# 種々のエネルギー吸収部材付き心棒架構の耐震性能 SEISMIC PERFORMANCE OF VARIOUS SPINE FRAMES WITH ENERGY-DISSIPATION MEMBERS

# 竹内 徽<sup>\*1</sup>, 陳 星 辰<sup>\*2</sup>, 松井良太<sup>\*3</sup> *Toru TAKEUCHI, Xingchen CHEN and Ryota MATSUI*

Recently, various controlled rocking systems have been proposed in seismic design to prevent damage concentration and to achieve self-centering against a wide range of input ground motion intensities. However, there are several obstacles to overcome before they can be applied to actual buildings, such as the requirement of large, self-centering post-tensioned (PT) strands and special treatment at uplift column bases. This paper proposes a non-uplifting spine frame system with energy-dissipating members without PT strands; its self-centering function relies on envelope elastic moment frames. The system is applied to an actual building constructed in Japan. Conventional shear damper and uplifting rocking systems with PT strands developed in prior studies are applied to the same building structures, and the performance of the three systems, including damage distribution, energy dissipation, self-centering, robustness against severe earthquake, and irregular stiffness, is compared and discussed through numerical simulations.

Keywords: Spine system, Seismic performance, Vertical structural irregularity, Incremental dynamic analysis 心棒架構, 耐震性能, 不均等耐力, 漸増動的解析

## 1. 序

平成 25 年に発表された東海・東南海・南海連動型地震<sup>1)</sup>や首都直 下型地震<sup>2)</sup>に対しては従来最大級と想定された地震動を超える地震 入力が建物に加わる危険性が提示された。制振構造では通常主構造 を弾性に留めることを目標とするが,想定外入力に対しては主構造 の塑性化と共に,制振部材が適切に配分された架構でも損傷や残留 変形が特定層に集中する傾向が強くなり<sup>3),4)</sup>,被災後の財産保持, 事業継続性が困難となる。

特定層への損傷集中を回避するためには、建物の各層を貫く心棒 架構を挿入し、構造全体が崩壊メカニズムに達した際でもこの心棒 架構を弾性に留める手法が古くから提案されてきた<sup>5),6)</sup>。一方、地震 後の建物の継続使用性を保証する残留変形の抑制を実現するために は米国で多くのセルフセンタリング構造に関する研究がなされてお り、回転可能な柱梁接合部に初期張力を導入した PC 材を通し地震 後の原点復帰を期待する架構<sup>7)</sup>や、座屈拘束ブレース自身に初期張 力材を導入し原点復帰させる部材<sup>8),9</sup>、ロッキング架構を導入し自 重または初期張力材により原点復帰させる架構<sup>10)-13</sup>等が提案され ている。また、これらの概念を組み合わせ、原点復帰機能を有する ロッキング架構を建物に挿入することで、層間の損傷配分機能と原 点復帰機能を満足させようとする試みも多い<sup>14)</sup>。筆者らはこのよう な考え方に基づき、初期張力が導入された PT ワイヤとエネルギー 吸収部材を有する制御型ロッキング架構システムの実大振動台実験 を実施しその動的応答性状を明らかにするとともに,瞬間入力エネ ルギーに基づく応答予測法の提案を行ってきた<sup>15),16)</sup>。

しかし上記システムを実際の建物に適用しようとする場合,数千 kNのPTワイヤ張力が必要となる場合が多く,浮き上がるロッキン グ架構柱脚のせん断力伝達機構の構成も複雑となり,これらが適用 の障害となることも多い。剛接架構を主体とした我が国の構法では 周囲の弾性架構に原点復帰機能を期待することも考えられるが,そ の効果について比較検証した事例は少ない。

そこで、本研究では初期張力材を用いず、原点復帰機能を周囲の 弾性架構に期待した、柱脚の浮き上がらない心棒架構システム(以 降、制御型スパイン架構と呼ぶ)について、現実に建設される建築 の構造に適用するとともに、同建物モデルを用いて従来の制振構造、 制御型ロッキング架構との耐震性能比較を行う。耐震性能は特に層 間の損傷集中度、残留変形に着目するが、合わせて米国で一般化し ている漸増動的解析(IDA: Incremental Dynamic Analysis)を実施し、 過大地震入力に対する各架構システムのロバスト性を確認する。ま た、併せて特定層の剛性・耐力が不足し主構造の保有水平耐力の応 答せん断力に対する比が不均等なモデルに対する各架構システムの 耐震性能について検証する。

Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Graduate Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology Assistant Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

<sup>\*1</sup> 東京工業大学建築学専攻 教授・博士(工学)

<sup>\*2</sup> 東京工業大学建築学専攻 大学院生

<sup>\*3</sup> 東京工業大学建築学専攻 助教・博士(工学)

## 2. 検討モデルの設定

## 2.1 制御型スパインシステムの定義および従来システムとの比較

Fig. 1 に提案する制御型スパインシステムの概念(c)と比較する従 来システムの概念図,並びに中央部架構の転倒モーメント (Mor) 頂部変形角 (RDR)関係を示す。従来のブレース型制振部材(BRB)を 各層に配置した形式(SD モデル, Fig. 1(a))は部材配置が適切で主構 造が弾性範囲においては良好な耐震性能を有することが知られてい る。しかし、主構造の耐力が不均等で塑性化する領域に入ると、特 定層への損傷集中や残留変形が顕在化する。このような危険性を回 避するために制御型ロッキングシステム(LU モデル, Fig. 1(b))が提 案されている<sup>14-10</sup>。本システムは柱脚の浮き上がりを伴いながらロ ッキングするトラス架構を建物内に挿入し,エネルギー吸収部材(ヒ ューズ)と共に原点復帰させるための初期張力材 (PT ワイヤ)を付 加したものである。ロッキングフレームは心棒構造として各層の損 傷を配分し、また履歴特性はフラッグ形となり、応答終了後は原点 に復帰するため残留変形も残らない。しかし PT ワイヤの初期張力 はヒューズの降伏耐力と自重の差分以上が必要であり,一定以上の 規模の建物では数千 kN に達する。また、ロッキングフレーム柱脚 の浮き上がり変位量は数十 mm に至り、この変位を許容しながらせ ん断力を伝達する機構は複雑なものとなり易い。このような制約の 為,優れた応答特性にも関わらず実際の建築物への適用例はまだ多 くない。この制約を緩和するため、本研究では Fig. 1(c)に示すよう な浮き上がりの無い心棒架構を用いたシステム(NL モデル)を考え る。一定以上の転倒モーメントを受けると芯棒架構は中央を中心に 地上面で回転し、両側面に設置された柱型制振部材(BRC)が圧縮・ 引張変形に対し塑性化し履歴減衰を発揮する。外周架構は弾性範囲 の広いラーメン架構とし、この弾性剛性により系の原点復帰を期待 する。制御型スパイン架構は制御型ロッキング架構と同様、特定層 への損傷集中を防止する効果が期待できる。また、一定以上の残留 変形抑制性能が達成できれば、地震後の継続使用能力を有する優れ た耐震架構システムとなる。

#### 2.2 適用建物の概要

提案した制御型スパインシステムの性能を確認するため、現実に 建設が予定されている建物を模擬した同一モデルを対象に制振部材 を各層に配置した従来型の SD システムおよび制御型ロッキングシ ステムとの比較を行う。対象とする建物の全景模型および架構平面 をそれぞれ Fig. 2, 3 に示す。地下1 階地上5 階,基準階階高は4m (第1層のみ 4.2m) であり、平面は 27m×27m の正方形で 9m×9m のグリッドで分割されている。耐震要素は建物中央部に配置され, SD モデルではここに座屈拘束ブレース (BRB), LU モデル, NL モ デルではそれぞれロッキング架構、スパイン架構が配置される。外 周架構には 9m グリッド中央に H 形断面の間柱が配置されている。 実際の設計には NL モデル Y 方向にはスパイン架構に接続された BRB が存在するが、今回の検討においてはその影響を無視し、X 方 向のみのシステムでの比較を行う。

各モデルはほぼ同一の保有水平耐力を持ち,我が国の50年超過確 率10%のいわゆる極稀地震に対し外周架構がほぼ弾性範囲内に留ま るように設計する。Table 1 に建物の構造寸法, 地震時重量の概要を, Table 2 に代表的な構造部材断面を示す。

Та	bl	е	1	D	imens	ions,	gravit	y I	oad	and	mass	dis	tri	bu	tic	or
----	----	---	---	---	-------	-------	--------	-----	-----	-----	------	-----	-----	----	-----	----

