

# テーパー付金物を用いたハードニング復元力特性要素を有する耐震構造システムの研究

野田亜久里\*1 尾崎亮斗\*1 前川利雄\*2 中里太亮\*3 青木浩幸\*3 山川誠\*4 笹谷眞通\*5

現行の耐震設計では、大地震時には梁端に塑性ヒンジを生じさせ構造体を塑性変形させることでエネルギー吸収能力を高めて崩壊を防いでいるが、部材の塑性化を許容することで固有周期が長くなり、長周期地震動による影響を受けやすくなる可能性がある。本研究では、過大な変形を抑制する変位制御部材の一つとして、ハードニング復元力特性を有する変形制御機構（以下、ハードニング機構）を提案する。また実験によりその力学的特性について検証し、振動モデルを用いた時刻歴応答解析により、建物にハードニング機構を組込んだ際の挙動や、ハードニング機構に求められる性能について検証を行った。

キーワード：テーパー付ハードニング構造部材、変形制御、硬化型復元力

## 1. はじめに

現行の耐震設計では、大地震時には梁端に塑性ヒンジを生じさせ構造体を塑性変形させることでエネルギー吸収能力を高めて崩壊を防いでいる。しかし、想定を超えるレベルの地震動に対しては過大なエネルギーの入力により、局所的な破壊から建物全体の崩壊に至る可能性も考えなければならない。また部材の塑性化を許容することで、地震動の影響により建物の固有周期が長くなり、長周期地震動による被害への検討も必要である。これらの事象への対策は、大地震時に人命を守ることや地震後の建物の継続使用という観点からとても重要である。この対処方法のひとつとして、部材の塑性化を許容しないことや、建物に想定を超える地震動が作用した場合にそれを抑制する等の研究が行われている。朝川らはPC鋼棒ブレースの作用開始点を遅らせ、過度な層間変形を抑制する変位制御型PC鋼棒ブレース<sup>1)</sup>、坂井らはブレース材の早期破断を抑制し、部材靱性能の確保を目的とした変位制御型座屈拘束ブレース<sup>2)</sup>の提案を行っている。また渡辺らは架構と耐震壁の間に離隔（ギャップ）を設け柔構造物的にふるまわせるギャップ連層耐震壁<sup>3)</sup>や、ギャップ機構を設けた損傷分散型架構<sup>4)</sup>の検討を行っている。これらのシステムはいずれもギャップ型の復元力であり初期剛性を有していないため、初期剛性を付与することにより大地震以外の場合においても初期剛性に応じた変位抑制効果を持つことや、残留変形の抑制などが期待できる。

本研究では、想定される巨大地震動に対して建物に余力を残し、過大な変形に対して建物を制御する機能を有する変形制御機構として、初期剛性を持つハードニング

復元力特性要素の開発を目的とする。

## 2. ハードニング機構の概要および予備実験

### 2.1 ハードニング機構概要

Fig. 1に、本研究で提案するハードニング復元力特性を有する変形制御機構（以下、ハードニング機構）の概要を示す。本機構は、テーパー形状を有するくさび材と拘束材、鋼棒および皿ばねにより構成されており、初期状態ではくさび材は拘束材に挟まれ、皿ばねと鋼棒により留め付けられている。くさび材が加力方向に押し込まれると拘束材が押し開かれ、皿ばねを介して鋼棒に力を伝達する。その後、皿ばねが密着状態になると鋼棒の軸剛性により機構全体として硬化し剛性が高くなる。

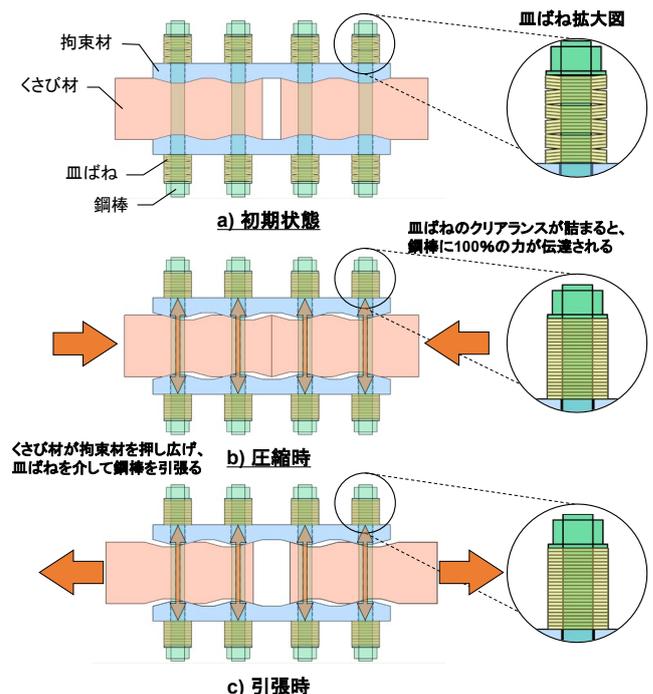


Fig. 1 ハードニング機構概要

- \*1 技術本部 技術研究所 防災技術研究室
- \*2 技術本部
- \*3 建築事業本部 建築技術統括部 建築構造技術部
- \*4 東京理科大学 教授 博士（工学）
- \*5 東京電機大学 教授 博士（工学）

本研究の第一段階として、Fig. 2 に示すようにブレースを介してハードニング機構にせん断力を伝達するシアリンク型の取付け方法を想定している。小規模な地震時はこのハードニング復元力特性によりブレースの剛性を低減させた初期剛性で抵抗し、中規模から大規模の地震により架構が所定の変位に達すると、ブレースが本来の剛性を発揮した二次剛性で架構の水平変位を抑制する効果に期待している。また今後、エネルギー吸収部材との併用の可能性についても検討予定である。

