

CFRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の耐震補強

Seismic Retrofit of Existing RC Pier by Polymer cement mortar for Shotcrete with CFRP Grid

中村智*, Arwin A.Amiluddin**, 渡邊弘史***, 谷口硯士****, 日野伸一*****, 山口浩平*****

Satoru Nakamura, Arwin A.Amiluddin, Hiroshi Watanabe, Kenshi Taniguchi, Shinichi Hino, Kohei Yamaguchi

*株式会社さとうベネック 九州支社 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 2-1-9)

**九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻博士後期課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

***アイテック株式会社 技術部 (〒870-0942 大分市羽田 193-1)

****日鉄コンポジット株式会社 トウシート部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3 番 8 号)

*****九州大学大学院 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

Seismic retrofit of Existing RC pier used RC lining method is most general, but there was a problem of increases of impediment ratio of river flow and the construction gauge and increases in the self-weight caused by the increase of the cross sectional area. Then it was proposed Seismic retrofit method by Polymer cement mortar for Shotcrete with CFRP Grid that is able to decrease thickness of cross section area. This paper shows the result of bond strength of the grid and PCM, and shear reinforcement effect of the RC beam and bending reinforcement effect of the Existing RC pier model which has the termination point of main reinforcement by PCM shotcreat method. As a result, it was clarified the effect of seismic retrofit based on Standard Specifications for Highway Bridges.

Key Words: CFRP grid, Polymer cement mortar, Seismic retrofit, Anchorope length

キーワード: CFRP グリッド, ポリマーセメントモルタル, 耐震補強, 定着長

1. はじめに

既設 RC 橋脚の耐震補強工法としては RC 巻立て工法, 鋼板巻立て工法, 連続繊維巻立て工法などがある。施工条件に制約がない場合 RC 巻立て工法が一般的に用いられるが, 構造上 250mm 以上の断面増加が必要となり¹⁾, 河積阻害率・建築限界の増大や自重の増加などに問題があった。その際には鋼板巻立て工法や連続繊維巻立て工法の検討がなされるが, 鋼板巻立て工法は施工性や経済性, 連続繊維シート巻立て工法は河川内橋脚の場合は湿潤面への接着性や, 雨天時の施工などに問題があった。

そこで, CFRP グリッド (以下, グリッド) を補強筋としてポリマーセメントモルタル (以下, PCM) 吹付け工法により一体化する耐震補強工法を提案した。補強筋として用いるグリッドは炭素繊維を格子状に樹脂含浸成形させたもので, 軽量・高強度で遮塩性, 耐食性に優れた材料である。様々な形状に加工可能であり, 筋の断面積や間隔を変更することで補強量を調整できる。また, 格点部は縦筋と横筋が高い交点強度で同一断面上に成形されるクロスラミネート構造となっているため施工

厚を薄くできる。

グリッドは通常 1 枚が 3.0×2.0m 程度の形状で工場作製されるため通常は継手部が発生する。その際にはこれまでの研究²⁾から 3 格点以上重ね合わせることで母材の破断強度以上の継手強度が得られることが明らかとなっている。また, 設計上多くの補強量が必要となり断面積の大きな (剛性の高い) グリッドを用いる場合で狭い場所への可搬性に問題が生じる場合があるが, その際には断面積の小さな (剛性の低い) グリッドを 2 層接触配置して, 1 層の場合と同様の補強効果を得ることが可能である。

図-1 に補強概略図を示す。既設 RC 橋脚の下地処理 (バキュームブラスト) を行い, グリッドを既設表面に接触配置し, リベットアンカーにて仮固定する (設計上アンカーの耐力は考慮しない)。その後かぶり厚が 10mm 以上もしくはグリッド厚さ以上となるように PCM を吹付けて既設構造物と増厚一体化する。グリッド 1 層の厚さはグリッドの筋番 CR-16 (鉄筋径 D16, SD345 相当) の場合 11mm であるため仕上がり厚さは 22mm となり従来工法と比較して 1/10 以下での巻立てが可能である。

また、本工法はコテ塗りと吹付けによる施工方法が可能であるが、PCM を吹付ける場合には、コテ塗りと比較して一度に施工できる範囲が広く、施工性・作業効率が向上し、工費の低減、工期の短縮が可能となる。なお、PCM はプレミックスタイプで水と練り混ぜるだけで混合が可能で品質が安定する等の長所がある。

本研究ではグリッドを用いた PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の耐震補強効果の検証を目的としてグリッドの定着長を確認するためのグリッドと PCM の付着強度試験（グリッドが 1 層または 2 層の場合）、せん断補強効果を確認するための 4 面巻き立てによるはり試験、段落とし部を有する既設 RC 橋脚の曲げ補強効果を確認するための正負交番載荷試験を行った。

2. 付着強度試験によるグリッドの定着長

2.1 目的

付着強度試験は、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（JSCE-G503-1999）³⁾ に準じて PCM ブロックに埋め込んだグリッドに引張力を作用させ引抜くことで、グリッドと PCM との付着強度を確認した。

