

(45) 垂直縫地補強工の支保効果に関する実験的考察

日本道路公団試験研究所

多賀 直大

日本道路公団試験研究所

○嘉指 登志也

東京都立大学工学部

西村 和夫

応用地質（株）川本地盤工学研究所 進士 正人

EXPERIMENTAL BEHAVIOR AND THEORETICAL CONSIDERATION OF THE SUPPORTING EFFECT OF VERTICAL FOREPOLING BOLT METHOD

Naoharu TAGA & Toshiya KAZASHI,
Kazuo NISHIMURA,
Masato SHINJI,

Japan Highway Public Corporation
Tokyo Metropolitan University
OYO Corporation

ABSTRACT

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 Method". In this method, bolts are driven at regular interval into the ground before excavation in order to reinforce the cutting face and the ground. However, there were still no data clarifying the effectiveness of this method from field measurements.

This model experiment was planned to verify the effectiveness of the method. It provides fundamental data for its application to engineering practice. Results from this experiment subjected to progress of the cutting face are presented. The experiment was conducted on the difference of the width and the density of reinforcement, compared with the ground pressure on the lining and the subsidence of the ground. As a result, it became clear that the reinforcement density had a good effect to reduce the ground pressure on the lining, furthermore, the width of the reinforcement had a large effect to control the subsidence of the ground.

1. はじめに

トンネル坑口部や土被りが小さい箇所においては、トンネル掘削に伴い地山に緩みが発生し地表面沈下、切羽の不安定化及び斜面の崩壊といった現象が生じ易い。これらの対策として、トンネル掘削前に、地表面より鉄筋を打設することにより地山の力学的性質を積極的に改善する「縫地補強工」が採用されている。この工法の従来の設計法は、トンネル掘削によって生じる地山の緩みにより、斜面安定を保つ上での地山の力学的バランスが崩れ、その崩れによって起因され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という考え方をとっているのが一般的である。しかし、著者らが収集した「縫地補強工」の現場計測データでは、トンネル掘削時において、縫地補強工の鉄筋には主に軸力が発生しているケースが多く認められ、従来の設計の考え方と実際の作用効果が異なることが予想された。そこで、縫地補強工の効果をトンネル掘削時の地山の緩み領域の拡大を事前に抑止する効果と考え、

著者らは縫地補強工を主として軸力のみを伝達する材料とした模型実験を実施し、トンネルに作用する土圧の低減及び地表面沈下の抑制という観点から「縫地補強工」の効

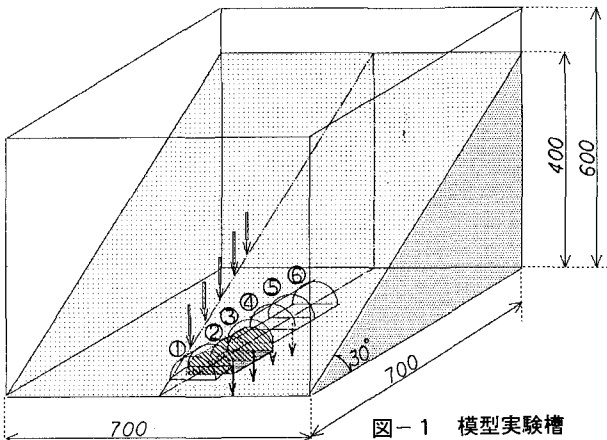


図-1 模型実験槽

表-1 地山材料

散弾：ワセツ：酸化亜鉛＝200：0.3：1.0
単位体積重量：6.7Kg/cm ³
内部摩擦角：27.5°
粘着力：≒0.0kgf/cm ²

表-2 実験パラメータ

補強密度 S	補強幅 W		
無補強	無補強		
1.0×1.0 (Cm)	1 W	2 W	3 W
1.5×1.5 (Cm)	1 W	2 W	3 W
2.0×2.0 (Cm)	1 W	2 W	3 W

