

平成 29 年度

修士論文

ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した
RC 曲げ部材の力学的挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Flexural Behavior of RC Beams

Repaired by Geopolymer Mortar

指導教員 畑中重光教授

三島直生准教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

PHOMMAHAXAY PALAMY

『ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 曲げ部材の力学的挙動に関する実験的研究』

—目次—

| | |
|---------------------------------------|--------|
| 第 1 章 序論 | ... 1 |
| 1.1 本研究の背景 | |
| 1.2 本研究の目的 | |
| 1.3 本論文の構成 | |
| 第 2 章 基礎知識および既往の研究 | ... 4 |
| 2.1 概説 | |
| 2.2 RC 構造物の補修・補強に関する基礎知識 | |
| 2.2.1 RC 構造物の変状および劣化とその機構 | |
| (1) 変状の種類 | |
| (2) 劣化の種類とその機構 | |
| 2.2.2 補修・補強について | |
| (1) 補修・補強の定義および目的 | |
| (2) 断面修復工法 | |
| (3) 断面修復材料 | |
| 2.3 既往の研究 | |
| 2.3.1 断面修復材の諸性能に関する研究 | |
| 2.3.2 RC 構造物の補修・補強に関する研究 | |
| 2.3.3 補修を目的とした GP に関する研究 | |
| 2.4 まとめ | |
| 第 3 章 高強度型無収縮モルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動 | ... 39 |
| 3.1 概説 | |
| 3.2 実験概要 | |
| 3.2.1 実験の要因と水準 | |
| 3.2.2 試験体概要 | |
| 3.2.3 試験方法 | |
| (1) 圧縮試験 | |
| (2) 鉄筋の引張試験 | |
| (3) RC 梁の曲げ試験 | |

3.3 実験結果と考察

3.3.1 材料特性試験

- (1) 圧縮強度
- (2) 鉄筋の引張強度

3.3.2 RC 梁の曲げ試験

- (1) ひび割れ発生状況および破壊性状
- (2) 曲げ耐力

3.4 まとめ

第4章 GP モルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動 ... 67

4.1 概説

4.2 実験概要

4.2.1 実験の要因および水準

4.2.2 試験体概要

- (1) 試験体の寸法および形状
- (2) 材料特性

4.2.3 試験方法

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 ひび割れ発生状況および破壊性状

4.3.2 曲げ耐力

4.4 まとめ

第5章 まとめ ... 89

5.1 本研究のまとめ

5.2 今後の課題と展望

【参考文献】

【謝辞】

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

日本ではかつて老朽化や劣化をした構造物への一般対処として、スクラップアンドビルドという言葉のように既存のものを解体して新しく建替える傾向にあった。しかし、スクラップアンドビルドは建設工事に伴い、大量の廃棄物や温室効果ガスの発生、建築竣工時・解体時のエネルギー消費増大などで環境問題を悪化させる。また、解体から完成させるまでは膨大な費用がかかる。

1950年代の半ばから1970年代前半にかけて高度経済成長期においては、急激な人口の増加などにより需要に応じてコンクリート構造物が盛んに建設された。しかし、建設ラッシュの当時は、生産性の向上による工期短縮やコスト縮減、技能技術者や良質な材料の不足の影響で低品質のコンクリート構造物ができてしまい、早期劣化現象が起きて社会問題になっていた²⁾。また、かつては従来のコンクリート構造物が耐久性に優れ、メンテナンスフリーでも半永久的に使用できると認識していたが、実際の既存建築物の調査結果によると、コンクリート構造物でも経年劣化が起きて進行し、適切なメンテナンスや補修補強を施さないと長く維持することができないことが明らかになった^{2) 3)}。このため、高度経済成長期に建設された構造物は、現在では老朽化を迎え、より長く使い続けるためにメンテナンスや更新をして延命化する必要がある。

日本は現在不景気な状態が続いているだけでなく、人口減少や高齢化の社会が到来すると推測される。このため、前述のような財政面や環境面等の要求を受け、日本はスクラップアンドビルドのようなフロー型社会から省資源のストック型社会へ転換しつつあり、大量にストックされていた既存構造物の延命化や今後建設される構造物の長寿命化を強化している。したがって、コンクリート構造物の耐久性や維持保全に関する研究活動が精力的に行われ、日本建築学会においても、コンクリート構造物の耐久設計・調査診断・維持保全についての調査研究が進められている。

コンクリート構造物の補修・補強は、劣化の状況や原因に応じた適切な工法や材料を選定しなければならない。これに関する研究開発などは今まで多くなされているが、更なる研究成果やデータの蓄積が求められている。

1.2 本研究の目的

本研究では、断面修復工法を取り扱っている。断面修復工法は、コンクリート構造物の補修作業において最も広く使用されるひとつの工法である。断面修復工法には、一般にポリマーセメント系やエポキシ樹脂系のモルタルが用いられるが、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や、引張強度、熱膨張係数及び弾性係数などの性質ではコンクリートとの相違があることなどの問題点がある。また、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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶と C-S-H ゲルで耐酸性や耐火性などが悪いことなど挙げられる⁴⁾。さらに、両者とも高価で経済的な面でのデメリットもある。

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セメントの代替材料である。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は普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現可能で、可使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ことが分かる。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。特に構造物の補修作業において有効な活用が期待できると考え、補修材料としての要求性能に関する検討が必要である。

そこで本研究では、ジオポリマーを補修材料として使用した RC 部材の挙動およびその特性を明らかにすることを目的として、曲げ挙動をする RC 構造部材の断面修復にジオポリマーモルタルを使用し、実験的および数学的解析による力学的挙動の検討を行い、コンクリート構造物への補修材料としてジオポリマーの実用性についての検討を行った。

1.3 本論文の構成

本論文は、以下のように5章で構成される。

第1章では、本研究の背景として、コンクリート構造物における補修・補強の必要性やジオポリマーの補修材料としての要求性能およびその力学的検討を行う必要がある根拠について述べ、本研究の目的と本論文の構成を示す。

第2章では、本研究の基礎知識として、コンクリート構造物において発生しうる変状や劣化、補修・補強工法の概要およびジオポリマーに関する基本事項について述べるとともに、それに関連する既往の研究を調査して整理する。

第3章では、基礎実験として、超高強度型無収縮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を行う。具体的には、補修前後の挙動およびその特性を明らかにすることを目的として、等曲げ区間圧縮縁に初期欠陥としてジャンカの発生があると想定した場合、補修済みの場合および健全な状態のRC梁を対象に曲げ試験を行い、耐力挙動および破壊性状の比較を示す。

第4章では、等曲げ区間圧縮縁にジオポリマーモルタルによる断面修復を施したRC梁の曲げ試験を行い、力学的挙動および破壊性状を明らかにする。また、健全な状態と、母体コンクリートと同レベルの圧縮強度の無収縮モルタルによる補修を施した梁の曲げ試験結果との比較を行う。

第5章では、総括として本研究により得られた知見および今後の課題を示す。

第 2 章

基礎知識および既往の研究

2.1 概説

鉄筋コンクリート構造には、施工段階において発生する初期欠陥、時間経過とともに生じる劣化や外力の衝撃による損傷などが生じることがある。これらの劣化現象に対し、劣化診断を行われたうえで補修補強の実施がなされる。これまでは損傷状況に応じる補修補強工法や適切な補修材料の性能、選定および新工法・新材料の開発に関する研究が数多くなされてきた。

本章では、RC 構造物における各種の変状および劣化とその現象、それに伴う影響および一般的に実施される対処方法に関する基礎知識を取りまとめる。また、RC 構造物の劣化現象に応じる改修工法、本研究で取り扱っている補修材料としてのジオポリマーに関する基本事項および既往の研究を調査して整理する。

2.2 RC 構造物の変状や劣化および補修補強に関する基礎知識

2.2.1 変状および劣化とその機構について

1) 変状の種類¹⁾

RC 構造物に発生する変状を大別すると、初期欠陥、経年劣化、構造的変状に分類される。表 2-1 に初期欠陥の変状を、表 2-2 に経年劣化に伴う変状を、表 2-3 に構造的変状をまとめる。

表 2-1 初期欠陥による変状

| 種類 | 定義および発生要因 | 影響 | 補修方法 |
|-----------|---|--|--|
| 豆板（ジャンカ） | コンクリートを打設するときに、材料分離、締固め不足、型枠下端からのセメントペーストの漏れなどにより粗骨材が集まる不良部分 | 耐力低下に影響するだけでなく、二酸化炭素や水を透過しやすいため、コンクリートの中酸化や塩害、鉄筋の腐食などを誘発する。 | はつり取る必要がない場合は、ポリマーセメントモルタルを塗布して補修する。はつり取る必要がある場合は、不良部分をはつり取り、界面を処理し、補修モルタルあるいはコンクリートを充填する断面修復工法で補修を行う。 |
| コールドジョイント | コンクリートの打重ね部分が一体化せず不連続面が生じる変状である。主要な要因としては前に打ち込まれたコンクリートの硬化程度や施工方法である。 | コールドジョイント部分のコンクリートは脆弱であり、ひび割れが生じていることが多く、構造物の耐力、耐久性、水密性を低下させる。 | 軽微なものはポリマーセメントペーストを刷毛塗りし対処する。縁切れしていてひどいものは、リカット工法などひび割れの補修に準じて行う事例がある。 |

| | | | |
|-------------|---|---|--|
| <p>内部欠陥</p> | <p>コンクリートとモルタル、あるいはタイルなどの仕上げ材との界面に生じる浮き・剥離や、躯体内部に生じる豆板や空洞などをいう。</p> | <p>コンクリートの内部に欠陥が生じてしまうと、耐力低化や中性化、塩害などの劣化要因を誘発する場合がある。</p> | <p>躯体内部に発生する欠陥は施工不良に主要な原因があり、鉄筋の腐食、水密性および構造物の維持管理上の問題が発生要因として挙げられる。建築物では、タイル仕上げやモルタル塗仕上げで生じる内部欠陥として、浮き・剥離があり、以下のようなことが原因である。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 直射日射・降雨など乾湿・温冷による仕上げ層の挙動とコンクリートの挙動の差によって生じる応力 • 地振動やその他の荷重時に躯体に強制的に発生する変形・ひずみ、ならびに面外方向の慣性力などにとり、取付け界面に発生する応力 • 躯体に発生したひび割れによって周囲の仕上げに発生する応力 |
| <p>砂すじ</p> | <p>ブリーディング水の多いコンクリートの打足しや軟練りコンクリートの過度の締固めにより、コンクリート中の水分が分離して、表面に流れ出し、表面に細骨材が縞状に露出した現象である。</p> | <p>構造物の美観性が低下する</p> | <p>補修としては、ワイヤーブラシで砂すじ部分とその近傍を健全な部分までケレンし、ポリマーセメントペーストなどを使用して均一に塗布する。</p> |

| | | | | | |
|------|------------|--|--|---|---|
| 表面気泡 | | 型枠に傾斜面を有する場合十分な締固めを行ったとしても材料分離した余剰水や空気泡により、コンクリート表面に水泡や空気泡が残ってあばた状になる。 | | 構造物の外観を損ねて美観上の問題となることだけでなく、表面層のあばたにブリーディングが残りやすくなるため、表層部のコンクリートの水セメント比が大きくなって強度や中性化抵抗性が低下する | 一般には、表面気泡部にポリマーセメントペーストを塗布し、直ちにポリマーセメントモルタルを表面気泡部に押し込むようにして密実に充填する。 |
| | | 乾燥収縮 | | コンクリートが乾燥して体積が減少し、ひび割れが発生 | |
| ひび割れ | 温度 (膨張) | 硬化熱 | 水和反応熱により内部温度が上昇してコンクリートが膨張し、温度低下に伴いひび割れが発生 | ひび割れによってコンクリート密実性が低下し、水や有害物の浸入が許してしまい中性化や鉄筋の腐食が早期に発生する。 | ひび割れの補修工法として、ひび割れ被覆工法、注入工法及び充填工法が一般的に行われる。 |
| | | 太陽熱 | 日光を長時間にわたリうけ続けるとコンクリートが膨張してひび割れが生じる | | |

| | | | | |
|--|----|--|--|--|
| | 沈下 | ブリーディングの発生に伴いコンクリートが沈下するが、鉄筋付近のコンクリートが拘束され、周囲との沈下量の差でひび割れが発生 | | |
|--|----|--|--|--|

表 2-2 経年劣化に伴う変状

| 種類 | | 定義および発生要因 | | その影響および対処方法 |
|------|------------------|-----------|--|--|
| ひび割れ | 鉄筋腐食先行型 | 中性化 | 水セメント比が過大な場合やかぶり厚さが少ない場合に、中性化抑制効果が低下し、鉄筋が腐食して膨張し、ひび割れの発生に至る。 | 鉄筋の腐食に伴う鉄筋断面不足や、コンクリート断面欠損により耐力が低下する。 |
| | | 塩害 | 塩分を含む材料の使用や海水の飛散により鉄筋腐食を起こし、ひび割れが発生する。 | |
| | ひび割れ先行型および劣化ひび割れ | アルカリ骨材反応 | コンクリートの中の骨材とセメントに含まれているアルカリ金属とが反応し、そこに水が入って膨張し、ひび割れを起こす。 | ある程度の鉄筋量が確保されていれば、耐力の低下はしないという報告があるが、鉄筋量が少ない場合は大きな変形やコンクリートの崩壊につながる可能性がある。また、鉄筋の腐食に影響する。 |

| | | | |
|-------|--|---|---|
| | 凍結融解 | コンクリート中の毛細管や内部の空洞などに水が浸入し、その水が凍結すると体積膨張を起こしコンクリートを押し割ってひび割れる。 | アルカリ骨材反応の問題ほど深刻ではないが、放置しておくとも凍害は確実に進行するため、交換や補修などの処置が必要となる。 |
| | 疲労 | 繰り返し荷重によって、ひび割れが発生し、コンクリートの剥落につながる。 | 構造ひび割れとともに、構造的弱部分に多発し、耐力が低下していく。 |
| | 化学的腐食 | 外部の化学的作用を受け、セメントの水和生成物の間の結合能力を失い、ひび割れが生じる | |
| 浮き・剥落 | かぶり厚さが比較的小さい場合や、中性化、塩害、凍害などを原因としてコンクリート表面の付着力が低下して、表面から次第にコンクリートが剥げ落ちる。 | | コンクリートの断面不足やかぶり不足などによって、構造物の耐力低下やコンクリート塊の落下被害などが発生する。 |
| 錆汁 | 錆汁は、コンクリート中の鉄筋あるいはコンクリート表面に設置した金具が腐食してコンクリートの表面にその腐食生成物が溶出して固着する変状である。中性化、塩害、剥離・ひび割れ、骨材などによる錆の発生が主要な原因である。 | | コンクリートの表面を汚染し、美観・景観に関する性能が低下するだけでなく、多くの場合は鉄筋の腐食により生じるため構造耐力の低下に注意する必要がある。 |

| | | |
|----------|--|--|
| エフロレッセンス | コンクリートの表面に白い析出物が付着する現象である。コンクリート中の可溶成分が水分とともに表面に移動し、表面での水分の蒸発や空気中の二酸化炭素の吸収によって析出物が生成する。 | コンクリートの表面を汚染し、美観・景観に関する性能が低下するだけでなく、コンクリートの変質や劣化が発生している可能性が高いので注意が必要である。 |
| 変色 | コンクリートの変色は、中性化、塩害、凍害などのコンクリートの劣化作用が原因となる場合、火災による場合、表面の付着物による場合及びセメントの水和生成物の変質による場合がある。 | コンクリートの表面を汚染し、美観上の問題を生じるが、発生要因によって強度特性などコンクリートの性能が低下する場合がある。 |
| すり減り | コンクリートの表面を移動する物質の繰り返しによって、その表面の一部が削られていく現象である。交通車輛の走行による舗装道路面のすり減り、人や荷役機械の移動による床面のすり減り、ダムや水路構造物に見られる砂礫やキャビテーションによるすり減り氷海域での海氷などによる構造物のすり減りなどがある。 | 鉄筋のかぶりの減少や断面不足により全体的に強度が低下する可能性が高い。また、中性化や鉄筋腐食の速度を加速させる要因にもなる。 |

表 2-3 構造的変状

| 種類 | 定義および発生要因 | その影響および対処方法 |
|-----|---|--|
| たわみ | 設計時の鉄筋量不足や部材の形状・寸法, 配筋の精度不良, 支保工の早期撤去および早期載荷などの施工欠陥, 用途変更による過荷重, 鋼材の腐食やコンクリートの強度低下など経年による劣化が原因として挙げられる。 | たわみの増大は, 構造物の崩壊につながる危険性が高く, たわみの調査を行い, 早期に補修・補強を行う必要がある。 |
| 変形 | コンクリート構造物に作用する外力(軸力, 曲げモーメント, せん断力, ねじりモーメント)と, コンクリートの性質(水和熱や日射, 温度上昇による膨張, 自己収縮, 乾燥, クリープなど)による変形がある。 | 外力による変形は, 曲げひび割れやせん断ひび割れが同時に発生することが多い。進行性がある場合, 構造的に弱点となるため, 対策が必要である。また, コンクリートの性質による変形は, 進行が遅いが, 変形が大きく, 設計耐力性が確保されていない場合は, 早急の対応が必要である。 |
| 振動 | 構造物が劣化して固有振動数が低下する。そうすると, 振動による振幅が増大し, たわみが大きくなる。 | 振動は健全なコンクリート構造物に影響を与えないが, 構造物にひび割れの存在や耐久性低下があると, 疲労劣化を助長する可能性がある。 また, 劣化した構造物は振動に伴いたわみ量が増大すると, 破損・破壊に至る場合が考えられる。 |

(2) 劣化とその機構¹⁾

表 2-4 に一般としての劣化要因に対する補修方針および補修工法を示す。

• 中性化

大気中の二酸化炭素がコンクリート内に浸入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象である。これにより、コンクリート内部の鋼材が腐食してひび割れの発生やかぶりコンクリートの剥離・剥落および鋼材の断面欠損による耐荷力の低下などが生じ、構造物あるいは部材の性能を低下させる。また、中性化は水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、コンクリートの強度変化などを引き起こす可能性もあるため、中性化の進行はコンクリート構造物の耐久性にとって重要である。

• 塩害

コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鋼材断面減少などを伴うことにより、構造物の性能が低下して所定の機能を発揮することができなくなる現象である。

• アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応は、セメントに含有するアルカリ (Na_2SO_4 および K_2SO_4) が骨材に含有するアルカリシリカ反応性鉱物と反応して、コンクリート内に異常な膨張を起こし、それに伴うひび割れを発生させる。

• 凍害

コンクリートの凍害は、コンクリート中の水分が 0°C 以下になったときの凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象である。

• 化学的腐食

コンクリートが外部からの化学的作用を受け、その結果として、セメント硬化体を構成する水和生成物に変質あるいは分解して結合能力を失っていく現象である。

• 疲労

コンクリート構造物における構造材料である鉄筋やコンクリートに繰り返し荷重の作用によりひび割れが発生し、それが進展することにより最終的には常時の荷重下において部材が破壊に至る現象である。

• 風化・老化

海洋環境，強酸や高濃度の硫酸塩との接触，あるいは凍結融解作用を受ける環境などの特別な劣化促進因子に曝される環境を除いて，通常の使用条件で経年的にコンクリートが変質・変化していく現象である。

• 火災

コンクリートは，火熱を受けるとセメント硬化物と骨材とは，それぞれ異なった膨張収縮挙動をするため，コンクリートの組織が緩み，かつ端部の拘束などによって生じた熱応力とによってひび割れを生じ，コンクリートが劣化，剥落する。

表 2-4 劣化要因に対する補修方針および補修工法^{20) 21)}

| 劣化要因 | 補修方針 | 補修工法 |
|---------------|---|---|
| 塩 害 | ・ Cl ⁻ に汚染されたコンクリートの除去 ・ 補修後の，Cl ⁻ ，水分，酸素の浸透抑制 | ・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(遮塩) |
| | ・ Cl ⁻ の除去 | ・ 電気化学的脱塩工法 |
| | ・ 鉄筋の電位制御 | ・ 電気防食工法 |
| 中性化 | ・ 中性化したコンクリートの除去 ・ 補修後の CO ₂ ，水分の浸透抑制 | ・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法 |
| | ・ アルカリ性付与 | ・ 電気化学的再アルカリ化工法 |
| 凍 害 | ・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 補修後の水分の浸透抑制 ・ コンクリートの凍結融解抵抗性の向上 | ・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(防水) |
| アルカリ シリカ反応 | ・ 水分の浸透抑制 ・ 内部水分の逸散促進 ・ アルカリ金属イオンの浸透抑制 | ・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(撥水) |
| | ・ 水分の浸透抑制 ・ アルカリ金属イオンの浸透抑制 | ・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(遮水) |
| | ・ リチウムイオンの供給 | ・ 亜硝酸リチウムの圧入工法 |
| 化学的侵食 | ・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 有害化学物質の浸透抑制 | ・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法(耐酸モルタル) ・ 表面保護工法(耐酸ライニング) |
| 疲 労 | ・ 軽微な場合にはひび割れ進展の抑制 (大半は補強に該当する) | ・ ひび割れ注入工法 (補強工法) |

2.2.2 RC 構造物の補修・補強について¹⁾

基本的な考え方としてコンクリート構造物の補修・補強は、構造物の性能をある一定水準以上に保つための維持管理対策における一手段として実施されるため、コンクリート構造物に補修・補強の方針はこの維持管理対策との関わりを踏まえて設定する必要がある。一般に維持管理対策は図 2-1 に示す手順で実施される。コンクリート構造物の性能を維持するためには、構造物の調査・診断結果を踏まえ、現状における劣化度と今後の劣化進行予測結果に基づき、適切な維持管理対策を定期的に行う必要がある。

補修・補強方法の選定にあたっては、構造物の変状の原因および劣化状況を十分に調査し、これらの劣化メカニズムに適切に対応できる方法とすることが重要である。

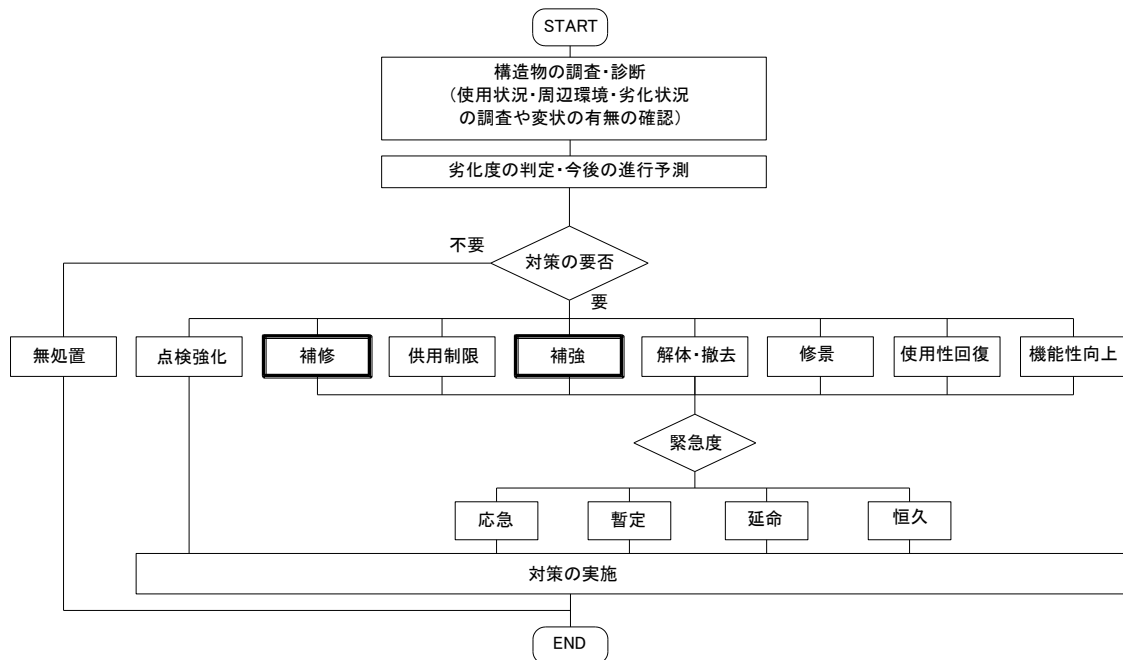


図 2-1 維持管理対策の実施フローの例

(1) 補修・補強の定義と目的

1) 補修

補修とは、劣化した部材あるいは構造物の構造の劣化進行を抑制し、耐久性の回復・向上と第三者影響度（劣化した構造物の周囲において、はく落コンクリートなどが人および器物に与える傷害などの影響度をいう）の除去または低減を目的とした対策である。なお、補修では、一般に、補修工事による耐荷性の回復・向上は目的としていない。しかし、建設時に構造物が保有していた程度まで、力学的な性能を回復させるための対策を補修と考える場合もある。

補修工事は、部材または構造物の劣化要因、劣化程度に応じた適切な補修工法や材料を選定して、実施されなければならない。現在実施されている補修工法は図 2-2 のように分類される。

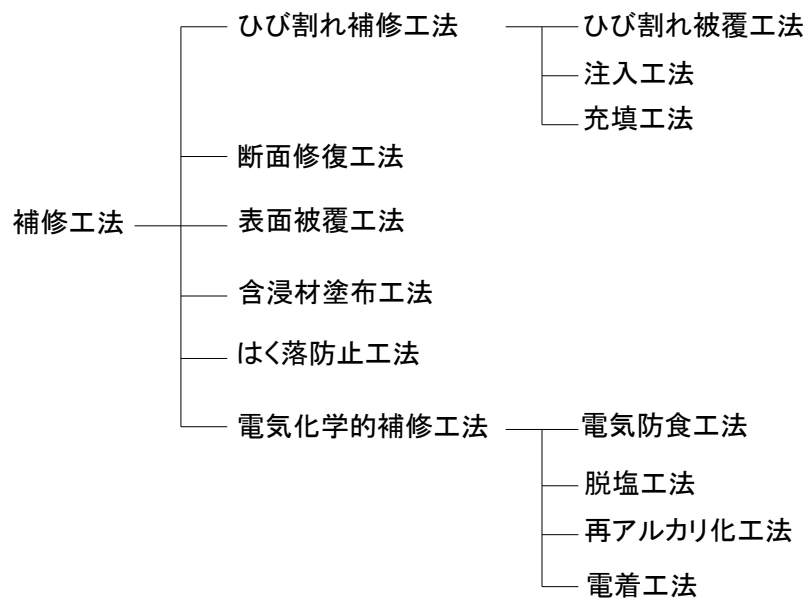


図 2-2 主な補修工法の分類

図 2-2 に示した各補修工法は、以下のような事項を主たる目的としている。

- ◆ ひび割れや剥離といった変状を修復し、内部鉄筋の腐食やひび割れ周辺部コンクリートの劣化進行の抑制
- ◆ 塩化イオンの浸入や中性化によって劣化因子を吸収してしまったコンクリートの除去
- ◆ 有害物質の再浸入を防止するための表面被覆
- ◆ コンクリート中の鋼材の不動態化あるいはコンクリート中の塩化物量減少
- ◆ コンクリートのアルカリ性回復

2) 補強

補強とは、部材あるいは構造物の耐荷性や剛性などの力学的な性能低下を回復または向上させることを目的とした対策である。なお、建設時に構造物が保有していたよりも高い性能まで、力学的な性能を向上させるための対策を補強と考える場合もある。

