

JNC TJ7400 2004-006

掘削損傷領域を考慮した MBC モデルによる 坑道掘削影響解析

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2004 年 2 月

鹿島建設株式会社

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaragi 319-1184, Japan

(C) 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

JNC TJ7400 2004-006

掘削損傷領域を考慮した MBC モデルによる
坑道掘削影響解析

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2004 年 2 月

鹿島建設株式会社

掘削損傷領域を考慮したMBCモデルによる坑道掘削影響解析

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

森 孝之* 森川 誠司** 田部井 和人** 岩野 圭太*

要 旨

核燃料サイクル開発機構では、超深地層研究所計画（以下、MIU 計画）の第1段階における研究として、掘削影響領域の予測解析手法の整備・高度化を進めている。昨年までに、岩盤内の亀裂挙動を考慮できる解析手法の1つである MBC (Micromechanics Based Continuum Model) 解析についても、2次元掘削影響解析を実施してきた。ただし、本解析手法は、通常の有限要素法の掘削解析同様、応力再配分現象のみを捉える解析となっており、発破や機械掘削により生じた掘削損傷領域を考慮していない。そこで、本業務では、MBC モデルを対象に、掘削損傷領域のモデル化手法を確立するとともに、掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析を実施し、掘削損傷領域を考慮することによる掘削影響についての検討を行った。得られた知見については以下の通りである。

1. MBC モデルで使用する岩盤や亀裂のパラメータについて感度解析を実施し、各パラメータが掘削影響領域に与える影響とその鋭敏性について検証し、亀裂密度と岩盤基質部の弾性係数の影響度が高いことが分かった。
2. 立坑・横坑断面に対し、掘削損傷領域を考慮した解析ケースを実施した。設定した掘削損傷領域内の亀裂密度を大きくするほど、またその領域を広げるほど、亀裂の開口量は増大し、等価せん断剛性は低減した。
3. 掘削損傷領域内の亀裂状態に関して、先在亀裂が進展する場合と、新たに坑道壁面平行に亀裂が発生する場合について解析を実施した結果、前者のケースは後者に比して、設定した掘削損傷領域の外へより影響が及ぶ傾向であった。
4. 以上の結果から、MBC モデルを用いた掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析による研究坑道の詳細検討は可能であることが分かった。また、研究坑道の岩盤挙動の実計測を通して本解析の検証を行うことができると思われる。

本報告書は、鹿島建設株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ

* 鹿島建設（株）技術研究所

** 鹿島建設（株）ITソリューション部

MBC analysis for rock mass behavior in excavating research shafts and galleries in consideration of Excavation Damaged Zone

Takayuki Mori*, Seiji Morikawa**, Kazuto Tabei**, Keita Iwano*

Abstract

JNC Tono Geoscience Center planed a comprehensive geoscientific research program for the construction of an underground research laboratory in order to conduct the research and evaluation of geological environment.

So far, based on mechanical data from 1,000-m borehole tests, several numerical analysis models, which consider the behavior of joints in a rock mass, have been applied to this site, and the discontinuous rock behavior around the shafts and galleries has been predicted. However, none of these analyses considered the "Excavation Damaged Zone".

In this study, in order to grasp the extent of the Excavation Disturbed Zone, MBC analysis considering the Excavation Damaged Zone was carried out and the following results were obtained.

1. Using several parameters relevant to the rock and joints, a parametric study was performed to verify the effect on and sensitivity of the behavior of the Excavation Disturbed Zone. The results showed that joint frequency and Young's modulus of the rock were much effective parameters.
2. Based on the parametric study, several analyses for shaft and gallery were conducted. As the joint density increased and the area of the Excavation Damaged Zone expanded, the joint opening area increased and the equivalent shear stiffness decreased.
3. Two contrasting cases were also analyzed: one was assumed that pre-existing joints progress in the Excavation Damaged Zone, and the other assumed that joints tangential to the excavation wall are generated in the Excavation Damaged Zone. It was found that Excavation Damaged Zone tends to be larger in the former case than the latter case.
4. From these results, prediction analysis for Excavation Disturbed Zone considering the Excavation Damaged Zone was found to be practical. Through the in-situ monitoring data for shafts and galleries, the validity of these analyses will be verified.

This work was performed by Kajima Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Tono Geoscience Center, Mizunami Underground Research Laboratory,
Underground Research Group

* : Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

** : IT Solution Department, Kajima Corporation

掘削損傷領域を考慮したMBCモデルによる坑道掘削影響解析

目次

1. はじめに.....	1
2. 業務概要.....	3
2. 1 件名	3
2. 2 実施期間	3
2. 3 実施機関	3
2. 4 納入場所	3
2. 5 実施内容	3
2. 6 参考技術資料	3
3. MBC 解析の概要.....	4
3. 1 MBC モデルの概要	4
3. 1. 1 マイクロメカニクスに基づく連続体理論	4
3. 1. 2 平均ひずみと平均応力	4
3. 1. 3 岩盤中における亀裂の挙動	5
3. 1. 4 亀裂を含む岩盤の応力・ひずみ関係	6
3. 1. 5 MBC モデルの特徴	10
3. 1. 6 MBC モデルの各パラメータと亀裂剛性の関係	12
3. 2 解析結果の評価指標	16
3. 2. 1 亀裂の開口量	16
3. 2. 2 局所安全率	16
3. 2. 3 等価剛性	17
3. 2. 4 透水係数	17
3. 3 MBC モデルで使用する亀裂パラメータ	18
4. 感度解析.....	20
4. 1 解析目的	20
4. 2 解析条件	20
4. 2. 1 共通解析条件	20
4. 2. 2 解析ケース	23
4. 3 解析結果	26
4. 3. 1 岩盤基質部の弾性係数 E	26
4. 3. 2 亀裂密度 $1/d$	27
4. 3. 3 亀裂面の起伏角 α	28
4. 3. 4 亀裂面の摩擦角 ϕ	30
4. 3. 5 亀裂面の方向 θ	31
4. 4 感度解析まとめ	47

5. 挖削損傷領域を考慮した坑道掘削解析	49
5. 1 解析目的	49
5. 2 解析条件	50
5. 2. 1 共通解析条件	50
5. 2. 2 解析ケース	55
5. 3 解析結果	61
5. 3. 1 挖削損傷解析ケース1（既存亀裂が進展した解析）	61
5. 3. 2 挖削損傷解析ケース2（壁面平行方向亀裂が新規発生した解析）	67
5. 4 坑道掘削解析まとめ	101
5. 4. 1 挖削損傷領域の特性の違いによる影響	101
5. 4. 2 挖削損傷領域の広がりの違いによる影響	101
5. 4. 3 挖削損傷領域の亀裂のモデル化による影響	101
5. 4. 4 挖削損傷領域考慮による坑道支保の評価	102
6. おわりに	103
参考文献	106

表 目 次

3章

表3. 3. 1 亀裂パラメータの設定方法	19
-----------------------	----

4章

表4. 2. 1 基本ケースの入力特性値	22
表4. 2. 2 感度解析（基質岩盤の弾性係数比 E/E_0 ）	23
表4. 2. 3 感度解析（亀裂密度 $1/d$ ）	23
表4. 2. 4 感度解析（亀裂面の起伏角 α ）	24
表4. 2. 5 感度解析（亀裂面の摩擦角 ϕ ）	24
表4. 2. 6 感度解析（亀裂面の方向 θ ）	24
表4. 2. 7 感度解析の入力特性値一覧	25
表4. 2. 8 各感度パラメータでの亀裂の開口量	47
表4. 2. 9 感度パラメータの亀裂開口に対する影響	47

5章

表5. 2. 1 立坑 初期応力	51
表5. 2. 2 横坑 初期応力	51
表5. 2. 3 立坑 岩盤および亀裂の特性値（掘削損傷領域は各ケースごとに指定）	52
表5. 2. 4 横坑 岩盤および亀裂の特性値（掘削損傷領域は各ケースごとに指定）	52
表5. 2. 5 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析（立坑）	56
表5. 2. 6 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析（横坑）	56
表5. 2. 7 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりの違いによる解析（立坑）	57
表5. 2. 8 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりの違いによる解析（横坑）	57
表5. 2. 9 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析（立坑）	59
表5. 2. 10 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析（横坑）	59
表5. 2. 11 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりの違いによる解析（立坑）	60
表5. 2. 12 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりの違いによる解析（横坑）	60
表5. 3. 1 掘削損傷領域（既存亀裂進展）の特性の違いによる解析結果のまとめ（立坑）	61
表5. 3. 2 掘削損傷領域（既存亀裂進展）の特性の違いによる解析結果のまとめ（横坑）	62
表5. 3. 3 掘削損傷領域（既存亀裂進展）の領域の違いによる解析結果のまとめ（立坑）	64
表5. 3. 4 掘削損傷領域（既存亀裂進展）の領域の違いによる解析結果のまとめ（横坑）	65
表5. 3. 5 掘削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の特性の違いによる解析結果のまとめ（立坑）	67
表5. 3. 6 掘削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の特性の違いによる解析結果のまとめ（横坑）	68
表5. 3. 7 掘削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の領域の違いによる解析結果のまとめ（立坑）	70
表5. 3. 8 掘削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の領域の違いによる解析結果のまとめ（横坑）	71

図 目 次

1章

図 1. 1	掘削損傷領域と掘削影響領域の定義	2
--------	------------------	---

3章

図 3. 1. 1	亀裂を有する岩盤と等価連続体	4
図 3. 1. 2	起伏を有する亀裂と作用応力	5
図 3. 1. 3	問題の重ね合わせ	7
図 3. 1. 4	巨視的接線コンプライアンスの算定手順	9
図 3. 1. 5	MBC 解析のフロー	11
図 3. 1. 6	解析条件	12
図 3. 1. 7	応力—ひずみ関係	12
図 3. 1. 8	ダイレイテーションのイメージ	12
図 3. 1. 9	起伏角と亀裂の剛性の関係	15
図 3. 1. 10	摩擦角と亀裂の剛性の関係	15
図 3. 2. 1	亀裂の起伏両側における局所安全率の計算	16
図 3. 3. 1	MBC モデルで使用する亀裂パラメータ	18

4章

図 4. 2. 1	感度解析 メッシュ図	21
図 4. 2. 2	境界条件	21
図 4. 2. 3	掘削損傷領域と亀裂	22
図 4. 2. 4	解析ステップ	22
図 4. 2. 5	各ケースでの亀裂の方向のイメージ	24
図 4. 3. 1	感度解析センター図（感度パラメータ：弾性係数 E 100%・50%・25%）	32
図 4. 3. 2	感度解析グラフ：パラメータ 弾性係数 E（立坑：北側）	33
図 4. 3. 3	感度解析グラフ：パラメータ 弹性係数 E（立坑：東側）	34
図 4. 3. 4	感度解析センター図（感度パラメータ：亀裂頻度 1/d 1倍・2倍・3倍・4倍）	35
図 4. 3. 5	感度解析グラフ：パラメータ 亀裂頻度 1/d（立坑：北側）	36
図 4. 3. 6	感度解析グラフ：パラメータ 亀裂頻度 1/d（立坑：東側）	37
図 4. 3. 7	感度解析センター図（感度パラメータ：起伏角 α 5°・10°・20°）	38
図 4. 3. 8	感度解析グラフ：パラメータ 起伏角 α （立坑：北側）	39
図 4. 3. 9	感度解析グラフ：パラメータ 起伏角 α （立坑：東側）	40
図 4. 3. 10	感度解析センター図（感度パラメータ：摩擦角 ϕ 10°・20°・35°）	41
図 4. 3. 11	感度解析グラフ：パラメータ 摩擦角 ϕ （立坑：北側）	42

図4. 3. 12	感度解析グラフ：パラメータ 摩擦角 ϕ （立坑：東側）	43
図4. 3. 13	感度解析センター図 (感度パラメータ：亀裂方向 θ 東西方向・壁面平行方向・壁面垂直方向)	44
図4. 3. 14	感度解析グラフ：パラメータ 亀裂方向 θ （立坑：北側）	45
図4. 3. 15	感度解析グラフ：パラメータ 亀裂方向 θ （立坑：東側）	46

5章

図5. 2. 1	解析ステップ	53
図5. 2. 2	立坑 解析メッシュ	54
図5. 2. 3	横坑 解析メッシュ	54
図5. 2. 4	各坑道で設定した掘削損傷領域の範囲	55
図5. 3. 1	亀裂の特性の違いによる影響センター図 —立坑—（既存亀裂が進展した場合） (損傷域：①考慮なし ②亀裂密度4倍 ③亀裂密度8倍)	73
図5. 3. 2	亀裂の特性の違いによる影響（既存亀裂が進展した場合）（立坑：北側）	74
図5. 3. 3	亀裂の特性の違いによる影響（既存亀裂が進展した場合）（立坑：東側）	75
図5. 3. 4	亀裂の特性の違いによる影響センター図 —横坑— (既存亀裂が進展した場合) (損傷域：①考慮なし ②亀裂密度4倍 ③亀裂密度8倍)	76
図5. 3. 5	亀裂の特性の違いによる影響（既存亀裂が進展した場合）（横坑：水平左側）	77
図5. 3. 6	亀裂の特性の違いによる影響（既存亀裂が進展した場合）（横坑：鉛直上側）	78
図5. 3. 7	亀裂の特性の違いによる影響（既存亀裂が進展した場合）（横坑：水平右側）	79
図5. 3. 8	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響センター図 —立坑— (損傷域：①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm)	80
図5. 3. 9	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響 (既存亀裂が進展した場合)（立坑：北側）	81
図5. 3. 10	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響 (既存亀裂が進展した場合)（立坑：東側）	82
図5. 3. 11	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響センター図 —横坑— (既存亀裂が進展した場合) (損傷域：①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm)	83
図5. 3. 12	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響 (既存亀裂が進展した場合)（横坑：水平左側）	84
図5. 3. 13	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響 (既存亀裂が進展した場合)（横坑：鉛直上側）	85
図5. 3. 14	亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響 (既存亀裂が進展した場合)（横坑：水平右側）	86
図5. 3. 15	亀裂の特性の違いによる影響センター図 —立坑—	

(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)	
(亀裂密度 $1/d$: ①考慮なし ②5本/m ③10本/m ④20本/m) 87	87
図5.3.16 亀裂の特性の違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(立坑:北側) 88	88
図5.3.17 亀裂の特性の違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(立坑:東側) 89	89
図5.3.18 亀裂の特性の違いによる影響センター図—横坑—	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)	
(亀裂密度 $1/d$: ①考慮なし ②5本/m ③10本/m ④20本/m) 90	90
図5.3.19 亀裂の特性の違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:水平左側) 91	91
図5.3.20 亀裂の特性の違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:鉛直上側) 92	92
図5.3.21 亀裂の特性の違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:水平右側) 93	93
図5.3.22 亀裂の掘削損傷領域の広がりの違いによる影響センター図—立坑—	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)	
(損傷域: ①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm) 94	94
図5.3.23 亀裂の掘削損傷領域の広がり違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(立坑:北側) 95	95
図5.3.24 亀裂の掘削損傷領域の広がり違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(立坑:東側) 96	96
図5.3.25 亀裂の掘削損傷領域の広がり違いによる影響センター図—横坑—	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)	
(損傷域: ①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm) 97	97
図5.3.26 亀裂の掘削損傷領域の広がり違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:水平左側) 98	98
図5.3.27 亀裂の掘削損傷領域の広がり違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:鉛直上側) 99	99
図5.3.28 亀裂の掘削損傷領域の広がり違いによる影響	
(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:水平右側) 100	100
6章	
図6.1.1 本解析結果の検証のための計測レイアウト例 105	105

1. はじめに

超深地層研究所計画（以下、MIU 計画）の第 1 段階における岩盤力学研究では、岩芯やボーリング孔を利用した試験などにより、岩盤の力学特性や初期応力状態を評価して、施設スケールの岩盤力学モデルを構築するとともに、その岩盤力学モデルをもとに坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の挙動を推定し、その結果を坑道の力学的安定性の評価や詳細設計、さらに次段階以降の調査・研究計画の策定に反映することとしている。

地下深部に坑道を掘削すると、その周辺岩盤には初期の岩盤と力学的・水理学的特性が変化する領域（以下、掘削影響領域）が生じる。この掘削影響領域は坑道壁面から地山に向けて掘削損傷領域、不飽和領域、応力再分配領域の順に分けられ、これらの領域の挙動予測は坑道の力学的な安定性を評価する上で極めて重要となる。

以上の観点から、核燃料サイクル開発機構では、MIU 計画の第 1 段階における研究として、複数の掘削影響領域の予測解析手法の整備・高度化を進めている。昨年までに、岩盤内の亀裂挙動を考慮できる解析手法の 1 つである MBC (Micromechanics Based Continuum Model) 解析について、2 次元掘削影響解析を実施してきた。ただし、本解析手法は、通常の有限要素法の掘削解析同様、応力再配分現象のみを捉える解析となっており、発破や機械掘削により生じた掘削損傷領域を考慮していない。また、この掘削損傷領域は坑道壁面の周囲に発生するため、これを考慮した場合、他の領域の挙動予測にそれ相応の影響があると考えられる。

そこで、本業務では、MBC モデルを対象に、掘削損傷領域のモデル化手法を確立するとともに、掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析を実施し、掘削損傷領域を考慮することによる掘削影響を明らかにする。本報告書の構成は以下のとおりである。

まず、2 章で本業務概要を示したのち、3 章にて本業務で用いた MBC モデルの概要および 4 章以降の解析結果の評価方法として用いる指標の定義や算出方法について説明する。

4 章では、亀裂や岩盤の特性に関する種々のパラメータについて感度解析を実施し、解析結果に及ぼす各パラメータの影響度を評価した。

5 章では、4 章の感度解析の結果を受け、具体的に研究坑道の立坑部および横坑部を対象として、掘削損傷領域内の亀裂特性や広がりをパラメータとした挙動予測解析を行い、岩盤変位や亀裂の開口量を主な指標として掘削損傷領域を考慮することによる掘削影響予測への影響についてまとめた。

6 章では、以上の解析結果を総括するとともに、今後本格的に進められる MIU 計画の坑道掘削時において、本解析の結果の検証・評価をするために必要と思われる調査・計測を提案した。

なお、本解析業務内において、「掘削損傷領域」および「掘削影響領域」の定義を図 1. 1 のように定める。

「掘削損傷領域」・・・発破や掘削機械により、物理的に損傷を受けた領域であり、掘削壁面の最も近傍の領域である。4章以降の解析では、この「掘削損傷領域」内の物性の変化や広がりを1つの解析パラメータとしている。

(Excavation Damaged Zone)

「掘削影響領域」・・・発破や機械掘削による物理的損傷だけでなく、掘削によって生じた力学的・水理学的な物性の影響領域である。本解析では「掘削損傷領域」の各パラメータ設定により、この「掘削影響領域」への影響を検証することを目的としている。

(Excavation Disturbed Zone)

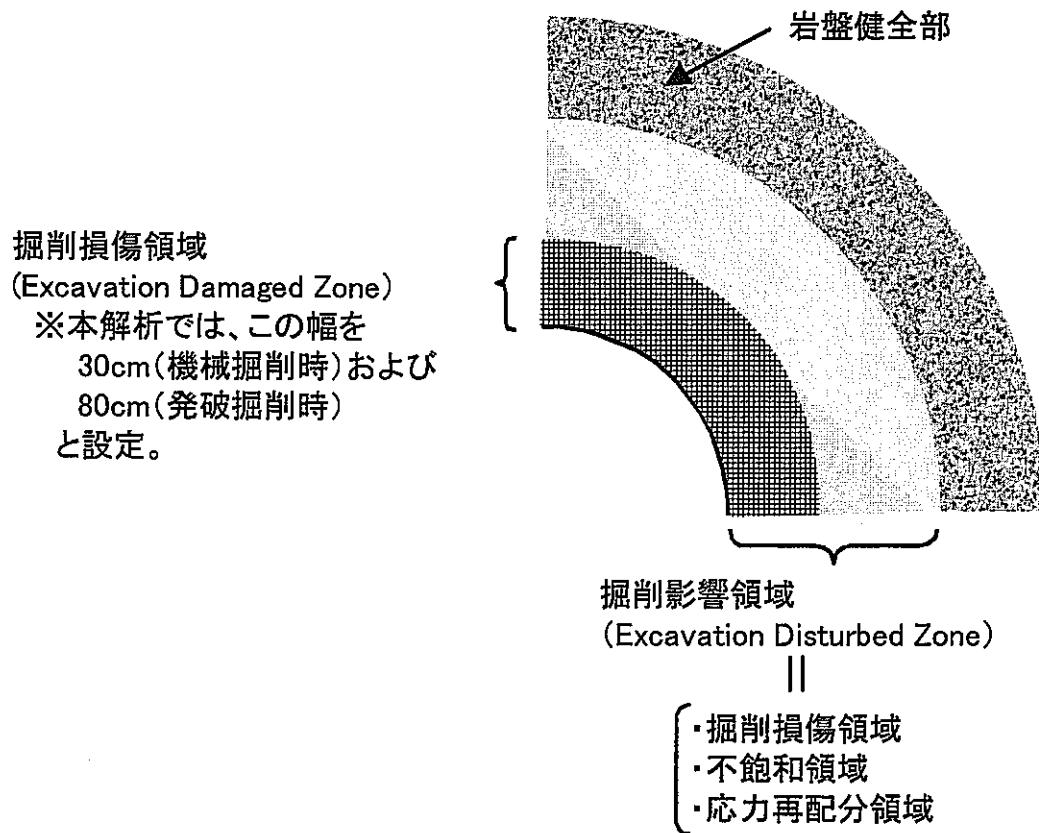


図1.1 掘削損傷領域と掘削影響領域の定義

2. 業務概要

2. 1 件名

「掘削損傷領域を考慮した MBC モデルによる坑道掘削影響解析」

2. 2 実施期間

自 平成 15 年 11 月 5 日

至 平成 16 年 2 月 27 日

2. 3 実施機関

鹿島建設技術研究所

〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 (Tel 0424-89-7081)

2. 4 納入場所

岐阜県土岐市泉町定林寺 959 番地 31

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

2. 5 実施内容

- 1) 掘削損傷領域を考慮に入れた MBC モデルによる掘削影響解析
- 2) 解析結果等のとりまとめ
- 3) 報告書の作成

2. 6 貸与技術資料

本業務を実施するにあたり、核燃料サイクル開発機構殿より貸与を受けた技術資料は以下の通りである。

技術資料：「研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析」

; JNC TJ7400 2002-007

3. MBC 解析の概要

ここでは MBC モデル (Micromechanics-Based Continuum model) の概要と本報告書において解析結果の評価方法として用いる亀裂の開口量、局所安全率、各要素の等価剛性、亀裂開口による透水係数変化の定義や算出方法について説明する。

3. 1 MBC モデルの概要¹⁾

3. 1. 1 マイクロメカニクスに基づく連続体理論

岩盤にマイクロメカニクスに基づく連続体理論を適用する場合、微視構造要素は個々の亀裂である。亀裂を多数有する岩盤を等価な連続体に置き換えるとき、まず、図 3. 1. 1 に示すような亀裂を多数有する岩盤の任意の点に着目し、その点を含む部分領域である代表要素 (Representative Volume Element, R.V.E.) を考える。ここで、代表要素は、微視構造要素に比べて十分に大きく、かつ物体の代表寸法に比べて十分小さい領域とする。その代表要素における平均応力と平均ひずみの関係、すなわち巨視的な構成式を求め、この構成式が等価な連続体の一点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行う。

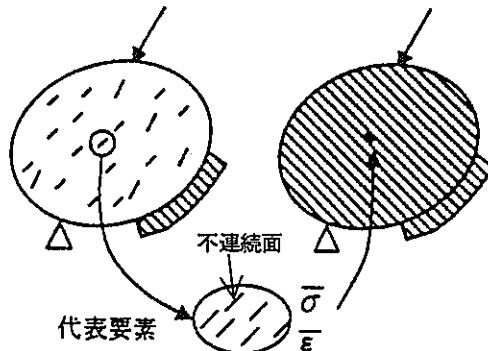


図 3. 1. 1 亀裂を有する岩盤と等価連続体¹⁾

3. 1. 2 平均ひずみと平均応力

代表要素における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する亀裂の寸法、平均間隔、方向に依存し、材料は異方的な挙動を強く呈する。ここで、亀裂を含む岩盤の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ と平均ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}_{ij}$ 増分の関係は、代表要素の応力増分とひずみ増分を平均化することにより、次のように得られる。

$$\Delta\bar{\epsilon}_{ij} = D_{ijkl}^R \Delta\bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{\Omega^m} (\Delta[u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + \Delta[u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) ds \quad (3. 1. 1)$$

ここで、 V は代表要素の体積、 D_{ijkl}^R は岩盤基質部のコンプライアンス tensor、 Ω^m は代表要素 V 中の m 番目の亀裂、 $n_i^{(m)}$ はその亀裂の単位法線ベクトル、そして $[u_i^{(m)}]$ はその亀裂の相対変位量である。ここで、亀裂における相対変位増分 $\Delta[u_i^{(m)}]$ が平均応力

増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ の関数として与えられるならば、式(3. 1. 1)より岩盤の構成式が、

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{ij} = \bar{D}_{ijkl}\Delta\bar{\sigma}_{kl} \quad (3. 1. 2)$$

と得られる。ここで、 \bar{D}_{ijkl} は亀裂を含む岩盤の巨視的接線コンプライアンスである。

3. 1. 3 岩盤中における亀裂の挙動

亀裂を多数含む岩盤において空洞掘削が行われる場合、地山応力解放により生ずる亀裂のせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的メカニズムと考えられる。しかし、空洞掘削時の空洞周辺の応力場は、掘削に伴って応力が解放されるが、依然として圧縮場にあるものと言える。そこで、圧縮下において亀裂が開口変形を生ずるメカニズムとして、図3. 1. 2に示すような起伏を有する亀裂を考え、起伏面でクーロンの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口を生ずると考える。すなわち、亀裂は次に示すような条件を満たした時、せん断すべりを生ずるものと仮定した。

$$|\bar{\sigma}_s^{J'}| = -\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^{J'} < 0 \quad (3. 1. 3)$$

ここで ϕ は亀裂面の摩擦角であり $\bar{\sigma}_n^{J'}$, $\bar{\sigma}_s^{J'}$ は起伏を有する亀裂のせん断面に作用する法線方向および接線方向の局所的平均応力である。

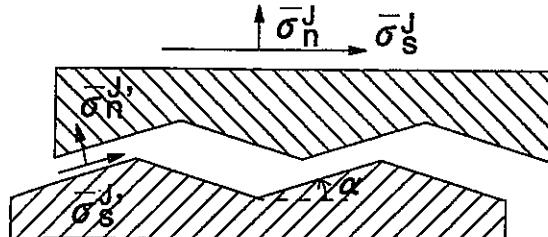


図3. 1. 2 起伏を有する亀裂と作用応力¹⁾

また、亀裂の一方の面でせん断すべりが生じた場合、他方の面では亀裂の開口が起こるため、ストレスフリーになるものと仮定している。従って、亀裂全体に作用する巨視的な法線方向・接線方向の平均増分 $\Delta\bar{\sigma}_n^J$, $\Delta\bar{\sigma}_s^J$ は亀裂のせん断面に作用する平均応力増分を用いて次のように表される。

$$\Delta\bar{\sigma}_n^J = \frac{1}{2}(\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} \tan \alpha + \Delta\bar{\sigma}_n^{J'}) \quad (3. 1. 4)$$

$$\Delta\bar{\sigma}_s^J = \frac{1}{2}(\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} - \Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \alpha) \quad (3. 1. 5)$$

ここで α は起伏角である。せん断すべりを起こしている間、すべりを生じている亀裂における応力増分は次の条件を満たすものと仮定している。

$$\Delta \bar{\sigma}_s^{J'} = \begin{cases} -\Delta \bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi & \alpha > 0 \\ \Delta \bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi & \alpha < 0 \end{cases}$$

(3. 1. 6)

さらに、すべりを生じている面における変位成分は、せん断方向のすべりのみを生じて、法線方向には変位を生じないものとする。これは局所的なダイレイテーションが巨視的な起伏によるダイレイテーションに比べて小さく、無視できるからである。これにより、亀裂の相対変位増分の法線・接線方向の成分($\Delta[\bar{u}_n^s]$, $\Delta[\bar{u}_s^s]$)とすべり面に対する法線・接線方向成分($\Delta[\bar{u}_n^{J'}]$, $\Delta[\bar{u}_s^{J'}]$)の関係は次のように表される。

$$\Delta[\bar{u}_n^{J'}] = \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \sin \alpha \quad (3. 1. 7)$$

$$\Delta[\bar{u}_s^{J'}] = \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \cos \alpha \quad (3. 1. 8)$$

$$\Delta[\bar{u}_n^{J'}] = 0 \quad (3. 1. 9)$$

3. 1. 4 亀裂を含む岩盤の応力・ひずみ関係

亀裂を含む岩盤の応力・ひずみ関係は以下のように問題の重ね合わせを考えることにより導入される。図3. 1. 3に示すようにある1つの亀裂だけに着目し、その亀裂を包含する系を等価な均一材料とみなす。これには無限遠方に平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}$ が、そして亀裂上には $\Delta\bar{\sigma}^J$ が作用しているものとする。この問題(a)を(b)「亀裂を含まない均一な問題」、(c)「亀裂をくり抜いたスリット問題」、(d)「くり抜かれた亀裂の問題」の3つに分ける。ここで、問題(c)におけるスリットの相対変位増分の平均値 $\Delta[\bar{u}^s]$ とスリットに作用する平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}^J - \Delta\bar{\sigma}$ の関係は系の剛性により以下のように与えられる。

$$\Delta\bar{\sigma}_n - \Delta\bar{\sigma}_n^J = \bar{K}_n \Delta[\bar{u}_n^s] \quad (3. 1. 10)$$

$$\Delta\bar{\sigma}_s - \Delta\bar{\sigma}_s^J = \bar{K}_s \Delta[\bar{u}_s^s] \quad (3. 1. 11)$$

ここで \bar{K}_n , \bar{K}_s はそれぞれ亀裂の法線方向, 接線方向の系の剛性であり,

$$\bar{K}_n = \frac{\bar{E}}{\lambda_n^0 L^J / 2} \quad (3. 1. 12)$$

$$\bar{K}_s = \frac{\bar{G}}{\lambda_s^0 L^J / 2} \quad (3. 1. 13)$$

と定義される。ここで、 \bar{E} は亀裂に対して垂直な等価剛性、 \bar{G} は岩盤の等価接線せん

断剛性であり、また \bar{L}' は亀裂の有効寸法である。亀裂の寸法は本来、亀裂の代表寸法と亀裂の連結性を表すパラメータの積を使用すべきであるが、亀裂の連結性を表すパラメータは具体的に値を測定して定めることは難しく、亀裂の寸法自身も特定しがたいため、ここでは、その積を有効寸法として用いている。また、 λ_n^0 および λ_s^0 は亀裂の形状に関する無次元のパラメータである。

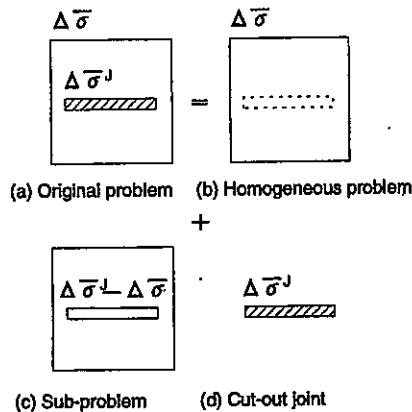


図3.1.3 問題の重ね合わせ

変位の適合条件を考慮すると、亀裂とスリットにおける両者の相対変位増分量の平均値は等しくなければならない。

$$\Delta[\bar{u}_n^s] = \Delta[\bar{u}_n^J] \quad (3.1.14)$$

$$\Delta[\bar{u}_s^s] = \Delta[\bar{u}_s^J] \quad (3.1.15)$$

ここで、 $\Delta[\bar{u}_n^J]$ および $\Delta[\bar{u}_s^J]$ はそれぞれ亀裂の法線方向および接線方向の相対変位増分の平均量である。式(3.1.4)～式(3.1.15)を連成させる事により、亀裂のすべり面上の相対変位増分の平均値が平均応力増分の関数として求められる。その結果、m 番目の亀裂セットの平均相対変位増分は、

$$\Delta[\bar{u}_n^{J(m)}] = Y_{nn}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_n^{(m)} + Y_{ns}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_s^{(m)} \quad (3.1.16)$$

$$\Delta[\bar{u}_s^{J(m)}] = Y_{sn}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_n^{(m)} + Y_{ss}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_s^{(m)} \quad (3.1.17)$$

と求まる。ここで $\Delta\bar{\sigma}_n^{(m)}$ 、 $\Delta\bar{\sigma}_s^{(m)}$ は平均応力増分の m 番目の亀裂セットに対する垂直及びせん断成分であり、 $Y_{nn}^{(m)}$ 、 $Y_{ns}^{(m)}$ 、 $Y_{sn}^{(m)}$ 及び $Y_{ss}^{(m)}$ は

$$Y_{nn}^{(m)} = \frac{\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}}{K^{(m)}} \sin \alpha^{(m)} \quad (3.1.18)$$

$$Y_{ns}^{(m)} = \frac{1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}}{K^{(m)}} \sin \alpha^{(m)} \quad (3.1.19)$$

$$Y_{sn}^{(m)} = \frac{\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)}} \cos \alpha^{(m)} \quad (3.1.20)$$

$$Y_{ss}^{(m)} = \frac{1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)}} \cos \alpha^{(m)} \quad (3.1.21)$$

$$\bar{K}^{(m)} = \bar{K}_n^{(m)} \sin \alpha^{(m)} (\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}) + \bar{K}_s^{(m)} \cos \alpha^{(m)} (1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}) \quad (3.1.22)$$

なお、 $\bar{K}_n^{(m)}$ 、 $\bar{K}_s^{(m)}$ は式(3.1.12)、(3.1.13)で与えられる。これにより、式(3.1.1)の第2項の亀裂の変形による平均ひずみ増分が計算される。これを亀裂の平均間隔 $d^{(m)}$ を考慮し、マトリックス表示すれば、

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{\varepsilon}_{11}^{(m)} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{22}^{(m)} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{33}^{(m)} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{12}^{(m)} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{23}^{(m)} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{31}^{(m)} \end{bmatrix}_m = \frac{1}{d^{(m)}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{nn}^{(m)} & 0 & 0 & Y_{ns}^{(m)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{sn}^{(m)} & 0 & 0 & Y_{ss}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\sigma}_{11}^{(m)} \\ \Delta\bar{\sigma}_{22}^{(m)} \\ \Delta\bar{\sigma}_{33}^{(m)} \\ \Delta\bar{\sigma}_{12}^{(m)} \\ \Delta\bar{\sigma}_{23}^{(m)} \\ \Delta\bar{\sigma}_{31}^{(m)} \end{bmatrix}_m \quad (3.1.23)$$

となる。式(3.1.23)を全体座標に変換して、平均応力増分と平均ひずみ増分の関係をテンソル表示すれば、

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{ij}^J = \sum_m D_{ijkl}^J (\bar{E}^{(m)}, \bar{G}^{(m)}) \Delta\bar{\sigma}_{kl} \quad (3.1.24)$$

式(3.1.1)と式(3.1.24)から

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{ij} = \left[D_{ijkl}^R + \sum_m D_{ijkl}^J (\bar{E}^{(m)}, \bar{G}^{(m)}) \right] \Delta\bar{\sigma}_{kl} \quad (3.1.25)$$

最終的に、亀裂を含む岩盤の巨視的接線コンプライアンスは、亀裂セットの方向に対する岩盤の等価垂直剛性 $\bar{E}^{(m)}$ と等価せん断剛性 $\bar{G}^{(m)}$ の関数となる。しかしながら、式中においてこれらは未知であり、亀裂を含む岩盤の構成式を完結させるには $\bar{E}^{(m)}$ 、 $\bar{G}^{(m)}$ を定める必要がある。吉田・堀井¹⁾では $\bar{E}^{(m)}$ 、 $\bar{G}^{(m)}$ を以下の手順で算定している。

まず、亀裂の相対変位増分算定にあたり、亀裂が岩盤基質部にあるものとし、式(3.1.25)の $\bar{E}^{(m)}$ 、 $\bar{G}^{(m)}$ を全て岩盤基質部の弾性定数 E 、せん断弾性定数 G に置き換えて計算を行い、巨視的コンプライアンステンソルを求める。次に、この求められた巨視的接線コンプライアンステンソルを持った等価な岩盤中に亀裂があるものとして、各亀裂セットに対する $\bar{E}^{(m)}$ 、 $\bar{G}^{(m)}$ を計算し、再度、式(3.1.25)より最終的な巨視的コンプライアンステンソルが求められる。以上の算定手順をまとめて図3.1.4に示す。

ジョイントのコンプライアンスマトリックス（ジョイントを包含する系のコンプライアンス）[CF]を求める。

$$\bar{K}_n = \frac{E}{16(1-\nu^2)}, \bar{K}_s = \frac{G}{3\pi(2-\nu)L}$$

$$[CF] = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{nn} & Y_{ns} \\ 0 & Y_{sn} & Y_{ss} \end{bmatrix}$$

但し、 $Y_{nn}, Y_{ns}, Y_{sn}, Y_{ss}$ は K_n, K_s, ϕ, α の関数

ジョイントのコンプライアンスマトリックス [CF] を局所座標系から全体座標系に変換し、岩盤基質部のコンプライアンスマトリックス [C_E] に重ね合わせる。

（応力の座標変換マトリックス：[T_s])

$$[CFF] = [T_s]^T \cdot [CF] \cdot [T_s]$$

$$[C] = [C_E] + [CFF]$$

（ただし、健全の場合、[CFF]=[0])

$$[CG] = [T_e] \cdot [C] \cdot [T_e]^T$$

（ひずみの座標変換マトリックス：[T_e])

[CG] から再度ジョイントのコンプライアンスマトリックス [CF] を求める

$$[CF] = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{nn} & Y_{ns} \\ 0 & Y_{sn} & Y_{ss} \end{bmatrix}$$

但し、 $Y_{nn}, Y_{ns}, Y_{sn}, Y_{ss}$ は ϕ, α の関数

ジョイントのコンプライアンスマトリックス [CF] を局所座標系から全体座標系に変換し、岩盤基質部のコンプライアンスマトリックス [C_E] に重ね合わせる。

（応力の座標変換マトリックス：[T_s])

$$[CFF] = [T_s]^T \cdot [CF] \cdot [T_s]$$

$$[C] = [C_E] + [CFF]$$

（ただし、健全の場合、[CFF]=[0])

図 3. 1. 4 巨視的接線コンプライアンスの算定手順¹⁾

3. 1. 5 MBC モデルの特徴

MBC モデルは等価連続体モデルの一つであり、亀裂のせん断すべり・開口の On・Off によりバイリニア型の応力・ひずみ関係を示す。また、MBC では亀裂を図 3. 1. 2 に示したように、起伏を有したモデルとしているので、亀裂のせん断すべりにより、ダイレイテーションをする特徴がある。以下に、各特徴について述べる。

(1) 等価連続体モデル

岩盤中の層理や節理といった亀裂を解析的に取り扱う方法には 2 種類ある。一つは個々の亀裂を要素としてモデル化する方法であり、もう 1 つは亀裂を含む岩盤を等価な連続体に置き換える等価連続体モデルと呼ぶ方法である。MBC モデルは等価連続体モデルの一種であり、定式化にあたっては個々の亀裂群をモデル化し、その挙動に基づき代表要素内において平均操作を行うことにより、巨視的な構成式を求めている。この構成式が等価な連続体の一点における材料の挙動を与えるものとして解析を行っている。

(2) バイリニア型の構成式

MBC モデルは、図 3. 1. 5 の解析フローに示すように、亀裂のせん断すべり・開口の On・Off によりバイリニア型の変形挙動をする。つまり、亀裂がせん断すべり・開口する前の岩盤は岩盤基質部の剛性を持つ等方弾性体であるが、亀裂を含む岩盤の応力が亀裂の破壊強度に達し、亀裂がせん断すべり・開口した後は各亀裂の変形により剛性が低減する。堀井ら²⁾は節理性岩盤を対象とした各種の等価連続体モデルによる要素解析結果の比較を行っている。解析条件は図 3. 1. 6 に示すように水平応力 $\sigma_x = 3$ MPa、鉛直応力 $\sigma_y = 5$ MPa の初期応力条件から水平応力 σ_x を 0 まで減少させる応力解放過程を設定している。亀裂は傾斜角左落ち 30°、左落ち 60°、右落ち 60° の 3 セットを設定している。解析結果の一例を図 3. 1. 7 に示す。 $\sigma_x = 1.29$ MPa の時点で、設定した強度が最も小さかった右落ち 60° の亀裂がすべり条件を満たして変形を開始し、それ以降の応力解放に伴ってバイリニア型の変形挙動をしている事が分かる。図 3. 1. 7 中にある NAPIS³⁾は亀裂の破壊を考慮したひずみ軟化モデル(Nonlinear Analysis Program Including Softening), EQM⁴⁾はロックボルト効果を考慮可能な等価連続体モデル(EQuivalent Rock-bolt Model), MYM⁵⁾は複合降伏モデル(Multiple Yield Model), CTM⁶⁾はクラックテンソルモデル(Crack Tensor Model), DTM⁷⁾は損傷テンソルモデル(Damage Tensor Model)を表す。

