

III-B 102

垂直縫地ボルト工で補強したトンネルの挙動と

解析に関する研究

東京都立大学

日本道路公団試験研究所

学生会員 樋田道昭

三谷浩二

正会員 西村和夫

中田雅博

1 はじめに

垂直縫地補強工法は、斜面や切羽の安定、地表沈下の抑止、トンネル土圧の低減等の効果があり、トンネル坑口部や土被りの小さい箇所では採用される補助工法である。しかしその設計手法は未だ確立されておらず、補強メカニズムの解明が急がれている。一般的には、補強ボルトをせん断抵抗を受け持つ部材として斜面の安定を保つ設計がなされているが、現場の計測データからは、ボルトの軸力の推移が卓越しており従来の設計の考え方とは異なることが予想された。これまでこの軸力に着目した模型実験により補強効果や作用機構の検討を行ってきたが、今回は二次元落し戸実験装置を用いることにより、地表沈下の抑制と落し戸に作用する荷重（以下、落し戸荷重と呼ぶ）の低減と補強範囲と補強ピッチとの関係を、計測と地山内部の変形の写真解析から検討する。以下計測の結果を主にその内容について報告する。

2 実験概要

長さ5cmのアルミ棒を高さ100mm（土被り1D）まで積み上げ、地山モデル（単位体積重量＝ $2.14\text{g}/\text{cm}^3$ 粘着力＝ $0\text{gf}/\text{cm}^2$ ）とし、落し戸を降下させることでトンネルの掘削を模擬する。補強範囲と補強ピッチを実験パラメーターとして、落し戸降下中の地盤に作用する荷重を装置底部に配置したロードセルで、地表沈下を上部よりレーザー変位計で測定し、正面から地山の変形を写真に撮り、解析を行う。なお、落し戸の降下速度は $1\text{mm}/\text{min}$ 、最終降下量は10mmである。地山材料には、粒状体地山を想定し直径1.6mmと3mmのアルミ棒を重量比にして3:2の割合で混合したものを用い、補強材には引張力のみを受け持たせるためにボールチェーンを使用した（図1）。

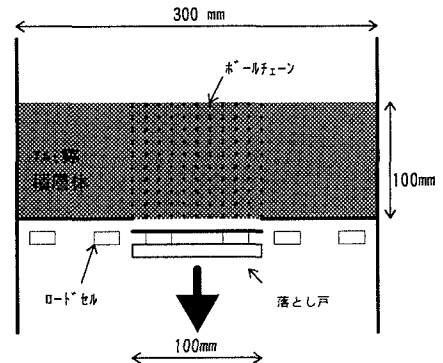


図1 落し戸実験装置模式図

3 実験の結果と考察

実験で得られた代表的結果について図2～図7に示す。なお、図1～図5の縦軸には、初期荷重で規準化した値を表している。

どのケースにおいても落し戸荷重は落し戸の降下とともに減少するが、補強パターンによりその効果が異なる。補強ピッチが2cmのときは降下量が4mm付近で最小値を示してその後荷重が増加する傾向にあり、補強ピッチが1cmのときは降下量が6mm付近で最小となるが、その後増加する傾向はない（図2）。1cm間隔で補強範囲を変化させた場合どのケースも初期荷重の1割の荷重が作用している（図3）。このことから、補強することにより落し戸荷重の軽減がみられるが、補強間隔が狭いほど落し戸荷重の軽減効

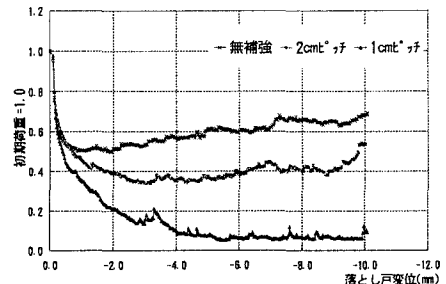


図2 荷重-変位曲線（補強ピッチ）

果と、荷重増加の抑制効果があり、補強範囲を変えても落とし戸荷重への効果に大差はないといえる。

落とし戸が降下することにより地山内に地山が本来持つせん断抵抗が発揮され、落とし戸に作用する荷重が減少し、その減少分が左右へ再配分される。無補強のときは、落とし戸中心の荷重が大きい山形の分布であるが、補強することにより均一分布になる。1 Wの補強では落とし戸左右の地山に荷重が集中する。3 Wでは頂点が外側へシフトし、地山全体へ荷重が分散する（図4、図5）。

