

軸力支持下で耐震性能の改変が可能な 鋼製メタボリズム柱構造の開発

植村 佳大¹・前田 紘人²・高橋 良和³

¹ 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)

² 正会員 クラフトバンク株式会社 (〒103-0002 東京都日本橋馬喰町 2-2-5)
E-mail: h.maeda@craft-bank.com

³ 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、軸力支持下におい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。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、その性能と部材の可換性について実験的検討を行った。その結果、提案構造が安定した履歴形状を示すと同時に、可換部を取り替えることで、耐震性能の新陳代謝が可能であることがわかった。また、提案構造では、永続部によって圧縮反力が担保されるため、可換部座屈後の柱の荷重低下を抑止できることが明らかとなった。

Key Words: *metabolism, replaceable, steel column, seismic performance, cyclic loading test*

1. 背景

近年、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。Guo ら¹⁾は、継手機構を取り入れた外付けダンパーを用いたコンクリート構造を検討している。しかし彼らの検討では、取替自体は実際には行われておらず、耐震性能についても従来の RC 柱構造と比べて低下するという結果が得られている。Wang ら²⁾は、セルフセンタリング機構を内包したコア部材に、プレキャスト部材とエネルギー吸収能を担保するダンパーを組み合わせ、損傷後のダンパー及びプレキャストカバーを取り替えることで、地震後の早期復旧を目指すコンクリート構造を提案した。この研究においては、損傷したダンパーの取替は実際に行われたものの、その際軸力は除荷されており、軸力支持下での取替は達成されていない。また Chenga 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出し、新たに Dog Bone Bar を取り付けることによって補修を試みている。しかし、取替を想定していない内部の鉄筋が座屈していたため、補修前の柱の耐力より補修後の

耐力は低下していた。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、柱内部の鋼管の残留変形が大きく、補修して再び使用することは困難であった。これらの研究から、取替可能な構造を実装した上で従来の柱構造に匹敵する耐震性能を発揮することや、軸力支持下において塑性部材を取り替えることは容易ではないことがわかる。

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。

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、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手などの接合部を配置しないのが一般的である。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。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⁹⁾¹⁰⁾。接合部に対する知見が豊富であるという特長を持つ鋼構造は、部材の可換性確保を目指すメタボリズム柱構造と高い親和性を持つといえる。

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れ、最大荷重後も設計に組み込める可能性がある。また、永続部が軸力を支持した状態で鋼製可換部を取り付けることで、永続部のみで初期軸力を支持することができるため、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。

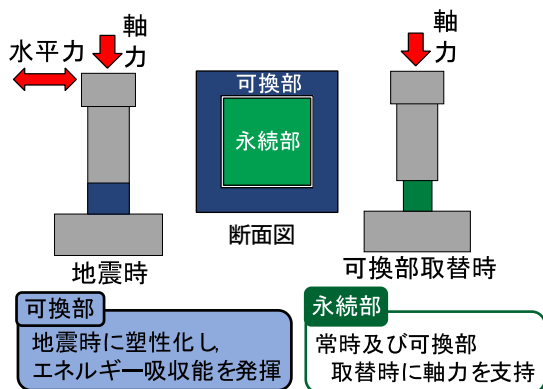


図-1 メタボリズム柱構造

(3) 従来の鋼管柱との相違点

従来の鋼管柱では、鋼管内部にコンクリートを充填することで、柱の耐震性能向上を図ることが一般的であり、これまでにコンクリート充填鋼管柱(CFT柱)に対する数多くの検討がなされてきた¹¹⁾¹²⁾。コンクリート充填による耐震性能の向上は、従来鋼管内に拘束され圧縮強度の向上が見込まれるコンクリートと鋼管の合成効果による強度上昇と、充填されたコンクリートによる鋼管の局部座屈防止効果によるものとされてきたが、近年、後藤らがCFT柱における耐震性能向上メカニズムについて、次のような見解を示している¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。それは、充填されたコンクリートがダイヤフラムを介して軸圧縮力を支持することで鋼管の座屈変形および軸沈下が大幅に抑制されること、繰り返し振動により一度局部座屈変形が生じていた鋼管も再引張により座屈変形が修復されるとともに引張力を負担し、反力としての圧縮力は拘束コンクリートが受け持つこと、これらにより耐力低下が抑制されるというものである。

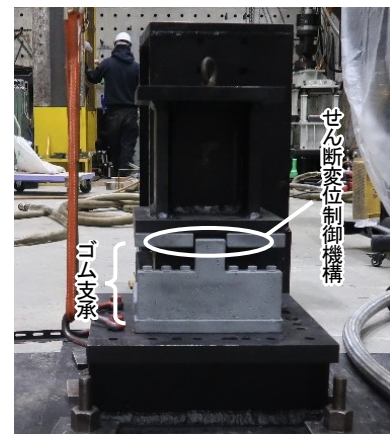
上記メカニズムにおける充填コンクリートの役割は、2.(b)で述べた鋼製メタボリズム柱構造における可換部座屈後の永続部に期待する役割と類似している。しかし、鋼製メタボリズム柱構造では、鋼製部材の取り替えが可能であることはもちろんのこと、永続部に死荷重を支持させた状態で可換部を取り付けるという手順を踏むことで、永続部のみで軸力を支持し、鋼製部材に初期軸力が作用しない状況を実現することができる。そのため、軸力支持性能と耐震性能を明確に分離することが可能となり、2.(b)で述べたような、鋼製部材の座屈後の耐震性向上や幅厚比パラメータ等の制限緩和を図る際、従来のCFT鋼管に比べて有利な構造形式になり得るといえる。

