

論文 覆工の損傷を想定したトンネル用吹付け耐火被覆材のはく落防止性能の実験的検証

谷辺 徹^{*1}・鎌田 亮太^{*2}

要旨： 笹子トンネル天井板落下事故の被害を受け、覆工体が変形や損傷を受けた際の吹付け耐火被覆材のはく落性状を曲げ疲労試験と押し抜き試験にて実験的に検証した。その結果、吹付け耐火被覆材は覆工体とともに変形、ひび割れが発生し、200万回の曲げ疲労試験後も付着強さが保持されていた。押し抜き試験では、ひび割れ発生後もはく落防止用メッシュによりはく落の発生はなく、押し抜き試験後の付着強さも保持されていた。これより、吹付け耐火被覆材は優れたはく落防止性能を有していることが確認できた。また、表層部に設置したガラス繊維メッシュは、かえって表層部のはく落を誘発する可能性があることも確認できた。

キーワード： 耐火被覆材, 吹付け, トンネル, はく落, 曲げ疲労試験, 押し抜き試験, 付着強さ

1. はじめに

トンネル用吹付け耐火被覆材には、はく落防止性能が要求性能の一つとして強く求められ、車両通行時に発生する動風圧に対する抵抗性の検証が行われている。吹付け耐火被覆材は、はく落防止用の金属製メッシュなどを内在させることや表層部に繊維製メッシュを設置することで、はく落防止性能が付与されている。筆者らは、吹付け耐火被覆材の付着が全くない状態で200万回の動風圧試験を実施し、はく落防止用のステンレスメッシュのみで十分なはく落防止性能を有していることを報告¹⁾している。しかし、2012年12月の笹子トンネル天井板落下事故の被害を受け、吹付け耐火被覆材には、さらなるはく落防止性能の検証が求められている。このため、覆工体の変形や損傷を受けた際の吹付け耐火被覆材のはく落性状について、曲げ疲労試験と押し抜き試験を適用して実験的に検証を行った結果を報告する。

2. 吹付け耐火被覆材のはく落防止工法の概要

吹付け耐火被覆材のはく落防止工法の一般的なイメージを図-1に示す。コンクリート覆工面に、はく落防止用メッシュが耐火被覆材の厚み方向の中央部となるようにあと施工アンカーなどを用いて所定のピッチで固定される。はく落防止用メッシュが設置された状態で、耐火被覆材が吹付け施工され耐火被覆層が構築される。

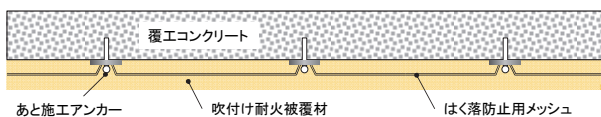


図-1 吹付け耐火被覆材のはく落防止工法概要図

3. 曲げ疲労試験

3.1 試験概要

(1) 曲げ供試体の概要

曲げ供試体の概要を図-2に示す。断面寸法150mm角、長さ1500mmの高強度コンクリートを適用したRCはりには、SD295の鉄筋を配置した。使用したコンクリートの配合を表-1に、強度特性を表-2に示す。

吹付け耐火被覆材には、パーミキュライト配合軽量モルタルを用いた。吹付け耐火被覆材の一般特性を表-3に示す。吹付け耐火被覆材は、実績の多い厚さ30mmにて施工した。なお、供試体は、表-4に示すはく落防止用メッシュを設置したType1と設置しないType2ならびに付着強さ試験基準用の3種類を作製した。はく落防止用メッシュは、形状が格子状（格子間隔：50mm、線径1.6mm）で、材質がステンレス製のものを用いた。はく落防止用メッシュの外観およびメッシュ固定位置を写真-1に示す。はく落防止用メッシュは、芯棒拡張式のあと施工アンカー（φ4mm、引抜き耐力2,880N）を用いてコンクリートに固定した。

