

山岳トンネルにおける可縮支保工の 設計と適用可能性検討

小原 伸高^{1*}・金子 哲也¹・坂井 一雄²・谷 卓也²・市田 雄行³

¹大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

²大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³大成建設株式会社 東京支店 (〒163-6008 東京都新宿区西新宿6-8-1)

*E-mail: ohara@ce.taisei.co.jp

高地圧条件下におけるトンネル掘削では、大変形に対応するために可縮支保構造が採用される場合がある。国内外の過去の実績は縦断方向に連続するスリットを設けて変位を吸収しようとするものであったが、良好な支保性能は得られなかった。近年は、欧州で一定の変形抵抗性を有する可縮部材が開発され適用されているが、国内での使用実績は報告されていない。可縮支保工の設計手法は確立されておらず、設計者の経験や判断により設定されているのが現状である。本研究では、大土被りトンネルへの適用性検討の一環として、解析的手法による可縮支保工の設計手法や可縮部材のモデル化手法を提案する。また、欧州で使用実績のある既存の可縮部材の実物大圧縮試験を実施し、材料特性を分析したので、あわせて報告する。

Key Words : yielding support, ductile lining, design methodology, full size test, hiDCon

1. はじめに

高地圧条件下におけるトンネル掘削では、大変形に対応するために可縮支保構造が採用される場合がある。近年は欧州で図-1に示すような一定の変形抵抗性を有する可縮部材が開発され適用されているが¹⁾、国内での使用実績は報告されていない。可縮支保工の設計手法は確立されておらず、設計者の経験や判断により設定されているのが現状である。筆者らは、大土被りトンネルへの適用性検討の一環として、可縮支保工の設計手法や可縮部材の仕様について検討してきた。また、欧州で使用実績のある既存の可縮部材の実物大室内試験を実施して圧縮特性の把握を試みた。現段階で得られた成果を報告する。

2. 可縮支保構造の発展経緯

過去の可縮支保構造は図-2に示すようなU型鋼を重ね合わせて可縮機能を付加した鋼製支保工(TH鋼)²⁾を使い、吹付コンクリートは脆性破壊することを防止するために、縦断方向に30cm程度の開口部を設けて断面の縮小を許容するオープンスロット方式であった。国内でもNATM導入期の1980年代前半までは膨張性地山に対し支保工の座屈を抑制するために同様の可縮U型鋼(MU-29)を用いた例が報告されているが、良好な支保性能は得られず³⁾、H型鋼の使用が一般的となった近年は施工事例の報告は

ない。これらオープンスロット方式の可縮支保工では、切羽崩落や大変形が発生した事例が報告されている。例えば、Galgenbergトンネルの可縮支保構造採用区間では切羽崩落事故が発生したが、支保工の可縮部に抵抗性があれば崩落現象を緩やかにしたであろうと考察された⁴⁾。また、Saint Martin La Porteアクセストンネルでも2m超の大きな内空変位が発生した事例が報告されている⁵⁾。

このような背景から、欧州を中心にトンネル断面の収縮を許容すると同時に、ある一定の変形抵抗性を発揮する可縮支保部材が開発され適用されている。鋼管を主要材料とするLining Stress Controllers (略称LSC, DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL社製, 写真-1) とコンクリート材料であるHigh Deformable Concrete (名称hiDCon, Solexperts社製, 写真-2) の適用例が多く、土被り1,000mを超える大土被りトンネルにも採用されている。

可縮支保工の設計手法については、ETH大学におけるCantieni, Anagnostouらの研究⁶⁾、Graz工科大学におけるRadonic, Schubert, Barlaらの研究⁷⁾が報告されているが、定量的な設計方法が確立されるには至っていない。

