

軟弱地山での支保工脚部先行改良工法によるトンネル沈下抑制効果について

THE EFFECT OF REINFORCEMENT OF TUNNEL SUPPORTS LEGS BEFORE EXCAVATION FOR TUNNEL SETTLEMENT IN SOFT GROUND

城間 博道¹⁾・江口 和義²⁾・高田 邦彦³⁾・井上 博之⁴⁾・桜井 孝臣⁵⁾

Hiromiti SHIROMA, Kazuyoshi EGUTI, Kunihiko TAKADA, Hiroyuki INOUE and Takaomi SAKURAI

To restrain the tunnel settlement in soft ground, the reinforcement method of tunnel supports legs with jet-grouting before excavation were adapted. The uniaxial compressive strength of ground which the tunnel was excavated are about 0.2—2.0Mpa. The effect of reinforcement was as follows:

- 1) The settlement of tunnel supports legs were reduced to approximately 50 % compared with no reinforcement pattern at the same ground condition.
- 2) The settlement were increased as the rock strength was more soft, but the velocity of the settlement were lower. So the next reinforcement method was adapted, before the rock condition was very bad.

Key Words: tunnel supports legs reinforcement before excavation, restraint of settlement, jet-grouting

1. はじめに

近年、軟弱地山中のトンネル掘削において切羽面の安定確保や緩み防止のため、トンネルアーチ部に対し各種の長尺先受け工法が開発され、数多くの現場で用いられるようになっている。

しかし、そのような地山では沈下量が大きくなることがよく問題となるが、それに対する対策工はアーチ部の対策工に比べると遅れているのが現状と考えられる。沈下量が大きくなる原因は地山の地耐力不足であることは明らかであるので、その対策としてサイロット導坑、上半仮インバート、インバート早期併合等が用いられ、最近ではサイドパイル、フットパイル等が施工されているが、サイロット導坑先進工法を除くと掘削後の応力解放されてからの対策である。長尺先受け工では、先行してアーチ外周部に改良体を形成することにより先行緩みを抑制し、切羽安定や沈下抑制を図ろうとするものである。この考え方を踏襲するならば、沈下対策においても掘削前に該当する地山範囲を改良しておくことが望ましいことになる。

3次元FEM解析によりトンネルの挙動解析を実施した事例^{1),2)}が報告されているが、これでもアーチ部に施工される補助工法が重になれば、脚部の沈下量は逆に大きくなるという結果が出ており、脚部の地山補強が沈下抑制にとって重要であることが推測される。

今回、軟弱地山を掘削中のトンネルに於いて支保工脚部の先行改良を実施し、沈下の抑制効果を確認すると共に今後の施工に役立つと思われる貴重なデータを得ることが出来たので、その結果について報告する。

2. 工事概要

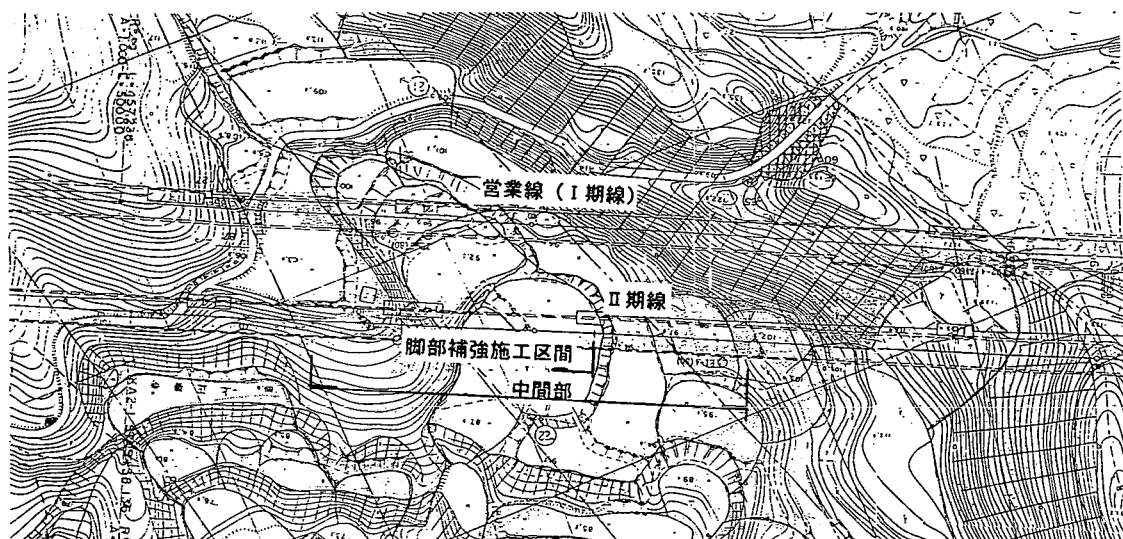
春日山トンネルは、北陸自動車道上越～朝日間に位置し、高田平野の西縁部に位置する延長 1029m の2車線道路トンネルである。そして、営業線であるⅠ期線トンネルがセンター離隔約 30m で近接して存在する。

