

論文 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

齋藤 明幸*1・下村 匠*2・田中 泰司*3・青木 優介*4

要旨: コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れを精度良く予測するためには、乾燥収縮が拘束された条件下におけるコンクリートの応力-有効ひずみ関係を把握する必要がある。著者らは、数値解析モデルとの比較に適した、乾燥条件、応力、ひずみの状態が軸対称となる円筒型供試体を用いて、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载荷試験および拘束収縮試験を行う装置を開発した。

キーワード: 乾燥収縮, 拘束収縮, 応力-有効ひずみ関係, 持続载荷

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。

コンクリート部材の収縮ひび割れ試験方法としては JIS A1151 に定められた一軸拘束収縮試験体による外部拘束試験がある。この収縮拘束試験は、コンクリートの収縮を鋼材で外的に線拘束するものであり、ひび割れ時の応力に加えて、収縮が拘束された条件下におけるコンクリートの応力-有効ひずみ関係を得ることができる。しかし、拘束鋼材のばね拘束による一定の拘束条件しか与えることができないので、一般的な材料特性の抽出には向かない。

一方近年、コンクリート部材に任意の拘束条件を与えて、収縮応力の導入を再現することが可能な試験装置がいくつか開発されている。国内においては丸山らによる VRTM¹⁾や、佐藤らによる収縮ひび割れ試験装置²⁾、中村らによる拘束試験機³⁾などにより、環境条件や拘束条件を変化させた場合の拘束収縮の実験結果が報告されている。いずれも研究者の研究目的に応じて、工夫のなされた試験装置である。

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型供試体を採用し、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载荷試験および拘束収縮試験を行う装置を



写真-1 持続载荷試験装置全体像

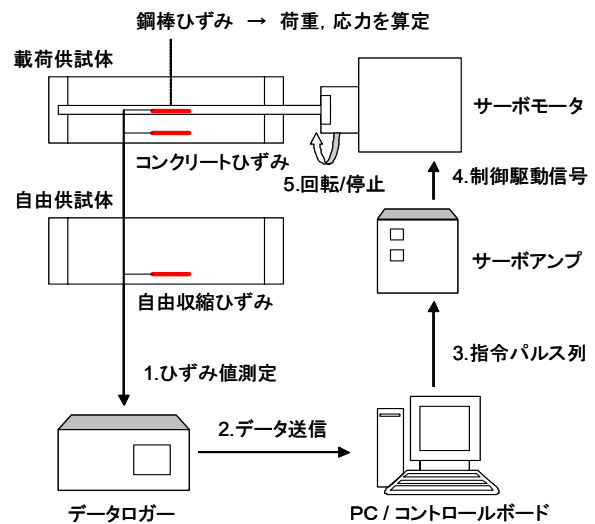


図-1 装置の制御フロー概要

開発した。本論文では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る。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

*3 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教 工博 (正会員)

*4 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 工博 (正会員)

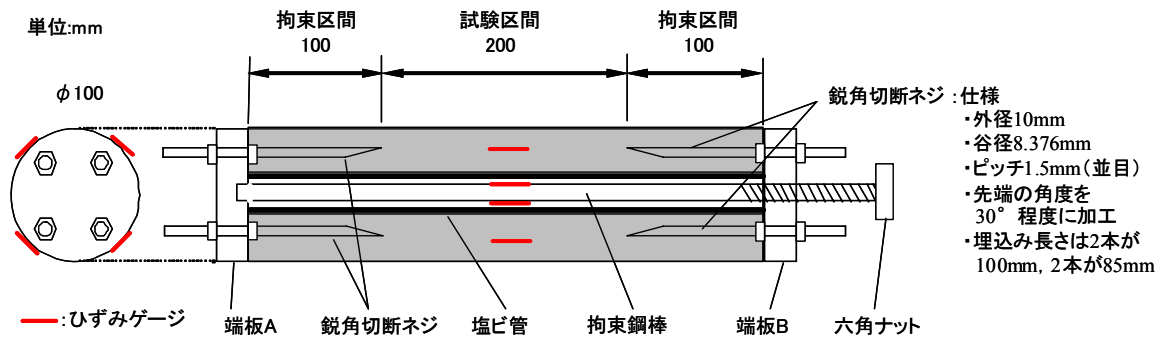


図-2 試験供試体寸法

2. 持続荷重試験装置

2.1 概要

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。

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、荷重供試体ともに、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7050mm²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⁴⁾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



