

P C建築の耐震性能に対する摩擦ダンパーの寄与に関する実験・解析研究

豊橋技術科学大学大学院工学研究科	○飯塚 桃子
元豊橋技術科学大学大学院工学研究科	杉浦 弘樹
大阪大学大学院工学研究科	正会員 博(工) 真田 靖士
豊橋技術科学大学大学院工学研究科	朝長 拓也

Abstract : The authors developed a friction damper for improving the energy dissipation capacity of prestressed concrete (PC) structures in their previous experimental study. The damper was applied to a typical unbonded PC beam specimen in this study. Comparing test results from two specimens with/without the damper, the following conclusions were obtained. (1) Equivalent damping factor increased by applying the friction damper. (2) Repair cost was equivalent or less in the experimental case with damper until a drift ratio of 1/33 rad. In addition, from earthquake response analyses of a fishbone model of 11-story PC building with/without damper, the following conclusions were obtained. (3) Story drift responses were smaller in the analytical case with damper. (4) Damper forces of more than 200 kN led to smaller responses of the PC model comparing to a referential RC model.

Key words : Earthquake response analysis, Energy dissipation device, Prestressed concrete

1. はじめに

近年、建築物の耐震設計に性能設計の概念が導入され、大地震後の継続使用性や損傷修復性の重要性が認識されつつある。プレストレストコンクリート造（以下、PC）は、その高い復元力特性から、優れた損傷抑制性能を有し、継続使用性や損傷修復性が注目されている。一方で、エネルギー吸収能力が低く、地震時の変形が大きくなるという耐震性能上の欠点がある。海外を中心に実施された近年の研究^{1)・2)}では、部品交換の不要な摩擦ダンパーを用いる手法が提案されている。しかし、これらの研究では摩擦ダンパーを梁端部に取り付けることを想定しており、梁上端（床位置）のダンパー取り付け位置がデッドスペースとなる。そこで、筆者らはより現実的なダンパー配置を想定して、摩擦ダンパーを梁端部片側（梁下端）に取り付けたアンボンドPC梁への適用実験を行い、開発したダンパーの有効性を確認した³⁾。なお、本研究では比較のために鉄筋コンクリート造（以下、RC）建物についても評価した。

本研究では、上記実験について文献³⁾では報告されていない等価減衰定数および修復費用に関する実験結果について報告する。さらに、本研究で研究対象とする11層PC建物の部分架構について、ダンパーが架構の地震応答に与える影響、とくにダンパーの有無によるPC建物の応答や修復費用について比較する。なお、摩擦ダンパーの適用実験については文献³⁾で報告したため、詳細については同文献を引用する方針としたが、本稿においても最小限の情報は要約して示す。

2. 摩擦ダンパー適用実験の概要

2.1 研究対象建物

研究対象建物として図-1に示す11階建てフルPCフレーム建築物⁴⁾を設定した。以下では本建築物をアンボンドPC造と仮定して検討した。

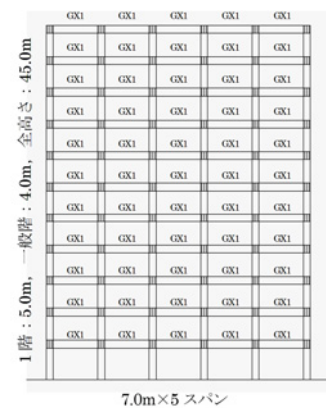


図-1 研究対象建物の立面図

2.2 摩擦ダンパー

摩擦ダンパーの詳細を図-2に示す。部材1に高摩擦材を溶接により固定し、3本のPC鋼棒(φ32)を用いて部材1, 2間に圧縮力を導入して一体化した。部材1が移動する際に、高摩擦材と部材2の間で摩擦力が発生する仕組みである。本ダンパーの摩擦係数は0.27である。

