

# 論文 鉄筋とポリマーセメントモルタルにより補強された扁平状 RC 梁の曲げ耐荷性状に関する研究

山崎 航希\*1・玉井 宏樹\*2・園田 佳巨\*3

**要旨：**既設 RC 部材の耐震補強工法の一つに補強鉄筋を配した上でポリマーセメントモルタルを吹き付けて既設部と一体化する補強工法がある。本研究では、既設ダムピアにその工法を適用した際の耐震性能を定量的に明らかにすることを目的に、その基礎段階として、ダムピアを模した扁平状 RC 梁の荷重実験を実施することで、曲げ補強効果や耐荷性状について検討し、さらに、妥当性を確認した FEM 解析により、補強部強度、鉄筋径や補強範囲といった補強仕様の変更が部材の耐荷性状に与える影響について検討した。

**キーワード：**耐荷性能, ポリマーセメントモルタル, 静的荷重試験, FEM 解析

## 1. はじめに

既設 RC 橋脚やダムピアの耐震補強工法の一つに補強鉄筋を配した上でモルタルを吹き付け、既設部と一体化する工法があり、その補強効果に関しては既往の実験主体の研究<sup>1,2)</sup>により明らかにされている。著者らは、本工法の既設ダムピアへの適用を考え、補強されたダムピアに対して地震応答解析を実施することで、その補強効果や動的破壊性状について定量的に把握することを最終的な目標としている。ダムピアとは重力式ダム等の天端部分に設けられるゲートの開閉を担う塔状の構造物であり、その構造上の特徴は弱軸方向に扁平状であること、扉体などの併設物の影響で全周補強が困難なため部分的な補強しかできないことが挙げられる。この他、既設ダムピアの寸法形状や使用材料の強度はダム個々で異なっており、本工法を既設ダムピアの耐震補強工法として一般化するためには種々の基礎検討が必要であるといえる。そこで、本研究では基礎検討として、まず、扁平状 RC 梁に対して、鉄筋とポリマーセメントモルタル(以降、PCM と称す)で補強した供試体を製作し、静的荷重実験及び FEM 解析を実施することで、補強効果はもちろん、全周補強した扁平状 RC 梁の耐荷性状や破壊過程について検討した。さらに、荷重-変位関係や鉄筋ひずみなど、実験と比較して妥当性が確認された FEM 解析モデルを用いて、補強仕様が耐荷性状や破壊過程に及ぼす影響について検討した。具体的には、実際に PCM の強度差、補強

部鉄筋の鉄筋径、補強範囲(全周または部分)をパラメータとし、それらの影響について詳細を検討した。

## 2. 静的荷重実験

### 2.1 供試体概要

図-1, 2 に形状寸法を示す。ここで、本論文では、補強していない RC 梁を無補強供試体、鉄筋と PCM により補強した RC 梁を PCM 補強供試体と呼ぶこととする。無補強供試体、PCM 補強供試体はいずれも同じ供試体を 3 体作成し、それぞれに対して静的荷重実験を行った。無補強供試体の配筋については引張側に D10 鉄筋、圧縮側に D6 鉄筋を主筋として配置し、せん断補強筋として D10 鉄筋を 100mm 間隔で配置した。PCM 補強供試体については無補強供試体を母材部と想定して、周囲に圧縮側と引張側の主筋として D6 鉄筋を、せん断補強筋として D6 鉄筋を 100mm 間隔で配置し、25mm の厚さで補強用モルタルを左官施工した。いずれの鉄筋も SD345 である。表-1 に材料試験により得られた各材料の材料特性値の平均値を示す。

表-1 各材料の材料特性値(単位:MPa)

