

論文 長期材齢を考慮したクリープ予測式に関する基礎的研究

西脇 敬一*1・土屋 智史*2・坂口 淳一*3・松岡 茂*4

要旨: コンクリート標準示方書におけるクリープの予測式は、多くが3年以下の試験結果に基づいて作成されたものであり、数十年の長期にわたる影響についての検討事例は少ない。そこで、本研究では、クリープの予測式について、短期から長期材齢までの予測精度の確認や提案を目的として実験および解析的検討を実施した。その結果、材料-構造連成応答解析システムを用いることで、短期から実験では確認が難しい数十年の長期におけるクリープを予測できること等を確認した。

キーワード: クリープ, 長期材齢, 材料-構造連成応答解析システム, ファイバーモデル

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は、長大化が進み、設計時に想定する供用年数も長くなる傾向にある。この場合、構造物の長期にわたる性能を予測する必要がある。橋梁等の構造物では、クリープを高精度に予測する重要性が増していくものと考えられる。また、長期におけるクリープを高精度に予測できれば、解析手法によってモニタリングポイントと管理値を設定することが可能となり、供用後の構造物における維持管理の効率化にも繋がることが予想される。

現状のコンクリート標準示方書のクリープの予測式¹⁾は、国内外の数多くの実験結果に基づき、また実務を考慮して及ぼす影響が小さい因子を省いて可能な限り簡略化した式として整理されたものである²⁾。本予測式は、クリープの影響が長期にわたって生じ続ける対数関数によって定式化されている。しかしながら、本予測式は、厚さ400mm以下の供試体を用いた、多くが3年以下の試験結果に基づいて作成されたものであり¹⁾、数十年の長期にわたる影響については検討事例が少ない。

長期におけるクリープの影響を検討可能な方法としては、PC長大橋において長期たわみを精度良く算出可能であることが確認されている³⁾材料-構造連成応答解析システム(DuCOM-COM3)が考えられる。本システムは、東京大学コンクリート研究室で開発されてきた解析手法であり、打設から供用終了までの長期の時間依存変形解析が可能な方法であり、セメント硬化体中の部位ごとに経時的に変化する微細空隙の水分およびエネルギー状態を、熱力学的平衡状態と移動側に基づき時空間スケールで積分することで、構造物の巨視的な変形を求めるものである⁴⁾。本システムは、自己収縮や乾燥収縮による収縮ひずみとクリープひずみを区分して算出するものでな

いが、収縮や応力下における変形挙動を水和反応の開始時から経時的に追跡することが可能である。そのため、載荷の有無のみを変化させた2種類の条件で解析を行い、載荷を行った解析の全ひずみから、載荷時の弾性ひずみと載荷を行わない解析での収縮ひずみを差し引くことでクリープひずみを経時的に算出することが可能である。

そこで、本研究では、コンクリート標準示方書と材料-構造連成応答解析システムによって算出したクリープの予測値について、短期から長期材齢における予測精度の確認を目的として実験および解析的検討を実施した。

2. クリープに影響を及ぼす要因および短期における予測精度の確認

(1) 検討概要

本検討では、クリープに影響を及ぼすと考えられる要因を確認すること、またコンクリート標準示方書のクリープ予測式の予測値(以下:示方書予測値と称す)および材料-構造連成応答解析システムによるクリープの予測値(以下:連成解析予測値と称す)の数年程度の短期における予測精度を確認することを目的として室内実験および解析を実施した。

(2) 実験ケースおよび実験方法

実験では、クリープに影響を及ぼす要因とし体積表面積比(以下、V/Sと称す)、応力強度比および寸法を変化させた試験体によってクリープひずみを測定した。

実験ケースおよび実験条件を表-1に示す。V/Sは、図-1に示すように試験体の一部分にアルミテープを貼り付け、水分逸散のない部位を設けることで変化させた。試験体に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。セメントには、早強ポルトランドセメントを使用した。目標強度は40N/mm²でスランプを12cmと設定した。

*1 鉄建建設(株) 建設技術総合センター 研究開発センター (正会員)

*2 (株)コムスエンジニアリング 博士(工学) (正会員)

*3 (株)HRC 研究所 鉄道構造技術部 (正会員)

*4 鉄建建設(株) 博士(工学) (正会員)

試験体は、材齢1日で脱型した後、材齢2日まで封かん養生とし、その後は20±3℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿環境下に供した。

