

論文 コンクリート中の細孔水に起因する変形駆動力が実PC橋の長期クリープたわみに及ぼす影響

大野 元寛^{*1}・千々和 伸浩^{*2}・前川 宏一^{*3}

要旨: 本研究では、微細空隙中の熱力学的状態量と巨視的な構造応答の相互連成を考慮可能なマルチスケール材料-構造連成解析を用いることで、異なる構造諸元を有する複数の実PC橋上部工の長期たわみを精度良く再現することに成功した。また、仮想状態での時間依存変形解析によって、外力と自己体積変形駆動力(毛細管空隙中の表面張力とゲル空隙中の分子間応力)によるたわみ応答を個別に抜き出した。自己変形駆動力によるたわみ成分が無視できないこと、これに外力に起因するたわみ応答成分を加算することで全たわみ量が簡便に評価できること、構造諸元毎に自己変形駆動力の影響度が異なることが明らかになった。

キーワード: 材料-構造連成解析, 非線形クリープ, 変形駆動力, 細孔水

1. はじめに

当初の予測を大きく超えるPC橋のクリープたわみが内外で報告されている¹⁾。1982年の竣工以降、スパン中央部のたわみ値が報告されている月夜野大橋(群馬県利根郡みなかみ町月夜野)を対象として、千々和らはセメント硬化体中の微視的機構モデルに基づく長期時間依存変形シミュレーションを行った²⁾。コンクリート構造の打設から供用終了まで、長期にわたる材料特性と構造応答を時空間で追跡する三次元構造-材料連成解析システム(略称 DuCOM-COM3: 図-1)を用いた解析により、セメント硬化体中の微細空隙中の水分挙動が巨視的な構造応答に及ぼす影響を考慮することを可能とし、月夜野大橋のたわみ履歴を概略、再現することに成功している。(図-2)

材料供試体レベルでの自己・乾燥収縮と基本・乾燥クリープ進行を、水分の熱力学的状態量と連成して追跡する上記の解析システム³⁾を用い、本研究ではさらに河成橋(愛媛県西予市野村町)と浦戸大橋(高知県高知市浦戸)の詳細データから検証を継続した。特に、浦戸大橋は橋長の二乗に対するたわみ量が他橋梁に比べて小さく、月夜野大橋とは異なるたわみ履歴の傾向を呈するため¹⁾、モデル化の検証に相応しいと考えられる。

さらに過剰たわみの原因を定量分析する目的で、微細空隙中の水分移動・散逸を維持しながらも、毛細管張力と表面エネルギーを無視した仮想状態での解析を行った。これにより、根源的に実験的手法では分離不能の、熱力学的な自己変形駆動力と細孔組織の変形性(いずれも水分移動と水分捕捉特性に依存)を、全クリープたわみから数値的に分離することを図った。ここから、実橋

