

複合応力作用下における摩擦減衰機構を有する 集合RC柱の弾塑性変形性能

中村英之¹・高橋良和²・澤田純男³

¹京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:nakamura.hideyuki@hx2.ecs.kyoto-u.ac.jp

²京都大学防災研究所准教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

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

³京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

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

レベルⅡ地震動に対しても修復を要する塑性変形に依らずに耐震性能を発揮する高性能な耐震柱を実現する方法として、集合弾性耐震構造が提案されている。矩形断面柱を鉛直軸方向に分割することで曲げひずみを小さくし、変形性能の向上を図るとともに、分割した柱部材を束ねるように強度の大きい拘束部材を設け、予めプレストレスを導入する。これにより変形時に柱部材間に摩擦が生じ、その摩擦力によるエネルギー吸収による減衰効果が期待できる。このようにして耐震性能の向上を図ることが集合弾性耐震構造の基本的な考え方である。本研究では、軸力を導入した集合RC柱供試体を対象とした静的正負交番載荷実験を行い、軸力-曲げモーメント作用下における弾塑性挙動及び復元力特性を検証した。

Key Words : high seismic-performance column, reinforced concrete, elasto-plastic behavior

1. はじめに

近年、我が国を襲った兵庫県南部地震や新潟県中越沖地震などの大地震では、都市内高速道路や都市間を結ぶ道路、橋梁などに甚大な被害を与え、交通系のライフラインの機能を大きく損なわせた。その中でも特に、鉄筋コンクリート(以下、RC)橋脚柱で多くの被害が発生した。1980 年頃までは、柱断面等を大きくして強度を高めることによって大地震に備えてきた。すなわち、構造物を「硬く、強く」することにより、耐震性能を高めようとしてきた。しかしながら、このような考え方は頻度の低い大地震に対し、その対策コストが大きくなりすぎることから、1980 年以降は弾塑性設計の考え方が主流となった。すなわち、比較的頻度の高い中小地震(レベルⅠ設計地震動)に対しては構造物の変形を弾性範囲内に留めるものの、頻度の低い大地震(レベルⅡ設計地震動)に対しては構造部材の損傷をある程度許容し、倒壊しないようにすれば良いという考え方である。これは弾性域を超えてから部材が完全に破

壊されるまでの塑性域で、十分な靱性(ねばり)を確保することを必要とする。

一方でレベルⅡ地震動に対して橋脚が地震力に耐えたとしても、大きな塑性変形が残ってしまうと地震後の供用が困難になり、復旧までに多くの時間と労力、費用がかかる。したがって、現在の道路橋示方書では、重要度の高い橋脚は地震による損傷を限定された範囲に留め、地震後の残留変形を橋脚高さの 1/100 以下に制限することが規定されている¹⁾。

こうした経緯からレベルⅡ設計地震動に対しても修復を要する塑性変形に依らずに耐震性能を発揮する高性能な耐震柱を実現する方法として集合弾性耐震構造が提案されている²⁾。本研究では、軸力を導入した集合 RC 柱供試体を対象とした静的正負交番載荷実験を行い、軸力-曲げモーメント作用下における弾塑性挙動及び復元力特性を検証した。