1 W：トンネル直径の1倍

2 W：トンネル直径の2倍

3 W：トンネル直径の3倍

果およびそのメカニズムに関して検討を行ってきた。以下、その内容について述べる。

2. 実験概要

実験は、図-1に示す実験槽を用いトンネル形状を模した落し戸（直径100mm・スパン50mm、6個）を斜面の奥側に向かって逐次降下させることによりトンネルの坑口掘削をモデル化したもので、一番手前の第1落し戸を固定し、第2落し戸より1mm/分の速度で降下量10mmまで順次第5落し戸まで降下させた。図-2に模型実験における落し戸の降下パターンについて示す。なお、第2落し戸の直上の土被りは、落し戸径の1/2(0.5D=50mm)とした。

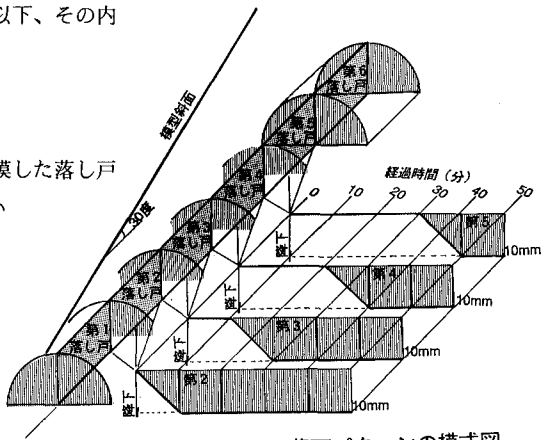


図-2 落し戸の落下パターンの模式図

測定項目は、各落し戸毎に小型のロードセルを組み込み、実験中の落し戸荷重の変化を随時計測した。また、落し戸の中心線上に配置した沈下計より地表面の沈下量を測定すると共に、地表面に格子状に配置した標点を用いて写真測量により、地表面全体の変形状況を把握した。

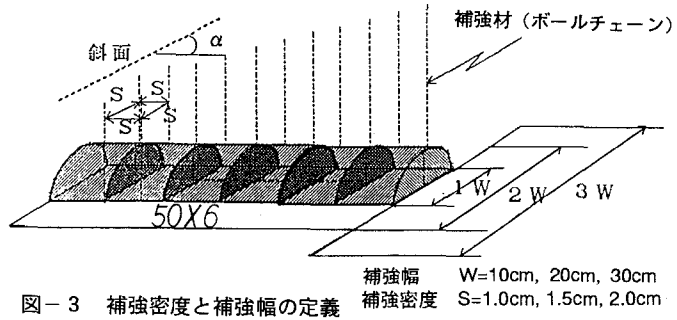


図-3 補強密度と補強幅の定義

模型実験に用いた地山材料は、崩壊性の粒状体地山を想定して、直径2mmの鉛散弾を用いた。また、地山に若干の粘性を持たせ補強材と地山の一体化を図るために、ワセリン、酸化亜鉛を散弾に僅かではあるが添加した。表-1に地山材料の配合および物性値の一覧を示す。地山の補強材は、引っ張り力としてのみの作用効果が期待できる材質として鋼球を連結したボールチェーンとし、その鋼球の大きさは地山材料との拘束効果を勘案して直径約3mmのものを用いた。また、斜面の勾配は、地山材料の内部摩擦角にほぼ等しい30度とした。

3. 実験結果

模型実験では、図-3に示すように補強材の密度と幅をそれぞれ変化させてそれらの違いによる落し戸に作用する土圧および地表面沈下を調べた。実験ケースを表-2に、また、実験によって得られた結果の一例を図-4に示す。荷重の実験結果から明らかなように、落し戸の降下とともに落し戸にかかる荷重はゼロに近づき、その落し戸が支えていた荷重は、一部が落し戸の両側の地山に分散し、いわゆる「グラウンドアーチ」を形成する。また、一部は前後の落し戸の荷重増加となる。すなわち、実験開始後の10分間（降下量10mm）では第2落し戸が降下するので、第2落し戸の荷重は、地山の釣り合いが保たれた初期応力状態と考えられる約4kgf程度からこの部分の掘削が行なわれた状況を表わすほぼ

