

委員会報告 セメント系材料の時間依存性挙動に関する研究委員会

田辺 忠顯^{*1}・阪田 憲次^{*2}・三橋 博三^{*3}・前川 宏一^{*4}・佐藤 良一^{*5}・中村 光^{*6}

要旨: 本研究委員会は、セメント系材料を含めて準脆性摩擦材料のクリープ、乾燥・自己収縮、耐久性等に関する力学的なメカニズム、モデリング、これらの知見に基づく体積変化の推定方法の改善とその利用方法を提言することを目的として活動を行った。委員会では、上記目的を達成するため、①コンクリートのナノ空隙構造とクリープ、乾燥・自己収縮との関係を明確化、②構造設計のためのクリープ、乾燥・自己収縮の推定モデルの比較考察ならびに精度向上、③耐久性に影響を及ぼす劣化現象の力学的侧面からの体系化、等の調査・検討を行った。

キーワード: クリープ、収縮、微細空隙構造、マルチスケール、マルチフィジックス、耐久性力学

1. はじめに

コンクリートのクリープ・収縮などによる体積変化の問題は、材料的側面から見れば、セメント系材料としての材料レベルの化学-物理現象として生じるものであり、コンクリート材料の本質そのものと密接に関係する。一方、構造的側面からは、コンクリートが主に長期供用を期待される社会資本構造物に使われることから、予定供用期間中の体積変化が構造特性に与える影響は、設計における最も重要かつ基本的な観点である。このような材料・構造側面の結合した成果の一つが、プレストレストコンクリートであり、橋梁構造工学とクリープ・乾燥収縮というコンクリート材料科学が結合して、今日の発展と利用があるといえる。近年ではコンクリート構造物の大きな問題の一つとして耐久性の議論が活発に行われるようになっているが、コンクリート構造物の劣化の問題に真正面に向き合うには、クリープ・収縮を含むコンクリート構造に関する時間依存挙動における材料・構造側面の融合が必要とされる。

近年、コンクリートを代表とするセメント系材料を対象とした研究の方向性の一つとして、ナノレベルの空隙構造や、その中で生じている化学反応・熱力学状態および変形が論じられるようになってきた。また、物質移動に関しても単相モデルでの取り扱いから気相・液層の複相モデル（それらの相互作用も考慮する）へと進化しつつある。今後は分子動力学的な取り扱いも視野に入って来ると考えられる。このように、時間依存挙動に関する問題は、マルチスケール・マルチフィジックスの問題として一層深化していくことで、コンクリート材料の発展

とその有効利用、コンクリート構造物の各種問題を解決していくことが期待される。

そこで本研究委員会は、セメント系材料を含めて準脆性摩擦材料の時間依存性挙動を様々な観点から取り上げ、調査・研究活動を行った。また、本研究委員会は、2008年に日本で行われる国際会議 CONCREEP8 (第8回コンクリートとコンクリート構造物のクリープ、収縮及び耐久性力学に関する国際会議) の組織委員会も兼ねた。以下では、研究委員会の成果ならびに CONCREEP8 の概要を報告する。

2. 委員会活動の概要

本委員会では、3つのワーキンググループを設置し、時間依存性挙動を様々な観点から検討した。

WG1 (主査: 三橋博三 (東北大学)) は、ミクロ構造のメカニズム、モデリング WG であり、ミクロ構造のメカニズム、対象寸法に対するモデリング、計測技術について調査・検討を行った。

WG2 (主査: 阪田憲次 (岡山大学)) は、設計コード式 WG であり、クリープおよび乾燥収縮ひずみに関する我が国のデータベースの構築を行い、時間に依存する収縮が要因となる設計の精度の現状の把握や、これから必要となる研究の展望について検討を行った。

WG3 (主査: 佐藤良一 (広島大学)) は、耐久性力学 WG であり、RC構造物の建設から供用までに進行する各種劣化現象について、時系列上での化学的-物理的相互作用に着目した機構の整理を行い、個々の劣化現象に、その相違に拘わらず共通して適用できる理論を抽出す

*1 中間法人社会基盤技術評価支援機構・中部 専務理事 工学博士 (正会員)

*2 岡山大学大学院 環境学研究科 教授 工学博士 (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 教授 工学博士 (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 工学博士 (正会員)

*5 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 教授 工学博士 (正会員)

