

モルタル吹き付けによるトンネル補強の性能評価

PERFORMANCE EVALUATION OF THE TUNNEL REINFORCEMENT BY MORTAR SPRAYING

岩井 孝幸¹⁾・森 康雄²⁾・山本 忠典³⁾・戸上 郁英⁴⁾

Takayuki IWAI, Yasuo MORI, Tadanori YAMAMOTO and Ikuhide TOKAMI

In order to verify the performance of the method of construction sprayed mortar on the lining surface partially as flaking preventive measures of the established tunnel lining concrete which deteriorated, indoor experiment and examination are performed. Push out test was carried out using the concrete board sprayed the quick-setting polymer cement mortar of three centimeters in thickness, and FEM analysis was carried out on the basis of the test result. Moreover, the simple oscillating experiment was conducted supposing a train passing immediately after the construction in a business route, and change of the adhesion intensity of mortar was checked. Consequently, efficient construction is possible and it turns out that it is satisfactory also about safety and durability.

Key Words: flaking prevention, tunnel lining, push out test, spray mortar, FEM analysis

1. はじめに

近年、コンクリート剥落防止対策として様々な工法による補強工事が各所で実施されている。供用開始から数十年経過している鉄道トンネルにおいても覆工コンクリートの劣化が進行しており、コンクリートの剥落が懸念されている。筆者らは、供用中の鉄道トンネルの補強工事を想定し、覆工コンクリートの剥落による重大災害の防止を目的としたモルタル吹き付けによる補強工法の性能を室内実験および解析により検証した。

本論文は劣化した既設トンネル覆工コンクリートの剥落防止対策として、覆工表面への部分的なモルタルを吹き付け工法（吹き付け厚さ：3cm）の性能を確認するために実験・検討を行ったものである。

2. 概要

急結性のポリマーセメントモルタルを吹き付けるはく落防止工法の施工性、安全性、耐久性（短期、長期）について室内実験および解析をもとに検討を行った。

図-1に各種性能評価のフローを示す。

1) 施工性の確認

- 1) 正会員 (株) 熊谷組土木事業本部土木技術部
- 2) 正会員 (株) 熊谷組土木事業本部土木技術部
- 3) (株) 熊谷組土木事業本部土木設計部
- 4) (株) 熊谷組技術研究所建設技術研究部

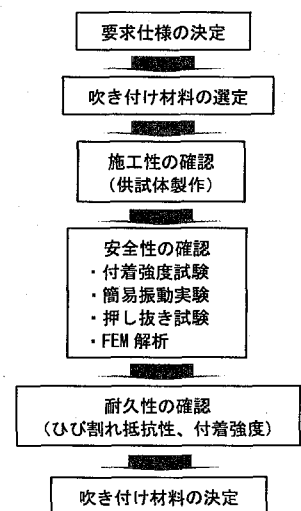


図-1 性能評価のフロー

一層あたりの限界吹き付け厚さ、コテ仕上げ性能、リバウンド率、施工速度等をもとに効率的なモルタル吹き付けの可能性を比較検討した。

2) 安全性の確認

営業している鉄道トンネルにおける施工では、列車通過に伴う振動、風圧力により吹き付けたモルタルの剥がれ、脱落など第三者への安全性を確保するために覆工コンクリートとモルタルの付着強度の経時変化を確認した。

3) 補強効果の確認

覆工コンクリートのはく落荷重に対する強度確認のために押し抜き強度試験を実施した。この試験結果をもとに、トンネル（円弧状の構造物）におけるモルタル吹き付けの耐荷力を三次元 FEM により解析した。

3. 施工性および安全性確認試験

3. 1 試験概要

供用中の地下鉄での工事を想定して、使用するモルタルは表-1 に示す要求性能を設定した。また、終電後から始発までの短時間内（2～3 時間を想定）での施工を考慮し、吹き付けモルタルはプレミックス材料とし、施工時の手間を極力単純化させる必要がある。さらに、施工完了後 2～3 時間後に始発電車が通過することを想定すると、電車通過による振動や風圧力の変化により弱材齢時にモルタルが肌落ちしたり、モルタル硬化後の既設覆工面との付着力低下に伴うはく落により第三者に被害を及ぼすことがあってはならない。

(1) 使用材料および配合

使用材料は表-2 に示すように市販されているポリマー系の断面修復材に急結剤等を加えたもの 2 種類（材料 A、B）および速硬性のセメントを用いたプレミックス材料 1 種類（材料 C）の合計 3 種類で試験を実施した。