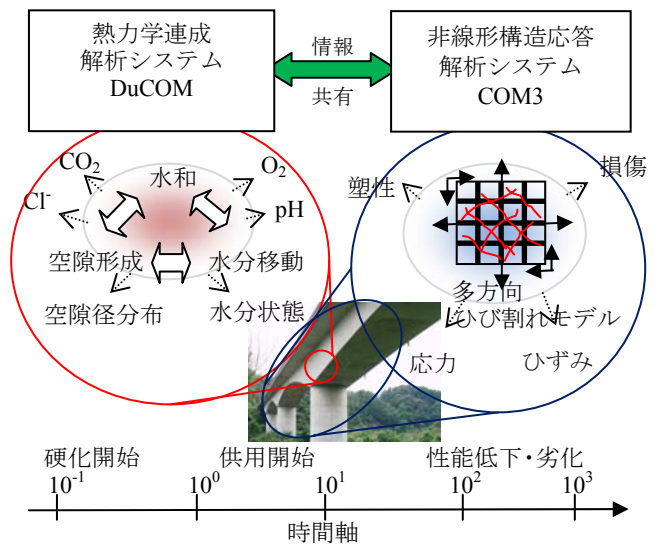


図-1 マルチスケール統合解析システムの概要

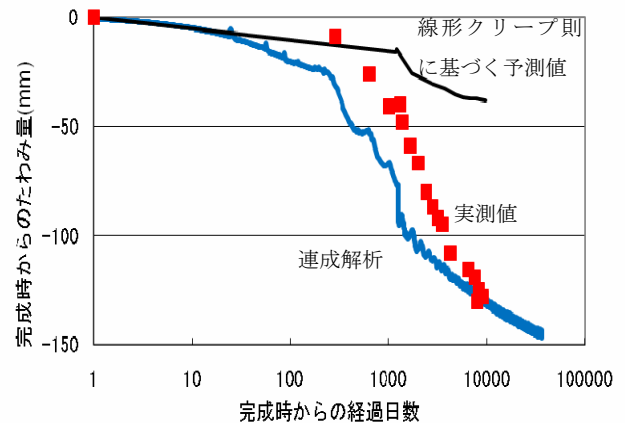


図-2 月夜野大橋におけるたわみの予測値、実測値と解析値(季節変動考慮)の差

*1 東京大学 工学部社会基盤学科 (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 特任助教 博士(工学)(正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 工博(正会員)

のクリープたわみに及ぼす力学的要因（荷重・自重・プレストレス）と熱力学的な自己変形要因（水和反応・空隙構造・水分移動による熱力学的状態量に起因する変形駆動力）の影響度を概括し、全クリープたわみに対する両者の相互作用を検証した。ここでは、相互に影響を及ぼし合う複数の事象の影響を簡易な予測式へ今後結びつけるために、厳密には分離不能の非線形連成事象を、あえて不完全さを許容しつつ分離して個々の要因を大まかに捉え、事象の理解を深めることを試みるものとした。

2. 連成解析による実橋長期クリープたわみの再現

2.1 解析対象橋梁

(1) 河成橋（愛媛県西予市）

1987年に竣工された河成橋は、支間101.5mのPC一径間中央ヒンジ付ラーメン箱桁橋である。橋台を起点とする、移動式作業車による張出し架設工法により施工された。解析対象箇所を図-3に示す。主桁の断面形状は一室箱桁断面であり、桁高は橋台前面で5.3m、中央ヒンジ部で2.0mとなるよう正弦曲線で擦り付けている。上床版厚は0.27mで一定、ウェブ厚は1.0~0.32m、下床版厚は0.9~0.2mで橋台から中央ヒンジ部に向かって連続的に変化する設計である。高欄も含めた上床版の幅員は7.3mであり、ウェブより外側へ張り出した上床版部は1.55mである。外力として自重・舗装荷重・プレストレスを解析で作用させ、静定構造である方持ち梁形式として境界条件を設定した。実交通荷重は上記外力に比べて相対的に小さいこと、持続応力が専らクリープに支配的であることから、交通活荷重は本研究では無視した。

