

# 論文 アンボンド PCaPC 造壁の骨格曲線評価のための解析的研究

松沢 隼斗\*1・秋田 悠輝\*1・河野 進\*2・谷 昌典\*3

**要旨：**アンボンド PCaPC 造壁の骨格曲線上の特性点評価の精度向上を目的として、9 体のアンボンド PCaPC 壁試験体についてマルチスプリングモデルを用いた解析を行った。モーメント-部材変形角関係の包絡線、最大耐力、残留変形角、PC 鋼棒の緊張力増分について実験結果を精度良く再現することができた。降伏点以降の特性点を、コンクリートの圧縮ひずみに基づいて評価することで、3 点全ての耐力について精度良く再現することができ、変形角についても概ね再現することができた。

**キーワード：**アンボンド PCaPC 造壁、履歴復元力特性、マルチスプリングモデル、骨格曲線、特性点評価

## 1. はじめに

近年、建物に要求される大地震後の機能維持を実現できる構造形式の一つにアンボンドプレキャスト(以下、PCa)プレストレストコンクリート(以下、PC)構造形式が挙げられる。PCaPC 壁部材に関する実験例は国内外で増加しつつあるが、梁部材に比べて実験例が少なく、その力学性状について十分に検討されているとは言えない。また、アンボンド PCaPC 壁の弾塑性挙動は複雑であり、未解明な部分も多くある。日本建築学会の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<sup>1)</sup>(以下、PC 性能評価指針)では PC 柱や梁の設計式は記載されているが、壁については記載がない。また、PC 柱・梁の設計式を壁部材に適用したとしても、部材変形角について実験値とのばらつきが大きいこと<sup>2)</sup>が報告されている。小原ら<sup>3)</sup>によるアンボンド PCaPC 壁の解析的研究では、荷重-変形角関係・PC 鋼棒の挙動の実験結果を精度よく追うことができた。また、李ら<sup>4)</sup>はこのモデルを参考にして、回帰分析により曲げ終局耐力算定式を提案した。しかし、骨格曲線の特性点全てが抵抗機構に基づいて定式化されるには至っていない。

以上のことを踏まえ、アンボンド PCaPC 壁の精度の高い特性点評価式を構築することを目的とする。本研究ではマルチスプリング(以下、MS)モデルを用いた簡易かつ高精度な解析によって、実験結果のモーメント-部材変形角関係を再現し、PC 鋼棒の緊張力とコンクリートの圧縮ひずみについて検討する。また、特性点をコンクリートの圧縮ひずみによって評価し、その精度について検討する。

験の結果<sup>5),6),7)</sup>を対象とし、小原らの解析モデル<sup>3)</sup>に修正を加えて解析を行った。図-1 に一例として PCW7<sup>7)</sup>の壁部材のモデル概要を示す。PC 鋼棒と軸方向組立筋はトラス要素とし、壁板下部の損傷領域を MS とした。塑性ヒンジ長さ $l_p$ は石井らの研究<sup>8)</sup>において圧着部材の等価塑性ヒンジ長さを参考にし、 $0.3D(D:壁せい)$ とした。コンクリートについては拘束効果を考慮するコア部と考慮しないカバー部に分けてモデル化した。

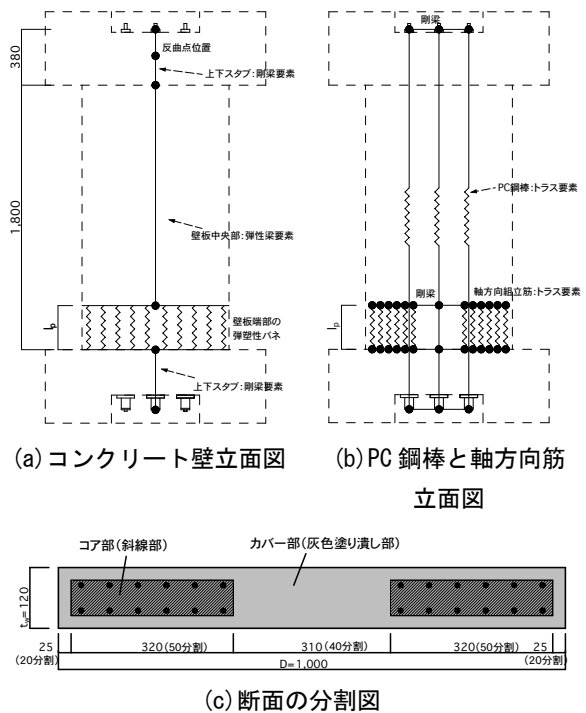


図-1 PCaPC 造壁モデル概要(PCW7) (単位 mm)

