

垂直縫地ボルトの地表面沈下抑止効果とボルトの軸力挙動に関する実験結果 並びに適用例

Experimental Results of the Vertical Anchor Bolts and Their Application to Control the Ground
Surface Settlement and the Axial Stress Change

奥田 庸*・石渡徳久**・阿部敏夫***

Mitsugi OKUDA, Tokuhisa ISHIWATA and Toshio ABE

In case of excavation of tunnels under thin-covered and unsettled ground, the control of ground surface settlement is the most important in the tunnel construction.

The authors are of the opinion that there are still two serious problems for the future construction, which they are discussing in this report as follows: one is the efficiency of vertical anchor bolts applied to control the ground surface settlement, and the other is the degree of axial stress change of vertical anchor bolts during excavation.

In addition the authors comment on the other application case of vertical anchor bolts to prevent the near-by buildings from being damaged by the tunnel construction.

Keywords: experimental result, ground surface settlement, vertical anchor bolts, axial stress change, building damage prevention

1. はじめに

土被りの薄い未固結地山を山岳トンネル工法で施工する場合の最も重要な課題の一つは、地表面沈下量の抑止であり、今後とも大きな課題となるものと考えられる。

本論文では、トンネルの上載土が人工盛土となっている土被りの小さい未固結地山のトンネルの施工時に採用した垂直縫地ボルトの地表面沈下の抑止効果と、掘削各段階での軸力挙動について論ずる。また、近接する住宅家屋の変状を防止するため施工した他の適用事例についても併せて論述する。

2. 地中及び地表面沈下の発生機構と垂直縫地ボルトの役割の検証方法

トンネル掘削により発生する地中及び地表面の変位に関する実験や研究は数多くあるが、切羽前方地山の変位を対象としたものは極めて少ない。

* 正会員 日本鉄道建設公団新幹線部新幹線第二課長
** 日本鉄道建設公団関東支社工事第一部工事第二課補佐
*** 日本鉄道建設公団関東支社西船鉄道建設所副所長

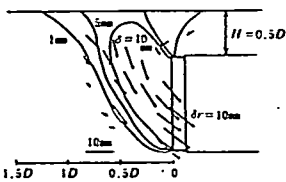
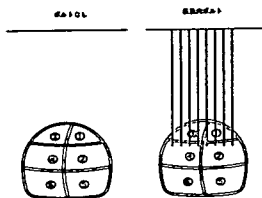


図2-1 切羽前方地中コンタ
ー及び変位ベクトル図
[土被り比(H/D)=0.5]



(○内数字は掘削順序を示す)
図2-2 CRD工法における
「縫地ボルト」の概念

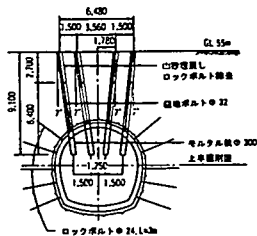


図2-3 垂直縫地ボルト
の施工例

図2-1は、上野、足立らが砂中に埋めた実験装置を用い、トンネル径Dに対する土被りHの比が0.5の場合の地中変位を計測し、変位ベクトルとして図化したものであるが、切羽前方には、大きな変位領域が形成され、あたかも切羽前方の土塊が切羽鏡面に流出しようとするかのような挙動を示すことを指摘しており、土被りが小さい場合には切羽面の変位と地表面変位との間に、大きな相関が有ることを述べている。¹⁾

土被り比が異常に小さくなることを防止するため、適切な加背割に留意し、併せて各掘削段階毎に支保の仮閉合を行うことが、地中及び地表面沈下の抑止という面から見て、いかに重要であるかは筆者らが検証したところであるが、²⁾ 土被り比の小さい未固結地山では、切羽面の押し出し変位を防止することが、極めて重要であることを改めて認識する必要がある。

本論文に述べる垂直縫地ボルトは、地山の一体化効果の他、切羽鏡面の押し出し変位に対する抵抗体として有効に機能することを期待するもので、図2-2に示す概念図のとおり上半掘削盤の下端までボルトを挿入することを基本とした。