写真-2 打設方法

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。

ところで、コンクリートの配合によってはブリーディングにより上下方向にコンクリート品質の不均一性が生じ、供試体の軸対象性が損なわれるおそれがある。そこで、縦方向打設についても検討を行った。その結果、作製は可能であったものの、打設作業が困難であったので、今回はブリーディングのなるべく少ないコンクリートを用いて横方向打設を行うことで解決した。

(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

表-1 示方配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)						
		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
G:粗骨材最大寸法 13mm

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	

表-3 コンクリート物性値

	材齢 (day)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
シリーズ1	21	38.5	33.8	2.62
シリーズ2	45	41.7	33.0	2.76
シリーズ3	87	47.0	36.1	3.00

目標値になるように鋼棒を回転させる。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°おきに4か所接着した60mmのひずみ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。試験区間のコンクリートのひずみは作動トランス型の変位計により測定する方法も試したが、ひずみゲージによる方法と測定精度が同程度であり、ひずみゲージの方が安定して測定できたので、ひずみゲージを採用した。

荷重供試体のコンクリート応力 σ_c は、荷重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、 ε_s :鋼棒ひずみであり、拘束鋼棒の弾性係数は、供試体の金属部分の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 ε_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)と荷重供試体のコンクリートひずみとの差として求められる。

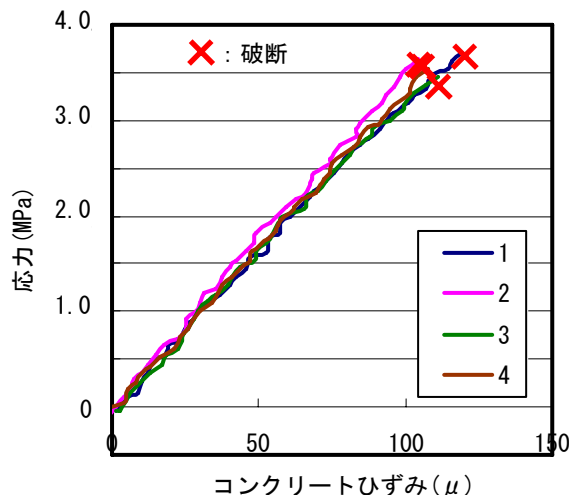


図-3 静的引張試験による応力-ひずみ関係

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

ここに、 ε_c :荷重供試体のコンクリートひずみ、 ε_{sh} :自由収縮(自由供試体のコンクリートひずみ)である。

自由収縮に対する荷重供試体のひずみの割合である拘束率を制御パラメータとして用いる場合もある。

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、断面内の水分分布が均一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均一ではない。しかし供試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. 静的引張荷重試験

まず、乾燥収縮が影響しない短時間での静的引張荷重試験を実施した。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た。材齢63日で脱型し、試験装置にかけ、荷重速度0.09 MPa/minで引張荷重を行い破断させた。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、供試体および荷重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

開発した持続荷重試験装置を用いて行った代表的な3つの実験シリーズについて紹介する。供試体は、表-1に示す配合のコンクリートを用いて作製し、恒温恒湿室

(室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 相対湿度 $60 \pm 10\%$) にて試験開始時まで乾燥が生じないように封緘状態で養生し, 脱型と同時に乾燥を開始した。载荷試験も同じ恒温室内において行った。試験期間中の水和の進行による物性変化の影響をなるべく排除するために最低3週間の養生期間を設けた。乾燥開始前の自己収縮は考慮しない。供試体数は各実験シリーズ4体作製し, そのうちの1体は自由供試体とし, 残りの3体にそれぞれ異なる载荷経路を設定して試験を行った。各実験シリーズ開始時には, 円筒供試体と同時に作製し同じ条件で養生した円柱供試体を用いて, 圧縮強度と弾性係数を試験した。得られたコンクリートの物性値を表-3に示す。表中の引張強度は実測値ではなく土木学会示方書の式 ($f_t = 0.23f_c^{2/3}$) による圧縮強度からの推定値である。

