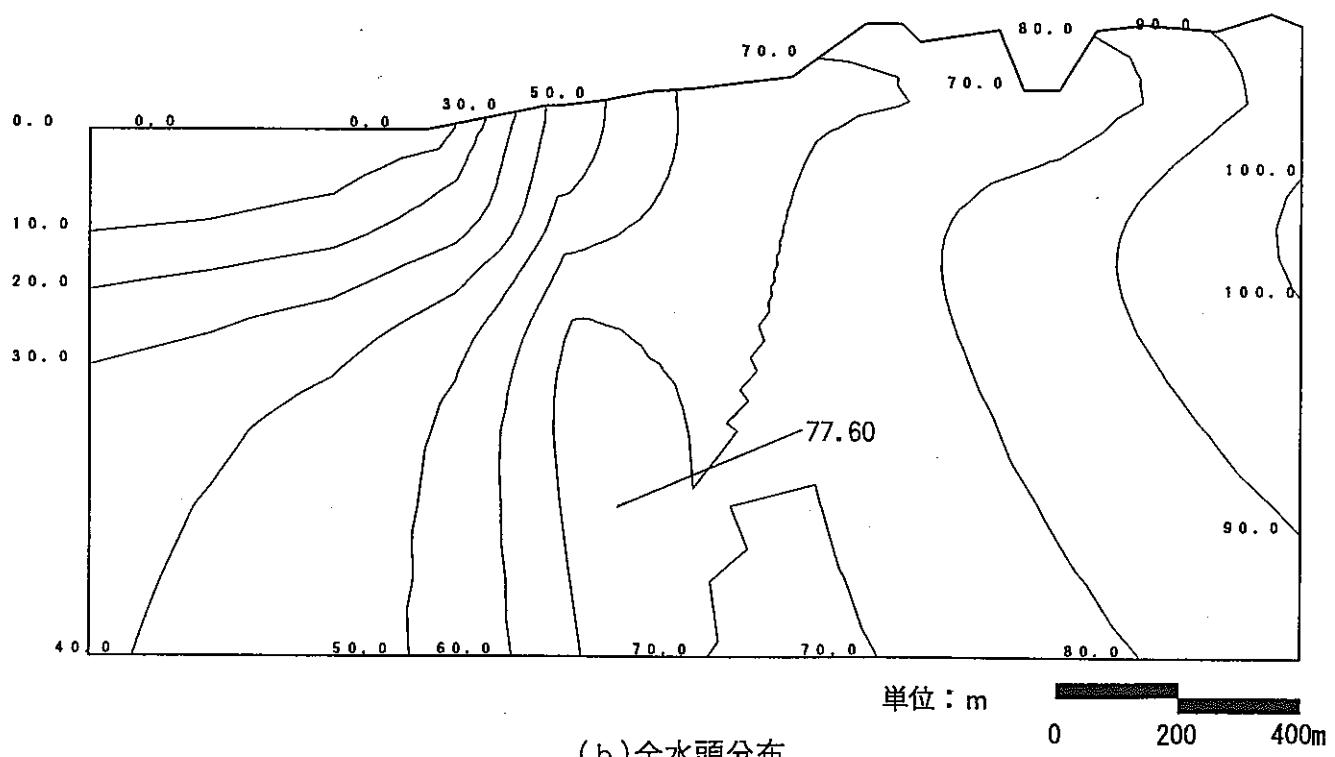


図 3-75 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE6)

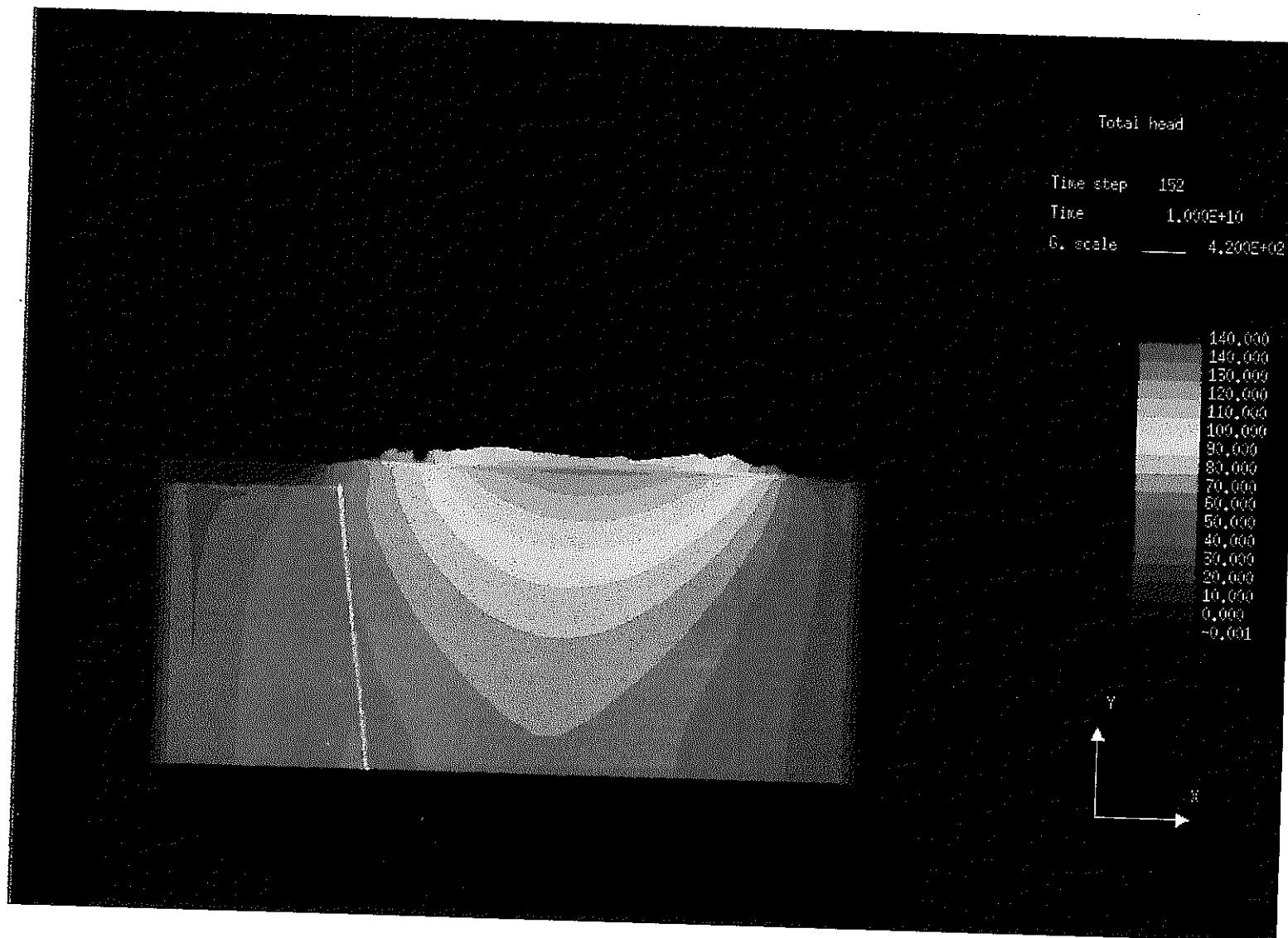


図 3-76 全水頭分布(地震直後, CASE6)

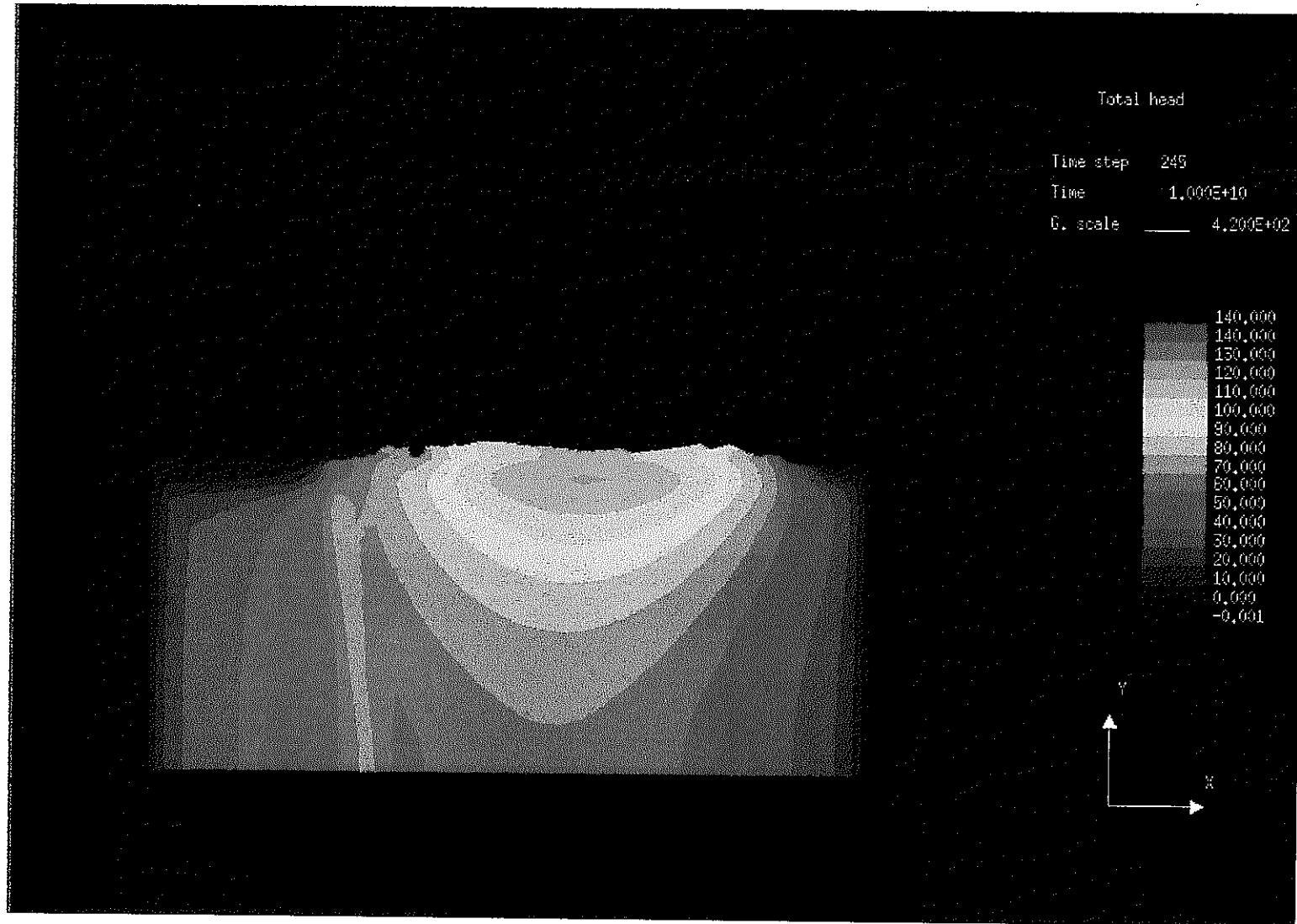


図 3-77 全水頭分布(1日後,CASE6)

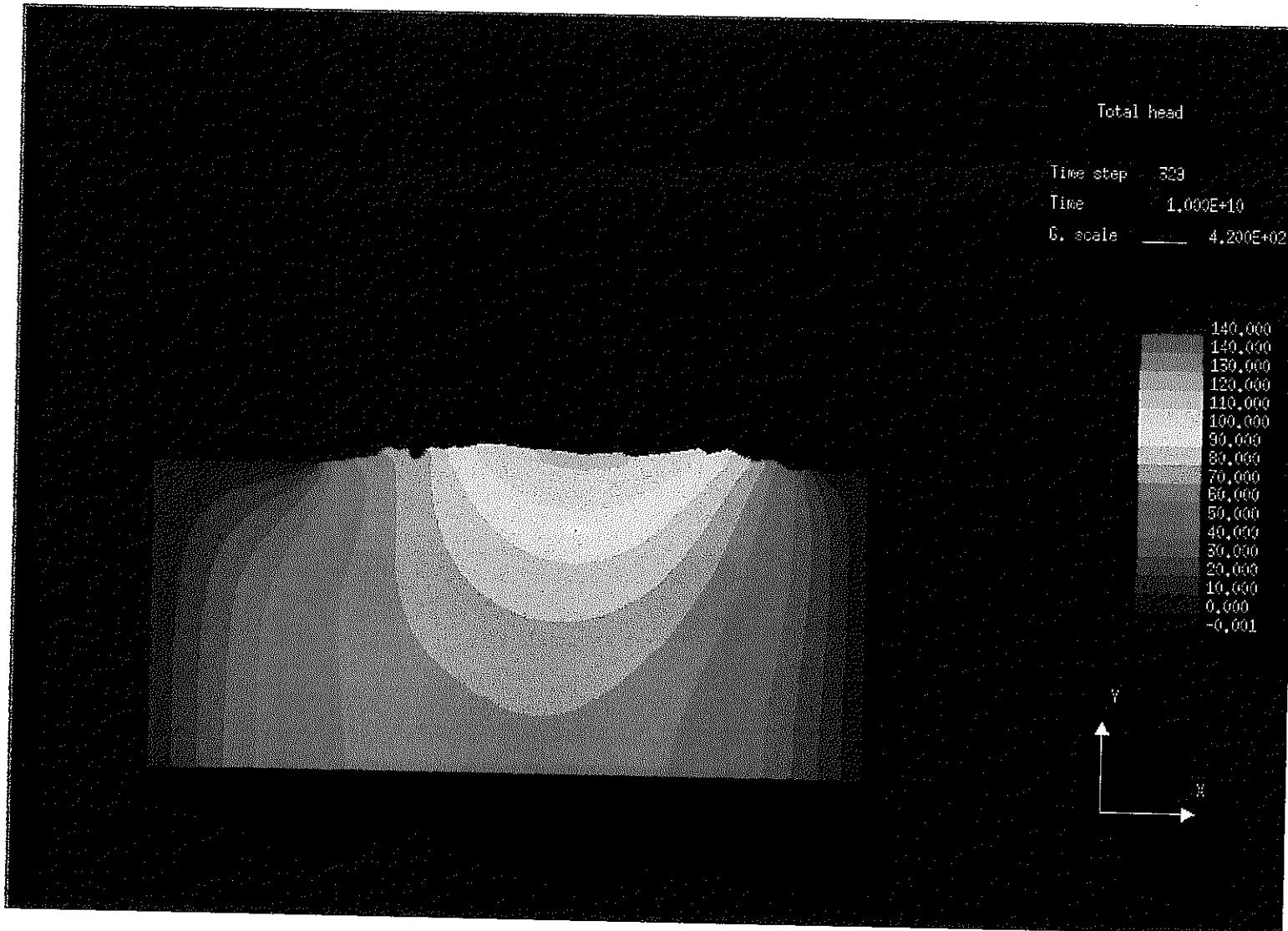


図 3-78 全水頭分布(30 日後, CASE6)

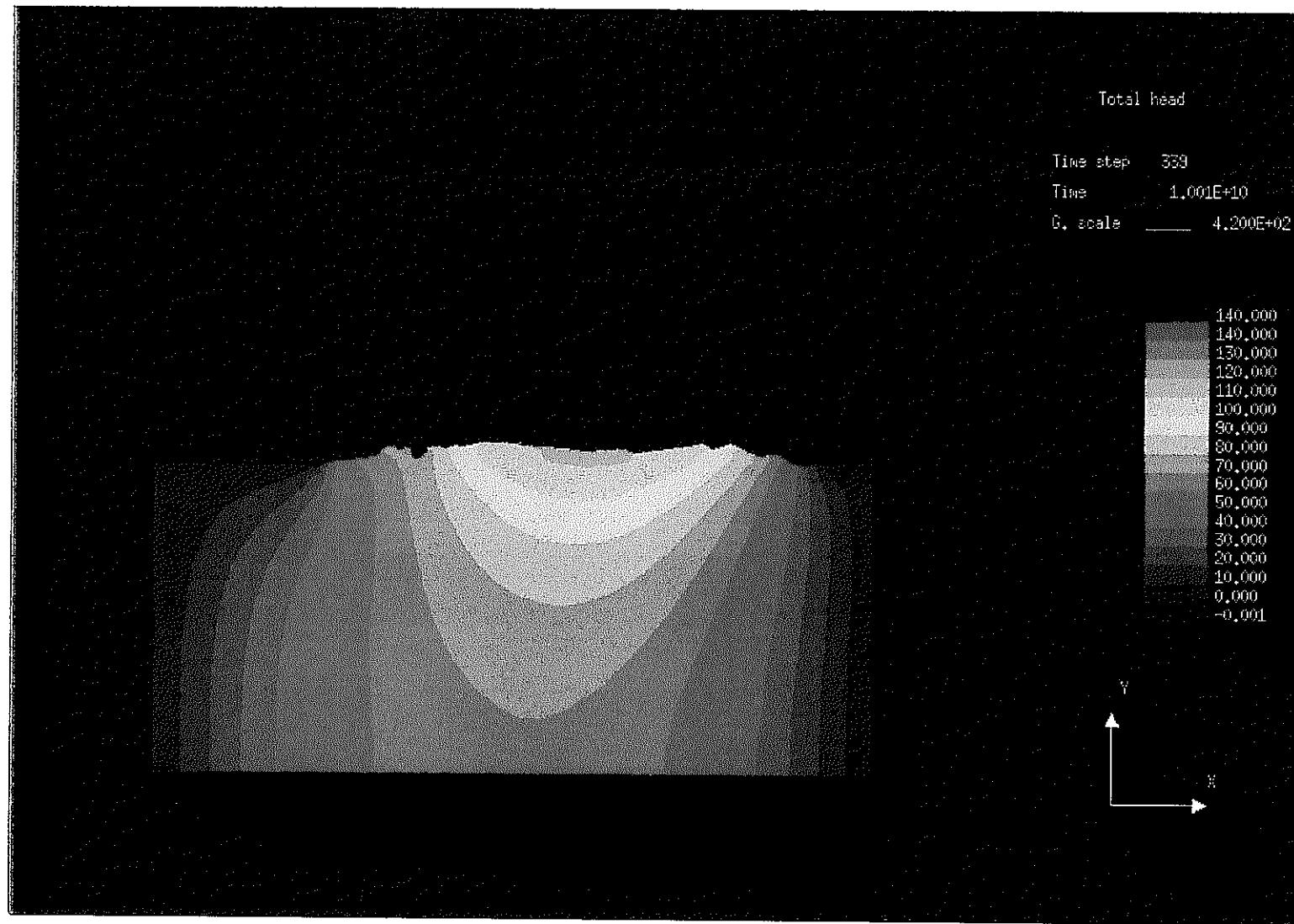


図 3-79 全水頭分布(60 日後, CASE6)

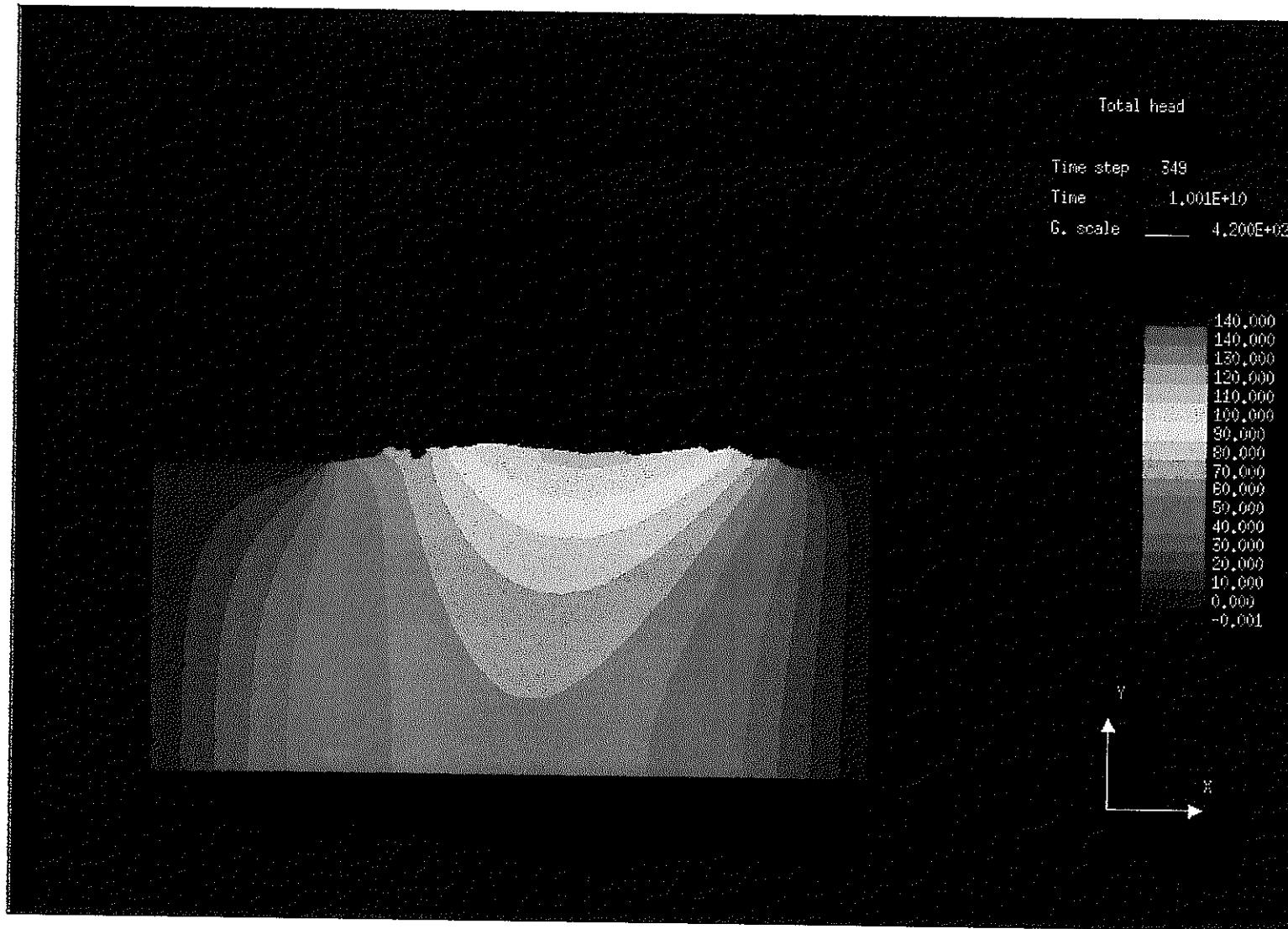
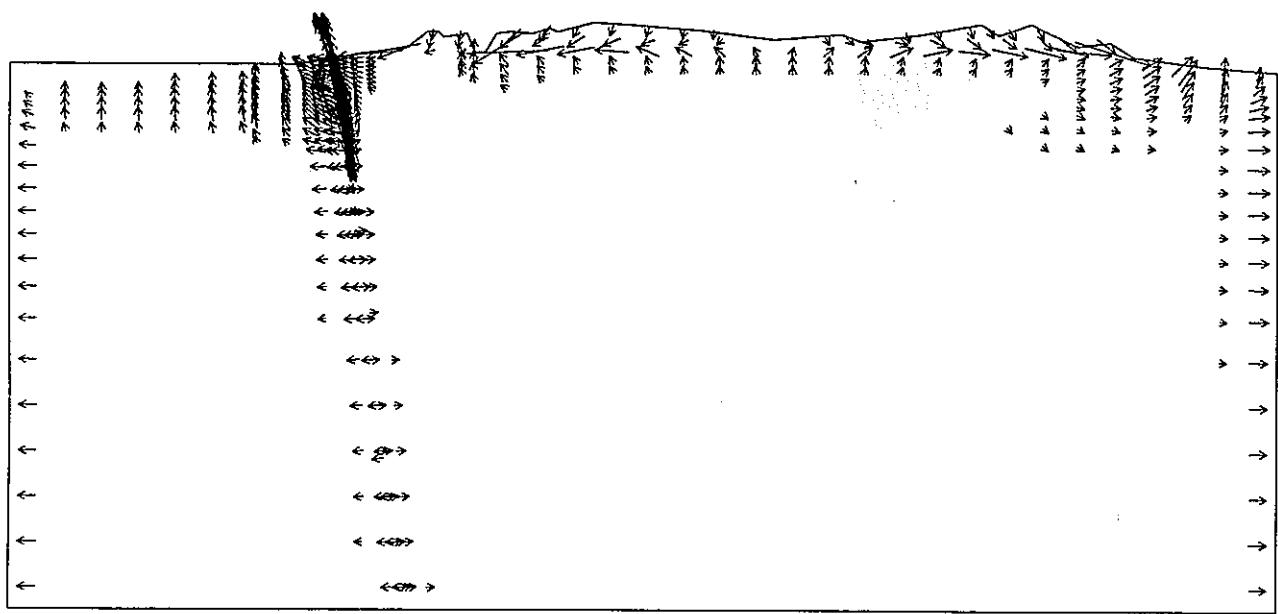
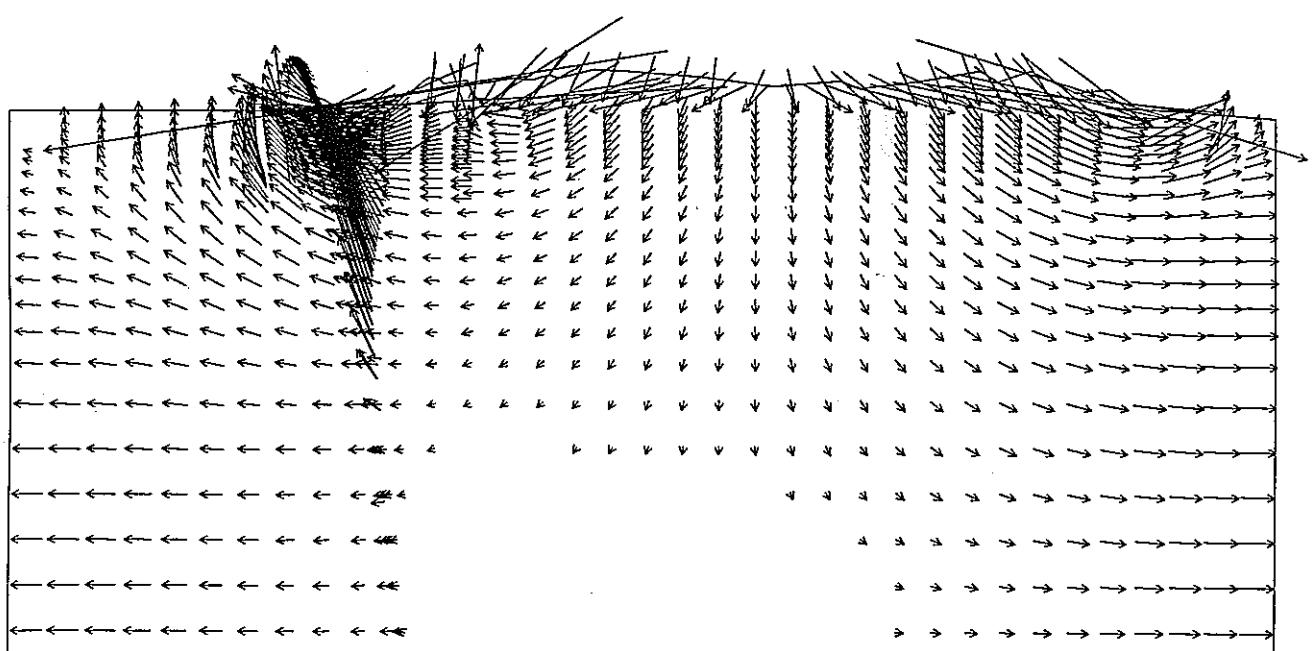


図 3-80 全水頭分布(90 日後, CASE6)



(a) 1日後

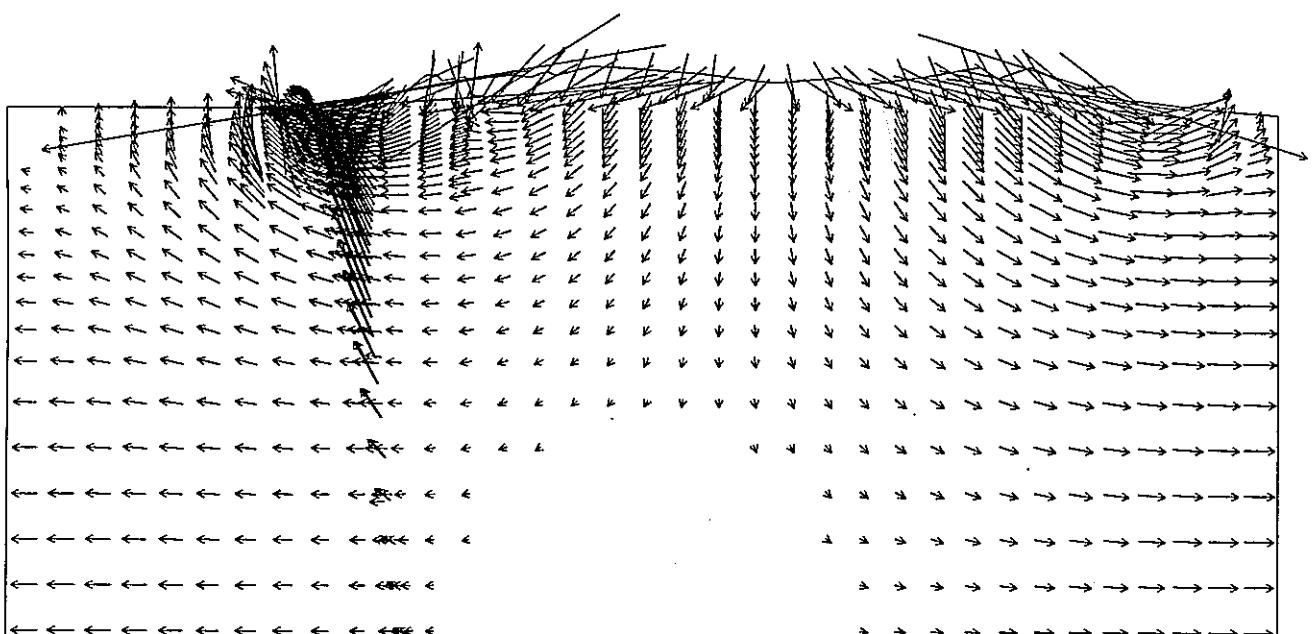
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(b) 30日後

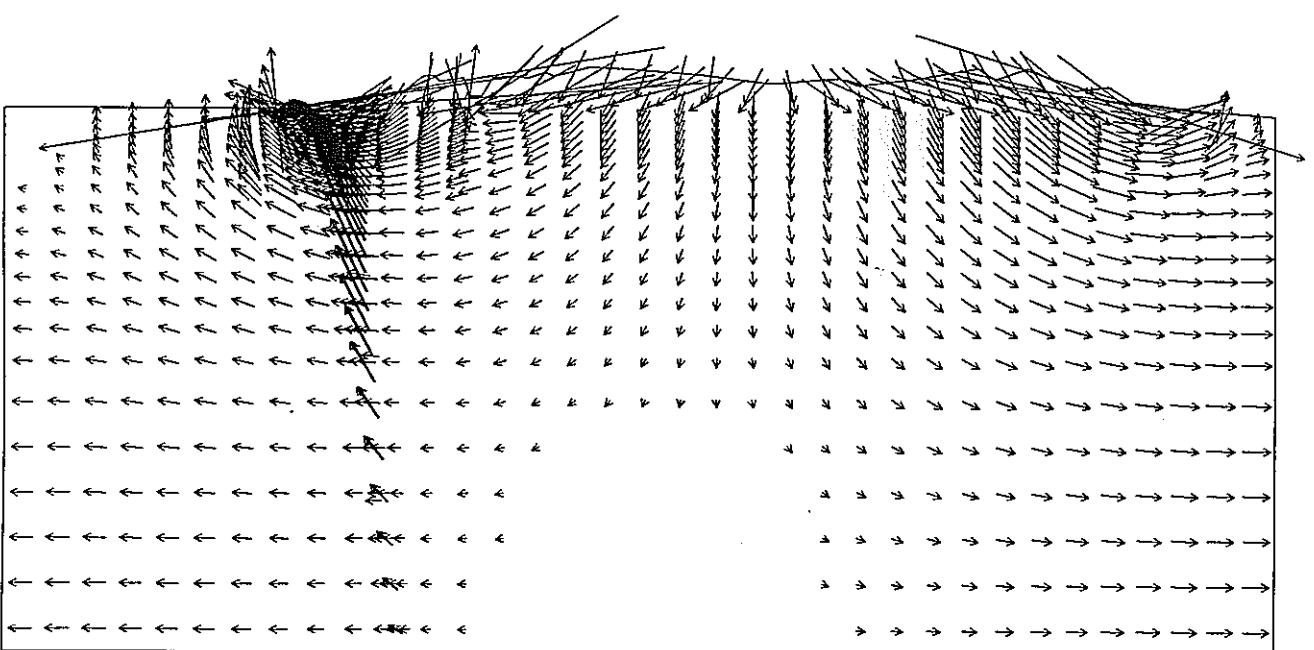
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-81 流速ベクトル(CASE6)



(c) 60 日後

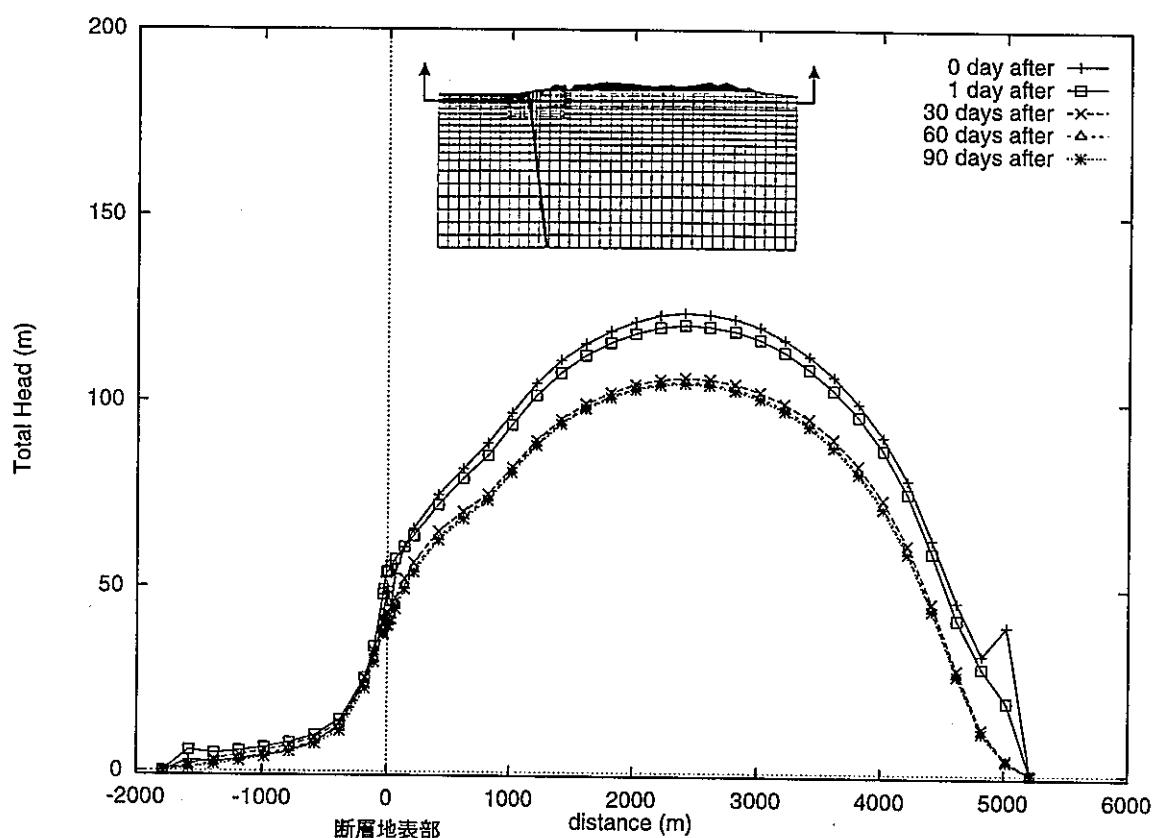
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



