

地表面沈下対策としての縫地ボルトを併用したトンネル掘削

種池信好*・松橋貞雄**・水原憲三***・
五十嵐 勉****

本文では、被りの薄い未固結地山を対象としてトンネル掘削を行う場合、これまで問題となっていた地表面沈下を垂直縫地ボルトを用いることにより制御した施工実績から、各種計測を含めてその効果、特性について明らかにしている。また、当該区域が盛土、及び沖積層を含むことから、都市近郊における地表面沈下防止対策として、垂直縫地ボルトの適用範囲の広いことを示している。

Key Words: restrained shallow covering, ground surface, vertical earth stitching bolts

1. はじめに

NATMは近年、施工範囲を土砂地山にまで広げておらず、これまで用いられたシールド工法の適用範囲の一部と重複するようになっている。

東葉高速鉄道・習志野台トンネルの坪井工区は土被りが極端に薄く、しかも土被りを構成する主な地質が盛土及び沖積層という特徴を有しており、これまでに例のないトンネルとして数えられる。

本報告ではこのような条件下で、地表面沈下の抑止対策としての縫地ボルトを併用した、CRD (Cross Diaphragm) 工法の施工結果と、施工を通して明らかになった縫地ボルトの効果・挙動について述べる。

2. 工事概要

東葉高速鉄道は、菅原地下鉄東西線の西船橋を起点とし、京成電鉄成田線の勝田台に至る延長 16.2 km の新線である(図-1)。

習志野台トンネルはこの路線の中程に位置する延長 2,360 m の典型的な都市トンネルであり、第四紀未固結洪積砂層、及び沖積層内の土被り 2.5~12 m で通過している。

坪井工区は習志野台トンネルの最も終点方に位置し、駅部開削トンネル 225.8 m を含む 725.8 m の区間である。丘陵台地部に立坑を設け、日本大学理工学部グラウンド下を通り、あかね町の民家密集区域に達する工区であり、この内、CRD-NATM により施工した 391.1 m について記述する(図-2)。

3. 地質概要

掘削対象地山は主として第四紀の洪積砂層で、いわゆる成田砂層であるが、工区の大部分を既に埋立てがなされた開析谷が横断しているため、一部で沖積層も対象としている(図-3)。

開析谷の地質状況について示す。

・盛土層

ローム層を主体とした盛土で、 $N=5$ 程度を示す。しかし、コンクリートガラや切り株等を混入するためかなりの空隙を有している。

・表土(旧表土) 沖積粘土層(Ac)

開析谷斜面部、および底部にあり、黒色で多量の草木根を混入する、いわゆる腐食土層と凝灰質粘土から構成されている。

・沖積砂層(As)

含水比が高く、粘土分の多い緩い層で $N=6\sim8$ 程度を示し、洪積砂層に連なる。

・洪積砂層(Ds)

いわゆる成田砂層と呼ばれている。開析谷底部に位置する部分では、もともとの土被りが薄いため、固結度は低く、 $N=10\sim15$ 程度を示す。

土質試験結果を表-1に示す。

4. トンネルの施工

(1) CRD工法^{1),2)}

標準断面、および掘削順序を図-4、5に示す。

CRD工法の特徴は強度の乏しい地山を掘削の対象としているため、断面を6分割とし、各断面をストラットや吹付けコンクリートにより仮閉合することで支保の剛性を高め、地山の緩みを抑止して地表面沈下を极力、抑えることにある。

また、従来のCD(Center Diaphragm)工法に見ら

* 日本鉄道建設公団関東支社工事二課長

(〒102 千代田区麹町4-2-1)

