第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

復旧時セルフセンタリング機能を実現する メタボリズム鋼製橋脚の正負交番載荷実験

植村　佳大[1]・白井　洵[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　住友商事株式会社　不動産投資開発事業部（〒100-8601 東京都千代田区大手町2-3-2）
[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

耐震基準やその考え方は地震被害の経験とともに変化してきており，たとえ現在の耐震基準を満たす橋梁でも，将来の耐震基準を満たすとは限らない．そこで筆者らは，予め柱に取替え可能な部材(可換部) を設けることで，可換部の取替えによる耐震基準が改定されても，それに合わせて構造部材を更新できるような柱構造「メタボリズム柱構造」を提案している．そして筆者らはこれまで，メタボリズムRC柱構造[1)]やメタボリズム鋼製柱構造[2)]の検討を行ってきた．特に，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」を有することから取り替えやすい構造であると言え，メタボリズム柱構造を考える上で有利であるといえる．

一方で，これまで提案してきたメタボリズム柱構造では，可換部の取り替えの際に外部機構により柱に荷重を加えて残留変位をゼロにする必要があり，復旧性向上の観点から課題があった．そうした中，著者らは，地震時にはセルフセンタリング機能を要求せず，復旧時において塑性部材を取替える中でセルフセンタリング機能の発現を期待する「復旧時セルフセンタリング」という概念を提案しており[3)]，メタボリズム構造と組み合わせた新たな柱構造の実現を検討している．しかしながら，復旧時セルフセンタリング機能は概念的な検討に留まっており，実際の挙動として実現させるには至っていないのが現状である．そこで本研究では，復旧時セルフセンタリング機能を有するメタボリズム鋼製柱構造を提案し，可換部の取替による耐震性能の改変に加え，復旧時に塑性化した可換部を撤去していく中で残留変位が低減する柱構造の実現を目指す．

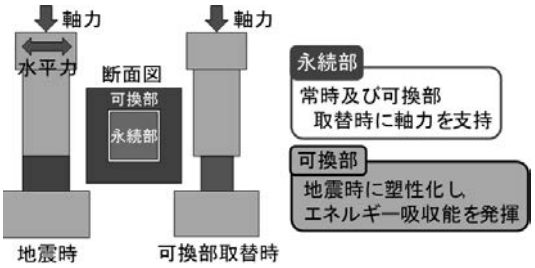


図-1　メタボリズム柱構造概要

2. 提案構造

(1) メタボリズム柱構造

メタボリズム柱構造は，機能分離型の橋脚構造であり，**図-1**のように鉛直力を支持する永続部と，地震力に抵抗する可換部の二部材で構成される．可換部は，地震時に塑性化することで地震エネルギーを吸収する役割を有している．さらに地震後の復旧時には，軸力支持下で撤去され，新たな可換部の取り付けが可能な部材である．一方，永続部は可換部が取り外されている間も軸力を支持する必要があるため，常に軸力支持機能が要求される．また，可換部とは対照的に取り替えは想定されていないため，地震時に損傷を受けないよう設計された部材である．メタボリズム柱構造は，元は耐震基準の改正により既存不的格となった橋梁に対して，耐震性能の更新を目的に提案された構造であるが，地震後に塑性化した可換部のみ取り替えることで耐震性能を回復させられるため，優れた復旧性能を有する構造と考えられる．

(2) 復旧時セルフセンタリング機能

PC柱や諸外国で盛んに検討されているロッキング

柱[4),5)]のような従来のセルフセンタリング橋脚は，地震時の柱の履歴特性における原点指向性を高めることで残留変位を低減させることが可能であるが，一般的なRC柱や鋼製柱と比較してエネルギー吸収性能が低下してしまうという課題がある．そこで，この課題解決のために著者らは，復旧時セルフセンタリングという概念を提案した．復旧時セルフセンタリングとは，地震時には柱にセルフセンタリング機能を要求せず，地震後の復旧時に塑性化した部材を撤去する中で，セルフセンタリング機能が顕在化することを狙うというものである．その際，柱に要求するセルフセンタリング力は柱の*P-Δ*効果を打ち消す程度で十分となるため，柱の地震時の復元力特性が履歴面積の小さいフラッグ型とならず，エネルギー吸収性能とセルフセンタリング機能の両立が可能となる．なお，上記の構造を実現させるためには，柱の*P-Δ*効果を打ち消す程度のセルフセンタリング機能を有する部材を柱内部に設けておく必要があるが，それに加え，地震時にその部材が損傷して機能を喪失してしまうことを防ぐことが重要となる．

