

## 論文 補修モルタルと鉄筋の付着特性に関する研究

米田 信年<sup>\*1</sup>・野口 貴文<sup>\*2</sup>・朴 同天<sup>\*3</sup>・濱崎 仁<sup>\*3</sup>

**要旨：**補修された鉄筋コンクリート部材の性能を解析で評価する際、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、それらの界面付着特性を求める必要がある。しかし、躯体コンクリートと鉄筋および補修モルタルとの付着特性に比べ補修モルタルと鉄筋との付着特性に関するデータは非常に少ない状況である。本研究では、補修された鉄筋コンクリート造部材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補修モルタルと鉄筋との付着要素の構成則を求めるために、様々なポリマーを含入した補修モルタルに関し引き抜き付着試験を行い、有限要素法で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、再乳化形ポリマー樹脂、鉄筋引き抜き付着試験、有限要素解析

### 1. 研究の背景および目的

#### 1.1 研究の背景

現在、日本国内のコンクリート生産量は減少傾向にあるが、コンクリート構造物の累積量は未だに増加している。ストックメンテナンスの世紀といわれる中で、将来にわたる経済発展の基幹である建設資本の維持管理に必要な費用は膨大なものになると予想されており、耐久性や経済性の面から無駄の無い最適な補修・補強工法が必要とされている。又、様々な環境指標が提案される中、それらを有効に機能させるには建設後の維持・修繕費等に関しても正確に知る必要がある。そのためには適切な補修・補強方法を確立する事が必要である<sup>1)</sup>。しかし既存構造物の補修・補強方法は新規構造物に対する耐久設計に比べて、未だ十分な研究がなされているとは言えず現在の補修・補強の工法・材料の選択は経験に依存している部分が多い。補修・補強する場合、最も重要な事は構造物が置かれている環境条件、劣化状況および供用期間に応じた“適材適所”の補修・補強を行なうことである。従って実際に補修された構造物の構造耐

力や耐久性に影響を与えると考えられる補修材の材料物性を測定し、さらにその物性をいかした解析を行い適材適所な補修方法を明らかにする研究は、鉄筋コンクリート構造物の最適なストックメンテナンス方法を確立する事に大きく役立ち、これからの社会において安全面や経済面、更に環境の面からも非常に有用であると言える。

#### 1.2 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特性を求める必要がある。しかし、躯体コンクリートおよび鉄筋の物性ならびに躯体コンクリートと鉄筋間および躯体コンクリートと補修モルタル間の付着性能のデータに比べ補修モルタルの物性、補修モルタルと鉄筋の付着性能に関するデータ・報告は非常に少ない状況<sup>3)</sup>である。本研究では、代表的な四種類のポリマーを様々な割合で含入した補修モルタルに関し、強度試験および鉄筋引き抜き

\*1 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

\*3 独立行政法人 建築研究所 材料グループ (正会員)

付着試験を行い、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補修モルタルの物性および補修モルタルと鉄筋間の付着要素の構成則を、有限要素法を用いて実験結果を逆解析することで求める。

## 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、およびポリマー含入率を実験因子として圧縮および割裂引張試験を行った。用いたポリマーはVVA(酢酸ビニルビニルバサテライト)、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)の四種類である。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。試験体はセメントの水和反応が十分進んだ状態のものとするため9週間水中養生し、乾燥させ、実験を行った。

#### (3) 圧縮および割裂引張試験方法と測定項目

圧縮試験はJIS A1108に準拠して行った。φ5×10cmのシリンダーをそれぞれ3体ずつ試験し、

変位および二軸のひずみ、荷重を測定し補修モルタルの圧縮強度および弾性係数、ポアソン比を求めた。割裂引張試験はJIS A1113に準拠して行った。φ10×20cmのシリンダーをそれぞれ3体ずつ試験し、引張強度を測定した。

#### (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。ポアソン比は最大圧縮強度の1/3時の値とした。コンクリートのポアソン比が1/6(0.2)程度である事を考えると、補修モルタルのポアソン比はその値と同程度、又は粗骨材が入っていないため多少大きくなると考えられるが、得られた値を見るとその予測とは大きく外れていなかった。又、ポリマー含入率と補修モルタルの物性の関係を図-1から図-3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入率が高くなると低下する傾向が見られ、その低下傾向も類似性が見られた。又、圧縮強度や引張強度においてもポリマーの種類に関わらず値の変化傾向に類似性が見られた。一般にポリマー含入率の増加に伴い弾性係数の低下、引張強度の増加、圧縮強度の低下の傾向があるとされているが、今回の測定では必ずしもその全ての傾向を示さなかった。圧縮強度に関してはいずれのポリマーにおいても5~10%含入時の変化が一般に言われる傾向と異なる値を示しており、ポリマー含入率5~10%付近に補修モルタルの性能変化の分岐点があると考えられる。

