論文　接着剤および炭素繊維シートを適用した定着ブラケット構造における既設桁強度の影響に関する研究

木村　俊紀[*1]・山下　亮[*2]・廣井　幸夫[*3]・山本　貴士[*4]

要旨：既設コンクリート橋に新たな荷重を支持するブラケットを取り付ける方法として，エポキシ樹脂によりコンクリート製ブラケットを接着接合し，既設コンクリートに深さが鉄筋かぶり程度の溝を形成し，エポキシ樹脂にて炭素繊維を定着させ引張補強材とする工法の開発を行っている。既設桁の強度低下や鉄筋の腐食に伴うひび割れの影響，および軽量化を目的とした鋼製ブラケット適用の可能性を検証するため，載荷試験を行った結果，ブラケット構造の曲げ強度と既設コンクリートの引張強度には相関があること，および既設コンクリートに腐食ひび割れがある場合，ブラケット構造の曲げ強度が低下することが明らかとなった。

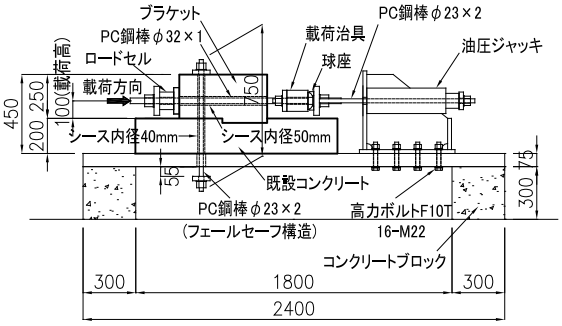
キーワード：エポキシ樹脂，接着剤，炭素繊維シート，定着ブラケット，曲げ強度，腐食ひび割れ

1. はじめに

既設コンクリート橋の補強において，外ケーブル補強工法，落橋防止装置設置工法，縁端拡幅工法等，外力を支持する部材を新たに設ける場合，ブラケット構造が採用されることが多い。このブラケットから既設橋への外力の伝達に，現行の設計手法では，鉄筋，PC 鋼材等の引張補強鋼材の設置が必要である。この鋼材の配置には既設橋の削孔が要求されるが，削孔位置は既設橋の鉄筋，PC 鋼材と干渉しないよう決定する必要があり，設計の自由度が限定されているのが現状である。特に外ケーブル補強工法では，支点付近の主桁ウェブに径 70mm 程度の貫通孔を設け，ブラケットを PC 鋼棒にて緊結する摩擦接合が一般的である。しかし，貫通孔を設けることによる既設桁への影響を定量的に評価するには至ってない。

これらの背景を踏まえ，既設構造への削孔を必要としない，または影響を最小とする構造の開発を目指し，接合部の接着剤としてエポキシ樹脂を適用し，かつ引張補強材としてシート状の炭素繊維（以下 CFRP）を使用したコンクリート製ブラケット構造の載荷試験 [1)]を実施した。その結果，ブラケットは，接合部が曲げを受ける時の引張側（荷重載荷側）が浮き上がり，最終的に回転して破壊し，曲げ破壊と見なして問題のないことがわかった。また，既設コンクリートが健全な場合，ブラケット構造に接着剤を適用することにより，一体打ちの 80～90%の曲げ強度が，CFRP 補強により同 70%の強度が，接着剤と CFRP 補強を併用することにより，同 100～110%程度の強度が期待できることが示された。しかし，実際の補強が必要な桁は，経年劣化や鉄筋の腐食に伴うひび割れにより，コンクリート強度が低下していることが想定されるが，それがブラケット構造の曲げ強度に与える影響については明らかになっていない。また，既設橋の補強を想定すると，施工性の観点からブラケットは軽量であることが望ましい。ブラケットを軽量化する手法の 1 つとして，鋼製ブラケットの適用が考えられる。

そこで本研究では，既設桁コンクリートの強度低下，腐食ひび割れの影響の検証，および鋼製ブラケットを適用した場合の挙動の 3 点を検証することを目的として，1/2 スケールの縮小モデル載荷試験を実施した（**図－1**）。