2.2 試験体および試験方法

表-1 に試験体の種類、表-2 に材料特性値を図-2 に形状を示す。試験体の種類はグリッド層数、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。材料特性値は、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。

試験体の形状は一辺の長さ 120mm の PCM ブロックに、グリッド（CMR-5、格子間隔 75×75mm）の縦筋（1 層の場合は 1 本、2 層の場合は 2 本）を定着した。設計上グリッドは表面付着力がゼロで、縦筋と横筋で囲まれた部分の PCM の付着力とグリッドの格点部で機械的に付着力を確保している。そこで本試験では横筋を格子間隔と同じ長さの 75mm だけ残して、PCM ブロック内部に定着した。Type 1~Type 4 は 2 格点、Type 5, 6 は 4 格点、Type 7, 8 は 6 格点の定着長を設け、スパイラル筋で補強した。

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。自由端側のグリッドは PCM ブロックから 30mm 突出させ、端面をグリッド軸に垂直に平滑面に仕上げ、グ

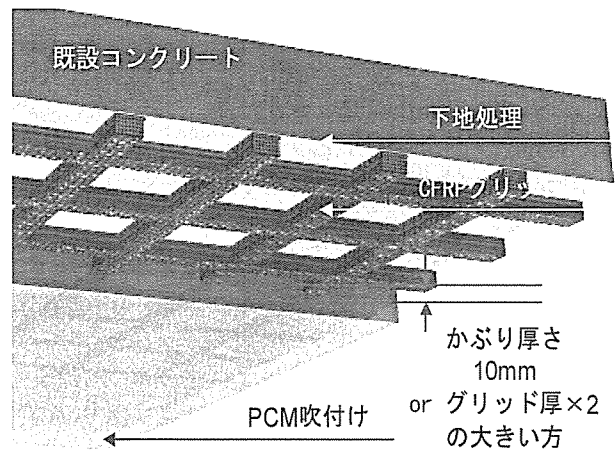


図-1 補強概略図

表-1 試験体の種類

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

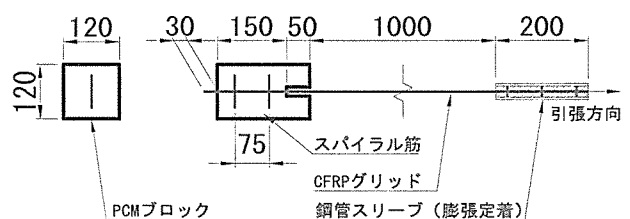
表-2 材料特性値

(a) グリッド

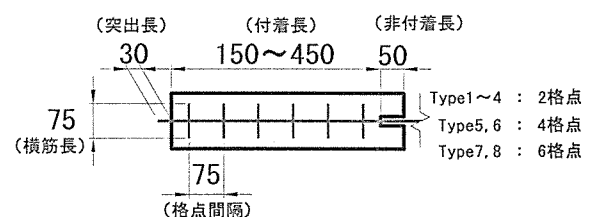
規格	断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)
CMR-5	13.2	1778	2.12×10^5	7272

(b) PCM

規格	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
高強度	57.2	2.70×10^4
低弾性	26.3	1.40×10^4



(a) 概略図 (2 格点タイプ)



(b) 格点部詳細図 (6 格点タイプ)

図-2 試験体の形状

リッドのすべり量を計測するための変位計を設置し、一様な速度でグリッドを引抜き、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。

2.3 結果および考察

試験結果を表-3、図-3に示す。低弾性PCMで4 格点のType4を除けば全て母材破断であり、これを「破断による破壊」と定義した。Type4 は荷重33.0kN あたりからPCM ブロックからの引抜けにより変位が増加しており、これを「引抜けによる破壊」と定義した。なお、4 格点のType 5,6 においては、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 7,8 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 格点の定着長で母材の引張強度以上の付着強度が得られ、グリッドが2 層の場合は、高強度型 PCM で2 格点、低弾性型 PCM で4 格点の定着長で母材の引張強度以上の付着強度が得られた。ただし、低弾性型 PCM で2 層 2 格点の Type4 は最大荷重平均値が 45.6kN で、母材が破断する荷重レベルまでほぼ達していたがこれは PCM の圧縮強度 (14 日強度) の差異 (高強度: 57.0N/mm^2 , 低弾性: 26.3N/mm^2) 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。ただし設計上のグリッドの引張強度は破断ひずみの 2/3 (4848μ) ⁵⁾ であるため設計上は2 格点で十分な格点強度を有している。

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。

3. はり試験によるせん断補強効果

3.1 試験概要

本試験は、既設 RC 橋脚のせん断補強を想定し、RC はりを FRP グリッドを補強筋として PCM 吹付け工法で 4 面巻立て補強した試験体をせん断破壊させ、既往のせん断耐力式との比較を行うことで、本工法のせん断補強効果について検証したものである。

3.2 試験体および試験方法

試験体の種類ならびに材料特性値を表-4, 5 に、形状を図-5 に示す。無補強試験体は、せん断スパン $a=550\text{mm}$, 断面形状 $200\times 200\text{mm}$ で軸方向鉄筋 (D22 SD345) を 8 本配置した。帯鉄筋 (D10 SD295A) は、補強前後でと