実験の概要図を図-2に示す。応力は、材齢5日に試験体中心部に配置したφ30mmのシース管内のφ26mmのPC鋼棒を緊張しナットを締め付けて作用させた。なお、応力は、設定した応力強度比に対して±2%の範囲となるように管理し、適宜ジャッキによって荷重を作用させた。載荷時の圧縮強度は、53.3N/mm²であった。ひずみの計測は、図-2に示すように直径17mm、標点距離100mmの埋込み型ひずみゲージで行い、同一条件の2体の試験体においてPC鋼棒を挟んで対象に配置し平均値を用いることで曲げの影響を含まないようにした。なお、クリープひずみは、載荷を行った試験体の全ひずみから載荷時の弾性ひずみと同時に作製し載荷を行わない同条件の試験体で測定した収縮ひずみを差し引いて算出した。

(3) 単位クリープひずみの予測

材料-構造連成応答解析システムの解析モデルは、対称性を考慮して1/2モデルとし、載荷荷重は節点力として与えた。環境条件は、実験条件を再現し相対湿度60%、外気温20℃とした。セメントの鉱物組成割合には表-3の値を用いた。ひずみの出力は、試験体中央100mmの区間での値とした。

(4) 実験結果および予測結果との比較

実験時の状況を写真-1に示す。V/Sと単位応力あたりのクリープひずみ(以下:単位クリープひずみと称す)の実験結果を材齢400日と材齢800日に分けて図-3示す。単位クリープひずみは、V/Sが150mmまではV/Sの増加に伴い減少する傾向が見られた。一方、データ数は少ないがV/Sが150mmから300mmに増加しても単位クリープひずみに大きな差は見られなかった。材齢800日の単位クリープひずみも同様の傾向を示した。既往の報告⁹⁾では、V/Sが100mm程度以上になるとV/Sの増加に伴うクリープの減少傾向が小さくなることが示されており、

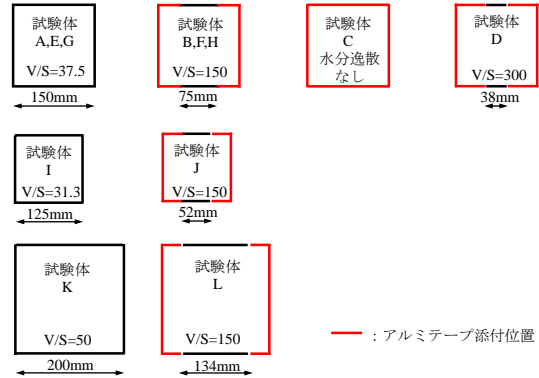


図-1 アルミテープによる試験体のV/Sの変化

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
36.9	41.9	160	434	704	1012

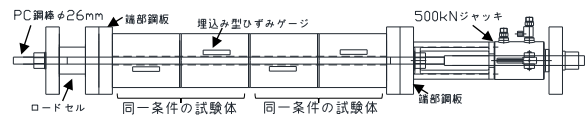


図-2 実験概要図

表-3 セメントの鉱物組成割合 (重量%)

C ₃ A	C ₃ S	C ₄ AF	C ₂ S	石膏
9.0	68.0	8.0	8.0	6.45



写真-1 クリープ実験の状況

表-1 実験ケースと実験条件

実験ケース	試験体記号	試験体寸法 (mm)	V/S (mm)	応力強度比	備考	
A	□150-V/S 37.5-0.25 f5	150×150×250	37.5	0.25	基本ケース	
B	□150-V/S 150-0.25 f5		150			実験ケースAとV/Sの違い
C	□150-V/S ∞-0.25 f5		300	300	0.25	実験ケースAと水分逸散の違い
D	□150-V/S 300-0.25 f5					
E	□150-V/S 37.5-0.10 f5		150	150	0.10	実験ケースAと応力強度比の違い
F	□150-V/S 150-0.10 f5					実験ケースBと応力強度比の違い
G	□150-V/S 37.5-0.42 f5		150	150	0.42	実験ケースAと応力強度比の違い
H	□150-V/S 150-0.42 f5					実験ケースBと応力強度比の違い
I	□125-V/S 31.3-0.25 f5		125	31.3	0.25	実験ケースAと寸法、V/Sの違い
J	□125-V/S 150-0.25 f5		125	150		実験ケースIとV/Sの違い
K	□200-V/S 50-0.25 f5		200	50	0.25	実験ケースAと寸法、V/Sの違い
L	□200-V/S 150-0.25 f5		200	150		実験ケースKとV/Sの違い