過去の施工例では、ボルトは掘削断面外の上方を定着端とすることが多く、図2-3のように無筋のモルタル杭が掘削断面内に挿入されることがあっても、掘削作業の施工性を考慮し、ボルト鋼材自体は掘削断面内に入らない事が通例であった。³⁾

本実験では、地表面沈下等の変位測定と掘削断面内を含むボルト鋼材の深度別の軸力測定により、切羽到達前の地山変位の抑制効果を把握することを目的とした。

3. 垂直縫地ボルトの設計・施工と地表面沈下の抑止効果

3-1 実験に供したトンネルと地質の概要

実験に供したトンネルの位置平面を図3-1に、同区間の地質縦断面を図3-2に示す。

地質的にみると、基盤層は第4紀の洪積砂層で、垂直縫地ボルトを施工した区間の住宅団地部と発達立坑側のグラウンド部では盛土造成がなされた開析谷が広がる。

表層から下方に向かっての地質特性は次のとおりである。

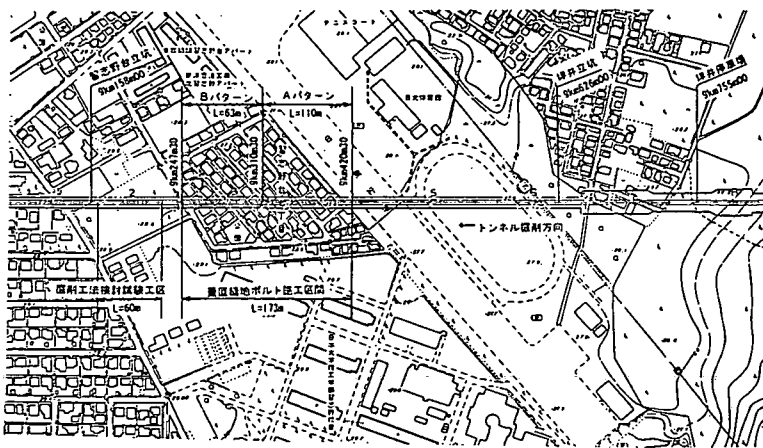


図3-1 実験に供したトンネルの位置平面

①盛土(Bn)：砂及びロームを主体とし、コンクリート片、木片を混入する。層厚は最大5m程度であるがかなり空隙を有する。一部区間では、トンネル頂部に分布する。

②旧表土及び沖積粘土層(Ac)：開析谷斜面部及び底部に分布する黒色のルーズな層で、多量の草木根が混在する、いわゆる腐植土層と凝灰質粘土により構成される。切羽は自立するものの、時間とともに液状化を呈し、外力に対して体積変化を生じ易い。変形係数Eは15～18kgf/cm² (1.47～1.76MPa)程度と極めて小さい。

③沖積砂層(As)：含水比が高く、粘性土分の多い緩い層でN値は5程度である。変形係数も約40kgf/cm² (3.9MPa)程度にとどまる。

④洪積砂層(Ds)：基盤層である成田砂層であるが、開析谷底部では先行上載土荷重が小さいため、固結度は低く変形係数も約180kgf/cm² (17.6MPa)と小さい。

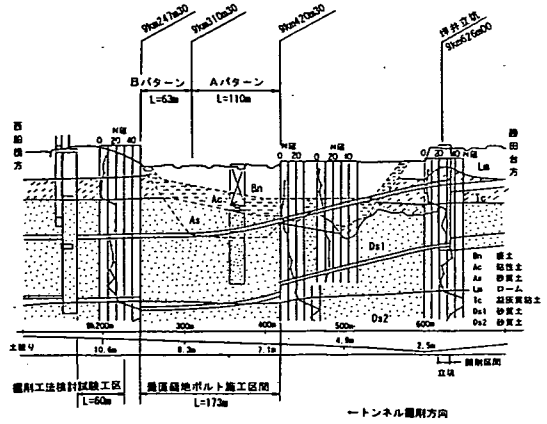


図3-2 実験に供したトンネルの地質縦断面

3・2 垂直縫地ボルトの設計・施工と地表面沈下量

図3-1及び図3-2に示すとおり、発進立坑方のグラウンド下部分では垂直縫地ボルトを施工せず、住宅団地下のうち、110m間を図3-3に示すAパターン、63m間を図3-4に示すBパターンとした。

