

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 25 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012 ～ 2012

課題番号：24656272

研究課題名（和文）簡易試験に基づく実用的引張クリープモデルの開発

研究課題名（英文）DEVELOPMENT OF A PRACTICAL TENSILE CREEP MODEL BASED ON SIMPLE EXPERIMENTS

研究代表者

佐藤 良一（SATO RYOICHI）

広島大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：20016702

研究成果の概要（和文）：

W/C=0.5、公称鉄筋比 0.1%~2.4%の 6 水準に変化させた一軸拘束試験体の鉄筋ひずみと自由乾燥収縮ひずみから引張クリープ係数を求める方法を検討した。その結果、載荷時材齢の異なる増分クリープ係数は得られたが、クリープ係数の載荷時材齢の依存性は表現できず今後の課題となった。この課題に関連し、プレストレストコンクリートはりの鋼材ひずみと自由収縮ひずみから、プレストレス導入時を載荷時材齢とするクリープ係数を導出する方法を考案し、妥当性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

A method to obtain tensile creep coefficient of concrete with W/C=0.5 was investigated, based on measured reinforcement strains in centrally reinforced concrete prisms due to drying and measured drying shrinkage strains in the companion prisms without restraint, in which nominal reinforcement ratios were in 6 levels from 0.1% to 2.4%. As a result, incremental creep coefficients at different loaded ages were obtained and however, the dependence of values of creep coefficient on loading age was not shown. Related to this, a method to evaluate creep coefficients of concrete in a prestressed concrete beam was developed by measuring strains in prestressing tendons and shrinkage strain of the companion specimen without prestressing tendons and the method was verified to be valid.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：コンクリート工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：鉄筋ひずみ、収縮ひずみ、応力損失、クリープ係数

1. 研究開始当初の背景

この 20 年で高強度コンクリートの自己収縮が顕在化し、その予測式が土木学会コンクリート標準示方書 2002 年版に取り入れられた。近年では、普通コンクリートであっても高温履歴を受けると自己収縮は増大するため、JCI マスコンひび割れ制御指針 2008 ではその予測式が規定された。これらは、いず

れもひび割れ抵抗性の評価のためである。一方、自己収縮および乾燥収縮により鉄筋コンクリート（以下、RC）はりの引張鉄筋が圧縮され、これがひび割れとともに解放されることにより、RC はりのせん断強度が有意に低下し、寸法効果も助長されることが明らかにされている。そのため、ひび割れ抵抗性の評価のみならず、収縮による鉄筋ひずみ予測のための高精度の引張クリープモデルの開発

は不可欠な検討課題である。引張クリープモデルに関する既往の研究は、統一見解が得られておらず、これは、精度の高い実験を行うことが困難であることによると考えられる。このため、従来の実験的検討のみでは、これを克服するのは困難で、実用に供しうるモデルの開発を行うべきだと考えたことが、研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

本研究は、コンクリートのヤング係数、一軸収縮拘束供試体の鉄筋ひずみすなわちコンクリート応力、および自由収縮供試体の自由収縮ひずみが容易にかつ高い信頼性を持って実測できることに着目し、線形クリープ則が成立することを前提とし、若材齢から載荷時材齢の異なる引張クリープ係数モデルを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

鉄筋比を0.1%、0.3%、0.6%、1.0%、1.6%、2.4%の6水準として、鉄筋ひずみおよびコンクリートの自由収縮ひずみを測定した。これらの試験体は、それぞれ図-1 および2に示すとおり、両端面をシールした100x100x1200mm、100x100x400mmの角柱供試体を用い、材齢7日目までは20℃の水中養生とし、その後、温度20±1℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室に搬入し、この時点初期値としてひずみを経時的に測定した。

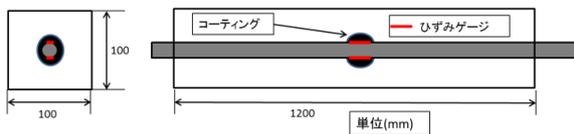


図-1 鉄筋ひずみ測定供試体概要図

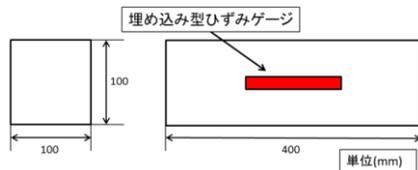


図-2 自由収縮ひずみ供試体概要図

なお、コンクリートは、表-1に示す材料を用い、表-2のとおり水セメント比50%の普通コンクリートを対象とし、材齢1、3、7、28、91日において、圧縮強度およびヤング係数を測定し、さらに鉄筋ひずみを双曲線近似して、クリープ算出に用いた。

