

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007-2008
 課題番号：19360195
 研究課題名（和文） コンクリート構造物の収縮ひび割れの発生およびひび割れ幅
 予測システムの構築
 研究課題名（英文） Development of prediction system for shrinkage crack and crack width in
 concrete structures
 研究代表者
 下村 匠（SHIMOMURA TAKUMI）
 長岡技術科学大学・工学部・准教授
 研究者番号：40242002

研究成果の概要：

コンクリートの乾燥収縮に起因して構造物に発生するひび割れを予測する数値解析システムを構築するために、実験装置の開発、実験によるデータ取得、数値シミュレーションモデルの開発およびその検証を行った。円筒型供試体を用いた持続引張載荷試験装置により、収縮が拘束されたコンクリートのさまざまな載荷経路における時間依存性引張挙動を精度良く測定することに成功した。実験結果を再現する数値解析モデルを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2008 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
年度			
総 計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：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

1. 研究開始当初の背景

施工段階や供用開始初期段階におけるコンクリート構造物の体積変化に起因するひび割れは、優れた施工だけでは防ぎ難く、設計段階でひび割れ予測を行い、材料・配合設計、構造設計の段階で適切な策を講じることが望ましい。これを具現化する代表例として、セメントの水和発熱に起因したマスコンクリートの温度ひび割れに関して、約 20 年前にわが国の示方書が世界に先立ち、コンピュータを駆使した温度解析と温度応力解析に基づく構造物のひび割れ予測を取り入れ、実構造物のひび割れ制御技術を大きく進展さ

せたことは特筆すべきである。

一方、コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れは、その性質上、発生が懸念されるのが主要な構造部材でない薄い部材であることが多いこと、またひび割れが小さいので、発生しても構造物にとって性能を大きく損なうほど致命的な影響をもたらさないと考えられること、などから、温度ひび割れほども示方書や実構造物の設計で大きく取り上げられることがなかった。

しかし、近年、乾燥収縮が原因と見られる過大なひび割れが橋梁に発生した事例が報告され、社会的関心を集めるとともに、その

原因究明に大きなエネルギーが注がれた。もはやこれまでとは事情が異なり、乾燥収縮ひび割れについても合理的なひび割れ予測手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的はコンクリート構造物の初期ひび割れ、とくにコンクリートの乾燥収縮、自己収縮に起因したひび割れの発生とその幅を予測する手法を、研究代表者の近年の研究成果に立脚して構築することである。

研究代表者は、10年以上にわたり、部材の乾燥収縮ひび割れ予測に関する研究を続けており、成果を蓄積している。研究代表者の乾燥収縮に関する研究は、1990年初頭のコンクリートの細孔構造とそこでの水分の熱力学的挙動に基づく水分移動および体積変化モデルに端を発している。その後、部材の乾燥収縮ひび割れの予測に取り組んでいる。

本研究では、研究代表者のこれまでの研究の流れと成果を踏まえ、部材・構造レベルの乾燥収縮ひび割れ予測に適用可能な材料モデルを完成させ、これらを用いた数値解析により、精度と適用性に優れたひび割れ予測手法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 持続荷重試験装置の開発

乾燥収縮を受けるコンクリートの持続荷重試験装置の開発を行う。従来、乾燥収縮については、自由収縮試験および一定のバネ拘束率で収縮が拘束された一軸拘束収縮試験が行われていたが、拘束の程度を任意に設定、制御できる荷重試験装置は存在しなかった。乾燥収縮は、供試体内の不均一な水分分布に起因した内部拘束の影響、収縮の拘束による応力導入速度が緩慢なことの影響が大きく、これらの影響の検討に適した実験の実施が不可欠である。このための試験装置の開発を本研究の重要な部分と位置づける。

(2) 乾燥と持続荷重を受けるコンクリートの引張応力導入性状とひび割れの発生に関する実験

開発した持続荷重試験装置を用い、種々の荷重経路、乾燥条件下における、コンクリートの応力導入性状とひび割れ発生を実験する。供試体の乾燥の有無、応力、ひずみ、有効ひずみ（ひずみと自由収縮の差）を時間軸上でコントロールした実験を行う。

(3) 各種コンクリートの収縮特性および収縮ひび割れ抵抗性の実験

収縮特性は骨材の種類、性質がコンクリートの収縮に及ぼす影響を試験する。一軸拘束収縮試験により、各種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の検討を行う。養生日数、フライアッシュの置換率、外部拘束の程度に着目し、クリープによる緩和を含んだ収縮応力の