2.3 試験体

図-3, 表-1, 2に開発した摩擦ダンパーの適用対象であるPC梁の試験体詳細, 使用材料の特性をそれぞれ示す。試験体は研究対象建物の2階床位置のアンボンドPC梁を1/2に縮小した半スパン模型2体であり, 実験パラメータはダンパー適用の有無である。導入緊張力 P_N は実験開始直前に導入した。摩擦ダンパーの摩擦力は, 主筋(組立筋)を降伏させないよう100kNに設定した。

2.4 荷重計画

実験に用いた荷重装置と荷重履歴を図-4に示す。同図に示すように, 梁試験体を鉛直に設置し, 試験体上端にピンを取り付け, スタブとピンを荷重装置に固定した。荷重は軸力が作用しない状態を維持し, 正負交番で水平力を作用させた。水平荷重は梁とスタブの境界からの高さ1500mm位置(ピン中心)での水平変位により制御した。

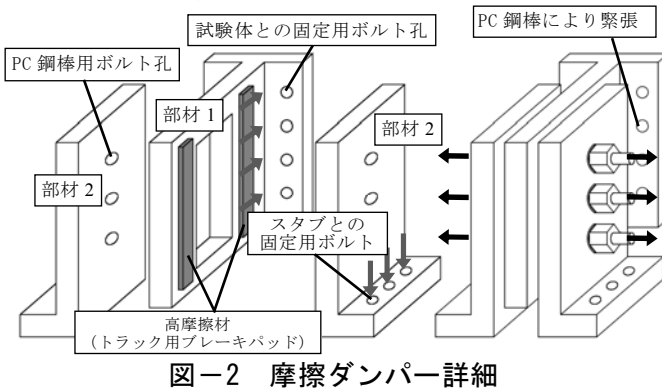


図-2 摩擦ダンパー詳細

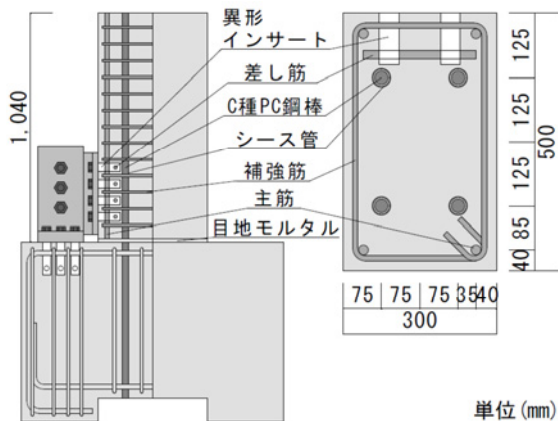


図-3 試験体立面図・断面図

3. 実験結果

3.1 破壊経過と荷重変形関係の概要³⁾

破壊経過を表-3に示す。荷重変形関係を図-5に示す。両試験体ともに安定した履歴を描き, ダンパー適用によって, 最大耐力, 履歴面積, 残留変形の増大を確認した。

3.2 等価減衰定数

図-6に各サイクルにおける等価減衰定数(以下, h_{eq})の推移を示す。両試験体ともに, いずれの変形角においても第1サイクルに比べ第2サイクルの h_{eq} は減少した。これは繰り返し荷重による履歴

表-1 梁断面詳細

断面(b×D)	300×500mm
設計基準強度	50N/mm ²
主筋(組立筋)	SD345, 4-D19
補強筋	SD345, D10@75($p_w=0.63\%$)
PC鋼棒	C種 4-φ26

表-2 材料特性一覧

試験体 (ダンパー適用 の有無)	E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	ϵ_c (μ)	
コンクリート					
非適用	3.18	53.6	3.50	2214	
適用	3.71	51.0	3.50	2258	
モルタル					
非適用		76.4			
適用		72.7			
鉄筋	E_s ($\times 10^4$ N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	ϵ_y (μ)	
	呼び径				
	D10	1.88	355	476	1889
	D19	1.87	368	552	1968
PC鋼棒	P_N (kN)	E_{pc} ($\times 10^4$ N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	ϵ_y (μ)	
	種類				
	C種	400	2.00	1218	6090

