

論文

[1167] 連続繊維補強筋を用いたコンクリートはりの長期たわみ挙動

佐藤 和弘^{*1}・榎田 佳寛^{*2}・棚野 博之^{*3}・鹿毛 忠継^{*4}

1. はじめに

現在、連続繊維を用いたコンクリート補強用新素材に関する研究は、はり部材を想定したものが多く、その中でも連続繊維を補強筋として使用した場合の曲げ性状やせん断補強筋として使用した場合のせん断性状に関する研究が多く発表されている[1-3など]。しかし、連続繊維補強筋の耐久性や長期変形ならびに連続繊維補強筋を使用したコンクリート部材の長期性状に関する研究は非常に少ない[4],[5]。また、従来の鉄筋コンクリート曲げ部材の長期性状(たわみ予測)については、数多くの研究がなされ、たわみの予測式[6]等が提案されているが、コンクリートのひび割れ・クリープ・乾燥収縮等の物性要因や部材の断面性能等、部材の長期たわみに影響を及ぼす要因は多く、一般にこれらを考慮した長期たわみの予測は容易ではないことが知られている[7]。

本研究では、主筋に各種連続繊維補強筋を使用したコンクリートはりの持続荷重下における長期たわみ制御や使用限界状態に関する基礎資料を得ることを目的に、連続繊維補強はりの長期たわみ試験を行い、実験結果と長期たわみの予測式による推定値との関係から、連続繊維筋の機械的性質などがその結果に及ぼす影響を、鉄筋コンクリートはりとの比較によって検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体

断面20×20cm、長さ180cm、有効せいd=16.1cmの鉄筋ならびに連続繊維補強コンクリート単純はりを作製した。コンクリートの使用材料を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。コンクリートは設計基準強度 $F_c=360\text{kgf/cm}^2$ の1種類とした。表-3に連続繊維補強筋の種類ならびに機械的性質を示す。補強筋は、引張補強筋比 $P_t=0.92\sim 0.94\%$ 、せん断補強筋比 $P_w=0.6\%$ 、複筋比 $\gamma=1$ とした。耐力試験ならびに長期たわみ試験体種類を表-4、試験体形状・寸法を図-1に示す。試験体は、長期たわみ試験体5体、耐力試験体5体(合計10体)である。すべての試験体は、コンクリート材令1週まで湿布養生をし、脱型後材令4週までシート散水養生を行った後、

表-1 コンクリートの使用材料

セメント 細骨材	普通ポルトランド(比重=3.16) 鹿島 陸砂 表乾比重=2.59 最大寸法=5mm 粗粒率=2.70	混和剤 粗骨材	AE減水剤(お'リ'リソN070) 新治 碎石2005 表乾比重=2.69 最大寸法=20mm 実績率=60.0%
-------------	---	------------	---

表-2 コンクリートの調合

調合強度 kgf/cm ²	スラン プ cm	空気量 %	水セメント比 %	粗骨材の最大寸法 mm	細骨材率 %	単位水量 kg/m ³	重量kg/m ³			混和剤
							セメント	細骨材	粗骨材	
360	18	4	49.0	20	43.8	178	364	756	1009	3.895

表-3 連続繊維補強筋の種類ならびに機械的性質

連続繊維補強筋種類	引張強度 tf/cm ²	弾性係数 tf/cm ²	伸び率 %
アラミド(組紐、M社)	14.0	650	2.2
炭素(組紐、M社)	13.1	1170	1.35
炭素(螺旋、K社)	18.3	1247	1.2
ガラス(螺旋、K社)	13.8	472	2.4
鉄筋(SD295B、D10)	3.0*	2100	20.0

*:規格降伏点強度

- *1 建設省建築研究所 第二研究部 無機材料研究室 (正会員)
- *2 建設省建築研究所 第二研究部 無機材料研究室 室長、工博(正会員)
- *3 建設省建築研究所 第二研究部 無機材料研究室 主任研究員、工博(正会員)
- *4 建設省建築研究所 第二研究部 無機材料研究室 研究員、学術博(正会員)