2. 集合弾性耐震柱の概念

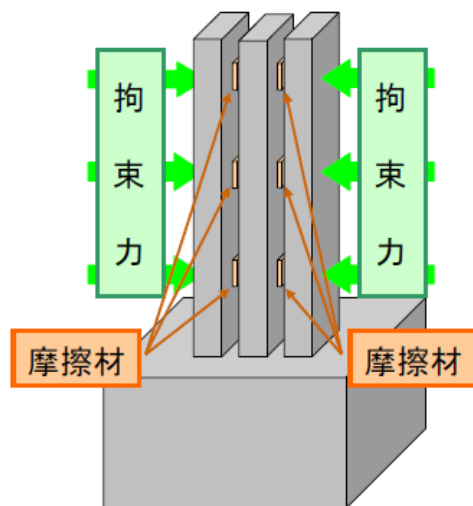


図-1 集合弾性耐震柱の概念図



写真-1 実験用供試体

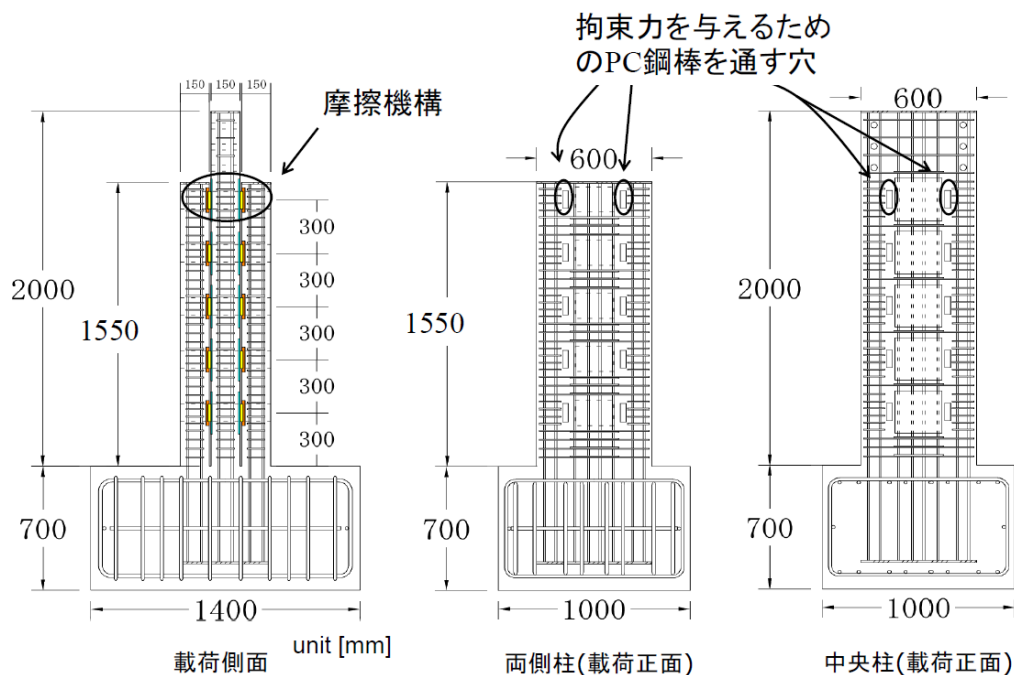


図-2 実験用供試体

弾性範囲内における変形性能は、部材内のひずみの最大値で決まる。曲げ変形に対しては断面保持の仮定が成り立つ限り、断面を大きくすれば部材表面のひずみは大きくなり、変形性能は下がる。従って、部材断面が小さい方が変形性能は大きくなり、同時に剛性は小さくなる。このような特性を踏まえて、柱部材を鉛直方向に分割することを考える。ただし、単に柱を分割しただけであれば、変形時の柱間の摩擦によるエネルギー吸収能は期待できないので、分割した柱部材を束ねるように周囲に強度の大きな拘束部材を設け、あらかじめプレストレスを導入する。これによって分割面での摩擦が期待できるようになる。本研究では、この構造形式を「集合弾性耐震構造」と呼ぶ(図-1)。

従来の RC 橋脚柱の曲げ塑性変形領域では、ひび割れが水平に入り、コンクリート及び鉄筋の塑性

変形でエネルギー吸収が行われるのに対して、この構造形式ではあらかじめ鉛直方向のせん断破壊面を入れることにより、柱全体としての塑性変形領域での挙動を制御して、分割された個々の柱部材を弾性域に留め、部材の塑性変形によるエネルギー吸収がない代わりに、分割面での摩擦によるエネルギー吸収による減衰が発揮される構造を想定している。

