

論文 ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的研究

ボンマハーサイ パラミ*1・伊藤 彰利*2・畑中 重光*3

要旨: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書にもあるように、ジオポリマーは無機系材料であるとともに紫外線による劣化を抑えることが可能な他、耐火性や耐酸性が優れ、RC 構造の補修工事における有効活用が期待できると考えられる。本研究ではジオポリマーモルタルを RC 梁の断面修復に使用し、曲げ試験により供試体の曲げ挙動を検討した。その結果、普通強度のジオポリマーモルタルで圧縮側の鉄筋の下まで断面修復した場合およびヤング係数の値がコンクリートのそれと近い高強度のジオポリマーモルタルで補修した場合には、曲げ耐力の回復が良い傾向にあった。

キーワード: RC 梁, 断面修復, 無収縮モルタル, ジオポリマーモルタル, 曲げ試験

1. はじめに

一般に断面修復工法に用いられる材料は、ポリマーセメント系やエポキシ樹脂系のモルタルが多い¹⁾。しかし、このような補修材料にはいくつかの問題点が挙げられる。エポキシ樹脂系の場合は、紫外線などに弱く耐候性が劣ること、引張強度、熱膨張係数及び弾性係数などの性質がコンクリートとは相違することが挙げられる。一方、ポリマーセメント系の場合は、セメントの水和生成物としての $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶や C-S-H ゲルは耐酸性や耐火性などが劣ることなどが挙げられる^{2) 3)}。

ジオポリマー (GP) は、セメントをまったく使用しないため、セメントの代替材料として用いば製造過程における二酸化炭素の排出量の低減が期待できる。GPは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの活性フィラーとアルカリ活性剤の混合で生成した縮重合体である。既往の研究によると、GPは価格がセメントの2倍程になるが、普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、凝結時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる^{3) 4)}。GPに関しては、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明にする段階にあるが、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。特に価格面や耐久性の面で構造物の補修工事において有効な活用が期待できると考えられる。

そこで本研究では、コンクリート構造物の補修材料としてのジオポリマーの実用性について検討することを目的とし、その第一段階として、RC 梁の断面修復にジオポリマーを使用した場合の曲げ変形挙動および破壊特性を実験的に調べることにした。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に本実験の要因水準および各試験体の詳細を示す。要因としては、補修材料の種類、補修深さおよび補修界面の処理の違いを取り上げた。補修材料は、母体コンクリートの強度と同等レベルの無収縮モルタル (以下、NSM) とGPモルタル (以下、GPM), そして母体コンクリートの強度より約2倍大きい強度を有するGPMの3種類とした。

また、補修界面の処理の違いが補修材の付着性状に与える影響と補修界面の位置による影響も検討するため、付着が良好な場合と不良な場合および補修深さ2種類を取り上げた。なお、付着が良好な状態とは、界面が細かな凸凹状で、補修する前に十分に水分の供給を行った状態である。一方で不良な場合とは、打設の段階で界面を平滑に仕上げ、水分の供給を行わずに補修を行った状態である。付着の良否が及ぼす影響をより明快に捉えるため、実務上は現実性にかけるが、ここでは補修界面が平滑に仕上げられている場合を極端な水準として取り上げた。

表-1 実験の要因水準および試験体の詳細

No	名称	詳細			
		状態	補修材料 (数字は目標強度)	付着状況	
1	N	健全	-	-	
2	GPM30	補修あり	深さ 30mm	30N/mm ² のGPモルタル	良好 (粗面 + 湿潤状態)
3	GPM60			60N/mm ² のGPモルタル	
4	NSM30		30N/mm ² の無収縮モルタル		
5	GPM3060		30N/mm ² のGPモルタル		
6	NSM3060		深さ 60mm	30N/mm ² の無収縮モルタル	不良 (平滑面 + ドライアウト)
7	GPM30-B		深さ 30mm	30N/mm ² のGPモルタル	
8	NSM30-B			30N/mm ² の無収縮モルタル	

*1 三重大学 工学研究科システム工学専攻 (学生会員)

*2 三重大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*3 三重大学 三重大学大学院工学研究科建築専攻 教授 工学博士 (正会員)

