

機能分離により地震後の早期復旧を可能とする メタボリズム鋼製柱構造の改良

植村 佳大¹・白井 洵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 非会員 住友商事株式会社 不動産投資開発事業部 (〒100-8601 東京都中央区大手町3-2)
E-mail: jun.shirai@sumitomocorp.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: yoshikazu.takahashi.4v@kyoto-u.ac.jp

著者らは一連の研究で、軸力支持下での耐震性能の改変や地震後の早期復旧が可能なメタボリズム柱構造の開発を行ってきた。メタボリズム柱構造とは、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、地震後の橋梁構造の復旧性向上を目的に、橋脚が有する機能を整理しつつ、メタボリズム鋼製柱構造の改良を行った。具体的には、永続部の軸剛性を高めることが柱の耐震性能ならびに地震後の復旧性に与える影響について、正負交番載荷実験により検討した。その結果、永続部の軸剛性の向上により、柱の耐震性能が向上することに加え、支点の位置が保持された状態で地震後の復旧性作業が可能となり、復旧性向上に寄与することが示された。

Key Words: metabolism, replaceable, functional separation, steel column, restoration

1. 背景

地震大国である我が国では、これまでに数多くの震災を経験し、その度に耐震規定の改定がなされてきた。そのため、新設時に当時の耐震規定を満たしていたものでも、現在の規定に適合しない、いわゆる既存不適格構造物が不可避免的に生じてきた。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おり、2011年東北地方太平洋沖地震では、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¹⁾)。とはいえ、現行の耐震規定も未だ完全ではないことは言うまでもなく、今後改定が行われる可能性は否定できない。

以上の背景を踏まえ、著者らは近年、将来起こり得るであろう要求性能の変化に対応するため、軸力支持下で耐震性能を改変できる柱構造「メタボリズム柱構造」を提案・開発している^{2,3,4)}。メタボリズム柱構造(図-1)は、柱基部を二重構造としており、地震時のエネルギー吸収能を担う可換部を外殻に、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、可換部に RC 部材や鋼製部材を採用し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を通じて、永続部で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。

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のためにも有益であるという点にある。2016年の熊本地震の際、熊本県土木部道路都市局道路整備課がまとめた「熊本地震での経験を踏まえた橋梁災害復旧のまとめ」⁵⁾によると、被災時の仮受材の確保が困難であっ

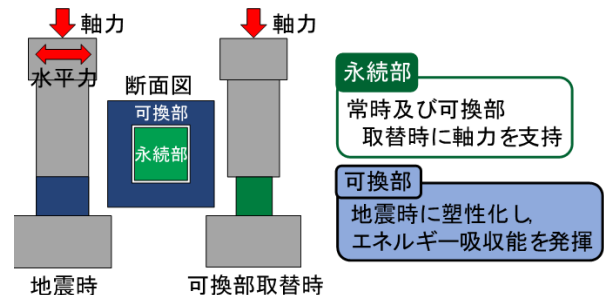


図-1 メタボリズム柱構造概要

たため、復旧作業に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、上部構死荷重を一時的に支持する仮受材を必要とせず、上部構造の鉛直位置を保持しながら柱の性能を回復させることが可能となる。

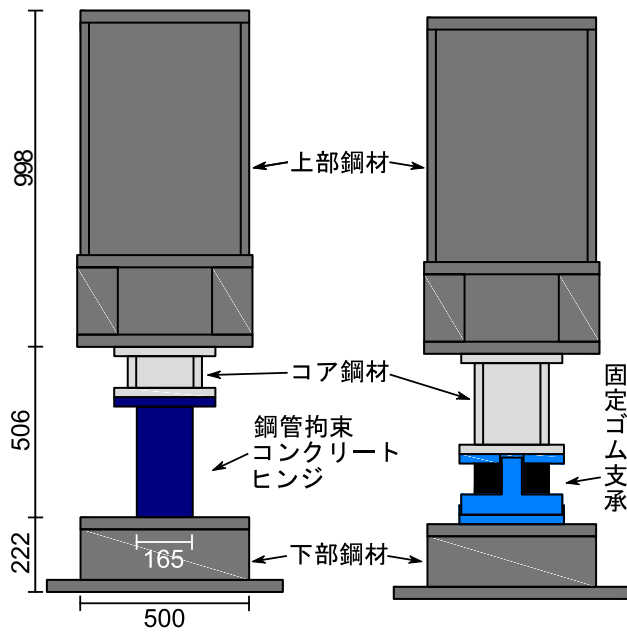
メタボリズム柱構造の他にも、塑性ヒンジ部の部材の取り替え可能性を検討した研究事例はいくつか存在する。Guo ら⁹⁾は、継手機構を取り入れた外付けダンパーを用いたコンクリート構造を検討している。Wang ら⁷⁾は、セルフセンタリング機構を内包したコア部材に、エネルギー吸収能を担保するダンパーとプレキャスト部材とを組み合わせ、損傷後のダンパー及びプレキャストカバーを取り替えることで、地震後の早期復旧を目指すコンクリート構造を提案している。また Chenga ら⁸⁾は、損傷した RC 柱に対して損傷部コンクリートをはつりだし、外側の座屈した軸方向鉄筋を取り出し、新たに Dog Bone Bar を取り付けることによって補修を試みている。藤倉ら^{9),10)}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 橋脚や PC 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、上記の既往研究では、柱の残留変位が大きかったがゆえ、取り替え後に期待通りの耐震性能が発揮されなかった、もしくは、軸力支持下での塑性化部材の取替まで至っていない。

一方で、著者らが提案している「メタボリズム柱構造」では、先述のように、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。これは、メタボリズム柱構造では、上記の他の構造と異なり、塑性ヒンジ部の機能を明確に分離しているためであるといえる。つまり、永続部に常時の軸力・せん断力支持機能を、可換部に地震時のエネルギー吸収性能を期待する機能分離型の構造を採用していることが、地震後の部材の取り替え、ひいては早期復旧を可能としていると解釈することができる。その一方で、筆者らが過去に提案したメタボリズム鋼製橋脚⁴⁾では、永続部の下端にゴム支承を用いたヒンジ構造を採用していたが、鋼製可換部の座屈後の荷重低下挙動が確認された。また、過去の検討⁴⁾では、あくまでメタボリズム鋼製柱構造の耐震性能ならびに可換部取替時の柱の挙動に関する検討に留まっており、永続部の軸力支持性能が地震後の復旧性に与える影響についての具体的な考察が不足しているのが現状である。そこで本研究では、地震後の橋梁の復旧性向上を目的に、橋脚が有する機能を整理し、メタボリズム柱構造の改良を行った。具体的には、過去の提案構造において過去の提案構造よりも永続部の軸剛性を高めたメタボリズム鋼製柱構造を提案し、永続部の軸剛性の向上が可換部座屈後の復元力特性ならびに地震後の復旧性に与える影響について実験的に検討した。

