

SFRCを用いたプレテンション梁の耐震挙動

大成建設(株)設計本部主任 正会員 工博 ○ 尹 亨在
京都大学大学院工学研究科教授 正会員 工博 西山 峰広

Abstract : Pretensioned members have been used for controlling crack width and deflection under service load. However, pretensioned members tend to fail in compression in concrete, which leads to brittle failure. Steel-Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is expected to enhance the tensile properties of the resulting composite material. The drawbacks described above in pretensioned members can be improved by using SFRC, which can result in higher performance in terms of flexural and shear resistances, and durability. Cyclic loading tests were conducted on prestressed concrete beams constructed with steel-fiber reinforced concrete, where the main parameters were the volumetric ratios of steel-fibers: 0.0, 0.5 and 1.0 percent. By using steel-fiber reinforced concrete in prestressed concrete beams, flexural strength was improved and the number of shear cracks was less than in beams without SFRC.

Key words : Steel-fiber reinforced concrete, Pretensioned beam, Seismic performance

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下、PC)構法は使用荷重下でのひび割れやたわみを制御するために使用される。とくに、プレテンション部材は、定着装置が不要のためポストテンション部材よりも製作費用低減が可能である。しかしながら、PC構法は、鋼材量が多いため、コンクリート圧壊が先行する圧縮破壊となりやすい。さらに、高強度コンクリートが使用されるため、かぶりコンクリートの剥落、剥離も危惧される。また、PC鋼材の付着性状は、異形鉄筋に劣るため、ひび割れ幅が広くなりやすい弱点があげられる。したがって、高性能部材を製作するためにプレテンション部材に鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)を利用することを考案した。SFRCにより常時荷重下でのひび割れ分散効果と、これによる耐久性の向上および終局時における靱性向上が期待できる^{1), 2)}。しかし、現在のプレストレストコンクリート設計施工規準・同解説³⁾では、SFRCを用いたPC部材に関する設計法や耐震性能評価法が無いのが現状である。さらには、SFRCを用いたRC部材や材料特性に関する研究や実験例は多少あるがSFRCを用いたPC部材(以下、PreSFC部材)に関する研究や実験例は少ない。本研究では、普通コンクリートを用いたプレテンション梁1体とPreSFC梁2体に対して実施した、逆対称曲げせん断載荷実験について報告する。実験結果より、PreSFC梁部材のひび割れ性状、変形性能、破壊性能などに関するデータを得、PreSFC部材力学性状に対する効果を検討し、SFRCに関する各種算定式による計算値と比較検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体計画

試験体一覧を表-1に、試験体の断面形状および配筋詳細を図-1と図-2に示す。有効プレストレス力 P_e はPCストランドに貼り付けたひずみゲージから測定したひずみを用いて算定した載荷直前の値である。実験変数は鋼繊維混入率($V_f=0.0\%:PC3, 0.5\%:PC3-SF05, 1.0\%:PC3-SF10$)である。全試験体のせん断余裕度(せん断耐力/曲げ耐力)は平均1.22であり、すべての試験体はせん断破壊に先行して曲げ破壊するように計画した。全試験体は、断面幅200mm、断面せい400mmである。全長は図-2

に示すように載荷用スタブを含めて2,810mmである。PCストランドは直径12.7mmの7本より線 (SWPR7BL) を用いた。

2. 2 材料特性

表-2および表-3にコンクリート配合とコンクリートおよび鋼材特性を示す。PC3試験体には普通コンクリート (NC) を、PC3-SF05とPC3-SF10試験体にはそれぞれSFC05とSFC10コンクリートを用いた。本研究では直径0.62mm、長さ30mm、アスペクト比48.5、引張強度1,200N/mm²の両端フック付き鋼繊維を用いた。図-3にシリンダー試験から得られた圧縮および割裂引張応力-ひずみ関係を示す。割裂引張応力-平均ひずみ関係の平均ひずみはシリンダーに生じるひび割れに鉛直方向に貼り付けた検長60mmのひずみゲージによる平均ひずみである。図-3に示すようにNCは圧縮強度と割裂引張強度にいたった後顕著な耐力低下を示すが、SFRCは圧縮強度と割裂引張強度にいたった後も荷重に抵抗しながら少しずつ強度が低下する挙動を示す。

