論文　PCM 吹付け工法による補強部界面の付着特性およびはりのせん断補強効果に関する実験的研究

山口　浩平[1]・日野　伸一[*2]・中村　智[*3]・Amiruddin　Arwin[*4]

要旨：既設 RC 橋脚の耐震補強工法として，鋼板や連続繊維シートなどを用いて橋脚周囲を巻立てる工法があるが，既設橋梁の建築限界，河川阻害率の面などから採用できない場合がある。そこで著者らは，従来の RC 巻立て工法に比べて巻立て厚を約 1/5 に抑えられ，巻立て範囲を狭くすることが可能な，鉄筋を既設橋脚表面に接触配置させ，ポリマーセメントモルタル（以下 PCM）吹付けにより巻立てを行う工法を開発した。本研究では，実施工で標準的に用いられる D22 の鉄筋を用いた付着強度試験およびはり試験を行い，鉄筋の定着長，既設コンクリート面と補強面との界面の付着特性，はりのせん断補強効果について明らかにした。

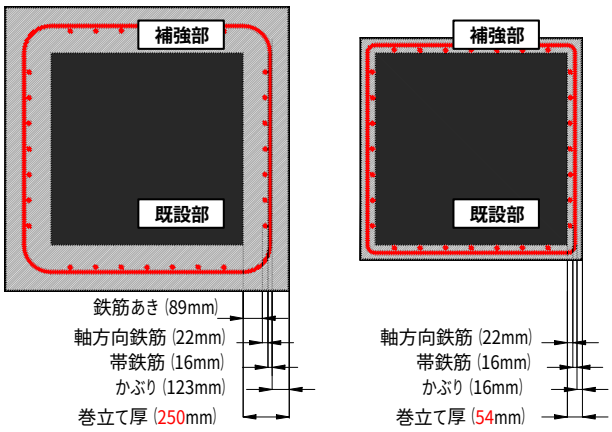
キーワード：耐震補強，ポリマーセメントモルタル，吹付け工法，付着特性，補強部界面

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 [1)]。このうち RC 巻立て工法は既設橋脚の周囲を RC で巻立て, RC 部材と既設橋脚が一体となって挙動する工法である。この工法は，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。

これらの問題を解決するため, PCM を用いて巻立て厚を低減させる工法が開発され, 施工実績をあげている [2)]。この工法は補強筋を既設橋脚表面に接触配置し，鉄筋かぶりを確保するまで PCM を塗り込んで既設橋脚と一体化するもので，巻立て厚を RC 巻立て工法の約 1/5 に抑えることが可能である（**図－1**）。しかし，従来の左官工法による施工では一度に施工できる範囲が狭いため工期が長期化しやすく，手作業による施工のため品質の均一化が難しいなどの問題点がある。

これまでに著者らは，PCM 吹付けにより既設 RC 橋脚を耐震補強する工法（PCM 吹付け工法：**図－2**）を提案し，地震時を想定した正負交番載荷試験を行い，本工法の有用性について示した [3)]。一方，本工法では一般的に付着特性に優れる PCM を用いること，また補強筋を接触配置させ巻立て厚が薄くなるために，既設コンクリートと補強筋と PCM 相互の付着特性の解明が重要となる。そこで本研究では，既設コンクリートと補強筋と PCM との付着特性およびせん断補強効果に着目して，実施工で標準的に用いられる D22 の鉄筋および主として高強度 PCM を用いて付着強度試験およびはりのせん断試験を実施した。



(a) RC 巻立て工法　　(a) PCM 巻立て工法

図－1　補強断面寸法（一例）

図－2　PCM 吹付け状況

*1 九州大学大学院　工学研究院　助教　博（工）　（正会員）
*2 九州大学大学院　工学研究院　教授　工博　（正会員）
*3 （株）さとうベネック　施工本部工務部　（正会員）
*4 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　（非会員）