2.2 試験体概要

梁試験体の形状、寸法及び配筋の状況を図-1に示す。今回の実験に使用したすべての梁試験体は、全長 1700 mm、幅 120mm、高さ 200 mm、そして等曲げモーメント区間を 400 mm とした。引張側の主筋には D16 を 2 本、圧縮側の主筋には D10 を 2 本、そしてせん断破壊を防ぐためのせん断補強筋には D6 を間隔 80 mm で配筋した。全梁試験体は、最終破壊形式を曲げ破壊となるように設計した。力を負担する重要な部位に断面欠損が発生したことを想定し、その一例として補修を設けた箇所は、梁中央の圧縮縁とした。補修部分の寸法は、深さがかぶり厚さに相当する 60mm (GPM3060 と NSM3060) と 30mm (前者以外の試験体)、幅は梁幅と同様で 120mm、長さは 300mm とした。また、補修箇所の形状は台形とした。

2.3 調合と使用材料

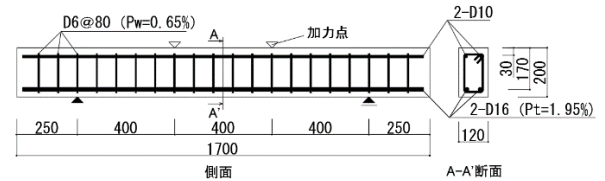
表-2～表-4 にコンクリート、GP モルタルおよび無収縮モルタルの調合をそれぞれ示す。また、表-5 にジオポリマーモルタルに使用した材料とその特性を、表-6 に鉄筋の特性を示す。

表-7 に各使用材料の特性を、図-2 に圧縮試験より求められた応力-ひずみ関係を示す。同一強度のコンクリートに比べ、ジオポリマーモルタルのヤング係数が小さいことが分かる。

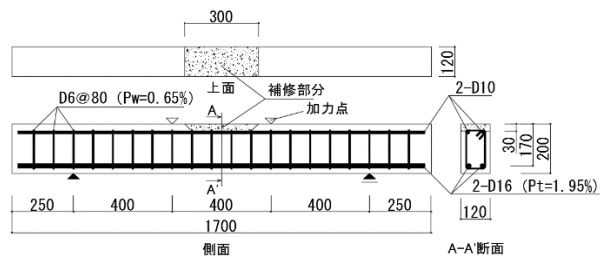
2.4 試験方法

図-3 に曲げ試験の概要図を示す。曲げ試験において、荷重には万能試験機を用い、スパン 1200mm、等曲げモーメント区間 400mm の 3 等分点荷重とした。なお、荷重方法は荷重速度 0.4kN/s の単調漸増荷重とし、最大

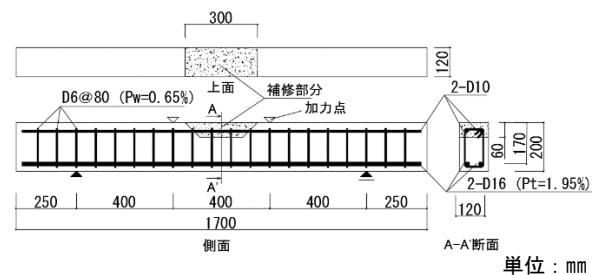
耐力に到達して明らかな耐力低下が生じるまで荷重を継続する。また、曲げひび割れが発生するまでの初期段階における荷重の増加量は、最大荷重の 1/50 (約 2.5kN に相当) 程度とした。その後は、荷重の増加量を最大荷重の 1/25 (約 5kN) 程度とし、各荷重段階においてひび割れ発生状況や進展、及び破壊性状を記録した。



a. N (健全)



b. GPM30, GPM60, NSM30, GPM30-B および NSM30-B



c. GPM3060 および NSM3060

図-1 試験体の形状および配筋

単位: mm

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュの性状

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	Tc (°C)
24	53.8	45.6	178	331	799	966	3.3	16.5	5.5	22

[註] Fc: 設計基準強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,

SP: 高性能 AE 減水剤, SL: スランプ, Air: 空気量, Tc: 温度

表-3 GP モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/P	bs/p	fa/p	単位量 (kg/m ³)					フロー値 (mm)
				活性フィラー (P)		溶液 (W)		S	
				FA	BS	水ガラス	NaOH		
30	0.6	0.1	0.9	449	64	216	92	1436	239
60	0.6	0.3	0.7	360	155	217	92	1442	246

[註] F: 設計強度, W/P: 溶液粉体比 (質量比), bs/p: 高炉スラグ置換率 (容積比), fa/p: フライアッシュ置換率 (容積比)