- 1) 日本道路公団新潟建設局 上越工事事務所
- 2) 日本道路公団新潟建設局 上越工事事務所
- 3) 前田建設工業(株) 北陸支店春日山作業所
- 4) 前田建設工業(株) 技術本部技術研究所
- 5) 前田建設工業(株) 土木本部土木設計部

周辺の地形は標高 50m～150m の小起伏山地や丘陵性山地で、全体に緩やかな斜面形態をなしている。

当該地の基盤岩は、新第三紀中新世中～後期の浅海堆積物である春日山層で、東部一帯は第四紀洪積世の居多層が広く分布している。春日山層は、能生谷層上層部に相当し砂質泥岩、細粒砂岩及びそれらの互層からなるが、泥質岩優勢である。春日山層の構造は、トンネル西縁部をほぼ南北に走る郷津背斜軸に支配され、地層は東～北に傾斜し、東坑口から掘り進めている当トンネルでは流れ盤となって切羽面に現れている。また、背斜軸の近傍では数本の破砕帯もⅠ期線施工時に確認されており、岩盤の劣化あるいは地すべり発生の要因として位置づけられている。

今回、脚部先行改良を実施した区間は、東坑口から T.D.約 600～700 m の断層破砕帯の区間で、泥岩砂岩層が破砕され軟質化された区間である。圧縮強度も小さく、水により容易に泥濁化する地質である。この区間に相当するⅠ期線区間では、当時の補助工法を駆使したにもかかわらず、最大 600mm にもおよぶトンネル沈下や地表面の陥没が生じている。しかも、土圧によると思われる地山の押し出し現象も生じたという記録が残っている。図一 1 に今回対象とした区間の平面図を図一 2 にトンネル位置縦断図を示す。

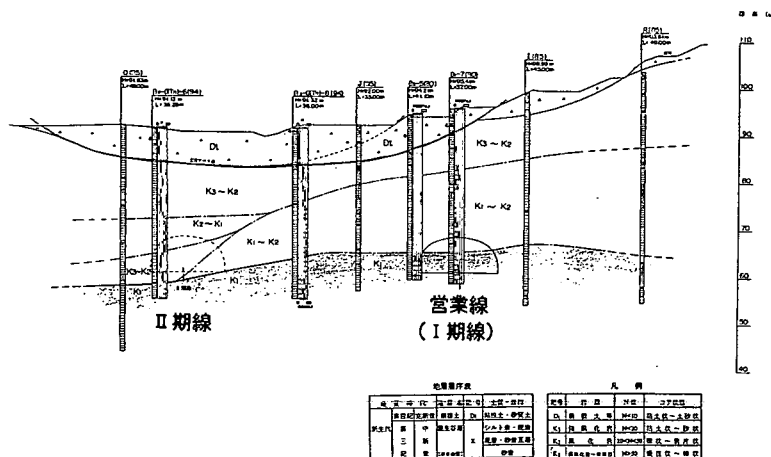


図一 1 春日山トンネル中間部位置平面図

3. 脚部先行改良工法

3.1 選定の経緯

当該区間の施工に当たり、Ⅰ期線施工時に得られていた地質状況や計測結果を再検討した。その結果、この区間は地山強度も低く地山の緩みを許容すると、塑性流動的な変形を発生し、周辺地山にも大きな変形を生じさせかねないと判断された。前述のように近接して営業線であるⅠ期線トンネルが存在するため、この営業線トンネルの保全と施工中の当トンネルの安定を確保するためには、極力緩みを発生させない工法を選定



