

遠心場でのトンネル掘削可視化による 補助工法の最適化検討

伊達 健介¹・横田 泰宏^{1*}・李 濟宇¹・山本 拓治¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1番地）
*E-mail: yokotaya@kajima.com

山岳トンネル分野では地質不良部や低土被り部において、補助工法が必要不可欠であり、その中でも先行変位の抑制効果の側面から切羽補強工の重要性が増してきた。その一方で、その補強効果に対する定量的な評価が立ち遅れているのが現状である。筆者らはこれまでに遠心模型実験を実施し、切羽補強工の補強効果を、破壊および変形の側面から評価してきた。今回は、半断面土槽を製作し、トンネル掘削中の縦断面の観察や画像解析から、従来の全断面土槽で実施した実験結果と比較分析を行った。これまでに実施した実験結果より、切羽補強工の補強範囲や変位抑制効果について新たな知見を得たので、実験技術とともにその結果を報告する。

Key Words : Centrifuge Test, Long Facebolt, Half Tunnel Cross Section Excavation Model

1. はじめに

近年、山岳トンネル分野は、都市化や大断面化をはじめとして急激な変化がみられ、シールド工法で施工されていたような地山に対しても、経済性や断面形状に対する自由度といった理由から、山岳工法を全面的あるいは部分的に採用するトンネル工事が増加している。これは、一般的に先受け工と呼ばれるトンネル補助工法が高度化し、パイプラーフや長尺フォアパイリングの補強効果が山岳トンネル分野以外でも評価されてきたことを表している。このような変化を背景に、先受け工の補強メカニズムや設計法については、数多くの研究が実施され、筆者らも新しい施工法及び簡便で合理的な設計法の提案を行ってきた^{1),2)}。

しかし、フォアパイリングに代表されるようなアンブレラ工法は、切羽周辺全体の安定性には必ずしも最適な手法ではなく、鏡ボルトを長尺化し切羽前方全体を補強することによって、トンネル全体の安定性を向上させるという考え方が一般的となりつつある。その動きに応じて、切羽補強工の補強メカニズムの解明や設計法確立に向けた基礎検討が行われてきた。しかしながら、実設計を行う際に最適な鏡ボルト仕様を求める設計フローを示している研究成果は数少ない。そこで、筆者らは、鏡ボルトの仕様決定に関する設計手法を確立することを目的とし、これまでに遠心模型実験を実施し、切羽補強工の補

強効果を、破壊および変形の側面から定量的な評価を行ってきた³⁾。さらに、三次元数値解析手法を用いたパラメトリックスタディを実施し、応力解放率に着目した簡便な設計法を提案してきた^{4),5)}。本論文では、これまでに実施した遠心模型実験に着目し、トンネル掘削時の鏡ボルトおよび地盤の挙動、トンネル掘削後の破壊形状に対して、切羽補強工パターンの違いが及ぼす影響について分析を行った。さらに、小土被り部における切羽補強工の補強メカニズムを検証するべく、プロトタイプの半分をモデル化した半断面土槽を製作し、トンネル掘削中の縦断面の観察および画像解析から、従来の全断面土槽で実施した実験結果と比較分析を行った。

2. 全断面土槽を用いたトンネル掘削実験

(1) 全断面遠心模型装置概要

トンネル遠心模型装置を図-1に示す。トンネル模型は直径100mmであり、アルミニウム製の覆工モデルとメンブレン製の掘削部から構成されている。加速度計は土槽外側底面付近に設置し、土圧計は切羽奥に3個(切羽面法線方向の水平土圧測定用)、天端から地表面にかけて2個(鉛直土圧測定用)、計5個を設置した。地表面沈下についてはレーザー変位計を用いて測定した。また、切羽の押し変位を測定するために、図-2のように大ひずみ用

ひずみゲージ(共和電業製, KFEL-2-120-C1)をクロロプレンゴム(硬度45)に貼付し, 地中変位計として設置した。トンネル掘削時の鏡ボルトモデルは, $\phi 2\text{mm}$ のステンレスパイプを用い, 表面にひずみゲージを貼付することでトンネル掘削時のひずみ変化を測定した。なお, 地中変位計については, 実験前に底面に固定した状態で地中に埋設し, 遠心場での落し戸実験により検定を行い, 測定されるひずみ量と地盤変位との相関を確認している⁹⁾。トンネル掘削はシリンダのピストンを上昇させて空気圧を下げることで模擬している。また, 実験終了後に, 地盤を切出して破壊パターンを観察できるように, 予め色砂(赤)の薄層を約10mmごとに設置している。