導入性状、ひび割れ発生応力を試験する。

(4) 数値解析モデルの開発と検証

研究代表者の開発した、コンクリート中の水分移動モデル、収縮モデル、ペースト-骨材複合構成モデルを統合し、有限供試体の乾燥収縮挙動の解析プログラムを構築する。(2)(3)で得られた実験結果、および既往の乾燥収縮試験の結果を解析し、応力の導入挙動の解析精度を検証する。また、巨視的ひび割れの発生条件についても検討する。

4. 研究成果

(1) 持続荷重試験装置の開発

開発した持続引張荷重試験装置の全体像を写真-1に、制御フローの概要を図-1に示す。装置は、無荷重状態と荷重状態各1体の円筒型コンクリート供試体、サーボモータおよびサーボアンプ、データロガーとパーソナルコンピュータから構成されている。自由供試体と荷重供試体は、同時に作製し、同じ養生条件とし、試験中は常に同じ乾燥条件に置かれている。制御フローは、自由供試体のひずみ、荷重供試体のひずみ、荷重供試体の応力をリアルタイム計測し、荷重供試体のひずみ、またはひずみ、または有効ひずみ（＝荷重供試体のひずみと自由供試体のひずみの差）がプログラミングされたその時点における制御目標値になるようにサーボモータを作動させ荷重供試体の拘束鋼棒を可動させるものである。

本試験装置は、自由供試体、荷重供試体ともに、専用に開発した円筒型コンクリート供試体を用いていることが特徴である。円筒型供試体を採用した理由は、乾燥収縮を受けた場合に、供試体内の水分量、収縮、応力、有効ひずみを軸対象分布となることにより、解析との比較が明瞭で理想的な条件下で行うことができるからである。

円筒供試体中心部には塩ビ管を配置しており、さらにその内部に鋼棒を配置している。塩ビ管とコンクリートの付着による拘束はないものとする。両端から100mmずつの区間には直径10mmの先端を鋭角に切断したボルトを4本ずつ埋め込み定着区間とし、それ以外の中央部200mmを試験区間としている。ボルトの詳細を含む定着部の仕様は、この部分での破壊が試験区間に先行して生じにくいように、著者らの直接引張試験方法の知見も踏まえ、試行錯誤を経て決定した。

拘束鋼棒には図上の右端から相当の区間においてネジ切りを施してある。拘束鋼棒を回転させることで、ネジ切り部で鋼棒の軸方向移動へと変換され、拘束鋼棒と端板が接触し、反力が発生することでコンクリートに軸方向引張応力が導入される仕組みである。



写真-1 持続荷重試験装置

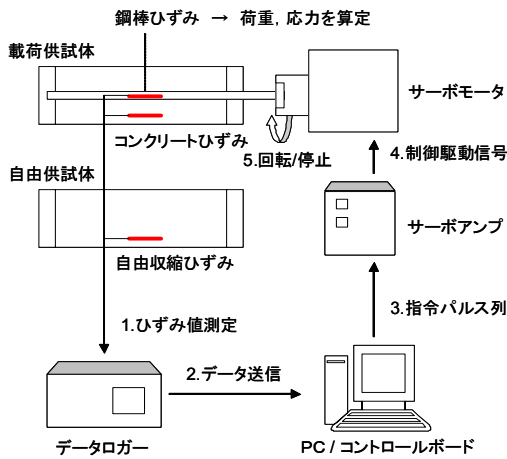


図-1 制御フロー概要

(2) 乾燥と持続荷重を受けるコンクリートの引張応力導入性状とひび割れの発生に関する実験

開発した持続荷重試験機を用いて、モデルの開発と検証に資するデータの取得を行った。図-2 にその結果の一例を示す。供試体 1-1 は試験開始時点からひずみをゼロに保つ完全拘束を行った。供試体 1-2 は試験開始時にコンクリートひずみが引張側に 50μ 生じるまで引張荷重を行い、その後も引張ひずみ 50μ に保った。供試体 1-3 は最初自由収縮させ、収縮ひずみが 100μ に達した時点から拘束を開始し、以降破断するまで 100μ にて拘束を続けた。

