

論文 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の戻り点および除荷挙動に関する研究

松茂良 諒*1

要旨: 本研究ではアンボンド PCaPC 圧着接合梁部材端部を対象とした復元力特性モデルにおいて, その除荷挙動を表現する戻り点について検討を行った。まず断面解析モデルを用いて複数の異なるサイクルの解析結果を比較し, 本部材の履歴挙動における履歴依存性について確認した。次に原点付近の除荷挙動について仮定を行い, その仮定に基づいた特性点を用いることで除荷挙動を表現可能であることを確認した。最後にそれら仮定に基づいて既報の算定式を改めて整理し, 当該式を用いることで戻り点の曲げモーメントを算定可能であることを, さらに既報の手法を組み合わせることでより適切な経路を設定可能であることを示した。

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 圧着接合構造はアンボンドの PC 鋼材によりプレキャスト柱・梁部材を圧着接合した構造である。その繰り返し載荷時における梁部材の履歴挙動において除荷挙動を扱った研究は少ない。本部材を対象とし, その復元力特性を扱った研究として, 菅田ら¹⁾, Morgenら²⁾などが挙げられる。しかし, これらの研究はエネルギー吸収デバイスを設置したアンボンド PCaPC 部材を対象としていることから, 除荷挙動はエネルギー吸収デバイスの影響を表現するのみであり, アンボンド PCaPC 部材そのものは非線形の弾性挙動として, 除荷挙動については詳細には言及されていない。そこで著者はアンボンド PCaPC 梁部材においてその塑性域の除荷挙動も表現することを目的として, 履歴による PC 鋼材の圧着力の低下を表現する復元力特性モデルを提案した³⁾。図-1に示すように当該復元力特性モデルでは塑性域において, ピークから直線状の経路を經由し, スケルトンカーブに戻る特性点として戻り点を定義している。しかし, その算定方法などは示しているものの, 考え方として「第一折れ点と同様の挙動が生じている」とだけ示しており, 戻り点付近で生じている応力状態などについては具体的な検討がない。そこで本研究では十字型架構におけるアンボンド PCaPC 梁部材を対象とする当該復元力特性モデルについて, 戻り点付近に生じるメカニズムを明らかにし, その妥当性および評価手法を示すことを目的として, 既往の実験結果や断面解析モデルによる解析結果を用いて検討を行う。

2. 研究手法

本研究では, まず山下らによる実験結果⁴⁾と十字型試験体を対象とした断面解析モデルによる載荷サイクルの異なった計算結果との比較を通して, 載荷・除荷挙動に

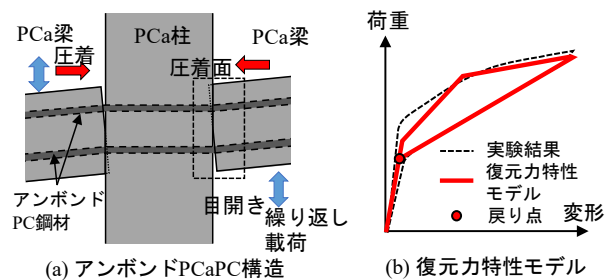


図-1 アンボンド PCaPC 梁部材復元力特性モデル

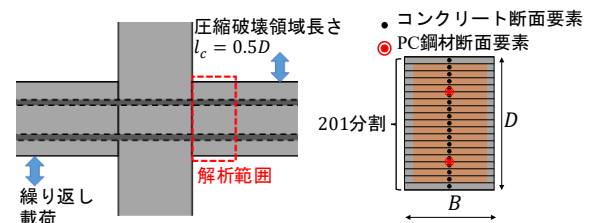


図-2 断面解析モデル模式図

における履歴依存性について検討し, 除荷挙動に影響する材料性状について考察を行う。次に, 著者が過去に提案した第一折れ点の考え方をを用いて除荷挙動上の特性点を求め, その特性点を戻り点として用いることへの妥当性について検討する。最後に, 除荷挙動に影響する材料性状を用いて既往の復元力特性モデルにおける戻り点算定式をより詳細な算定式として改めて整理し, 戻り点の推定手法の一例を示す。

