

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

CONSTRUCTION OF DATA BASE ON CREEP COEFFICIENT AND SHRINKAGE FOR ANALYZING STRESS AND
DEFORMATION IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

中井 博*・栗田 章光**・L.一ノ瀬 伯子***

By Hiroshi NAKAI, Akimitsu KURITA and L.Hiroko ICHINOSE

Data base on the creep and shrinkage of the restrained concrete is prepared for the analysis of the long-term behaviour of various steel-concrete composite structures. The composite structures in this data base are categorized into three kinds of reinforced and prestressed concrete members, concrete filled steel tubes and concrete encased steel members. 110 test data have been collected from various sources and analyzed by the unified data processing method. In order to express test conditions and test results, 56 items are input. This data base can be used not only in the analysis of long-term behaviour of newly developed steel-concrete composite structures such as truss and arch bridges by using concrete filled steel members, but also can be applied to the method of rehabilitation for an abnormal deflection and stress concerning the actual composite structures including prestressed concrete girder bridges.

1. まえがき

無筋コンクリートのクリープひずみと乾燥収縮ひずみについて、阪田^{1),2)}らは、多量のデータを収集した結果、それらの予測式を提案している。しかし、これまでのところ、まだデータベースの作成には、至っていないようである。さらに、鉄筋や形鋼などによる内部拘束、あるいは鋼管などによる外部拘束を受けるコンクリートのクリープ係数、および乾燥収縮量に関するデータベースは、国の内外を通じて全く見当たらないのが現状である。

コンクリートのクリープ係数と乾燥収縮量とを把握するための試験は、相当な日数を要する疲労試験と比

* 工博 大阪市立大学 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 工学部土木工学科 (〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1)

*** 工修 (株)春本鐵工所 設計技術部 (〒551 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

較しても、けた違いの日月が必要となる。もちろん、たとえば、道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編³⁾では、コンクリート橋や合成桁橋の設計のためのクリープ係数と乾燥収縮の量とが、ある程度の内部拘束を考慮して提示されている。これによって、その示方書で規定されている適用範囲内の橋梁を設計する場合には、何ら支障が生じない。しかし、PPCS工法⁴⁾などに見られるように、新形式の鋼・コンクリート合成桁橋の長期にわたる経時挙動を解析する場合や、コンクリート充填、あるいは被覆鋼管構造をトラス系・アーチ系の橋梁やその他の構造物に応用する場合、それぞれの拘束条件に対応したクリープ係数や乾燥収縮量の予測や評価が必要となる。そのような際に、種々な条件下におけるコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮量とに関するデータベースが構築されていると、先に述べたよう、コンクリートのクリープ試験には多大の日月を要するだけに、その利用価値が大きい。

このような背景のもとで、著者らは、自ら実施したクリープ試験^{5)～8)}をはじめ、国内外で公表された種々な拘束を受けるコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮量とに関する実験結果^{9)～14)}を収集し、それを統一した手法で数値処理するデータベースを構築した。このデータベースは、上で述べた新形式の鋼・コンクリート合成構造物の長期にわたる経時挙動の評価にも使用できる。このほか、PC構造物を含む既存の鋼・コンクリート合成構造物のたわみなどの経時挙動に異常が生じた場合、その原因の究明や補修対策を立てる際にも、このデータベースが有効に利用できよう。なお、ここで作成したデータベースには、クリープ・乾燥収縮に関するデータが110例登録されている。

2. データベースの構成

表-1 対象とした構造形式

(1) 対象構造の分類

この研究で作成しようとするデータベースでは、表-1に示すように、対象構造を大きく3つに分類している。このうち、分類コードAの構造は、一般的なRC、およびPC構造に対応するものである。そして、合成柱などに用いられるコンクリート充填鋼管構造は、分類コードBとした。もちろん、この構造では、角形鋼管と円形鋼管との2つの使用が考えられる。また、コンクリート中に鋼部材(鋼管、形鋼、あるいは溶接集成材など)が埋め込まれる構造は、コンクリート被覆鋼管構造とみなし、Cの分類コードに入れられている。分類コードB、およびCの形式のものが、最近、基礎構造や地下構造(抗土圧構造)に積極的に応用されようとしているので、対応しておく必要がある。