	Story Height (m)	Span of beam (m)	Gravity Load (kN/m <sup>2</sup> )	Mass (kN/m <sup>2</sup> )
Roof	-	4.5	11.3	10.6
2nd~5th Story	4.0	4.5	7.65	6.65
1st story	4.2	4.5	-	-
Total	20.2	27	30500	27000

Table 2 Sizes and materials of typical members

Structural members	Size (mm)	Material	$M_P(kNm)$	
Beams	H-500×300×12×19	SN400B	870	
Columns in MRF	Box-500×500×19	SN490B	2360	
Columns in BRBF/RF/SF	Box-550×550×25	SN490B	3700	
Braces in RF/SF	$\text{H-600} \times 550 \times 25 \times 25$	SN490B	3374	
MRF·外周架構 BRBI	F·BRR 架構 RF・ロッキング	が如構 SF・スパ	イン如構	



Fig. 1 Concept of element configuration and hysteretic curves of the three structural systems

Fig. 3 Plan of the building

SD/Rocking/Spine Frame

<u>≁</u>9.0 m

H-500×300×16×22

Envelope

Frame

Rigid end

Seismic direction

Table 3 Section area and yielding force of BRBs in SD model

Story	Section area	Yielding force	Strength ratio
Story	$A_{BRBi} (mm^2)$	$F_{y\_BRBi}(kN)$	$Q_{BRB}/Q_u$
5	4300	970	0.15
4	5900	1330	0.15
3	7100	1600	0.15
2	8000	1800	0.15
1	8700	1960	0.15

SD モデルは各層の BRB 降伏荷重がほぼ Ai 分布に比例するよう 設計する。得られた BRB の緒元を Table 3 に示す。LU モデルでは SD モデルの BRB 付き架構を H 形断面トラス架構で構成されたロッ キング架構に置き換え、中央部に座屈拘束部材(BRC)および初期張 力を導入した PT ワイヤを配する。降伏転倒モーメントは SD モデル と同じ46000 kN·m なるよう, Eq.(1)を用いて設定する。

$$M_{oT} = \left(G_{ff} + F_{PT} + F_{y}^{BRC}\right) \cdot \frac{b_{ff}}{2}$$
(1)

ここに Mor: ロッキング架構の転倒モーメント, Grf: ロッキング 架構に加わる鉛直荷重, F<sub>PT</sub>: PT ワイヤの BRC 降伏時張力, F<sub>v</sub><sup>BRC</sup>: BRC 降伏軸力, b<sub>rf</sub>: ロッキング架構幅である。本例においては鉛直 荷重 3390kN, PT ワイヤ断面積 8300 mm<sup>2</sup>, 初期張力 1860kN(降伏 荷重の 11.3%) となる。BRC の芯材断面積は 13900 mm<sup>2</sup>,降伏軸力 は 4500kN である。 鉛直荷重と PT ワイヤ初期張力の合計は 5250kN となり, BRC の降伏荷重を上回るため, 応答終了後の原点復帰条件 が満たされた設定となっている。

NL モデルにおけるスパイン架構はLU モデルにおけるロッキン グフレームと同じ断面部材を使用し、両端に BRB を配置する。BRB の両端は上部がスパイン架構に、下部が地上部に定着され、スパイ ン架構が一定以上回転したとき降伏し、エネルギー吸収を開始する。 BRCの降伏軸力はLUモデルと同一の転倒モーメントで降伏するよ う, Eq. (2) を用いて設定する。



ここに  $F_v^{BRC}$ : BRC の降伏軸力,  $b_{rf}$ : スパイン架構の幅である。得 られた BRC の芯材断面は 13900 mm<sup>2</sup>降伏軸力は 4500kN となった。 スパイン架構は外周のラーメン架構とピン支持された梁で接続され, 水平力を伝達する一方、スパイン架構のロッキング変形に追従する 納まりとなっている。

