

鋼材の拘束を受けるコンクリート部材の 回復クリープ現象に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON PHENOMENON OF CREEP RECOVERY OF CONCRETE WITH RESTRAINT BY STEEL MEMBERS

中井 博*・栗田 章光**・瀬野 靖久***

By Hiroshi NAKAI, Akimitsu KURITA and Yasuhisa SENO

At present, it is well known fact that the creep phenomena of concrete consist of two components, i.e., delayed elastic (creep recovery) and flow creep. Two coefficients of creep must, therefore, be adopted for designing the concrete or steel-concrete composite structures. It is also considered that the values of creep coefficients are significantly affected by the restraint from the steel members. In current specification, however, the coefficient of creep recovery, which is the same as the delayed elastic creep, is coded as the constant value of 0.4. To evaluate the coefficient of creep recovery, three kinds of test on the creep are carried out under the various restraint conditions. Presented in this paper is the test results of creep recovery concerning the steel-concrete ratio and flow creep.

1. まえがき

鋼・コンクリート合成構造におけるクリープの影響を解析する際、クリープ係数値の取扱いは、かなり重要なものである。コンクリートのクリープ現象は、すでに明らかにされているように、2つの成分、すなわち遅れ弾性クリープ成分（回復クリープ）、およびフロークリープ成分（非回復クリープ）から成り立っているからである。中でも、連続的な除荷を伴う場合の回復クリープ成分の解析上の取扱いは複雑である。しかし、この回復クリープをクリープ解析において考慮すれば、設計上有利な結果を得ることがすでに報告されている^{1), 2)}。現在、わが国の鋼合成桁を含むコンクリート構造関係の設計規準には、回復クリープ係数、すなわち遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数の基本値（最終値）が0.4なる一定の値で規定されている。ところが、この値は、フロークリープ係数と同様に、環境条件、部材断面の形状寸法、断面の構造形式、および鋼材による拘束の程度などによって、相当に変化すると考えられる。

そこで、本研究では、主として鋼材の拘束効果を変化させたコンクリートのクリープ実験を通じて、回復クリープ係数の値を、フロークリープ係数値、および鋼材比の関数として表わし、評価を試みる。実験では、

* 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

** 工修 大阪工業大学講師 工学部土木工学科 (〒535 大阪市旭区大宮5-16-1)

*** 工修 修成建設専門学校教諭 土木工学科 (〒555 大阪市西淀川区大和田5-19-30)

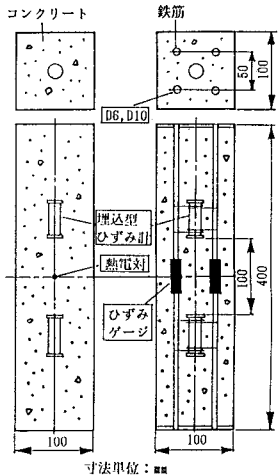
今後、種々な鋼・コンクリート合成構造物が開発・研究される際に、その利用が期待されているコンクリート鋼管構造の供試体も含めている。

実験を行った供試体は、RC部材、プレキャストPC床版、およびコンクリート充填鋼管柱の3種類である。このうち、コンクリート充填鋼管柱については、コンクリート断面のみへの载荷と合成断面への载荷との2通りの载荷方法を採用した。応力解放は、コンクリート充填鋼管柱を除いて、導入後約2年で行っている。もちろん、本文では、フロークリープ、および回復クリープ値について、実験結果と道路橋示方書規定値との比較・検討も行っている。なお、すべての供試体のクリープ実験は、ほぼ20℃の条件下で行われた。また、すべての供試体には、普通セメントが使用された。したがって、本論でのコンクリートの材令は、有効材令と考えてよい。

