

山岳トンネルにおける変形制御型支保の 適用検討と開発

岡田 侑子^{1*}・岩野 圭太¹・伊達 健介¹・横田 泰宏¹・小泉 悠²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²鹿島建設株式会社 東北支店 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27)

*E-mail: okadyuko@kajima.com

大土被りによる高地圧や膨張性地山などの大変形トンネルへの対策として、海外のトンネルや鉱山では、あえて地山の変形を許すことで支保に作用する土圧を軽減させる“変形追従型”の支保技術が採用される事例が見られる。国内においては、多重支保で剛に抵抗する手法がよく用いられているが、今後の大土被り地山で予想以上の大変形が生じた場合の対策として変形追従型支保を検討しておく必要がある。そこで、まずロックボルトに着目し、海外製の変形追従型支保を参考に、新たに変形を制御することが可能な“変形制御型”ロックボルトを開発した。また、地山条件に応じた変形制御型支保の適用性を2次元FEM解析を用いて検討した。

Key Words : tunnel liner design, yield control support, rockbolt, analysis, 2DFEM

1. はじめに

大土被りによる高地圧や膨張性地山においてトンネルを施工する場合、掘削時に地山が大きく変形し通常の支保では強大な地圧に抵抗することが困難となる可能性がある。そのような地山に対して、国内では、剛性の高い支保を二重・三重に建て込んで、剛な力で地圧に抵抗する多重支保がよく適用されている。一方、海外のトンネルや鉱山では、支保に作用する地圧を低減させるため、地山の変位を許容・制御しながら掘削する事例が見られる¹⁾(図-1)。国内においても、今後の大土被りトンネルで予想以上の大変形が生じた場合の対策として変形追従型支保を検討しておく必要がある。

一般に、変形を許すことのできる支保は“可縮支保”と呼ばれているが、本稿では、その中でも変形に追従す

るのみのものを“変形追従型”と呼び、さらに変形追従量を制御できるものを“変形制御型”と呼ぶこととする。

(1) 変形追従型支保技術の海外動向

海外の特に欧州においては、変形追従型支保が採用された事例が複数あり、いずれも大変形が生じた地山に対して導入されている。一方、国内においても1980年代に同種の支保部材の一部が試験的に導入されたが²⁾、近年では適用された事例はほとんどない。その間も、海外においては、変形に追従し高地圧にも抵抗できる新しい変形追従型の支保技術の開発が進められてきた。