#### 2.3 数値解析モデル

上記3タイプの架構モデルについて,3次元解析モデルを構築し 耐震性能の比較を行う。解析には UC バークレー校で開発されたオ ープンソースコードOpenSEES<sup>17)</sup>を使用する。各部材は線材置換し, パネルゾーンは考慮しない。梁・柱、ロッキング架構・スパイン架 構部材は軸方向に4部材に分割され、それぞれを Gauss-Lobatto 積分 点を持つファイバー要素で構成することで降伏条件における軸力-曲げモーメント相関関係および塑性領域の進展による歪硬化を表現 なお本解析では局部座屈の影響は考慮しない。BRB (BRC) する。 および PT ワイヤはピン端部を有するトラス要素とし、PT ワイヤに は初期張力を導入する。柱梁接合部はすべて剛接とし,床は水平方 向に剛床とするが 2FL 以上の各節点の鉛直変位は拘束しない。各フ ァイバー要素はバイリニアの応力-歪関係を有し,降伏後の歪硬化係 数は LY225 で 0.4%, 他鋼材で 1.0%とする。降伏応力は各鋼材の F 値に基づき設定し、粘性減衰はレイリー減衰とし、X 方向卓越モー ドである3次モード,6次モードに対しh=0.02とする。また,LU,NL モデルの BRC には長期荷重による軸力を考慮する。

#### 3. 各架構システムの耐震性能

#### 3.1 静的增分解析

2.1 節で定義した3種の架構システムモデルに対し、まず Ai 水平 荷重分布に基づく静的増分解析を行った結果をロッキング/スパイ ン架構と全体架構に分けて Fig. 4 に示す。降伏転倒モーメントは 3





Fig. 5 Acceleration spectra of normalized ground motions (h<sub>0</sub>=0.02)

Fig. 6 Overturning moment and roof drift ratio hysteresis loops (Hachinohe NS)



Fig. 7 Comparison of 2nd story SDR time history response of three models (Hachinohe NS)

モデルともに概ね 46000 kNm と同等の値となっている。LU モデル は主構造降伏後も PT ワイヤが弾性に留まるため,他の2 モデルに 比べてやや降伏後の耐力上昇が顕著であるが,概ね同等の保有水平 耐力を有する架構モデルが構成されていると言える。

## 3.2 入力地震動

入力地震動は人工地震波 BCJ-L2 および El Centro NS (1940), JMA Kobe NS (1995), TAFT EW (1925), Hachinohe NS (1968)の観測 4 波位 相を Fig. 5 に示す極稀地震告示波スペクトルに規準化して使用する。 継続時間は BCJ-L2 で 120s, 他は 30s とする。

各架構モデルに対し固有値解析を実施した結果,1,4次振動モードはY方向主体,2、5次振動モードは捩れ主体のモードとなる。3,6次振動モードがX方向の卓越モードであり,各固有周期をTable4に示す。各架構モデルともに類似の弾性振動特性を有するが,LUモデルは柱浮上りまでの初期剛性が高いため固有周期がやや短い。

## Table 4 Elastic natural periods (unit: s)

Model	3	6		
NL model	0.630	0.152		
LU model	0.516	0.149		
SD model	0.646	0.198		

## 3.3 時刻歴応答解析

## 3.3.1 応答層間変形角

時刻歴応答解析により得られた各架構モデルの転倒モーメント (MOT)-頂部回転角(RDR)関係を Fig. 6 に示す。LU モデルではフラ ッグ型の荷重 – 変形関係を示していることがわかる。Fig. 7 に Hachinohe NS 位相波に対する各モデルの層間変形角(SDR)の時刻歴 を示す。各モデルの最大値は概ね同じ時刻で発生している。各層の 最大層間変形角分布を Fig. 8 に示す。全 15 ケースの内, SD モデル の 2 層 Hachinohe 位相のみが最大層間変形角 1%を超過している。



全体的に SD モデルは 2 層に変形が集中する傾向が強い。一方, LU モデルおよび NL モデルでは全層にわたりより均等な層間変形 角分布を示している。ロッキング架構,スパイン架構の心棒効果を 評価するために,最大層間変形角 SDR の頂部変形角 RDR の比率を 層間変形集中率 DCF として Fig.9 に示す。図中横軸の数値は地震波 番号を示す。5 波全てにおいて NL モデルは最小の DCF 値を示し, LU モデルはわずかに大きく SD モデルははるかに大きい DCF 値を 示す。このように,提案した NL モデルは最大層間変形角,層間変 形集中率ともに最も小さく抑えられている。

