

切羽安定対策工に関する解析的考察

ANALYTIC CONSIDERATIONS ON FACE STABILIZATION METHODS

竹林亜夫¹⁾・西崎晶士¹⁾・羽馬 徹²⁾・岡部 正²⁾・

Tuguo TAKEBAYASHI, Shoushi NISHIZAKI, Tohru HABA, Tadashi OKABE

Unstable phenomenon including collapse of face is important problem in tunneling works, and give greater influence to safety of works, construction period and cost. In the past 10 years, face stabilization methods such as umbrella-methods and long length facebolting become spread gradually. Therefore safety of tunnel works nearby unstable face including face collapse was improved, and influence to neighboring structures such as ground surface settlement was decreased. In this paper we analyzed construction examples of umbrella-methods and long length facebolting, and considered by 3-D analytical methods (FEM, FDM). As rock mass condition, to examine plastic zone structure in front of face, FEM has normally used until now. Also under the rock mass condition where wide plasticization occurs as excavation proceeds, effectiveness of various face stabilization methods were examined by FDM which is easier for forepiling-member modeling and has actual records in plasticity analysis.

Key words : tunnel, unstable face, facebolt, forpiling, umbrella-method, 3-D FEM, 3-D FDM

1. はじめに

切羽の崩壊を含む不安定現象は、トンネル工事上の重要な問題で、工事の安全、工期および工事費等に大きな影響をもたらす事がある。最近の十年間で、アンブレラ工法、長尺鏡ボルト等の切羽安定対策工が普及し、切羽崩壊を含む不安定切羽の作業の安全性と地表沈下等の周辺構造物に与える影響も小さく工事の安定性が向上してきて、事例報告も増加している。^{1), 2), 3), 4), 5)}

本文では、アンブレラ工法と長尺鏡ボルトの施工事例を分析し、地山条件の差異による、採用方法の特徴を検討し、その検証を兼ねて、3D- σ とFLAC3Dの2種類の三次元解析(FEM, FDM)による考察を行った。地山条件による切羽前方の塑性領域の形成状態の考察では解析条件をパラメトリックに変化させ多数のケースを解析するため、弾性解析の計算速度に優れた3D- σ を用いた。また、掘削に伴い塑性化するような地山条件下での各種切羽安定対策工の効果の考察においては、切羽安定対策工の多くが線状部材であるため、線状部材のモデル化に適したFLAC3Dを用いた。

2. 切羽安定対策工法の施工事例分析

2.1 アンブレラ工法の事例分析

アンブレラ工法には、イタリアより技術導入したRJFP (Rodin Jet Forpiling) 工法とトレヴィ工法に対して、我が国で技術開発されたAGF (All Ground Fasten) 工法とMJS

表-1 各アンブレラ工法の採用実績⁶⁾

(1999年11月現在)

工 法	最初に採用された現場	採用現場数
RJFP 工法	1989年国分川T	15件
AGF 工法	1992年二つ井T	約400件
トレヴィ工法	1993年舞子T	23件
MJS 工法	1994年小束山T	31件

1) 正会員 清水建設㈱ 土木本部 技術第二部

2) 正会員 ㈱ケー・エフ・シー 技術部 技術開発課 (* トンネル技術室)

(Metro Jet System) 工法があり、最近十年の間に表-1⁹⁾ のように急速に普及している。とくに AGF 工法は、他の工法が専用機械を使用するのに対して、現場でロックボルト打設や発破用穿孔作業に必要な削岩機を使用していることから、採用現場数は多くなっている。平成 10 年度迄の AGF 工法の採用状況を分析した結果、坑口対策が 6～7 割で、残りの 3～4 割はトンネル内の切羽安定対策、地表沈下対策や近接構造物変位対策であり、坑口対策区間は平均 3 シフト (1 シフト長さは通常アンブレラ部材長が 12.5m、トンネル掘削が 9m) 前後で、トンネル内の切羽安定対策等では平均 6～7 シフトである。AGF 工法が採用された現場数を地質条件別に示したものが図-1 で、崖錐堆積物、風化花崗岩、風化砂岩、風化安山岩では、平均 3 シフトで、主に坑口対策工として用いられているのに対して泥岩・頁岩・砂層の互層地山、凝灰岩、粘板岩の地山では平均 6～7 シフトで坑口対策のみならずトンネル内の不良地山区間で用いられている。