(4) 提案構造

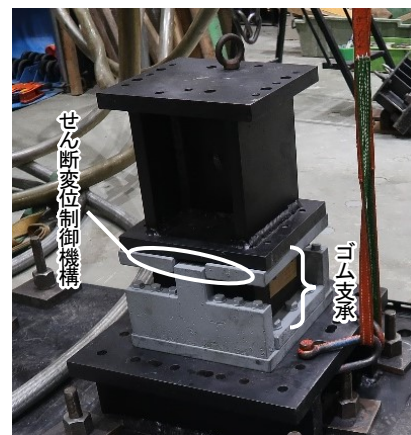
a) 永続部の構造について

本提案構造では、過去の検討^{5a)}に倣い、軸力・せん断力を支持しながらも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、せん断変形を許容せず、図-2に示すサイドブロックにより、せん断変形を防止する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。

本提案構造のように、ゴム支承に対し曲げ変形を期待した検討は過去に行われており、変形性能および復旧性に富む新形式のRC橋脚として、ゴム層を柱基部に高減衰ゴム支承を設けた柱構造が提案されている¹⁶⁾¹⁷⁾。しかしながら、ゴム支承に回転変形を期待する際のゴム支承の適切な設計手法については更なる検討が必要であるといえる。そのため、本研究では、事前に永続部単体で正



(a) 正面の様子



(b) 全体の様子

図-2 固定ゴム支承

負交番載荷実験を行い、本実験での柱の変形レベルにおいて、固定ゴム支承に安定したヒンジ機構が期待できることを確認している。

また、可換部撤去後の柱の安定性を保証するため、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よう、可換部取り外し時に、鋼棒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こととする。

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(図-3)。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¹⁸⁾)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

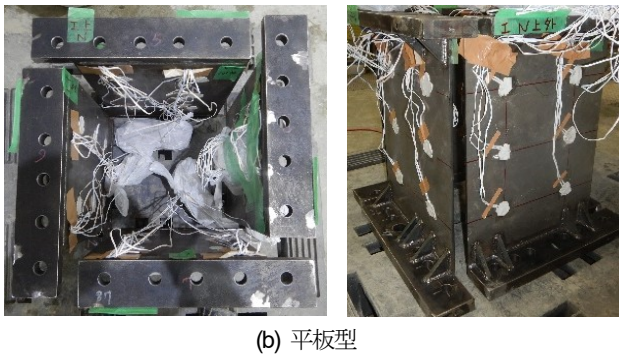
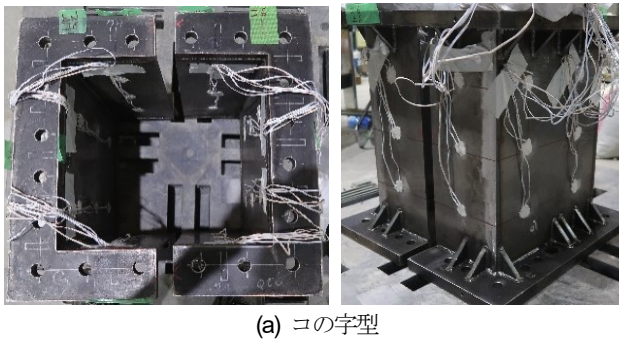


図3 可換部の外観

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. 正負交番载荷実験・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4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2.(4)a)で述べたように、本実験では、事前に永続部単体に対して鉛直軸力の载荷および正負交番载荷実験を行い、本実験での柱の軸力レベル・変形レベルにおいて固定ゴム支承が安定したヒンジ機構を示すことを別途確認している。図5に示す通り、本実験で用いた固定ゴム支承は、安定した軸力支持性能およびヒンジ機構を有していることが確認できる。

また、取替時の安定性を保証する鋼棒部材として、構造用アンカーボルトを用いた。鋼種はABR490(以降、こ

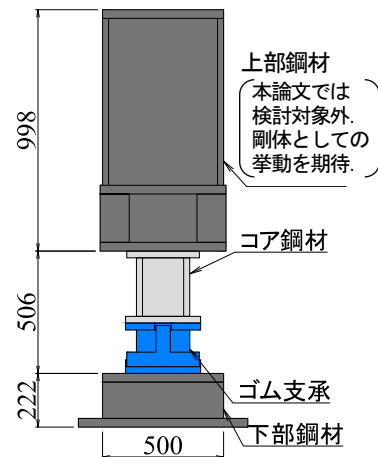
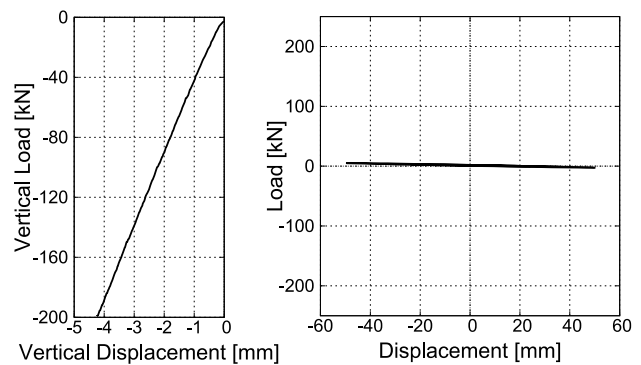


図4 永続部 (Unit : mm)



(a) 鉛直軸力ー鉛直変位関係

(b) 荷重ー変位関係

図5 永続部の軸力支持機能およびヒンジ機構

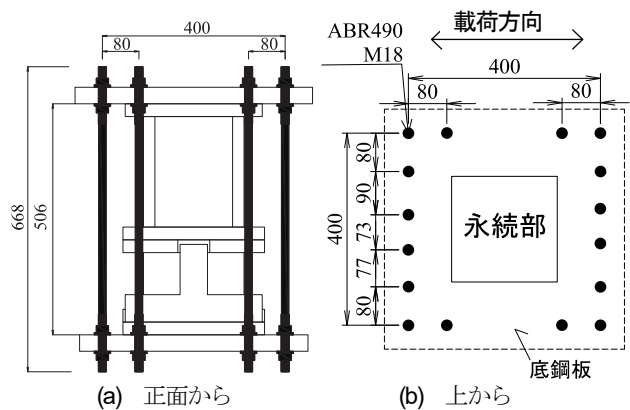


図6 ABR鋼棒の取り付け (Unit : mm)