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
ポリマー含入率	0%, 5%, 10%, 20%

表-2 補修モルタルの調合

水セメント比 (%)	セメント: 細骨材	消泡剤 (g)	ポリマー含入率(P/C)(%)	モルタルフロー(mm)				空気量(%)			
				VVA	EVA	PAE	CPAE	VVA	EVA	PAE	CPAE
50	1:3	ポリマーの1%	0	15.0				3.1			
			5	169	160	161	153	6.8	3.4	5.7	3.6
			10	179	168	169	166	6.0	3.7	3.4	3.6
			20	180	172	173	183	7.3	4.6	4.0	3.5

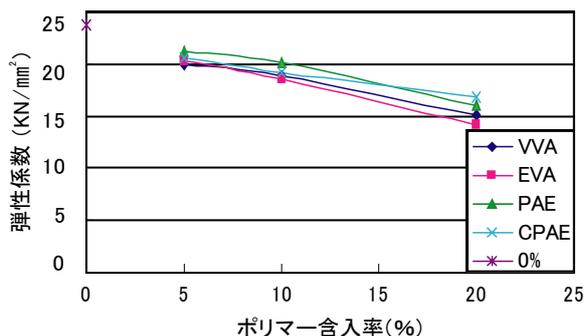


図-1 ポリマー含入率と弾性係数の関係

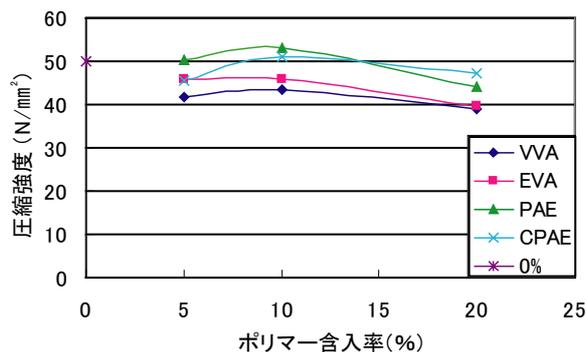


図-2 ポリマー含入率と圧縮強度の関係

表-4 鉄筋の力学特性

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D 19	368	544	193

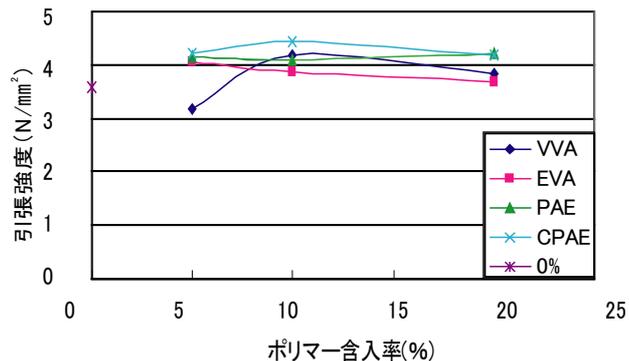


図-3 ポリマー含入率と引張強度の関係

## 2.2 引き抜き付着試験による補修モルタルと鉄筋間の付着特性

### (1) 実験因子および水準

2.1 と同様の実験因子で鉄筋引き抜き付着試験を行い、補修モルタルと鉄筋間の付着応力-すべり曲線を得た。

### (2) 使用材料の物性

鉄筋は横ふしのSD345AのD19であり、その物理的特性を表-4に示す。

### (3) 試験体の形状

試験体は一辺が150mmの立方体である。直径19mm(D)の異形鉄筋を用い、鉄筋の付着長さは120mmとした。ボンドフリー部分はその上下

表-3 補修モルタルの物性

ポリマー種類	ポリマー含入率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
	0	49.9	3.58	23.7	0.267
VVA	5	41.8	3.16	20.0	0.150
	10	43.3	4.20	18.8	0.144
	20	39.0	3.85	15.2	0.176
EVA	5	46.0	4.07	20.3	0.162
	10	45.9	3.86	18.5	0.193
	20	39.6	3.67	14.1	0.194
PAE	5	50.5	4.15	21.3	0.132
	10	53.0	4.08	20.1	0.183
	20	44.0	4.21	16.0	0.210
CPAE	5	45.5	4.22	20.5	0.274
	10	51.1	4.42	19.2	0.186
	20	47.4	4.17	16.9	0.259