梁中央部のたわみ量の測定は、梁試験体のスパン中央部に設置したレーザー変位計と両支点に設置した高感度変位計により求めた。中央断面のひずみ分布は、ワイヤーストレインゲージを図-4のように貼り付けて測定した。

3 実験結果及び考察

3.1 ひび割れ発生状況および破壊性状

図-5に実験終了時の破壊状況を示す。図中に黒く塗りつぶした部分は圧壊により大きく損傷した部分を示す。各梁試験体は、梁下縁に曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに圧縮側に進展し、圧縮縁中央のコンクリートあるいは補修箇所が圧壊し、耐力が低下して終局破壊に至るといった典型的な曲げ破壊を呈した。

健全試験体 N は、荷重約 20kN のときに最初の曲げひび割れの発生が確認できた。それに対し、NSM30 試験体は、約 17.5kN のときに曲げひび割れが発生した。荷重の増加とともに、曲げひび割れの進展は確認でき

表-4 無収縮モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/B	S/B	単体量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)
			W	B	S	
30	0.4	2.5	213	532	1329	127.4

[註] F：設計強度，W/B：水結合材比，S/B：砂結合材比，W：水，
B：プレミックス無収縮モルタル粉末，S：細骨材

表-5 ジオポリマーモルタルの使用材料

種類	名称	略号	密度 (g/cm ³)
活性フィラー	フライアッシュ II種	FA	2.26
	高炉スラグ微粉末	BS	2.91
溶液	水ガラス2号	WG	1.45
	水酸化ナトリウム水溶液	NH	1.35
細骨材	屋町川産砂	S	2.59

表-6 使用鉄筋の特性

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D6 (SD345)	370	1.74 × 10 ⁵
D10 (SD345)	336	2.1 × 10 ⁵
D16 (SD345)	345	2.1 × 10 ⁵

表-7 各使用材料の性状

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	30.4	2.9	22.1
GP30モルタル	33.4	2.9	15.2
GP60モルタル	56.8	4.1	18.9
無収縮モルタル	32.0	3.7	28.0

前において補修箇所あるいは母材コンクリートとの界だが、降伏前において補修箇所あるいは母材コンクリートとの界面でのひび割れや破壊はまだ見られなかった。梁全体が曲げ降伏に達した後、梁中央変位が約 10mm たわんだところで補修箇所付近のコンクリートと補修界面に剥離が発生し、曲げ変形とともに剥離幅が増大して補修界面が剥がれ、付着の良好な部分によって拘束を受けながら補修モルタルが大きく 2 つに折れて破壊した。

NSM30-B 試験体の場合は、降伏前は NSM30 と類似した挙動がみられたが、降伏後はたわみが約 8mm の時に補修界面での剥離と補修モルタルにひび割れが発生し、急速に進展した。付着界面の処理が悪いことと圧縮鉄筋の座屈により、補修界面全体が剥がれ、曲げ変形の作用で上に押し出される状態となり、補修下部のコンクリートが圧縮破壊して終局に到達した。

