

報告 ひずみ制御機能を備えた収縮ひび割れ試験装置の開発

濱永 康仁^{*1}・佐藤 嘉昭^{*2}・上田 賢司^{*3}・清原 千鶴^{*4}

要旨: コンクリートのひび割れ発生メカニズムやひび割れ発生条件を明らかにするためには、コンクリートを拘束する応力とひび割れ発生の関係を明らかにする必要がある、そのためには精度の高いひび割れ試験装置が必要となる。そこで、本報告では、従来のひび割れ試験装置の問題点を克服し、拘束度を一定に保つことができ、さらにコンクリートに生じる応力を直接測定できる装置を試作した。ここでは、試作装置の概要とその性能に関する評価実験を行った。

キーワード: 収縮ひび割れ試験, ひずみ制御, 応力制御, 引張クリープ試験, 引張強度試験

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れ発生の予測と制御については古くから取り組まれているが、ひび割れ発生のメカニズム、ひび割れ分布状況や環境条件など様々な問題を抱えたまま、未だ解決されず現在に至っている。近年、コンクリートの高強度化が進み、若材齢での乾燥収縮や温度収縮、自己収縮によるひび割れが多く報告されており、ひび割れの制御方法の確立がますます重要視されている。

コンクリートは打設直後から収縮変形を開始し、その変形量と拘束度合に応じて生じる引張応力は徐々に増加する。拘束されたコンクリートの挙動は乾燥しながら極めてゆっくりとした時間で引張られる場合の破壊という問題に置き換えられる。ひび割れの発生を予測するためには刻々と変化するコンクリートの力学特性を的確に評価することが必要となる。これらは実験データを基に論じることになるが、そのためにはできるだけ精度の高いひび割れ試験を行うことが必須となってくる。そこで、ここでは、ひずみや応力を自動的に制御できる新しい収縮ひび割れ試験装置を開発し、試作した装置の性能を評価するために乾燥収縮ひび割れ実験を行った。以下は、その報告である。

2. 既往の収縮ひび割れ試験方法

収縮ひび割れ試験方法はこれまでに多くの方法が考案され、実験が行われている。**表-1**にその概要を示すが、(1)～(3)の試験方法では、拘束されたコンクリートの応力の推定は鉄筋または鋼材のひずみより算出する間接的な方法のため、必ずしも応力を正確に把握できない。特に JIS 試験方法では鋼材が曲げの影響を受けるため、正確な応力を推定するには鋼材のひずみ分布の把握が必要であり¹⁾、装置組立て時の鋼材のひずみも影響する。また、拘束度は鉄筋や鋼材の断面積に依存するため自由に变化させることができず、また、乾燥期間とともにヤング係数も変化するような場合、常時一定の拘束度を与えることが難しく、ひび割れ抵抗性の比較が困難である。これに対して、(4)の方法では、ひずみを自動的に制御できれば収縮ひび割れ試験方法としては最も適したものとなる。最近ではコンクリートに任意の温度条件と拘束条件を与えることができる可変拘束試験機 (**Variable Restrain Testing Machine**)²⁾を用いた試験方法が提案されている。VRTM 試験は、試験機本体が大きく、広いスペースを必要とし、そのため一度に実験可能となる供試体の本数が少ないなどの問題点がある。

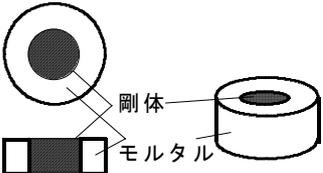
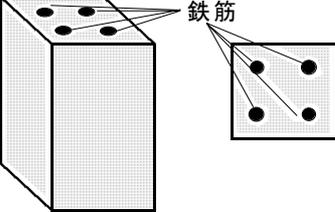
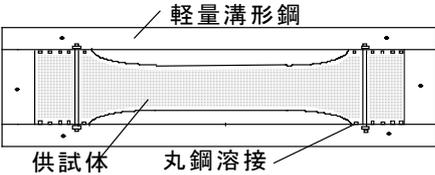
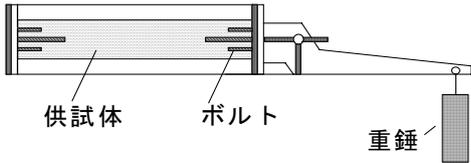
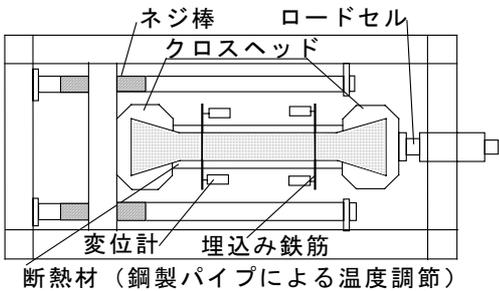
*1 大分大学大学院 工学研究科博士前期課程建設工学専攻 (正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース 教授 工博 (正会員)