表-1 使用材料

材料	記号	種類/特性
水	W	工業用水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
細骨材	S	砕砂(石英粗面岩) 表乾密度2.62g/cm ³
粗骨材	G	砕石(石英粗面岩) 表乾密度2.65g/cm ³
混和剤	AE	AE減水剤標準型I種

表-2 配合

W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	配合表(単位:kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE
50	4.5	45.0	175	350	789	976	2.63

拘束鉄筋比が大きくなれば、当然コンクリート応力は大きくなる。しかし、線形クリープ則の成立を前提とするので、クリープ係数は応力の大きさに依存しない。ゆえに、拘束鉄筋比が3水準の場合、タイムインターバル1では一次元、3では載荷時材齢が異なる3種のクリープ係数を未知変数とする三次元方程式となる。これを実測値を用いて解くことにより順次増加する引張クリープ係数を求める。

4. 研究成果

(1) 主な成果

W/C=0.5で鉄筋比0.1%および0.3%の鉄筋ひずみは2回にわたり自由収縮ひずみより大きく、測定方法等が正しければ、説明できない現象が認められた。そのため鉄筋ひずみと鉄筋比の関係を求め、これから鉄筋比0%のひずみを自由収縮ひずみとした。

鉄筋ひずみから求めた単位クリープひずみは、鉄筋比が1%以上の3水準に限定すれば、鉄筋比に依存せず平均値に対し±20%以内となった。この平均した単位クリープひずみを用いて増分クリープ係数を求めた結果、図-3に一例を示すとおり、載荷時材齢の異なる増分クリープ係数は得られたが、クリープ係数の大きさの載荷時材齢の依存性は表現できず、線形則の適用範囲を含め、今後の課題となった。

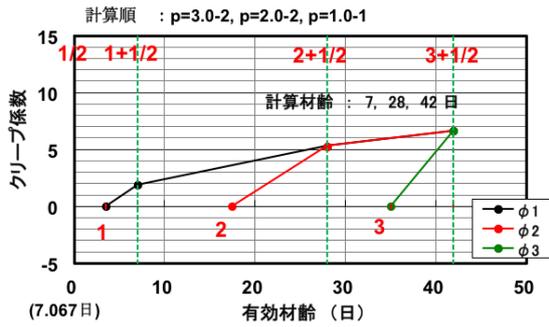


図-3 クリープ係数の一例

一方、これに関連して、プレストレストコンクリートはりの鋼材ひずみ、これと同断面の供試体の自由収縮ひずみから、プレストレス導入時を載荷時材齢とするクリープひずみを導出する方法を考案した。この方法はコンクリートの変動応力を双曲線で近似し、クリープひずみの定義にしたがい材齢係数を用いることなくクリープ係数を求めるものである。図-4から6にPC鋼材ひずみ、PC鋼材応力およびコンクリート応力の概念図を示す

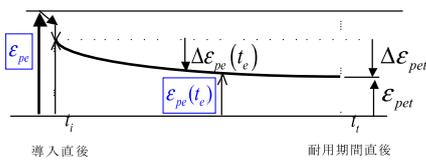


図-4 PC鋼材ひずみの経時変化

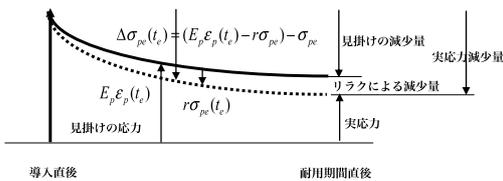


図-5 PC鋼材応力の経時変化

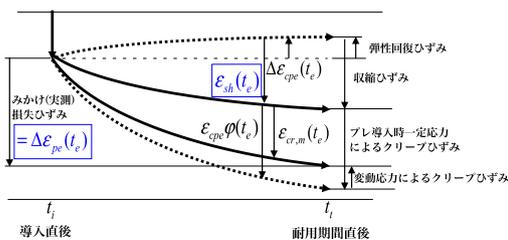


図-6 コンクリート応力の経時変化

これらの概念図に基づき、各鋼材位置におけるコンクリートのクリープ係数は、以下に示すとおり、①鋼材応力の算出、②コンクリート応力の算出、③クリープ係数の算出、の順で求めた。