アンブレラ工法の中では、シフト数が多い場合では、RJFP 工法やトレヴィ工法が採用されて、専用機で作業能率をあげたり、地表沈下や近接構造物の変位防止のために剛性の大きいアンブレラが施工されている。MJS 工法は直径 3 m 程度の水平方向の地山改良コラムが形成されるために、地表沈下を最小限に留めるなど、条件の厳しい所で採用される傾向にある。またアンブレラ工法だけで切羽が自立しない場合や変位量が大きい場合には長尺鏡ボルトを併用して効果を挙げている工事も増加している。

2. 2 長尺鏡ボルトの事例分析

鏡ボルトは、事前に切羽鏡部前方地山を補強することにより、切羽鏡部の押出しに伴う周辺地山のゆるみを抑制し、トンネル周辺地山の安定性を確保する目的で使用されている。これまでの実績では、3～4 m の短尺鏡ボルトの適用例が多数を占めていたが、最近の施工事例では 5 m 以上、時には 10m を越えるような長尺鏡ボルトの施工実績が増加している傾向にある。この要因としてはトンネルの大断面化、地山条件の悪化、施工の高速化が挙げられ、アンブレラ工法の普及と同時に厳しい地山条件下において、長尺鏡ボルト併用によりトンネル掘削が進められていることがうかがえる。平成 10 年度迄の採用実績を分析した結果、先受け工だけで切羽の安定を確保できない場合に鏡ボルトが併用されている例がほとんどで、長尺鏡ボルト単独による施工例は数少なく、切羽天端の安定性には先受け工、切羽鏡部の安定性を確保するためには、鏡ボルトを使用するケースが多い。

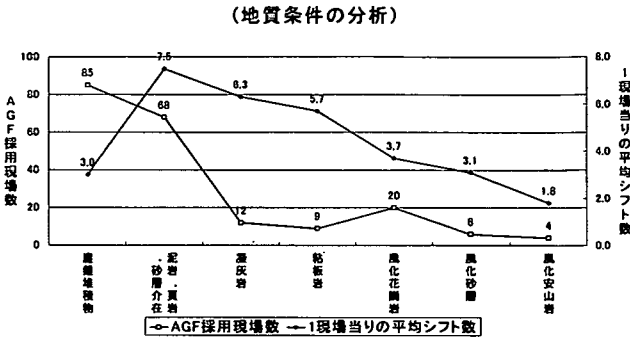


図-1 アンブレラ工法の採用実績

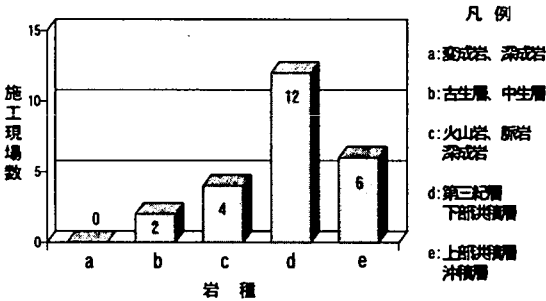


図-2 岩種による分類⁷⁾

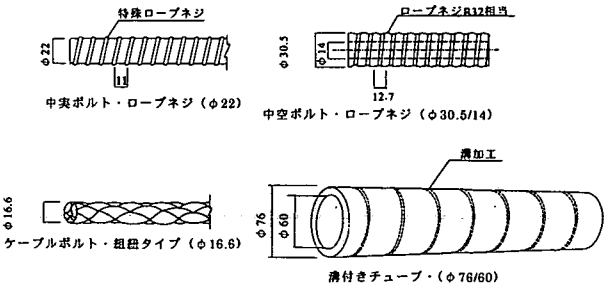


図-3 最近の長尺鏡ボルト (GFRP)

長尺鏡ボルトが適用されている岩種は、図-2に示すように、第三紀層や下部洪積層といった脆弱層においての適用例が多く、最近の適用例についても同様な傾向が見られる。⁷⁾

