

論文 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

千々和 伸浩^{*1}・杉田 恵^{*2}・石田 哲也^{*3}・前川 宏一^{*4}

要旨: 線形クリープ則に基づく予測値を超えるクリープ変形が進行している実 PC 橋の貴重な計測例が報告されている。本研究では、微細空隙中の熱力学的状態から巨視的な構造応答まで寸法の異なる事象相互の連成を考慮できる時間依存変形解析システムを用い、実構造スケールにおけるクリープ変形の再現、および長期予測と諸要因の与える影響の分析を行った。解析の結果、実橋での長期クリープ変形の特徴が概ね再現された。桁断面内での温湿度分布状況や上下フランジ間での配筋量の差によって、橋のクリープたわみが有意に変化することも確認された。微細空隙中の水分挙動が構造応答に及ぼす感度についても分析を加えた。

キーワード: 材料-構造連成解析, 非線形クリープ, 環境作用

1. はじめに

建設以後の長期計測から、幾つかの PC 橋で設計予測を超えるクリープたわみが報告されている¹⁾。これらの橋は 1975 年前後に建設されたものであり、弾性ひずみの 2-3 倍のクリープひずみを仮定する線形クリープ則に則ったものである。計測された長期供用後のたわみが線形クリープ則に則ったものとして線形クリープ係数を逆推定すると、その大きさは 4-5 となり²⁾土木学会コンクリート標準示方書³⁾による算定値の倍以上となる。標準示方書におけるクリープ予測式は 1996 年に改訂され³⁾、さらに線形クリープに体積表面積比、外気相対湿度を考慮したクリープ係数に改訂された⁴⁾。材料試験レベルで高い予測精度と適用性を有するが、実構造の長期応答計算に用いる場合には、さらに改善の余地が残されていると思われる。社会基盤施設を長期にわたり供用するために維持管理の重要性に対する認識が深まっている。既存の PC 橋における維持管理において、クリープたわみがいつどの程度で収束するのかを科学的に推定可能な手法が求められるところである。

コンクリートのクリープはセメント硬化体中の細孔構造、および細孔内水分の熱力学的状態に依存する現象であることが知られている。セメント硬化体は比較的粗大なキャピラリー空隙から分子スケールの層間空隙まで、様々な寸法の空隙の集合体である。これらの空隙内での水分挙動及びそれに伴うゲル-キャピラリー骨格の変形挙動は空隙のスケールによって異なるため、一般性を持たせたクリープ予測モデルの構築には、微細構造単位ごとに異なる変形を考慮することが必要不可欠である。

