

# 論文 高耐久性レジンコンクリートパネルにより曲げ補強された RC 部材の曲げ補強効果および疲労特性

岡本 拓也\*1・日野 伸一\*2・畠山 繁忠\*3・本松 崇\*4

**要旨:** 本研究で用いる高耐久性レジンコンクリートパネルは、レジンコンクリートを構成原料とした高耐久性パネルで、劣化したコンクリート構造物の補修材として適用されてきた。そこで本研究では、本パネルを RC 部材の曲げ補強時に埋設型枠兼高耐久性被覆材として用いることで、一体化させた鉄筋による曲げ補強効果を評価するため、静的載荷試験および繰り返し載荷試験を実施した。繰り返し載荷試験により、使用限界レベル相当での荷重であればパネルへ曲げひび割れは発生せず、またその場合、繰り返し載荷後の静的載荷試験においても残存耐力を保持し得ることがわかった。

**キーワード:** 曲げ補強, ひび割れ抑制効果, 埋設型枠材, レジンコンクリート, 残存耐力

## 1. はじめに

高度経済成長期に架けられた橋梁を中心に、供用期間が 50 年を超える橋梁が増加し、RC 部材の劣化が進んでいる。そこで、既存の補強工法だけでなく、速やかに導入し得る新たな曲げ補強工法が必要である。本研究で使用した高耐久性パネルは、レジンコンクリートを構成原料とし、プレス成形された高耐久性埋設型枠材である。レジンコンクリートとは、早強かつ高強度で、耐酸性、耐摩耗性、遮塩性および凍結融解抵抗性などに優れた建設材料である。パネルの基本物性を表-1 に示す。また、パネル裏面(図-1)に配列された複数の球状突起が、打設されたコンクリートおよび無機系グラウト材に対してアンカー効果を発揮するため、パネル全面がほぼ均一な接着性を発現する。これらの特徴から、現在、本パネルは水路補修、橋梁下部工補修および下水処理施設の補修に適用されている。これらに加え、本研究では、RC 部材の曲げ補強時に埋設型枠兼高耐久性被覆材として用いることで、一体化させた鉄筋による曲げ補強効果を評価することを目的とし、静的載荷試験および繰り返し載荷試験を行い、曲げ補強効果、疲労特性および繰り返し荷重を受けたはりの残存耐力を明らかにした。

## 2. 補強筋量および目地位置を変化させた場合の曲げ補強効果

### 2.1 試験概要

本パネルを用いた RC 部材の曲げ補強効果に関しての既往研究<sup>2)</sup>では、補強筋量およびパネル間の目地の有無をパラメータとした試験体を作製し、静的曲げ載荷試験が実施されている。表-2 に試験体一覧を示す。試験体の

諸元は、3 章の図-3 に示したものと基本的には同様である。

ここで、既設部曲げ補強筋を主筋、補強部曲げ補強筋を補強筋と定義し、無補強試験体 CASE0 の主筋 D13 は、圧縮側に 3 本、引張側に 5 本配置した。また、曲げ破壊を先行させるため、せん断補強筋は D13 とし、70mm 間隔で配置した。

CASE0 を補強した試験体 CASE1~5 は、既設 RC はりの下面に補強筋および高耐久性パネルを配置し、無収縮

表-1 パネルの基本物性

項目	特性値
寸法	*1800(Max)×900(Max)×10(18)mm
部材厚	t=10(18)~30(38)mm
質量	24kg/10(18)mm <sup>2</sup>
密度	22kg/m <sup>3</sup>
圧縮強度	80N/mm <sup>2</sup> 以上
曲げ強度	20N/mm <sup>2</sup> 以上
静弾性係数	1.5~2.5×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>

※パネル寸法は任意に調整可能

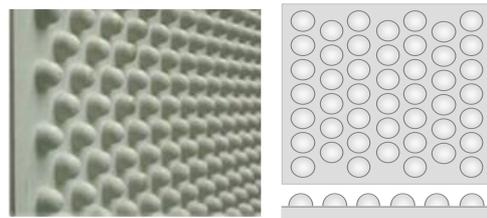


図-1 裏面形状写真および裏面形状<sup>1)</sup>

表-2 試験体一覧

CASE	レジンパネルの目地	補強筋		補強筋比	補強厚 (mm)
		本数	断面積 (mm <sup>2</sup> )		
0	-	-	-	-	-
1	無	3	380	0.6	54
2	無	5	634	1.0	54
3	無	7	887	1.4	54
4	1箇所	5	634	1.0	54
5	3箇所	3	380	0.6	54