2. 橋脚の機能とメタボリズム柱構造

本章では、地震後の更なる復旧性向上を可能とするメタボリズム鋼製柱構造の実現に向けて、橋脚の持つ機能について整理する。橋脚の機能は、上部構造を支えること、すなわち、「支点の高さを保持すること」であるといえる。この機能が失われると、橋梁全体の機能喪失に繋がるため、支点の高さ保持機能は、橋脚の最も重要な機能であると考えられる。他には、「鉛直・水平方向の力に抵抗すること」が橋脚の機能に含まれる。ここで、鉛直方向の力に抵抗したとしても、柱が軸方向に沈下することはあり得るため、鉛直方向の力の抵抗機能は、支点の高さ保持機能の必要条件的な位置づけといえる。また、耐震の機能はまさに水平方向の力の抵抗に係る機能であり、既往の研究等において橋脚の水平荷重—水平変位関係を基に評価しているのは、この水平方向の力の抵抗機能であるといえる。一方、免震構造の場合は、作用する力に対する抵抗性を下げて地震時の応答低減を目指す。橋梁においては上部構造と下部構造の接合部に設置された支承によってその機能を実現させることが一般的である。そのため、免震を図る際の橋脚の機能は、支承により決定された上部構造と下部構造の境界条件に応じて、下部構造に作用する力に抵抗することであると捉えられる。

ここで、従来の橋脚では、支点の高さ保持機能と力の抵抗機能、特に、鉛直・水平の機能が明確に分離されていない。そのため、地震により水平方向の力の抵抗機能が喪失すると、それに連動して鉛直方向の力の抵抗機能、そして支点の高さ保持機能が失われてしまう。これが、地震後の復旧の大きな妨げになっていると考えることができる。一方、メタボリズム柱構造では、1. で述べたように、柱基部が永続部と可換部の二重構造になっており、永続部が常時の軸力・せん断力に抵抗し、可換部が地震力に抵抗する構造となっている。つまり、先に整理した橋脚の機能と照らし合わせると、支点の高さ保持機能および鉛直方向の力の抵抗機能を永続部が担い、水平方向の力の抵抗機能を可換部が担っていると解釈できる。これにより、地震によって可換部が有する水平方向の力の抵抗機能が喪失したとしても、永続部が鉛直方向の力の抵抗機能ならびに支点の高さ保持機能を維持しているため、地震後の迅速な復旧が可能となると考えられる。そこで本研究では、永続部の構造を改良することで、橋脚の最も重要な機能といえる支点の高さ保持機能の持続性を高め、メタボリズム柱構造の地震後の復旧性を高めることを目指す。



(a) 鋼管拘束コンクリートヒンジ (CHI65-4.5) (b) 固定ゴム支承 (SC-4.5)⁴⁾

図-2 供試体(永続部, Unit: mm)

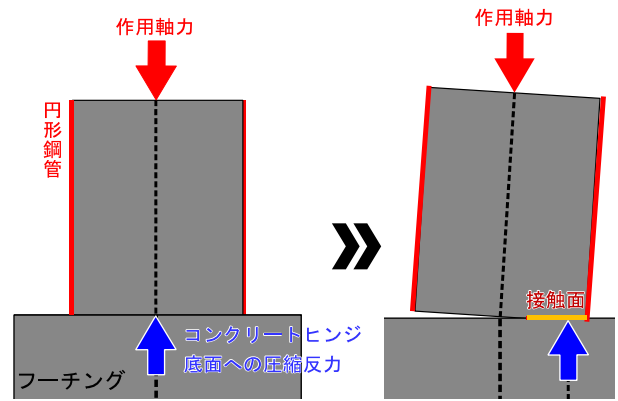


図4 鋼管拘束コンクリートヒンジ構造の耐荷メカニズム



図-5 鋼管拘束コンクリートヒンジ下端に設けたブレイクピン

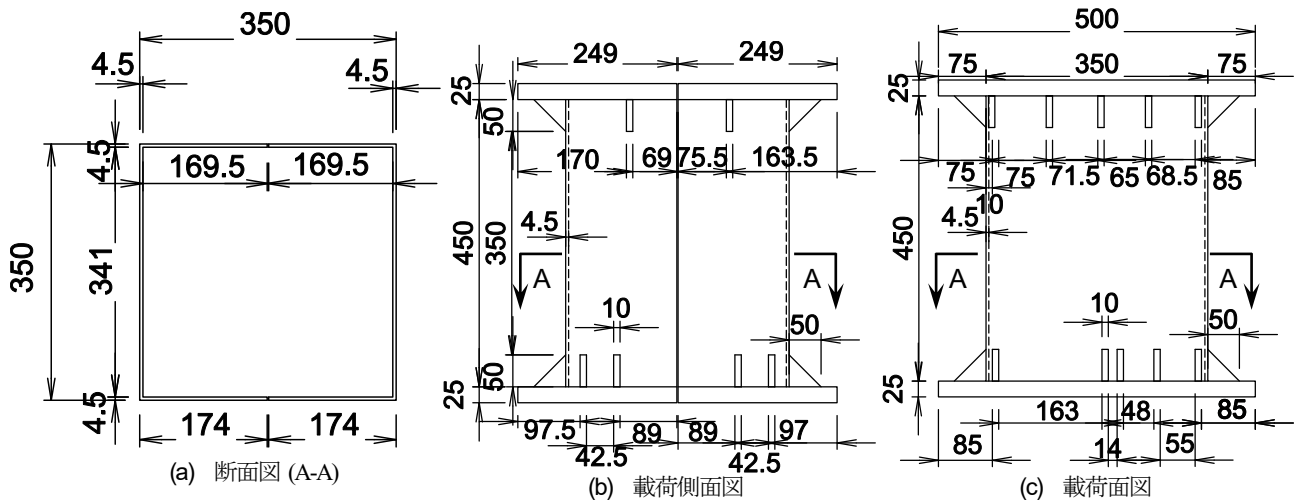


図-3 供試体(可換部, Unit: mm)

3. 実験概要

(1) 供試体

本研究では、計 2 種類の供試体(図-2, 3)に対し、正負交番載荷実験ならびに地震後の復旧作業を想定した可換部取替実験を通じて検討を行った。特に、永続部の軸剛性の違いが柱の復元力特性ならびに柱の軸力支持機能に与える影響について考察した。なお本研究では、検討構造の復元力特性および復旧性を評価することに主眼を置くこととし、図-2(a), (b)に示すように、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。以下に供

試体の詳細を永続部と可換部に分けて説明する。

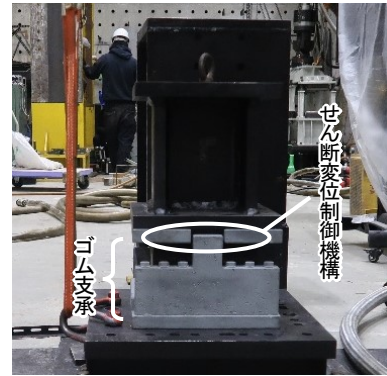
a) 永続部

CHI65-4.5 は永続部に直径 165mm、鋼管厚 7.1mm の鋼管拘束コンクリートヒンジ¹⁾を使用した供試体であり、本研究で新たに提案する構造である。ヒンジ構造は本来、曲げ剛性を持たない構造であるが、コンクリートヒンジは構造形式によっては曲げに対して復元力を発揮するものもあるため、「imperfect hinges (不完全ヒンジ)」や「semi-articulation (半接合)」と呼ばれることもある。そして、鋼管拘束コンクリートヒンジは、ヒンジ下端のコンクリートの損傷を軽減させるため、コンクリートヒンジ

