

# 乾燥収縮の内的・外的拘束と外部作用荷重を受けるコンクリートの変形と応力

コンクリート研究室 齋藤 明幸  
指導教員 下村 匠

## 1. はじめに

乾燥収縮は、温度収縮、自己収縮など他の収縮現象に比べて現象が進行する時間スケールが長く、コンクリート内部の水分逸散は供試体断面の外側から進行するため、内部の水分勾配による拘束の影響を受けることが特徴である。よって、乾燥収縮ひび割れを精度良く予測するためには、これらの影響を考慮したコンクリートの変形特性、破壊条件の開発が必要である。

著者らは、汎用的な材料モデルの開発を行うことを主目的としていることから、乾燥条件、応力、ひずみの状態が軸対称となり数値解析モデルとの比較に適した円筒供試体を採用し、供試体に生じる乾燥収縮を検知しつつ、リアルタイムで応力、有効ひずみ、ひずみを制御することで持続引張載荷試験および拘束収縮試験を行う装置を開発した。装置の概要およびこれを用いて行った基本的な試験について述べ、微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデルを用いて、得られた実験結果の再現解析を行う。

## 2. 持続引張載荷試験装置

### 2.1 概要

開発した持続引張載荷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、無載荷状態と載荷状態各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。自由供試体と載荷供試体は、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、載荷供試体のひずみ、拘束鋼棒のひずみより算出される載荷供試体の応力をリアルタイム計測し、載荷供試体の応力、ひずみ、有効ひずみがプログラミングされたその時点にお



写真-1 持続載荷試験装置全体像

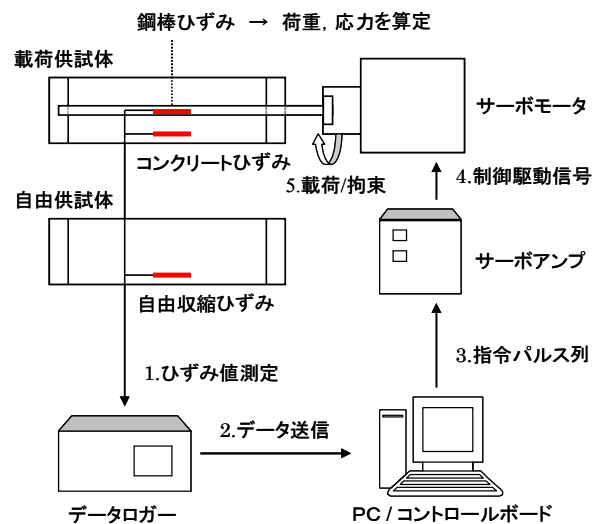


図-1 装置の制御フロー概要

ける制御目標値になるようにサーボモータを動作させ載荷供試体の拘束鋼棒を可動させるものである。

### 2.2 円筒型供試体

#### (1) 供試体の形状・寸法

本試験装置は、自由供試体、載荷供試体ともに、図-2に示す専用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