(3) 検討構造

本研究では，可換部に矩形鋼管を用いたメタボリズム鋼製柱構造に対して検討を行う．その際，以下に示す2種類の構造を永続部として採用し，それらを比較検討することで，メタボリズム鋼製柱構造に適した永続部について検討する．

a) 検討構造1(永続部：固定ゴム支承)

検討構造1では，永続部に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) を採用した．固定ゴム支承には，せん断変形を防止する機構が内包されており，回転のみ許容する構造となっている．すなわち，検討構造1では，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ヒンジ構造を永続部に採用した場合にメタボリズム鋼製柱構造が示す性能について検討を行う．なお本構造は，過去の文献[2)]にて検討結果を報告済みであり，本論文では比較用の構造と位置付ける．

b) 検討構造2(永続部：コンクリートヒンジ)

検討構造2では永続部に鋼管拘束コンクリートヒンジを採用した．鋼管拘束コンクリートヒンジとは，筆者が過去に提案した構造であり，**図-2**に示すように，軸力に釣り合うように反力が作用している状態で，反力作用位置が断面中心から偏心すると復元力が発揮され，セルフセンタリング機能が発現する構造である．検討構造2では，永続部にヒンジ機能に加えて*P-Δ*効果による柱の倒壊を防止する程度のセルフセンタリング力を期待することで，優れた復旧性能を有する柱構造の実現を目指す．

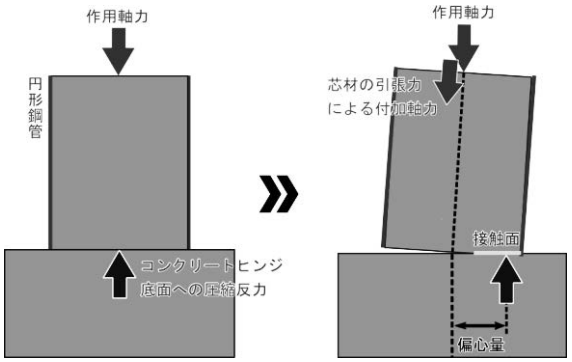


図-2 鋼管拘束コンクリートヒンジの耐荷メカニズム

(4) 基部座屈後の耐震性と永続部による軸力支持

メタボリズム鋼製柱構造は，軸力支持性能と耐震性能を明確に分離した構造となる．そのため，柱基部の可換部が座屈したとしても，永続部の存在により軸力支持機能が維持されているため，通常の鋼管柱と比較して基部座屈後の荷重低下が緩やかになると考えられる．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. 実験概要

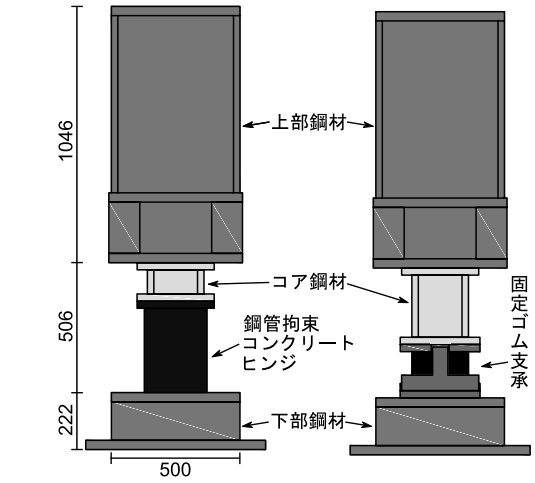
(1) 供試体

本研究では，計4種類の供試体(**図-3**)を製作し，それぞれの供試体に対して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実施した．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-3**(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．以下にそれぞれの供試体の詳細を示す．

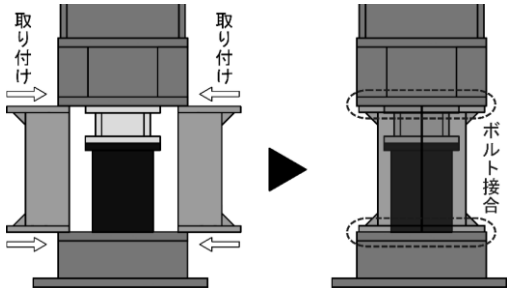
a) PCH254-R4.5

PCH254-R4.5は永続部に直径254mmの鋼管拘束コンクリートヒンジ，可換部に厚さ4.5mmの矩形鋼管を使用した供試体である．本試験体では，永続部に軸力支持機能と*P-Δ*効果による柱の倒壊を防止する程度のセルフセンタリング機能を期待しており，可換部座屈後の荷重低下抑制および復旧時セルフセンタリング機能を図る．