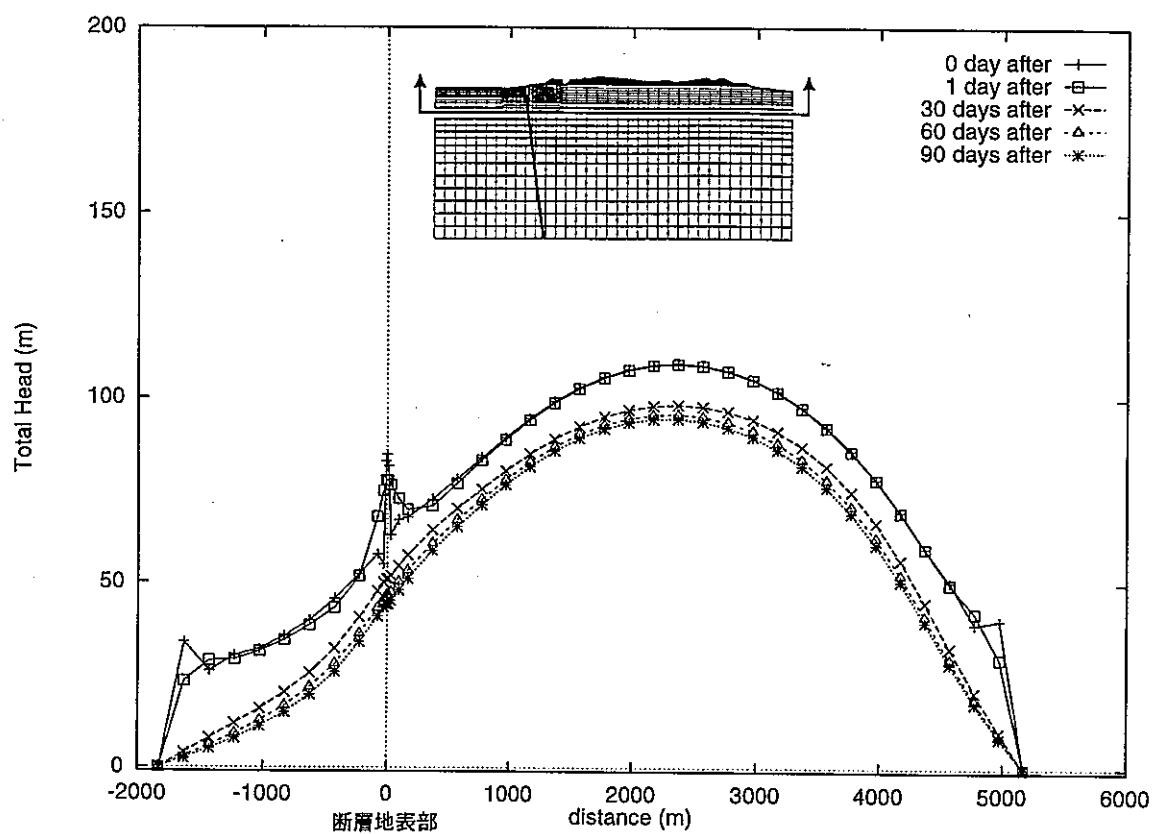
(d) 90 日後

$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-81 流速ベクトル(CASE6)

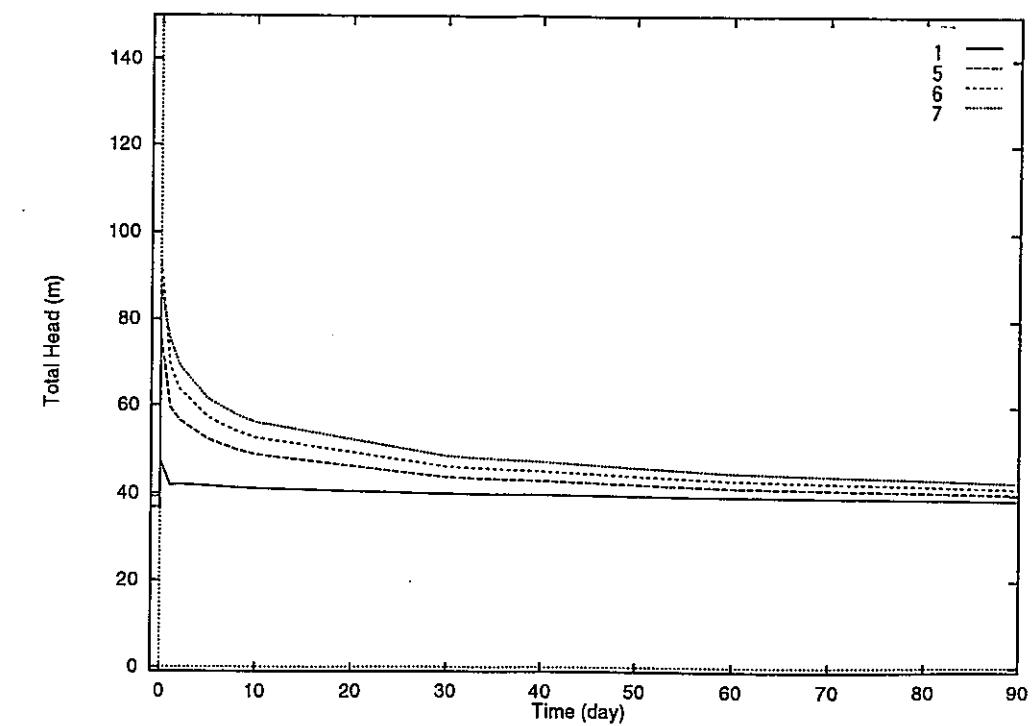
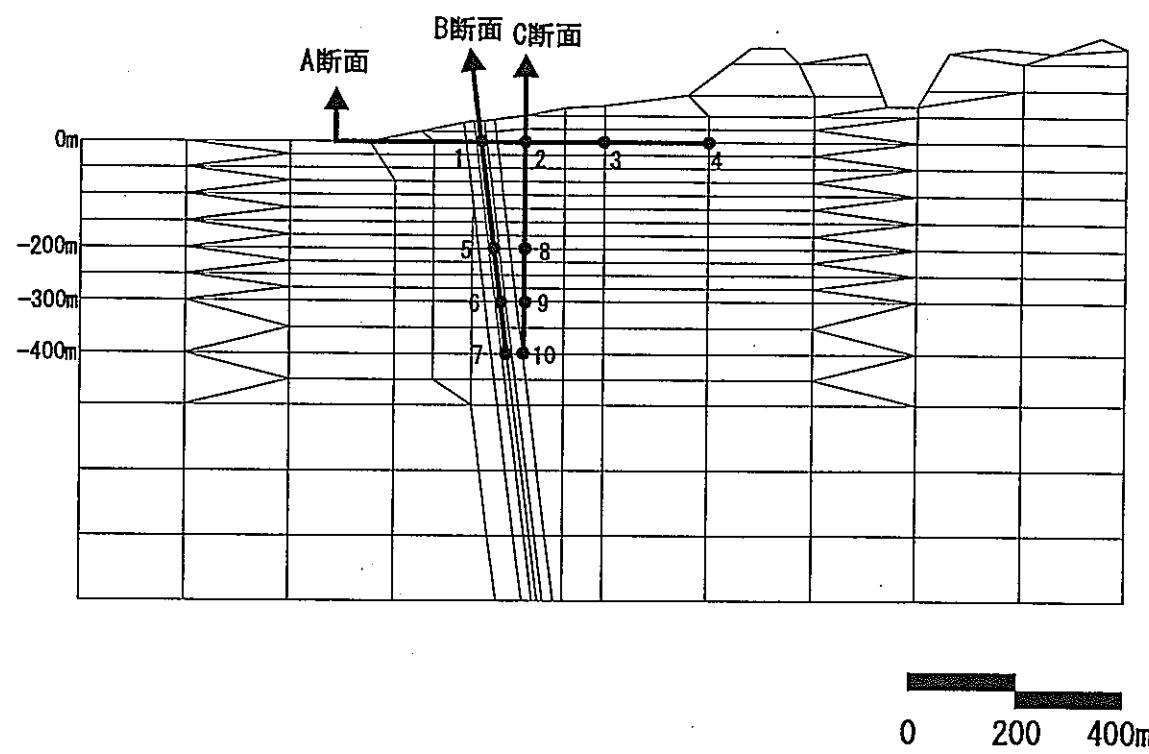


(a) EL-150m

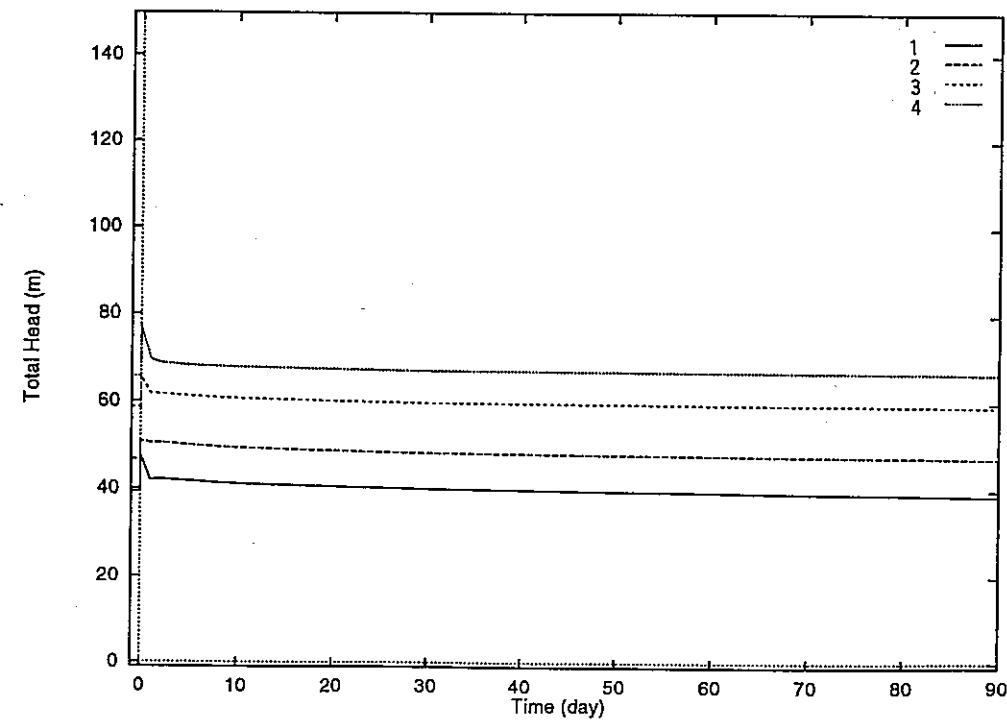


(b) EL-500m

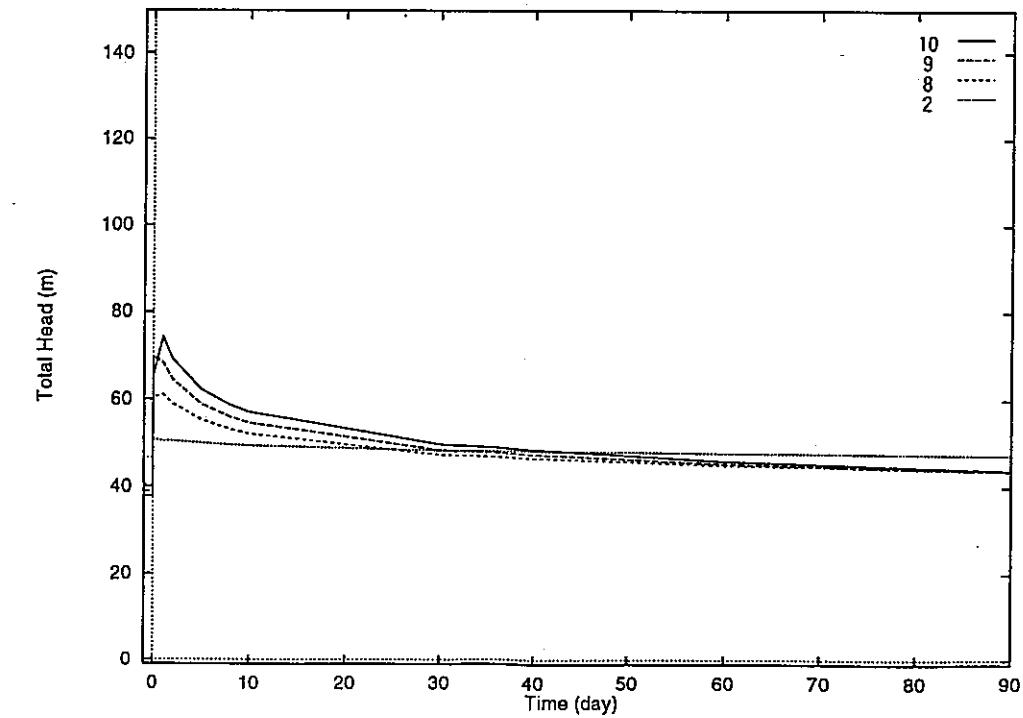
図 3-82 全水頭の空間分布(CASE6)



(b) B断面

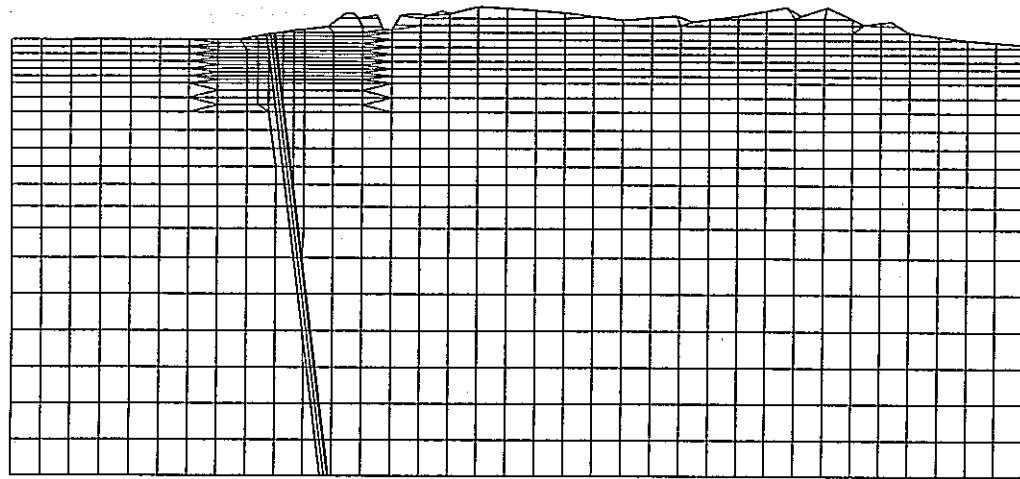


(a) A断面



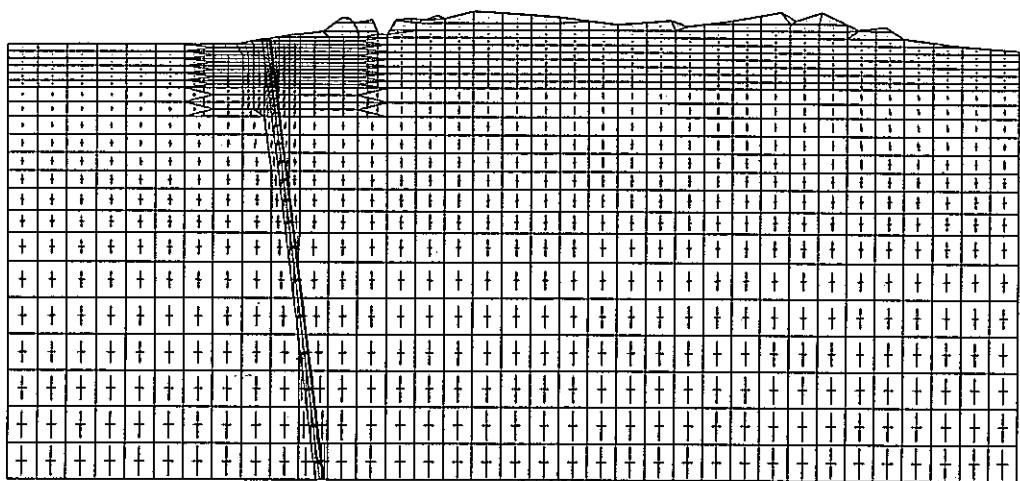
(c) C断面

図 3-83 全水頭の時間変化(CASE6)



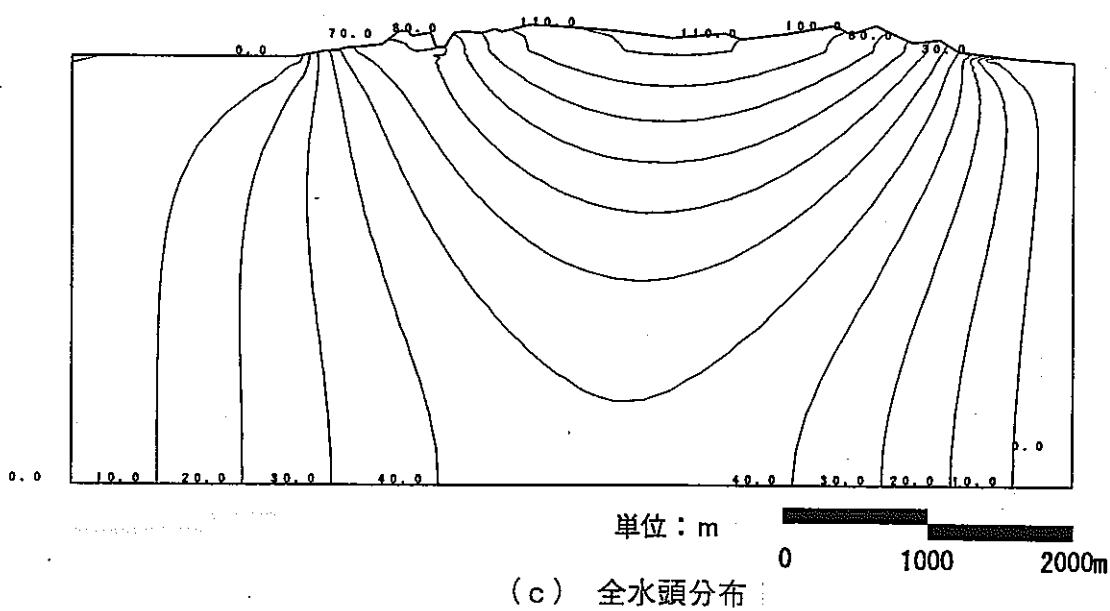
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : 1.0×10^4 t/m²

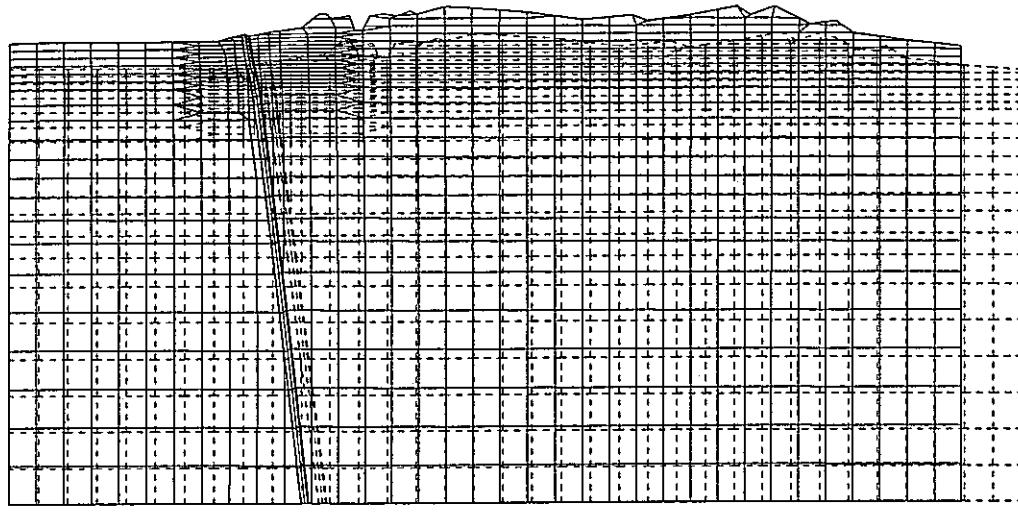


(c) 全水頭分布

単位 : m

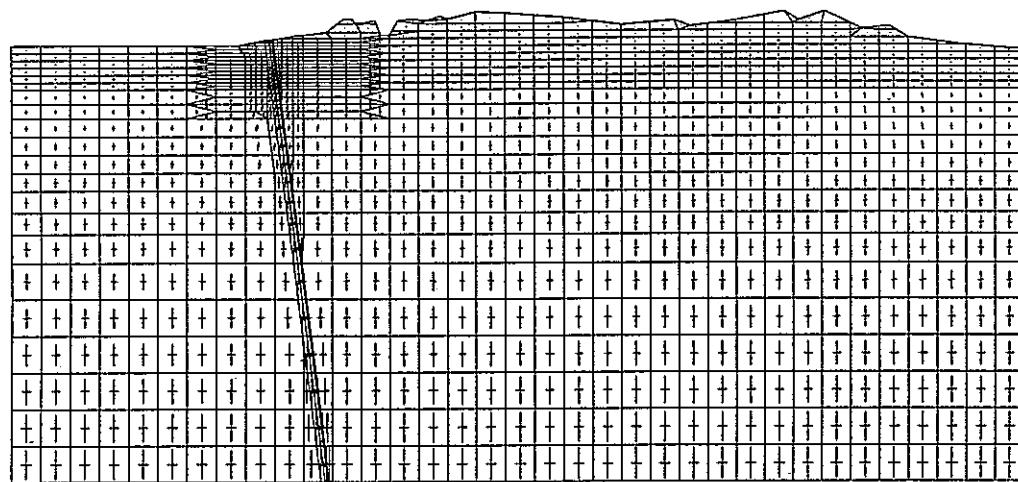
0 1000 2000m

図 3-84 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE7)



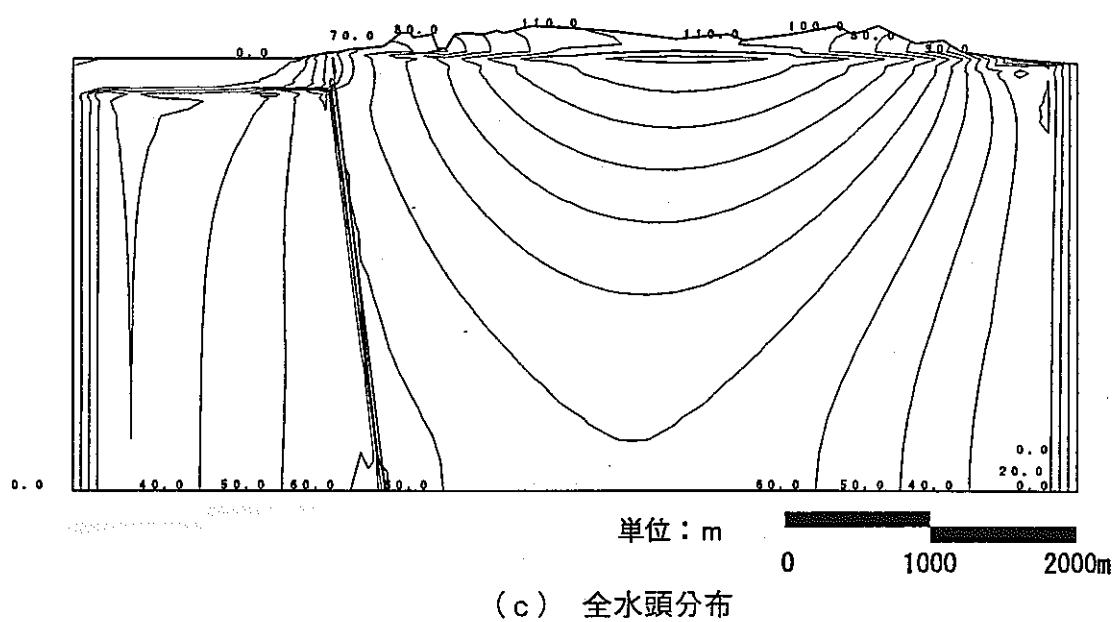
(a) 変形図

— : 0.2m



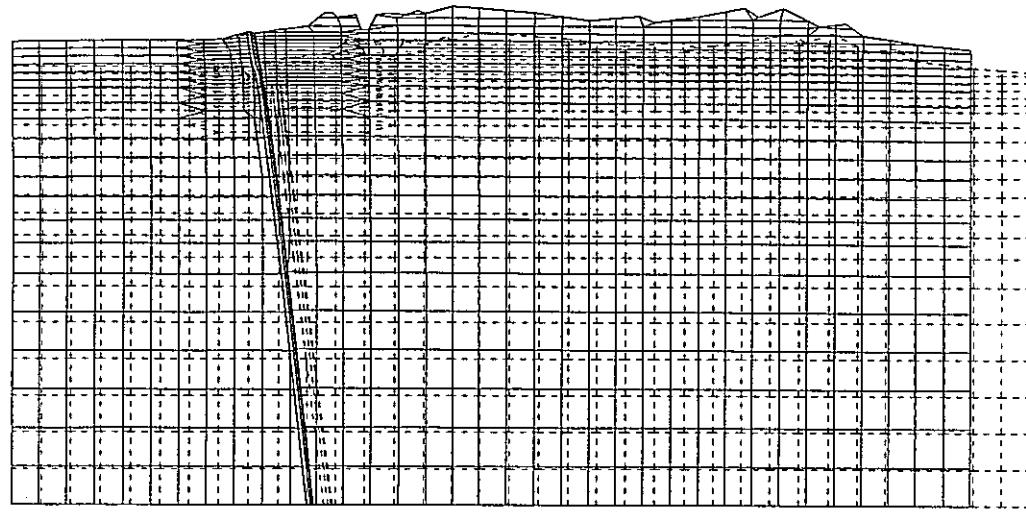
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

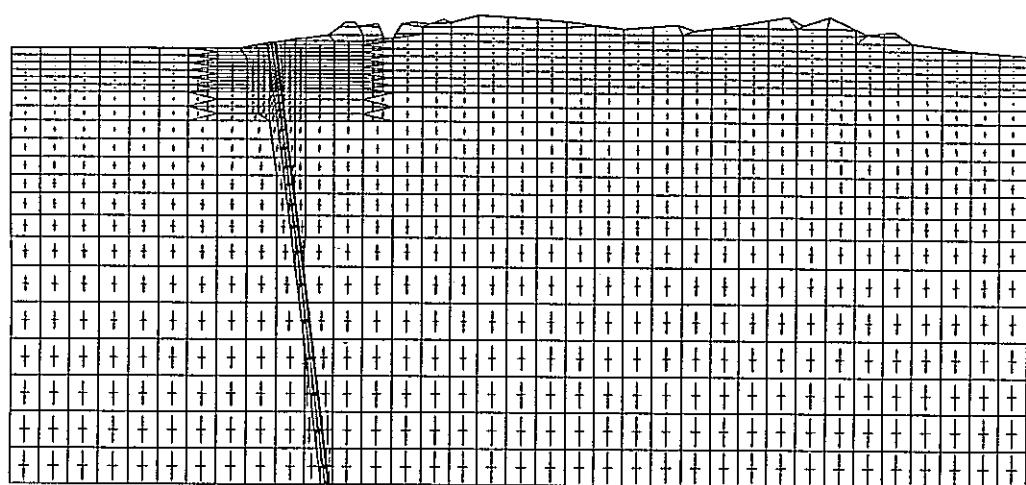


(c) 全水頭分布

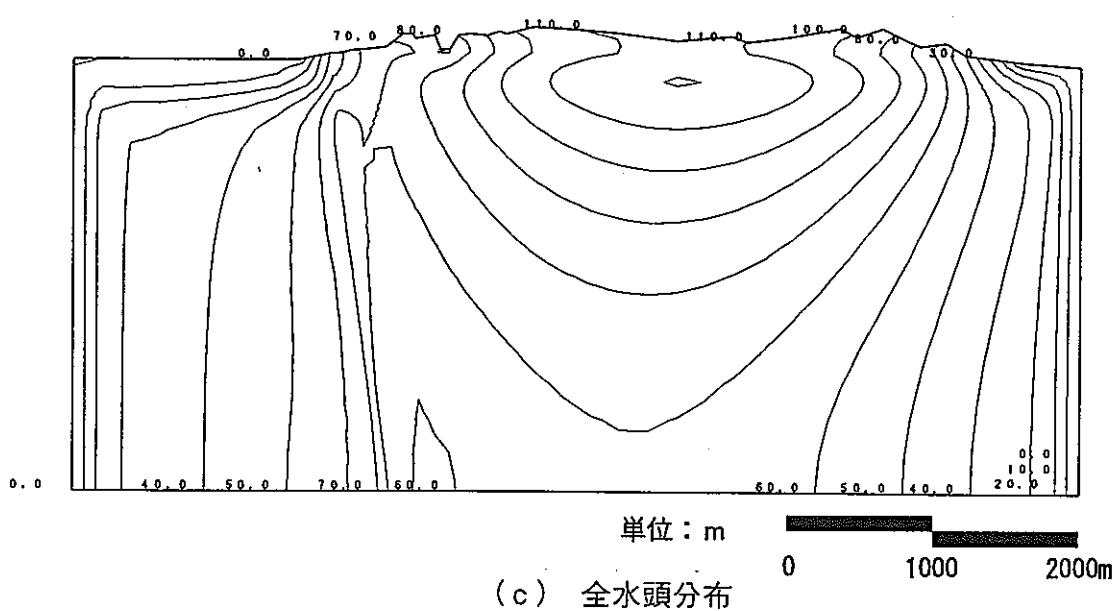
図 3-85 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE7)



(a) 変形図

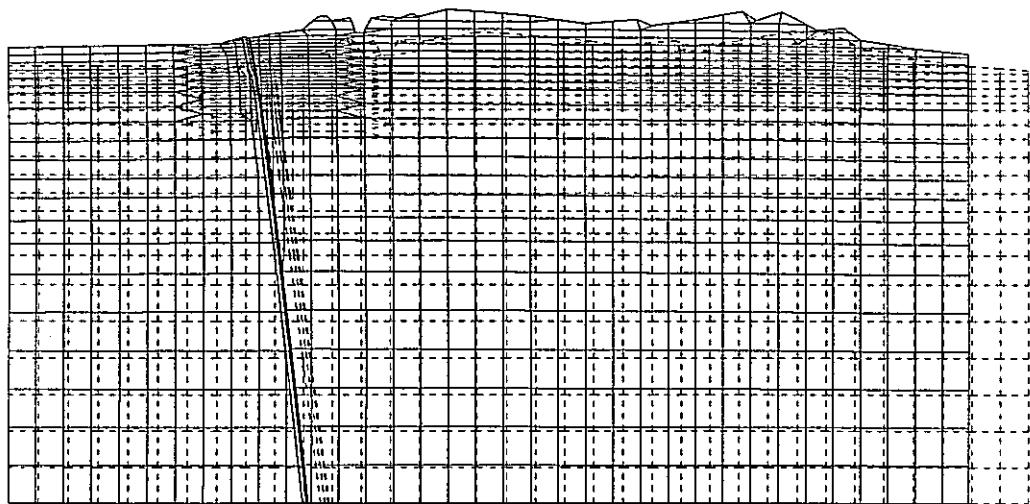


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



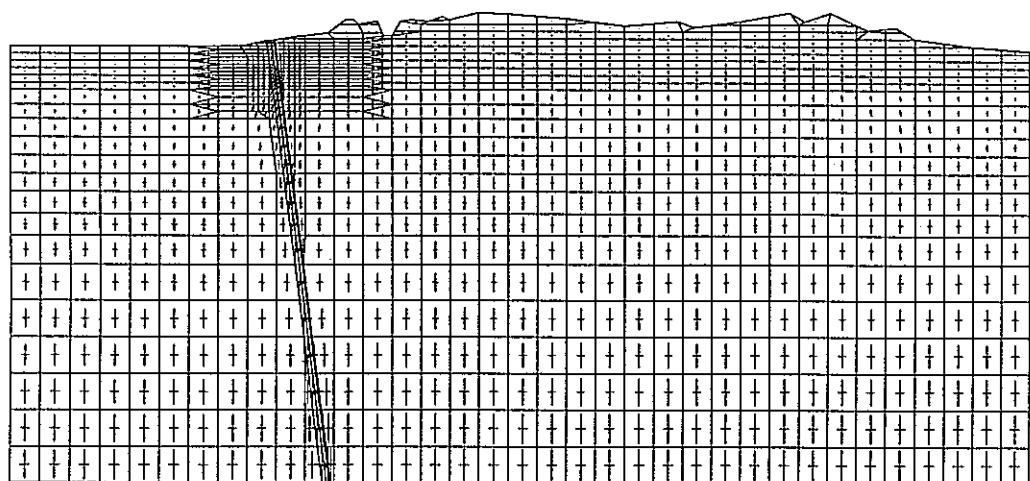
(c) 全水頭分布

図 3-86 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE7)