\*1 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻 (学生会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門教授 工博 (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門助教 修(工) (正会員)

\*4 麻生商事株式会社 技術開発部

グラウト材 (J ロート (JSCE-F521) 流下値 8 秒) を充填させ一体化したものである。補強試験体 CASE1~5 の補強筋には実構造物への適用を想定してメッシュ筋 CD13 を用いた。その軸方向の補強筋は、CASE1 は 3 本、CASE2 は 5 本、CASE3 は 7 本と補強筋量を変化させた。ここで、補強筋比とは、主筋に対する補強筋の断面積比と定義して、CASE1 は 0.6、CASE2 は 1.0、CASE3 は 1.4 である。

一方、パネルの枚数を変えることによる目地の有無については、CASE1~3 はパネル 1 枚の目地無、補強筋比 1.0 の CASE4 はパネル 2 枚のスパン中央位置に目地 1 箇所、補強筋比 0.6 の CASE5 はパネルを 4 分割するように目地を 3 箇所設けたケースである。

試験体に使用した材料特性値は、コンクリート、グラウト材およびパネルの圧縮強度はそれぞれ 34N/mm<sup>2</sup>、63N/mm<sup>2</sup>、100N/mm<sup>2</sup> であり、主筋、補強筋およびせん断補強筋の降伏強度はそれぞれ 368N/mm<sup>2</sup>、375N/mm<sup>2</sup>、418N/mm<sup>2</sup> である。また荷重は、支点間距離 1500mm、載荷スパン 200mm の 2 点線載荷とした。

また、数値解析は、汎用 FEM パッケージ DIANA<sup>3</sup> を用い、試験体の再現解析に加え、3 ケースの補強筋比について目地無し、目地有り (1, 2, 3 箇所) の計 4 ケースのパラメータ解析を行った。

## 2.2 結果および考察

表-3に、補強筋の降伏した時の荷重 (Py) , 実験上の最大荷重 (Pmax) および解析上の最大荷重を、図-2に最大荷重時のひび割れ図を解析結果の主応力コンタ-図と

併記して示す。なお、設計値の算出では、引張力を負担する鉄筋としては、主筋および補強筋を考慮した。解析値は、2.1に示す3次元非線形FEMによる解析結果である。無補強試験体のCASE0および補強筋比0.6のCASE1, 5は、曲げ圧縮破壊を呈したため、降伏荷重、最大荷重ともに試験値と現行のRCの曲げ理論に基づく設計値<sup>4)</sup>の比はほぼ1.0であることがわかる。一方、補強筋比1.0および1.4のCASE2, 4およびCASE3の最大荷重の試験値と設計値の比は、それぞれ0.74, 0.73および0.59と補強筋比が大きいほどその比は小さくなり、現行のRC部材の曲げ補強設計法では評価できないことがわかる。これは、曲げ圧縮破壊に至る前の補強部端部界面からの斜めひび割れに起因するものであり、数値解析においても同様の結果が得られた。

また、図-2 から、目地を設けていない (b) では補強部界面に応力が集中している (同図①) のに対し、目地を 3 箇所設けた (f) では補強部界面の応力集中は見られない (同図②)。このことから、補強筋比 0.6 の場合においても、補強部端部界面から微細な斜めひび割れが発生したが、目地を設けることで補強部端部界面の応力集中を低減させられることが数値解析により明らかになった。