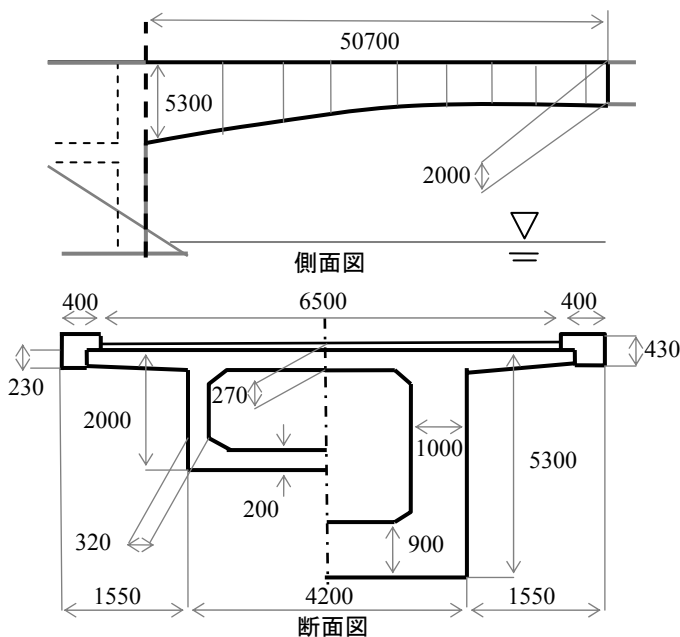


図-3 河成橋解析対象箇所

(2) 浦戸大橋（高知県高知市）

PC中央ヒンジ付ラーメン箱桁橋である浦戸大橋（月夜野大橋、河成橋と同じ）は1972年に竣工した。5径間連続箱桁形式であり、最大スパン230mの長大橋である。ディビダーク式プレストレスコンクリートを使用し、カンチレバー工法により架設しながらブロックごとに延伸施工された。解析対象箇所は中央径間の支点部から中央ヒンジ部である（図-4）。桁高（11.833m~3.845m）、床版厚（上床版：0.47m~0.25m、下床版：1.3m~0.15m）、ウェブ厚（0.5m~0.2m）は月夜野大橋、河成橋と同様に支点から中央ヒンジ部に向かって連続的に変化している。高欄も含めた上床版の幅員は8.5mであるが、ウェブより外側へ張り出した上床版部は1.25mであり、月夜野大橋や河成橋と異なり、全幅員に比べて張り出し部分が狭い。外力の設定条件は河成橋と同様である。

2.2 解析要素

本研究で用いたDuCOM-COM3は細孔構造の寸法・形態と内部水分の状態に応じて力学モデルを構成し、それに基づく時間依存構成則によってマルチスケールの現象の強連成を考慮している³⁾。ここで、外環境との熱力学的平衡条件から、熱エネルギーと水分の移動速度、およびその勾配が構造物表面付近で大きくなるため、構造表面付近の要素寸法と時間差分間隔が解の収束安定性を左右する。月夜野大橋では解の収束安定性を担保するために、構造物表面付近ではmm単位の要素寸法を設定した²⁾。一方、mm単位の厚さに対して橋軸長手方向には50cm程度の要素寸法を設定したため、全体行列演算で桁落ち誤差のリスクが危惧された。そこで、河成橋と浦戸大橋においては、数値精度の検証を行った上で構造