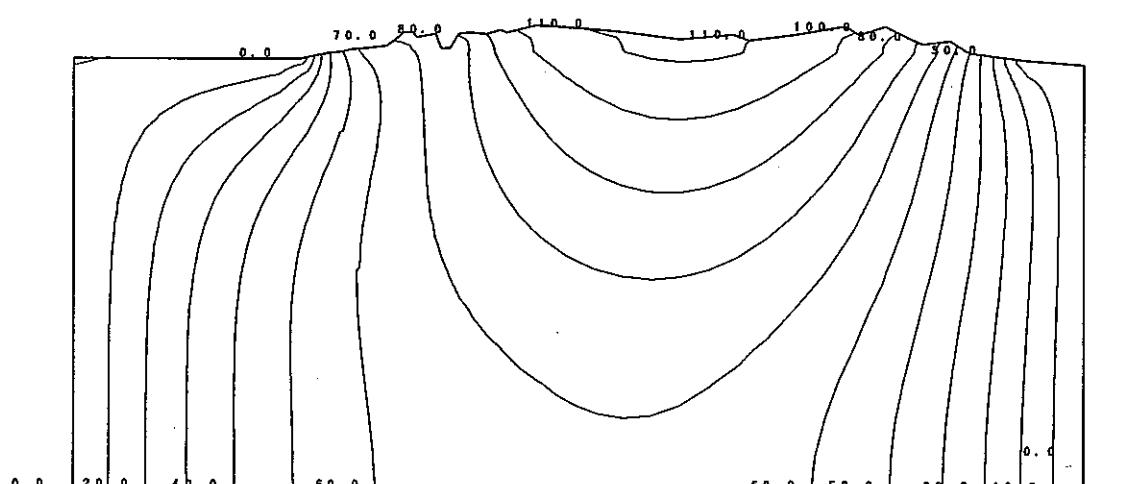
(a) 変形図

— :0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : 1.0×10^4 t/m²

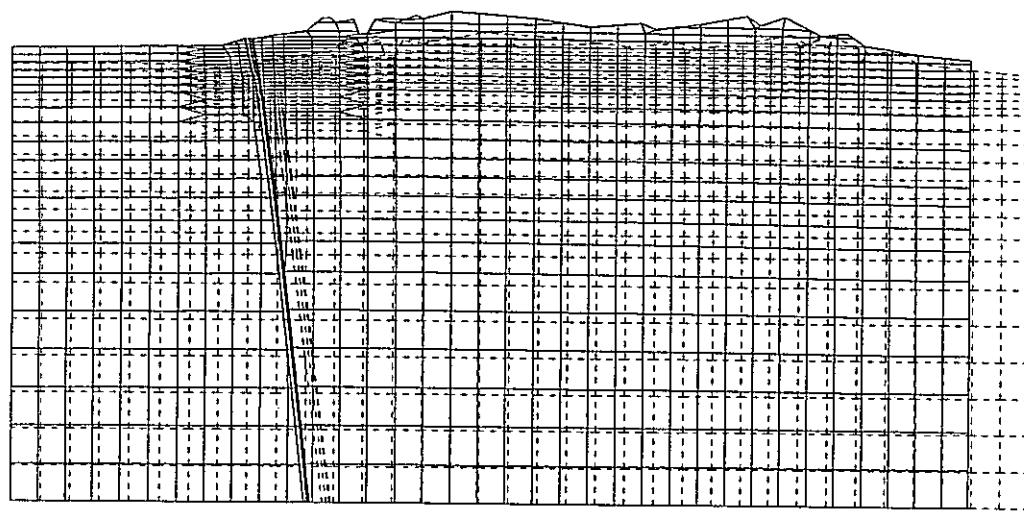


(c) 全水頭分布

単位: m

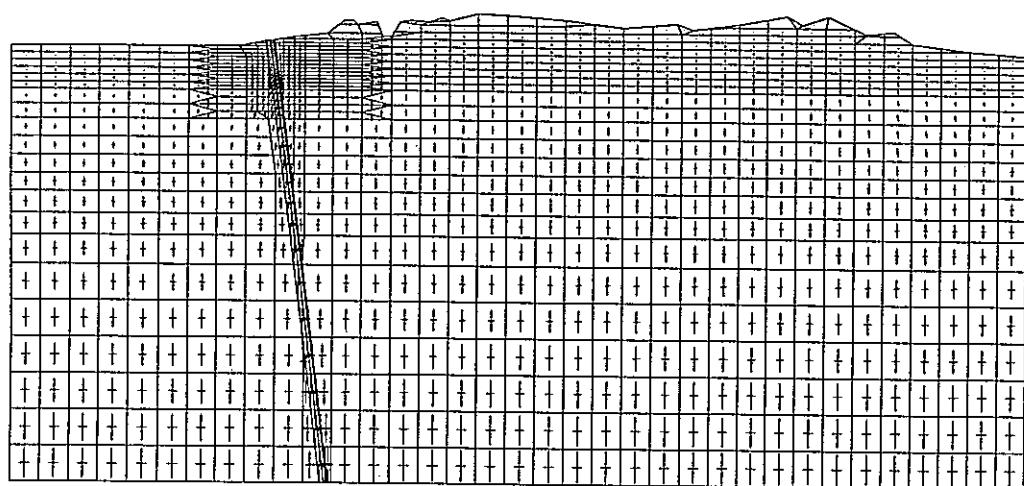
0 1000 2000m

図 3-87 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE7)



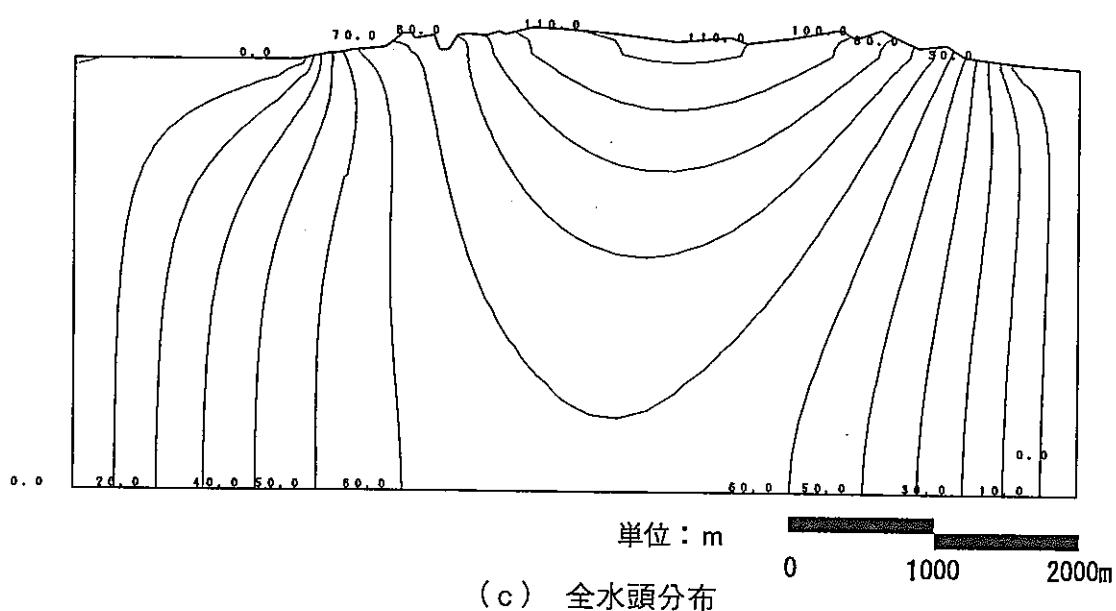
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

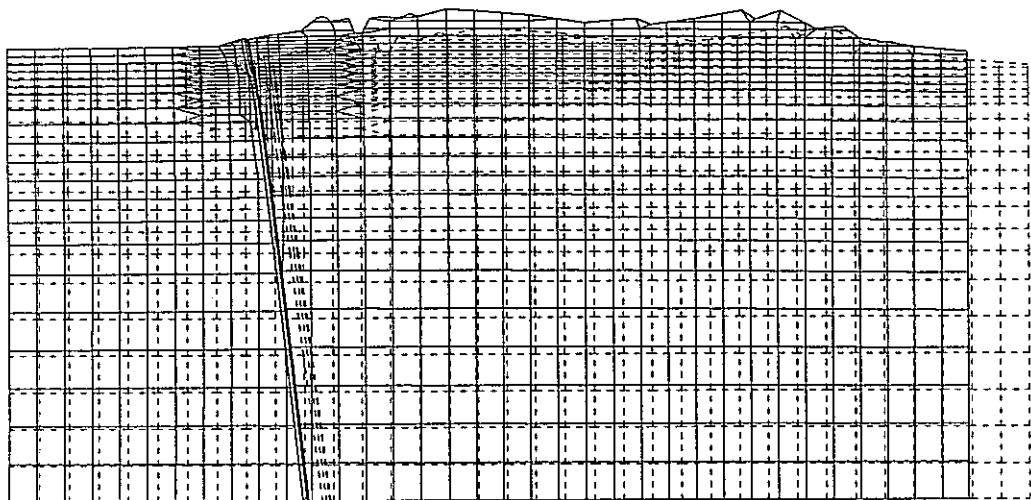


(c) 全水頭分布

単位 : m

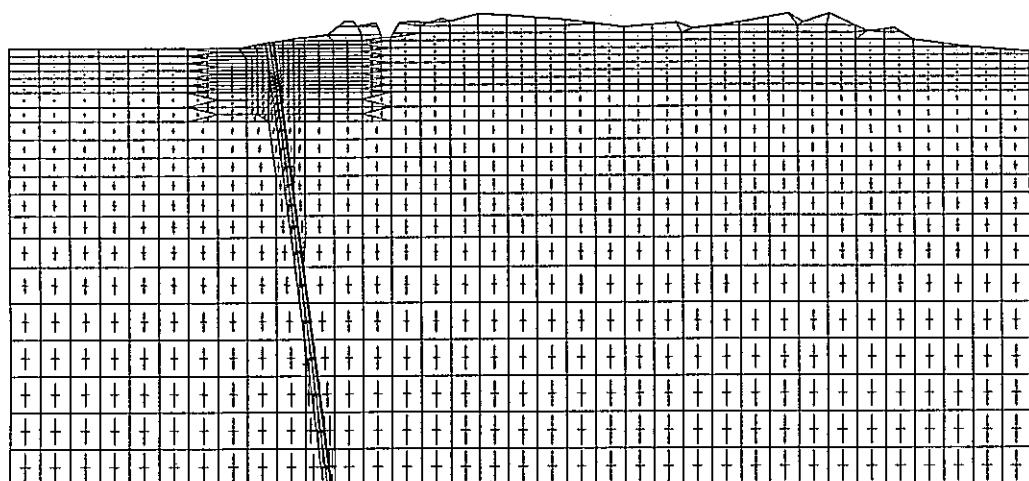
0 1000 2000m

図 3-88 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE7)



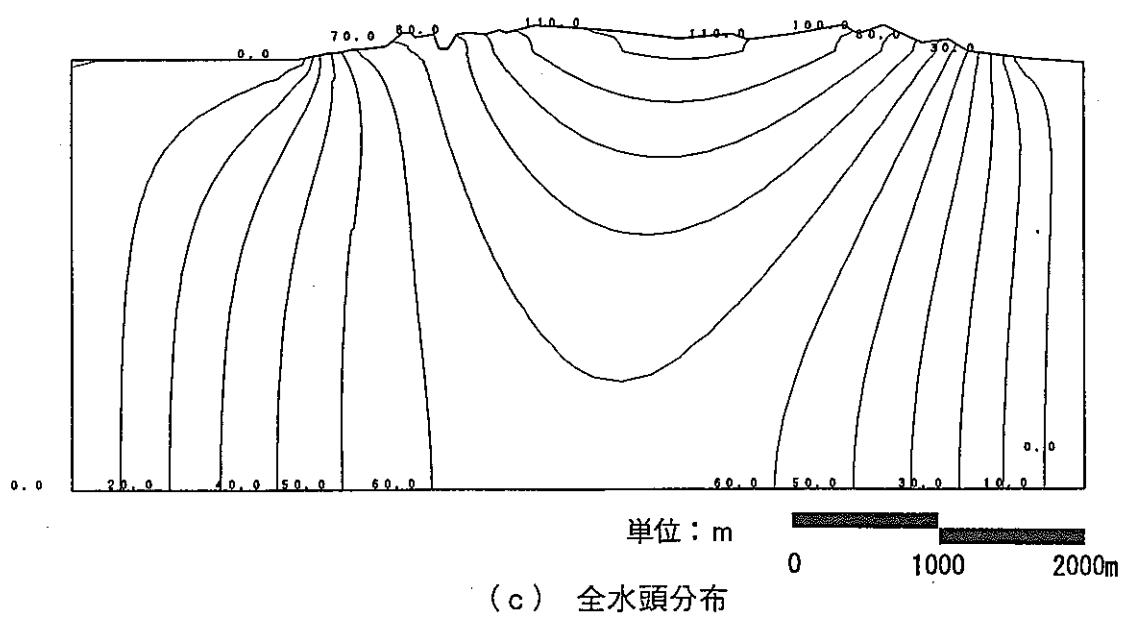
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : 1.0×10^4 t/m²

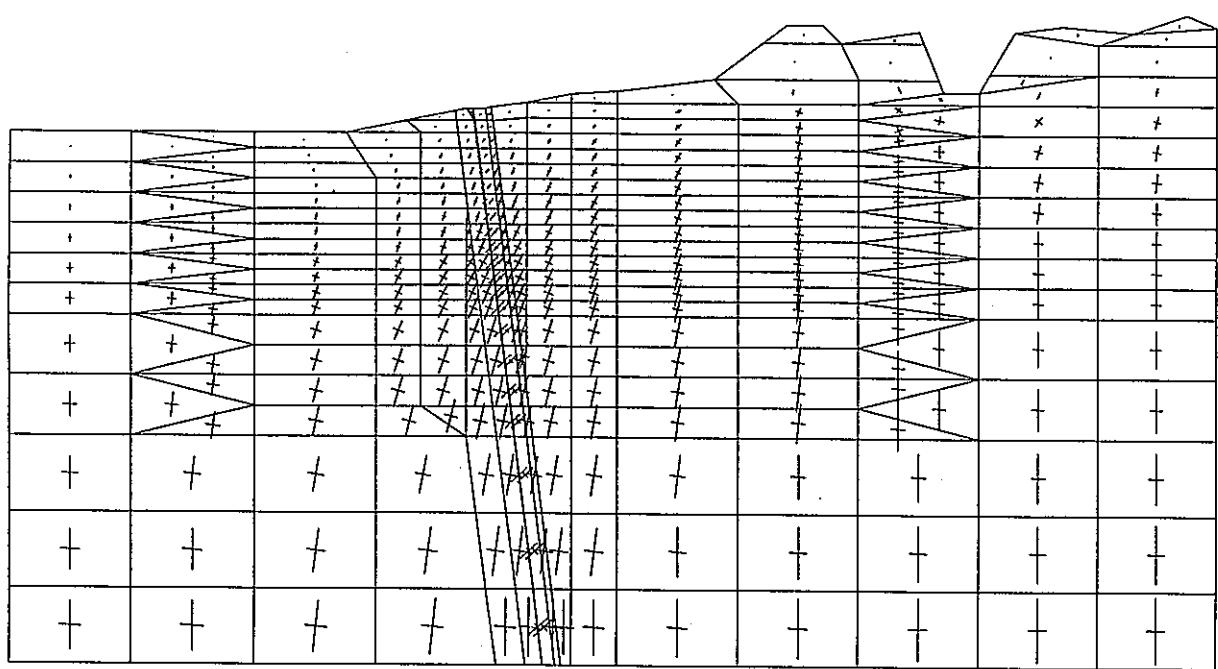


(c) 全水頭分布

単位 : m

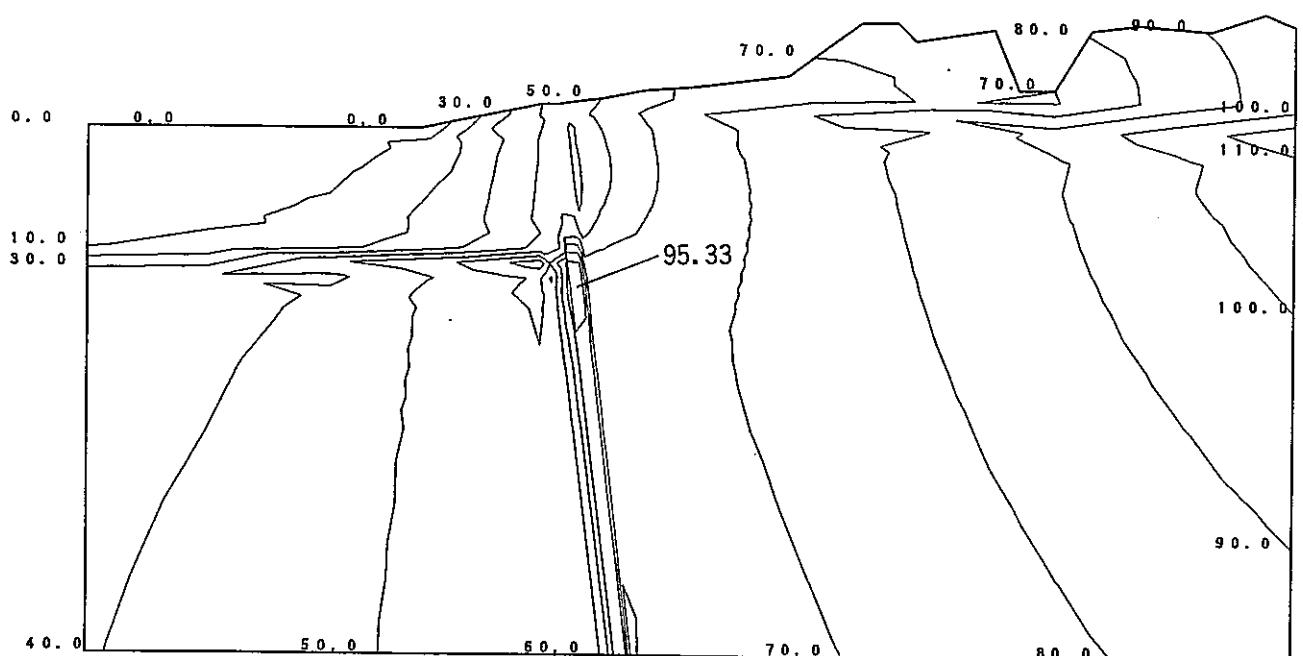
0 1000 2000m

図 3-89 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE7)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

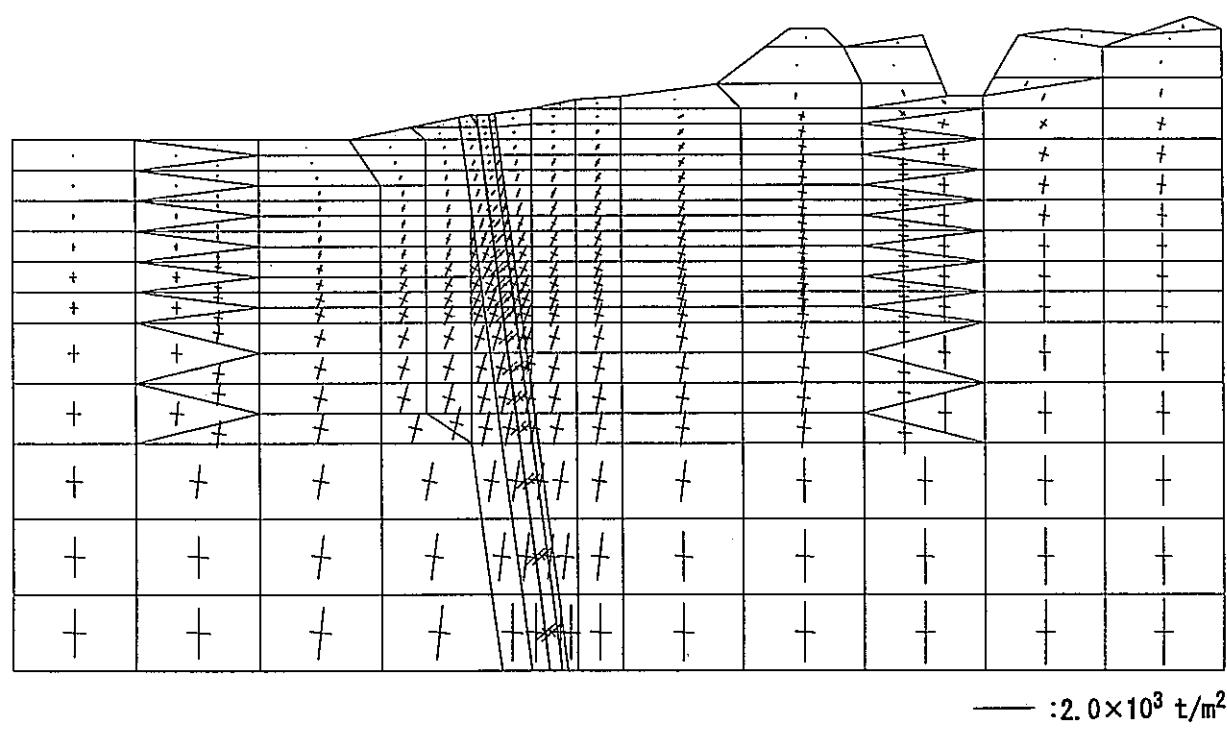


(b) 全水頭分布

単位: m

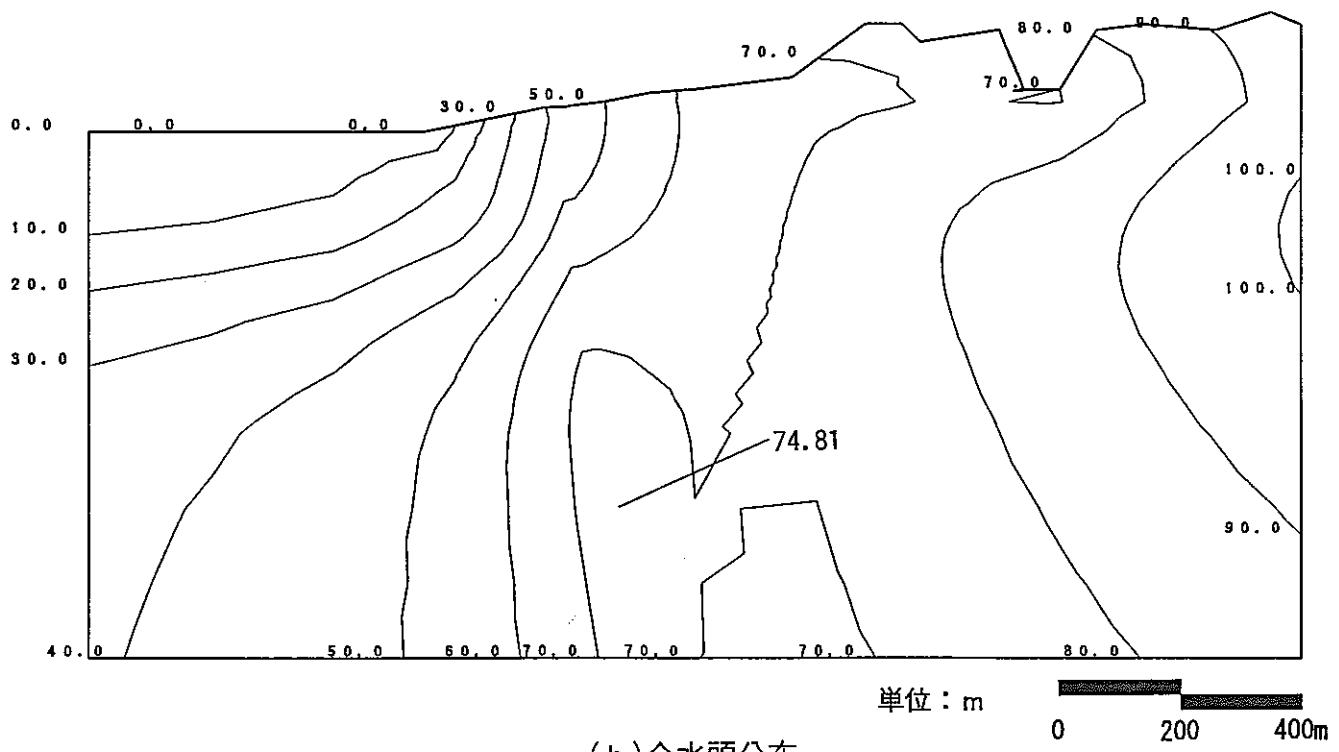
0 200 400m

図 3-90 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後,CASE7)



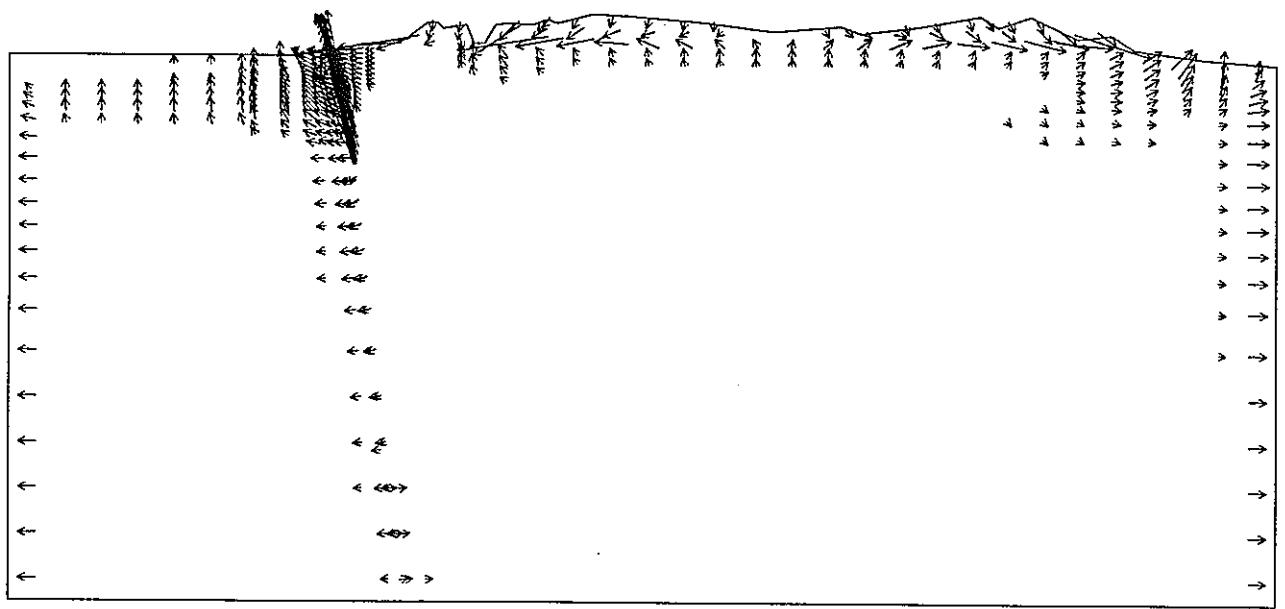
(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$



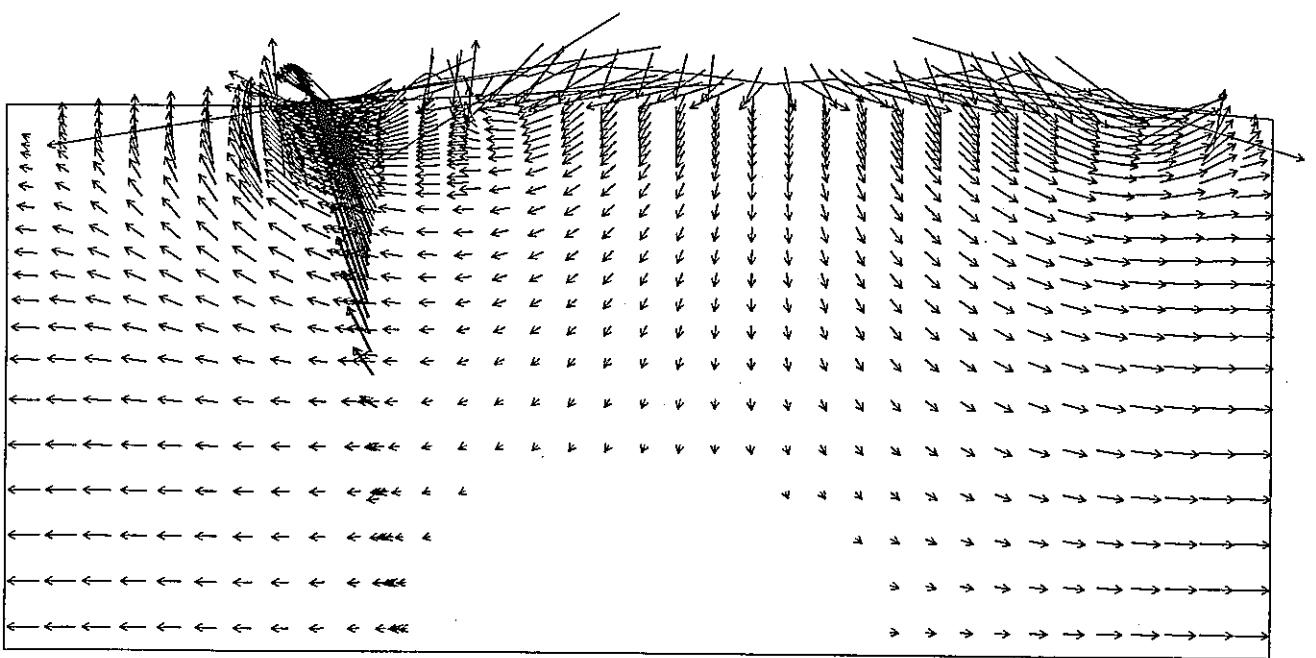
(b) 全水頭分布

図 3-91 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE7)



(a) 1日後

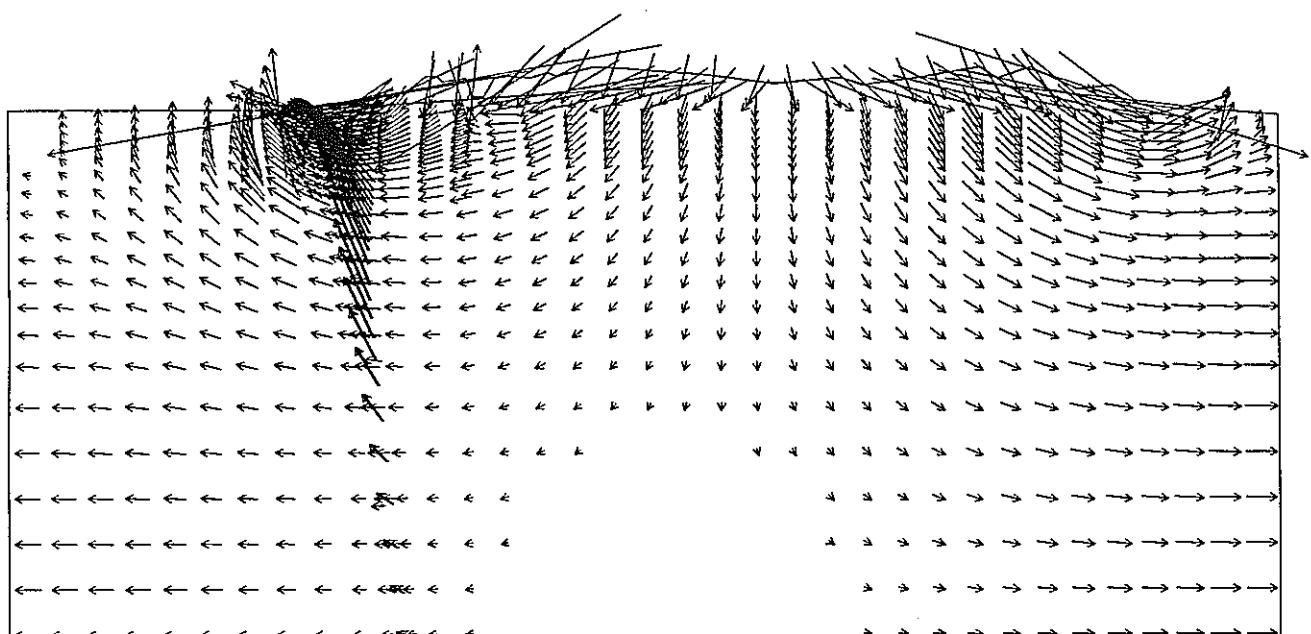
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(b) 30日後

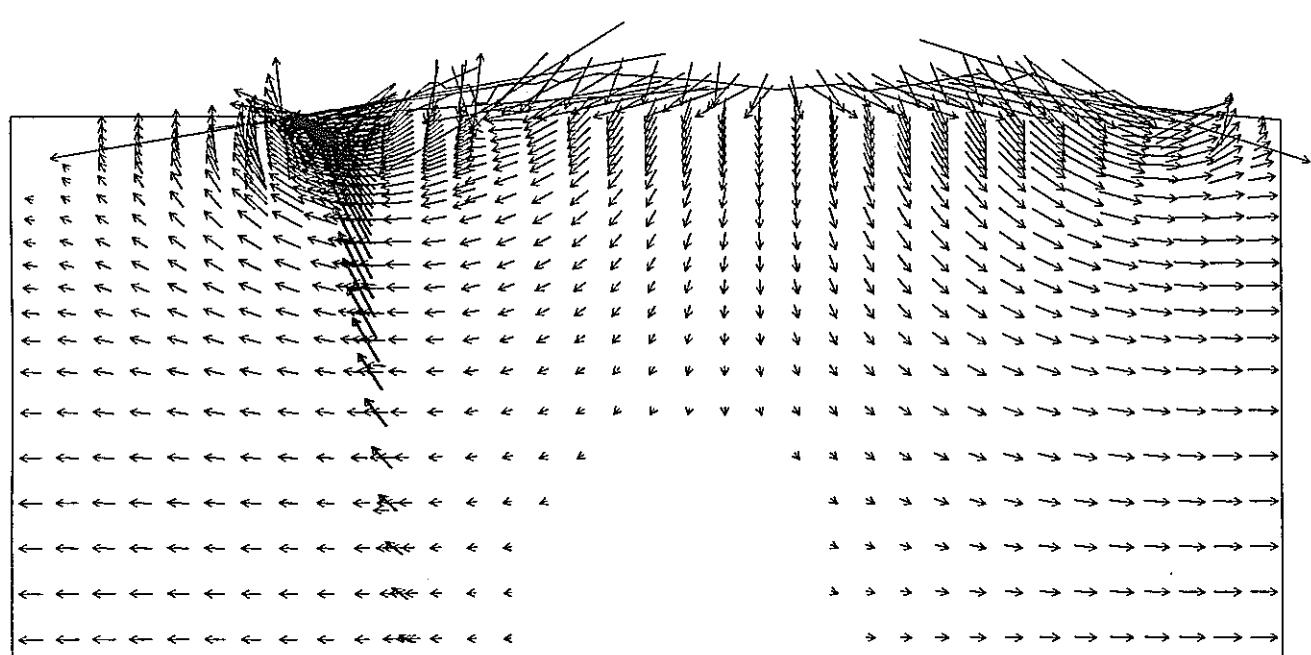
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-92 流速ベクトル(CASE7)



