

粘着力を考慮した未固結地山における 鏡ボルトの作用効果に関する検討

芳賀 康司¹・上野 光¹・阿部 敏夫²・岡野 法之³・平田 亮³

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構設計技術部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail:yas.haga@jrtt.go.jp

²正会員 レールウェイエンジニアリング技術開発部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

鏡面の安定や地表面沈下の抑制を目的に、土被りの小さい未固結地山を対象として、粘着力を考慮した砂質模擬地盤を用いた土槽実験により、鏡面前方地山の挙動と長尺鏡ボルトの本数を変化させた場合の鏡ボルトによる地山補強効果について検証した。

この結果、土被りの小さい未固結地山における長尺鏡ボルトの作用効果の基礎的データを得ることができた。また、長尺鏡ボルトの本数の違いによる鏡面周辺の地山挙動や地山の補強効果を確認し、長尺鏡ボルトの作用効果について検討した。

Key Words : long facebolting, unconsolidated ground, cohesion, model experiment, effect

1. はじめに

近年、土被りの小さい未固結地山において、鏡面の安定や地表面沈下の抑制を目的として、長尺鏡ボルト（以下鏡ボルトと記載）が補助工法として用いられる事例が増加している。しかし、鏡ボルトの配置や長さ、本数といった仕様は、地質条件や鏡面安定性等の条件に応じて個別に決められることが多い。また、鏡ボルトに関する研究は多いものの、鏡ボルトによる地山の補強効果について、模型実験によって検証した研究例^{1)・2)}は少ない。

そこで本稿では、粘着力を考慮した模擬地盤を用いた模型実験（写真-1）により、土被りの小さい未固結地山における鏡ボルトの作用効果の基礎的データを得ることや、鏡ボルトの打設本数を変化させた場合の、鏡ボルトによる鏡面周辺の地山挙動や地山の補強効果について確認し、鏡ボルトの作用効果について検討したので報告する。

2. 模型実験の概要

模型実験には、図-1に示す土槽実験装置を用いた。模型実験では、土槽内に1/50スケールのアルミ製の半円トンネル模型（直径D：200mm、長さ75mm）および鏡ボルトを模擬したステンレス製の中空パイプ（内径5mm、

肉厚0.5mm、長さ350mm）をセットし、粘着力を考慮した模擬地盤（含水比0.9%湿潤砂）で土被り0.4Dまで埋めた。地盤材料には乾燥浜岡砂を使用し、攪拌器で乾燥砂と水を混合して所定の含水比とした。含水比は、事前試験を行い鏡面崩壊の模擬試験が可能となる0.9%とした。なお、土圧のトンネル模型への応力集中を緩和させるため、トンネル模型直上に緩衝材（EPS）を設置した。

実験時の鏡面の土圧、地表面沈下量、鏡面前方の土圧、鏡ボルトの断面力を計測するため、面板に荷重計1箇所、模擬地盤上に変位計13箇所（図-2）、土槽底版に土圧計15箇所（図-3）、模擬ボルトにひずみ計（光ファイバーセンサ）6箇所/本を設置した。

