

論文 補強鉄筋埋設方式 PCM 巻立て工法における帯鉄筋側面拘束力の影響に関する検討

多田 隈 育生*1・日野 伸一*2・彌永 裕之*3・小沼 恵太郎*4

要旨: 補強鉄筋埋設方式 PCM 巻立て補強工法は、既設コンクリート表面に切削溝を設け、補強鉄筋を埋設する補強工法である。本研究では、付着強度の把握を目的とした要素試験と巻立て施工による定着向上効果の把握を目的とした鉄筋引抜試験を実施した。試験結果より、3面定着の引抜抵抗に対して有効に作用する面積は、鉄筋周長の3/4の範囲であることが明らかにされた。また、溝切り定着の定着長は、帯鉄筋巻立て無しでは 27ϕ (ϕ は鉄筋直径を示す)以上で軸筋降伏が先行するが、帯鉄筋巻立て有りでは 20ϕ でも軸筋降伏が先行したため引抜耐力に及ぼす側面拘束力の影響を確認することができた。

キーワード: 補強工法, 定着長, PCM 巻立て, エポキシ樹脂, 帯鉄筋, 引抜き試験

1. はじめに

補強鉄筋埋設方式 PC 巻立て補強工法(以後、本工法と称する)は、RC 構造物の曲げ補強および靱性向上を目的とした補強工法であり、橋脚耐震補強工法として従来から用いられている鉄筋コンクリート巻立て工法に比べ、補強厚を大幅に抑制することが可能な工法である。図-1 に本工法の概念図を示す。施工方法としては、既設構造物のコンクリート表面に溝切削を施し、溝内に配置した補強鉄筋をエポキシ樹脂により定着し、その上からポリマーセメントモルタルによる巻立てを行い、対象構造物を補強するものである¹⁾²⁾。この施工方法により、本工法は、補強厚を大幅に抑えられることから、河積阻害率の制限を受ける橋脚やダムピアといった河川構造物の耐震補強に多くの施工実績を有する。しかし、ダムピアの補強では、構造物を供用しながらの施工となるため、水門や検査路等による空間的な制約やダムピア形状の関係から、施工上の課題が多く存在する。例えば、本工法では通常、補強鉄筋を定着する際、対象構造物の基部にコア削孔を施し、接着剤を用いて補強鉄筋の端部を定着する(以後、アンカー定着と称する)。しかし、ダムピアの補強部位において、コア削孔を施すことが難しく、切削溝への埋設のみで鉄筋端部も含めた補強鉄筋全長を定着する(以後、溝切り定着と称する)必要がある場合が存在する。切削溝への埋設のみで補強鉄筋を定着させた本工法の施工事例はこれまで存在せず、その定着長についても、不透明な部分が多い。著者らは、補強鉄筋を切削溝への埋設のみで定着した際の必要定着長と破壊特性の把握を目的に対象ダムピアの施工限界定着長を基準とした鉄筋引抜試験を実施した³⁾。実験の結果、 27ϕ 以上の