(2) 変形追従型支保の構成

海外で適用されている変形追従型支保は、例えば、スライドすることで周長が縮む鋼製支保工と、柔らかいス

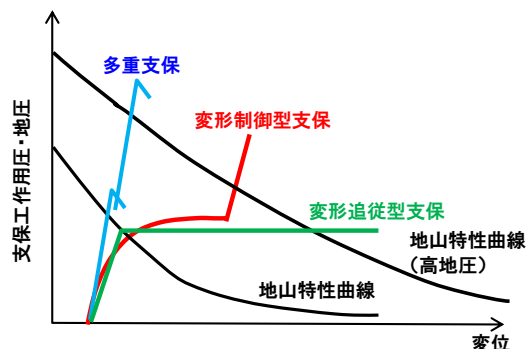


図-1 地山応答曲線と支保応答曲線

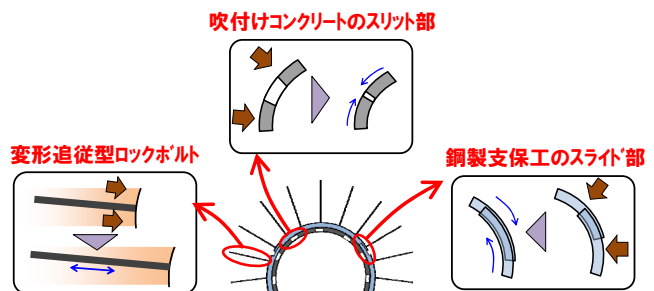


図-2 変形追従型支保の構成

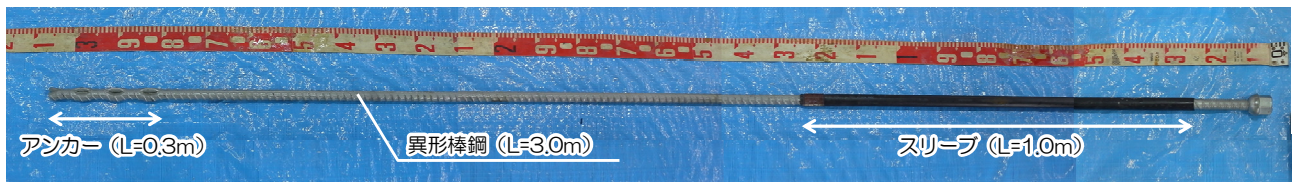


図-3 Secura bolt

リットを部分的に挟んだ吹付けコンクリートとで構成されている（図-2）。鋼製支保工がスライドすると同時に吹付けのスリット部が優先的に圧潰することで変形に追従することができる。鉱山では、鋼材が伸びることで変形に追従するロックボルトも開発されている。ただし、設計方法は未確立で、使用材料も各国において多種多様である。そこで、まずは、海外製の変形追従型ロックボルトに着目し、その引抜きメカニズムを確認した。

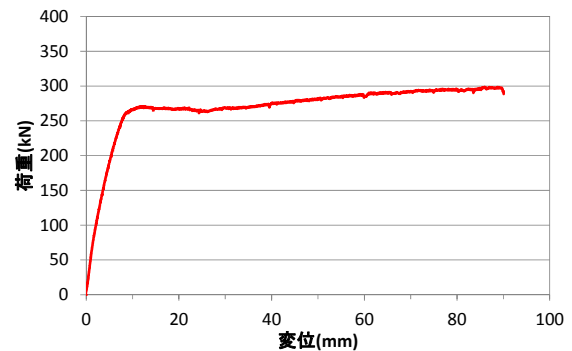


図-4 荷重 - 変位曲線（Securaボルト）

2. 海外の変形追従型ロックボルトの基本性能

(1) ロックボルト構造の概要

海外で用いられている変形追従性ロックボルトの構造とその引抜きメカニズムを把握することを目的に、Orica社製Secura ボルト（図-3）を調達した。Securaボルトは、全長3.0m、 $\phi 23.5\text{mm}$ の異形棒鋼で口元側から約1.0mはプラスチックスリーブで被覆されている。これはボルトと定着材のモルタルとを縁切りするため、この区間の鋼材が伸びることで変形に追従することができる。また、先端約30cmには複雑な溝形状が施されており、アンカーの役目を果たす機構を有している。

(2) 室内引抜試験

地山を模擬した長さ約3mの鋼管にSecuraボルトを挿入し、モルタルで全面定着させた。モルタルを14日間養生（＝モルタル強度30MPa）した後、引抜試験を実施した。試験の結果得られた荷重 - 変位曲線（図-4）は、バイリニアな支保挙動を示しており、高い抵抗力を保ったまま約90mmの変形まで追従できることを確認した。Securaボルトは大変形を許すことが可能であることが確認できたが、これでは変形を助長するのみで、変形を許しすぎて地山が緩んでしまう恐れもある。

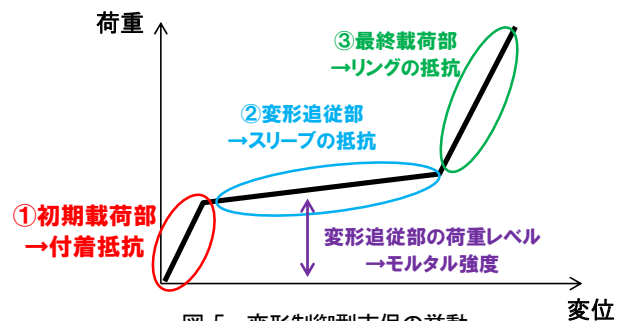
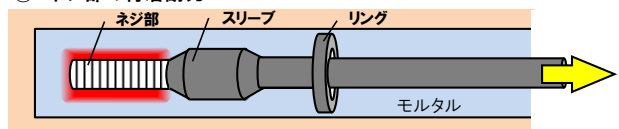
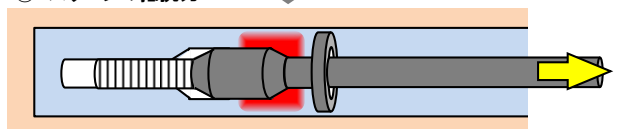