試験時まで気中に放置した。

2.2 試験方法

図-2を試験方法を示す。長期たわみ試験は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ R.H.の室内で、クリーブ試験機(最大容量4 tonf \times 5台、てこ比=1:20)を使用し、3等分点载荷(純曲げスパン50cm、せん断スパン比 $a/D=2.5$)により行った。測定は、主筋のひずみを長期たわみ試験体の

载荷スパン内の圧縮・引張補強筋に貼付した防水加工を施した抵抗線ひずみゲージ(検長5mm)で、主筋位置のコンクリートのひずみをコンタクトゲージ(検長200mm,精度0.001mm)で、载荷点と中央点変位をダイヤルゲージ(精度0.001,0.05mm)を使用して、適当な時間間隔で行った。さらに、試験体側面のひび割れを観察し、クラックスケールを使用してひび割れ幅を測定した。

次に、载荷荷重を表-5に示す。長期たわみ試験での载荷荷重は、鉄筋コンクリートはりにおいて主筋の長期許容応力度($2000\text{kgf}/\text{cm}^2 = 2/3 \cdot \sigma_s$)が生じる荷重($2/3 \cdot P_v$ 、 P_v は部材の降伏耐力)とした。これにより、鉄筋コンクリートはりと連続繊維補強コンクリートはりが同一の主筋量をもつ場合、主筋に作用する応力度は同一となる。

3. 長期たわみ解析方法

3.1 はり部材のひび割れ後の剛性と曲率の算定

ひび割れ領域を持つはり部材の曲率 ϕ は、式(1)によって算出される。

$$\phi = M / E_c \cdot I_e \quad \dots \dots \dots (1)$$

M : 最大曲げモーメント、 E_c : コンクリートのヤング係数、

I_e : 有効断面2次モーメント(式(2), [8])

$$I_e = (M_{cr} / M)^3 \cdot I_o + (1 - (M_{cr} / M)^3) \cdot I_{cr} \quad \dots \dots \dots (2)$$

表-4 耐力試験ならびに長期たわみ試験体種類

試験体種類 (主筋種類)	引張 主筋	E_s or E_f	A_s or A_f	P_t (%)	変形 剛性比	σ_f / σ_s
アラド(組紐)	6-8 ϕ	650	3.01	0.94	3.188	0.99
炭素(組紐)	6-8 ϕ	1170	3.01	0.94	1.771	0.99
炭素(螺旋)	6-8 ϕ	1247	3.01	0.94	1.662	0.99
ガラス(螺旋)	6-8 ϕ	472	3.01	0.94	4.390	0.99
鉄筋(SD295B)	6-D8	2100	2.97	0.92	1.000	1.00

E_s or E_f : 鉄筋もしくは連続繊維補強筋の弾性係数(tf/cm^2)
 A_s or A_f : 引張補強筋断面積(cm^2)
 P_t : 引張補強筋比(%) ($\gamma=1$)
 変形剛性比 = $(E_s \times A_s) / (E_f \times A_f)$
 $\sigma_f / \sigma_s = A_s / A_f$