2.1 断面解析モデルおよびパラメータ

断面解析モデルの概要を図-2, 用いた材料モデルを図-3に示す。断面解析モデルは著者らが既往の研究⁵⁾において発表した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に, コンファインドコンクリートを考慮できるよう改良を加えたモデルである。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-4に示す既往の実験で用いた試験体と同様の形状と

*1 崇城大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

した。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-3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，コンファインド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。

2.2 比較対象となる実験概要

解析結果の比較対象として山下らが行った既往の実験結果⁴⁾を用いた。本実験の試験体 PCBB00-III は，図-4に示すようにスティールバンドを付加した柱の両側に，スティールバンドを付加していないプレキャスト梁部材を圧着接合した十字型試験体であり，梁部材の荷点において部材角 $\pm 5\%$ の繰り返し荷重を行っている。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降伏強度の 7 割となる 540 kN，コンクリート断面に 4 N/mm²のプレストレス，初期導入力による PC 鋼材の応力が降伏強度の 6 割程度となるよう設定された試験体である。また，コンクリートの圧縮強度は 56.1 N/mm²，圧縮目地モルタルの圧縮強度は 61.1 N/mm²，PC 鋼材の降伏強度は 1093 N/mm²である。

2.3 復元力特性モデルの概要

4 章以降では復元力特性モデルにおける第一折れ点の考え方や戻り点を用いて検討を行うため，以下にその概要を示す。

著者が既報⁶⁾において示した第一折れ点の曲げモーメント M_1 の算定式を改めて以下の式(1)に示す。

$$M_1 = P_e \left(h_{pc1} - \alpha \cdot \frac{D}{3} \right) + P_e \left(h_{pc2} - \alpha \cdot \frac{D}{3} \right) \quad (1)$$

ここで， $\alpha = \begin{cases} 1 & (\text{状態 1 : } q_0 > n/2) \\ 2q_0/n & (\text{状態 2 : } n/2 \geq q_0 > n/4) \\ 1/2 & (\text{状態 3 : } n/4 \geq q_0) \end{cases}$

ただし， $q_0 = q \times \lambda_{pe}$ ， q ：PC 鋼材係数， λ_{pe} ：導入力レベル， h_{pc1} ， h_{pc2} ：PC 鋼材配置位置， P_e ：初期導入力， n ：第一折れ点時における圧縮縁応力度の圧縮強度に対する割合。

本式は，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(状態 2)に位置する時の曲げモーメントを求める算定式である。図-5に示すように係数 α は梁せいに対する中立軸位置の割合を示し，例えば状態 3 の場合，中立軸位置は梁せい中央となる。圧縮応力は三角形に分布すると仮定し，圧縮縁から中立軸位置までの距離の 1/3 となる高さに圧縮力が作用するとしたものである。この時 PC 鋼材応力は初期導入力 P_e とほぼ変化しないものと仮定している。

