

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289189

研究課題名(和文) 損傷軽減機構を有する部材を活用した鉄筋コンクリート造高耐震建築物の開発研究

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF HIGH SEISMIC PERFORMANCE BUILDINGS UTILIZING REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITH DAMAGE MITIGATION SYSTEM

研究代表者

平石 久廣 (HIRAISHI, HISAHIRO)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号：40113211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：変形一様化システムおよび基礎回転系構造に供する損傷軽減機構を有する鉄筋コンクリート造半固定型柱および杭の実験開発研究を行った。また建物最上階柱の柱頭および最下階柱の柱脚を半固定型とした変形一様化システムおよび板状建物の短辺方向の杭頭を半固定とした基礎回転系構造の優れた耐震性能を立証するとともにその耐震性の簡潔な評価法を提示した。

研究成果の概要(英文)： This research developed semi-rigid reinforced concrete columns and piles with damage mitigation system which are used for the uniform deformation structural system and the base rotational structural system, respectively.
The research also verified the excellent seismic performance of both structural systems and proposed the simple evaluation method of their seismic performance.

研究分野：応答制御

キーワード：建築構造・材料
耐震実験
コンクリート構造 耐震設計 半固定型柱 応答制御 損傷軽減 層間変形一様化

1. 研究開始当初の背景

近年、建築物の設計では大地震時に対しても建物の継続使用性や損傷の軽減が抑制されるようになってきた。このため制振構造や免震構造などの構造システムが普及しつつあるが、現状ではコスト面や意匠上の制約などの問題がある。またこれらの構造は装置を用いる関係上、想定以上の外乱に対する安全性の問題など配慮すべき課題もある。このような背景から本研究では損傷軽減機構を有するとともに架構としても応答が生じにくく、コスト面に優れかつ意匠上制約の少ない新しい鉄筋コンクリート造高耐震構造システムの開発を目的とした。

2. 研究の目的

- (1) 損傷軽減機構を有するとともに架構としても応答が生じにくく、コスト面で優れかつ意匠上制約の少ない新しい鉄筋コンクリート造の柱の開発
- (2) 浮き上がりに伴う鉛直加速度の低減および着地時の衝撃緩和を目的とする緩衝材を用いた杭の開発
- (3) 建築物に半固定型柱を用いたことによる、変形一様化構造システムの地震時応答への効果の検討
- (4) 基礎回転構造の基本的な耐震性状へ与える P-Δ 効果による影響の解明。また、P-Δ 効果を考慮した際の基礎回転構造の簡便な応答評価式の提案

3. 研究の方法

- (1) 損傷軽減機構を有する鉄筋コンクリート造半固定型柱の開発に関する研究

損傷軽減機構を有する鉄筋コンクリート造半固定型柱の開発を目的とし、構造詳細を明らかにするため柱の耐震実験を行った。平成 26 年度は 3 体、27 年度は 2 体である。図 1 に加力装置図を示す。载荷は部材角制御で行い、鉛直アクチュエーターを用いて軸力を与え、水平アクチュエーターによりせん断力を与えた。

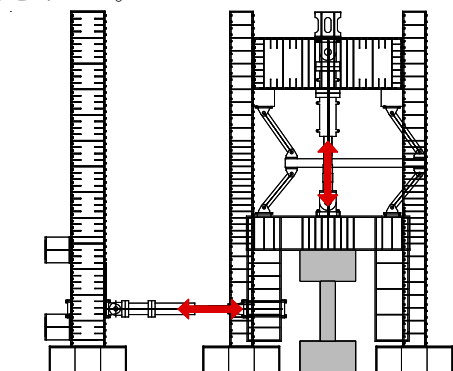


図 1 加力装置図

- (2) 沈み込みを伴う基礎回転系架構の半固定型杭の開発に関する研究
試験体は以下のような 3 体とした。図 2 に試験体全体図を示す。

- 1) 試験体 No.1 (ゴム厚 20mm, 杭頭部挿入型)

緩衝材としての機能を目的とした外径 176.8mm, 内径 17mm, 厚みを 20mm のクロロプレンゴムを杭頭部に配した。また上部構造から杭へのせん断力伝達及び、面外方向へのスリップの抑制を目的として、杭頭部をパイルキャップに挿入する杭頭部挿入型とした。

- 2) 試験体 No.2 (ゴム厚 10mm, 杭頭部挿入型)

試験体 No.2 は、緩衝材ゴムの断面形状は試験体 No.1 のものと同様とし、厚みを 10mm とした。また、試験体 No.1 と同様に、杭頭部挿入型とした。

- 3) 試験体 No.3 (ゴム厚 10mm, 鋼管内挿入型)

