

論文 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

岸本 一藏*1・大野 義照*2

要旨：ファイバー法による断面解析を行い，断面の諸条件及び断面に要求する変形量に応じて等価粘性減衰定数 (h_{eq}) がどのように変化するか，また，履歴形状，導入プレストレスがどのように変化するかについて検討した。更に解析モデルの終局プレストレス率 (λ) と h_{eq} の相関性についても検討した。その結果，ヒンジ部での回転角が 1/50 以下の変形領域では PC 鋼材は PC 鋼材配置位置にかかわらず圧縮降伏せず， h_{eq} の値は PC 鋼材—グラウト間の付着程度や PC 鋼材配置位置等の条件には大きな影響を受けないことを明らかにした。また， λ が同じ値であれば h_{eq} の値はほぼ同じであることを明らかにした。

キーワード：PC 梁部材，ファイバーモデル，等価粘性減衰定数，エネルギー吸収量

1. はじめに

2000 年 6 月に建築基準法が改正され，限界耐力計算による建物の耐震設計の手法が示されるに至った。同設計法では，部材の塑性ヒンジ部のエネルギー吸収能力にその基礎を置いている。よって，限界耐力設計法により建物耐震性を精度良く設定するためには，部材耐力だけではなく履歴特性を含めたエネルギー吸収能力を精度良く知る必要が不可欠である。

一方，プレストレストコンクリート (PC) 部材では，部材内に配置される PC 鋼材の影響により，鉄筋コンクリート (RC) 部材よりも原点指向性の強い曲げ挙動を示すことが知られており，エネルギー吸収能力に関しては RC 部材に比べて小さいとされている。しかしながら，配置される PC 鋼材の量，強度，初期導入力等の条件，或いは配置される普通鉄筋の諸条件によりその履歴形状は大きく変わり，その結果，部材のエネルギー吸収能の大小についても非常に大きな範囲に及ぶと考えられるが，これらの点について系統的に検討された研究は殆ど無い。

本論文は，ファイバー法による断面解析を用いて，プレストレストコンクリート梁部材のエ

ネルギー吸収能力について検討するものである。具体的には，断面内に配置される PC 鋼材に関する諸条件および断面に要求する変形量に応じて等価粘性減衰定数がどのように変化するか，また，履歴形状，導入プレストレスがどのように変化するかについて検討する。

2. 解析仮定と条件

解析対象とした断面は，図-1 に示すように断面幅 (b) × せい (D) が 400 × 1000 (mm) の矩形断面である。PC 鋼材配置の異なる 2 種の断面を設定しており，配置位置が断面中央の

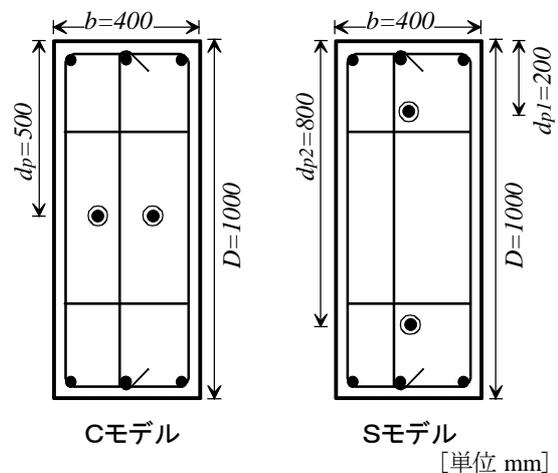


図-1 解析対象梁断面 [単位 mm]

*1 大阪大学大学院講師 工学研究科建築工学専攻 博士 (工学) (正会員)

*2 大阪大学大学院教授 工学研究科建築工学専攻 工博 (正会員)

表-1 解析に用いたパラメータ及び条件

要因	記号	水準
鉄筋鋼材係数	q_{sp}	0.1, 0.2, 0.3
引張鉄筋比	p_t	0.0, 0.2, 0.4, 0.8 [%]
ヒンジ部回転角	θ	1/200, 1/100, 1/50, 1/30
ひずみ適合係数	F	0.2, 0.8

【共通事項】
 コンクリート圧縮強度=30N/mm²
 コンクリートヤング係数=20000N/mm²
 普通鉄筋降伏強度=350N/mm²
 普通鉄筋ヤング係数=205000N/mm²
 PC鋼材降伏強度=1500N/mm²
 PC鋼材ヤング係数=200000N/mm²
 横拘束補強 D10@50mm、サブタイ本数1本
 PC導入力：降伏強度の80%
 有効プレストレス率：85%