2. 実験概要（供試体の種類、および実験条件）

（1）RC部材³⁾

図-1、および表-1に示すように、供試体は10×10×40cmの角柱で、鉄筋比 p を $p=0$ 、1.27、および2.85%の3通りに変化させて製作した。導入応力は、材令28日目に約60kgf/cm²を導入した。そして、約2年経過した後、応力を解放した。ひずみ測定は、コンクリート内に設置した埋込型ひずみ計と鉄筋に各1枚ずつ貼付したひずみゲージとにより行った。また、持続荷重の変化は、ロードセルにより測定した。コンクリートの材料試験結果、材令28日の圧縮強度、弾性係数、およびポアソン比は、後述の表-4にまとめたように、それぞれ357.8kgf/cm²、 2.86×10^5 kgf/cm²、および0.18である。



(a) コンクリート柱 (b) RC柱

図-1 RC部材の供試体

（2）プレキャストPC床版^{4), 5)}

図-2、および表-2に示すように、供試体は220×200×18cmの実物大プレキャストPC床版を、合計8体製作した。プレストレスは、幅員方向（プレテンション方式）、および橋軸方向（ポストテンション方式）の2方向に導入されている。応力導入量は幅員方向100kgf/cm²で、橋軸方向は120kgf/cm²と65kgf/cm²との2種類とした。そのうち、1体については、導入後、9日目に導入量の約半分（65kgf/cm²→35kgf/cm²）の解放を行い、約2年経過した後、全供試体ともプレストレスをすべて解放した。ひずみ測定については、埋込型ひずみ計と表面ゲージとを併用して測定した。また、PC鋼棒の緊張力は、センターホール型ロードセルを2カ所に取り付けて測定した。なお、材令28日の材料試験結果は、後述の表-4にまとめられている。

表-1 RC部材の供試体の種類、および記号

実験目的	$p=0\%$	$p=1.27\%$	$p=2.85\%$
クリープ	A-1	B-1	C-1
乾燥収縮	A-2	B-2	C-2

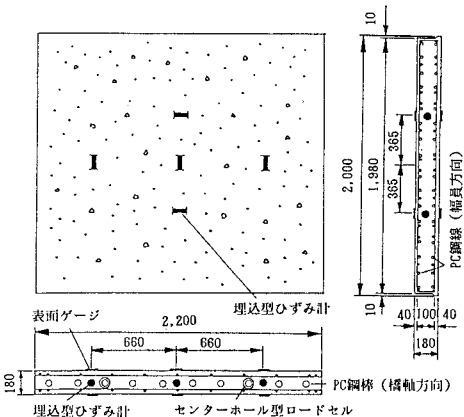


図-2 プレキャストPC床版の供試体

（3）コンクリート充填鋼管柱⁶⁾

供試体は、SS41材製の直径165.2mm、および高さ1000mmの鋼管に、コンクリートを充填したものである。鋼管厚は、4.5mmである。導入応力は、60kgf/cm²、および80kgf/cm²

の2種類とした。また、載荷形式については、コンクリート断面のみへの載荷、および合成断面への載荷の2種類とした。比較のために、それぞれの応力レベルに対して鋼管を用いない純粋なコンクリート柱のクリープ実験も行った。表-3には、これらの詳細を示す。応力解放は、導入後約1年経過した時点で行った。荷重の測定については、ロードセルを用いた。そして、ひずみの測定については、コンクリートひずみを埋込型ひずみ計で、鋼管ひずみを2軸ゲージで、また鋼管柱全体のひずみを鋼管外側に取り付けたひずみ計を用いてそれぞれ計測した。図-3、および図-4には、コンクリート充填鋼管柱、およびコンクリート柱の詳細図を示す。なお、鋼管、およびコンクリートの材料試験結果を、後述の表-4に示す。この種の実験は、当然のことではあるが、周囲の環境条件、とくに温度と湿度との影響を大きく受けるため、比較的温度変化の少ない地下室にすべての供試体を設置して計測を行った。

