# 論文 PC 部材の履歴モデル別にみた等価粘性減衰定数と残留変形の比較

柴田 祐丞\*1・藤田 大\*2・岸本 一蔵\*3・大野 義照\*4

要旨:提案されている既往のプレストレストコンクリート部材の履歴モデルに対し,プレストレス率,鋼材 係数,初期導入力の大きさ,PC鋼材位置を要因としたパラメトリックスタディを行い,分割要素法を用いた 解析結果との比較から,等価粘性減衰定数および残留変形率についてのそれぞれのモデルの特徴について検 討を行った。いずれの履歴モデルにも適合性の良い条件と悪い条件が存在するが,モデルの簡便さ,等価粘 性減衰定数および残留変形率の解析結果との整合性等から,PC部材の履歴モデルとしては浜原・尹が提案す る履歴モデル<sup>1)</sup>が適当であると考えられる。

キーワード:プレストレストコンクリート,履歴モデル,等価粘性減衰定数,残留変形量,分割要素法

1. はじめに

建築構造設計では,限界耐力計算法に代表されるよう に,諸事における性能を明確化する性能設計への移行が 進みつつあり,プレストレストコンクリート(以下 PC) 構造の耐震設計では,日本建築学会から 2009 年度に限 界耐力設計を対象とした耐震設計指針を刊行する予定 のあることが 2007 年度大会中に開催されたパネルディ スカッションにおいてアナウンスされている。

限界耐力設計法に限らず,建物の耐震性能を地震動と の関連で評価するためには,建物や部材の荷重-変形履 歴が必要になるが PC 構造では鉄筋コンクリート構造に おける武田モデルのような代表的な履歴モデルが定ま っていない。これは,部材内に配置される PC 鋼材の多 様性(鋼材量,鋼材位置,鋼材種等々)が原因で,その 履歴形状が大きく変わるためであり,これらを統一的に 表すモデルの構築が非常に難しいことに起因している。 このような状況下,1)浜原・尹モデル<sup>1)</sup>,2)西山モデ ル<sup>2)</sup>,3) 林・岡本モデル<sup>3)</sup>の3つの履歴モデルが研究お よび実務に比較的よく用いられている。しかしながら、 これらの履歴モデルがそれぞれどのような特徴をもち, 設計や解析に用いる場合,等価粘性減衰定数や残留変形 にどの程度の差違が生じるのかは必ずしも明確にはな っていない。これらを検討した唯一の資料として,浜原 等が文献4において既往の実験との比較検討を行ってい るが,各種要因に対し系統だった検討とはなっていない。

本論文では上記3種の履歴モデルについて,その特徴 について示すと共に,各種要因が変化する場合に各モデ ルがどのような履歴を描くのか,また,等価粘性減衰定 数および残留変形量の値にどのような差異がみられる のかを検討し,その適用性について検討する。 2. 既往の履歴モデルの特徴

2.1 既往の履歴モデル

本項では既往の履歴モデルについて紹介し,その特徴 について示す。なお,鋼材降伏前ではRC,PCに限らず 履歴消費エネルギー,残留変形ともに小さく,耐震性に 関しては問題とはならないことから,本論文では部材の 塑性化後の履歴のみを対象とする。

(1) 浜原・尹モデル(モデル A)

浜原・尹モデルの特徴はRCタイプの履歴(図-1(a)) と純PCタイプの履歴(図-1(b))をパラメータ を用 いて,結合することにより求められることにある(図-1(c))。は普通鉄筋,作用軸力,初期導入力大きさの条 件から算出される(図-1中の式(1))。このモデルは複 雑になりがちなPC部材の履歴を単純な2つの履歴モデ ルを足し合わせることにより求めている点が大きな長 所であり,特に履歴がスケルトン上以外での点から反転 するような状況では,他の履歴モデルでは,履歴の詳細 なルールを"その履歴ルールの場合分けされた各々の条 件"に対し定める必要があるのに対し,本モデルでは比 較的単純なRCモデルの履歴についてのみ定めれば良い という点が実用上のメリットとなる。

(2) 西山モデル(モデルB)