一般に長尺鏡ボルトに使用される材料は、掘削時において切削が容易で引張り耐力が大きい GFRP 製の中実・中空材、あるいはケーブル材等が採用され(図-3)、長尺部材の効果的な定着方法として、後注入方式により早強性のセメント系注入材料が使用されている。打設密度は、鏡面 1.5~2.25m² 当り 1 本程度が標準的で、概ね、鏡面全体にバランス良く配置するが多いが、天端掘削線から若干下がった位置にリング状に配置するパターンも用いられており本文では、長尺切羽リング部補強工と称する。

削孔機械については、ドリルジャンボによる施工が殆どであるが、孔壁の自立性により削孔機械・使用材料・施工長さ・定着材が選定される。長尺削孔で孔壁が自立しない場合には、専用機による二重管削孔が必要となるため、やむなく施工長さを短くしているケースもこれまでは多かったが、最近では孔壁の自立しにくい地山でもドリルジャンボとロストビットを組み合わせることで長尺鏡ボルトの施工が可能となり、そのような施工事例が増えている。

3. 切羽前方の塑性域の解析的考察

3.1 切羽近傍の塑性域の解析

切羽の安定性は、地下水に関係せず連続体の仮定に近い地山条件の場合は、応力と強度の関係に依存することから、塑性領域の発生状況で評価することとした。そのため、地山強度比と内部摩擦角をパラメータとし、3次元 FEM 弾性解析により得られた応力とモール・クーロンの破壊基準を用いて計算した塑性領域について検討した。⁸⁾

解析モデルは、地山を線形弾性体、掘削トンネルは半径 5m の上半円断面とし、解析領域はトンネル下方に 10D、トンネル側方に 10D をとり、トンネル軸方向は 108m の範囲とし、対称性を利用した 1/2 モデルとした。掘削解析手順としては、掘削長 40m、5m、3m、2m、1m、1m、1m の逐次掘削解析とした。

表-2 解析条件

地山強度比 Gh	単位体積重量 γ (kN/m ³)	土被り H(m)	ポアソン比 ν	初期側圧係数 K	変形係数 E(MPa)
0.3,0.5,0.7,1.0	23	200	0.3	1	E=100q _u

なお、せん断定数については以下の関係式を用いて計算した。

$q_u = Gh * \gamma * H = 2 * c * \cos \phi / (1 - \sin \phi)$ 、ここに q_u : 一軸圧縮強度、 Gh : 地山強度比、 c : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角

3.2 解析結果と考察

切羽前方の塑性領域深さの解析結果を、地山強度比をパラメータとし内部摩擦角を変化させて図化したものを図-4に、地山強度比 0.5、内部摩擦角 0 の場合、支保剛性を変化させた切羽前方および半径方向の塑性領域の深さを図-5に示す。これらの図より以下のことがわかる。

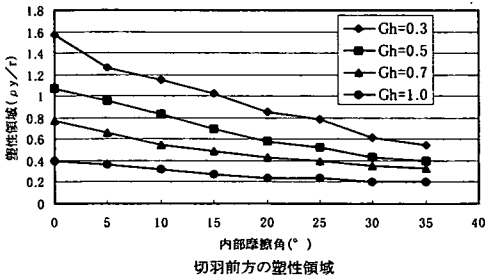


図-4 切羽前方の塑性領域と内部摩擦角の関係

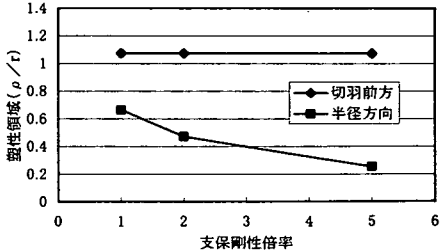


図-5 塑性領域と支保剛性倍率の関係

- ・切羽前方の塑性領域深さは、地山強度比の影響を受け、その程度は内部摩擦角が小さいほど顕著である。
- ・図-5に示されるように、切羽前方の塑性域は半径方向の塑性域より大きい。
- ・半径方向の塑性領域深さは支保剛性の増加に伴い減少するが、切羽前方の塑性領域の深さは、支保剛性に依存しない。