分類コード	構 造 形 式	具 体 的 な 適 用 構 造 例
A - 1 A - 2	鉄筋コンクリート構造 PSコンクリート構造	RC橋、PC橋、合成桁橋
B	コンクリート充填鋼管構造	合成柱の橋脚、合成トラス橋
C - 1 C - 2	コンクリート被覆鋼管構造 コンクリート被覆形鋼構造	コンクリート巻き立てアーチ橋、 基礎杭、その他、多数のもの

(2) データベースの入力項目

ここで作成したデータベースの入力項目は、構造形式によって若干異なる。しかし、本質的なものは同じであり、ここでは、分類コードAの場合のみの入力項目を表-2に例示する。この表から明らかなように、分類コードAでは、合計56項目の入力値が設定してある。これらの項目について説明すると、下記のとおりである。

表-2 データベースの入力項目(コードAの場合のみ示す)

項 目 の 分 類			具 体 的 項 目			
出 典			1.文献番号 5.言語	2.研究者名 6.特記事項	3.研究機関名	4.発表年
試 験 条 件	試 験 体	外 形 寸 法	7.試験体寸法	8.鋼材比		
		コンクリート	9.設計強度 13.骨材の種類 17.ポアソン比	10.セメントの種類 14.混和剤の種類 18.特記事項	11.セメント量 15.実測圧縮強度	12.水セメント比 16.ヤング係数
		鉄筋、PC鋼材	19.鋼種 23.降伏点	20.呼び径 24.特記事項	21.実測径	22.使用本数
		試験体の本数	25.クリープ	26.乾燥収縮	27.回復クリープ	
	試 験 方 法	試 験 装 置	28.載荷方法	29.特記事項		
		載荷応力と材令	30.載荷応力	31.初期載荷材令	32.載荷応力の調整の有無	
		測 定 期 間	33.クリープ	34.回復クリープ	35.乾燥収縮	
		測 定 方 法	36.荷重 40.温度	37.応力 41.湿度	38.変位(ずれ)	39.ひずみ
		試 験 環 境	42.設置場所	43.乾燥条件	44.特記事項	
	試 験 結 果	ひずみ等の測定データ		45.ひずみ	46.温度	47.湿度
ク リ ー プ 係 数		48.最終クリープ係数 50.回帰式		49.回復クリープ係数 51.クリープ係数と鋼材比との関係		
乾 燥 収 縮 量		52.最終乾燥収縮量 54.乾燥収縮量と鋼材比との関係		53.回帰式		
粘 弾 性 定 数		55.パネ定数	56.粘性係数			

まず、データの出典に関しては 6 項目にわたって入力し、図-1 に示したように、その他は文献番号で参考文献(あるいは報告書)に戻る方法をとっている。そして、クリープ・乾燥収縮の試験では、特にコンクリートの物性と試験体の大きさ、および拘束度が試験結果に与える影響が大きい。そこで、試験体に関する入力データは、21 項目となっている。なお、分類コード B,およびC の構造では、試験体に関する入力項目として重要なものに、ずれ止めの配置の有無とその形式とが挙げられる。そのため、分類コードA の入力項目のほか、ずれ止めに関する項を加えている。また、クリープに関する比較的最近の知見である回復クリープの試験の実施の有無と試験体数とが、第 27 項目に入れてある。