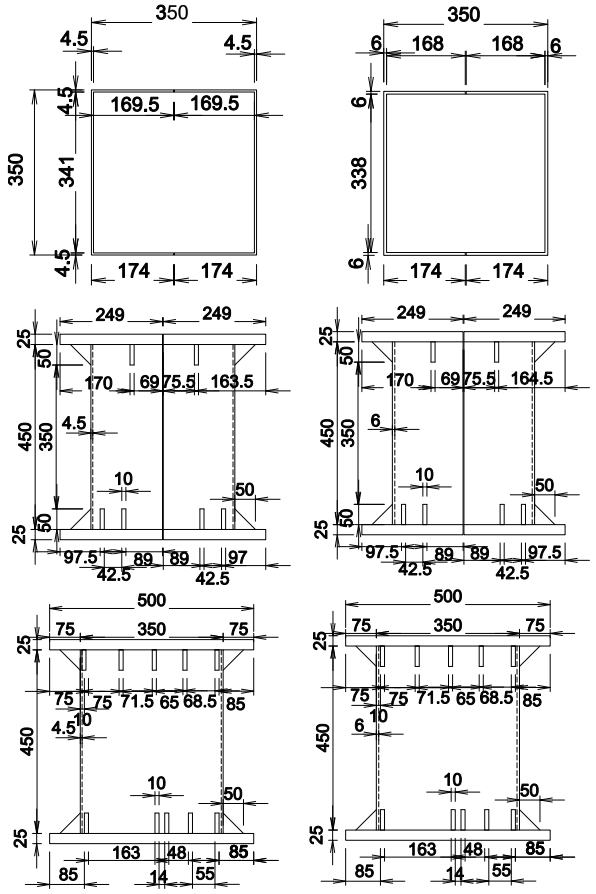
永続部の鋼管拘束コンクリートヒンジには，厚さ8.0mmの鋼管 (SS400) に無収縮モルタル (一軸圧縮強



(a) 永続部(鋼管拘束コンクリートヒンジ)　(b) 永続部(固定ゴム支承)



(c) 可換部取付の様子



(d) 可換部 (板厚 4.5mm)　(e) 可換部 (板厚 6.0mm)

図-3　供試体の詳細 (Unit [mm])

度：58.1MPa)を充填したものを用いた．なお，鋼管内部にコンクリートではなく無収縮モルタルを充填したのは，本供試体が縮小模型であることから，永続部にコンクリートを充填すると骨材寸法の影響が大きくなる恐れがあったためである．可換部は**図-3(c)**のようにコの字型断面二部材によって構成されている．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．なお，本検討では，永続部-可換部間の接合部については検討対象外とした．さらに，鋼管拘束コンクリートヒンジの底面には，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．

b) PCH254-R6.0

PCH254-R6.0は永続部に直径254mmの鋼管拘束コンクリートヒンジ，可換部に厚さ6.0mmの矩形鋼管を使用した供試体である．本供試体では，PCH254-R4.5と同様，可換部座屈後の荷重低下抑制および復旧時セルフセンタリング機能を期待する．なお，PCH254-R6.0とPCH254-R4.5は同一の永続部を使用しており，PCH254-R4.5の載荷実験終了後，可換部の取替を行い，PCH254-R6.0の実験を実施した．PCH254-R4.5との差異は，可換部に使用した矩形鋼管の厚さのみである．PCH254-R4.5と比較することで，軸力支持下での可換部の取替ならびに耐震性能の改変が可能であるかを検証する．

c) PCH165-R4.5

PCH165-R4.5は永続部に直径165mmの鋼管拘束コンクリートヒンジ，可換部に厚さ4.5mmの矩形鋼管を使用した供試体である．本試験体の永続部に径の小さな鋼管拘束コンクリートヒンジを用いたのは，永続部に軸力支持機能のみを期待し，復旧時セルフセンタリング機能は要求しない構造と位置付けたためである．また，永続部の鋼管拘束コンクリートヒンジには，厚さ7.1mmの鋼管 (SS400) に無収縮モルタル (一軸圧縮強度：52.3MPa)を充填したものを用いたが，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．永続部下端に普通モルタルを使用したため，PCH254-R4.5・R6.0に比べて永続部下端の損傷が顕著になると考えられるが，先述のように，本試験体では永続部に軸力支持機能のみを要求しているため，大きな影響はないと考えた．なお，可換部にはPCH254-R4.5で用いたものと同様の構造を採用して

おり，鋼管拘束コンクリートヒンジの底面にはせん断方向へのずれ止めを目的としてずれ止めピンが取り付けられている．

d) S-C-4.5[2)]