本モデルでは図 - 2 に示す 3 点 A, B, C を設定するこ とによりモーメント(M) - 曲率()関係が描かれる。 最大変形点 A から除荷により B 点を指向するが,同点で の曲率 」は同図中の式(3)で表されるように塑性率(µ) の関数となっており,µの増加(=変形の増加)に伴い 大きな値,即ち最大変形点 A の曲率 mpに近づく。よっ て履歴面積の大きなエネルギー吸収の大きな履歴とな

*1	大阪大学大学院	工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)
*2	東京大学大学院	工学研究科建築専攻
*3	大阪大学大学院	工学研究科地球総合工学専攻 准教授 工学博士 (正会員)
*4	大阪大学大学院	工学研究科地球総合工学専攻 教授 工学博士 (正会員)

る。また B 点の M は  $0.8M_u$  ( $M_u$  は最大耐力)から  $M_{ld}$ を引いた値であるが,最も PC 的性質が強い場合(プレストレッシング係数()=1),  $M_{ld}$ が最小に(B-C 点間距離が最も小さく)なり,エネルギー吸収能の小さい履歴となる。一方 M- 関係の負側から正側を目指す場合の指標点 C 点の は, B 点と同じ」と設定されている。 M は  $0.8M_u$ の固定値である。本モデルでは B 点の M の値を決定する  $M_{ld}$ の大きさが履歴面積に大きく影響するが,  $M_{ld}$ の計算式(図 - 2 中式(2))をみてもわかるように,その値は =1 で最小値  $0.3M_u$ である。この値は =1(純 PC 部材)としてはかなり大きな値と考えられる。 即ち実際よりエネルギー吸収の大きな履歴になることが予想される。

(3) 林・岡本モデル(モデルC)

本モデルは図 - 3 に示す 2 点 B,C を設定することによ り履歴ループが描かれる。両点の M の絶対値は共に  $M_{d0}$ と設定されており, $M_{d0}$  は初期導入力の大きさ( $P_e/T_{py}$ ), プレストレッシング係数(),最大経験部材角( $R_{max}$ ) の関数として式(4)から求められる。一方,A 点から B 点を指向する剛性  $K_{d0}$  は, をパラメータとする式(5) により計算される。上記の  $M_{d0}$ ,  $K_{d0}$  から B 点が決定さ れる。更に B 点から C 点を指向する勾配  $K_{d1}$  が をパラ メータとする式(6)により求まるが,C 点の M は B 点 での M の逆符号の値,即ち- $M_{d0}$ とされているので,これ らの条件により C 点が決定される。 が1に近づき PC の性質が強くなるほど, $K_{d0}$ の傾き, $M_{d0}$ の値は小さくな リ,エネルギー吸収の小さな履歴になる。また,  $P_e/T_{py}$ が大きいほど, $R_{max}$ が大きいほど  $M_{d0}$ の値は小さくなり, エネルギー吸収の小さな履歴になる。

## 2.2 考慮されている要因

表 - 1に,履歴形状に影響を与えると考えられる要因 と,それらの要因が上記(1)~(3)の各モデルでどの ように考慮されているかを示す。考慮要因は (プレス トレッシング係数),qpr(鉄筋鋼材係数), (PC鋼材 - コンクリート間の付着強度), Pe/Tpy(PC鋼材の降伏 耐力に対するプレストレス導入力の割合),dp1(断面せ いに対する圧縮縁から引張側PC鋼材位置までの距離 の比)である。いずれのモデルにおいても PC鋼材 - コ ンクリート間の付着については考慮されていないが,モ デルA,Cについてはそれ以外の要因は全て考慮されてい る。

#### 2.3 除荷時履歴の特徴

各履歴モデルの概形を理解するために,図-4に純PC 部材に近い =0.9とRC部材に近い =0.5のケースにつ いて,塑性率1および部材変形角(R)=1/50時の履歴を 示す。具体的な検討は3章で行うが,いずれのケースで もモデルCが最も原点指向性の強いモデルであること, モデルBでは =0.9であってもエネルギー吸収能の大き な履歴を描いていること等がわかる。