図-5 変形制御型支保の挙動

① ネジ部の付着耐力



② スリーブの抵抗力



③ リングの抵抗力

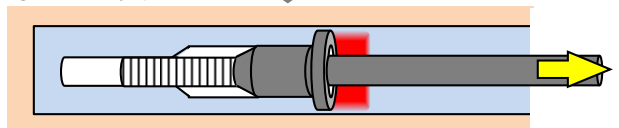


図-6 引抜き時のメカニズム

(1) 変形制御型ロックボルトの構成

変形制御型ロックボルトは、丸棒とスリーブ、全ネジボルトを組み合わせた1本のボルトと、リングの2つの部材から構成されている。このロックボルトの荷重 - 変位曲線は、図-5に示すように①初期載荷部、②変形追従部、③最終載荷部に分かれ、それぞれの挙動は①ネジ部のモルタル付着耐力、②スリーブのモルタル内移動に伴う抵抗力、③スリーブがリングに当たった後のリングの抵抗力が担う（図-6）。また、変形追従部の荷重レベルは、

3. 新しい変形制御型ロックボルトのコンセプト

そこで、筆者らは、変形に追従するが、ある一定の変位に達すると変位を抑制する“変形制御型ロックボルト”を開発した。これにより、トリリニアな変形挙動を再現することができ、地山条件に応じて適切な変形量をコントロールすることができる。

表-1 試験ケース（プロトタイプ L=75cm）

No.	ボルト長さ	リング	ねじ長	モルタル強度
1本目	全長750mm (定着長500mm)	なし	150mm	10MPa
2本目		丸リング(変形許容量30mm)		
3本目		切欠きリング(変形許容量30mm)		

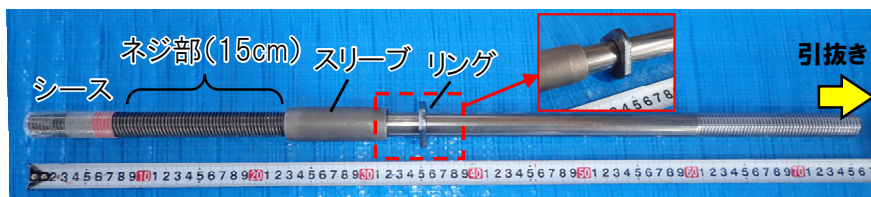


図-7 変形制御型ロックボルト

モルタルの強度で調整することができる。したがって、荷重 - 変位曲線は、ネジの長さ（＝初期載荷部の最大荷重）、スリーブとリングの相対距離（＝変形追従部の変位区間長）、モルタル強度（＝変形追従部の荷重レベル）によりその形を任意に調節することができる。

4. 変形制御型ロックボルトの引抜試験

変形制御型ロックボルトの引抜挙動を確認するため、まずは長さが75cmのプロトタイプを製作し、引抜試験を行った。このとき、地山を模擬する鋼管は半割れ状になっており、試験後に解体しモルタル状況を確認することができる。さらに、長さが3mのボルトを用いて、現場施工を想定した挿入試験と室内引抜試験を実施した。

(1) プロトタイプ（L=75cm）の室内引抜試験

a) 試験概要

長さ75cmの変形制御型ロックボルト（図-7）を製作し、室内引抜試験を行った。試験ケースは表-1に示した3通りの条件（リングなし、円形リング、切欠きリング）について行った。切欠きリングについては、実施工ではモルタル充填後にボルトを挿入することを想定し、リング周辺のモルタル充填性を考慮して採用したものである。ボルト長は定着長で50cmとし、モルタル強度は一軸圧縮強度10MPaとなるよう調整した。また、スリーブとリングの間を3cm（＝変形許容量）とし、ネジ部の長さを15 cmに設定した。試験装置の関係で載荷荷重が180kNまたは変位が80mmに到達するいずれか早い条件で試験を終了した。

b) 試験結果

引抜き試験の結果（荷重 - 変位曲線）を図-8に示す。いずれのケースも初期荷重として70～80kN程度を示した後、変形追従部に移行している。その後1本目（リングなし）は少しずつ荷重が上昇しつつ変位追従部が継続していくが、2、3本目は変位30mm付近から最終変位部に移行していることが分かる。また、切欠きリング（3本目）は、やや最終変位部の移行が遅いものの、ほぼ円