表-3 試験結果

Type	No	最大荷重 (kN)	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		-	-	
	3	23.7		-	-	
2	1	23.2	21.6	8231	2.07×10^5	破断
	2	19.9		-	-	
	3	*計測不良		-	-	
3	1	43.6	44.0	7672	2.04×10^5	破断
	2	44.1		-	-	
	3	44.2		-	-	
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		-	-	
	3	*計測不良		-	-	
6	1	45.7	44.1	8524	1.93×10^5	破断
	2	39.5		-	-	
	3	47.1		-	-	
7	1	43.2	38.3	7521	2.02×10^5	破断
	2	32.6		-	-	
	3	39.2		-	-	
8	1	36.2	37.7	7523	1.85×10^5	破断
	2	42.9		-	-	
	3	33.9		-	-	

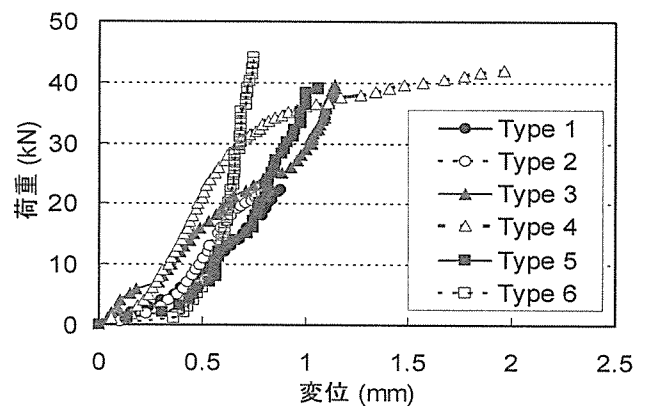


図-3 荷重-変位関係

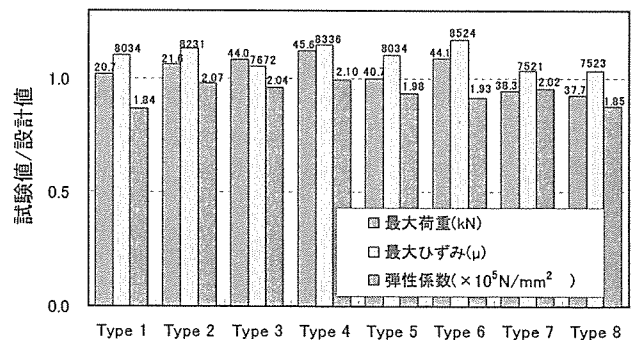


図-4 試験値と設計値との比較

表-4 試験体の種類

タイプ	PCM種類	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
無補強	-	35.0	3.06×10^4	2.99
グリッド	高強度	69.5	2.61×10^4	2.97

もにせん断破壊先行型となるようにスパン中央と支点到に3本配置した。補強試験体（グリッド）は、補強筋として軸方向筋（CR-10）と周方向筋（CR-6）を90度で配交させたグリッドを用いた。周方向筋は構造細目 $d/2=115\text{mm}$ 以下を満足するように110mm間隔で配置した。また、周方向筋の継手位置は、載荷試験時の曲げ圧縮・引張側となるように2格点を重ね合わせた。巻立て厚は、純かぶりが10mmとなるように18mmとしてPCM吹付け工法により増厚した。載荷は、片側をローラー支持、他方をピン支持として、スパン中央位置の漸増載荷（載荷幅100mm）とした。

3.3 結果および考察

ひび割れ耐力 P_{cr} 、初降伏耐力 P_{y0} 、終局耐力 P_u 、せん断耐力 P_s を道路橋示方書 V^6 およびコンクリート標準示方書 7 に基づき算出した。なお、せん断耐力については、断面の有効高を引張鉄筋の図心位置としたものを設計値-1、最外縁の引張鉄筋位置としたものを設計値-2として両者を試験値と比較した。本試験ではせん断耐力の評価を目的としているため、全試験体ともせん断破壊するように、 $P_{y0}/P_s > 1.5$ と設計した。

試験結果を表-6に示す。なお、同表の試験値は、各タイプ2体の平均値である。破壊形態は、全試験体ともせん断破壊で、まず載荷点直下に曲げひび割れが発生し、その後両支点と載荷点とを結ぶ線上にせん断ひび割れが発生・進展し、最終的にはせん断破壊した。試験値と設計値-1の比は1.3以上であり、道示 V のせん断耐力式による設計値と比較すれば、十分な安全側となることがわかった。従来のRC巻立て工法と比較して、本工法のように巻立て厚の薄い場合でも、2格点の定着長を確保することで十分なせん断補強効果が期待できることが確認された。

次に、試験値と設計値-2の比は補強試験体で0.90とやや危険側評価となった。これは、終局時に既設コンクリートとPCMの界面で剥離が生じたためと考えられる。また、軸方向および周方向グリッドの交点部で破壊が生じていたことが、試験終了後に観察されており、せん断破壊よりもグリッドの破壊がやや先行したことも影響していると考えられる。

