

論文 曲げを受ける高強度 PRC はりの二次元非線形有限要素解析

木場 貴之^{*1}・豊福 俊英^{*2}・井上 貴文^{*3}

要旨：本研究は、高強度コンクリートを用いた PRC はりの曲げ挙動を材料非線形を考慮し、二次元有限要素法解析を行ったものである。解析対象供試体は、コンクリート圧縮強度が約 $60\text{N/mm}^2 \sim 120\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた PRC はりであり、FEM 解析で短期および長期曲げ挙動の解析を行った。材料非線形として、コンクリートの応力-ひずみ、付着応力-すべり量を考慮している。その結果、本解析法は、短期挙動でプレストレス量を過大に評価する事がわかった。長期曲げ挙動は、材齢に対するたわみ量の増加量を回帰式で表し、クリープ係数として用いることで実験値との一致が見られた。

キーワード：高強度コンクリート、付着応力-すべり曲線、クリープ、有限要素解析

1. はじめに

近年、構造解析の技術の進歩や終局状態での構造物の安全評価の必要性が高まってきた中でひび割れに起因するコンクリートの非線形挙動の定量的な把握が重要な課題となってきた。また、有限要素法等の数値解析法の発達が目覚しく、コンクリートのひび割れの伝達機構など、非線形挙動を生起する種々の要因を組み込んだコンクリート構造物の解析も可能となってきた。しかし、解析方法の発達に見合った材料非線形モデルの利用がなさなければ、この有限要素法の持っている威力を十分に発揮できない。今後、ますますの利用が期待されている高強度コンクリートへの有限要素法の適用は、高強度コンクリートの材料非線形モデルを如何に正確に把握するかに掛かっているといっても過言ではない。

このような背景を受け、高強度コンクリートの材料非線形モデルを用いる事で、高強度コンクリートを用いた PRC 構造物の曲げ挙動を、どれだけ正確に把握できているかが必要となると思われる。

本研究は、有限要素法を用いて高強度 PRC はりの短期および長期曲げ挙動に関して解析を行う

ものである。また、材料非線形のうち特に高強度コンクリートの付着応力-すべり量関係に着目し実験的に研究を行った。一般的にコンクリート部材は、曲げ耐力に至るまで著しい非線形を示す。この非線形性には、コンクリートの材料特性及びひび割れが大きく関与しているため、これらを考慮した高強度 PRC はりの力学的挙動を解析する。解析の対象とした供試体モデルは、コンクリートの圧縮強度が約 $60\text{N/mm}^2 \sim 120\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた PRC はりであり、曲げ耐力まで追跡する短期曲げ挙動と持続荷重を行う長期曲げ挙動の解析を行い実験値との比較を行った。なお、本解析を行うにあたって使用した汎用解析ソフトは、DIANAである⁶⁾。

2. 解析概要

2.1 ひび割れモデル

ひび割れモデルは、主に分布ひび割れ型モデルと離散ひび割れ型モデルに分類できる。分布ひび割れ型モデルは、ひび割れが2本以上許容されることが多く、ひび割れ現象を応力とひずみの関係から剛性を低下させて表現し、ひび割れ発生後もコンクリートを連続体として取り扱う。また、事

*1 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 関西大学 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

前にひび割れ発生位置の予測を必要とせず、解析に要する作業が容易で全体的な挙動が把握できる。離散ひび割れ型モデルは、コンクリートに発生した個々のひび割れをモデル化し、ひび割れ発生後はコンクリートを非連続体として取り扱う。また、ひび割れ幅を追うことができるという特徴がある。しかし、事前にひび割れ発生位置の予測が必要であり、分布ひび割れ型モデルに比べ入力データが非常に大きくなり解析に要する作業が困難であるため、本解析では、平均応力-平均ひずみにもとづく分布ひび割れ型モデルを用いている。解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ曲線を、図-1に示す。引張軟化については、解析の対象としているモデルが、PRC構造であるため $\epsilon'_{ci} = \epsilon_{sy}$ とし鉄筋の降伏ひずみを使用した。

