

高付着鋼管による切羽補強工の効果に関する 施工実績と解析的評価

岡部正¹・井本厚¹・横田泰宏²・伊達健介³・山本拓治²

¹正会員 株式会社ケー・エフ・シー 技術部 (〒135-0064 東京都江東区青海二丁目4-32)

E-mail:okabe.tadashi@kfc-net.co.jp

²正会員 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)

³正会員 鹿島建設株式会社 北の峰トンネル工事事務所 (〒076-0037 北海道富良野市西町一番100号)

近年、補助工法分野では、従来の天端補強を目的とした長尺鋼管先受け工と、切羽鏡部前方地山の補強を目的とした長尺鏡補強工の併用パターンが採用される機会が増加している。特に長尺鏡補強工は鏡部の安定化効果に伴う先行変位の抑制が期待できることから、地表面沈下が問題となるような厳しい条件下での適用事例も多くなってきているが、補強材や注入材の仕様や設計法については明確にされていないのが現状である。特に鏡補強工としての作用機構は、天端補強工と異なり、ロックボルトと同様に軸方向の摩擦抵抗も重要であると考えられる。

著者らはこれまで、定着材との付着抵抗の向上を目的として開発された長尺切羽補強鋼管についての引抜試験結果等について検討してきたが、本報告では実現場における施工および計測結果や3次元数値解析による評価について述べる。

Key Words : Long face bolting, Bonding strength, Measurement data, 3D numerical analysis

1. はじめに

近年、山岳トンネル工法で脆弱な地山状況や周辺環境への影響を最小限に抑える必要がある際には、トンネル掘削に伴う先行変位や切羽安定を目的とした補助工法が適用される機会が増加している。これまでに用いられてきた補助工法は、天端部の補強を目的としたフォアポーリングや長尺鋼管先受け工等が主体であったが、近年は切羽鏡部前方地山の補強を目的とした長尺鏡補強工との併用パターンの実施例が増えている。また最近では、変位抑制を目的とした「早期閉合」による施工事例も報告されており、切羽鏡部の解放面が大きくなる場合には長尺鏡補強工を併用する例が多い。ただし、長尺鏡補強工の採用実績が増えているものの、補強部材や定着材の選定や設計手法等はまだまだ十分に明確化されていないのが現状である。長尺先受け工は、天端上部地山のゆるみ荷重を補強鋼管の曲げ抵抗を主体として作用するのに対し、長尺鏡補強工は、ロックボルトやケーブルボルトと同様に軸方向の摩擦抵抗による作用が重要であると考えられる。ただし、長尺鏡補強工の補強部材については、長尺先受け工と同様に表面が平滑な従来の鋼管を使用する場

合が多く、このような場合においては補強部材と定着材との付着耐力不足が懸念される。

本報告では、付着耐力を向上させることを目的として開発された「縞付き鋼管」の地質別における現場引抜試験結果と長尺鏡補強工としての現場適用事例および部材応力、地山変位の計測結果について述べる。また、現場計測結果より再現解析を実施し、縞付き鋼管の補強効果に関する解析的評価を行った。



写真-1 縞付き鋼管による切羽補強工部材

写真-1に縞付き鋼管の形状について示す。今回、切羽補強部材として使用する縞付き鋼管は鋼管径76.3 mm、厚さ4.5 mmで、従来の小口径切羽補強工に使用される鋼管（厚さ5.2mm）と比較し薄肉であるが、ネジ接続部の耐力は従来と同等以上の強度を有するように加工されている。この薄肉化により使用鋼管は軽量化され、施工上の安全性、経済性の向上が図れることが期待できる。表-1は従来の鋼管と今回開発された縞付き鋼管の諸元についてである。