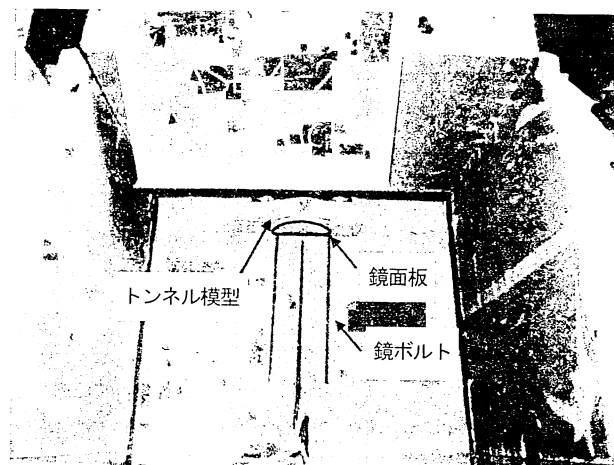


写真-1 土槽実験装置の設置状況

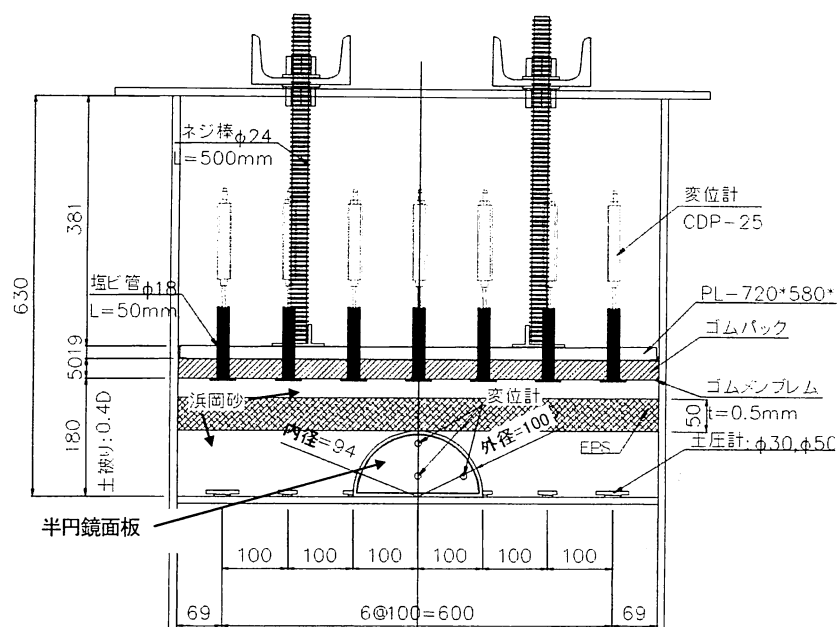


図-1 模型土槽実験装置 (横断面図)

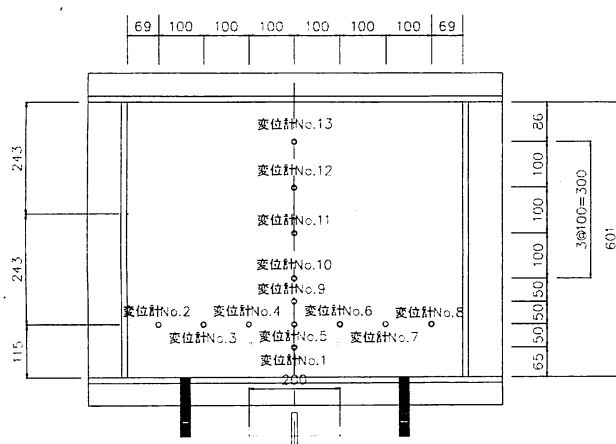


図-2 地表面変位計配置図 (平面図)

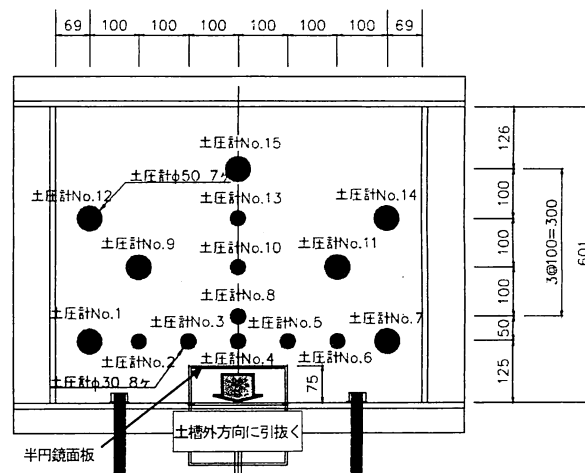


図-3 底板土圧計配置図 (平面図)

CASE1 (鏡ボルトなし)	CASE2 (鏡ボルト 6 本)	CASE3 (鏡ボルト 11 本)