2. 補強部界面の付着特性

2.1 付着強度試験

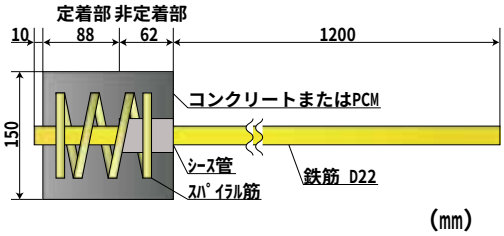
(1) 試験概要

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）[4] に準じてブロックに埋め込んだ鉄筋に引張力を作用させ引抜くことにより，鉄筋とコンクリートまたは PCM との付着強度を確認する目的で行った。

(2) 試験体および試験方法

試験体概略図を**図－3** に示す。試験体は，ブロックに使用する材料をコンクリート, 高強度 PCM, 低弾性 PCM とした 3 種類(各 3 体)である。形状は, 150×150×150mm のブロックに鉄筋(D22　SD345)を付着長が 4φ(88mm)になるように埋め込み，スパイラル筋で補強したものである。

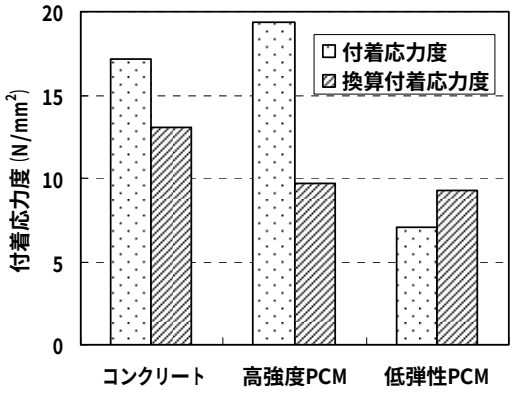
試験は，試験体を自由端側の端面を鉄筋軸に垂直な平滑な面に仕上げ，鉄筋のすべり量を計測するための変位計を設置し，一様な速度で荷重を加えて鉄筋を引抜いた。



図－3　試験体概略図（付着強度試験）

表－1　試験結果（付着強度試験）

タイプ	コンクリート	高強度PCM	低弾性PCM
最大荷重（kN）	105	118	43.0
圧縮強度（N/mm^2）	39.4	60.0	22.9
設計基準強度（N/mm^2）	30.0		
付着応力度（N/mm^2）	17.2	19.4	7.08
換算付着応力度（N/mm^2）	13.1	9.70	9.28



図－4　試験結果（付着強度試験）

(3) 結果および考察

試験結果を**表－1，図－4** に示す。同表は，各 3 体の平均値である。コンクリート, 高強度 PCM, 低弾性 PCM の付着応力度は，それぞれ 17.2，19.4，7.08 N/mm^2 であり，高強度 PCM はコンクリートと同等以上であることがわかる。ここで低弾性 PCM の付着応力度が小さいのは，圧縮強度が相対的に小さいためであると考えられる。

また，本試験方法では，付着応力度に圧縮強度と設計基準強度の比をかけた値を換算付着応力度と定義している。本試験での設計基準強度は 30N/mm^2 であるため，換算付着応力度はコンクリート 13.1N/mm^2，高強度 9.70 N/mm^2，低弾性 9.28 N/mm^2 と，一般的なコンクリートと鉄筋との付着応力度レベルであることがわかる。