4.1 シリーズ1: 外部拘束条件が引張挙動に及ぼす影響

シリーズ1では, 乾燥収縮する供試体がさまざまな条件で外部拘束を受ける場合のひずみ挙動, 応力を検討する。各供試体に与える拘束条件は表-4に示す。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 生じるまで引張载荷を行い, 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。このうち, 供試体1-1は载荷試験機で自動载荷を行い, 供試体1-2と1-3は手動载荷を行った。

シリーズ1の結果として, まずコンクリートひずみの経時変化を図-4に示す。図中の×印は供試体の破断を表す。各供試体, 設定した条件通りのひずみ操作が実行できていることが確認できる。

次に, コンクリート応力の経時変化を図-5に, 応力-有効ひずみ関係を図-6に示す。供試体1-1については応力が小さい段階で破断してしまった。本研究では, 応力-有効ひずみ関係の傾きのことを有効弾性係数と呼ぶことにする。図-6の応力-有効ひずみ関係を見ると, まず完全拘束供試体1-1の有効弾性係数と, 供試体1-2の有効ひずみ 50μ までの静的载荷時の傾き(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载荷と同じ程度に厳しい载荷条件であることがわかる。

供試体1-2の有効ひずみ 50μ 以降の持続载荷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と思われる。

表-4 シリーズ1 载荷経路

自由収縮	乾燥条件	操作内容
1-1	乾燥	非拘束
1-2		常にひずみを生じさせない
1-2		引張ひずみを 50μ 一定
1-3		100μ 収縮時点から 100μ 一定