表-2 プレキャストPC床版の供試体の種類

供試体	記 号	荷重方向 (kgf/cm ²)	撓曲方向 (kgf/cm ²)	供試体寸法(mm) (幅×長さ×厚さ)	実験目的
1-1	C120L-1	100	120	2,200×2,000×180	クリープ
1-2	C120L-2	100	120	2,200× $\frac{998}{998}$ ×180	クリープ 目地（無収縮モルタル）の影響
1-3	C120L-3	100	120	2,200× $\frac{998}{998}$ ×180	クリープ 目地（樹脂モルタル）の影響
2	C65L	100	65	2,200×2,000×180	クリープ
3	C35L	100	65→35(*1)	2,200×2,000×180	クリープ
4	S100L	100	0(*2)	2,200×2,000×180	乾燥収縮
5	S0L	0(*3)	0(*2)	2,200×2,000×180	乾燥収縮
6	SPL	0(*4)	0(*4)	1,100×1,000×180	乾燥収縮

(*1): 85kgf/cm²を導入し、5日後に35kgf/cm²までリリースを行う (*3): 鋼線を配置する
(*2): 鋼線を配置しグラウトを施す (*4): グレーンコンクリート 1kgf/cm²=0.098MPa

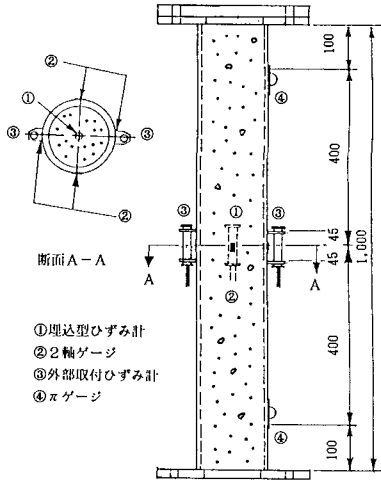


図-3 コンクリート充填鋼管柱の供試体

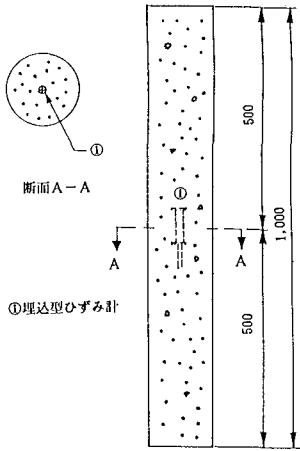


図-4 コンクリート柱の供試体

表-3 コンクリート充填鋼管柱の供試体の種類、および記号

記 号	種 類	導入応力 (kgf/cm ²)
CR-0.0	コンクリート柱	80
CR-60-4.5	コンクリート充填鋼管柱 (コンクリート断面載荷)	60
CR-4.5AC	コンクリート充填鋼管柱 (合成断面載荷)	80

注: 1kgf/cm²=0.098MPa

表-4 各供試体の材料試験結果 (材令28日)

項 目	供試体	RC部材	プレキャストPC床版	充填鋼管	充填鋼管
圧縮強度 (kgf/cm ²)		357.8	488.7	394.0	—
引張強度 (kgf/cm ²)		34.5	39.6	—	4,528
弾性係数 (kgf/cm ²)		2.86×10 ⁵	3.33×10 ⁵	3.04×10 ⁵	1.90×10 ⁶
ポアソン比		0.18	0.19	0.189	0.293
伸び (%)		—	—	—	16.5

注: 1kgf/cm²=0.098MPa

3. 実験結果とその考察

(1) 実験データの処理方法

ひずみの測定値には、乾燥収縮ひずみ、弾性ひずみ、クリープひずみ、および温度・湿度の変化によるひずみなどがすべて含まれているため、クリープ以外のひずみを取り除く必要がある。そのため、各供試体とも乾燥収縮を並行して測定し、全体のひずみから乾燥収縮ひずみと弾性ひずみとを差し引き、純粋なクリープひずみを算出した。また、各クリープひずみに対しては、時刻を t にとり、指数関数 $\varepsilon(t)=a\{1-\text{EXP}(-bt)\}$ を仮定し、最小自乗法を用いて定数 a 、および b を同定し⁷⁾、クリープひずみの最終値を推定した。