建築分野における補強工法は、主として耐震補強を目的としたものであり、現在実施されている主な補強工法を適用目的別にまとめると以下の図 2-3 のように分類できる。

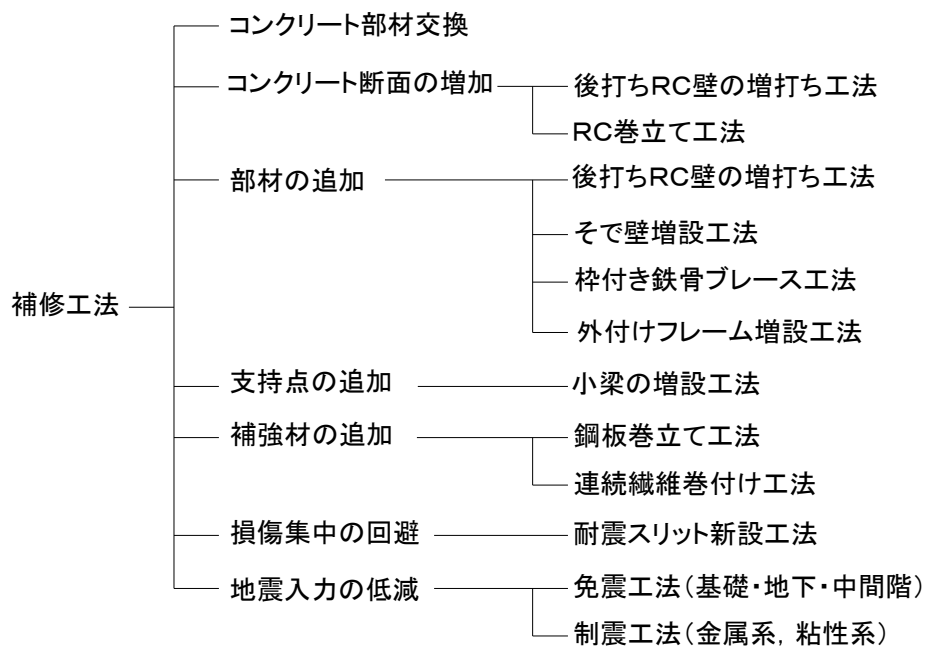


図 2-3 建築物を対象とした補強工法

(2) 断面修復工法

1) 概要

断面修復工法は、コンクリート構造物が劣化により元の断面を喪失した場合の修復や、中性化、塩化イオンなどの劣化因子を含むかぶりコンクリートを撤去した場合の断面修復を目的とした工法である。

断面修復工法に要求される性能は、修復部材、環境条件、施工方法などにより様々であるが、一般には以下に示すような性能が要求される。

- ◆ 圧縮、曲げおよび引張強度等が既存コンクリートと同等以上であること
- ◆ 熱膨張係数、弾性係数およびポアソン比等が既存コンクリートと同等であること
- ◆ 乾燥収縮が小さく、接着性が高いこと

- ◆ 現場施工であるため、作業性が良いこと

断面修復工法は、一般に補修界面の下地処理と、断面修復材による欠損部充填の 2 工程で実施される。

2) 断面修復工法の種類

断面修復工法は、施工条件や補修規模により、左官工法、モルタル注入工法、コンクリート充填工法、吹付け工法（乾式、湿湿）で実施される。

- ◆ **左官工法**： 補修面積が比較的小面積の場合に用いられ、エポキシ樹脂モルタルやポリマーセメントモルタルを左官コテを使用して充填する工法である。
- ◆ **モルタル注入工法**： モルタル注入工法とは、補修面積が比較的大面積の場合に用いられ、補修断面にあわせた形状で型枠を組み、流動性に優れたポリマーセメントモルタルやセメントモルタルを、ポンプで圧送して充填する工法である。
- ◆ **コンクリート充填工法**：補修面積が大面積の場合に使用され、流動性の良いコンクリートを充填する工法である。
- ◆ **吹付け工法**： 補修面積が比較的大面積の場合に使用され、あらかじめ練り混ぜた断面修復材を吹付ける湿式工法と、粉体と水または混和液を別々に圧送して吹付ける乾式工法があり、それぞれ専用の吹付け機を専用する。

3) 断面修復工法に使用する一般補修材料

(ア) 下地処理

通常、断面修復工法では、断面修復材の既存コンクリートへの接着性を強固にするためには、有機系またはポリマーセメント系プライマーが使用される。その種類としては以下のようなものが挙げられる。

- ◆ 有機系プライマー：溶剤型エポキシ樹脂、水性アクリル樹脂など。
- ◆ ポリマーセメント系プライマー：SBR（スチレンブタジエンゴム）系、PAE（ポリアクリル酸エステル）系などのポリマーセメントペースト。また、防錆剤を混和したものもある。
- ◆ 錆転換塗料（鉄筋部のみ）：リン酸、有機酸、キレート化剤などを配合した塗料。

(イ) 断面修復材料

一般に使用されている断面修復材は、ポリマーセメント系と樹脂系モルタル（ポリマーモルタル）系に大別される。材料の種類は次のとおりである。

- ◆ ポリマーセメント系： SBR 系，PAE 系などのポリマーセメントモルタルおよびコンクリート，ポリマーセメントモルタルを用いたプレパックドコンクリートなど
- ◆ 樹脂モルタル系：軽量エポキシモルタル，メタクリルモルタル，ポリエステルモルタルなど

表 2-5 ポリマーセメント系と樹脂系モルタルの諸特性の比較⁵⁾

| 項目 | ポリマーセメント系モルタル | 樹脂系モルタル |
|----------|--|---|
| 各種強度 | 一般的に、コンクリートと同程度であるが、ポリマーの種類や混入量によって異なるものもあるので、使用目的に応じ、適切な材料を選定する必要がある。 | 一般的に、圧縮強度，引張強度/圧縮強度，曲げ/圧縮強度ともコンクリートより大きい。 |
| 弾性係数 | | 一般的に、コンクリートよりやや小さく変形しやすい。 |
| 熱膨張係数 | | コンクリートより大きい。 |
| 耐火，耐熱性 | | 温度が高くなると軟化や変形が起こる。 |
| 耐候性 | | 紫外線の影響を受ける場合がある。一般的に表面被覆材を併用する必要がある。 |
| 接着性（付着性） | 良好であるが，混和されるポリマーの種類によって若干異なる。 | 通常良好な接着性を示すが，低温時等施工条件によっては，性能が低下する。 |
| 施工性 | 湿潤面の施工が可能。取り扱いが容易で左官・充てん・吹付け施工が可能。大断面の施工にも適している。 | 従来，湿潤面への施工は接着性の面から困難であったが，湿潤面施工用のエポキシ樹脂が開発され，湿潤面への施工も可能。施工方法は左官施工に限定される。また，取り扱いに関しては，エポキシ系のため，施工時の換気等に注意を要する。 |
| 強度発現性 | 普通，早強，速硬とセメントのタイプにより数時間～数日と幅広い強度発現速度範囲がある。 | 一般的に早く，硬化剤の種類により硬化速度を調整できる。ただし，温度依存性が大きく低温時に硬化しにくいものもある。 |

(3) ジオポリマーについて¹²⁾

1) 概説

ジオポリマーに関する研究は、これまでも数多く行われてきた。本節では、補修材料としてジオポリマーを使用し断面修復した RC 構造部材の力学的挙動に関する研究を行う前段階として、ジオポリマーについての基礎知識を取りまとめる。

2) 定義

ジオポリマーとは、アルカリシリカ溶液（GP 溶液）と活性フィラーとの反応によって形成される非晶質の縮重合体（ポリマー）の総称であり、フランス人の Joseph Davidovits により 1988 年に提唱されたものである。

ジオポリマー硬化体の特徴としては、脱水を伴う重縮合反応であるため、硬化時の収縮は大きく、耐酸性が強いので、海洋構造物や下水管への使用に向いている。また、普通ポルトランドセメントに比べ、耐火性も高く、アルカリ骨材反応は生じにくい。

このジオポリマーは、メタカオリンや石炭灰など、Si, Alを含む非結晶物質と、水酸化ナトリウムや水酸化カリウムなどのアルカリ性溶液、珪酸アルカリ溶液を混合することで以下の反応により生じる。

- ①水酸基による出発物質からのSiとAlの溶出
- ②出発物質から溶出しや陽イオンとモノマーとの縮合
- ③モノマーの重縮合によるポリマー構造の形成

ただし、これらの3段階は互いに重複し、ほとんど同時に起こる。

3) 固化機構

図2-4に、ジオポリマーの固化概念図を示す。

ジオポリマーの硬化体は、活性フィラーを無機質の不定形ゲルで固めた構造になり、この硬化は珪酸モノマーの重縮合反応によるポリマー化である。水ガラス中の酢酸は、モノマー（単量体）に近い状態で存在する。フィラーから溶出した金属イオンは水ガラス成分を含む水と接すると、金属イオンが架橋金属として作用し、水ガラス中の珪酸が水の蒸発を伴いながらイオンを取り込んで高分子化（珪酸錯体を架橋）すると考えられている。

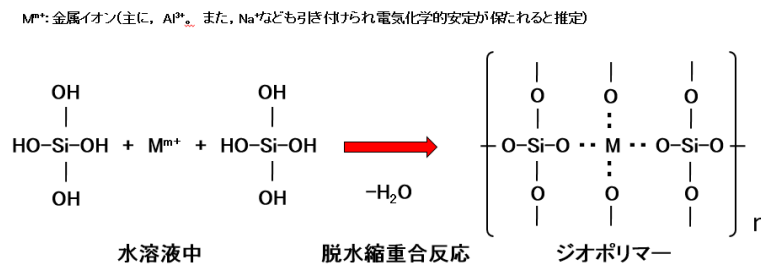


図2-4 ジオポリマーの固化概念図

4) 構造化学

図2-5に、ジオポリマーの微細組織の模式図を示す。活性フィラーが珪酸ポリマーのバインダーで糊付けされているのがジオポリマー硬化体である。分子構造の内部に3次元のケージがあり、Na, Kなどが収容されている。ジオポリマーのバインダーは非晶質のゲルであるため、X線回折が使えないため、固体NMRを用いて ^{29}Si などのスペクトルを観測し、内部構造を推定している。

図2-6に、ポリマー化珪酸ゲルの構造を示す。現在は、バインダーゲルは珪酸錯体(SiO_4)が6員環を形成していると考えられ、この6員環が6個集まり、ソーダライトやゼオライトのような構造になっていると推定されている。

5) 生産方法

ジオポリマーは、フライアッシュと高炉スラグ微粉末などから構成される活性フィラー、アルカリ溶液および骨材とを混練し、養生して硬化させることにより製造される。

ジオポリマーは、セメントとは異なり石灰岩に依存しない生産方法である。原料の水ガラスを生産する場合に、ソーダ灰(Na_2CO_3)が必要となり、天然物と人工物があるがこの使用料は少なく、珪砂とともに 1250°C 程度の比較的低温で融解されるため、燃料から発生する CO_2 が比較的少ない。また、フィラーと呼ばれるカオリン粉末を活性化するため、 750°C 程で仮焼する必要があるが、低温度なためこの段階でも二酸化炭素の発生量は少ない。総合すると、ジオポリマーはセメントに比べて、約80%も CO_2 の発生量が少ないといわれている。

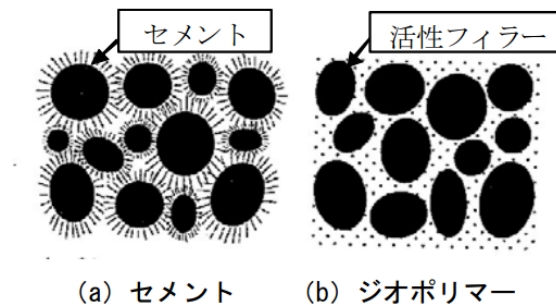


図2-5 ジオポリマーおよびセメントの微細組織の模式図

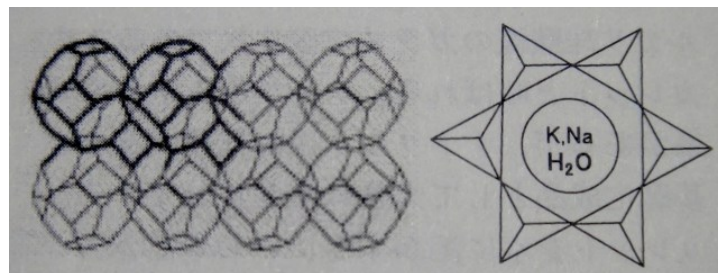


図2-6 ポリマー化珪酸ゲルの構造

2.3 既往の研究

2.3.1 断面修復材の性能に関する研究

1) 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

朴ら⁷⁾は、ポリマーセメントモルタルの化学的および物理的な付着特性を評価するため、躯体の水セメント比および補修材のポリマー含有率を水準とした付着試験を行った。この実験においては、補修材と躯体の界面で発生するすべての応力状態での付着特性を把握するため、あらゆる界面角度を持つ圧縮-せん断付着試験および引張-せん断付着試験を行い、破壊包絡線を求めた。

表 2-6 に試験水準と測定項目を、表 2-7 に圧縮-せん断試験用躯体の調査を、表 2-8 に引張-せん断試験用躯体の調査を、表 2-9 にポリマーセメントモルタルの調査を、また、図 2-7 に試験概要を示す。

その結果、圧縮-せん断付着試験の場合は、ポリマーセメント比の増加によって保水係数が増加し、化学的な付着強度が増加する傾向がみられるが、躯体の吸水性状、界面粗さや内部摩擦係数、界面の水和の進行および躯体または補修材の強度の方が付着強度に大きな影響を及ぼす。一方、引張-せん断付着試験は補修材の強度よりも、ポリマー含有率、界面の粗さ、躯体の吸水状態が付着強度に大きな影響を与えることが分かる。

表 2-6 試験水準と測定項目

| | | 圧縮-せん断付着試験 | 引張-せん断付着試験 |
|---------|--------------|-------------------------------|----------------------------|
| 調 合 | 躯体基板 | モルタル(W/C=30%, 50%, 70%) | コンクリート (W/C=30%, 50%, 70%) |
| | ポリマーセメントモルタル | P/C=0%, 5%, 10%, 20%, W/C=50% | |
| 測 定 項 目 | 躯体基板 | 圧縮強度、引張強度、吸水量 | |
| | ポリマーセメントモルタル | - | 割裂表面の粗さ |
| 付着角度 | | 15°, 30°, 45° | 45°, 60°, 75°, 90° |

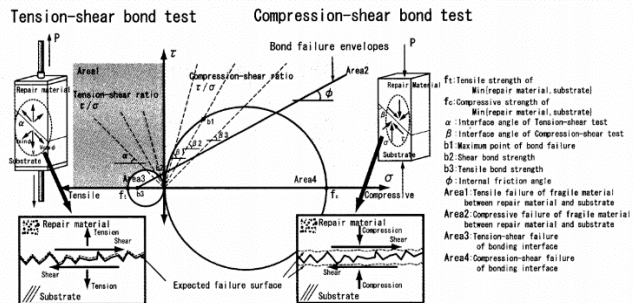


図 2-7 試験概要

表 2-7 圧縮-せん断試験用躯体の調査

| W/C(%) | セメント:細骨材 (重量比) | 高性能 AE 減水剤 (%) | 圧縮強度 (MPa) |
|--------|----------------|----------------|------------|
| 30 | 1:3 | 0.38 | 84.7 |
| 50 | | - | 49.8 |
| 70 | | - | 28.1 |

表 2-8 ポリマーセメントモルタルの調査

| ポリマーセメント比(%) | セメント:細骨材(重量比) | W/C (%) | 消泡剤 (%) | フロー値 (mm) | 空気量 (%) |
|--------------|---------------|---------|---------|-----------|---------|
| 0 | 1:3 | 50 | 1 | 160 | 6.2 |
| 5 | | | | 185 | 7.5 |
| 10 | | | | 190 | 8.2 |
| 20 | | | | 195 | 8.9 |

表 2-9 引張-せん断試験用躯体の調合

| W/C (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 細骨材率(%) | 骨材 (kg/m ³) | | | 高性能 AE 減水剤 (g/m ³) | 空気量(%) | スラブ (cm) | 圧縮強度 (MPa) |
|---------|---------------------------|---------|-------------------------|-----|-----|--------------------------------|--------|----------|------------|
| | | | 大 | 中 | 小 | | | | |
| 30 | 185 | 38 | 417 | 232 | 278 | 1500 | 4.5 | 16.5 | 84.1 |
| 50 | 185 | 43 | 435 | 242 | 290 | 833 | 4.5 | 20 | 54.7 |
| 70 | 178 | 48 | 424 | 235 | 283 | 2000 | 3.2 | 12.5 | 17.8 |

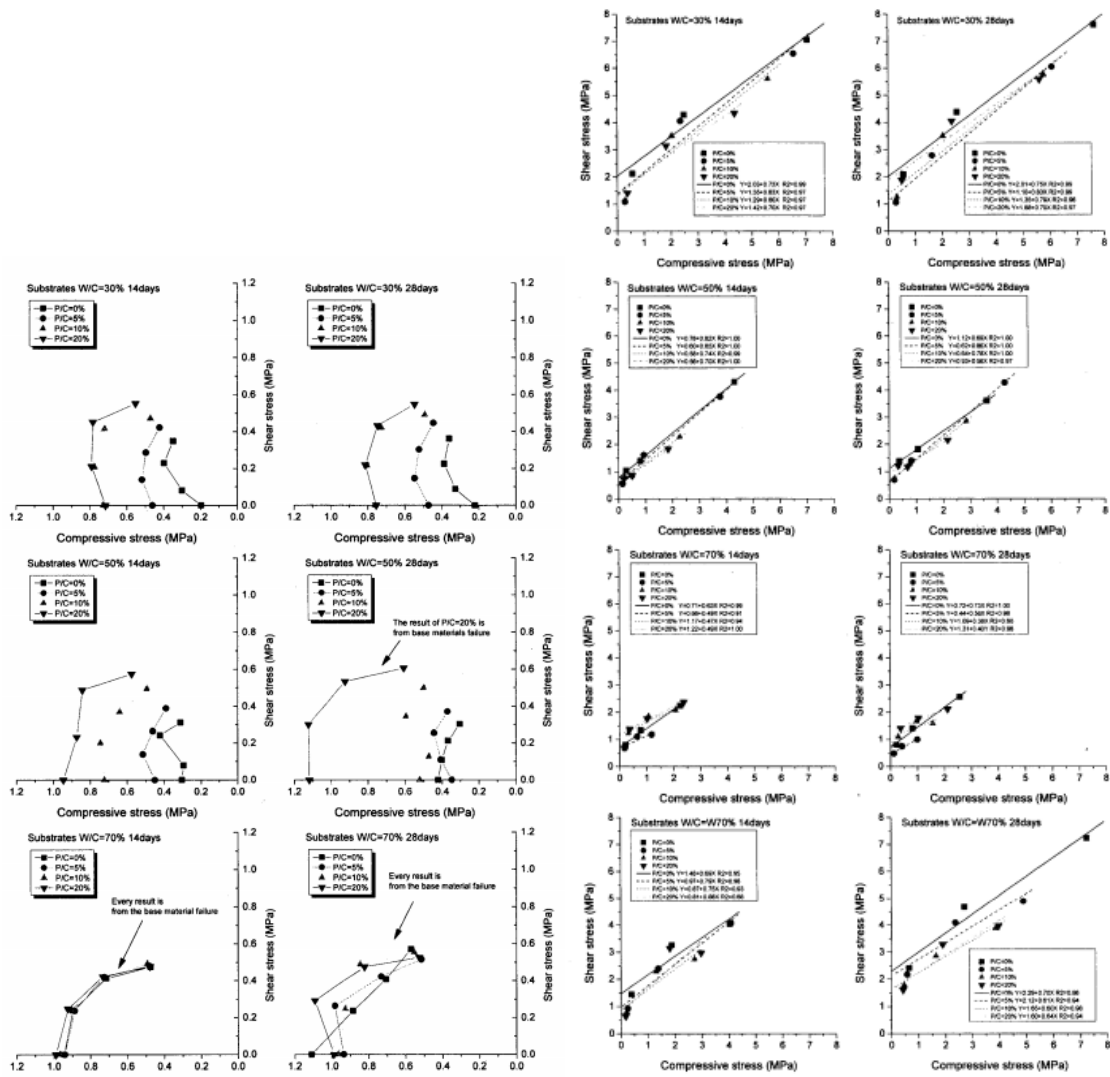


図 2-8 引張 - せん断付着試験結果

図 2-9 圧縮 - せん断付着試験結果

2) 断面修復材によるコンクリート部材の補修に関する研究

古賀ら¹⁰⁾は、はつり形状が異なる補修試験体を作成し、各種断面修復材における長期接着性について、温冷、乾湿繰返し促進試験により検討を行った。表 2-10 に使用する断面修復材の各種類を、表 2-10 にコンクリートの調合を、表 2-12 に各断面修復材の基礎物性試験結果を示す。また、図 2-11 にひび割れ状況および熱膨張係数と接着強度関係を、図 2-12 に試験体形状および寸法を示す。

その結果として、硬化収縮時の寸法変化が小さく、基材コンクリートと同等の膨張係数・弾性係数を有するポリマーセメントモルタルが良好なひび割れ耐久性を示している。また、基材コンクリートとの熱膨張係数差が大きく、高い引張強度を有する断面修復材は基材コンクリートにひび割れを発生させる。

表 2-10 断面修復材料

| 記号 | 断面修復材 | 下地処理材料 |
|----|-----------------------------------|-----------------------------|
| A | セメント系モルタル | EVA系エマルジョン *1 |
| B | セメント系モルタル | 水湿し |
| C | SBR系ボ [®] リマセメントモルタル | エボ [®] キシエマルジョン *1 |
| D | SBR系ボ [®] リマセメントモルタル *4 | 水湿し |
| E | 軽量SBR系ボ [®] リマセメントモルタル | SBR系セメントファイバー |
| F | アクリル系ボ [®] リマセメントモルタル *4 | アクリル系エマルジョン *1 |
| G | 軽量アクリル系ボ [®] リマセメントモルタル | アクリル系エマルジョン *1 |
| H | EVA系ボ [®] リマセメントモルタル | 水湿し |
| I | カチオン系CR系ボ [®] リマセメントモルタル | 水湿し |
| J | セメント系無収縮モルタル | 水湿し |
| K | セメント系無収縮モルタル | 水湿し |
| L | エボ [®] キシ樹脂モルタル | エボ [®] キシ樹脂 *2 |
| M | 軽量エボ [®] キシ樹脂モルタル *3 | エボ [®] キシ樹脂 *2 |
| N | 軽量エボ [®] キシ樹脂モルタル *3 | エボ [®] キシ樹脂 *2 |

*1：吸水調整材 *2：溶液系シーラー
*3：特殊軽量骨材 *4：ビニロン繊維含有

表 2-11 コンクリートの調合

| 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単体量 (kg/m ³) | | | | スランフ (cm) | 空気量 (%) | 圧縮強度 28日 (N/mm ²) |
|------------|----------|--------------------------|-----|------|------|-----------|---------|-------------------------------|
| | | セメント | 水 | 細骨材* | 粗骨材* | | | |
| 60 | 47.1 | 280 | 168 | 910 | 990 | 19 | 6.0 | 28.7 |

*1：絶対質量

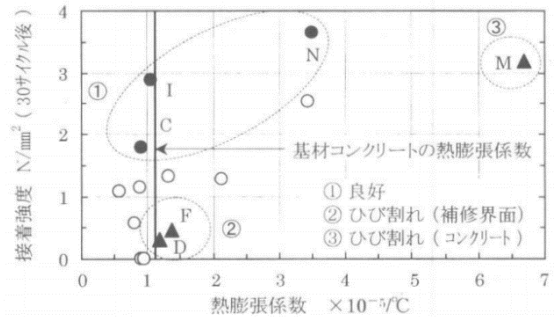


図 2-11 ひび割れ状況と熱膨張係数 - 接着強度

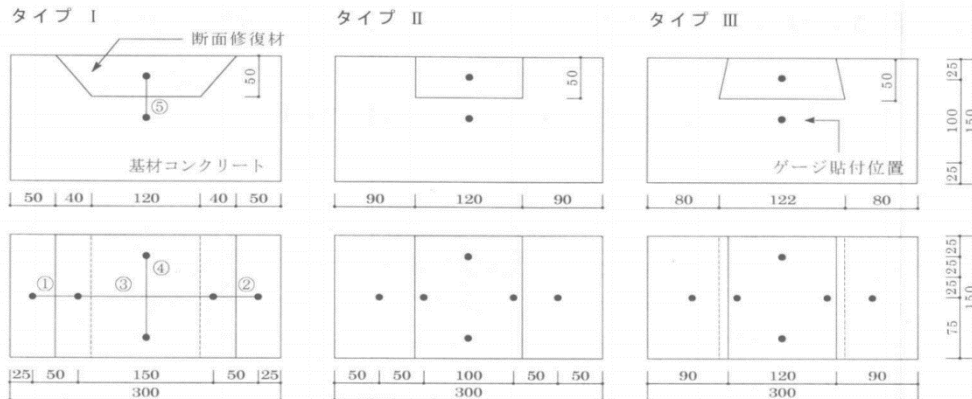


図 2-12 試験体形状および寸法

表 2-12 基礎物性試験結果

| 種類 | 硬化密度 | 圧縮強度 | 引張強度 | 静弾性係数 | ポアソン比 | 接着強度 | 長さ変化率 | 熱膨張係数 | 吸水率 | 吸水膨張率 | 乾燥収縮率 |
|----|------|--------------------------|--------------------------|---|-------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|
| | 28日 | 28日 N/mm ² | 28日 N/mm ² | 28日 ×10 ⁴ N/mm ² | 28日 | 28日 N/mm ² | 28日 ×10 ⁻⁴ | 28日 ×10 ⁻⁵ /°C | 48時間 vol % | 48時間 ×10 ⁻⁴ | 28日 ×10 ⁻⁴ |
| A | 2.07 | 42.3 | 3.12 | 2.34 | 0.14 | 1.50 | 6.76 | 0.92 | 10.3 | 6.12 | 5.60 |
| B | 2.17 | 52.2 | 3.72 | 1.86 | 0.12 | 0.00 | 10.3 | 0.96 | 14.5 | 8.62 | 6.74 |
| C | 2.03 | 32.2 | 3.44 | 2.08 | 0.11 | 1.10 | 4.79 | 0.92 | 8.06 | 3.61 | 3.58 |
| D | 2.16 | 34.8 | 4.50 | 1.53 | 0.10 | 1.50 | 8.29 | 1.18 | 5.56 | 2.71 | 2.92 |
| E | 1.84 | 15.1 | 2.88 | 0.79 | 0.12 | 1.27 | 30.7 | 2.14 | 5.59 | 3.72 | 6.84 |
| F | 2.08 | 36.9 | 4.73 | 1.42 | 0.12 | 1.60 | 6.79 | 1.37 | 7.40 | 5.47 | 4.57 |
| G | 1.67 | 27.6 | 3.89 | 1.17 | 0.15 | 2.80 | 6.13 | 1.33 | 5.91 | 7.33 | 7.99 |
| H | 2.07 | 27.0 | 3.71 | 1.24 | 0.11 | 1.60 | 9.34 | 0.90 | 8.37 | 4.28 | 4.92 |
| I | 2.08 | 32.2 | 3.33 | 2.04 | 0.14 | 2.95 | 1.46 | 1.06 | 3.42 | 2.71 | 3.22 |
| J | 2.07 | 43.0 | 3.29 | 1.87 | 0.14 | 2.40 | 7.96 | 0.59 | 10.6 | 7.13 | 6.20 |
| K | 2.13 | 39.9 | 2.55 | 2.18 | 0.08 | 1.30 | 6.68 | 0.81 | 7.72 | 3.96 | 4.25 |
| L | 1.65 | 56.3 | 11.3 | 0.93 | 0.18 | 4.30 | 2.77 | 3.42 | 0.11 | 0.00 | - |
| M | 0.82 | 10.3 | 3.13 | 0.06 | 0.18 | 1.09 | 3.13 | 6.68 | 0.12 | 0.05 | - |
| N | 1.09 | 26.1 | 8.40 | 0.38 | 0.22 | 3.00 | 10.4 | 3.49 | 0.03 | 0.03 | - |

2.3.2 RC 部材の補修・補強に関する研究

1) HPFRCC で補修された RC 梁のひび割れ挙動

林ら⁶⁾は、複数微細ひび割れ方繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) を対象として、引張終局ひずみが異なる 2 種類の HPFRCC で断面修復された RC 梁のひび割れ挙動について実験的に比較検討を行った。表 2-13 に母材コンクリートの調合を、表 2-14 に HPFRCC の調合を、表 2-15 に圧縮・曲げ強度の結果を示す。また、図 2-13 に梁試験体の形状・寸法および HPFRCC の打設方向を、図 2-14 にモーメント - 曲率関係を、さらに写真 2-1 に実験終了後のひび割れ発生状況を示す。

その結果、HPFRCC のひび割れ幅は、高々 0.1 mm 程度であり、荷重が増加してもひび割れ幅は増加することなく、ひび割れ本数が増加することが示された。また、HPFRCC で補修された場合は、無補修と比較して耐力が高くなることが確認できた。

