

劣化したコンクリート部材の長寿命化を目指した繊維補強プラスチック

(FRP) を用いた補強における実際の有効な定着長に関する実践的な研究

山口浩平¹, 渡邊弘史², 宮野暢紘³

九州大学大学院¹, 株式会社福山コンサルタント², 株式会社 SNC³

概要：RC 部材を各種 FRP により補強する工法は、最近、実橋への適用も多くなっている。しかし、既設コンクリート部材と FRP の付着メカニズムは未解明な部分が多く、定着長の設計概念は実挙動を反映していないのが実際である。そこで、本課題では FRP グリッドと既設コンクリート部材の付着特性について検討した。

1. はじめに

橋梁をはじめとする社会基盤の長寿命化のために、一昔前には夢の素材といわれた軽量・高強度・高耐腐食性の FRP を用いたコンクリート部材の補強工事は、九州においても盛んに実施されている。この補強対策は力学的に理に適っているが、既設のコンクリート部材と FRP の両者の「付着」は十分な検討がなされていないのが実際である。そのため海外では、補強対策後に FRP シートの剥離などの変状が多くみられ、日本でも同様の事象が発見されつつある。図-1 から、補強工事後の FRP シートの浮きが確認されるように、最近になり FRP シート貼付け端部のせん断力が卓越する位置の付着の不具合が多数発見されるようになった。

一方、日本でのその付着に関する設計指針は 2000 年以降大きな変化もなく、15 年以上前の研究成果に基づく経験式のような設計用値が示されたままである。しかし、ここ 15 年程度の間の実挙動を再現し得る改良型の評価試験や高精度の数値解析により、従前の設計での「平均付着強度」という実挙動とはかけ離れ

た考えは、最新の研究結果から完全に否定されている。さらに、実挙動を基にした付着長さの算定式は論文レベルでは散見される状況である。

そこで本課題では、FRP グリッドを対象とした付着試験を実施してその付着特性を明らかにした。

2. コンクリート部材と FRP の付着メカニズム FRP シートの場合¹⁾

土木学会から 2014 年 11 月に発行された「複合構造レポート 12 FRP によるコンクリート構造の補強設計の現状と課題」¹⁾ では、主に現状の FRP 材料による補強設計法や補強技術の抱える問題点の取りまとめ、それと FRP 材料によるコンクリート構造物の補強設計の合理化に資する調査研究（特に、付着、疲労、環境作用の影響など）が最新の知見とともに纏められている。その中で、コンクリートと FRP シートの付着メカニズムについて本章で概説する。

2.1 付着界面の実際のせん断応力分布と設計上のその取扱いの違い

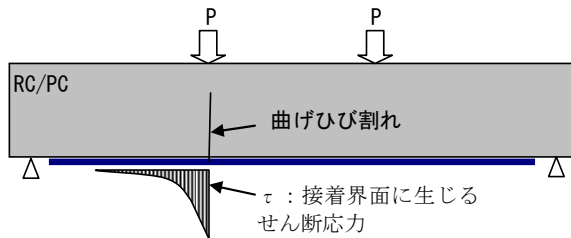
はり部材に曲げひび割れが発生したら、FRP シートとコンクリート界面には、図-2 (a) のようなせん断応力が生じる。また、同図 (b) に示すこの挙動を再現し得る改良型の付着試験でも同様の分布を得ることができ、せん断応力が作用している実質的な有効な付着長さ（有効付着長）は、種々の実験結果から最大でも 40～50 cm 程度であることが最近わかってきた。ま



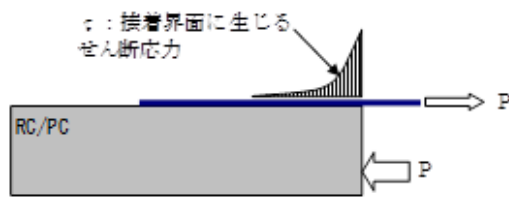
図-1 FRP シートの浮き

た、それらの結果は同図 (c) のように模式化して数値解析にも応用されつつある。しかし従前の設計では、取扱い易さに重きがおかれ、我国では同図 (d) に示すような『付着強度は長手方向に一定』であるという実挙動とは全く異なる考え方であり、設計上必要な定着長（必要定着長）は 1m を超えるような設計上の結果がよくみられる。このことは見方を変えれば、「実際の付着長を 1m でも 2m でも長くすれば、必要な定着力を確保できる」といったことになってしまう。

