

論文 小変形域における履歴挙動の表現を目的としたアンボンドPCaPC梁部材を対象とする復元力特性モデルの拡張

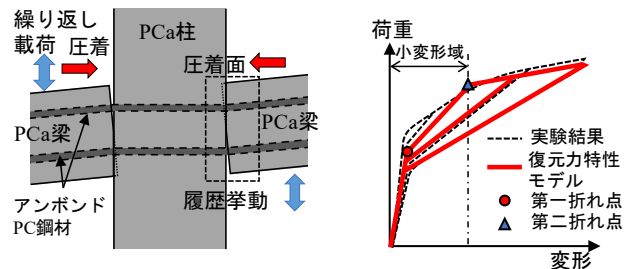
松茂良 諒*1

要旨: 既報にて提案したアンボンドPCaPC梁部材端部を対象とする復元力特性モデルについて、第二折れ点以前に生じる荷重・除荷の履歴挙動の違いを表現するため、新たに第一折れ点と第二折れ点間に初期導入力により異なる2種の特性点を設置し、その特性点から第二折れ点までの領域に除荷挙動を表現する履歴ルールを拡張した復元力特性モデルを構築した。その評価について既往の実験結果および断面解析結果との比較を行った結果、両方の特性点を用いたケースともに比較対象の履歴挙動をおおむね追跡できることを確かめた。

キーワード: プレストレスト, プレキャスト, アンボンド, 圧着接合, 復元力特性

1. はじめに

アンボンドPCaPC圧着接合構造は、図-1に示すようにアンボンドのPC鋼材を用いてプレキャスト柱・梁部材を圧着接合した構造形式である。著者は本構造の十字型架構の梁部材端部を対象とした復元力特性モデルについて、その塑性域の除荷挙動を表現し、加えてPC鋼材の圧着力の低下を表現した復元力特性モデルを提案した。当該モデルのスケルトンカーブは初期剛性を決定する第一折れ点、曲げ終局耐力の0.9倍点である第二折れ点、最大耐力点の3点で構成され、原点から第二折れ点に到るまでは非線形の弾性挙動、第二折れ点以降に荷重とは経路が異なる除荷挙動が生じるものとして定義している。この除荷挙動について、実験結果では第二折れ点以前の比較的小さい変形域においても同様な挙動を確認できるものの、当該モデルでは現状そのような挙動を表現することができない。また第二折れ点の部材角は大変形域に近づくこともあり、時刻歴応答解析時に小さい変形域も含めた、より精度のよい評価を行うためには第二折れ点以前の挙動について詳細なモデル化が必要である。PC鋼材をボンドとした従来のPC部材やPCaPC部材は梁の曲げ挙動時にPC鋼材や鉄筋が降伏することで比較的小さい変形域内にある程度明確な部材降伏点を得られやすいことから、プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説²⁾などでは曲げ終局耐力の0.9倍点を、浜原ら³⁾による復元力特性モデルはPC鋼材の降伏点を部材降伏点として用いている。一方、アンボンドPCaPC部材はPC鋼材が降伏しにくいことから、それらを対象とした復元力特性モデルに関する既往の研究において、ボンドPC部材と同様の降伏点として、菅田ら⁴⁾は初期の有効緊張力と定数項と梁せいにより求めた応力間中心距離に当たる項により耐力を求めた部材曲げ降伏点を提案している。Morgenら⁵⁾はスト



(a) アンボンドPCaPC構造 (b) 復元力特性モデル
 図-1 アンボンドPCaPC梁部材復元力特性モデル

レスブロック係数にあたる数値を定数とし、菅田らと同様にPC鋼材の応力は初期張力から大きく変わらないものとして応力中心間距離から耐力を求めた折れ点を提案している。他にも前述した提案復元力特性モデルの第二折れ点同様その変形が大変形域に近づくものではあるが、菅ら⁶⁾はPC鋼材応力が降伏強度の8割に到達する点を第二折れ点として提案している。しかし、これらはスケルトンカーブ上の折れ点を定義するに留まっており、特に除荷挙動も含めた履歴挙動の表現やその影響までは検討されていない。本研究では、前述した復元力特性モデルの第二折れ点以降の履歴ルールを第二折れ点以前に拡張することで、比較的小さい変形域内における履歴挙動を考慮した復元力特性モデルを提案する。その際の折れ点として、PC鋼材応力が降伏強度の7割に達した点と、初期導入力時にすでにPC鋼材応力が降伏強度の7割を超えていた場合を想定し、部材角0.5%点を特性点として設定した検討を行い、前者は実験結果と、後者は断面解析結果との比較を行い、その評価を行った。