(2) 実験結果

a) RC部材

図-5には、鉄筋比の異なる3種類の供試体(A-1、B-1、およびC-1)の約2年間にわたるクリープひずみの経時変化を示す。また、図-6には、一般的な床版の鉄筋比である $p=1.27\%$ なる供試体B-1の実測クリープひずみと、その同定結果とを示した。

測定値、および同定結果から求めた各供試体のクリープ係数、および回復クリープ係数を、後述の表-5にまとめている。この表から、鉄筋比が大きくなるに伴って、フロークリープ係数は、小さくなるのがわかる。

b) プレキャストPC床版

図-7には供試体C120L-1の材令～ひずみ図を、また図-8には供試体C120L-1、およびC65Lのプレストレス解放後の回復クリープひずみのみの経時変化を示す。後述の表-5には、この2体の供試体(C120L-1、およびC65L)のフロークリープ係数、ならびに回復クリープ係数がまとめられている。これらから、幅員方向のプレストレスの影響を含めたプレキャストPC床版のフロークリープ係数、および回復クリープ係数は、それぞれ0.66、および0.24程度と推定される。

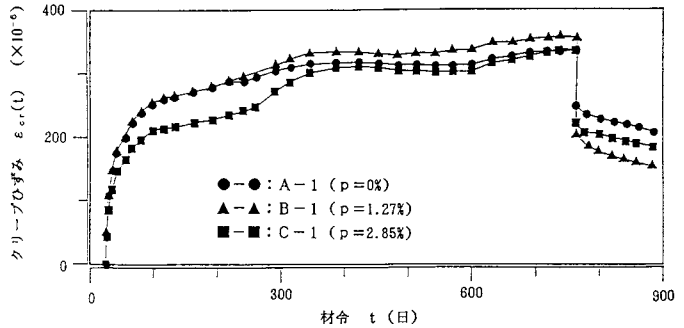


図-5 RC部材のクリープひずみの経時変化

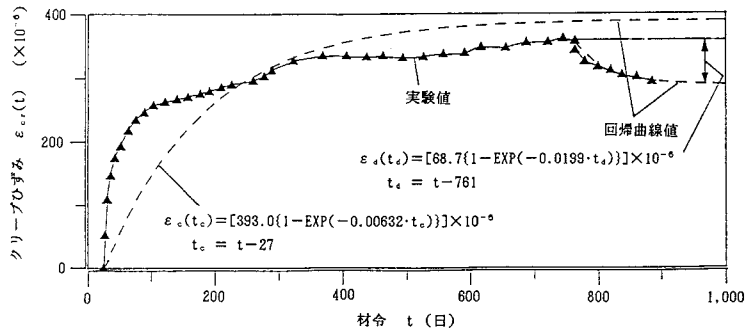


図-6 供試体B-1のクリープひずみの経時変化の詳細

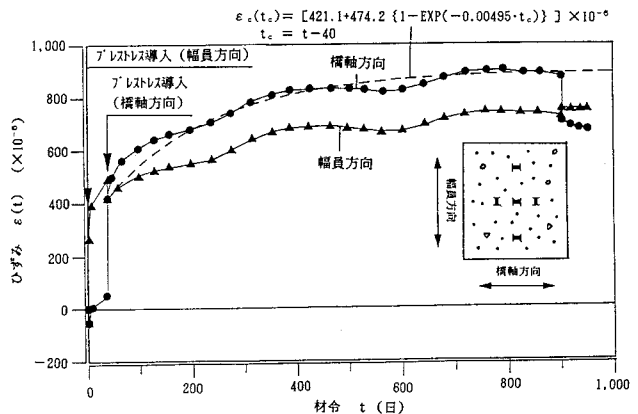


図-7 プレキャストPC床版C120L-1のひずみの経時変化

c) コンクリート充填鋼管柱

コンクリート柱、およびコンクリート充填鋼管柱（コンクリート断面載荷、および合成断面載荷）のクリープひずみの経時変化を、回帰曲線とともに、図-9に示す。また、表-5には、各供試体のフロークリープ係数、および回復クリープ係数を総括してある。これらの結果から、コンクリート充填鋼管柱の回復クリープ係数は、コンクリート柱の約半分であることがわかる。また、図-9から、コンクリート充填鋼管柱のコンクリート断面載荷と合成断面載荷とを比較すれば、両者のクリープひずみは、ほぼ同じであることがわかる。

