

論文 梁端ダンパーを付加したアンボンドPCaPC梁の非対称曲げ挙動解析

門脇 花子 *1・越川 武晃 *2

要旨: 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検討するため、この種の梁が逆対称曲げに近い非対称曲げを受ける場合の変形挙動を対象とした断面解析に基づく解析法を提案した。本研究では梁端ダンパーの配置による影響を見るために、配置を変化させたパラメトリックスタディにより梁端部の圧着面や梁全体における履歴挙動およびエネルギー吸収性能について検討を行った。その結果、各ダンパーの降伏曲げモーメントの和を等しくした上で配置を変化させると、エネルギー吸収性能の違いはほぼ見られないものの、特に圧着面の残留変形の大きさには顕著な影響が表れることを明らかにした。

キーワード: アンボンド, プレストレストコンクリート, 断面解析, 梁端ダンパー, 非対称曲げ

1. はじめに

近年、アンボンドPC鋼材を用いたプレキャスト・プレストレストコンクリート（以下、アンボンドPCaPC）構造における低いエネルギー吸収性能を、エネルギー吸収デバイスを付加することによって改善する試みがいくつか提案されている^{1)~3)}。これらが想定しているエネルギー吸収デバイスは、この種の構造に特徴的な圧着接合部での変形挙動を利用するダンパーであり、主として柱と梁端部をつなぐように梁の上端や下端にダンパー（以下、梁端ダンパー）を設置することで、圧着面に生じる目開きによってそれを変形させ、その履歴特性によるエネルギー吸収機構を意図したものである。

既往の研究ではこれまでに、梁端ダンパーによるエネルギー吸収性能に関して載荷実験などを用いた種々の検討がなされてきたが、多くの場合、アンボンドPCaPC骨組への水平力作用時に梁が逆対称曲げを受ける状態を前提にして、片持ち形式の梁がその対象となっている。しかし実際には、梁に作用する応力状態が必ずしも完全な逆対称曲げになるわけではなく、ある一つの梁の両端で梁端ダンパーの設置状況が異なっている場合などは、逆対称曲げに近い非対称曲げの状態となる。梁端ダンパーの挙動は梁圧着面の目開き挙動に依拠しており、梁の曲げ挙動は梁端ダンパーによるエネルギー吸収性能に直接関係する。したがって、その効果を適切に評価するため

には、この種の梁の非対称曲げ挙動時における検討が必要となる。

本研究では、上記のような梁端ダンパーを付加したアンボンドPCaPC梁の非対称曲げ挙動を対象として、梁両端の圧着面における断面解析に基づく変形挙動解析法を提案する。さらに、梁端ダンパーの配置を変化させたパラメトリックスタディを行うことにより、梁端部の圧着面や梁全体における履歴挙動およびエネルギー吸収性能について検討を行う。

2. 梁端ダンパーの配置に起因したアンボンドPCaPC梁の非対称曲げ挙動

図-1にアンボンドPCaPC圧着接合の骨組に梁端ダンパーを付加した軸組図の例を示す。前述したとおり、ここで対象とするダンパーは、荷重作用時に圧着接合部に生じる目開きを利用するものであり、鋼材ダンパーや摩擦ダンパーを想定している。梁端ダンパーの圧着接合部への設置方法や骨組内の配置については、目標とするエネルギー吸収性能や種々の制約条件などとの兼ね合いで様々なパターンが考えられるが、梁単体に着目した場合には、図中に示すような4種類の配置方法が想定できる。

本研究においては、このような配置の梁端ダンパーを有する1つの梁が、逆対称曲げに近い非対称曲げを受ける場合の変形挙動について考える。すなわち、図-2にその一例を示すように、梁端ダンパーの配置によって、梁両端の圧着面における断面性能に差が生じるような場合がこれに該当する。この時の梁の変形状態や応力状態に特徴的な点は、それぞれの圧着面における曲げモーメントや目開き量が異なる値を取ることで、これに伴って梁の反曲点が中央ではなく片側に寄った所に位置し、その時々の変形・応力状態に応じてこの位置は変動することの2点である。