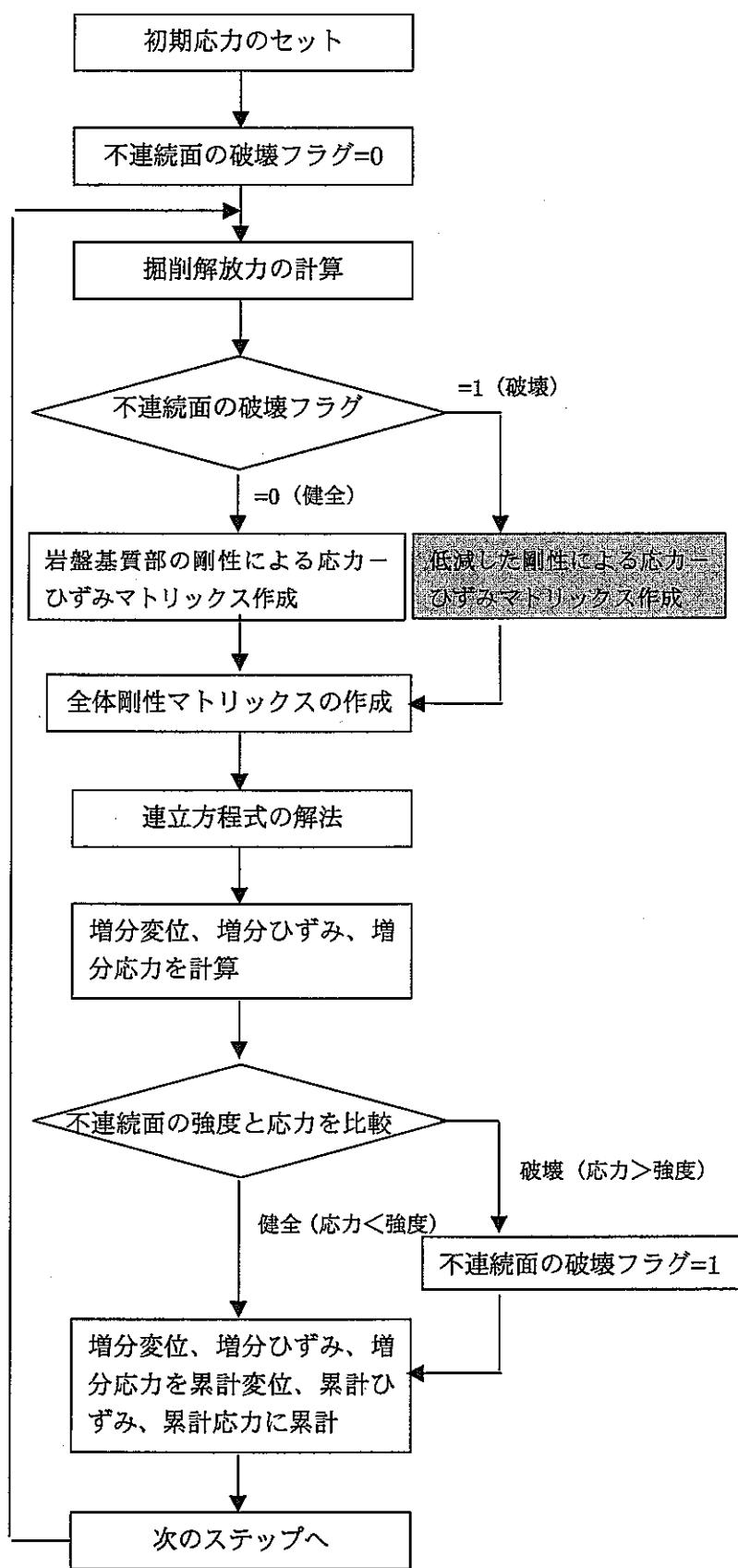


図3.1.5 MBC解析のフロー

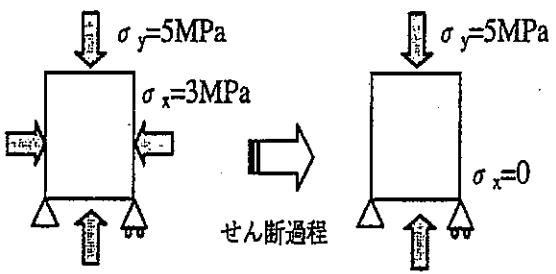


図3.1.6 解析条件²⁾

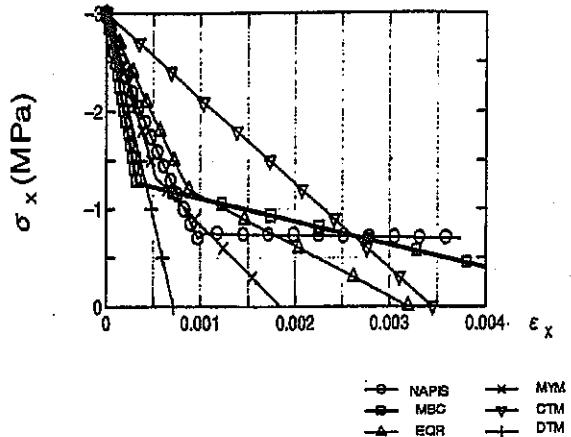


図3.1.7 応力ーひずみ関係²⁾

(3) ダイレイテーション

MBC モデルでは、図3.1.8に示すような起伏を有する亀裂を仮定しているため、起伏面で式(3.1.3)に示す摩擦条件が満足された時に、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口するためダイレイテーションが生じる。このように、MBC モデルでは、圧縮応力下においても亀裂のせん断すべりにより開口現象が表現できる。

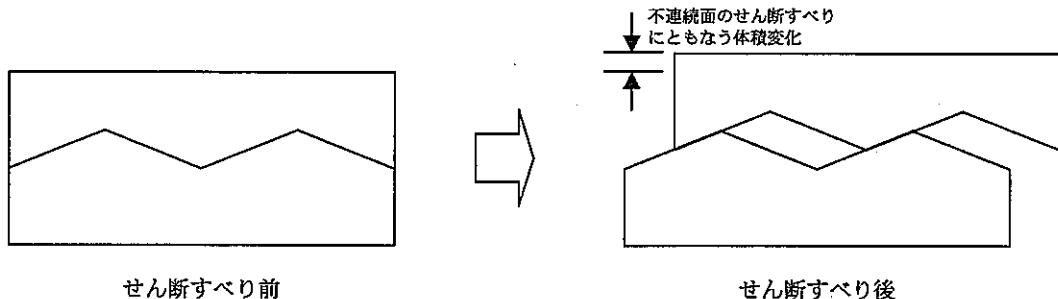


図3.1.8 ダイレイテーションのイメージ

3.1.6 MBC モデルの各パラメータと亀裂剛性の関係

3.1.5 (2) で MBC モデルはバイリニア型の構成式であることは述べた。亀裂上で応力が破壊強度に達し、亀裂がせん断すべり・開口した後は亀裂の変形により剛性が極端に低下する。開口条件に寄与するのは摩擦角のみであるが、開口した後の開口量に関しては、亀裂の有効寸法、平均間隔、起伏角、岩盤基質部の剛性が亀裂剛性に影響を与える。本節では、MBC モデルの各パラメータが亀裂剛性に与える影響について説明する。

(1) 亀裂の有効寸法 (L : 亀裂の長さ)

亀裂の平均応力増分と平均ひずみ増分の関係を表す式(3.1.23)は式(3.1.12), (3.1.13), (3.1.16)～(3.1.22)から以下のように書き直す事ができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon_{11}^{-J} \\ \Delta\epsilon_{22}^{-J} \\ \Delta\epsilon_{33}^{-J} \\ \Delta\epsilon_{12}^{-J} \\ \Delta\epsilon_{23}^{-J} \\ \Delta\epsilon_{31}^{-J} \end{bmatrix}_m = \frac{\bar{L}^J}{d^{(m)} E} [S] \begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11}^{-J} \\ \Delta\sigma_{22}^{-J} \\ \Delta\sigma_{33}^{-J} \\ \Delta\sigma_{12}^{-J} \\ \Delta\sigma_{23}^{-J} \\ \Delta\sigma_{31}^{-J} \end{bmatrix}_m \quad (3.1.26)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\tan\phi^{(m)} + \tan\alpha^{(m)})\sin\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - \tan\phi^{(m)} \tan\alpha^{(m)})\sin\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\tan\phi^{(m)} + \tan\alpha^{(m)})\cos\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3. 1. 27)

ここで、

$$\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E} = \frac{1}{\lambda_n^0 / 2} \sin\alpha^{(m)} (\tan\phi^{(m)} + \tan\alpha^{(m)}) + \frac{1}{\lambda_s^0 (1 + \nu)} \cos\alpha^{(m)} (1 - \tan\phi^{(m)} \tan\alpha^{(m)}) \quad (3. 1. 28)$$

従って、式(3. 1. 27)の[S]は $\phi^{(m)}$, $\alpha^{(m)}$, ν の関数である。よって、式(3. 1. 26)より、有効寸法が比例的に増加すれば、見かけ上、亀裂の剛性は比例的に減少する。

(2) 亀裂の平均間隔 (d)

式(3. 1. 26)から、亀裂の平均間隔が比例的に増加すれば、見かけ上、亀裂の剛性は比例的に増加する。すなわち、平均間隔を2倍にすると、有効寸法を半分にするのは同じ結果となる。

(3) 岩盤基質部の剛性 (E)

式(3. 1. 26)から、岩盤基質部の剛性が比例的に増加すれば、見かけ上、亀裂の剛性は比例的に増加する。また、式(3. 1. 25)から岩盤基質部のコンプライアンスと亀裂のコンプライアンスの両方に寄与するため、変形挙動に与える影響は他のパラメータに比べ大きい。

(4) 亀裂の起伏角 (α)

亀裂の平均応力増分と相対変位増分の関係を表す式(3. 1. 16), (3. 1. 17)の $Y_{nn}^{(m)}$, $Y_{ns}^{(m)}$, $Y_{sn}^{(m)}$, $Y_{ss}^{(m)}$ は式(3. 1. 18)~(3. 1. 21)から起伏角の関数であり, 起伏角を変化させれば, 見かけ上の亀裂の剛性も変化する。 $Y_{nn}^{(m)}$ は亀裂と直交する方向の応力に対する開口しやすさを表す。 $Y_{ns}^{(m)}$ は亀裂方向のせん断応力に対する開口しやすさを表す。 $Y_{sn}^{(m)}$ は亀裂と直交する方向の応力に対するせん断すべりのしやすさを表す。 $Y_{ss}^{(m)}$ は亀裂方向のせん断応力に対するせん断すべりのしやすさを表す。4章の基本ケースの物性の範囲内で起伏角を変化させ, $Y_{nn}^{(m)}$, $Y_{ns}^{(m)}$, $Y_{sn}^{(m)}$, $Y_{ss}^{(m)}$ を計算した結果を図3. 1. 9に示す。起伏角と亀裂の剛性は複雑に変化するが, 図に点線枠に示す感度解析の範囲では, 起伏角を増加させることにより, 亀裂の開口に寄与する $Y_{nn}^{(m)}$ は増加しており, 亀裂のせん断変形に寄与する $Y_{ss}^{(m)}$ は減少している。また, $Y_{ns}^{(m)}$, $Y_{sn}^{(m)}$ は $Y_{nn}^{(m)}$, $Y_{ss}^{(m)}$ に比べ変化の程度は小さい。従って, 後述する4章の感度解析の範囲では, 起伏角を増加させることにより, 亀裂は開口しやすく, せん断変形はしにくくなると考えられる。

(5) 亀裂の摩擦角 (ϕ)

摩擦角は式(3. 1. 3)に示すように, 亀裂の強度であり, 摩擦角が大きいほど, 亀裂はせん断すべりしにくくなる。しかし, 起伏角と同様に摩擦角にはダイレイテーションにも寄与する。つまり, 亀裂の平均応力増分と相対変位増分の関係を表す式(3. 1. 16), (3. 1. 17)の $Y_{nn}^{(m)}$, $Y_{ns}^{(m)}$, $Y_{sn}^{(m)}$, $Y_{ss}^{(m)}$ は式(3. 1. 18)~(3. 1. 21)から摩擦角の関数であり, 摩擦角が変化すれば, 見かけ上の亀裂の剛性も変化することが分かる。4章の基本ケースの物性の範囲内で摩擦角を変化させ, $Y_{nn}^{(m)}$, $Y_{ns}^{(m)}$, $Y_{sn}^{(m)}$, $Y_{ss}^{(m)}$ を計算した結果を図3. 1. 10に示す。図に点線枠に示す感度解析の範囲では, 摩擦角を増加させても変化は少ないが, 亀裂の開口に寄与する $Y_{nn}^{(m)}$ は若干増加しており, 亀裂のせん断変形に寄与する $Y_{ss}^{(m)}$ は若干減少している。従って, 後述する4章の感度解析の範囲では, 摩擦角を増加させることにより, 亀裂は開口しやすく, せん断変形はしにくくなると考えられる。

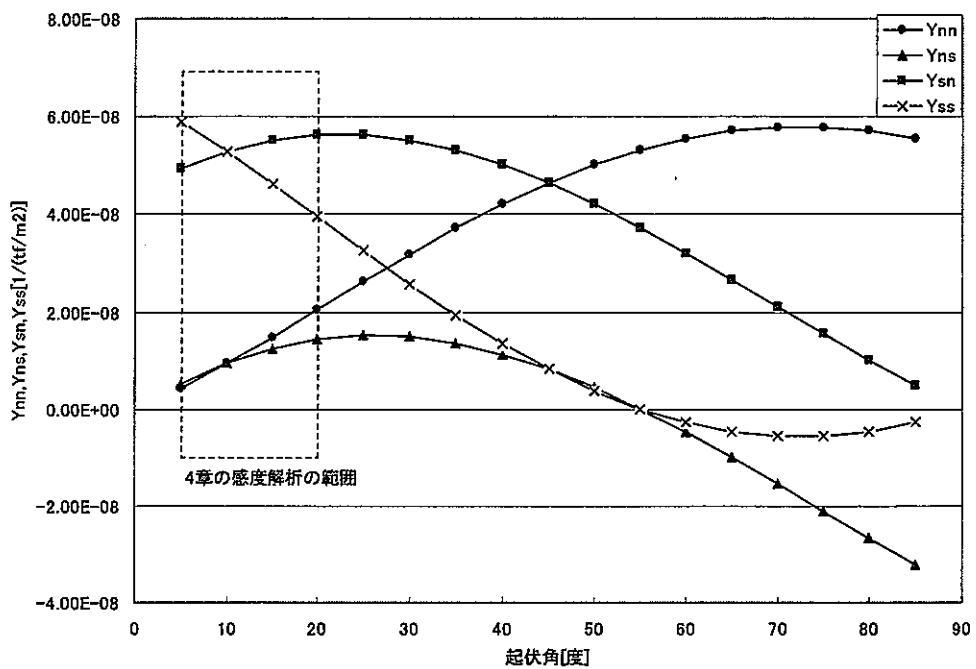


図3.1.9 起伏角と亀裂の剛性の関係

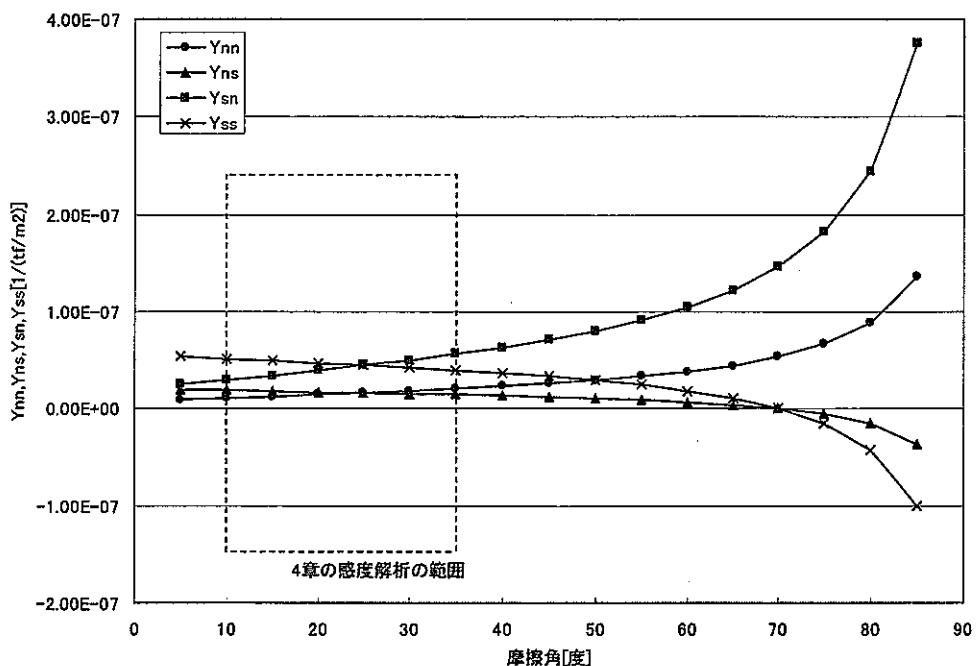


図3.1.10 摩擦角と亀裂の剛性の関係

3. 2 解析結果の評価指標

3. 2. 1 亀裂の開口量

MBC モデルは、亀裂を図 3. 1. 2 のような起伏を有する形状と考え、起伏面でクロスの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口を生じる。次式（式(3. 1. 16)の再掲）に亀裂上の平均応力を代入する事により、亀裂 1 本当りの開口量が求まる。

$$\Delta \bar{\mu}_n^{J(m)} = Y_{nn}^{(m)} \Delta \bar{\sigma}_n^{(m)} + Y_{ns}^{(m)} \Delta \bar{\sigma}_s^{(m)}$$

解析結果は亀裂 1 本当りの開口量を亀裂の平均間隔で除し、1 m 当りの開口量として表示している。

3. 2. 2 局所安全率

亀裂がせん断すべりする条件は次式（式(3. 1. 3)の再掲）を満足する場合である。

$$|\bar{\sigma}_s^{J'}| = -\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^{J'} < 0$$

そこで、せん断すべりの発生しやすさを表現する指標として起伏の両側について以下の局所安全率 FS を計算し、安全率の小さい方を採用する事にした。

$$FS = \frac{-\bar{\sigma}_n'^J \tan \phi}{\bar{\sigma}_s'^J} \quad \bar{\sigma}_n'^J < 0 \quad (3. 2. 1)$$

ここで、例として図 3. 2. 1 に示すような左落ち θ 、起伏角 α の亀裂を想定し、水平方向に一軸圧縮応力状態を想定すると、起伏の左側でせん断すべりが生じて開口する。この場合は、起伏の左側の面で局所安全率の算定を行う。

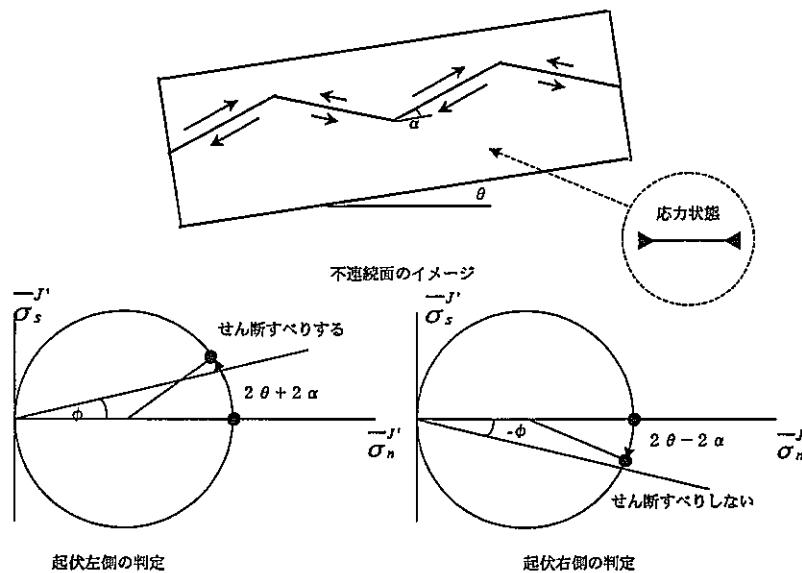


図 3. 2. 1 亀裂の起伏両側における局所安全率の計算

3. 2. 3 等価剛性

MBC モデルでは、亀裂の幾何学的分布により異方性が生じるため、評価する方向により剛性が異なる。要素剛性マトリックスは非対称マトリックスになるため、その変形性能は単純に剛性やせん断剛性で表すことができない。そこで、ここでは MBC モデルによる岩盤の非線形的変形性能を評価する指標として、以下の式に示す等価せん断剛性 \bar{G} を用いた。

$$\bar{G} = \frac{\tau_{MAX}}{\gamma_{MAX}} \quad (3. 2. 2)$$

ここで τ_{MAX} , γ_{MAX} は要素ごとの最大せん断応力、最大せん断ひずみを表す。つまり、せん断荷重に対する変形性能を表す等価せん断剛性 \bar{G} は、坑道掘削により周辺岩盤に発生した最大のせん断応力をそれに対する応答性状（最大せん断ひずみ）で除すことにより求める。

3. 2. 4 透水係数

掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化は亀裂の開口に依存し、等方的に透水性が増加すると考え、MBC 解析により求めた要素ごとの亀裂の開口量から、いわゆる 3 乗則を用いて透水係数を算定した。

$$K = \frac{g}{12\mu} \sum_m \left[\frac{u_n^{J(m)}}{d^{(m)}} \right]^3 + K_{matrix} \quad (3. 2. 3)$$

ここで、 $[u_n^{J(m)}]$ と $d^{(m)}$ は第 m 番目の亀裂群の 1 本当りの開口量と間隔である。 g と μ はそれぞれ重力加速度と水の動粘性係数、 K_{matrix} は岩盤基質部の透水係数を表す。

3. 3 MBC モデルで使用する亀裂パラメータ

MBC モデルで使用する亀裂パラメータは図 3. 3. 1 に示すように有効寸法, 傾斜角, 平均間隔, 起伏角, 摩擦角の 5 つである。亀裂の寸法は, 亀裂の代表寸法, 連結性, 形状を表す 3 つのパラメータの積で表されるが, 連結性は測定して定めることが難しく, また, 亀裂の寸法自身も特定しがたい。MBC モデルでは, 代表寸法, 連結性を表すパラメータの積を有効寸法として用いている。傾斜角, 平均間隔は, 解析断面に投影した亀裂の傾斜角度, 間隔を表す。起伏角は亀裂の不陸の程度を表す。摩擦角は亀裂上の強度を表す。MBC モデルで使用する亀裂パラメータは, 地質調査で得られた亀裂の方向や間隔が直接解析の入力データとして解析に反映できる。表 3. 3. 1 に各パラメータの設定方法を示す。なお, 表中の太字は今回の解析で設定した方法である。

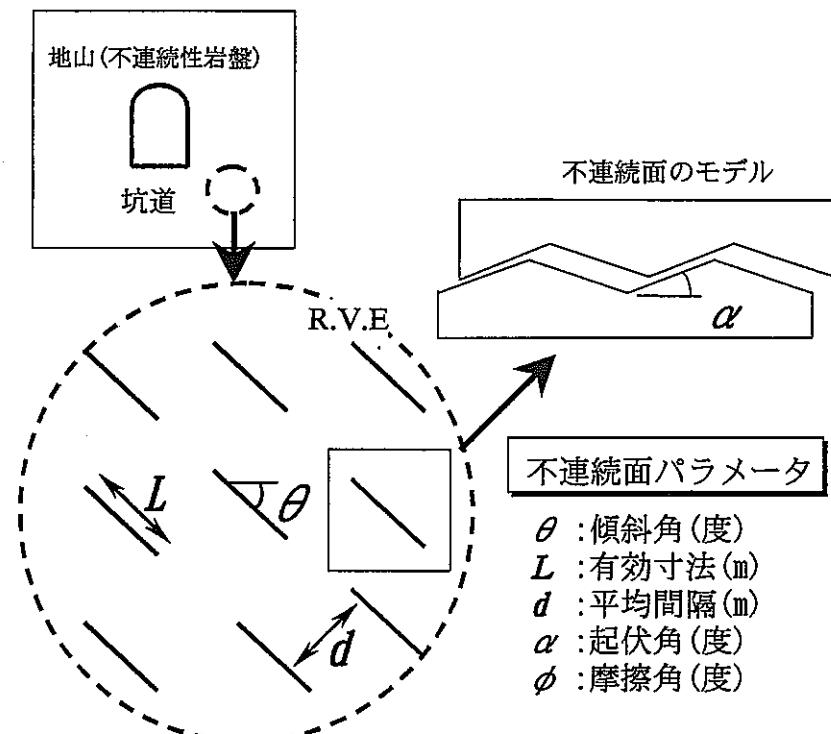


図 3. 3. 1 MBC モデルで使用する亀裂パラメータ

表3.3.1 亀裂パラメータの設定方法

亀裂パラメータ	設定方法
有効寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目トレース長と割れ目密度の関係から設定 ・観察記録から設定
傾斜角*	<ul style="list-style-type: none"> ・BTV データより亀裂の卓越方向をグループ化し、各亀裂群の走向、傾斜を設定 ・観察記録から設定
平均間隔*	<ul style="list-style-type: none"> ・卓越亀裂群の亀裂間隔ヒストグラムから設定 ・観察記録から設定
起伏角	<ul style="list-style-type: none"> ・過去の MBC 解析の実績より設定 ・岩盤せん断試験破断面起伏状況から設定
摩擦角	<ul style="list-style-type: none"> ・ジョイントせん断試験におけるティルト試験結果から設定 ・ジョイント一面せん断試験

*二次元解析の場合、亀裂の傾斜角、平均間隔は解析断面に投影した値を使用する

4. 感度解析

4. 1 解析目的

前章で述べた通り、MBC 解析は亀裂を含む岩盤の挙動を表現するため、亀裂に関する複数のパラメータを有している。これらパラメータは複雑に作用し、坑道掘削時における周辺岩盤は、亀裂のせん断・開口現象に支配された極めて複雑な挙動を呈することになる。従って、亀裂に関する個々のパラメータが岩盤の挙動に及ぼす影響を把握するのは非常に難しい。しかし、解析の結果得られた複雑な亀裂のせん断・開口現象について検討・評価するには、個々のパラメータが及ぼす影響を正しく把握しておくことが非常に重要である。

そこで本章では、条件を極めてシンプルにし、感度解析を実施することで、岩盤基質部や亀裂に関する各パラメータが、掘削周辺岩盤の亀裂のせん断・開口現象に及ぼす影響について検討を行う。

4. 2 解析条件

条件をシンプルにした感度解析の共通解析条件および検討パラメータの解析ケースを以下に示す。

4. 2. 1 共通解析条件

解析メッシュを図 4. 2. 1 に示す。また解析条件は以下の通りである。なお、解析に用いた条件は貸与技術資料^④の解析ケースを基にして設定している。

[条件]

- ・解析は立坑のみ

(解析領域は、境界条件の影響を受けない十分な広さとして立坑を中心として 50m × 50m の領域とし、立坑は掘削径 7.3m とする。)

- ・初期地圧は、等方等圧とし、その応力 $\bar{\sigma}$ は、中間ステージレベル (GL-500m) の最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の平均とする。(図 4. 2. 2)

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{25.01 + 14.28}{2} = 19.65 \text{ MPa}$$

- ・亀裂は東西方向 1 セットのみ(図 4. 2. 3) とし、基本ケースの亀裂の物性は、中間ステージレベルの複数の卓越亀裂のうち、第 1 卓越亀裂を参考に決定した。表 4. 2. 1 に基本ケースの各物性値をまとめた。

- ・掘削損傷領域は掘削壁面から 80cm までの領域とする。

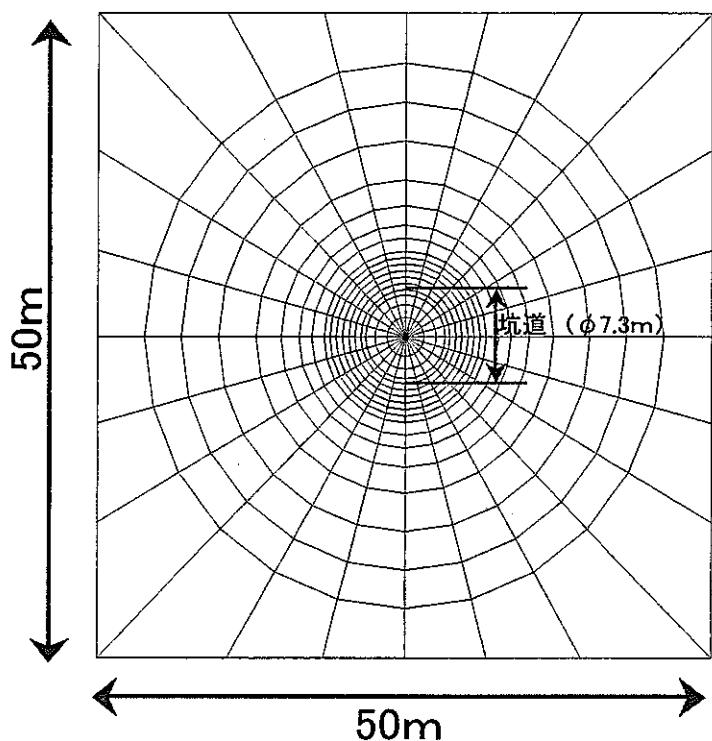


図4.2.1 感度解析 メッシュ図

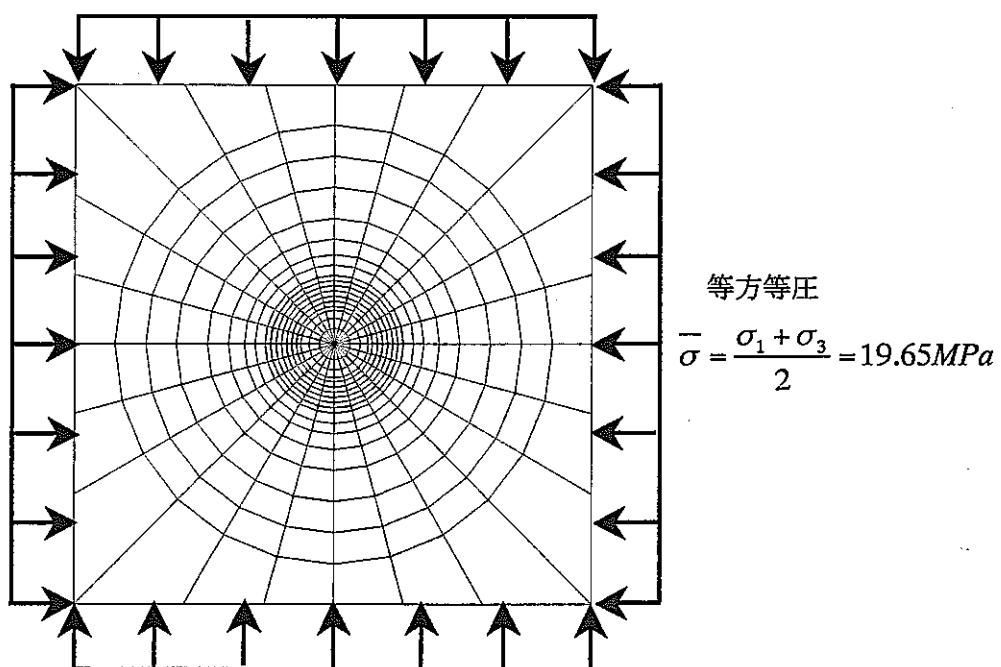


図4.2.2 境界条件

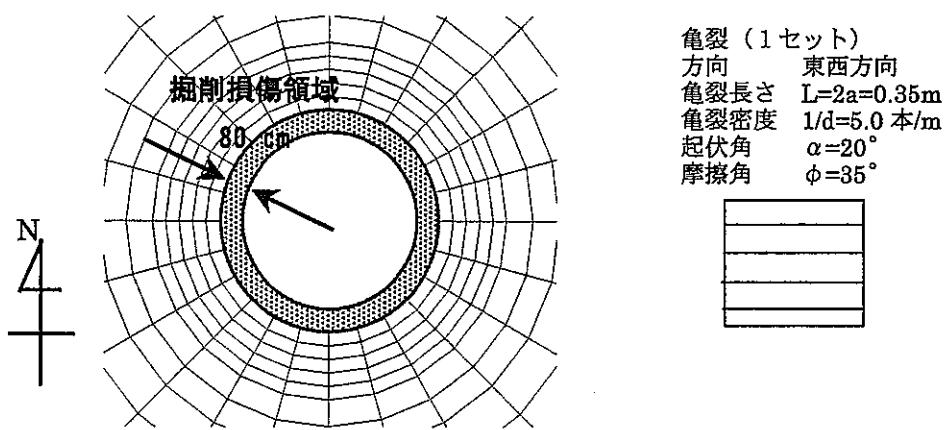


図 4. 2. 3 掘削損傷領域と亀裂

表 4. 2. 1 基本ケースの入力物性値

ケース	掘削壁面から の損傷域 (cm)	岩盤基質部 弾性係数 E_0 (MPa)	亀裂					コメント
			亀裂密度 $1/d$	亀裂長さ $L(-2a)$	傾斜 θ	起伏角 α	摩擦角 ϕ	
			(本/m)	(m)	(°)	(°)	(°)	
基本ケース	80	49,400	5.0	0.35	東西方向	20°	35°	・中間ステージレベル (GL~500m) の値を参考 ・これらを基本ケースとし感度解析を実施。

[解析ステップ]

解析ステップは図 4. 2. 4 に示すように、まず初期応力状態を設定後、立坑掘削により岩盤応力を 40% 解放した後に、掘削損傷領域において物性変更を行う。その後、残りの 60% を応力解放する。

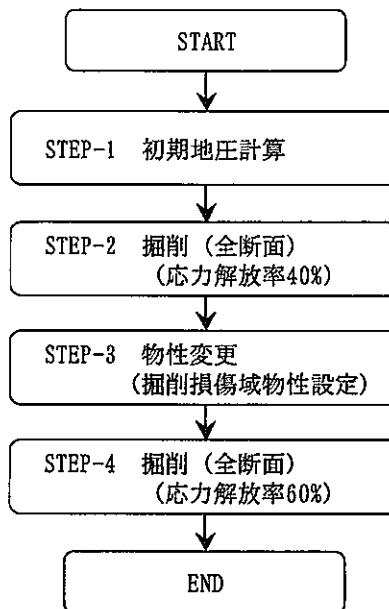


図 4. 2. 4 解析ステップ

4. 2. 2 解析ケース

感度解析を行うパラメータは以下のとおりである。掘削損傷領域における各パラメータについて基本ケースを含め、3~4ケースの感度解析を実施し、掘削損傷領域に与える影響を検討する。なお、亀裂長さLに関しては、3章で前述したように、MBCモデルの構成式の性質上、亀裂密度 $1/d$ の値を変化するケースと同等の結果が得られるため、ここでは解析ケースとしては取り上げないこととした。

(1) 岩盤基質部の弾性係数比 E/E_0 (3 ケース)

$$E/E_0 = 100\%, 50\%, 25\%$$

E : 掘削損傷領域の岩盤基質部の弾性係数

E_0 : 掘削前の岩盤基質部の弾性係数

表 4. 2. 2 感度解析 (岩盤基質部の弾性係数比 E/E_0)

解析対象位置	損傷域	岩盤基質部		亀裂				
		弾性係数比 E/E_0		亀裂密度 $1/d$	亀裂長さ L	傾斜 θ	起伏角 α	摩擦角 ϕ
立坑部	80cm	100%		1倍	1倍	東西方向	20°	35°
		50%						
		25%						

(2) 亀裂密度 $1/d$ (4 ケース)

$$1/d = \text{基本ケースの } 1\text{ 倍}, 2\text{ 倍}, 4\text{ 倍}, 8\text{ 倍}$$

表 4. 2. 3 感度解析 (亀裂密度 $1/d$)

解析対象位置	損傷域	岩盤基質部		亀裂				
		弾性係数比 E/E_0		亀裂密度 $1/d$	亀裂長さ L	傾斜 θ	起伏角 α	摩擦角 ϕ
立坑部	80cm	100%	1倍	1倍	東西方向	20°	35°	
			2倍					
			4倍					
			8倍					

(3) 亀裂面の起伏角 α (3 ケース)

$$\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$$

表 4. 2. 4 感度解析 (亀裂面の起伏角 α)

解析対象位置	損傷域	岩盤基質部						亀裂					
		弾性係数比 E/E_0	亀裂密度 $1/d$	亀裂長さ L	傾斜 θ	起伏角 α	摩擦角 ϕ						
立坑部	80cm	100%	1倍	1倍	東西方向	5°	35°						
						10°							
						20°							

(4) 亀裂面の摩擦角 ϕ (3 ケース)

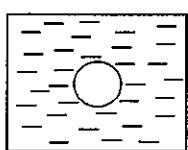
$$\phi = 10^\circ, 20^\circ, 35^\circ$$

表 4. 2. 5 感度解析 (亀裂面の摩擦角 ϕ)

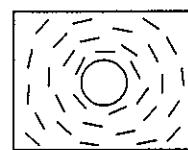
解析対象位置	損傷域	岩盤基質部						亀裂					
		弾性係数比 E/E_0	亀裂密度 $1/d$	亀裂長さ L	傾斜 θ	起伏角 α	摩擦角 ϕ						
立坑部	80cm	100%	1倍	1倍	東西方向	10°	35°						
						20°							
						35°							

(5) 亀裂面の方向 θ (3 ケース)

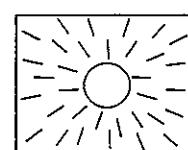
θ = 東西方向, 壁面平行方向, 壁面垂直方向



東西方向



壁面平行方向



壁面垂直方向

図 4. 2. 5 各ケースでの亀裂の方向のイメージ

4. 2. 6 感度解析 (亀裂面の方向 θ)

解析対象位置	損傷域	岩盤基質部						亀裂					
		弾性係数比 E/E_0	亀裂密度 $1/d$	亀裂長さ L	傾斜 θ	起伏角 α							
立坑部	100%	1倍	1倍	東西方向	東西方向	35°	20°						
					壁面平行方向								
					壁面垂直方向								

※本ケースのみ掘削損傷領域を考慮しない。

感度解析の全ケースで入力する岩盤基質部および亀裂の物性値の一覧を表4. 2. 7に示す。

表4. 2. 7 感度解析の入力物性値一覧

解析対象位置	対象パラメータ	健全部 岩盤							損傷領域 岩盤						
		岩盤基質部		亀裂					岩盤基質部		亀裂				
		弾性係数	ボアン比	亀裂長さ	亀裂密度	亀裂方向	起伏角	摩擦角	弾性係数	ボアン比	亀裂長さ	亀裂密度	亀裂方向	起伏角	摩擦角
		E (MPa)	ν	a (=L/2) (m)	1/d (本/m)	θ (°)	α (°)	ϕ (°)	E (MPa)	ν	a (=L/2) (m)	1/d (本/m)	θ (°)	α (°)	ϕ (°)
立坑部	弾性係数	49,400	0.34	0.175	5.0	0°	20°	35°	80cm	49,400					
										24,700	0.34	0.175	5.0	0°	20°
										12,350					35°
	亀裂密度	49,400	0.34	0.175	5.0	0°	20°	35°	80cm	5.0					
										10.0	0.34	0.175	0°	20°	35°
										20.0					
										40.0					
	起伏角	49,400	0.34	0.175	5.0	0°	20°	35°	80cm	49,400	0.34	0.175	5.0	0°	5°
										49,400	0.34	0.175	5.0	10°	35°
										49,400	0.34	0.175	5.0	20°	10°
	摩擦角	49,400	0.34	0.175	5.0	0°	20°	35°	80cm	49,400	0.34	0.175	5.0	20°	20°
										49,400	0.34	0.175	5.0	35°	35°
										49,400	0.34	0.175	5.0	35°	35°
	亀裂方向	49,400	0.34	0.175	5.0	東西方向	20°	35°	全要素	49,400	0.34	0.175	5.0	東西方向	
										49,400	0.34	0.175	5.0	壁面平行方向	
										49,400	0.34	0.175	5.0	壁面垂直方向	

4. 3 解析結果

4. 3. 1 岩盤基質部の弾性係数 E

岩盤基質部の弾性係数 E をパラメータとした解析ケースの結果として、図 4. 3. 1 に、3. 2 に示した各評価指標に関するコンター図をまとめて示した。また、図 4. 3. 2 および図 4. 3. 3 に壁面北側・東側の線上での岩盤変位等のグラフを示した。

図 4. 3. 1 のコンター図より、南北方向の壁面周辺の亀裂が開口している。局所安全率および等価せん断剛性について見てみると、岩盤基質部の弾性係数を低減していくほど、壁面周囲全体で、等価せん断剛性は低減しているが、亀裂面のすべり易さを示す局所安全率は、南北方向の壁面周辺のみである。

これは、等価せん断剛性は、岩盤基質部の弾性係数 E を低減させた領域（壁面より 80cm）全体で低減するが、一方、亀裂の開口は、亀裂面における破壊条件（式（3. 1. 3））により決定されることから、主に壁面周辺の応力状態と亀裂の方向（東西方向）に依存するためである。また、その結果、東西方向の壁面周辺では、亀裂は一切開口していない。

岩盤基質部の弾性係数が小さくなるほど、その亀裂は開口しやすくなる傾向がわかる。

弾性係数比が 100%, 50%, 25% と低減するに従い、北側の壁面近傍の亀裂開口量は、壁面近傍において、それぞれ単位深度 (m) あたり、0.11mm, 0.19 mm, 0.34 mm となっている。この傾向を示す原因としては、次式（式（3. 1. 26）の再掲）に示すように亀裂に関するコンプライアンスマトリクスは岩盤基質部の弾性係数をパラメータの 1 つとして含んでいるため、弾性係数が小さくなると、亀裂自体の剛性が小さくなるためである。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_{11}^J \\ \Delta\epsilon_{22}^J \\ \Delta\epsilon_{33}^J \\ \Delta\epsilon_{12}^J \\ \Delta\epsilon_{23}^J \\ \Delta\epsilon_{31}^J \end{Bmatrix}_m = \frac{\bar{L}^J}{d^{(m)} E} [S] \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{11}^J \\ \Delta\sigma_{22}^J \\ \Delta\sigma_{33}^J \\ \Delta\sigma_{12}^J \\ \Delta\sigma_{23}^J \\ \Delta\sigma_{31}^J \end{Bmatrix}_m \quad (3. 1. 26)$$

4. 3. 2 亀裂密度 $1/d$

亀裂密度 $1/d$ をパラメータとした解析ケースの結果として、図4. 3. 4に、3. 2に示した各評価指標に関するコンター図をまとめて示した。また、図4. 3. 5、および図4. 3. 6に壁面北側・東側の線上での岩盤変位等のグラフを示した。

図4. 3. 4のコンター図では、岩盤基質部の弾性係数 E のケースと同様、南北方向の壁面周辺の亀裂が開口している。

また、亀裂密度が大きくなるほど、その亀裂は開口しやすい傾向がわかる。亀裂密度 $1/d$ が、1倍、2倍、4倍、8倍と大きくなるに従い、北側の壁面近傍の亀裂開口量は、壁面近傍で、それぞれ単位深度 (m)あたり、0.11 mm, 0.24 mm, 0.37 mm, 0.49 mm となっている。MBC モデルでは、亀裂の長さが大きいほど、亀裂密度が大きいほど、亀裂を含んだ岩盤の系のコンプライアンスは大きくなる、つまり系の剛性が下がる。今回の感度解析もそれに対し妥当な結果となっている。また、今回のケースも東側の壁面では、亀裂の開口はなかった。