図3-2に示すように、垂直縫地ボルトの施工区間は、前後の一般区間に比し、トンネルの内空を下方に拡大した断面となっているが、

これは列車走行路を振動減衰対策としてゴム支承の桁構造としたことによるものであり、トンネル構築部に相当する地表部は、予め用地を取得し、家屋を撤去した後、図3-5に示す構造の垂直縫地ボルトの施工を行った。

ボルトの間隔は、線路方向及び線路直角方向ともに1m間隔としたが、これはトンネル上方の全土荷重がボルトに「引張力」として均等に作用した場合のボルトの引張耐力から決定した。

図3-6は、トンネル中心線上の地表面沈下量とトンネル天端の沈下計測結果を示している。

掘進初期段階のグラウンド下区間では、当初から薬液注入を併用したが、開析谷中央部の掘削に移行するに従い、地表面沈下量が急増し、9km515m付近では最大98mmの沈下を生じた。

一方、トンネル天端の沈下量も増大傾向が観測されたため、掘削作業自体の安全を図る必要性から、薬液注入のゾーンを図3-4に示すBパターン区間のものと同等程度までレベルアップし、対応することとした。

この結果、残るグラウンド下の区間では地表面沈下量を70mm以下、天端沈下量は20mm程度にまで改善する

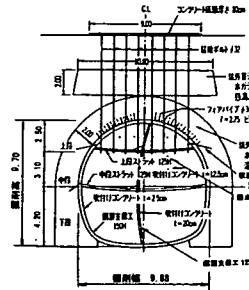


図3-3 垂直縫地ボルトAパターン

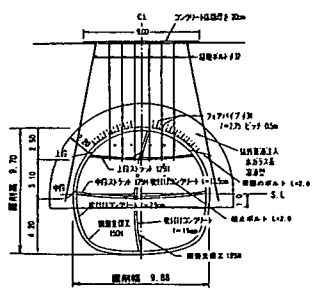


図3-4 垂直縫地ボルトBパターン

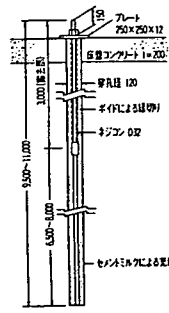


図3-5 縫地ボルト詳細図

ことができたものの、9km420m付近から始まる住宅団地区間では、取得用地に隣接する家屋防護のため、地表面沈下量を更に低減する必要がある、図3-3に示すAパターンの垂直縫地ボルトを施工した。この結果、Aパターンの区間では一部区間を除き概ね50mm以内の地表面沈下量となっている。

また、9km310m付近から始まるBパターン区間では、Aパターン区間での計測値の推移と、開析谷中央部から縁端部への移行区間という地山条件を考慮に入れ、図3-4に示すとおり、薬液注入のゾーンをやや軽減したが、Aパターン区間での最外側の縫地ボルトを斜めボルトとして掘削断面外に定着させ、その効果を確認することとした。

Bパターン区間では、これらの相乗効果もあり、地表面沈下量は一部区間を除き25mm以内の値となっている。

ここで横断方向の地表面沈下量に着目すると、この住宅団地区間では、直上部の最大値の低減とともに、買収地との境界付近での沈下量の変化を示す「沈下勾配」を抑制しうる有効な対策が必要となる。

図3-7はAパターン区間の9km355m地点での地表面沈下量の横断方向の分布を示したものである。

一方、図3-8は、図3-1あるいは図3-2に示す「掘削工法検討試験工区（縫地ボルト無し）」での横断方向

の地表面沈下量の分布を表しているが、トンネル構築幅の最外縁部付近での沈下勾配に関しては、垂直縫地ボルトによる抑制効果が明らかに認められる。図3-9は、9km490mから9km230m間の地表面沈下量とトンネル天端沈下量の関係を「ボルト無し区間」「Aパターン区間」及び「Bパターン区間」の3区間に分け表したものである。