完全拘束供試体 1-1 の応力-有効ひずみ関係の傾き (有効弾性係数) と、供試体 1-2 の有効ひずみ 50μ までの静的荷重時の傾き (静弾性係数) がほぼ同じであることがわかる。これより、完全拘束は、クリープによる緩和が少なく、コンクリートにとって静的荷重と同じ程度に厳しい荷重条件であることがわかる。供試体 1-2 の有効ひずみ 50μ 以降の持続荷重時の有効弾性係数と、供試体 1-3 の有効弾性係数を比較すると、供試体 1-2 のほうが小さいことがわかる。これは、供試体 1-2 は乾燥開始時にすでに有効ひずみ 50μ が導

入されているため、その後の乾燥による内部拘束により表面付近が軟化域に達するのが早いためと思われる。

このように、開発した持続荷重試験機は、種々の荷重経路、乾燥条件下における、コンクリートの応力導入性状とひび割れ発生を十分な精度で実験可能であることが明らかとなった。

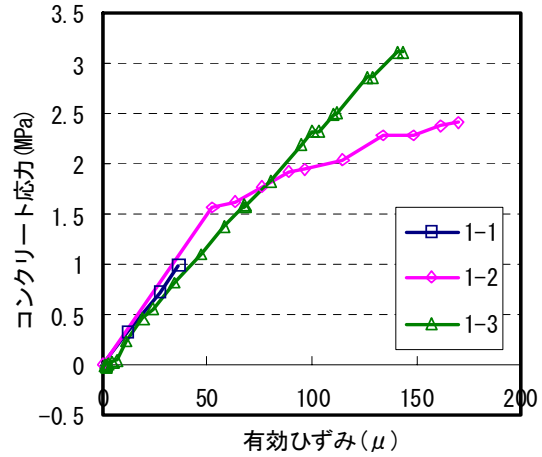


図-2 円筒供試体の応力-有効ひずみ関係

(3) 各種コンクリートの収縮特性および収縮ひび割れ抵抗性の実験

骨材の種類、性質に着目したコンクリートの自由収縮試験を行った結果、以下が明らかとなった。

- ① 骨材によるコンクリートの収縮低減のメカニズムとして、骨材によるセメントペーストの体積希釈効果 (直列メカニズム) と骨材によるセメントペーストの収縮拘束効果 (並列メカニズム) を考えた場合、乾燥収縮では直列メカニズムが卓越し、並列メカニズムがわずかに認められる結果となった。これは従来の知見と整合する。
- ② 乾燥収縮に比べ、自己収縮では骨材の弾性係数の影響が大きかった。セメントペーストと骨材の弾性係数の比が材齢によって異なること、多少とも並列メカニズムが存在することがその理由として考えられる。
- ③ 収縮の小さい一般の骨材を使用する場合、従来どおり骨材を無収縮と考えてコンクリートの収縮を予測して問題はないことが示された。
- ④ 種々の骨材を用いたコンクリートの収縮試験によって、複合則による予測値とおおむね一致する骨材と予測値と異なる傾向を示す骨材の両方が存在することが確認された。
- ⑤ フライアッシュを用いたコンクリートは

初期強度が低いので、早期に乾燥を受け、かつ収縮が拘束された場合、普通コンクリートよりもひび割れが発生しやすい傾向にあることが明らかとなった。

- ⑥ フライアッシュを用いたコンクリートは、早期に乾燥を受ける場合であっても、外部からの拘束の程度を緩やかにし、収縮応力が卓越する前に強度発現できる条件を整えれば、普通コンクリートと同等の収縮ひび割れ抵抗性を確保することができる。
- ⑦ フライアッシュを用いたコンクリートは十分に養生を行えば、外部からの拘束の程度に関わらず、普通コンクリートと同等の収縮ひび割れ抵抗性を確保することができる。

(4) 数値解析モデルの開発と検証

図-3 は開発したコンクリート有限供試体の水分移動・乾燥収縮・応力解析手法の概要を示している。コンクリートを骨材とセメントペーストの二相複合材料と考え、水分の移動とセメントペーストの収縮は細孔構造に基づくモデルを用いる。