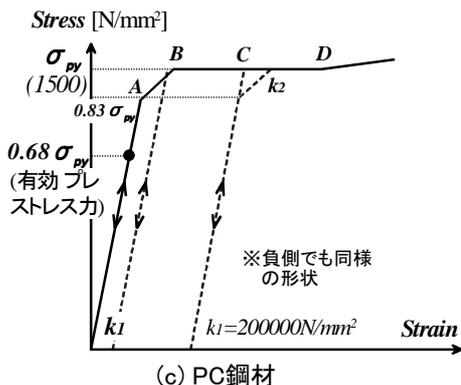
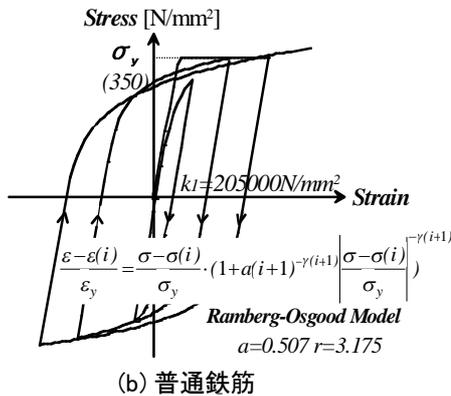
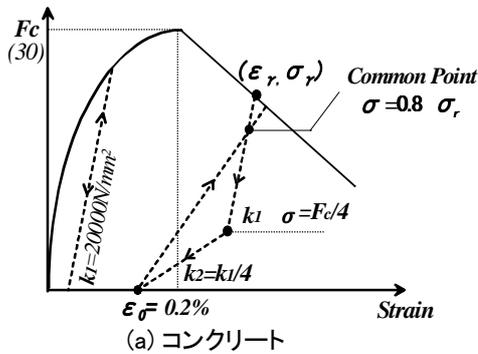


図-3 材料の応力度-ひずみ度関係

ものを C モデル、断面せい方向 200, 800mm の位置の S モデルとする。C モデルは、断面が曲げ変形を受ける場合に PC 鋼材のひずみ変動が最も小さい、即ち最も PC 鋼材が降伏しにくい断面を、S モデルは大きい、即ち降伏しやすい断面を想定している。採用したパラメータは、モデル別に示した PC 鋼材位置の他に、PC 鋼材量を表す鉄筋鋼材係数 (q_{sp})、引張側普通鉄筋量 (p_t)、ヒンジ部回転角 (θ)、PC 鋼材ーグラウト間の付着程度を表すひずみ適合係数 ($F = \Delta \epsilon_{pc} / \Delta \epsilon : \Delta \epsilon_{pc}$ は PC 鋼材ひずみ増分、 $\Delta \epsilon$ は PC 鋼材配置位置でのコンクリートひずみ増分) である。一般に F 値は部材変形の増加に伴い減少し、ある一定値に収束する値として定義されるが、ここでは部材の変形程度によらず一定値として扱っている。これは、部材変形に伴う付着減少の程度が、繰り返し履歴を受ける場合について明確な知見が得られていない事、また一定値として扱っても履歴形状に大きな影響が無い事りの理由による。なお、本論文の解析対象断面では普通鉄筋の複筋比を 1.0 としていることから、式(1)に示すように q_{sp} の値は直接 PC 鋼材量を表すパラメータである。

$$q_{sp} = \frac{T_{py} + T_{ry} - C_{ry}}{b \cdot D \cdot F_c} = \frac{T_{py}}{b \cdot D \cdot F_c} \dots (1)$$

ここで、 T_{py} ：全 PC 鋼材降伏時応力、 T_{ry} ：引張鉄筋降伏時応力、 C_{ry} ：圧縮鉄筋降伏時応力 b ：梁幅、 D ：梁せい、 F_c ：プレーンコンクリートの圧縮強度

表-1 に各パラメータの諸元および共通事項を

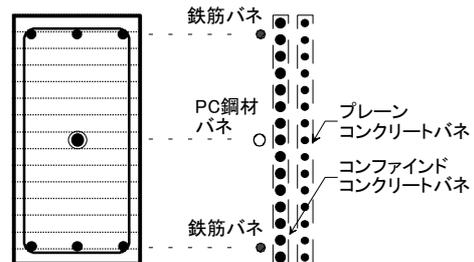


図-2 梁断面のモデル化例 (ファイバーモデル)

