

熱処理鋼棒ダンパーのアンボンドPCaPC耐震壁への適用

京都大学		○長屋	翔悟
京都大学		劉	媛
京都大学	正会員	博 (工)	西山 峰広
京都大学	正会員	博 (工)	谷 昌典

Abstract : This paper presented the experimental and analytical research on the newly-developed partially strengthened hysteretic steel bar damper treated by induction heating (IHD), which was used for the energy dissipation of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Wall (UPT Wall). The uniaxial tension test conducted on IHD showed that, the hysteresis properties changed due to the diversity of induction heating patterns, and the amount of energy dissipation increased compared to the standard dampers. The linear analysis on UPT Wall with IHD externally indicated that, the yield force of IHD and the ratio of the yield strength (between induction heated steel region and normal strength steel region) had a great impact on the equivalent viscous attenuation coefficient and the residual deformation.

Key words : Damper, Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Wall, Induction heating, Cyclic behavior

1. はじめに

近年、地震による損傷が制御でき、かつ被災後の早期復旧が可能な新たな構造システムの開発が進められており、アンボンドポストテンション壁 (UPT 壁)^{1)~3)}もその一例である。UPT 壁はプレキャストコンクリート壁 (PCa 壁) と PC 鋼材および定着部から構成される。PCa 壁を連層に積み重ね、内部を貫通するアンボンド PC 鋼材をポストテンション方式で緊張することにより全体を一体化するシステムである。UPT 壁では、地震時に主に壁板の脚部に変形が集中するため、効率的なエネルギー吸収を意図して壁板の脚部にダンパーを設置し、被災後の交換を目的としてダンパーを外付けすることが試みられている。UPT 壁に関する従来の研究で小型履歴エネルギー吸収型鋼棒ダンパーを外付けで使用する場合^{4),5)}、ダンパーの中央部で確実に降伏させるために、一定の長さにわたって径を細くする切削加工が必要である。しかしながら、切削加工には手間がかかり、大量生産が困難である。

そこで、本論文では、高周波熱処理加工を施した鋼棒ダンパー (Induction Heated Damper, 以下IHD) をUPT壁に適用した場合のエネルギー吸収性能を検証することを目的として研究を行った。具体的には、IHDの挙動検証を目的とした一軸引張試験を行うとともに、切削ダンパーを用いた既往のUPT壁実験に対して妥当性が検証された解析モデルにIHDを適用した場合の挙動を検討した。なお、高周波熱処理とは、鋼材を電磁誘導により1000℃以上に加熱、直後に急冷し、強度を通常鋼の2~3倍にする技術である。

2. 鋼棒ダンパーの一軸引張載荷試験概要

2. 1 試験概要

図-1に本実験で用いた試験体の概要図をまとめる。試験体は6種類とし、中央の150mm区間が試験区間、両端の125mmはネジ部 (試験区間外) とした。試験区間内の灰色の部分は熱処理加工を行った高強度部で、白色の部分は普通強度部である。SDは試験区間全体が普通強度の試験体、IHD_Aシ

リーズは試験区間中央部が普通強度の試験体で、数字は普通強度部長さ (mm) を示す。IHD_B シリーズは試験区間中央に 30mm の高強度部を設け、普通強度部を二箇所分散させた試験体で、数字は一箇所当たりの普通強度部長さ (mm) を示す。IHD では、普通強度部が塑性域に入っても、高強度部が弾性域にとどまることが可能であり、ダンパー全体の降伏後剛性が二段階に変化すると予測される。よって、IHD には SD より優れた降伏後挙動および高いエネルギー吸収能力が期待できる。また、IHD_B に関しては、分散配置された高強度部に補剛材に似た役割を期待して圧縮側挙動の改善が期待できる。試験体一覧および材料試験結果を表-1 に示し、変数は普通強度部長さとした。

