

# 論文 マルチスプリングモデルを用いたアンボンドプレストレスト鉄筋コンクリート造梁の解析的研究

伊藤 旺真\*1・小原 拓\*2・河野 進\*3

**要旨:** アンボンドプレストレスト鉄筋コンクリート(PCR)造梁部材の構造性能を、マルチスプリングモデルを使用した比較的簡易な解析手法を用いて評価した。3体の片持ち試験体の実験結果と比較したところ、提案モデルは非常に高い精度でせん断力-部材変形角関係、PC鋼棒の緊張力、スラブ筋歪み、残留変形率そして等価粘性減衰定数に関する実験結果を再現できることがわかった。

**キーワード:** アンボンド PCR 造梁, マルチスプリングモデル, 残留変形角, 等価粘性減衰定数

## 1. はじめに

過去に国内で発生した東北地方太平洋沖地震のような地震災害において建物が倒壊しなかった場合でも、多くの建物が耐震部材や非耐震部材等の損傷により継続使用不可能となった<sup>1)</sup>。この稼働停止時間が原因による経済的損失は、被害を受けた建物の修復費以上になることもある。そこで、出来る限り地震時の損傷を低減し、地震後の早期復旧や機能維持を実現する構造形式へ近年の社会的要求は移行している。こうした需要に対して、プレストレスト鉄筋コンクリート(以下、PCR)構造は、曲げ耐力をある程度確保し、かつ部材の損傷を抑制する損傷制御型構造を実現できる。これにより履歴面積が大きく、地震後の残留変形が小さい理想的なフラッグシェイプ型の履歴復元力特性を有する構造システムを実現できる。

本報では、フラッグシェイプ型の履歴復元力特性を実現可能なアンボンド PCR 造梁に焦点を当て、その性能評価を解析的観点から実施する。アンボンド PCR 造梁部材を対象とした実験的研究として森口ら<sup>2)</sup>は、曲げ破壊型のスラブ付きアンボンド PCR 造梁について、スラブ筋の損傷評価の検討を目的とし6体の梁試験体について曲げせん断試験を行った。解析的な研究では、例えば岸本ら<sup>3)</sup>は、ファイバー法を用いた PC 梁の断面解析モデルを用いて鋼材係数や主筋量を変数にパラメトリックスタディを行い、履歴復元力特性や等価粘性減衰定数を定量的に評価している。渡邊<sup>4)</sup>らは、アンボンドプレキャストプレストレストコンクリート部材を対象とした断面解析モデルを提案し、実験結果の損傷の再現を行った。

一方で、アンボンド PCR 造梁部材を対象として、具体的にひび割れ量や限界状態などの定量的な評価を行なった研究は少ない。そこで、高い機能維持性能と早期復旧性を持つアンボンド PCR 造梁の解析モデルの構築を目

指して、部材の損傷状態を定量的に予測できる解析手法の提案を実現する研究を進めることとした。本報では、その基礎研究として、森口ら<sup>2)</sup>が行なった3体のアンボンド PCR 造梁の静的載荷実験結果を比較的簡易なマルチスプリングモデル(以下、MSモデル)を用いて再現し、部材および材料のレベルにおける挙動をどこまで追跡できるか検証した。

## 2. MSモデルを用いた解析手法

本章では、文献3)のアンボンド PCR 造梁を解析対象とし、MSモデルを用いた解析モデルを提案する。

### 2.1 解析対象試験体

表-1にアンボンド PCR 梁試験体の実験変数と諸元を、表-2にコンクリートと鋼材の力学的特性を、図-1に試験体の配筋と寸法を示す。梁幅500mm、梁せい600mm、梁固定端から載荷点までを1800mmとした。PCR1(スラブ筋定着有り)とPCR2(スラブ筋定着無し)のみ厚さ100mm、幅1500mmのスラブを有した試験体で、PCR1は軸方向スラブ筋のスタブ内定着長さを800mmとした。PCR3はスラブが無い試験体であり、スラブ部分以外はPCR1、PCR2の梁部分と同じである。梁主筋またはスラブ筋、およびせん断補強筋に使用する鉄筋は全試験体共通とし、曲げ破壊型となるように設計した。3体とも圧着接合ではなく、スタブ・梁・スラブを一体打ちとしている。