以上の塑性領域深さの解析結果を切羽安定性の評価尺度として、支保工および補助工法と関連させて考察すると以下のようになる。

- ・支保剛性を増加させることは、切羽後方の地山安定化には役立つが、鏡面の安定化には寄与しない。従って、鏡面の安定化のためには切羽前方地山の安定対策として、先受けや鏡ボルト等が必要である。
- ・地山強度比および内部摩擦角が小さな地山では、切羽前方の塑性領域は掘削半径を超えた深度まで達する。このような場合には3m程度の短尺鏡ボルトやフォアボーリングでは塑性領域をカバーできないため、長尺の先受け工や鏡ボルトの施工が必要となる。

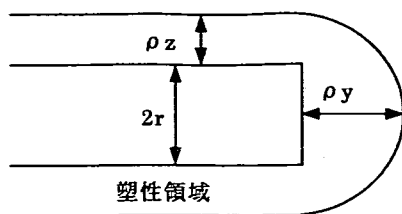


図-6 塑性領域の分布

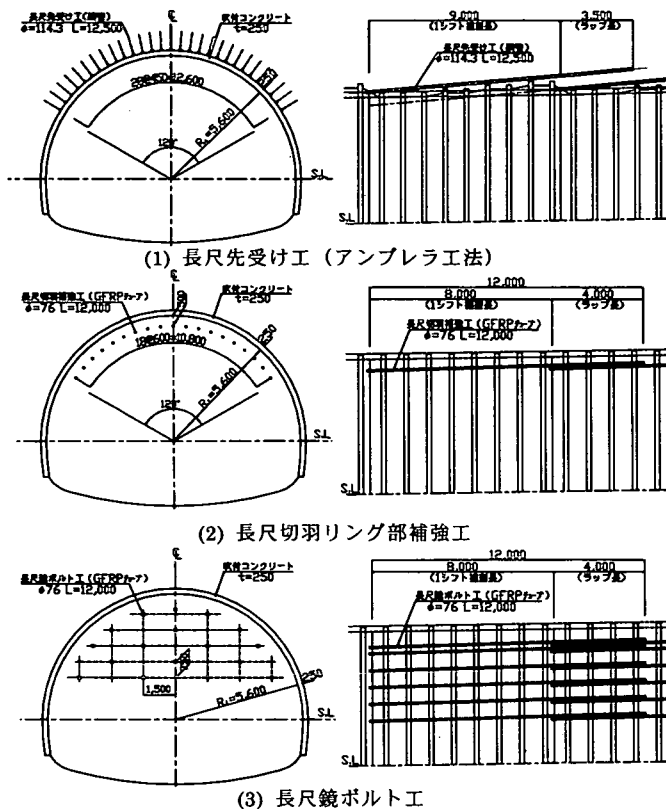


図-7 各種切羽安定対策工の施工

4. 切羽安定対策工の解析的考察

地山強度比、内部摩擦角が小さな地山条件においては、切羽が不安定となるので、切羽安定対策工が必要となる。切羽安定対策工の効果、メカニズムを解析的に把握することを目的とし、3次元FDM解析を行った。

4.1 解析条件

(1) 解析対象とする支保パターン

以下の切羽安定対策工について解析を行う。

- ・長尺先受け工（アンブレラ工法）
- ・長尺切羽リング部補強工
- ・長尺鏡ボルト工

対象とする各種切羽安定対策工の施工概

表-3 入力物性値

	単位体積重量 (γ) KN/m ³ (t/m ³)	弾性係数 (E) MPa (kgf/cm ²)	ポアソン比 (ν)	粘着力 (c) MPa (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (ϕ) °
地山	20 (2.0)	150 (1,500)	0.35	0.06 (0.6)	17

	構造要素	単位体積重量 KN/m ³ (t/m ³)	弾性係数 MPa (kgf/cm ²)	断面積 m ²	断面二次モーメント m ⁴
吹付コンクリート+鋼製支保工	Shell	23.8 (2.38)	8,650 (86,500)	2.50E-01	-
鋼管 (長尺先受け工)	Beam	78 (7.8)	210,000 (2,100,000)	2.03E-03	2.98E-06
GFRPチューブ (長尺切羽リング部、 長尺鏡ボルト)	Beam	17.5 (1.75)	20,000 (200,000)	1.71E-03	1.00E-06

