

現場計測による垂直縫地ボルトの補強効果に関する基礎的研究

The study on the effect of support on vertical forepoling bolt method by field measurements

中田 雅博*、三谷 浩二**、城間 博道***、西村 和夫****、進士 正人*****

Masahiro NAKATA, Koji MITANI, Hiromichi SHIROMA, Kazuo NISHIMURA and Masato SHINJI

During the excavation of tunnels, such problems as subsidence of the ground surface, collapse of cutting face or slope, sometimes occur in the area of the shallow overburden near the tunnel entrance. One method of coping with such problems is called "Vertical Forepoling Bolt Method". In this method, the bolting are driven at regular interval from the surface before excavation in order to reinforce the cutting face and the ground. However, there were still no data clarifying the effectiveness of this method.

At this time, field measurements was carried out by verifying the effectiveness of this method. From the field measurement, nearly elastic behavior of subsidence was measured by "EL beams sensor". And, it become clear that the effectiveness of vertical forepoling bolt method is different from the upper zone and the shoulder of the tunnel by "Sliding deformeter E" and axial force measurements.

Keywords: vertical forepoling bolt method, shallow overburden tunnel, field measurements, design, tunnel entrance

1. はじめに

山岳トンネルの施工技術は、NATMの導入以降、積極的な現場計測と数値解析手法の活用により飛躍的な発達を遂げ、道路計画の多様なニーズに応えつつある。しかし、坑口部や土被りが小さい箇所においてトンネルを計画する場合、大きな地表面沈下、切羽の不安定化及び地すべりの発生といった一連の地山変状などへの的確な対策工の選定が極めて重要となる。これらの変状を未然に防止する施工法のひとつとして、トンネル掘削前に、地表面から鉄筋を適当な施工間隔で打設することにより地山を積極的に改善する「垂直縫地補強工法」(以下、「補強工」と呼ぶ。)がある。この補強工の従来の設計の考え方は、トンネル掘削により地山に緩みが発生すると同時に斜面安定上の力学バランスが崩れ、その結果発生する地山中の滑り荷重に対し鉄筋のせん断抵抗により斜面の安定を保つような考え方が基本となっている。しかし、補強工の作用効果の一つは地表面沈下の防止という効果であり、この場合の設計は、従来の設計法とは異なることが十分予想される。また、地表面沈下を抑止することが地山の緩み領域発生抑制となり、この抑制効果が地山内の滑り発生抑制に結びつくとも考えられる。

著者らは垂直縫地ボルトを主として軸力のみを伝達する補強材と考え、ボルトによる軸力の分担が地山の緩みを抑制すると考えた落し戸による模型実験を実施し、トンネルに作用する土圧の低減及び地表面沈下の抑止という観点から補強工の効果およびそのメカニズムに関して検討を行なった。その結果、補強工の効果は①補強によ

* 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室長

** 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室主任

*** 日本道路公団 上越工事事務所 春日山工事区 工事長

**** 正会員 東京都立大学講師 工学部土木工学科

***** 正会員 応用地質(株) 川本地盤工学研究所 トンネル技術課長

る地山の緩み領域の低減効果、②補強による地山物性値（特に地山の粘着力）の向上という観点で整理でき、模型実験が補強工の設計の基礎データになりうることを示した^{1),2)}。