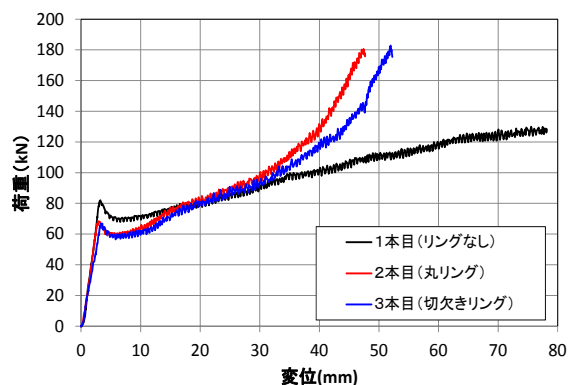


図-8 荷重 - 変位曲線（プロトタイプ L=75cm）



図-9 試験後の試験体（2本目）

形リング（2本目）と同等の挙動を示すことが分かった。図-9に試験終了後、地山を模擬した半割れ鋼管を外し解体した供試体（2本目）を示す。初期荷重部におけるネジ部の付着切れ後、その後スリーブがモルタルを押し潰しながら移動し、同部分のモルタルが圧密で水分が絞り出され、最終的にリングに当たっている状況が確認できた。

(2) 施工性の確認（室内挿入試験）

a) 試験概要

現場で施工することを想定し、モルタル充填後の孔へのボルトの挿入性の確認試験を実施した（図-10）。地山を模擬したクリア塩ビ管にモルタルを注入した後、3mのロックボルトを挿入した。1日養生後に半割れ状に

表-2 試験ケース (L=3m)

No.	ボルト長さ	リング	ねじ長	モルタル強度
1本目	全長3000mm (定着長2912mm)	丸リング(変形許容量30mm)	205mm	10MPa
2本目		丸リング(変形許容量100mm)		
3本目		丸リング(変形許容量30mm)		30MPa

解体し、ネジ部やリング裏へのモルタル充填状況を確認した。モルタルは、通常現場で用いられる基準値（フロー値 $150\pm 20\text{mm}$ ）を満たすものを使用した。

b) 試験結果

3本とも1～2名の人力で挿入できることが確認できた。また、ネジ部やリング裏には密にモルタルが充填されていることが確認でき、現場においても問題なく施工可能であることを示すことができた。



図-10 挿入試験の様子

(3) L=3mのボルト室内引抜試験

a) 試験概要

トンネルのパターンボルトとしてよく用いられる長さ3mのボルトでもプロトタイプと同様の支保挙動を得られるか確認するため、3mの変形制御型ロックボルトを製作し、室内引抜試験を行った。試験ケースを表-3に示す。モルタル強度10MPaでは変形許容量3cm、10cmとし、モルタル強度30MPaでは変形許容量3cmに設定した。

b) 試験結果

プロトタイプと同様に、リングの位置によって変形をコントロールできていることがわかった（図-11）。さらに、モルタル強度10MPaの若材齢では変形に追従し、モルタル強度30MPaでは通常のボルトと同様の荷重-変位曲線をたどることが分かった。モルタル強度が30MPaの場合においても、ネジ長を短く調整することで変形追従型の挙動を示すと考えられる。この結果から、現場施工の3mボルトにおいてもリングの位置を調節することで変位量を制御でき、大変形にも対応できるボルトであることが確認できた。

