

長尺鏡ボルトの継ぎ手部補強による耐力増加

CONNECTOR STRENGTH IMPROVEMENT OF FACEBOLTS

大塚勇*・谷卓也**・竹津英二***・小杉勝之****・羽馬徹*****・藤田清一*****

Isamu OHTSUKA, Takuya TANI, Eiji TAKETSU, Katsuyuki KOSUGI, Touru HABA, Seiichi FUJITA

Recently, long facebolting with connected-GFRP-tube-type bolts has been adopted for the stabilization measure against face collapse of tunnels. However, the bearing strength at bolt connection is 1/5 as weak as that of the bolt material (1,000kN). In this study, the bearing strength of the connection part of the bolt was improved by setting a reinforcing GFRP bar inside the connector of the GFRP tube bolt followed by grouting. It was confirmed that the reinforced connection part had the bearing strength of 350kN or more with laboratory pull tests. At Iiyama tunnel, such reinforced GFRP tube bolts were applied for the facebolting. The axial forces of a facebolt during excavation were measured and the axial forces at the connection parts were confirmed to bear the axial forces of more than 300kN. Analyses of tunnel excavation with facebolting with and without the connector reinforcement were performed and the results were compared in the effects of face reinforcement.

Key Words: facebolt, connector strength, measurement of axial force, numerical analyses

1. はじめに

近年、切羽の安定対策として、継ぎ手タイプの中空 GFRP 管ボルト（外径 76mm、内径 60mm）を長尺鏡ボルトとして採用する事例が増えている。しかし、GFRP 管ボルトの母材部の軸方向耐力は約 1000kN と高耐力であるのに対して、継ぎ手部の耐力は約 200kN で母材部の約 1/5 と大幅に低下するという問題がある。

著者らは、GFRP 管ボルトの中空部に GFRP ボルトなどの補強材を挿入し、注入材により一体化させることによって、耐力が増加すると考え、室内にて GFRP 管ボルトの引張試験を実施し、継ぎ手部の補強による耐力増加を確認した¹⁾。そこで、本研究では原位置（北陸新幹線飯山トンネル木成工区）にて補強材を挿入した GFRP 管ボルトを鏡ボルトとして打設し、補強材の挿入や注入などについて施工性の確認を行った。また、掘削中の GFRP 管ボルトの軸力測定を行い、原位置における耐力増加の確認実験を行った。さらに、数値解析によって軸力測定結果をシミュレーションした。最後に継ぎ手部の補強の有無による比較解析を行い、岩盤補強効果の違いについて検討した。

2. 継ぎ手部の補強方法

GFRP 管ボルトは、長さ 3m のボルトを鋼製カプラによってネジ接合して長尺化させる二重管削孔方式の自穿孔ボ

* 正会員 工修 大成建設（株） 土木本部土木設計部

** 正会員 工修 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所

*** 正会員 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局

**** 正会員 大成建設（株） 北信越支店飯山トンネル作業所

***** 正会員 （株）ケー・エフ・シー 技術部

***** 正会員 （株）東亜測器

ルトであり、地山条件によって長さ 20m 程度まで施工が可能である。GFRP 管ボルトの諸元を表-1 に、写真を写真-1 に示す。鋼製カプラの諸元は谷部の最も薄い部分の値である。なお、表-1 には補強材として用いた GFRP ボルトの諸元も示している。

開発した継ぎ手部の補強方法の概念図を図-1 に示す。継ぎ手部の補強は、GFRP 管ボルトの継ぎ手位置の内に補強材を配置して注入材と一体化させることによって行われる。補強材に要求される性能としては、切羽掘削時の切削が容易で、GFRP 管ボルトおよび注入材と同程度の剛性のものが望ましい。そこで、今回はトンネルの鏡ボルトやロックボルトとして使われている GFRP ボルト (CG22S) を補強材として用いることとした。

3. 室内試験結果

室内試験¹⁾では、GFRP 管ボルトの中央部に継ぎ手部を設けた試験体の両端を油圧サーボ式万能試験機で引張る試験を行った。補強材の長さや注入材 (モルタル) の強度による影響を調べた結果、補強材の長さはカプラ長の 2.5 倍である 500mm が適当な長さであり、注入材の強度による影響は小さいことがわかった。また、補強材以外に注入管やエア抜きチューブを GFRP 管ボルトの中空部に挿入させた場合や補強材の位置を中心からずらすなど、実際の施工条件と近い条件で試験を行った結果、継ぎ手部の耐力は 350kN 以上に増加することを確認した。

