

# 軸力支持下での塑性ヒンジ取替性能を向上させた 埋込メナーゼヒンジRC柱の実験的検討

植村 佳大<sup>1</sup>・西根 幸輝<sup>2</sup>・林 学<sup>3</sup>・高橋 良和<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 村本建設株式会社 東京支店土木部 (〒102-0084 東京都千代田区二番町3-4)  
E-mail: mc62869nis@muramoto.co.jp

<sup>2</sup>正会員 村本建設株式会社 技術開発部 (〒543-0002 大阪市天王寺区上汐4-5-26)  
E-mail: mhayashi@muramoto.co.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

著者らは一連の研究の中で、軸力支持下にて耐震性能の改変が可能なメタボリズム柱構造の開発を行っている。メタボリズム柱構造は、柱基部を二重構造とし、地震エネルギー吸収能を期待する可換部を外殻に、常時の軸力・せん断力を支持する永続部を柱内部に配置した構造である。過去の検討では、永続部にメナーゼヒンジを用いたメタボリズムRC柱構造を提案したが、可換部取り替え後に期待する耐震性能が発揮されないという問題が残っていた。そこで本研究では、そのメタボリズムRC柱構造に対して改良を行い、実験的検討によりその効果を検討した。検討の結果、メナーゼヒンジで形成された永続部の柱基部をスパイラル筋で保護することで、可換部取り替え時の柱の軸沈下が抑制され、可換部取り替え後の柱の耐震性能が適切に確保されることを確認した。

**Key Words:** *metabolism, replaceable, reinforced concrete column, Mesnager hinge, cyclic loading test*

## 1. はじめに

我が国ではこれまで、被災経験を基に幾度となく耐震規定の改定がなされてきた。それに伴い、新設当時の耐震規定を満たしていたものの、現在の規定を満たさない、いわゆる既存不適格構造物が不可避免的に生じてきた。そして、このような既存不適格構造物への対応として、近年、耐震補強策が精力的になされている。その結果、2011年東北地方太平洋沖地震において、耐震補強の有無で被害状況が異なり、耐震補強の効果が実証されることとなった(東日本大震災橋梁被害調査報告書<sup>1)</sup>)。しかしながら、現行の耐震規定も未だ完全ではなく、今後改定される可能性は十分にあるといえ、今後、既存不適格となるが更に増加することは否定できない。

そうした中、既存不適格となったRC橋脚には、RC巻き立て等、柱断面を増大させることで橋脚の持つ耐震性能を向上させるという方策が採用される

ことが多い。しかし、RC巻き立て補強のような後付けの耐震補強では、現代の最新の構造技術が効率的に反映されていると言え難く、また、橋脚の断面積増大により、美的景観を損ねているといえる。これらの問題は、構造物を大規模更新して再構築するという方策を取ることで回避可能であるが、橋脚の再構築は、橋梁を通行止めにする、あるいは支保工の設置などの対策が必要となる。前者では交通量の大幅な低下を招き、後者では施工期間が長期化することから社会へ与える影響が大きいと考えられる。

以上の背景を踏まえ、著者らは近年、将来の要求性能の変化に応じて、軸力支持下で耐震性能を改変させることができる柱構造「メタボリズム柱構造」を提案・開発している<sup>2,3,4)</sup>。メタボリズム柱構造は、**図-1**に示すように柱基部を二重構造とし、地震時のエネルギー吸収能を期待する可換部を外殻に、常時の軸力・せん断力を支持する永続部を柱内部に配置する柱構造である。先行研究では、永続部にメナー

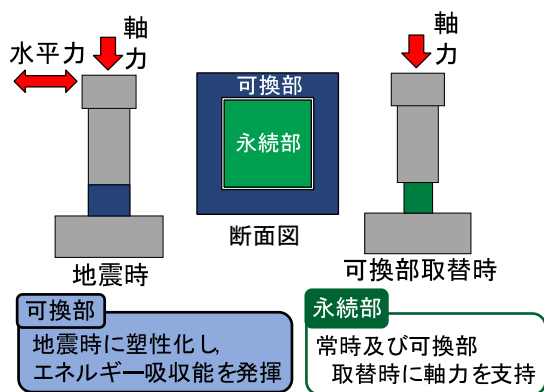


図-1 メタボリズム柱構造

ゼヒンジを用いたメタボリズムRC柱構造を提案しており、軸力作用下での可換部取り替え実験により、永続部で軸力を支持した状態で可換部を取り替えることに成功している<sup>4)</sup>。筆者らの研究の他にも、地震後の早期復旧を目的としてRC柱の損傷部材の取り替え可能性を検討した研究はいくつか見受けられるが<sup>5)6)</sup>、メナーゼヒンジを用いたメタボリズムRC柱構造のように、実際に軸力支持下で柱部材の取り替えを実施した検討は見当たらない。

しかし、過去の検討で提案した、メナーゼヒンジを用いたメタボリズム柱構造では、地震被害後に可換部を取り外し、同性能の可換部を取り付けたとしても、取替前後で柱の耐震性能が変化するという課題がある。そこで本研究では、可換部取り替え前後で要求する性能が確実に発揮されるよう、メナーゼヒンジを用いたメタボリズム柱構造の改良を行う。具体的には、改良を加えたメタボリズムRC柱供試体に対し、正負交番載荷実験や可換部取り替え実験を行うことで、可換部取り替え前後での柱の耐震性能や、可換部の取り替え可能性について検討を行う。加えて、実験に対する再現解析を行い、本構造が示す復元力特性のメカニズムの解明を目指す。

## 2. 提案構造について

### (1) メタボリズム柱構造の概要

橋脚に対して要求される機能は大きく2つに分けることができる。1つは上部構造死荷重や自重に起因する鉛直方向の力（以下、軸力とする）に対する軸力支持機能、もう1つは地震動等に起因する水平方向の力に対する耐震性能である。前者は永続的に一定の機能を要求され、設計時の想定が以後変化することは稀である。しかしながら後者に関する規定は1.で述べたように幾度となく改定されてきた。

以上から、メタボリズム柱構造では、永続的に軸力を支持しながらも、要求される耐震性能に応じて耐震性能のみ新陳代謝できる構造を目指している。具体的には、図-1に示す通り、柱基部が断面内側に位置する永続部と、それを囲う可換部の2部材で構成される柱構造である。永続部は軸力支持機能に資する部材であり、永続的な使用が想定される。それに対し可換部は、耐震性能に資する部材であり、必要に応じて取り替えが可能である。このように、メタボリズム柱構造では、要求する性能を永続部と可換部で分離させることで、既存不適格となった際には、永続部の軸力支持下のもと、可換部を取り替えることができ、橋梁を供用したまま迅速に既存適格構造へと性能を更新することが可能となる。

また、メタボリズム柱構造の開発意義は、上述する既存不適格構造物への対応だけでなく、地震被害後の早期復旧にも資するという点である。2016年の熊本地震において、熊本県土木部道路都市局道路整備課が取りまとめた「熊本地震での経験を踏まえた橋梁災害復旧のまとめ<sup>7)</sup>」によると、仮受材の確保が困難であったため、復旧作業に工期の遅れが生じた事例が存在する。それに対し、メタボリズム柱構造では永続部に軸力支持機能が備わっているため、上部構死荷重を別途仮受せずとも復旧を行える可能性がある。

以上より、メタボリズム柱構造は、永続部の存在により、確実に軸力支持機能を発揮した状態で可換部を取り替えることができるため、供用中の要求性能の変化への対応や地震被害後の早期復旧が可能となるといえる。

### (2) メタボリズム柱構造の要求性能

メタボリズム柱構造の永続部には、地震後における可換部の取替を可能とするための軸力支持性能が要求される。また、レベル2地震動のような強い地震が発生したとしても、可換部の取り替えが実施できるよう、基部の軸沈下やせん断ずれを防止するための性能も要求される。

可換部に要求される性能は、地震時に塑性化し、安定したエネルギー吸収能を発揮するなど、所定の耐震性能を有することである。また、メタボリズム柱構造の最大の特徴の一つは、可換部が軸力支持下でも容易に取り替えられることである。そのため、可換部取り替え時の施工性を確保できるような構造上の工夫が必要となる。

### (3) 過去に検討したメタボリズムRC柱構造

筆者らは、過去の研究<sup>4)</sup>において、永続部にメナ

一ゼヒンジを用い、可換部にプレキャストRC部材を用いたメタボリズム柱構造に対して検討した(図-2)。メナーゼヒンジとは、コンクリートヒンジの一種であり、鉄筋を交差状に配置することで、交差部に構造上のヒンジを形成させる構造である。過去の検討<sup>9)</sup>にて、メナーゼヒンジをRC柱基部に埋め込むことで、RC柱基部の軸沈下・せん断ずれを防止できており、永続部基部においても同構造を採用することとした。また、プレキャストの可換部と既設躯体との間の接合に関しては、機械式継手による鉄筋接合と無収縮モルタルの充填による接合を採用した。

検討の結果、軸力支持下での可換部取り替えが可能であるものの、可換部の取り替え前後で柱の最大荷重に差異が生じることが確認された。この要因として、可換部撤去後に永続部が軸沈下し、永続部におけるメナーゼヒンジの交差鉄筋が圧縮された状態で新たな可換部が取り付けられたため、可換部取り替え後に交差鉄筋が引張抵抗力を示さなくなったと考察している。