表-1, 2の記号を以下にまとめて示す。

p_w :せん断補強筋比, $E_{pc(e,s)}$:弾性係数, f_c :圧縮強度, f_t :引張強度,
 ϵ_c :圧縮強度時歪度, σ_y :降伏応力度, ϵ_y :降伏歪度, P_N :導入緊張力

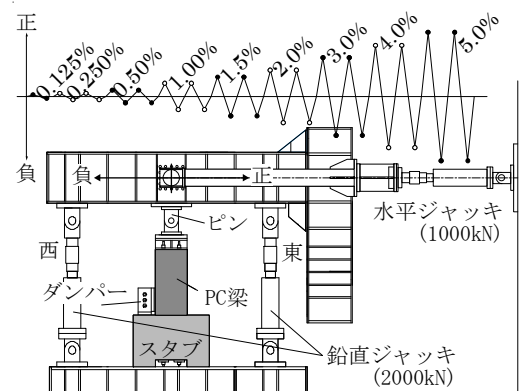


図-4 荷重装置と荷重履歴

形状の変化に起因する。ダンパーを適用した場合、第2サイクルの h_{eq} が、ダンパー非適用時の第1サイクルを上回る水準となったことを確認できる。

表-3 目視で観察された損傷の推移

変形角	摩擦ダンパー非適用	摩擦ダンパー適用
1/800	・ 損傷なし	・ 損傷なし
1/400	・ 圧着部目地と梁端部に曲げひび割れ発生	・ ダンパー最上部(図-3の異形インサート位置)に曲げひび割れ発生
1/200	・ 圧着部から縦ひび割れ発生	・ 圧着部目地の曲げひび割れ発生およびダンパー周辺の曲げひび割れ増加
1/100	・ 縦ひび割れの進展 ・ 圧縮側コンクリートの圧壊開始	・ 圧着部, ダンパー上部に縦ひび割れ発生 ・ 圧着部, 圧縮側コンクリートの圧壊および剥落開始
1/67	・ 圧縮側圧着部でコンクリートの剥離	・ サイクルが進むごとにひび割れが増加, 進展 ・ 損傷はダンパー取付け位置および圧着部に集中 ・ 残留ひび割れの増大 ・ R=1/33の正載荷時, ダンパーの拘束効果により, ダンパー上部のコンクリートが圧壊 ・ 目地モルタルに大きな損傷は見られなかった
1/50	・ サイクルが進むごとにコンクリートの剥離が進展 ・ 損傷は圧着部圧縮側に集中 ・ 圧着部目地の残留ひび割れの増大 ・ 目地モルタルに大きな損傷は見られなかった	
1/33		
1/25		
1/20		

