

5. 四国の建設工事における土質工学的諸問題

5.3 三波川変成帯における地山特性

—四国横断自動車道笹ヶ峰トンネル南工事—

5. Geotechnical Engineering Problems of Construction Works in the Shikoku District

5.3 The geological Characterization of Rock Mass in Sanbagawa Metamorphic Belt —Sasagamine Tunnel South Construction of Shikoku Oudan Expressway—

池 辺 健 二 (いけべ けんじ)

日本道路公団 高知工事事務所所長

吉 田 幸 信 (よしだ ゆきのぶ)

日本道路公団 高知工事事務所立川工事区工事長

1. はじめに

西暦 794 年、桓武天皇は現在の京都市に都を移し平安時代の始まりとなった。当時、土佐国の国府は現在の南国市内に置かれていたが、この国府と都とを結ぶ官道が南海道である。797 年南海道は、それまでの阿波国を經由して土佐国に入るルートに代わり、現在の愛媛県川之江市から県境の笹ヶ峰付近を通り高知県大豊町を経て本山町へ抜けるルートで新しく開発されている。

江戸時代になり、第 6 代土佐藩主山内豊隆公が、笹ヶ峰を越えるルートを、参勤交代の道である土佐街道として復活させた。この参勤交代道は険路ながらも殿様道の名で大豊町立川の山里に現存している。

そのような歴史的変遷をたどってきたこの区間において、平安遷都1200年という節目を 3 年後に控えた平成の今日、かつての大路沿いに現代の官道である高速自動車国道四国横断自動車道の建設が、日本道路公団の手により急ピッチで進められている。この間は距離的にわずか 30 km 足らずの区間であるが、四国を東西に縦断する脊梁山脈が横たわり、急峻地形ゆえ島内の南北交通の円滑なる往来の妨げとなっている。とりわけ高知県と愛媛県との県境には、千 m を越す峰々とともに急峻な山々が障壁となっており、この区間で最大の難所とされてきた。

四国横断自動車道笹ヶ峰トンネルは、この県境を貫く延長 4 300 m を越える長大トンネルで、昭和 62

年以来工事が進められてきたところである。

本報文は、高知工事事務所で担当してきた同トンネル高知県側の施工記録のなかで、地山の計測結果を中心にとりまとめて報告するものである。

2. 工事概要

川之江、大豊間は、効率的な経済投資という観点から、当面将来の下り線を対面交通で利用する段階建設方式により建設されている。

しかしながら、笹ヶ峰トンネルについては長大トンネルであり、供用後の防災上の基準に基づいて上り線計画断面内に、非常時の避難用に供する小断面トンネル（避難坑）を本坑と並行に施工している。この小トンネルの施工にあたっては、工事を先行させることで作業坑としての役目を課し、本坑切羽の地質状況の事前確認などに利用できる。

また笹ヶ峰トンネルは、供用後のトンネル換気方式として電気集じん機付縦流換気方式を採用することになっている。このため中間地点よりもやや高知側坑口寄りに、集じん機器類プラントを設置するための換気用バイパストンネル（集じん機坑）を設けている。

3. 地形・地質概要

笹ヶ峰トンネルは、両県境にある標高 1 016 m の笹ヶ峰の直下をほぼ直線で貫いている。トンネルの計画高は南坑口で約 440 m、トンネル内中央付近のクレスト部で約 445 m である。

山岳地形の様相は、全体に急峻で、急崖、溪流、岩塊が多く、地形的には荒々しい山容である。

地質的には、淡路島南端から吉野川沿いに四国北部を通り、佐田岬半島から豊後水道に抜ける中央構造線と、大豊 IC 南方桧生トンネル付近を東西に走る御荷鉾構造線に挟まれた三波川帯に属している。

三波川帯は、石墨片岩、緑色片岩等の片岩類を主体として構成されている変成帯で、トンネルの周辺では三縄層の泥質片岩（黒色片岩）と、小歩危層の砂質片岩が優勢である。

地質構造としては、走向がおおむね N 50° W ~ EW, 傾斜が70~80° S であり、北進するトンネル掘削に対しては、片理面が鉛直から瀬戸内側に若干傾斜した流れ盤構造を呈することになる。泥質片岩は砂質片岩と互層をなす場合が多く、はく離性に富み、片理面に沿って破碎粘土化しやすい性質を持つ。また砂質片岩は、暗灰色を呈し、片理面が発達しているが、泥質片岩に比べれば密着しており、へき開面や節理が発達し、亀裂面に沿ってブロック状・塊状となりやすい性質を持っている。さらに、中央・御荷鉾の二つの構造線の間には、無数の断層破碎帯が存在している。この工事でも14箇所の断層破碎帯に遭遇するなど、当該地山はトンネルを掘削していくうえで問題点の多い地質である(図-1)。