(c) 60 日後

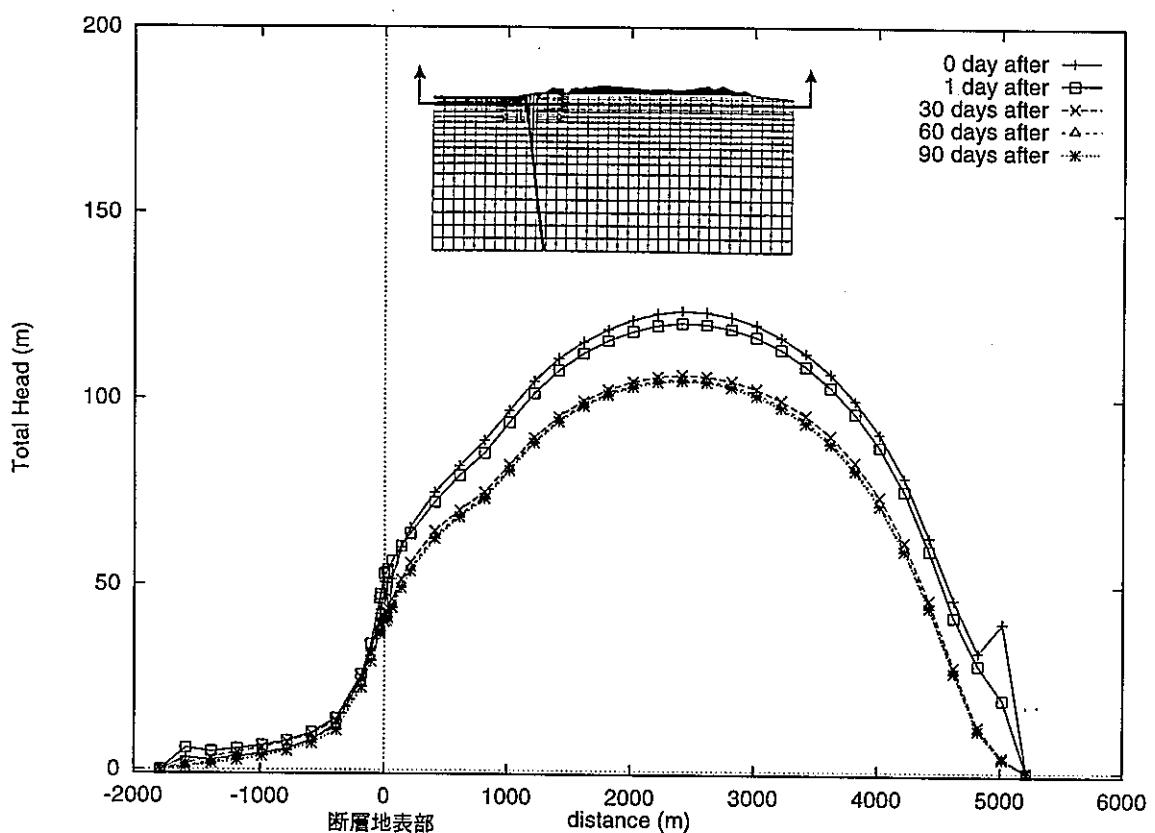
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



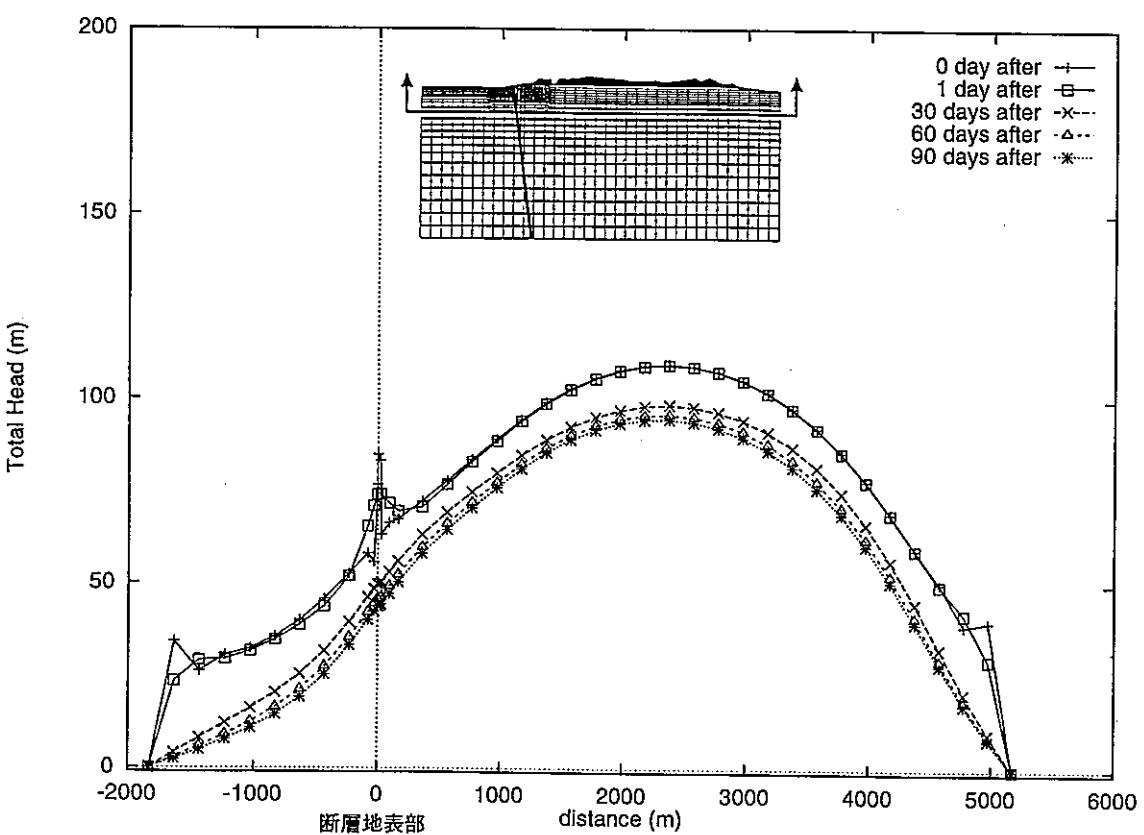
(d) 90 日後

$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-92 流速ベクトル(CASE7)



(a) EL-150m



(b) EL-500m

図 3-93 全水頭の空間分布(CASE7)

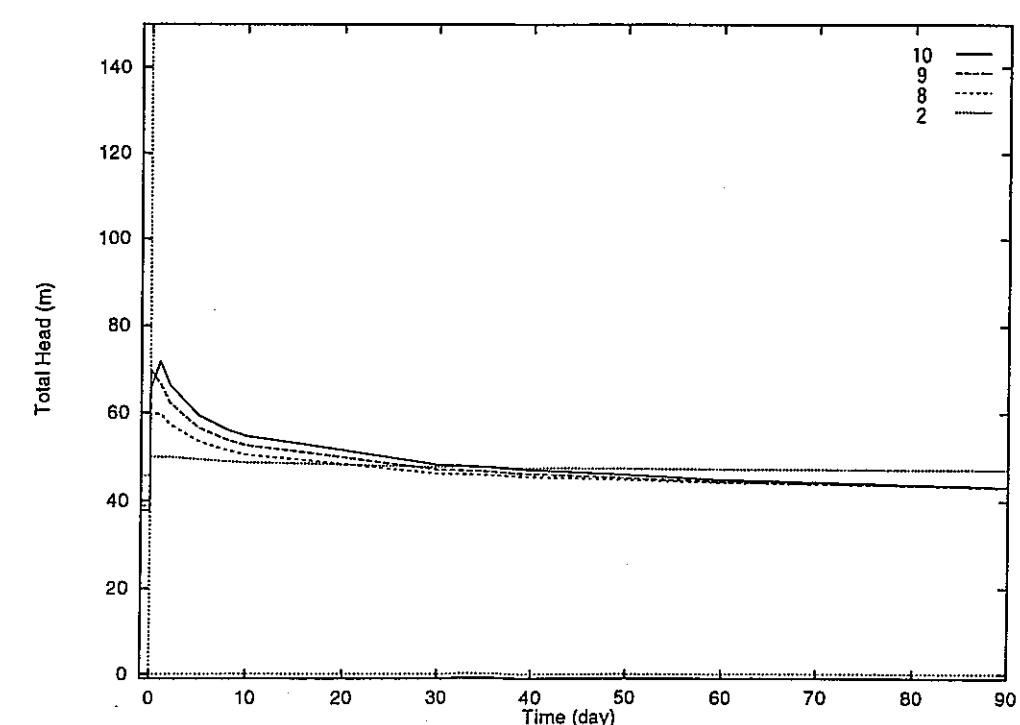
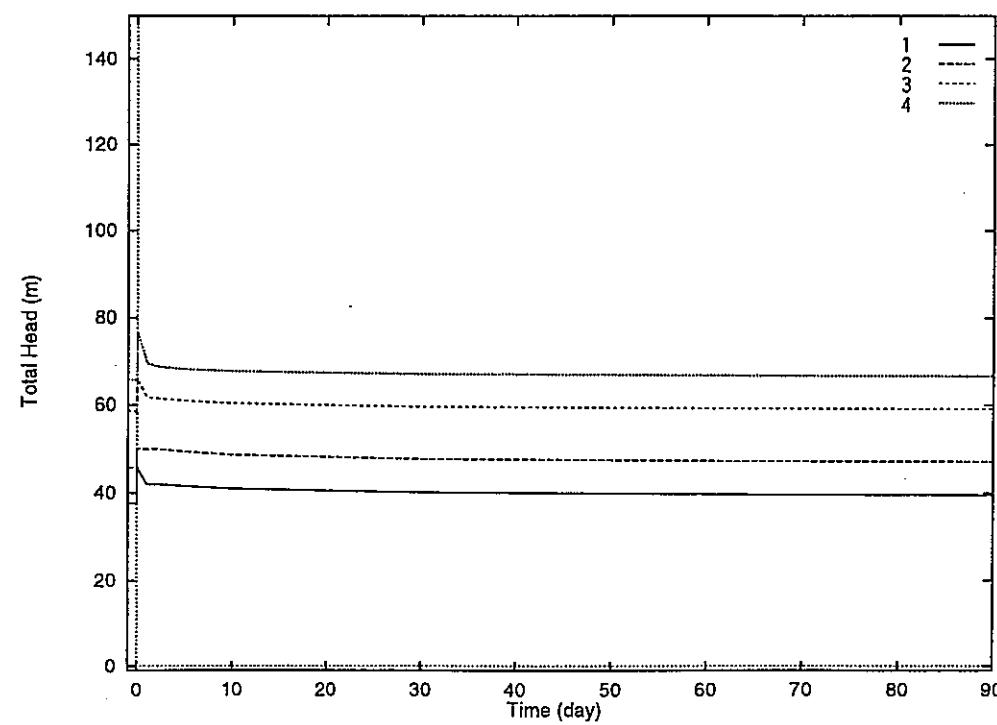
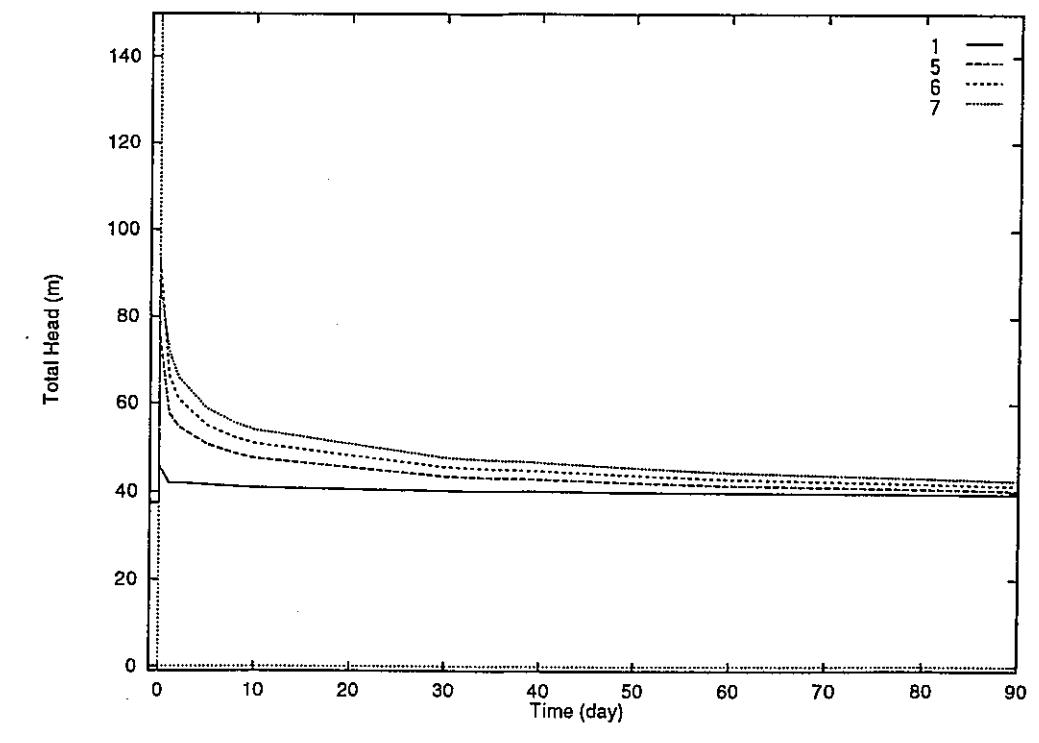
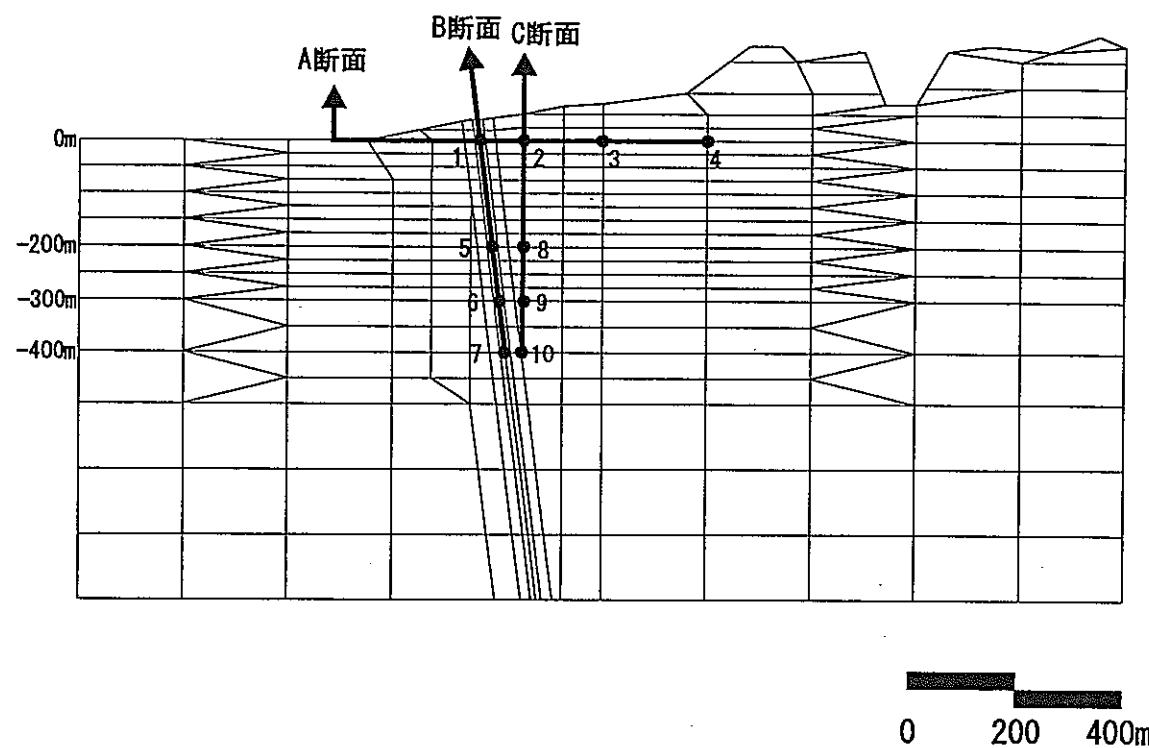
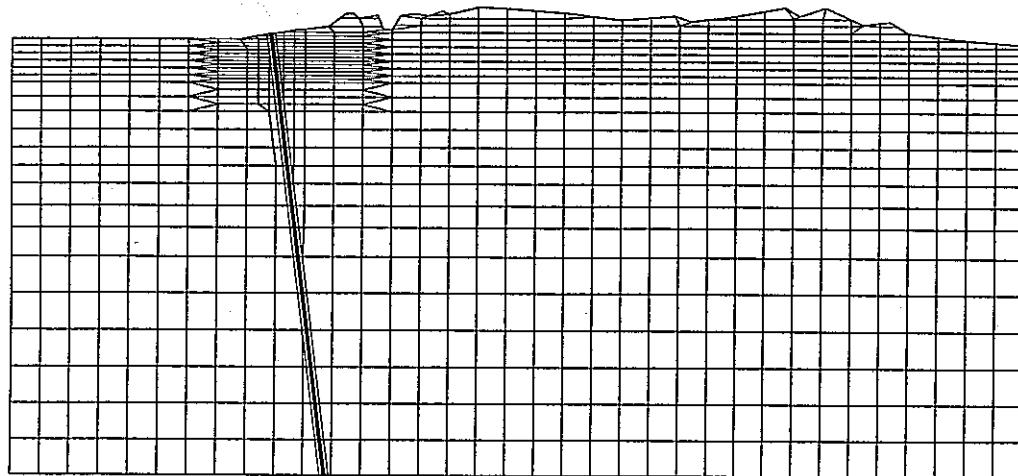
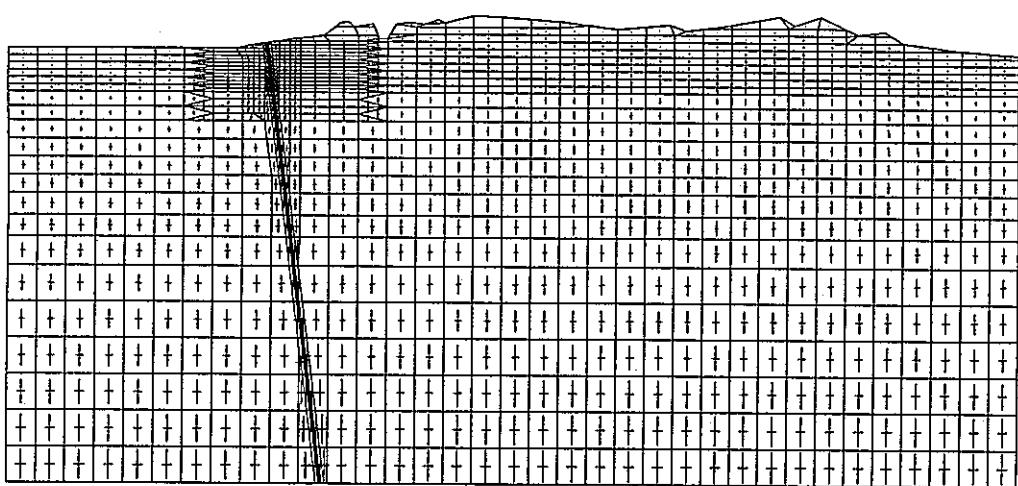


図 3-94 全水頭の時間変化(CASE7)



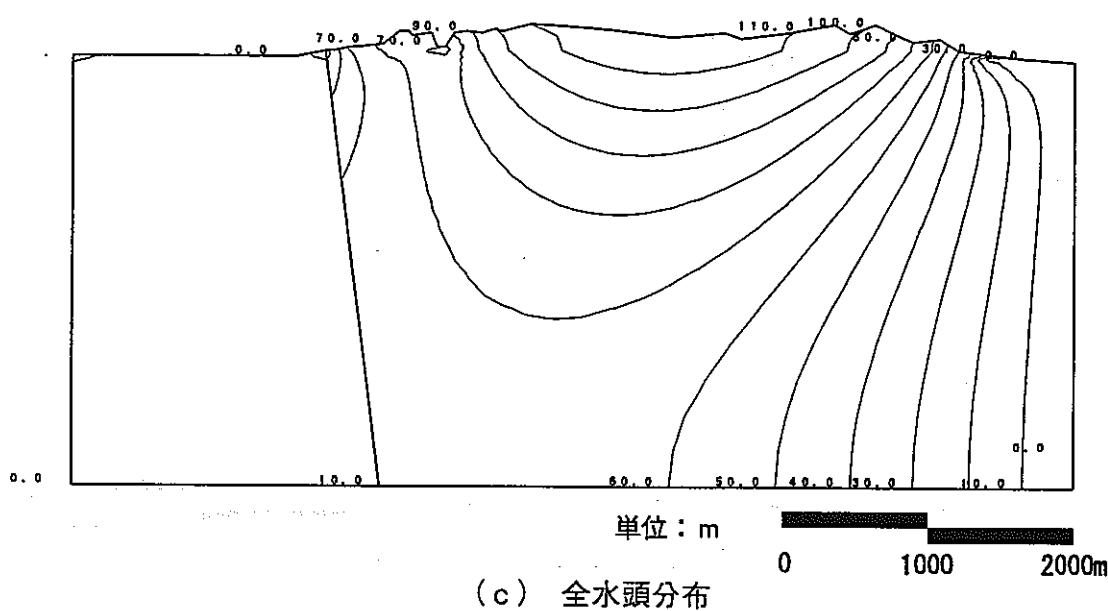
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

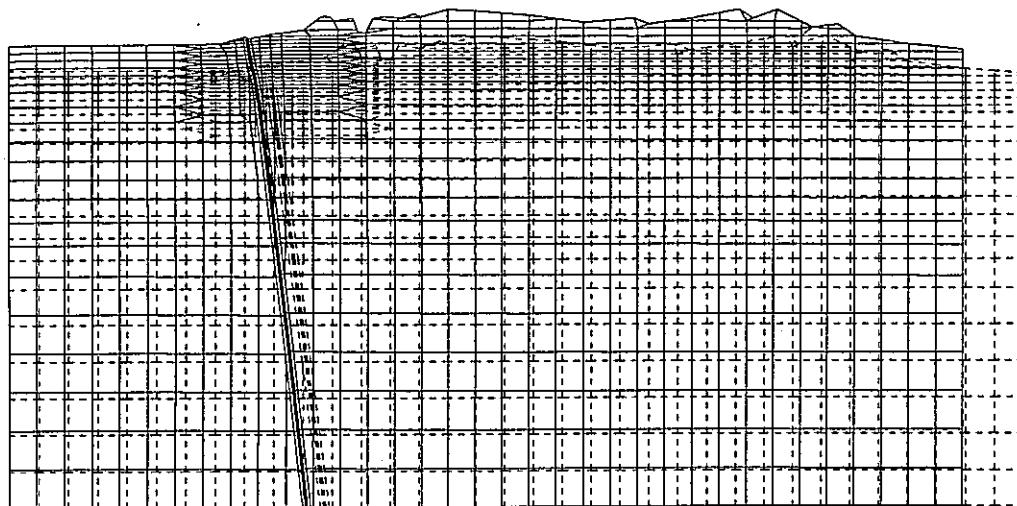


(c) 全水頭分布

単位 : m

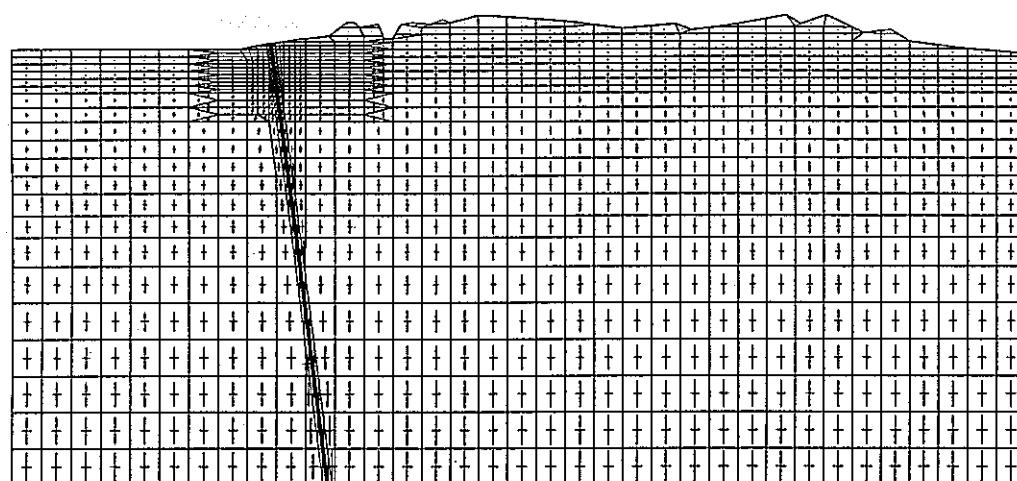
0 1000 2000m

図 3-95 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE8)



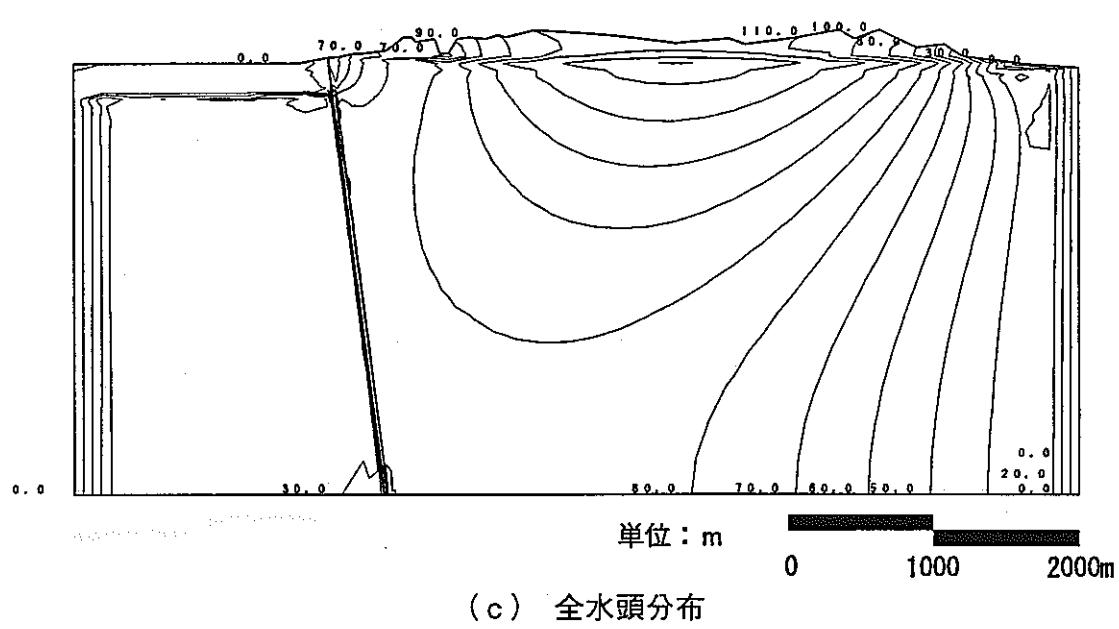
(a) 変形図

— : 0.2m



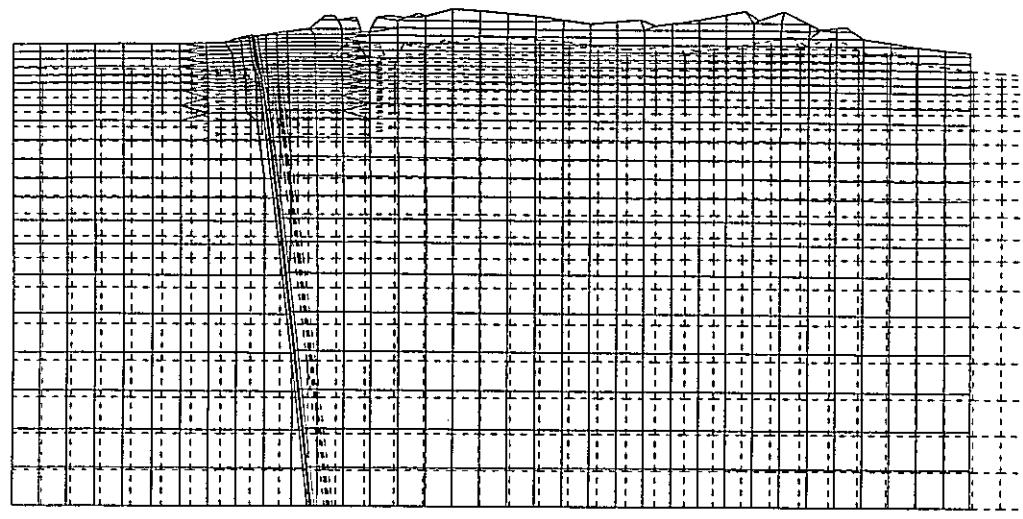
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

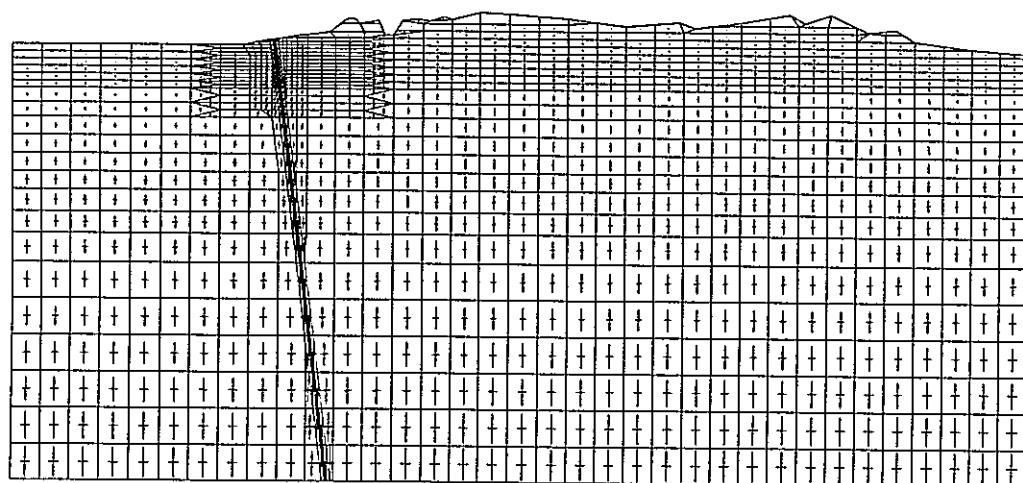


(c) 全水頭分布

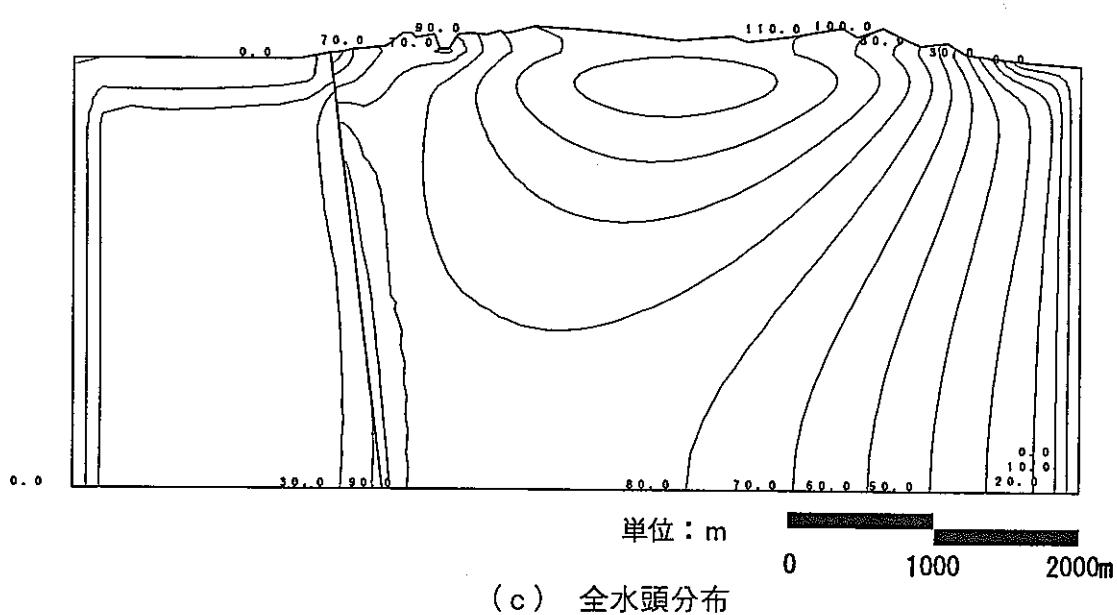
図 3-96 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE8)



(a) 変形図 — : 0.2m

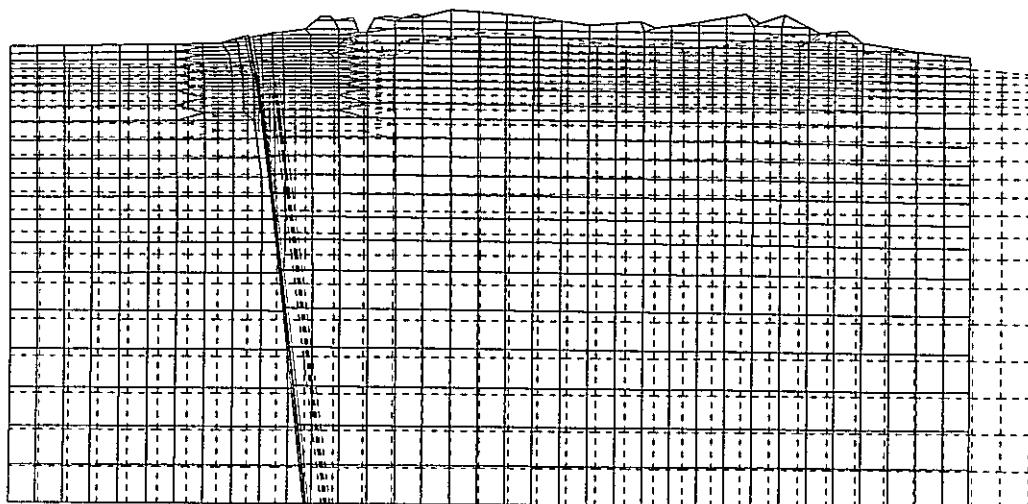


(b) 主応力(有効応力)ベクトル — : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$



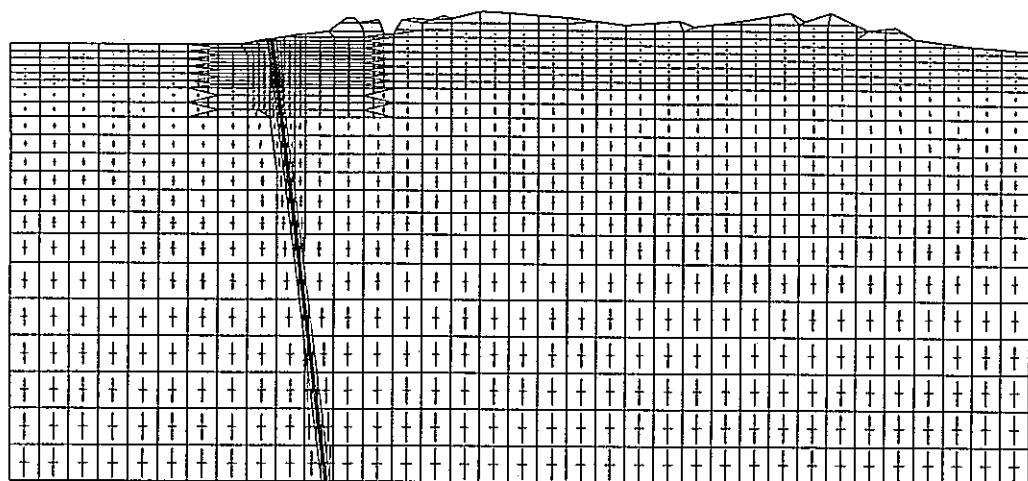
(c) 全水頭分布

図 3-97 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE8)