材料名	圧縮強度	引張強度	静弾性係数
コンクリート	41.2	3.07	27,389
PCM	56.5	5.73	28,373

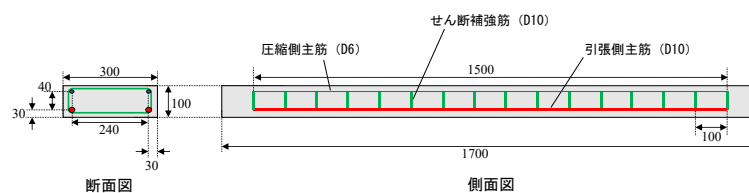


図-1 無補強供試体の寸法(単位:mm)

\*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (学生会員)  
 \*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門助教 博(工) (正会員)  
 \*3 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門教授 工博 (正会員)

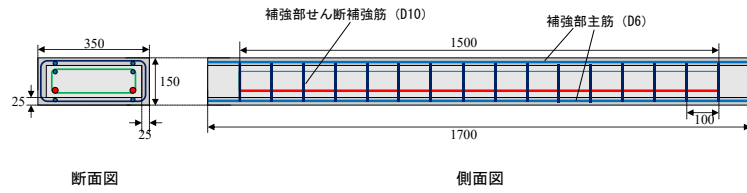


図-2 PCM補強供試体の寸法 (単位: mm)

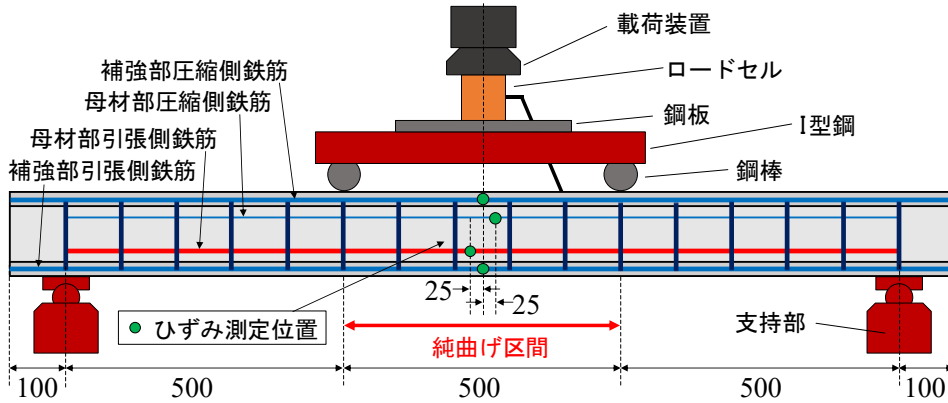


図-3 供試体の設置状況図 (単位: mm)

## 2.2 荷重方法

図-3 に供試体の設置状況図を示す。本学所有のオールセン万能試験機を用いて静的荷重実験を行った。支持部については半円形の鋼棒とプレートで構成されており、ピン支持に近い構造となっている。

## 2.3 実験結果

### (1) 荷重-変位関係

図-4 に無補強供試体, PCM 補強供試体の荷重-変位関係をそれぞれ示す。それぞれ 3 体の供試体に対して実験を行ったため、無補強供試体については 1 体目を N-1, 2 体目を N-2, 3 体目を N-3, 同様に PCM 補強供試体についても PCM-1, PCM-2, PCM-3 としている。荷重については载荷装置に取り付けられたロードセルの値, 変位については接触型高感度変位計により得られた供試体のスパン中央における値を示している。無補強供試体については荷重 4~5kN (図中 1) でスパン中央近辺において曲げひび割れが発生した。ひび割れの発生に伴い、図-4 に示したように荷重の増減を繰り返しながら変位のみが増加することが確認できた。その後、ひび割れの発生と進展を伴って荷重 16~17kN (図中 2) で引張側鉄筋が降伏し、コンクリートの圧縮側縁端部が圧壊し、終局に至った。

至った。PCM 補強供試体については無補強供試体と同様に荷重 12~13kN (図中 3) でスパン中央近辺において補強部に曲げひび割れが発生した。その後、ひび割れの発生と進展を伴って荷重 34~35kN (図中 4) で引張側鉄筋が降伏し、補強部の圧縮縁端部が圧壊し、終局に至った。図-5 に代表して N-1, PCM-1 のひび割れ性状を示す。