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6に示す。なお ABR 鋼棒を取り付けた永続部には、余震等に対する耐震性能として、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。これは、現行の道路橋示方書・同解説一耐震設計編¹⁹⁾にてレベル1地震動の設計水平震度の標準値が最大 0.3G と規定されていることから、2.(1)a)で述べた永続部に対する要求性能

を踏まえ、レベル1地震動程度の地震力に余裕を持って抵抗することができる耐震性能を永続部に期待するためである。その際、ABR 鋼棒は可換部と同一位置に取り付ける構造となっており、実際の地震後の復旧作業では、可換部を撤去してから ABR 鋼棒を取り付けるという工程となる。これは、ABR 鋼棒には、地震後に損傷した可換部を撤去した後、新しい可換部の製作・取付が完了するまでの仮部材としての役割を期待しているためである。復旧時の仮部材として ABR 鋼棒を用いることで、余震に対する耐震性能を確保しつつ、柱構造の早期復旧および早期運用が可能となると考えている。

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-P-6.0 の 3 ケースを用意した。S-C-4.5、S-C-6.0 は図-3(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-3(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-7 に示す。なお、本実験供試体では、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 RR が S-C-4.5 で 1.59、S-C-6.0 および S-P-6.0 で 1.19 となっ

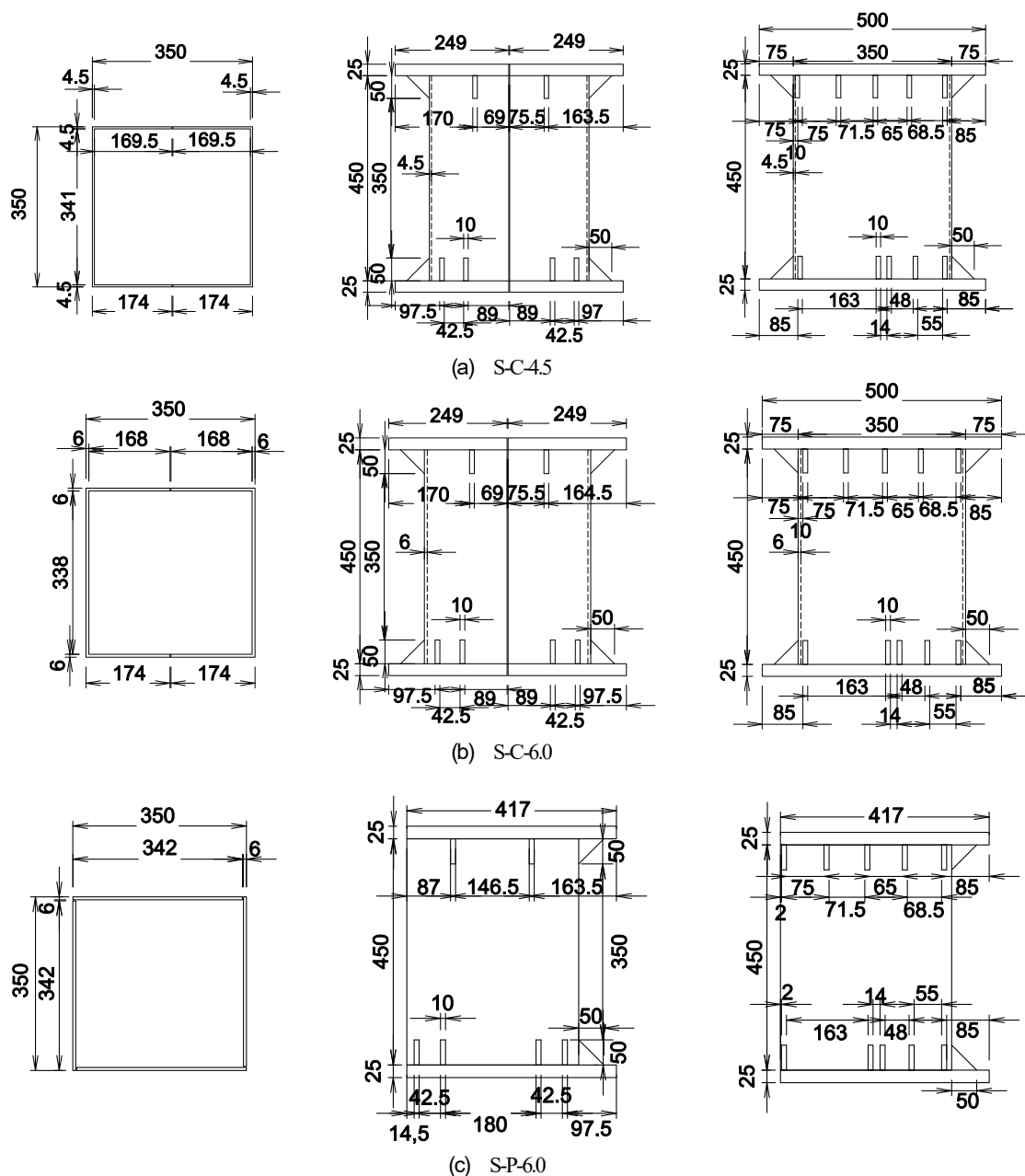


図-7 可換部の寸法(左：断面図，中央：載荷側面，右：載荷面，Unit：mm)

ており、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_k 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) 正負交番載荷実験

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。水平載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載荷を行った。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⁹⁾に倣って 50mm 振幅で載荷を終了した。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載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載荷を行った。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

正負交番載荷実験後、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、柱に正の復元力が発生すると、それをゼロに戻すように変位を制御した。これは、実際の復旧作業において、柱に水平外力を加えずに可換部を撤去する状況を想定している。またその際、柱に負の復元力が発生した場合、 $P-A$ 効果により柱が自己倒壊することを表しているため、柱に水平外力を加えずに可換部を撤去することは困難と判断し、水平外力を加えて柱を鉛直に戻しながら撤去を行うこととした。

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 および 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) 永続部が負担する軸力の計測について