3. 実験概要

(1) 実験用供試体

a) 供試体概要

写真-1 及び図-2 に実験用供試体の概要を示す。断面が 150[mm]×600[mm] の柱をスリット間隔

10[mm]で3本並べ、高さは西側柱、東側柱が1550[mm]、中央柱が2000[mm]とした。また、主鉄筋はSD345のD10を柱1本あたり16本、帯鉄筋はSD295のD6を40[mm]または50[mm]間隔で配置した。また、各柱基部から300[mm]、600[mm]、900[mm]、1200[mm]、1500[mm]の位置に、30[mm]×100[mm]の貫通穴を各高さそれぞれ2ヶ所ずつ計10ヶ所、東西方向に設けた。この貫通穴に ϕ 23C種PC鋼棒を挿入し、両側からナットで締め付けることにより柱に拘束力を与えた。

b) 摩擦機構

摩擦機構は、基部から300[mm]おきに5ヶ所設置した。摩擦材は鋼材SS400、相手材はステンレスSUS304を用いた。摩擦材の寸法は、断面が100[mm]×100[mm]、厚さが16[mm]、相手材の寸法は、断面が240[mm]×240[mm]、厚さが6[mm]とし、摩擦材と摩擦材固定用治具とは支圧接合とした。なお、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た。

c) 軸力導入機構

各柱の頂部に設置した治具とフーチングに取り付けた治具をPC鋼棒で接続し、両側からナットを締め付けることにより軸力を与えた。なお、本実験では各柱に1[MPa]の軸力を導入して载荷を行った。

(2) 測定データ

a) 荷重

供試体の各変形状態における復元力を得るために、アクチュエータに設置されているロードセルにより供試体の载荷位置における復元力を測定した。

b) 変位

供試体の载荷位置における変位を計測するために、基部から1800[mm]の位置(载荷点高さ)にレーザー変位計及び接触式変位計、ワイヤー変位計を設置した。さらにアクチュエータへの指令値も記録した。

c) 軸方向主鉄筋のひずみ

柱の高さ方向の曲率分布及び断面ひずみ分布を調べるために軸方向主鉄筋のひずみを計測した。供試体の西側柱及び東側柱の载荷面正面(西面)と裏面(東面)における軸方向主鉄筋のうち、北面より1本目と4本目に対し高さ方向に5点、基部より10[mm]、380[mm]、680[mm]、980[mm]、1280[mm]の位置に、ひずみゲージを貼付した。また、中央柱については、载荷面正面(西面)と裏面(東面)における軸方向主鉄筋のうち、北面より1本目と4本目に対し高さ方向に6点、基部より10[mm]、380[mm]、680[mm]、980[mm]、1280[mm]、1580[mm]の位置に、ひずみゲージを貼付した(図-3)。