2. 付着耐力確認試験

切羽補強部材の付着耐力の確認を目的とし、室内および現場における引抜試験を実施した結果について示す。

(1) 室内試験

写真-2は室内試験状況についてである。室内における付着耐力の確認試験は、模擬模擬ポアホールとして内径φ114.3mmの鋼管に定着長さ200mmの供試体（補強部材）を挿入し定着材を注入する。所定時間養生後、万能試験機により供試体の引抜試験あるいは押し抜き試験によって荷重を測定し付着耐力および付着剛性の確認を行うものである。表-2は室内試験から得られた定着材と補強部材の付着耐力である。なお、室内試験におけるプレミックスモルタルの材令は24時間（10～15N/mm²）とし、ウレタン、シリカレジン発泡倍率はそれぞれ4倍、3倍としている。ただし、室内試験から得られた付着耐力は理想的な状況であり、実現場においては、削孔時のスライム等の影響により付着耐力が低減することから、設計に使用する際にはこれらを考慮して付着耐力の設定を行う必要があると考えられる。

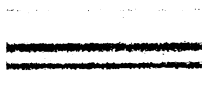
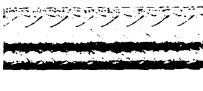
(2) 現場試験¹⁾

現場における引抜試験は、トンネル側壁部に長さ0.5～1.5m程度の削孔を行い、定着長さを0.5m～1.3mとした供試体となる補強鋼管を挿入後、地山と供試体の間隙に定着材の注入を行う。その後、所定の養生時間後にラムチェア等の引抜用治具をセットし、油圧ジャッキにより引抜試験を実施する。この際、記録計により引抜き時の荷重と変位について計測を行う。写真-3は現場における引抜試験状況である。

引抜試験を実施した現場の対象地質は、①強風化凝灰角礫岩、②風化頁岩、③破碎性泥岩、④火砕流堆積物の4ケースである。定着材は各現場の使用状況に合わせて、早硬性モルタル、超速硬性モルタル、シリカレジンを使用している。表-3は各現場における引抜試験から得られた付着耐力である。

今回の4現場での引抜試験において、付着切れ箇所を

表-1 鋼管諸元比較表

	従来鋼管	縞付き鋼管
形状	φ76.3(t=5.2)	φ76.3(t=4.5)
概要図		
単位重量 (kg/m)	10.16	8.87
素管断面積 (mm ²)	1 162	1 014
接続部 引張強度 (kN)	230	340

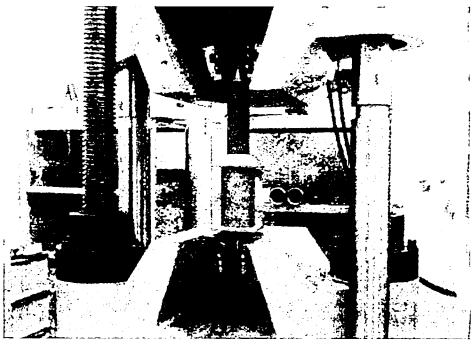


写真-2 室内試験状況

表-2 室内試験結果

		従来鋼管	縞付き鋼管
付着耐力 (kN/m)	早硬性モルタル	50	500
	ウレタン	75	250
	シリカレジン	25	130

※モルタルは材令24hr強度

ウレタン：4倍発泡、シリカレジン：3倍発泡



(記録計)



(引抜装置)

写真-3 現場試験状況

表-3 現場試験結果

	定着長 (m)	注入材※2	付着耐力 (kN/m)	
			従来鋼管	縞付き鋼管
①強風化凝灰角礫岩	1.3	シリカレジン	36	175
②風化頁岩	1.0, 0.5※1	早硬性モルタル	48	482
		超速硬性モルタル	46	408
③破碎性泥岩	1.0	シリカレジン	12	89
④火砕流堆積物	1.0	シリカレジン	60	220