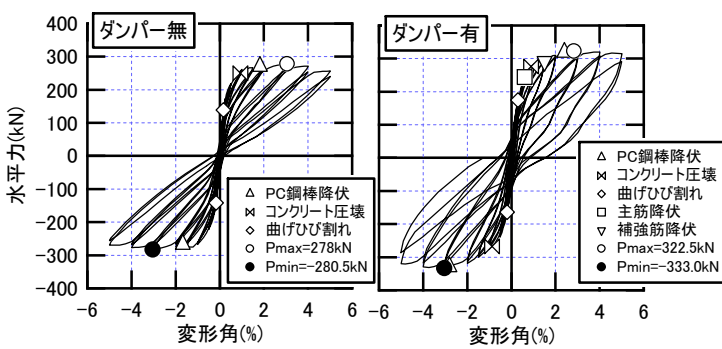


図-5 荷重変形関係

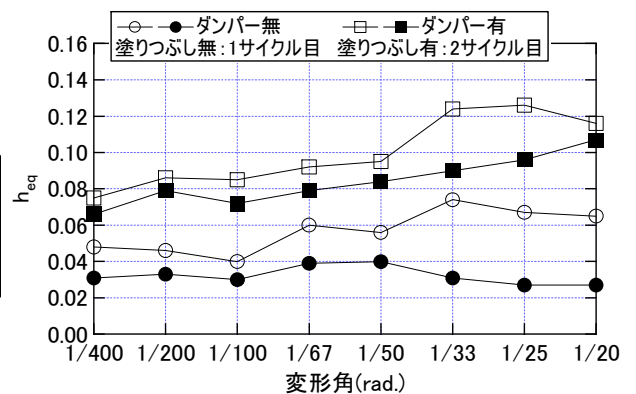


図-6 等価減衰定数

表-4 損傷状況, 補修工法, 施工単価の分類一覧

損傷内容	損傷状態	補修工法	補修費用単価
ひび割れ	0.2mm未滿	シーリング工法	910 円/m
	0.2mm以上 1.0mm以下	手動式エポキシ樹脂注入	6600 円/m
	1.0mmを超える	手動式エポキシ樹脂注入 +Uカットシーリング材充填	10800 円/m
剥離	剥離面積5%未滿	欠損部樹脂モルタル充填	27000 円/m ²
	剥離面積5%以上	鋼板巻き +無収縮モルタル注入	41418 円/m ²

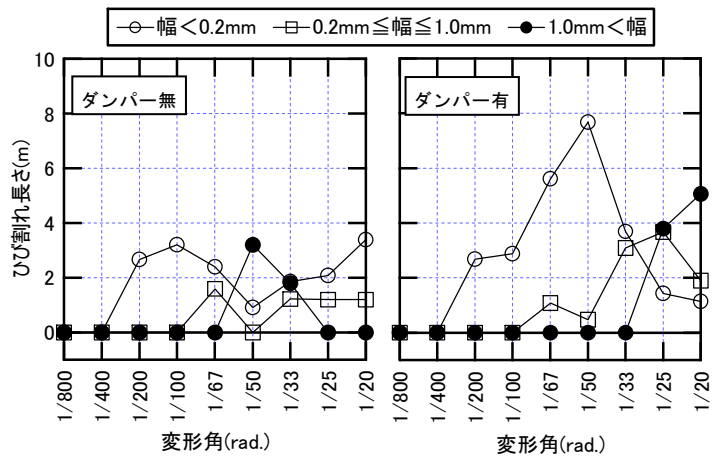


図-7 ひび割れ長さの推移

3.3 損傷の推移

両試験体の第2サイクル終了時の写真をもとに、残留ひび割れ長さと剥離面積を正面と側面(正面側半分)において測定し、2倍の値を梁一端分の損傷として評価した。既往の研究⁵⁾を参考に設定した補修に要する施工単価を表-4に示す。この表の分類と試験体の縮尺1/2を考慮し、ひび割れ長さは幅0.1mm未滿, 0.1mm以上0.5mm以下, 0.5mmを超えるひび割れの3段階, 剥離面積は試験体表面積の5%未滿, 5%以上の2段階で分類した。この評価値を実大スケールに換算して、図-7にひび割れ長さ、図-8に剥離面積の推移を示す。ただし、剥離面積は両試験体ともに試験体表面積5%未滿であった。摩擦ダンパー適用時、幅0.1mm(実大換算で0.2mm)未滿のひび割れが非適用時と比較して大幅に増加した。剥離面積は、摩擦ダンパー適用時のR=1/20で顕著に増大した。

3.4 修復費用の算定

上記の実験結果を用いて、各変形角における梁一端分の修復費用を算定する。なお、文献 6) より、本摩擦ダンパーは緊張力を解放すると残留変形が解消されるが、その効果は無視した。図-9 に両試験体の修復費用の推移を示す。ただし実際の修復工事にかかると予想される、直接工事費以外の費用は除外した。R=1/50 において、摩擦ダンパー非適用時の修復費用が増加した。

これは同サイクルで発生した幅 0.5mm (実大換算で 1.0mm) を超えるひび割れの修復費用に起因する。しかし、R=1/33 以降はひび割れが剥離へ移行したため修復費用が減少した。摩擦ダンパー適用時の修復費用は、R=1/25 以上で非適用時を大幅に上回ったが、それ以前は非適用時と同等未満であった。