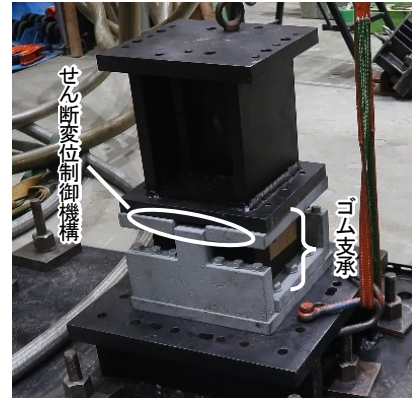
を鋼管で拘束し、底面に発生する作用軸力に対する反力の偏心によって、原点指向型の復元力を発揮するコンクリートヒンジ構造である(図4)¹¹⁾。なお、本研究は縮小模型を用いた検討であることから、鋼管内部にコンクリートを充填した場合、骨材寸法の影響が大きくなる可能性が考えられる。そこで CH165-4.5 では、鋼管拘束コンクリートヒンジの材料に、無収縮モルタルを採用することで、鋼管拘束コンクリートヒンジの構造性能を簡易的に再現することとした。その際、無収縮モルタル打設時にフーチングとの接触面に凹凸が生じ、十分な接触面積を確保できない恐れがあったため、無収縮モルタル打設後に普通モルタル (22.1MPa) を打設して表面を均す作業を施した。永続部の鋼管の鋼種は SS400 を採用した。表-1 に使用した鋼材の材料特性の各諸量を示す。なお、鋼管拘束コンクリートヒンジの設計に関しては、文献 11) にて提案されている数値解析モデルを用い、永続部のみで軸力支持した際に、 $P-A$ 効果により柱の初期剛性が負とならない構造とした。

さらに、鋼管拘束コンクリートヒンジの底面には、図-5 で示すように、せん断方向へのずれ止めを目的としてずれ止めピンを取り付けた。フーチングにあたる下部鋼材にピンを通すことで、鉛直方向には作用せずに、せん断方向へのずれを防止することが可能となる。ズレ止めピンの設計については、ズレ止めに作用するせん断力を適切に評価し、それに応じて材料や寸法を決定する必要がある。しかしながら、現状、本提案構造における鋼管拘束コンクリートヒンジの底面のズレ止めに作用するせん断力を算定する設計式や数値解析モデルの開発には至っていない。そこで本研究では、過去の検討⁴⁾を参考に、S-C-4.5 が示した最大水平荷重 143.6kN が永続部底面に作用したとしてもズレ止めピンで抵抗できるよう、径 20mm の SUS304 の丸鋼をズレ止めピンに採用した。本実験では、結果的に柱基部でのせん断ずれは発生しなかったものの、より適切なズレ止めピンの設計法については、今後の課題とする。

S-C-4.5 は永続部に図-6 に示す固定ゴム支承(変位制御装置を有するゴム支承)を使用した供試体であり、筆者



(a) 正面の様子



(b) 全体の様子

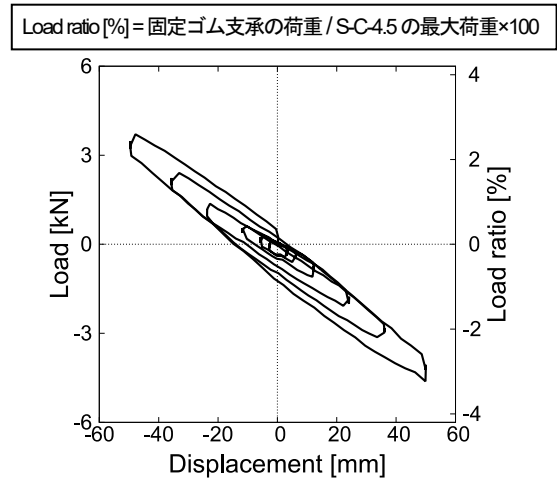
(c) 水平荷重—水平変位関係⁴⁾(圧縮軸力 200kN 載荷時)

図-6 固定ゴム支承

表-1 使用した鋼材の材料特性(*付き数字は規格値、それ以外はミルシート値。)

	可換部	永続部 (鋼管)	永続部 (ズレ止めピン)	上部鋼材, コア鋼材, 下部鋼材
鋼種	SS400	SS400	SUS304	SS400
降伏強度 (MPa)	309	245以上*	205以上*	235以上*
引張強度 (MPa)	451	400-510*	520*	400-510*
ヤング率 (GPa)	206*	206*	193*	206*

らの既往研究⁴⁾で提案された構造である。本研究では CH165-4.5 の比較供試体として位置付ける。固定ゴム支承は、図-6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、せん断変形を許容せず回転のみ許容するヒンジ構造となっている。また、過去の検討において、永続部単体で 200kN の圧縮軸力下での正負交番載荷実験が実施されており、本研究で検討対象とする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が確認されている(図-6(c)⁴⁾。

また、図-2に示すコア鋼材は、鋼管コンクリートヒンジおよび固定ゴム支承を上部鋼材に接合するために設置した。なお、実構造物に鋼管拘束コンクリートヒンジを永続部に用いたメタボリズム柱構造を適用する際は、永続部の鋼管とそれより上部の柱部を直接接合すればよく、コア鋼材のような接合部材を設ける必要はない。

b) 可換部

可換部の供試体は、過去に実施したメタボリズム鋼製橋脚と同じ設計とした。具体的には、鋼種が SS400 で板厚が 4.5mm のコの字型断面二部材によって構成した(図-7)。可換部に使用した鋼材の材料特性等の各諸量を表-1に示す。ここで、既往の研究^{12,13)}から、矩形箱型断面を有する鋼製柱において、座屈後の柱の急激な荷重低下を防止するためには、鋼材の幅厚比パラメータを 0.5 以下とすることが望ましいとされている。しかし、本供試体では、表-1に記載の通り、可換部の幅厚比パラメータは 1.59 である。これは、メタボリズム柱構造では、永続部が軸力支持の機能を担うため、幅厚比パラメータの値が大きい場合でも、座屈後の柱の荷重低下が緩やかとなることが期待できるためである。また、本供試体でのコの字型断面二部材同士は一体化せず、二つに分離させることとした。これは過去の検討⁴⁾と比較するためであるが、本来は、分離している境界を溶接によって一体化することを想定している。

角溶接は、溶接部が弱点とならないよう、完全溶込み開先溶接の両面溶接とした。さらに、急激な断面変化を防ぐため端部に三角リブを設け、両端が完全固定端となることを期待した。また、本研究の提案構造における可換部と永続部の接合法は、過去の検討⁴⁾と同様にボルトによる引張接合とした。その際、図-2および図-3に示すように、可換部の高さを 500mm、永続部における可換部設置区間の高さを 506mm とし、可換部設置の際にできた隙間にシムプレートを挿入することで、可換部設置区間の高さを調節した。しかし、可換部設置区間の高さを厳密に可換部の高さと一致させるのは困難であり、実験時に永続部と可換部をボルトで引張接合した際、可換部に引張ひずみが発生してしまった。同様の傾向は過去の検討⁴⁾でも確認されており、可換部と永続部にボルト

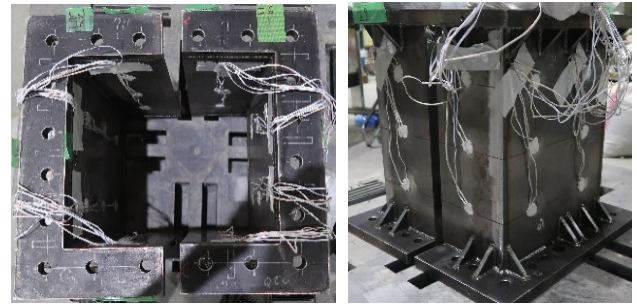


図-7 可換部の外観

による引張接合を採用する場合の課題といえる。しかしながら、本実験においては接合部の最適化を行うことはせず、接合部の構造詳細については検討対象外とした。また、図-2(b), (c)に示すように、下部鋼材との接合の関係で、可換部上下端に設置した三角リブの位置が非対称となっている。しかし、同様の可換部を採用した既往の研究において、可換部に発生したひずみ性状の対称性が大きく損なわれる等の影響が見られなかったため、本実験においても同様の可換部を採用することとした。