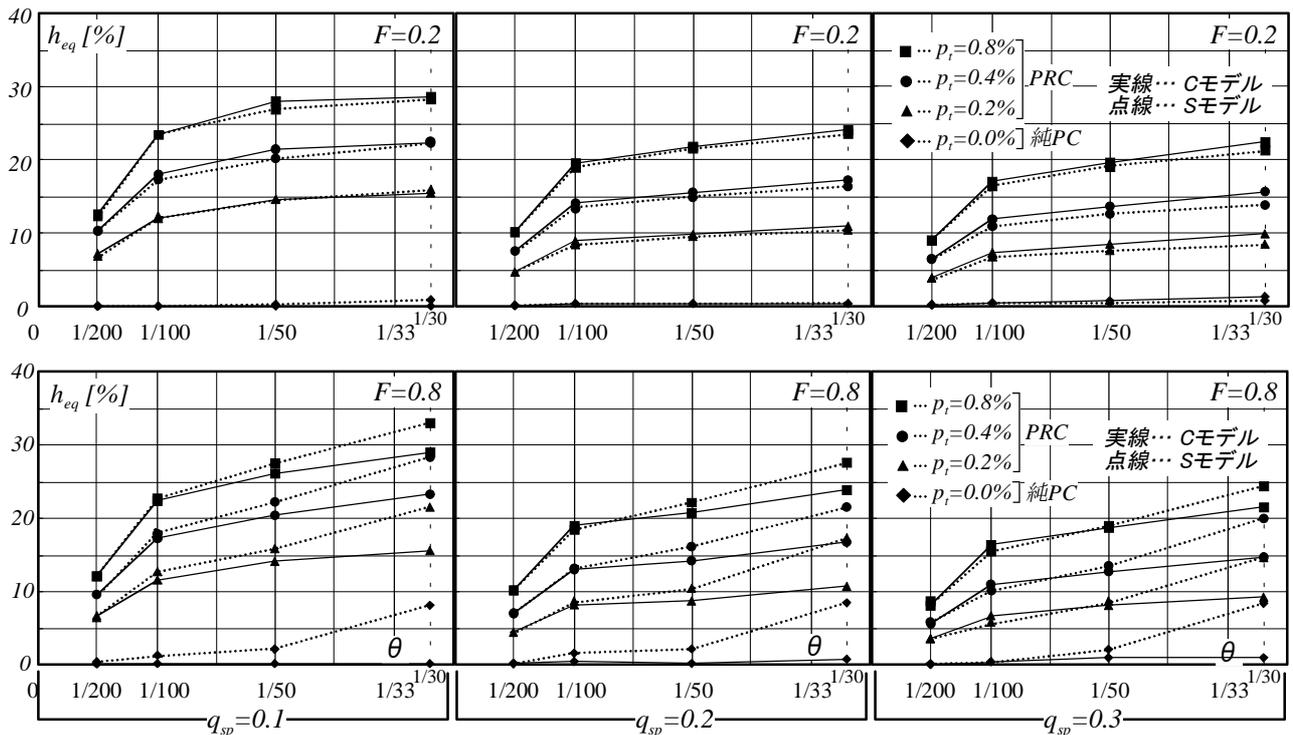


図-4 部材回転角(θ)—等価粘性減衰定数(h_{eq})関係

示す。断面解析は、図-2 に示すように断面をせい方向に分割し（分割数 100）、コンクリート、鉄筋、PC 鋼材それぞれをバネに置換するファイバーモデルにより行った。等価粘性減衰定数 (h_{eq}) は定常ループ時の値、即ち、設定する目標値（ヒンジ部回転角 θ ）に対し正-負-正の繰り返し解析を行い、その後、負-正で履歴が一周する場合について計算した。各材料バネの履歴則を図-3 に示す。コンクリートの応力度-ひずみ度 (S-S) 関係は応力上昇域を n 次関数、応力下降域を直線で近似するモデル²⁾を、また、鉄筋の S-S 関係は繰り返し応力を受ける場合の Bauschinger 効果を考慮したモデル³⁾を用いた。PC 鋼材については、文献 4 を参考にトリリニアモデルとした。なお、横補強筋により拘束を受ける断面コア部分のコンクリート、即ちコンファインドコンクリートの力学特性については中塚等の提案する式²⁾を用いた。