また、筆者らは未固結洪積層の地山でのトンネルを対象に、天端近傍の地山に水平傾斜計を予め設置し、計測した先行沈下量（掘削切羽到達前に発生する天端沈下量）の全沈下量に占める割合を報告しており、⁵⁾ この比率を本例に適用すると、掘削後に坑内で計測される天端沈下量が全沈下量の約65%に相当するところから、坑内計測による天端沈下量の1.5倍(1/0.65)と地表面沈下量とが等量になる線を斜めの実線で表示したが、この実線から上方に離れる程、上載地山が圧縮性を示すことを意味している。これは、計測データ間での土被りの若干の変化を考慮したとしても、縫地ボルトの無い区間から、Aパターン区間及びBパターン区間へと移行するにつれ、地

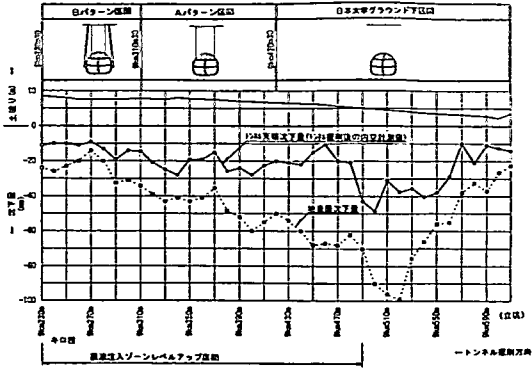


図3-6 トンネル直上地表面沈下量とトンネル天端の沈下量

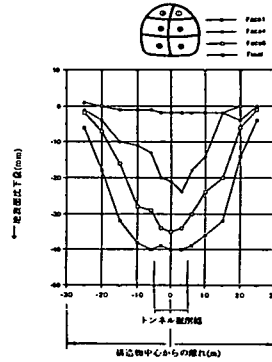


図3-7 横断方向地表面沈下分布図 [9km355m]

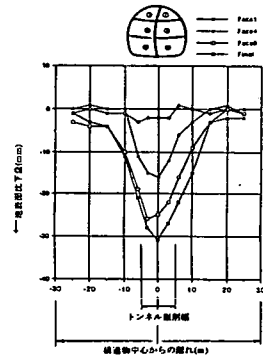


図3-8 横断方向地表面沈下分布図 (試験工区CRD工法) [9km210m]

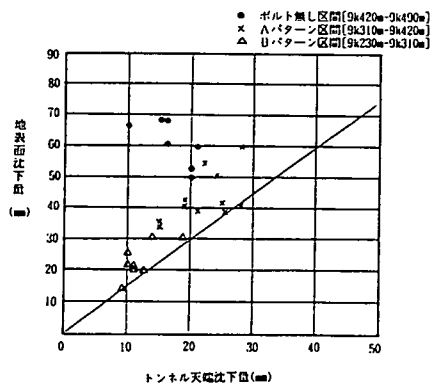


図3-9 地表面沈下量とトンネル天端沈下量

表面沈下量だけではなく、圧縮性の地山の変形特性を改良しているものと理解できる。

4. ボルト鋼材の定着条件の相異による軸力と地山の挙動

図4-1は上半掘削盤の下端までボルトを挿入した垂直縫地ボルトの深度別の軸力と掘削各断面の切羽位置との関係を示している。

最も先行して掘削する上半切羽1が接近するに従い、どの深度の軸力も圧縮力が徐々に増え、断面1の掘削幅程度にまで切羽が近接して以降、圧縮力は急増しているが、断面1の切羽がボルト位置に到達し、掘削に