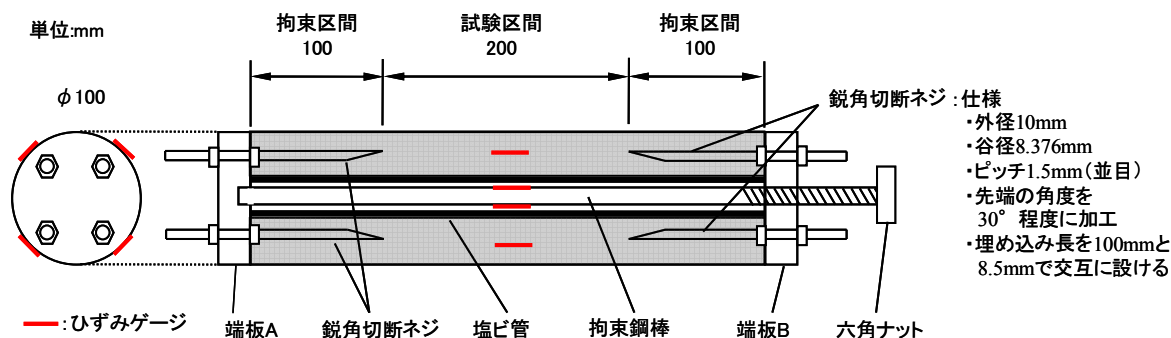


図-2 円筒型供試体寸法

で理想的な条件下で行うことができるからである。

円筒供試体は外径 100mm, 内径 32mm, 長さ 400mm であり, 中心部には内径 25mm, 外径 32mm の塩ビ管を配置してあり, さらにその内部に直径 20mm の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. コンクリートの厚さは 34mm であり, 断面積は  $7050\text{mm}^2$  となる. 全長 400mm のうち両端から 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<sup>1)</sup>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り, 端板 B の中心部にはそれと噛み合うネジ切り穴を設けてある. 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, 端板 B から押しだされる. 拘束鋼棒と端板 A 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. 自由供試体の場合は, 鋼棒を端板 A に接触させない.

## (2) 供試体の作製

コンクリートの打設は, 写真-2 のように供試体全体を内径 100mm の塩ビ管の型枠で覆い, 横方向から行う. この際, 拘束鋼棒測定用のひずみゲージはあらかじめ貼付し, 塩ビ管内部から端板



写真-2 打設方法

B に沿わせて外部へリード線を導出している. コンクリートの打設は恒温室内で行い, 乾燥開始まで塩ビ管型枠内で養生した.

## (3) 供試体への加力

コンクリートへの引張応力の導入は, 拘束鋼棒に固定した六角ナットを掴んで回転させることにより行う. 各時間におけるコンクリートの応力, 有効ひずみ, ひずみのいずれかについて目標値を設定し, 制御対象物理量が目標値になるよう出力値をモニターしながら鋼棒を回転させる. プログラム設定された荷経路に従いサーボモータにより自動荷重するほか, 手作業で鋼棒を回転させることによっても荷重を行うことが可能である. 複数個の供試体を並行して試験する場合には, 手動荷重を併用する.

## 2.3 測定項目

試験時の測定項目は, 自由供試体および荷重供試体の試験区間におけるコンクリートのひずみ, および荷重供試体の拘束鋼棒のひずみである. コンクリートひずみはコンクリート表面に円周方向の  $90^\circ$  おきに 4 か所接着した 60mm のひずみ

表-1 示方配合

W/C	S/A	単体量(kg/m <sup>3</sup> )						
		W	C	S	G	Ad1	Ad2	混和材
0.5	0.5	170	340	891	908	6.8	0.408	0.51

Ad1:高性能AE減水剤 Ad2:消泡剤 混和材:分離低減剤

表-2 静的引張試験結果

	1	2	3	4	平均
引張強度(MPa)	3.72	3.64	3.45	3.53	3.58
弾性係数(GPa)	30.6	34.9	32.8	34.0	33.1
破断位置	ネジ先端	試験区間	試験区間	試験区間	

ゲージにより測定し、鋼棒ひずみは正対する2か所に接着した5mmのひずみゲージにより測定し、それらの平均値を採用する。

載荷供試体のコンクリート応力 $\sigma_c$ は、載荷供試体の試験区間における力の釣り合いを考え、鋼棒ひずみから、式(1)により算出する。

$$\sigma_c = -\frac{A_s}{A_c} \times E_s \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに、 $A_s$ ：鋼棒断面積、 $A_c$ ：試験区間コンクリート断面積、 $E_s$ ：鋼棒弾性係数、 $\varepsilon_s$ ：鋼棒ひずみであり、拘束鋼棒の弾性係数は、供試体の金属部分作製時に使用された鋼材と同ロットの素材を用いて、同形状の鋼棒の引張試験を行い求めた。

コンクリートの体積変化が生じている際に実際に応力の生成に寄与している変形成分である有効ひずみ $\varepsilon_e$ は、同時に打設した自由供試体のコンクリートひずみ（自由収縮）と載荷供試体のコンクリートひずみとの差として求められる。

$$\varepsilon_e = \varepsilon_c - \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_c$ ：載荷供試体のコンクリートひずみ、 $\varepsilon_{sh}$ ：自由収縮（自由供試体のコンクリートひずみ）である。