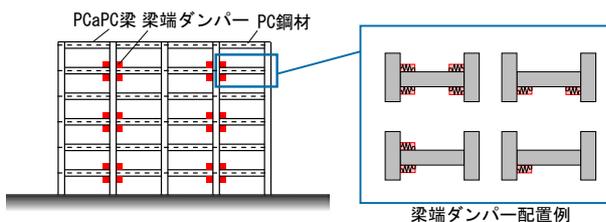


図-1 梁端ダンパーを付加した軸組例

*1 北海道大学大学院工学院 建築都市空間デザイン専攻 大学院生 (学生会員)

*2 北海道大学大学院工学研究院 建築都市空間デザイン部門 助教 博士 (工学) (正会員)

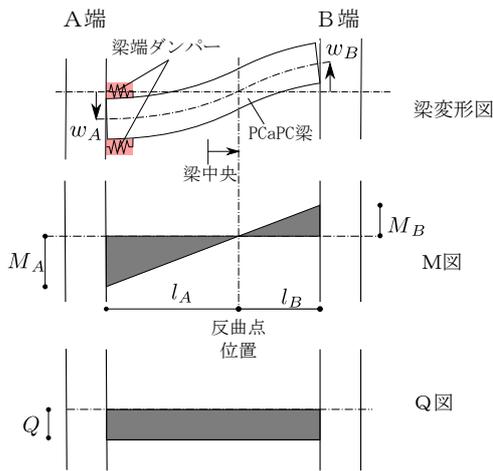


図-2 梁の変形および応力状態

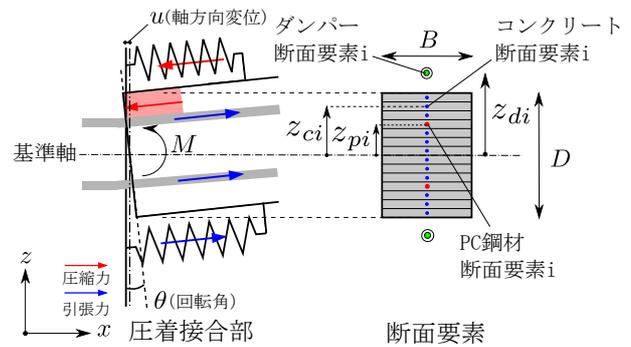


図-3 断面解析モデル

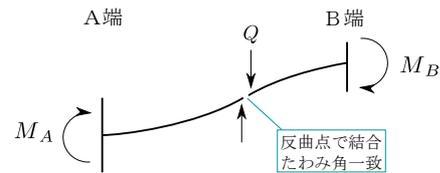


図-4 片持ち梁結合モデルの概要

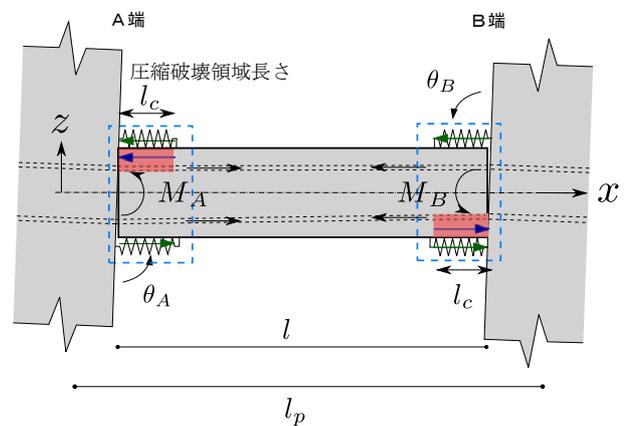


図-5 非対称曲げ挙動解析モデル

3. アンボンド PCaPC 梁の非対称曲げ挙動解析法

梁端ダンパーを付加したアンボンド PCaPC 梁の非対称曲げ挙動を解析するためには、梁両端の圧着面における力学挙動と梁部材全体の变形挙動の2者について、その関連性を考慮した適切な評価を行う必要がある。本研究では、このうちの前者については著者らの既提案の「アンボンド PCaPC 梁の断面解析モデル⁴⁾」の手法を用い、また後者についてはいわゆる「片持ち梁結合モデル⁵⁾」の概念に基づいた新たな解析法を提案する。すなわち本解析法は、断面解析によって得られる梁両端の曲げモーメントと、そこから求められる梁の反曲点位置での変形の連続性を考慮して、これらの関係を満足するように収束計算を行う非線形挙動解析法である。なお、ここでは簡単のため、梁の自重等による影響は考慮せず、外力によって曲げモーメントが梁内を線形に分布する応力状態をその対象とする。