## 2. 解析手法概要

### 2.1 アンボンド PCaPC 造壁部材のモデル化

本解析では本研究グループで過去に実施した 9 体の実

### 2.2 材料の応力-ひずみ関係

図-2 に解析に用いたコンクリートおよび PC 鋼棒、軸方向組立筋の応力-ひずみ関係を示す。カバーコンクリ

\*1 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 (学生会員)

\*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 教授・Ph.D. (正会員)

\*3 京都大学 工学研究科建築学専攻 准教授・博士 (正会員)

ート、PC 鋼棒の各値には材料試験結果を用いた。コアコンクリートの圧縮強度と圧縮強度時のひずみの上昇分、終局限界ひずみは修正 Kent-Park モデル<sup>9)</sup>を用いた。軸方向筋は降伏強度に材料試験結果を用い、圧縮のみを考慮するバイリニアモデルとした。なお、解析には弾塑性解析プログラム SNAP<sup>10)</sup>を使用した。解析対象試験体概要を表-1 に示す。

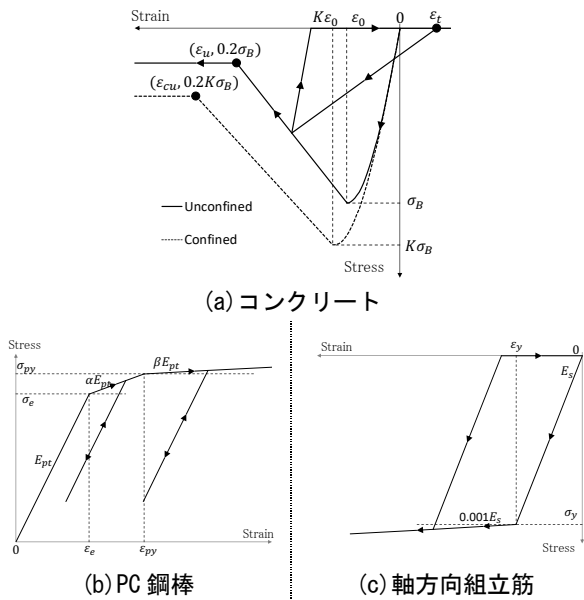


図-2 材料の応力-ひずみ関係

### 3. 解析結果と実験結果の比較

#### 3.1 モーメント-部材変形角関係

図-3 に 9 体のうち 3 体についての実験と解析のモーメント-部材変形角関係を示す。本解析モデルは曲げ変形のみを対象としているため、実験も曲げ変形のみを考慮した。

PCW1, PCW4 において、解析は正載荷時および負載荷時の実験における包絡線と最大耐力、残留変形角(荷重 0 時の変形角)、除荷剛性を精度良く再現できた。PCW7 に

おいても、正側および負側の包絡線と最大耐力、残留変形角を精度良く再現できたが、除荷剛性は解析の方が小さくなった。

そのほかの試験体においても精度良く実験の包絡線、最大耐力、残留変形角、除荷剛性を再現できた。

#### 3.2 PC 鋼棒の緊張力増分およびひずみ増分

図-4 に PCW7 の PC 鋼棒(正載荷時に圧縮側となる 1 本)の載荷開始時からの緊張力増分およびひずみ増分の挙動を示す。緊張力増分に関しては、その挙動を再現できた。ひずみ増分については弾性範囲である、 $R=\pm 1.0\%$  までは精度良く再現できた。しかし、弾性限界点の負側  $-1.0\%$  以降は実験の引張ひずみが緩やかに上昇していくのに対して、解析では弾性範囲と同様に上昇している。また、変形角 0% 時のひずみの実験値が繰り返しの影響で、初期ひずみより縮むのに対して、解析では初期のひずみを保ったままであった。この違いの原因は現在検討中である。また、他の結果は比較的精度良く再現できているため、この違いによる影響は少ないと考えている。後述の特性点評価についても、コンクリートのひずみによって評価しているため、影響は少ないと考えている。