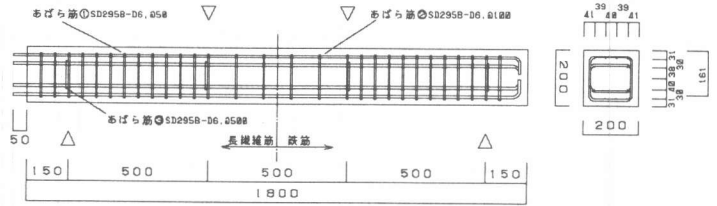


図-1 試験体形状・寸法

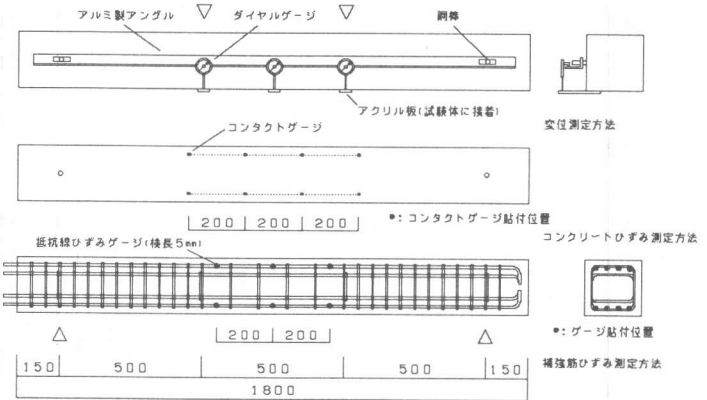


図-2 試験方法

表-5 载荷荷重

試験種類	载荷荷重またはモーメント (tonf or t.m)
耐力試験	漸増繰返し载荷
長期たわみ試験	3.347 (tonf) \rightarrow 0.83765 (t.m)*

*: 鉄筋の降伏強度 $\sigma_s = 3000\text{kgf}/\text{cm}^2$ と仮定した鉄筋コンクリート試験体での引張鉄筋降伏荷重(計算値) $\times 2/3$

M_{cr} : ひび割れモーメント(式(3))、 I_0 : 全断面の弾性断面2次モーメント

I_{cr} : ひびわれ断面(引張コンクリート無視)の等価断面2次モーメント(式(4))

$$M_{cr} = 1.8\sqrt{\sigma_c} \cdot (b \cdot D^2 / 6), \quad b, D : \text{はり幅, せい}, \quad \sigma_c : \text{コンクリートの圧縮強度} \quad (3)$$

$$I_{cr} = b \cdot X_n^3 / 3 + n \cdot A_t \cdot (d - X_n)^2 + A_c \cdot (n - 1) \cdot (X_n - d_c)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

X_n : ひび割れ断面の中立軸位置(式(5))、 n : ヤング係数比(= E_f / E_c)

A_t : 引張補強筋の断面積、 A_c : 圧縮補強筋の断面積、 E_f : 補強筋のヤング係数

d : 部材の有効せい、 d_c : 圧縮端から圧縮筋中心までの距離

ただし、ひび割れ断面の中立軸位置は次式で与えられる。

$$X_n = -n \cdot (A_t + A_c) / b + \sqrt{\{(n \cdot (A_t + A_c) / b)^2 + 2n \cdot (A_t \cdot d + A_c \cdot d_c) / b\}} \quad (5)$$

3. 2 長期の曲率の算定

はり部材のひび割れ断面における長期の曲率 ϕ は、コンクリートのクリープを考慮した曲率 ϕ_{creep} と乾燥収縮による曲率増加 ϕ_{sh} の和であり、式(6)によって算出される。

$$\phi = \phi_{creep} + \phi_{sh} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ϕ_{creep} は簡便で精度も良い修正ヤング係数法を使用し、式(7)によって算出される。

$$\phi_{creep} = M / E_t \cdot I_{et} \quad \dots\dots\dots (7)$$

E_t : クリープを考慮したヤング係数(= $E_c / (1 + \psi_t)$)、 $n_t = n(1 + \psi_t)$)

I_{et} : クリープを考慮した I_e

次に、 ϕ_{sh} も同様に修正ヤング係数法を使用し、式(8)で算出される。

$$\phi_{sh} = (0.5b \cdot X_{nt}^2 + (n_t - 1) \cdot A_c \cdot (X_{nt} - d_c)) \cdot E_t \cdot \epsilon_{sh} / (E_t \cdot I_{et}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

X_{nt} : クリープを考慮した X_n 、 ϵ_{sh} : 乾燥収縮ひずみ

なお、使用したクリープ係数 ψ_t 、ならびに乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} は、式(9)、(10)を使用した。

$$\psi_t = a_1 \cdot b_1 \cdot t / (1.5 + 0.25t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$a_1 = 1$ 、 $b_1 = b_2 = 0.75$ 、 t : 材令(週)