なお、実験により測定されるコンクリートの応力、ひずみ、有効ひずみ、自由収縮は、試験区間の断面内の平均値である。コンクリートの乾燥収縮が進行している非定常条件下では、供試体表面から水分の逸散が生じるため、断面内の水分量分布が一樣ではなく勾配を持つ、その結果、コンクリートの収縮（非拘束下の体積変化成分）、応力、有効ひずみも断面内で一樣ではない。しかし供試

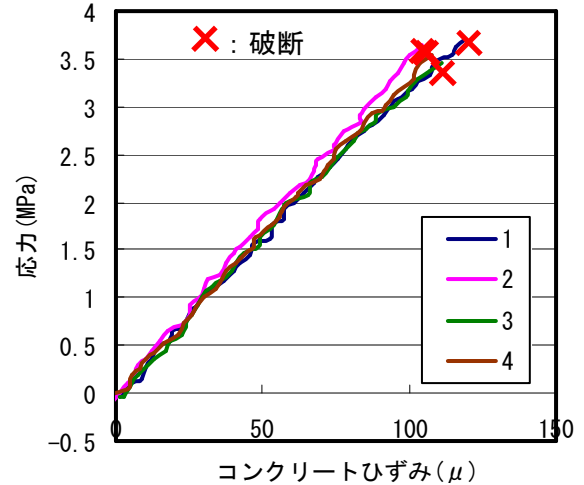


図-3 静的引張試験による応力-ひずみ関係

体内の局所的な収縮、応力、有効ひずみは一般に実測できないので、数値解析を併用することにより検討せざるを得ない。本研究における供試体は、そのような検討に好都合であるように軸対象の円筒型とした。

### 3. 静的引張載荷試験

まず、乾燥収縮が影響しない短時間での静的引張載荷試験を実施した。表-1に示す配合のコンクリートで作製した4体の供試体を封緘養生し、材齢63日時点で載荷試験を行った。脱型直後の供試体を試験装置にかけ、載荷速度0.09 MPa/minで引張載荷を行い破断させた。その結果、表-2に示す引張強度と弾性係数、および図-3に示す応力-ひずみ関係が得られた。引張強度、弾性係数ともにばらつきが少なく、供試体および載荷方法ともに相応の実験精度を有していることが確認できた。

### 4. 拘束収縮試験結果と解析モデルとの比較

持続引張載荷試験装置を用い、拘束条件を変化させて4つの実験シリーズを実施した。得られた実験値を本研究室で開発した乾燥収縮解析モデルによる解析値と比較することで、解析モデルの妥当性を検証する。材料モデルについては既往の論文<sup>2),3),4)</sup>を参考されたい。

ここでは実施した実験のうち実験シリーズ1について取り上げる。シリーズ1では乾燥収縮下に

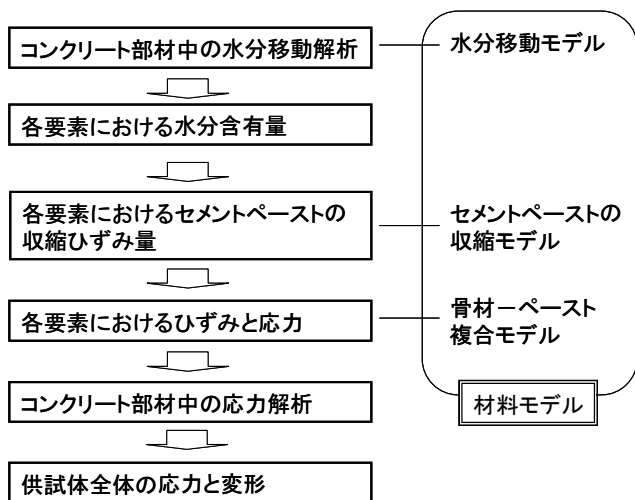


図-4 解析フローチャート

において外部拘束の影響を把握するため、表-3に示すように載荷供試体に与えるコンクリートひずみを変化させて実験を行った。図-5のコンクリートひずみが実験の入力値であり、得られた応力、有効ひずみから、図-6に示す応力-有効ひずみ関係が得られた。応力-有効ひずみ関係について実験値と解析値を比較すると、ある程度精度よく再現できているが、解析値は有効弾性係数を低めに評価する傾向があると言える。特に供試体1-3を比較すると、初期は整合が取れているが、徐々に差が開いていく結果となった。