#### 3. 等価粘性減衰定数および残留変形量

- 3.1 検討条件
  - (1) 検討対象部材とパラメータ



#### 表-1 各モデルの考慮要因

論文中の名称	提案者	λ	$q_{\scriptscriptstyle pr}$	τ	$\eta P_e/T_{py}$	$d_{pl}$
モデルA	浜原·尹			-		
モデルB	西山		-	-	-	
モデルC	林·岡本			-		

間接的に考慮されている



も行う。分割要素法は図-6に示すように、各部材を部 材せい方向および材軸方向にそれぞれ分割して剛性マ トリックスを誘導する方法である。分割要素法ではいず れの履歴モデルでも考慮されていない PC 鋼材 - コンク リート間の付着について検討するため,付着強度を 10N/mm<sup>2</sup>(異形鋼棒を想定)と 1N/mm<sup>2</sup>(丸鋼を想定) の2種類について計算を行う。なお,検討は最もRC的 なモデル(モデル名:Astd =0.5 ,  $q_{pr}=0.1$  ,  $\eta P_e/T_{py}=0.2$  , d<sub>p1</sub>=0.6)と最も PC 的なモデル(モデル名:Bstd =0.9,  $q_{pr} = 0.3$ ,  $\eta P_e/T_{pv} = 0.8$ ,  $d_{p1} = 0.9$ )を2つを標準モデルとし, 表-2に示す各5つのパラメータが単独でそれぞれ変化し た場合の10(5×2)ケースについて行う。なお,モデル BはM- 関係を与えるものであることから,等価塑性ヒ ンジ長さに 0.5Ds(Ds: 断面せい)を仮定し,R= ×0.5Ds として求めた。また,分割要素法における材軸方向の分 割ブロック1つの長さは文献6を参考に0.5Dsとして計 算を行った。

## (2) 履歴のスケルトンの設定方法

本検討では,全てのモデルに対し共通のスケルトン (トリリニア)を与える。設定する折れ曲がり点は,曲 げひび割れ点および部材降伏点(PC部材の剛性低下は, 部材条件によって異なる原因で発生するため,ここでは あえて部材降伏の名称で呼ぶ)とし,その設定方法は以 下の式によった。曲げひび割れ点は初期剛性 K<sub>1</sub>(=EI), 曲げひび割れモーメント M<sub>er</sub>(式(7))により設定し,



曲げ降伏点については降伏剛性低下率 <sub>y</sub>(式(8)),降 伏曲げモーメント M<sub>y</sub>=(M<sub>u</sub>)(最大荷重の9割に設定,式 (9))により設定した。

$$M_{cr} = \sigma_{tb} \cdot Z + \sum P_e \cdot \{(Z/(b \cdot D)) + e\}$$
(7)  
$$(\sigma_{tb} = (5/3) \cdot 0.07 \cdot \sigma_B)$$

$$\alpha_{y} = \begin{cases} 1.64 \left( n_{r} \cdot p_{t} + n_{p} \cdot p_{g} \cdot \frac{\sigma_{py}}{\sigma_{y}} \cdot \frac{d_{g}}{D} \right) \\ + 0.043 \left( 1 + \frac{a}{D} \right) + 0.33 \cdot \eta_{0} \end{cases} \cdot d_{1}^{2}$$
(8)

$$M_{u} = 0.9 \begin{cases} a_{p} \cdot \sigma_{py} \cdot d_{p} + a_{i} \cdot \sigma_{y} \cdot d_{t} - a_{i} \cdot \sigma_{y} \cdot (D - d_{t}) \\ -(a_{p} \cdot \sigma_{py} + a_{i} \cdot \sigma_{y} - a_{i} \cdot \sigma_{y}) \cdot k lk 2 \cdot x_{n} \end{cases}$$
(9)

b:断面幅,D:断面せい,ΣP<sub>e</sub>:プレストレス力総和 e:ΣP<sub>e</sub>作用位置から断面中心までの距離 tb:コンクリート引張強度,B:コンクリート圧縮強度 a:せん断スパン,0:軸力比(=N/(b・D・B)),N:軸力 dg,dr:圧縮縁からPC鋼材までの距離,有効せい nr,np;PC鋼材,普通鉄筋に関するヤング係数比 pg,pt:PC断面積/(b・D・B),引張鉄筋断面積/(b・D・B) y, py:普通鉄筋,PC鋼材の降伏応力度