※1 従来鋼管は1.0m、縞付き鋼管は0.5m（油圧ジャッキの能力を考慮）

※2 早硬性モルタルの材令は24hr、超速硬性モルタルの材令は3hr（10～15N/mm²）

定着材の注入量については、モルタル系材料は、ボアホール内の充填、シリカレジンは①が9kg/m、③、④が8kg/mとしている。

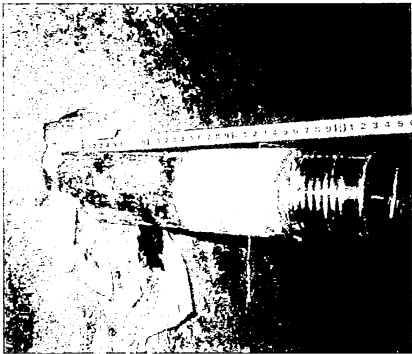


写真-4 定着材と補強部材の
付着切れ状況

確認したが、すべてのケースにおいて付着切れは定着材と補強部材間で発生した（写真-4）。ロックボルトのように削孔径が小さく、ボルト自体が摩擦抵抗を考慮した表面形状の場合は、地山と定着材間で付着切れが発生することが多いが、本工法の削孔径程度（ビット径90mm）では、地山と定着材間よりも補強部材と定着材間の付着耐力のほうが弱い結果となった。ただし、さらに脆弱な地質状況の場合は地山と定着材間で付着切れが起こることも考えられるため、今後も他の地質状況において追加試験を行っていく予定である。

定着材については室内試験結果と同様に、シリカレジンと比較し、硬化後の強度が大きいモルタルの付着耐力が高いことが分かる。これまでの現場試験はシリカレジンが3件であるが、③破碎性泥岩では、従来鋼管、縞付き鋼管ともに室内試験以下の値を示し、各ケースにバラつきがみられる。上記は、室内試験においても同様であるが、定着材が均一な発泡状態でなく、硬化後の空隙や強度に違いが生じたためと考えられる。ただし、バラつきはみられるものの、縞付き鋼管は従来鋼管と比較し、早硬性モルタル、超速硬性モルタルで9～10倍程度、シリカレジンで4～7倍程度の付着耐力の向上が確認されている。縞付き鋼管についてモルタル系の定着材と比較し、シリカレジンの場合は向上率が低い結果となっている。付着抵抗は定着材のせん断抵抗により支配されることから、定着材の強度に影響されることが考えられる。

3. 現場実施事例

(1) 施工性

室内および現場における引抜試験結果より縞付き鋼管の付着耐力の向上は確認できたが、削孔打設推進時において、縞付き鋼管の突起部が抵抗となることが想定された。今回、長尺鏡補強工(L=12.5m)として施工を実施した強風化角礫岩、風化頁岩、破碎性泥岩での地質におい



写真-5 縞付き鋼管打設状況（長尺鏡補強工）

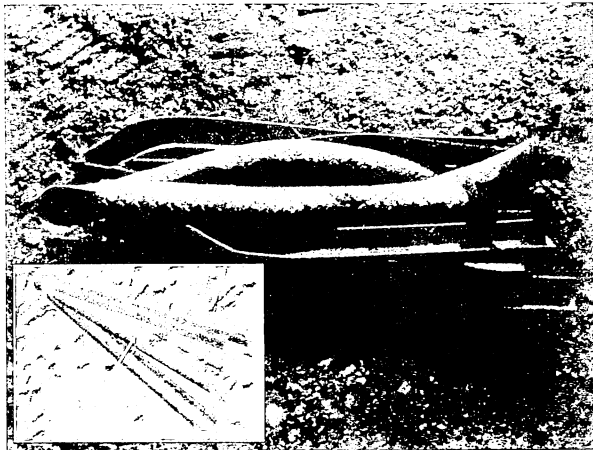


写真-6 撤去後の鋼管

て、特に削孔時の抵抗によるサイクルの遅れは生じていないものと判断された。

ただし、砂質系地山等で削孔時において締付けなどが生じる際には、削孔抵抗となることもあることから、今後は現場実施例を増やし、当工法の適用範囲を把握する

必要がある。写真-5は縞付き鋼管の打設状況である。また、従来の工法の撤去管は、切除した鋼管内に注入材が含まれた「混合産廃」として取り扱われるが、当工法は、撤去管の縦方向に貫通スリットを設け、非貫通の周方向スリットが掘削機により解放されると撤去鋼管と注入材が分別される機構となっている。撤去管の周方向スリットの切れ易さは、施工機械や地山の硬軟、注入材により影響されるが、風化頁岩の現場においてこの縦スリット入りの切除管を使用した際にはほぼ問題なく分別回収することができた。写真-6は切除管の分別された状況である。