4. 長尺鏡ボルトの施工方法と軸力測定

(1) 施工方法

長尺鏡ボルトの軸力測定は、北陸新幹線飯山トンネル木成工区にて行った。計測を行った位置の土被りは約 200m で、支保パターンは、鋼製支保工が H200、吹付けコンクリートは 25cm、ロックボルトは上半アーチ部に長さ 4m を 10 本と上下半の側壁部に長さ 4.5m を 16 本打設している。長尺鏡ボルトのパターン図を図-2 に示す。上半断面に長さ 12.5m の GFRP 管ボルトを 15 本打設し、ラップ長 3.5m で施工している。

補強材 (CG22S、長さ 500mm) は、3m 間隔の継ぎ手の位置にくるように、注入パイプにバインド線で予め固定しておくことにより、簡単に設置できる。試験施工では、GFRP 管ボルトを 4 本継いだ長さ 12.5m の長尺鏡ボルトを一断面あたり 8~11 本打設し、4 シフトで合計 38 本の施工を行った。その結果、補強材を取付けた注入パイプは問題な

表-1 GFRP 管ボルトの諸元

	GFRP管ボルト	鋼製カプラ	GFRPボルト (補強材)
外径 (mm)	76	76	22
内径 (mm)	60	72	—
長さ (mm)	3,000	200	500
引張強度 (kN)	母材部 1,000 継ぎ手部 200	329	200
備考	—	—	CG22S (中実)

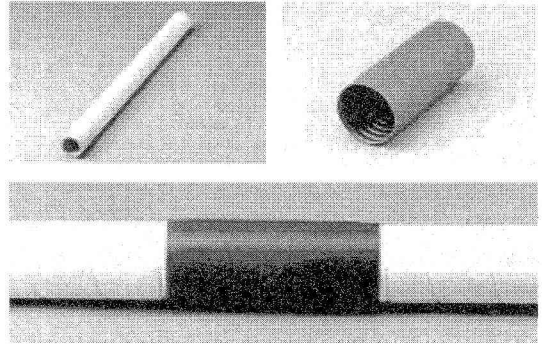


写真-1 GFRP 管ボルト

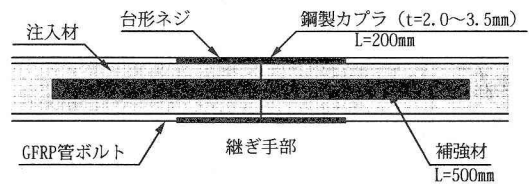


図-1 継ぎ手補強の概念図

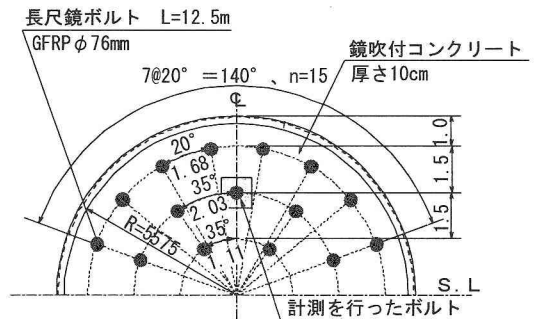


図-2 長尺鏡ボルトのパターン図

く挿入することができた。注入パイプへの取付け位置と挿入時の位置合わせには留意しなければならないが、通常の施工と比べて運搬性や挿入性などの施工性については遜色ないこと、コスト面でも補強材の材料費などしか発生しないことがわかった。

(2) 軸力測定

軸力測定を行ったボルトは、図-2 に示すように切羽中央のボルトである。GFRP 管ボルトは自穿孔タイプのボルトであるため、ボルトに直接ひずみゲージを貼り付けるとゲージを傷めてしまう。そこで、GFRP 管ボルト打設後にボルト中空部にひずみゲージを貼り付けたセンサー管 (PET 製) を挿入し、注入材で固めて間接的に GFRP 管ボルトに発生する軸力を計測する。センサー管と GFRP 管ボルトの追従性は現場での引抜き試験²⁾ および室内試験³⁾ によって、両者は同様な挙動を示すことを確認した。