筆者らはコンクリート構造の打設から供用終了まで、

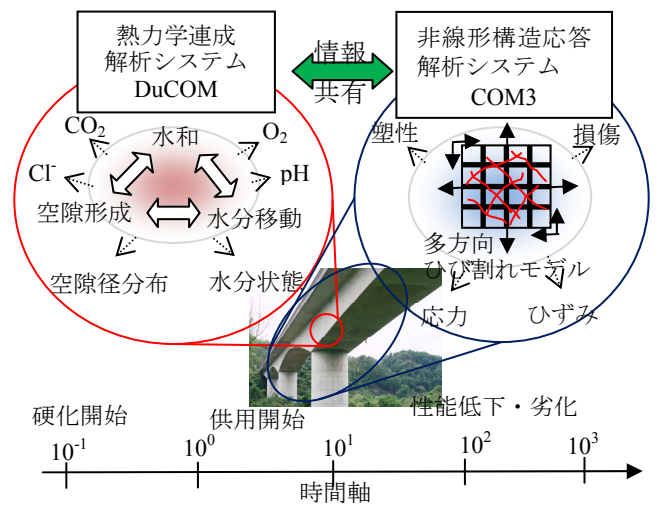


図-1 マルチスケール統合解析システムの概要

長期にわたる特性の推移を時刻歴で追跡する 3 次元構造-材料応答連成解析システム (略称 DuCOM-COM3) を開発してきた⁵⁾。水和反応-空隙構造-水分移動の三者の数理モデルを連結させた熱力学連成解析モデル(nm~ μ m)と、非線形材料構成則に基づく材料構造応答解析(mm~m スケール)を並列作動させ、逐次情報を共有しながら事象を追跡するものである(図-1)。両システムは、寸法の異なる微細空隙内での水分移動-固液平衡の事象を積分⁶⁾して、cm scale の時間依存変形を与える構成モデルを通じて強連成が維持されているのである⁷⁾。毛細管張力や表面エネルギーに起因する内部応力など、分子スケールの現象によって引き起こされる巨視的な構造変形やひび割れ損傷などを評価することが可能となるものである。

本研究は、この材料科学-構造応答連成解析システムを用い、実橋で観察される長期クリープ変形の要因分析と

*1 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)

*2 東京大学 工学部社会基盤学科 (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 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)

表-1 使用されたコンクリートの配合

σ_{ck}	セメント	最大骨材寸法	空気量		
kgf/cm ²	種類	mm	%		
400	早強ポルトランドセメント	25	4		
コンクリート 1m ³ 当りの配合(kg)					
セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	備考
423	165	639	1108	1.0575	夏用
440	167	629	1099	1.1	春秋 冬用

モデルの検証を試みるものである。さらに、微細空隙中の水分挙動を仮想的に変化させた感度解析を通じて、巨視的な構造応答にどの程度、微視的レベルの熱力学的状態量が関与しているかを分析し、クリープ事象の考察を深めることを本研究は目指している。

2. 解析対象

2.1 解析対象構造物

竣工（1982年）以来、スパン中央部のたわみ計測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）を対象とした^{1),2),8)}。科学的分析に耐える、他に例を見ない貴重なデータである。この橋梁は移動架設桁による張出し架設工法(P&Z工法)により施工された4径間PC有ヒンジラーメン橋であり、分割されたブロックごとにコンクリートを打設し、PC鋼材に緊張力を導入した後、次のブロックの施工に進む形で延伸しながら施工されたものである。使用されたコンクリートの仕様を表-1に示す。

本研究では、打設時にひずみゲージが埋め込まれ、以降の収縮のデータが利用可能な区間である、P4橋脚からP5橋脚に向かう区間のうち、P4橋脚側の支点からスパン中央までの区間を対象とした（図-2）。橋桁断面は中空形状であり、高欄を含む上フランジの幅は10.65m、下フランジの幅は5.8mである。厚み方向には、上フランジ厚は300mm（舗装厚80mm除く）一定になっているが、ウェブ厚が600mmから350mmまで、下フランジ厚は800mmから200mmまで、支点から中央ヒンジに向かって連続的に変化する設計となっている。年平均気温はみなかみのデータ⁹⁾から10.2℃、年平均相対湿度については月夜野周辺でかつ地形条件が近いと考えられる軽井沢の気象データから78%と推定した。

2.2 実測されたクリープたわみ

図-3は竣工された1982年から光学計測により実測された、スパン中央部の鉛直位置の経時変化である。竣工から数百日が経過した辺りから、線形クリープ予測値からの乖離が始まっていることが分かる。設計時クリープ

