

論文 トンネル覆工における繊維補強吹付けコンクリートの補強効果に関する実験的研究

清水 陽一郎^{*1}・田中 徹^{*2}・新谷 壽教^{*3}・真下 英人^{*4}

要旨：本研究では、山岳トンネルにおいて、上部からの緩み荷重によって損傷した既設トンネル覆工への補強材として、ポリプロピレン繊維を混入した繊維補強コンクリートに着目し、トンネル内面に吹付けることで得られる補強効果と適用性の確認を目的に、実大試験体による載荷実験および非線形 FEM 解析による耐荷力の評価を行った。その結果、トンネル頂部からの荷重が卓越する場合、吹付け厚さ 15cm（解析結果等によると 10cm 程度）で損傷前の覆工コンクリートの耐荷力と同等以上になることが確認できた。

キーワード：繊維補強, 吹付けコンクリート, トンネル, 耐荷力

1. はじめに

老朽化したトンネルが増大する中で、維持管理を効率的に進めていく必要がある。対策として、損傷が発生し、特に内空断面に余裕がない既設トンネルに対して適切な補強を行うことができる補強材料および補強工法の開発が必要である。

本研究では、補強材料としてポリプロピレン繊維を混入した繊維補強コンクリートを用いることとし、本補強材料をトンネル内面に吹付けることで得られる補強効果と適用性を確認することを目的として、実大試験体による載荷実験および非線形 FEM 解析による耐荷力の評価を行った。本文ではその結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 覆工載荷実験

繊維補強吹付けコンクリートの補強効果と適用性を確認するため、覆工載荷実験を行った。

本実験に用いる載荷装置を写真-1に、載荷実験の概要を図-1にそれぞれ示す。荷重の載荷位置や、ひび割れの発生等について説明を加えるため、座標系を右側の脚部を 0°、天端部を

90°、左側の脚部を 180°と設定した。

本実験に用いる覆工試験体は、2車線道路トンネルを模擬した半円形で外径 9.7m である。



写真-1 載荷装置

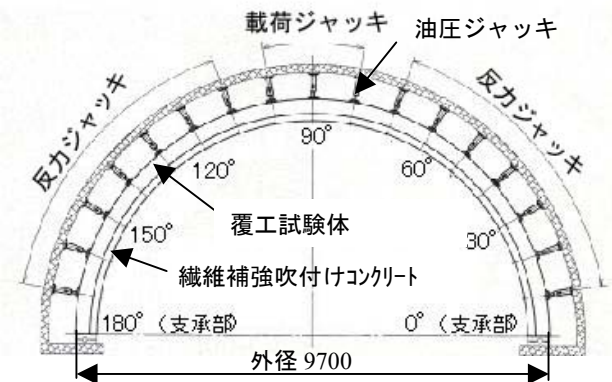


図-1 載荷実験の概要図

*1 戸田建設(株) 環境ソリューション部 工修 (正会員)

*2 戸田建設(株) 環境ソリューション部 主管 工修 (正会員)

*3 西松建設(株) 技術研究所土木技術研究課 係長 工修 (正会員)

*4 独立法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル) 上席研究員 工博

載荷形式は、長期の緩みに起因するトンネル上部からの荷重等に代表される緩み荷重を実験にて模擬した。具体的には、天端部の80°、90°、100°の3箇所の載荷ジャッキにてトンネル中心方向に載荷した。この載荷形式により無垢(損傷が発生していない)の覆工試験体には軸力の影響が大きく現れ、天端外面、肩部分の内面の一部に曲げモーメントが集中して発生することが報告されている¹⁾。

2.2 実験ケース

(1) 損傷載荷

無垢の覆工試験体に、ひび割れや圧壊等の損傷が発生するまで載荷を行い、荷重が耐荷力(最大荷重)の95%程度まで低下した時点で除荷する一連の載荷を損傷載荷とした。損傷載荷により、無垢の覆工試験体の耐荷力および破壊形態を把握することができると共に、損傷が発生したトンネル試験体を模擬することができる。損傷載荷は、覆工試験体の材齢14日目に行うこととした。