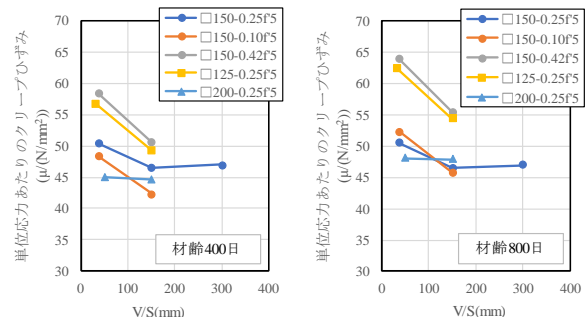


図-3 V/Sと単位クリープひずみの関係 (実験値)

今回の実験結果も同様の傾向であった。

応力強度比と単位クリープひずみの実験結果を図-4に示す。今回検討を行った応力強度比 0.4 程度までの範囲では、材齢 400 日および材齢 800 日において、いずれの材齢も単位クリープひずみは、応力強度比に比例して増大する結果が得られた。既往の報告²⁾でも、応力強度比の増大に伴い、クリープが増大する傾向であることが示されており、今回の実験結果も同様であった。

試験体寸法の影響を見ると図-5に示すように、同じ V/S の条件下では、寸法が大きくなると単位クリープひずみは、小さくなる傾向が伺えた。

単位クリープひずみの実験結果と示方書予測値および連成解析予測値の関係を図-6に示す。示方書予測値は、今回の実験条件の配合、環境および載荷材齢が同じであるため、一定値となり、単位クリープひずみは、材齢 400 日では $55.5 \mu / (\text{N}/\text{mm}^2)$ 、材齢 800 日では $61.9 \mu / (\text{N}/\text{mm}^2)$ となる。示方書予測値の単位クリープひずみは、実験結果に対して、材齢 400 日、800 日ともにおおよそ 30% の範囲内となり、全体としては実験結果に対して大きい傾向を示した。既往の文献²⁾でも、示方書予測値は $\pm 40\%$ で再現されるとの報告があり、今回の実験が同一のコンクリートの結果であることを考えると、同様の再現性であったと考えられる。

一方、連成解析予測値は、材齢 400 日、材齢 800 日ともに $\pm 20\%$ の範囲内で、材齢 800 日では大部分が -10% の

範囲内となった。連成解析予測値は、全体として実験結果に対して若干小さい傾向を示したが、実験結果に対して非常に近似する結果であった。また、連成解析予測値

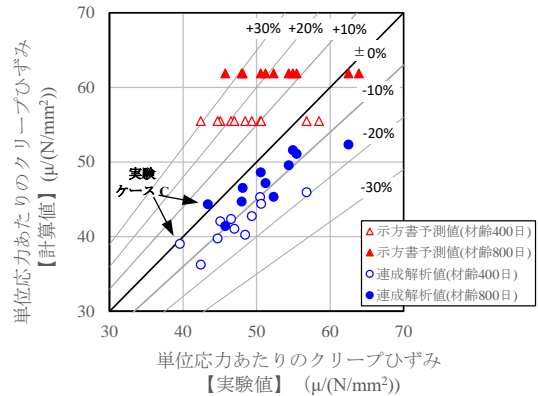


図-6 単位クリープひずみの実験値と計算値の関係

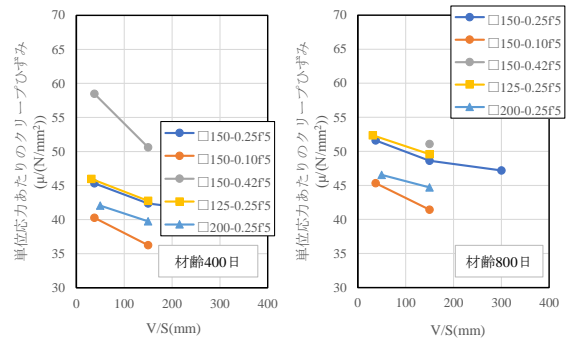


図-7 V/S と単位クリープひずみの関係 (連成解析予測値)