*6 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

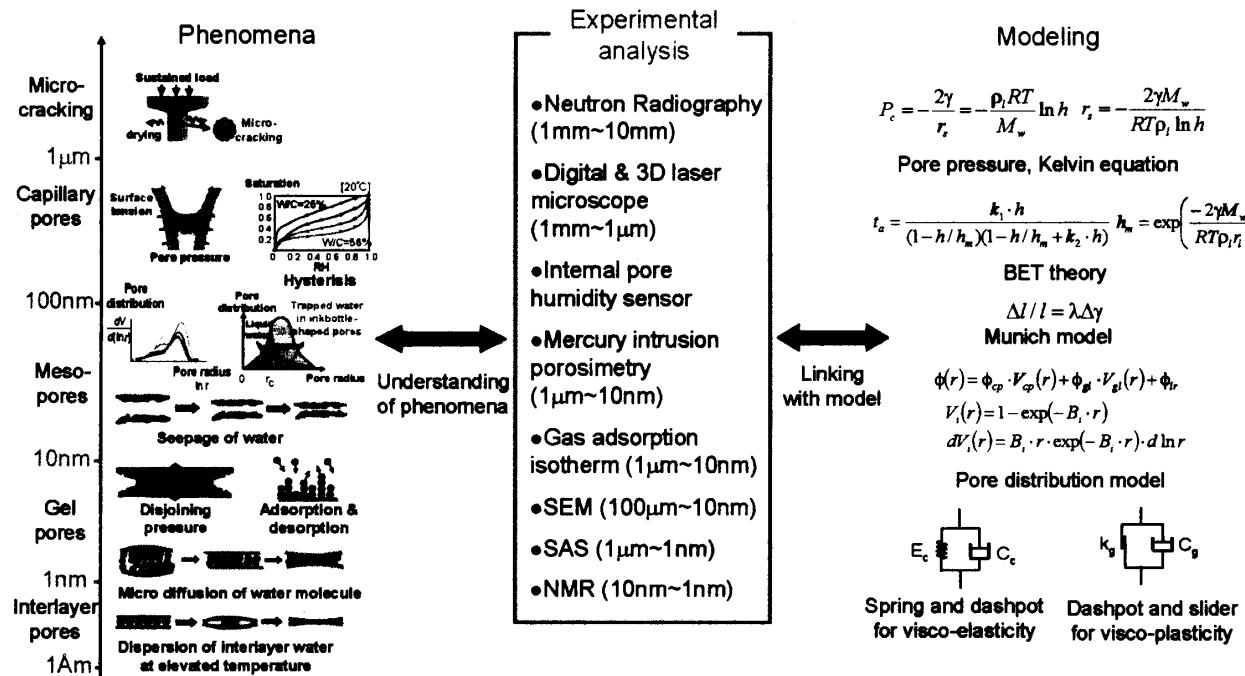


図-1 各スケールにおける現象とそれを計測する技術、予測するモデル手法

ることで、劣化現象とその評価手法の体系化を実現するための調査・検討を行った。

以下では各 WG ごとの検討概要を紹介する。

3. ミクロ構造のメカニズム、モデリング WG

WG1 では、ナノメートルからメートルスケールまでのマルチスケールの各階層で展開される事象に着目し、各々を取り扱う SWG(サブワーキンググループ)を設け、セメント系材料の時間依存性挙動に関する国内外の解析モデルの比較、最新計測技術の適用性について検討した。上述のように、材料の化学、物理的な時間依存性現象がクリープ、収縮に大きく影響するため、これら微視的な事象を把握するための計測技術、材料モデルの動向を調査した。さらに、ミクロな時間依存性挙動がもたらす巨視的な体積変化、変形、損傷を分析する最新の解析技術についてまとめた。

ミクロな事象について検討を行った SWG では、欧米の水和反応、空隙構造形成モデルと日本の解析モデルの現況を概説し、これらから得られる微視的な情報をもとに、収縮、クリープ挙動を予測する最新のマルチスケールモデルについて調査を行った。実験から得られるデータと解析パラメータを結びつける理論、仮定についてまとめ、モデル化の立場から必要となるミクロな情報について検討を行った。セメント系材料の時間依存性挙動を支配する各々のスケールで発生する事象、およびそれをモデル化するのに必要な情報をまとめると図-1 のようになる。本検討を踏まえ、最新計測技術を用いた近年の研究事例、その適用性について調査した。

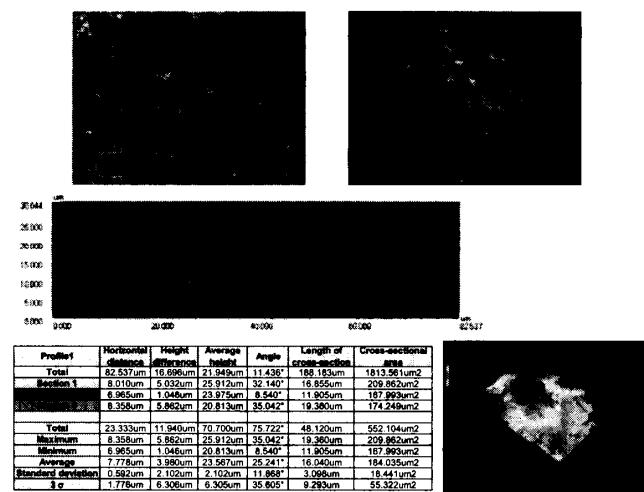


図-2 3D レーザー顕微鏡を用いた硬化セメントペーストの表面観察例

セメント系材料の時間依存性挙動は空隙内部の水分状態に大きく影響を受けるため、水分が存在、移動する状態でのミクロな現象を計測する技術について検討した。近年のレーザー顕微鏡、デジタルマイクロスコープは、数千倍の高解像度で前処理をせず非接触で試料の直接観察が可能であり、測定区分の水平距離、高度差を計測する技術（図-2）も開発され¹⁾、マイクロメートルスケールの現象の把握、経時変化の計測が期待される。また、図-3 に示すように、中性子ラジオグラフィを利用し、コンクリートのひび割れ部およびマトリックス中に移動する水分挙動を可視化、定量化する技術も研究されている²⁾。ナノメートルスケールの空隙構造、水分挙動の情報については、核磁気共鳴（NMR）：

Nuclear Magnetic Resonance) や微小角散乱 (SAS : Small-Angle Scattering techniques)などの計測技術によって徐々に分析が進められているものの、明確な結論には至っていないのが現状である。ナノレベルの現象観察には先端的な計測技術の開発が課題と考えられ、ミクロな事象を扱う化学、ナノテクノロジーなど他の学問分野の研究との一層の意見交流、連携が必要である。