3. 数値解析におけるモデル化手法

本章では、既往の数値解析手法の課題について検討し改良を加えた手法を提案する。また、施工実績の再現解析を行うことで提案手法の妥当性を確認する。

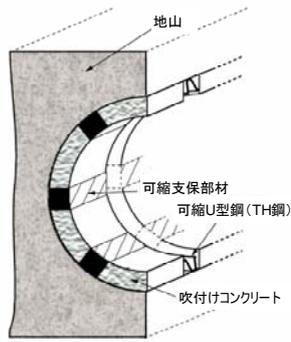


図-1 可縮支保構造概念図¹⁾に加筆

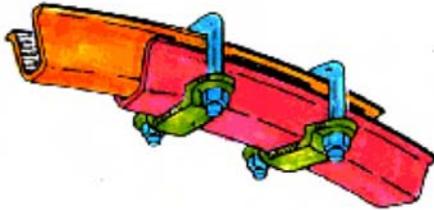


図-2 可縮U型鋼 (TH鋼)²⁾



写真-1 Lining Stress Controllers (LSC) 採用例³⁾



写真-2 hiDCon 採用例⁵⁾

(1) 地山のモデル化

既往の研究⁷⁾で示されている方法を準用する。吹付コンクリートと地山とのせん断ずれ挙動に対応するために支保工背面の地山要素分割を細かくする。また、地山からの拘束を避けるため可縮部材の背面にはギャップを設ける。地山要素はモール・クーロンの降伏規準にしたがう弾完全塑性体としてモデル化する。

(2) 可縮部材のモデル化

① 既往の研究

地山と同様にモール・クーロンの降伏規準にしたがう弾完全塑性体のソリッド要素でモデル化する。この方法には次のような課題が考えられる。一つは可縮部材に

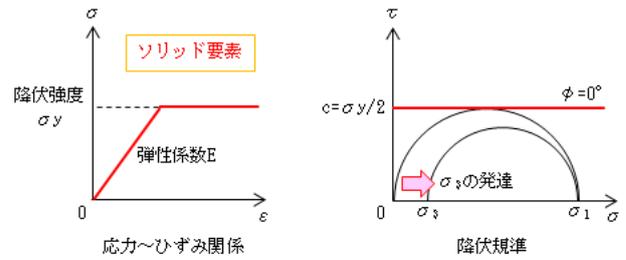


図-3 可縮部材の力学モデル (既往の研究)

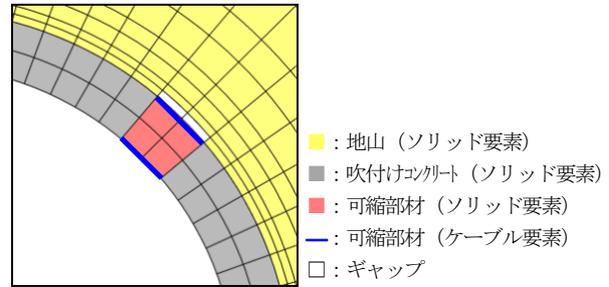


図-4 可縮部材のモデル化 (提案手法)

許容される変形量 (ひずみ) に達した後の応力～ひずみ関係を表現できないこと。もう一つは軸力部材として設計されているのにソリッド要素でモデル化されているため、吹付コンクリートとの接触面で受ける拘束により所定の応力 (一軸圧縮強度) では降伏せず、変形しにくいモデル化となっていることである (図-3)。

② 本研究

既往の方法に対して改良した提案方法は次のとおりである。ケーブル要素とソリッド要素による複合モデルとすることで、軸圧縮力のみで所定の降伏強度 (一軸圧縮強度) にて降伏させることができるようにする (図-4)。各解析ステップにおけるソリッド要素のトンネル周方向成分のひずみに着目し、可縮部材の限界ひずみ (限界可縮量) に達した時点で弾性係数を変更させる。つまり可縮部材が閉合する (限界可縮量に達する) まではソリッド要素の弾性係数を0としてケーブル要素で可縮部材の力学特性を再現し、閉合後はソリッド要素の弾性係数を吹付コンクリートと同等の値に変更させることで荷重が伝達されることを再現している (図-5)。

