

集合弾性耐震RC柱の正負交番載荷実験 に対する数値シミュレーション

酒井久和¹・澤田純男²・高橋良和³・五十嵐晃⁴・真鍋和将⁵・藤田遼⁶

¹正会員 法政大学教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

²正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂C1)

E-mail: igarashi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁵非会員 五洋建設 東京建築支店 (〒102-0074 京都千代田区九段南4-7-13)

E-mail: Kazumasa.Manabe@mail.penta-ocean.co.jp

⁶非会員 大林組 東京本店建築事業部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail: fujita.ryo@obayashi.co.jp

澤田らは新しい耐震構造として摩擦機構を有する拘束集合柱を開発し、その実用化に向けて正負交番載荷実験を行っている。本研究では、集合柱の拘束条件の異なる6つの実験ケースに対して、3次元有限要素法による数値シミュレーションを実施した。モデル化は、柱を軸力変動の考慮できる非線形ファイバー要素、柱間の摩擦機構を非線形バネで行い、正負交番載荷状態は準静的に変位制御した。損傷箇所と荷重-変位関係に着目して解析モデルの検討を行った結果、応力経路や最大荷重等に対して実験結果と整合した解析結果が得られた。

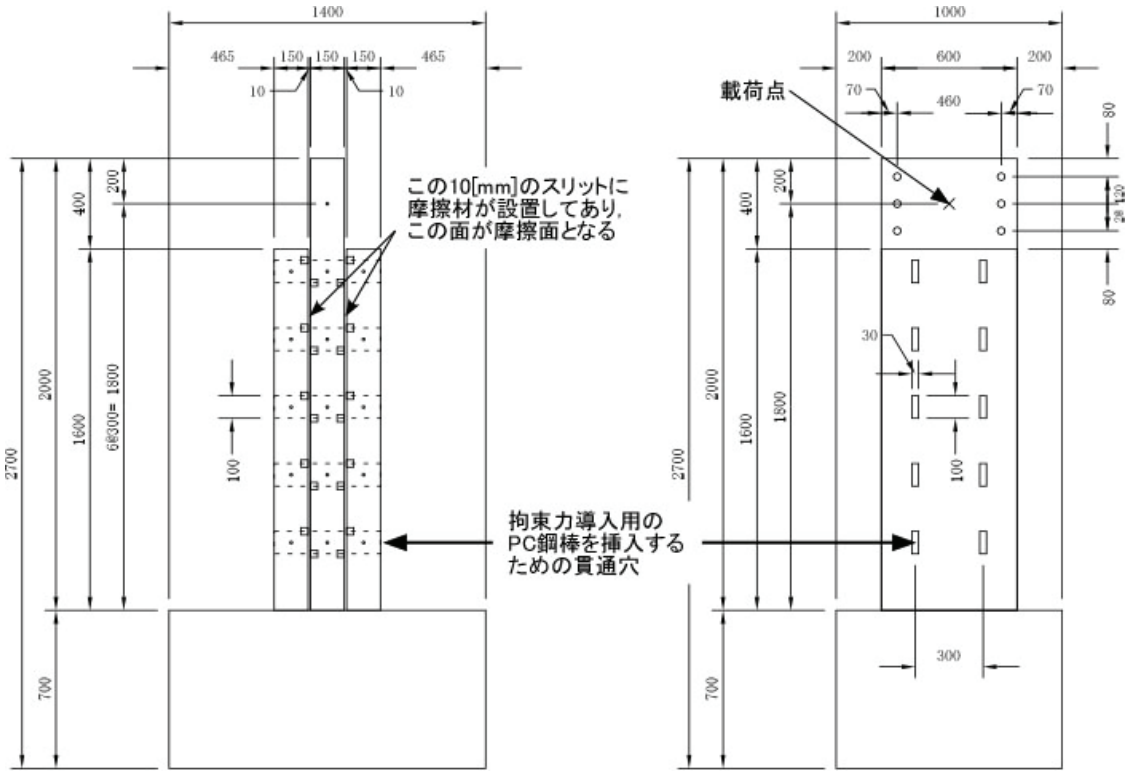
Key Words : *new seismic damping mechanism, finite element analysis, fiber model, cyclic loading test,*