(2) 試験方法

表-3 に試験項目および試験方法を示す。吹き付け施工試験はウォータージェットで目荒らしを施した 800^W×1000^L×80^Tmm の鉄筋コンクリート板にφ3.2mm の溶接金網を固定した後、上向き吹き付け（吹付厚=30mm）で実施した。押し抜き試験は圧縮試験機の上に吹き付け試験体を設置して、予め設けておいたコア部分を表-4 に示す条件で載荷した。またひび割れ抵抗性確認試験は 500^W×2000^L×60^Tmm の鉄筋コンクリート板にモルタルを吹き付けし、ひび割れの目視調査を実施した。

また、地下鉄シールドトンネルにおいて電車通過時の振動と風圧力の変化を測定して、その計測値をもとに簡易的な室内振動実験と数値的検討によりコンクリート板に吹き付けたモルタルの付着に与える影響について検討

表-1 吹き付けモルタル要求性能

項目	材齢	要求性能
圧縮強度	3 時間	0.1 N/mm ²
	28 日	21 N/mm ²
付着強度	3 時間	0.01 N/mm ²
	28 日	2 ～ 3 N/mm ²
ひび割れ抵抗性	3 ヶ月	0.3mm未満

表-2 使用材料

材料	材料の仕様
A	モルタル : 補修用吹き付け材（プレミックスタイプ）
	ポリマー : SBR 系ラテックス
	水 : 水道水
	急結材 : アルミン酸アルカリ系液体急結剤
	流動化剤 : メチロールメラミン系流動化剤
	プライマー : エチレン-酢酸ビニルエマルジョン
B	モルタル : ポリマーセメントモルタル（プレミックスタイプ）
	水 : 水道水
	急結材 : アルカリフリー液状急結剤
	養生剤 : 水性エマルジョン
C	結合材 : 高アルカリ型の速硬型特殊セメント
	砂 : 珪砂
	混和剤 : 遅延系凝結調整剤
	ポリマー : SBR 系ラテックス

表-3 試験項目

試験項目	試験内容（適用規格）	
材料試験	ブルアウト試験	JSCCE - G561
	圧縮強度試験	JIS A 1108
	付着試験	建研式
吹き付け施工試験	吹き付け性状の確認	吹き付け時のダレ、コテ仕上げ性状等目視調査
	リバウンド率の測定	リバウンド率＝（はねかえり材の全質量／吐出した材料の全質量）×100
押し抜き試験		押し抜き量と荷重の測定、破壊状況の確認等
ひび割れ抵抗性確認試験		ひび割れの目視調査および長さ、幅の測定

した。

3. 2 試験結果および考察

(1) 材料試験

表－5 に材料試験結果を示す。初期材齢（～6 時間）では材料 A が最も圧縮強度が大きく、次ぎに材料 B で、材料 C は最も小さい結果となった。材齢 28 日ではその逆となり、材料 C が最も圧縮強度が大きく、次ぎに材料 B、材料 A の順であった。これは材料 A、B は急結剤を混入していることから、28 日材齢時における強度の伸びが小さくなったことが原因と予想される。発現強度の傾向は材料 A、B と材料 C では違うものの、すべての材料で圧縮強度、付着強度ともに要求性能を満足した結果となった。

(2) 吹き付け施工試験

表－6 に吹き付け施工試験結果を示す。材料 A および B は一層吹き付けで 30mm を確保することが十分可能であった。しかし、材料 C は 30mm を確保するのに、2～3 層に分けて吹き付けを実施する必要がある（打設時の環境温度による）ことがわかった。また、吹き付け施工時のリバウンド率や吹き付け性状において、材料 B が最も優れており、材料 C および材料 A に関しては施工性の観点で改善の余地が確認された。

(3) 簡易振動試験

電車通過時のトンネル内の正圧力の最大値は 0.115kPa (11.5kgf/m²)、負圧力の最大値は-0.343kPa (-34.3kgf/m²) であり、トンネル覆工の最大加速度は、44.9gal で、トンネルの固有振動数は 60～70Hz 程度であった。

電車通過時のトンネル覆工に発生する最大加速度に、負圧力発生に伴い覆工表面に吹き付けたモルタルに負荷される

荷重を加速度に換算して合計した振動（約 600gal）を棒状パイプレータによりモルタルを吹き付けたコンクリート板に作用させた。モルタルの付着強度試験結果を表－7 に示す。