#### (4) 提案するメタボリズムRC柱構造

本研究では、過去に検討した永続部にメナーゼヒンジを用いたメタボリズムRC柱構造に対し、可換部取り替え前後での耐震性能低下を抑制するための変更や、施工性を向上させるための変更等を加える。以降、その変更点の詳細を述べる。

##### a) 永続部の変更点

本研究では、過去の検討と同様、永続部にコンクリートヒンジの一種であるメナーゼヒンジを採用する。ここで、過去に検討した永続部<sup>4)</sup>との違いを図-3に示す。過去に検討した構造では、菅野ら<sup>9)</sup>が提案した内巻きスパイラル構造を参考に、永続部の損傷が柱高さ方向に拡大しないよう、永続部基部より上部の区間でスパイラル筋を配筋していた。本研究で提案する永続部では、スパイラル筋をより密に配筋するとともに、柱高さ0mmの位置から内巻きスパイラル筋にて保護することとした。これらの変更により、可換部取り替え前の地震等の影響でメナーゼヒンジ周囲のコンクリートが損傷し、可換部撤去時における柱の軸沈下を抑制することを期待する。

##### b) 可換部の変更点

2.(3)で述べたように、過去の検討<sup>4)</sup>では、取り替え後の新たな可換部にプレキャストRC部材を使用していた。また、新たに取り付けるプレキャストの可換部と既設躯体の接合には、機械式継手による鉄筋接合と、無収縮モルタルの充填による接合を採用していた。過去の検討では、プレキャスト部材により施工の省力化や早期復旧が可能であると想定さ

れていたが、可換部重量や接合部分の拘束条件の関係上、かえって施工難易度が高くなる結果となった。

そこで本研究では、可換部取り替え時に新たな可換部を設置する際、可換部の重量により施工が困難とならないよう、可換部に現場打ちのRC部材を採用することとする。具体的には、モルタル充填式機械式継ぎ手および下部鉄筋(以下、下部継ぎ手機構と称する)をフーチング内部に埋め込んでおき、可換部の取り替え時に、図-4に示すように、下部継ぎ手機構と柱上部の塑性化していない軸方向鉄筋を

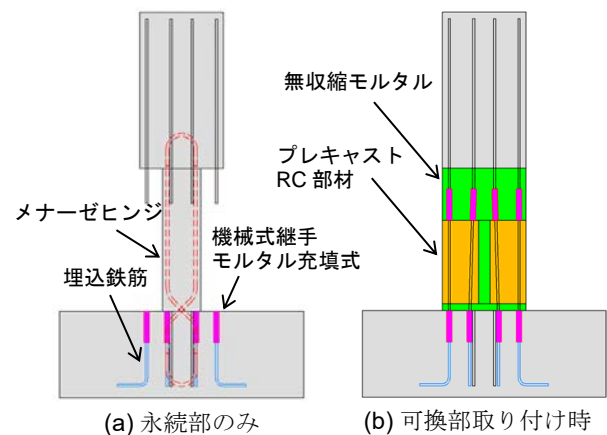


図-2 過去に提案したメタボリズム RC 柱構造

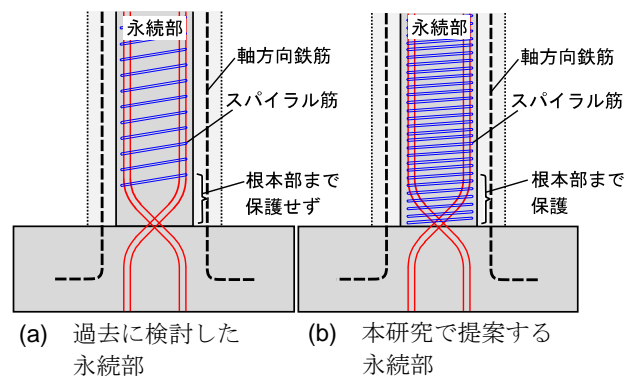


図-3 永続部における変更点

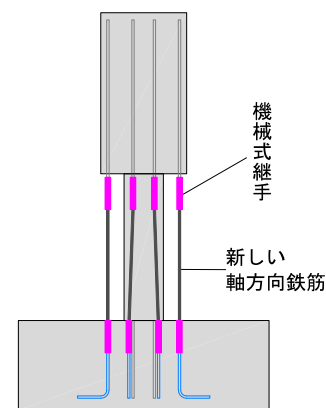


図-4 可換部取り替え時の鉄筋接合方法

新たな鉄筋で接続する。その後、現場で帯鉄筋の配筋作業を行い、型枠を設置する。最後にコンクリートを打設した後、既設コンクリート部との隙間を無収縮モルタルで充填する。なお、本提案構造で用いるモルタル充填式の機械式継ぎ手は、異なる径を有する鉄筋同士を接合できるものもあり、将来の耐震基準の改定に応じて、より径の大きな鉄筋を用いるなど柔軟な対応ができるという利点がある。

以上のように、本提案構造では、取り替え後の新たな可換部を現場打ちで作製することで、施工性が向上することを期待する。可換部を現場打ちにより製作することで、取り替えを行う可換部の高さを状況に応じて自由に決定することが可能となる。また、地震後の復旧時においては、損傷した可換部を撤去し、直ちに新たな軸方向鉄筋を取り付けることで、余震を想定した仮復旧を行うことも可能である。

### (5) 提案構造における可換部の取り替え可能回数について

先述したように、提案するメタボリズムRC柱構造は、可換部の取り替えにより、供用中に生じる耐震基準の改訂に対応することを可能とする柱構造である。その際、耐震基準改訂に何度も対応可能である構造が理想的であるものの、供用中に何度も可換部を取り替えできる構造を実現しようとすると、柱に予め埋め込んでおく機械式継ぎ手が多数必要となり、コスト面や施工面で問題が生じる。他方で、既存構造物が要求性能の変化に1度たりとも対応できないことを考えると、供用期間内に1度でも要求性能の変化に対応可能となれば、耐震基準改訂に伴う社会への影響は十分に軽減されるといえる。そこで本研究では、コスト面や施工面での問題を考慮し、可換部の取替可能回数を1回とする構造を提案することとする。

## 3. 実験概要

### (1) 実験供試体の設計

筆者らが過去に実施した検討<sup>4)</sup>では、実橋脚を設計した上で、使用する実験システムおよび実験治具に合わせて縮小したものを実験供試体として採用した。本研究では、その際に作製されたcase-3 供試体(以下、比較供試体と称する)を参考に、実験供試体を作製した。設計の詳細については既往文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

また、永続部のメナーゼヒンジの設計については、道路橋支保便覧<sup>10)</sup>の規定を参考とし、メナーゼヒン

ジに作用する軸力とせん断力に対して交差鉄筋(メナーゼ筋)に発生する圧縮応力が制限値を超えないよう設計した。具体的には、メナーゼ筋に作用する応力を式(1)により算出し、式(2)により算出される応力の制限値と比較することで、メナーゼ筋の径および本数を決定した。

$$\sigma_{sc} = \frac{N}{nA_s \cos \theta} + \frac{S}{nA_s \sin \theta} < \sigma_{yd} \quad (1)$$

$$\sigma_{yd} = \xi_1 \Phi_y \sigma_{yc} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{sc}$ は交差鉄筋の圧縮応力度、 $N$ は作用軸力、 $S$ は作用せん断力、 $n$ は交差鉄筋本数、 $A_s$ は交差鉄筋1本の断面積、 $\theta$ は交差鉄筋の部材軸方向に対する角度、 $\sigma_{yd}$ は交差鉄筋の圧縮応力度の制限値、 $\xi_1$ は調査・解析係数、 $\Phi_y$ は抵抗係数、 $\sigma_{yc}$ は交差鉄筋の降伏強度の特性値である。なお本研究では、式(1)における作用軸力 $N$ は上部構死荷重による全軸力を、作用せん断力 $S$ はL1地震動相当のせん断力を想定して設計を行った。

また2.(4)a)で述べたように、本提案構造では、永続部のスパイラル筋を柱高さ0mmから配筋する。ここで、菅野ら<sup>9)</sup>の検討により、内巻き耐力比(内巻きスパイラルによるせん断耐力と曲げ耐力に達するときのせん断力との比)が2.4程度で、ピッチが10mmから28mmの範囲でスパイラル筋を配筋することで最も効果的にコアコンクリートを保護できることが示されている。そこで本提案構造では、内巻き耐力比が2.4程度となるよう、スパイラル筋のピッチを25mmに設定した。

また、2.(2)で述べたように、メタボリズム柱構造における可換部は、容易に取り替えが可能であることが求められ、可換部取り替え時の施工性を確保できるような構造上の工夫が必要となる。そこで本提案構造における永続部と可換部の間には、可換部の撤去作業の施工性向上のため、図-5に示すように縁切り材を配置した。

### (2) 実験の流れ

本研究では、図-6に沿って実験を行う。まず、載荷試験1として、作製した供試体に対し正負交番載荷実験を行う。その後、可換部の取り替え実験として、損傷した可換部の撤去を行い、撤去したものと同一構造を有する新たな可換部の取り付けを行う。最後に載荷試験2として、再び正負交番載荷実験を行い、可換部取り替え前後での柱の耐震性能の変化およびそのメカニズムを考察する。