15m をビニールテープで巻くことで設け、又横補強筋による試験体の拘束により付着強度が高まる事が予想されるが、その影響の大きさが未知のため本実験では横補強筋を入れなかった。試験体の表面は実験を行う前にあらかじめ研磨しておいた。試験体形状を図-4に示す。

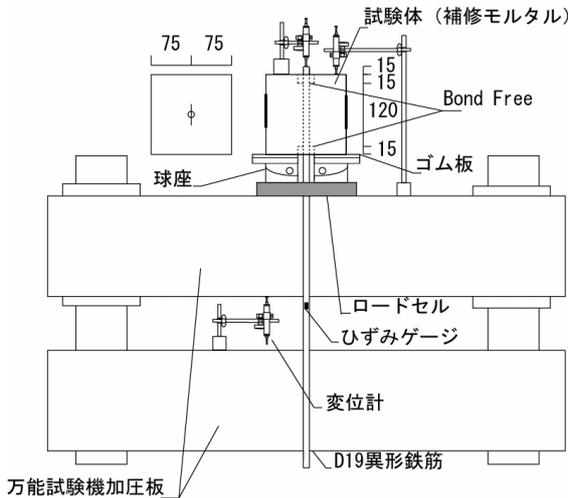


図-4 試験体の形状および引き抜き試験装置

#### (4) 引き抜き付着試験方法および測定項目

図-4に示すような引き抜き付着試験を行った。鉄筋を引っ張りながらロードセルによって荷重を、変位計によって自由端のすべりおよびモルタル自身の変形、試験体全体の変位、ひずみゲージによってモルタルのひずみおよび鉄筋のひずみを測定し補修モルタルと鉄筋間の付着応力を求め、付着応力-すべり曲線を得た。球座と試験体の間にゴム板を挿入することで試験体表面の凹凸の影響を少なくし、又鉄筋が垂直に引っ張られるようにした。各水準に対し3体ずつ試験を行った。自由端すべりはモルタルと鉄筋のずれであり、ゴム板の変形はこの値に影響は無いと考えられる。

#### (5) 試験体の破壊状況と付着応力-すべり曲線

試験体の破壊状況は横補強筋による拘束がなかったため全て脆性的な割裂破壊であり、ポリマーの種類や含入率による破壊状況の違いは特に見られず、モルタルの割裂時に最大付着応力を示した後、付着応力は急激に低下し、その低

下傾向はばらついた。得られた付着強度-すべり曲線の一例を図-5に、曲線の主要成分である弾性域の傾きと付着強度を表-5に示す。表-5の値は3体の試験体の平均値である。又グラフ中の記載記号はポリマー名、ポリマー含入率、試験体番号の順である。

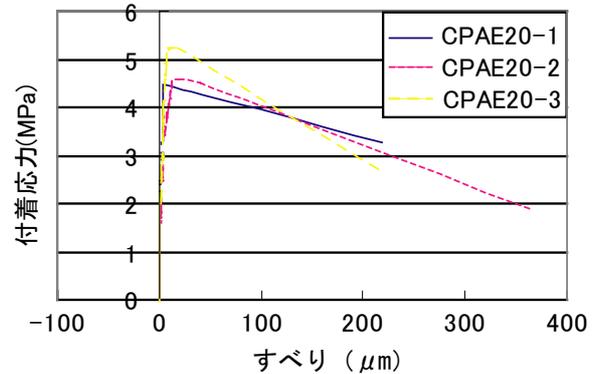


図-5 付着応力-すべり曲線

表-5 付着応力-すべり曲線の傾きおよび付着強度

ポリマー含入率 (%)	傾き (MPa/μm)			
	VVA	EVA	PAE	CPAE
0	0.667			
5	0.314	0.373	0.574	0.347
10	0.444	0.705	0.356	0.286
20	0.517	0.332	0.557	0.439
ポリマー含入率 (%)	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
	VVA	EVA	PAE	CPAE
0	6.81			
5	6.08	5.49	4.98	5.30
10	5.52	4.19	4.58	4.07
20	6.17	7.06	4.87	4.78

#### (6) 考察

ポリマー含入率と付着強度の関係を図-6に示す。付着強度においても圧縮強度および引張強度と同様にポリマーの種類に関わらず値の変化傾向に類似性が見られ、一般に言われる<sup>1)</sup>ポリマー含入率の増加に対する付着強度増加の傾向を示さなかった。これは破壊形状が補修モルタルの割裂破壊であり、純粋な補修モルタルと鉄筋間の付着界面の破壊でなかったた

