

大規模地下空洞の掘削に伴う局所破壊の 実験及び解析的検証

Experimental and Numerical Analysis of the Local Failure Around Large-scale Underground Opening Due to Excavation

肖 俊^{*}・蔣 宇静^{**}・棚橋 由彦^{***}・中川 光雄^{****}

Jun XIAO, Yujing JIANG, Yoshihiko TANABASHI, Mistuo NAKAGAWA

Deformation and failure mechanism of underground opening are governed by not only the existing discontinuities but also on the new cracks, which are generated and progress due to excavation. In this study, the rational approach is proposed to define the generation and progress of the potential cracks by using distinct element method (DEM). In order to examine the proposed method, the base friction test experiment of a deep underground opening excavation in the discontinuous rock masses is carried out, and good agreement between model tests and numerical simulations are obtained. Finally, reinforcement effect of rock anchors and cable bolts on deformation behavior of underground opening is also discussed.

Key Word: underground opening, discontinuities, DEM, the base friction test experiment

1. はじめに

最近では、エネルギー施設や燃料貯蔵施設など大規模地下開発利用が積極的に進められている。一方で、地下空洞の掘削に当たっては、工事全体の安全性と合理化を目指す「情報化設計施工」を実施するために、調査・試験、解析・設計、施工・計測の各種要素技術の高度化が求められ、とくに模型実験・解析などに基づく挙動の事前予測と、計測に基づくフィードバックと設計修正が不可欠である。さて、地下空洞の変形・破壊挙動については、岩盤内に含まれる不連続面に大きく支配されると考えられる。不連続性岩盤を対象とした解析手法では、例えば個別要素法やキープロック理論が既存不連続面による地下空洞の安定性評価のために用いられている。しかし一方で、掘削に伴う新たな亀裂の発生と進展が施工現場の計測によって確認され、また、新規亀裂による局所破壊が空洞周辺岩盤の変形・破壊挙動を大きく影響することが指摘された¹⁾。したがって、岩盤空洞の力学的挙動を正しく評価するために、既存不連続面のみならず、局所破壊のメカニズムの解明やそれを取り扱える解析手法の確立が必要である。

著者らは、不連続面を直接モデル化することが可能で取り扱いも容易な個別要素法（DEM）を拡張し、不連続性岩盤の局所破壊をシミュレーションできるアプローチを提案してきた^{2)~4)}。本研究では提案手法の妥当性を底面摩擦模型実験装置を用いた模型実験により検証した上で、大規模地下空洞の掘削に伴う周囲地山の変形挙動と

^{*} 学生会員 博士後期課程 長崎大学大学院 海洋生産科学研究科

^{**} 正会員 工学博士 長崎大学 工学部 社会社会開発工学科

^{***} 正会員 工学博士 長崎大学 工学部 社会開発工学科

^{****} 正会員 工学博士 CRC 総合研究所(株) 科学システム事業部西日本科学システム部

不安定機構の解明を試みる。さらに、局所破壊を考慮した空洞壁面補強設計について、ロックボルトとアンカーの支保効果を解析的に検討する。

2. 亀裂の発生・進展による局所破壊の表現方法

個別要素法では、既存不連続面をブロックの境界面として定義するが、新規亀裂の発生・進展による局所破壊の解析的处理について、著者らが、亀裂の発生が予測される位置に潜在面を定義する方法を提案してきた。潜在面は载荷初期には連続体として挙動する剛性と強度を持つ。潜在面に作用する応力状態が破壊条件を満たしたとき、潜在面の剛性と強度が自動的に既存不連続面の値として処理され、以降は不連続面として挙動する。潜在面が亀裂と判定される条件として岩盤基質部の降伏・破壊条件を適用し、せん断による発生条件は Mohr-Coulomb 規準に基づくとする。

新規亀裂の発生判定に関わる具体的なプロセスを Fig.1 に示す。すべての潜在面に対し判定を行い、発生した新規亀裂は、既存不連続面と同様に挙動し、その結果として潜在面を含む周囲の岩石基質部に対して逐次的に応力再配分がなされる。この応力再配分に起因して変化した応力分布により、既に亀裂となった潜在面の隣接もしくは近傍にある他の潜在面にて亀裂の発生条件が満足されるなら、これが新たな亀裂の発生となる³⁾。