本研究ではみがき棒鋼用一般鋼材 SGD3M を用いた。材料試験用では熱処理なしの試験体と同じ条件で全体を熱処理した試験体をそれぞれ 3 本ずつ用意し引張試験を行った。表に示すように条件が同じ試験体間で強度の大きなばらつきは見られなかった。高強度部の降伏強度および引張強度は、それぞれ普通強度部の 1.40 倍、1.25 倍であった。

一軸引張試験用の荷重装置および計測機器を図-2 に示す。試験体に取り付けた CDP 変位計が計測する範囲を計測区間とし、その中央 150mm の範囲が試験区間となる。試験区間を除く部分の変形量を上下にある π 型変位計にて計測し、その差を中央 150mm の試験区間の変形量とし、これを試験区間長さ 150mm で除した値を軸平均ひずみ (引張正) と定義した。荷重は軸平均ひずみが圧縮とならないように制御した。軸平均ひずみの値が 0.25%, 0.50%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5% のサイクルを 2 回ずつ繰り返した。その後は試験体が破断するまで単調引張荷重を行った。

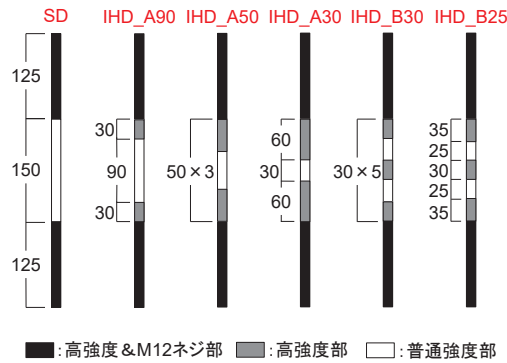


図-1 試験体概要図 (単位: mm)

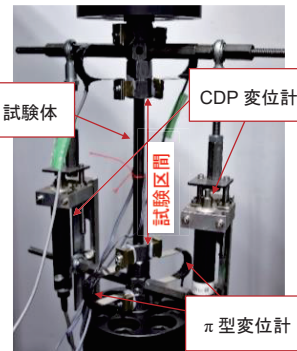


図-2 荷重, 計測状況

表-1 試験体一覧および材料試験結果

試験体名	普通強度部長さ (mm)	直径 (mm)	普通強度部			高強度部		
			降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
SD	150	11	598 595 595 (596)	687 685 677 (683)	214 211 209 (211)	824* 833* 842* (833*)	848 864 855 (855)	210 212 213 (212)
IHD_A90	90							
IHD_A50	50							
IHD_A30	30							
IHD_B30	30+30							
IHD_B25	25+25							

* : 0.2% オフセット降伏強度 () 内は平均値

2. 2 鋼棒ダンパー一軸引張荷重試験結果

試験結果の一例として、IHD_A50, IHD_A30, IHD_B30 および SD の荷重一軸平均ひずみ関係を図-3 に示す。縦軸は荷重、横軸は軸平均ひずみを表し、図中の黒実線は IHD の結果を、灰色破線は SD の結果をそれぞれ示す。IHD_A50 と SD の結果を比較すると、3.5% サイクル終了時まで大きな差は見

られなかった。IHD_A30 と SD を比較すると、2.0%サイクルまでは SD と比べて IHD_A30 は降伏後剛性の上昇が確認されたが、2.5%サイクル2回目以降においては試験区間外も含む座屈挙動を示したためピーク時荷重が大きく低下し、SD と比較して荷重は小さくなった。IHD_B30 では引張荷重側ではあまり大きな差は見られなかったものの、試験区間内の一部が座屈挙動を示さなかったため、全サイクルにおいて圧縮側の最大荷重が SD を上回る結果となった。

破断直前の計測点における軸平均ひずみを比較すると、SD が 8.6%、IHD_A50 は 5.8%、IHD_A30 は 4.4%、IHD_B30 は 6.1%となり、そのほかの試験体を含めても熱処理加工を行った試験体はすべて SD の値よりも小さくなった。