マイクロからミリメートルレベルの事象を議論した SWG では、近年国内でクローズアップされた骨材特性がコンクリートの乾燥収縮等の時間依存性に及ぼす影響とモデルの現況についてまとめた。さらに、マスコンクリートの熱応力解析を最も有効に活用しているのが日本であることを踏まえ、国内の温度ひび割れの照査手法、

マスコンクリートのひび割れ以後の鉄筋等によるひび割れ制御設計と解析³⁾について、主として実務的な観点から紹介した(図-4)。

メートルスケールの構造部材としての時間依存性挙動を検討した SWG は、収縮やクリープによるひび割れ発生以後のたわみ、高応力下の非線形クリープと破壊、時間依存性と高サイクル疲労繰り返し荷重の複合など最新構造解析モデルについてまとめた。図-5 に示すように、材料解析から得られる乾燥状態に応じた局所的な自由収縮ひずみの情報を各要素に反映させ、収縮ひび割れなど初期欠陥を考慮した非線形構造解析が可能となつており、今後の発展が期待される。

以上のように、WG1 では、各スケールの現象をつなぐ

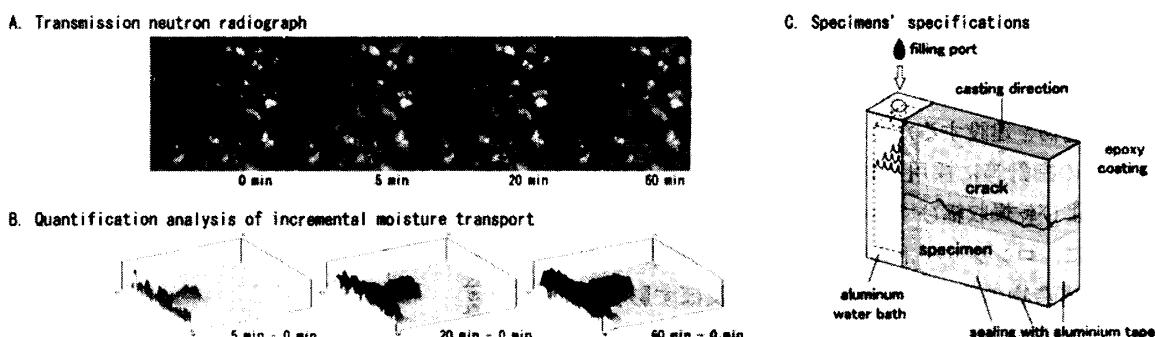


図-3 中性子ラジオグラフィを用いた 0.05mm のひび割れ幅内の水分移動の観察 (W/C=0.5)