(2) 鋼管拘束コンクリートヒンジと鋼製柱構造の親和性

著者ら¹¹⁾は、RC 柱の地震後の復旧性向上をを目的に、鋼管拘束コンクリートヒンジ構造を RC 柱内部に埋め込んだ構造を提案し、正負交番載荷実験を実施した。当該構造では、正負交番載荷実験後において RC 柱内部の鋼管拘束コンクリートヒンジが健全な状態で残存していたことによって、柱の荷重低下を抑制することが可能であることが確認された。しかし、鋼管拘束コンクリートヒンジを柱内部に埋め込むことで、せん断抵抗に寄与するコンクリート断面積が減少し、RC 柱のせん断抵抗力を低下させることが明らかとなった。

一方、本研究で提案するメタボリズム鋼製柱構造では、鋼製部材(可換部)の内部に鋼管拘束コンクリートヒンジが配置される。そのため、可換部の座屈が発生したとしても、永続部として採用された鋼管拘束コンクリートヒンジが圧縮軸力を支持するため、柱の荷重低下が抑制されると考えられる。また、RC 柱と鋼管拘束コンクリートとの組み合わせた際に生じた柱のせん断抵抗特性の低下も発生しない。以上のことから、文献 11) で提案された鋼管拘束コンクリートヒンジと RC 柱を組み合わせた構造と比べ、鋼管拘束コンクリートヒンジと鋼製柱構造の親和性は高いといえる。

(3) 実験の流れ

本研究では、二種類の供試体に対して、正負交番載荷実験と軸力支持下での可換部撤去実験の二つの実験を

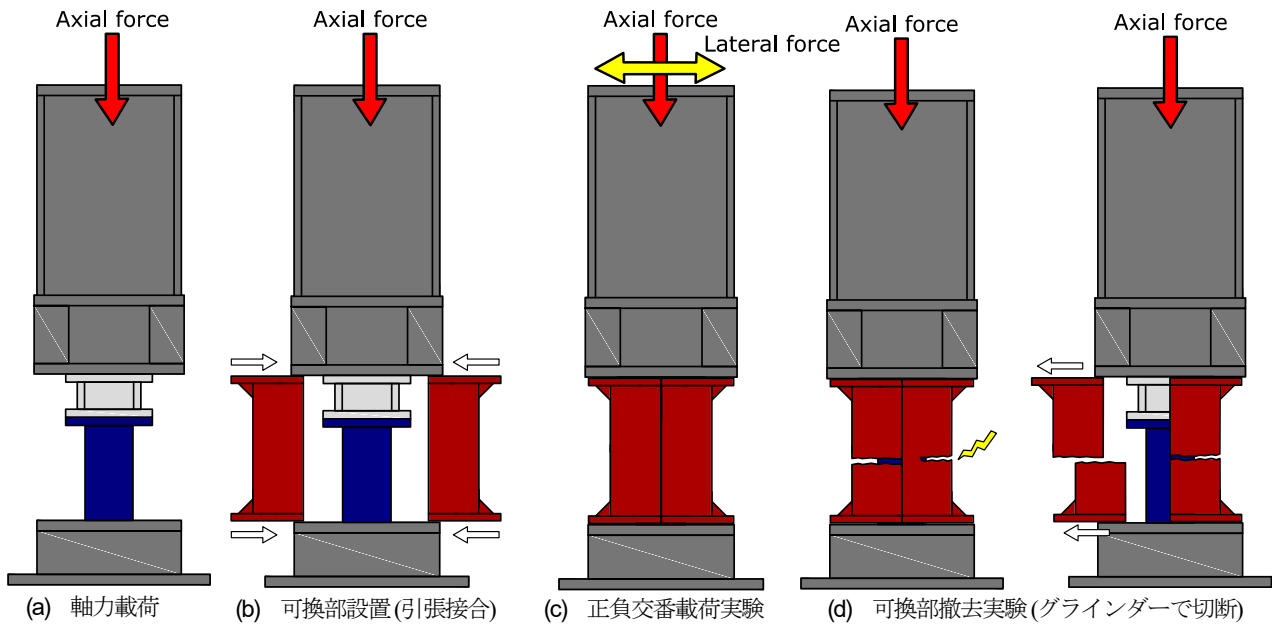


図-8 実験の流れ

一連の流れで実施した。実験の流れを図-8 に示す。(a) に示すように軸力 200kN を載荷し、その状態で(b) に示すように可換部を設置して他の部材と接合する。なお、CH165-4.5 では、軸力の支持機能は永続部の鋼管拘束コンクリートヒンジに期待し、軸力 200kN は CH165-4.5 の永続部の降伏軸力の 16.4% に相当する。そして(c) に示すように正負交番載荷実験を実施した後、(d) に示すように可換部の切断・撤去を行う。

以下に本実験における正負交番載荷実験および可換部撤去実験についての詳細を述べる。

a) 正負交番載荷実験の詳細

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繰り返し回数 3 回の載荷を行った。なお、CH165-4.5 における可換部の降伏変位 δ_y は 15.0mm であったが、柱の荷重-変位関係が線形となる領域での本提案構造の挙動を詳細に検討することを目的に、基準振幅を 5mm に設定した。変位振幅 50mm 以降は、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。変位 50mm 以降の変形領域での繰り返し回数は 1 回とした。

b) 可換部撤去実験の詳細

可換部撤去実験は正負交番載荷実験後に行われる。その際、残留変位発生位置を初期位置として実験を開始し、鉛直軸力を常に作用させた状態で可換部の撤去を行う。なお、安全確保のため変位制御のもと可換部の撤去を行うこととするが、可換部の撤去に伴い水平荷重が発生することが想定される。そこで、水平荷重が発生してもゼロとなるように変位を調整しながら撤去を行うことで、実際の現場において外部機構を用いずに撤去を行う状態

を模擬する。可換部撤去が終了しても残留変位が残っている場合は、強制的に水平荷重を加え、残留変位をゼロとしてから可換部の設置を行う。また撤去方法は、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。

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 サイクル目の載荷を「+20mm-2」と表記することとする。

(1) 永続部の軸剛性

図-9 に、軸力載荷時の供試体の鉛直荷重-鉛直変位関係を示し、永続部の軸剛性を確認する。これらの図より、変形量が少ない領域を除くと、概ね線形的な挙動をしていることが確認され、その軸剛性は CH165-4.5 が 117.6kN/mm、S-C4.5 では 47kN/mm と算出された。一方、CH165-4.5 に対して、規格値から算出されるコンクリートヒンジの軸剛性が約 1577kN/mm であるように、本供試体の鋼管拘束コンクリートヒンジの軸剛性が規格値から得られる値と大きく異なっていることがわかる。これは、本供試体における接合部や他の部材が存在することによる影響であると考えられる。しかしながら、CH165-4.5 は固定ゴム支承と比較して約 2-3 倍の軸剛性を有しているため、永続部の軸剛性の向上が当該構造の耐震性能および地震後の復旧性に与える影響に関する検討は可能であると判断し、以降の検討を進めることとする。