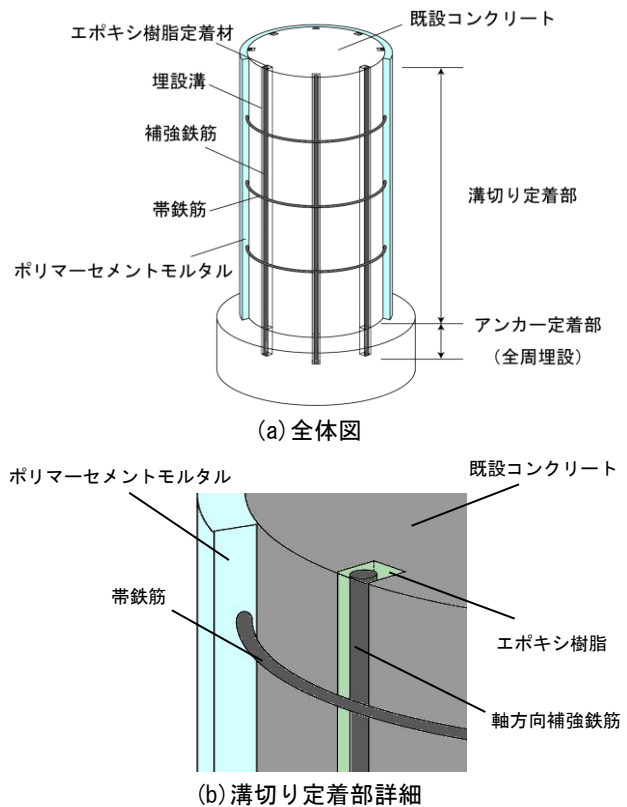


図-1 補強鉄筋埋設方式 PCM 巻立て工法概念図

定着長を確保した場合、鉄筋降伏が支配的な破壊形式となり、十分安全性が担保できることを確認された。しかし、本工法の定着メカニズムを十分明らかにできなかったとは言えない。そこで本研究では、エポキシ樹脂による鉄筋定着鉄筋定着における付着応力度の把握を目的とした要素試験および巻立て施工による定着力向上効果の把握を

*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 (フェロー会員)

*3 (株) アーテック AT 事業部

*4 パシフィックコンサルタンツ (株) 交通基盤事業本部 博(工) (正会員)

目的とした鉄筋引抜試験を実施した。

2. 要素試験

定着に使用するエポキシ樹脂の異形鉄筋に対する付着強度に関して十分に把握ができていないため、全周定着と同等の強度を有する必要定着長が明らかではない。そこで、アンカー定着および溝切り定着に関して、それぞれの定着方法における付着応力度の測定および定着方法の異なる際の付着応力度の変動について検討を行うことを目的として鉄筋引抜試験を行った。

2.1 試験概要

表-1 に材料特性値、表-2 に試験体一覧、図-2 に試験体模式図、図-3 にエポキシ充填状況を示す。試験体は JSCE 503-2013⁴⁾ に準拠し、一辺 200mm のコンクリートに SD345、D32 の異形鉄筋をコンクリートまたはエポキシ樹脂により定着させるものとした。また、付着長は 127mm、非付着長を 73mm とした。試験体種類はコンクリート定着、エポキシ全周定着、エポキシ 3 面定着、エポキシ 5/6 定着の 4 ケースとした(図-3)。5/6 定着については 3 面定着とコンクリート-エポキシ間の接着面積が同等となるようにした。図-2 に示す矢印の方向に油圧ジャッキを用いて、鉄筋に緊張力を作用させ、荷重を測定した。

2.2 試験結果

表-3 に試験結果一覧を示す。最大付着応力度については最大荷重時の鉄筋-エポキシ間の付着応力度の値を求めた。付着応力度の算出方法については JSCE 503-2013⁴⁾ に準じて以下に示すとおりである。

$$\tau = P/A \times \alpha$$

ここで τ : 付着応力度, P : 引張荷重, A : 定着面積

$\alpha = 30/f'_c$: コンクリートの圧縮強度 f'_c による補正係数

エポキシ樹脂全周定着を基準試験体として最大荷重を比較すると、コンクリート定着は、エポキシ樹脂全周定着に比べて 1.2 倍大きく、コンクリートと鉄筋の付着応力はエポキシ定着よりも強固であることが確認された。また、エポキシ樹脂同士で比較すると、接着面積を減じた 5/6 定着は全周定着と比べ最大付着応力度は 0.84 倍となり、これは接着面積の比 5/6 に相当する結果となる。付着応力度で比較すると全周定着とほぼ同等であり、円周状に接着した場合、5/6 定着まではほぼ同等の付着応力度に変化となった。一方 3 面定着では、コンクリートとエポキシ樹脂の接着面積は 5/6 定着とほぼ同等にも関わらず最大荷重は低下しており、全周定着と比較すると、最大付着応力度は 25% 低下した。これは 3 面定着の自由面側の引抜き抵抗はほとんど期待できないこと示唆する結果となった。すなわち、3 面定着における最大付着応力度は、全周定着の付着応力度の 3/4 倍として取り扱う

表-1 材料特性値

	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	54.2	—	—	28.2
異形鉄筋 (SD345, D32)	—	402	565	200
エポキシ樹脂	66.0	48.6	27.7	2.1

表-2 試験体一覧

試験体	定着方式	備考
コンクリート	コンクリート定着	比較用試験体
全周定着	エポキシ全周	アンカー定着
3 面定着	エポキシ 3 面定着	溝切り定着
5/6 定着	エポキシ 5/6	コンクリート部の定着面積が 3 面定着と同等