支障するボルト鋼材を切断した後、軸力が引張側に急転しているように見える。

その後、圧縮力が再び増大し、結果的に軸力は圧縮側で平衡状態となっている。

垂直縫地ボルトがこのような軸力挙動を示すことは、事前に予測すらしておらず、切羽到達前後の掘削作業の内容とどのような関係があるのか、極めて興味のある課題となった。

図4-2は、このような観点からボルト軸力の経時変化を計測したものであり、①縫地ボルトが掘削作業によって露出されるまでの短時間に、掘削断面内の計測位置でのボルト軸力は急激な圧縮力の増大を観測しているが、逆に掘削断面外の各計測位置では引張力が増大している。②掘削断面内のボルトが切断されると、切断箇所から上方の計測可能な各位置では、全て引張力が急増している。③吹付コンクリート等の支保の施工後、各計測位置ではほぼ同等の増分で引張力が微増状態に移行している。等が確認された。

図4-1及び図4-2の結果から、掘削作業に伴う地山の挙動と、これに対抗しようとするボルトの働きを次のように理解することができる。

①切羽が到達する直前から、切羽前方の地山は図2-1のような挙動を示すため、上半掘削盤の下端で支持された縫地ボルトには図4-1のように圧縮力が作用する。切羽到達前のこの軸力挙動は、掘削断面内の測点を含め、下方に向かうに従い圧縮力が増大する傾向にあることは図4-2でも大略を確認できるが、掘削断面内の計測値に整合性が見られない等、ボルト支持端部の地山のゆるみに起因するものと考えられる計測値の乱れが認められる。

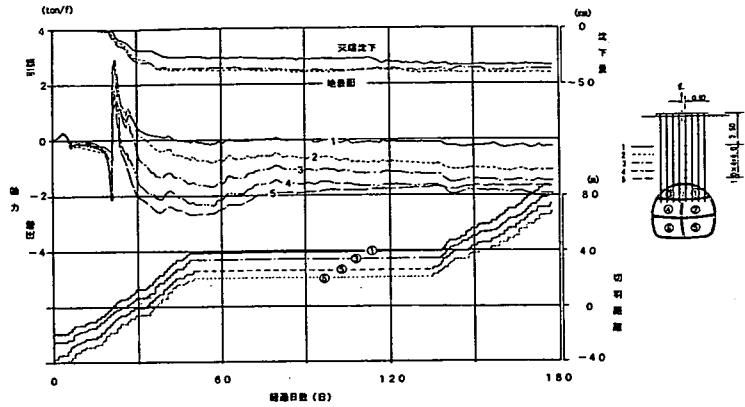


図4-1 垂直縫地ボルト軸力経時変化(9km359m80)

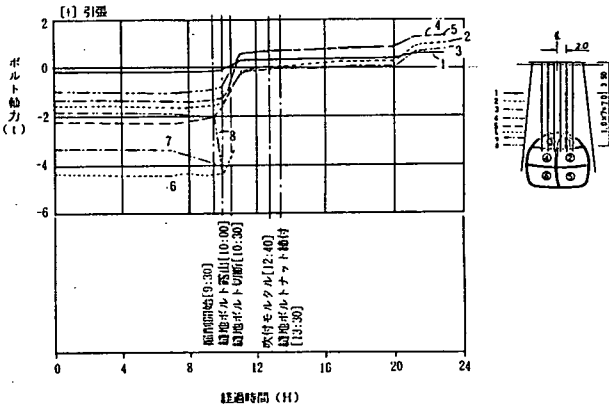


図4-2 鏡近傍の縫地ボルト軸力経時変化(9km279m)

図4-1では圧縮力が極大となる時点が判然としなかったが、図4-2では縫地ボルトが切羽から露出する前の状態、即ちボルトが切羽面にある状態で掘削断面外のボルト軸力は極大値となっているのに対して、掘削断面内とそのごく近傍では、ボルト切断の直前まで圧縮力は増大を続け、特に掘削断面内の変化は激しい。

このように、掘削断面の内外で縫地ボルトが圧縮力の極値を計測する時点にずれを生じるのは、切羽鏡面近傍での急激な地山の緩みがボルト周りの拘束を解放することに起因するものと考えられる。