載荷装置図を図-2に示す。載荷はスタブをPC鋼棒で反力床にかさ上げ台(高さ455mm)を介して緊結し、載荷点の鉛直変位をスタブ端から載荷点までの距離1800mmで除した部材変形角Rにより制御した。

### 2.2 アンボンド PCR 造梁のモデル化

図-3に解析モデルの立面図を示す。試験体を軸方向

\*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 建築学系 (学生会員)

\*2 東京工業大学大学院 科学技術創成研究院 助教 工博 (正会員)

\*3 東京工業大学大学院 科学技術創成研究院 教授 Ph.D. (正会員)

表-1 アンボンド PRC 梁試験体の実験変数と諸元<sup>3)</sup>

試験体名	PRC1	PRC2	PRC3
加工方法	PRC		
試験体形状	スラブ付	スラブ無	
コンクリート設計基準強度	60MPa		
梁	幅×せい	500mm×600mm	
	上下端主筋	4-D19(SD345)	
	PC 鋼材	4-φ26(C種1号)	
	シーす管	#1050	
	スター ラップ	D10(SD295A)@100( $p_w=0.51\%$ )	
ス ラ ブ	厚さ	100mm	
	幅	1500mm	
	スラブ配筋	12-D6(SD295A)@150	
	定着	有	
せん断スパン比(M/Qd)	3.0		
鋼材係数(q)	0.17		
プレストレス率(λ)	0.62	0.68	0.68
初期張力	2000kN	1944kN	2020kN

表-2 各材料の材料特性<sup>3)</sup>

(a) コンクリート

試験体	$f_c$ (MPa)	$\epsilon_c$ (%)	$E_c$ (GPa)
PRC1	69.6	4.35	34.3
PRC2	72.7	4.79	34.8
PRC3	69.0	5.23	34.6

$f_c$ :圧縮強度,  $\epsilon_c$ :最大荷重時歪み,  $E_c$ :ヤング係数

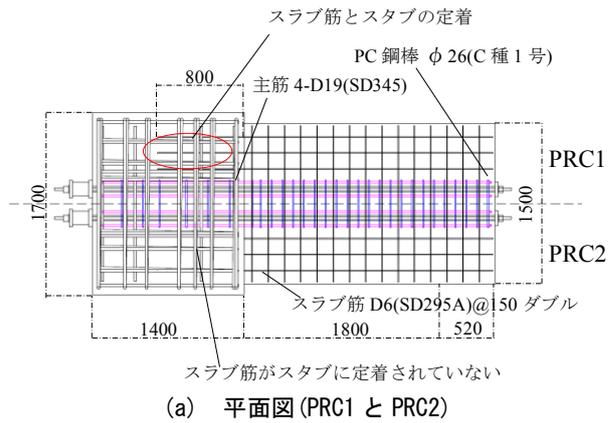
(b) 鋼材

	径	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$f_s$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
鉄筋	D19(SD345)	386	0.208	579	186
	D10(SD295A)	387	0.205	545	189
	D6(SD295A)	397	0.203	533	195
PC 鋼材	φ26 (C種1号)	1179	0.770	1265	205

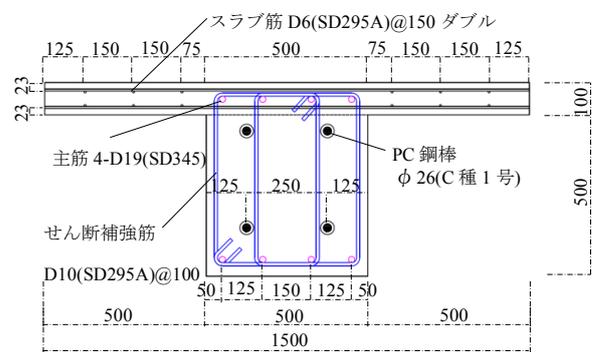
$f_y$ :降伏強度,  $\epsilon_y$ :降伏ひずみ,  $f_s$ :引張強度,  $E_s$ :ヤング係数

にスタブ, 変形集中領域, 梁弾性領域に分割してモデル化した。変形集中領域は梁固定端側長さ  $L_p$  の領域であり, この領域に部材の非線形挙動が集中すると仮定してモデル化を行った。PRC 梁部材の変形集中領域の軸方向長さについて, 本報では渡邊ら<sup>4)</sup>の解析手法を参考とし, 変形集中領域長さを梁せい  $D$  の半分である  $L_p=300\text{mm}$  とし, 軸力と曲げモーメントの相互作用を評価できる MS モデルをこの変形集中領域に適用した。