*3 (株) さとうベネック 建築事業本部工事部 工博 (正会員)

*4 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース 助手 工修 (正会員)

表-1 ひび割れ試験方法の一例

試験装置の概要		特徴	
(1) リング 試験型 ³⁾		<ul style="list-style-type: none"> ・簡便で多数の供試体を試験するには適している。 ・拘束の程度が不明確である。 	
(2) 内部 拘束型 ⁴⁾		<ul style="list-style-type: none"> ・簡便である。 ・実構造物の拘束状態に対応している。 ・コンクリートと鉄筋の温度差の影響が少ない。 ・JCI 自己収縮研究委員会以自己収縮応力試験方法として提案されている⁵⁾。 ・拘束の程度を大きくできない。 ・鉄筋を埋設するため、JIS の長さ変化試験の供試体と異なるものがある。 	
(3) 外部 拘束型 ⁶⁾		<ul style="list-style-type: none"> ・拘束ひずみや拘束応力が算定できる。 ・JIS の長さ試験と対応できる。 ・JIS の乾燥収縮ひび割れ試験方法に採用されている。 ・常時一定の拘束を与えることができない。 ・型枠を組み立てる時に生じる鋼材のひずみの影響が大きい。 	
(4) 引張 装置型	従来型 ⁷⁾		<ul style="list-style-type: none"> ・完全拘束を実現できる。 ・実際の乾燥状態で生じる応力の変化には追従できない。 ・拘束率の設定および制御ができない。
	VRTM ²⁾		<ul style="list-style-type: none"> ・任意の拘束率を与えることができる。 ・供試体に生じる応力とひずみを経時的に捉えることができる。 ・一定の温度、任意の温度履歴に制御できる。 ・装置の剛性が高いため装置本体が大きく一度に実験可能な供試体本数が少ない。 ・試験機が非常に高価である。

3. 収縮ひび割れ試験装置の開発

3.1 試験装置の概要

本報告では、収縮ひび割れを解明するためには、刻々と変化するコンクリートの物性によらず拘束度を一定に保った条件で実験を行い、その結果について評価を行うことが必要であると考へた。そのため、上述した試験方法の問題点を克服し、さらに、これまで正確に把握することが困難であった拘束応力を測定できるように、(4)の引張装置型を改良した試験装置⁸⁾を試作した。本装置は、ひずみ増分を自動的に制御で

きるようにしたもので、拘束度を 0~100%まで自由に变化させることができ、ロードセルによって直接応力を測定することができる。また、VRTM 試験機と異なり、一度に 6 体まで試験を行うことが可能である。

図-1 に試験装置を示す。図-2 にひび割れ試験装置の概略を示す。供試体の形状は JIS A 1151 に準じて作製し、スクリュージャッキにより拘束を与えている。供試体には予めアンカーボルトを埋込み、鋼製のプレートを介して載荷応力が確実に伝達するようにしている。図-3 に本試



図-1 試作装置の写真

験装置の制御フローチャートを示す。制御方法は、拘束コンクリートのひずみと自由収縮ひずみを 60mm の小型埋込みゲージを埋込んで測定し、拘束コンクリートのひずみが自由収縮のひずみに対して設定した比率のひずみとなるように制御している。拘束率とは、同一条件で乾燥したコンクリート供試体の自由収縮ひずみを拘束する割合である。拘束率 100%とは自由収縮ひずみに関係なく、コンクリート供試体のひずみが試験開始時から変化しないようにする、いわゆる完全拘束状態を意味している。なお、ひずみ制御のための時間間隔は自由に設定でき、常に拘束率が一定になるようにしている。また、载荷応力が変動する場合の引張クリープ試験や応力緩和試験にも対応できる試験装置となっている。