表 2-13 母材コンクリートの調合

| W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|---------|--------------------------|-----|-----|------|-------|-----------|---------|
| | W | C | S | G | Ad | | |
| 49.5 | 153 | 309 | 748 | 1082 | 0.966 | 7.5 | 4.0 |

表 2-14 HPFRCC の調合

| HPFRCC の種類 | 単位量 (kg/m ³) | | | | フロー (mm) |
|------------|--------------------------|----------|----------------|--------------|-------------------|
| | 水 | プレミックス粉体 | ポリマー (エマルジョン系) | 繊維混入率 (vol%) | |
| 打込みタイプ | 286 | 1507 | 34.7 | 2 | 520 ^{*1} |
| 吹付けタイプ | 303 | 1640 | — | 2 | 147 ^{*2} |

*1: スランブフロー *2: モルタルテーブルフロー

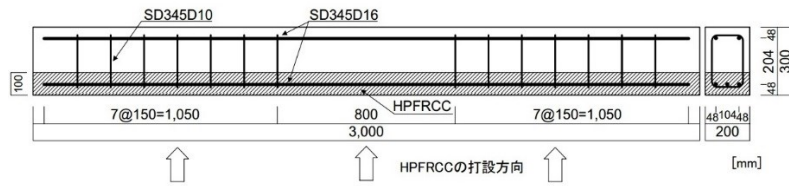


図 2-13 梁試験体の形状・寸法および HPFRCC の打設方向

表 2-15 圧縮・曲げ強度の結果

| | 圧縮強度 (N/mm ²) | 曲げ強度 (N/mm ²) |
|--------------|------------------------------|------------------------------|
| 母材コンクリート | 24.6 | 3.8 |
| HPFRCC (打込み) | 29.3 | 10.7 |
| HPFRCC (吹付け) | 42.8 | 8.0 |

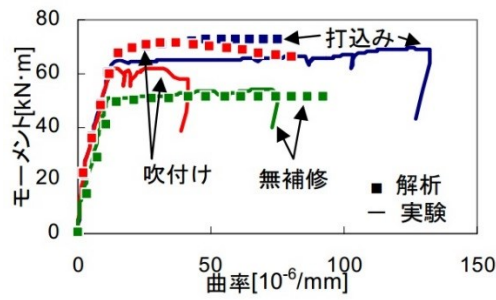


図 2-14 モーメント - 曲率関係

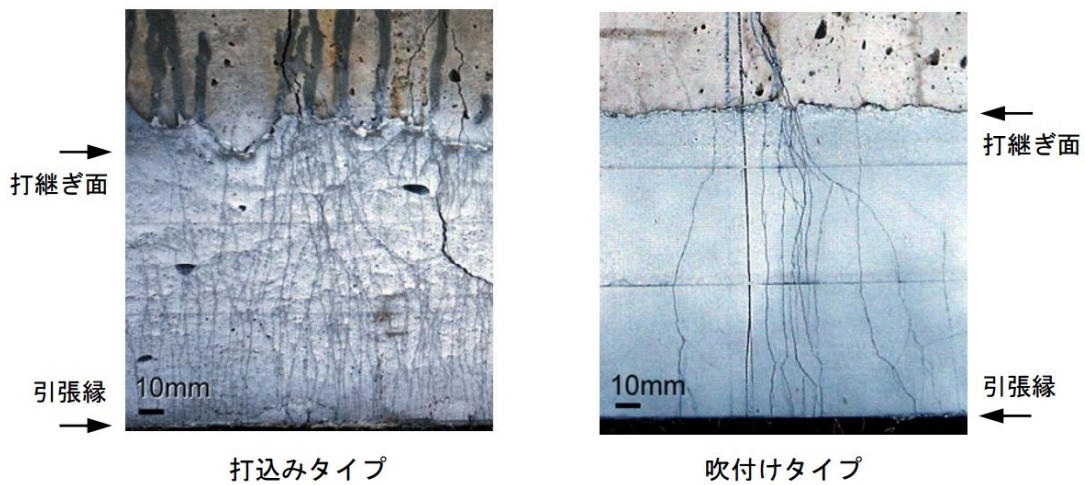


写真 2-1 実験終了後のひび割れ発生状況

2) 断面修復を考慮した RC 梁の連続繊維シート補強効果

彭ら⁹⁾は、断面修復材 4 種、シート 2 種およびプライマー塗布の有無について、RC 部材を用いる曲げ載荷実験を行い、それぞれの影響について検討を行った。表 2-16～2-18 には試験要因、材料性能および試験結果を順に示す。図 2-15 に試験体の概要を、図 2-16 に荷重 - 中央たわみ関係を示す。

結果として、高弾性係数の補修材を用いる断面修復が補強効果に与える影響がほとんどなく、また、プライマー塗布の場合、事前に付着試験による接着性能の評価および良いプライマーを選択する必要があることが明らかになった。

表 2-16 試験要因

| 供試体名 | 供試体の情報 | | |
|-------|----------|--------------|--------------|
| | プライマーの有無 | 補修有無or補修材の種類 | 補強有無or補強材の種類 |
| C-N | なし | なし | なし |
| N1-N | | Ns1 | |
| L-N | | L | |
| N2-N | | Ns2 | |
| PN2-N | あり | Ns+水 | CFRP |
| PW-N | | なし | |
| C-C | なし | Ns1 | |
| N1-C | | L | |
| L-C | | Ns2 | |
| N2-C | | Ns+水 | |
| PN2-C | あり | Ns2 | AFRP |
| PW-C | | Ns+水 | |
| PN2-A | | Ns+水 | |
| PW-A | なし | なし | |

表 2-17 材料の性能

| 材料名 | 弾性係数 (N/mm ²) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| コンクリート | 27.26 × 10 ³ | 34.75 | 3.02 |
| PCM(L) | 13.15 × 10 ³ | 36.64 | 2.67 |
| PCM(Ns1) | 12.96 × 10 ³ | 39.08 | 3.75 |
| PCM(Ns2) | 18.08 × 10 ³ | 49.46 | 3.45 |
| PCM(Ns+水) | 23.06 × 10 ³ | 61.57 | 3.40 |

※L は特殊軽量細骨材とカーボンファイバーを配合した PCM であり、NS はコテ塗り工法および湿式吹付け工法に適応する PCM である。また、特殊なモルタルとする Ns は、材料特性の異なる 2 種類 (Ns1 と Ns2) を用いた。補修材 PCM(Ns+水) というのは、普通の補修材 PCM(Ns) の硬化材を水で替えたものである。

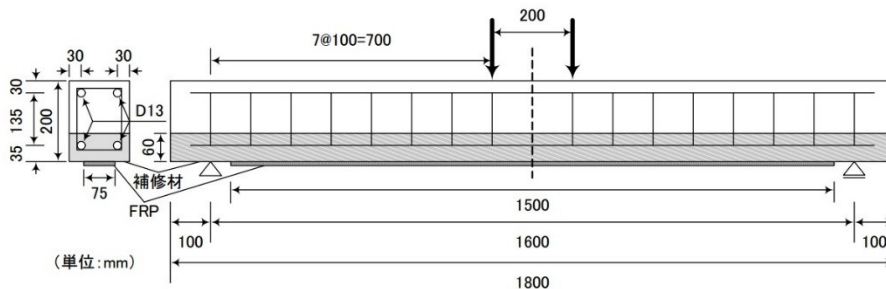


図 2-15 試験体概略図

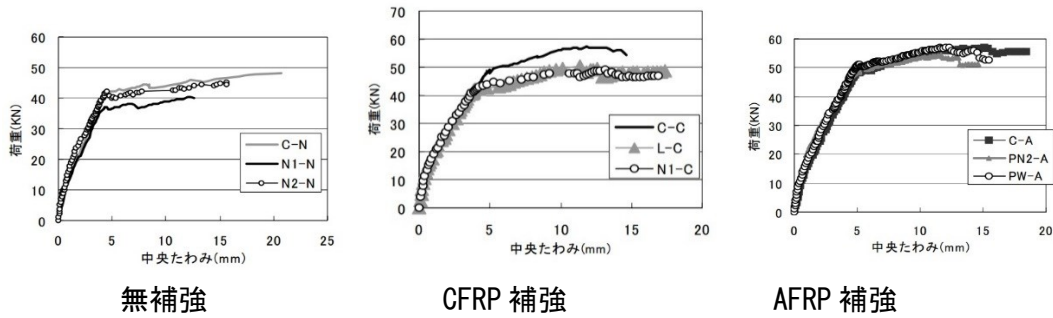


図 2-16 荷重 - 中央たわみ関係

表 2-18 試験結果一覧

| 供試体名 | 試験結果 | | | | | 供試体名 | 試験結果 | | | | |
|-------|------------|------------------------------|--------------|------------------------------|----------------------------------|-------|------------|------------------------------|--------------|------------------------------|----------------------------------|
| | 部材降伏荷重(KN) | 耐力比 ¹⁾ (部材降伏時) | 最大荷重 (KN) | 耐力比 ¹⁾ (最大荷重時) | 部材降伏後 ²⁾ 剛性(KN/mm) | | 部材降伏荷重(KN) | 耐力比 ¹⁾ (部材降伏時) | 最大荷重 (KN) | 耐力比 ¹⁾ (最大荷重時) | 部材降伏後 ²⁾ 剛性(KN/mm) |
| C-N | 41.83 | | 48.00 | | | L-C | 41.97 | 0.86 | 50.31 | 0.88 | 1.13 |
| N1-N | 36.98 | | 40.52 | | | N2-C | 49.38 | 1.18 | 56.44 | 1.12 | 1.16 |
| L-N | 36.00 | | 39.14 | | | PN2-C | 48.98 | 0.99 | 56.09 | 0.99 | 1.02 |
| N2-N | 42.27 | | 45.26 | | | PW-C | 52.02 | 1.06 | 57.03 | 1.02 | 0.75 |
| PN2-N | 41.58 | | 45.31 | | | PN2-A | 49.03 | 1.00 | 54.38 | 0.97 | 0.81 |
| PW-N | 41.78 | | 42.71 | | | PW-A | 51.34 | 0.99 | 57.12 | 1.00 | 0.83 |
| C-C | 49.08 | 1.17 | 57.22 | 1.34 | 1.19 | C-A | 48.64 | 0.99 | 56.93 | 1.05 | 0.83 |
| N1-C | 42.46 | 1.02 | 48.94 | 1.15 | 0.71 | | | | | | |

※1 無補強の部材降伏荷重および最大荷重はC-N, N1-N, L-N, N2-N, PN2-N, PW-Nのそれぞれのデータを使用

※2 部材降伏後剛性: (最大荷重-部材降伏荷重) ÷ (最大荷重時のたわみ-部材降伏時のたわみ)

※3 供試体C-C(補強)の曲げ耐力の計算値: 62.44KN⁴⁾

3) ポリマーセメントで補修した RC 梁の曲げ性状に関する研究

吉田ら⁸⁾は、劣化を再現した RC 梁に、PAE 系および SBR 系の 2 種類のポリマーセメントモルタルを補強材料に用い、無振動および振動環境下の 2 つの条件のもと下面増厚補強を行いその静的曲げ性状について検討を行った。図 2-17 に試験体寸法および配筋を、表 2-19 にコンクリートの調合を、表 2-20 にポリマーセメントモルタルの調合を、表 2-21 にポリマーセメントモルタルの特性を、図 2-18 に最大耐力および破壊形態を、そして図 2-19 に荷重 - たわみ関係を示す。

その結果、PAE 系材料・SBR 系材料とも補強効果の有効性が認められ、環境の違いについては、振動環境下の場合材料分離や鉄筋の定着不良等の問題点は認められず、むしろ強度が強くなりひび割れ発生荷重の向上につながる結果が得られた。

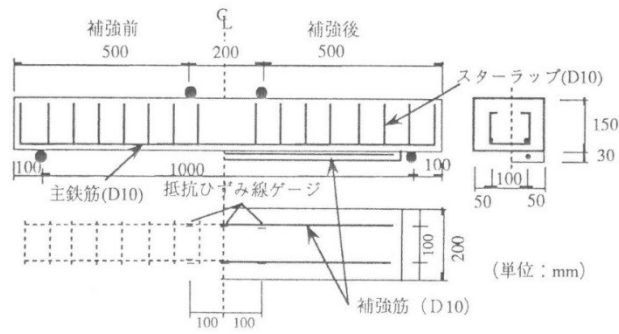


図 2-17 試験体寸法および配筋

表 2-19 コンクリートの調合

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | スランプの範囲 (cm) | 空気量の範囲 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | |
|---------------|--------------|------------|------------|----------|-------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 |
| 20 | 8 ± 1 | 4.5 ± 0.5 | 60 | 47.5 | 300 | 180 | 831 | 930 | 0.554 |

表 2-20 ポリマーセメントモルタルの調合

| | 系統名 | コンパウンド | エマルジョン | 追加水量 | p/c |
|------|--------------|----------|--------|--------|-----|
| PAE系 | ポリアクリル酸エステル系 | 1袋(20kg) | 3.33kg | 0kg | 15% |
| SBR系 | スチレンブタジエンゴム系 | 1袋(20kg) | 2.67kg | 0.82kg | 15% |

p/c=ポリマーセメント比

表 2-21 ポリマーセメントモルタルの特性

| | 曲げ強度 | 圧縮強度 | 引張強度 | ヤング率 | 付着強度 |
|------|------|-------|------|------------------------|------|
| PAE系 | 60.9 | 178.3 | 19.7 | 0.96 × 10 ⁵ | 12.3 |
| SBR系 | 102 | 293.0 | 32.0 | 1.82 × 10 ⁵ | 28.1 |

材齢7日 (単位: kgf/cm²)

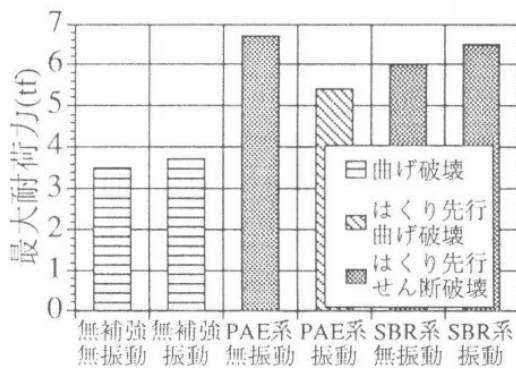


図 2-18 最大耐力および破壊形態

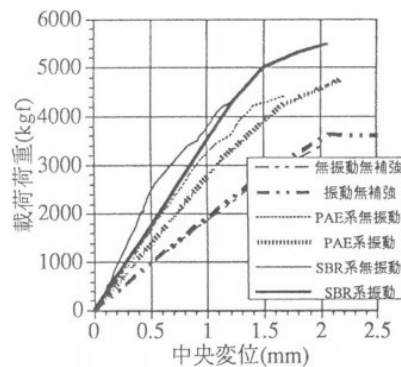


図 2-19 荷重 - たわみ関係

2.3.3 補修を目的とした GP に関する研究

1) ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究¹²⁾

原田らは、ジオポリマーモルタルの各種耐久性試験を実施し、その耐久性について基礎的な検討を行った。表 2-22 にジオポリマーモルタルの配合表を、表 2-23 にセメントモルタルの配合表を示す。

表2-22 ジオポリマーモルタルの配合表 (kg/m³)

| 記号 | 種類 | GP 溶液 | フライアッシュ | 高炉スラグ* | 細骨材 |
|-----|-------------|-------|---------|--------|---------|
| GP1 | フライアッシュ 1 種 | 244.2 | 480.3 | 66.0 | 1,535.4 |
| GP2 | フライアッシュ 2 種 | 244.2 | 468.1 | 66.0 | 1,535.4 |

表2-23 セメントモルタルの配合表 (kg/m³)

| 記号 | 水 | セメント | 細骨材 |
|----|-------|-------|--------|
| OP | 255.9 | 511.8 | 1535.4 |

乾燥収縮試験の結果は、図2-20に示すように、フライアッシュを材料とするジオポリマーモルタルの乾燥収縮量は十分実用可能なレベルにあること、フライアッシュ1種を材料とするジオポリマーモルタルの乾燥収縮ひずみは、セメントモルタルに比べて約1/3と極めて小さいことなどを報告している。

中性化試験の結果は、図 2-21 と図 2-22 に示すように、フェノールフタレイン噴霧直後は無色であっても、時間の経過ともなって変色する特性があり、その原因の究明とあわせて中性化の評価方法に関しても、今後検討する必要があることなどを報告している。

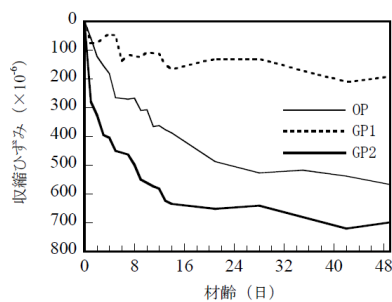


図2-20 収縮ひずみと材齢の関係

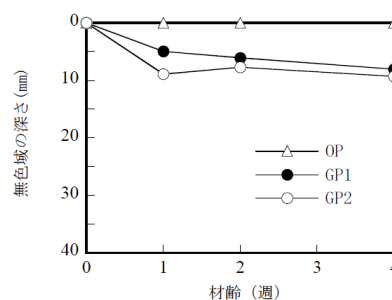


図2-21 無色域の深さと材齢の関係



(a) 噴霧直後 (b) 噴霧30分後



(c) 噴霧40分後 (d) 噴霧80分後

図2-22 フェノールフタレイン噴霧後の色の变化

アルカリ骨材反応試験の結果，**図 2-23** と **図 2-24** に示すように，ジオポリマーモルタルはアルカリ骨材反応が発生せず，高いアルカリ骨材反応の抵抗性があることなどを報告している。

硫酸浸漬試験の結果，**図 2-25**～**図 2-27** に示すように，ジオポリマーモルタルはセメントモルタルに比べ高い耐酸性を有しており，5%濃度の硫酸溶液に8週間浸漬した場合，セメントモルタルの質量が60%近く減少したのに対して，ジオポリマーモルタルは数%しか減少しなかったことなどを報告している。

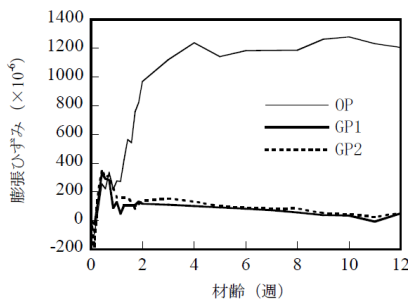


図2-23 反応性骨材を使用した供試体のひずみと材齢の関係



図2-24 表面ひび割れの発生状況の比較 (上からOP, GP1, GP2)

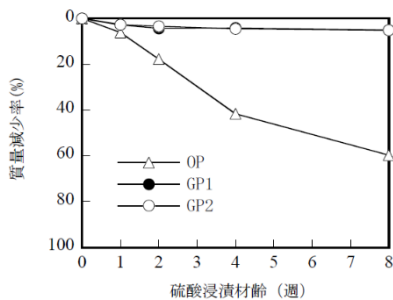


図2-25 硫酸浸漬試験の結果 (質量減少率)

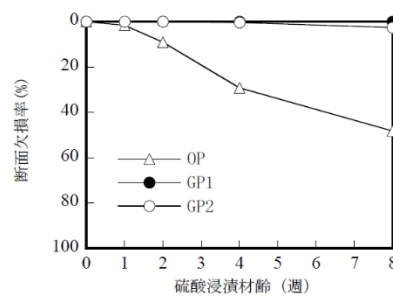


図2-26 硫酸浸漬試験の結果 (断面欠損率)



図2-27 硫酸浸漬前後の外観の比較 (浸漬材齢8日)

2) 活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性^{12) 13)}

一宮らは、フライアッシュベースのジオポリマーに対して、活性フィラーの一部を高炉スラグ微粉末で置換した供試体を用い、耐酸性実験（室内における硫酸浸漬実験、酸性温泉地における温泉水浸漬実験）と電気マッフル炉を用いた高温環境における物性変化に関する基礎的実験を行った。表2-24にジオポリマーモルタルの配合を、表2-25にセメントモルタルの配合を示す。

(1) 耐酸性に関する検討

耐酸性に関する検討の結果、図2-30～図2-33に示すように、ジオポリマーは高炉スラグ微粉末置換率が高くなると耐酸性が低下するが、セメントに比べると性状変化はわずかであること、この劣化現象は一般的な酸性温泉地ではほとんど問題とならないと推察されることなどを報告している。

表2-24 ジオポリマーモルタルの配合 (kg/m³)

| BS 置換率 (%) | GPS | FA1 | BS | S |
|------------|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 244.2 | 533.6 | 0.0 | 1535.4 |
| 10 | 244.2 | 480.3 | 66.0 | 1535.4 |
| 20 | 244.2 | 426.9 | 132.0 | 1535.4 |
| 30 | 244.2 | 373.6 | 198.0 | 1535.4 |

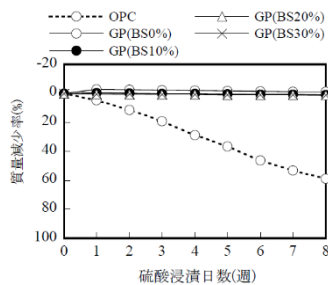


図2-28 硫酸浸漬の結果（質量減少率）

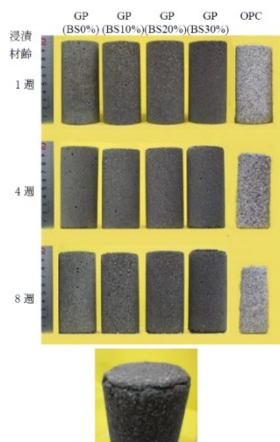


図2-30 硫酸浸漬の結果

表2-25 セメントモルタルの配合 (kg/m³)

| W | OPC | S |
|-------|-------|--------|
| 255.9 | 511.8 | 1535.4 |

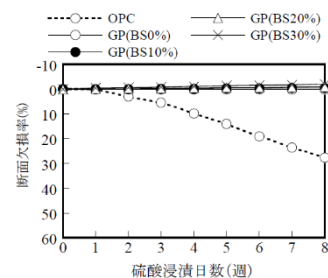
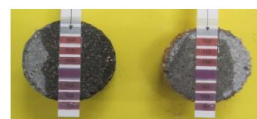


図2-29 硫酸浸漬の結果（断面欠損率）



(a) 浸漬材齢20週の外観と切断面
(左：GP(BS10%)，右：OPC)



(b) 供試体内部のpHの比較
(左：GP(BS10%)，右：OPC)

図2-31 温泉水浸漬試験結果

(2) 高温特性に関する検討

高温特性に関する検討の結果，表2-26，図2-32～図2-36に示すように，ジオポリマーは優れた高温抵抗性があること，材齢13週のジオポリマーは高温に伴い膨張したことから，短期材齢でも高温抵抗性を得ることができる配合や養生方法の提案が望まれることなどを報告している。

表2-26 加熱前後の供試体質量ならびに圧縮強度の比較

| 供試体種別 | 供試体質量(g) | | 圧縮強度(N/mm ²) | |
|-----------|----------|-------|--------------------------|------|
| | 加熱前 | 加熱後 | 加熱前 | 加熱後 |
| OPC | 129.6 | 118.3 | 46.8 | 5.3 |
| GP(BS10%) | 123.6 | 115.6 | 31.7 | 36.8 |

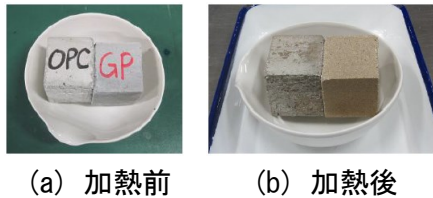


図2-33 加熱前後の供試体の状況 (左：OPC，右：GP (BS10%))

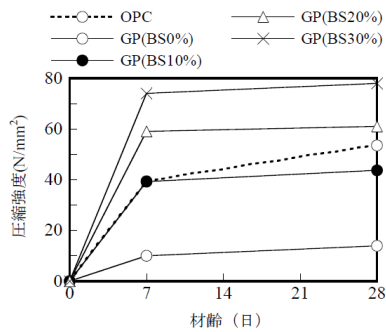


図2-35 加熱前のBS置換率ごとの材齢と圧縮強度の関係

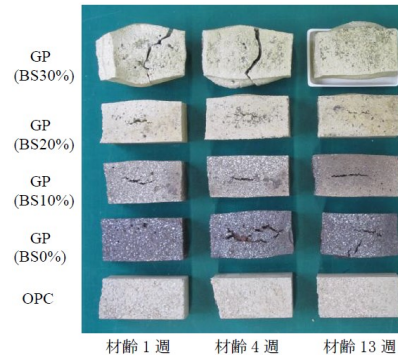


図2-32 加熱後の供試体の外観



図2-34 加熱に伴う供試体の膨張 (GP (BS30%)，材齢7日)

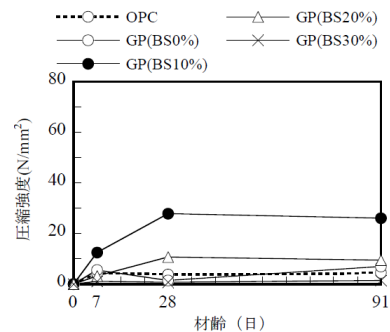


図2-36 加熱後のBS置換率ごとの材齢と圧縮強度の関係

3) ジオポリマーモルタルとコンクリートとの付着性能に関する研究

Tanakorn ら¹¹⁾は、コンクリート構造物の補修材料として、普通ポルトランドセメントを混在したジオポリマーモルタルの利用に関する実験的検討を行った。実験概要としては、ジオポリマーモルタルと従来の補修モルタルを用いて補修した試験体を対象に、母体コンクリートとの付着強度を評価するための傾斜せん断試験および切欠き梁の曲げ試験を行った。

その結果、従来の補修モルタルで補修した場合の結果と比較して、ジオポリマーによる補修を施した結果は良好な付着強度と曲げ強度を示し、コンクリートの構造物の補修材料としての利用が期待できる。それに加え、補修の打ち継ぎ面を電子顕微鏡法による画像解析を行った結果は、補修モルタルよりジオポリマーモルタルの方がコンクリートとの接着がよく一体化となっていることが分かる。

表 2-27 フライアッシュおよびセメントの化学組成 (質量比)

| Materials | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | LOI |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|------|
| HFA | 29.32 | 12.96 | 15.64 | 25.79 | 2.94 | 2.93 | 2.83 | 7.29 | 0.30 |
| PC | 20.80 | 4.70 | 3.40 | 65.30 | 1.50 | 0.40 | 0.10 | 2.70 | 0.90 |

表 2-28 フライアッシュおよびセメントの物理特性

| Materials | Specific gravity | Median particle size, <i>d</i> ₅₀ (μm) | Blaine fineness (cm ² /g) |
|-----------|------------------|---|--------------------------------------|
| HFA | 2.61 | 8.5 | 4300 |
| PC | 3.16 | 14.6 | 3600 |

表 2-29 ジオポリマーモルタルの調合および強度特性

| Mix symbol | HFA (g) | PC (g) | Sand (g) | NaOH (g) | | | Na ₂ SiO ₃ (g) | Properties of GPM | |
|------------|---------|--------|----------|----------|------|------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | | 6 M | 10 M | 14 M | | <i>f</i> _c (MPa) | <i>f</i> _t (MPa) |
| 6M0PC | 100 | - | 100 | 20 | - | - | 40 | 38.5 | 2.91 |
| 6M5PC | 95 | 5 | 100 | 20 | - | - | 40 | 40.2 | 3.79 |
| 6M10PC | 90 | 10 | 100 | 20 | - | - | 40 | 45.3 | 4.77 |
| 6M15PC | 85 | 15 | 100 | 20 | - | - | 40 | 48.2 | 4.93 |
| 10M0PC | 100 | - | 100 | - | 20 | - | 40 | 50.5 | 6.22 |
| 10M5PC | 95 | 5 | 100 | - | 20 | - | 40 | 56.7 | 6.85 |
| 10M10PC | 90 | 10 | 100 | - | 20 | - | 40 | 60.4 | 7.17 |
| 10M15PC | 85 | 15 | 100 | - | 20 | - | 40 | 64.1 | 7.32 |
| 14M0PC | 100 | - | 100 | - | - | 20 | 40 | 56.0 | 7.07 |
| 14M5PC | 95 | 5 | 100 | - | - | 20 | 40 | 58.5 | 8.51 |
| 14M10PC | 90 | 10 | 100 | - | - | 20 | 40 | 63.3 | 8.96 |
| 14M15PC | 85 | 15 | 100 | - | - | 20 | 40 | 62.0 | 7.49 |

*f*_c = compressive strength at the age of 28 days (50 × 50 × 50 mm³ cube specimen).
*f*_t = flexural strength at the age of 28 days (75 × 75 × 300 mm³ rectangular specimen).