(3) 再現解析による検証

数値解析手法の妥当性を検証する目的として、パイアードルフ調査トンネル (図-6) で得られた計測変位データをもとに再現解析を実施する。地山条件、支保工の仕様、掘削手順などは文献⁷⁻¹⁰⁾を参考とした。

既往研究と提案手法による再現解析結果を図-7に示す。提案手法による解析結果は測点Z1～Z3の変位について非常に良い整合が得られている。施工実績の再現性が高いことから提案手法は妥当であると考えられる。

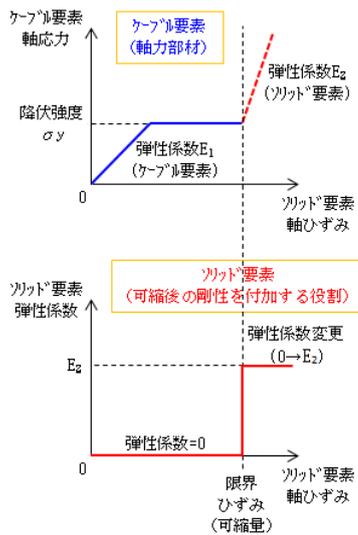


図-5 可縮部材の力学モデル (提案手法)

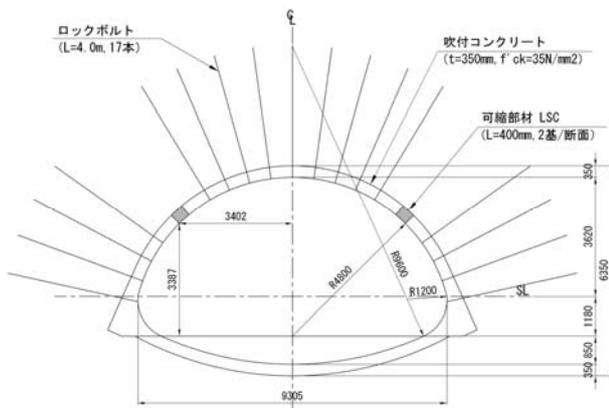
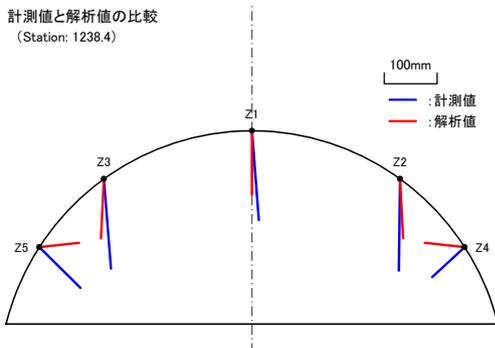
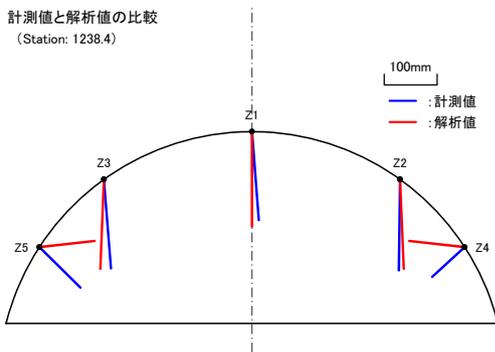