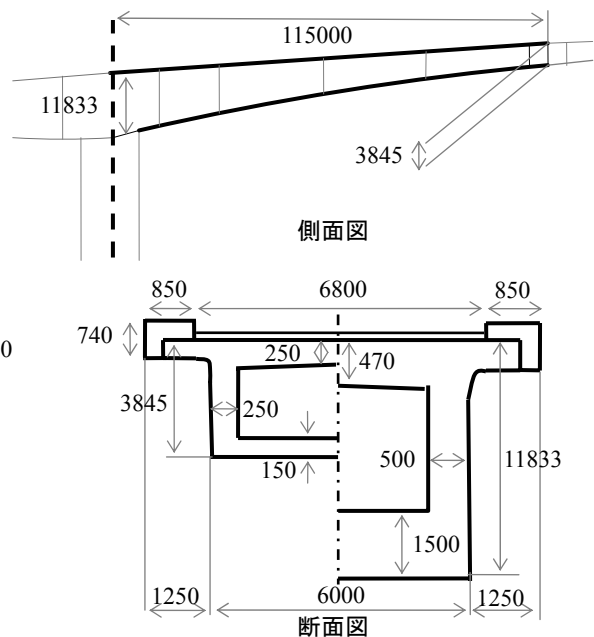


図-4 浦戸大橋解析対象箇所

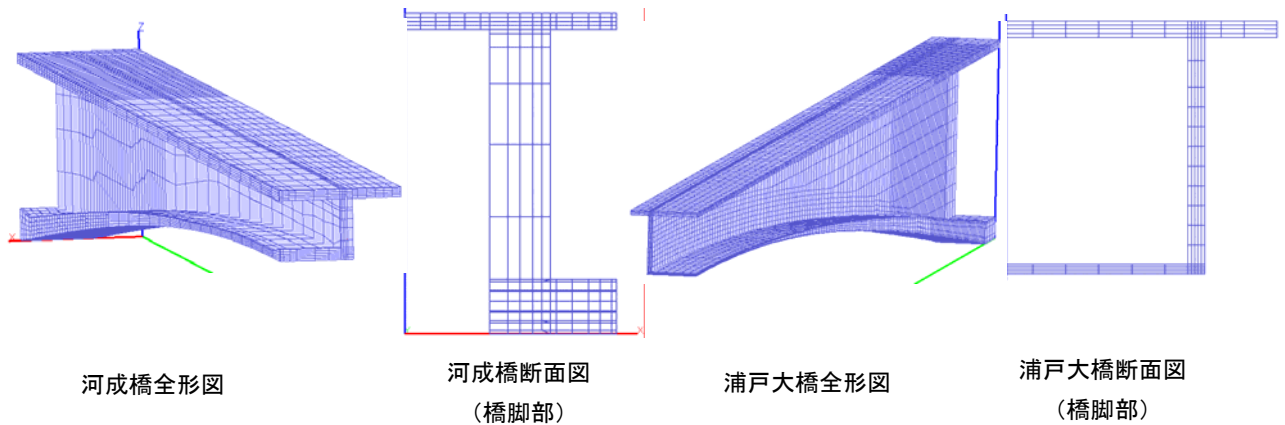


図-5 解析モデルの要素分割

物表面において cm スケールの薄さの要素分割とし (図-5)、構造物と外気境界面付近のポテンシャル勾配は時間差分間隔を短くすることで解の安定性を担保した。その結果、解析に要する時間は長くなったものの、解の収束性は向上し、極端な条件を設定した感度解析 (後出) でも安定性は失われなかった。

2.3 解析条件

(1) 計測原点

千々和らの月夜野大橋の解析²⁾と同様、コンクリート打設後、二週目に外力として自重、舗装・高欄荷重、プレストレスを導入し、その時点を経過時間とたわみ量の原点とした。一方、実橋はブロックごとに打設され、約半年かけて延伸施工されるため、施工中にもクリープ・乾燥収縮が進行する。実際のたわみ計測は竣工時を計測原点とするため、上記解析条件はたわみを過大側に評価するが、厳密な段階施工の解析値と大差ないことが確認されている²⁾。これを考慮した上で実計測結果との比較検討を行う。本研究では既報との整合性を考慮して、長期クリープ変形を時間の対数で標記することとした。

(2) 環境条件

解析に用いた外気温湿度を表-1に示す。各橋梁の所在地に近い気象庁観測所の気象データ⁵⁾を、箱桁の全ての境界面において適用した。箱桁上面には舗装層があることから、橋上面への日射と降雨の影響を遮ると仮定し、桁上面で、熱および水分移動を許容していない。河成橋、浦戸大橋ともに季節変動を考慮して、月ごとの平均温湿度を適用している。

(3) 配合条件

浦戸大橋のコンクリートの示方配合を表-2に示す。河成橋では現場配合が不明であったが、他橋梁と同程度の圧縮強度が報告されていること、施工時期が近いことから、月夜野大橋と同じ配合²⁾を解析で仮定した。

表-1 解析で使用した環境条件

橋梁	使用データ	気温 °C	湿度 %
河成	月別平均値	5.2~27.0 で季節変動	62.5~72.3 で季節変動
浦戸	月別平均値	6.1~27.2 で季節変動	59.0~79.0 で季節変動

表-2 浦戸大橋で使用されたコンクリート示方配合

σ_{ck} kg/cm ²	セメント	最大粗骨材	空気量 %	スランプ cm
400	早強ポルトランド	25	2~4	3~8
コンクリート 1 m ³ あたりの配合 kg				
	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
152	400	645	1217	1.0

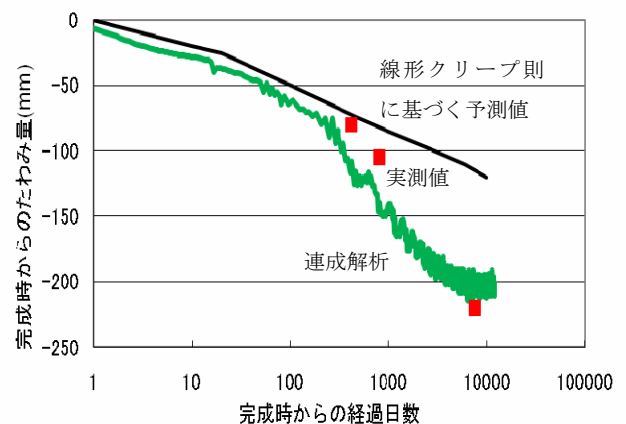


図-6 河成橋におけるたわみの予測値、実測値と解析値 (季節変動考慮) の差

2.4 解析結果

河成橋と浦戸大橋の解析結果から、経過時間によって実測値と解析値に差が見られるが、長期たわみの推移はほぼ再現できることが検証、確認できた。河成橋では季節変動によるたわみ量の変動が解析で再現され、小刻みなたわみの推移を呈しつつ、供用後約 20 年の実測値とも概ね予測できている (図-6)。設計予測値を超える過剰たわみが数値解析でも再現された。