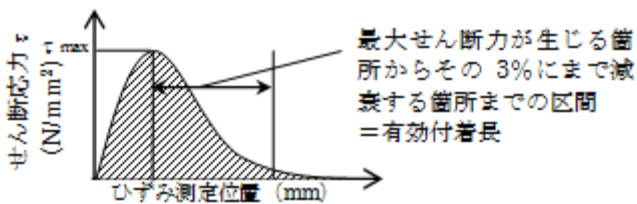
例えば、従前の設計により算出された必要定着長が 1m を超えるような場合、実橋への適用性を考慮して定着長さを短くする代わりに、他



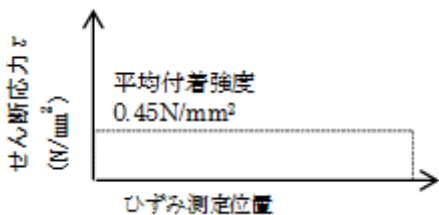
(a) はり部材でのせん断応力分布



(b) 付着強度試験でのせん断応力分布



(c) 実際のせん断応力と定着長さの関係



(d) 設計でのせん断応力と定着長さの関係

図-2 せん断応力

の定着構造（アンカーやプレートなど）を付加的に用いて、設計思想である『付着による一体化』とは異なったメカニズムに頼っているのが現実である。

2.2 実際の有効な付着長（有効付着長）と設計式から算出された必要な付着長（必要定着長）の実験結果を基にした比較

図-3 は、付着に関する既往実験結果から、横軸には実験値から読み取られる実際の有効付着長、縦軸は従前の設計から算出される設計上の必要定着長をまとめたものである。同図の赤線は 1 : 1 の関係であるが、実際の有効付着長は設計上必要とされる必要定着長よりもはるかに小さく（足りなく）、剥離を暗に設計で織り込んでいることを示唆している。

3. FRP グリッド工法概要²⁾

既設 RC 橋脚の耐震補強工法として、コンクリートによる増厚工法、鋼板巻立て工法、連続繊維巻立て工法などがある。中でもコンクリートによる増厚工法は、他の工法に比べて経済的で維持管理の面からも有利であるが、施工上、巻立て厚は 250mm 程度以上となり、既設橋梁の建築限界や河川阻害率の面などから採用できない場合がある。また、自重による慣性力が増加するため、橋脚基礎に対しては他の工法に比べて不利となる。

これらの問題点を解決するため、FRP グリッド工法がある。本工法はグリッド（図-4）を既設コンクリートに接触配置して PCM を吹付

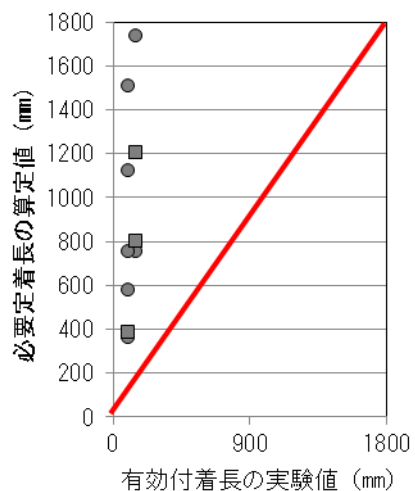
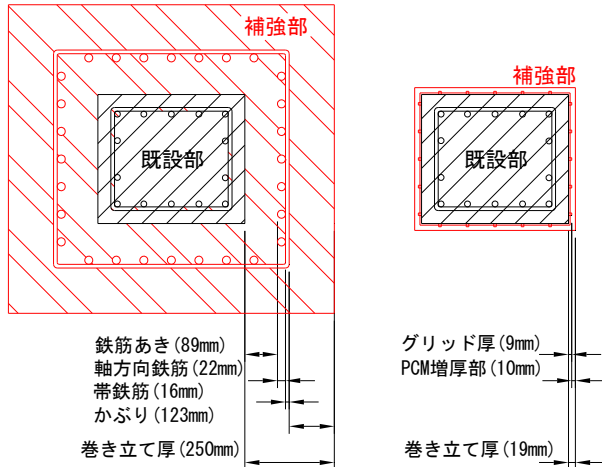