1. はじめに

構造物の耐震設計として2段階設計法が導入され、構造物は発生頻度が高いレベル1地震動に対して構造部材が無被害レベルの耐震性能を有し、発生確率が低い直下型地震や海溝型の巨大地震に対して損傷を許容した安全性が求められている。近年、入力を低減する免震構造やエネルギー吸収材を導入した構造が盛んに取り入れられているが、導入費用が高額であり、建設予算縮減下において建設各社が低コストの構造体の開発を進めている。

澤田ら¹⁾は、柱断面を分割、その間に摩擦材を配置し、部材間に拘束力を導入することにより、変形性能とエネルギー吸収性能を有する集合弾性耐震柱を開発し、二次元はりフレームモデルによるプッシュオーバー解析を行い、挙動特性を明らかにしている。また、拘束部材によ

るプレストレスを適切に分布させることで、強震時応答を柱部材の弾性限度内に留める可能性を示している。西郡ら²⁾は、この集合弾性耐震柱についてアクリル製小型模型による正負交番載荷実験を行い、その変形性能と減衰(エネルギー吸収能)を検証し、その摩擦機構により十分な耐震性能を持つことを示している。田尾・酒井³⁾は、集合弾性耐震柱実験の事前解析を行い、実験に適切な拘束力の検討を行っている。柑本⁴⁾は、RC柱に摩擦機構を導入した集合柱模型に対する静的な正負交番載荷実験を行い、その挙動特性を検証している。以上の研究では、柱軸方向の力が作用していない状態での検討であるが、中村ら⁵⁾は、柱軸方向力作用下における集合弾性耐震RC柱の正負交番載荷実験を行い、弾塑性挙動および復元力特性を検討している。本研究では、中村らの正負交番載荷実験に対して、部材の非線形特性に軸力変動を