4. 地震応答解析による摩擦ダンパーの効果の検証

4.1 解析対象

解析モデルを図-10 に示す。研究対象建物から部分的に切り出した 11 層のフィッシュボーンモデルを解析対象として設定した。なお、以下の解析では PC 建物に加え、これを RC 建物に置き換えた解析ケースも設定した。ここで、フィッシュボーンモデルの各部材の骨格曲線は PC と RC で同一であり、履歴モデルのみが異なると仮定した。モデル化では基礎固定、柱梁接合部を剛域と仮定し、柱、梁は線材置換した。せん断と軸特性を弾性バネとし、曲げ特性を弾塑性バネとした。曲げ特性の履歴モデルには PC 建物では文献 7) に基づく原点指向モデルを用いた。一方、RC 建物では剛性劣化型トリリニアモデルを用いた。後者の除荷剛性 k_r は式(1)とした。

$$k_r = \frac{M_c + M_y}{\delta_c + \delta_y} \left| \frac{\delta_{max}}{\delta_y} \right|^{-\alpha} \quad (1)$$

(δ_c, M_c) : ひび割れ点 (δ_y, M_y) : 降伏点
 δ_{max} : 最大変形 α : 除荷時剛性低下指数 (= 0.5)

4.2 摩擦ダンパーのモデル化方法

摩擦ダンパーを適用する際は、図-10 に示すように建物の曲げバネにダンパーの曲げバネを並列結合して合成した。紙面の都合上詳細な説明は割愛するが、ダンパーの曲げバネ置換は筆者らによる既往の研究⁷⁾に従った。本モデルではダンパーによる付加耐力が図-11 に示すように加力方向に