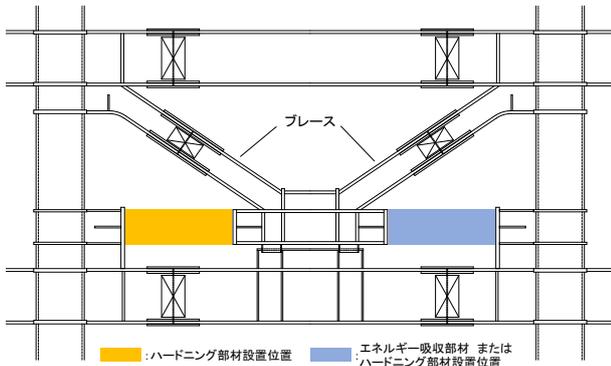


Fig. 2 ラーメン架構への取付け想定

## 2.2 予備実験概要

ハードニング機構の基本性状を確認するために、鋼棒1本を用いた予備試験体について一方向載荷実験を行った。試験体概要および載荷方法を Fig. 3 に示す。予備試験体は、一对の拘束材と載荷用治具としてのくさび材を皿ばねと鋼棒1本で留め付けており、くさび材から鋼棒1本への力の伝達を確認することを目的とした。Table 1 に試験体パラメーター一覧を示す。本実験では、くさび材および拘束材のテーパ角度をパラメーターとした。テーパ角度は、それぞれ 60°、30° とし、当該界面は鋼材表面にフライス処理を施した。鋼棒は SNR400B (φ20mm) を用いており、ねじ部は切削加工とした。くさび材、拘束材は SS400 とし、皿ばねは SUS304-CSP の重荷重用を 8 枚直列で使用した。Table 2 に鋼棒の機械的性質を示し、Table 3 および Fig. 4 に皿ばねの諸元を示す。なお鋼棒はくさび材が落下しない程度の手締めとした。皿ばねを組み合わせたときのたわみ  $\delta_G$  は JIS B 2706:2013 より算出した。

実験状況を Photo. 1 に示す。加力はアムスラー型万能試験機により一方向載荷を行った。拘束材底面と載荷装置との界面は、摩擦の影響を低減するためテフロンシートを敷いている。計測は変位計によりくさび材の鉛直変位および拘束材の開き変位を測定し、ひずみゲージにより鋼棒中央の表裏のひずみを計測した。

## 2.3 実験結果および考察

Fig. 5 に a) 実験により得られた鉛直荷重 (P) とくさび材の鉛直変位 (Vd) 関係、各種計算値、鋼棒のひずみから算出した荷重値 (T) を式 (1) にて鉛直方向力に変換し

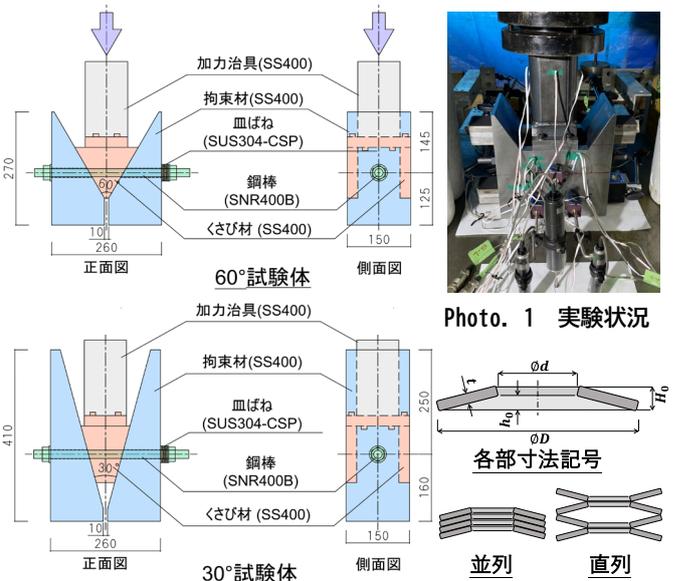


Fig. 3 試験体概要

Photo. 1 実験状況

Fig. 4 皿ばね諸元

Table 1 試験体パラメータ

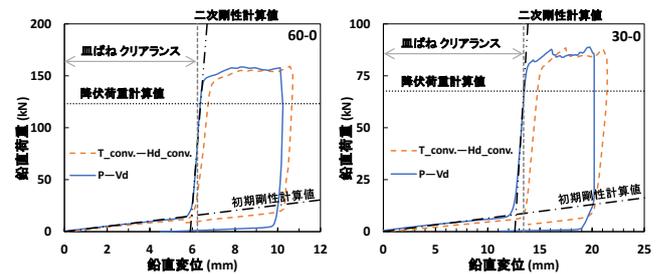
Case	くさび材・拘束材		皿ばね			
	テーパ角度 $\theta$	界面の状態	並列重ね枚数 n	直列組合せ枚数 m	皿ばねを組み合わせたときのたわみ $\delta_G$ mm	ばね定数 $k_{sp}$ kN/mm
60-0	60	フライス処理	1	8	7.2	1.04
30-0	30					

Table 2 鋼棒の機械的性質

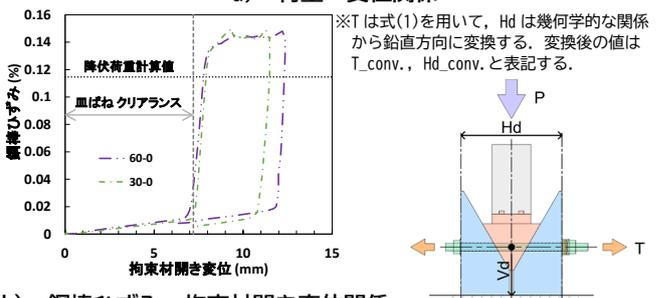
鋼種	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	伸び率 %
SNR400B (φ20)	317	457	211,930	28

