

高土被りの泥岩地山における大断面トンネルの変形挙動

Deformation behaviors of large cross sectional tunnel in sedimentary rock

八木 弘¹⁾・大坪 力²⁾・橋本昌朗²⁾・吉田安利³⁾・河又 清³⁾

Hiroshi YAGI, Chikara OOTSUBO, Masaaki HASHIMOTO, Yasutoshi YOSHIDA and Kiyoshi KAWAMATA

The Kanaya tunnel in the New Tomei Expressway employed the TBM pilot-tunneling method is under construction. These tunnels with large cross sectional area, in general, cause large deformation at the foot of top heading due to the stress concentration. In particular, the zone where the overburden depth is about 300m in mudstone layer demonstrates excessive displacement more than 100mm without convergence tendency. Considering the restriction of excessive internal and foot displacement and the reinforcement of the surrounding ground, the high tensile strength bolts instead of rock bolts are introduced on the circumferential arrangement.

This paper describes the results and applications of the high tensile strength bolts as the countermeasures for the excessive displacement.

Key Words: mudstone, high tensile strength bolt, large displacement, TBM pilot-tunneling method, large cross sectional tunnel

1. はじめに

大断面トンネルにおける変形挙動の特徴として、上半掘削時に上半脚部に大きな応力集中が見られることが挙げられる。当トンネルにおいても土被りが約 300mの脆弱な泥岩層では地山強度比が 2 以下となり、掘削後の内空変位が収束せず、100mm を超える変位が発生し、ロックボルトの破断や吹付けコンクリートのクラックが現象として現れた。TBM掘削時のデータを用いた事前検討による評価よりも地山状況が悪く、変位抑制や支保耐力の向上が必要となった。変形挙動の特色として水平変位と脚部沈下が卓越したため、対策として耐力 748KNのPC鋼棒をパターンボルトとして採用したところ、変位抑制効果が顕著に現れた。

本報告は泥岩地山における大断面トンネルの変状対策実績とロックボルトとしてのPC鋼棒の適用性を報告するものである。

2. 金谷トンネルの概要

1) 工事概要

第二東名高速道路の金谷トンネルは、静岡県掛川市大字倉真～榛原郡金谷町に位置する、上り線延長 4,527m、下り線延長 4,667mのトンネルである。約 190 m²の掘削断面を有する第二東名高速道路で最も長

- 1) 正会員 日本道路公団 静岡建設局 掛川工事事務所
- 2) 日本道路公団 静岡建設局 掛川工事事務所
- 3) 金谷トンネル西工事 鹿島・竹中土木・青木建設共同企業体

いトンネルで、掘削工法はTBM導坑先進拡幅掘削工法を採用している。

金谷トンネル西工事の下り線本坑トンネルは36ヶ月で2,540mを掘削し、今年8月に貫通を迎えた。本報告で述べる脆弱地山区間(約920m)においては、各種の変状対策を実施したことにより、通過に約16ヶ月を要した。

2) 地質と地山の特徴

金谷トンネルの地質は、トンネル中央部を境に新第三紀中新世の倉真層群と古第三紀漸新世の瀬戸川層群に分けられ、泥岩、砂岩、頁岩の互層で構成されている。(図-1参照)

西坑口側の倉真層群泥質岩層は第三紀泥岩としては硬質な良好岩盤である。これに続く砂岩層から戸綿泥岩層、天方砂岩層の岩石コアの物性値を表-1に示すが、泥岩優勢層では砂岩に比べて著しく強度が劣るのが特徴であり、泥岩優勢で風化が進んでいるものはスレーキングしやすい特徴を有している。また、砂岩優勢互層では硬質であるが亀裂が発達しているのが特徴である。この区間は土被りが約300mと大きく、岩の性状から、掘削後に地山変形が生じやすい区間となっており、下り線TBM掘削実績では導坑変状、TBMの機体拘束、天端崩落などが発生している。瀬戸川層群は強い褶曲作用による鏡肌を持つ頁岩が砂岩の亀裂に挟まっており、剥落の多い不良地山区間となっている。