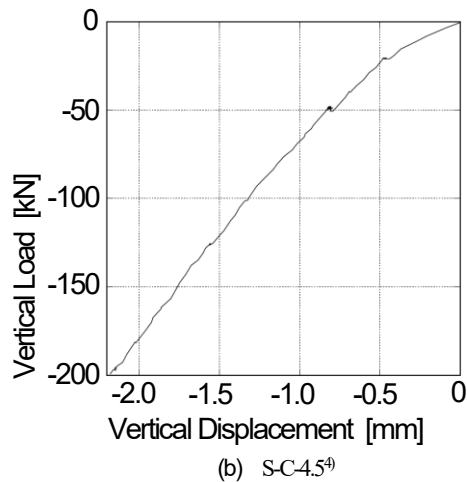
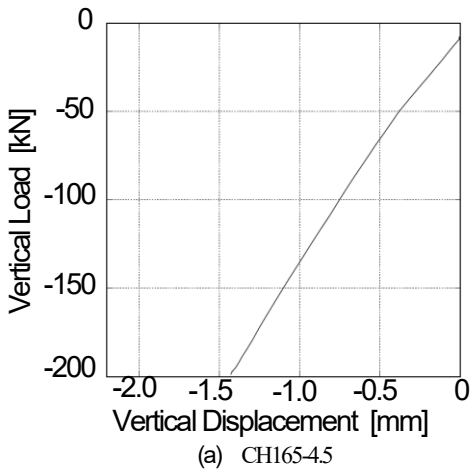


図-9 軸力載荷時の鉛直荷重－鉛直変位関係

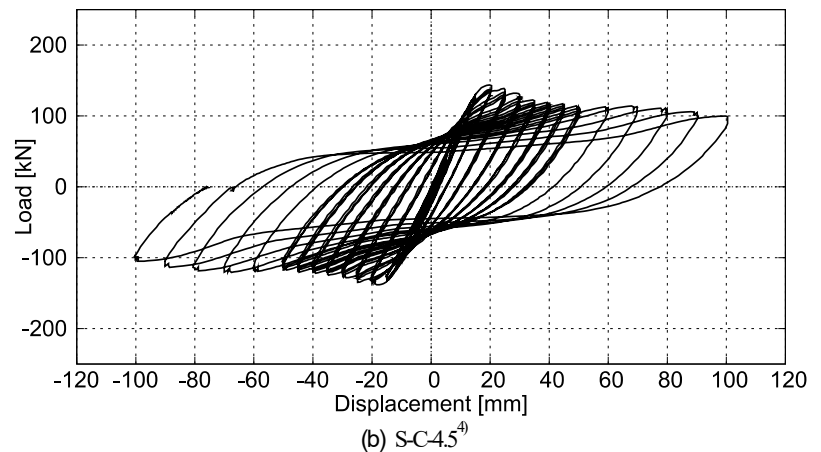
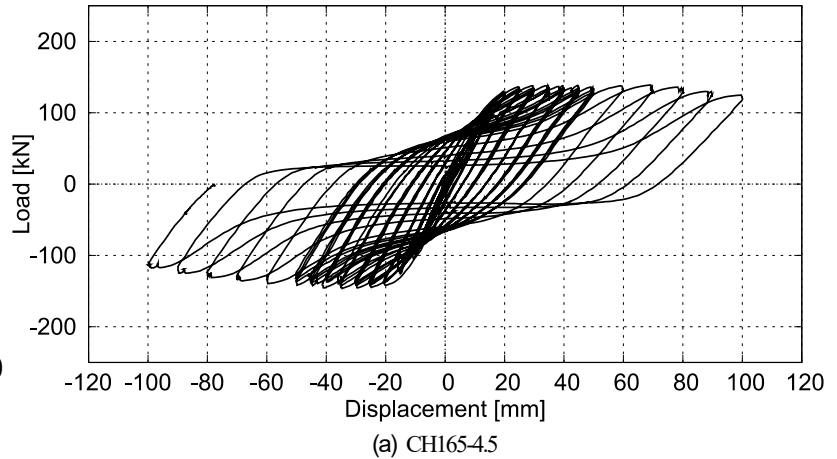


図-10 荷重－変位関係

(2) 荷重－変位関係

図-10 に各供試体の荷重－変位関係を示す。CH165-4.5 では、可換部の座屈が -20mm で見られた後も荷重低下は発生しなかった。その後、変位振幅が大きくなった後も顕著な荷重低下は発生せず、安定した復元力が維持されていた。具体的には、正側よりも相対的に荷重低下が大きかった負側の荷重に着目すると、最大荷重が -146.6kN で最大振幅 100mm 時の荷重が -117.6kN であったことから、荷重低下の割合は最大荷重の 19.8% であった。また、柱の荷重が最大荷重の 90% となったのは、正側で水平変位 $99.7\text{mm}(6.6\delta_y)$ 、負側で水平変位 $-78.4\text{mm}(5.2\delta_y)$ であった。一方で、S-C-4.5 では、CH165-4.5 と同程度の最大荷重を示したものの、可換部座屈後に最大荷重の 30.5% の荷重低下が発生した。よって、永続部の剛性を向上させることで、可換部座屈後の荷重低下が改善することがわかった。

ここで、柱の荷重が最大荷重の 90% となったときの水平変位を指標として、CH165-4.5 で確認された荷重低下改善効果を矩形コンクリート充填鋼管柱を対象とした既往研究¹⁴⁾¹⁵⁾の結果と比較する。既往研究¹⁴⁾¹⁵⁾において、

軸力比 0.20 、幅厚比パラメータ 0.90 である No.1 供試体(K-1)の荷重が最大荷重の 90% となったのは、正側で水平変位 $3.3\delta_y$ 、負側で水平変位 $3.1\delta_y$ であった。また、軸力比 0.20 、幅厚比パラメータ 0.42 の No.3 供試体(K-3)の荷重が最大荷重の 90% となったのは、正側で水平変位 $4.2\delta_y$ 、負側で水平変位 $5.3\delta_y$ であった。よって、幅厚比が 1.59 である CH165-4.5 では、より幅厚比が小さな矩形コンクリート充填鋼管柱と比較しても、荷重低下が緩やかであったことがわかる。無論、軸力比等の各種パラメータが異なるため、CH165-4.5 で得られた結果と単純に比較はできない。しかしながら、永続部の軸剛性を一定以上に高めることで、従来の鋼製柱よりも大きな幅厚比パラメータで基部座屈後の荷重低下を防止できる可能性が示されたといえる。