つぎに、クリープ試験では、種々の載荷方法が考えられる。最も簡易なものとして、試験体の内部、あるいは外部にPC鋼棒を配置して、それを緊張・固定することによって持続力を載荷する方法がある。この方法では、試験体の大きさと導入応力に応じて固定治具、およびPC鋼棒の本数とを自由に選択することができる。小型の試験体であれば、数種のクリープ試験装置¹²⁾がある。もちろん、試験装置の良否が結果に与える影響は極めて大きいので、特記事項を設け、装置に関する詳細なコメントを入力できるように配慮している。なお、分類コードB、およびCでは、コンクリート部材への載荷、鋼部材への載荷、および合成部材への載荷の3つが考えられるので、これらを入力項目として追加している。測定期間については、長いものでは4年間にわたるものもみられる。そして、荷重、ひずみ、および温度等の測定方法については、6項目とした。大型の試験体を用いる場合、最も条件がよいとされる恒温・恒湿の試験室を用意することが一般に不可能であり、普通の実験室の適当な場所に試験体が設置されることが多い。そのため、試験結果に対しては、温度と湿度との補正が必要になってくる。したがって、この場合、温度と湿度との測定方法も重要な因子となる。また、乾燥収縮試験では、試験体表面の乾燥条件が最も重要である。そこで、乾燥面が何面あるかに関する情報を、43番目の項目で入力することにした。

さらに、試験結果に関する入力データの項では、載荷材令とひずみ、温度、および湿度の多量のデータをとりあえず入力する。そして、最終的に利用者が求めているクリープ係数、および乾燥収縮量などをついで入力する。鋼材比を種々変化させた試験では、クリープ係数、および乾燥収縮量と鋼材比との関係が代数式でまとめられているので、このデータも入力することとした。また、クリープ現象を3.で述べる3要素のモデルでとらえて粘弾性解析が行われるケース^{9), 16), 17)}もまれにあるので、粘弾性定数の項目も入力できるように配慮してある。この入力値が記載されていない文献では、3.で述べる方法をもとにしたアプリケーションプログラムが用意されているので、その計算を実施したうえ、粘弾性定数が出力できるようにしている。

(3) データベースとアプリケーションプログラムの構成

本研究で作成したデータベースとそのアプリケーションプログラムの構成を、図-1に示す。

データベース、およびそのアプリケーションプログラムは、文献15)を参照にしてパーソナルコンピューターを使用し、市販のデータベース言語とBasic言語とを用いて作成してある。この図より明らかなように、本システムは、クリープ・乾燥収縮データのデータベースと、これにアクセスするいくつかのプログラムとで構成されている。これらの機能としては、データ入力機能、データ処理機能、検索機能、および出力機能などを備えている。

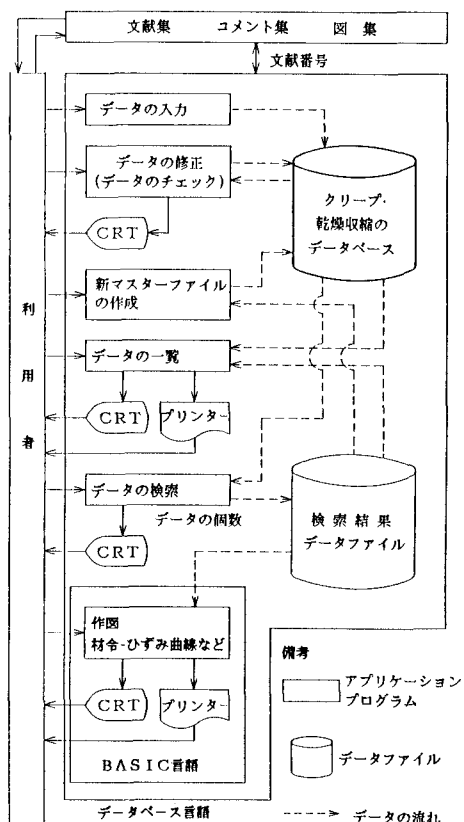


図-1 データベースとアプリケーションプログラムの構成

(4) データベースの出力項目

本文で作成したデータベースの出力項目は、表-1で示した 56 の入力項目のほか、必要に応じて、材令～クリープ係数曲線図、材令～乾燥収縮量曲線図、およびクリープ係数～鋼材比関係図などが、CRT 上、あるいはハードコピー、もしくはプロッターで出力できる。また、クリープ係数と乾燥収縮量に関する各国の設計規準(たとえば、ACI、および DIN など)の値と比較した形で試験値を出力することもできる。