本報では, 梁の自由端鉛直変位, および固定端曲げモーメントを, 非線形断面解析を用いて計算する。図-3 で示すような複数の弾塑性バネ要素, 弾性梁要素, 剛梁要素を用いてモデル化を行う。図-4 は PRC1 における MS モデル部分の断面分割図を示す。MS モデルは図-4 に示す Y 軸方向に 25 分割し, 同一高さのカバーコンクリートとコアコンクリートは別々のバネで表現した。軸方向のバネ要素や梁要素は直行する剛梁を介して接合されている。また, マルチスプリングモデル左端と PC 鋼棒左端は固定端とし, 固定端以外の節点には N1 から N4 までの節点を付した。PRC2 はスラブ筋がないもの, PRC3 に関してはスラブがない断面とした。



(a) 平面図 (PRC1 と PRC2)



(b) 断面図 (PRC1 と PRC2)

図-1 試験体の配筋と寸法

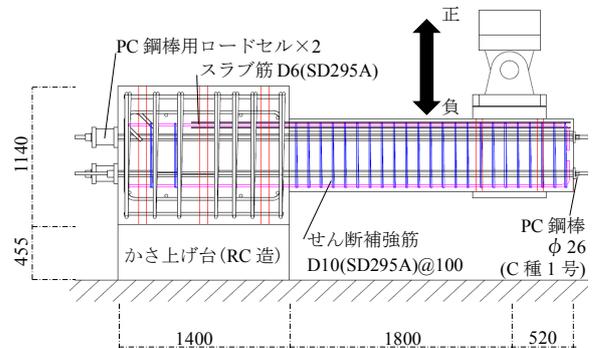


図-2 荷装置置図

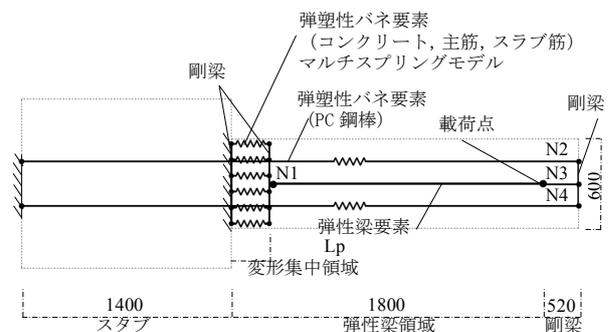


図-3 解析モデルの立面図

変形集中領域にはコンクリートおよび主筋を弾塑性バネ要素に置き換えて配置する。また、PC 鋼棒は定着板から定着板までの長さを持つ弾塑性バネに置き換えて、梁要素と並列に設置する。また、主筋は完全付着としてモデル化を行った。PC 鋼棒の初期緊張力は、実験で計測された PC 鋼棒の初期緊張力を与えた。その後、変位制御で梁部材に曲げせん断力を作用させる。このとき制御に用いる変位は、片持ち梁先端の自由端の鉛直変位とする。今回の解析では、実験で主筋の破断が見られなかった部材変形角±4.0%までを損傷評価の対象とする。なお、解析には弾塑性解析プログラム SNAP<sup>5)</sup>を使用した。

### 2.3 材料構成則

図-5に、解析に用いたコンクリートおよびPC 鋼棒、主筋の応力-ひずみ関係を示す。(引張正、圧縮負とする)コンクリートの応力-ひずみ関係は、カバーコンクリート部分およびせん断補強筋で囲まれたコンクリート部分に分けた。カバー部分は修正 Kent-Park モデルによりモデル化し、終局限界ひずみは 0.007 としてモデル化を行った。コア部分は終局限界ひずみも修正 Kent-Park モデルを適用し、拘束効果を評価した。引張側でのひびわれ強度は式(1)<sup>6)</sup>に基づいて算出し、圧縮応力の伝達を考慮するため局部接触開始点を $\epsilon_t=0.05\%$ とした。PC 鋼棒には、包絡線にはトリリニア型のモデルを使用した。降伏後の剛性低下率は 0.001 とした。主筋、スラブ筋は、包絡線にバイリニアモデルを用い、繰り返し载荷に修正