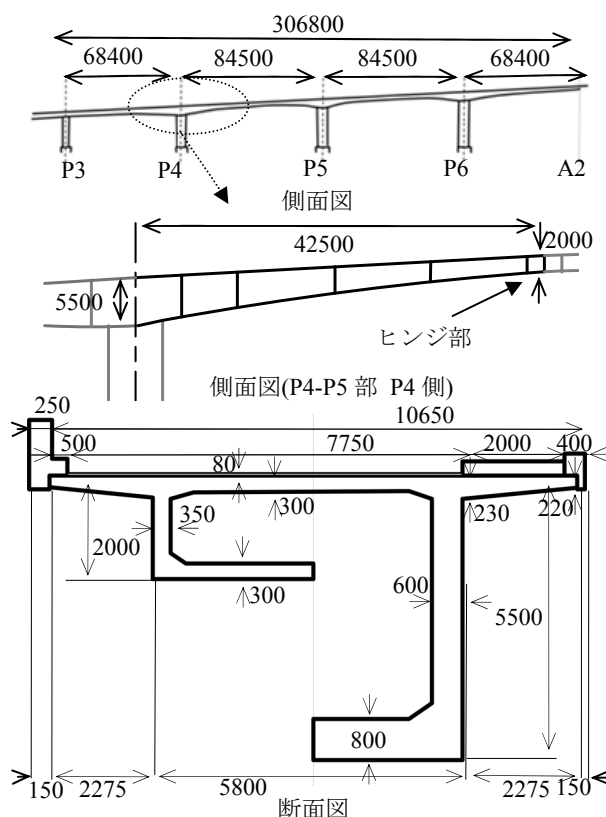


図-2 月夜野大橋 解析対象箇所

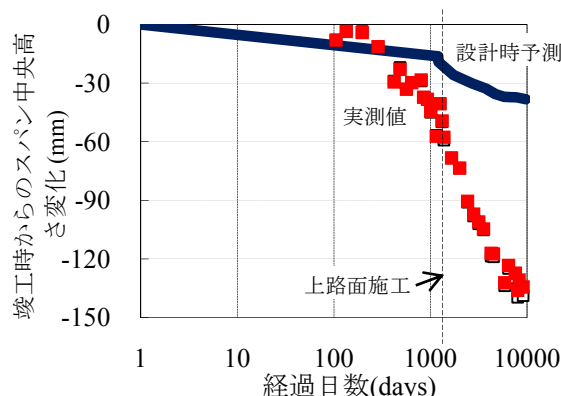


図-3 たわみの予測値と実測値の差

たわみ進行予測は1978年道路橋示方書に基づき、設計値としてコンクリート強度400kgf/cm²、ヤング率350000kgf/cm²、クリープ係数1.58、乾燥収縮185μが用いられた。

3. 解析手法の概要・条件と実橋の挙動再現

2章で概要を述べた月夜野大橋のクリープ変形の機構を分析するため、本研究では1章にて概要を述べたDuCOM-COM3を用いた。本解析システムは分子レベルの現象から構造レベルの現象まで様々なスケールの現象が構成則を通じて強連成されているものである。コンクリートの配合・施工条件、構造諸元（寸法、形状、配筋）、ならびに力学・熱力学的境界条件を入力するのみで、水和や含水状態等に代表される熱力学的諸量が逐次

計算され、以下の時間依存構成則に基づき構造物の巨視的な変形挙動が算出されることとなる。本システムでは後述するように水の移動がキャピラリー水やゲル水の駆動力を励起するようになっており、乾燥の影響は自動的にとりこまれる⁷⁾。

3.1 時間依存構成則の概要

本解析システムに組み込まれている時間依存構成則⁷⁾は、細孔構造の寸法・形態と内部に存在する水分の状態にあわせて力学モデルを構成し、それらの総体として巨視的なコンクリートの時間依存挙動を表現している(図-4)。セメント硬化体組織の骨格そのものによる弾性応答は①で示される弾性モデルで表現される。②はスケールが $10^{-6}\text{m}\sim 10^{-8}\text{m}$ 程度の比較的粗大な空間に存在するキャピラリー水の状態と関連付けられた力学構成要素であり、相対的に速やかな応答を表現する粘弾性モデルである。載荷初期のクリープにはこの項が支配的である。③④にあたる $10^{-8}\text{m}\sim 10^{-9}\text{m}$ の空間に相当するゲル空隙中の水分は、微細空間ゆえに壁面との相互作用により緩慢な動きを示すと共に非回復な変形成分に寄与すると仮定し、粘塑性モデルにより表現されている。②が載荷初期のクリープ現象の進行に寄与が大きいのに対し、③④の項は比較的長期にわたるクリープ現象の進行において寄与が大きい。 10^{-10}m スケールの層間空隙では、空隙が十分に小さく、一度水が抜けると表面エネルギーの増加に伴って閉塞してしまうことから、⑤のように塑性モデルのみで表現されている。実際の層間水が高温下や低湿度のような水の蒸発が著しい状況で大きく動くことを反映して、このモデルも水分蒸発が著しい状況において駆動するよう設計されている。