試験体 No.3 は、緩衝材ゴムの形状を試験体 No.2 と同様のものを配し、パイルキャップに設置した鋼管内に杭頭部を挿入する鋼管内挿入型とした。

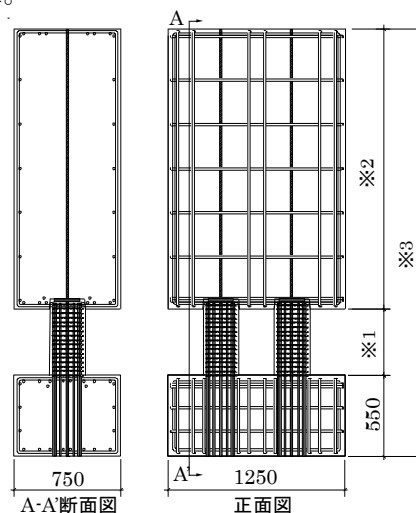


図 2 試験体全体図

- (3) 変形一様化構造システムの地震時応答解析

解析対象建物は、3、10、14 階建て鉄筋コンクリート造無限均等ラーメンである。解析モデルには、魚骨形モデルを用いた。また、降伏部材を下層部にみに限定した場合には、上層部を非降伏架構とすることで構造設計を容易に行うことができ、かつ、損傷の抑制も容易な構造とした。さらに、建物の下層部に半固定型柱と制震部材を併用した場合での検討も行った。

- (4) 基礎回転系構造の地震時応答に及ぼす P-Δ 効果の評価

解析対象建物は、鉄筋コンクリート造の 14 階建高層集合住宅で桁行方向が 6 スパンのラーメン構造、梁間方向が 1 スパンの連層耐震壁架構とした。解析モデルは一質点系モ

デルを参考に、下部構造を杭の引き抜き及び沈下を表すばね、杭頭の伸びを表す鉄筋ばね、水平地盤ばねの3種類のばねを梁要素で結合した。入力地震動には第2種地盤の加速度応答スペクトルを基に作成した、告示波と定常ループを与えるスイープ波を用いた。

4. 研究成果

(1) 損傷軽減機構を有する鉄筋コンクリート造半固定型柱の開発研究

試験体の例として平成 27 年度の試験体 2 体を挙げる。図 3 に試験体形状および部材断面図を示す。損傷軽減機構を有する半固定型柱の開発にあたり柱端部に断面縮小およびテーパー加工を施し、うち 1 体は柱端部の内側主筋の付着を除去した降伏機構分離型の試験体とした。図 4 に工法概念図を示す。

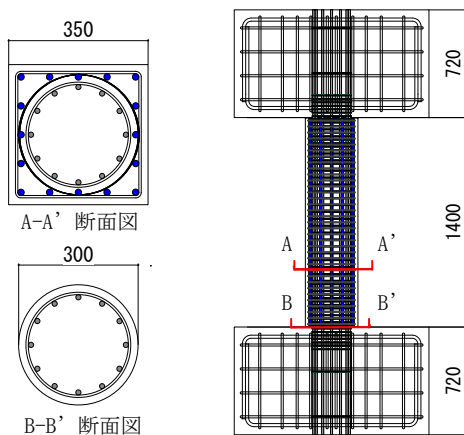


図 3 試験体詳細図

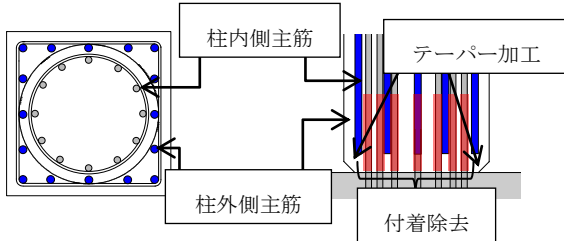


図 4 半固定型柱工法概念図

以下に実験による成果の概要を示す。

① 良好なエネルギー吸収能

図 5 に回転角-モーメント関係を示す。グラフからも明らかのように、回転角 1/200 に至る過程で内側主筋が早期降伏し小さな変形レベルから良好なエネルギー吸収を示した。

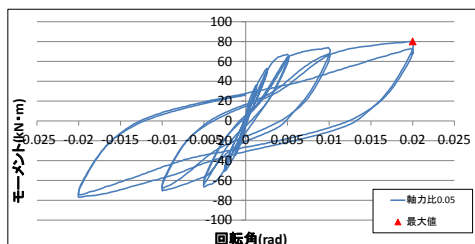


図 5 部材角-モーメント関係

② 優れた損傷低減機能

2015 年度試験体である 2 体を例として本構造の優れた損傷低減機能について示す。各試験体の最大軸力比における $R=1/50$ のひび割れ状況および破壊状況を示す。

