

塑性ヒンジ外殻部取り替えにより履歴特性が変化する メタボリズムRC橋脚の解析的検討

前田 紘人¹・林 学²・植村 佳大³・高橋 良和⁴

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
²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）
³正会員 京都大学助教 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
⁴正会員 京都大学教授 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. はじめに

橋脚の要求性能は、上部構造を支持する重力支持機能と地震力に抵抗する耐震性能に大別される。前者は重力という大きさや向きも不変である永続作用に由来する一方、後者は大きさや向きが変動する偶発作用に由来する。このため、要求される重力支持機能は変わらないのに対し、耐震性能は、表-1 に示すように大きな地震被害が生じるたびに改訂されてきた¹⁾。繰り返し改訂の結果、現行の耐震基準を満たさない既存不適格橋脚が生まれ、現在そのような橋脚に対してはRC巻き立てなどの耐震補強が施されている。しかしこのような後追いの対策では、「用・強・美」をバランスよく考慮にいれて設計されたであろう本来の設計者の意図が失われてしまう危険性がある。

今後も求められる耐震性能は変化する可能性があり、その際上記のような後追いの対策とならないためには、予め性能の更新可能な構造が有効と考えられる。筆者らは、そのような構造の開発にあたり、要求性能のうち耐震性能のみ変化するという点に着目し、機能分離型の橋脚構造で、耐震性能を担保する部材のみ適切に更新できるような構造を検討してきた^{2),3)}。耐震性能をメタボリズム（新陳代謝）できるという意味で、筆者らは本構造をメタボリズム耐震橋脚構造と呼んでいる。本構造は、鉛直力（軸力）を支持するコア部と地震力に抵抗する外殻部の二部材で構成される。このような構造を採用することで、軸力支持下でも外殻部の取り替えが可能であるとともに、配筋量の多い外殻部を配置することで最大水平耐力を向上させられることが実験によ

表-1 地震と耐震基準の変遷

主な地震名	耐震基準
1923 年関東地震	1926 年 道路構造に関する細則案
1948 年福井地震	S31 年(1956) 鋼道路橋設計示方書
1964 年新潟地震	S46 年(1971) 道路橋耐震設計指針
1978 年宮城県沖地震	S55 年(1980)道路橋示方書 H2 年(1990)道路橋示方書
1995 年兵庫県南部地震	H8 年(1996)道路橋示方書 H14 年(2002)道路橋示方書
2011 年東北地方太平洋沖地震	H24 年(2012)道路橋示方書
2016 年熊本地震	H29 年(2017)道路橋示方書

り確認させている^{2),3)}。また本構造では、全軸力をコア部が支持した状態で水平載荷を実施すると、通常のRC橋脚よりも大きな降伏後剛性を示すことが明らかとなった。そしてこの降伏後剛性の発現は、コア部のみに作用していた軸力が、変位の増大に伴って外殻部に伝達され、外殻部の断面耐力が増加したことに起因するという考察が導かれている。そこで本研究では、過去の実験で確認された降伏後剛性発現メカニズムの妥当性を数値解析により検証するとともに、メタボリズム耐震橋脚構造の履歴特性と軸力支持状態との関係を定量的に明らかにする。

2. メタボリズム耐震橋脚構造

(1) メタボリズム運動

メタボリズム運動とは、生物が代謝を繰り返しながら成長していくように建築や都市も有機的に変化できるようにデザインされるべきという考えのもと、1960年代に流行した建築運動である⁴⁾。メタボリズムとは新陳代謝を意味し、黒川紀章の中銀カプセルタワーや丹下健三の山梨文化会館⁵⁾など、劣化や将来の要求性能の変化に備え新陳代謝できるような構造を内包したメタボリズム建築が当時いくつか建設された。理想論との批判⁶⁾もあるものの、日本発の建築運動として世界にインパクトを与えたことも事実である。

(2) メタボリズム耐震橋脚構造の意義

本研究では、このメタボリズムの考え方を橋脚構造に取り入れて、耐震性能の新陳代謝可能な構造、すなわちメタボリズム耐震橋脚構造の開発を目指す。1. で述べたように、求められる耐震性能は時代とともに変化してきた一方、要求される鉛直力支持機能は変わらない。そのため、部材に期待する機能を明確に分離し、耐震性能のみ新陳代謝すればよいと考えることができる。図-2 のように橋脚基部をコア部と取替可能な外殻部の二重構造とすると、地震時には外殻部が塑性化することでエネルギー吸収能を担保し、常時あるいは外殻部取替時にはコア部が鉛直力を支持するような構造性能を期待できる。本構造であれば、耐震性能を担う外殻部を取り替えることで既存不適格となっても容易にレトロフィットできると考えられる。

