

論文 連続繊維補強プレレストコンクリートの長期たわみ挙動の研究

野々村家寿道*1・棚野博之*2・坂下雅司*3・佐竹寛次*4

要旨：本研究は、主筋及び緊張材に連続繊維補強材を使用したプレレストコンクリート梁部材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、ハーフモデルの長期たわみ試験を行い、持続荷重下でのコンクリートのたわみや主筋及び緊張材の歪みを測定し、たわみ計算法の弾性たわみに対する倍率 K （ひび割れによる倍率 k_1 ＋クリープによる倍率 k_2 ＋乾燥収縮による倍率 k_3 ）について検討を行った。

キーワード：連続繊維補強材，連続繊維補強プレレストコンクリート，長期たわみ，たわみ倍率 K

1. はじめに

現在、連続繊維補強プレレストコンクリートの長期たわみの算定方法としては、日本建築学会のRC規準書[1]が提案している算定方法を、準用出来るのではないかと考えられている。しかし、連続繊維補強プレレストコンクリート部材の長期載荷実験に関する研究報告は僅かであり、算定用の値を提案できるまでには至っていない。

本研究は、主筋及び緊張材に連続繊維補強材を使用したプレレストコンクリート梁部材の長期たわみ試験を行い、持続荷重下におけるコンクリートのたわみや主筋及び緊張材の歪みを測定し、たわみ計算法の倍率 k_1 、 k_2 、 k_3 の数値（ k_1 ：ひび割れによる倍率， k_2 ：クリープによる倍率， k_3 ：乾燥収縮による倍率）を実験により算定し、長期たわみ挙動に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図-1に示すように、断面 20×20 cm、長さ180 cm、有効せい16.1 cmの連続繊維補強プレレストコンクリート梁を作成した。補強筋は緊張材も含めた引張補強筋比 $P_t = 0.62 \sim 0.92\%$ 、せん断補強筋比 $P_w = 0.6\%$ の試験体を作成した。

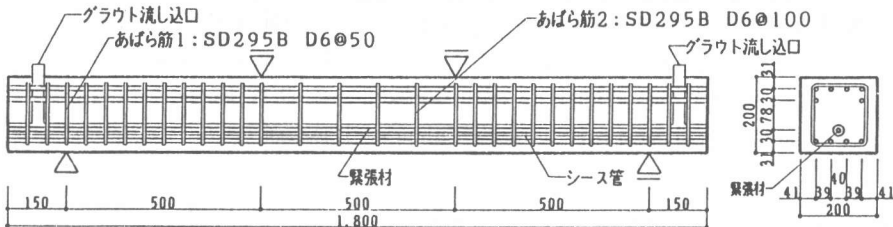


図-1 試験体形状寸法

* 1 ㈱宇佐美組技術本部（正会員）
 * 2 建設省建築研究所第二研究部無機質材料研究室主任研究員、工博（正会員）
 * 3 ㈱建材テクノ研究所、工修
 * 4 ㈱宇佐美組設計部（正会員）

表-1に緊張材，補強筋及び試験体の種類，試験体数を示す。試験体の種類は、SS（主筋：鉄筋，緊張材：PC鋼線），SA（主筋：鉄筋，緊張材：アラミド繊維），AA（主筋，緊張材共：アラミド繊維），CC（主筋，緊張材共：炭素繊維）の4種類とし、それぞれクリープ試験用2水準、乾燥収縮用2水準及び曲げ試験用を1水準の各々5体とした。緊張力導入はポストテンション方式で行い、緊張力は60KN±1%の張力を導入した。また、緊張材付着の為、グラウト注入により試験体全区間ボンドとした。（緊張力はセンターホール型ロードセルにて管理した。）