各試験体のエネルギー吸収量計算結果を図-4 に示す。縦軸はエネルギー吸収量、横軸は軸平均ひずみを表す。IHD_A50 では SD と比較してあまり大きな差は見られなかった。IHD_A30 では 2.5%サイクル2回目以降においてピーク時荷重が大きく低下した影響があり、SD の吸収量を下回る結果となった。IHD_B30 は圧縮側の最大荷重が SD と比較して大きかったことから全サイクルで SD の吸収量を上回る結果となった。3.5%サイクル終了時までの累積エネルギー吸収量をまとめたものを表-2 に示す。表中の括弧内の数値は SD の結果に対する比を表す。6 種類の中では IHD_B30 が SD と比較して 1.27 倍の値を記録し、エネルギー吸収性能に最も優れた。

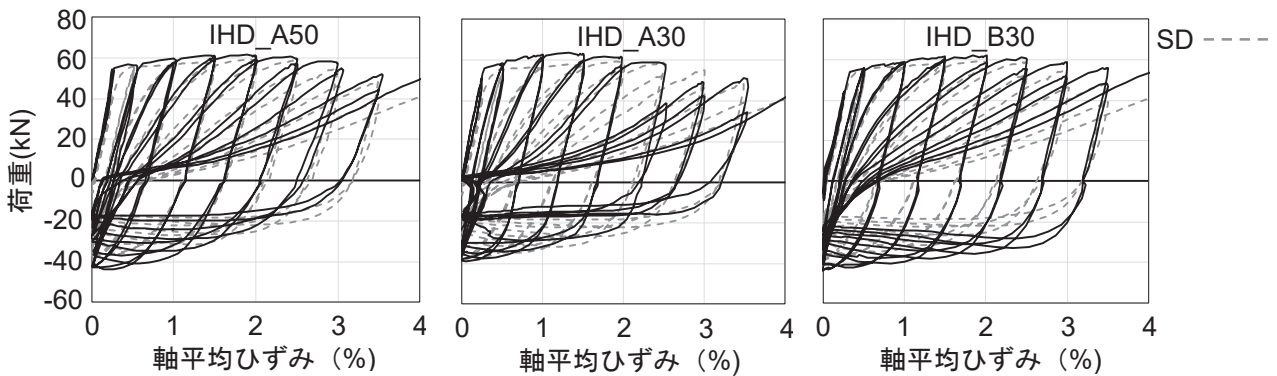


図-3 荷重—軸平均ひずみ関係

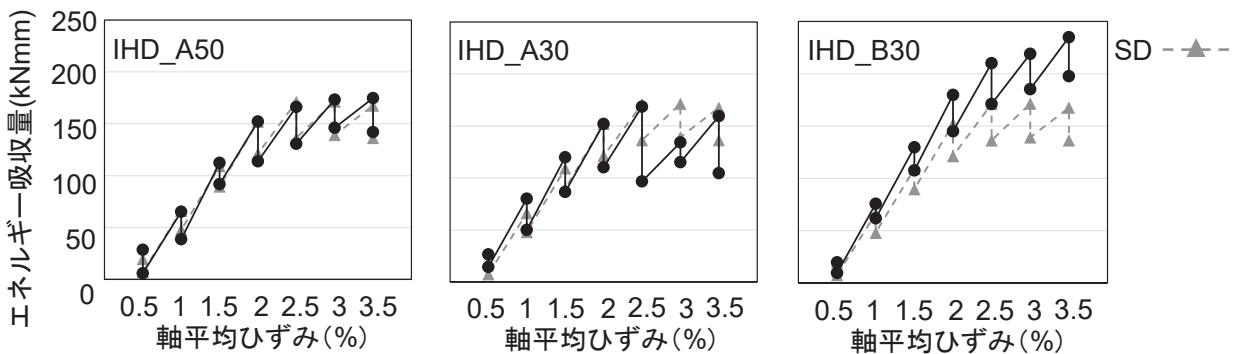


図-4 エネルギー吸収量

表-2 3.5%サイクルまでの累積エネルギー吸収量 (単位: kNmm)