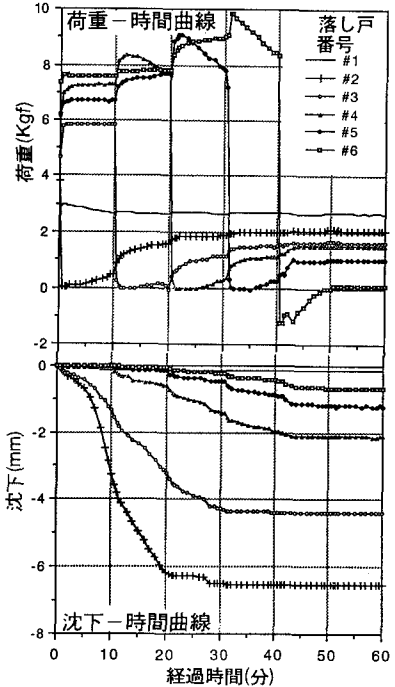


図-4 実験結果

ゼロに低下する。この第2落し戸の荷重低下は第1落し戸、第3落し戸への荷重増加として現われる。また、地表面沈下は自段の落し戸の降下により急激に増加し、降下終了後も次段落し戸の沈下が終了するまで一様に増加する傾向を示しその後収束する傾向が認められる。これらの結果より、今回の模型実験の落し戸降下による落し戸荷重及び地表面沈下の経時変化は切羽進行に伴うトンネルの3次元挙動をよく表現しているものと考えられる。

3. 1 実験結果の整理

図-5に補強材の有無による荷重と沈下の違いについての一例を示す。この結果を見ると補強材の有無に関わらず、落し戸の降下と共に荷重は一旦ゼロに近づく。しかし、20分から30分の間に生じた第4落し戸の降下に伴う第3落し戸の荷重の増加量は補強材のあるケースは補強材がない場合に比べて明らかに小さくなっていることがわかる。先にも述べたように、この荷重増加は次段落し戸の降下による荷重の3次元的な応力再分配により第3落し戸に生じたものと考えられる。また、地表面沈下についても自段落し戸が降下している時及びその後の10分間の10分から30分の間に特に顕著に沈下するが、補強の効果は次段落し戸降下時の10分間（20分から30分の間）に特に大きく現われることが分かる。そこで、補強材の補強幅および補強密度の違いによる支保効果の検討において、ここでは自段落し戸が降下した直後の10分間すなわち次段降下時の挙動に特に着目して実験の結果得られた荷重と地表面沈下量について整理検討した。

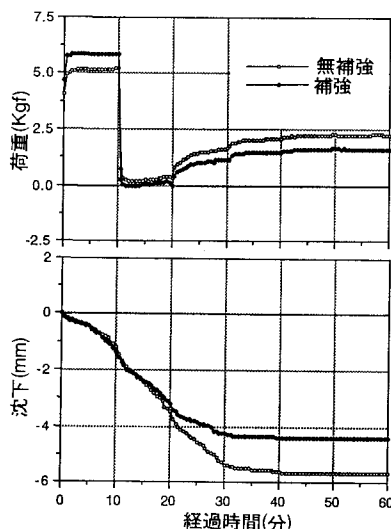


図-5 補強材の有無による補強効果 (第3落し戸)

そこで、補強材の補強幅および補強密度の違いによる支保効果の検討において、ここでは自段落し戸が降下した直後の10分間すなわち次段降下時の挙動に特に着目して実験の結果得られた荷重と地表面沈下量について整理検討した。

3. 2 支保効果の検討

図-6、図-7に自段落し戸が降下した直後の10分間に各落し戸に作用する荷重および地表面沈下の経時変化を補強幅と補強密度とに関連づけて整理した結果を示す。図には参考のために無補強時の結果も合わせて示してある。以下それぞれの結果について述べる。