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_n \cdot \psi_t / \psi_n \quad \dots\dots\dots (10)$$

ϵ_n : 乾燥収縮ひずみ最終値(= $5 a_1 \cdot b_2 \times 10^{-4} = 3.75 \times 10^{-4}$)

ψ_n : クリープ係数最終値(= 3.0)

4. 実験結果ならびに考察

4. 1 耐力

表-6にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。以下、コンクリートの圧縮強度とヤング係数は実験値を使用した。表-7に耐力試験での

表-6 コンクリートの圧縮強度試験結果

材令	圧縮強度kgf/cm ²	ヤング係数kgf/cm ²	強度時のひずみ
材令28日	275	-----	-----
曲げ強度試験時	337	2.11×10 ⁵	0.2922×10 ⁻²
クリープ試験開始時	345	-----	-----

各試験体のひび割れ発生荷重ならびに終局耐力の実験値と計算値を示す。終局耐力は、いずれの試験体も計算値に対して実験値が20~50%程度上回っている。これは、試験体断面の複筋比 $\gamma = 1$ であることから圧縮補強筋の効果であると考えられる。

4. 2 曲げモーメント-曲率関係

図-3に各試験体の曲げモーメント-曲率関係を示す。図中の細実線と細点線はそれぞれ中央および載荷点変位より算出した曲率と上下主筋のひずみより算出した曲率の実験値を、太実線は式(1)、(2)より算出した曲げひび割れ剛性による曲げモーメント-曲率関係の計算値を示している。

これらより、鉄筋コンクリート試験体では、曲げひび割れ発生直後から終局耐力時まで、式(1)、(2)によって曲げひび割れ剛性がよく表現できていることがわか

表-7 耐力試験での各試験体のひび割れ発生荷重ならびに終局耐力の実験値と計算値

試験体種類 (主筋種類)	初期ひび割れ荷重 P_{cr} (tf)			終局曲げ耐力 P_{bu} (tf)			主筋破断耐力 P_{fu} (tf)			破壊状況
	exp.	cal.	ex/cal	exp.	cal.	ex/cal	exp.	cal.	ex/cal	
アラミド(組紐)	2.14	1.762	1.215	16.46	13.20	1.25		21.690		圧壊
炭素(組紐)	1.82	1.762	1.033	19.26	17.31	1.11		20.860		圧壊
炭素(螺旋)	1.775	1.762	1.007	25.44	17.84	1.43		27.009		圧壊
ガラス(螺旋)	1.96	1.762	1.112	17.36	11.42	1.52		21.326		圧壊
鉄筋(SD295B)	1.892	1.762	1.074	11.8	9.521	1.24	----	----	----	圧壊

- 初期ひび割れ荷重 P_{cr} (tf)
 $P_{cr} = 2M_{cr} / 50$, $M_{cr} = 1.8\sqrt{\sigma_c \cdot Z}$, $Z = b \cdot D^2 / 6$ ($\sigma_c = 337\text{kgf/cm}^2$ を採用)
- 終局曲げ耐力 P_{bu} (tf)
 ※鉄筋の降伏強度 $\sigma_y = 3000\text{kgf/cm}^2$ と仮定
 ※ $\epsilon_u = 0.35\%$ と仮定し、コンクリート圧縮応力度-ひずみ関係には、e関数式を使用した。
 ※耐力算定は、平面保持を仮定し、合力が釣合ように反復法で求めた。
- 主筋破断耐力 P_{fu} (tf)
 ※破壊モードが主筋破断の場合は、耐力算定に連続繊維補強筋の引張強度をそのまま使用した。