以上のような取替可能な塑性部材を有するメタボリズム耐震橋脚構造の開発意義は他にもある。まず、予め性能の更新を想定した新しい構造計画が策定でき、後追い工学からの脱却を図れる。次に、一般的な橋梁の寿命は50年と言われ、耐震性能に関して言えば表-1 で示したように基準改定のペースが経年劣化速度よりもはやいが、本構造であれば経年劣化の影響を受ける前に部材を新陳代謝できる。また、塑性部材の取替が容易であるため、地震時の早期復旧も期待できる。さらに、取替時に新たな技術が開発されていればその導入の場としても利用でき、技術力維持のための定期的な建設現場確保にもつながる。そして何より、世界に大きなインパクトを与えたメタボリズム運動の精神を受け継いでいること、日本が世界有数の地震国であることをふまえると、本構造が我が国独自の新しい構造型式として取り入

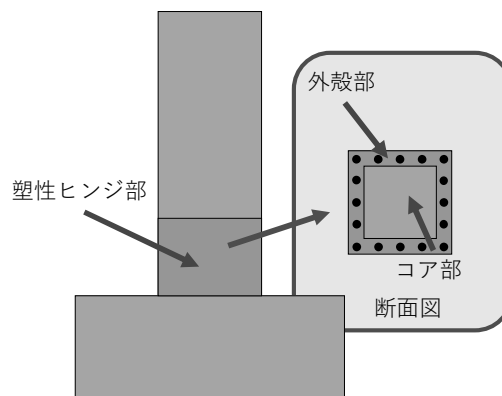


図-2 メタボリズム橋脚構造概略図

れられることには大きな意義があると考えられる。

(3) 構造概要と既往研究

本研究では、メタボリズム耐震橋脚構造としてコア部にゴム支承を、外殻部にRC構造を用いた橋脚構造を検討する。コア部にゴム支承を採用したのは、回転及び水平方向には抵抗せず、鉛直方向のみ抵抗するような構造とすることで、鉛直力は支持しつつ、地震時に塑性変形が残らず繰り返し使用できると考えられたからである。橋脚基部にゴム支承が用いられた事例として弁天工区の連続立体免震橋がある⁷⁾。兵庫県南部地震によって落橋被害を受けた同地域では、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、橋脚基部に免震ゴム支承が配置された構造が採用されている。

外殻部にはRC構造を用いることで、塑性化により地震時のエネルギー吸収を期待する。また、予め取替を想定した構造とすることで、塑性変形した際にも取替により容易に新陳代謝できるようにした。

このようなコア部と外殻部により構成されるメタボリズム耐震橋脚構造に対して、筆者らは既往研究²⁾において軸力支持下での塑性ヒンジ部取替実験及び正負交番載荷実験を実施した。図-3 に供試体の一部を示す。詳細は参考文献²⁾を参照されたいが、本実験により軸力支持下でも小さな水平支持力で外殻部を取り替えられることが確認された。また、正負交番載荷実験時の水平荷重－水平変位関係を図-4 に示す。図-4 (a) が取替前の外殻部 (OS-H8) に対する実験結果であり、図-4 (b) が取替後の外殻部 (OS-H24-1) の結果である。OS-H8よりOS-H24-1の方が密な配筋となっており、外殻部の配筋量を変えることで同断面でも最大水平耐力が向上していることがわかる。