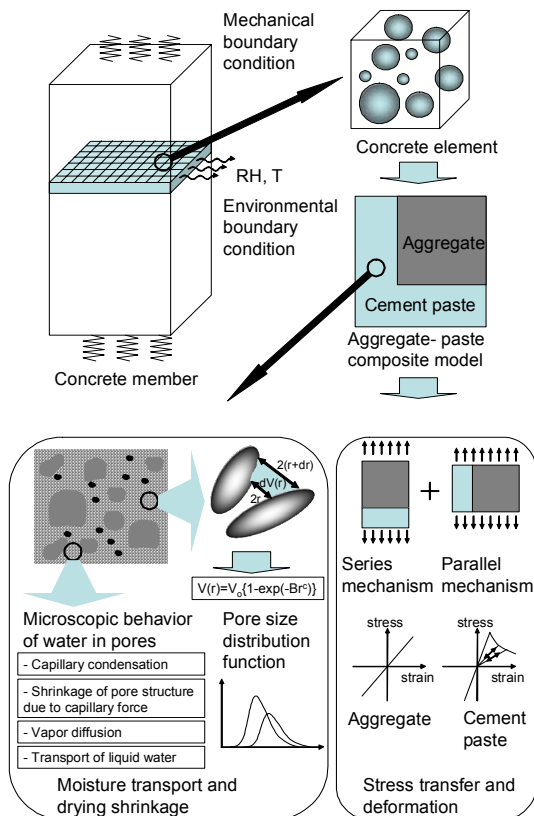


図-3 乾燥収縮応力解析モデルの概要

セメントペーストと骨材の複合関係は、直並列モデルにより表す。ここに並列モデルとは、骨材近傍のセメントペーストが骨材と変形適合しつつ相互の体積変化を拘束する現象を表し、直列モデルとは骨材はその体積分

だけコンクリート中のセメントペーストを希釈する役割を表す。骨材は、完全弾性により表し、コンクリート中のセメントペーストは微細なひび割れが分散することを考慮し、弾性-軟化モデルにより表す。セメントペースト単体の変形特性としてのクリープは考慮していない。その理由は、乾燥収縮応力が問題となる部材では大きな圧縮応力は作用しないので圧縮クリープの影響は小さいこと、引張クリープは基本クリープの影響は小さく表面の微細ひび割れにともなう引張剛性低下による見かけの引張クリープの影響が大きいと考えたことによる。

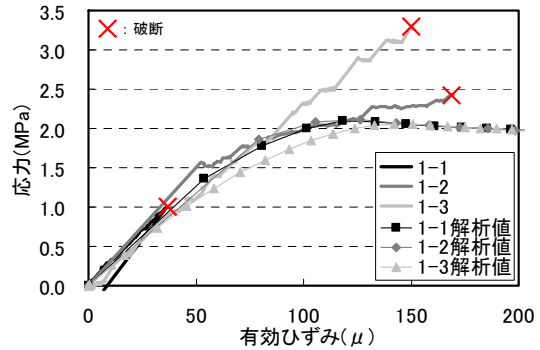


図-4 円筒供試体の応力-有効ひずみ関係の解析結果の例

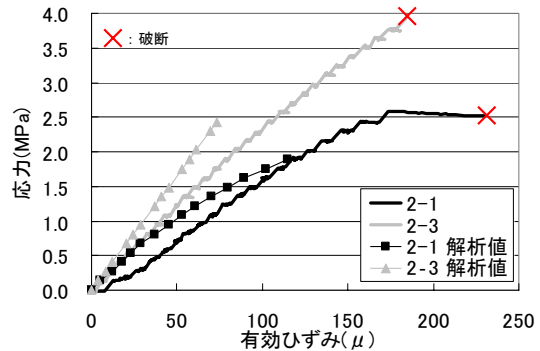


図-5 円筒供試体の応力-有効ひずみ関係の解析結果の例

図-4 は、開発した数値解析モデルにより、図-2 の実験結果を解析したものである。供試体 1-2 の瞬間載荷時の挙動を含め、その後の拘束下での応力、有効ひずみともによく合っている。ただし、完全拘束の供試体 1-1 は実験ではかなり低い応力で破断している。ひび割れ発生判定法については、今後の検討を要する。

図-5 は、乾燥の有無と載荷速度が供試体の応力-有効ひずみ関係に及ぼす影響を検討したものである。供試体 2-1 は乾燥させながら低速 (0.135MPa/day) で引張載荷し、供試体 2-3 は乾燥させないまま同じ載荷速度で載荷した。乾燥により持続載荷時の剛性が低下することが実験、解析にも現れている。こ