Table 3 皿ばねの諸元

種類	板厚 t	内径 d	外径 D	全たわみ $h_0$	自由高さ $H_0$	材質	硬度
	mm	mm	mm	mm	mm		
重荷重用	2.2	20.4	40	0.9	3.1	SUS304-CSP	37~46HRC



a) 荷重-変位関係



b) 鋼棒ひずみ-拘束材開き変位関係

Fig. 5 荷重およびひずみ変位関係

た値 (T\_conv.) と拘束材の開き変位 (Hd) を幾何学的な関係から鉛直方向変位に変換した値 (Hd\_conv.) の関係、b) 鋼棒ひずみと拘束材の開き変位関係を示す。ねじ部が切削加工であるため、降伏荷重の算出には鋼棒の公称値を用い、有効断面積 Ae は 245mm<sup>2</sup> とした。ここで、式 (1) の鉛直方向の荷重と鋼棒の荷重値の関係は、くさび材のテーパ一部に生じる水平成分および拘束材底面に生じる摩擦を考慮して導出した。鋼材同士の接触については摩擦係数を  $\mu = 0.25$ 、拘束材底面と載荷装置の界面の摩擦係数は  $\mu' = 0.10$  と仮定した。鋼材同士の接触に対する摩擦係数  $\mu$  は 0.2 程度とされている<sup>5)</sup>が、実験結果よりくさび材の軸ずれ等による影響を 0.05 程度として見込んだ。

$$P = \frac{2 \times \left( \tan \frac{\theta}{2} + \mu \right)}{(1 - \mu \cdot \mu') - (\mu + \mu') \tan \frac{\theta}{2}} \times T \quad \text{--- (1)}$$

- P : 鉛直方向荷重
- T : 鋼棒の軸方向力
- $\mu'$  : 鋼材底面と載荷装置底面の摩擦係数
- $\theta$  : くさび材の角度
- $\mu$  : 鋼材界面の摩擦係数

皿ばねを組合せたときのたわみ  $\delta_G$  が 7.2mm であるため、拘束材の開き変位が 7.2mm で皿ばねが密着状態となると想定される。その際の鉛直変位はくさび角度との幾何学的な関係から、くさび角度 60° で 6.24mm、30° で 13.44mm と算出される。Fig. 5 a) より、P-Vd 関係の勾配が概ねこの位置近傍で変化しているため、想定した位置で剛性が切り替わることを確認できた。また初期剛性および二次剛性は計算値と概ね良い対応を示しており、皿ばねを用いて任意に鋼棒の剛性を低減することができた。T\_conv. -Hd\_conv. 関係も P-Vd 関係に対し同様の傾向を示すことから、式 (1) により鋼棒ひずみと拘束材の開きから概ねの挙動を推測可能であると確認した。ただし鋼材界面の摩擦係数については経験的な値を使用していることや、載荷後に細かい傷が確認され摩擦係数の変化が推測されることから、引き続き検討を行う必要がある。また Fig. 5 b) より鋼棒のひずみは同様の値を示し、くさび角度によらず鋼棒へ荷重が伝達された。以上より、提案の機構で、鉛直方向の荷重を鋼棒に伝達し、二段階の剛性を得られることを確認した。

### 3. ハードニング機構の要素実験

#### 3. 1 要素実験および試験体の概要

ハードニング機構の架構への実装を目的とし、構造性能を鋼棒の本数により調整可能な装置形状を提案し、この構造性能を要素実験により確認した。試験体概要および載荷方法を Fig. 6 に示す。要素試験体は、複数の鋼棒、皿ばね、一對のくさび材および一對の拘束材から構成される。Table. 4 に試験体パラメータ一覧を示す。本実験では、くさび材のテーパ角度 (30°、45°、60°)、皿

ばねの枚数および組合せ、鋼棒の本数をパラメータとした。各界面には全て鋼材表面にフライス処理を施した。鋼棒は SNR400B (φ22mm) を用いており、ねじ部は切削加工とした。くさび材、拘束材は SN490B とし、皿ばねは SUS304-CSP の重荷重用を使用した。Table 5 に鋼棒の機械的性質、Table 6 に皿ばねの諸元を示す。なお鋼棒は前章と同様に手締めとした。加力はアムスラー型万能試験機による一方向載荷とし、鋼棒の弾性域内で除荷からの再載荷を 3 度繰り返した。実験および計測状況を Photo. 2 に示す。変

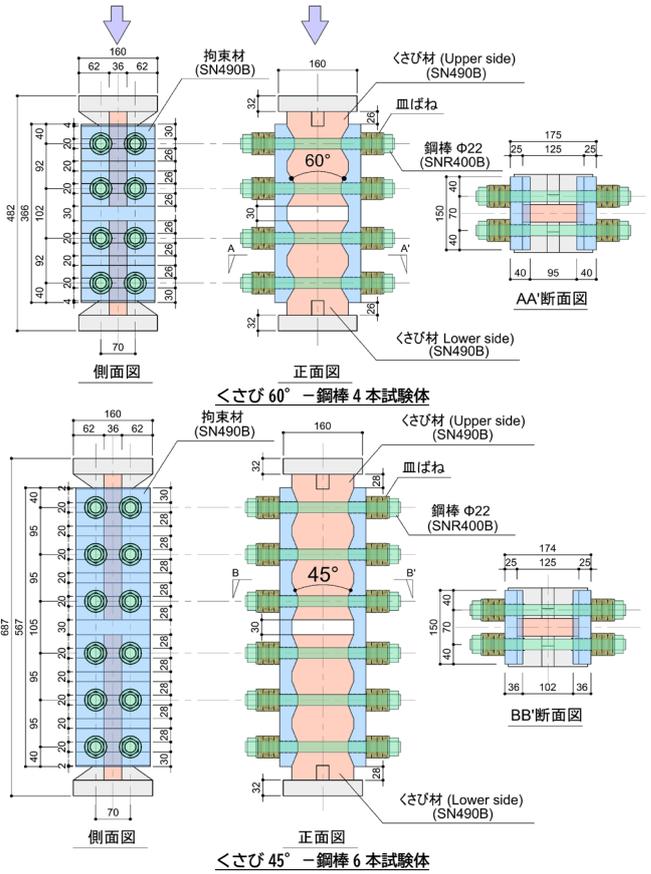


Fig. 6 試験体概要

Table 4 試験体パラメータ

Case	鋼棒本数 (くさび材1本あたり) n (本)	テーパ 角度 θ (°)	皿ばね (1セット分)		※鋼棒1本につき2セット使用	
			並列重ね 枚数 n (枚)	直列組合せ 枚数 m (枚)	皿ばねを組み合わせた ときのたわみ δ <sub>G</sub> (mm)	ばね定数 k <sub>sp</sub> (kN/mm)
30-4	4	30	1	2	4.0	4.81
45-4		45				
60-4		60				
45-6-1	6	45	1	2	4.0	6.41
45-6-2			2	3	6.0	