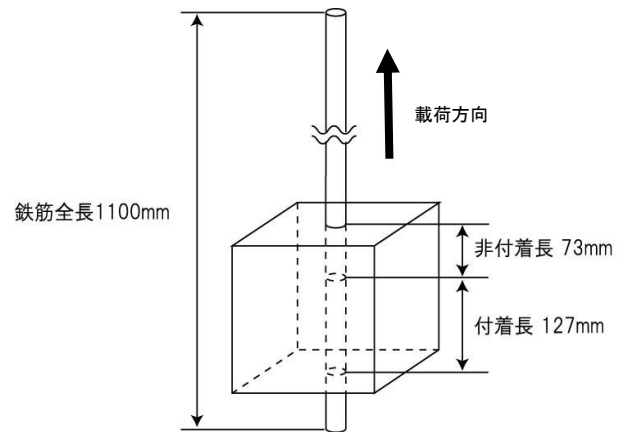


図-2 試験体模式図

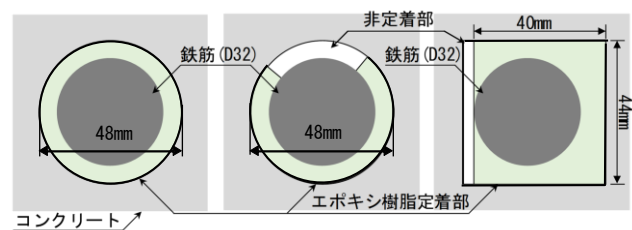


図-3 要素試験定着部詳細

表-3 試験結果一覧

試験体	最大荷重 (kN)	最大付着応力度 (N/mm ²)	全周定着との 最大付着応力度比
コンクリート	223.0	9.70	1.20
全周定着	186.6	8.13	1.00
5/6 定着	156.6	8.17	1.00 ^{※元のまま}
3 面定着	140.1	6.00	0.75

のが妥当であると考えられる。このことより、溝切り定着における必要定着長は、通常アンカー定着法に比べ

4/3 倍必要であると推察される。

3 実規模試験

本工法を用いた実施工の場合には、軸方向鉄筋を溝切り定着した後、その外側に帯鉄筋を配置し、PCM 吹付け施工を実施する。したがって、帯鉄筋及び PCM による側面拘束が及ぼす引抜き抵抗への影響を把握する必要がある。そこで、要素試験を踏まえ、実物大の試験体を作製し、PCM および帯鉄筋の引抜き耐力に及ぼす側面拘束力の影響について検討を行った。

3.1 試験概要

表-4 に試験体一覧、表-5 に材料特性値、図-4 に試験体概略図および平面図を示す。試験体は、エポキシ樹脂により、コンクリートに鉄筋を定着させるものとし、アンカー定着と溝切り定着(帯鉄筋無)、溝切り定着(帯鉄筋有)の 3 ケースとした。アンカー定着については各試験体とも 1 体ずつ、溝切り定着については 3 体ずつ試験体を用意した。なお鉄筋は異形鉄筋(SD345)を用い、軸方向鉄筋は D22、帯筋は D16 を使用した。

アンカー定着試験体は、コンクリートをコア削孔し、エポキシ樹脂を用いて鉄筋をコンクリートに定着した。定着長は 440mm (20φ)、330mm (15φ)、220mm (10φ) とした。

溝切り定着試験体は、試験体コンクリート側面に幅 29mm×溝切深さ 33mm の角形埋設溝を設け、エポキシ樹脂により鉄筋を 3 面定着させた。前述の要素試験の結果より、最大付着応力度が全周定着の 3/4 倍に低下することを考慮して、アンカー定着の定着長を 4/3 倍した定着長 590mm (27φ)、440mm (20φ)、300mm (14φ) に設定した。帯鉄筋は、軸方向鉄筋と接触しないようにコンクリート天端より 75mm の位置から 150mm 間隔で 27φ 試験体に 4 本、20φ 試験体に 3 本、14φ 試験体に 2 本を配置した。

表-4 試験体一覧

定着方法	記号	定着長 (mm)	試験体数
溝切り定着 (帯筋有)	MP	590(27φ)	3
		440(20φ)	3
		300(14φ)	3
溝切り定着 (帯筋無)	M	590(27φ)	3
		440(20φ)	3
		300(14φ)	3
アンカー定着	A	440(20φ)	1
		330(15φ)	1
		220(10φ)	1