2. 研究手法

本研究では、まず既報において提案した復元力特性モデルについて簡単に解説し、当該モデルの拡張として第

*1 崇城大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

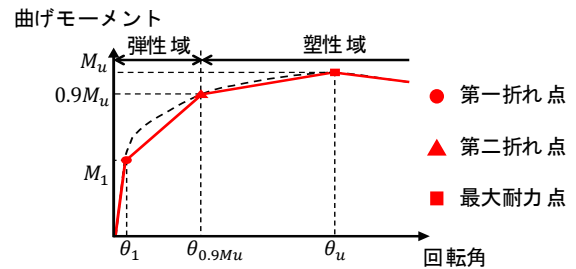
二折れ点以前の履歴ルールについて提案する。次に拡張した復元力特性モデルを用いて、初期導入時の PC 鋼材応力が 7 割未満の比較として山下らによる実験結果⁷⁾との比較を、初期導入時の PC 鋼材応力が 7 割以上の比較として十字型試験体を対象とした断面解析モデルによる実験とは荷重サイクルの異なった計算結果との比較を行う。これら検討を通して、提案モデルの適合性について評価を行う。

2.1 既報における復元力特性モデルの概要

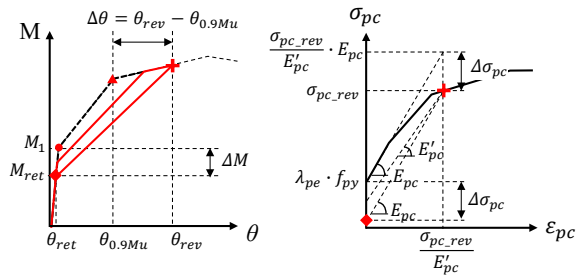
既報¹⁾において提案したアンボンド PCaPC 梁部材を対象とした復元力特性モデルを以下に示す。当該モデルは、**図-2(a)**に示すように、第一折れ点、第二折れ点、最大耐力点によりスケルトンカーブを構成し、第二折れ点までを弾性域、第二折れ点以降を塑性域として、塑性域以降の変形から圧着力の低下量を求め、それを用いて戻り点への除荷挙動として表現する。当該モデルにおける第一折れ点はディコンプレッションモーメント時(状態1)、PC 鋼材伸長開始時(状態3)、もしくはその中間に位置する時(状態2)の曲げモーメントおよび回転角を求めるものである。また第二折れ点は最大耐力の 0.9 倍点を用いている。履歴挙動については、第二折れ点に至るまでは非線形の弾性挙動として扱い、荷重挙動と除荷挙動は同じ経路をたどる。第二折れ点以降は塑性域として荷重挙動と除荷挙動が異なる経路をたどる。具体的には、スケルトンカーブ上の点から除荷すると、最大変形の更新に伴い PC 鋼材が伸長することで、回転角 0% 時の PC 鋼材応力が減少し、それが第一折れ点の曲げモーメントの減少として戻り点という形で表現される。この戻り点の曲げモーメント M_{ret} の求め方は第二折れ点を基準として計算されるものであり、簡単に示すと、まず**図-2(b)**に示すように第二折れ点からの回転角増分 $\Delta\theta$ と $\Delta\theta$ による PC 鋼材の変形量増分を求める。この PC 鋼材の変形量増分に第二折れ点時の PC 鋼材変形量を加え、初期導入時の伸びまで含めた PC 鋼材の変形量を計算する。さらにこの PC 鋼材の変形量を用いて、PC 鋼材全長、**図-2(c)**に示す応力-ひずみ関係を用いて、PC 鋼材の圧着応力の低下量を求めたのち、さらに圧着力の低下量から曲げモーメント減少量 ΔM を求め、第一折れ点の曲げモーメント M_1 から ΔM を差し引くことにより戻り点の曲げモーメント M_{ret} を求めるものである。

2.2 復元力特性モデルの拡張

当該復元力特性モデルは第一折れ点から第二折れ点までの履歴挙動の表現に課題があることから、第一折れ点から第二折れ点までの挙動をより精度よく表現するため、復元力特性モデルの拡張を試みた。拡張の概要としては、**図-3**に示すようにスケルトンカーブ上の第一折れ点と第二折れ点の間に特性点を設け、履歴ルールにお