1) 荷重

無補強時の結果に特に顕著に示されるように、各落し戸毎に、荷重の増加量について比較すると、その荷重差は極めて小さい。すなわち、この荷重の増加量を次段落し戸周辺の地山の応力解放に伴う

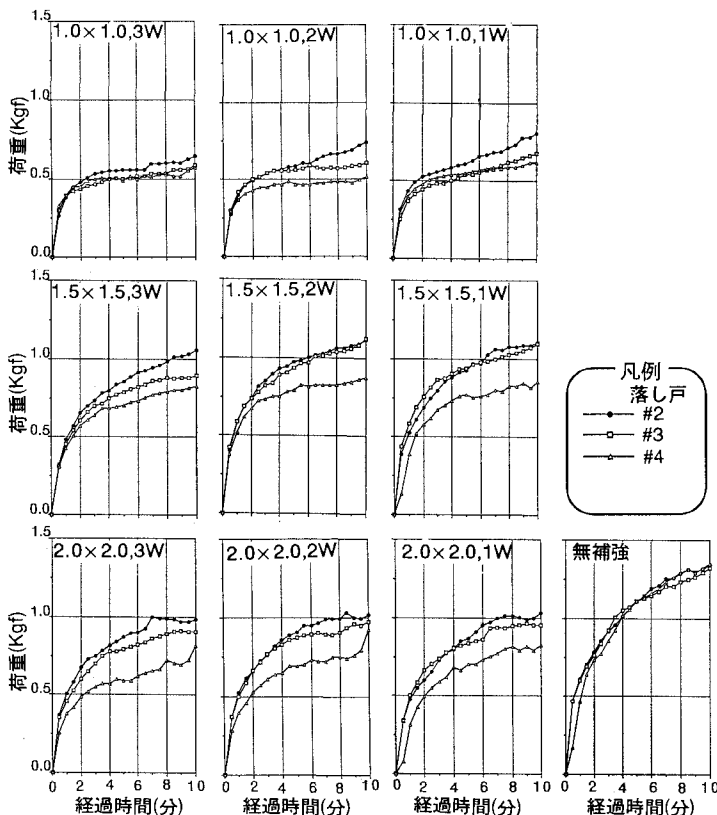


図-6 次段落し戸降下時の荷重増加

再配分荷重と仮定すれば、この荷重は土被り高さに関係なく、補強密度、補強幅のみの関係で決まることがわかる。以下、この荷重を便宜上「緩み荷重」、その荷重に見合う高さに落し戸半径を加えたものを「緩み半径」、また、この緩み半径を落し戸半径で除したものを「緩み半径比」と呼ぶ。

次に無補強時の緩み荷重を100とした時の各密度における荷重割合を図-8に示す。図から明らかなように補強密度を1.0cm×1.0cmとすると、無補強時の約50%程度まで落し戸に作用する荷重を低減できることがわかる。次に、補強密度を1.5cm×1.5cm及び2.0cm×2.0cmとした時の補強密度による荷重差は明確に認められないがほぼ75~80%程度となる。それに対し、同じ補強密度で補強幅を上げた場合には緩み荷重は徐々に低下するが、大きな荷重の低減は認められない。これらについて整理すると、補強密度を上げることによる落し戸荷重の低減は明確である。しかし、補強幅の拡大による効果はさほど明瞭ではない。

2) 地表面沈下

図-7に示すように、荷重の場合と異なり、土被りが大きくなる（落し戸番号が大きくなる）につれて、補強密度並びに補強幅に関わらず地表面沈下量は小さくなる。また、補強密度を上げることはもちろんであるが、特に補強幅を上げてても地表面沈下が無補強時よりも小さくなるのが地表面沈下の特徴である。これは、補強幅を上げることが、地山内の荷重の伝達を円滑にし、それにより地表面の変形勾配が滑らかとなり、結果的に地山内部に生じるせん断ひずみの発生を抑制することを意味しているものと考えられる。