3.2 供試体の作製方法

ひび割れ供試体型枠および引張試験体型枠を 図-4 に示す。ひび割れ供試体は、JIS A 1129 に規定されたコンクリートの長さ変化試験用供試体の断面に対応するように、中央部長さ 300mm の区間断面を 100×100mm としている。本供試体の型枠作製上で最も重要なことは、試験時に供試体に偏心荷重が作用しないよう、供試体の中心軸がずれないように作製することである。したがって、型枠の端板を確実に平行に設置できる工夫が必要となる。そこで、ここでは、端板を固定する前に、規定の長さ (945mm) の鋼管を両端板の中心に固定させることにより、端

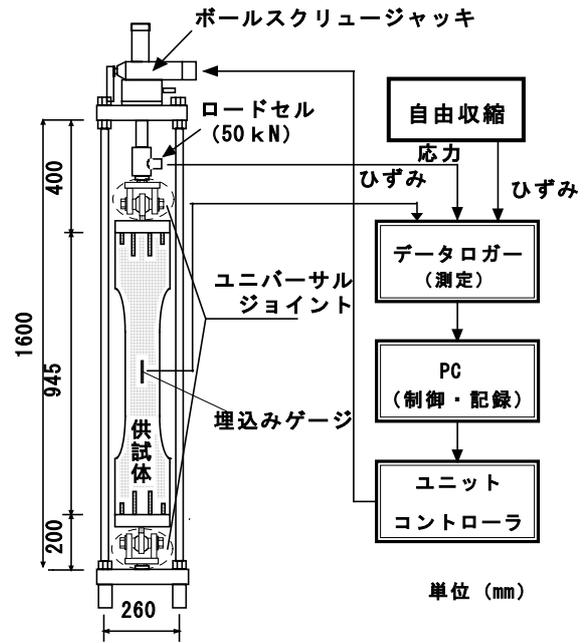


図-2 収縮ひび割れ試験装置の概略図

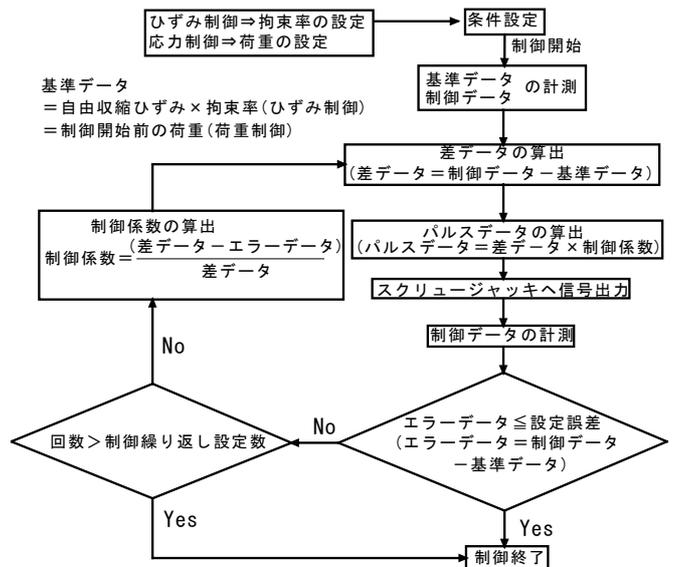


図-3 試験装置の制御フローチャート

板を平行かつ中心軸を一致させた後、側板を固定する方法をとった。この手順を加えることで、供試体を正確に作製することが可能となった。なお、ひずみの測定のための小型埋込みゲージは、釣り糸で固定し、打設の際に供試体の中央部に設置できるようにした。

