## 論文 有限要素逆解析による補修モルタルと躯体コンクリートの付着構成 則構築

金 享俊\*1・野口 貴文\*2・米田 信年\*3・濱崎 仁\*4

要旨:補修を施した鉄筋コンクリート部材の性能を有限要素解析により評価する際,躯体コンクリートや補 修モルタル,鉄筋の物性に加え,それらの界面付着特性を入力する必要がある。現在まで躯体コンクリート と補修モルタルとの付着特性に関しては多くの研究がされているが,付着要素の構成則の構築までは至って いない状況である。そこで本研究では,補修された鉄筋コンクリート部材の構造耐力を有限要素解析で定量 的に評価する際に必要な補修モルタルと躯体コンクリートとの付着要素の構成則を求めるために,ポリマー を含有した補修モルタルに関し様々な試験を行い,実験結果を逆解析する事で構成則を求め考察を行った。 キーワード:補修モルタル,再乳化形粉末樹脂,せん断付着試験,有限要素解析

## 1. 研究の目的

補修部材の構造性能に関し界面付着特性を考慮した 解析で評価する際,入力値として躯体コンクリートや補 修モルタル、鉄筋の物性に加え、躯体コンクリートと補 修モルタル間、躯体コンクリートと鉄筋間、補修モルタ ルと鉄筋間それぞれの界面付着特性を求める必要があ る。FEM 解析を行う場合,各物質間の付着現象を再現す るために付着要素を設けることでより精緻な解析を行 うことが可能であり、その構成則としては強度と弾性係 数が最も重要な数値と言える。現在まで、躯体コンクリ ートと補修モルタル間の付着特性に関する研究は数多 くされている<sup>1,2)</sup>が,それらは強度に関するものが多く, 構成則の構築には至っていない。また、躯体コンクリー トの表面粗度や,骨材の有無など付着に影響を及ぼす多 岐にわたる因子を比較検討した研究<sup>2)</sup>はあるものの,そ れらの影響を除いた状態でポリマーの影響のみを比較 したものは少ない。

そこで本研究では、様々な影響因子を取り除いた状態 で、ポリマーの変化のみによる付着性能の変化を捉え、 解析に用いる付着要素の構成則を構築することを目的 とした。そのため、躯体としてコンクリートを想定した 躯体モルタルを使用した。補修モルタルには代表的な4 種のポリマーを含有したポリマーセメントモルタルを 使用し、躯体モルタルへの付着性能を評価するために、 強度試験、せん断付着試験、建研式引張付着試験を行っ た。そして、補修された鉄筋コンクリート構造物の構造 耐力を有限要素法で定量的に評価する際に必要な付着 要素の構成則を、有限要素法を用いた逆解析により求め た。また、圧縮応力下でせん断試験を行い、圧縮応力下 におけるせん断付着強度の変化の傾向を求めた。

## 2. 研究方法

### 2.1 補修モルタルの物性測定

#### (1)実験因子および水準

ポリマーの種類,およびポリマー含有率を実験因子と して試験を行った。用いたポリマーは VVA (酢酸ビニル・ ベオバ・アクリル系), EVA (エチレン酢酸ビニル), PAE (ポリアクリル酸エステル), CPAE (セルロースポリア クリル酸エステル) の4種類である。**表-1** に実験因子 および水準を示す。

### (2) 補修モルタルの調合

実験に用いた補修モルタルの調合を表-2に示す。セ メントは普通ポルトランドセメントを,細骨材は大井川 産のものを用いた。フローや空気量は JIS A1171 に準拠 して測定した。打設後はせん断付着用試験体,引張付着 試験用試験体の状況と等しくするため 20℃, 60%R.H. の恒温恒湿室で9週間封緘養生とした。

## (3) 圧縮および割裂引張試験方法

圧縮試験は JIS A1108 に規定される方法に準じ、φ5 ×10cmの円柱試験体をそれぞれ3体ずつ測定した。割裂 引張試験は JIS A1113 に規定される方法に準じ、φ10× 20cmの円柱試験体をそれぞれ3体ずつ測定した。