図-6 再現解析の対象トンネル断面図



(a) 既往研究の解析結果



(b) 提案手法による解析結果

図-7 再現解析結果

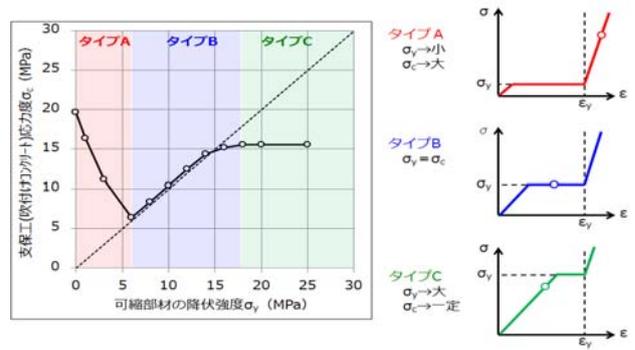


図-8 可縮部材の降伏強度と支保工応力の関係

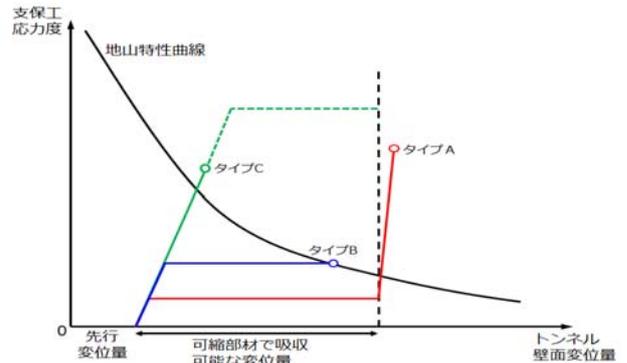


図-9 地山と支保工の平衡点

4. 可縮支保工の設計手法

本章では、円形かつ全断面掘削トンネルの3次元逐次掘削解析による検討に基づき、主として可縮部材の降伏強度と可縮部材が吸収する変形量(可縮変形量)を適切に設定することにより、吹付コンクリートに発生する応力を最も低く抑えるような設計手法について提案する。

(1) 可縮部材の降伏強度

既往の研究⁶⁾や本研究の解析より、可縮部材の降伏強度により支保工応力(吹付コンクリート応力)の平衡状態は3つのタイプに分類される。解析結果の一例として、可縮部材の降伏強度と吹付コンクリート応力の関係を図-8に、地山特性曲線と可縮部材による支保工特性曲線との平衡点の関係を図-9に示す。

タイプA: 地山特性曲線より高い応力レベルで平衡状態に達するが、可縮部材の降伏強度が大きいほど、地山特性曲線からの乖離は小さくなる。

タイプB: 地山特性曲線上にて平衡状態に達する。地山条件ごとに吹付コンクリート応力が最小となる可縮部材の最適な降伏強度が存在する。可縮部材が降伏強度を維持したままちょうど閉じたときに吹付コンクリートの発生応力が最も小さくなる。

タイプC: 地山特性曲線より高い応力レベルで平衡状態に達する。可縮部材の降伏強度の大小に関わらず、吹付コンクリート応力は一定となる。

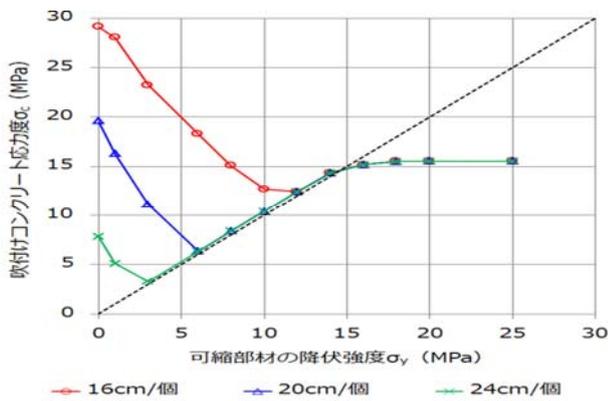


図-10 可縮変形量と吹付けコンクリート応力の関係

すなわち、可縮部材がタイプBの状態では平衡状態に達するような条件下で施工できれば、吹付けコンクリートの発生応力を最も効果的に低減できることになる。

なお、タイプAとタイプCでは地山特性曲線より高い応力レベルで平衡状態となるが、この乖離の原因については既報^{11)~13)}にて考察している。

(2) 可縮変形量

可縮変形量は「1断面当りの可縮部材の配置個数」と「可縮部材1個当りに許容される変形量」によって決まる。可縮部材を8個配置するものとして、可縮部材1個当りの許容変形量と降伏強度を変化させた場合の解析結果を図-10に示す。これより、可縮変形量を大きくすることで、最適な降伏強度を小さくできるといえる。