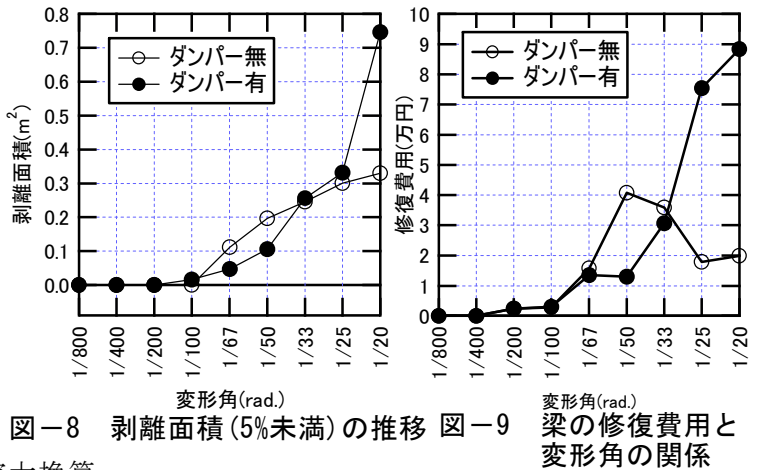


図-8 剥離面積(5%未満)の推移 図-9 梁の修復費用と変形角の関係

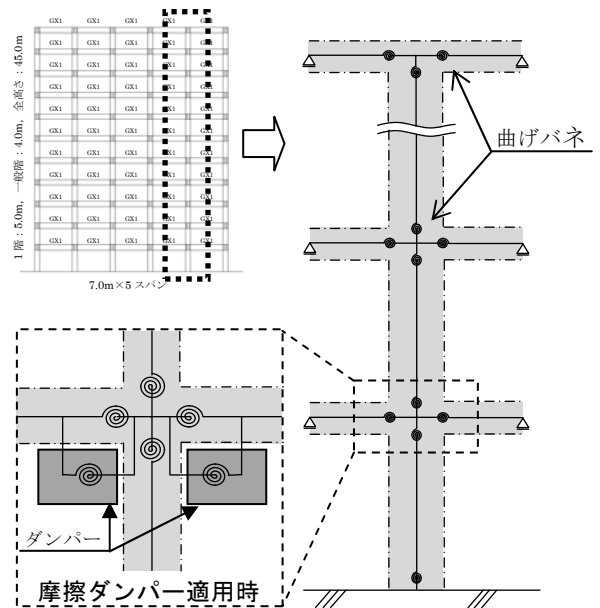


図-10 解析モデル

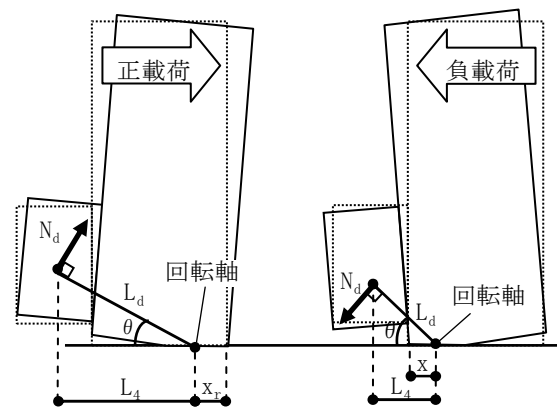
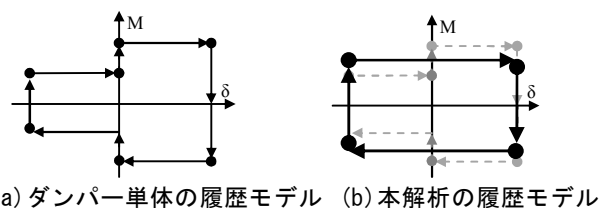


図-11 摩擦ダンパーによる付加耐力の評価方法



(a) ダンパー単体の履歴モデル (b) 本解析の履歴モデル
 図-12 ダンパー効果の復元力特性モデル

よって異なるが(図-12 (a)), 本解析モデルでは柱の両側に 2 台の摩擦ダンパーが装着されることを想定したため(図-10), 加力方向によるダンパー耐力の差分は両ダンパー間で相殺されると見なすことができる。そこで, 本解析では各ダンパーの付加耐力として正負方向の平均値を用いた(図-12 (b))。なお, ダンパーの摩擦力は, 適用実験で設定した 100kN と, RC 建物との比較のために 150kN, 200kN, 250kN の 4 パターンを設定した。

4.3 数値計算方法

研究対象建物の部分架構モデルの地震応答解析を行い, 摩擦ダンパーの適用の有無が架構の地震応答や修復費用に与える影響について検討する。また, RC 建物を想定した同架構モデルの解析も行い, 摩擦ダンパーを適用した PC 建物の解析結果と比較・検討した。地震応答解析には OpenSees⁸⁾ を用い, 原点指向モデルを用いるためにソースに修正を加えた。数値積分法には Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) を用い, 積分刻みを 0.005 秒(加速度時刻歴の時間刻みの 1/10) とした。減衰は瞬間剛性比例型と仮定し, 減衰定数は 5%と仮定した。

4.4 入力地震動

入力地震動は, 限界耐力計算の安全限界時の設計用加速度スペクトルに基づき作成した模擬地震動⁹⁾とした。設定マグニチュードは 8.0 である。位相特性は, 桑村らの手法¹⁰⁾により正規分布の標準偏差をパラメータとすることでパルス的な地震波から海洋型の地震波までを表現した。本解析では, 平均 μ を 0.4 (地震継続時間に対して 40%) とし, 標準偏差 σ は 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.10, 0.14, 0.20, 0.26 の 8 種を用いた。標準偏差ごとに 3 波の加速度時刻歴を作成し, 合計 24 波の地震動で地震応答解析を行った。解析結果は 3 波の平均値を示す。なお, 本解析では地震動入力後に 30 秒間自由振動させた。図-13 に地震波の例を示す。