図-4 鏡ボルトの配置位置

なお、湿潤砂の地盤物性を把握するため三軸圧縮試験 (CD) を実施した結果、粘着力 $C=1.3\text{kPa}$ 程度、内部摩擦角 $\phi=33.1^\circ$ であった。

模擬地盤には、上載荷重 150kPa を一定載荷し、土盛り荷重を再現した。また、上載荷重が模擬地盤全体に均一に載荷されるよう、模擬地盤上にはゴムパックを敷きつめた。

半円鏡面板を土槽外方向へ引抜くことで、掘削を再現した。鏡面板の引き抜き速度は 0.025mm/秒 とし、模擬地盤の安定を図るため30秒静止した後に計測を行った、これを引抜き量が 10mm になるまで繰り返した。

実験ケースは、鏡ボルトの本数の違いによる鏡面付近の地山挙動を比較するため、鏡ボルトの本数をパラメータとして、図-4に示す3ケースとした。

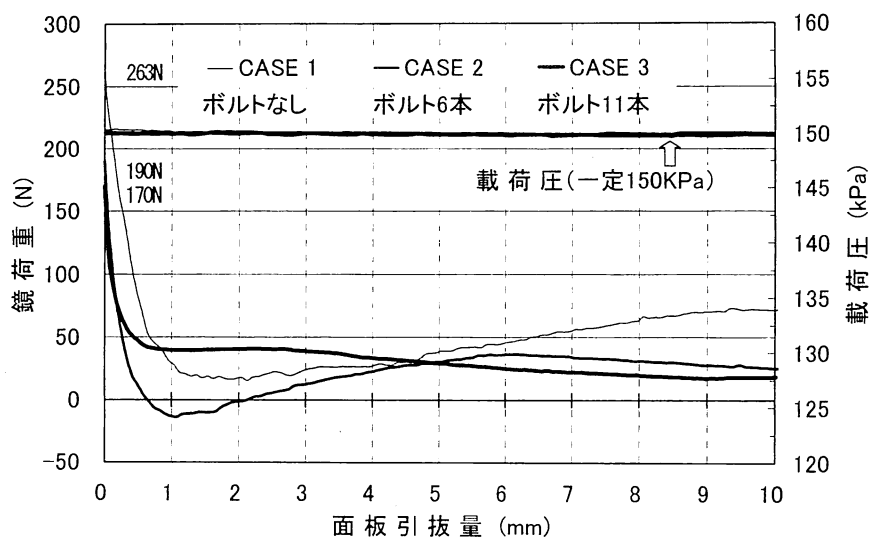


図-5 面板引抜き量と鏡荷重の関係

3. 模型実験の結果

(1) 鏡面に作用する土圧

a) 初期応力の違い

図-5に面板の引抜き量と鏡荷重の関係を示す。引抜き開始前の鏡面の初期土圧を比較すると、263N（鏡ボルトなし）＞190N（鏡ボルト6本）＞170N（鏡ボルト11本）と鏡ボルトが多くなるとほど初期土圧が低減されている。

これは、鏡ボルトが多くなるにつれて、鏡ボルトが地山と一体となり地山剛性を高めることによって、鏡面に作用する水平力が低減したためと考えられる。

b) 引抜き量に対する土圧の変化

図-5より、鏡面に作用する土圧は、面板を引抜くことで初期応力状態から急激に減少し、さらに引抜くと、土圧は増加あるいは緩やかな減少傾向を示す。ここで、仮に鏡前方地山が崩壊せず鏡面が自立していれば、面板を引抜いても鏡面に作用する土圧は増加せず、急激に低下すると想定されることから、図-5のように面板の引抜きに伴い土圧が継続して計測されることは、鏡前方地山の破壊が進行していることを示していると考えられる。