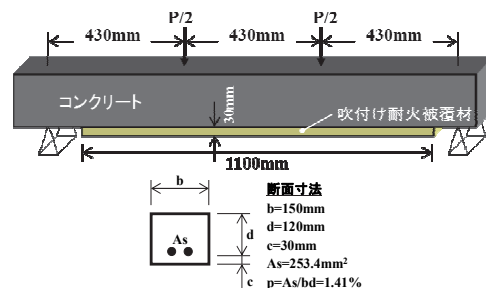


図-2 曲げ供試体概要図

*1 太平洋マテリアル（株）開発研究所 博士（工学）（正会員）

*2 太平洋マテリアル（株）開発研究所 修士（正会員）

表－1 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	Sg	S	G	SP
20	2	35	45	135	193	193	893	1044	1.2

W 水
 C 普通ポルトランドセメント
 Sg 高炉スラグ末粉末 密度=2.89g/cm³, 粉末度=4,000cm²/g
 S 静岡県小笠産陸砂 表乾密度=2.60, 吸水率=1.42%
 G 岩瀬産砂岩砕石 5号6号混合 表乾密度=2.65, 吸水率=0.62%
 SP ポリカルボン酸系高性能減水剤

表－2 コンクリートの強度特性

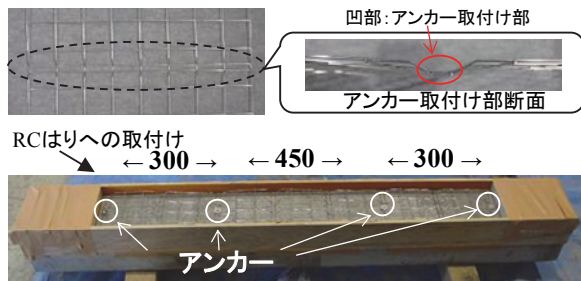
圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
74.1	36,833

表－3 吹付け耐火被覆材の一般特性

単位容積 質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
700~800	2.3	1.2	2,200

表－4 供試体種類

種類	はく落防止用メッシュ	試験種類
Type1	あり	曲げ疲労試験
Type2	なし	付着強さ試験
基準	なし	無負荷付着試験

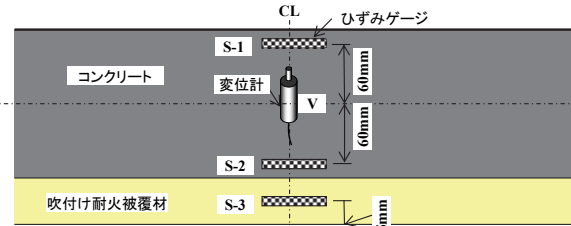


写真－1 はく落防止用メッシュの外観と設置例

(2) 試験方法

曲げ試験は、図－2 に示すとおりスパン 1100mm の 3 等分点 2 点載荷とした。また、曲げ供試体の変形挙動を把握するため、図－3 に示すとおり、供試体にひずみゲージおよび変位計を設置した。試験は、RC はりに対する耐火被覆材の変形追従性を確認するため、まず、弾性変形範囲内の載荷荷重 10kN までの静的曲げ試験を実施した。その後、上限荷重 25kN, 下限荷重 2.5kN にて 200 万回の曲げ疲労試験を実施した。上限荷重は鉄筋コンクリートの疲労を考慮した許容応力度として、鉄筋に導入される応力が 160MPa を上限荷重として設定した。また、荷重の波形は sin 波とし、振動数を 3Hz とした。

なお、曲げ疲労試験後に供試体のひび割れ観察ならびに吹付け耐火被覆材の付着強さの測定を行い、無負荷の基準供試体の付着強さとの比較を行った。付着強さ試験は、JIS A 6909「建築用仕上塗材」の付着強さ試験の手順を参考に、吹付け耐火被覆材に 40mm 角となる様にコンクリートに達する切り込みを入れ、建研式のアタッチメントを接着剤で貼り付けて十分に硬化した後、日本建築工学会認定の引張試験機を用いて測定した。