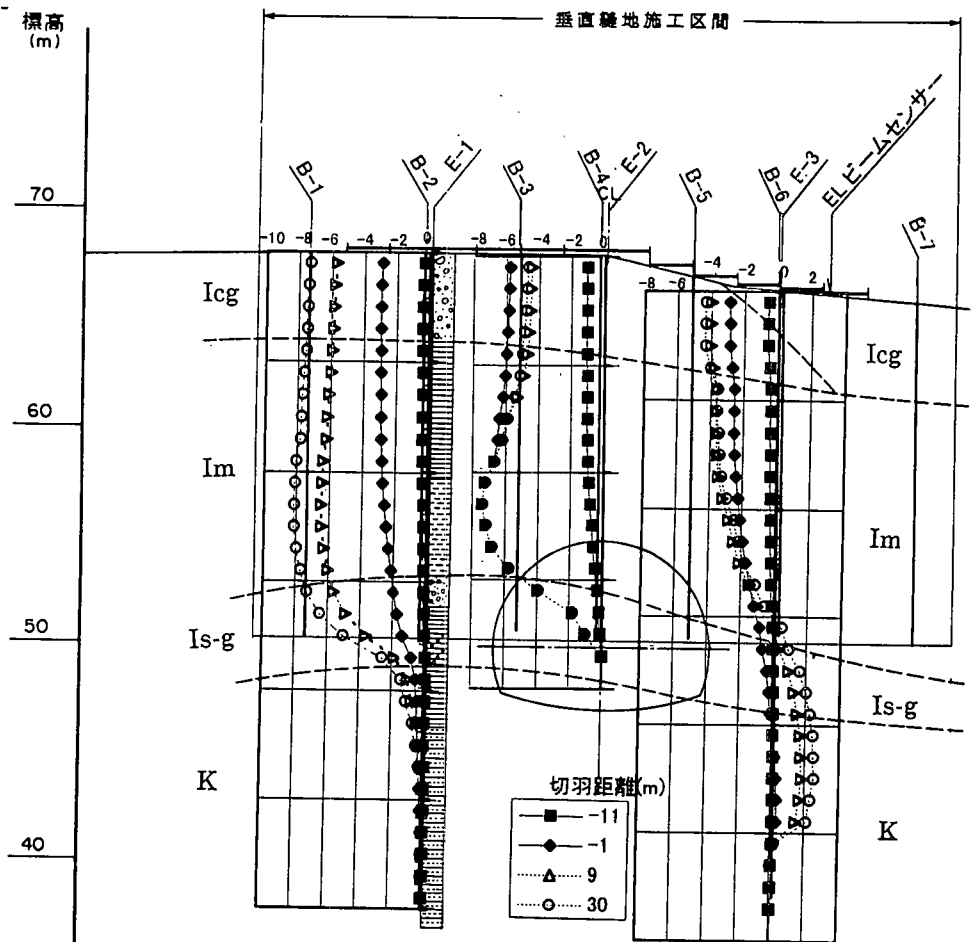
今回、これら室内試験の結果を検証するため、実スケールにおける現場計測を実施する機会を得た。本論文は、まず簡単に現場計測の概要を述べ、補強効果という点から結果を整理する。次に、補強工による地山の緩み領域の抑止効果について、理論式による検討を行ったのでその結果について述べる。

表－１ 地山物性値一覧表

記 号	N 値	水平載荷試験のよる地山の 変形係数 (KN/m ²)	地質凡例
Icg	30～50	1,020	シルト質砂岩
Im	30～50	4,490～13,870	シルト岩
Is-g	50 以上	3,650～4,850	砂岩～礫岩
K	50 以上	14,230～6,1900	砂質泥岩、砂岩

2. 現場実験概要

現場実験は、既設トンネルに平行して建設される２車線道路トンネルの坑口部において実施された。このトンネルの地質は、新生代第四紀の比較的固結度の低い泥岩 (Im)、砂岩および新第三紀中新世のほぼ均質で比較的締まった泥岩・砂岩 (K) からなり、２つの地層間には、握りこぶし大のチャートの円礫～亜円礫を 50～60% 程度含む厚さ 4～5 m の礫岩層 (Is-g) を挟んでいる。表－１に、これまでの地質調査結果および今回実施した孔内水平載荷試験などを整理した地山の物性値一覧を示す。この坑口は、既設トンネル施工時において地すべりが発生しており、地すべり対策工として排土工および深礎工が施工された。新設トンネル施工に当たっては、供用中の既設トンネルへ