また、鏡面に作用する土圧の減少傾向が変化する面板の引抜き量は、2mm（鏡ボルトなし）＞1mm（鏡ボルト6本）＞0.5mm（鏡ボルト11本）であった。

このように、ボルト本数が少ないほど土圧減少からの変化点が遅くなることから、ボルト本数が少ないと地山の破壊が継続しやすいと考えられる。

さらに面板を引抜くと、ボルトなしでは、土圧は継続して増加する傾向にあるが、ボルト11本では、土圧の大きな増減がみられない状態から減少傾向へと転じた。一方、ボルト6本では、引抜き量6mmまではボルトなしと同様に土圧が増加する傾向にあるが、さらに引抜くと土

圧は減少傾向へと転じた。

これらより、ボルトなしでは面板の引抜きに伴い地山の崩壊が大きく進行したが、ボルト11本では地山崩壊の進行は小さく、鏡ボルトが地山の崩壊に対して有効に機能したと考えられる。一方、ボルト6本では、地山崩壊に対する抑制効果は限定的であることがわかった。

以上より、鏡ボルトは地山の崩壊に対して抑制する効果があるものの、ボルト本数によって、効果の違いが生じることがわかった。

(2) 地表面沈下量

図-6に、面板の最大引抜き量10mm時における横断方向（鏡面前方0.2Dの位置）および縦断方向（トンネルセンター）の地表面沈下量を示す。

横断方向の沈下量を比較すると、鏡ボルトを設置することで沈下量は大きく低減されることがわかる。各ケースともに、地表面沈下が認められるのは、トンネルセンター（以下、CLと記載）から左右1.0D程度の範囲である。CLでの沈下量が最も大きく、鏡ボルトなしでは4.4mm、鏡ボルト6本では1.7mm、鏡ボルト11本では0.7mmであり、鏡ボルトなしに対する沈下量の比率は、鏡ボルト6本で39%、鏡ボルト11本では16%と、鏡ボルトを設置することで地表面沈下量は大きく低減された。

横断方向の地表面沈下量の分布は、ボルト本数に関わらず正規分布に近い形状を示し、CLから0.5Dの測点では、CLの沈下量の12～30%に留まり、トンネル肩部からCLにかけて沈下が大きく進行することがわかる。

縦断方向の沈下分布を比較すると、各ケースとも沈下が認められるのは、鏡面前方1.2D程度までの範囲であり、沈下が大きく進行するのは0.45Dまでであった。また、ボルト本数の違いに関わらず、沈下分布は同様の傾向を示した。

これらより、沈下が大きく進行する緩み範囲は、横断

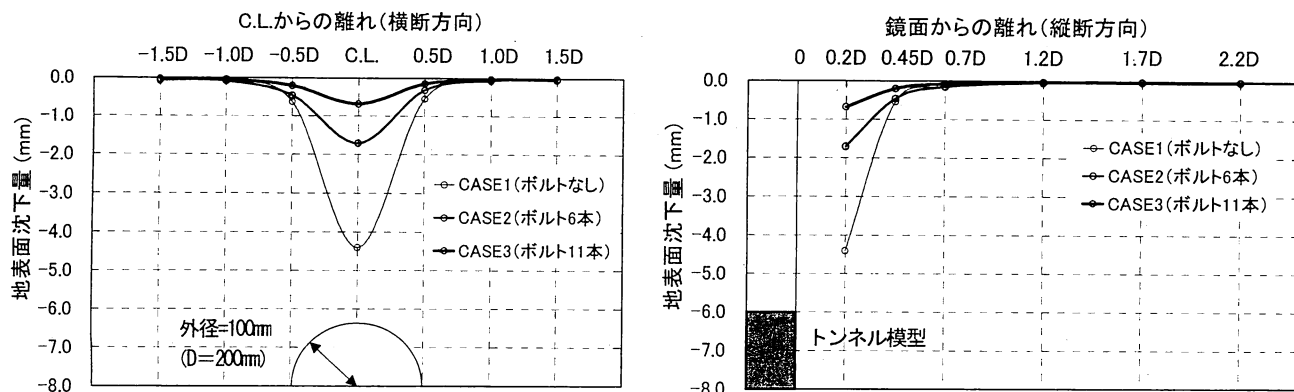


図-6 地表面沈下量 (面板引抜き量 10mm)