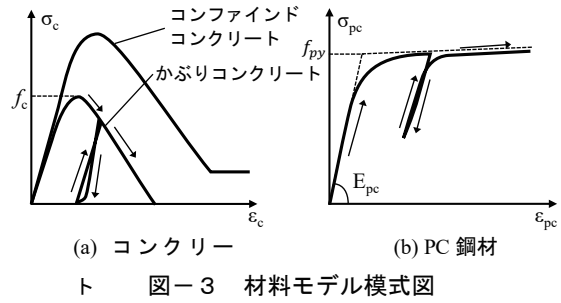


図-3 材料モデル模式図

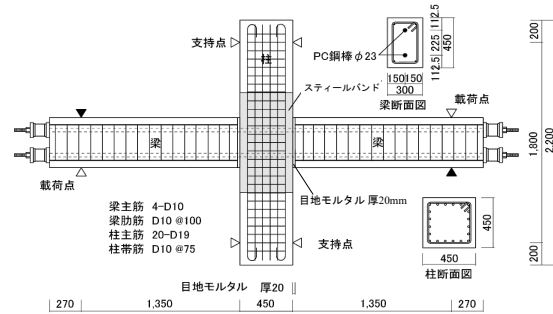


図-4 試験体詳細

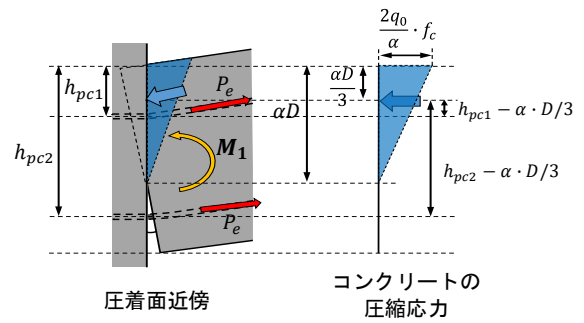


図-5 第一折れ点時の応力状態

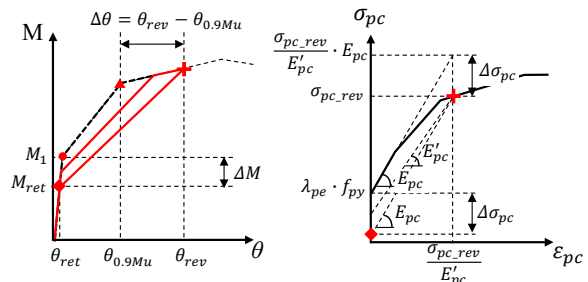
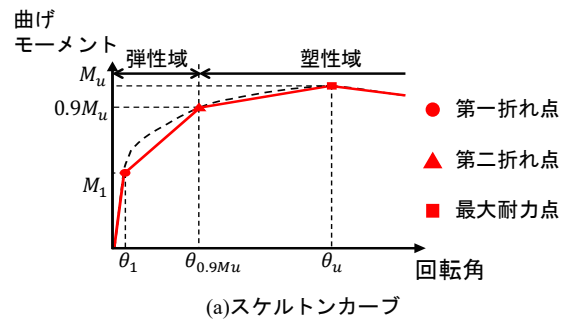