図一 2 トンネル位置縦断図

すべきであるとの結論に達した。

支保工脚部の地山を先行して改良することを前提にして、各種工法^{3),4)}の中から比較検討の結果、表一1に示す工法を選択し、FEM解析によりI期線への影響度合いや変形抑制効果を求め、最終的に高圧噴射式フォアパイリング工法の一つであるRJFPによるアーチ部の先行補強と脚部先行補強工法に決定した。

なお、RJFPによる地山強度の改良目標値を、脚部については15kgf/cm²とし、改良径は100cmとした。なお、アーチ部については、改良目標値を30kgf/cm²とし、改良径は60cmとした。

表一1 選択した工法とFEM解析結果

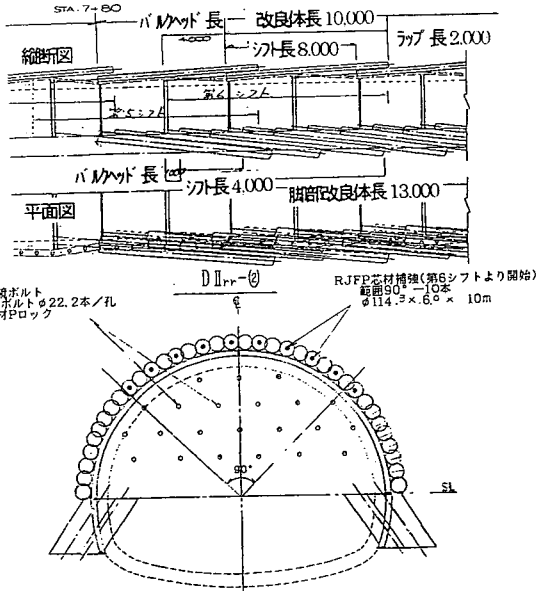
対策工法		AGF+レッグパイル	RJFP+レッグパイル	MJS	RJFP (脚部改良)	RJFP (全周改良)
概要図						
FEM解析結果	天端沈下、内空変位	416 mm、207 mm	332 mm、118 mm	148 mm、2 mm	190 mm、11 mm	123 mm、128 mm
	地表面沈下	307 mm	259 mm	120 mm	147 mm	81 mm
	吹付コンクリート応力	49 kgf/cm ²	50 kgf/cm ²	49 kgf/cm ²	46 kgf/cm ²	49 kgf/cm ²
	鋼製支保工応力	3,047 kgf/cm ²	2,122 kgf/cm ²	794 kgf/cm ²	837 kgf/cm ²	914 kgf/cm ²
	地表面沈下	26 mm	22 mm	14 mm	14 mm	3 mm
有効性	掘削面沈下防止	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。
	切羽の安定確保	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。
	トンネルの安定確保	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。
	切羽の安定確保	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。
	トンネルの安定確保	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。	トンネルの安定確保効果は小さい。
総合評価		掘削面沈下防止効果は小さい。掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。掘削面沈下防止効果は小さい。	掘削面沈下防止効果は小さい。掘削面沈下防止効果は小さい。

3.2 施工パターン

中間部の地質状況をI期線の状況などから判断し、全ての区間を同一支保パターンとはせず、脚部地山状況がそれなりに良好な場合の補助工法をRJFP+ウィングパイル（以下RWと称する）と、脚部の地山が非常に悪くなった場合の用いる補助工法をRJFP+ウィングパイル+脚部先行改良施工（以下RRと称する）の2段階としていた。

TD約600m地点からRWパターンで施工を開始したが、約30m進んだ地点において、支保工建て込み時に切羽崩壊が生じ、また、今後更に地山状況特に支保工根足付近の状況が悪くなると想定されたため、本格的な補強対策をとらなければならぬと判断し、RRパターンに変更した。RJFPは8mシフトとし、脚部改良は上半掘削4m毎に施工することとした。脚部先行改良区間の施工パターン図を図一3に示す。泥岩、砂層中に存在する転石にあたった場合に削孔に時間を要する等の問題はあったが施工は順調に進んでいる。

なお、この区間ではRJFP施工時や切羽掘削時に切羽面の押し出しや崩壊が当初から生じていたので、切羽面にグラスファイバーによる長尺鏡ボルト（l=14m、24本、6mφ7φ）を打設し、これらの現象を防止している。