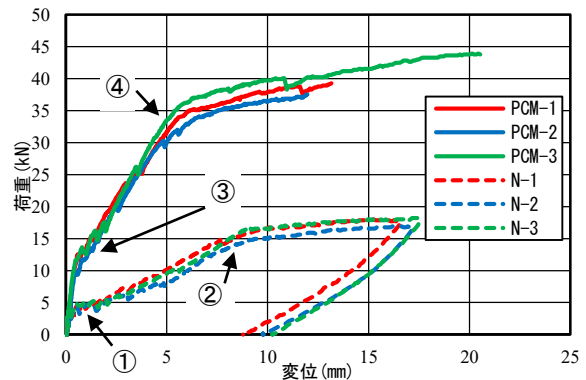


図-4 荷重-変位関係

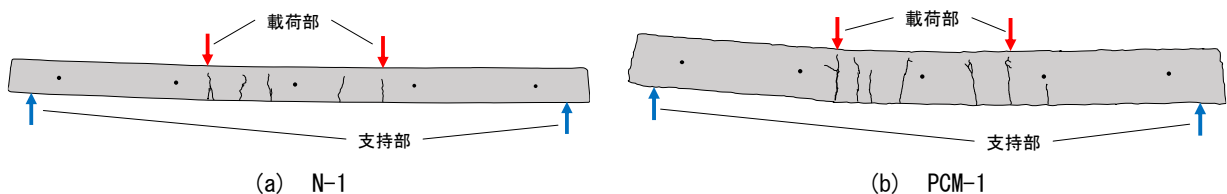
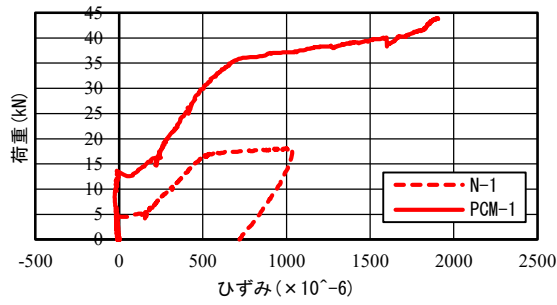
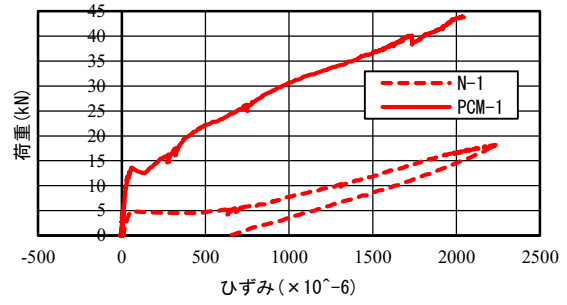