4. 作業坑の施工

4.1 計測結果と考察

当初、作業坑の設計支保パターンは、公団の設計要領「トンネル」による小断面トンネルの支保パターンの目安を参考にして表-1のとおり設定した。

表-1 作業坑の当初および新規支保パターン

当初 新規 の別	支保パターン 名称	1発破 進行長 (m)	ロックボルト (m)		鋼アーチ 支保工 (H鋼 サイズ)	吹付け コンクリート (cm)	金網
			長さ	円周 方向			
当初	Br	2.0	なし	なし	なし	5	なし
	Cr	1.5	2.0	1.2	なし	10	上半
	DIr	1.0	2.0	1.0	100×100	10	上下半
新規	CIIr	1.5	なし	なし	なし	10	なし
	CIIIr	1.5	なし	なし	100×100	10	上半

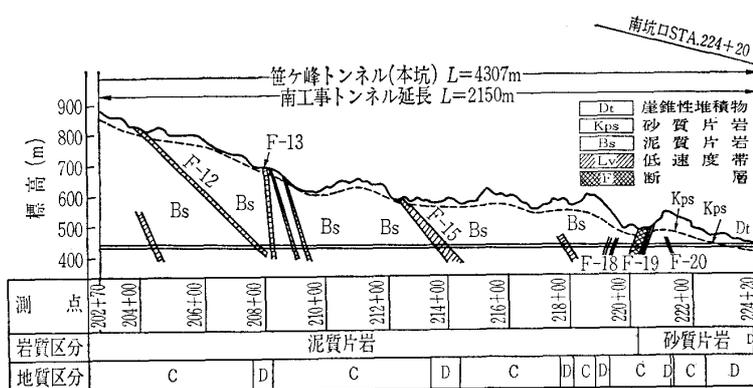


図-1 地質縦断図

作業坑の施工は、2ブームガントリージャボを使用し、レール方式による全断面工法で行った。

坑口部付近については土かぶりが薄い区間が続いたが、坑口より約50m入った地点からは土かぶりが3Dを越えるようになった。土かぶりが3D以上となった区間での、トンネルの掘進に伴う計測結果を見てみると、表-2のとおりである。

計測結果について検討した結果、

- ① 内空変位（水平）は小さく、いずれも最大で3mmを越えることはなく、切羽通過後、掘削径の3倍（3D）以内でいずれも収束を見ている。
- ② Cr区間で実施したロックボルトの軸力測定結果では、最大でも2.5tf、しかも切羽通過後、掘削径の2倍（2D）以降ほとんど変化がない。ことなどが分かった。

これらの検討結果から当初設定しておいたBrパターンへの移行も考えたが、

- ① 地山が泥質片岩のうえ、激しい褶曲作用を受けて部分的に節理や片理の開口が見受けられる。
- ② 地山の走向がほぼEWであり、走向に直交する

表-2 作業坑における内空変位

坑口からの 距離 (m)	土かぶり (m)	地山 区分	施 工 パターン	初期変位速度 (mm/日)	最大水平内空 変位 (mm)
50	27.0	D	DIr	0.2	2.7
70	34.0	D	DIr	0.6	2.2
93	42.5	D	DIr	0.3	1.6
110	52.0	D	DIr	0.4	1.1
130	58.4	D	DIr	0.4	2.2
147	63.1	C	Cr	0.7	0.5
155	64.0	C	Cr	0.1	-0.1
175	61.5	C	Cr	0.0	-0.2
195	67.7	C	Cr	0.2	0.5
219	76.9	C	Cr	0.0	0.2
225	77.8	C	Cr	0.4	0.3



写真-1 断層破砕帯での作業坑変状

ように掘進するのに対して、傾斜が 80° S の構造を呈するため、天端が弱点となりやすい。

- ③ 爆破に際し、節理や片理などいわゆる岩塊の目に沿ってはく離する傾向が強く、爆破後の断面形状にも不陸が見られ、地山応力の集中が生じやすい。
- ④ 小断面掘削であり、爆破エネルギーによる影響は小さく、岩盤の緩みは比較的小さい。
- ⑤ 多くの断層破砕帯が予想され、これらが片岩類と互層をなしていることから、切羽の状況が急激に変化することがある。