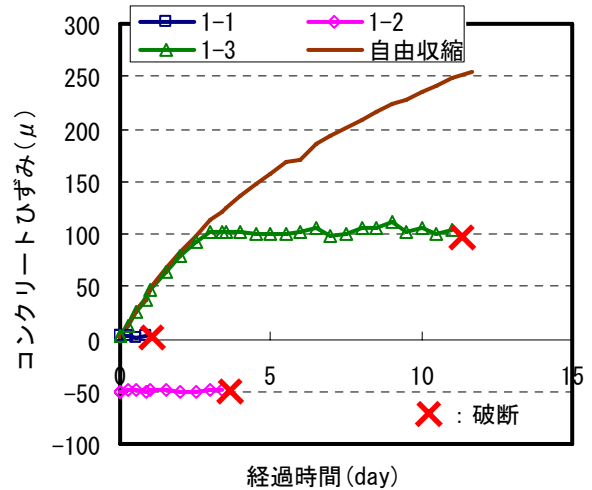


図-4 シリーズ1 コンクリートひずみ経時変化

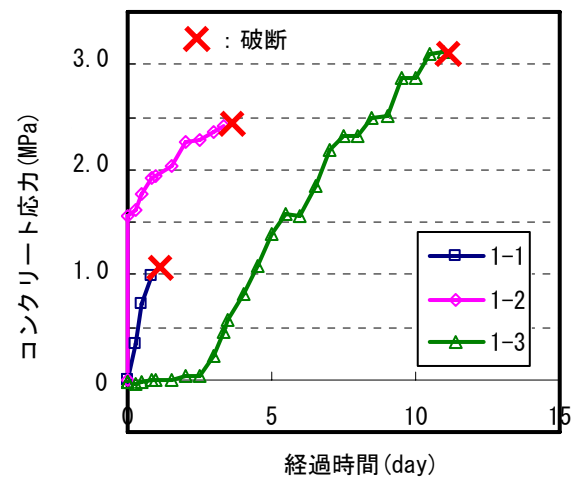


図-5 シリーズ1 コンクリート応力経時変化

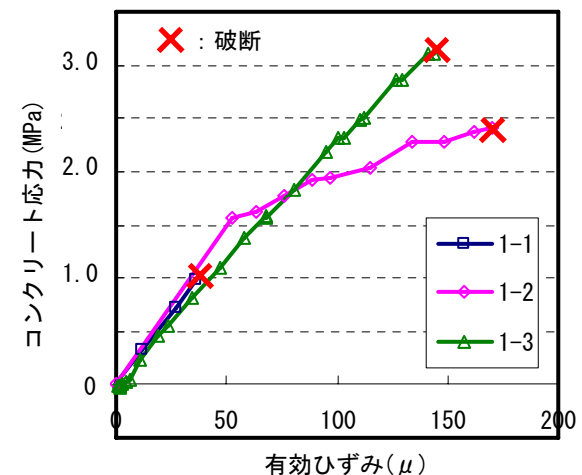


図-6 シリーズ1 応力-有効ひずみ関係

4.2 シリーズ 2：乾燥による内部拘束と持続荷荷が引張挙動に及ぼす影響

シリーズ 2 では表-5 に示すように荷荷試験中の乾燥の有無と外的な持続荷荷の有無を実験パラメータとした。荷荷供試体は、応力制御により荷荷を行い、毎日所定の時間に 0.135MPa の引張応力を増加させた。供試体 2-3 は荷荷試験機で自動荷荷を行い、供試体 2-1 は手動荷荷を行った。非乾燥供試体は、供試体全体をポリエチレン袋で封緘しながら試験を行った。

シリーズ 2 のコンクリートひずみの経時変化を図-7、コンクリート応力の経時変化を図-8 に示す。供試体 2-1 は試験開始後 20 日目で応力が 2.52MPa に達して破断、供試体 2-3 は 29 日目に 3.93MPa にて破断した。

応力-有効ひずみ関係を図-9 に示す。持続荷荷を行った破断させた供試体 2-1 および 2-3 に加え、封緘自由供試体 2-2 と乾燥自由収縮供試体も、試験開始から 42 日時点で引張荷荷を行い破断させた。参考として乾燥開始時に測定した強度試験体の圧縮弾性係数も示した。いくつかの興味深い結果が得られた。

まず、試験開始時に行った強度試験による圧縮弾性係数と、乾燥および持続荷荷を与えていない供試体 2-2 の引張弾性係数はほぼ等しかった。圧縮と引張の違いはあるが、乾燥も持続荷荷も受けていない場合、剛性の低下はないということが確認できる。

自由収縮供試体は、封緘自由供試体 2-2 と比べて弾性係数、ひび割れ強度ともに小さい。この理由の一つは、乾燥に伴う内部拘束により、表面付近のコンクリートの引張応力負担能力が低下するためと考えられる。

供試体 2-2 と 2-3 の差異は、持続荷荷の影響によるものである。有効弾性係数の低下は、乾燥によらない荷荷による引張クリープであるといえる。今回の実験では、青木による既往の実験⁵⁾で見られたよりも、その程度が大きかったが、荷荷速度が遅いことによると思われる。

乾燥させながら持続荷荷を行った供試体 2-1 は最も小さい有効弾性係数とひび割れ応力となった。これは青木による既往の実験⁵⁾でも観察されたことで、乾燥に伴う内部拘束の影響と持続荷荷の影響の複合であると言える。

4.3 シリーズ 3：外部拘束が解放される際の引張挙動

シリーズ 3 では有効ひずみを制御パラメータとした。収縮が拘束された状態にある供試体を、さまざまな経路で除荷し、有効ひずみの回復挙動に着目した。

荷荷条件は表-6 に示すように、試験開始時から乾燥させながら有効ひずみ（自由供試体とのひずみの差）を毎日 10 μ ずつ増加させ、12 日後に 120 μ まで達した後、翌日から異なる除荷経路により拘束を解放した。供試体 3-1 は往路と同じく有効ひずみを毎日 10 μ ずつ除荷し、供試体 3-2 は半分の毎日 5 μ ずつ除荷した。供試体 3-3 は瞬間

表-5 シリーズ 2 荷荷条件

乾燥条件		操作内容
自由収縮	乾燥	非拘束
2-1		応力導入 0.135(MPa/day)
2-2	非乾燥 (封緘)	非拘束
2-3		応力導入 0.135(MPa/day)

