

軸力支持下において耐震性能の改変が可能な 鋼製メタボリズム柱構造の正負交番載荷実験

植村 佳大¹・前田 紘人²・高橋 良和³

¹正会員 工博 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）

²正会員 工修 大成建設株式会社 土木部（〒163-6008 東京都新宿区西新宿6-8-1）

³正会員 工博 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）

1. 背景

地震後の早期復旧を目的として、塑性ヒンジ部の部材の取り替え可能性を検討した研究事例がいくつか存在する。例えば、Tong ら¹⁾は、継ぎ手機構を有する取り替え可能な外付けダンパーを取り付けたコンクリート構造を検討している。Zhen ら²⁾は、セルフセンタリング機構を内包したコア部材に、取り替え可能なプレキャスト部材およびダンパーを取り付けたコンクリート構造を提案している。またChin ら³⁾は、損傷したRC 柱に対して損傷部コンクリートをはつりだし、外側の座屈した軸方向鉄筋を取り替えることによって、RC柱の補修を試みている。藤倉ら⁴⁾は、レベル2 地震のような強震動が作用して損傷を受けても補修可能なRC橋脚の開発に向けて、柱内部にCFT柱を配置した柱構造に対する検討を行っている。しかしながら、これらの研究の中に、軸力を支持した状態で塑性部材を取り替え、柱の耐震性能を回復させることに成功した事例は存在しない。

そうした中、著者らは地震後の早期復旧に加え、将来の要求性能の変化に応じて耐震性能を容易に更新することができるRC柱構造「メタボリズムRC柱構造」を提案・開発している^{5),6),7)}。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ような構造である。先行研究では、可換部にRC 部材を用いた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、永続部により軸力を支持した状態で可換部を取り替え、柱の耐震性能を新陳代謝させることに成功している^{5),6),7)}。

しかしながら、本来は一体構造として設計されるRC構造の塑性ヒンジ部に、可換性を確保するための不連続部を設けることの影響について、今後更なる検討を必要としている。

本研究では、新たなメタボリズム柱構造として、部材同士のつなぎ合わせによって構造体が形成される鋼構造に着目し、メタボリズム柱構造の可換部に鋼製部材を適用した「鋼製メタボリズム柱構造」を提案し、正負交番載荷実験および可換部取替実験により、その性能と部材の可換性について検討を行った。

2. 鋼製メタボリズム柱構造について

(1) メタボリズム柱構造の要求性能

メタボリズム柱構造は永続的に使用する構造として永続部を柱内部に、取替可能な構造として可換部をその外殻に配置した二重構造で構成される柱構造である（図-1）。下記に永続部および可換部の要求性能について述べる。

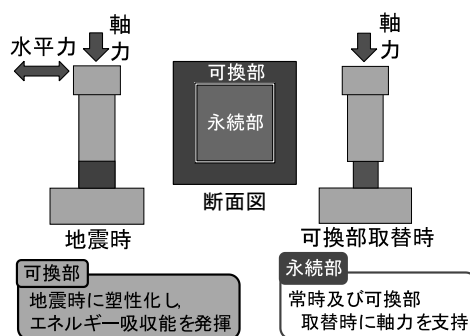


図-1 メタボリズム柱構造

a) 永続部の要求性能

地震後における可換部の取替を可能とするため、メタボリズム柱構造の永続部には、軸力を支持する性能と、レベル2 地震動のような強い地震が発生したとしても軸沈下やせん断変形が防止されるような性能が求められる。また、永続部は地震後も繰り返し使用することを考慮すると、地震が発生しても塑性変形しないような構造が望ましい。すると永続部構造として、曲げ抵抗を一切発揮しないヒンジ機構を内包した構造が適切であると考えられる。一方で、可換部取り外し時の安定性を考慮すると、永続部にも一定の曲げ抵抗を付与する必要があると考えられる。平常時の取替であれば、 $P-\Delta$ 効果の影響を打ち消せる程度の曲げ抵抗で十分であるが、地震後の取替を想定した場合、余震の影響も考慮する必要がある。余震に対してどこまでの性能を付与するかについては、例えばレベル1 地震動程度の地震力にも抵抗できるほどの性能であったり、橋梁の架設時に用いられるようなレベル2 地震動の半分程度の地震力には抵抗できるような性能などが考えられる。

b) 可換部の要求性能

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。取替可能な構造とするためには、必然的に柱基部に可換部とその他部材を接合する箇所を設けることになる。しかしながら、柱基部などの大きな曲げモーメントが発生する箇所には継ぎ手などの接合部を配置しないのが一般的である。平成29 年道路橋示方書-耐震設計編⁸⁾においては、軸方向鉄筋の段落としては塑性化を考慮する領域で行ってはならないとあり、鋼構造接合部設計指針⁹⁾においても、柱継手は骨組の終局状態における作用応力の小さい位置に設け、柱継手を弾性域に留めるとある。したがって、接合部の挙動が弾性域に留まるように設計を行う必要がある。