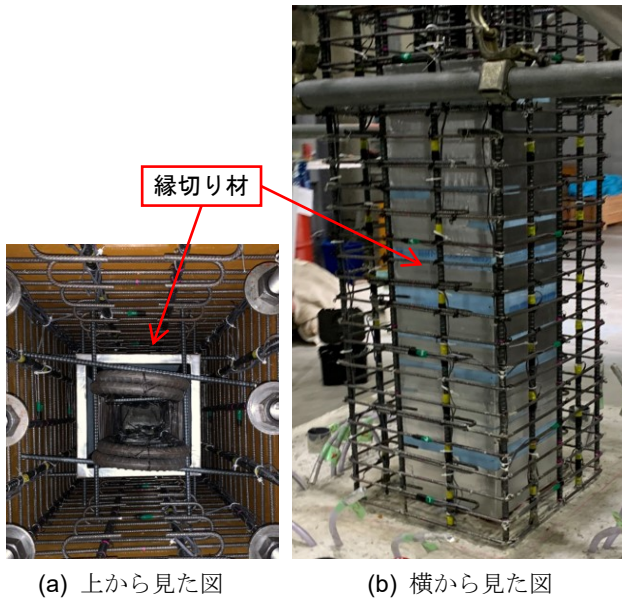


図-5 永続部と可換部の縁切り

表-1 使用材料

コンクリート	呼び強度 [MPa]	18
	スランブ [cm]	18
	粗骨材最大寸法 [mm]	15
鉄筋	セメント	早強ポルトランドセメント
	軸方向鉄筋	SD345 D13
	帯鉄筋	SD345 D6
	メナーゼ筋	SD345 D19
無収縮モルタル用セメント		太平洋セメント製 太平洋プレユーロックス
機械式継ぎ手		東京鉄鋼製SA級 NEWポルトトップスSA
スパイラル筋		PC鋼線丸線A種 SWPR1AN 2.9mm

### (3) 実験供試体の詳細

本研究では、著者らが過去に検討した供試体(以下、比較供試体)と、それを参考に2.4)で述べた改良を加えた供試体(以下、提案供試体と称する)の2つを用いて比較・検討を行う。ここで、本研究で使用了材料の各諸元を表-1に、各供試体の詳細を次項にて示す。

#### a) 比較供試体 (载荷実験1および载荷実験2)

载荷実験1・2における比較供試体の寸法および配筋図を図-7に示す。比較供試体は、永続部にメナーゼヒンジを採用したメタボリズム柱構造を有するRC柱供試体であり、永続部のスパイラル筋が柱高さ150mmの位置から45mm間隔で配筋されている。また先述のように、载荷実験1の供試体では、可換部の取り替えを行う際の施工性を向上させることを目的に、永続部と可換部の間に厚さ20mmの縁切り

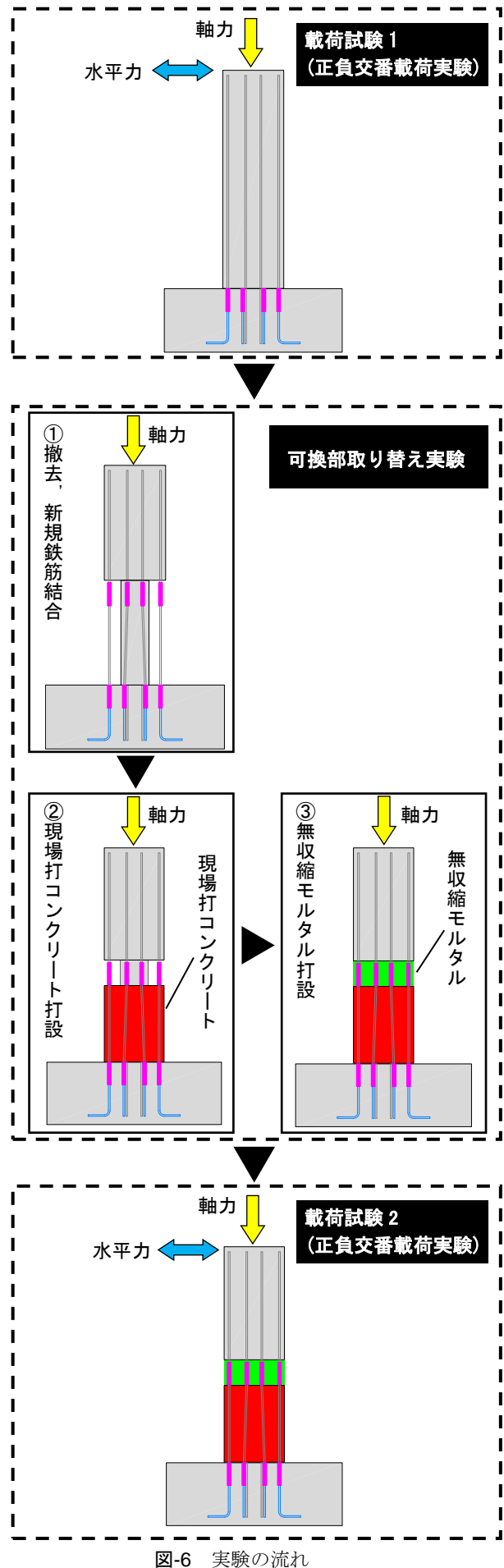


図-6 実験の流れ

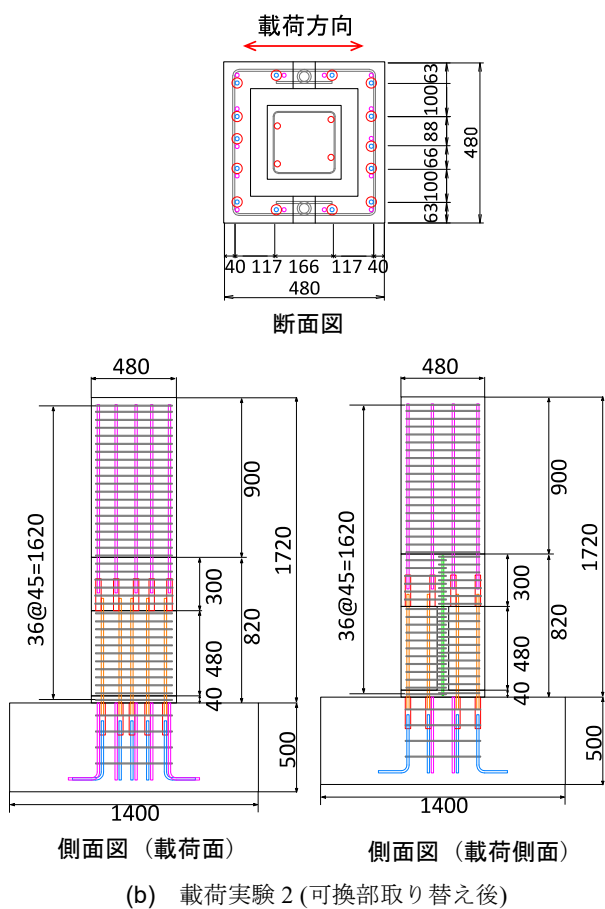
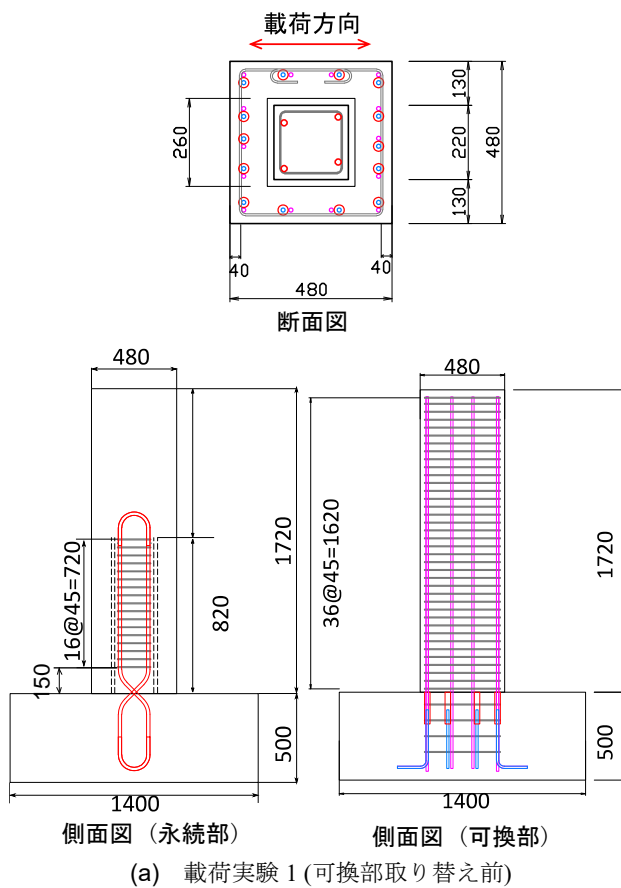


図-7 比較供試体<sup>4)</sup>の寸法および配筋図 (Unit:[mm])