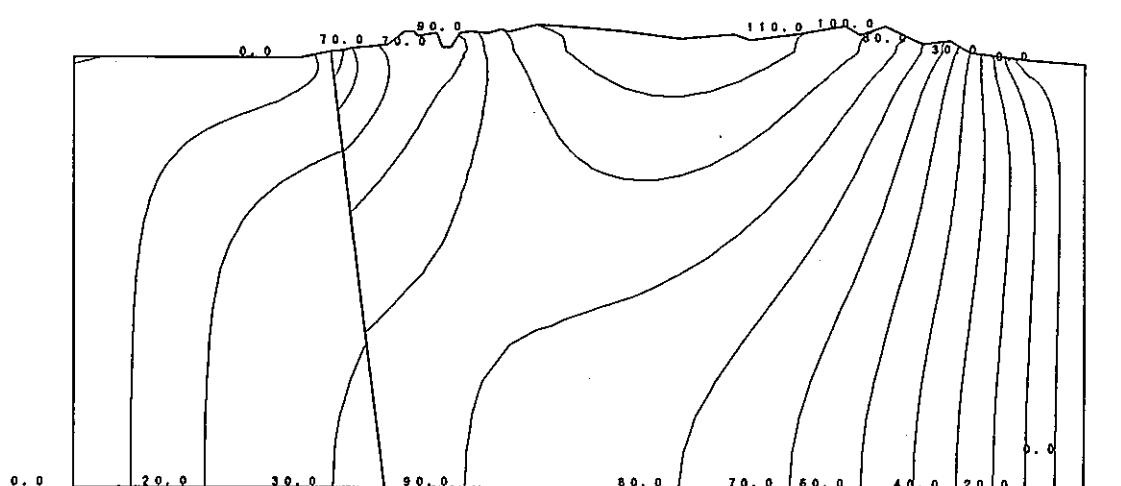
(a) 変形図

— : 0.2m



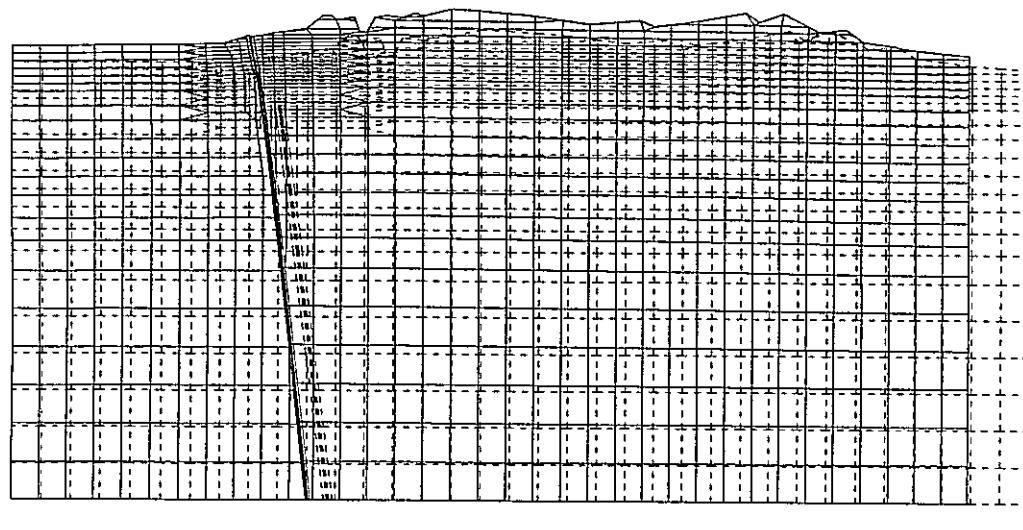
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

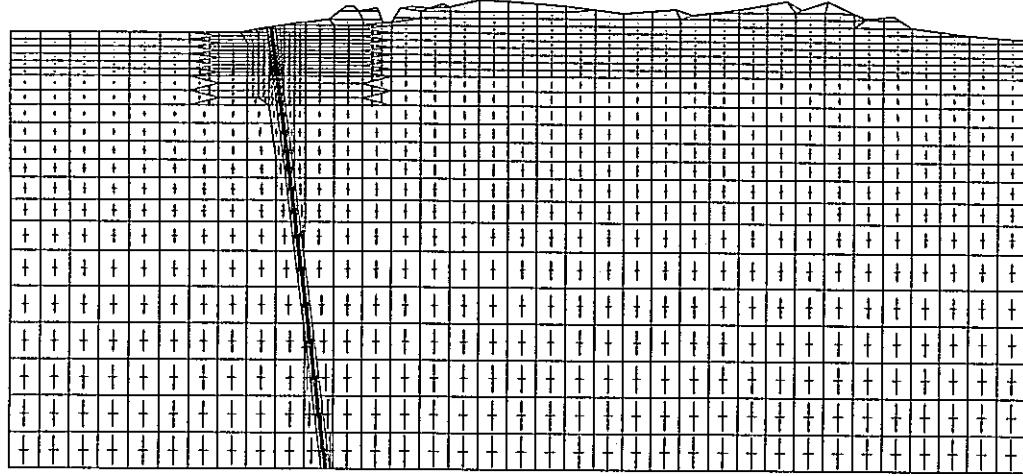


(c) 全水頭分布

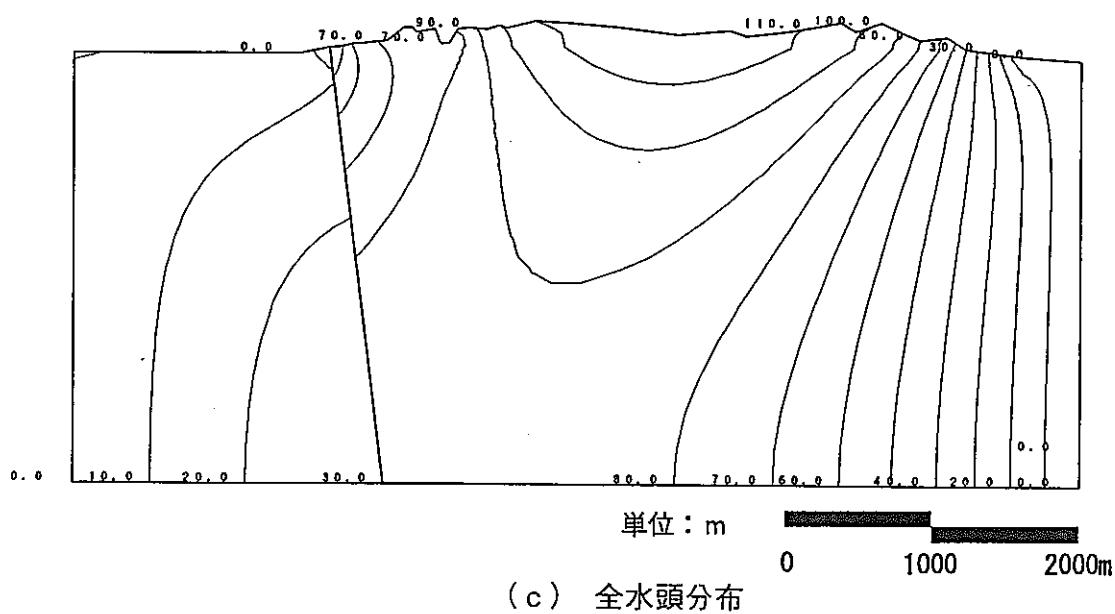
図 3-98 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30 日後, CASE8)



(a) 変形図 :0.2m

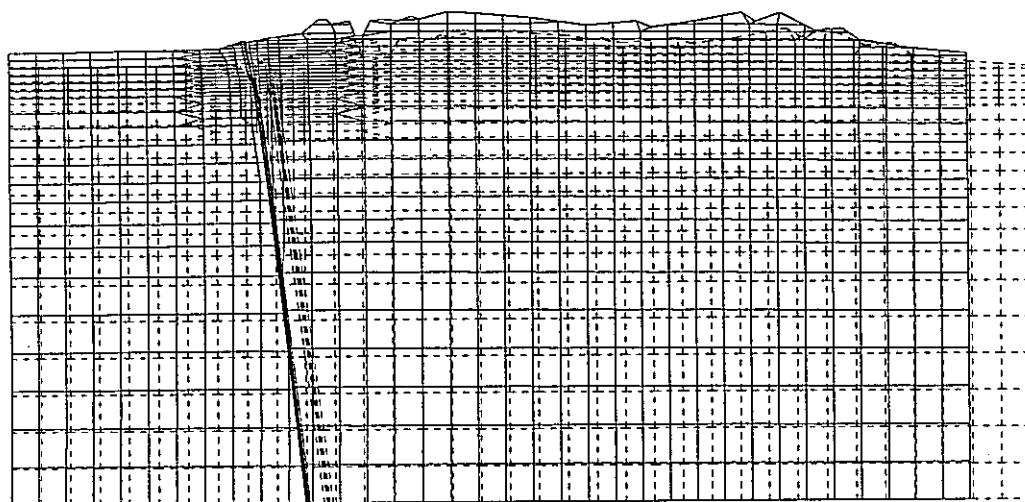


(b) 主応力(有効応力)ベクトル :1.0×10⁴ t/m²

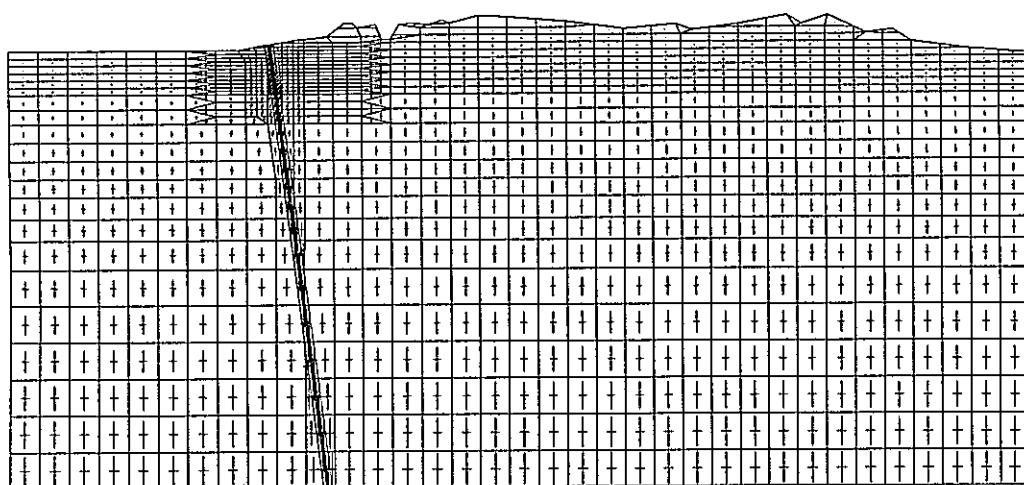


(c) 全水頭分布

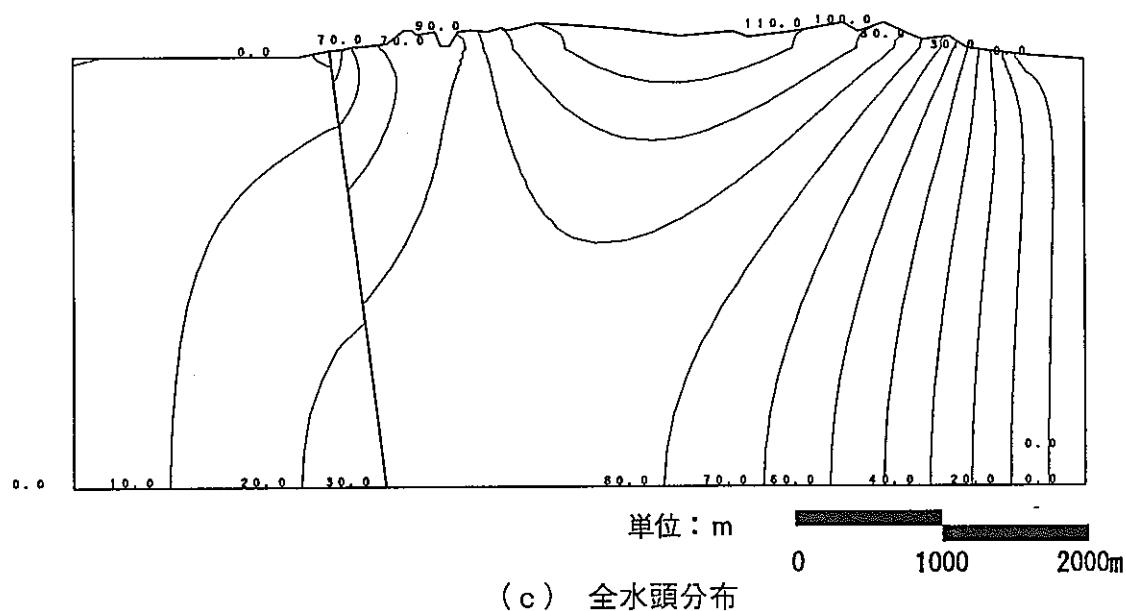
図 3-99 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE8)



(a) 変形図
— : 0.2m

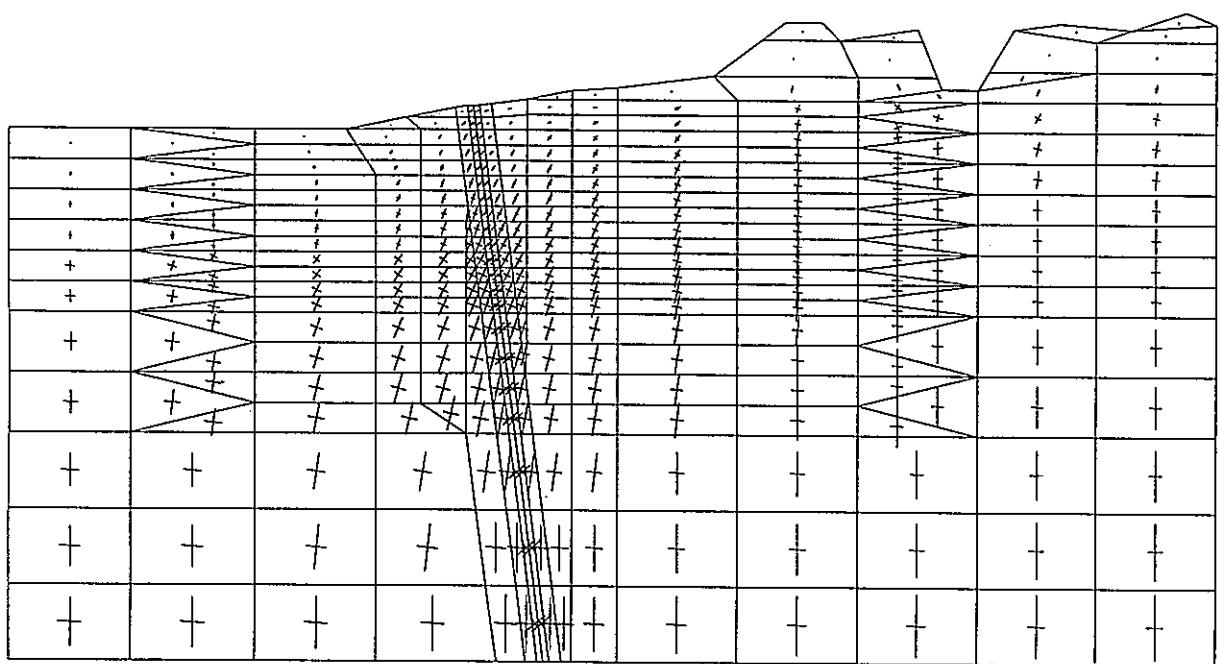


(b) 主応力(有効応力)ベクトル
— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$



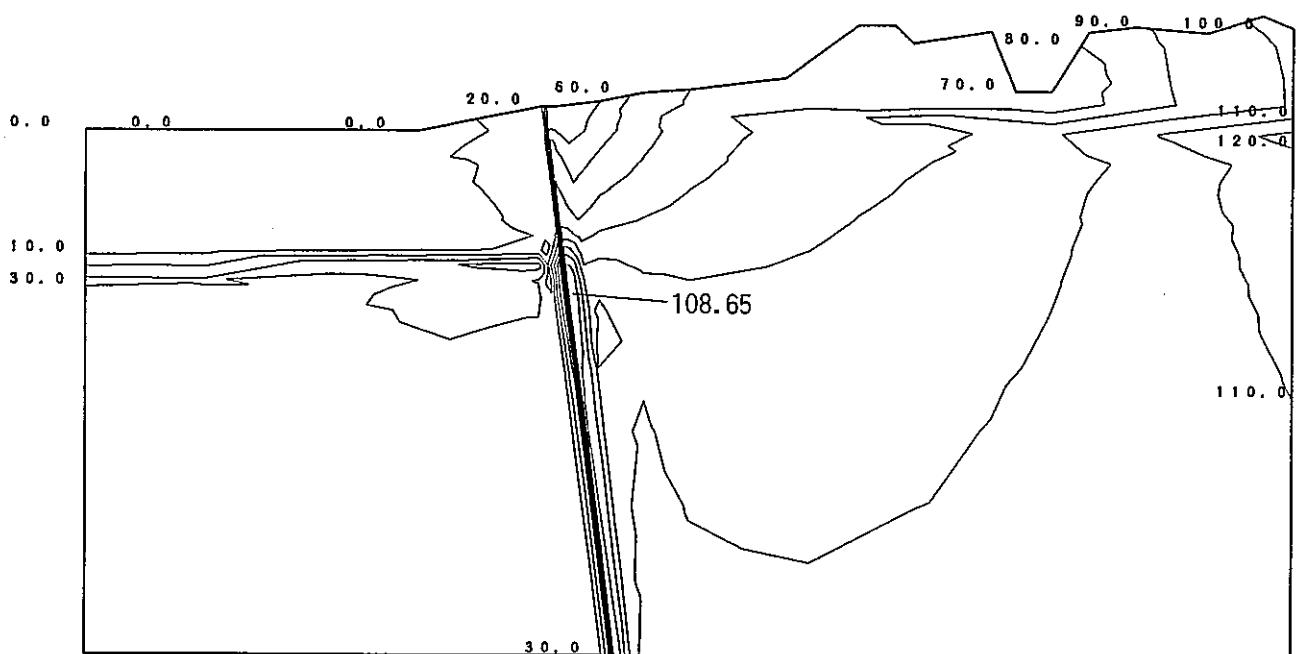
(c) 全水頭分布

図 3-100 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE8)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

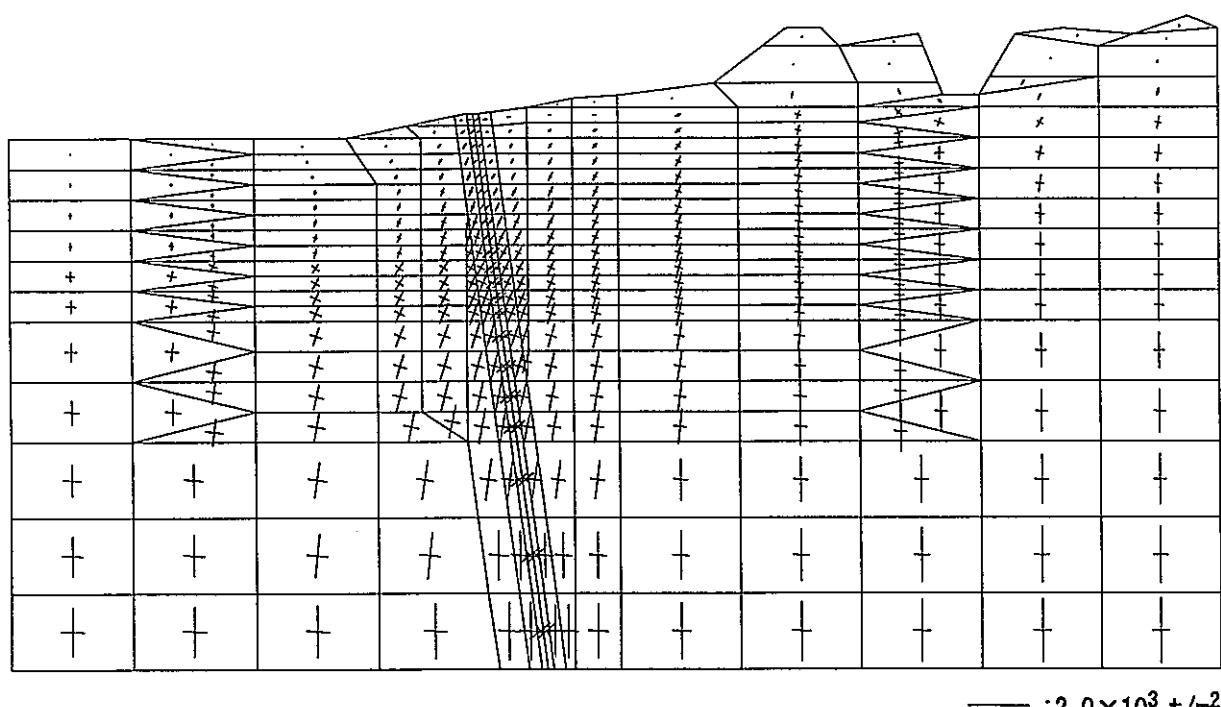


(b) 全水頭分布

単位: m

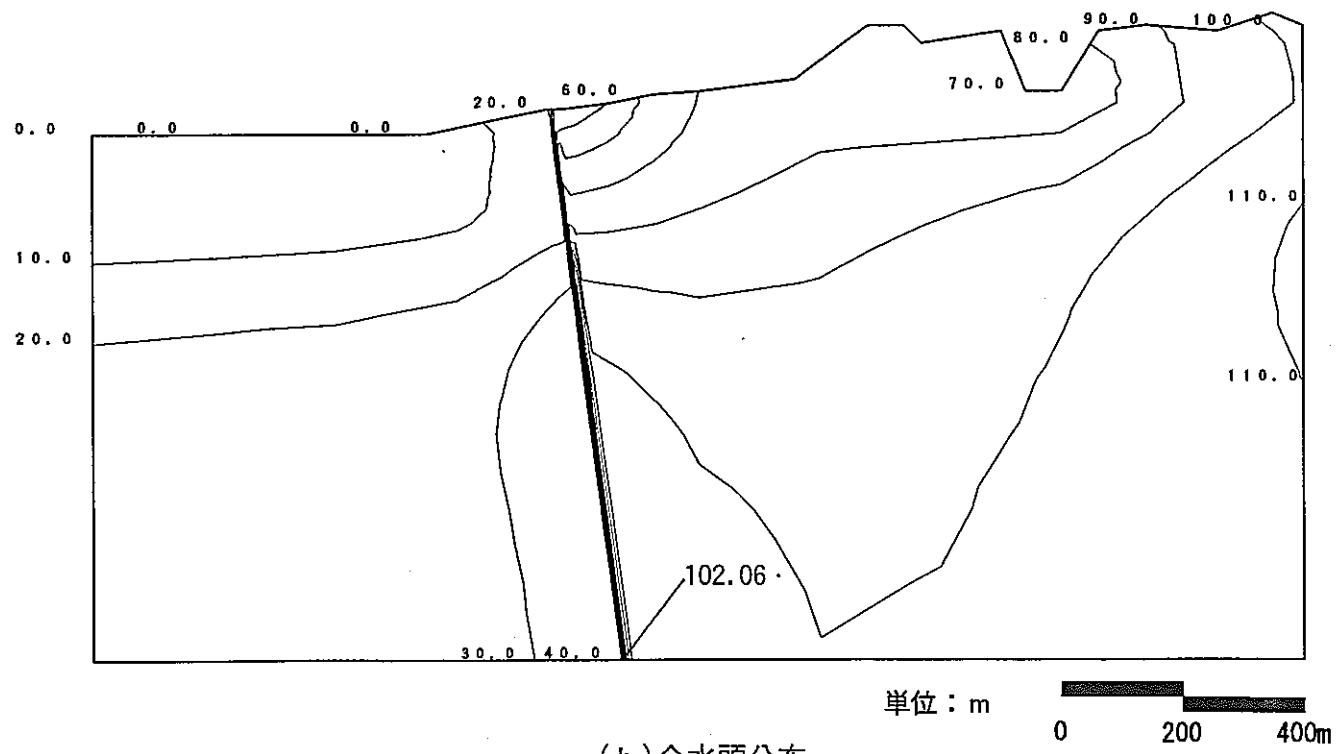
0 200 400m

図 3-101 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE8)



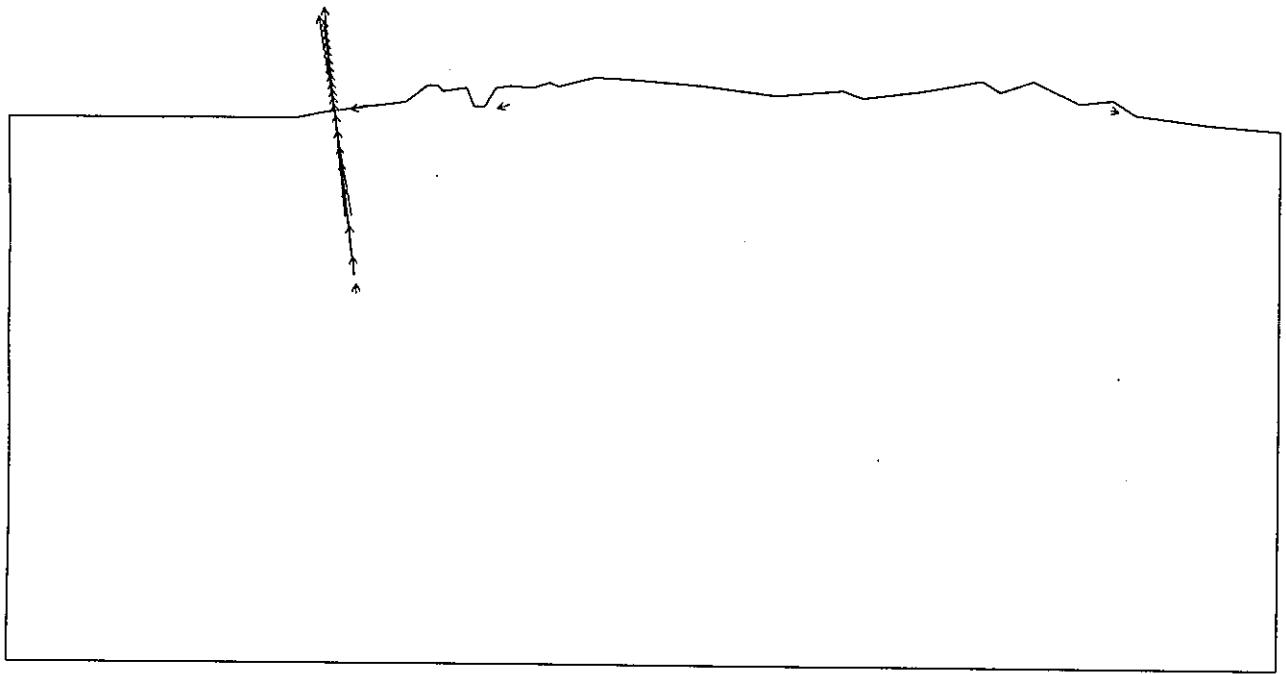
(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$



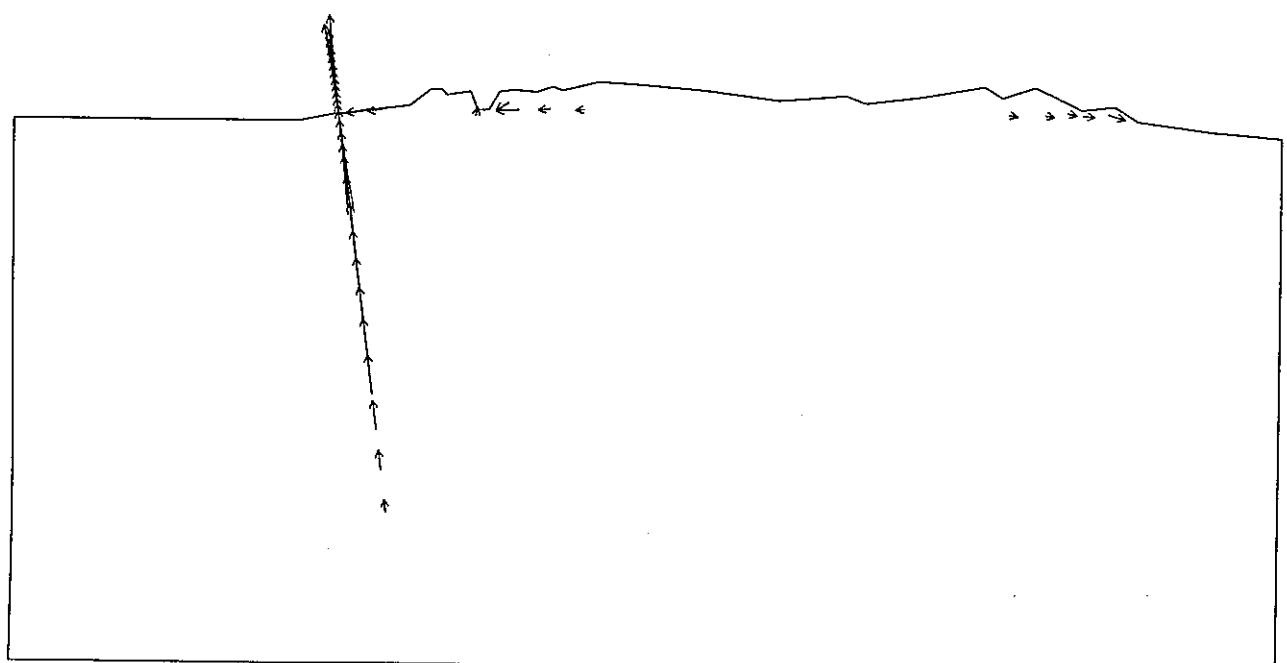
(b) 全水頭分布

図 3-102 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE8)



(a) 1日後

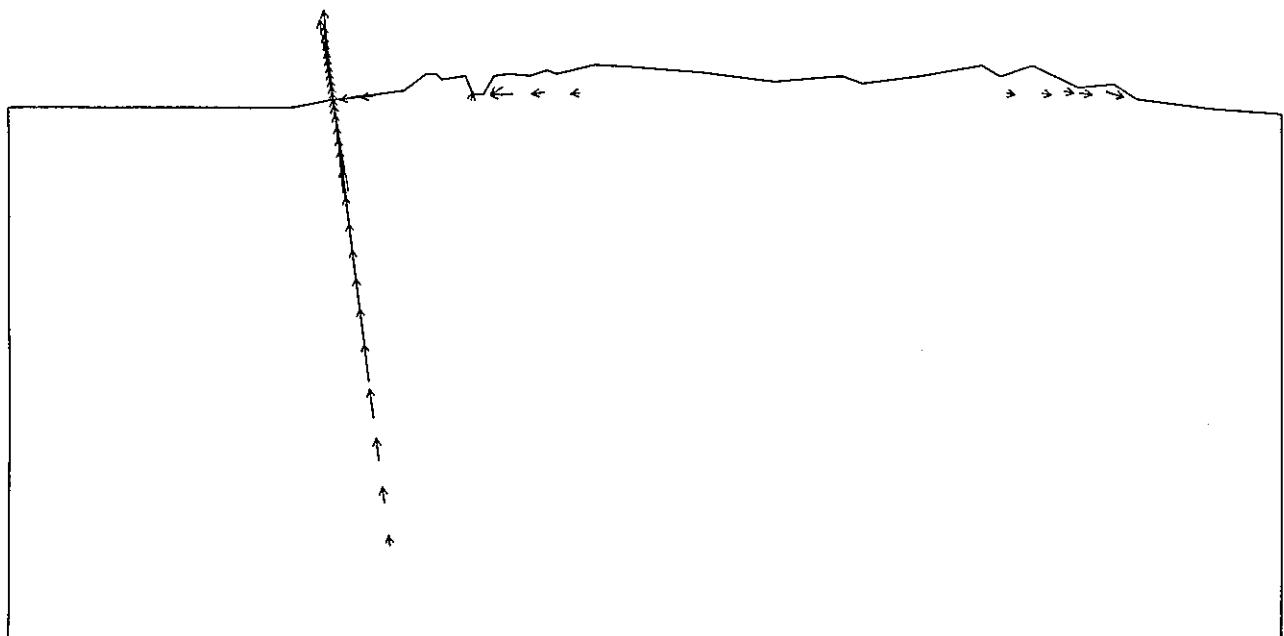
← : 5.0×10^{-7} m/sec



(b) 30日後

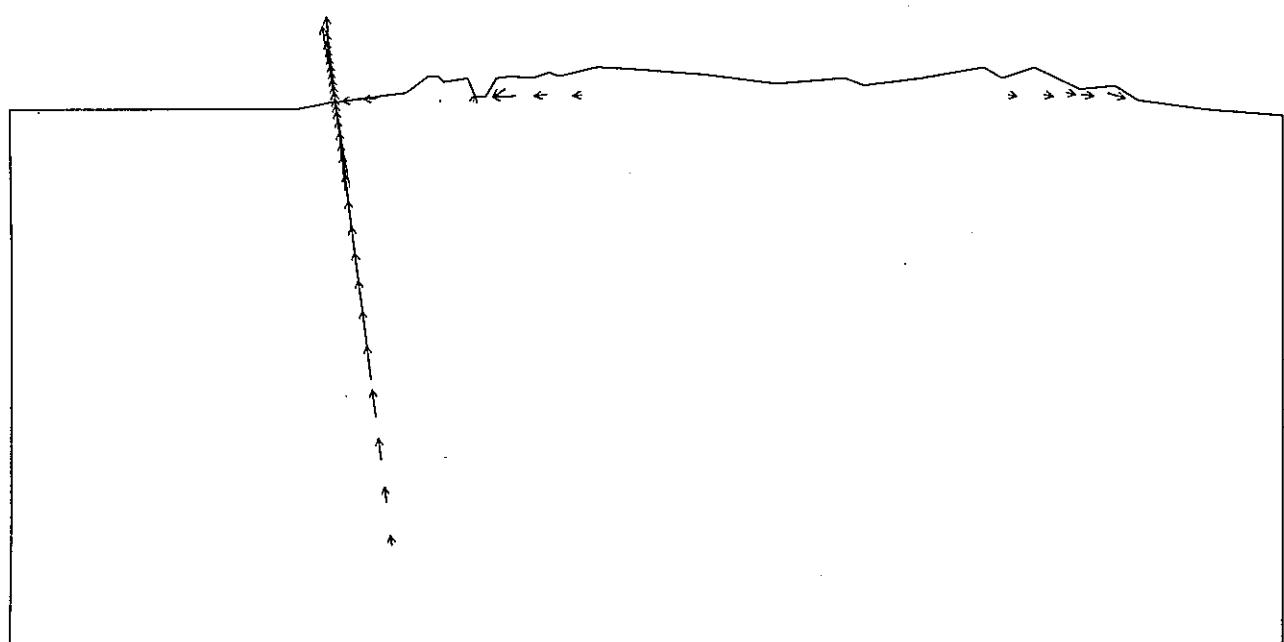
← : 2.5×10^{-7} m/sec

図 3-103 流速ベクトル(CASE8)