表 2-30 コンクリートの調合

| Components | PC (kg/m ³) | Aggregates (kg/m ³) | | Water (kg/m ³) | Properties of PCC | |
|-------------|-------------------------|---------------------------------|--------|----------------------------|-------------------|-------------|
| | | Fine | Coarse | | f_c (MPa) | f_t (MPa) |
| Proportions | 495 | 510 | 938 | 238 | 35.9 | 8.5 |

f_c = compressive strength at the age of 28 days (100 mm in diameter and 200 mm in length specimen).

f_t = flexural strength at the age of 28 days (40 × 40 × 160 mm³ rectangular specimen).

表 2-31 補修モルタルの特性

| Repair materials | Water/binder ratios | f_c at 28 days (MPa) | f_t at 28 days (MPa) |
|------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| RM1 | 0.15 | 62.0 | 8.2 |
| RM2 | 0.25 | 48.3 | 11.0 |
| RM3 | 0.15 | 60.0 | 5.5 |
| RM4 | 0.14 | 70.0 | 7.8 |
| RM5 | 0.17 | 42.6 | 8.5 |

Remark: Water/binder ratios of RMs were based on the recommendation of manufacturer.

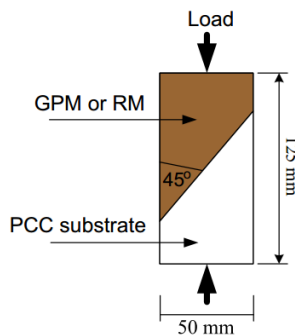


図 2-37 傾斜せん断試験

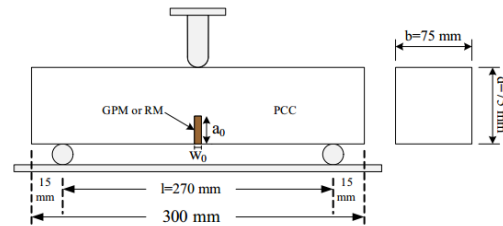


図 2-38 切り欠き梁の曲げ試験

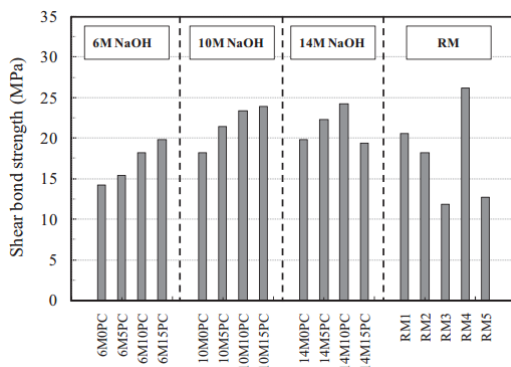


図 2-39 傾斜せん断試験結果

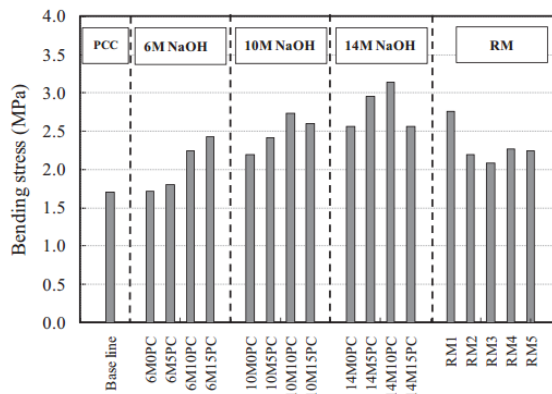
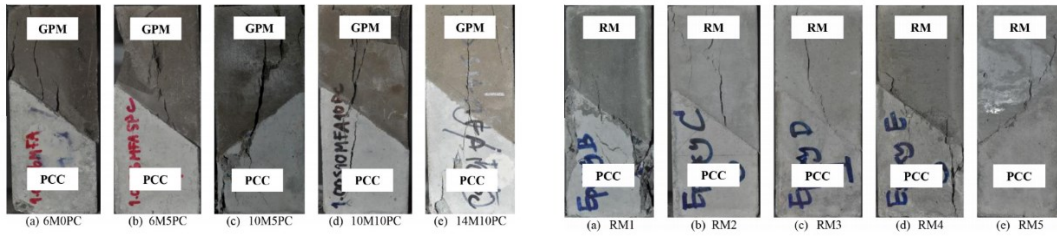


図 2-40 切り欠き梁の曲げ試験結果



a. ジオポリマーモルタル b. 補修モルタル

図 2-41 試験体の破壊特性

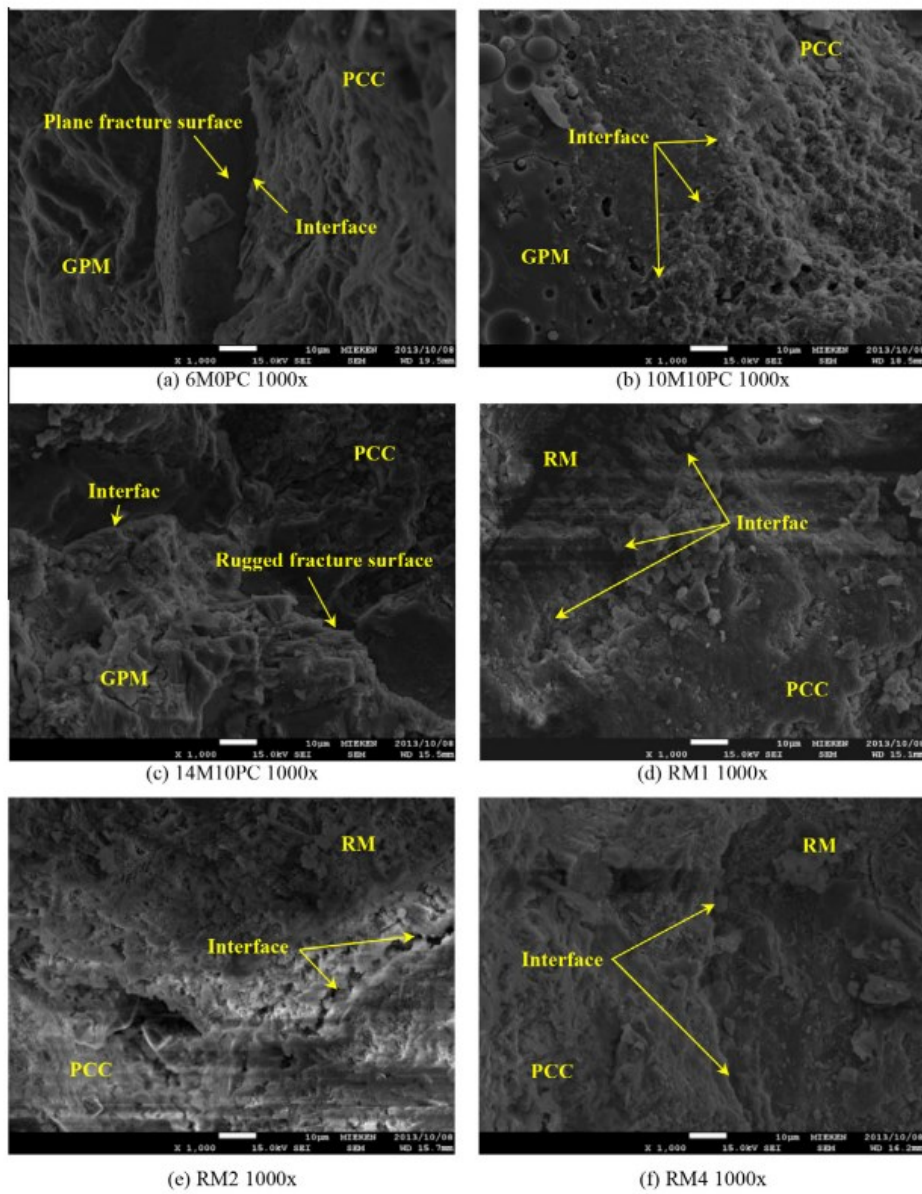


図2-42 補修の打ち継ぎ面の画像解析結果

2.4 まとめ

本章では、RC部材の断面修復後の挙動を検討する前段階の基礎知識として、RC構造物に発生しうる変状、劣化とその機構、およびRC構造物の補修・補強についての基本事項とそれに関する既往研究を調査して整理し、取りまとめをした。また、GPについても同様に行った。

RC構造物の補修作業においては、断面修復工法は最も用いられるひとつの工法であり、補修の際に使用される断面修復材料も様々である。その劣化状況と要因、補修部位や補修環境などを考慮して補修材または補修工法を選定する必要がある。また、補修の際、補修材料の性能だけに注目するのではなく、その補修界面の付着による影響も大きいいため、十分な処理が重要である。補修界面の付着力は、補修界面形状や粗さ、保水状態および補修材料の性質などによる影響を受けるため、注意して入念に施工する必要がある。さらに、従来の断面修復材には不十分な点がある。それは、耐火性や耐熱性が低いこと、あるいは樹脂系の場合は紫外線の影響を受けやすい低耐候性などであることが分かる。

また、GPはまだ基礎的な研究の段階にあるが、今までの研究報告によれば、強度発現はコンクリートと同等レベルまで可能で、耐酸性や耐火性、コンクリートおよび鉄筋との付着性が優れていることが分かる。したがって、構造物の建設材料としての利用だけでなく、構造物の補修材料としての利用も期待できる。

そこで本研究では、補修材料としてGPを利用した部材の挙動およびその特性を、従来の断面修復材を利用した場合と比較することで明らかにし、実験的検討を行う。

3.1 概説

構造部材を断面修復した場合、その部材の耐力性状や挙動が健全な状態と異なっていく場合が考えられるため、検討を行わなければならない。そこで、本実験では曲げ挙動をするRC梁を対象に、等曲げ区間圧縮縁に補修前の初期欠陥としてのジャンカを有する状態と、補修を施した状態の曲げ試験を行い、健全な状態の結果と比較することで、各状態の挙動およびその特性を把握する。

3.2 実験概要


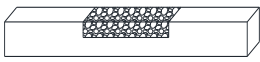
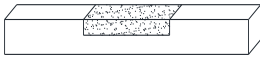
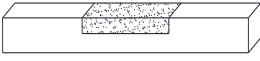
3.2.1 実験の要因および水準

本実験では、RC曲げ部材の補修前後の曲げ挙動を比較することを目的として、等曲げ区間圧縮縁に初期欠陥としてジャンカの発生があると想定した場合と、超高強度型無収縮モルタル（以下、補修モルタル）を用いて断面修復した場合および健全な場合のRC梁を対象に曲げ試験を行った。実験の要因と水準としては、表3-1に示すように、梁試験体の損傷状態と、補修の場合の補修界面の処理条件を要因として取り上げた。梁試験体は健全試験体（ND）、ジャンカ試験体（D）、補修付着界面良好（R）、補修付着界面不良（RB）、計4体を作成した。表3-2に梁試験体一覧を示す。

表3-1 要因および水準

| 要因 | 水準 |
|----------------|--------------------------------------|
| 損傷状態 | 健全；ジャンカ；補修 |
| 補修試験体の付着界面処理条件 | 付着良好（粗面＋湿潤状態）； 付着不良（平滑な状態＋ドライアウト） |

表3-2 梁試験体の一覧

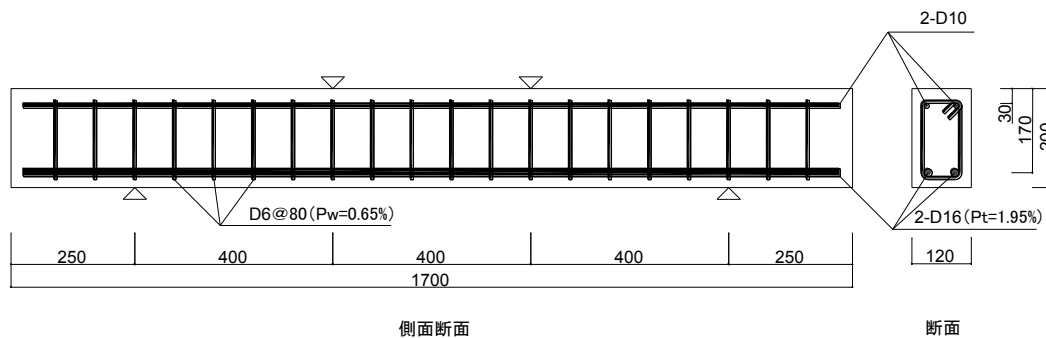
| 試験体名称 | 試験体形状 | 寸法(mm) (幅×高さ×長さ) | 引張鉄筋 | 圧縮鉄筋 | せん断補強筋 | 損傷状態 |
|-------|---|---------------------|---|---|--------------------------------|--------------|
| ND |  | 120×200 ×1700 | 2-D16 SD345 P _t =1.95% | 2-D10 SD345 P _c =0.70% | D6@80 P _w =0.66% | 健全 |
| D |  | | | | | 欠陥 (ジャンカ) |
| R |  | | | | | 補修 (付着良好) |
| RB |  | | | | | 補修 (付着不良) |

3.2.2 試験体概要

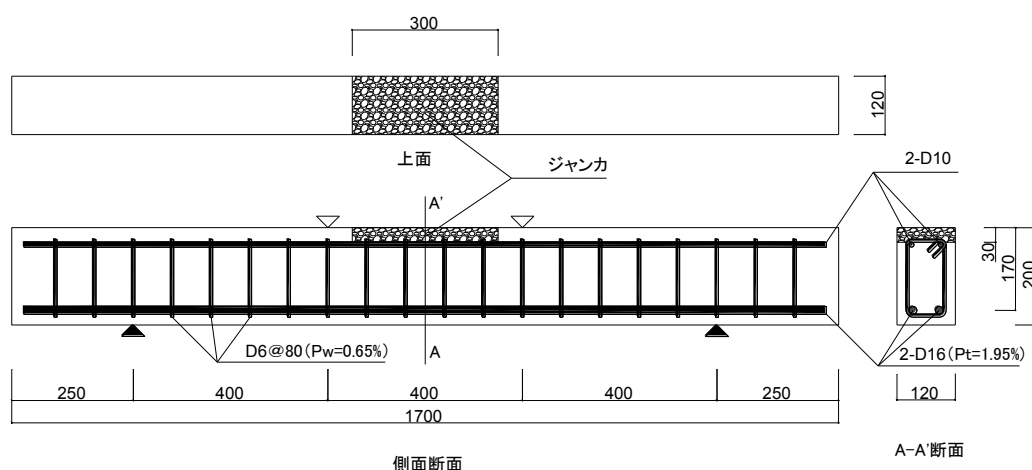
(1) 試験体の寸法および形状

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 120 mm、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。すべての梁試験体は、最終破壊形式を曲げ破壊となるように設計した。

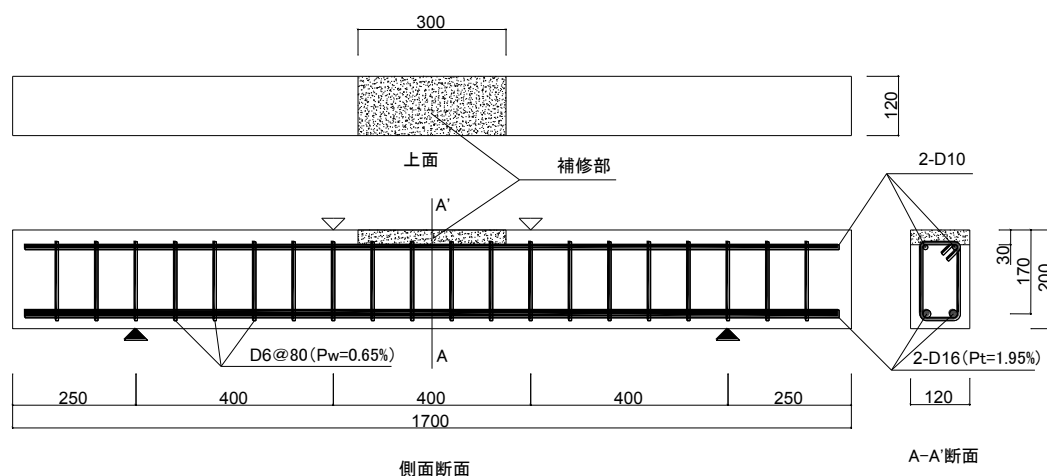
ジャンカ・補修を設けた箇所は、等曲げ区間の圧縮縁中央とした。その寸法は、深さをかぶり厚さと同等で 30 mm、幅を梁幅と同様で 120 mm、そして既往の研究より規模の同じ程度の梁で曲げ終局時に圧縮破壊される等曲げモーメント区間内のコンクリートの範囲が約 25 mm~35 mm となることから長さを 30 mm とした。



a. 健全試験体



b. ジャンカ試験体



c. 補修試験体

図3-1 試験体の形状および配筋

(2) 使用材料および調合

表3-3に各使用材料の詳細を、表3-4コンクリートの調合表を、表3-5にジャンカの調合を、表3-6に補修モルタルの調合を示す。

健全部分のコンクリートには、セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は川砂を、粗骨材は最大寸法20mmの砕石を、そして混和剤は高性能AE減水剤を使用した。

補修モルタルは、市販のプレミックスタイプ超高強度型セメント系無収縮モルタルを使用した。その理由としては、一般に建築・土木の補修工事に採用されるもので、高強度、高流動性やノンブリーディングなどの特徴があるからである。

ジャンカの部分の調合に関しては、既往研究を参考に、セメントペーストやモルタル分の漏れがあると想定して、健全部分のコンクリートの調合より水、セメントおよび細骨材の質量を削減する方法で再現した。健全コンクリートの調合に対し、モルタル分を約60%削減し、図3-2にジャンカの作成方法のイメージ図を示す。

表 3-3 使用材料の詳細

| 材料 | 記号 | 特性値 |
|------|----|---|
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント 密度 : 3.15g/cm ³ , 比表面積 : 4000 cm ² /g |
| 細骨材 | S | 屋町川産砂, 密度 : 2.59 g/cm ³ |
| 粗骨材 | G | 志摩産砕石, 密度 2.68 g/cm ³ |
| 混和材 | SP | 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) |
| 補修材料 | DS | プレミックスタイプ超高強度型セメント系無収縮モルタル |

表 3-4 コンクリート調合表およびフレッシュ性状

| 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 | 60 | 44.64 | 179 | 298.33 | 809.92 | 979.62 | 0.99 | 17.8 | 1.0 | 26.5 |

表 3-5 ジャンカコンクリートの調合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|------------|------------|--------------------------|--------|--------|--------|
| | | W | C | S | G |
| 60 | 24.85 | 71.60 | 119.33 | 323.97 | 979.62 |

表 3-6 補修モルタルの調合

| W/DS (%) | 単位量 (kg/m ³) | | フロー値 (mm) |
|-------------|--------------------------|--------|--------------|
| | DS | W | |
| 0.13 | 2285.71 | 291.83 | 149 |

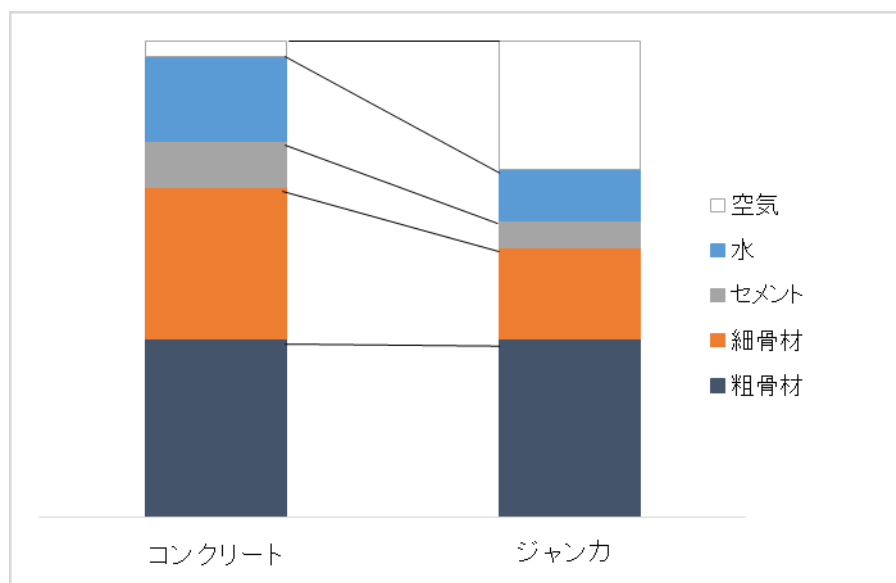


図 3-2 ジャンカの調合のイメージ

(3) 試験体作成方法




健全梁試験体およびジャンカ・補修の試験体の健全部分は、木製の積板により作成した型枠を使用して打込みを行った。作業の容易性およびブリーディングによる影響を避けるため、本来上面となる圧縮縁を下向きにして打設した。ジャンカおよび補修の箇所には、コンクリートの打込みの段階において、市販の発泡スチロールをはめ込んで欠損部を作り出し、後にジャンカコンクリートおよび補修モルタルを充填することとした。母体コンクリートの養生は気中養生とし、ジャンカ・補修の部分はビニールと養生テープを使用しシート養生とした。

補修付着界面不良の試験体は、型枠内に設置する前に、特にコンクリートと接触する発泡スチロールの表面はビニールテープで巻きつけ、その面の凸凹状態を減らし平滑な界面を作り出すこととした。

また、各材料の力学的性状を求めるため、コンクリートおよびジャンカコンクリートの $\phi 100 \times 200$ の円柱試験体をそれぞれ 6 体、補修モルタルの $\phi 50 \times 100$ の円柱試験体を 6 体作成した。

表 3-7 にジャンカ・補修の部分の作成方法を示す。

表 3-7 ジャンカ・補修部分の作成方法

| | | | |
|---|---|--|---|
| 1. 発泡スチロールを型枠内の所定箇所に設置 | 2. 鉄筋を設置 | 3. コンクリートを打設 | 4. コンクリート硬化後に材齢 7 日に脱型 |
|  |  |  |  |
| 5. 発泡スチロールを除去し、ウォータージェットで表面を清掃 | 6. ジャンカコンクリートあるいは補修モルタルを充填 | | 7. ビニールで覆い、載荷試験（材齢 28 日）までシート養生 |
|  | ジャンカ  | 補修  | |
|  |  |  |  |

3.2.4 試験方法

(1) 圧縮試験

圧縮試験は、JISA1108 に準拠し、後から打ち込んだ補修モルタルおよびジャンカの材齢が 28 日（コンクリートの場合は 35 日に該当）になったときに行った。

コンクリートおよび補修モルタルの円柱供試体の端面は研磨により、またジャンカ円柱供試体は硫黄キャッピングにより処理を行った。圧縮試験には万能試験機を用いた。また、コンクリートおよび補修モルタルの円柱供試体のうちそれぞれ 3 体は、側面中央に縦と横に 2 箇所ずつ対角となるようにワイヤーストレインゲージを貼り付け、ジャンカ供試体の場合はコンプレッソメーターを使用してひずみ度を測定した。

各材料の圧縮強度は、円柱供試体 6 体の圧縮試験結果の平均とし、ヤング係数はそれぞれひずみ度の測定を行った 3 体の平均とした。



写真 3-1 補修モルタル円柱供試体



写真 3-2 コンクリート円柱供試体



写真 3-3 ジャンカ円柱供試体



写真 3-4 ジャンカ円柱供試体に
コンプレッソメーターを設置した状態

(2) 引張試験

鉄筋の引張試験は、JISZ2241 に準拠し、载荷には万能試験機を、また、ひずみ測定には 5mm のワイヤーストレインゲージを用いて行った。

SD345 の鉄筋、D6、D10、D16 のそれぞれ 3 本ずつ引張試験を行い、その平均値を各種の鉄筋の引張応力度とした。なお、引張応力度の算出時には、異形鉄筋の直径および原断面積は JISG3112 の公称値を用いた。

(3) 梁の曲げ試験

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 2 点荷重とした。なお、荷重方法は単調漸増荷重とし、明らかな耐力低下まで荷重を継続することとした。また、各荷重増加段階において、ひび割れ発生や進展の状況、及びは破壊性状を観察するために、荷重の増加量を 5kN とした。

梁中央部の変位量の測定は、梁の下面中央に設置したレーザー変位計、及び両サイドの支点位置における梁上面中央に設置した高感度変位計によって測定した。中央断面ひずみ分布は、ワイヤーストレインゲージを用いて図-2 のように貼り付けをして測定を行った。曲げ試験の概要は図-3 に示す。

曲げ試験時には、曲げ変形に伴う曲率の測定も簡単な自作曲率測定器を使用して行った。その曲率測定器の仕組みは写真 3-5 に示すように、高感度変位計、変位計ホルダー、変位計の測定子に押し当てるパネル、基盤の金属棒および梁の回転を拘束させないためのベアリングによって構成されている。測定の概要としては、梁の曲げ区間中央の上下の縁から 30mm 離れた箇所に強力な接着剤で取り付け、幅が 21mm となるように設置する。片方のベアリングは基盤の棒を固定し、反対側は固定せずにベアリングと基盤の棒の間に曲げ回転とともに水平移動ができる軌道を設けてあるため、その変位量を変位計により読み取って計算式に代入し曲率を求める。

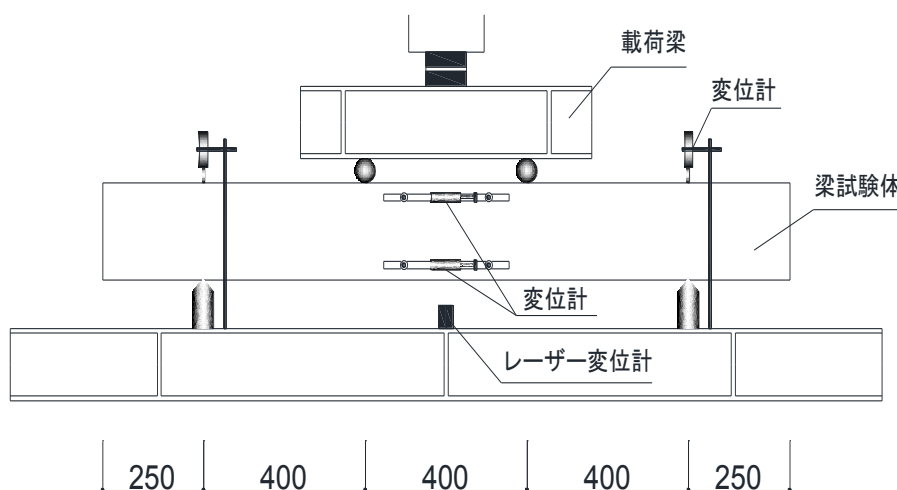


図 3-3 曲げ試験概略図

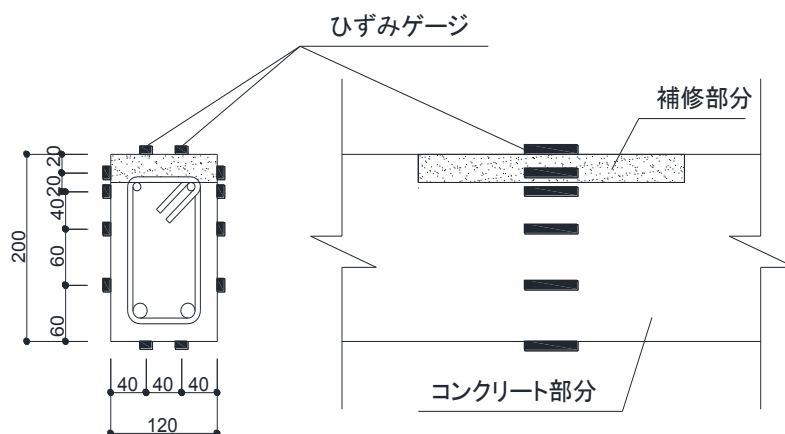


図 3-4 ひずみゲージの貼付図

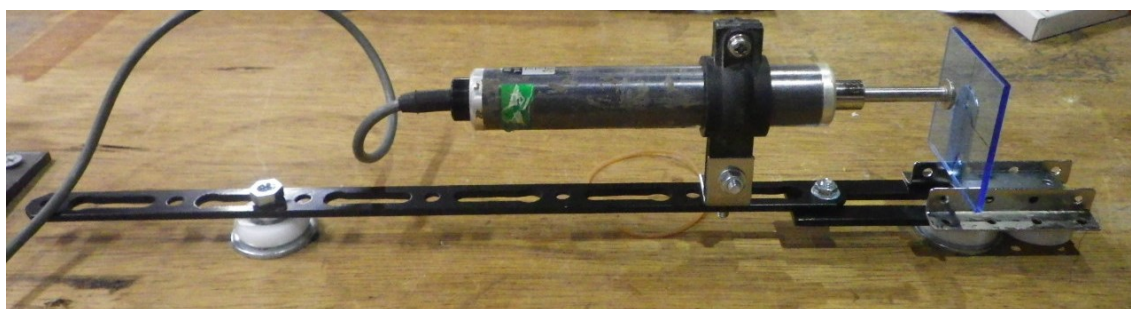


写真 3-5 曲率測定器



写真 3-6 曲げ試験の様子

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 材料特性試験

(1) 圧縮試験

実験に使用したコンクリート、補修モルタル及びジャンカ部分の材料の圧縮試験結果を表3-8に示す。また、図3-5には各材料の圧縮応力-ひずみ関係を示す。

コンクリートの強度は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体6体の平均で 29.21N/mm^2 となるものの、補修モルタルの強度は、 133.28N/mm^2 であり、コンクリートより圧縮強度が約4倍以上、ヤング係数が約1.5倍も大きい結果となった。しかし、補修モルタルはコンクリートのように降伏後変形と共に徐々に耐力低下をして破壊に至る性状ではなく、降伏点に到達した時点で爆裂破壊をした。今回使用した補修モルタルは超高強度型であるため、変形能力が著しく少ない特性を持っていることが分かる。