また、各ケースで亀裂密度 $1/d$ を変更したのは、掘削損傷領域として設定した壁面より 80cm の領域であるが、亀裂密度 $1/d$ を大きくするに従い、最大で壁面より 2 m を超えた領域でも亀裂が開口している。これは、掘削による亀裂の開口によって、掘削損傷領域の剛性が低下し、応力再配分により、設定した掘削損傷領域の外側の岩盤についても亀裂の開口が進展し、結果として掘削影響領域が広がったものと思われる。

4. 3. 3 亀裂面の起伏角 α

起伏角 α をパラメータとした解析ケースの結果として、図4. 3. 7に3. 2に示した各評価指標に関するコンター図をまとめて示した。また、図4. 3. 8、および図4. 3. 9に壁面北側・東側の線上での岩盤変位等のグラフを示した。

図4. 3. 7のコンター図では、これまでのケースと同様、南北方向の壁面周辺の亀裂が開口している。また、起伏角 α を大きくするほど、その亀裂は開口しやすい傾向がわかる。

起伏角が、 5° , 10° , 20° と大きくなるに従い、北側の壁面近傍の亀裂開口量は、壁面近傍でそれぞれ単位深度 (m)あたり、 0.02 mm , 0.05 mm , 0.11 mm となっている。しかし、図4. 3. 8のグラフを見ると、壁面北側の開口量は、 $\alpha=5^\circ$, 10° のケースにおいて、壁面に近づくにつれて開口量が増大する傾向と異なり、掘削損傷領域を設定した境界付近でグラフが不連続的になり、開口量が一旦、減少している。しかしながら、亀裂面のすべり易さを示す局所安全率は、どのケースもほぼ同じ傾向で、壁面から 1 m 程度でほぼ $FS=1$ であり、亀裂は開口する条件を満たしていることが分かる。

上記の傾向を示す理由は、MBC モデルにおいて亀裂の開口量は、次式（式(3. 1. 7), (3. 1. 8)の再掲）に示すように、起伏面の乗り上げ分として算出するため、掘削損傷領域として設定した境界では、起伏角を変更することによって亀裂の開口量が不連続となり、また、変更した起伏角が小さいほど亀裂剛性が大きくなるためである。

$$\Delta[\bar{u}_n^J] = \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \sin \alpha \quad (3. 1. 7)$$

$$\Delta[\bar{u}_s^J] = \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \cos \alpha \quad (3. 1. 8)$$

また、MBC モデルでは、亀裂面のすべりの発生の判断については、式(3. 1. 3)で示したように、亀裂面の摩擦角 ϕ により決定されるが、一旦、亀裂面のすべりが生じた後の亀裂の系の剛性については、次式（式(3. 1. 26), 式(3. 1. 27)の再掲）で示したとおり、亀裂のコンプライアンスを起伏角 α の関数として設定しており、3. 1. 6 (4) にも示したように起伏角 α が大きくなるに従い、亀裂は開口しやすく、せん断変形しにくくなることが考えられる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon_{11} \\ \Delta\epsilon_{22} \\ \Delta\epsilon_{33} \\ \Delta\epsilon_{12} \\ \Delta\epsilon_{23} \\ \Delta\epsilon_{31} \end{bmatrix}_m = \frac{\bar{L}^J}{d^{(m)} E} [S] \begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{12} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \end{bmatrix}_m \quad (3.1.26)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\tan\phi^{(m)} + \tan\alpha^{(m)})\sin\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - \tan\phi^{(m)} \tan\alpha^{(m)})\sin\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\tan\phi^{(m)} + \tan\alpha^{(m)})\cos\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - \tan\phi^{(m)} \tan\alpha^{(m)})\cos\alpha^{(m)}}{\bar{K}^{(m)} \bar{L}^J / \bar{E}} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.27)$$

また、亀裂面のすべりの結果、発生する開口量についても、起伏角 α が大きいほど式(3.1.7)および式(3.1.8)より、開口量が大きくなることを示している。今回のケースも東側の壁面では、亀裂の開口はなかった。

4. 3. 4 亀裂面の摩擦角 ϕ

摩擦角 ϕ をパラメータとした解析ケースの結果として、図4. 3. 10 に3. 2に示した各評価指標に関するコンター図をまとめて示した。また、図4. 3. 11、および図4. 3. 12 に壁面北側・東側の線上での岩盤変位等のグラフを示した。

図4. 3. 10 のコンター図では、これまでのケースと同様、南北方向の壁面周辺の亀裂が開口している。摩擦角 ϕ が、 $\phi=35^\circ$ のケースに比べ、 $\phi=20^\circ$ 、 $\phi=10^\circ$ のケースの方が、亀裂が開口しやすくなり、更に、 $\phi=20^\circ$ と $\phi=10^\circ$ のケースを比較すると、 10° のケースの方が、開口領域が壁面近傍においてより広がっている。

また、図4. 3. 11 の開口量のグラフを見ると、 $\phi=10^\circ$ 、 20° 、 35° のケースで壁面近傍においてそれぞれ単位深度(m)あたりの開口量は、0.12 mm, 0.14 mm, 0.11 mm となっている。

特に、 $\phi=10^\circ$ のケースで、掘削損傷領域(壁面から 80 cm)において、亀裂の開口が他ケースに比べ、比較的小さくなっている傾向が見られる。

また、同図の安全率では、 $\phi=10^\circ$ のケースで、壁面近傍にて、大きく1を割り込んでいる結果となった。

これらの傾向・結果は、以下のような理由であると考えられる。

本解析は全ケースとも掘削解放力 40%相当を作成させた後に掘削損傷領域のパラメータを変更しており、各起伏面でのすべり・開口の判定は 40%解放時の応力を元にして、次式(式(3. 1. 3)の再掲)により行っている。

$$|\bar{\sigma}_s^{J'}| = -\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^{J'} < 0 \quad (3. 1. 3)$$

このとき、すべり・開口条件として用いている摩擦角 ϕ が小さいと、40%解放時の応力状態で既に起伏面のすべり・開口条件を大きく超越しており、安全率も1を極端に割り込んだ値となっている。そのため、掘削損傷領域内の摩擦角 ϕ の値を小さく設定した解析ケースでは、掘削壁面周辺の岩盤は破壊状態に至っており、更なる掘削応力解放後に壁面周辺の岩盤が応力の負担をすることができず、その結果、掘削損傷領域の開口量が大きくならなかつたと思われる。

摩擦角 ϕ に関しては、式(3. 1. 3)に示すように、亀裂面の破壊条件を決めるパラメータであり、摩擦角 ϕ が小さいほど亀裂面は破壊しやすい。一方、3. 1. 6 (5)で示したように、摩擦角 ϕ が小さくなるほど破壊した後の亀裂の剛性が大きくなる効果もあり、摩擦角 ϕ が亀裂の開口に寄与する効果は一概には言えない。

4. 3. 5 亀裂面の方向 θ

亀裂面の方向 θ をパラメータとした解析ケースの結果として、図4. 3. 13に3. 2に示した各評価指標に関するコンター図をまとめて示した。また、図4. 3. 14、および図4. 3. 15に壁面北側および・東側の線上での岩盤変位等のグラフを示した。

図4. 3. 13のコンター図では、亀裂方向が東西方向のみのケースではこれまでと同様、南北方向の壁面周辺の亀裂が開口しているが、亀裂方向が壁面平行方向のケースでは、壁面周囲全体がほぼ円形に開口している。これに対し、壁面垂直方向では、亀裂は一切開口していない。この理由としては、壁面垂直方向の亀裂分布では、坑道周辺岩盤の応力分布において、最大主応力が亀裂面に対し垂直方向に作用するので、亀裂面の破壊モードが形成されないためである。従って、各ケースでの亀裂開口についての傾向は亀裂の開口が決定される起伏面上での応力状態を考慮すれば妥当な結果である。

また、図4. 3. 14の開口量のグラフを見ると、亀裂方向が東西方向のみのケースが壁面付近の開口量が0.11 mmに対し、壁面平行方向のケースは、0.07 mmとなっている。

壁面平行方向のケースの方が、東西方向のケースと比較して亀裂の開口量が小さくなっている原因としては、以下の2つのことが考えられる。

1つめは、亀裂開口量は各要素に付随する値として算出するため、北側測線上の亀裂の開口量は、その両端要素の平均値として算出することとしている。壁面平行方向のケースでは、メッシュの影響により、厳密には北側測線に対し、垂直な亀裂方向（東西方向）でないことが影響しているためであると思われる。

2つめの原因是、MBCモデルでは、起伏角を有する亀裂のせん断すべりにより、亀裂が開口するため、亀裂の起伏面に対する鉛直応力成分とせん断応力成分がすべり量、すなわち開口量を決定することとなる。壁面平行方向のケースでは、壁面と亀裂方向の幾何学的な関係から、掘削壁面周辺に一様に亀裂が開口しようとするため、亀裂面にかかるせん断応力が比較的小さく開口に寄与しない。それに比べ、東西方向のケースでは、北側測線上の両端要素内の亀裂面には、より大きいせん断応力が作用し、亀裂の開口につながりやすいものと思われる。

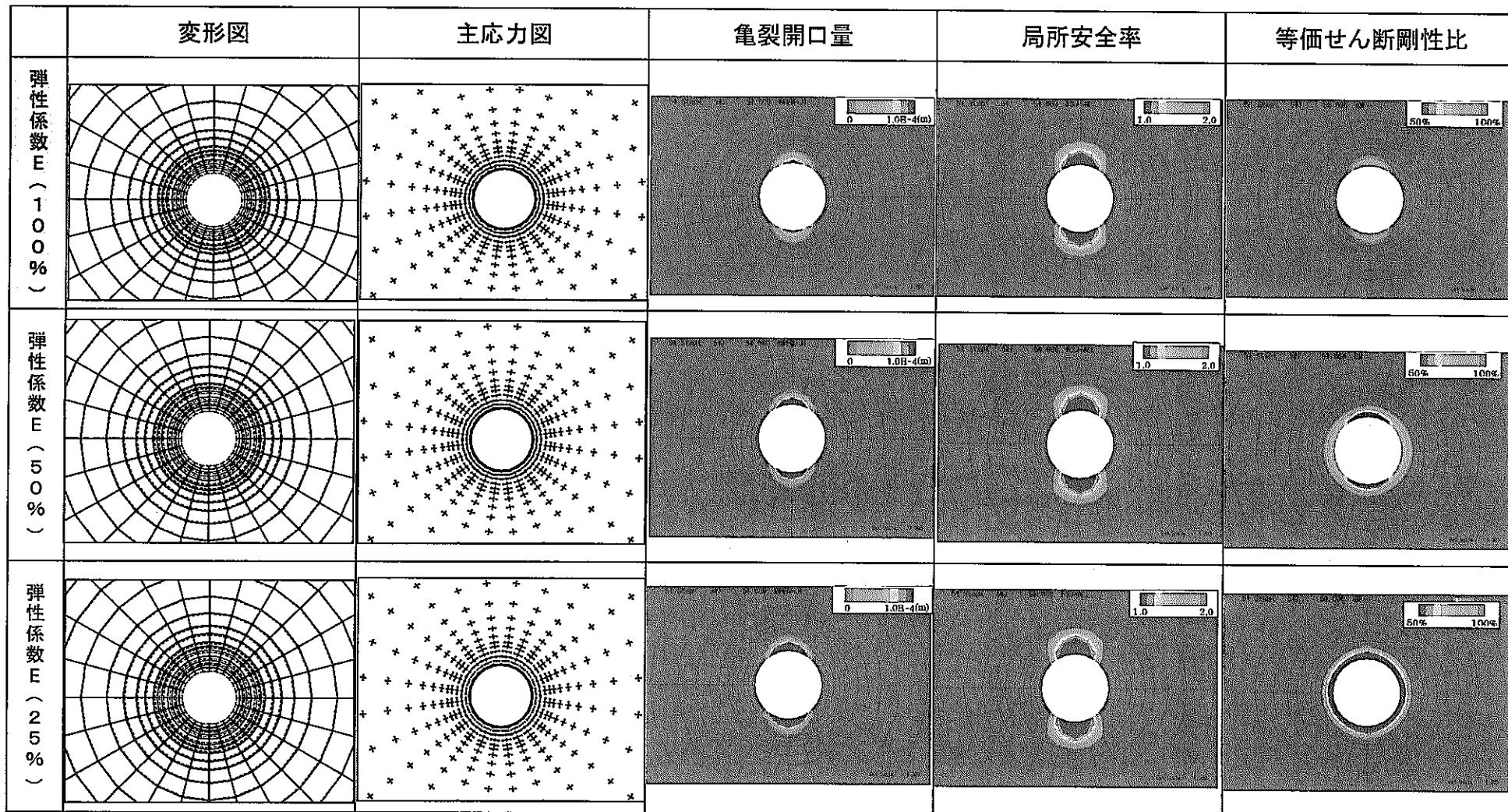
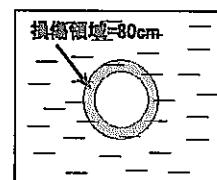


図4.3.1 感度解析センター図（感度パラメータ：弾性係数E 100%・50%・25%）

感度解析：弾性係数E
〔損傷領域〕
※ 下記パラメータは掘削解放率40%後に導入する。
弾性係数E
 ① 100%（基本ケース）
 ② 50%
 ③ 25%



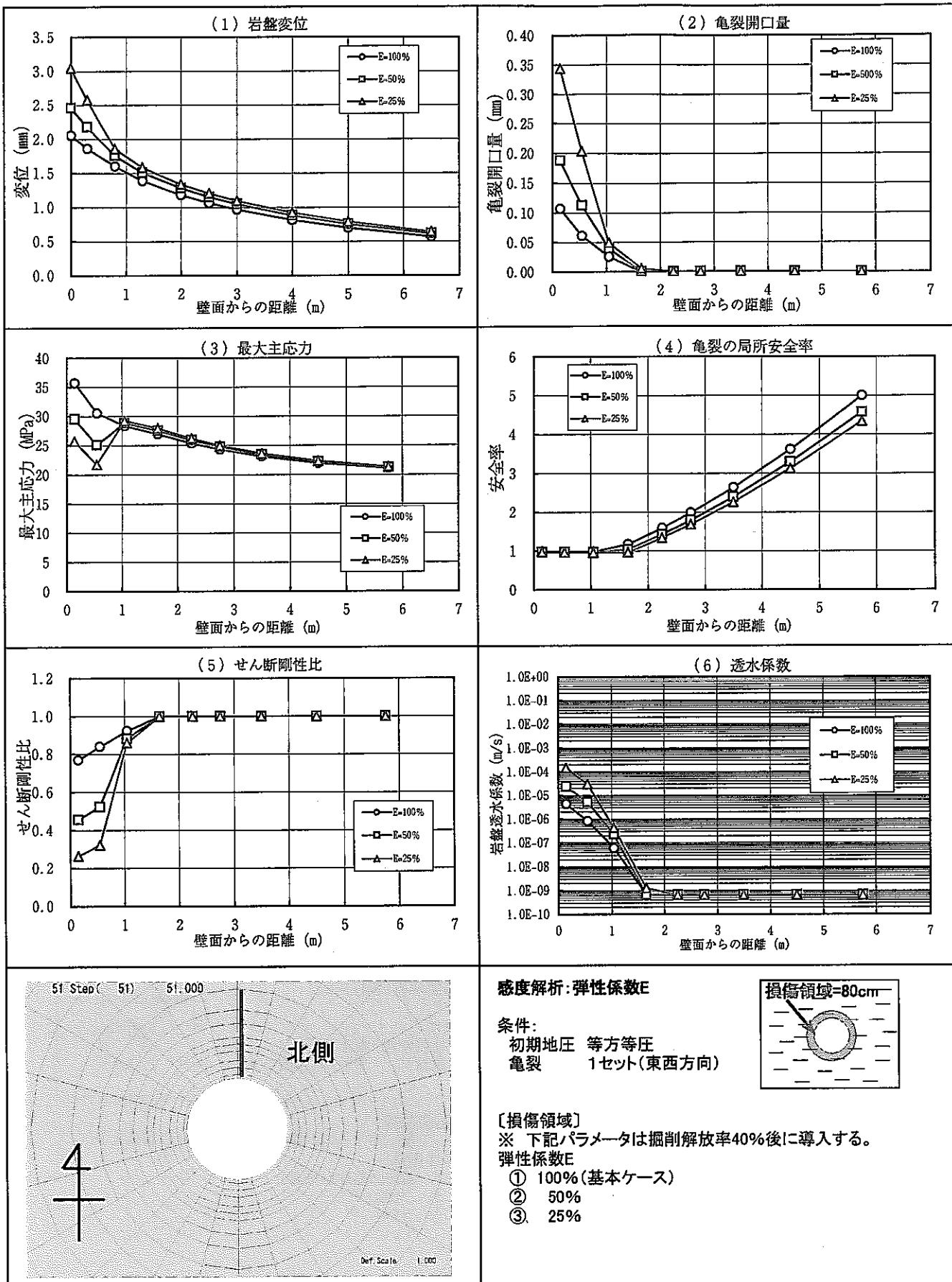


図4.3.2 感度解析グラフ: パラメータ 弾性係数E (立坑: 北側)

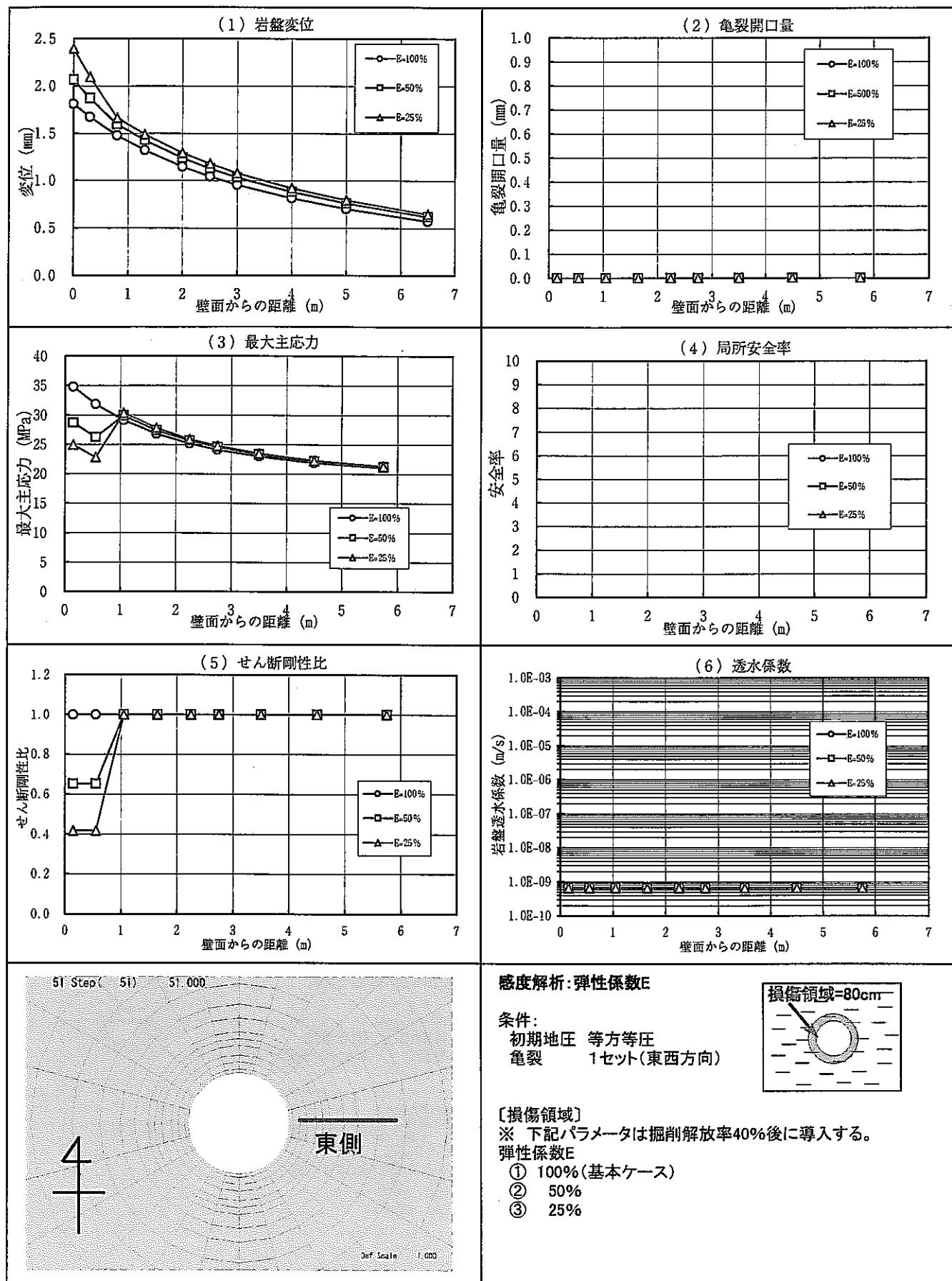


図4.3.3 感度解析グラフ:パラメータ 弾性係数E (立坑:東側)

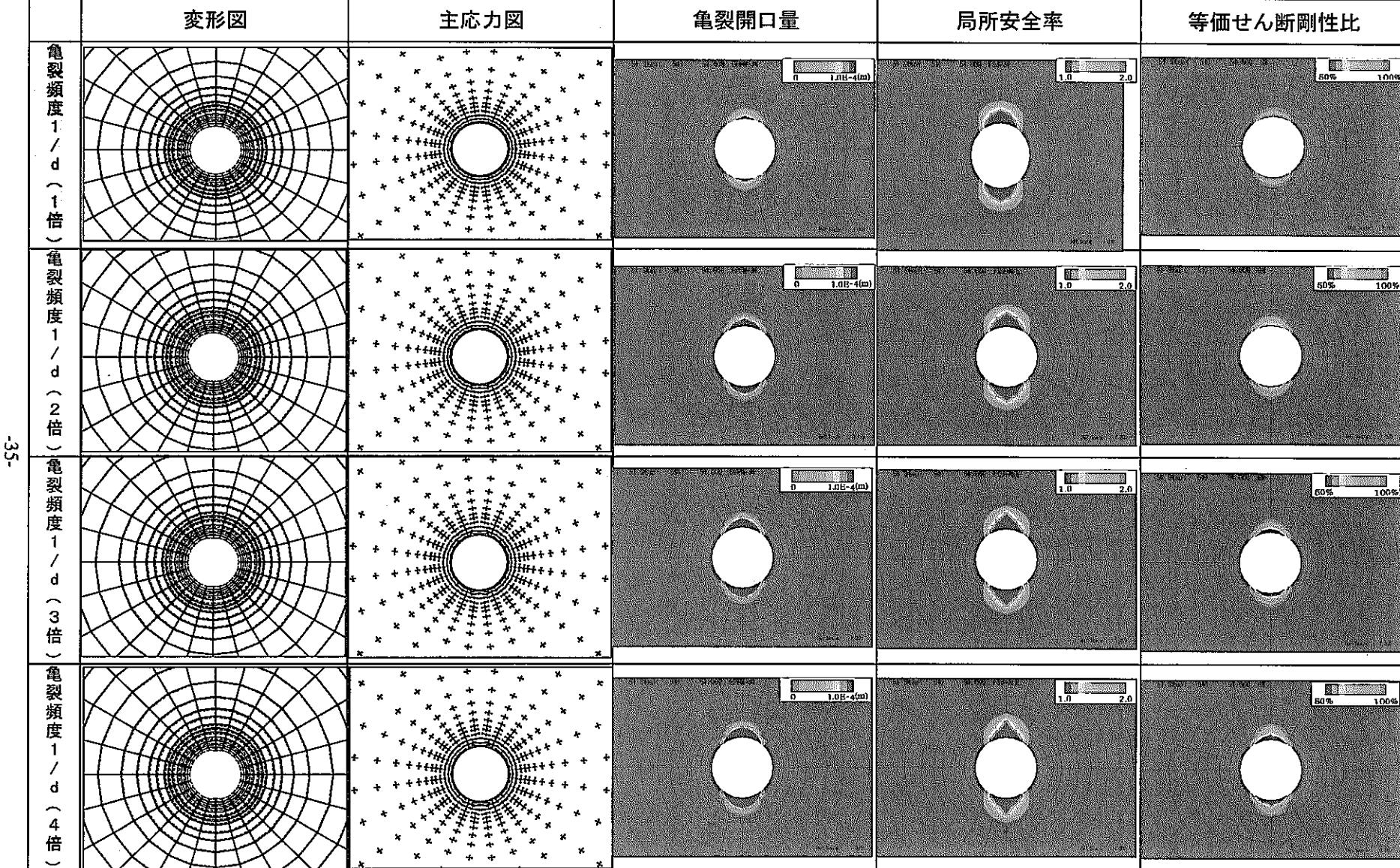
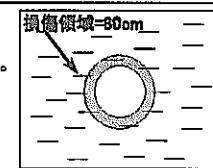


図4.3.4 感度解析センター図(感度パラメータ:亀裂密度 $1/d$ 1倍・2倍・3倍・4倍)

感度解析:亀裂密度 $1/d$
〔損傷領域〕
※ 下記パラメータは掘削解放率40%後に導入する。

亀裂密度 $1/d$

- ① $1/d = 1$ 倍
- ② $1/d = 2$ 倍
- ③ $1/d = 3$ 倍
- ④ $1/d = 4$ 倍



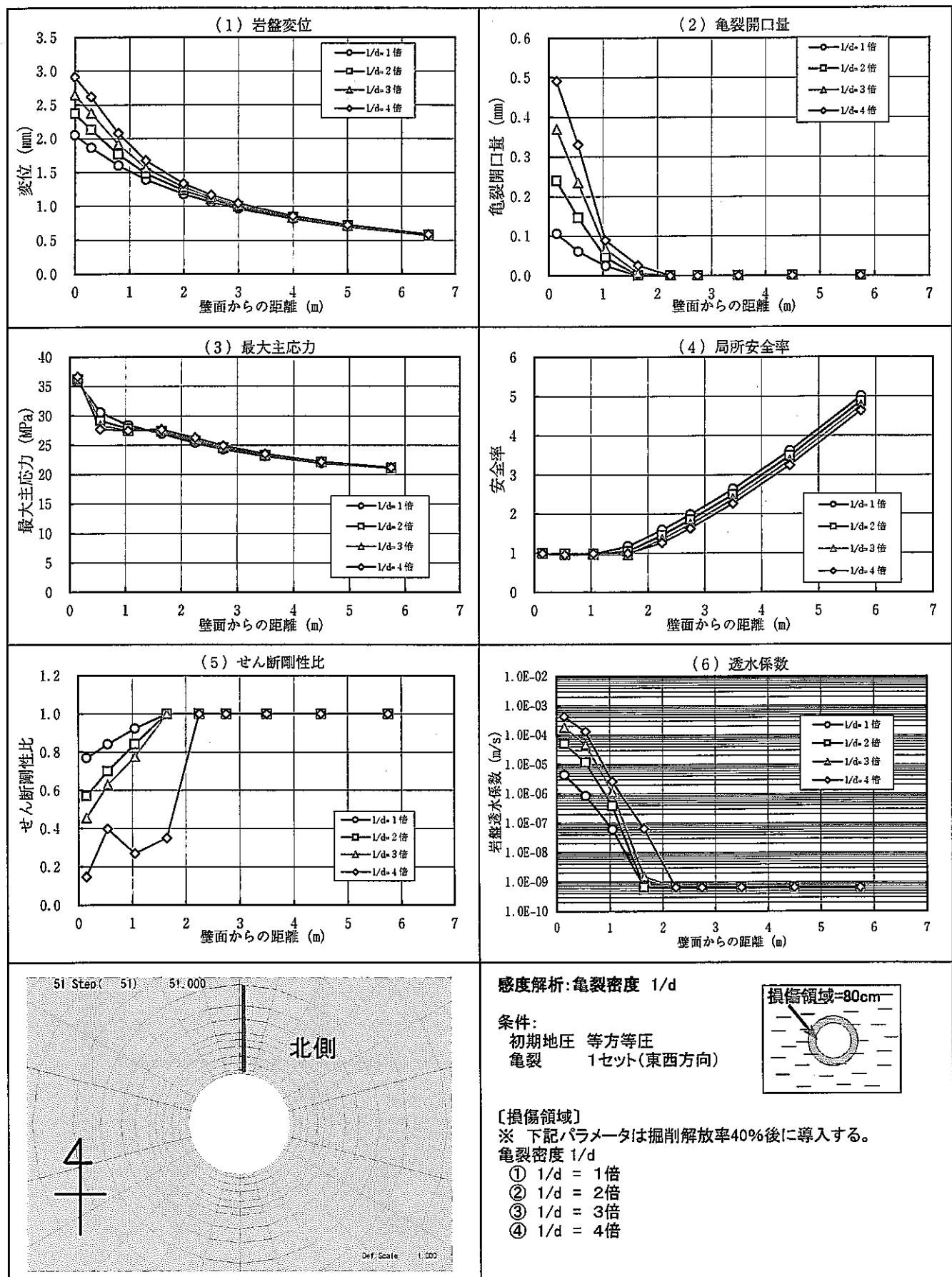
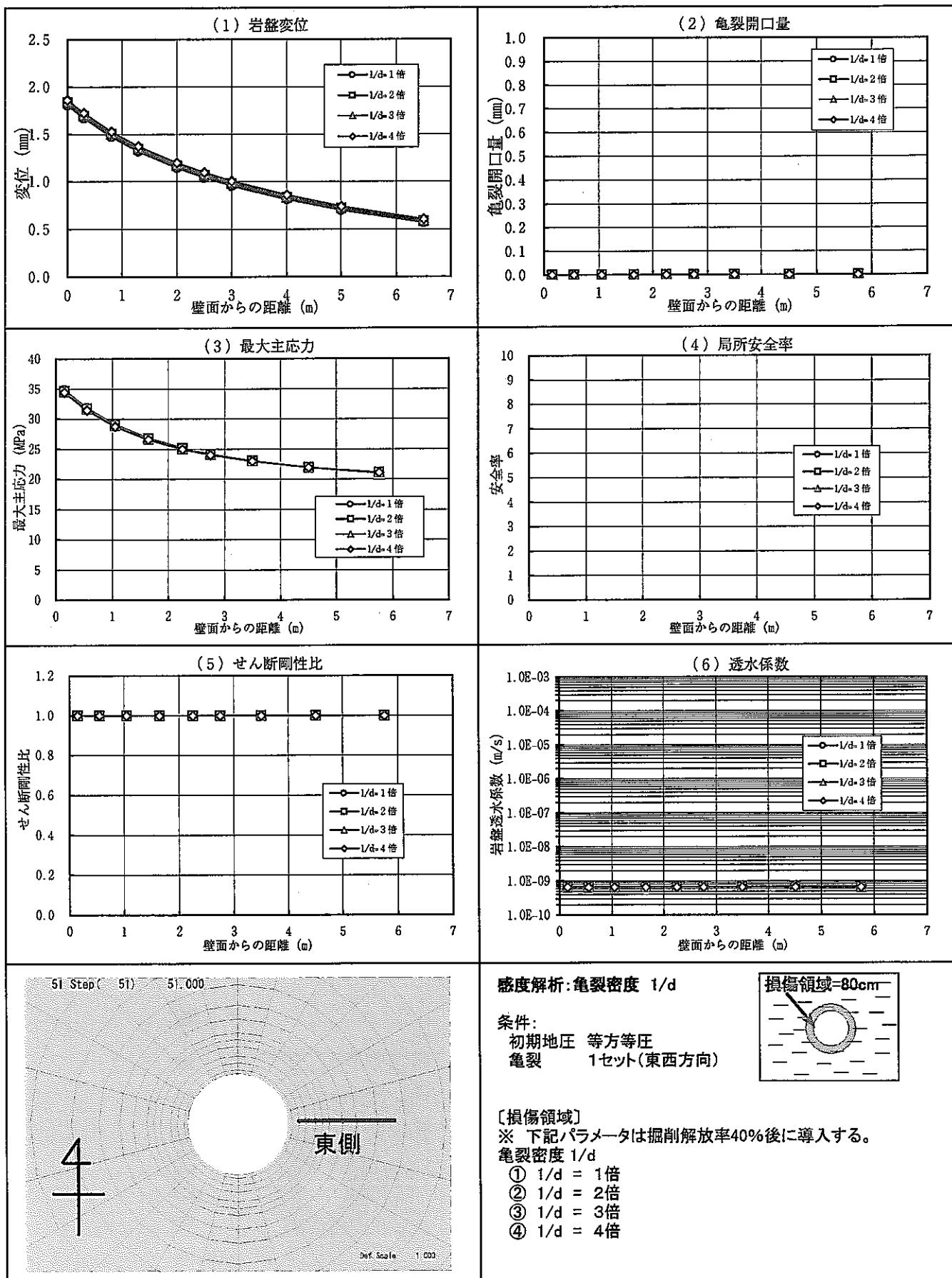


図4.3.5 感度解析グラフ:パラメータ 亀裂密度($1/d$) (立坑:北側)



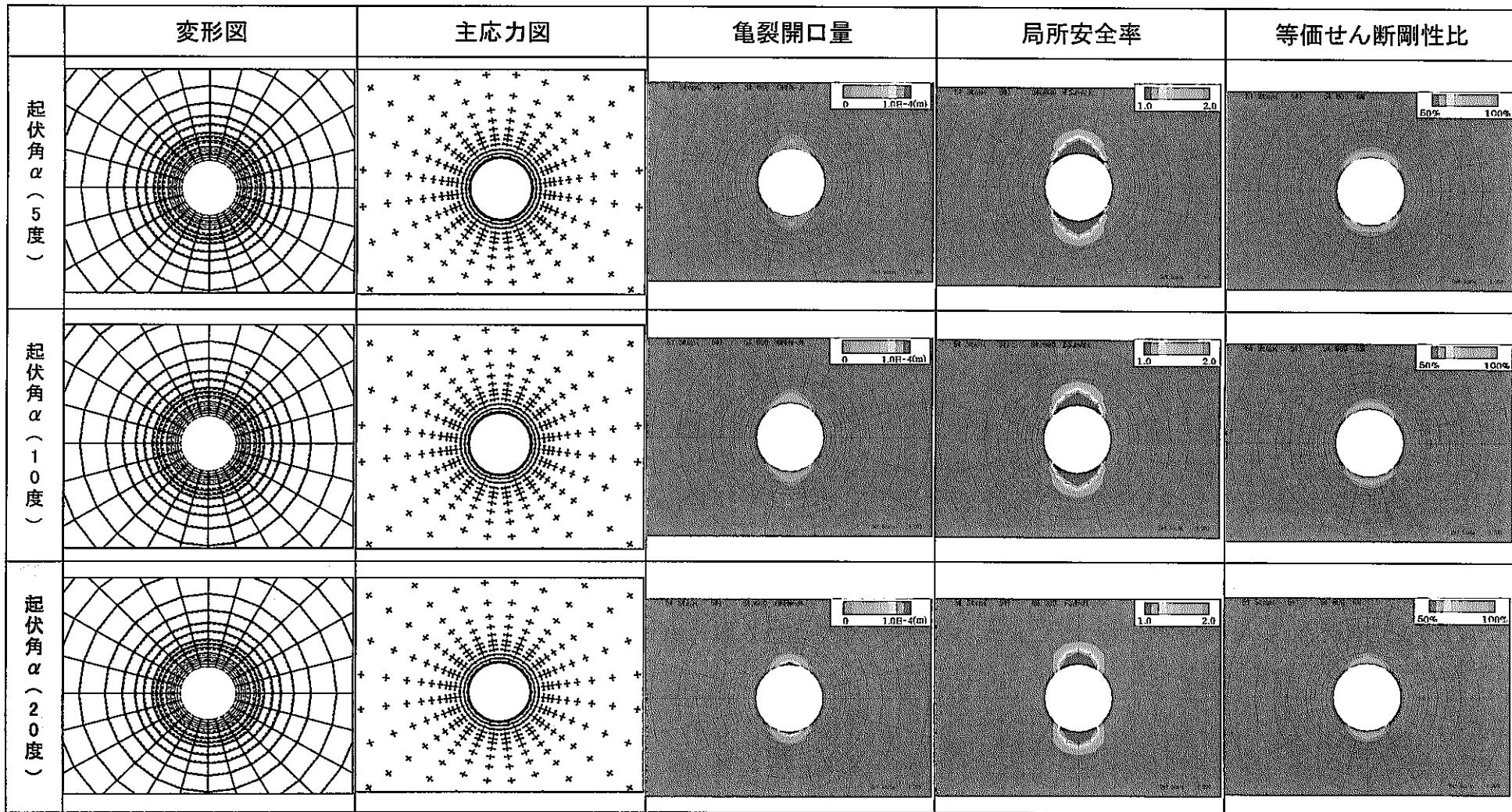


図4.3.7 感度解析センター図 (感度パラメータ: 起伏角 α 5°・10°・20°)

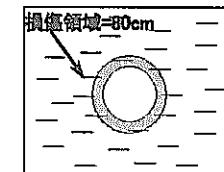
感度解析: 起伏角 α

〔損傷領域〕

※ 下記パラメータは掘削解放率40%後に導入する。

起伏角 α

- ① 5°
- ② 10°
- ③ 20° (基本ケース)



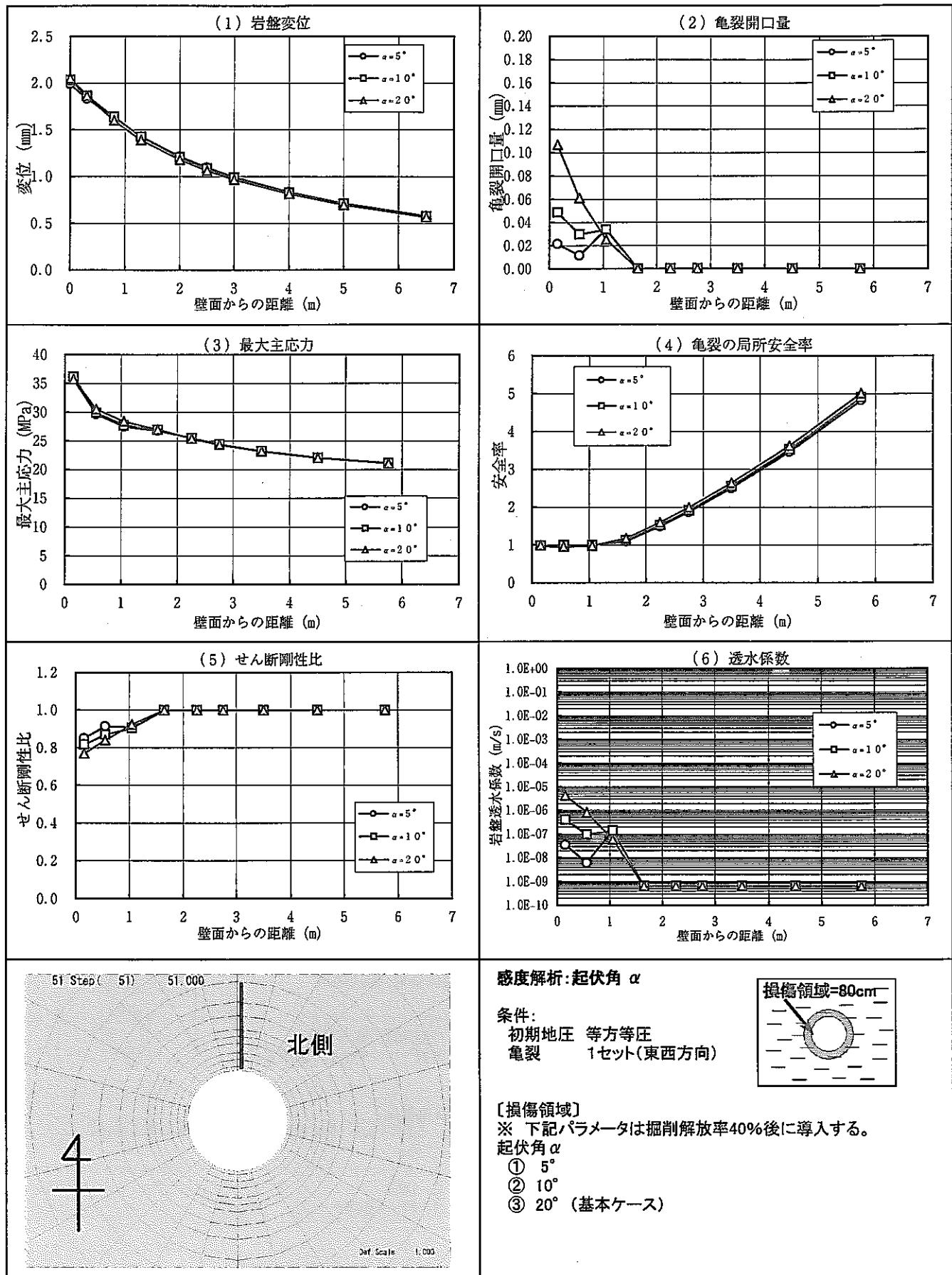


図4.3.8 感度解析グラフ: パラメータ 起伏角 α (立坑: 北側)