要図を図-7に示す。

(2)入力物性値

地山は切羽安定対策工が必要であると考えられるような、地山強度比、内部摩擦角が小さな地山条件とした（破壊基準は Mohr-Coulomb）。表-3に地山、部材の入力物性値を示す。吹付コンクリート（厚さ 25cm）と鋼製支保工は合成部材としてモデル化を行った。

(3)解析モデル

解析領域を図-8に示す。また境界条件は地表面を自由面、他の面はローラー境界とした。

(4)解析ステップ

解析ステップを図-9に示す。解析における掘削は 22m までを一括掘削、その後 8m を 1m 逐次掘削とした。（上半のみ掘削）

4.2 解析結果

(1)地山変位量

図-10は各種切羽安定対策工について(a)天端沈下量、(b)鏡部押し出し量をプロットしたものである。また、補助工法無しのケースについて比較対象とした。(a)天端沈下量については、補助工法無しに比べ、各種切羽安定対策工を用いた場合は顕著な抑制効果がみられる。各種切羽安定対策工の天端沈下量における抑制効果の程度はほぼ等しい結果となった。(b) 各種切羽安定対策工の天端付近における鏡部の押し出し量としては、ほぼ同程度の抑制効果がみられるが、鏡部全体の変位状況に着目すると、鏡部全体を補強する長尺鏡ボルト工の抑制効果が最も大きく、他のケースとは異なったモードとなっている。

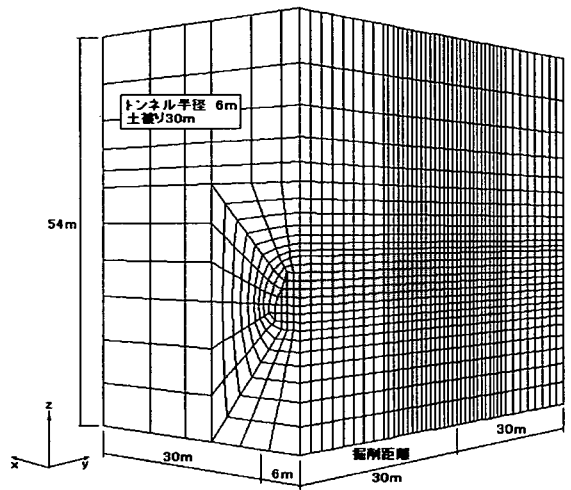


図-8 解析領域

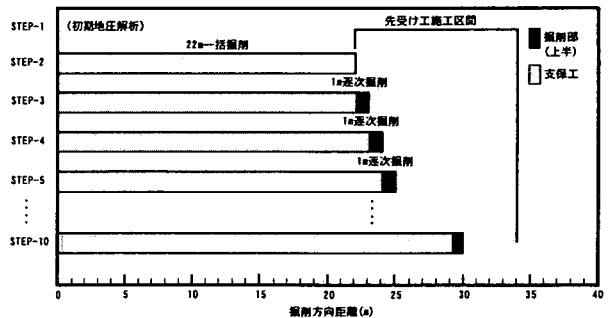
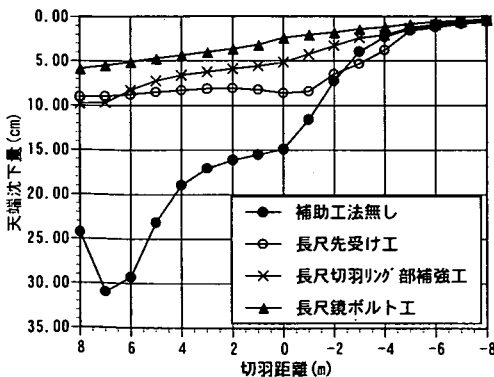
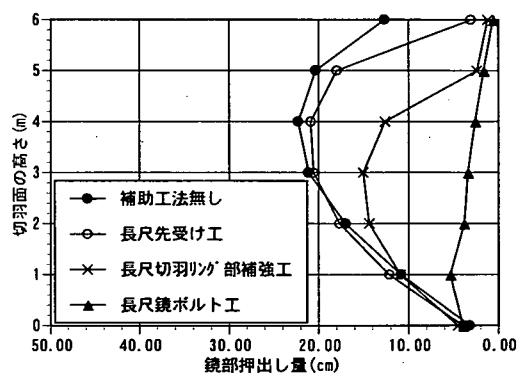