3. 空洞掘削による局所破壊の室内模型実験による検証

3.1 実験・解析モデル

大規模地下空洞の掘削に伴う周辺地山の局所破壊メカニズムの解明と提案手法の妥当性を検証するために、模型実験及び数値シミュレーションによる比較検討を行う。

本研究では、底面摩擦模型実験装置を用いた実験を行う⁵⁾。この底面摩擦模型実験は、原地盤との相似則をよく満足する定量的実験であり、モデルの変形・破壊挙動を連続的にかつ視覚的に観察することができる。解析は上記に述べた提案手法を用いて行う。

想定した地盤状態を Fig.2 に示す。解析対象は、天盤部が地下約 160m に位置し、高さ 50m、幅 25m、弾頭型の地下発電所で想定した。周辺地山は弾性体とする。実験モデルと解析モデルの幾何スケール $\Lambda=400$ 、応力スケール $\Sigma=17.86$ である⁵⁾。さらに、対象領域の応力拘束状態は、領域境界の応力を外力载荷で表現することより、実地盤内の側圧係数 $K_0=0.6$ とした初期応力状態を再現した後、空洞の掘削は全断面掘削で行う。

岩盤不連続面の分布形態について、まず基礎的検討として、卓越方向を有する不連続面群は、1つとし、規則的で平行なものとす。さらに、不連続面の方向または幅を変換させ、十数パターンで実験および解析を行ったが、本文では三つのパターンについて報告を行う。その三つのパターンの一覧を Table 1 に示す。なお、模型は、

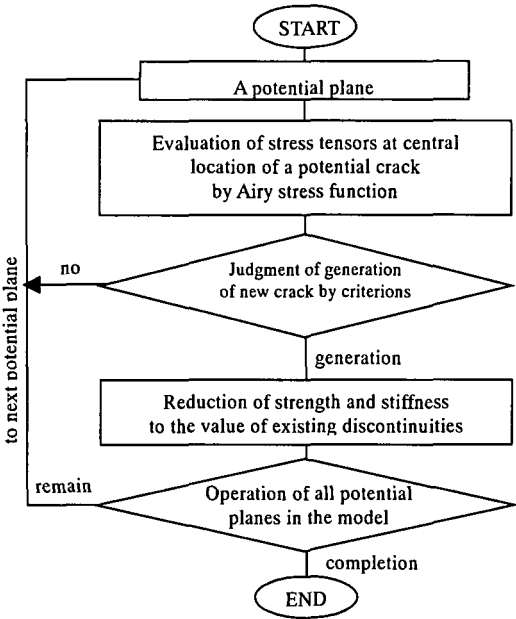


Fig.1 Judgment process of generation of new cracks in jointed rock masses.

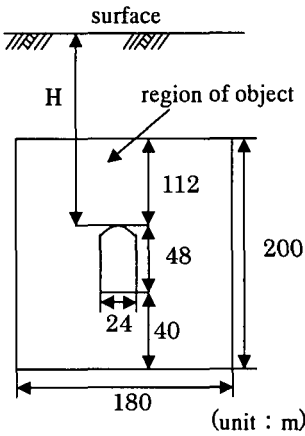


Fig.2 Boundary conditions of model.

今までの供試体作成箱の改良により⁵⁾、供試体幅（2,3,4cm）を変化させることで、様々な不連続面の分布性状を再現できるようにした。配合材料から細長い角柱状に作成整形して、それを模型実験装置上に並べて傾斜した不連続面（層理面）を有する岩盤モデル（45cm×50cm）を作成する（Fig.3 参照、実地盤モデルは 180m×200m である）。

一方、解析モデルは、Fig.3 と同様な範囲を設定した。提案手法を解析モデルに導入するためのプロセスを説明するために、Case-1 を例にとる。まずは、弾塑性解析を行うことにより、塑性領域を把握し、新規亀裂の発生域がこの塑性領域に類似すると考え、潜在面の定義域を決定する。なお、潜在面の方向は主応力ベクトルの分布に基づいて決定し、主軸の方向を一樣と見なせる区域を分ける。せん断破壊を想定するときは最大主応力面から $45^\circ + \phi/2$ で潜在面を定義する。ここで、内部摩擦角 $\phi = 34^\circ$ より得られる破壊角は 62° である。また、引張破壊を想定するときは最大主応力に対して平行と垂直に潜在面を定義する。潜在面の定義域の一例(Case-1)を Fig.4 に示す。Case-2, 3 についても同様な方法で潜在面の定義を行う。