本モデルについては、これまで主に小型供試体を対象として、構成モデルと一般化解析手法に対する検証を実施してきた。結果、様々な温湿度・荷重条件下における自己・乾燥収縮、ならびに基本・乾燥クリープについて、材料供試体レベルでは十分な精度で追跡可能となっている⁷⁾。一方、本研究の主眼は、線形クリープ則では予測し得なかった実橋のたわみを、提案する解析手法で予測可能か否かを検証する点にある。なお提案モデルを用いて対象コンクリートのクリープ係数を求めた場合、材齢によって変化するものの平均値として2程度の値が算出される⁷⁾。冒頭で述べた実測の長期クリープたわみを線形クリープ則で説明する際に逆推定される値(概ね4-5)²⁾と大きく異なることをここで述べておきたい。

3.2 解析要素

有限要素解析における要素分割において、部材断面内のうち構造物表面付近は外気と内部コンクリートとの間で、熱エネルギー(温度)および間隙水圧(水分状態)

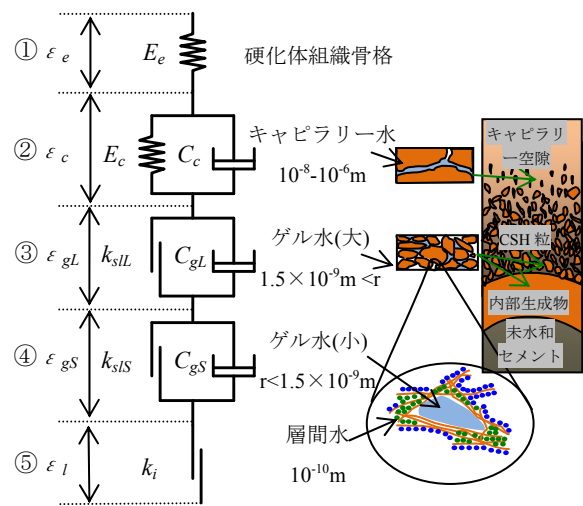


図-4 非線形クリープモデル

表-2 温度の季節変動パターン

経過日数	45	91.25	136.25	182.5
外気温度(°C)	-1.17	0.97	10	16.4
経過日数(続き)	227.5	273.25	318.25	365
外気温度(°C)	21.9	20	10.4	3.2