(2) 実験ケース

表-1は, 実施した実験ケースの一覧である。地盤条件, 一掘削長(鋼製支保工間隔に一致), 鏡ボルト配置(図-3)は固定条件とした。モデル地盤は, 豊浦砂を乾燥状態で相対密度が約80%となるように空中落下法により作製した。また, 一掘削長は, 0.2D(D:トンネル模型直径, 実地盤換算で1.5m)とした。ケース1が無補強の場合の標準パターン(土被り1.0D:実地盤換算で7.5m), ケース3が鏡ボルトモデルを設置した場合の標準パターンである。ケース2はボルトと周辺地盤の付着強度が補強効果に与える影響を確認するために表面が滑らかなボルトモデルを採用した。また, ケース4, ケース5はボルト長の違いによる補強効果の差を把握するた

め, 長さ0.5D, 0.2D(実地盤換算で3.75m, 1.5m)のボルトを用いて実験を実施した。

また土被り厚の影響を確認するため, ケース6から9は土被り厚をそれぞれ0.5D, 2.0D(実地盤換算で3.75m, 15m)と設定し, それぞれの土被りにおいて, 鏡ボルトの有無をパラメータとしている。

(3) 実験結果

図-4の上段は, 実験後にトンネル中央縦断面まで地盤を切り出し縦断面の破壊状況を観察した結果であり, 中段の図は切羽の崩壊形状を3次元的にCG化した結果である。また, 図-4の下段に破壊時のトンネル内圧値を示す。

破壊した地山領域の減少および破壊時の内圧の低下により, どの鏡ボルトパターンや土被り厚においても無補強時に比べ, 鏡ボルトの補強効果を確認することができる。つまり, 鏡ボルトによる補強効果は, 破壊時のトンネル内圧で評価可能であることが分かった。

a) 付着強度および鏡ボルト長の影響

次に, ケース2と3を比較すると, 付着強度の違いによって切羽前方の破壊面が小さくなることを確認できる。これより, ボルトと周辺地盤との付着が破壊形状に及ぼす影響は大きく, 実施工に即したボルトのモデル化を行うことが重要であることが分かる。

また, ケース3から5より, ボルト長が短くなるにしたがい, 破壊形状が無補強時の破壊形状に近づくが, ボルト打設によって共に切羽前方の破壊領域が小さくなり,

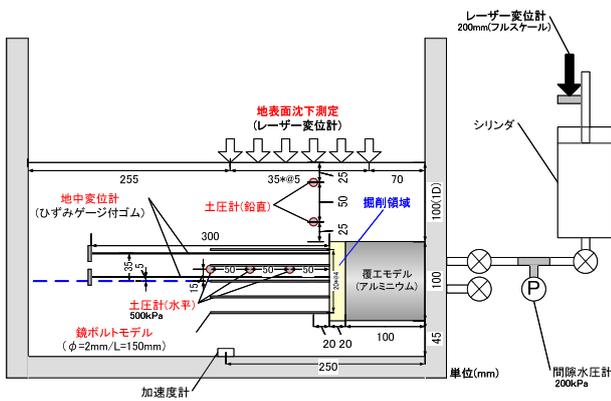


図-1 全断面トンネル掘削模型装置

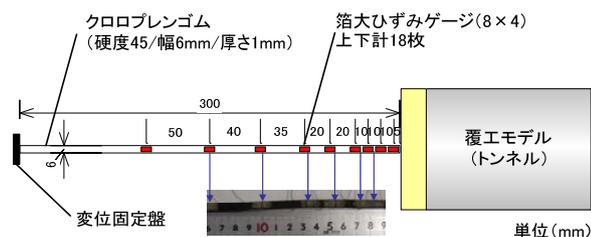


図-2 地中変位計(ひずみゲージ付きゴム)

