

梁端ダンパーを有するアンボンド PCaPC 梁のエネルギー吸収性能評価

北海道大学大学院工学院 修士 (工学) ○松茂良 諒
 北海道大学大学院工学院 門脇 花子
 北海道大学大学院工学研究院助教 正会員 博士 (工学) 越川 武晃

Abstract: This study investigates the energy dissipation of unbonded post-tensioned precast concrete member with beam-end dampers by using section analysis model. The section analysis model used in this study is the numerical model to estimate the relation between bending moment and rotation at beam ends, and the energy dissipation by analytical study using this model compare well with the results of previous experiments. In order to propose the evaluation method for the energy dissipation of dampers, we carry out the analytical parametric study using the model and present the predictive equation for the energy dissipation. The results yielded using this equation evaluate accurately the results of the parametric study.

Key words : Precast, Unbonded tendons, Damper, Energy dissipation

1. はじめに

アンボンド PCaPC 構造は、プレキャストコンクリート造の柱・梁部材をアンボンドの PC 鋼棒を用いて圧着接合した構造形式である。本構造形式は、高い原点指向性を持ち、残留変形が少ないという特長を持つが、一方でエネルギー吸収性能が低いという問題点が指摘されている。その問題点を克服するため、圧着接合部における離間変形を利用した梁端ダンパーの開発^{1)~3)}が行われているが、ダンパーを付加した際のエネルギー吸収量についての定量的な評価手法は確立されていない。そこで、本研究ではアンボンド PCaPC 梁に対してダンパーを付加した際の効果について解析的な検討を行う。本論文では、まずはじめにアンボンド PCaPC 梁の断面解析法について述べ、梁端ダンパーを付加した際におけるその解析法の妥当性について実験結果との比較を通して検討する。次に、断面解析法によるパラメトリック解析を用いて、ダンパーを付加した際の効果について検討する。

2. ダンパーを付加したアンボンド PCaPC 梁の断面解析

2.1 断面解析法

アンボンド PCaPC 部材は、変形時に圧着接合面で目開きを生じるという構造的な特徴を持つ。本研究で用いる断面解析法は、この点に着目してモデル化したもの⁴⁾であり、圧着接合面における回転挙動を対象とする。

図-1 に断面解析モデルの概要を示す。本解析モデルは柱部材に PC 鋼材を貫通させて梁部材を圧着した片持ち部分架構の圧着接合面および梁端ダンパーを対象としており、梁端部の圧着接合面をコンクリート、PC 鋼材、ダンパーのそれぞれの断面要素で表現する。圧着接合面が平面を保持したまま移動する状態を仮定し、圧着接合面の変位を回

