

機関番号：12601
 研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21686040
 研究課題名（和文） マルチスケール環境モデルによるセメント系材料・構造と
 自然環境の強連成解析システム
 研究課題名（英文） Multi-scale modeling of cementitious materials and structural
 concrete coupled with various environmental actions
 研究代表者
 石田 哲也（ISHIDA Tetsuya）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：60312972

研究成果の概要（和文）：

時間とともに変化するコンクリート構造物の性能を精度よく予測するために、材料構成モデルの適用範囲の拡張と高精度化を行った。混合材を使用した系における水和物の変化を考慮することで、材齢初期の硬化過程を一般的に追跡するモデルである。さらに実構造物の性能予測にとって必要不可欠な環境作用について、風洞試験ならびに現地観測を通じて機構の分析と定量化を試みると同時に、実際の変動環境下におけるコンクリートの時間依存挙動と耐久性に関する予測を行った。

研究成果の概要（英文）：

In order to predict various performances of structural concrete with time, this research aimed to enhance existing material models for wider applicability and higher accuracy. Through its enhancement, early age development process of cement and mineral admixtures can be predicted in a unified manner. In addition, environmental actions have been quantified by a wind tunnel experiment and on-site measurement so that the proposed simulation system can be applied to a concrete structure in real complex environmental conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2010 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
年度			
年度			
年度			
総計	20,900,000	6,270,000	27,170,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート、耐久性、飛来塩分、マルチスケール、環境作用、高炉セメント、細孔構造

1. 研究開始当初の背景

研究代表者が所属する研究室では過去 20 年来、無機複合材料とコンクリート構造のマルチスケール解析システムの開発に取り組んできた。実験室環境など、初期条件ならびに境界条件が制御された条件での材料と構

造の振る舞いについては、かなりの精度で予測・追跡することが可能となってきた。

一方で、様々な環境条件で使用される構造物の性能を精緻に把握するためには、構造物を取り巻く環境作用を定量化することが不可欠である。材料モデルの精度と適用範囲が

拡大しつつある状況において、周辺の境界条件を適切に取り扱うことが、構造物の性能照査技術の高度化に向けて必須の課題であるといえる。そのような背景から、本研究課題を進めることとした。

2. 研究の目的

本研究は構造物を取り巻く自然環境条件の把握、定量化と、そのもとでのコンクリート構造物の振る舞いを高度化することを目的とする。そのために、無機複合材料 (10^{-9} ~ 10^{-4} [m]スケール) -コンクリート構造 (10^{-3} ~ 10^1 [m]) -地圏, 水圏, 大気圏を含む周辺環境 (10^2 ~ 10^6 [m]) の相互作用を考慮可能なシステムへと展開を図るものである

3. 研究の方法

- (1) 構造物の耐久性を損なう飛来塩分の発生、輸送、付着、浸透の各プロセスに着目し、風洞試験ならびに現地観測によって、飛来塩分の浸透機構を明らかにするとともに定量評価手法の構築を行う。
- (2) 塩化物イオンに対して浸透抑制効果があることが知られている高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの物性を高精度に予測するために、水和反応、空隙構造、強度発現に関するモデル化を行う。
- (3) 気温、湿度や雨かかりに代表される自然環境条件と、コンクリート構造物の使用性(たわみ)ならびに耐久性(中性化進行)の相互依存性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 風洞装置を用いて飛来塩分の発生・輸送・付着・浸透の一連のプロセスを再現し、モルタル供試体内部に浸透する飛来塩分の浸透機構の解明を試みた。風速や風向、飛来塩分の発生を制御することのできる環境を作り出すために風洞を作製した。概要を図1に示す。ファンの近傍に水槽を設置し、水槽底面に設置した気泡発生装置により水面から塩水粒子を発生させ、ファンの風で輸送させることで飛来塩分を再現した。