表-1 地山岩石コア物性

地質	泥岩	砂岩
密度(g/cm ³)	2.487	2.494
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	2.4	51.1
変形係数 E (MPa)	2,790	9,760
静ポアソン比 ν	0.34	0.28
V_p (km/sec)	3.0	3.6
V_s (km/sec)	1.4	2.1

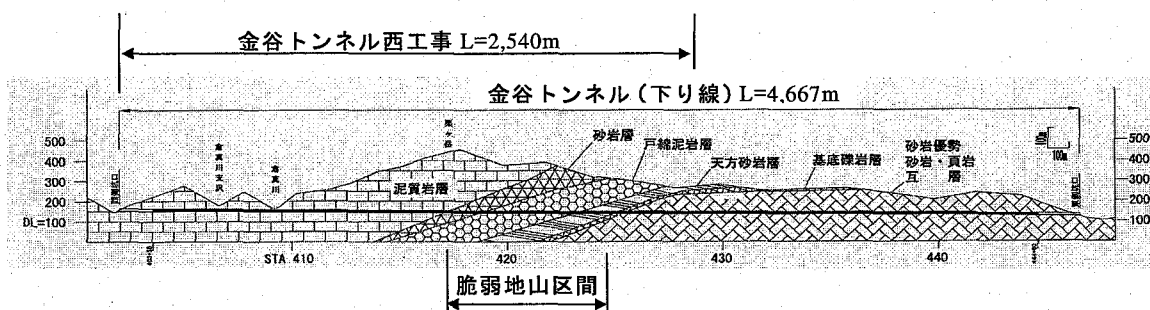


図-1 地質縦断面

3. 事前検討

脆弱地山区間ではTBM掘削時に天端崩落が頻発し、地山強度比やTBM導坑内の切羽評価点(以下「TBM評価点」という)の低下がみられた。さらに、TBMの機体拘束やTBM支保工の変形等が生じ、TBM導坑壁面にモルタルの増吹付け($t=10\text{cm}$)を実施し導坑の安定を図っている箇所もある。これら現象により本坑拡幅掘削時に大規模な変状が生じる事が懸念された為、導坑内からの調査ボーリングやFEM解析を実施し、TBM掘削時の実績と併せて評価・分析を行い、図-2に示すとおり地山状況により当該区間を3区間に分割し、支保パターンの検討を行った。

1) DIパターン区間

TBM掘削時の発生変位は10mm程度と小さく、TBM評価点では40点~60点(DI~CII相当)と比較的良好な値を示しており、本坑拡幅掘削時の支保パターンとしてDIパターンを採用した。ただし、TBM掘削データから算定した地山強度比が2.0~3.0程度であること、TBM評価点・変位量から徐々に地山状況が悪くなっていることから、計測計画も併せて立案し対応した。

2) DII (100) -a パターン区間

当該区間は地山強度比が 2.0 前後と低いことや、切羽評価点も次第に低くなること、TBM 導坑の天端沈下も 100mm に達する箇所もあることから、導坑内での調査ボーリングによる地山物性値を用いて FEM 解析を実施し、拡幅掘削時の支保パターンを決定することとした。ボーリング調査の結果、周辺地山は風化変質部や粘土化している層が随所に混在しており非常に複雑な地質になっており、概ね DI ~ DII 相当の地山と判断した。さらに、TBM 導坑内において天端崩落が連続していることから、AGF による天端崩落と先行変位を抑制する支保パターンを採用した。しかし、FEM 解析の結果、完成時に 80mm 程度の変位が予測されたことから、変形余裕量 (100mm) を確保した。

3) DII (100) -b パターン区間

当該脆弱地山区間の中でも最も地山状況が悪いと推定された区間である。地山強度比は 2.0 以下に低下し、切羽評価点も 30 点台に低下することに加え、TBM 導坑の天端沈下、内空変位ともに大きかったことから、増吹付けを行った区間である。前区間と同様にボーリング調査および FEM 解析を実施して拡幅掘削時の支保パターンを決定することとした。地山状況はさらに複雑な地質となっており、概ね DII ~ E 相当の地山と判断した。DII (100) -a の支保パターンと比べて支保耐力を向上する為、吹付け厚さ増加 (250mm → 300mm) やロックボルト打設本数増加 (6 本 → 26 本) を行い、上半脚部の支持力不足対策としてウィングリブ付き支保工を採用した。

