TBM導坑先進拡幅掘削した大断面トンネルの 力学挙動特性

奥隅 豊栄¹・大矢 隆二²・木村 厚之²・上岡 真也²・楠本 太^{3*}

1西日本高速道路株式会社 関西支社 大津工事事務所

²第二名神高速道路甲南トンネル下り線工事 清水建設・飛島建設・錢高組共同企業体 ³清水建設株式会社 土木技術本部 技術第二部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館) *E-mail: kusumoto@shimz.co.jp

甲南トンネル下り線は、掘削断面積約180m²、延長2,531mの大断面トンネルであるので、TBM導坑先進 拡幅掘削工法を採用した.本坑支保構造の標準は設計要領に定められているが、TBM導坑の先行掘削によ り、地質性状や力学特性などは明らかになっているので、再生PET繊維補強高強度吹付けコンクリートと 鋼管膨張型ロックボルトを主要支保部材とする新たな薄肉支保構造系などを計画、設計し、高度化した Smooth Blasting、曲面切羽などを併用し、計測工を実施しながら施工した.

その結果,鋼アーチ支保工のない新支保構造系の大断面トンネル挙動特性と支保効果が標準支保構造との対応で明らかになった.

Key Words : enlargement method, recycled PET fiber, friction anchored rock bolts, large tunnel

1. はじめに

第二名神高速道路甲南トンネル下り線は、掘削断面積約 180m², 延長 2,531mの大断面トンネルであるので、 TBM 導坑先進拡幅掘削工法を採用した.本坑支保構造は、旧日本道路公団(JH)設計要領に定められているが、 TBM 導坑の先行掘削により、地質性状や力学特性などは明らかになっているので、高強度再生 PET(ポリエチレンテレフタレート)繊維補強吹付けコンクリートと鋼管 膨張型ロックボルトを主要支保部材とする新たな薄肉支 保構造系などを設計し、計測工 A, Bを実施しながら拡幅 掘削した.

その結果,鋼アーチ支保工を用いない新支保構造系の 大断面トンネル挙動特性と支保効果が標準支保構造との 対応で明らかになったので、以下に述べる.

2. 地形·地質概要

山地構成岩体は、中世代白亜紀後期の貫入岩体である 田上花崗岩が分布する.この花崗岩は、沢部や深部では、 全体的に中硬質~硬質であり、岩石の一軸圧縮強さは、約 40~100N/mm²である.斜面部では、表層から数十メート ル程度風化が進み、マサ状で脆弱である.トンネル中央 付近の約 300m間は、熱水貫入による変質を受けたと推定される変質花崗岩が分布し、全体に圧砕され、軟質、脆弱な風化・変質岩、断層、亀裂密集帯と局部的に安山岩の岩脈が認められる.切羽集中湧水はない.トンネルの中央付近は、土被り厚 17mの小土被り部が存在する.

3. トンネル支保構造概要

(1) 支保構造仕様と判定基準

トンネル支保構造は、坑口部と小土被り部を除くと、 表-1に示すように、旧JH標準のC -B-P, C -B-P, D -B-Pと効率的支保の C -c-P, C -a-P および脆弱地質の D -B-P であり、SS590 相当の高規格鋼アーチ支保工, 圧縮 強度が 36N/mm²の高強度吹付けコンクリート, 耐力 170kN以上のモルタル充填式ロックボルトを標準支保部 材としている.また、地山等級 C の高効率施工を目指 した C -c-Pは、鋼アーチ支保工代替として、フリクショ ンタイプ鋼管膨張型ロックボルトと薄肉高じん性の高強 度繊維補強吹付けコンクリートを主要支保部材にしてい る.D -B-Pは、TBM 導坑施工時に、TBM 切羽は先抜け、 崩壊し、補助工法と簡易ライナで施工した区間に対応し、 支保性能は坑口部と同様であるが、補助工法として注入 式長尺鋼管先受け工を採用する.

表-1 トンネル支保構造仕様

鋼アーチ支保工								ロックボルト				
なし		C -B-P						1 5	2.0	6.0		
なし			C -c-P					1.0	2.0	6.0	4 0	
上半	H-125			C -a-P				1.5	15	15		
上下半	HH-154				С -В-Р			1.2	1.5	6.0		
上下半	HH-154					D -B-P		1.2	1.2	0.0	6.0	
上下半	HH-200						D -B-P	1.0	1.0		0.0	
吹付け厚 (cm)			1	5		20	25	周方向	延長方向	上半	下半	
繊維補強(上半)		SFRS	PETFRS プレーン					(m)	(m)	ボルト	長(m)	
								(C -c-P:上半は鋼管膨張型)				

支保パターン判定基準は、表-2に示すように、旧JH施 工管理要領に先行施工した甲南トンネル上り線工事の実 績を反映させたものを適用する.