3. データの解析方法

このデータベースを作成するに当たって、共通して用いたデータの解析方法(係数の同定法)を、以下に述べる。もちろん、種々の参考文献中で行われた本解析法とは別のデータ処理結果も、データベースに入力され、記録されている。

(1) 解析モデル

応力が一定なとき、ひずみが増加する現象がクリープである。しかし、これを実際に試験しようとするとき、大がかりな試験装置が必要となる。したがって、たとえば図-2に示す一般的な試験装置では、ひずみのみならず、応力も同時に変動する。そのため、実際には、クリープと同時にリラクセーションの試験を行っていることにもなる。それ故、バネ要素とKelvinモデルとを直列させた3要素モデルによって、クリープ現象を解析できる。通常、試験体に作用する荷重が測定されていることが多いので(たとえば、図-2では、ロードセルを用いている)、3要素モデルにおけるバネ要素の項は、既知である。

そこで、ここでは、図-3に示すKelvinモデルを用いて解析を行う。

(2) 応力が与えられたときのひずみの解

図-3に示すKelvinモデルに応力 $\sigma(t)$ を与えたときのひずみ $\epsilon(t)$ は、次のように表される。

$$\eta \frac{d\epsilon(t)}{dt} + E_{c1} \cdot \epsilon(t) = \sigma(t) \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon(t)$: モデルに生じるひずみ

η : ダッシュポットの粘性係数

$\sigma(t)$: モデルに働く応力

E_{c1} : バネ要素の弾性係数

いま、試験体への時刻 t における作用荷重 $P(t)$ を、次のように仮定する。

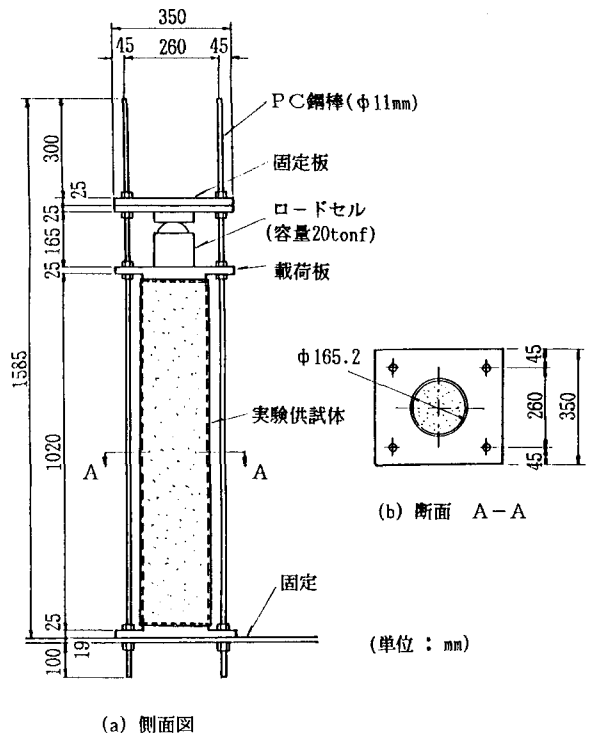


図-2 合成柱クリープ試験の一例

$$P(t) = P_0 \cdot \{ \alpha + (1 - \alpha) \cdot e^{-\kappa \cdot t} \} \quad (2)$$

この式は、途中の応力下降が指数関数的であり、また時刻 $t=0$ 、および $t=\infty$ のとき、次の値をとる。

$$P(0) = P_0, \quad P(\infty) = \alpha \cdot P_0 \quad (3)_{1-2}$$

すなわち、式(2)中の係数 $(1 - \alpha)$ は、レラクセーション係数を意味する。すると、式(1)の応力 $\sigma(t)$ は、荷重 $P(t)$ を供試体の有効断面積 A_{eff} で割ったものである。

