

## 論文の内容の要旨

### Enhanced Multi-scale Constitutive Model of Solidifying Cementitious Composites and Application to Cracking Assessment of Concrete Structures (セメント系複合材料のマルチスケール型時間依存構成モデルの高度化と 実構造物のひび割れ評価)

浅本 晋吾

コンクリートは、優れた施工性、耐久性、利便性、経済性を併せ持つ主要な建設材料の一つである。地下構造物から超長期の安全性が要求される放射性廃棄物処理施設まで用途は多岐に渡り、汎用性のある工業材料として重要性は高い。その一方で、所要の性能を確保するためには、適切な設計・施工が必要不可欠である。コンクリートの時間依存変形は、常温・常時作用応力下であっても弾性ひずみを超える程の変形を呈するという点で特徴的な挙動であり、長期の耐久性を考慮する上で精度の高い予測値が必要とされる。性能照査型設計への移行が進みつつある昨今、精度の高いコンクリートの時間依存変形予測モデルの構築は、設計・施工の合理化、また品質の高い社会基盤を実現するうえで大きな貢献をなすものと考えられる。

コンクリートの収縮・クリープ現象は、セメント硬化体の細孔構造および細孔内水分状態に大きく依存する現象であることが、既往の研究によって明らかにされている。従って、材齢、水セメント比、雰囲気相対湿度、単位水分量などに基いた様々な収縮・クリープの予測式が提案されているが、室内実験に基いた経験モデルに留まっているものが多く、任意の配合、環境条件に対応できる予測モデルは少ない。配合、使用材料、ならびに養生条件などによって異なる時間依存変形を、微視的な機構に基づき、定量的に一般表記することはこれまで困難と考えられてきた。

一方で、これまでの研究から得られた現象・機構に対する理解、および数値解析技術の進展に伴い、セメント系複合材料の微細材料モデルと、巨視的な応力・変形を与える構造モデルを直結するマルチスケール型連成解析システムが提案されている。その代表的な一つとして、東京大学コンクリート研究室での研究成果が挙げられる。材料熱力学に基づく微視的な視点と構造工学的な巨視的視点を融合・連成させ、時空間にわたって挙動を予見しうる解析システムの構築を目的としている。本解析システムで核となるのが、コンクリート材料の硬化から劣化までを追跡する熱力学連成解析システム *DuCOM* と、任意の外力下での構造応答、損傷を追跡する非線形有限要素構造解析システム *COM3* である。*DuCOM* から出力される水和・水分分布・細孔構造などの熱力学状態量に立脚した複合材料としての物性、ならびに内的・外的要因からもたらされる体積変化駆動力を構造力学解析システムに組み入れることで、巨視的な時間依存変形を得ることが可能となっている。近年の先行研究によって、統合解析システムの基盤プラットフォームは確立されており、

常温恒湿環境において一定精度の時間依存変形の予測が可能である。

以上の背景のもと、本研究では、既存の材料構成モデルの高度化と適用性の拡大を図るとともに、実際の構造物への適用を試みることを目的とした。さらに、常温・高温環境下で様々な境界条件を意図的に作り出し、モデルの基本コンセプトに関する検証実験、および高温下の水分挙動がもたらす巨視的な体積変化についても検討を行った。時間依存変形モデルのさらなる一般化、検証、実構造物への適用が本研究の柱である。

セメント系複合材料の収縮・クリープ現象は、実験室レベルにおいても 20 年以上という長期に渡って持続的に発生する特徴的な物性である。従って、長期的な変形挙動の観点から、既存モデルの高度化を図った。3 年を超える実験結果との比較を通じ、既存モデルは収縮・クリープの収束が実際より早いことが確認された。まずは単純に、変形速度を決定する既存のパラメータを調整することで、実験で見られる長期にわたって持続する時間依存挙動が表現可能であるか否か検討を行った。その結果、微視的機構に立ち返った新たなモデルの提案が必要であることが判明した。従って、各細孔に存在する水分滲出に起因する力学モデルの再検討を行った。

熱力学モデルにおけるゲル空隙の定義は CSH ゲル粒子内部に取り込まれる空隙と、隣接するゲル粒子に挟まれている微小空間の和で定義されており、これらに存在する各水分は物理的には異なる挙動を示すと考えられる。既存モデルはゲル空隙内のこれらの水分を単純に平均化して取り扱っていたが、1000 日を越える持続的な変形挙動はゲル粒子内部に存在する分子レベルの水分挙動に支配されていると考えた。すなわち、ゲル空隙内の水分滲出モデルをゲル粒子内部の滲出モデルとゲル空隙間の滲出モデルに分離してモデル化を行ったものである。提案モデルによって、常温・高温ともに収縮・クリープの長期予測は大きく改善され、その妥当性が検証された。