(2) 現場計測結果

風化頁岩を対象とし、長尺鏡補強工として縞付き鋼管を試験施工した際の計測結果について述べる。対象トンネルの断面図および長尺鏡補強工の配置は図-1の通りである。長尺鏡補強工の打設長は13.5mで、注入材は2種類のプレミックスモルタルを使用している。土被りは70m程度であり、局所的に風化部を呈した地質状況となっている。付着耐力の確認を目的として実施された現場引抜試験結果を図-2に示す。

当試験では、プレミックスモルタルの強度特性と付着耐力の相関について検討することを目的とし、2種類の定着材（早硬性モルタル、超速硬性モルタル）を比較した。なお、早硬性モルタルの材令は24時間（圧縮強度 19.6N/mm^2 ）、超速硬性モルタルの材令は3時間（圧縮強度 12.4N/mm^2 ）としている。試験結果より、プレミックスモルタルの圧縮強度と付着耐力に相関はあるが、補強鋼管の表面形状の違いによる影響のほうが大きいことが把握された。

図-3、図-4はトンネル掘削毎における縞付き鋼管の軸力計測結果および切羽鏡部前方地山の押出し変位量である。軸力計および前方変位計の位置は図-1に示す通りである。

縞付き鋼管に発生する最大軸力は6m掘進時での切羽以奥2mの位置において300kN程度となっている。接続部の耐力が340kN程度であることから、さらに軸力が大きくなる場合には本数を増やす必要性もあると考えられる。今回の条件下において縞付き鋼管は、接続部耐力程度まで軸力が発生しており、補強部材として効率的に地山挙動に抵抗できているものと考えられる。

切羽前方変位量については、最大押出し量が55mmであり、孔口から奥の計測地点ほど押出し変位が小さくなっていることから、鏡補強工が効果的にゆりみを抑制したものと考えられる。また、鏡補強工の軸力が最大値を示し低下した後に、変位が増大することが確認され、補強部材の発生軸力が変位抑制に大きく相関があると考えられる。