S-C-4.5は永続部に**図-3(b)**に示す固定ゴム支承，可換部に厚さ4.5mmの矩形鋼管を使用した供試体である．固定ゴム支承は，本実験での柱の軸力レベル・変形レベルにおいて弾性的なヒンジ機構を示すことが確認されている．そのため，本構造の永続部には軸力支持機能のみを期待し，PCH165-R4.5の結果と比較することで，永続部の軸剛性の違いが柱の復元力特性に与える影響について考察する．可換部には PCH254-R4.5で用いたものと同様の構造を採用しており，PCH254-R4.5およびPCH165-R4.5との違いは永続部の構造の違いのみである．

(2) 正負交番載荷実験の詳細

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．PCH254-R4.5においては，各振幅での繰り返し回数は3回とし，50mm振幅で載荷を終了した．PCH165-R4.5およびS-C-4.5においては，永続部の軸剛性が可換部座屈後の柱の復元力特性に与える影響ついて検討するため，50mm振幅での載荷以降，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．PCH254-R4.5においては，50mm振幅の載荷時に可換部の取り付け部で破断が発生し，柱の復元力を評価することができなかった．そこで，それ以降はPCH254-R6.0における復旧時セルフセンタリング機能の評価のみを行うことを目的とし，変位80mmまでの片押し載荷を行うことで残留変位を発生させ，次節で詳述する可換部取替実験へとつなげた．

(3) 可換部取替実験の詳細

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，復旧時において，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，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．このとき，柱に負の復元力が発生した場合，*P-Δ*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，実構造物に本構造を適用する際は可換部をガス切断するなどの方法が考えられるが，本実験では簡易的に，PCH165-R4.5およびPCH254-R4.5・R6.0では可換部腹部をグラインダーで切断する方法を，S-C-4.5ではボルトを緩めることにより可換部を撤去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) 荷重－変位関係

図-4に各供試体の荷重－変位関係を示す．PCH254-R4.5では，+ 20mm-3において圧縮側の可換部に座屈変形が確認された．しかし，荷重低下は発生せず， 35mm-1で最大荷重を示した．その後，可換部の座屈変形は顕著になっていったが，急激な荷重低下は確認されず，期待していた基部座屈後の荷重低下抑制が実現された．

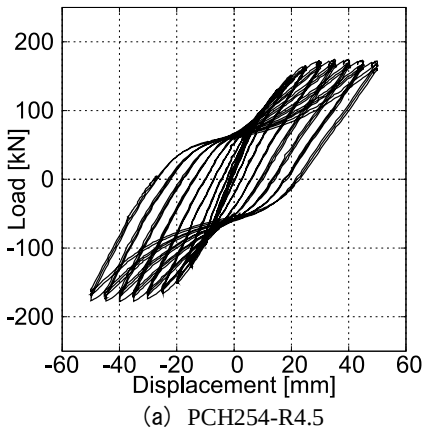
PCH254-R6.0では，-50 mm-1の際に可換部取り付け部の溶接個所の破断が確認され，急激な荷重低下が発生した．そのため，それ以降の柱の復元力特性の評価は困難といえる．しかしながら，破断が生じるまでの領域において，PCH254-R4.5より大きな荷重を示しており，可換部の板厚を変更することにより，柱の耐震性能の改変が可能であることが確認された．

PCH165-R4.5では，同一厚の可換部を有するPCH254-R4.5と比較して，最大荷重が小さかったものの，可換部の座屈が-20mm-1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．

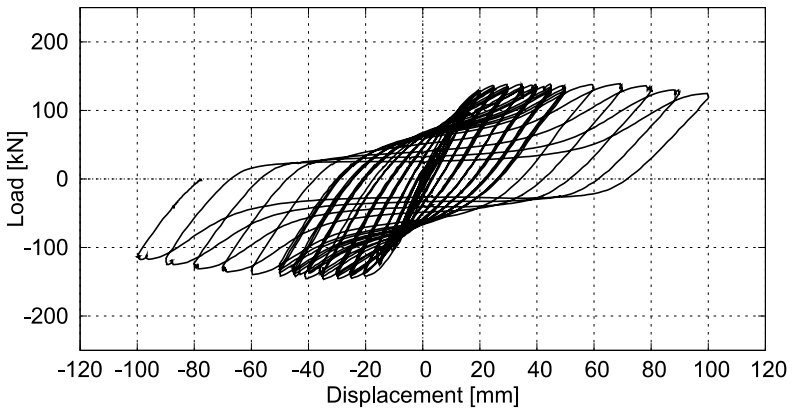
S-C-4.5では，PCH165-R4.5と同程度の最大荷重を示した一方で，基部座屈後に僅かな荷重低下が発生した．しかしながら，可換部座屈後の急激な荷重低下は抑制されていると判断でき，永続部の軸剛性が可換部座屈後の荷重低下抑制の程度に影響を与えることが明らかとなった．