3.1 断面解析

本解析法における断面解析の扱いに先立って、まず片持ち梁を対象とした既提案の断面解析モデル⁴⁾の要点について概説する。図-3にその概要を示す。このモデルは、圧着面をコンクリート、PC鋼材、ダンパーのそれぞれの断面要素で表現し、圧着面の目開き挙動に対する各断面要素の変形量 δ を次式で求めることを基本とする。

$$\delta = u - z\theta \quad (1)$$

ここで、 u : 軸方向変位、 z : 基準軸から当該断面要素までの距離、 θ : 回転角

そして、各断面要素の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のち、コンクリートの圧縮力、PC鋼材の引張力、ダンパーの圧縮力および引張力による力の釣り合いが取れるまで軸方向変位 u を変化させて収束計算を行い、釣り合い状態での曲げモーメントを得るという手順で解析を行うものである。非線形解析は増分法に基づいて、変形量から曲げモーメント

を求めるまでを1ステップとし、ステップ終了後に回転角に増分を与えて次ステップの計算を行っている。

3.2 非対称曲げ挙動解析

前節で述べたアンボンド PCaPC 梁の断面解析モデルを拡張し、さらに片持ち梁結合モデルの概念に基づく解析法を展開する。片持ち梁結合モデルは図-4に示すように、1つの梁を2つの片持ち梁に分割して扱い、梁の反曲点位置でたわみ角が一致するという条件のもと結合する部材モデルである。ここでは拡張した断面解析モデルと、反曲点位置での計算方法について述べるものとする。

図-5に非対称曲げを受けるアンボンド PCaPC 梁の解析モデルを示す。梁両端にある2つの圧着面が断面解析の対象である。梁を通るPC鋼材は完全なアンボンドの状態で緊張されているものとし、PC鋼材長さは柱の心心の距離として l_p で表し、梁長さは l で表す。また、梁の両端をそれぞれA端、B端と呼ぶこととし、それらの圧着面における曲げモーメントを図に示すように M_A 、 M_B とし、それぞれの回転角および軸方向変位を θ_A 、 θ_B および u_A 、 u_B とする。なお、以下ではこれらと同様に

A端側とB端側で区別が必要な記号には、それぞれ下付きのA, Bを添えて表す。

断面解析における各断面要素の変形量は、先の式(1)と同様の考え方で求められる。すなわちコンクリート断面要素*i*の変形量 δ_{cAi} , δ_{cBi} およびダンパー断面要素*i*の変形量 δ_{dAi} , δ_{dBi} についてはそれぞれ式(2), (3)で表す。

$$\delta_{cAi} = u_A - z_{cAi} \theta_A, \quad \delta_{cBi} = -(u_B - z_{cBi} \theta_B) \quad (2)$$

$$\delta_{dAi} = u_A - z_{dAi} \theta_A, \quad \delta_{dBi} = -(u_B - z_{dBi} \theta_B) \quad (3)$$

ここで、 z_{cAi} , z_{cBi} : A端およびB端の基準軸からコンクリート断面要素*i*までの距離, z_{dAi} , z_{dBi} : A端およびB端の基準軸からダンパー断面要素*i*までの距離
PC鋼材の変形量については、PC鋼材は梁全体で連続しておりアンボンド状態であることから、次式のようにA端とB端の圧着面における目開きによる変形量の重ね合わせで表現する。

$$\delta_{pi} = (u_A - z_{pi} \theta_A) - (u_B - z_{pi} \theta_B) \quad (4)$$

ここで、 z_{pi} : 基準軸からPC鋼材断面要素*i*までの距離
ひずみに関しては、コンクリート断面要素*i*のひずみ ϵ_{cAi} , ϵ_{cBi} は両端部で同様の圧縮破壊領域長さ l_c 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(5)のようにコンクリート断面要素*i*の変形量 δ_{cAi} および δ_{cBi} を l_c で除して求める。また、PC鋼材断面要素*i*のひずみ ϵ_{pi} はアンボンド状態であることを考慮して、式(6)のように変形量 δ_{pi} をPC鋼材の全長 l_p で除して求める。