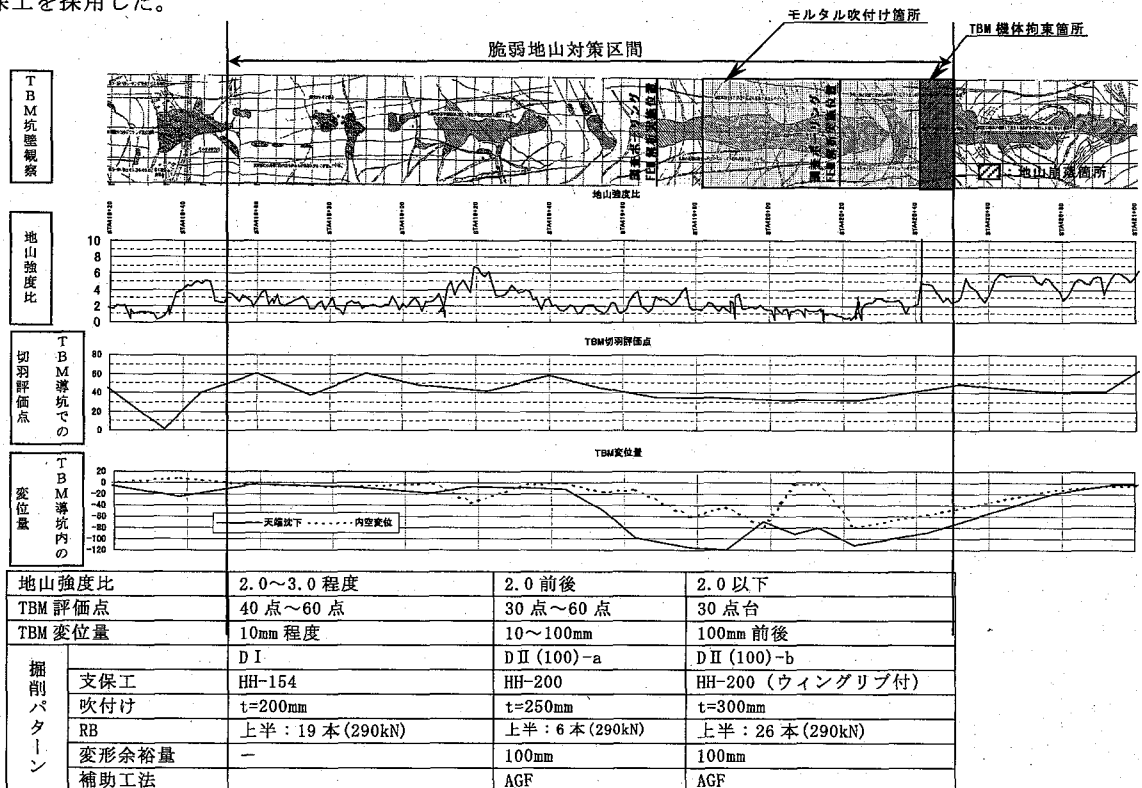


図-2 事前検討概要

4. 上半拡幅掘削時の変状対策および計測結果

事前検討で決定した支保パターンを用いて脆弱地山区間の施工を開始したが、想定以上に発生変位・支保工変位が大きかった為、追加対策を実施した。図-3 に示すように掘進に伴い地山状況が悪化してゆく中