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{A_{eff}}, \quad \sigma(t) = \frac{P(t)}{A_{eff}} \quad (4)_{1-2}$$

さて、初期ひずみ ϵ を、

$$\epsilon(0) = 0 \quad (5)$$

とおき、式(1)、(2)、および(4) をラプラス変換を用いて解くと、ひずみ $\epsilon(t)$ は、次のように与えられる。ただし、 $\beta = E_{c1} / \eta$ である。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_{c1}} \cdot \{ \alpha \cdot (1 - e^{-\beta \cdot t}) + \frac{1 - \alpha}{1 - \kappa / \beta} (e^{-\kappa \cdot t} - e^{-\beta \cdot t}) \} \quad (6)$$

以上の式より、 $P(t)$ 、および $\epsilon(t)$ として実測値を用い、パラメーター α, κ 、および η を最小自乗法を用いて回帰し、試験の結果を整理することができる。

しかし、この式は、荷重がレラクセーション的に変動し、最終的に αP_0 になるとの仮定のもとに導かれた式である。そのため、一定の荷重 P_0 が作用するときの純粋なクリープひずみとは、みなし得ない。そこで、この式から純粋なクリープひずみを求めるために、式(6)において、時刻 $t=\infty$ とおく。すると、

$$\epsilon(\infty) = \alpha \cdot \frac{\sigma_0}{E_{c1}} = \alpha \cdot \epsilon_{\infty} \quad (7)$$

となる。この式から逆算して、応力が変動するときの最終クリープひずみ $\epsilon(\infty)$ を $1/\alpha$ 倍して、応力が一定なときの最終クリープひずみ ϵ_{∞} に換算する必要がある。これらの操作を図示したものが、図-4である。

(3) 応力に関するパラメーター κ 、および α の同定法

上述の(2)で明らかにしたように、応力、および、ひずみの経時挙動を数理的に処理したとき、同定式は、いずれも指数関数を含んだものとなる。そのため、原式のままの形で最小自乗法を適用して各種パラメーターを同定したとき、解式は、著しく煩雑な陰関数を含んだ連立方程式となる。ここでは、それを避けるため、以下に示すように、パラメーターを逐次近似法を用い、同定する方法について述べる。

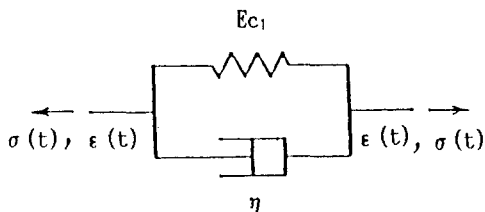


図-3 Kelvinモデル

a. パラメーター κ の同定法

まず、以下のように、式(2)より
パラメーター κ を同定するため、
荷重 $P(t)$ を

$$p_i = P(t_i)/P_0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

とする。すると、式(2)は、次のよう
に表せる。

$$p_i = \alpha + (1 - \alpha) \cdot e^{-\kappa \cdot t_i} \quad (9)$$

上式を $e^{-\kappa \cdot t_i}$ について解き、両辺の自然対数をとった後に、最小自乗法を適用すると、パラメーター κ は、

$$\kappa = -\frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot \ln \left(\frac{p_i - \alpha}{1 - \alpha} \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (10)$$

によって与えられる。ただし、ここでパラメーター α は、あくまで既知でなければならない。

b. パラメーター α の同定法

式(9)から、パラメーター α を同定するため、同様に最小自乗法を適用すると、

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - e^{-\kappa \cdot t_i}) \cdot (1 - e^{-\kappa \cdot t_i})}{\sum_{i=1}^n (1 - e^{-\kappa \cdot t_i})^2} \quad (11)$$