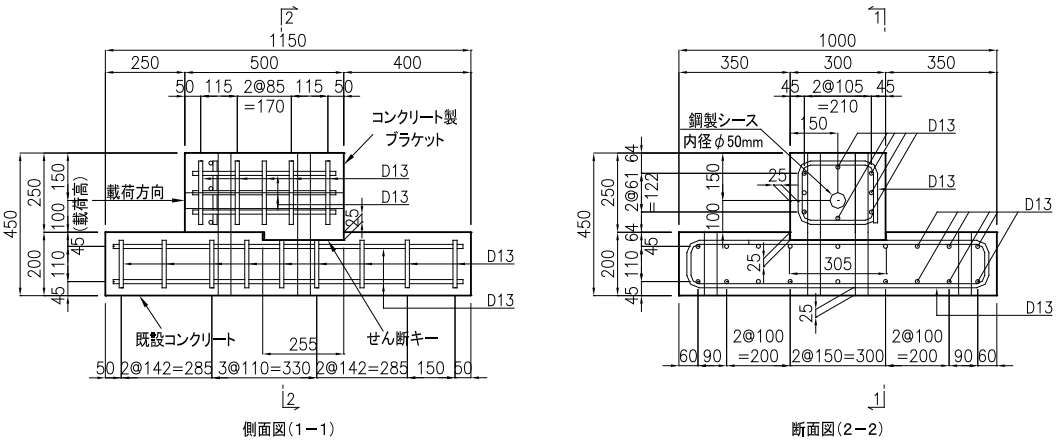
図－1　1/2 縮小モデル載荷方法（単位：mm）

2. 1/2 縮小モデル試験体載荷試験

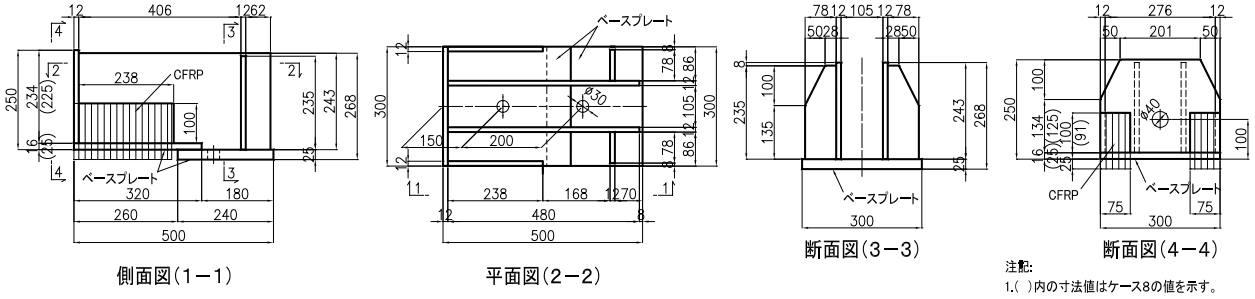
2.1 試験供試体

試験体の基本構造図を**図－2** に，鋼製ブラケットの詳細を**図－3** に示す。本研究ではブラケットの寸法は補強事例 [2)]を参考に幅 600mm，高さ 500mm，長さ 1000mm，載荷高さ 200mm 程度を想定している。1/2 縮小モデル試験体の寸法は幅 300mm，高さ 250mm，長さ 500mm，載荷高さ 100mm となる。以前に実施した載荷試験 [3)]において，ブラケット構造を片持ち梁とした際の固定端部（接

*1　(株)IHI インフラ建設　PC 事業部 PC 技術部　(正会員)
*2　(株)IHI インフラ建設　PC 事業部 PC 技術部　博(工)　(正会員)
*3　(株)IHI インフラ建設　PC 事業部 PC 技術部　(正会員)
*4　京都大学大学院　工学研究科　准教授　博(工)　(正会員)



図−2　試験体の基本構造（コンクリート製ブラケット，単位：mm）



図−3　試験体の基本構造（鋼製ブラケット，単位：mm）

合部）の引張縁曲げ応力が 0.7MPa となるときの荷重を設計荷重と設定しており，本試験体では設計荷重作用時の外ケーブル荷重として 90kN を想定した。実構造では，360kN に相当する。鋼製ブラケットにおいてもベースプレートの幅，長さをコンクリート製ブラケットと同じとした（**図−3**）。荷重載荷方向を橋軸方向とし，その直角方向を橋軸直角方向と呼ぶこととした。なお橋軸直角方向はウェブの鉛直方向を想定している。

