

大土被りトンネルに適用する 変位制御型段階式二重支保工に関する検討

村上 浩次^{1*}・北村 義宜¹・宇津野 衛¹・横田 泰宏²・小泉 悠²

¹鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

²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: koji-murakami@kajima.com

土被りの極めて大きい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、欧州の大土被りトンネルでは地山の変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、過度に地山の変形を許容すれば地山を必要以上に緩めることが懸念される。このため、著者らは変形に追従できるが、一定量以上の変位は制限する「変位制御型段階式二重支保工」の開発に取り組んでいる。本稿では、外側支保工に可縮部材を組み込んだ変位制御型二重支保工の概念を示すとともに、可縮部材の圧縮特性をモデル化したトンネルの掘削解析により、可縮部材の最適な仕様を検討した結果を記載する。

Key Words : high overburden, 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、緩みの増大が瞬刻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現象が考えられる。このような地山条件に遭遇した場合であってもトンネルの掘進を継続するためには、地山の緩みや変位を制御することが重要になる。このような地山に対してこれまで日本国内では、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。しかし、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、これら既存の方法では対処できなくなる事態も想定される。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、変位制御型段階式二重支保工の概念を示すとともに、可縮部材の圧縮試験結果より得られた応力—ひずみ関係を再現できる解析モデルを構築し、これを用いたトンネルの掘削解析を行い可縮部材の効果を確認したので、その結果を記載する。

2. 変位制御型段階式二重支保工の概念

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。これらのトンネルは総じて土被りが大きいため、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^{1) 2)}。

また、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)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



写真-1 hiDConの施工事例³⁾

よりトンネルの変形に追従するTHribs（Bouchumer Eisenhutte Heintzmann社製）が広く用いられる（図-1参照）。

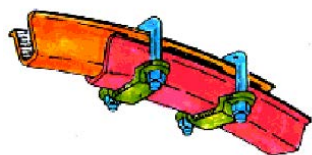


図-1 THribsの構造⁴⁾

これらの可縮支保部材は、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-2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も懸念される。これらの課題を解消するため、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

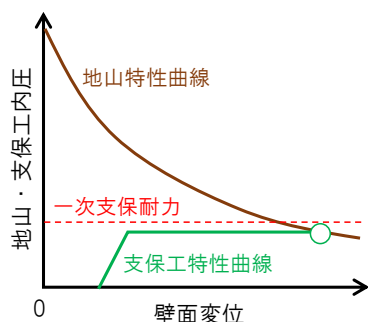


図-2 可動域に制限のない可縮部材を用いた場合の地山特性曲線

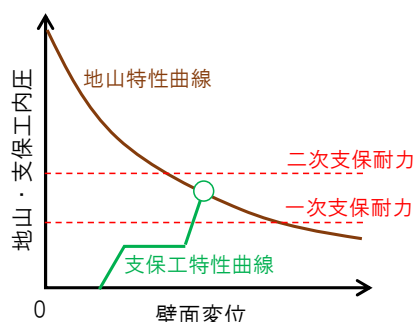


図-3 変位制御型段階式二重支保工の地山特性曲線

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ことができる変位制御型段階式二重支保工の開発を進めている。変位制御型段階式二重支保工の特徴は以下の2点であり、地山特性曲線に表現すれば図-3のようになる。

- 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。

3. 可縮支保部材の圧縮特性

欧州にて広く用いられている可縮部材である特殊コンクリートhiDCon（Solexperts社製）の一軸圧縮試験を実施し、圧縮時の応力-ひずみ関係を確認した。

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-1は、実施した試験ケースと供試体諸元の一覧であり、図-4に供試体の写真と載荷状況を示した。今回の圧縮試験では、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）を用いて両者の応力-ひずみ関係を比較した。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。

表-1 試験ケースと供試体諸元

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



図-4 供試体写真（左）と載荷状況（右）

試験により得られた応力-ひずみ関係を図-5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、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、ひずみが15%を過ぎたあたりで、せん断破壊に伴い応力が少し抜ける挙動を示すものの、概ね応力一定のまま変形に追従していく。最後にひずみが30%を超えたあたりから、再び応力の増加が確認された。