り、連続繊維補強筋のヤング係数が鉄筋の約1/2程度の炭素(組紐、螺旋)試験体においても、終局耐力付近ではやや曲率を小さく評価するが、式(1),(2)によって曲げひび割れ剛性がほぼ表現できていることがわかる。しかし、連続繊維補強筋のヤング係数が鉄筋の3/10~2/10程度のアラミド(組紐)、ガラス(螺旋)試験体では、終局耐力付近では曲率の実験値と計算値との比率は約2倍程度となり。式(1),(2)をそのまま使うことはできないと考えられる。参考として、表-8、図-4に長期たわみ試験における載荷荷重(3.347tf)が作用したときの耐力試験での曲率の実験値と計算値との比率をヤング係数順に示す。以上の原因として、連続繊維補強筋と鉄筋のコンクリートとの着着力の差や弾性係数の違い等が考えられる。結果として、連続繊維補強筋のように、鉄筋と比較して弾性係数が低い主筋を使用したコンクリートはりについては、従来の鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ剛性評価式をそのまま使用できない。しかし、上記の曲げ剛性評価式を準用するならば、何らかの低減係数などが必要である。

4.3 長期たわみ試験結果と解析結果の考察

図-5に長期たわみ試験開始より1年後(52週、364日)までの曲率の経時変化を示す。図中の太実線は曲率の計算値を示し、細実線と細点線はそれぞれ中央および載荷点変位より算出した曲率と上下主筋のひずみより算出した曲率の実験値を示す。また、上段と下段の曲線群はそれぞれ試験開始時からの曲率の合計 ϕa と曲率の増分 $\Delta\phi$ を示している。

表-8には載荷直後と1年後の $\Delta\phi$ と ϕa の実験値と計算値ならびにその比率を示しており、図-4に長期たわみ試験における $\Delta\phi$ と ϕa の実験値と計算値との比率を示す。

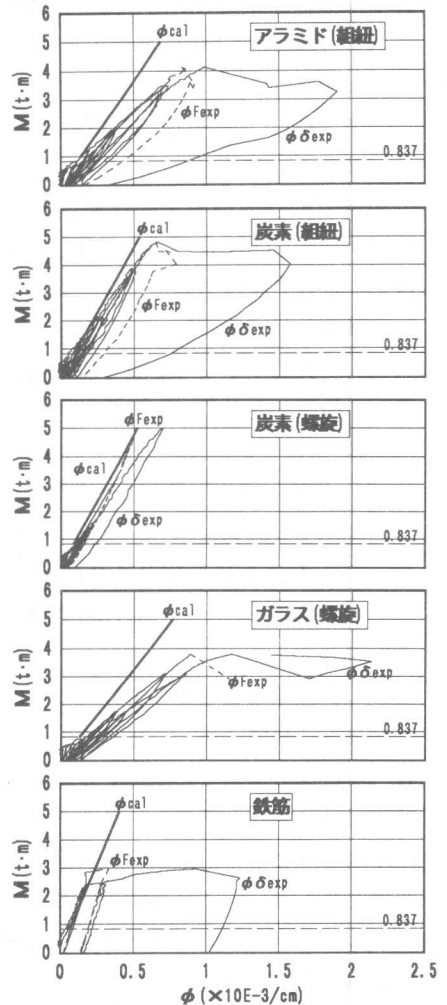


図-3 各試験体の曲げモーメント-曲率関係(耐力試験)

