

論文 接着剤を適用したコンクリート接合部の曲げ付着強度および破壊エネルギーに関する研究

岡野 暢弥^{*1}・山下 亮^{*2}・山本 貴士^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨: コンクリート橋の補強において新コンクリート部材を設置する時に、接合部に接着剤を適用した場合の曲げ特性を把握するため、曲げ付着試験および破壊エネルギー試験を実施した。接合部は場所打ちコンクリート打継ぎおよびプレキャスト部材接着の2つを想定した。コンクリート打継ぎ想定ケースでは、遅延剤を用いて打継ぎ面を表面処理した上で接着剤を適用した場合、曲げ付着強度の改善効果が小さかった。一方、プレキャスト接着想定ケースでは、エポキシ接着剤を適用することにより接合部の破壊エネルギーが増加し、接合部のない一体打ちコンクリートよりも曲げ付着強度が大きくなることがわかった。

キーワード: 接着剤, コンクリート接合部, 曲げ付着強度, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線

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、コンクリート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鋼材等の軸方向引張鋼材の配置が必要である。引張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る、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 70 mm 程度の貫通孔を設けた上で、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いない。

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、または悪影響を最小とする構造の開発を目指し、軸方向引張鋼材を配置しないブラケット構造の載荷試験を実施した。その結果、新設ブラケットと既設コンクリートの打継ぎ処理をチッピングとした場合、曲げ付着強度が、打継ぎのない一体打ちの 30%程度であることが明らかとなった¹⁾。この接合面の曲げ付着強度を向上させる手法としては、接着剤の適用が考えられる。接着剤を適用した時の強度は、一般に建研式と呼ばれる 40×40 mm の平滑な接着面における一軸引張強度で評価されることが多い。接着剤をブラケット構造の接合面へ適用する際は、既設コンクリートの表面処理による凹凸を考慮した曲げ付着強度が重要と考えられるが、この点に着目

した既往の研究はほとんど見当たらない。類似の研究としては、例えば、橋高ら²⁾や国枝ら³⁾によるひび割れ補修材の評価や栗原ら⁴⁾による接着剤を適用しない打継ぎ面の評価等が挙げられる。これらの研究では、ひび割れ補修材や打継ぎ面の付着特性評価に破壊エネルギーや引張軟化曲線等の破壊力学のパラメータを用いることにより、ひび割れの発生や進展に対する抵抗性が定量的に評価できることが示されている。

そこで、本研究では接合面に接着剤を適用した場合の曲げ特性を把握し、設計強度設定の基礎データを得るため、曲げ付着試験および破壊エネルギー試験を実施した。また、破壊エネルギー試験結果から引張軟化曲線を算出し、接合面の特性を評価することとした。

2. 試験概要

2.1 試験方法

(1) 曲げ付着試験

JIS A 1106 を参考とし、中央に接合部を設けたはりを用いて 4 点曲げ試験を行った。試験ケースを表-1 に、曲げ付着試験方法を図-1 に示す。100×100×200 mm のコンクリートブロックの断面に接着剤を塗布し、同寸法のコンクリートを打ち継ぐ場所打ちコンクリート想定ケース（以下、打継ケース）を 4 ケース、同寸法のコンクリートブロック同士を接着させるプレキャスト部材想定ケース（以下、接着ケース）を 3 ケース、比較供試体として接着剤を用いずに打ち継ぐ 1 ケース、および一体打ち 1 ケースの全 9 ケースとした。なお、供試体数は各ケース 3 体とした。打継ぎ面はコンクリート打設前に遅延

*1 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 (株) IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部 工修 (正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