Table 5 鋼棒の機械的性質

鋼種	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	降伏比 %	伸び率 %
SNR400B (φ22)	314	451	70	30

Table 6 皿ばね諸元

種類	板厚 t mm	内径 d mm	外径 D mm	全たわみ 自由高さ (1枚あたり)		材質	硬度
				h <sub>0</sub> mm	H <sub>0</sub> mm		
重荷重用	2.5	22.4	45	1.0	3.5	SUS304-CSP	37~46HRC

位計によりくさび材間の相対変位，拘束材間の開き変位を測定し，またひずみゲージにより鋼棒の表裏のひずみを計測した。

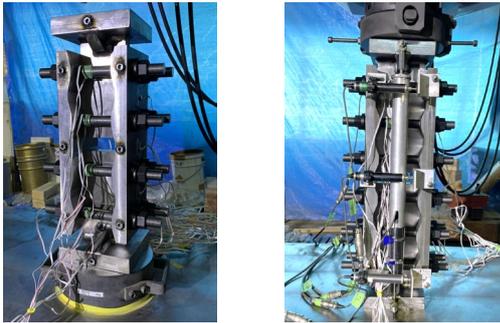


Photo. 2 試験体および計測状況

### 3. 2 実験結果と考察

Fig. 7 に各試験体の鉛直荷重 (P) とくさび材の相対変位 (Vd) 関係，各種計算値，および鋼棒のひずみから算出した荷重値 (T) を式 (2) により鉛直方向力に変換した値 (T\_conv.) と，拘束材の開き変位 (Hd) を幾何学的な関係から鉛直方向変位に変換した値 (Hd\_conv.) の関係をそれぞれ示す。T\_conv. は[Upper][Lower]それぞれくさび材 1 本あたりの鋼棒が負担した荷重値を合計したもので算出している。前章の予備実験と同様に，鋼棒のねじ部が切削加工であるため，降伏荷重の算出には鋼棒の公称値を用いて有効断面積 Ae を 303mm<sup>2</sup> とし，鉛直方向荷重と鋼材の負担荷重との関係は，くさび材のテーパ部に生じる水平成分より式 (2) で導出した。鋼材同士の接触については摩擦係数を  $\mu=0.25$  とした。

$$P = n \times T \times \frac{2 \times \left( \tan \frac{\theta}{2} + \mu \right)}{1 - \mu \tan \frac{\theta}{2}} \quad \text{---(2)}$$

- P : 鉛直方向荷重                       $\theta$  : くさび材の角度
- T : 鋼棒の軸方向力                   $\mu$  : 鋼材界面の摩擦係数
- n : くさび材 1 本あたりの鋼棒の本数

全ケースについて，概ね皿ばねが密着状態となる鉛直方向変位 (30-4 : 14.92mm, 45-4, 45-6-1 : 9.66mm, 60-4 : 13.86mm, 45-6-2 : 14.49mm ※ $\delta_0$ より算出) 近傍で荷重-変位関係の勾配が変化していることを確認した。また P-Vd 関係においては各計算値と実験値とが良好な対応を示した。また T\_conv.-Hd\_conv. の関係より，鋼棒が概ね想定通りの荷重を負担していることを確認できた。予備実験とは異なり P-Vd 関係に対し二次剛性が高い傾向を示しているのは，鋼棒の負担荷重がばらつくことが要因の一つとして挙げられる。くさび材と拘束材を，皿ばねを介した鋼棒で留め付けていることや，拘束材を受けるくさび材が1列であることなど，機構全体としてやや不安定な状態であることが原因と推察される。除荷からの再載荷の影響については，初期剛性の範囲内でも除荷剛性が低く，くさび角度の浅い 30-4 では残留変位を残してほぼ 0 まで

荷重低下した。これは先述した鋼棒の負担荷重のばらつきに起因すると考えられる。くさび角度が深くなる 45-4 では低下しているとはいえ荷重を保持している。二次剛性に入り皿ばねが完全に密着すると皿ばねが塑性化し潰れることでクリアランスが生じるため，除荷剛性が低くなり，再載荷時に荷重が上昇するまでの間にギャップが生じる。今後，こういった機構の不安定性や繰り返し載荷に対する検討が必要である。

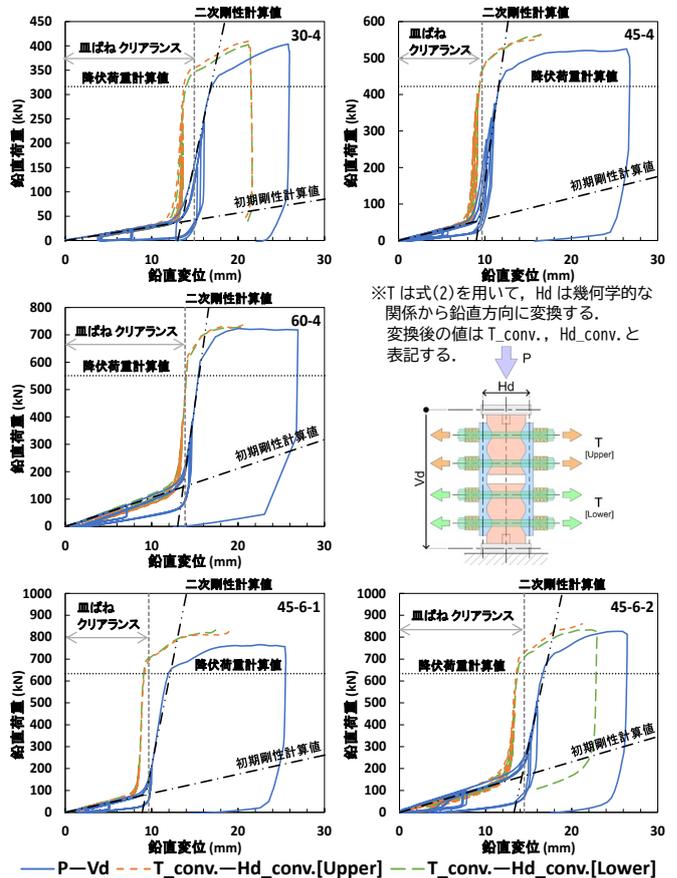


Fig. 7 荷重-変位関係

## 4. 多質点モデルによる動的解析

### 4. 1 解析概要

ハードニング復元力特性要素の初期剛性が，建物に対しどのような影響をおよぼすかについて確認するため，多質点系モデルを用いた時刻歴応答解析を行った。架構モデルは，テーマストラクチャー<sup>6)</sup>の簡易振動解析モデルより，トリムタイプのせん断棒モデル (10 層) を用いる。その際，補強効果を簡便に把握するため，架構モデルの復元力はトリリニア型からバイリニア型に置換した。置換後の各剛性他諸元を Table 7 に示す。また，Fig. 8 に振動解析モデルを示す。