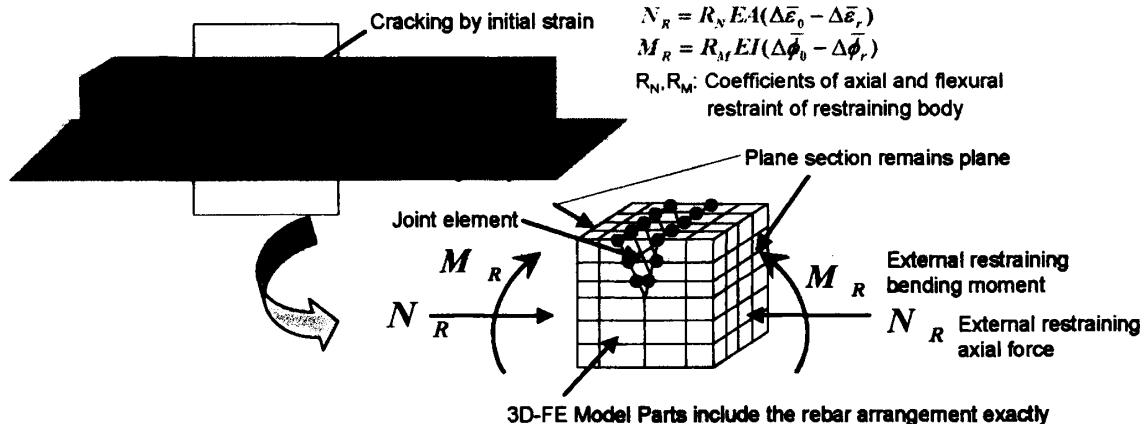


図-4 ハイブリッド CP/FEM 法の概念

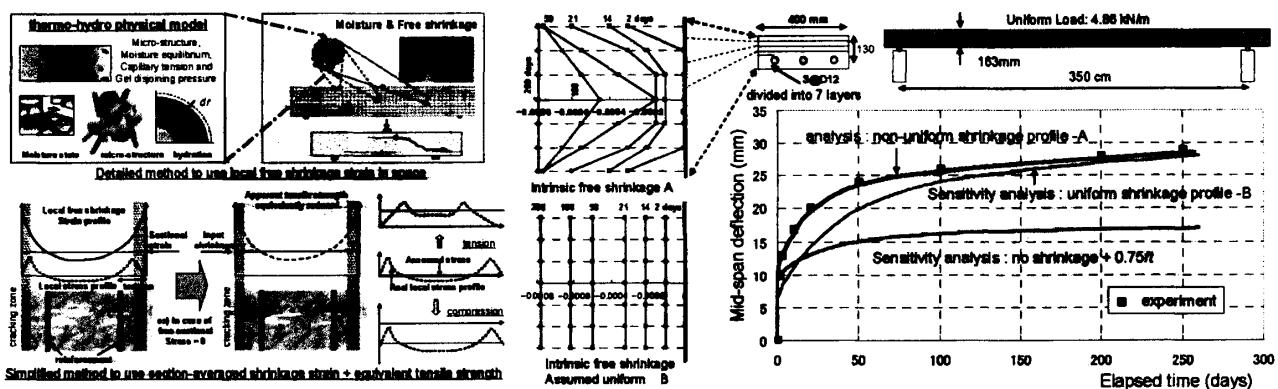


図-5 材料モデルと非線形構造解析モデルの融合例⁴⁾

視点で、ミクロな材料領域から構造部材までの時間依存性挙動についての最新の研究成果とそれに関連する計測技術について取りまとめた。

4. 設計コード式 WG

コンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみは、コンクリート構造物の長期にわたる変形挙動や耐久性に大きな影響を及ぼす。プレストレスコンクリートにおける有効プレストレス力の減少、コンクリート構造物の耐久性を損なわせる原因となるひび割れ、時間とともに増加するコンクリート部材のたわみ、使用荷重下における鉄筋とコンクリートの間での応力の再配分の問題等、実構造物の設計において、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみの影響を考慮する場面は数多くある。従って、クリープおよび乾燥収縮ひずみの影響を正確に理解し、設計時にこれらの値を計算することのできる予測式が、安全で、耐久的、かつ高い供用性をもつコンクリート構造物を建設するために必要となる。

国内外の指針等に採用されているコンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみの予測式は、多くの実験データを基に、コンクリートの調（配）合や、強度、コンクリート構造物の置かれる環境条件等が及ぼす影響を変数とした関数の形で与えられている。実験データを近似した予測式は、設計段階で得られるデータから、長期にわたって生じるクリープおよび乾燥収縮ひずみを予測できる点で実用的であるとともに汎用性は高いが、必ずしも高い予測精度があるとはいえない。

海外における代表的な予測式としてはCEB-FIP1990式やACI209式等が挙げられるが、これらの予測式は、使用するコンクリート材料の違いにより、日本国内の実験データよりも小さい予測結果になる傾向のあることが指摘されている。このような背景より、我が国的事情に

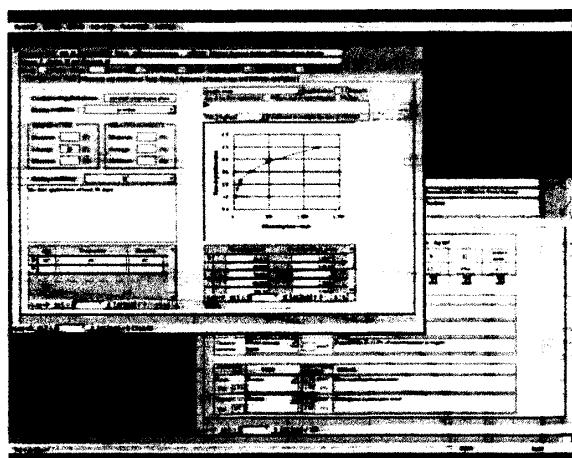


図-6 設計コード式WGで構築したデータベース
(実験室レベル)

あつた予測式が提案され、土木学会および建築学会に採用されたものもある。

種々提案されているコンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみの予測式の精度の検証を行うためには、信頼できる実験データの蓄積が必要である。このような観点から、土木学会では、JSCE308(1995-2000、阪田委員長)とJSCE320(2000-2003、椿委員長)において、実験室レベルのコンクリートのクリープと乾燥収縮ひずみに関するデータベースの開発が行われている。建築学会においても、2006年に「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」を刊行しているが、その執筆を担当した収縮ひび割れ研究小委員会(三橋主査)において、建築学会などに投稿された論文等から実験データの収集を行い、データベース化が行われている。