図-9 解析ステップ



(a)天端沈下量(STEP10)



(b)鏡部押し出し量(STEP10)

図-10 地山変位

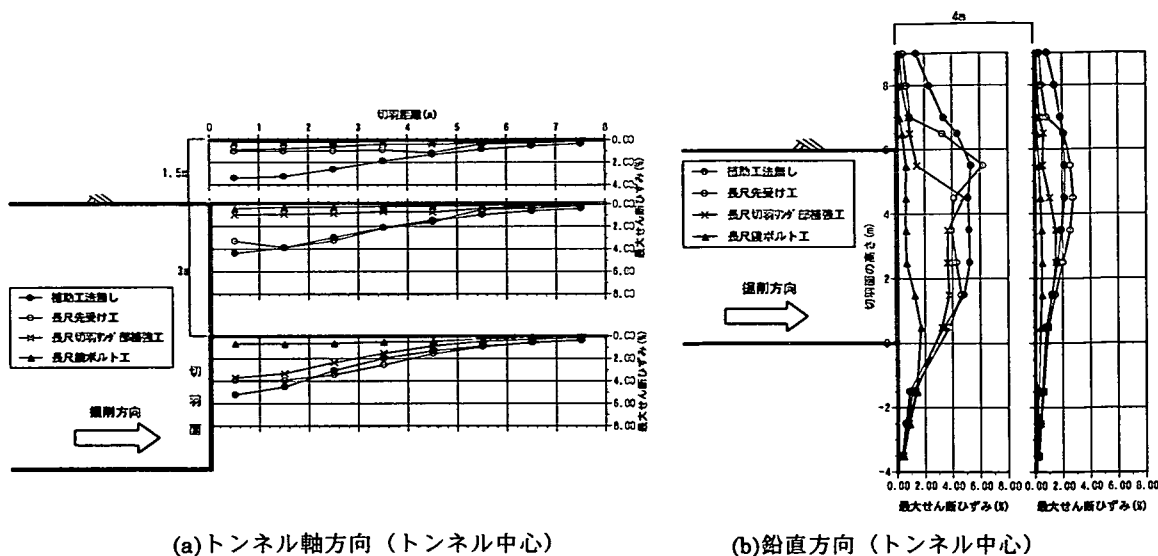


図-11 最大せん断ひずみ量

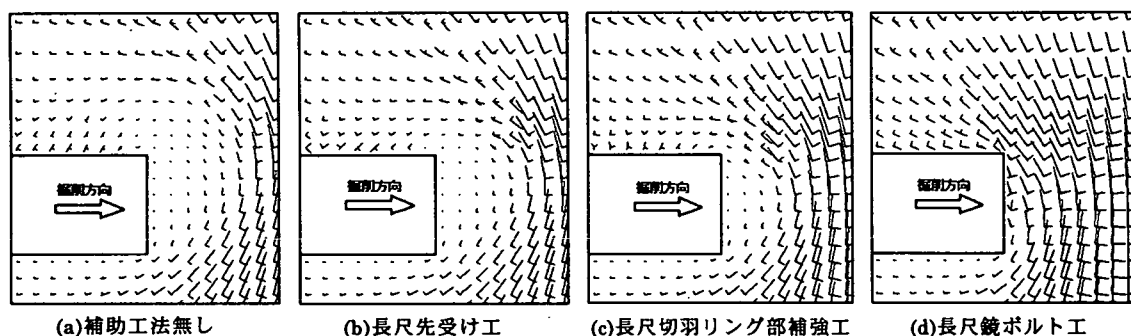


図-12 主応力図

(2)最大せん断ひずみ量

図-11は切羽前方の(a)トンネル軸方向、(b)鉛直方向の最大せん断ひずみ量（トンネル中心）をプロットしたものである。(a)トンネル軸方向については、天端より1.5m上方の軸方向ラインでは補助工法無しと比較して、各種切羽安定対策工を実施した場合の抑制効果が顕著に現れている。鏡部全体を補強していない長尺先受け工、長尺切羽リング部補強工に関しては、部材位置より下のトンネル軸方向ラインにおける最大せん断ひずみの抑制効果は現れていない傾向にある。長尺鏡ボルト工の施工については、切羽応力の解放を抑制し、それに伴い天端上部の最大せん断ひずみが抑制されている傾向を示している。(b)の鉛直方向についても、(a)トンネル軸方向と同様の傾向がみられる。