$$\epsilon_{cAi} = \frac{\delta_{cAi}}{l_c} + \epsilon_{c0i}, \quad \epsilon_{cBi} = \frac{\delta_{cBi}}{l_c} + \epsilon_{c0i} \quad (5)$$

$$\epsilon_{pi} = \frac{\delta_{pi}}{l_p} + \epsilon_{p0i} \quad (6)$$

ここで、 ϵ_{c0i} , ϵ_{p0i} : プレストレスによりコンクリートおよびPC鋼材断面要素*i*に生じるひずみ

各断面要素の応力および軸力は、ひずみもしくは変形量からそれぞれの材料特性を通して求める。この結果から、両圧着面における軸力 N_A , N_B および曲げモーメント M_A , M_B がそれぞれ次式で得ることができる。

$$N_A = \sum a_{cAi} \sigma_{cAi} + \sum a_{pAi} \sigma_{pAi} + \sum P_{dAi}$$

$$N_B = \sum a_{cBi} \sigma_{cBi} + \sum a_{pBi} \sigma_{pBi} + \sum P_{dBi} \quad (7)$$

$$M_A = -(\sum a_{cAi} \sigma_{cAi} z_{cAi} + \sum a_{pi} \sigma_{pi} z_{pAi}) + \sum P_{dAi} z_{dAi}$$

$$M_B = \sum a_{cBi} \sigma_{cBi} z_{cBi} + \sum a_{pi} \sigma_{pi} z_{pBi} + \sum P_{dBi} z_{dBi} \quad (8)$$

ここで、 a_{cAi} , a_{cBi} : A端およびB端のコンクリート断面要素*i*の断面積, a_{pi} : PC鋼材断面要素*i*の断面積, σ_{cAi} , σ_{cBi} : A端およびB端のコンクリート断面要素*i*に生じ

る応力, σ_{pi} : PC鋼材断面要素*i*に生じる応力, P_{dAi} , P_{dBi} : A端およびB端のダンパー断面要素*i*に生じる力

以上の断面解析によって求められた圧着面の曲げモーメントを用いて反曲点位置を求める。本解析では、外力によって曲げモーメントが梁内を線形に分布する応力状態を対象としていることから、A端およびB端の圧着部から反曲点までの距離 l_A , l_B は式(9)で表せる。

$$l_A = \frac{M_A}{M_A + M_B} l, \quad l_B = \frac{M_B}{M_A + M_B} l \quad (9)$$

A端側およびB端側から見たときの反曲点におけるたわみ角は、梁端における回転角と梁の曲げ変形によるたわみ角の和として、断面解析より得られた曲げモーメントを用いて式(10), (11)と表せる。梁が連続する場合、二つの片持ち梁の反曲点におけるたわみ角が一致するという条件が成立する。また、 θ_{IA} と θ_{IB} の差を θ_I とすると、これは式(12)のようになる。

$$\theta_{IA} = \theta_A + \frac{M_A l_A}{2EI} \quad (10)$$

$$\theta_{IB} = \theta_B + \frac{M_B l_B}{2EI} \quad (11)$$

$$\theta_I = \theta_A - \theta_B + \frac{l}{2EI} (M_A - M_B) \quad (12)$$

3.3 解析手順と収束計算法

解析での各ステップにおける計算手順は、まずA端側の回転角 θ_A にのみ増分を与えA端B端それぞれに断面解析を行い、圧着面での軸力を求め、曲げモーメントから反曲点位置および式(12)の θ_I を求める。収束条件は、両圧着面における軸力 N_A , N_B および θ_I が0となることである。条件を満たさなかった場合には、それぞれの釣り合わない分 ΔN_A , ΔN_B , $\Delta \theta_I$ から次式を用いてこれらに相当する軸変位増分 Δu_A , Δu_B およびB端側の回転角増分 $\Delta \theta_B$ を求める。

$$\begin{bmatrix} \Delta u_A \\ \Delta u_B \\ \Delta \theta_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta N_A \\ -\Delta N_B \\ -\Delta \theta_I \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、 k_{11} から k_{33} は、これまで示してきた式(2)~(12)の関係から弾性の条件下で展開して得られる係数である。得られた Δu_A , Δu_B , $\Delta \theta_B$ を増分として与え、再び断面解析および軸力、曲げモーメント、たわみ角の計算と判定を行い、収束条件を満たした時点でそのステップを終了し、次のステップへと進むものとする。