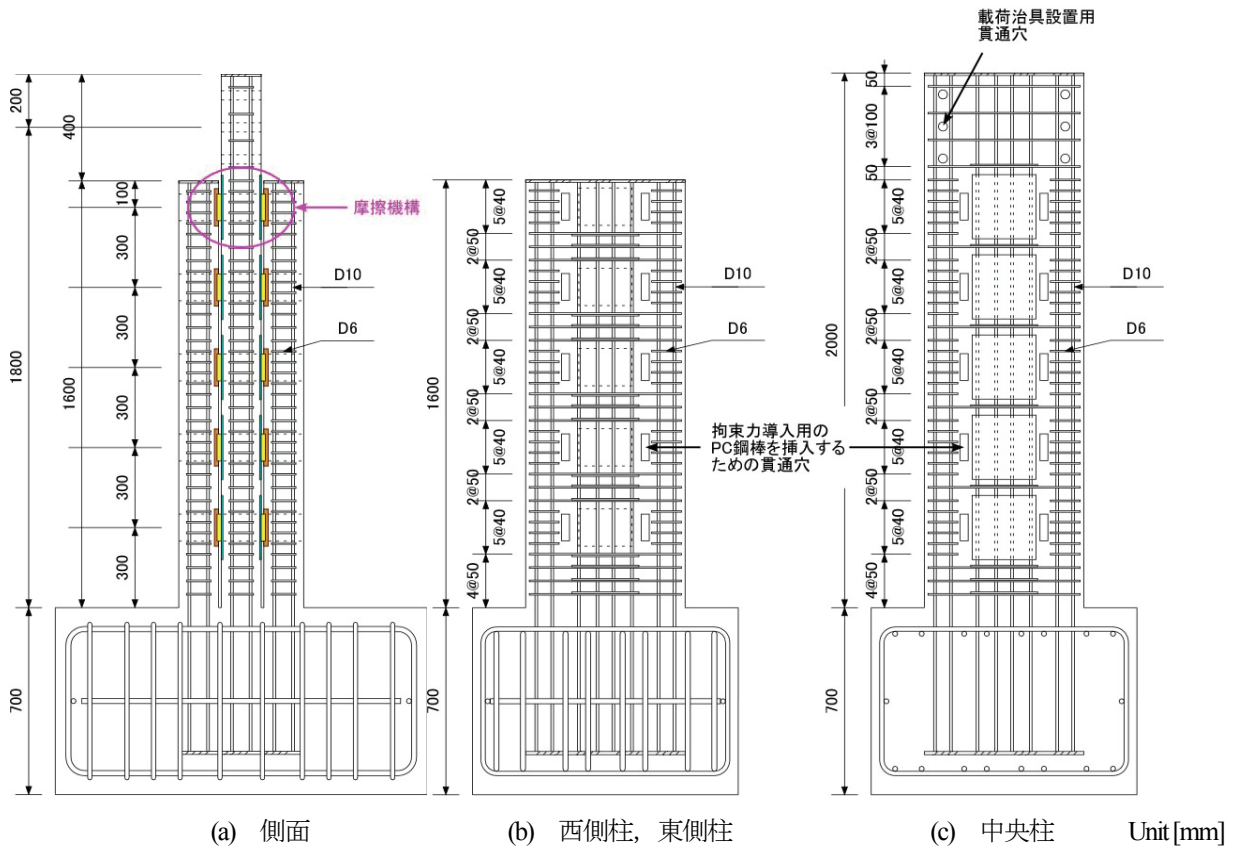


(a) 側面図

(b) 正面図

Unit [mm]

図-1 供試体全体図⁵⁾



(a) 側面

(b) 西側柱, 東側柱

(c) 中央柱

Unit [mm]

図-2 配筋図⁵⁾

表-1 柱部材の断面諸量

f_{ck} [N/mm ²] : コンクリートの圧縮強度	37.12[N/mm ²]
E_c [kN/mm ²] : コンクリートのヤング係数	30[kN/mm ²]
A : 断面積	9.0×10^4 [mm ²]
I_c : コンクリート部の断面二次モーメント	1.6875×10^8 [mm ⁴]
ϵ_{y1} : 鉄筋の降伏ひずみ	1.725×10^{-3}
E_s [kN/mm ²] : 鉄筋のヤング係数	200[kN/mm ²]

表-2 実験ケースおよび荷重順序

実験ケース	最小振幅 [mm]	最大振幅 [mm]	拘束力分布 [kN]
T100	-10	10	三角形分布 100
T200	-10	10	三角形分布 200
U100	-10	10	等分布 100
T200-2	-20	20	三角形分布 200
U100-2	-20	20	等分布 100
T400	-160	200	三角形分布 400

考慮できるファイバー要素を用いて、数値シミュレーションを行い、解析モデルの検証を行う。

2. 正負交番荷重実験

2.1 実験概要⁹⁾

中村⁹⁾は軸方向力を荷重した集合 RC 柱に対する正負交番荷重実験を行った。軸方向力は 3 本の柱にそれぞれ 1MPa 荷重され、また、供試体は 1 体のみを使用し、損傷しても取り換えられていない。

供試体の全体図を図-1、配筋図を図-2に示す。図-1に示すように、断面が 150mm×600mm の柱をスリット間隔 10mm で、中央柱の高さ 2000mm、西側柱、東側柱の高さ 1600mm とし配置されている。かぶりコンクリート厚さは 17mm または 29mm、主鉄筋は SD345 の D10 を柱 1 本あたり 16 本、帯鉄筋は SD295 の D6 を 40mm または 50mm 間隔で配置され、コンクリートには、粗骨材の最大寸法が 13mm で呼び強度が 24MPa の早強コンクリートを用いている。柱の断面諸量を表-1に示す。

摩擦機構は、基部から 300mm おきに 5ヶ所設置している。摩擦材及び相手材は、ともにステンレス SUS304 を用い、図-2に示すように、各柱基部から 300mm、600mm、900mm、1200mm、1500mm の位置に、2ヶ所ずつ計 10ヶ所、東西方向に設けられている。摩擦材の寸法は、断面が 100mm×100mm、厚さが 16mm とし、相手材の寸法は、断面が 240mm×240mm、厚さ 6mm としている。摩擦材と摩擦材固定用治具とは支圧接合とし、摩擦機構はコンクリート打設前に埋め込むことにより設置しされている。また、拘束力の与え方は、西柱、東柱の

計 10ヶ所の貫通穴にφ23C 種 PC 鋼棒を挿入し、人力でネジを締め付けることにより与えている。PC 鋼棒の締め付け治具は、荷重中に PC 鋼棒に曲げ応力が発生しないような構造となっている。摩擦材はステンレス (SUS304) で、大林組技術研究所で行われたすべり摩擦試験結果では、摩擦係数は 0.14 であった。荷重方法は、中央柱の荷重点 (基部から高さ 1800mm) において水平方向への正負交番荷重である。同一振幅の繰り返し回数は 1回である。