図－１ 地質縦断面図

の影響を配慮して新たな地すべり対策工として、新たに深礎工および垂直縫地工が実施された。

計測は、トンネル坑口から約100mの位置で実施した。使用機器を表-2に示す。計測機器の配置図を図-

表-2 計測機器一覧表

記 号	計測機器	計測数量	計測目的
B-	ボルト軸力計	7測線 (-14m,-8m,-4m,CL,4m,8m,14m)	切羽通過前後のボルト軸力の発生状況を計測する
E-	スライディングティフォーメータE	3測線 (-8m,CL,8m,)	地山の变形挙動(鉛直、水平)を計測する。
EL-	ELビームセンサー	2mのセンサーを12台連結 2m×12台=24m	地表面沈下を自動的に計測する。

1に示す。図には、地質横断面図も合わせて示す。補強工は、2mピッチでトンネルの幅のほぼ3倍、トンネルのSLの深度まで施工されている。

トンネル掘削は、上半先進のショートベンチ掘削工法で行われ、5月14日深夜に上半が、5月31日に下半が通過している。

る。本文では、上半通過前後の地山挙動に着目しデータの整理を行った。

2. 1 計測結果

1) 地表面沈下計測

地表面沈下計測は、通常はレベル測量によって実施されるが、今回は精度のよい計測と自動化を目的としてELビームセンサーによる自動計測により実施した。図-1に示すように、2mの長さのELビームセンサーは地表面に一列に並べそれぞれのセンサーの両端部を地面に固定する。沈下計測はそれぞれのセンサーの端部の相対的な傾きを計測し、それをセンサー列の最端部を固定として加算することにより沈下量を計測する。沈下量は現地のデータ収録コンピュータに自動保存され、これにより1時間毎の地表面沈下測定が可能となる。

ELビームセンサーでは、ビーム間の相対的な沈下挙動を測定しているため、絶対沈下に換算する必要がある。そこで、トンネル中心から左右8m離れた位置における地中変位計測結果を参考にして地表面の絶対沈下とした。補正した地表面沈下計測結果を図-2に示す。図から明らかなように、切羽が5月14日夜間に通過した直後から沈下量が增大していることが分かる。また、地表面沈下は、トンネルから左右12m離れた地点においても沈下が発生しており、地表面沈下は垂直縫地の打設幅程度から発生しているものと考えられるが、沈下の発生状況は、局所的な沈下の増大がない。模型実験の結果では、これは補強工の効果が表れているものと考えられる。

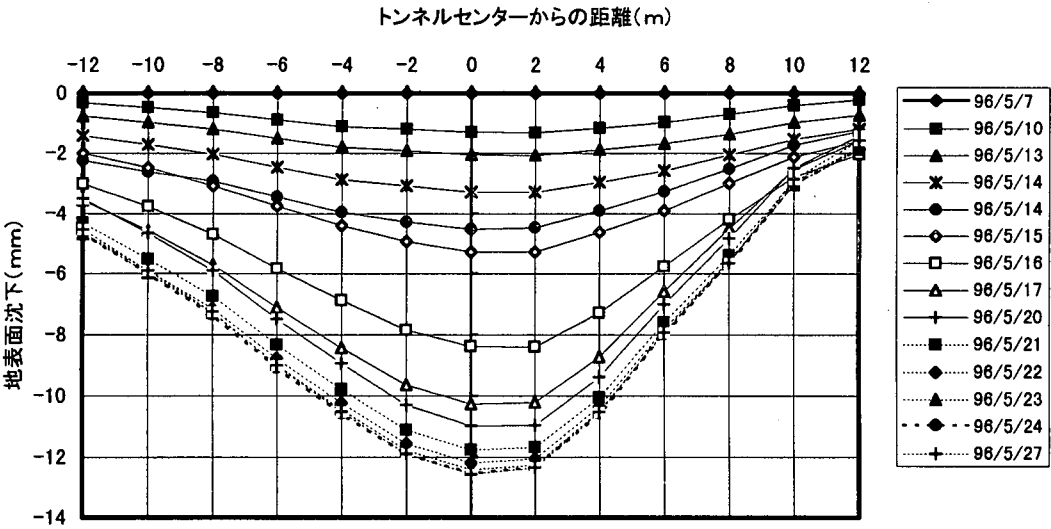


図-2 地表面沈下の経時変化(補正)