(2) 鋼製部材とメタボリズム柱構造との親和性

a) 接合部の存在と可換性

鋼構造は多くの場合、部材同士のつなぎ合わせによって構造体が形成される。そのため、鋼構造物は溶接やボルトなどによるつなぎ合わせ箇所である「接合部」を有することが多い。この接合部は、構造物の一様性を失わせるため、局所的な応力集中の要因となり、弱点部となりえる。したがって、接合部は鋼構造設計において重要な設計部位のひとつで

あり、これまでに数多くの研究がなされてきた。その結果得られた知見は各示方書に整理され、我が国における設計の指針となっている。このように従来弱点であった接合部であるが、接合部を有することは、言い換えれば取り替えやすい構造であるとも言え、メタボリズム柱構造を考える上では利点となりえる。

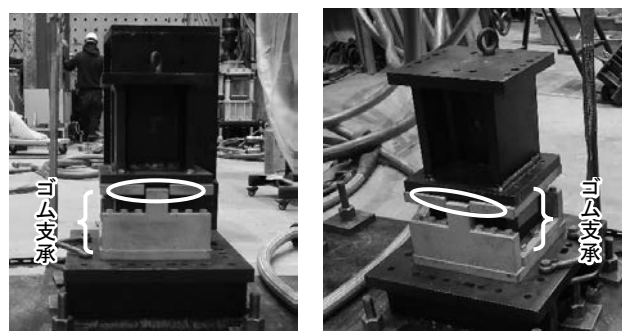
b) 座屈後の耐震性と永続部による軸力支持

従来の鋼管柱では、基部に像足座屈が生ずれば水平荷重が急速に失われ崩壊に至るため、現在の耐震設計では最大荷重程度までの挙動しか考慮しないのが一般的である。それに対し、メタボリズム柱構造の可換部に鋼製部材を用いた場合、軸力を支持する永続部が存在することにより、通常の鋼管柱と比較して座屈後の強度劣化が緩やかになると考えらる。そのため、最大荷重後も設計に組み込める可能性があり、これまでの設計基準、幅厚比パラメータ等の制限を緩和できると考えられる。そのため、鋼製メタボリズム柱構造では、薄肉な断面の適用が可能であったり、縦補剛材が不要であったり等、より経済的な構造となることが期待される。

(3) 提案構造

a) 永続部の構造について

本提案構造では、過去の検討^{5),6)}に倣い、軸力・せん断力を支持しながら耐震性能への寄与ができるだけ少ない構造として、図-2に示す変位制御装置を有するゴム支承(以降、固定ゴム支承とする)を永続部の基部に採用する。固定ゴム支承には、軸力支持機能が期待されるとともに、図-2中の白丸で示したように、一定以上水平変位が発生すると、それ以上せん断変形しないようにサイドブロックで制御するような機構が内包されており、回転のみ許容するヒンジ構造となっている。また、可換部取替時に $P-\Delta$ 効果や余震に弾性範囲内で抵抗できる程度の復元力を確保するため、可換部取り外し時には、鋼樑部材を補助的に固定ゴム支承まわりに取り付けた構造を検討する。



(a) 正面の様子

(b) 全体の様子

図-2 固定ゴム支承

b) 可換部の構造について

本提案構造の可換部には、取付時の作業性を考慮し、コの字型断面の二部材によって構成された鋼製部材と、平板型部材の四部材によって構成された鋼製部材の2種類を採用する。なお、可換部にRC部材を使用した過去の検討では、可換部同士の接合や可換部と永続部の接続には、鉄筋継手と無収縮モルタルを用いていた。鋼製の可換部を使用する本提案構想では、高力ボルトによる機械的接合や溶接接合などが考えられる。しかしながら、本研究では部材の接合部に対する詳細な検討は対象外とする。

c) 柱基部にゴム支承と鋼製部材が用いられた事例

弁天工区の連続立体免震橋(弁天高架橋¹⁰⁾)では、兵庫県南部地震での落橋被害からの復旧にあたって既設基礎を再利用しつつ地震力の低減を図ることを目指し、基部に免震ゴム支承が配置されている。またゴム支承を囲うように鋼製部材が配置されており、ゴム支承の経年劣化抑制の役割を担っている。

以上のように、本提案構造のように、柱基部にゴム支承および鋼製部材が用いられた構造は提案され、実装の実績がある。なお本提案構造は、ゴム支承のせん断変形を許容しておらず、鋼製部材の部材力による復元力を期待しているため、弁天高架橋で採用された構造とは異なる形式であるという点には留意が必要であるといえる。