4.5 解析結果

図-14 は PC 建物におけるダンパー非適用時と適用時(摩擦力 100kN)の最大層間変形角と修復費用の比較である。ただし, 修復費用の算定では梁のみを対象とした。ダンパーを適用することで, ほぼ全ての地震波に対して最大層間変形角が低減された。応答が低減された結果, 修復費用も低減された。図-15 では, 標準偏差 $\sigma=0.26$ の地震動(海洋型)を入力した場合について, ダンパー非適用時と適用時の入力・消費エネルギーの時刻歴を比較する。ダンパー非適用時は消費エネルギーの大部分を粘性減衰 (E_d) に依存しているのに対し, ダンパー適用時は履歴消費エネルギー (E_h) の割合が大幅に増加していることを確認できる。続いて, 図-16 では, ダンパーの摩擦力を変化させた PC 建物の最大層間変形角を, RC 建物を想定した場合の解析結果と比較する。同図より, 本解析対象の場合, 摩擦力を 200kN に設定することで, すべての地震動に対して RC と同等以下の応答に低減できることを確認した。

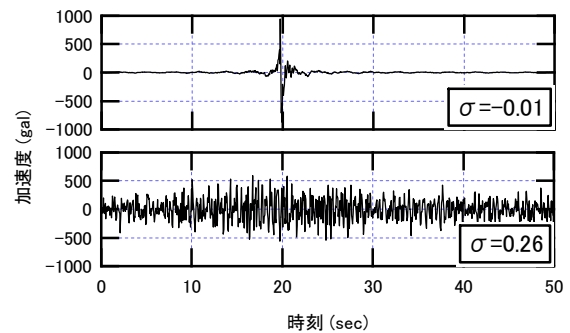


図-13 地震波例

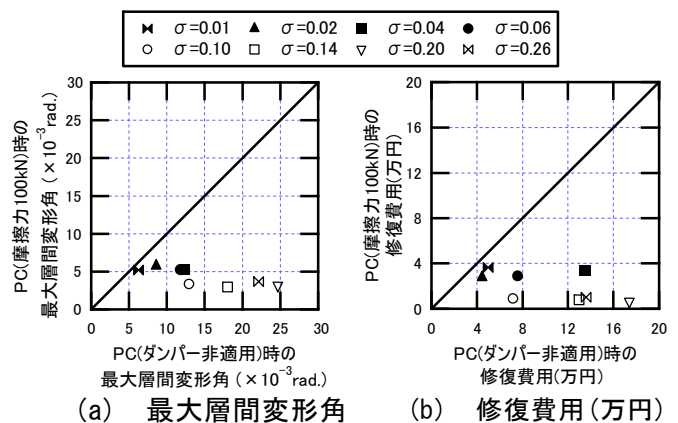


図-14 PC 建物のダンパー有無による最大層間変形角と修復費用の比較

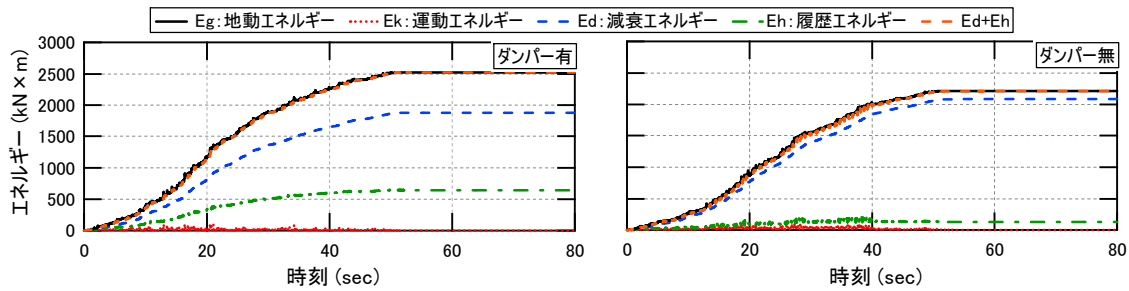


図-15 ダンパー非適用時と適用時の入力・消費エネルギーの比較

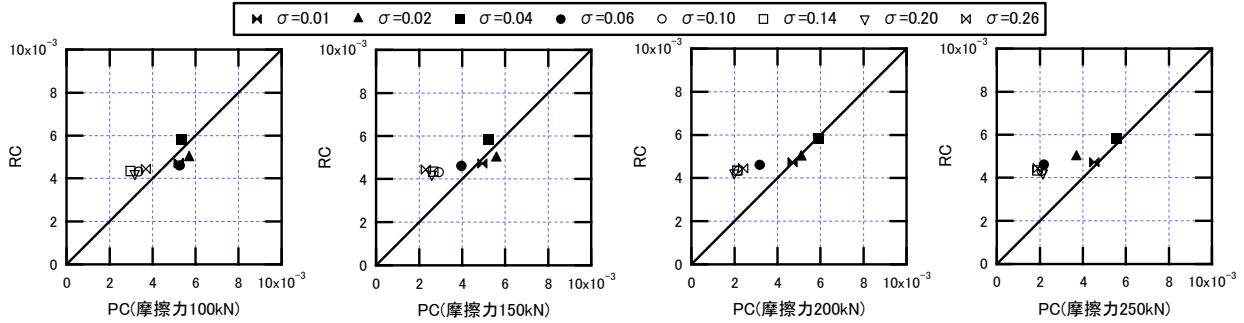


図-16 RC建物とダンパーを適用したPC建物の最大層間変形角(rad.)の比較

5. まとめ

摩擦ダンパーの有無をパラメータとしたPC梁の静的荷重実験を行った。また、11層PC建物の部分架構モデルについて地震応答解析を行い、ダンパーが架構の地震応答に与える影響について解析的に検討した。得られた知見を以下にまとめる。

1. 実験結果より、摩擦ダンパーを適用することで、繰り返し荷重時の h_{eq} が非適用時の第1サイクルの水準を上回ることを確認した。
2. 摩擦ダンパー適用時の修復費用は、 $R=1/25$ 以上で幅 1.0mm を超えるひび割れがダンパー取り付け位置周辺に増加したため、非適用時を大きく上回った。それ以前では非適用時と同等未満であった。
3. 地震応答解析結果から、ダンパーを適用することで建物の応答が低減するため、修復費用も低減することを確認した。
4. 本解析対象の場合、ダンパーの摩擦力を 200kN に設定することで、PC建物をRC建物と同等以下の応答まで低減させることができた。

参考文献