3.2 模型材料及び想定地盤の力学特性

実験模型では、不連続性岩盤のモデル材料として、石膏：石灰：標準砂：水を重量比で 1:3:12:3.61 で配合したものを用いた⁵⁾。実験用供試体は常温で 1 日、100℃の炉乾燥室で 2 日間強制乾燥させて作成した。

インタクト供試体の特性は三軸圧縮試験、一軸圧縮試験、圧裂引張り試験を実施することで求めた。今回の三軸圧縮試験は側圧を 0.1MPa、0.15MPa、0.2MPa の 3 つのパターンに変化させて行った。これをもとに作成したモールの応力円より粘着力 $c = 0.14(\text{MPa})$ 、内部摩擦角 $\phi = 34^\circ$ となった。一軸圧縮試験は 3 回行い、その平均値 $\sigma_c = 0.92(\text{MPa})$ を模型材料の一軸圧縮強度とした。

模型材料の不連続面の力学的特性を適切に把握するために垂直剛性試験、一面せん断試験を行った⁵⁾。改良した一面せん断試験装置(Fig.5)を用いたが、垂直応力制御による一面せん断試験では、せん断面積がせん断過程において一定となるように、下箱（固定）を上箱（せん断移動）より大きく製作した。せん断応力-せん断変位の関

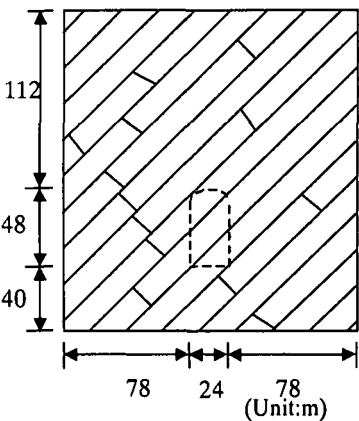


Fig.3 Analytical model(Case-1).

Table 1 Experimental conditions.

Case	1	2	3
Slope angle of joint $\alpha(^{\circ})$	45	60	60
Spacing of joint d (m)	16	16	16, 12, 8

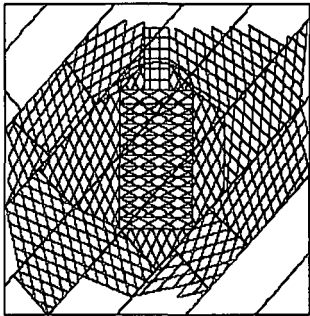


Fig.4 Defining potential planes(Case-1).

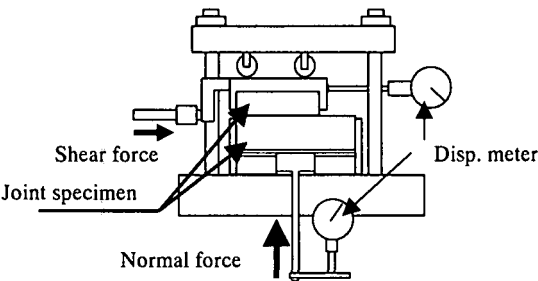


Fig.5 Shear test for experimental material.

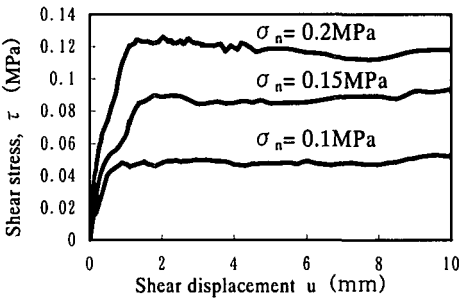


Fig.6 Deformational behavior of rock joint in shear loading.

係は Fig.6 に示す。不連続面のせん断剛性 K_s は各垂直応力における K_s の平均値を用いる。

垂直剛性 K_n を求めるために、垂直せん断試験を行った。Fig.7 に示したように、垂直剛性が非線形性を示すことがわかる。この非線形性を再現するために、Fig.7 に示すように 3 つの区間 (I、II、III 区間) を分けて垂直剛性値を求める ($K_{nI}=260.0$ MPa/m、 $K_{nII}=940.0$ MPa/m、 $K_{nIII}=1880.0$ MPa/m)。これを超える範囲については次の回帰曲線式 (1) を用いて推定する。式中では、 ν は垂直変位を、 σ_n は垂直応力を表す。

$$\sigma_n = -4.302\nu^3 + 7.688\nu^2 - 0.123\nu, \quad R^2=0.9987 \quad (1)$$

解析に必要なインタクト岩石及び不連続面の物性値は、応力相似則に基づき、模型材料の物性値から算出した。結果を Table 2, 3 に示す。

Table 2 Properties of rock mass.