図-3 必要定着長と有効付着長の比較



図-4 FRP グリッド



(a) RC 増厚工法 (b) FRP グリッド工法
図-5 補強断面寸法(一例)

けることにより一体化する工法であり、増厚量をコンクリートによる増厚工法の約 1/12 程度に抑えることが可能である(図-5)。また、PCM を吹付けることにより、左官によるこて塗りと比較して、施工性・作業効率が向上し、施工費が安価となる。また、こて塗りに比べ、左官の技量に左右されないため、品質が安定する等の長所がある。

4. 付着特性

4.1 付着強度試験の概要

グリッドを2層接触配置した場合のグリッドとPCMの付着特性を解明するため、コンクリート標準示方書[規準編]³⁾の「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」に準じて、付着強度試験を実施した。

表-1に供試体の種類、表-2に各材料特性値をそれぞれ示す。供試体はグリッドの層数、格点数およびPCMの種類をパラメータとした8種類(各3体)である。高強度型PCMは、単位セメント量が多く圧縮強度に優れ多用途に

表-1 供試体種類

Type	グリッド		PCM種類
	層数	格点数	
1	1	2	高強度
2		2	低弾性
3		2	高強度
4	2	2	低弾性
5		4	高強度
6		4	低弾性
7		6	高強度
8		6	低弾性

表-2 使用材料の特性値

(a) グリッド

規格	断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)
CMR-5	13.2	1778	2.12 × 10 ⁵	7272

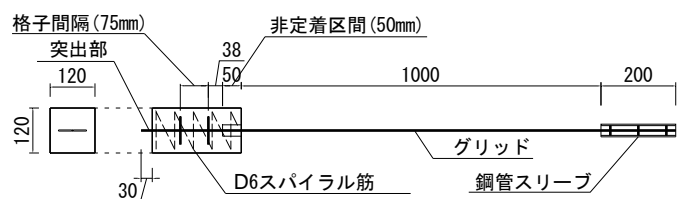
(b) PCM^{*}

規格	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
高強度	57.0	2.70 × 10 ⁴
低弾性	26.3	1.40 × 10 ⁴

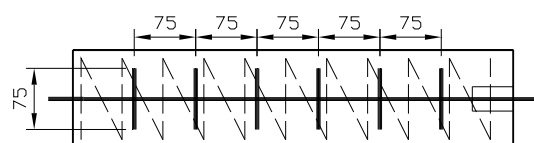
^{*}14日強度

渡って使用されるが、低弾性型PCMは、ポリマー含有量が多く追従性に優れており床版下面増厚等に用いられる。材料特性値については、グリッドはメーカー試験値、PCMは試験時の材料試験値とした。

供試体の形状を図-6、グリッド配置状況を図-7にそれぞれ示す。PCMブロックは一辺の長さを120mmとし、グリッドの縦筋1本を埋め込んだ。設計上、グリッドは表面付着力がないものとし、縦横に交差する部分で機械的に付着力を確保するため、横筋の格子間隔は75mmとし、横筋長さは格子間隔に合わせて全長75mmとしてPCMブロックと定着した。Type 1



(a) 概略図



(a) 格点部詳細図(6格点タイプ)

図-6 供試体形状

～Type 4 は 2 格点, Type 5 および Type 6 は 4 格点, Type 7 および Type 8 は 6 格点の定着長をそれぞれ設けた。また, 載荷板からの応力の均等化を図るため, 載荷板端側に塩化ビニール管を設置し非定着区間を設けた。また, PCM ブロックの補強筋として, SD295A D6 のスパイラル筋を設置した。ブロックからのグリッドの突出量は, 全供試体ともに自由端側を 30mm とし, 端面をグリッド軸に垂直に平滑な面に仕上げ, グリッドのすべり量を計測するため変位計を設置した。

固定端側は試験機の形状に合わせて 1200mm とし, 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)⁴⁾の「定着用膨張材を用いた引張試験方法」に準じて, 試験機に固定するために固定端側に鋼管スリーブを取付け, 鋼管スリーブ内のグリッドには横筋を鋼管スリーブ内径である 26mm 残し膨張材を用いてグリッドと鋼管スリーブを定着させた。なお, 膨張材は室温 30 度に保たれた室内で 5 日間養生を行った。膨張圧および定着力については, それぞれ同試験法に基づいて算出した。