次に、切羽距離と地中変位計の設置位置における沈下量に関して整理した結果を図-3に示す。図から明らかなように、切羽の進行に伴う地表面沈下の発生状況は弾性連続体的な挙動であり、トンネル中央部の沈下量は、切羽到達時に全体の約40%が発生していることが分かる。この結果からも補強工による掘削応力の縦断面方向への荷重伝達がスムーズに行われているものと考えられる。

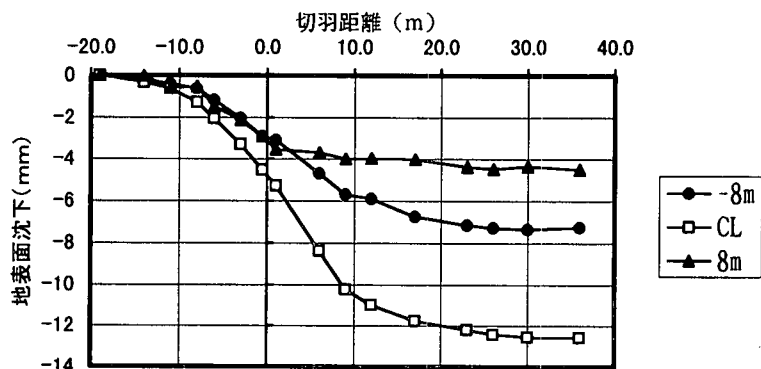


図-3地表面沈下と切羽距離との関係

2) 地中変位計測

地中変位計測結果を図-1の地質横断面図に合わせて示す。図中■、◆、▲、○印は、それぞれ切羽と計測断面との距離における地中変位分布を表している。

左8mに設置された地中変位(B-1)は、全線にわたり縮みの挙動を示す。特に縮みが増加する箇所は、深度19m~16m付近であり、16mから地表部までは、ほぼ一様な沈下挙動を示す。この付近は、礫岩層で強度も低いこと、また、垂直縫地ボルトが深度17m

まで打設されていることなどから、16mから地表部まではほぼ一様に沈下したと考えられる。従って、トンネル側壁部の剛性が沈下に大きく影響していることが考えられ、今後、側壁部の補強と地表面沈下抑制効果についてさらに検討を行う必要がある。

トンネルセンターに設置した地中変位計測結果(B-2)は、切羽通過後は深度12m以深部分の地中変位計が計測不能となるため、それ以降は深度10mまで地中変位計測を行った。図から明らかなように切羽通過直前には、天端付近で大きく沈下が発生し、その後は地表面の相対的沈下量は伸び傾向を徐々に示している。

右8mに設置した地中変位計(B-3)は、計測断面を切羽が通過直後から深度約25mの1m区間で急激な伸びを示す。全体として伸びを示している部分は深度25~16mの区間で16mがImとIs-g層の境界と考えられる。それより地表部に近い領域は、縮みの傾向を示す。

このようにB-1とB-3は、異なる地中変位挙動を示している。特にB-3は、土被りが小さいにも関わらず沈下量が小さい。これは、ELビームセンサーによる地表面沈下測定でも確認できる。

3) ボルト軸力計測

ボルト軸力の計測結果を図-4から図-10に示す。なお、ボルト軸力計は地中変位計よりも0.5m奥に設置されているため、切羽通過は15日早朝である。そして、図中の記号は、地表面からのボルト軸力の計測位置(地表面からの設置深度)を示す。