本提案構造では、永続部に軸力支持性能を期待するため、実験中に永続部が支持している軸力の値を把握することは重要である。そこで本実験では、永続部のコア鋼材(図-4)に数点添付したひずみゲージを添付し、永続部に対して鉛直軸力載荷実験(図-5(a))や正負交番載荷実験(図-5(b))を実施することで、コア鋼材のひずみと永続部が軸力の関係を算出した。この関係を用いて、正負交番載荷実験や可換部取替実験中に計測されたコア鋼材のひずみ値から、永続部が負担する軸力を算出することとした。

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-8(a),(b),(c)に永続部に可換部を取り付けた各供試体の荷重—変位関係を、図-8(d)に永続部に ABR 鋼棒を取り付けた際の荷重—変位関係を示す。図-8(a),(b),(c)より、永続部に可換部を取り付けた全ての供試体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る。ここで、載荷変位 10mm 時における圧縮側の可換部の鉛直ひずみの高さ方向分布(図-9)を見ると、S-C-6.0 についてはどの高さにおいても同程度の圧縮ひずみが発生しており、鋼板内側と外側でひずみの値に大きな違いがないのに対し、S-P-6.0 については、高さ方向でひずみの値に差異がある上、内面と外面でひずみ発生傾向が反転していることがわかる。また、このときの可換部の曲率の高さ方向分布を見ると(図-10)、S-P-6.0 において明らかに S-C-6.0 よりも大きな曲率が発生していることが確認される。つまり、S-C-6.0 では角溶接による端部での拘束が強く、載荷面の変形が抑制されているのに対し、S-P-6.0 は S-C-6.0 より変形が大きく、圧縮側の鋼板が 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考えられる。そのため、この違いが耐震性能に影響を及ぼし、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-11)、降伏後の荷重低下は可換部の座屈による