また、既存の粘塑性変形モデルでは、過去の応力履歴とは独立して変形が進行するモデルを採用していた。しかしながら、実際には持続応力が大きく低下すると、その後のクリープの進行は小さいことが報告されており、過去の応力履歴の影響を考慮する必要がある。そこで、応力履歴の影響を反映させるため塑性仕事の概念を導入し、粘塑性速度に経路依存性をもたせることでモデルの改良を図った。その結果、応力履歴に依存する実験の傾向が再現され、変動する作用外力下の時間依存変形についても改善がなされた。

マルチスケール複合構成モデルの特色のひとつは、毛細管張力や表面エネルギーに起因する内部応力と外部からの外部応力を連成させることで、収縮・クリープ項を分離することなく、境界条件に応じた構造応答として変形を予測できることにある。これら数理モデルの検証として、毛細管張力によるセメント硬化体中の内在収縮応力が、材料の体積変化に与える影響について実験的に検討した。乾燥後、即座に封緘を施し毛細管張力の増加を意図的に停止させ、一定内在応力下での時間依存変形挙動を観察した。結果、内在応力による持続変形は封緘前の乾燥履歴の影響を強く受け、封緘によって内部の水分が乾燥した表面に移動し平衡状態に至ると、水分移動経路に由来する相対湿度上昇によって変形の進行が阻害される傾向が見られた。短い乾燥期間(1 日)の後封緘を施すと、封緘後の収縮回復は小さくその後大きく収縮が進行した。これによって、現在の研究アプローチの妥当性が検証され、収縮はクリープ現象の一種であることが示されたのである。

さらに同様の実験を高温環境下で行い、温度の違いが体積変化にもたらす影響について検討を行った。高温環境下で封緘を施すと、収縮が大きく回復するという常温とは全く異なる挙動を呈した。これは

近年報告された高温環境下でインクボトル中の水分の逸散に起因するものと考えられ、これらの水分が逸散、再分配されることで封緘時の平均内部相対湿度が上昇し、著しく収縮が回復したと推察した。高温における特異な水分挙動を巨視的な体積変化の観点から検証することができたのである。

最後に、提案システムを PRC 道路橋に適用して、実際に発生した初期ひび割れに関する検討を行った。ひび割れにつながった各種要因について、解析的な観点から定量的検討を行ったものである。建設時の季節、コンクリートの配合、ならびに過剰な鉄筋配置が多大なひび割れをもたらす要因として挙げられ、検査報告と適合する妥当なシミュレーション結果が得られた。実構造物のひび割れ照査に本解析システムが有効に適用できることを示したのである。

以上のように、本研究では既存のコンクリート複合構成モデルの高度化・検証を図り、実際の構造物への適用を行い、より汎用性のあるモデル提案、実構造物への適用性を示した。今後の課題としては、内部湿度変化、水和反応を含めた極若材齢時の自己収縮挙動の検討などが挙げられる。また、剛性以外の骨材特性が収縮などの挙動に大きな影響を与えることが本研究で明らかになり、骨材収縮などの影響も考慮した時間依存変形のモデル化が必要である。

## Abstract

### Enhanced Multi-scale Constitutive Model of Solidifying Cementitious Composites and Application to Cracking Assessment of Concrete Structures (セメント系複合材料のマルチスケール型時間依存構成モデルの高度化と 実構造物のひび割れ評価)

ASAMOTO, Shingo  
浅本晋吾

Concrete is one of superior building materials, which has high workability, durability, utility and economy together. Recently, the application of concrete has become wider; for example, it is used in LNG tank, underground structures and the containments of nuclear power plants. In order to obtain the great performance successfully, it is indispensable to design and construct the concrete structures appropriately.

The time-dependent deformation of cementitious composites is significant and can seriously affect structural performances and service-life. It seems that the accurate prediction of the long-term shrinkage and creep deformation is of great important from the view of rational design as well as the construction of high quality infrastructures.

A number of previous researches have revealed that shrinkage and creep of concrete are associated with the state of moisture in pores. Although numerous predictive models for shrinkage and creep behaviors have been proposed based on age, water-to-cement ratio, ambient relative humidity, temperature, moisture content and others, most of them are empirical determining from laboratory experimental data. It remained rather difficult to comprehensively associate time-dependency with moisture potentials in concrete pores, because of complexity of mutually coupled chemo-physical phenomena such as cement hydration, pore structure formation and pore pressure.

