

FRPによるコンクリート構造物の補強設計法の比較（せん断補強）

新日鉄マテリアルズ(株)	正会員	○小林 朗
九州大学	正会員	山口 浩平
(株)さとうベネック	正会員	中村 智

1. はじめに

繊維強化樹脂材料（FRP）を用いたコンクリート構造物の補強工法は、1990年代初頭から我が国で材料開発や設計法の研究が活発に行われ、1995年の阪神淡路大震災以降 RC 橋脚の耐震補強などで広く利用されるようになった。土木学会では、それまでの研究成果をとりまとめて 2000 年に「連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修補強指針」を発刊した。連続繊維シートによるコンクリート構造物の補強設計法については、各種構造物に対応した設計・施工の技術基準や、最近では米国など諸外国でも設計コードが発刊されている。本報告では、FRP によるコンクリート構造物の補強設計技術の向上を目的として、各種技術基準のせん断補強設計法について比較検討した。

2. 対象とした技術基準

本稿で調査をおこなった技術基準は、以下のとおりである。

- [1]土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000. 7
- [2-1]鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1996. 7
- [2-2]鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1996. 11
- [3]東・中・西日本高速道路(株)：構造物設計要領第2集 橋梁保全編，2011. 7
- [4]American Concrete Institute (ACI)：Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures，2008. 7
- [5]日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案，2002. 3

3. 補強材料および対象部材

補強材料についてみると[4]を除く国内の技術基準では炭素繊維シート、アラミド繊維シートを、米国の[4]は炭素繊維、アラミド繊維およびガラス繊維を強化繊維とする連続繊維シートおよび FRP 板を対象としている。補強対象の RC 部材としては、[1]は棒部材で全周巻立てもしくは完全な定着効果が得られる機械式定着で端部を定着した場合、[2][3]は柱部材の全周巻立てを適用範囲とし、[4]は棒部材の全周巻立てに加えて梁部材の側面接着、底面+両側面の 3 面巻立てを、[5]はさらに壁つき柱、耐震壁および SRC 造の独立柱を加えている。

4. せん断耐力の照査方法

[1]～[4]は、部材の設計せん断耐力 (V_{fyd}) として修正トラス理論に基づきコンクリート (V_{cd}) およびせん断補強鋼材の負担せん断力 (V_{sd}) に FRP の負担せん断力 (V_{fd}) を累加する形の耐力式 (1) を用いている。

$$V_{fyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (1)$$

[5]は日本建築学会の終局強度型設計指針で用いられている式に準じてトラスとストラットのせん断伝達機構を考慮した (2) 式を用いている、また付着割裂時のせん断耐力も示されている。

$$Q_{su} = b \cdot j_i \cdot \sum (p_w \cdot \sigma_w) \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (2)$$

ここで、 $\sum (p_w \cdot \sigma_w)$ は横補強鉄筋と FRP によるせん断補強量の和を表し、次式で与えられる。

キーワード FRP、コンクリート構造物、補強設計、せん断、技術基準

連絡先：〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8 新日鉄マテリアルズ(株) 日鉄コンポジット社 TEL03-5623-5558

$$\Sigma (p_w \cdot \sigma_w) = p_{ws} \cdot \sigma_{ws} + p_{fd} \cdot E_{fd} \cdot \varepsilon_{fd} \quad (3)$$

[1][2-1][2-2]および[4]は、限界状態設計法により材料係数、部材係数などの部分安全係数を用いているのに対し、[3]はFRPの設計強度で、[5]はFRPの有効ひずみで安全余裕度を確保する形となっている。

いずれの技術基準でもFRPの負担せん断力については、低減係数を乗じる、設計引張強度を低減する、有効ひずみを用いるなどの手法でFRPの引張強度から算定される負担せん断力より低減した設計値を算出している。これは、せん断補強材としてFRPを用いた場合、FRPが塑性域をもたない弾性体であり、鋼材のように応力の再分配が起こらずトラス内の応力状態が一定とならないことや、FRPの伸び能力や巻立て量によっては破壊形式がFRPの破断を伴わないコンクリートのせん断圧縮破壊となることやせん断破壊時の斜めひび割れ幅が過大となりコンクリートの噛み合わせ作用が低下するなどの要因によると考えられている。

[1][2-1][2-2]では式(4)のようにFRPの設計引張強度 f_{fud} から算定される負担せん断力にせん断補強効率 K を乗じて低減した V_{fd} を算定している。[1]では、FRPのせん断補強筋比、ヤング係数、引張強度およびコンクリートの圧縮強度を変数としたせん断補強効率 K ($K=0.4\sim0.8$)の算定式が示されている。ヤング係数が低く引張強度の大きなFRPで補強効率が低くなる傾向にある。[2-1]は炭素繊維に対して $K=0.8$ 、[2-2]はアラミド繊維に対して $K=0.4$ としている。[4]では、せん断補強効率 K は用いずに、炭素繊維シート、アラミド繊維ともに設計引張強度を引張強度の特性値の0.6倍に低減して V_{fd} を算定している。

$$V_{fd} = K \cdot [A_f \cdot f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f] \cdot z / \gamma_b \quad (4)$$

[3][5]ではFRPの有効ひずみ ε_f にヤング係数 E_f を乗じてFRPの負担せん断力を算定している。[3]では、全周巻立ての場合で有効ひずみ ε_{fe} の上限を0.004とし、側面接着や3面接着の場合は、付着強度を考慮してさらに低減係数を乗じることとしている。[5]では全周巻立ての場合で有効ひずみ ε_{fd} を0.005～0.009の範囲でFRPの巻立て量、ヤング係数、コンクリート強度の関数として算定している。

次に各技術基準で示されている安全率を考慮してFRPの負担せん断力の最終的な低減係数 RF を算定する。

$$RF = (\text{せん断補強効率や有効ひずみを考慮したFRPの応力度/安全係数}) / \text{FRPの引張強度} \quad (5)$$

[1]の上限および[2-1]の炭素繊維の $K=0.8$ 場合、材料係数1.2、部材係数1.25とすると RF は0.53となり[3]の0.6より若干低い値となる。[1]の下限および[2-2]のアラミド繊維の $K=0.4$ 場合は、 RF は0.26となり[3]の1/2以下となる。

米国の基準[4]のでは、有効ひずみ0.004を上限としている。FRPの破断ひずみは高強度型炭素繊維：0.014、アラミド繊維1：0.018、アラミド繊維2：0.03であるので[4]に規定される安全係数を考慮して RF を算定すると高強度型炭素繊維： $RF=0.2$ 、アラミド繊維1： $RF=0.16$ 、アラミド繊維2： $RF=0.09$ となり国内の基準よりFRPの負担せん断力は低く算定され、特に破断ひずみの大きいアラミド繊維2でその傾向が強くなる。

5. まとめ

各種技術基準のせん断補強設計法について比較検討した結果、いずれの技術基準でもFRPの負担せん断力を累加する形のせん断耐力の算定式を用いているが、せん断補強効率の設定、FRPの設計引張強度や有効ひずみの低減を行っていた。安全率を考慮した最終的な低減率は、各技術基準で異なり特に破断ひずみの大きなFRPではその乖離が大きくなる傾向にあった。今後は、FRPで補強されたコンクリート部材のせん断耐力の設計値と実験データの比較などにより、その精度について検討する予定である。

【謝辞】

本検討を行うにあたって、多大なるご協力を頂いた土木学会複合構造委員会FRPによるコンクリート構造の補強設計研究小委員会(佐藤靖彦委員長)委員各位に謝意を表する。