モルタル吹き付け 2 時間の加振開始時にも、モルタルの肌落ちやひび割れなど表面上の変状は認められなかった。また、時間の経過に伴う付着強度の低下は見られず電車の通過に伴う第三者に対する安全性は確保できる判断される。

(4) 押し抜き試験

押し抜き試験結果を表－8、押し抜き量と荷重の関係を図－2 に示す。この図からも確認できるように押し抜き試験において材料 A、B の試験体と材料 C の試験体では、試験体の破壊状況に違いが確認され、A、B の試験体

表－4 押し抜き試験条件

試験条件	
載荷速度	モルタル破壊前 0.2mm/min 剥離後 1.0mm/min
制 御	変位制御
測定項目	荷重（ロードセル） 変位（変位計）：試験機のストローク
データ取得頻度	変位 0.2mm 毎または 10kN 毎
剥離状況の観察	必要に応じて剥離範囲を測定（最大変位量 50mm） マーキングおよび写真撮影。

表－5 材料試験結果

		N/mm ²							
		1 時間	3 時間	6 時間	1 日	3 日	7 日	28 日	91 日
ブルアウト／ 圧縮強度試験	A	0.31	0.75	1.5	13.1	—	32.0	44.4	—
	B	0.23	0.37	0.97	13.2	26.9	28.4	47.0	—
	C	0.0	0.2	0.5	38.3	50.8	52.8	80.7	—
付着強度試験	A				—	(0.06)	2.60	2.78	—
	B				—	(0.03)	2.10	2.22	2.49
	C				—	(0.02)	2.46	3.50	—

() 内は推定付着強度：圧縮強度の 1/12

表－6 吹き付け施工試験結果

材料	フレッシュ性状		吹き付け性状				※2 リバウンド率
	フロー (スラン)	練上 温度 (°C)	※1 吹付 性状	最大 吹付厚 (mm/1 層)	吹付 速度 (m ² /hr)	コテ 仕上げ 性	
A	167x165	17	○	30	4.8	△	19.8
B	(125)	14.5	○	40	30.0	△	4.8※3
C	106x109	17	△	15		○	19.5※4

※1 吹き付け時のダレ、剥離状況 ○：良好、△：改善の余地あり

※2 リバウンド率＝（跳返材の全質量／吐出材料の全質量）×100（％）

※3 エア一量に対してモルタルの吐出量が小さく、単位時間あたりの吹付量が小さくなり、細骨材のリバウンドが目立った。（機械選定ミス）

※4 19.5％は吹き付け施工時に剥離したモルタルも含んでいる。

表－7 付着強度試験結果（単位：N/mm²）

7 日			28 日		
付着強度	破壊形態	平均値	付着強度	破壊形態	平均値
1.76	B1.35	0.81	B1.29 (1.79)		
1.40	B	0.78	B		
0.87	B	2.18	M		
		1.40	M		

B：基盤破壊

K：材料（モルタル）と基盤の界面破壊

M：材料（モルタル）

は剪断による破壊が支配的であり、Cの試験体は曲げによる破壊が支配的であると思われる破壊状況であった。また、材料Cの試験体は3層吹き付けで製作したが、各層の界面で剥離が確認されており、層打ちしたモルタル部が一体化されていないことが確認された。

(5) ひび割れ抵抗性確認試験

材料Cの試験体は材齢1日で最大0.5mm幅のひび割れが試験体長手方向に対し垂直方向に確認された。一方、材料A、B試験体では有害なひび割れは確認されなかった。

4. 補強効果の確認

モルタル吹き付け工法の強度試験結果を踏まえ、トンネル覆工の剥落防止対策として適用した場合の安全性をFEM解析を用いて検証する。

4. 1 検証方法

小型平板押抜き試験結果は、構造が直線形状であるが、本工法の適用を想定するトンネル壁面は曲線となる場合が多く、試験で得られた結果より危険側になると考えられる。ここでは、FEM解析を用いて、試験結果の検証と実構造物への適用を図-3に示すフローにしたがって検証を行った。

4. 2 解析モデルの検証と判定値の設定

押抜き試験で用いられた試験体は、コンクリート製小型平板にモルタルを吹き付けたものであったが、破壊に至る挙動は、コンクリート平板と吹き付けモルタルの付着力が大きく、一体構造としてせん断破壊が発生していた。したがって解析モデルは、特にコンクリート平板と吹き付けの間に境界要素などを考慮せず、図-4に示すモデルを作成した。