2.2 付着モデル

はり供試体の解析の多くは、完全付着を仮定し行われているが、本解析においては、付着についても考慮している。付着は、コンクリートを平面要素、PC鋼棒と主筋を truss 要素とし、その間に interface 要素を配置し考慮している。interface 要素の性質上データの作成するに当たり2重節点が必要となる。interface 要素のモデルは図-2である。付着要素の中心線に対し、法線方向の相対変位を Δu_n 、応力を t_n 、接線方向の相対変位を Δu_t 、付着力を τ_t とすると式(1)の関係で表される。

$$\begin{bmatrix} t_n \\ \tau_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

マトリックスの係数を $D_{11} = t_n / \Delta u_n$ 、 $D_{12} = D_{21} = 0$ 、 $D_{22} = \partial f_{tan} / \partial \Delta u_t$ とする。 D_{11} および D_{22} は、接線剛性係数であり、 D_{11} は垂直方向の接線剛性係数であるので、垂直方向のすべり量は無いものとして $D_{11} = 1.0 \times 10^{10}$ とした。 D_{22} はすべり量 $\Delta u_t = 0.1mm$ 時の接線剛性係数を用いた。

解析に用いた付着応力-すべり量関係は、コンクリートの圧縮強度が約 $100N/mm^2$ 時の土木学会規準 (JSCE-G503) による鉄筋の引き抜き試験により求めた実験値より得た帰式を用いた。図-3(a) (b) にそれぞれシリカフェーム置換率 (SF 置換率) を

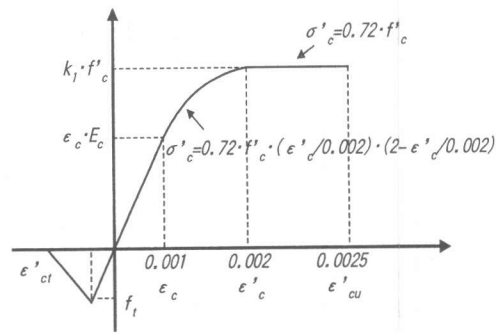


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

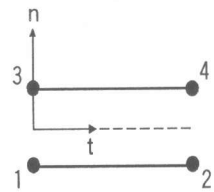


図-2 interface 要素

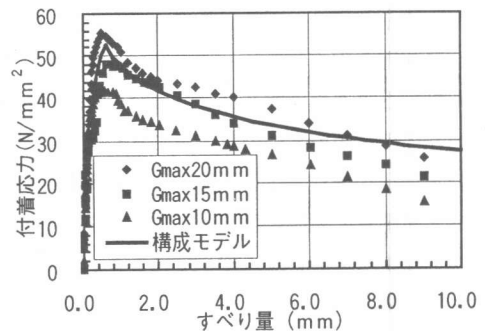


図-3(a) 付着応力-すべり量関係 (SF10%)

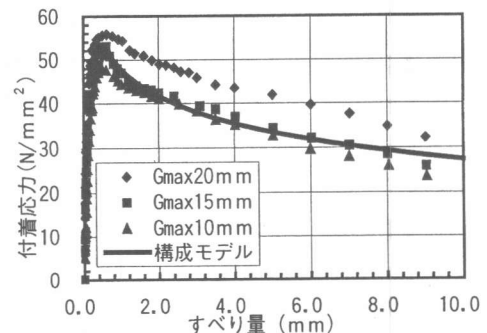


図-3(b) 付着応力-すべり量関係 (SF15%)

10%, 15%とし、粗骨材の最大寸法 (Gmax) をパラメータとした付着応力-すべり量曲線を示し、表-1に最大付着応力とその時のすべり量を示した。最大付着応力時のすべり量は平均で約 $0.6mm$ となっ

ている。また、図中の構成モデルは、供試体6体の付着応力-すべり量の回帰を取った回帰式であり、 Δu_t は最大付着応力時のすべり量の平均をとった。式(2)に表す。

$$\tau_t = \begin{cases} 126 \cdot \ln(\Delta u_t) + 588 & 0 \leq \Delta u_t \leq 0.6 \\ -8.9 \cdot \ln(\Delta u_t) + 47.8 & 0.6 < \Delta u_t \leq 100 \end{cases} \quad (2)$$