(c) 60 日後

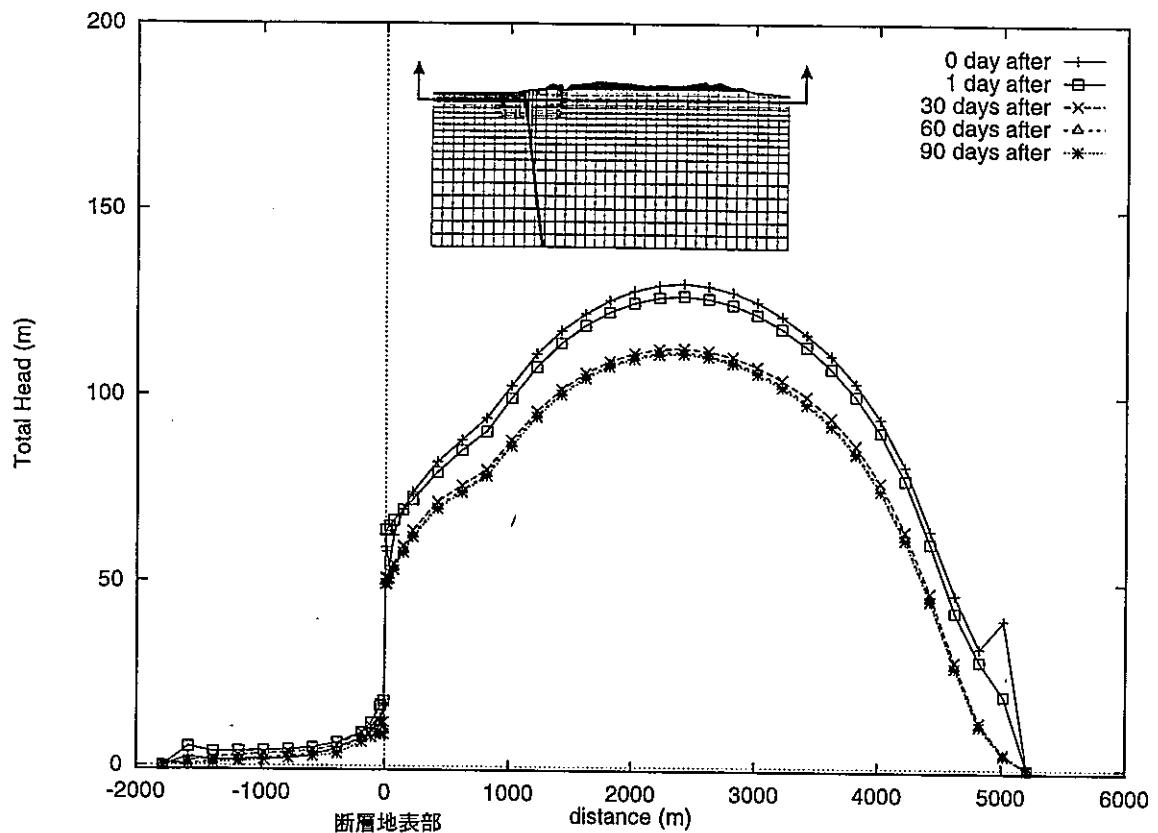
← : 2.5×10^{-7} m/sec



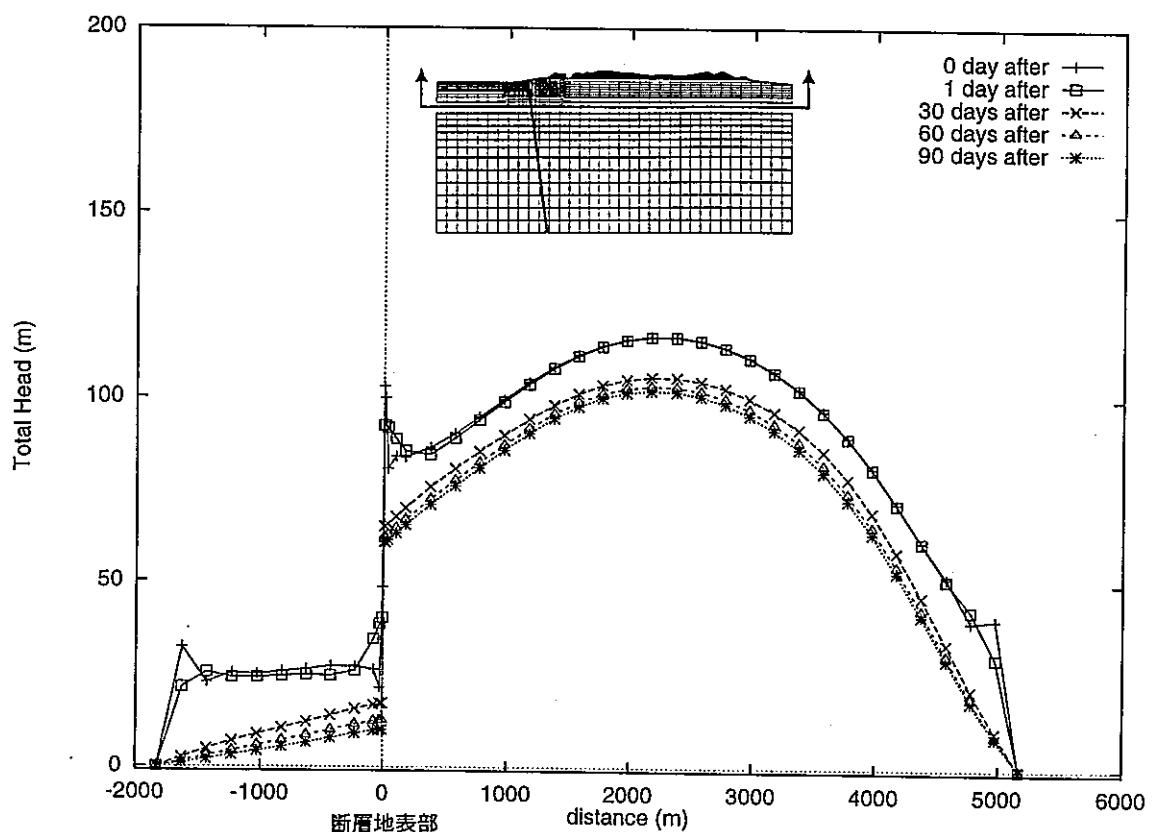
(d) 90 日後

← : 2.5×10^{-7} m/sec

図 3-103 流速ベクトル(CASE8)



(a) EL-150m



(b) EL-500m

図 3-104 全水頭の空間分布(CASE8)

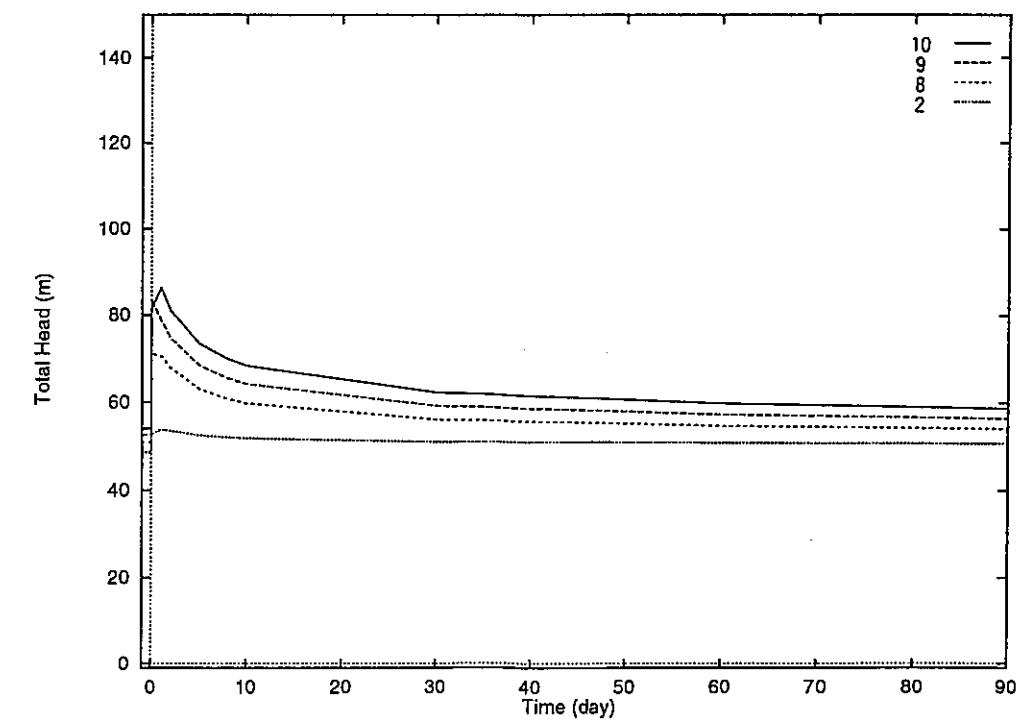
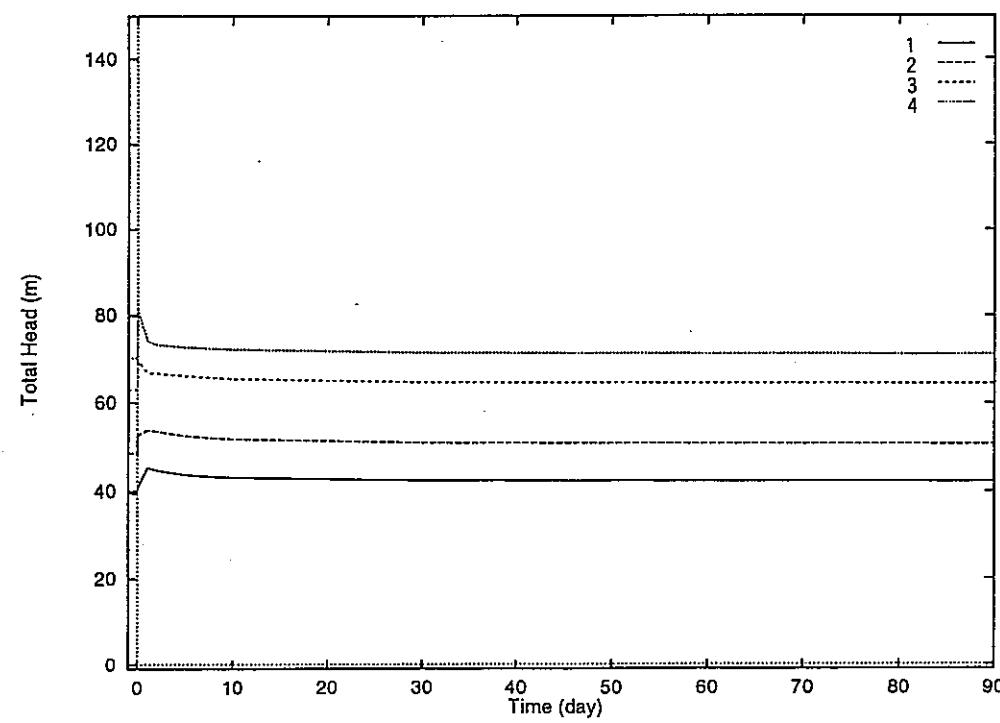
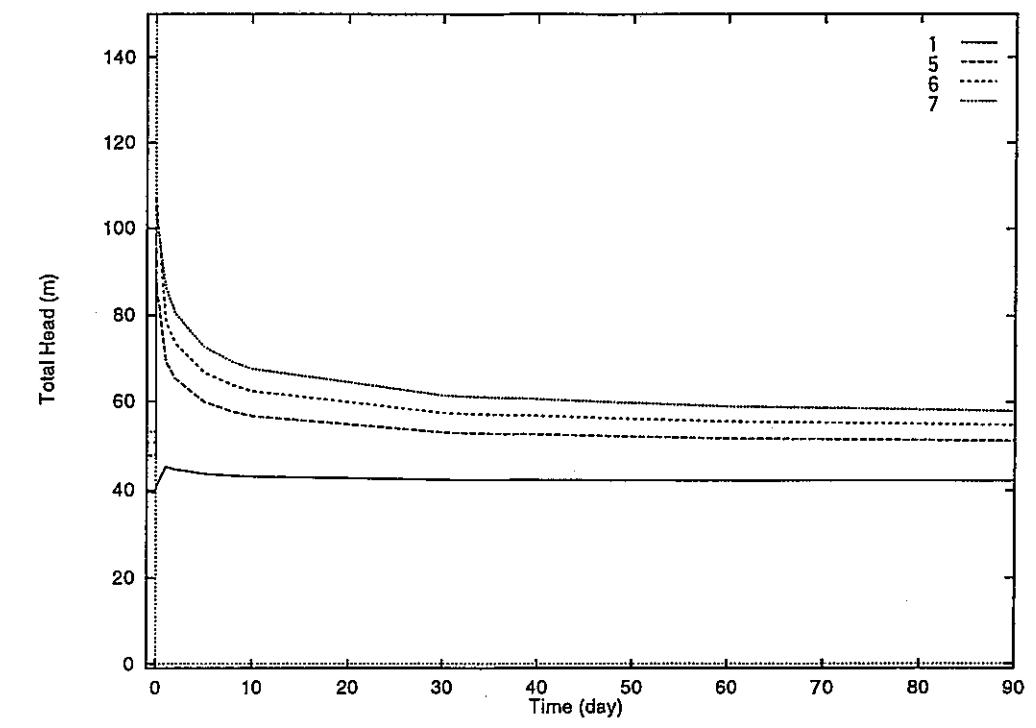
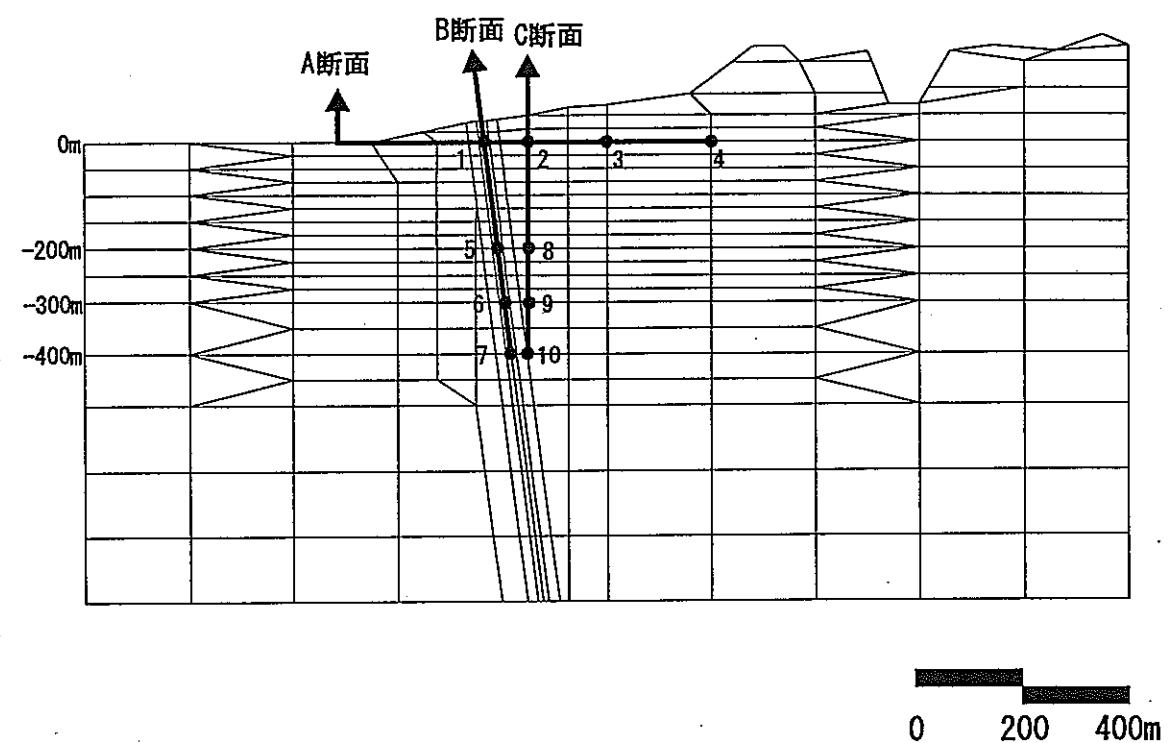
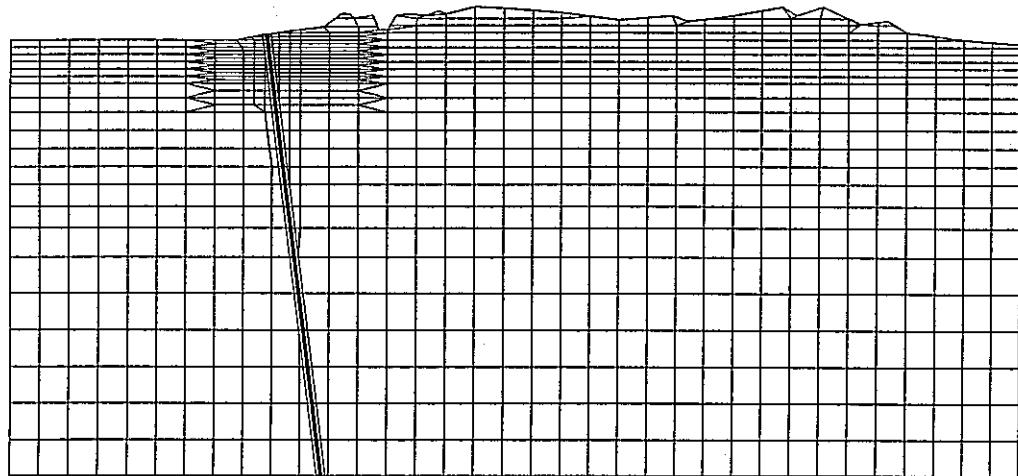
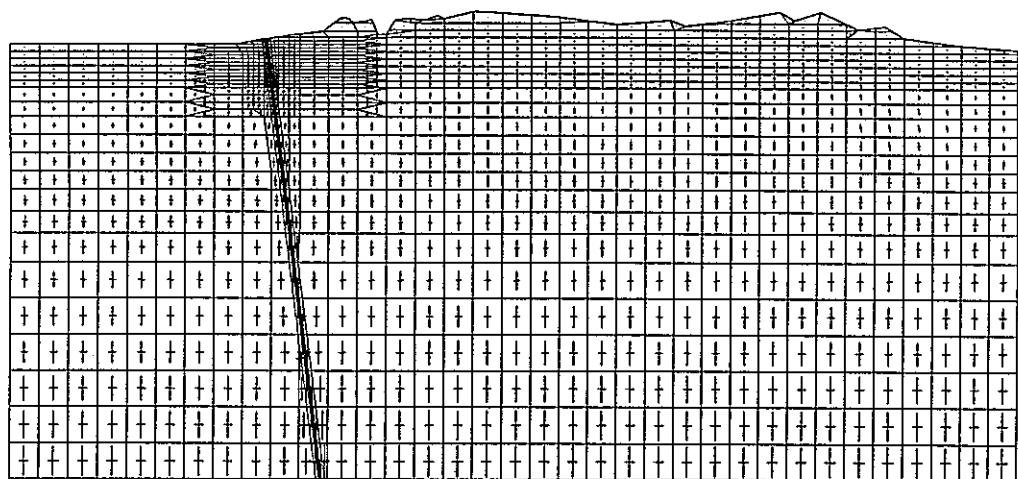


図 3-105 全水頭の時間変化(CASE8)



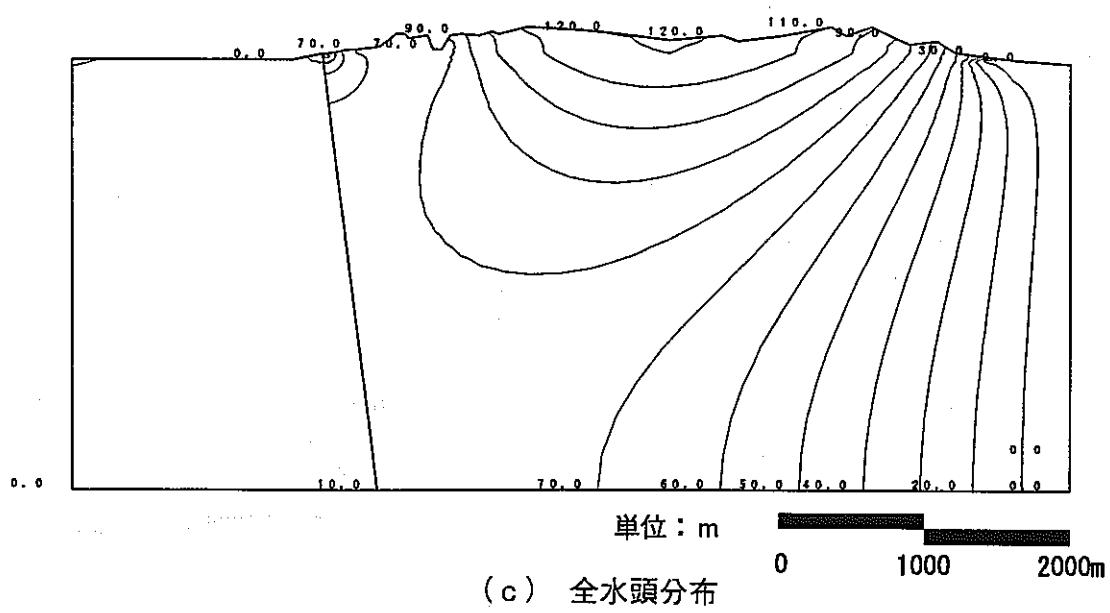
(a) 変形図

— : 0.2m



(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

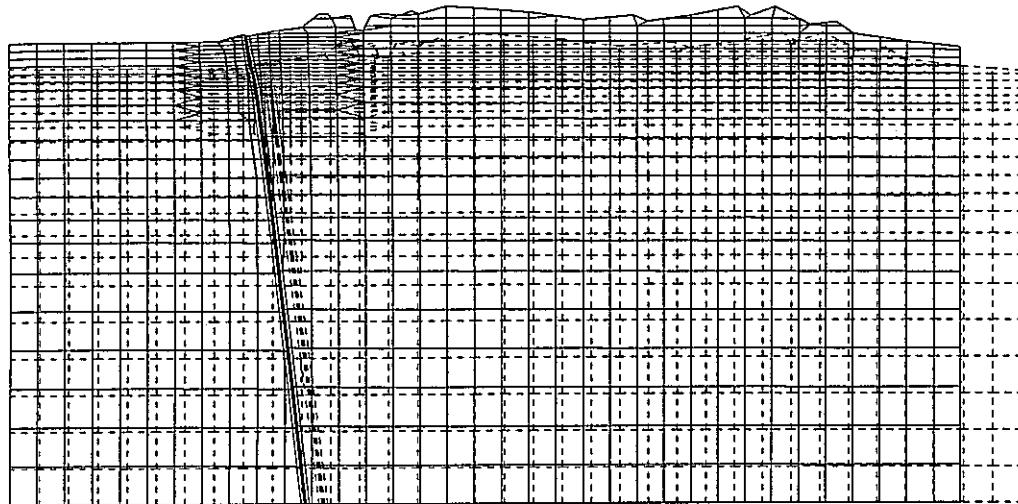


(c) 全水頭分布

単位: m

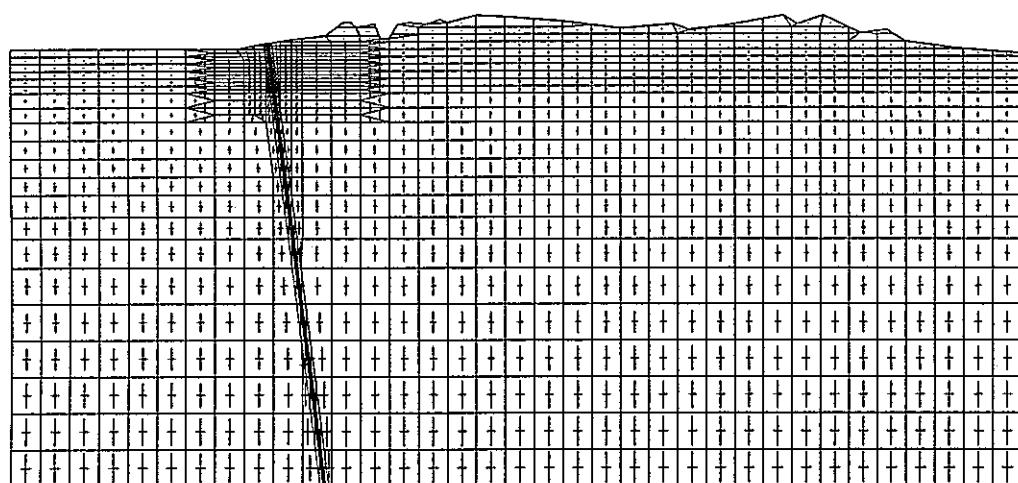
0 1000 2000m

図 3-106 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震前, CASE9)



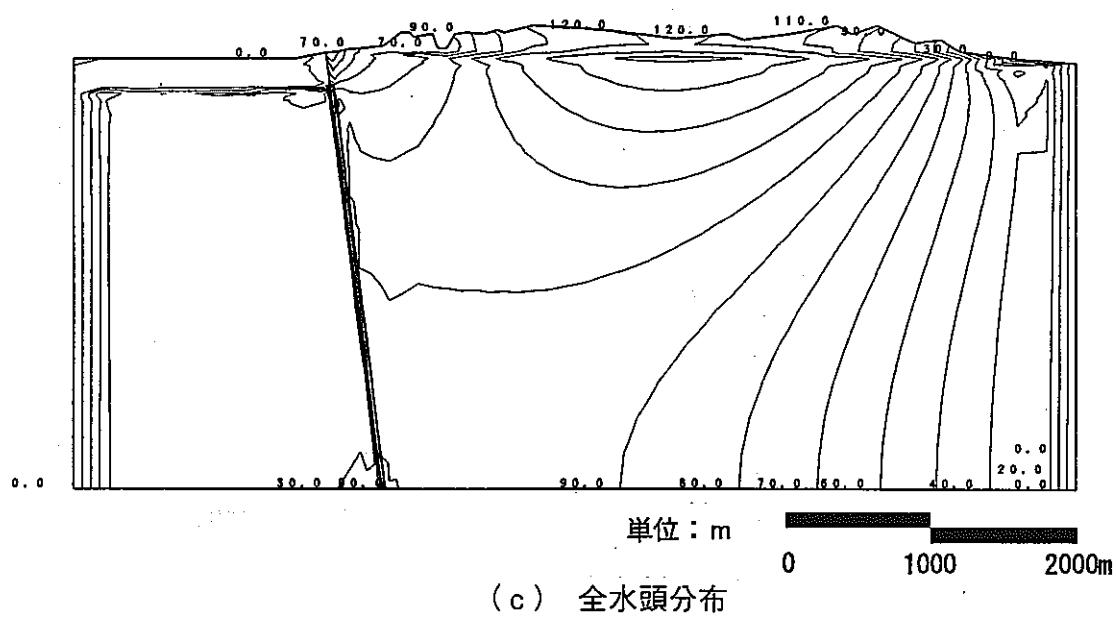
(a) 変形図

— : 0.2m



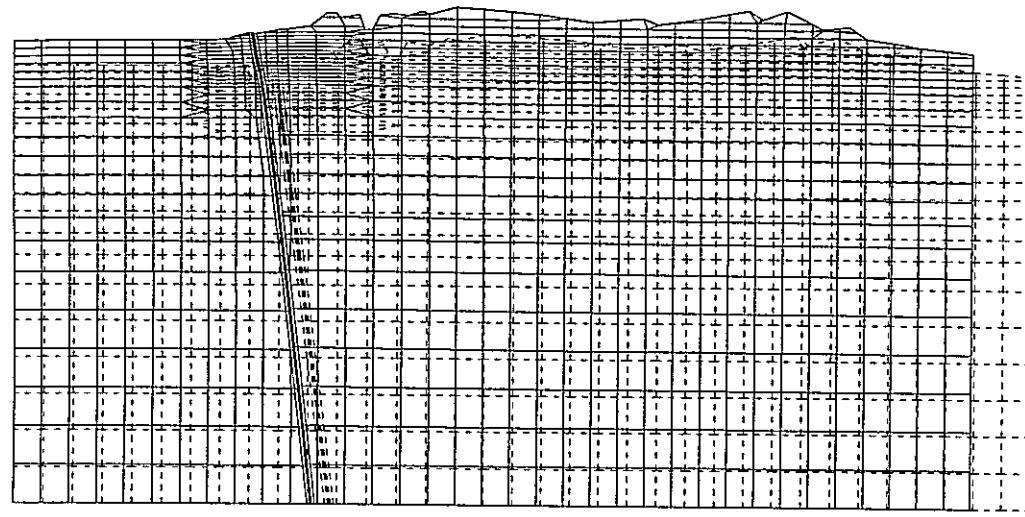
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$



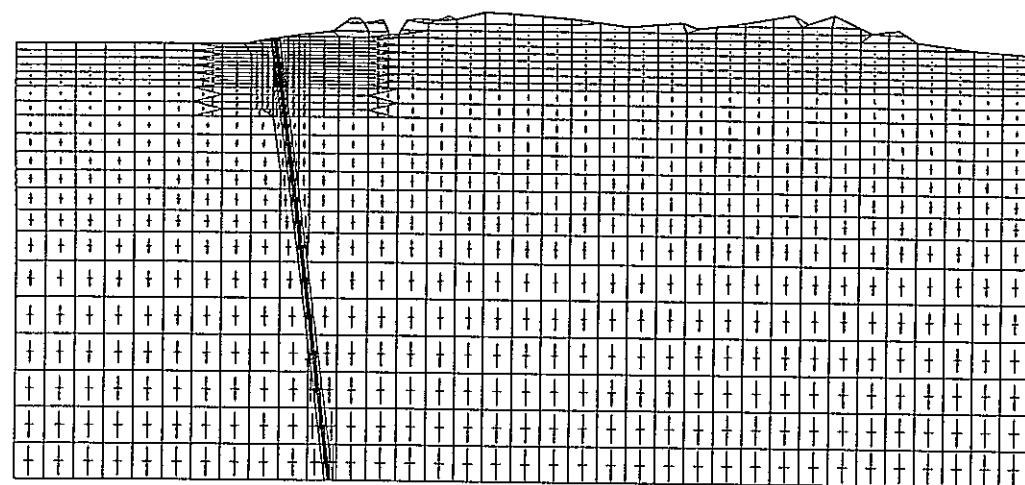
(c) 全水頭分布

図 3-107 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE9)



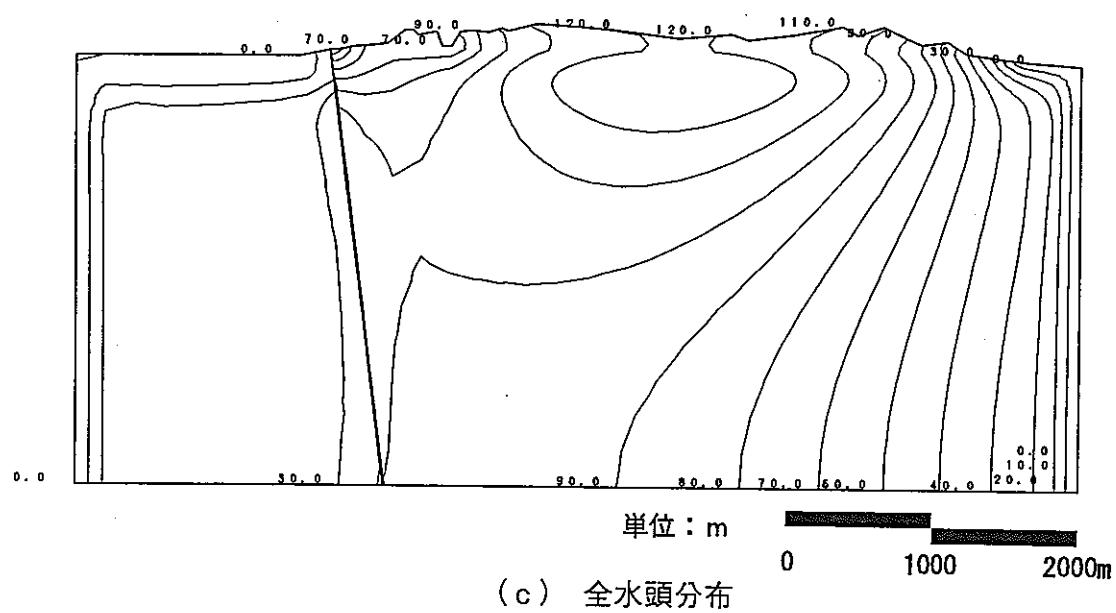
(a) 変形図

— : 0.2m



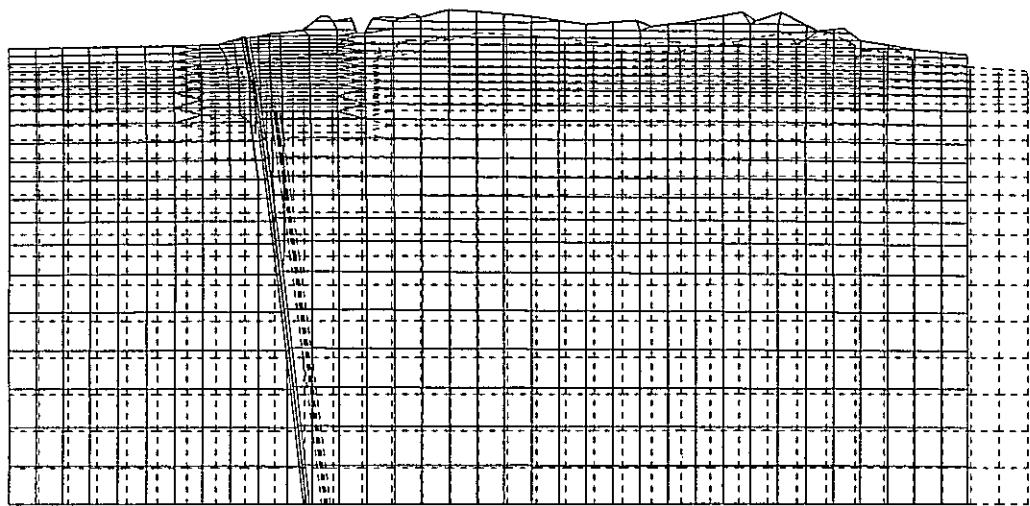
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