#### 3.3 コンクリートの平均圧縮ひずみ-部材変形角 R 関係

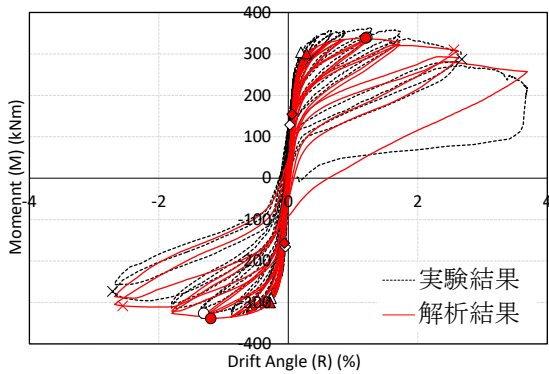
図-5 に PCW1 について壁下端部のコンクリートの平均圧縮ひずみ-部材変形角関係、図-6 に実験の壁板下部の変位計取付位置を示す。ひずみについて圧縮側をマイナスとする。図-5 (a) において、実験の値には、図-6 中の圧縮縁から 80mm 内側位置の壁下端部から検長 450mm の変位計 A,B によって得られた変形を、その検長 450mm で除したものを平均ひずみとした。解析では実験の変位計取り付け位置と同位置の、長さ  $l_p$  (300mm) の MS によって得られたひずみを平均ひずみとした。図-5 (b) では、図-5 (a) の場合と同様の変位計から得られた変形を、解析に用いた塑性ヒンジ長さ  $l_p$  と同じ 300mm で除したものを実験の平均ひずみとしている。なお、圧着型アンボンド PC 部材は変形が圧着界面付近に集中することから、

表-1 解析対象試験体概要<sup>5),6),7)</sup>より転記

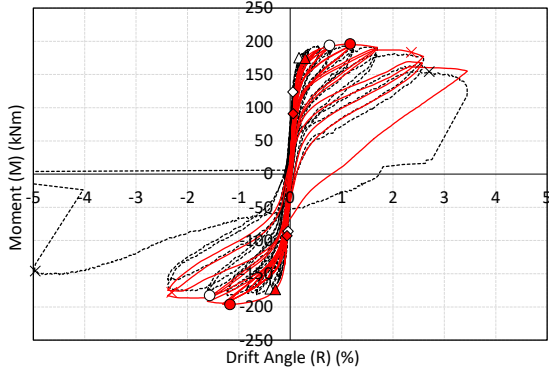
試験体名	PCW1	PCW2	PCW3	PCW4	PCW5	PCW7	PCW8	PCW9	PCW10
特徴	基準試験体	軸力比大	壁厚大 幅厚比小	壁せい小 幅厚比中	コンクリート 強度高	PC本数多	面外補強筋 比大	補強筋ピッチ 75mm	補強筋ピッチ 67mm
壁	120×1000		240×1000	120×750	120×1000				
板	1800			1350	1800				
諸	16-D10		32-D10	16-D10		24-D10			
元	2-D10@150		2-D10@80	2-D10@150		2-D10@75	2-D10@150	2-D10@75	2-D6@67
	70		190	70					74
	290			190	290	320	290		294
PC鋼棒	1-Φ21		2-Φ21	1-Φ19	2-Φ26	3-Φ13		1-Φ21	
拘束補強筋降伏強度(Mpa)	369.5								459.4
拘束域せん断補強筋体積比	0.0252		0.0252	0.0207	0.0252	0.0413	0.0233	0.0401	0.0193
コンクリート圧縮強度(Mpa)	38.5	35.1	39.4	38.8	154.1	40.1	37.5	37.7	37.1
せん断スパン(mm)	2000			1500	2000				