ケース	地盤条件	土被り(D)	鏡ボルトの仕様		目的
			ボルト表面	ボルト長さ(D)	
1	豊浦砂 乾燥 Dr=80%	1.0	—	—	(標準)
2		1.0	滑	1.5	粗度
3		1.0	粗	1.5	(標準)
4		1.0	粗	0.5	ボルト長さ
5		1.0	粗	0.2	ボルト長さ
6		0.5	—	—	土被り
7		0.5	粗	1.5	土被り
8		2.0	—	—	土被り
9		2.0	粗	1.5	土被り

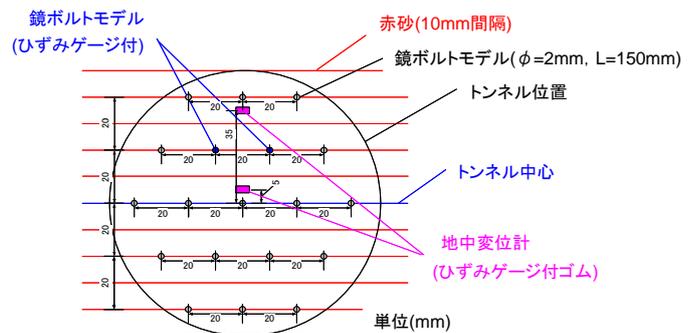


図-3 鏡ボルト配置図

やや切羽後方で破壊が進行する類似点が確認できる。

さらに、図-4の中段で示す、切羽の崩壊形状を3次元的にCG化した結果を見ると、破壊形状はトンネル縦断方向のみでなくトンネル横断方向へも縮小されることが分かった。

図-5(a) (b)に、トンネルセンターの縦断方向におけるトンネル内圧7.5kPa時の地表面沈下分布を示す。グラフの縦軸は実地盤に換算した沈下量である。図-5(a)から、ボルト粗度の違いはやや見られるものの、鏡ボルトによる沈下抑制効果を確認できる。図-5(b)ではボルト長の影響を比較している。ボルト長を0.5Dとした場合は、1.5Dとした標準パターンとほぼ同等の補強効果が得られているが、0.2Dとした場合には、無補強時に近い沈下パターンが発生していることが確認できる。これより、破壊領域は小さくなっていても、必ずしも地表面沈下が抑制されているとは限らないということが分かる。また、このような地盤条件においては、鏡ボルト長0.5D程度が、コスト面、補強効果を共に満足するボルト長であると推測される。図-6に、地中変位計より得られた切羽押し出し変位量分布を実地盤レベルに換算した数値で示す。トン

ネル内圧が20kPaの時、ボルトの有無による大きな違いは見られないが、5kPa(破壊が進行した状態)では鏡ボルトによって押し出し変位が抑制されていること、切羽前方0.5D付近から無補強の場合との乖離が生じていることが確認できた。

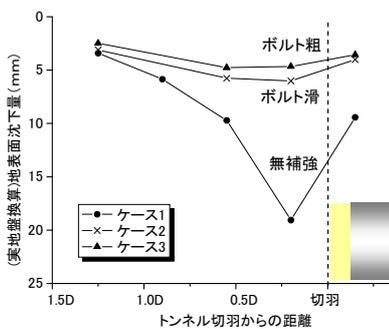
b) 土被りの影響

次にケース1, 4およびケース6から9に着目し、土被り厚の違いが切羽補強工の補強効果に及ぼす影響について考察する。

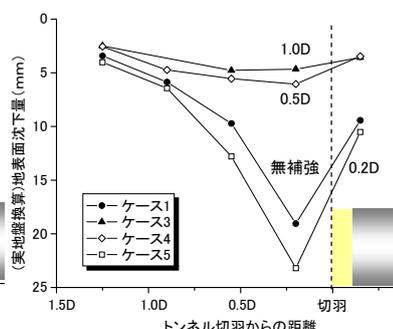
図-4の上段に示す各土被り厚における破壊形状の違いは、土被り厚が0.5D~1.0Dの場合、グランドアーチを形成することができないためか、鏡ボルトの有無によらず破壊面が地表まで到達することが分かる。一方、土被り厚が2.0Dのケースでは、破壊領域の進展は切羽上方1.5Dの辺りで終了することが分かる。これは、地中内でグランドアーチが形成され、地表への影響がほとんどなかったためであると考えられる。また、鏡ボルトが無い場合、全ての土被りに共通して、破壊領域はトンネル底部から対数螺旋に近い曲線を示しながら上方へ発達する。一方、鏡ボルトを設置した場合、ボルトと地盤のせん断によっ