供試体表面に到達する塩分量と内部に浸透する塩分量を比較したところ、断続的に塩水粒子が噴霧される状況において、相対的に多くの塩化物イオンが内部に浸透することが明らかになった。一方で、持続して塩水噴霧の作用を受ける場合や塩水浸せき時には、塩化物イオンが内部に浸透する速度が低下するという結果が得られた。すなわち、表面の乾燥状態が保持されたまま飛来塩分が作用する環境において、内部への浸透が多くなる現象が実験的に示された(図2)。

続いて、飛来塩分の発生と輸送、および構造物への付着と内部浸透を一気通貫で取り扱うマルチスケール環境モデルの検証に資

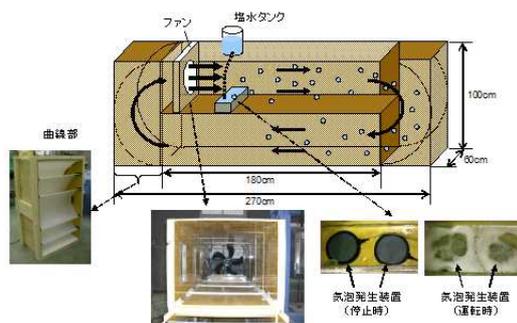


図1 本研究で作製した風洞試験装置

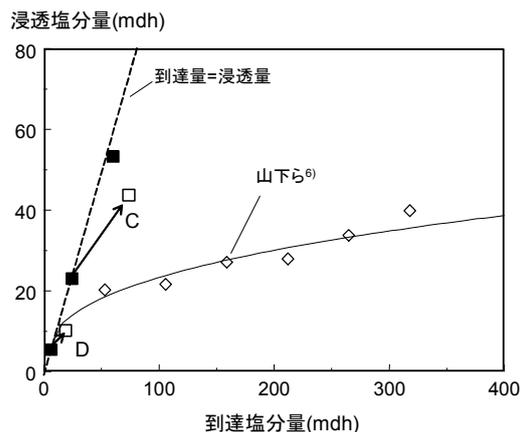


図2 コンクリート表面に到達する塩化物イオン量と内部への浸透塩化物イオン量の関係

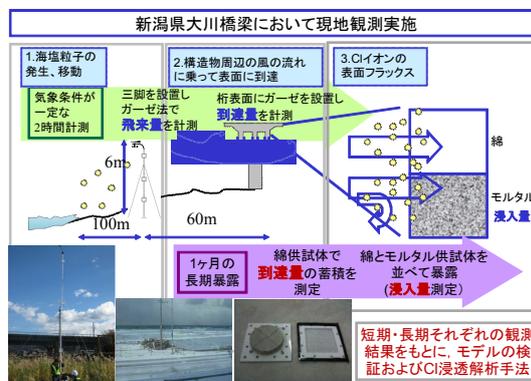


図3 新潟県大川橋梁における現地観測の概要

するために、新潟県大川橋りょうを対象として現地観測を実施した(図3)。およそ2時間の短期計測を月ごとに行った結果、小窪らの既往研究による飛来量予測モデルを用いて、現地の観測値を概ね再現できることを明らかにした。同時に、風向や風速ならびに波浪条件によって構造物近傍への飛来塩分到達量は部位によって大きく異なる傾向を示すことが明らかとなった。またモルタル片と綿を同一環境に置いた1ヶ月間の暴露試験を実施した結果、雨雪による洗い流し効果が無い場合には、到達量と浸透量がほぼ等しくなる

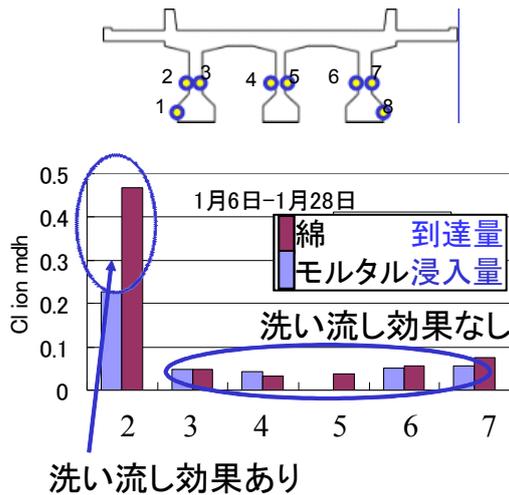


図4 構造部位ごとの到達塩分量と浸透塩分量の関係 (1月観測の例)