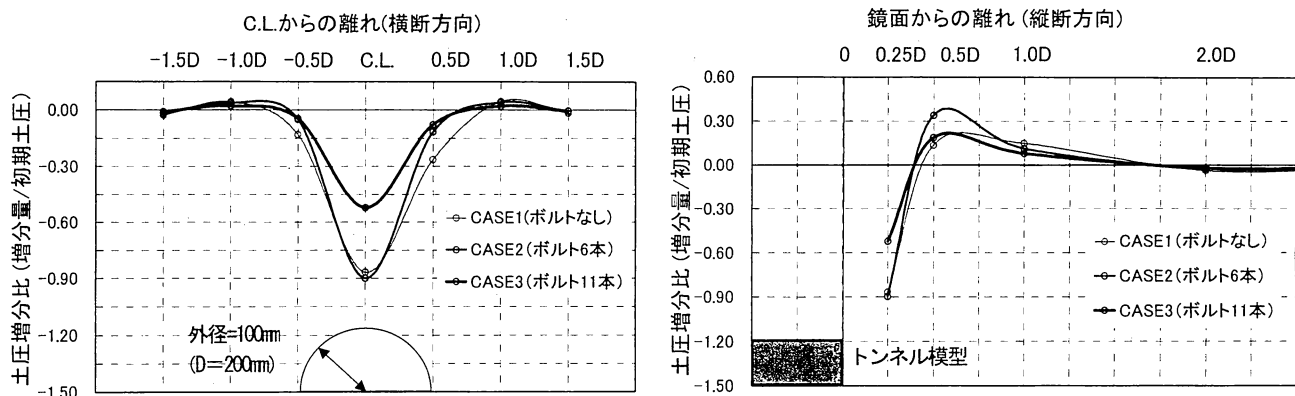


図-7 鏡面前方土圧増分比 (面板引抜き量 10mm)

方向で、トンネル肩部から側壁部の間であり、縦断方向で、鏡面前方0.5D程度であることがわかった。

(3) 土槽底版の土圧分布

図-7に鏡面前方0.25Dにおける面板の最大引抜き量 10mmでの土圧増分比を示す。土圧増分比（土圧増分量／初期土圧）は、各測点において初期土圧から土圧が増加した割合を表しており、土圧増分比の絶対値が大きいほど、初期土圧に対する土圧の変化量大きい。また、土圧増分比がマイナスであれば土圧は初期土圧から減少したことを表す。

横断方向の土圧増分比を比較すると、CLでの土圧増分比の絶対値が大きく値がマイナスであることから、土圧が大きく減少していることがわかる。

ボルトなしのケースに着目すると、CLにおける土圧増分比は-0.9となり、初期土圧に対して土圧が約90%減少した。CLから0.5Dでは左右平均で約20%減少し、CLから1.0Dでは応力集中の影響を受け土圧は4%程度高くなった。さらに外方1.5Dでは土圧の変化はほとんど見られなかった。

土圧の減少量が地山の崩壊の程度を表していると考ええると、CLでは地山の崩壊が大きく進行していることがわかる。

ボルト本数の違いに着目すると、CLでは、ボルト6本で土圧は約90%減少し、ボルトなしとほぼ同様の結果で

あった。一方、ボルト11本では、土圧の減少率は50%と大きく改善されている。また、CLから0.5Dでも同様に、ボルト11本はボルトなしと比べて土圧の減少率は8%程度と大幅に改善された。

これらは、ボルト11本では、鏡ボルトが有効に機能し鏡ボルトがCLから側壁付近の地山を保持したが、ボルト6本の場合は、鏡ボルトがトンネル外径に近くに配置されており、鏡ボルトより下部の鏡面を自立させるには本数が不足していたため、十分に地山を保持できなかったと考えられる。このことは、3. (1) -b) で述べた鏡面に作用する土圧の傾向とも一致する。