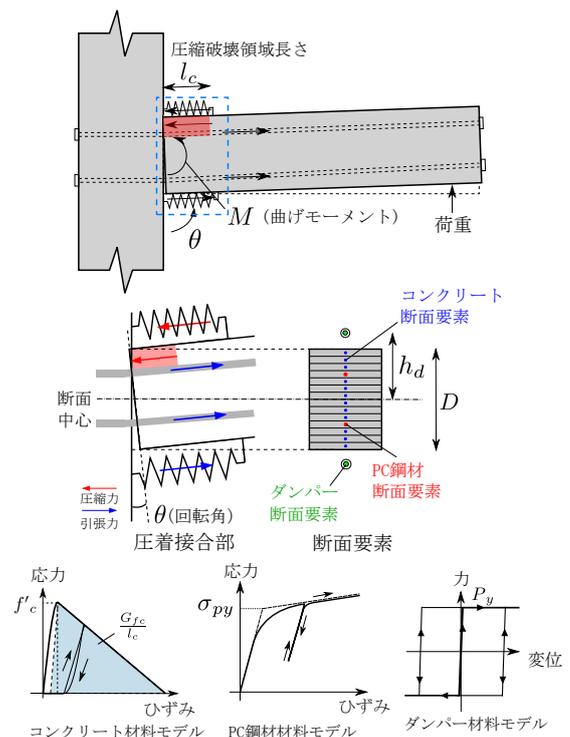


図-1 断面解析モデル

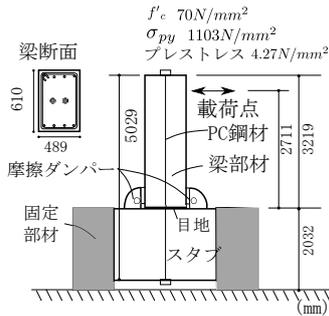


図-2 試験体概要

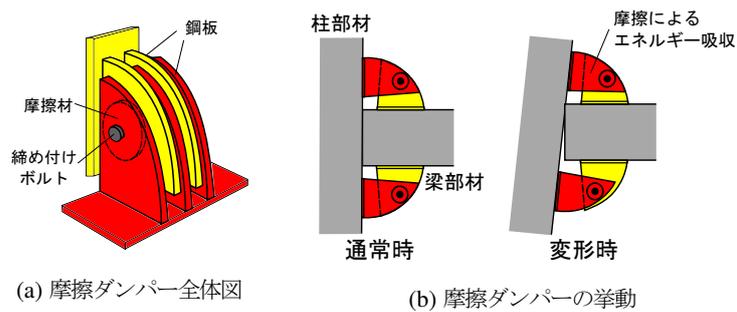


図-3 摩擦ダンパー

転角 θ による回転変位と軸変位の和として求め、各断面要素の位置におけるこの変位にプレストレス力導入時の変形量を加えたものを、それぞれコンクリート断面要素の変形量、PC 鋼材断面要素の伸び量およびダンパー断面要素の変形量として扱う。次に変形量からひずみを求め、材料モデルを通して応力および力を得た後、コンクリート断面の圧縮力、PC 鋼材断面の引張力、ダンパーの圧縮力および引張力による力の釣り合いがとれるまで軸変位を変化させて収束計算を行い、曲げモーメントを得るという手順で解析を行う。ひずみに関しては、コンクリート断面要素のひずみ ϵ_c は圧縮破壊領域長さ $l_c(mm)$ を設定し、この領域にコンクリートのひずみが等分布するものと仮定して、式(1)のように変形量 δ_c を l_c で除して求める。また、PC 鋼材断面要素のひずみ ϵ_{pc} はアンボンド状態であることを考慮して、式(2)のように伸び量 δ_{pc} を PC 鋼材の全長 l_{pc} で除して求める。

$$\epsilon_c = \delta_c / l_c \tag{1}$$

$$\epsilon_{pc} = \delta_{pc} / l_{pc} \tag{2}$$

コンクリートの材料特性は圧縮破壊エネルギー G_{fc} により圧縮軟化経路を決定し、離間変形を考慮して引張応力を生じないモデルとした。また PC 鋼材の材料特性は menegotto-pinto 式に基づいて履歴経路を決定するモデルとした。ダンパーの断面要素は、材料モデルにより変形量から直接力を求める。ダンパーは軸バネで表現し、材料モデルについては図-1 に示す通り、十分に大きな初期剛性を有するバイリニア型の経路を設定した。また変形時の部材角については、梁の曲げ変形による変位と梁端面の回転による変位を足し合わせることで荷重点での変位を求め、その変位を荷重点距離で除して求めた。

2.2 実験結果との比較

本解析モデルの適合性について検討を行うため、Morgen ら¹⁾ の行った摩擦ダンパーを付加した片持ち梁試験体の実験結果を対象に断面解析を行った。試験体は、図-2 に示すように、プレキャストの梁部材を PC 鋼材の緊張力によりスタブに圧着したもので、梁端部の上下端にスタブと梁をつなぐ形で摩擦ダンパーを設置し、離間変形時に摩擦ダンパーによるエネルギー吸収が行われるよう設計されたものである。図-3 に示すように摩擦ダンパーは柱と梁にそれぞれ取り付けられた鋼板とその間の摩擦材のずれによって生じる摩擦力を利用したダンパーであり、本論文ではダンパーのずれが生じる荷重を便宜上降伏荷重と呼ぶことにした。ダンパーの降伏荷重 P_y は摩擦材による摩擦力であるため、ダンパーの締め付け力 F_{ds} 、摩擦材の摩擦係数 μ 、摩擦材の枚数 n を用いて式(3)の形で求めることができる。摩擦ダンパーの摩擦材の枚数は4枚であり、摩擦係数 μ は Morgen らの摩擦ダンパー単体の荷重実験⁵⁾ から 0.209 が得られている。また上下端のダンパーで締め付け力を同一とし、0, 13(57.8), 26(115.6), 39(173.5), 52(231.3), 65(289.1)kips(kN) の6種類の締め付け力に対して検討を行っている。