3. 正負交番載荷実験および可換部取替実験の概要

(1) 実験供試体

a) 永続部

永続部の全体図および基部に使用する固定ゴム支承の寸法を図-3に示す。本研究では、提案構造の復元力特性および可換部取替の影響を検討事項とし、本構造における上部鋼材は剛体として挙動させることとした。また、取替時の安定性を保証する鋼棒部

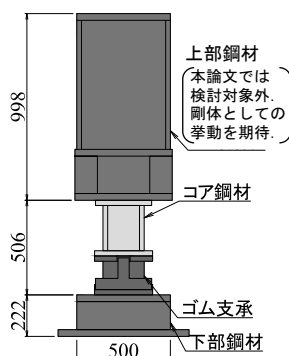


図-3 永続部

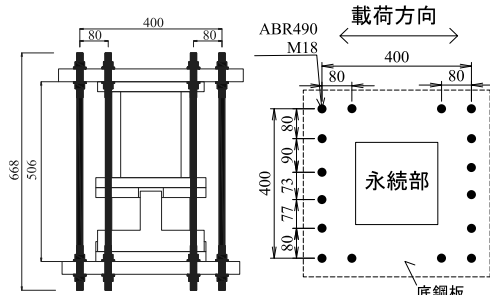


図-4 ABR 鋼棒の取り付け

材として、構造用アンカーボルトを用いた。鋼種はABR490 (以降、この鋼棒部材をABR鋼棒と呼ぶ)) であり、短期許容引張耐力は62.4kN/本、短期許容せん断耐力は36.0kN/本である。ABR鋼棒取り付けの様子を図-4に示す。なおABR鋼棒を取り付けた永続部には、余震等を考慮して期待する最低限の耐震性能として、0.5Gに相当する水平力が作用しても弾性範囲内で抵抗できる復元力を期待することとした。またABR鋼棒は、上端及び下端における鋼板を両側からナットで挟むように締結して接合したが、上部構造を含めて実構造に実装する際のABR鋼棒の適切な接合法については、今後の検討事項とする。

b) 可換部

可換部は、S-C-4.5、S-C-6.0、S-C-6.0の3ケースを用意した。S-C-4.5、S-C-6.0は図-5(a)のようにコの字型断面二部材によって構成され、板厚がそれぞれ4.5mmと6mmである。S-P-6.0は図-5(b)のように平板型の部材四枚から構成され、四方向から設置できるようになっている。鋼材の鋼種はSS400を用い、角溶接は完全溶込み開先溶接の両面溶接とした。ここで、各可換部の寸法を図-6に示す。なお、本実験供試体では、幅厚比パラメータ R_R がS-C-4.5で1.59、S-C-6.0およびS-C-6.0で1.19となっており、本供試体は可換部同士が接合された矩形箱型断面であると仮定しても幅厚比パラメータ R_R は設計上望ましいとされている0.5以下とならないことが確認される。しかし、鋼製メタボリズム柱構造においては、前節で述べたように、永続部が圧縮力を受け持つことで、最大荷重後に従来ほどの激しい荷重低下は生じないことが期待され、幅厚比パラメータ R_R の制限を緩められる可能性がある。そのため本研究においては本設計値を採用し、その適用性を検討することとした。

また本供試体では、可換部端部での急激な断面変化を防ぐため、端部に三角リブを設けることで両端が完全固定端となることを期待した。なお、可換部と永続部を接合は、1~3mm程度の鋼板を可換部と上部鋼材の間に挿入し、ボルト締めを行うことによ