図-3(a)(b)よりSF置換率15%の供試体とSF置換率10%の供試体を比較するとSF置換率10%の供試体の方が最大付着応力後の付着応力の低下が著しい。また、Gmaxの小さい供試体の方が付着応力が小さく現れている。式(2)をコンクリートの圧縮強度が 100N/mm^2 の時の付着応力-すべり量曲線とし、 $\tau/f_c^{2/3} = \text{const}$ により、他の圧縮強度に対応させた鉄筋の引き抜き試験による付着応力-すべり量曲線が、PRCはり部材の曲げ挙動の付着特性を表すとは必ずしも言えないが本解析では、この回帰式を用いた。PC鋼棒の付着応力-すべり量曲線に関しては、圓林ら¹⁾の提案を引用した。

2.3 クリープ特性

一般的にクリープ係数は長期の曲げ挙動に及ぼす影響が大きいため文献²⁾の実験値だけでなく文献³⁾の実験値も考慮してある。文献^{2), 3)}のクリープ係数-材齢関係を回帰式で表したものを式(3)に示す。 ϕ をクリープ係数、 t を時間とする。

$$\phi = 0.110 \ln(t) + 0.096 \quad (3)$$

また、逆解析式として解析対象供試体C1の短期載荷を除く、材齢とたわみ量の傾斜と材齢に対するたわみ量の増加量を回帰式とし、切片を取り除いた式が逆解析式(4)である。

$$\phi = 0.317 \ln(t) \quad (4)$$

クリープ係数-材齢関係を図-4に示す。

2.4 解析対象

解析の対象とした供試体形状図および解析対象供試体の諸元をそれぞれ図-5、表-2に示す。図-5の上段がAシリーズ、中段がBシリーズ、下段がCシリーズとなっている。BシリーズおよびCシリーズは、それぞれ文献^{2), 4)}より引用した高強度コンクリートを用いた供試体である。AおよびBシリーズは短期載荷試験、Cシリーズは持続載荷試験

表-1 最大付着応力とすべり量

SF置換率 %	Gmax mm	圧縮強度 N/mm^2	最大付着応力 N/mm^2	すべり量 mm
10	20	101	55.8	0.624
	15	107	52.9	0.516
	10	106	47.6	0.569
15	20	102	55.5	0.590
	15	111	48.0	0.608
	10	106	41.6	0.567