** 正会員 日本鉄道建設公団関東支社前習志野台鉄道建設所長

*** 正会員 (株)奥村組筑波研究所地盤研究室長

**** 奥村・福田、東葉・習志野台T(坪井)共同企業体所長

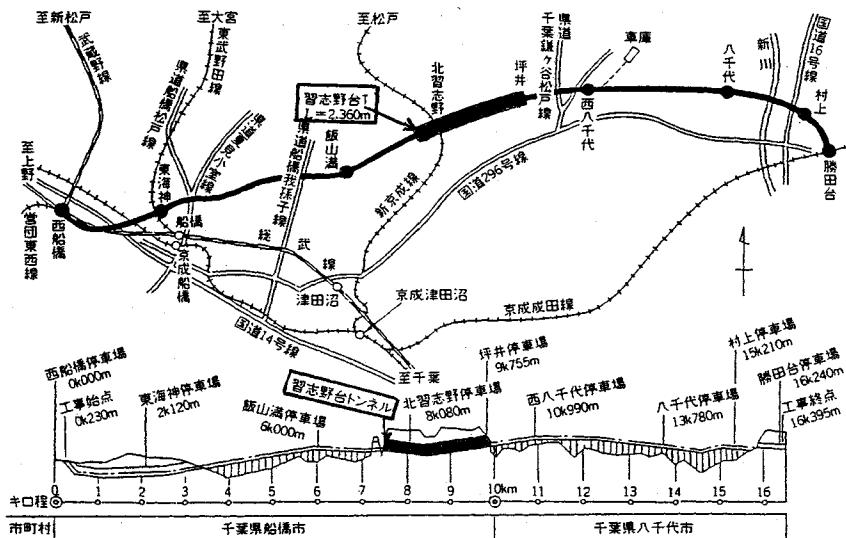


図-1 習志野台トンネル位置図

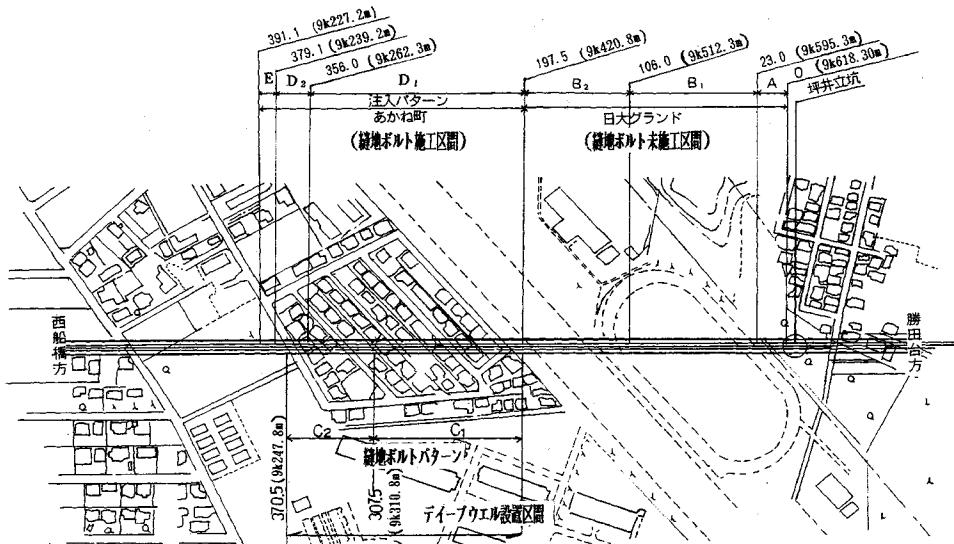


図-2 坪井工区 (NATM 施工区間) 平面

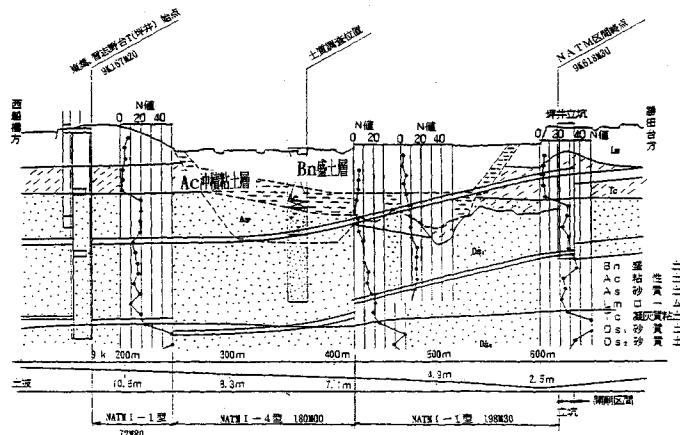


図-3 坪井工区地質縦断

表-1 土質試験結果

土質	N 値	含水比 %	湿潤密度 gf/cm³	間隙比	飽和度 %	シルト・粘土分 %	均等 係数	粘着力 kgf/cm²	内部 摩擦角 (度)	原位置 変形係数 kgf/cm²
有機質 粘性土	-	79 ~ 112	1.33 ~ 1.41	1.80 ~ 2.95	93.4 ~ 98.4	79 ~ 89	-	0.31 ~ 0.38	0 ~ 18.75	15.38
高灰質 粘土	5	66.8	1.573	1.833	96.5	93	-	0.316	2.6	38.53
細砂	7~15	27.0	1.723	1.003	73.2	25	9.6	0.062	32.8	176.34

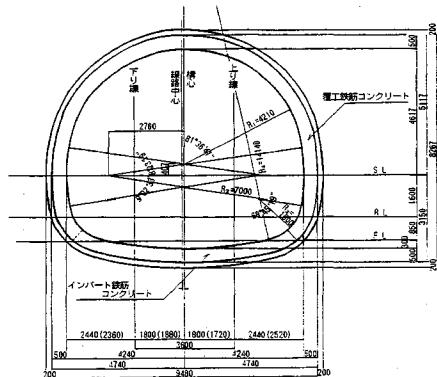


図-4 標準断面図

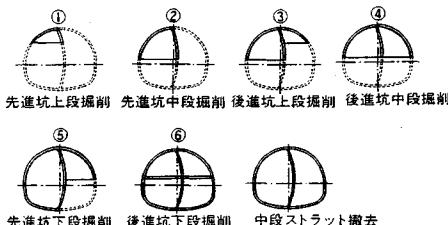


図-5 CRD 工法の施工順序

れるような縦長断面の掘削では、本工区の地質を対象とした場合、側圧の影響を受け易く、地山に対する抑止効果が低減するため、順番を変え、掘削途中の断面形状の安定と、早期の最終閉合を図れる掘削順序・形状としている。

(2) 補助工法

本工区の問題点は、大別して地下水対策の地表面沈下対策に分かれる。

a) 地下水対策

緩い土砂地山を掘削の対象とするため、地下水位のトンネル底盤以下への低下を必要とした。

重力排水工法と薬液注入による遮水壁の造成を比較検討した結果、確実性、経済性からディープ・ウェル ($\phi 500 \text{ mm}$, $l=33.0 \text{ m}$, ストレーナー長 16 m) を採用し、地下水位が掘削盤以上となる $9 \text{ k } 420.0 \text{ m}$ 付近より、起点側へ約 30 m ピッチで計 9 本施工した。