### 3.2 等価粘性減衰定数

図-7((a-1)~(a-5),(b-1)~ (b-5))に各モデルおよび分割要 素解析により求まる等価粘性減 衰定数(*h<sub>eq</sub>*)を示す。なお検討 は、「3.1 検討条件」で述べたよ うに,標準モデルAstd,Bstdを 基準に,各パラメータを単独に 変化させた場合の10のケース について行っている。同図よ以 下のことがわかる。

(1) 全体の傾向:解析値は, =0.9 すなわち純 PC に近い部材 の場合,部材角(R)の増加に伴う heaの増大の程度は小さく,また 付着の大小にかかわらずその値 には殆ど差がない。これは,解 析時の PC 鋼材の応力度 - ひず み度関係例である図 - 7に示す ように, PC 鋼材 - コンクリート 間の付着は最大変形時における PC 鋼材の降伏,未降伏の状況に は影響するが,最大変形時から の除荷時においては,いずれも エネルギー吸収を伴わない弾性 挙動状態を示すためである。従 って付着の大小が heq に及ぼす 影響は小さく,かつ hea は小さい。 この状況は,部材変形が R=1/50 を超える大変形時でも同様であ リ,PC 鋼材が圧縮側で降伏する ことがないため,エネルギー吸 収に寄与せず,部材の経験する 最大変形が大きくなる場合でも heq はほとんど変化しない。この 状況に対する各履歴モデルの適 合度をみると,いずれのモデル においても部材角増大に伴う heaの増加量は小さく、この現象 を良く反映しているといえる (hea の大小関係についての考 察は後述)。一方, =0.5, すな わち RC に近い部材では,部材 の曲げ耐力に占める普通鉄筋の 割合が大きく,普通鉄筋は部材



変形の早期に降伏することから,部材角の増加に伴い普 通鉄筋の塑性化に伴うエネルギー吸収能は増加する(図 -9)。従って, *h<sub>eq</sub>* も部材角の増加に伴い大きくなる。 この状況に対する各履歴モデルの適合度をみると,モデ ルA(印),C(印)ではこの傾向を良く表しており, 増加の程度も解析値と概ね等しい。 (2) モデルA(印):本モデルは,3 モデル中,分割要素解析結果と最も よく一致している。 =0.9 の場合, heq の値は解析値に比べて塑性率 1 程度の R が小さい範囲で 2%程度低 い値を, R=1/50 の場合でほぼ同程 度の値を示している。 以外のパラ メータ ( q<sub>pr</sub> , PC 鋼材位置 , 初期導 入力)が変わる場合でもその値はほ とんど変わらない。 =0.5 の場合, Astd(a-1)と, Astd から を 0.9 に代 えた(a-2)以外では解析値と比較的 よく一致していることがわかる。た だし, を 0.9 に代えた(a-2)では, 塑性率(µ)=1の時の変形が R=0.004 程度と非常に小さいため, 塑性率が大きくなり, h<sub>ea</sub> が大きく なったものと思われる。

 (3)モデル B(印):本モデルは, の大きさにかかわらず,全般に h<sub>eq</sub>をかなり大きく評価する傾向が ある。特にが小さく,かつ塑性率 が小さい場合にその傾向が著しい。 また,変形の増大に伴う h<sub>eq</sub>増加の 程度が他のモデルおよび解析値に 比べて小さく,本モデルでは塑性率 1程度の小さい変形時と,R=1/50時 の差はいずれの場合でも1%程度以 下である。以外のパラメータが変 わる場合でもその値は殆ど変わら ず, =0.5の場合のh<sub>eq</sub>は15~17% 程度, =0.9の場合10%~12%程 度である。