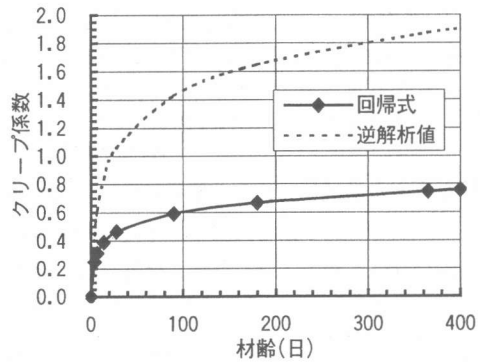


図-4 クリープ係数-材齢関係

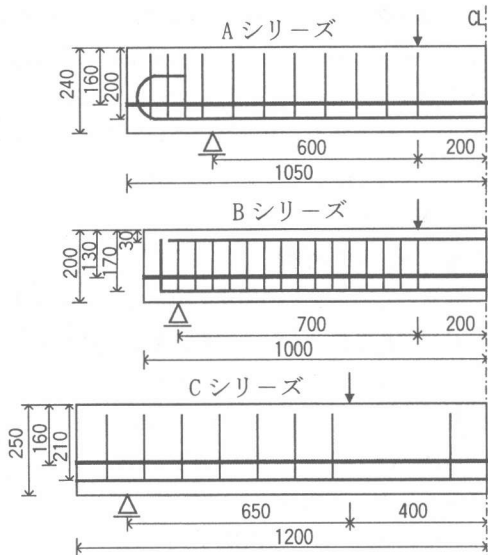


図-5 供試体形状図

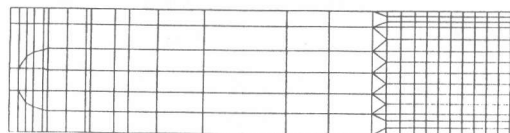


図-6 メッシュ分割

表-2 解析対象供試体の諸元

供試体名	コンクリート圧縮強度 f'_c N/mm ²	コンクリート引張強度 f_t N/mm ²	供試体幅 b mm	引張鉄筋断面積 A'_s mm ²	圧縮鉄筋断面積 A_s mm ²	P C 鋼棒断面積 A_b mm ²	総鋼材比 p	P C 鋼棒降伏点強度 f_{dv} N/mm ²	鉄筋降伏点強度 f_{sv} N/mm ²	コンクリート弾性係数 E_c N/mm ²	有効PS力 P_e kN	下縁導入応力 f_{PC} N/mm ²	導入比 f_{PC}/f_c
A1	53.7	3.91	180	573.0	-	129.2	0.0202	1462	390	32500	123	5.69	0.106
A2	87.3	4.70	180	573.0	-	186.5	0.0221	1400	390	38700	119	5.51	0.063
A3	87.3	4.70	180	774.0	-	261.3	0.0304	1228	390	38700	173	8.01	0.092
A4	109.6	5.39	180	774.0	-	261.3	0.0304	1228	390	42000	195	9.03	0.082
B1	121.5	7.25	120	397.0	253.0	530.9	0.0526	1131	386	49000	115	9.10	0.075
B2	121.5	7.25	120	397.0	253.0	530.9	0.0526	1131	386	49000	200	15.83	0.130
B3	121.5	7.25	120	397.0	253.0	530.9	0.0526	1131	386	49000	277	21.93	0.180
C1	100.0	4.27	200	397.2	-	80.0	0.0118	1275	353	36600	72	2.65	0.026
C2	100.0	4.27	200	146.7	-	180.0	0.0090	1275	353	36600	169	6.23	0.062

注) 総鋼材比は、総有効高さ $d=(A_s d_s + A_p d_p)/(A_s + A_p)$ とした時の $p=(A_s + A_p)/bd$ である。

験を行った供試体である。解析に用いた要素は、コンクリートに平面応力要素、P C 鋼棒および主鉄筋に truss 要素、フープ筋に鉄筋要素、付着に interface 要素を用いた。鉄筋およびP C 鋼棒の応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書⁵⁾に従った。P C 鋼棒はトリリニアモデルを使用している。コンクリートの応力-ひずみ曲線は、図-1 に示してある。降伏条件は、Von-Mises による構成式を適用し、A シリーズのメッシュ分割を図-6 に示す。B および C シリーズについても同様に純曲げスパンは、細かく分割している。

3. 解析結果および考察

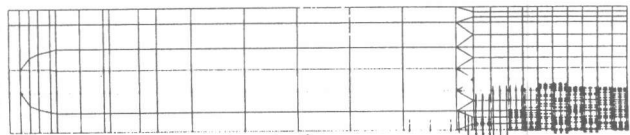
3.1 短期曲げ挙動

荷重とたわみ量との関係について、実験結果、FEM解析結果および示方書に準じた計算値との比較を行った。供試体A2のひび割れの進展状況を図-7に示す。荷重とたわみとの関係は、AシリーズおよびBシリーズをそれぞれ図-8(a)~(g)に示す。図中の実験値は、荷重開始時のたわみ量を0としたものである。解析値の荷重-たわみ量は、実験値の最大たわみ量まで求めている。解析結果は、全体的に実験結果に比べて荷重が大きくなっている。Aシリーズにおいて解析値が実験値の弾性範囲を追跡できていないのは、

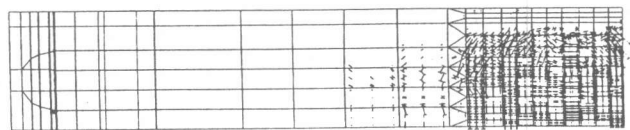
載荷試験で支点のコンクリートの沈下を考慮していないためと思われる。しかし、全体的な実験値の荷重-たわみ曲線の傾きは追跡できている。Bシリーズは、パラメータとしてプレストレス量をとったものである。解析値を実験値および計算値と比較してみるとプレストレス量を過大に評価して

表-3 解析結果

供試体名	解析値		実験値/解析値	
	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	P_{cr} の比	P_u の比
A1	48.8	218.0	0.94	0.96
A2	58.8	269.5	1.11	0.91
A3	88.1	340.3	1.50	0.86
A4	97.9	342.6	0.73	0.91
B1	68.6	219.9	0.86	0.96
B2	107.8	227.2	0.77	0.92
B3	127.4	235.3	0.80	0.96



P_{cr} (58.8kN)



P_u (269.5kN)