図-8 に試験状況を示す。変位計はグリッド



図-7 グリッド配置状況

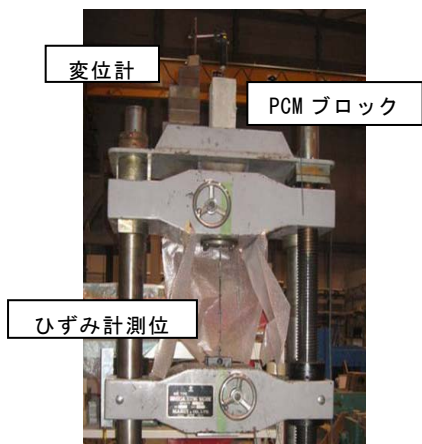


図-8 試験状況

の引込み量を測定するために突出部に設置し, ひずみゲージはグリッドの固定端の両面に 1 枚ずつ設置した。荷重はグリッドおよび PCM ブロックに衝撃を与えないように, 一様な速度で加えた。また, 荷重が 1kN 増加する毎に, 補強筋のすべり量およびひずみ量を計測した。

4.2 破壊性状

表-3 に試験結果, 図-9 に荷重-変位関係の代表例を示す。結果は, 2 格点で低弾性である Type 4 を除けば全て母材破断となった。なお, 弾性係数はひずみ-荷重曲線から引張荷重の 20% と 60% の割線勾配より算出した。

本試験では, 図-9 の Type4 は荷重 33kN あたりから変位が急増している。これは PCM ブロックからの引抜けによるもので, これを「引抜けによる破壊」と定義した。また, その他の供試体のように, グリッドの変位が急増することなく, グリッドが破断したものは, 「破断による破壊」と定義した。なお, 4 格点である Type 5 および Type 6 において, 全ての供試体が破断による破壊の挙動を示したため, 6 格点の Type 7 および Type 8 では変位の計測を省略した。

試験結果より, グリッドが 1 層の場合は PCM の種類に関わらず, 2 格点の定着長があれば母

表-3 試験結果

Type	最大荷重 (kN)	最大荷重平均 (kN)	最大ひずみ (μ)	弾性係数 (N/mm^2)	破壊性状	
1	1	20.7	20.7	8034	1.84×10^5	破断
	2	17.6		-	-	破断
	3	23.7		-	-	破断
2	1	23.2	21.6	8231	2.07×10^5	破断
	2	19.9		-	-	破断
	3	※ 計測不良				
3	1	43.6	44.0	7672	2.04×10^5	破断
	2	44.1		-	-	破断
	3	44.2		-	-	破断
4	1	44.7	45.6	8336	2.10×10^5	引抜け
	2	47.8		-	-	引抜け
	3	44.4		-	-	引抜け+破断
5	1	42.5	40.7	8034	1.98×10^5	破断
	2	38.9		-	-	破断
	3	※ 計測不良				
6	1	45.7	44.1	8524	1.93×10^5	破断
	2	39.5		-	-	破断
	3	47.1		-	-	破断
7	1	43.2	38.3	7521	2.02×10^5	破断
	2	32.6		-	-	破断
	3	39.2		-	-	破断
8	1	36.2	37.7	7523	1.85×10^5	破断
	2	42.9		-	-	破断
	3	33.9		-	-	破断

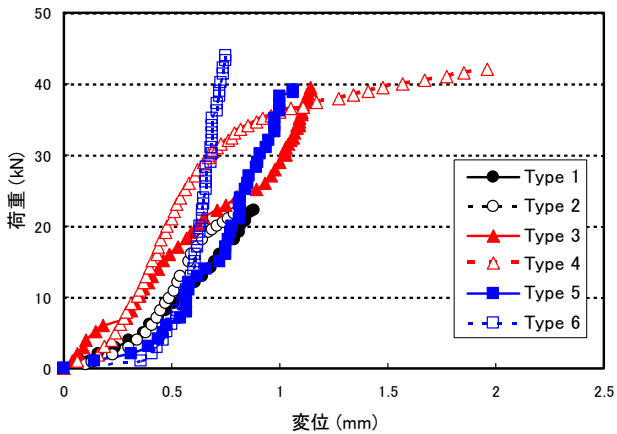


図-9 荷重-変位関係

材の引張強度以上の付着強度が得られることがわかった。グリッドが2層の場合の必要定着長は、高強度型PCMの場合で2格点、低弾性型PCMの場合で4格点確保が妥当であることがわかった。ただし、低弾性PCM4格点(Type4)の最大荷重平均値は45.6kNであり、母材が破断した他のタイプと差はほとんどない結果であった。Type4-No.3は引抜けと破断が同時に起こったことからわかるように、母材が破断する荷重レベルまでほぼ達していたが、PCMの圧縮強度の差異(高強度型:57.0N/mm², 低弾性型:26.3kN/mm²)により低弾性型PCMの付着強度が小さくなり、引抜けがやや先行したものと推