表-5 材料特性値

	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	32.9	—	—	29.4
軸方向鉄筋 (SD345, D22)	—	396	568	200
帯鉄筋 (SD345, D16)	—	414	552	200
ポリマーセメントモルタル	42.0	—	—	13.5
エポキシ樹脂 (アンカー)	66.0	—	27.7	2.1
エポキシ樹脂 (溝切り)	67.8	—	44.4	2.7

3.2 載荷試験方法

図-5 に載荷方法および計測機器設置位置の模式図を示す。試験方法はあと施工アンカーの試験方法に準拠し⁵⁾、試験体上に反力台を設け、油圧ジャッキを用いて定着鉄筋に鉛直上向きに引張力を作用させた。荷重、変位および鉄筋ひずみの計測を行い、変位は試験体コンクリート部上面より 50mm の位置における鉄筋の変位を計測した。軸方向鉄筋ひずみはコンクリート天端位置と帯鉄筋に関しては軸方向鉄筋と交差する位置で計測した。

3.3 試験結果

3.3.1 荷重-変位関係

(1) アンカー定着試験体

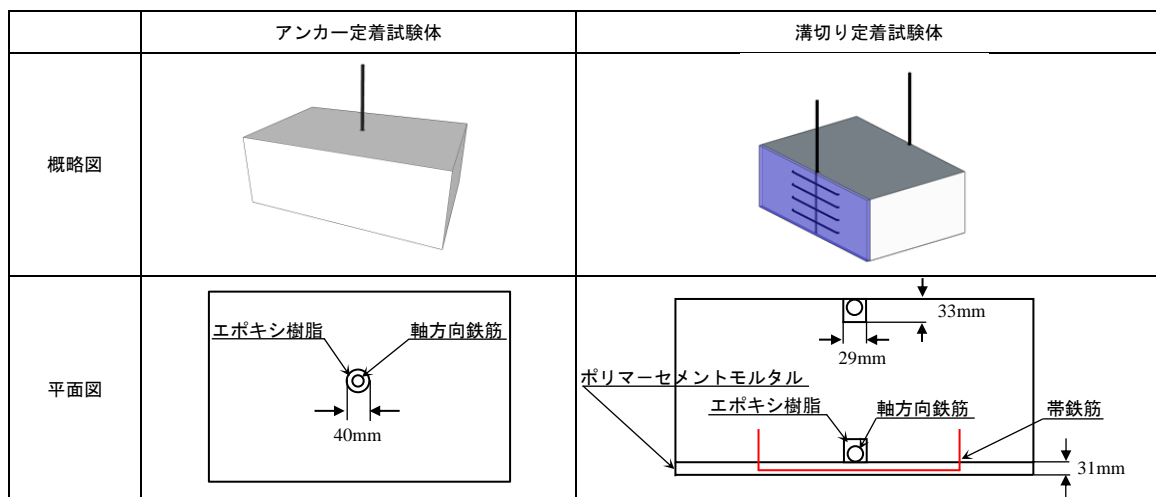


図-4 試験体概略図および平面図

図-6 にアンカー定着試験体の荷重-鉄筋変位関係を示す。20φ、15φ試験体では、140kNを越えたあたりで軸筋が降伏していることが確認できる。10φ試験体では降伏とほぼ同時に破壊に至った。載荷初期では、いずれの試験体においても剛性に差はなかったが、440mm、330mmに比べ220mm試験体では100kN付近で剛性が低下しはじめ、130kNでコンクリートひび割れが発生したため変位量が大きくなったと考えられる。

(2) 溝切り定着試験体(帯鉄筋無)

図-7 に溝切り定着試験体(PCM・帯鉄筋無)の荷重-鉄筋変位関係についての代表値を示す。27φ試験体では軸筋降伏が先行した一方で、20φ試験体では軸筋降伏とほぼ同時に付着破壊に至り、14φ試験体では軸筋降伏前に付着破壊に至った。このことから20φ以下の定着長では定着長が十分ではないことが示唆され、既往の研究と同じ結果を示した³⁾。また、剛性に関しては27φ試験体に比べ、20φ、14φ試験体では顕著に剛性が低くなっており、載荷初期から変位量が大きいことから破壊の進展が大きく、引抜きに対し抵抗が小さいことが分かる。