(3) 実験結果の考察

各供試体の実験結果より、回復クリープ係数 $\phi_{d,\infty}$ とフロークリープ係数 $\phi_{f,\infty}$ との比、すなわち

$$\frac{\phi_{d,\infty}}{\phi_{f,\infty}} = \frac{\phi_{d,\infty}}{\phi_{\infty} - \phi_{d,\infty}} \quad \cdots(1)$$

を求め、各供試体のクリープ係数比と

鉄筋比との関係を調べてみると、図-10のようになる。

ただし、コンクリート

充填鋼管柱に対する鉄筋比

p は、鋼管断面積／コンク

リート断面積としている。

この図より明らかなように、

鉄筋比すなわち鋼材の拘束

が大きくなるほど $\phi_{d,\infty} /$

$\phi_{f,\infty}$ 値が大きくなる傾向にあることが

わかる。これは、拘束が大きくなるほど、

クリープによるコンクリートひずみが小

さくなるためであると考えられる。

4. 道路橋示方書規定値との比較

一般に、時刻 t_0 で載荷されたコンクリートの時刻 t におけるクリープ係数 $\phi(t, t_0)$ は、

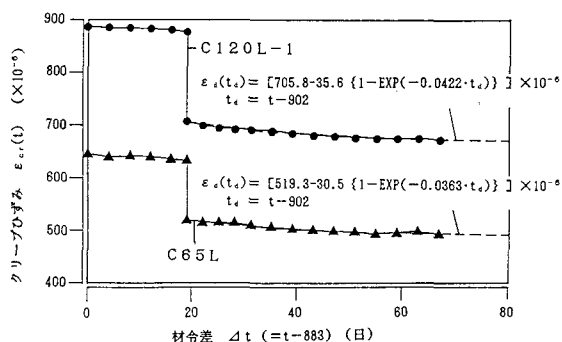


図-8 プレキャストPC床版C120L-1、およびC65Lの回復クリープひずみの経時変化

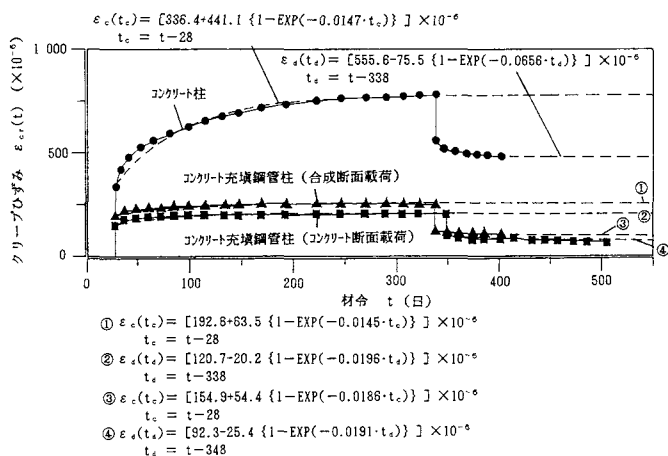


図-9 コンクリート充填鋼管柱のクリープひずみの経時変化

表-5 各供試体のクリープ係数

供試体	供試体の記号	鉄筋比 p (%)	フロークリープ係数 ϕ_f		回復クリープ係数 ϕ_d	
			測定値 (t_s (日))	回帰曲線値	測定値 (t_s (日))	回帰曲線値
RC部材	A-1	0.0	3.37 (733)	3.80	0.48 (124)	0.42
	B-1	1.27	2.55 (733)	2.82	0.54 (124)	0.54
	C-1	2.85	2.38 (733)	2.49	0.29 (124)	0.27
プレキャストPC床版	C120L-1	1.8	0.69 (862)	0.66	0.18 (50)	0.21
	C65L	1.8	0.70 (862)	0.66	0.22 (50)	0.27
コンクリート充填鋼管柱	CR-0.0	0.0	0.86 (310)	0.97	0.32 (62)	0.34
	CR-60-4.5	5.7	0.13 (320)	0.11	0.16 (277)	0.20
	CR-4.5AC	5.7	0.19 (310)	0.16	0.10 (62)	0.17