荷重-スパン中央たわみ関係を図-6に示す。補強試験体は、いずれも無補強試験体に比べて最大荷重および剛性が向上している。

荷重-ひずみ関係を図-7に示す。同図の左側に圧縮縁コンクリートまたはPCMのひずみを、右側に最外縁引張鉄筋ひずみを示す。鉄筋およびグリッドの降伏、破断ひずみはそれぞれ 1975μ 、 14000μ であるが、試験での最大値はそれぞれ 1400μ 、 4500μ 程度であり、鉄筋降伏やグリッド破断はしていないことがわかる。また圧縮縁コンクリートのひずみも低弾性試験体を除いては、ほぼ弾性挙動を呈していることがわかる。

表-5 材料特性値

(a) 鉄筋

径	規格	部材	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
D22	SD345	軸鉄筋	395	582	2.0×10^5
D10	SD345	帯鉄筋	323	455	

(b) グリッド

名称	規格	部材	断面積 (mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
グリッド	CR-10	軸方向	39.2	1400	1.0×10^5
	CR-6	周方向	17.5		

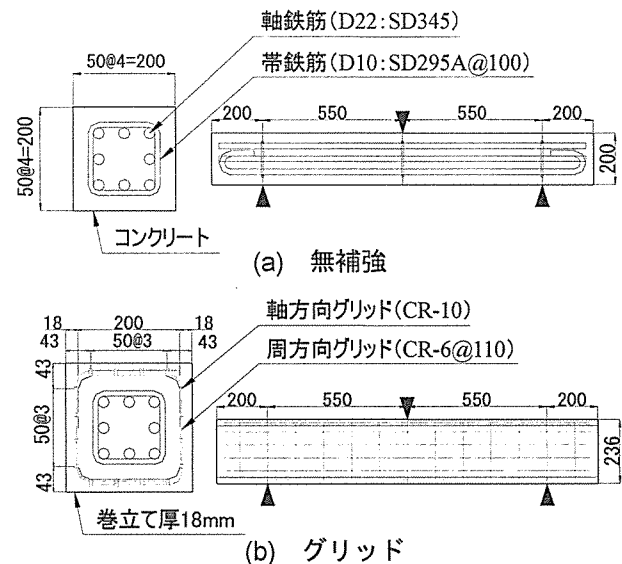


図-5 試験体の形状

表-6 試験結果

タイプ	項目	P_{cr} (kN)	P_{y0} (kN)	P_u (kN)	P_s (kN)	試験/設計
無補強	試験	15.1	-	-	147	-
	設計-1				96	1.53
	設計-2	19.3	211	216	112	1.31
グリッド	試験	29.0	-	-	352	-
	設計-1				268	1.31
	設計-2	24.7	535	438	376	0.94

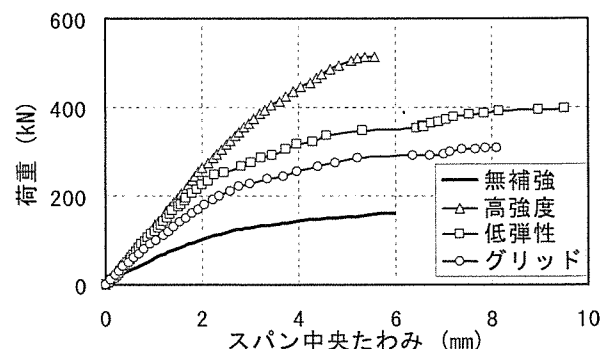


図-6 荷重-スパン中央たわみ関係

4. 柱試験による段落とし部の曲げ補強効果

4.1 試験概要

2. の付着強度試験により、グリッドの定着長は2 格点程度であった。そこで断落とし部を有する既設 RC 橋脚を作製し、設計上の断落とし位置からの定着長を2 格点としてグリッドを2 層接触配置し、高強度型 PCM を用いて PCM 吹付け工法により一体化した柱形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。

4.2 試験体および試験方法

試験体の形状を図-8 に示す。試験体は既設 RC 橋脚を約 1/5 スケールで模型化し、柱部の高さ 1600mm、断面高さ 350mm、断面幅 400mm とした。

A-A 断面（基部から 150mm の断面）に軸方向鉄筋（D10:SD295×6 本+D16:SD295×8 本）を 50mm のかぶりを確保して配置し、C-C 断面（実際の段落とし位置）で、D16 の鉄筋を段落としとした。段落とし鉄筋の定着長は昭和 55 年以前の設計⁸⁾ に従い $30\phi=480\text{mm}$ （ ϕ ：鉄筋径）とした。よって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（D10:SD295）はコンクリートの横拘束効果を期待しないため、重ね継手とし 100mm 間隔で 16 本配置した。

補強に用いたグリッドは 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 格点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 格点アンカー定着した。よって、本試験での定着長の着目部は 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が 10mm となるように吹付けた。