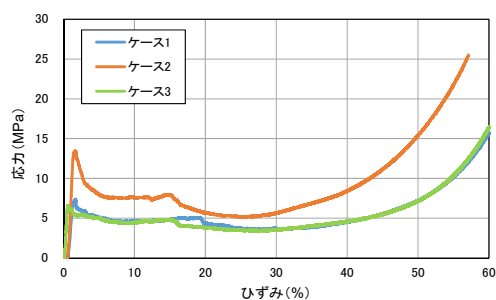


図-5 hiDConの応力-ひずみ関係

図-5で確認されたhiDConの挙動は図-6に示すようにトリニアなモデルで仮定することとした。同図に示す区間Aは、中空ガラスビーズの破壊は生じず、基質をなすコンクリートと中空ガラスビーズが弾性的に変形している状態、区間Bは中空ガラスビーズの一部が破壊が生じて塑性変形を示す状態、区間Cは中空ガラスビーズのすべてが破壊し、再度弾性的な変形に戻った状態を示している。また、区間Aの弾性係数はセメントの種別や水セメント比、降伏応力は中空ガラスビーズの圧縮強度等に依存し、区間Bにおける塑性特性は中空ガラスビーズや鋼繊維の混入率等と関連するため、各種材料の配合を調整することで任意の圧縮特性を有する可縮部材の製作が可能と考えられる。このため、本検討では可縮部材の応力-ひずみ関係を図-7に示すようなトリニア型であると想定して解析モデルを構築した。

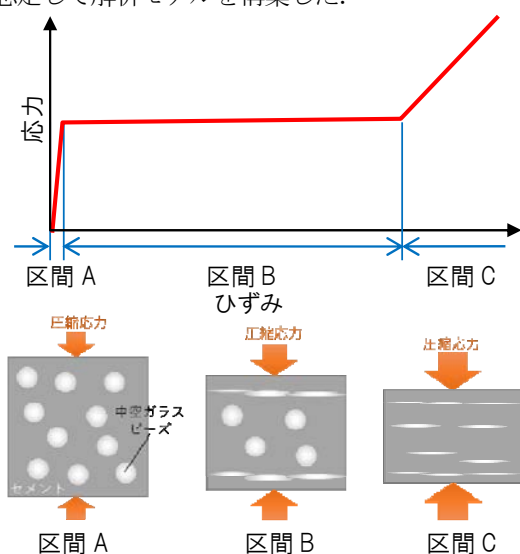


図-6 可縮部材の圧縮特性のモデル化

4. 大土被り条件での解析検討

変位制御型支保構造の効果を検証するため、大土被りの地山を想定した解析検討を行った。解析にはFLAC3D 6.0を使用した。この解析では、可縮構造の有無により支保部材の内側、特に吹付けコンクリートの応力状況にどのような影響が生じるかに着目した。そこで、加背割による影響を少なくするため、全断面掘削工法を想定した解析ステップを採用した。また、吹付けコンクリート、鋼製支保工それぞれの可縮挙動を正確に再現するため、解析モデルは奥行きが1mの三次元モデルを使用し、吹付けコンクリートはシェル要素で、鋼製支保工はビーム要素でモデル化を行った。図-7に解析に使用したメッシュを示す。

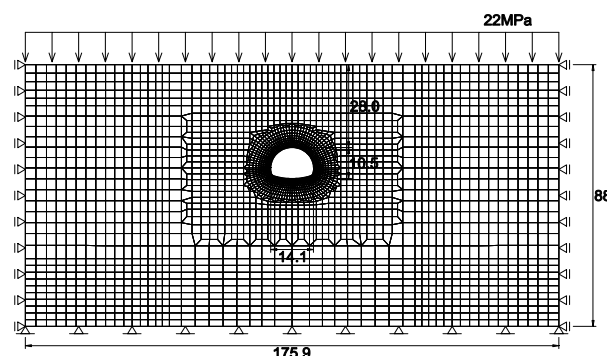


図-7 解析メッシュ

(1) 通常支保ケースの検討

可縮支保を必要とする地山条件は、通常の支保構造では施工が難しいという想定のもと、最初には可縮部を持たない通常支保の解析ケースを実施した。表-2に地山条件を示す。土被りは1000mと大きいが地山は中硬岩～硬岩の比較的健全な地山を想定している。