入力波形は L2 地震動とし，EL CENTRO NS, TAFT EW, HACHINOHE NS, BCJ-L2, 建設省第 1461 号に規定されている加速度スペクトルに適合する模擬地震波形<sup>7)</sup> (以下告示波) 3 波の計 7 波を用いた。Table 8 に波形の一覧，Fig.

9に応答スペクトルを示す。

初期剛性の影響を確認するため、渡辺ら<sup>4)</sup>の検討手法を参考に、Fig. 10に示す復元力特性をモデル化した。この特性（以下、補強モデル）は振動モデルの $k_{hn}$ に該当する。補強モデルは補強倍率  $p$  と初期剛性倍率  $\alpha$  で定義する。補強倍率  $p$  は架構モデルの弾性剛性に対する補強モデルの剛性の割合を示し、 $p=0.1\sim 0.5$  の値を取る。初期剛性倍率  $\alpha$  は、補強モデルの初期剛性と二次剛性の割合を決定するものである。既往検討より、勾配変化点は架構

モデルの塑性率 $\mu=1.0$ とし、 $\mu=2.0$ で  $p$  ごとに同等の層せん断力を負担するよう設定した。 $\alpha$  は  $0\sim 1.0$  の値をとり、初期剛性のない a) ギャップ型 ( $\alpha=0$ ) および b) 初期剛性付与型 ( $\alpha=0.1\sim 0.9$ ) の補強モデルは非線形の剛性となる。 $\alpha=1.0$  では初期剛性と二次剛性の値が同等となり、線形の剛性を示す。これを c) リニア型補強と呼称する。架構モデルとの合成後の復元力は、 $p$  ごとに  $\mu=2.0$  の間で履歴吸収エネルギーが同等となる。Table. 9 に検討ケースの固有周期を示す。

Table 7 架構モデル諸元

層	層高 h (cm)	重量 w (kN)	弾性剛性 $k_f$ (kN/cm)	降伏変位 $\delta_y$ (cm)	降伏後剛性 $k_D$ (kN/cm)
10	400	8705	1571.8	3.5	45.8
9	400	6492	1785.0	4.4	54.1
8	400	6558	2183.2	4.4	39.5
7	400	6598	2426.9	4.6	57.2
6	400	6667	2893.5	4.3	67.8
5	400	6694	3037.5	4.4	82.5
4	400	6750	3254.1	4.4	94.4
3	400	6791	3796.6	3.9	101.3
2	400	6807	3798.3	4.0	135.8
1	600	6985	2771.4	5.7	84.7

Table 8 入力波諸元

地震波名	最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )	備考
EL CENTRO NS	510.80	観測波
TAFT EW	496.60	観測波
HACHINOHE NS	348.90	観測波
BCJ-L2	355.66	日本建築センター模擬波（基盤波）
JSCA-BL2-1	348.50	告示波 位相特性：八戸港湾ES
JSCA-BL2-2	292.98	告示波 位相特性：東北大学NS
JSCA-BL2-3	381.15	告示波 位相特性：神戸海洋気象台NS

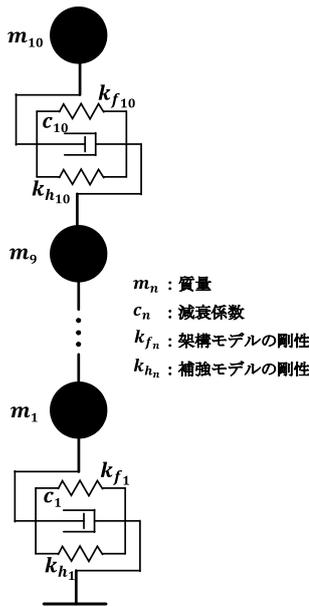


Fig. 8 振動解析モデル

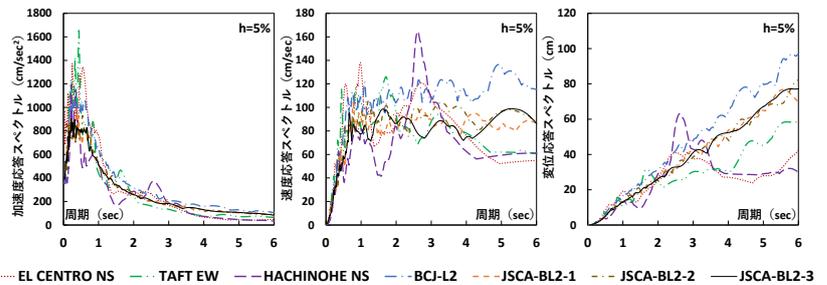
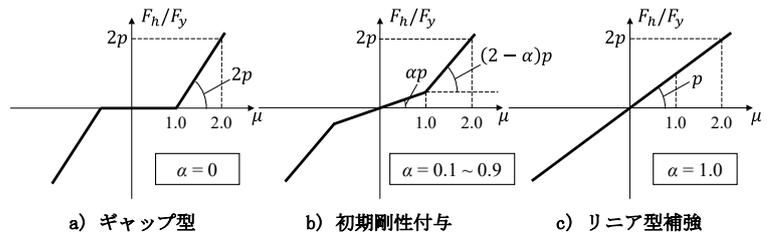


Fig. 9 応答スペクトル



$\alpha$  : 初期剛性倍率  $p$  : 補強倍率  $\mu$  : 架構モデル各層の塑性率  
 $F_f$  : 架構モデル層せん断力  $F_y$  : 架構モデル層降伏せん断力  $F_h$  : 補強モデル層せん断力