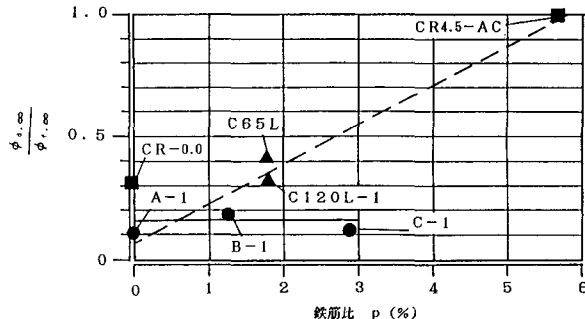


図-10 鉄筋比 p と $\phi_{d,\infty} / \phi_{f,\infty}$ との関係

道路橋示方書⁸⁾によると、次式で与えられる。すなわち、

$$\phi(t, t_0) = \phi_{d0} \beta_d(t-t_0) + \phi_{f0} \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_0) \} \quad \dots(2)$$

ここに、

- $\phi(t, t_0)$: 材令 t_0 日に持続荷重が載荷されたコンクリートの材令 t 日におけるクリープ係数
- ϕ_{d0} : 持続荷重を取り除くと、時間の経過とともに回復するクリープひずみ(遅れ弾性ひずみ)に対するクリープ係数で、一般に、0.4としてよい。
- $\beta_d(t-t_0)$: 持続荷重載荷後の経過日数($t-t_0$)に関する関数
- ϕ_{f0} : 持続荷重を取り除いても、回復しないクリープひずみ(フロークリープひずみ)に対する係数
- $\beta_f(t), \beta_f(t_0)$: それぞれ、コンクリートの材令 t (日)、および部材の仮想厚さに関する関数

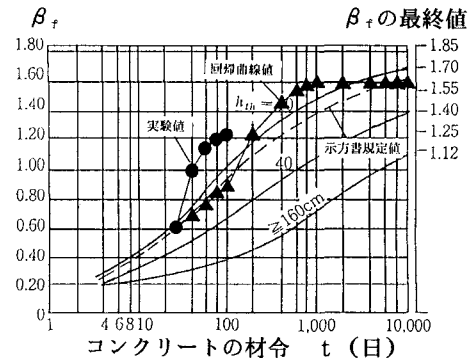
である。また、上式中の関数 $\beta_d(t-t_0)$ 、および $\beta_f(t)$ に関しては、コンクリート材令 t の経過に伴う進行曲線が道路橋示方書⁸⁾で示されている。そこで、以下、これらについて、道路橋示方書と実験値と比較してみる。

(1) フロークリープ係数に対する関数

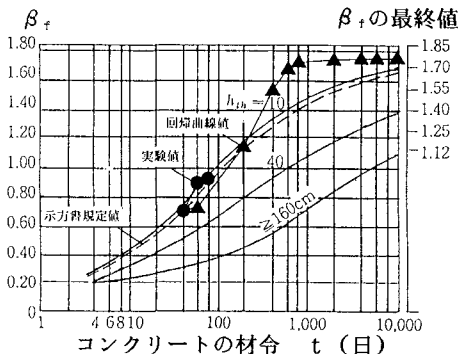
式(2)より、フロークリープ係数に対する関数 $\beta_f(t)$ は、次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \phi_f(t-t_0) &= \phi_{f0} \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_0) \} \\ \phi_{f, \infty} &= \phi_{f0} \\ \therefore \beta_f(t) &= \frac{\phi_f(t-t_0)}{\phi_{f, \infty}} + \beta_f(t_0) \quad \dots(3) \end{aligned}$$