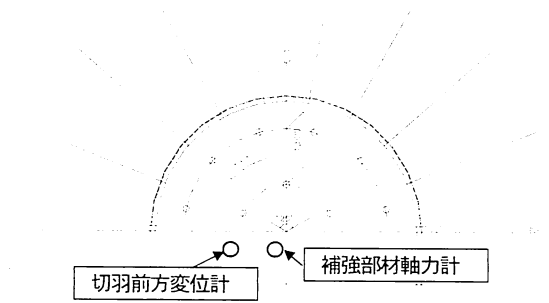


図-1 長尺鏡補強工配置図

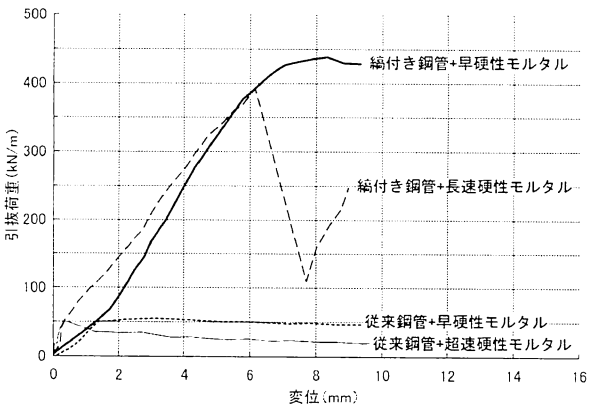


図-2 現場引抜試験結果

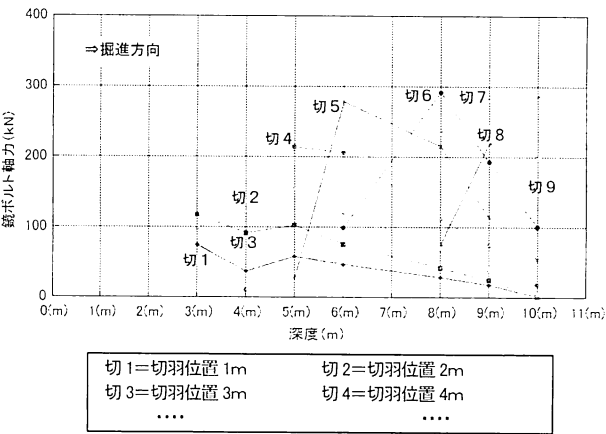


図-3 長尺鏡補強工の軸力と切羽深度の関係

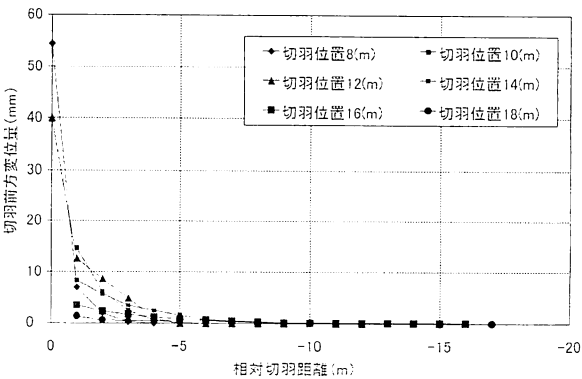


図-4 切羽前方変位量と相対切羽距離との関係

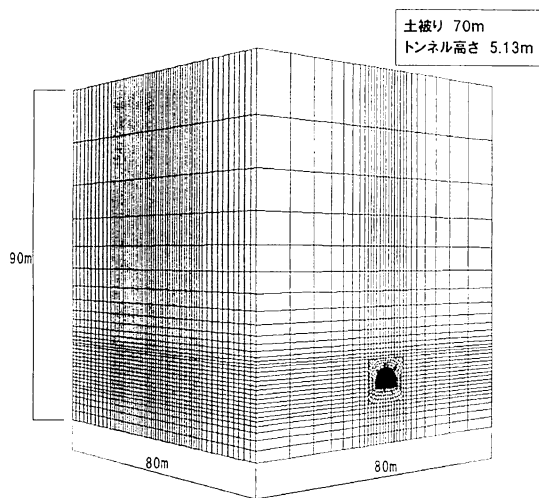


図-5 再現解析用モデル図

4. 数値解析による評価

(1) 再現解析

風化頁岩を対象に実施した編付き鋼管による長尺鏡補強工施工時の計測データについて数値解析により再現解析を行うものとした。なお、解析手法は補助工法の解析でも適用が多い「FLAC3D」を用いた。

再現解析は、長尺鏡補強工の軸力、切羽前方地山変位について行うものとする。図-5は再現解析を行った対象トンネルの解析モデル図である。再現解析で決定された地山の入力物性値は表-4の通りである。構成則はモール・クーロンである。変形係数以外の定数は、当トンネルにおいての設計用の地山定数を参照し、変形係数のパラメータスタディを実施した。また、編付き鋼管による長尺鏡補強部材の入力物性値は表-5の通りである。編付き鋼管は、軸方向の付着特性を考慮したCable要素によりモデル化を行った²⁾。付着特性については、バネとスライダーによりモデル化される。グラウトの付着特性については、バネ定数は付着剛性を示し、ある付着強度に達するとスライダーがすべり始める。Cable要素における付着剛性と付着強度は原位置において実施された補強部材の引抜試験における荷重－変位曲線から決定される。

図-6、図-7は長尺鏡補強工の軸力図、切羽前方変位量について再現解析結果および計測結果を比較したグラフである。軸力については解析結果においても300kN程度の値が発生している。解析結果においては、鏡補強工の残長が短くなると最大軸力は小さくなる傾向がみられる。計測事例は掘削初期において軸力が小さいが、この理由としては解析では鏡補強打設前の前方ゆるみの影響を評価していないこと等が考えられる。切羽前方変位については、計測結果と同様に切羽壁面に最大値が発生しており、切羽と奥に行くほど変位量は小さくなる傾向はみられる。また、解析結果において鏡補強工の残長が短くなると押し出し変位が大きくなることが確認できる。以上よ

表-4 地山入力物性値（再現解析結果）

単位体積重量 (kN/m^3)	19
弾性係数 (MN/m^2)	200
ポアソン比	0.3
粘着力 (kN/m^2)	10
内部摩擦角 ($^{\circ}$)	39