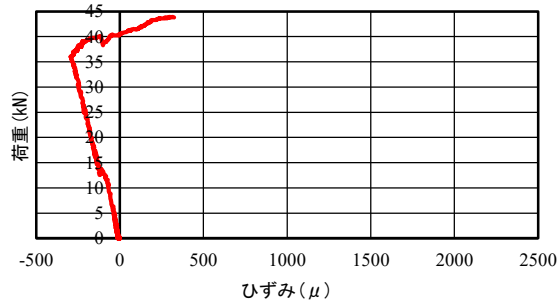
図-5 ひび割れ性状



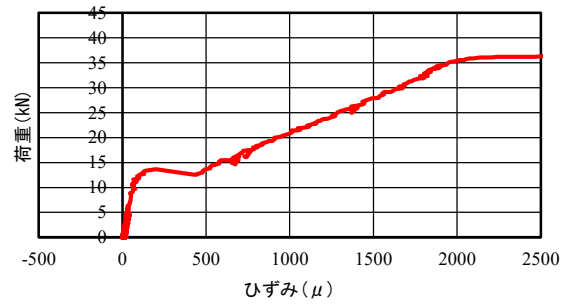
(a) 母材部圧縮側鉄筋



(b) 母材部引張側鉄筋



(c) 補強部圧縮側鉄筋



(d) 補強部引張側鉄筋

図-6 各主筋の荷重-ひずみ関係

## (2) 荷重-ひずみ関係

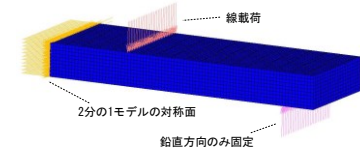
図-6に代表してN-1およびPCM-1における母材部圧縮側鉄筋、母材部引張側鉄筋、補強部圧縮側鉄筋、補強部引張側鉄筋の荷重-ひずみ関係を示す。N-2、N-3、PCM-2、PCM-3の結果については荷重-変位関係から分かるようにほぼ同様の結果を示したため割愛する。ひずみは図-3に示した位置で測定を行った。いずれの荷重-ひずみ関係についても供試体にひび割れが生じるとともに変曲していることが確認できた。また、母材部圧縮側鉄筋について荷重初期はわずかな圧縮ひずみが生じ、ひび割れが生じるとともに中立軸が移動し、引張ひずみに転じていることが確認できた。これは供試体が扁平状であり、ひび割れ発生に伴い中立軸が上縁側に移動したためと考えられる。同様に補強部圧縮側鉄筋について、荷重初期では圧縮ひずみを示したものの荷重終盤に引張側鉄筋が降伏するのに伴って引張ひずみに転じていることが確認できた。

## 3. 実験結果の再現解析

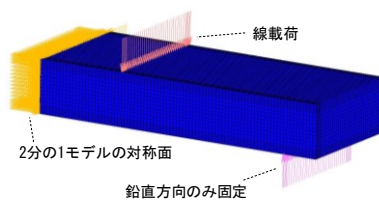
### 3.1 解析条件

補強仕様や部分的な補強が補強梁の耐荷性状や破壊過程に及ぼす影響を解析により検討することを考慮して、その基礎的段階として、FEMを用いた解析によって無補強供試体とPCM補強供試体の実験結果の再現を試みた。作成したモデルを図-7に示す。コンクリートについては3次元ソリッド要素、鉄筋についてはトラス要素を用いてモデル化し、コンクリートと鉄筋は完全付着を仮定

した。境界条件については無補強供試体、PCM補強供試体ともに解析対象の対称性を考慮して、スパン中央で分割した2分の1モデルとした。対称面では2分の1モデル化のために鉛直方向以外の変位を固定した。図-7に示すように線状に強制変位を与える方法で荷重を行った。また、母材部コンクリートと後施工のPCMの間の付着状況が重要な境界条件となるが、実験時に当該界面における大きなずれは生じなかったため、本解析においては境界面で完全付着しているものとし、母材部コンクリートとPCM間では節点を共有するものとした。材料特性については無補強供試体とPCM補強供試体ともに、コンクリートとPCMは表-1に示した材料試験により得られた圧縮強度、引張強度、静弾性係数の値を用い、降伏条件についてはvon Misesの降伏条件に従うものとし



(a) 無補強供試体のモデル



(b) PCM補強供試体のモデル

図-7 解析モデル図

た。なお、一般的にコンクリートやモルタルは静水圧依存性を有した降伏条件を用いるが、本解析で対象としている扁平状 RC 梁に対する事前解析により静水圧依存性による影響は大きくないことを確認している。また、ひび割れのモデル化としては、分散ひび割れモデルを仮定し、引張強度以降は要素寸法に応じた勾配を有する線形軟化則に従うこととした。鉄筋については降伏強度を SD345 の規格値である 345MPa、静弾性係数を 200GPa と仮定した。また、降伏条件については von Mises の降伏条件に従うものとし、降伏後は初期剛性の 1/100 で等方硬化するものとした。