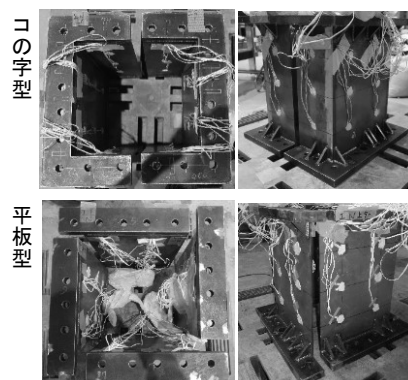


図-5 可換部の外観

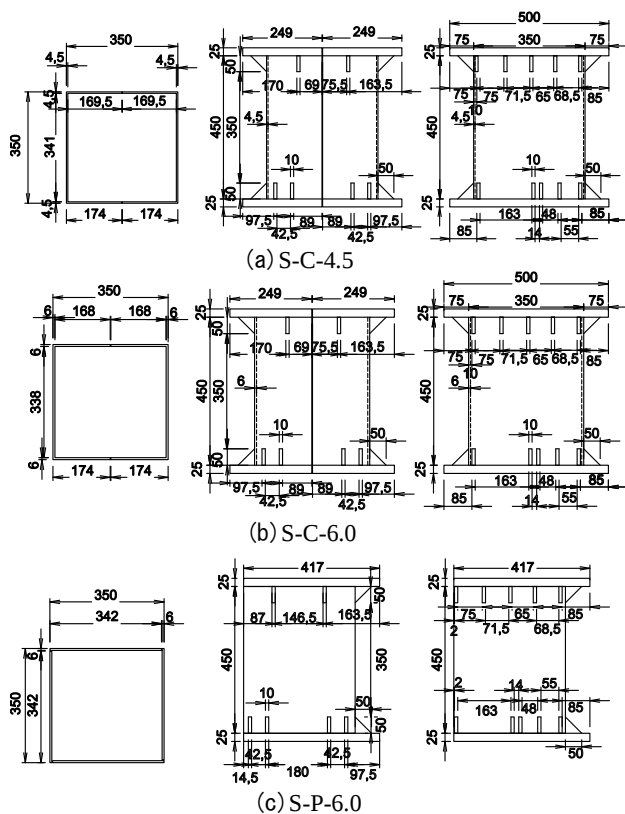


図-6 可換部の寸法

り行ったが、先述したように、接合部の性能については検討対象外とした。また、S-C-4.5とS-C-6.0は二部材、S-P-6.0は四部材から構成されるため、実橋梁に適用する際はそれら同士も設置後に接合されるべきであるが、実験では供試体間の形状の違いが耐震性能に及ぼす影響を明確にするため、これらは接合しないこととした。

(2) 正負交番载荷実験における载荷方法

本実験では、永続部に200kNの軸力を作用させた後、可換部の取付を行った。水平载荷方法は正負交番漸増とし、5mmを基準振幅として、その整数倍の変位振幅で载荷を行った。S-C-6.0およびS-P-6.0においては、各振幅での繰り返し回数は3回とし、過去の検討^{5),6)}に倣って50mm振幅で载荷を終了した。S-C-4.5においては、可換部座屈後の柱の復元力特性について検討するため、50mm振幅までは他の供試体と同様の载荷パターンを採用し、その後、10mmずつ振幅を増大させて変位振幅が100mmとなるまで繰り返し载荷を行った。その際、変位50mm以降の変形領域での繰り返し回数は1回とした。

(3) 可換部取替実験

正負交番载荷実験後、各ケースとも残留変位が発生した状態で、軸力作用下での可換部撤去実験を実

施した。その際、水平荷重が発生するとそれをゼロに戻すように変位制御しながら実施した。その際、水平変位を動かしても水平荷重をゼロに戻せなかった時には、強制的に柱を鉛直に戻して撤去を行うこととした。また撤去方法は、S-C-6.0については可換部の接合方式によらない方法として、可換部腹部をグラインダーで切断する方法を採用した。また、ボルト接合が実際の接合方式となる可能性が高いことも考慮し、S-C-4.5及びS-P-6.0については可換部腹部を切断せず、接合部のボルトを緩めることにより可換部を撤去することを目指した。

4. 実験結果および考察

(1) 荷重－変位関係および破壊性状

a) 永続部 + 可換部 (S-C-4.5, S-C-6.0, S-P-6.0)

図-7に各供試体の荷重－変位関係を示す。図より、全てのケースにおいて安定した履歴形状が得られたことがわかる。また、S-C-4.5とS-C-6.0を比較すると、S-C-6.0の最大耐力がS-C-4.5よりも向上しており、履歴面積も大きくなっていることが確認される。つまり、可換部を取り替えることにより、耐震性能の新陳代謝が可能であることがわかる。次に、S-C-6.0とS-P-6.0を比較すると、同じ板厚であるにも関わらず、耐震性能の差が確認される。これは、角部の接合の有無による拘束条件の差に起因すると考えられ、S-P-6.0では圧縮側の鋼板がはらむことで、S-C-6.0に比べて圧縮抵抗力を発揮できていなかったと推測される。それが耐震性能にも影響を及ぼし、同じ板厚でも荷重レベルが大きく異なったといえる。