図-4に載荷計画を、図-5にひずみゲージおよび変位計設置位置を示す。載荷は逆対称曲げモーメントになるように制御を行った。また、部材角R(%)により制御し、0.05%、0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、2.0%、4.0%、5.0%までそれぞれ2サイクルずつ繰り返すことを原則とする繰り返し載荷とした。材料試験結果に基づいた各試験体のつり合い破壊時引張鋼材比計算値は、PC3は2.35%、PC3-SF05とPC3-SF10はそれぞれ2.52%、2.68%である。ここで、圧縮側に配置したPCストランドは有効プレストレス力 P_e に等しい一定の圧縮力を与えるとして扱った。全試験体の引張側鋼材比は1.69%となり、SFRCを用いることによる曲げ耐力向上が期待される。

表-1 試験体一覧

試験体	繊維混入率 (%)	P_e^{*1} (kN)	η^{*2} ($=P_e/(bDf_c')$)
PC3	0.0	433.3	0.098
PC3-SF05	0.5	457.0	0.096
PC3-SF10	1.0	386.1	0.077

*1: 有効プレストレス力, *2: 有効プレストレス率

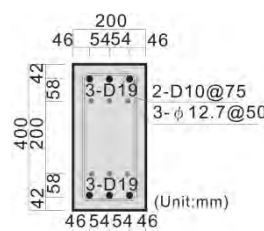


図-1 断面形状

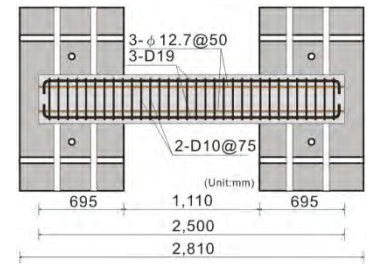


図-2 配筋詳細

表-2 コンクリート配合

Con'c	設計強度 (N/mm ²)	V_f (%)	Slump (cm)	W/C	空気量	水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	AE剤
				(%)							
NC	60	0.0	15.0	42.0	4.5	158	376	808	951	2.44	0.75
SFC05		0.5								2.63	0.00
SFC10		1.0								3.01	

表-3 コンクリートおよび鋼材特性

試験体	コンクリート				鋼材			
	強度 (N/mm ²)		E_c (x10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン比	種別	σ_y	σ_u	E_s (x10 ⁵ N/mm ²)
	f_c^{*1}	f_{sp}^{*2}						
PC3	55.1	3.44	3.17	0.193	D10(SD295)	376	498	1.98
PC3-SF05	59.3	3.51	3.47	0.202	D19(SD345)	358	537	2.01
PC3-SF10	62.5	4.53	3.68	0.249	φ12.7(SWPR7BL)	1,798	1,980	2.02

※PC3-SF05とPC3-SF10は混和剤を除くコンクリート配合は同じだが、バッチが違うためコンクリート材料特性にも違いがある。*1: コンクリート圧縮強度, *2: コンクリート割裂引張強度