設計コードWGでは、これらのデータベースを維持し、さらに、日本国内で実施されたコンクリートの時間依存

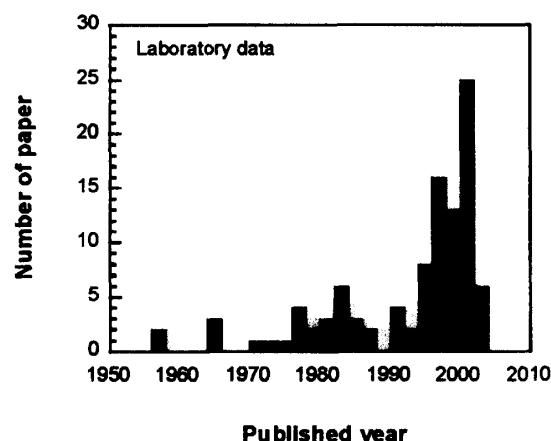


図-7 実験室レベルのデータを引用した論文の発行年範囲

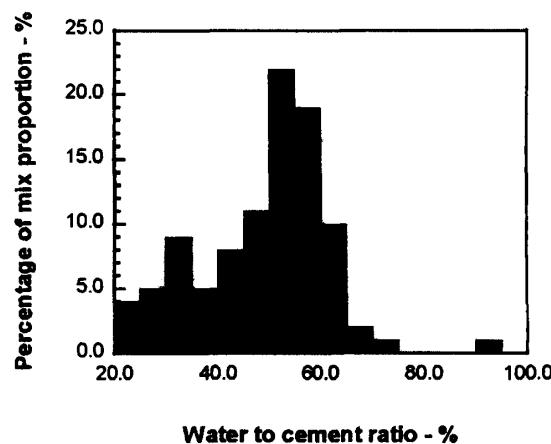


図-8 実験室レベルのデータベースに収録されているコンクリートの水セメント比の範囲

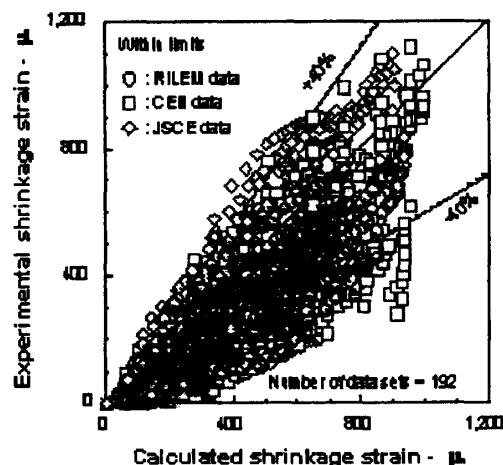


図-9 乾燥収縮ひずみ予測式の精度の現状

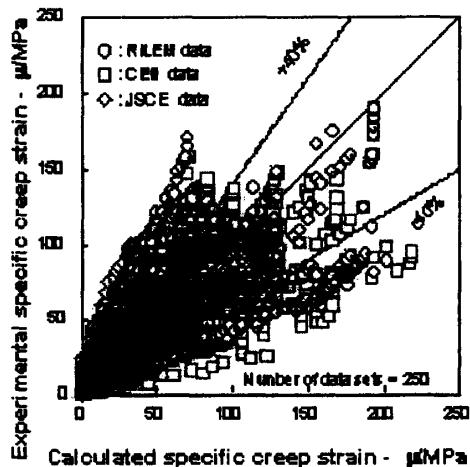


図-10 クリープ予測式の精度の現状

性挙動に関する代表的な論文を海外に紹介することを目的に、土木学会および建築学会において収集し整理されたデータベースを統合するとともに、さらに日本国内で発表された論文を対象にデータを収集し、収録データの充実も図ったデータベースの構築を行った。また、RILEM 等のデータベースとの関連性を考慮し、海外の研究者や技術者が利用できるものとするため、引用した論文の著者、タイトル、論文名、キーワード、アブストラクトは、全て英訳を行い、それらも参照できるシステムとしている。図-6 に、本ワーキングで作成したデータベース（実験室レベル）の表示例を示す。本データベースには、データの抽出機能をもたせており、例えば、単位水量の範囲および水セメント比の範囲を設定すれば、その範囲の調（配）合のコンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみの実験データが表示され、さらに、そのデジタルデータを活用できるものとなっている。

実験室レベルのデータベースを構築するために引用

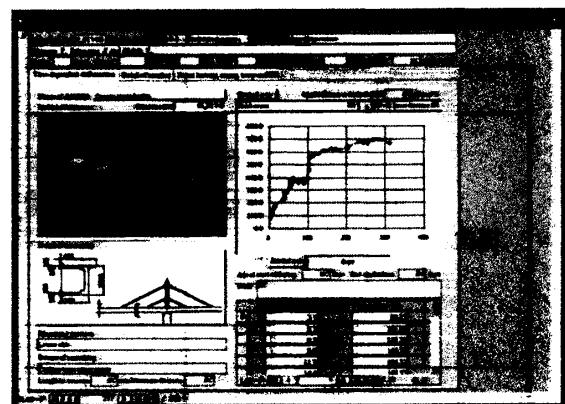


図-11 実構造物レベルのデータベース

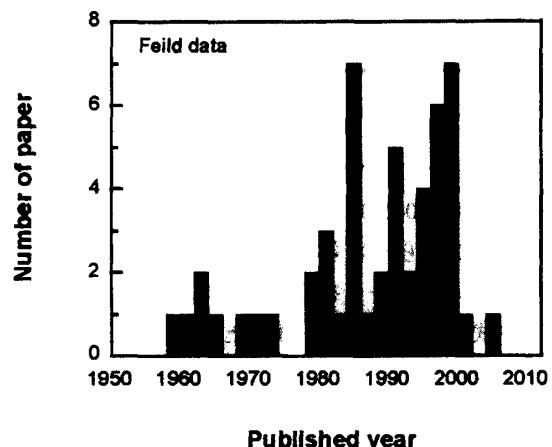


図-12 実構造物レベルのデータを引用した論文の発行年の範囲

した論文数は、116編であり、その発行年は、図-7に示されるように、2000年前後のものが多い。土木に関すると思われる論文は47編で、建築に関すると思われる論文数は69編である。これらの論文から収集したコンクリートの配合数は、771種類で、図-8に示すように、高強度から一般の強度の配合のものが含まれている。測定期間とクリープまたは乾燥収縮ひずみの経時変化の関係を1セットとしたデータ数は、クリープに関するものが367セットで、乾燥収縮ひずみに関するものが687セットである。日本国内で発表された論文のみから、1,000を超えるデータを整理、蓄積した。また、設計コード式WGでは、このデータベースを活用し、図-9および図-10に示すように、FIB, ACI, JSCEおよびAIJの予測式の精度を照査し、予測精度の現状と課題を示した。

設計コード式WGでは、実験室レベルのデータを収集したデータベースとともに、実構造物で計測されたクリープ、たわみ、乾燥収縮ひずみを収録したデータベースも構築した。実構造物のデータを収集するために引用した論文数は52編で、これらの論文に関しても、著者、

表-1 実構造物の種類

種類		個数
橋梁	桁	48
	T型桁	10
	I型桁	30
	長方形断面	2
	中空床板	10
	橋脚	1
床板		1
壁		8
ダム		3
ボックスカルバート		1
合計		114