(4)モデル C( 印):本モデルは,
 いずれの条件においても 3 モデル
 中最も h<sub>eq</sub>を小さく算定する。 =0.9

の場合には,0%~4%程度と解析や他のモデルと比べ非 常に小さく,=0.5 の場合では, $q_{pr}$ が大きい場合, $d_{p1}$ が大きい場合に小さい値となっている。上記のように, このモデルの特徴は $q_{pr}$ ,すなわち PC 鋼材量が大きくな ると  $h_{eq}$ が小さくなる性状を持つことである。既往の研 究<sup>7)</sup>では,PC 部材の $h_{eq}$ は (曲げ耐力に対する PC 鋼 材の寄与率)に強く影響を受けるが, $q_{pr}$ にはあまり影響 を受けないと報告されている。また,前述したように =0.3 で $q_{pr}$ =0.3 のケースでは $h_{eq}$ が 0~1%,=0.5  $q_{pr}$ =0.3 の RC 部材に近い条件においても, $h_{eq}$ が 1~7%と一般的



単独で変化させた場合の結果 パラメータを単独で 図-10 残留変形率(REr)の比較

に考えられる値に対して非常に小さい値を示すことが

## 3.3 残留変形量

わかる。

図 - 10 (a-1~a-5, b-1~b-5)に各モデルおよび分割 要素解析により求まる残留変形率 (*REr*)を示す。なお 検討は, *h<sub>eq</sub>*の検討と同じ 10 のケースについて行ってい る。同図より以下のことがわかる。

(1)全体の傾向:解析値は, =0.9 すなわち純 PC に近い 部材の場合,部材角の増加に伴う REr の増大の程度は小 さく,また付着の大小にかかわらずその値には殆ど差が ない。これは,先の等価粘性減衰定数の項で述べたよう に,最大変形時からの除荷時においては PC 鋼材が弾性 挙動状態にあるためである(図-8)。従って付着の大 小が REr に及ぼす影響は小さく,かつその値は小さい。 この状況は,部材変形が R=1/50 を超える大変形時でも 同様であり,PC 鋼材が圧縮側で降伏することがないため, PC 鋼材がエネルギー吸収を行わず,部材の経験する最大 変形が大きくなる場合でも REr はほとんど変化しない。 この状況に対する各履歴モデルの適合度をみると,いず れのモデルにおいても部材角増大に伴う REr の増加量は 小さく,この現象を良く反映しているといえる。一方,

=0.5, すなわち RC に近い部材では,部材の曲げ耐力 に占める普通鉄筋の割合が大きく,普通鉄筋は部材変形 の早期に降伏することから,部材角の増加に伴い普通鉄 筋の塑性化程度は増大しする。従って,REr も部材角の 増加に伴い急速に大きくなっている。この状況に対する 各履歴モデルの適合度をみると,モデルA(印)では この傾向を良く表しており,変形量が増加するときの増 加の程度も解析値と概ね等しい。

(2)モデル A( 印):本モデルは, *h<sub>eq</sub>* の場合と同様,分 割要素解析結果と最もよく一致している。 =0.9 の場合, 全ての条件で解析値とほぼ同程度の値を示している。 =0.5 の場合,全般に解析値を上回る値となっている。 (3)モデル B( 印):*h<sub>eq</sub>* の場合と同様,, の大きさにか かわらず,全般に *REr* を大きく評価する傾向がある。 (4)モデル C( 印):本モデルは,PC 的性質が強い場合 には,3 モデル中最も *REr* を小さく算定する傾向がある。 即ち =0.9 の場合には,ほとんどのケースで 5%以下と なっており,解析や他のモデルと比べ非常に小さくなっ ている。一方 =0.5 の場合では,d<sub>p1</sub> が 0.6 のケース,*q<sub>pr</sub>* が 0.3 のケースで解析値より小さい値となっている。

#### 4. まとめ

提案されている 3 つの PC 部材履歴モデルを対象に, 等価粘性減衰定数(*h<sub>eq</sub>*)および残留変形率(*REr*)を計 算し,それらと分割要素法による解析値との比較から, 各モデルの PC 部材の履歴モデルとしての適正について 検討した。得られた知見を以下に示す。