長尺先受け工が切羽応力の解放による天端上部部の地山挙動を拘束する効果に対し、鏡部に部材配置する工法は解放面を拘束することにより天端上部部を含む周辺地山のゆるみを拘束する効果が高いことが解析的に示されている。

(3)主応力

図-12は各種切羽安定対策工における掘削時の主応力を示したものである。特に長尺鏡ボルト工のケースは切羽周囲の応力解放を抑制し、切羽鏡部以奥の地山応力状態は3軸状態の傾向が示されている。

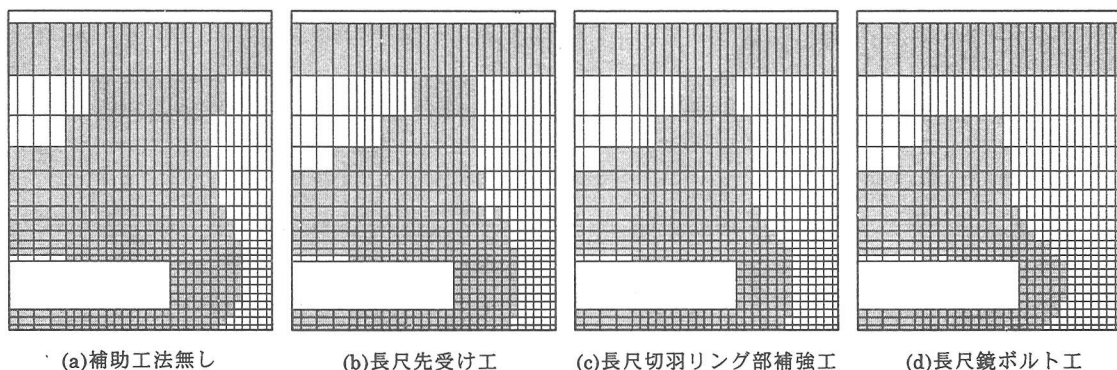


図-13 塑性領域図

(4)塑性領域

図-13は各種切羽安定対策工における掘削時の塑性領域図である。図中の灰色のブロックは塑性領域を示す。本解析の地山条件では内部摩擦角が小さく、地山全体で塑性化しようとする傾向にあるため、全ケースで塑性領域は大きく発生している。このような地山条件においては、各種切羽安定対策工における塑性領域の抑制効果は顕著には現れていないが、補助工法無しのケースに比較して、各々の切羽安定対策工によって切羽上部の塑性領域が抑制されている。長尺錨ボルト工のケースでは、錨前方の塑性領域を抑制する効果が最も高く、切羽上部の塑性化についても大きな抑制効果がみられる。

5. 切羽安定対策工法の効果

前章では、地山強度比および内部摩擦角の小さな地山条件のもとで3次元弾塑性解析を実施し、各種切羽安定対策工法の効果について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・切羽前方地山を先行して拘束する長尺先受け工は、天端上部地山の崩落抑制効果が期待できる。但し、錨部の押出挙動の抑制効果は比較的小さい。
- ・長尺切羽リング部補強工は、錨上部の応力解放を抑制することにより、切羽前方を含めた天端部のゆるみ抑制に効果的である。
- ・長尺錨ボルト工は、錨部の押出挙動を制限することにより、切羽の応力解放の抑制、地山応力状態の3軸応力状態への保持効果があり、切羽周辺地山を安定化させる。また、錨部の押出の抑制は同時に天端沈下も抑制する。