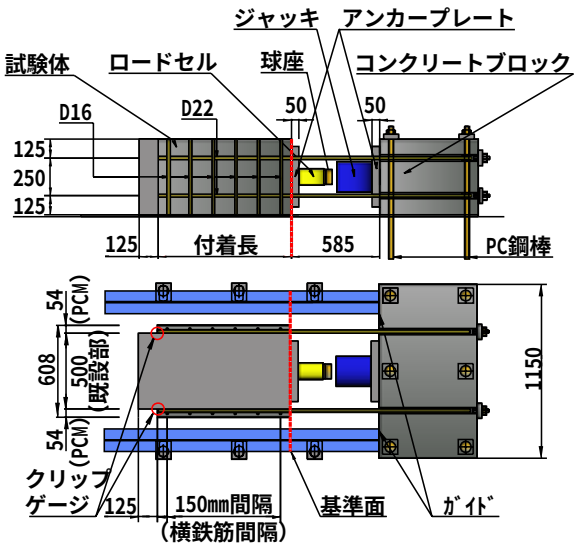
2.2 九大式付着強度試験

(1) 試験概要

道路橋示方書では，鉄筋とコンクリートとの許容付着応力度に基づき有効定着長を算出するが，本工法では一般的に付着特性に優れる PCM を用いるが補強筋を接触配置させ巻立て厚が薄くなるため，有効定着長について検討する必要がある。そこで九州大学で開発した試験装置（九大式）を用い，既設コンクリートに軸鉄筋を接触配置し PCM 吹付けで増厚一体化させた試験体の軸鉄筋に，引張力を作用させ引抜く試験を行った。

(2) 試験体および試験方法

試験体概略図を**図－5** に示す。試験体は，増厚材に高強度 PCM を使用した付着長 20φ（440mm），30φ（660mm），40φ（880mm）の 3 種類（各 3 体）である。形状は，既設コンクリートに補強部の軸方向鉄筋を模擬した軸鉄筋（D22　SD345）を 250mm の間隔で 2 面に 4 本接触配置し，補強部の帯鉄筋を模擬した横鉄筋（D16 SD295A）を 150mm の間隔で配置し，PCM 吹付けにより 16mm 増厚した。試験体の製作は**図－6** に示すように，



図－5　試験体概略図（九大式付着強度試験）

まずバキュームブラストにより既設コンクリート表面上の油脂などの汚れを取り除き，健全なコンクリート表面を粗面にして，その後，軸鉄筋を接触配置しプライマー処理をして PCM との付着特性を向上させ，最後に PCM 吹付けをした。なお，試験装置固定のため鉄筋の片側は露出する形状とした。試験体下面にはテフロン板を設置して，地面との摩擦をなくした。

図－7 に試験状況を示す。試験体の露出させた軸鉄筋をコンクリートブロックに固定させ，試験体とコンクリートブロックの間にジャッキと荷重計（ロードセル）を設置し，ジャッキにより試験体の既設コンクリート全面を支圧することにより軸鉄筋に引張力を作用させた。また，軸鉄筋のすべり量は，露出側と反対の端面での PCM との相対変位と定義し，クリップゲージを用い測定した。

(3) 結果および考察

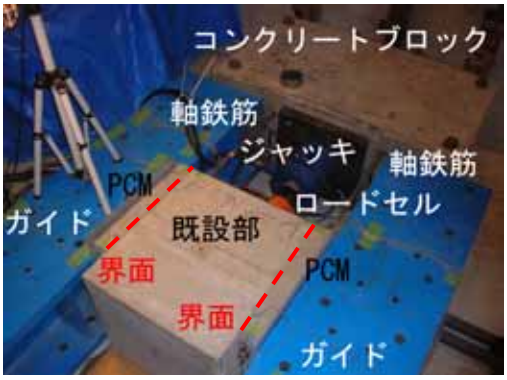
表－2 に，PCM 圧縮強度，最大荷重，有効定着長を示す。全試験体とも，最大荷重 391～471kN で既設コンクリートと PCM の界面剥離により破壊した。**図－8** に**図－5** の赤丸で示す位置の軸鉄筋のすべり量を示す。同図の剥離面は終局時に界面剥離した面，定着面は終局時においても界面剥離しなかった面である。同図より，20φ試験体は 250kN 付近で軸鉄筋が PCM からすべり出しており，特に剥離面のすべり量が大きいことがわかる。一方，40φ試験体は最大荷重時まですべりが発生せず，軸鉄筋と PCM の付着力が十分であることがわかる。

