

大土被りトンネルにおける 変位制御型段階式二重支保工の開発

北村 義宜¹・横田 泰宏²・伊達 健介³・小泉 悠⁴・宇津野 衛⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)
E-mail: y-kitamura@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒449-269 80 Marine Parade Road, Singapore)
E-mail: y.yokota@kajima.com.sg

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒449-269 80 Marine Parade Road, Singapore)
E-mail: k.date@kajima.com.sg

⁴正会員 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)
E-mail: koizumyu@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)
E-mail: utsuno@kajima.com

大土被りや膨張性地山においてトンネルを掘削する場合、緩みの増大が支保耐力を上回る荷重となってトンネルに作用するため、緩みや変位の制御が重要となる。このような地山に対して、国内では、①先進導坑掘削による切羽安定と本坑支保の軽減、②二重支保工による剛なリングでの変位制御などにより対応してきたが、土被りや地質状況によってはこれらのみでは対処できない可能性がある。一方、海外の大土被りトンネルでは、地山の變形に追従することで支保に作用する土圧を軽減させる可縮支保工が採用される事例が増えているが、過度に地山の變形を許容すれば地山を必要以上に緩めてしまうことが懸念される。著者らは變形に追従できるが、一定量以上の変位は制限する「変位制御型二重支保工」の開発に取り組んでいる。本報告では「変位制御型二重支保工」の概念を示すとともに、新しい吹付けコンクリート・鋼製支保工・ロックボルトのコンセプトと主に実験検討結果について報告する。

Key Words : *high overburden, squeezing rock, expansive rock, deformation-controlled support, double layer support*

1. はじめに

大土被りや膨張性地山にてトンネルを施工する際、緩みの増大が瞬く間に支保耐力を上回る荷重となってトンネルに作用し、支保が脆性的に破壊する可能性がある。このような地山条件においてトンネルの掘進を継続するためには、地山の緩みや変位制御が重要になる。このような地山に対して国内では、①先進導坑掘削による切羽安定と本坑支保の軽減、②二重支保工による剛なリングでの変位制御などにより対応が行われてきたが、過去に経験のない程度の大きな土被りや著しい膨張性を有する地山を掘削する際には、既存の方法では対処できなくなることが想定される。このため筆者らは、外側支保工を可縮構造として変位を許容・制御しながら、内側に可縮

構造を有しない通常の支保工を構築する変位制御型段階式二重支保工の開発に取り組んでいる。

本報文では、筆者らが考える変位制御型段階式二重支保工の概念を示すとともに、可縮特性を有する新しい吹付けコンクリート、鋼製支保工およびロックボルトの開発コンセプトとこれらの支保部材に関する各種の室内試験や数値解析結果について報告する。

2. 欧州における可縮支保工の適用事例

欧州では、主要都市間を接続する高速鉄道網の整備が進められており、過去に建設したトンネルよりも深い位置に新たなトンネルを建設する事例が増加している。こ

これらのトンネルは総じて土被りが大きいため、欧州では強大な地圧に対処する手段としてトンネル断面の収縮を許容すると同時に、一定の変形抵抗性を発揮できる可縮支保部材の研究開発が行われており¹⁾、図-1及び図-2の例に示すようにこれらの部材を組み込んだ支保工が複数の大土被りトンネルにて施工されている。

欧州では剛性が低くかつ圧縮時の靱性が高い部材を吹付けコンクリートに挟み込むことで吹付けコンクリートに可縮機能を与えており、写真-1に示すHigh Deformable Concrete（略称hiDCon, Solexperts社製）や写真-2に示すLining Stress Controllers（略称LSC, Geotechnical Group Graz製）の適用事例が多い。また、鋼製支保工に可縮機能を付与する部材としては、重ね合わせた2枚のU字型の支保工を加締め部材にて固定し、互いの支保工をスライドさせることによりトンネルの変形に追従するTH ribs（Bouchumer Eisenhutte Heintzmann社製）が広く用いられる（図-3参照）。

ロックボルトについては、図-4に示すように、一定の引張荷重が作用した時点で荷重を保持したまま変位が

増大する様々な構造が開発されており、可縮特性を有する吹付けコンクリートや鋼製支保工を施工する場合は、これらのロックボルトを適用してトンネルの変形に追従させる必要があるが、鉱山分野での適用に留まっている。

3. 変位制御型段階式二重支保工の概念

欧州にて実用化されている各種の可縮支保部材は、一定の荷重が作用すればこの荷重を維持したまま変位が増大するものが多い。図-5に示す地山特性曲線と支保工特性曲線の交点にてトンネルの安定性が確保できると考えれば、大土被りや膨張性などの特殊な地山条件では地山特性曲線と支保工特性曲線が交差するまでに大きな変位を発生させる必要がある。そのため、必要な内空断面を侵食することで縫い返しのリスクが高まるだけでなく、地山内に緩み領域が拡大することにより支保工に作用する荷重が増加する懸念もある。また、二次覆工の背面に可縮支保工が存在すれば、地山が長期的に劣化する場合や地震が発生した際に付加される荷重に支保工が抵抗できず、この荷重が直接二次覆工に作用することが懸念さ