2.2 試験ケースおよび載荷方法

試験ケースを**表−1** に示す。各ケース試験体を 3 体製作した。コンクリート製ブラケットについては，既設コンクリートの圧縮強度（20MPa，30 MPa，50MPa），ひび割れ方向（橋軸方向，橋軸直角方向）を試験パラメータとした。ケース 4 とケース 5 の一体打ちケースは，接着剤で接合した場合の曲げ強度とコンクリート自体の曲げ強度を比較するため，接合部に鉄筋は配置しなかった。

表−1　試験ケース

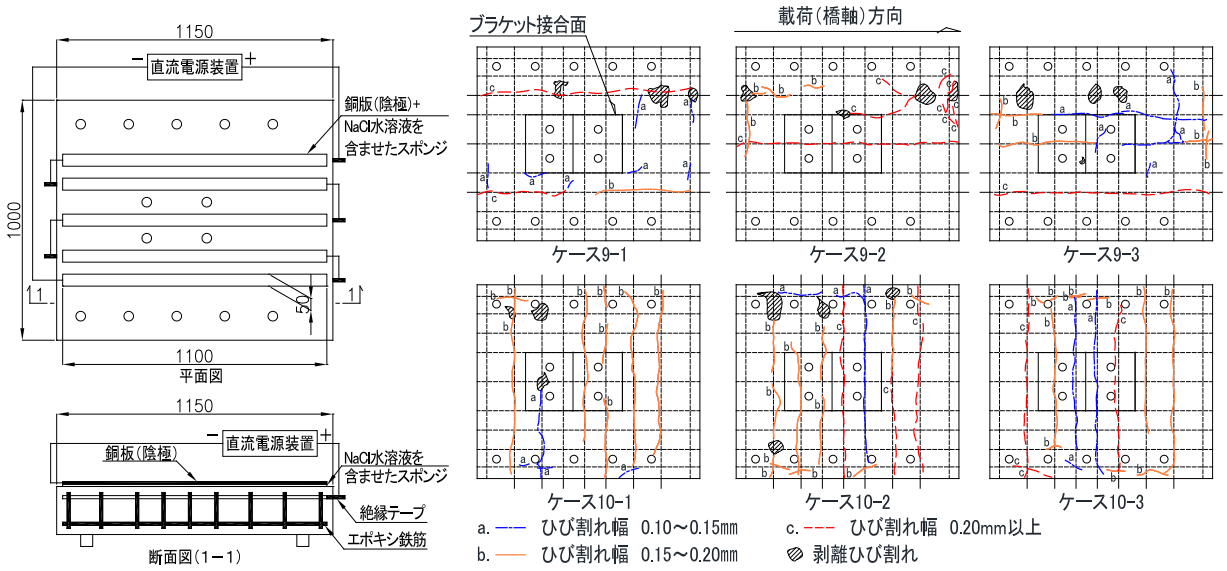
試験ケース	コンクリート圧縮強度(MPa)		接合方法
	既設	ブラケット	
ケース 1	20	50	接着
ケース 2	30	50	接着
ケース 3	50	50	接着
ケース 4	30		一体
ケース 5	50		一体
ケース 6	50	鋼製 1)	接着
ケース 7	50	鋼製 2)	接着
ケース 8	50	鋼製 3)	接着
ケース 9 4)	50	50	接着
ケース 10 5)	50	50	接着

注 1) ベースプレート厚 16mm，CFRP 補強なし
注 2) ベースプレート厚 16mm，CFRP 補強あり
注 3) ベースプレート厚 25mm，CFRP 補強なし
注 4) 電食により橋軸方向のひび割れを再現
注 5) 電食により橋軸直角方向のひび割れを再現

コンクリート製ブラケットの CFRP 補強の有無による影響については，既往の実験で確認しており，今回の検討対象からは除外した。鋼製ブラケットについては，CFRP 補強の有無およびベースプレート厚を試験パラメータとした。ここでベースプレート厚をパラメータとしたのは，その剛性がブラケット接合部の曲げ強度に影響する可能性があると考えたからである。