Fig. 10 補強モデル概要

Table 9 固有周期一覧

P (補強倍率)	無補強	無補強	ギャップ型 $\alpha$ (初期剛性倍率)										リニア型	
			0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9		1.0
無補強	初期	2.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	勾配変化後	12.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.1	初期	-	2.04	2.03	2.02	2.01	2.00	1.99	1.98	1.97	1.96	1.95	1.94	
	勾配変化後	-	4.27	4.37	4.47	4.58	4.70	4.83	4.98	5.13	5.30	5.49	5.70	
0.2	初期	-	2.04	2.02	2.00	1.98	1.96	1.94	1.93	1.91	1.89	1.88	1.86	
	勾配変化後	-	3.12	3.19	3.27	3.36	3.46	3.56	3.68	3.80	3.94	4.10	4.27	
0.3	初期	-	2.04	2.01	1.98	1.95	1.93	1.90	1.88	1.85	1.83	1.81	1.79	
	勾配変化後	-	2.57	2.64	2.71	2.78	2.86	2.95	3.05	3.15	3.27	3.41	3.56	
0.4	初期	-	2.04	2.00	1.96	1.93	1.89	1.86	1.83	1.80	1.78	1.75	1.72	
	勾配変化後	-	2.24	2.30	2.36	2.42	2.50	2.57	2.66	2.76	2.86	2.98	3.12	
0.5	初期	-	2.04	1.99	1.94	1.90	1.86	1.82	1.79	1.76	1.72	1.69	1.67	
	勾配変化後	-	2.01	2.06	2.12	2.18	2.24	2.31	2.39	2.48	2.57	2.68	2.81	

(単位: 秒)

## 4. 2 解析結果および考察

代表的な解析結果の例として、Fig. 11 に層間変形角の最大値分布、Fig. 12 に加速度の最大値分布を示す。それぞれ各波形の  $p=0.1, 0.3, 0.5$  における応答値である。初期剛性の影響を確認するため、層間変形が二次剛性領域に一度も達しなかったケースは除外している。(EL CENTRO NS:  $p=0.5, \alpha=1.0$  / HACHINOHE NS:  $p=0.3, \alpha=0.8 \sim 1.0$  / 同:  $p=0.4, \alpha=0.6 \sim 1.0$  / 同:  $p=0.5, \alpha=0.5 \sim 1.0$  が該当) 層間変形角は、無補強のケースに対し補強ありのケースで抑制されている傾向が見える。特に EL CENTRO NS, HACHINOHE NS, BCJ-L2, JSCA-BL2-2 でその傾向が顕著である。初期剛性  $\alpha$  の影響については、無補強とリニア型補強の応答に差が生じたケースでは、 $\alpha=0.1 \sim 0.9$  のケースがリニア型補強 ( $\alpha=1.0$ ) とギャップ型 ( $\alpha=0.1$ ) 間を補完するような分布状況になっている。ただし補強倍率  $p$  が大きいケースでは、上層階での応答が従来補強と同等に収束していく傾向もみられる。EL CENTRO NS や BCJ-L2, JSCA-BL2-2 のように無補強で局所的に応答が大きくなるケースでも、低い初期剛性で、ある程度応答を平滑化していることがわかる。またギャップ型も応答を抑えているが、局所的に応答が大きくなるケースでは、初期剛性のある  $\alpha=0.1$  以上のケースで抑制効果が高かった。また、無補強に対して補強ありのケースで応答が大きくなる場合については、応答の上昇割合は概ねリニア型補強と同等であるが、 $p$  の値が大きいケースにおいて、リニア型補強よりも応答が大きくなる傾向がみられた。(TAFT EW, JSCA-BL2-1) 加速度については、概ねリニア型補強と無補強の間を  $\alpha=0.1 \sim 0.9$  のケースが補完する分布である。ギャップ型や  $\alpha=0.1$  の初期剛性がない、または小さいケースで、応答が過大になるものもみられた。全体として、加速度最大値の分布が平滑化されている様子がうかがえる。

Fig. 13 に各応答における無補強ケースに対する補強ケースの比率を示す。a) に層間変形角の最大値の増減、b) に加速度の最大値の増減、c) にベースシア係数の増減、d) に残留変形の増減である。層間変形角、加速度、残留変形については、層に関係なく最大値で比較している。いずれも波形によって増減に差が出る結果となったものの、層間変形角は無補強ケースに対し  $\alpha$  によらず  $0.6 \sim 1.2$  倍程度の範囲内に抑えられている。特に  $\alpha=0 \sim 0.3$  では、 $\alpha$  が小さいほど応答のばらつきが小さい。一方で、高さ方向の分布において顕著な抑制効果がみられなかった TAFT EW や JSCA-BL2-1 で無補強よりも大きな変形が生じる結果となっている。この2波形については補強剛性を上げると応答が大きくなる傾向がみられたが、リニア型補強では応答が抑制されているため、より詳細な検討が必要である。加速度については全体では  $0.9 \sim 1.8$  倍程度の増減であったが、概ねのケースでは無補強に対し  $0.9 \sim 1.2$  倍程度の範囲内にあった。 $\alpha=0.4$  以上での告示波と TAFT EW の応答が大きい結果となっているが、リニア型補強 ( $\alpha$