### 3.2 解析結果と実験結果の比較

#### (1) 荷重－変位関係の比較

図-8 に荷重－変位関係の比較図を示す。無補強供試体においては、曲げひび割れ発生荷重、曲げひび割れ後の挙動や引張側主鉄筋降伏荷重など、精度良く再現できることが確認できた。同様に、PCM 補強供試体においても、ひび割れ発生荷重のみならず鉄筋降伏以降の挙動に関しても概ね実験結果を再現できた。

#### (2) 荷重－ひずみ関係の比較

図-9 に PCM 補強供試体の荷重－ひずみ関係の比較図を示す。母材部の鉄筋ひずみに関して、解析では、曲げひび割れ発生直後の引張側主鉄筋のひずみの低下が見られたものの、圧縮側、引張側ともに概ね良好に再現できた。さらに、補強部の鉄筋ひずみに関しても、引張側主鉄筋降伏荷重である約 35kN までは概ね良好に再現できた。

### 3.3 解析結果の分析

前節において本研究で用いた解析手法やモデルの妥当性が確認された。つまり、解析において仮定したように、本研究で対象とした PCM 補強供試体においては、母材部コンクリートと PCM との界面におけるずれは実験時にも生じていなかったことが推察される。さらに、実験時に計測できなかった母材部および鉄筋の破壊性状など、荷重－変位関係の各プロセスについて詳細を分析し、鉄筋と PCM によって全周補強された扁平状 RC 梁の耐荷性状の把握を試みた。図-10 に解析により得られた PCM 補強供試体の荷重－変位関係を示す。赤色で示した点はひび割れの発生や鉄筋降伏が確認できた点を示している。この図に示すように、1.補強部の引張端部でひび割れが生じる、2.母材部の引張端部でひび割れが生じ、直後に荷重が減少する、3.補強部引張側の鉄筋が降伏する、4.母材部引張側の鉄筋が降伏する、5.母材部圧縮側の鉄筋が引張によって降伏する、といった破壊過程となった。なお、本解析においてはコンクリートの圧縮破壊をモデル化していないが、実験時には補強部圧縮側コンクリートの圧縮破壊で終局に至った。

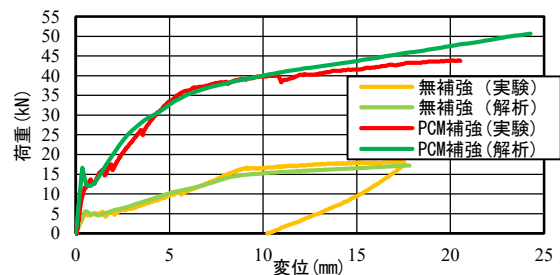
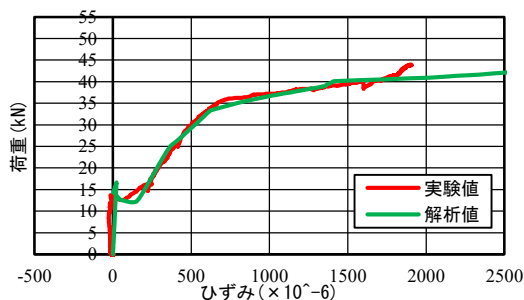
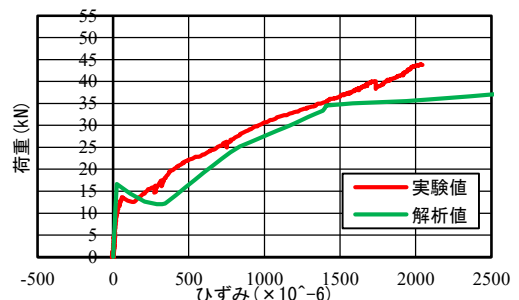