ディープ・ウェルの揚水量は 1 本当たり平均 160 l/min で、計 $1,400 \text{ l/min}$ を排水しており、トンネル断面内の残留水についてはウェル・ポイントを使用した。

尚、ディープ・ウェルによる地下水位低下に伴う先行沈下は 5 mm 程度を記録した。

b) 地表面沈下対策

当工区の土被りは約 $2.5 \sim 8.0 \text{ m}$ とに薄く、また、工区の大半が盛土を含む軟弱な地層によって構成されている。

そのため、掘削による地表面沈下がかなり発生することが予想され、地表面沈下対策としての補助工法を必要とした。

補助工法の採用にあたっては、剛性のある線材を利用することを主眼としており、斜面の影響を受ける立坑坑口部 23.0 m 間についてはパイプルーフを、あかね町の民家密集区域下を通過する坑口より 197.5 m ($9 \text{ k } 420.8 \text{ m}$) $\sim 370.5 \text{ m}$ ($9 \text{ k } 247.8 \text{ m}$) までの 173 m 間は縫地ボルトを採用した。

その他、空隙充填、地山強化を目的とした薬液注入を全線にわたって採用した。

各区間で採用した補助工法の一覧と、パターンを図-2、および 6 に示す。

5. 計測、および施工結果³⁾

計測項目の一覧と配置を表-2、図-7 に、またトンネル直上部の地表面沈下と坑内天端沈下の計測結果を図-8 に示す。

(1) 縫地ボルト施工区間（日本大学グランド）

$$l=197.5 \text{ m} (9 \text{ k } 618.3 \text{ m} \sim 9 \text{ k } 420.8 \text{ m})$$

坑口より 106 m ($9 \text{ k } 618.3 \text{ m} \sim 9 \text{ k } 512.3 \text{ m}$) の内、補助工法 B_1 パターン区間では、地表面沈下は土被りに従い増加しており、盛土が支保材料としての強度を有しておらず、ただ単に荷重として作用していることを示している。

また、坑口より 98 m ($9 \text{ k } 520 \text{ m}$) 付近では先進坑上段を起点とする楕円形のクラックが地表面に発生し、最大 98 mm の沈下を生じた。このため、薬液注入材料をこれまでの無機系から有機系へと変更し、地山強度の増加を目的としたパターン B_2 を 91.5 m 間 ($9 \text{ k } 512.3 \text{ m} \sim 9 \text{ k } 420.8 \text{ m}$) にわたり採用した。

この結果は地表面沈下量の 20 mm 程度の低下となつて現れているものの、なお 70 mm 前後の沈下を生じていた。

これ以降の区間は、直上部分は立ち退きによって空地となっているが、あかね町の民家密集区域となる。周辺民家に与える影響を考慮し、木造家屋建築基準の最大許容傾斜角 ($5/1000 \text{ rad}$) 以内とするため、トンネル直上中心部の最終沈下量を 60 mm 程度としなければならず、