図-7 ひび割れ進展図

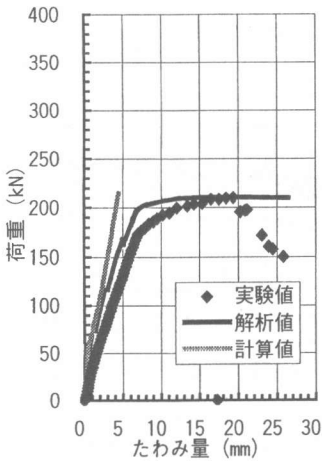


図-8(a) 荷重-たわみ量関係(A1)

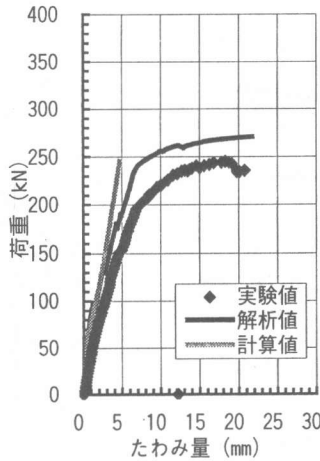


図-8(b) 荷重-たわみ量関係(A2)

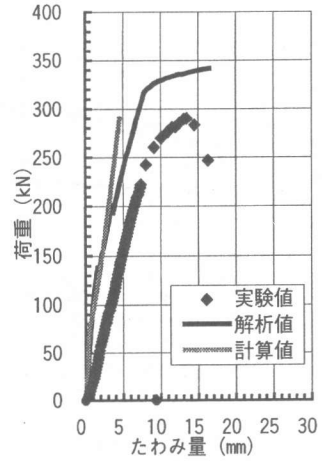


図-8(c) 荷重-たわみ量関係(A3)

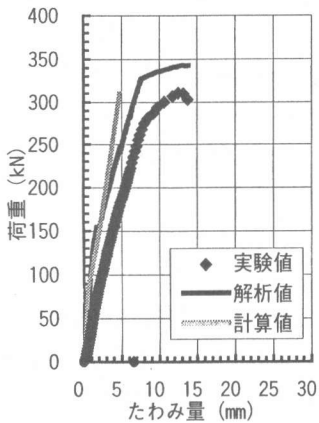


図-8(d) 荷重-たわみ量関係(A4)

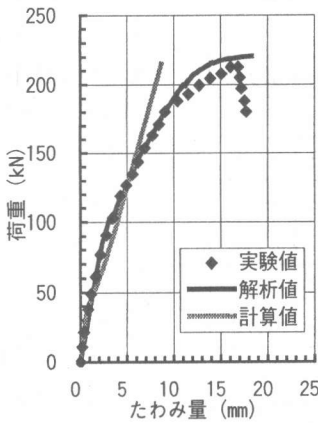


図-8(e) 荷重-たわみ量関係(B1)

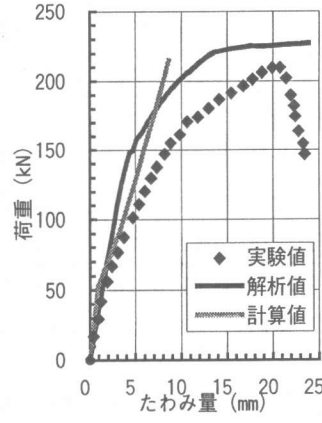


図-8(f) 荷重-たわみ量関係(B2)

いる。表-3にひび割れ発生時および曲げ破壊時の解析値、実験値と解析値との比を示す。ひび割れ発生荷重時 P_{cr} および曲げ破壊時 P_u の実験結果/解析結果の平均は、それぞれ0.96および0.93である。ひび割れ発生荷重は、ばらつきがあり有効プレストレス力大きい供試体の方が解析値が大きくなっている。曲げ破壊荷重は、満足のいく精度を得られた。

3.2 長期曲げ挙動

材齢とたわみ量との関係は、実験結果を式(3)を用いた解析結果、計算値、式(4)を用いた逆解析値との比較を行い図-9(a), (b)に示す。式(3)を用いた解析結果は、実験値を材齢が400日で大きく下まわっている。式(4)を用いた逆解析結果についても、若干下まわっているが、一致している。材齢におけるたわみ量の比を表-4に表す。解析値、計算値、逆