Properties		Value
Density	ρ (g/cm ³)	1.505
Cohesion	C (MPa)	0.143
Friction angle	ϕ (°)	34
Young's modulus	E (MPa)	415.52
Poisson's ratio	ν	0.136
Tension strength	σ_t (MPa)	0.0546

Table 3 Properties of rock joints.

Normal stiffness	K_n (MPa/m)	*
Shear stiffness	K_s (MPa/m)	80.7
Cohesion	c_j (MPa)	0
Friction angle	ϕ_j (°)	31.2
Tension strength	σ_{ij} (MPa)	0

* see Fig.7

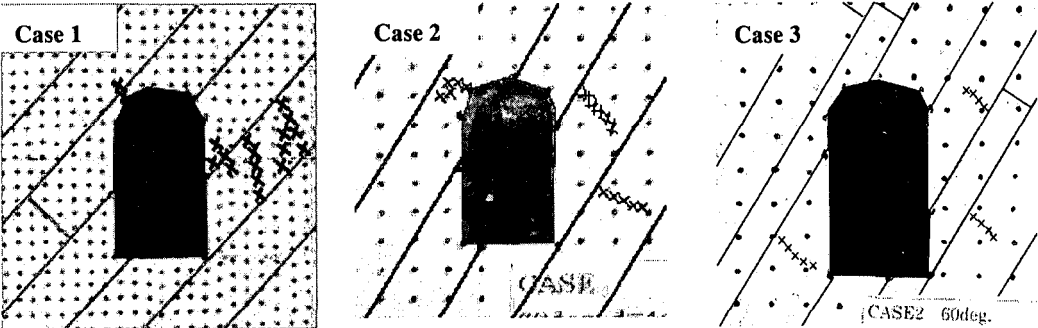


Fig.8 Photographs of new cracks around underground opening.

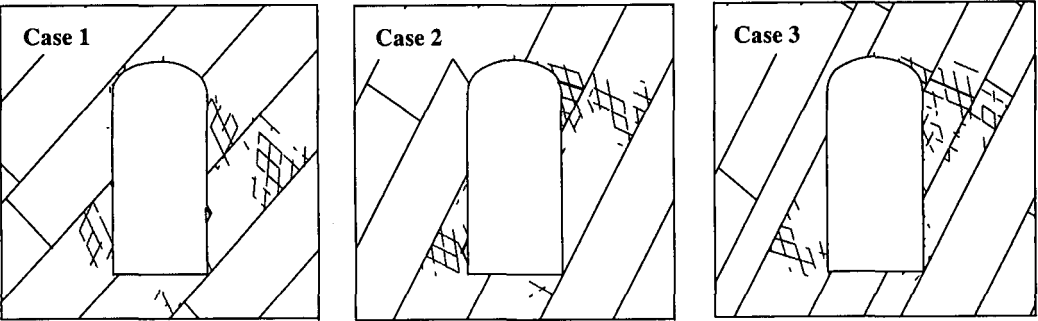


Fig.9 Distribution of new cracks due to excavation.

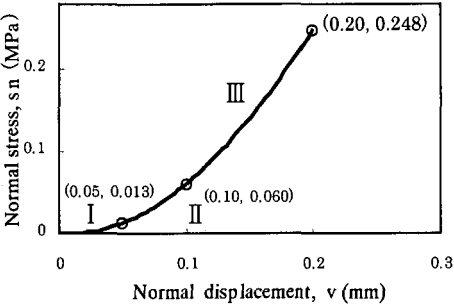


Fig.7 Deformational behavior of rock joint in normal loading.