材が配置されている。

また比較供試体では、荷重実験1終了後に可換部の撤去が行われ、プレキャストRC部材を用いた可換部を取り付けられる。その際、可換部は、永続部を挟み込むようにコの字のプレキャストRC部材を2つ取り付け、帯鉄筋部のループ継ぎ手により水平方向に接合される。柱部と可換部の取り付けに関しては、プレキャストRC部材下端に露出した軸方向鉄筋と、フーチングに埋め込んだ継ぎ手機構を機械式継ぎ手により接合される。プレキャストRC部材上端に露出した軸方向鉄筋については、機械式継ぎ手を用いて可換部撤去の際柱部から露出させた軸方向鉄筋と接合される。最後に、柱部と可換部の隙間には無収縮モルタルが充填され、柱部、永続部、および可換部の一体性が確保される。

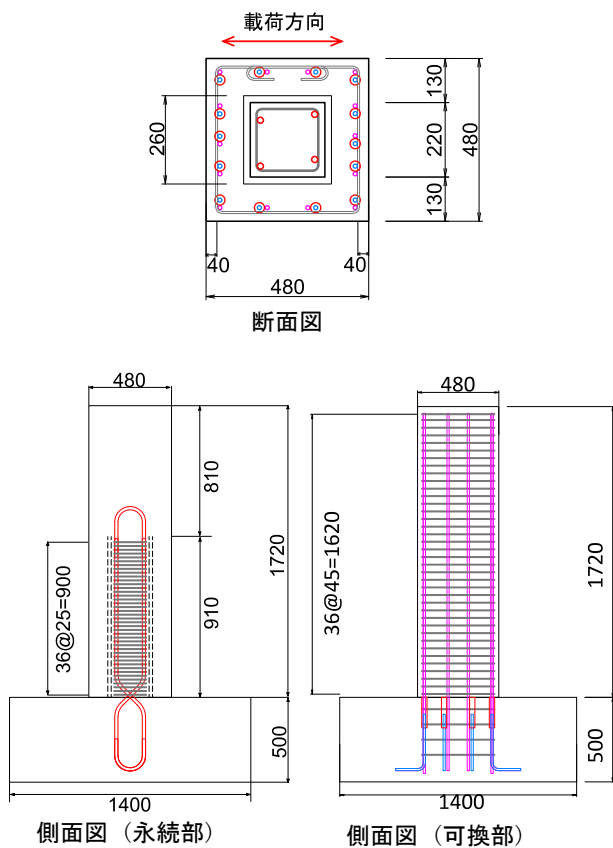
### b) 提案供試体 (荷重実験1および荷重実験2)

荷重実験1・2における提案供試体の寸法および配筋図を図-8に示す。なお、荷重実験1時における軸方向鉄筋、帯鉄筋、機械式継ぎ手の埋め込みに関しては、比較供試体(荷重試験1時)と同様である。2.(4)で述べたように、提案供試体では、可換部撤去時の軸沈下防止を目的として、永続部のスパイラル筋の配置を比較供試体から変更し、柱高さ0mmより上部に25mmピッチで配置している。また、より適切な可換部高さを選択できるよう、メナーゼ筋、縁切り材を110mm伸長し、フーチング上面から910mmとしている。

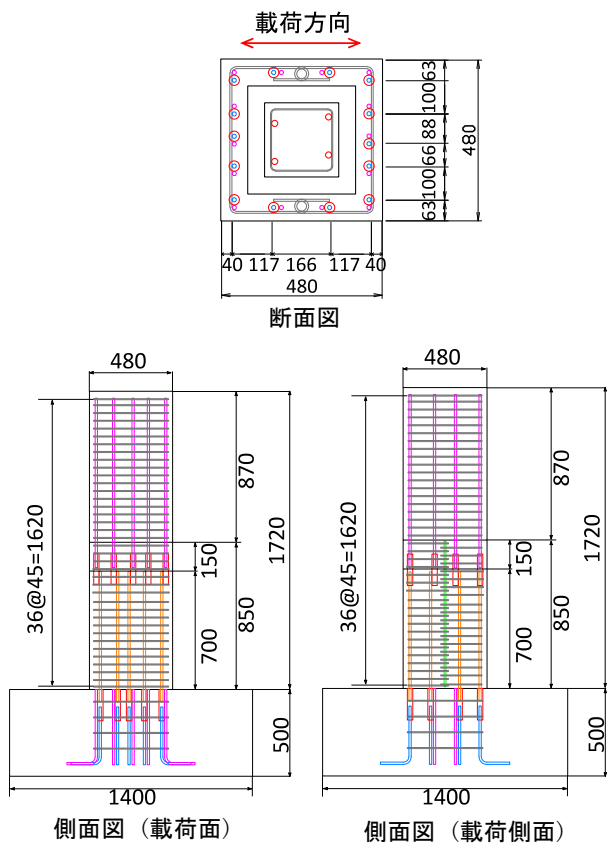
また提案供試体では、荷重実験1終了後に可換部の撤去が行われ、現場打ちRC部材を用いた新たな可換部が施工される。具体的には、2.(4)b)で述べたように、柱上部から露出させた鉄筋およびフーチング内部に埋め込んだ鉄筋を利用し、新たな軸方向鉄筋を機械式継ぎ手により接合する。その後、帯鉄筋の配筋作業を行い、現場打ちコンクリートの打設を行う。帯鉄筋はループ継ぎ手により接合し、せん断力の伝達を確保する。また、柱部と新可換部の隙間は無収縮モルタルで充填し、柱部、永続部および可換部の一体性を確保する。

### (3) 測定データ

供試体の各変形状態における復元力を得るため、アクチュエータに設置されているロードセルにより供試体の荷重位置における復元力および軸力を測定し、供試体の荷重位置における水平変位を計測するため、供試体の荷重位置にワイヤ式変位計を設置した。また、各種鋼材のひずみをひずみゲージにより測定した。



(a) 荷重実験 1 (可換部取り替え前)



(b) 荷重実験 2 (可換部取り替え後)

図-8 提案供試体の寸法および配筋図 (Unit:[mm])

#### (4) 荷重方法

本実験における荷重試験1・2は、正負交番漸増で荷重を行い、軸方向鉄筋の降伏変位 $\delta_y$  (=5.0mm)を基準として、50mmまでその整数倍、以降60mm、70mmと繰り返し荷重を行った。繰り返し回数は3回とした。また荷重軸応力は0.91MPa (荷重軸力 = 210kN)とした。

### 4. 実験結果

本実験ではアクチュエータが供試体を引いている際の変位を正とし、例えば+20mmの2サイクル目の荷重を「+20mm-2」と表記することとする。

#### (1) 荷重実験 1

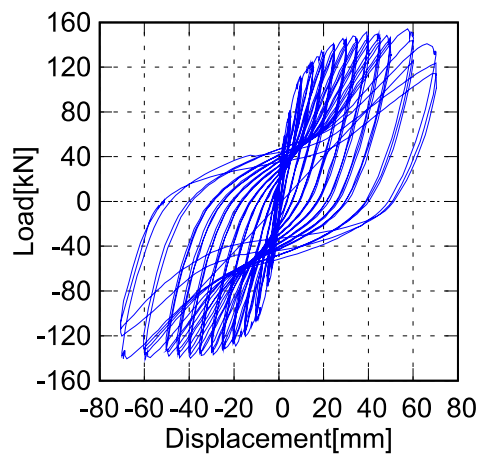
##### a) 荷重-変位関係

比較供試体および提案供試体の荷重-変位関係を図-9に示す。図-9に示す通り、各供試体とも水平変位+10mmにおいて軸方向鉄筋の降伏が生じた。この段階では未だメナーゼ筋が降伏していないため、水平変位35mmまでの骨格曲線において二次剛性が確認できる。その後、両供試体とも水平変位+60mmにおいて荷重が最大となり、比較供試体で+154.1kN、提案供試体で+149.4kNの最大荷重を示した。続いて、柱基部コンクリートのはらみ出しおよび軸方向鉄筋の座屈が+60mm-2および-70mm-1で確認された。そして、荷重振幅70mmにおいて、同一振幅での繰り返しにより著しい荷重低下が発生したことから、両供試体とも荷重試験1を終了した。上述の通り、各供試体間で荷重-変位関係に顕著な違いは見られなかった。したがって、提案供試体における永続部の改良が可換部取り替え前の柱の荷重-変位関係へ与える影響は小さいといえる。

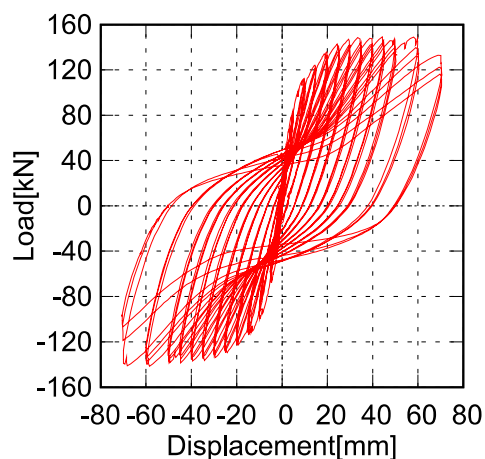
##### b) 破壊性状

各供試体の荷重終了時におけるひび割れ状況をそれぞれ図-10に示す。図より、両供試体のひび割れ性状に顕著な違いは確認されなかった。また、両供試体とも、柱高さ約1200mmの高さまでひび割れが確認された。

ここで、可換部撤去後に確認した永続部のひび割れ状況を図-11に示す。図より、比較供試体の永続部では、柱基部に開口幅の大きなひび割れが多数発生しているのに対し、提案供試体の永続部では、開口幅の小さいひび割れのみしか発生していないことがわかる。また、荷重側面のひび割れを見ると、比較供試体では柱基部のコンクリートが剥落に至るほどの損傷していたのに対し、提案供試体で生じたひ