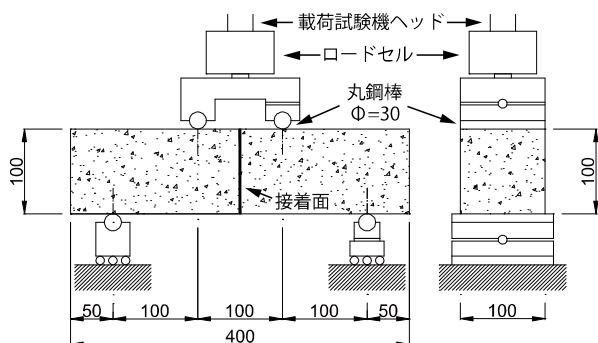
剤を塗布しておき、脱型後ワイヤーブラシで洗出し処理をすることで2～3mmの凹凸を設けた。打継ケースでは、プライマー処理のみを想定したアクリル系ポリマーディスペーション（以下、APD）および特性の異なる打継ぎ用エポキシ接着剤を3種類使用し、接着ケースでは、ポリマーセメントグラウト（以下、PCG）および特性の異なる接着用エポキシ接着剤を2種類使用した。

(2) 破壊エネルギー試験

JCI-S-001-2003 切欠きはりを用いたコンクリートの破

表－1 曲げ付着試験ケース

	接着方法	使用材料	打継ぎ処理
M	一体打ち		—
NJ	打継ぎ（接着剤不使用）		打設前に遅延剤を塗布し、 脱型後ワイヤーブラシで処理 （2～3mmの凹凸）
C-apd	打継ぎ	APD	
C-ep1		エポキシ1	
C-ep2		エポキシ2	
C-ep3		エポキシ3	
P-pcg	プレキャスト接着	PCG	
P-ep4		エポキシ4	
P-ep5		エポキシ5	



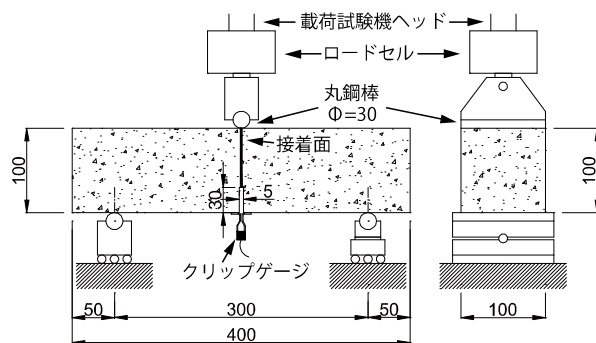
図－1 曲げ付着試験方法(単位:mm)

壊エネルギー試験方法を参考に、中央部を接着した切欠きはりを用いて3点曲げ試験を行った。試験ケースを表－2に破壊エネルギー試験方法を図－2に示す。後述する曲げ付着試験結果を踏まえ、試験ケースは、打継ケースで使用したエポキシ接着剤の中で中間の結果が得られたC-ep3、接着ケースの中で差異が評価しきれなかったP-ep4、P-ep5、比較供試体として一体打ちおよび接着剤を使用しない打継ケースの全5ケースとした。JCI 規準に従い切欠き深さは30mm、供試体数は各ケース4体とし、打継ぎ処理は曲げ付着試験と同様とした。また、載荷はクリップゲージにより測定するひび割れ肩口開口変位（以下、CMOD）による変位制御で実施した。

引張軟化曲線は、計測した荷重－CMOD 曲線および

表－2 破壊エネルギー試験ケース

	接着方法	使用材料	打継ぎ処理
M	一体打ち		—
NJ	打継ぎ（接着剤不使用）		打設前に遅延剤を塗布し、 脱型後ワイヤーブラシで処理 （2～3mmの凹凸）
C-ep3	打継ぎ	エポキシ3	
P-ep4	プレキャスト接着	エポキシ4	
P-ep5		エポキシ5	



図－2 破壊エネルギー試験方法(単位:mm)

表－3 コンクリート配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤
15	40	48	8	7	170	425	780	861	1.063