①鋼材応力の算出

鋼材応力の算出は、みかけの応力とリラクゼーションによる減少から成る式(1)を用いた。

$$DS_{pei}(t_e) = DS_{pei,cr}(t_e) + DS_{pei,r}(t_e) = E_p \epsilon_{pei}(t_e) - (1 + r_i) S_{pei} \quad (1)$$

ここで、 i : はり高さ方向に複数段配置されたPC鋼材のうち i 番目に配置されているPC鋼材を示す、 $\Delta\sigma_{pei}(t_e)$: i 番目のPC鋼材応力の減少量、 $\Delta\sigma_{pei,cr}(t_e)$: クリープおよび収縮により減少した i 番目のPC鋼材の見かけの応力($=E_p \epsilon_{pei} - \sigma_{pei}$)、 $\Delta\sigma_{pei,r}(t_e)$: リラクゼーションにより減少した i 番目のPC鋼材応力($= -r_i \sigma_{pei}$)、 r_i : i 番目のPC鋼材の見かけのリラクゼーション率、 E_p : PC鋼材のヤング係数

②コンクリートの損失応力

プレストレス導入後の i 番目のPC鋼材各位置のコンクリートの応力損失は各位置の鋼材の応力損失から式(2)のとおり求められる。右辺にマイナスがついているのはコンクリート応力が鋼材とは逆方向に生じるためである。

$$DS_{cpe,i}(t_e) = - \sum_{j=1}^i p_j g_{ji} DS_{pej}(t_e) \quad (2)$$

$$\text{ただし、 } g_{ij} = 1 + \frac{(d_i - c_g)(d_j - c_g)}{I_c / A_c}$$

ここで、 $\Delta\sigma_{cpe,i}(t_e)$: i 番目のPC鋼材位置のコンクリート応力の減少量、 p_j : j 番目のPC鋼材比($=A_{pj}/A_c$)、 d_i : 上縁から i 番目のPC鋼材までの距離、 c_g : 上縁から図心までの距離、 I_c : コンクリートの断面二次モーメント、 A_c : コンクリートの純断面積

③クリープ係数の算出

クリープ係数の算出に先立ち、コンクリートの応力損失を実測に基づいて式(3)の双曲線で近似した。ただし、 $\Delta\sigma_{cpe,i}(\infty)$ は変動応力の最終値、 C_i は実験定数を表す。

$$DS_{cpe,i}(t_e) = \frac{t_e}{t_e + C_i} DS_{cpe,i}(\infty) \quad (3)$$

これを用いれば、変動応力 $\Delta\sigma_{cpe,i,cr}(t_e)$ および一定応力下のクリープひずみ $\epsilon_{cpe,i,cr}(t_e)$ は次式となる。

$$De_{cpei,cr}(t_e) = \int \frac{j_{cri}(t_e)}{E_c} d(DS_{cpei}(t_e)) = \frac{j_{cri}(t_e)}{E_c} DS_{cpei}(\infty) \frac{t_e}{t_e + C_i} \quad (4)$$

$$e_{cpei,cr}(t_e) = \frac{j_{cri}(t_e)}{E_c} S_{cpei} \quad (5)$$

クリープひずみは、式(4)および(5)を加算したものであり、またコンクリートと鋼材ひずみの適合条件から、鋼材ひずみ損失から弾性回復ひずみと収縮ひずみを引いたものである。最終的に i 番目の鋼材位置にあるクリープ係数は次式となる。なお、このクリープ係数は、標準養生 28 日のヤング係数 E_c を用いて定義した。

$$j_{cri}(t_e) = \frac{E_c e_{c,cri}(t_e)}{S_{cpei} + DS_{cpei}(\infty) \frac{t_e}{t_e + C_i}} \quad (6)$$

このクリープ係数算出式に基づいて、図-7 に示す断面の供試体のクリープ係数を求めた。コンクリートの配合は水結合材比 0.17、単位水量 $155\text{kg}/\text{m}^3$ とし、セメントにはシリカフュームが質量 9.7% 相当プレミックスされた低熱ポルトランドセメントを使用した。また、ごみ熔融スラグ細骨材を細骨材容積に対して 30% 置換した。すべての供試体は、前養生 16 時間 (20°C)、昇温速度 $4^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度 40°C 、最高温度保持時間 15 時間の蒸気養生を行い、端面を封かんし 4 面乾燥としている。