次に，軸鉄筋の露出面側を基準面とし，基準面からの軸鉄筋のひずみ分布を**図－9** に示す。同図には，荷重 200kN および 400kN 時のひずみ分布を示しているが，前者は低荷重時，後者は終局直前すなわち界面剥離が一部の領域で発生した時の挙動を表している。

同図（a）より，定着面の軸鉄筋のひずみは，ひずみゲージ位置が 0，10，20，30φ と増えるにつれて小さくなっていることがわかる。これは，軸鉄筋露出部では軸鉄筋が全ての引張力を負担しているが，補強部内では軸鉄筋から PCM に，そして PCM から既設コンクリートに力の伝達がなされていることを示唆するものである。また，界面剥離が起こらなかった定着面であるため，後述するひずみ値一定領域が見られず，定着力は十分であることがわかる。なお，全試験体とも同様の挙動を呈していた。

次に，剥離面である同図（b）について述べる。全試験体とも低荷重（200kN）時において，いずれも所定の定着長さの範囲内でひずみがほぼ 0 となり定着が十分であることがわかる。また，終局直前の 400kN 時は，30φおよび 40φ試験体はそれぞれひずみゲージ位置 5φおよ

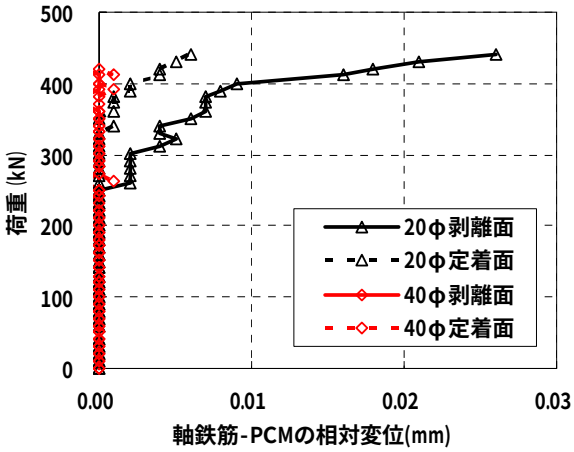
図－6　試験体製作手順（九大式付着強度試験）



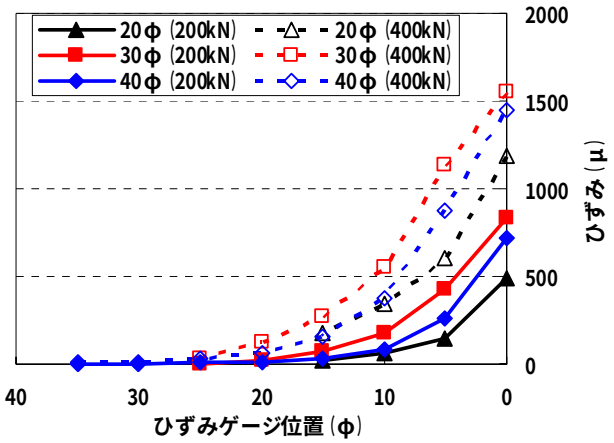
図－7　試験状況（九大式付着強度試験）

表－2　試験結果（九大式付着強度試験）

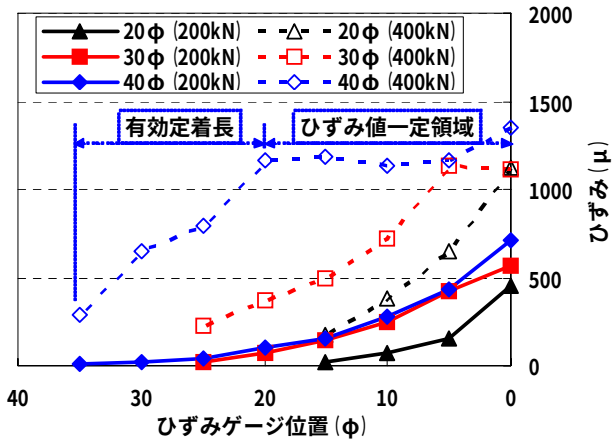
タイプ	PCM圧縮強度 (N/mm^2)	最大荷重 (kN)		有効定着長
20φ	60.8	391	434	なし
		440		
		471		
30φ	64.1	450	460	20φ程度
		469		
		-		
40φ	60.0	446	422	15～20φ
		420		
		400		