浦戸大橋でも、たわみの季節変動と進行速度は精度よく再現され、本手法が大略、適用可能と考えられる (図-7)。浦戸大橋では過剰クリープたわみが報告されている月夜野大橋、河成橋をはじめとする他の橋梁と異なり、設計基準で示方されている線形クリープ則とクリープ係数に基づく予測値と本解析は長期においてほぼ等しく、ともに実測と良好に整合している点で特徴的である。加えて、橋長に対してたわみ値が他の橋梁と比べても顕著に抑えられている (図-8)。他の橋梁と異なる時間たわみ特性を有する浦戸大橋においても、たわみの時間履歴を精度よく追跡できたことで、実橋長期クリープへの連成解析の適用が、大略、一般性を有するものと判断される。

3. 実橋過剰たわみに関する仮想状態での感度解析

2 章の結果から、本解析システムが実橋の長期クリープたわみの定量分析に適用可能であることが確認できた。本節では数値解析の利点を活かし、実験的手法では再現不能の仮想状態に対する長期時間依存変形シミュレーションを行い、実橋クリープに及ぼす影響因子を個別に抜き出すことを試みる。

3.1 外荷重作用を排除した仮想状態での解析

クリープを引き起こす主要な持続応力は、自重・外荷重・プレストレスの外力項 (以下、これを力学系と呼ぶ) と、セメント硬化体中の水分によって導入される自己体積変形駆動力 (以下、これを熱力学系と呼ぶ) の二者が連成解析で考慮されている。材料供試体レベルでの自己・乾燥収縮 (熱力学系駆動力で励起される) に対して、既往の研究成果が少なからず報告されている。しかし、実構造の時間依存変形に及ぼす熱力学系の影響を定量的に議論した研究は、筆者らの知る限り、稀である。月夜野大橋の解析では、温湿度や比表面積の感度解析を行い、厚さや表面積の異なる上下床版とウェブの、各々の水分移動・散逸量の差から、膨張・収縮量に差が生まれ、たわみを引き起こすことを議論している²⁾。本研究ではさらに連成解析において、熱力学的な自己変形駆動力のみを考慮した仮想状態でのシミュレーションを行った。以下、二橋の構造特性を比較するために、ともに河成橋の年平均温湿度を用いた。(気温 15.8℃, 湿度 67%一定)

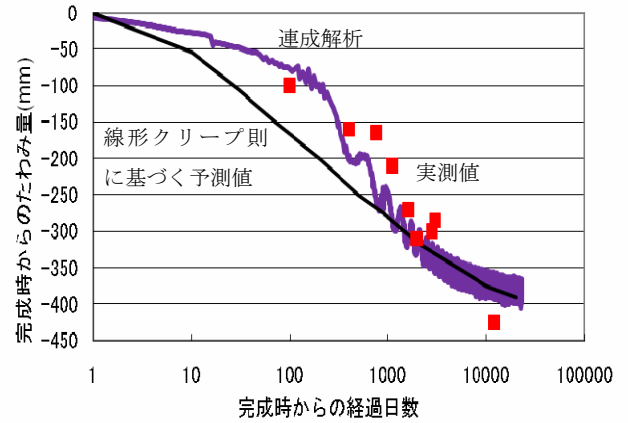


図-7 浦戸大橋におけるたわみの予測値、実測値と解析値 (季節変動考慮) の差

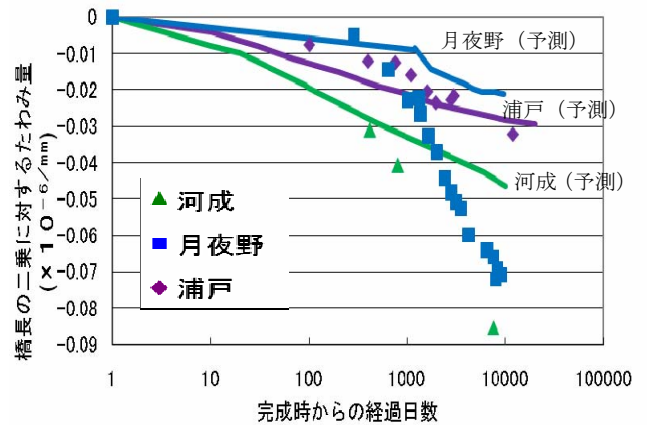


図-8 たわみ値の経時変化と設計予測 (線形クリープ)