表-8 耐力試験ならびに長期たわみ試験での曲率の実験値と計算値

試験体種類 (主筋種類)	耐力試験でのP=3.347tf t時			長期たわみ試験(載荷荷重P=3.347tf)									ヤング 係数比 n ^{*4}
	$\phi_{exp.}$	$\phi_{cal.}$	ex/cal	載荷直後 $\phi(\times 10^{-4}/cm)^{*1}$			1年後 $\Delta\phi(\times 10^{-5}/cm)^{*2}$			$\phi a = \phi + \Delta\phi(\times 10^{-4}/cm)^{*3}$			
				$\phi_{exp.}$	$\phi_{cal.}$	ex/cal	$\Delta\phi_{exp.}$	$\Delta\phi_{cal.}$	ex/cal	$\phi a_{exp.}$	$\phi a_{cal.}$	ex/cal	
アラミド (組紐)	1.475	1.150	1.283	1.861	1.130	1.647	5.386	7.976	0.675	2.400	1.928	1.245	3.081
	0.972		0.845	1.374		1.216	7.712		0.967	2.146		1.113	7.731
炭素 (組紐)	1.142	0.901	1.267	1.357	0.890	1.525	3.246	5.283	0.614	1.682	1.418	1.186	5.545
	0.478		0.531	1.029		1.156	4.256		0.806	1.454		1.025	13.916
炭素 (螺旋)	1.057	0.875	1.208	1.335	0.865	1.543	4.404	5.041	0.874	1.776	1.369	1.297	5.910
	1.011		1.155	0.894		1.034	2.864		0.568	1.181		0.863	14.832
ガラス (螺旋)	1.731	1.285	1.347	2.400	1.259	1.906	5.553	9.793	0.567	2.955	2.238	1.320	2.237
	1.741		1.355	1.349		1.071	6.096		0.623	1.958		0.875	5.614
鉄筋 (SD295B)	0.578	0.678	0.853	0.654	0.673	0.972	3.104	3.422	0.907	0.965	1.015	0.951	9.953
	0.371		0.547	0.386		0.574	3.632		1.061	0.749		0.738	24.977

*1: $\phi_{exp.}, \phi_{cal.}$: 等t-メント区間での曲率の実験値と計算値、*2: $\Delta\phi$: 等t-メント区間での曲率の増分、*3: ϕa : 等t-メント区間での全曲率

*4: n(上段): 初期のヤング係数比、n(下段): クリブ係数による修正ヤング係数比(364日後)

* $\phi_{exp.}$ (上段): 主筋のひずみより算出した曲率、 $\phi_{exp.}$ (下段): 中央点、載荷点変位より算出した曲率

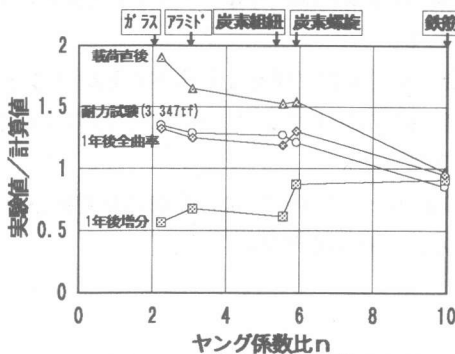


図-4 曲率の実験値/計算値とヤング係数比との関係

これらより、鉄筋より弾性係数の低い連続繊維補強筋を用いたコンクリートはりでは、 $\Delta\phi$ 、 ϕa とも鉄筋コンクリートはりを上回っていることがわかる。また、鉄筋コンクリートはりの場合は、 $\Delta\phi$ と ϕa の計算値は実験値とほぼ一致しており、前述の曲げひび割れ剛性と長期たわみ解析方法を使用することで、 $\Delta\phi$ ならびに ϕa をよく近似できていることがわかるが、連続繊維補強コンクリートはりの場合は、 $\Delta\phi$ の実験値は計算値の60~90%程度であり、ヤング係数比が小さくなるに従って、その比率も小さくなるが、 ϕa の実験値は計算値の1.2~1.3倍程度となり、ヤング係数比が小さくなるに従って、その比率は大きくなる。これは、連続繊維補強コンクリートはりでは、耐力試験時のような短期的な外力が作用する場合、式(1),(2)の曲げひび割れ剛性は、ヤング係数比が小さい試験体ほど変形を過小評価するが、長期的な外力が作用する場合、修正ヤング係数法を使用した式(7)での曲げひび割れ剛性は、ヤング係数比が小さい試験体ほど変形を過大評価していることを表している。