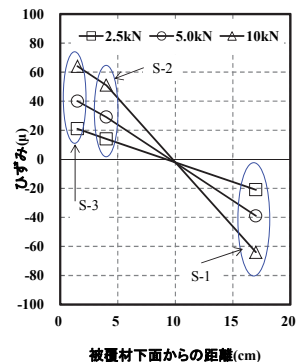
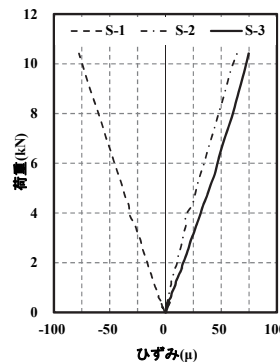


図－3 ひずみゲージと変位計設置位置

3.2 試験結果

(1) 静的曲げ試験

Type1 の 10kN までのスパン中央部の荷重－ひずみの関係と断面内のひずみ分布を図－4、図－5 に示す。荷重－ひずみ関係、断面内ひずみ分布ともに直線性を示し、吹付け耐火被覆材とコンクリートが一体となって曲げ変形していることが確認された。



図－4 荷重－ひずみ関係 図－5 断面内ひずみ分布

(2) 曲げ試験疲労試験

200 万回疲労試験後の曲げ供試体の状況を写真－2, 写真－3 に示す。はく落防止用メッシュの有無に関わらず吹付け耐火被覆材にコンクリートと同様な曲げひび割れが確認されたが、はく離、はく落は認められなかった。また、図－6 に示した付着試験位置にて付着強さ、破断モードを測定した結果を表－5 に示す。Type1 は基準供試体と同等の付着強さを示したが、Type2 は付着強さが 30%程度低下した。また、基準と Type1 の破断モードは被覆材内が高い割合を示すが、Type2 はコンクリートとの界面が高くなる傾向を示した。

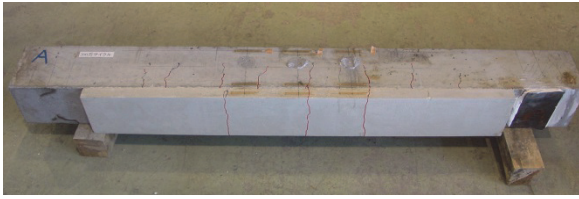


写真-2 疲労試験後の供試体状況 (Type1)

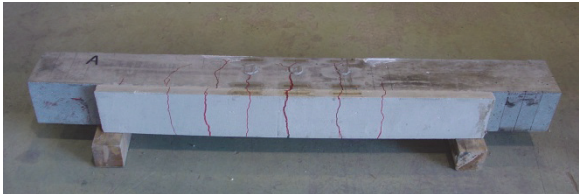


写真-3 疲労試験後の供試体状況 (Type2)

た。使用したガラス繊維メッシュの外観ならびに仕様を写真-6、表-7に示す。なお、吹付け耐火被覆材も3章と同様にパーミキュライト配合軽量モルタルを用いた。



写真-4 基板コンクリート

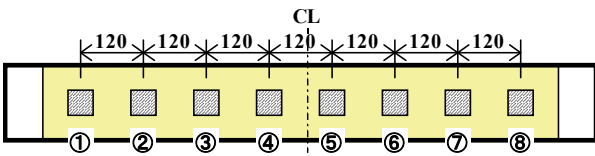


図-6 付着強さ試験位置

表-5 付着強さ試験結果

種類	付着強さ (N/mm ²)	破断モード*
Type1	0.30	A75:B25
Type2	0.21	A25:B75
基準	0.31	A80:B20

*) A:被覆材内, B: コンクリート/被覆材界面

表-6 供試体種類

種類	メッシュ	断面位置	供試体数	試験種類
N	なし	-	3	押し抜き試験 付着強さ試験
			1	無負荷付着強さ 試験
ST	ST	中央	3	押し抜き試験 付着強さ試験
ST-G1	ST	中央	2	押し抜き試験 付着強さ試験
	G	表層1mm		
ST-G5	ST	中央	1	押し抜き試験 付着強さ試験
	G	表層5mm		

