

トンネル補強材としてのFRPグリッドの付着強度と補強効果に関する考察

長崎大学工学部 学生会員 ○上野 竜志 長崎大学大学院 学生会員 東 幸宏
 長崎大学工学部 フェロー会員 蔣 宇静 長崎大学工学部 正会員 李 博
 さとうベネック(株) 正会員 石田 耕生 さとうベネック(株) 正会員 竹内 一博
 日鉄コンポジット(株) 正会員 谷口 碩士 (株)エイト日本技術開発 正会員 米田 裕樹

1. はじめに

近年、供用年数が30~40年以上のトンネル構造物の劣化現象が全国的に顕在化し、内空断面は建築限界に近いトンネルにおける安全な維持管理手法について幾つかの提案をされている。しかし、それらには鋼板の腐食や、施工の手間、施工期間の長さなどまだ解決されていない問題点があるので、より軽量で腐食に強く、施工性が高い補強材料として、FRPグリッドが注目されている。現在、トンネルにおけるFRPグリッドの利用が増えているが、その補強効果の力学的な評価が不十分である。そこで本研究では、FRPグリッドを使ったせん断付着強度試験により、補強工の付着面強度、せん断剛性を算出し、それらを用いた数値解析により本工法の補強効果を評価することを目的とする。

2. FRPせん断付着強度試験

2.1 試験材料の特性と試験概要

FRP (Fiber Reinforced Plastics) は、耐腐食性、耐薬品性に優れていて、鋼材より軽量な材料である。高強度ポリマーセメントモルタル (吹付け用; 以下 PCM) は、塩害、中性化、凍結融解作用に強く、耐候性に優れている材料である。これらの補強材料を使って、図-1 に示すようなトンネル覆工に見立てた供試体 (幅 100mm×長さ 200mm×高さ 100mm、コンクリート 28 日、PCM14 日養生) を作製し、デジタル制御

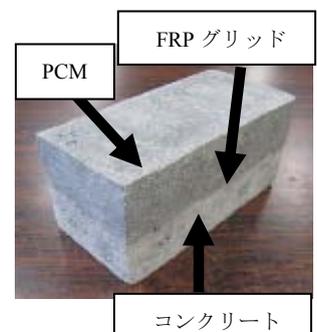


図-1 せん断試験用供試体

表-1 実験ケース

		CR4	CR6	CR8
垂直応力	1MPa	○	-	○
	2MPa	○	○	-
	3MPa	-	○	○

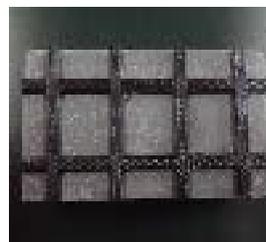


図-2 せん断面

型一面せん断試験機を使って、FRPせん断付着強度試験を行った。図-2 に供試体のせん断面を示す。グリッドをCR4、CR6、CR8¹⁾、垂直応力を1MPa、2MPa、3MPaとし、計6ケースを設定した(表-1)。供試体作製のばらつきを考慮して、1ケースにつき、供試体2~3体を用いて試験を行った。なお、試験はすべて同じ条件下(せん断速度 0.5mm/min)で行った。

2.2 付着面強度の算出

図-3 に試験結果の一例として、CR6における垂直応力2MPaと3MPaのせん断変位-せん断応力関係を示す。それぞれ供試体3体を用いて試験を行ったところ平均最大せん断応力は、付着面に作用する垂直応力2MPaのときが2.69MPa、垂直応力3MPaのときが3.25MPaとなり、PCMの必要物性である付着強度2.0MPa¹⁾より大きい値となったため、十分な付着強度を有していると考えられる。また、垂直応力2MPaと3MPaの比較により、垂直応力が大きいほどせん断応力が大きくなっている。図-3を見ると、同じケースであっても供試体ごとに試験結果にばらつきがみられる。これは、供試体作製の際に供試体の大きさやせん断面の表面処理にばらつきがあったためであり、極端な値においては再度実験を行っている。図-4 に垂直応力-せん断応力関係(τ-σ曲線)を示

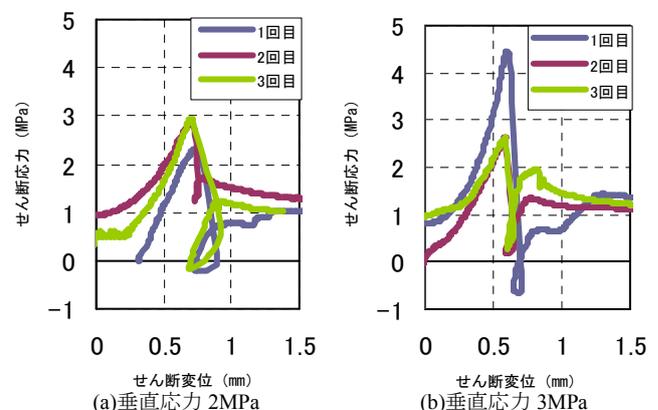


図-3 試験結果 (CR6)

※文献1)を参照すること

図-3を見ると、同じケースであっても供試体ごとに試験結果にばらつきがみられる。これは、供試体作製の際に供試体の大きさやせん断面の表面処理にばらつきがあったためであり、極端な値においては再度実験を行っている。図-4 に垂直応力-せん断応力関係(τ-σ曲線)を示