3.3 実験・解析結果の比較及び検証

実験後の空洞周辺の拡大写真を Fig.8 に示す。図中の×印は、実験後に発生した新規亀裂を、黒い実線は不連続面を表す。また、提案手法を用いた解析結果を Fig.9 に示す。Fig.8,9 を比較検討した結果は、新規亀裂の発生箇所は両者とも概ね類似している。また、今回の解析では、空洞側壁周辺に引張破壊が顕著であり、局所破壊による新しい岩盤ブロックの形成及び滑り傾向を確認できた。亀裂の進展及び発生方向については、実験と解析は全てのケースでほぼ同様な傾向を示した。そこで、本文に示した解析手法の妥当性が検証されたと考える。

4. 大規模地下空洞のベンチカット掘削シミュレーション

4.1 無支保空洞の掘削解析

地下空洞の局所破壊と空洞深度及び不連続面の分布特性との関係を調べるためにシミュレーションを行った。解析モデルを Fig.10 に示す。アーチ部は①中央、②左、③右の順序で掘削する。まず、掘削進行に伴う応力再分布の過程での実態を明らかにするために、無支保状態でアーチ部より順次 16 段ベンチカットにより盤下げを実施した。掘削は、各盤下げにおいて最終的に平衡状態が達成された後、次の盤下げを行った。

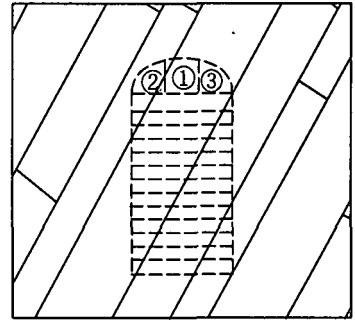


Fig.10 Numerical modeling of bench excavation.

Fig.11 はアーチ部、9 段ベンチ、16 段ベンチ掘削までの解析結果を示す。

三つのケースともに掘削の初期段階では壁面付近のみで新規亀裂が生じるものの、掘削が進むにつれ空洞壁面より離れた位置での局所破壊も確認できた。これは、掘削当初は応力解放により壁面付近で亀裂が発生し、掘削の進行に伴いブロックの滑りなどが関係して壁面から離れた位置でも引張による亀裂が発生したためと考えられる。また、Fig.11(a),(b),(c)を比べて分かるように、局所破壊箇所は不連続面の傾斜方向、位置、間隔などにも大きく影響される。さらに、Fig.11(c)と(d)を代表例として比べてみると、空洞深度が深くなるにつれ、空洞周辺では局所破壊を多く発生することが分かる。

4.2 ボルト支保工による補強効果の考察

大規模地下空洞の安定性に対するロックボルトとケーブルボルト⁷⁾の支保効果について、深度 $H=158\text{m}$ の Case-3 を用いた検討を行う。まず、支保工のパターン①(以後、支保①)として、長さ 5m のロックボルトを 1.5m 間隔で配置し、パターン②(以後、支保②)は空洞右上部と空洞左下部に生じうる局所破壊を考慮して、ボルトの長さを変化させた。ボルトの打設角は空洞壁面に垂直とした。Fig.11(b)と Fig.12, 13 を比べると、亀裂の発生領域に変化が見られ、ボルトの支保効果が確認できた。これはボルトが変形に対し軸力を生じ、新規亀裂の発生と進展に対する抑制効果を発揮したためである。しかし、支保②が支保①と比べ、空洞右側のブロックの滑りをより効果的に抑制できた。一方、支保①と支保②では新規亀裂の発生密度には若干の差が見られ、局所破壊の抑制にボルトの長さが寄与しているものの、亀裂の発生箇所には変化が確認できなかった。

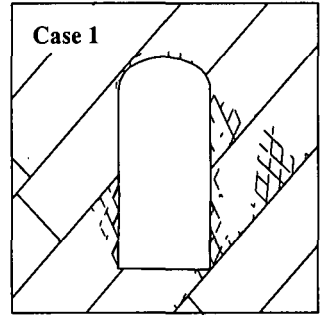
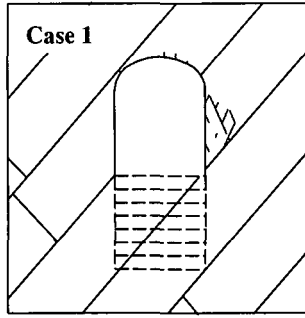
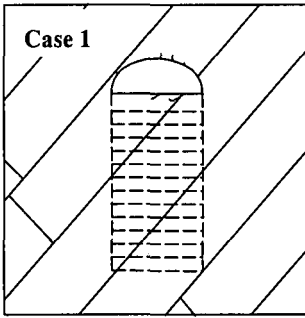
5. おわりに

