

超高強度吹付けコンクリートの土被りトンネルへの適用性検討

大成建設(株) 土木設計部 正会員 大塚 勇・板垣 賢・蔭山 凌・〇横畑 友幹

1. はじめに

大土被りで低強度の地山にトンネルを掘削する場合、大きな変位や支保工の破壊が生じ、特別な対策を余儀なくされることが珍しくない。従来、多重支保工や導坑先進工法などにより対策が行われてきたが、これらの対策は工程の長期化や工費の増大を免れない。当社で開発中の超高強度吹付けコンクリート¹⁾(以降、超高強度)は、従来の吹付けコンクリート(以降、従来型)と比較して高い強度(材齢28日で約100N/mm²)を有しており、従来型よりも厚さを低減することで工期短縮や工費低減に有効であると考えられる。本稿では、超高強度の適用範囲拡大と設計手法確立を目指し、吹付けの若材齢における剛性変化を考慮した3次元掘削解析により、現状の適用範囲と弾性係数の発現過程に着目した感度分析の結果を示すとともに、2次元解析における等価弾性係数に対する考察を示す。

2. 解析条件

解析モデルを図-1に示す。トンネル断面は、直径13.6mの円形とし、解析ステップは、初期地圧13.5MPa(土被り500m相当)を等方等圧に与えた状態から、全断面で掘進長を1mとして掘削・支保設置のステップを繰り返すものとしている。支保部材は、吹付けコンクリート(厚さ:30cm)のみをシェル要素でモデル化し、地山はMohr-Coulombの降伏規準に従う弾完全塑性体のソリッド要素でモデル化している。吹付けコンクリートは超高強度と従来型($\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$)の2通りを想定し、これらの弾性係数と圧縮強度は、実験値¹⁾より得た対数近似曲線および推定式²⁾から図-2に示すものとして1ステップ(サイクルタイム:8.3時間)ごとに吹付けコンクリートの物性値を変更している。解析ケースを表-1に示す。CASEexは、弾性係数の発現過程の影響を検討するため、仮想の材料特性を与えた解析を実施している。解析結果は、トンネル壁面変位と支保応力に着目し、解析値から地山の安定性および支保の健全性を照査することで各吹付けの適用範囲を求めている。

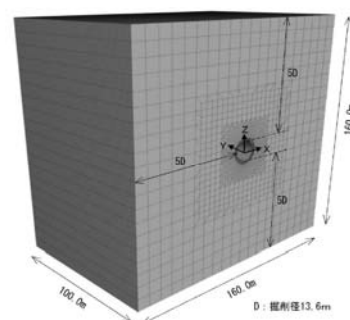


図-1 解析モデル図

表-1 解析ケース

解析ケース	変形係数(MPa)	粘着力(kPa)	内部摩擦角(°)	ポアソン比	吹付け	
					種類	厚さ(cm)
CASE1	200	300	35	0.30	H	30
CASE2	500	500	40	0.30	H	30
CASE3	1000	1000	45	0.30	H	30
CASE4	200	300	35	0.30	N	30
CASE5	500	500	40	0.30	N	30
CASE6	1000	1000	45	0.30	N	30
CASEex	500	500	40	0.30	ex	30

※H: 超高強度 N: 従来型 ex: 仮想

3. 解析結果

1) 超高強度と従来型の適用範囲比較

解析結果より得られた特性曲線を図-3に示す。地山特性曲線は支保工背面の要素のトンネル半径方向応力と壁面変位量をプロットしたものであり、支保特性曲線はシェル要素の応力をトンネル半径方向に換算したものと壁面変位量の関係をプロットしたものである。壁面変位は掘削径の5%(680mm)を許容値とし、支保応力は圧縮強度を許容値としている。ここで、各評価指標がそれぞれ許容値を満足する土被りを推定するために、解析値と許容値の比を計算上の土被り(500m)に掛けて算出した値を換算土被りと定義する。この換算土被りと地山の変形係数の関係から各吹付けの適用範囲を図-4に示す。同図より、今回設定した条件下では、支保応力から算定される換算土被りH1の方が小さいため、着目した評価指標のうち、支保応力から各吹付け材料の適用範囲が決定されているといえる。しかし、超高強度については、地山の変形係数が200MPa以下でH1とH2の関係が逆転し、壁面変位から適用範囲が決定され

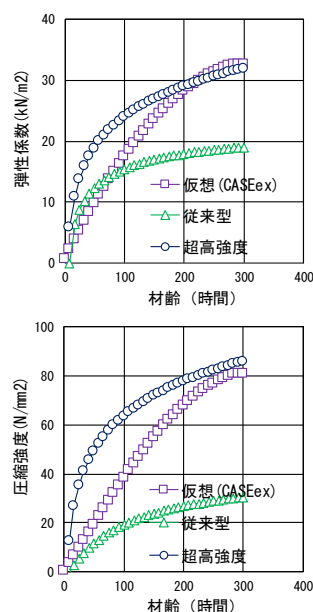


図-2 吹付け材料特性

キーワード 3次元掘削解析, 吹付けコンクリート, 超高強度, 弾性係数

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル) 大成建設株式会社 TEL 03-5381-5296

る領域が存在すると考えられる。超高強度と従来型の適用範囲を比較すると、同じ地山条件においては、超高強度が適用可能となる土被りは、従来型と比較して2倍程度となり、超高強度の優位性が示されたといえる。