4. 試作装置の評価実験

4.1 実験概要

試作した収縮ひび割れ試験装置はひび割れ試験のほかに静的引張試験や引張クリープ試験を

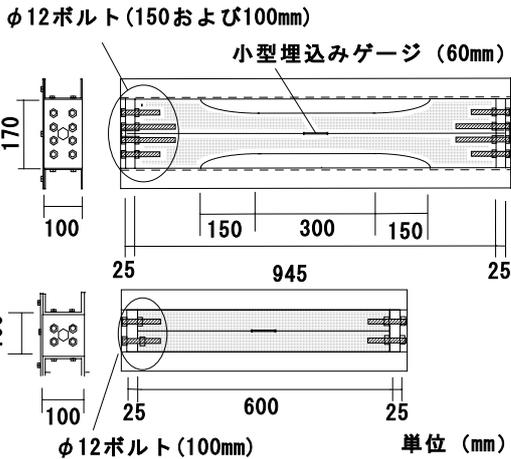


図-4 ひび割れ試験および静的引張試験供試体型枠

行う機能を備えている。その性能を確認するために試験装置の性能評価実験を行った。使用したコンクリートの調合を表-2に示す。

4.2 静的引張強度試験

装置の剛性の違いが引張強度試験に及ぼす影響について確認するため、1000kN 万能試験機を用いて引張強度試験を行い、両者の結果を比較検討した。使用した供試体は 100×100×600mm の角柱供試体であり、材齢 1, 7, 28 日で試験を行った。供試体は各材齢 3 本とし、試験材齢まですべて標準水中養生とした。また、供試体内部に埋設した小型埋込みゲージによりひずみの測定を行い、「引張応力-ひずみ曲線」を求め、引張強度の 1/2 までの割線ヤング係数を算出した。

図-5に引張強度試験結果および算出したヤング係数の経時変化を示す。試験結果は供試体3本の平均値を示している。引張強度および引張ヤング係数ともに試験装置の違いによる影響は見られなかった。これらの結果より試作した試験装置は静的引張強度試験にも充分使用できることが確認できた。

4.3 引張クリープ試験

本試作装置はロードセルにより直接応力を測定することができるため応力制御も可能となり、引張クリープ試験にも対応できる。そこで載荷材齢 1 日において乾燥条件下にある引張クリープ試験を実施し、ひずみの測定を行った。載荷

表-2 調合および使用材料

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
24	55	44.1	181	331	802	965	3.31

W ; 水, C ; 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)
 S ; 細骨材 (山砂 : 表乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 1.88%, 粗粒率 2.65)
 G ; 粗骨材 (石灰石砕石, 表乾密度 2.70 g/cm³, 吸水率 0.38%)
 s/a; 細骨材率, Ad; 混和剤 (AE 減水剤標準形 I 種)

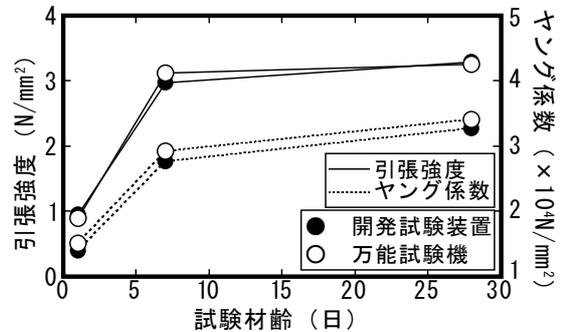


図-5 引張強度試験結果

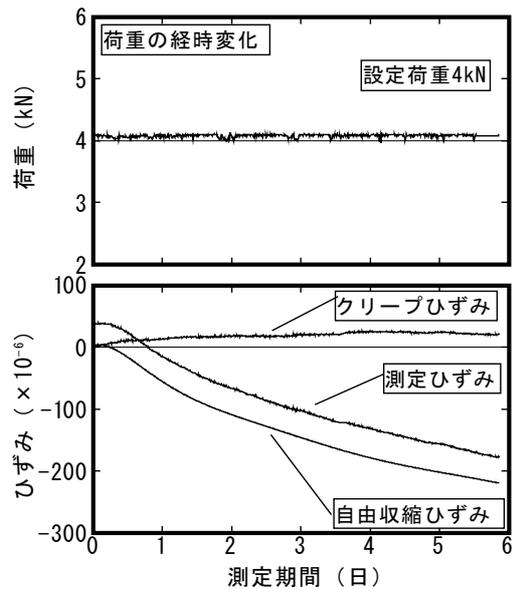


図-6 クリープ試験結果

応力は載荷開始時の静的引張強度の 40%程度である 0.4N/mm² (載荷荷重 4kN) とした。

図-6にTotalクリープ試験結果を示す。上図には載荷荷重の経時変化を、下図にはコンクリートのひずみの測定結果を示している。図中には測定ひずみと自由収縮ひずみおよびクリープひずみを示している。クリープひずみは、クリープ試験において実測された全ひずみから、自己収縮または自由収縮試験で実測されたひずみと、弾性ひずみを差し引いた値として示している。

載荷荷重は $4 \pm 0.1 \text{ kN}$ の範囲内に納まっており、載荷期間中設定した荷重を一定に制御できている。このように試作装置は、若材齢からのクリープ試験にも対応できることが確認できた。