2.2 実験ケース

2.1 で示したように、1つの供試体に対して様々な荷重条件で正負交番荷重が行われている。荷重ケース、順序を表-2に示す。ここで、三角形分布 100 は、基部から 1500mm と 300mm の摩擦材に作用する拘束力をそれぞれ 0kN、100kN、その間を三角形分布の拘束力を作用させたケースであり、等分布 100 は基部から 1500mm のみを他の摩擦材の半分の拘束力 50kN を作用させたケースであることを意味する。

3. 数値シミュレーション

3.1 解析方法

正負交番荷重実験の数値シミュレーションは、ファイバー要素により骨組み構造の 3次元材料的非線形解析が可能な解析コード UC-Win/Frames(3D) Advanced ver.4 (Forum8) を採用する。解析は、部材に拘束圧依存した非線形特性を考慮するため、自重解析を行った後、準静的に変位制御でステップ荷重を行う。

3.2 解析モデル

供試体の下端は固定とし、フーチング部は剛体、それ以外の部材は非線形特性を持つファイバー要素とする。摩擦面については、柱間にばね要素を用いて拘束によって発生する摩擦力を表現する。実験の解析モデル (要素 51、節点 43) を部材表示およびソリッド表示した図を図-3に示す。荷重点は実験と同様の中央柱の高さ 1800mm の位置とする。数値シミュレーションで用いた RC の物性値は表-1の実験値と同じ値を使用する。

柱間に設置するばね要素は、ばね軸直角方向については、各摩擦材位置の拘束力とすべり摩擦機構の摩擦係数の積を最大耐力とするノーマルバイリニアの弾完全塑性バネとする。ここで、摩擦係数は、前述のように、大林組による摩擦試験結果では、摩擦係数が 0.14 であった。しかし、上記の摩擦試験は理想的な条件下での結果で、田尾・酒井の研究よりコンクリートの粉塵等が混入する正負交番荷重実験において、摩擦係数が 0.4の方が実験