表-1 緊張材・補強筋及び試験種類一覧

名称	主筋の種類	主筋	E_{f1} kN/mm ²	a_{t1} cm ²	緊張材	E_{f2} kN/mm ²	a_{t2} cm ²	P_t (%)	γ	PS t	試験体の種類	試験体数
SS-1	SD295B	上端筋	206	1.98	SWPR7B 12.7mm	197	0.99	0.92	1	6	載荷荷重①	1
SS-2		6-D8									載荷荷重②	1
SS-3		下端筋									乾燥収縮	1
SS-4											乾燥収縮	1
SS-5											4-D8	曲げ試験
SA-1	SD295B	上端筋	206	1.98	アラミド* 10.4φ	68.6	0.85	0.88	1	6	載荷荷重①	1
SA-2		6-D8									載荷荷重②	1
SA-3		下端筋									乾燥収縮	1
SA-4											乾燥収縮	1
SA-5											4-D8	曲げ試験
AA-1	アラミド* (組紐)	上端筋	68.6	1.68	アラミド* 10.4φ	68.6	0.85	0.79	1	6	載荷荷重①	1
AA-2		6-φ7.3									載荷荷重②	1
AA-3		下端筋									乾燥収縮	1
AA-4											乾燥収縮	1
AA-5											4-φ7.3	曲げ試験
CC-1	炭素 (ヨリ線)	上端筋	140	1.22	炭素 12.5φ	140	0.76	0.62	1	6	載荷荷重①	1
CC-2		6-φ7.5									載荷荷重②	1
CC-3		下端筋									乾燥収縮	1
CC-4											乾燥収縮	1
CC-5											4-φ7.5	曲げ試験
DS-1										コンクリートのみ	1	

注) E_{f1} : 主筋ヤング係数 (KN/mm²) E_{f2} : 緊張材ヤング係数 (KN/mm²)

a_{t1} : 引張主筋断面積 (cm²) a_{t2} : 緊張材断面積 (cm²)

P_t : 引張補強筋 (主筋+緊張材) 比 (%), あばら筋: SD 295 B(D6)

γ : 複筋比 (圧縮主筋断面積 / (引張主筋断面積 + 緊張材断面積))

なお、長期たわみ試験の載荷荷重は、以下の2種類とした。

載荷荷重①：曲げ試験結果(表-2)より、初期ひび割れ発生荷重約29.4KNの1/2の14.7KN

載荷荷重②：「連続繊維補強コンクリート梁の長期たわみ挙動」[2, 3]の試験体との比較をする

ために同一荷重(引張鉄筋降伏荷重(計算値) $\times 2/3=32.8KN$ ： $\sigma_t=2/3\sigma_{sy}$)とした。

コンクリートは、設計基準強度 $f_c=36 N/mm^2$ の1種類とした。表-3にコンクリートと、グラウトの材料定数(実測値)、表-4に補強筋及び緊張材の特性を示す。

2.2 試験方法

長期たわみ試験は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{RH}$ の恒温恒湿室内で、てこ式クリープ試験機にて載荷した。図-2に示すように、緊張材と主筋のひずみは、試験体の載荷スパン区間に相当する位置に、防水加工を施して貼付けた検長5mmのひずみゲージで測定し、主筋位置のコンクリートのひずみはコンタクトゲージ(検長200mm)で測定した。試験体中央部と載荷点のたわみはダイヤルゲージ(精度0.001mm)により測定し、同時に試験体表面のひび割れを、目視観察で記録した。

3. 実験結果及び考察

3.1 長期たわみ量

図-3に、長期たわみ列の材令と、試験体中央部のたわみ量の関係を示す。

表-2 初期ひびわれ発生荷重(実験値)

試験体名	初期ひびわれ荷重(KN)
AA-5	28.5
SA-5	31.4
CC-5	27.7
SS-5	35.3

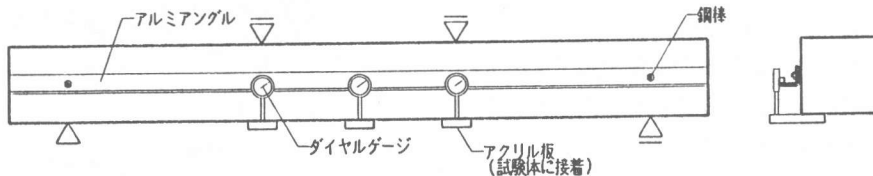
表-3 コンクリート・グラウトの材料定数(実測値)