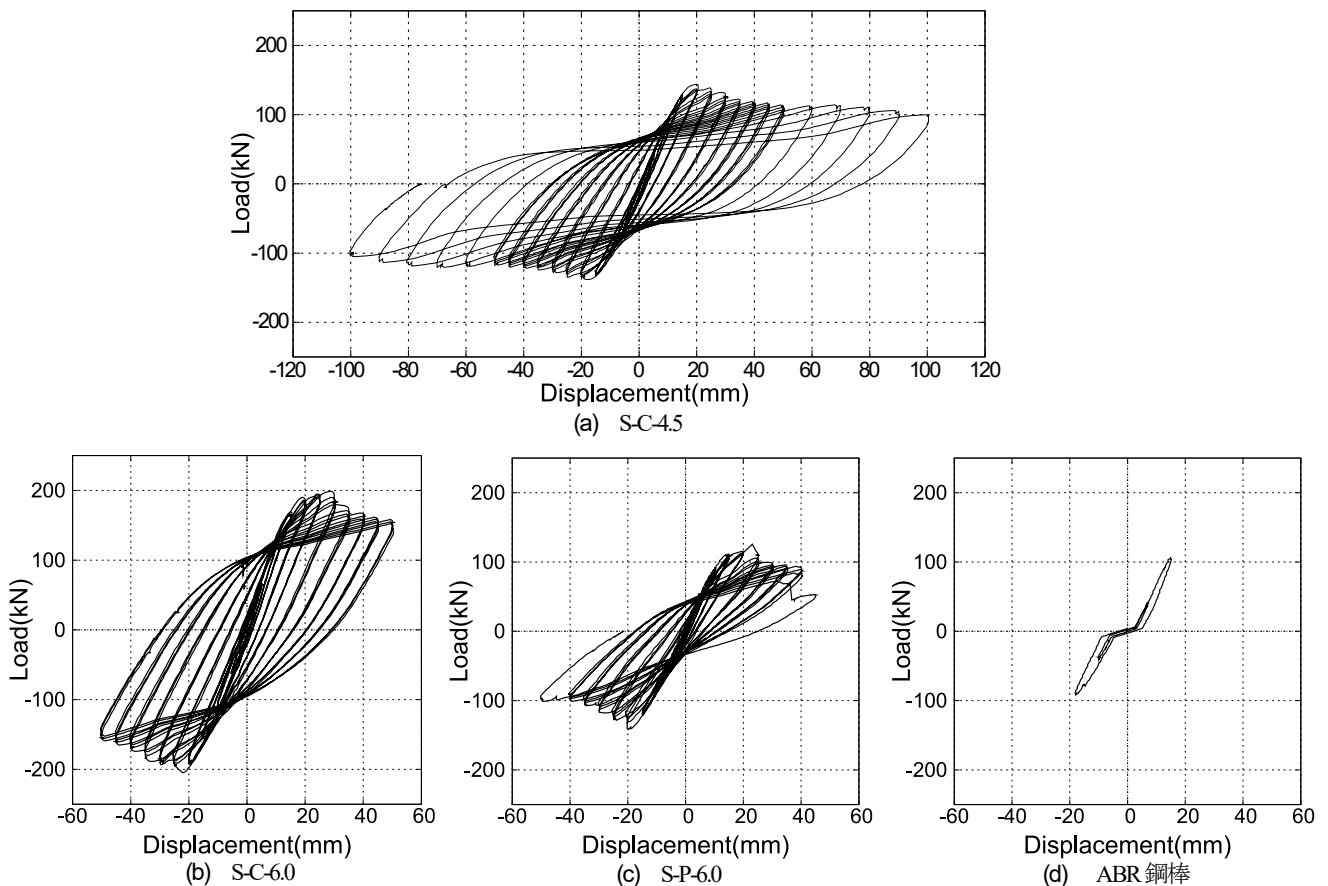


図-8 荷重-変位関係

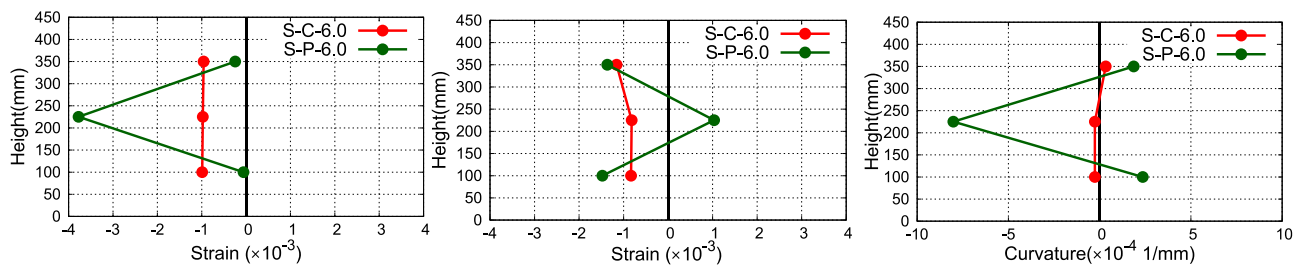


図-9 圧縮側可換部の鉛直ひずみの高さ方向分布(載荷変位 10mm 時, 引張: 正)

図-10 圧縮側可換部の曲率の高さ方向分布(載荷変位 10mm 時)

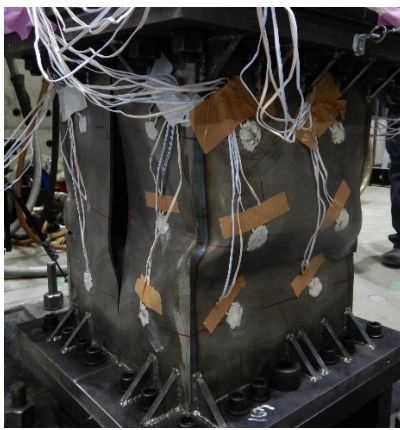
ものであると判断できた。その一方で、大変形領域まで載荷を行った S-C4.5 のポストピーク挙動を見ると、可換部の座屈以降も一定の荷重を保っていることがわかる。これは、永続部が軸力を支持しているためであると考えられる。事実、図-12 に示すように、圧縮側の変形時に大きく座屈変形していても、可換部の四方全体が座屈することはなく、引張側になると再度引張を受け、引張力を負担している様子が確認される。そこで、本実験にて確認された座屈後の荷重低下抑制効果に対し、次章で解析的な検討を行う。

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-8(d)に示す。図-8(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。

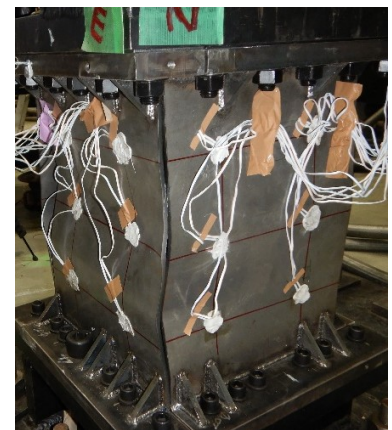
また本実験では、ABR 鋼棒に座屈変形は確認されず、圧縮・引張ともに一定の抵抗力を発揮したと考えられる。一方で、このような棒部材は座屈により圧縮抵抗力が低下する可能性も十分に考えられる。したがって、本実験においては上記のように圧縮抵抗も発揮した上で 0.5G 水平力程度の復元力が発揮されたが、設計においては、圧縮は永続部のみが負担するものとし、棒部材には引張抵抗のみ期待して設計するのが安全であると考えられる。



(a) S-C-4.5

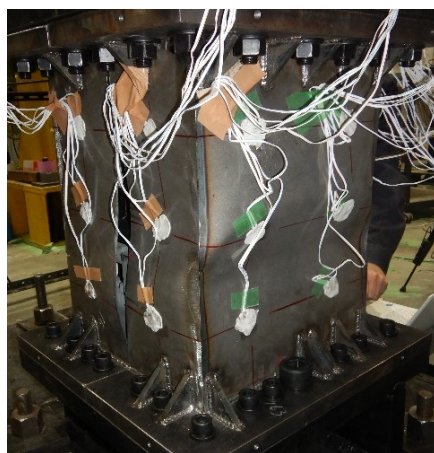


(b) S-C-6.0

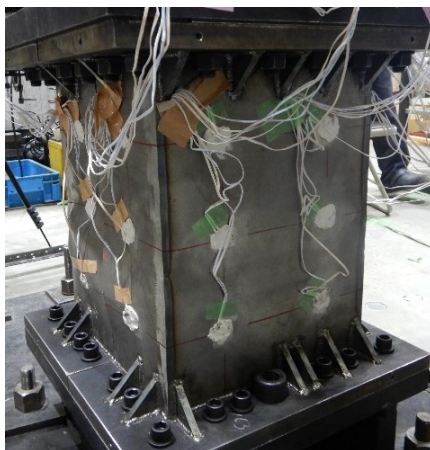


(c) S-P-6.0

図-11 載荷後の可換部の様子



(a) 圧縮変形時

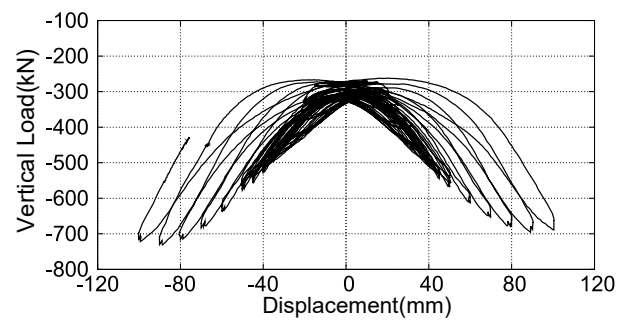


(b) 引張変形時

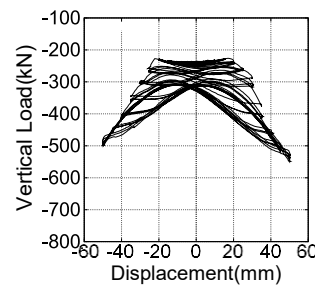
図-12 座屈後の可換部における再引張の様子

(2) 永続部の軸力支持性状について

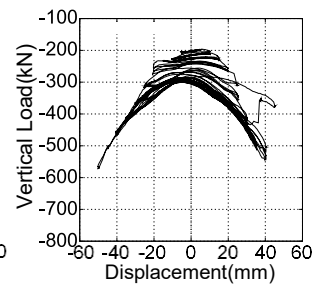
図-13 に各ケースにおける永続部の負担軸力ー水平変位関係を示す。なお、永続部の負担軸力は3.(4)で述べた方法で算出しており、水平変位は水平載荷点位置、すなわち供試体天端の水平変位を指している。いずれのケースにおいても、正負交番載荷に伴って永続部の負担軸力