無補強時でも落とし戸の降下量に比して地表面沈下量は少ない。2 cmピッチの補強では逆の効果が生じ無補強時よりも3割程度沈下量が大きい（図6）。1 cmピッチで補強範囲が1 Wの時は沈下量は無補強時の6割程度で、地表面沈下の影響範囲はほぼ落とし戸幅であるが、補強範囲を広げると影響範囲は拡大するが沈下量は減少し、沈下勾配は緩和される（図7）。

補強効果を縫地ボルトと地山との摩擦による地山粒子の吊り下げ効果とすると、補強間隔を狭めることでボルトに生じる軸力が地山のせん断抵抗によって隣接するボルトに順次伝達され、周辺地山に分散する。結果として、落とし戸荷重を軽減し、同時に地山の変形を拘束し沈下と地山の緩みを抑制すると考えられる。補強範囲を広げることで地山内の荷重の伝達が円滑になり、より広い範囲へ荷重が分散され、地表面の沈下形状が緩やかとなり、せん断ひずみ勾配が緩和され沈下量も小さくなると考えられる。落とし戸幅のみの補強では粒子の吊り下げによる荷重の集中が大きくなり、支持基盤が軟弱だと崩壊する可能性が高く、補強範囲を広げる必要があるといえる。

4 まとめ

補強範囲は地表沈下量の抑制に、補強ピッチは落とし戸荷重の軽減と地表沈下量の抑制に効果があることが確認でき、これまで行われてきた実験に近い結果が得られた。今後は、写真計測からのひずみ分布やせん断帯などの地山変形情報と関連づけて補強メカニズムを解明し、現場での施工や設計手法に反映されるようにする。

【参考文献】

- 1) 村山、松岡、砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究。
土木学会論文報告集第 187 号(1971.3)
- 2) 中田、佐野、嘉指、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報告(1993)

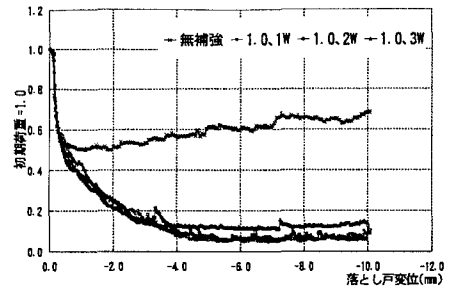


図 3 荷重—変位曲線（補強範囲）

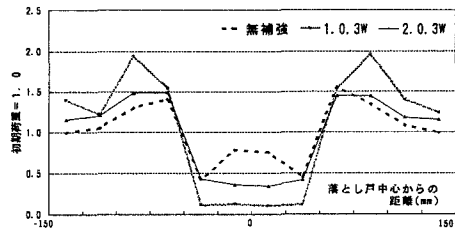


図 4 5mm 降下時の荷重分布（補強1'7'）

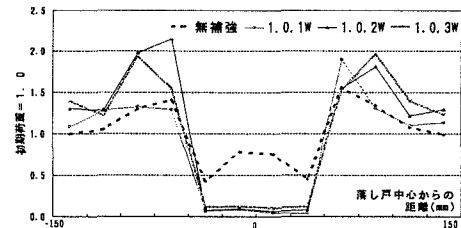


図 5 5mm 降下時の荷重分布（補強範囲）

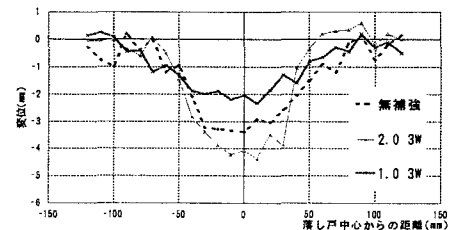


図 6 地表面沈下（補強1'7'）

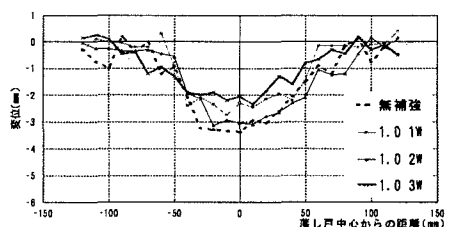


図 7 地表面沈下（補強範囲）