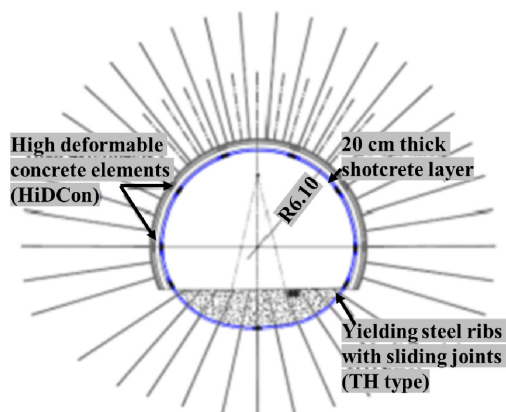


図-1 Lyon-Turin Base Tunnel における可縮部材を組み込んだ支保パターン²⁾

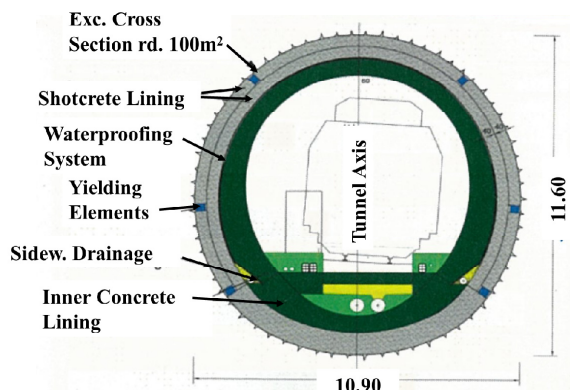


図-2 Semmering Base Tunnel における可縮部材を組み込んだ支保パターン³⁾



写真-1 hiDCon の施工事例⁴⁾



写真-2 LSC の施工事例⁵⁾

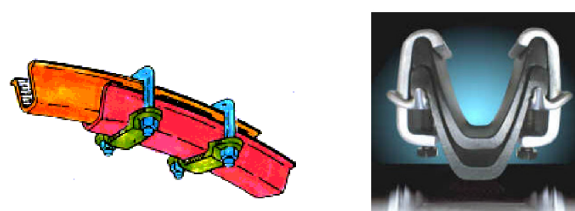


図-3 TH ribs の構造⁶⁾

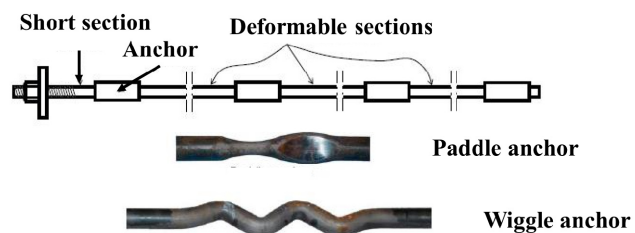


図-4 大変形に追従できるロックボルトの構造例⁷⁾

れる。このため、以下に示す特徴を有する支保工（変位制御型段階式二重支保工）を開発コンセプトに据え、トンネルの掘削時に発生する変位を適切に制御することで縫い返しが必要となるような過大な変位の発生を防止するとともに、長期的に二次覆工に外力が作用するリスクを低減する（図-6参照）。

- ① 支保工は二重支保構造とし、一次側支保工（地山側）に可縮部材を組み込むが、二次側支保工（内空側）には可縮部材を組み込まない。
- ② 可縮部材には一定量の可動域を設定する。この部材にあらかじめ定めた荷重が作用すれば塑性的な挙動を示すが、可動域を使い切れば弾性的な挙動に変化する。

上述したコンセプトを実現するため、著者らは鋼製支保工、ロックボルト、吹付けコンクリートのそれぞれについて、図-7に示す特徴を有する部材の開発を行っている。次節以降に各部材の開発成果を示す。

4. トンネル径方向の変位制御型支保工の開発（ロックボルト）

本章では、開発を進めている変位制御型ロックボルト（略称DCボルト：Deformation Controlled rock bolt）について、変位制御機能を有するアンカー部の詳細設計とプロトタイプを用いた室内試験結果について報告する。図-8に示すように、押出性地山でトンネル掘削中のB計測（ロックボルト軸力、吹付け工及び鋼製支保工応力）を分析すると、掘削後初期にロックボルトが効果を発揮し、その後、吹付け工と鋼製支保工が長期にわたって徐々に抵抗力を発揮する。最初の応力解放に対して効果的に働くロックボルトで変位を制御できなければ、トンネル支保全体の変位制御効果も低下する。一方で、2章に示した通り、欧州では変位に追従する機能を有する吹付け工や鋼製支保工が既に適用されている。

しかしながら、変位を制御可能なロックボルトは見られないため、吹付け工や鋼製支保工の変位制御機能の高度化・合理化と並行しながら、独自の機能を有するロックボルトの開発を進めてきた。