また、すべてのケースにおいて可換部の座屈が発生しており(図-8)、降伏後の荷重低下は可換部の座屈によるものであると判断できた。その一方で、大変形領域まで载荷を行ったS-C-4.5のポストピーク挙動を見ると、可換部の座屈以降も一定の荷重を保っていることがわかる。これは、永続部が軸力を支持しているためであると考えられる。事実、図-9に示すように、圧縮側の変形時に大きく座屈変形していても、可換部の四方全体が座屈することはなく、引張側になると再度引張を受け、引張力を負担している様子が確認される。そこで、本実験にて確認された座屈後の荷重低下抑制効果に対し、次章で解析的な検討を行う。

b) 永続部 + ABR鋼棒

永続部にABR鋼棒を取り付けた際の荷重－変位関係を図-7(d)に示す。図-7(d)から、正負ともに

100kN 程度の復元力が得られたことが確認された。また、水平変位をゼロにすると荷重が概ねゼロとなるような弾性的な挙動を示しており、期待通りの耐震性能が発揮されたことが確認される。よって、鋼製メタボリズム柱構造では、可換部取り替え時に構造用アンカーボルトを仮設することで、 $P-A$ 効果や余震に弾性範囲内で抵抗できる程度の復元力を確保できることがわかった。

また本実験では、ABR鋼棒に座屈変形なども確認されず、圧縮・引張ともに一定の抵抗力を発揮したと考えられる。一方で、このような棒部材は座屈により圧縮抵抗力が低下する可能性も十分に考えられる。したがって、本実験においては上記のように圧縮抵抗も発揮した上で0.5G水平力程度の復元力が発揮されたが、設計においては、圧縮は永続部のみが負担するものとし、棒部材には引張抵抗のみ期待して設計するのが安全であると考えられる。

(2) 永続部の軸力支持性状について

図-10に各ケースにおける永続部の負担軸力－水平変位関係を示す。いずれのケースにおいても、正負交番载荷に伴って永続部の負担軸力は増加していることがわかる。载荷軸力以上に永続部負担軸力が増加しているのは、可換部の鋼板が引張力を発揮しているためと考えられる。また、可換部の座屈が発生して以降も、永続部は安定して圧縮軸力を支持している。よって、座屈発生後に可換部の鋼板が圧縮力を負担しなくとも、永続部によって圧縮反力が担保されることで、柱の耐震性能が向上したと考えられる。ここで、各供試体の鉛直変位－水平変位関係を見ると(図-11)、全ての供試体において、水平変位が0mmとなった際の軸沈下が1mm程度であり、可換部座屈後の軸沈下が抑制されていることがわかる。

以上の結果から、従来の鋼管柱と比べて鋼製メタボリズム柱構造の座屈後の荷重低下が抑制されたのは、内部に軸力を支持する永続部が存在することに起因していると考えられる。

(3) 軸力作用下での可換部撤去実験結果

接合方式によらない撤去方法として、グラインダーで可換部腹部を切断することによりS-C-6.0の撤去を実施したところ、軸力支持下でも可換部の撤去が可能であった。図-12にその時の様子を示す。次に、図-12に示したように、S-C-4.5やS-P-6.0に関してはボルトを緩めることによる撤去を実施した。本撤去方法においても、可換部に作用している力を永続部に移しながら可換部を取り外すことが可能であることが実証できた。