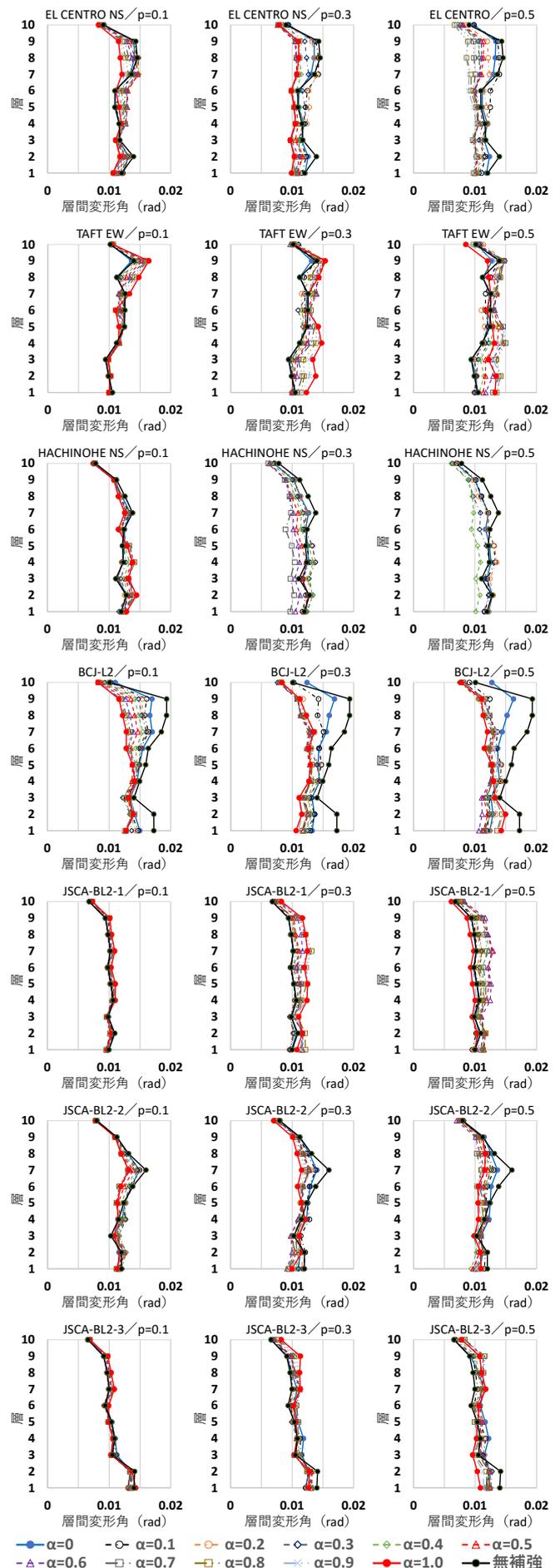


Fig. 11 最大層間変形角分布

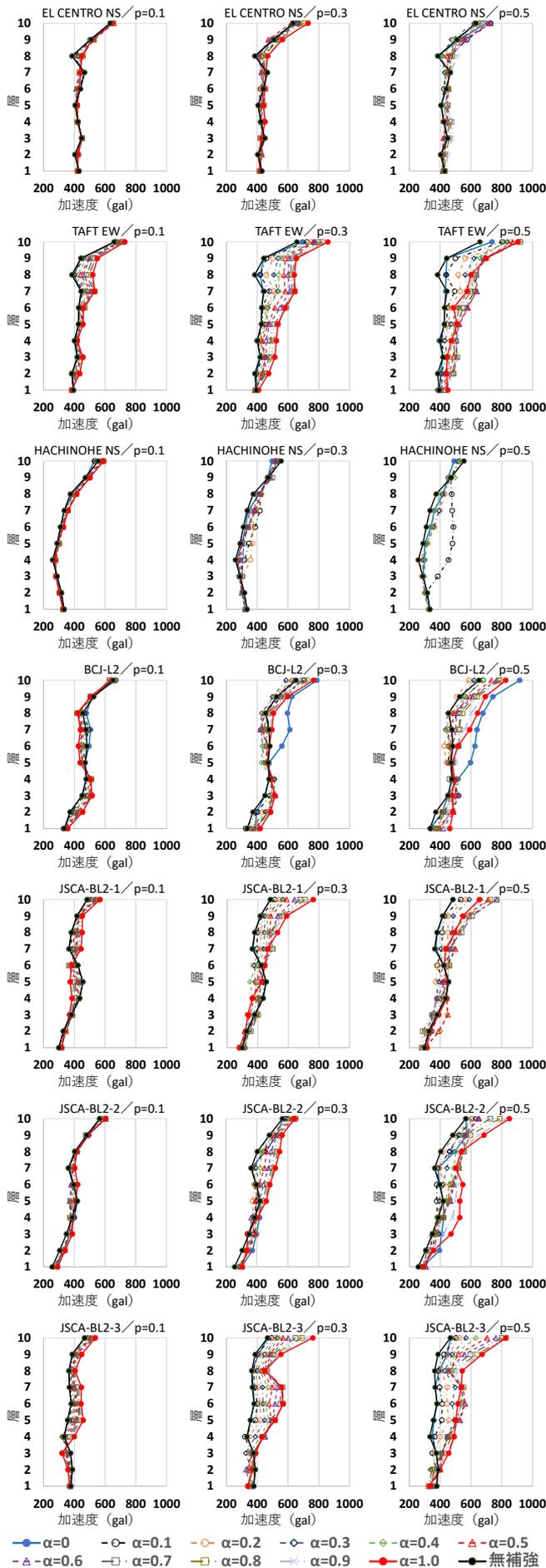


Fig. 12 最大加速度分布

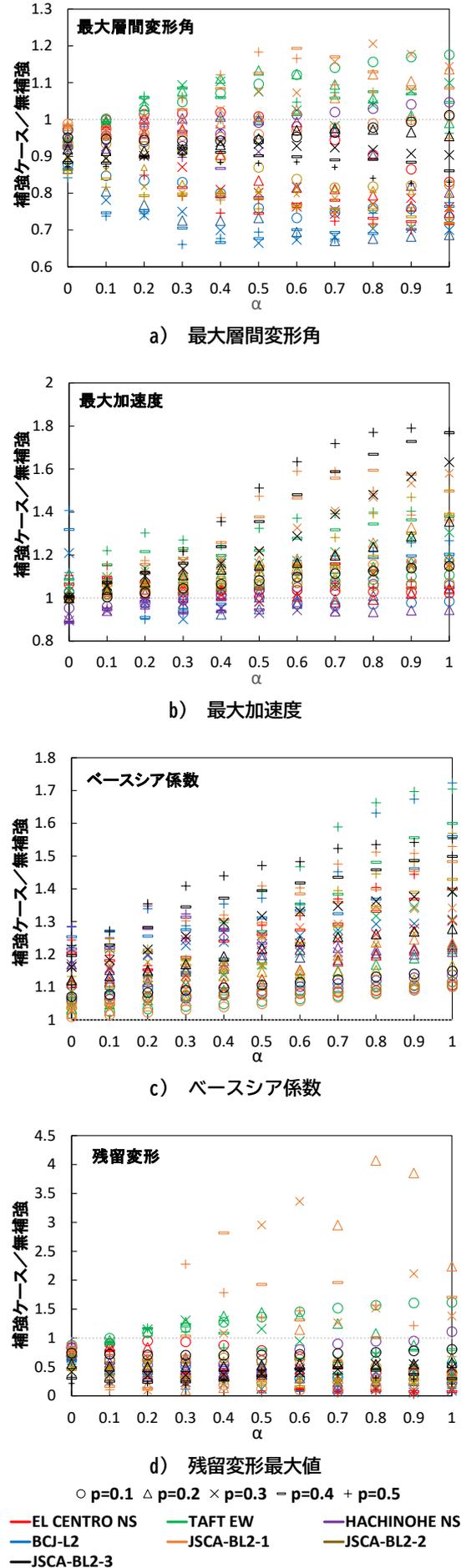


Fig. 13 各応答の無補強ケースに対する補強ケースの比率

=1.0) へ向かって右肩上がりの傾向がみえることから、応答の大きなケースでもリニア型補強時の応答は下回るものが多い。ベースシア係数についても同様で、補強倍率  $p$  が上がるに従い、 $\alpha$  が 1.0 に近づくと比率が高くなっている。全体としては 1.0~1.7 程度の範囲内であった。層間変形の抑制効果がみられた波形 (EL CENTRO NS, JSCA-BL2-2) では  $\alpha=0\sim 0.2$  などで比率が上がる傾向がみられたが、効果の薄い波形 (TAFT EW, JSCA-BL2-1) ではほぼ無補強と同等であった。残留変形については、初期剛性が付与されることにより、概ねのケースで無補強ケースよりも抑制されていたが、JSCA-BL2-1 では  $\alpha=0.3$  以上で残留変形が過大となるケースが目立ち、最大で無補強ケースの約 4.1 倍であった。TAFT EW も多くのケースで無補強ケースよりも残留変形が大きく、 $p=0.1$ 、 $\alpha=1.0$  のケースで最大となり、比率は約 1.6 倍であった。

全体として、加速度分布の平滑化やリニア型補強に対する応答の低減といった効果については、ギャップ型の補強に初期剛性を付与する効果を確認できた。同時に波形の特性により効果に差が生じるという結果も得られた。補強により応答が大きくなる傾向がある波形については、無補強ケースとの相対的な評価を行うだけでなく、設計クライテリア等に対する絶対的な評価等により検証を行う必要がある。また併せて建物に対し最適な初期剛性の大きさなどについても引き続き検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では過大な変形を抑制する制御部材であるハードニング復元力特性を有する変形制御機構の開発を目的としてハードニング機構を提案し、予備実験、要素実験を通して力学的性状を確認した。また、最適なハードニング復元力の設定のためギャップ型の剛性に初期剛性を付与した補剛材を持つ多質点系モデルによる時刻歴応答解析を行い、ハードニング復元力特性要素を建物に適用した

際の水平挙動について確認した。以下にその知見を示す。

- 1) 予備実験および要素実験により、テーパ形状を有するくさび材および拘束材、鋼棒および皿ばねを用いることで、二段階の剛性を持つハードニング復元力特性を得られること、皿ばねの組合せにより初期剛性を調整可能であること、鋼棒の本数により想定通りに容量の増加が可能であることを確認した。
- 2) 多質点系モデルによる時刻歴応答解析を L2 波 7 波に対して行い、初期剛性の付与による変形抑制効果および位相の影響を確認した。一定の変形抑制効果は確認できたが、L3 波形などの想定を超える地震動に対しては引き続き検討を行う。
- 3) 時刻歴応答解析による検討より、 $p$  と  $\alpha$  が低いほど位相によるばらつきが少ない傾向がみえた。応答の抑制効果との兼ね合いを見ながら、メカニズムについての検討を続け、ハードニング機構に必要な性能について検証を行う。

## 参考文献

- 1) 朝川剛, 山川誠, 田川浩: 変位制御型 PC 鋼棒プレースを用いた鋼構造建物の応答制御設計, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, pp. 874-881, 2016. 11.
- 2) 坂井誠, 田川浩, 陳星辰, 上原誠, 西村真: 鋼構造高層建築物における変位制御型座屈拘束プレースの制振効果, 日本建築学会技術報告集, 第 30 巻, 第 70 号, pp. 1305-1310, 2024. 10.