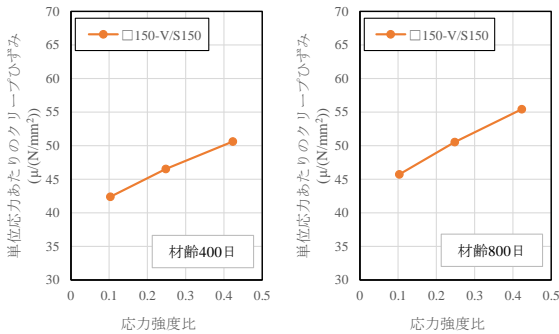


図-4 応力強度比と単位クリープひずみの関係 (実験値)

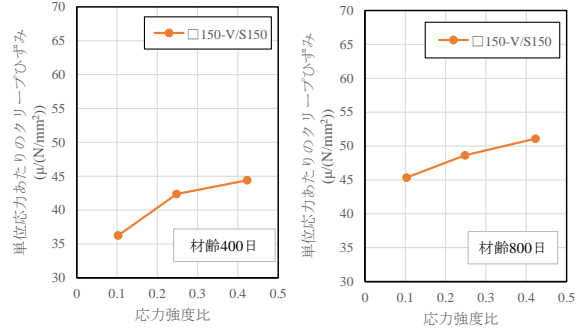


図-8 応力強度比と単位クリープひずみの関係 (連成解析予測値)

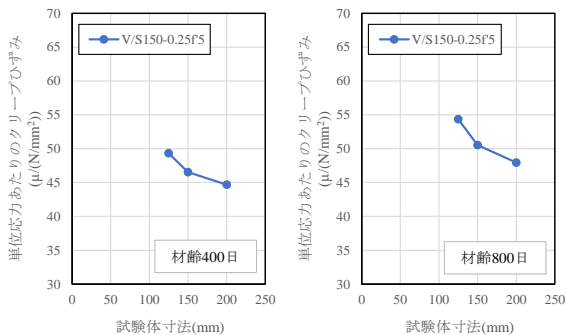


図-5 試験体寸法と単位クリープひずみの関係 (実験値)

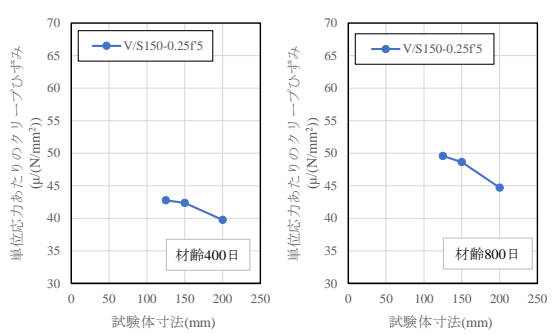


図-9 試験体寸法と単位クリープひずみの関係 (連成解析予測値)

は、V/S、応力強度比および試験体寸法の違いによる変化傾向が図-7～図-9に示すように実験結果と同様の傾向を示していることが確認できる。これらより、材料-構造連成応答解析システムは、クリープに及ぼすこれらの要因の影響を考慮できていると示唆される。

以上より、材齢 800 日程度の短期材齢における実験および解析による検討では、実務を考慮して可能な限り簡略化を目指して整理されたコンクリート標準示方書のクリープの予測値は、既往の報告のように±40%で再現可能であると考えられる。一方、材料-構造連成応答解析システムによるクリープの予測値は、コンクリート標準示方書の予測式に比べると計算が煩雑であるが、クリープに影響を及ぼす影響が詳細に考慮されることで予測精度が高くなると推察される。

3. 長期材齢におけるクリープの予測精度の確認

(1) 検討概要

2 章での検討結果から、材料-構造連成応答解析システムによって算出したクリープの予測値は、数年程度の

短期の材齢では予測精度が高いこと等が確認された。本検討では、長期材齢におけるクリープの予測精度を確認することを目的とした。

検討では、実橋において完成後からのたわみの経時変化の実測値があり、コンクリート標準示方書のクリープ係数を用いてファイバーモデルによって長期たわみが試算されている文献⁶⁾を対象とした。前述のように材齢-構造連成応答解析システムを用いた PC 長大橋の全体系の解析では、長齢でのたわみを精度良く算出可能であることが確認されている³⁾。このため、材齢-構造連成応答解析システムでは、長期においてもクリープの影響を考慮できていると考えられる。そこで、今回、新たに材料-構造連成応答解析システムによって部材レベルのクリープ係数を算出して、これを入力値としファイバーモデルによってたわみを試算し、実測値との比較から長期におけるクリープの予測精度を検証した。