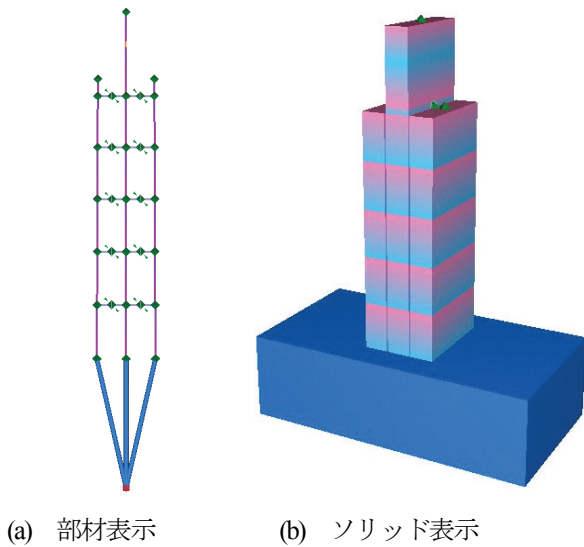


図-3 解析モデル

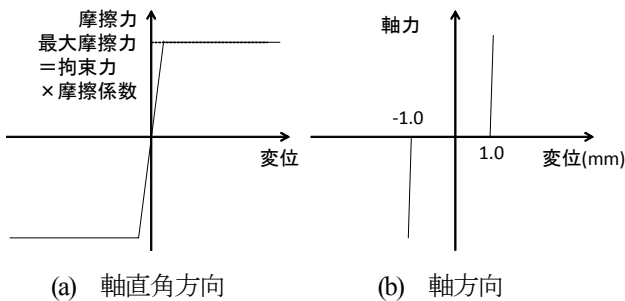


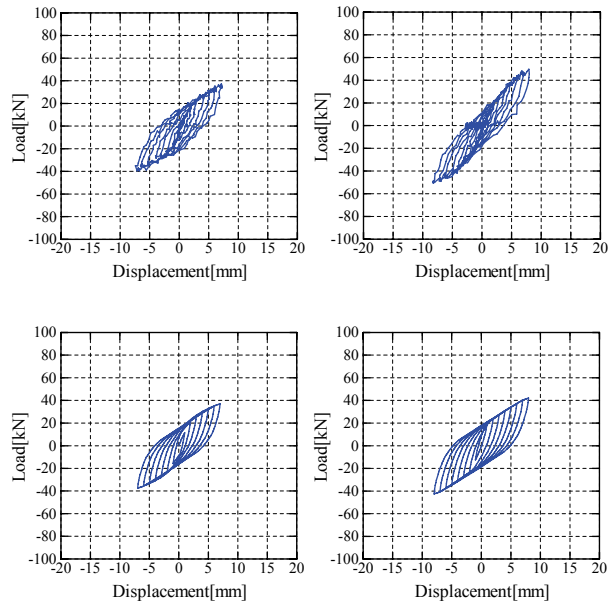
図-4 摩擦機構のばね特性

結果と耐力や減衰の整合度が高いことが示されている。そのため、本研究でも摩擦係数を 0.4 とする。

一方、柱間に設置された摩擦機構は、非載荷時において、隙間が無いように集合柱が製作されている。しかし、隙間が無いとモデル化した各ケースの数値シミュレーションにおける荷重-変位関係の初期勾配が実験結果よりも大きく、また、供試体が乾燥収縮することにより柱間に微小な隙間が生じることも十分想定されることから、拘束していない状態で柱間に 1mm の隙間があるものと仮定してモデル化を行った。具体的には、柱間の相対変位が 1mm に達した時点で軸力が作用する非線形バネをばね軸方向に配置する。軸直角方向、軸方向のばねの非線形特性を図-4に示す。

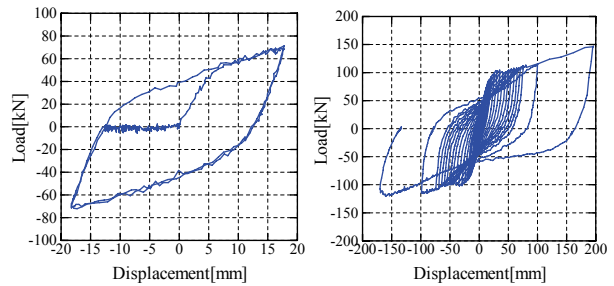
3.3 解析条件

前述のように載荷実験においては、同一の供試体で拘束条件の異なるケースの実験を行っている。そのため例えば T200-2 のケースにおいて載荷される際には、既に T100, T200, U100 の載荷を経験し、軽微な損傷を受けている。解析において、この状況を考慮せずに各解析ケースにおいて健全な供試体として載荷を行えば、実験の状況を十分に再現できないことから、本研究の解析にお



(a) T100

(b) T200



(c) U100-2

(d) T400

図-5 荷重-変位関係 (実験: 上段, 解析: 下段)

いては各ケースの載荷を一連で行う。ここで、各実験ケースで摩擦ばねの最大摩擦力が異なるが、解析コードの制約により一連の計算中に摩擦ばねの特性を変化させることができない。そのため、T100, T200, U100, T400 の4ケースの摩擦ばねを有するモデルを4つ用意し、それぞれのモデルでケースに応じた拘束圧を静的外力として作用させながら、強制変位によるシミュレーションを行った。