図-6 復元力特性モデルにおける戻り点の推定

次に既報³⁾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示す。当該モデルは，

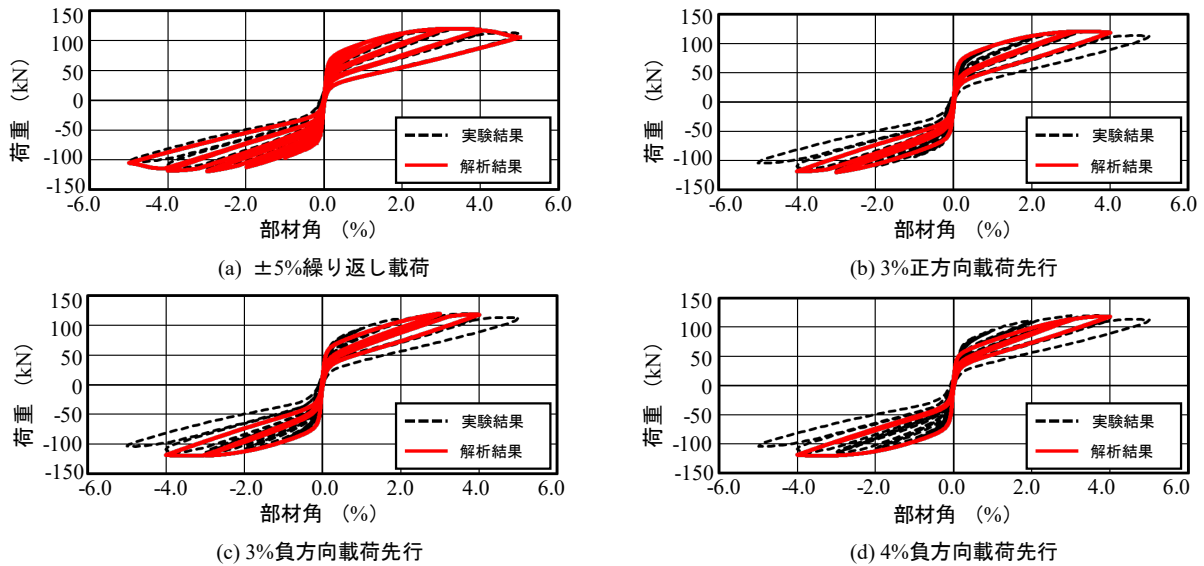


図-7 履歴依存性に関する検討

図-6(a)に示すように、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、塑性域以降の変形による圧着力の低下を戻り点への除荷挙動として表現する。本モデルによる戻り点の曲げモーメント M_{ret} の求め方を簡単に示すと、まず図-6(b)に示すように第二折れ点からのPC鋼材の変形量増分 $\Delta\theta$ を求め、この変形量増分に第二折れ点時の変形量を加え、初期導入力時の伸びまで含めた変形量を計算する。さらにこのPC鋼材の変形量を用いて、PC鋼材全長、図(c)に示す応力-ひずみ関係を用いて、変形、ひずみ、応力、圧着力の低下量、第一折れ点の曲げモーメント M_1 からの減少量 ΔM 、戻り点の曲げモーメント M_{ret} を順に求めるものである。戻り点の曲げモーメントを表した式を以下に改めて示す。

$$M_{ret} = M_1 - \Delta M \quad (2)$$

式(2)において用いた第一折れ点からの曲げモーメント減少量 ΔM は、圧着力の低下量および式(1)に用いた中立軸位置・圧縮力作用位置より求めるものである。

3. 履歴依存性についての検討

アンボンドPCaPC梁部材端部の履歴挙動は、圧縮側コンクリート部材の性状とPC鋼材の圧着力により決定されると考えられる。しかし、十字型架構のようにアンボンドのPC鋼材が複数の圧着面を貫通する架構においては、一方向の変形によりPC鋼材の降伏の程度が大きく進むことで圧着力が低下すると、もう一方向の変形において、後に示す図-7(b)(c)のように圧縮側コンクリート部材が健全であったとしても、圧着力の低下が履歴性状に影響すると考えられる。本研究ではそれらを履歴依存性と呼称して、実験結果と解析結果の比較により、主に除荷挙動についての検討を行う。図-7に梁部材の荷重-部材角関係における解析結果と実験結果の比較を示す。それぞれ解析結果の正負交番サイクルが異なっており、

(a)は実験と同様のサイクル、(b)はPC鋼材の圧着力の低下が顕著となり、なおかつ目視で変化を確認しやすいサイクルとして部材角3%と4%の正負交番サイクルを正方向から行ったもの、(c)は(b)と同様に部材角3%と4%の正負交番サイクルを行ったものであるが先に負方向、次に正方向と言った順序で実施したもの、(d)は先に負方向4%まで変形させたのち、正方向3%まで変形させ、0%まで除荷後、さらに正方向4%まで変形させたものである。

まず(a)の比較を見ると、解析結果は実験結果をおおむね追跡できており、各サイクルの除荷挙動についても同様であることが分かる。次に(b)の比較を見ると、3%サイクル時は、解析結果の正方向荷重挙動はおおむね実験結果の包絡線と同様であり、さらに除荷挙動も実験結果とほぼ同程度であることがわかる。また負方向については、除荷挙動はおおむね実験値と同程度であるが、荷重挙動については実験結果の包絡線を下回りつつも3%サイクルの荷重を上回っていることが分かる。これは、荷重挙動に関しては、先に正方向に変形することでPC鋼材が伸長し、圧着力が低下しているものの、実験時とは違い部材角3%以前のサイクルがないことから負方向圧縮側コンクリート部材が健全であったためと考えられる。また除荷挙動については、荷重挙動によりコンクリート部材の圧潰が進んだため、(a)と同様になったものと考えられる。4%のサイクルについては正負両方向ともに(a)とほぼ同様の履歴挙動となっている。次に(c)の比較を見ると、(b)とは正負が逆になった結果が生じていることが分かる。PC鋼材やコンクリート部材の性状も(b)と同様に变化するものと考えられることから、(b)の挙動は特定の方向にのみ生じる履歴挙動ではなく、先に実施された履歴挙動による部材性状の変化がのちの履歴挙動に影響を与えていることがわかる。(d)においては、負方向の4%まで変形しているため、圧着力の低下により正方向3%の