ひび割れの影響を確認するケース 9 とケース 10 の試験体は，橋軸方向または橋軸直角方向の鉄筋を電食により腐食させ，ひび割れを発生させた。**図−4** に電食方法と発生したひび割れ状況を示す。ひび割れを発生させる鉄筋の直上に銅板を置き，コンクリート面と銅版の間に 3%NaCl 水溶液を浸み込ませたスポンジを設置し，0.25A の直流電流を流すことにより，鉄筋を腐食させひび割れを発生させた。また，ひび割れを発生させない方向の鉄筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。

目標ひび割れ幅は 0.2mm とし，この時の積算電流量は高谷らの研究 [4] を参考に 216A・h を想定した。この積算電流量から求まる鉄筋の腐食量は 100mg/cm^2 である。通電開始後，ひび割れ幅が 0.2mm に達した部分は銅板とコードを外し，電流が流れないようにした。積算電流量が 50A・h を越えた時点からひび割れが発生し，120A・h を越えた時点から 0.2mm に達する部分が出始めた。積算電流量が 300A・h となった時点で通電を終了した。



図－4　電食方法と電食劣化試験体ひび割れ状況図

ブラケットの構築方法は，コンクリート製プレキャストブラケットおよび鋼製ブラケットをエポキシ樹脂接着剤によって接着するものと，既設コンクリートとブラケットを一体打ちしたものを設けた。既設コンクリートは実際の既設桁のウェブ側面を想定し，ブリーディング等の影響を除くため，コンクリート打込み時に接着面が側面となるように打設した。接合面の表面処理は，表面の凹凸が深さ 2~3mm となるようチッピングを行った。ケース 9，10 の試験体においてもチッピングを行い，表面の錆汁は取り除いたが，ひび割れの補修等の処理は行わなかった。接着方法としてコンクリート製ブラケットは，凝結遅延材により処理した接合面にコンクリート接着用エポキシ樹脂を塗布後，接合面に平均 0.5MPa の圧縮応力を M24 ボルトにて与え，3 日間の養生後に M24 ボルトを撤去し，圧縮応力を解放した。鋼製ブラケットについては，ケレンした接合面にプライマー(エポキシ樹脂)を塗布した後，鋼接着用エポキシ樹脂を塗布し，コンクリート製ブラケットと同様に平均 0.5MPa の圧縮応力を M24 ボルトにて与えた。コンクリート製ブラケットと鋼製ブラケットでは使用する接着剤が異なっている。

2.3 使用材料

コンクリートの配合および載荷試験日の材料試験結果を**表－2**，**表－3** に，エポキシ樹脂の主成分および材料試験結果を**表－4** に示す。

表－2 コンクリート配合

	粗骨材の最大寸法 G_{max} (mm)	スランプ sl (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 Air (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
20MPa	20	12.0	69.0	4.5	48.4	171	248	898	972	2.48
30MPa	20	12.0	50.0	4.5	44.4	171	342	790	1001	3.42
50MPa	20	12.0	47.3	4.5	48.0	145	307	912	1000	4.45
50MPa[1)]	20	21.0	38.2	4.5	46.1	170	445	781	933	4.67

注1)　ひび割れ試験体ケース 9，10 用

表－3 コンクリート材料試験結果

ケース	既設コンクリート (MPa) 圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ブラケット (MPa) 圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
ケース 1	18.8	1.81	3.33	21.6	55.0	2.87	7.95	39.2
ケース 2	31.9	2.67	5.16	26.9	48.2	3.25	6.72	38.2
ケース 3	44.2	3.14	6.99	34.7	44.2	3.14	6.99	34.7
ケース 4	33.6	2.70	5.01	27.3	一体型			
ケース 5	46.7	3.26	6.60	36.5				
ケース 6	55.0	2.87	7.95	39.2	鋼製ブラケット			
ケース 7	43.4	2.81	6.90	35.7				
ケース 8	47.1	3.36	6.84	38.3				
ケース 9	47.7	2.98	9.12	29.9	43.4	2.81	6.90	35.7
ケース 10	47.7	2.98	9.12	29.9	47.1	3.36	6.84	38.3

表－4 エポキシ樹脂主成分と材料試験結果

用途	主成分	硬化物比重	可使時間 (分)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張せん断強度 (MPa)
コンクリート接着用エポキシ樹脂	主剤：ビスフェノール A 型エポキシ樹脂 硬化剤：変性脂肪族ポリアミン	1.49	124	89	5.23	23.0
鋼接着用エポキシ樹脂	主剤：ビスフェノール A 型エポキシ樹脂 硬化剤：変性脂肪族ポリアミン	1.24	70	105	3.06	12.8