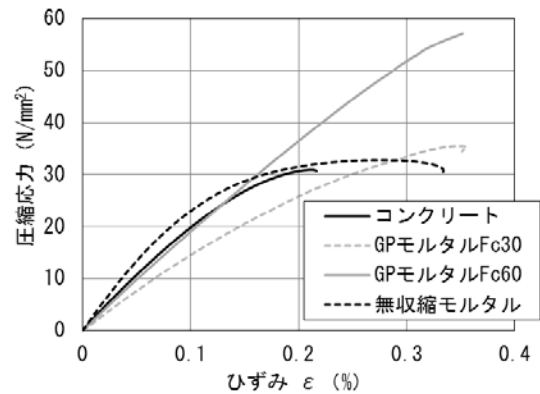


図-2 各材料の応力-ひずみ関係

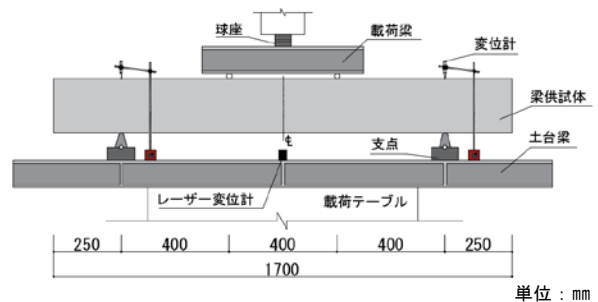


図-3 曲げ試験概要図

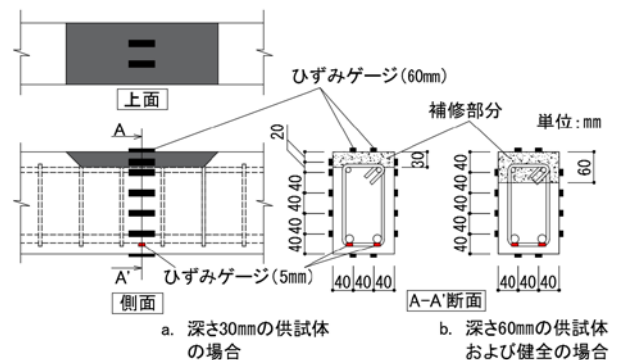


図-4 ひずみゲージの貼付け図

GPM30 と GPM30-B 試験体は、健全試験体 N の場合と比較して、最初の曲げひび割れ発生が若干低い荷重で確認された。GPM30 の場合は 15kN、GPM30-B では約 12.5kN のときであった。降伏後、両者とも小さいたわみ値のときに補修界面での剥離の発生が確認できたが、GPM30-B の場合の方が顕著であった。最終的には、GPM30 の場合、片側の支点側に荷重が偏り、母体から補修箇所が剥がれたが、もう片方は付着がまだ少し良好な状態にあるため、補修箇所の中央付近でモルタルが破壊した。GPM30-B の場合は、補修界面全体に沿って発生した剥離で母体から補修箇所が剥がれて外側に押し出される状態となり、最終的に GP モルタルに斜めひび割れが生じて破壊した。ジオポリマーの場合は、母材コンクリートとの付着界面が平滑な状態においてもドライアウトの影響を受けにくい傾向があることは伊藤らが行われた傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートとの付着特性に関する基礎的実験により報告されているが、今回の実験範囲では付着界面がちょうど圧縮鉄筋の位置にあるため、ドライアウトの影響に加え、その鉄筋の座屈による影響が付着界面の剥がれる原因のひとつであると考えられる。

GPM60 試験体は、荷重が約 15kN のときに最初の曲げひび割れが確認でき、荷重とともにそのひび割れが進展していったが、曲げ降伏後補修部分の強度が大きいため等曲げ区間の変形が小さく、せん断スパンで発生したひび割れの進展の方が顕著であった。たわみが約 14mm のときに、補修界面でのひび割れと補修部分の破壊が確認できた。

圧縮縁から 60mm の深い部分まで補修を施した GPM3060 と NSM3060 では、ほぼ同様な破壊性状が得られた。降伏後、両者ともに補修部分付近のコンクリートの破壊や傾斜界面の剥がれが確認できたが、補修界面の深い部分の付着がまだ良好な状態にあったため、曲げ変形が進行し、その後に補修モルタル部分に亀裂が入って破壊に至った。

3.2 曲げ耐力

表-8 に各梁試験体の曲げ試験結果を、図-6 および図-7 に各梁試験体の荷重-たわみ関係を示す。

GP モルタルで断面修復した場合、強度レベルを問わず、健全の状態および無収縮モルタルで断面修復したものと比較して、降伏荷重および最大荷重が若干低い結果となった。また、荷重の増加とともに曲げ剛性が徐々に低下していく傾向がみられた。

GPM30 と GPM30-B の荷重-たわみ関係としてはほぼ同様な曲線が得られた。両者とも降伏荷重(最大荷重でもある)に達した後、徐々に耐力が低下し、荷重が約 90kN 前後で一定となって変形だけが進展した。一方で、