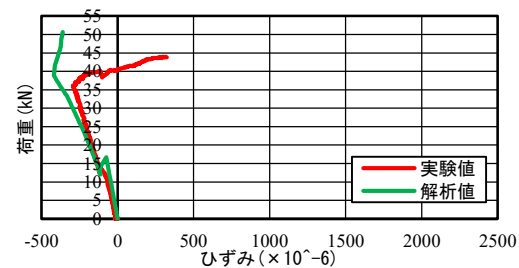
図-8 荷重－変位関係の比較



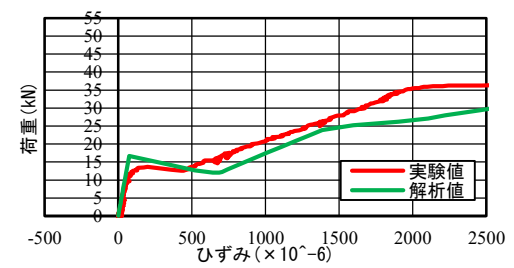
(a) 母材部圧縮側鉄筋



(b) 母材部引張側鉄筋



(c) 補強部圧縮側鉄筋



(d) 補強部引張側鉄筋

図-9 各主筋の荷重－ひずみ関係の比較

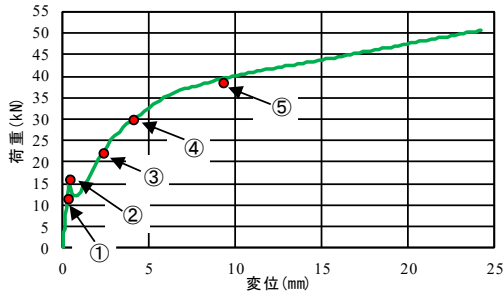


図-10 破壊プロセスの分析結果

#### 4 補強仕様が耐荷性状に及ぼす影響

##### 4.1 解析概要

前章までは、母材部供試体の圧縮側主鉄筋と同径の鉄筋を補強鉄筋として用い、その補強鉄筋を母材部と同数配し、その後、母材部よりも強度の大きい PCM を左官施工し、全周補強するといった補強仕様を採用し、その耐荷性状について実験、解析によって把握した。本章では、補強仕様が補強供試体の耐荷性状に及ぼす影響を検討する目的で、実際に考え得る補強仕様として、母材部コンクリートと補強部 PCM の強度差、補強部鉄筋の鉄筋径、補強範囲（全周または部分）をパラメータとし、前章で妥当性が確認された解析手法、モデルを用いて解析することで、それらの影響について詳細を検討した。まず、既設部コンクリートと補強部 PCM の強度差、補強部鉄筋の鉄筋径をパラメータとした解析ケースを表-2 に示す。ケース M-1 についてはコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に記載があるコンクリートの圧縮強度の設計基準強度における最大の値である 80MPa を基準としてこの値から求められる引張強度と静弾性係数の値を入力した。ケース M-2 については補強部 PCM の強度に母材部のコンクリートと同値を採用した。ケース S-1 から S-2 については引張・圧縮側の補強用鉄筋の鉄筋径をそれぞれ表-2(c)に従って仮定した。次に、補強範囲をパラメータとした解析ケースとして、前章までに記していた全周補強をベースとして部分的に補強した部分補強モデルを作成した。なお、実際のダムピアにおいては部分補強になるケースも多い。図-11 に部分補強の解析モデルを示す。両ケースともに補強範囲は全周補強の半分のエリアとし、ケース P-1 については全周補強の場合と同じ鉄筋の本数、ケース P-2 については引張・圧縮側にそれぞれ 1 本ずつ鉄筋を追加した。せん断補強筋について現実的には閉合せず、アンカーで定着させているが、本解析においては図-11 に示すように貫通させてモデルを作成した。なお、本章では、前章で用いた PCM 補強供試体を比較対象とするため、以降、基準供試体と称す。

表-2 解析ケース

(a) 基準供試体の補強部のデータ (単位:MPa)