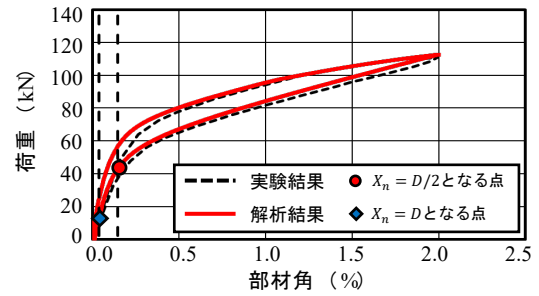
載荷挙動が実験結果の荷重を下回っている。また 3%までの変形にとどめているためコンクリート部材の圧潰が進まず、その除荷挙動は 4%の除荷挙動の荷重を上回りつつ、3%の除荷挙動と同程度の挙動となっており、4%サイクルでは実験値とほぼ同程度の除荷挙動となっている。

各図を比較すると、以下のようにまとめることができる。本比較において、(1)載荷挙動については、一方の方向への変形で PC 鋼材の圧着力が低下することにより、もう一方の方向の載荷挙動において包絡線に比べ荷重が減少するなど影響が見られる。またサイクルを重ねることによる圧縮側コンクリート部材の圧潰程度についても履歴挙動への影響が見られる。(2)除荷挙動については、事前の載荷挙動による PC 鋼材の圧着力の低下とコンクリートの圧潰の影響が大きく、一方向に大きな変形が生じていても、もう一方の方向の除荷挙動に対する影響は大きくはなく、載荷挙動に比べてその挙動は比較的实验値と同程度の結果が得られている。以上のことから以降の検討では、除荷挙動については、特殊な履歴依存性による影響は考慮せず、PC 鋼材の圧着力の低下と圧縮側コンクリート部材の圧潰による影響、算定式に示すところの圧縮力作用位置の変化を考慮し、検討を行う。

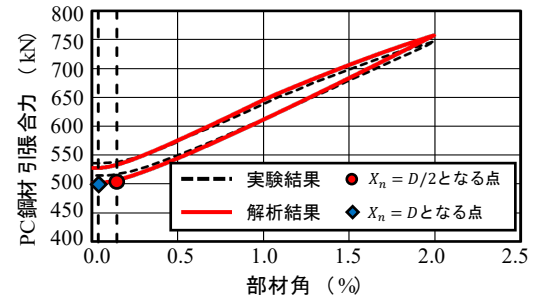
4. 戻り点の推定

本章では以下の仮定を通して得られた除荷挙動上の特性点に対し、戻り点として用いる妥当性について検討する。本研究で用いる仮定は、実験結果において顕著な損傷は圧縮縁の圧潰のみであり、最大変形が増加しても除荷挙動は初期剛性と同程度の剛性に戻る点、さらに再載荷の履歴挙動は除荷挙動とほぼ同様な挙動となる点に着目したもので、除荷挙動の特に原点に近づく挙動上において、PC 鋼材の圧着力の低下は進んでいるものの、その圧着力が維持され、コンクリート部材は圧潰が進んでいない健全な断面による抵抗が支配的となる場合には、スケルトンカーブの載荷挙動とほぼ同様のメカニズムで原点に戻る、とする仮定である。つまり、2 章において示した第一折れ点の算定式に対し、3 章において示したような除荷挙動の PC 鋼材の圧着力の低下やコンクリート部材の圧潰程度による影響を適用し、曲げモーメントを算定することで除荷挙動上に復元力特性モデルの第一折れ点のような特性点を推定できると考えるものである。第一折れ点の算定手法では中立軸位置の推定が必要となるが、実験結果では詳細な中立軸位置を把握できていないため、以下では解析により得られた上記仮定と同様な状態にあると思われる点と、解析結果・実験結果の除荷挙動の比較を通して、上記仮定による特性点の推定および妥当性について検討する。

