

炭素繊維補強材（CF グリッド）を用いた既設 RC 橋脚の耐震補強における

補強部界面の付着特性に関する研究

山口浩平¹，合田寛基²，中村智³，渡邊弘史⁴

九州大学大学院，九州工業大学，（株）さとうベネック，（株）インフラネット

概要：CFRP グリッドを 2 層接触配置したときの付着強度に着目して試験を実施した。その結果，母材破断までの必要定着長は，高強度型 PCM で 2 格点以上，低弾性型 PCM で 4 格点以上が妥当であり，また CFRP グリッドを 2 層接触配置し定着長を 2 格点とした RC 柱供試体の正負交番載荷試験の結果，設計で想定した通りの曲げおよびせん断補強効果が得られた。

1. はじめに

近年，高強度で耐久性に優れ，かつ施工性も良好な，連続繊維補強材を用いた補修・補強工法が注目されている。中でも CFRP グリッド(以下，グリッド，写真-1)を配置し，ポリマーセメントモルタル(以下，PCM)を吹付けて一体化する増厚工法が，ボックスカルバートの曲げ補強等に広く用いられている。

グリッドは，炭素繊維を耐薬品性に優れた樹脂に含浸させながら，縦筋と横筋を格子状に一体成形するもので，格点部はクロスラミネート構造となっている。そのため，鉄筋と比較すると，比重が 1.3~1.7 と非常に軽く(比強度は鉄筋の約 5 倍)，耐食性に優れる等の長所がある。現在製造されているグリッドの種類は筋 1 本当りの断面積により分類され，CR-4(断面積 6.6mm²)から CR-16(断面積 100mm²)まであり，補強量に応じて適したものを選定することができる。しかし，CR-10(断面積 39.2mm²)以上の断面積の大きいグリッドは，剛性が高く，補強対象構造物が下水道や水路ボックス等，搬入口が狭隘である場合，平板形状のグリッドを搬入口に合

わせて，曲げて搬入することが困難な場合がある。そこで，比較的搬入の容易な CR-10 より筋番の低いグリッドを 2 層接触配置することで，1 層の場合と同等の補強効果を得ることが可能であるか検討する必要がある。

著者らは，これまでにグリッドを 1 層配置した場合の必要定着長は 2 格点であるという結果¹⁾を得ており，本試験ではグリッドを 2 層接触配置した場合の必要定着長を，グリッドの層数，格点数および PCM の種類との関係から明らかにするために，付着強度試験を実施した。また，同試験から得られた必要定着長に基づき，段落とし部を有する RC 柱供試体を作製し，段落とし部を補強することで，グリッドを 2 層接触配置した時の曲げ，せん断補強効果および必要定着長を確認した。

2. FRP グリッド工法概要

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



写真-1 CFRP グリッド

ッド工法がある。本工法はグリッドを既設コンクリートに接触配置して PCM を吹付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-1)。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。

3. 付着強度試験

3.1 試験概要

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]²⁾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-2、グリッド配置状況を写真-2 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

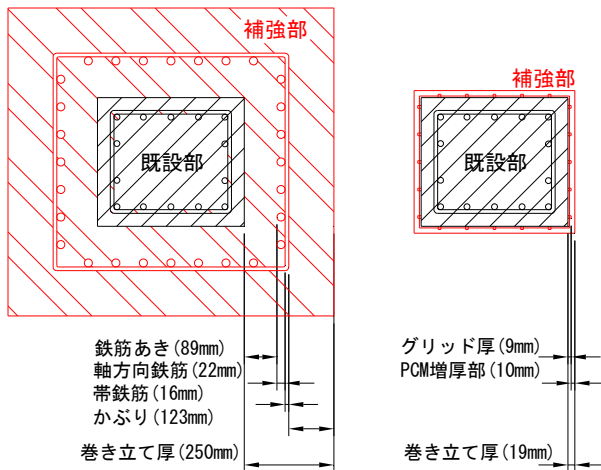


図-1 補強断面寸法(一例)