(2) 検討を行った PC 橋

検討を行った PC 橋は、月夜野大橋と河成橋の 2 橋とした。月夜野大橋および河成橋の断面図を図-10に、側

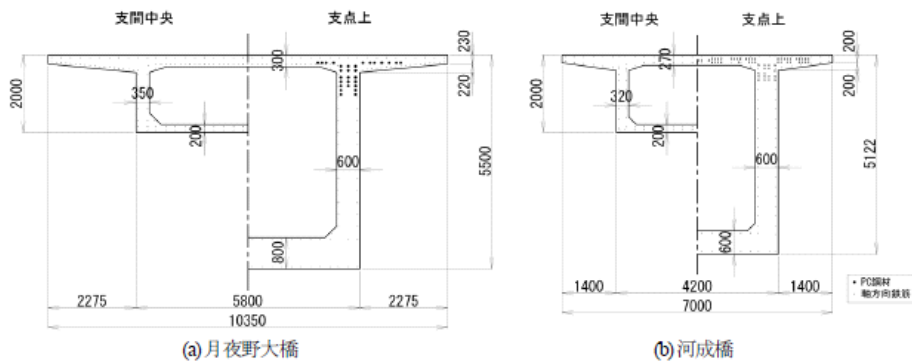


図-10 断面図 (文献⁶⁾ から引用)

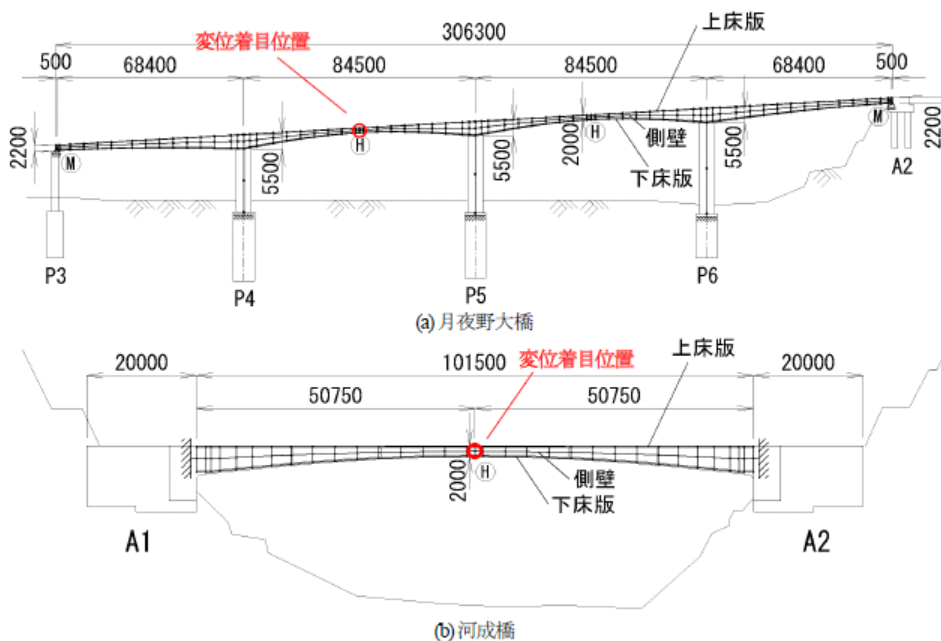


図-11 側面図および変位着目位置 (文献⁶⁾ から引用)

面図および変位の着目位置を図-11に示す。

(3) 長期たわみの解析方法と解析条件

解析方法は、ファイバーモデルによる方法とした。クリープ係数は、当該橋梁の環境条件下で図-12に示すように上床版、ウェブ、下床版の部材毎に材料-構造連成解析システムによって算出し、これらのクリープ係数をファイバーモデルでの入力値とした。なお、クリープ係数の算出における環境条件については、千々和ら⁴⁾が、気温や相対湿度がクリープ変形に及ぼす影響を検討している。これによると気温の季節変動を考慮した場合には、気温の高い時期に進行したクリープの不可逆性成分の累積によって、鉛直変位の終局値は外気温を最高気温の一定とした解析の最終収束値に向かうこと、一方、相対湿度については、季節変動させた場合と平均値の一定とした場合で大きな差が見られなかったとされている。そこで、今回の解析では、気温や相対湿度による影響は、これらに従うこととし、気温は、月夜野大橋で21.9℃、河成橋で27℃に、また相対湿度は、年間平均値を採用して、月夜野大橋では、上床版以外の部材で78%、上床版では降雨の影響を考慮して95%、河成橋は、全ての部材で67%の一定とした。