図一3 脚部先行改良区間施工パターン図

4. トンネル挙動

図一4には、切羽地山状況図を示す。この区間は、破碎粘土と未固結砂層の入り混じった地質となっており、切羽観察では、山側部が海側部に比べ相対的に軟弱であると判断された。図一5、6にこの区間での天端沈下と支保工脚部沈下の代表的な経時変化グラフを示す。ただし、横軸は切羽離れをトンネル径で除した値としている。下半掘削前の変化図であるが、天端沈下量は30～50mm、脚部の沈下量は30～100mmで収束傾向を示している。図一7にはI期線で得られている同様の地質での天端沈下と地山強度値を示す。横軸には計測がなされた切羽位置を示しており、沈下量はII期線との比較のため、1D掘削時の値を示してある。

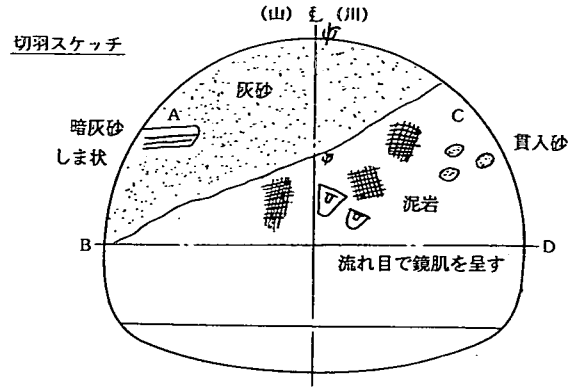
図5、7から、I期線施工時の沈下量は40～460mmであるのに今回は10～30mmの沈下量と小さい値で推移していることがわかる。

5. 考察

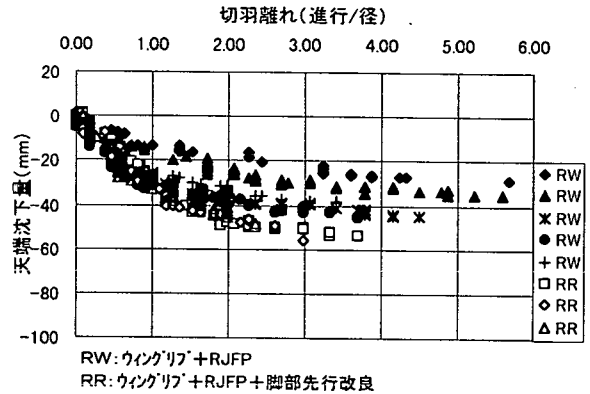
脚部先行改良の沈下抑制効果を中心に考察する。

図一8に中間部での距離程毎の脚部沈下量と脚部周辺地山の強度を示す。ここで示した、地山強度は針貫入試験値から換算したものである。

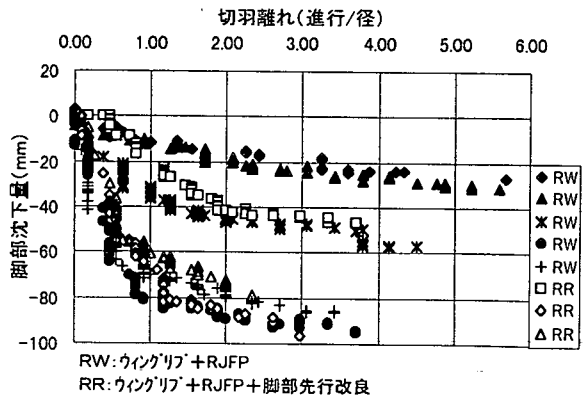
図一8から、当たり前であるが地山強度が小さくなるにつれて、脚部沈下が大きくなる傾向が確認できる。また、図一9には、各支保パターン毎のA計測結果をまとめたものを示す。ただし、それぞれ1D進行時の変位量であり、DWとはウィングリップのみのパターンである。内空変位にはほとんど差は見られないが、他の天端沈下や脚部沈下では、支保パターンで変位量の差が見られる。特に山側の脚部沈下での差が顕著である。図一9では、DW→RW→RRと支保構造が重にしても、沈下量が減少する傾向が見られる。これは、周辺地山の強度に着目していないことが原因であると考え、支保工脚部付近の地山強度に対する脚部沈下速度について検討した。その結果を図一10に示す。ただし、今回は脚部補強の効果について検討しているためRW区間とRR区間の結果について整理し、かつ沈下速度の大きさに主眼をおいたため、0.5D



