

耐震解析に用いるポリプロピレン繊維補強セメント系複合材料の応力-ひずみ関係の定式化

山田真司¹・佐々木智大²・Richelle Zafra³・川島一彦⁴

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 博(工) (独) 防災科学技術研究所特別研究員 (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

³修(工) 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

1. はじめに

コンクリート橋脚の曲げ耐力の低下は、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈、コアコンクリートの圧壊などによって引き起こされる。このため、かぶりコンクリートの剥落、コアコンクリートの圧壊を低減することにより、橋脚のじん性は向上する。ポリプロピレンファイバー繊維補強セメント系複合材料(以下、PFRCC)は、引張力作用下において、ひび割れ発生後も繊維の架橋作用によってひび割れ幅の拡大を抑え、ひび割れを複数のひび割れに分散させるひび割れ分散性を持つため、橋脚に利用した際に一般のコンクリートと比較して高いじん性が期待される。

PFRCCを塑性ヒンジ区間に用いた実大橋脚(C1-6)の震動実験結果によれば、C1-6の変形性能は少なくとも6%ドリフトまで、コアコンクリートの損傷や軸方向鉄筋の座屈の進展を抑制し、かつ安定した履歴特性を保持する効果があることが明らかとなっている¹⁾。

PFRCCを用いた橋脚を動的解析するためには、PFRCCの構成則が必要である。しかし、現在までにPFRCCの構成則は開発されていない。応力-ひずみ関係を定式化するに当たっては、単に圧縮側や引張側のモデル化だけでは不十分であり、両者の相互作用を考慮する必要がある。

PFRCC以外の、他の繊維補強セメント系複合材料の構成則を検討した研究としては、Han et al.が挙げられる²⁾。これはKenser et al.がポリビニルアルコール繊維やポリエチレン繊維を対象に行った実験³⁾に

基づいて、圧縮側および引張側の応力-ひずみ関係をそれぞれ独自にモデル化したものである。また、Nagai et al.は、ポリビニルアルコール繊維を用いたセメント系複合材料を対象に、圧縮側と引張側の応力-ひずみ関係の相互関連性を考慮して、圧縮、引張、せん断の応力-ひずみ関係のモデル化を行っている⁴⁾。

本研究では一軸圧縮・引張載荷実験に基づき、圧縮側と引張側の応力-ひずみ関係の相互作用を考慮して、PFRCCの除荷・再載荷履歴特性を検討し、これを定式化する。

2. PFRCCの応力-ひずみ履歴特性

(1) 供試体および載荷方法

実験に用いた供試体は図-1に示すとおりであり、中央部の断面積は70x70mmの正方形で、供試体に引張力を作用させるため、上下端には、断面寸法25x25x3mmの山形鋼を2枚背中合わせに溶接した部材で補強した。上下端の断面積は105x70mmであり、高さは350mmである。

PFRCCの配合を表-1に示す。PFRCCの設計基準強度は40MPaとした。直径42.6 μ m、長さ12mmのポリプロピレン繊維を使用し、モルタルに対して体積比3%に相当するPFRCCを混入した。一般に繊維補強セメント系複合材料に混入する繊維の割合は体積比で2%程度であるが、平田らの研究結果によれば、ポリプロピレン短繊維を体積比で3%混入することにより、ひずみ硬化特性が向上する⁵⁾。このため、

表-1 PFRCCの配合

Water/Binder (%)	Sand/Binder (%)	Water (kg/m ³)	Fiber volume (%)
27	32.9	378	3

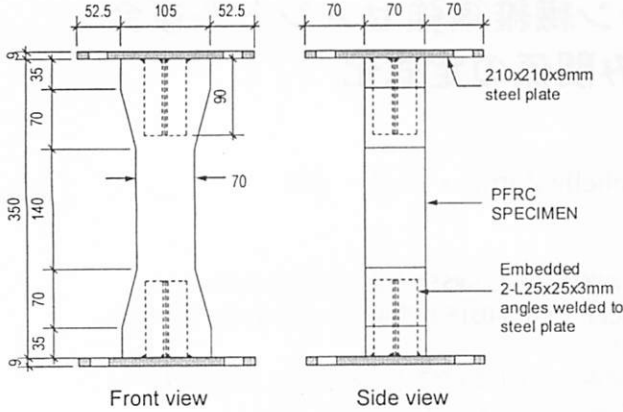


図-1 供試体 (mm)

強度やファイバーの攪拌、経済性等を総合的に考慮し、体積比で3%を加えることとした。なお、本実験で用いたポリプロピレン繊維の引張強度は482MPa、弾性係数は5GPaである⁵⁾。