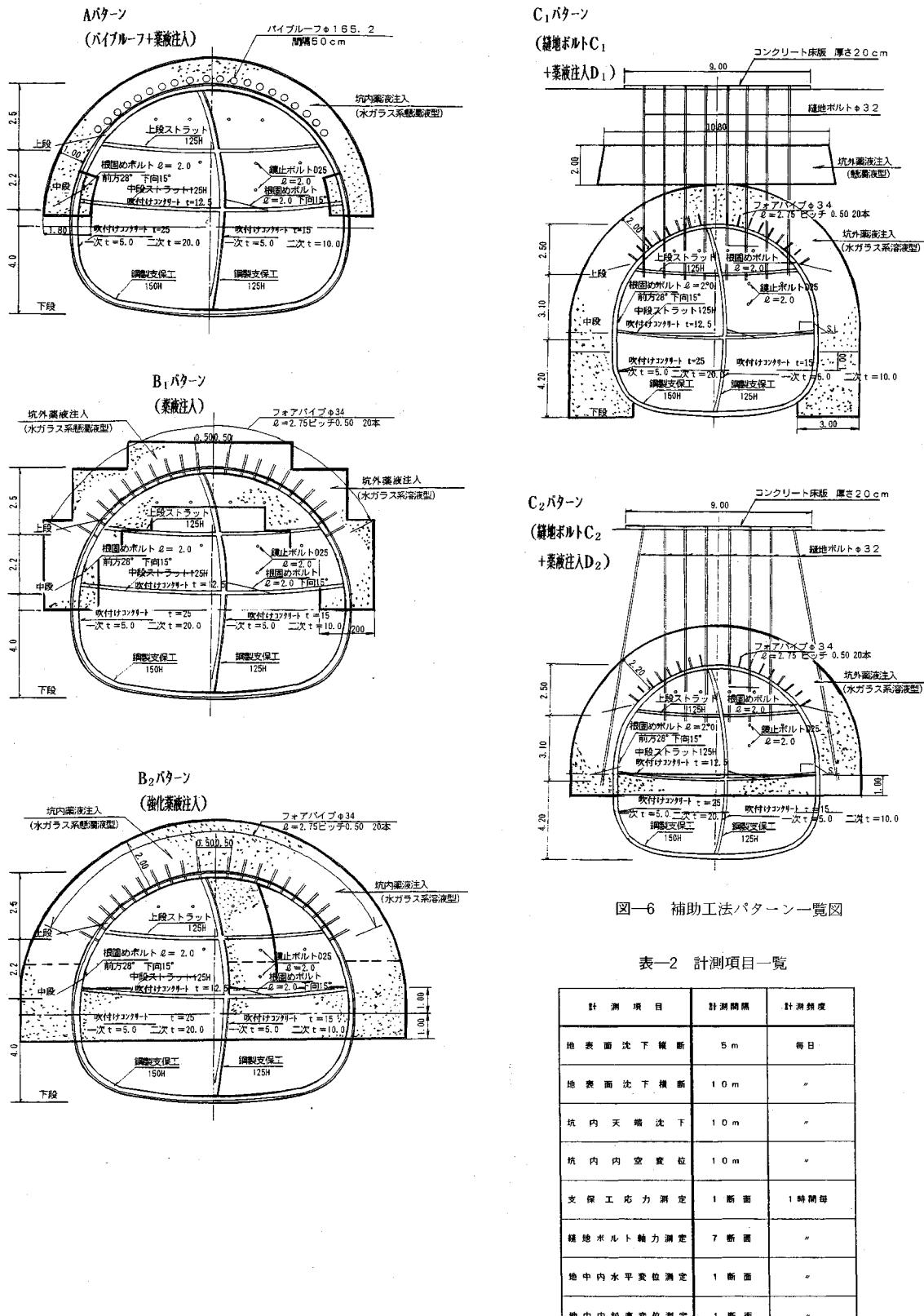


図-6 补助工法パターン一覧図

表-2 計測項目一覧

計測項目	計測間隔	計測頻度
地表面沈下観察	5 m	毎日
地表面沈下横断	10 m	〃
坑内天端沈下	10 m	〃
坑内内空変位	10 m	〃
支保工応力測定	1断面	1時間毎
縫地ボルト輪力測定	7断面	〃
地中内水平変位測定	1断面	〃
地中内鉛直変位測定	1断面	〃

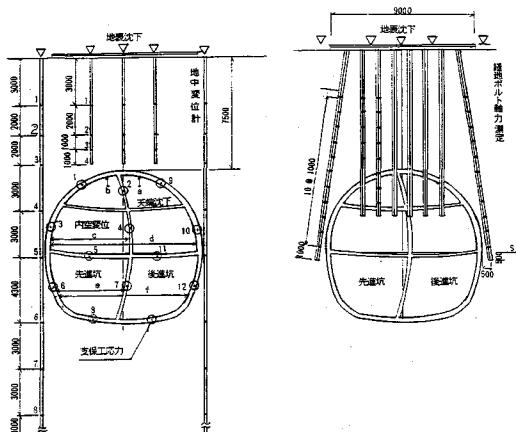


図-7 計測項目配置図

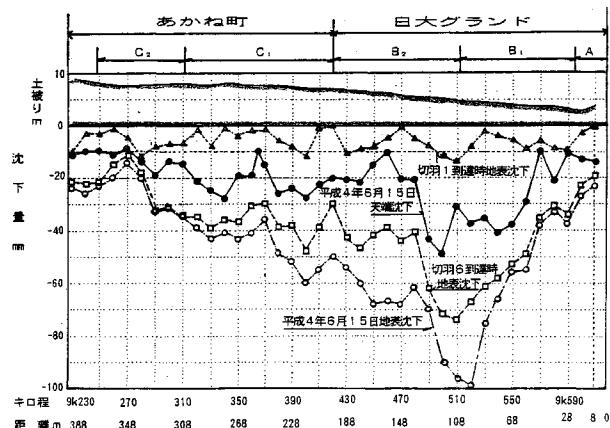


図-8 地表面沈下計測グラフ

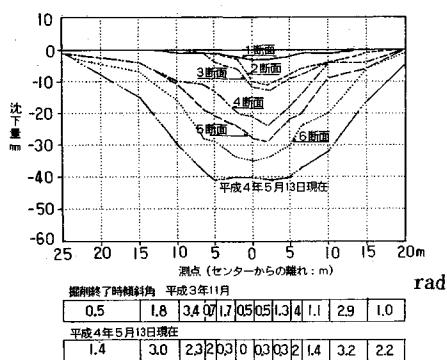


図-9 260 m (9 k 360 m) 付近横断方向沈下曲線図

別途の対策を必要とした。

これまでの沈下計測の大きな特徴としては、各測定期間のバラツキが坑内、地上とも大きく、また、地表面の沈下量が坑内天端沈下量の2倍近い値を記録していることが上げられる。更に、閉合後の地表面沈下量の増加も、際立っていた。

このような状況から、盛土層がかなりの空隙を有しており、掘削に伴う外力の変化による圧密沈下を長時間にわたって続けていると判断した。

こうしたことを防ぐためには、盛土内の空隙をできるだけ充填するとともに、盛土の動きを拘束し、不均一な盛土材料を統合・強化する必要があり、以後の区間は縫地ボルトを追加したパターン C_1 , C_2 を採用した。

(2) 縫地ボルト施工区間（あかね町）

$I=173$ m (9 k 420.0 m ~ 9 k 247.8 m)

縫地ボルトを採用したパターン C_1 , C_2 区間、坑口より 197.5 m (9 k 420.8 m) ~ 370.5 m (9 k 247.3 m) 間は地表面沈下も減少しており、明らかな効果が窺えた。