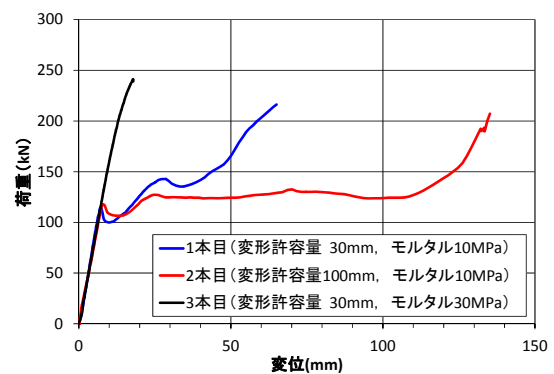


図-11 荷重 - 変位曲線 (L=3m)

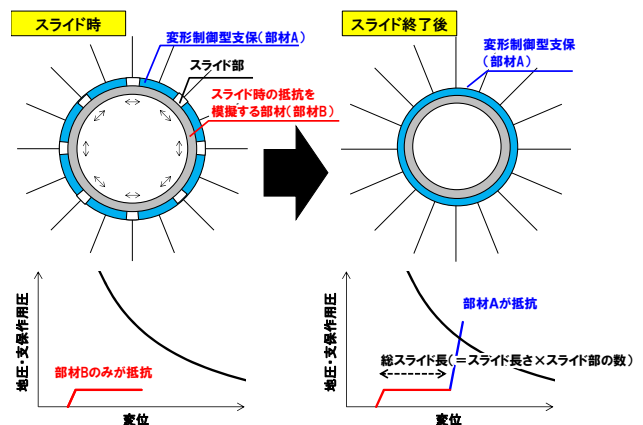


図-12 変形制御型支保のモデル化

5. 2次元FEM解析による検討

ボルトのみの検討にとどまらず、吹き付けコンクリートや鋼製支保工を含んだトンネル支保全体としての変形追従型支保の適用条件を検討する必要がある。そこで、2次元FEMを用いて変形制御型支保をモデル化し、地山条件に応じた支保の適用性を整理した。

(1) 解析モデル

トンネル形状は直径10mの円形とし、上下に3D (Dはトンネルの直径を表す) の解析領域を確保した。初期地

圧は土被り圧相当とし、応力を開放することでトンネル掘削に伴う周辺地山の挙動を再現した。地山は、Mohr-Coulombの降伏条件に基づいた弾完全塑性モデルとした。支保は二重支保と変形制御型支保の2種類とした。なお、今回使用したソフトでは変形追従部を設ける等のオプションが無かったため、2つの部材を組み合わせることで変形制御型支保のトリリニアな支保挙動を再現した（図-12）。まず1つめの部材（A）は、ある一定量縮むことのできるスライド部を有した部材である。ただし、縮ん

でいる間は支保力を発揮しなかったため、支保が縮む間の抵抗を模擬する部材（B）を追加した。二重支保は一次支保を切羽で建て込むこととし、二次支保を0.5D後方で建て込むこととした。変形制御型支保は切羽で建て込むこととした。

(2) 解析ケース

検討ケースを表-3に示す。地山条件はCⅡとDⅠの2種類とし、それぞれ土被りを500m、800m、1000mと変化させた。支保は大きく分けて二重支保と変形制御型支保の2種類である。二重支保は支保の規格を軽いものから重いものまで3種類検討したのに対して、変形制御型支保は支保の規格2通りに対してさらに総スライド長（トンネル周方向の縮み量の和）を3通り変化させた計6種類を検討した。

全54ケース（①～⑮×土被り3パターン）についてパラスタを行い、支保の応力照査と変位量の整理を行った。

(3) 解析結果

支保の応力照査として、吹き付けコンクリートの最大応

力、変位量の代表値として天端沈下量を評価した。全ケースにおける評価結果を図-13に示す。なお、吹き付けコンクリートの圧縮応力の許容値に対する安全率SFが1.5以上の場合を◎（図中緑色の範囲）とし、1.0以上1.5未満を○（図中黄色の範囲）、1.0未満を×（図中赤色の範囲）としている。ここではCⅡ地山で土被りが800mの場合（図-14）を例にとってみると、二重支保では最も剛な支保でも一次支保が○の範囲に入っている。これでは一次支保に相当な応力がかかってしまう懸念がある。一方、変形制御型支保は◎の範囲で高い健全性を確保することができる。ただし、二重支保に比べて変形制御型支保の方が変位が1.5倍程度大きくなる傾向があるため、設計余裕量をさらに大きく確保する必要がある。また、吹き付け応力が零の点については、スライド部が縮まりきる前に地山が安定していることを表しており、適切なスライド長を設定することが重要であることを示している。