次に、補強による地山の剛性の向上について検討するため、Limanovの式を用いてそれぞれの補強幅、補強密度における地表面沈下量から等価な地山の弾性係数を推定した。そして、それぞれの場合の等価弾性係数を無補強時のそれで除すことにより補強による地山剛性の改善率を推定した。その結果を図-9に示す。これらの図から明らかなように補強密度を上げた場合の地山の弾性係数の改善よりも、補強幅

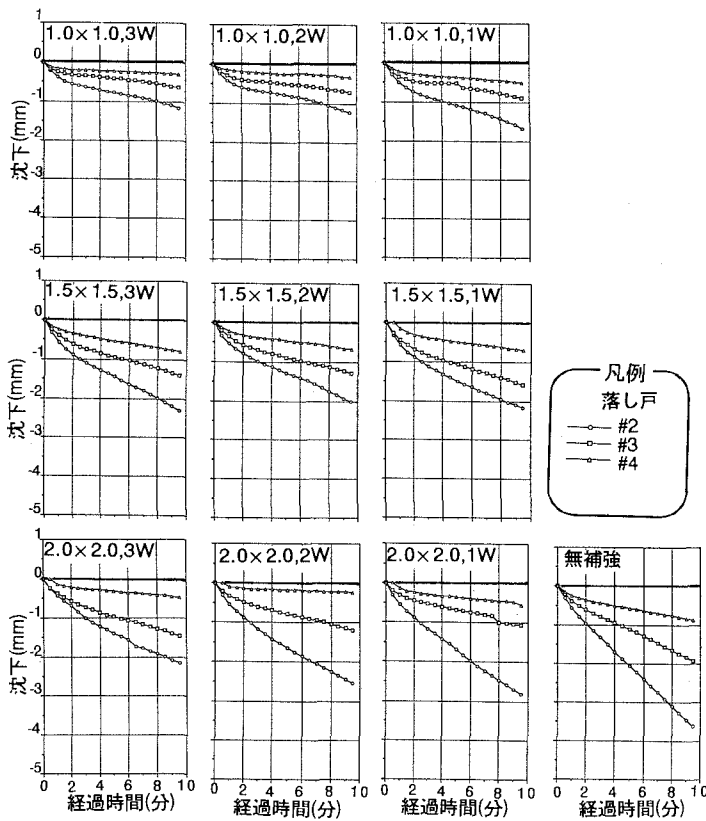


図-7 次段落し戸降下時の地表面沈下増加

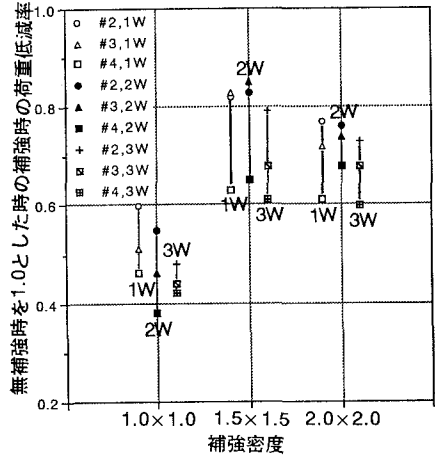


図-8 補強密度と荷重低減率との関係

を大きくしたときの剛性の改善効果が大きく補強幅を広げると、見かけ上無補強時の3倍程度に弾性係数を改善できることがわかる。言い換えれば補強幅を広げることにより緩み領域の進展を抑制し、緩み領域の巾が小さくなると考えられる。

3) 緩み領域の低減効果

次に、補強の効果を見掛け上の緩み領域の減少という観点で整理することにより地表面沈下と荷重との関連性について検討を行なった。

それぞれの落し戸における地表面沈下に対して見掛け上緩み半径が大きくなったものと考えて緩み半径比と見

掛けの弾性係数との関係を整理した。その結果を図-10に示す。そして、Terzaghiの土圧式並びに表-1に示す地山物性値を利用して、緩み高さと落し戸に作用する荷重との関係から無補強時の土圧に対応する緩み高さを推定した。すなわち、図-6に示すとおり無補強時の土圧は土被り高さに関係せずほぼ1.3kgfであるので、Terzaghiの土圧式から1.3kgf程度の土圧が生じる高さを求めると約2.8cmとなった。この高さから、無補強時の緩み半径比は $(5+2.8)/5=1.56$ となるので、それぞれの落し戸における無補強時の弾性係数は、図中の無補強時の曲線に示すようにそれぞれ決定される。無補強時の地山の弾性係数が決まれば、落し戸毎の地山の弾性係数は一定と考えられるので、補強幅を広げたときの緩み半径比の低減量について推定することができる。