が得られる。ここに、前記a.よりパラメーター κ が求まっていれば、パラメーター α の同定は、可能である。

実際の計算処理は、当初、パラメーター α は未知であったが、 $\alpha_0 = \alpha_n$ と仮定し、あとは逐次近似法によって2つのパラメーター κ , および α の収束値を得ることができる。図-5は、そのフローチャートを示したものである。

(4) ひずみに関するパラメーターの同定法

すでに、(2)で示したように、時刻 $t = \infty$ の時のひずみは、 $\epsilon(\infty) = \alpha \epsilon_\infty$ で与えられ、その結果、一定の荷重 $P(t) = P_0$ を受ける場合のひずみ $\epsilon(t)$ の経時挙動、すなわち

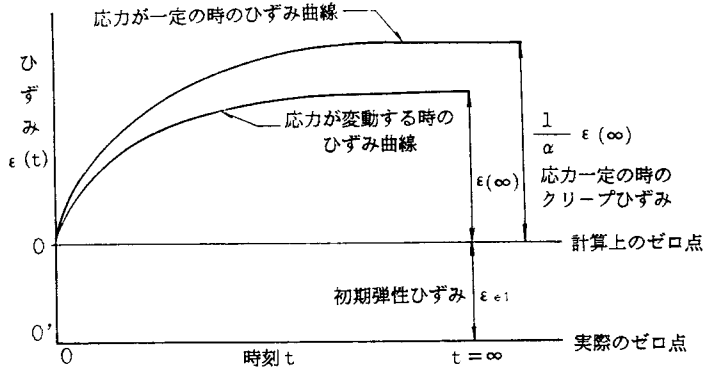


図-4 応力一定、および変動するときの
クリープひずみ

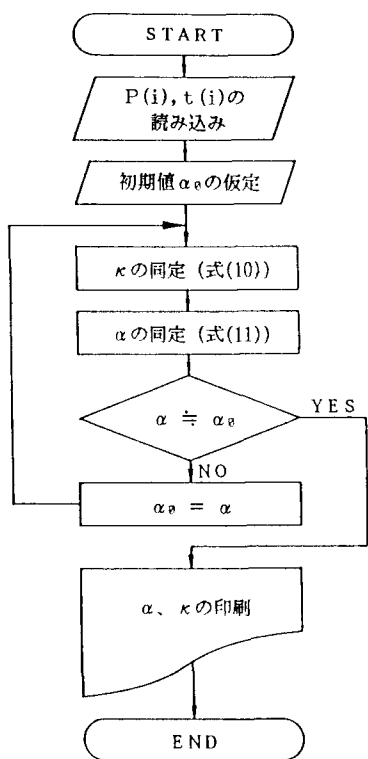


図-5 パラメーター α 、および κ を計算するためのフローチャート

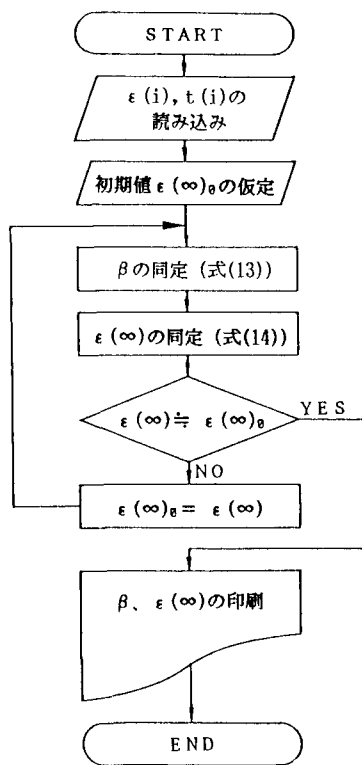


図-6 パラメーター β 、および最終ひずみ $\epsilon(\infty)$ を計算するためのフローチャート

$$\epsilon(t) = \epsilon(\infty) (1 - e^{-\beta t}) \quad (12)$$

を最終的に $1/\alpha$ 倍すればよいことを示した。

ここでは、式(6)より、パラメーター β 、および最終クリープひずみ ϵ_∞ を同定する代わりに、より簡単な指数関数で表された式(12)から、それらを同定するようにした。前述の(3)と同様の方法を用いると、次のように、パラメーター β 、および $\epsilon(\infty)$ が求められる。

$$\beta = - \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot \ln \{1 - \epsilon(t_i)\}}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (13)$$

$$\epsilon(\infty) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon(t_i)}{1 - e^{-\beta \cdot t_i}} \quad (14)$$

