PC鋼棒ロックボルトの変位抑制効果に関する解析的検証

鹿島建設株式会社　　正会員　　小野塚　大輔　畝田　篤志
北村　義宣　○秋山　崇裕

1．はじめに

城山八王子トンネルは,圏央道(さがみ縦貫道路)の一部となる,神奈川県と東京都の都県境に位置する上下線2本の併設道路トンネルであり,2011年12月に神奈川県区間（延長1.6km）の掘削を完了した.本トンネルでは図-2に示すような鉛直方向の亀裂が発達する頁岩がトンネル軸方向に沿って連続して出現し,土被り50m以上の領域で150mmを超える内空変位が発生した.この変状対策としてロックボルトにPC鋼棒を採用したところ,顕著な変位抑制効果が確認された[1].本文ではPC鋼棒ロックボルトのトンネル変形抑制効果を解析的に検証したので,その結果を報告する.

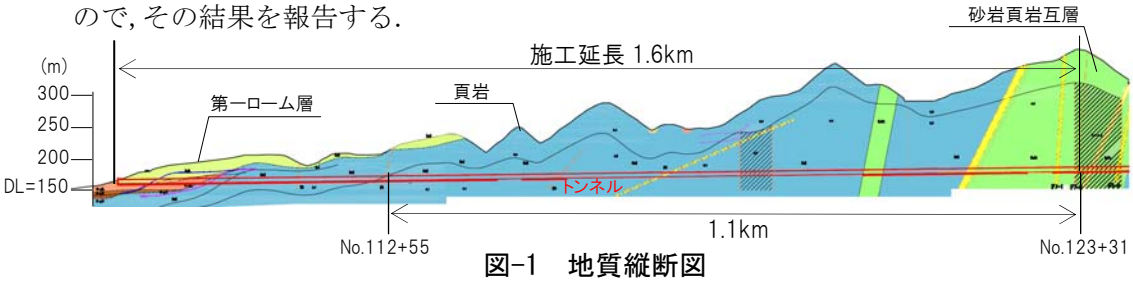

図-1　地質縦断図

図-2　頁岩亀裂状況写真

2. 変形抑制対策とその効果について

①変形抑制対策の概要

表-1に示すＤⅠ-KからＤⅡs-K-4までの支保パターンを順次採用し,土被りの増加に合わせて段階的に支保耐力を向上させた.またＤⅡ-K-2からＤⅡs-K-4までは,亀裂面に直交する方向に追加ロックボルトを施工することで内空変位の抑制を図った.特にＤⅡs-K-4はロックボルトを降伏させぬ様,降伏応力の高いPC鋼棒を用い,より高い変形抑制効果を期待した.

表-1　支保パターン一覧

支保パターン	鋼アーチ支保工	吹付けコンクリート厚(cm)	ロックボルト 長さ(m)	延長方向(m)	周方向(m)	耐力(kN)	本数(本)	備考
ＤⅠ-K	H125	20	4	1	1.2	176.5	19	－
ＤⅡ-K	H150	20	4	1	1.2	176.5	19	－
ＤⅡ-K-2	H150	20	4	1	1.2	176.5	15	側壁部追加ロックボルト(通常ロックボルト)
			6	1	0.6	176.5	10	
ＤⅡs-K-2	H200	25	4	1	1.2	176.5	15	側壁部追加ロックボルト(通常ロックボルト)
			6	1	0.6	176.5	10	
ＤⅡs-K-3	H200	25	4	1	1.2	176.5	15	側壁部追加ロックボルト(鋼管拡張型)
			6	1	0.6	176.5	10	
ＤⅡs-K-4	H200	25	4	1	1.2	176.5	15	側壁部追加ロックボルト(PC鋼棒)
			6	1	0.6	748	10	

②坑内変位計測結果

上り線における支保パターンと内空変位および天端沈下収束値の関係を図-3に示す.また表-2に上下線の各支保パターンに対する平均土被りと平均坑内変位を算出した結果を示す.これらの結果からＤⅡs-K-4(追加ロックボルト：PC鋼棒ロックボルト)を採用した後に土被りが大きいにも拘わらず坑内変位が顕著に低下することが確認できる.