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、PCM ブロックと定着した。Type 1~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)³⁾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

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	2	高強度
4		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 各材料特性値

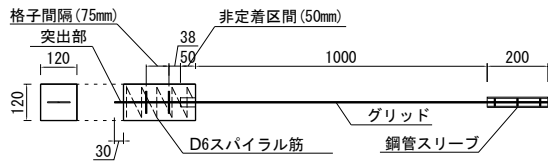
(a) グリッド

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

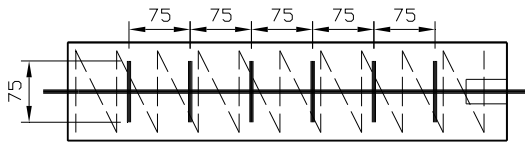
(b) PCM ※

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



(a) 概略図



(b) 格点部詳細図(6格点タイプ)

図-2 供試体形状



(a) 全体状況(6格点タイプ)



(b) PCMブロック詳細(2格点タイプ)

写真-2 グリッド配置状況

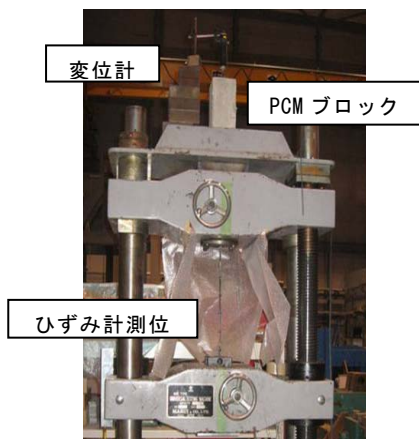


写真-3 試験状況

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。

3.2 試験方法

写真-3 に試験状況を示す。変位計はグリッド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。

3.3 試験結果

(1)破壊性状

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	8034	1.84×10^5	破断
	2	17.6	-	-	破断
	3	23.7	-	-	破断
2	1	23.2	8231	2.07×10^5	破断
	2	19.9	-	-	破断
	3	-	※ 計測不良		
3	1	43.6	7672	2.04×10^5	破断
	2	44.1	-	-	破断
	3	44.2	-	-	破断
4	1	44.7	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	8034	1.98×10^5	破断
	2	38.9	-	-	破断
	3	-	※ 計測不良		
6	1	45.7	8524	1.93×10^5	破断
	2	39.5	-	-	破断
	3	47.1	-	-	破断
7	1	43.2	7521	2.02×10^5	破断
	2	32.6	-	-	破断
	3	39.2	-	-	破断
8	1	36.2	7523	1.85×10^5	破断
	2	42.9	-	-	破断
	3	33.9	-	-	破断

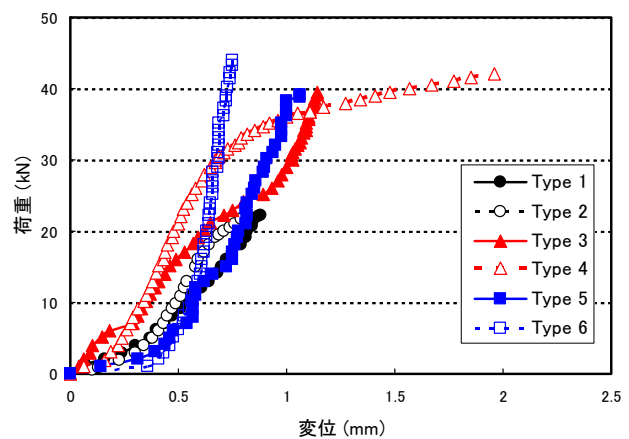


図-3 荷重-変位関係

表-3 に試験結果, 図-3 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-3 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,