補強部 PCM の物性値			補強部鉄筋の鉄筋径	
圧縮強度	引張強度	静弾性係数	圧縮側	引張側
56.5	5.73	28,373	2-D6	2-D6

(b) 補強部 PCM の物性値を変更したケース (単位:MPa)

ケース	圧縮強度	引張強度	静弾性係数
M-1	80.0	6.00	38,000
M-2	41.2	3.07	27,389

(c) 補強部鉄筋径を変更したケース

ケース	圧縮側	引張側
S-1	2-D6	2-D10
S-2	2-D10	2-D10

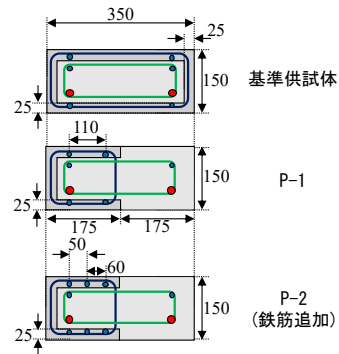


図-11 部分補強モデルの断面図 (単位: mm)

##### 4.2 解析結果および分析

###### (1) 母材コンクリートと補強部 PCM の強度差の影響

荷重-変位関係の比較図を図-12 に示す。PCM の強度でいうと、ケース M-1 と M-2 の間に基準供試体があるため、荷重-変位関係も同様な傾向を示した。母材部コンクリートとの強度差が大きいケース M-1 の結果をみると、曲げひび割れ発生荷重が大きくなり、以降、終局までその差分、大きい傾向となった。なお、破壊過程は図-10 に示す基準供試体と同様であった。また、母材部コンクリートと同強度に仮定したケース M-2 においては、基準供試体よりひび割れ発生荷重が若干小さくなるものの、その差はあまり小さくなく、終局時の荷重も同程度であった。なお、破壊過程もケース M-1 同様、基準供試体と同様であった。

###### (2) 補強部鉄筋の鉄筋径の影響

荷重-変位関係の比較図を図-13 に示す。まず、補強部引張側主鉄筋を母材部引張側主鉄筋と同径の D10 に変更したケース S-1 の場合、ひび割れ発生後の降伏荷重が大きくなり、それにより、終局時荷重も大きくなることが確認できた。次に、補強部引張側主鉄筋と同様に圧縮側主鉄筋も母材部引張側主鉄筋と同径の D10 に変更したケース S-2 の場合、ほぼケース S-1 と同じ荷重-変位関係を示した。つまり、本研究で設定しているような単調

に片方向に載荷する場合、ケース S-1 で十分な耐荷力を担保できることが明らかとなった。なお、破壊過程に関しても、図-10 に示す基準供試体と同様であった。

### (3) 補強範囲の影響

荷重 - 変位関係の比較図を図-14 に示す。まず、鉄筋量は同じで補強範囲を半分に設定したケース P-1 においては、基準供試体に比べて、耐荷力が低下することが確認された。その低下率は、約 8%程度（基準供試体において母材部引張側鉄筋が降伏する変位である約 10mm 時点）であった。次に、ケース P-1 において鉄筋量を増加させたケースであるケース P-2 においては、ケース P-1 に比べて耐荷力は大きくなり、今回の解析においては、基準供試体において母材部引張側鉄筋が降伏する変位である約 10mm 時点においては基準供試体以上の耐荷重を示した。つまり、部分補強の場合、全周補強を基準として、補強範囲減少率を鉄筋量の増加分と捉えることで全周補強同等の耐荷力を担保できるといえる。また、破壊過程に関しては、基準供試体と異なる点を確認できた。まず、基準供試体では母材部にひび割れが生じた直後に荷重が減少することが確認できたが、部分補強を行った場合は母材部にひび割れが生じたあとも荷重が増加し続け、新たなひび割れが生じた直後に荷重が減少することが分かった。ひび割れの進展については図-15 のモデルを斜め下から見た図が示すように P-1 では補強部でひび割れが生じた後に無補強部でもひび割れが発生し、両側からひび割れが進展していくことが確認できた。一方で鉄筋を増やした P-2 では、補強部で発生したひび割れが無補強部に進展していくことが確認でき、鉄筋量によってひび割れ進展のプロセスが異なることが確認できた。鉄筋の降伏についても基準供試体では 23.5kN で補強部引張鉄筋が降伏したが、P-1 では 19kN と約 19%程度低い小さな値で降伏することが分かった。しかし、鉄筋を増やした P-2 では 29kN と基準供試体に比べて約 23%程度大きな値まで降伏しないことが確認できた。