注) ST: ステンレスメッシュ, G: ガラス繊維メッシュ

3.3 曲げ疲労試験結果のまとめ

吹付け耐火被覆材はコンクリートと一体となって曲げ変形することが確認された。また、はく落防止用メッシュの有無に関わらず、200万回後においても、はく離はく落および付着強さの顕著な低下が認められず、優れたはく落防止性を有していることが確認された。

4. 押し抜き試験

4.1 試験概要

(1) 押し抜き供試体の概要

JIS A 5372 (プレキャスト鉄筋コンクリート製品) 付属書5に規定されるU形ふた(呼び名1種 300, 400×600×60mm)に厚さ35mmの吹付け耐火被覆材を設置して供試体とした。基板コンクリートの外観を写真-4に示す。また、供試体種類は、表-6に示すとおり、吹付け耐火被覆材に内在させるはく落防止用メッシュや表層部に伏せ込むガラス繊維メッシュの効果ならびにガラス繊維メッシュを伏せ込む深さの影響を確認することを目的に4種類とした。供試体の外観を写真-5に示す。はく落防止には、3章と同様にステンレスメッシュを設置し

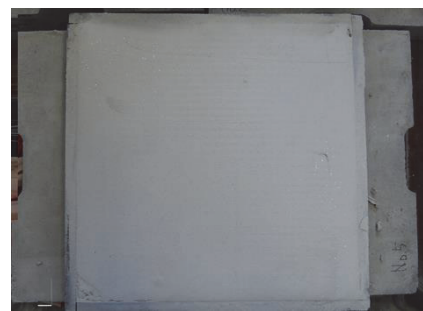


写真-5 吹付け耐火被覆材施工後 (ST-G5)

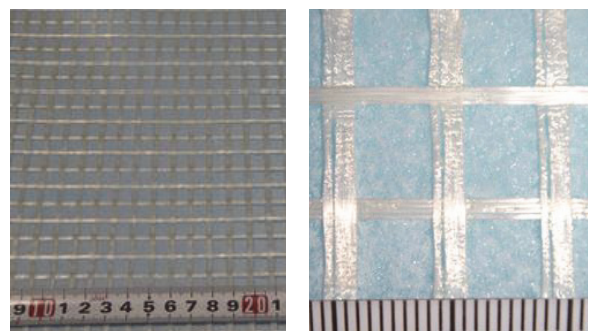


写真-6 ガラス繊維メッシュ外観写真

表-7 ガラス繊維メッシュの仕様

質量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 (N/25mm)	目間隔 (mm)
150	0.35	400 以上	10×10

(2) 試験方法

押し抜き試験は、NEXCO 試験法 734-2011「トンネルはく落防止用繊維シート接着工の押し抜き試験方法」²⁾に準じた。押し抜き試験は、スパンを 500mm とし、コア中央部を変位 2mm まで 0.2mm/分、2mm から 50mm まで 1.0mm/分の速度で载荷した。本試験の最大変位を 50mm とし、押し抜き耐力を保持していても変位 50mm で試験を終了とした。写真-7 に試験状況を示す。本試験では、荷重-変位の関係、最大押し抜き耐力、ひび割れ発生状況観察、吹付け耐火被覆材はく落重量の測定ならびに付着強さ試験を実施した。なお、押し抜き試験後の付着強さ試験は、曲げ疲労試験後の付着強さ試験と同様な手順で行い、付着強さ測定位置は、円形に発生したひび割れの外側の 4 箇所とした。