	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (KN/mm^2)
コンクリート	63.50	6.52	29.11
グラウト	68.89		16.95

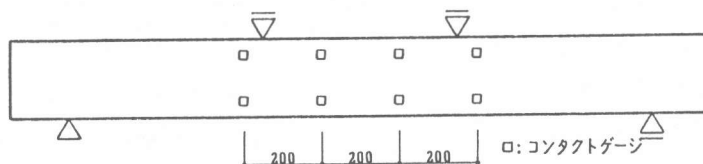
表-4 補強筋及び緊張材の特性

種類	構成	呼び径 (mm)	公称断面積 (mm^2)	破断荷重 (KN)	ヤング係数 (KN/mm^2)
鉄筋	異形	D8	49.5	14.6	206
PC鋼	7本ヨリ線	$\phi 12.7$	98.71	183.3	197
アラミド	組紐	$\phi 7.3$	42	62.7	68.6
アラミド	組紐	$\phi 10.4$	85	125.4	68.6
炭素	ヨリ線(1x7)	$\phi 7.5$	30.4	56.8	140
炭素	ヨリ線(1x7)	$\phi 12.5$	76.0	142.1	140

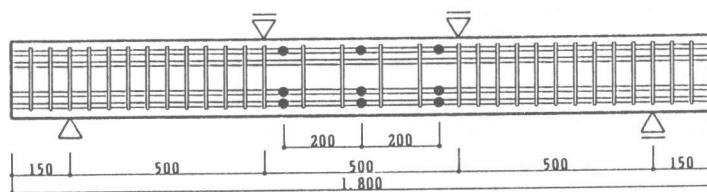
(変位測定方法)



(コンクリートひずみ測定方法)



(主筋及び緊張材のひずみ測定方法)



●: ひずみゲージ(検長5ミリ)

図-2 曲げ試験及び長期たわみ試験方法

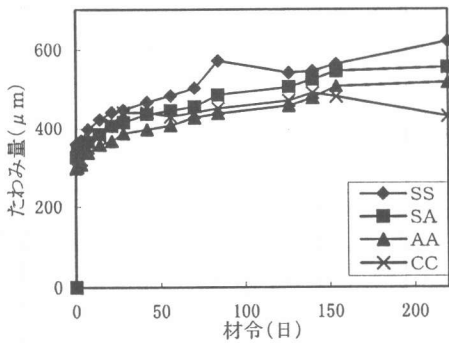
表-5 長期たわみ量

(μm)

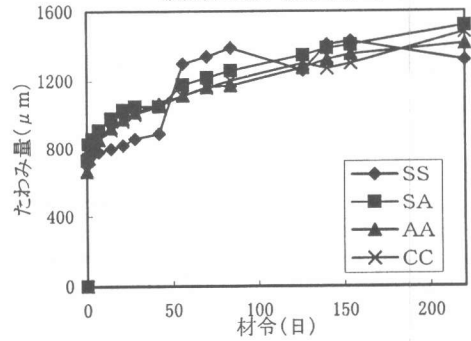
種類	載荷荷重①		載荷荷重②		乾燥収縮
	載荷直後のたわみ量 δ_0	材令 220 日目のたわみ量 δ_1	載荷直後のたわみ量 δ_0'	材令 220 日目のたわみ量 δ_2	材令 220 日目のたわみ量 δ_3
SS	359	620	758	1,318	-123
SA	325	555	726	1,516	-170
AA	297	517	662	1,412	-425
CC	300	430	669	1,479	-270