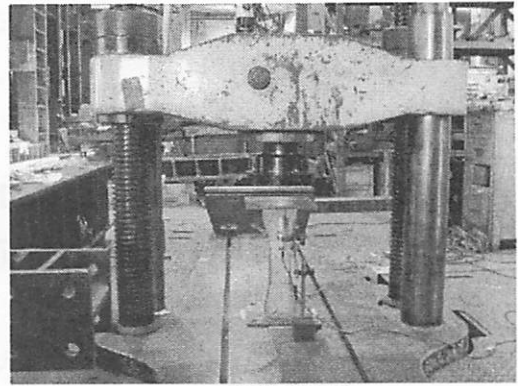
載荷実験に使用した載荷装置を写真-1に示す。単調圧縮載荷実験および圧縮除荷・再載荷実験には1000kN万能試験機を、引張・圧縮載荷実験には500kN動的アクチュエーターを使用した。載荷実験は表-2(a)に示す計13体の供試体に対して行った。実験に基づく平均圧縮強度は36MPaであった。

図-2は載荷履歴を示したものである。圧縮と引張の相互作用や除荷・再載荷過程を含めた応力-ひずみ関係式を定式化するため、以下の3種類の載荷履歴に対する応力-ひずみ関係を求められるように載荷履歴を定めた。

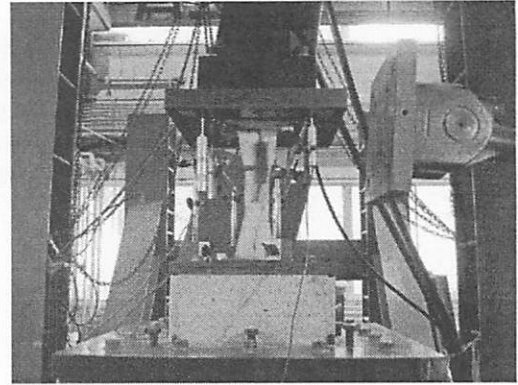
- 1) 圧縮側、引張側にそれぞれ単調載荷、除荷、再載荷する場合
- 2) 圧縮載荷の途中で除荷し、そのまま引張側に載荷する場合 (図-2中のO-E-F-Gに相当)
- 3) 引張載荷の途中で除荷し、そのまま圧縮側に載荷する場合 (図-2中のO-I-J-Aに相当)

以上の載荷履歴を供試体ごとに示すと表-2(b)のようになる。ここで、最大引張応力 σ_{tc} およびそのときのひずみ ϵ_{tc} は図-3のように定義した。塑性ひずみ ϵ_{plc} 、 ϵ_{plt} は、図-4で示すように応力がゼロになるまで完全除荷したときの残留ひずみの値である⁶⁾。図中の $\epsilon_{pl,1}$ は1回目の塑性ひずみ、 ϵ_{ul} は除荷し始めた点のひずみ(除荷ひずみ)、 σ_{ul} はそのときの応力(除荷点応力)である。

(2) 応力-ひずみ履歴特性とその定式化



(a) 圧縮載荷実験



(b) 圧縮及び引張載荷実験

写真-1 載荷実験

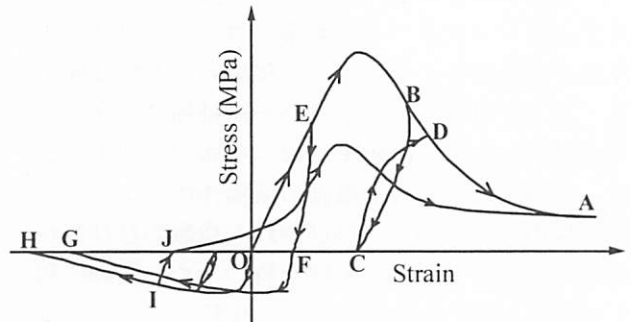


図-2 応力-ひずみの履歴

a) 圧縮載荷の骨格曲線

図-5は単調圧縮載荷の履歴曲線である。図中には後述する提案式も比較のために示してある。最大圧縮応力は40.1MPaであり、そのときのひずみは0.0045である。最大圧縮応力後、応力はひずみの増加とともになめらかに低下し、最終的に最大圧縮応力の約20%まで低下した。ひずみが0.05に到達しても、なお2.1MPaの応力を保持していることが分かる。

以上の載荷実験結果を用いて、圧縮側骨格曲線の応力 σ_c とひずみ ϵ_c の履歴曲線を定式化する。定式化にあたり、コンクリートの応力-ひずみ関係式として次式による中澤らの定式化を用いる⁷⁾。中澤らのモデルの特長は、応力上昇域と応力下降域を1つの式によりモデル化している点、そして終局条件($\epsilon_c = \infty$ で $\sigma_c = \sigma_{cu}$)を考慮できる点である。