3.4 解析結果

表-2に示した解析ケースのうち、三角形分布の T100, T200, T400 および等分布 U100-2 について、解析

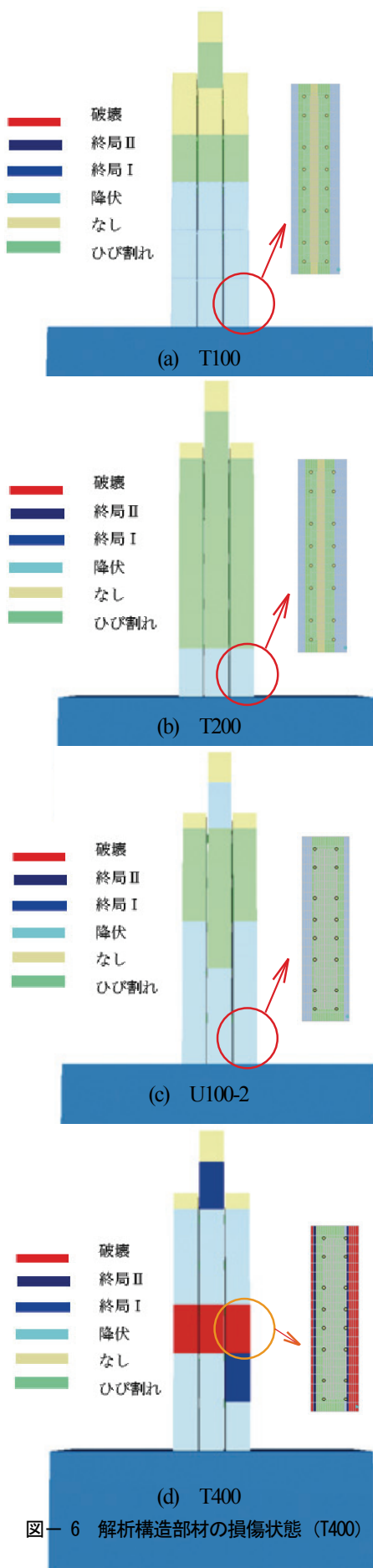
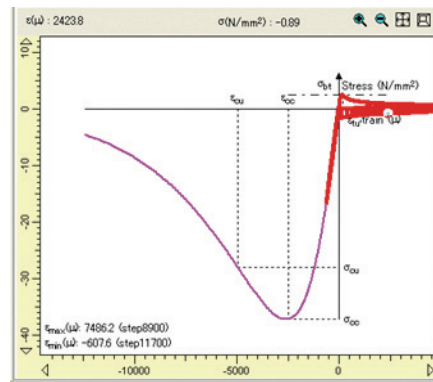
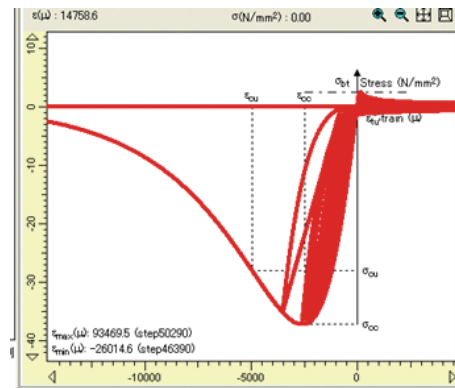


図-6 解析構造部材の損傷状態 (T400)



(a) U100-2



(b) T400

図-7 柱損傷部の荷重-変位関係

を行った結果を実験結果と比較して図-5に示す。また、解析において柱の損傷状況と最も損傷の早かった部分の損傷詳細図を図-6に、U100-2、T400のケースの上記損傷部の荷重変位関係を図-7に示す。

図-5より T100 のケースでは、解析における最大ひずみ時の荷重が実験値と同じ 37kN であり、また、初期剛性、各載荷ステップにおける除荷時の初期勾配、その後はほぼ一定に収束する勾配（以降、除荷時の第2勾配という。中村ら⁵⁾はこのとき、柱間の摩擦機構において全てすべりを生じていることを確認している。）とも非常に実験結果と整合した解が得られている。

T200 のケースでは、最大変位時の作用荷重が実験 50kN、解析 43kN と十数%の誤差が生じている。また、初期勾配、除荷時の初期勾配はほぼ同等の値であるものの、除荷時の第2勾配は実験結果の方が大きく、履歴によって生じる減衰も実験と解析では差が大きくなっていることが分かる。

一方、U100-2 のケースでは、履歴によって生じる減衰は実験と解析で同等であるだけでなく、最大変位時の作用荷重もほぼ同等の結果が得られている。ここで、解析の載荷初期段階において、荷重-変位の原点から始まっていないのは、3.3の解析条件で示したように、1つの供試体に対して実験を行っていることを再現するため、U100-2 の荷重ケースを行う前に、T100、T200 等と同じ

強制変位による荷重を行っているためである。しかし、除荷時の初期剛性と比較して、荷重初期の初期剛性もほぼ同等の値を示すものと考えられる。

最後に、T400 のケースについては、変位 100mm までの履歴において各ステップの最大荷重が解析が実験より 2 割弱小さくなっている。また、除荷時の初期剛性は実験と解析で同等であるが、T200 のケース同様に解析における履歴減衰が実験よりも大きくなっている。さらに、変位 200mm に達する過程において、解析は変位 100mm 以降、柱の非線形化が進み最大荷重が増加していないのに対して実験では依然としてひずみ硬化していることが分かる。この原因を調べるために部材の損傷状態に着目する。解析終了段階における部材の損傷状態と荷重ステップにおいて最も早く大きな損傷を受けた箇所およびその部材断面の損傷状態を図-6に示す。