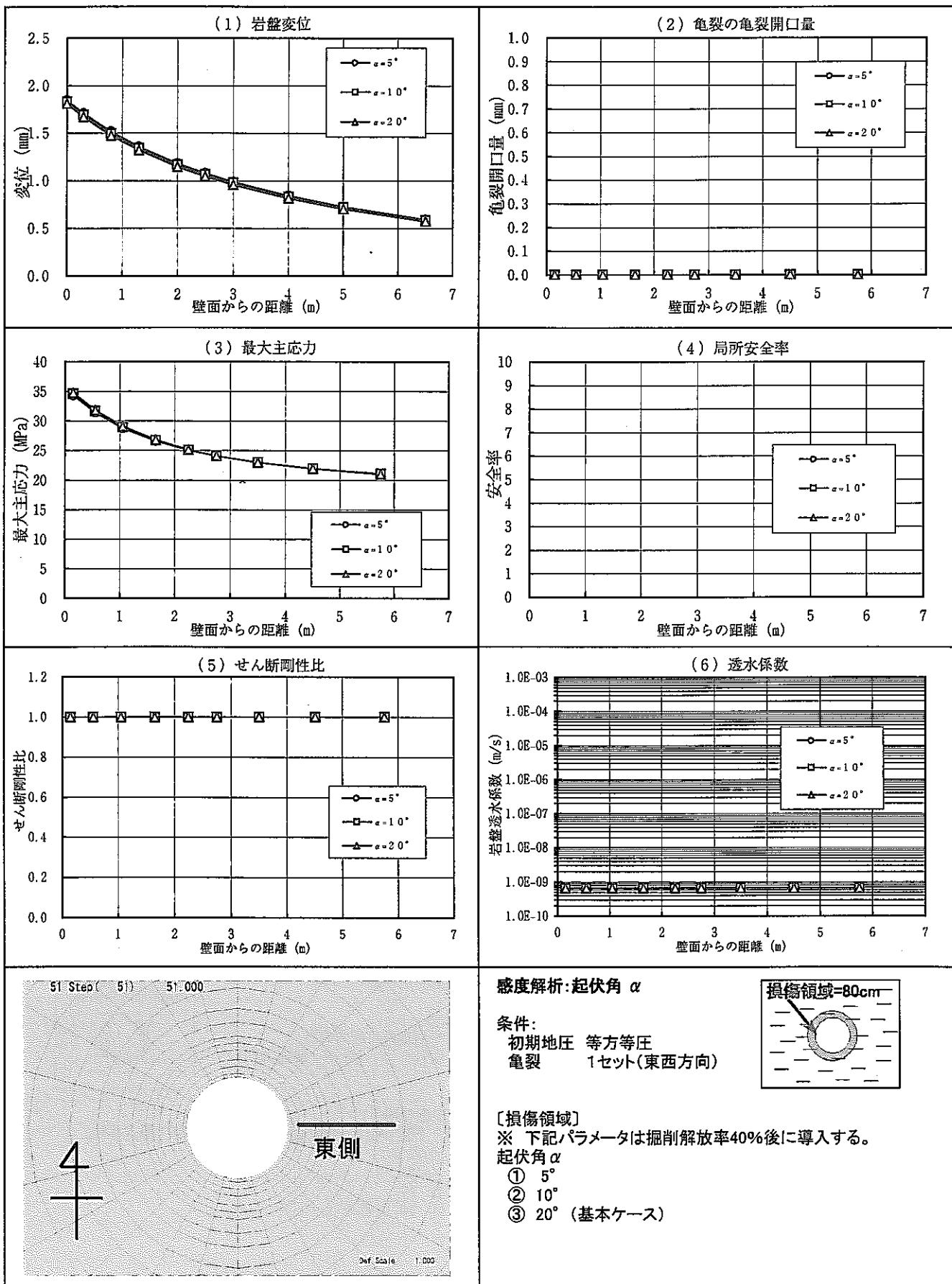


図4.3.9 感度解析グラフ:パラメータ 起伏角 α (立坑: 東側)

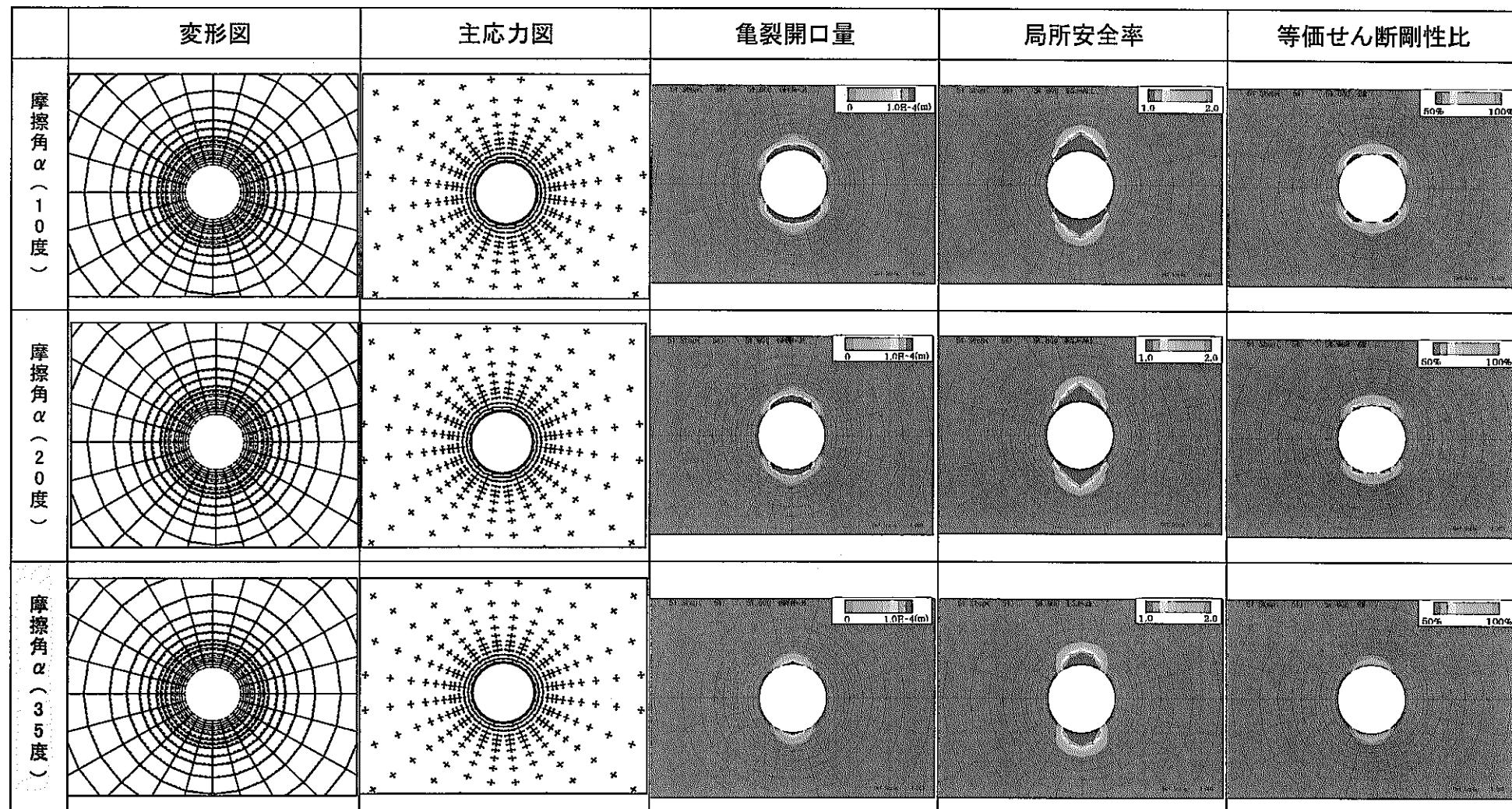


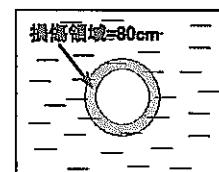
図4.3.10 感度解析センター図(感度パラメータ:摩擦角 ϕ 10°・20°・35°)

感度解析:亀裂面の摩擦角 ϕ
[損傷領域]

※ 下記パラメータは掘削解放率40%後に導入する。

亀裂面の摩擦角 ϕ

- ① 10°
- ② 20°
- ③ 35° (基本ケース)



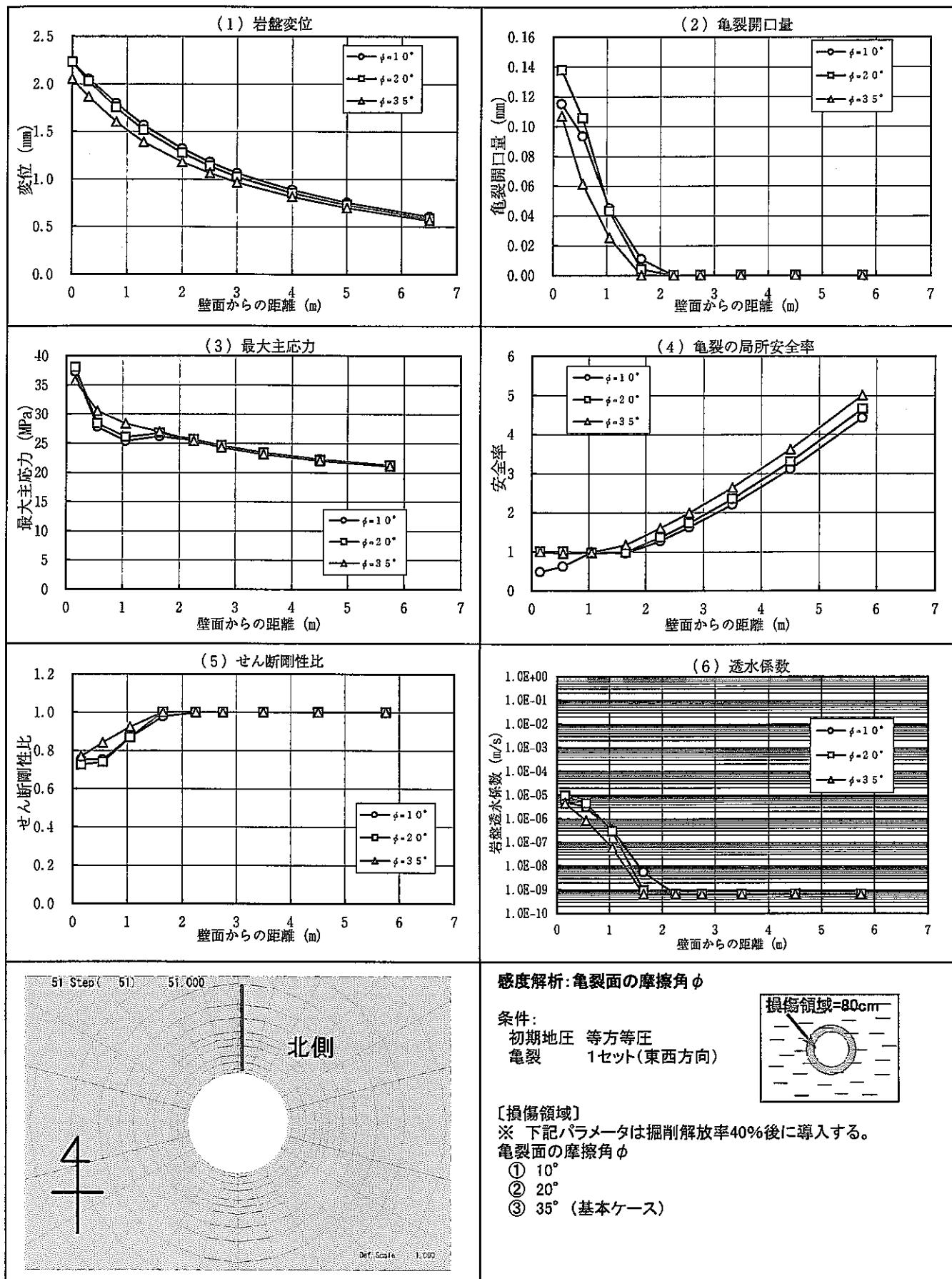


図4.3.11 感度解析グラフ: パラメータ 亀裂面の摩擦角 ϕ (立坑: 北側)

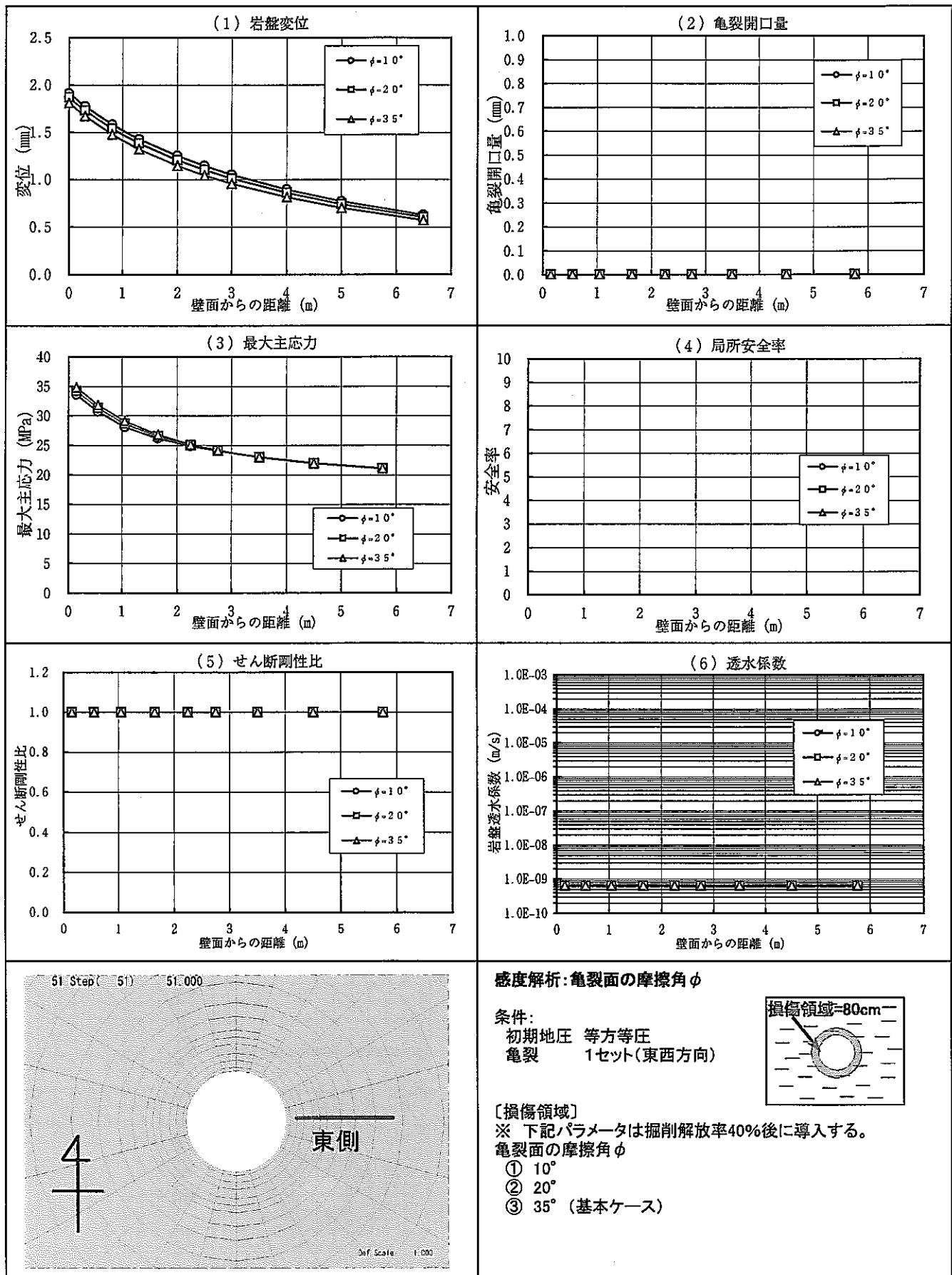


図4.3.12 感度解析グラフ: パラメータ 亀裂面の摩擦角 ϕ (立坑: 東側)

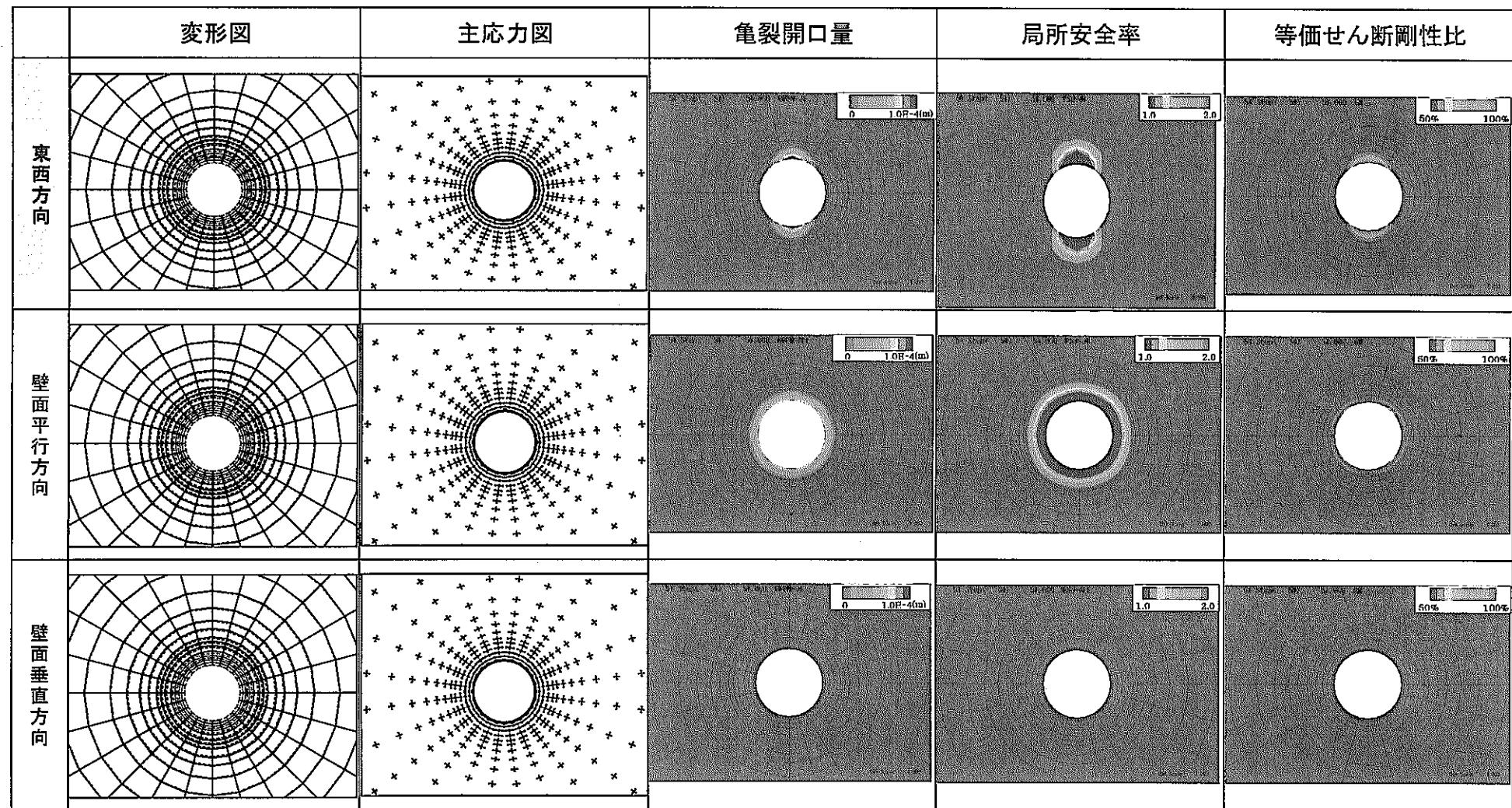
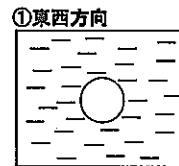


図4.3.13 感度解析センター図（感度パラメータ：亀裂方向 東西方向・壁面平行方向・壁面垂直方向）

感度解析:亀裂方向 θ
 [損傷領域]
 亀裂方向 θ
 ① 東西方向(基本ケース)
 ② 壁面平行方向
 ③ 壁面垂直方向

※本パラメータについては、
 損傷領域は考慮しない



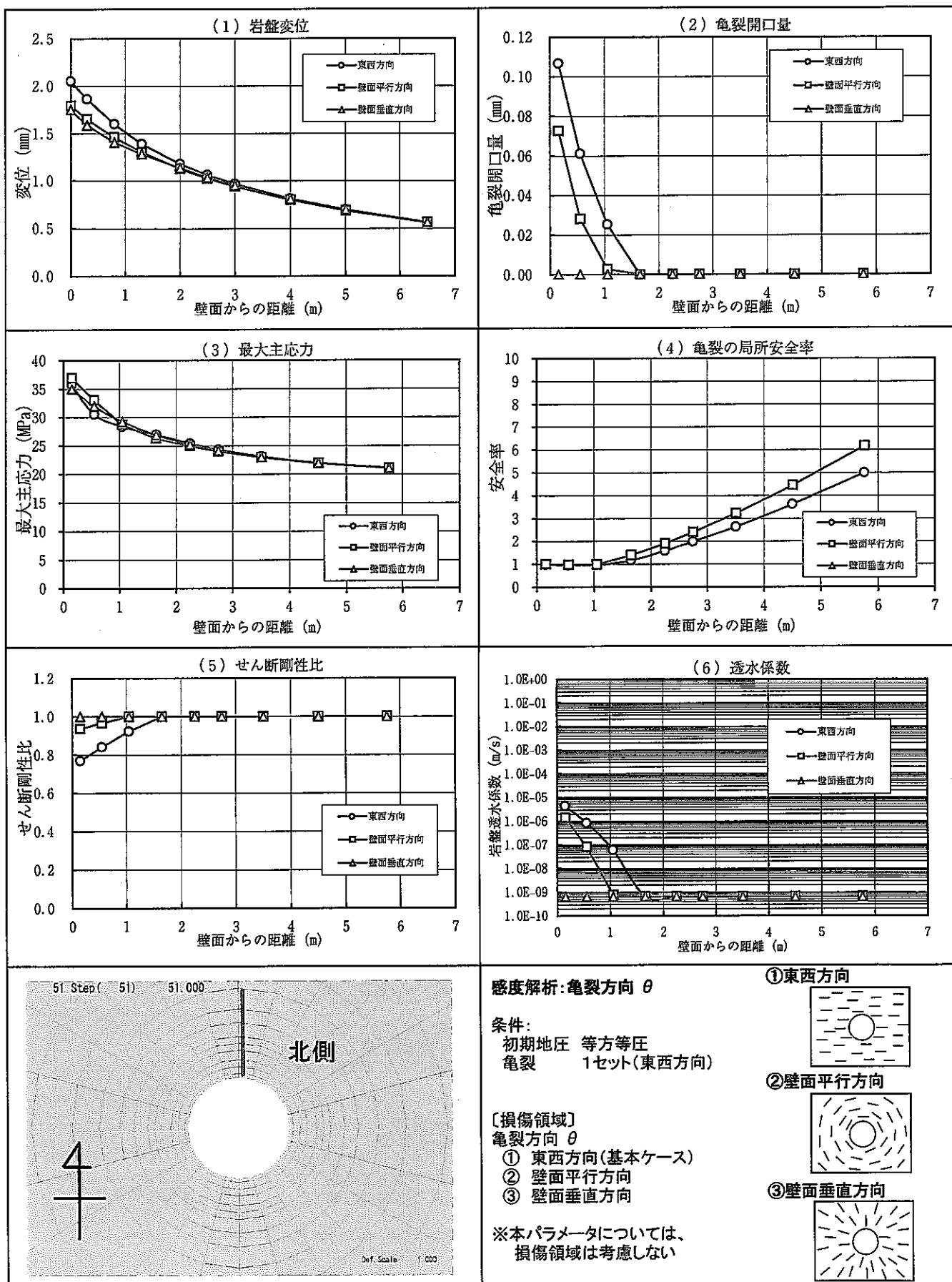


図4.3.14 感度解析グラフ: パラメータ 龟裂方向 θ (立坑: 北側)

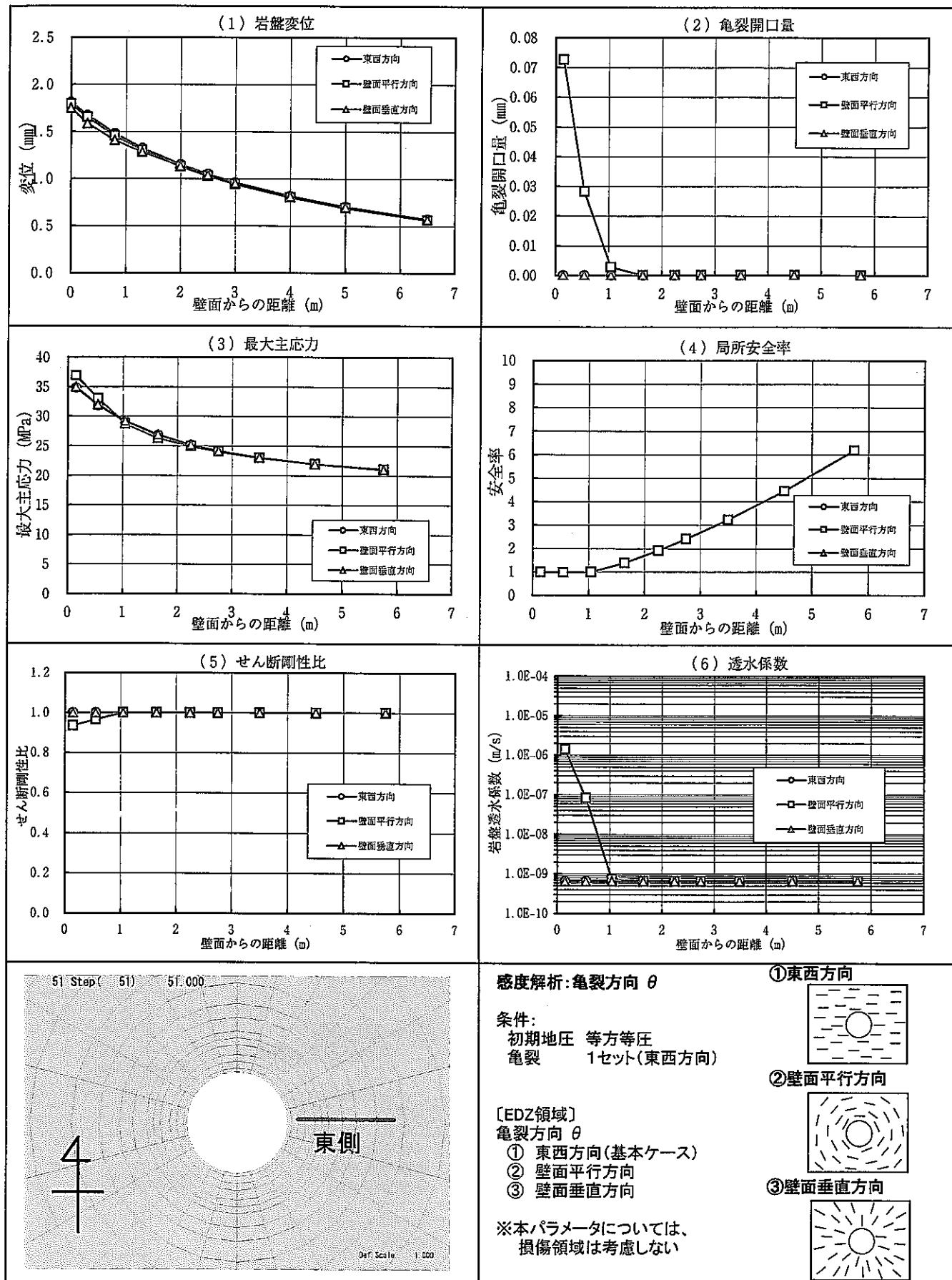


図4.3.15 感度解析グラフ: パラメータ亀裂方向 θ (立坑: 東側)

4. 4 感度解析まとめ

4. 3. 1から4. 3. 5まで、岩盤基質部の弾性係数E、亀裂密度 $1/d$ 、亀裂面の起伏角 α 、亀裂面の摩擦角 ϕ 、亀裂の方向 θ の5つのパラメータの感度解析を実施してきた。表4. 2. 8に各感度パラメータによる壁面近傍の亀裂開口量の最大・最小値およびその開口量の差を示した。以上の感度解析の結果、大まかな傾向として表4. 2. 9のようにまとめられる。

表4. 2. 8 各感度パラメータでの亀裂の開口量

感度パラメータ	壁面近傍（北側）の亀裂の開口量		
	①最大値(㎟) (その時の解析ケース)	②最小値(㎟) (その時の解析ケース)	感度パラメータをふった場合の開口量の差(㎟) (①-②)
岩盤基質部の弾性係数 E	0.34	0.11	0.23
	E/E₀=25%	E/E₀=100% (基本ケース)	
亀裂の密度 $1/d$	0.49	0.11	0.38
	$1/d=8$ 倍	$1/d=1$ 倍 (基本ケース)	
亀裂の起伏角 α	0.11	0.02	0.09
	$\alpha=20^\circ$ (基本ケース)	$\alpha=5^\circ$	
亀裂の摩擦角 ϕ	0.14	0.11	0.03
	$\phi=20^\circ$	$\phi=35^\circ$ (基本ケース)	

表4. 2. 9 感度パラメータの亀裂開口に対する影響

感度パラメータ		亀裂の開口条件への寄与	亀裂開口量への寄与
岩盤基質部の弾性係数 E	小さくなると↓	あまり影響はない	大きくなる↑
亀裂の密度 $1/d$	大きくなると↑	あまり影響はない	大きくなる↑
亀裂の起伏角 α	小さくなると↓	あまり影響はない	基本的には※小さくなる↓
亀裂の摩擦角 ϕ	小さくなると↓	開口しやすい↑	基本的には※小さくなる↓

※ 今回、感度解析を実施したパラメータの設定範囲内ではの意

亀裂の開口条件は次式（式(3. 1. 3)の再掲）で示した通り、亀裂面の摩擦角とその応力状態で決定されるため、直接的に影響を及ぼすのは亀裂の摩擦角 ϕ のみである。

$$\left| \bar{\sigma}_s^{J'} \right| = -\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^{J'} < 0$$

しかし、一旦亀裂が開口すると、岩盤基質部の弾性係数Eが小さくなるほど、また亀裂の密度 $1/d$ が大きくなるほど、亀裂を含んだ岩盤全体の系としてのコンプラ

イアンスが大きくなるため、系としての剛性は小さくなり、亀裂の開口量は大きくなる。

一方、亀裂面の起伏角 α 、摩擦角 ϕ については、次式（式(3. 1. 18)～式(3. 1. 21)の再掲）の Y_{nn} 、 Y_{ns} 、 Y_{sn} 、 Y_{ss} の関数である。

$$Y_{nn}^{(m)} = \frac{\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}}{K^{(m)}} \sin \alpha^{(m)} \quad (3. 1. 18)$$

$$Y_{ns}^{(m)} = \frac{1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}}{K^{(m)}} \sin \alpha^{(m)} \quad (3. 1. 19)$$

$$Y_{sn}^{(m)} = \frac{\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}}{K^{(m)}} \cos \alpha^{(m)} \quad (3. 1. 20)$$

$$Y_{ss}^{(m)} = \frac{1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}}{K^{(m)}} \cos \alpha^{(m)} \quad (3. 1. 21)$$

従って、例えば、起伏角 α および摩擦角 ϕ を小さくすると、 Y_{nn} は小さくなり、 Y_{ss} は大きくなるので、系の剛性としては鉛直方向の剛性は大きくなり、せん断方向の剛性は小さくなる傾向であり、亀裂面の開口量は小さくなる傾向にあることになる。ところが、摩擦角 ϕ については、前述したように、亀裂面の破壊条件を決めるパラメータであり、摩擦角 ϕ が大きいほど、亀裂面の破壊は発生しにくくなる傾向も有している。従って、亀裂面の起伏角 α および摩擦角 ϕ について、亀裂の開口に対する寄与については一概に言えない。

以上のことから、これまでに検討してきた感度パラメータとして、掘削損傷領域の影響度の高いものとしては、岩盤基質部の弾性係数 E と亀裂密度 $1/d$ である。ただし、岩盤基質部の弾性係数 E は、岩盤基質部のみならず亀裂の剛性にも影響を与えるパラメータである。MBC モデルでは、元々、岩盤基質部の破壊は考慮せず、亀裂の破壊のみで岩盤挙動を表現するモデルである。従って、掘削損傷領域を考慮した影響解析の検討に用いるパラメータとしては亀裂密度 $1/d$ が最も適当であると考える。従って、5章では、亀裂密度をパラメータとしてケーススタディを行った。

5. 掘削損傷領域を考慮した坑道掘削解析

5. 1 解析目的

4章における感度解析により、岩盤や亀裂の個々のパラメータが坑道周辺岩盤に与える影響を把握した。しかし、実際の発破や機械掘削により形成された掘削損傷領域の振舞いは初期応力状態、坑道形状、先在亀裂の状態の違いにより非常に複雑であるものと思われる。そこで、本章では、感度解析結果を参考にし、研究坑道の立坑部および横坑部を対象として、掘削損傷領域を考慮したMBCモデルによる坑道掘削解析を行う。具体的には、坑道掘削による周辺岩盤への力学的および水理学的影响を念頭に入れ、ア)掘削損傷領域の特性の違いによる挙動予測解析、イ)掘削損傷領域の広がりの違いによる挙動予測解析を実施する。また、ア)では、4章の感度解析の結果から特性の違いを検討するパラメータとして、亀裂密度を取り上げる。

また掘削損傷領域の亀裂のモデル化として、発破や機械による掘削により、元々、岩盤に内在していた先在亀裂（既存の亀裂）が進展するモデルと、壁面に対し平行方向（接線方向）に新たに亀裂が発生するモデルの2種類の亀裂のモデル化が考えられる。

そこで、ここでは、掘削損傷領域の亀裂を上述の2つの亀裂モデルをMBCモデルで表現し、それぞれについて坑道掘削影響解析を実施することとする。

以上により得られた解析結果を既実施の解析結果（貸与技術資料^⑧）と比較し、掘削損傷領域を考慮することによる解析結果に与える力学的・水理学的な影響について検討する。

なお、本章の解析における掘削損傷領域を除く領域の境界条件や応力条件、特性値、亀裂の分布等については既実施の解析結果（貸与技術資料^⑧）を参考に設定する。

5. 2 解析条件

5. 2. 1 共通解析条件

解析は立坑および横坑に分け、解析条件は以下の通りとした。なお、本章の解析における掘削損傷領域を除く領域の境界条件や応力条件、特性値、亀裂の分布等については既実施の解析結果（貸与技術資料⁸⁾）を参考に設定した。

（1）解析対象

超深地層研究所研究坑道レイアウトに基づき、立坑部および横坑部に分け、中間ステージレベル（GL-500m）とした。

（2）立坑の解析条件

- ・ 解析条件は貸与技術資料⁸⁾の中間ステージレベルのケースを基に設定。
- ・ 解析領域は、境界条件の影響を受けない十分な広さとして、立坑を中心として 50m×50m の領域とする。
- ・ 立坑断面は掘削径 $\phi 7.3\text{ m}$ で、無支保とする。
- ・ 掘削解析時の境界条件は、全周にわたり固定条件とする。
- ・ 掘削解析は全断面掘削とする。

（3）横坑の解析条件

- ・ 解析条件は貸与技術資料⁸⁾の中間ステージレベルのケースを基に設定。
- ・ 解析領域は、境界条件の影響を受けない十分な広さとして、横坑を中心として 50m×50m の領域とする。
- ・ 横坑断面は馬蹄型で、3 m×3 m の無支保とし、坑道軸の展開方向は最大主応力方向に対して 0° （N45W）とする。
- ・ 掘削解析時の境界条件は、全周にわたり固定条件とする。
- ・ 掘削解析は全断面掘削とする。

(4) 初期応力

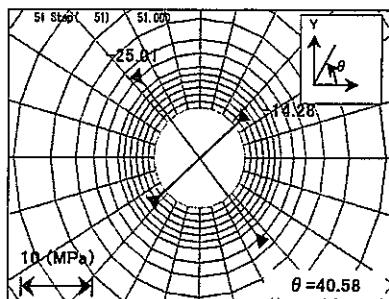
立坑および横坑の初期応力は、既実施の解析結果（貸与技術資料^⑧）における中間ステージレベル（GL-500m）と同一とする。

立坑および横坑の解析に用いた初期応力状態をそれぞれ表5. 2. 1および表5. 2. 2に示す。

<立坑 初期応力>

表5. 2. 1 立坑 初期応力

深度	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	側圧比K (σ_x/σ_y)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	θ (°)
GL-500m (ゾーン2)	-18.82	-20.47	5.30	0.92	-14.28	-25.01	40.58

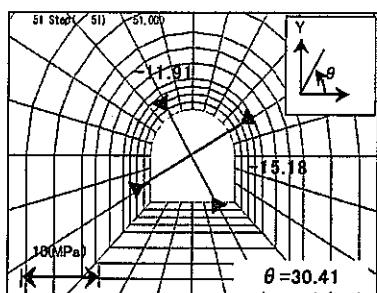


σ_x : 東西方向
 σ_y : 南北方向
負号: 圧縮を負

<横坑 初期応力>

表5. 2. 2 横坑 初期応力

深度	坑道 方向	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	側圧比K (σ_x/σ_y)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	θ (°)
GL-500m (ゾーン2)	0°	-14.35	-12.75	-1.43	1.13	-11.91	-15.18	30.41



σ_x : 水平方向
 σ_y : 鉛直方向
負号: 圧縮を負

(5) 岩盤および亀裂の特性値

立坑および横坑解析における、掘削損傷領域を除く領域の岩盤および亀裂の特性値は、既実施の解析結果（貸与技術資料^④）における中間ステージレベル（GL-500m）と同一とする。但し、各解析ケースにおける掘削損傷領域の特性については、それぞれ設定することとする。立坑および横坑の解析に用いた特性値をそれぞれ表5.2.3および表5.2.4に示す。

表5.2.3 立坑 岩盤および亀裂の特性値（掘削損傷領域は各ケースごとに指定）

深度(GL)	岩盤基質部		亀裂①			亀裂②			亀裂③		
	弾性係数 E_0 (MPa)	ボアソン比 ν	亀裂長さ $L(=2a)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	亀裂方向 θ (°)	亀裂長さ $L(=2a)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	亀裂方向 θ (°)	亀裂長さ $L(=2a)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	亀裂方向 θ (°)
GL-500m	49,400	0.34	0.175	5.000	49	0.220	2.632	177	0.855	0.020	90

注1) 亀裂の方向：水平軸の正側から反時計回りを正とする。

各亀裂の傾斜角度

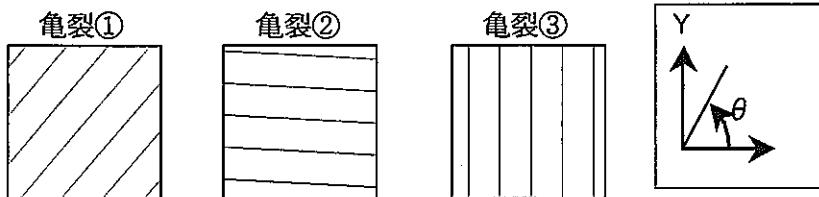


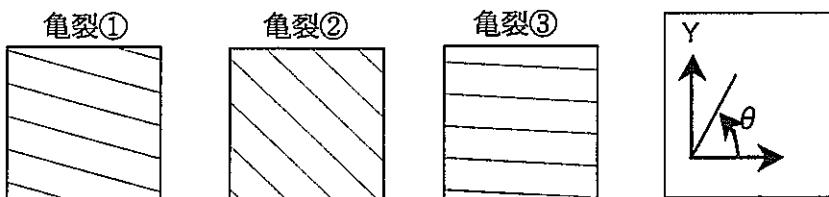
表5.2.4 横坑 岩盤および亀裂の特性値（掘削損傷領域は各ケースごとに指定）

深度(GL)	坑道 方向	岩盤基質部		亀裂①			亀裂②			亀裂③		
		弾性係数 E_0 (MPa)	ボアソン比 ν	亀裂長さ $L(=2a)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	亀裂方向 θ (°)	亀裂長さ $L(=2a)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	亀裂方向 θ (°)	亀裂長さ $L(=2a)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	亀裂方向 θ (°)
GL-500m	0°	49,400	0.34	0.175	1.370	165	0.220	2.857	137	0.855	0.290	177

注1) 亀裂の方向：水平軸の正側から反時計回りを正とする。

注2) 坑道方向0°：N45W方向に展開

各亀裂の傾斜角度



(6) 解析ステップ

解析ステップは図5. 2. 1に示すように、まず初期応力状態を設定後、立坑掘削により岩盤応力を40%解放した後に、規定の掘削損傷領域において特性変更を行う。その後、残りの60%を応力解放する。

