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

東京大学　学生会員　○杉田　恵
東京大学　正会員　千々和　伸浩
東京大学　正会員　前川　宏一

１．研究背景と目的

複数の 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]．一般に弾性ひずみの 2-3 倍のクリープひずみを仮定し、線形クリープ則に則って設計されたものである．線形クリープ則による予測は材料試験体レベルで多くが検証されてきたが，実構造レベルでは竣工後数年程度で実測と乖離することが多く，改善の余地が残されている．コンクリートのクリープはセメント硬化体中の様々な寸法の細孔構造，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おり，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，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[2]．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~μm)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）．本研究は，DuCOM-COM3 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モデルの検証を試みる．

２．解析対象

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)を対象とした[1]．この橋梁は 4 径間有ヒンジラーメン橋である．ブロック単位で延伸しながら約半年間かけてｺﾝｸﾘｰﾄが打設されたが，今回の解析では全橋が一度に打設されるものとして計算した．

３．時間構成則の概要

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 2）．本構成則の整合性については，これまで小型供試体レベルで十分な検証を行っている[2),3)]．

４．長期クリープたわみの再現および予測結果

線形クリープ則による設計値が３年程度で実測と乖離しはじめるが，解析では実測されたクリープたわみに近似した結果を得た（図３）．竣工後約千日が経過した後にクリープ変形の進行速度が上がるが，これは地覆施工完成時に一致し、自重が最大値となった時間にほぼ相当する．数十から数百日までの間で，解析値も実測もたわみの絶対値は小さいが、前者が相対的に大きい．実橋では段階施工により各部位で材齢が異なり初期クリープ速度が異なるのに対し，解析では簡略化して一度に打設された状態を仮定したため、全橋で材齢初期のクリープ速度が一致したことに由来する．この影響は時間経過に伴い平準化する．解析では、300 年後にたわみが回復するという興味深い結果を得た．これは外気と構造体内部の空隙が平衡に接近し自己乾燥が緩和方向に向かい、かつインクボトル効果によりゲル空隙に補足されていた水分が徐々に開放された結果である[2)]．

５．　実橋のクリープ変形に与える各要因の影響（温度，湿度，体積表面積比，各空隙の水分挙動）

クリープ変形に対する温度変化の影響について検討するため，気温が一定のものであるとして解析した（図 4）．外気温度が高いほどたわみ量も大きいことがわかる．温度の上昇に伴い空隙中の水の移動が加速され圧縮縁のクリープ変形が進行するためである．相対湿度についても同様に解析した（図 5）．外気湿度が低いほど

キーワード　材料–構造連成解析，非線形クリープ，環境作用
連絡先　〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1（東京大学内）　ＴＥＬ03-5841-1774

たわみ量も大きいことがわかる．湿度の低下に伴い空隙中の水分が移動しやすくなるとともに，毛細管張力が大きくなり，圧縮クリープが進行する．体積表面積比の変化による熱力学状態の変化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い，スパンに対するたわみ量を比較した（図 6)．コンクリートの強度は断面積に比例するため，体積力と荷重と強度の比が一定になるよう各寸法において体積力と荷重を寸法の拡大率の逆数を乗じて調整した．寸法が小さいほど平衡に達する時間が早いことがわかる．寸法が小さいほどコンクリート内部と外部境界面の距離が短くなり，内部の熱力学的状態が平衡に達するまでの時間も短くなるからである．寸法が小さいほどスパンに対するたわみ量も小さいことがわかる．これは外気境界面との距離が短くなることで自己乾燥による内部湿度の低下が妨げられるからである．