$$P_y = n \cdot \mu \cdot F_{ds} \tag{3}$$

解析モデルでは梁端部のコンクリート断面を45分割し、ダンパーの位置については Morgen らの論文には明記されていないため、断面中心からダンパーの締め付けボルト位置までを $\pm 18inch(\pm 457mm)$ と仮定した。PC 鋼材の伸び量は、前述のように、圧着接合面の移動による変位とプレストレス力による伸び量の

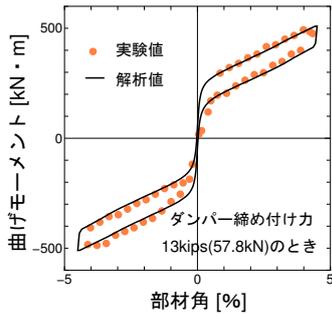


図-4 曲げモーメント-部材角関係の比較

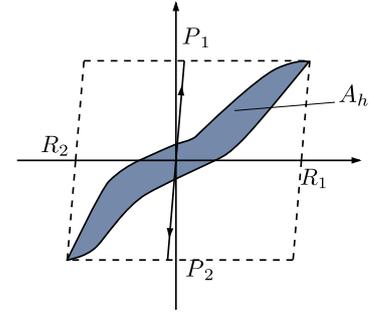
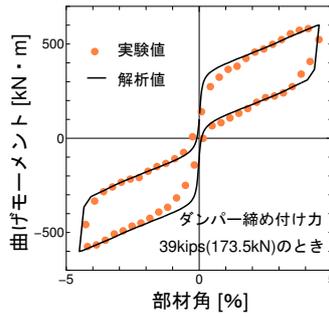


図-5 エネルギー吸収率 β 概要

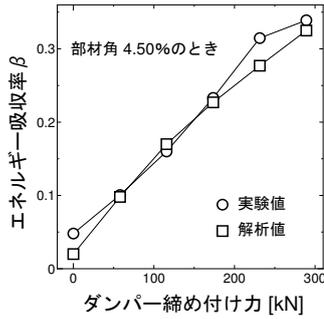


図-6 エネルギー吸収率 β の比較

表-1 解析に用いたダンパーに関するパラメータ

パラメータ名	水準
降伏荷重 P_y (kN)	30, 50, 100, 150, 200, 250, 300
位置 h_d (mm)	(断面中心から) 400, 500
配置	上下端設置, 下端のみ設置

和として求める。載荷サイクルについては、Morgen らの実験では、まず摩擦ダンパーに締め付け力 65kips (289.1kN) を与えた状態で、部材角で $\pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.25, \pm 0.35, \pm 0.5, \pm 0.75, \pm 1.0, \pm 1.4, \pm 1.75, \pm 2.2, \pm 2.75, \pm 3.5, \pm 4.50$ (%) を各 3 サイクルずつの載荷実験を行った後、この試験体を再利用して、締め付け力のみを変えた各 1 サイクルずつの載荷を締め付け力ごとに順次行っている。本解析ではこのような実験における被載荷状態を再現するため、65kips(289.1kN) を除いた各締め付け力の解析において、前述のサイクルを各 3 サイクルずつ繰り返す事前解析を行った後、続けて 1 サイクルずつ載荷する本解析を行った。また、本研究では材料モデルに用いる圧縮破壊エネルギー G_{fc} と圧縮破壊領域 l_c の値を決定するため予備解析を行った。ダンパーの降伏荷重が 0kips の実験結果を対象に G_{fc} と l_c の値を変化させて解析を行った結果、最大耐力点と履歴形状がもっとも実験結果と適合していた $G_{fc} = 160\text{N/mm}$, $l_c = 0.5D\text{mm}$ (ただし D は梁せい) を用いてダンパーに各締め付け力を与えた場合の解析を行うこととした。