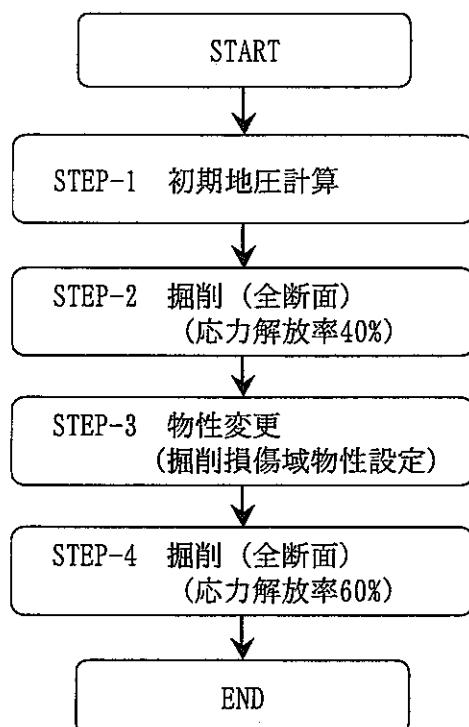


図5. 2. 1 解析ステップ

(7) 解析メッシュ

立坑および横坑の解析メッシュを図5.2.2および図5.2.3に示す。図5.2.4に各坑道で設定した掘削損傷領域を示す。

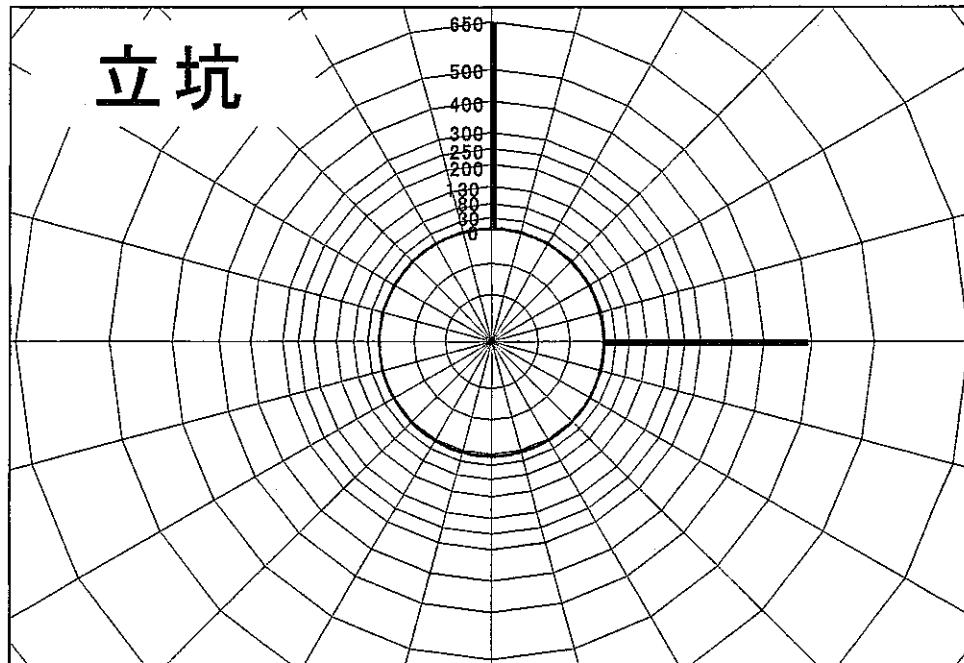


図5.2.2 立坑 解析メッシュ

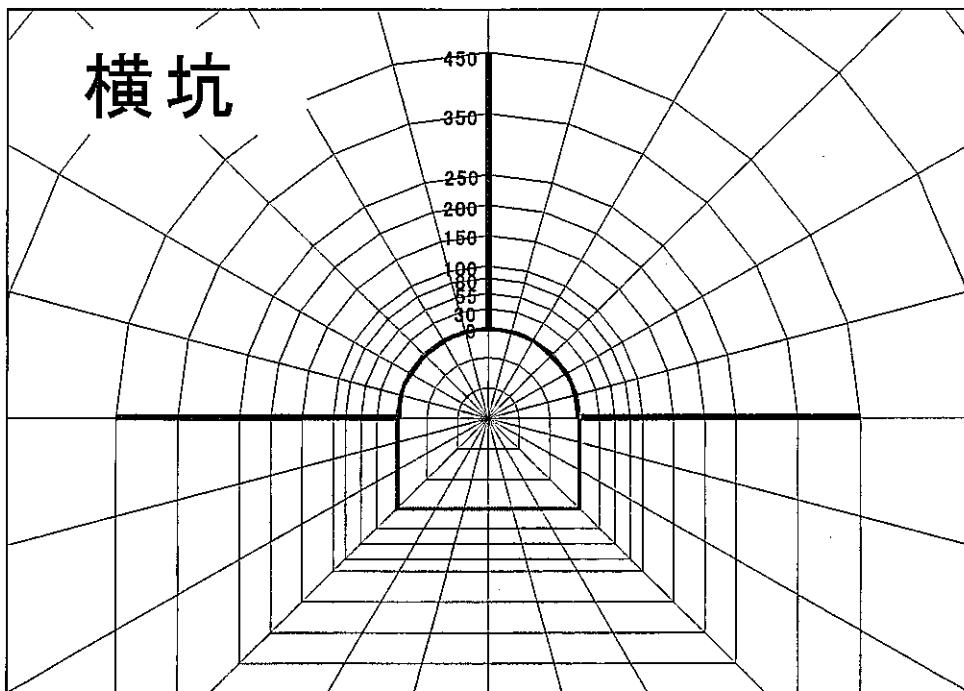


図5.2.3 横坑 解析メッシュ

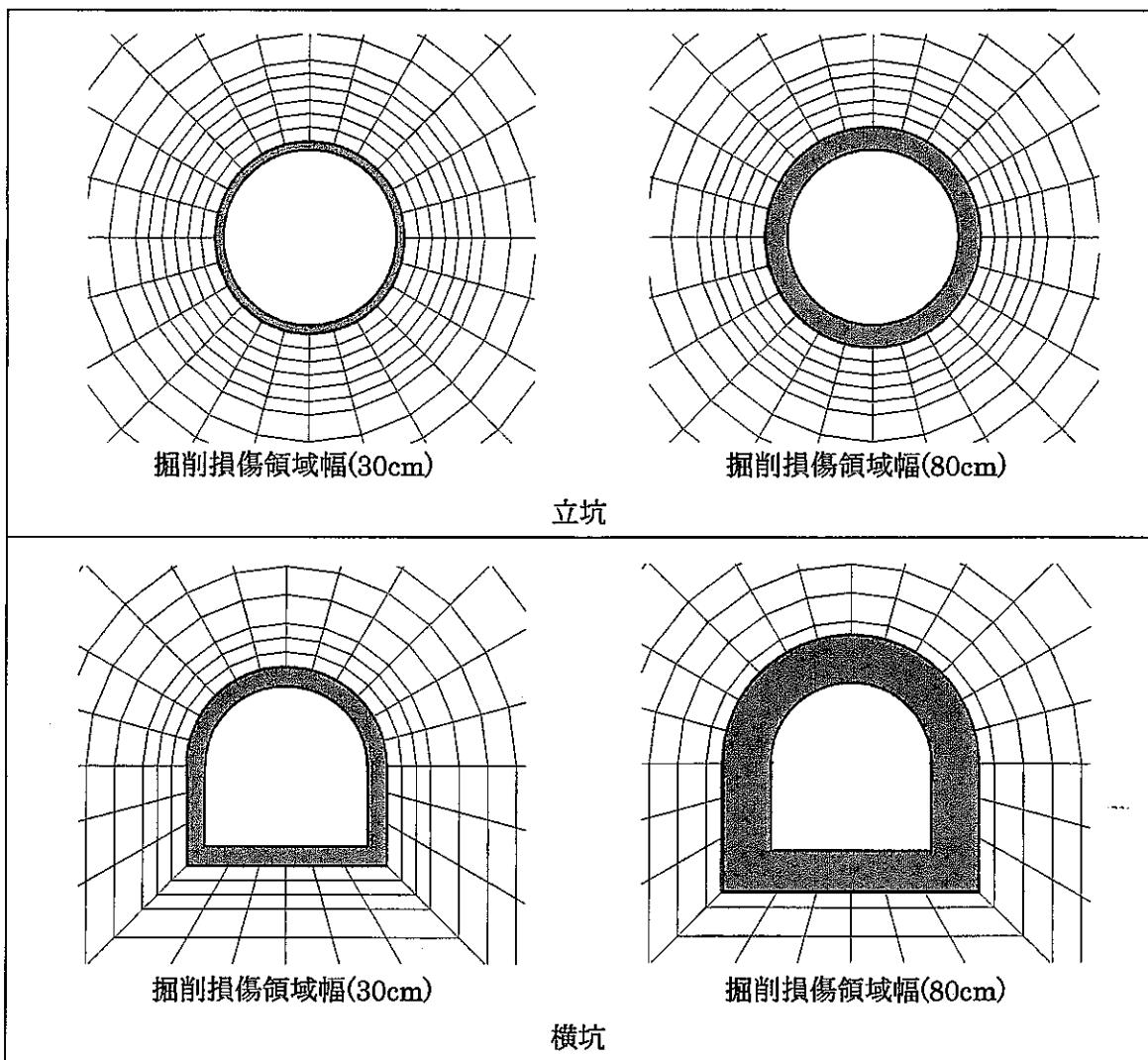


図 5.2.4 各坑道で設定した掘削損傷領域の範囲
(ハッキング部が掘削損傷領域)

5. 2. 2 解析ケース

解析では、掘削損傷領域でモデル化する亀裂として

- ① 岩盤に内在していた既存亀裂が進展
 - ② 発破等により新規に壁面平行方向亀裂が発生
- の2つのモデル化が考えられる。それぞれのモデルを対象として、
- (ア) 掘削損傷領域の特性の違いによる挙動予測
 - (イ) 掘削損傷領域の広がりの違いによる挙動予測
- を実施することとする。

(1) 既存亀裂が進展したケース

ア) 挖削損傷領域の特性の違いによる挙動予測解析

パラメータとして、亀裂密度 $1/d$ を取り上げ、以下の3ケースについて比較検討する。

- ① 亀裂密度 設定変更なし (掘削損傷領域: 壁面より 80cm)
- ② 掘削解放率 40%後、亀裂密度 4倍 (掘削損傷領域: 壁面より 80 cm)
- ③ 掘削解放率 40%後、亀裂密度 8倍 (掘削損傷領域: 壁面より 80 cm)

表5. 2. 5および表5. 2. 6に立坑・横坑の入力特性値を示す。

表5. 2. 5 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析 (立坑)

			岩盤部			亀裂①						亀裂②						亀裂③					
解析位置	解析ケース	領域	弾性係数	ボアン比	亀裂長さ	亀裂密度	傾斜角	起伏角	摩擦角	亀裂長さ	亀裂密度	傾斜角	起伏角	摩擦角	亀裂長さ	亀裂密度	傾斜角	起伏角	摩擦角				
			E (MPa)	v	a (m)	1/d (m/m)	θ (°)	α (°)	φ (°)	a (m)	1/d (m/m)	θ (°)	α (°)	φ (°)	a (m)	1/d (m/m)	θ (°)	α (°)	φ (°)				
立坑	既存亀裂 物性変化なし	掘全部	49,400	0.34	0.175	5200	49	10	25.5	0.220	2.632	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5				
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	6000	49	10	25.5	0.220	2.832	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5				
	既存亀裂 亀裂密度4倍	掘全部	49,400	0.34	0.175	5200	49	10	25.5	0.220	2.532	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5				
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	20,000	49	10	25.5	0.220	10.528	177	10	25.5	0.855	0.080	90	10	25.5				
	既存亀裂 亀裂密度8倍	掘全部	49,400	0.34	0.175	5200	49	10	25.5	0.220	2.632	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5				
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	40,000	49	10	25.5	0.220	21.056	177	10	25.5	0.855	0.160	90	10	25.5				

表5. 2. 6 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析 (横坑)

			岩盤部			亀裂①						亀裂②						亀裂③					
解析位置	解析ケース	領域	弾性係数	ボアン比	亀裂長さ	亀裂密度	傾斜角	起伏角	摩擦角	亀裂長さ	亀裂密度	傾斜角	起伏角	摩擦角	亀裂長さ	亀裂密度	傾斜角	起伏角	摩擦角				
			E (MPa)	v	a (m)	1/d (m/m)	θ (°)	α (°)	φ (°)	a (m)	1/d (m/m)	θ (°)	α (°)	φ (°)	a (m)	1/d (m/m)	θ (°)	α (°)	φ (°)				
横坑	既存亀裂 物性変化なし	掘全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2.857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5				
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2.857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5				
	既存亀裂 亀裂密度4倍	掘全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2.857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5				
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	6,480	165	10	25.5	0.220	11.428	137	10	25.5	0.855	1.160	177	10	25.5				
	既存亀裂 亀裂密度8倍	掘全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2.857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5				
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	10,880	165	10	25.5	0.220	22.856	137	10	25.5	0.855	2.320	177	10	25.5				

イ) 掘削損傷領域の広がりの違いによる挙動予測

亀裂密度 $1/d$ を 8 倍に固定し、以下 3 ケースを解析し、掘削損傷領域の広がりの違いを検討する。

- ① 掘削損傷領域なし (亀裂密度 設定変更なし)
- ② 掘削損傷領域: 壁面より 30 cm (掘削解放率 40% 後亀裂密度 8 倍)
- ③ 掘削損傷領域: 壁面より 80 cm (掘削解放率 40% 後亀裂密度 8 倍)

表 5. 2. 7 および表 5. 2. 8 に立坑・横坑の入力特性値を示す。

表 5. 2. 7 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりの違いによる解析 (立坑)

解析位置	解剖ケース	岩盤部		亀裂①						亀裂②						亀裂③					
		弾性係数 E (MPa)	ボアソン比 ν	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)			
立坑	既存亀裂 物性変化なし	健全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5		
		掘削域 30cm	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5		
	既存亀裂 亀裂密度8倍	健全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5		
		掘削域 30cm	49,400	0.34	0.175	40,000	49	10	25.5	0.220	21,056	177	10	25.5	0.855	0.160	90	10	25.5		
	既存亀裂 亀裂密度8倍	健全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.855	0.020	90	10	25.5		
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	40,000	49	10	25.5	0.220	21,056	177	10	25.5	0.855	0.160	90	10	25.5		

表 5. 2. 8 既存亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりの違いによる解析 (横坑)

解析位置	解剖ケース	岩盤部		亀裂①						亀裂②						亀裂③					
		弾性係数 E (MPa)	ボアソン比 ν	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)			
横坑	既存亀裂 物性変化なし	健全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5		
		掘削域 30cm	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5		
	既存亀裂 亀裂密度8倍	健全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5		
		掘削域 30cm	49,400	0.34	0.175	10,960	165	10	25.5	0.220	22,856	137	10	25.5	0.855	2.320	177	10	25.5		
	既存亀裂 亀裂密度6倍	健全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.855	0.290	177	10	25.5		
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	10,960	165	10	25.5	0.220	22,856	137	10	25.5	0.855	2.320	177	10	25.5		

(2) 壁面平行方向亀裂が新規発生したケース

ア) 掘削損傷領域の特性の違いによる挙動予測解析

感度パラメータとして、亀裂密度 $1/d$ を取り上げ、以下の4ケースについて比較検討する。

- ① 亀裂密度 設定変更なし (掘削損傷領域：壁面より 80 cm)
- ② 掘削解放率 40% 後、壁面平行方向の亀裂密度 5 本/m
(掘削損傷領域：壁面より 80 cm)
- ③ 掘削解放率 40% 後、壁面平行方向の亀裂密度 10 本/m
(掘削損傷領域：壁面より 80 cm)
- ④ 掘削解放率 40% 後、壁面平行方向の亀裂密度 20 本/m
(掘削損傷領域：壁面より 80 cm)

なお、壁面平行方向の亀裂を対象としたケースでは、既存の亀裂のうち、MBC 掘削解析で解析結果への影響が小さい亀裂セット③を削除し、掘削応力解放率 40% 後に、壁面平行方向の亀裂を亀裂セット③として導入するものとする。これは MBC モデル解析では、4つ以上の亀裂セットを考慮した解析では、解が発散しやすいためである。

表 5. 2. 9 および表 5. 2. 10 に立坑・横坑の入力特性値を示す。

表5.2.9 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析
(立坑)

解析位置	解析ケース	領域	岩盤部		亀裂①						亀裂②						亀裂③(壁面平行亀裂)					
			E (MPa)	ν	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 t/d (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 t/d (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 t/d (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)			
立坑	既存亀裂 物性変化なし	鉛全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5								
		掘削域 なし	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5								
	壁面平行亀裂 亀裂密度 5本/m	鉛全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5								
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.25	5,000	各壁面の接線方向	10	25.5			
	壁面平行亀裂 亀裂密度 10本/m	鉛全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5								
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.25	10,000	各壁面の接線方向	10	25.5			
	壁面平行亀裂 亀裂密度 20本/m	鉛全部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5								
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.25	20,000	各壁面の接線方向	10	25.5			

表5.2.10 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の特性の違いによる解析
(横坑)

解析位置	解析ケース	領域	岩盤部		亀裂①						亀裂②						亀裂③(壁面平行亀裂)					
			E (MPa)	ν	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 t/d (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 t/d (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 t/d (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	摩擦角 ϕ (°)			
横坑	既存亀裂 物性変化なし	鉛全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5								
		掘削域 なし	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5								
	壁面平行亀裂 亀裂密度 5本/m	鉛全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5								
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.25	5,000	各壁面の接線方向	10	25.5			
	壁面平行亀裂 亀裂密度 10本/m	鉛全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5								
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.25	10,000	各壁面の接線方向	10	25.5			
	壁面平行亀裂 亀裂密度 20本/m	鉛全部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5								
		掘削域 80cm	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.25	20,000	各壁面の接線方向	10	25.5			

イ) 挖削損傷領域の広がりによる挙動予測解析

壁面平行方向の亀裂密度 $1/d$ を 20 本/m に固定し、以下の 3 ケースを解析し、掘削損傷領域の広がりの違いを検討する。

① 挖削損傷領域なし (亀裂密度 設定変更なし)

② 挖削損傷領域：壁面より 30 cm

(掘削解放率 40% 後、壁面平行方向の亀裂 (密度 20 本/m) を導入)

③ 挖削損傷領域：壁面より 80 cm

(掘削解放率 40% 後、壁面平行方向の亀裂 (密度 20 本/m) を導入)

なお、壁面平行方向の亀裂を対象としたケースでは、既存の亀裂のうち、MBC 挖削解析で解析結果への影響が小さい亀裂セット③を削除し、掘削応力解放率 40% 後に、壁面平行方向の亀裂を亀裂セット③として導入するものとする。これは MBC モデル解析では、4 つ以上の亀裂セットを考慮した解析では、解が発散しやすいためである。

表 5. 2. 11 および表 5. 2. 12 に立坑および横坑の入力特性値を示す。

表 5. 2. 11 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりによる解析
(立坑)

解析位置	解析ケース	岩盤部	亀裂①				亀裂②				亀裂③ (壁面平行亀裂)							
			弾性係数 E (MPa)	ボアン比 γ	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	厚壁角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	厚壁角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)
立坑	既存亀裂 特性変化なし	傾斜部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5				
		直立部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5				
	壁面平行亀裂 亀裂密度 20本/m	傾斜部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5				
		直立部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.25	20,000	各壁面の 接線方向	10 25.5
	掘削平行亀裂 亀裂密度 20本/m	傾斜部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5				
		直立部	49,400	0.34	0.175	5,000	49	10	25.5	0.220	2,632	177	10	25.5	0.25	20,000	各壁面の 接線方向	10 25.5

表 5. 2. 12 壁面平行方向の亀裂を対象とした掘削損傷領域の広がりによる解析

解析位置	解析ケース	岩盤部	亀裂①				亀裂②				亀裂③ (壁面平行亀裂)							
			弾性係数 E (MPa)	ボアン比 γ	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	厚壁角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)	厚壁角 ϕ (°)	亀裂長さ $a (=L/2)$ (m)	亀裂密度 $1/d$ (本/m)	傾斜角 θ (°)	起伏角 α (°)
横坑	既存亀裂 特性変化なし	傾斜部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5				
		直立部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5				
	掘削平行亀裂 亀裂密度 20本/m	傾斜部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5				
		直立部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.25	20,000	各壁面の 接線方向	10 25.5
	掘削平行亀裂 亀裂密度 30本/m	傾斜部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5				
		直立部	49,400	0.34	0.175	1,370	165	10	25.5	0.220	2,857	137	10	25.5	0.25	20,000	各壁面の 接線方向	10 25.5

5. 3 解析結果

5. 3. 1 挖削損傷解析ケース1（既存亀裂が進展した解析）

ア) 挖削損傷領域の特性の違いによる挙動予測解析

既存亀裂が進展した場合を対象とし、掘削損傷領域にて亀裂密度 $1/d$ の特性を4倍・8倍と変更したケースの結果を示す。

<立坑>

図5. 3. 1に3. 2に示した評価指標などのセンター図、図5. 3. 2および図5. 3. 3に壁面北側および東側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

立坑のケースは亀裂として解析断面上での傾斜角 $\theta = 49^\circ, 177^\circ, 90^\circ$ の3つの亀裂群を設定している。センター図の亀裂の開口量分布をみると、亀裂密度を4倍、8倍にえたケースでは、掘削損傷領域を考慮しない解析結果と比較し、開口領域が相似的に拡大した分布となっている。各センター図について全体的傾向、亀裂密度を変化させた影響と結果に対する考察をまとめたものを表5. 3. 1に示す。

表5. 3. 1 挖削損傷領域（既存亀裂進展）の特性の違いによる解析結果のまとめ
(立坑)

項目	指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	北西一南東方向に圧縮変形している	初期地圧により最大主応力が北西一南東方向に傾いている	壁面近傍の北西・南東部に開口領域が発生している	壁面近傍の北東・南西部に安全率低下領域が発生している	壁面近傍の北西・南東部に等価せん断剛性低下領域が発生している	
亀裂密度を増加させた影響	北西一南東方向の変形量が増加している	北西・南東部に応力が低下するとともに、応力分布が乱れた領域が発生し、拡大している	壁面近傍の北西・南東部の開口領域が拡大している	壁面近傍の北東・南西部の安全率低下領域が拡大している	等価せん断剛性低下領域が拡大している	
考察	亀裂①の開口により、北西一南東方向の変形が増加したものと考えられる	亀裂①・②の相互作用によるものと考えられる	亀裂①は亀裂密度が高いため、他の亀裂より多く開口している	亀裂②・③の安全率が低下しているため、北東・南西部に安全率低下領域が出ている	亀裂①・②の開口によりせん断剛性が低下している	

図5. 3. 2および図5. 3. 3より、北側の測線(図5. 3. 2)では、亀裂密度8倍のケースが壁面近傍より2番目の要素で開口量が大きくなっている、東側の測線(図5. 3. 3)では、亀裂密度が大きいほど、亀裂の開口量が大き

くなる傾向となる。これら3ケースの結果を詳細に見ていくと、亀裂密度 $1/d$ を大きくすることで、壁面近傍の亀裂①・②の開口する領域が拡大し、複数の亀裂が同時に開口する領域が発生する。そのような領域では、複数の亀裂の相互作用により、壁面近傍の応力状態は複雑に変化し、主応力軸が回転するなどして大きく乱れており、その結果、亀裂密度 $1/d$ を4倍、8倍としたケースでは、壁面近傍の複数の要素で引張応力が生じている。

これらの原因により、亀裂密度 $1/d$ を8倍にしたケースでは、北側の測線で、開口量や主応力が不連続的になり、剛性も大きく低下していると考えられる。

<横坑>

図5.3.4に3.2に示した評価指標などのセンター図、図5.3.5、図5.3.6および図5.3.7に水平左側、鉛直上側および水平左側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

横坑のケースは亀裂として解析断面上での傾斜角 $\theta=165^\circ, 137^\circ, 177^\circ$ の3つの亀裂群を設定している。センター図の亀裂の開口量分布をみると、亀裂密度を4倍、8倍に変えたケースでは、掘削損傷領域を考慮しない解析結果と比較し、開口領域が相似的に拡大した分布となっており、壁面より離れた領域へ亀裂の開口が広がっている。これは感度解析結果の傾向と一致する。各センター図について全体的傾向、亀裂密度を変化させた影響と結果に対する考察をまとめたものを表5.3.2に示す。

表5.3.2 掘削損傷領域（既存亀裂進展）の特性の違いによる解析結果のまとめ
(横坑)

項目 指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	右上一左下方向に圧縮変形している	横坑掘削により、坑道周辺で応力が一軸化している	壁面近傍の右上・左下部に開口領域が発生している	壁面近傍の右上・左下部に安全率低下領域が発生している	壁面近傍の右上・左下方向に等価せん断剛性低下領域が発生している
亀裂密度を増加させた影響	右上一左下方向の変形量が増加している	右上・左下部に応力分布が乱れた領域が発生し、拡大している	壁面近傍の右上・左下部の開口領域が拡大している	壁面近傍の右上・左下部の安全率低下領域が拡大している	等価せん断剛性低下領域が拡大している
考察	亀裂②の開口により、右上一左下方向の変形量が増加したものと考えられる	亀裂①・②・③の相互作用によるものと考えられる	亀裂②は亀裂密度が高いため、他の亀裂より多く開口していると考えられる	亀裂①・②・③の安全率が低下しているため、右上・左下部に安全率低下領域が出ていている	亀裂①・②の開口によりせん断剛性が低下している

図5.3.5～7より、水平左側測線（図5.3.5）および水平右側測線（図5.3.7）では、掘削損傷領域（壁面より80cm）は、亀裂密度の増加に従い開口量も大きくなっているがその外側の領域では、亀裂の開口はほとんどない。一方、鉛直上側（図5.3.6）については、亀裂密度が大きくなるに従い、亀裂の開口分布が掘削損傷領域の外側の領域まで及んでおり、結果として掘削影響領域が広がっていることが分かる。これは感度解析結果の傾向と一致する。

これら3ケースの結果を詳細に見ていくと、立坑のケースと同様に、亀裂密度 $1/d$ を大きくすることで、壁面近傍の各亀裂の開口する領域が拡大し、複数の亀裂が同時に開口する領域が発生する。そのような領域では、複数の亀裂の相互作用により、壁面近傍の応力状態は複雑に変化している。掘削断面が立坑に比べ小さい為、壁面近傍にそれほど引張応力が生じていないものの、応力分布は大きく乱れている。

イ) 掘削損傷領域の広がりによる挙動予測解析

既存亀裂が進展した場合を対象とし、掘削損傷領域の広がりを変更したケースの結果を示す。

<立坑>

図5.3.8に3.2に示した評価指標などのセンター図、図5.3.9および図5.3.10に壁面北側および東側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

立坑のケースは亀裂として解析面上での傾斜角 $\theta=49^\circ, 177^\circ, 90^\circ$ の3つの亀裂群が設定されているが、センター図の亀裂の開口量分布をみると、掘削損傷領域の広がりを変更したケースでは、掘削損傷領域を考慮しない解析結果と比較し、開口領域が相似的に拡大した分布となっており、特に壁面東西側に亀裂開口分布が広がっていることがわかる。

これら3ケースの結果をみると、ア) 特性の違いによる解析と同様に掘削影響領域を30cm, 80cmと設定することで、掘削影響領域内で壁面近傍の亀裂①・②の開口する領域が拡大し、複数の亀裂が同時に開口する領域が発生する。そのような領域では、複数の亀裂の相互作用により、壁面近傍の応力状態は複雑に変化し、主応力軸が回転するなどして大きく乱れており、掘削損傷領域を80cmとした壁面近傍のかなりの要素で引張応力が生じている。各センター図について全体的傾向、掘削損傷領域を変化させた影響と結果に対する考察を表5.3.3に示す。

表5. 3. 3 挖削損傷領域（既存亀裂進展）の領域の違いによる解析結果のまとめ
(立坑)

項目 指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	北西 - 南東方向に圧縮変形している	初期地圧の影響を受け、主応力が北西 - 南東方向に傾いている	壁面近傍の北西・南東部に開口領域が発生している	壁面近傍の北東・南西部に安全率低下領域が発生している	壁面近傍の北西・南東部に等価せん断剛性低下領域が発生している
損傷領域を増加させた影響	北西 - 南東方向の変形量が増加している	北西・南東部の応力が低下するとともに、応力分布が乱れた領域が発生し、拡大している	壁面近傍の北西・南東部の開口領域が拡大している	安全率低下領域が拡大している	等価せん断剛性低下領域が拡大している
考察	亀裂①の開口により、北西 - 南東方向の変形量が増加したものと考えられる。	亀裂①・②の相互作用によるものと考えられる。	亀裂①は亀裂密度が高いため、他の亀裂より多く開口していると考えられる。	亀裂②・③の安全率が低下しているため、北東・南西部に安全率低下領域が出ている。	亀裂②・③の開口によりせん断剛性が低下している。

<横坑>

図5. 3. 11 に3. 2 に示した評価指標などのセンター図、図5. 3. 12、図5. 3. 13 および図5. 3. 14 に水平左側、鉛直上側および水平左側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

横坑のケースは亀裂として解析面上での傾斜角 $\theta = 165^\circ, 137^\circ, 177^\circ$ の3つの亀裂群が設定されている。センター図の亀裂の開口量分布をみると、掘削損傷領域の広がりを変更したケースでは、掘削損傷領域を考慮しない解析結果と比較し、開口領域が相似的に拡大した分布となっており、壁面より離れた領域へ亀裂の開口が広がっている。

これら3ケースの結果についても、ア) 特性の違いによる解析と同様に、掘削影響領域を 30cm, 80cm と設定することで、壁面近傍の各亀裂の開口する領域が拡大し、複数の亀裂が同時に開口する領域が発生する。そのような領域では、複数の亀裂の相互作用により、壁面近傍の応力状態は複雑に変化している。掘削断面が立坑に比べ小さい為、壁面近傍にそれほど引張応力が生じていないものの、応力分布は大きく乱れている。各センター図について全体的傾向、掘削損傷領域を変化させた影響と結果に対する考察を表5. 3. 4 に示す。

表5. 3. 4 挖削損傷領域（既存亀裂進展）の領域の違いによる解析結果のまとめ
(横坑)

項目	指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	右上一左下方向に圧縮変形している	横坑掘削により、坑道周辺で応力が一軸化している	壁面近傍の右上・左下部に開口領域が発生している	壁面近傍の右上・左下部に安全率低下領域が発生している	壁面近傍の右上・左下方向に等価せん断剛性低下領域が発生している	
損傷領域を拡大した影響	右上一左下方向の変形量が増加している	右上・左下部の応力が低下し、方向が乱れた領域が発生し、拡大している	壁面近傍の右上・左下部の開口領域が拡大している	壁面近傍の右上・左下部の安全率低下領域が拡大している	等価せん断剛性低下領域が拡大している	
考察	亀裂②の開口により、右上一左下方向の変形量が増加したものと考えられる。	亀裂①・②・③の相互作用によるものと考えられる。	亀裂②は亀裂密度が高いため、他の亀裂より多く開口していると考えられる。	亀裂①・②・③の安全率が低下しているため、右上・左下部に安全率低下領域が出ていている。	亀裂①・②の開口によりせん断剛性が低下している。	

〈既存亀裂が進展した場合の解析のまとめ〉

5. 3. 1 の既存亀裂が進展した場合を対象とし、掘削損傷領域内の亀裂の特性や領域の広がりの違いによる挙動予測解析結果への影響について以下にまとめる。

① 既存亀裂は、設定した掘削損傷領域外まで開口している

既存亀裂を対象として、掘削損傷領域として亀裂の特性や領域の広がりを設定したケースでは、亀裂の開口量は、掘削損傷領域を考慮しない解析結果と比較し、開口領域が相似的に拡大した分布となっており、掘削影響領域が広がっている。これは、掘削損傷領域における亀裂の開口により、その領域の剛性が低下し、応力再配分により、掘削損傷領域外側の岩盤まで亀裂の開口を促進させているためと考えられる。

② 設定した掘削損傷領域内の亀裂の開口挙動は極めて複雑となる

掘削損傷領域として設定した領域では、亀裂密度を増加させることにより、各既存の亀裂の開口領域が拡大する。その結果、各亀裂が同時に開口し、相互作用する領域が発生する。各亀裂が相互作用する領域では、主応力軸が回転するなど応力状態が大きく乱れ、掘削損傷領域内の挙動は極めて複雑である。

③ 岩盤変位は、設定した掘削損傷領域外まで亀裂特性や掘削損傷領域の広がりの影響を受けている

掘削損傷領域の亀裂の特性や領域の広がりを変えた各ケースで岩盤変位を比較すると、各ケースの岩盤変位は亀裂密度を大きくするほど、また、掘削損傷領域を大きくするほど、岩盤変位は相対的に大きくなり、掘削損傷領域外においてもその影響を受けている。

④ 岩盤透水性は、掘削損傷領域外まで亀裂特性や掘削損傷領域の広がりの影響を受けている

掘削損傷領域では亀裂開口により、岩盤基質部の透水係数は掘削損傷領域を考慮しない解析結果と比較して、2～4オーダー程度透水性が増加する。また、透水性変化は壁面から数m程度の領域まで影響を受け、掘削損傷領域との境界でも掘削前の岩盤基質部の透水係数は、掘削損傷領域を考慮しない場合と比べ、1オーダー程度透水性が増加する。

5. 3. 2 掘削損傷解析ケース2（壁面平行方向亀裂が新規発生した解析）

ア) 掘削損傷領域の特性の違いによる挙動予測解析

壁面平行方向の亀裂が新規に発生した場合を対象とし、掘削損傷領域にて亀裂密度の特性を変更したケースの結果を示す。

<立坑>

図5. 3. 15に3. 2で示した評価指標などのコンター図、図5. 3. 16および図5. 3. 17に壁面北側および東側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

本ケースでは、解析結果の安定性を考慮し、既存亀裂は解析結果への影響が大きな2つの亀裂セット（解析断面上での傾斜角 $\theta = 49^\circ, 177^\circ$ ）とし、掘削損傷領域の亀裂はこの既存亀裂に壁面平行方向の亀裂を3つ目の亀裂として追加している。また、ここでは、掘削損傷領域内の亀裂特性を変化したケースを実施し、壁面平行方向の亀裂密度が5, 10, 20本/mの3ケースを実施した。亀裂の開口量について見ると、既存亀裂に比べ大きく開口しており、図5. 3. 15のコンター図では、掘削損傷領域を考慮した3つのケースで壁面から80cmの領域は全て一様に赤色になっており、その違いは区別できない。各コンター図について全体的傾向、亀裂密度を変化させた影響と結果に対する考察を表5. 3. 5に示す。

表5. 3. 5 掘削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の特性の違いによる解析結果
のまとめ（立坑）

項目 指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	北西-南東方向に大きく圧縮変形している	初期地圧の影響を受け、主応力が北西-南東方向に傾いている	損傷領域が集中的に開口している	損傷領域および北東・南西部に安全率低下領域が存在している	壁面近傍の北西・南東部にせん断剛性低下領域が存在している
亀裂密度を増加した影響	北西-南東方向の変形量が増加している	亀裂密度を増加させた影響は少ない	亀裂密度を増加させしたことによる開口領域は変化少ない	亀裂密度による影響は少ない	損傷領域のせん断剛性低下領域が拡大している
考察	亀裂①-③の開口により、北西-南東方向の変形が増加したものと考えられる	亀裂開口による影響はあまり受けていない	亀裂③以外の亀裂にはあまり影響していない	亀裂開口による影響はあまり受けていない	亀裂③の開口によりせん断剛性が低下している

図5. 3. 16および図5. 3. 17より、北側の測線（図5. 3. 16）では、

壁面平行方向の亀裂の亀裂密度にはほぼ比例して、壁面付近の亀裂の開口量が変化していることがわかる。これは感度解析結果の傾向と一致する。これは、東側測線（図5.3.17）でもほぼ同じことが言える。逆に、掘削損傷領域の外側では開口量はどのケースも殆ど開口していないことから、既存亀裂はこの壁面平行方向の亀裂の開口による影響をそれほど受けないことがわかる。更に、等価せん断剛性比についてみると、センター図、グラフとも壁面平行方向の亀裂の亀裂密度が大きくなるほど、壁面近くの剛性の低減が激しくなることがわかる。

<横坑>

図5.3.18に3.2に示した評価指標などのセンター図、図5.3.19、図5.3.20および図5.3.21に水平左側、鉛直上側および水平左側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

本ケースでは、解析結果の安定性を考慮し、既存亀裂は解析結果への影響が大きな2つの亀裂セット（解析断面上での傾斜角 $\theta = 165^\circ, 137^\circ$ ）とし、掘削損傷領域の亀裂はこの既存亀裂に壁面平行方向の亀裂を3つ目の亀裂として追加している。また、ここでは、掘削損傷領域内の亀裂特性を変化したケースを実施し、壁面平行方向の亀裂密度が5, 10, 20本/mの3ケースを実施した。亀裂の開口量について見ると、既存の亀裂に比べ、大きく開口しており、図5.3.18のセンター図では、掘削損傷領域を考慮した3つのケースで壁面から80cmの領域はほぼ一様に赤色になっている。各センター図について全体的傾向、亀裂密度を変化させた影響と結果に対する考察を表5.3.6に示す。

表5.3.6 掘削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の特性の違いによる解析結果
のまとめ（横坑）

項目	指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	等方的に圧縮変形している	横坑掘削により、坑道周辺で応力が一軸化している	損傷領域が集中的に開口している	損傷領域および坑道の天端・底盤に安全率低下領域が存在している	壁面近傍の天端・底盤にせん断剛性低下領域が存在している	
亀裂密度を増加した影響	変形量が増加している	底盤部の応力低下領域が拡大している	亀裂密度を増加させることによる開口領域は変化少ない	亀裂密度による影響は少ない	損傷領域のせん断剛性低下領域が拡大している	
考察	亀裂③の開口により、等方的に変形量が増加したものと考えられる。	亀裂開口による影響はあまり受けていない	亀裂③以外の亀裂にはあまり影響していない	亀裂開口による影響はあまり受けていない	亀裂③の開口によりせん断剛性が低下している	

図5. 3. 19~21より、鉛直上側測線（図5. 3. 20）では、壁面平行方向亀裂の亀裂密度が大きくなるに従い、壁面に近づくにつれて、一様に亀裂開口量は大きくなり、せん断剛性は小さくなる傾向となっているが、水平左側測線（図5. 3. 19）や水平左側測線（図5. 3. 21）では、亀裂密度10本/mや20本/mのケースについては、壁面に近づくにつれて一様に開口量が大きくならず、不連続的になっている。これは、壁面平行方向亀裂の開口に従い、既存の亀裂が開口した結果であると言える。逆に、掘削損傷領域の外側では、開口量はどのケースも殆ど開口していないことから、掘削損傷設定外の領域でみると、既存の亀裂はこの壁面平行方向の亀裂の開口による影響をほとんど受けないことがわかる。

イ) 掘削損傷領域の広がりの違いによる挙動予測解析

壁面平行方向の亀裂が新規に発生した場合を対象とし、掘削損傷領域の広がりの違いを変更したケースの結果を示す。

<立坑>

図5. 3. 22に3. 2で示した評価指標などのコンター図、図5. 3. 23および図5. 3. 24に壁面北側および東側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

本ケースでは、解析結果の安定性を考慮し、既存亀裂は解析結果への影響が大きな2つの亀裂セット（解析断面上での傾斜角 $\theta = 49^\circ, 177^\circ$ ）とし、掘削損傷領域の亀裂はこの既存亀裂に壁面平行方向の亀裂を3つ目の亀裂として追加している。また、ここでは、掘削損傷領域の広がりの変化したケースを実施し、壁面平行方向の亀裂密度を20本/mに固定し、掘削損傷領域が壁面から30cmおよび80cmとなる2ケースを実施した。

亀裂の開口量について見ると、既存の亀裂に比べ、掘削損傷領域として設定した領域（壁面より30cmまたは80cm）は、大きく開口しており、図5. 3. 22のコンター図では、これらの領域では全て一様に赤色になっている。各コンター図について全体的傾向、掘削損傷領域を変化させた影響と結果に対する考察を表5. 3. 7に示す。

表 5. 3. 7 挖削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の領域の違いによる解析結果
のまとめ（立坑）

項目	指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	北西一南東方向に圧縮変形している	初期地圧の影響を受け、主応力が北西一南東方向に傾いている	損傷領域が集中的に開口している	損傷領域および北東・南西部で安全率低下領域が存在している	壁面近傍の北西・南東部にせん断剛性低下領域が存在している	
損傷領域を変化した影響	北西一南東方向の変形量が増加している	損傷領域による影響は少ない	損傷領域の開口域が拡大している	損傷領域の低下域が拡大している	損傷領域のせん断剛性低下領域が拡大している	
考察	亀裂①・③の開口によるものと考えられる	亀裂開口による影響はあまり受けていない	亀裂③以外の亀裂にはあまり影響していない	亀裂③以外の亀裂にはあまり影響していない	亀裂③の開口によりせん断剛性が低下していない	

図 5. 3. 23 および図 5. 3. 24 より、北側測線（図 5. 3. 23）および東側測線（図 5. 3. 24）ともに、掘削損傷領域として設定した領域で急激に開口量が増大している。逆に、それより外側の領域では、開口量はどのケースも殆ど開口していないことから、既存亀裂はこの壁面平行方向の亀裂の開口による影響を殆ど受けないことがわかる。

＜横坑＞

横坑については、図 5. 3. 25 に 3. 2 に示した評価指標などのコンター図、図 5. 3. 26 および図 5. 3. 27 に壁面北側および東側の測線上での岩盤変位等のグラフを示した。

本ケースでは、解析結果の安定性を考慮し、既存亀裂は解析結果への影響が大きな 2 つの亀裂セット（解析断面上での傾斜角 $\theta = 165^\circ, 137^\circ$ ）とし、掘削損傷領域の亀裂はこの既存亀裂に壁面平行方向の亀裂を 3 つ目の亀裂として追加している。また、ここでは、掘削損傷領域の広がりの変化したケースを実施し、壁面平行方向の亀裂密度を 20 本/m に固定し、掘削損傷領域が壁面から 30cm および 80cm となる 2 ケースを実施した。

亀裂の開口量について見ると、既存の亀裂に比べ、掘削損傷領域として設定した領域（壁面より 30cm または 80cm）は、大きく開口しており、図 5. 3. 25 のコンター図では、これらの領域では全て一様に赤色になっている。各コンター図について全体的傾向、掘削損傷領域を変化させた影響と結果に対する考察を表 5. 3. 8 に示す。

表5. 3. 8 挖削損傷領域（壁面平行亀裂発生）の領域の違いによる解析結果
のまとめ（横坑）

項目	指標	変形図	主応力図	開口量	局所安全率	等価せん断剛性比
全体的傾向	等方的に圧縮変形している	横坑掘削により、坑道周辺で応力が一軸化している	損傷領域が集中的に開口している	損傷領域および坑道の天端・底盤にせん断剛性低下領域が存在している	壁面近傍の天端・底盤にせん断剛性低下領域が存在している	
損傷領域を変化した場合	変形量が増加している	底盤部の応力低下領域が拡大している	損傷領域の開口域が拡大している	損傷領域の低下域が拡大している	損傷領域のせん断剛性低下領域が拡大している	
考察	亀裂③の開口によるものと考えられる	亀裂①・②・③の相互作用によるものと考えられる。	亀裂③以外の亀裂にはあまり影響していない	亀裂③以外の亀裂にはあまり影響していない	亀裂③の開口によりせん断剛性が低下している	

図5. 3. 26～28より、水平左側（図5. 3. 26）、鉛直上側（図5. 3. 27）および水平右側（図5. 3. 28）の各測線とも、掘削損傷領域として設定した領域で急激に開口量が増大している。逆に、その外側の領域では、開口量はどのケースも殆ど変わらないことから、掘削損傷領域の外側において既存亀裂は、この壁面平行方向の亀裂の開口による影響を殆ど受けないことがわかる。

〈壁面平行方向の亀裂が新規に発生した場合を対象とした解析のまとめ〉

5.3.2 の壁面平行方向の亀裂が新規に発生した場合を対象として実施した、掘削損傷領域内の亀裂の特性や領域の広がりの違いによる挙動予測解析結果への影響について以下にまとめる。

① 掘削損傷領域外の既存亀裂は、掘削損傷領域の影響をほとんど受けていない

掘削損傷領域に壁面平行方向の亀裂が新規に発生する場合、亀裂の開口量は、設定した掘削損傷領域内においては壁面平行方向の亀裂の開口量が極めて増加するが、その外側の領域では掘削損傷領域を考慮しないケースとの変化はほとんどなく、掘削損傷領域の外の既存亀裂への影響は小さい。これは、掘削損傷領域では壁面平行方向の亀裂が全域にわたり開口するため、掘削損傷領域より外側の領域では応力分布の不均衡が生じにくいためと考えられる。