写真-1 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約 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。橋脚の下フーチングは固定端で、載荷点の位置は試験体基部から 2555mm（ピン支点）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載荷を繰返した。

4.3 補強設計

設計計算に用いたコンクリート、PCM および補強筋の材料試験値を表-7 に示す。コンクリートおよび PCM は試験体作成時にテストピース（試験項目ごとに 3 本）を

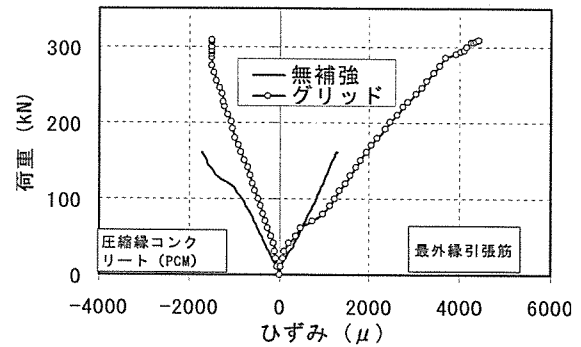


図-7 荷重-ひずみ関係

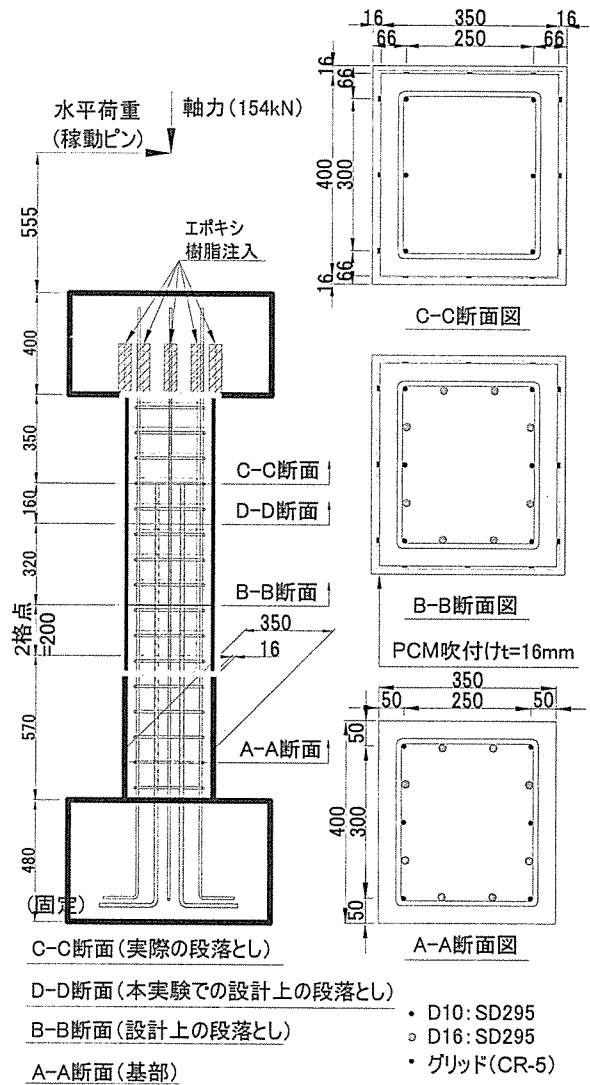


図-8 試験体の形状

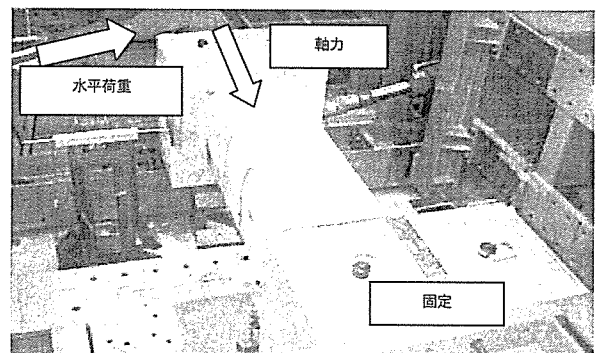


写真-1 試験状況

採取し、載荷試験当日に材料試験を行った。また、補強筋として用いた鉄筋の引張試験も行った。図-9、表-8に設計値を示す。単柱式RC橋脚のひび割れ水平耐力 P_{cr} 、初降伏水平耐力 P_{y0} 、終局水平耐力 P_u 、ひび割れ変位 δ_{cr} 、初降伏変位 δ_{y0} 、終局変位 δ_u 、せん断耐力 P_s を道示V、コンクリート標準示方書、および既設橋梁の耐震補強工法事例集⁹⁾に基づき断面ごとに算出した。

段落とし部の曲げ補強は、A-A断面が初降伏曲げモーメント ($91.0\text{kN}\cdot\text{m}$) の1.2倍に達したときのB-B断面の作用モーメント ($76.3\text{kN}\cdot\text{m}$) と、補強前のB-B断面の初降伏曲げモーメント ($42.0\text{kN}\cdot\text{m}$) の差分の不足曲げモーメントに対して行った。