図-4 に解析結果と実験結果の比較として、ダンパー締め付け力が 13kips(57.8kN), 39kips(115.6kN) の場合の最大部材角 4.5 % のサイクルにおける曲げモーメント-部材角関係を示す。図より、各締め付け力に対する解析結果の最大曲げモーメントおよび履歴形状は実験結果を良好に追跡できていることがわかる。

次に解析結果と実験結果のエネルギー吸収量について検討する。Morgen らの論文では ACI 基準 T1.1-01⁶⁾ によるエネルギー吸収率 β を用いて各試験体のエネルギー吸収量の比較を行っている。図-5 にその概念を示すように、エネルギー吸収率 β は当該履歴の最大部材角となる点の荷重とその点から初期剛性を用いて横軸に下した点の部材角を用いて当該履歴の面積を基準化した指標であり、次式で定義される。

$$\beta = \frac{A_h}{(P_1 + P_2)(R_1 + R_2)} \tag{4}$$

ただし、 A_h : 当該履歴の面積 [N], P_1, P_2 : 最大(最小)荷重 [N], R_1, R_2 : 当該履歴から正側(負側)の最大部材角と初期剛性により得られる部材角 [rad]

図-6 に部材角 4.50 % のサイクル時における 6 種類のダンパー締め付け力に対するエネルギー吸収率 β の比較を示す。この図より、ダンパーの締め付け力、つまり降伏荷重が増加すると部材のエネルギー吸収率もまた増加することがわかる。また解析値は実験値とおおよそ等しくなり、本解析モデルが実験の履歴形状およびエネルギー吸収性能を捉えていることが確認できる。

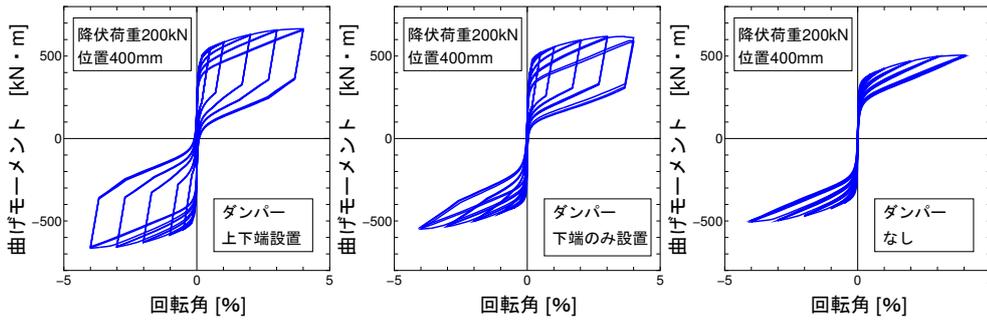


図-7 曲げモーメント-回転角関係

図-8 ダンパーなしの解析結果

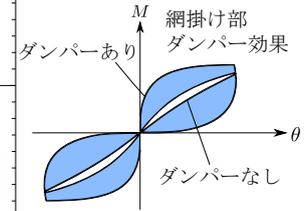


図-9 ダンパー効果の定義

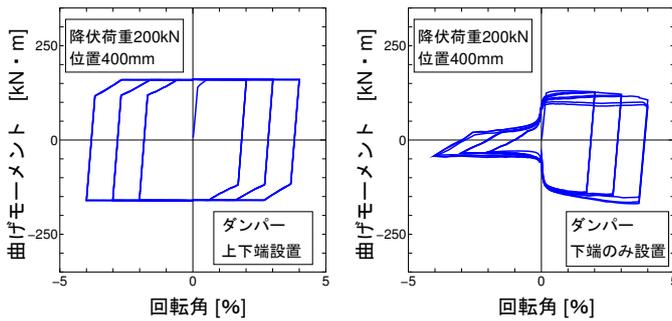
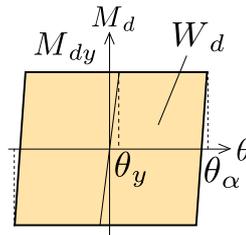
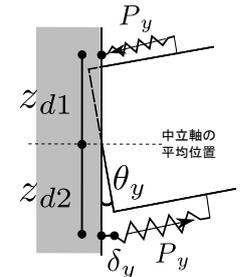