表 1 ひび割れ幅

試験体 No.1	ひび割れ幅(mm)	
	軸力比0.05 R=1/100	軸力比0.50 R=1/33
正加力	a	-
	b	0.05(0.05未満)
	c	0.05未満(0.05未満)
	d	0.05未満(0.05未満)
負加力	A	-
	B	0.05未満(0.05未満)
	C	-

軸力比 0.50 R=1/50

a) 試験体 No. 1

試験体 No.2	ひび割れ幅(mm)	
	軸力比0.05 R=1/100	軸力比0.50 R=1/33
正加力	a	測定不可能
	b	0.45(0.20)
	c	1.0(0.80)
	d	0.05未満(0.05未満)
負加力	A	0.30(0.15)
	B	0.05(0.05未満)
	C	0.35(0.20)

軸力比 0.50 R=1/50

b) 試験体 No. 2

③ 付着除去の有効性

柱端部に付着除去を施した試験体では、その効果により軸力比 0.20 における $R=1/50$ サイクルまでひび割れの発生は見られなかった。また高軸力下においても、端部にのみひび割れの発生がみられ、本工法において付着除去は優れた効果を示し、有効である。

④ 曲率分布

図 6 に平成 28 年度の試験体における曲率分布を示す。曲率分布よりテーパー加工および断面縮小を施した柱脚部に变形が集中していることが分かる。このことから半固定型柱を用いることにより変形一様化法にも対応が可能である。

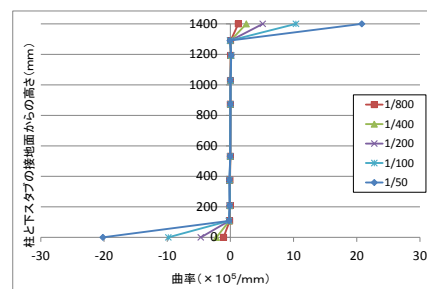


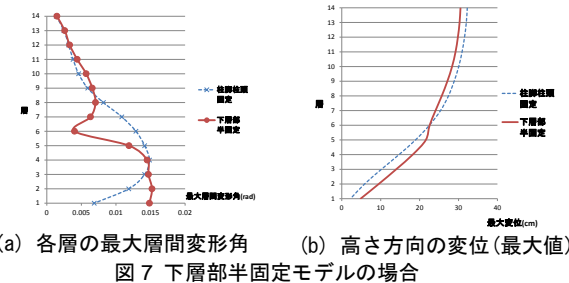
図 6 曲率分布

(2) 沈み込みを伴う基礎回転系架構の構造性能に関する研究

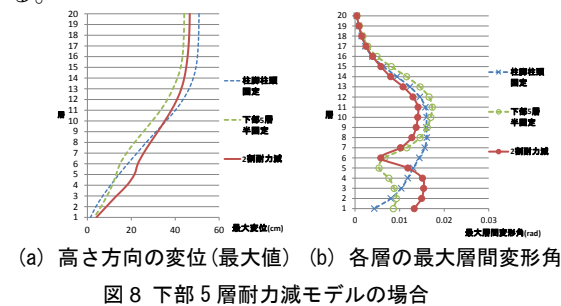
各試験体は、大地震時に想定される大変形を繰り返し経験しても杭体に損傷は少なく、安定した履歴性状を示した。特に、緩衝材ゴムの厚い試験体 No.1 は、杭頭部での沈み込みが卓越しているため、他の二つと比較して、杭体の損傷は軽微なものであり、より優れたエネルギー吸収能を有している。

(3) 変形一様化構造システムの地震時応答解析

図7に14階建て建物の柱頭柱脚固定モデルと下層部半固定モデルの各層の最大層間変形角と高さ方向の最大応答時の変位の比較を示す。1階柱脚及び5階柱頭に半固定型柱を用いた場合、半固定型柱による変形一様化効果により上部構造の応答制御が可能であるといえる。



更なる応答低減効果を得るために、下層部の強度を下げた場合での検討を行った。図8に、20階建て建物の柱頭柱脚固定モデルと下部5層耐力減モデルの各層の最大層間変形角と高さ方向の最大応答時の変位の比較を示す。20階建て建物の1階柱脚及び5階柱頭に半固定型柱を用いた場合、下層部の耐力を下げ履歴吸収をさせ上層部での塑性化を抑制させることで、半固定型柱による層間変形一様化効果により構造の応答制御が可能である。