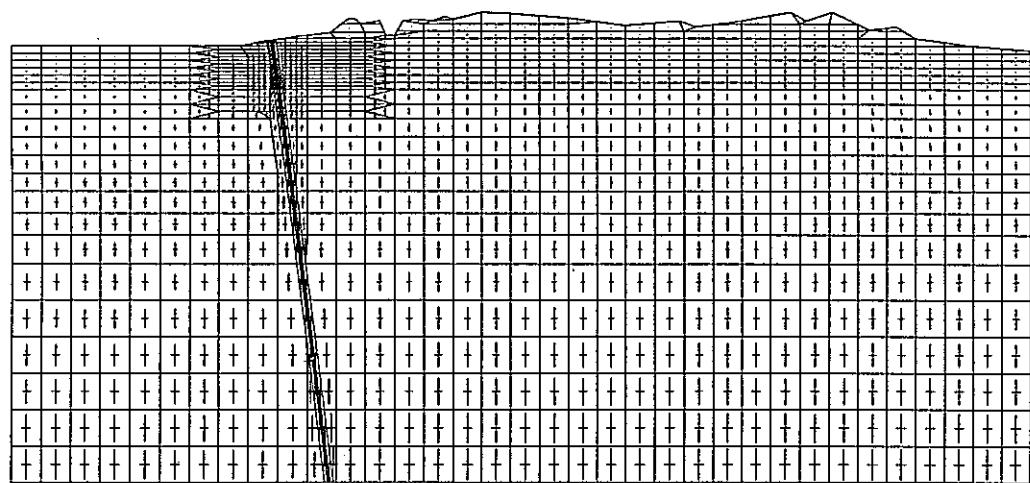


(c) 全水頭分布

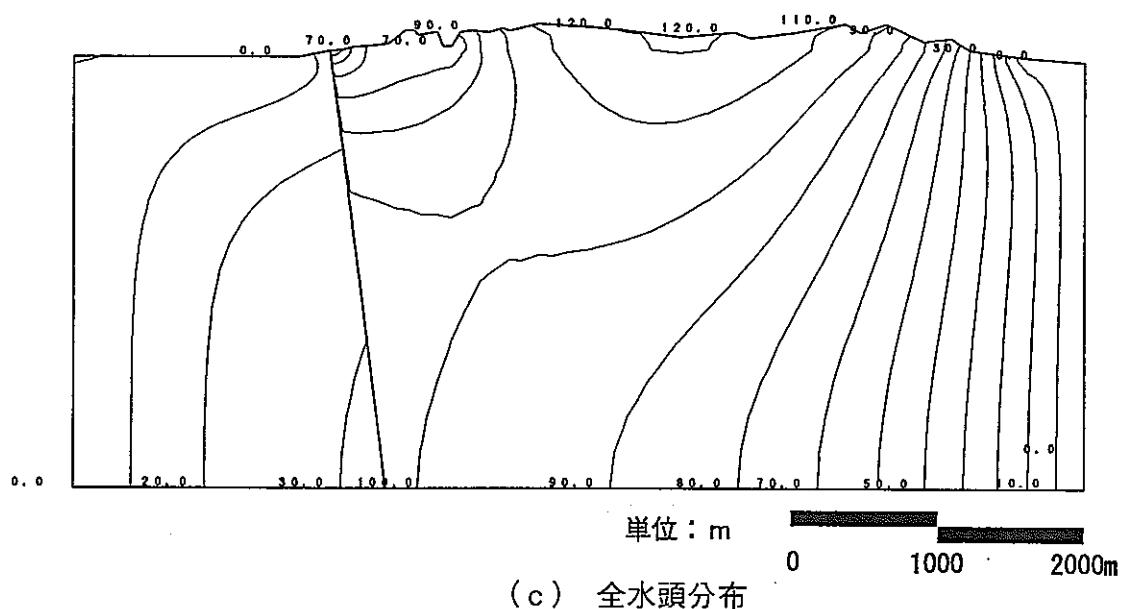
図 3-108 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後, CASE9)



(a) 変形図 — : 0.2m

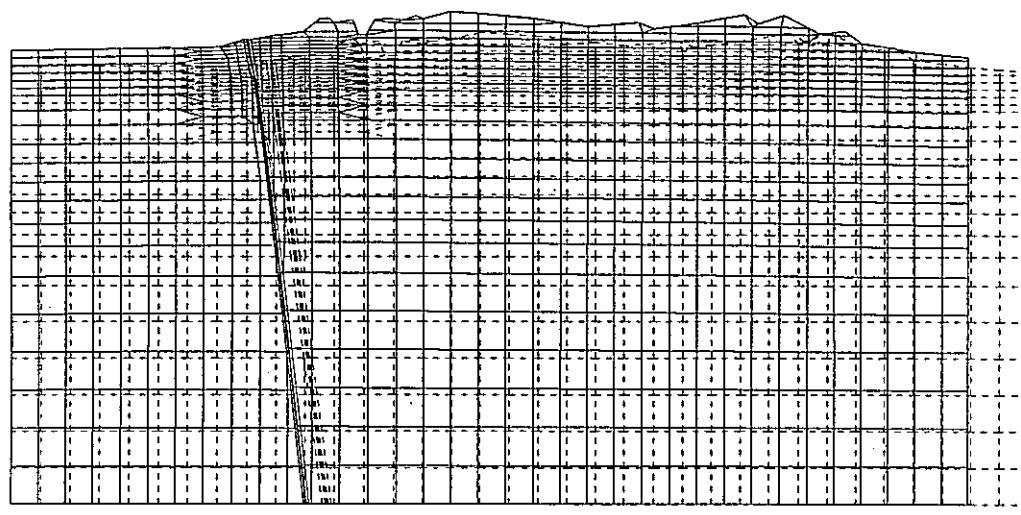


(b) 主応力(有効応力)ベクトル — : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

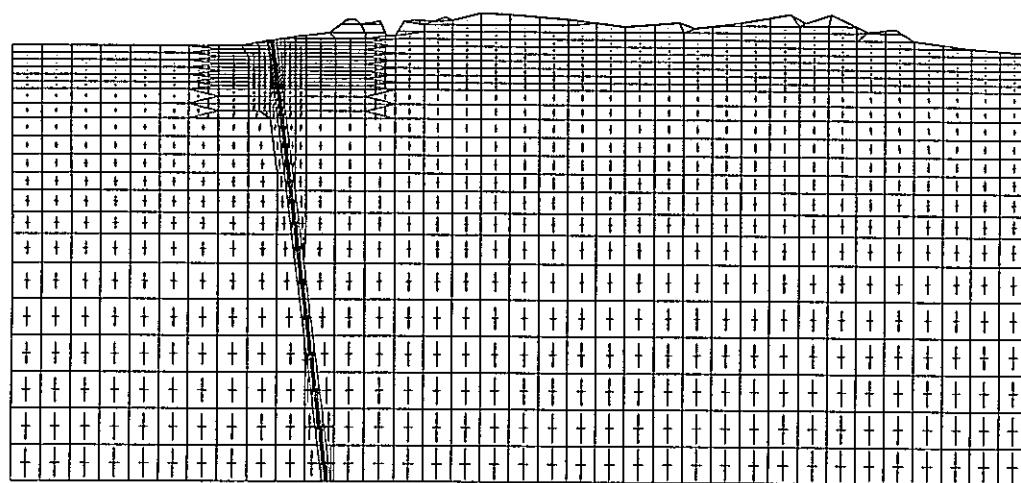


(c) 全水頭分布 単位 : m — : 0 1000 2000m

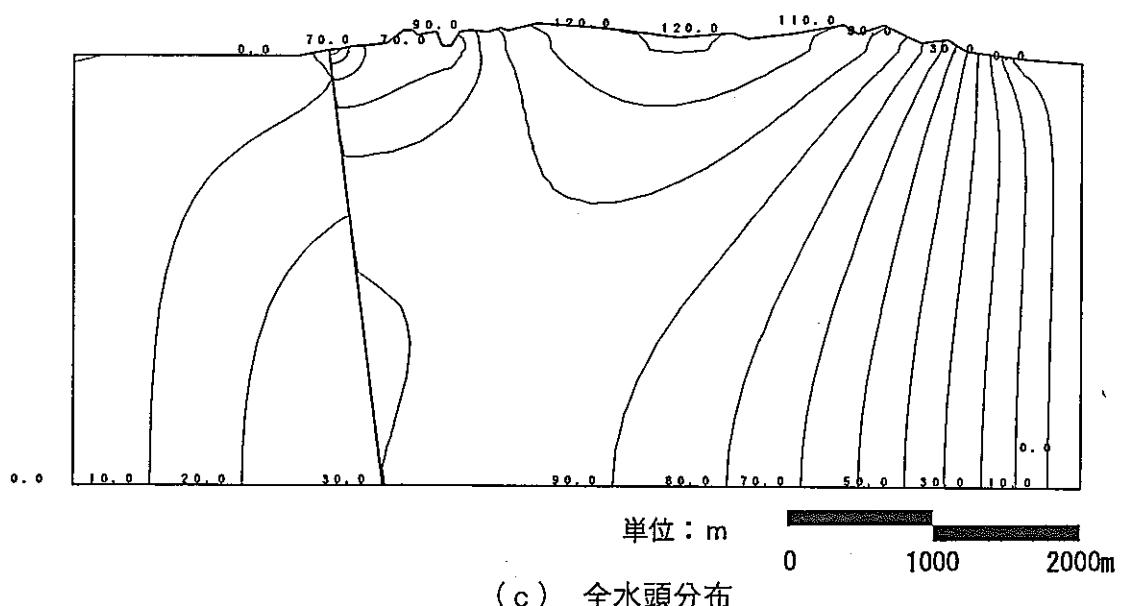
図 3-109 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(30日後,CASE9)



(a) 変形図

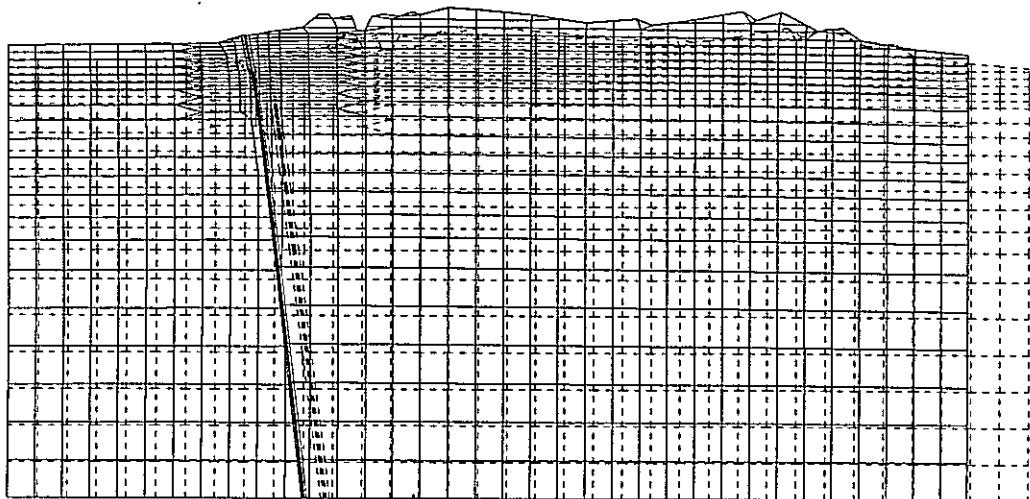


(b) 主応力(有効応力)ベクトル



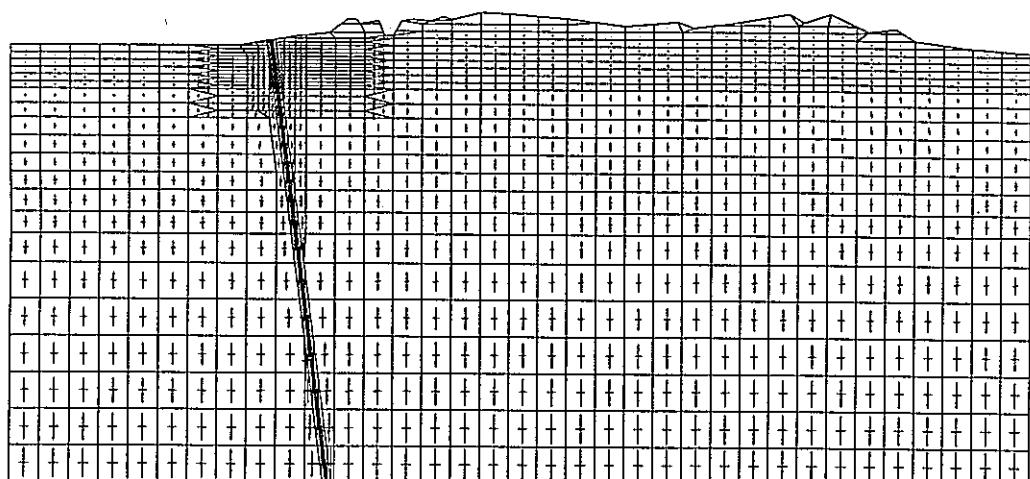
(c) 全水頭分布

図 3-110 変形、主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(60 日後, CASE9)



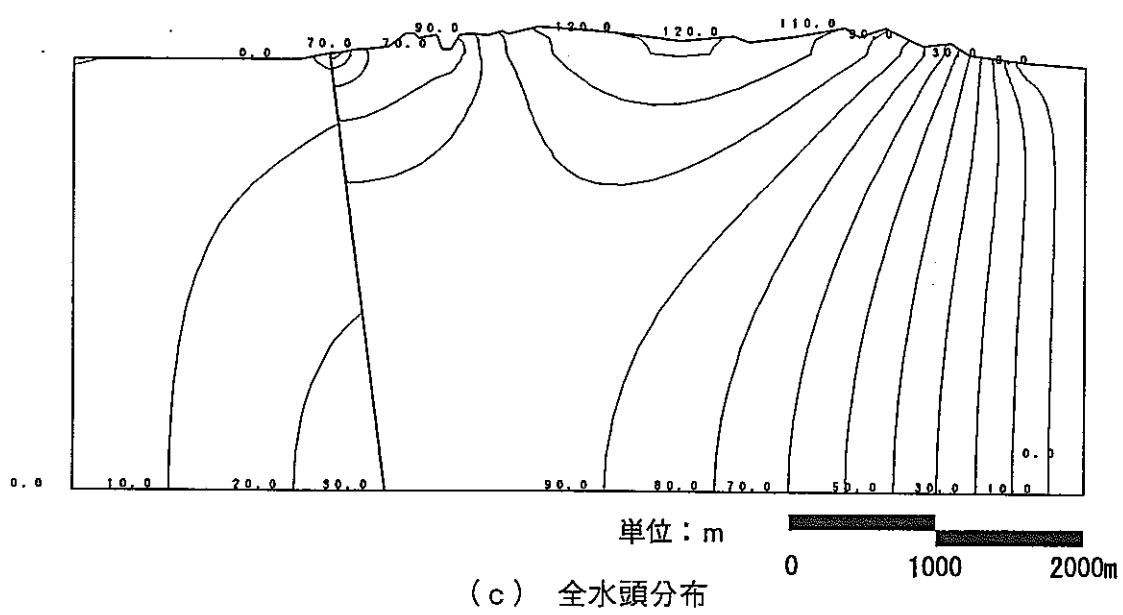
(a) 変形図

↑ : 0.2m



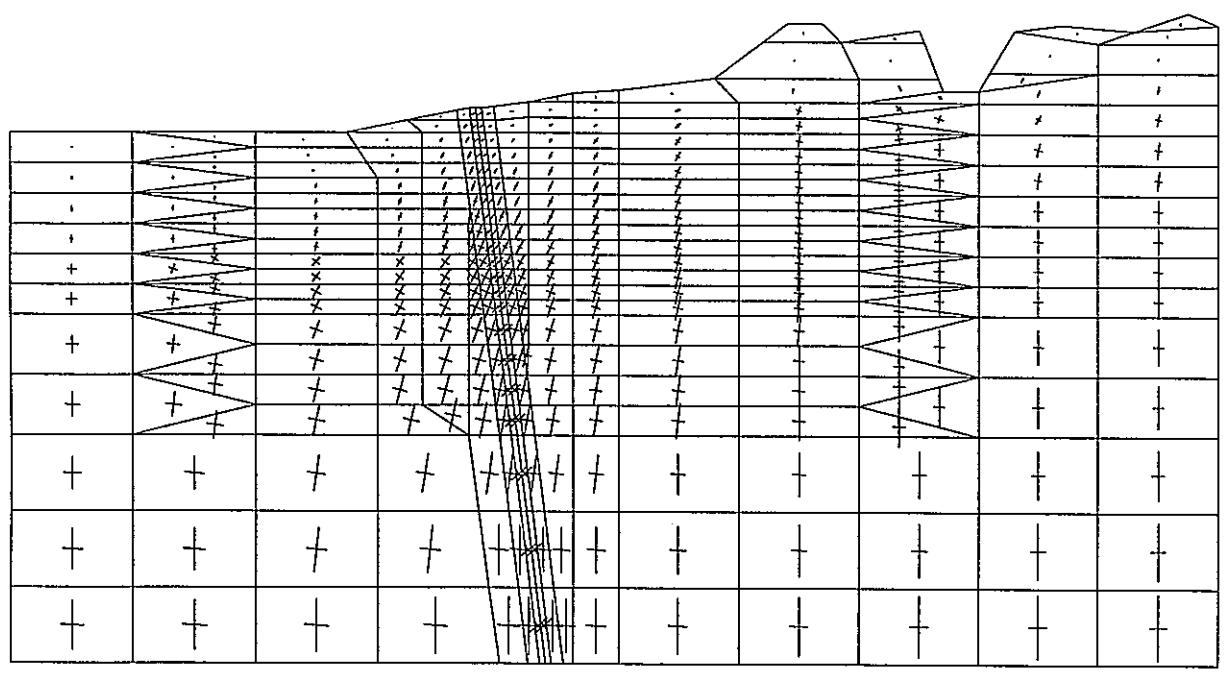
(b) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $1.0 \times 10^4 \text{ t/m}^2$

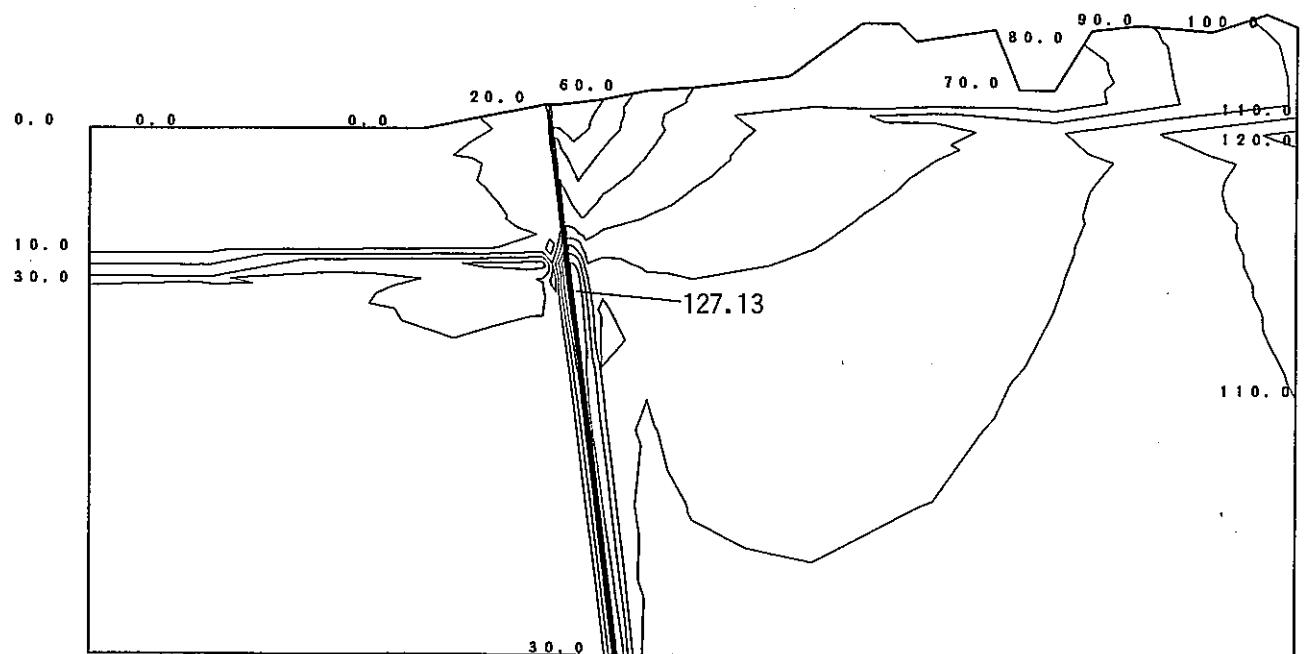


(c) 全水頭分布

図 3-111 変形, 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(90 日後, CASE9)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

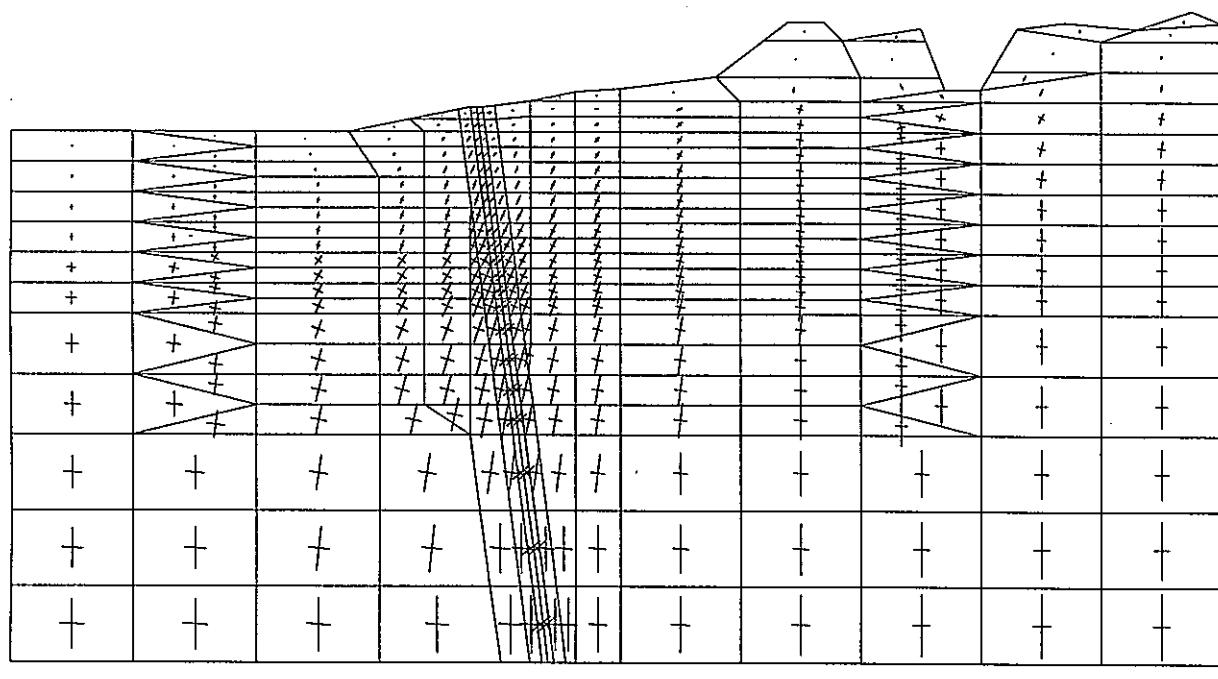


(b) 全水頭分布

単位: m

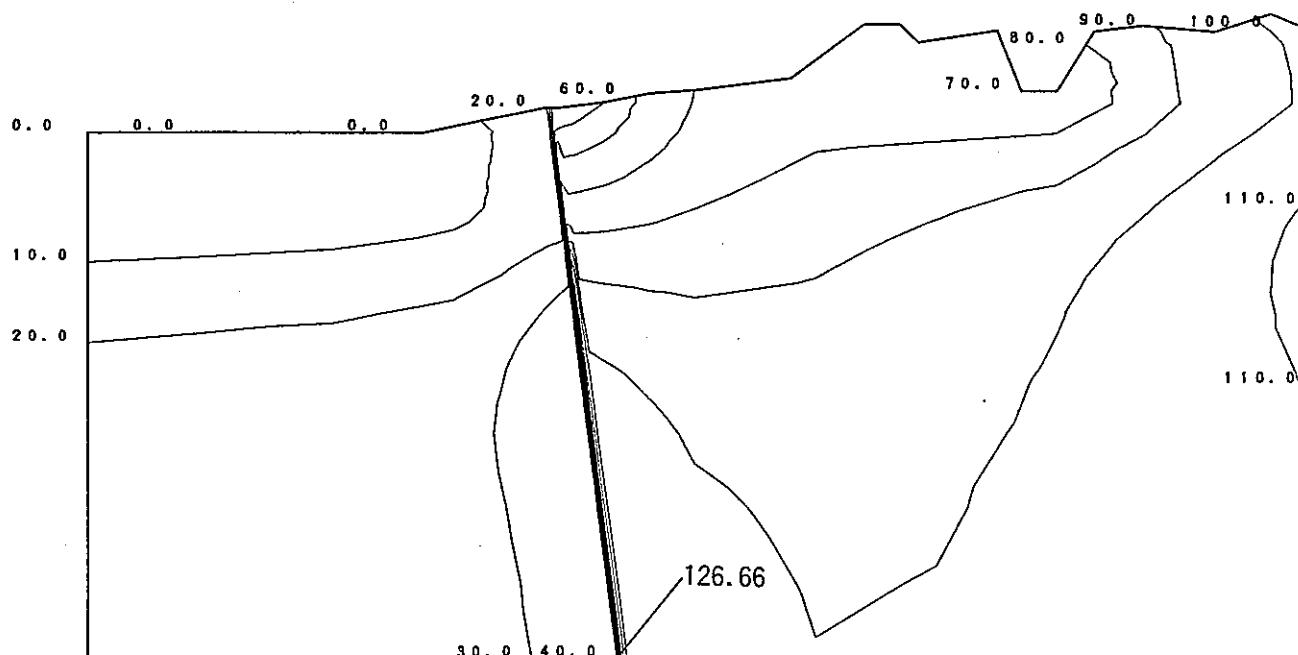
0 200 400m

図 3-112 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(地震直後, CASE9)



(a) 主応力(有効応力)ベクトル

— : $2.0 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

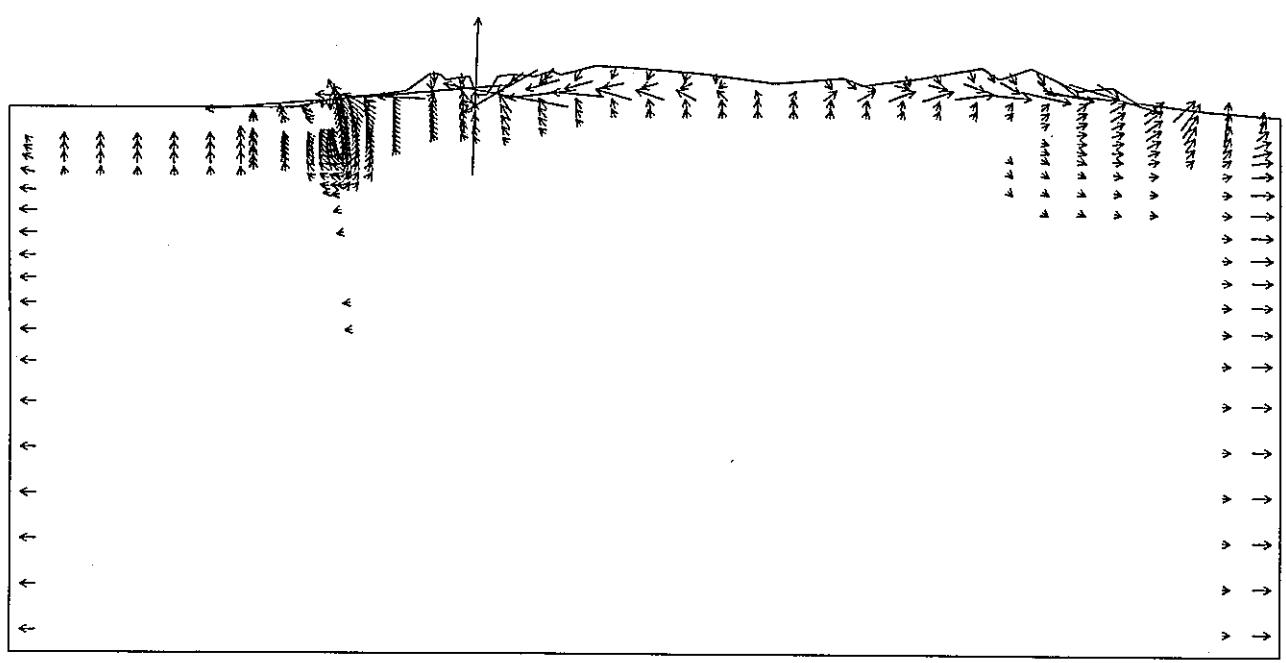


(b) 全水頭分布

単位: m

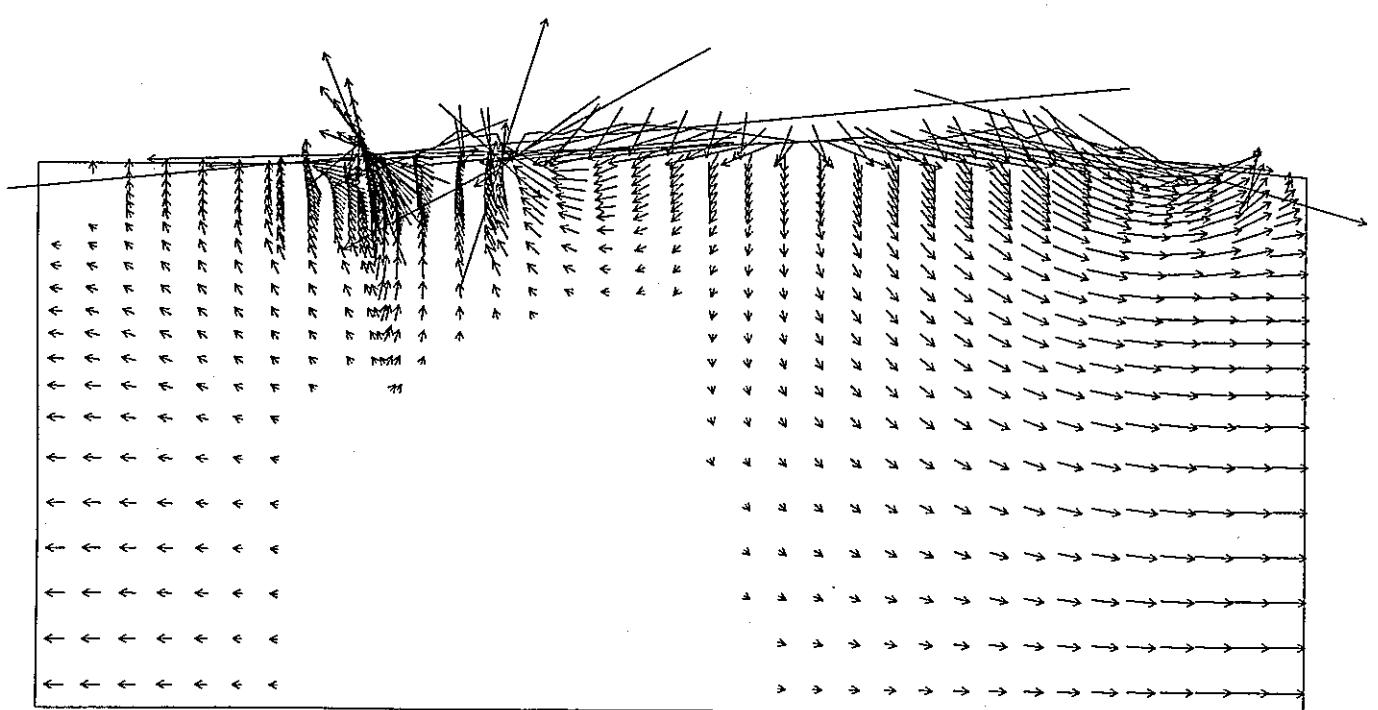
0 200 400m

図 3-113 主応力(有効応力)ベクトルおよび全水頭分布(1日後,CASE9)