ここで、S-C-4.5における撤去中の荷重－変位関係を図-13に赤線で示す。黒線は正負交番载荷実験

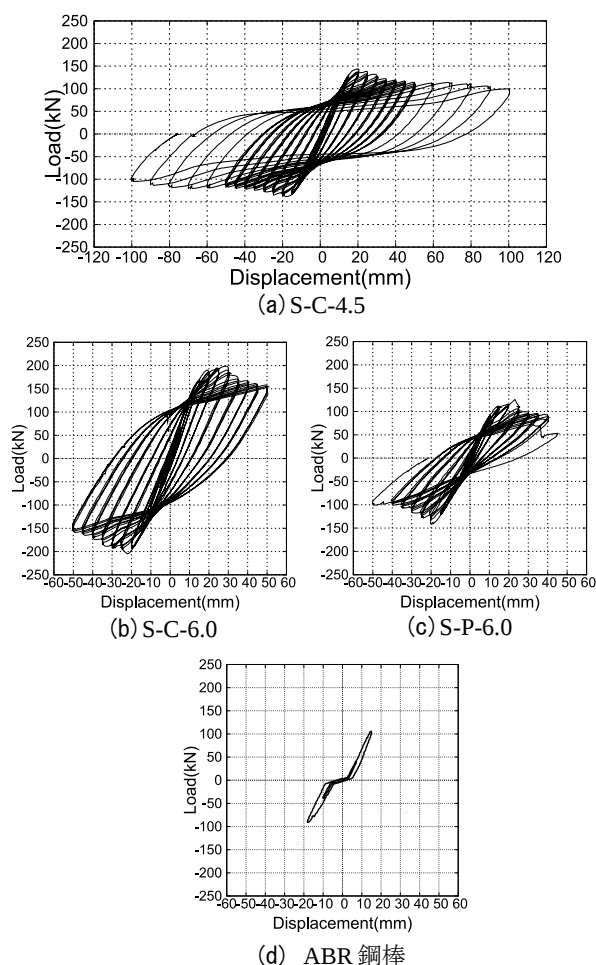


図-7 荷重-変位関係



(a) S-C-4.5

(b) S-C-6.0

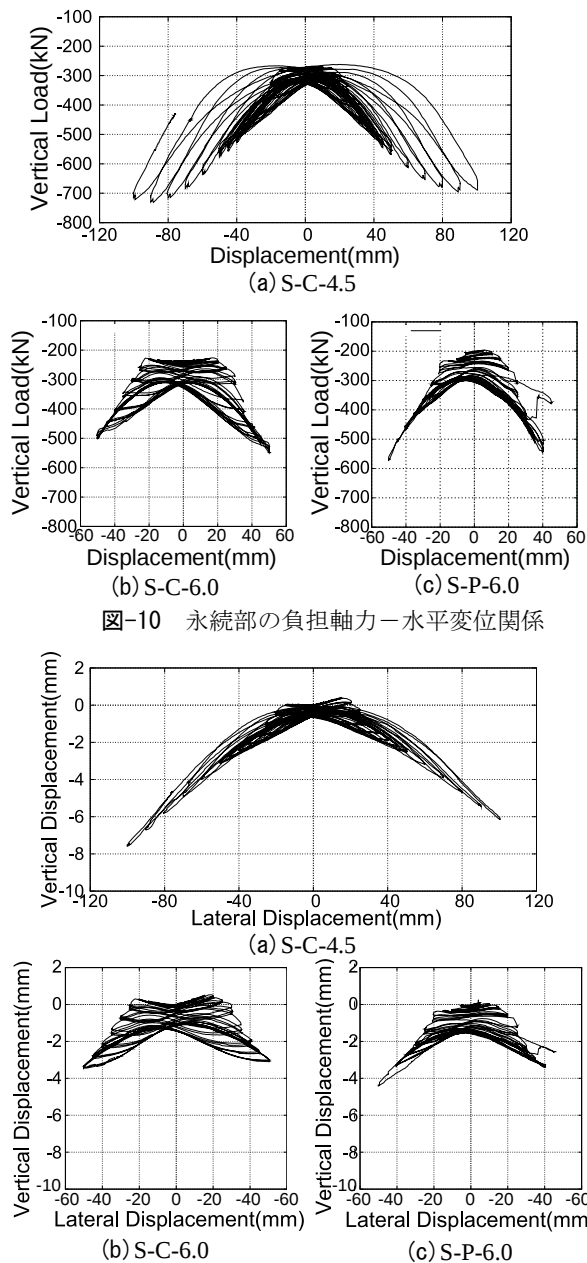
(c) S-P-6.0

図-8 载荷後の可換部の様子

(a) 圧縮変形時

(b) 引張変形時

図-9 座屈後の再引張の様子



中の荷重－変位関係であり、青矢印が水平変位の調整方向である。図より、正負交番載荷時と比較して、小さな水平荷重で水平変位をゼロに戻すことが可能であることがわかった。したがって、鋼製メタボリズム柱構造において、軸力を支持した状態で、残留応力を有する可換部を撤去し、新たな可換部に取り替えられることが実証されたといえる。

5. 鋼製メタボリズム柱構造の解析的検討

(1) 本章の目的

本研究では、鋼製メタボリズム柱構造の永続部が圧縮を受け持つことにより、柱の耐震性能の向上を

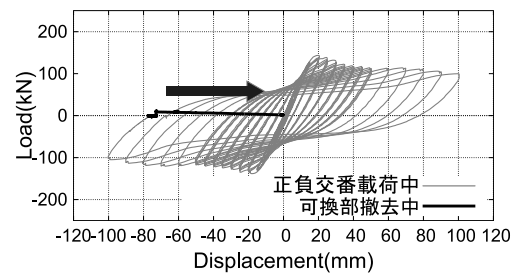


(a) S-C-6.0



(b) S-P-6.0

図-12 可換部の撤去の様子



狙っている。そして、4. で示した実験的検討では、鋼製メタボリズム柱構造において、幅厚比パラメータ R_R が現行の設計基準を満たしていないのも関わらず、座屈後の荷重低下が抑制されることを確認した。そこで本章では、正負交番載荷実験を模擬した数値解析により、永続部の軸力支持機能と可換部の座屈後の復元力特性との関係について検討を行う。

(2) 解析モデル

図-14に本検討で使用した解析モデルの概要図を示す。本モデルでは、可換部をシェル要素によりモデル化した。その際、可換部の形状を再現するために、S-C-4.5, S-C-6.0 については載荷側面中央部の可換部の節点同士を、S-P-6.0 については可換部の四隅節点同士を結合しないこととした。上部鋼材は剛体で模擬し、シェル要素上端の節点は剛体部下端の節点と剛結することで、可換部と上部鋼材の接合を模擬した。シェル要素の下端には、初期剛性が実験と合致するように回転ばねを導入した。鋼材の応力ひずみ関係は降伏後剛性が初期剛性の1/100となるようなバイリニア型とし、降伏条件はMisesの降伏条件を用いた。また、硬化則は移動硬化則を用い、塑性流れ則は関連流れ則を用いた。