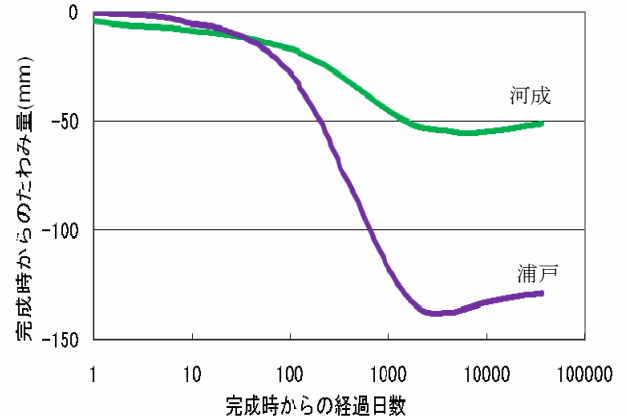


図-9 力学系を除外した仮想状態シミュレーション

図-9 の通り、河成橋、浦戸大橋ともに、熱力学系の変形駆動力のみでも実橋梁たわみと比較して無視できないたわみが生じる。特に浦戸大橋では 140mm 近いたわみが仮想状態での数値解析で発現し、通常状態の解析における全たわみ量の 3 分の 1 以上を占めていることが特徴的である。また、河成橋の約 2 倍の橋長を持つ浦戸

大橋では、入力した環境条件が同じでも、約3倍のたわみが見られる。ここで興味深い点として、2000日以降からたわみが減少傾向に転じることが挙げられる。部材を形成しているコンクリートの含水率が、長期にわたる自己乾燥によって外気湿度よりも下がり、外環境からの水分の吸湿とインクボトル効果によって捕捉されている凝縮水の開放が数値計算上、起こっている。そのため、毛細管空隙内の収縮駆動力が一部、緩和されて、たわみを抑制するモーメントが生じるためである。今後の実証が待たれる。

3.2 内部変形駆動力を除いた仮想状態解析

熱力学系の変形駆動力をゼロとし、外荷重のみによるたわみ応答を分離・抽出するために、自己変形駆動力（水分移動・散逸によって発生する毛細管空隙内の表面張力とゲル空隙に展開する分子間応力）を無視した仮想状態での解析を行った。

微細空隙の水分移動・散逸を維持しながらも、熱力学的な収縮応力が発生しないという仮想状態は、実験で再現することは根源的に不可能であるが、数値シミュレーションでは可能である。これらの感度解析は、過剰たわみの機構に関する思考の深化に有益と考えられる。

河成橋、浦戸大橋ともに、熱力学系によるたわみ応答よりも大きなたわみ値が得られた（図-10）。ここで浦戸大橋のたわみ値は河成橋の約2倍となっている。さらに、河成橋では線形クリープ則に基づく予測値と、力学系のみなたわみ応答解析値がほぼ一致していることが分かる。これは、従来の設計予測法が熱力学的なたわみ応答を考慮せず、力学系のみに対応したたわみ予測に基づいているとも解釈されよう。換言すれば、実橋の過剰たわみの要因の一つは、前述の軽視できない熱力学系駆動力による構造たわみ応答を考慮できていないことに因るものと言えよう。

一方、浦戸大橋では、力学系のみなたわみ応答が設計段階での予測値の傾きを概ね再現しているものの、たわみ自体には大きな差があり、なおかつ、連成解析と予測値ともに実測値を精度よく評価できている。したがって、浦戸大橋の長期たわみ特性は、材料特性以上に構造諸元に起因するものが大と推定される。この点に関する考察は次章にて詳述する。