す。ここで得られた近似曲線を数式化し、ピーク時及び残留強度時における付着面強度定数を算出した。表-2 は算出結果をまとめたものである。図-4 を見ると、ピーク時と残留強度時のせん断抵抗角に大きな変化が見られないが、表-2 から破壊後の付着面の残留粘着力はピーク時のおよそ 1/10 程度まで低下していることがわかる。従って、破壊によって付着面の粘性が急激に低くなり、付着面の摩擦抵抗が残留強度に大きく寄与していると考えられる。図-3 に示す曲線の傾きからせん断剛性 k_s が得られた。せん断剛性はピーク時、残留強度時共にグリッドが大きくなるにつれ、大きくなる傾向が見られる。また、残留強度時のせん断剛性は、大きな変化が見られず、値もピーク時の半分以下となった。これらのパラメータを用いて数値解析を行った。

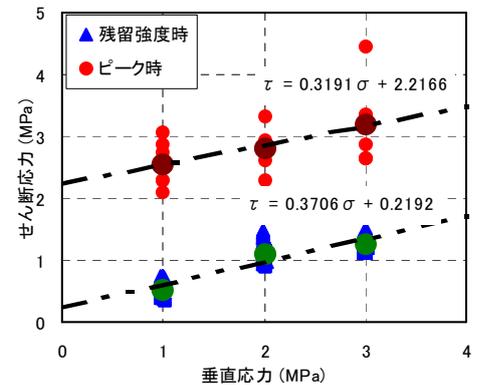


図-4 τ-σ 強度曲線

表-2 算出したパラメータ

	粘着力 c (MPa)	せん断抵抗角 ϕ (deg)	せん断剛性 k_s (MPa/m)		
			CR4	CR6	CR8
ピーク時	2.217	17.7	5.30×10^3	6.39×10^3	13.4×10^3
残留強度時	0.219	20.3	2.19×10^3	2.27×10^3	2.52×10^3

3. 数値解析による補強効果の評価

3.1 解析モデルと解析ケース

図-5 に本研究で用いた解析モデルの概略図を示す。

本解析で対象としているトンネルは、土被り約 374m、地山強度比(S_{rp})約 0.24 の軟岩地山である。補強なしの場合と CR4、CR6、CR8 を用いた場合のピーク時及び残留強度時におけるパラメータを用いて変状解析を行った。補強範囲は上半アーチ部を設定し、Liner 要素でモデル化し、ケースごとに 50 年間の変状解析を行った。なお、既往研究²⁾と同様に供用後 3 年を補強の施工時期とした。

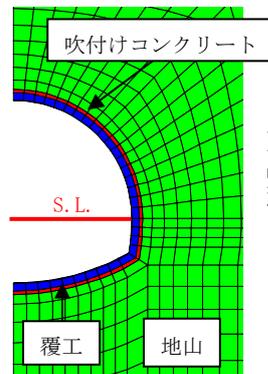


図-5 解析モデル

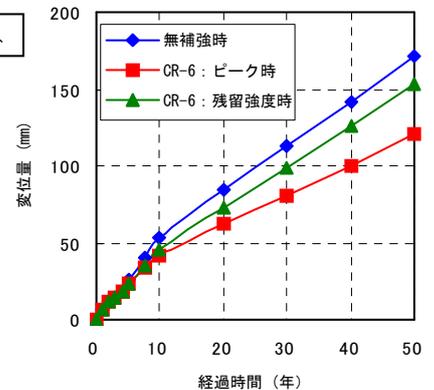


図-6 S.L.における内空変位の比較

3.2 変状解析結果

図-6 に解析結果の一例として、CR6 を用いた上半アーチ部補強で、ピーク時と残留強度時における水平変位の比較を示す。最初の 5 年間では無補強時、ピーク時、残留強度時による変位量の差はほとんど見られなかったが、しだいに差が大きくなっている。図-7 は天端と内空におけるピーク時及び残留強度時の変位抑制率の比較である。内空変位量について、無補強時に比べピーク時は 31.8%、残留強度時は 11.0%を抑制することができており、残留強度時の変位抑制率はピーク時の 1/3 程度であることが分かった。天端と内空の変位抑制率を比較すると、ピーク時が残留強度時と共に天端変位に対する抑制率のほうが高く、残留強度時において差がより顕著にみられた。これらの結果から天端変位及び内空変位において変状抑制効果が得られたが、補強が残留強度になると抑制効果は格段に低くなることがわかった。

4. おわりに

本研究は FRP グリッドを使ったせん断付着強度試験により、補強工の力学特性を評価し、数値解析を行うことで本工法の補強効果を考察した。試験結果から得られた付着面強度定数を用いた数値解析により、ピーク時と残留強度時及び各種グリッドにおける変位抑制率を比較することができた。今後は、様々な境界条件下において、付着面の破壊による補強工の変状特性を調査し、より合理的な補強手法を提案していく。

【参考文献】1) FRP グリッド工法研究会：FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強（設計・施工マニュアル）（案），2007. 2)大隈祥平ほか：FRP グリッドを用いたトンネル覆工補強効果の評価，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.489-490，2010.