一方、ジャンカコンクリートの場合は、モルタル分を減ずることによりコンクリートと比較して圧縮応力が極端に低くて変形も大きいものの、最大耐力に達した後の耐力の低下は緩やかである。

表 3-8 各材料の特性

| 材料 | 圧縮強度 (N/mm^2) | ヤング係数 (N/mm^2) |
|------------|-----------------------------|------------------------------|
| コンクリート | 29.21 | 2.53×10^4 |
| 補修モルタル | 133.28 | 3.83×10^4 |
| ジャンカコンクリート | 9.53 | 1.26×10^4 |

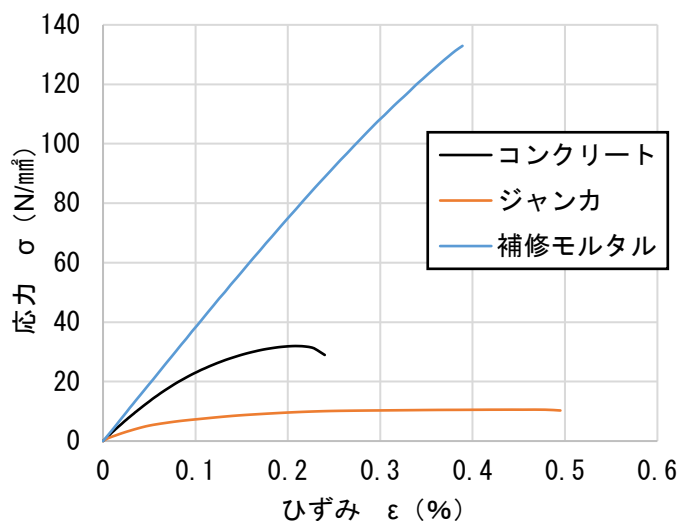


図 3-5 応力 - ひずみ関係

1) コンクリート

表 3-9 にコンクリートの圧縮試験結果を，図 3-6 に応力 - ひずみ関係を示す。

表 3-9 コンクリートの圧縮試験結果

| No | 直径 (mm) | | | | 高さ (mm) | | | 質量 (g) | 断面積 (mm ²) | 最大荷重 (kN) | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) |
|----|---------|------|------|------|---------|-------|-------|--------|------------------------|-----------|---------------------------|-----------------------------|
| | 上端 | 中央 | 下端 | 平均 | ① | ② | 平均 | | | | | |
| 1 | 99.8 | 99.1 | 99.8 | 99.6 | 198.1 | 198.3 | 198.2 | 3555.0 | 7782 | 230.5 | 29.6 | 24 |
| 2 | 99.3 | 99.3 | 99.4 | 99.3 | 197.6 | 197.2 | 197.4 | 3554.4 | 7746 | 247.5 | 31.9 | 27.5 |
| 3 | 99.3 | 99.4 | 99.5 | 99.4 | 199.4 | 199.2 | 199.3 | 3572.9 | 7756 | 222.5 | 28.7 | 24.4 |
| 4 | 99.3 | 99.1 | 99.4 | 99.3 | 198.2 | 198.4 | 198.3 | 3559.7 | 7735 | 230.2 | 29.8 | |
| 5 | 99.4 | 99.2 | 99.4 | 99.3 | 198.8 | 198.6 | 198.7 | 3561.3 | 7746 | 187.7 | 24.2 | |
| 6 | 99.2 | 99.3 | 99.5 | 99.3 | 198.1 | 197.9 | 198.0 | 3565.7 | 7746 | 240.5 | 31.1 | |
| 平均 | | | | | | | | | | | 29.21 | 25.3 |

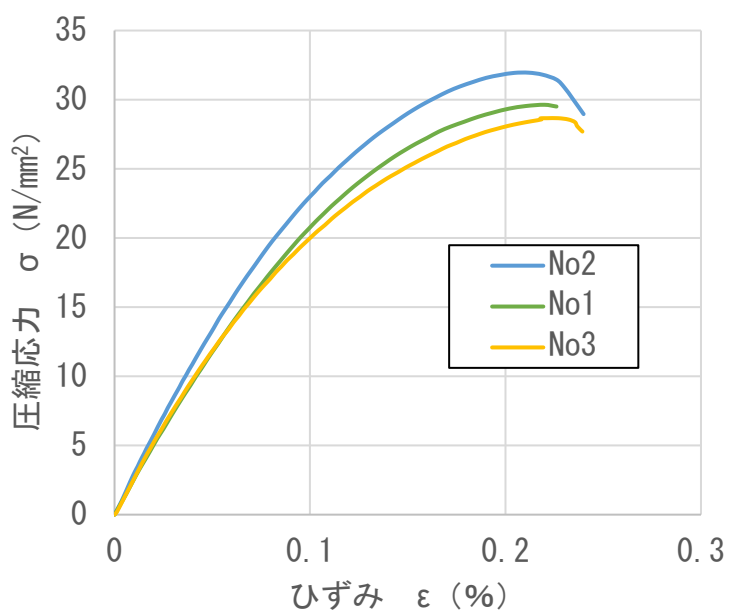


図 3-6 応力 - ひずみ関係

2) 補修モルタル

表 3-10 に補修モルタルの圧縮試験結果を、図 3-7 に応力 - ひずみ関係をしめす。

表 3-10 補修モルタルの圧縮試験結果

| No | 直径(mm) | | | | 高さ(mm) | | | 質量(g) | 断面積 (mm ²) | 最大荷重 (kN) | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) |
|----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|---------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| | 上端 | 中央 | 下端 | 平均 | ① | ② | 平均 | | | | | |
| 1 | 50.10 | 50.20 | 50.15 | 50.15 | 99.95 | 99.95 | 446.6 | 1974.29 | 1974.29 | 260.3 | 131.84 | 38.18 |
| 2 | 49.80 | 50.35 | 50.08 | 50.08 | 99.55 | 99.55 | 447.3 | 1968.39 | 1968.39 | 218.0 | 110.75 | 37.63 |
| 3 | 49.70 | 50.35 | 50.03 | 50.03 | 98.40 | 98.40 | 444.8 | 1964.46 | 1964.46 | 302.5 | 153.99 | 38.58 |
| 4 | 50.10 | 50.15 | 50.13 | 50.13 | 99.30 | 99.30 | 448.4 | 1972.32 | 1972.32 | 284.0 | 143.99 | |
| 5 | 50.25 | 49.80 | 50.03 | 50.03 | 98.75 | 98.75 | 443.9 | 1964.46 | 1964.46 | 262.5 | 133.62 | |
| 6 | 50.05 | 50.20 | 50.13 | 50.13 | 98.55 | 98.55 | 445.2 | 1972.32 | 1972.32 | 247.5 | 125.49 | |
| 平均 | | | | | | | | | | | 133.28 | 38.13 |

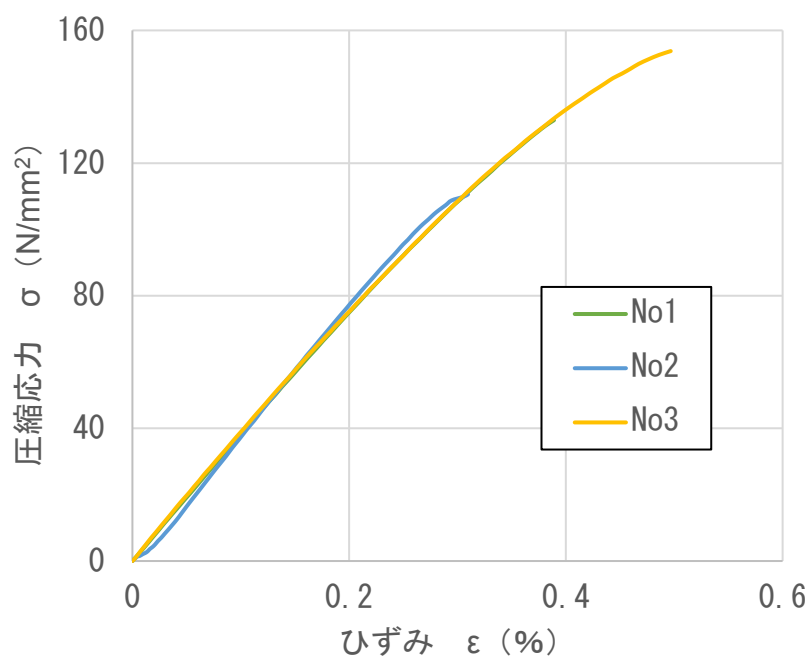


図 3-7 応力 - ひずみ関係

3) ジャンカコンクリート

表 3-10 にジャンカコンクリートの圧縮試験結果を、図 3-8 に応力 - ひずみ関係を示す。

表 3-10 ジャンカコンクリートの圧縮試験結果

| No | 直径(mm) | | | | 高さ(mm) | | | 質量(g) | 断面積(mm ²) | 最大荷重(kN) | 圧縮強度(N/mm ²) | ヤング係数(kN/mm ²) |
|----|--------|------|-------|------|--------|-------|-------|--------|-----------------------|----------|--------------------------|----------------------------|
| | 上端 | 中央 | 下端 | 平均 | ① | ② | 平均 | | | | | |
| 1 | 99.6 | 99.0 | 100.5 | 99.7 | 202.8 | 203.8 | 203.3 | 3279.9 | 7803 | 70.7 | 10.09 | |
| 2 | 99.4 | 99.0 | 99.3 | 99.2 | 204.9 | 203.6 | 204.3 | 3294.0 | 7730 | 61.5 | 7.96 | 12.36 |
| 3 | 99.0 | 99.6 | 98.7 | 99.1 | 204.1 | 204.5 | 204.3 | 3389.3 | 7709 | 81.2 | 10.53 | 12.85 |
| 平均 | | | | | | | | | | | 9.53 | 12.61 |

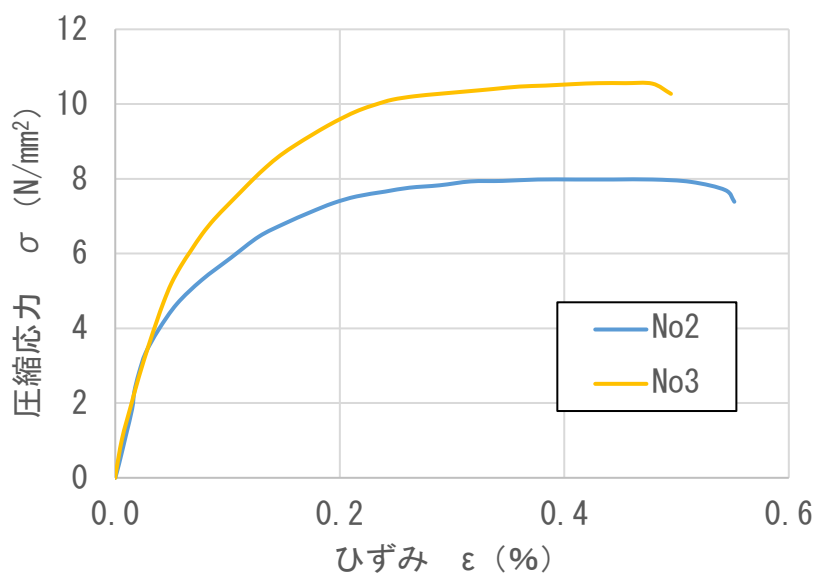


図 3-8 応力 - ひずみ関係

3.3.2 鉄筋の引張試験

表3-11に使用鉄筋の引張特性を示す。また、図3-9～図3-11にD16, D10 およびD6の引張応力 - ひずみ関係を示す。

表 3-11 使用鉄筋の詳細

| 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 |

1) D16

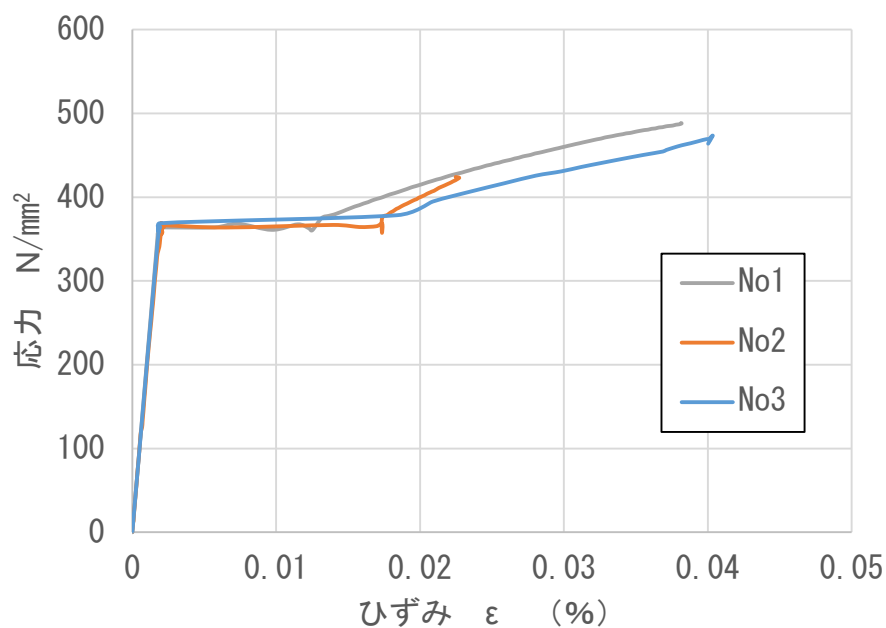


図 3-9 D16 の応力 - ひずみ関係

2) D10

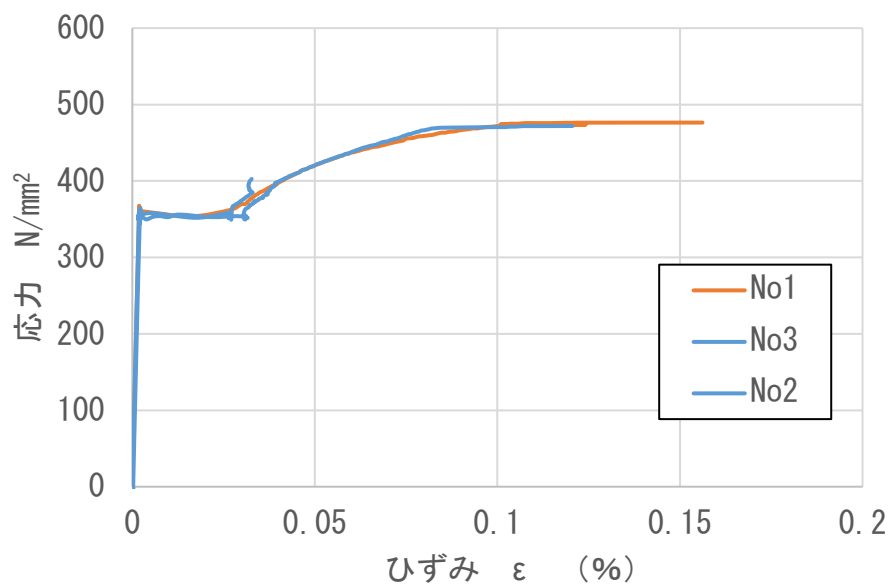


図 3-10 D10 の応力 - ひずみ関係

3) D6

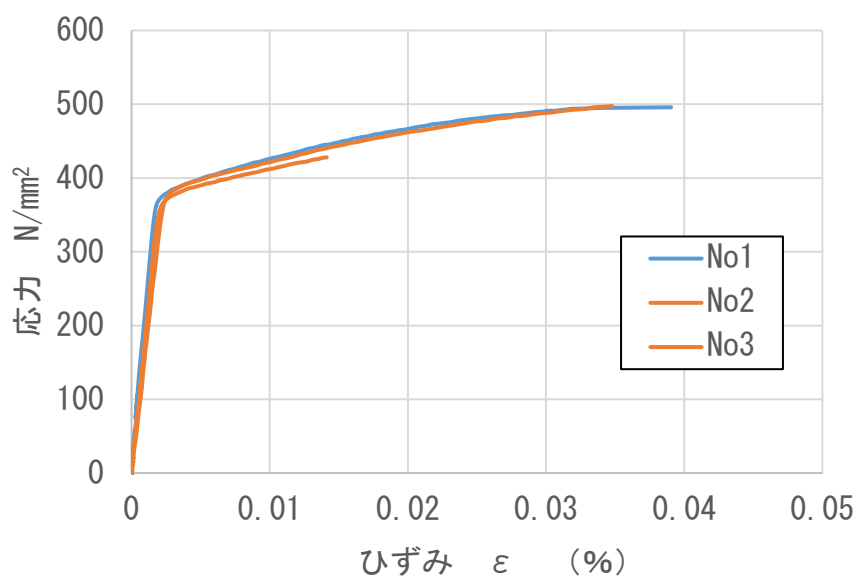


図 3-11 D6 の応力 - ひずみ関係

3.3.2 梁の曲げ試験

(1) ひび割れ発生状況および破壊性状

写真 3-7 に曲げ試験終了後の等曲げモーメント区間の破壊状況を、図 3-12～図 3-15 に各梁試験体の終局時のひび割れ発生状況を示す。

すべての梁試験体は、梁引張縁に曲げひび割れが発生し、その後荷重の増加に従いひび割れが圧縮側に進展し、圧縮縁の等曲げモーメント区間のコンクリートあるいはジャンカ部分及び補修モルタル部分が圧縮破壊をして梁全体の耐力が低下し終局破壊に至る典型的な曲げ破壊をした。

健全梁試験体および2種類の補修試験体では、最初の曲げひび割れが荷重 15kN のときに発生したのに対し、ジャンカ試験体は約 5kN 前後に発生した。

補修およびジャンカ試験体のひび割れ状況としては、健全試験体と比較すると、いずれもせん断スパンの領域に微細なひび割れが多く発生したことを除き、ほぼ同様であった。また、いずれの試験体においても、引張主筋に沿った付着ひび割れの発生が観察できた。これは、打込みに際して本来上面となる面を下向きにしたため、ブリーディングなどの影響や気中養生による乾燥などの影響が考えられる。

補修試験体の2種類を比較すると、付着不良の場合は荷重が 70kN のときに、付着面の剥がれ音がし、付着面の隙間が徐々に大きく開き、終局時に補修モルタルが破壊して試験体から剥離したが、付着良好の試験体にはこのような破壊は起きなかった。



a. ND 健全



b. D ジャンカ

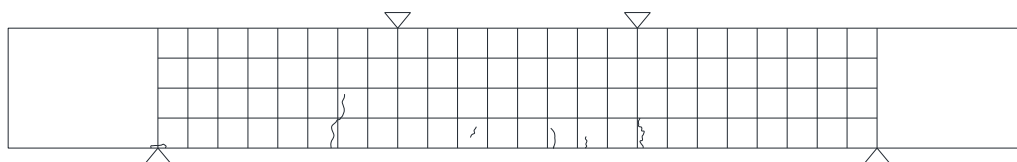
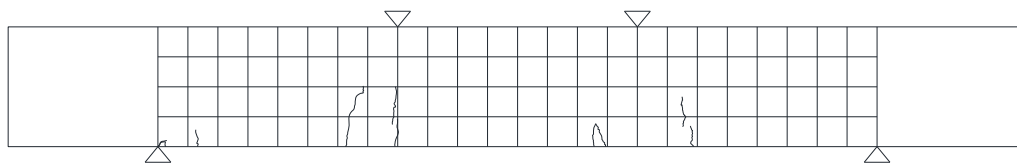


c. R 補修 (付着良好)

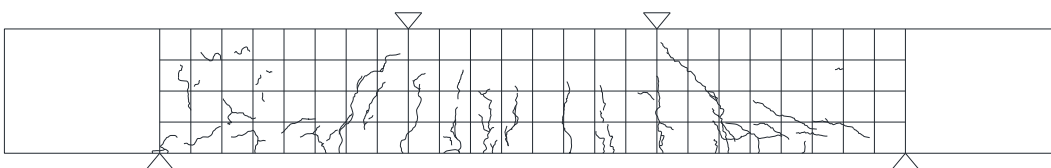
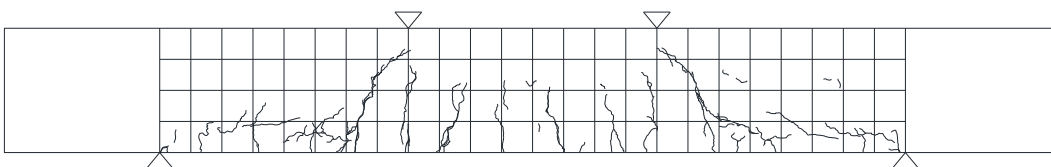


d. RB 補修 (付着不良)

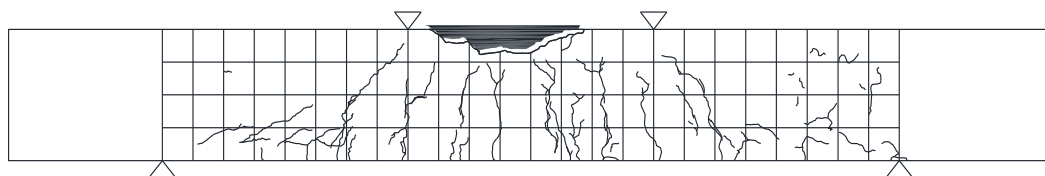
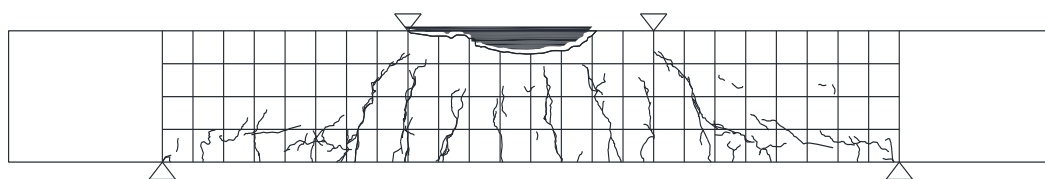
写真 3-7 終局時の等曲げ区間の破壊状況



a. ひび割れ発生時



b. 降伏時



c. 終局時

図 3-12 健全梁試験体のひび割れ状況

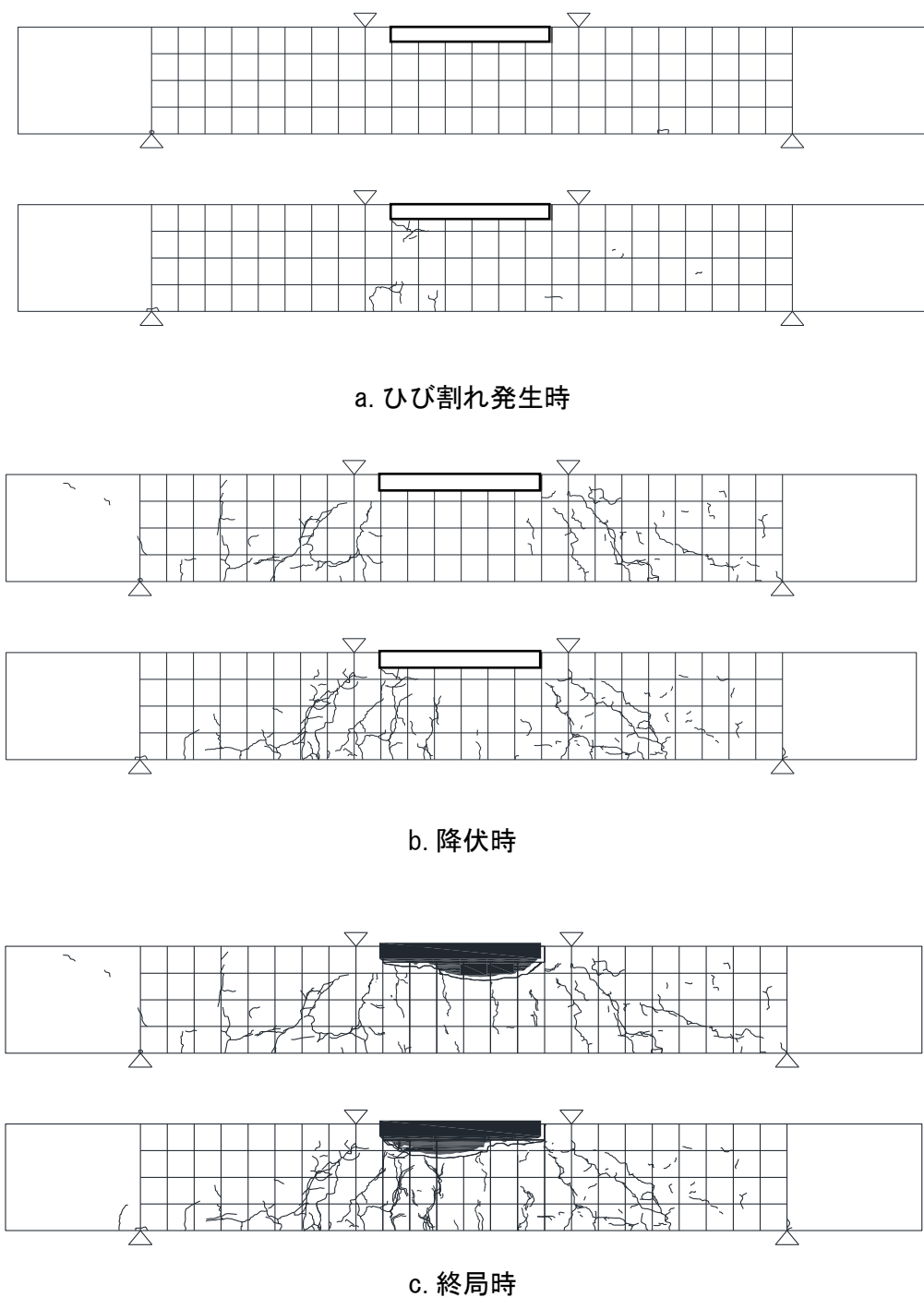
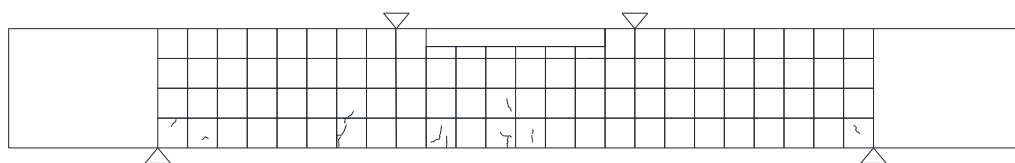
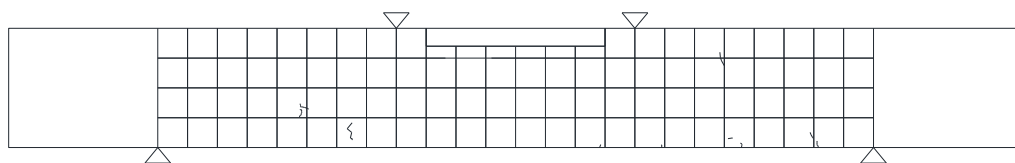
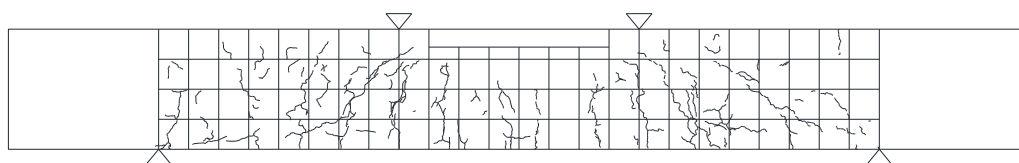
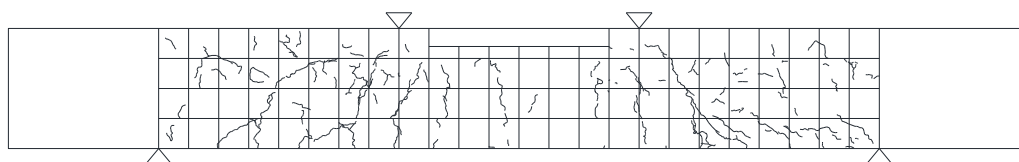