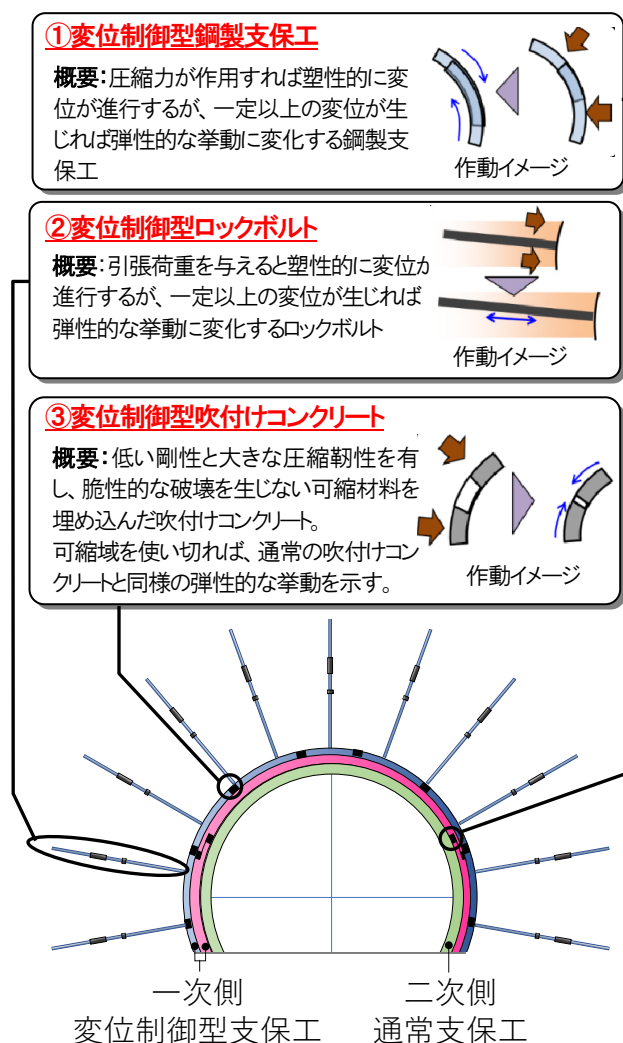


図-7 変位制御型段階式二重支保工に用いる可縮支保部材の特徴

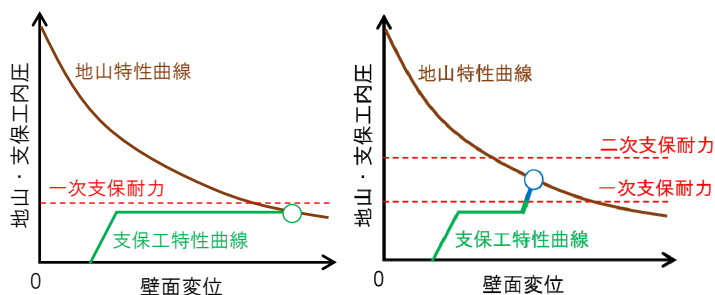


図-5 可動域に制限のない可縮部材を用いた場合の地山特性曲線
図-6 変位制御型段階式二重支保工の地山特性曲線

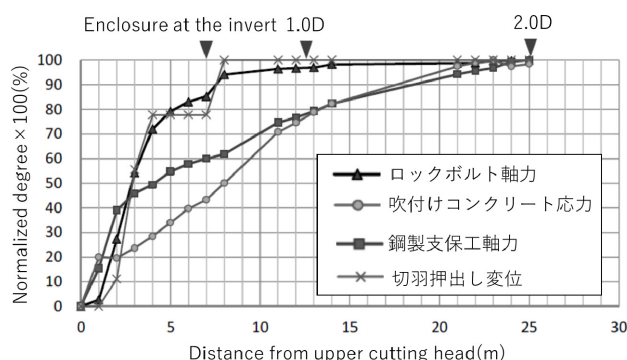


図-8 押出性地山におけるB計測結果（文献⁸⁾に加筆）

(1) 不連続体解析によるアンカー部の詳細設計

DCボルトアンカー部の詳細設計及び補強メカニズムを検証するために、不連続体解析（略称DDA：Discontinuous Deformation Analysis）を活用した簡易ロックボルト数値解析モデルを用いた。簡易ロックボルト数値解析モデルは、ロックボルトと定着材間の境界挙動や定着材内に生じるクラックまで詳細に再現可能な数値解析モデルである^{9) 10)}。

図-9は、考案したDCボルトのコンセプト図と簡易ロックボルト数値解析モデルにより、アンカー部近傍をモデル化した図である。DCボルトは、主にボルト（平滑部、ネジ部）、端部アンカー、リングの三要素で構成される。図-10に示す数値解析モデルでは、リング部は回転をしないよう固定されている。リング部とアンカー部の離れは30mmと設定した。ボルト端部において、矢印の方向に引抜荷重を載荷することで、引抜試験を簡易に再現した。表-1は、ボルト部と定着材に用いたモルタルの物性値である。

図-11は、引抜き荷重を載荷した際にモルタル内に発生した水平応力分布とクラック分布状況である。また、図-12は、数値解析結果から得られた荷重 - 変位曲線である。これらの結果から、まず引抜試験開始直後（水平変位2.5mm）は、アンカーとリング間に応力が集中し、クラックもアンカー近傍から生じたことが確認できた（図-11 (a)）。次に、引抜荷重の増加に伴って、荷重 - 変位曲線の傾きは徐々に小さくなり、最終的には荷重が一定値を示した（水平変位5mmから30mm）。この区間において、アンカー部がモルタル内部を引抜方向へ移動する様子が確認できた。アンカー部の移動に伴い、アンカーとリング間のモルタル内には多数のクラックが生じたことも確認できた（図-11 (b)）。最終的に、アンカーがリングに接触した際に、応力集中の範囲が、リングの前方へ移動したことを確認した（図-11 (c)）。