②掘削断面内のボルトを切断すると、下支えを失った縫地ボルトは、図4-2に示すとおり瞬時に引張力を増大させ、いわゆる「吊下げ」状態となる。切断時の軸力の変化量は下方に向かうに従い大きく、「下支え」状態から、瞬時に「吊下げ」状態に移行したことを意味する。

③引張側に転じたボルト軸力は、吹付コンクリートの強度発現等、十分な支保が機能するまでの間に極大値を迎え、再び急速に圧縮力を増大させた後、徐々に平衡軸力に至る。これは支保効果が発揮されると再び「下支え」効果が生じ、上載土の圧縮変形の挙動に呼応した軸力変動を計測しているものと判断される。

上記のことから、縫地ボルトは掘削盤の下端に定着させ、「下支え」効果を発揮させることが極めて重要であると考え、縫地ボルトのBパターン区間内で、(ア)「モルタル部及びボルト鋼材ともに掘削断面外上方で定着したボルト」と、(イ)「掘削断面内はモルタル杭とし、ボルト鋼材は掘削断面外上方で定着したボルト」を各1本ずつ施工し、ボルト軸力の変動を計測することとした。

図4-3及び図4-4は、それぞれの軸力変動と切羽進行との関係を示している。

図4-3によれば、切羽到達直前から地山挙動に呼応する引張力が急激に増大し、以降平衡状態に至るまで、終始吊下げ状態となっていることが判る。

一方、掘削断面内のモルタル杭の「下支え」効果を期待したボルト軸力の挙動を図4-4に示すが、図4-3の場合と有意な差が得られなかった。

これは、切羽到達前の鏡面近傍の地山に坑内側へ側方移動する挙動が生じ、モルタル杭部分がせん断力を受け、連続体としての機能を失ったことに起因するものと考えられる。

また図4-4では、いずれの時点においても、圧縮力は作用しておらず、下支え状態とはなっていないと考えられる。

図4-5は、縫地ボルトBパターン区間で施工した最外側の斜めボルトの

軸力変動を示しており、切羽到達直前から各断面とも圧縮力が急激に増大していることが判る。この斜めボルトは掘削による切断を伴わないことから、先進切羽の到達・通過後も軸力は累加的に増大して、地中及び地表面の下方への変位に対し抵抗している。

ボルトの定着端が中段盤下端付近となっていることに起因して、中段盤切羽4の通過時の圧縮力が極値と

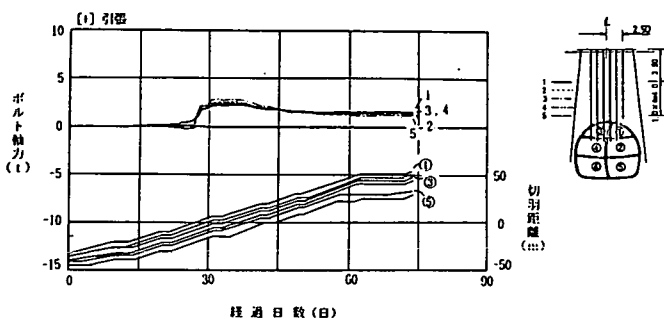


図4-3 垂直縫地ボルト軸力経時変化(9km281m)

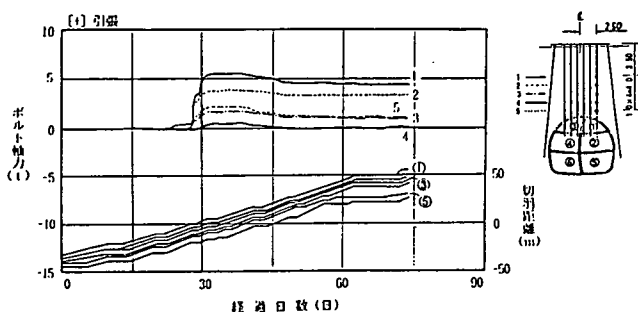


図4-4 垂直縫地ボルト軸力経時変化(9km280m)