以上検討対象とした補助工法はいずれも切羽前方地山に施工するものであり、切羽前方のコア部の変形拘束が⁹⁾、切羽全体の安定性に大きく寄与することを示している。

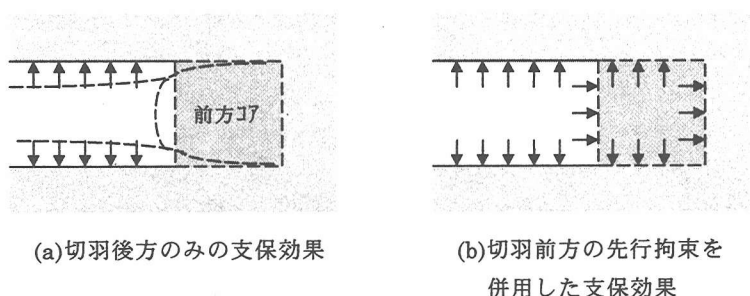


図-14 支保効果のパターン

この結果は、図-14に示すように吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工による切羽後方の支保のみでは鏡面の押出に起因する不安定現象を抑制できない場合でも、切羽前方の先行支保により切羽近傍の安定性を向上させることができることを示すものである。

ただし、以上の結果は地山を理想的な連続体と仮定した解析上の結果であり、必ずしも地山の節理・層理等の不連続性、破碎の程度、湧水の状況等地山の不安定性に関わるあらゆる要因を考慮したものではない。そのため、実施工における切羽安定対策工法の選択・適用にあたってはこの解析で得られた知見だけではなく地山の性状、特性を十分考慮する必要があることは言うまでもない。例えば、解析上では長尺鏡ボルト工は、前方コアの拘束効果が最も高く天端の安定化にも寄与することになっているが、天端で肌落ちの著しい地山では長尺先受け工の併用が必要であろう。

なお、4章の解析で用いた地山条件は、地山強度比として0.3程度を想定したものであり、膨張性地山はもとよりメランジェ構造や付加体等の破碎された粘板岩、頁岩、泥岩および粘土質の断層破碎帯など現実には遭遇する可能性の高いものである。従って、このような地山では切羽前方の変形拘束に期待した地山安定対策工はきわめて効果的な方法と考えられる。

6. おわりに

NATMの都市部や不良地山における施工例の増加に伴い、切羽の安定対策事例が増加してきたことを反映し、長尺先受け工、長尺鏡ボルト工の施工事例について整理・分析し、最近の適用傾向について明らかにした。

次に、地山条件をパラメータとした3次元FEM解析により切羽近傍の塑性領域の発生状況を吟味することにより、通常の支保工の作用効果および鏡面の安定化に対する限界、すなわち、切羽面の安定化のためには先受け工や鏡ボルトなど切羽前方領域に施工する補助工法の必要性を示した。

先受け工法や鏡ボルトなどの切羽安定化対策の効果を解析的に実証するため、3次元FDM解析を用いて各補助工法の力学的挙動特性を明らかにした。

その結果、長尺鏡ボルトが通常期待される鏡面押出しの抑制効果だけではなく、先行変位を含めた天端沈下量の抑制にも大きな効果を持つことが明らかになった。

また、施工例が少ないが、鏡面の周辺部に先行打設する長尺切羽リング部補強工は、先行変位及び天端沈下に対する抑制効果がきわめて大きいことが解析結果として示されたため、掘削断面の拡幅が不必要であり施工性も良い長所を考慮すれば、今後試行する価値があると思われる。

実際の現場における適用にあたっては、地山条件が多様であるため、今回の解析で明らかになった支保特性を参考にして地山状況に応じた最適な組み合わせを選択すれば良いと思われる。

参考文献

- 1) 岡沢、浜村、他：住宅地直下到大断面トンネルをアンブレラ工法で掘る、トンネルと地下、1996.12
- 2) 北里、飯村、他：凝灰岩の変質帯を長尺鏡ボルトで突破、トンネルと地下、1996.12
- 3) 高橋、明道、他：長尺フェースボルトによる坑口切羽対策、トンネルと地下、1997.3
- 4) 城間、江口、他：地すべり地におけるⅡ期線施工、トンネルと地下、1997.12
- 5) 芦屋、渡辺、他：AGFと長尺鏡ボルトで交叉点直下を掘る、トンネルと地下、1998.9
- 6) ジェオフロンテ研究会：アンブレラ工法選定上の要点（改訂版）、1999.12
- 7) ジェオフロンテ研究会：ケーブルボルトに関する調査報告書、1998.11
- 8) 竹林、山本、他：切羽の不安定現象の分類と対策に関する考察、トンネル工学研究発表会 1999.11
- 9) P.Lunardi：The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, T&T international, 2000.5