3. 解析結果と考察

部材塑性化によるエネルギー吸収については様々な点からの検討が可能であるが、ここでは

部材設計の代表的な指標である等価粘性減衰定数 (h_{eq}) を検討した。また PC 部材特有の性質である原点指向性について調べるため、履歴形状および PC 鋼材応力度についても検討した。

図-4 に各モデルの定常ループを描く時の h_{eq} を、横軸にヒンジ部での回転角 ($\theta =$ 断面曲率 (ϕ) \times 等価塑性ヒンジ長さ, $l_{eq}=1D$ と仮定 (D は断面せい)) をとって示す。1 つのグラフには、PC 鋼材が断面中央に配置される C モデル (図中実線)、0.2D、0.8D の位置に配置される S モデル (図中点線) のそれぞれについて鉄筋量が異なる 4 つのモデル、計 8 モデルを併記している。

(a) 純 PC モデル ($p_r=0.0\%$)

PC 鋼材のみが配置される純 PC モデルでは、普通鉄筋を有するモデルに比べ h_{eq} 値は極端に小さく、 $\theta < 1/50$ の領域では全てのモデルでおおよそ 3% 以下の値となっている。ただし S モデルで、かつ PC 鋼材-グラウト間の付着程度が大きい $F=0.8$ 場合、 θ が大きくなるにつれて h_{eq} は急に大きくなり、 $\theta=1/30$ 時では q_{sp} の値によらず約 8% となっている。この現象より詳し