(3) 溝切り定着試験体(帯鉄筋有)

図-8 に溝切り定着試験体(PCM・帯鉄筋有)の荷重-鉄筋変位関係についての代表値を示す。27φ、20φ試験体では軸筋降伏が先行した。14φ試験体では軸筋降伏前に付着破壊に至った。このことから帯鉄筋無とは異なり、20φ試験体においても必要定着長を満たす結果となった。また、帯鉄筋無に比べると定着長による剛性の差が小さくなった。これは帯鉄筋の拘束力によるものと考えられ

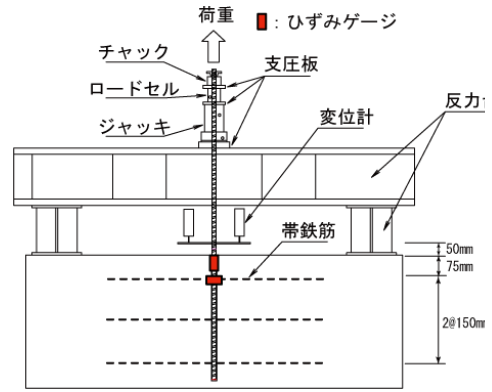


図-5 載荷方法および測定機器設置位置

る。

(4) 付着応力度の同等な試験体間による比較

図-9 に相当定着長別での荷重-鉄筋変位関係を示す。いずれもアンカー定着が最も高い剛性を示し、終局荷重も大きな値となっている。20φ相当試験体の溝切り定着では帯鉄筋の有無による剛性の大きな変化はなかった。これは、溝切り定着においても20φ相当の定着長であれば十分であるためと考えられる。一方、15φ相当および10φ相当試験体においては、全周定着、帯鉄筋有、帯鉄筋無の順に剛性は大きくなり、定着方法によって剛性に変化が表れた。これより、帯鉄筋による側面拘束力が有効に作用していると推測できる。

3.3.2 各イベント荷重の評価

表-6 に各試験体のイベント毎の平均荷重値の一覧を示す。溝切り定着では帯鉄筋無の試験体1体を除く全て

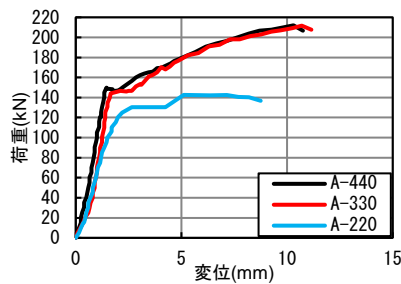


図-6 荷重-変位関係 (アンカー定着)

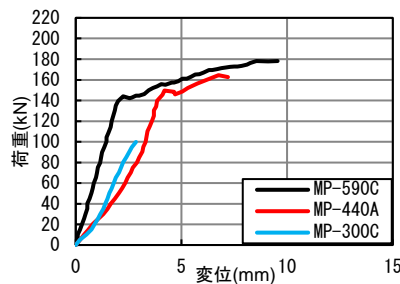


図-7 荷重-変位関係 (溝切り定着・帯鉄筋無)

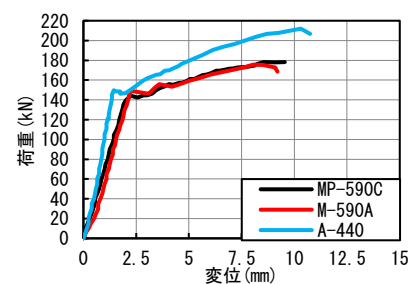
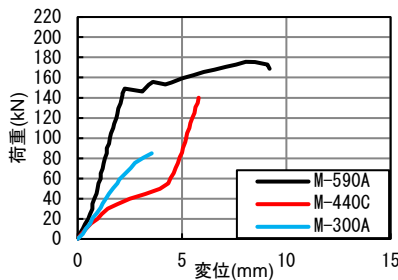
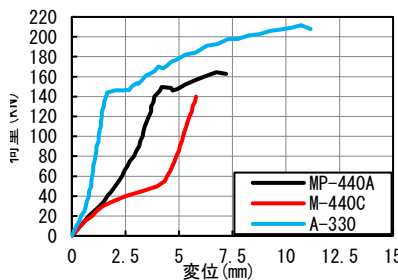