4. 仮想状態解析と実現象状態解析の比較

4.1 たわみの力学的応答と熱力学的応答の加算則

3章において個別に抽出した力学系と熱力学系によるたわみ応答を、実現象状態（実際の外力、環境条件を入力した通常状態）の解析値と比較する。図-11、図-12に河成橋と浦戸大橋の、各仮想状態におけるたわみ応答成分とその単純および連成解析値を示す。図から自己

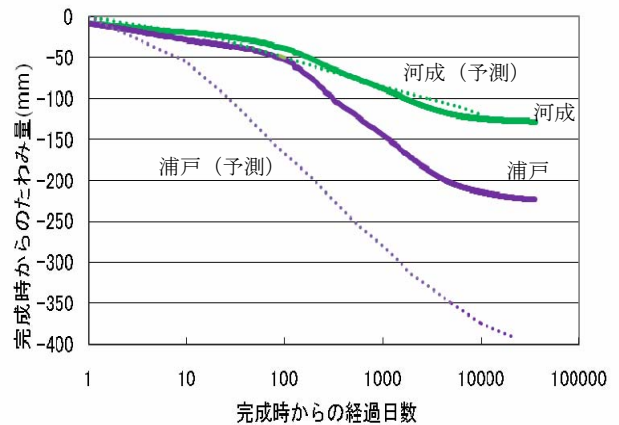


図-10 熱力学系を除いた仮想状態シミュレーション

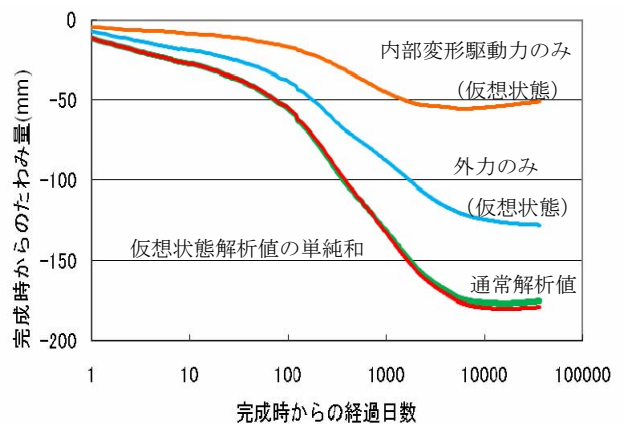


図-11 河成橋におけるたわみの仮想状態と実現象状態における解析値の比較

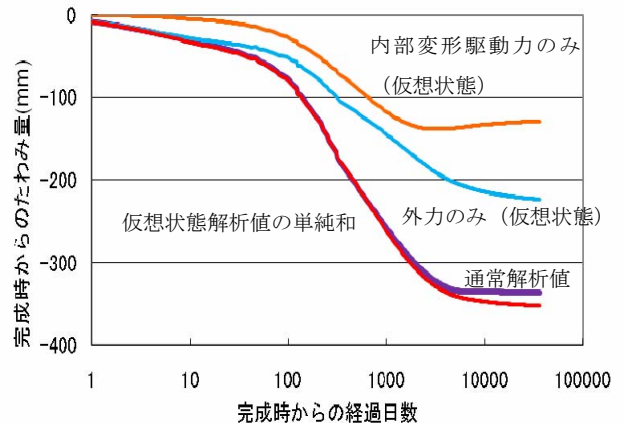


図-12 浦戸大橋におけるたわみの仮想状態と実現象状態における解析値の比較

変形駆動力による熱力学的たわみ応答成分と、外力による力学的たわみ応答成分の単純和が、通常解析のたわみ値とほぼ一致することが分かる。すなわち、外力と自己変形駆動力はクリープ変形に対して互いに独立と仮定でき、全たわみについて力学系と熱力学系の加算則を用

いてもよい結果となった。持続荷重と弾性クリープ、自己・乾燥収縮による収縮応力、ならびに乾燥クリープなどの各影響因子が、相互に絡み合っ生じると捉えられてきた非線形クリープを微細空隙中の水分移動・散逸と関連づけることで、力学的成分と熱力学的成分の二つに便宜的に分離することができた。また、部材ごとに断面形状や鉄筋量など、諸元が異なる構造詳細を有する実橋についても、この加算則がほぼ成り立つことが示された。