無補強試験体は、既設部段落とし鉄筋の有効定着長を $10\phi=160\text{mm}$ として、C-C断面から下側に 160mm の断面 (D-D断面：本実験での設計上の段落とし位置とする) における初降伏水平耐力 P_{y0} 、ならびに終局水平耐力 P_u を算出した。結果は $P_{cr}=8.9\text{kN}$ でA-A断面にひび割れが発生し、 $P_{y0}=28.7\text{kN}$ でD-D断面の軸方向鉄筋が降伏、 $P_u=33.0\text{kN}$ でD-D断面の最外縁コンクリートが圧壊する。補強試験体も同様に算出すれば、 $P_{cr}=8.9\text{kN}$ でA-A断面にひび割れが発生、 $P_{y0}=35.6\text{kN}$ でA-A断面の軸方向鉄筋が降伏、 $P_u=47.1\text{kN}$ でA-A断面の最外縁コンクリートが圧壊する。水平変位は各断面 (A-A、B-B、C-C、D-D断面) における $M-\phi$ 関係をそれぞれ計算し、単柱式RC橋脚の静的解析により算出した。両試験体を比較すると、ひび割れが発生するのは互いにA-A断面であるのでひび割れ耐力は等しくなる。また、無補強試験体はD-D断面が先に降伏するが、補強試験体はD-D断面の曲げ耐力が向上するためA-A断面が先に降伏する。また、補強試験体はひび割れ後の剛性、終局耐力・変位も向上する。なお、せん断耐力 P_s はいずれの断面においても曲げ耐力より十分大きい。

4.4 結果および考察

(1) 水平荷重-水平変位関係

図-10に水平荷重-水平変位関係の包絡線を、表-9に試験結果をそれぞれ示す。無補強試験体は $P_{cr}=10.9\text{kN}$ でA-A断面にひび割れが発生した。その後、本来ならばD-D断面の鉄筋ひずみが降伏となる変位を初降伏変位 δ_{y0} とすべきであるが、D-D断面のひずみ値の測定が困難であったため、A-A断面の鉄筋ひずみが降伏となる水平変位を $\delta_{y0}=18.6\text{mm}$ と定義した。その後は $P_u=43.5\text{kN}$ で最大荷重を示し、 $+2\delta_y$ 、 $-2\delta_y$ でそれぞれ最大荷重の76%、60%まで水平荷重が低下したため載荷を終了した。補強試験体は $P_{cr}=10.6\text{kN}$ でA-A断面にひび割れが発生し、 $P_{y0}=44.2\text{kN}$ でA-A断面の鉄筋ひずみが降伏となったため初降伏変位を $\delta_{y0}=11.8\text{mm}$ と定義した。その後 $\pm 3\delta_y$ まではA-A断面のひび割れ幅が拡大しながら、水平荷重も増加した。 $P_u=51.6\text{kN}$ ($+4\delta_y$) で最大荷重を示し、以後 $+6\delta_y$ 、 $+8\delta_y$ 、 $+10\delta_y$ 、 $+12\delta_y$ でそれぞれ最大荷

表-7 材料特性値

(a) コンクリート・PCM

項目	コンクリート	PCM
圧縮強度	41.8	71.6
ヤング係数	2.91×10^4	3.05×10^4
引張強度	1.54	3.43
曲げ強度	2.68	7.58

(b) 補強筋

項目	径	部材	降伏強度	引張強度	弾性係数
SD295	D10	既設部	323	455	2.0×10^5
	D16		329	487	
グリッド	CR-5	補強部	1400	1400	1.0×10^5

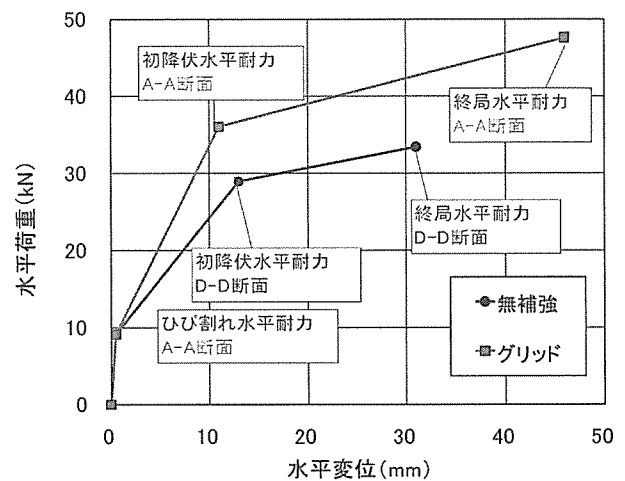


図-9 設計値

表-8 設計値

	無補強				グリッド			
	P_{cr}	P_{y0}	P_u	P_s	P_{cr}	P_{y0}	P_u	P_s
C-C断面	16.9	32.2	37.1	175	30.3	61.1	75.9	378
D-D断面	15.0	28.7	33.0		27.0	54.4	67.6	
B-B断面	12.3	23.5	27.1		22.2	44.6	55.5	
A-A断面	8.9	35.6	47.1	203	8.9	35.6	47.1	203