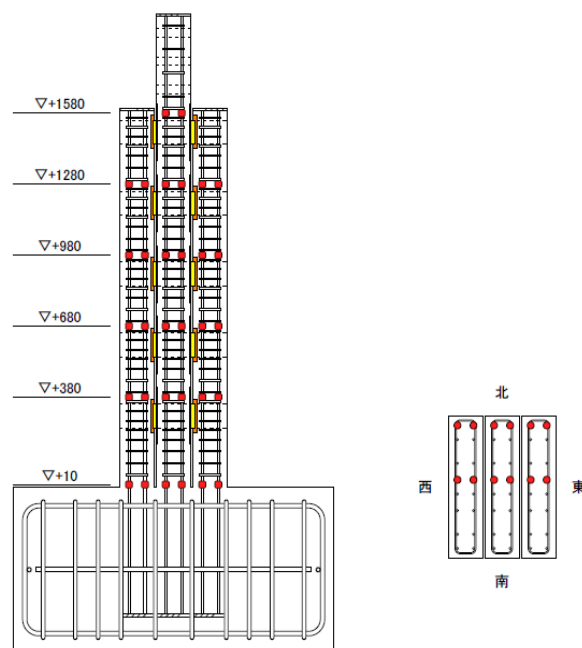


図-3 ひずみゲージ貼付位置

(3) 実験システム

実験装置概観を図-4に示す。载荷方法は、図-4に示す中央柱の载荷点(基部から高さ1800[mm])において水平方向への静的正負交番载荷とする。载荷装置は東京衡機社製のアクチュエータを使用した。载荷点の治具構造はあらかじめ供試体に埋め込んだ鋼管の中にPC鋼棒を通すことにより両側からはさみこむ形式とした。その治具とアクチュエータヘッドとの接続にスィベルヘッドを使用することで、载荷点に生じるモーメントを解放している。また、アクチュエータと反力壁の間にもスィベルベースを用いることで、実験時のアクチュエータの支持条件は両端ヒンジとなる。

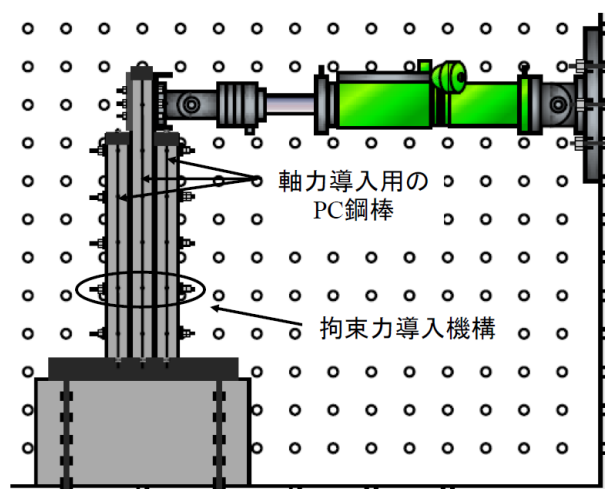


図-4 実験装置概観

4. 実験ケース

本研究では、柱の高さごとに拘束力を変化させ、拘束力分布により柱の挙動が異なることを明らかにした。主な拘束力分布は等分布拘束と三角形分布拘束の2種類である。等分布拘束は基部から頂部まで等しい拘束力を与えるものであり、三角形分布拘束は基部に近づくにつれて拘束力を大きくするものである。

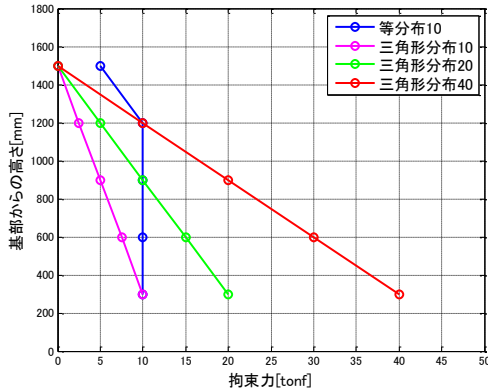


図-5 4種類の拘束力分布

本研究では、拘束力分布による挙動の違いを検討するため、等分布 10、三角形分布 10、20、40 の 4 種類の拘束力分布を導入して実験を実施した。拘束力分布を図-5 に示す。なお、供試体頂部からすべりを発生させるために、拘束力を等分布で与えた場合のみ、基部から高さ 1500[mm]の点での拘束力を、その他の点での拘束力の 1/2 倍とした。また、等分布 10 及び三角形分布 20 の 2 ケースにおいて、載荷後の柱部材が弾性範囲内であるかを調べるために、一度すべての点での拘束力を 0 にして柱の残留変位が 0 になるかどうかを確認した。