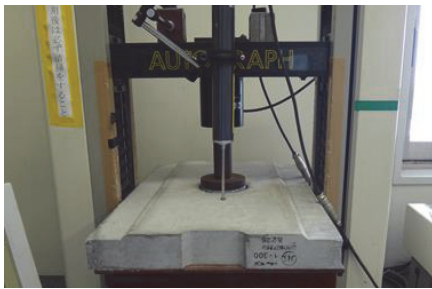


写真-7 試験状況

4.2 試験結果

(1) 荷重-変位の関係

荷重と変位の関係を図-7～図-10 に示す。ST-G1 供試体は変位 2mm ごとに载荷を停止して状況観察を行った。何れの供試体も 5000 から 6000N の荷重でシーリング材によるコアの固定が切れることが確認された。N 供試体は、コアの固定が切れると同時に吹付け耐火被覆材に貫通ひび割れが発生して耐力を失った。その他の供試体は、ステンレスメッシュによるはく落抑制効果が認められ、コアの固定が切れた後も変位 50mm まで押し抜き耐力を保持していた。ここで、変位 50mm 時点の荷重を最大押し抜き耐力とした。各供試体の最大押し抜き耐力を表-8 に示す。N 供試体以外は、同様な荷重-変位曲線と最大押し抜き耐力(約 5000N)を示し、ガラス繊維メッシュの効果は認められなかった。これは、ガラス繊維メッシュの押し抜き耐力への影響は、ステンレスメッシュに比べてはるかに小さいためと考えられる。

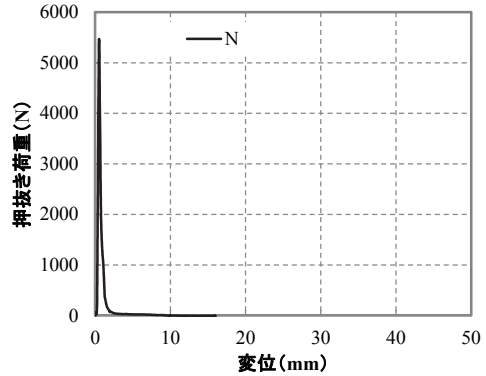


図-7 荷重と変位の関係 (N 供試体)

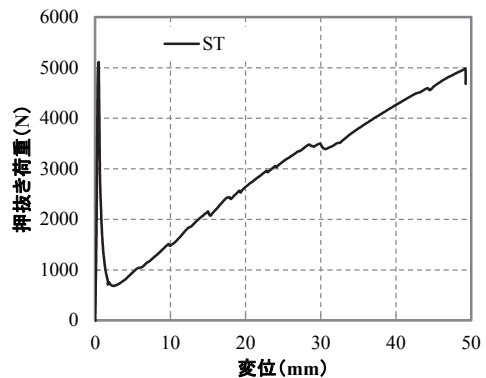


図-8 荷重と変位の関係 (ST 供試体)

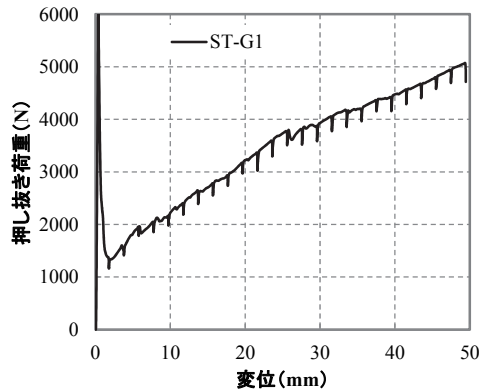


図-9 荷重と変位の関係 (ST-G1 供試体)