６．結論

本研究は，実構造の時間依存変形を再現，予測するにはナノからマイクロメータースケールの空隙構造の特性及び熱力学状態を計算することが必要であることを示した．

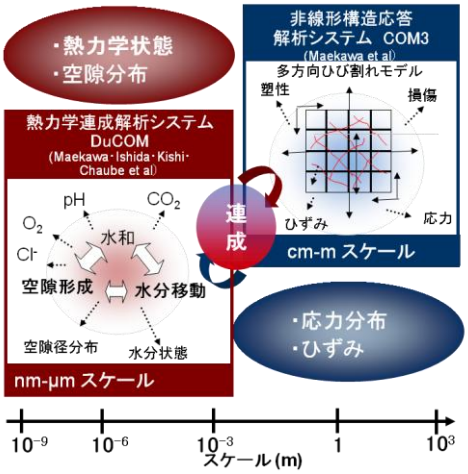

図１：DuCOM-COM3 概要

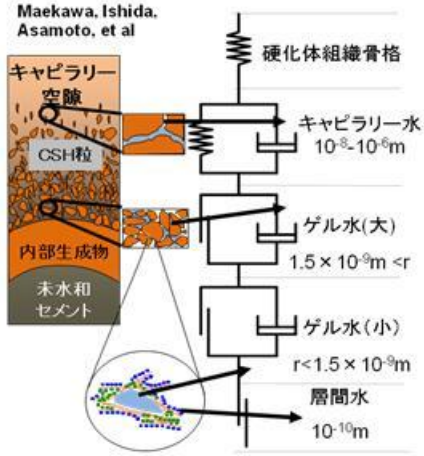

図２：時間依存構成則概要

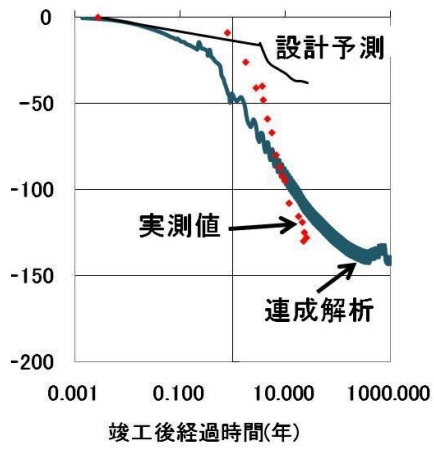

図３：たわみ再現及び予測

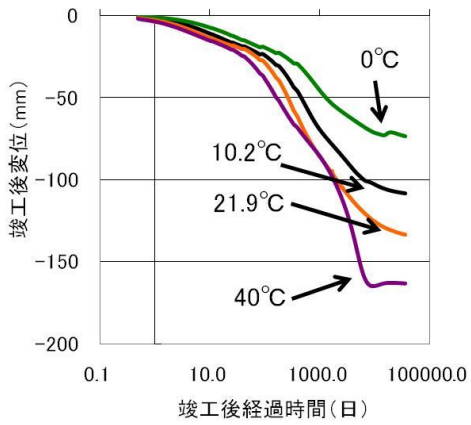

図４：気温の感度分析

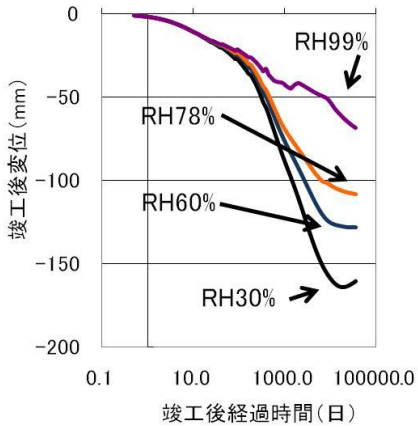

図５：湿度の感度分析

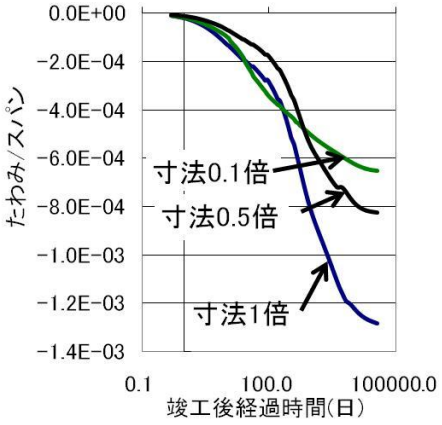

図６：体積表面積比の感度分析

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) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete: Taylor & Francis, 2009

3) 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