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9
2次元縦断面写真	無補強 土被り:1.0D 崩壊 掘削範囲 覆工	ボルト表面:滑 鏡ボルト	ボルト表面:粗 ボルト長:1.0D 土被り:1.0D	ボルト長:0.5D	ボルト長:0.2D	土被り:0.5D	土被り:0.5D	土被り:2.0D	土被り:2.0D
3次元CG									
破壊内圧	6.4 (kPa)	2.6	3.5	3.4	5.9	6.6	4.0	5.7	4.6

図-4 附着強度およびボルト長の違いによる鏡ボルトの補強効果



(a) 附着の影響



(b) ボルト長の影響

図-5 トンネルセンターの地表面沈下分布

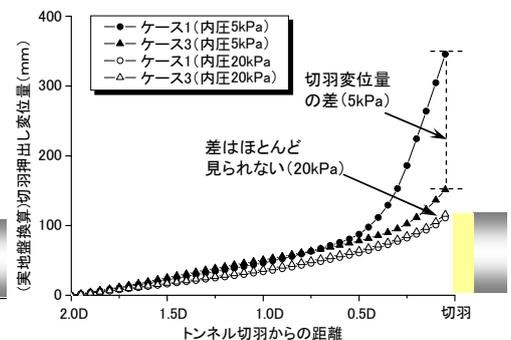


図-6 切羽押し出し変位量分布

て前方地盤のせん断強度が増加するためか、切羽前方への破壊領域は小さくなる。さらに、**図-4**の中段で示す、切羽の崩壊形状を3次元的にCG化した結果を見ると、附着強度やボルト長の違いと同様に破壊形状はトンネル縦断方向のみでなくトンネル横断方向へも縮小されることが分かる。このように、トンネル掘削に伴う破壊形状は、3次元CG化を行うことで、より正確に評価することが可能となる。その結果、現状で一般的に実施されているトンネル切羽安定性の設計において仮定されている切羽前方地山の直線や対数螺旋形で囲まれたすべり土塊の形状は、鏡ボルトの設置により大きく変化することが分かる。さらに合理的な設計のためには、その形状やゆるみ荷重の変化についても評価をしていく必要がある。

最後に、**図-7(a)(b)**に示すトンネル内圧とトンネル直上で発生した地表面沈下量（実地盤換算）との関係は、土被り厚の違いによって破壊に至るまでに大きく異なった傾向を示す。土被り厚が0.5Dの場合、地表面沈下量を示す曲線は、内圧低下初期段階において線形挙動から逸脱し始め、破壊に至るまでに発生する変位量は大きいことが分かる。一方、土被り厚が2.0Dの場合、ボルトの有無にかかわらず、地表面沈下量を示す曲線は、内圧を低下させても破壊に接近するまで弾性的な沈下発生傾向を示しており、発生した変位量は比較的小さいことが分かる。**図-8**は、各グラフにおける最大曲率点を、破壊が近づき変位が顕著に発生し始める点として整理した図である。これより、土被り厚が概ね2.0Dより深い場合は、地表面沈下量に対する鏡ボルトの補強効果は小さいが、土被り厚が小さい場合は、地表面沈下量によって鏡ボルトの補強効果を評価することが可能であるものと思われる。

3. 半断面土槽を用いたトンネル掘削実験

これまでに実施した全断面模型を用いたトンネル掘削実験では、**図-4**に示すようにトンネル掘削後の破壊形状

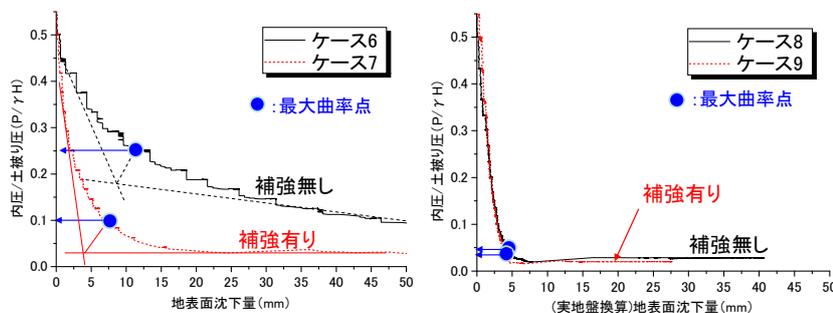
について、切羽補強工の補強効果を破壊の側面から検証することができるものの、破壊に至るまでの破壊メカニズムを分析することは困難である。また、変形抑制効果についても、レーザー変位計やひずみゲージ付きゴムを用いた地中変位計を用いることで、地表面沈下量や地中変位量などを計測することはできるが、模型実験では計測機器を設置するスペースが限定されてしまうため、地盤中の一部分における変形抑制効果しか評価することができないといった問題点が挙げられる。