(2) 補強後載荷

損傷載荷により損傷が発生した覆工試験体内面を、繊維補強吹付けコンクリートにより補強し、14日養生した後、再び載荷装置により載荷を行った。この載荷を補強後載荷とした。

補強後載荷により、損傷が発生した覆工試験体の補強後の耐荷力および破壊形態を把握することができ、損傷載荷の結果と比較することで繊維補強吹付けコンクリートの補強効果を評価することができる。

2.3 使用材料

(1) 覆工試験体の仕様

無垢の覆工試験体の仕様を表-1に示す。試験体は、現状の2車線道路トンネルの覆工と同程度の仕様とした。

表-1 覆工試験体の仕様

項目	仕様
配合	18-12-40-N (設計基準圧縮強度18N/mm ²)
覆工厚	30cm
形状寸法	外径9,700mm 高さ1,000mm

(2) 繊維補強吹付けコンクリートの仕様

使用材料を表-2に、繊維補強コンクリートの配合を表-3に、また、ポリプロピレン繊維の形状を図-2にそれぞれ示す。繊維補強コンクリートは、吹付け後の目標圧縮強度(設計基準強度)を36N/mm²と設定し配合した。繊維混入率は、コンクリートの曲げじん性と剥落防止効果が十分に得られると共に、フレッシュコンクリートのワーカビリティを阻害しない範囲

表-2 使用材料

使用材料	記号	名称	緒元・主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16 g/cm ³ , 比表面積3300cm ² /g
繊維	PF	ポリプロピレン繊維	密度: 0.91 g/cm ³ , 断面形状: 十字型, 繊維長: 30mm 換算直径: 0.7mm, 引張強度453N/mm ²
細骨材	S1	鹿島産山砂	表乾密度: 2.61 g/cm ³ , 吸水率: 1.50%, 粗粒率: 2.63
	S2	葛生産石灰石細砂	表乾密度: 2.67 g/cm ³ , 吸水率: 1.47%, 粗粒率: 2.77
粗骨材	G	岩瀬産6号碎石	表乾密度: 2.65 g/cm ³ , 吸水率: 0.41%, 粗粒率: 6.31 最大寸法: 13mm
混和剤	AD	高性能減水剤	主成分: ポリグリコールエステル誘導体
	-	消泡剤	主成分: ポリアルキレングリコール誘導体
急結剤	CA	アルカリフリー液体急結剤	主成分: 水溶性アルミニウム塩

表-3 繊維補強コンクリートの配合

繊維混入率 (vol%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 (%)	空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量							
						(kg/m ³)				(C×%)			
						水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤		急結剤
W	C	S1	S2	G	AD	消泡剤	CA						
0.3	13	18	40	3	60	192	480	690	296	665	1.25	0.01	7

を考慮し、0.3vol%とした。また、急結剤は添加量の調節が容易で粉塵・はね返りの少ない液体急結剤を採用した。

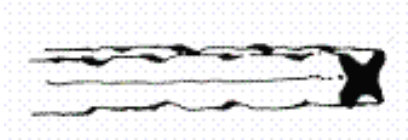


図-2 繊維の形状

(3) 補強仕様の概要

補強仕様の概要および吹付け条件を図-3、表-4にそれぞれ示す。

繊維補強コンクリートは、ポンプで圧送し、ノズル手前で空気を混入し、水平方向に吹付けた。繊維補強コンクリートの吹付け厚さは15cmとし、吹付け前に損傷载荷により損傷が発生した覆工試験体との付着性を向上させるため溶接金網(φ5-150×150)を取付けた。