なお、収縮ひずみの予測式は、いずれの方法も既往の研究⁶⁾で提案され、現状のコンクリート標準示方書の長期たわみの算出用として示される予測式を用いた。

(4) 長期たわみの解析結果

材料-構造連成応答解析システムによって得られたクリープ係数を図-13と図-14に示す。コンクリート標準示方書のクリープ係数は、対数関数によって定式化されているため、長期の材齢でも増加を続けるが、材料-構造連成応答解析システムによって得られたクリープ係数は、収束する傾向が見られた。

図-13のクリープ係数を用いてファイバーモデルによって算出した月夜野大橋における鉛直変位(たわみ)の解析結果を図-15に示す。図中には、鉛直変位の実測値⁶⁾を併記した。実測値は、材齢10,000日程度までは増大する傾向を示しているが、その後は変位の増大が緩やかになる傾向が見られた。コンクリート標準示方書のクリープ係数を用いた解析値は、実測値と比較して変位が大きい傾向であるが、完成時からの経過日数が10,000日までは実測値と変位の変化傾向が似ている。一方、材料-構造連成応答解析システムによるクリープ係数を入力値とした解析値は、完成時からの経過日数が2,000日程度まではコンクリート標準示方書のクリープ係数による変位と同等であるが、その後は、変位の増大傾向が緩やかとなることが確認された。実測値も材齢10,000日程度以降においては、変位の増大傾向が緩やかとなっており、長期材齢では同様の傾向が伺えた。これらより、当

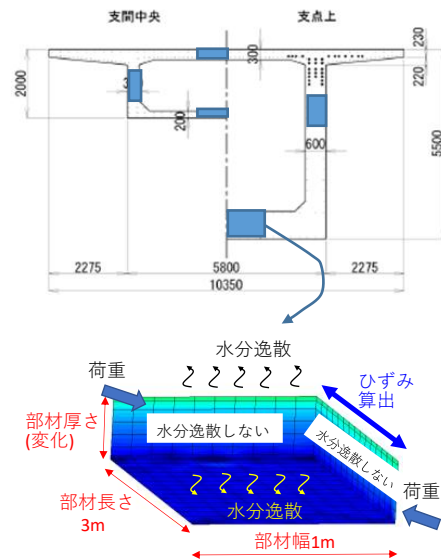


図-12 材料-構造連成応答解析システムにおける部材毎のクリープ係数算出の解析モデル

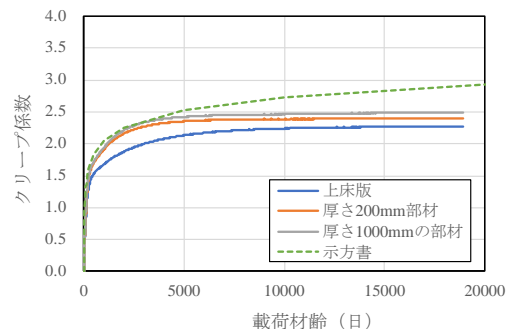


図-13 算出されたクリープ係数(月夜野大橋)

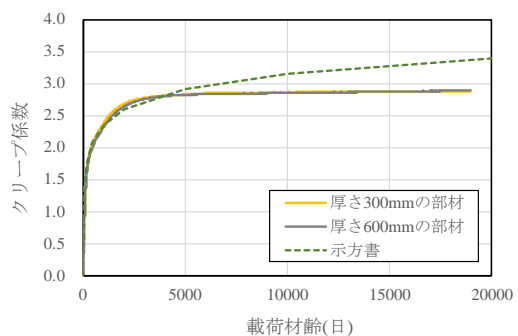


図-14 算出されたクリープ係数(河成橋)

該橋梁では、いずれの予測値も同程度の予測精度と判断される。

次に図-14のクリープ係数を用いてファイバーモデルによって算出した河成橋における鉛直変位の解析結果を図-16に示す。完成時からの経過日数が1,000日程度までの変位は、実測値および2つの解析値は同程度であった。さらに2つの解析値は、3,000日程度まで同等であるが、その後は、材料-構造連成応答解析システムの