4.4 乾燥収縮ひび割れ試験

(1) ひずみの測定方法

乾燥収縮ひび割れ試験において、拘束コンクリートのひずみを測定する際に埋込みゲージを使用することの妥当性を確認するために、**図-7**に示すように、小型埋込みゲージおよび変位計を用いてコンクリートのひずみを測定し、比較検討を行った。変位計の測定間の距離は200mmである。実験は若材齢および長期材齢におけるひずみの挙動について評価するため材齢1日、170日で実施した。拘束率は100%，すなわち、小型埋込みゲージの値を常に 0×10^{-6} となるように制御している。

実験結果を**図-8**に示す。変位計の測定値を見ると、若材齢においては $0 \pm 7 \times 10^{-6}$ の値を示しており、長期材齢においてはほとんど変動は見られず小型埋込みゲージの値と同様な傾向を示している。このことから、拘束コンクリートのひずみの測定は、小型埋込みゲージを用いても問題がないことが確認できた。

(2) 乾燥収縮ひび割れ

試作したひび割れ試験装置の性能の確認・評価を行うために、若材齢から乾燥を受けたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ実験を行った。乾燥開始材齢を1および7日とし、1日の場合は拘束率を100%および70%，7日の場合は100%のみとした。ひずみ制御のための自由収縮は拘束コンクリートと同形状の供試体を用い、ひずみの制御は2分間隔で行い、10分間隔で計測した。

図-9に乾燥収縮ひび割れ試験結果を示す。図中の▲印でひび割れが発生したことを示す。ひずみの測定結果より、拘束率を100%に設定している供試体のひずみは、 $0 \sim -3 \times 10^{-6}$ の範囲にあることが分かる。拘束率を70%に設定している供試体では、拘束コンクリートのひずみは自由収縮ひずみの28~32%の値を示しており、精度良

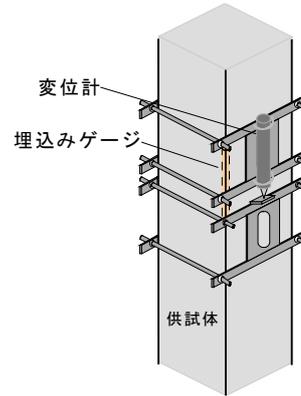


図-7 ひずみの測定方法

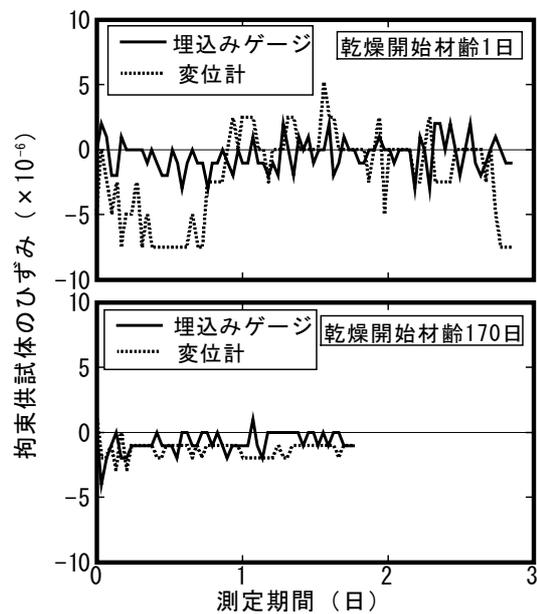


図-8 拘束コンクリートのひずみの経時変化

くひずみを制御できていることが確認できた。自由収縮ひずみから拘束コンクリートのひずみを除して算出した拘束引張ひずみの経時変化は、拘束率が低いものほど、また乾燥開始材齢が早いものほど曲線の傾きが緩やかになっている。測定されたひずみから求めた実拘束率（拘束引張ひずみ/自由収縮ひずみ）は自由収縮の小さい乾燥初期の間はばらつくが、すぐに安定し、設定した拘束率が常に得られていることが分かる。ロードセルより測定された荷重を破断面積で除した拘束応力の経時変化を見ると、拘束引張ひずみの経時変化と同様に拘束率が低いものほど、また乾燥開始材齢が早いものほど、曲線の傾きが緩やかになっている。