れは、乾燥収縮の進行とともに供試体内部の水分分布の勾配による内部拘束が生じ、表面付近のセメントペーストに引張軟化が生じるためである。乾燥させない2-3の実験値には持続載荷により徐々に剛性が低下する傾向がわずかに見て取れるが、本実験の時間スケールの範囲では、乾燥によらない基本引張クリープは小さいことがわかる。

(5) 今後の展望

本研究により、乾燥と拘束を受けるコンクリートの応力導入性状とひび割れに関する精密なデータ取得が行うことができた。また、応力と変形に関しては、種々の要因を合理的に考慮しつつ精度良く現象を表現する数値解析モデルを開発した。今後は、巨視的ひび割れの発生条件について検討すること、部材レベルの実験を行い、解析手法の検証を行うことが課題である。それらの成果に基づき、実構造物の収縮ひび割れを簡単に、汎用的に、精度良く予測する技術の確立が望まれる。

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6件)

- ① 赤井洋満、下村 匠、若材齢コンクリートの適用可能な応力測定方法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.29, No.1, pp.609-614, 2007.7, 査読有
- ② 高瀬和男、倉田幸宏、下村 匠、丸山久一、構造物中のコンクリートの応力測定方法に関する再検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.29, No.1, pp.615-620, 2007.7, 査読有
- ③ 尾口佳丈・田中泰司・下村 匠、骨材の性質に着目したコンクリートの収縮の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, 2009.7, 査読有
- ④ 齋藤明幸・下村 匠・田中泰司・青木優介、中空円筒供試体を用いたコンクリートの拘束収縮試験装置の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, 2009.7, 査読有
- ⑤ 臼井裕規・下村 匠・田中泰司、フライアッシュを用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, 2009.7, 査読有
- ⑥ 青木優介、蓮見 亮、嶋野慶次、米村恵一、デジタル画像撮影によるコンクリート表面の収縮ひずみ分布測定のための基礎的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, 2009.7, 査読有

[学会発表] (計10件)

- ① 尾口佳丈、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを用いた高強度コンクリート

の耐久性と収縮特性、土木学会第63回年次学術講演会、仙台、2008.9

- ② 齋藤明幸、コンクリートの収縮がRC部材のひび割れ幅に及ぼす影響、土木学会第63回年次学術講演会、仙台、2008.9
- ③ 臼井裕規、各種粉体混和材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性、土木学会第63回年次学術講演会、仙台、2008.9
- ④ 蓮見 亮、デジタル画像関連法を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定、土木学会第63回年次学術講演会、仙台、2008.9
- ⑤ Y.Aoki, Effects of loading rate and drying condition on uniaxial tensile stress-strain relationship and cracking strength of concrete, the 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures (ConCreep8), Ise Shima, 30 September-2 October, 2008
- ⑥ T.Shimomura, Time-dependent stress and strain in concrete member under restraint drying shrinkage, the 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures (ConCreep8), Ise Shima, 30 September-2 October, 2008
- ⑦ Y.Kurata, Study on measurement of concrete stress in structural members by effective stress meter, the 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures (ConCreep8), Ise Shima, 30 September-2 October, 2008
- ⑦ T.Shimomura, Effect of concrete shrinkage on crack width in reinforced concrete member with high strength concrete, the 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete (8HSC-HPC), Tokyo, 27-29 October, 2008
- ⑧ 尾口佳丈、骨材の弾性係数がコンクリートの収縮に及ぼす影響、第26回土木学会新潟会研究調査発表会、長岡、2008.11
- ⑨ 齋藤明幸、円筒型コンクリート供試体を用いた持続載荷試験装置の開発、第26回土木学会新潟会研究調査、長岡、2008.11
- ⑩ 松岡泰弘、乾燥収縮が拘束されたコンクリート一軸円筒供試体の引張挙動の解析、第26回土木学会新潟会研究調査、長岡、2008.11

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：高強度コンクリートおよびその自己収

縮低減方法

発明者：田中泰司・下村 匠

権利者：同上

種類：

番号：特願 2 0 0 8 - 3 2 6 6 3 1

出願年月日：2008 年 12 月 22 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

下村 匠 (SHIMOMURA TAKUMI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：40242002

(2)研究分担者

田中泰司 (TANAKA YASUSHI)

長岡技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：40377221

青木優介 (AOKI YUSUKE)

木更津工業高等専門学校・准教授

研究者番号：70360328

(3)連携研究者

なし