で実施した様々な対策の概要について計測結果と併せて報告する。

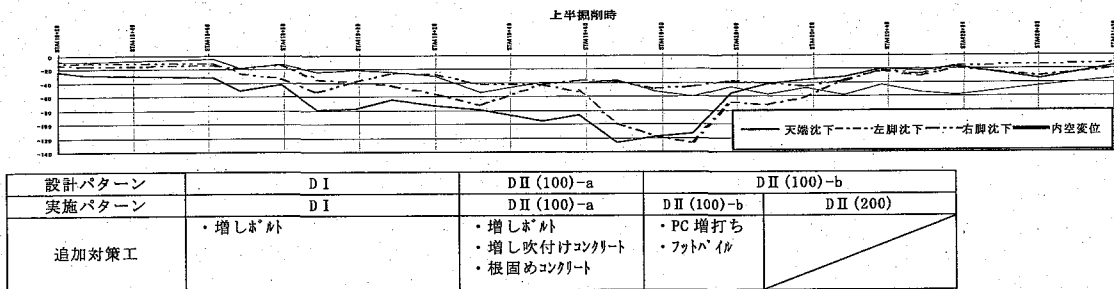


図-3 当該区間の上半掘削完了時収束変位分布および掘削パターン

1) D I パターン区間

図-3に示すとおり徐々に変位量は大きくなっており、この区間での最大変位量は天端沈下 30mm、水平内空変位 80mm となった。吹付けコンクリートのクラック・ロックボルトプレートの変形等の支保変状が生じた為、図-4のとおり追加対策工として増しボルトを実施し、変位・変状抑制を図った。

2) D II (100)-a パターン区間

地山状況はさらに悪化し、100mm を超える内空変位が発生した。挙動としては脚部沈下および側部からの押出しが顕著となり、側部ロックボルトプレートの変形、天端付近の吹付けコンクリートクラックが生じた。この変状の原因として支保内圧の不足や上半脚部付近の地山強度不足によるものと判断し、図-5に示す追加対策工を実施した。

3) D II (100)-b パターン区間

事前検討で最も支保耐力の高いパターンを採用していたが、想定以上

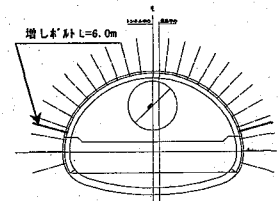


図-4 追加対策工 (D I)

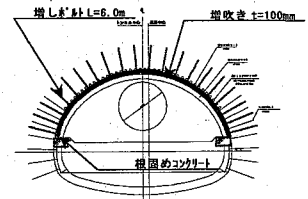


図-5 追加対策工 (D II (100)-a)

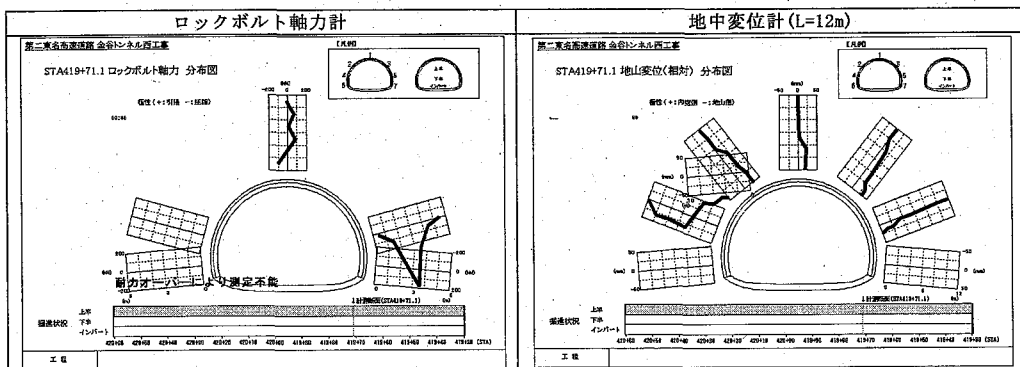


図-6 B 計測結果 (D II (100)-b)

に、変位増大・支保変状が生じた。最大で 130mm の内空変位が発生し、特に左側脚部沈下が卓越している。本パターンではウィングリップ付き支保工を採用して上半脚部支持力を増強しているが、さらに大きな荷重が作用したと思われる。また、図-6に示すとおり B 計測結果からは側部のロックボルトでは耐力を上回る軸力が発生している。変状の原因は掘削に伴う上半脚部への応力集中により支持力不足が生じ、地盤変状したものであると判断した。図-7に示すように、追加対策として上半脚部の補強を目的に、より高耐力の