タイトル、論文名、キーワード、アブストラクトは、全て英訳を行っている。実構造物に関するデータは、JSCE320（2000-2003、権委員長）で蓄積された成果を引き継ぎ、これらをさらに充実させたものである。なお、図-11に示すデータを公開するためのシステムは、設計コード式WGで新たに作成したものである。コンクリート構造物の時間に依存する変形挙動に関するデータに加え、構造物の写真、断面の詳細も掲載している。実構造物レベルのデータベースを構築するために引用した論文の発行年は、図-12に示すように1950年代から2000年代以降のものを含んでいる。構造物の種類は、114種類で、その多くが表-1に示されるように橋梁である。実構造物レベルのデータベースに収録したデータ数は、362セットで、計測されたデータの種類を表-2に示す。実験室レベルで収集されたデータと併せて実務において活用されることが望まれる。

5. 耐久性力学WG

耐久性力学WGでは、佐藤良一主査（広島大学）、下村匠幹事長（長岡技術科学大学）、丸山一平幹事（名古屋大学）、半井健一郎幹事（群馬大学）と12名の委員で調査・研究活動を行い、2007年12月21日に、WG活動の国内における中間報告として「耐久性力学に関するシンポジウム」を開催し、「コンクリート構造物の耐久性力学」⁹⁾を発刊した。

5.1 本WGの目的と「耐久性力学」の定義

コンクリート構造物の合理的な設計・施工・維持管理を推進するためには、時間経過とともに変化するコンクリート構造物の性能を、適切な物理化学モデルで評価し、予測することが必要である。特に、材料と構造の両者の相互作用を考慮することが重要である。そこで本WGでは、2001年の第6回CONCREEP会議においてUlmらが

表-2 計測データの種類

種類	個数
全ひずみ	211
クリープひずみ	51
単位応力あたりのクリープひずみ	2
クリープ係数	22
乾燥収縮ひずみ	30
弾性ひずみ	12
たわみ・そり	27
変位	3
その他	4
合計	362

インフラストラクチャーの深刻な崩壊を防ぐことを目的として提唱とした「Durability Mechanics」の概念¹⁰⁾を参考にし、日本版「耐久性力学」を新たに定義することによって、コンクリート構造物の性能評価の体系化の実現を目指すこととした。本WGで提案する耐久性力学の定義は、「水和・環境・外力等によるセメント系材料の変質・劣化現象の時系列上での進展を、反応・移動・破壊およびそれらの相互連成を考慮した物理化学モデルにより記述するとともに、コンクリート構造物の性能の経時変化への影響を構成則で記述することで、材料・構造に関する時間依存性問題の体系的な予測と評価を実現する学問体系」とした。この定義は、Ulmらが提唱した「Durability Mechanics」に関する提案を包含するものであるとともに、学問領域としての具体性を付与したものである。この定義に基づき、収縮やクリープのみならず、鉄筋腐食、凍害、ASRなどの広範な劣化現象を対象として、最新の研究動向を整理し、それらの評価システムの枠組みを提示することとした。

5.2 「耐久性力学曼荼羅」の作成

耐久性力学の概念に基づき体系化された全体像を具現化するものとして、セメント系材料に起こる様々な事象の相関関係を示した、耐久性力学における相互連関図「耐久性力学曼陀羅」を作成した（図-13）。本図は、練混ぜ、運搬、打込みの製造および施工から供用期間中にコンクリート構造物に関する、セメントの水和反応を初めとした化学反応、各種相変化や平衡関係、諸現象を記述可能な支配方程式とそこに関わる諸物性、特徴的なコンクリートの状態量、外部環境との物理・化学的なやりとりについて取り纏めたものである。