## 3. 疲労特性および残存耐力の検討

### 3.1 試験概要

前章において、本パネルを埋設型枠兼被覆材として用いることで、補強筋が終局時まで有効に作用し、静的曲げ耐力の向上が得られることが明らかとなった。さらに、

表-3 降伏荷重および最大荷重

CASE	設計値(kN)		試験値(kN)		解析値(kN)	試験値/設計値		試験値/解析値
	Py	Pmax	Py	Pmax		Py	Pmax	
0	-	140	-	135	141	-	0.96	0.96
1	164	225	175	222	227	1.07	0.99	0.98
2	222	282	206	210	229	0.93	0.74	0.92
3	278	359	-*	212	227	-*	0.59	0.93
4	222	282	170	205	221	0.77	0.73	0.93
5	165	226	160	213	212	0.97	0.94	1.00

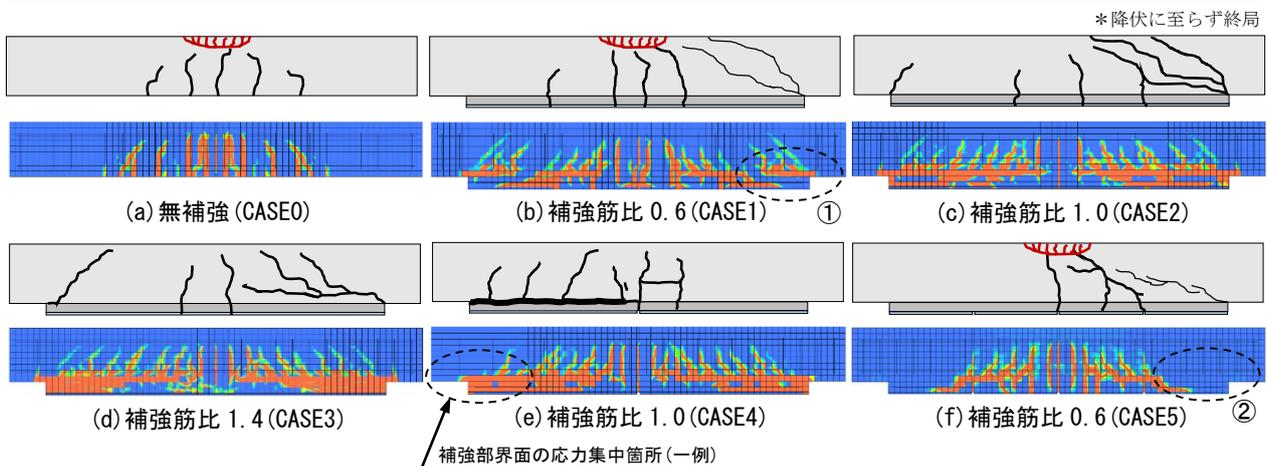
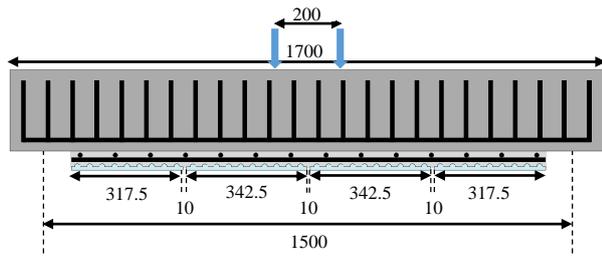
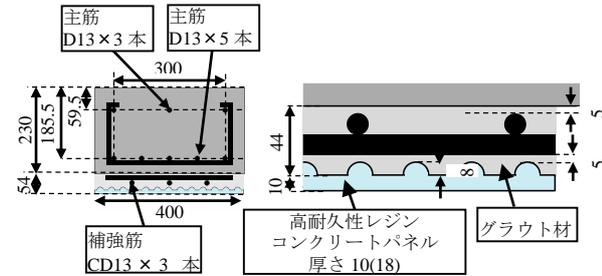


図-2 実験によるひび割れ状況と解析による最大主応力コンタ-図



(a) 側面図



(b) 断面図

(c) 補強部拡大図

図-3 試験体概略図

目地を設けることで最大荷重相当での補強部界面の応力集中を低減させ、使用限界レベルでも曲げひび割れは目地に集中して発生するため、ひび割れ誘導目地になり得ることがわかった。