② 設定した掘削損傷領域内の亀裂開口挙動は亀裂の特性に依存する

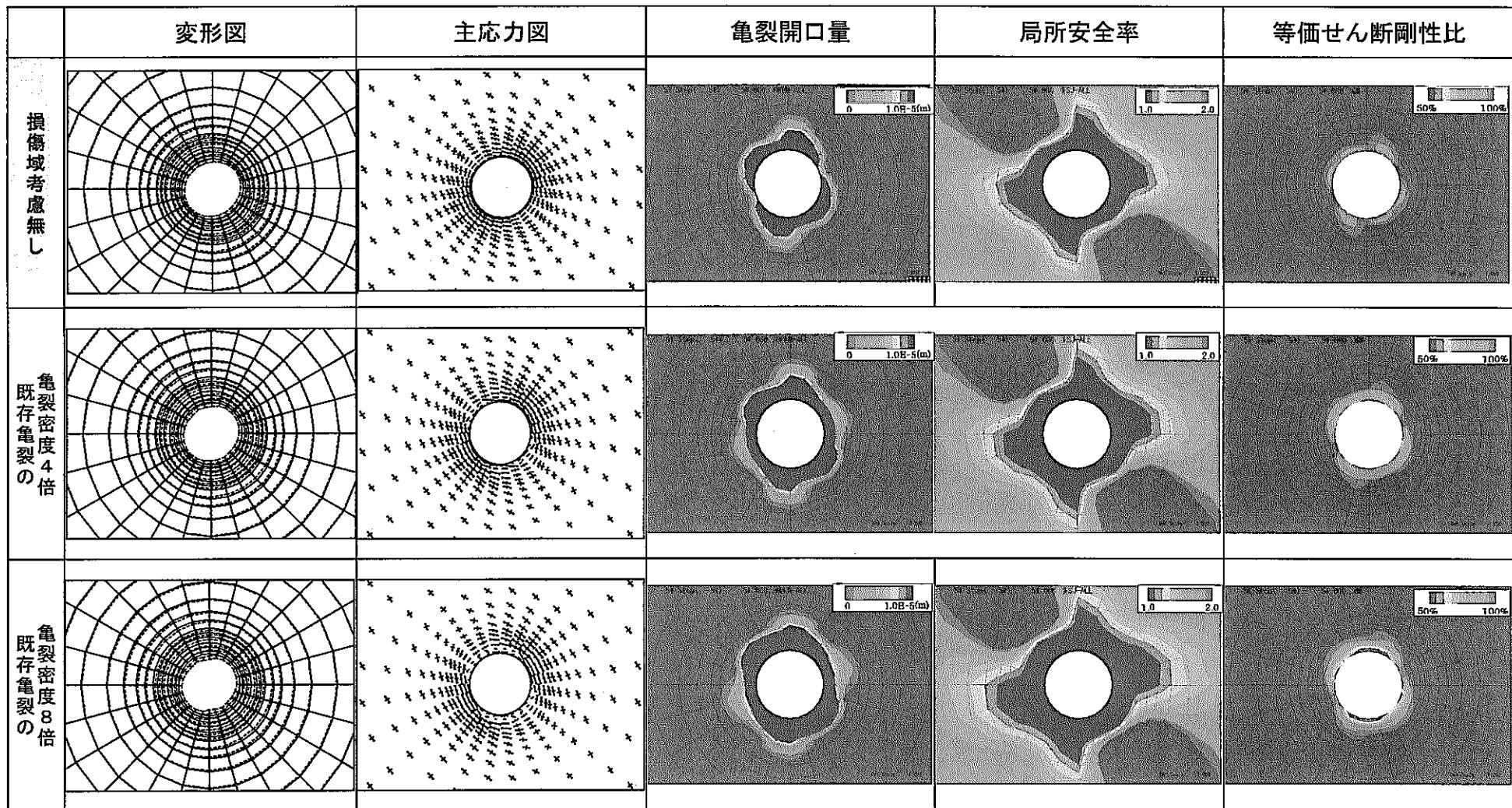
掘削損傷領域内の亀裂開口量は、設定した壁面平行方向の亀裂によるものがほとんどであり、壁面平行方向の亀裂密度が大きいほど、壁面平行方向の亀裂の開口量は増大し、亀裂特性に依存する結果となる。

③ 岩盤変位は、設定した掘削損傷領域外では亀裂特性や掘削損傷領域の広がりの影響は小さい

掘削損傷領域の亀裂の特性や領域の広がりを変えた各ケースで岩盤変位を比較すると、掘削損傷領域外の領域では、亀裂密度を大きくした場合でも、掘削損傷領域を大きくした場合でも、各ケースの岩盤変位はほとんど同様な岩盤変位であり、特性や広がりの影響は小さい。

④ 岩盤透水性は、掘削損傷領域内で亀裂特性や掘削損傷領域の広がりの影響を受ける

掘削損傷領域では亀裂開口により、岩盤基質部の透水係数は、掘削損傷領域を考慮しないケースと比べ、2～4オーダー程度透水性が増加する。ただし、設定した掘削損傷領域外の領域では、特性や広がりの影響による透水性の変化は、既存亀裂が進展した場合と比べて小さい。



-73-

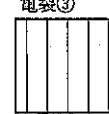
図5.3.1 亀裂の特性による影響センター図 -立坑- (既存亀裂が進展した場合) (損傷域:①考慮なし ②亀裂密度4倍 ③亀裂密度8倍)

既存亀裂の物性による:立坑

条件:

初期地圧 深度500mレベル

- 亀裂
 1. 亀裂① ($\theta = 49^\circ$)
 2. 亀裂② ($\theta = 177^\circ$)
 3. 亀裂③ ($\theta = 90^\circ$)



【損傷域】

※ 左記亀裂を掘削解放率40%後に導入する。

① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし

② 損傷域= 80cm 左記の3つの亀裂の密度を4倍に変更

③ 損傷域= 80cm 左記の3つの亀裂の密度を8倍に変更

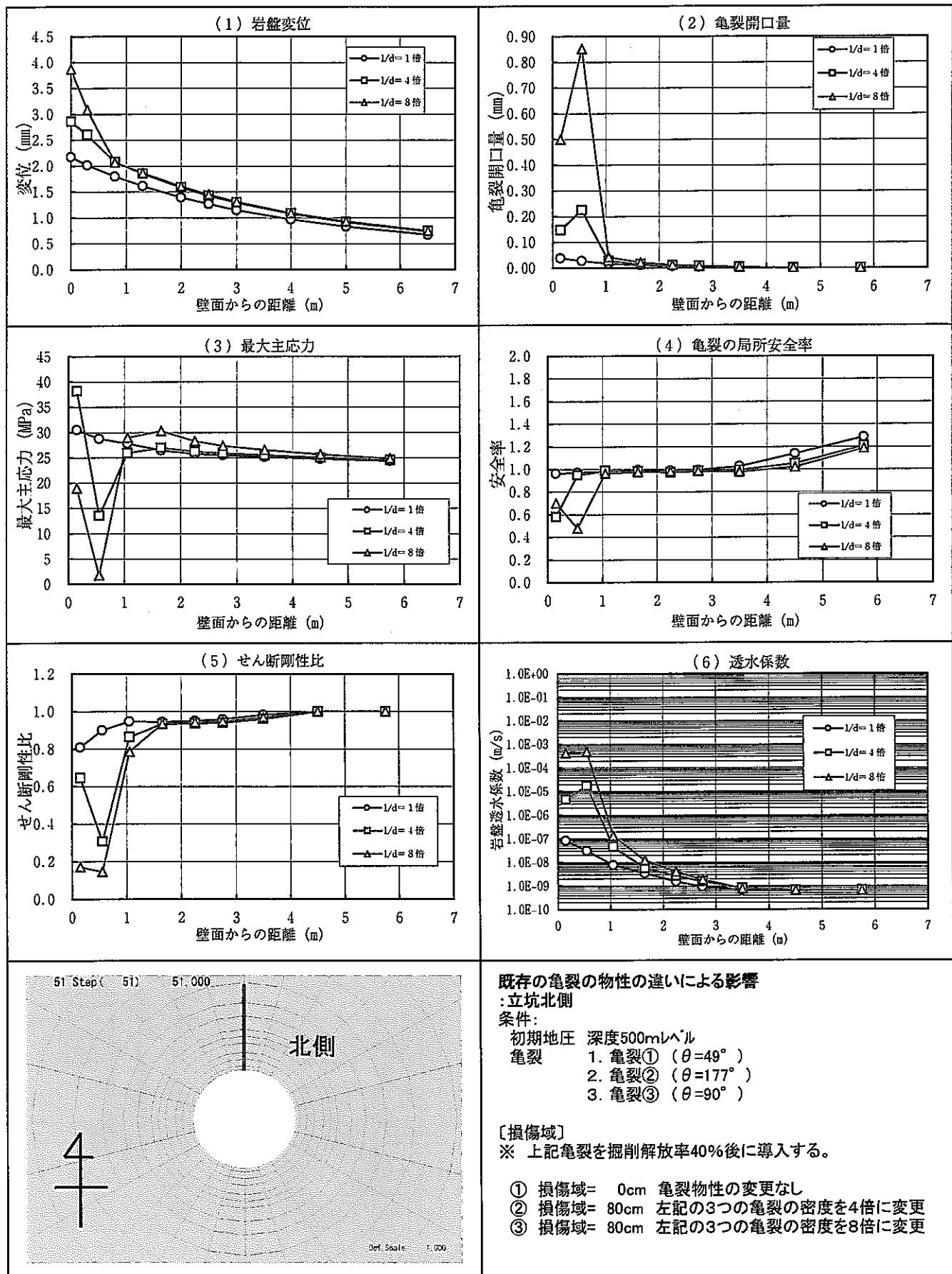


図5.3.2 亀裂の特性の違いによる影響(既存亀裂が進展した場合) (立坑:北側)

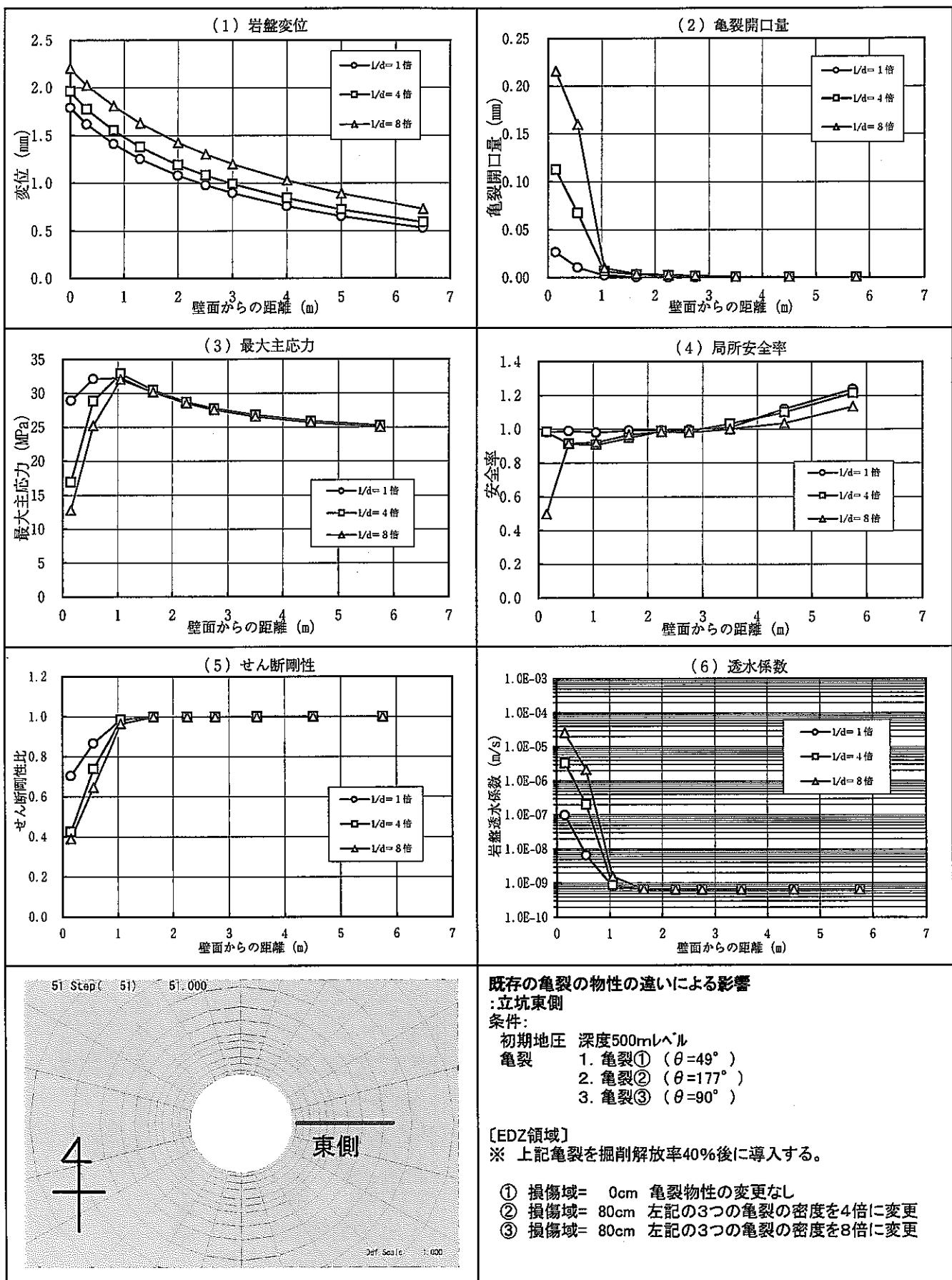


図5.3.3 亀裂の特性の違いによる影響(既存亀裂が進展した場合) (立坑: 東側)

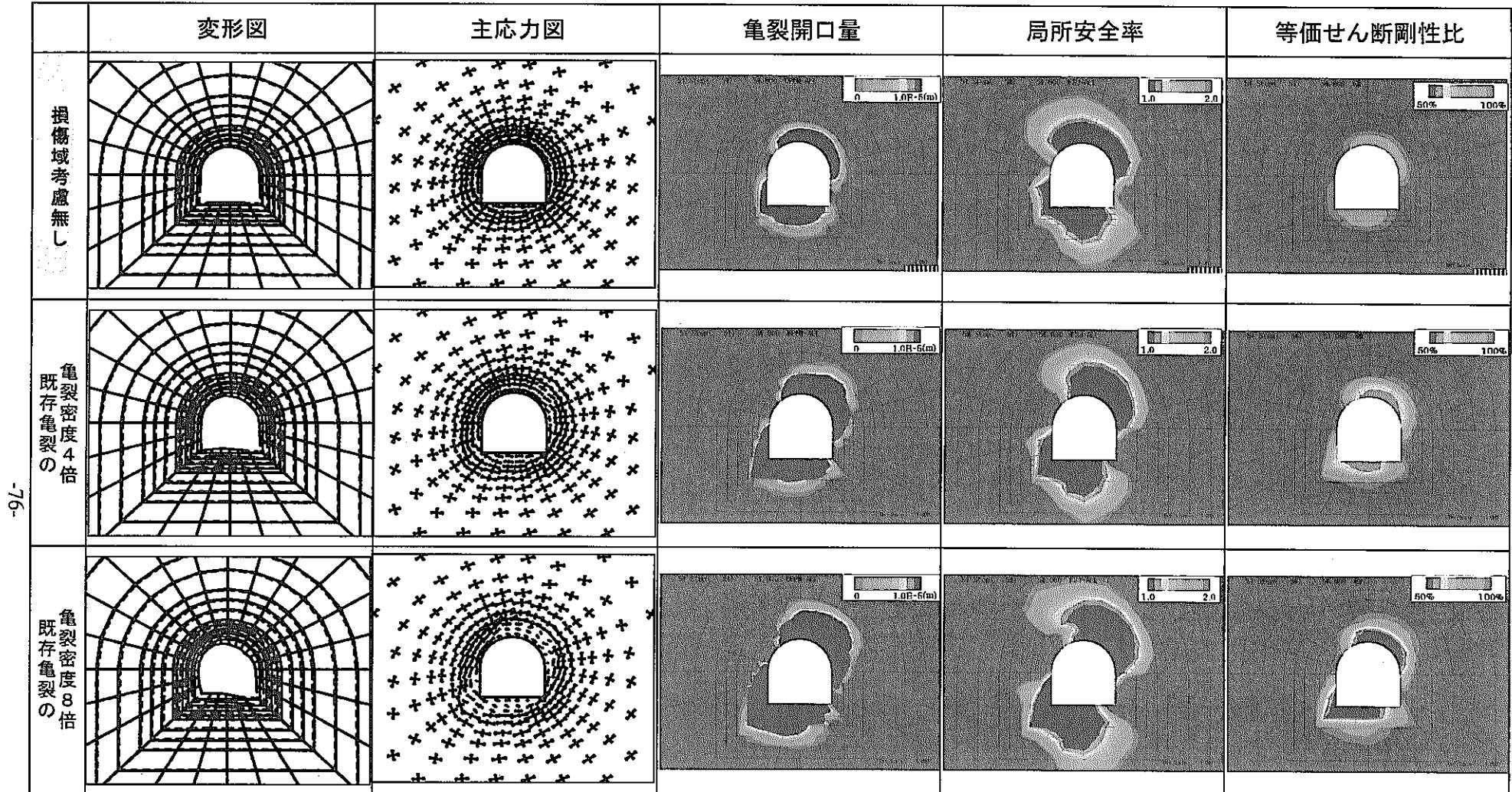


図5.3.4 亀裂の特性の違いによる影響センター図-横坑-(既存亀裂が進展した場合)(損傷域:①考慮なし ②亀裂密度4倍 ③亀裂密度8倍)

既存亀裂の広がりによる:横坑
条件:

- 初期地圧 深度500mレベル
亀裂 1. 亀裂① ($\theta=165^\circ$)
2. 亀裂② ($\theta=137^\circ$)
3. 亀裂③ ($\theta=177^\circ$)



[損傷域]

※ 左記亀裂を掘削解放率40%後に導入する。

- ① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし
② 損傷域= 80cm 左記の3つの亀裂の密度を4倍に変更
③ 損傷域= 80cm 左記の3つの亀裂の密度を8倍に変更

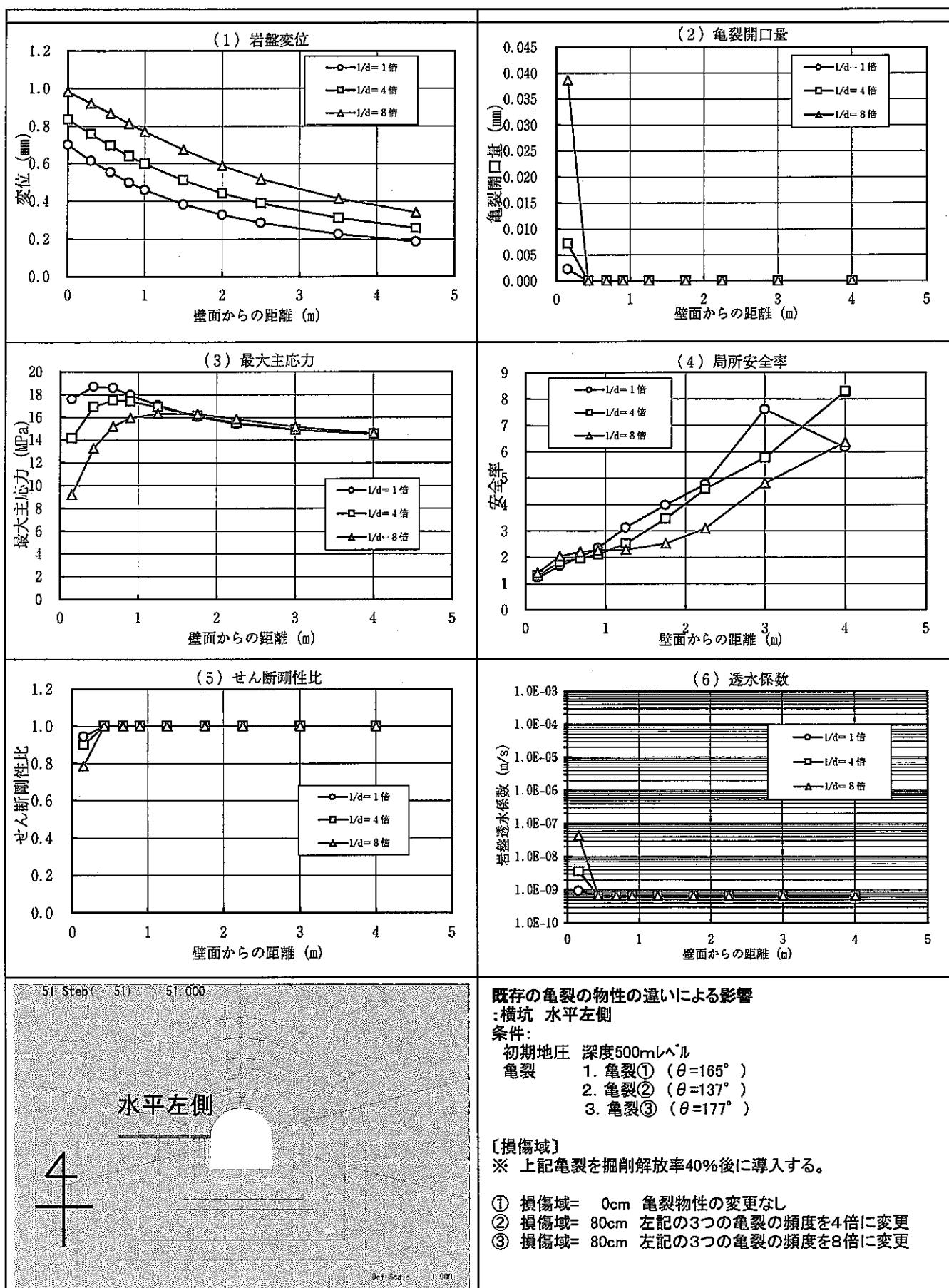


図5.3.5 亀裂の特性の違いによる影響(既存亀裂が進展した場合) (横坑:水平左側)

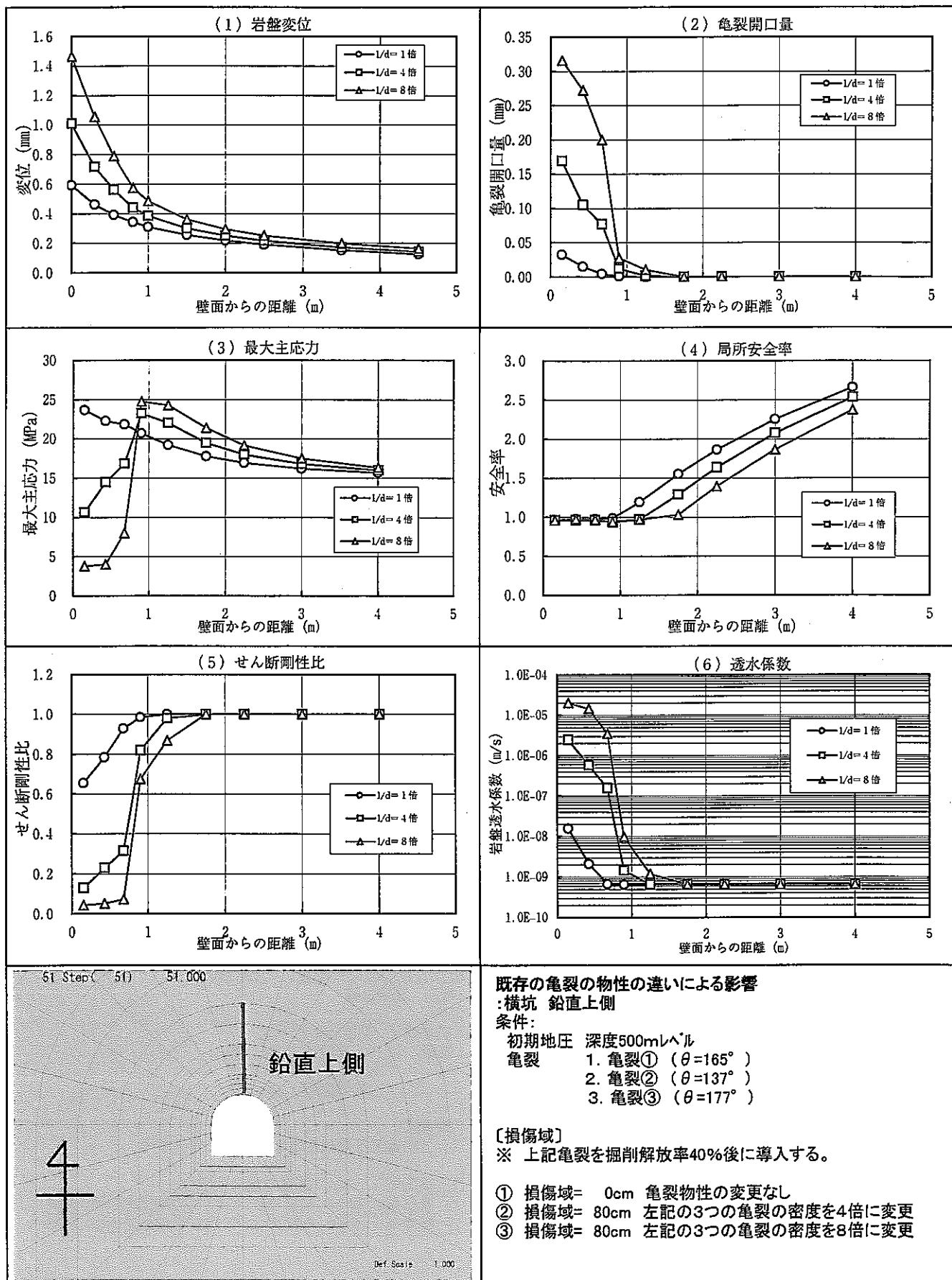


図5.3.6 亀裂の特性の違いによる影響(既存亀裂が進展した場合) (横坑:鉛直上側)

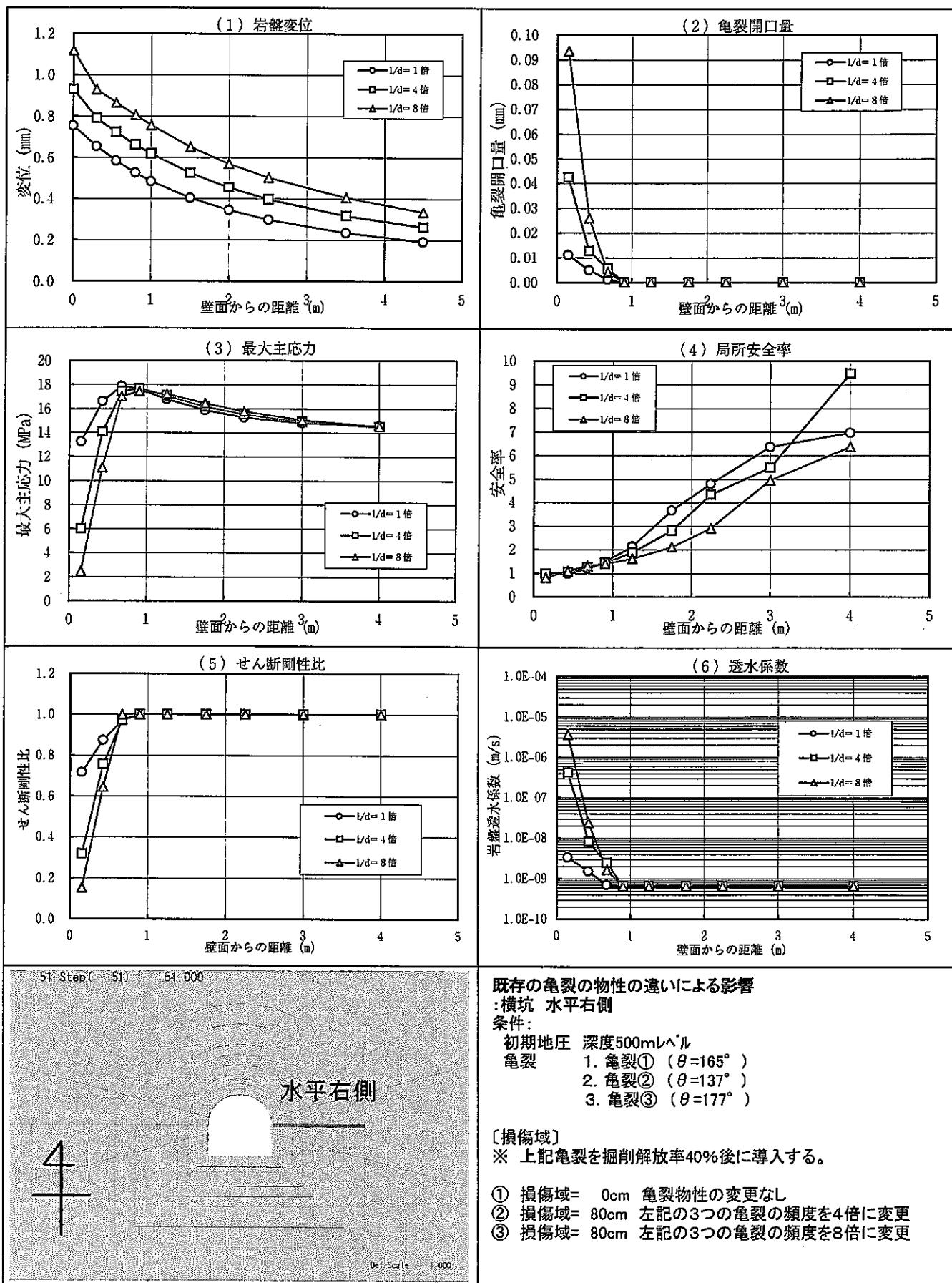


図5.3.7 亀裂の特性の違いによる影響(既存亀裂が進展した場合) (横坑:水平右側)

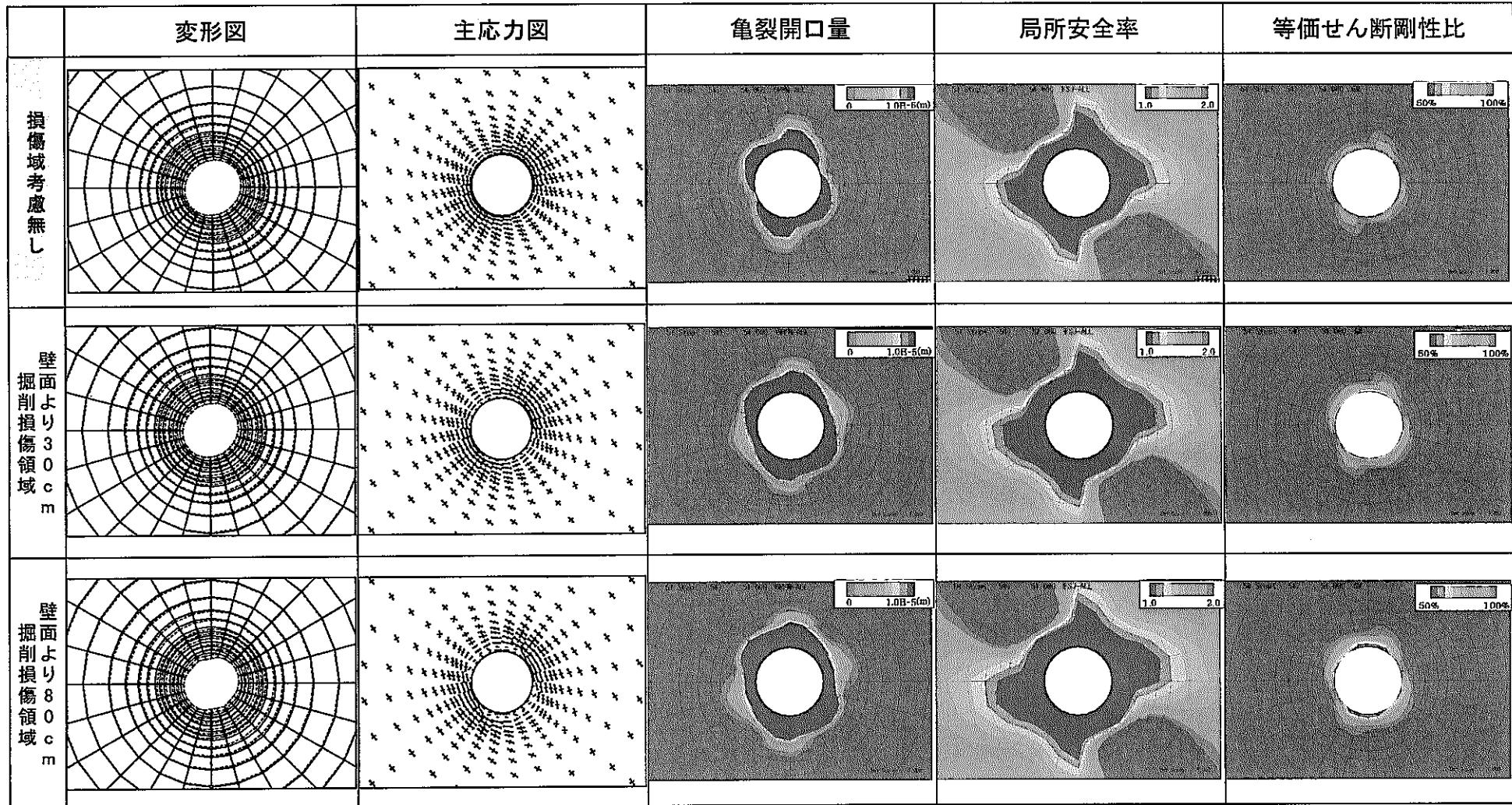


図5.3.8 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響センター図 -立坑-(既存亀裂が進展した場合) (損傷域:①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm)

既存亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響:立坑

条件:

初期地圧 深度500mレベル

- 亀裂
 1. 亀裂① ($\theta=49^\circ$)
 2. 亀裂② ($\theta=177^\circ$)
 3. 亀裂③ ($\theta=90^\circ$)



【損傷域】

※ 下記亀裂を掘削解放率40%後に導入する。

- ① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし
 ② 損傷域= 30cm 左記の3つの亀裂の密度を8倍に変更
 ③ 損傷域= 80cm 左記の3つの亀裂の密度を8倍に変更

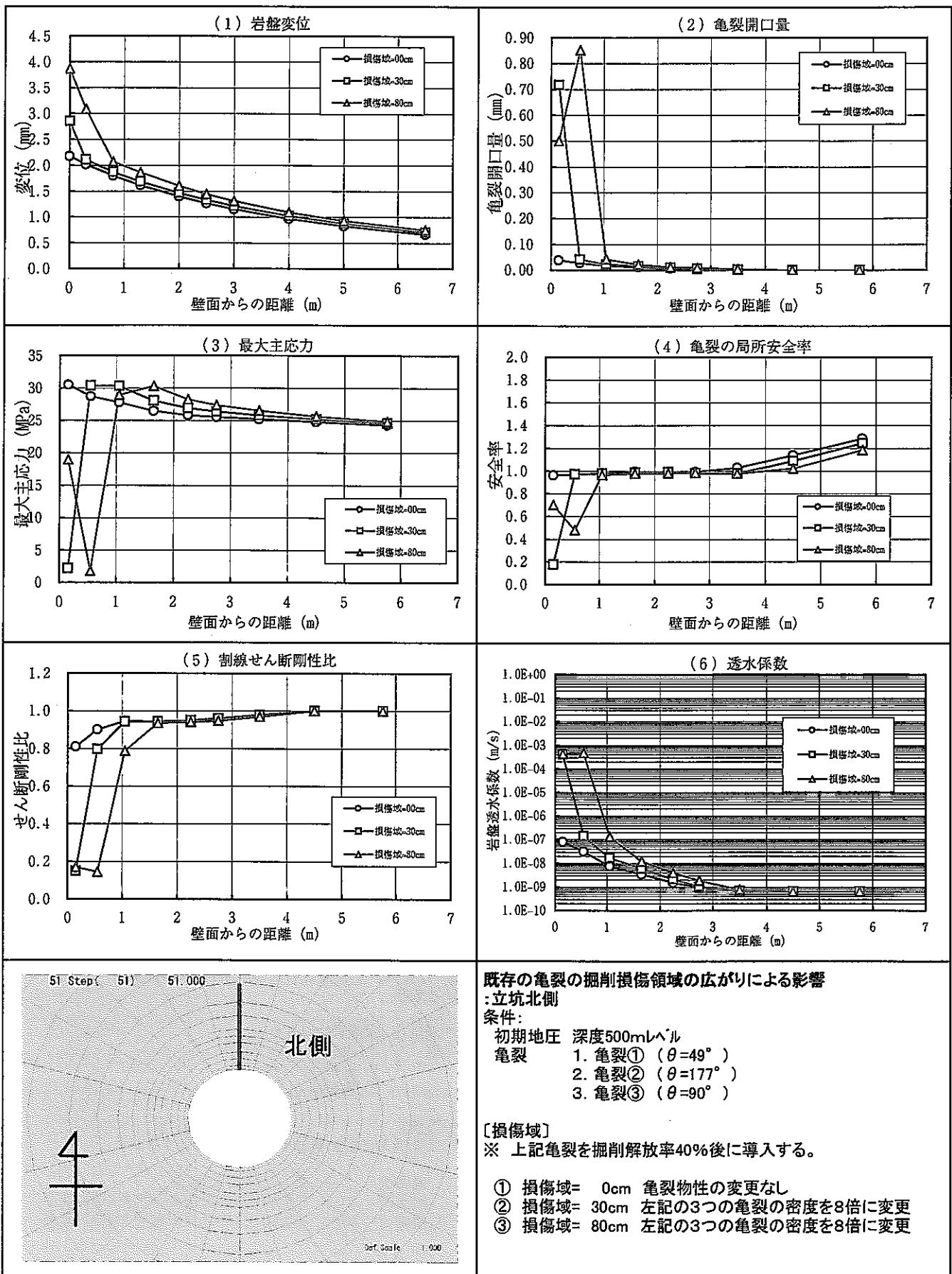


図5.3.9 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(既存亀裂が進展した場合) (立坑:北側)

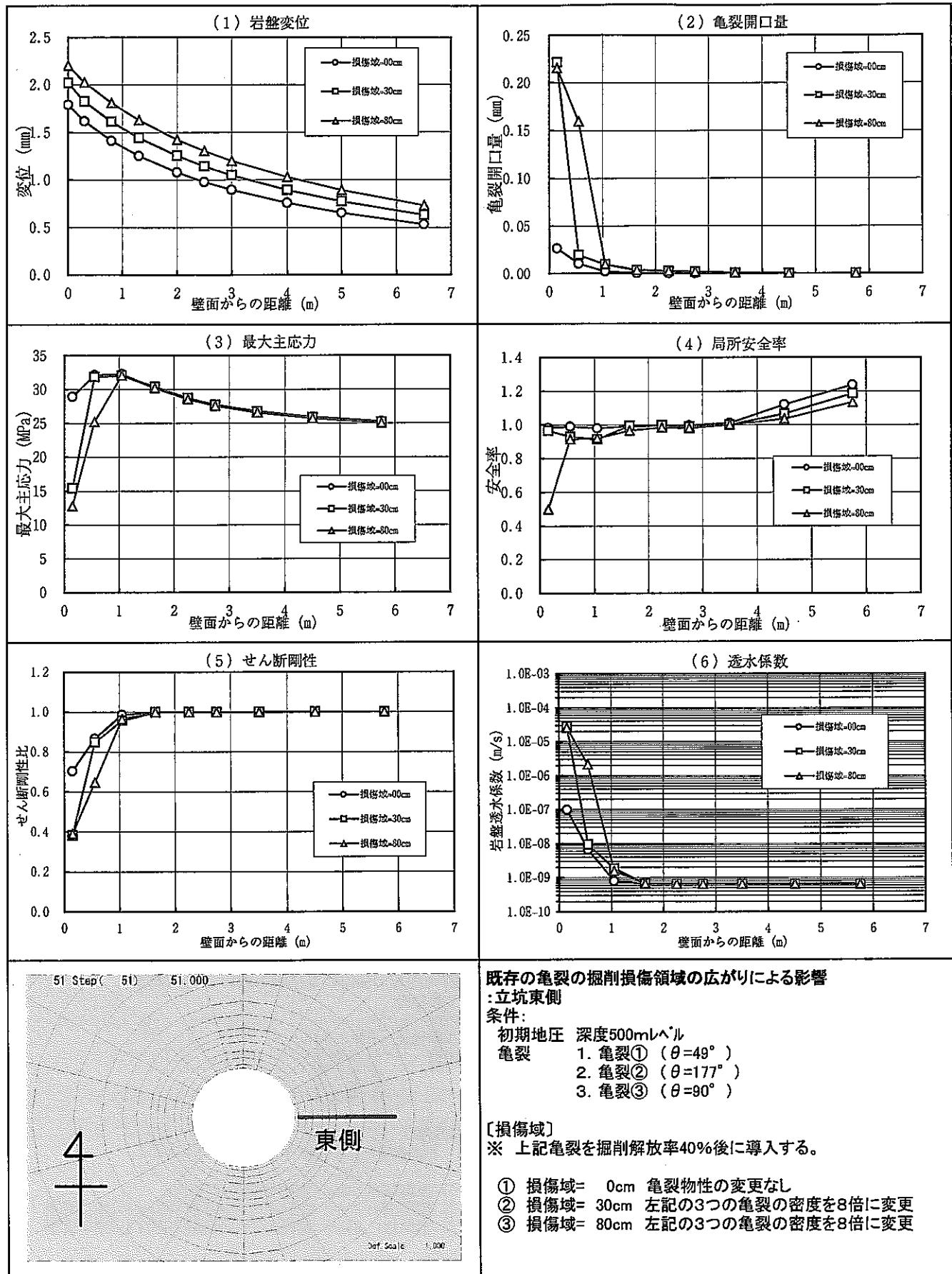


図5.3.10 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(既存亀裂が進展した場合) (立坑:東側)