5. 実験結果及び考察

(1) 曲率の高さ方向の変化

鉄筋のひずみ値から各柱の曲率 ϕ を算出し、高さ方向の曲率分布を示して曲げ応力による柱部材への影響を検討する。曲率 ϕ は式(1)により算出した。

$$\phi = \Delta \varepsilon / l \quad (1)$$

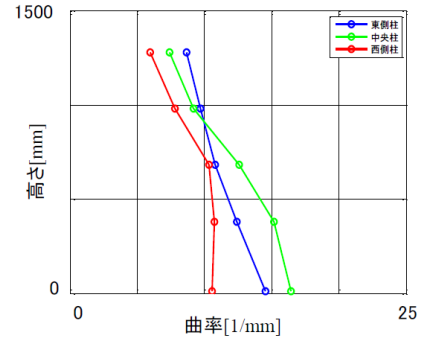
ここに、

$\Delta \varepsilon$: 各柱における西側鉄筋のひずみ値と東側鉄筋のひずみ値の差

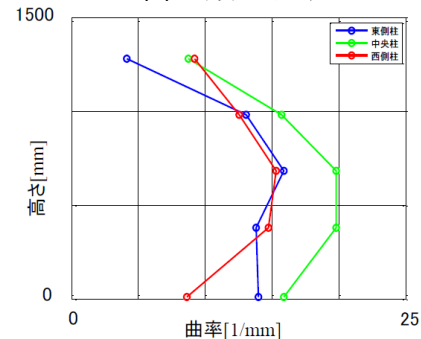
l : 各柱における西側鉄筋と東側鉄筋の距離[mm]である。

各柱の高さ方向の曲率分布を図-6に示す。ここでは、等分布10と三角形分布20の結果を比較する。

等分布拘束では、曲率と高さが曲げモーメント分布と同じようにほぼ直線関係にあり、基部に近づくにつれて曲率が増加する分布が確認される。一方、三角形分布拘束では、基部から380[mm]ないしは基部から680[mm]の高さでの曲率が最大となることがわかる。



(a) 等分布拘束



(b) 三角形分布拘束

図-6 曲率の高さ方向の変化

(2) 弾性範囲内における荷重-変位関係

a) 拘束力分布による挙動特性の違いの定性的評価

図-7に示すように、分割後の個々の柱が一体となって挙動する場合の荷重-変位関係は赤色の直線(最大剛性)、分割しただけで側方向からの拘束力を与えない場合の荷重-変位関係は青色の直線(最小剛性)で表される。したがって適切な拘束力を与えた場合の荷重-変位関係は紫色の曲線で表されることがわかる。

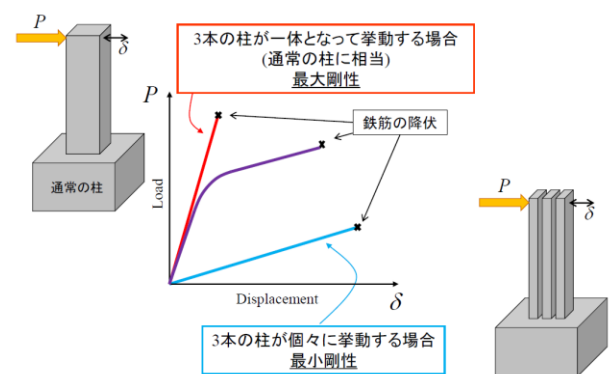


図-7 弾性範囲内における荷重-変位関係

図-8に等分布10の場合と三角形分布20の場合とで荷重-変位関係を比較したものを示す。従来の研究²⁾で知られている通り、等分布拘束においては剛性が急激に変化するのに対し、三角形分布拘束においては剛性が緩やかに変化する結果が得られた。また、载荷終了後にすべての点の拘束力を0にしたところ、しばらくすると柱の変位が約0[mm]となり、载荷終了後の柱部材は弾性範囲内にあることが確認できた。