図-9 にトンネル横断方向沈下曲線を示す。

図-10 に縫地ボルトの詳細を示す。

縫地ボルトは、トンネル上部の全土荷重を支えるもの

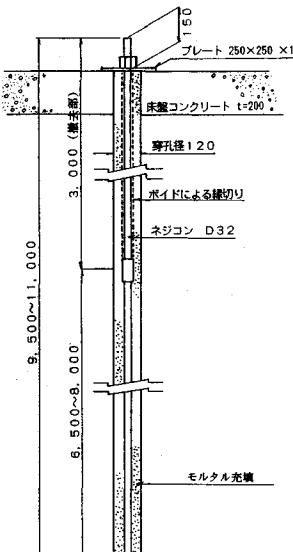


図-10 縫地ボルト詳細

と考え、周面摩擦力との釣合いから穿孔径 ($\phi 120$ mm) と打設ピッチ (1本/ 1m^2) を定めた。

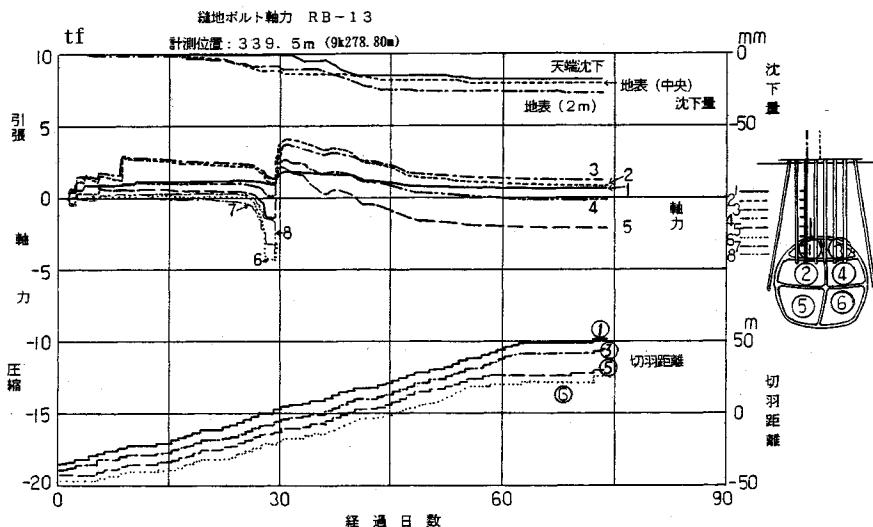
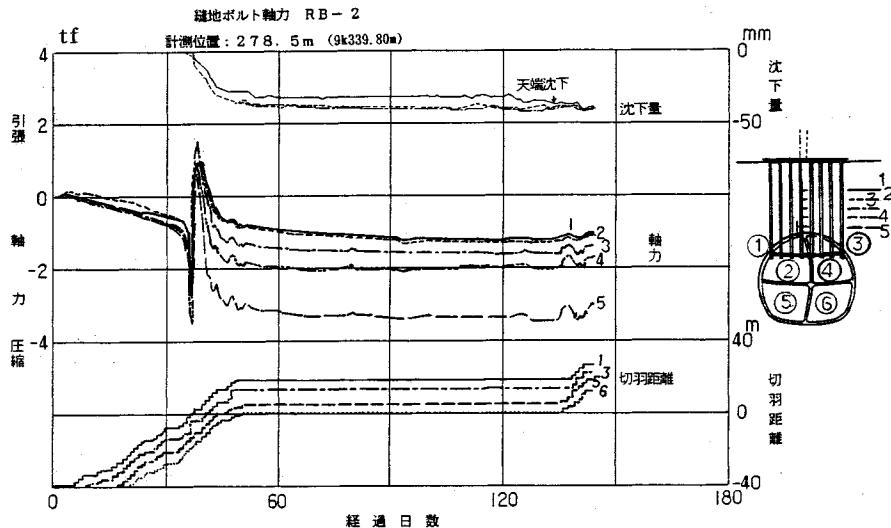
a) 縫地ボルト軸力の経時変化

パターン C_1 , C_2 における軸力の経時変化を図-11, 12 に示す。

ボルトに働く軸力は切羽が近づくにつれて圧縮力を発生し、先進坑上段 (①) 通過後、引張方向に転じ、また、徐々に圧縮側へと推移する。

これは、切羽通過まではボルトの周囲摩擦力によって拘束された土塊重を、上段掘削盤以下にまで設置されたボルトがトンネル断面内の砂層を支持層とする摩擦杭として支えていることを意味している。