今回は図-3 に示すように、センサー管 (注入管も兼用) に補強材を取付けて、センサー管と一緒にボルト中空部に挿入して、補強材を継ぎ手の位置に配置した。計測位置は、深度 4.5~9.5m を 1m ピッチでセンサー管にて計測し、深度 6m と 9m の継ぎ手部では補強材にひずみゲージを取付けて計測した。ボルト長は 12.5m であり、注入材はモルタルである。計測データはセンサー管の先端に取付けられているデータロガーにより 15 分間隔で自動計測し、切羽がデータロガーに到達した時に回収した。

計測されたひずみには、GFRP 管ボルトに注入材を充填して行われた室内引張り試験³⁾ から求めた換算係数 (73MN) を乗じて軸力を算出した。この換算係数は GFRP 管ボルトの断面積と弾性係数の積であるボルトの軸剛性 (65MN) の約 1.1 倍であり、中空部の注入材の剛性も考慮した値である。

図-4 に長尺鏡ボルトに作用した軸力の経時変化図を示す。図中の数字は、各測点の鏡ボルトを打設した切羽からの深度を表しており、全ての測点で切羽の進行とともに軸力は増大している。切羽が止まっている時でも軸力は時間とともに増加している。深度 9.5m の測点では 300kN を超える軸力が発生している。



図-3 長尺鏡ボルトの軸力計

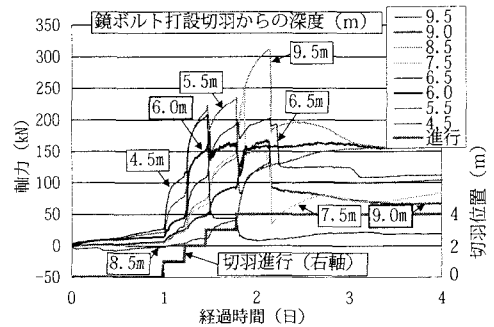


図-4 軸力の経時変化図

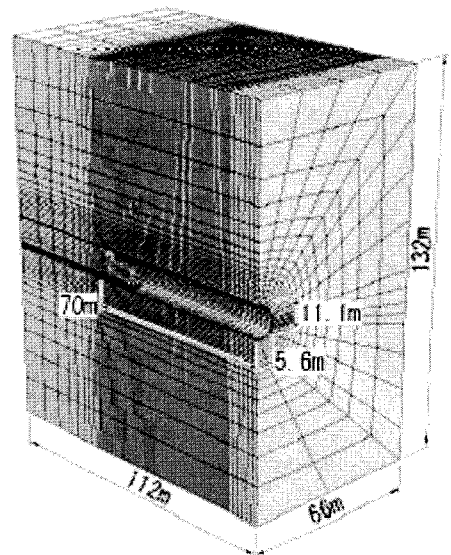


図-5 解析モデル図

5. 軸力測定の数値シミュレーション

軸力測定結果を数値シミュレーションで再現し、掘削中の鏡ボルトの挙動を把握するために、三次元逐次掘削解析を行う。

表-2 解析に使用した地山と支保の物性値

	仕様	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	粘着力 [MPa]	内部摩擦角 [°]	単位体積重量 [kN/m ³]	降伏応力 [N/mm ²]
地山	完全弾塑性体	0.3	0.3	0.4	20	20.5	—
吹付けコンクリート	厚さ 250mm	3.4	0.2	9.0	0	—	(18.0)
鋼製支保工	H200	200	—	—	—	—	235

(1) 解析方法

解析は三次元有限差分法⁴⁾によって行った。解析モデル図を図-5に示す。対称性を考慮して半断面とした。計測箇所土の土被りは200mであり、側圧係数を1.0として、各要素に土被り相当圧の自重を初期応力として作用させた。解析ステップは実際の施工手順を再現し、上半切羽が70m進むまで解析を行った。

施工手順はベンチ長を11mとし、上半を1mずつ4m掘削した後下半を同じく1mずつ4m掘削する。その後、下半の切羽後方5mまでを4mまとめてインバート掘削し、インバートストラットと吹付けコンクリートによりリング閉合する。