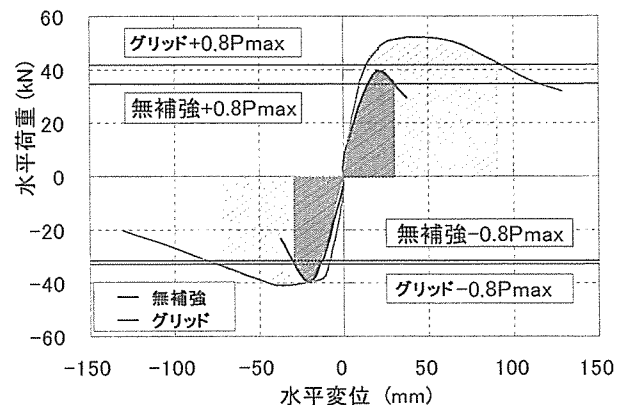


図-10 水平荷重-水平変位関係の包絡線

重の 97%, 84%, 70%, 61%と水平荷重が低下したため
 載荷を終了した。水平荷重に関して設計値と実験値を比
 較すると、実験では無補強試験体の降伏耐力は C-C 断面
 のひずみ値が計測不良で、A-A 断面の降伏で定義したた
 め、やや大きく (1.4) になった。グリッドは実験/設計が
 1.2 とほぼ一致していた。なお、終局耐力は無補強に比べ
 約 20%増加した。

(2) 塑性率およびエネルギー吸収能

表-10 に塑性率およびエネルギー吸収能を示す。本研
 究では実験における正側載荷時の水平荷重が最大水平
 荷重の 80%まで低減した時の変位を終局変位 $\delta u'$ とし、
 これを降伏変位 δy で除した値 ($\mu = \delta u' / \delta y$) を塑性
 率として定義した。また、図-10 に示すように終局変位
 $\delta u'$ 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。補強試験体は段
 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、無補強試験体に比べ、塑性
 率が 5.3 倍、エネルギー吸収能が 12.9 倍と大幅に向上し
 た。

(3) 補強筋のひずみ分布

図-11 に $P=30.0\text{kN}$ (A-A 断面の初降伏荷重の直前)
 におけるグリッドのひずみ分布を示す。縦軸が巻立て下
 端のグリッドを 0 格点として、上側に 1 格点、2 格点と
 した。グリッドは巻立て下端のから上方に 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。これらから定着長は 2 格
 点程度であることが確認された。

(4) ひび割れ性状および破壊性状

写真-2, 3 に破壊性状を示す。無補強供試体は写真-
 2 に示すように $P_{cr}=10.9\text{kN}$ で A-A 断面にひび割れが発生、
 $P=20.0\text{kN}$ で B-B 断面と C-C 断面にひび割れが発生した。
 $+\delta y_0$ で C-C 断面のひび割れ幅が急増し、 $-2\delta y_0$ で C-C
 断面より上方に 50mm の位置で軸方向鉄筋が降伏・座屈
 し、かぶりコンクリートを剥落させ耐荷力を失った。

これは、ひずみゲージによる測定の結果、既設部段落
 とし軸方向鉄筋の実際の定着長が約 10 ϕ であったため、
 B-B 断面の抵抗曲げモーメントが大きく、実際の段落と
 し位置が D-D 断面となり、実験において A-A 断面の降
 伏曲げモーメントの 1.2 倍が作用したときの D-D 断面の
 作用曲げモーメントと抵抗曲げモーメントの交点付近

(D-D 断面より上方に約 210mm) に塑性ヒンジ領域が発
 生し、その領域内で曲げ破壊後にせん断破壊したものと
 考えられる。補強供試体は写真-3 に示すように
 $P_{cr}=10.6\text{kN}$ で A-A 断面にひび割れが発生、 $P_{y0}=35.6\text{kN}$
 で B-B 断面と C-C 断面にひび割れが確認された。その後
 $2\sim 6\delta y_0$ は柱全体 (周方向グリッドの位置) にひび割れ
 が分布するとともに、基部のひび割れ幅は増大した。 $+8$
 δy_0 で A-A 断面のコンクリートに浮きがみられ、 $+10\delta y_0$
 で A-A 断面の軸方向鉄筋が降伏・座屈し、かぶりコンク
 リートを剥落させ塑性ヒンジを形成して曲げ破壊した。

表-9 試験結果

(a) 無補強

水平荷重 (kN)	P_{cr}		P_{y0}		P_u	
	設計	実験	設計	実験	設計	実験
	8.9	10.9	28.7	38.9	33.0	43.5
実験/設計	1.2		1.4		1.3	
水平変位 (mm)	δ_{cr}		δ_{y0}		δ_u	
	0.49	0.78	13.0	18.6	31.0	29.5
実験/設計	1.6		1.4		1.0	