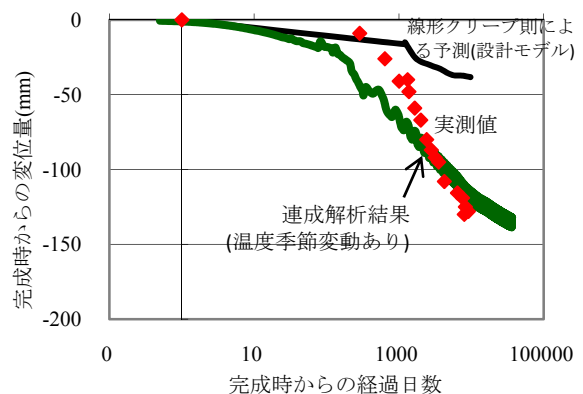


図-5 月夜野大橋クリープたわみの再現結果

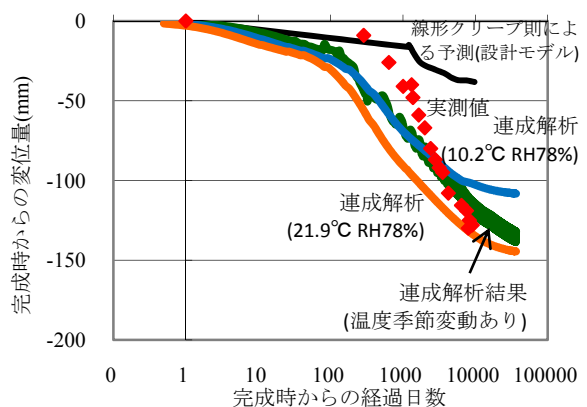


図-6 温度一定と仮定した場合のたわみ量推移の違い

のポテンシャル勾配が大きくなるため、解の収束性を担保するために、mm単位での要素寸法とした。部材断面

内のうち構造物内部では温湿度の分布勾配は小さいことから数十 cm 程度の要素寸法とした。一方、橋軸方向には数 m の要素分割とした。

3.3 解析条件

実際の橋はブロック単位で延伸しながら約半年間かけて打設されるが、今回の解析では全橋が一度に打設され、プレストレスについても全緊張力が同時に導入されるものとした。外力は重力を体積力として、舗装と高欄の重量を上面への分布荷重として与えた。実測値と比較する上での時間とたわみの原点は、それぞれプレストレスと諸荷重が全て作用した時点での、時間とたわみ量とした。また外環境条件は箱桁内外ならびに下面において全て同一であるとした。箱桁上面は舗装されているため、熱ならびに水分の移動境界として設定しておらず、日射や降雨の影響は舗装面でとどまり、橋自体には影響しないと仮定した。

3.4 長期クリープたわみの再現結果

実橋で観測されたクリープたわみを再現するために、実環境変動を簡略化した境界条件を解析に与えた(表-2)。すなわち季節変動により変化する気温を簡略化した数分割の変化として与える一方、相対湿度については簡単のため現地の平均値(相対湿度 78%一定)を与えた。

解析を行った結果、初期のたわみ進行度において差はみられるもの、たわみ量の推移について実橋で観測されたものと近い挙動が再現されることがわかった(図-5)。実測では約千日が経過した後にクリープ変形の進行速度が加速されるが、今回の解析においても、数百日が経過したあたりでクリープ変形の進行速度が上がる現象が再現されている。数十から数百日までの間で、今回の解析と実測値との間に見られる特に初期において顕著なたわみ進行速度の差は、実橋が段階施工され材齢が異なる部位ごとにクリープ進行度が異なるのに対し、解析は橋が一度に打設された状態を設定し、全部位で同時にクリープが進行するとしたことに由来すると考えられる。

4. 実橋のクリープ変形に与える各要因の影響

3章での解析結果から、本解析システムによって実橋で生じた変形挙動がおよそ再現可能であることが確認された。ここでは同解析システムを用い、温度、相対湿度、体積表面積比の与える影響について感度解析を行う。

4.1 温度に関する分析

はじめにクリープ変形の進行に対する温度変化の影響について検討した。3章では温度を実環境に合わせて変動させたが、ここでは実環境データから年間の最大と平均の気温に着目し、それぞれの温度が通年で続くという2通りのパターンを設定した。

表-3 相対湿度の季節変動パターン

経過日数	45	91.25	136.25	182.5
外気温度(°C)	73	73	76	76
経過日数(続き)	227.5	273.25	318.25	365
外気温度(°C)	86.7	87.3	81	75