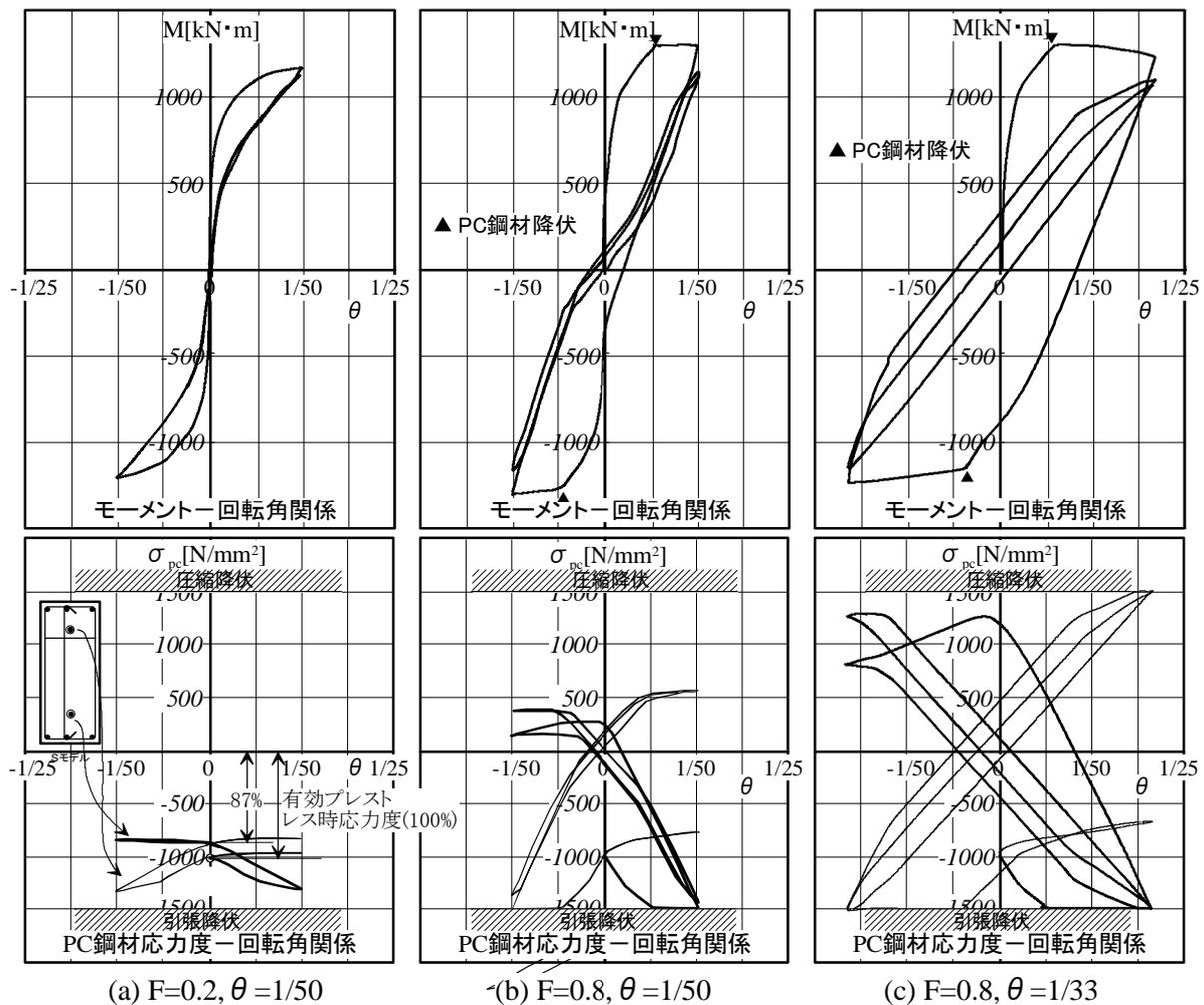


図-5 モーメント(M)－部材回転角(θ)関係($q_{sp}=0.3, p_t=0.0\%$)

く見るため図-5にSモデルの $q_{sp}=0.3, \theta=1/50$ 時における $F=0.8$ と $F=0.2$ (図5(a),(b)),更に $\theta=1/30$ 時における $F=0.8$ (同図(c))のモーメント(M)－回転角(θ)関係とPC鋼材応力度(σ_{pc})－ θ 関係を示す。図-5(a),(b)より, $\theta=1/50$ でPC鋼材－グラウト間の付着程度が小さい $F=0.2$ 場合,PC鋼材は圧縮を受ける側,引張を受ける側の両方について未降伏であり, σ_{pc} － θ 関係上の履歴は定常ループ時には同一線上をトレースしている。従ってPC鋼材によるエネルギー吸収はないことがわかる。M－ θ 関係はPC特有の原点指向性の強い形状を示しており,履歴によるエネルギー吸収も極めて小さい。また $F=0.8$ の場合,PC鋼材は引張を受ける側で降伏しているものの圧縮を受ける側では未降伏であり, σ_{pc} － θ 関係上の履歴は $F=0.2$

の場合と同様ほぼ同一線上をトレースしている。M－ θ 関係も原点指向性の強い履歴となっており吸収エネルギーは $F=0.2$ の場合と同様極めて小さい。一方,PC鋼材に残存する応力度を比較すると, $F=0.2$ の場合(図-5(a)),残存率($\theta=0$ 時におけるPC鋼材応力度/有効プレストレス時のPC鋼材応力度)は87%であるのに対し, $F=0.8$ の場合(図-5(b))ほぼ0となっている。にこれに対し, $F=0.8$ でより変形の大きい $\theta=1/30$ 時では,PC鋼材は引張側でも圧縮側でも降伏状態となっており,PC鋼材によるエネルギー吸収が発生していることがわかる。その結果M－ θ 関係は原点指向型の履歴とはならず,紡錘状のループを描く履歴吸収エネルギーの大きいものとなる。また,PC鋼材応力度の残存率は $\theta=1/50$ 時と同様ほぼ0である。