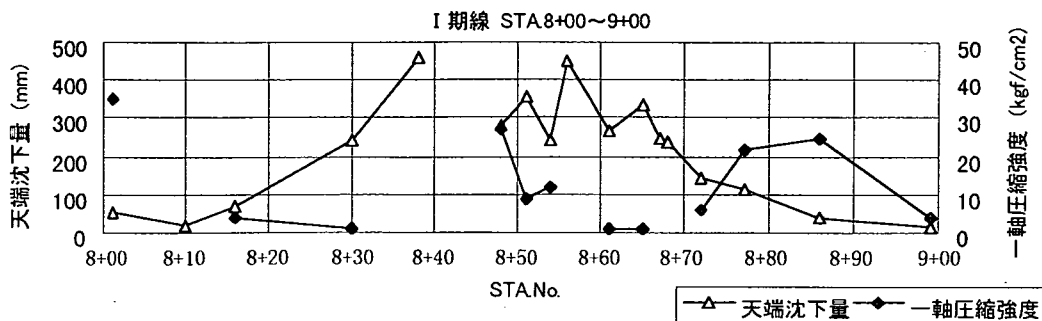
図一4 中間部での切羽地質状況図の一例



図一5 中間部での代表的な天端沈下経時変化図

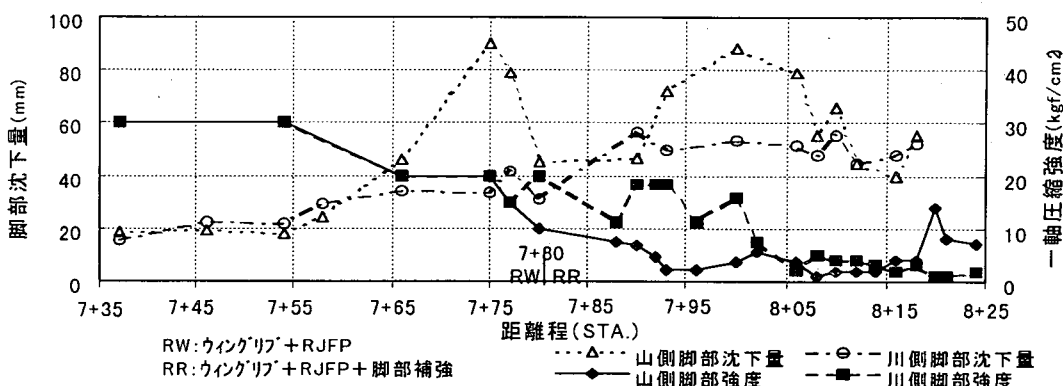


図一6 中間部での代表的な支保工脚部沈下経時変化図

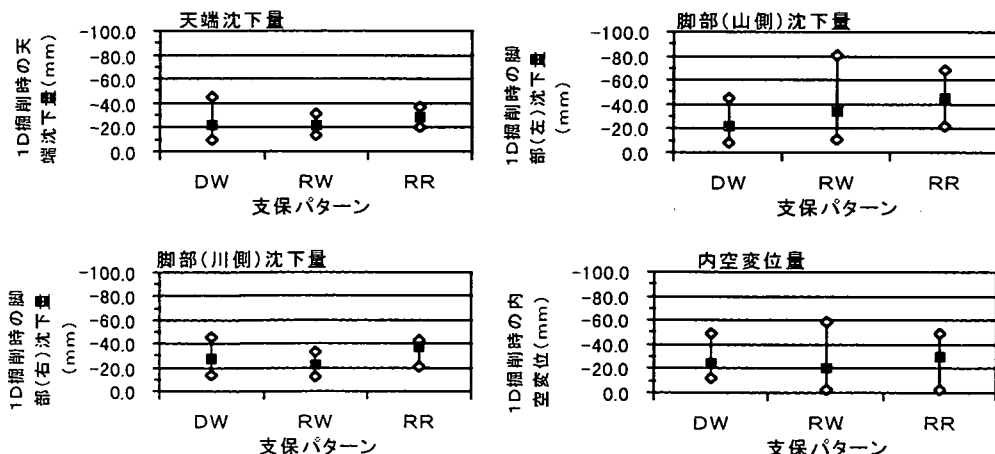


図一七 I 期線施工時の天端沈下量と地山強度

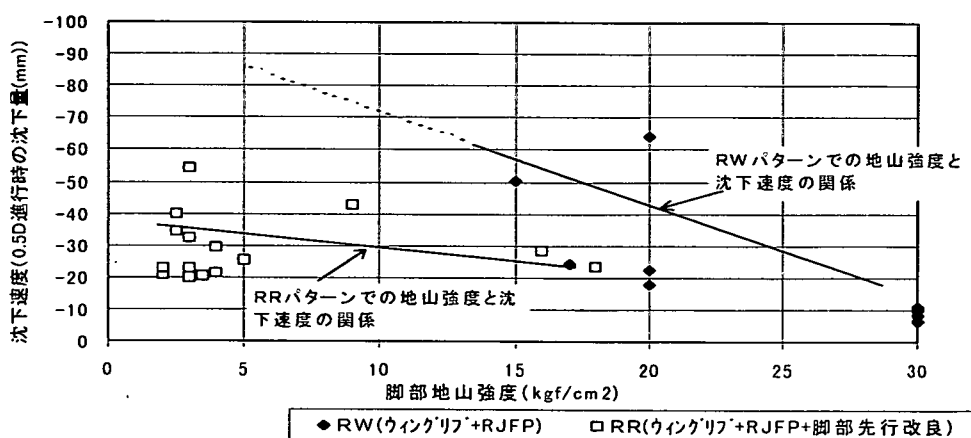
進行時の沈下量についてまとめた。図一10より地山強度が 15kgf/cm^2 程度では、脚部先行改良の有無により沈下速度は約半分になっていることがわかる。そして、地山強度がさらに小さくなると沈下速度はやはり大きくなるが、その速度は地山強度が 20kgf/cm^2 と同等程度であることがわかる。従って、先行脚部改良により約半分の沈下抑制効果が得られていることが言える。掘削後の脚部補強だと図一10の点線で示した量の沈下が生じた後の施工になるため、かなり地山を緩ませた後の対策になると考えられる。



図一八 中間部距離程毎の脚部沈下量と脚部付近の地山強度



図一九 各支保パターンでのトンネル変形量(1D 施工時の値)



図—10 脚部周辺の地山強度と脚部沈下速度の関係

6. まとめ

今回、破碎粘土と未固結砂層の入り混じったいわゆる断層破碎帯において、近接する供用中のトンネルへの悪影響を防止するため、掘削時のトンネル沈下抑制を目的として、アーチ部の先行改良と共に支保工脚部の先行改良も施工した。その結果、まだ施工中ではあるが、現在まで営業線トンネルには何の被害も生じさせることなく施工することが出来ている。今回施工した脚部先行改良工法で得られた結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ①脚部先行改良を実施した場合、同程度の地山だと沈下速度も小さくなり、変位量はほぼ半分程度になる。