## 3.3.2 残留層間変形角

時刻歴応答解析により得られた各架構モデルの残留層間変形角 (ReSDR)分布を Fig. 10 に示す。いずれも残留層間変形角は 0.12%以 下に分布しているが,特に LU および NL モデルでは 0.05%以下と小 さく抑えられている。Fig. 11 には各モデルの最大応答せん断力分布 を示す。応答せん断力は各層で概ね Fig. 4 右に示す系全体の降伏せ ん断力 Q<sub>u</sub>近傍の値と対応しており,主架構は概ね弾性限度内に留ま っていることを示している。



each story of the envelope

frames

dissipating devices and the envelop

frames

LUモデルの最大応答せん断力は SD モデルより大きいが,LUモ

デルの残留変形角は SD モデルより全般的に小さい。一方, NL モ デルは SD モデルと同等の応答せん断力で残留変形角は SD モデル よりすべてのケースで小さくなっている。以上より提案した NL モ デルの外周架構は弾性限度内に留まれば残留変形を抑制するために 十分な原点復帰性能を有していると言える。

#### 3.3.3 エネルギー吸収能力

系に入力されたエネルギーはBRB, BRC等のエネルギー吸収部材 および外周架構の弾塑性履歴エネルギー,または振動に伴う粘性減 衰エネルギーとして吸収される。応答終了後は運動エネルギーおよ び弾性歪エネルギーはほぼ消失する。系に入力された総エネルギー はSD, LU, NLモデルで 39 MNm, 38 MNm, 40 MNm とほぼ等しい。 その中で履歴吸収エネルギーは25 MNm, 14 MNm, 25 MNm と LUモ デルのみが小さく,減衰吸収エネルギーは 14 MNm, 24 MNm, 15 MNm と LUモデルのみが大きくなっている。これは LUモデルがフ ラッグ形の履歴を有するために等価履歴減衰定数が小さく,より粘 性減衰に依存していることを示している。

Fig. 12 に各モデルの履歴吸収エネルギー量およびその内訳を示 す。白い範囲は BRB や BRC 等のエネルギー吸収部材,斜線の範囲 は外周架構による履歴吸収エネルギーを示す。NL モデルにおいて 殆どの履歴吸収エネルギーはスパイン架構足元の2本のBRC で吸収 されており,その比率は 90.74%~99.91%に達する。このため,主架 構の損傷は殆どない状態となっている。スパイン架構の最大応力は 許容応力度の 90%程度に収まる。同様に SD モデルでは BRB が履 歴吸収エネルギーの 85% 以上を吸収している。一方,LU のロッキ ング架構では外周架構が履歴吸収エネルギーの 60% 以上を吸収し ておりエネルギー吸収部材(BRC)より大きい。

BCJ-L2 の入力は他の地震波より継続時間・入力エネルギーが大きいため、各観測波位相入力における外周フレームの履歴吸収エネルギーの層間分布をモデルごとに Fig. 13 に示す。NL モデルは最も値が小さく、外周架構の損傷が小さいことを示している。最大値は2層で125.12 kNm である。SD モデルの外周架構の損傷は 2~3 層に





(c) NL Model: 1st story irregular (f) NL Model: 2nd story irregular Fig. 15 Shear force-story drift ratio relationship in regular and irregular models

集中しその最大値は 246.46 kNm である。一方, LU モデルは 2 層に 損傷が集中し, その最大値は 677.90 kNm に達している。全体的に提 案した NL モデルは外周架構の損傷を最も小さく抑えることに成功 している。

### 3.4 漸增動的解析

ロッキング架構 LU モデルおよびスパイン架構 NL モデルは特定 層の損傷集中が回避され,残留変形も抑制されることが明らかになったが,過大入力に対するロバスト性は確認されていない。特に PT ワイヤが降伏した後の LU モデルの挙動に留意する必要がある。そ こで,各架構モデルに対し漸増動的解析(IDA)を実施し過大入力に対 するロバスト性を確認する。

入力指標(IM)に最大地動加速度(PGA),損傷指標(DM)に最大層間 変形角をとりプロットした結果を Fig. 14 に示す。全体的に SD モデ ルが他のモデルより早く損傷が進む傾向が見て取れる。LU モデル において黒丸の点は PT ワイヤが降伏する点である。降伏は概ね最 大層間変形角が 5%に達した時点で生じている。Hachinohe 位相波に 対しては LU モデルにおいて PT ワイヤが降伏した後に NL モデルよ り損傷が進行するが、それ以外の入力波に対しては概ね LU モデル は NL モデルと同等の IDA カーブを描き、SD モデルより概ね良い 性能を示す。