図－8　軸鉄筋のすべり量（九大式付着強度試験）



(a) 定着面



(b) 剥離面

図－9　軸鉄筋のひずみ分布
(九大式付着強度試験)

び 20φ付近までのひずみがほぼ一定であることが見られる。これは，基準面からその付近まで既設コンクリートと PCM が界面剥離したためであり，軸鉄筋と既設コンクリートとの力の伝達がそれ以降の領域へ移行したことを示唆している。一方，終局直前の 400kN 時の 20φ試験体は，**図－8** からわかるように軸鉄筋のすべりが発生したためひずみ値一定領域が見られず，定着力が不十分であることがわかる。

以上より，界面剥離した面から算出される本工法による軸鉄筋のひずみ値一定領域を有する有効定着長は，20φ程度であることがわかる。このことから，本工法のように巻立て厚が薄くても付着特性に優れる PCM を用いることにより，現行の設計法で算出される有効定着長 35φよりも短い定着長で，十分な定着力を確保できることがわかる。

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 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。

表－3　試験体の種類

タイプ	PCM	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
無補強	-	39.0	3.06×10^4	2.99
高強度	高強度	59.8	2.48×10^4	2.91
低弾性	低弾性	25.0	1.33×10^4	2.16
グリッド	高強度	69.5	2.61×10^4	2.97

表－4　鉄筋

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

表－5　グリッド

筋番	部材	断面積 (mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
CR-10	軸方向	39.2	1400	1.0×10^5
CR-6	周方向	17.5		

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－3，4，5** に，試験体概略図を**図－10** に示す。試験体は 4 種類（各 2 体）で，補強筋の種類（鉄筋・グリッド）または PCM の種類（高強度・低弾性）をパラメータとした。

無補強試験体は，せん断スパン a=550mm，断面形状 200×200mm で軸鉄筋（D22　SD345）を 8 本配置した。帯鉄筋（D10　SD295A）は，補強前後でともにせん断破壊先行型となるようにスパン中央と支点に 3 本配置した。

補強試験体（高強度・低弾性）は，既設コンクリートに軸方向鉄筋（D22　SD345）を接触配置し，帯鉄筋（D10 SD295A）は道示Ⅴ[5] の構造細目（d/2=126mm 以下　d：有効高）を満足するように 120mm 間隔で配置した。帯鉄筋の継手部はフレア溶接で接合し，横拘束効果を考慮した。PCM は，コンクリートに比べて圧縮強度の高い高強度またはひび割れ追従性に優れる低弾性の 2 種類とし，巻立て厚は帯鉄筋の純かぶりが 10mm となるよう 42mm とした。

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 度で配交させた炭素繊維グリッドを用いた。周方向筋は構造細目 d/2=115mm 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 網目を重ね合わせた。すなわち，曲げ圧縮・引張側の補強筋量は，はり側面の 2 倍である。巻立て厚は，純かぶりが 10mm となるように 18mm とした。