5.3 「耐久性力学」に関わる劣化機構の分析

本WGでは、コンクリートや鋼材という材料そのものの劣化のみならず、コンクリートにひび割れを生じさせることによって構造性能を低下させる要因を含め、水和

耐久性力学 曼荼羅

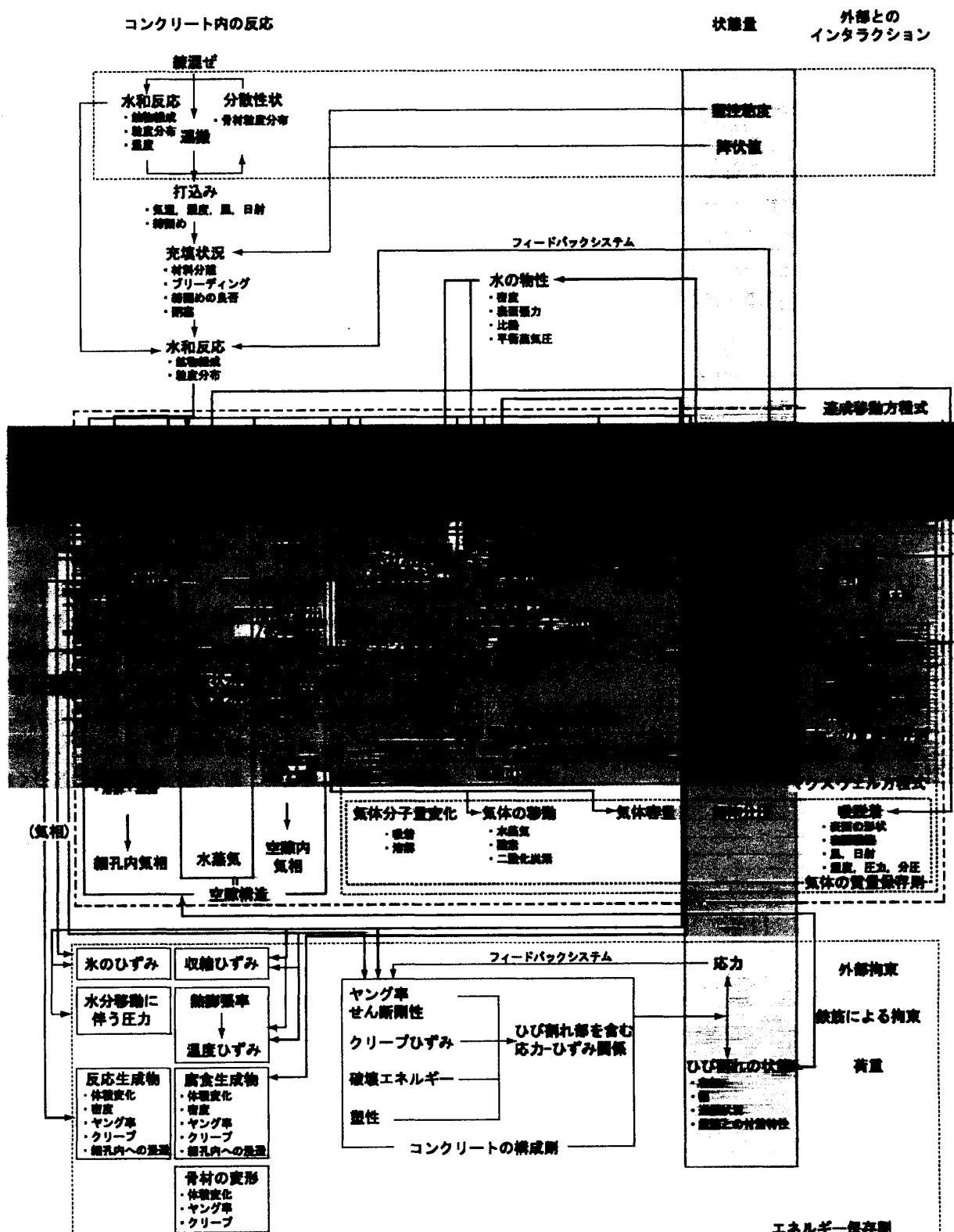


図-13 耐久性力学における相互連関図「耐久性力学曼荼羅」

熱, 自己・乾燥収縮, 鋼材腐食, ASR, 溶脱, 化学的侵食, 外気温変動, 凍害, 日射, 荷重作用, クリープを検討対象とした。まず, それぞれにおけるコンクリート構造物の劣化, および関連するコンクリートの諸現象に関

して, メカニズムを記述するとともに, 耐久性力学における位置付けを相互連関図「耐久性力学曼荼羅」との関係から整理した。たとえば, 鋼材腐食であれば, 劣化機構を説明するフロー(図-14)に基づき, 「耐久性力学曼

荼羅」上で耐久性力学における位置付けが明確化される（図-15）。

5.4 「耐久性力学」に関するモデルの分析

国内外の文献を収集し、耐久性力学を構成する支配方程式とその支配方程式を構築する上で必用となる諸モデルを整理した。特に、耐久性力学という概念に関わる時間依存性の性能変化の評価モデルに力点を置いた。収集したモデルは、①物質の生成・変化・消費、②物質移動、③体積変化・変形・応力ひび割れに関する基本モデルに分離して整理することによって、「耐久性力学曼荼羅」に示された諸々の現象と対応させることとした。

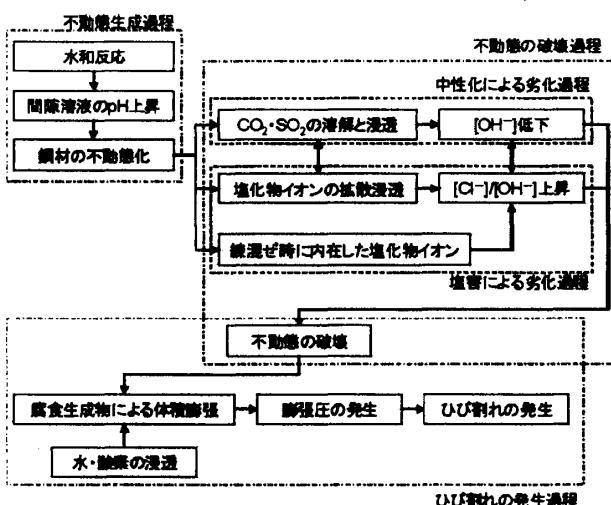


図-14 鋼材腐食による劣化機構のフロー

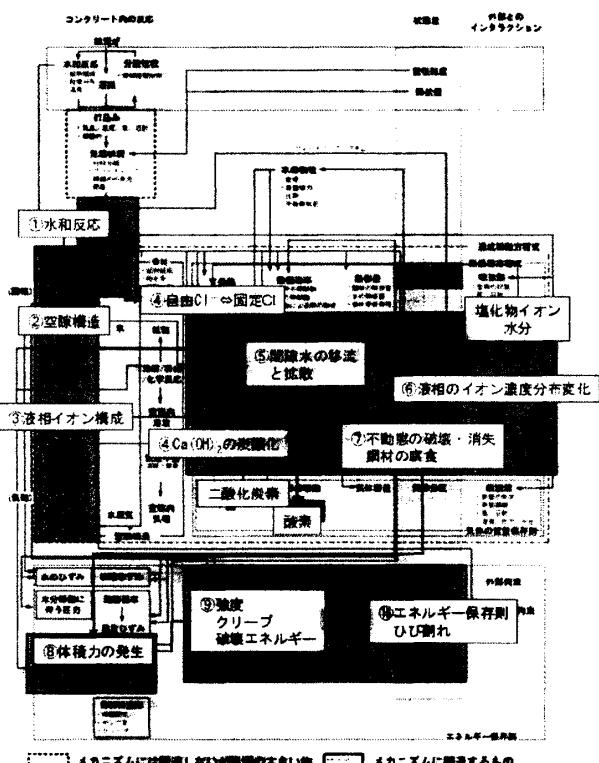


図-15 鋼材腐食に関する耐久性力学

その上で、前述した劣化機構のフロー（たとえば図-14）に基づき作成された耐久性力学的アプローチ（たとえば図-15）に従って、基本モデルを組み立てることによって、予測手法の構築が可能となることを示した。あわせて、主として国内の研究者による関連する予測手法の分析を行った。検討対象とした予測手法は、コンクリート構造物の時間依存性挙動を物理化学モデルによって直接表現する数値解析手法を基本としたが、設計式のような簡便な工学モデルについても対応関係を整理した。