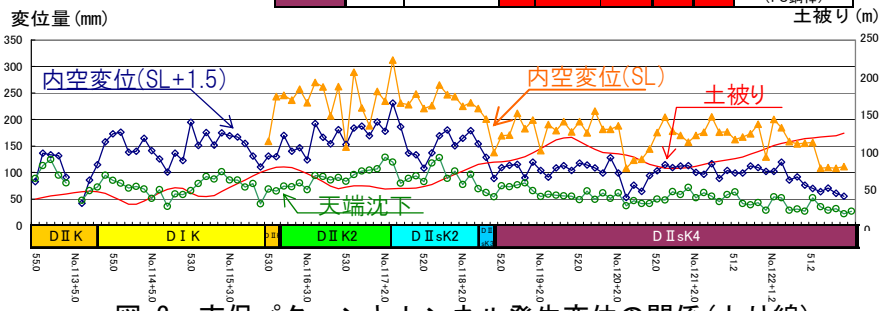

図-3　支保パターンとトンネル発生変位の関係(上り線)

表-2　支保パターン別平均内空変位量

支保パターン	平均土被り(m)	平均SL内空変位(mm)	平均天端沈下(mm)
ＤⅡ-K	75	187	80
ＤⅡ-K-2	90	216	82
ＤⅡs-K-2	85	188	67
ＤⅡs-K-3	116	211	－
ＤⅡs-K-4	134	153	42

③ロックボルト軸力計測結果

土被り120m前後の位置にてＤⅡs-K-2(追加ロックボルト：通常ロックボルト)とＤⅡs-K-4のロックボルト軸力を計測した結果を表-3に示す.通常ロックボルトを用いたＤⅡs-K-2は降伏しているのに対し,ＤⅡs-K-4(追加ロックボルト:PC鋼棒ロックボルト)は降伏応力を下回っていることが確認される.

表-3　ロックボルト軸力計測結果

支保パターン	最大値(kN)	耐力(kN)
ＤⅡs-K-2	198(降伏)	175
ＤⅡs-K-4	465	784

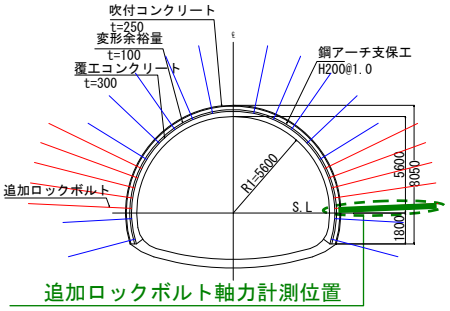

図-4　ロックボルト軸力計測位置
(ＤⅡs-K-2,ＤⅡs-K-4)

キーワード：NATM,ロックボルト,PC鋼棒,頁岩,FEM解析
連絡先：〒107-8502　東京都港区赤坂6-5-30　　Tel：03-6229-6614　Fax：03-5561-2156

3. 地盤物性値の再現解析

上下線で採用され,早期にデータの評価・分析が可能であった支保パターンDⅡ-Kを対象とし,2次元FEMによる地盤物性値の再現解析を実施する.トンネル掘削時の計測結果を基に解析を行い頁岩区間全線での地盤物性値を推定する.

本解析で用いた支保部材の物性値を表-4に示す.本解析ではロックボルトを梁要素でモデル化し鋼材応力が降伏応力を超えた際には鋼材の剛性を低下させる応力-ひずみ関係を採用する(図-5).

再現解析の結果,表-5に示すように実測値の坑内変位は概ね一致する.本解析により得られた地盤物性値として表-6に示す値を得た.

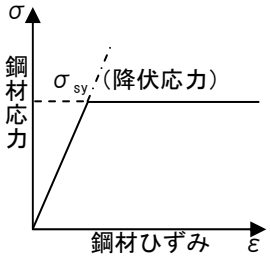

図-5 鋼材の応力-ひずみ関係(非線形弾性モデル)

表-4 支保部材物性値

支保部材			単位体積重量 γ(kN/m³)	変形係数 E(kN/m²)	断面積 A(m²)	断面2次モーメント I(m⁴)	断面係数 Z(m³)	降伏応力 σsy(kN/m²)
ロックボルト	PC	D=32	78	2.1.×10⁸	8.0×10⁻⁴	5.1×10⁻⁸	3.2×10⁻⁶	9.3×10⁵
	通常	D=25			4.9×10⁻⁴	1.9×10⁻⁸	1.5×10⁻⁶	3.5×10⁵
鋼製支保工	H-200		78	2.0.×10⁸	6.3×10⁻³	4.7×10⁻⁵	4.7×10⁻⁴	2.4×10⁵
	H-150				3.9×10⁻³	1.6×10⁻⁵	2.1×10⁻⁴	2.4×10⁵
吹付けコンクリート	t=250		23	3.4.×10⁶	0.25	―		―
	t=200				0.2	―		―