(b) グリッド

水平荷重 (kN)	P_{cr}		P_{y0}		P_u	
	設計	実験	設計	実験	設計	実験
	8.9	10.6	35.6	44.2	47.1	51.6
実験/設計	1.2		1.2		1.1	
水平変位 (mm)	δ_{cr}		δ_{y0}		δ_u	
	0.49	1.26	11.0	11.8	46.0	34.2
実験/設計	2.6		1.1		0.7	

表-10 塑性率およびエネルギー吸収能

塑性率	無補強	グリッド	グリッド/無補強
	1.83	9.61	5.3
エネルギー吸収能 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	0.26	3.35	12.9

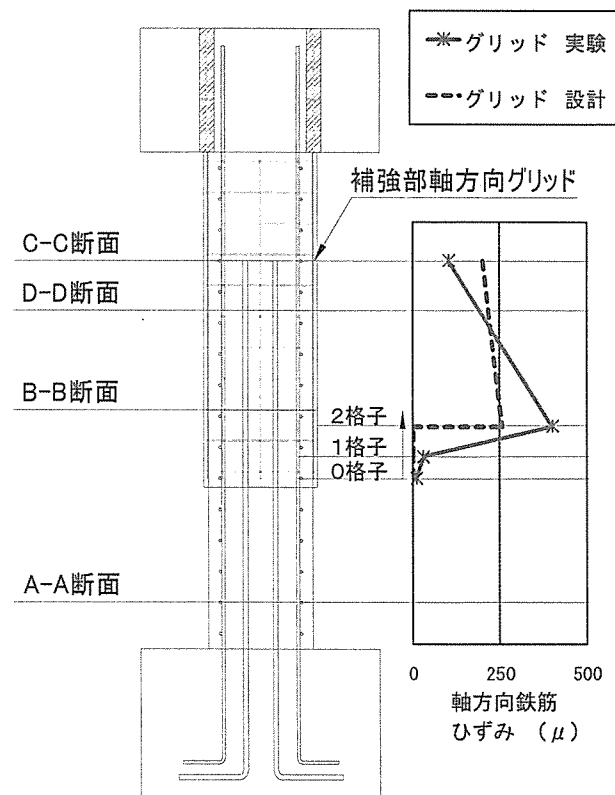


図-11 グリッドのひずみ分布 ($P=30\text{kN}$)

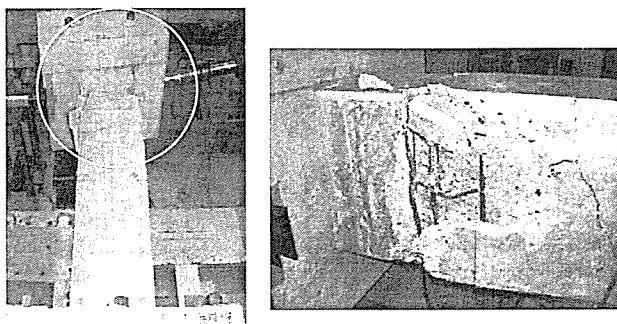


写真-2 無補強（C-C断面付近での破壊）

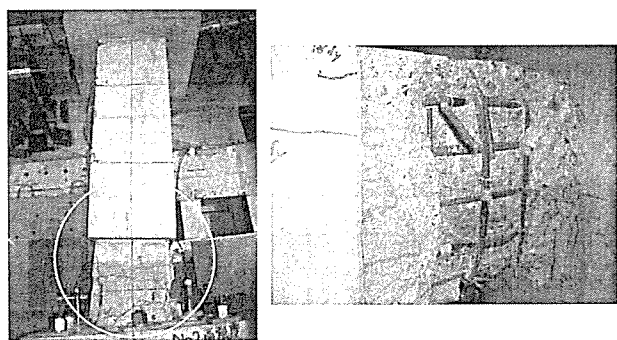


写真-3 グリッド（A-A断面での破壊）

5. まとめ

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) グリッドの定着長は、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) PCMにより補強されたはりのせん断耐力は、既存の設計法の算定値よりも安全側となり、せん断補強効果は十分であることがわかった。
- (3) 正負交番載荷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り、無補強の供試体に比べ、初降伏耐力が1.13倍に増加した。

- (4) 曲げ部材として薄層のグリッドを2層接触配置した正負交番RC柱載荷試験において、グリッドの付着試験結果と同様に、高強度型PCMの定着長は2格点であることが確認された。

以上より、CFRPグリッドを用いたPCM吹付け工法による既設RC橋脚の耐震補強効果が確認された。

謝辞

ここに本研究を遂行するに当たり、研究に関するご助言材料の提供、および工法のご指導を頂きましたFRPグリッド工法研究会および、RC構造物のポリマーセメントモルタル吹付け補修・補強工法協会（略称：吹付け協会）の皆様へ感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 日本高速道路株式会社：設計要領第二集 橋梁保全編，2002.3
- 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]，2005.3
- 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），pp.337-340，1996.9
- 5) 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），2007.7
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002.3
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002.3
- 8) 全日本建設技術協会：建設省制定土木構造物標準設計第6～12巻（橋台、橋脚）の手引き 建設省土木研究所編，pp.18-19，1976.5
- 9) （財）海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集，2007.4