以上のことなどを勘案し、支保部材としてロックボルトよりも吹付けコンクリートの機能を重視するとともに、この先の地山の状況変化次第では先受工を必要とする場合が生じることも考え、表-1 に示す2種類の新規パターンを設定した(写真-1)。

4.2 新規パターンの施工と評価

新規パターンによる施工区間における計測結果では、

- ① 坑内の観察記録で一部の吹付けコンクリートにヘアークラック程度が散見されるものの危険を伴うようなはく離やはく落等の変状は無く安定している。
- ② 水平内空変位は、切羽後方おおむね掘削径の3~5倍(3~5D)で収束し、最大変位量はCIIrパターンで6mm, CIIIrパターンで10mmである。
- ③ 吹付けコンクリート応力については切羽周方向に均等な分布を示し、 $13\sim 15\text{ kgf/cm}^2$ である。
- ④ 鋼アーチ支保工の応力については、軸力として

はほぼ均等に分布しているが、曲げモーメントについては本坑側からの偏圧傾向を示していることなどが分かった。

これらの計測結果を総合して、新規パターンは十分にその機能を果たしているものと評価した。

5. 本坑の施工

5.1 計測Aの結果と地山性状

本坑掘削は上半工法による掘削で、2ブームクローラージャンボを使った爆破掘削、ずり出しはタイヤ方式で行った。

片岩地山の特性からか、作業坑に比べてトンネル断面積が大きいと、部分的に切羽の不安定な状態が見られた。

今回の本坑掘削において平均的な地山はCIIパターンである。内空変位は、断層破砕帯部を除いて全般に20mmを越えることは少なかった。CIIパターンにおける代表的な内空変位の経日変化を見てみると、上半部の掘削後約10日間で収束しているケースが多い。

一般にトンネル掘削径の2~3倍(2~3D)以内で変位が収束する場合、弾性挙動といわれているが、10日間で30m程度切羽が進むことを考えると、一部に弾塑性挙動と思われる変位も見受けられる。代表的な内空変位の経日変化を図-2に示す。

つぎに、上下半部それぞれの掘削に伴う変位量の関係を見てみる。CI, CII, DI各パターンを総合して考察するが、上半掘削に伴う変位量と下半掘削に伴う変位量との比は、おおむね1:1である。

しかしながら、上半掘削時の変位量が小さい場合は、下半掘削時の変位量が大きくなる傾向を示し、その比率は図-3に示すように1:2程度である。

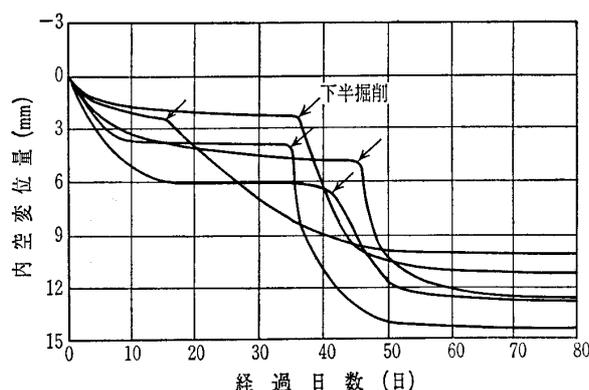
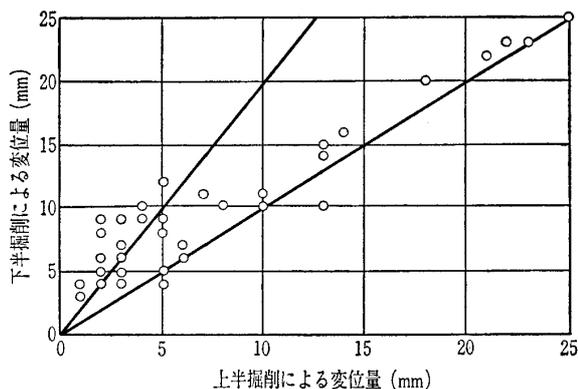


図-2 本坑の代表的内空経日変化

報文—2160



図—3 上下半掘削による変位量比

5.2 計測Bの結果と地山性状

B計測については、地山がほとんど泥質片岩により占められており、地質の変化が単調なこともあって、多くを実施しなかった。

ここでは、CIIパターン施工区間での地山挙動と支保状況を把握するため、地山芯部に入ってその代表区間と考えられる地点で実施したB計測（同時に実施したA計測を含む）の結果について紹介する。

計測箇所は、坑口から約1470m入った、土かぶり約170m、切羽状況としては岩盤の目が粗くクラッキーで石英の介在する泥質片岩区間である。走向はEW、傾斜は80°S、岩全体は比較的堅いが一部はもまれ、亀裂が部分的に開口している。計測項目および測定結果は表—3のとおりであるが、同表中のロックボルト軸力測定等同一断面内の複数ポイントで測定を実施したものについては、その最大値を表示している。