クリープ係数による解析値は、変位の増加傾向が小さくなり、完成時からの経過日数が 7,500 日程度の時点においても、実測値と同程度であることが確認された。

これらの検討結果より、材料-構造連成応答解析システムによって部材毎に算出したクリープ係数は、長期においてもコンクリート標準示方書のクリープ係数と同等以上の精度を有するものと判断される。また、材料-構造連成応答解析システムは、実験では確認が難しい数十年の期間におけるクリープを考慮でき、算出したクリープ係数をファイバーモデルの入力値として使用することで構造物の長期たわみを算定可能であることが明らかとなった。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 単位応力あたりのクリープひずみは、V/S が大きいほど小さくなる。ただし、V/S が 100mm 以上では、その影響は小さい。
- (2) 単位応力あたりのクリープひずみは、応力強度比が高いほど大きい。また同一の V/S でも部材寸法が大きいほど小さくなる。
- (3) 数年程度の短期材齢における単位応力あたりのクリープひずみの予測値は、現状のコンクリート標準示方書の予測式では実験値に対して±30%程度、材料-構造連成応答解析システムでは実験値に対して±20%程度の範囲となり、材料-構造連成応答解析システムは予測精度が高い。
- (4) 材料-構造連成解析システムによって算出したクリープ係数は、長期材齢においてもコンクリート標準示方書のクリープ係数と同等以上の精度を有する。
- (5) 材料-構造連成解析システムは、実験では確認が難しい数十年の期間におけるクリープを考慮できる。

ただし、今回の研究では、長期における検討ケースが少ないため、今後さらに検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、東京大学大学院工学系研究科社会連携講座「インフラ材料・構造の次世代性能評価技術の開発」での検討の結果を整理したものである。材料-構造連成応答解析システムの解析手法に関して、東京大学大学院の石田哲也教授ならびに栗原遼大助教より、貴重なご助言を賜ました。この場を借りて、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，pp.113-116，2022

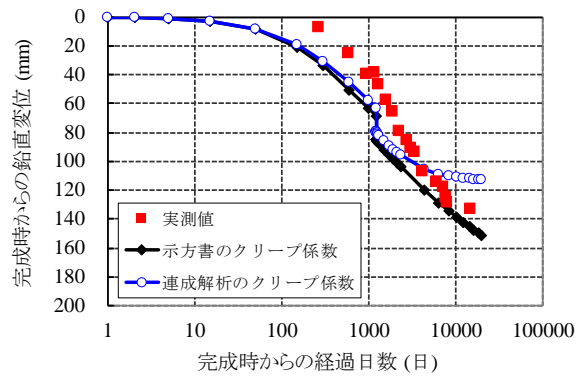


図-15 たわみの実測値と解析結果（月夜野大橋）

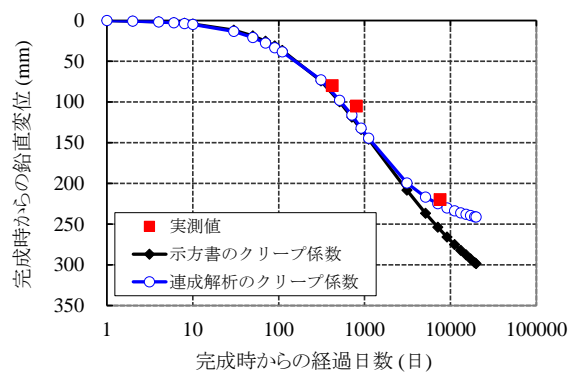


図-16 たわみの実測値と解析結果（河成橋）

- 2) 阪田憲次，椿龍哉，井上正一，綾野克紀：高強度域を考慮した乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式の提案，土木学会論文集，No.690，V-53，pp.1-19，2001.11
- 3) 例えば，千々和伸浩，杉田恵，石田哲也，前川宏一：セメント硬化体中の微視的機構モデルに基づく実 PC 橋の時間依存変形シミュレーション，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.407-412，2010
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale modeling of concrete performance-integrated material and structural mechanics, journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126,2003
- 5) 村田二郎，岡田清著：フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ，山海堂，pp.125-165，昭和 56 年 5 月
- 6) 渡邊忠明，土屋智史，坂口淳一，笠井尚樹：断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.207-226，2013
- 7) 今井遥平，千々和伸浩，永来良吾：月夜野大橋の長期的なクリープ計測と一考察，プレストレストコンクリート工学会第 29 回シンポジウム論文集，pp.179-182，2020.10