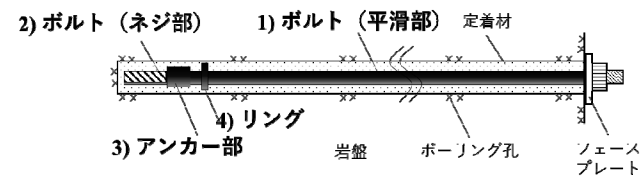


図-9 DCボルトコンセプト図

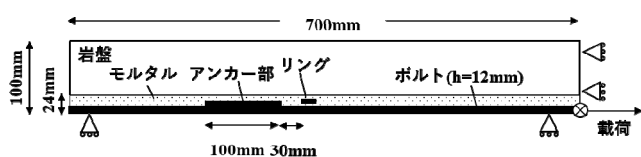
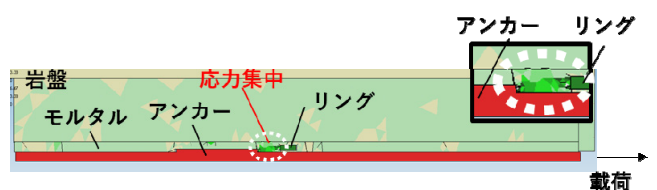


図-10 数値解析モデル図

その結果、荷重 - 変位曲線より、ボルトが負担する引抜荷重が再度上昇することを確認できた。得られたトリリニア形状の荷重 - 変位曲線は、まさに変位制御型支保工に期待される特性曲線であると言える。

表-1 DCボルト及びモルタル物性値

材料	パラメータ	値	材料	パラメータ	値
モルタル	単位体積重量	23(kN/m ³)	ロックボルト	単位体積重量	78(kN/m ³)
	弾性係数	7.3(GPa)		弾性係数	200(GPa)
	ポアソン比	0.2		ポアソン比	0.3
	内部摩擦角	40/42.5(°)		内部摩擦角	35/30(°)
	(初期/残留)			(初期/残留)	
	粘着力	8.5/3.0(MPa)		粘着力	0.5/0.0(MPa)
	(初期/残留)			(初期/残留)	
	引張強度	1.8/1.0(MPa)			
	(初期/残留)				



(a) 引抜試験開始直後（水平変位2.5mm）



(b) アンカー部モルタル内移動中（水平変位10mm）



(c) アンカー部とリング接触時（水平変位30mm）

図-11 モルタル応力分布とクラック発生状況

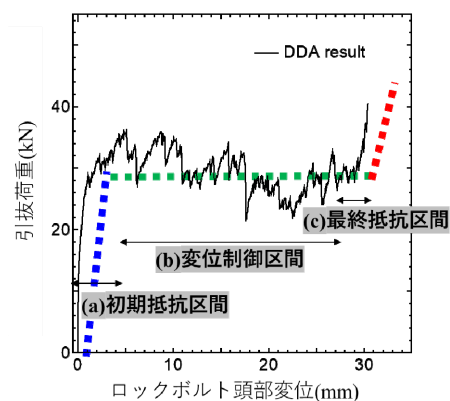


図-12 数値解析から得られた荷重 - 変位曲線

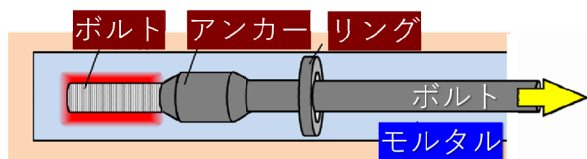
従って、簡易ロックボルト数値解析モデルを用いた解析結果により、ボルト部、アンカー部、リングの三要素を適切に配置することで、変位制御型のロックボルトが設計できることが分かった。以下に、数値解析結果から判断されるDCボルトの抵抗メカニズムをまとめる。

- 1) 初期抵抗区間（第一ステージ）：ロックボルトと定着材間の摩擦抵抗やアンカー部が引抜荷重に対して抵抗する（図-13(a)）。
- 2) 変位制御区間（第二ステージ）：アンカー部が定着材内を引抜方向に移動する（図-13(b)）。
- 3) 最終抵抗区間（第三ステージ）：アンカー部がリングに接触した後、リングが引抜荷重に対して抵抗する（図-13(c)）。

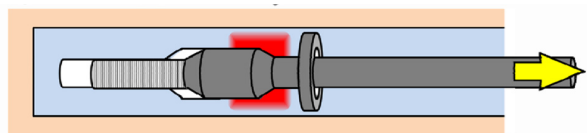
（2）変位制御型ロックボルトの製作と引抜試験

簡易ロックボルト数値解析モデルにより、トリリニア形状の荷重 - 変位曲線が得られることや抵抗メカニズムを検証できた。その構造で、プロトタイプのロックボルトを製作した（図-14）。プロトタイプのDCボルト（ $L=3.0\text{m}$ ）を2本準備し、室内引抜試験を実施した¹¹⁾。表-2は、試験ケースとロックボルト仕様の一覧である。本試験では、2本のDCボルトに加え、比較検証を目的として、ツイストタイプの全面定着型ロックボルトの試験結果も活用した。DCボルトの変位制御量となるアンカー部とリングの離れは、それぞれ30mmと100mmと設定した。ロックボルトが挿入されるボーリング孔は鋼管（ $\phi 50\text{mm}$ ）で模擬し、一軸圧縮強度約10MPaのモルタルで充填した。

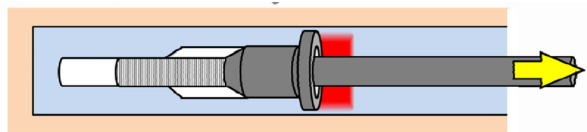
図-15は、室内引抜試験の実施状況である。ロックボルト口元に設置したセンターホールジャッキにより引抜