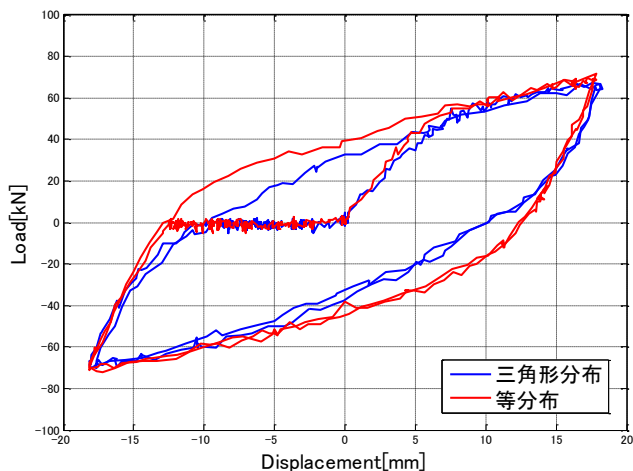


図-8 等分布10と三角形分布20の荷重-変位関係

b) 拘束力分布による挙動特性の違いの定量的評価

弾性範囲内における柱の変形挙動を図-9のように分割後の3本の柱が一体となって挙動している段階(赤色の線で示した部分)、部材間の摩擦部が段階的にすべり出している段階(緑色の線で示した部分)、3本の柱が個々に挙動している段階(紫色の線で示した部分)の3つに分類し、それぞれステージ0、1、2と呼ぶこととする。

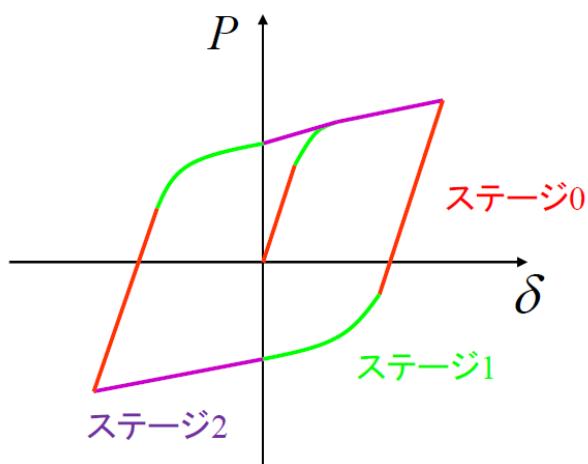
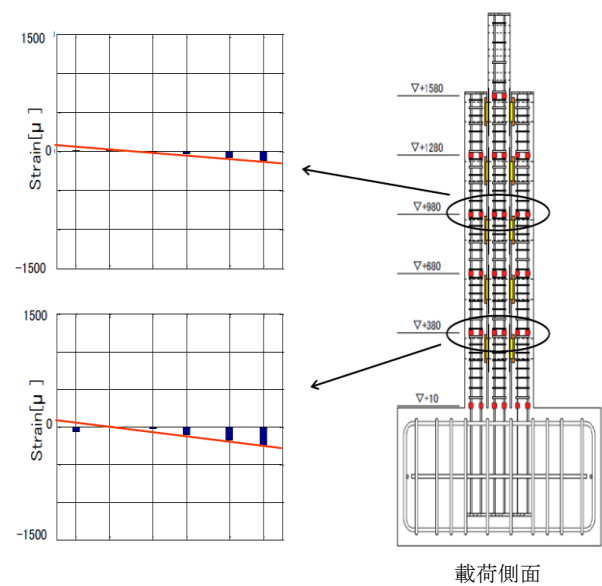