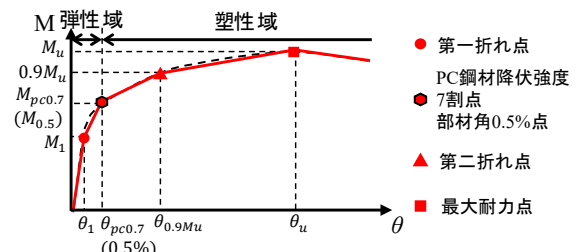


(a)スケルトンカーブ

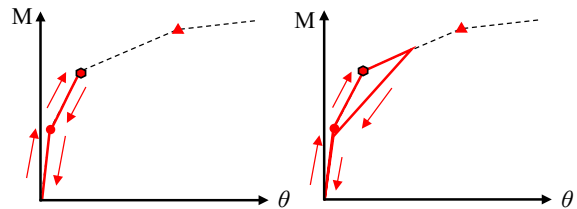


(b)曲げモーメント-回転角関係 (c)PC鋼材応力-ひずみ関係

図-2 復元力特性モデル概要



(a)スケルトンカーブ



(b)弾性域履歴ルール

(c)塑性域履歴ルール

図-3 拡張復元力特性モデル概要

いてはその特性点と第二折れ点間において、特性点を基準点とし、第二折れ点以降と同様の履歴ルールを用いて挙動を表現するものである。以下に上記特性点と履歴ルールおよび戻り点について詳細を示す。

まず特性点については、本復元力特性モデルにおいて PC 鋼材の弾性限界と見なす降伏強度の 7 割に達する点と、初期導入時にすでに PC 鋼材応力が 7 割もしくはその近傍に到達していた場合はスケルトンカーブを表現するため、本研究で暫定的に用いる点として部材角 0.5% 点の 2 点を検討することとした。PC 鋼材応力 7 割点における曲げモーメント $M_{pc0.7}$ (N・mm) は**図-4**に示すような応力状態を想定し、式(1)により求め、回転角 $\theta_{pc0.7}$ は式(2)により求める。この際、特性点の定義より PC 鋼材張力 $T_{pc0.7}$ (N) は PC 鋼材の降伏時引張力の 7 割とし、中立軸位置 X_n (mm) は式(3)により求めた。式(1)から(3)までに

用いたストレスブロック係数，コンクリート圧縮応力平均値の圧縮強度に対する割合を示す k_1 とコンクリート圧縮力作用位置の中立軸位置に対する割合を示す k_2 については簡便に値を決定するため第二折れ点の計算時に用いたものと同様として， $k_1 = 0.63$ ， $k_2 = 0.36$ を用いた。

$$M_{pc0.7} = T_{pc0.7}(h_{pc1} - k_2 X_n) + T_{pc0.7}(h_{pc2} - k_2 X_n) \quad (1)$$

$$\theta_{pc0.7} = \frac{(0.7 - \lambda_{pe}) f_{py}}{E_{pc}} \cdot \frac{l_{pc}}{h_{pc1} + h_{pc2} - 2X_n} \quad (2)$$

$$X_n = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{\Sigma T_{pc0.7}}{B D f_c} \cdot D \quad (3)$$

このとき， h_{pc1} ， h_{pc2} ：PC 鋼材配置位置(mm)， $\lambda_{pe} = P_e/P_y$ ：導入力レベル， P_e ：初期導入力(N)， P_y ：PC 鋼材の降伏時引張力(N)， f_{py} ：PC 鋼材の降伏強度(N/mm²)， E_{pc} ：PC 鋼材のヤング係数(N/mm²)， l_{pc} ：PC 鋼材全長(mm)， B ：梁幅(mm)， D ：梁せい(mm)， f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)。

次に部材角 0.5%点について，その曲げモーメント $M_{0.5}$ は PC 鋼材応力 7 割点とほぼ同様の式を用いるが，PC 鋼材張力 T_{pc} (N)，ストレスブロック係数 k_1 および k_2 ，それに伴う中立軸位置 X_n の値が異なる。PC 鋼材張力，ストレスブロック係数ともに検討ケースごとに断面解析結果を用いて定めたため後述する。中立軸位置 X_n はこれら PC 鋼材張力およびストレスブロック係数を式(3)に当てはめて計算する。