この場合の計算も(3)と同じで、まず $\epsilon(\infty)$ を仮定している。そのため、逐次近似法により、両パラメーター β 、および $\epsilon(\infty)$ を求めることができる。これに対するフローチャートを、図-6に示す。

以上に述べたデータ解析法がアプリケーションプログラムとして、本データベースの数値処理に用いられている。

4. 使用例

(1) PC 版のクリープとその同定結果

以上に述べたデータベースとアプリケーションプログラムとを用いて、実物大PC版の430 日間にわたるクリープひずみのデータ⁶⁾をプロッタにより出力させた例を、図-7に示す。この図より明らかなよう、生データのプロットとともに、3.で述べたデータ解析法により処理された回帰式も出力されている。

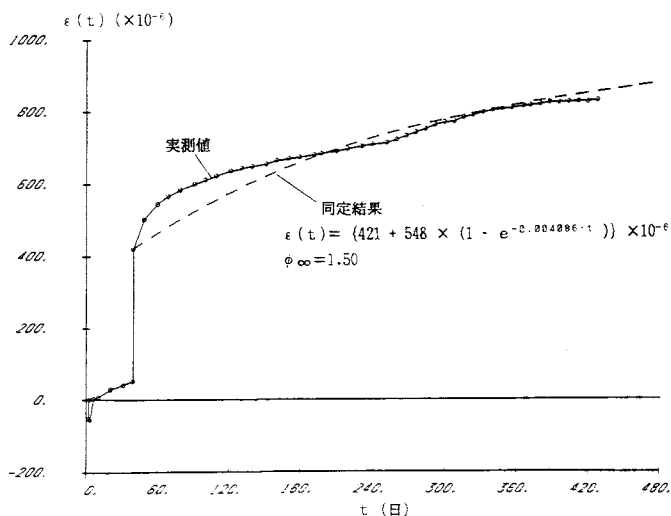


図-7 PC 版のクリープの実測値とその同定結果の一例

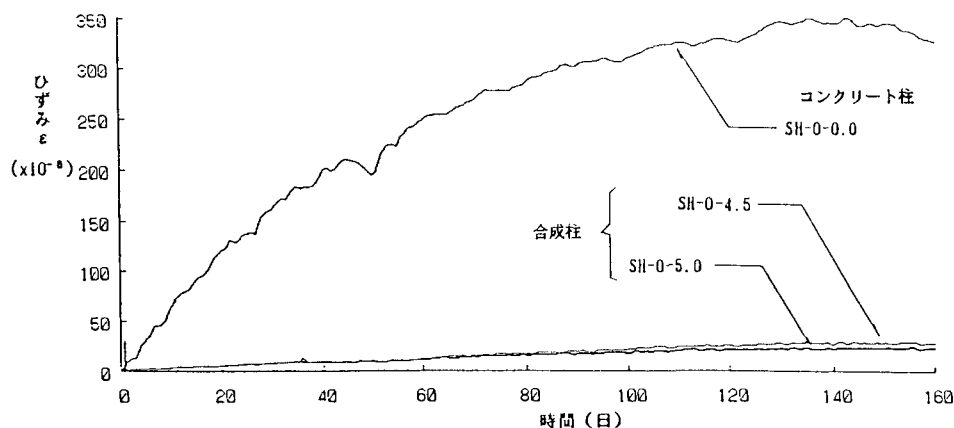


図-8 コンクリート柱と合成柱との乾燥収縮ひずみの実測値

(2) コンクリート柱と合成柱との乾燥収縮ひずみの比較

図-8 に示す出力例は、コンクリート柱(鋼管なし)と合成柱(ずれ止めなしのコンクリート充填鋼管柱)⁸⁾の乾燥収縮量(収縮ひずみ)とを比較して画面上に出力し、それをハードコピーしたものである。この図から、合成柱の乾燥収縮量は、計算上、無視しうるほど小さいことがわかる。