そこで著者らは、全断面模型の半分をモデル化した半断面模型（**図-9**）を製作し、トンネル掘削中の縦断面の観察および画像解析から、破壊メカニズムや変形抑制効果について詳細な分析を加えることを試みた。

(1) 半断面遠心模型装置概要

半断面遠心模型装置を**図-9**に示す。トンネル掘削模型は直径100mm（全断面装置と同サイズ）の半円柱形であり、アルミニウム製の覆工モデルとメンブレン製の掘削部から構成されている。地盤との境界面に当たるトンネルセンターにはアクリル面を設置し、掘削中の地盤状況をデジタルカメラやビデオカメラで撮影・録画することができる。

トンネル掘削は、全断面装置と同様にシリンダのピストンを上昇させて空気圧を下げることで模擬している。本装置は、シリンダを用いてトンネル内圧を任意に調節することが可能なため、遠心力に伴って増加する地盤初期応力とトンネル内圧とのバランスを適切に保つことができる。そのため、トンネル掘削を開始するまでの間、トンネル周辺地盤の応力解放による影響を可能な限り軽減させて掘削実験を行うことができる。また、地盤作製中にトンネル内の内圧が変化することによって地盤へ悪影響が生じるといった理由や、地盤初期応力が小さい場合（遠心加速度が10G程度まで）には、地盤初期応力とトンネル内圧との適切なバランスを保つことが困難であるといった理由から、トンネル模型（メンブレン）内に



(a) 土被り 0.5D (D:トンネル径) (b) 土被り 2.0D

図-7 換算地表面沈下量とトンネル内圧の関係

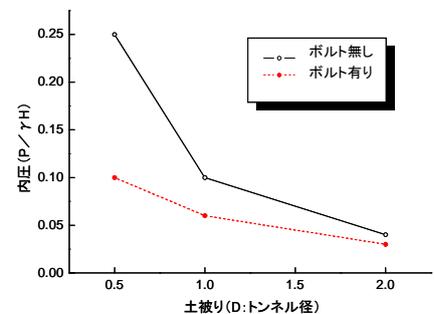


図-8 土被り別最大曲率点

一時的な支保部材 (図-9青枠) を設置し、トンネル内空を一定に保つことが可能な装置を設計した。この部材はトンネル掘削を開始するまでの任意なタイミングで後方へ引き抜くことができ、切羽周辺での急激な応力変化を防止して、理想的な初期条件に近づけることができる。

(2) 実験ケース

半断面模型を用いて実施した実験ケースは、無補強、土被り1.0Dの標準ケースである。これは、全断面模型を用いた実験ではケース1 (表-1) の仕様に相当する。地盤の作成方法や、一掘削長は全て全断面実験と同様とした。ただし、全断面実験では実験終了後に、地盤を切出して破壊パターンを観察するために、予め色砂 (赤) の薄層を設置していたが、半断面実験では、デジタルカメラやビデオカメラを用いて画像解析により破壊形状を分析するため色砂は設置していない。

本章では、半断面模型を用いて実施した標準ケースと全断面模型の標準ケースを破壊および変形の両側面から比較した結果を報告する。

(3) 実験結果

図-10は、破壊直前 (トンネル内圧10kPa) および破壊直後に撮影した画像を用いて画像解析を行った結果であ

る。図中に描かれたベクトルの幅は、初期状態から撮影した時点までに発生した地盤変位量を示し、ベクトルの向きは変位が発生した方向を示す。これらの結果を見ると、破壊直前において、トンネル切羽前面では切羽方向に変位が卓越し、トンネル天端上方から地表面付近にかけては、鉛直下向きに変位が卓越していることが確認できる。また、破壊直後にはさらに顕著な変位が発生し、ベクトルの乱れた範囲が破壊した領域であると考えられ、その外側ではすべり線沿いに変位が卓越していることが良く分かる。トンネル直上で様々な方向へ地盤が変位したことが確認できる。全断面実験から得られた破壊形状 (図-4) と図-10 (b) を比較すると、両図の破壊領域はほぼ一致していることが分かる。