表-2 載荷履歴パターンとパラメータ

(a) Property of specimen

No.	Strength(N/mm ²)		Strain at peak strength		plastic strain		Initial modulus of elasticity, E_{co} (kN/mm ²)
	Compression σ_{cct}	Tension σ_{ttc}	Compression ε_{cct}	Tension ε_{ttc}	Compression ε_{plc}	Tension ε_{plt}	
C1	38.78	-	0.0048	-	-	-	11.2
C2	34.11		0.0043	-	-	-	11.0
C3	41.84		0.0050	-	-	-	11.4
C4	32.90		0.0038	-	-	-	10.2
C5	29.27		0.0035	-	-	-	10.8
C6	40.14		0.0045	-	-	-	11.6
TC1	24.64	-2.38	0.0035	-0.0006	-	-0.0486	3.8
TC2	-	-2.45	-	-0.0007	-	-0.0139	3.7
TC3	-	-2.55	-	-0.0006	-	-0.0070	3.9
TC4	-	-1.98	-	-0.0005	-	-	4.2
	22.34		-	-	-	-	4.6
CT1	-	-1.84	-	0.00003	0.0007	-0.0144	2.8
CT2	-	-2.75	-	-0.0007	0.0005	-	5.7
CT3	-	-2.34	-	-0.0002	0.0007	-	4.9

(b) Type of loading

No.	Loading in compression		Loading in tension	Tension loading after compression loading	Compression loading after tension loading
	Monotonic	Cyclic	Cyclic		
C1	●	-	-	-	-
C2	●	-	-	-	-
C3	-	● (n=5)	-	-	-
C4	-	● (n=2)	-	-	-
C5	-	● (n=2)	-	-	-
C6	-	● (n=2)	-	-	-
TC1	-	-	-	-	●
TC2	-	-	-	-	●
TC3	-	-	-	-	●
CT1	-	-	-	● (n=4)	-
TC4	-	-	● (n=5)	-	-
	●	-	-	-	-
CT1	-	-	-	● (n=4)	-
CT2	-	-	-	●	-
CT3	-	-	-	●	-