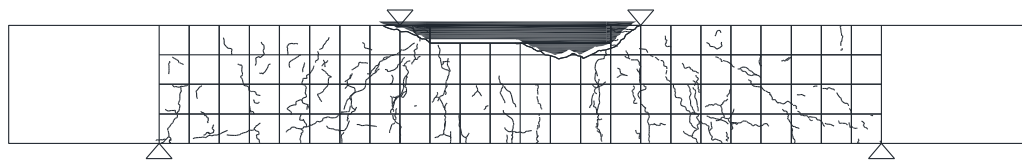
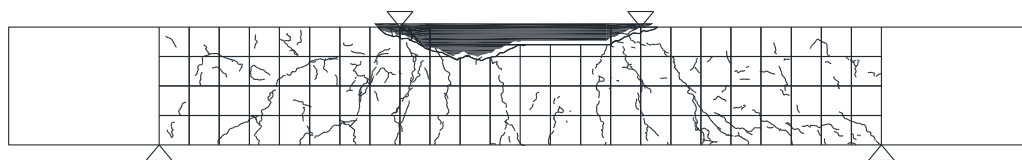
図 3-13 ジャンカ梁試験体のひび割れ状況



a. ひび割れ発生時

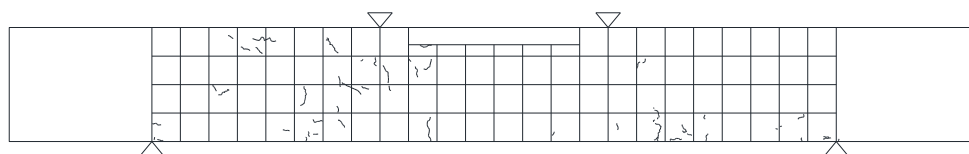
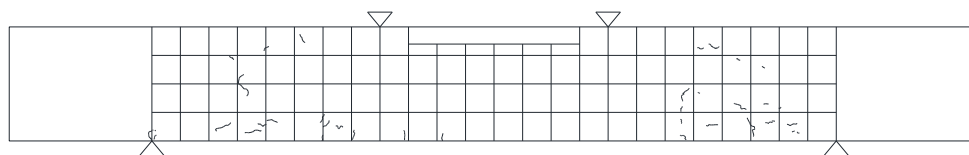


b. 降伏時

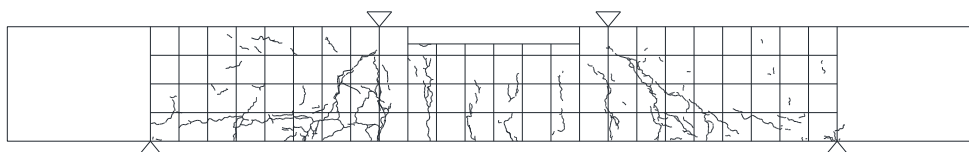
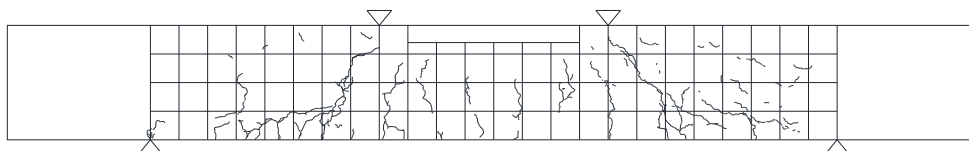


c. 終局時

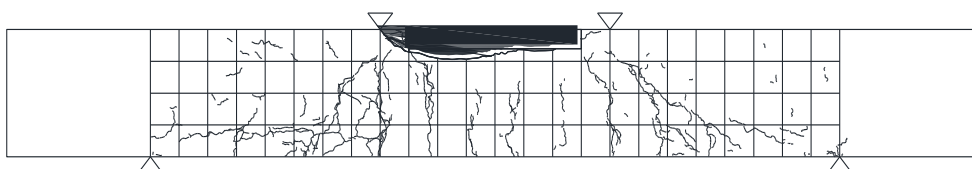
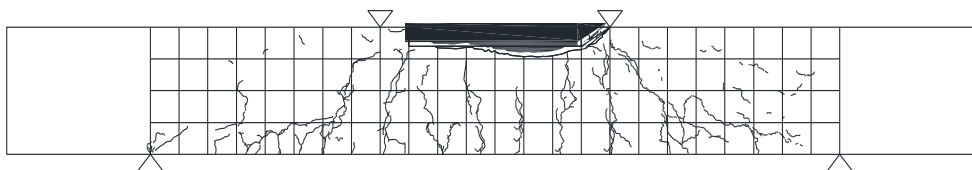
図 3-14 補修付着良好梁試験体のひび割れ状況



a. ひび割れ発生時



b. 降伏時



c. 終局時

図 3-15 補修付着不良梁試験体のひび割れ状況

(2) 曲げ耐力

図 3-16 に各試験体の荷重-たわみ関係を、図 3-17 に曲げモーメント-曲率関係を示す。なお、図 3-17 には解析結果も併示する。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、コンクリートと鉄筋の完全付着を仮定したうえで、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線を図 3-18 のようなバイリニアモデル（コンクリートの圧壊時ひずみは 0.3%）に単純化し、図 3-19 のように梁中央の断面の変形・応力分布を仮定してモーメント - 曲率の関係を求めた。

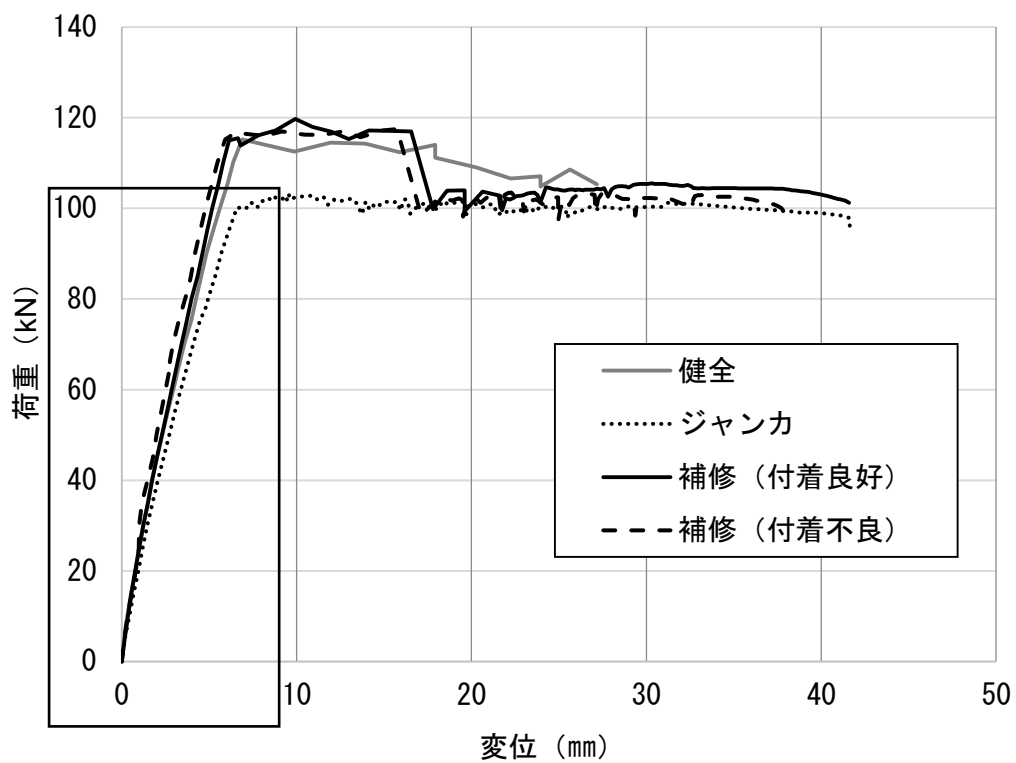
図 3-16 より、ND 健全試験体は、最大耐力が 115.2kN を占め、引張鉄筋の降伏荷重ともなった。張鉄筋比が大きいことより鉄筋の降伏直後にコンクリートが降伏し、その後耐力が上昇せず徐々に耐力が低下し、圧縮縁の等曲げ区間コンクリートが圧壊するまで変形のみ緩やかに進展して終局破壊に到達した。

D ジャンカ試験体は、最大耐力が約 103.3kN となり、ND の健全試験体と比べて若干低い結果となったことが分かる。また、補修試験体の場合、R 試験体は ND の健全試験体より多少最大耐力が大きい結果となり、119.7kN を占めた。RB の場合は R 試験体と同等な最大耐力が得られた。さらに、補修の場合は、いずれの試験体にしても鉄筋が降伏し最大耐力に達した後、変位 15mm を超えた直後に D ジャンカ試験体の最大耐力と同等またはそれ以上にまで急速な耐力低下が見られ、R に比べて RB の耐力低下が若干早めに生じた。この現象は、今回の実験に使用した補修モルタルの特性による局所的な破壊や補修界面での付着破壊が原因なのではないかと考えられる。

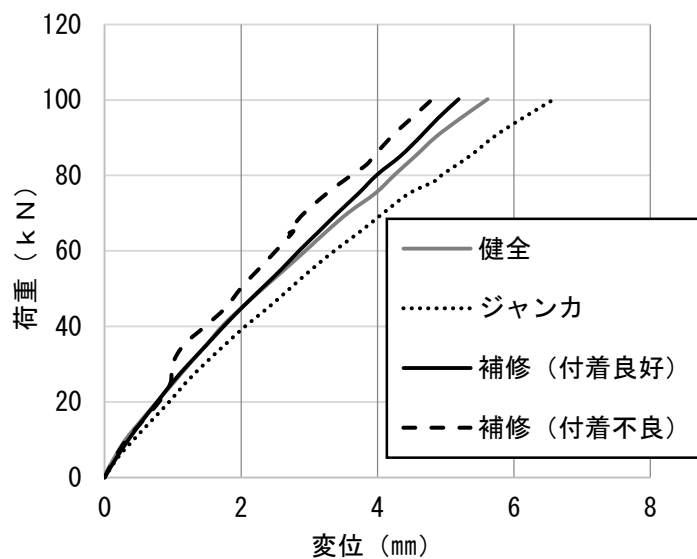
また、R 試験体と RB 試験体の力学的挙動には、コンクリートと補修モルタルの界面の施工状況を明らかに違った工法としたことにかかわらずその差異があまり見られなかった。その原因として考えるのは箱型にした補修形状による周囲付近のコンクリートからの拘束力の効果である。

各梁試験体の引張鉄筋が降伏するまでの曲線の傾きに注目すると、D の試験体は一番小さくて、補修試験体が最も大きいことより、梁試験体の圧縮縁中央部分のコンクリート性状によってはりの曲げ剛性が異なる結果が得られるといえる。

図 3-19 にモーメント - 圧縮縁ひずみ関係を、図 3-20 にモーメント - 曲率の関係を自製の測定器で求められた結果を、そして図 3-21 に曲率測定器とひずみ値より計算したモーメント曲率の結果の比較を示す。図 3-20 と図 3-21 より、曲率測定器の不具合で適切な結果が得られなかったため、本実験で取り扱うモーメント - 曲率関係の実験値はひずみゲージの値を使用して計算した結果とする。そこで、実験結果と曲げ解析の結果を比較したところ、若干ばらつきはあるものの、曲げ剛性および降伏耐力の値は概ね一致している。



a) 全体



b) a) の口で囲まれた部分の拡大

図 3-16 荷重 - 変位の関係

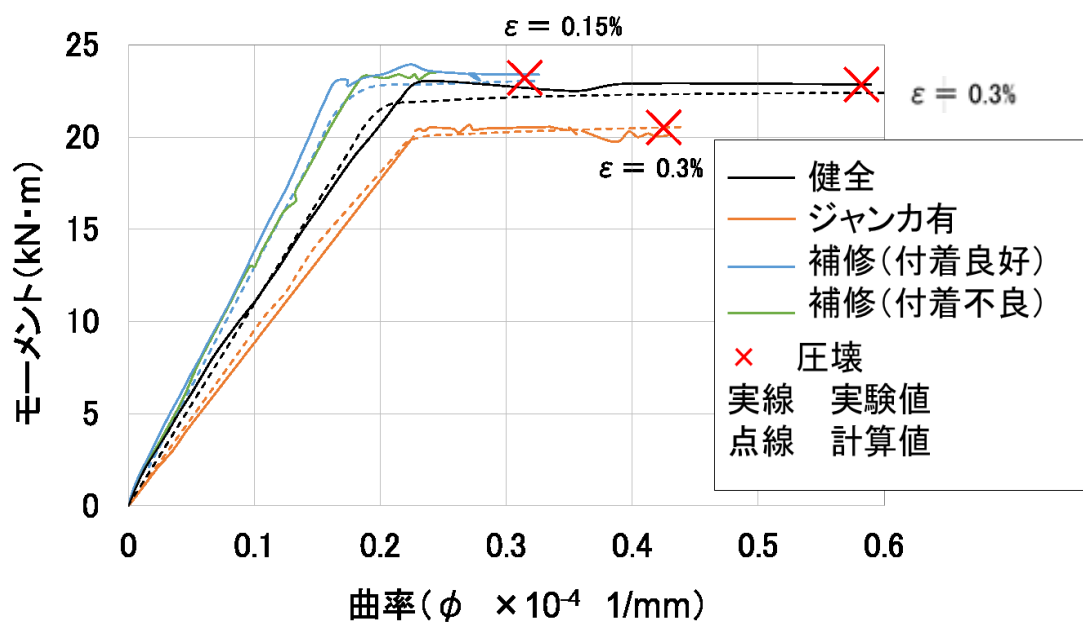


図 3-17 モーメント - 曲率 (実験値と計算値)

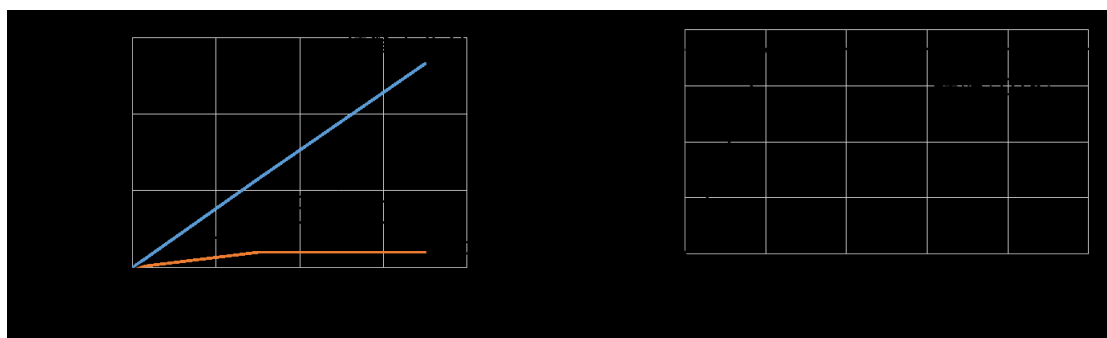


図3-18 応力 - ひずみのバイリニアモデル化

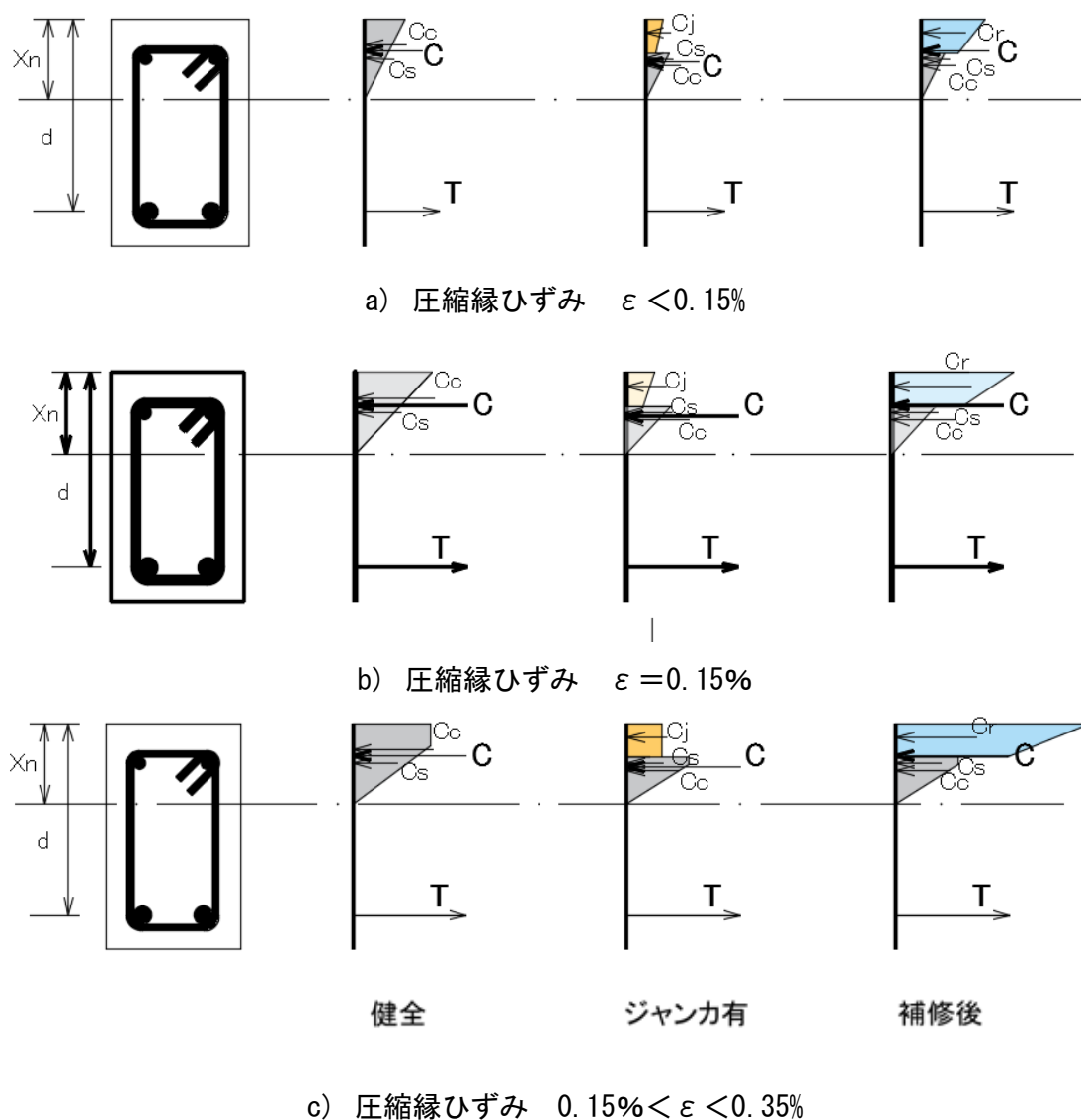


図3-18 梁中央の断面における応力分布の仮定

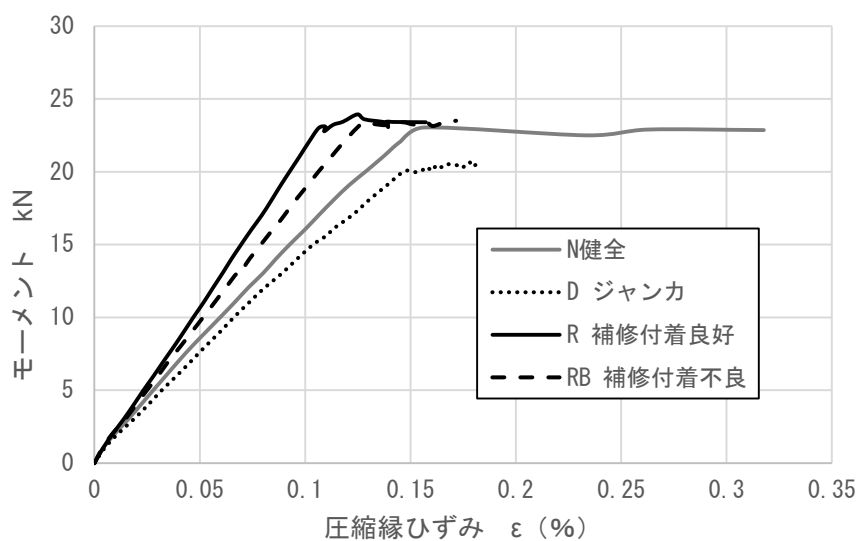


図 3-19 モーメント - 圧縮縁ひずみ関係

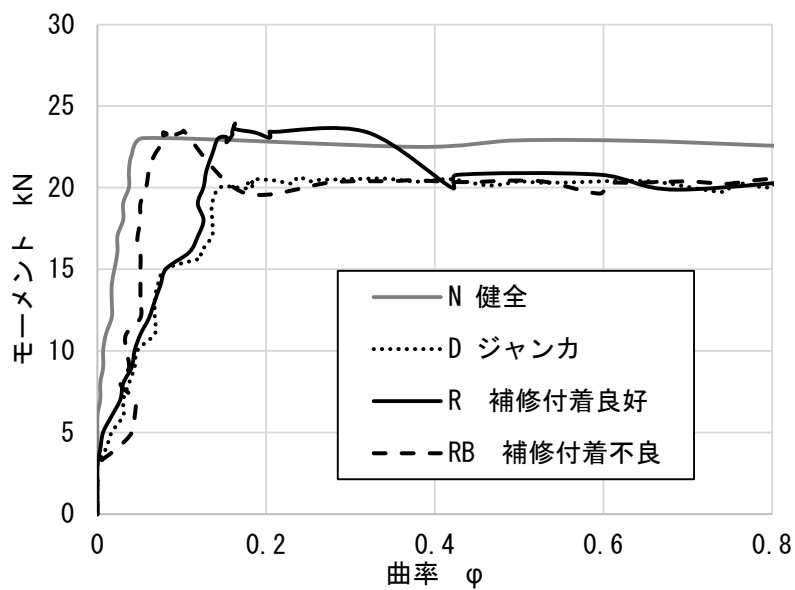


図 3-20 モーメント - 曲率関係 (曲率測定器)

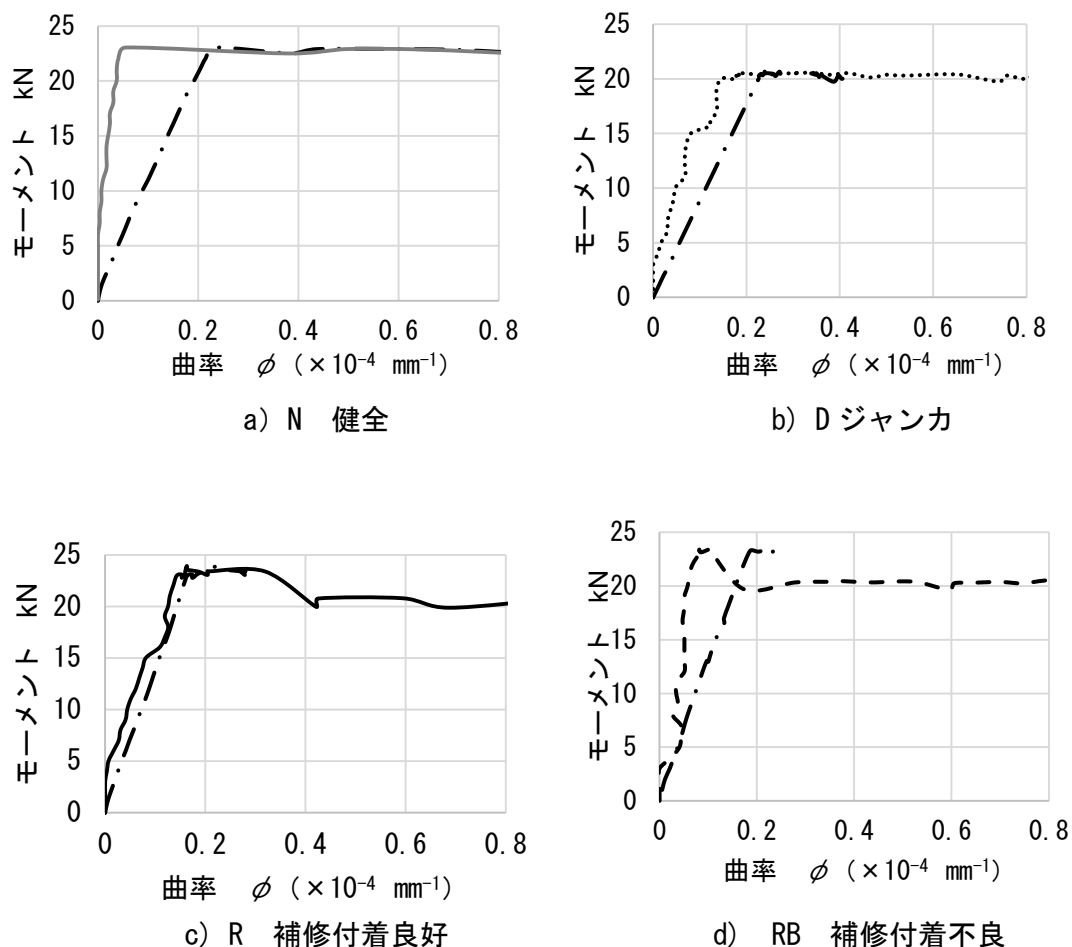


図 3-21 モーメント - 曲率関係
(曲率測定器の結果とひずみ値より計算した結果の比較)

3.4 まとめ

本実験の範囲では以下のような知見が得られた。

- 1) RC 梁の等曲げ区間圧縮縁の中央部分に初期欠陥（ジャンカ）が発生した場合，梁全体の最大耐力および曲げ剛性が低下することを確認した。
- 2) 欠陥部に対し高強度無収縮モルタルを使用して断面修復した場合，健全な状態と同等レベルまで耐力の回復が認められた。ただし，終局時には無収縮モルタルの局所的な破壊により急激な耐力低下を生じた。
- 3) 付着界面処理の違いによる影響について，破壊性状において認められたが，耐力においてはあまり確認できなかった。

第 4 章

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

4.1 概説

第3章では、圧縮縁中央にジャンカのような初期欠陥の発生がある場合と、それに無収縮モルタルを用いて断面修復した場合の曲げ部材の挙動および破壊性状に関する基礎的な検討を行った。結果として、ジャンカがあると耐力および剛性が低下するのに対し、断面修復した場合は健全な状態まで耐力の改善が確認できたが、ヤング係数が大きく高強度型の補修モルタルを使用したため、降伏後局所的な破壊により急激な耐力低下の現象が見られた。第4章では、GP モルタルを用いて断面修復した場合の梁部材の曲げ挙動を明らかにすることを目的として、健全な状態と、無収縮モルタルを使用した場合と曲げ試験結果を比較することで検討を行う。