表－4 接着剤の特性

試験ケース	使用材料	可使時間 (min)	弾性係数 (kN/mm ²)	付着強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張せん断強さ (N/mm ²)
C-apd	APD	—*	—	1.6	—	—
C-ep1	エポキシ1	30	2.54	4.3	71	29
C-ep2	エポキシ2	82	—	2.6	—	—
C-ep3	エポキシ3	36	2.87	2.1	87	18
P-pcg	PCG	—	—	2.3	31	—
P-ep4	エポキシ4	177	4.91	4.3	85	25
P-ep5	エポキシ5	65	2.45	3.6	43	17

* データなし

JCI のウェブ上からダウンロードできる有限要素法をベースとしたプログラム^{5), 6)}を用いて算出した。解析モデルには、接合部に仮想ひび割れを1本モデル化し、接着剤層の変形、コンクリートのひび割れ、および微細な接着剤とコンクリート界面の破壊による全体の挙動を再現した。ここで、厳密には接着剤の変形はひび割れと異なるが、ミクロレベルでの界面破壊を含めた接合部の全体挙動を正確にモデル化することは困難と考えられたため、仮想ひび割れ1本で接合部全体の挙動を評価することとした³⁾。

2.2 使用材料

コンクリートの配合を表-3に、接着剤の特性を表-4に示す。なお、接着剤の特性値は材料メーカーによる試験結果またはカタログ記載の値で参考値である。

3. 試験結果

3.1 曲げ付着試験

(1) 管理供試体の試験結果および接着剤材齢

管理供試体の試験結果を表-5に示す。打継ケースで

は、コンクリートの材齢が異なるので、それぞれ旧コンクリート、新コンクリートと呼称し、試験結果を掲載している。なお、括弧内の数字は試験日における材齢である。接着ケースの接着剤材齢は8日であった。

(2) 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-6に、特徴的な破壊モードの概念図を表-7に示す。ここに示した曲げ付着強度の値は、供試体3体の平均値で、接合部ではなくコンクリート部が破壊したケースについても曲げ付着強度と呼ぶこととした。

打継ケースに着目すると、すべてのケースにおいて大

表-5 曲げ付着試験の管理供試体

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)		引張強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
	旧*1	新*2	旧	新	旧	新
打継	60.3 (22日)	50.3 (8日)	3.89 (22日)	3.33 (8日)	36.8 (22日)	35.0 (8日)
接着	64.0 (30日)		4.42 (30日)		39.0 (30日)	

*1旧コンクリート、*2新コンクリート

表-6 曲げ付着試験結果

供試体		打継ケース				接着ケース			
		NJ	C-apd	C-ep1	C-ep2	C-ep3	P-pcg	P-ep4	P-ep5
曲げ付着強度(N/mm ²)		2.27	2.36	2.65	1.81	2.43	2.40	6.98	6.78
同材齢のケースMの 曲げ強度(N/mm ²)	旧	5.93				6.09			
	新	4.07							
破壊モード		モード0	モード0	モード1	モード1	モード1	モード0	モード2	モード3
備考		モード0 …… 新・旧コンクリートの界面で破壊 (P-pcgはPCGとコンクリートの界面で破壊) モード1 …… 新コンクリートと接着剤層の界面が新コンクリートの表層 (モルタル部) を伴って破壊 モード2 …… 接着剤層近傍のコンクリートにひび割れが生じ、接着剤層が鉛直方向に破断 モード3 …… 接着剤層からおよそ30mmのコンクリート部で破壊							

表-7 破壊モード

	モード0	モード1	モード2	モード3
側面図				
平面図				
ケース	NJ, C-apd, P-pcg	C-ep1, C-ep2, C-ep3	P-ep4	P-ep5

きな差は見られなかった。曲げ付着強度が接着剤等による付着力と骨材の存在等によるアンカー効果の2つの効果で決まることを考慮すると以下のことが言える。

① 本試験の供試体は室内で製作し、打継ぎ処理は遅延剤洗出しにより実施したため、接合面に粉塵等の異物がなく、また粗度が高く、接着剤を使用しない NJ の強度が比較的高かった。NJ の破壊は打継ぎ界面で生じ、その曲げ付着強度は 2.27 N/mm^2 で、一体打ち (M) の曲げ強度 4.07 N/mm^2 の 56% であった。