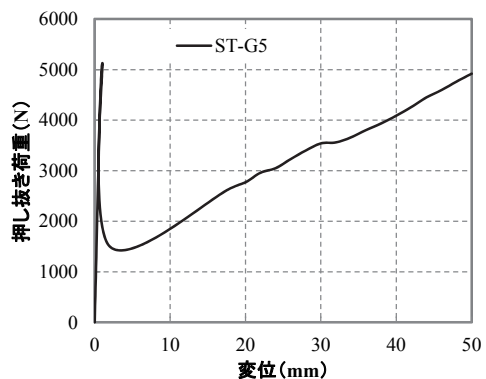


図-10 荷重と変位の関係 (ST-G5 供試体)

表-8 押し抜き耐力

種類	最大押し抜き耐力 (N)	最大押し抜き耐力時変位(mm)
N	—	—
ST	4878	50
ST-G1	5085	50
ST-G5	4920	50

(2) 試験状況観察およびはく落重量


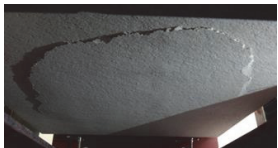
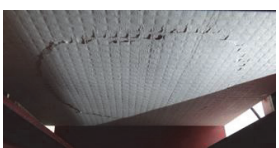




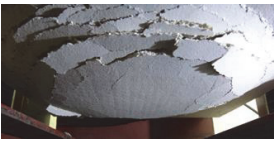
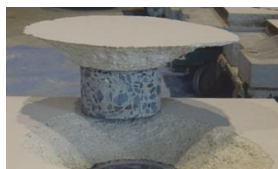



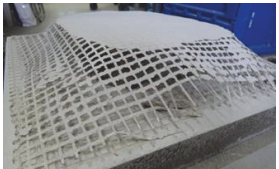
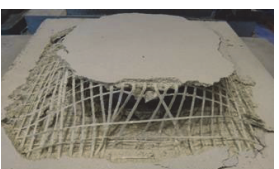
試験状況の観察結果およびはく落重量の測定結果を表-9に示す。また、押し抜き試験状況を表-10に示す。

当然ではあるが、はく落防止対策を実施しない場合、吹付け耐火被覆材は覆工コンクリートの落下に対するはく落防止性能を殆ど有していないことが確認された。しかし、ステンレスメッシュを設置することで押し抜き耐力が変位 50mm まで保持され、覆工コンクリートの落下に対するはく落防止性能が付与されていることが確認された。ガラス繊維メッシュを吹付け耐火被覆材の表層部に伏せ込む対策では、深さ 5mm に伏せ込んだ場合にひび割れ発生変位を若干遅らせる傾向は認められたが、押し抜き耐力の向上に効果は認められなかった。また、伏せ込む深さを深くすると、引っ張られたガラス繊維メッシュにより表面側の被覆材がはく離し、かえって表層部のはく落を誘発する可能性があることが確認された。

表-9 観察結果およびはく落重量

種類	はく落重量(g)	観察結果
N	2	1mm 変位でひび割れが発生すると同時に、押し抜き耐力を失った。ひび割れ発生時に若干の欠け落ちが発生した。なお、はく落重量を 2g としたが、実際はコア全体がはく落したと推察される。
ST	6	約 10mm 変位でひび割れが発生した後も、ステンレスメッシュにより押し抜き耐力を変位 50mm まで保持した。若干の欠け落ちが発生した。
ST-G1	6	約 10mm 変位でひび割れが発生した後も、ステンレスメッシュにより押し抜き耐力を変位 50mm まで保持した。変位が進行すると共にガラス繊維メッシュが表層部より抜け出し、若干のはく落が発生した。
ST-G5	173	約 20mm 変位でひび割れが発生した後も、ステンレスメッシュにより押し抜き耐力を変位 50mm まで保持した。変位が進行すると共にガラス繊維の抜け出しと表層側の吹付け耐火被覆材のはく落が発生した。