- ②地山がより軟弱になると、やはり変位量はそれなりに大きくなるが、初期の変位速度が小さくなるので、他の工法を追加施工でき地山の緩みを少なくできる。
- ③転石削孔に非常に時間がかかる等の問題も残されているのでさらなる施工能力の改良の必要がある。

7. おわりに

本トンネルは、残り約340m（平成9年9月現在）を平成10年3月頃の貫通を目指し施工中である。今回採用した脚部の先行改良は、計測結果や施工状況からみて有効であると判断できる。今回は報告できなかったが、アーチ部に採用したRJFPについても各種のデータを採取している。現在、今回採用した補助工法の総合的な補強効果について検討を進めており、機会をあらためて報告したいと考えている。軟弱地山に於いて沈下抑制が課題となる工事や近接してトンネルが存在する工事は今後とも増加することは明らかである。そのような場合には、何らかの対策工の採用が不可欠であり、今回の結果が何らかの参考になれば幸いである。最後に、施工に当たり有意義なご指導をいただいた構造技術センターの長友取締役、高速道路技術センターの岩井調査役に御礼申し上げます。また、地盤の変形について適切な助言をいただいた九州産業大学奥園教授には感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中田雅博, 佐野信夫, 佐藤淳, 伊藤淳, 樽井稔; 3次元有限要素法による超大断面トンネルの挙動検討, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, PP755~760, 1994
- 2) 小森 博, 堀地紀行, 熊耳哲雄, 大津宏康, 瀧 治雄; NATMにおける支保構造の三次元効果とその評価について, 土木学会論文集, No. 529, PP57~68, 1995, 12
- 3) アンブレラ工法の設計技術資料; ジェオフロンテ研究会, 1996年11月
- 4) 脚部補強工技術資料; ジェオフロンテ研究会, 1995年12月