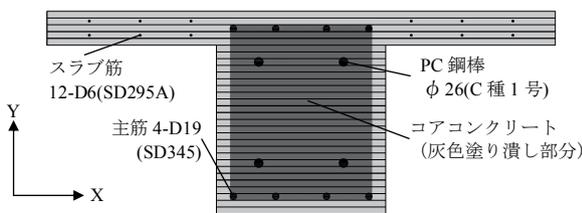


図-4 マルチスプリング部における断面分割図

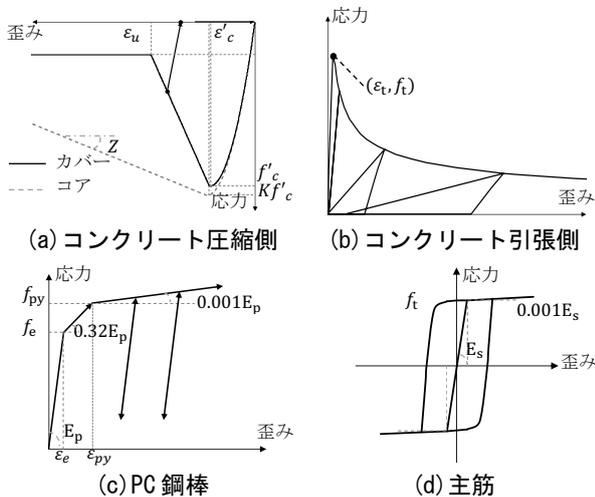


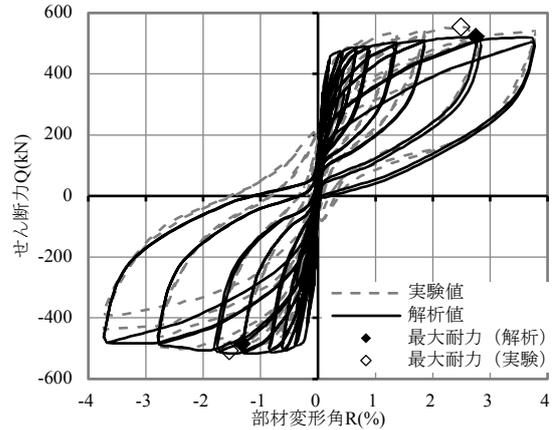
図-5 材料の応力-歪み関係

Ramberg-Osgood モデルを用いた。各モデルの材料定数は、材料試験結果の値を用いた。

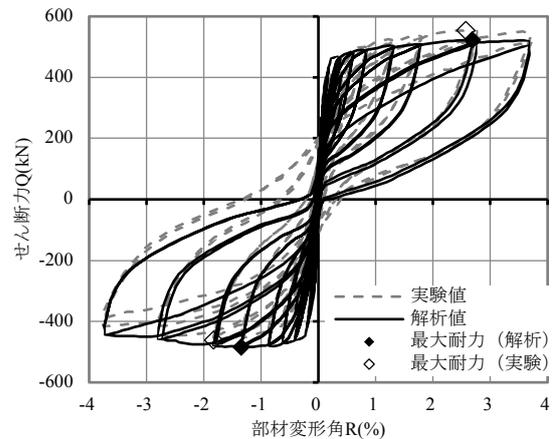
$$f_t = 0.33\sqrt{f'_c} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

ただし、 $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度[MPa]