図-4および10から明らかなようにトンネルからそれぞれ16m離れた箇所でのボルト軸力の発生は、SL付近でB-1で1.5tf、B-7で0.8tf程度の圧縮力が切羽通過により発生するが、全体としては非常に小さい量といえる。図-5および9から明らかなようにトンネル中心からそれぞれ8mの離れた位置すなわち、トンネル側壁領域におけるボルト軸力計測結果では、SL付近においてB-2で9.0tf、B-7で6.5tf程度の圧縮力を示す。また、切羽通過後は僅かではあるが地表付近で引張り力が作用していることがわかる。全体としては、17日から軸力発生が収束傾向を示す。図6、7および8は、トンネルより上部の地山である左-4m、トンネル中心、右4mの位置におけるボルト軸力の計測結果である。この領域は、切羽にボルトが出現するまで軸力は圧縮挙動を示すが通過直後から引張りに転じることがわかる。その傾向は、トンネル中心に設置された軸力計B-4に顕

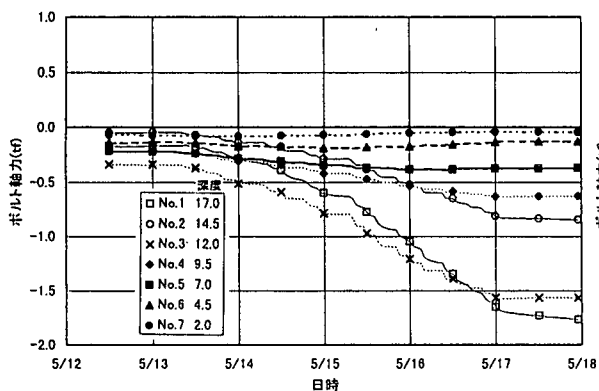


図-4 ボルト軸力の経時変化図(B-1)

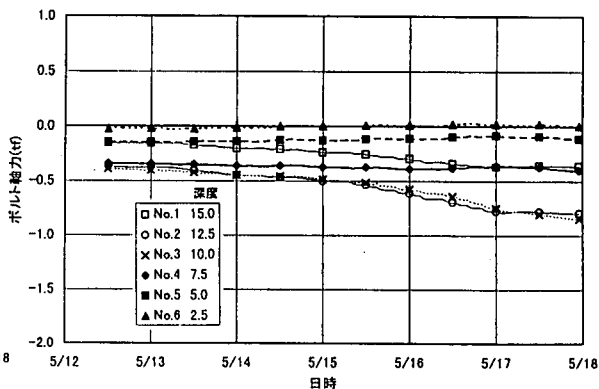


図-10 ボルト軸力の経時変化図(B-7)

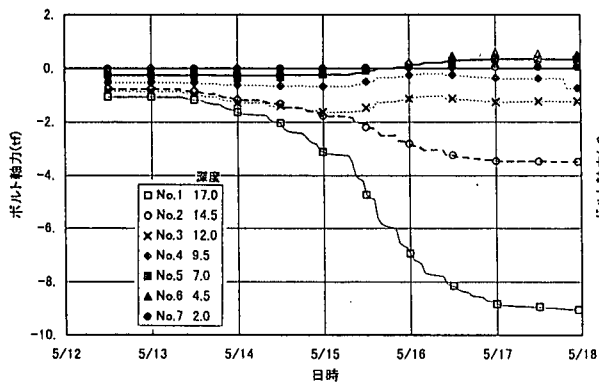


図-5 ボルト軸力の経時変化図(B-2)