ここで、鏡ボルトなしとボルト6本のケースに着目すると、縦断方向の土圧増分比は、鏡面に近い0.25Dで土圧が大きく減少し、鏡面から0.5Dで土圧は増加に転じ応力集中が生じた。その後鏡面からの距離が大きくなるにつれて、土圧の増加量は小さくなる傾向が見られた。

一方、鏡ボルト11本では、土圧の変化が小さいことから、鏡ボルトが多いほど鏡面前方地山は安定することがわかる。

(4) 鏡ボルトの断面力

a) 鏡前方地山の変形

鏡面からの距離と鏡ボルトの軸力との関係を図-8に示す。鏡ボルトの軸力は、ボルト本数に関わらず最大約24Nという結果となった。

面板の引抜き量と鏡ボルトの曲げひずみの関係を図-9に示す。曲げひずみの最大値に着目すると、鏡面から0.25Dの測点で、ボルト6本では約340 μ 、ボルト11本では約200 μ と、ボルト11本はボルト6本の約59%、鏡面から0.5Dの測点で、ボルト6本では約450 μ 、ボルト11本では約120 μ と約27%であり、ボルト6本に比べてボルト11本では、鏡ボルトの曲げひずみが小さい。

これらは、鏡ボルトの本数が多いほど、鏡面前方地山の変形が小さいことを示していると考えられる。

b) 鏡面前方地山の緩み領域の拡大

図-9のように、鏡ボルト6本、鏡ボルト11本ともに、面板の引抜き量が6～7mmのポイントを境に、鏡面から0.25Dよりも0.5Dの測点で曲げひずみが大きくなる。

これは、引抜き量が大きくなるに従って、地山の緩み領域が前方へ拡大したため、鏡ボルトに大きな曲げが生じるポイントが鏡前方0.25Dから0.5Dへ移行したことを示していると考えられる。

(5) 模型実験後の鏡面状況

写真-2に各ケースの実験終了時の鏡面状況を示す。鏡

ボルトなしでは、天端付近をはじめ鏡面全体が崩壊し、鏡ボルト6本では、天端付近は比較的自立しているものの、一部鏡ボルトの先端が露出し、鏡ボルトがない中心部から下部が崩壊した。

一方、鏡ボルト11本では、鏡ボルトが2段で配置されており、天端付近から中心部周辺は比較的自立しているが、鏡ボルトの内側や上半脚部付近などの鏡ボルトがない部分に鏡面の崩壊が確認された。