## 4. 低耐力層を持つ架構への適用

建築計画上の理由により,特定層の剛性・耐力が他層より低くなった架構を計画せざるを得ない場合も多い。剛性・耐力・重量が不 均等な架構においては特定層への損傷が生じやすく,建物の耐震性 能が著しく低下する<sup>18),19)</sup>。既往のロッキング架構や提案したスパイ ン架構はこういった損傷集中を緩和する性能が期待される。そこで



特定層の外周架構柱の剛性・耐力を低下させた不均等架構モデルを 作成する。Fig. 15(a), (b), (c) に第1層の剛性・耐力を低下させたモ デル, Fig. 15(d), (e), (f) に第2層の剛性・耐力を低下させたモデル の静的増分解析結果を示す。SD, LU, NL モデルのすべてにおいて, 第1層低下モデルは全層において耐力低下を示す。一方,第2層低 下モデルでは SD モデルのみ上部層の耐力低下がみられるものの, LU, NL モデルでは耐力の低下が限定的となっている。

#### 4.1 最大層間変形角

不均等モデルに対し時刻歴応答解析を行った結果得られた各モ デルの最大層間変形角分布を Fig. 16 に示す。第1 層低下モデルに おいて SD モデルの最大層間変形角は 1.2%に達する一方, LU, NL モデルの最大層間変形角は概ね 1%以下に収まっている。第2 層低 下モデルにおいては, SD モデルの最大層間変形角は2 層で 1.5%程 度に達する一方, LU, NL モデルでは 1%以下に収まっている。

各モデルの層間変形集中率 DCF を Fig. 17 に示す。不均等モデ ルにおいて SD モデルの DCF 値は 2 近くに達するが、LU、NL モ デルにおいては 1.4 以下に収まり、心棒架構による損傷配分機能 が不均等モデルにおいても発揮されている。



## Fig. 18 Residual story drift ratio of each story in irregular models

#### 4.2 残留層間変形角

不均等各モデルの残留層間変形角 ReSDR を Fig. 18 に示す。第1 層低下 SD モデルの残留層間変形角は最大 0.25%に達するが、LU、 NL モデルは 0.07%以下に収まっている。第2 層低下モデルにおいて も SD の最大残留層間変形角が 0.25%に達する一方、LU、NL モデ ルは 0.05%以下とさらに小さく抑えられている。



#### 4.3 漸増動的解析(IDA)

不均等各モデルに対しても漸増動的解析を実施し,過大地震入力 に対する性能を確認する。第1層低下モデルに対する解析結果をFig. 19に,第2層低下モデルに対する解析結果をFig.20に示す。

第 1 層低下モデルではロッキング架構基部の斜め材が PGA 6-10m/s<sup>2</sup> で降伏した後に急速に損傷が進行し, SD モデルと同等か それ以下の性能となる。一方斜め材降伏後は転倒モーメントが頭打 ちとなり PT ワイヤの降伏は層間変形角が 5%に達しても生じていな い。第 1 層低下 NL モデルでは均等モデルと同等の IDA カーブを維持し, LU, SD モデルと比較し劣化が少ない。

第2層低下モデルでは Fig.19 に示すように、概ね均等モデルと同等の傾向を示し、SD モデルが第1層低下モデルと同等の劣化を早くから示すのに対し、LU モデルでは層間変形角 5%で PT ワイヤが降伏するものの、NL モデルと共に安定した IDA カーブを描くことが確認された。

#### 5. 結

初期張力材を用いず柱脚の浮き上がりも生じない心棒構造シス テムとして,原点復帰機能を外周架構に期待した制御型スパイン架 構を考え,建設予定の建物モデルを用いて従来のせん断型制振架構 および既提案の制御型ロッキング架構との性能比較を行った。得ら れた結論を以下に示す。