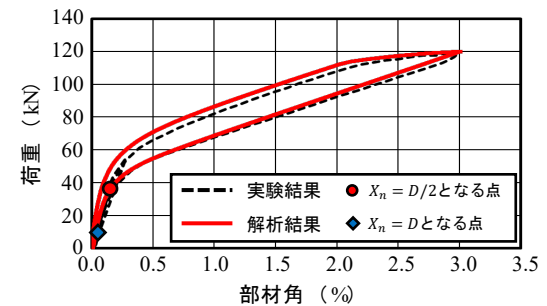
図-8(a)(b)に、山下らの実験において荷重-部材角関



(a)荷重-部材角関係 (部材角 2%サイクル)



(b)PC 鋼材引張合力-部材角関係 (部材角 2%サイクル)



(c)荷重-部材角関係 (部材角 3%サイクル)

図-8 第一折れ点と同様な状態となる点

係における部材角 2%の正方向のサイクルのみを実験値、解析値ともに取り出したものと、同様に同試験体における PC 鋼材引張合力-部材角関係を部材角 2%のサイクルのみを取り出した結果を示す。また両図には解析結果除荷挙動において第一折れ点算定手法における状態 3($X_n = D/2$)となる点およびその部材角を点線で示している。さらに、山下らの試験体については第一折れ点の算定手法は状態 3 の適用となるが、参考として第一折れ点算定手法における状態 1($X_n = D$)となる、ディコンプレッションモーメント時も示している。図-8(c)には(a)と同様な形で、部材角 3%サイクル時の荷重-部材角関係を示している。

(a)を見ると、除荷時において中立軸位置が梁せい中央に達した点は、解析結果除荷挙動上の初期剛性に近づくような挙動上に位置しており、その点とピークとを結んだ傾きや原点と結んだ傾きがおおむね除荷挙動と近しくなると見られることから、戻り点として用いてもおおむね問題ないと考えられる。これを実験結果と比較しても同様である。また参考ではあるが、状態 1 のディコンプレ

レッションモーメント時の点については、状態3より低い位置にあり、単純にピークからの戻り点とするには不適であることも分かる。次に(b)PC 鋼材引張合力-部材角関係を見ると、状態3の点における圧着力は本サイクルにおける部材角 0%時とほぼ同程度に低下した圧着力が作用していることが分かり、第一折れ点の算定式と同様に扱えることが分かる。次に(c)を見ると、(a)と大きく履歴挙動の形状が異なるものの、(a)と同様に状態3の点は戻り点として用いてもおおむね問題ない箇所に位置していることがわかる。また図として示していないが、部材角 3%サイクルにおいても状態3時のPC 鋼材の圧着力は3%サイクル除荷後部材角0%時の圧着力と同程度であった。以上のことから前述の仮定を用いることにより得られた特性点は、除荷挙動をおおむね表現可能な点に位置しており、またサイクルの最大変形が変化してもその除荷挙動上においておおむね同様な相対的位置にあることを確認できる。

5. 戻り点の算定手法

本章では前章において示した仮定を用いて、圧着力の低下やコンクリート部材の圧潰の関係性を式(1)の拡張として改めて整理し、前述した復元力特性モデルの戻り点算定手法との共通点を指摘するとともに、それらを再度解析結果と比較し、その適合性について検討を行う。

まず算定式の整理を行う。図-9に示すような、あるサイクルにおける除荷時部材角 0%時のPC 鋼材の圧着力の低下量を ΔT_{pc} 、圧縮力作用位置の変化を ΔX_{cc} と置くと、式(1)に示した第一折れ点の曲げモーメント算定式を用いて以下の式のように表すことができる。

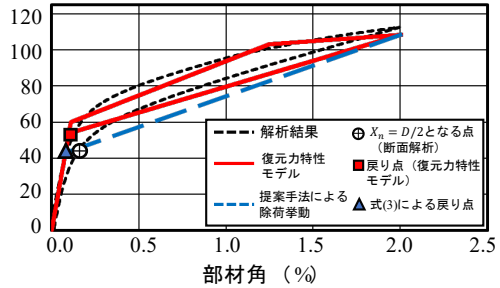
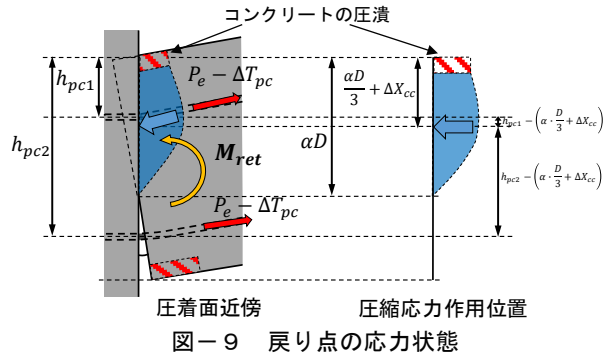
$$M_{ret} = (P_e - \Delta T_{pc})\{h_{pc1} - (\alpha \cdot D/3 + \Delta X_{cc})\} + (P_e - \Delta T_{pc})\{h_{pc2} - (\alpha \cdot D/3 + \Delta X_{cc})\}$$