表-10 押し抜き試験状況写真

N 供試体	ST 供試体	ST-G1 供試体	ST-G5 供試体
			
【ひび割れ発生】	【ひび割れ発生】	【ひび割れ発生】	【ひび割れ発生】
			
【試験終了後 1】	【押し抜き耐力時】	【ガラス繊維抜け出し】	【はく落発生前】
			
【試験終了後 2】	【試験終了後】	【押し抜き耐力時】	【押し抜き耐力時】
			
		【試験終了後】	【試験終了後】

(3) 付着強さ

N 供試体で押し抜き試験を実施していない無負荷条件の付着強さ試験を実施した。この無負荷条件の付着強さを基準に各供試体の押し抜き試験後の付着強さを比較した。付着強さ、破断モードを測定した結果を表-11 に、付着試験状況を写真-10 に示す。

付着強さを測定した結果、何れの供試体においても無負荷の供試体と同等の値を示し、押し抜き破壊が発生した外側の吹付け耐火被覆材に顕著な付着強さの低下は認められなかった。

表-11 付着強さ試験結果

種類	付着強さ (N/mm ²)	破断モード
N 無負荷 (基準)	0.32	A100
N	0.25	A57:B43
ST	0.29	A92:B8
ST-G1	0.42	A100
ST-G5	0.31	A86:B14

*) A:被覆材内, B: コンクリート/被覆材界面

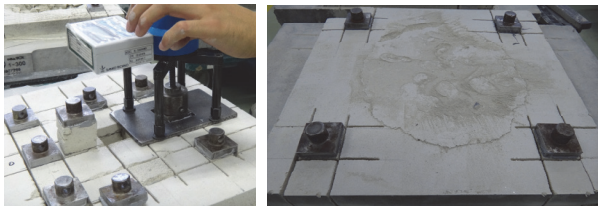


写真-10 付着強さ試験状況

4.3 押し抜き試験結果のまとめ

ステンレスメッシュを設置することで押し抜き耐力が変位 50mm まで保持され、覆工コンクリートの落下に対するはく落防止性能が付与されていることが確認された。また、ステンレスメッシュの効果により、最大押し抜き耐力も 5000N 程度の高い値を示し、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)編著のト

ンネル施工管理要領(平成 25 年 7 月)の基準試験に示される繊維接着系工法によるはく落対策の規定値³⁾(荷重 0.7kN, 変位 50mm 以下)と比較しても十分な性能を有していることが確認された。さらに、押し抜き試験後の付着強さ試験においても、押し抜き破壊周辺の付着強さの低下は認められず、周辺への影響も少ないことが確認された。なお、ガラス繊維メッシュの設置は、深さ 5mm に伏せ込んだ場合にひび割れ発生変位を若干遅らせる効果は認められたが、押し抜き耐力の向上に効果は認められなかった。また、伏せ込む深さを深く(5mm)すると、かえって表層部のはく落を誘発する可能性があることが確認された。

5. まとめ

トンネル用の吹付け耐火被覆材の覆工体の変形や損傷に対するはく落防止性能を検証することを目的に RC はりの曲げ疲労試験と押し抜き試験を適用して実験的に検証を行った。その結果、覆工体が損傷を受ける程度の変形や覆工の落下が生じる状況となっても、吹付け耐火被覆材は覆工体と一体となって変形するとともに、設置したステンレスメッシュの効果により、ひび割れが発生してもはく離、はく落は、最小限の範囲に収まり、付着強さの顕著な低下が生じず、覆工体の損傷に対しても優れたはく落防止性能を有していることが確認された。

参考文献

- 1) 菊地弘悦, 谷辺徹, 清宮理: トンネル用吹付け軽量モルタル耐火被覆材の動風圧に対するはく落防止設計法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1859-1864, 2010.
- 2) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): トンネルはく落防止用繊維シート接着工の押し抜き試験方法, NEXCO 試験法 734, 第 7 編トンネル関係試験方法, pp.47-48, 2011.
- 3) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): トンネル施工管理要領(本体工編), p.14, 平成 25 年 7 月.