(2) 座屈発生後の可換部の変形性状

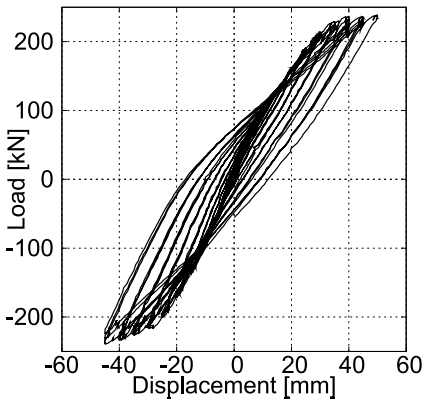
図-5にPCH165-R4.5を例として±50mm-3における可換部の変形性状を示す．図より，圧縮側の可換部が座屈したとしても，載荷方向が反転した際に，座



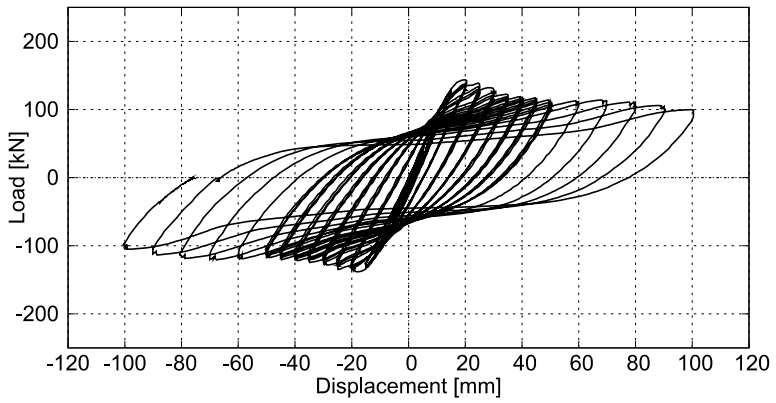
（a） PCH254-R4.5



（b） PCH165-R4.5



（c） PCH254-R6.0 (可換部取付部破断まで)



（d） S-C-4.5[2)]

図-4 荷重－変位関係


（a） +50mm-3

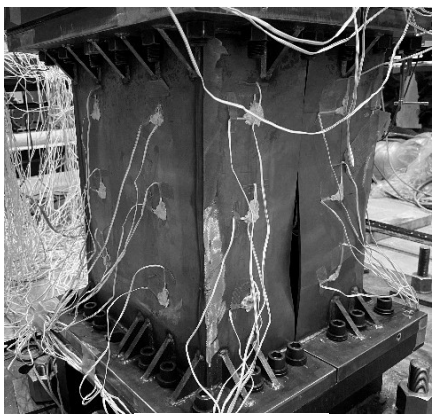
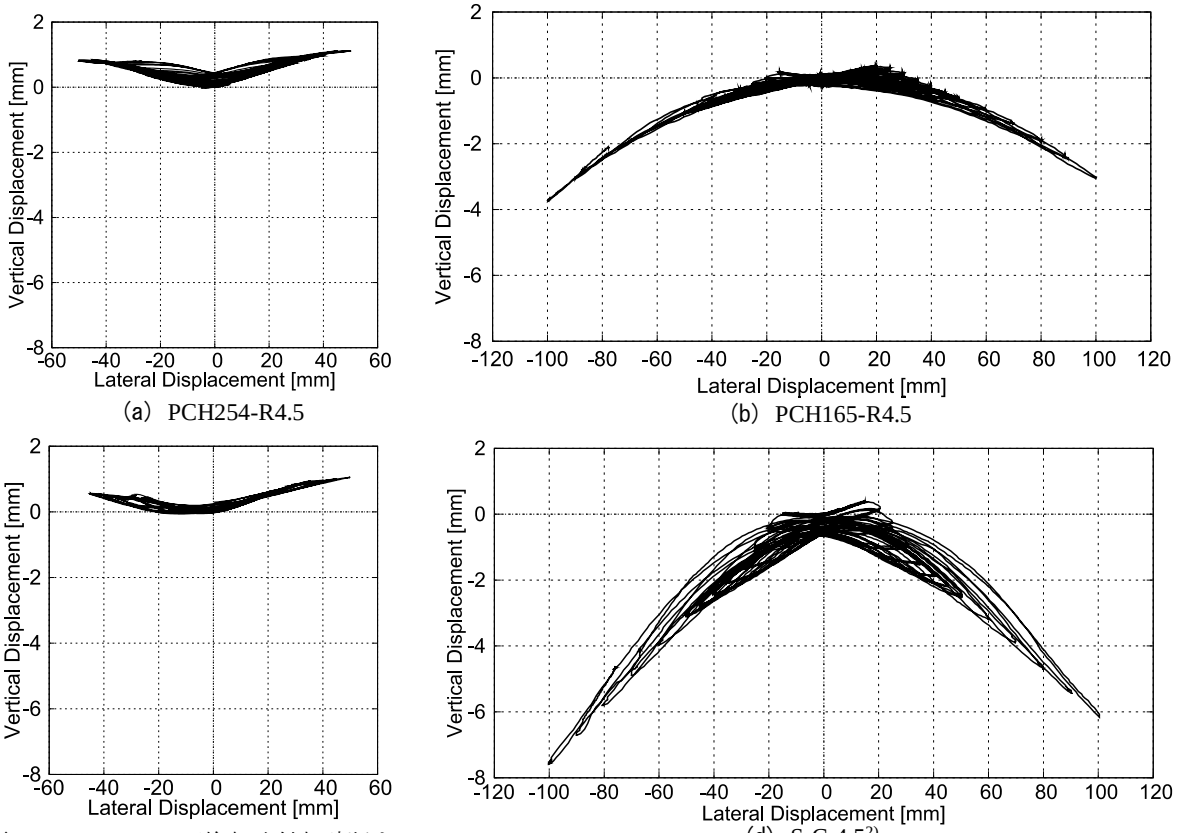