PC 鋼棒(L=12m ϕ 32mm 耐力 748kN)を打設した。さらに左側脚部の支持力不足が顕著である事から、沈下抑制対策として左側のみフットパイルを打設した。この対策により図-8 に示すとおり変位速度は小さくなり対策による効果が確認できた。

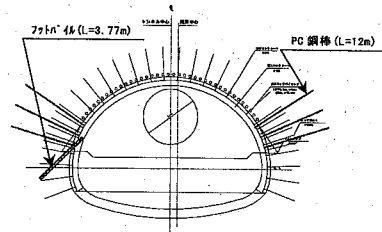


図-7 追加対策工 (DII (100)-b)

4) DII (200) パターン区間

この区間は当初 DII (100)-b パターンで計画したが、前区間において変位増大・支保変状が生じた事から、図-9 に示す新たな支保パターンの検討を行った。DII (100)-b パターンでは高耐力ボルトを 26 本打設していたが、図-6 で示したとおり側部のボルト耐力が不足している事が分った為、側部のパターンボルトの打設間隔を 1/2 とし、PC 鋼棒に変更する事とした。前区間で PC 鋼棒を増打ちした時には B 計測結果より緩み範囲を推定してボルト長を L=12m としたが、この区間では緩みの少ない切羽の直近で打設する事から通常のロックボルトと同じく L=6.0m とした。また、変形余裕量に関しては前区間で 130mm の変位が発生した事から、今後下半・インバート掘削による変位増分を考え変形余裕量を 200mm 確保することとした。この掘削パターンを施工し始めてからもさらに地山状況は悪化していったが、発生変位量は図-3 に示すとおり平均して 50mm 以下程度に抑制された。これにより PC 鋼棒を用いた脆弱有効性が確認でき、その後の脆弱地山区間においては、この掘削パターンを基本に、変形挙動に対応した効果的なパターン選定を実施する事ができた。

第二東名高速道路金谷トンネル西工事(下り線)

天端沈下、内空変位 経時変化図

断面 [STA.419+83.2]

[主測点] 隆起,伸び(+), 沈下,縮み(-)

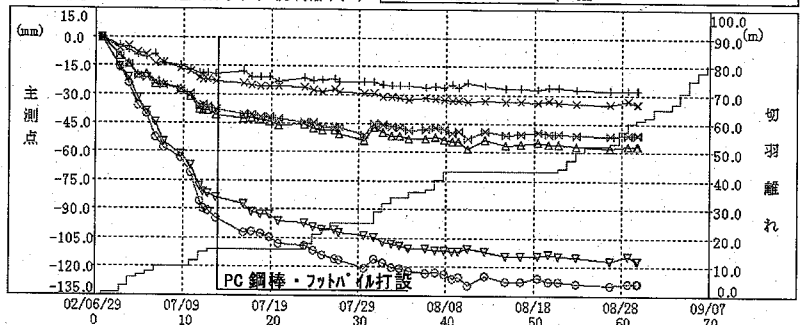


図-8 変位計測結果 (DII (100)-b)

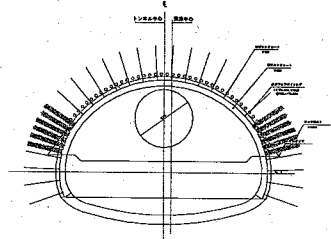


図-9 DII (200)パターン図

5. PC 鋼棒の効果

PC 鋼棒の効果を定量的に評価するために、DII 区間における変位との関係を図-10 に示す。

これにより PC 鋼棒の効果について以下にまとめる。

- (1) PC 鋼棒の打設によって、変位速度が緩くなり内空変位が収束に向かっている。
- (2) 初期変位速度に着目すると切羽に近いほど地山状況が悪化しているものの、切羽に近い位置で PC 鋼棒を打設することで、変位抑制効果が高くなる。
- (3) 特に PC 鋼棒をパターンボルトとして採用した結果 (切羽距離 0m)、切羽から 0.5D 以上離れて打設した場合よりも内空変位は 1/3 程度に抑えることができる。