(2) 地山と支保のモデル化と物性値

地山はMohr-Coulombの破壊規準に従う完全弾塑性体モデルとした。地山の物性値は、A計測結果を近似するように設定した。吹付けコンクリートは、弾塑性体のソリッド要素とし、一軸圧縮強度に達したら降伏するものと設定した。鋼製支保工は軸降伏する一軸棒要素としてモデル化した。解析に使用した地山と支保の物性値を表-2に示す。

(3) 長尺鏡ボルトのモデル化と物性値

ボルトには付着特性を考慮でき⁵⁾、曲げ抵抗するモデルを採用した(パイル要素⁴⁾)。継ぎ手部は破断強度で壊れるモデルとし、補強した継ぎ手部では破断強度を350kNと設定した。表-3に長尺鏡ボルトの物性値を示す。注入材にはモルタルを使用しており、付着定数(せん断剛性、付着強度)は引抜き試験結果より設定した²⁾。

(4) 解析結果と計測結果の比較

a) A計測

図-6にA計測の経距変化を比較した結果を示す。天端沈下、上半内空変位ともに、解析結果と計測結果は良く一致している。

表-3 解析に使用した長尺鏡ボルトの物性値

名称	単位	入力パラメータ
断面積	m ²	1.71×10^{-3}
弾性係数	GPa	38
ポアソン比		0.3
せん断剛性	N/m ²	9.36×10^9
付着強度	N/m	2.16×10^5
断面二次モーメント	m ⁴	1.00×10^{-6}
破断荷重(母材部)	kN	1,000
破断荷重(継ぎ手部)	kN	350

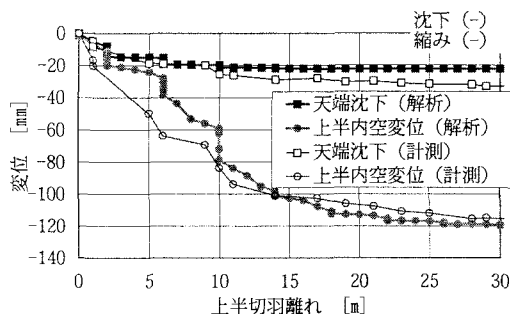


図-6 A計測結果比較図

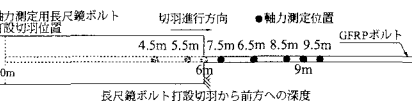
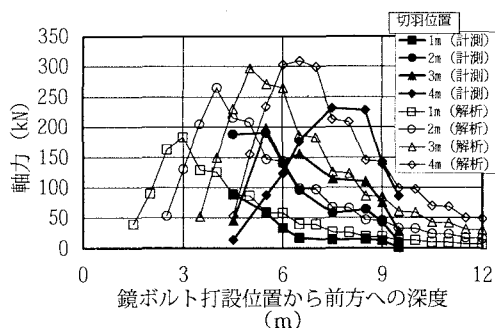


図-7 長尺鏡ボルト軸力分布比較図

b) 長尺鏡ボルトの軸力測定

図-7 に長尺鏡ボルトの軸力深度分布図の結果を示す。太線が計測結果であり、細線が解析結果である。横軸に軸力計設置切羽からの深度を、縦軸に鏡ボルトに発生する軸力を示す。凡例の数字は軸力計設置切羽を 0m とした時の掘削切羽位置を表しており、掘削完了時での軸力分布である。切羽が 1m (□)、2m (○) の位置における軸力分布は計測と解析結果で良く一致している。切羽が 3m (△)、4m (◇) と進むと、継ぎ手部の位置にあたる深度 6m 付近で軸力が上がらず、解析結果のほうが大きな軸力が発生している。継ぎ手部が破断していれば、軸力が作用せず深度 6m で軸力が 0 となる。しかし、150 kN 程度の軸力が作用し続けていることから、深度 6m 付近で軟弱な地山が現れ、ボルトと地山との付着力が低下し、軸力が作用しなかったものと思われる。深度 6m 付近の挙動を除けば、両者は良く一致している。