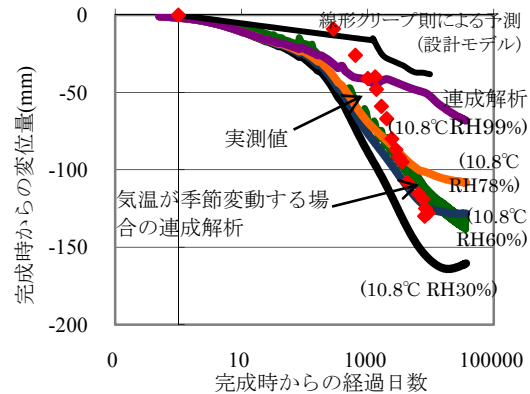


図-7 相対湿度を一定とした時のたわみ量推移の違い

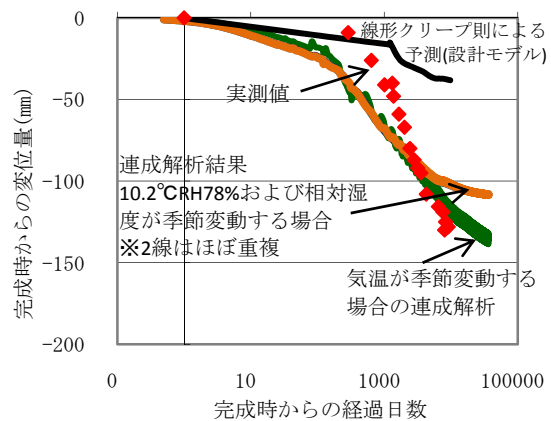


図-8 相対湿度が変動する場合のたわみ量推移の違い

図-6 に解析結果を示す。外気温度が高いほど、たわみ量の最終値も大きくなった。温度の上昇に伴い収縮量が増加すると共に空隙中の水の移動が加速され、その結果としてクリープ変形が進行するためである。

温度一定の解析結果と外気温度を変動させた場合の解析結果を比較すると、温度を変動させた場合には、年間最高気温一定で解析を行った場合よりもたわみの進行速度は低下するものの、最終的には外気温が年間最高気温一定のまま続くとした解析を行った場合の最終収束値に向かうことが分かった。気温の高い時期に不可逆性のクリープが進行し、それが年々蓄積されることでこのような現象が発生するものと解釈される。

4.2 相対湿度に関する分析

続いてクリープ変形に対する相対湿度変化の影響について検討した。異なる相対湿度を一定値として与える場合と、表-3のように季節変動に合わせて湿度を1年

周期で変化させる場合の2通りを用意した。

一定の相対湿度を与える解析では、99%, 78%, 60%, 30%の4通りで計算を行った。その結果、相対湿度が小さくなるほどスパン中央部のたわみ量も大きくなることがわかった(図-7)。断面内の湿度分布を確認したところ、変形が進行する過程で上部と下部のフランジの間に顕著な相対湿度の違いが見られた。箱桁上面は水分の移動境界と設定していないためである。乾燥する部位ほど収縮量は大きくかつクリープがより速く進行することから、下フランジの方が上フランジよりも橋軸方向に対して大きいクリープ変形がみられ、結果としてスパン中央部のたわみが進行する結果となった。またその量は、大きな湿度勾配をもたらす厳しい乾燥条件でより大きくなったのである。また相対湿度が30%一定の場合、数値解析によれば40年後にたわみが回復に転じる興味深い結果を得た。これは自己乾燥とクリープ、フランジ上下面の水分移動特性が関与している。現時点で検証するすべはないが、感度解析を系統的に行い、たわみ回復にもっとも貢献すると考えられる物理化学事象を今後、明らかにしていく予定である。

相対湿度を季節変動させた場合の計算(図-8)では、平均値一定として計算した場合と比べて、たわみ量に特に差異が見られず、終局変位についてもほぼ同じ値に収束した。外気中の湿度の変動に対するコンクリート中の湿度変化の応答は遅いので、季節変動による影響が表れなかったものと考えられる。

4.3 体積表面積比に関する分析

体積表面積比がクリープ変形に与える影響を調べるため、同形状の要素を等倍で拡大、縮小させて解析をおこなった。体積力や分布荷重は倍率に伴って変化するが、コンクリート強度は変化しないため、荷重によって断面内に発生する応力度分布が異なる。応力度分布が異なるとクリープ進行も異なると考えられるため、解析では重力を変化させて、ほぼ同じ応力度分布を再現した。