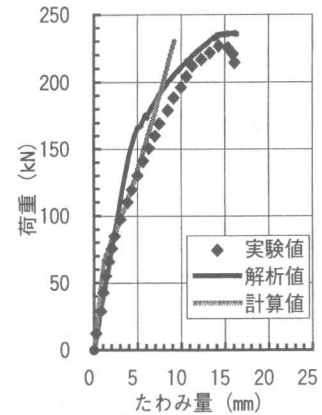


図-8(g) 荷重-たわみ量関係(B3)

解析値いずれにおいても初期材齢の誤差が大きい。材齢が進むにつれ計算値や逆解析値に比べ解析値は、誤差が大きくなっていく。しかしながら、クリ

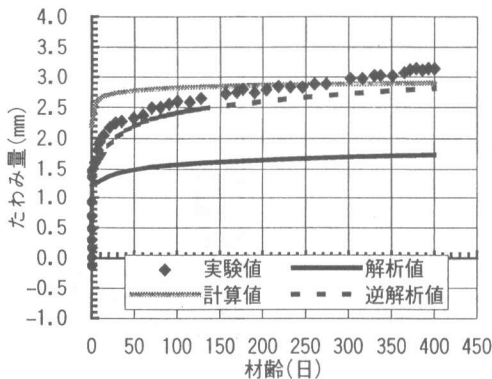


図-9(a) 材齢-たわみ量関係(C1)

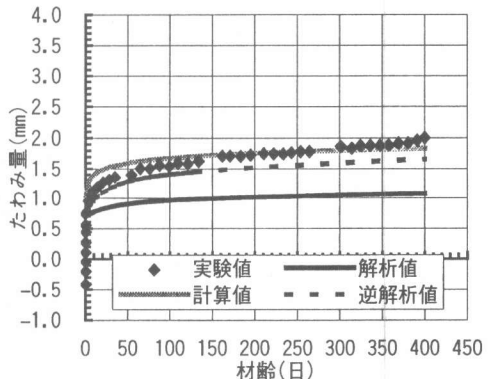


図-9(b) 材齢-たわみ量関係(C2)

表-4 材齢におけるたわみ量の比

	供試 体名	材齢			
		7日	28日	90日	400日
実験値/ 解析値	C1	1.43	1.58	1.63	1.71
	C2	1.40	1.54	1.63	1.86
実験値/ 計算値	C1	0.67	0.82	0.90	0.95
	C2	0.77	0.86	0.86	1.09
実験値/ 逆解析値	C1	0.89	0.94	1.07	1.06
	C2	1.12	1.12	1.12	1.20

ープ係数を材齢に対するたわみ量の増加量を回帰式で表したクリープ係数を用いると実験値に近づく。解析値と逆解析値のクリープ係数を比較すると高強度コンクリートのクリープ係数を小さく考えすぎているといえる。しかしながら、計算値はC1, C2いずれの供試体にも初期材齢時こそ誤差が大きいものの材齢が進むにつれ誤差が小さくなっている。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下のような結果が得られた。

- (1) 短期荷重の解析対象モデルであるAおよびBシリーズは、荷重に対するたわみ量が実験値に比べ全体的に小さい値となっている。
- (2) 有効プレストレス力をパラメータとしたBシリーズの実験値と解析値の荷重-たわみ曲線、ひび割れ発生荷重の比較より、本解析ではプレストレス力を過大に評価する傾向がある。

(3) 長期たわみ量について大きな要因と考えられる高強度コンクリートのクリープ係数-材齢関係を用いて解析に当たったが、実験値との誤差が大きかった。しかし、材齢に対するたわみ量の増加量を回帰式で表し、クリープ係数で用いることで実験値と一致させることができた。

参考文献

- 1) 圓林栄喜, 香月智, 石川信隆, 太田俊昭: P C鋼材の動的付着強度に関する高速引抜き実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.667~672, 1999
- 2) 手塚正道, 佐藤良一, 許明, 柚山隆行: 長期有効曲げ剛性の高強度コンクリート部材への適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.247~252, 1998
- 3) 尾崎訊, 菅田紀之: コンクリートの長期クリープ及び乾燥収縮試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.685~690, 1998
- 4) 望月秀朗, 児島孝之, 高木宣章: 高強度シリカフェームコンクリートを用いたPRCはりの曲げ挙動について, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.764~765, 1995
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 1996
- 6) DIANA 説明書