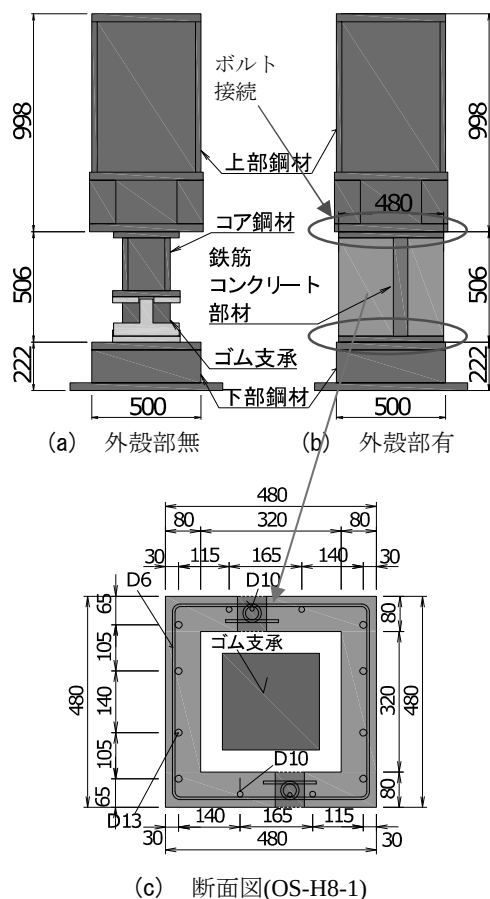
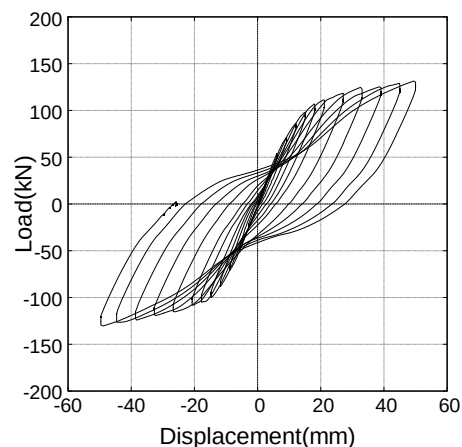


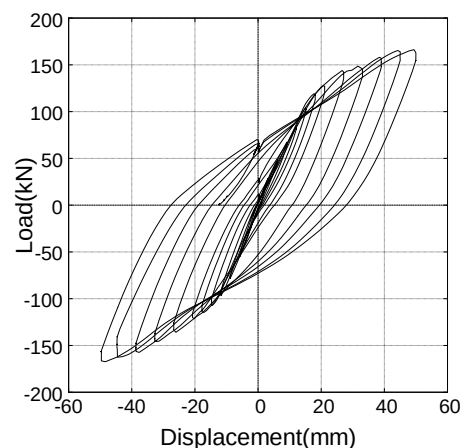
図-3 供試体概要 単位:mm

また、図-4 (c) はOS-H8と同じ配筋量の外殻部 (OS-H8-1) を用いた実験結果であるが、OS-H8の時よりも降伏後の剛性が大きくなっている。これは、一般にRC部材は負担軸力が増加すれば最大水平耐力は向上すること、OS-H8-1はOS-H8とは異なりコア部が全軸力を支持した状態で後から外殻部を設置したことに起因すると考えられた。つまり、外殻部OS-H8-1は初期状態において軸力を負担していなかったが、正負交番载荷に伴って外殻部が塑性化することで、コア部の負担軸力が徐々に外殻部に移行していき、軸力負担量の増加に伴って水平耐力が向上することで結果として、見かけ上降伏後剛性の大きな履歴が得られたと考えられる。

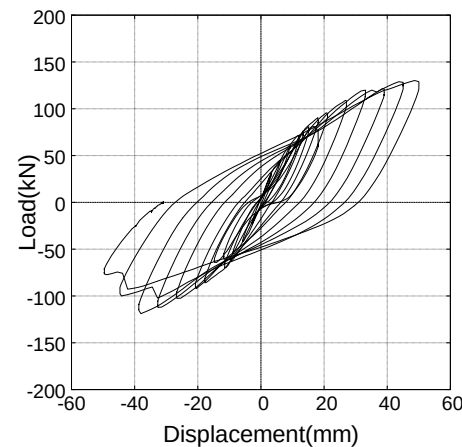
本考察の妥当性は、既往研究²⁾において、図-5 のようなモデルに対するプッシュオーバー解析によって示されている。なお、Node 0とNode 1は同一座標である。図-6 が解析結果の一部である。図-6中、下図は実験における外殻部負担軸力量と载荷点水平変位の関係を表しており、変位の増大に伴って外殻部負担軸力量が増加していることがわかる。そして、図-5 に示したモデルに対して0 kN、50 kN、100 kN、



