

CFRP を用いた合成セグメントの強度特性に関する実験的検討

清水建設(株) 正会員 ○稲田裕 吉武謙二 杉山博一 フェロー会員 後藤茂 石塚与志雄
北海道大学 正会員 松本高志 東レ(株) 正会員 鈴川研二 松井孝洋

1. はじめに

著者等は, CFRP のシールドトンネルのセグメントへの適用性に関する検討を継続的に実施している. CFRP の外殻にコンクリートを詰めた合成構造セグメントを想定した検討を行い, これまでに技術的¹⁾と経済的²⁾な実現可能性の検討結果を報告した. 本報では, CFRP・コンクリート合成構造の強度特性の把握と構造的な適用性の評価を目的として実施した材料・構造体試験について, 試験の概要と主な結果を示す.

2. 評価対象と検討課題

評価対象は, CFRP の矩形の外殻にコンクリートを中詰めしたものである. セグメントは図 1(a)のように曲率を持つユニットを複数個並べて構成するが, ここでは同図(b)の曲がりのない単体ユニットを用いて基本特性を把握する. セグメントは強い圧縮力を受けるため, 圧縮軸力下での曲げ変形性能, 強度特性の検討を行う.

試験パラメータとその設定を表 1 に示す. CFRP 部は繊維方向の異なるシートを重ねた積層版とし, 軸方向と軸直行方向の繊維比率が異なる 5 種類の繊維配向のものを用いた. そして圧縮強度 30N/mm^2 程度の普通コンクリート(N)と 20kN/mm^2 程度の低強度(L)のコンクリートを中詰めした場合と, コンクリートなしの中空の場合(E)とを比較した. 以下の検討では, 試験条件を“配向-曲げ軸力比-コンクリート強度(例: S1-32-N)”で表す.

表 1 試験パラメータ

パラメータ	内容	記号
繊維配向 (繊維比率)	1(9:1), 2(2:1), 3(1:1), 4(1:2), 5(1:9)	S*
曲げ 軸力比	∞ (曲げのみ) 0.32, 0.16, 0.04	∞ 32, ..
中詰め	無し, 普通, 低強度	E, N, L

3. 引張試験による CFRP の部材強度の評価

(1) 試験の概要

FRP 材料の強度試験は, 一般に JIS K 7073 等に準じて行われる. しかし, その試験は比較的薄い FRP 部材を対象とするため, 強度の高い CFRP 材料ではタブ部で破断する場合がある等の問題も見られる. そこで, 炭素繊維補強材の試験として提案されている方法³⁾に従い, その適用性と繊維配向が強度特性に与える影響の評価を行う. 試験体の形状を図 2 に示す. CFRP 試験片は, 水準 2 を除く 4 種類の繊維配向について各 5 本, 後述の曲げ試験体から切り出して作製した. 試験片と鋼管は静的破砕材を用いて固定した. そして, 鋼管を試験機で掴んで引張载荷し, 荷重と中央部のひずみを計測した.

(2) 試験結果と考察

各配向の試験体について, 弾性率と引張強度の平均値と変動係数を求めた結果を表 2 に示す. 荷重とひずみの関係は, 破断寸前まで概ね線形の関係を保ち, 得られた強度と弾性率のばらつきも小さい. 弾性率, 強度ともに, 繊維配向による特性の差が顕著に見られる. しかし配向 1 と 3 では, 部材の引張強度に達する前に試験片と破砕材の間で付着切れによる抜けが発生してしまった. 引張強度の把握が十分にはできていないため, 掴み長の拡大, 試験片表面処理の見直し等の試験方法の改良を進めている.

表 2 引張試験結果

配向	特性 値	弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)	破断 部位
1	Ave. COV	110.8 0.01	(1790.4) 0.03	掴み 部
3	Ave. COV	92.3 0.01	(1758.9) 0.04	掴み 部
4	Ave. COV	39.0 0.11	715.1 0.08	検長 端部
5	Ave. COV	20.9 0.03	294.6 0.04	検長 中央

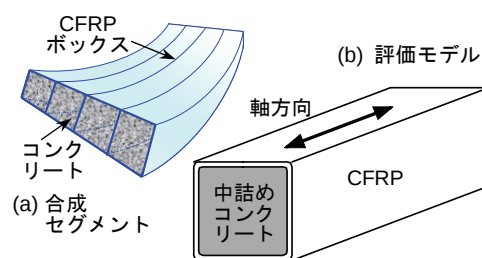


図 1 評価モデルの設定

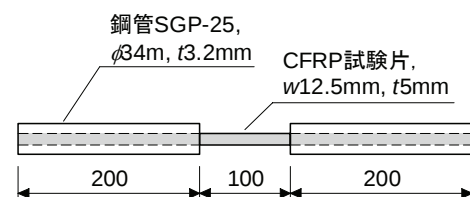


図 2 引張試験体

キーワード シールドトンネル, CFRP, 合成構造, 強度特性

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 Tel 03-3820-8315

4. 合成構造の圧縮曲げ試験による特性評価

(1) 試験の概要

CFRP 合成構造の曲げ試験は、試験条件を表 3 に示すように設定し、CFRP とコンクリートの特性が部材強度や破壊性状に与える影響を検討する。CFRP は 1 辺 10cm、厚さ 5mm の正方形断面で長さが 1m のものを用いた。図 3 に示すように、曲げ軸力比に従い鉛直荷重と軸力を増大させて载荷を行った。なお試験時のコンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートが 31.7N/mm²、低強度が 19.4N/mm²であった。