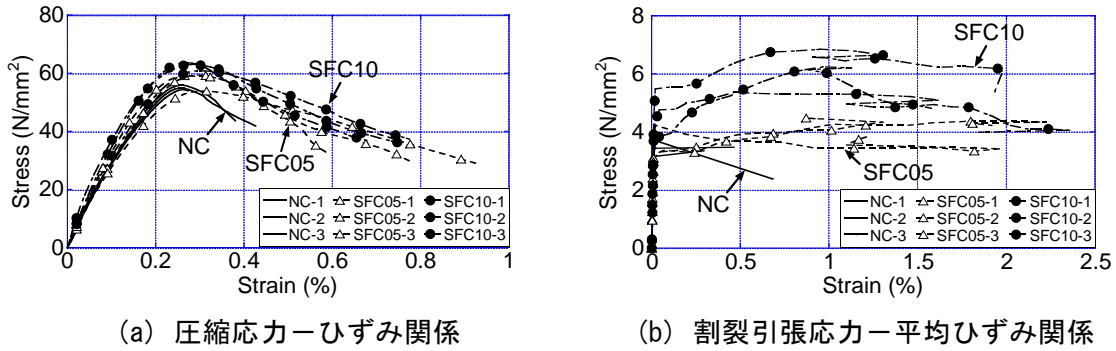


図-3 シリンダー試験の応力-ひずみ関係

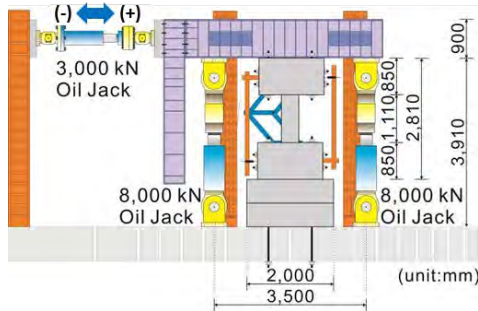


図-4 荷重計画

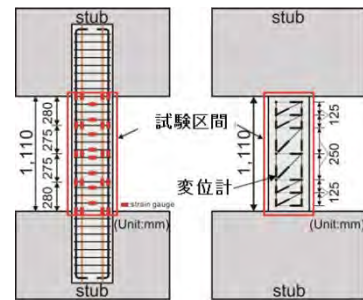


図-5 ひずみゲージおよび変位計位置

3. 実験結果

3. 1 せん断力-部材角関係

表-4および表-5に全試験体の初期ひび割れ発生時から終局までの実験結果まとめを、図-6にせん断力-部材角関係を示す。降伏判定は、引張側軸鉄筋の降伏ひずみ0.201%を超える時点を、終局判定は最大耐力の80%まで耐力が低下した時点を基準とした。図-6の中に示されている正側と負側の $Q_{max,cal}$ は日本建築センターのプレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例⁴⁾ (以下、PC技術書) に示されている曲げ耐力算定法を用いて算定した曲げ耐力である。PC技術書では、図-7に示すように圧縮側に配置されたPCストランドによって部材断面の圧縮側にも一定の圧縮力が作用していると仮定している。せん断力-部材角関係から、PC3 ($V_f=0.0\%$) 試験体の最大曲げ耐力はPC技術書による最大曲げ耐力と約2.5%の誤差となり、現在の曲げ耐力算定法で概ね精度よく評価ができた。しかし、PC3-SF05 ($V_f=0.5\%$) やPC3-SF10 ($V_f=1.0\%$) 試験体はPC技術書による最大曲げ耐力よりそれぞれ約8.6%, 7.4%大きく観察された。このことから、鋼繊維補強によるプレテンション梁部材の曲げ耐力向上効果が期待できると考えられる。

表-4 実験結果-正側

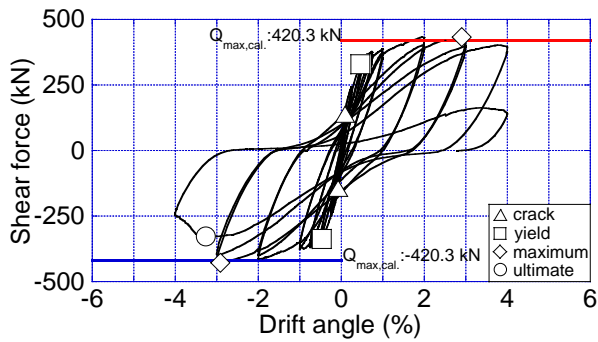
試験体	初期ひび割れ ^{*2}		降伏 ^{*3}		最大		終局 ^{*4}	
	Q_{cr} (kN)	R_{cr}^* (%)	Q_v (kN)	R_v (%)	Q_{max} (kN)	R_{max} (%)	Q_u (kN)	R_u (%)
PC3	138.0	0.092	329.2	0.460	432.9	2.903	--	--
PC3-SF05	115.8	0.057	349.7	0.447	470.3	2.974	373.7	4.086
PC3-SF10	139.6	0.078	350.4	0.450	462.9	2.909	370.3	4.470