しかし、耐疲労部材への適用を考えた場合、静的試験における最大荷重や損傷状況から疲労特性を考慮することは困難である。そこで、本パネルの RC 部材の曲げ補強材としての適用性を検討するため、現行の RC 部材の曲げ補強設計法で評価できる結果が得られた、前章の CASE5 と同じ試験体を作製し、定点繰り返し荷重試験を行った。また、繰り返し荷重を受けたはりの残存耐荷力についても確認するため、200 万回の繰り返し荷重後に静的荷重試験を行い、繰り返し荷重を受けていない試験体の結果と比較した。

### 3.2 試験体および使用材料

図-3 に試験体概略図、表-4 に試験体一覧、表-5 に使用材料の特性値 (実測値) を示す。

試験体は、既設部の形状、補強筋比および目地位置は 2.1 の CASE5 と同じであるが、試験装置の都合上、両端のパネルを 25mm ずつ短くし、結果として補強部分を 50mm 短くした。CASE5-2 は静的荷重試験のみ、CASE5-3, 5-4 および 5-5 については、それぞれ異なる荷重振幅で繰り返し荷重試験を行った後、静的荷重試験を行い、繰り返し荷重を受けたはりの残存耐荷力を確認した。繰り返し荷重試験の上限荷重は、補強筋が許容応力度に達したときの荷重を基準とした。CASE5-3 は、CASE5-2 の静的試験結果から、実際に補強筋が許容応力度に達した荷重である 100kN、CASE5-4 は、RC の曲げ理論に基づく設計値 (補強筋が許容応力度に達した荷重) である 65kN、CASE5-5 は設計値の 1.3 倍の値である 85kN とし、

表-4 試験体一覧

CASE	試験	上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	上限荷重の備考
5-2	静的試験	-	-	-
5-3	疲労試験後 静的試験	100	10	静的試験結果 (設計値の 1.5 倍)
5-4	疲労試験後 静的試験	65	10	設計値
5-5	疲労試験後 静的試験	85	10	設計値の 1.3 倍

表-5 材料特性値

(a) コンクリート、グラウト材およびパネル

	CASE	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	5-2,3	36.5	3.21	2.67
	5-4,5	32.1	2.90	2.42
グラウト材	5-2,3	62.1	2.75	2.42
	5-4,5	55.6	-	2.44
パネル <sup>a</sup>	5-2~5	100	30.0	2.45

\*パネルの諸値は規格値

(b) 鉄筋

	CASE	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )
既設筋	5-2~4	366	2.0
	5-5	348	
補強筋	5-2~4	354	2.0
	5-5	350	
せん断補強筋	5-2~4	418	2.0
	5-5	405	

下限荷重はいずれも 10kN とした。なお、補強筋が許容応力度に達した荷重は、その設計値よりやや安全側となったが、この差は補強筋に貼付したひずみゲージの値から試験値を算出したことによるものと考えられる。

荷重は、支点間距離 1500mm、載荷スパン 200mm の 2 点線載荷とし、たわみ、ひび割れおよび各種ひずみをひずみゲージにより測定した。

### 3.3 結果および考察

#### (1) 疲労特性の検討

図-4 および図-5 に繰り返し荷重試験結果を示す。図-4 は、スパン中央変位および補強部曲げ補強筋ひずみの上限荷重時と下限荷重時の値を併記したものを、図-5 は、上限荷重時の値と下限荷重時の値の差の振幅値を縦軸に示し、いずれも横軸は荷重回数を示す。

静的荷重試験の結果を上限荷重とした CASE5-3 については、変位およびひずみともに荷重回数を重ねるごとに増加しているが、100 万回までは振幅値に大きな変化は見られなかった。しかし、荷重回数 130 万回時には、変位およびひずみともに大きく増加している。これは荷重回数 100 万回から 130 万回の間にパネルに曲げひび割れが発生したことによる影響であると考えられる。目地には、荷重 1 回目の 60kN 時にひび割れが発生したが、ひび割れ断面となっても、100 万回まではパネルにひび割れが発生せず、ひび割れ誘導目地として有効に機能していることを示唆している。