図-5 (b)は実験の検長 450mm における変形が解析での  $l_p$  (300mm)範囲で生じたと考えた場合のひずみを比較するために示した。

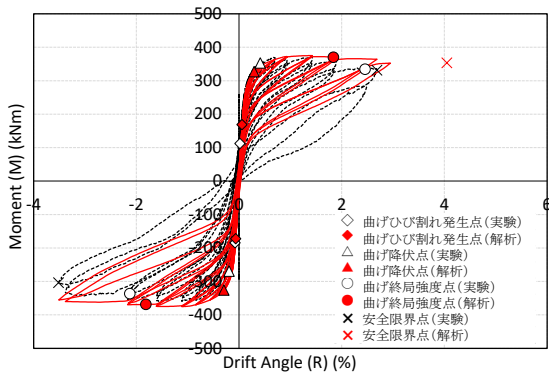
図-5 (a)ではひずみの挙動を正側、負側ともに概ね再現できているが、全体的に解析値がやや大きい。これに比べて図-5 (b)では精度が向上している。このことから、検長 450mm で得られた変形は、スタブから 300mm の範囲で集中して生じていたと考えることが妥当であることがわかる。



(a) PCW1

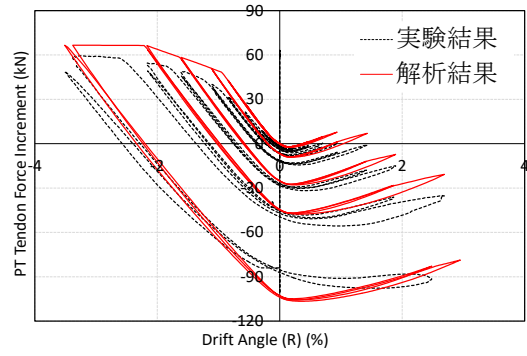


(b) PCW4

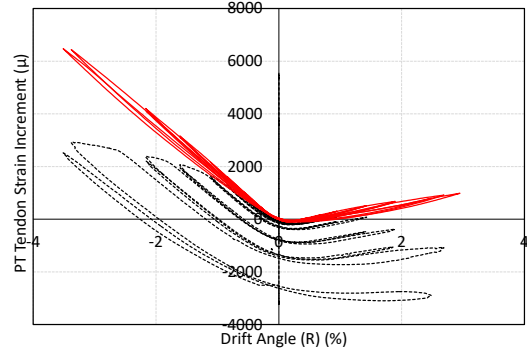


(c) PCW7

図-3 モーメント-部材変形角関係

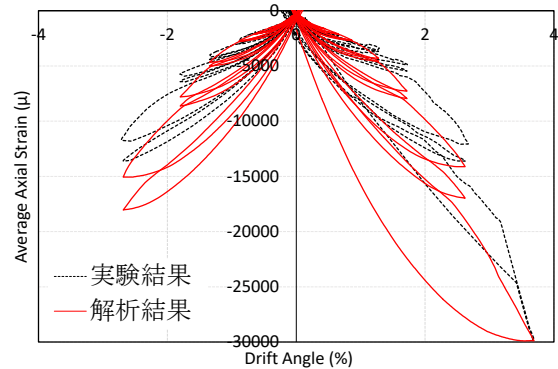


(a) 緊張力増分-部材変形角関係

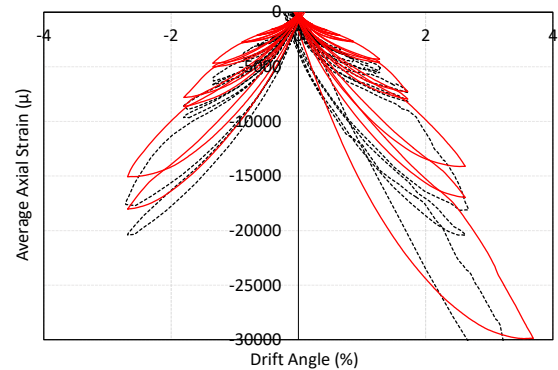


(b) ひずみ増分-部材変形角関係

図-4 PC 鋼棒の緊張力増分とひずみ増分(PCW7)