可縮部材により吹付けコンクリート発生応力を低減させようとする場合、一般に土被りが大きいほど必要とされる可縮部材の降伏強度も大きな値となるが、可縮変形量を大きくすることで降伏強度を小さくすることができる。すなわち、地山条件の変化等に対して、配置個数を増やすことで吹付けコンクリート発生応力を可縮部材の降伏強度相当に抑えることが可能となる。

(3) 可縮部材の配置個数

トンネル断面の可縮変形量を一定とし、可縮部材の配置個数が異なる場合の解析結果例として、吹付けコンクリート応力分布を図-11に、支保工背面地山の最大せん断ひずみ分布を図-12に示す。可縮部材1箇所あたりの変形量を大きくして配置個数を少なくすることは、局部的に大きな応力やひずみを発生させるため好ましくない。

海外の施工実績によれば、断面当たり2~9個の可縮部材が配置されている。上記考察と施工実績より可縮部材の個数は最大8個程度が適当であると考えられる。

(4) 可縮部材の設計

吹付けコンクリートの発生応力を最も低減できるような可縮部材の降伏強度を次の手順で設定する(図-13)。

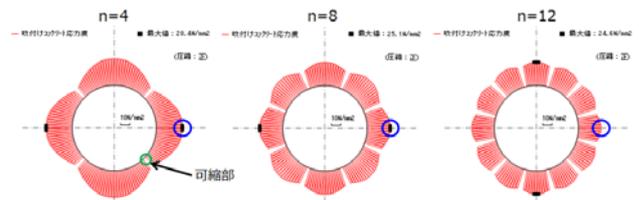


図-11 可縮部材使用時の吹付けコンクリート応力分布

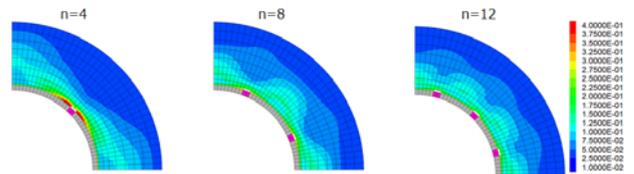


図-12 可縮部材使用時の地山の最大せん断ひずみ分布

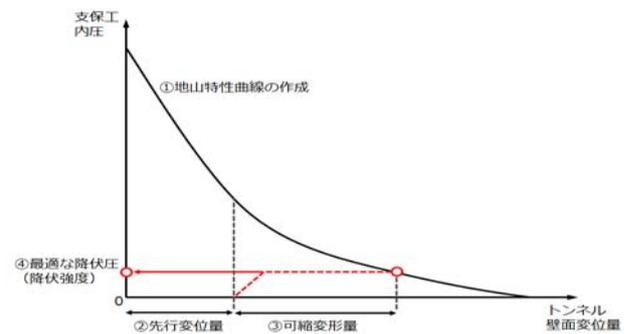


図-13 最適な降伏強度の設定手順

- ①理論解による地山特性曲線の作成
- ②支保工設置までの先行変位率を仮定(例:40%)
- ③可縮部材による可縮変形量を設定

トンネル半径方向の可縮変形量 U_{yr} は下式で表される。

$$U_{yr} = \frac{n \times U_{yt}}{2\pi} \quad (1)$$

ここに、 n : 可縮部材の配置個数

U_{yt} : 部材1箇所当り周方向許容変形量

- ④地山特性曲線より支保工内圧および降伏強度を算定

支保工設置後から平衡状態に達するまでのトンネル変形量は可縮変形量 U_{yr} と等しいことに着目し、地山特性曲線を用いて「支保工設置時の変位+可縮変形量 U_{yr} 」となる場合の支保内圧を求める。これが内圧換算した可縮支保工の最適降伏圧 P_{yo} となる。可縮部材の降伏強度 σ_{yo} は次式で算定される。