(3) 鉛直変位－水平変位関係

図-11 に各供試体の鉛直変位－水平変位関係を示す。図-11 の鉛直変位は、永続部に軸力を作用させて可換部を設置した直後の状態を初期位置とした。

道路震災対策便覧(震災復旧編)¹⁶⁾によると、地震後の

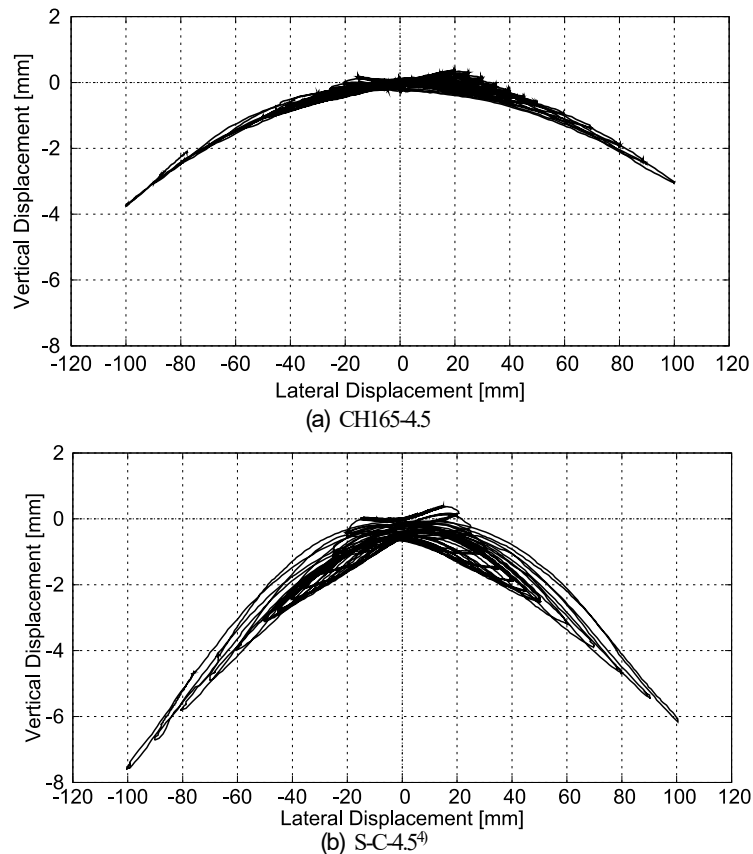
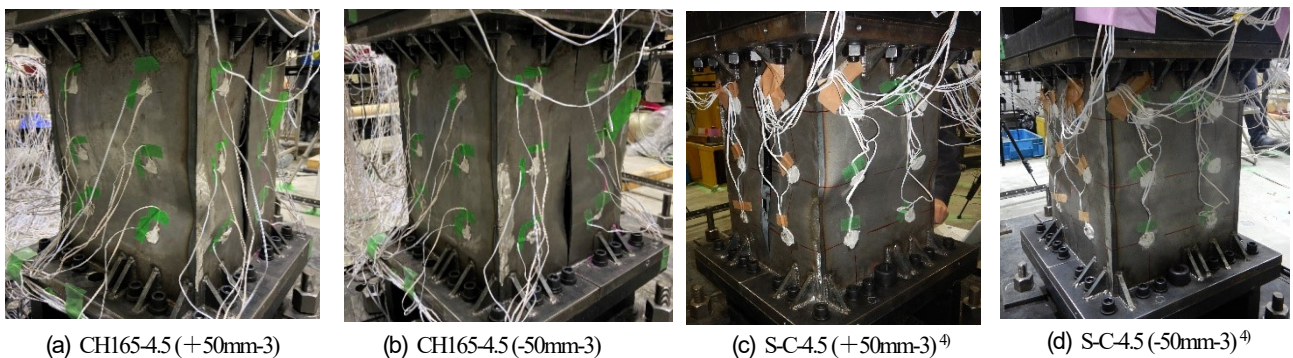


図-11 鉛直変位—水平変位関係

図-12 $\pm 50\text{mm-3}$ における可換部の変形性状

柱の残留変位が柱高さの $1/100$ 以上であれば、柱の再構築が望ましいとされている。メタボリズム柱構造では、地震により可換部が大きく塑性化し、本来であれば柱の再構築が必要な場合でも、可換部のみを取り替えることで継続して柱を供用させることを目指している。一方で、柱の残留変位が柱高さの $1/100$ 未満であれば、可換部の取替を行わず、継続して柱を供用することも考えられる。そこで、地震後の供用性の観点から、柱の残留変位が初めて柱高さの $1/100$ である 15mm に達した際の両供試体の軸沈下量を見ると、CH165-4.5 で 0.34mm (柱高さの 0.22%)、S-C-4.5 で 1.43mm (0.95%) であった。このように、永続部の剛性の違いにより、残留変位時の軸沈下量に差

異が確認でき、CH165-4.5 が有する支点の高さ保持機能が維持されていたことがわかる。なお、両供試体間での軸沈下量の差が、地震後の復旧性へ与える影響についての考察は、4.(5)にて行う。

(4) 可換部の変形性状

両供試体の $\pm 50\text{mm-3}$ における可換部の変形性状を図-12 に示す。図より、両供試体とも、圧縮側の可換部が座屈したとしても、载荷方向が反転した際に、座屈した可換部が再度引張応力を発揮していることがわかる。ここで、4.(3)で述べたように、両供試体では、永続部の存在により可換部座屈後の柱の軸沈下が僅かであり、支点

の高さ保持機能が維持されていた。そのため、支点の高さ保持機能の必要条件的な位置づけである鉛直方向の力の抵抗機能も維持できていたと判断することができる。よって、永続部による鉛直方向の力の抵抗機能により、座屈発生後においても可換部が引張力を発揮することが可能となり、柱の荷重低下抑制につながったと考えられる。

(5) 軸力作用下での可換部撤去実験結果

可換部撤去中の荷重－変位関係を図-13に示す。なお、両供試体とも、可換部撤去中、柱の復元力が負となったため、水平外力を加えて柱を鉛直に戻しながら撤去を行った。そのため、実際の現場での復旧作業では、従来の柱構造と同様、柱の残留変位を消失させるために柱に水平外力を加える必要があるといえる。しかしながら、図より、CH165-4.5およびS-C-4.5ともに、正負交番载荷時と比較して、小さな水平荷重で水平変位をゼロに戻すことができることがわかる。また、可換部撤去中、常に軸力を永続部によって支持することができており、メタボリズム鋼製柱構造が従来の柱構造と比較して優れた復旧性を持つことがわかる。

ここで、可換部撤去時の供試体の鉛直変位－水平変位関係を図-14に示す。なお、図-14の鉛直変位は、永続部に軸力を作用させて可換部を設置した直後の状態を基準とした。図-14(a)を見ると、CH165-R4.5では、可換部を撤去して水平変位がゼロに近づく中で、鉛直変位も元の位置(0mm)に近づいていき最終的に元の位置から-0.56mmの高さに戻っていることがわかる。これは、永続部の剛性を高めたCH165-4.5では、柱が持つ支点の高さ保持機能と力の抵抗機能を効果的に分離しているため、地震により柱基部が塑性化するなどの被害に見舞われたとしても、柱の軸沈下が柱高さに対して0.03%程度に留まることを意味する。また、CH165-4.5の一連の実験終了後に永続部の底面を観察したところ、普通モルタルの一部が圧縮破壊し粉状になっていた。これが、僅かながら軸沈下が生じた要因であるといえ、鋼管内部に充填するコンクリート(本実験ではモルタル)の強度を高めることで、軸沈下を更に軽減できると考えられる。

ここで参考として、鉄道構造物等設計標準・同解説変位制限¹⁷⁾に記載されている、常時の新幹線の走行安全性の照査に使用される軌道面における鉛直目違い(変位差)の設計限界値を参照すると、鉛直目違いが1mm以下