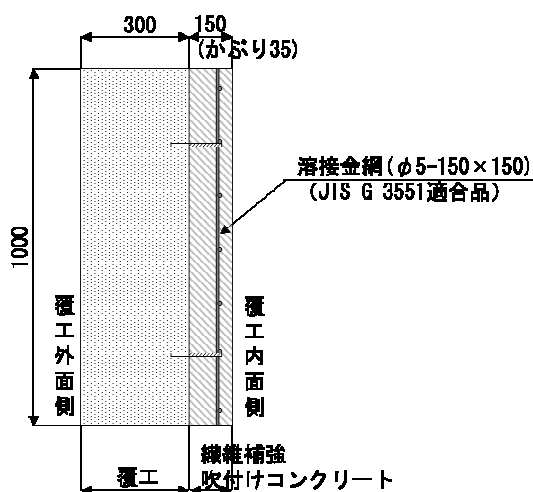


図-3 補強仕様概要図

2.4 各種強度試験と耐久性試験

覆工試験体と繊維補強吹付けコンクリートの硬化性状および耐久性の把握を目的として各種強度試験と耐久性試験を実施した。試験項目および試験方法、供試体作成および養生方法を表-5、6にそれぞれ示す。繊維補強コンクリートの吹付け前後における性状変化を把握するため吹付け前と吹付け後に供試体を採取することとした。吹付け前の供試体は、アジテータ車より荷卸した繊維補強コンクリートより採取し、吹付け後の供試体は、別途作成したパネル型枠(長さ60cm×幅60cm×高さ25cm)に繊維補強コンクリートを吹付け、材齢10日目に切出すことにより採取した。

表-4 吹付け条件

項目	仕様
吹付け機の種類	コンクリートポンプ方式 (ノズル部：人力)
急結剤添加装置	液体急結剤供給装置
配管条件	ノズル部配管径：φ50mm 急結剤添加位置：ノズルから1.0m手前
吐出量	3.0m ³ /hr
吹付け方向	水平
吹付け距離	1.0m (吹付け面とノズル先端の距離)

表-5 試験項目および試験方法

使用材料	試験項目	試験方法
覆工試験体	硬化性状	圧縮強度試験 JIS A 1108
	圧縮強度試験 曲げ強度試験	JIS A 1107, JIS A 1108 JSCE-G 552
繊維補強 コンクリート	耐久性	凍結融解試験 長さ変化試験 促進中性化試験
		JIS A 1148 JIS A 1129 JIS A 1153

表-6 供試体作成および養生方法

使用材料	実験区分	試験項目	採取場所	供試体区分	供試体作成方法	養生方法
覆工試験体	損傷载荷	圧縮強度試験	荷卸時	管理供試体	JIS A 1132	現場封緘養生
	補強後载荷					
繊維補強 コンクリート	補強後载荷	圧縮強度試験	吹付け前 (荷卸時)	管理供試体	JSCE-F 552	現場封緘養生
			吹付け後	切出し供試体	JSCE-F 553	現場封緘養生
		曲げ強度試験 凍結融解試験 長さ変化試験 促進中性化試験	吹付け前 (荷卸時)	管理供試体	JSCE-F 552	現場封緘養生
			吹付け後	切出し供試体	JSCE-F 553	現場封緘養生

表－7 各種強度試験結果

使用材料	実験区分	供試体区分	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ靱性 係数 (N/mm ²)
覆工試験体	損傷載荷	管理	14	18.37	19.36	0.19	—	—
	補強後載荷	管理	28	21.71	21.87	0.16	—	—
繊維補強 コンクリート	補強後載荷	管理	14	58.18	33.07	0.20	4.64	1.39
		切出し	14	40.30	24.64	0.20	4.26	0.89

3. 実験結果と考察

3.1 各種強度試験結果

損傷載荷時および補強後載荷時の無垢の覆工試験体、繊維補強吹付けコンクリートの各種強度試験結果を表－7に示す。

覆工試験体の圧縮強度は、損傷載荷時（材齢 14 日）において 18.37N/mm²と目標圧縮強度 18N/mm²を既に上回り、補強後載荷時（材齢 28 日）には、21.71N/mm²となった。