*1: 部材角, *2: 曲げひび割れ発生時, *3: 引張側軸鉄筋降伏時, *4: 最大耐力の80%まで耐力が低下した時

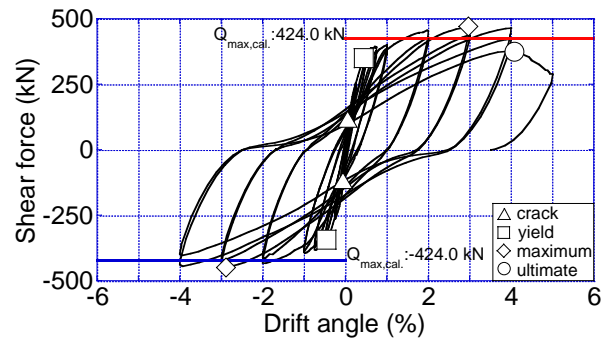
表-5 実験結果-負側

試験体	初期ひび割れ ^{*2}		降伏 ^{*3}		最大		終局 ^{*4}	
	Q_{cr} (kN)	R_{cr}^* (%)	Q_v (kN)	R_v (%)	Q_{max} (kN)	R_{max} (%)	Q_u (kN)	R_u (%)
PC3	144.4	0.073	337.3	0.467	428.6	2.911	327.6	3.261
PC3-SF05	118.1	0.058	343.9	0.455	450.2	2.881	--	--
PC3-SF10	129.6	0.075	342.0	0.428	452.9	2.951	--	--

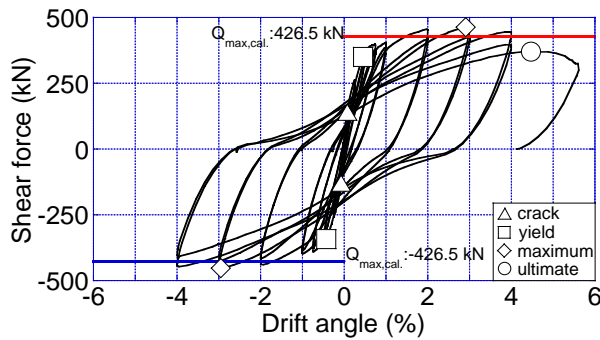
*1: 部材角, *2: 曲げひび割れ発生時, *3: 引張側軸鉄筋降伏時, *4: 最大耐力の80%まで耐力が低下した時



(a) PC3



(b) PC3-SF05



(c) PC3-SF10

図-6 せん断力-部材角関係

3. 2 損傷特性

図-8に載荷終了後のひび割れおよび破壊状況を示す。PC3試験体では、耐力低下の原因ではないが、最終的に試験体中央部の広い範囲でコンクリート剥落が発生した。しかし、SFC05とSFC10を用いたPC3-SF05およびPC3-SF10試験体ではコンクリート剥落はなかった。さらに、試験体のせん断区間でのせん断ひび割れの本数もPC3試験体より鋼繊維補強量の増加にしたがって減少している傾向が確認された。図-9に各試験体のせん断補強筋のひずみ-部材角関係を示す。PC3試験体のせん断補強筋はほぼすべてが降伏しているが、PC3-SF05およびPC3-SF10ではまだ降伏ひずみにいたっていないものが多数確認された。このことから、プレテンション梁部材での鋼繊維補強コンクリートによるせん断補強効果および損傷抑制効果が期待できると考えられる。

4. 考察

4. 1 PreSFC梁部材のエネルギー吸収特性

PreSFC梁部材のエネルギー吸収能力を調べるために、図-10に示すような等価粘性減衰定数 (h_{eq}) 概念と式 $h_{eq} = 1/4\pi \cdot (\Delta A / (A_1 + A_2)) \times 100(\%)$ を用いて h_{eq} を算定した。図-11に各試験体の等価粘性減衰定数の比較結果を示す。図-11は、PC3試験体の各部材角における等価粘性減衰定数に対するPC3-SF05とPC3-SF10試験体の等価粘性減衰定数の比率(%)を示したものである。