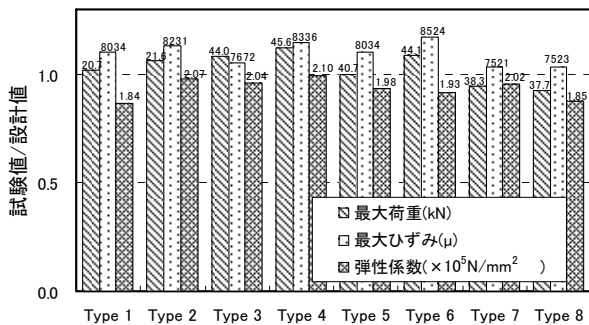


図-4 試験値および設計値の比較

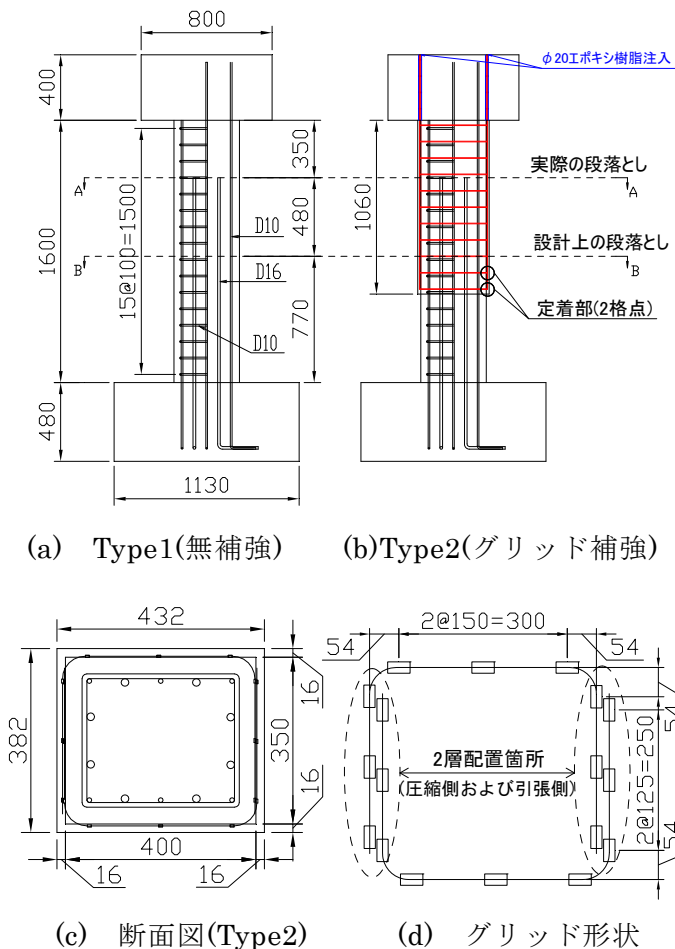


図-5 柱試験体の概略図

「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 PCM 4 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。

(2) 設計値との比較

図-4 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

表-4 各材料試験値

(a) 鉄筋

規格	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D10, SD295	9.5	71.3	323	455	2.0 × 10 ⁵
D16, SD295	15.9	198.6	329	487	2.0 × 10 ⁵

(b) 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)
CR-5	13.2	1400	1.0 × 10 ⁵

(c) コンクリート

規格	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
30-12-20 H	41.8	2.91 × 10 ⁴

(d) PCM

規格	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
高強度	71.6	2.88 × 10 ⁴

表-5 設計値

		(単位:kN)		
		A-A断面	B-B断面	基部
Type 1	P_{cr}	12.8	16.9	8.90
	P_{y0}	51.0	32.2	35.6
	P_u	67.4	37.1	47.1
	P_s	203	175	203
Type 2	P_{cr}	23.0	30.3	8.90
	P_{y0}	74.2	61.1	35.6
	P_u	108	75.9	47.1
	P_s	400	378	203