- (1) 終局設計用の地震入力に対し,提案された制御型スパイン架構 モデル(NLモデル)は初期張力材が無いにもかかわらず,せん断 型制振架構モデル(SDモデル),制御型ロッキング架構モデル(LU モデル)との中で最大層間変形および残留変形が最も小さく,良 好な損傷配分機能,原点復帰性能が確認された。
- (2) 入力エネルギーの配分に関しては,NLモデルおよびSDモデル において塑性履歴エネルギーの殆どが交換可能なエネルギー吸 収部材に配分されているのに対し,LUモデルのエネルギー吸収 はより等価粘性減衰に依存し,塑性履歴エネルギーの多くは外 周架構を損傷させている傾向が見られた。
- (3) 漸増動的解析(IDA)において提案された NL モデルは LU モデル とともに SD モデルと比較し過大入力に対しても安定した耐震 性能を発揮した。
- (4) あえて特定層の剛性・耐力を低下させた不均等モデルにおいて は、SDモデルの損傷集中が顕著となる一方、LU、NLモデルは 良好な損傷配分機能を発揮し、特に NLモデルは初期張力によ る心棒架構への負担が小さく、LUモデルが基部斜材で降伏し劣 化が進むケースでも安定した性能を発揮した。

以上より提案された制御型スパイン架構システムは良好な性能 を発揮することが確認され、外周架構は十分な原点復帰機能を担保 し得ることが明らかになった。同架構システムは検討に用いられた 建物設計の実施設計に採用され、2014年3月に着工し2015年竣工 予定である。引き続きスパイン架構の鉛直変位に追従し得る内装の 納まり等が課題として検討されている。

#### 参考文献

- 1) 内閣府:南海トラフの巨大地震モデル検討会中間報告, 2012
- 2) 内閣府: 首都直下地震対策検討ワーキンググループ最終報告, 2013. 12

- 3) 日本構造技術者協会: JSCA 応答制御設計法・改定版シンポジウム-巨大 地震への対応-, 2013.5
- Uriz P., Mahin S.A.: Toward earthquake-resistant design of concentrically braced steel-frame structures. PEER-2008/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley, 2008.
- 5) 手塚武仁,他2名:層損傷集中制御制震構造,鋼構造論文集,第5巻, 第20号, pp. 1-8, 1998
- 6) Qu Z., Wada A., Motoyui S., Sakata H., Kishiki S.: Pin-supported walls for enhancing the seismic performance of building structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2012; 41:2075-2091. DOI: 10.1002/eqe.2175
- Garlock M.M., Sause R., Ricles J.M.: Behavior and design of posttensioned steel frame systems. Journal of Structural Engineering 2007; 133(3): 389-399.
  DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445 (2007)133:3(389)
- Miller D.J., Fahnestock L.A., Eatherton M.R.: Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace. Engineering Structures 2012; 40: 288-298. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.02.037
- 9) Christopoulos C., Tremblay R., Kim H.-J., Lacerte M.: Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation. Journal of Structural Engineering 2008; 134, SPECIAL ISSUE: Design and Analysis of Structures with Seismic Damping Systems, 96–107. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(96)
- 10) Midorigawa M., Azuhata T., Ishihara T., Matsuba Y., Matsushima Y., Wada A.: Earthquake response reduction of buildings by rocking structural system. Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways; Proceedings of SPIE, 2002; Vol. 4696: 265-272.
- 11) Wada A., Yamada S., Fukuta O., Tanigawa M.: Passive controlled slender structures having special devices at column connections. 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, Italy, 2001.
- 12) Midorikawa M., Azuhata T., Ishihara T., Wada A.: Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2006; 35: 1767-1785. DOI: 10.1002/eqe.603
- 13) Ikenaga M., Nagae T., Nakashima M., and Suita K.: Development of column bases having self-centering and damping capability. Proceedings of the Fifth International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA. Yokohama, Japan, 2006; pp. 703-708.
- 14) Deierlein G., Ma X., Eatherton M., Hajjar J., Krawinkler H., Takeuchi T., Kasai K., Midorikawa M.: Earthquake resilient steel braced frames with controlled rocking and energy dissipating fuses. The sixth European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary, 2011
- 15) 緑川光正,竹内徹,引野剛,笠井和彦,グレゴリー・ディアライン,大林 優,山崎僚平,吉敷祥一:せん断パネル及び張力材を有するロッキング 架構の耐震性能-汎用慣性質量装置を用いた鉄骨造ロッキング架構の震 動台実験 その1-,日本建築学会構造系論文集,No.654, pp.1547-1556, 2010.8
- 16) 竹内 徹、山本洋介、緑川光正、笠井和彦、ジェロム・ハジャー、弓野 剛、松井良太、 吉敷祥一:座屈拘束ブレースを用いた制御型ロッキング架構の応答評価一汎用慣性 質量装置を用いた鉄骨造ロッキング架構の震動台実験 その 2-, 日本 建築学会構造系論文集, Vol.76, No.667, pp.1695-1704, 2011.9
- 17) Mazzoni S., McKenna F., Scott M. H., Fenves G. L.: OpenSEES version 2.0 user manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2009. Available from: http://opensees.berkeley.edu (accessed on 2<sup>nd</sup> March 2014)
- 18) 秋山宏:エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計,技報堂, 1999.11
- 19) Al-Ali A.A.K., Krawinkler H.: Effects of vertical irregularities on seismic behavior of building structures. Report No. 130. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, U.S., 1998.