(a) 初期抵抗区間（第一ステージ）



(b) 変位制御区間（第二ステージ）



(c) 最終抵抗区間（第三ステージ）

図-13 DCボルト補強メカニズム

荷重を载荷した。引抜試験の間、荷重とロックボルト頭部の変位をロードセルと2つの変位計によって計測した。

図-16は、ケース3の引抜試験を実施した後に、鋼管を半割れ状に切断し、内部を観察した結果である。

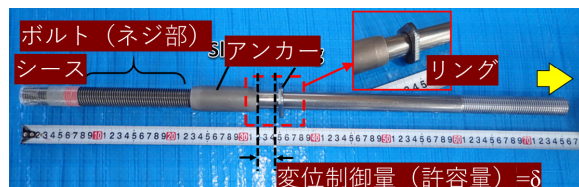


図-14 試作したDCボルト（アンカー部）

表-2 試験ケースとロックボルト仕様

ケース	ボルト タイプ	ボルト長 (m)	ネジ部長 (mm)	変位制御量 (mm)	モルタル強度 (MPa)
1	全面定着型 ロックボルト	3	3000	-	10
2	変位制御型 ロックボルト	3	205	30	10
3	変位制御型 ロックボルト	3	205	100	10

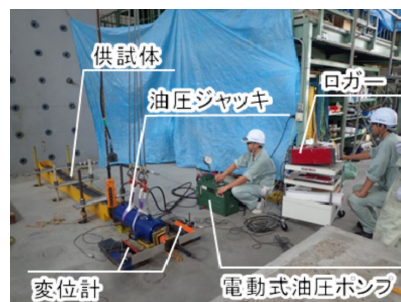


図-15 室内引抜試験実施状況

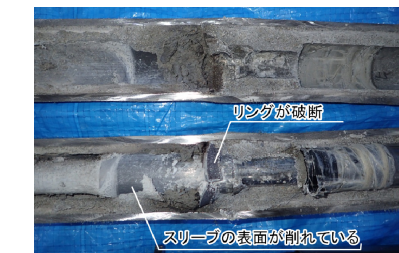
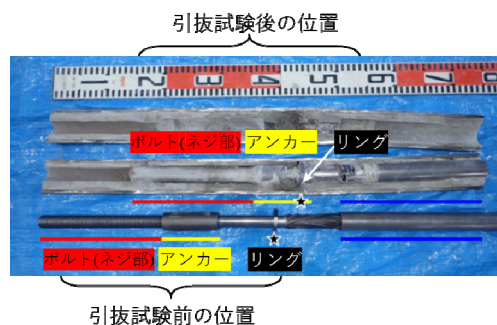


図-16 室内引抜試験後のDCボルト観察結果

観察結果によると、数値解析から想定されたように、アンカー部がモルタル内部を移動し、最終的にリングと接触したことが確認できた。ケース2でも同様の結果が得られたことから、抵抗力が発揮されるメカニズムはDCボルトの変位制御量の大小に関係ないことを確認した。しかしながら、引拔荷重が200kNに達した際に、ボルトが破断する前にリングが破損した。よってDCボルトを実適用する際には、より分厚いリングの使用が望ましい。

図-17は、引抜試験結果から得られた荷重 - 変位曲線である。比較対象とした全面定着型ロックボルトの引抜試験結果は、ボルト引張強度（450MPa）を超過しないよう载荷を中止するまで、直線的に引拔荷重が増加している傾向が見てとれる。引張荷重が200kNの時、ロックボルト頭部の変位はわずか5mmであった。一方、DCボルトの荷重 - 変位曲線を見ると、ケース2及びケース3共に、期待されたトリリニア形状の荷重 - 変位曲線が得られたことが分かった。以下に、各ステージごとに結果をまとめる。

- 1) 初期抵抗区間（第一ステージ）：両グラフとも引拔荷重100kNに到達するまで、直線的な荷重の増加が見られた。その時のロックボルト頭部変位は、約10mmであり、変形特性を示すグラフの傾きは、全面定着型のロックボルトと比較してやや低下することが確認された。この理由は、DCボルトはアンカー部より手前側は平滑なボルト表面形状となっているため、この部分ではモルタルとの付着抵抗は期待できず全面定着型ロックボルトと比較してボルトの伸びが大きく生じるためである。
- 2) 変位制御区間（第二ステージ）：引拔荷重が100kNを超過した後は、両グラフとも傾きに変化が見られた。荷重は100kN付近で一定値を保ち、設定した各変位制御量（30mm, 100mm）に到達するまで、変位量のみが増加する傾向を示した。
- 3) 最終抵抗区間（第三ステージ）：各変位制御量に達

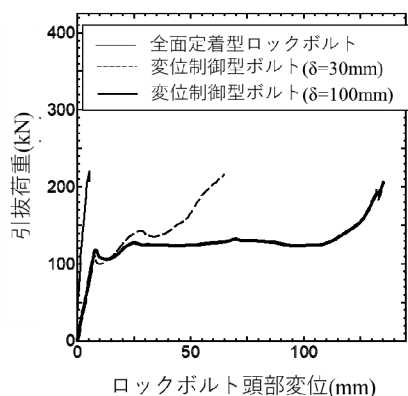


図-17 室内引抜試験結果

すると、再び傾きの変化点が見られ、その後、両グラフとも荷重が徐々に上昇する傾向が確認された。

設定された引拔荷重200kNでリングが破損した際に生じたロックボルト頭部変位は、ケース2で60mm、ケース3で135mmであった。全面定着型のロックボルトではわずか5mmであったことから、新しく開発したDCボルトの大変形が生じる地山における優位性を室内実験から検証することができた。