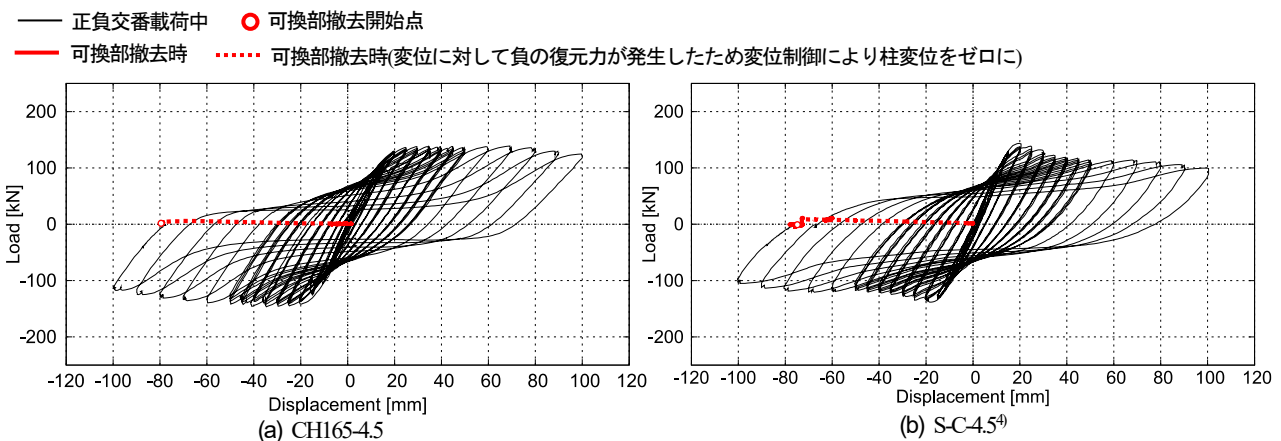


図-13 可換部撤去中の荷重－変位関係

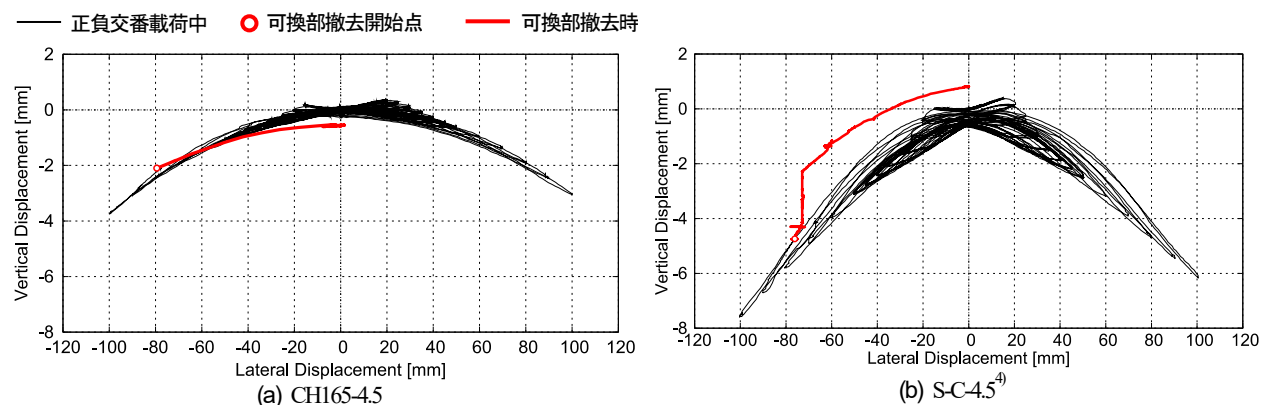


図-14 可換部撤去中の鉛直変位－水平変位関係

であれば、新幹線は速度360km/hで走行することができ、最高速度が260km/hであれば鉛直目違いが2mmまで許容されていることがわかる。以上より、本実験結果は縮小供試体から得られたものであるため、単純な絶対量の比較はできないものの、CH165-4.5の永続部が持つ支点の高さ保持機能により、地震後の列車走行性、ならびに車両の安全な通行が維持され、物資の運搬や緊急車両の通過など、地震後の迅速な復旧作業に繋がると考えられる。また、4.(3)で述べたように、柱の残留変位が柱高さの1%程度発生している際の軸沈下量は、CH165-4.5で0.34mm(柱高さの0.22%)であり、S-C4.5で1.43mm(柱高さの0.95%)であった。そのため、先述の軌道面における鉛直目違いの設計限界値を踏まえると、可換部の取替を行わずに柱を継続して供用する場合でも、CH165-4.5における永続部の軸剛性増大により、地震後の供用性の向上ならびに迅速な復旧作業が実現できる可能性があるといえる。

一方、図-14(b)を見ると、S-C4.5では、可換部を撤去して水平変位がゼロに近づく中で、鉛直変位が最終的に元の位置から約+1mmの高さに戻っていることがわかる。S-C4.5において、可換部撤去後に柱高さが約1mm増大した理由は、以下のように考えられる。3.(1)で述べたように、本実験では、可換部を設置する際、可換部と上部鋼材の隙間にシム板を挿入し、できる限り可換部と上部鋼材の隙間を小さくしてからボルトによる引張接合を行った。しかし、S-C4.5では、ボルトで可換部と上部鋼材を引張接合した際、鉛直変位が約1mm減少したことが分かっている。これは、S-C4.5では可換部と上部鋼材に隙間が残っており、ボルトにより引張接合した際、相対的に軸剛性が小さい永続部のゴム支承が軸沈下したためであると考えられる。先述のように、図-14の鉛直変位は、可換部設置後、すなわちボルト接合後の柱高さを基準として図示している。そのため、S-C4.5において、可換部撤去後に柱高さが約1mm増大した理由は、可換部が撤去されたことで、ボルト接合時に沈下した分の鉛直変位が解放されたことによるものであると考えられる。可換部との接合による柱の軸沈下は、永続部には付加的に軸圧縮力が作用していることを意味するため、永続部の機能維持の観点でも好ましくない。本研究では部材同士の接合法については検討の対象外であるが、メタボリズム柱構造では、可換部取付時に永続部に負担がかからないよう、配慮する必要があるといえる。