設計値を上限荷重とした CASE5-4 および設計値の 1.3

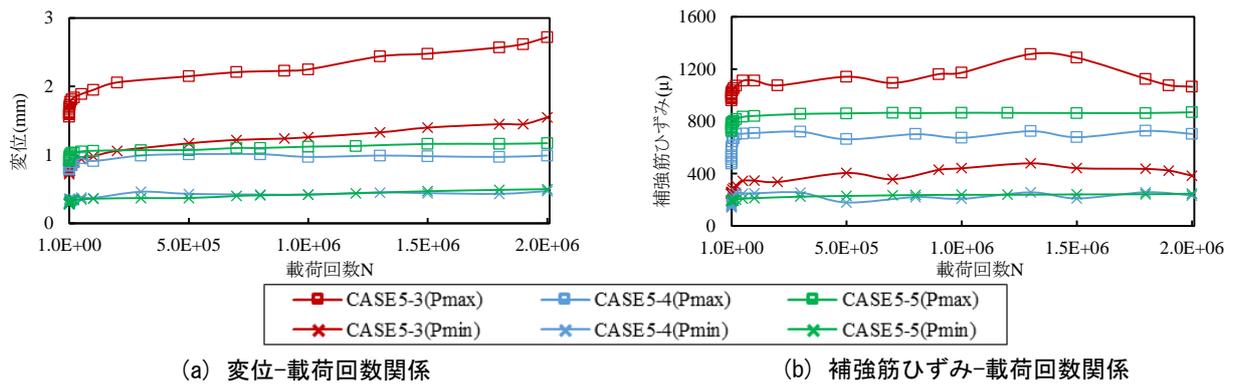


図-4 繰り返し載荷試験結果(上限荷重時および下限荷重時併記)

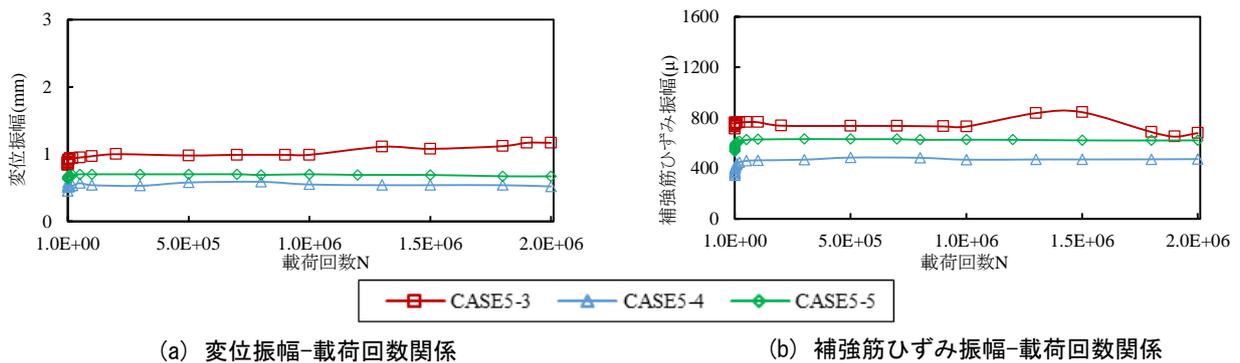


図-5 繰り返し載荷試験結果(振幅値)

表-6 最大荷重およびパネルひび割れ発生時

CASE	疲労試験		最大荷重 (kN)	パネルひび割れ発生
	上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)		
5-2	-		250	静的試験 165kN 時
5-3	100	10	182	疲労試験 130万回時
5-4	65	10	235	疲労試験後 破壊試験 135kN 時
5-5	85	10	235	疲労試験後 破壊試験 135kN 時

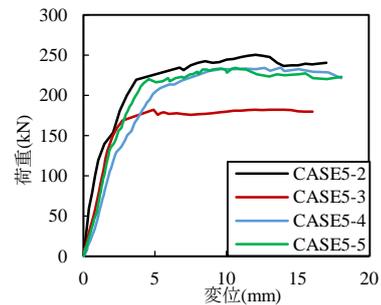


図-6 荷重-スパン中央変位関係

倍の値を上限荷重とした CASE5-5 については、変位およびひずみともに CASE5-3 よりも低い値を示し、振幅値も載荷回数 200 万回まで大きな変化は見られなかった。また、いずれも 200 万回載荷終了時にパネルに曲げひび割れは確認されなかった。このことから、使用限界レベル相当での荷重による繰り返し載荷では、パネルによるひび割れ制御の有効性が明らかとなった。