より効率の良いエネルギー吸収を可能とさせるために、半固定型柱を用いることで、下層部に降伏部材を集中させ、上層部を非降伏架構とし、さらに下層部に制振部材を併用した場合の地震応答性状についても検討した。

図9は14階建て建物の柱頭柱脚固定モデルと柱頭柱脚固定モデルの1階～5階に制振部材を用いたモデル、下層部半固定モデル及び、下層部編固定モデルの1階～5階に制振部材を用いたモデルそれぞれの各層の最大層間変形角と高さ方向の最大応答時の変位の比較を示す。14階建て建物の1階柱脚及び5階柱頭に半固定型柱を用い、さらに制振部材を併用した場合、下層部に制振部材のみを用いた場合に比べ、より効率よく上部構造の応答制御が可能である。

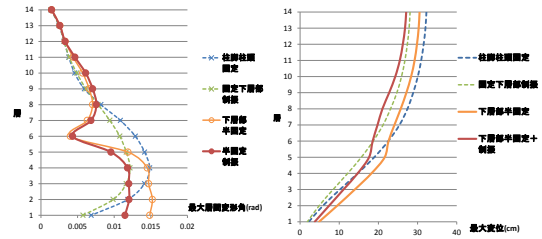


図9 半固定制振モデルの場合

図10は20階建て建物の柱頭柱脚固定モデルの1階～5階に制振部材を用いたモデルと柱頭柱脚固定モデルの1階～7階に制振部材を用いたモデル、下部5層耐力減のモデルの1階～5階に制振部材を用いたモデル、及び、下部7層耐力減のモデルの1階～7階に制振部材を用いたモデルそれぞれの各層の最大層間変形角と高さ方向の最大応答時の変位の比較を示す。20階建て建物の1階柱脚及び7階柱頭に半固定型柱を用い、さらに制振部材を併用した場合、下層部に制振部材のみを用いた場合に比べ、より効率よく上部構造の応答制御が可能である。

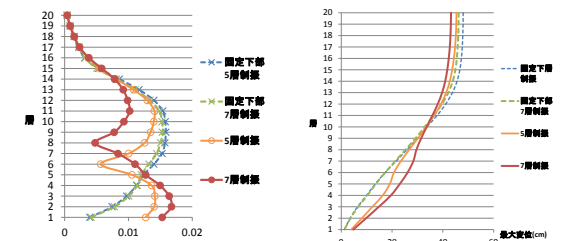


図10 下部7層制振モデルの場合

(4) 基礎回転系構造の地震時応答に及ぼすP-Δ効果の評価

図11に定常ループを与えるスイープ波を用いて応答解析を行った、P-Δ効果を考慮しない場合とP-Δ効果を考慮した場合の上部構造の履歴の比較を示す。P-Δの効果を検討した場合での基礎回転系構造の上部構造履歴は耐力が低下するにも係わらず、最大応答変位は低減された。

また、図12に告示波を用いた、P-Δ効果を考慮しない場合とP-Δ効果を考慮した場合の応答解析結果を示す。告示波においては、P-Δ効果により応答が増大するものも見られたが、概して応答は低減した。

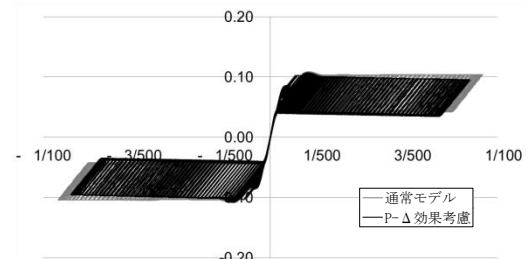


図11 上部構造履歴

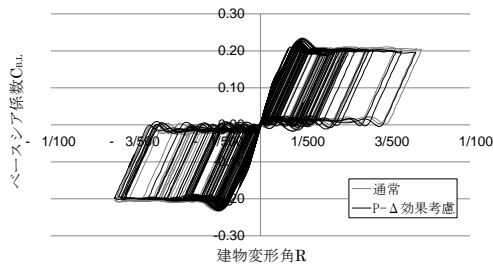


図 12 上部構造履歴

さらに、P-Δ効果による耐力低下及び、応答低減係数の低下の関係が、定常応答時の応答変位へ与える影響について検討した。図 13 に示されるような、P-Δ効果の耐力低下による等価の最大ポテンシャルエネルギーの減少を考慮すると、P-Δ効果を考慮した等価減衰定数の算定式((1)式)が導ける。(1)式による等価減衰定数は P-Δ効果を無視した場合に比べ、一般的に増加する。

$$p_{\Delta} h_{eq} = \left(\frac{\alpha}{\mu} + \frac{2(\mu-1)}{\pi\mu} \cdot \frac{s C_{BL}}{C_{BL}} \right) \cdot \frac{C_{BL}}{p_{\Delta} C_{B2}} \quad (1)$$