(a) OS-H8



(b) OS-H24-1



(c) OS-H8-1

図-4 実験から得られた水平荷重—水平変位関係

150 kN、200 kN、250 kNと離散的に軸力の入力値を増大させて数値解析を実施した時の各骨格曲線はそれぞれ、図-6 中、上図の赤線、青線、茶線、橙線、桃線、カーキ線のようになる。そして緑丸点で示したように下図と上図で変位を対応させて各軸力入力時の骨格曲線上の点を水色の線で結ぶと、概ね実験

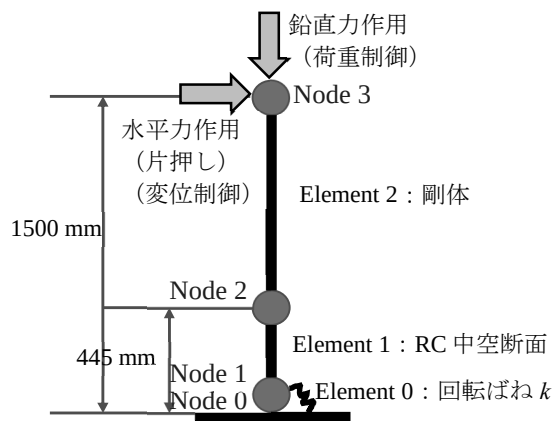


図-5 解析モデル

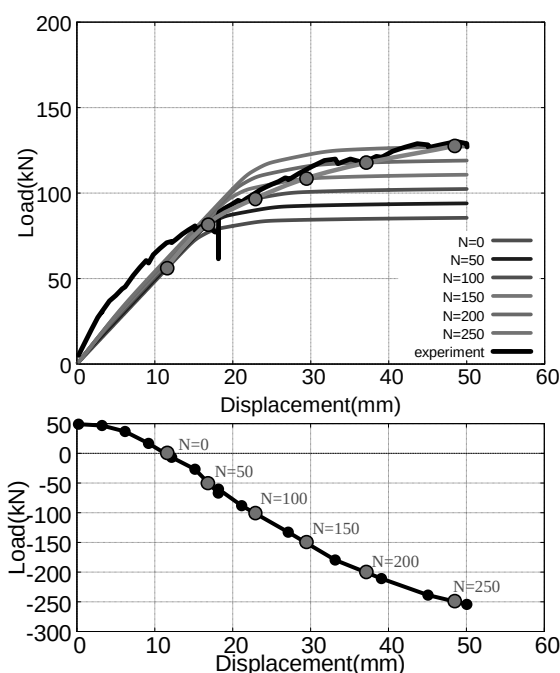


図-6 OS-H8-1の実験と解析の比較

の骨格曲線（黒線）と一致している。

しかしながら本モデルは、外殻部の負担軸力量の増加をNode 3への作用軸力を離散的に増大させることにより表現しており、現象を定性的には把握できているものの、定量的に評価するには至っていない。また、コア部の構造及び材料特性をモデルに組み込んでいないため、コア部の特性が橋脚全体の性能に与える影響についても評価できていない。そこで本研究では、外殻部だけでなくコア部もモデル化し、さらに正負交番载荷を模擬した数値解析を実施することで、より厳密な実験の再現解析を行い、軸力の負担量がコア部から外殻部に移ること、またそれによる降伏後剛性の発現、さらにコア部の特性による

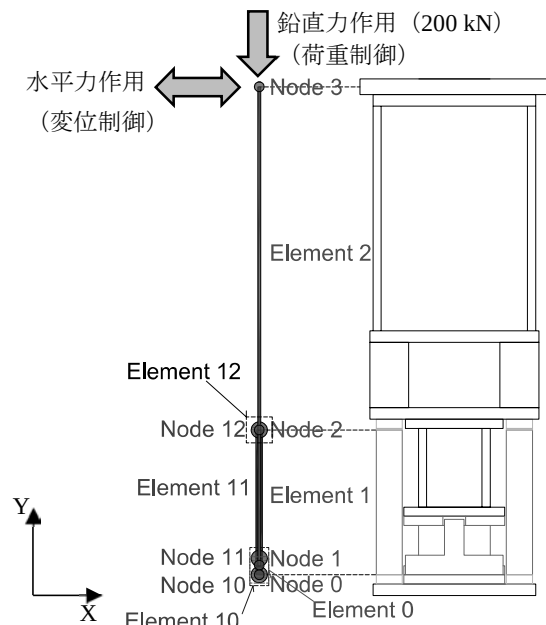


図-7 解析モデル概略図

表-2 Node 座標, 条件

No.	X	Y	条件
0	0.0	0.0	固定
1	0.0	0.0	自由
2	0.0	445.0	自由
3	0.0	1500.0	自由
10	0.0	0.0	固定
11	0.0	0.0	回転のみ自由
12	0.0	445.0	自由