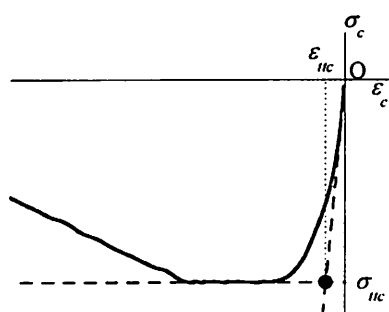


図-3 最大引張応力 σ_{ttc} およびそのときのひずみ ε_{ttc} の定義

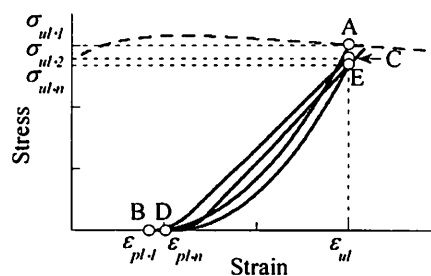


図-4 完全除荷、再載荷の履歴

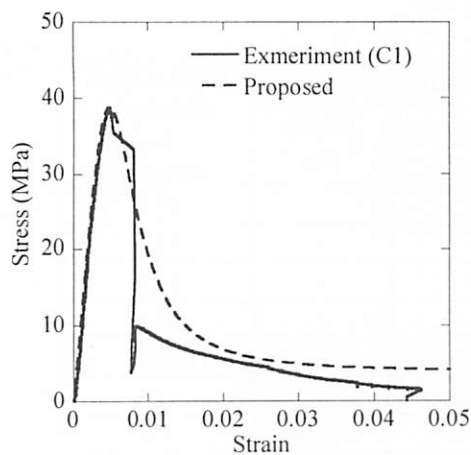


図-5 圧縮側の骨格曲線

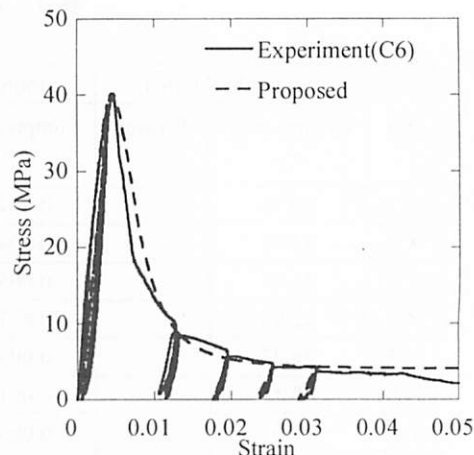


図-7 圧縮側に荷重、除荷、再荷重した場合の履歴

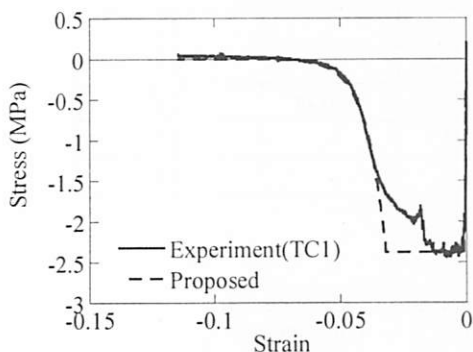


図-6 単調引張した場合の履歴

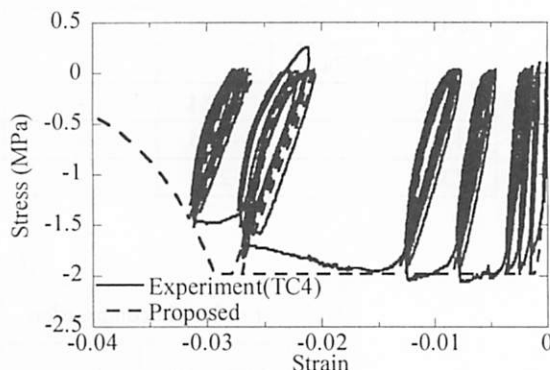


図-8 引張側に荷重、除荷、再荷重した場合の履歴

$$\sigma_c = \sigma_{cu} + \frac{-\sigma_{cu} + E_{c0} \cdot \varepsilon_c}{1 + \frac{E_{c0} \cdot \varepsilon_{cct} - \sigma_{cct}}{\sigma_{cct} - \sigma_{cu}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cct}}\right)^{n_{ev}}} \quad (1)$$

ここで、

$$n_{ev} = \frac{E_{c0} \cdot \varepsilon_{cct}}{E_{c0} \cdot \varepsilon_{cct} - \sigma_{cct}} \quad (2)$$

ここで、 σ_{cu} はひずみが大きくなったときにお保持している応力であり、次式のように与えた。

$$\sigma_{cu} = R_{scc} \cdot \sigma_{cct} \quad (3)$$

ここでは、実験結果に基づいて $R_{scc} = 0.1$ と仮定した。 E_{c0} は初期弾性係数であり、 σ_{cct} 、 ε_{cct} はそれぞれ PFRCC の最大圧縮応力、最大圧縮応力時のひずみである。

式(1)による $\sigma_c \sim \varepsilon_c$ 関係を図-5に示す。提案式は実験結果を良く表していると言える。

b) 引張荷重の骨格曲線

図-6は単調引張荷重した場合の履歴曲線である。図中には後述する提案式も比較のために示している。引張荷重した場合には、応力は引張強度に達するまで概ね線形に増加し、その後は引張ひずみが -0.02 に達するまではほぼこの値を保つ。引張ひずみが -0.02 以下になると、その後は引張ひずみの増加に伴い応力は徐々に減少し始める。

以上のような単調引張荷重した場合を応力-ひずみ関係は、以下のように定式化する。

$$\tilde{\sigma}_{te} = \begin{cases} 1 - \left(1 - \frac{\tilde{\varepsilon}_{te}}{2.5}\right)^{2.5} & (0 \leq \tilde{\varepsilon}_{te} \leq 2.5) \\ 1 & (2.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{te} \leq 55) \\ \exp\{-0.08(\tilde{\varepsilon}_{te} - 55)\} & (55 \leq \tilde{\varepsilon}_{te}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで

$$\tilde{\sigma}_{te} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{tc}} \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{te} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{plc}}{\varepsilon_{tc} - \varepsilon_{plc}} \quad (6)$$

ここで σ_{tc} は引張強度、 ε_{tc} はそのときのひずみ、そして ε_{plc} は圧縮包絡線から除荷し、応力が0に達したときのひずみである。式(4)で提案した $\tilde{\sigma}_{te} \sim \tilde{\varepsilon}_{te}$ 関係を図-6に示す。提案式は実験結果を良く表していると言える。

c) 圧縮、引張の除荷・再荷重曲線

図-7、図-8はそれぞれ圧縮、引張の完全除荷・再荷重履歴曲線である。除荷曲線、再荷重履歴曲線においては、ともに除荷点ひずみの増加に伴い、剛性が低下し、非線形性が強まることが分かる。除荷、

再載荷履歴曲線は、圧縮側に対する中澤らの提案式に引張側の式を新たに加えて、以下のように定式化する。

$$\tilde{\sigma}_{ulc} = \tilde{\varepsilon}_{ulc}^{n_{ulc}} \quad (7)$$

$$\tilde{\sigma}_{ult} = \tilde{\varepsilon}_{ult}^{n_{ult}} \quad (8)$$

ここで、 n_{ulc} は圧縮側の乗数、 n_{ult} は引張側の乗数である。また、 $\tilde{\sigma}_{ul}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_{ul}$ は無次元化された完全除荷履歴の応力 σ_c およびひずみ ε_c であり、次式により定義する。

$$\tilde{\sigma}_{ulc,n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ulc,n}} \quad (9)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ulc,n} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{plc,n}}{\varepsilon_{ulc} - \varepsilon_{plc,n}} \quad (10)$$