（b） -50mm-3

図-5 PCH165-R4.5 における可換部の変形性状

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，各供試体の鉛直変位－水平変位関係を**図-6**に示す．図より，PCH254-R4.5およびPCH254-R6.0 においては，他の供試体と異なり，載荷変位が大きくなるにつれて軸変位が増加していることがわかる．これは水平変位を与えて柱が傾いた際に，鋼管拘束コンクリートヒンジ部に目開きが生じる挙動をすることによって，鉛直方向への変位の伸び上がりが現れたためであると考えられる．一方で，PCH165-4.5 で上記の傾向が見られなかったのは，水平変位時の永続部の鋼管拘束コンクリートヒンジ底面に発生した目開き量の違いによるものであると考えられ，直径の小さなPCH165-R4.5の方が鋼管拘束コンクリートヒンジ底面の目開きが発生した時の柱の鉛直方向の高さ増分がPCH254-R4.5 およびPCH254-R6.0 と比べて小さかったことが要因と考えられる．また，S-C-4.5においても水平変位の増大に伴う鉛直変位の低下が確認され，その程度はPCH165-R4.5よりも大きかった．これは，永続部の軸剛性の違いによるものであると考察できる．

以上のように，永続部の構造の違いにより，柱の水平変位－鉛直変位関係に差異が見られた．しかし



(a) PCH254-R4.5　(b) PCH165-R4.5

(c) PCH254-R6.0 (可換部取付部破断まで)　(d) S-C-4.5[2)]

図-6　鉛直変位－水平変位関係

ながら，いずれの供試体においても，水平変位が0mmとなった際の軸沈下が抑制されていることがわかる．このように，永続部の存在により可換部座屈後の柱の軸沈下が抑制されることで，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．

(3) 永続部の負担軸力－水平変位関係

本実験では，永続部のコア鋼材(**図-3**)に数点ひずみゲージを添付し，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した．その際，体PCH254-R6.0とPCH165-R4.5において，ひずみデータの欠損が発生したため，本章では正常にひずみを計測できたPCH254-R4.5を対象に検討を行う．**図-7**にPCH254-R4.5の永続部の負担軸力―水平変位関係を示す．この結果を見ると，水平変位が小さい段階では載荷に伴って永続部の負担軸力が減少している様子が見て取れる．これは，水平変位が小さい領域では，柱が傾くことで可換部に圧縮軸力が伝達され，結果として永続部が負担する軸力が減少したためと考えられる．しかし，載荷変位±10mmを超えると，永続部の負担軸力が増加しており，明らかな傾向の違いが現れた．ここで， PCH254-R4.5における可換部の曲率を算出し水平変位との関係をプロットした