図-10 ダンパー効果の履歴



(a) 等価ダンパー効果



(b) 等価曲げモーメント

図-11 算定値の概念

3. パラメトリック解析

3.1 パラメータの設定

断面解析法を用いたパラメトリック解析により、試験体サイズのアンボンドPCaPC梁に梁端ダンパーを設置した際のエネルギー吸収量について検討を行う。表-1に本解析で用いたパラメータとその値を示す。パラメータはエネルギー吸収量に影響を与えると考えられるダンパーの降伏荷重、ダンパーの位置、およびダンパーの配置の3種類とした。ダンパーの降伏荷重および位置についてはMorgenらおよび既往の実験^{1)~3),7)}を参考に、降伏荷重は最小値を30kNとし、50kNから300kNまでの50刻みの値を、位置は梁の断面中心から400mmおよび500mmの距離を設定した。配置については、梁の上下に対称配置する場合と、下端のみに配置する場合³⁾の検討を行った。また解析対象の梁部材には、前述したMorgenらの試験体と同様の試験体を設定し、圧縮破壊エネルギー $G_{fc}=160\text{N/mm}$ および圧縮破壊領域長さ $l_c=0.5D\text{mm}$ の値として、载荷サイクルはMorgenら¹⁾および矢野ら²⁾を参考に回転角で $\pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.5, \pm 1.0, \pm 2.0, \pm 3.0, \pm 4.0$ (%)を、各3サイクルずつ行った。

3.2 エネルギー吸収量に関する考察

図-7にダンパーを設置した場合の、図-8にダンパーなしの場合の梁端部における曲げモーメント-回転角関係の解析結果を示す。各図を比較すると、ダンパー上下端設置、下端のみ設置のどちらの場合においてもダンパーなしの場合と比べて履歴面積が大きくなり、ダンパーの付加によりエネルギー吸収量が増加していることがわかる。また、ダンパーを下端のみに設置した際には正側と負側で履歴形状に差が出るのがわかる。これらの履歴からダンパーによる効果のみを取り出すために、本研究では図-9に示すように、ダンパーを設置した場合の履歴から設置しない場合の履歴を差し引いたものをダンパー効果と定義した。図-10に図-7の場合における最大部材角が2%から4%の時のダンパー効果を示す。図より、ダンパーを上下端に設置した場合のダンパー効果は、おおそ弾塑性型の履歴になるのに対し、ダンパー下端のみ設置の場合には、正側と負側で履歴形状に大きな違いが出ていることがわかる。

本研究では、ダンパー効果の1サイクルあたりの履歴面積をダンパーによる付加エネルギー吸収量とし、これを解析結果から求めるとともに、より簡便に求めるために算定式による評価を検討した。図-11に算