繊維補強コンクリートの切出し供試体（吹付け後）の強度試験結果より、補強後載荷時の圧縮強度は、40.30N/mm²と目標圧縮強度 36N/mm²を上回り、覆工試験体の 1.9 倍となった。また、管理供試体（吹付け前）と比較すると曲げ強度を除いた圧縮強度、ヤング係数、曲げ靱性係数において 25～36%程度の減少が認められた。これは、吹付け時のペースト分の飛散、急結剤の添加、空気の巻き込み等の影響によるものと考えられる。

3.2 耐久性試験結果

繊維補強吹付けコンクリートの各種耐久性試験結果を表－8に示す。

(1) 凍結融解試験結果

凍結融解 300 サイクルにおいて、吹付け前後共に相対動弾性係数は 80%以上を確保し、質量減少率は 0.5%程度であることより、十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認できた。吹付け後の相対動弾性係数は、10%減少している。

(2) 長さ変化試験

吹付け後の方が吹付け前に比べて、0.02%収縮が大きい結果となった。

(3) 促進中性化試験

吹付け後の中性化深さは、7.5mm となり、本

表－8 各種耐久性試験結果

試験名	測定項目	試験 材齢	単位	区分	
				吹付け前	吹付け後
凍結融解試験	相対動弾性 係数	300 サイクル	%	97.4	87.2
	質量減少率	300 サイクル	%	-0.5	-0.4
長さ変化試験	長さ変化率	26週	%	-0.055	-0.077
促進中性化 試験	中性化深さ	26週	mm	4.80	7.50

補強仕様の溶接金網への最小かぶり 35mm を考慮すると、十分な耐久性を有していると判断できる。

3.3 覆工載荷実験結果

(1) 損傷載荷

損傷載荷時の荷重変位曲線を図－4に、ひび割れ状況図を図－5にそれぞれ示す。荷重変位曲線より、無垢の覆工試験体の耐荷力（最大荷重）は 2046kN であり、そのときの変位は 38mm である。最大荷重以降、両肩部内面の圧壊（70° および 110° 付近）と変位 20mm 程度から始まっていた天端外面（90° 付近）の圧壊が進んだことにより、荷重が低下し、変位 42mm で耐荷力の約 95%である 1930kN まで低下したため損傷載荷を終了した。

(2) 補強後載荷

補強後載荷時の荷重変位曲線を図－4に、ひび割れ状況図を図－6にそれぞれ示す。荷重変位曲線より、荷重が 2500kN(変位 18mm)、3000kN(変位 28mm) 付近で荷重低下が見られた。この荷重低下は、覆工試験体と繊維補強吹付けコンクリートとの付着切れによるものである。この付着切れにより天端付近に短いひび割れが生じたが、繊維補強コンクリートの剥離、剥落は見られなかった。また、荷重低下後も荷重を受け持っていることから、吹付け補強後の耐荷力は

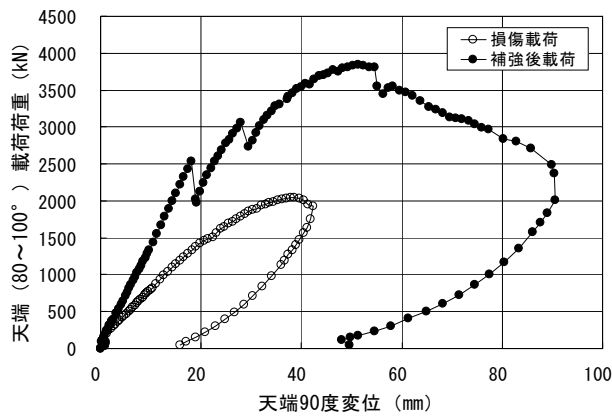


図-4 荷重変位曲線

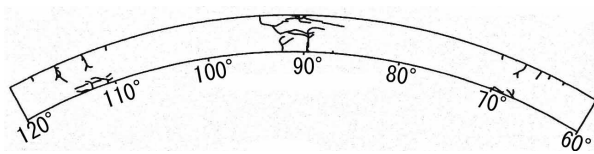


図-5 ひび割れ状況図 (損傷載荷)