表-2 支保パターン判定基準

古保パタン	切羽評価点													
	10		20		30		40		50		60		70	
B-B-P														•••
С -В-Р									• • •					
C -c-P														
C -a-P														
С -В-Р														
D -B-P			•••			• • •								
D -B-P														
──岩判定の目安 ──= 均的な範囲 硬質・塊状岩の範囲														

(2) 効率的支保構造

地山等級 C では、掘削面周辺岩盤の自立度は高く、TBM 導坑の先行掘削により、地山性状はすでに明らかになっ ているので、周辺岩盤はシステムロックボルトで早期に 縫付け、掘削自由面は薄肉高強度吹付けコンクリートで 補強する方法は、支保構造系の力学的安定確保に最も有 効と考え、新支保部材による支保構造 C -c-Pを設計した (図-1).これの実施は、旧 JH新切羽評価点法の切羽評 価点が 45~60 点の範囲内とし、新支保部材の特徴は、以 下に示す.



図-1新支保パターン概要(C -c-P)

a) フリクションタイプロックボルト

上半断面 15本のシステムロックボルトは、打設直後か ら地山補強効果が期待できる高耐食メッキ ZAM 加工鋼 管の 36mm フリクションタイプ鋼管膨張型ロックボル ト (RPE Rock Bolt, 耐力 170kN 以上, 膨張時 54mm, 加圧 水圧 25N/mm²)を採用する.下半断面 4本は, 標準的な モルタル充填全面定着型ツイストボルトである. b) 高強度 PET 繊維補強吹付けコンクリート

吹付けコンクリートは、ロックボルト間の不安定岩塊 などの保持による周辺岩盤の自立安定確保を主な支保機 能とし、スラリー状急結剤による吹付けコンクリート配 合決定のための品質管理基準は、旧JH基準(表-3)を準 拠する. 材齢 28 日における曲げじん性特性の「荷重-たわみ仕様線」は、曲げじん性試験値のすべての変位に 対して、以下に求める荷重 P を下まわらないようにする.

この荷重 P は、図-2 に示すように、鋼管膨張型ロック ボルト間の不安定岩盤ブロックの自重とし、吹付け厚さ 15cm の吹付けコンクリートに作用する荷量として W=24.5kNを想定し、これを曲げじん性試験用供試体寸法 100×100の荷重に対応させて、P=W×0.1(軸方向)× 0.10.15(吹付け厚) 1.63 1.7kNを定めている.

表-3 高強度繊維補卵次付けコンクリート品質管理基準

材齢3時間における平均強度	N/mm ²	2
材齢1日における強度	N/mf	10
材齢28日における強度	N/mf	36
スランプ	a	18±2
粗骨材の最大寸法	m	10
単位セメント量	kg	450
単位急結測量(対切計量)	%	10



図-2 吹付けコンクリート作用荷重概念

再生 PET 短繊維材は、繊維長 30mm, 換算直径 0.7mm, 密度 13.2kW/m³, 引張強度 477Wmm², ヤング係数 23,000W/mm² のものを使用し、高強度 PET 繊維補強吹付けコンクリートの繊維混入率は 0.75%である。

発破時の掘削面周辺岩盤の損傷域を抑制し、掘削面を 平滑に仕上げることにより周辺岩盤の安定度は高くなる ので、Electronic Delay DetonatorSmooth Blasting 工法を採用す る.SB 孔を除く払い助孔などは、爆薬の機械集中装填が 可能なバルクスラリー爆薬を使用する.SB 孔の穿孔は、 三次元自動測量・計測システムのもとで稼動する 2B 全 自動コンピュータジャンボと 3B ホイールジャンボを配 置し、削孔管理する.また、切羽鏡面自立の確保、グラン ドアーチ形成の促進、発破効率の向上をねらって、TBM 導坑周辺の中央部を深く掘り込んだ自立度の高い凹面形 状の曲面切羽(図-3)を採用する.



5. 計測工要領

トンネル支保構造系の挙動特性の把握, 力学的安定性 と支保効果の確認および設計照査などを主目的として, 計測工 A, B を実施した(図-4).計測工 A の計測断面 は, トンネル進行方向 6~20m間隔に設け, 切羽通過時に, 1 断面に 7 測点を設け, 初期値をとり, 12時間毎に自動測 定する.計測工 B は, 標準支保パターン C -B-P と新支 保パターン C -c-P に, それぞれ 1 断面ずつ設ける.計器 配置概要は, 図-5 に示す.



図-4 計測断面配置概要

6. 計測結果と考察

(1) 大断面トンネルの挙動特性

計測工 A計測断面数は 156 である.下半後の支保パタ ーン別測点変位の平均値は図-6 に示し、下半後変位量の 切羽評価点との対応は、図-7 に示す.また、下半後天端沈 下量の掘削エネルギー値 じとの対応は、図-8 に示す.