② C-apd は旧コンクリートの接合面における吸水を防止する目的で APD によるプライマー処理を施したが、本試験の範囲内では明確な効果が表れなかった。破壊は打継ぎ界面で生じた。

③ エポキシ接着剤を適用したケースでは、NJ と比較して C-ep1, C-ep3 の曲げ付着強度は増加し、C-ep2 の強度は減少したがその差は小さい。これらの破壊面を観察すると、破壊は新コンクリート接合面のモルタル部で生じており、また、新コンクリートの粗骨材は接着剤に触れていなかった (表-7)。よって、破壊面の粗度が低くなりアンカー効果が減少したが、接着剤により付着力が増加した結果、NJ と大差ない結果が得られたと考えられる。

接着ケースに着目すると、PCG を用いた P-pcg の破壊はコンクリートと PCG の界面で生じた。その結果、NJ と同等の曲げ付着強度であったため、PCG の付着力は今回使用したコンクリートと同程度であったと言える。一方、エポキシ接着剤を用いた P-ep4, P-ep5 の曲げ付着強度は、各々 6.98 N/mm^2 , 6.78 N/mm^2 であり、一体打ち M の曲げ強度と比較して約 1.1 倍の強度であった。P-ep4 と P-ep5 を比較すると、曲げ付着強度には大きな差異は認められないが、破壊モードが大きく異なった。P-ep4 はひび割れが接合面付近のコンクリートに生じ、最終的には接着剤層が鉛直方向に破断したのに対し、P-ep5 は接着剤層からおおよそ 30 mm の位置にひび割れが生じ、接合部近傍では破壊の兆候が見受けられなかった (表-7)。この理由として、接着剤の弾性係数の違いが考えられる。P-ep4 および P-ep5 に適用したエポキシ接着剤の弾性係数は、それぞれ 4.91 kN/mm^2 および 2.45 kN/mm^2 である (表-4)。よって、定性的には弾性係数の大きい方で接

合部への応力集中が大きくなり、P-ep4 の破壊が接合部近傍で生じた可能性がある。P-ep4 と P-ep5 の違いについては、次の破壊エネルギー試験による定量的な結果を踏まえて再度考察する。

3.2 破壊エネルギー試験

(1) 管理供試体の試験結果および接着剤材齢

管理供試体の試験結果を表-8 に示す。なお、試験日の接着剤材齢は、打継ケースは 8 日、接着ケースは 15 日であった。

表-8 破壊エネルギー試験の管理供試体

ケース	圧縮強度 (N/mm^2)		引張強度 (N/mm^2)		静弾性係数 (kN/mm^2)	
	旧*1	新*2	旧	新	旧	新
打継	56.5 (27日)	53.8 (8日)	4.32 (27日)	4.14 (8日)	5.76 (27日)	5.06 (8日)
接着・ 一体打ち	56.5 (27日)		4.32 (27日)		5.76 (27日)	

*1旧コンクリート、*2新コンクリート

(2) 試験結果および考察

試験結果一覧を表-9 に、荷重-CMOD 曲線を図-3 に示す。ここで、破壊エネルギーは、厳密には供試体が破断するまでに要したエネルギーであるが、本研究では使用したクリップゲージの最大計測変位である CMOD 2mm までに要したエネルギーを破壊エネルギーとした。また、表-9 に示した値は図-3 の平均曲線の値であり、曲げ付着強度は最大荷重時の曲げモーメントを接合部の断面係数で除して求めた参考値である。ここで、M の値は曲げ強度である。なお、供試体数は各ケース 4 体としたが、不安定な結果が得られた供試体は図-3 から除外した。

平均曲線の比較 (図-3(f)) に着目すると、打継ケースの C-ep3 および NJ は曲げ付着試験と同様、ほぼ同じ結果が得られ、荷重-CMOD 曲線は一体打ち M の包絡線内であった。C-ep3 および NJ の最大荷重は M の約 70% で、破壊エネルギーは約 50% であり、曲げ付着強度試験と同様の結果であったと言える。