上式を展開し、整理すると以下のように記述できる。

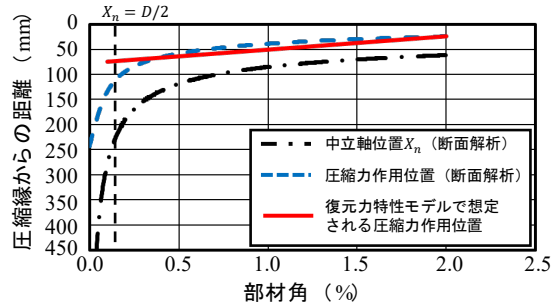
$$M_{ret} = P_e(h_{pc1} + h_{pc2} - 2 \cdot \alpha \cdot D/3) + \Delta T_{pc}(h_{pc1} + h_{pc2} - 2 \cdot \alpha \cdot D/3) - 2(P_e - \Delta T_{pc})\Delta X_{cc} \quad (3)$$

上式の右辺第一項は式(1)(2)に示すところの第一折れ点の曲げモーメント M_1 と同様であり、第二項は式(2)に示すところの戻り点における第一折れ点曲げモーメントからの曲げモーメント減少量 ΔM に相当する。これらより、既報において示した戻り点の曲げモーメント M_{ret} は式(3)において $\Delta X_{cc} = 0$ とした場合の式となる。

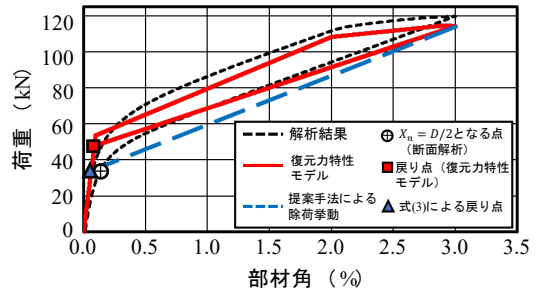
次にその適合性について検討する。図-10(a)に断面解析結果における荷重-部材角関係の部材角 2%サイクル正方向を抜き出したものと、復元力特性モデルの計算結果において同様に 2%サイクル正方向を抜き出したものを重ねて示す。加えて、4章において推定した特性点、復元力特性モデルによる戻り点、式(3)を用いて得られた



(a)荷重-部材角関係 (部材角 2%サイクル)



(b)中立軸位置-部材角関係 (部材角 2%サイクル)



(c)荷重-部材角関係 (部材角 3%サイクル)

図-10 提案手法による除荷挙動の変化

戻り点、さらにそれとピークを結んだ破線を示す。図-10(b)には、解析値の部材角 2%サイクル正方向除荷挙動における中立軸位置と圧縮力作用位置を示したものであり、加えて復元力特性モデルの戻り点において想定した圧縮力作用位置とピークを結んだ実線を重ねて示している。(a)の式(3)による戻り点で使用した圧縮力作用位置は(b)で示す $X_n = D/2$ 時点と同様と考え、 $\alpha \cdot D/3 + \Delta X_{cc} = 110$ 程度に設定した。また図-8と同様に(c)には部材角 3%サイクルの結果を示し、圧縮力作用位置は2%サイクルと同程度とした。