(a) 比較供試体<sup>4)</sup>



(b) 提案供試体

図-9 載荷試験 1 における荷重—変位関係

び割れは軽微であった。これは、提案供試体の永続部では、柱基部までスパイラル筋が密に配筋されたことで、永続部のコンクリートの損傷が抑制されたためであると考えられる。

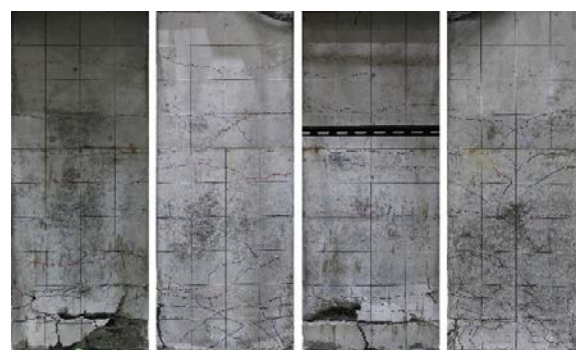
#### c) 軸方向鉄筋ひずみ

各供試体における軸方向鉄筋および帯鉄筋のひずみの柱高さ方向分布をそれぞれ図-12に示す。なお、提案供試体に対しては、鉄筋の引張試験を実施しており、軸方向鉄筋の降伏ひずみは $\epsilon_y = 0.0020$ 、帯鉄筋の降伏ひずみは $\epsilon_y = 0.0023$ であった。比較供試体に関しては、鉄筋の引張試験を実施していないため、比較供試体の鉄筋部材の降伏ひずみが、提案供試体と同程度であると仮定して考察を行うこととする。

図-12に示す通り、両供試体ともに柱高さ500～600mm程度の高さまで軸方向鉄筋が塑性化していることがわかる。なお、両供試体ともに、柱基部にて大きなひずみが生じているが、軸方向鉄筋の破断は確認されなかった。

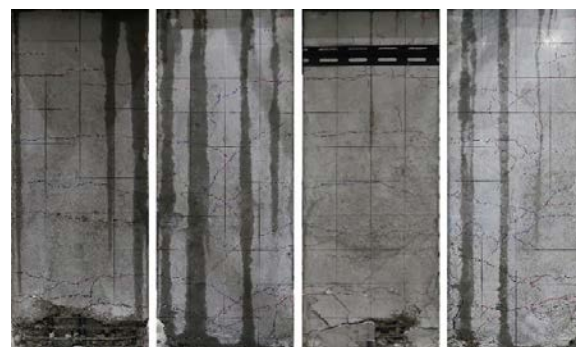
#### d) メナーゼ筋のひずみ

比較供試体および提案供試体の柱基部におけるメ



載荷面 載荷側面 載荷裏面 載荷側面

(a) 載荷実験 1 (比較供試体<sup>4)</sup>)



載荷面 載荷側面 載荷裏面 載荷側面

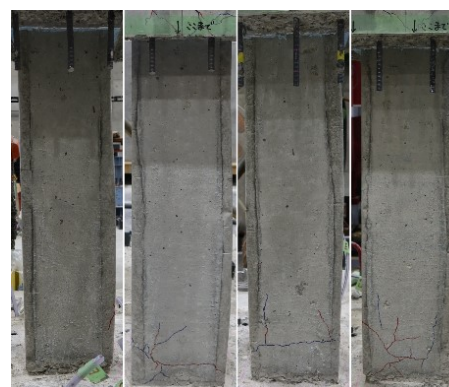
(b) 載荷実験 2 (提案供試体)

図-10 載荷試験 1 終了時におけるひび割れ状況



載荷面 載荷側面 載荷裏面 載荷側面

(a) 載荷実験 1 (比較供試体<sup>4)</sup>)



載荷面 載荷側面 載荷裏面 載荷側面

(b) 載荷実験 2 (提案供試体)

図-11 載荷試験 1 終了時における永続部のひび割れ状況

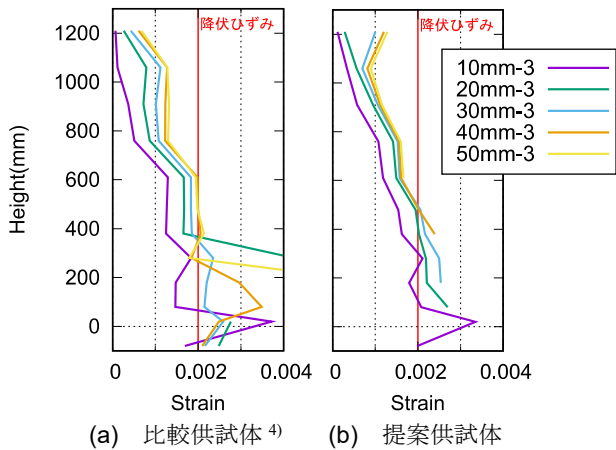
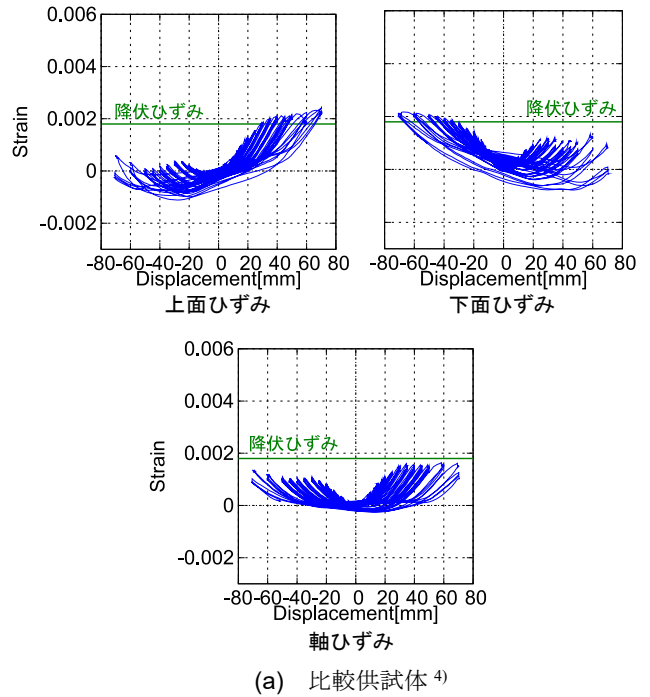


図-12 荷重試験 1 における軸方向鉄筋ひずみ

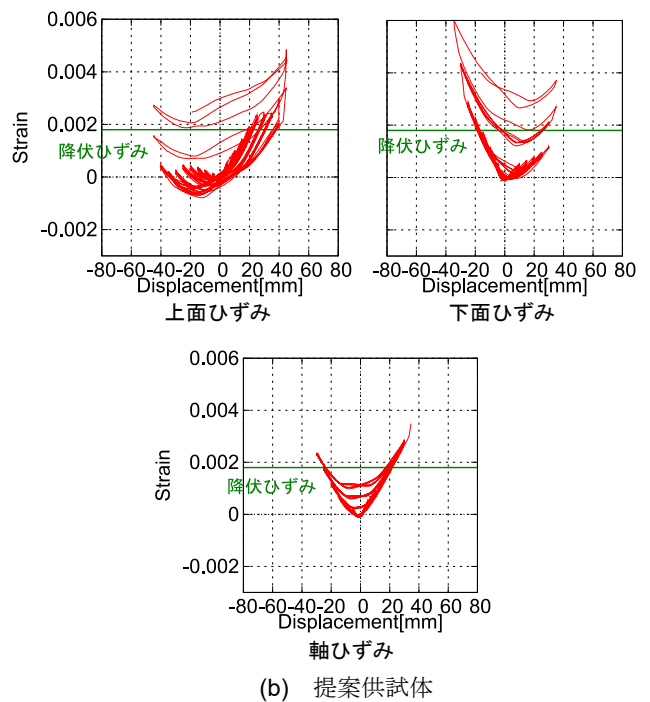
メナーゼ筋ひずみと柱の水平変位の関係を図-13に示す。図中には、本研究にて行った材料試験から得られた降伏ひずみ $\epsilon_y = 0.0018$ を緑線で示している。また、軸方向鉄筋と同様、比較供試体におけるメナーゼ筋の降伏ひずみも同様の値であるものと仮定して検討を行う。なお、各ひずみの値は、図-13(c)に示す位置に添付したひずみゲージから得られた値である。また、軸ひずみは上面ひずみと下面ひずみの平均から算出した。

図-13(a)より、比較供試体では、柱の水平変位が増大している領域においても、メナーゼ筋の上面ひずみ・下面ひずみともに圧縮側の値を取る区間が存在しており、軸ひずみも降伏ひずみ以下の値に留まっている。すなわち、比較供試体のメナーゼ筋では、曲げ変形が卓越していることがわかる。一方、図-13(b)を見ると、提案供試体のメナーゼ筋は軸方向へ伸長し、荷重振幅が35mmの段階でメナーゼ筋の全断面が引張降伏している様子が確認できる。