本研究では既存不連続面のみならず新規亀裂の発生も考慮できる不連続体解析アプローチを提案した。まずは底面摩擦模型実験との比較により、本提案手法における新規亀裂の発生・進展の再現に妥当性を有することが認められた。次に、空洞の深さによる変形挙動や安定性に対する影響効果を主に調べたが、深度が増加するほど局所破壊域の増加傾向が見られ、空洞の壁面より離れた奥部までの亀裂の発生が空洞の変形挙動と安定性に大きく影響を与えることが明らかになった。また、ロックボルトとケーブルボルトは、空洞壁面変位の抑制や局所破壊域の縮減としての支保効果が期待できるが、既存不連続面の分布性状に大きく支配されることが分かる。今後はさらに、ボルトの支保効果と不連続面の分布特性との関係などについて検討して行く予定である。

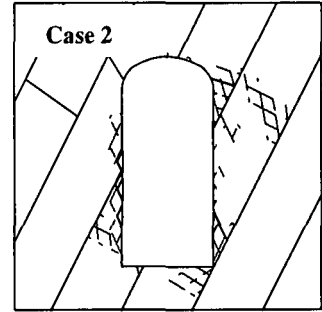
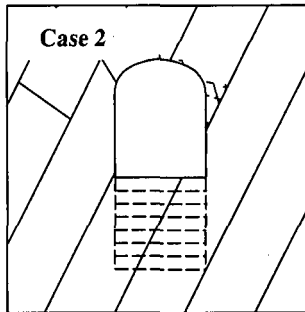
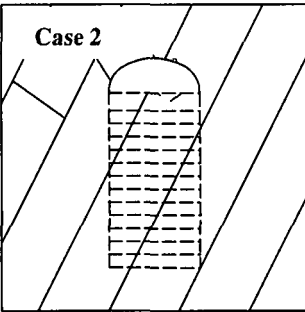
arch portion excavation

9th bench excavation

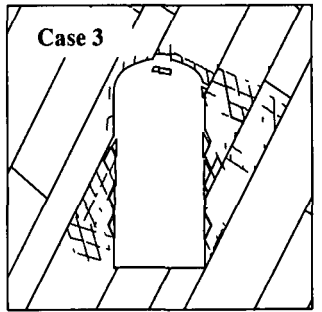
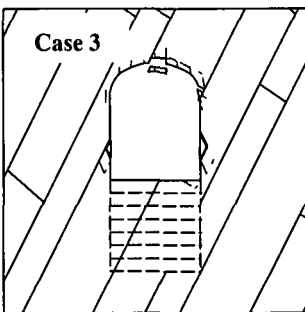
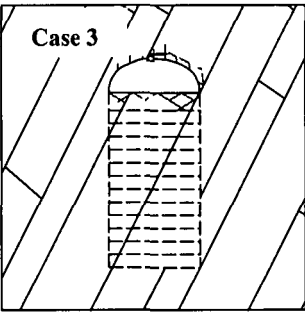
final bench excavation



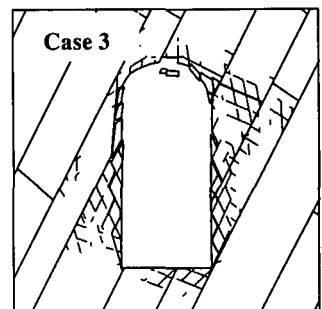
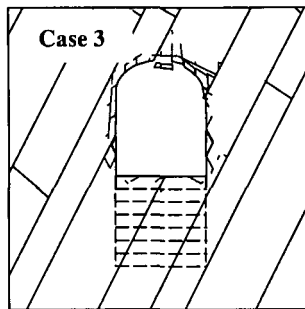
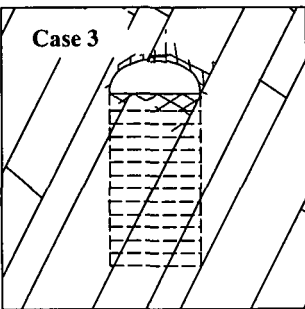
(a) Depth of underground opening(case 1): $H = 158$ m



(b) Depth of underground opening(case 2): $H = 158$ m



(c) Depth of underground opening(case 3): $H = 158$ m



(d) Depth of underground opening(case 3): $H = 262$ m

Fig.11 Generation of new cracks during excavation process.