履歴ルールについてもピーク点から戻り点を求める計算手順は図-5に示すような曲げモーメント-回転角関係において第二折れ点以降と同様に計算する。

まず特性点以降の回転角増分を $\Delta\theta$ として，回転角増分 $\Delta\theta$ から上下段各 PC 鋼材の変形量増分 $\Delta\delta_{pc}$ (mm)を下式(4)，(5)のように求める。ピーク時の中立軸位置 X_{rev} (mm)は第二折れ点時の中立軸位置 X_n を用いる。

$$\Delta\delta_{pc1} = \Delta\theta(h_{pc1} - X_{n,rev}) \quad (4)$$

$$\Delta\delta_{pc2} = \Delta\theta(h_{pc2} - X_{n,rev}) \quad (5)$$

次に変形量増分 $\Delta\delta_{pc}$ (mm)と初期導入力による PC 鋼材の変形量 δ_{pe} (mm)，基準点までの PC 鋼材変形量 $\Delta\delta_{pc,ref}$ (mm)を用いて PC 鋼材の全変形量を求め，PC 鋼材全長 l_{pc} (mm)と応力-ひずみ関係からピーク時の PC 鋼材応力度 $\sigma_{pc,rev}$ (mm)を，式(6)を用いて求める。基準点までの変形量 $\Delta\delta_{pc,ref}$ は導入力レベル λ_{pe} が 0.7 を超えない場合は PC 鋼材降伏強度 7 割時の変形量を応力-ひずみ関係および PC 鋼材全長を用いて求める。導入力レベル λ_{pe} が 0.7 を超える場合は，断面解析から得た部材角 0.5% 時点での PC 鋼材応力を用いて，降伏強度 7 割時と同様に PC 鋼材の変形量を求める。

$$\sigma_{pc,rev} = \frac{\delta_{pe} + \Delta\delta_{pc,ref} + \Delta\delta_{pc1} + \Delta\delta_{pc2}}{l_{pc}} \cdot E'_{pc} \quad (6)$$

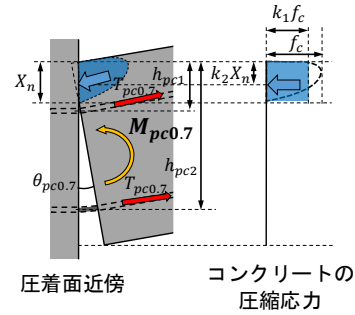


図-4 PC 鋼材降伏強度 7 割点の応力状態

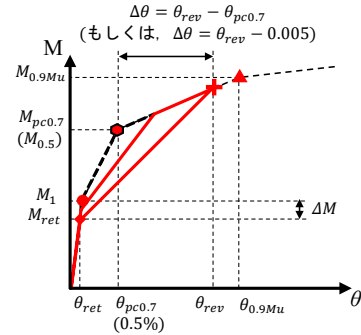


図-5 戻り点計算時の曲げモーメント関係

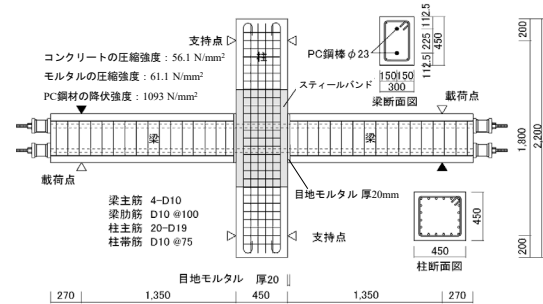


図-6 試験体詳細

上記手順以降は前節で示した第二折れ点以降の履歴ルールと同様の計算手順を用いて戻り点の耐力を算定する。PC 鋼材の応力-ひずみ関係に関する考え方も図-2(c)などと同様である。なお，本研究では負側の履歴挙動は正側と同様の形状として計算している。

2.3 比較対象となる実験結果および解析モデル

拡張した復元力特性モデルの比較対象として山下らが行った既往の実験結果⁷⁾および断面解析モデルによる数値解析を用いた。山下らの実験では PC 鋼材降伏強度に対する初期導入力の比である導入力レベルが 0.6 程度であり，前章で示した初期導入力時に PC 鋼材応力が降伏強度の 7 割を超えている場合の検討として用いることができない。そこで断面解析モデルを用いて初期導入力時に PC 鋼材応力が降伏強度の 7 割を超えているケースを検討することとした。