3.4 梁部材のせん断力と部材角

梁に生じるせん断力は、両圧着面に生じる曲げモーメント M_A , M_B の和を梁長さ l で除したものとして式(14)で求められる。また、変形時の部材角 R は、A端側およびB端側から見たときの反曲点におけるたわみ w_A , w_B

から、式 (15) で求められる。

$$Q = \frac{M_A + M_B}{l} \quad (14)$$

$$R = \frac{-w_A + w_B}{l} \quad (15)$$

3.5 材料モデル

解析に用いた材料特性を、図-6 に示す。コンクリートについては、原点から圧縮強度 f'_c に至るまでは放物線上の経路、圧縮強度以降は直線軟化経路とし、破壊力学の概念に基づいて図中の色塗り部分の面積を圧縮破壊エネルギー G_{fc} と圧縮破壊領域長さ l_c によって決定する。 G_{fc} はコンクリートの圧縮強度以降の塑性変形と圧縮強度の関係から表される。除荷・再載荷時の履歴経路についてはコモンポイントを通る除荷・再載荷経路上を移動し、軟化経路に戻る。また梁部材は圧着面において目開きが生じるため引張時の応力を考慮しないものとした。

PC鋼材の材料特性については menegotto-pinto 式に基づいた包絡線および履歴経路を持つモデルを設定した。

ダンパーの材料特性については、非常に剛性の高い弾塑性型のバイリニアモデルとしており、具体的には摩擦ダンパーを想定している。

4. アンボンド PCaPC 梁の非対称曲げ挙動の検討

梁端ダンパーの配置による影響を見るため、ここでは、配置を変化させたパラメトリックスタディにより梁端部の圧着面や梁全体における履歴挙動およびエネルギー吸収性能について検討を行う。解析対象については、梁端ダンパーを付加したこの種の梁の非対称曲げ状態を想定した実験結果が著者らの知る限り見当たらないため、既往のアンボンド PCaPC 片持ち梁載荷実験⁶⁾ の諸元を参考に仮想試験体を設定して解析を行った。

4.1 解析対象

解析対象のアンボンド PCaPC 梁およびその断面を図-7 に示す。梁の断面は梁せいを 450mm、梁幅を 300mm とし、梁の長さ l は 2700mm、PC鋼材長さ l_p は柱の中心の距離から 3150mm と設定した。その他の解析対象の梁に関する諸元は表-1 に示す通りである。荷重サイクルは正負交番荷重とし、部材角で $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ を各 2 サイクルとした。 G_{fc} は既報告の検討結果⁷⁾ を参考にコンクリートの終局塑性変形を 5mm とし、これと f'_c の関係から 140.25N/mm と定めた。 l_c は梁せいの半分の 225mm とした。

4.2 解析ケース

解析ケースの一覧を図-8 に示す。梁端ダンパーを両圧着面上下に設置したものを case1、両圧着面下端のみに設置したものを case2、A 端側圧着面上下に設置したものを case3、A 端側圧着面下端のみに設置したものを

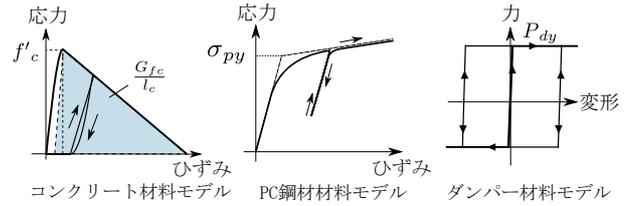


図-6 材料モデル

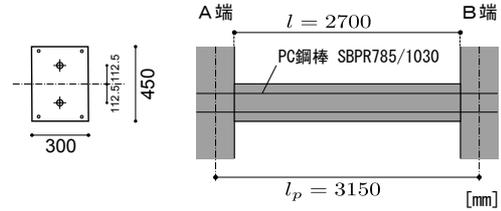


図-7 解析対象

表-1 解析対象諸元

諸元名	値
梁せい (mm)	450
梁幅 (mm)	300
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	56.1
PC鋼材降伏強度 (N/mm ²)	1093
PC鋼材ヤング係数 (N/mm ²)	195000
PC鋼材全断面積 (mm ²)	831
プレストレス力 (kN)	540