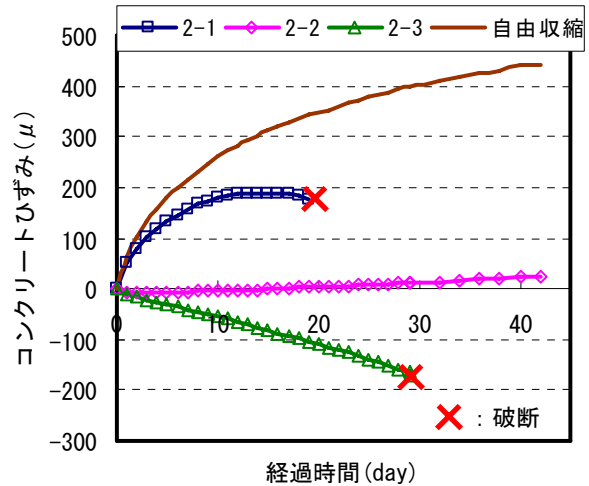


図-7 シリーズ 2 コンクリートひずみ経時変化

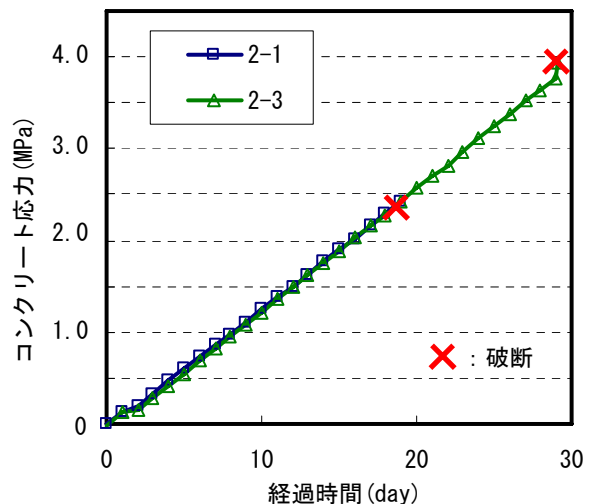


図-8 シリーズ 2 コンクリート応力経時変化

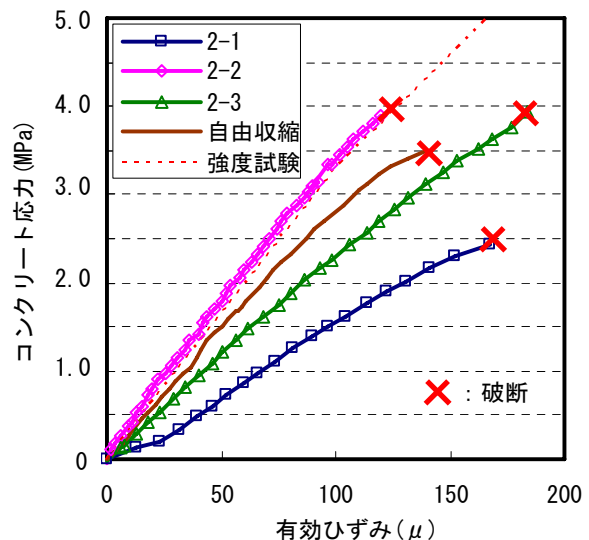


図-9 シリーズ 2 応力-有効ひずみ関係

的に応力を解放した。供試体 3-2 は載荷試験機で自動載荷を行い、供試体 3-1 と 3-3 は手動載荷を行った。

得られた結果として、有効ひずみの経時変化を図-10に、コンクリート応力の経時変化を図-11に示す。結果として、120 μ までの有効ひずみの導入および、拘束解放は条件通り操作できたが、有効ひずみ導入時に発生するコンクリート応力の大きさについては多少の差が見られた。その理由は明らかではなく、実験誤差と考えている。

次に、応力-有効ひずみ関係を図-12に示す。除荷過程に着目すると、一瞬で除荷を行った供試体 3-3 に比べ、徐々に除荷を行った供試体 3-1 および 3-2 は除荷剛性が小さいことがわかる。これは有効ひずみに遅れ弾性ひずみ（クリープ回復）が含まれるからである。

5. まとめと今後の課題

開発した持続載荷試験装置を用いて乾燥収縮条件下にあるコンクリート供試体に対して拘束収縮試験を行った。その結果、乾燥収縮と持続載荷を受けるコンクリートの応力、ひずみ挙動を、研究目的に適った精度で試験できることを確認した。