山下らの用いた試験体は，図-6に示すようににスティールバンドを付加した柱部材の両側にプレキャスト梁部

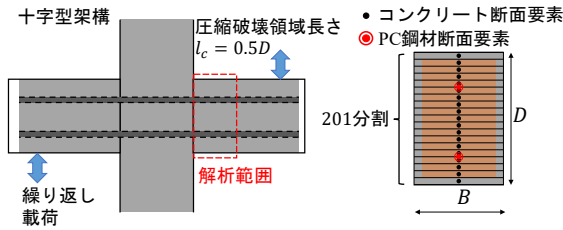


図-7 断面解析モデル模式図

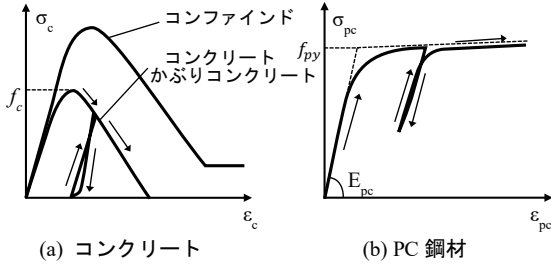


図-8 材料モデル模式図

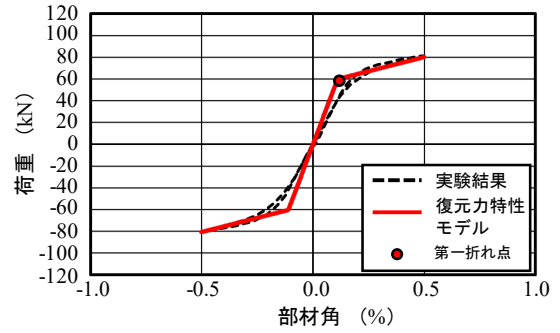
材を圧着接合した十字型架構の試験体である。梁部材の寸法は梁せい 450 mm, 梁幅 300 mm, PC 鋼材の径は 23 φ, 2 本の PC 鋼材による初期導入力は 540 kN であり, 前述の通り初期導入力による PC 鋼材の応力は降伏強度の 6 割程度である。コンクリートの圧縮強度は 56.1N/mm², 圧縮目地モルタルの圧縮強度は 61.1N/mm², PC 鋼材の降伏強度は 1093 N/mm² であり, 実験では梁部材の載荷点において部材角±5%の繰り返し荷重を行っている。

断面解析モデルの概要を図-7, 用いた材料モデルを図-8に示す。断面解析モデルは著者らが既報⁸⁾において発表したものを改良したものであり, 復元力特性モデルの検討に用いたモデルと同様のモデルである。本モデルは十字型試験体の梁端部を対象としてファイバー要素を用いた解析モデルであり, 本研究では実験結果との比較を行うため, 断面形状等は図-6に示した既往の実験で用いた試験体と同様の形状とした。初期導入力は PC 鋼材の降伏強度の 7 割としたケースおよび 8 割としたケースの 2 ケースの検討を行っている。コンクリート要素は梁せい方向に 201 分割, コンクリート部材の解析範囲となる圧縮破壊領域については梁せい D の 0.5 倍としている。また PC 鋼材についてはその全長 l_{pc} について, 実験時に使用したロードセルを考慮した長さとした。コンクリートの材料モデルは図-8に示すように, かぶりコンクリートにプレーンコンクリートの材料モデルを, コアコンクリートに修正 Kent&Park モデルを用いている。また PC 鋼材には Menegotto-Pinto モデルを用いた。