$$\tilde{\sigma}_{ult,n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ult,n}} \quad (11)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ult,n} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{plt,n}}{\varepsilon_{ult} - \varepsilon_{plt,n}} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma_{ul,n}$ 、 $\varepsilon_{pl,n}$ は n 回完全除荷、完全再載荷を繰り返した場合のそれぞれ n 回目の除荷点応力、 n 回目の塑性点ひずみである。

n_{ulc} 、 n_{ult} は除荷点ひずみレベル $\tilde{\varepsilon}_{cm}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_{im}$ によって変化するため、それぞれ次式のように与える。

$$n_{ulc} = 0.61 \cdot [\tan^{-1}\{1.7 \cdot (\tilde{\varepsilon}_{cm} - 0.18)\} + \tan^{-1}(0.31)] + 1 \quad (13)$$

$$n_{ult} = \tan^{-1}\{0.21(\tilde{\varepsilon}_{im} + 0.18)\} + \tan^{-1}(-0.04) + 1 \quad (14)$$

ここで、 $\tilde{\varepsilon}_{cm}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_{im}$ は次式で定義する。

$$\tilde{\varepsilon}_{im} = \frac{\varepsilon_{cm}}{\varepsilon_{cct}} \quad (15)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{im} = \frac{\varepsilon_{im} - \varepsilon_{plc}}{\varepsilon_{itc} - \varepsilon_{plc}} \quad (16)$$

ここで ε_{cm} 、 ε_{im} は載荷履歴上最大の圧縮ひずみ、引張ひずみである。

再載荷履歴曲線は以下のように、 n 次曲線と直線を用いて定式化する。

$$\tilde{\sigma}_{rlc} = \begin{cases} \tilde{\varepsilon}_{rlc}^{n_{rlc}} & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{rlc} \leq 0.5 \\ \frac{E_{rlc}(\varepsilon_c - \varepsilon_{ulc})}{\sigma_{ulc,n+1}} + 1 & 0.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{rlc} \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

$$\tilde{\sigma}_{rll} = \begin{cases} \tilde{\varepsilon}_{rll}^{n_{rll}} & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{rll} \leq 0.5 \\ \frac{E_{rll}(\varepsilon_c - \varepsilon_{ult})}{\sigma_{ult,n+1}} + 1 & 0.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{rll} \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 $\tilde{\sigma}_{rl}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_{rl}$ は無次元化された完全除荷履歴の応力 σ_c およびひずみ ε_c であり、次式のように定義する。

$$\tilde{\sigma}_{rlc,n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ulc,n+1}} \quad (19)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{rlc,n} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{plc,n}}{\varepsilon_{ulc} - \varepsilon_{plc,n}} \quad (20)$$

$$\tilde{\sigma}_{rll,n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ult,n+1}} \quad (21)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{rll,n} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{plt,n}}{\varepsilon_{ult} - \varepsilon_{plt,n}} \quad (22)$$

ここで、 E_{rlc} 、 E_{rll} は $0.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{rlc} \leq 1$ 、 $0.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{rll} \leq 1$ における再載荷履歴の平均弾性係数であり、次式のように与える。

$$E_{rlc} = \frac{(1 - 0.5^{n_{rlc}}) \cdot \sigma_{ulc,n+1}}{0.5(\varepsilon_{ulc} - \varepsilon_{plc,n})} \quad (23)$$

$$E_{rll} = \frac{(1 - 0.5^{n_{rll}}) \cdot \sigma_{ult,n+1}}{0.5(\varepsilon_{ult} - \varepsilon_{plt,n})} \quad (24)$$

完全除荷履歴と同様に、 n_{rl} の値は除荷点ひずみレベル $\tilde{\varepsilon}_{cm}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_{im}$ によって変化することを考慮し、次式のように与える。

$$n_{rlc} = \begin{cases} 1.08 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 1 \\ 1.08 - 0.05(\tilde{\varepsilon}_{cm} - 1) & 1 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 4.7 \\ 0.895 & 4.7 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \end{cases} \quad (25)$$

$$n_{rll} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{im} \leq 1 \\ 1 - 0.077(\tilde{\varepsilon}_{im} - 1) & 1 \leq \tilde{\varepsilon}_{im} \leq 5 \\ 0.692 & 5 \leq \tilde{\varepsilon}_{im} \end{cases} \quad (26)$$