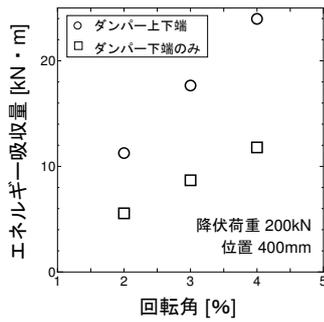


図-12 エネルギー吸収量

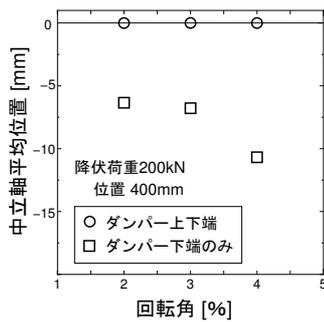
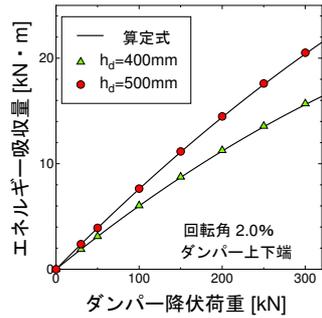
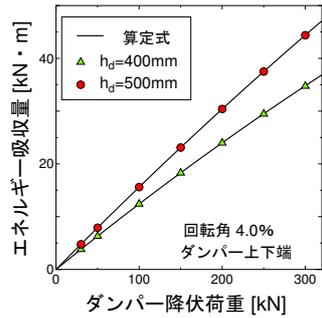
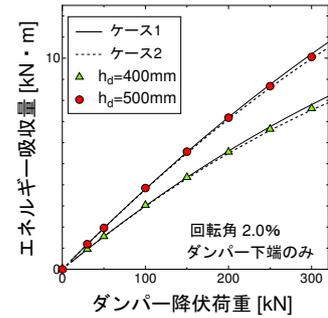


図-13 中立軸平均位置



(a) 回転角 2%



(b) 回転角 4%

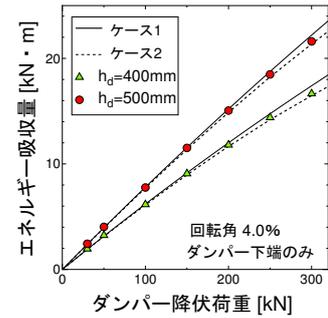


図-14 ダンパー効果の履歴面積と算定値の比較

定式概念を示す。本式は図-11(a)に示すようにダンパーによる等価曲げモーメント M_{dy} と等価回転角 θ_y 、当該サイクルの最大回転角 θ_α を用いてダンパーによる付加エネルギー吸収量 W_d [N・mm] を求めるものである。等価曲げモーメント M_{dy} を図-11(b)に示すように中立軸位置が当該サイクルの中立軸の平均位置にあるとした時のダンパーによるモーメントと定義し、ダンパーの降伏荷重を用いて式(5)のように表す。

$$M_{dy} = \sum_{i=1}^n P_y \cdot z_{di} \tag{5}$$

ただし、 n : ダンパー設置数、 z_{di} : 中立軸平均位置からの各ダンパーの位置 [mm]

また等価回転角 θ_y は、ダンパーの降伏変位 δ_y [mm] および中立軸平均位置を用いて表した等価曲げモーメント M_{dy} 時の回転角であり、ダンパーの初期剛性を E_0 [N/mm] と置くことにより式(6)のように表す。

$$\theta_y = \delta_y / z_{di} = P_y / (E_0 \cdot z_{di}) \tag{6}$$

これら等価曲げモーメント M_{dy} 、等価回転角 θ_y および θ_α を用いて図-11(a)の W_{dy} を表すと、式(7)が得られる。

$$W_d = 4(\theta_\alpha - \theta_y)M_{dy} = 4\left(\theta_\alpha - \frac{P_y}{E_0 \cdot z_{di}}\right) \sum_{i=1}^n P_y z_{di} \tag{7}$$

図-12に断面解析結果の一例として、ダンパー降伏荷重 200kN、ダンパー位置 400mm のダンパーを上下端に設置した場合および下端のみに設置した場合の付加エネルギー吸収量の比較を示す。ダンパーを下端のみに設置した場合の付加エネルギー吸収量はダンパーを上下端に設置した場合にくらべて 1/2 程度の値を示しており、付加エネルギー吸収量は履歴形状によらず、おおむねダンパーの設置数に比例していることがわかる。また、これらの解析結果における各回転角ごとの中立軸平均位置を図-13に示す。図からダンパーが上下端にあるときの梁の中立軸平均位置はほぼ断面中心に位置しており、またダンパーを下端のみに設置した際には、中立軸平均位置はやや下端側に位置していることがわかる。図-14に本式による算定値と解析によるダンパー効果の履歴面積の比較、(a) 回転角 2% の場合と (b) 回転角 4% の場合を示す。ここで、算定式における z_{di} の値については、ダンパーを上下端に設置した場合については上記の結果から断面中心から各摩擦ダンパーまでの距離とした。また下端のみに設置した場合は、上下端に設置した場合と同様の断面