また、図-4 (b) の下限荷重時の値から、補強部の曲げ補強筋には、CASE5-3 は約 400 $\mu$ 、CASE5-4 および CASE5-5 は約 200 $\mu$  ほど残留ひずみが生じていることがわかる。また、補強部の曲げ補強筋だけでなく、既設部の主筋にも、後述の(4)に示すように、繰り返し載荷によって残留ひずみが生じた。

(2) 繰り返し載荷後の残存耐力の確認

繰り返し荷重を受けたはりの残存耐力を確認するため、200 万回繰り返し載荷を行った後、静的載荷試験を行った。静的載荷試験のみ行った CASE5-2 の静的耐力

と CASE5-3~5-5 の最大荷重を比較した。

表-6 に最大荷重およびパネルひび割れ発生時をまとめたものを、図-6 に荷重-スパン中央変位関係を示す。CASE5-2 は、繰り返し荷重を受けていない試験体であるため他の試験体と比較して初期剛性が高く、最大荷重は最も大きい値が得られた。

CASE5-3 は、CASE5-2 と比較すると最大荷重が 27% 減少した。これは、繰り返し載荷試験終了後に除荷した状態において、補強筋に残留ひずみが生じたことで、見かけの強度が低下したため、静的耐力が低下したと考えられる。

CASE5-4 および CASE5-5 についても、CASE5-3 と同様、CASE5-2 と比較すると、最大荷重が 6% 減少した。CASE5-3 に比べ繰り返し荷重の影響が小さい理由は、繰り返し載荷試験中にパネルに曲げひび割れが発生していなかったために、曲げ引張側の鉄筋の負担を低減させることができたためであると考えられる。また、CASE5-

3～5-5については、繰り返し載荷試験の1回目の載荷中に、60kN付近で目地からひび割れが発生したため、CASE5-2と比較すると初期剛性が低くなっている。

図-7に荷重-補強部曲げ補強筋ひずみおよび上縁コンクリートひずみ関係を示す。CASE5-2についてのみ、目地からのひび割れが発生していなかったため、初期剛性が高くなっているが、65kN以降はいずれの試験体も同等の剛性を示している。また、CASE5-3の最大補強筋ひずみは約1200 $\mu$ であるが、残留ひずみが約800 $\mu$ であるため、いずれの試験体も残留ひずみを考慮すると、補強部の曲げ補強筋が降伏時まで有効に作用していることがわかる。一方、上縁コンクリートは圧縮破壊ひずみ相当まで発生し、一般的な曲げ圧縮破壊の挙動であったことがわかる。

### (3) ひび割れ性状

図-8および図-9に各試験体の200万回繰り返し載荷後の状態および終局状態のひび割れ図を示す。

CASE5-3は130万回載荷時に載荷点直下付近からパネルに曲げひび割れが発生し、200万回繰り返し載荷後の状態ではひび割れ本数が増大し、ひび割れが進展している。

CASE5-4およびCASE5-5については、200万回繰り返し載荷後の状態においても、パネルに曲げひび割れは見られず、目地位置からのひび割れのみであった。

終局状態では、いずれの試験体も、最大曲げモーメント区間に曲げひび割れが集中して発生し、載荷点直下付近からパネルにも曲げひび割れが発生した。補強部界面端部から微細なひび割れが発生したが、補強部の曲げ補強筋は終局時まで有効に作用していたため、終局に至る致命的なものではなく、いずれの試験体も設計通り曲げ圧縮破壊を呈した。CASE5-2は165kNでパネルに曲げひび割れが発生したが、CASE5-4およびCASE5-5は135kNで曲げひび割れが発生した。これは、繰り返し載荷試験後の残留ひずみによる影響であると考えられる。

このことから、補強筋比0.6で目地を3箇所設けた試験体であれば、繰り返し荷重を受けたはりににおいても、静的試験結果と同様の破壊形態であることが確認できた。

### (4) 耐力の評価

繰り返し荷重を受けていないCASE5-2と比較して、CASE5-3～5-5は残留ひずみの影響より静的耐力が低下した。既往研究<sup>9)</sup>より、未損傷のRCはりの静的耐力と繰り返し荷重を受けたRCはりの残存耐荷力を比較すると、残留ひずみの影響により、耐力の低下が見られることが明らかとなっている。そこで著者らは、残留ひずみを考慮した場合の各鉄筋の降伏ひずみを算定し、その値を用いてRCの曲げ理論に基づき設計値を求め、設計評