ことが分かった (図4)。

(2) 塩化物イオンに対して浸透抑制効果があることが知られている高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの物性を高精度に評価するために、水和による自己乾燥および自己収縮の程度と、材齢初期における強度発現の関連について実験的検討を行った。高炉セメントB種として分類されるセメントを複数取り寄せ実験を行った結果、セメントの種類によって強度発現性状と自己収縮の関連に大きな相違があることが分かった。すなわち初期の強度発現が大きい場合、それに応じて自己収縮量も増大することが明らかとなった。材料設計の観点から、耐久性を損なう初期ひび割れを低減するための考え方を示唆する貴重な実験結果を得た (図5)。

さらに高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの物性を高精度に予測するために、材料特性を左右する水和反応や微細構造形成モデルの高度化を行った。X線回折リポートベルト法を高炉セメント硬化体に対して適用し、セメントと高炉スラグ微粉末の2成分系での水和反応を定量化したうえで、微細空隙構造の測定を行った。その結果、高炉セメントの生成するC-S-Hのキャラクターがポルトランドセメントの系と大きく相違し、C-S-Hの保持するゲル水の割合が全水和過程を通じて一定ではなく、水和後期において増加することを本研究で初めて見出した。その結果に基づき、高炉セメントの空隙構造形成モデルに対して、C-S-Hの保有空隙率をスラグの水和の進行とともに増加させる新たなパラメーターを導入し、高炉セメントの空隙構造の微細化や長期強度の増進に関する現象を定量的に再現することに成功した。

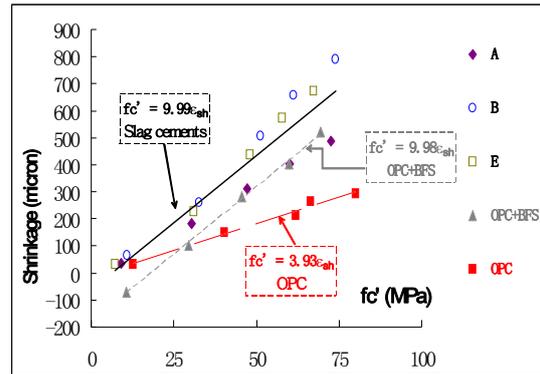


図5 異なる高炉B種セメントの強度と自己収縮の関係

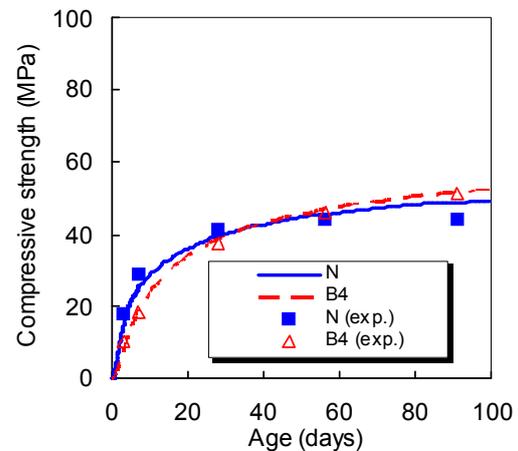


図6 普通ポルトランドセメントならびに高炉セメントを用いたモルタルの強度発現予測

(3) 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 (図7)。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。さらに部材内部の熱力学分布をコントロールすることで、コンクリート構造物のたわみを制御する可能性について、実験を通じて実証することができた。