$$\sigma_{yo} = \frac{P_{yo} \times R}{t} \quad (2)$$

ここに、 R : トンネル半径

t : 吹付けコンクリート厚

5. 可縮支保部材の基本性能確認試験

前章にて詳述した可縮支保構造に用いる部材のうち、コンクリート部材であるhiDCon (Solexperts社製) のサンプルを入手して、基本圧縮性能の確認試験を実施した。

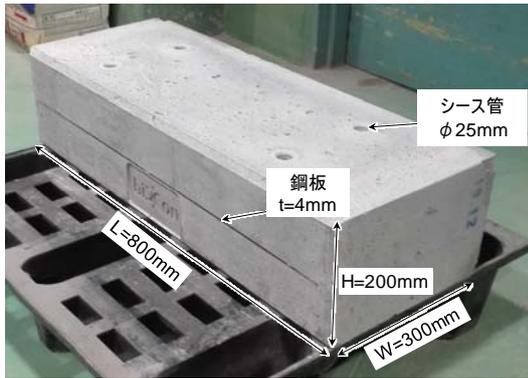


写真-3 hiDCon サンプル

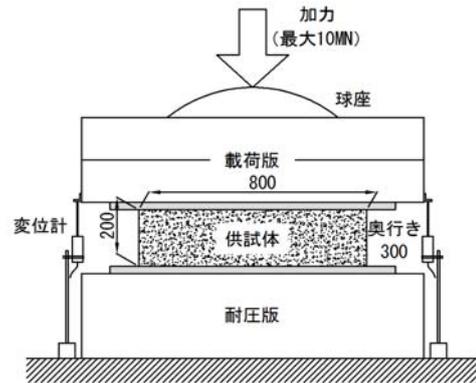


図-14 試験概要図

(1) hiDConの特徴と構成材料

Solexperts社ホームページ¹⁴⁾を参照すると、hiDConは空隙率の高いガラス性発泡材料が主要な骨材となったプレキャスト軽量コンクリートである。また、繊維や鋼板といった補強材によって圧縮時の側方への変形を適切に制御することで、降伏後も脆性的な破壊と顕著な応力低下を示さない材料である。すなわち、部材圧縮に対する靱性（本論文では圧縮靱性と称す）が高い材料である。

hiDConサンプルを写真-3に示す。寸法はL800mm×W300mm×H200mmであった。高さ方向中央部に厚さ4mmの鋼板が配置され、ハンドリング用のシース管が4箇所にて設けられていた。また、降伏後の応力が8.5±1.5N/mm²の範囲となるように設計された製品であった。

(2) 実寸法供試体を用いた圧縮性能確認試験

a) 試験目的・試験条件

筆者らは、同じhiDConサンプルから200mm角供試体を切り出し圧縮試験に供することで、30%を超える圧縮ひずみが加わった場合でも、脆性的な破壊を示さないことを確認した¹⁵⁾。しかし、実際に使われる寸法で、同様の挙動や力学特性を示すかは確認できておらず、また報告もされていない。そこで、実スケールでのhiDConの圧縮性能を確認し、設計や数値解析に用いる諸定数を把握することを目的に、サンプル部材をそのまま供試体とした一軸圧縮試験を実施した。

図-14に試験概要図を示す。圧縮ひずみが30%を超えた時点から始まるひずみ硬化過程（既報¹⁵⁾にて確認）では応力が20N/mm²を超過し、部材断面が大きいため、載荷荷重が5,000kNを超える可能性が考えられた。そこで試験は10MN大型圧縮試験機を用いて実施した。供試体は耐圧版の中央部に配置し、図-14に示す載荷版と供試体間には平滑性を確保する目的で、石膏によるキャッピングを施した。載荷は変位制御にて実施し、載荷速度は供試体、補強鋼板の変形およびクラックの発生状況を確認する目的で十分遅くした。具体的には、降伏までは0.2mm/min(=0.1%/min)で、降伏後は1.0mm/min(0.5%/min)の