6. 継ぎ手部の補強有無による比較解析

継ぎ手部を補強することによる岩盤補強効果の違いを調べるために、継ぎ手部を補強しない場合と補強した場合の比較解析を行う。

5 章の解析条件のように、土被りが深く地圧が大きい場合は、鏡ボルトによる切羽の変化抑制という観点では、継ぎ手部の破断耐力による差がほとんど現れなかった。そこで、土被りが浅い地山条件で解析を行い、継ぎ手部の補強の有無による岩盤補強効果の違いについて検討することとした。土被りを 30m とし、側圧係数を 0.5 としして解析を行った。地山と支保の物性値を表-4、表-5 に示す。鏡ボルトの付着定数 (kbond と sbond) は引抜き試験結果を基に算出した値である⁶⁾。

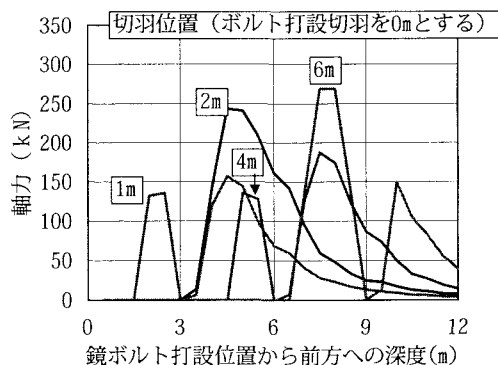
解析ケースはボルトの継ぎ手を補強しない場合とした場合および鏡ボルトを打設しない場合の計 3 ケースで行った。

図-8 にボルト継ぎ手部の耐力が 200kN と 350kN の場合の鏡ボルトに発生する軸力深度分布図を示す。耐力が 200kN の場合には切羽が 1m 進んだ時点で深度 3m の継ぎ手部が破断し、その後も深度 6m、9m の継ぎ手部が破断している。一方、耐力が 350kN の場合には、切羽の進行とともに軸力が増大するが、破断することはない。

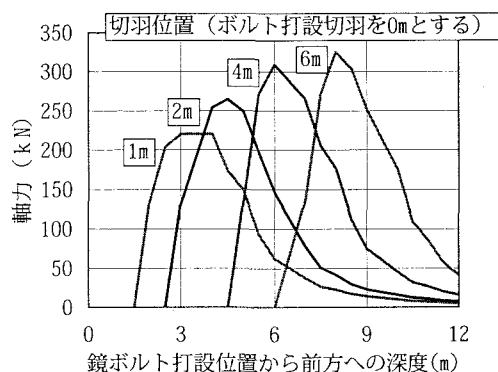
図-9 に鏡面の押出し変位分布図を、図-10 に鏡面の最大せん断ひずみ分布図を示す。これらの図は切羽の位

表-4 地山と支保の物性値

	名称	単位	入力パラメータ	備考
岩盤	弾性係数	MPa	150	
	ポアソン比		0.35	
	G	MPa	56	
	K	MPa	167	
	密度	10 ³ kg/m ³	2.00E-03	
	粘着力	MPa	0.02	
鏡ボルト	摩擦角	°	30	
	断面積	m ²	1.71E-03	
	弾性係数	GPa	38	
	破断強度(継ぎ手部)	kN	350	補強材有
	破断強度(母材部)	kN	200	補強材無
	kbond	kN	1,000	
吹付コンクリート	断面積	MN/m ²	8.19E+02	
	sbond	MN/m	2.80E-01	
	厚さ	m	0.2	
	密度	10 ³ kg/m ³	2.30E-03	
	弾性係数	GPa	4	
	ポアソン比		0.2	
鋼製支保工 (H150)	断面積	m ²	3.97E-03	
	断面二次モーメント(強)	m ⁴	1.62E-05	
	断面二次モーメント(弱)	m ⁴	5.63E-06	
	密度	10 ³ kg/m ³	7.85E-03	
	弾性係数	GPa	205	
	ポアソン比		0.3	



(a) 耐力 200kN (継ぎ手補強なし)



(b) 耐力 350kN (継ぎ手補強あり)

図-8 鏡ボルトの軸力深度分布図

置が鏡ボルトを打設した切羽から深度 6m の断面であり、継ぎ手部の位置である。鏡ボルトを打設することによって押し変位、最大せん断ひずみともに抑制されており、継ぎ手部が破断しない耐力 350kN の場合では、より効果が大きくなることがわかる。