これと同じ要領で、吹き付けコンクリートの圧縮応力の許容値に対する安全率SFを表-4に整理した。CⅡ地山で土被り500m程度では二重支保①でも◎となり十分に対応することができるが、逆に変形制御型支保にすると

表-3 解析ケース

地山条件		支保条件									
地山	土被り	No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
CⅡ	500m	支保の種類	二重支保			変形制御型支保					
		鋼製支保工	H125-H125	H200-H125	H200-H200	H125			H150		
		吹き付けコンクリート (cm)	15-15	25-20	25-25	15			20		
		総スライド長 (mm)	-	-	-	400	600	800	400	600	800
		ロックボルト (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
DⅠ	500m	支保の種類	二重支保			変形制御型支保					
		支保規格	H125-H125	H200-H125	H200-H200	H150			H200		
		吹き付けコンクリート (cm)	15-15	25-20	25-25	20			25		
		総スライド長 (mm)	-	-	-	800	1000	1800	800	1000	1800
		ロックボルト (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3

※□-□は、「1次支保」-「2次支保」を示す。

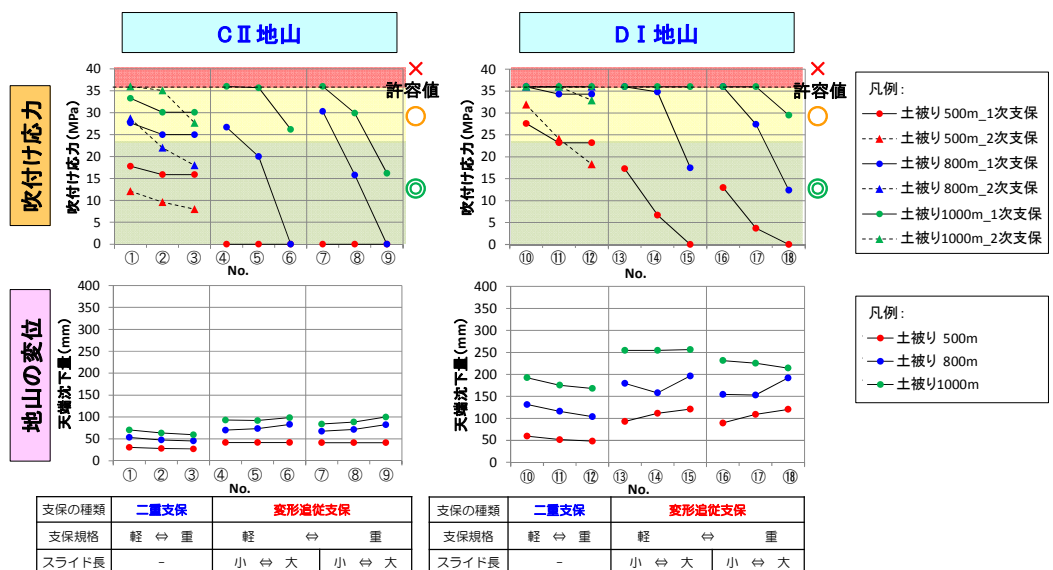


図-13解析結果（吹き付け応力、天端沈下量）

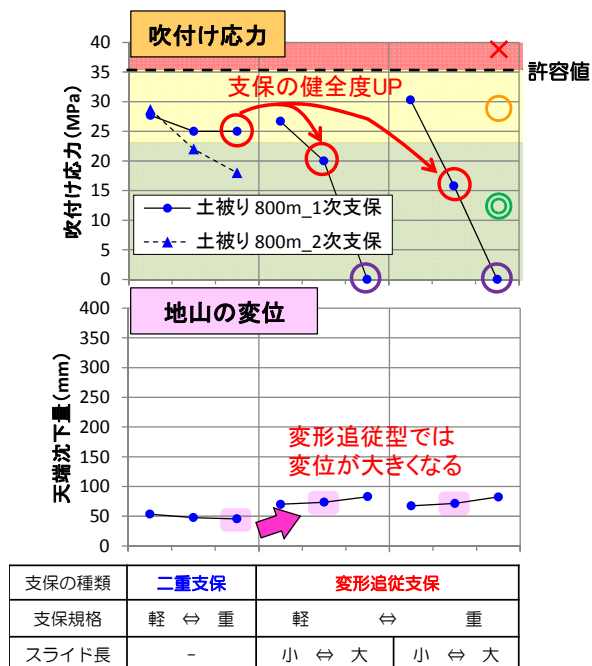


図-14 解析結果 (CII地山, 土被り800mの場合)

表-15 支保の安全率

支保の種類		二重支保		変形追従型支保					
支保規格		軽 ⇄ 重		軽 ⇄ 重		軽 ⇄ 重		軽 ⇄ 重	
スライド長 (mm)		-		小 ⇄ 大		小 ⇄ 大		小 ⇄ 大	
地山	土被り	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
C II	500m	◎	◎	◎	-	-	-	-	-
	800m	○	◎	◎	○	◎	-	○	◎
	1,000m	×	○	○	×	○	○	×	○
地山	土被り	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰
D I	500m	○	○	○	◎	◎	-	◎	◎
	800m	×	×	×	×	○	◎	×	◎
	1,000m	×	×	×	×	×	×	×	○

<凡例>安全率SF=σc/36
 ◎: SF ≥ 1.5 ×: 1.0 > SF
 ○: 1.5 > SF ≥ 1.0 -: スライド部が閉塞せず

④～⑨全てでスライド部が縮まりきらない結果になった。一方, D I 地山で土被りが800m以上になると, 二重支保