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。

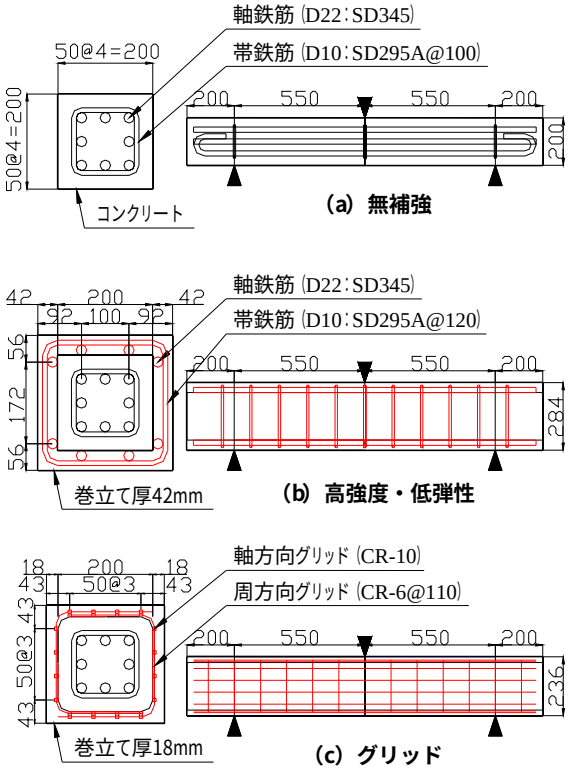
3.3 結果および考察

(1) せん断耐力の評価

ひび割れ耐力 Pcr，初降伏耐力 Py_0，終局耐力 Pu およびせん断耐力 Ps を道示Ⅴ[5]およびコンクリート標準示方書[6]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，$Py_0/Ps>1.5$ と設計した。

試験結果を**表－6，図－11** 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あった。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。

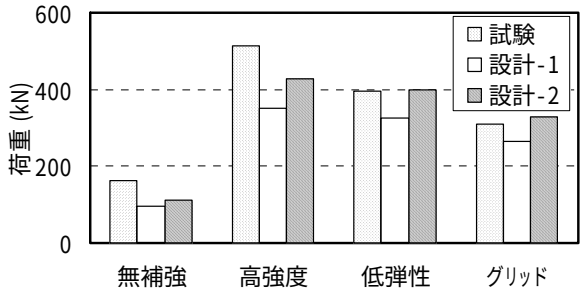
次に，試験値と設計値－2 の比は 0.9～1.3 であるが，せん断破壊を呈した補強試験体（高強度・低弾性）については，1.1 と精度よく評価できている。本工法のような巻立て厚の薄い場合でも，帯鉄筋の継手部をフレア溶接で接合することにより横拘束効果が十分に発揮され，その結果，有効高を最外縁引張鉄筋位置とした設計値－2 で評価できることがわかる。一方，補強試験体（グリッド）は 0.9 とやや危険側評価となった。これは，終局時に既設コンクリートと PCM の界面で剥離が生じたためと考えられる。また，軸方向および周方向グリッドの交点部で破壊が生じていたことが，試験終了後に観察されており，せん断破壊より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。