完全除荷・完全再載荷をくり返すと、除荷ひずみ ε_{ul} に達した際の応力は低下し、塑性点ひずみは増加する。そのため、応力低下率 β_n および塑性点ひずみ増加率 γ_n を以下のように定義する。

$$\beta_{c,n} = \frac{\sigma_{ulc,n+1}}{\sigma_{ulc,n}} \quad (27)$$

$$\beta_{t,n} = \frac{\sigma_{ult,n+1}}{\sigma_{ult,n}} \quad (28)$$

$$\gamma_{c,n} = \frac{\varepsilon_{ulc} - \varepsilon_{plc,n}}{\varepsilon_{ulc} - \varepsilon_{plc,n-1}} \quad (29)$$

$$\gamma_{l,n} = \frac{\varepsilon_{ult} - \varepsilon_{pl,n}}{\varepsilon_{ult} - \varepsilon_{pl,n-1}} \quad (30)$$

$\beta_{c,n}$, $\beta_{l,n}$, $\gamma_{c,n}$, $\gamma_{l,n}$ は除荷点ひずみレベル $\tilde{\varepsilon}_{cm}$, $\tilde{\varepsilon}_{lm}$

を用いて、次式のように定式化できる。

$$\beta_{c,n} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot (0.0244n - 0.086) \cdot \tilde{\varepsilon}_{cm} + 1 \leq 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} < 1.5 \\ 0.0244n + 0.914 \leq 1 & 1.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \end{cases} \quad (31)$$

$$\beta_{l,1} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 2.5 \\ 1.011 - 0.0044 \cdot \tilde{\varepsilon}_{lm} & 2.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 15 \\ 0.945 & 15 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \end{cases} \quad (32)$$

$$\beta_{l,n_{2sn}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 2.5 \\ 1 + 4(0.02n - 0.09) \cdot (\tilde{\varepsilon}_{lm} - 2.5) \leq 1 & 2.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 2.75 \\ 0.02n + 0.91 \leq 1 & 2.75 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \end{cases} \quad (33)$$

$$\gamma_{c,2} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 1 \\ 1 - 0.106(\tilde{\varepsilon}_{cm} - 1) & 1 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 2.5 \\ 0.841 & 2.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \end{cases} \quad (34)$$

$$\gamma_{c,n_{3sn}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 1 \\ 1 + \frac{2}{3}(0.016n - 0.112) \cdot (\tilde{\varepsilon}_{cm} - 1) \leq 1 & 1 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 2.5 \\ 0.016n + 0.888 \leq 1 & 2.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \end{cases} \quad (35)$$

$$\gamma_{l,n} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 2.5 \\ 1 + 4(0.014n - 0.089) \cdot (\tilde{\varepsilon}_{lm} - 2.5) \leq 1 & 2.5 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 2.75 \\ 0.014n + 0.915 \leq 1 & 2.75 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \end{cases} \quad (36)$$

塑性点ひずみ $\varepsilon_{plc,1}$, $\varepsilon_{pl,1}$ も同様に除荷点ひずみレベル $\tilde{\varepsilon}_{cm}$, $\tilde{\varepsilon}_{lm}$ を用いて、次式のように定式化できる。

$$\frac{\varepsilon_{plc,1}}{\varepsilon_{ccl}} = \begin{cases} 0.417 \cdot \tilde{\varepsilon}_{cm}^2 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \leq 2 \\ 0.964 \tilde{\varepsilon}_{cm} - 0.26 & 2 \leq \tilde{\varepsilon}_{cm} \end{cases} \quad (37)$$

$$\frac{\varepsilon_{pl,1} - \varepsilon_{plc}}{\varepsilon_{lc} - \varepsilon_{plc}} = \begin{cases} 0.606 \tilde{\varepsilon}_{lm} & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \leq 25 \\ 0.012 \cdot \tilde{\varepsilon}_{lm}^2 + 7.65 & 25 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \end{cases} \quad (38)$$

式(7), (8), (17), (18)により求めた $\tilde{\sigma}_{ul} \sim \tilde{\varepsilon}_{ul}$, $\tilde{\sigma}_r \sim \tilde{\varepsilon}_r$ 関係を図-7, 図-8に示す。提案式は実験結果を良く表していると言える。

c) 圧縮载荷後除荷した場合の引張側骨格曲線

図-9 は圧縮後、引張ったりその後さらに圧縮した場合の载荷履歴である。これによれば圧縮側骨格曲線から除荷し、応力 σ_c が $\sigma_c = 0$ を超えて $\sigma_c < 0$ になると、履歴は引張側の骨格曲線に近い曲線となる。したがって、圧縮から除荷し、引張側へ移る際、