(2) 試験結果と考察

試験結果の例として、S3 の試験体について荷重と CFRP 中央部上下面のひずみの関係を図 4 に示す。試験体の変形は破断寸前まで荷重に対して概ね線形に増大し、最終的に上部 CFRP が圧縮破壊した。この結果では、破壊時の圧縮ひずみは 3,000μ程度である。一方向の CFRP の破断ひずみは 15,000μ程度であるため、部材の圧縮ひずみよりかなり小さい領域で破壊に達している。

次に、曲げ軸力比が 0.16 の試験体について最大荷重とたわみとの関係を図 5 に示す。軸方向の繊維比率が小さくなると、たわみは一様に増加するのに対して最大荷重は S2 で最大となる。変形は軸方向の剛性の影響が支配的であるのに対して、破壊強度は軸・周方向の強度のバランスによって決まっている。破壊時の状況の例(S4-16-N)を図 6 に示すが、ほとんどの試験体が载荷点の近傍で CFRP が面外に向けて破壊した。以上の結果から、この試験では CFRP が圧縮強度に達する前に、局所的な層間剥離、せん断破壊などにより破壊に達していることが考えられる。この原因としては载荷方法の影響も大きいと考えられるため、試験体の強度を正確に把握するためには、試験方法の見直しが必要である。

最後に、軸力なしの試験でのせん断力と CFRP 底面の歪みの関係から弾性率を推定し、表 4 に引張試験の結果と比較して示す。曲げ試験により得られた弾性率は引張試験結果に概ね一致しており、構造体の剛性に対しては繊維配向による CFRP の弾性率の違いが明確に影響していることが分かる。

5. まとめ

試験結果から、合成構造の強度特性には CFRP の特性の影響が大きく、繊維配向等を適切に設定するための力学的メカニズムの把握と強度特性評価方法の確立が重要であることが確認された。今後は、等分布载荷への変更等の試験方法の検討を進め、耐力推定法と設計手法の確立を図っていく予定である。

参考文献

1) 小林朗他, 土木学会 61 回年次講演会, CS10-007, 2008.
2) 石塚与志雄他, 土木学会 61 回年次講演会, CS10-008, 2008.
3) 土木学会コンクリート委員会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), 土木学会, 2006.

表 3 曲げ試験ケース

中詰め	曲げ軸力比	繊維配向				
		1	2	3	4	5
E	∞	○		○	○	○
N	∞	○	○	○	○	○
	0.32	○	○			
	0.16	○	○	○	○	○
	0.04	○		○	○	○
L	∞	○		○		
	0.16			○		
	0.04	○		○		

表 4 弾性率の推定結果

弾性率(Gpa)		繊維配向				
		1	2	3	4	5
引張試験		110.8		92.3	39.0	20.9
曲げ試験	∞-E	121.4		101.0	42.8	21.8
	∞-N	122.0	122.8	119.8	20.0	17.3

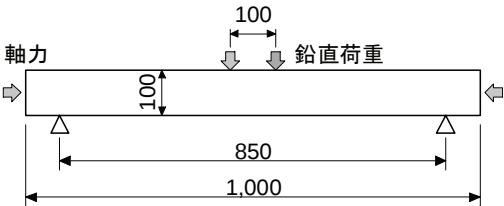


図 3 曲げ試験方法

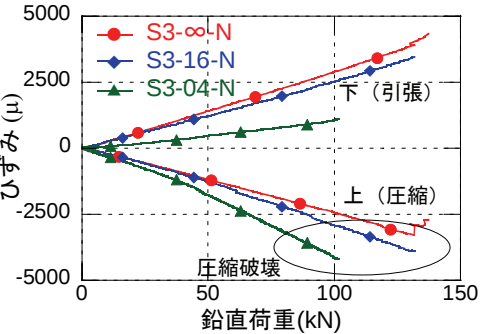


図 4 荷重とひずみの関係

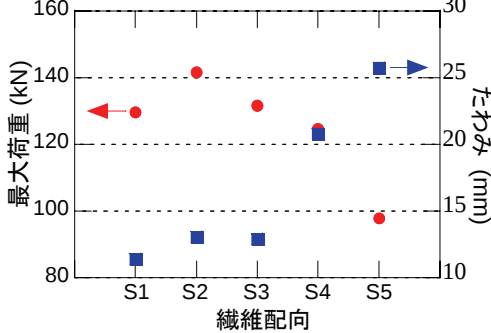


図 5 配向と最大荷重・たわみの関係

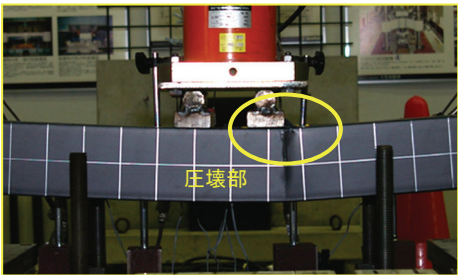


図 6 破壊時の試験体の状況