(a) S-C-4.5



(b) S-C-6.0



(c) S-P-6.0

図-13 永続部の負担軸力ー水平変位関係

は増加していることがわかる。載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ー水平変位関係を見ると(図-14)、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。

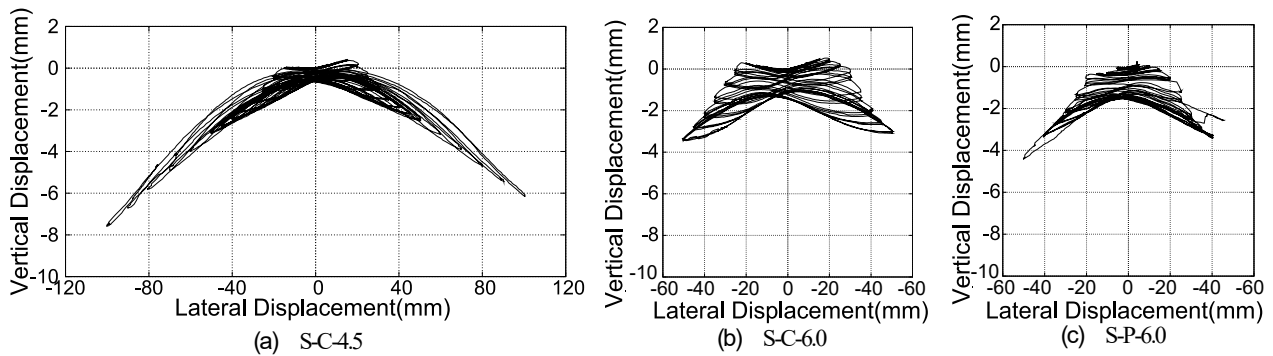
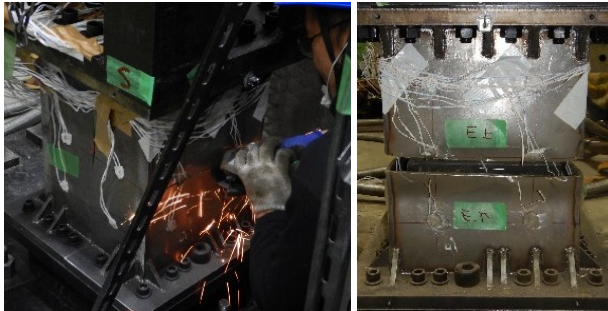


図-14 鉛直変位—水平変位関係

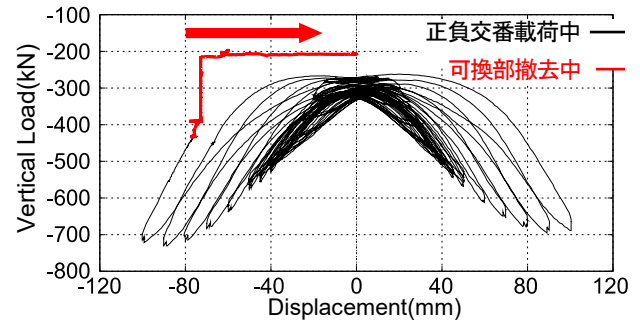


(a) SC-6.0

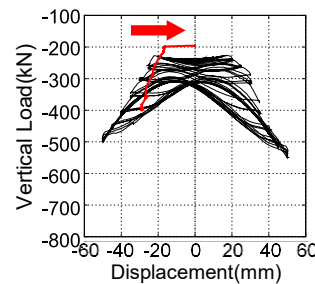


(b) SP-6.0

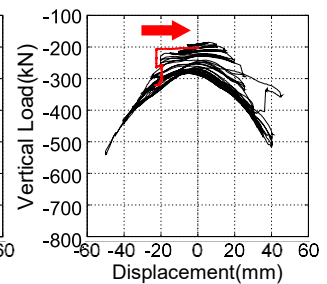
図-15 可換部の撤去の様子



(a) SC-4.5



(b) SC-6.0



(c) SP-6.0

図-16 可換部撤去時の永続部の負担軸力—水平変位関係

(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 SC-6.0 の撤去を実施したところ、軸力支持下での可換部の撤去が可能であった。図-15(a)にその時の様子を示す。また、図-15(b)に示したように、SC-4.5やSP-6.0に関しては、ボルトを緩めることにより可換部の撤去を実施した。ここで図-16に、可換部撤去中の永続部の負担軸力—水平変位関係を赤線で示す。なお、図中の黒線は正負交番載荷実験中の永続部の負担軸力—水平変位関係であり、赤矢印が水平変位の調整方向である。図より、正負交番載荷実験後に可換部に残留している引張応力が可換部撤去の中で開放され、永続部の負担軸力が軽減されていることがわかる。そして最終的に、永続部の負担軸力が、柱への作用軸力 200kN と等しくなっている様子が確認できる。以上より、永続部が軸力を支持した状態で、残留応力を有する可換

部を撤去できることが実証されたといえる。また、本実験での全ての正負交番載荷実験および可換部取替実験終了後に永続部の固定ゴム支承を確認したところ、目立った損傷は見られなかった。