In the past decade, a multi-scale, multi-chemo physical approach has been developed for moisture in concrete. The author's research group in the University of Tokyo has proposed a multi-scale constitutive model of solidifying concrete, which has been integrated into the thermo-dynamic simulator named *DuCOM*. This computational system aims to evaluate structural performances over the whole service life. By coupling the micro-chemo physical information by *DuCOM* with a structural analysis program named *COM3*, consistent simulation of shrinkage, creep and cracking is made possible under any ambient and mechanical boundary conditions. Since the driving forces of time-dependency are explicitly given, the overall deformation is not necessarily separated into components of creep and shrinkage. This means that the structural responses can be obtained directly with information on mix proportion, structural details and boundary conditions. A reasonable simulation is currently obtained under constant temperature and simple

stress histories.

The objective of this research is threefold: the enhancement, verification, and application of the multi-scale constitutive model of concrete. Firstly, it was aimed to enhance the original multi-scale and micro-chemo physical constitutive model of concrete in view of more generic temperature and moisture histories. Next, the basic concept of the model was experimentally verified under both normal and high temperature conditions. Finally, the proposed model was applied to the actual damaged structure and to analyze the influence factors. The strategy is to investigate the time-dependent deformation of cementitious materials analytically and experimentally based on microscopic mechanisms.

The continuous deformation of concrete, especially creep, needs extremely long time for convergence. It was reported that creep deformation progressed even 20 years after loading. The original model is re-examined from a viewpoint of the long-term behaviors. Through a comparison with the experimental data of long-term creep and shrinkage and a re-examination of the original model, it was found that the analytical time-dependent deformation by the original model tends to be convergent faster than the observed one and can not reproduce the reasonable long-term creep deformation. Thus, the enhanced multi-chemo-physical model for time-dependent deformation of concrete was proposed in association with thermodynamic states of moisture in micro-pores.

In thermo-dynamic oriented system, *DuCOM*, gel pores are defined as the internal pores of CSH grains and small fraction of inter-particle spaces among CSH gels, where new CSH gel grains may conditionally precipitate just at elevated temperature. Although the fictitious model idealizes the moisture migration in those pores averagely in the original model, it is supposed that the physical states of moisture in extremely fine space inside CSH gel grains are thought to be much different from that of water inside inter-particle spaces. Thus, moisture migration mechanism was divided into moisture transport through the internal pores of CSH gel grains and water in motion within the inter-particle spaces of hydrate micro-products. By installing the new component for slow moisture migration through the gel grains into the model, predictions of long-term creep deformation were improved remarkably. Coupling of the proposed model and the lasted moisture model can reasonably simulate the time-dependent deformation under extremely long-term drying at room temperature. Further, the enhanced mechanical law of stress path dependency is also introduced to cope with a wide variety of stress history. Under decreasing stress conditions, the proposed model simulates creep deformation more accurately than previous one.

Next, it was experimentally investigated whether internal stress can cause the time-dependent deformation of hardened paste, in order to verify the model concept that shrinkage can be regarded as a part of the creep phenomenon. By sealing after a short-term period of drying, a study was carried out of time-dependent deformation under sustained internal stress.

Specimens sealed after 7 and 14 days of drying recovered the shrinkage and then remained stable. Predictions using the model suggest that the recovery of shrinkage may result from the hysteresis curve of moisture transfer from the interior to the surface. When the drying period before sealing is shorter, just one day, slight time-dependent deformation was observed after sealing. These experimental results demonstrate that internal capillary force causes creep deformation and that the drying history before sealing affects the progress of the shrinkage under sealed conditions.

The same experiment was conducted at 60 °C and the same relative humidity. At this elevated temperature, shrinkage recovered significantly after sealing. It was inferred that the dispersion and redistribution of moisture trapped in inkbottle-shaped pores increases pore humidity under sealed conditions at elevated temperature and results in the large recovery of the shrinkage. Predictions obtained when the proposed model is coupled with new moisture model give reasonable agreement with experimental results. From the viewpoint of the shrinkage under sealed conditions at high temperature, it was verified that water trapped in inkbottle-shape pores disperses.

Finally, an assessment of the cracking damage to an actual RC structure was carried out with the focus on casting season. The proposed model was able to quantitatively simulate the large shrinkage of the cement paste rich concrete, as well as the numerous cracks noted in the visual inspection resulting from strong confinement by a large amount of reinforcing steel. Thus, the proposed model can be applied to actual concrete structures reasonably.

In the research presented in this thesis, the multi-scale constitutive model was enhanced analytically and verified experimentally, and then applied to the actual structures. As future plan, it is necessary to examine autogeneous shrinkage behavior at a very early age considering hydration, pore structure formation and self-desiccation. Since it was found in the study that properties of aggregate other than stiffness lead to large time-dependent deformation, it is also important that other effects such as aggregate shrinkage, particle shape and chemical bonding with cement paste are taken into consideration.