3. 試験結果および考察

3.1 試験結果

試験結果の一覧を**表－5** に示す。最大荷重は，既設コンクリートまたはブラケットが破壊した時点の荷重を示す。曲げ強度は，ブラケット構造を片持ち梁とした時の，最大荷重作用時における接合面での曲げ引張応力度であり，ここでは，破壊の性状を問わず，すべて曲げ強度と呼ぶこととした。

3.2 破壊性状

各ケースの代表的な破壊状況を**図－5** に示す。ケース 1~3（**図－5(a)**）では，各ケースともブラケットがエポキシ樹脂層および既設コンクリートの表層をともない，回転し，曲げ引張に起因して破壊した。一体打ちしたケース 4 および 5（**図－5(b)**）については載荷側である，ブラケットの引張縁に発生したひび割れが既設コンクリート内に進展し，曲げ引張により破壊した。

鋼製ブラケットを適用し，接着剤のみで接合したケース 6 とケース 8（**図－5(c)**）においても，ブラケットがエポキシ樹脂層および既設コンクリートの表層をともない，回転し，曲げ引張に起因して破壊した。しかし，コンクリート製ブラケットの場合と比較して，既設コンクリートはより表層に近い面で破壊されており（**図－5(a)および(c)**），既設コンクリートの損傷が小さかった。また，ケース 6 とケース 8 のブラケットのベースプレート厚さによる違いについては，破壊面の状況からは違いが見受けられなかった。接着剤および CFRP 補強を適用したケース 7（**図－5(d)**）についても曲げ引張により破壊し，載荷側のブラケット周囲に幅 20mm，深さ 25mm の溝を設けて接着剤にて定着させた CFRP 埋込み部にはコーン状の剥離破壊が確認された。

ひび割れによる劣化を模擬したケース 9（**図－5(e)**）およびケース 10（**図－5(f)**）においては，破壊面に鉄筋の腐食による錆汁が広がって付着しており，既設鉄筋間を結ぶ水平方向のひび割れがあったと推察される。