(a) 検長(450mm)で除した結果



(b) 塑性ヒンジ長さ  $l_p$  (300mm)で除した結果

図-5 コンクリートの平均圧縮ひずみ-部材変形角関係(PCW7)

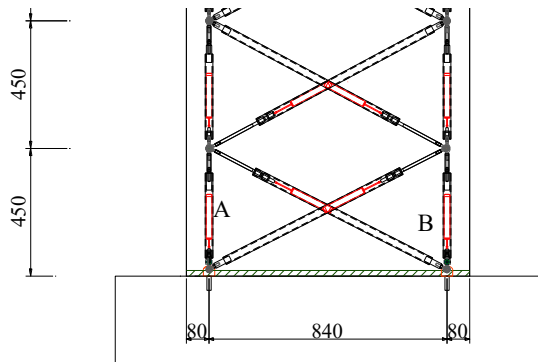


図-6 壁板下部の変位計取付位置(PCW1)

#### 4. 特性点の耐力および変形角の比較

PC 性能評価指針<sup>1)</sup>では復元力特性の骨格曲線を表す特性点として、曲げひび割れ発生点、曲げ降伏点、曲げ終局強度点、安全限界点の4点が示されている。この4点について、実験結果と解析結果を比較する。

##### 4.1 特性点の定義と評価方法

曲げひび割れ発生点は圧着界面が離間する点と定義される。解析、実験ともに壁下端部引張縁のひずみが曲げ引張強度 $\sigma_t$ 時のひずみに達した点とする。ここで、PC性能評価指針<sup>1)</sup>より $\sigma_t = 0.24\sqrt{\sigma_B}$  ( $\sigma_B$ :かぶりコンクリートの圧縮強度)とした。引張ひずみを求めるにあたって、引張ひずみを求めるにあたって、実際には圧着界面が離間して変形が集中するが、圧縮ひずみ実験値の計算と同じ変形領域450mmで一様に引張変形が生じていると仮定して引張ひずみ実験値を求め、MSモデルの解析値との比較を行った。そのため、解析では引張縁のMS要素(長さ: $l_p$ )のひずみを用い、実験では壁下端部から検長450mm(PCW4のみ337.5mm)位置までの変形をその検長で除したものをひずみとした。

曲げ降伏点は0.9Mmax点(耐力が最大耐力の90%まで上昇した点)と定義されている。本研究では、定式化する目的で、圧縮縁コンクリートが $0.9\sigma_B$ 時のひずみとなった点と定義した。ただし、実験でのひずみの求め方は曲げひび割れ発生点と同様である。なお、PCW5の実験値のみ圧縮縁コンクリートが $0.9\sigma_B$ 時のひずみに達しなかったため、示していない。

曲げ終局強度点は最大耐力に達した点と定義されている。本研究では曲げ降伏点に示した理由と同様の理由で、曲げ終局強度点に関してもかぶりコンクリートまたはコアコンクリートのひずみによって評価するため、コアコンクリート圧縮縁がコアコンクリート圧縮強度後90%まで低下した点のひずみになる点と定義した。歪みの求め方は曲げひび割れ発生点と同様である。なお、PCW5の実験値のみコアコンクリートの圧縮縁がコアコンクリート圧縮強度後90%まで低下した点のひずみに達しなかった。そのため、最大耐力に達した点を示す。

安全限界点は最大耐力到達後80%まで耐力が低下した点と定義されているが、同様の理由でひずみによって評価する。解析ではコアコンクリート圧縮縁が終局限界ひずみ $\epsilon_{cu}$ に達した点とした。ここでコアコンクリートの終局限界ひずみ $\epsilon_{cu}$ はMander<sup>11)</sup>による(1)式によって算定する。また、実験では定義と同様とし、耐力が80%まで低下しない試験体(PCW7,PCW8)については変形角が最大の点を安全限界点とした。