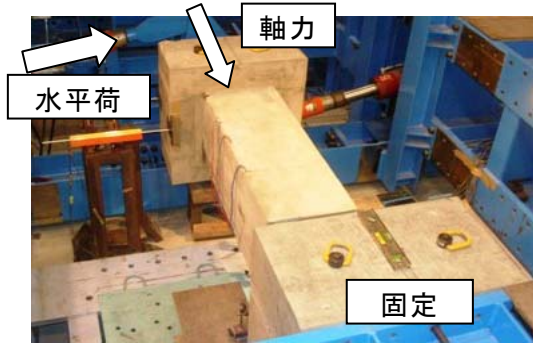


写真-4 試験状況

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. 柱試験

4.1 試験概要

前述の付着強度試験により、グリッドを 2 層配置した場合の必要定着長は、高強度型 PCM で 2 格点, 低弾性型 PCM で 4 格点以上が妥当であった。そこで、高強度型 PCM を用いて、グリッドを 2 層接触配置し、補強対象領域からの定着長を 2 格点として設計した柱型供試体の段落とし部の曲げ・せん断補強効果を確認するため、地震時を想定した正負交番載荷試験を実施した。

図-5 に試験体概要図を示す。柱部高 1600mm, 断面高×幅=350×400mm とし、実橋 RC 橋脚の約 1/5 スケールで作製した。既設部は基部から 1250mm の A-A 断面(実際の段落とし位置)で D16 の軸方向鉄筋を段落としした。段落とし鉄筋の定着長は、旧基準

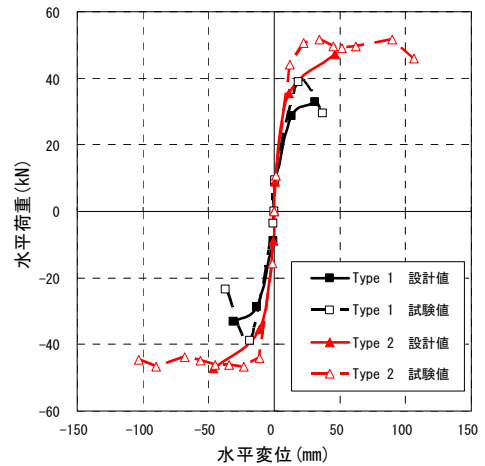


図-6 水平荷重-水平変位関係

の示方書より 30Φ としたため、設計上の段落とし位置は B-B 断面となる。なお、既設部の帯鉄筋は重ね継手とし、D10 を 100mm 間隔で 16 本配置した。使用したグリッドは CR-5, 格子間隔 100mm であり、コ型形状のグリッドを圧縮・引張作用側に 2 層となるように配置した。縦筋は B-B 断面より下側に 2 格子の必要定着長を取り、本試験では上部が先行して曲げ破壊しないように、上部フーチングに 3 格点定着した。よって、本試験での有効定着長の着目部は B-B 断面より下側となる。グリッド横筋は横拘束効果を期待できるように、継手長を 2 格点として接合した。PCM は最外縁補強筋からのかぶり長が 10mm となるように検出ピンを 1m²につき 4 箇所設置し、吹付けた。

表-4 に各材料試験値, 表-5 に設計値をそれぞれ示す。ひび割れ水平耐力 P_{cr} , 初降伏水平耐力 P_{y0} , 終局水平耐力 P_u およびせん断耐力 P_s は、道路橋示方書 V⁴⁾ (以下、道示 V), コンクリート標準示方書⁵⁾ および既設橋梁の耐震補強工法事例集⁶⁾ に基づき断面ごとに算出した。

4.2 載荷方法

写真-4 に試験状況を示す。載荷方法は、154kN(コンクリート設計基準強度の 3.7%, $\sigma=1.1\text{N/mm}^2$)の一定軸力下で正負の水平荷重を与えた。載荷点の位置は供試体基部から 2555mm である。正負交番載荷については変位制御とした。まず正側の変位を増加させ、

ひび割れ発生時の変位をひび割れ時変位 (δ_{cr}) と定義し、負側にも同じ変位を入力した。再び正側の変位を増加させ、基部のフーチングに定着した軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時の変位を初降伏変位 (δ_{y0}) と定義し、負側にも同じ変位を入力した。その後は δ_{y0} の整数倍で変位振幅を増加させながら正負交番に水平荷重を繰返した。