表-5 補強部材入力物性値（編付き鋼管）

単位体積重量 (kN/m^3)	7.8
弾性係数 (MN/m^2)	210 000
付着強度 (kN/m)	430
付着剛性 (MN/m^2)	63

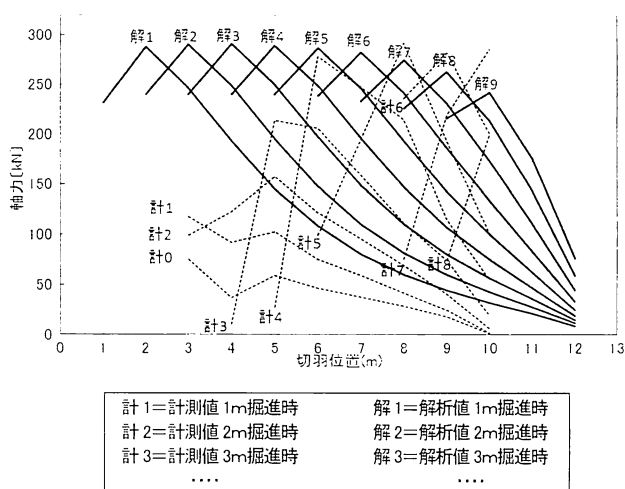


図-6 長尺鏡補強工の軸力（計測値、解析値）

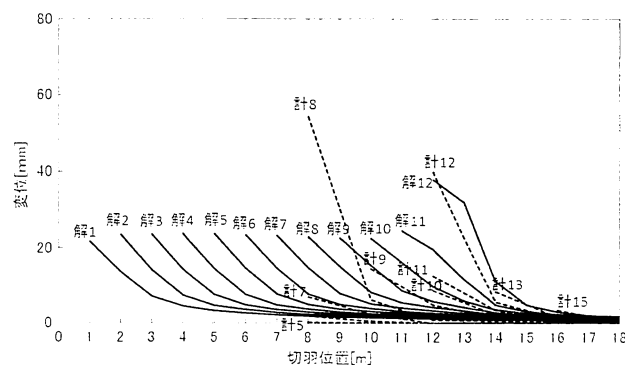


図-7 切羽前方変位量（計測値、解析値）

り今回、設定されたモデルはおおよそ軸力、前方地山変位について現場計測結果を再現できているものと思われる。

(2) 従来鋼管との比較解析

施工を実施した縞付き鋼管の効果について把握することを目的として、再現解析により設定された地山条件において、従来鋼管との比較解析を実施した。各長尺鏡補強工の配置パターンは図-1と同様である。従来鋼管の付着剛性、付着強度は原位置における引抜試験結果よりそれぞれ35MN/m/m、50kN/mとした。付着特性の比較を目的としているため、他の物性値については、縞付き鋼管と同様の値としている。

図-8は従来鋼管および縞付き鋼管における長尺鏡補強工の軸力分布図である。図中の×印は補強部材要素の付着切れ現象が生じていることを示す。従来鋼管は縞付き鋼管と比較し付着切れの発生がみられ、その結果、発生軸力値も小さく、最大値の発生位置も切羽以奥となっており、塑性領域の拡大が懸念される。

図-9はトンネル掘削時における地山の変位量の分布図である。従来鋼管を使用した場合は、縞付き鋼管に比較し、切羽鏡部に発生する変位量は2倍程度となっている。このことから、従来鋼管は付着切れによる摩擦抵抗力の低下により変位抑制効果が小さくなり、地質状況に応じて打設本数等を増やす必要があると考えられる。

以上より、縞付き鋼管は従来鋼管と比較し、高い付着耐力を有することにより付着切れの発生を抑制し、地山挙動に対して十分に補強部材の軸力で抵抗できることから、切羽の安定化効果が高いことが解析的に把握できた。

(3) 撤去管スリット部の照査

当工法は、掘削時において縦方向のスリットを設けた特殊な撤去管により鋼管と注入材を分別回収できる構造を特徴としている（図-10）。当工法の撤去管を先受け工として使用する場合や鏡補強として使用時にせん断方向の荷重が作用する場合は、縦方向の貫通スリットにより、スリット部の耐荷力が減少することが懸念された。そのため本検討では、縦スリットの影響を評価することを目的とし、縦スリットの有無による部材モデルの比較解析を行った。解析モデルは梁状とし、モデル内に鋼管が設置されており、モデルの中間点に集中荷重を作用させる。図-11に解析モデル図である。なお、鋼管内外のモデルについてはプレミックスモルタル($E=1\,000\text{MN/m}^2$)としている。解析ケースは、①補強鋼管無し、②縦スリット無鋼管、③縦スリット有鋼管（スリット位置A）、④縦スリット有鋼管（スリット位置B）の4ケースを設定した。図-12は各ケースの概要図である。