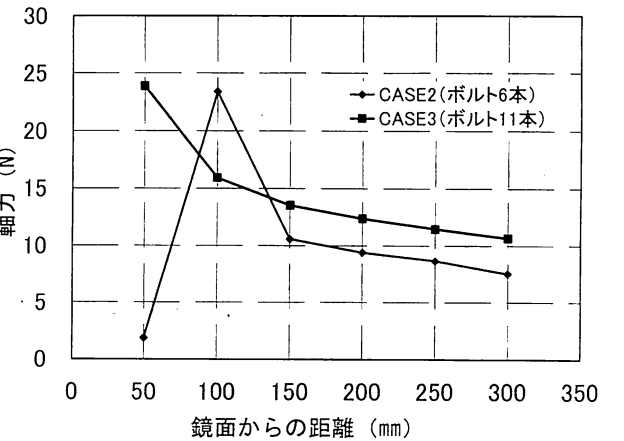


図-8 鏡面からの距離と鏡ボルト軸力の関係

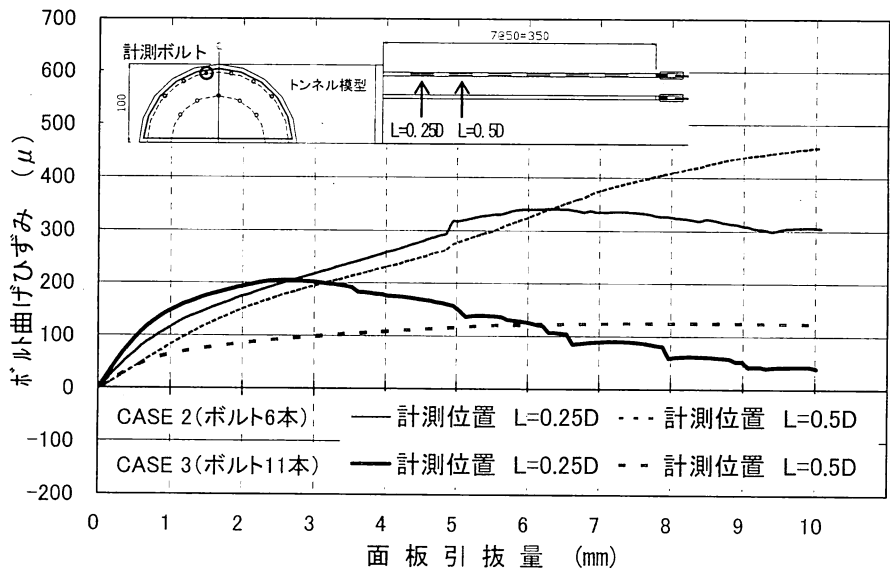
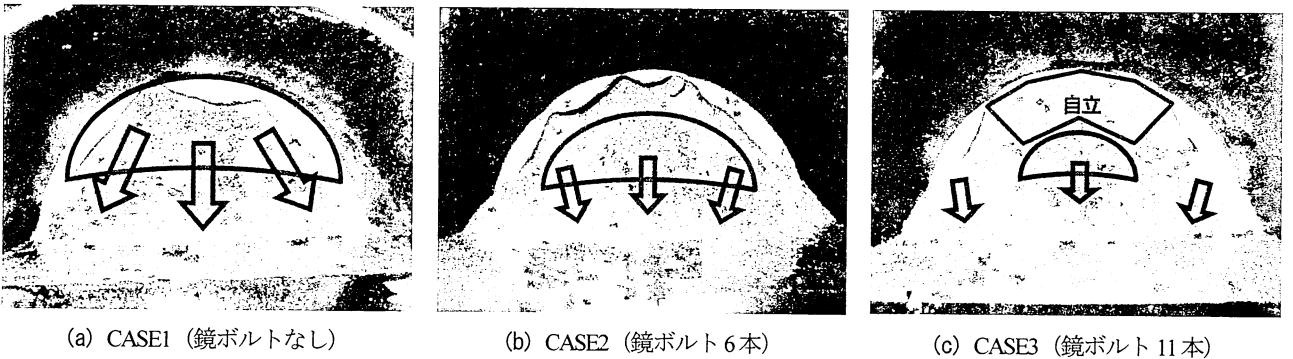


図-9 鏡面引抜き量と鏡ボルトの曲げひずみの関係

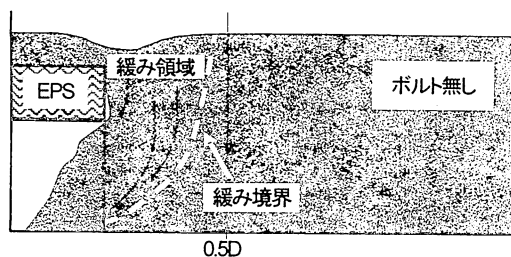


(a) CASE1 (鏡ボルトなし)

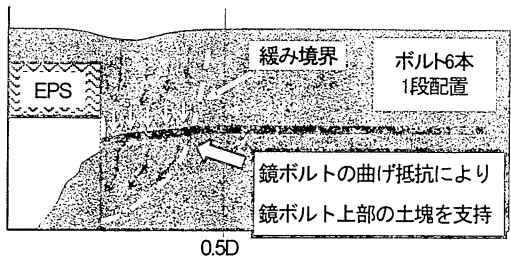
(b) CASE2 (鏡ボルト 6本)