表-5 解析結果と実測値の比較

支保パターン		平均土被り(m)	平均SL内空変位(mm)	平均天端沈下(mm)
DⅡ-K	実測値	75	187	80
	解析結果		189	75

表-6 地盤物性値(再現解析により算出)

単位体積重量 (kN/m³)	変形係数 (kN/m²)	ポアソン比	粘着力 (kN/m²)	内部摩擦角 (°)	側圧係数
24.0	190000	0.35	17.0	37.0	0.54

4. 支保パターン別トンネル掘削挙動の再現解析と変位抑制効果の検証

表-6に示す地盤物性値を各支保パターンに適用したFEMを実施し,トンネル掘削挙動の再現性を確認する.

①内空変位解析値と平均実測値の比較

図-6に土被りに応じた内空変位の解析値と平均実測値を支保パターン別に比較した結果を示しており,各支保パターンにおける平均実測値と解析結果が一致している.

DⅡ-K-2,DⅡs-K-2(追加ロックボルト:通常ロックボルト)とDⅡs-K-4(追加ロックボルト:PC鋼棒ロックボルト)を比較するとDⅡs-K-4では土被りが大きいにも拘わらず内空変位が顕著に抑制されている事が確認される.

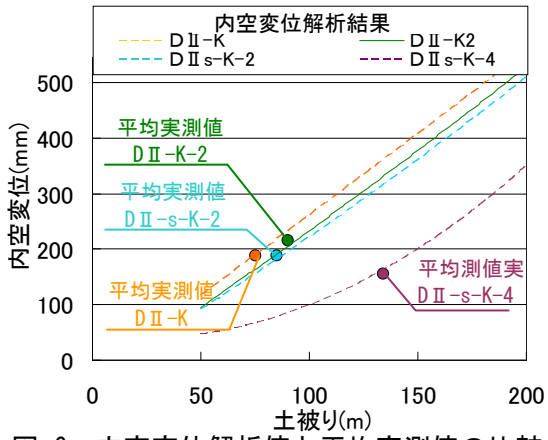

図-6 内空変位解析値と平均実測値の比較

②ロックボルト軸力解析値と実測値の比較

図-7にロックボルト軸力の解析値と実測値を比較した結果を示しており,解析結果と実測値が概ね一致している.解析結果,実測値でDⅡs-K-2(追加ロックボルト:通常ロックボルト)のロックボルトが降伏しているのに対し,PC鋼棒ロックボルトは降伏応力を下回ることが確認される.

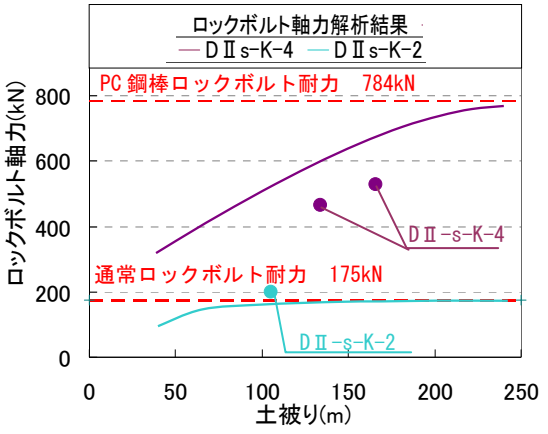

図-7 ロックボルト軸力解析値と実測値の比較

5. まとめ

本事例ではPC鋼棒ロックボルトによる変位抑制効果について解析的に検証し,PC鋼棒ロックボルトの大きな変位抑制効果が確認された.本報告が同種工事の参考となれば幸いである.

参考文献 1)北村義宣,畝田篤志,上南隆,小野塚大輔:頁岩地山に対するPC鋼棒ロックボルトのトンネル変形抑制効果について-さがみ縦貫城山八王子トンネル(その1-2)工事-,第66回年次学術講演会,2010