case4 とする。ダンパー降伏荷重 P_{dy} の設定に当たっては、梁端ダンパーを付加したことによって生じる可能性がある残留変形との兼ね合いを考慮する必要がある。そこで本研究では、アンボンド PCaPC 梁に梁端ダンパーを付加した際の履歴挙動を模式的に示した図-9 に基づいて設定を行う。図の (a) はアンボンド PCaPC 梁の履歴挙動を、(b) は梁端ダンパーの履歴挙動を示す。梁端ダンパーを付加したアンボンド PCaPC 梁は (a) と (b) を足し合わせた (c) のような履歴挙動を示し、これによりエネルギー吸収性能を有し、かつ残留変形を残さない特性を得ることができる。履歴挙動がこの模式図通りであった場合、アンボンド PCaPC 梁の降伏曲げモーメント M_{py} がダンパーの降伏曲げモーメント M_{dy} 以上であれば残留変形は残らないことになる。しかしながら、実際の履歴挙動に対しては $M_{py} > M_{dy}$ となる場合でも残留変形が残る可能性も考えられる。そのため、本研究では始めに梁端ダンパーを付加しない場合の case0 の解析を行い、その解析結果に基づき M_{dy} を設定した。case0 の解析により得られた曲げモーメント一回転角関係を図-10 に示す。これより上記の考えに基づき、本解析においてはダンパー降伏曲げモーメント M_{dy} を両圧着面合わせて 60kNm と設定した。ダンパーの設置個数が異なるケースについては、各

ダンパーの降伏曲げモーメントの和が梁全体で等しくなるよう降伏曲げモーメントを割り振った。それぞれの解析ケースにおけるダンパーひとつあたりの降伏曲げモーメント \overline{M}_{dy} は図-8 に示す通りとなる。ダンパーの降伏荷重 P_{dy} は、ダンパー降伏曲げモーメント M_{dy} 、断面中央からの距離 z_d 、個数から式(16)に従い求めた。ダンパーの梁に対する位置 z_d は、梁断面中央から梁せい方向に上下 300mm の位置とした。

$$M_{dy} = P_{dy} \times z_d \times \text{ダンパー個数} \quad (16)$$

4.3 圧着面の履歴挙動による比較

解析より求められた両圧着面での曲げモーメント-回転角関係を図-11 に示す。case1 の場合には、A端側とB端側の履歴は同じ挙動を示しており、残留変形は残らない。一方、case2~4 の場合を見ると、A端側とB端側の挙動はそれぞれに違った履歴を示しており、除荷時にはいずれかの圧着面で残留変形が生じていることがわかる。また、梁端ダンパーを付加した圧着面において梁端ダンパーが引張側となった場合の除荷時に残留変形が残ること、引張側に位置するダンパーの降伏曲げモーメントが大きいくほど残留変形も大きくなることが見取れる。

図-12 に参考として、曲げモーメントより求められる反曲点位置の変動を示す。case1 の場合には、反曲点位置はほぼ中央に位置しているのに対し、case2~4 においては反曲点位置は大きく変動している。反曲点位置の変動の大きさは、A端側とB端側の圧着面の曲げモーメントの差に応じた値となっており、本解析法が反曲点位置の動きを捉えていることが確認できる。

4.4 梁全体の履歴挙動と等価粘性減衰定数による比較

図-13 に解析より得られたせん断力-部材角関係を示す。梁全体の挙動に関しては case1~3 には大きな違いがみられない。ただし、case4 ではダンパーが引張側の場合に大きく履歴が膨らんでおり、エネルギー吸収性能および最大耐力に偏りが見られることがわかる。また、残留変形については部材全体で見ただけではどのケースにおいてもさほどの違いが見られていない。しかしながら、梁圧着面においては前述の通り残留変形が生じていることを考えると、梁の挙動を知るには梁全体だけではなく圧着面の挙動も把握する必要があることがわかる。