表-2 地山条件解析入力値

項目	記号	入力値
土被り	H	1000m
側圧比	K_0	1.0
単位体積重量	γ	23.0kN/m ³
初期弾性係数	E_0	1.0×10^6 MPa
粘着力	c	1.0 MPa
内部摩擦角	ϕ	45°
ポアソン比	ν	0.3
引張強度	σ_t	0.2 MPa

a) 支保物性

表-3に支保部材の物性値を示す。本検討では支保部材が過大に応力を負担しないよう、鋼製支保工、吹付けコンクリートともに降伏応力と設計基準強度に達した際は

剛性を低下させ、その後の応力を負担させないような物性モデルを使用した。

表-3 支保物性値

	鋼製支保工	吹付け コンクリート
モデル	ビーム要素	シェル要素
弾性係数:E	200,000 MPa	3,400 MPa
降伏応力度: σ_y	245 MPa	-
設計基準強度: f_{cd}	-	36 MPa

b) 解析ケース

可縮部を持たない通常支保の検討ではあるが、土被りが大きいため、一重支保に加え二重支保のケースも検討した。両ケースとも応力解放率40%で支保の設置を行った。表-4に検討ケースの概要を示す。

表-4 解析ケース

ケース	鋼製支保工	吹付け コンクリート
Case-1 一重支保	H200	t=250 mm
Case-2 二重支保	H200×2	t=250mm×2

c) 解析結果

解放率1%ごとにシェル要素の軸力を部材の面積で除して吹付けコンクリートに発生する応力を算出した。一重支保では解放率70%、二重支保では79%の段階で応力

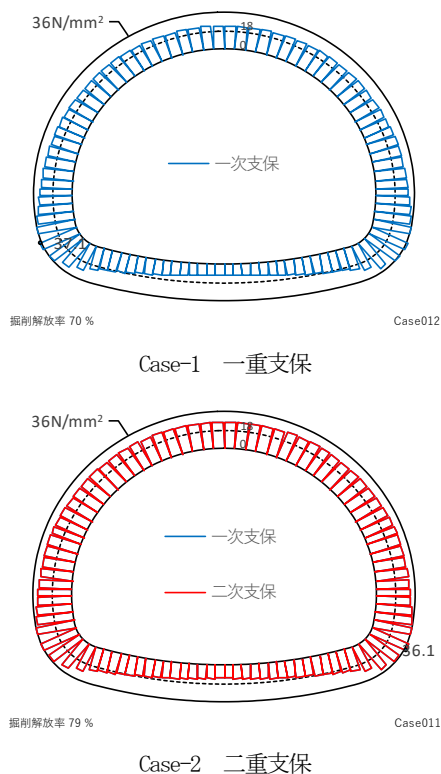


図-8 解析結果 吹付けコンクリート応力分布

が36MPaに達し、支保としての健全性を確保できないことが確認できた。図-8にそれぞれのケースで応力が36MPaに到達した時点の応力分布図を示す。この結果が示すような支保に過大な応力が生じる条件下では、通常は支保工のランクアップや先進導坑の採用によって荷重を低減することが考えられる。

(2) 変位制御型支保構造の検討

前節の結果より、比較的地山の強度が高くても土被りが1000mに達する条件下では、一重支保はもちろん二重支保であっても掘削途中で吹付けコンクリートの応力が設計基準強度を超過することが分かった。

本検討で提案する支保は二重構造を前提としており、先に可縮部を持つ一重目の支保のみを設置する。その後、この可縮部で変位を制御しながら応力を負担し切羽を進める。可縮可動域がなくなるタイミングを見極めて、二次側の支保を設置する。このような機構を支保に持たせることから、本構造を変位制御型支保構造と呼んでいる。

a) 解析ステップ

図-9に変位制御型支保構造の解析ステップを示す。一般的な二次元のトンネル解析では、初期状態から40%応力解放後に支保要素を入れることで、掘削と支保のモデル化を行っている。本手法ではこれに加えて二次側の支保の設置タイミングもパラメータとして必要になる。図-10に示すように、二次側の支保の設置時期が早過ぎると、可縮構造が十分生かされず、二次側の支保が過大に応力を負担することになる。逆に、二次側の支保の設置時期が遅過ぎると、二次側支保設置前に一次側の支保が破壊してしまうことになる。