(c) CASE3 (鏡ボルト 11本)

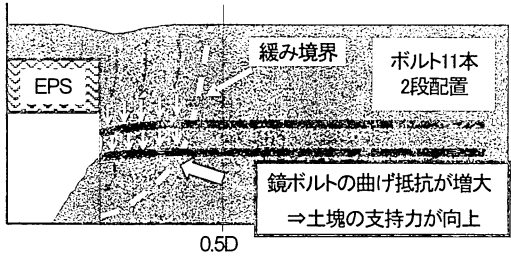
写真-2 模型実験後の鏡面状況



(a) 鏡ボルト 6 本



(b) 鏡ボルト 6 本



(c) 鏡ボルト 11 本

図-10 鏡ボルトの作用効果 (模式図)

4. 鏡ボルトの作用効果

模型実験結果より鏡ボルトの作用効果を推定する。

図-10に作用効果の模式図を示す。鏡ボルトがない場合、掘削に伴う応力解放によって緩み領域内の土塊の鉛直変位は増大し、鏡面は崩壊すると考えられる (図-10(a))。

一方、鏡ボルトがある場合、鏡ボルト間の部分的な抜け落ちはあるものの、鏡ボルトの曲げ抵抗によって鏡ボルトより上側にある緩み領域内の土塊を支持することで、鏡面の崩壊範囲は、鏡ボルトがない部分に限定されると考えられる (図-10(b))。

さらに、鏡ボルトの本数が増え二段になると、緩み領

域にある土塊に対する鏡ボルトの曲げ抵抗が増大し、土塊を支持する力が向上するため、鏡面の崩壊範囲はより限定されると考えられる (図-10(c))。

5. まとめ

(1) 土被りの小さい未固結地山を対象として、粘着力を考慮した模擬地盤を用いた模型実験によって、土被りの小さい未固結地山における長尺鏡ボルトの作用効果の基礎的データを得た。

(2) 鏡ボルトの本数を変化させることで、鏡面周辺地山の挙動や鏡ボルトによる地山の補強効果の違いを確認した。

- 鏡ボルトを設置することで地表面沈下量は大きく低減される。
- 沈下が大きく進行する緩み範囲は、横断方向で、CL からトンネル肩部ないし側壁部までの間であり、縦断方向で、鏡面前方 $0.5D$ 程度である。
- 鏡ボルトの本数が多いほど、鏡面前方地山の変形が小さく、鏡面前方地山は安定する。
- 引抜き量が大きくなるに従って、地山の緩み領域が前方へ拡大する。

(3) 上記の得られた知見や、模型実験後の鏡面崩壊状況から、鏡ボルトの作用効果について検討した。

参考文献

- 高橋源太郎, 湯澤謙一郎, 小島芳之, 岡野法之, 嶋本敬介, 朝倉俊弘: 未固結地山に対する鏡ボルトの作用メカニズムと効果に関する検討, 第 64 回土木学会年次学術講演会, VI-293, 2009
- 岡野法之, 高橋源太郎, 三浦聡史, 吉川和行, 徳永高志: 未固結地山における先受け工と鏡ボルト工の併用効果について, 第 65 回土木学会年次学術講演会, III-409, 2010

(2012. 9. 3 受付)

STUDY ON EFFECT OF FACEBOLTING FOR UNCONSOLIDATED GROUND CONSIDERING SOIL COHESION

Yasushi HAGA, Hikaru UENO, Toshio ABE, Noriyuki OKANO, and Ryo HIRATA

For the purpose of face stabilization and suppression of ground subsidence, reinforcing effect of facebolting was studied focusing on unconsolidated ground with small earth covering. Earth tanks of sandy soil were used for the experiment, considering the cohesion. Ground behavior in front of a face was examined in different numbers of facebolting.

As a result, basic data on effect of the long facebolting for unconsolidated ground with small earth covering was obtained. Ground behavior and reinforcing effect around a face varying with the number of the long facebolting were identified, and effect of long facebolting was estimated.