また、図-10を利用すれば、地山の弾性係数と許容変位量を与えられたとき、どの程度の補強幅を設定すれば、許容変位量に収めることができるかについて補強幅による緩み半径の減少という点から決定することが可能となる。

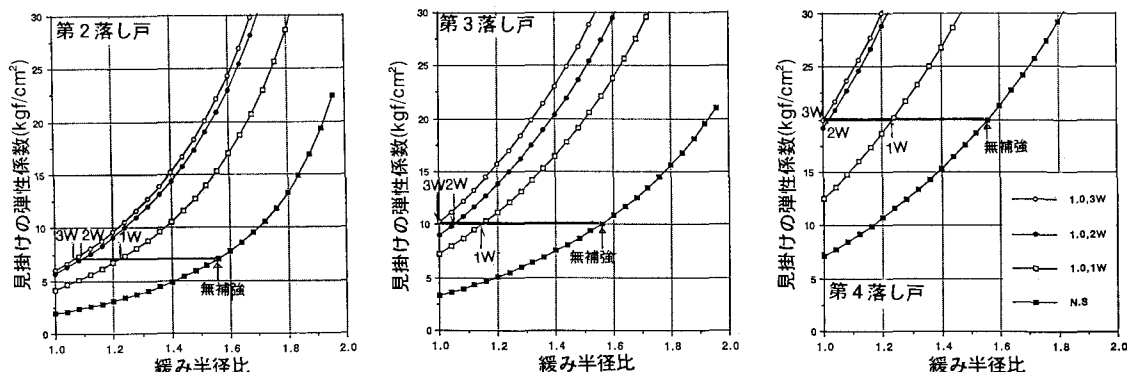


図-10 それぞれの落し戸における緩み半径比と見掛けの弾性係数との関係

4. まとめ

縫地補強工の現場計測データでは、切羽近傍において補強材に最大軸力が発生し、崩壊する地山と釣り合おうとする挙動が多く見受けられる。これは、トンネル掘削によって地山に生じるグラントアーチそのものであるが、本報告は、この補強材の持つ引張り力と地山のせん断抵抗力に起因する力の釣り合いによって発生する補強効果に着目した模型実験を整理したものである。落し戸降下直後の補強材に大きな引張り力が作用している時の補強幅と補強密度の違いを土圧と沈下について整理すると、土圧は土被りに関する影響が少ないこと、土圧の低減には補強密度が大きく関与し、沈下の抑制には補強幅が大きく関与することが明らかとなった。これらにより、縫地補強工による土圧抑止ならびに地山変形の制御のメカニズムがある程度定性的ではあるが検証できたと考える。

最後に、東京都立大学今田教授には実験当初からこの模型実験の御指導を頂くと同時に論文のとりまとめに際しても数多くのアドバイスを頂いた。ここに紙面を借りて感謝致します。

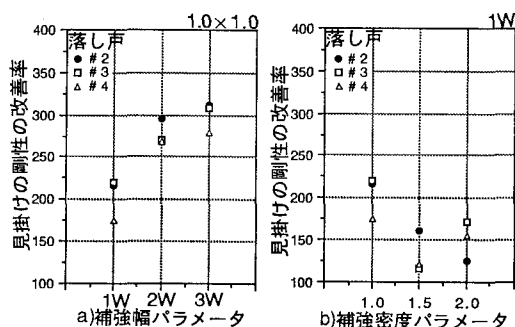


図-9 見掛けの剛性の無補強時からの改善率