掘削によって支持部が失われ、引張力を示したボルトは先進坑上段 (①) 掘削完了後、切断され、吹付けコンクリート内にプレート・ナットで固定されるため、その



後の地山の変位により再び圧縮力に転じるものと考えられる。

この現象は、これまで計測された地表面沈下>坑内天端沈下と言う結果を裏付けると同時に、閉合後のクリーブ的な変形をも拘束していると判断できる。

最大発生軸力としては、鉄筋 $\phi 32$ で、3.8~5.0 tonf (29.4~49.0 kN) 程度の圧縮力を示しているが、鉄筋周囲の固結したモルタルにも同様のひずみが発生しているものとすれば次式が成り立つものと考えられる。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c$$

$$\varepsilon_i = P_i / (A_i \times E_i)$$

$$= P_i / (7.942 \times 2.1 \times 10^6)$$

$$\varepsilon_c = P_c / (A_c \times E_c)$$

$$= P_c / (105.155 \times 2.8 \times 10^5)$$

$$\therefore P_c = P_i \times 105.155 \times 2.8 \times 10^5 / (7.942 \times 2.1 \times 10^6)$$

$$\approx 1.7 \times P_i$$

ここに

ε_i : 鉄筋のひずみ

ε_c : コンクリートのひずみ

P_i : 鉄筋に作用する力

P_c : コンクリートに作用する力

A_i : D32 断面積 = 7.942 cm²

A_c : モルタル杭の断面積 = 105.155 cm²

E_i : 鉄筋のヤング係数 = 2.1×10^6 kgf/cm²

(0.2058×10^6 MPa)

E_c : モルタル杭のヤング係数

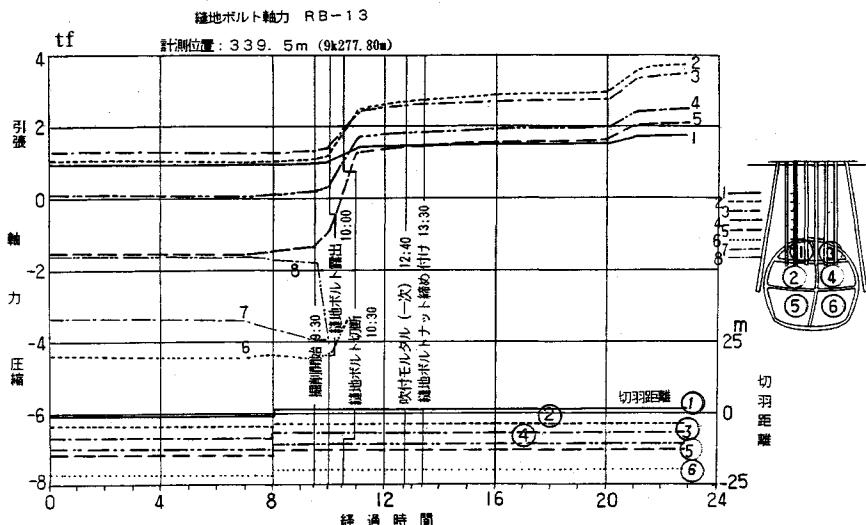


図-13 RB-13 縫地ボルト軸力当たり経時変化拡大図

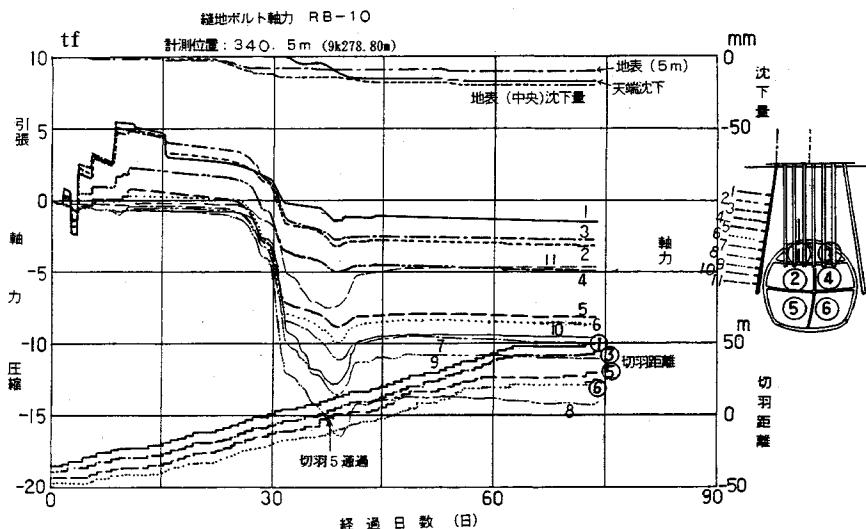


図-14 RB-10 縫地ボルト軸力経時変化図

$$\delta_{28} = 300 \sim 350 \text{ kgf/cm}^2 \text{ より } 2.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\ (0.2744 \times 10^5 \text{ MPa})$$

従って、杭全体として鉄筋の2.7倍程度の圧縮力 $10.3 \sim 13.5 \text{ tf}$ ($100.94 \sim 132.30 \text{ kN}$) が働いているものと想定できる。

これに対して、当初仮定したボルト1本当たりが受け持つ土荷重 P は、土被り7.5 m、平均単位体積重量を 1.45 t/m^3 (14.21 kN/m^3) とすれば、 $P=10.9 \text{ tf/m}^2/\text{本}$ ($106.82 \text{ kN/m}^2/\text{本}$) となり、 m^2 当たりの単位荷重以上の軸力が発生しており、地山を効果的に拘束していることが裏付けられている。

図-13はボルト切断時の時間当たり経時変化拡大図である。

掘削開始と同時に、断面内にある測点7、測定8の圧縮力は増加するものの、トンネル上部の測点は、圧縮状態から急激に引張方向へと転じている。

これは、トンネル上部の地山が掘削と同時に急速に内空側に変位するとともに、掘削断面以下の地山が支持層として抵抗していることを示している。

このことから断面内に打設した縫地ボルトは、上段切羽通過前までは杭効果により地山を拘束して地表面沈下を抑止し、切羽通過時には地上床盤コンクリートを反力点とする吊下げ効果によりトンネルの安定に寄与して、ボルト切断後、吹付けコンクリートに固定されてからは再び、杭効果により地山を拘束するものと考えられる。