表-1 実験因子及び水準

実験因子	水準
ポリマーの種類	VVA, EVA, PAE, CPAE
ポリマー含有率 (P/C)	0%, 5%, 10%, 20%

*1	東京大学大学院	工学系研	F究科建築学専攻大学院生	修士	(工学)	(正会員)
*2	東京大学大学院	工学系研	开究科建築学専攻准教授	博士	(工学)	(正会員)
*3	国土交通省	近畿地力	5整備局	修士	(工学)	(正会員)
*4	独立行政法人建築	阿究所	材料研究グループ主任研究員	博士	(工学)	(正会員)

調合比(質量比)				モルタルフロー(cm)		空気量(%)						
水	セメント	細骨材	ポリマー	消泡剤	VVA	EVA	PAE	CPAE	VVA	EVA	PAE	CPAE
0.5	1	3 0.0 0.1 0.2	0	0		14.6			4.0			
			0.05	0.0005	15.4	16.5	14.5	15.9	3.9	3.1	3.0	3.1
			0.1	0.001	15.6	16.7	15.5	15.6	3.2	3.5	2.8	3.2
			0.2	0.002	15.5	16.2	14.7	16.4	3.3	3.5	3.5	3.7

表-2 補修モルタルの調合

## (4) 実験結果および考察

測定した補修モルタルの物性値を表-3に示す。弾性 係数は JIS A1149 に準拠して求めた。ポリマー含有率と 補修モルタルの物性の関係を図-1に示す。弾性係数は ポリマーの種類に関わらずポリマー含有率の増加にと もない低下する傾向が見られ、低下傾向も類似性が見ら れた。また、引張強度においてはポリマーの種類によら ず、ポリマーの含有量の増加に伴い引張強度は上昇する 傾向となったが、その変化傾向はポリマーによって相違 が見られた。いずれもポリマー含有率10%~20%で引張 強度の上昇が停止する結果となった。 圧縮強度は PAE を 除いた他のポリマーに関しては含有率の増加に伴い低 下する傾向となった。しかし、こちらも引張強度と同様 にポリマーによって変化傾向が異なった。したがって, 補修モルタルの強度はポリマー含有率の変化に伴い単 純な比例的な関係を示すのではないと言える。よって補 修設計時には部材にかかる応力状態によって圧縮強度 と引張強度のバランスを考慮し、最適なポリマーおよび その含有率を決定すべきであると考えられる。

# 2.2 引張付着試験による補修モルタルと躯体モルタル間の付着特性

## (1) 使用材料の物性

補修モルタルとコンクリート間の付着特性を明らか にするため、躯体のコンクリートを想定したモルタル下 地(以下、躯体モルタルと称す)と補修モルタル間の引 張付着試験を行った。躯体モルタルの調合はセメント: 水:砂=1:0.5:3(質量比)とした。物性を表-4に 示す。

## (2) 試験体形状および試験装置

試験体は 100mm×100mm×25mm の躯体モルタルの中央 に 40mm×40mm×10mm の補修モルタルを打設したもので ある。躯体モルタルの表面は紙やすりで平滑にし,打設 時には水湿り状態とし,打設後は 20℃,60%R.H.の恒温 恒湿室で9週間封緘養生とした。試験時には,補修モル タル表面は面外方向へ垂直に引張荷重が作用するよう に紙やすりであらかじめ平滑にし,エポキシ樹脂で治具 に接着させ,一日静置させた上で試験を行った。試験体 形状および試験装置を図-2に示す。

#### 表-3 補修モルタルの物性

$\backslash$	P/C	圧縮強度	引張強度	弾性係数
	(%)	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	$(kN/mm^2)$
	0	43.6	3.83	24.1
	5	39.7	3.81	22.0
VVA	10	42.1	4.46	19.6
	20	38.9	4.13	16.1
	5	45.5	4.27	22.2
EVA	10	46.5	4.23	19.1
	20	41.3	4.06	14.5
	5	48.2	4.40	22.7
PAE	10	50.4	4.57	21.0
	20	44.5	4.65	17.8
	5	43.6	4.35	22.6
CPAE	10	49.9	4.74	20.3
	20	47.6	4.62	17.4



図-1 ポリマー含有率と補修モルタルの物性

表-4 躯体モルタルの物性

圧縮強度	引張強度	弹性係数		
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )		
36.2	4.48	13.6		