計器	最小読取	測線長	
地中変位計(8点)	Е	0.05mm 以下	12.0m
コンクリート有効応力計	Т	0.1N/mm ² 以下	
鋼管膨張型 RB 軸力計(6 点)	R	0.2kN 以下	5.5m

図-5 計器配置概要(計測工B)













図-8 天端沈下(下半後)

これから、以下のことがわかる.

下半後内空変位の平均値は、切羽評価点が35以上では、2~3mm内空側に変位する.天端沈下の平均値は、-4mm以下の沈下であり、地山等級Cでは、支保構造の違いによる有意な変位差はなく、2車線道路トンネルの場合²と同程度の約10mm以下である.

切羽評価点が 20 を下まわると、天端沈下の平均値 は-42mm、内空変位は 34mm となり急激に増加し、支保構 造系は不安定になり、第三紀層堆積岩の場合と同様の挙 動特性 ³を示す.

切羽評価点が 30以上の下半後上半内空変位は、地山 側に約 5mm 広がり、約 8mm の上方向への天端沈下が測 定された.これは、応力再配分過程において、岩盤の力学 特性と断面形状などに起因し、天端からアーチ部に限定 して、固有のグランドアーチ形成がなされたと推察する

TBM 導坑施工時の掘削エネルギー値が 20N/mm²以 上では、本坑変位量は 10mm 以下である.地山等級が D で、これが 15N/mm²を下まわると、天端沈下は急激に増加 し、支保構造系は不安定になる.

(2) 周辺地山の挙動特性

C -B-P,C -c-Pの2断面での地中変位測定結果の半径 方向ひずみは、切羽2m進行時、上半収束時、下半収束時に ついて、図-9 に示す.C -c-Pの天端と右肩測線の半径 方向ひずみの切羽距離との関係は、図-10 に示す.これ らから、以下のことがわかる.

C -c-P では、半径方向ひずみは約 0.2%以下の伸び と小さく、切羽 2m進行時にその大半が発生し、その後の 増加は、上半脚部測線を除き、少ない、C -B-P の天端と 左肩部測線では、伸びと縮みが分布する地質不良部固有 の特性が現れるが、これを除くと、C -c-P と同等レベル の半径方向ひずみが発生する.

半径方向ひずみは、グランドアーチ域内で、卓越する 周方向応力場に直交し、自由面に向かって発生するが、天 端測線では、上半切羽通過時に、その大半が発生し、その 後は、このひずみレベルで推移する.これに対し、肩部測 線では、切羽進行とともに増加傾向を示し、上半切羽通過 後も、グランドアーチ形成は継続する. 地山等級 C では、グランドアーチ域は、掘削面から約 0.3 倍掘削幅の約 6m範囲に形成され、これの半径方向ひ ずみの平均値は、約 0.1~0.2%の伸びである.このことか ら、掘削面での発生変位量 は、グランドアーチ形成域の 広がりと岩盤の力学特性で決まる半径方向ひずみの測定 値を用いて計算すると、 =6,000 × (0.001~0.002)=6~ 12mmとなり、計測工 A からの測定変位値と対応する.





(3) 吹付けコンクリートの補強効果

地山等級 C の吹付けコンクリート軸応力度は、C - c-P, C -B-Pの 2 断面について、図-11 に示す.これの施工 1 日後設計強度に対する吹付けコンクリート軸応力測定値 の比は、図-12 に示す.また、背面土圧 Pe は、吹付けコン クリート換算軸力 Ni とトンネル半径 r を用いて、Pe=Nirr で計算すると、図-13 のように求まる.これらから、以下 のことがわかる.

吹付けコンクリート軸応力の最大値は,右脚部を除 くと,アーチ部に生じ,2.5~3.9N/mm²の圧縮であり,設計 強度36N/mm²に対して,十分に余裕を持って安定する.

吹付けコンクリートに作用する背面土圧は、Pe=42~ 65kWm²が推定され、これはグランドアーチ域内の卓越す る周方向圧縮応力場を形成する深度 2.5~4.5mより内側 の掘削面から 1.6~2.5m高の土荷重に相当する.このこ とから、自立度の高い地山等級 C での吹付けコンクリー トは、地質不良部の場合 ⁴⁾と異なり、グランドアーチ形成 による支保構造系の自立安定への直接的な寄与は小さい.

吹付けコンクリート施工1日後すなわち上半切羽 8 m進行時の吹付けコンクリート設計強度(10N/mm²)に対 する測定軸応力の比は、C -c-P、C -B-Pともに 0.12以下 であり、掘削の初期段階では、吹付けコンクリートへの作 用外力は小さい.また、吹付けコンクリート仕様の違い が支保性能や変形特性などに及ぼす影響は小さい.