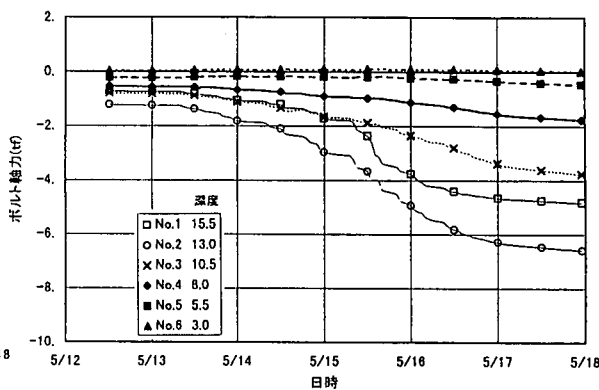


図-9 ボルト軸力の経時変化図(B-6)

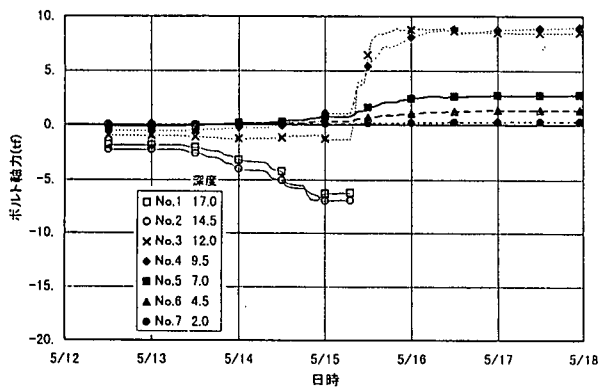


図-6 ボルト軸力の経時変化図(B-3)

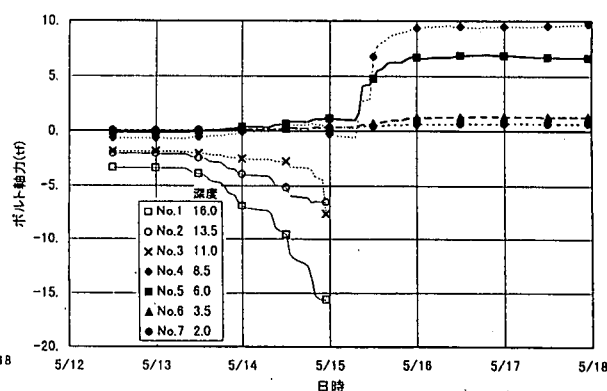


図-7 ボルト軸力の経時変化図(B-4)

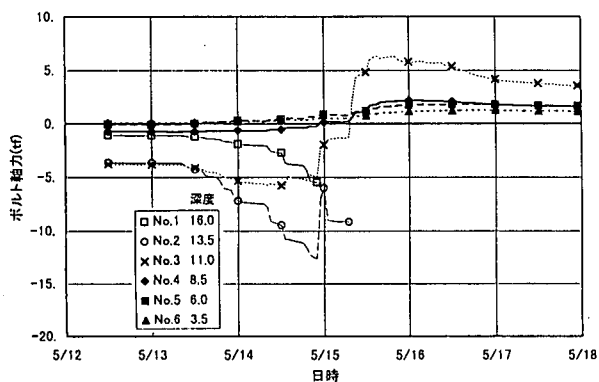
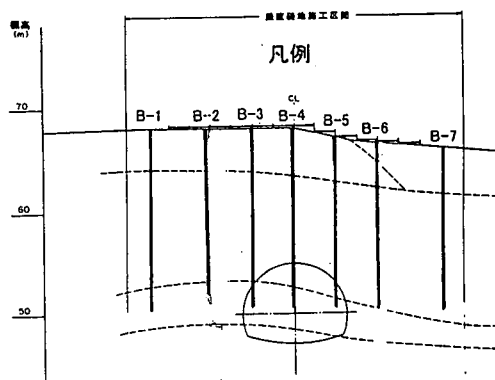


図-8 ボルト軸力の経時変化図(B-5)