5. あとがき

本論文では、3つの鋼・コンクリート合成構造形式を対象に作成されたクリープ・乾燥収縮に関するデータベースとそのアプリケーションプログラムの構成、データの統一した数値処理法、ならびに使用例を述べた。

拘束を受けるコンクリートのクリープ・乾燥収縮に関する試験データは、無筋コンクリートのそれに比べはるかに少ないが、今後のデータ収集により、本データベースの規模の拡大をはかっていく必要がある。

参考文献

- 1) 阪田憲次・綾野克紀・廣村治：コンクリートのクリープひずみの予測式の提案、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、日本コンクリート工学協会、1988年、pp. 271～276.
- 2) 阪田憲次・綾野克紀：コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案、第43回セメント技術大会講演集、セメント協会、1989年、pp. 338～343.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、丸善、平成2年2月.
- 4) 中井博編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988年5月.
- 5) 中井博・藤井学・渡辺英一・竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ現象に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.33A、土木学会、1987年3月、pp. 275～284.
- 6) 中井博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久：連続合成箱桁橋に用いられた実物大プレキャスト床版のクリープ・乾燥収縮に関する室内実験について、土木学会第45回年次学術講演会、Ⅰ-268、平成2年10月、pp. 566～567.
- 7) 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、土木学会第45回年次学術講演会、Ⅴ-381、平成2年10月、pp. 788～789.
- 8) Ichinose, L.H., Kurita, A. and Nakai, H. : An Experimental Study on Creep of Concrete Filled Steel Columns , 45th Annual Conference of JSCE , Ⅰ-267 , October 1990 , pp. 564～565.
- 9) 日本道路公団大阪管理局・新構造技術(株)：大阪管理局内釈迦池橋及び美陵高架橋追跡調査(その3) 報告書、昭和57年3月.
- 10) Bridge, R.Q. : The Behaviour of Composite Columns under Long Term Loading, Research Report No.R321, The University of Sydney, May 1978.
- 11) Roik, K., Bergmann, R. und Bode, H. : Einfluß von Kriechen und Schwinden des Betons auf die Tragfähigkeit von ausbetonierten Horlprofilstützen, Projekt 27, Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V. , Februar 1979.
- 12) Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J. : Creep of Plain & Structural Concrete, Construction Press, 1983.
- 13) Smerda, Z. and Kristek, V. : Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures, Elsevier, 1988.
- 14) Roik, K., Bergmann, R. und Managerig, I. : Zur Traglast von einbetonierten Stahlprofilstützen unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens von Beton, Der Stahbau, Jahrg. 59, H.1, 1990, S.15～19.
- 15) 三ツ木幸子・近藤明雅・山田健太郎・寺尾圭史：ボルトおよびリベット継手の疲れ試験データベースの作成とその利用、土木学会論文集、第404号／Ⅰ-11(報告)、1989年4月、pp.435～441.
- 16) 中井博・渡辺英一・竹中裕文・林圭一：プレキャスト床版合成桁のクリープ、リラクセーションに関する基礎的考察、構造工学論文集、Vol.33A、土木学会、1987年3月、pp. 327～340.
- 17) Watanabe, E., Hayashi, K., Takenaka, T. and Nakai, H. : Behavior of Precast Concrete Composite Girders, Proc. of JSCE, No.392/I-4, April 1988, pp. 71～79.

(1990年10月12日 受付)