(1) 物性値

FEM解析に用いた物性値を表-8に示す。

	弾性係数 N/mm ²	ポアソン比
吹付け材料	2.01×10^4	0.2
本体材料	3.50×10^4	0.2
鉄筋	20.0×10^4	0.3

(2) 解析ケース

試験結果に対する解析は、荷重が作用する

表-8 押し抜き試験結果

材料	補強筋	モルタル吹付厚	最大荷重値 (kN)	最大変位量 (mm)	応力※ (N/mm ²)
A	溶接金網 φ3.2mm	30mm	29.2	0.62	1.65
B	溶接金網 φ3.2mm	30mm	38.0	1.28	2.15
C	溶接金網 φ3.2mm	30mm	32.2	0.56	1.82

※応力=最大荷重値/コア部の底面積

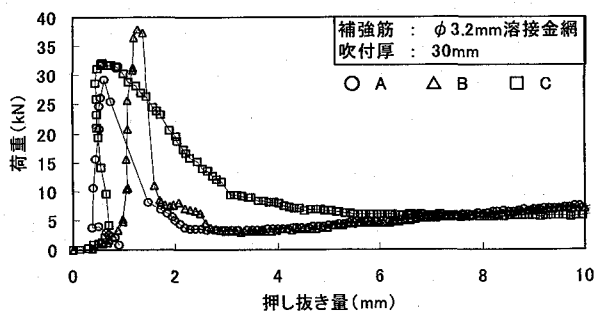


図-2 押し抜き量と荷重の関係

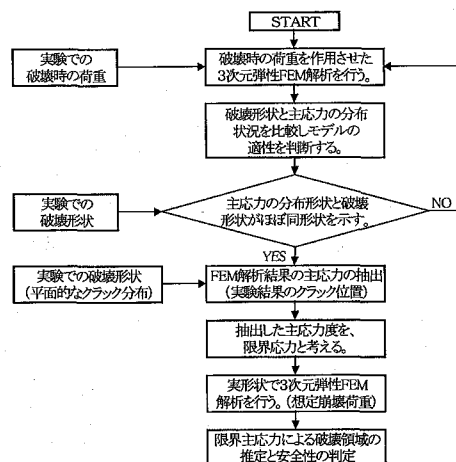


図-3 解析検証フロー図

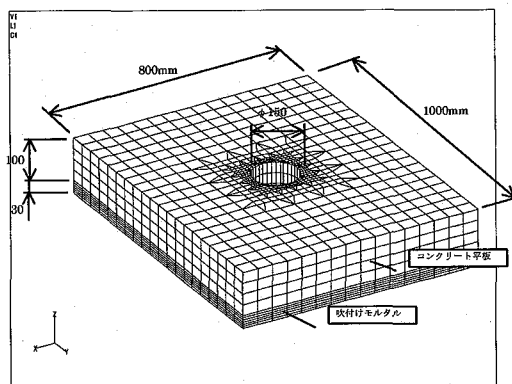


図-4 押抜き試験解析モデル図

載荷範囲の影響と鉄筋の影響を把握するため、
表－9に示すケースを行った。

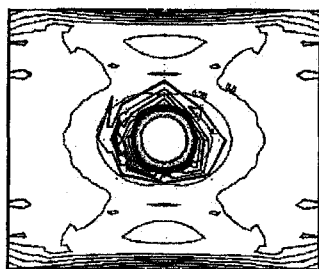
表－9 解析ケース

	荷重載荷方法	鉄筋のモデル化
Case1	載荷断面全体に等分布	鉄筋をモデル化しない。
Case2	断面周長部分に等分布	鉄筋をモデル化しない。
Case3	載荷断面全体に等分布	鉄筋をモデル化する。

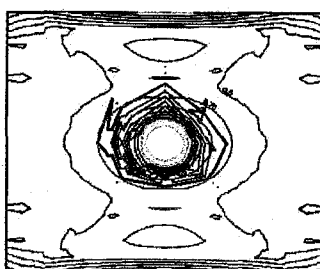
(3) 解析結果の評価

解析結果は、モデル下面の主応力値と押抜き試験の破壊面が一致する場所より評価を行った。(図－5～図－7参照) Case1,2の結果は、最も外側のクラック線と発生主応力の 0.75N/mm^2 (引張応力) のコンターラインがほぼ同じ位置である。また、Case3の結果からは、同様の線が発生応力の 1.00N/mm^2 (引張応力) のコンターラインとほぼ同じラインとなる。これは、鉄筋の効果により約 30%引張強度が増加したことを示している。また、荷重載荷方法の違いによる解析結果に大きな違いがなく、鉄筋の効果による主応力コンターは、値こそ違うものの分布形状に大きく差異はないことが判った。