3.3 考察

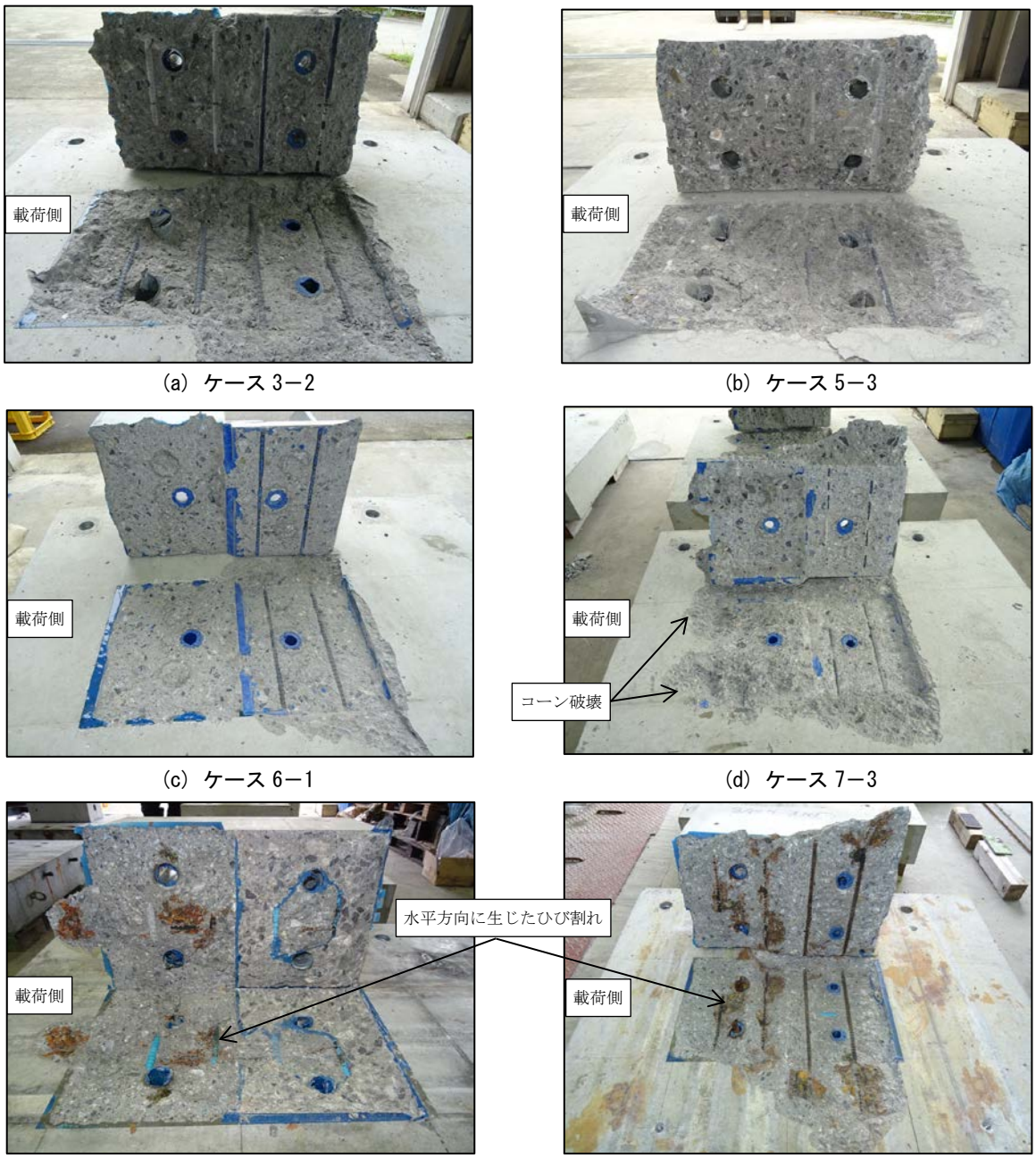
(1) ブラケット構造の曲げ強度と既設コンクリートの引張強度の関係

ブラケット構造の曲げ強度（**表－5**）と既設コンクリートの割裂強度（**表－3**）を比較した結果を**図－6** に示す。ケース 1 については，曲げ強度 2.26MPa に対し割裂強度 1.81MPa，ケース 2 では，曲げ強度 2.64MPa に対し割裂強度 2.67MPa，ケース 3 では，曲げ強度 3.20MPa に対し割裂強度 3.14MPa となった。いずれのケースもブラケット構造の曲げ強度と既設コンクリートの割裂強度の値がほぼ同じであり，相関関係が見受けられた。鋼製ブラケットケース（ケース 6, 8），ひび割れケース（ケース (9, 10)