パターンC₂では縫地ボルトのこうした地山拘束効果

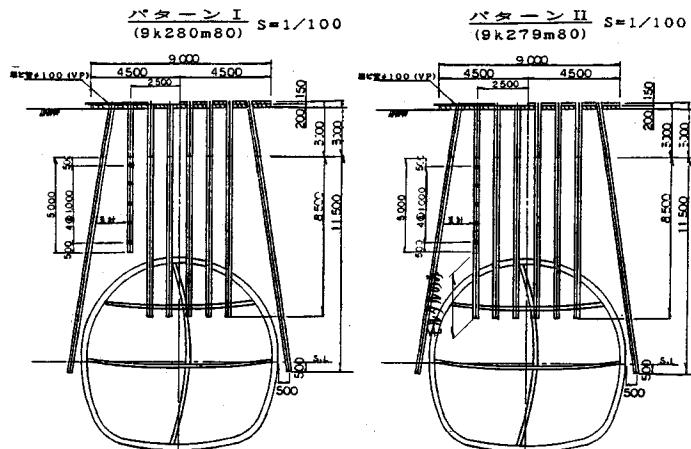


図-15 縫地ボルト長効果確認試験パターン図

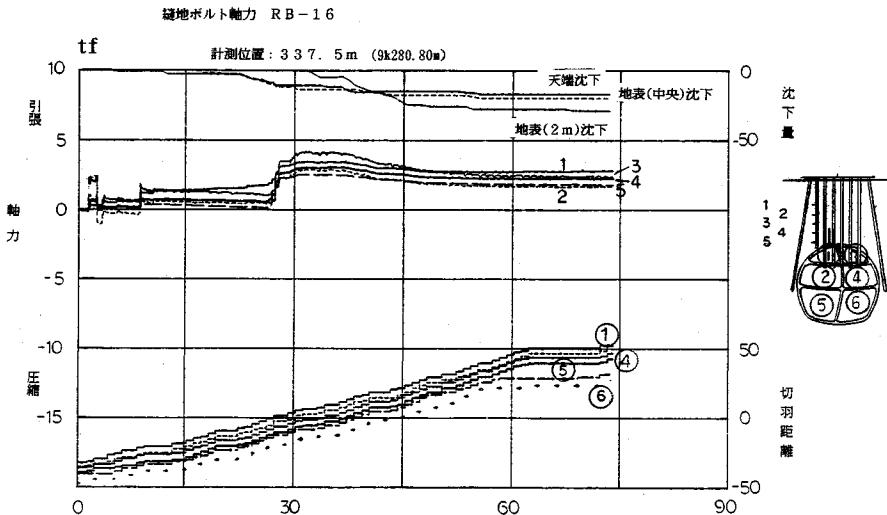


図-16 パターンI 軸力経時変化図

を、掘削～切断という作業過程の中で損なうことなく、最終閉合後も有効に発揮できるよう、両側2本を断面外に設置した。

軸力の経時変化を図-14に示す。

これまでと異なり、切端5の掘削により支持部が緩められるまで圧縮力は増加を続け、鉄筋の軸力として最大15tf(147kN)以上を記録しており、効果が高いと判断できる。

b) 縫地ボルトの打設パターン試験

縫地ボルトの有効打設パターンを調査するために、これまでのパターンの他、図-15に示すパターンで軸力の測定を行った。

- ・パターンI (9k280.8m)

縫地ボルト設置長をトンネル天端までとしたもの。

- ・パターンII (9k279.8m)

挿入する鉄筋はトンネル天端までとし、モルタル杭についてはトンネル断面内まで設置したもの。

パターンI、IIにおける軸力の経時変化を図-16、17に示す。両パターンとも上段切羽が近づいても、これまで見られたような圧縮力の増加傾向は示さず切羽到達とともに、急激に引張力を増加させている。また、その後の圧縮力への転じ方も少なく、これまでのパターンとは異なる傾向を示している。

これは、最大の変位発生点であるトンネル掘削天端以深までボルトを挿入しないと、杭効果が得られず、地表面沈下の抑制効果が小さいことを表している。

また、パターンIIでは掘削断面内は圧縮力のみ作用するので、鉄筋はトンネル天端までとし、断面内はモルタルのみとしたが、薬液注入や、掘削時に発生する外力の影響、および切羽で発生する変位により連続性が損なわ