察される。

4.3 設計値との比較

図-10に各供試体の最大荷重, 最大ひずみおよび弾性係数について, 設計値(表-2(a)の諸値)との比較を示す。2層配置されたタイプの最大荷重は, 6格点のType7, 8はやや小さかったものの, 1層配置されたタイプのその2倍以上であり, 試験値と設計値の比は0.93~1.12とn=3のばらつきの範囲内に収まる結果であった。最大ひずみの試験値と設計値の比は1.03~1.17, 弾性係数のそれは0.87~0.99となり, これらからも母材が破断したことが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では, CFRPグリッドを2層接触配置した場合の付着強度について試験を実施した。その結果, グリッドの必要付着長は, グリッドを1層配置した場合はPCMの種類によらず2格点以上であり, 2層接触配置した場合は高強度型PCMで2格点以上, 低弾性型PCMで4格点以上とするのが妥当であることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会: 複合構造レポート12 FRPによ

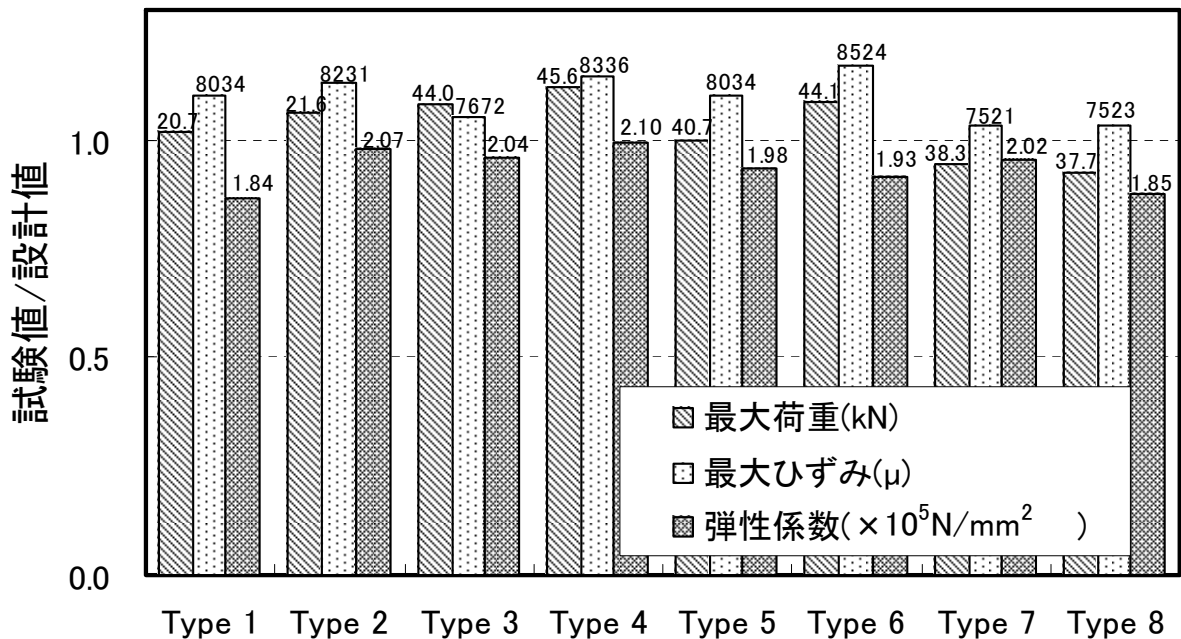


図-10 試験値および設計値との比較

るコンクリート構造の補強設計の現状と
課題, 2014.11

- 2) FRP グリッド工法研究会 : FRP 格子筋 技
術資料, 2001.11
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書[規
準編], 1999.11
- 4) 土木学会 : 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), 1996.9