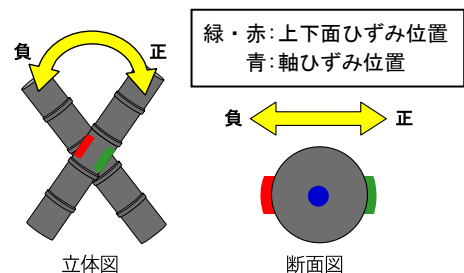
ここで、比較供試体と提案供試体でメナーゼ筋のひずみ性状に差異が見られた要因は以下のように考察できる。4.(1).b)で述べたように、比較供試体の永続部では、基部のコンクリートがスパイラル筋で保護されていないため、メナーゼ筋交差部周りのコンクリートの損傷が顕著であった。それに対し、提案供試体では、永続部がスパイラル筋で保護されているために、コンクリートの損傷が軽減されていた。したがって、提案供試体では、比較供試体と比較して中立軸が圧縮側に位置したため(図-14)、メナーゼ筋が荷重面・荷重面裏側へ伸長し、塑性化が進行したと考えられる。



(a) 比較供試体<sup>4)</sup>



(b) 提案供試体



(c) メナーゼ筋のひずみ位置

図-13 荷重試験 1 におけるメナーゼ筋ひずみ

(2) 可換部の取り替え実験

a) 可換部取り替え高さの設定

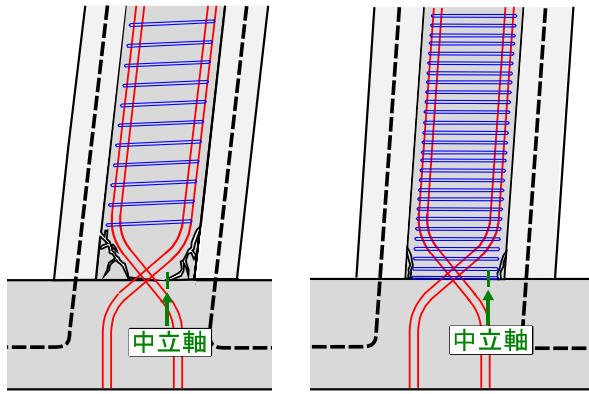
4.(1)c)で述べたように、提案供試体において、載荷試験1で軸方向鉄筋が塑性化した領域は柱高さ0mm～600mmの区間であった。ゆえに、柱高さ600mm以上の部材は、可換部取り替えの際に再利用することができると考え、可換部取り替え実験では、柱高さ700mm以上の軸方向鉄筋を再利用することとした。

しかしながら、4.(1)b)で述べたように、載荷試験1によるひび割れは柱高さ1200mm程度まで発生していた。コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>では、コンクリートにひび割れが生じていると、鋼材の腐食による耐震性能の低下が生じる可能性があるため、環境条件により許容ひび割れ幅が定められている。そのため、ひび割れ幅に応じて別途ひび割れ充填等、対応

が必要となる可能性があるといえる。

b) 可換部の撤去作業

本実験では、水平力が0kNを維持するようマニュアルで水平アクチュエータを制御しながら、可換部の撤去作業を実施した。その結果、**図-15**に赤線で示したように、完全に可換部を撤去した段階で-34mmの残留変位が生じた。その後、アクチュエータにより水平力を加えて柱の変位を0mmに戻す作業を実施したところ(**図-15**の青線)、±10kN以下の水平力で柱の残留変位を0にすることが可能であった。ここで、可換部取り替え実験の工程について作業内容とその様子を**図-16**に整理する。図より、はじめに、かぶりコンクリートをはつりとり、軸方向鉄筋を露出させ(工程2)、次に柱基部における可換部全断面のコンクリートをはつりとった(工程3)。その後、新可換部を取り付ける高さまで鉄筋コンクリートを



(a) 比較供試体 (b) 提案供試体

図-14 メナーゼ筋ひずみ

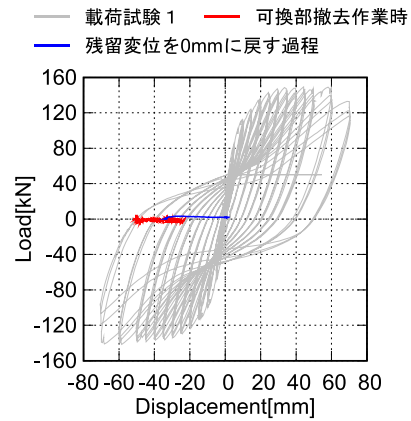


図-15 可換部取り替え実験における荷重-変位関係 (提案供試体)

1.作業開始時	2.かぶりコンクリートはつり 軸方向鉄筋切断	3.可換部柱基部 コンクリート撤去	4.可換部はつり 完了
5.軸方向鉄筋配筋 機械式継手接合	6.現場打ちコンクリート 型枠配置・打設	7.現場打ちモルタル打設	8.可換部取替作業 完了

図-16 可換部取り換え実験の作業工程およびその様子

撤去した。続いて、図-16の5~8の工程である新可換部の取付作業を説明する。撤去作業後においては、新可換部が取り付けられるまでの間、余震により柱が倒壊する可能性がある。そのため、可換部の撤去作業終了後、直ちに新たな軸方向鉄筋を取り付ける必要がある。その後、新可換部の帯鉄筋の配筋を行った後(工程5)、現場打ちコンクリート用の型枠を設置し、コンクリートの打設を行った(工程6)。最後に元の柱と新可換部の隙間を無収縮モルタルにて充填し(工程7)、可換部取り替え実験を終了した。

以上の工程を軸力210kNの载荷下で可換部の撤去を行うことができたことから、本研究が提案するメタボリズムRC柱構造は、永続部で上部工死荷重を支持したまま可換部の取り替えが実施可能な構造であることがわかった。

### c) 可換部撤去時の柱の軸沈下について

両供試体における可換部撤去時の鉛直変位-水平変位関係を図-17に示す。なお、図中の緑線は可換部撤去前の正負交番载荷実験時のデータ、赤線は可換部撤去および水平変位0mmに戻す作業時のデータを表している。なお、比較供試体に関しては、別途、永続部のみに対して载荷試験が行われており、その際の結果を青線で示している。

図-17(a)より、载荷試験1における最終サイクル水平変位0mm時のそれぞれの鉛直変位を基準に考えると、比較供試体では約3.2mmの軸沈下が生じており、永続部の载荷試験を含めると、約4.7mmの軸沈下が生じていた。それに対し、提案供試体では、可

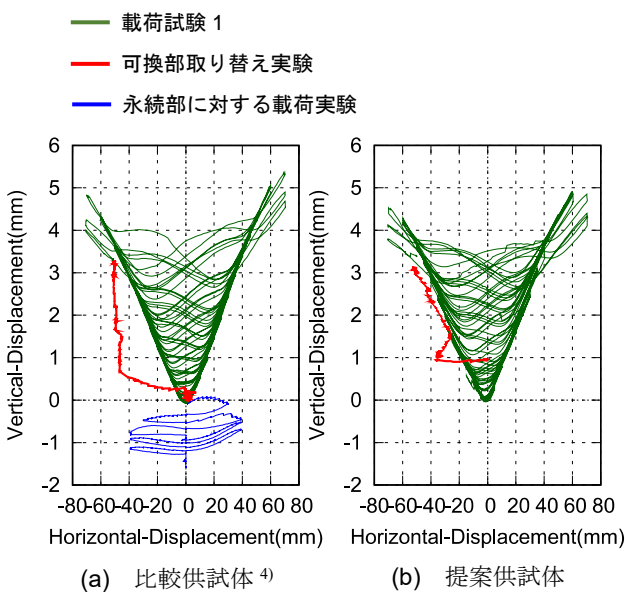


図-17 载荷試験1および可換部取り替え実験における鉛直変位-水平変位関係

換部撤去および水平変位0mmに戻す作業終了時において、軸沈下は約2.2mmに留まっている。さらに、载荷試験1の開始前を基準にして考えると、可換部取り替え後の時点で、柱が約1mm程度鉛直方向に伸長していることがわかる。これは、4.(1) d)で示したように、メナーゼ筋が軸方向に塑性化したことに起因すると考えられる。可換部取り替え時に柱が1mm伸長していたことから、スパイラル筋で拘束した永続部のコンクリートには引張りひび割れが発生していると考えられ、永続部基部のコンクリートは軸耐力を發揮しておらず、可換部撤去後の軸力はメナーゼ筋で支持していたと考えられる。

ここで、両供試体における柱の鉛直変位の推移から推測される柱の挙動の模式図を図-18に示す。図に示すように、メナーゼ筋の周囲のコンクリートの損傷度の違いにより、メナーゼ筋に対する拘束効果に差異が生じ、結果として永続部の軸剛性に差異が生じたと考えられる。すなわち、提案供試体では、スパイラル筋を柱高さ0mmまで配筋することで、永続部基部のコンクリートが残存してメナーゼ筋を拘