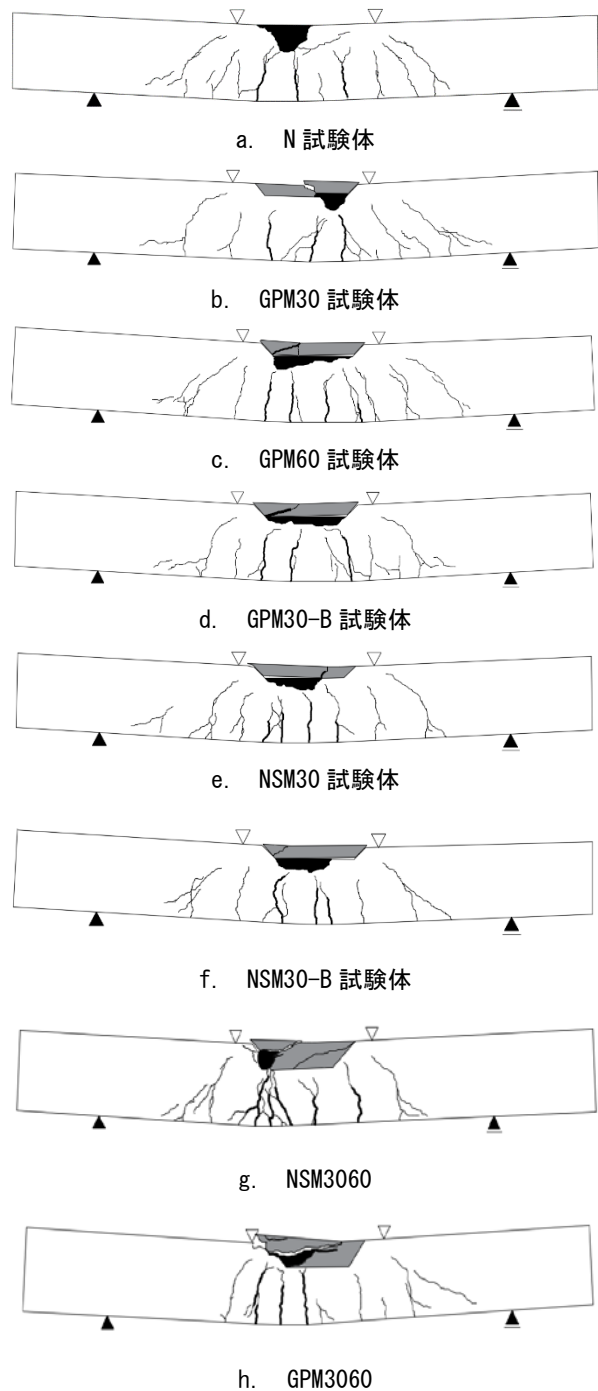


図-5 ひび割れおよび破壊状況(曲げ試験終了時)

表-8 実験結果

No	試験体	ひび割れ発生荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
1	N	19.70	100.01	103.52
2	GPM30	15.08	92.45	95.09
3	GPM60	15.06	98.59	102.41
4	NSM30	17.12	103.98	103.98
5	GPM30 - B	12.55	98.56	101.94
6	NSM30 - B	15.08	103.22	103.22
7	GP3060	15.09	98.32	98.32
8	NSM3060	17.57	104.39	106.85

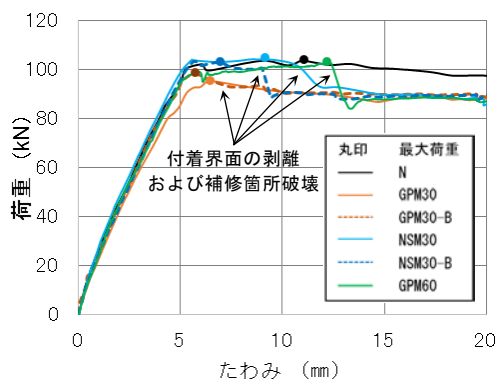


図-6 荷重-たわみ (GP モルタルの強度の違いと付着界面状況の違いの比較)

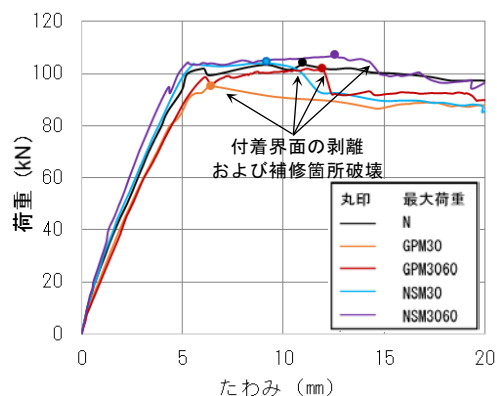
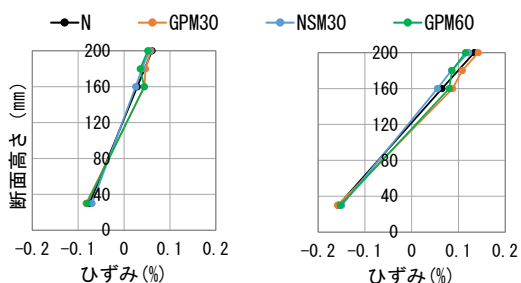