以上の結果と考察から、長期クリープたわみを外力と自己変形駆動力に起因するたわみ応答成分の単純和で評価することが、実務上、可能と考えられる。ただし、外力系の計算には、水分と力学モデルとの非線形性を考慮する必要はあり、既往の線形重ね合わせ法では困難であろう。外力と自己変形駆動力によるたわみ応答は、共に微細空隙中の水分動態の影響を受けることに変わりなく、外力・変形駆動力・空隙水分の関係性の検討を構造レベルで今後とも継続していく予定である。

4.2 線形クリープ則に基づく予測の適合性

河成橋と浦戸大橋ともに、全たわみに対する熱力学系のたわみ応答成分の比率は大きい(図-11, 図-12)。微細空隙中の水分移動・散逸現象に影響を受け、それらは橋の構造諸元(部材厚, 断面形状など)に左右される。そのため、線形クリープ予測が力学系のみに対応するとすれば、異なる構造諸元を有する橋梁上部工では熱力学系のたわみ応答も異なり、ゆえに予測の適合性は見かけ上異なろう。換言すれば、熱力学的応答成分が相対的に大きくなるような構造諸元を有する橋梁では、線形クリープ則に基づく予測値から大きく外れると推定される。

浦戸大橋の設計段階での線形予測値は実測値と大差ない。また、図-8で示したように浦戸大橋は他の橋梁と異なり、橋長の二乗に対するたわみ値が例外的に小さい⁶⁾。これは、浦戸大橋の持つ構造諸元が力学的、熱力学的、あるいは双方によるたわみ成分を抑えているものと解釈される。特に浦戸大橋では橋脚部付近での上下フランジ厚が大きい。橋長や幅員を考慮しても、他橋梁と比べたフランジ厚の大きさは顕著である。部材厚は断面二次モーメントなどの力学的なたわみ特性だけでなく、自己・乾燥収縮における水分移動・散逸にも影響する。今後、簡易的な橋梁モデルで断面形状を変化させる感度解析も行い、たわみ成分への寄与をさらに考察することで、浦戸大橋の構造諸元が有する特異性を明らかにし、長期過剰たわみの設計と制御方法に展開していく予定である。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- 1) 材料-構造応答連成解析システムを用いることで、

月夜野大橋に加えて河成橋、浦戸大橋でもそのたわみ履歴を精度良く再現することが可能である。

- 2) 自己変形駆動力による熱力学的たわみ応答成分は大きく、実橋の長期たわみを予測する上で無視できない。
- 3) 線形クリープ則に基づく従来の予測手法は、熱力学的応答成分を考慮しきれていないために、実測との乖離を生んでいる可能性が高い。
- 4) 微細空隙中の水分移動・散逸を維持すれば、全たわみ量を力学的応答成分と熱力学的応答成分に分けることができ、それらの加算則が成り立つ。
- 5) 橋梁ごとに異なる構造形式が力学的、熱力学的応答成分を左右し、線形クリープ則に基づく予測の適合性が見かけ上異なる。

謝辞

元清水建設・渡辺泰充氏と高知県土木部道路課から、本研究で対象とした月夜野大橋、浦戸大橋と河成橋の長期たわみデータ、図面および施工・管理に関する貴重な記録の提供を受けました。ここに深謝致します。

参考文献

- 1) Watanabe, Y., Ohura, T., Nishio, H. and Tezuka, M.: Practical prediction of creep, shrinkage and durability of concrete in Japan, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures: Proceedings of the CONCREEP 8 Conference Held in Ise-Shima, Japan, 30 September - 2 October 2008, CRC Press, pp.529-536, 2008
- 2) 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橋の長期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
- 3) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor and Francis, 2008
- 4) Asamoto, S., Ishida, T. and Maekawa, K.: Time-Dependent Constitutive Model of Solidifying Concrete Based on Thermodynamic State of Moisture in Fine Pores, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.2, pp.301-323, 2006
- 5) 気象庁ホームページ:
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 6) Bazant, Z.P., Yu, Q., Li, G.-H., Klein, G., and Kristek, V.: Excessive Deflections of Record-Span Prestressed Box Girder, Concrete International, Vol.32, No.06, 2010