永続部は弾性梁要素としてモデル化し、要素下端の拘束条件を回転のみ自由とした。永続部の軸剛性

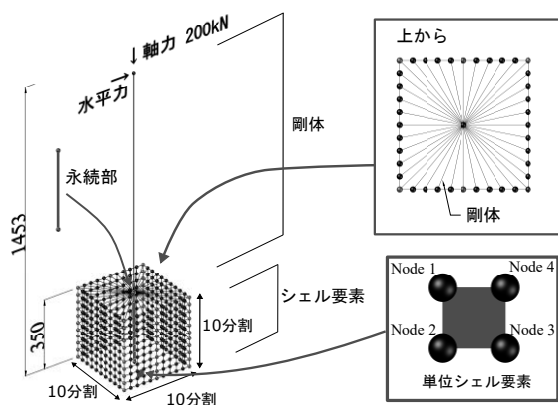


図-14 解析モデル全体図

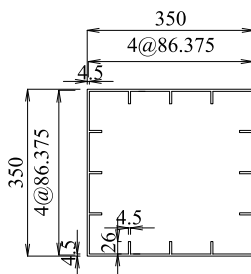


図-15 導入した縦補剛材

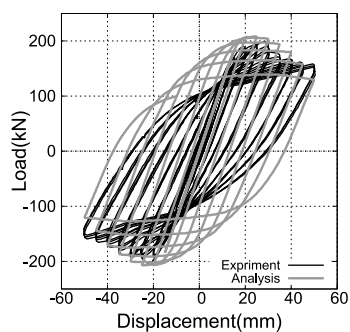
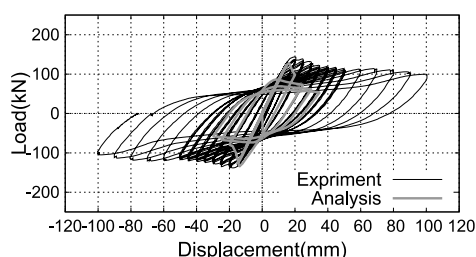
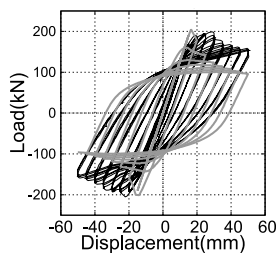


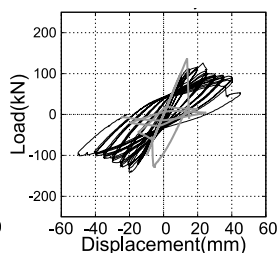
図-18 解析で得られた荷重-変位関係(永続部の軸剛性がゼロ)



(a) S-C-4.5

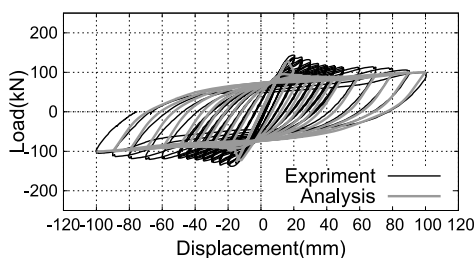


(b) S-C-6.0

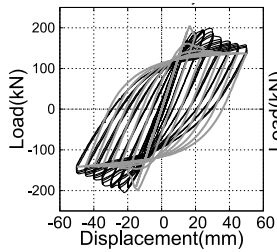


(c) S-P-6.0

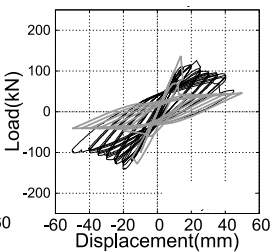
図-16 解析で得られた荷重-変位関係(永続部の軸剛性がゼロ)



(a) S-C-4.5



(b) S-C-6.0



(c) S-P-6.0

図-17 解析で得られた荷重-変位関係(永続部の軸剛性に実験供試体の値を採用)

は、実験に用いた固定ゴム支承の軸剛性を参考に47.0kN/mmとした場合と、永続部が存在しない場合の性能を把握するため、軸剛性をゼロとした場合の検討を行った。

また本解析では、現行の耐震基準を満たす従来の鋼製柱構造に対する検討も併せて実施した。具体的には、図-15に示すような縦補剛材を導入することで、幅厚比パラメータ R_R を0.387とした鋼製柱の解析モデルを作成し、縦補剛材を導入した鋼製柱構造と永続部を有する鋼製メタボリズム柱構造の耐震性能について比較を行った。