図-7 荷重-たわみ (補修深さの違いの比較)



45kN のとき 90kN のとき
図-8 中央断面のひずみ分布 (一例)

RC 梁のコンクリート強度より約 2 倍強度が大きいジオポリマーで補修した GPM60 の場合は、荷重が健全な状態と同等レベルで降伏したが、約 13mm たわんだところで耐力が約 100kN から 90kN 前後まで急低下した。図-8 に示している梁中央断面のひずみ分布によると、ヤング係数の低いジオポリマーを使用した試験体の場合、健全試験体やヤング係数の大きい無収縮モルタルを使用した試験体の場合より中立軸が若干低い位置にあるとともに、ひずみ分布が直線になっていない。すなわち、ジオポリマーの使用に加え、補修部分と母材コンクリートの間の付着が徐々に破壊し部材断面が一体化して変形しないことで、曲げモーメント(曲げ耐力)がやや低い結果になったこといえる。

RC 梁のコンクリートと同強度の無収縮モルタルで補修した場合の NSM30 と NSM30-B では、健全の状態とほぼ同等な降伏荷重および最大荷重の結果を得たが、たわみが約 10mm 前後で耐力が低下し、その後は横ばい状態となった。この現象は NSM30 に比較して NSM30-B の方が先に起きた。急激な耐力低下を起こした理由としては、まず補修界面の剥離が生じ、曲げ変形の増大とともに補修モルタルが局所的に破壊したことが要因かと考えられる。

また、圧縮側の鉄筋の下部分まで補修を施した試験体については、GPM3060 の場合は健全試験体と比較して、降伏荷重や最大荷重が若干低い結果となったが、降伏後から圧縮縁の補修モルタルが破壊するまで耐力の増加が確認できた。しかし、補修モルタルが破壊した時点での耐力の低下現象が急激であった。

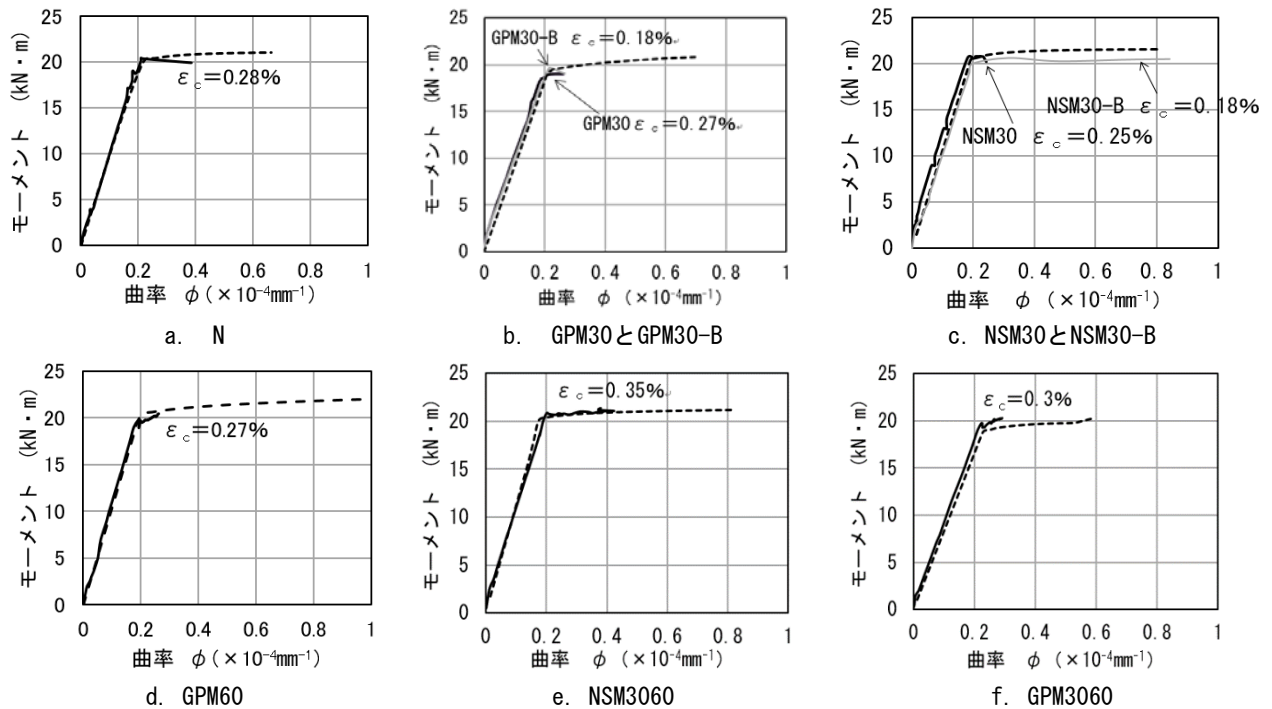
それに対し、NSM3060 では健全な状態の結果より降伏荷重および最大荷重が若干大きく、補修モルタル破壊後の耐力低下も健全試験体と同様に緩やかであった。