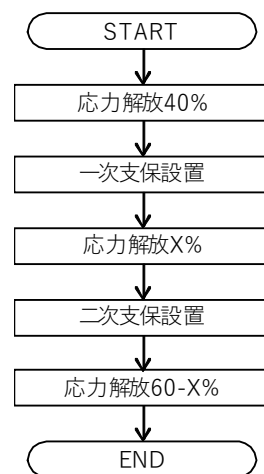


図-9 二重支保解析ステップ

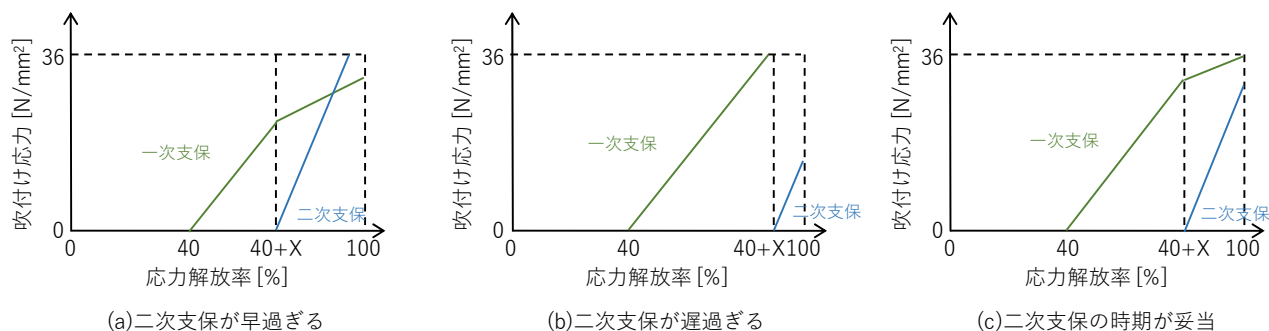


図-10 二重支保の支保応力イメージ

b) 解析モデル

図-11にトンネル周辺の拡大図を示す。可縮構造はアーチ部、インバート部にそれぞれ2箇所ずつ計4箇所設置した。

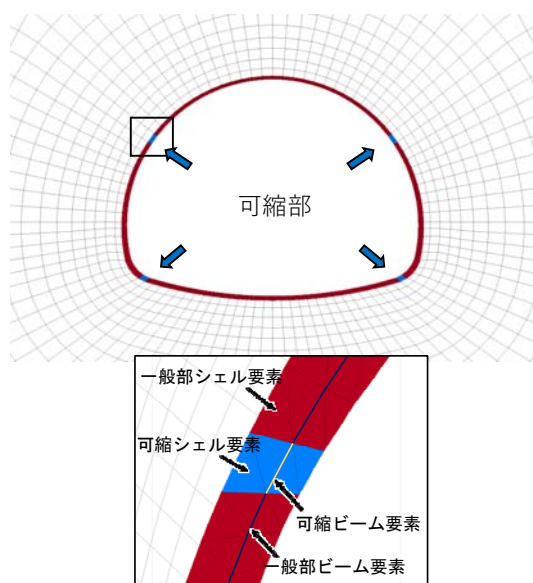


図-11 可縮部を持つ解析モデル

けコンクリート応力の最大値をプロットしたものを図-12に示す。一次支保を設置した後、40%応力を解放した後二次支保を設置したケースでは、最終ステップにおいて応力が36MPaを超過した。

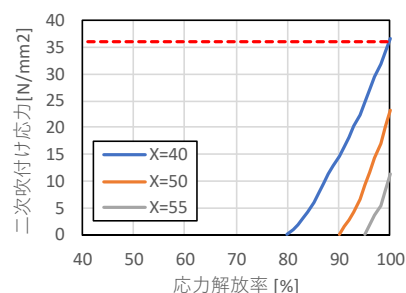


図-12 吹付け応力の増加状況

図-13にX=50のケースでの二次の支保設置時点(解放率90%)と最終ステップ(解放率100%)での吹付けコンクリートの応力分布図を示す。上の図より一次支保だけの時点では可縮部のある位置の周囲で応力の増加が抑制されて