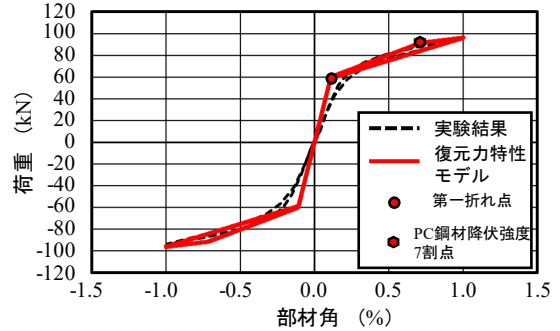
3 拡張した復元力特性モデルの適合性についての検討

3.1 山下らの実験結果との比較

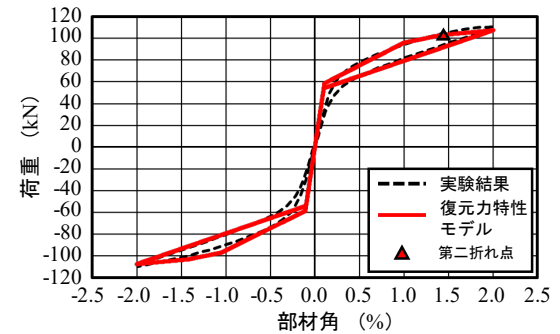
図-9に山下らの実験結果と, 同実験と同様な部材構成およびプレストレス, 荷重サイクルを模した拡張復元



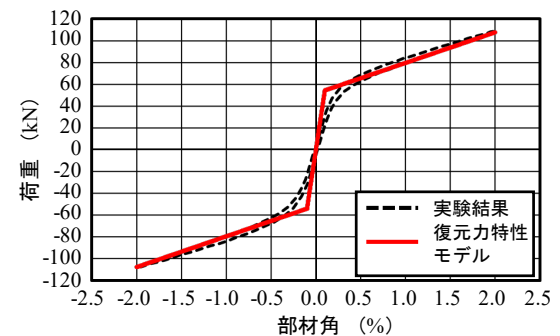
(a)0.5%サイクル



(b)1.0%サイクル



(c)2.0%サイクル (初回)



(d)2.0%サイクル (2回目)

図-9 実験値との比較

力特性モデル計算結果の比較を示す。図はそれぞれ各サイクルの比較を示しており, 図-9(a)は部材角 0.5%の初回サイクルの比較, (b)は部材角 1.0%の初回サイクル, (c)は部材角 2.0%の初回サイクル, (d)は部材角 2.0%の 2 回目のサイクルの比較を示している。図-10は部材角 2%までのサイクルを実験結果, 拡張復元力特性モデル計算結果ともに重ね合わせたものを示している。本検討にお

いて拡張復元力特性モデルの PC 鋼材降伏強度 7 割点におけるストレスブロック係数は、前述の通り断面解析結果から得られた値と同様とし、 $k_1 = 0.65$ 、 $k_2 = 0.35$ とした。

まず図-9(a)0.5%サイクルを見ると、復元力特性モデルの初期剛性は実験結果より高い剛性を示しており、また第一折れ点についても同部材角における実験結果よりも高い荷重を示すことが分かる。しかし、履歴挙動全体としては、その荷重・除荷の挙動にほとんど違いがないところを含め比較的近い挙動を追跡できている。次に図-9(b)1%サイクルにおいては、前述の通り PC 鋼材降伏強度 7 割点 が 0.9%であったことから、ピーク点からの除荷経路は荷重経路と異なる経路で除荷している。しかし、PC 鋼材降伏強度 7 割点からの回転角増分 $\Delta\theta$ が大きいことから、戻り点の曲げモーメント減少量 ΔM もほとんどなく、実験結果と同様にふくらみのない履歴挙動を表現できている。また、0.5%サイクルと同様に初期剛性については復元力特性モデルが荷重を大きく評価していることが分かる。図-9(c)(d)の 2%サイクルにおいては、初期剛性については 0.5%サイクル、1.0%サイクルと同様だが、第二折れ点も設定されていることから初回サイクルの荷重経路を比較的精度よく追跡できていることが分かり、加えて除荷経路、その履歴挙動のふくらみもおおむね追跡できていることが分かる。さらにその 2 回目のサイクルにおいても荷重経路、除荷経路に大きな差異がなく、同様な経路を追跡できていることが分かる。最後にこれら各サイクルの履歴挙動をまとめた図-10を見ると、PC 鋼材降伏強度 7 割点以前や除荷経路上で初期剛性に戻る際、曲線状に変化する箇所についてはまだ課題があるものの、第一折れ点から第二折れ点までの荷重・除荷経路や履歴挙動をおおむね表現可能であることが分かる。