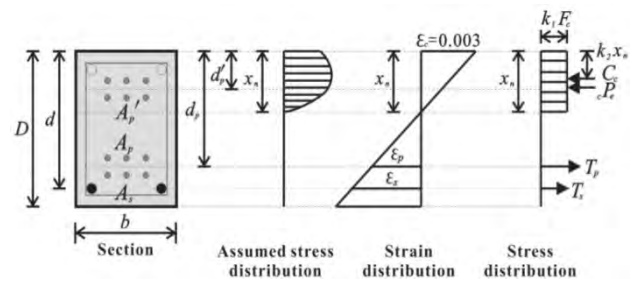


図-7 PC部材の応力-ひずみ分布関係

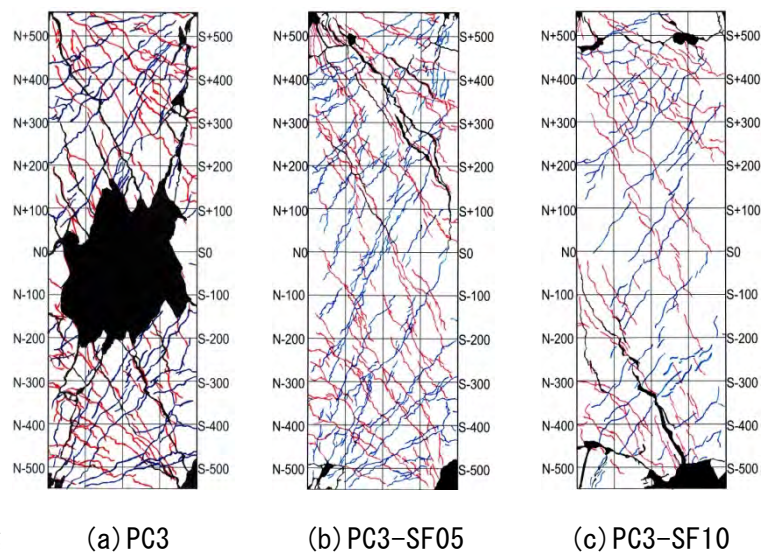
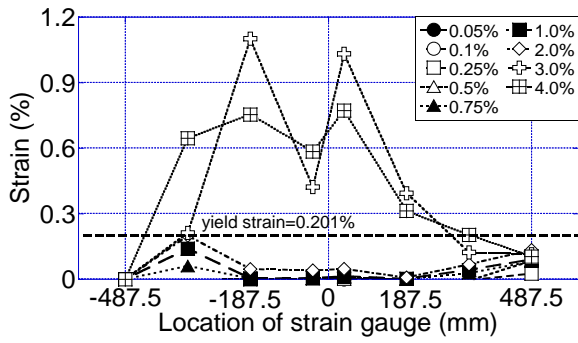
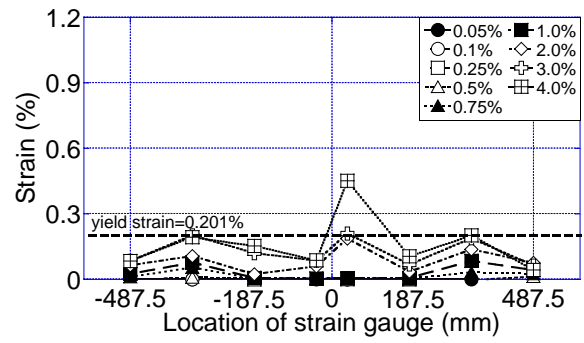