また、可換部撤去中の荷重—変位関係を図-17に赤線で示す。図-16と同様、黒線は正負交番載荷実験中の荷重—変位関係であり、赤矢印が水平変位の調整方向である。なお、可換部撤去中、柱の復元力が負となったため、3.(3)で述べたように、水平外力を加えて柱を鉛直に戻しながら撤去を行った。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。そのため、地震後の復旧性を向上させるという観点でも、本提案構造は有効であると考えられる。

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、正負交番载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。

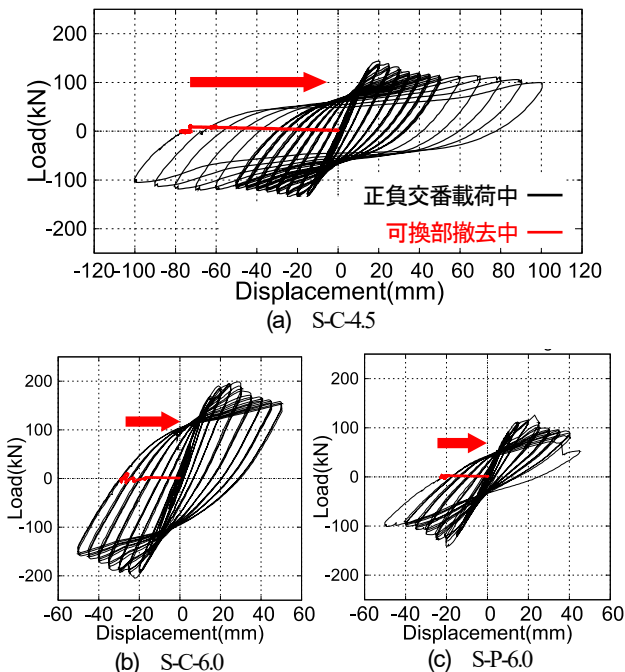


図-17 可換部撤去時の荷重-変位関係

(2) 解析モデル

図-18 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、幾何学的非線形性を考慮し、可換部は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 については载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。また、可換部と永続部の接合部や载荷治具と供試体の接合部の緩み等による初期剛性の低下を再現するため、シェル要素の下端に、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。

永続部は図-5 に示した固定ゴム支承の軸力支持性能およびヒンジ機構を再現するため、軸剛性が 47.0kN/mm である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。また、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-19 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。

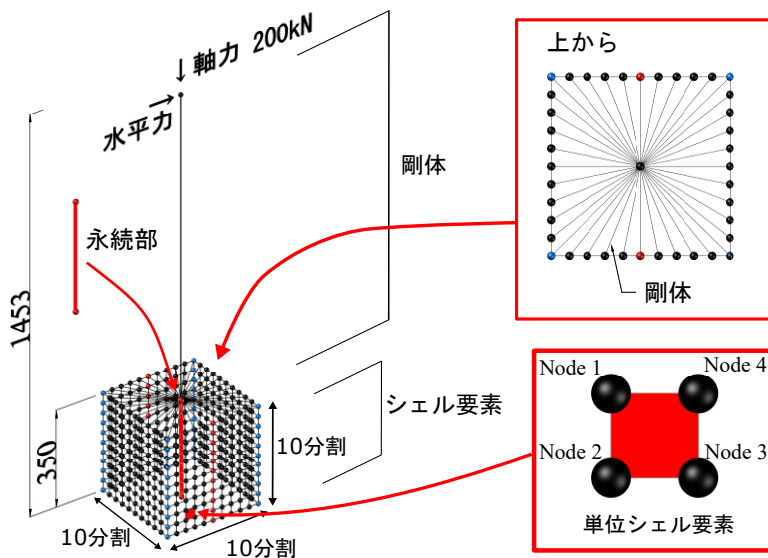


図-18 解析モデル全体図 (Unit: mm)

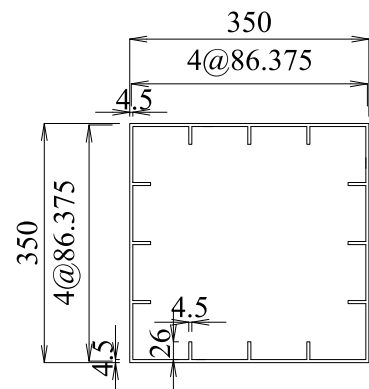


図-19 導入した縦補剛材 (Unit: mm)

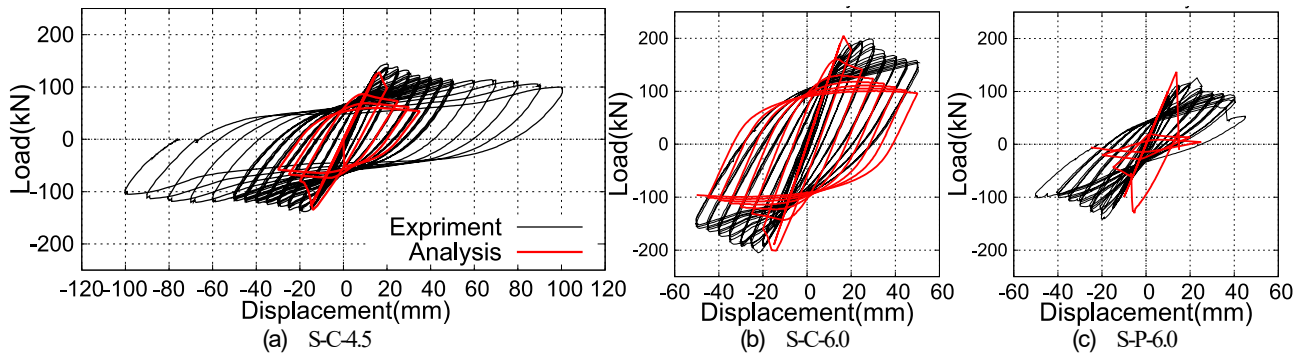


図-20 解析で得られた荷重-変位関係(永続部の軸剛性がゼロ)