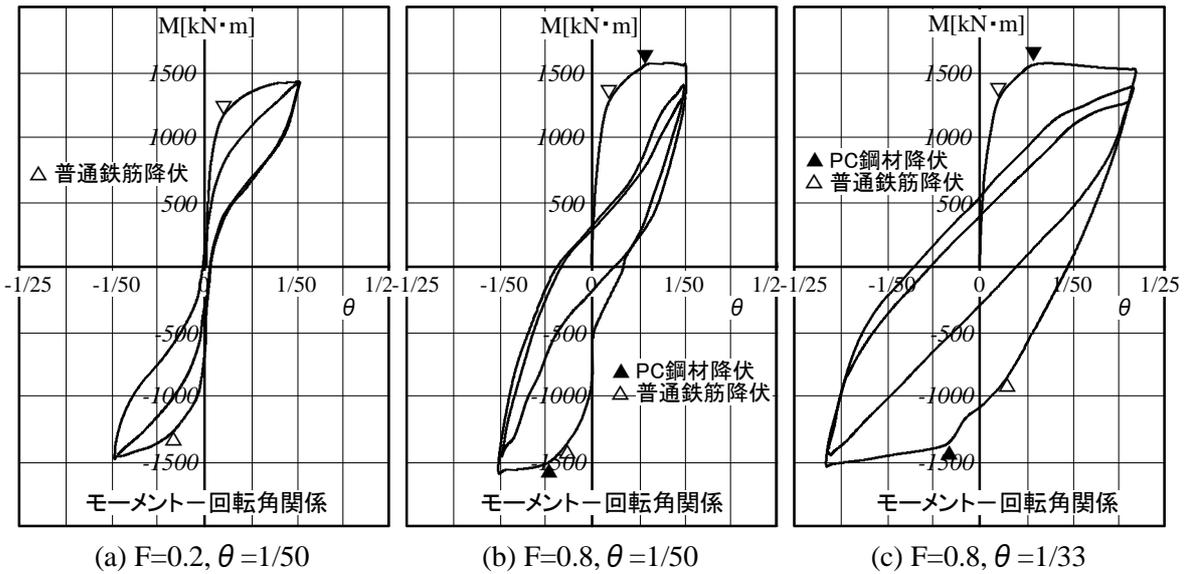


図-6 モーメント(M)－部材回転角(θ)関係($q_{sp}=0.3, p_t=0.2\%$)

(b) PRC モデル ($p_t=0.2\%, 0.4\%, 0.8\%$)

図-4 より、普通鉄筋が配置される断面では、引張鉄筋比 (p_t) が 0.2% の小さい値であっても、純 PC モデルに比べ h_{eq} の値は大幅に高いことがわかる (図中▲と◆印の比較)。 h_{eq} は $\theta=1/200 \sim 1/100$ の間で大きく上昇し、S モデルで $F=0.8$ (PC 鋼材の最も降伏し易いケース) の場合を除くと、 $1/100$ 以後 θ の増大とともに緩やかに増加しているが、 q_{sp}, p_t が同じであれば F の値や PC 鋼材位置に関係なくほぼ同じ値である。具体的には、最も PC 鋼材量が多く、普通鉄筋量が少ない $q_{sp}=0.3, p_t=0.2\%$ のモデルで、 $\theta=1/200, 1/100, 1/30$ 時の h_{eq} はそれぞれ、およそ 4, 6, 15%。最も PC 鋼材量が少なく、普通鉄筋量の多い $q_{sp}=0.1, p_t=0.8\%$ のモデルで、同じくそれぞれ、およそ 12, 23, 28% である。これに対し、S モデルで $F=0.8$ の場合、 $\theta=1/50$ 以上の回転角時において h_{eq} が急に大きくなる傾向がみられる。この傾向は先に述べた純 PC モデルの場合と同様であり、 $\theta=1/50$ 時を越える領域において、PC 鋼材が引張を受ける側でも圧縮を受ける側でも降伏に近いひずみを受けていることに起因する。図-6 に $q_{sp}=0.3, p_t=0.4\%$ 、 $\theta=1/50$ 時における $F=0.8$ と $F=0.2$ 、更に $\theta=1/30$ 時における $F=0.8$ の $M-\theta$ 関係を示す。履歴形状についても純 PC モデルと同様の傾向がみ

られるものの、普通鉄筋が配置されている影響を受けて純 PC モデルに比べて履歴面積は大きくなっている。特に純 PC 断面で $F=0.2, \theta=1/50$ 時のように、PC 鋼材が未降伏で PC 鋼材によるエネルギー吸収量が極めて小さい場合には、

表-2 終局プレストレス率(λ)一覧

		q_{sp}		
		0.1	0.2	0.3
p_t [%]	0.0	1.0	1.0	1.0
	0.2	0.81	0.90	0.93
	0.4	0.68	0.81	0.87
	0.8	0.52	0.68	0.76