(3) 解析結果

解析により得られた柱の荷重-変位関係を図-16、図-17に示す。図-16より、永続部の軸剛性をゼロとした解析では、実験では確認されなかった急激な荷重低下が発生していることがわかる。それに対し、永続部の軸剛性に実験供試体の値を採用した解析(図-17)では、座屈直後の挙動に実験結果との差異があるものの、S-C-4.5及びS-C-6.0については、変位の大きな範囲における荷重が概ね一致していることがわかる。S-P-6.0については、実験で得られた履歴形状を解析で表現できていないが、これは解析が初期不整を考慮していない簡易的な解析であったことに起因し、変形による圧縮力の低下を過剰に評価してしまったことなどが要因として考えられる。しかしながら、本解析により、中心に軸力を支持する部材が存在することで、可換部座屈後の荷重低下が抑制されるという傾向が表現できたといえる。

また、縦補剛材を導入した鋼製柱構造に対する解析結果(図-18)を見ると、鋼製メタボリズム柱構造の実験結果と同程度のポストピーク性能を示していることがわかる。以上から、鋼製メタボリズム柱構

造では、柱中心に軸力を支持する永続部が存在することにより、現行の設計基準、幅厚比パラメータ等の制限を満たさない、薄肉断面の適用が可能であり、より経済的な構造となることが期待できるといえる。

6. まとめ

本研究では、新たなメタボリズム柱構造として、メタボリズム柱構造の可換部に鋼製部材を適用した「鋼製メタボリズム柱構造」を提案し、正負交番載荷実験および可換部取替実験により、その性能と部材の可換性について検討を行った。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- 鋼製メタボリズム柱構造は、安定した履歴形状を示すと同時に、鋼板の板厚が異なる可換部に取り替えることで、耐震性能の新陳代謝が可能であることがわかった。
- 構造用アンカーボルトを永続部に取り付けすることで、0.5G水平力相当の弾力的な復元力を実現することができた。そのため、鋼製メタボリズム柱構造では、可換部取り替え時に構造用アンカーボルトを仮設することで、 $P-\Delta$ 効果や余震に弾性範囲内で抵抗できる程度の復元力を確保できることがわかった。
- 鋼製メタボリズム柱構造では、座屈発生後に可換部の鋼板が圧縮力を負担しなくとも、永続部によって圧縮反力が担保されることで、柱の耐震性能が向上すると考えられる。事実、正負交番載荷実験では、可換部の座屈が発生して以降も、永続部は安定して圧縮軸力を支持しており、座屈後の柱の軸沈下も1mm程度に抑制されたことを確認した。
- 解析的検討により、軸力を支持する永続部が存在することで、可換部座屈後の荷重低下が抑制されるという傾向を示した。また、縦補剛材を導入した鋼製柱構造が、鋼製メタボリズム柱構造の実験結果と同程度のポストピーク性能を示していることを確認し、軸力を支持する永続部の存在により、これまでの設計基準、幅厚比パラメータ等の制限を満たさない、薄肉な断面の

適用が可能である可能性を示した。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574および研究活動スタート支援20K22431の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) Guo, T., Cao, Z., Xu, Z., and Lu, S.: Cyclic Load Tests on Self-Centering Concrete Pier with External Dissipators and Enhanced Durability, *Journal of Structural Engineering*, 142(1), 2016.
- 2) 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*, 177(15), pp.540-555, 2018.
- 3) Chenga, C.T., Yanga, J.C., Yehb, Y.K., and Chen, S.E.: Seismic performance of repaired hollow-bridge piers, *Construction and Building Materials*, 17(5), pp.339-351, 2003.
- 4) 藤倉修一，忍田祥太，臼井裕太，NGUYEN MINH HAI，中島章典，浦川洋介：レベル2 地震損傷後に修復可能なRC 橋脚の提案および実験的検証，土木学会論文集A1，75(4)，pp.I_591-I_601，2019.
- 5) 前田紘人，林学，高橋良和：メタボリズム耐震橋脚構造の開発に向けた正負交番載荷及び塑性ヒンジ部取替実験，土木学会論文集A1，76(4)，pp.I_377-I_392，2020.
- 6) 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検討，第40回地震工学研究発表会講演論文集，No.1651，2020.
- 7) 林学，植村佳大，高橋良和：埋込メナーゼヒンジ RC 橋脚の地震後復旧性に関する実験的検討，第 23 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演概要集，pp.75-82，2021.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-耐震設計編-，日本道路協会，2017.
- 9) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.
- 10) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて 震災復旧工事誌，pp. 462-477，1997.