4.3 試験結果

(1) 補強効果

図-6 に各供試体の水平荷重・水平変位関係の包絡線、表-6 に試験結果を示す。試験値と設計値との比は水平荷重で 1.1~1.4, 水平変位で 0.7~2.6 となり、Type2 のひび割れ水平変位が設計より大きくなったが、それ以外は設計値とほぼ同程度となった。

Type1 は設計通りに段落とし部が曲げせん断破壊し、Type2 は、同部の曲げせん断破壊を回避し、橋脚基部が曲げ破壊した。水平耐力については、道示Vに基づく設計値で想定した通り、初降伏耐力が 1.13 倍の増加となった。

最大水平荷重の 80% まで低減したときの

表-6 試験結果

	水平荷重(kN)		試験値/設計値	
	設計値	試験値		
Type 1	ひび割れ P_{cr}	設計値	8.90	1.22
		試験値	10.9	
	初降伏 P_{y0}	設計値	28.7	1.36
		試験値	38.9	
	終局 P_u	設計値	33.0	1.32
		試験値	43.5	
水平変位(mm)		試験値/設計値		
ひび割れ δ_{cr}	設計値	0.49	1.59	
	試験値	0.78		
初降伏 δ_{y0}	設計値	13.0	1.43	
	試験値	18.6		
終局 δ_u	設計値	31.0	0.95	
	試験値	29.5		
	水平荷重(kN)		試験値/設計値	
	設計値	試験値		
Type 2	ひび割れ P_{cr}	設計値	8.90	1.19
		試験値	10.6	
	初降伏 P_{y0}	設計値	35.6	1.24
		試験値	44.2	
	終局 P_u	設計値	47.1	1.10
		試験値	51.6	
水平変位(mm)		試験値/設計値		
ひび割れ δ_{cr}	設計値	0.49	2.57	
	試験値	1.26		
初降伏 δ_{y0}	設計値	11.0	1.07	
	試験値	11.8		
終局 δ_u	設計値	46.0	0.74	
	試験値	34.2		

変位を終局変位 δ_u' とし、図-7 に示すように δ_u' までの P- δ 曲線で囲まれた部分の面積(正負側の平均)をエネルギー吸収能と定義した。グリッド補強供試体は段落とし部での脆性的な破壊から、基部での曲げ破壊へと破壊モードが移行した結果、無補強供試体に比べエネルギー吸収能が 12.9 倍と大幅に向上した。

(2) 断面のひずみ分布

図-8 および図-9 に P=30kN (基部の初

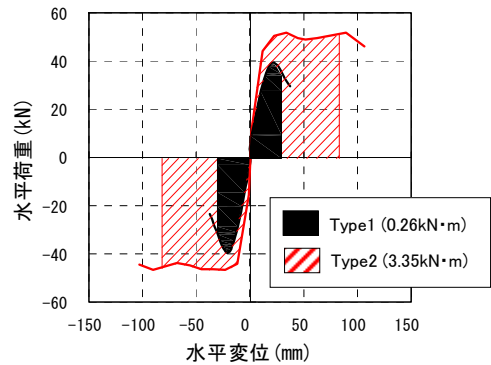


図-7 エネルギー吸収能

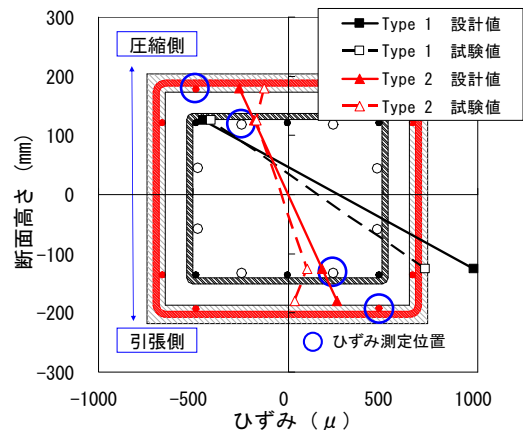


図-8 A-A 断面 ひずみ分布(P=30kN)