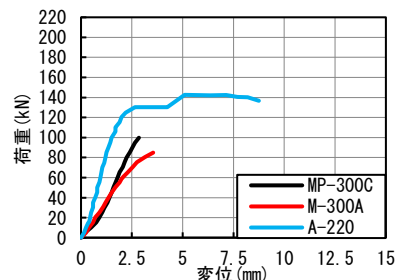
図-8 荷重-変位関係 (溝切り定着・帯鉄筋有)



(a) アンカー定着 20φ 相当



(b) アンカー定着 15φ 相当



(c) アンカー定着 10φ 相当

図-9 相当定着長別 荷重-変位関係

の15φ相当以上の試験体で軸筋降伏が先行した。そのため、本工法における埋設溝定着長の最小値は、PCM・帯鉄筋配置無で27φ、配置有で20φであることが示唆された。図-10にPCM・帯鉄筋の有無による各イベント荷重の比較、図-11に各最上段帯鉄筋下部の荷重-鉄筋ひずみ関係を示す。いずれも80kN付近より帯鉄筋にひずみが増加し始めていることから、帯鉄筋はコンクリートひび割れ発生以後から引抜きに対し、有効に拘束力が作用し始めていることがわかる。帯鉄筋配置によって終局荷重が27φでは11%、20φで15%、14φでは23%のように定着長が小さいほどPCM・帯鉄筋の拘束効果が大きく表われることが確認された。アンカー定着では10φ試験体

が軸筋降伏とほぼ同時に破壊に至った。20, 15φ試験体では、軸筋降伏が先行し、ジャッキのストロークが限界に達したため途中除荷をした。このことからアンカー定着でも定着長は15φ以上必要であることが示唆された。

3.3.3 試験体の破壊性状

表-7に溝切り定着試験体(PCM・帯鉄筋無), アンカー定着試験体の破壊状況を示す。すべての溝切り定着試験体(PCM・帯鉄筋無)においてひび割れの発生位置は鉄筋定着部のコンクリート天端付近となっており、エポキシ樹脂が鉄筋の節位置から局所的な割れを生じた後、コンクリートにひび割れが進展した。その後、全ての試験体が鉄筋-エポキシ樹脂間の付着破壊に至った。また、試験体

表-6 各試験体荷重平均一覧

試験体名	各イベント荷重(kN)			破壊形式
	ひび割れ発生	鉄筋降伏	終局	
MP-590	89.7	139.6	191.9	鉄筋降伏後、付着破壊(エポキシ樹脂-鉄筋)
M-590	81.5	140.5	173.4	鉄筋降伏後、付着破壊(エポキシ樹脂-鉄筋)
MP-440	81.5	138.5	165.3	鉄筋降伏後、付着破壊(エポキシ樹脂-鉄筋)
M-440	87.3	135.5	144.3	付着破壊(エポキシ樹脂-鉄筋)
MP-300	-	-	106.6	付着破壊(エポキシ樹脂-鉄筋)
M-300	-	-	87.0	付着破壊(エポキシ樹脂-鉄筋)
A-440	-	145.2	212.0	途中除荷(油圧ジャッキのストロークが限界に達したため)
A-330	-	144.2	211.7	途中除荷(油圧ジャッキのストロークが限界に達したため)
A-220	130.3	142.6	145.5	母材コンクリートの割裂破壊(コーン状破壊)

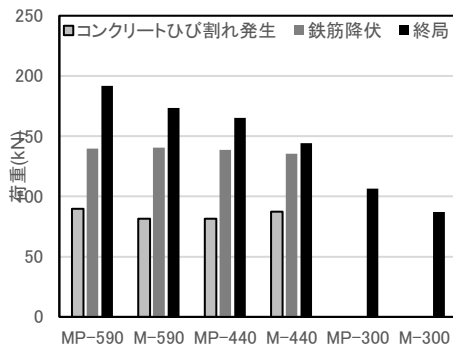


図-10 帯筋の有無による各荷重値比較

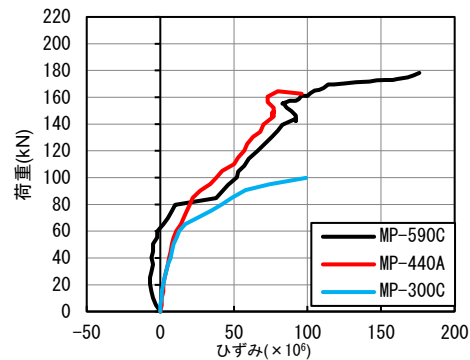






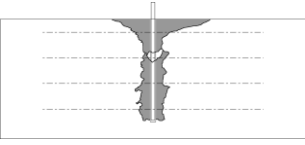
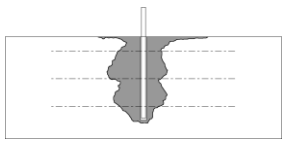
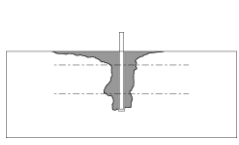