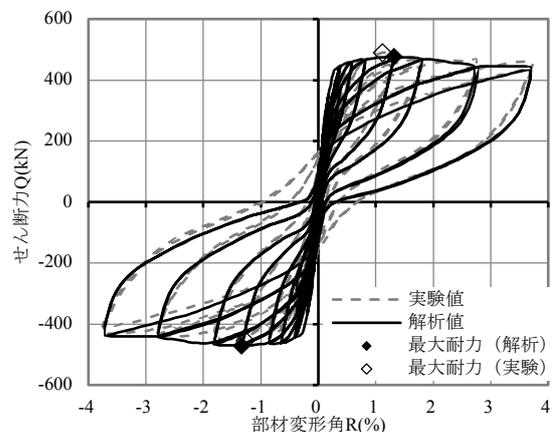
### 3 解析結果および実験結果との比較



(a) PRC1



(b) PRC2



(c) PRC3

図-6 せん断力(Q)-部材変形角(R)関係

### 3.1 せん断力(Q)－部材変形角(R)関係

図-6 に解析および実験によって得られたせん断力(Q)－部材変形角(R)関係をそれぞれの最大耐力点と併せて示す。表-3 に最大耐力点における実験値と解析値の比較を示す。正載荷側においては包絡線および除荷剛性をR=4.0%まで高い精度で再現できている。一方、負載荷側において PRC2 と PRC3 の包絡線は実験結果よりも大きめの評価となった。明らかな違いが見られる除荷時の履歴ループにおいては、鉄筋が降伏することによって実験のような残留変形となることが考えられるため、次節以降で鋼材の挙動を確認する。

表-3 最大耐力点における実験値と解析値の比較<sup>3)</sup>

		正側		負側	
		Q[kN]	R[%]	Q[kN]	R[%]
PRC1	実験値	554	2.50	-509	-1.54
	解析値	522	2.76	-518	-1.32
	実験値/解析値	1.06	0.91	0.98	1.17
PRC2	実験値	554	2.57	-461	-1.83
	解析値	523	2.68	-485	-1.35
	実験値/解析値	1.06	0.96	0.95	1.36
PRC3	実験値	490	1.12	-456	-1.26
	解析値	477	1.32	-472	-1.33
	実験値/解析値	1.03	0.85	0.97	0.95

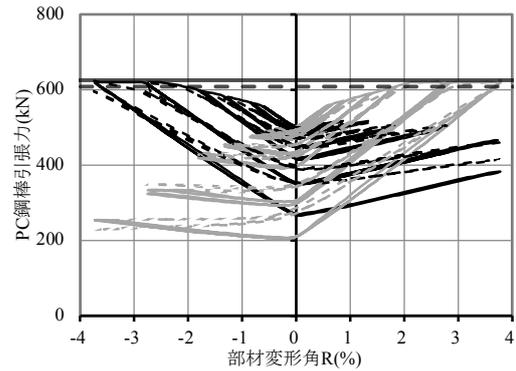
Q:せん断力, R:部材変形角

### 3.2 PC 鋼棒の挙動

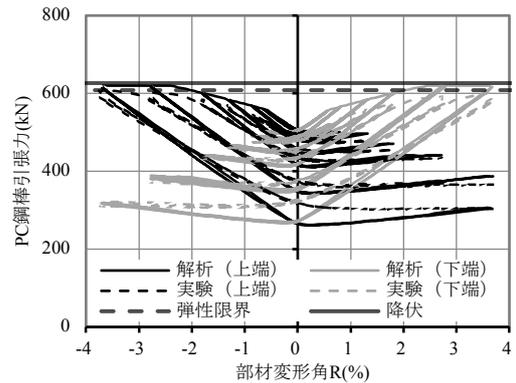
図-7に PRC1 と PRC3 の PC 鋼棒引張力－部材変形角(R)関係を示す。PRC2 は PRC1 とほぼ同じ挙動を示したため省略した。実験の PC 鋼棒引張力はスタブ端に設置したロードセルの値を使用した。図-7 中の X 軸に平行な点線は PC 鋼棒の弾性限界(0.02%オフセット強度)を、実線は降伏強度を示している。両試験体とも部材変形角 R=3.0%までは、除荷した際の履歴ループを含めて実験結果を精度よく再現することができた。また包絡線も実験結果と概ね一致したため、図-6 の包絡線も精度良く再現できたと考えられる。しかし、R=3.0%以降の PC 鋼棒引張力推移の傾向は再現できなかった。これにより図-6 の原点付近で見られる曲線の傾きにも実験値と解析値で差が現れていると考えられる。

### 3.3 スラブ筋および主筋歪みの推移

図-8 に PRC1 におけるスラブ筋歪み－部材変形角(R)関係、図-9 に主筋歪み－部材変形角(R)関係を示す。実験の歪みは危険断面に貼付した歪みゲージの値、解析では MS モデルのスラブ筋や主筋に相当するバネの歪みの値を使用した。図-8、図-9 のどちらにおいても、実験では部材変形角 R=-0.75%から-1.0%程度で降伏した際に歪みが大きく進展し、それ以後は歪レベルが引張側にシフトしたまま値が推移する。これに対し、解析ではスラブ筋または主筋が降伏しても、載荷と除荷の載荷経路は同じであり、実験のような履歴ループを描くことはな