この結果、コンクリートの応力損失は、図-8 のとおり、またクリープ係数は図-9 に示すとおりとなった。図に示すように、クリープ係数は PC 鋼材各位置で得られ、若干ではあるが、PC 鋼材位置で異なる場合があることが認められる。クリープ係数の最終値は 1.0 程度 (鋼材位置上縁側から 0.91、0.92、1.00) であり、既往の研究における水結合材比 0.15 から 0.35^{1), 2)} のクリープ係数の収束値とほぼ等しく、妥当なクリープ係数が算出できている可能性が高いといえる。

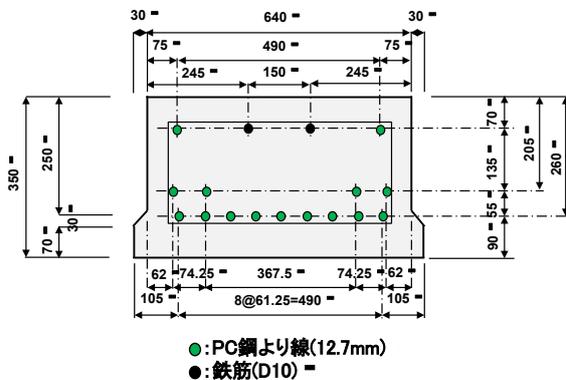


図-7 PC 供試体断面図 (単位:mm)

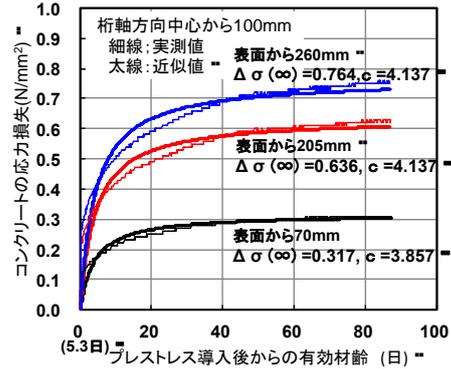


図-8 コンクリートの応力損失

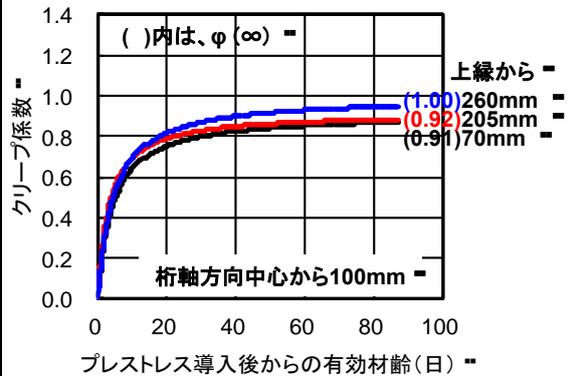


図-9 クリープ係数

この成果は、応力の減少を忠実に取り入れたものであり、現行の応力損失の評価精度向上に貢献すると考えており、平成 25 年度土木学会年次学術講演会にて、成果発表を行う。

参考文献

- 1) Y. YANG et al.: Experimental Investigation on Shrinkage and Creep of High Strength Concrete at Early Age, Proc. of 4th CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, ACI International SP-179, pp. 201-215, 1998. 6
- 2) 鈴木雅博ほか: 超高強度膨張コンクリートの自由変形と拘束応力に関する検討、コンクリート年次論文集、Vol. 28、No. 1、2006. 7

(2) 今後の展開

引張クリープモデルについては、乾燥開始材齢を検討要因として取り上げるなどして、増分クリープ係数の載荷時材齢の影響を取り入れることができるように検討したい。また、得られたクリープ係数は大きいと思われるのでこの点についても改善を図りたい。

研究成果の後半で述べた、プレストレストコンクリートはりにおけるクリープ係数の

導出については、同一断面のクリープ供試体から得られるクリープ係数を比較・検証し、本提案モデルの妥当性を確認する。さらに実構造物であっても、鋼材位置の変位および鋼材位置の無応力計によるコンクリートひずみを導入前から計測すれば、有効応力およびクリープ係数を求められることを意味すると考えられ、経年的なモニタリングの有用な手法としてその展開を図りたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

1. 小川由布子、亀田昭一、佐藤良一、上谷康晴、PC鋼材のひずみ測定に基づくクリープ係数評価方法、第68回土木学会年次学術講演会、2013年9月4～6日、千葉県、発表確定

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 良一 (SATO RYOICHI)

広島大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：20016702

(2) 研究分担者

小川 由布子 (OGAWA YUKO)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：30624564

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

亀田 昭一

成田国際空港株式会社