載荷速度とした。なお、載荷は当初の供試体高さ200mmが100mm（圧縮ひずみ50%）となるまで実施した。

b) 試験結果および考察

圧縮試験の結果により得られたhiDConの応力-ひずみ関係を図-15に示す。ここで、応力は載荷荷重を当初の供試体断面積で除した値とし、断面積補正は実施していない。また、図-15中に示すひずみレベルでの供試体状況を写真-4に示す。試験結果は次のように要約される。

約0.7%の圧縮ひずみ、12.3N/mm²の応力で降伏した。その時の応力とひずみの関係から、33%割線弾性係数を算出すると約1.1GPaであった。この値は既報¹⁵⁾の200mm角の供試体を用いた際の弾性係数と概ね整合する。普通コンクリートと比較して小さな値であるが、トンネル周方向の変形を可縮部材に集中させるという観点からは小さな弾性係数は有利な力学特性であると考えられる。

降伏後に圧縮ひずみ3.5%に至る過程で、応力は漸減するものの、脆性的な破壊は生じない。これは供試体には降伏後に微細なクラックが生じるが、補強材による拘束効果で、大半の形状が維持されるためと考えられる。また、写真-4(A)でも観察されるが、鋼板の存在により供試体全体を貫通するような大きな破断面の形成が抑制されていることも一つの要因であると推察される。

圧縮ひずみが3.5%から25%程度になるまでは、圧縮ひずみの値によらず応力が9N/mm²付近で、概ね一定値である。圧縮ひずみが25%を超過すると、応力は上昇に転じ、試験終了時（圧縮ひずみ50%）で、32N/mm²となった。骨材として利用されるガラス発泡体がhiDCon内部に変形を吸収できる空隙を形成しており、これら空隙が圧縮される過程では、応力の上昇が抑制、もしくは緩和されているものと考えられる。空隙が閉塞すると、密実な材料が、鋼繊維や鋼板によって内部拘束された擬似的な三軸状態で圧縮されるため、ひずみの増加に伴い応力も上昇すると考えられる。試験終了時には、側面の表層部は薄く剥離するものの、受圧面および中心部は試験開始前と比べて密になっており、ガラス発泡体の空隙が潰されていることが確認された（写真-4(B)を参照）。

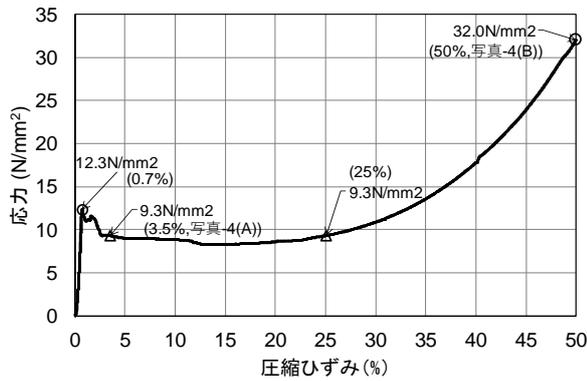


図-15 応力-ひずみ関係

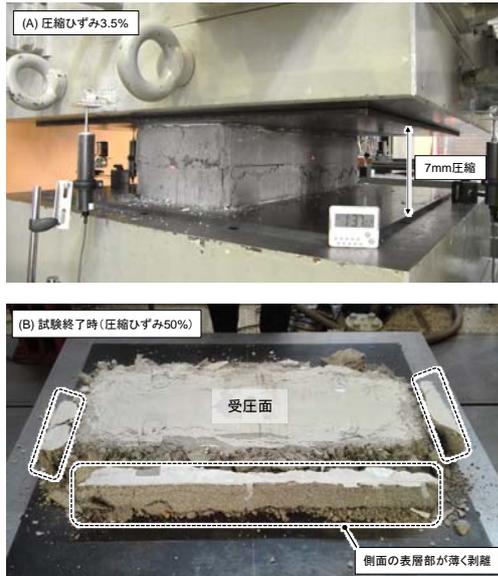


写真-4 試験状況 (A: ひずみ3.5%, B: 試験終了時)