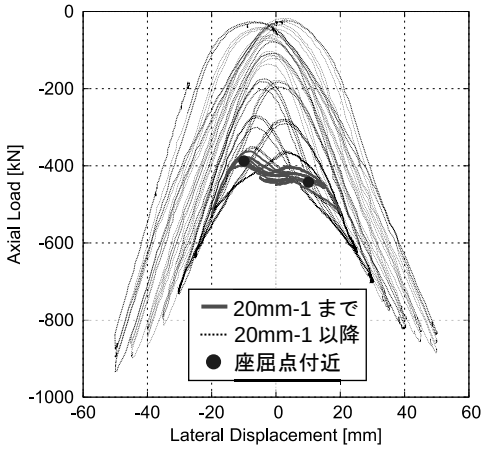


図-7　永続部の負担軸力－水平変位関係 (PCH254-R4.5)

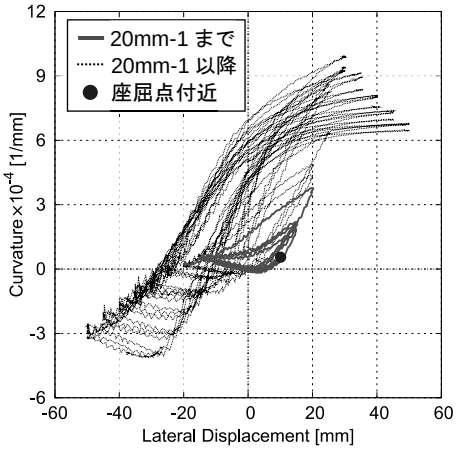


図-8　可換部曲率－水平変位関係 (PCH254-R4.5)