(1) 内空変位測定

最終時の値を見ても比較的小さかった。変位量をトンネルの直径で除した換算ひずみは、内空変位で0.13%、天端沈下で0.08%であり、桜井が発表した限界ひずみと比較しても、この近傍の岩石の一軸圧縮強度を300 kgf/cm²と推定した場合、いずれ

も地山破壊に伴うゆるみの発生はないものと考えられる。

しかしながら、一試行として指数関数（ワイブル関数）近似による内空変位に対する回帰分析を行ったところ、収束係数が10.34となった。この値を見る限りでは、弾塑性挙動と考えられ、切羽前方でのゆるみの発生を示唆している。

(2) 地中変位測定

表—3に示した値は肩部におけるもので、両肩部での変位が卓越していることが特徴である。また、SL部付近の側方変位は小さく、両側側壁間での相対変位量の和は2.64mmで、内空変位量と比べ極めて小さい。側壁面での地山挙動について、下半通過時ほとんど変化がない状況であったことと考えあわせれば、ゆるみ領域が地山深部に広がっている可能性が想像できる。ただ、今回の計測が、片理にほぼ沿うような方向での測定となっており、片岩地山の特性とも関連させた詳細な分析を行う必要がある。

(3) ロックボルト軸力測定

結論的には、前項の地中変位の動きに呼応した軸力状態が確認できた。表—3の値は左肩部の値であり、右肩部でも最終値16.8tfを示している。左側側壁部ボルトに対しては、ゆるみ領域に打設した場合のようにほとんど軸力の発生が認められていない。本坑の左側には、約20mの離隔距離をもって作業坑の施工が先行して行われていることに、片岩地山特有の理由付けができるのかも知れない。

(4) 吹付けコンクリート応力測定

表—3にある81 kgf/cm²の値は左肩部で記録された値である。天端部での最終値48 kgf/cm²とともに高い応力状態にあると考えられる。その点、作業坑における新規支保パターン検討時に、吹付けコンクリートへの支保力依存を大きく評価したことの妥当性が裏付けられる。

(5) 鋼アーチ支保工応力測定

軸力の最終最大値は73tfである。支保工断面内の10点について測定したなかで、脚部付近を除く6点で60tf以上が記録されている。このように鋼アーチ支保工には、肩部から天端部にかけて降伏軸力(125H)に近い軸力がほぼ一様に発生している。

このように鋼アーチ支保工が高い応力状態にあると考えられる原因については、最大軸力発生地点で

表—3 本坑におけるB計測の測定結果

計測項目	単位	測定結果(最大値)	
		上半掘削時	最終時
内空変位	mm	3.8	12.7
天端沈下	mm	2	4
地中相対変位	mm	6.3	8.4
ロックボルト軸力	tf	17.7	17.8
吹付けコンクリート応力	kgf/cm ²	50	81
鋼アーチ支保工曲げM	tf・m	0.56	0.42
鋼アーチ支保工軸力	tf	63	73

の鋼アーチ支保工のひずみが0.16%と、吹付けコンクリートの破壊ひずみ(0.4~1.0%)と比較しても小さいことから、剛性の違いに起因しているものと考えられる。

(6) 荷重分担状況

鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートの地山荷重の分担について考察してみる。これに先立ち、鋼アーチ支保工軸力の荷重分担率および同軸力比を下記のように定義する。

$$\text{荷重分担率} = \frac{\text{鋼アーチ支保工軸力}}{\text{鋼アーチ支保工軸力} + \text{吹付けコンクリート応力}}$$

$$\text{軸力比} = \frac{\text{鋼アーチ支保工軸力}}{\text{吹付けコンクリート応力}}$$

両者について施工後の測定結果値の経日変化をもとに分析してみると、まず荷重分担率については、

- ① 全般に施工後の早い時期からほぼ一定の値を示しながら推移しており、当初予想された減少傾向は認められない。
- ② 推移していく過程での値は平均で0.7程度であり、荷重の70%を鋼アーチ支保工が分担していることを示している。
- ③ 下半掘削後は、ほとんどの測点で減少が見られている。

ことなどが言える。つぎに、軸力比については、

- ① 比較的早い時期に一定値を示す。その値は多少のばらつきはあるものの、1~4程度である。
- ② 前項が意味することは、早い時点から鋼アーチ支保工が軸力の2/3程度を分担して、その割合はほとんど変わらないことを示している。