3.2 導入力レベルが 0.7 を超えるケースについての比較

前節では山下らの実験結果を対象に比較したが、前述の通り山下らの実験結果は導入力レベルが 0.6 程度であり、導入力レベルが 0.7 を超えるようなケースでは PC 鋼材降伏強度 7 割点を定義することができない。本節では第一折れ点と第二折れ点の間に PC 鋼材降伏強度 7 割点と同様な基準点として部材角 0.5%点を設定し、第一折れ点と第二折れ点間の履歴挙動の表現について検討した。この際、部材角 0.5%点の荷重は前述の通り PC 鋼材降伏強度 7 割点と同様に求めており、PC 鋼材の張力およびストレスブロック係数 k_1 および k_2 は断面解析結果と同等とした。それぞれ導入力レベル $\lambda_{pe} = 0.7$ のケースでは PC 鋼材の張力は $0.733P_y$ 、 $k_1 = 0.38$ 、 $k_2 = 0.33$ 、導入力レベル $\lambda_{pe} = 0.8$ のケースでは PC 鋼材の張力は $0.813P_y$ 、 $k_1 = 0.40$ 、 $k_2 = 0.33$ を用いている。比較においては部材

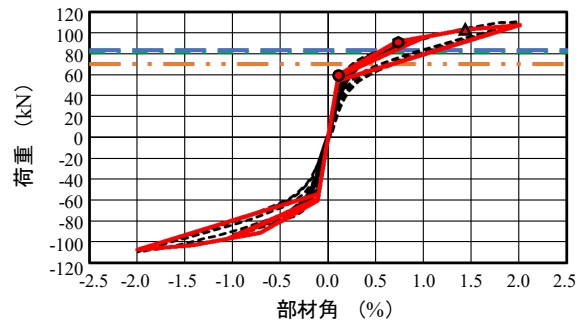


図-10 実験値との比較

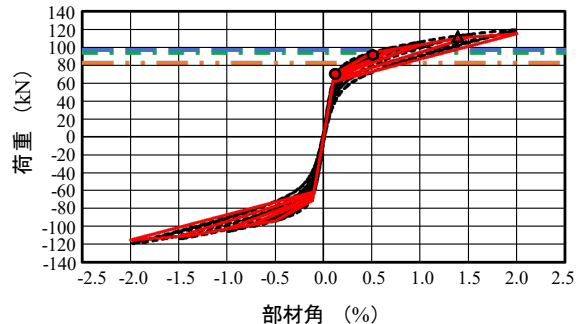


図-11 $\lambda_{pe} = 0.7$ の比較

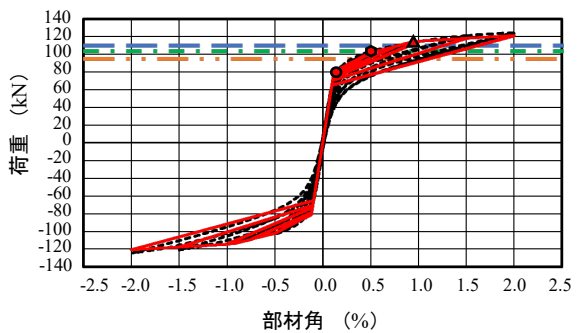


図-12 $\lambda_{pe} = 0.8$ の比較

角 0.5%点を設定することによる履歴挙動の追跡精度を評価するため、山下らの実験で用いられたサイクルに加えて、0.5%と 1%サイクルの間に 0.75%サイクル、1%と 2%サイクルの間に 1.5%サイクルを加えて実施している。なお、両ケースにおいて復元力特性モデルにおける最大耐力点算定値が小さく算定され、本拡張による影響を評価しにくい履歴挙動となったため、復元力特性モデルの最大耐力点は断面解析結果と同じ値を用いて計算を行った。

図-11に導入力レベル $\lambda_{pe} = 0.7$ のケースを、また図-12に導入力レベル $\lambda_{pe} = 0.8$ のケースを示しており、凡例は前述の図-10上側に示している。また、部材角 0.5%点は一般性のある耐力算定手法が明確ではないことから、耐力算定の参考とするため、それぞれの図では、算定式の目的が異なるため参考ではあるが、菅田ら⁴⁾と

Morgen ら⁵⁾による部材降伏点の耐力算定式で得られた値を示している。これらとの比較に用いることを目的として山下らの実験結果との比較を示した図-10にも同様に菅田らおよび Morgen らの部材角降伏点耐力算定式の結果と部材角 0.5%耐力の推定結果を示している。