6. まとめ

大土被りトンネルへの可縮支保工の適用性検討の一環として、解析的手法による可縮支保工の設計手法や可縮部材のモデル化手法を提案し、再現解析により妥当性を確認した。また、欧州で使用実績のある既存の可縮部材 hiDCon の実物大試験を行い基本圧縮特性を把握した。

今後は、可縮部材の特性を本論文で報告した設計手法

に反映し、掘削対象となるトンネルの地山条件や立地条件を考慮した可縮支保部材の適用可能範囲等について検討を行うとともに、過去に使用されていた可縮U型鋼の代替についても検討を進める所存である。

参考文献

- 1) Arno Thut et al: Tunnelling in Squeezing Rock-Yielding Elements and Face Control, 8th International Conference on Tunnel Constructions and Underground Structures, 2006
- 2) C.C.Li: Design principles of rock support for underground excavations, Eurock2012, 2012.
- 3) 伊藤, 磯野: 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, 1983.
- 4) W. Schubert: Design of Ductile Tunnel Linings, ARMA2008, 2008.
- 5) K.Kovari: Design Methods with Yielding Support in Squeezing and Swelling Rocks, WTC2009, 2009.
- 6) L.Cantieni, G.Anagnostou, G.Barla, F.Pellet: Spatial effects in tunnelling through squeezing ground, Doctoral thesis, ETH, Zurich, 2011.3
- 7) N. Radonic, W. Schubert, G. Barla: Tunnel design and prediction of system behaviour in weak ground, Doctoral thesis, Graz University of Technology, Graz, 2011.3
- 8) Hanns Wagner, Austrian Federal Railways: The successful application of different excavation methods on the example of the Koralm tunnel lots KAT1&KAT2, Austrian Tunnelling Seminar Ankara, 2015.3.31-4.1
- 9) N.Radonic, W.Schubert, B.Moritz: Ductile support design, Geomechanics and Tunnelling 2, No.5, 2009.
- 10) W.Schubert: Novel method for ductile lining pre-design, Geomechanics and Tunnelling 4, 2011.
- 11) 金子, 市田, 小原: トンネル切羽近傍における一時的な塑性域に着目した地山挙動の考察, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2016.1
- 12) Kaneko, Ichida, Ohara: Study on ground behavior considering temporary plastic zone around tunnel face, Eurock2016, 2016.8
- 13) 市田, 金子, 小原: トンネル支保工の剛性が切羽近傍の一時的塑性域の成長に及ぼす影響について, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム, 2017.1
- 14) <http://www.hidcon.ch/index.php?lang=en>
- 15) 谷, 坂井, 青木, 金子, 市田: 山岳トンネルに用いる可縮支保部材に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-371, pp.741-742, 2017

STUDY OF DESIGN METHODOLOGY AND APPLICABILITY OF YEILDING SUPPORT FOR TUNNELLING

Nobutaka OHARA, Tetsuya KANEKO, Kazuo SAKAI, Takuya TANI and Takeyuki ICHIDA

Deformable supports are applied in mountain tunnelling to deal with large deformation due to poor rock and high stress conditions. The supports that can contract while maintaining a certain compressive resistance have been developed in Europe and implemented in actual tunnels. They are however installed based on the designer's experience and engineering judgements, not based on quantitative methods. In this report we address the current results of ongoing study on the design and numerical modelling method, with the result of a full-scale compression test to verify mechanical characteristics of an yielding element.