- 浜原・尹が提案する履歴モデルは、モデル自身が簡 便であること、h<sub>eq</sub>、REr共に解析値との適合性が最 も良いこと等から、PC部材の履歴モデルとして有用 であると考えられる。
- 2) 西山が提案する履歴モデルは,他の2モデルおよび 解析値に比べ h<sub>eq</sub>, REr ともに大きめに評価する傾向 がある。
- 林・岡本が提案する履歴モデルは,PC 的性質が強い 部材では,他の2 モデルおよび解析値に比べ h<sub>eq</sub>, REr ともに小さめに評価する傾向がある。

参考文献

- 浜原正行, 尹元奎ほか: プレキャストプレストレス トコンクリート柱の復元力特性に関する実験的研 究,日本建築学会論文報告集,1996, 480, pp.63-69
- Nishiyama M.: Seismic Response and Seismic Design of Prestressed Concrete Building Structures, Ph.D. Thesis, Kyoto University, 1993, pp.155-179
- 林三男ほか: PC 部材の履歴特性と PC 造建物の地震 応答性状,プレストレストコンクリート,1995, Vol.37, 4, pp.57-67
- 4) プレストレスト(鉄筋)コンクリート構造部材の設計
   法,日本建築学会構造委員会,2000,pp.145-17
- 5) 前田博司・岸本一蔵・西山峰広・大野義照: PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 部材の履歴挙動解析法,コンクリート工学年次論文集,2004, 第27巻,第2号, pp.709-714
- 6) 隅田寛・岸本一蔵・李徳基・大野義照: PC 梁部材の 残留変形率算定式,プレストレストコンクリート, 2007, Vol.49, №5, pp.80~89
- 7) 解析法の違いによるプレストレストコンクリート
   梁部材の残留率の比較,李 徳基・岸本 一蔵・西山峰弘・大野 義照,コンクリート工学年次論文集, 27 巻,1号,pp.583-588,2005.6

$$r = C_r \cdot \mu_p^{a_r-1} \qquad a_y = (a/D)/4 C_r = \alpha_y \cdot a_r \cdot \frac{q_r^2}{q_r + \eta_g} \qquad a_y = (a/D)/4 \eta_g = \Sigma P_e/(b \cdot D_s \cdot \sigma_B) q_r = a_t/(b \cdot D_s \cdot \sigma_B) v \downarrow d x \chi \oplus \mathcal{O} \vec{\mathfrak{x}}(8)$$

付録2‐

$$K_{gy} = (M_u - M_g) / (R_{max} - M_g / K_1)$$

$$K_{ay} = (M_u + M_{cr}) / (R_{max} + R_{cr})$$

$$K_{dg} = K_{gy} \cdot \mu^{-\gamma} \qquad K_d = K_{ay} \cdot \mu^{-\gamma} \qquad M_g = (P_e / A_c) Z$$

$$\gamma = (3 / 7) \lambda' + 0.5$$

付録3 -

- :終局曲げ耐力に対するPC鋼材の寄与率 $\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_r}$  Mp:曲げ耐力のPC鋼材負担分Mr:曲げ耐力の普通鉄筋負担分
- $q_{rrr}$ :コンクリート断面の中心圧縮強度に対する 終局時の全鋼材応力の比率  $q_{rrr} = \frac{T_{py} + T_{po} + (T_{ry} - C_{ry})}{2}$

$$P_{pr} = \frac{I_{py} + I_{po} + (I_{ry} - U_{ry})}{b \cdot D_s \cdot F_c}$$

*1py*:引張側PC鋼材停伏時力,*1po*:圧縮側PC鋼材長期有効張力 *1ry*:引張側普通鉄筋降伏時力,*Cry*:圧縮側普通鉄筋降伏時力 b:断面幅,*Ds*:断面せい,*Fc*:コンクリート圧縮強度

d<sub>a</sub>: : 圧縮縁から引張側PC鋼材配置位置までの距離 を断面せい(Ds)で除し無次元化した値。

 $\eta P_{e}/T_{pv}$ : PC鋼材降伏耐力に対する初期導入力量の比率