まず $\lambda_{pe} = 0.7$ のケースを見ると、復元力特性モデルの結果は断面解析結果をおおむね追跡できていることが分かる。部材角 0.5%点を設定していることから、山下らの実験結果と比較したケースと同様に部材角が比較的小さい範囲においてもスケルトンカーブを比較的精度よく追跡できていることが分かる。ピーク時の荷重については復元力特性モデルの結果が小さく評価しているが、これは最大耐力まで断面解析結果は曲線状に推移するのに対して、復元力特性モデルでは直線状のスケルトンカーブを設定しているためである。また除荷挙動については解析結果の曲線状の挙動を詳細には追跡できていないものの、おおむね解析結果と同様な傾向を表現できていることが分かる。

次に $\lambda_{pe} = 0.8$ としたケースを見ると、こちらも $\lambda_{pe} = 0.7$ の結果と同様に部材角が比較的小さい範囲においてもスケルトンカーブを比較的精度よく追跡できていることが分かる。また、除荷挙動についてもこちらも $\lambda_{pe} = 0.7$ のケースと同様に断面解析結果の曲線状の部分の追跡については課題があるものの、おおむねその傾向を表現できていることが分かる。両ケースともに山下らの実験結果との比較と同様に第二折れ点以前に基準点を設定し、履歴ルールを拡張することで、部材角が比較的小さい範囲においてもその履歴挙動を追跡できる可能性があることが分かる。

部材角 0.5%点の耐力算定については、山下らの実験結果との比較および $\lambda_{pe} = 0.7$ のケースでは Morgen 式を用いることで、部材角 0.5%点耐力に比較的近い結果を求めることができることが分かる。しかし、 $\lambda_{pe} = 0.8$ のケースでは Morgen 式は部材角 0.5%点の耐力よりも高い値を評価している。また菅田式は、3 ケースすべてにおいて 0.5%点耐力よりも小さな値として評価している。菅田式本来の目的である降伏点となるような位置における耐力を比較的精度よく求めることができおり、部材角 0.5%点より小さな部材角の特性点を設定する場合には菅田式が適している可能性を示している。

4. まとめ

本研究では十字型架構におけるアンボンド PCaPC 梁部材の復元力特性モデルにおける履歴ルールを第二折れ点以前に拡張し、その評価を行うことを目的として以下の検討を行い、結論を得た。

既往の実験結果と比較した結果、初期剛性などに差が

見られたものの、0.5%サイクル、1.0%サイクル、2.0%サイクルともに、拡張した復元力特性モデルを用いることでおおむねその小変形域における履歴挙動を追跡できることを確認した。また、各サイクルにおいて実験結果が曲線状に変化する部分では追跡性に課題が見られた。

また、導入力レベル λ_{pe} を変化させた断面解析結果と比較した結果、実験結果と比較した場合と同様に、おおむねその小変形域における履歴挙動を追跡できることを確認した。また導入力レベル λ_{pe} が 0.7 以上の場合において暫定的に設定した部材角 0.5%点の耐力算定について、既往の算定式を用いて比較した結果、一部のケースでは部材角 0.5%点の耐力と同等の評価を得られたものの、評価できないケースもあり、簡便な耐力の算定手法には課題を残した。

参考文献

- 1) 松茂良諒：繰り返し載荷による圧着力低下を考慮したアンボンド PCaPC 圧着接合梁部材端部を対象とする復元力特性モデルに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.601-606，2022
- 2) 日本建築学会編：プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針（案）・同解説，2015
- 3) 浜原正行，中村昌弘，飯田誠次郎，福井 剛：プレストレストコンクリート骨組みの復元力特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.530，pp.139-145，2000.4
- 4) 菅田昌宏，中塚 侑：アンボンド PC 圧着エネルギー旧型高復元性部材のフラッグ型履歴モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.598，pp.133-140，2005.12
- 5) Morgen, B. G. and Kurama, Y. C. : Seismic Design of Friction-Damped Precast Concrete Frame Structures, Journal of Structural Engineering, pp. 1501-1511, Dec. 2007
- 6) 晉 沂雄，井上大河，上野彩菜，北山和宏：十字型骨組におけるアンボンド PCaPC 梁部材の骨格曲線の評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.88，No.803，pp.133-144，2023.1
- 7) 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・梁ト型試験体及び十字型試験体の繰り返し載荷実験，日本建築学会学術講演梗概集（東北），pp.865-866，2009.8
- 8) 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，日本建築学会構造工学論文集，Vol. 59B，pp.73-80，2013.3