(4) ロックボルトの補強効果

鋼管膨張型の C -c-P と全面定着型の C -B-P のロックボルト軸力分布は、図-14 に示し、天端測線でのロックボルト軸力の切羽距離との関係は、図-15 に示す.



これらから、以下のことがわかる.

鋼管膨張型ロックボルト軸力の最大値は、右肩部の 深度 4.5mで、144kN の引張である.天端部の深度 2.5mで は、94kN の引張である.これ以外は 50kN 以下と小さい. これと同じ断面に打設した全面定着型ロックボルトの R21,R22 では、25kN 以下の引張であり、鋼管膨張型に比べ て滑らかに発生し、小さい.また、全面定着型ロックボル ト軸力の最大値は、天端部の深度 4.5mで、160kN の引張で ある.これ以外は 30~80kN 以下と小さい.

鋼管膨張型ロックボルトは、打設後の切羽 2m進行時に、全軸力の 50~80%以上が発生し、上半切羽が 4m進行すると、ほぼ収束傾向を示す.全面定着型では、切羽 2 m進行時に、約 45kN の引張が発生するが、上半切羽進行とともに増加する傾向を示す.

C -c-P の鋼管膨張型ロックボルト軸力の深度方向 変化は激しいが、半径方向地中ひずみの変化は滑らかで 小さい.C -B-P の全面定着型ロックボルト軸力の深度 方向変化は滑らかであるが、半径方向地中ひずみは大き く変化する.このことから、ロックボルト仕様の違いは、 周辺岩盤の挙動特性に現れるが、岩盤性状の違いの方が 支配的であり、これによる有意な変位差は見られない.

(5) C -c-P, C -a-Pの適合性

C -c-P により、切羽評価点が 55 を下まわる地山にお いて、1 掘進長 2.0mで、延長 330mの施工を可能にした. また、鋼アーチ支保工サイズを H-125 とする C -a-P は、 切羽評価点 20~50 に適用し、標準支保パターン C -B-P の施工延長 845mと同程度の延長 647mを施工した.こ れら 2 タイプの支保構造系は、標準支保パターンと同様 の挙動特性を示し、力学的安定は確保でき、支保構造仕様 の違いによる変位量の有意な差はみられない.

(6) 支保構造系の不安定化

重力作用方向とグランドアーチ形成域内の周方向圧縮 応力場の方向が直交する天端からアーチ部にかけて、上 半切羽通過時に、グランドアーチは概ね形成され、力学的 に安定する.これに対し、重力作用方向とグランドアー チ形成域内の周方向圧縮応力場の方向が一致する側部で は、グランドアーチの形成過程がアーチ部の場合と大き く異なり、この周方向応力場は切羽通過後も継続して変 化し、支保構造系の力学的安定は、この側部岩盤の強度特 性に支配され、グランドアーチ域の周方向応力場が地山 強度を超えると不安定になり、大きく変位する.

7. おわりに

大断面トンネルの施工に、TBM 導坑先進拡幅掘削工法 を適用し、新たな薄肉支保構造系を含む 5 支保パターン を設計、施工した.その結果、結晶質岩における大断面ト ンネルの挙動特性と支保効果がグランドアーチ形成との 関係で判明した.

今後は、第三紀層堆積岩などの計測データと対比する ことにより、更なる考察を加え、大断面トンネルの挙動特 性としてとりまとめる予定である.

参考文献

- 高戸順一,木村厚之,大矢隆二:TBM 機械データの工学的評価に関する考察,土木学会第61回年次学術講演会,第部門,2006年9月.
- 2) 中田雅博:比較的良好な地山における山岳トンネルの支保 工選定に関する研究,山口大学学位論文, pp.38-42, 1999 年 12 月.
- 3) 小林隆幸, 佐藤 淳, 楠本 太: 脆弱地質での大断面トンネ ルの挙動特性, 第 33回岩盤力学に関するシンポジウム, 2004 年1月.
- 4) 大西昌彦, 川俣和久, 楠本 太: 大規模断層破壊帯を大断面双 設トンネルが貫く, トンネルと地下, 2005年8月.

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A LARGE TUNNEL EXCAVATED BY USING THE TBM PILOT DRIFT AND ENLARGEMENT METHOD

Toyohide OKUZUMI, Ryuji OHYA, Atsuyuki KIMURA, Shinya UEOKA and Futoshi KUSUMOTO

The TBM pilot drift and enlargement method was used to construct the outbound lane of the New Meishin Expressway Konan Tunnel since it is a long, large tunnel. After identifying geological characteristics and mechanical stability during the first step of the TBM pilot tunnel excavation, a new supporting system using mainly high-strength shotcree reinforced with recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber and friction anchored rock bolts was proposed and measurements were taken during construction. This led to the identification of the mechanical characteristics of a large tunnel when constructed with this new supporting system in comparison with a standard supporting system.