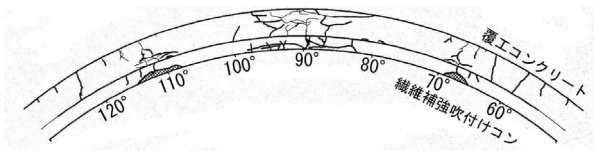


図-6 ひび割れ状況図 (補強後載荷)

荷重の増加が認められなくなった最大荷重 3844kN (変位 51mm) と判断できる。最大荷重以降、70° および 110° 付近の繊維補強コンクリートの圧壊と、変位 55mm にて生じた天端外面 (90° 付近) の覆工試験体の圧壊による剥落により、荷重は低下し、変位 90mm にて終局となった。

吹付け補強後の耐荷力は、無垢の覆工試験体の耐荷力 (2046kN) の約 2 倍となり、繊維補強吹付けコンクリートによる補強効果が認められた。また、終局時には繊維補強吹付けコンクリートの剥離は認められたが、繊維混入の効果により剥落には至っていない。

4. 解析による耐荷力の評価

4.1 解析の概要

解析では、ひび割れ進展を考慮できる非線形有限要素法 (プログラム名称: ATENA) を用い、覆工載荷実験結果 (荷重変位曲線) の再

現を図った後、目標耐荷力を満足する繊維補強吹付けコンクリートの厚さを求めた。

4.2 解析モデル

解析モデルは、損傷載荷および補強後載荷について、実験時の載荷形式等を考慮し、設定した。解析モデルの概要図を図-7に示す。

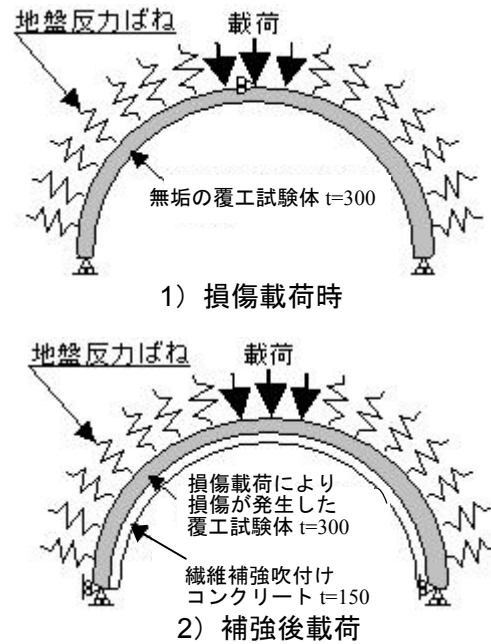


図-7 解析モデル概要図

4.3 覆工載荷実験結果の再現

損傷載荷、補強後載荷の両載荷実験結果を解析にて再現するため、地盤反力ばね定数をパラメーターとした解析を行った。解析結果を図-8および図-9に示す。解析結果より、地盤反力ばね定数を 50MN/m と仮定すると実験結果 (荷重変位曲線) を再現できた。ただし、仮定した地盤反力ばね定数は、載荷実験時の反力ジャッキのばね定数とは合致しなかった。

4.4 目標耐荷力の設定

繊維補強吹付けコンクリートによる補強の目標耐荷力を、覆工コンクリートの設計基準強度である 18N/mm^2 を用いた無垢の覆工試験体における損傷載荷の耐荷力とした。この耐荷力を求めるため、覆工載荷実験 (損傷載荷) を再現できた解析モデル (地盤反力ばね定数 50MN/m) を用い解析を行った。解析の結果、目標耐荷力は 1950kN となった。

4.5 目標耐荷力を満足する吹付け厚さ

目標耐荷力を満足する吹付け厚さを求めるため、繊維補強吹付けコンクリートの圧縮強度を 36N/mm^2 （設計基準強度）と設定し、吹付け厚さをパラメーターとして、覆工載荷実験（補強後載荷）を再現できた解析モデル（地盤反力ばね定数 50MN/m ）を用い解析を行った。解析結果を図-10に示す。解析の結果、吹付け厚さ 62.5mm 以上を確保すると目標耐荷力を満足できる。しかし、実施工上は、吹付け厚さの施工誤差、はね返りによる施工後の品質の安定性等を考慮すると、最小吹付け厚さとして 100mm 程度は必要であると考えられる。