解析の結果を図-9に示す。ここでは縦軸をスパンに対するたわみ量の相対値とした。体積表面積比が大きい、すなわち寸法が相対的に大きくなるほど、クリープ開始後、約数百日にあらわれるたわみ進行の加速時期が遅くなることが分かった。幾何形状が同じであっても、構造体内部の乾燥は表面からの距離に依存するため、体積表面積比が大きいものほど内部の乾燥がより進み、クリープが早い時期から加速的に進行することが明示された。

5. 月夜野大橋のたわみ進行将来予測

以上の解析から各条件がたわみの進行に与える影響が明らかになった。ここではこれらの知見を元に、月夜野大橋でのクリープたわみの進行についての将来予測を

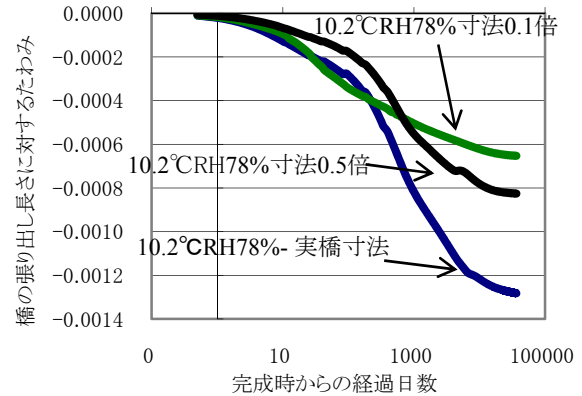


図-9 体積表面積比が変化する場合のたわみ量推移

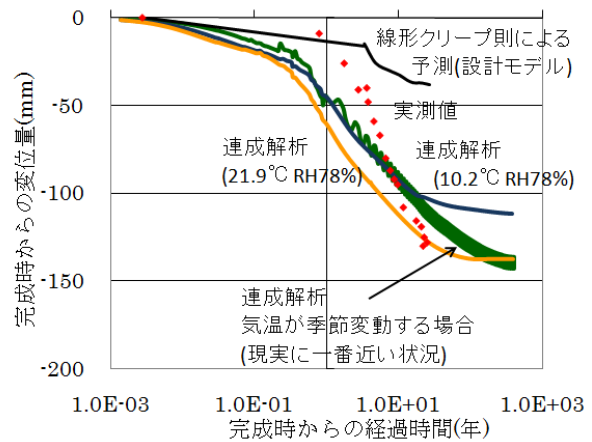


図-10 本解析システムによる月夜野大橋のたわみ量将来進行予測

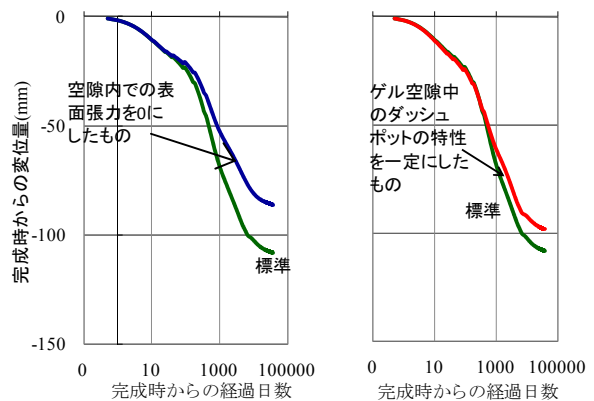


図-11 微視的レベルの各事象が実構造物スケールの構造物の挙動に与えている影響

行った。ここでは月夜野大橋の置かれた環境下において、クリープの収束値に最も早く達することが想定される夏季温度が年間一定とした条件と、現実に近い条件を想定した気温変動するとした条件の2つについて検討した。

図-10に示した解析の結果から、月夜野橋では竣工から170年程度が経過した時期に最大140mm程度までのたわみが進行して収束することが予見された。

6. 微視的レベルの各事象が実構造物スケールの構造物の挙動に与えている影響

本研究で用いる時間依存変形構成則は、ナノからマイクロメートルスケールの含水状態が、巨視的な挙動に直接影響を及ぼすという特徴を有する。本章では、構造物全体の時間依存変形に及ぼす各スケールでの水の挙動の影響を分析する。