図-9 に RC 梁の中央部のモーメント-曲率関係を示す。実験値は、耐力が最大となるときまでとし、解析結果も併示した。解析では、平面保持の成立、コンクリートの引張応力の無視、母材コンクリートと補修モルタルおよび鉄筋との付着が完全と仮定したうえで、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線をバイリニアモデル(コンクリートの圧壊時ひずみは 0.35%)に単純化した。同図より、実験結果と解析結果では、降伏後の曲率の伸びに大きな差が見られるものの、降伏前の初期剛性の部分はほぼ一致している。

5 まとめ

曲げ破壊する RC 梁の断面修復にジオポリマーモルタルを用いる場合について実験的に検討した。本実験の範囲では以下のような知見が得られた。

- 1) ジオポリマーモルタルは同等強度のコンクリートや無収縮モルタルに比べ、ヤング係数が低いため、断面修復後の RC 梁の曲げ剛性が低下する傾向が確認された。
- 2) ジオポリマーモルタルで断面修復した場合、補修深さを圧縮縁から 60cm の深さまでとした場合およびヤング係数がコンクリートに近い高強度 (F_c60) のものとした場合は、曲げ耐力の回復が良好な傾向にあった。
- 3) 付着処理の違い(補修界面の粗度と補修直前の水分供給状態)による影響について、ジオポリマーモルタルで補修した場合も無収縮モルタルを用いた場合と同様に、界面が平滑でドライアウトさせた場合



(実線：実験値；点線：計算値)

図-9 梁中央断面における曲げモーメント-曲率関係

には付着不良が生じた。

- 4) 補修界面を圧縮鉄筋の位置にある場合、付着状況が良好であっても、荷重の増大とともに座屈する鉄筋の影響で付着界面における破壊が起き、耐力の急激な低下の原因になる可能性がある。また、補修界面を鉄筋の下まで補修した場合は付着界面での破壊を抑制できることを確認した。

[謝辞]

本研究に際し、三島直生先生(三重大学准教授)、和藤浩氏(三重大学技術専門員)、坪内徹郎氏(三重大学大学院生)のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究(B)17H03291(研究代表者：一宮一夫先生・大分高専教授)によった。付記して謝意を表す。

[参考文献]

1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編], 2012
 2) 北田達也, 李柱国: コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2059-2064, 2017
 3) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
 4) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 三島直生, 畑中重光: 初期欠陥が生じた鉄筋コンクリート梁の断面修復後の力学挙動に関する基礎的実験, 日本建

築学会大会学術講演梗概集, pp.17-18, 2017

5) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田攻: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011.7
 6) 吉田己理, 小玉克巳, 佐藤真一, 渡辺裕一: ポリマーセメントモルタルで補修した RC 梁の曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.801-806, 1995
 7) 彭丰, 森川英典, 小林秀惠: 断面修復を考慮した RC はりの連続繊維シート補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1489-1494, 2007
 8) Tanakorn Phoo-ngernkham, Vanchai Sata, Sakonwan Hanjitsuwan, Charoenchai Ridtirud, Shigemitsu Hatanaka, Prinya Chindaprasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, Construction and Building Materials, 98, pp.482-488, 2015
 9) 新井泰, 有賀貴志, 平野勝識, 渡辺忠朋: 断面欠損が生じたRCはりの補修効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1525-1530, 2006
 10) 中村光, 付李: コンクリート部材内部ひび割れ進展抑制による鉄筋座屈の抑制と変形性能向上に関する研究, 中部セメントコンクリート工学論文集, 第30号, pp.43-44, 2017