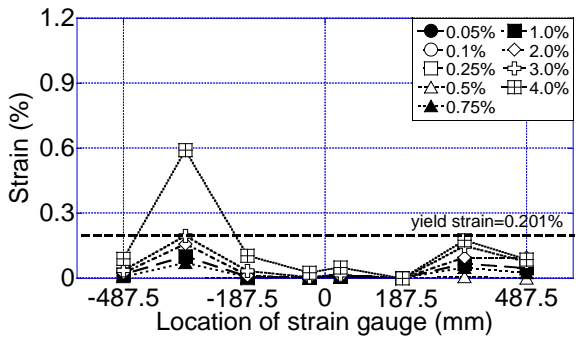
図-8 載荷終了後のひび割れおよび破壊状況



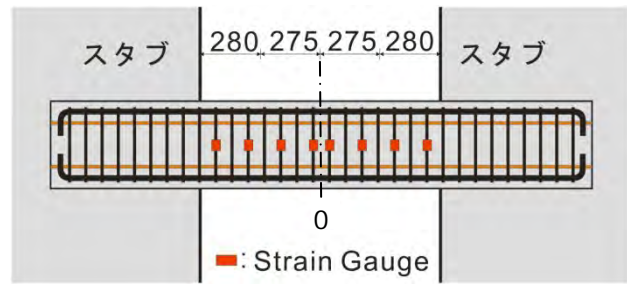
(a) PC3



(b) PC3-SF05



(c) PC3-SF10



(d) ひずみゲージ位置

図-9 せん断補強筋ひずみ-部材角関係

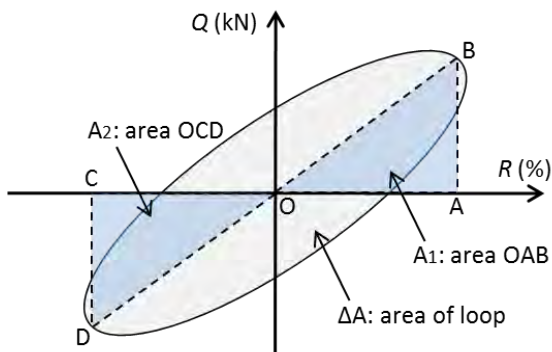


図-10 等価粘性減衰定数概念

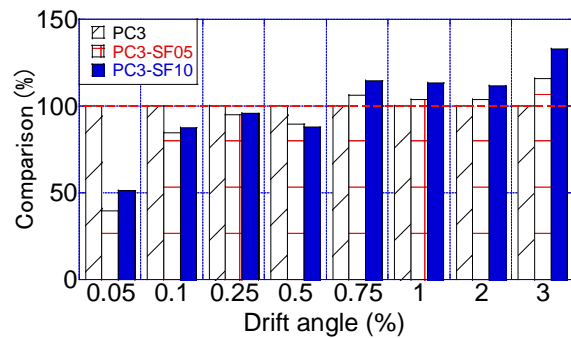


図-11 等価粘性減衰定数比較

等価粘性減衰定数の比較結果、部材角0.5%まではPC3-SF05とPC3-SF10のエネルギー吸収能力はPC3試験体より小さい。しかし、引張側軸鉄筋の降伏後からはPC3-SF05とPC3-SF10のエネルギー吸収量はPC3試験体より大きくなり、引張側軸鉄筋降伏後からはPreSFC部材のエネルギー吸収能力向上効果が確認された。

4. 2 PreSFC梁部材の曲げ終局耐力

本研究では、PC梁部材にSFRCを用いた場合の曲げ耐力を検討するために、SwamyとHenagerによって提案されたSFRC部材の曲げ耐力算定概念を用いて実験値と比較検討を行った。表-6にすべての試験体の計算値と実験値の比較結果を示す。Swamy⁵⁾とHenager⁶⁾は曲げ終局耐力算定ではコンクリート圧縮ひずみ0.35%、0.3%時を仮定しているため、その時点の実験値と算定値を比較するために求めた。しかし、コンクリート圧縮ひずみ0.3%と0.35%時の曲げ耐力実験値は曲げ耐力に大きな違いは見られなかったため、本研究ではコンクリート圧縮ひずみ0.3%時の曲げ耐力に対して検討を行った。SwamyとHenagerが提案した鋼繊維補強コンクリートの曲げ終局耐力算定式を修正した式(1), (2)を用いてPreSFC

表-6 曲げ耐力比較

試験体	Swamy	Henager	Test results	Cal. / Test	
	Q_{sw}	Q_{he}	$Q_{0.3}^{*1}$	Q_{sw}	Q_{he}
	(kN)		(kN)	$/Q_{0.3}$	$/Q_{0.3}$
PC3-SF05	452.4	538.0	349.7	129.4	153.8
PC3-SF10	461.6	560.0	387.5	119.1	144.5