6.1 解析条件

ここでは解析条件として、a)標準、b)収縮を引き起こす機構の一つである毛細管張力を常に0と設定したもの、c)ゲル空隙の変形成分のうち、粘性を与えるダッシュポットの特性が変わらないとしたもの（ゲル空隙の飽和度を常に100%と設定）の3通りを設定した。なお環境条件は気温10.2℃、相対湿度は78%で年間一定とした。

6.2 解析結果

解析結果を図-11に示す。標準のa)と毛細管張力を常に0と設定したb)を比べると、十数日経過後辺りからその乖離が顕著になることが分かる。このことは乾燥の進行により、毛細管張力の寄与が部材全体の挙動に顕著な役割を果たしていることを示している。一方、ゲル水の動きを止めたc)の場合は、a)に比べて1000日以降のクリープの進行が遅くなる結果となった。これは1000日以降のたわみ急増が、ゲル空隙内での水の動きに由来するものであることを示すものである。以上のことから実橋レベルの構造挙動を予測するためにもナノメートルスケールの水の動きを考慮する必要性が明らかになった。

7. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- 1) コンクリート細孔構造および細孔中の水分状態を考慮した時間依存構成則を用いることで、実橋で計測されたものに近いクリープ変形の進行を再現可能である。
- 2) 外気温度が高いほどクリープ変形は進む。クリープ変形は外気温度の変動に敏感であり、変動幅の中で相対的に高温時の履歴を累積しながら進行する。
- 3) 外気との平衡状態に至るまでの断面内の相対湿度とその分布状況がクリープ変形量に影響を及ぼす。相対湿度の数カ月程度の変動はクリープ変形量にあまり影響しない。
- 4) 幾何形状が同じでも、寸法によって構造物中の乾燥速度が異なるため、クリープの進行速度は異なる。
- 5) 微細空隙が構造挙動に与える影響を精緻に評価した計算の結果、月夜野大橋は竣工から170年程度でたわみが140mm程度に収束すると予想される。
- 6) 各空隙の水の挙動に対応する時間依存変形モデルをそれぞれ固定して解析したところ、キャピラリー

中の水の動きは打設から水が抜けるまでの比較的短い期間のクリープたわみに影響すること、たわみの進行が打設後、ある期間の経過後に早まるのはゲル水の移動に由来することが明らかになった。即ち、各々のスケールの水分状態-力学応答の連関を考慮することが、実構造物の挙動を予測する上で不可欠であることが示された。

謝辞

本研究は東京大学グローバルCOEプログラム「都市空間の持続再生学の展開」からの援助により行った。

参考文献

- 1) Watanabe, Y., Ohura, T., Nishio, H., 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*, pp.529-536, CRC Press, 2008
- 2) Witchkreangkrai, E., Tsuchida, K., Maeda, T., Watanabe, Y.: Long-term deflection monitoring of a cantilever prestressed concrete bridge with intermediate hinges over 25 years. *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*, pp.595-600, CRC Press, 2008
- 3) 土木学会:平成8年制定 コンクリート標準示方書, 丸善, 1996
- 4) 土木学会:2007年制定 コンクリート標準示方書, 丸善, 2007
- 5) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete: Taylor & Francis, 2009
- 6) 石田哲也, 前川宏一, 岸利治, 磐田吾郎, 楠原千佳子: 温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp.39-54, 2005.8
- 7) Shingo Asamoto, Tetsuya Ishida and Koichi Maekawa: Time-Dependent Constitutive Model of Solidifying Concrete Based on Thermodynamic State of Moisture in Fine Pores, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (2) pp.301-323, 2006
- 8) 中村克己, 福吉孝雄, 守屋元雄: P&Z工法による月夜野大橋の施工, *コンクリート工学*, Vol.20 No.1, pp.80-89, 1982
- 9) 気象庁ホームページ: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>