試験体名	SD	IHD A90	IHD A50	IHD A30	IHD B30	IHD B25
エネルギー吸収量	1535	1824	1542	1418	1946	1769
(SD との比率)	(—)	(1.19)	(1.00)	(0.92)	(1.27)	(1.15)

3. 線材解析を用いたUPT壁の挙動追跡

3. 1 解析概要

既往実験⁴⁾の追跡および本研究で開発した IHD を適用した場合の挙動検証を目的として線材解析を

行った。試験体は鋼棒ダンパーを外付けで適用した UPT_EA を対象とし、試験体概要を図-5に示す。壁部分はP1とP2の2枚で構成され、試験体材軸から100mmの位置に配置したPC鋼材(2C-4S15.2)を緊張することで一体化している。P1断面図を図-6に示す。ダンパーは切削部分が直径13mm、長さ150mmであり、グラウトを注入した座屈防止鋼管で拘束されている。コンクリートと鋼材の材料試験結果の一部をそれぞれ表-3、表-4に示す。試験体頂部に一定圧縮軸力665kNを作用させ、水平方向に正負繰り返し载荷を行った。水平载荷点高さ(反曲点高さ)は下スタブの上面から3265mm、水平载荷開始時に計測されたPC鋼材の緊張力は642kNであった。

モデル化の概要を以下に示す。解析ソフトはSNAP Ver.7⁶⁾を用いた。モデル概形を図-7に示す。PCa壁の軸および曲げ挙動にはMSモデル⁶⁾を適用し、せん断挙動は弾性とした。PC鋼材は上下端の2点を結ぶトラス要素でモデル化し、線形弾性とした。また、壁とPC鋼材を一体化するために定着部、上スタブ、下スタブは剛棒としてモデル化し、端部においてPC鋼材と壁を接続した。ダンパーは長さ150mmのトラス要素としてモデル化し、弾塑性バネには単軸バネを用いた。骨格曲線はバイリニア、履歴特性は修正Ramberg-Osgoodモデル⁶⁾を用いた。また、解析モデルでは試験体に作用させた圧縮軸力および水平载荷直前に計測されたPC鋼材緊張力の合計をP2の上面に等価節点荷重として導入した。材料特性のモデルを図-8に示す。コンクリートのモデルは帯筋による拘束効果を考慮し、端部の拘束域をコアコンクリートとし、残りのコンクリート部分はカバーコンクリートとしてモデル化した。材料試験結果を基に応力-ひずみ曲線をNewRCモデル⁶⁾に基づいて作成した曲線を4折れ線モデルに近似した。パネル端面における壁縦方向鉄筋は無視した。

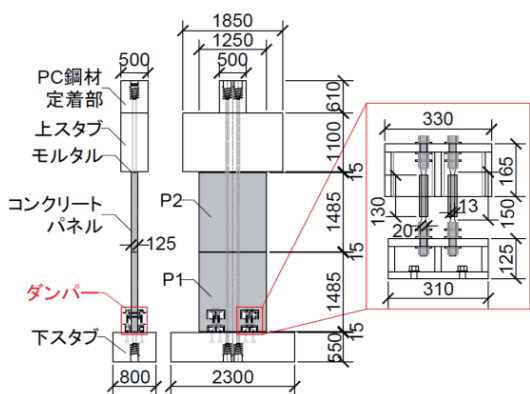


図-5 対象試験体概要 (単位: mm)

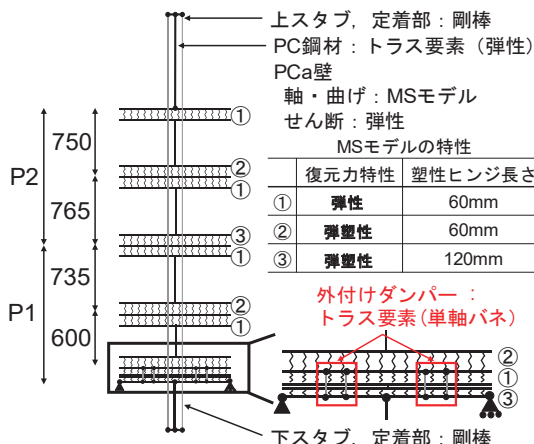


図-7 モデル化概要 (単位: mm)