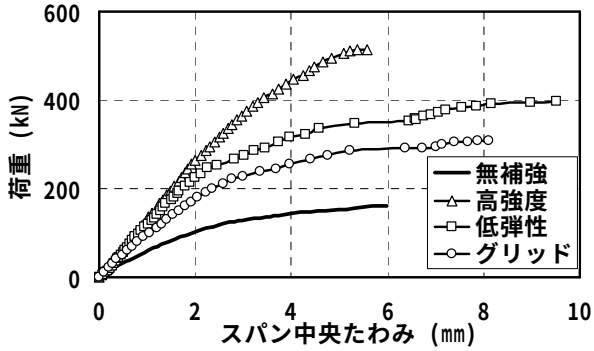
図－10　試験体概略図

表－6　試験結果

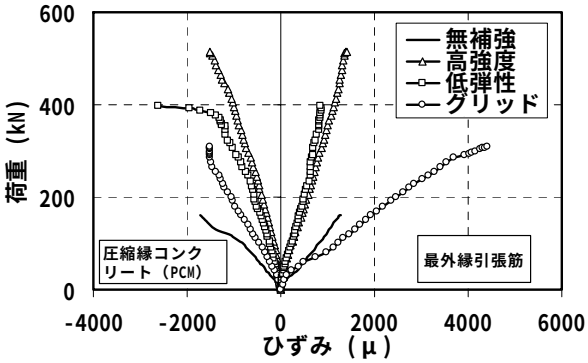
タイプ	項目	Pcr (kN)	Py0 (kN)	Pu (kN)	Ps (kN)	試験/設計
無補強	試験	15.1	-	-	147	-
	設計-1	19.3	211	216	96	1.5
	設計-2				112	1.3
高強度	試験	58.1	-	-	481	-
	設計-1	64.7	581	853	354	1.4
	設計-2				428	1.1
低弾性	試験	36.9	-	-	439	-
	設計-1	49.8	540	770	328	1.3
	設計-2				398	1.1
グリッド	試験	29.0	-	-	352	-
	設計-1	24.7	535	438	268	1.3
	設計-2				376	0.9



図－11　せん断耐力の比較



図－12　荷重-スパン中央たわみ関係



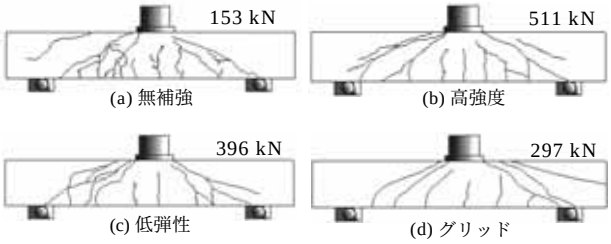
図－13　荷重-ひずみ関係

(2) 変形挙動およびひび割れ状況

荷重－スパン中央たわみ関係を**図－12** 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－13** に示す。計測位置は，いずれもスパン中央である。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。

最大荷重時のひびわれ性状を**図－14** に示す。ひび割れは，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。



図－14　ひび割れ性状

4. まとめ

本研究では, PCM 吹付け工法の既設コンクリートと補強部 PCM（または補強部軸鉄筋）との付着特性およびせん断補強効果に着目して，付着強度試験およびはり試験を実施した。得られた知見は以下のとおりである。

（1） 付着強度試験より, コンクリート, 高強度 PCM ，および低弾性 PCM の鉄筋との付着応力度は, それぞれ 17.2N/mm^2, 19.4N/mm^2, 7.08N/mm^{2}であった。また設計基準強度を基にした換算付着応力度は, 同様に 13.1N/mm^2，9.70N/mm^2，9.28N/mm^2 であった。

（2） 九大式付着強度試験より，全試験体の破壊形態は既設コンクリートと補強部 PCM の界面剥離であった。また定着長 30φ，40φ試験体では界面剥離の影響により有効付着長が確認でき，有効定着長は 20φ程度であり，付着特性に優れる PCM は有用であることがわかった。

（3） 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。

（4） PCM 吹付け補強されたはりのせん断耐力は, 巻立て厚の薄い場合でも，帯鉄筋の継手部をフレア溶接で接合することにより横拘束効果が十分に発揮され，その結果，有効高を最外縁引張鉄筋位置とした設計値で評価できることがわかった。

（5） 補強鉄筋の代わりに CF グリッドを用いたはりは, はりのせん断破壊よりも CF グリッドの交点部の破壊がやや先行し，かつ既設コンクリートと PCM の界面で剥離が生じた。

以上より本試験の範囲内では, PCM 吹付け工法における鉄筋の有効定着長，既設コンクリート面と補強面との界面の付着特性およびはりのせん断補強効果が明らかになった。

参考文献

1) （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.
2) PP 工法研究会：PP マグネラインで補強した橋脚の正負交番載荷試験報告書，1998.3
3) 中村智，日野伸一，山口浩平，佐藤貢一：PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の耐震補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1219-1224，2007.7
4) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準偏], 2005.3
5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 2002.3
6) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査偏], 2002.3