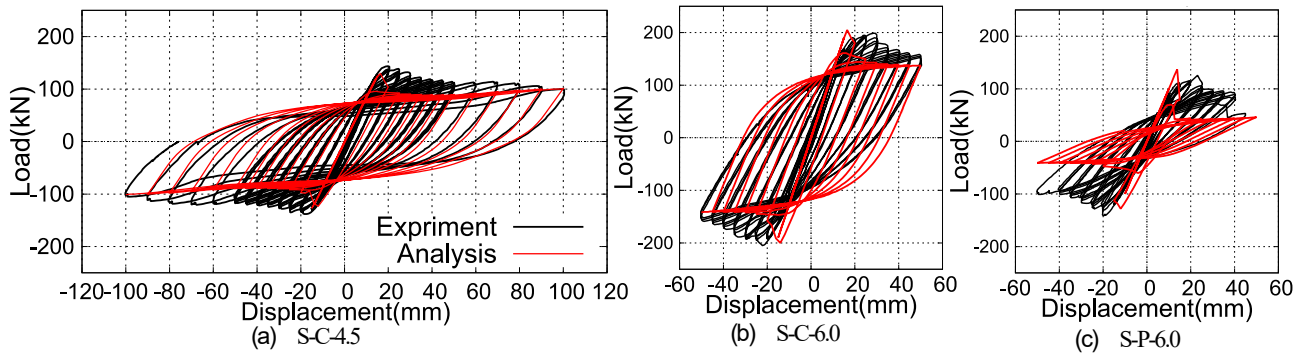


図-21 解析で得られた荷重-変位関係(永続部の軸剛性に実験供試体の値を採用)

(3) 解析結果

解析により得られた柱の荷重-変位関係を図-20、図-21に示す。図-20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-21)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-C4.5及びS-C6.0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-P6.0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、可換部の座屈モードを正しく再現できていなかったことが要因であると考えられる。事実、図-9に示す通り、実験では可換部が波打つように座屈した様子が確認されたが、解析ではこのような座屈モードの再現には至らなかった。S-C4.5およびS-C6.0において座屈直後の結果に差異が見られたのも、同様の要因と推測している。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-22)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

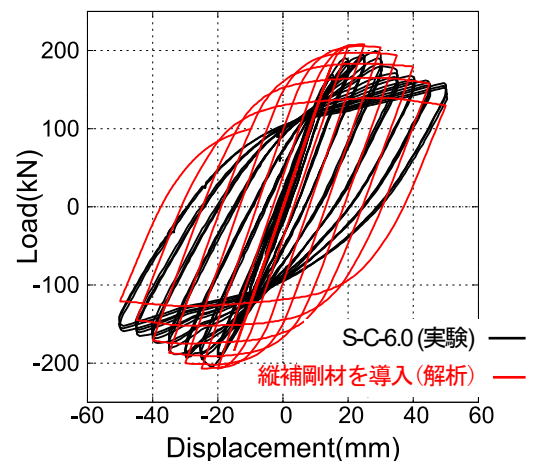


図-22 縦補剛材を導入した鋼製柱構造に対する解析で得られた荷重-変位関係(永続部の軸剛性がゼロ)

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*, Vol. 142, No. 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*, Vol. 177, No. 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*, Vol. 17, No. 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*, Vol. 75, No. 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*, Vol. 76, No. 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, *土木学会論文集 A1*, Vol. 77, No. 4, pp. I_424-I_435, 2021.
- 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) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2012.
- 9) 土木学会: 座屈設計ガイドライン改訂第2版, 2005.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説—鋼橋・鋼部材編—, 2017.
- 11) 森下益臣, 青木徹彦, 鈴木森晶: コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究, *構造工学論文集*, Vol. 46A, pp. 73-83, 2000.
- 12) 井浦雅司, 折野明宏, 石澤俊希: コンクリートを部分充填した円形鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究, *土木学会論文集*, No. 696/I-58, pp. 285-298, 2002.
- 13) 後藤芳顯, KUMAR, G. P., 川西直樹: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰返し挙動の FEM 解析, *土木学会論文集 A*, Vol. 65, No. 2, pp. 487-504, 2009.
- 14) 後藤芳顯, 水野貢介, KUMAR, G. P., 藤井雄介: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰返し挙動の FEM 解析, *土木学会論文集 A*, Vol. 66, No. 4, pp. 816-835, 2010.
- 15) 後藤芳顯, 関一優, 海老澤健正, 呂西林: 地震動下のコンクリート充填円形断面鋼製橋脚における局部座屈変形の進展抑制機構と耐震性向上, *土木学会論文集 A1*, Vol. 69, No. 1, pp. 101-120, 2013.
- 16) 川島一彦, 永井政伸: 塑性ヒンジ領域にゴム層を有する鉄筋コンクリート橋脚の開発, *土木学会論文集*, No. 703/I-59, pp. 113-128, 2002.
- 17) 山岸睦功, 川島一彦: 免震ゴムビルトイン型 RC 橋脚の開発, *土木学会論文集*, No. 752/I-66, pp. 43-62, 2004.
- 18) 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.
- 19) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2017.

(Received October 25, 2021)
(Accepted February 12, 2022)

DEVELOPMENT OF STEEL METABOLISM COLUMN CAPABLE OF MODIFYING SEISMIC PERFORMANCE WHILE SUPPORTING AXIAL FORCES

Keita UEMURA, Hiroto MAEDA and Yoshikazu TAKAHASHI

In a series of studies, the authors have developed metabolism columns capable of modifying their seismic performance while supporting axial forces. The Metabolism column structure has a double structure at the base of the column, with a replaceable part that is expected to absorb seismic energy as the outer shell, and a core part that supports the constant axial and shear forces inside the column.

In this study, a new metabolism column with steel members as the replaceable parts was proposed, and experimentally investigated its performance and the replaceability of the replaceable parts. As a result, it is found that the proposed structure has high seismic performance, and it is possible to metabolize the seismic performance of the structure by replacing the steel replaceable parts. In addition, it is confirmed that the proposed structure can improve the post-peak behavior after the buckling of the steel replacement parts because the core part can support the compressive axial force.