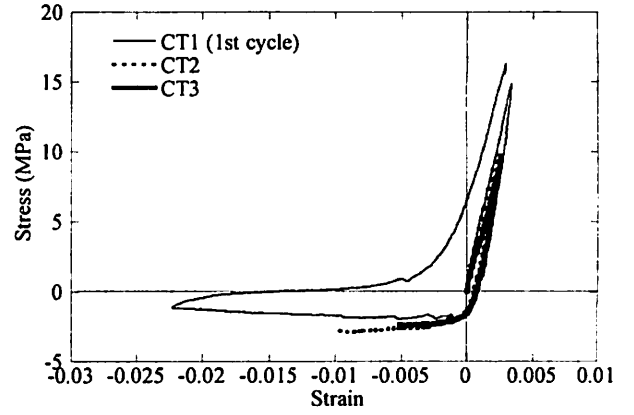


図-9 圧縮後に引張载荷した場合の履歴

履歴は引張側の骨格曲線に移行すると考えることとする。この場合には、圧縮側履歴から引張側へ移行する区間に対して新たな関数を定義する必要はない。

ただし、圧縮応力 σ_c が最大圧縮応力 σ_{ccl} を超え、応力が低下し始めた後、引張った場合には、Zafra et al.の実験結果に基づき、引張応力は0とする⁸⁾。

以上より、圧縮側から引張側に移った場合の応力は、以下のようにモデル化できる。

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \sigma(\varepsilon - \varepsilon_{plc}) & \varepsilon_{cm} < \varepsilon_{ccl} \\ 0 & \varepsilon_{ccl} \leq \varepsilon_{cm} \end{cases} \quad (39)$$

d) 引張载荷後除荷した場合の圧縮側骨格曲線

図-10 および図-11 は引張载荷後に除荷し、圧縮载荷した場合の履歴曲線である。図中には後述する提案式も比較のため示している。注目すべきは、引張後に除荷し、圧縮側に移行した骨格曲線は、単調圧縮した場合の圧縮側骨格曲線とは異なり、図-12に示すように最大圧縮応力およびそのときのひずみが単調圧縮した場合の最大圧縮応力およびそのときのひずみより低下することである。この応力低下率 β_{ccl} を次式により定義する。

$$\beta_{ccl} = \frac{\sigma_{ccl}}{\sigma_{cc0}} \quad (40)$$

β_{ccl} が正規化された引張ひずみ $\tilde{\varepsilon}_{lm}$ の増加に伴いどのように低下するのを示すと、図-13 のようになる。図中には後述する提案式も示してある。

これより、圧縮強度の低下率 β_{ccl} を次式のようにモデル化する。

$$\beta_{ccl} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} < 1 \\ 1 - \frac{0.4}{29} \cdot (\tilde{\varepsilon}_{lm} - 1) & 1 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} < 30 \\ 0.6 & 30 \leq \tilde{\varepsilon}_{lm} \end{cases} \quad (41)$$

式(41)による $\beta_{ccl} \sim \tilde{\varepsilon}_{lm}$ 関係を図-13に示す。式(41)は実験の特徴を与えることができる。

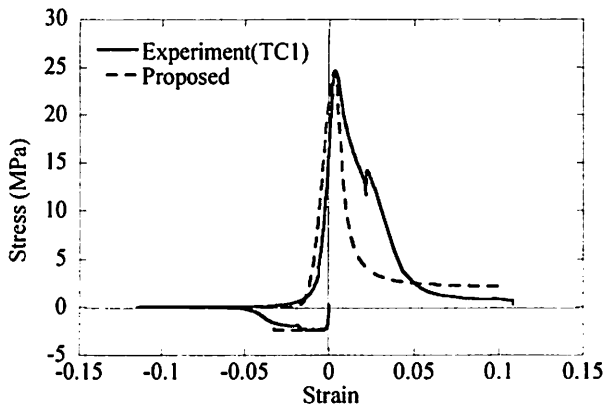


図-10 単調引張後、単調圧縮した場合の履歴

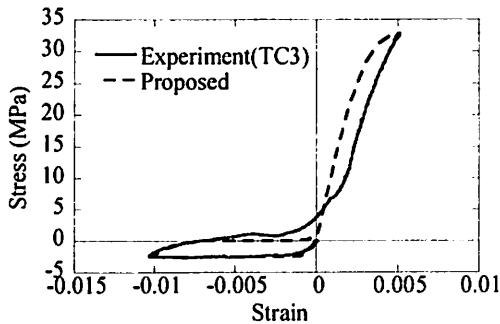


図-11 単調引張後除荷し、圧縮した場合の履歴

以上のような点に留意しつつ、引張载荷後、圧縮载荷を行った履歴を、以下のように定式化する。

$$\tilde{\sigma}_{ie} = \tilde{\varepsilon}_{ie}^{C_1} \cdot \exp\{C_1(1 - \tilde{\varepsilon}_{ie})\} \quad (42)$$

ここで

$$\tilde{\sigma}_{ie} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{cct}} \quad (43)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ie} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{plt}}{\varepsilon_{cct} - \varepsilon_{plt}} \quad (44)$$

$$C_1 = 7.5461 \cdot \frac{\varepsilon_{cct} - \varepsilon_{plt}}{\varepsilon_{cct}} + 10.577 \quad (45)$$