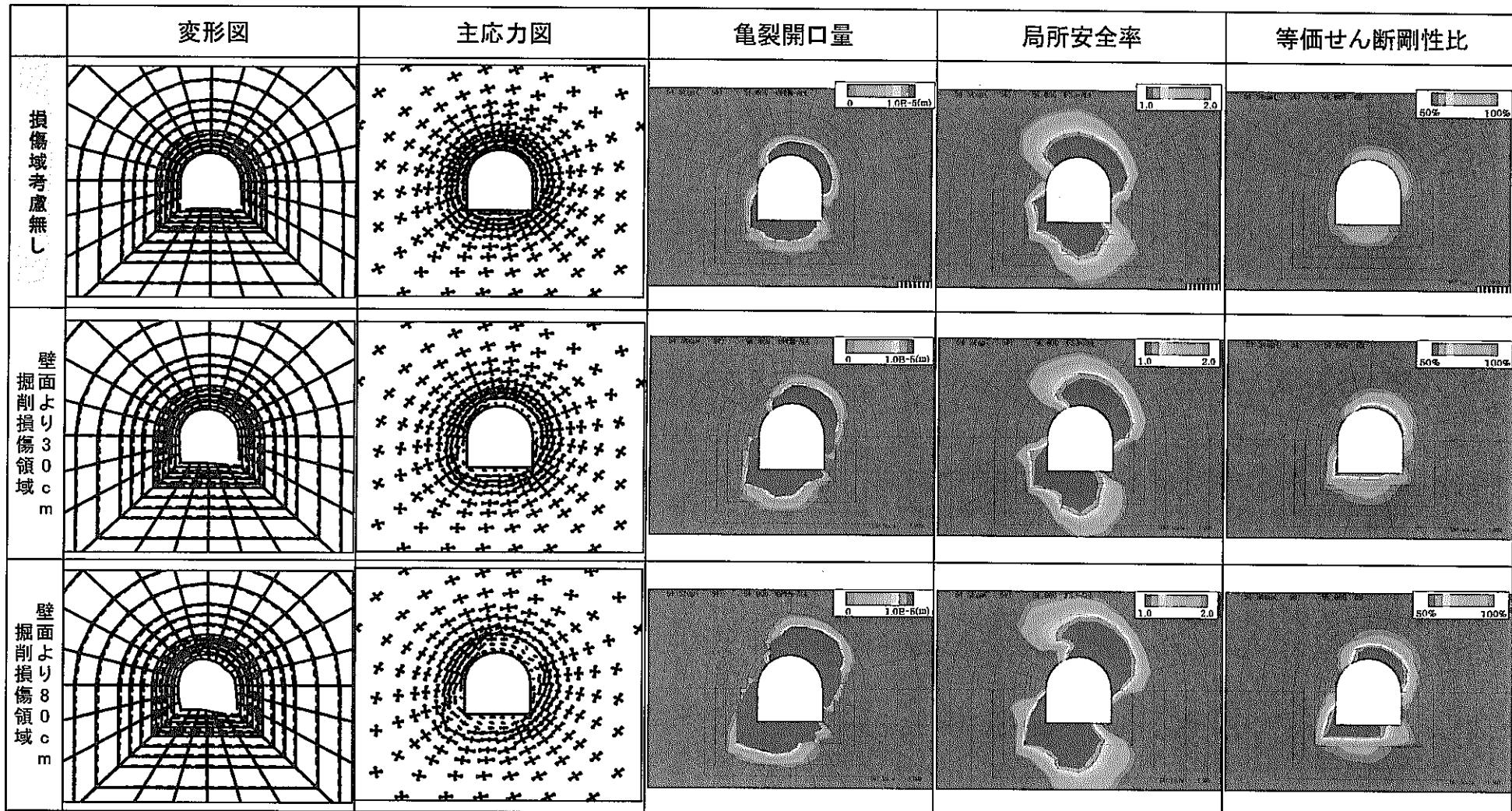


図5.3.11 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響センター図-横坑-(既存亀裂が進展した場合) (損傷域:①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm)

既存亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響:横坑

条件:

- 初期地圧 深度500mレベル
 亀裂
 1. 亀裂① ($\theta=165^\circ$)
 2. 亀裂② ($\theta=137^\circ$)
 3. 亀裂③ ($\theta=177^\circ$)



【損傷域】

* 左記亀裂を掘削解放率40%後に導入する。

- ① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし
 ② 損傷域= 30cm 左記の3つの亀裂の密度を2倍に変更
 ③ 損傷域= 80cm 左記の3つの亀裂の密度を8倍に変更

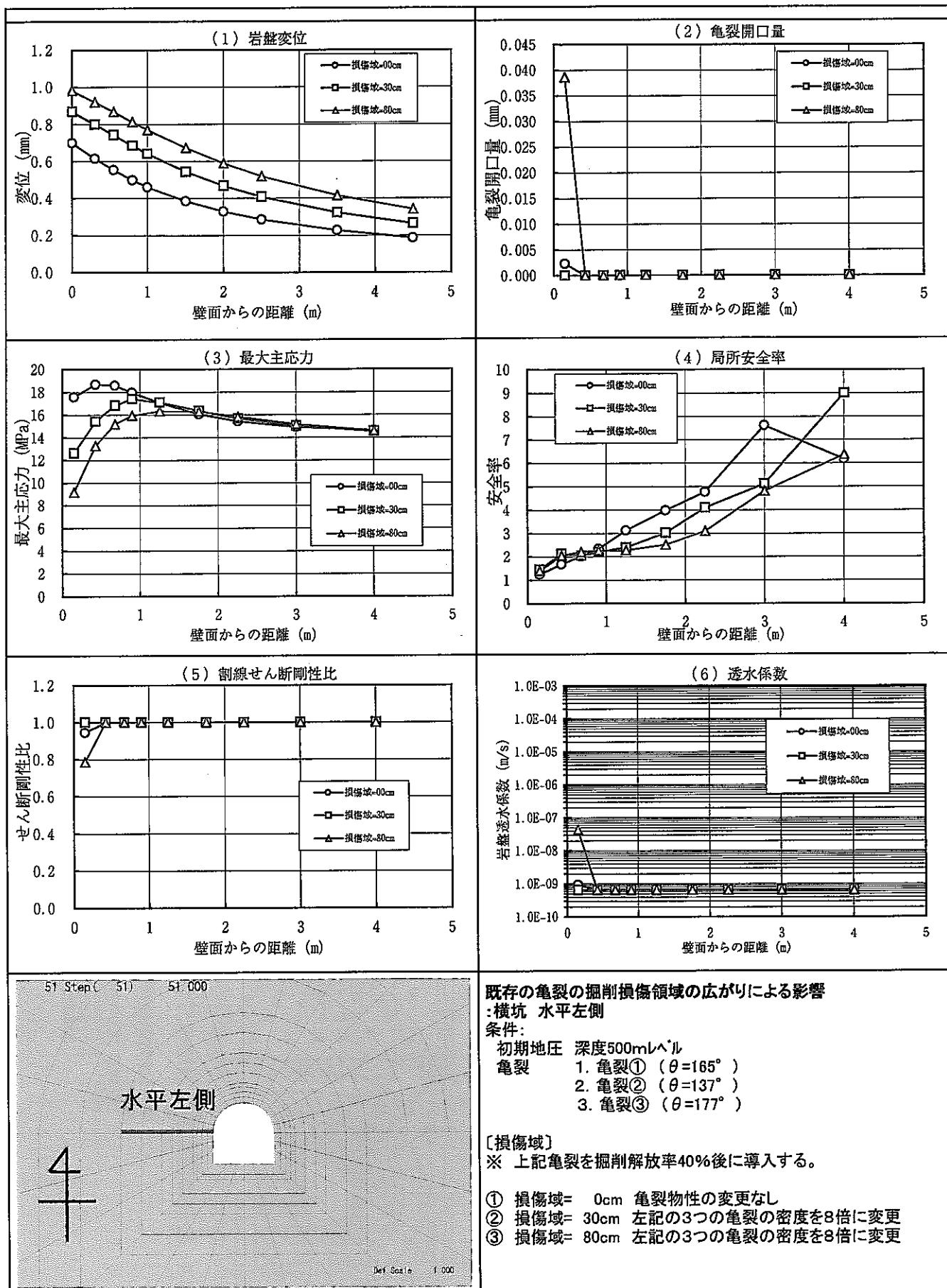


図5.3.12 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(既存亀裂が進展した場合) (横坑:水平左側)

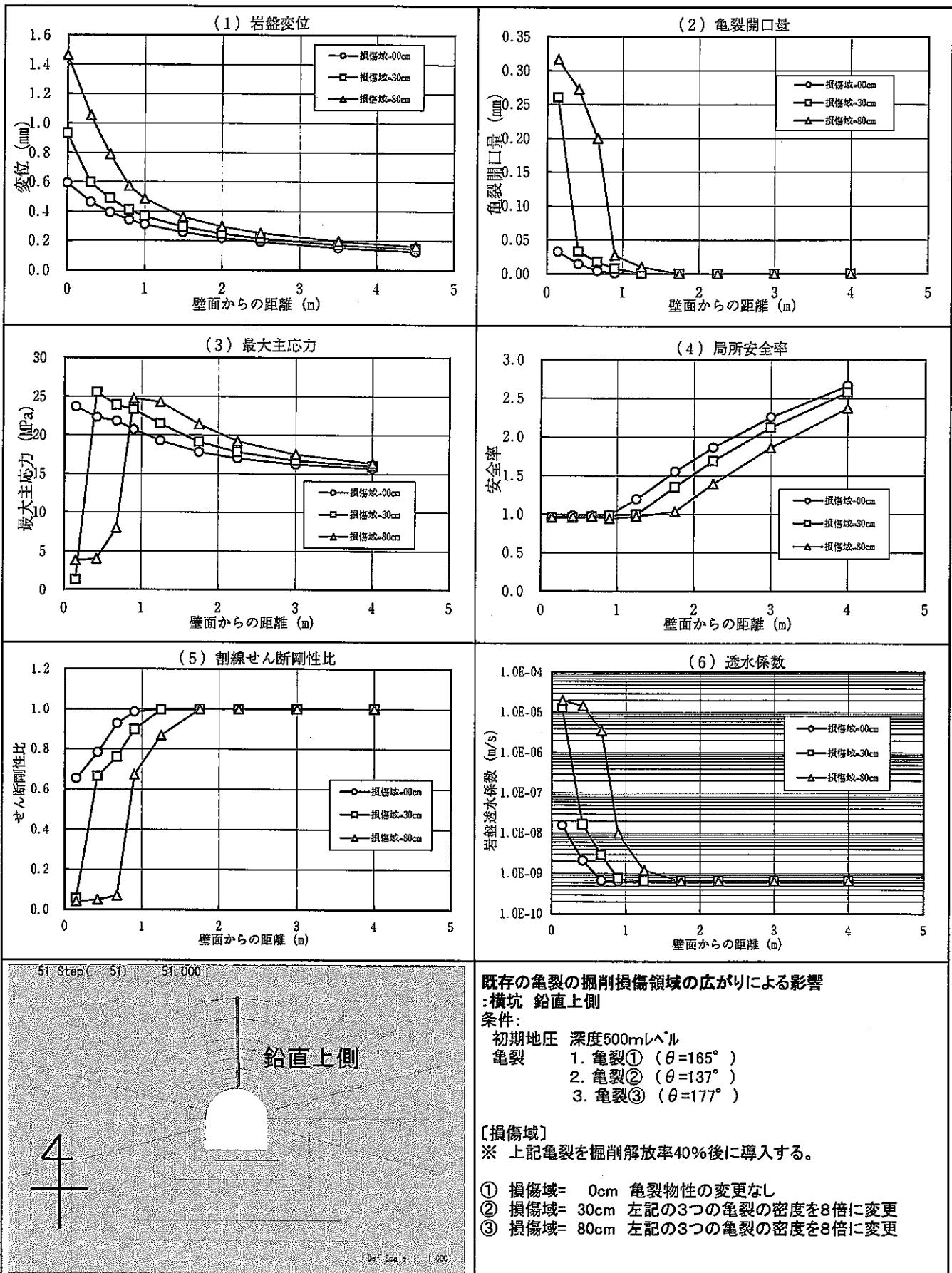


図5.3.13 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(既存亀裂が進展した場合) (横坑:鉛直上側)

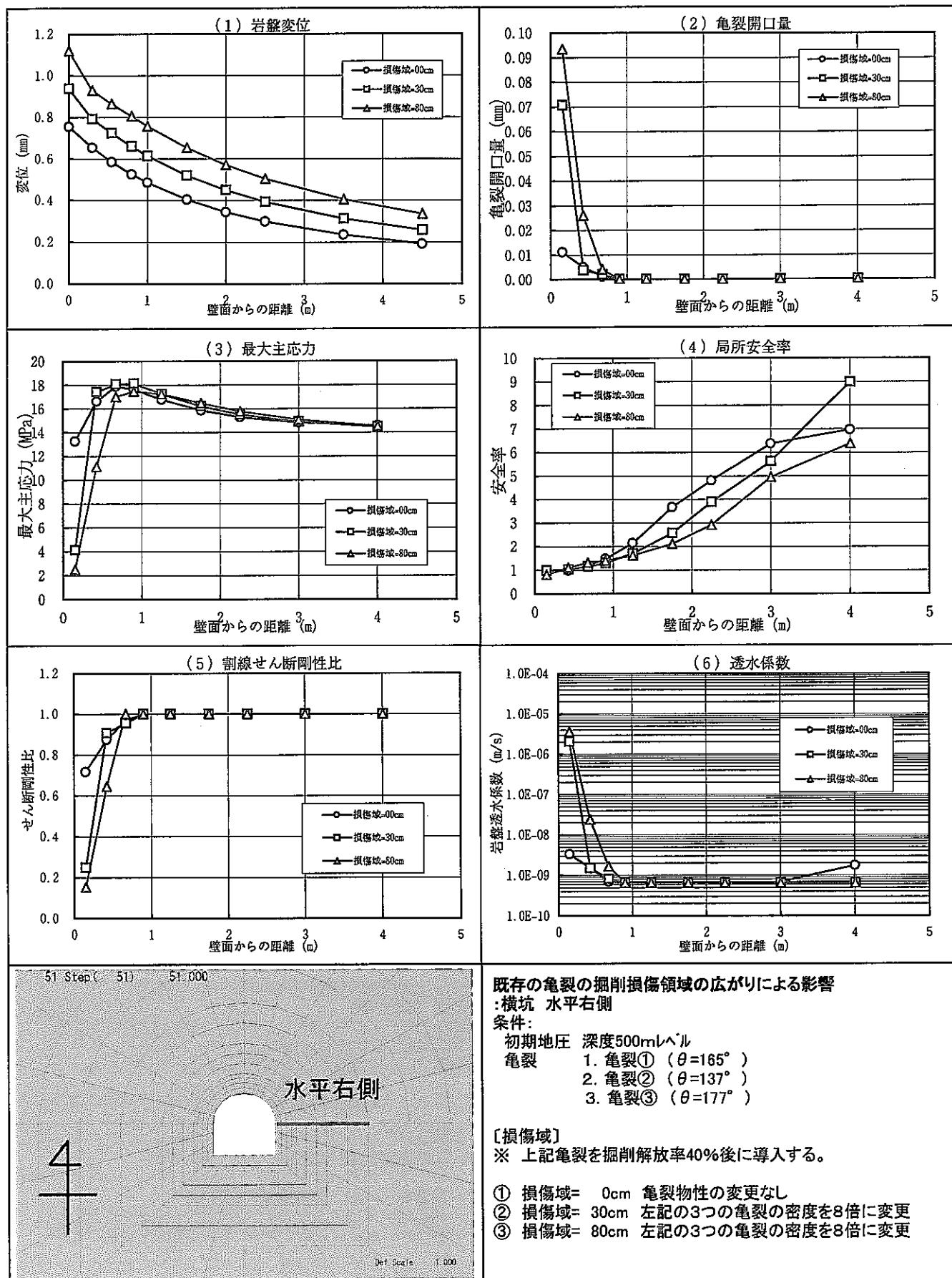


図5.3.14 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(既存亀裂が進展した場合) (横坑:水平右側)

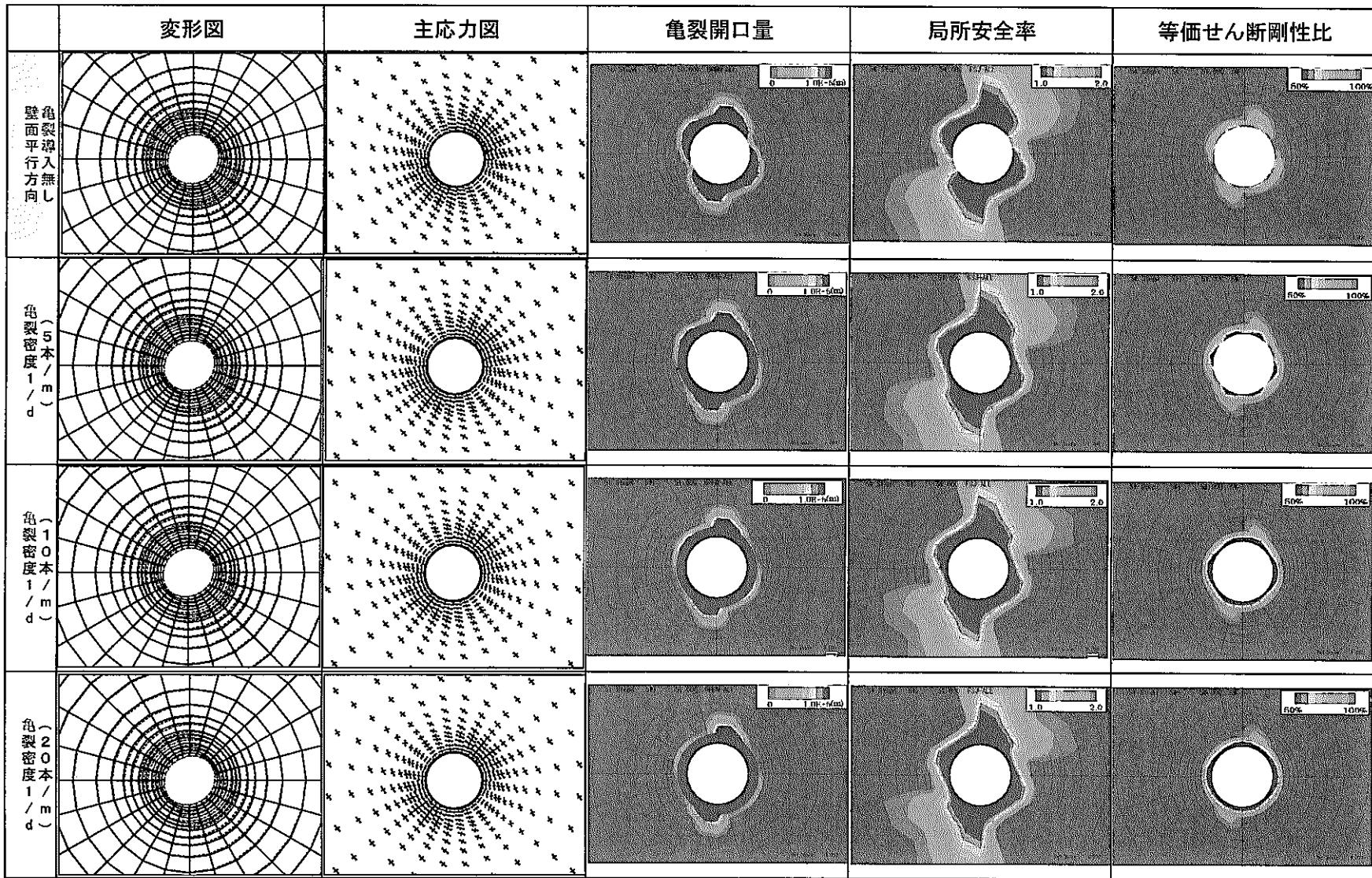


図5.3.15 亀裂の特性の違いによる影響センター図 -立坑-(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)

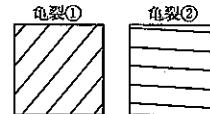
(亀裂密度 $1/d$ ①考慮なし ②5本/ m ③10本/ m ④20本/ m)

壁面平行方向亀裂の物性の違いによる影響:立坑

条件:

初期地圧 深度500mレベル

- 亀裂
 1. 亀裂① ($\theta=49^\circ$)
 2. 亀裂② ($\theta=177^\circ$)



【損傷域】

* 下記記述亀裂を掘削解放率40%後に導入する。

3. 亀裂③ 壁面平行亀裂

① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし

② 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 5$ 本/ m で導入

③ 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 10$ 本/ m で導入

④ 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 20$ 本/ m で導入

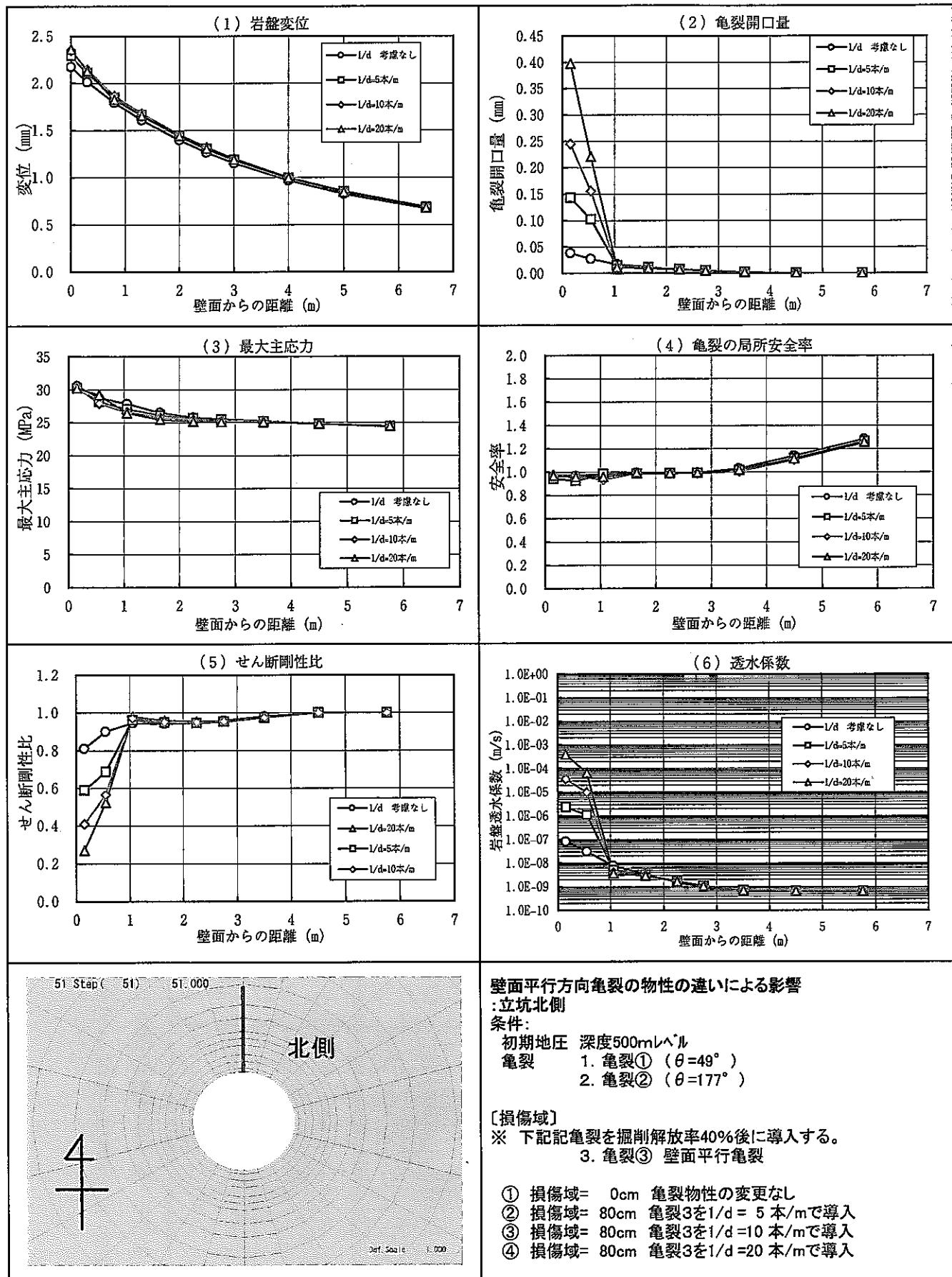


図5.3.16 亀裂の特性の違いによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合) (立坑:北側)

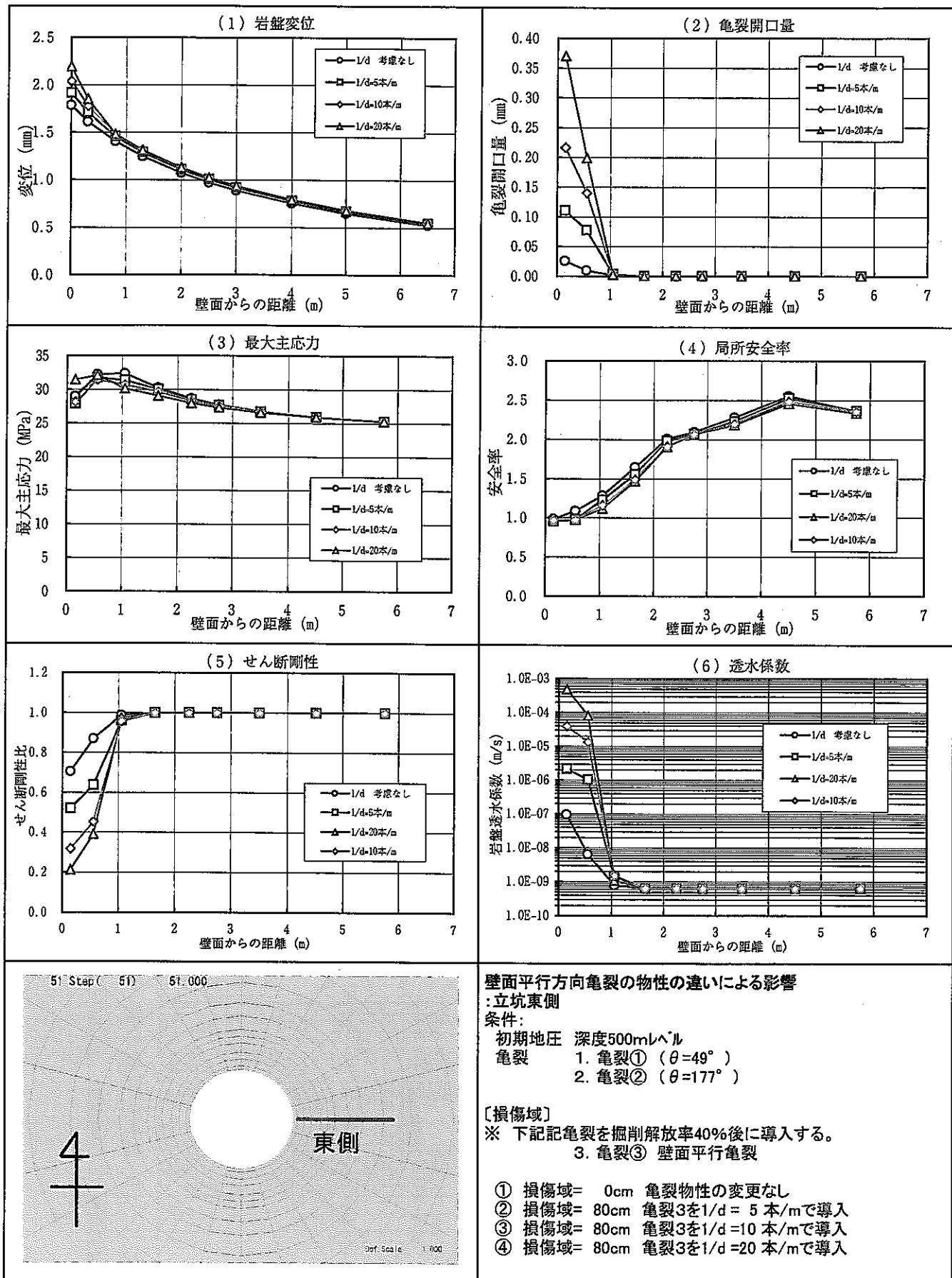


図5.3.17 亀裂の特性の違いによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合) (立坑: 東側)

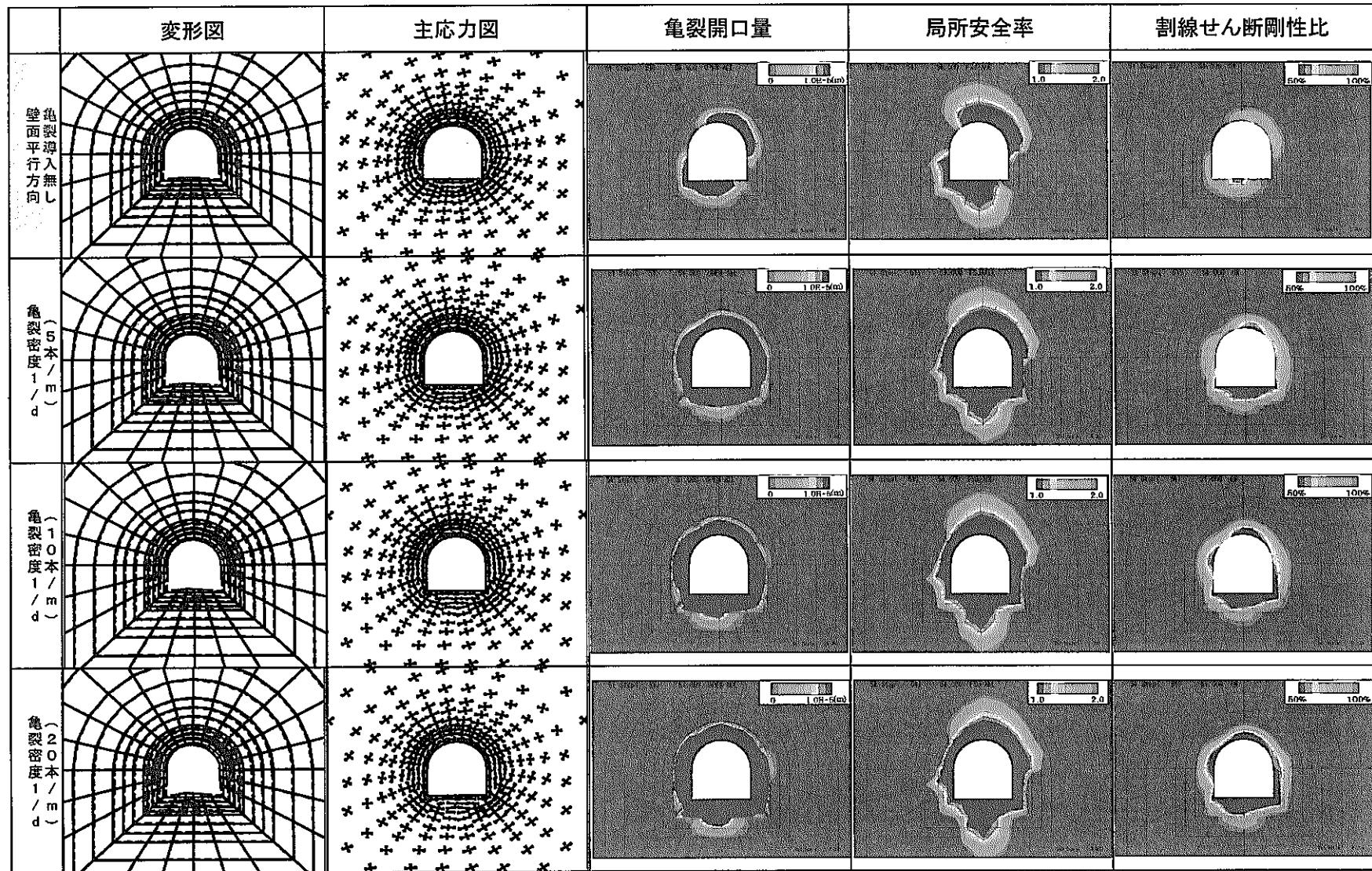
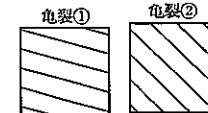


図5.3.18 亀裂の特性の違いによる影響センター図 -横坑- (壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)

(亀裂頻度 $1/d$ ①考慮なし ②5本/ m ③10本/ m ④20本/ m)

壁面平行方向亀裂の物性の違いによる影響: 横坑

条件:
初期地圧 深度500mレベル
亀裂 1. 亀裂① ($\theta=165^\circ$)
2. 亀裂② ($\theta=137^\circ$)



[損傷域]
※ 下記亀裂を掘削解放率40%後に導入する。
3. 亀裂③ 壁面平行亀裂

- ① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし
- ② 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 5$ 本/ m で導入
- ③ 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 10$ 本/ m で導入
- ④ 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 20$ 本/ m で導入

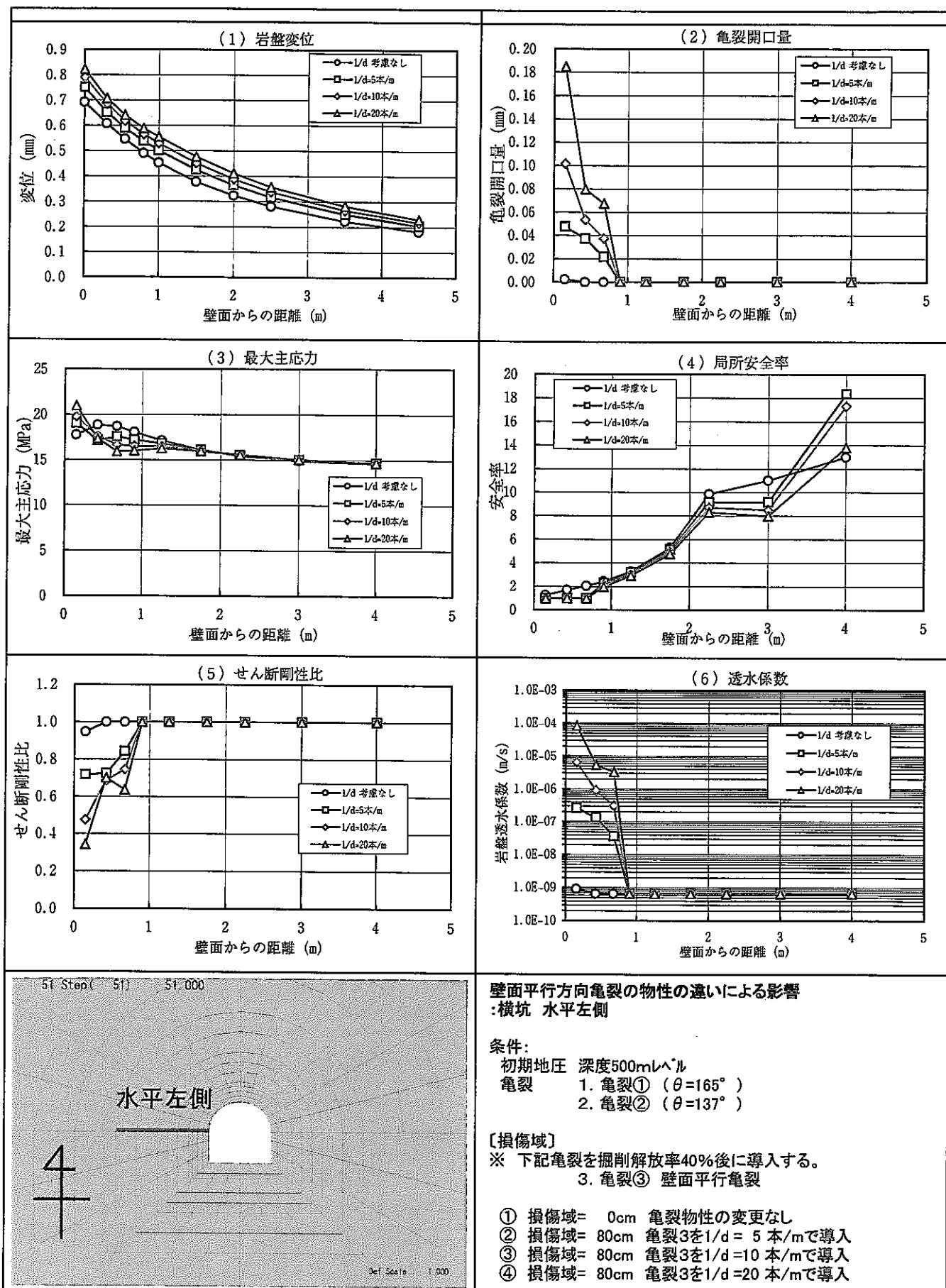


図5.3.19 亀裂の特性の違いによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:水平左側)

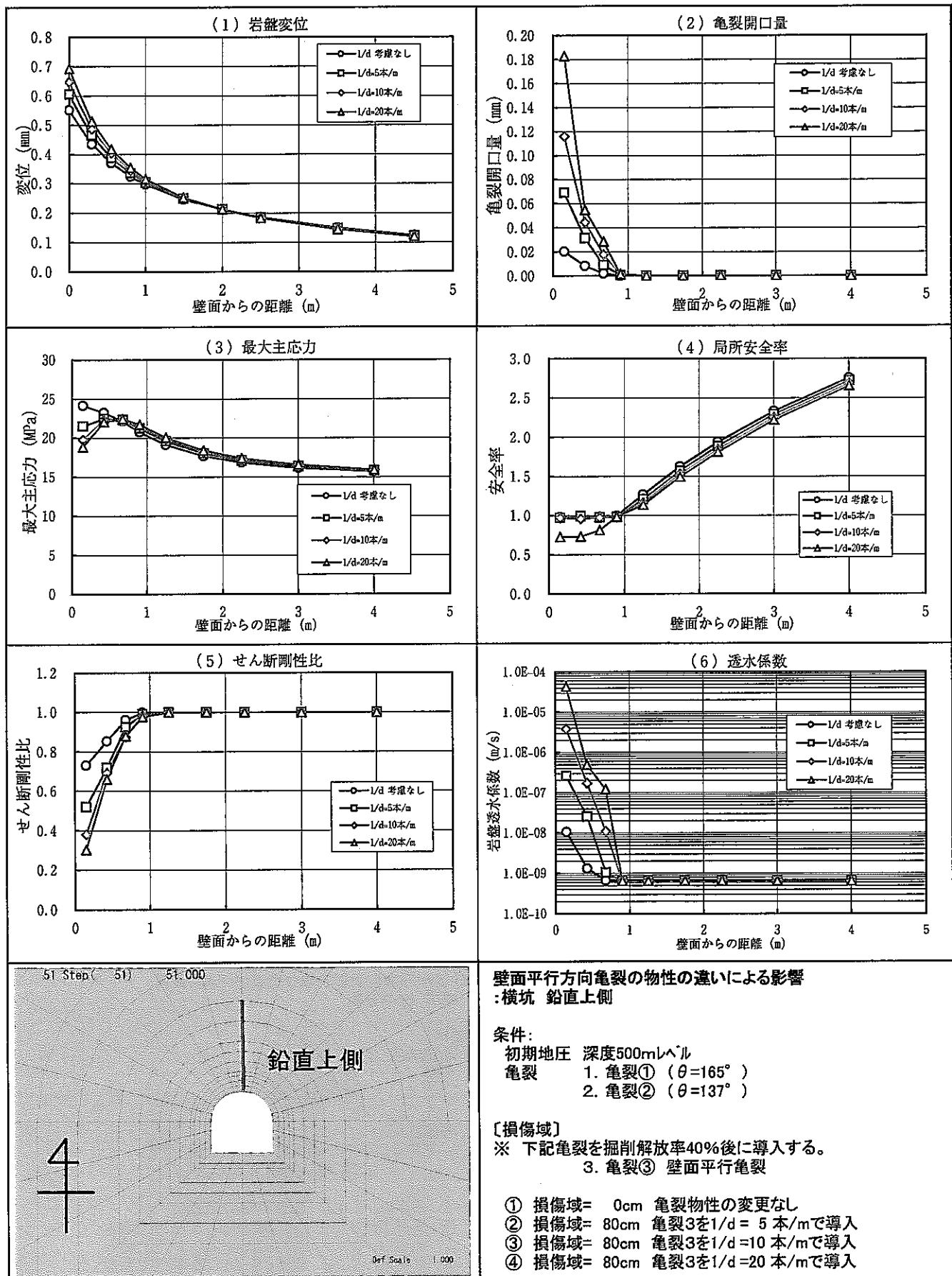


図5.3.20 亀裂の特性の違いによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:鉛直上側)

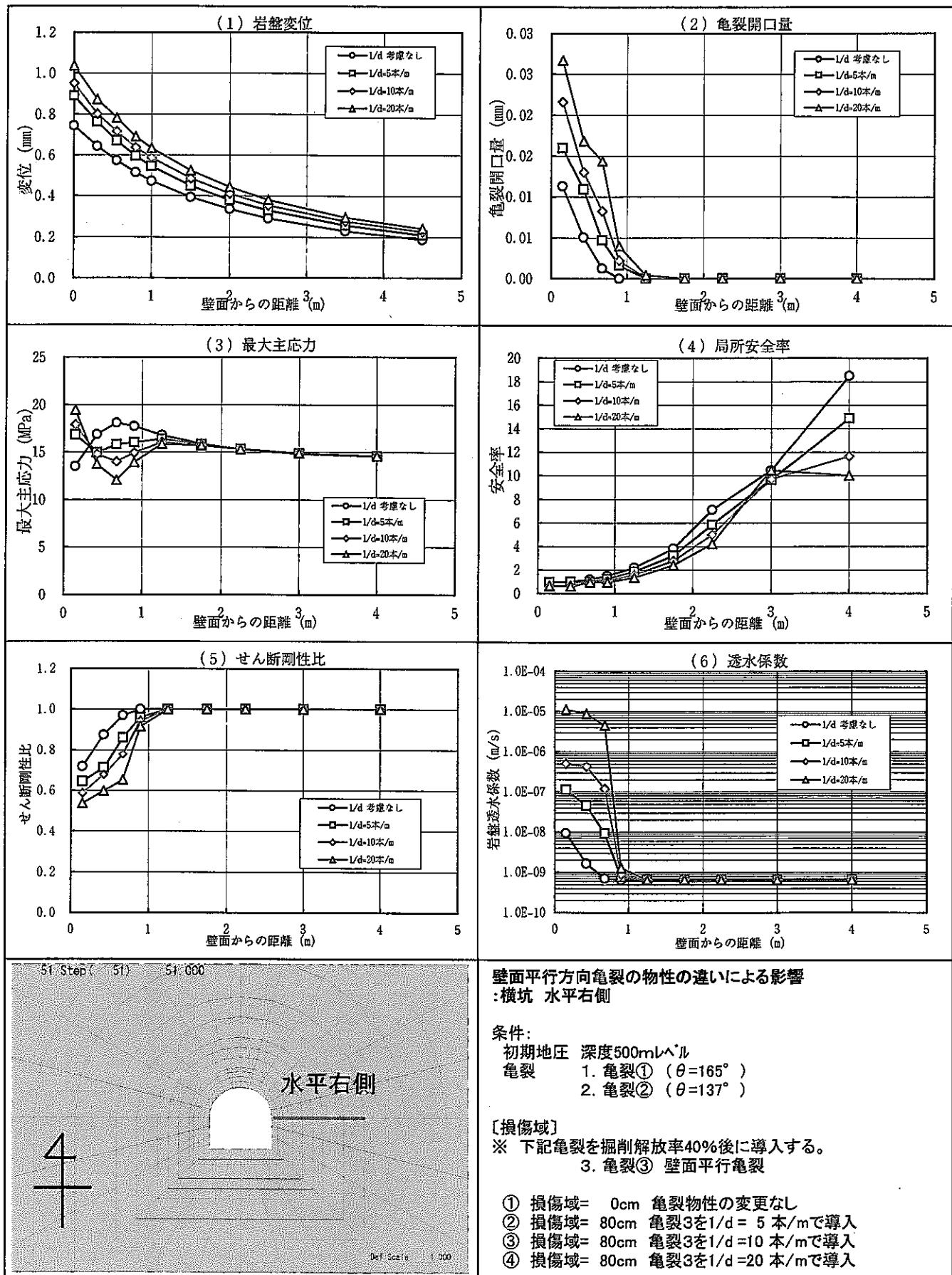


図5.3.21 亀裂の特性の違いによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)(横坑:水平右側)