めと考えられるが、圧縮強度と同様いずれのポリマーの種類でも 10%付近で強度低下の傾向を示しており、ここでもポリマー含入率 10%付近に補修モルタルの性能変化の分岐点があるということが示唆された。補修モルタルの圧縮強度および引張強度と付着強度の関係を図-7および8に示す。コンクリートの場合圧縮強度と引張強度の間に正の相関関係が見られ、付着性能に関しても同様の関係が見られるのが一般的であるが本研究ではポリマーが入った補修モルタルの場合それとは逆に負の相関関係が見られ付着性能の高いモルタルほど圧縮および引張強度は低くなる傾向が見られた。よって補修の最適化のためには付着性能のみを重視した補修設計を行うのではなく、付着性能と圧縮および引張強度とのバランスを考える必要がある。

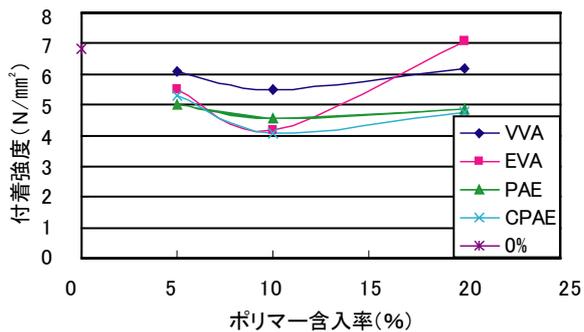


図-6 ポリマー含入率と付着強度の関係

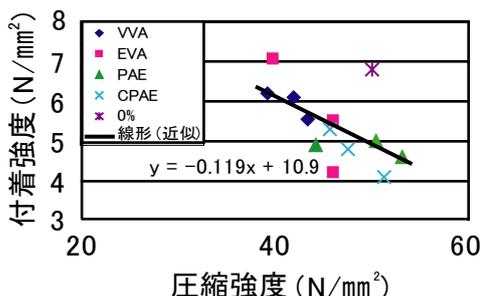


図-7 圧縮強度と付着強度の関係

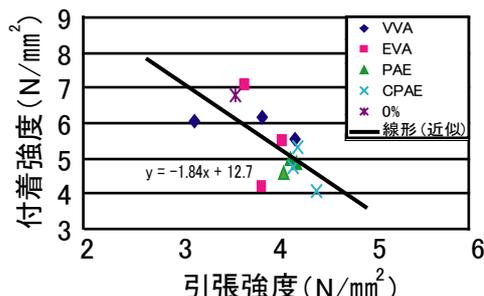


図-8 引張強度と付着強度の関係

### 3. 引き抜き付着試験の有限要素解析

#### 3.1 解析概要および解析モデル

本解析では、ポリマー含入率の異なる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ときに必要な鉄筋と補修モルタルとの付着要素の材料定数を逆解析により求めた。付着要素の構成は主に最大付着強度と付着剛性から成る。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である。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。付着要素の構成則および解析モデルを図-9に示す。付着引き抜き試験から得られた付着応力-すべり曲線を平均し理想化したものを更に付着応力-せん断ひずみ曲線に変換したものと、解析により得られる曲線が近づくようにボンド要素以外の要素の物性を固定しポリマー含入率に応じてボンド要素の付着強度(測定値)と付着剛性、残留応力度、残留剛性度を変化させて解析を行った。ボンド要素はせん断剛性と同等である付着剛性とその垂直方向の剛性である弾性係数の二方向の剛性を持つが、今回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。又、付着要素の厚さに関しても本解析における付着剛性との関係から厚さ一定の1mmとしても問題が無いことを考えて定めた。よって本解析での付着剛性はそのまま付着要素の真の値ではなく、解析に用いる上で特に問題の無い仮の値であると言える。