中心から摩擦ダンパーまでの距離とした場合（ケース1）と、図-13の結果から、摩擦ダンパーの位置から中立軸平均位置を差し引いた値とした場合（ケース2）の二つを示している。ダンパー上下端設置の場合には、(a)(b) どちらにおいてもダンパーの降伏荷重、位置に関わらず算定値とダンパー効果の履歴面積がほぼ同一の値を示している。ダンパーを下端のみに設置した場合については、履歴形状は算定式における仮定と解析結果で大きく異なるものの、ケース1の算定結果はエネルギー吸収量を若干大きめに評価するがおおむねその傾向を捉えており、ケース2の算定結果は良好にエネルギー吸収量を評価できている。このことから算定式を用いることでダンパーを上下端に設置した場合および下端のみに設置した場合のどちらのエネルギー吸収量でもおおむね評価することができ、またダンパーを下端のみに設置した場合は中立軸の平均位置を考慮することでより良好にエネルギー吸収量を評価できることがわかる。

4. まとめ

本論文では、アンボンド PCaPC 梁に梁端ダンパーを付加した際のエネルギー吸収性能について断面解析法を用いて検討を行い、以下の結論を得た。

1) 摩擦ダンパーを対象とした Morgen らの実験結果を対象に断面解析を行った結果、本解析法により各締め付け力ごとの履歴形状および部材のエネルギー吸収率 β を比較的良好に表現できることを確認した。

2) ダンパーによるエネルギー吸収量について検討するため、断面解析モデルを用いてダンパーの降伏荷重、ダンパーの位置、配置をパラメータとした試験体サイズのパラメトリック解析を行った。この結果、上下端設置の場合にはほぼ弾塑性型のダンパー効果が、下端のみ設置の場合には正側と負側で形状が大きく違うダンパー効果が得られることを示した。

3) ダンパーによる1サイクルあたりの付加エネルギー吸収量を評価するため、ダンパー諸元を用いた算定式を提案した。またその算定式を用いてパラメトリック解析結果との比較を行い、ダンパーを梁上下端に設置した場合は良好にエネルギー吸収量を算定することができることを示した。また下端のみに設置した場合は、算定式に緒元のみを用いた場合はおおむねエネルギー吸収量の傾向を捉えることができ、また中立軸平均位置を考慮することにより良好にエネルギー吸収量を表現できることを示した。

謝辞

本研究の一部は、科研費(若手研究(B)・23760514・越川武晃)によりました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Morgen, B. G., and Kurama, Y. C. : A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete Moment Frames, PCI JOURNAL, pp.112-133, July-August 2004
- 2) 矢野貴大, 越川武晃, 溝口光男, 山下仁, 上田正生 : ダンパーを付加したアンボンド PCaPC 柱・梁圧着接合構造の構造性能に関する研究, 日本建築学会技術報告集 Vol.16, No.32, 145-150, Feb.2010
- 3) 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 第76巻 第666号, pp.1489-1497, 2011.8
- 4) 松茂良諒, 越川武晃, 山下仁 : 断面解析を用いたアンボンド PCaPC 圧着接合部材の耐力評価に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会 第20回シンポジウム論文集, pp.103-106, 2011.10
- 5) Morgen, B. G., and Kurama, Y. C. : Characterization of Two Friction interfaces for Use in Sismic Damper Applications, Materials and Structures, Vol.42, No.1, pp.35-49, 2009
- 6) ACI Innovation Task Group 1 : Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing(ACI T1.1-01) and Commentary(ACI T1.1R-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2001
- 7) 巽英明, 中塚侑, 浅川弘一, 寒川勝彦, 溝口茂 : アンボンド PC 鋼材圧着工法と剥離性目地によるサステブル PC 建築についての基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp141-144, 2006.9