一方、接着ケースの P-ep4 および P-ep5 に関しては、曲げ付着試験では把握できなかった明確な違いが確認された。荷重-CMOD 曲線に着目すると、P-ep4 の初期お

表-9 破壊エネルギー試験結果

	破壊エネルギー		最大荷重		最大荷重時CMOD	CMOD=2mm時の荷重	曲げ付着強度
	(N/mm)		(N)		(mm)	(N)	(N/mm^2)
M	0.182	(1.00)*	4912	(1.00)	0.040	44	4.43
NJ	0.095	(0.52)	3605	(0.73)	0.048	16	2.87
C-ep3	0.090	(0.49)	3361	(0.68)	0.040	13	2.81
P-ep4	0.289	(1.59)	6533	(1.33)	0.076	285	5.72
P-ep5	0.644	(3.54)	4697	(0.96)	0.560	1722	4.17

* () は M に対する比率

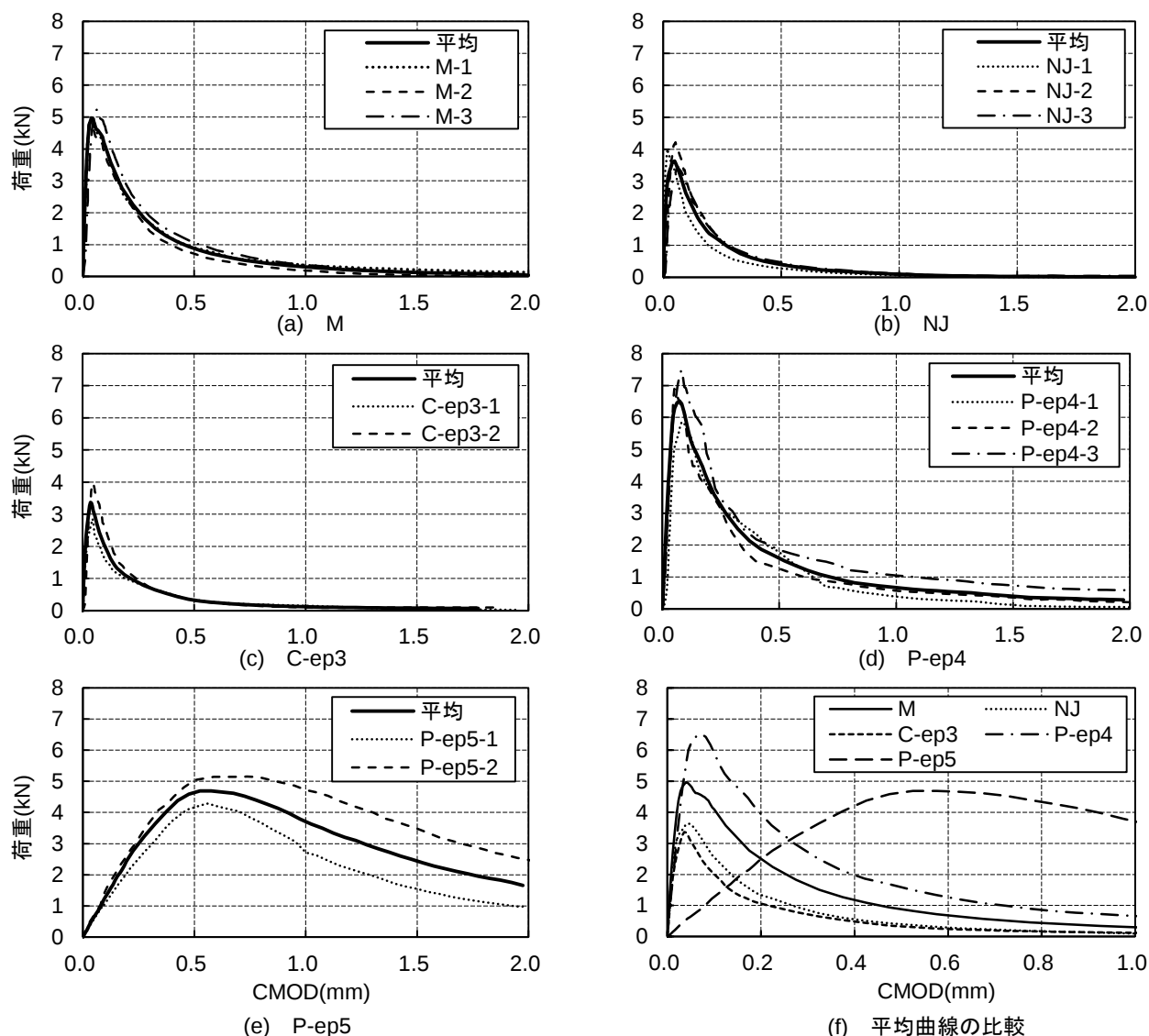


図-3 荷重-CMOD 曲線

および最大荷重後の勾配は M とほぼ同じである。しかし、P-ep4 の最大荷重は M と比較して 33% 高く、結果として、破壊エネルギーが 59% 大きくなった。P-ep5 の初期および最大荷重後の勾配は、M と比較していずれも緩やかであり、CMOD 2mm 時において最大荷重の 36% の荷重を保持し、破壊エネルギーは M の 3.54 倍となった。この要因の一つとして、曲げ付着試験で述べたとおり接着剤の弾性係数が考えられるが、最大荷重後の勾配には接着剤のじん性による影響が大きいと推察され、次に算出する引張軟化曲線で評価する。