図-11 にトンネルセンターにおける鏡面の押し変位を示す。鏡ボルトのないケースでは大きくはらみ出す分布をしている。継ぎ手を補強して耐力を上げたほうが変位抑制効果は大きい。

7. まとめ

今回、継ぎ手を補強して原位置試験および数値解析を行った結果、以下のことがわかった。

- ①原位置にて補強材を挿入した GFRP 管ボルトを鏡ボルトとして打設し、掘削中の軸力測定を行った結果、300kN 以上の軸力がボルトに作用しても継ぎ手部が破断しない。
- ②施工性に優れ、コストパフォーマンスの良い補強方法である。
- ③数値解析による軸力測定のシミュレーションによって、継ぎ手を補強した鏡ボルトの挙動を良く再現することができた。
- ④限られたケースではあるが、継ぎ手部の補強の有無による比較解析を行い、岩盤補強効果の違いについて検討した結果、継ぎ手を補強することによって、切羽の押し変位や切羽に発生するせん断ひずみを抑制する結果となった。

参考文献

- 1) 中村敦, 谷卓也, 小杉勝之, 羽馬徹, 藤田清一: 長尺鏡ボルトの継ぎ手部補強による耐力増加の確認実験, 第 22 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2004 (投稿中)
- 2) 大塚勇, 谷卓也, 小杉勝之, 竹津英二, 小島隆: 各種注入材によるボルトの付着特性について, 第 58 回土木学会年次学術講演会, 3-095, pp.189-190, 2004.
- 3) 遠藤太嘉志, 米倉政雄, 西村好恵, 大塚勇, 谷卓也, 井本厚: 長尺先受け鋼管や長尺鏡補強ボルトの間接的計測手法について, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム (投稿中), 2004
- 4) Itasca Consulting Group. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D). ver. 2.1. 2002.
- 5) Brady, B. and Lorig, L.: Analysis of rock reinforcement using finite difference methods, Computers and Geomechanics, pp.123-149, 1988
- 6) 大塚勇, 青木智幸, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム, 自由投稿 (1), pp. 73-78, 2004.

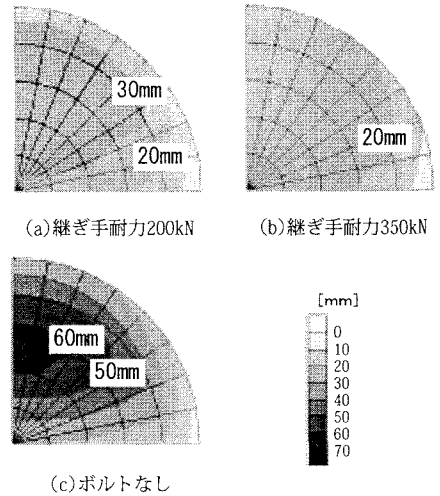


図-9 鏡面の押し変位分布

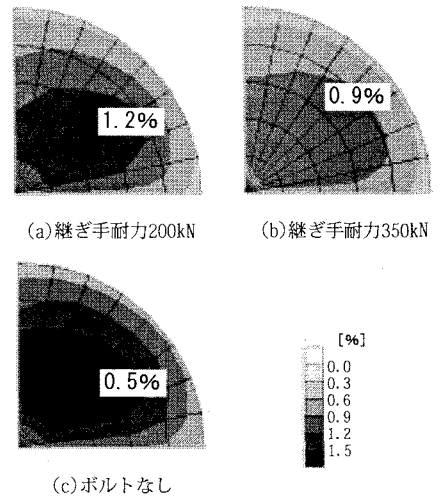


図-10 鏡面の最大せん断ひずみ分布図

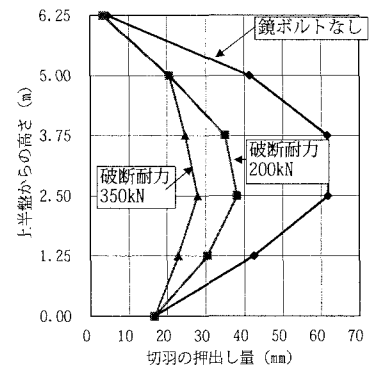


図-11 鏡面の押し変位 (トンネル中心)