## (3) 試験体の破壊状況

試験体の破壊状況はポリマーの種類や含有率によっ て違いが見られ,界面の破壊,躯体モルタルの破壊,補 修モルタルの破壊の3種類であった。ポリマー含有率の 高いものは躯体モルタル破壊の割合が高かった。得られ た引張付着強度および代表的な破壊状況を表-5に示 す。表-5の値は3体の試験体の平均値であり、破壊状 況の違いを考慮していない。そのため付着強度が高く、 躯体モルタルや補修モルタルの引張破壊が生じたもの は通常よりも引張付着強度を低く評価していると考え られる。VVA 以外のポリマーではポリマー含有率が10~ 20%になると、全て躯体モルタル又はモルタルの破壊と なった。

#### (4) 考察

ポリマー含有率が高いものでは躯体モルタル側の破 壊が生じた。これは補修モルタルの引張強度および引張 付着強度がポリマー含有率の増加によって上昇し,躯体 モルタルの引張強度よりも高くなったためであり,ポリ マーの含有により引張付着性能を補修前の性能まで回 復させることが可能であることが確認された。よって, ポリマーを含有した補修モルタルはひび割れ等の劣化 後の補修としては補修材側で破壊を生じさせないこと が可能という点で十分な性能を有していると言え,補修 設計時にはポリマー含有率を引張強度および,引張付着 強度がコンクリートの引張強度を上回るように調合す ることが好ましいと考えられる。

## 2.3 せん断付着試験による補修モルタルと躯体モルタル 間の付着特性

### (1) 目的

せん断付着試験を行い、補修モルタルと躯体モルタル 間のせん断付着応力-すべり曲線を得た。また 0. 6N/mm<sup>2</sup>, 1. 2N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力を加え同様の試験を行い破壊基準 を得た。

## (2) せん断付着試験方法および測定項目

試験体形状は引張試験と同様とし,図-3に示すよう なせん断付着試験を行った。ロードセルによってせん断 荷重を,変位計によって補修モルタル端部のすべりを測 定し,せん断荷重-すべり曲線を得た。モルタル打設部 周辺の型枠からもれ出たモルタルは除去し,加圧面はや すりで平滑にした。各水準に対し3体ずつ試験を行った。

### (3) 試験体の破壊状況とせん断荷重-すべり曲線

試験体の破壊状況は多くが界面破壊であったが,ポリ マー含有率が 10%以上のものは躯体モルタルの一部が 破壊した。また,圧縮応力をかけた試験体の場合は躯体 モルタルの破壊が激しくなった。得られたせん断荷重– すべり曲線の一例を図-4に示す。グラフ中の記載記号 はポリマー名,ポリマー含有率,試験体番号の順である。 いずれの水準においても,荷重が小さい段階では加圧 部自体のすべりや接触誤差,試験体自体のすべりも測定 されるため直線とはなっていないが,最大付着荷重の 1/3~1/2 付近からは直接補修モルタル部分に荷重がか かり曲線はほぼ直線となった。せん断付着強度およびせ ん断応力-ひずみ曲線から算出したせん断剛性を表-6に示す。せん断応力はせん断荷重を付着面積1600 mm<sup>2</sup> で除し、ひずみはすべりを付着長さ40mm で除して求め た。また、せん断剛性はせん断応力-ひずみ曲線のせん 断付着強度と1/2強度との間から算出した。表-5の値 は3体の試験体の平均値である。せん断付着強度に多少 のばらつきはあるものの、曲線は類似していた。最大せ ん断荷重後の挙動は、付着界面に脆性的な破壊が生じ、



P/C (%)	引張付着強度(N/mm <sup>2</sup> ) 界:界面破壊, 躯:躯体モルタル破壊								
	VVA EVA PAE CPAE								
0		0.085:界							
5	0.558:界	1.20:界	0.573:界	0.648:界					
10	0.542:界	1.79:躯	1.31:界	1.52:躯					
20	1.02:界	1.63:躯	1.79: 躯	1.48:躯					



図-3 せん断付着試験装置



急激に荷重が落ちた。その低下傾向のばらつきは大きい が、このばらつきは破壊後の急速な変形に測定機器が追 従できなかったことによると考えられる。圧縮応力をか けた状態のせん断荷重-すべり曲線は、試験体の変形に よって圧縮応力を一定に保つことが困難であったため、 載荷初期段階からばらついた。