(3) 引張軟化曲線

算出した引張軟化曲線を図-4 および図-5 に示す。図-4 では、解析結果の妥当性を照査するため、一体打ち M の結果を土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾および fib Model Code 2010 Final Draft⁸⁾に規定される引張軟化曲線と比較した。その結果、M は設計規準に近い曲線とすることが確認された。

図-5 に示すとおり、C-ep3 および NJ の結果は M の包

絡線内であり、前述の試験結果から推察できる結果となった。M はひび割れ発生直後から引張応力が減少しているのに対し、P-ep4 および P-ep5 では、それぞれひび割れ幅が 0.02 mm および 0.10 mm に達するまで引張応力は減少していない。この理由として、接着剤のじん性が考えられる。解析モデルでは、1 本の仮想ひび割れをモデル化し、この仮想ひび割れが唯一の非線形挙動を表現する要素である。よって、接着剤の非線形挙動、コンクリートのひび割れ、および接着剤とコンクリート界面の微小な破壊は、すべて 1 つのひび割れ幅と評価される。そこで、接着剤が最大引張応力に達した後も十分な伸び能力を有していると仮定すると、図-5 に示す結果が得られると考えられる。すなわち、P-ep4 は M に近い引張軟化曲線を示しているが、ひび割れ幅 0.02 mm までは接着剤のじん性が影響していると考えられる。また、0.02 mm 以降は、コンクリートの破壊が支配的となり、結果として、M と近い勾配の引張軟化曲線が得られた。一方、P-ep4 と P-ep5 を比較すると、弾性係数の低い P-ep5 が高いじ