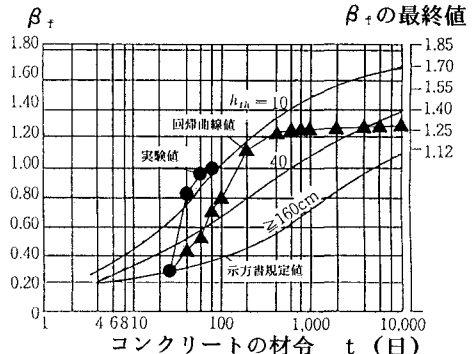
各実験結果に対して、上式を用いて求めた $\beta_f(t)$ を、道路橋示方書の規定値⁸⁾と比較した結果を、図-11(a)~(c)に示す。その際、 $\beta_f(t_0)$ 値に関しては、道路橋示方書の規定値と同一であると仮定した。これらの図より、各供試体とも最終値は、ほぼ道路橋示方書の規定値に近い値を示している。しかし、その進行が道路橋示方書の進行曲線にくらべて、若干、早く最終値に達しているようである。



(a) RC部材 (B-1)



(b) プレキャストPC床版 (C120L-1)



(c) コンクリート充填鋼管柱 (CR-4.5AC)

図-11 各供試体についての β_f 値

(2) 回復クリープ（遅れ弾性クリープ）係数に対する関数

式(2)によると、回復クリープ係数に対する関数 $\beta_d(t-t_0)$ は、次式によって求めることができる。

$$\begin{aligned}\phi_d(t-t_0) &= \phi_{d0} \beta_d(t-t_0) \\ \phi_{d,\infty} &= \phi_{d0} \\ \therefore \beta_d(t-t_0) &= \frac{\phi_d(t-t_0)}{\phi_{d,\infty}} \quad \dots(4)\end{aligned}$$

すると、(1)と同様に、上式を用いて求めた実験結果と道路橋示方書の規定値⁸⁾とを比較した結果を、図-12(a)~(c)に示す。

この図より、RC部材に関しては、比較的良好一致している。しかし、プレキャストPC床版、およびコンクリート充填鋼管柱に関しては、遅れ弾性ひずみが比較的早く進行することがわかる。

5. まとめ

種々な供試体を用いて、鋼材の拘束効果の大小が回復クリープ現象に与える影響に着目し、約2年間にわたるひずみの長期測定の結果、次のことがわかった。

- (1) 各供試体とも、回復クリープ現象が明確に現れている。そして、鋼材による拘束効果が大きなるほど、回復クリープ係数は、小さくなる傾向にある。
- (2) 鋼材拘束を受けるコンクリートの回復クリープ（遅れ弾性クリープ）の進行は、道路橋示方書の規定値⁸⁾よりも、早く最終値に到達する。
- (3) 無筋コンクリートの回復クリープ係数の最終値は、道路橋示方書の規定値どおり、ほぼ0.4の値となる。
- (4) しかし、RC部材の場合、鋼材拘束量（鉄筋比）に関係なく回復クリープ成分とフロークリープ成分との比 $\phi_{d,\infty} / \phi_{f,\infty}$ は、ほぼ一定で、0.15程度の値をとる。ところが、鋼材拘束量が大きくなる程、フロークリープ係数の値が小さくなるので、回復クリープ係数の値も鋼材拘束量に応じて小さくする必要がある。
- (5) PC版の橋軸方向の回復クリープ係数の最終値は、鉄筋比 $p=1.8\%$ の場合、0.24程度の値をとる。これには、幅員方向のプレストレスの影響が含まれている。
- (6) コンクリート充填鋼管柱の実験結果に関しては、コンクリート柱と比較すると、クリープ係数、および回復クリープ係数がかなり小さい。これは、鋼管によるコンクリートのひずみ拘束が、かなり大きいためである。また、荷重条件（コンクリート断面荷重、合成断面荷重）を変えた2体の比較から、フロークリープ係数、および回復クリープ係数の値は、両者ともほぼ同じであり、荷重条件による差異がないように思われる。この構造形式の回復クリープ係数の最終値は0.20程度である。
- (7) 今後、今回以外の条件、たとえば、荷重材令、除荷材令、および部材の仮想厚さなどの影響が回復クリープに及ぼす影響を詳しく調べる必要がある。