## 5. まとめ

円筒型コンクリート供試体を核とする持続引張載荷試験装置を開発し、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 持続引張載荷試験装置を用いて、静的引張試験を行い、円筒型供試体を用いた実験の精度を確認した
- (2) 装置により、コンクリートの乾燥収縮に対応した収縮スパンでの拘束収縮試験を行うことができた
- (3) 乾燥収縮解析モデルにより、乾燥収縮下にあるコンクリートの引張挙動を現すことができる可能性が示唆された

## 参考文献

- 1) 木優介, 平野雄太, 鈴木孝治, 嶋野慶次: 直接引張試

表-3 シリーズ1 実験条件

供試体	乾燥条件	操作内容	載荷方法
自由収縮	乾燥	非拘束	—
1-1		完全拘束(常にひずみを生じさせない)	試験装置
1-2		引張ひずみを50 $\mu$ 一定	手動
1-3		100 $\mu$ 収縮時点から100 $\mu$ 一定	手動

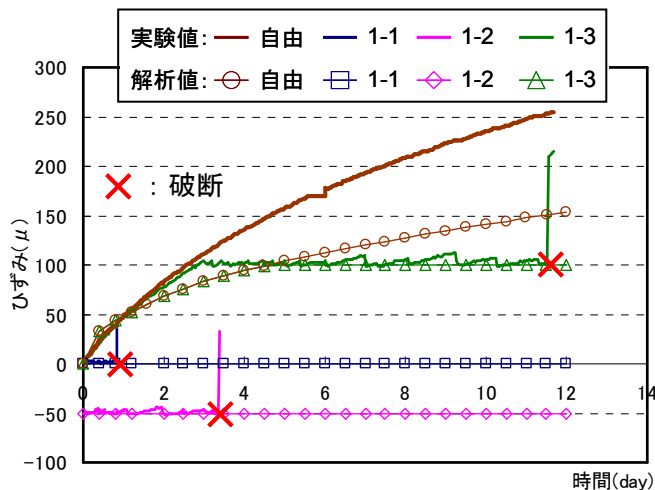


図-5 シリーズ1 コンクリートひずみ経時変化

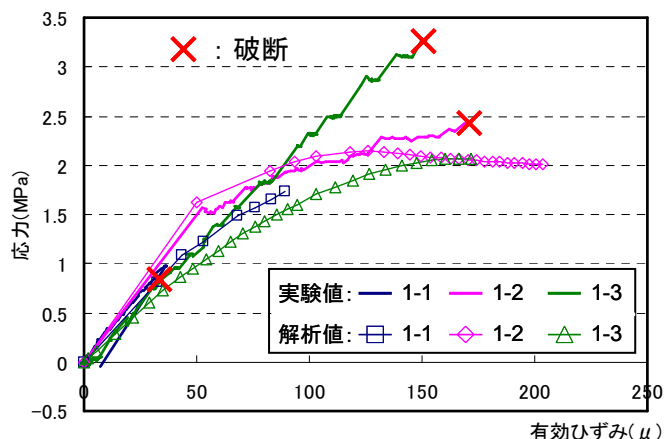


図-6 シリーズ1 応力-有効ひずみ関係

験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.531-536, 2007

- 2) 下村 匠, 福留和人, 前川宏一: 微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, 土木学会論文集, No.514, pp.41-53, 1995
- 3) 下村 匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.35-45, 1995.8
- 4) 小幡浩之, 下村 匠: 骨材-ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.781-786, 1999.6.