今後は、本装置を用いて、さまざまな条件下で乾燥、変形拘束、荷重作用を受けるコンクリート部材の変形と応力を、コンクリート中の水分移動解析、応力解析に基づき評価する際に用いることができるコンクリートの構成モデルの開発と検証を進めたい。

参考文献

- 丸山一平, 朴宣圭, 野口貴文: 疑似完全拘束実験による若材齢高強度コンクリートの性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.485-490, 2003
- 濱永康仁, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 清原千鶴: ひずみ制御機能を備えた収縮ひび割れ試験装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.519-524, 2004
- 小嶋一樹, 中村成春: 拘束収縮下におけるハイブリッド・ファイバー・コンクリートの若材齢引張力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.627-632, 2007
- 青木優介, 平野雄太, 鈴木孝治, 嶋野慶次: 直接引張試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
- 青木優介, 下村匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.135-148, 2003

表-6 シリーズ3 載荷条件

自由収縮	乾燥条件	操作内容	
		非拘束	
3-1	乾燥	有効ひずみ120 μ →徐々に除荷	
3-2		有効ひずみ120 μ →緩やかに除荷	
3-3		有効ひずみ120 μ →一瞬で除荷	

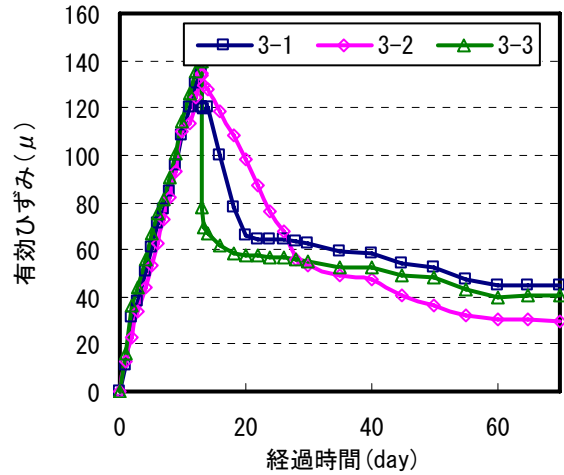


図-10 シリーズ3 有効ひずみ経時変化

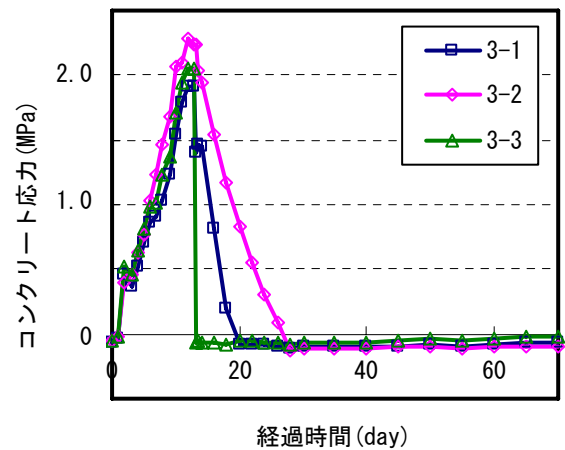


図-11 シリーズ3 コンクリート応力経時変化

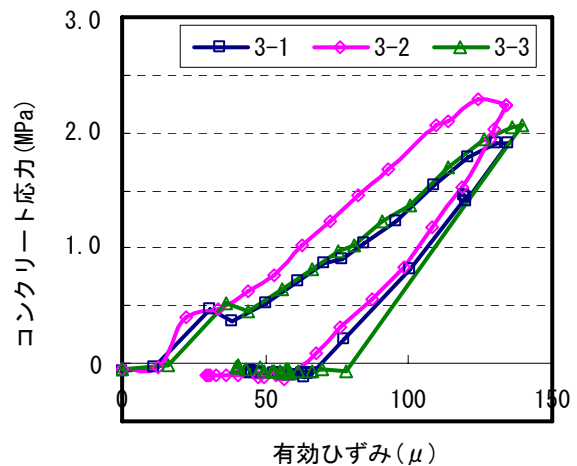


図-12 シリーズ3 応力-有効ひずみ関係