著であり、切羽通過前は16tf程度の圧縮が発生するが、切羽通過後は10tf程度の引張りとなる。この結果は、トンネル中央の地中変位計E-2が切羽通過直後から徐々に伸びる傾向を示すことと一致し、天端沈下が地表面沈下より大きいことを意味している。この領域のボルト軸力は他の計測結果と異なり、16日から軸力が収束する。地中変位がまだ伸びの傾向を示していることを考えると、これは10tf付近でボルトと地山が分離するからと推察される。ただし、B-5の深度9.5mのボルト軸力は10tfに達する前に徐々に引張力が減少してきており、覆工が荷重を分担しつつあるものと考えられる。

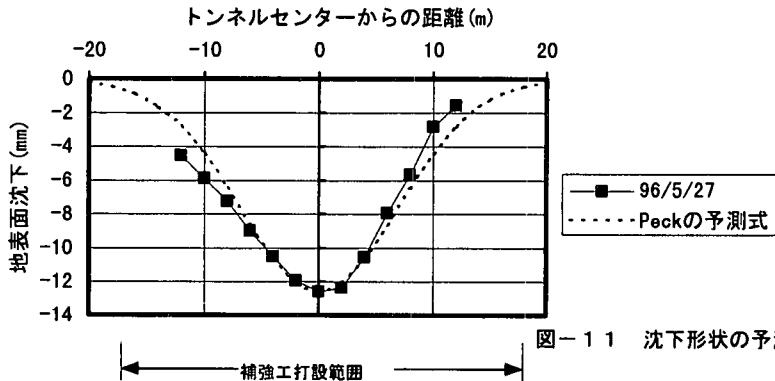


図-1-1 沈下形状の予測

3. 理論解析による補強効果の検討

補強効果について、Limanov と Peck の式を用いて検討を行った。Limanov の式では、トンネル中心部での最大沈下量から地山の弾性係数を逆算で求めた。その結果、Limanov の式によって推定される地山の弾性係数は $E=19,400\text{KN/m}^2$

となり、表-1に示す地山の

変形係数より大きな値を示す。これは、これまで模型実験においても予想されていた「補強工による地山の見かけの弾性係数の向上」が確認できたと言える。

Peck の式による沈下形状の予測を行った結果を図-1-1に示す。Peck の式において変曲点までの水平距離 i は地山によって異なるため、ここでは上半掘削最終時の変位分布と最も一致する変曲点までの水平距離を逆算で求めた。図-1-1の予測沈下曲線は、水平距離 i を 5.04m とした時の結果で最も計測変位とよく一致するケースである。この図に実際の補強工の打設範囲を合わせて示すと明らかなように、垂直縫地の打設範囲は沈下の範囲をほぼカバーしていることが分かる。

4. まとめ

本文では、補強工の作用効果を検証するために実施した現場計測の計測結果と、補強効果について理論式から簡単な検証を行った。現場計測の結果では、地表面沈下と切羽距離との関係から地山は弾性連続体に近い変形挙動を示していること。地中変位計測結果では、トンネル側壁部の挙動が地表面沈下に大きな影響を及ぼしていること。ボルト軸力は、トンネル上部と側壁部で全く異なる挙動を示し、ボルトの作用効果も設置場所により効果が異なることが明らかとなった。また、理論解による検討では、地表面沈下から推定される地山の弾性係数は、地山よりも約2倍程度の弾性係数を示し補強工の見かけの弾性係数の向上が確認された。また、沈下形状から今回計画された垂直縫地の打設範囲がほぼ妥当であることが確認された。最後に、現場計測の実施にあたり日本道路公団新潟建設局および前田・住友建設共同企業体の関係者各位の御協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 多賀 直大、嘉指 登志也、西村 和夫、進士 正人「垂直縫地の支保効果に関する実験的考察」、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.211～220、1993。
- 2) 嘉指 登志也、西村 和夫、進士 正人「逆解析手法に基づく垂直縫地補強工法の補強効果に関する研究」、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.665～670、1994。