## 5 結論

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- (1) 載荷実験により、今回設定した補強仕様によって、本補強工法によって十分な耐荷力の向上を確認できた。
- (2) 本研究で仮定した FEM モデルによって、無補強の扁平 RC 梁と補強梁の荷重 - 変位関係や荷重 - ひずみ関係といった耐荷性能を十分な精度で再現できた。さらに、全周補強された補強梁の破壊過程を明らかにした。
- (3) 妥当性が確認できた FEM モデルを用いて 1.補強用モルタルの強度、2.補強用鉄筋の鉄筋径、3.補強範囲を変化させたケースについて解析を行い、補強梁の耐荷性能や破壊性状に与える影響について明らかにした。

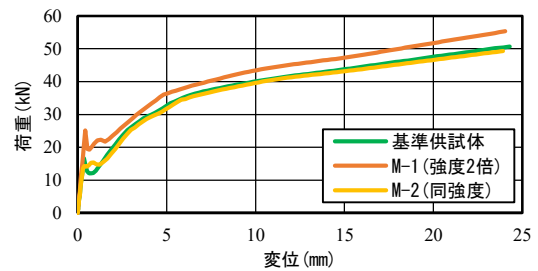


図-12 補強用モルタルの強度を変化させた場合の荷重 - 変位関係

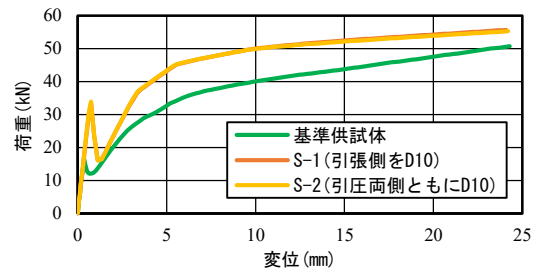


図-13 補強用鉄筋の鉄筋径を変化させた場合の荷重 - 変位関係

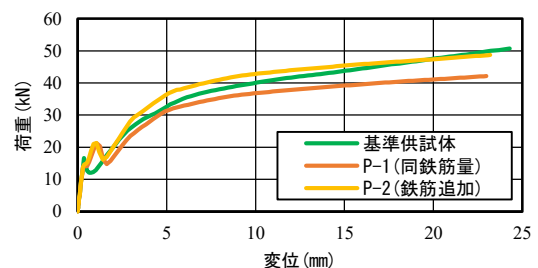


図-14 部分的な補強を行った場合の荷重 - 変位関係

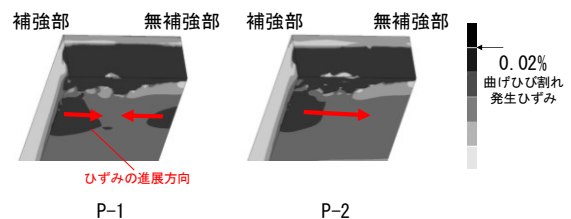


図-15 部分補強によるひずみの進展の違い

## 参考文献

- 1) 中村 智, 日野 伸一, 山口 浩平, 佐藤 貢一: PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の耐震補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.3, 2007
- 2) 杉山 智昭, 松崎 育弘, 鶴田 敦士, 間所 大介: ポリマーセメントモルタルを用いて耐震補強された RC 造りで壁付柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.3, 2007
- 3) 公益社団法人土木学会編: コンクリート標準示方書構造性能照査編, 2002