5. トンネル周方向の変位制御型支保工の開発 (吹付けコンクリートと鋼製支保工)

第2章で記したように、欧州では、高地圧地山への対策として、吹付けコンクリートにスリットを設け、可縮部材を挿入することで、吹付けコンクリート応力と地山の内空変位を制御する手法が取られている。著者らは、代表的な挿入部材である特殊コンクリートhiDCon（Solexperts社製）を海外から調達し、一軸圧縮試験を実施し、既往の文献に示される可縮性能を確認した。あわせて、国内でより容易に調達できる新部材の探索を進め、ガラス長繊維強化プラスチック発泡体（積水化学工業製、以下FFU部材と呼ぶ）の可縮性能の評価実験を実施した。これらの部材は、吹付けコンクリートに設けられたスリットのみならず、開発中の変位制御型鋼製支保工向けの可縮部材としても活用することができる。本章では、hiDConとFFU部材の可縮性能を評価した実験結果を取りまとめた。

（1）hiDConの可縮性能の評価

2章で説明したように既に欧州で適用実績のあるhiDConは、コンクリート、鋼繊維、鉄板及び中空ガラスビーズから構成される。中空ガラスビーズは、コンクリートの空隙率を増加させ、設定された圧縮応力で破壊する特性を有している。

表-3は、実施した試験ケースと供試体諸元の一覧である。

表-3 試験ケースと供試体諸元

ケース	質量 (kg)	比重	载荷速度 (%/min)
1	7.43	0.93	1.0
2	9.28	1.16	1.0
3	7.43	0.93	0.25

ここでは、中空ガラスビーズの混入量が多い供試体（比重0.93）と少ない供試体（比重1.16）を用いて、一軸圧縮試験を行った。供試体寸法は、一辺が200mmの立方体で、載荷速度は2パターン（1%/min、0.25%/min）と設定した。

図-18は、供試体の写真と載荷状況である。また、図-19は、hiDConの破壊過程を詳細に把握するために実施したPIV（Particle Image Velocimetry）の解析結果である。PIVは、流体の流れを定量的に可視化する手法で、地盤分野にも応用されている。本研究では、GUIベースのオープンソースコードを活用した¹²⁾。実験結果を分析すると、ピーク強度を超えると供試体内部にクラックが発生し始めた。ひずみが15%から20%程度までの間は、鉄板下部のコンクリートのみが破壊され、その後、鉄板上部の破壊も進行した。また、発生した亀裂は、主に鉛直方向に生じた亀裂が多数を占め、PIV解析結果から得られた主要なベクトル分布を見ると、水平方向へ膨らみながらも、繊維補強の効果により粘り、鉛直方向に徐々に潰れていく様子が確認できた。

試験により得られた応力-ひずみ関係を図-20に示す。中空ガラスビーズの混入量が多い供試体では、ピーク強度は6.2MPaと7.4MPa、33%弾性係数は1.2GPaと1.6GPaであった。また、中空ガラスビーズの混入量が少ない供試体では、ピーク強度は13.3MPa、33%弾性係数は1.95GPaであった。どの供試体も、ピーク強度に到達後に、やや応力が低下する傾向が確認された。特に、中空ガラスビーズ含有量が少ないケースで著しく低下した。その後、応力一定のまま、変形に追従し、ひずみが30%を超過すると、再び応力の増加が確認された。今回、異なる載荷速度で実験を行ったが、両者に顕著な違いは見られなかった。今回の検討を通じ、空隙率に直接寄与する中空ガラスビーズだけでなく、水平方向にわずかに膨らみながら脆性的な破壊を防ぎ、徐々に破壊が進行していく形態が、高い変形追従性を有する材料にとって重要であることが分かった。



図-18 供試体写真（左）と載荷状況（右）

（2）FFU部材の可縮性能の評価

FFU部材は、ガラス長繊維と熱硬化性樹脂発泡体からなり、ガラス長繊維の混入量を任意に調整できる。ガラス長繊維の向きが一樣であるといった特徴を持つ。ここでは、ガラス長繊維の混入量が少ないFFU50（比重0.5）、中程度のFFU74（比重0.74）、混入量が多いFFU100（比重1.0）の供試体を準備し、一軸圧縮試験を行った¹³⁾。供試体寸法は一辺が95mmの立方体で、載荷はひずみ制御