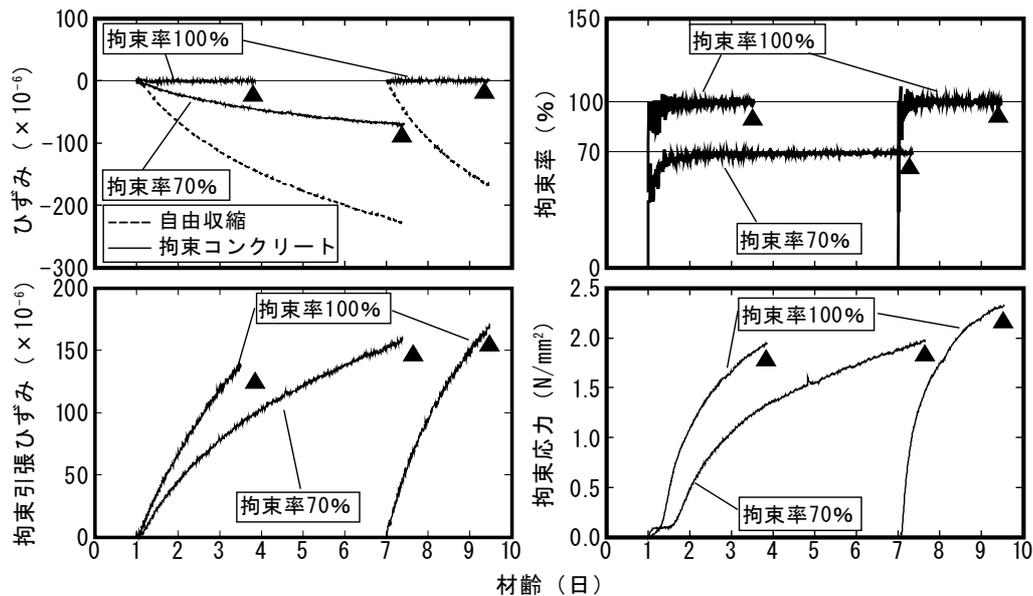


図-9 乾燥収縮ひび割れ試験結果

以上の実験結果より、図-10 に示す拘束応力と拘束引張ひずみの関係が得られる。拘束率を一定に保つことが可能な試験装置から得られた拘束応力と拘束引張ひずみの関係はコンクリートの引張変形特性を示すものである。したがって、この曲線の形状を的確にとらえ詳細に分析することによって、ひび割れ発生条件を評価することが可能になるものと思われる。

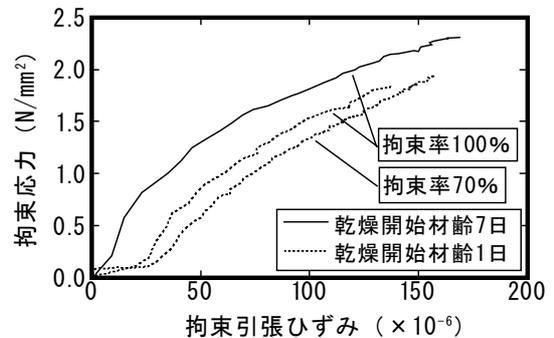


図-10 拘束応力-拘束引張ひずみの関係

5. まとめ

本報告で試作した収縮ひび割れ試験装置は、拘束率を一定に保つことができ、かつ供試体に負荷される応力を直接測定できるということが明らかとなった。今後この装置を用いて実験を行い、ひび割れ発生メカニズム解明のために多くのデータを収集する予定である。

参考文献

- 1) 上田賢司ほか: コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験における拘束鋼材のひずみ分布, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.703-708, 1997
- 2) 丸山一平ほか: 擬似完全拘束実験による若材齢コンクリートの時間依存的力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.357-362, 2002
- 3) 久保ホベルト洋ほか: リング試験による自己収縮拘

束特性の評価と損傷の蛍光顕微鏡観察, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.607-612, 2000

- 4) 大野義照ほか: 鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.579-580, 2002
- 5) 竹内良ほか: 高強度コンクリートの自己収縮応力の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19 No.1, pp.751-756, 1997
- 6) 牧角龍憲ほか: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.185-188, 1983
- 7) 佐治泰次ほか: 拘束状態にあるモルタルに生ずる乾燥収縮応力度についての実験の研究, 日本建築学会論文報告集, 第101号, pp.1-6, 1964
- 8) 特許出願 2002-255790: コンクリートの収縮ひび割れ試験装置, 佐藤嘉昭ほか, 2002.8