図-6より、T100、T200、U100-2 のケースではいずれも柱基部が最も早く損傷を受け、鉄筋の降伏状態にあるのに対し、T400 のケースでは柱中央部において終局耐力を越え、破壊状態に至っている(図-7参照)。実際、実験時の損傷状態は、写真-1 に示すように柱端部においてかぶりコンクリートが完全に剥落する損傷状態であり、解析結果と最も大きな損傷箇所に違いが生じている。中村ら⁵⁾の検討によると、三角形拘束のケース(T100、T200)では中央部、等分布拘束(U100-2)では柱基部に最も大きな曲率が生じることが示されている。したがって、T400 のケースのみが荷重された場合は、柱中央付近が損傷が最も大きくなるが、実験ではその前の T100 ~U100-2 の荷重によって損傷を受けていた基部で、大きな損傷に至ったと考えられる。解析において、その状態を再現するために T100~T400 までの荷重荷重を行ったが、解析の制約上、ばねの最大摩擦力が T400 のものであり、実験と必ずしも同じモデルで行われていないことが、損傷箇所が異なった原因と考えられる。

4. まとめ

本研究では、中村らの正負交番荷重実験に対して、ファイバー要素を用いた 3 次元弾塑性解析に基づく数値シミュレーションを行い、解析モデルの検討を行った。解析モデルは、柱間に最大摩擦力と拘束力の積を最大摩擦力とするノーマルパイリニアの非線形バネを配置し、非拘束状態において柱間に 1mm の隙間を仮定した。また、1 つの供試体で行われた実験を模擬するために、一連の荷重を作用させる条件で、拘束ケースごとに拘束力を静的に外力として作用させた解析を行った。検討の結果、拘束力が三角形分布 100kN、等分布 100kN のケースでは、上記の解析条件、解析モデルで、初期剛性、除荷時初期



写真-1 東側柱の基部付近の損傷状態⁵⁾ (T400)

剛性など、実験の荷重-変位関係を高精度に再現できることが確かめられたが、拘束力が三角形分布 200kN、400kN のケースでは、解析による履歴減衰が過大評価されたり、耐力が過小評価される結果となった。特に、大変形域で実験がひずみ硬化を示している領域において、解析で最大耐力に達してしまう結果が得られたことから、より実験の再現性を有する解析モデル、解析条件の確立が求められる。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(A)一般、“拘束された集合柱による新しい耐震構造の実用化に関する研究”(研究代表者 澤田純男、課題番号 21246073)の助成を受けたものです。また、実験データは元京都大学大学院中村英之氏から提供を受けました。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 澤田純男、西郡一雅：摩擦減衰機構を持つ耐震弾性柱の提案，日本地震工学会大会 2005 梗概集，pp.378-379，2005
- 2) 西郡一雅：摩擦減衰機構を持つ弾性耐震柱の実験的研究，京都大学修士論文，2007.
- 3) 田尾徹郎，酒井久和：拘束された集合柱による新しい耐震構造の実用化に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，2010.
- 4) 柑本 慎一郎：摩擦減衰機構を持つ集合 RC 柱の正負交番荷重実験，京都大学院修士論文，2010.
- 5) 中村英之，澤田純男，高橋良和，五十嵐晃：複合応力作用下における摩擦減衰機構を持つ集合弾性耐震 RC 柱の弾塑性挙動，土木学会年次学術講演会講演概要集，2011.
- 6) 中村英之：摩擦減衰機構を持つ集合 RC 柱の正負交番荷重実験，京都大学院修士論文，2010.

NUMERICAL SIMULATION OF CYCLIC LOADING TESTS OF COMBINED COLUMNS WITH FRICTION DAMPING MECHANISM

Hisakazu SAKAI, Sumio SAWADA, Yoshikazu TAKAHASHI,
Akira IGARASHI, Kazumasa MANABE and Ryo FUJITA

Sawada et al proposed a combined RC column with friction damping mechanism and have been examining its practical application through cyclic loading tests. We conducted numerical simulations of the experiment based on three-dimensional elastic-plastic analysis in order to examine the analytical model. To gain good agreement between the experiments and simulations, we needed to append binding forces to that model, because the column was already in damaged condition before loading. We got a better agreement between them by applying a sequence loading to the columns in the simulations, for the specimen had been subjected to a series of cyclic loading in the experiments. However, it is necessary to further improve the analytical model and condition, because in large strain levels in a few cases, the maximum bearing force, hysteresis damping and strain hardening properties of the seismic structure system are different between the experiments and analyses.