注) 下方へのたわみ量を、正で表示

載荷荷重①による長期たわみ



載荷荷重②による長期たわみ



また、表-5に、載荷直後のたわみ量と、材令220日目のたわみ量および、乾燥収縮による材令220日目のたわみ量を示す。

3. 2たわみ倍率算定

表-5の各たわみ量の関係を以下に示す。

1) 載荷直後のたわみ量 δ_0 = 弾性たわみ

2) 載荷荷重①による長期たわみ量 δ_1

$$\delta_1 = \delta_0 + \delta_3 + \text{クリープたわみ量 } \delta_k$$

3) 載荷荷重②による長期たわみ量 δ_2

$$\delta_2 = \delta_3 + \delta_0 * 32.8\text{kN} / 14.7\text{kN} + \text{ひび割れによるたわみ量 } \delta_H$$

ひび割れによるたわみ量 δ_H

4) クリープによるたわみ量 $\delta_k = \delta_1 - \delta_0 - \delta_3$

5) ひび割れによるたわみ量

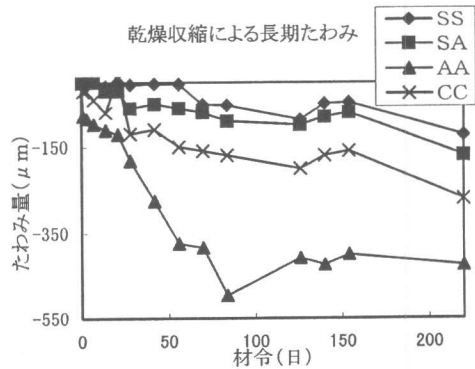
$$\delta_H = \delta_2 - \delta_3 - \delta_0 * 32.8\text{kN} / 14.7\text{kN}$$

各たわみ倍率は、以下の式(1)~式(3)で算定した。

$$\text{ひび割れによるたわみ倍率 } k_1 = \delta_H / \delta_0$$

$$= (\delta_2 - \delta_3 - \delta_0 * 32.8\text{kN} / 14.7\text{kN}) / \delta_0 \quad (1)$$

乾燥収縮による長期たわみ



注) 下方へのたわみ量を、正で表示

図-3 長期たわみの経時変化

$$\text{クリープによるたわみ倍率 } k_2 = \delta k / \delta_0 = (\delta_1 - \delta_0 - \delta_3) / \delta_0 \quad (2)$$

$$\text{乾燥収縮によるたわみ倍率 } k_3 = \delta_3 / \delta_0 \quad (3)$$

式(1)～式(3)で求めたたわみ倍率の値を表-6に示す。

表-6 たわみ倍率一覧表

	SS	SA	AA	CC
ひび割れによるたわみ倍率 k_1	1.78	2.96	1.09	3.60
クリープによるたわみ倍率 k_2	1.07	1.23	2.17	1.33
乾燥収縮によるたわみ倍率 k_3	-0.34	-0.52	-1.43	-0.90
たわみ倍率 $K=k_1+k_2+k_3$	2.51	3.67	1.83	4.03

3. 3 変形剛性比とたわみ倍率との比較

今回の実験で得られたたわみ倍率 k_1 , k_2 , k_3 の値と、SSを1とした場合の変形剛性比との比較を、表-7に示す。(ここでの変形剛性は、引張側主筋及び緊張材による剛性で、次のように求めた。変形剛性 = $a_{t1} * E_{t1} + a_{t2} * E_{t2}$, 変形剛性比 = (SSの変形剛性) / (各試験体の変形剛性))

表-7 SSに対するたわみ倍率と変形剛性比との比較の一覧表

	変形剛性比	SSに対する k_1 の比率 (ひび割れ)	SSに対する k_2 の比率 (クリープ)	SSに対する k_3 の比率 (乾燥収縮)	SSに対する Kの比率
SS	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
SA	1.31	1.66	1.15	1.53	1.46
		(+26.7%)	(-12%)	(+17%)	(-11.5%)
AA	3.52	0.61	2.03	4.21	0.73
		(-82.7%)	(-42%)	(+20%)	(-79.3%)
CC	2.25	2.02	1.24	2.65	1.61
		(-10.2%)	(-45%)	(+19%)	(-28.4%)