っており、下半盤の掘削時にはボルト先端地山の緩みの発生による圧縮力の低減がみられた後、平衡状態に至っている。また、掘削による切断を必要としない縫地ボルトの存在が地表面沈下にどの程度有効かを定量的に論ずるには至っていないが、図3-6によりAパターン区間の沈下量と比較すると、定性的な有効性は検証できたものと考えられる。

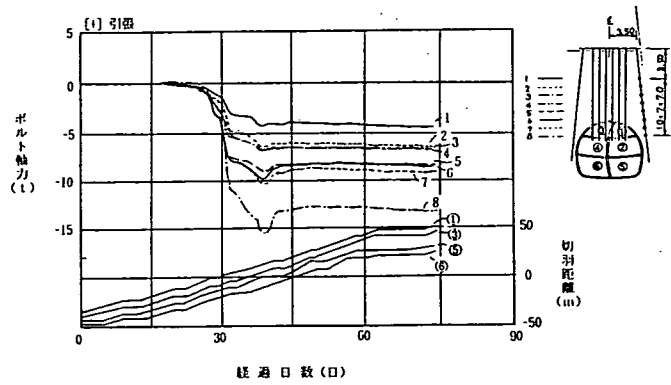


図4-5 垂直縫地ボルト軸力経時変化(9km279m)

5. 近接する家屋への影響を防止することを目的とした適用例⁴⁾

図5-1及び図5-2は適用した区間の平面及び縦断面である。図5-3及び図5-4にボルト平面配置と代表断面を示すとおり、垂直縫地ボルトはトンネルと家屋との間とトンネル掘削断面内の左側に、上半掘削盤下端を定着端として施工した。トンネル横断方向の地表面沈下量の分布を図5-5に示すが、家屋位置での地表面沈下量は微少であり、垂直縫地ボルトの施工により所要の目的を達成することができた。

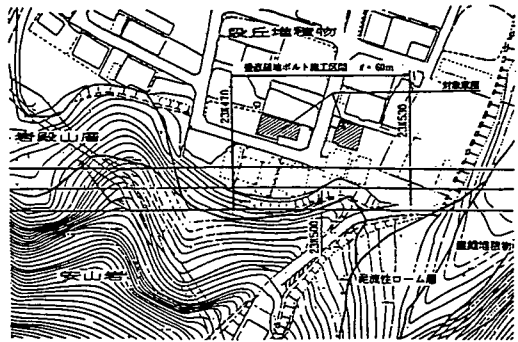


図5-1 垂直縫地ボルト適用区間平面図

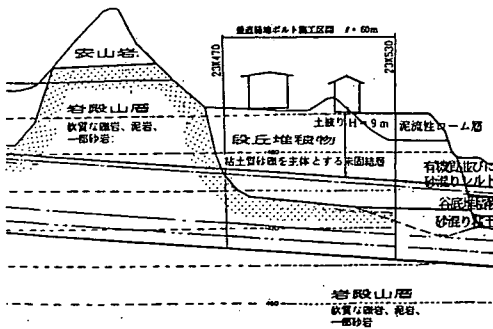


図5-2 垂直縫地ボルト適用区間縦断面図

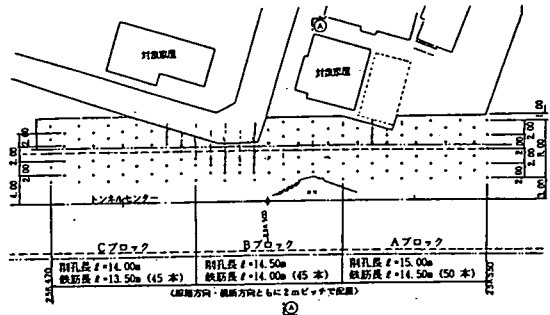


図5-3 垂直縫地ボルト配置平面図

図5-6は上半切羽の位置とボルトの深度別の軸力の関係を図示したものであり、掘削断面内に挿入したボルトAに着目すると、①切羽到達前の軸力は、既に3.で述べた実測例と異なり鋭敏な軸力挙動を示していないが、②切羽到達直後に至り、掘削断面内では既述例と同じく圧縮側への大きな軸力変動がある。③掘削断面内のボルトを切断した後、各深度の引張力が増大し、最終軸力に移行する挙動は既述例とほぼ同様である。上記②及び③から、縫地ボルトを掘削盤下端で挿入したことによる、いわゆる「下支え」効果が確認される。