## SEISMIC PERFORMANCE OF VARIOUS SPINE FRAMES WITH ENERGY-DISSIPATION MEMBERS

## Toru TAKEUCHI<sup>\*1</sup>, Xingchen CHEN<sup>\*2</sup> and Ryota MATSUI<sup>\*3</sup>

\*1 Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
\*2 Graduate Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology
\*3 Assistant Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

### 1. Introduction

Catastrophic earthquakes striking beneath Tokyo and along the Nankai trough have been predicted to occur with high probability, which warns that, the existing buildings in those areas are running a high risk of suffering earthquake shaking beyond the conventional design level. In order to prevent damage concentration at weak stories and to mitigate residual deformation, various controlled rocking systems have been proposed. However, to apply these systems to actual buildings, several obstacles must be overcome. To eliminate these difficulties, this paper proposes a new non-uplifting spine frame (NL) system without PT strands. The proposed system is applied for an actual building structure under construction, and its performance is compared with a conventional shear damper (SD) system and a controlled uplifting rocking frame (LU) system with PT strands.

#### 2. Design and Modeling of Structural Systems

The proposed NL system consists of: 1) a stiff braced steel frame (for example, spine frame); 2) replaceable energy dissipating members; 3) envelope moment frames. The spine frame plays a key role in distributing damages uniformly to whole stories. The envelope moment frames remain mostly elastic and provide self-centering performance. The proposed NL systems are designed with the same condition for an actual building under construction, and compared with the steel moment-resisting frame with SD, and LU systems. Detailed three-dimensional nonlinear models were developed in the OpenSEES software.

#### 3. Seismic Performance of Three Structural Systems

Nonlinear dynamic analysis was conducted to evaluate the performance of the three systems. Five ground motions which were scaled to follow the BRI-L2 were used herein. Some key parameters, for example maximum story drift, drift concentration factor, residual story drift, and cumulative plastic strain energy, were compared and discussed. In addition, the limit-state capacities of the three systems were studied by incremental dynamic analysis.

#### 4. Seismic Performance with Single-story Irregular Configuration

The models in previous sections were modified to irregular models by degrading stiffness and strength of columns in a specific story. Same analysis methods with those in section 3 were employed to validate the seismic behavior of the NL system with irregular configurations.

## 5. Conclusion

The following conclusions were summarized from this study.

- For the regular models subjected to a design-level earthquake, the proposed NL model achieved the smallest story drifts and damage concentration factors compared with the SD and LU models. Additionally, the residual story drift of the NL model was as small as that of the LU model, even without PT strands. The LU model resulted in more damage in the envelope frames, whereas the envelope frames in NL model remained almost undamaged.
- In the incremental dynamic analysis, the LU model and the NL model showed stable seismic performance with increased input ground motion intensity.
- 3) Even for the irregular models with unbalanced vertical strength distributions subjected to a design-level earthquake, the story drifts, damage concentration factors, and residual story drift of the LU and NL models were kept consistent with those of the regular models. In contrast, severe damage concentration in the irregular story was observed in the SD model.
- 4) The first-story irregular LU model exhibited degradation after the bottom diagonal members in the rocking frame yielded during IDA analysis, similar to the degradation of the SD model. In contrast, the proposed NL model showed stable performance with increased input ground motion intensity even with the irregular first story.

In summary, the proposed NL spine frame was verified as showing excellent performance in preventing damage concentration in weak stories as well as sufficient self-centering capacity and robustness under large earthquakes even without PT strands.

(2014年4月22日原稿受理, 2014年9月2日採用決定)