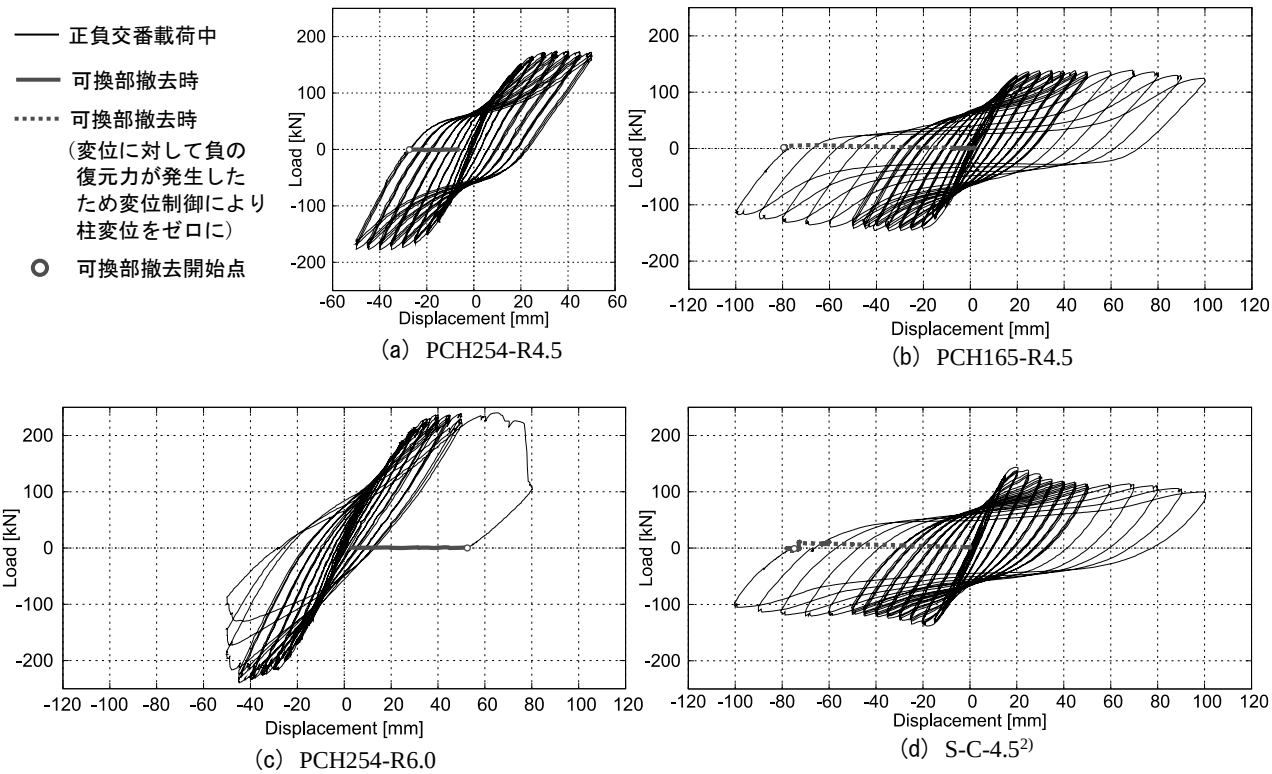


図-9　可換部撤去中の荷重－変位関係

ものを**図-8**に示す．図より，変位+10mmを超えたあたりで曲率が急激に増加していることが読み取れる．この結果から，軸沈下やフランジのへこみなど見かけ上変形が表れたのは変位20mm程度であったが，より微視的かつ局所的に見ると，変位10mmを超えた段階で可換部の座屈が発生したと考えられる．そのため，可換部が圧縮軸力を負担しにくくなり，永続部の負担軸力が変位10mmを超えた付近で増加したと考えられる．このことから，可換部が座屈して圧縮抵抗性が低下したとしても，永続部がその分の軸力を負担することが可能となっていると判断でき，結果として可換部座屈後の荷重低下抑制が実現されたと考えられる．

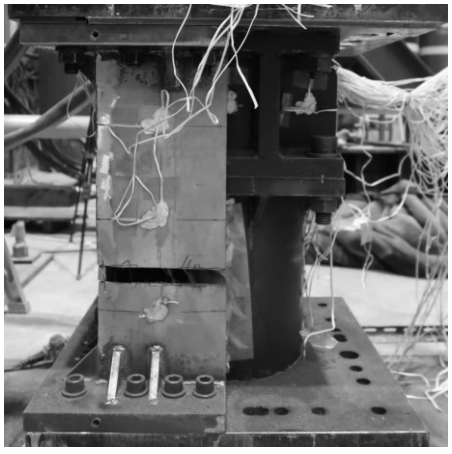
(4) 軸力作用下での可換部撤去実験結果

可換部撤去中の荷重－変位関係を**図-9**に示す．PCH165-R4.5およびS-C-4.5では，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．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できており，地震後の復旧性を向上させるという観点でも，当該構造は有効であると考えられる．

それに対し，PCH254-R4.5 とPCH254-R6.0 においては，可換部を撤去していくと(**図-10**)，残留変位が



(a) 可換部切断時



(a) 圧縮側の可換部撤去後

図-10　可換部撤去時の様子 (PCH254-R4.5)

減少する向きの復元力が生じることで，水平外力を加えずとも柱の変位が減少していいき，撤去完了時には残留変位がそれぞれ6.1mm と2.3mm となった．これは，可換部を撤去する中で自然と柱がセルフセンタリングする「復旧時セルフセンタリング機構」が実現していることを意味し，提案構造が高い復旧性を有していることがわかった．

5. まとめ

本研究では，復旧時において塑性部材を取替える中でセルフセンタリング機能が発現する「復旧時セルフセンタリング機能」を有するメタボリズム鋼製柱構造を提案し，可換部の取替による耐震性能の改変に加え，復旧時に塑性化した可換部を撤去していく中で残留変位が低減する柱構造の実現を目指した．以下に本研究で得られた知見を示す．

- せん断変位制御装置を有するゴム支承 (固定ゴム支承)および*P-Δ*効果を打ち消す程度の鋼管拘束コンクリートヒンジを永続部に，矩形鋼管を可換部に採用したメタボリズム鋼製柱構造(それぞれ検討構造1，検討構造2とする)に対して正負交番載荷実験を実施した．その結果，両構造において柱基部の座屈後の荷重低下が抑制されることが明らかとなった．
- 検討構造1および検討構造2において基部座屈後の荷重低下が抑制されたのは，可換部が座屈したとしても永続部によって圧縮反力が担保されたことに起因したと考えられる． 事実，検討構造2において，可換部の曲率が急増し座屈が発生したと考えられるタイミングで，永続部に作用する圧縮軸力が増加しており，永続部が可換部座屈後の圧縮軸力の支持機能を担っていることが確認された．
- 検討構造2において，永続部に採用した鋼管拘束コンクリートヒンジの直径が十分である場合，可換部を撤去していくにつれて残留変位を戻す向きの復元力が柱に生じ，撤去完了時には残留変位が大きく減少することが明らかとなった．

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．

参考文献

1) 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 埋込メナーゼヒンジRC柱の実験的検討，第42回地震工学研究発表会，No.33，2022.
2) 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A1，78(4)，I_294-I_306，2022.
3) 植村佳大，前田紘人，高橋良和：復旧時セルフセンタリング機構を有するメタボリズム柱構造の解析的検討，土木学会論文集A1，78(4)，I_523-I_536，2022.
4) Cheng,C.T. : Shaking table tests of a self-centering designed bridge substructure, Engineering Structures, 30, pp.3426-3433, 2008.
5) Marriott, D., Pampanin, S., Palermo ,A. : Quasi-static and pseudodynamic testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters, Earthquake engineering and structural dynamics, 38(3), pp.331-354, 2009.