上記性能の変化を定量的に評価することを目指した。詳細は、次章以降で述べる。

4. 解析的検討

(1) 解析モデル

解析モデルの概略図を図-7 に示し、表-2、表-3 に節点情報と要素情報を示す。図表中Element 0はNode 0とNode 1を結ぶゴム支承部を表現する要素として、各方向（鉛直、水平、回転）に対して一定の剛性をもつ長さゼロの弾性体とした。なお、鉛直剛性と回転剛性は実験値を、水平剛性はゴム支承の性能値を採用した。図表中Node 11とNode 12を結ぶElement 11は外殻部を表しており、実験に用いたRC

表-3 Element

対象部	No.	解析モデル
ゴム支承	0	鉛直方向ばね (剛性: 42.5 kN/mm) 水平方向ばね (剛性: 0.582 kN/mm) 回転ばね (剛性: 0.080 kN・mm/rad)
コア鋼材	1	剛体
上部鋼材	2	剛体
回転補正	10	回転ばね(各実験ごと)
外殻部	11	ファイバー要素
コア部と 外殻部の 端部接続	12	剛体

表-4 材料モデル

材料	コンクリート	鋼材
モデル	Hognestad	Menegotto-Pinto (完全弾塑性)
ヤング係数	-	200000 N/mm ²

表-5 材料パラメータ

供試体名	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)
OS-H8	30.7
OS-H8-1	34.4
OS-H8-2	36.4
OS-H24-1	39.3
鉄筋径	降伏強度(N/mm ²)
D10	373
D13	380
D16	390

表-6 基部回転ばね

供試体名	ばね定数 (kN・m/rad)
OS-H8-1	3.32×10 ⁴
OS-H8-2	3.32×10 ⁴
OS-H24-1	1.92×10 ⁴

中空断面を定義しFiber要素で表現した。なお、コンクリートと鋼材の材料モデルは表-4 に示す通りであり、コンクリートの強度は、表-5 に示す実強度を用いてH29年版道路橋示方書⁹⁾に基づき帯鉄筋による拘束効果を考慮し算出した。このようなモデル

に対して、変位制御のもと正負交番載荷実験を模擬した数値解析を実施するが、解析によって得られる載荷点水平変位は実験値よりも小さくなると考えられる。これは解析ではNode 0やNode 10を固定端としたり、Element 1とElement 2を連続的に接続してモデル化するため、実験供試体におけるボルト接合部や載荷治具との接続部でのわずかなゆるみが考慮できないためである。そこで本解析では、Element 10に示すように回転ばねを導入した。ばね定数は実験と初期剛性が合致するように決定し、表-6 に各値を整理した。また、水平力を作用させる前の、コア部のみによる軸力の支持状態を再現するため、鉛直力を作用させる前には外殻部上端節点 (Node 12) とコア部上部節点 (Node 2) は結合せず、Node 3に鉛直力200 kNを作用させた後に初めてNode 12とNode 2を剛体 (Element 12) で結合した。その後変位制御により正負交番水平載荷を模擬した数値解析を行った。

(2) 解析結果

図-8 に数値解析により得られた水平荷重－水平変位関係と実験結果の比較を、図-9 にその包絡線の比較を示す。黒線が実験結果、赤線が解析結果であるが、解析においても通常のRC橋脚とは異なる比較的大きな降伏後剛性を表現できており、その傾向が実験と良く一致していることがわかる。また、図-10 に載荷点水平変位と外殻部の負担軸力の関係を示すと、解析 (赤線) においても載荷変位の増加に伴って外殻部の負担軸力が増加しており、その傾向は実験とよく一致している。