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm} / f'_{cc} \quad (1)$$

ここに、 $\rho_s$ :拘束補強筋体積比、 $f_{yh}$ :拘束補強筋降伏強度、 $\epsilon_{sm}$ :鉄筋の破断時ひずみ(0.5%と仮定)、 $f'_{cc}$ :コアコンクリート圧縮強度とする。

なお、特性点の比較には正側特性点と負側特性点の絶対値の平均値を用いる。ただし、安全限界点のみ正側特性点の値を比較している。また、平均値を求める際に正側のみのデータしか得られていない場合はその値を用いている。

##### 4.2 特性点の耐力の精度予測

図-6に4つの特性点の耐力における精度予測を示す。なお、点線は誤差 $\pm 20\%$ の直線である。

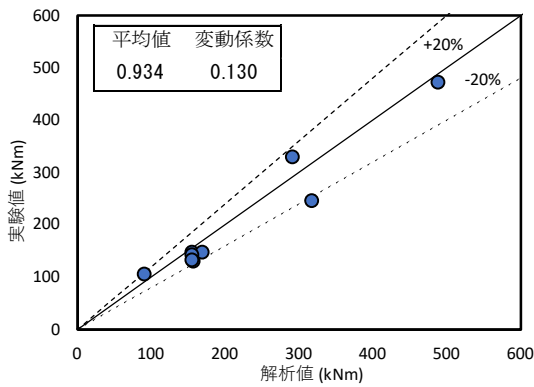
曲げひび割れ発生点について、実験値/解析値の平均が0.934、変動係数が0.130、ほとんどの試験体が誤差 $\pm 20\%$ 以内と精度良く評価できた。曲げ降伏点と曲げ終局限界点については全ての試験体で誤差 $\pm 20\%$ 以内と非常に精度良く評価できた。安全限界点についても実験値/解析値の平均が0.981、変動係数が0.223、ほとんどの試験体が誤差 $\pm 20\%$ 以内と精度良く評価できた。

コンクリートのひずみによって特性点を評価することによって、耐力について精度良く再現することができた。

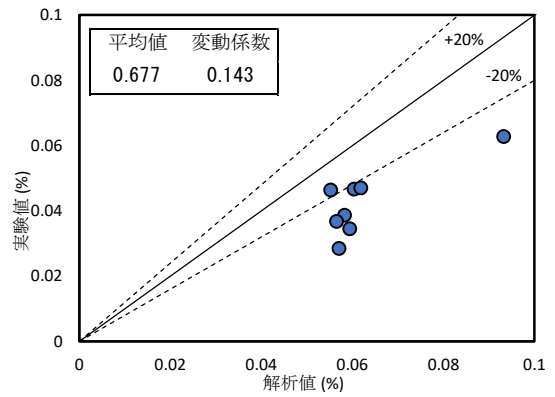
##### 4.3 特性点の変形角の精度予測

図-7に4つの特性点の変形角における精度予測を示す。なお、点線は誤差 $\pm 20\%$ の直線である。

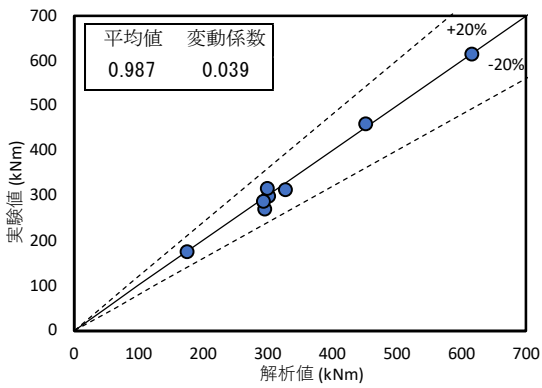
曲げひび割れ発生点について、変動係数が0.143と実験結果の傾向は再現できたものの、実験値/解析値の平均が0.677と全体的に解析の方が変形角が大きい結果となった。曲げ降伏点について、実験値/解析値の平均が1.054、変動係数が0.326とほとんどの試験体について、PC性能評価指針による評価<sup>2)</sup>精度の向上が見られたが、耐力に比べてばらつきが大きい結果となった。精度が大きく外れた試験体は補強筋ピッチの小さいPCW9であった。曲げ終局強度点について、実験値/解析値の平均が1.195、変動係数が0.193と再現できた。耐力に比べるとばらつきは大きいものの、PCaPC壁は最大耐力到達後ほぼ一定のモーメントで変形角が大きくなる。そのため、曲げ終局強度点変形角のばらつきは骨格曲線の評価の際にそこまで影響しない。安全限界点について、実験値/解析値の平均が0.972、変動係数が0.239と実験結果を