- 1) Brian G. Morgen and Yahya C. Kurama: A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete Moment Frames, PCI Journal, Vol. 49, No. 4, pp.112-133, Jul.-Aug. 2004
- 2) 真田靖士: PC建築を対象とするエネルギー吸収デバイスの近年の開発事例, コンクリート工学, Vol. 48, No. 3, pp. 35-40, 2010. 3
- 3) 杉浦弘樹, 佐島悠太, 真田靖士: 摩擦ダンパーを端部に装着したアンボンドPC梁の性能評価実験, 第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 107-112, 2011. 10
- 4) 新田剛士, 小嶋慶大, 佐島悠太, 真田靖士: プレストレストコンクリート造建物の耐震修復費用評価(その1) PCおよびRC梁の損傷計測実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2構造IV, pp. 809-810, 2010. 9
- 5) 小嶋慶大, 真田靖士: プレストレストコンクリート造建物の耐震修復費用評価(その2) 等価1自由度系を用いたPCおよびRC建物の修復費用評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2構造IV, pp. 811-812, 2010. 9
- 6) 佐島悠太, 杉浦弘樹, 真田靖士, 小嶋慶大: 摩擦ダンパーによるプレストレストコンクリート構造のエネルギー吸収能力の補填に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 523-528, 2010. 7
- 7) 佐島悠太, 真田靖士, 杉浦弘樹: プレストレストコンクリート構造のエネルギー吸収性能を向上する摩擦ダンパーの開発-基礎的な数値解析モデルの構築-, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 666, 1489-1497, 2011. 8
- 8) OpenSees Website: <http://opensees.berkeley.edu/>
- 9) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994. 5
- 10) 桑村仁, 竹田拓也, 佐藤義也: 地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 491, pp. 29-36, 1997. 1