5. まとめ

本研究では、地震後の橋梁構造の復旧性向上を目的に、橋脚が有する機能を整理しつつ、著者らが一連の研究の

中で開発してきたメタボリズム柱構造の改良を行った。具体的には、過去の提案構造よりも永続部の軸剛性を高めたメタボリズム鋼製柱構造を提案し、永続部の軸剛性の向上が柱の耐震性能ならびに地震後の復旧性に与える影響について実験的に検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 本研究では、橋脚の最も重要な機能は、上部構造を支えること、すなわち、「支点の位置を保持すること(支点の高さ保持機能)」であり、その下層的な位置づけとして、「鉛直・水平方向の力に抵抗すること(力の抵抗機能)」が橋脚の機能に含まれると考えた。
- 鋼管拘束コンクリートヒンジ(円形鋼管の内部にモルタルを充填した構造)および固定ゴム支承(せん断変位制御装置を有するゴム支承)を永続部に、矩形鋼管を可換部に採用したメタボリズム鋼製柱構造(それぞれ、CH165-4.5およびS-C4.5とする)に対して正負交番載荷実験を実施した。なお、S-C4.5は著者らが過去の検討で用いた試験体であり、比較用の供試体として位置付けた。CH165-4.5は本論文の提案構造であり、S-C4.5よりも永続部の軸剛性を向上させた構造である。その結果、S-C4.5では可換部座屈後に僅かな荷重低下が発生したのに対し、CH165-4.5では可換部の座屈も顕著な荷重低下は発生せず、安定した復元力が維持されていた。より幅厚比が小さな矩形コンクリート充填鋼管柱に対する過去の実験結果と比較しても、CH165-4.5で発生した荷重低下は緩やかであった。以上より、永続部の軸剛性を一定以上に高めることで、従来の鋼製柱よりも大きな幅厚比パラメータで基部座屈後の荷重低下を防止できる可能性が示されたといえる。
- 地震後の供用性の観点から、正負交番載荷実験中に柱の残留変位が初めて柱高さの1/100である15mmに達した際の両供試体の軸沈下量を見ると、CH165-4.5で0.34mm(柱高さの0.22%)、S-C4.5で1.43mm(0.95%)であった。これは、メタボリズム鋼製柱構造における永続部の軸剛性の向上により、柱が有する支点の高さ保持機能が維持されていることを意味する。
- CH165-4.5およびS-C4.5とも、圧縮側の可換部が座屈したとしても、載荷方向が反転した際に、座屈した可換部が再度引張応力を発揮していた。よって、永続部の存在により可換部座屈後の柱の軸沈下が僅かであったことで、座屈発生後においても可換部が引張力を発揮することが可能となり、柱の荷重低下抑制につながったと考えられる。
- 正負交番載荷実験後に実施した可換部撤去実験により、CH165-4.5およびS-C4.5とも、常に永続部によって軸力が支持された状態で可換部が撤去でき、かつ

小さな水平外力で柱の残留変位を消失させることができた。以上より、メタボリズム鋼製柱構造が従来の柱構造と比較して優れた復旧性を持つことがわかった。

- CH165-4.5において、可換部を撤去して水平変位がゼロに近づく中で、鉛直変位も元の位置(0mm)に近づいていき最終的に元の位置から-0.56mmの高さに戻っていることがわかる。これは、永続部の剛性を高めたCH165-4.5では、柱が持つ支点の高さ保持機能と力の抵抗機能を効果的に分離しているため、地震により柱基部が塑性化するなどの被害に見舞われたとしても、柱の軸沈下が柱高さに対して0.03%に留まることを意味する。よって、CH165-4.5の永続部が持つ支点の高さ保持機能により、地震後の列車走行性、ならびに車両の安全な通行が維持されるため、物資の運搬や緊急車両の通過など、地震後の迅速な復旧作業に繋がると考えられる。

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 Bridge 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，西根幸輝，林学，高橋良和：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ジェヒンジRC柱の実験的検討，第42回地震工学研究発表会，No. 33, 2022. [Uemura, K., Nishine, K., Hayashi, M. and Takahashi, Y.: Improved plastic hinge replacement performance under axial force for embedded Mesnager hinge RC column, *Proceedings of the 42nd JSCE Earthquake Engineering Symposium*, No. 33, 2022.]
- 4) 植村佳大，前田紘人，高橋良和：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，土木学会論文集 A1, Vol. 78, No. 4, pp. I_294-I_306, 2022. [Uemura, K., Maeda, H. and Takahashi, Y.: Development of steel metabolism column capable of modifying seismic performance while supporting axial forces, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1*, Vol. 48, Issue 4, pp. I_294-I_306, 2022.]
- 5) 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.]
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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. [Fujikura, S., Oshida, S., Usui, Y., Nguyen, M. H., Nakajima, A. and Urakawa, Y.: Seismic performance of repairable reinforced column under level 2 earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1*, Vol. 75, Issue 4, pp. I_591-I_601, 2019.]
- 10) 藤岡光，藤倉修一，Visal THAY，運上茂樹，渡瀬博：地震後の復旧性能の向上を目指したPC橋脚の耐震性能に関する研究，土木学会論文集，Vol. 79, No. 13, 22-13042, 2023. [Fujioka, H., Fujikura, S., Thay, V., Unjoh, S. and Watase, H.: Seismic resistance of PC column improving post-earthquake recovery performance, *Japanese Journal of JSCE*, Vol. 79, Issue 13, 22-13042, 2023.]
- 11) 植村佳大，五島健斗，高橋良和：復旧時の要求性能を実現するコンクリートヒンジの開発とそれを埋め込んだRC柱の正負交番載荷実験，土木学会論文集 A1, Vol. 77, No. 4, pp. I_266-I_283, 2021. [Uemura, K., Goto, K. and Takahashi, Y.: Development of concrete hinge with recovery performance and cyclic loading test on RC column with the concrete hinge, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1*, Vol. 77, Issue 4, pp. I_266-I_283, 2021.]
- 12) 土木学会：座屈設計ガイドライン改訂第2版，2005. [Japan Society of Civil Engineers: *Guidelines for Stability Design of Steel Structures* 2nd Edition, 2005.]
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋・鋼部材編，2017. [Japan Road Association: *Specifications for Highway Bridges and Commentary II*, Steel Bridges and Steel Members Section, 2017.]
- 14) 井上佳樹，吉田一，青木千里，山田正人，網谷岳夫：幅厚比やせん断スパン比，材料強度に着目した角形CFT柱の力学特性，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，I-254, 2015. [Inoue, Y., Yoshida, H., Aoki, C., Yamada, M., and Amitani, T.: Mechanical properties of rectangular CFT columns focusing on width-thickness ratio, shear-span ratio, and material strength, *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers 2015 Annual Meeting*, I-254, 2015.]
- 15) 網谷岳夫，斉藤雅充，池田学，青木千里，井上佳

- 樹：矩形コンクリート充填鋼管部材の曲げ耐力・変形性能の算定法，鉄道総研報告，Vol. 30, No. 5, pp. 53-58, 2016. [Amitani, T., Saito, M., Ikeda, M., Aoki, C. and Inoue, Y.: Evaluation method of bending capacity and ductility of concrete filled steel tube members with square section, *RIRI Report*, Vol. 30, No. 5, pp. 53-58, 2016.]
- 16) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編)令和4年度改訂版，2023. [Japan Road Association: *Earthquake Disaster Countermeasures Handbook for Road Bridges* (Recovery from Earthquake Disaster, ed.) Revised 2023, 2023.]
- 17) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準 同解説 変位制限，2006. [Railway Technical Research Institute: *Design Standards for Railway Structures and Commentary*, Displacement Limit, 2006.]

(Received October 31, 2023)
(Accepted February 10, 2024)

IMPROVEMENT OF METABOLISM SEISMIC COLUMN FOR RAPID POST-EARTHQUAKE RESTORATION

Keita UEMURA, Jun SHIRAI and Yoshikazu TAKAHASHI

The authors have developed a ‘metabolism seismic column’ designed to modify seismic performance under axial force and facilitate rapid restoration post-earthquakes. This metabolism seismic column features a double-layered base structure: The outer layer comprises a replaceable plastic zone intended to absorb seismic energy, while the inner part has a permanent hinge designed to support axial and shear forces under regular conditions. In this study, we improved the metabolism seismic steel column by organizing the functions of the bridge piers in order to improve the recoverability of the bridge structure after earthquakes. We specifically examined the impact of augmenting the axial stiffness of the permanent hinge on the column’s seismic performance and its post-earthquake recoverability using cyclic loading tests. The results indicate that enhancing the axial stiffness of the permanent hinge not only improved the seismic performance of the columns but also aided in post-earthquake restoration. This was attributed to the column’s ability to maintain the position of the upper structure due to the permanent hinge.