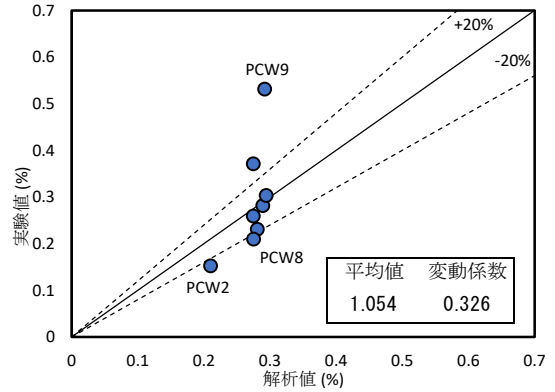
(a) 曲げひび割れ発生点における精度予測



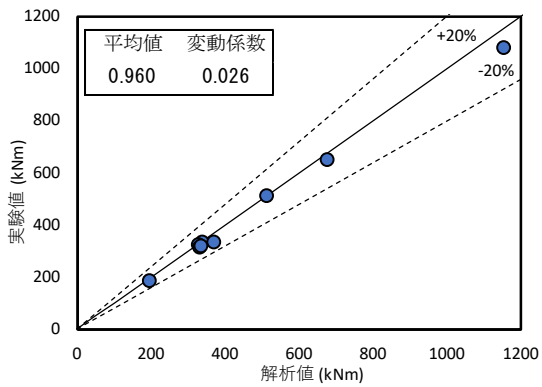
(a) 曲げひび割れ発生点における精度予測



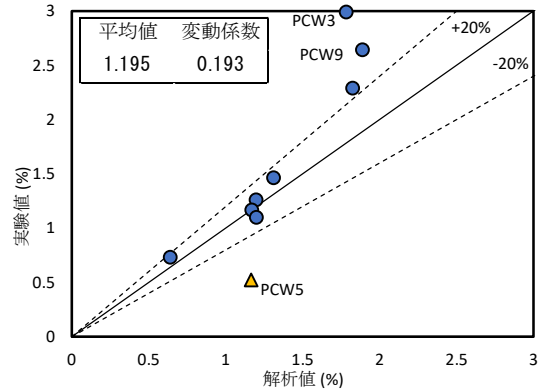
(b) 曲げ降伏点における精度予測



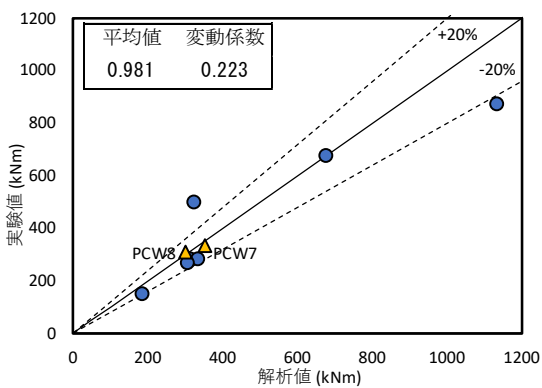
(b) 曲げ降伏点における精度予測



(c) 曲げ終局強度点における精度予測

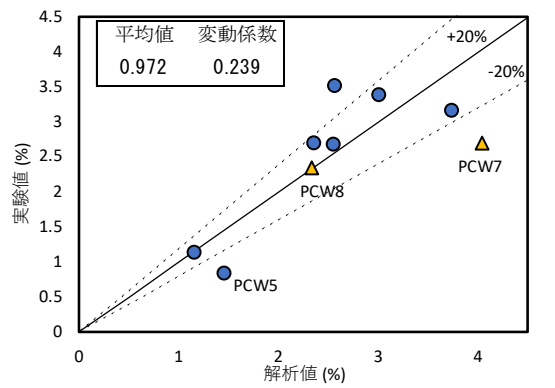


(c) 曲げ終局強度点における精度予測



(d) 安全限界点における精度予測

図-6 特性点耐力における精度予測



(d) 安全限界点における精度予測

図-7 特性点変形角における精度予測

再現できた。ただし、実験の耐力が80%まで低下した試験体のうちPCW5が誤差-20%以下の危険側の評価となった。この原因として、PCW5では超高強度コンクリートを使用しているが、解析においてポストピークでの応力負担を普通コンクリートと同様としていることが挙げられる。

コンクリートのひずみによって各特性点を評価することにより、変形角についても概ね再現できた。しかし、耐力に比べるとばらつきが大きい結果となった。

## 5. 結論

本研究ではMSモデルによる解析を用いて、モーメント-部材変形角関係、PC鋼棒の挙動、コンクリートの平均圧縮ひずみ、骨格曲線評価の特性点について、実験結果の再現を図った。以下に、結論を示す。

- 塑性ヒンジ長さ $l_p$ を $0.3D(D:壁せい)$ とすることで、実験のモーメント-部材変形角関係の包絡線、最大耐力、残留変形角を非常に精度良く再現できた。PC鋼棒緊張力についても概ね実験結果を再現できた。
- コンクリートの平均圧縮ひずみについて、壁下端部450mmの変形を解析に用いた塑性ヒンジ長さ $l_p(300mm)$ で除した値を実験の平均ひずみとすることで、検長の450mmで除した時に比べて、精度の向上が見られた。
- 各特性点について、かぶりコンクリートまたはコアコンクリートの圧縮ひずみによって評価した結果、耐力については精度良く評価できた。変形角についても実験結果を概ね再現でき、精度は向上したものの耐力に比べるとばらつきが大きくなった。

今後の展望として、今回対象としなかったPCaPC造壁部材についても検討を重ね、その復元力特性の特性点を再現できる、より精度の高いモデルを作成していく。そのモデルでパラメトリックスタディを行い、各特性点の耐力と変形性能の定式化を目的として、研究を進める。