*1:圧縮側コンクリートひずみが0.3%時の耐力

梁部材の曲げ耐力を算定した。

$$M_u = F_c(d_n - k_2) + F_{sc}(d_n - d') + F_{st}(d - d_n) + F_{ft} \frac{(D - d_n)}{2} + F_{py}(d_p - d_n) \dots \dots \dots (1)$$

$$M_u = A_s \cdot \sigma_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t \cdot b(h - e) \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_p \cdot \sigma_{py} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) - A_p \cdot \sigma_{pc} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 F_c =コンクリート圧縮力; F_{sc} =圧縮鉄筋による圧縮力; F_{st} =引張鉄筋力; F_{ft} =鋼繊維による引張力($=\sigma_t \cdot b \cdot (h - d_n - e)$); F_{py} =引張側 PC ストランドによる引張力; d_n =中立軸深さ; d' , d_p =圧縮縁から圧縮鉄筋および圧縮側 PC ストランド中心まで距離; k_2 =圧縮縁から圧縮応力ブロックの中心まで距離; A_s =引張側の鉄筋断面積; σ_y =主筋の降伏応力; d =断面の有効深さ; a =等価圧縮応力ブロックの深さ; σ_t =鋼繊維補強コンクリートの引張応力($=\eta_0 \cdot \eta_L \cdot \eta_b \cdot 2\tau_a \cdot l_f/d_f \cdot V_f$); η_0 =繊維方向係数; η_L =繊維長さ補正係数; η_b =繊維形状による付着有効係数; τ_a =繊維とコンクリート間の付着応力; l_f =繊維長さ; d_f =繊維直径; b =断面幅; h =断面高さ; d_n , e =圧縮縁から繊維補強による引張応力ブロックの上端までの距離; σ_{py} =引張側 PC ストランドによる引張力; σ_{pc} =圧縮側 PC ストランドによる圧縮力である。

表-6 から、Swamy や Henager による終局曲げ耐力は、本研究でのコンクリート圧縮ひずみ 0.3%時の実験値より約 19.1%~53.8%大きく確認され、Swamy と Henager による SFRC の曲げ終局耐力算定法では鋼繊維補強効果を過大評価していることがわかる。Swamy や Henager による終局曲げ耐力算定では、鋼繊維補強によるコンクリート引張側抵抗区間を部材断面の引張縁から中立軸高さまでの区間とし、損傷程度は考慮していない。しかしながら、実験では、部材引張側のひび割れ進展などの損傷程度によってコンクリート引張側抵抗範囲が小さくなり、繊維補強効果も減少したと判断される。このことから、部材損傷程度による引張側抵抗範囲を考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

- 1) PC部材にSFRCを用いることによるPC梁部材の曲げ耐力向上が確認された。
- 2) PreSFC梁部材のせん断補強効果および損傷低減効果が確認された。
- 3) 引張側軸鉄筋の降伏後からは、PreSFC部材のエネルギー吸収能力向上が期待されると考えられる。
- 4) SwamyやHenagerによる繊維補強効果考慮法では、繊維補強効果を過大評価しているため、損傷程度による繊維補強効果を考慮した曲げ終局強度評価法が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Haruhiko Suwada, Hiroshi Fukuyama : Nonlinear Finite Element Analysis on Shear Failure of Structural Elements Using High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.1, pp.45-57, 2006.2
- 2) Hiroshi Fukuyama : Application of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites for Damage Mitigation of Building Structures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.1, pp.35-44, 2006.2
- 3) 日本建築学会, プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 4) 日本建築センター, プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例, 2009
- 5) R. N. Swamy, Sa'ad A. Al-Ta'an, "Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete", *Structural Journal, ACI*, Vol. 78, No.36, pp.395-405, 1981
- 6) Charles H. Henager, M. ASCE and Terrance J. Doherty, "Analysis of reinforced fibrous concrete beams", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 102, No.ST1, pp.177-188, 1976