ただし、図-10 中青丸点で示したように、解析では初期状態 (鉛直力のみ作用させ、水平力は作用させていない状態) における外殻部の負担軸力はゼロであるのに対し、実験では外殻部に引張軸力が作用しており、外殻部の初期軸力支持状態が少し異なる。ここで実験において外殻部に引張軸力が作用したのは、外殻部とその他部材のボルト接合に起因するボルト張力が外殻部に伝達したからだと考えられる。したがって初期状態において外殻部に引張軸力が作用するようなモデルを組み込めば、初期の外殻部の軸力支持状態も表現できると考えられるが、初期状態で外殻部に作用していたボルト張力が水平載荷中も一定とは限らない。既往実験において、水平載荷中しばしばボルトの締めつけが緩んでいることが確認されている。以上をふまえると、外殻部に初期引張を作用させるようなモデルを組みこむ際には、その値に留意が必要であると考えられる。

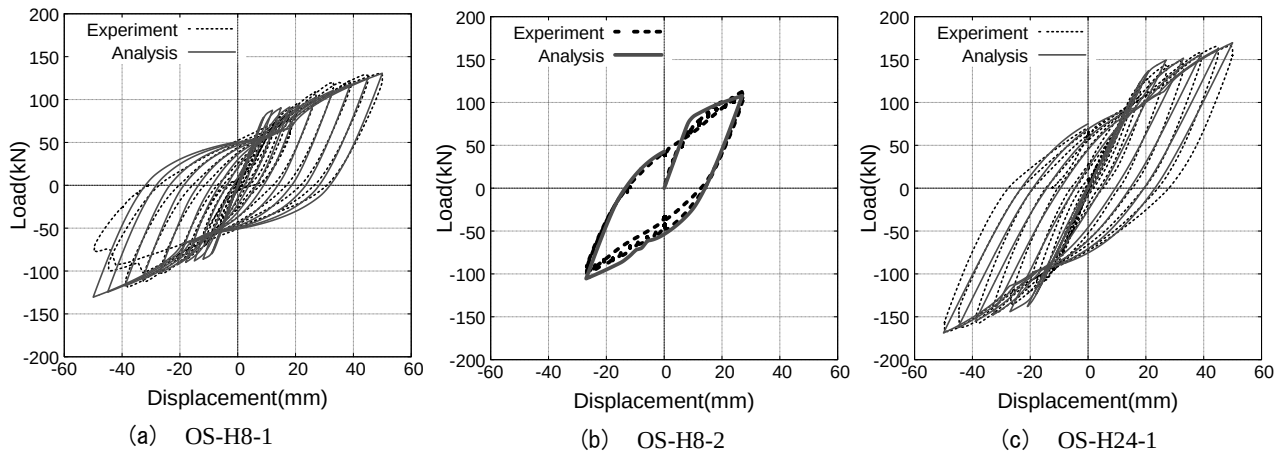


図-8 荷重—変位関係の比較

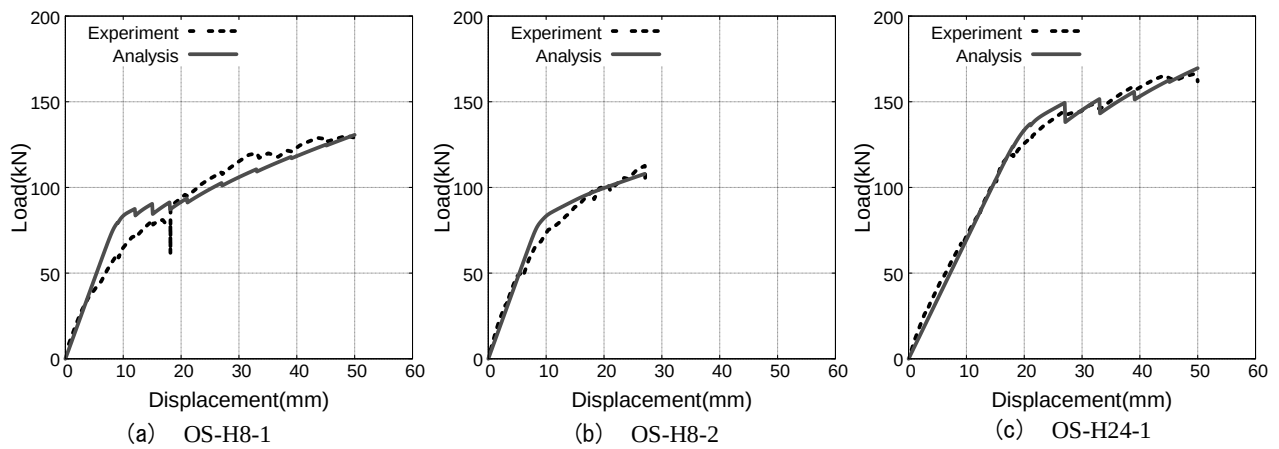


図-9 包絡線の比較

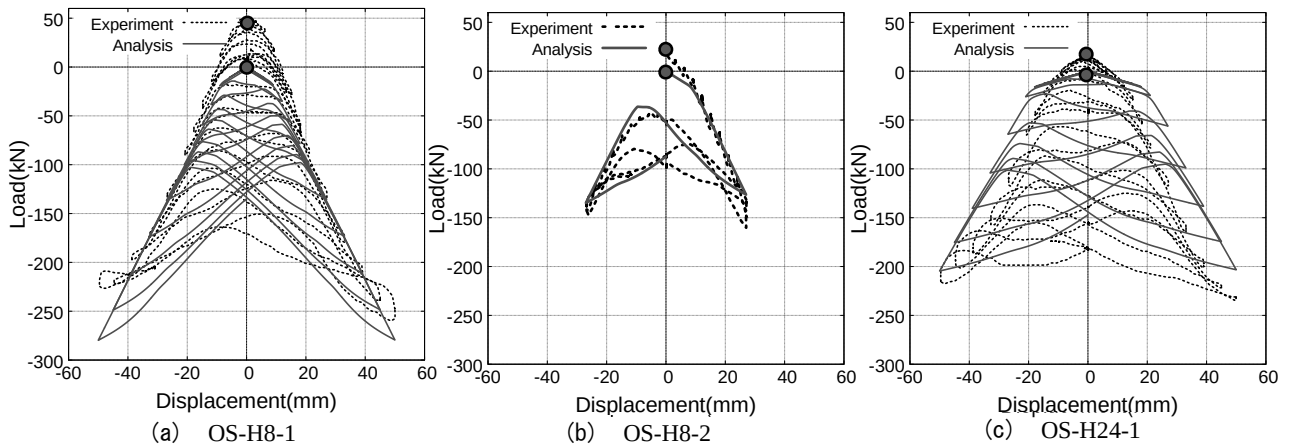


図-10 外殻部負担軸力—水平変位関係