## (4) 実験結果および考察

ポリマーを含有した補修モルタルは含有率 0%の補修 モルタルに比べ躯体モルタルに対する高い付着性能を 示し,ポリマー含有率の増加とともにせん断付着強度の 増加,せん断剛性の増加の傾向を示した。せん断剛性の 増加はすなわち付着界面のせん断方向への硬化を示し ており,補修モルタルの弾性係数がポリマー含有率の増 加とともに低下の傾向を示すのと逆である。これは,ポ リマー含有率の増加とともに付着の一体性が高くなっ ていることを示すと考えられる。

コンクリートと補修モルタル間の応力の差は互いの 弾性係数が異なるほど大きくなると考えられるため補 修設計時にはポリマー含有率の増加による弾性係数の 低下に考慮すべきであるが、その一方でコンクリートと 補修モルタル間の一体性は高まるといえ、両者のバラン スを考える必要がある。図-5および図-6にせん断付 着強度とポリマー含有率の関係、せん断剛性とせん断付 着強度の関係を示す。EVA, PAE, CPAE の傾向が類似して おりいずれもポリマー含有率の増加に対し徐々にせん 断付着強度の増加率が減少する傾向を示しているが, VVA はポリマー含有率に比例して増加する傾向を示した。 せん断剛性の傾向もせん断付着強度と同様に, EVA, PAE, CPAE は類似の傾向を示し、WA のみ異なる傾向を示した。 図-6からせん断付着強度とせん断剛性の間にはコン クリートの弾性係数と圧縮強度の関係に類似した、ポリ マーの種類や含有率によらない高い相関性が見られた。

## (5) 圧縮応力下でのせん断付着強度

試験から得られた圧縮応力下でのせん断付着強度の 変化を図-7に示す。これは物質の破壊基準として重要 なモール・クーロンの破壊包絡線に相当するものと考え られるが既往の文献値<sup>1)</sup>と比較すると内部摩擦角が大き く,せん断付着強度の値も高くなった。これは既往の文 献<sup>1)</sup>と付着界面の状態が異なること,また加力方法が異 なることが関係していると考えられる。また,本実験で は破壊面の角度が常に界面方向に限定されていた点が 通常の破壊包絡線との相違である。これは,本来均質な 試験体ならばせん断荷重方向に対しある角度を持って 破壊が生じるのに対し,付着界面の存在により破壊方向 が限定されたために界面の摩擦の影響を大きく受けて おり,せん断付着強度が高く評価されていると言える。 現実には付着界面が破壊包絡線より求められる破壊面 になることは稀であり,強制的に付着界面での破壊が進 行すると考えられるため,FEM上で実現象を精緻に再現 するには界面の摩擦を考慮したものの方が適している と言えるが,安全側の補修設計のためには破壊包絡線に よる評価での設計が望ましいと考えられる。

表-6 せん断付着強度およびせん断剛性

$\backslash$	D/C	せん断付	せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )		
$\backslash$	P/C	圧縮応			
	(70)	0	0.6	1.2	(1)/11111 )
$\setminus$	0	0.784	1.02	2.02	120
	5	2.69	3.75	4.73	307
EVA	10	5.01	5.69	6.26	408
	20	6.10	6.29	8.50	406
	5	1.41	2.14	2.53	278
VVA	10	2.09	2.01	3.27	250
	20	3.93	2.99	4.35	336
	5	1.71	2.66	3.55	241
PAE	10	4.59	4.92	5.98	389
	20	5.11	8.55	10.6	394
CPAE	5	2.47	3.59	4.68	315
	10	5.26	5.30	5.77	433
	20	5, 29	7.83	8, 45	430