2) 吹付け弾性係数の発現過程に着目した感度分析

地表面等の変位に対する制限が少ない大土被りトンネルであれば、超高強度吹付けの適用範囲を拡大するためには、トンネル壁面変位を積極的に許容し、支保応力を低減することが有効であると考えられる。CASE2の地山条件で吹付けの弾性係数の発現過程を変化させた解析であるCASEex(図-2参照)の平衡点を図-5に示す。弾性係数と圧縮強度の最終値は図-2で示したものと同一値としている。CASE2の解析結果と比較し、平衡点はグラフ右下へシフトしている。すなわち、変位を許容することで支保応力が低減されている。また、図-6に示すように、支保応力から算定される換算土被りH1がCASE2と比較して上方へシフトしており、適用範囲が拡大している。ただし上述のように、壁面変位が適用範囲を決定する領域では、適用範囲が縮小すると考えられるため、対象とする地山条件に応じて開発の方向性を決定する必要がある。

3) 吹付けの等価弾性係数の推定

一般的な2次元解析では、吹付けの弾性係数は、打設直後からの剛性変化やクリープ変形を全て考慮した等価弾性係数³⁾が採用されることが多い。図-3で得られる平衡点の吹付け応力と壁面変位から本解析を再現可能な等価弾性係数 E_c を推定した結果を表-2に示す。吹付けの材料特性が同じであれば地山条件によらず、等価弾性係数は同程度の値となる。従来型の弾性係数は全ケースの平均で7.3GPaとなり、一般的に用いられる値(例えば3.4GPa)より大きくなるが、本解析では1ステップで全周を閉合していること等が影響しているものと考えられる。超高強度と従来型を比較すると、2.3倍程度の値となり、超高強度を2次元解析で扱う場合には、従来の吹付けより大きな値として設定することが妥当であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、吹付けコンクリートの剛性変化を考慮した3次元掘削解析により、超高強度吹付けの優位性を示した。また、弾性係数の発現過程が適用範囲に与える影響を示した。今後は、施工データの分析により、本検討で得られた知見の妥当性を評価し、設計手法を確立していきたい。

参考文献

- 1) 川口哲生, 吉本宏和, 武田均: 超高強度材の極若材齢における圧縮強度とヤング係数の発現性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol. 73, V-254, pp. 507-508, 2018
- 2) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針, 2008
- 3) 土屋敬: トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究, 土木学会論文集, III-4, pp31-40, 1985

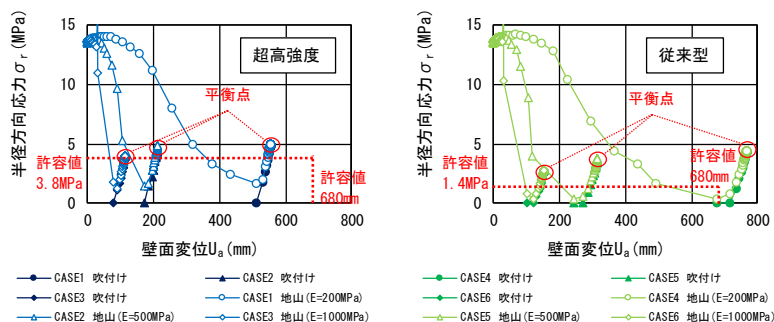


図-3 特性曲線

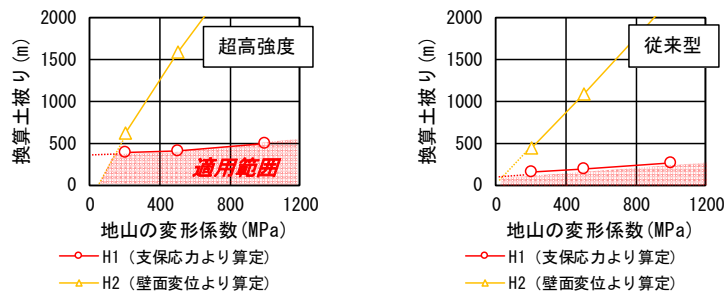


図-4 超高強度と従来型の適用範囲比較

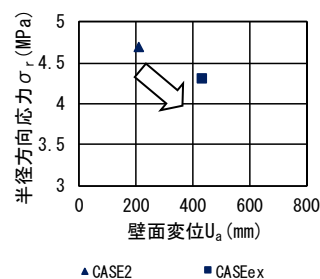


図-5 弾性係数の影響検討 (平衡点の比較)

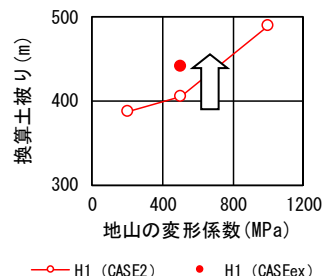


図-6 弾性係数の影響検討 (適用範囲の比較)

表-2 吹付けの等価弾性係数の推定

解析ケース	Kc (MPa)	Ec (GPa)
CASE1	796	16.8
CASE2	778	16.4
CASE3	773	16.3
CASE4	330	6.9
CASE5	350	7.4
CASE6	361	7.6

$$Kc = Ec(a^2 - a_1^2) / (1 + \nu) \{ (1 - 2\nu)a^2 + a_1^2 \} = a \cdot (\sigma_r / U_s)$$

Kc: 吹付けリング剛性, Ec: 吹付け弾性係数

a: 掘削半径, a₁: 吹付け内側までの半径

ν: ポアソン比, σ_r: 吹付け半径方向応力, U_s: 壁面変位