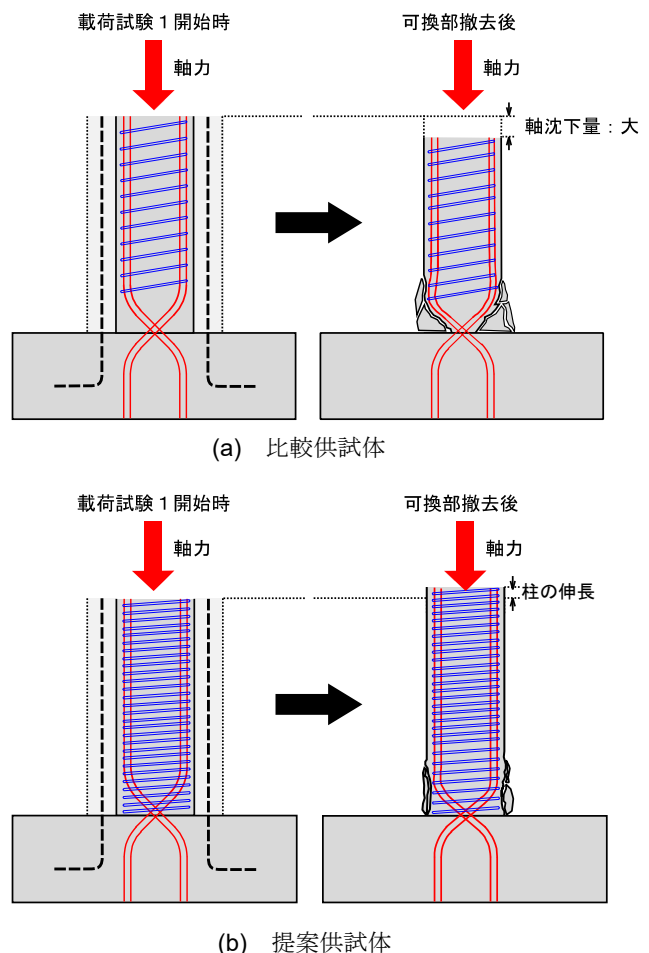


図-18 柱の鉛直変位の推移から推測される柱の挙動の模式図

束した結果、比較供試体と比べて永続部の軸剛性が向上したと考えられる。

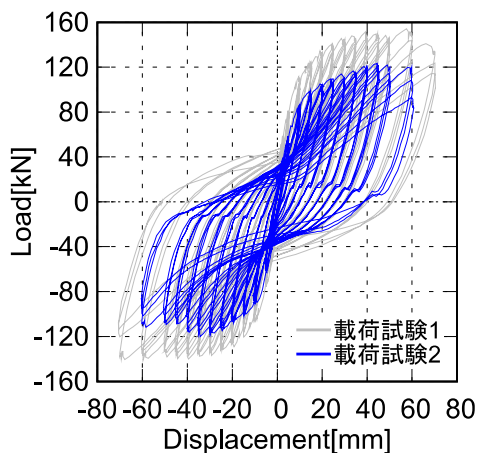
### (3) 荷重実験 2

#### a) 荷重－変位関係

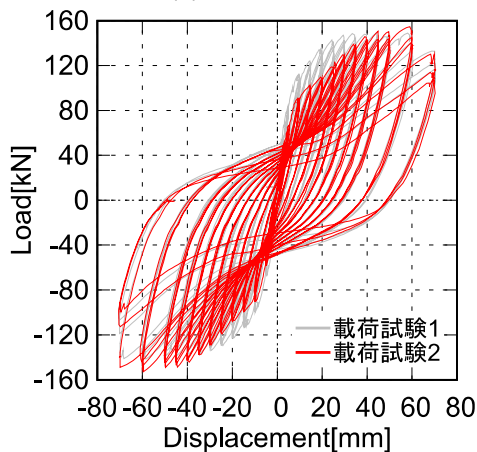
両供試体の荷重－変位関係を図-19に示す。なお図中には、可換部取り換え前に行われた正負交番荷重実験(荷重試験1)の結果を灰色で示している。

図-19(a)より、比較供試体において、荷重試験1で得られた結果と比べて最大荷重が低下していることがわかる。この要因については、過去の検討において、可換部撤去に際して永続部の軸沈下が発生し(図-17)、メナーゼ筋が圧縮された状態で新たな可換部が取り付けられたため、荷重中にメナーゼ筋が発揮する引張力が低下したことが要因であると考察している<sup>4)</sup>。

一方、提案供試体(図-19(b))では、荷重試験1で得られた結果と同程度の最大荷重を示していることがわかる。これは、永続部におけるスパイラル筋の配筋法の改良により、可換部取り替え時における柱の



(a) 比較供試体<sup>4)</sup>



(b) 提案供試体

図-19 荷重試験2における荷重－変位関係

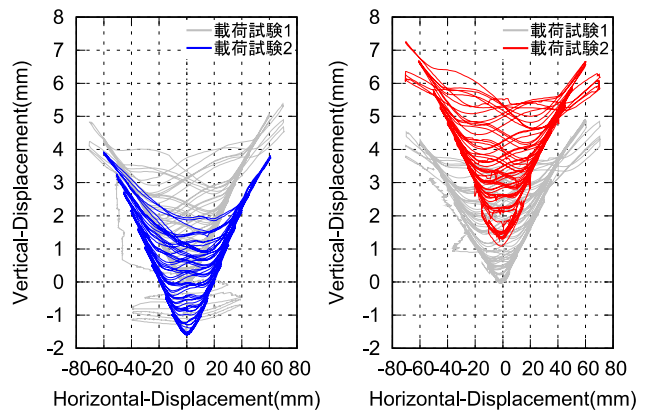
軸沈下が抑制されたことで、荷重中にメナーゼ筋が発揮する引張力が低下しなかったことが要因であると考えられる。ここで、両供試体の鉛直変位－水平変位関係を図-20に示す。なお図中には、荷重試験1および可換部取り替え実験時の結果を灰色で示している。図より、提案供試体では、比較供試体と比べて柱の軸方向野伸長量が大きいことが確認できる。このことから、提案供試体におけるメナーゼ筋の引張力が確実に発揮されていたことが伺える。

以上より、提案供試体では、永続部におけるスパイラル筋の配筋法の変更し、永続部の軸剛性を確保したことにより、可換部取り換え前後で適切に柱の耐震性能が確保できることがわかった。

#### b) 破壊性状

両供試体の荷重終了時におけるひび割れ図をそれぞれ図-21に示す。両供試体とも、曲げによるひび割れが柱下端部に卓越し、下端および中程に水平ひび割れが多く見られた。また、比較供試体では、柱基部における無収縮モルタルとコンクリートの境界が大きく目開きする様子が確認された(図-22)。一方、提案供試体では、可換部と躯体間に充填した無収縮モルタルとコンクリートの境界でひび割れは生じていたものの、このひび割れが目開きして損傷が過度に集中することはなかった。

また、比較供試体では、軸方向鉄筋の座屈が荷重試験1と比較して早期に発生したことが確認された。これは、プレキャスト部材を接合する際、軸方向鉄筋に無理な変形を与えたことによる影響や、柱高さ40mmに存在する無収縮モルタル打ち継ぎ目に損傷が集中し、軸方向鉄筋の座屈拘束力が低下した可能性などが考えられる。一方、検討供試体では荷重試験1と同様の水平変位において軸方向鉄筋の座屈が発生しており、可換部の取り替え前後で軸方向鉄筋



(a) 比較供試体<sup>4)</sup>

(b) 提案供試体

図-20 荷重試験2における鉛直変位－水平変位関係

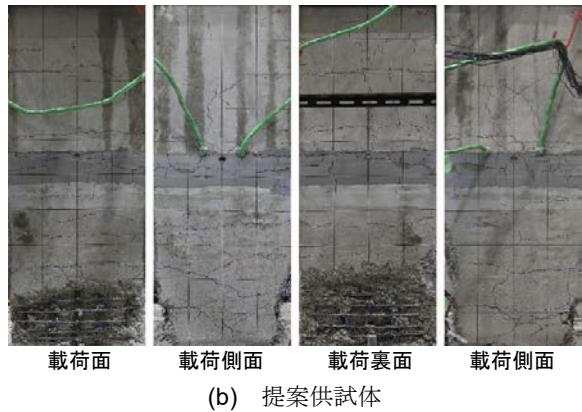
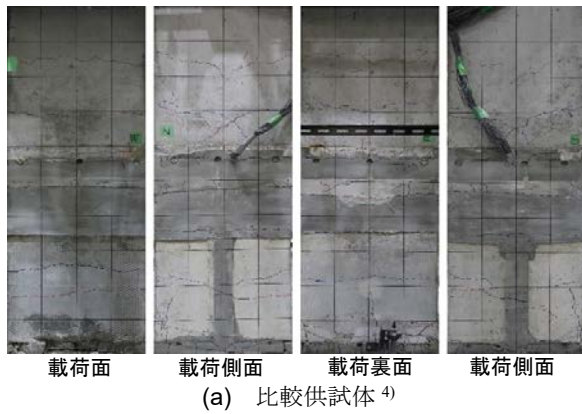