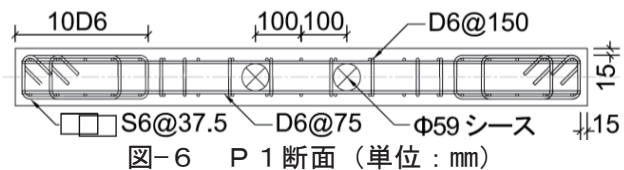


図-6 P1断面 (単位: mm)

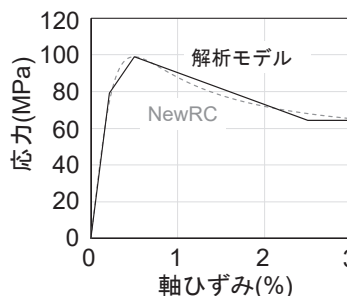
表-3 コンクリート材料試験結果 (単位: MPa)

種類	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
P1	85.2	5.4	37050
P2	89.7	5.8	39230

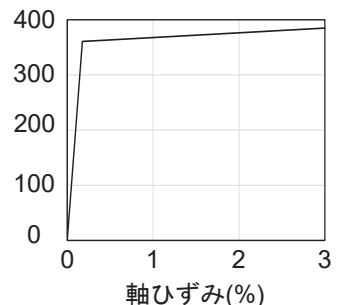
表-4 鋼材材料試験結果 (単位: MPa)

種類	降伏強度	引張強度	ヤング係数
ダンパー	360.8	563.6	204300
PC鋼材	1803.6*	1910.3	211600

*: 0.2%オフセット降伏強度



(a) コアコンクリート



(b) ダンパー

図-8 材料特性

3. 2 解析結果

荷重-変形角関係の実験値と解析値の比較を図-9に示す。変形角は、载荷点位置における下スタブ

に対する相対変位を載荷点高さで除した値と定義した。図中の黒い線が解析結果を、灰色の破線が実験結果を示す。ピーク時荷重やループの形状をおおむね精度良く再現できた。図-10に各サイクルにおける等価粘性減衰定数の計算結果を示す。0.25%サイクルから1.0%サイクルまではおおむねよい対応を示したが、2.0%サイクルにおいて等価粘性減衰定数を過小評価する結果となった。解析ではサイクルのピーク点を直線的に指向し、ピークに向かう途中における荷重を解析値が実験値を下回っていたことが原因であると考えられる。