(a) 1日後

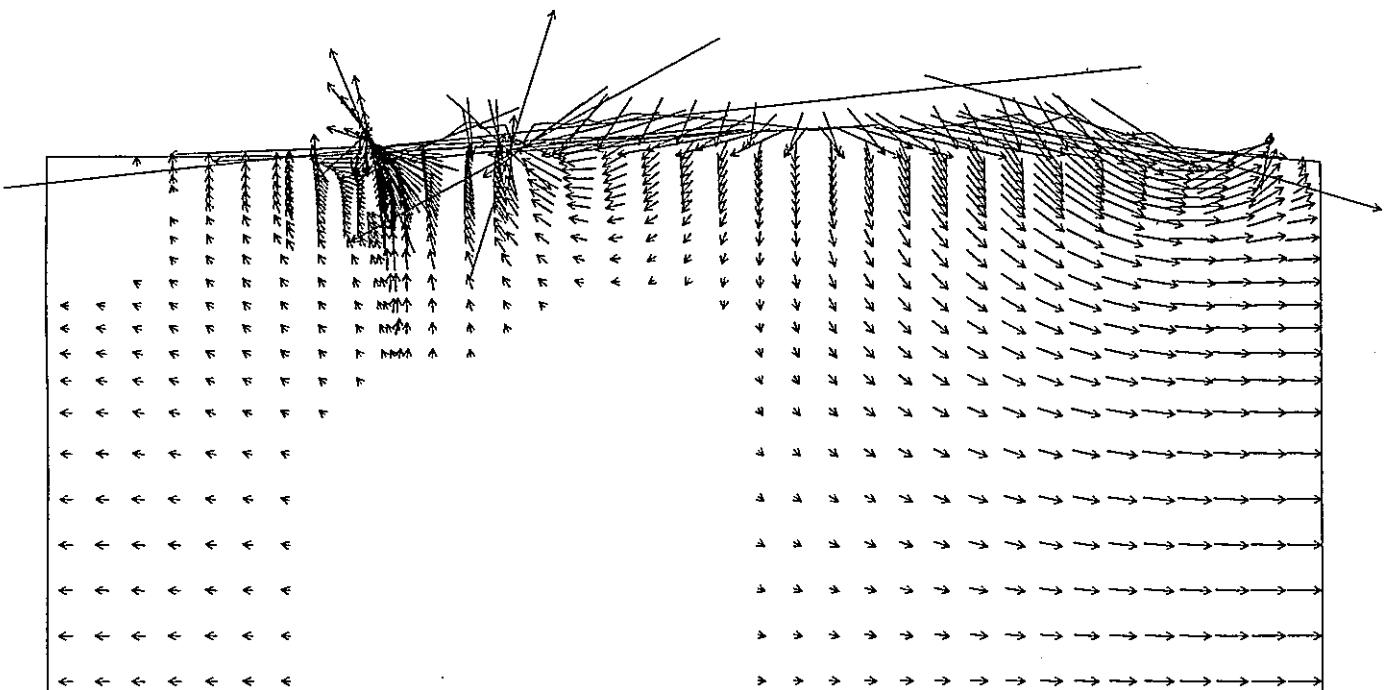
$\longleftrightarrow : 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(b) 30日後

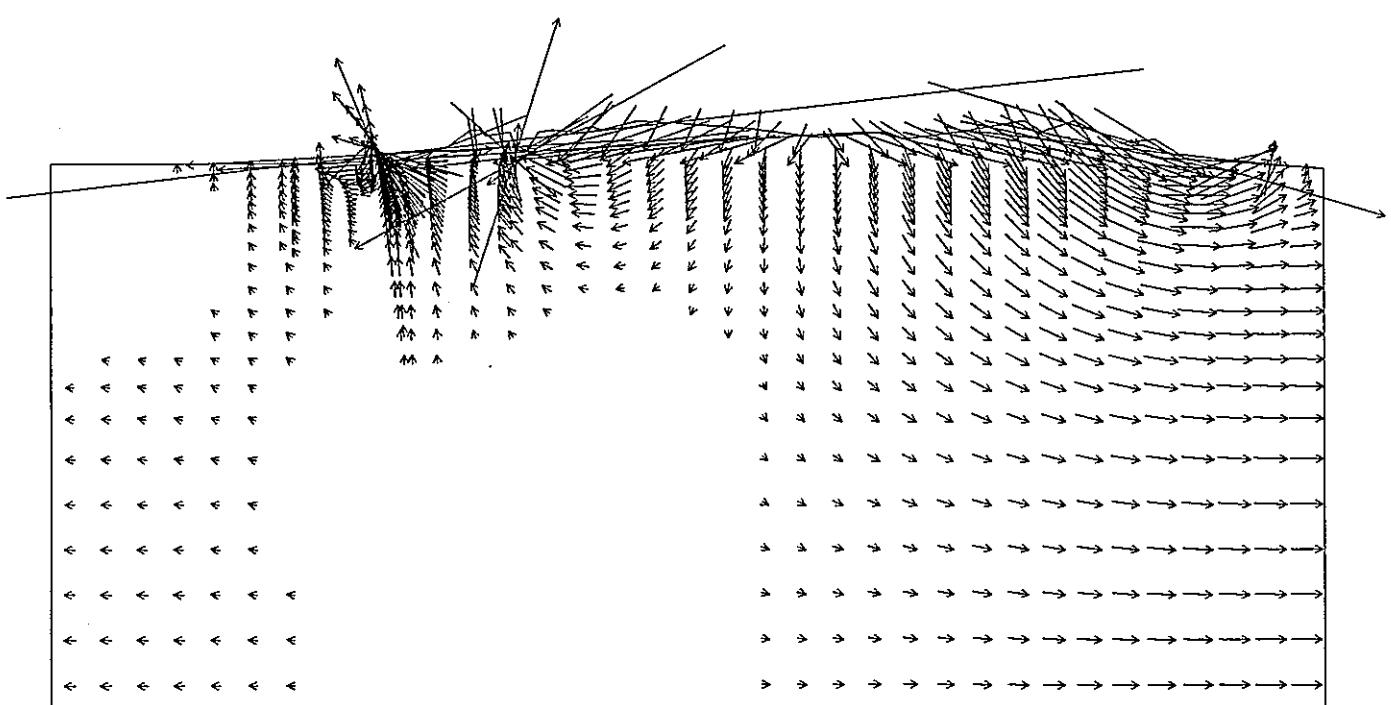
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-114 流速ベクトル(CASE9)



(c) 60 日後

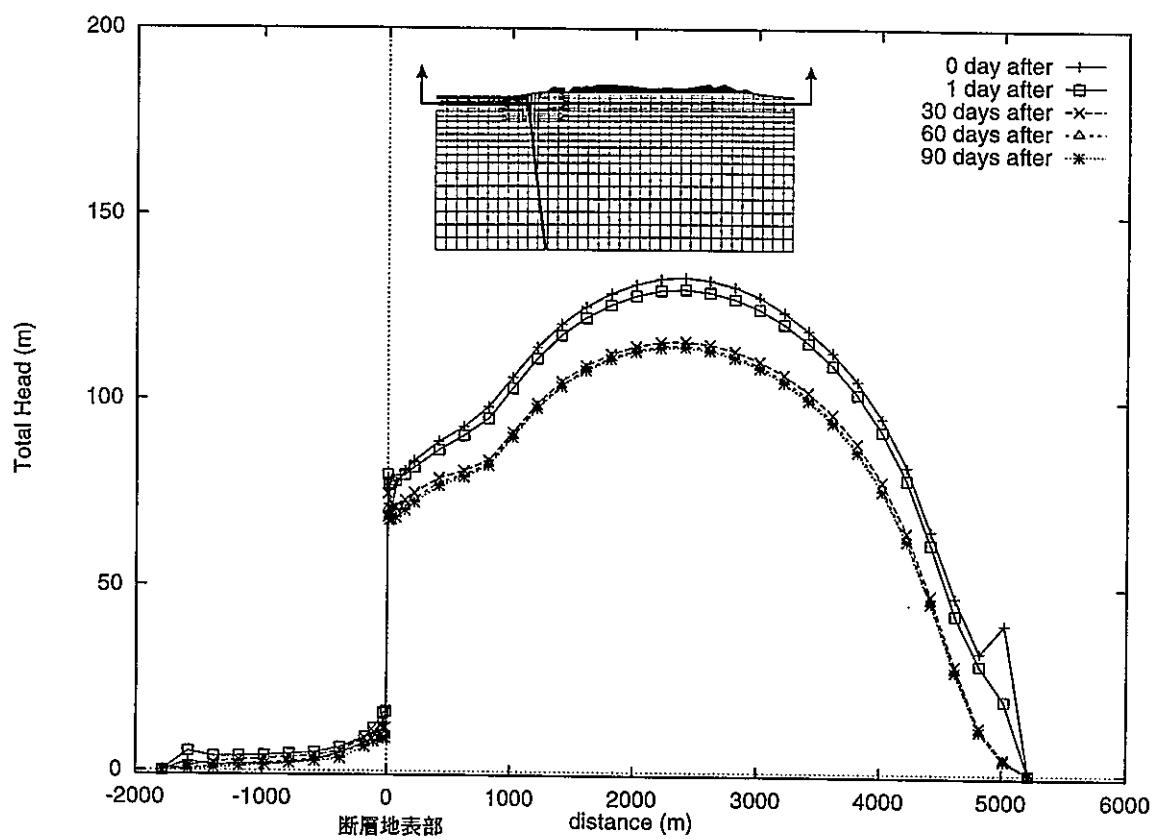
$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$



(d) 90 日後

$\longleftrightarrow : 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$

図 3-114 流速ベクトル (CASE9)



(a) EL-150m

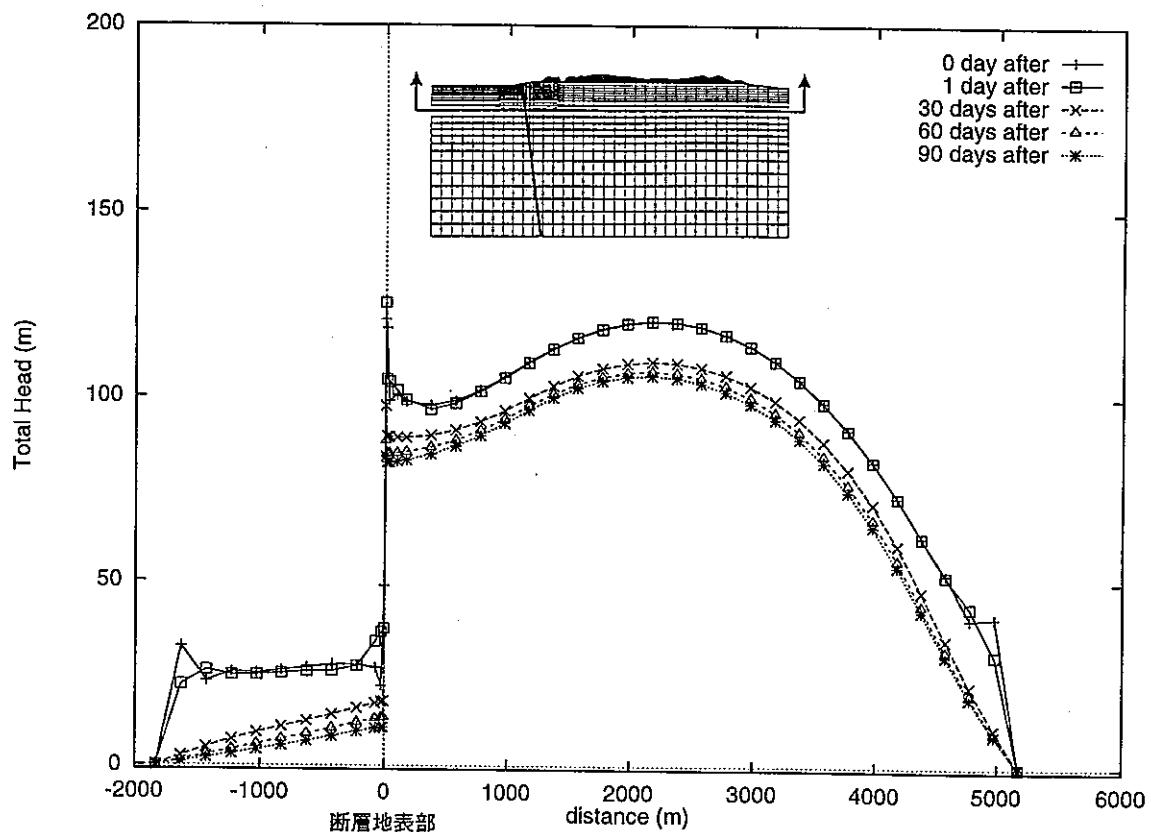
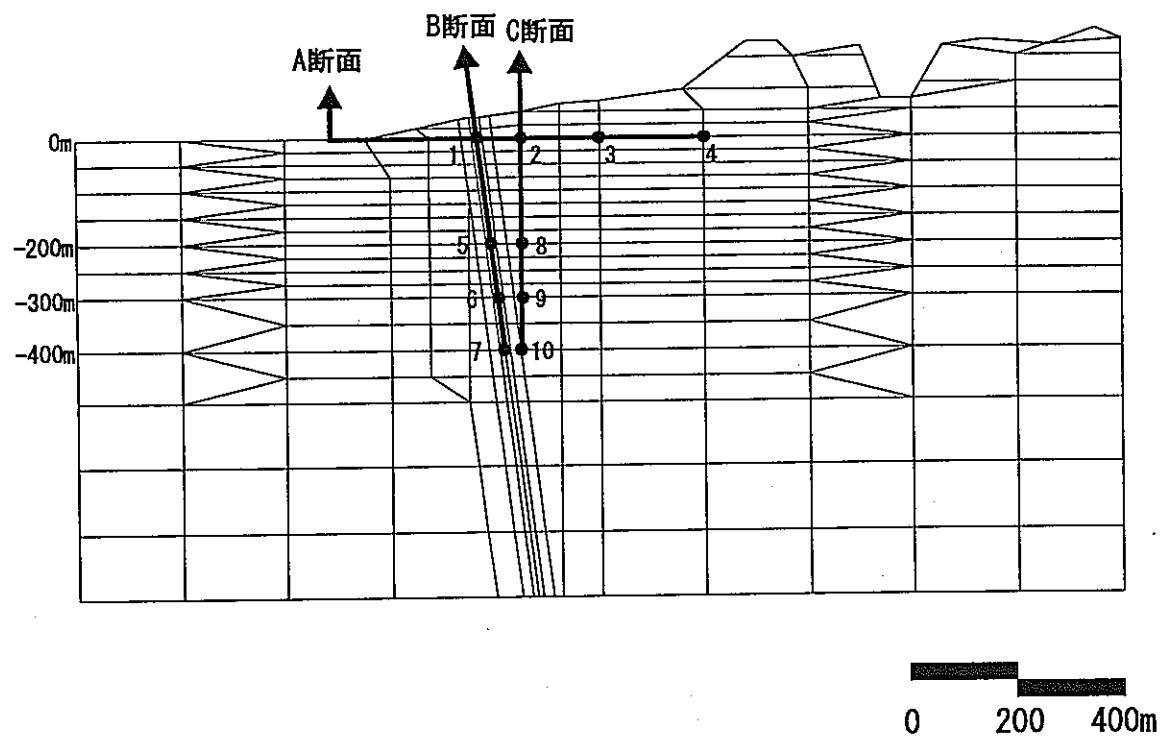
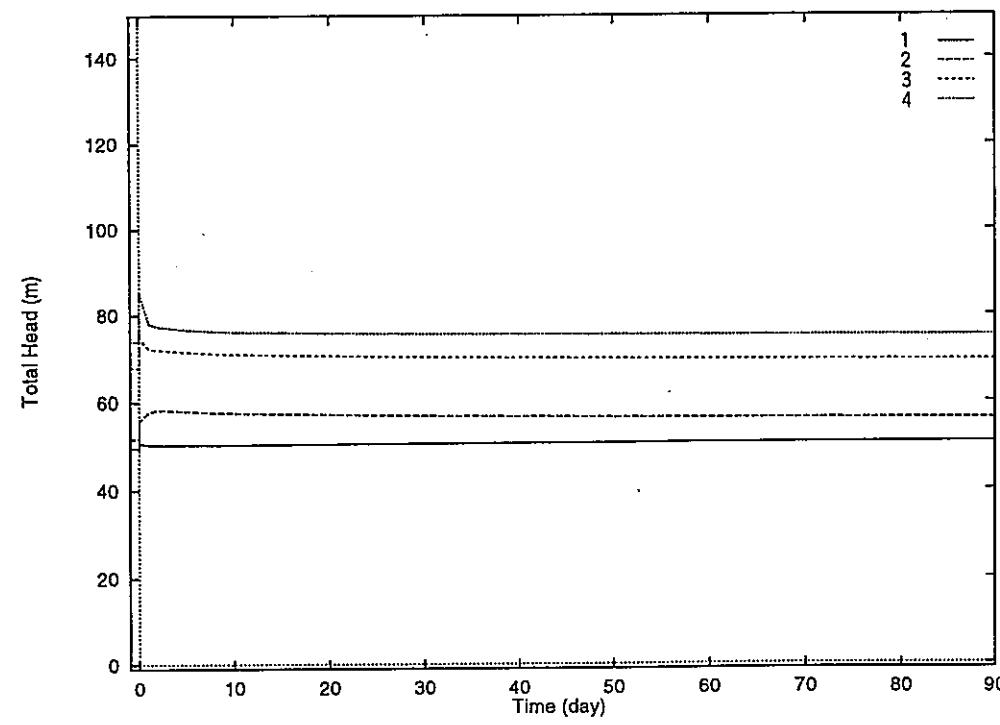


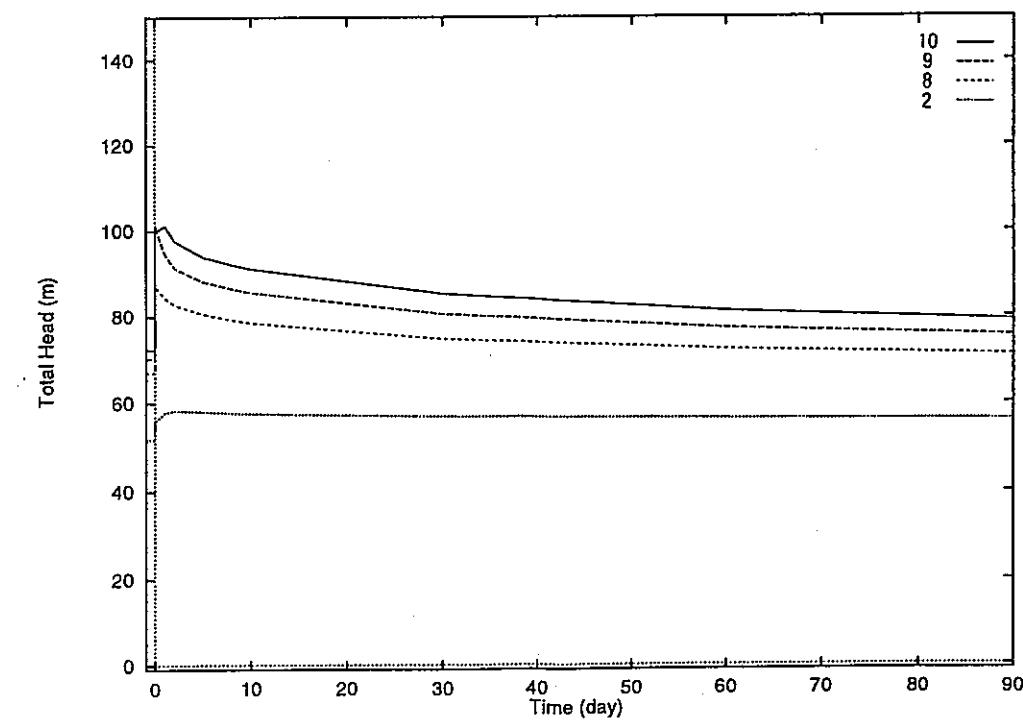
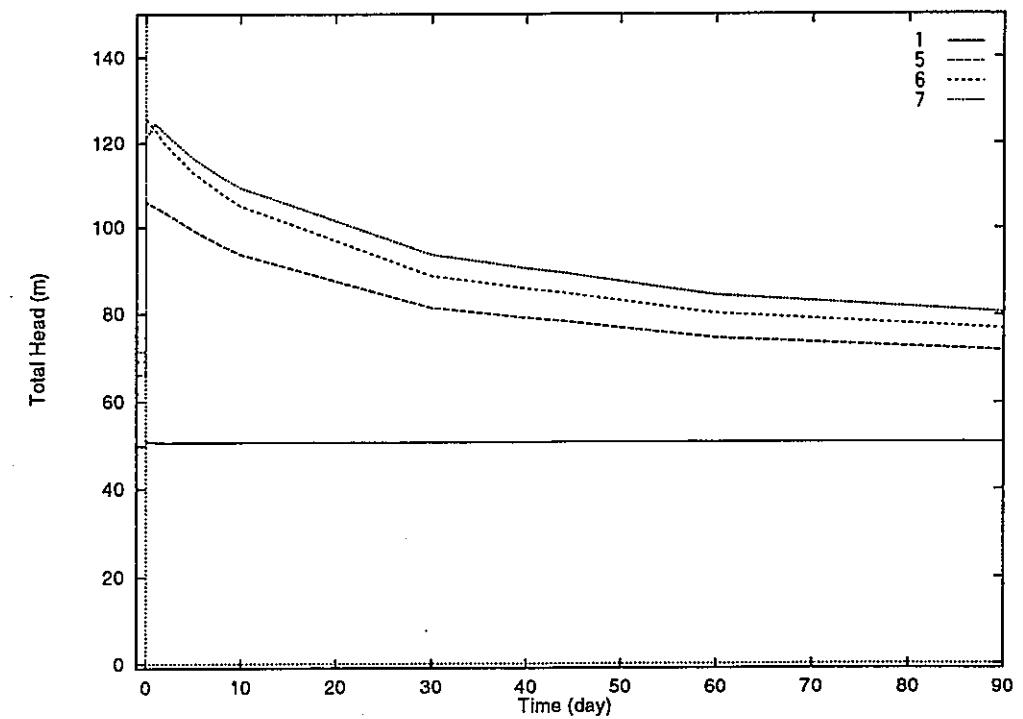
図 3-115 全水頭の空間分布(CASE9)



(b) B断面



(a) A断面



(c) C断面

図 3-116 全水頭の時間変化(CASE9)

4. 今後の課題

本検討では、応力・浸透連成解析により、野島断層の活動による周辺地下水環境の変化についてシミュレーションを行い、周辺地下水挙動をある程度再現することができた。その結果、本解析でのアプローチは、断層運動と地下水との力学的なメカニズムを解析する有効な手法のひとつと考えられる。しかしながら、実際の地下水の挙動は非常に複雑であり、その挙動を正確にシミュレートするためには、より高度なアプローチが必要である。

そのためには、次のようなことを実施していく必要があると考えられる。

(1) 現地調査

野島断層およびその周辺地盤・地下水に関しては、既に多数の調査が行われ、多くの貴重な知見が得られている。しかし、断層の力学的・水理学的特性や、周辺地下水の挙動などについては、まだ十分に解明されていない。よって、これらに関するより詳細な調査や試験を行い、地盤や地下水の性状や挙動を把握することが必要である。

(2) 岩盤の非線形挙動のモデル化

今回の解析においては、断層を含む岩盤の挙動を線形として扱っているが、実際、断層活動に伴い、断層部および周辺岩盤に破壊や緩みなどの非線形挙動が生じる。したがって、応力・浸透連成解析において、弾塑性解析等の手法を適用することにより、これらの非線形挙動を考慮した解析が必要である。

(3) 三次元解析の適用

今回解析対象とした野島断層周辺では、地震後、様々な地下水環境変化が起こっている。新たな湧水の発生ばかりでなく、既存の湧水源の水位の低下や増加等が広範囲に生じている。これらの3次元的な現象を的確にシミュレートするためには、三次元モデルによる解析は極めて重要である。

5. 参考文献

- 【1】栗田泰夫, 水野清秀, 杉山雄一, 井村隆介, 下川浩一, 奥村晃史, 佃栄吉, 木村克己, 兵庫県南部地震に伴って淡路島北西岸に出現した地震断層: 地震, 49卷1号, pp.113-124 (1996)
- 【2】池田隆司, 飯野熊久, 小林健太朗, 阪神・淡路活断層ドリリング(1)－野島断層の破碎帶と応力状態－: 日本地震学会講演予稿集, B12 (1996)
- 【3】池辺展生編, 17万分の1兵庫県地質鉱産図及び同説明書: 兵庫県, p.171 (1961)
- 【4】石井康夫, 矢嶋壮吉, 建設工事の地質診断と処方: 土木工学社, pp.62-64 (1983)
- 【5】市原実, 大阪層群: 創元社, p.340 (1993)
- 【6】伊藤久男, 桑原保人, 宮崎光旗, 木口努, 断層掘削と坑井内調査による野鳥断層の地下微細構造: 第11回地質調査所研究講演会資料, pp.66-68 (1996a)
- 【7】伊藤久男, 桑原保人, 宮崎光旗, 木口努, 活断層掘削による野島断層の地下構造, 日本地震学会講演予稿集, B07 (1996b)
- 【8】伊藤久男, 西沢修, 桑原保人, 山本晴彦, 佐野修, 小林洋二, 断層近傍における地殻応力分布: 第11回地質調査所研究講演会資料, pp.69-73 (1996c)
- 【9】今井久, 古屋和夫, 大澤英昭, 柳澤孝一, 立坑周辺地域の地下水流动の計測・評価(2)水理解析: 立坑掘削影響試験ワークショップ発表論文集, pp.33-52 (1992)
- 【10】活断層研究会, 新編日本の活断層: 東京大学出版会, p.437 (1991)
- 【11】木口努, 桑原保人, 宮崎光旗, ハイドロフォンVSPによる野島断層の透水性評価, 物理探査学会, 第94回学術講演会講演論文集, pp.44-47 (1996)
- 【12】佐藤努, 高橋誠, 松本則夫, 佃栄吉, 1995年兵庫県南部地震後に生じた淡路島の湧水: 地質ニュース, 496号, pp.61-66 (1995a)
- 【13】佐藤努, 高橋誠, 1995年兵庫県南部地震に伴う地下水の変化－淡路島で生じた湧水－: 地震予知連絡会会報, 第54巻, pp.732-734 (1995b)
- 【14】佐藤努, 高橋誠, 湧水量から推定される沈降量－1995年兵庫県南部地震による淡路島の湧水－: 日本地震学会講演1996年度秋季大会, p.106 (1996c)
- 【15】佐藤稔紀, 石丸恒存, 杉原弘造, 清水和彦, 文献調査によるわが国の岩石の物理的性質に関するデータ収集: pp.8-9 (1992)
- 【16】高橋幸蔵, 西垣好彦, 福沢久, 加島聰, 神戸層群の物理的性質: 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.21, pp.236-240 (1989)
- 【17】中島和一, 政岡郁夫, 小笠誠二, 森鼻隆夫, 田結庄良昭, 天野啓三, 淡路島北部の領家花崗岩類: 地球科学, 40巻4号, pp.227-237 (1986)
- 【18】藤田和夫, 前田保夫, 須磨地域の地質: 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, p.101 (1984)

- 【19】三木幸蔵, 古谷正和, 土木技術者のための岩石・岩盤図鑑: 鹿島出版会, pp. 4-5 (1984)
- 【20】水野清秀, 服部仁, 寒川旭, 高橋浩, 明石地域の地質: 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, p. 90 (1990)
- 【21】皆川潤, 大槻憲四郎, 日吉直, 松井和夫, 青野正夫, 野島地震断層と構造物被害について: 「阪神大震災」中間報告会予稿集, 日本応用地質学会, pp. 22-37 (1995)
- 【22】柳澤孝一, 今井久, 古屋和夫, 若松尚則, 梅田浩司, わが国を対象とした地下水流动解析 その1, 中部日本を対象とした地下水流动解析: 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所, pp. 14-15 (1992)
- 【23】吉中龍之進, 桜井春輔, 菊地宏吉, 岩盤分類とその適用: 土木工学社, pp. 39-61 (1988)
- 【24】渡辺紹裕, 堀野治彦, 水谷正一, 中村公人, 中桐貴生, 大上博基, 阪神・淡路大震災による淡路島北部の水環境の変化: 農業土木学会誌, Vol. 63,, No. 11, pp. 1161-1166 (1995)

附資料-1 応力・浸透連成解析プログラム U N I C O U P の概要

U N I C O U P

UNIFIED NORMAL AND INVERSE
STRESS AND SEEPAGE FLOW
COUPLING ANALYSIS
PROGRAM

国土が狭く急峻な日本は水資源に恵まれている反面、地下水位が高く、平野の大部分を軟弱な被履層で占められている。このことは、工学的な問題をいろいろと引き起こす原因となっている。

一般に、軟弱な地盤、特に軟らかい粘土地盤の変形は、かなり長期にわたることが多く、圧密変形と呼ばれ、その研究は古くから知られている。この現象は、土の構造骨格とその間隙を充填する地下水の相互作用によるもので、両者を切り離して軟弱地盤の変形を論じることはできない。

本プログラムは、有限要素法により応力変形と地下水浸透を連成させた解析手法と数理計画法でよく用いられる非線形最小二乗法を組み合わせることで（逆解析手法）、軟弱な地盤の変形挙動を支配する物性パラメータを合理的に推定し、決定したパラメータを用いてより信頼性の高い将来予測シミュレーションを実現するものである。

1. 支配方程式

圧密現象についての支配式には、基本的な二つの流れがある。一つは、Terzaghiの流れを汲むもの、他は、Biotが1941年に提案した多次元圧密論の考え方を基礎とするものである。前者は土塊における連続条件を基本方程式としているのに対し、後者は連続条件と同時に釣り合い条件式を連立させている。したがって、力学的には、Biotの圧密論は論理的一貫性を有し、かつ圧密現象のメカニズムを忠実に表しているのに対し、Terzaghiの圧密方程式は、釣り合い条件の考慮を必要としない特殊な場合を除いて適合条件を乱すことがある。

本プログラムは、次のBiotの圧密方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_j} + f_i = 0 \\ \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{k}{\tau_w} \nabla^2 P \\ \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

を土台に、以下のような仮定の下にその支配方程式が導かれる。

ここに、 σ'_{ij} は有効応力ランソル、Pは過剰間隙水圧、kは透水係数、 τ_w は間隙水の単位体積重量、 f_i は物体力の成分、 θ は体積ひずみであり、(1)式は土塊の釣り合い条件、(2)式は連続条件である。

1) 間隙水の運動方程式として、ダルシーの法則が成り立つ。

2) 飽和領域だけでなく、不飽和領域においても連続の式が成り立つ。

1.1 釣り合いの式

$$\sigma_{ij,j} + \rho_s b_i = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

二二六

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} T \cdot \psi$$

σ_{ij} : 全応力テンソル

σ' : 有効応力テンソル

$\delta_{1,1}$: クロネッカーのデルタ

γ_w : 水の単位体積重量

ψ : 壓力水頭 (=全水頭 - 位置水頭)

ρ_s : 固相 + 液相の密度

b₁ : 物体力

1.11 応力 - ひずみ関係

ここに、

Dijkl : 応力 - ひずみテンソル

ε_{kk} : ひずみテンソル

1.12 ひずみ - 変位関係

$$\epsilon_{i,j} = -\frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \dots \quad (5)$$

1.2 ダルシーの法則

$$v_i = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \dots \quad (6)$$

ここに、

v_1 : 流速

$k(\theta)^*$: 透水係数

h : 全水頭

1.3 質量保存則

$$-v_{i,i} = -\frac{\partial \theta}{\partial t}$$

* 飽和領域の k : 間隙比 e の関数で、 $e = A \log k + B$ とする。

A, B は定数。

不飽和領域の k : 体積含水率 θ 及び飽和透水係数の関数である。

ここに、

S_r : 饱和度

u_i : 変位

$C(\psi)$: 比水分容量 ($C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$)

n : 間隙率

ただし、間隙流体は非圧縮性で、(7)式の右辺第2項の $C(\psi)$ は、

$$n \frac{\partial S_r}{\partial \psi} = \frac{\partial (n S_r)}{\partial \psi} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = C(\psi)$$

と近似されている。

以上の(1)~(7)式より、次の2式が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \frac{1}{2} D_{ijkl} (u_{k,i} + u_{i,k}) + \delta_{ij} \tau_w h \right\}_{,j} + (\rho_s - \delta_{ij} \tau_w \delta_{ij}) b_i = 0 \\ \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ K(\theta) h_{,i} \right\}_{,i} = \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} S_r + C(\psi) \frac{\partial h}{\partial t} \end{array} \right. \quad (9)$$

(8)式は釣り合い方程式、(9)式は連続の式と呼ばれ、これらは、ある初期条件、境界条件の下に連立させて解かれる。

土の構成方程式については、多数提案されているが、粘性（クリープ効果）も取り扱っている点、異方圧密の効果、ダイラタンシーの効果、堆積年代の違いによる粘塑性ひずみ速度の差を表すための定数 $\dot{\epsilon}_{vv}$ や二次圧密の効果 (α で表す) が考慮されているなどの粘性土の力学的な挙動をほぼ完全に取り扱っている関口・太田モデルを本プログラムに用いる。

附資料-2 貯留係数の考え方

応力・浸透連成解析においては、地盤の変形が未知量として扱われるため、間隙率は変数となり、それに基づく貯留係数も変数となる。以下では、地盤の変形特性と貯留係数との関係について説明する。

質量保存則は、水の圧縮性を無視すると次式で表される。

$$-v_{i,i} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\theta = nSr \quad (2)$$

ここに、 θ ：体積含水率、 v ：地下水水流速、 n ：土の間隙率、 Sr ：飽和度である。

(1)式の右辺に(2)式を代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t}(nSr) \\ &= Sr \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial Sr}{\partial t} \\ &= \left(Sr \frac{\partial n}{\partial \psi} + n \frac{\partial Sr}{\partial \psi} \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここに、 ψ は圧力水頭を意味する。(3)式を、飽和不飽和解析においては、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = (\alpha Ss + C(\psi)) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

のように表している。ここに、 Ss ：貯留係数、 $C(\psi)$ ：比水分容量である。また、

$$\begin{cases} \text{飽和領域} & : \alpha = 1, Sr = 1, C(\psi) = 0 \\ \text{不飽和領域} & : \alpha = 0 \end{cases}$$

である。土粒子構造の体積変化を考慮しない場合すなわち単なる浸透流の場合は、 Ss をコンスタントとして与え、 $C(\psi)$ は、不飽和特性曲線により決定する。

連成解析においては、飽和領域の貯留係数は、

$$Ss = \frac{\partial n}{\partial \psi} = \frac{\partial u_{i,i}}{\partial \psi} \quad (5)$$

に対応している。すなわち、有効応力解析から得られた土の変形($u_{i,i}$)によって変化する。実際には、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = Sr \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (6)$$

のように計算を行っている。

したがって、土の弾性係数を大きく評価することは、変形量を小さく、すなわち、貯留係数 Ss を小さく評価することに対応し、弾性係数を小さく評価することは、貯留係数 Ss を大きく評価することに相当する。