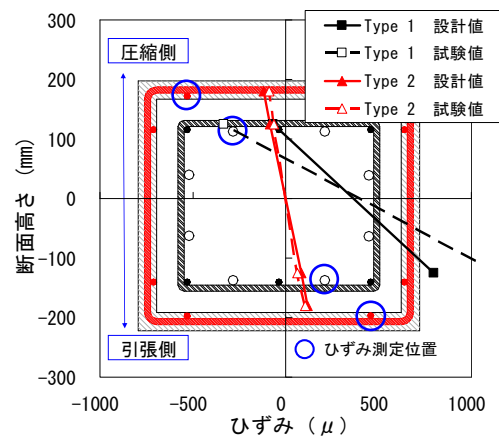


図-9 B-B 断面 ひずみ分布(P=30kN)

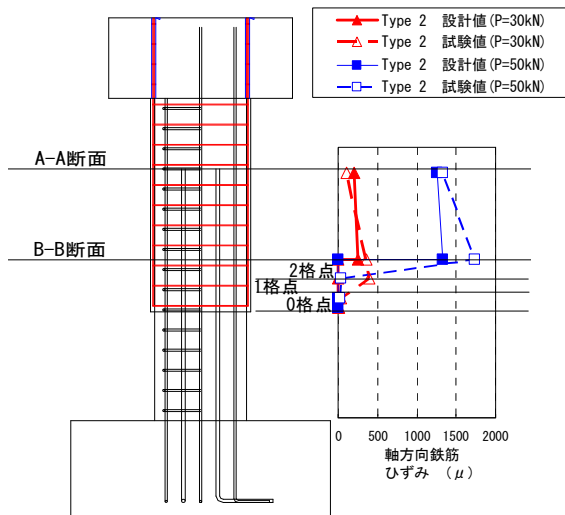


図-10 軸方向グリッドひずみ分布

降伏荷重の直前)における A-A 断面および B-B 断面のひずみ分布を示す。補強供試体は全断面有効(最外縁グリッドまでコンクリートの引張力を考慮した)として算出した。各断面において、平面保持の法則が成立しており、設計値と試験値がほぼ一致している。これより、圧縮・引張側に 2 層接触配置されたグリッドは有効に機能していることが確認された。

(3) 補強部軸方向定着長

図-10 に補強部軸方向グリッドの既設鉄筋降伏前と降伏後のひずみ分布を示す。縦軸が巻立て下端のグリッド位置を 0 格子(格点間隔: 100mm)として、上側に 100mm および 200mm の位置をそれぞれ 1 格点, 2 格点とした。補強部軸方向グリッドは、巻立て下端の鉄筋位置から上方に 2 格点の位置でひずみがピークとなっており、全断面有効と仮定した計算値ともよく一致している。このことより、有効定着長は 2 格点であり、高強度型 PCM を用い薄層で曲げ部材としてグリッドを 2 層配置した柱試験において、無限遠 PCM に埋め込まれたグリッドの付着試験結果と同様の結果が確認された。

5. 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確認を実施した。また、得られた知見により、実橋をモデル化した柱試験を実施した。これらの試験より得られた知見は以下の通りである。

- (1) 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。
- (2) 正負交番荷重試験を行った柱試験において、グリッドを 2 層接触配置し段落とし部を曲げ・せん断補強した供試体は、設計で想定した通り、同部での破壊を回避し基部の曲げ破壊となることで、無補強の供試体に比べ、初降伏耐力が 1.13 倍に増加した。
- (3) 薄層で曲げ部材としてグリッドを 2 層接触配置した正負交番 RC 柱荷重試験において、グリッドの付着試験結果と同様に、高強度型 PCM での必要定着長は 2 格点であることが確認された。

参考文献

- 1) FRP 格子筋 技術資料, FRP グリッド工法研究会, 2001.11
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[基準編], pp.435-438, 1999.11
- 3) 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), pp.337-340, 1996.9
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.148-178, 2002.3
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 構造性能照査編, pp.67-69, 2002.3
- 6) (財)海洋架橋・橋梁調査会: 既設橋梁の耐震補強工法事例集, 2005.4