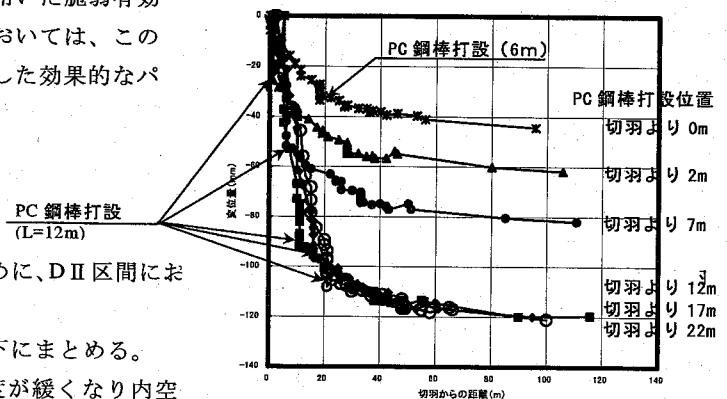


図-10 経距変化図

(4) さらにパターンボルトとして採用すれば、緩み領域が広がった後に打設した場合と比べて、短いボルトで効果が得られる。

6. 今後の課題

今回TBMの機械データ・掘削実績および導坑内からの事前調査結果を総合的に判断して、事前照査・検討により変状区間の範囲と対策支保パターンを決定した。第二東名高速道路のトンネルは扁平断面であるため、側圧係数を1.0とした解析によると天端沈下が大きくなり上半掘削では天端沈下量と内空変位量の比が4:1程度となる。しかし、実施工では変形挙動として天端沈下よりも脚部沈下に伴う水平変位が卓越し、当初予想と異なった結果となった。上半掘削完了後、計測結果をもとに逆解析を行なったが、当初解析時の設計条件と比較すると変形係数は大きくは変わらないものの側圧係数が約3倍となり、変形挙動の特性を反映した結果となった。

TBM掘削結果から得られるデータとしては下記のものがある。

- ①機械データ：推力、トルク、掘削速度、準岩盤強度(FN)、準岩盤強度(T_r)、掘削体積比エネルギー
- ②岩判定による切羽評価結果
- ③坑壁観察結果
- ④導坑内のA計測・B計測結果
- ⑤導坑内における追加ボーリング調査結果

今回、これらのデータから変形挙動を予測したが実施工と異差が生じた。今後、事前検討時に的確な変形挙動を予測するため、既存データの活かし方や、新たなデータ採取の必要性などを含めた地山評価法の見直しが必要である。さらに、高土被りの泥岩地山における大断面トンネルの挙動特性について実績をまとめ、本坑掘削方法や支保構造の設計手法の確立を目指すことが課題である。

7. おわりに

本報文では、高土被りの泥岩地山における扁平大断面トンネルにおける変形挙動の特性と、支保部材としてのPC鋼棒の有効性が確認された。特に図-11のように支保パターンボルトとして採用することで、支保耐力の増強や脚部付近の地山の緩みを最小限に押さえることができ、内空水平変位・脚部沈下抑制に大きな効果があった。今後は、下半やインバート掘削も含めたデータ解析による高土被りの泥岩地山における変形挙動について、さらに検討を行っていきたいと考えている。

第二東名高速道路はTBM導坑や高強度部材等の新技術を採用しており、安全性・施工性・経済性の向上に期待通りの効果を発揮している。今後、新たな新支保材の開発、新しい地山評価方法、地山探査方法の採用および施工データ等の収集活用により更なるトンネル施工技術の向上を図り、大断面トンネルの発展に大きく寄与していきたいと考えている。

以上

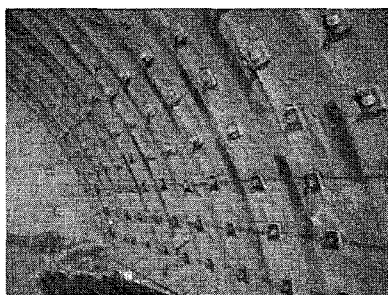


図-11 PC鋼棒の採用