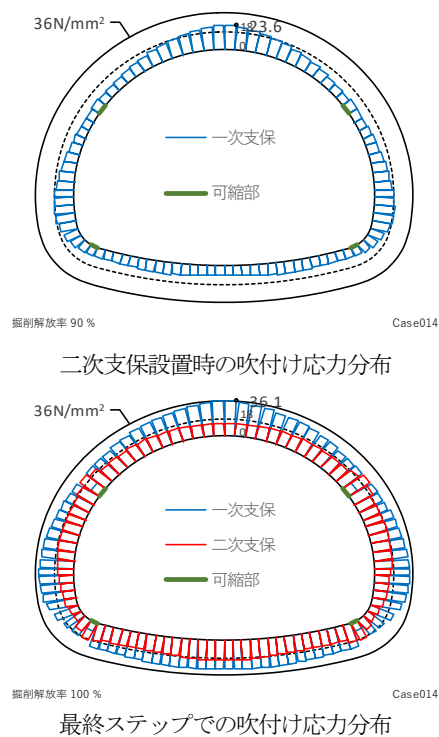


図-13 解析結果 吹付けコンクリート応力分布

(3) 可縮支保の照査方法に関する提案

可縮支保では、支保の応力、地山のゆるみ、変位量など何に着目して、設計の妥当性を確かめるか明瞭な基準がない。本研究では、設計の妥当性つまり支保構造の健全性を担保する指標として、以下の項目を満足することを条件とした。

- ① 鋼製支保工は一次支保、二次支保のどちらも解析の全ての段階での降伏を許容する。
- ② 一次の吹付けコンクリートは、二次支保工設置までは設計基準強度以内であること。
- ③ 二次の吹付けコンクリートは、解析の最終段階まで設計基準強度以内であること。

(4) 解析結果

二次支保を設置するタイミング(一次支保設置後の応力解放率増分 X%)をパラメータとした際の、二次吹付

いることがわかる。また、この時点で既に90%の応力が解放されているが、図-8と比べ全体的に支保の応力が小さくなっている。一方で、可縮構造を持たない二次側の支保を設置することによってリングが閉合されるため、解放率90%以降は応力の増加が大きくなっていることも確認できる。また、二次側の支保で、一次側が可縮部に当たる位置では、特に応力が高くなっていることが分かる。一般部は一次と二次で剛性の高い吹付け厚が50cmあるのに対し、可縮部では半分に当たる25cmは可縮構造で剛性が小さいため、このような結果になったものと考えられる。実施工においては、本検討のように二次側に余裕をもつよう、遅めに支保を設置するか、二次支保設置の段階で、可縮構造をキャンセルし周囲と同程度の剛性、強度を持つような工夫が必要であると考えられる。

5. まとめ

今回、比較的土被りが大きく、一般的な支保構造では支保の健全性が確保できない地山条件において、変位制御型支保構造の効果を解析により確認した。変位制御機構を有した支保工では、一次支保設置から41%以上の応力解放後に二次支保を設置した場合、一次支保、二次支保とも吹付けコンクリートの応力は想定的设计基準強度36MPaに達することなく支保の健全性を確保することができた。

今回は、奥行き1mの3次元解析モデルを使用し、応力解放率により支保効果を再現したが、実際の施工においては、一次支保を設置した後に、二次支保を巻くタイミングは切羽離れで管理されるものと考えられる。同様に、本検討では上半、下半、インバートを同時に掘削することで、解析ステップの簡略化を行ったが、これも実施工では、各ベンチは数メートルから十数メートルの長さをもって施工されることになる。今後は、実施工での施工手順と切羽の進行を模擬した3次元解析を行い、支保工設置の最適な切羽離れを求める検討を行う予定である。

参考文献

- 1) G. Barla & M. Bonini, M. Semeraro : 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 .
- 2) The new Semmering base tunnel – tunnel design in the fault zone, *Geomechanics and Tunnelling*, Volume 4, Issue 3, 2011.
- 3) E. Schneider, M. Spiegl : Convergency compatible support systems, *JUNE 2008 Tunnels & Tunnelling International*, 2008.
- 4) Hoek Evert : *Practical Rock Engineering*, 2006

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

Koji MURAKAMI, Yoshinori KITAMURA, Mori UTSUNO and Yu KOIZUMI

Yielding tunnel supports have been developed and increasingly applied to high overburden tunnels in Europe. However, these yielding supports may loosen 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” is illustrated and the result of examining the optimum specifications of the deformable element is described through the excavation analysis by modeling the compressive characteristics of the element.