図-10(a)を見ると、式(3)で求めた戻り点は4章にお

いて推定した戻り点とおおむね近い値を算定できていることが分かる。また、復元力特性モデルの除荷挙動の傾きは、初期剛性近傍では荷重に差が生じるものの、おおむね解析値と同程度の傾きとなっているが、式(3)で求められる戻り点を用いた場合、解析値や復元力特性モデルによる除荷挙動の荷重を下回る挙動となることが分かる。これは(b)に示すように、復元力特性モデルでは圧縮力作用位置を高い位置で直線状に想定しており、また解析値では圧縮力作用位置の変動が部材角 0.3%程度に至るまで大きく変化しない非線形の挙動となるため、式(3)の値を用いてピーク点と戻り点を直線的につなぐ表現では差が生じるものと考えられる。(c)に示す部材角 3%サイクルの比較についても、部材角 2%サイクルとほぼ同様の傾向があることが分かる。

上記の通り、式(3)により求めた戻り点は、戻り点付近に近づくほど復元力特性モデルや解析値と比べて荷重を小さく評価する傾向があることから、簡単な除荷経路設定の一例として、既報の復元力特性モデルによる除荷挙動に内分点を設け、その内分点から式(3)により求めた戻り点へ接続する経路を検討した。図-11に解析結果と復元力特性モデルの結果に加えて、提案手法による除荷挙動を重ねて示している。内分点は、サイクルのピーク点から復元力特性モデルの戻り点までを線分と見なすと、復元力特性モデルの戻り点から内分点までの距離を1としたとき、内分点からピークまでの距離が5となる点として設定しており、その内分点から復元力特性モデルの戻り点ではなく、式(3)により求めた戻り点に接続する。図より、PC鋼材の圧着力減少およびコンクリートの圧潰を考慮した提案手法は内分点付近や以降を見てもおおむね除荷挙動と同様の挙動となっていることがわかる。

6. 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戻り点のメカニズムを明らかにし、その評価手法を示すことを目的として、以下の検討を行い、結論を得た。

アンボンド PCaPC 梁部材の履歴依存性について確認することを目的として、十字型試験体を用いた実験の荷重-部材角関係を対象とし、実験と異なるサイクルの解析結果との比較を行った。その結果、サイクルの違いによる除荷挙動に対する影響は大きくないことを確認し、その原因として、PC鋼材の圧着力の低下のほか、コンクリートの圧潰程度による影響を挙げた。

次に、除荷挙動において原点に近づく挙動上ではスケルトンカーブの載荷挙動と同様の挙動が生じていると仮定し、第一折れ点と同様の考え方をを用いて除荷挙動上の特性点を示し、荷重-部材角関係と PC 鋼材引張合力-

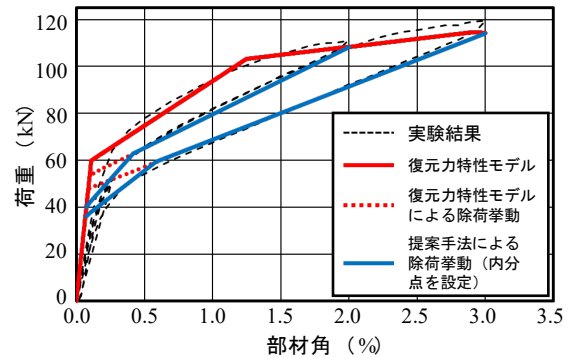


図-11 提案手法による除荷挙動

部材角関係とを対比させながら、戻り点として比較的適切な点となることを確認した。

最後に、戻り点について PC 鋼材の圧着力の低下やコンクリートの圧潰などを考慮した算定式を示したうえで改めて整理し、既報による復元力特性モデルとの比較を行い、提案した戻り点による除荷挙動の特徴について確認した。また既報の復元力特性モデルにおける除荷挙動と組み合わせ、より適切に実験結果の除荷挙動を追跡できる手法について提案し、その手法を用いて除荷挙動を追跡できる可能性について示した。

参考文献

- 1) 菅田昌宏, 中塚 信: 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, Vol.598, pp133-140, 2005.12
- 2) 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
- 3) 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, pp.601-606, Vol.44, No.2, 2022
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 松茂良諒: アンボンド PCaPC 圧着接合構造十字型試験体梁部材の復元力特性モデルにおける第一折れ点の耐力評価に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), pp.821-822, 2019.