以上の理由は、連続繊維補強筋のクリーブによる見掛けの弾性係数の低下がコンクリートのそ

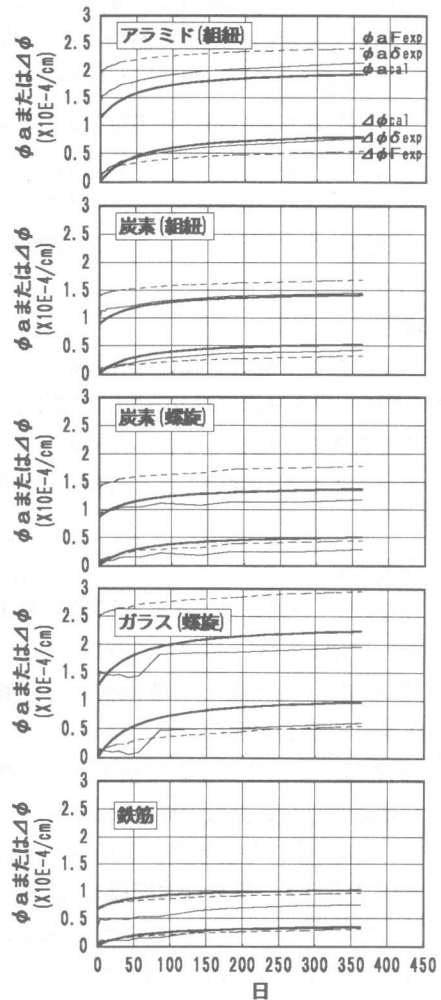


図-5 各試験体の曲率の経時変化(長期たわみ試験)

れを上回り、結果として、ヤング係数比が小さい試験体ほど、修正ヤング係数法を使用した経時的なヤング係数比の増加を過大評価していることが考えられるが、曲率の経時変化を安全側に推定していることにはなる。

ただし、1年後の ϕ_a で判断すると、前述の曲率の推定方法では若干危険側に推定しており、今後の試験結果ならびに曲率の推定方法を再考察し、検討する必要があると考える。

5. まとめ

- (1)鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ剛性を算出するための汎用式では、弾性係数が低い補強筋を使用した連続繊維補強コンクリートはりの曲げひび割れ剛性を過大評価する傾向がある。
- (2)持続荷重下における変形の増加は、本研究における曲率の推定方法では、連続繊維補強筋の弾性係数が小さい試験体ほど曲率の増加を過大評価(ひび割れ剛性を過小評価)する傾向があるが、原因として連続繊維補強筋のクリープが考えられる。
- (3)長期たわみ試験1年後の各試験体の曲率の合計は、ヤング係数比が小さな試験体ほど大きくなり、本研究における曲率の推定方法では若干危険側に推定しており、今後の試験結果ならびに曲率の推定方法を再考察し、検討する必要があると考える。
- (4)連続繊維補強筋を用いたコンクリートはりの長期たわみ予測では、連続繊維補強筋のクリープや長期的なコンクリートとの付着性状等を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究は、建設省総合開発技術プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」(通称：新素材総プロ)の中の長繊維補強コンクリート研究委員会(委員長：園部泰寿筑波大学教授)での研究の一環として行ったものである。また、使用した連続繊維補強筋は各メーカーに提供して頂きました。併せてここに謝意を表します。

参考文献

- [1]鈴木 淳司ほか：FRPC梁の曲げ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、vol.13, No.2, pp.743-748, 1991.
- [2]松崎 育弘ほか：長繊維補強材を用いたRC梁の曲げ性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、vol.13, No.2, pp.807-810, 1991.
- [3]谷垣 正治ほか：組紐状アラミド連続繊維筋を用いたPRC梁の曲げ性状に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、No.420, pp.31-41, 1991.
- [4]岡本 直ほか：アラミド繊維による組紐状棒材の研究(その9. PRC梁の長期荷重性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.153-154, 1989.10
- [5]岡本 直ほか：組紐状アラミド連続繊維筋を用いたPPC梁の長期荷重実験(その1. 実験概要およびたわみ性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.155-156, 1992.8
- [6]武田寿一、小柳光生：拘束スラブの長期たわみに関する研究、コンクリート工学(論文)、vol.23, No.1, 1985.1
- [7]日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp.506-511, 1991.4
- [8]ACI Committee 435, ACI Journal, Proc., vol.75, No.6, 1978.