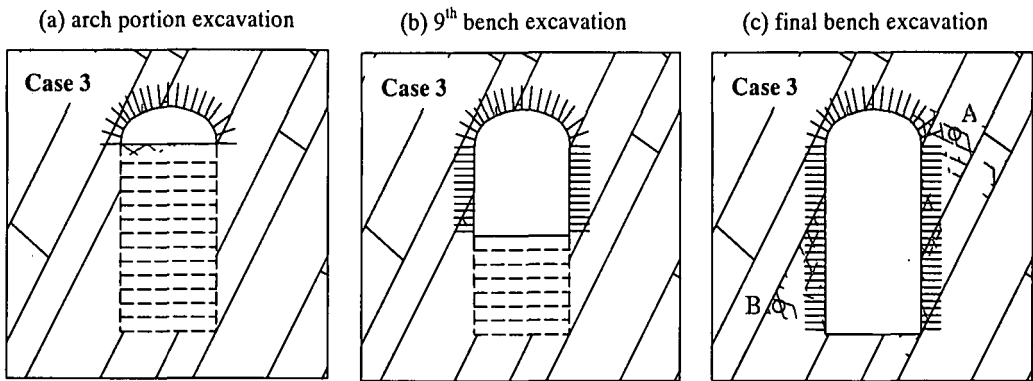


Fig.12 Controlling generation of new cracks by system bolting ①, Depth of underground opening: $H = 158$ m

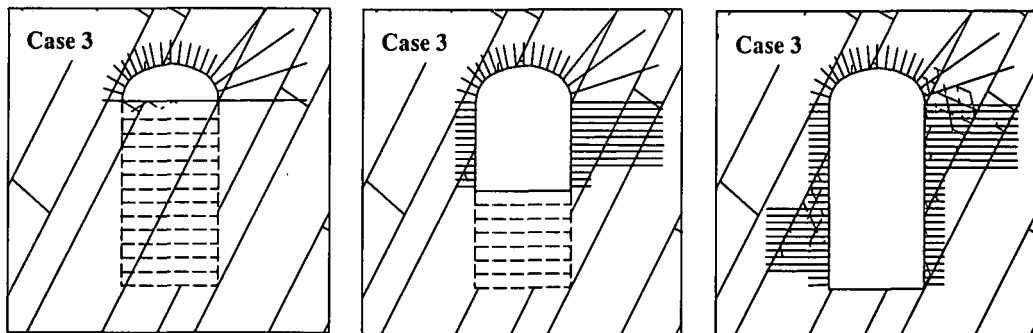


Fig.13 Controlling generation of new cracks by system bolting ②, Depth of underground opening: $H = 158$ m

(A, B : Measurement point) — Shear failure — Tension failure

謝辞：解析と実験に際して、長崎大学大学院生山口耕平氏と平成11年度修了生足立順一氏（現在は西松建設に勤務）に協力を得た。ことに記して感謝の意を表す。

参考文献

1. 吉田次男, 打田靖夫, 平川芳明: 大規模地下空洞掘削時の側壁岩盤挙動の検討, 第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.67-72, 1998.
2. Nakagawa, M., Y. Jiang and T. Esaki: A new modeling of mechanical behaviour of discontinuities for discontinuum analysis, Proc. of the 9th Int. Conf. on Rock Mechanics, Int. Society for Rock Mechanics, pp.943-946, 1999.
3. 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化, 土木学会論文集, No. 631/Ⅲ-48, pp. 397-410, 1999.
4. Jiang, Y., M. Nakagawa and Y. Tanabashi: Modeling Generation and Progress of Crack in Rock Masses, Proc. of Recent Development of Theory & Practice in Geotechnology, JS-HongKong, pp.191-198, 1999.
5. 蔣 宇静, 江崎哲郎, 三谷泰浩: 底面摩擦模型実験による地下空洞の安定評価, 地盤工学会誌「土と基礎」, Vol.46, No.6, pp.21-25, 1998.
6. 蔣 宇静, 中川光雄, 江崎哲郎: 岩盤不連続体解析に必要な不連続面の挙動特性の評価法, 土木学会論文集, No.624/Ⅲ-47, pp.231-243, 1999.
7. 木梨秀雄他: 大規模地下空洞におけるケーブルボルトの支保効果に関する解析的検討, 大林組技術研究所報, No.53, 1996.