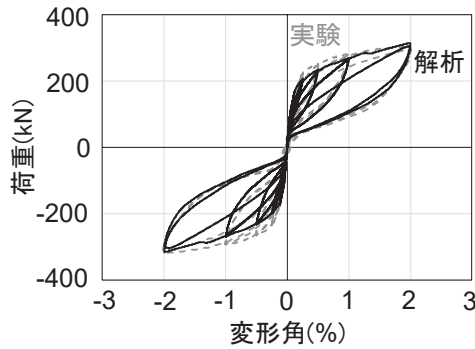


図-9 荷重—変形角関係

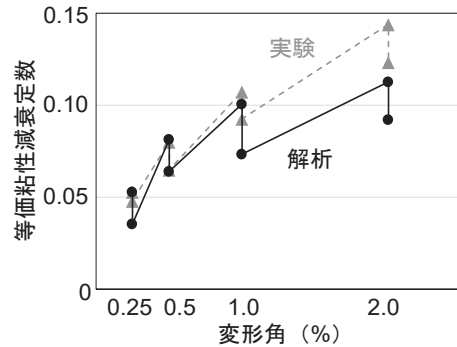


図-10 等価粘性減衰定数

4. UPT壁へのIHDの適用および減衰付与に関する検討

2. 1に示した材料試験結果から得た高強度部と普通強度部の材料特性に基づき、ダンパーの挙動をモデル化した。モデル化概要を図-11に示す。CSDは全長普通強度のダンパーであり、IHDの熱処理加工のパターンは、2.で示した実験で最もエネルギー吸収性能が高かったIHD_B30と同じものを用いた。図-12にIHD_B30の解析モデルと実験から得られた荷重—軸平均ひずみ関係を示す。UPT壁に適用するダンパーは、座屈防止鋼管で拘束することで座屈の発生を想定しておらず、圧縮側の挙動には相違がある。一方で引張側の耐力や段階的に変化する包絡線の剛性はおおむね正しく評価している。これらのモデルを前章で示した解析モデルに組み込むことで、ダンパー全体の降伏後剛性の違いが架構全体の挙動に及ぼす影響について検討した。

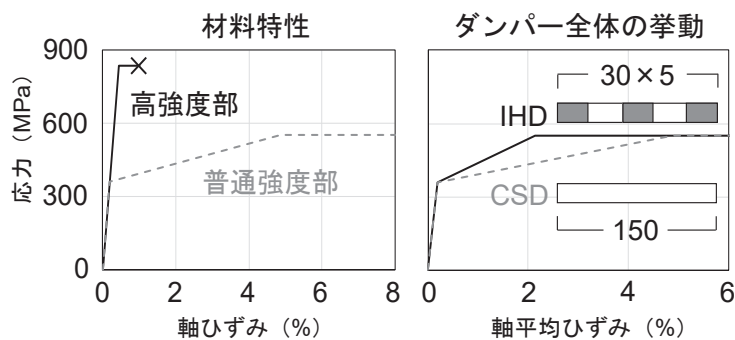


図-11 熱処理加工ダンパーモデル化概要

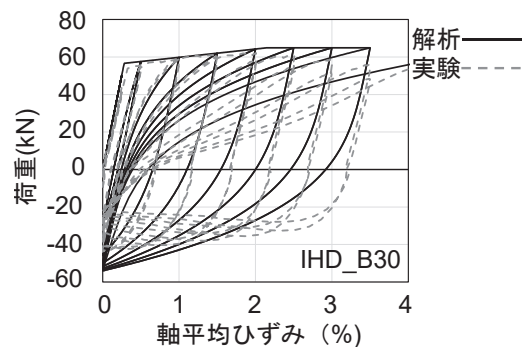


図-12 荷重—軸平均ひずみ関係

解析結果に基づき、UPT壁にIHDとSDを適用した場合の等価粘性減衰定数の計算結果を比較したものを図-13に示す。全体的に大きな差は見られず、差が最大のサイクルは1.0%サイクル1回目であり、その差は8%であった。次に、ダンパーの降伏軸力を変数としたパラメトリックスタディを行った。試験体に初期導入されたPC鋼材緊張力および軸力の合計1307kNを N_t とし、ダンパー8本合計の降伏軸力を $\eta_t \times N_t$ として、 η_t を変数とした。本研究では η_t の値として0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0の5つの場合を検討した。各ケースの解析結果から計算した等価粘性減衰定数の推移を図-14に示す。 η_t が大きくなるにつれて等価粘性減衰定数は上昇する傾向が見られたが、1.5 N_t と2.0 N_t のケースでは大

きな差は見られなかった。各ケースの残留変形角の推移を図-15に示す。 η_t が1.0を超えるまでは残留変形角は確認されなかったが、1.5Ntと2.0Ntでは1.0%変形角以降に残留変形角が見られた。これは、1.5Ntと2.0Ntの場合、最終载荷サイクルまでダンパーが圧縮降伏しなかったことが原因と考えられる。