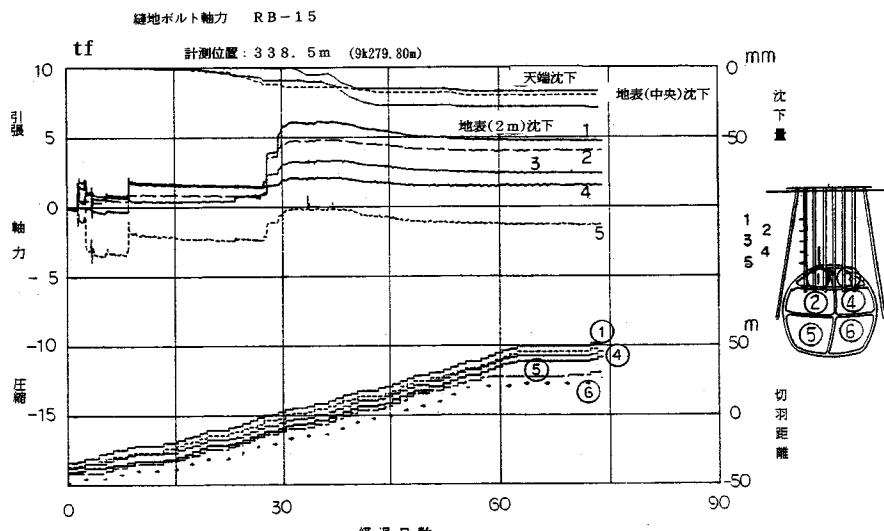


図-17 パターンII軸力経時変化図

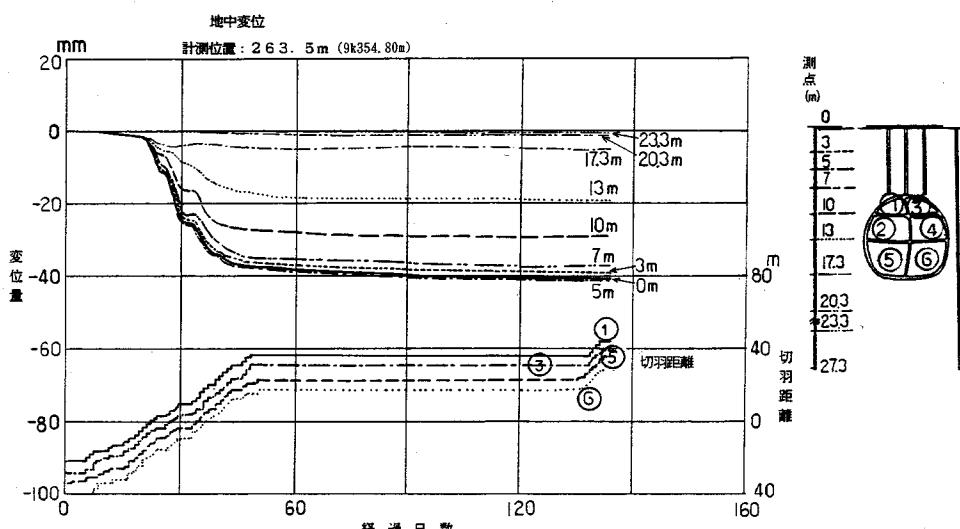


図-18 地中変位分布経時変化図

れ、パターンIと同様の結果になったものと考えられる。

従って、地表面沈下の抑止を目的とした縫地ボルトでは、断面内まで鉄筋、およびモルタルを設置するのが効果的と言える。

c) 地中変位測定

図-18にC₁パターン区間の鉛直方向地中変位分布図を示す。

鉛直方向の地中変位は、ボルトが挿入されている地表からトンネル直上部付近までの地山がほぼ一体となった動きを示しており、これまで述べてきた縫地ボルトによる拘束効果の高いことを裏付けるものとなっている。また、トンネル掘削盤以下となる17.3 m以降の変位が少ないことから、この部分の洪積砂層は充分に支持地盤と

しての機能を有していると同時に、この支持盤に達する長尺ボルトを設置すれば、より大きな、沈下抑制効果が期待できるものと判断できる。

6. まとめ

本トンネルは、記述したように縫地ボルトを有効に用いながら、平成4年5月26日に掘削を終了している。

これまでの各種報告によって指摘されてきたのは、周面摩擦力を利用したボルトの引張り効果(吊り下げ効果)であった。しかし、本トンネルのような特異な地盤状況では、摩擦杭的な利用方法が効果的であり、圧縮力を利用する一つの方法となろう。

このように、盛土を含むN=10~15程度の砂地盤で

あっても、地山に適した効果的な補助工法を併用することで、都市NATMの適用は充分可能と考えられる。

最後に、これまで御指導いただいた山本稔都立大学名誉教授を委員長とする習志野台トンネル特別委員会の諸先生方に、誌上を借りて、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 土谷幸彦・高瀬昭雄：CRD工法で都市NATMに挑む，

トンネルと地下, Vol. 19, No. 2, pp. 7~13, 1988. 2.

- 2) 前田昌康・佐藤正人・管野勝廣：CRD工法による市街地道路下のNATM, トンネルと地下, Vol. 20, No. 5, pp. 37~42, 1989. 5.
- 3) 藤井 浩・奥田 庸・登坂敏雄・阿部敏夫：洪積層における地表面沈下量を抑止した山岳トンネル工法の開発・適用に関する実験的検証, 土木学会論文集 No. 462, VI-18, pp. 63~72, 1993. 3.

(1993.4.8受付)

THE TUNNELLING WITH THE NATM ACCOMPANIED WITH VERTICAL EARTH STITCHING BOLTS TO RESTRAIN SURFACE SETTELEMENT

Nobuyoshi TANEIKE, Sadao MATSUHASHI, Kenzou MIZUHARA and Tsutomu IGARASHI

Based on the actual results of the work, this paper has made clear characteristics of restrained settlement of the ground surface by using vertical earth stitching bolts and their effect for tunnel excavation under the ground condition of loose bedsand and shallow covering.

Considering the geology of the site consists of filling and alluvial deposit, the settlement restraint method by vertical stitching earth bolts can be widely applied to tunnel construction in urban area.