(a) PRC1



(b) PRC3

図-7 PC 鋼棒引張力－部材変形角(R)関係

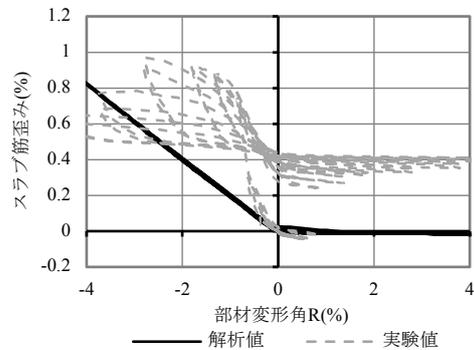


図-8 スラブ筋歪み－部材変形角(R)関係 (PRC1 上端)

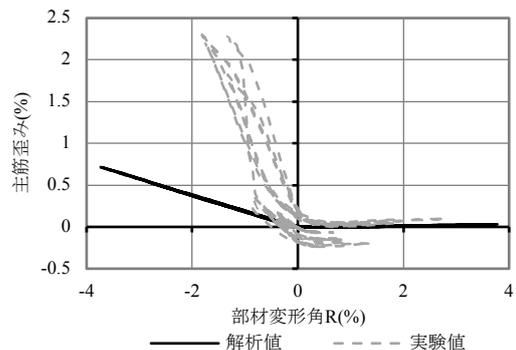


図-9 主筋歪み－部材変形角(R)関係 (PRC1 上端)

った。実験では梁固定端でひび割れが生じ、付着がある程度確保されていれば図に見られるように危険断面で歪みが局所的に大きくなる。変形集中領域で歪みが平均化されるMSモデルでは、実験で生じる局所的な歪みや応力度の集中を再現できなかったことになる。

### 3.4 残留変形角

図-10にPRC1とPRC2の残留変形角—部材変形角(R)関係を示す。PRC3はPRC2とほぼ同じ傾向を示したため省略した。残留変形角は、梁部材に作用する水平荷重が0kN時の正負除荷時部材変形角を用いた。解析、実験とも各サイクル2周目の履歴ループを用いて算出した。

両試験体ともにR=2.0%まで実験と解析で残留変形角が0.4%以下と小さな値をとった。PRC1はR=4.0%まで精度良く実験結果を追跡することができた。一方、PRC2はR=0.25%から1.0%までは実験結果に近い値を再現することができたが、R=-1.0%以降、実験値は解析値よりも上昇傾向にあった。これは前節でも述べたように、降伏後の主筋の影響を受けると考えられる。

### 3.5 等価粘性減衰定数 $h_{eq}$

図-11にPRC1とPRC2の等価粘性減衰定数( $h_{eq}$ )—部材変形角(R)関係を示す。PRC3はPRC2と同じ傾向を示したため省略した。等価粘性減衰定数は文献7)に基づいて算出した。解析、実験とも各サイクル2周目の履歴ループ

ープを用いて算出した。

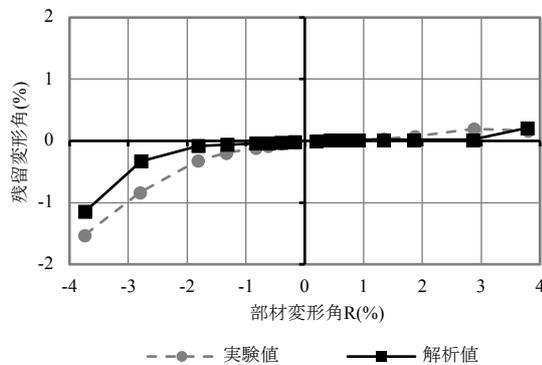
両試験体とも、部材変形角R=4.0%まで精度良く実験値の傾向を捉えることができた。R=2.0%以下で $h_{eq}$ が13~15%程度と、実験結果と同程度の値を示した。PRC1では解析値のほうが実験値に比べ大きな値をとり、危険側の評価となった。