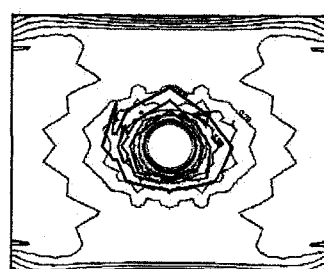
以上のことから、実構造物への適用は最も簡素な Case1 のモデルを採用し、主応力(引張り応力)が 0.75N/mm^2 以上発生した場合を危険領域と判断することとした。



図－5 解析結果(case1)



図－6 解析結果(case2)



図－7 解析結果(case3)

4. 3 実構造物への適用

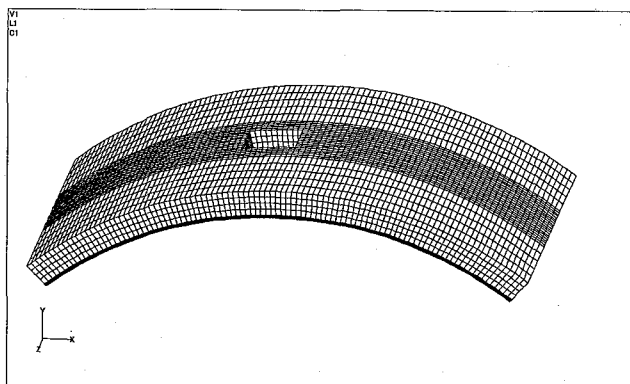
実構造物への適用として、半径 4 m、覆工厚 25cm のトンネルにモルタル吹き付け工法 ($t=30\text{mm}$)を採用し、覆工が $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ で剥落した場合を想定した。解析モデルを図－8に示す。

(1) 物性値

解析モデルに用いた物性値を表－10に示す。

表－10 FEM 解析に用いた物性値

	弾性係数 N/mm^2	ポアソン比
吹き付け材料	2.01×10^4	0.2
本体材料	3.50×10^4	0.2



図－8 解析モデル図

(2) 解析結果の評価

解析結果を図－9に示す。これによると、主に剥落部周辺に引張り応力が発生した。剥落部の周辺部における発生主応力は、吹き付け面上側で最大 0.2N/mm^2 、下面(内側) 0.26N/mm^2 であり、限界応力と考えられる 0.75N/mm^2 に対し、約 1/3 の値となった。したがって、 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ の剥落荷重では吹き付けモルタルは、破壊に至らないと考えられる。

5. まとめ

今回供用中の鉄道トンネルの補強を想定し、各種性能試験を実施したが、材料Bが材料物性および施工性等の

観点から最適な材料であることがわかった。仮に材料Bを使用し、吹き付け補強をした場合、最大押し抜き荷重は 38.0kN 程度になることが確認された。

また、モルタル吹き付け 2～3 時間後に電車が通過することに振動や風圧力によるモルタルの肌落ちやひび割れなど表面上の変状は認められず、時間の経過に伴う付着強度の低下もなく、電車の通過に伴う第三者に対する安全性が確保されることがわかった。

さらに、本工法は、コンクリート剥落が比較的小さな場合に有効であることが、解析から検証できた。今後は、アーチ形状の違いや剥落の大きさによる吹き付け工法の安全性について確認する必要があると考えられる。

参考文献

吉川和行、小島芳之、六車崇司：FRP によるトンネル覆工剥落対策工への適用性評価 鉄道総研報告 (RTRI REPORT Vol.16 No.3, 2002.3)

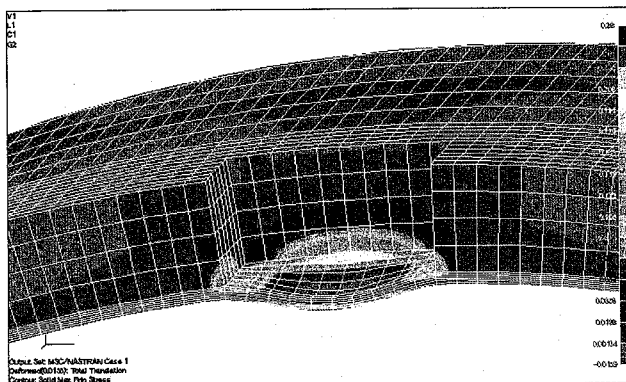


図-9 解析結果