図-13は各ケースにおける集中荷重作用時の梁モデル

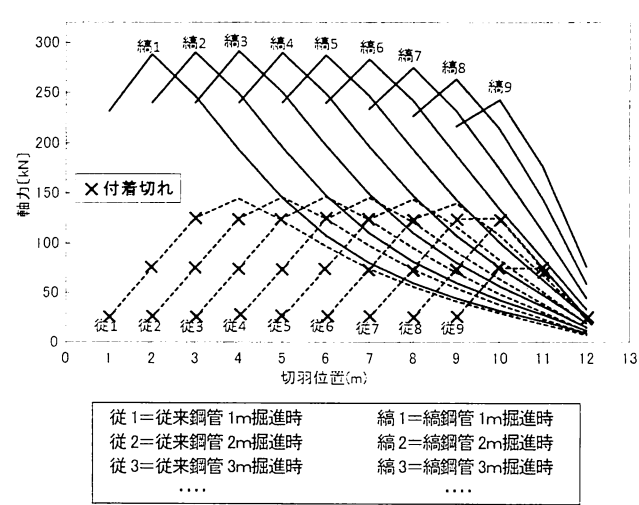


図-8 長尺鏡補強工の軸力（従来鋼管、縞付き鋼管）

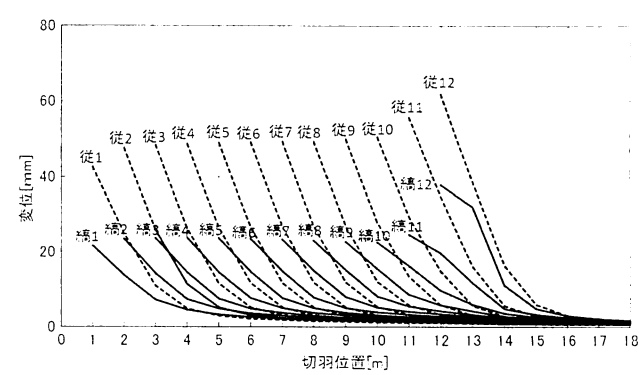


図-9 切羽前方変位量（従来鋼管、縞付き鋼管）

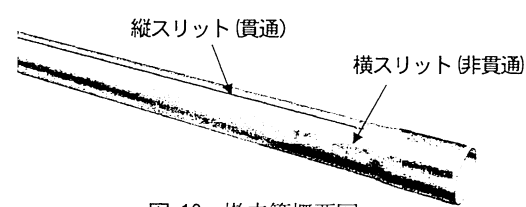


図-10 撤去管概要図

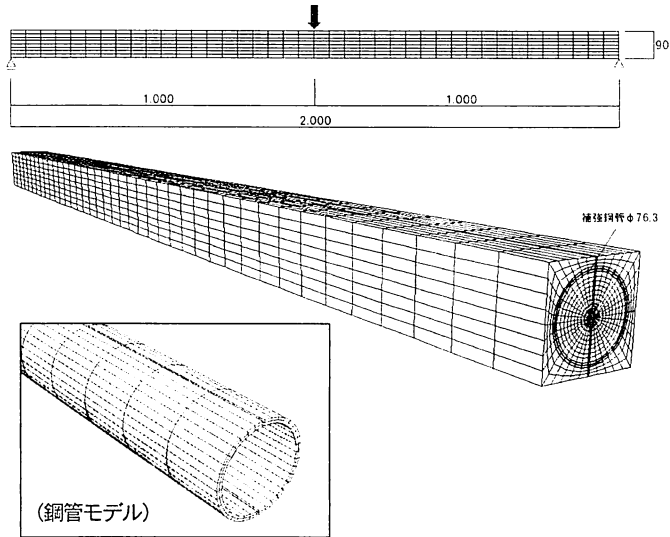


図-11 梁モデル図

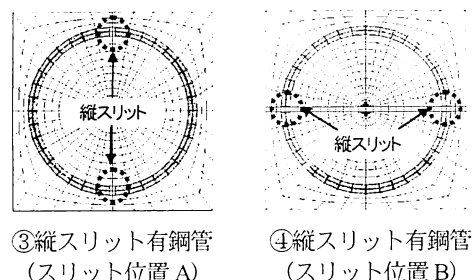
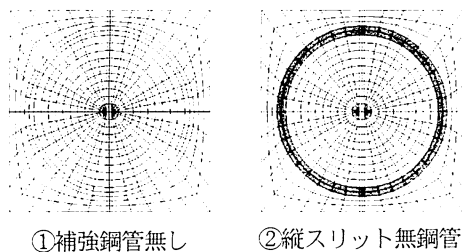


図-12 解析ケース

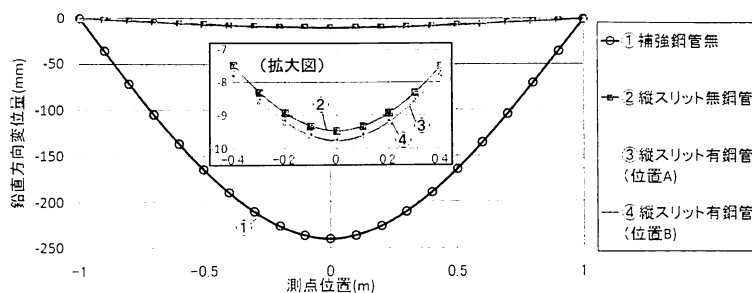


図-13 梁モデル鉛直変位量



図-14 鋼管主応力分布図

の変位量（鉛直方向）である。変位測定位置は梁モデルの天端位置としている。補強鋼管無しと比較し、補強鋼管が設置されているケース②～④は、変位量が小さくなっており、鋼管剛性による沈下抑制効果がみられる。縦スリットの有無および縦スリットの位置による差は殆どみられない。

図-14は荷重載荷時における鋼管の最大主応力分布図である。鋼管モデルに発生する最大主応力の最大値は、3ケースとも大きな差異はなく、縦スリットによる過度の応力集中はみられない。このことから、鋼管内に注入材が充填されていることを考慮した場合、縦の貫通スリットによる断面欠損の影響はほとんどないものと判断される。

5. まとめ

以上、付着耐力の向上を図った「縞付き鋼管」について現場への適用および計測、解析結果より以下の知見が挙げられる。

- ・室内および現場における引抜試験結果より、従来鋼管に比べ、「縞付き鋼管」の優位性が示された。注入材の強度による影響も付着耐力に相関があることが確認された。
- ・現場における縞付き鋼管による長尺鏡補強工の軸力および切羽前方地山変位の計測結果について解析モデルにより、ある程度再現することができた。
- ・再現解析結果に基づく地山モデルにおいて従来鋼管と縞付き鋼管の比較解析を実施し、縞付き鋼管は切羽安定効果が高いことが示された。
- ・分別回収を可能とした撤去管の縦スリットの断面欠損について解析的に検討した結果、縦スリットの有無による影響はほとんどないことが確認された。

参考文献

- 1) 横田泰宏, 伊達健介, 山本拓治: 縞付き鋼管による切羽補強工法の開発, トンネル工学報告集第 20 巻, pp.175-181, 2010.
- 2) Itasca: *FLAC3D Manuals, Structural Element*

Achievement and analytic evaluation of effect of face stabilization using steel tube with high bonding strength

Tadashi OKABE, Atsushi IMOTO, Yasuhiro YOKOTA, Kensuke DATE and Takuji YAMAMOTO

Recently, Various auxiliary method to prevent ground surface settlement and collapse of the face are widely and highly rated. We studied the pull-out test about the Long face reinforcement method developed for the axial direction bonding strength with grout materials until now. This report show evaluation of application to tunnel construction and measurement date of the tunnel face and axial force of the material, and 3D numerical analysis of effect of new face bolts.