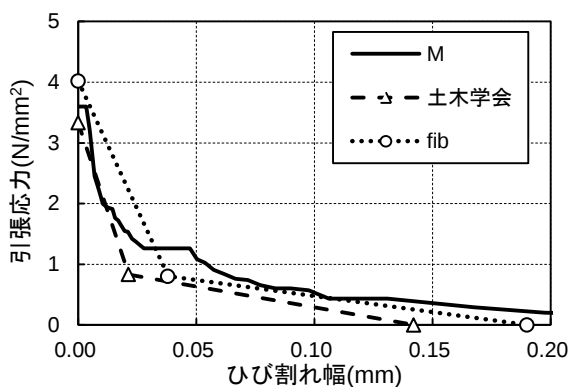


図-4 M と設計規準の比較

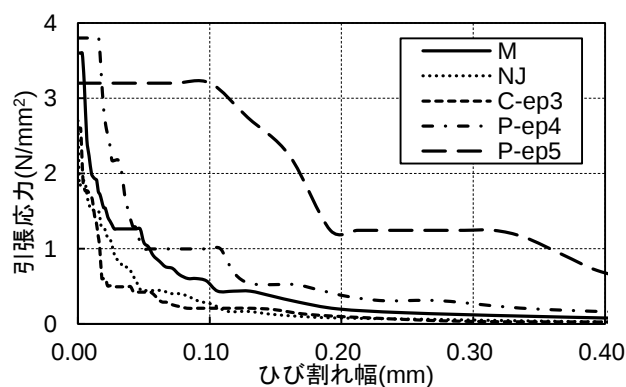


図-5 引張軟化曲線の比較

ん性を示しており、引張軟化曲線の応力低下時の勾配も緩やかである。これらの結果、破壊エネルギー試験での差異が生じたと言える。一方、曲げ付着試験では4点曲げ載荷を実施した。そのため、曲げモーメントが一定となる区間において、特に P-ep5 では接着剤が高いじん性を示し、接合面の強度がコンクリート部よりも高くなり、また、接合部近傍の変形を吸収したため、結果として接合面から離れたコンクリート部で破壊した可能性がある。接着剤のじん性を検証するためには、接着剤そのもののタフネス試験が必要と考えられ、今後の課題である。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて、本論文の結論とする。

- (1) 表面処理を遅延剤の洗出しとした場合、打継ケースにおけるアクリル系ポリマーディスパーションおよび接着ケースにおけるポリマーセメントグラウトは、曲げ付着強度の改善効果が小さかった。
- (2) 打継ケースにおけるエポキシ接着剤も同様に、曲げ付着強度の改善効果が小さかった。破壊は新コンクリート接合面のモルタル部で生じており、また、新コンクリートの粗骨材は接着剤に触れていなかった。よって、破壊面の粗度が小さくなりアンカー効果が減少したが、接着剤により付着力が増加した結果、曲げ付着強度の改善効果が小さくなった。
- (3) 接着ケースにおけるエポキシ接着剤は、一体打ちコンクリートと比較して破壊エネルギーを増加させ、曲げ付着強度が、一体打ちよりも 10%程度大きくなった。
- (4) 引張軟化曲線は、エポキシ接着剤の弾性係数およびじん性の影響を大きく受けることが確認された。本研究で使用した弾性係数の異なる 2 種類のエポキシ接着剤では、弾性係数が大きい方で一体打ちコンクリートに近い引張軟化曲線を示した。これに対し、比較的じん性の高いと考えられる弾性係数が低い方で、応力低下時に緩やかな勾配となる引張軟化曲線

を示した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、新日鉄住金マテリアルズ株式会社コンポジット社から材料の提供および技術支援を、住友大阪セメント株式会社から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，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
- 2) 橘高義典，上村克郎，中村成春：コンクリート切り欠き試験体の曲げ試験によるひびわれ補修材料の評価，日本建築学会構造系論文報告集第 432 号，1992.2
- 3) 国枝稔，川瀬貴行，鎌田敏郎，六郷恵哲：ひび割れ注入材の曲げ付着特性の評価に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，No.669, V-50, pp.203-213, 2001.2
- 4) 栗原哲彦，安藤貴宏，内田祐市，六郷恵哲：引張軟化曲線によるコンクリート打継ぎ部の付着性状の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.2, 1996
- 5) 内田裕市：引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロードプログラム，
http://www.jci-net.or.jp/jci/study/jci_standard/kitsutaka_dl.html
- 6) 栗原哲彦，安藤貴宏，国枝稔，内田裕市，六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532, V-30, pp.119-129, 1996.2
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2007
- 8) fib: Model Code 2010 Final Draft, 2012