## 参考文献

1) 日本建築学会：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

2) 日本建築学会：古くて新しい・アンボンドPCが紡ぐ未来の空間創造，2021年度AIJ年次大会(関東)，PD資料，2021

3) 小原拓，渡邊秀和，桑原健，河野進：アンボンドPCaPC造壁部材における機能維持性能に着目した損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第748号，pp879-889，2018.6

4) 李尚洙，阿波野昌幸：アンボンドPCaPC造方立壁の曲げ終局耐力算定式に関する解析的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp. 657-658，2022.7

5) 植村一貴，張明嘉，小原拓，Priyana Rajbhandari，河野進，David MUKAI，谷昌典：PC鋼材の緊張力に着目したアンボンドPCaPC壁の曲げ耐力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.725-726，2020.9

6) 張明嘉，藤岡知也，秋田悠揮，小原拓，河野進，谷昌典，大村哲矢，David MUKAI：アンボンドPCaPC造壁の構造性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.659-666，2022.7

7) 藤岡知也，河野進，小原拓，秋田悠揮，濱田夏帆，谷昌典，大村哲矢，Mukai David：圧着型アンボンドPCaPC造壁部材の変形性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.577-582，2023

8) 石井孝幸，中塚侑，阿波野昌幸，上東弘英，岸本一蔵：等価塑性ヒンジ長さや断面曲げ解析によるPC梁の荷重-変形関係の推定，AIJ近畿支部研究報告集，pp. 453-456，1999.5

9) Scott B.D., Park R., Priestley M.J.N. : Stress-Strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates, ACI Journal, pp. 13-27, 1982

10) 株式会社構造システム：任意形状フレームの弾塑性解析，SNAP Ver. 8, 2023

11) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. : Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No.8, pp. 1827-1849, Aug.1998