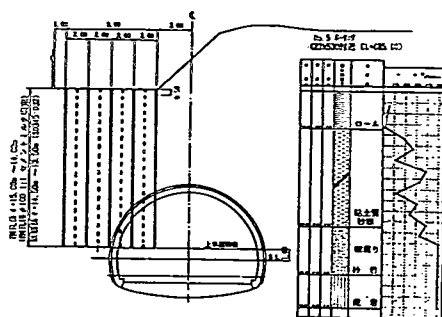


図5-4 A-A断面図

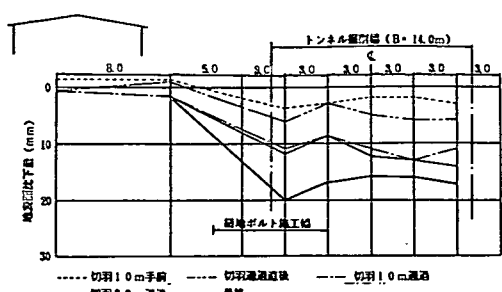


図5-5 23km490地点での地表面沈下量の横断方向の分布

次に掘削断面外に定着端を有するB及びCのボルトに着目すると、①下部の定着端部側の測点では、常に圧縮力になっているものと理解することができる。②一方、地山の緩みはそれほど上方にまで及ばず、地表面側に向かうと軸力は極めて小さな値となっている。上記①及び②から、縫地ボルトは地山の緩みの拉散を防止する点で有効であり、「下支え」機能が作用しているものと考えられる。

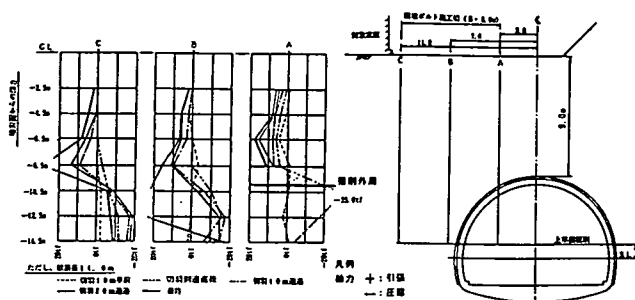


図5-6 垂直縫地ボルトの深度別軸力変動

6. 終わりに

一般に「吊下げ」効果によって機能するものと考えられている垂直縫地ボルトの軸力測定を経て得たものは、ボルトの圧縮力に期待する「下支え」効果の有効性であった。

また、この「下支え」効果が有効に機能する機構は、切羽到達前の切羽付近の地山変位の抑制を主眼とする未固結度の高い地山だけではなく、適用例に示される崖錐性の地山においても検証することができた。

今後、地山物性値等との相関を把握し、より定量的な解析、検証を行いたいと考えている。

7. 参考文献

- 1) 上野洋, 足立紀尚, 八嶋厚, 湯浅泰則: 砂質地山トンネル掘削に伴う切羽前方の地山挙動について, 第21回土質工学会研究発表会講演集, Vol. 2, 1986.
- 2) 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.
- 3) 松田慎一郎, 池田一樹, 永井隆吉: 都市トンネルにおける変形大断面NATM——三沢川分水路——, トンネルと地下, 第13巻第2号, 1982. 2.
- 4) 鶴田五八男, 吉原和美, 辰巳正太郎: 山梨リニア実験線トンネル工事に於ける垂直縫地工法による建物防護, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第4巻, 1994. 11., 報告(34)
- 5) 桜井春輔, 足立紀尚編: 都市トンネルにおけるNATM, PP. 219~PP. 222, 鹿島出版会, 1988. 12.