4.2 実験概要

4.2.1 実験の要因および水準

表4-1に本実験の要因と水準を示す。要因としては、断面修復材料の種類、補修深さおよび補修界面の処理条件を取り上げた。断面修復材料は、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倍くらい大きいGPMの3種類とした。補修の深さは、GPの場合はコンクリートと鉄筋との付着が良いということから補修後の挙動に及ぼす鉄筋との付着の影響も検討するため、30mmと60mmとした。また、補修界面の処理の違い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を取り上げた。なお、付着が良好な状態とは、界面の状態が凸凹で粗く、補修する前に十分に水分の供給を行った。また、不良の場合は、打設の段階で界面を平滑に仕上がり、水分の供給を行わずに補修を行ったものである。

表 4-1 要因および水準

| 要因 | 水準 |
|----------------|--------------------------------------|
| 断面修復材料 | 無収縮モルタル；GPモルタル |
| 補修の深さ | 30 mm；60 mm |
| 補修試験体の付着界面処理条件 | 付着良好（粗面＋湿潤状態）； 付着不良（平滑な状態＋ドライアウト） |

表4-2に各梁試験体の詳細

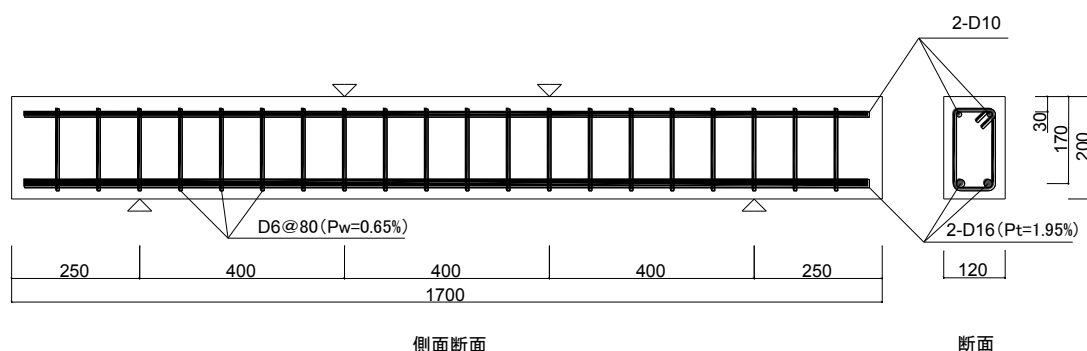
| No | 試験体 | 状態 | | | | |
|----|----------|----|------------------------------|--------|---------------------------|--------------------------|
| | | 補修 | 補修材料 | 程度 | 付着状況 | |
| 1 | N | 健全 | - | - | - | |
| 2 | GPM30 | あり | 30N/mm ² のGPモルタル | 深さ30mm | 良好 (界面が粗面で 十分な水分供給) | |
| 3 | GPM60 | | 60N/mm ² のGPモルタル | | | |
| 4 | NSM | | 30N/mm ² の無収縮モルタル | | | |
| 5 | GPM30-60 | | 30N/mm ² のGPモルタル | 深さ60mm | | |
| 6 | NSM-60 | | 30N/mm ² の無収縮モルタル | | | |
| 7 | GPM30-B | | 30N/mm ² のGPモルタル | 深さ30mm | | 不良 (平滑な界面で ドライアウト) |
| 8 | NSM-B | | 30N/mm ² の無収縮モルタル | | | |

4.2.2 試験体概要

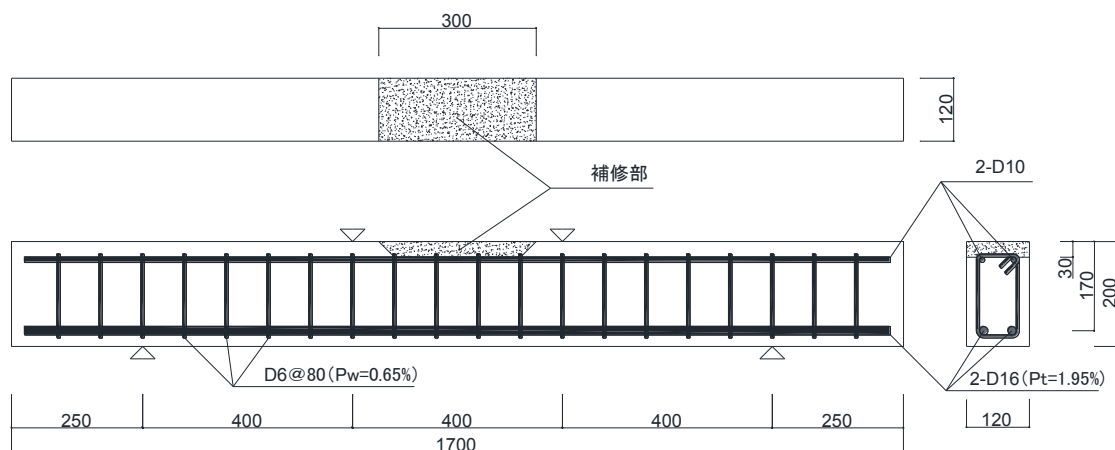
(1) 試験体の寸法および形状

梁試験体の形状、寸法及び配筋の状況を図4-1に示す。今回の実験に使用したすべての梁試験体は、全長1700mm、幅120mm、高さ200mm、そして等曲げモーメント区間を400mm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80mmで配筋した。すべての梁試験体は、最終破壊形式を曲げ破壊となるように設計した。

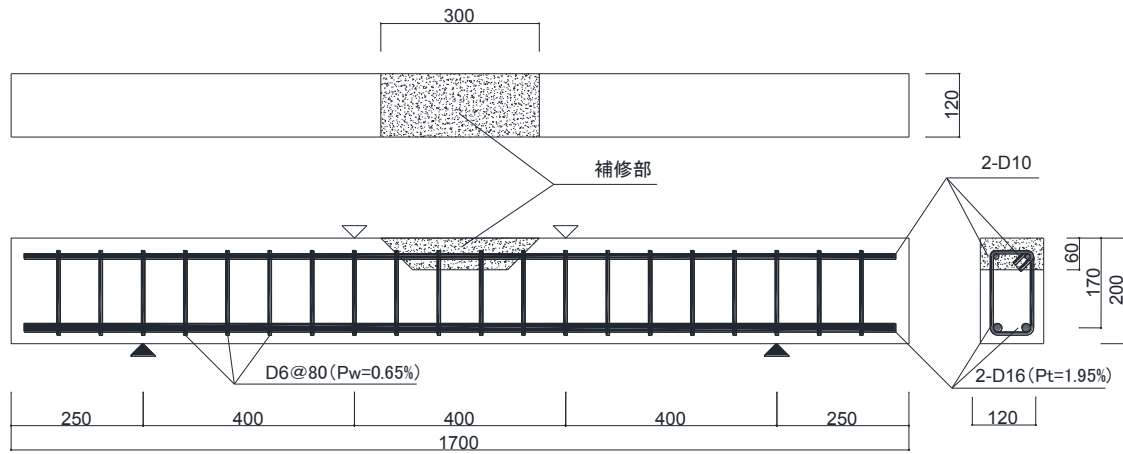
補修を設けた箇所は、圧縮縁中央とした。その寸法は、GPM30-60およびRM-60の場合は深さが60mmでそれ以外の試験体は30mm、幅は梁幅と同様で120mm、そして既往の研究より規模が同じ程度の梁の場合曲げ試験で圧縮破壊される等曲げモーメント区間内のコンクリートの範囲が約250mm~350mmとなることから長さを300mmとした。また、補修箇所の形状は、台形とした。



a. N試験体（健全）



b. GPM30, GPM60, NSM, GPM30-B および RM-B



c. GPM30-60 および NSM-60

図4-1 試験体の形状および配筋

(2) 使用材料およびその特性

1) コンクリート

表4-3 コンクリートの調合表を示す。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用して普通コンクリートとし、呼び強度が24 N/mm²、そして最大骨材寸法が25mmで設計した。

図4-2にコンクリートの圧縮試験の応力ひずみ関係を示す。表4-4に圧縮試験結果を示す。なお、圧縮試験は、载荷には万能試験機を使用し、ひずみの測定はワイヤーストレインゲージを用いて測定を行った。また、圧縮応力の結果は円柱供試体の6体の平均とし、ヤング係数は3体の平均の結果とした。

表 4-3 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 (%) | 単体量 (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 | 3.31 | 16.5 | 5.5 | 22 |

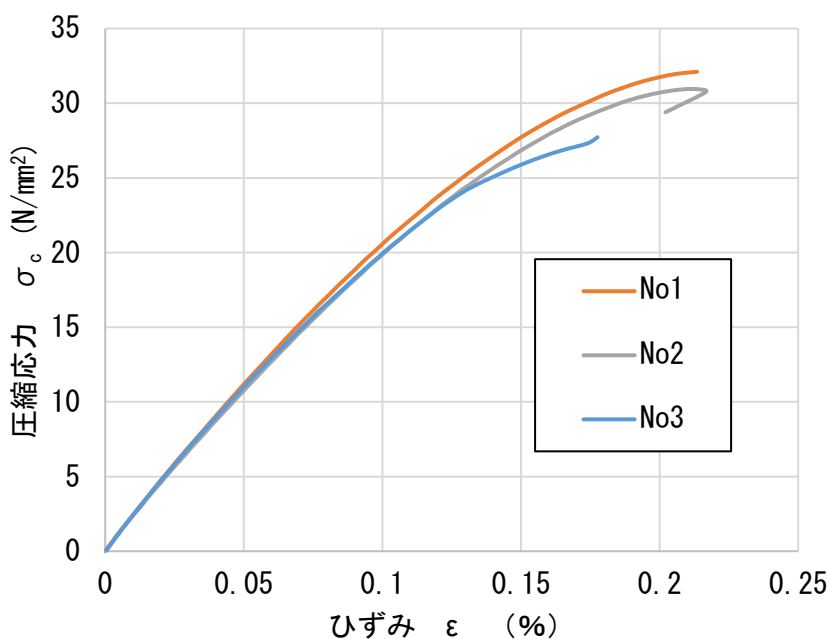


図 4-2 応力 - ひずみ関係

表 4-4 コンクリートの圧縮試験結果

| No | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) |
|----|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 32.11 | 22.47 |
| 2 | 29.15 | 22.34 |
| 3 | 30.94 | 21.62 |
| 4 | 28.90 | |
| 5 | 30.78 | |
| 6 | 30.21 | |
| 平均 | 30.35 | 22.14 |

2) GP モルタル

表 4-5 に GP モルタルの調合を示す。GP モルタルの圧縮試験は、φ50×100 の円柱供試体を使用した。圧縮応力はその 6 体の円柱供試体の圧縮試験結果の平均とし、また、ヤング係数はワイヤーストレインゲージを貼り付けた 3 体の結果を平均化したものとした。表 4-6 と表 4-7 に各種の GP モルタルの圧縮試験結果を示す。また、図 4-3 と図 4-4 には応力ひずみ関係を示す。

表 4-5 GP モルタルの調合

| Fc (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) | | 砂 (S) | |
| | | | | FA | BS | 水ガラス | NaOH | | |
| 30 | 0.60 | 0.1 | 0.9 | 448.57 | 64.19 | 215.81 | 91.83 | 1435.66 | 239 |
| 60 | 0.60 | 0.3 | 0.7 | 360.45 | 154.47 | 216.73 | 92.22 | 1441.77 | 246 |

表 4-6 GPM30 の圧縮試験結果

| No | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) |
|----|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 34.59 | 15.33 |
| 2 | 32.33 | 15.26 |
| 3 | 35.52 | 15.10 |
| 4 | 32.14 | |
| 5 | 32.84 | |
| 6 | 33.00 | |
| 平均 | 33.40 | 15.23 |

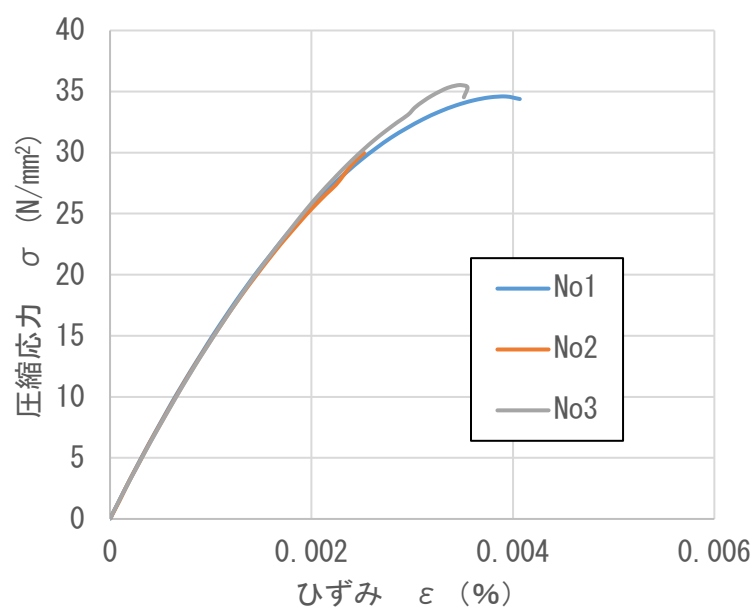


図 4-3 GPM30 の応力 - ひずみ関係

表 4-7 GPM60 の圧縮試験結果

| No | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) |
|----|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 57.19 | 19.04 |
| 2 | 58.09 | 18.59 |

| | | |
|----|-------|-------|
| 3 | 55.18 | 19.00 |
| 平均 | 56.82 | 18.88 |

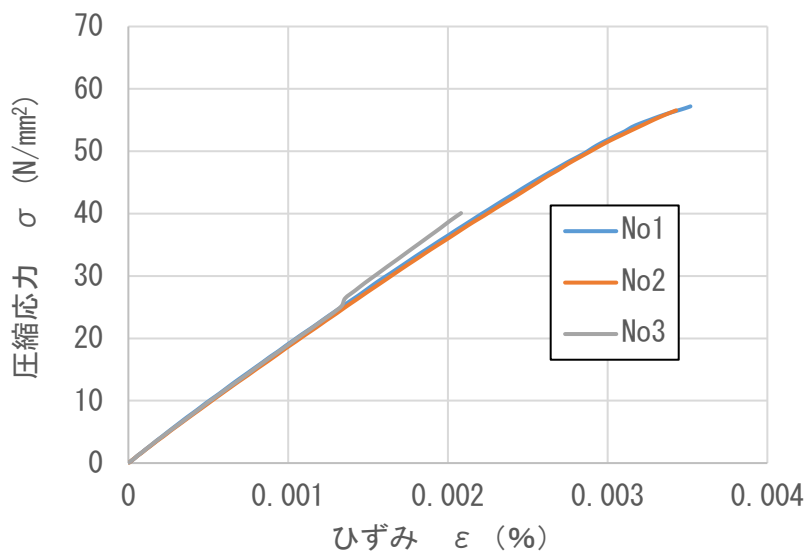


図 4-4 GPM60 の応力 - ひずみ関係

3) 無収縮モルタル

表 4-8 に無収縮モルタルの調合を示す。また、表 4-9 無収縮モルタルの圧縮試験結果を、図 4-5 に応力ひずみ関係を示す。本実験で使用した無収縮モルタルは第 3 章で使用したものと同じであるが、本実験では母体コンクリートと同等の強度のものを使用するため、単位水量および細骨材量を増加して目標強度まで低下させた。

表 4-8 無収縮モルタルの調合

| F _c (N/mm ²) | W/C (%) | s/c | 単位量 (kg/m ³) | | | フロー値 (mm) |
|--|------------|-----|--------------------------|--------|---------|--------------|
| | | | w | c | s | |
| 30 | 0.4 | 2.5 | 212.67 | 531.67 | 1329.17 | 127.4 |

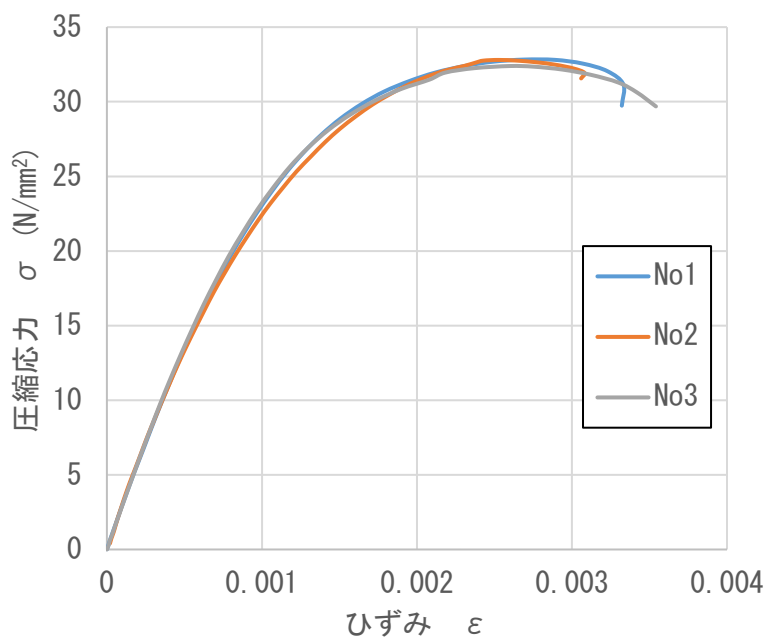


図 4-5 NSM の応力 - ひずみ関係

表 4-9 GPM60 の圧縮試験結果

| No | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) |
|----|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 32.39 | 28.40 |
| 2 | 32.83 | 27.64 |
| 3 | 32.80 | 27.97 |
| 4 | 32.58 | |
| 5 | 31.69 | |
| 6 | 29.77 | |
| 平均 | 32.01 | 28.00 |

4) 鉄筋の特性

表 4-9 使用鉄筋の詳細

| 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 |

5) まとめ

表4-10には各材料の特性を、図4-6に各材料の応力ひずみ関係を併せて示す。

表4-10 各材料の特性

| 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 | 30.35 | 2.87 | 22.14 |
| GP30モルタル | 33.40 | 2.88 | 15.23 |
| GP60モルタル | 56.82 | 4.13 | 18.88 |
| 無収縮モルタル | 32.01 | 3.70 | 28.00 |

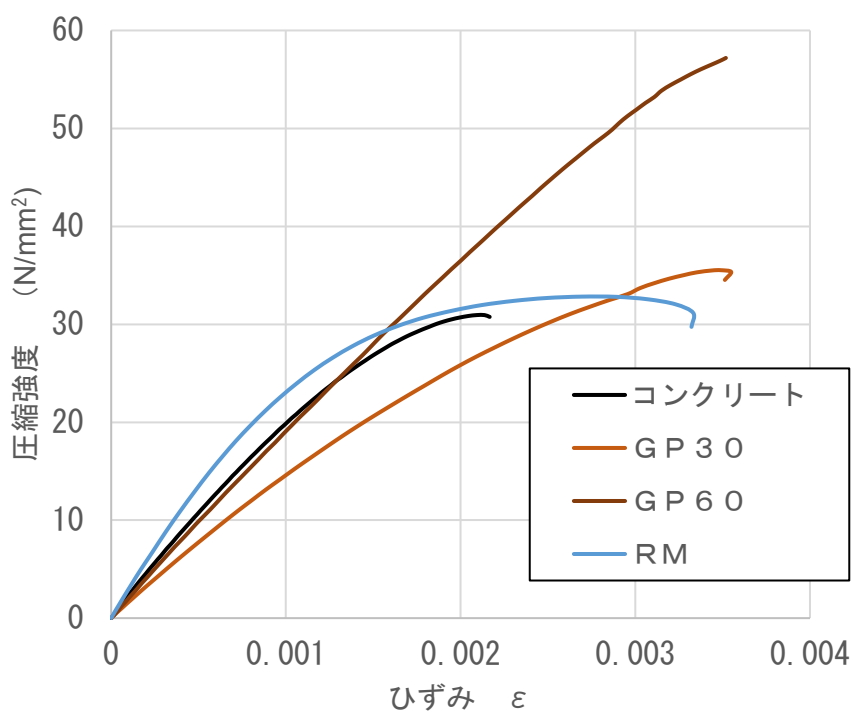


図4-6 各材料の応力 - ひずみ関係

4.2.4 試験方法

図 4-7 に曲げ試験の概要を示す。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 等分点荷重とする。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) 程度とする。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、及び破壊性状を印、写真および動画で記録する。

梁中央部の変位量の測定は、梁試験体のスパン中央部に設置するレーザー変位計と両支点に設置する高感度変位計によりたわみを測定する方法を採用する。中央断面ひずみ分布は、ワイヤーストレインゲージを用いて図 4-8 のように貼り付けをして測定を行った。

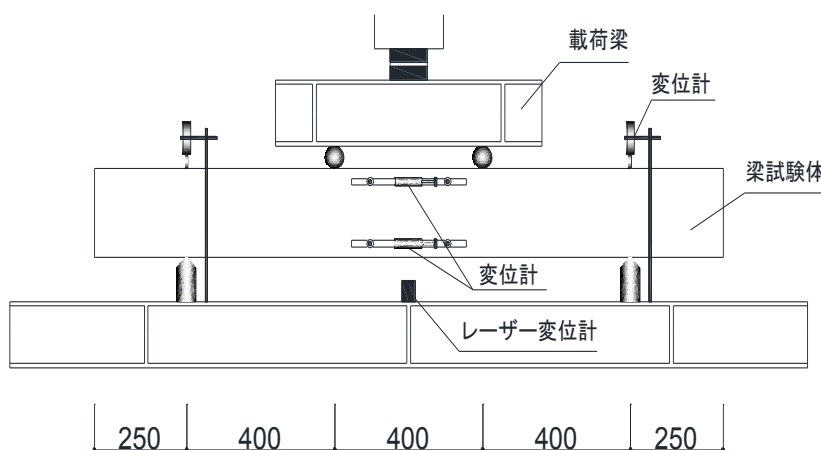


図 4-7 曲げ試験概略図

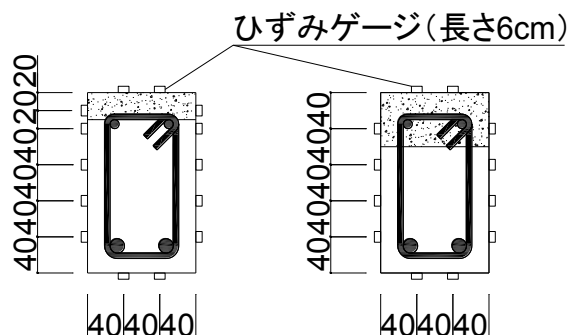


図 4-8 ひずみゲージの貼付図

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 ひび割れ発生状況および破壊性状

表 4 - 11 に曲げ試験終了後の等曲げモーメント区間の破壊状況を示す。また、図 4-9 に実験終了時の破壊性状を示す。

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され、耐力が低下して終局破壊に至ったという典型的な曲げ破壊をした。

N 健全試験体は、荷重 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、NSM 試験体は、約 17.5kN のときにひび割れが発生した。荷重の増加とともに、ひび割れの進展は確認できたが、補修部分あるいは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。梁全体が曲げ降伏をした後、梁中央変位が約 10mm たわんだところで補修付近コンクリートと補修界面にひび割れが発生し、曲げ変形とともにひび割れ幅が増大して補修界面が剥がれ、曲げ荷重ともに付着の良好部分による拘束で補修部分の破壊が生じた。その後、補修部分下のコンクリートが負担し終局破壊に至った。


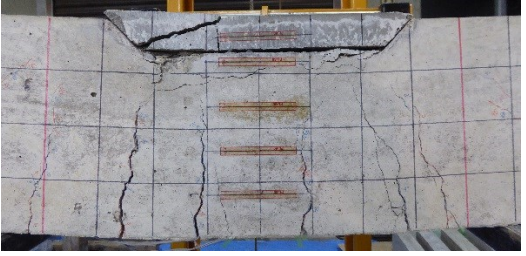
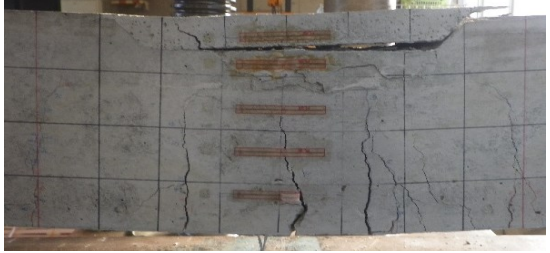
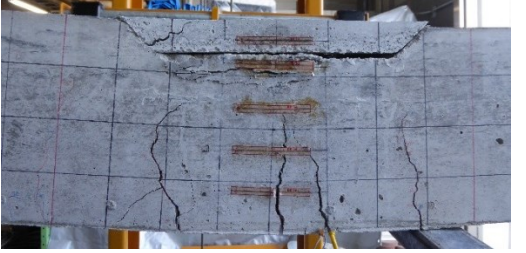
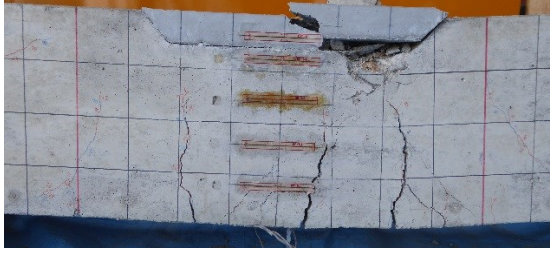
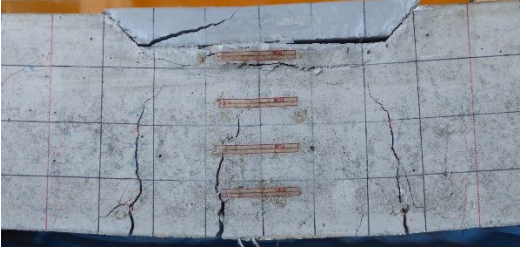
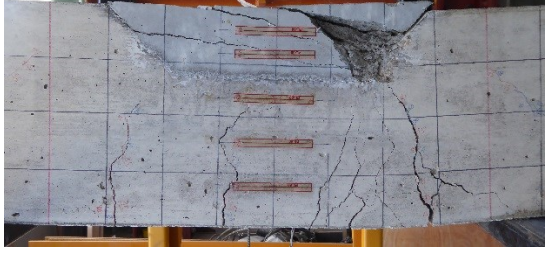
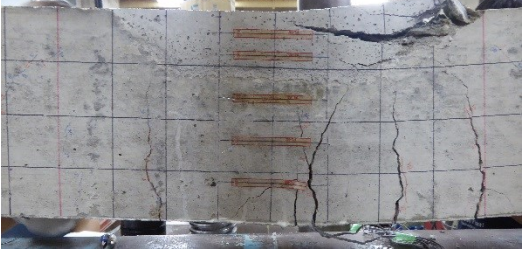
NSM-B 試験体の場合は、降伏前は NSM と同様な挙動を得られたが、降伏後たわみが約 8 mm の時に補修界面と補修モルタル自体にひび割れが発生し、急速な進展をした。付着界面の処理が悪いため、補修界面全体が剥がれ、曲げ荷重で上に押し出される状態となり、下部分のコンクリートの圧縮破壊とともに終局に到達した。

GPM30 と GPM30-B は健全の場合と比較して、最初のひび割れ発生が若干低い荷重で確認できた。GPM30 の場合は 15kN で、GPM30-B 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ひび割れの発生が確認できたが、GPM30-B の場合のほうが顕著であった。最終的には、GPM30 の場合、片側に荷重が偏り、母体から補修部分が剥がれたが、もう片方は付着が少し良好な状態にあるため、真ん中当たりでモルタルが破壊した。GPM30-B の場合は、補修界面全体にそって入ったひび割れで曲げ変形とともに母体から補修部分が剥がれて外側に押し出される状態となり、曲げ荷重によって GP モルタルに斜めひび割れが入って破壊した。

GPM60 試験体は、荷重が約 15kN のときに最初のひび割れが確認でき、荷重とともにひび割れが進展していくが、補修部分の強度が大きいため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。

60mm の深い部分まで補修を施した GPM30-60 と NSM-60 は、同様な挙動が得られた。降伏後、両者とも補修付近のコンクリートや界面の斜め部分の剥がれは確認できたが、深い部分の付着がまだ良好な状態にあるため、曲げ荷重による働きで補修モルタルに亀裂が入って破壊に至った。