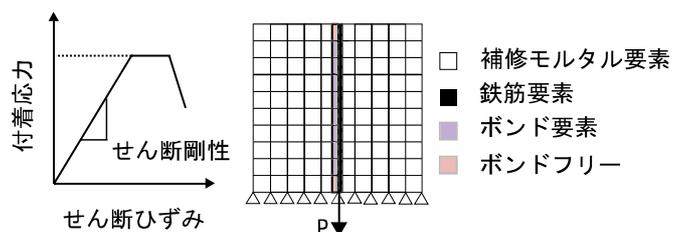


図-9 付着構成則および解析モデル<sup>2)</sup>

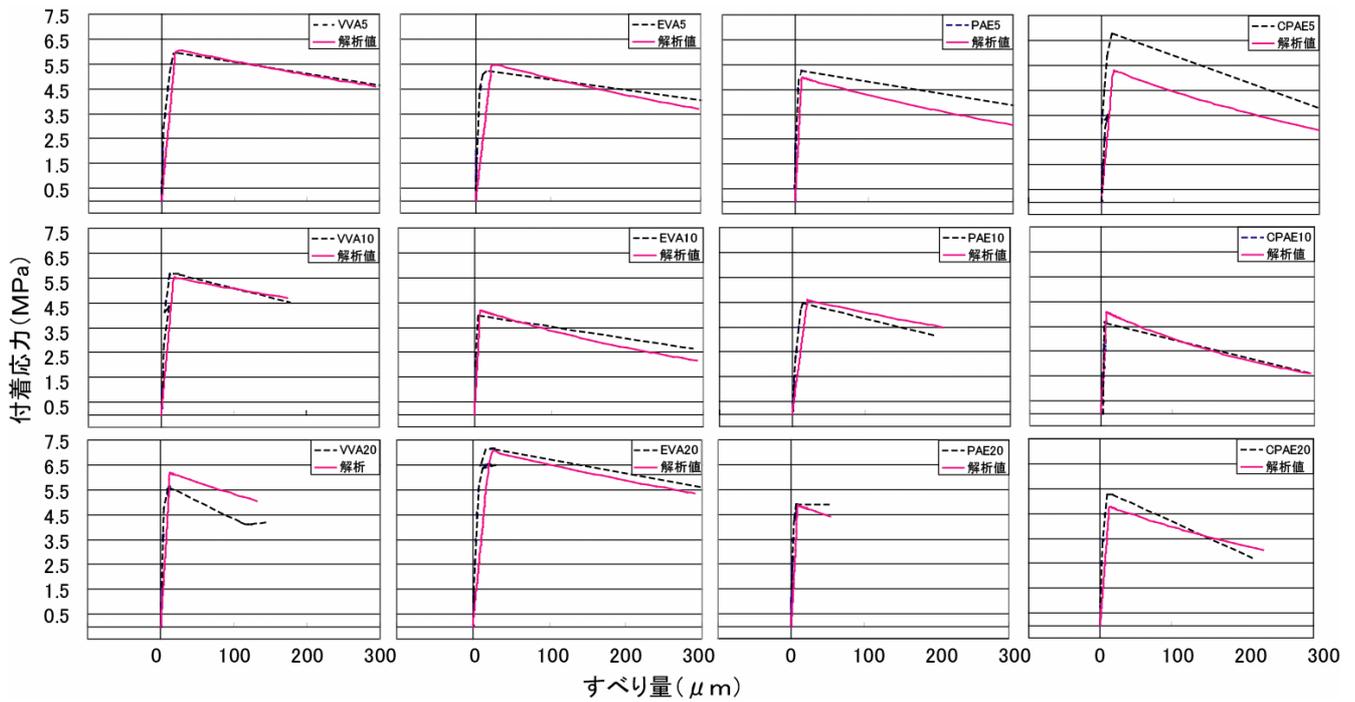


図-10 解析値との比較

表-6 解析に用いた付着剛性の値

P/C (%)	付着剛性(N/mm <sup>2</sup> )			
	VVA	EVA	PAE	CPAE
0	1000			
5	380	300	800	400
10	400	900	250	800
20	800	450	900	500

### 3.2 付着応力-すべり曲線における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付着応力-すべり曲線と解析による曲線を比較したものを図-10に、解析で用いた付着要素の入力物性を表-6に示す。最大付着応力に達するまでの曲線は実験で得られた曲線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鉄筋の付着特性を上手く表現できたと言える。しかし、実際には主筋を跨いで断面修復する 경우가多く、補修モルタルと主筋との付着にはせん断補強筋による拘束が発生していることを考えると、今後は補強筋を入れた試験体で同様の試験をする必要がある。

### 4. 結論

- (1) ポリマー含入率 10%前後に補修モルタルの性能分岐点が存在する可能性がある。
- (2) 本研究の実験条件では鉄筋と補修モルタル間の付着要素の物性として表-6の付着剛性が得られた。

### 参考文献

- 1) 朴同天, 兼松学, 野口貴文: 垂直-せん断荷重を受ける断面修復材の付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1761-1766, 2004
- 2) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文: 腐食劣化した鉄筋コンクリート構造部材の耐力性能評価および補強に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 50, pp. 534-539, 1996. 12
- 3) 長瀧重義, 岡本享久, 曾我寿孝: 断面修復した鉄筋コンクリートはりの力学挙動と合理的補修設計法の提案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 1281-1286, 1990. 12