- 3) 渡辺宏一, 田村和夫: ギャップ連層壁架構の基本振動特性, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp. 2753-2758, 1998.
- 4) 渡辺宏一, 中井正一: 硬化型復元力特性を有する部材により耐震補強した多層骨組の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 687 号, pp. 931-938, 2013. 5.
- 5) 脇山広三, 八木毅, 山田義智: 高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす表面粗さの影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II, pp. 925-926, 1987. 10.
- 6) 日本免震構造協会 (JSSI): パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 4 版, 2024. 6.
- 7) 日本構造技術者協会: 建築構造の計算と監理, 付録 2, 2002.

## Study of earthquake-resistant structures with a hardening restoring force characteristic element based on tapered fittings

Aguri NODA, Akito OZAKI, Toshio MAEGAWA, Taisuke NAKAZATO, Hiroyuki AOKI,  
Makoto YAMAKAWA and Masamichi SASATANI

### Abstract

In the event of a major earthquake, current earthquake-resistant structures are designed to undergo plastic deformation via the plastic hinge created on beam ends, thereby boosting energy absorption capacity and preventing collapse. However, any element that adds to the plasticization of members increases the natural period, rendering structures susceptible to long period seismic motions. This study proposes a deformation control mechanism with hardening restoring force characteristics ("hardening mechanism" hereafter) as a displacement control member to prevent excessive deformation. We verified the mechanical properties of this mechanism through experiments, examined the behavior of a building incorporating the hardening mechanism, and identified the performance required of the mechanism by time history analysis of a vibration model.

Key words: tapered hardening structural member, deformation control, hardening restoring force