表 4-11 終局時の等曲げ区間の破壊状況

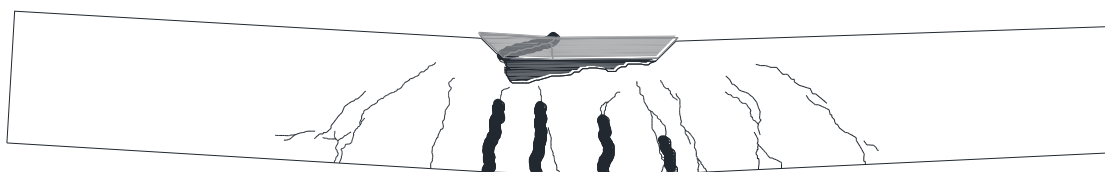
| | |
|---|--|
| 1. N | 2. GPM60 |
|  |  |
| 3. NSM | 4. NSM-B |
|  |  |
| 5. GPM30 | 6. GPM30-B |
|  |  |
| 7. GPM30-60 | 8. NSM-60 |
|  |  |



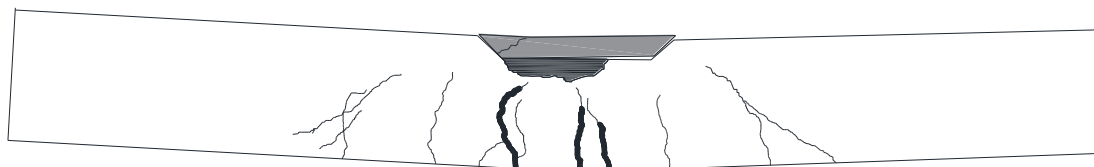
a. N 試験体



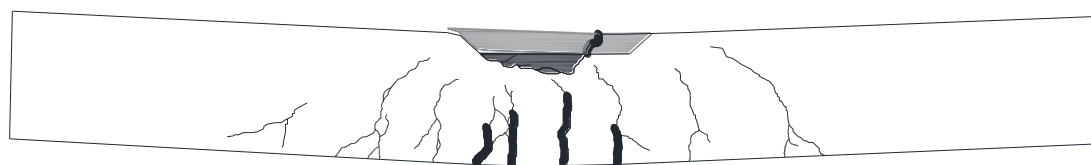
b. GPM30 試験体



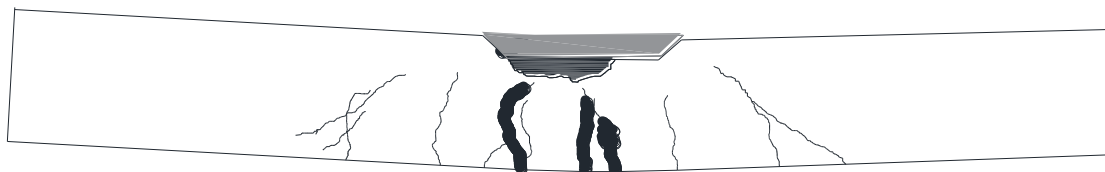
c. GPM60 試験体



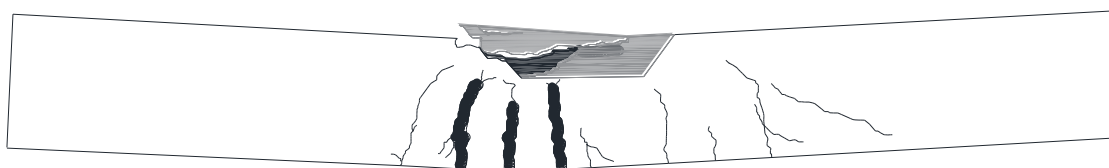
d. GPM30-B 試験体



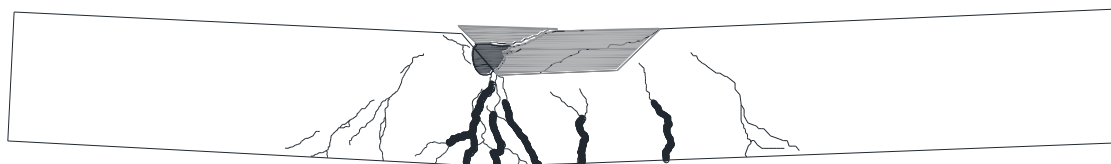
e. NSM 試験体



f. NSM-B 試験体



g. GPM30-60 試験体



h. NSM-60 試験体

図 4-9 ひび割れおよび破壊状況（曲げ試験終了時）

4.3.2 曲げ耐力

表 4-12 に曲げ試験結果を示す。図 4-10～図 4-12 に梁試験体の荷重 - たわみ関係を示す。実験の結果より得られた荷重 - 引張鉄筋ひずみを図 4-13 に、荷重 - 圧縮縁ひずみを図 4-14 に示す。また、図 4-15 にモーメント - 曲率関係を示す。なお、図 4-15 には解析結果も併示する。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、コンクリートと鉄筋の完全付着を仮定したうえで、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 0.3%）に単純化した。詳しくは第 3 章の実験結果で参照されたい。

ジオポリマーモルタルで断面修復した場合、強度レベルを問わず、健全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。GPM30 と GPM30-B の荷重 - たわみ関係はほぼ同様な曲線を描いた。両者とも降伏を達成した後、圧縮側の GP モルタルも降伏して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、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、降伏後再び耐力が健全な状態の最大耐力と同等レベルまで増加したが、約 13mm たわんだところで耐力が 90 kN 前後まで急低下し、そこから荷重が増加せずに変形だけが進んで荷重が一定となった。

無収縮モルタルで補修した場合、NSM と NSM-B は健全な状態の結果と同等の降伏荷重および最大荷重を得ることができたが、たわみが約 10mm 前後である荷重まで耐力が低下して横倍となった。これは、無収縮モルタルのヤング係数がコンクリートより大きいこと変形能力が乏しくひび割れが入るとすぐに破壊に至ることや、補修界面での付着破壊などが原因だと考えられる。

また、圧縮側の鉄筋のした部分まで補修を施した試験体は、GPM30-60 の場合は健全と比較して、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は耐力の増加が確認できた。また、圧縮側の補修モルタルが降伏して破壊した時点での耐力の低下現象が急激であることも確認できた。それに対し、NSM-60 は健全の結果より降伏荷重および最大荷重が大きく、圧縮側の補修モルタルの降伏後も緩やかな低下し方をした。

さらに、図 4-13 によると、初期載荷からひび割れ発生まではコンクリートの引張強度が荷重を負担したため、各試験体は同様な曲線を描いた。ひび割れ発生後、曲線が徐々に傾き、一番傾いているのは付着界面の処理が不良の試験体で、その次がコンクリート同程度強度の GP モルタルで補修した試験体である。各段階の荷重における引張鉄筋ひずみの値に極わずかな差異は認められないが、全体で見ればほぼ同様であるといえる。また、図 4-14 によると、GP モルタルで補修した場合の試験体は、コンクリートおよび無収縮モルタルに比べ GP モルタルのヤング係数が小さいため、ひび割れ発生後の圧縮縁ひずみが徐々に大きくなるのが分かる。

図4-15によれば、曲げモーメント - 曲率関係の実験より得られた結果と、曲げ解析により計算した結果は、特に降伏前の初期剛性の部分がほぼ一致している。なお、図4-15に示している実験値は、圧縮縁のひずみ値と引張鉄筋ひずみ値で計算し、最大耐力時の結果までだけである。

表 4-12 曲げ試験結果一覧

| No | 試験体 | 曲げひび割れ発生荷重 (kN) | 降伏荷重 (kN) | 最大荷重 (kN) |
|----|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| 1 | N | 20 | 103.5 | 103.5 |
| 2 | GPM30 | 15 | 94.4 | 95.9 |
| 3 | GPM60 | 15 | 98.5 | 102.4 |
| 4 | NSM | 17.5 | 104 | 104 |
| 5 | GP30-60 | 15 | 98.5 | 101.9 |
| 6 | NSM-60 | 17.5 | 104.3 | 106.7 |
| 7 | GPM30 - B | 12.5 | 98.5 | 98.5 |
| 8 | NSM - B | 15 | 103.4 | 103.4 |

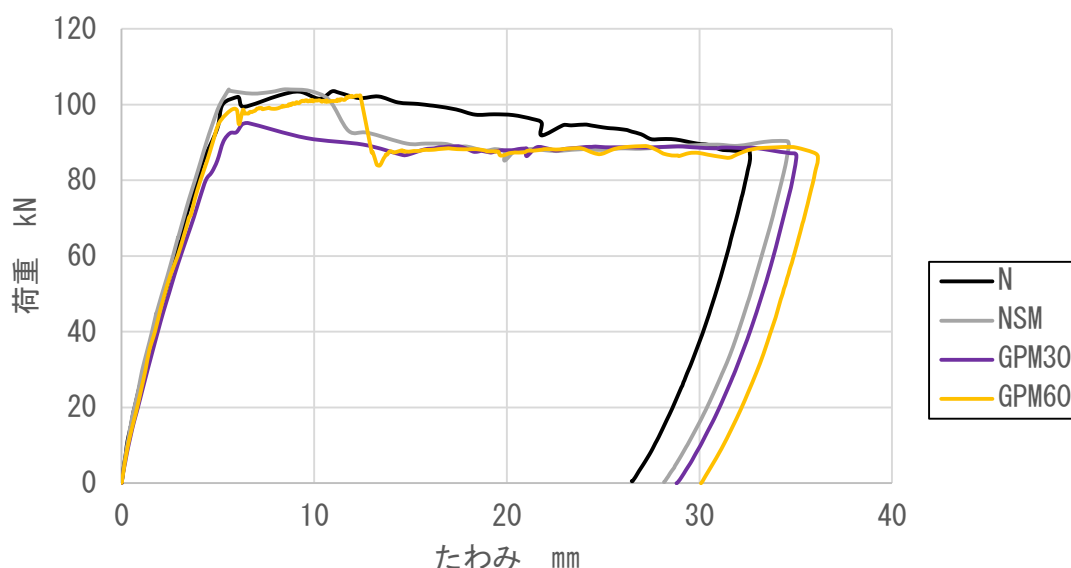


図 4-10 N, NSM, GPM30 および GPM60 の荷重 - たわみ関係

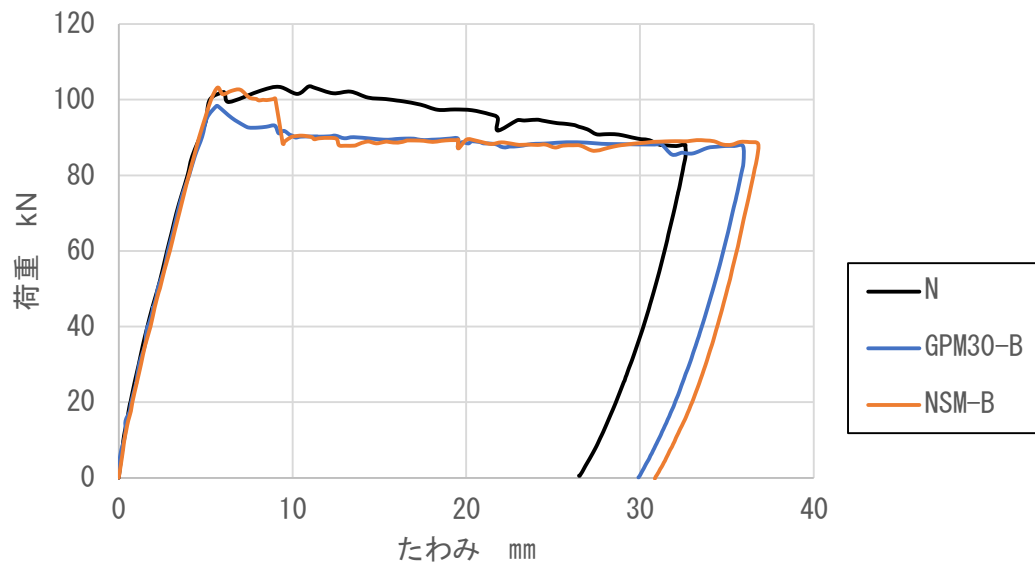


図 4-11 N, GPM30-B および NSM-B の荷重 - たわみ関係

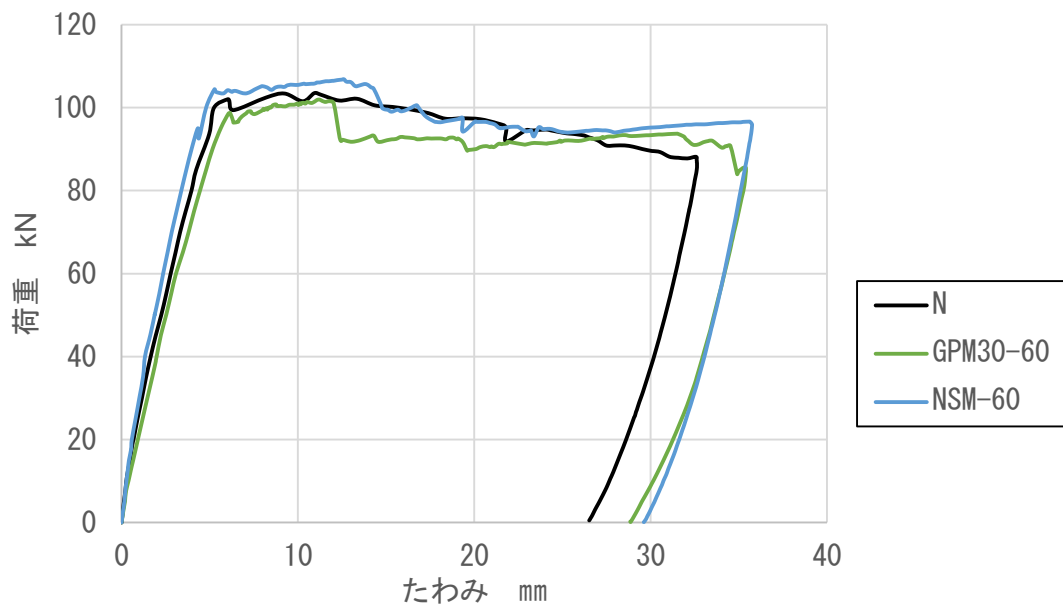


図 4-12 N, GPM30-60 および NSM-60 の荷重 - たわみ関係

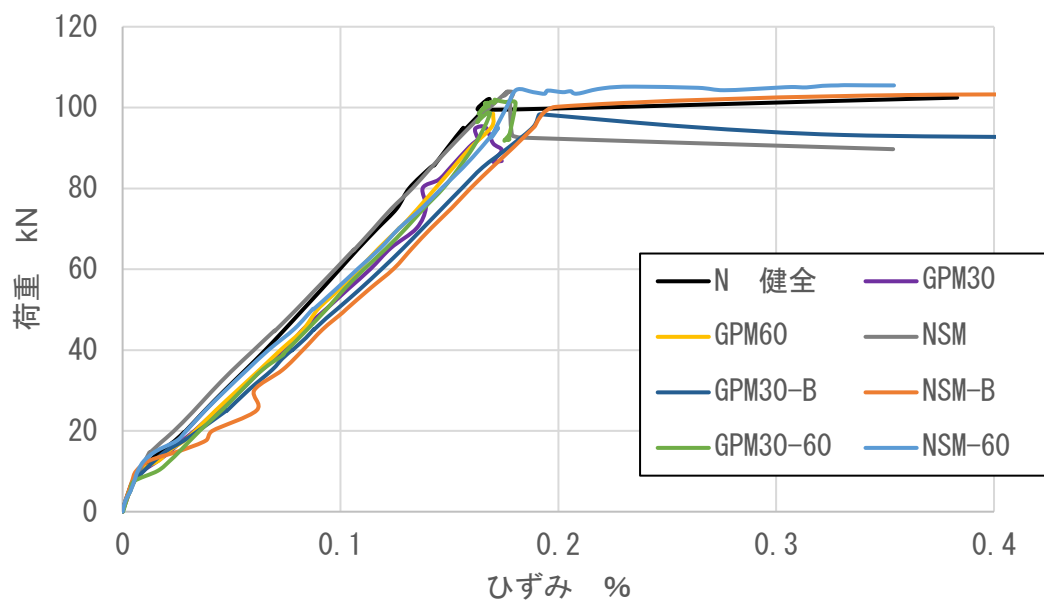


図4-13 荷重 - 引張鉄筋ひずみ関係

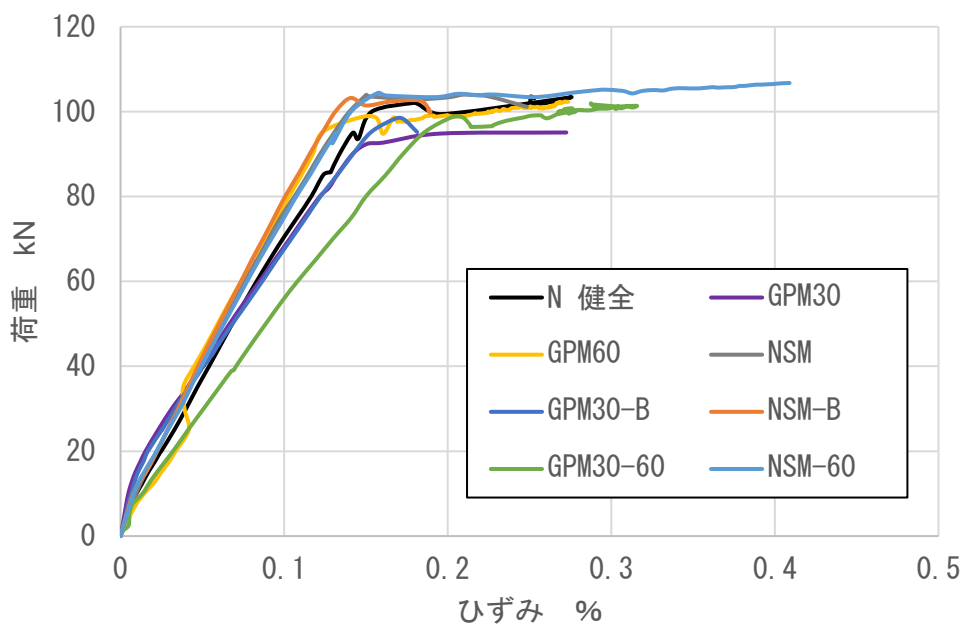


図4-14 荷重 - 圧縮縁ひずみ関係

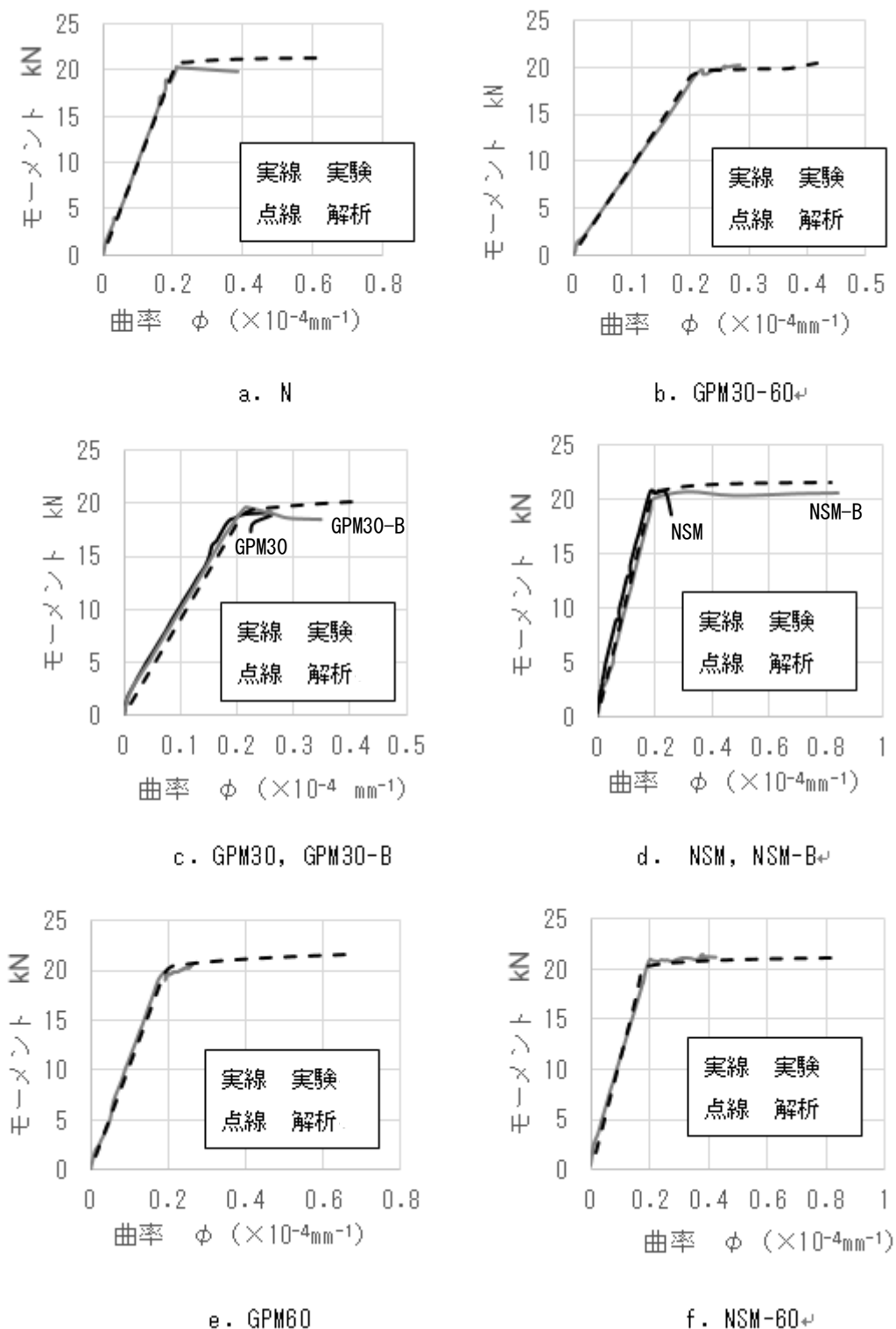


図4-15 曲げモーメント - 曲率関係

4.4 まとめ

本実験の範囲では以下のような知見が得られた。

- 1) 母体コンクリートと同等強度の GP モルタルを断面修復に用いた場合は、健全と無収縮モルタルで補修した場合と比較して、ヤング係数が低いため曲げ剛性が若干低下し、降伏荷重や最大耐力が低い結果となった。また、降伏後の耐力増加が得られず低下した。
- 2) 母体コンクリートと同等強度の GP モルタルで深さ 60 mmまで補修した場合と、母体コンクリートより強度が大きい GP モルタルで補修した場合は、曲げ降伏後耐力の増加が確認でき、補修効果が認められた。
- 3) 付着界面処理の違いによる影響について、耐力性状において GP モルタルを使用した場合は違いがあまり見られなかった。一方、無収縮モルタルで補修した場合、付着界面が不良の試験体においては、良好な試験体に比較して最大耐力に達した後耐力の低下が早い段階に起きた。また、破壊性状においては、どの補修材料を使用した場合においても影響は確認できた。
- 4) 補修界面の処理状況および補修材料に関わらず、補修界面における付着破壊は深く補修した試験体を除き、どの試験体においても確認できた。それにより、母体コンクリートとの一体性が失うとともに、曲げ荷重の作用による補修モルタルの局所的な破壊が生じ急激な耐力低下現象を引き起こしたと考えられる。

第5章

まとめ

5.1 本研究のまとめ

本研究では、圧縮縁にジャンカがある場合と、無収縮モルタルと GP モルタルを用いて断面修復した場合の梁部材の曲げ試験を行い、その耐力性状および挙動について検討を行った。その結果、本研究の範囲において、以下のことが分かった。

1) 梁中央の圧縮縁にジャンカのような欠陥が存在する場合、梁の曲げ耐力や初期剛性が低下する。

2) 無収縮モルタルで断面修復した場合、健全な状態と同様な荷重-たわみの結果が得られ、補修効果が認められたが、終局時における補修モルタルの局所的な破壊で耐力が急低下する恐れがある。

3) GP モルタルで補修した場合、GP モルタルはヤング係数が低いため、コンクリートと同じ強度のものを使用してかぶり厚さと同等の深さまで補修したときは降伏後の耐力の増加が得られず、低下した。

4) GP モルタルで補修した場合、コンクリートと同じ強度のもので圧縮鉄筋位置より深く補修したときと、コンクリートより強度が大きいもので補修した場合は、降伏後においても耐力の増加が得られ、補修効果が認められた。

5) 付着界面処理の違いによる影響は、第3章、第4章ともに耐力性状における違いはあまり見られなかったものの、破壊性状においては違いが認められた。特に第4章の台形の補修形状の場合は大きく確認できた。

6) 断面修復した RC 梁は、平面保持の仮定に加え、補修界面の付着が良好で二つの材料が一体化する条件下で、曲げ解析による耐力性状の推測が可能である。

5.2 今後の課題および展望

本研究で取り扱った GP モルタルは、強度2種類ともコンクリートや無収縮モルタルに比較してヤング係数が低く、降伏時の荷重や最大耐力の値が若干低い結果となった。そのため、GP モルタルのヤング係数を変えて、母体コンクリートと同等あるいはそれ以上のものを使用して補修した場合の部材に関する検討を行い、比較する必要があると考えている。また、本実験は柱脚に発生した欠陥の補修で軸力のほかに地震時などの水平荷重を受けたときを想定し、梁部材による検討を行ったため、実際の挙動と異なる場合があると考えられる。そのため、今後は柱の試験体を用いて検討する必要がある。

参考文献

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) CES コンサルタント技術士事務所，高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の早期劣化状況の調査方法
<http://www.ces-consult.net/concrete-rekkachousa.html>
- 3) 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査 WG 主査 野口貴文：高度経済成長期以前の鉄筋コンクリートの現状，2015
- 4) 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.1，2017
- 5) 繊維補強協会：断面修復工法の紹介，会報，2013
- 6) 林承燦，森山守，河合正則，内田裕市：HPFRCC で補修された RC 梁のひび割れ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007
- 7) 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，第 615 号，pp. 61-67，2007
- 8) 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.1，1995
- 9) 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.3，2007
- 10) 古賀一八，衣笠秀行，山本佳城，山辺智典：断面修復材によるコンクリート部材の補修に関する研究
- 11) Tanakorn Phoo-ngernkham, Vanchai Sata, Sakonwan Hanjitsuwan, Charoenchai Ridthirud, 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
- 12) 市川敬悟，畑中重光，三島直生：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究，平成 27 年度三重大学修士論文
- 13) 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
- 14) 佐々木尚美，小林薫，半井健一郎：はり下面に豆板補修箇所を有する RC はりのせん断破壊挙動に関する実験的検討，土木学会構造工学論文集，Vol.61，pp.715 - 724，2015
- 15) 池野誠司，小林薫，坂本淳，梁俊：コンクリート充填不良箇所への固結材注入による補修方法確認試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，2010
- 16) 佐々木尚美，小林薫，半井健一郎：樹脂注入による豆板補修工法の提案と各種材料強度の評価，土木学会構造工学論文集，Vol.70，pp.252 - 271，2014
- 17) 田村雄一，畑中重光，三島直生：低強度コンクリートを用いた RC 梁の破壊挙動と

- CFRPによる補強効果に関する研究，平成21年度三重大学修士論文
- 18) 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.2，2006
 - 19) 浅野勇，渡嘉敷勝，森充広，川上昭彦，川邊翔平：断面欠損させたRC梁の曲げ変形挙動，農業農村工学会論文集，No.297（83-3），pp.I_83-I_90，2015
 - 20) 槇島修，加藤佳季，魚本健人：コンクリート構造物の耐久性を考慮した断面修復工法の適用と断面修復材の性能評価に関する一考察，土木学会論文集，Vol.66，No.1，2010
 - 21) 若杉三紀夫：ポリマーセメント系補修材の開発と無機系複合表面処理工法のASR抑制効果に関する研究，平成26年度京都大学博士論文

謝辞

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切にご指導を賜った畑中重光教授ならびに三島直生准教授に深く感謝いたします。また、本実験に際し、時利偉氏、伊藤彰利氏、エルドンオチル氏、ケイチン氏（いずれも三重大学大学院生）、橋本雄喜（三重大学学部生）、和籐浩氏（三重大学技術専門員）及び三重大学大学院工学研究科建築学専攻畑中・三島研究室の皆様にご助力をいただいたことを、ここに付記して謝意を表します。