図-7 圧縮応力下でのせん断付着強度

## 3. せん断付着試験の有限要素逆解析

## 3.1 解析概要および解析モデル

本解析では、ポリマーを含有した補修モルタルを用い て補修された鉄筋コンクリート構造物の耐力性能を有 限要素法によって解析する際に必要なコンクリートと 補修モルタルの付着要素を、まず躯体モルタルと補修モ ルタルの付着要素と想定し、その材料定数を逆解析によ り求めた。付着要素の構成則を求めるのが困難な理由の 一つとして、現実には付着要素という物質が存在せず、 測定を直接行うことが非常に困難であることがある。本 実験においても測定項目はせん断荷重と自由端すべり であり、計算で求めるせん断付着強度やせん断剛性の値 は想定付着面全域の平均値にすぎず、各補修モルタルの 特徴を比較するには適しているが正しい値ではない。よ って本解析では、逆解析により再現する実験結果として 付着応力-自由端すべり曲線ではなく直接の測定項目 であるせん断荷重-自由端すべり曲線とした。

解析方法は二次元平面応力弾塑性解析とし,荷重増分 法を用いた。本解析では付着要素として板ボンド要素を 用いた。板ボンド要素は軸方向に弾性係数,軸方向に鉛 直なせん断方向に付着剛性,という二方向の剛性を持つ

が、本解析では荷重方向がせん断方向のみのため弾性 係数による影響はほとんど無いことを解析により確認 し、その値は補修モルタルと同じとした。板ボンド要素 の構成則および解析モデルを図-8に示す。板ボンド要 素の構成則は主に最大付着強度と付着剛性から成る。図 -8に示すせん断ひずみは自由端すべりを付着層の厚 さで除したものと定義され、本解析での付着要素の厚さ は付着剛性の定義から厚さ一定の0.5mmとしても問題が 無いことから定めた。

逆解析は板ボンド要素以外の物性を測定値に固定し, ポリマー種類およびその含有率に応じて板ボンド要素 の付着強度と付着剛性を変化させ,内部の応力分布およ びクラック進展等を同時に確認しながら行った。また, 実測において最大せん断荷重後にせん断荷重が極端に 落ち,すべりが生じるという挙動を破壊後の残留応力の 値を変化させて表現可能なものに関しては解析を行っ た。しかし,破壊後の挙動は正確な測定が困難であった ため,仮定したものとなっている。







## 3.2 実験結果と解析結果の比較および考察

実験によって得られたせん断荷重-自由端すべり曲 線と解析による曲線を比較したものを図-9に、解析で 用いた付着要素の入力物性を表-7に示す。実験値の曲 線は3試験体を平均したものであり,試験機の性質上存 在する加圧板と補修モルタルとの十分な接触が得られ るまでの部分においては、すべりが大きく評価されてい るため曲線となっている。そのため、過大に評価してい ると考えられる分のすべりを除去するために曲線をx軸 負の方向に移動させた。最大せん断荷重に達するまでの 曲線は実験値とよく一致しており、本解析で入力した付 着要素の物性値で破壊が生じるまでの補修モルタルと 躯体モルタルの付着特性を表現できていると思われる。 また、解析に用いた付着強度および付着剛性の値は実験 値から試算した値と近くなっており, 生じた応力分布が 均一なものであったと考えられる。VVA 以外でポリマー 含有率 10%以上のものは実験同様コンクリート要素に もクラックが生じるため、付着要素の変化のみで破壊後 の傾向を表現するのは困難であった。

## 4. 結論

本研究では、以下の知見が得られた。

ポリマー含有率の増加とともに補修モルタルのコンクリートに対する付着強度、せん断剛性は上昇する。

## 表-7 付着強度および付着剛性(解析値)

P/C	付着強度,付着剛性(N/mm <sup>2</sup> )					
(%)	VVA	EVA	PAE	CPAE		
0						
5	1.41, 3.48	2.70, 3.84	1.71, 3.01	2.43, 3.94		
10	2.10, 3.13	5.21, 5.10	4.61, 4.86	5.39, 5.41		
20	3.99, 4.20	6.21, 5.08	5.27, 4.92	5.40, 5.37		

- 2) せん断付着強度と剛性の間には高い相関がある。
- 解析に用いる構成則として表-7の付着強度,付着 剛性を得た。

## 謝辞

本研究は、「国土交通省・建設技術研究開発助成金」 を受けて実施した。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 朴同天,兼松学,野口貴文:劣化した鉄筋コンクリ ート造建築物用断面修復材の付着性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 615, pp. 61-67, 2007
- さ内仁、川崎祐史、上田多門:疲労荷重下における ポリマーセメントモルタルの付着強度について、コ ンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.2、 pp.841-846,2007