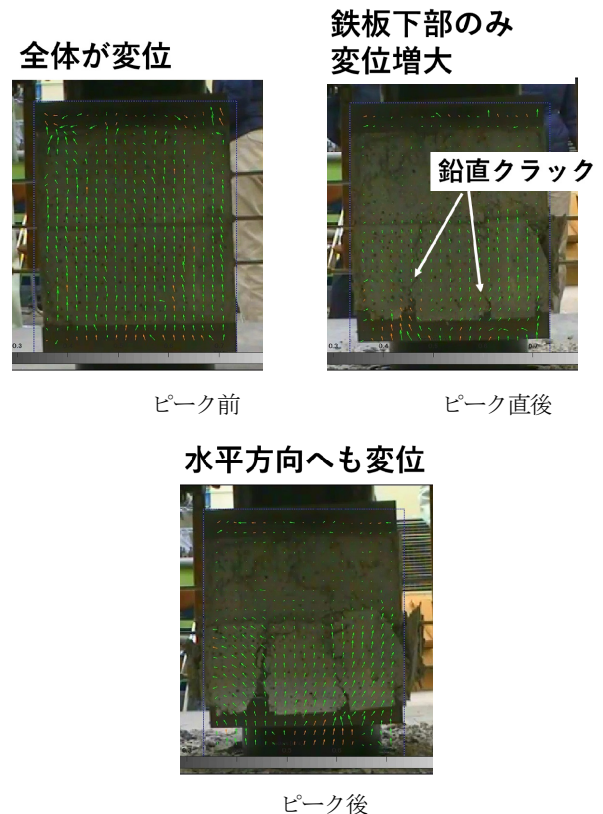


図-19 PIV解析結果（ケース2）

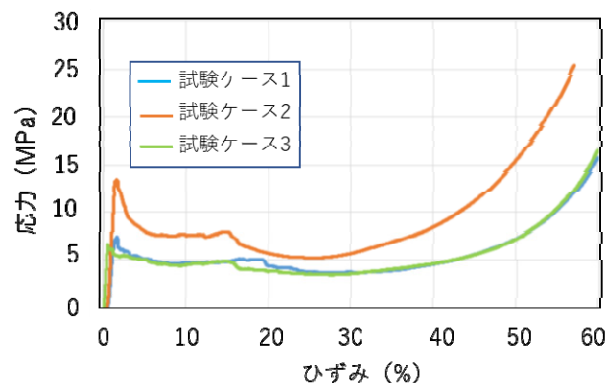


図-20 応力-ひずみ関係

(1%/min) とした。ガラス長繊維の向きと载荷方向が直交するケースを横置き、平行なケースを縦置きと呼ぶ(図-21)。

試験により得られた応力-ひずみ関係を図-22に示す。吹付けコンクリートのスリットへ挿入する可縮部材に求められる性能として、剛性が適度に小さく可縮すること、破壊ひずみが大きいこと、脆性破壊せず適度な耐荷力を有することが考えられる。この観点から、各供試体の結果を評価すると、図-22 (a) に示す縦置きについては、特にFFU100の場合、高い剛性によって周囲の吹付けコンクリートに軸力が伝達され、本部材挿入の効果が期待

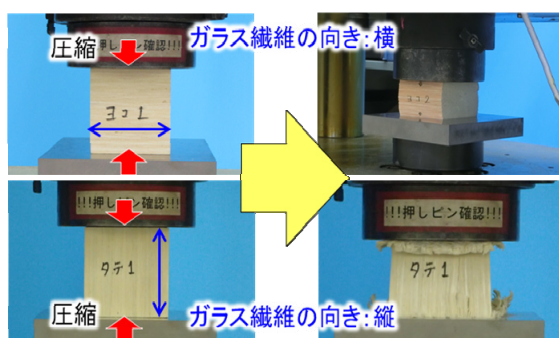
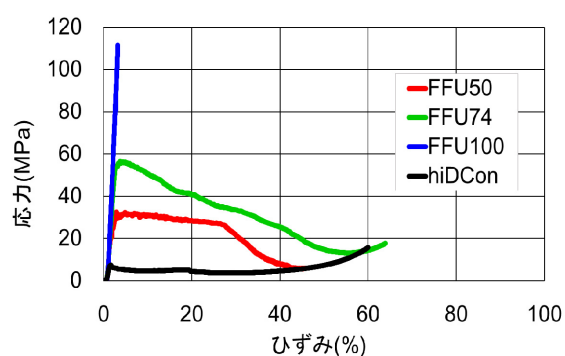
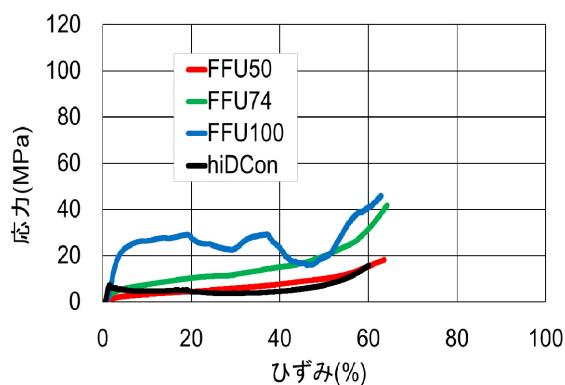


図-21 FFU 部材の一軸圧縮試験状況



(a) 縦置き



(b) 横置き

図-22 FFU 部材の応力-ひずみ関係

できないと考えられる。FFU50, FFU74は、ピーク荷重に達した後、ガラス長繊維の折れ曲がりによって耐荷力が低下し、このとき周囲の吹付けコンクリートでは急激な圧縮応力の増大が懸念される。これに対し、図-22 (b) に示す横置きについては、ガラス長繊維の混入量が比較的少ないFFU50, FFU74で、载荷軸方向に収縮しながら、载荷軸直交方向に膨らみ、载荷面積が徐々に増大することで応力-ひずみ関係が滑らかに推移する。hiDConの応力-ひずみ関係とも類似し、吹付けコンクリートのスリットへ挿入する可縮部材として、適当であると考えられた。