次に、半断面実験と全断面実験において、発生した変位量を比較した結果を示す。図-11は、両実験においてトンネルセンターの縦断方向における破壊直前の地表面沈下量をそれぞれ最大変位量で正規化したものである。半断面実験で得られた地表面沈下量は画像解析から算出し、全断面実験で得られた地表面沈下量はレーザー変位計によって計測した沈下量である。これらの結果を見ると、両実験結果とも切羽前方0.5Dから1.0Dの間に変位が顕著に発生し、トンネル切羽直上から前後0.25D付近までさらに卓越した地表面沈下が発生したことが分かる。

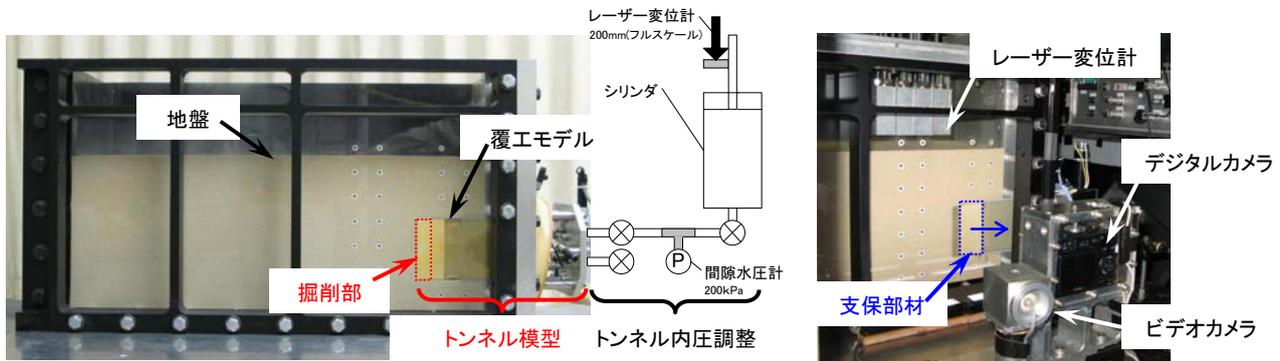
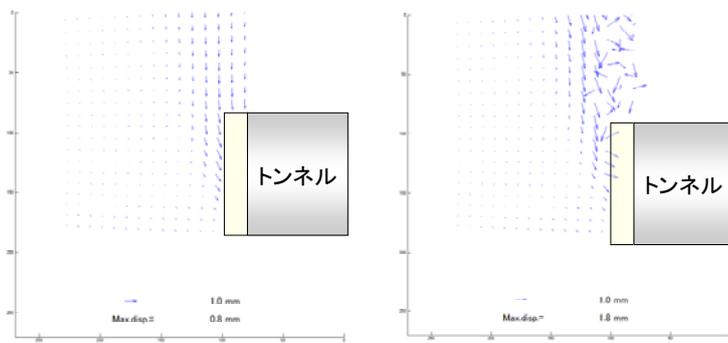


図-9 半断面遠心模型装置 (左: 半断面土槽全景、右: 設置状況)



(a) 破壊直前 (トンネル内圧 10kPa)