しかしながら、外殻部とその他部材のボルト接合に起因するボルト張力をモデル化せずとも、本解析モデルを用いることで変位の増大に伴って外殻部の負担軸力が増加するという傾向は十分に再現できた。また、同時に通常のRC橋脚では見られない比較的

大きな降伏後剛性を発現する履歴も表現できたことから、変位の増大に伴って外殻部の負担軸力が増加し、それにより断面耐力が徐々に向上した結果、降伏後剛性の大きな履歴を描くという降伏後剛性発現メカニズムの妥当性を解析的に示せたと考えられる。

(3) コア部の設計

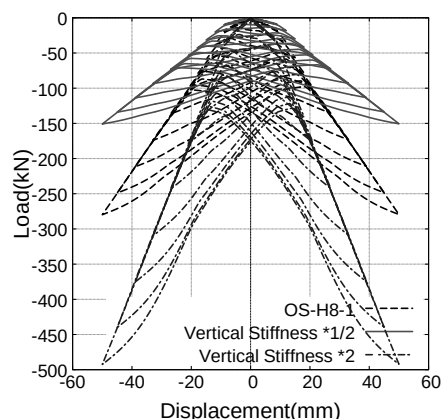
本研究ではコア部にゴム支承を採用した。つまり、コア部には軸力支持のみを期待しており、曲げに対しては一切抵抗しないヒンジ構造と言える。そうすることで、地震時に塑性化する部材を外殻部に限定しコア部を損傷させないこと、コア部と外殻部の機能をできるだけ分離させ、設計を単純にできることを目指したからである。結果として、取替前後でゴム支承は損傷を受けず、繰り返し利用できることは確認できた。一方、このようなヒンジ構造では、取替の際に全く曲げ抵抗を発揮しないため、 $P-\Delta$ 効果に抵抗するためには、何らかの曲げ抵抗部材が必要となる。また、余震への抵抗性を要求する場合は、一定の曲げ耐力を発揮するようなコア部が必要となる。