ひび割れ発生後は、SSに対する各試験体の k_1 に関する比率と、主筋及び緊張材の変形剛性比は、近い値を示すと考えられる。今回の実験では、AAを除いて、 k_1 に関する比率と、変形剛性比は、近い値となった。

主筋が繊維筋の場合、SSに対する k_2 の比率は、変形剛性比に対して42～45%低下した。また、主筋が異形鉄筋である場合、緊張材に繊維筋を使用しても、SSに対する k_2 の比率は、1.15となり、変形剛性比1.3に近い値を示した。

k_3 の比率は、主筋・緊張材の材種に関係なく、それぞれの変形剛性比の値に対して20%増の数値が算定できた。

Kの比率は、主筋に繊維筋を使用した試験体では、変形剛性比に対して20～70%の値となった。しかし、主筋が異形鉄筋の場合は、緊張材に繊維筋を使用しても、Kの比率と変形剛性比は近い値を示した。

3. 4 連続繊維補強コンクリート梁との比較検討

「連続繊維補強コンクリートの長期たわみ挙動」[2. 3]との比較をする為、表-8に載荷荷重②におけるたわみ増加率と変形剛性比を示す。(たわみ増加率 = δ / δ_0)

表-8 たわみ増加率の比較

主筋の種類	たわみ増加率		変形剛性比	
	RC梁	PC梁	RC梁	PC梁
アラミド (組紐)	8.65	2.13	3.19	3.52
炭素 (組紐)	11.16	/	1.77	/
炭素 (らせん)	10.26	/	1.66	/
炭素 (より線)	/	2.21	/	2.25
鉄筋	2.10	1.74	1.00	1.00

表-8より、緊張の有無によるたわみ増加率の差が認められた。緊張材にアラミド繊維、炭素繊維を使用した連続繊維補強プレストレスト梁のたわみ増加率は、緊張材を用いない連続繊維補強コンクリート梁の1/4~1/5であった。よって、長期たわみの観点からも繊維筋は、RC部材として使用するよりもPC部材として使用した方が、その特性を有効に利用できると思われる。

日本建築学会のRC規準書に示されている長期たわみ計算法を元に、部材厚20cm, $\gamma = 1.0$ から、Kを算出すると、K=3.11の値が求められた。[1] 今回の実験により算出された表-6のKの値と比較すると、主筋・緊張材の材種の組み合わせにより、RC規準書の0.8~1.3倍の値となった。

4. まとめ

- (1) 表-8からすると、連続繊維補強材を使用して梁を形成する場合、プレストレスト梁にする事によりたわみ増加率は、1/4~1/5に小さくなる。
- (2) 今回の実験により、主筋及び緊張材に、連続繊維を用いた場合のたわみ倍率Kは、2~4という値を、得ることが出来た。今後、主筋と緊張材の材種の組み合わせ、また、荷重レベルを増やした試験結果をふくめた、たわみ倍率の検討が必要と考える。
- (3) 「連続繊維補強コンクリートの長期たわみ挙動」の研究[2. 3]でも、たわみが長期に渡ると言われているが、緊張を掛けた梁部材(図-3のグラフ参照)でも、たわみの増加は長期に渡って継続している。今後も計測を継続して、たわみが収束した時点で曲げ試験を実施し、試験結果を含めて長期たわみ挙動を報告する予定である。

最後に、実験やデータ整理に協力してくれた宇都宮大学卒論生の大野君、そして、資料提供等にご協力を頂いた(株)安部工業所、東邦レーヨン(株)、エー・エム・エンジニアリング(株)にこの場を借りて謝意を表わします。

5. 参考文献

- [1] (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、(社)日本建築学会、pp. 510-520、1994. 2
- [2] 連続繊維補強コンクリート編集委員会：連続繊維補強コンクリート—諸性質と設計法—、技報堂出版(株)、pp. 168-170、1995. 7
- [3] 建設省総合技術開発プロジェクト：「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」報告書