(b) 破壊直後

図-10 画像解析結果

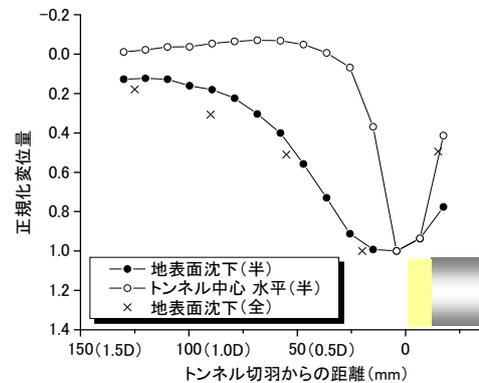


図-11 全断面結果との比較

また、トンネル中心高さにおける破壊直前の地中水平変位量を最大変位で正規化した結果を同グラフに示したが、卓越した変位が切羽前方0.5D付近を境に発生し、地表面沈下のグラフに比べより切羽近傍で発生したことが確認できる。この結果は、図-6に示した全断面実験の結果と整合性が見られる結果となった。このように半断面模型装置を用いることで、トンネル掘削から破壊に至るまで、地盤中の任意な点を観察し、分析することが可能となる。ただし、半断面土槽を用いて実験を行う場合、地盤とアクリル面の摩擦により、本来の地盤変形を過小評価することが懸念される。しかしながら今回用いた地盤条件に限定すると、両実験結果は、破壊および変形の両面から十分に整合性が見られた結果が得られている。よって今後は、鏡ボルトモデルを半断面模型に設置し、全断面実験では評価が困難なトンネル掘削中の縦断面の観察および画像解析を行い、地盤の破壊メカニズムや鏡ボルトの変形抑制効果についてさらなる分析を行う所存である。

4. まとめ

本報告で得られた知見を以下に示す。

全断面模型実験より、

- ・ 鏡ボルトと周辺地盤との付着が破壊形状に及ぼす影響は大きい。
- ・ 本実験の地盤条件では、変位抑制効果や経済面からボルト長0.5D程度が最適である。
- ・ 土被り厚が2.0D以上になると、地表面沈下抑制効果の評価は困難になるが、切羽ゆるみ部の減少効果は十分に期待できる。

- ・ 土被り厚が2.0D以下の場合、ゆるみ部の減少効果だけでなく、地表面沈下抑制効果も大きい。

半断面模型実験より、

- ・ 実験条件が同様な全断面実験と比較し、両実験結果には破壊および変形の両面から整合性が見られた。
- ・ 半断面模型を用いることで、トンネル掘削から破壊に至るまで、地盤中の任意な点を観察し、画像解析を行うことができるため、地盤の破壊メカニズムや鏡ボルトの変形抑制効果についてさらに詳細な分析を行えるようになった。

参考文献

- 1) 北本幸義, 伊達健介, 山本拓治: 中尺鋼管フォアパイリングの開発と有効性評価, 土木学会論文集, No.756/vI-62, pp.145-156, 2004.
- 2) 北本幸義, 伊達健介, 山本拓治: 注入式鋼管フォアパイリングの補強効果に関する研究, 土木学会論文集, No.736/III-63, pp.167-177, 2003.
- 3) Date, K., Mair, R.J., Soga, K.: Reinforcing effects of forepoling and facebolts in tunnelling, IS—Shanghai2008, pp.494-499,2008.
- 4) 横田泰宏, 李済宇, 伊達健介, 山本拓治: 数値解析的検討による切羽補強工の簡易設計手法に関する研究, 第12回岩の力学国内シンポジウム, pp.767-773, 2008.
- 5) Yokota, Y, Lee, J, Date, K, Yamamoto, T.: Numerical Approach for Simple Estimation of Reinforcing Effects of Facebolts, ITA-AITES World Tunnel Congress, O-09-09, 2009
- 6) 齋藤潤, 伊達健介, 横田泰宏, 北本幸義, 山本拓治: トンネル掘削実験における切羽押し出し変位の計測, 第43回地盤工学会研究発表会, pp.1461-1462, 2008

OPTIMIZATION OF TUNNEL REINFORCEMENT THROUGH VISUALIZATION OF TUNNEL EXCAVATION IN A CENTRIFUGAL FIELD

Kensuke DATE, Yasuhiro YOKOTA, Jeawoo LEE and Takuji YAMAMOTO

Tunnel reinforcement techniques are now frequently used at actual tunnelling sites. However, most designs of the techniques have been still empirically made without proper evaluation of their supporting effects. The aim of the research is thus to investigate the reinforcing effects of facebolts, one of common tunnel reinforcement techniques, on face stability and ground deformation by means of experimental and analytical methods. The necessity of further understanding of how facebolts work in terms of reinforcing mechanism has led to experimental investigation into behavior of a facebolts-reinforced tunnel through the centrifuge tests with a half tunnel cross section in comparison with the observation from those with full tunnel cross section. In addition to the experimental results observed so far, the new findings on the reinforcing range of facebolts and their effect on deformation control as well as the experimental methodology are described in this paper.