また、現在の構造ではコア部と外殻部の機能分離は一部達成できたものの、軸力支持機能に関しては明確に分離されなかった。しかしながら、RC外殻部を採用する場合、外殻部が軸力を負担しないとして設計すると、軸力を負担しているものよりも水平耐力が小さくなってしまう。また既往研究²⁾により、外殻部に後から軸力が移る構造の方が、最初から軸力を負担しているものよりも優れた減衰性能を発揮することがわかっている。さらに三上ら⁹⁾の研究により、二次剛正比を大きくすると、応答塑性率、残留変位塑性率、必要強度が小さくなり、動的に有利な構造となることが報告されている。以上をふまえると、メタボリズム構造としては通常時にはコア部が全軸力を負担しつつも、地震時には外殻部に軸力が移っていくような構造が望ましいと考えられる。そして本研究が示した解析モデルは上記現象を再現できることから、設計の際に軸力移行の影響が定量的に評価可能となったと言える。

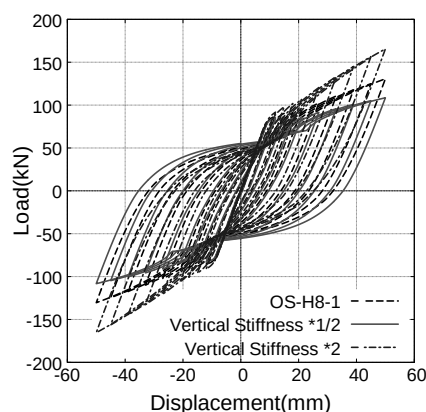
例えば、本研究ではコア部にゴム支承を採用し、解析においては一定の鉛直剛性をもつ鉛直ばねを導入したが、鉛直剛性を1/2にして解析すると、図-11(赤線)のように軸力が十分に外殻部に移行しておらず、最大水平耐力もOS-H8-1(図-11(b)黒線)に及ばない。逆に、鉛直剛性を2倍にすると、図-11(青線)のように外殻部への軸力移行が早くなる。このようにコア部の鉛直剛性によって軸力移行の度合いは異なるため、設計の際には留意が必要である。

5. まとめ

本研究では、耐震性能の新陳代謝可能な橋脚構造



(a) 外殻部負担軸力—水平変位関係



(b) 荷重—変位関係

図-11 コア部の鉛直剛性による違い(OS-H8-1)

として、軸力を支持するコア部と地震時のエネルギー吸収を期待する取替可能な外殻部の二部材から構成される橋脚構造を想定し、その履歴特性について解析的検討を行った。検討の結果、RC外殻部の配筋量を変えることで最大水平耐力を変えられ、外殻部の初期軸力支持状態やコア部の鉛直剛性を変えることで橋脚構造の履歴特性を変えられることが確認された。初期状態において軸力を負担していなかった外殻部にコア部から軸力が移行していくことで、外殻部の断面耐力が向上し、結果として降伏後剛性の大きな履歴を描くことが、解析的に再現でき、定量的に評価可能となった。降伏後剛性が定量評価可能となったことと既往研究をふまえると、メタボリズム耐震橋脚構造は、初期状態において外殻部が軸力負担しないような構造が適当であると考えられ、そのような構造であれば、塑性部材の新陳代謝が可能となるだけでなく、減衰性能及び動的性能の優秀な構造となることがわかった。ただし、コア部の鉛直剛性によって軸力移行度合いは異なるため、設計の

際には留意が必要である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(B)18H01522の助成を受けて実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計法の開発，土木学会，2001. 3.
- 2) 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. 377-392, 2020.
- 3) 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. 10.

- 4) 川添登，菊竹清訓，大高正人，槇文彦，黒川紀章：METABOLISM1960—都市への提案—，美術出版社，1960. 7.
- 5) 森美術館：メタボリズムの未来都市，新建築社，2011. 9.
- 6) チャールズ・ジェンクス：現代建築講義，彰国社，1976. 7.
- 7) 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. 9.
- 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. 11.
- 9) 三上卓，家村浩和：塑性域の二次剛性が必要降伏強度と応答塑性率に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol. 48A，2002. 3.