$$\lambda = \frac{T_{py}}{T_{py} + T_y}$$

記号については式(1)参照

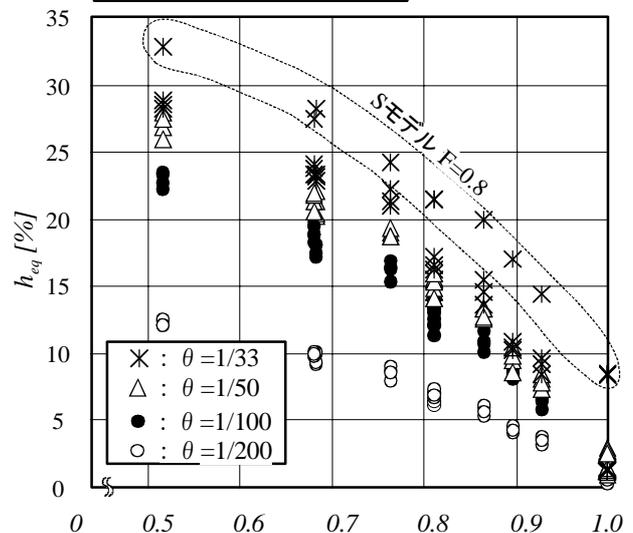


図-7 終局プレストレス率(λ)－等価粘性減衰定数(h_{eq})関係

h_{eq} の値は大きく改善される。

(c) 終局プレストレス率 (λ) と等価粘性減衰定数 (h_{eq})

表-2 に各モデルの λ の値一覧を、図-7 に各モデルの h_{eq} の値を λ を指標として θ 別にまとめたものを示す。同図より h_{eq} は λ が大きくなるに従い小さくなるが、PC 鋼材が圧縮側でも降伏するモデル、即ち S モデルで $F=0.8$ の場合(図中点線により囲まれた*印)以外の値は次のような傾向を示す。即ち、PC 鋼材量 (q_{sp})、引張鉄筋比 (p_t) の値が異なるモデルであっても λ が同じであれば各 θ 時の h_{eq} の値はほぼ同じである。また、 $\theta \leq 1/50$ 程度の変形では PC 鋼材-グラウト間の付着程度、即ち F 値の h_{eq} への影響は小さく、2~3%程度である。一方、 $\theta=1/30$ の変形では、PC 鋼材が圧縮側で降伏するモデルの値は同一条件の他のモデルに比べて大きな値となり、その程度は $\theta=1/30$ 時で λ 値にかかわらずおよそ5%大きい。

4. まとめ

PC 鋼材位置、PC 鋼材量、PC 鋼材-グラウト間の付着程度、普通鉄筋量、ヒンジ部回転角をパラメータとして、ファイバーモデルによる PC 梁断面の解析結果を行い、エネルギー吸収、履歴形状等に関して以下の知見を得た。

- 1) 純 PC 断面の場合、ヒンジ部回転角 (θ) が 1/50 以下の領域では等価粘性減衰定数 (h_{eq}) は 3%以下の非常に小さい値である。これに対し、普通鉄筋が配置される PRC 断面では、引張鉄筋比が 0.2%程度の小さい値であっても h_{eq} は大きく改善される。
- 2) PC 鋼材が引張降伏しても、圧縮側で降伏しない場合は、履歴の原点指向性は損なわれない。これは普通鉄筋が配置される断面においても同様である。但し、導入力は PC 鋼材の引張降伏により失われ、S モデル $F=0.8$ の場合、 $\theta=1/50$ 程度の変形で0となった。
- 3) 終局プレストレス率 (λ) が同じ値で、ヒンジ部回転角 (θ) が 1/50 以下であれば、PC

鋼材-グラウト間の付着程度、PC 鋼材配置位置の h_{eq} の大きさへの影響は小さく、値にしておよそ2~3%である。

本論文は梁の断面解析から PC 部材のエネルギー吸収能について検討したものであるが、実際の部材では普通鉄筋の抜け出しや、コンクリートひび割れ発生による劣化、PC 鋼材-グラウト間の滑りによるエネルギー吸収等、断面レベルでの検討が不可能な問題がある。今後これらの点について検討する予定である。

謝辞

本研究は、大阪大学工学部建築工学科4回生 井上直亮君の協力を得て行ったものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 岸本一蔵, 松居八重子, 大野義照: PRC 梁断面の履歴モデルに関する研究 (その2 コンクリート-PC 鋼材間の付着劣化が履歴に及ぼす影響の検討), 日本建築学会大会梗概集, C-2 構造4, pp.1041-1042, 1999.9
- 2) 日本建築学会構造委員会: プレストレスト(鉄筋)コンクリート構造部材の設計法-現状と将来-, 日本建築学会, pp.10-13, 2000
- 3) 岡田潔, 六車熙編: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.452-464, 1985
- 4) 日本建築学会: コンクリート構造(PC, PRC)部材の靱性設計手法と耐震架構への応用, pp.58-81, 1997.9