これらの履歴から得られた等価粘性減衰定数 heq を図-14 に示す。 heq の値は梁端ダンパーの配置によらず case4 も含めほぼ同等であることがわかる。このことは、本研究で行ったように、各ダンパーの降伏曲げモーメントの和が梁全体で同じになるようダンパーの降伏曲げモーメントを振り分けることで、梁全体としては梁端ダンパーの配置によらず同様のエネルギー吸収性能を得られることを意味している。

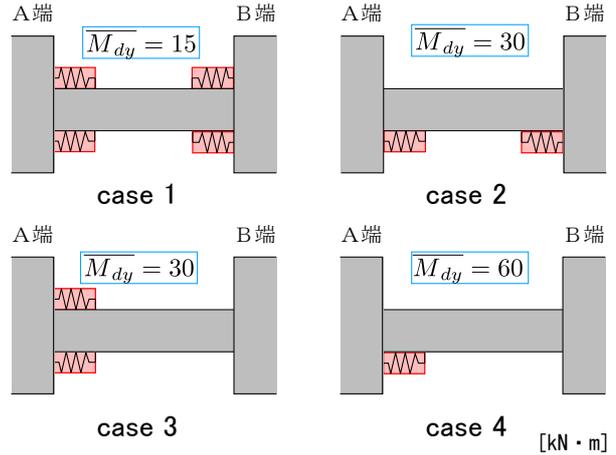


図-8 解析ケース

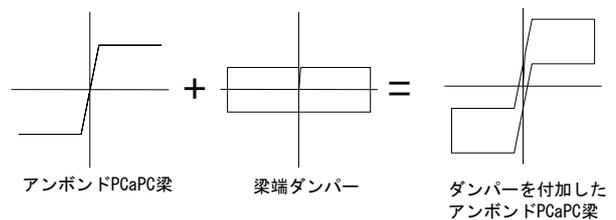


図-9 ダンパーによるエネルギー吸収概念図

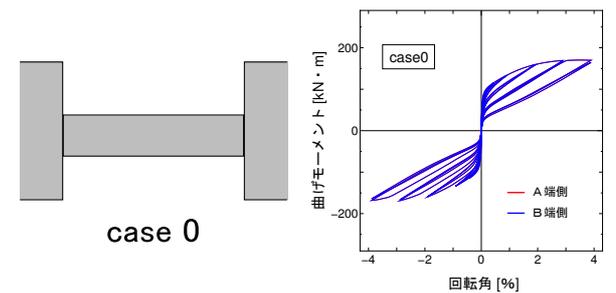


図-10 圧着面における曲げモーメント-回転角関係 (ダンパーなしの場合)