ここで、 σ_{cct} は圧縮強度、 ε_{cct} はそのときのひずみ、 ε_{plt} は引張側骨格曲線から除荷し応力が 0 になるときのひずみである。式(42)に示した $\tilde{\sigma}_{ie} \sim \tilde{\varepsilon}_{ie}$ 関係は図-10 および図-11 に示すように、実験結果を良く表している。

3. 結論

圧縮だけでなく引張にも抵抗できるポリプロピレン繊維補強セメント系複合材料(PFRCC)の応力～ひずみ履歴を一軸载荷実験に基づいて定式化した。本研究より得られた結論を示すと、以下の通りである。

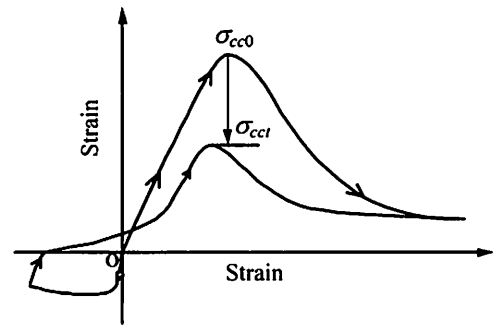


図-12 引張後、圧縮した場合の最大圧縮強度の低下

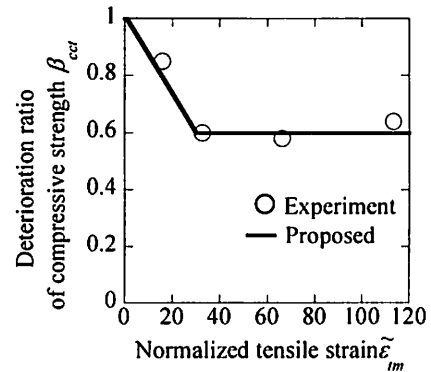


図-13 圧縮強度低下率 β_{cct} に及ぼす引張ひずみの影響

- 1) 引張後、圧縮に転じた場合の最大圧縮応力 σ_{cct} は、どれだけ引張ひずみを与えたかによって変化し、圧縮応力の低下度 β_{cct} を式(44)のように定義すると、 β_{cct} は式(46)のようにモデル化できる。
- 2) 圧縮後、除荷して引張を加えた場合の引張強度は、事前にどこまで圧縮変形を与えたかによって大きく変化し、最大圧縮応力 σ_{cct} に達する前に除荷して引張を加えた場合には、引張強度は単純に引張変形を与えた場合の引張強度にほぼ近い値をとるが、最大圧縮応力 σ_{cct} を越してから除荷し、引張を加えた場合には、引張応力は 0 となる。
- 3) 上記の引張側と圧縮側の履歴の相互作用を定式化した。これを用いて PFRCC の応力～ひずみ関係を推定すると、実験より得た履歴を良く表すことが出来る。

謝辞：本研究は（財）国土技術研究センターの研究開発助成（助成番号09002号）を受けて実施したものである。本実験の実施に際しては、（株）大林組技術研究所の平田隆祥氏、石関嘉一氏の両氏から各種のご支援、ご協力を賜った。ここに記して厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Kawashima, K., Zafra, R., Sasaki, T., Kajiwara, K. and Nakayama, M.: Seismic performance of polypropylene fiber reinforced cement composite bridge column based on E-Defense shake table excitations, *Proc. 13th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp. 1290-1297, Tsukuba Science City, Japan, 2010.
- 2) Han, T., Feenstra, P. and Billington, S.: Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading, *ACI Materials Journal*, 100(6), 749-757, 2003.
- 3) Kenser, K., Billington, S. and Douglas, K.: Cyclic response of highly ductile fiber-reinforced cement-based composites, *ACI Materials Journal*, 100(5), 381-391, 2003.
- 4) Nagai, K., Suryanto, B. and Maekawa, K.: Space-averaged constitutive model for HPFRCCs with multi-directional cracking, *ACI Material Journal*, Vol. 108, No.2, pp. 139-149, 2011.
- 5) 平田隆祥, 川西貴士, 岡野素之, 渡辺哲: ポリプロピレン短繊維を用いた高じん性セメント系材料の物性と構造性能に関する基礎的検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.31, No.1, pp. 295-300, 2009.
- 6) Sakai, J. and Kawashima, K.: Unloading and reloading stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.132, No.1 pp.112-122, 2006.
- 7) 中澤宣貴, 川島一彦, 渡邊学歩, 堺淳一: 円形断面高強度コンクリートの横拘束モデルの開発, *土木学会論文集*, No.787/I-71, pp.117-136, 2005.
- 8) Zafra, R., Kawashima, K., Sasaki, T., Kajiwara, K., and Nakayama, M.: Cyclic stress-strain response of polypropylene fiber reinforced cement composites, *土木学会論文集 A1*, Vol.66, No.1, pp.162-171, 2010.