表-7 材料特性値(残留ひずみ考慮)

	CASE	残留ひずみ( $\mu$ )	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
			(1)	(2)	
既設部鉄筋	5-3	484	366	269	20.0
	5-4	145	366	337	20.0
	5-5	153	348	317	20.0
補強部鉄筋	5-3	777	354	199	20.0
	5-4	234	354	307	20.0
	5-5	247	350	301	20.0

(1) 残留ひずみを考慮していない場合の強度  
(2) 残留ひずみを考慮した場合の強度

価を行った。繰り返し載荷によって生じた残留ひずみ、

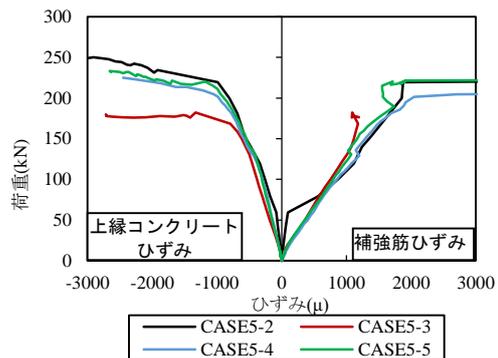


図-7 荷重-ひずみ関係

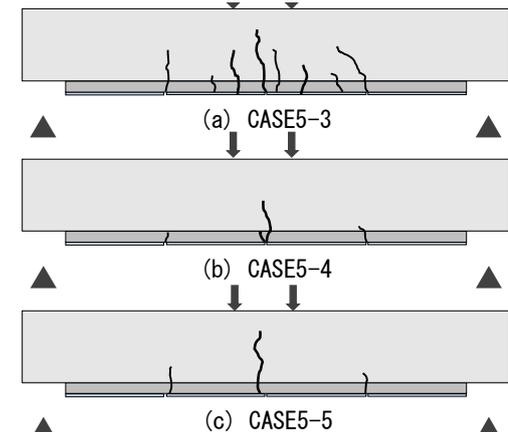


図-8 200万回繰り返し載荷終了時ひび割れ状況

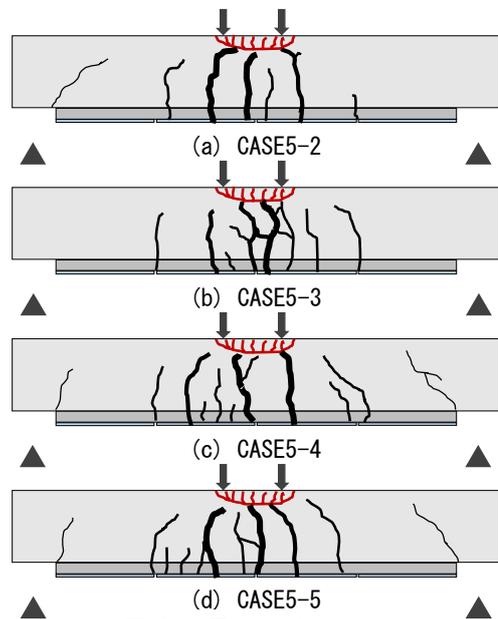


図-9 終局時ひび割れ状況

表-8 設計値(残留ひずみ考慮)

CASE	補強筋降伏荷重			既設筋降伏荷重			最大荷重		
	設計値 (kN)	試験値 (kN)	試験値/設計値	設計値 (kN)	試験値 (kN)	試験値/設計値	設計値 (kN)	試験値 (kN)	試験値/設計値
5-2	165	181	1.10	212	235	1.11	228	250	1.10
5-3	(1)	165	131	0.79	212	169	0.80	228	182
	(2)	92		1.42	140		1.21	164	
5-4	(1)	165	171	1.04	212	209	0.99	223	235
	(2)	141		1.21	189		1.11	204	
5-5	(1)	160	176	1.10	204	220	1.08	218	235
	(2)	138		1.28	181		1.22	197	