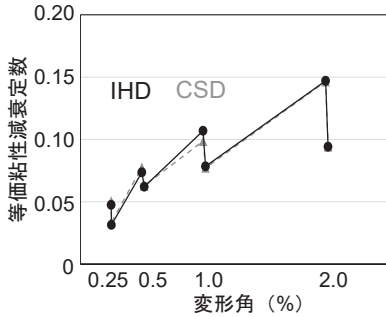


図-13 等価粘性減衰定数の比較

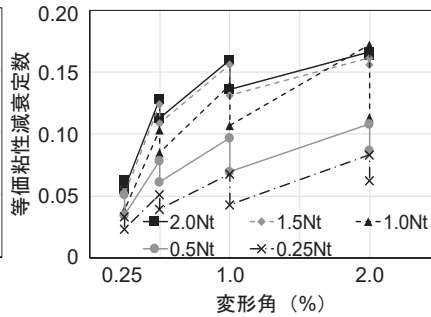


図-14 各ケースの等価粘性減衰定数

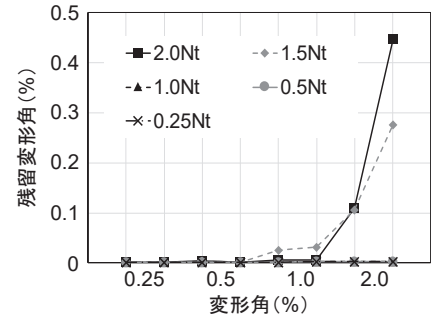


図-15 各ケースの残留変形角

5. まとめ

本研究で得られた成果をまとめる。

- ・ダンパーの一部に熱処理加工を施した試験体を作成し、引張载荷試験を行った。熱処理パターンによって荷重やエネルギー吸収量に違いが見られ、3.5%サイクル終了時までの累積エネルギー吸収量では一箇所当たり30mmの普通強度部を二箇所に分散させたIHD_B30が最も大きく、普通試験体SDの1.27倍となった。
- ・既往のPCa壁载荷実験を対象に線材モデルによる数値解析を行った。全体の挙動はおおむね精度良く追跡できた。また、等価粘性減衰定数の検討を行ったところ、0.25%サイクルから1.0%サイクルまではよい対応を示したが、2.0%サイクルにおいて等価粘性減衰定数を過小評価した。
- ・再現解析と同じモデルを使用し、ダンパーの材料特性をIHD_B30とCSDでそれぞれモデル化し、解析を行った。解析結果から各ケースの等価粘性減衰定数を計算したところ、1/100サイクル1回目において8%IHD_B30が上回ったが、そのほかのサイクルでは大きな差は見られなかった。
- ・ダンパーの降伏軸力を変数としたパラメトリックスタディを行った。 η_t の値が上昇すると等価粘性減衰定数は増加する傾向が見られた。残留変形角は η_t の値が1.0を超えると確認された。

参考文献

- 1) Holden T, Restrepo J, Mander JB: Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls. J. Struct. Eng. 2003; 129: 286-296.
- 2) Smith BJ, Kurama YC, McGinnis MJ: Behavior of Precast Concrete Shear Walls for Seismic Regions: Comparison of Hybrid and Emulative Specimens. J. Struct. Eng. 2013; 139:1917-1927.
- 3) Jose Restrepo, Amar Rahman: Seismic Performance of Self-Centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators. J. Struct. Eng. 2007; 133 (11): 1560-1570.
- 4) Luis Bedriñana: Seismic Performance and Seismic Design of Damage-Controlled Prestressed Concrete Building Structures D). Kyoto University, 2018.
- 5) Francesco Sarti, Alessandro Palermo, and Stefano Pampanin: Fuse-Type External Replaceable Dissipators: Experimental Program and Numerical Modeling. J. Struct. Eng., 2016;142 (12): 04016134.
- 6) 構造システム：SNAP Ver.7 テクニカルマニュアル, 2019

謝辞

本研究は、実験計画および試験体作成において高周波熱錬(株)のご協力を賜りました。また、竹中工務店川崎亮様、京都大学技術職員野村昌弘様に論文の作成および実験の遂行にご協力いただきました。ここに記して謝意を示します。