表－5 試験結果一覧

ケース	試験体	試験パラメータ						圧縮強度 (MPa)		最大荷重 (kN)		曲げ強度 (MPa)		破壊性状・備考
		コンクリート強度(MPa)		接着剤	CFRP 補強	鋼ブラケット底板厚	ひび割れ方向	既設	ブラケット	個別	平均	個別	平均	
		既設	ブラケット											
1	1-1	20	50	コンクリート接着用	—	—	—	18.8	55.0	309	282	2.47	2.26 (0.70)*	曲げ破壊（既設側破壊大）
	1-2									298		2.38		曲げ破壊（既設側破壊大）
	1-3									239		1.91		曲げ破壊（既設側破壊大）
2	2-1	30	50	コンクリート接着用	—	—	—	31.9	48.2	338	330	2.70	2.64 (0.82)	曲げ破壊（既設側破壊大）
	2-2									341		2.73		曲げ破壊（既設側破壊大）
	2-3									310		2.48		曲げ破壊（既設側破壊大）
3	3-1	50	50	コンクリート接着用	—	—	—	44.2	44.2	350	400	2.80	3.20 (1.00)	曲げ破壊（既設側破壊大）
	3-2									406		3.25		曲げ破壊（既設側破壊大）
	3-3									444		3.55		曲げ破壊（既設側破壊大）
4	4-1	30		一体打ち	—	—	—	33.6		302	309	2.41	2.47 (0.77)	曲げ破壊（既設側破壊大）
	4-2									314		2.52		曲げ破壊（既設側破壊大）
	4-3									310		2.48		曲げ破壊（既設側破壊大）
5	5-1	50		一体打ち	—	—	—	46.7		418	375	3.35	3.00 (0.94)	曲げ破壊（既設側破壊大）
	5-2									344		2.75		曲げ破壊（既設側破壊大）
	5-3									362		2.89		曲げ破壊（既設側破壊大）
6	6-1	50	鋼製	鋼接着用	—	16mm	—	55.0	—	326	216	2.60	1.73 (0.58)	曲げ破壊（既設側破壊小）
	6-2									227		1.82		曲げ破壊（既設側破壊小）
	6-3									95.9		0.77		曲げ破壊（既設側破壊小）
7	7-1	50	鋼製	鋼接着用	有り	16mm	—	43.4	—	422	367	3.38	2.94 (0.92)	曲げ破壊＋CFRP 剥離破壊
	7-2									372		2.98		曲げ破壊＋CFRP 剥離破壊
	7-3									306		2.45		曲げ破壊＋CFRP 剥離破壊
8	8-1	50	鋼製	鋼接着用	—	25mm	—	47.1	—	295	215	2.36	1.72 (0.54)	曲げ破壊（既設側破壊小）
	8-2									158		1.26		曲げ破壊（既設側破壊小）
	8-3									192		1.53		曲げ破壊（既設側破壊小）
9	9-1	50	50	コンクリート接着用	—	—	橋軸方向	47.7	43.4	291	249	2.33	1.99 (0.62)	ひび割れ部破壊
	9-2									143		1.15		ひび割れ部破壊
	9-3									312		2.49		ひび割れ部破壊
10	10-1	50	50	コンクリート接着用	—	—	橋軸直角方向	47.7	47.1	225	228	1.80	1.83 (0.57)	ひび割れ部破壊
	10-2									254		2.03		ひび割れ部破壊
	10-3									206		1.64		ひび割れ部破壊

*ケース 3 に対する比率（曲げ強度比）



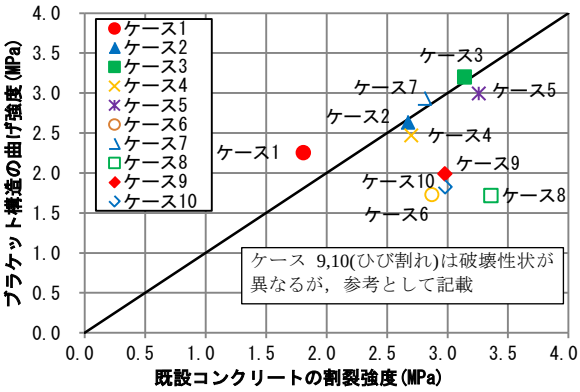
(a) ケース 3−2　(b) ケース 5−3

(c) ケース 6−1　(d) ケース 7−3

(e) ケース 9−2　(f) ケース 10−3

図−5 試験体の破壊状況

については，各試験体で曲げ強度のばらつきも大きく，相関関係を見出すことはできなかったが，定性的には曲げ強度が低下した。これより，既設桁の引張強度を精度よく推定できれば，既設桁にひび割れが発生していない場合，コンクリート製ブラケット構造の強度を算定できると考えられ，ブラケット構造の構築にあたっては，既設桁の強度評価が重要であると考えられる。既設桁の引張強度を推定する方法として，リバウンドハンマにより推定した圧縮強度から求める方法，小径コア採取による推定，および建研式引張強度試験による推定が考えられる。今後，それらの方法の精度を検証し，引張強度推定の可否について実証する予定である。



図−6 ブラケット構造の曲げ強度と既設コンクリートの割裂強度(材料試験結果)の比較

(2) 鋼製ブラケットについて

ケース 6 とケース 8 は，試験体毎のばらつきは大きいものの，曲げ強度の平均値は同程度であった。ケース 6 に対して CFRP 補強したケース 7 の曲げ強度比は 1.70 となった。CFRP 補強により試験体毎のばらつきが小さくなり，補強の効果が確認できたが，接着剤のみで接合したコンクリートブラケット（ケース 3, 曲げ強度比 0.92）よりも小さい値となった。ケース 6-3 は試験体を載荷装置に固定する際に，既設コンクリートに過度の変形を生じさせてしまい，ひび割れが生じていた。この損傷が強度に影響を与えた可能性が考えられる。コンクリート製ブラケットと比較した場合，鋼製ブラケットは試験体毎のばらつきが大きく，曲げ強度も低い値となった。コンクリートと鋼という異種材料間での接着であることや使用した接着剤の種類が異なるため，コンクリート製ブラケットとは異なる破壊メカニズムであった可能性が考えられる。破壊面を比較すると鋼製ブラケットの既設コンクリート破壊面（図－5(c)）は，コンクリート製ブラケットの既設コンクリート破壊面（図－5(a)）より凹凸が少なく，また，表層のみの破壊であった。その結果，破壊面積が小さくなり曲げ強度が低くなったと考えられる。今後，要素実験を通じてこの要因を検証する予定である。