4.6 解析結果の評価上の留意点

耐荷力の評価で用いた解析手法により求まる荷重変位曲線は覆工載荷実験結果における荷重変位曲線と良い近似を示した。しかし、その再現を図る上で一部の解析用入力値が実験結果と合致しない部分（反力ジャッキのバネ定数）、また、仮定値を設定した部分（覆工と補強工の付着特性等）がある。これらの設定方法については、今後の課題となる。

5. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) トンネル頂部からの荷重が卓越する、載荷形式においては、繊維補強コンクリートを厚さ 15cm で吹付けることにより、無垢の覆工試験体の耐荷力と同等以上の耐荷力を確保できる。
- 2) 非線形FEM解析による検討結果および実施工等を考慮すると、無垢の覆工試験体の耐荷力と同等以上を期待できる最小吹付け厚さは 100mm 程度となる。
- 3) 補強後載荷において、繊維補強吹付けコンクリートの剥離は見られたものの、剥落の発生は、認められなかった。
- 4) ここで用いた繊維補強コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、曲げ靱性係数は、吹付けることにより $25\sim 36\%$ 程度減少する。

- 5) ここで用いた繊維補強吹付けコンクリートは、凍結融解および中性化に十分な抵抗性を有している。

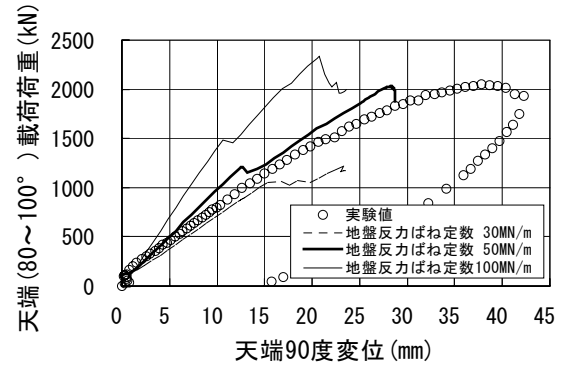


図-8 解析結果（損傷載荷）

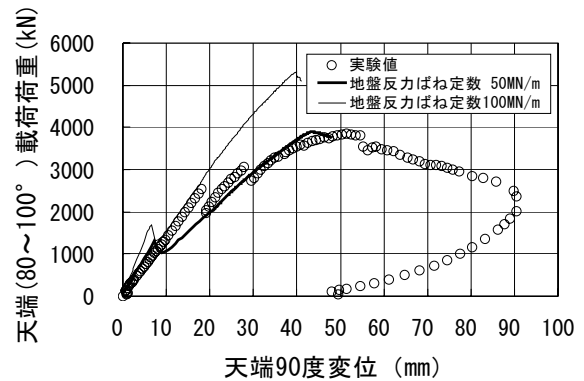


図-9 解析結果（補強後載荷）

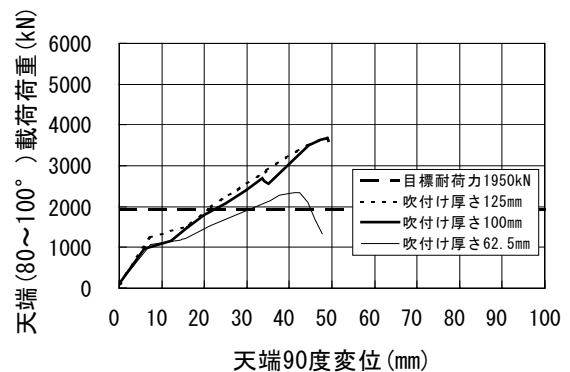


図-10 解析結果（補強後載荷）

参考文献

- 1) 国土交通省土木研究所，日本道路公団試験研究所：トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書，2001.3