$p_{\Delta} h_{eq}$: P-Δ効果を考慮した等価減衰定数

α : 内部粘性減衰定数 (=3%)

μ : 塑性率

$s C_{BL}$: 鉄筋の降伏による上昇耐力にみあうベースシア係数

C_{BL} : 耐力時のベースシア係数

$p_{\Delta} C_{B2}$: 最大応答時におけるベースシア係数

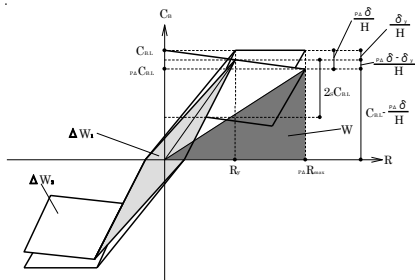


図 13 上部構造履歴図(浮き上がり発生後:P-Δ効果考慮)

ここで、(2)式に P-Δ効果を考慮した場合の応答変位と無視した時の応答変位の関係を示す。(2)式における係数 β は P-Δ効果の補正係数であり、(3)式で与えられる。

$$p_{\Delta} \delta = \beta \cdot \delta \quad (2)$$

$$\beta = \frac{C_{BL}}{C_{BL} - \frac{p_{\Delta} \delta}{H}} \cdot \frac{p_{\Delta} F_h^2}{F_h^2} \quad (3)$$

δ : 応答変位

$p_{\Delta} \delta$: P-Δ効果を考慮した時の応答変位

F_h : 応答低減係数

$p_{\Delta} F_h$: P-Δ効果を考慮した時の応答低減係数

H : 建物高さ

(3)式で得られる補正係数の理論値と応答解析結果の誤差は、定常ループを与えるスイープ波の場合では 1%以下(図 14)であり、告示波の場合では約 3%未満に収まる結果(図 15)となった。このことから、提案した応答評価式は定常状態及び、非定常状態の P-Δ効果を考慮した応答を適切に評価しうる。

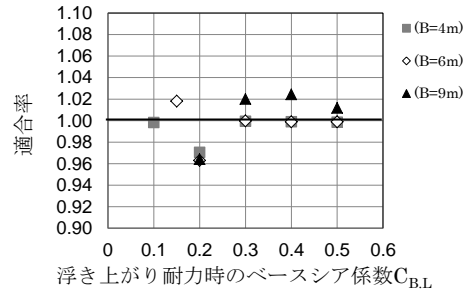


図 14 補正係数の解析値と理論値の比較

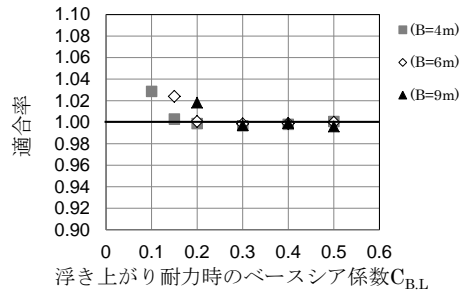


図 15 補正係数の解析値と理論値の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① 平石 久廣, 和泉 寛幹, 積山 悠, 首都圏における現行基準鉄筋コンクリート造建物の耐震性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、81 巻、2016、769-777
- ② 平石 久廣, 朱 盈, 大井 希良里, 大塚 悠里, 大出 大輔, 稲井 栄一, エネルギーに立脚した非定常弾性応答における減衰による応答低減係数の評価、日本建築学会構造系論文集、査読有、81 巻、2016、19-27

[学会発表] (計 71 件)

- ① 渋谷 圭祐, 平石 久廣, 劉 詩琦, 小菅 真緒, 損傷軽減機構を有する半固定型柱の開発研究: その 1~その 3、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、2016
- ② 大塚 悠里, 平石 久廣, 朱 盈, 大井 希良里, 大出 大輔, 小林 正人, 共振時における応答評価に関する研究: その 1~その 2、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、2016

[その他]

ホームページ

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~kohzoul/con tents/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平石 久廣 (HIRAISHI HISAHIRO)

明治大学理工学部・教授

研究者番号：4 0 1 1 3 2 1 1

(2) 研究分担者

小林 正人 (KOBAYASHI MASAHIRO)

明治大学理工学部・教授

研究者番号：5 0 3 7 3 0 2 2

高木 仁之 (TAKAGI HITOYUKI)

明治大学理工学部・教授

研究者番号：7 0 1 3 0 8 2 0