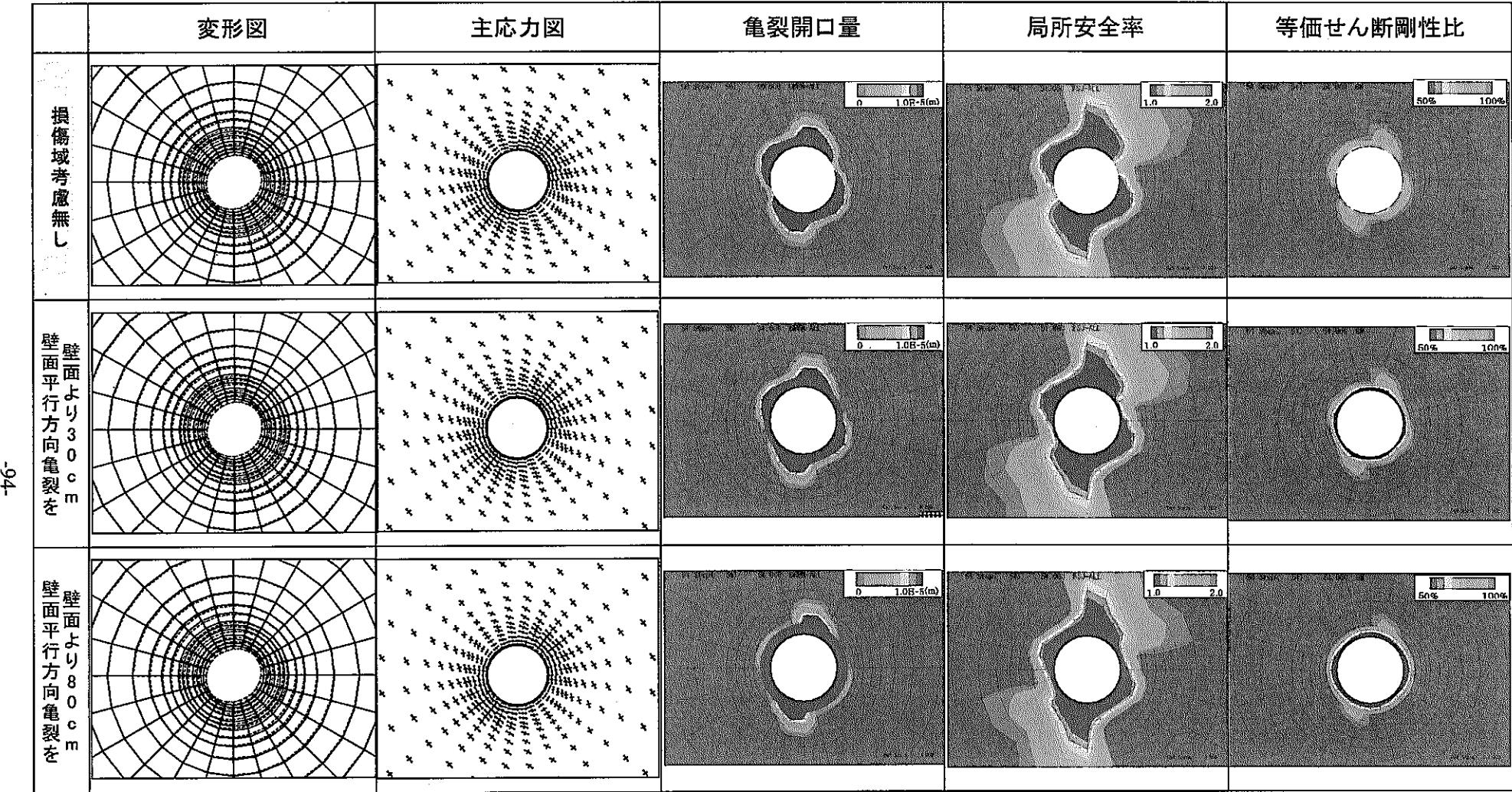


図5.3.22 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響センター図一立坑一(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)

(損傷域:①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm)

壁面平行方向亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響

:立坑

条件:

初期地圧 深度500mレベル

亀裂 1. 亀裂① ($\theta = 49^\circ$)

2. 亀裂② ($\theta = 177^\circ$)



[損傷域]

※ 下記記載亀裂を掘削解放率40%後に導入する。
3. 亀裂③ 壁面平行亀裂

① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし

② 損傷域= 30cm 亀裂3を1/d=20 本/mで導入

③ 損傷域= 80cm 亀裂3を1/d=20 本/mで導入

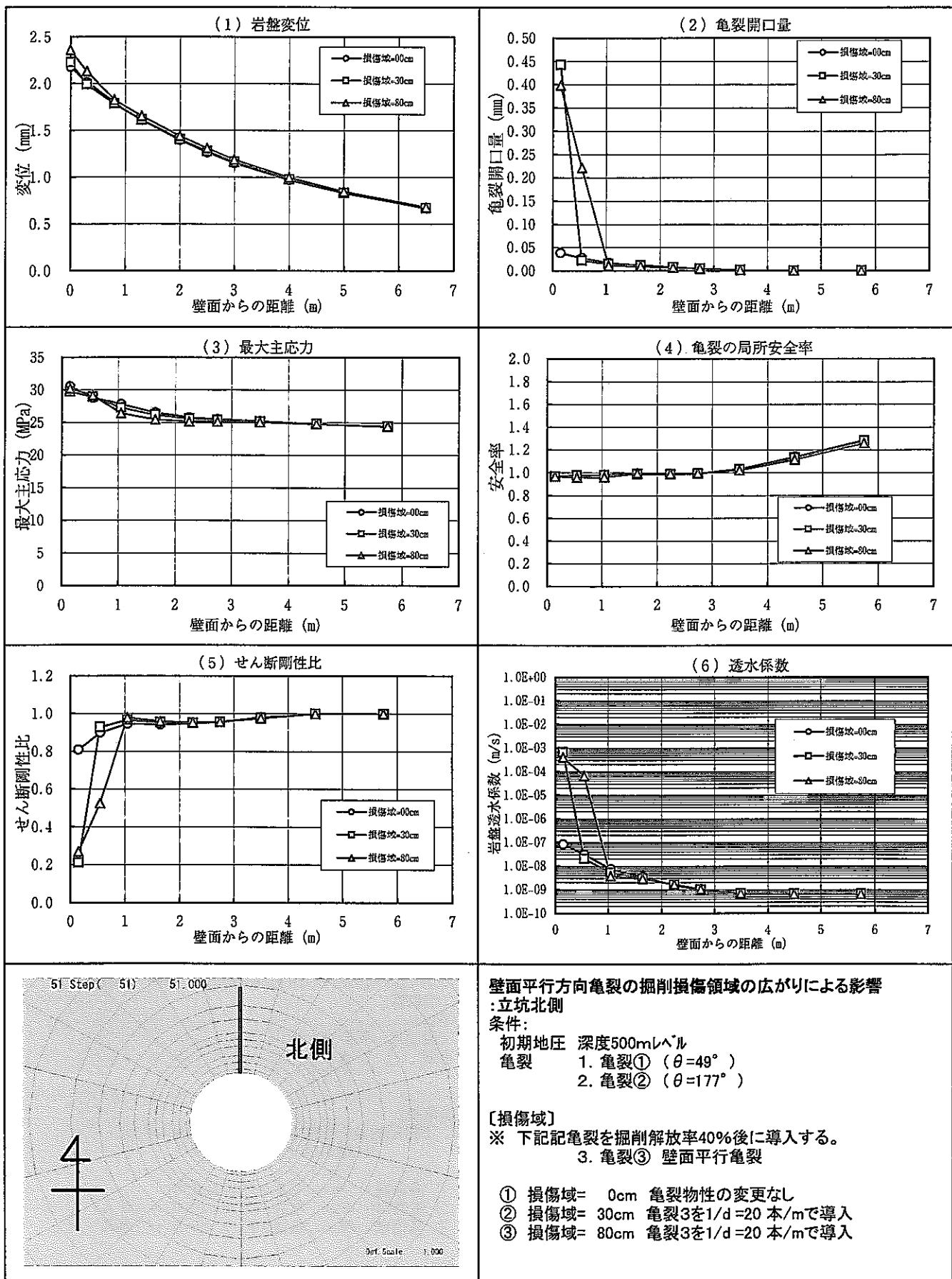


図5.3.23 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)
(立坑:北側)

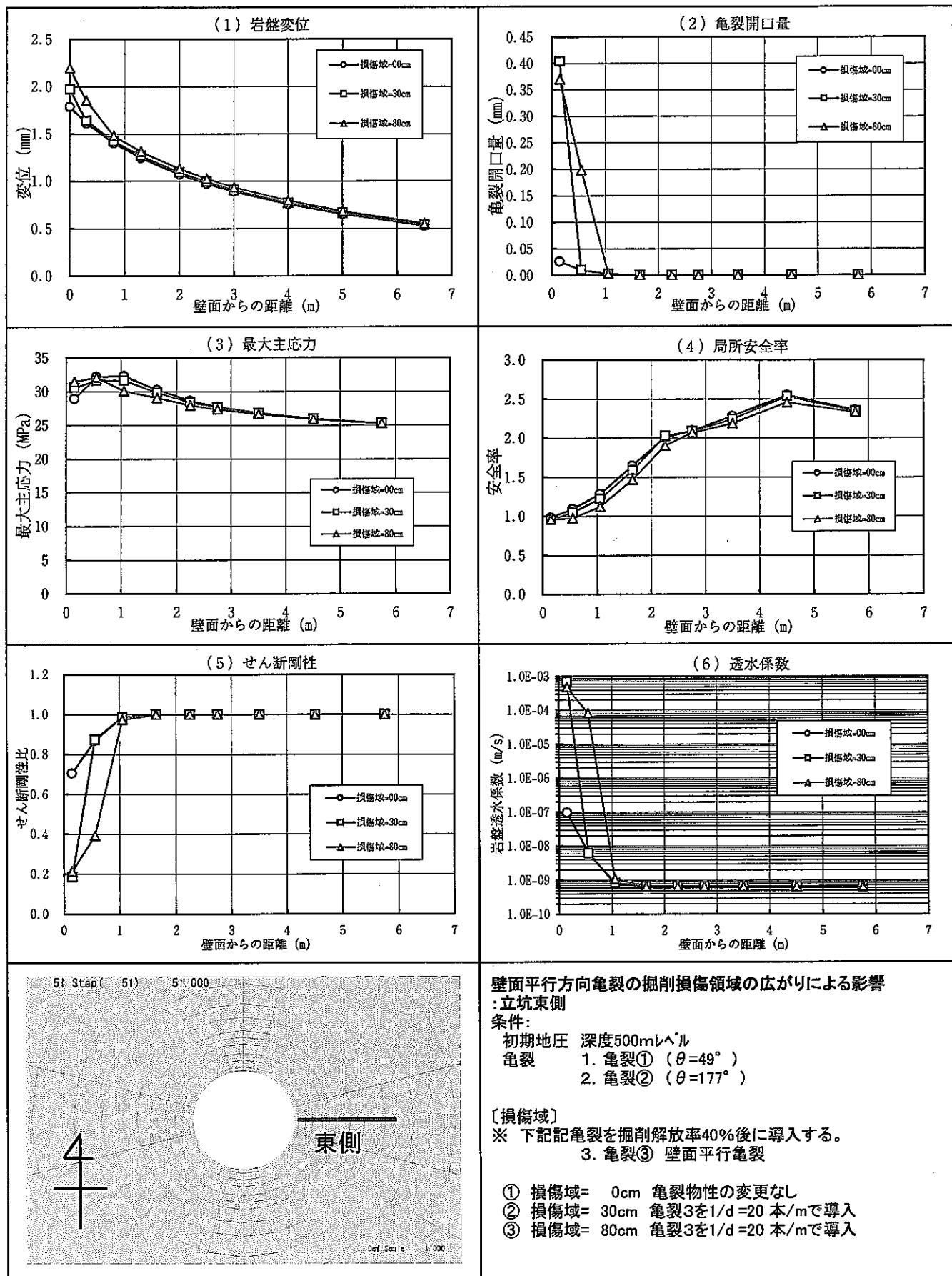


図5.3.24 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)
(立坑: 東側)

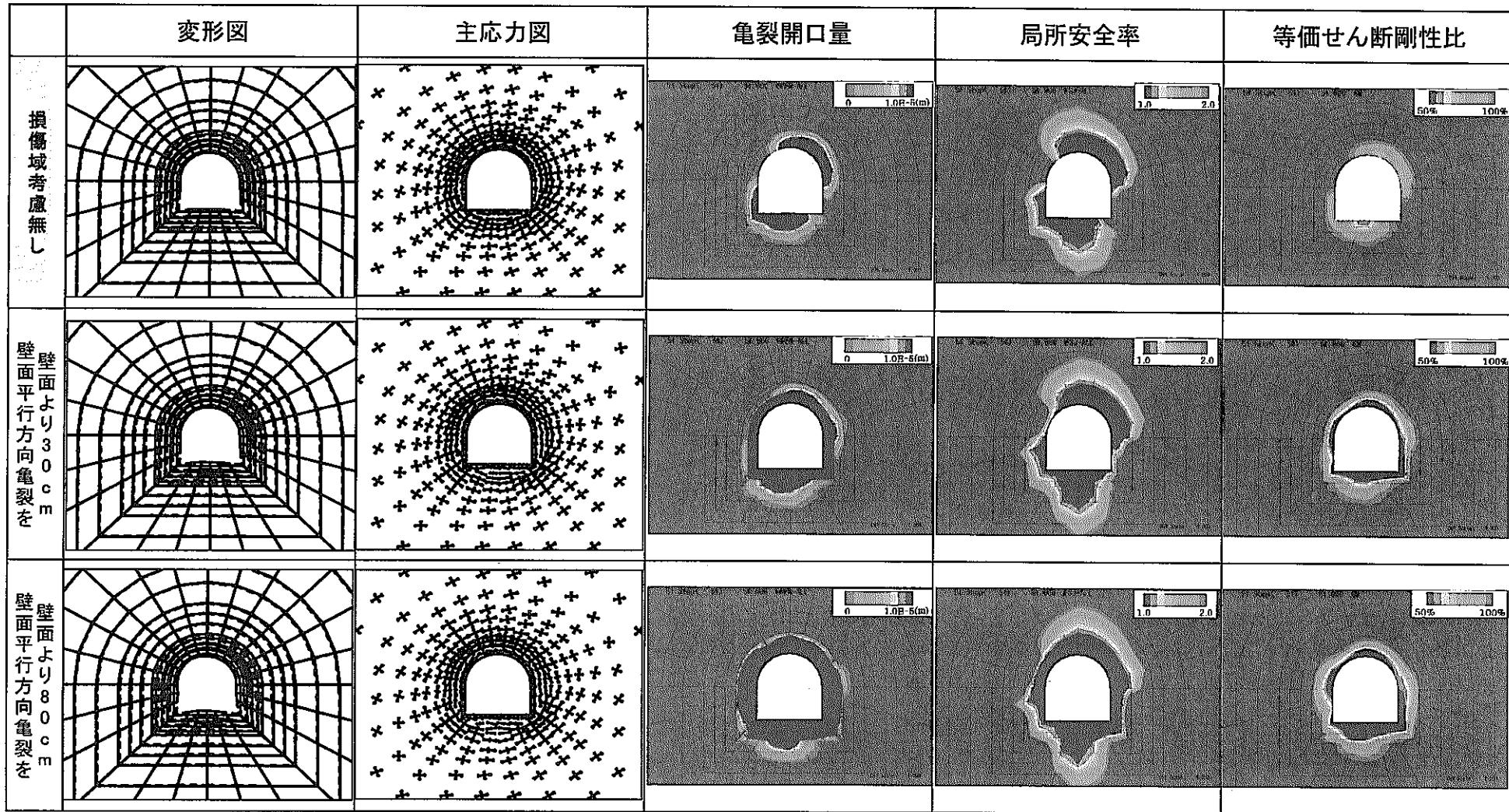
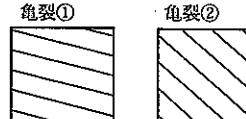


図5.3.25 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響—横坑—(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)

(損傷域:①考慮なし ②壁面より30cm ③壁面より80cm)

壁面平行方向亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響
:横坑
条件:
初期地圧 深度500mレベル
亀裂 1. 亀裂① ($\theta=165^\circ$)
2. 亀裂② ($\theta=137^\circ$)



【損傷域】
※ 下記記述亀裂を掘削解放率40%後に導入する。
3. 亀裂③ 壁面平行亀裂

- ① 損傷域= 0cm 亀裂物性の変更なし
- ② 損傷域= 30cm 亀裂3を $1/d = 20$ 本/mで導入
- ③ 損傷域= 80cm 亀裂3を $1/d = 20$ 本/mで導入

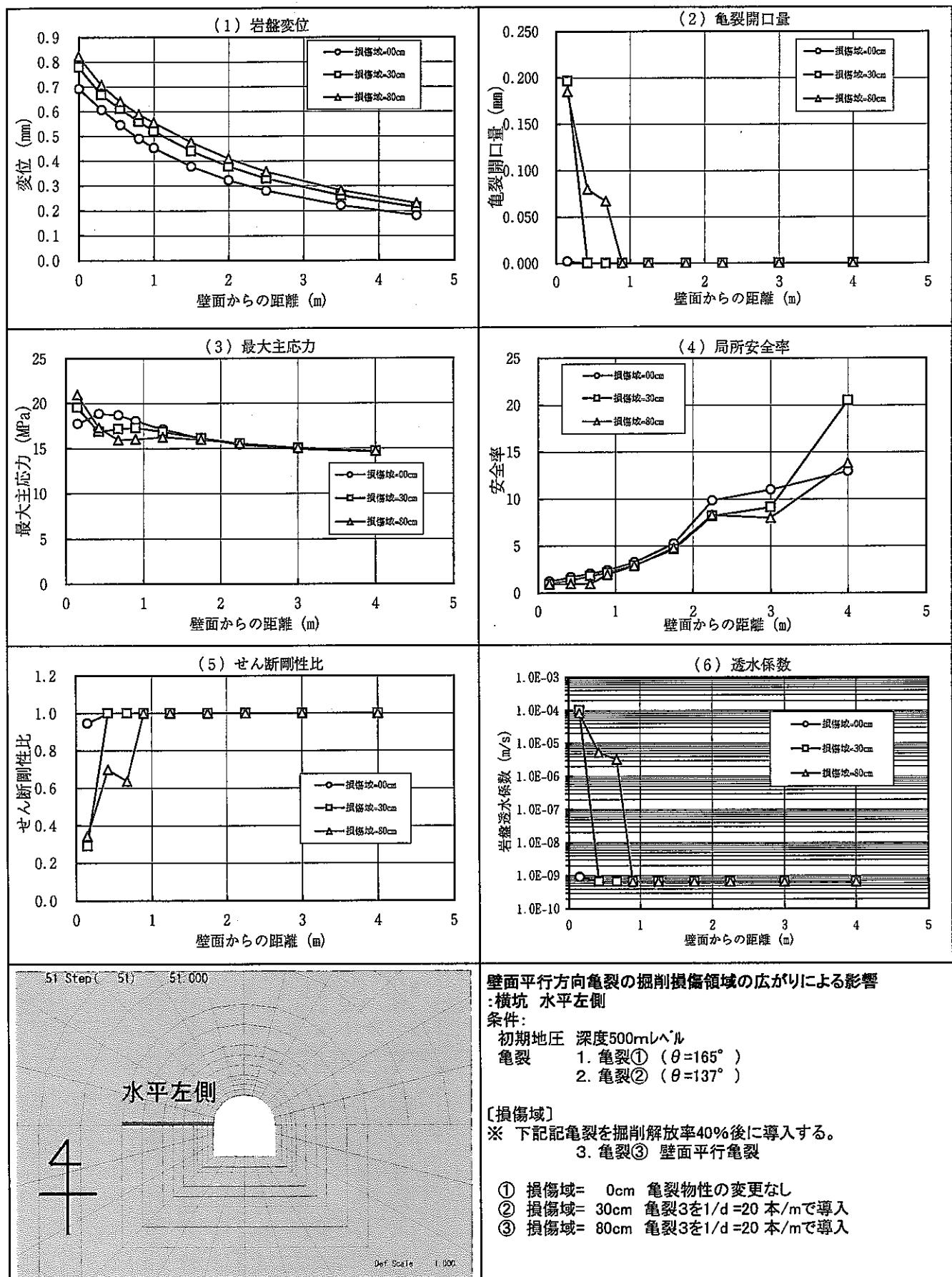


図5.3.26 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)
(横坑:水平左側)

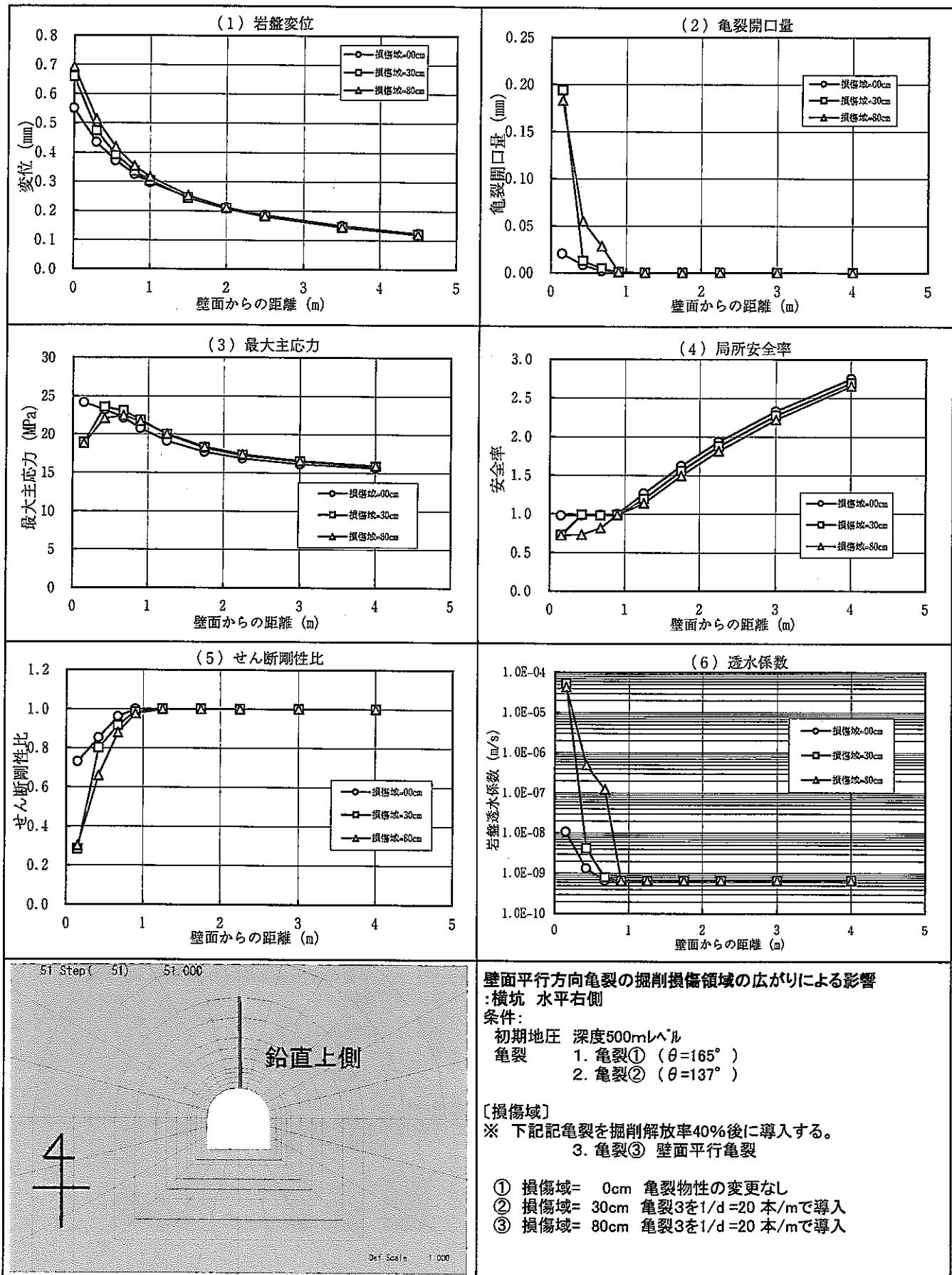


図5.3.27 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)
(横坑:鉛直上側)

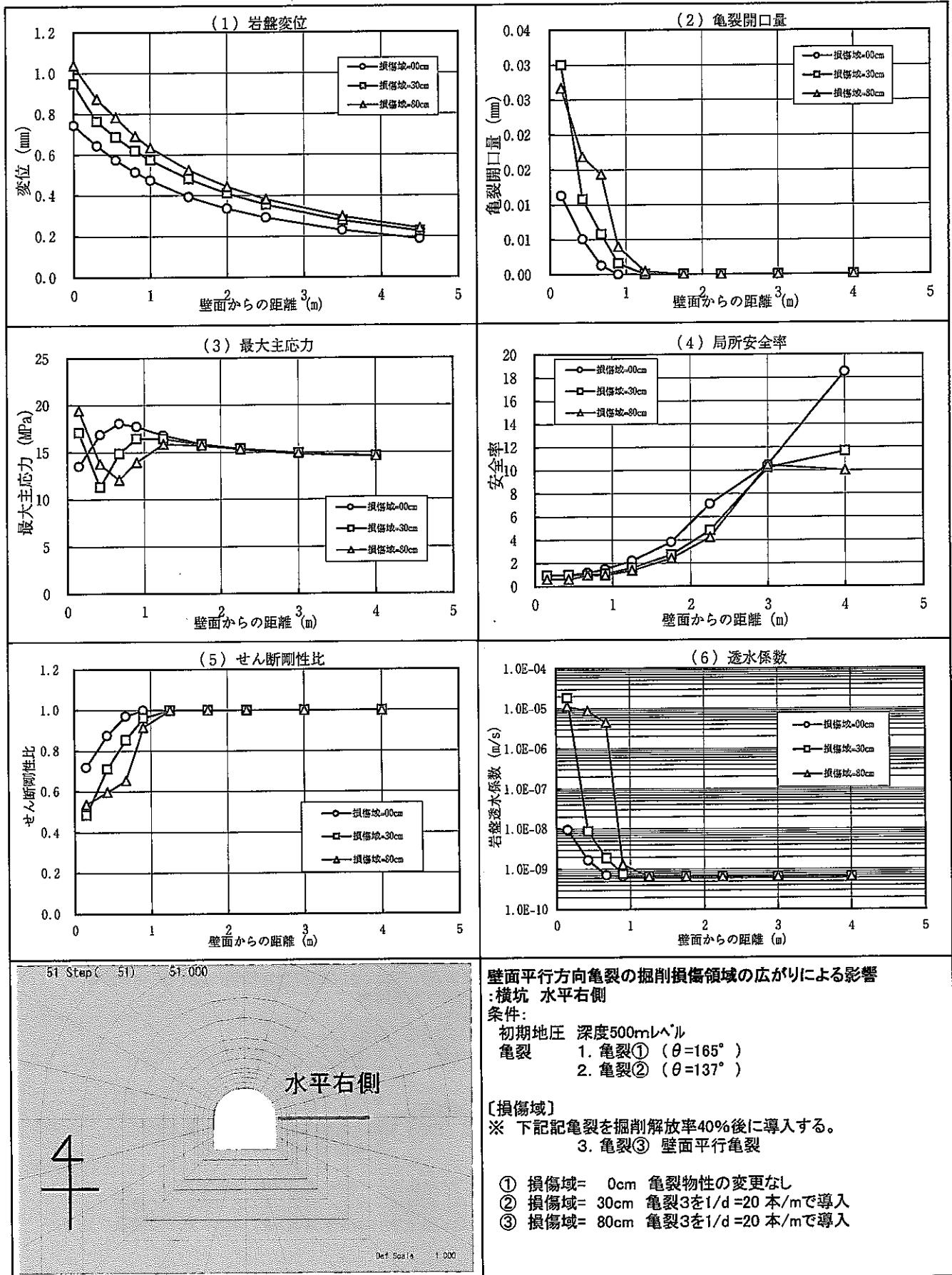


図5.3.28 亀裂の掘削損傷領域の広がりによる影響(壁面平行方向亀裂が新規発生した場合)
(横坑:水平右側)

5. 4 坑道掘削解析まとめ

5. 4. 1 掘削損傷領域の特性の違いによる影響

5. 3. 1では、既存亀裂を対象とし、5. 3. 2では、壁面平行方向の亀裂を対象として、掘削損傷領域の特性を変更した解析ケースを実施した。パラメータとした特性は亀裂密度である。岩盤に内在していた既存亀裂が進展したとモデル化した場合も、発破等により新規に壁面平行方向の亀裂が発生したとモデル化した場合も、ともに、亀裂の密度を大きくするとほど、壁面近傍の亀裂の開口量は増大し、せん断剛性は低減していく傾向にある。これは感度解析の解析結果とも一致する。ただし、既存亀裂の密度を大きくすると、掘削損傷領域内では各亀裂の開口領域が拡大し、各亀裂が同時に開口する領域が発生する。そのような領域では、亀裂間の相互作用により、複雑に応力状態が変化する場合がある。

5. 4. 2 掘削損傷領域の広がりの違いによる影響

5. 3. 1では、既存亀裂を対象とし、5. 3. 2では、壁面平行方向の亀裂を対象として、掘削損傷領域の広がりを変更した解析ケースを実施した。

全体的な傾向としては、既存亀裂を対象とした場合も、壁面平行方向の亀裂を対象とした場合も、ともに、掘削損傷領域を大きくするとほど、壁面近傍の亀裂の開口量は増大し、せん断剛性は低減していく傾向にある。しかし、5. 4. 1の「特性の違い」の場合と比べ、その傾向は顕著ではない。

さらに、ある測線上に限って見れば、既存亀裂の場合も壁面平行方向亀裂の場合も、掘削損傷領域が30cmのケースが、掘削損傷領域内で急激な開口量の増大や、せん断剛性の低減が見られ、場合によっては、壁面近傍にて80cmのケースよりも開口量が大きくなるケースが見られた。この理由は、掘削損傷領域内では、同じ要素で複数の亀裂が開口する場合があるが、そのような場合に、互いの亀裂のすべり方向の関係から、亀裂同士がその開口を抑制する効果を生じことがある。掘削損傷領域を80cmに設定したケースは、亀裂が開口する要素の数が多く、上記のような現象が発生しやすいため、掘削損傷領域内で、30cmのケースほど開口量が増大しなかったと思われる。

5. 4. 3 掘削損傷領域の亀裂のモデル化による影響

発破や機械による掘削損傷領域の亀裂状態をモデル化するにあたり、以下の2種類の亀裂のモデル化を検討した。

①岩盤に内在していた既存亀裂が進展した場合

②発破等により壁面平行方向の亀裂が新規に発生した場合

「既存亀裂が進展した場合」としてモデル化した場合は、掘削損傷領域を考

慮しない解析と比較すると亀裂開口領域が相似的に拡大する傾向が見られる。

「壁面平行方向の亀裂が新規に発生した場合」としてモデル化した場合には、「既存亀裂が進展した場合」とモデル化した場合に比べ、掘削損傷領域内に亀裂が集中的に開口し、掘削損傷領域より外側岩盤の開口量は少ないため、掘削影響領域がそれほど広がらない。これは、「既存亀裂が進展した場合」とモデル化した場合、掘削損傷領域内外で同じ傾斜の既存亀裂が存在するため、掘削損傷領域外でも同一傾斜の亀裂セットが開口しやすくなり亀裂開口領域が相似的に拡大するが、一方、壁面平行方向の亀裂を配置した解析では坑道周方向に均等に開口するため、掘削損傷領域より外側の岩盤の既存亀裂の開口に与える影響が小さいためであると考えられる。

5. 4. 4 掘削損傷領域考慮による坑道支保の評価

本検討については、鋼製支保工やロックボルトなどを考慮した解析ケースは実施しなかったが、本解析ケースにおける境界条件や応力、各特性値を決定する上で参考とした貸与技術資料^⑧では、GL-500mについては、鋼製支保工やロックボルトを考慮した解析ケースを実施しており、立坑・横坑ともに鋼製支保工やロックボルトの応力照査の結果、特に部材の耐力の観点から問題はなく、健全であり、無支保のケースと比較しても、それほど岩盤変位の抑制効果に寄与しない結果であった。これは、ボーリング孔のデータに基づいて決定した基質岩盤の弾性係数を50GPaクラスに設定しており、掘削後も岩盤として健全であったためである。

本解析ケースにおいても、貸与技術資料^⑧と同じ基質岩盤の弾性係数を設定していることから、貸与技術資料^⑧と同様に支保を考慮したケースについても、部材の耐力の観点からは問題ない結果となることが予測される。

しかし、本解析結果では、図5. 3. 9や図5. 3. 13のように、掘削損傷領域を考慮しないケースと比較して、掘削壁面の岩盤変位が2倍以上になっているケースもあり、また、実際の掘削を念頭に入れると本解析に充てた弾性係数ほどの健全な岩盤ばかりでないことも十分予測されることから、ゆるみの進展防止の観点も踏まえ、鋼製支保工やロックボルトなどの支保は、長期的な立坑・横坑の安定性に寄与するものと思われる。

また、これらの坑道に対する支保の効果を評価する観点から、健全でない基質岩盤の特性のケースも含めて、更に詳細な解析・検討が必要であると思われる。

6. おわりに

MIU 計画の第 1 段階における研究として、これまでに岩盤亀裂を考慮した解析手法による 2 次元坑道掘削影響解析を実施してきた。これを受け、本業務では、MBC モデルを対象として、発破や機械掘削により生じた掘削損傷領域を考慮して、まず掘削損傷領域のモデル化手法を確立し、さらに掘削影響領域を考慮することによる解析結果への影響を明らかにすることを目的として掘削損傷領域を考慮した掘削解析を実施した。

4 章では、MBC 解析で用いられる様々な亀裂や岩盤に関するパラメータが掘削による坑道周辺岩盤の亀裂の開口・せん断現象に及ぼす影響について検討を行うため、感度解析を実施した。

感度解析を実施したパラメータは、基質岩盤の弾性係数 E 、亀裂密度 $1/d$ 、亀裂面の起伏角 α 、亀裂面の摩擦角 ϕ 、亀裂の方向 θ である。解析の結果、基質岩盤の弾性係数 E が小さくなるほど、また亀裂の密度 $1/d$ が大きくなるほど、亀裂を含んだ岩盤全体系としてのコンプライアンスが大きくなるため、系としての剛性が小さくなり、亀裂の開口量は大きくなり、検討してきた感度パラメータの中でも、掘削影響領域の影響度の高いパラメータであることが分かった。これは、式 (3. 1. 26) から推察される傾向とも一致する。一方、亀裂面の起伏角や摩擦角については、亀裂の開口量に与える感度は、弾性係数 E や亀裂密度 $1/d$ よりも小さく、また式 (3. 1.16), (3. 1.17) に示すように、亀裂の平均応力増分と平均ひずみ増分の関係を示す式の関数であり、一概に亀裂の開口量へ及ぼす影響を述べるのは難しいといえる。

5 章では、実際の発破や機械掘削により発生した掘削損傷領域が及ぼす掘削影響予測への影響を検討するため、研究坑道の立坑部および横坑部を対象として、坑道掘削影響解析を実施した。

具体的には、ア) 掘削損傷領域の物性の違いによる挙動予測解析、イ) 掘削損傷領域の広がりの違いによる挙動予測解析を実施した。なお、ア) では 4 章の感度解析の結果から、物性の違いを検討するパラメータとして亀裂密度を取り上げた。

また、掘削損傷領域のモデルとして、岩盤に内在していた既存亀裂が進展したモデル化と、発破等により壁面平行方向の亀裂が新規に発生したモデル化を考え、各モデル化について上記ア), イ) のパラメトリックスタディを実施した。

5 章の検討の結果をまとめて以下に示す。

- ① 亀裂の開口量に着目すると、既存亀裂が進展する場合のモデルおよび、壁面平行方向の亀裂が新規に発生する場合のモデルとも、掘削損傷領域内の開口量は増大する傾向にあるが、前者のモデルは、設定した掘削損傷領域の外側まで、既存亀裂の開口領域が広がっているのに対し、後者のモデルは掘削損傷領域の外側の既存亀裂にほとんど影響を及ぼさない。
- ② 応力状態について着目すると、既存亀裂が進展する場合のモデルでは、各方向の既存亀裂が開口し、影響しあうことで、局所的に主応力軸が回転するなど、応力状態

は大きく乱れている。一方、壁面平行方向の亀裂が新規に発生する場合のモデルでは、壁面周辺に一様に亀裂が開口するため、そのような応力の乱れは見られない。

- ③ 岩盤変位について着目すると、亀裂の開口に着目した場合と同様に、既存亀裂が進展する場合のモデルでは掘削損傷領域外まで、亀裂密度や掘削損傷領域の広がりの影響を多大に受けている。一方、壁面平行方向の亀裂が新規に発生する場合のモデルでは、掘削損傷領域外の岩盤変位は亀裂密度や掘削損傷領域の広がりといったパラメータによる影響は比較的小さい。
- ④ 岩盤透水性について着目すると、既存亀裂が進展する場合のモデルおよび、壁面平行方向の亀裂が新規に発生する場合のモデルとも、掘削損傷領域内では最大で6オーダー程度透水係数が増大する。また、既存亀裂が進展する場合のモデルでは、壁面から数m程度まで透水性変化の影響を受けている。一方、壁面平行方向の亀裂が新規に発生する場合のモデルでは、掘削損傷領域の外では透水性の影響は比較的小さい。

以上の検討結果より、MBCモデルによる坑道掘削時の岩盤挙動予測解析では、岩盤挙動は亀裂の幾何学的分布により支配されており、MBCモデルの亀裂パラメータのなかで亀裂密度が最も影響度が高いことが分かった。また、掘削損傷領域における亀裂特性としては、元々内在していた先在的な亀裂だけでなく、発破などにより発生した壁面に平行な亀裂を考慮することは、過去の地下発電所やトンネル交差部・拡幅部などにおいて経験的に知られている実現象の知見からみても適切であると考えられる。

以上の成果などから、亀裂挙動を考慮可能なMBCモデルを用い、掘削損傷領域を適切にモデル化して解析することによって、より実現象に近い坑道周辺岩盤の掘削挙動予測解析が可能となり、研究坑道の詳細検討に有効に活用できるものと考える。ただし、今後の課題として、実現象における亀裂の開口現象を定量的に実測し、MBCモデルによる予測解析の妥当性を検証することが必要と考えられる。解析モデルの検証のための具体的な検討案を以下に示す。

既に釜石鉱山等で同様の研究がされているが、図6.1.1に示すように、坑道から掘削された計測坑道より、調査用ボーリング孔を設置し、計測坑道の掘削に伴う岩盤や亀裂の挙動を把握する必要があると思われる。

必要な計測項目としては、

① 亀裂性状の把握

- ・調査ボーリングによる、試験坑道掘削前の、亀裂密度、走向傾斜の把握。また、採取コアのジョイントせん断試験による起伏角 α 、摩擦角 ϕ の算出。

- ② 坑道周辺亀裂開口量
 - ・掘削に伴う坑道周辺岩盤の亀裂の開口量計測。
- ③ 坑道周辺岩盤変位
 - ・掘削に伴う坑道周辺岩盤の変位計測
- ④ 坑道周辺岩盤応力分布
 - ・掘削に伴う坑道周辺岩盤の応力分布の計測
- ⑤ 坑道周辺岩盤の透水性
 - ・試験坑道掘削前の周辺岩盤の透水性の計測と、掘削に伴う透水性の計測。

以上の計測を実施することにより、地下深部における坑道掘削に伴う、応力再配分や既存亀裂の開口、新規亀裂の発生等による掘削損傷領域の挙動が把握でき、本業務による解析結果の検証が行えるものと思われる。

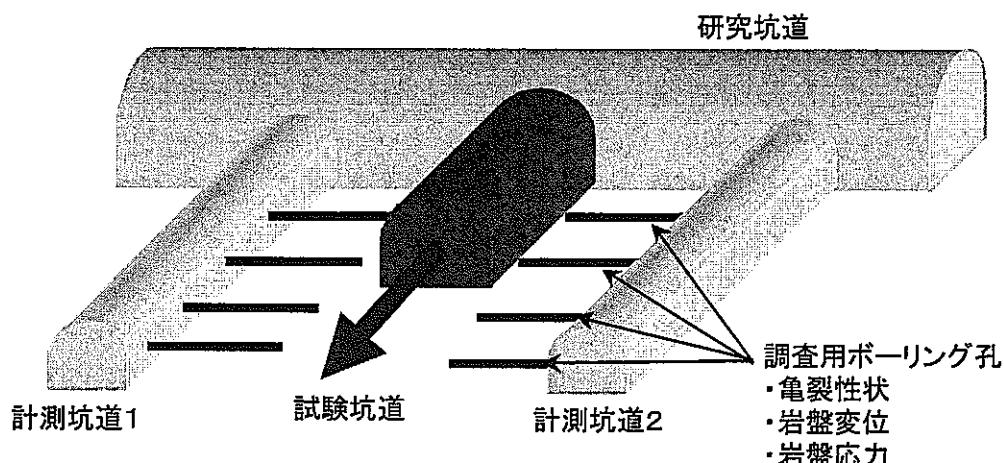


図 6.1.1 本解析結果の検証のための計測レイアウト例

参考文献

- 1) 吉田秀典, 堀井秀之:マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535, III-34, pp.23-41, 1996
- 2) 堀井秀之他:節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較, 土木学会論文集, No.659, III-52, pp.229-240, 2000
- 3) 田坂嘉章他:節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法による地下発電所空洞掘削の解析, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.575-580, 1998
- 4) 北條明他:不連続性岩盤におけるロックボルトの設計法について, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.143-153, 1996
- 5) 佐々木猛他:有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.59-68, 1994
- 6) 山辺正他:クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.121-129, 1987
- 7) 京谷孝史他:岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.27-35, 1985
- 8) 森孝之他:研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析, サイクル機構技術資料(契約業務報告書 鹿島建設株式会社), JNC TJ7400 2002-007, 2002