では⑩～⑫全てで×となり抵抗することができない結果となったが, 変形制御型支保では⑮や⑯で1800mm程度変位させることで, 地山と支保を安定させることができた。したがって, 土被りが500m程度の場合には, 二重支保の方が支保の健全度を確保しつつ変位を抑制することができるため, 剛に抵抗することが効果的である。一方で, 土被りが800m以上で特に地山条件が悪い場合には, 変形制御型支保で変形を許容する方が支保を安定させることができ, 1800mm程度のスライド許容長が適切である結果となった。

6. おわりに

本稿では, まず最初に海外で用いられている変形追従型ロックボルトの挙動を参考とし, これまでは変形に追従するのみであったロックボルトに対して変形を任意に調整可能な変形制御型ロックボルトを開発し, その変形挙動を室内引抜試験で確認した。今後は, 現場試験にて施工性と引抜特性を確認し, 実適用につなげていく予定である。また, 2次元FEM解析を用いて地山条件に応じた変形制御型支保の適用性を整理した。地山条件が悪く特に土被りが800m以上の大土被りの場合には, 多重支保と併せて変形制御型支保の検討も進めておくべきであると言える。今後は3次元FEMを用いてより詳細な検討を進め, 変形追従部の配置やその変形量について具体的に検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) K.Kovári : DESIGN METHODS WITH YIELDING SUPPORT IN SQUEEZING AND SWELLING ROCKS, World Tunnel Congress 2009, 2009.
- 2) 伊藤好人, 恵那山トンネル長平沢断層における NATM の設計, 施工, トンネルと地下, 第14巻, 2号, pp7-14 (1983)

DEVELOPMENT OF A NEW YIELD CONTROL ROCKBOLT AND ANALYSIS OF A YIELD CONTROL SUPPORT SYSTEM

Yuko OKADA, Keita IWANO, Kensuke DATE and Yasuhiro YOKOTA, Yu KOIZUMI

Yield control support system is applied in Europe, when tunnel lining in difficult condition with severely high overburden. On the other hand, Multiple support which has high rigidity used in Japan. It need to consider applicability of yield control support system in Japan. Therefore, we focus on energy absorbing bolt. But it is only allow high deformable, best system is that control deformability. Therefore, we developed a new yield control rockbolt which control high deformability. Furthermore numerical analyse are discussed to find out possible optimizations of the support system adopted.