5.5 本WGの活動のまとめと今後の展望

本WGで示した「耐久性力学」のアプローチは、これまで個別に取り扱われることが多かった材料と構造の問題、および個別の劣化現象を、時空間におけるコンクリート構造物の性能評価という観点のもと、「耐久性力学曼荼羅」のフレームワークを用いて再構成したものである。「耐久性力学」に関わる研究は、個別の劣化現象の検討という意味ではすでに多く行われ、一部には体系的な枠組みを構築した先駆的研究も存在するが、より一層の発展が望まれている。本WGで提示したように、関連する個別研究を全体のフレームの中で捉え直すことにより、現象の類似性、相互作用の存在、全体の中での個々の問題の位置づけなどが明確になり、手法の共通化、相互作用の考慮、統一されたパラメータによる整理など新たな研究課題が見えてくる。冒頭で示したように、国内においてシンポジウムを開催したことにより、材料と構造の分野融合を含め、耐久性力学の概念に基づく統合化研究の重要性が広く理解されるきっかけになったものと思われる。耐久性力学はコンクリート分野を網羅する壮大な研究領域であるとともに、構造物の耐久性評価という現代の問題を解決するために不可欠な概念である。各種の分野の研究者が総力を挙げて取り組むことがあります期待される。

なお、本WGの活動の詳細は、報告書「コンクリート構造物の耐久性力学」を参照されたい。

6. CONCREEP8

CONCREEP（コンクリートおよび準脆性材料のクリープ、収縮および耐久性の力学に関する国際会議）は、コンクリートおよびコンクリート構造物の時間依存性問題を中心課題とし、1958年にMunich工科大学でRuschによって開催されて以来、Neville, Bažant, Carol, Ulm, Pijaudier-Cabotと引き継がれてきている由緒ある国際会議である。その前身を含めると50年近くの歴史を有し、過去に7回にわたって国際会議を開催している。この由緒ある国際会議の第8回が、2008年9月30日(火)～



写真-1 会場周辺状況

10月2日(木)の3日間にわたり、志摩観光ホテル(写真-1)で開催される。

会議の目的は、コンクリートをはじめとするセメント系材料、他の準脆性材料のクリープ、収縮や耐久性の予測、モデル化やメカニズムの解明を促進することであるが、日本での開催においては、コンクリート構造物の設計等への反映を目的とする実用的な観点から、セメント系材料の固体力学、材料科学、実験力学、計算力学などの最新の成果を整理し、両者を結びつけることで、コンクリート構造物に残された課題の克服を目的とする。

会議のトピックは以下の通りである。

- ・収縮・クリープのマイクロメカニクスとマイクロメカニズム
- ・マルチフェーズ・マルチスケールの観点によるクリープ・収縮・耐久性
- ・不確実さ、統計的なばらつきや実験結果を考慮したクリープや収縮の予測勾配の改善
- ・セメント系材料のクリープと破壊の相互作用
- ・温度や毛細管中にある水分の移動の影響
- ・若材齢コンクリートの物性
- ・クリープ・収縮および耐久性に関する構成則と計算力学
- ・過酷環境下でのコンクリートの劣化進行とそのモデル化
- ・コンクリートの劣化の物理化学
- ・コンクリート構造物のモニタリング
- ・セメント系新材料のクリープと収縮

・収縮の低減方法

- ・収縮、クリープ及び耐久性に関する設計手法・指針・ガイドライン

7.まとめ

本研究委員会では、セメント系材料を含めて準脆性摩擦材料の時間依存性挙動を様々な観点から取り上げ、調査・研究活動を行った。クリープ・収縮などの時間依存性問題に対し、メカニズムの観点ならびに実務設計の観点からの既往の知見の整理を行った。また、データベースの構築や耐久性力学という新たな概念の提示も行った。時間依存性問題は、コンクリートを扱う上で最も基本的かつ重要な事項であり、本研究委員会の成果が、今後のこの分野の更なる発展に寄与できればと考えている。

参考文献

- 1) <http://www.keyence.co.jp/microscope/index.jsp>
- 2) 兼松学ほか：中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における水分挙動の可視化および定量化に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.981-986, 2007
- 3) マスコンクリートソフト作成委員会：コンクリートの初期ひび割れおよびひび割れの進展の解析方法、日本コンクリート工学会、2003
- 4) K. Maekawa et al.: Time-Dependent Space-Averaged Constitutive Modeling of Cracked Reinforced Concrete Subjected to Shrinkage and Sustained Loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 4, No. 1, pp.193-207, 2006
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリート構造物の耐久性力学, JCI-C73, 2007
- 6) O. Coussy, and F. -J. Ullm: Elements of Durability Mechanics of Concrete Structures, Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, edited by F. -J. Ullm, Z. P. Bazant, and F. H. Wittmann, Elsevier Science Ltd., pp. 393-409, 2001