(3) 変位制御型鋼製支保工への活用

筆者らが考案した変位制御型鋼製支保工の実施例を図-23に示す。鋼製支保工と鋼製支保工の間に本章で示した可縮性能を有する部材を挿入し、高地圧に起因する、過大な軸力の発生を抑制し、鋼製支保工の座屈を防止する役目を果たす。また、周囲を鋼枠で覆うことで、偏圧に起因する曲げモーメントの伝達を図ることができる。

6. おわりに

本報告では「変位制御型二重支保工」の概念を示すとともに、新しい変位制御型の吹付けコンクリート・鋼製支保工・ロックボルトのコンセプトと主に実験検討結果について報告した。

本研究の結果、吹付けコンクリートや鋼製支保工のスリット間に設置可能な可縮部材について、国内外から新材料を準備し、それらの力学特性を詳細に把握することができた。また、ロックボルトについても、プロトタイプを用いた引抜試験により、大変形に追従して、かつ制御もできる新しいロックボルトを開発することができた。

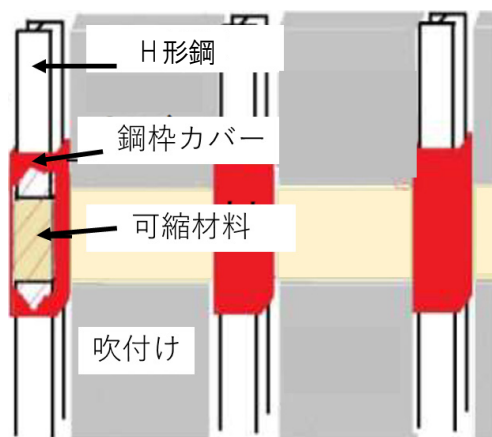


図-23 変位制御型鋼製支保工の実施例

今後、実際に現場適用を図る上で、以下の課題が残されており、引き続き検討を進める所存である。

- ① 変位制御型支保工をモデル化したトンネルの掘削シミュレーションによる変位制御型支保部材の最適化
- ② 合理的な施工を実現を目指した変位制御型支保部材の改良および代替材の開発
- ③ 力学試験による変位制御型支保部材の性能検証

参考文献

- 1) Kovari, K.: Design Methods with Yielding Support in Squeezing and Swelling Rocks, World Tunnel Congress, 2009
- 2) Barla, G., Bonini, M and Semeraro, M.: Performance monitoring and analysis of a yield-control support system in squeezing rock, Eurock 2010 - Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering, Volume 1, 2010 .
- 3) The new Semmering base tunnel – tunnel design in the fault zone, Geomechanics and Tunnelling, Volume 4, Issue 3, 2011.
- 4) Schneider, E. and Spiegl, M.: Convergency compatible support systems, JUNE 2008 Tunnels & Tunnelling International, 2008.
- 5) Barla, G. and Barla, M.: Innovative Tunnelling Construction Method In Squeezing Rock, Ingegneria Ferroviaria 63(12), pp103-119 , 2008.
- 6) Hoek, E.: Practical Rock Engineering, 2006.
- 7) Li, C. C.: A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 47(3), 396-404, 2010.
- 8) Date, K., Narita, N., Sato, H., Saito, H., and Kashima, T.: Tunnel Excavation in Multiple Fractured Mudstone. EUROCK 2015.
- 9) Yokota Y., Zhao Z., Nie W., Date K., Iwano K. and Okada Y.: Laboratory and Numerical Study on the interface behaviour between the rock bolt and bond material. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018.
- 10) Yokota Y., Zhao Z., Shang J., Nie W., Date K., Iwano K. and Okada Y.: Effect of bolt configuration on the interface behaviour between a rock bolt and bond material: A comprehensive DDA investigation. Computers and Geotechnics 105, 116-128, 2019.
- 11) 岡田侑子, 岩野圭太, 伊達健介, 横田泰宏, 小泉悠: 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, 第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, No.17, pp.97-102, 2017.
- 12) Thielicke W. and Stamhuis E. J.: PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB, Journal of Open Research Software 2, 2014.
- 13) 黒川紗季, 升元一彦, 小泉悠, 岡田侑子, 宇津野衛: 高地圧フレキシブル支保部材の変形特性評価および解析による適用性検討, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会予稿集, III-297, 2019.

(2019. 8. 9 受付)

DEVELOPMENT OF NEW DEFORMATION-CONTROLLED DOUBLE LAYER SUPPORT FOR TUNNEL EXCAVATION UNDER HIGH OVERBURDEN

Yoshinori KITAMURA, Yasuhiro YOKOTA, Kensuke DATE,
Yu KOIZUMI and Mori UTSUNO

It is indispensable to pay attention to the extent of yielding zone and the amount of rock displacement carefully when a tunnel is excavated under high overburden pressure or in expansive rock conditions. In case that tunnels are excavated in such conditions, two types of countermeasure have been employed in Japan. The one is “tunnel excavation with advanced horizontal shaft”, and the other one is “tunnel excavation with rigid double layer supports”. However, these countermeasures might be insufficient when a tunnel cover is extremely deep and geological condition is very poor. On the other hand, yielding tunnel supports have been developed and increasingly applied to high overburden tunnels in Europe. However, these yielding supports may loose surrounding rock masses excessively. Therefore, the authors have been developing a new “deformation-controlled double layer tunnelling support. This support can sustain the large tunnel deformation, and control/restrict the rock displacement based on the design value. In this paper, the new concept of “deformation-controlled double layer tunnelling support”, which is comprised of shotcrete, steel beam and rock bolt, is illustrated. And the performance of proposed materials is verified with laboratory tests.