ことなどが言える。

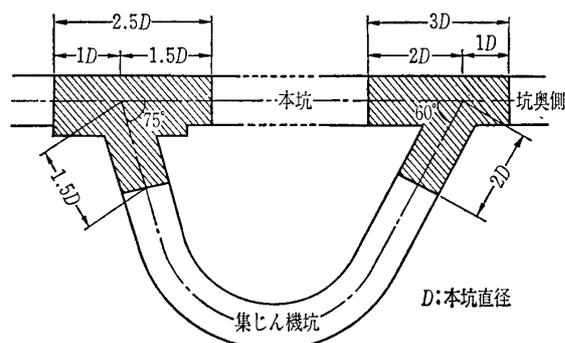


図-4 集じん機坑分岐部補強範囲

6. 集じん機坑分岐部の施工

集じん機坑は、坑口から約2kmの地点に計画された本坑のバイパストンネルである。本坑からの分岐部の設計は、「山岳トンネルの交差部の設計・施工に関する研究報告書」(日本トンネル技術協会)などを参考にして図-4に示す範囲について、支保構造を1ランクアップさせる(本坑施工の場合であればCパターンを適用するところをDパターンにより施工する)ことで考えた。

施工手順としては地山状況および工事工程を勘案した結果、基本的に本坑の上下半掘削完了後に施工することとした。ただ60度側の上半部については、本坑の上半部掘削時に約20mの迎え掘りを行った。

75度側本坑は非常駐車帯部で断面が98m²と大きいこと、あいにく破砕帯部であったことから、5日間に内空変位で18mm、天端沈下で25mmを越すような急激な直線的地山変位に見舞われた。またロックボルトの最大軸力も27~22tfに達し、特に肩部のボルトには、全体にわたって10tfを越す高い軸力が作用していることが分かった。補強対策としては、6mの増ボルトを約100本施工し地山の安定を図ったが、結果的に下半掘削後の累計内空変位は38mmであった。地中変位測定結果では、ゆるみ領域が天端部で深度2.5~3.0mに及んでいることが判断され、増ボルトに6mボルトを採用したことは妥当であった。

すべての本坑下半掘削後、改めて盛土により足場を作り、取合い部の上半断面の施工に取り掛かった。その結果、上半掘削で約15mm、下半掘削で約15mmの天端沈下の累積があり、収束まで下半掘削後2週間(5D)を要し、最終沈下量は62mmに達

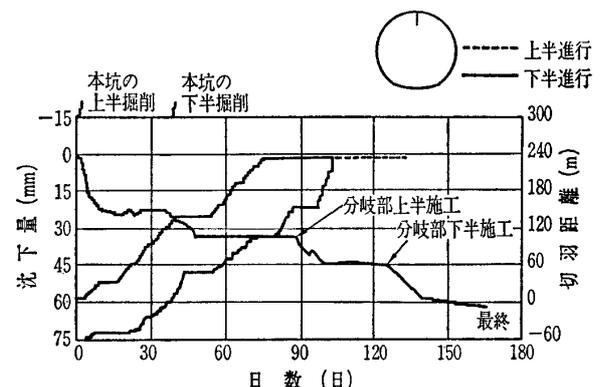


図-5 分岐部施工直後の地山挙動

報文—2160

した。

一方ロックボルト軸力は、上半脚部で約 5 tf, 肩部で約 3 tf の増加が認められた反面, 天端部では最深部付近での 3.0~4.5 tf の減少を見た。また地中変位測定は, 天端部で坑壁から 4.5 m, 肩部で同 6 m, 脚部で同 4.5 m, 各測点の変化が大きかった。

分岐部の設計にあたっては事例が少なく, あってもこれまでは一般に支保パターンのランクアップでの対応が多く行われているようである。しかし当該地山のような特性を示す地山の場合, 当初からシステムボルトとしての長尺のロックボルトを施工し, 天端部の吊り下げ効果を期待することが有効と考え

られる示唆が得られたような結果であった。

7. おわりに

急峻な四国山脈の山懐, 笹ヶ峰トンネルはこれまで川之江・大豊間の難工事の象徴とされてきた。このトンネルも昨年11月8日に貫通し, これがこの区間の工事の進捗に一段と弾みを付け, 平成3年度内の供用を確実なものとした。この区間の工事が完成すれば, 同時期に供用予定の高松・善通寺間と合わせて高速道路を利用できることになり, 高知・高松間が約2時間, 高知・岡山間が約2時間半と現在の所要時間の約半分で結ばれることになる。