(1) 残留ひずみを考慮していない場合の設計値  
(2) 残留ひずみを考慮した場合の設計値

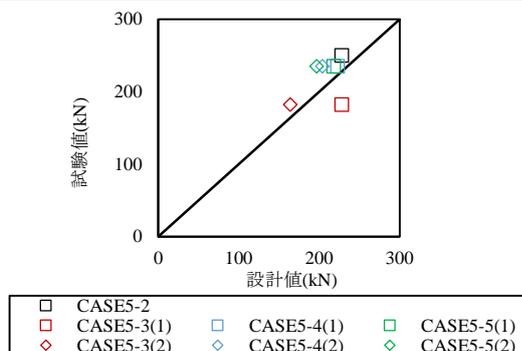


図-10 試験値/設計値(最大荷重)

および残留ひずみを考慮した見かけの鉄筋の特性値を表-7に、設計値と試験値を併記したものを表-8に、設計値と試験値の比を図-10に示す。ここで、残留ひずみを考慮した見かけの鉄筋の強度は、残留ひずみ分を降伏強度から差し引いて算定した。

表-7より、繰り返し載荷中にパネルに曲げひび割れが生じたCASE5-3は、CASE5-4およびCASE5-5と比較して残留ひずみが大きく生じていることがわかる。この影響により、CASE5-3は残留ひずみを考慮していない場合の設計値と試験値の比は小さいが、残留ひずみを考慮することで、残存耐荷力を安全側に評価できることがわかる。また、CASE5-4およびCASE5-5は、繰り返し載荷後も現行のRCの曲げ理論で十分に評価し得ることがわかった。これは、繰り返し載荷による損傷が小さかったためであり、繰り返し載荷後もパネルが補強材として有効に作用できる状態であれば、残存耐荷力を保持し得ることがわかった。また、パネルに曲げひび割れが発生する程度の荷重を受けたとしても、曲げ補強筋の残留ひずみを考慮することで、繰り返し荷重を受けたRCはりの鉄筋降伏荷重および最大荷重を安全側に評価できることがわかった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 異なる荷重振幅値の繰り返し載荷試験から、使用限界レベル相当での荷重であれば、目地がひび割れ誘導目地になり得ることがわかった。またパネルに曲げひび割れは発生しなかったため、本パネルの高耐久性被覆材としての適用性および本パネルによる

本工法の曲げ補強効果が明らかとなった。

- (2) 設計値の1.3倍を上限荷重として200万回繰り返し載荷を行った結果、パネルにひび割れは発生しなかった。またその後の静的載荷試験においても、静的試験のみの結果と比較して最大荷重は同程度で、残存耐荷力を保持し得ることが明らかとなった。
- (3) 補強筋比0.6で、かつ目地を3箇所設けた場合には、繰り返し載荷試験後においても、補強筋は終局時まで有効に作用し、静的試験結果と同様の破壊形態であることがわかった。
- (4) パネルに曲げひび割れが発生する程度の損傷を受けたはりにおいても、繰り返し載荷試験において生じた曲げ補強筋の残留ひずみを考慮することで、その後の残存耐荷力を安全側に評価し得ることがわかった。

#### 謝辞

本研究は、九州大学と麻生商事(株)の共同研究として実施いたしました。本研究を遂行するにあたり、麻生商事(株) 松下博氏、大久保正人氏、(一財)橋梁調査会 山口浩平氏および九州工業大学 合田寛基氏に多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 麻生商事(株) As フォーム参照: <http://www.asoshoji.jp/products/asform/>
- 2) 山口浩平, 本松 崇, 大久保正人, 合田寛基: 高耐久性レジンコンクリートパネルによるRC部材の曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1279-1284, 2015.7
- 3) Diana User's Manual: <https://support.tnodiana.com/manuals/d96/Diana.html>
- 4) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2013.3
- 5) 阿部 忠, 木田哲量, 徐銘謙, 澤野利章, 走行振動疲労荷重を受けたCFS補強RC床版の補強効果および残存耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1471-1476, 2006.7