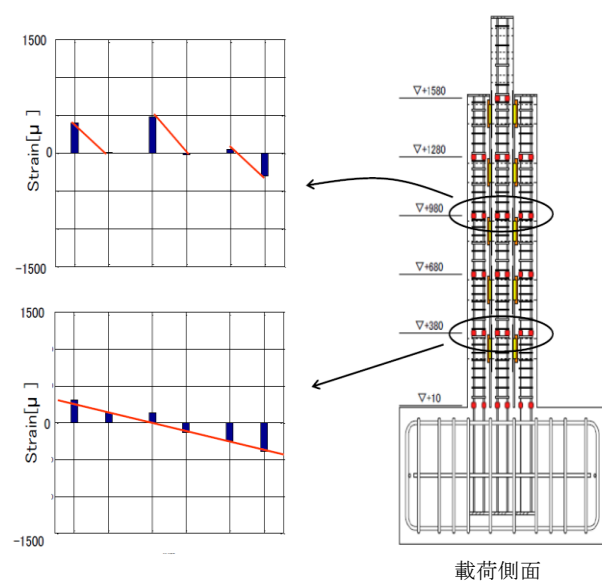
図-9 ステージ0～2

先に述べたように、図-3の赤点の位置にひずみゲージを貼付し、軸方向主鉄筋のひずみを計測した。これを用いて軸方向主鉄筋の高さ方向のひずみ分布を調べ、頂部・基部ともに3本の柱全体で

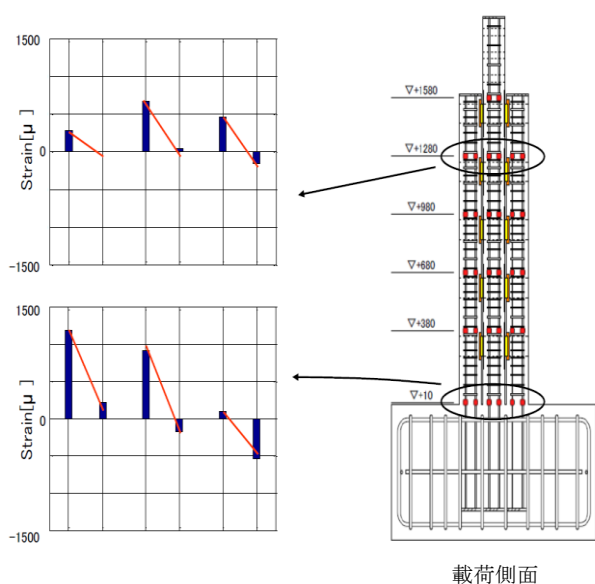
三角形のひずみ分布であればステージ0、頂部に近い点においては各柱で三角形のひずみ分布であるのに対し、基部に近い点においては柱全体で三角形のひずみ分布であればステージ1、頂部・基部ともに各柱で三角形のひずみ分布であればステージ2と判断した(図-10)。各拘束力分布のケースについて、载荷ステップごとの高さ方向の鉄筋のひずみ分布に基づきステージを判定した結果、図-11に示す結果が得られた。このようにして等分布拘束では最大剛性から最小剛性へ急激に変化するのに対し、三角形分布拘束では最大剛性から最小剛性へ緩やかに変化することが定量的に示された。