また実験結果と同様に、正負荷重ともにスラブ筋の定着があるPRC1のほうが、 $h_{eq}$ が大きくなる傾向を解析で捉えることができた。

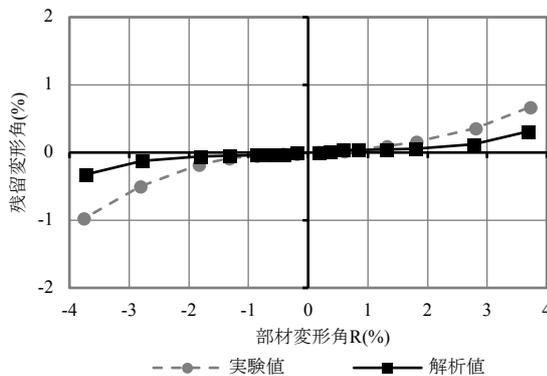
## 4. 結論

本報では、MSモデルを用いた解析手法を提案し、静的荷重実験を行った3体のアンボンドPRC造梁を対象として、実験結果の再現を試みた。梁端部の変形集中領域長さ $L_p$ を梁せいDの0.5倍と仮定してモデル化することで、せん断力—部材変形角関係・PC鋼棒の応力の推移・等価粘性減衰定数に関する実験結果を精度良く再現できた。

ただし、せん断力—部材変形角関係における除荷時の履歴ループやスラブ筋歪み・主筋歪みの挙動、および残留変形角に関しては、実験結果を精緻に捉えることができなかった。除荷時の履歴ループは、前節の通り鉄筋やPC鋼棒とコンクリートの影響を受けると予測される。そ

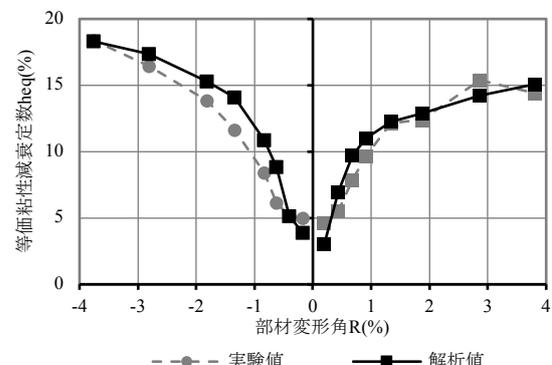


(a) PRC1

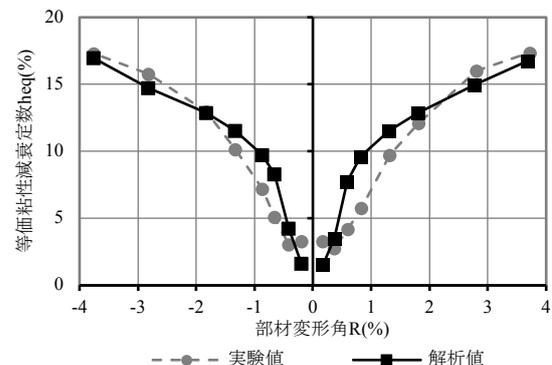


(b) PRC2

図-10 残留変形角—部材変形角(R)関係



(a) PRC1



(b) PRC2

図-11 等価粘性減衰定数  $h_{eq}$ —部材変形角(R)関係

ここで今後の課題として、それらの材料に関する履歴ループについて高精度な構成則モデルが求められる。

#### 謝辞

本研究は、一般社団法人長寿命建築システム普及推進協議会による長寿命建築システム普及推進事業の一環として行われた実験で得た実験データを利用しました。本研究の一部は、東工大フロンティア研究所全国共同利用を用いて行われました。

#### 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，Vol.674(NILIM)，Vol.136(BRI)，2012.3
- 2) 岸本一蔵，大野義照：断面解析を用いたプレストレストコンクリート梁部材のエネルギー吸収能に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，24 巻，2 号，pp.643-648，2002.6
- 3) 森口佑紀ほか：スラブ付アンボンドプレストレストコンクリート梁の曲げ性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.749-752，2014.9
- 4) 渡邊秀和，森口佑紀，小原拓，河野進，竹中啓之：ファイバーモデル解析を用いたアンボンド PCaPC 造梁の損傷評価，日本建築学会構造系論文集，No.729，pp.1921-1931，2016.11
- 5) 株式会社構造システム：任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム，SNAP Ver.7，2019
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 7) 柴田明德:最新耐震構造解析（第 3 版），森北出版，2014.12