図-21 載荷試験2終了時におけるひび割れ状況

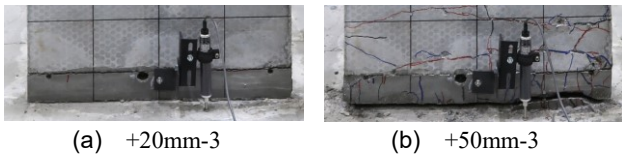


図-22 比較供試体<sup>4)</sup>の載荷試験2における無収縮モルタルとコンクリートの境界

の座屈性状に大きな変化はなかった。

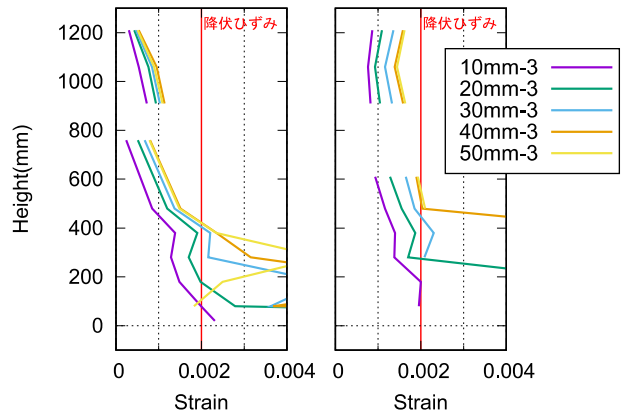
以上より、可換部取り替え後の柱の破壊性状を踏まえると、過去に比較供試体で採用したプレキャストRC部材を用いた可換部の取り替え方法よりも、提案構造で採用した現場打ちによる可換部の取り付け方法の方が、柱の変形性能を確保する上で適していると判断できる。

### c) 軸方向鉄筋ひずみ

各供試体における軸方向鉄筋の柱高さ方向分布をそれぞれ図-23に示す。両供試体ともに、載荷試験2における軸方向鉄筋の塑性化領域が載荷試験1と同程度であることがわかる。したがって、提案構造における可換部の改良が、可換部取り替え後の軸方向鉄筋の変形性状に与える影響はないことがわかった。

### (4) 実験結果まとめ

提案供試体と比較供試体では、載荷試験1の段階では荷重-変位関係や柱の軸変位-水平変位関係に



(a) 比較供試体<sup>4)</sup> (b) 提案供試体

図-23 載荷試験2における軸方向鉄筋ひずみ

関して大きな差異は確認されなかった。その一方で、永続部のメナーゼ筋の変形性状においてのみ明確な差異が見られ、提案供試体において永続部のスパイラル筋の配筋法を変更した影響が確認された。そして、可換部の撤去作業や可換部取り換え後の載荷試験2の段階では、検討供試体と比較供試体の挙動に明確な差異が確認された。具体的には、提案供試体における永続部基部のコンクリートがスパイラル筋で保護されたことで、永続部の軸剛性低下が抑制され、可換部取り換え後に柱の最大荷重が確実に発揮されることが明らかとなった。

## 5. 結論

本研究では、将来の要求性能の変化に応じて、軸力支持下で耐震性能を改変させることができる柱構造「メタボリズム柱構造」の実現に向けて、過去に提案した永続部にメナーゼヒンジ、可換部にプレキャストRC部材を用いたメタボリズム柱構造に対して改良を加えた新たなメタボリズムRC柱を提案した。提案構造では、永続部のメナーゼヒンジをスパイラル筋で保護し、可換部に現場打ちRC部材を用いた。そして、本研究における提案構造(提案供試体)と過去研究により提案された構造(比較供試体)における正負交番載荷試験や可換部取り替え実験の結果を比較し、両供試体の耐震性能の比較・検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 可換部の取り替え前に実施した比較供試体と検討供試体の正負交番載荷実験結果を比較すると、復元力特性や破壊性状、軸変形特性に顕著な違いは確認されなかった。

- 可換部の取り替え前において、永続部のメナーゼ筋の変形性状については明確な差異が見られた。具体的には、比較供試体ではメナーゼ筋交差部においてメナーゼ筋の曲げ変形が卓越していたが、検討供試体では柱の水平変位増大に伴って、鉛直方向にメナーゼ筋が伸長していった。これは、提案供試体において永続部基部をスパイラル筋で保護したため、永続部基部のコンクリートの損傷が軽減された結果、中立軸が圧縮側に位置したためであると推測される。
- 提案供試体では、永続部基部のコンクリートをスパイラル筋で保護した結果、正負交番載荷実験時の永続部の軸剛性低下が抑制された。その結果、可換部を取り外した際の永続部の軸沈下が軽減されることが示された。
- 比較供試体では、可換部取り替え前後で柱の最大荷重が低下するのに対し、提案供試体では、可換部取り替え前後で柱が示す最大荷重に変化がないことが確認された。これは、永続部におけるスパイラル筋の配筋法の改良により、可換部取り替え時における柱の軸沈下が抑制されたことで、載荷中にメナーゼ筋が発揮する引張力が低下しなかったことが要因であると考えられる。

以上の結果から、本研究で提案したメタボリズム RC 柱構造は、可換部取り替え前後で要求する性能が確実に発揮することができ、供用中の要求性能の変化への対応や地震被害後の早期復旧に資する柱構造であるといえる。

**謝辞**：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574 と、科学研究費補助金若手研究21K14231の助成を受けて実施した。謝意を表します。

## REFERENCES

- 1) 日本橋梁建設協会：東日本大震災橋梁被害調査報告書，2011。[Japan Brige Association: Great East Japan Earthquake Bridge Damage Survey Report, 2011.]
- 2) 林学，植村佳大，高橋良和：埋込継手構造を用いた塑性ヒンジ部取替による RC 橋脚の耐震性能回復に関する実験的検討，土木学会論文集 A1, Vol. 77, No. 4, pp. I\_424-I\_435, 2021。[Hayashi, M., Uemura, K., and Takahashi, Y.: Experimental study on seismic performance recovery of RC pier by replacement of plastic hinge part using embedded joint structure, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1*, Vol. 77, Issue 4, pp. I\_424-I\_435, 2021.]
- 3) 植村佳大，前田紘人，高橋良和：軸力支持下で耐震性能を改変できる鋼製メタボリズム柱構造の正負交番載荷実験，第 41 回地震工学研究発表会, No. 2305, 2021。[Uemura, K., Maeda, H., and Takahashi, Y.: Cyclic loading test for steel metabolism column capable of modifying seismic performance while supporting axial forces, *The 41st JSCE Earthquake Engineering Symposium*, No.2305, 2021.]
- 4) 林学，植村佳大，高橋良和：メナーゼヒンジを用いたメタボリズム RC 橋脚の地震後復旧性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.343-348, 2021。[Hayashi, M., Uemura, K., and Takahashi, Y.: Experimental study on recovery performance after earthquake of metabolic RC pier with embedded Mesnager hinges, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.44, No.2, pp.343-348, 2021.]
- 5) Wang, Z., Wang, J.Q, Tang, Y.C., Liu, T.X., Gao, Y.F., and Zhang, J.: Seismic behavior of precast segmental UHPC bridge columns with replaceable external cover plates and internal dissipaters, *Engineering Structures*, Vol.177, No.15, pp.540-555, 2018.
- 6) Chenga, C.T., Yanga, J.C., Yehb, Y.K., and Chen, S.E.: Seismic performance of repaired hollow-bridge piers, *Construction and Building Materials*, Vol.17, No.5, pp.339-351, 2003.
- 7) 熊本県土木部道路都市局道路整備課：熊本地震での経験を踏まえた橋梁災害復旧のまとめ，2018。[Road Maintenance Division, Road and Urban Development Bureau, Department of Public Works, Summary of bridge disaster recovery based on the experience of the Kumamoto earthquake, 2018.]
- 8) 五島健斗，植村佳大，高橋良和：設計基準外事象に対する挙動が定性的に予測可能な埋め込みメナーゼヒンジ RC 構造の開発，土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 4, pp. I\_506-I\_519, 2019。[Hayashi, M., Uemura, K., and Takahashi, Y.: Development of embedded Mesnager hinge RC structure capable of predicting behavior qualitatively for beyond design basis events, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1*, Vol. 75, Issue 4, pp. I\_506-I\_519, 2019.]
- 9) 菅野貴浩，石橋忠良，木野淳一，小林薫：軸方向鉄筋の内側に円形帯鉄筋を配置した鉄筋コンクリート柱の地震時変形性能，コンクリート工学論文集, Vol.20, No.2, pp.2\_1-2\_12, 2009。[Uemura, K., Maeda, H., and Takahashi, Y.: Deformation capacity under earthquake on reinforced concrete column reinforced by inside spiral reinforcement, *Concrete Research and Technology*, Vol.20, No.2, pp.2\_1-2\_12, 2021.]

- 10) 日本道路協会：道路橋支承便覧，pp.207-212，2018. [Japan Road Association: Dorokyo-shisyobinran, pp. 207-212, 2018.]
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2017. [Japan Society of Civil Engineers: Standard Specifications for Concrete Structures “Design”, 2018.]

## IMPROVED PLASTIC HINGE REPLACEMENT PERFORMANCE UNDER AXIAL FORCE FOR EMBEDDED MESNAGER HINGE RC COLUMN

Keita UEMURA, Koki NISHINE, Manabu HAYASHI and Yoshikazu TAKAHASHI

The authors have developed Metabolism column structure that can modify seismic performance during supporting axial force. The Metabolism column structure has a double-layered base of column with the replaceable part in the outer shell, which is expected to absorb seismic energy, and the permanent part, which supports axial and shear forces at any time. In a previous study, we proposed a Metabolism RC column with Mesnager hinges in the permanent part, but the expected seismic performance could not be achieved after the replacement of the outer RC shell. In this study, the Metabolism RC column was modified and its effect was investigated experimentally. As a result, it was confirmed that the base of the permanent part formed by the Mesnager hinge was protected by spiral rebars to suppress the axial settlement of the column at the time of replacement of the outer RC shell, and the seismic performance of the column after replacement of the outer RC shell was adequately secured.