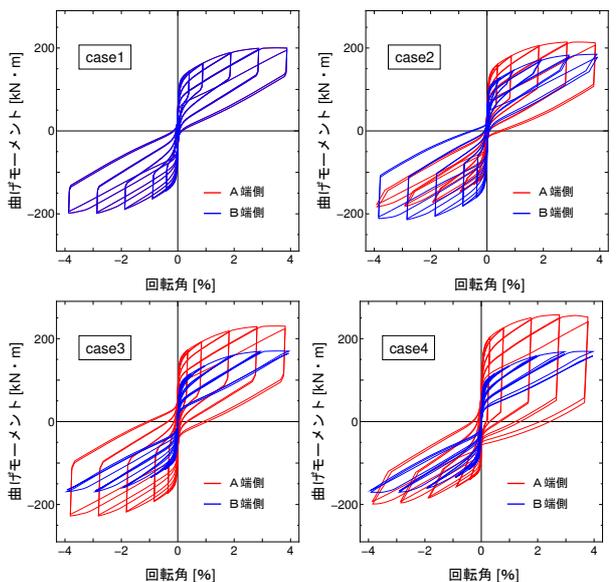


図-11 圧着面における曲げモーメント-回転角関係

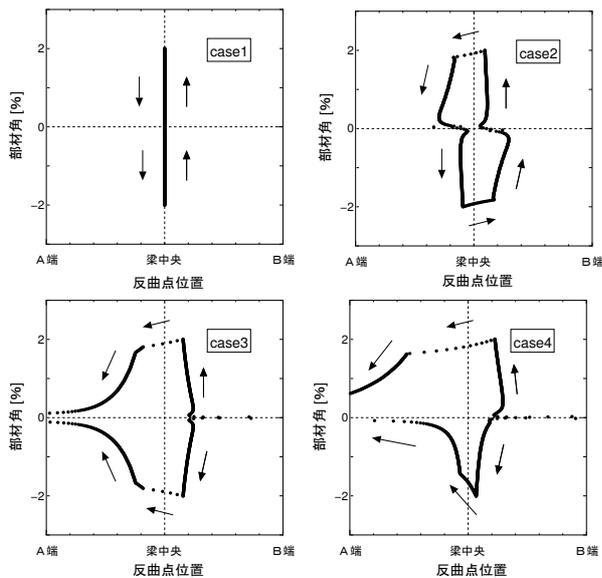


図-12 部材角2%2ループ目での反曲点位置の変動

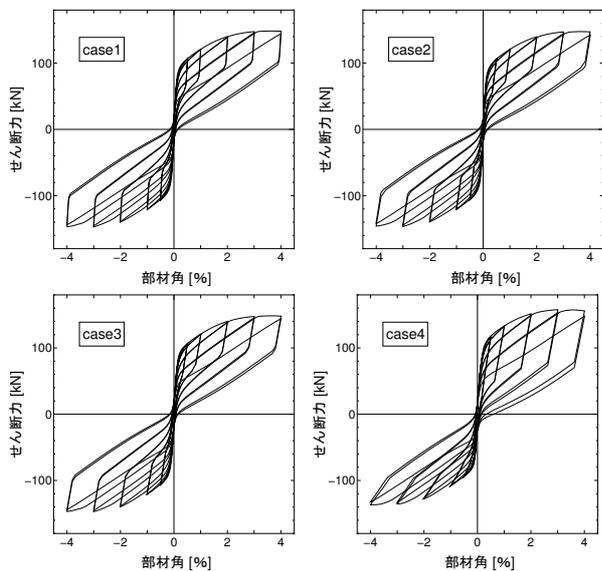


図-13 せん断力-部材角関係

5. まとめ

本研究では、アンボンドPCaPC梁に梁端ダンパーを付加した際の非対称曲げ挙動を対象に断面解析に基づく解析法を提案した。また1つの梁に設置される各ダンパーの降伏曲げモーメントの和を等しく設定した上で梁端ダンパーの配置を変化させたパラメトリックスタディを行い、その影響について検討を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧着面の履歴挙動に関しては、梁端ダンパーの配置を変化させることにより、圧着面での残留変形の大きさに違いが表れる。梁端ダンパーを均等に分散配置したもののほど残留変形は小さくなる。
- (2) 梁全体の履歴挙動については、圧着面での履歴挙動ほどの違いは見られないが、ダンパーを1箇所だけに配置

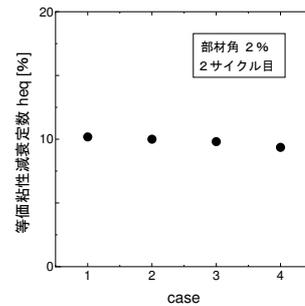


図-14 各解析ケースの等価粘性減衰定数の違い

した case4 の場合には、ダンパーが引張側にある場合と圧縮側にある場合で履歴挙動に偏りが生じる。
 (3) 各ダンパーの降伏曲げモーメントの和が梁全体と同じになるようダンパーひとつ当たりの降伏曲げモーメントを振り分けることで、梁端ダンパーの配置によらず同様のエネルギー吸収性能を得ることができる。

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) Brian G. Morgen, Yahya C. Kurama: 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, 第16巻, 第32号, pp.145-150, 2010.2
- 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, 76(666), pp.1489-1497, 2011.8
- 4) 松茂良諒, 門脇花子, 越川武晃: 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, プレストレストコンクリート技術協会第21回シンポジウム論文集, pp.151-156, 2012.10
- 5) Otani.S.: Inelastic Analysis of R/C Frame Structures, Proc.ASCE, vol.100, ST7, pp.1433-1449, 1974.7
- 6) 山下仁, 溝口光男, 越川武晃, 菊地優: スティールバンドを有するアンボンドPCaPC圧着接合による柱・梁ト型試験体および十字型試験体の繰返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.865-866, 2009.8
- 7) 松茂良諒, 越川武晃, 菊地優: アンボンドPCaPC梁部材を対象とした断面解析モデルの適用性に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.59B, 2013.3, 採録決定済