(a) ステージ0

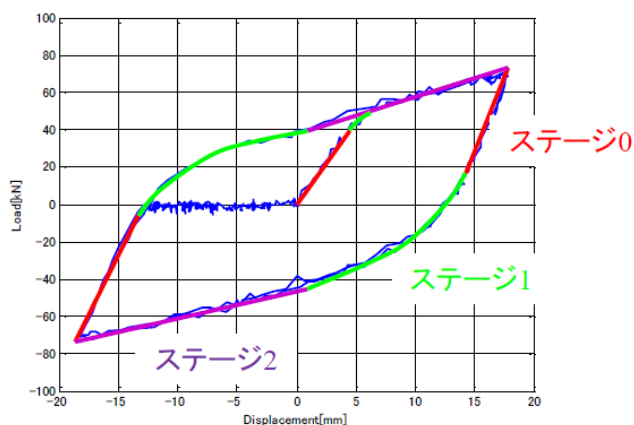


(b) ステージ1

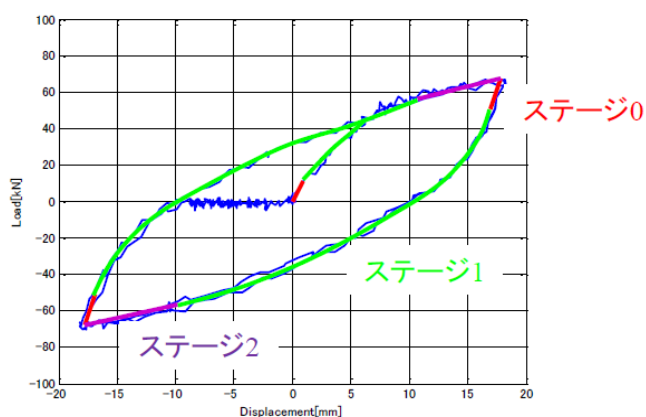


(c) ステージ2

図-10 各ステージのひずみ分布



(a) 等分布拘束



(b) 三角形分布拘束

図-11 ステージ判定結果

(3) 塑性化領域における集合RC柱の変形性能

三角形分布20の拘束条件で変位 ± 200 [mm]まで漸増載荷を行った実験結果を図-12に示す。変位約40[mm]、荷重約80[kN]で各柱は塑性化した。つまりこのことは柱の高さの約1/50程度まで各柱が弾性範囲内であることを示している。塑性化してからRC柱は柱の高さの約1/10に相当する非常に大きな変形量を許容し、なおかつ復元力もほぼ一定であり、十分な靱性を発揮していることがわかる。

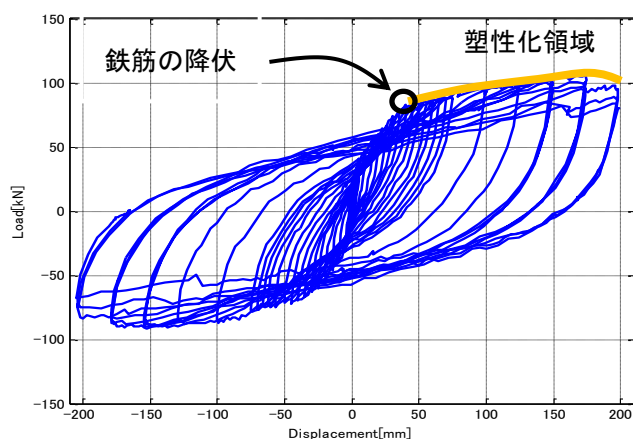


図-12 塑性化領域における柱の挙動

6. 結論

本研究で得られた知見をまとめれば、以下の通りである。

- (1) 集合弾性耐震柱をRC構造においても実現できることを正負交番載荷実験で確認した。その結果、柱の高さの約1/50程度まで鉄筋が降伏することなく変形でき、摩擦材による減衰性能が期待できることが明らかとなった。
- (2) 断面ひずみ分布をもとに、弾性範囲内における集合弾性耐震RC柱の変形特性をステージ0～2に分類し、拘束力分布による挙動の違いを各ステージの発現状態が異なることで説明できることを示した。
- (3) 鉄筋ひずみから得られた曲率を調べることで、異なる拘束力分布による高さ方向の曲げ変形の差を表現した。
- (4) 各柱が塑性化領域に入っても十分な靱性を発揮していることが明らかになった。

参考文献

- 1) 「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」、日本道路協会、2002.3
- 2) 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

THE ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF THE RC COLUMN ACCOMPANIED WITH FRICTION DAMPING MECHANISM

Hideyuki NAKAMURA, Yoshikazu TAKAHASHI and Sumio SAWADA

We propose a novel idea of high seismic-performance column which is never damaged by strong earthquake motions. This column has a large deformational capacity and a large hysteretic damping but the column components are kept elastic. We obtain a large elastic displacement by dividing vertically to several column components. Also, we obtain an adequate friction damping by giving the column confining forces horizontally.

In this study, we clarify the elasto-plastic behavior of the RC column accompanied with friction damping mechanism, carrying out static loading tests.