(3) 劣化試験体のひび割れおよび方向の影響について

本試験は，鉄筋からコンクリート表面に向かうかぶりの腐食ひび割れを模擬し，ひび割れの方向による違い（橋軸方向または橋軸直角方向）を検証するために行った。

健全体であるケース 3 に対してケース 9 の曲げ強度比は 0.62，ケース 10 の曲げ強度比は 0.57 となった。試験前はひび割れの影響に関し，特にケース 9 の橋軸方向のひび割れについては，ひび割れ方向が載荷方向と一致しているため，ブラケット強度に対するひび割れの影響は少ないと想定していたが，異なる結果となった。

ケース 9 の橋軸方向の腐食ひび割れは一様に発生せず，各試験体でひび割れ発生度合のばらつきが大きくなった。これは，橋軸方向の鉄筋は橋軸直角方向の鉄筋の内側に配置されているため，橋軸直角方向の鉄筋の拘束力が作用したためと推察される。破壊荷重が 143.3kN と一番小さかったケース 9-2 では表面の橋軸方向に，ブラケット接合部中央を通る，0.2mm（図－4）を超えるひび割れが発生していた。破壊面では錆汁から確認できるようにひび割れが鉄筋間をつなぐ方向の水平方向にも広がっており，これを起因とするひび割れが破壊に影響し，強度が低下したと考えられる（図－5(e)）。

ケース 10 の橋軸直角方向鉄筋を腐食させた試験体のひび割れはほぼ一様に発生し，各試験体の曲げ強度に大きな差は見られなかった。引張部および圧縮部の接合面外側に錆汁の分布が見られ，ケース 9 と同様に水平方向に発生したひび割れが強度に影響したと考えられる。

今後，現在製作中の暴露・塩水散布によってひび割れを発生させる試験体にてブラケット構造の強度を再評価する予定である。

4. まとめ

本研究により，得られた知見を以下に示す。

(1) 既設コンクリートの引張強度とコンクリート製ブラケット構造の曲げ強度には相関がある。既設コンクリートにひび割れがない場合，ブラケット構造の曲げ強度は既設桁側の引張強度から推定できると考えられる。そのため，既設桁の引張強度を精度よく推定する手法の確立が課題である。

(2) 鋼製ブラケット構造の場合，コンクリート製のものと比較して，曲げ強度が低く，ばらつきも大きく，破壊面の凹凸も少なく表層のみの破壊であった。この要因として，使用接着剤の種類，異種材料接合等が考えられる。CFRP による補強を適用した場合，強度は改善し，ばらつきも小さくなった。強度低下の要因を整理し，鋼製ブラケット構造の強度推定方法を確立する必要がある。

(3) 既設コンクリートにひび割れがある場合，強度が低下するが，ひび割れの方向と強度に明確な相関は見られなかった。本研究の範囲内では水平方向のひび割れが強度に影響したと考えられる。ひび割れ方向の影響を再評価する必要がある。

謝辞

本研究を実施するに当たり，新日鉄住金マテリアルズ株式会社コンポジットカンパニーおよび株式会社エスイーから材料の提供および技術支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 山下亮，小林崇，高木祐介，廣井幸夫，中村定明：接着剤および炭素繊維を適用した外ケーブル補強工法に用いる定着ブラケット構造に関する研究開発，IHI インフラ技報，Vol.3，pp.110-117，2014.10

2) プレストレストコンクリート建設業協会：外ケーブル方式によるコンクリート橋に補強マニュアル(案)，2007

3) 山下亮，廣井幸夫，山本貴士，宮川豊章：軸方向引張鋼材を配置しないブラケット構造の力学挙動に関する基礎的研究，第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.227-232，2012.10

4) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.154-165，2013.