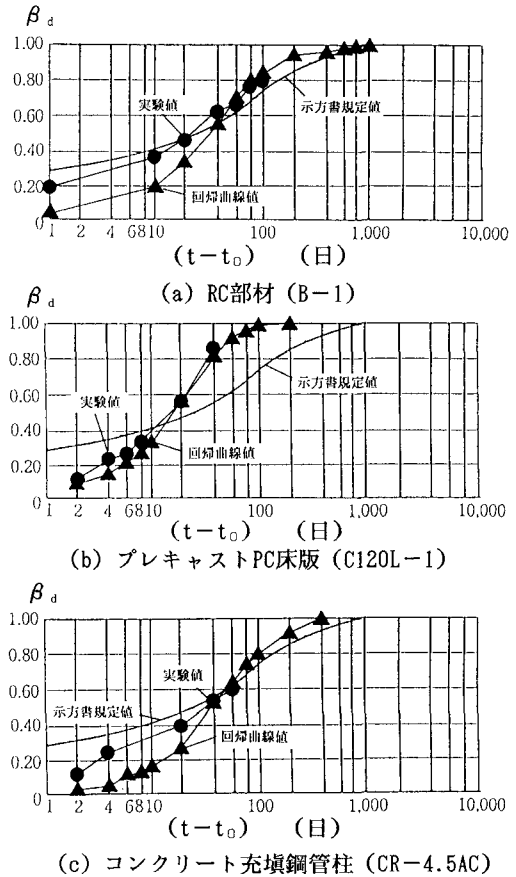


図-12 各供試体についての β_d 値

謝辞：本実験を行うにあたって、供試体の製作、測定方法、およびデータ整理などに関して種々なる協力を頂いた住友金属工業（株）・飯村 修氏、（株）春本鐵工所・Luiza H. Ichinose氏、オリエンタル建設（株）・田村 章氏、および（株）東京測器研究所・末吉良敏氏、大阪工業大学、ならびに大阪市立大学・橋梁工学研究室の方々に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中井 博・栗田章光：鋼・コンクリート合成構造のクリープ・乾燥収縮解析における種々の基礎式に関する一考察、構造工学論文集Vol.36A、土木学会、1990年3月、pp.1275～1284.
- 2) 栗田章光・中井 博：回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁のクリープ解析、構造工学論文集Vol.37A、土木学会、1991年3月、pp.1407～1418.
- 3) 栗田章光・瀬野靖久・末吉良敏：鉄筋比を変化させたクリープ・乾燥収縮に関する一実験について、第45回年次学術講演会、土木学会、平成2年9月、pp.788～789.
- 4) 中井 博・亀井正博・瀬野靖久・栗田章光：プレキャスト床版連続合成桁橋のクリープ・乾燥収縮に関する研究、第46回年次学術講演会、土木学会、平成3年9月、pp.334～335.
- 5) Nakai, H., Kurita, A., Kamei, M. and Seno, Y.: Creep and Shrinkage of Continuous Composite Girder Bridge by Using Prestressed Precast Concrete Slabs, Proc. of ICCS-3, ASCCS, Sept. 1991, pp.407～412.
- 6) 財団法人・災害科学研究所：コンクリートを充填した鋼管柱のクリープに関する実験的研究報告書、平成2年3月.
- 7) 中井 博・栗田章光・L.一ノ瀬伯子：鋼コンクリート合成構造物の応力・変形解析のためのクリープ係数と乾燥収縮量に関するデータベースの作成、構造工学論文集、Vol.37A、土木学会、1991年3月、pp.1397～1406.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編、丸善、平成2年2月.

(1991年9月30日受付)