図-11 最上段帯鉄筋下部の荷重-鉄筋ひずみ関係

表-7 溝切り定着試験体(PCM・帯鉄筋無), アンカー定着試験体の破壊状況

	M-590A	M-440C	M-300A	A-220
側面図				
ひび割				

表-8 溝切り定着試験体の破壊状況

	MP-590C	MP-440A	MP-300C
側面図			
はつり後			
ひび割れ図			

上面は半楕円状に破壊が起きていた。アンカー定着試験体では、20、15φでは破壊は確認されず、10φ試験体ではコンクリート上面に大きなコーン状破壊が確認された。表-8に溝切り定着試験体(PCM・帯筋有)の破壊状況を示す。いずれの試験体でもPCMの表面には軸方向鉄筋の埋設された位置からひび割れが発生したため、荷重が上がるにつれ、軸方向鉄筋はPCM側に向かってはらみ出すような挙動を示したことがわかる。試験終了後、PCMをはつり、内部のコンクリートの状況を観察した。いずれの試験体でも試験終了後はPCMの大部分がはく離しており、PCMはつり後内部を確認すると、軸方向鉄筋とエポキシ樹脂間で付着破壊が発生しており、エポキシ側に鉄筋の黒皮が付着しているのが確認された。また、試験体上面では半楕円状のコンクリートの剥落が起きていた。帯鉄筋配置無と比べ、配置有の方は20φ、14φ試験体のコンクリート破壊面が波線状になっており帯鉄筋の設置位置付近は破壊幅が小さくなった。これにより帯鉄筋の側面拘束力が働いていたことが推測できる。

4 まとめ

コンクリートの圧縮強度 54.2N/mm^2 を用いた要素試験の結果より

- (1) コンクリート定着とエポキシ定着の最大付着応力度を比較すると、それぞれ 9.70N/mm^2 、 8.13N/mm^2 となり、コンクリート定着の方が大きいことが確認された。
- (2) 3面定着において引抜き抵抗に対して有効に作用する面積は、鉄筋周長の3/4の範囲であると考えられ、実施工において、溝切り定着の定着長は通常のアンカー定着の4/3倍以上は必要であると推定される。コンクリートの圧縮強度 32.9N/mm^2 を用いた実規模試験

の結果より

- (3) いずれの定着長でも帯鉄筋配置を行うことで終局耐力が向上し、27φ、20φ、14φの試験体でそれぞれ11%、15%、23%強度が向上した。
- (4) 溝切り定着の、帯鉄筋巻立て無しでは、定着長27φ以上で軸筋降伏が先行するが、20φ以下では軸筋降伏前もしくは同時に終局し、定着長が十分とは言えない。一方で帯鉄筋巻立て有では20φ以上で軸筋降伏が先行することが確認された。

謝辞

本研究の実施にあたり、九州大学大学院島山繁忠助教には多大の協力を賜った。また、一般社団法人九州地域づくり協会の研究助成を賜った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)小沼恵太郎, 日野伸一, 弥永敏明, 山口浩平, 榎本碧: 既設RC橋脚の鉄筋埋設型PMM巻立て工法に関する実験的研究, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004.9
- 2)補強鉄筋埋設方式PCM巻立て橋脚補強本工法(河川構造物)施工指針: AT工法研究会, 2012.9
- 3)石村昌也, 日野伸一, 彌永裕之, 小沼恵太郎: 補強鉄筋埋設方式PCM巻立て補強工法(本工法)における鉄筋定着長に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol39, No.2, pp445-450,
- 4)土木学会: 2013年制定コンクリート標準示方書(標準編)
- 5)あと施工アンカー標準試験法・同解説: 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会 あと施工アンカー認定委員会