外部環境条件とコンクリート構造物の耐久性の関連について検討するために、外部環境に晒される既設構造物の中性化深さにつ

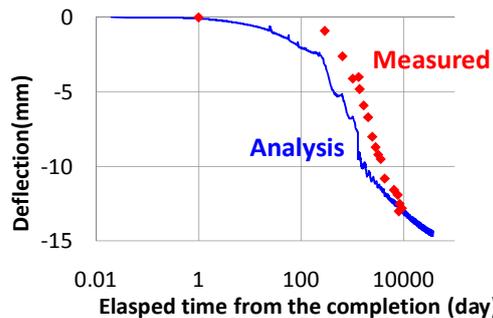


図7 PC橋の長期たわみの実測値と解析結果の比較

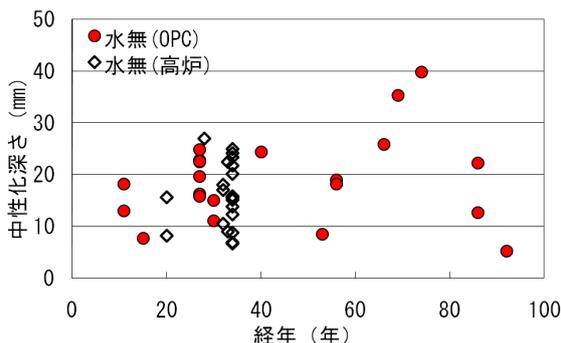


図8 セメントの種類が与える中性化深さへの影響

いて調査を行った。調査の結果、実環境での中性化深さはコンクリート表面における雨水等の水の影響が顕著であることがわかった。また、普通ポルトランドセメントを使用したと推定されるコンクリート構造物と、高炉セメントを使用したと推定されるコンクリート構造物の中性化深さに大きな差が無いことがわかった(図8)。その一方で、調査を行った構造物から採取したコアを用いて促進中性化試験を行ったところ、高炉セメント使用コンクリートが普通ポルトランドセメント使用のコンクリートに比べ中性化が早い結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① 石田哲也、堀切寛、風洞試験によるモルタル内部への飛来塩分浸透機構の解明、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、9巻、2009、91-96
- ② Januarti Jaya EKAPUTRI、Amiltra BONGOGHETSAKUL、石田哲也、前川宏一、Internal Relative Humidity Measurement on Moisture Distribution of Mortar Considering Self-Desiccation at

Early Ages、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、31巻、2009、643-648

- ③ Januarti Jaya EKAPUTRI、石田哲也、前川宏一、Autogeneous Shrinkage of Mortars Made with Different Types of Slag Cement、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、32巻、2010、353-358
- ④ 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報告集、査読有、32巻、2010、407-412
- ⑤ Yao LUAN、石田哲也、Modeling of Moisture Loss and Shrinkage Behaviors of BFS Concrete Based on Enhanced Pore Distribution Model、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、32巻、2010、413-418
- ⑥ 松田芳範、上田洋、石田哲也、岸利治、実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、32巻、2010、629-634
- ⑦ 佐川孝広、石田哲也、Yao Luan、名和豊春、高炉セメントの水和組成分析と空隙構造特性、土木学会論文集 E、査読有、66巻、2010、311-324
- ⑧ 石田哲也、数値解析技術を用いた既存構造物の状態・性能予測、査読無(依頼寄稿)、コンクリート工学、48巻、2010、128-131
- ⑨ 千々和伸浩、石田哲也、前川宏一、コンクリートの微細空隙中の水分とPC橋の長期変位報告、査読無(依頼寄稿)、橋梁と基礎、2011、38-41

[学会発表] (計3件)

- ① Tetsuya ISHIDA、Yao LUAN、Takahiro SAGAWA、Toyoharu NAWA、Modeling of Strength Development of Blast Furnace Slag Concrete based on Micro-physical Properties、CONMOD 10、2010.6、EPFL、Switzerland
- ② 山本聖輝、石田哲也、熱力学境界条件の操作によるコンクリート構造の時間依存変形制御、第65回土木学会年次学術講演会、2010.9、北海道大学
- ③ Tetsuya ISHIDA、Multi-scale Modeling of Concrete Performance - Toward a lifespan simulation of reinforced concrete structure、招待講演、Lafarge International Workshop、2010.7、Lyon、France

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0 件)
- 取得状況 (計0 件)

[その他]
ホームページ等

<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/mem/ishi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 哲也 (ISHIDA Tetsuya)

研究者番号 : 60312972

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :