

論文 円環状試験体を用いた収縮が拘束される応力履歴下におけるコンクリートの引張応力-ひずみ関係の測定

市川 大介*1・島 弘*2

要旨: コンクリート構造物の設計や施工において、コンクリートの収縮が拘束されることによるひび割れの発生の有無および発生時期を予測することが重要である。この予測のためには、コンクリートの若材令における拘束応力下での応力-ひずみ関係を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、若材令でも収縮が拘束できる円環状のコンクリートを内側の鋼管で拘束する試験体を用いて応力-ひずみ関係を測定することを試みた。その結果から、自由収縮ひずみと円環状試験体の鋼管のひずみ変化を測定することによって、若材令において収縮が拘束される応力履歴下での応力-ひずみ関係を求めることができることを明らかにした。

キーワード: 乾燥収縮, ひび割れ, 若材令, 円環状試験体, 引張応力, 応力-ひずみ関係, クリープ

1. はじめに

コンクリート構造物を設計あるいは施工する上で、コンクリートの収縮が拘束されることによるひび割れの発生を予測することは重要である¹⁾。コンクリートの収縮の原因には自己収縮と乾燥収縮があり、それに対する拘束には鉄筋やコンクリート自身による内部拘束と近接部材による外部拘束がある。

収縮によるひび割れが発生するか否か、あるいは乾燥開始の何日後に発生するかを予測するためには、コンクリートの引張強度と拘束による引張応力のそれぞれの経時的な増加を知る必要がある。

拘束による引張応力は、拘束の程度と収縮量に比例すると考えるのが一般的であり、この場合は現状の技術で予測できないこともない。ただし、コンクリートに応力が生じた場合には、クリープあるいはリラクセーションという現象を起し、時間とともに応力が緩和される。クリープはコンクリートの強度に対する応力の比（応力強度比）に比例するとされており、若材令でコンクリートの強度が小さいときには、クリープが大きくなると予想される。すなわち、収縮によるひび割れ発生を予測するためには、収縮拘束応力下での引張クリープ特性をコンクリートの種類や収縮開始材令などに応じて明らかにする必要がある。

そこで、本研究は、コンクリートの収縮を若材令においても拘束し、引張応力が時間とともに増加する収縮拘束の応力履歴状態における引張応力-ひずみ関係を測定する新しい方法を試みるものである。

2. 現状と問題点

コンクリートの収縮拘束応力下における引張応力-ひずみ関係の測定に関しては、図-1に示すような外部

の鋼材で拘束するものや内部の鉄筋で拘束するものがある。しかし、これらの試験方法は、若材令においてはコンクリート強度が小さいために定着部が滑り、十分に拘束が出来ないという問題点がある。

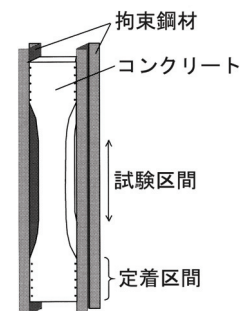


図-1 JISの拘束試験体

一方、コンクリートの打設直後から完全に拘束が出来る方法として、鋼管の外側に円環状のコンクリートを打設する試験体がある。本研究では、この鋼管の厚さを調整し、試験体のひずみを測定することによって、応力-ひずみ関係を求めることを試みた。

3. 実験

3.1 実験条件

実験要因は、コンクリートの収縮量、乾燥開始材令および収縮に対する拘束度である。実験条件を表-1に、各シリーズにおける試験体の条件を表-2に示す。

コンクリートの収縮量としては、環境が温度20℃、湿度60%における乾燥収縮の大きさが、乾燥開始材令1日の14日収縮ひずみで約500μのものをコンクリート1および約430μのものをコンクリート2の二種類とした。

*1 高知工科大学 工学部社会システム工学科 (正会員)

*2 高知工科大学 工学部社会システム工学科教授 工博 (正会員)

乾燥開始材令としては、1日、7日および28日とした。

収縮に対する拘束度は、拘束のない自由収縮のものおよび拘束度が二つの合計三種類とした。

表-1 実験条件

シリーズ番号	コンクリート (乾燥開始材令1日の14日収縮ひずみ)	乾燥開始材令(日)
1	コンクリート1 (500 μ)	1
2	コンクリート2 (430 μ)	1
3		7
4		28

表-2 各シリーズにおける試験体条件

試験体番号	収縮拘束度	試験体形状
1	0	直方体
2	小	拘束鋼管厚 6.4mm
3	大	拘束鋼管厚 12.7mm

試験体の数は、各シリーズに対して、直方体試験体は3本、円環状試験体はそれぞれ1個とした。

3.2 試験体

(1) 材料

コンクリートの示方配合およびそれぞれのスランブ値、空気量を表-3に示す。コンクリート1とコンクリート2は、配合条件は同じであるが、粗骨材の種類を変えることによって乾燥収縮の大きさを変化させた。粗骨材として、コンクリート1には輝緑岩およびコンクリート2には砂岩の砕石を用いた。

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は海砂と石灰石砕砂を混合して粗粒率を2.77としたもの、減水剤は変性リグニンスルホン酸系を用いた。

コンクリートの圧縮強度は、コンクリート1が材令14日で29.4MPa、コンクリート2が材令14日で25.9MPa、材令28日で34.5MPaである。

鋼管には、JIS G 3444に適合する一般構造用炭素鋼鋼管を用いた。

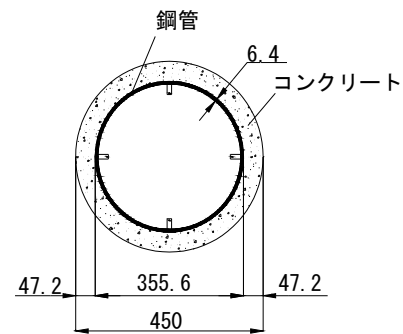
(2) 形状・寸法

コンクリートの収縮を拘束しない試験体は、幅100mm×高さ100mm×長さ400mmの直方体である。

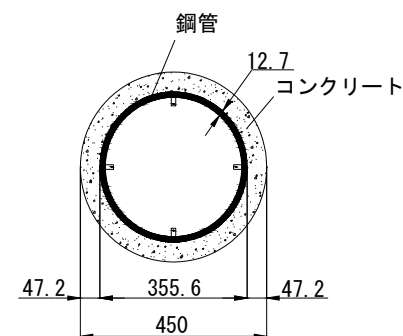
収縮を拘束する試験体の形状は、図-2に示すような高さが100mmの円環である。外径が355.6mmで厚さが6.4mmおよび12.7mmの鋼管の外側に、外径が450mmの円環状のコンクリートを打設するものである。

円環状試験体では、円環軸方向のみに水分が移動するように、円環の外周側をシールするものとする。それに対応して、自由収縮の直方体試験体においても、対面の2側面および2端面をシールするものとする。

ひずみの測定には標点間300mmのコンタクトゲージを用いることにし、直方体試験体の乾燥する2面の中央に距離300mmで鋼球を打ち込んだチップを埋め込んでいる。また、円環状試験体のひずみ測定の標点用として、鋼管内面に幅20~25mm、厚さ10mmの平鋼を対角に4ヶ所溶接し、直径方向の距離300mmの位置に標点用の鋼球を打ち込んでいる。



(a) 拘束小 (拘束鋼管厚=6.4mm)



(b) 拘束大 (拘束鋼管厚=12.7mm)

図-2 拘束試験体の形状と寸法 (単位: mm)

表-3 コンクリートの配合およびスランブの試験結果

コンクリート	粗骨材の種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 A
1	輝緑岩	6.0	2.3	46.0	180	300	807	962	3.0
2	砂岩	12.0	3.5	46.0	180	300	807	944	3.0

(3) 作製

円環試験体の外周側の型枠としては、内径 450mm の紙製ボイド管を用いた。内型枠は拘束用鋼管である。鋼管外面に剥離剤等の処理は何も施していない。

コンクリートの打込みは、直方体型枠には2層に分けてバイブレーターを使用し、円環状試験体には3層を突き棒で締め固めた。打込み後は、温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室で養生した。直方体試験体の全型枠および円環状試験体の外周型枠の脱型枠をコンクリートの打込みから 24 時間後に行った。脱型枠後、直方体試験体の4面および円環状試験体の外周を防水用のブチルゴム系アルミテープを用いて、隙間ができないようにテープを重ねながらシールした。乾燥開始後の環境は、温度 20℃、湿度 60% である。

乾燥開始材令1日のシリーズ以外の試験体は、シール後から乾燥開始の時期まで 20℃ の水中で養生を行った。

また、コンクリートの圧縮試験用に、φ100×H200mm の円柱供試体を JIS A 1132 にしたがって作製し、各シリーズで円環試験体と同じ環境履歴の養生を行った。

3.3 ひずみ測定

直方体試験体のひずみは、各面を3回測定し、合計18個のデータを平均したものを測定値とした。

鋼管のひずみは、鋼管内側に対角に設置した標点間の長さ変化を元の標点間距離で除して求める。測定した結果を鋼管内面のひずみとした。ひずみの測定は、円環裏表各2ヶ所の合計4ヶ所で行い、それらの平均値を測定値とした。なお、1ヶ所では3回の測定を行い、その平均をその箇所のデータとした。

収縮ひずみの基準となる乾燥開始前の標点間の距離は、乾燥開始材令1日のシリーズ1および2の試験体では、脱型枠のシーリングの直後に測定し、脱型枠後に水中養生を行うシリーズ3および4の試験体では、乾燥開始時に測定した。以後、原則として1日毎に標点間の長さ変化を測定した。

測定したひずみが過去の値に対して大きく減少した時点で、ひずみが解放される結果および目視による確認によって既にひび割れが発生していると判断し、その試験体の測定を終了した。

4. 実験結果および考察

4.1 ひび割れの発生

ひび割れ発生日は、ひび割れが既に入っていると判断した測定日の前回の測定日、すなわち本実験では1日前とした。乾燥開始材令が1日のシリーズ1および2では、乾燥開始から11日から13日にかけてひび割れが発生した。乾燥開始材令が7日のシリーズ3では、乾燥開始から17日と19日に発生した。乾燥開始材令が28日のシ

リーズ4の結果は両乾燥開始材令のもの間となっている。また、拘束度の違いの影響に関しては、鋼管厚が6.4mmの試験体のひび割れは、鋼管厚が12.7mmのものひび割れ発生から、シリーズ2で1日後、他のシリーズは2日後に発生し、拘束度の違いに対して大きな差はない結果となった。

4.2 試験体のひずみ

各シリーズにおけるひび割れが発生するまでの乾燥時間とひずみの変化との関係を図-3から図-6に示

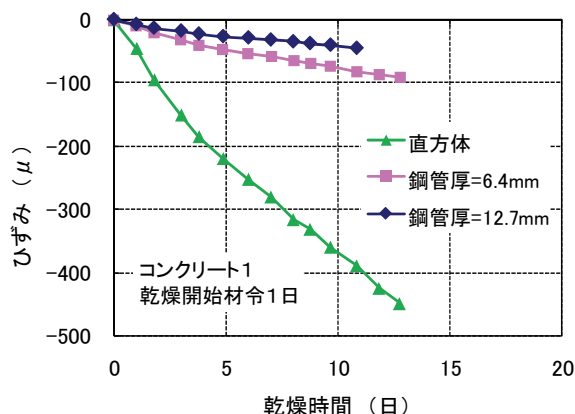


図-3 シリーズ1の測定ひずみ

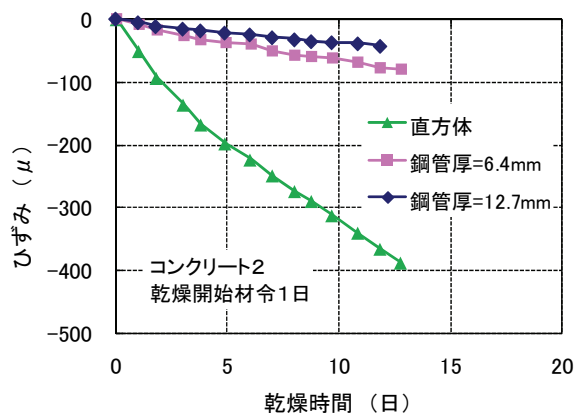


図-4 シリーズ2の測定ひずみ

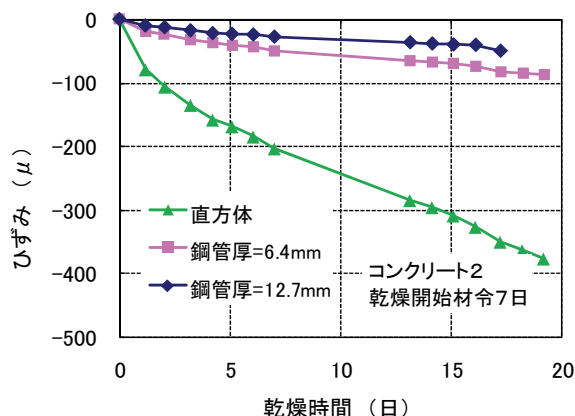


図-5 シリーズ3の測定ひずみ

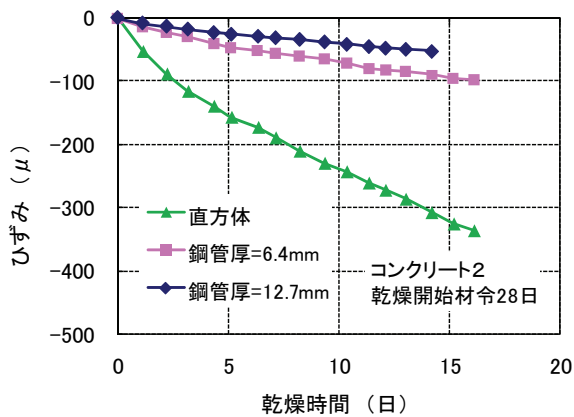


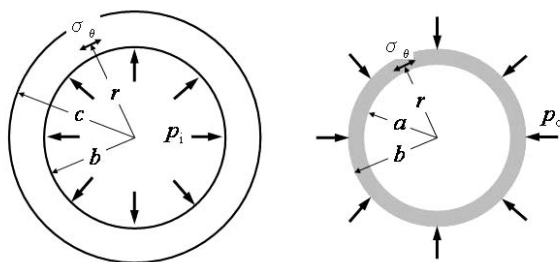
図-6 シリーズ4の測定ひずみ

す。自由収縮の直方体では、シリーズによって差はあるが、たとえば、乾燥時間10日において250μから350μ程度の範囲に大きく収縮している。収縮を拘束した円環状試験体では、自由収縮試験体の収縮ひずみに対して、鋼管厚が6.4mmの試験体で約1/5、鋼管厚が12.7mmの試験体で約1/10程度となっている。

4.3 拘束による引張応力

円環状コンクリートの収縮が内側の鋼管で拘束される場合にコンクリートに生じる引張応力を厚肉円筒理論によって求める²⁾。図-7(a)に示すような、内径 b 、外径 c の厚肉円筒が等分布した内圧 p_i を受ける場合、半径 r における円周方向の応力 σ_θ は、式(1)のようになる。

$$\sigma_\theta = \frac{b^2 p_i}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (1)$$



(a) 拘束を受けるコンクリート (b) 収縮を拘束する鋼管
図-7 厚肉円筒理論

一方、図-7(b)に示すような内側鋼管が外圧を受ける場合、外圧 p_o と鋼管の内面($r=a$)におけるひずみ ε_a との関係は式(2)のようになる。

$$p_o = -\frac{b^2 - a^2}{2b^2} E_s \varepsilon_a \quad (2)$$

外側円環の内圧 p_i は、内側鋼管に対する外圧 p_o と等しいので、式(1)と式(2)を用いて、ひずみ ε_a からコンクリート円環中の応力分布が求まる。この応力分布は、断

面内でほぼ直線的に変化するが、コンクリートの場合には、内外での応力差はクリープによって緩和され、弾性理論よりも小さくなり、断面内で平均化される方向に行くものと思われる。本研究においては、円環の外径と内径の比を1.25程度とし、外面と内面における応力の比は弾性理論で0.8弱であるので、コンクリート円環内の応力分布は平均化し、ひずみ分布は円環内面と同じになるという仮定を用いる。このとき、コンクリート応力 σ_c は、式(1)に $r=(b+c)/2$ を代入して、式(3)で求まる。

$$\sigma_c = \frac{b^2}{c^2 - b^2} \left\{ 1 + \left(\frac{2c}{b+c} \right)^2 \right\} p \quad (3)$$

ここで、鋼管材料のヤング係数を $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした時、本実験における円環の寸法では、鋼管厚さ6.4mmで $\sigma_c = -26,400 \varepsilon_a$ 、鋼管厚さ12.7mmで $\sigma_c = -51,500 \varepsilon_a$ となる。

測定ひずみを用いて計算したコンクリート円環の引張応力の経時変化の例を図-8および図-9に示す。引張応力は、乾燥時間とともに大きくなっている。また、同じ時間経過でみると、拘束力の大きい方の引張応力が大きくなっている。

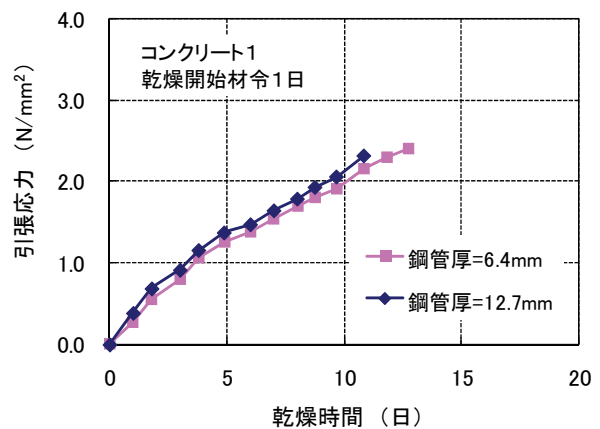


図-8 シリーズ1の引張応力の経時変化

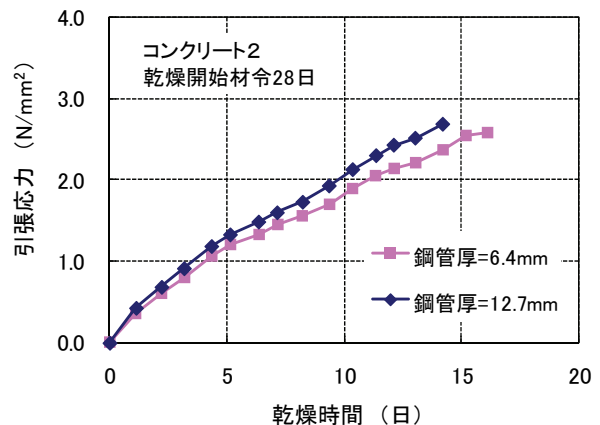


図-9 シリーズ4の引張応力の経時変化

4.4 拘束力による引張ひずみ

拘束されたコンクリート円環断面内のひずみ分布に関しても、コンクリートがリラクセーションを起こすために、弾性体としては取り扱いできず、鋼管内面のひずみ測定値からはコンクリート円環断面内の正確なひずみ分布が計算できない。ただし、コンクリート円環の内面におけるひずみ ε_{cb} は、鋼管の外面のひずみと同じとして、測定するひずみ ε_a から以下のように求めることができる。

コンクリート円環の円環内面 ($r=b$) における拘束力による半径外側方向への変位 u_{cb} は、図-10 に示すように、自由収縮コンクリート円環の内面 ($r=b$) における自由収縮による半径内側方向への変位 u_{c0b} と拘束されたコンクリート円環の内面 ($r=b$) における半径内側方向への変位 u_{sb} の差であり、式(4)で表される。

$$u_{cb} = u_{c0b} - u_{sb} \quad (4)$$

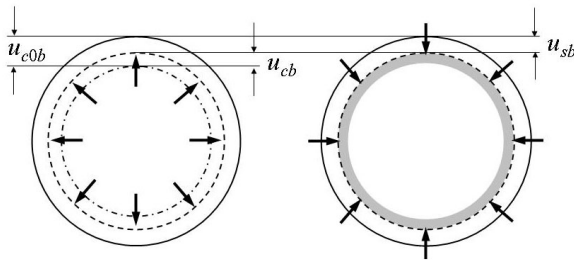


図-10 コンクリート円環内面の変位

自由収縮による変位 u_{c0b} は、円環のひずみの測定値を ε_{c0} とすると、式(5)で表される。

$$u_{c0b} = b \varepsilon_{c0} \quad (5)$$

鋼管に外圧 p_o が作用するときの鋼管外面 ($r=b$) における変位成分 u_{sb} は、式(6)で表される。

$$u_{sb} = \frac{1}{E_s} \frac{b}{a^2 - b^2} \left\{ (1 + \nu_s) a^2 + (1 - \nu_s) b^2 \right\} p_o \quad (6)$$

これに式(2)の p_o を代入すると、式(7)となる。

$$u_{sb} = \frac{1}{2b} \left\{ (1 + \nu_s) a^2 + (1 - \nu_s) b^2 \right\} \varepsilon_a \quad (7)$$

これから、拘束されたコンクリート円環の内面 ($r=b$) における円周方向の引張ひずみ ε_{cb} は、式(4)、式(5)および式(7)から、式(8)で表される。

$$\varepsilon_{cb} = \frac{u_{cb}}{b} = \varepsilon_{c0} - \frac{1}{2b^2} \left\{ (1 + \nu_s) a^2 + (1 - \nu_s) b^2 \right\} \varepsilon_a \quad (8)$$

ここで、鋼管材料のヤング係数を $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu_s = 0.3$ とした時、本実験における円環の寸法では、鋼管厚さ 6.4mm で $\varepsilon_{cb} = 0.954\varepsilon_a - \varepsilon_{c0}$ 、鋼管厚さ 12.7mm で $\varepsilon_{cb} = 0.910\varepsilon_a - \varepsilon_{c0}$ となる。

測定ひずみを用いて計算したコンクリート円環の拘

束外力による引張ひずみの経時変化を図-11 および図-12 に示す。拘束による引張応力と同様に、同じ乾燥時間において、拘束度の大きい試験体の引張ひずみが大きくなっている。

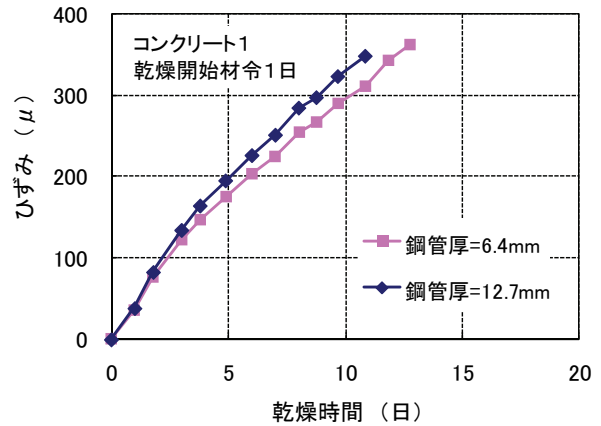


図-11 シリーズ1の引張ひずみの経時変化

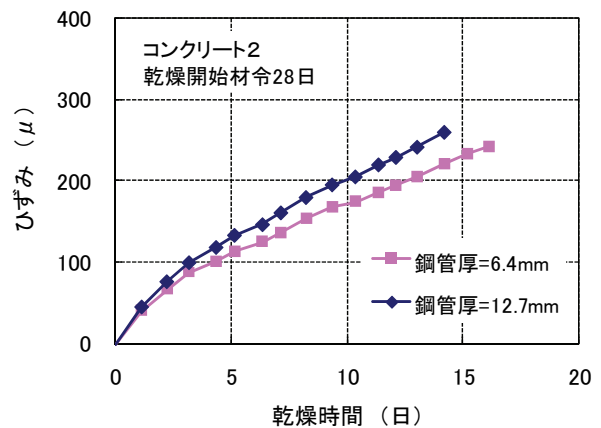


図-12 シリーズ4の引張ひずみの経時変化

4.4 引張応力-ひずみ関係

実験で得られた鋼管で収縮が拘束されるコンクリートの引張応力-ひずみ関係を図-13 から図-16 に示す。

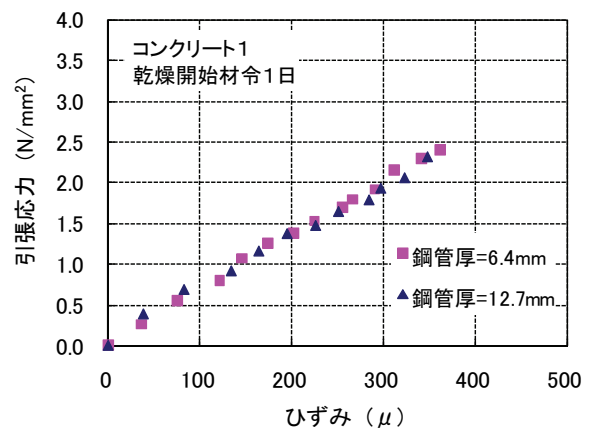


図-13 シリーズ1の引張応力-ひずみ関係

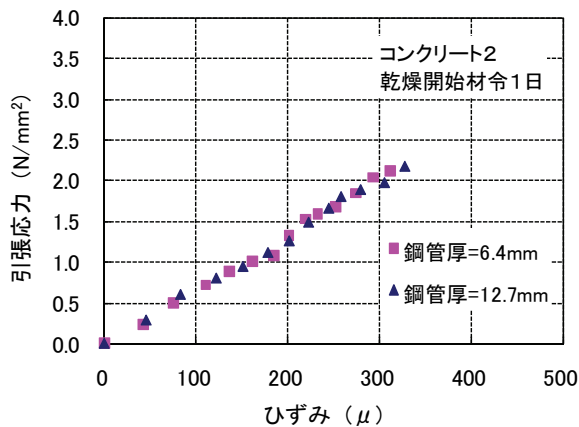


図-14 シリーズ2の引張応力-ひずみ関係

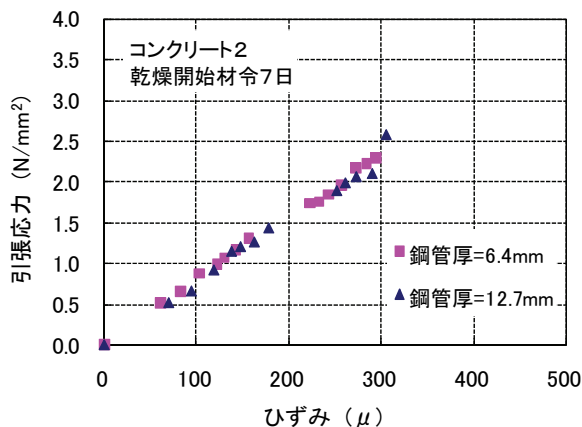


図-15 シリーズ3の引張応力-ひずみ関係

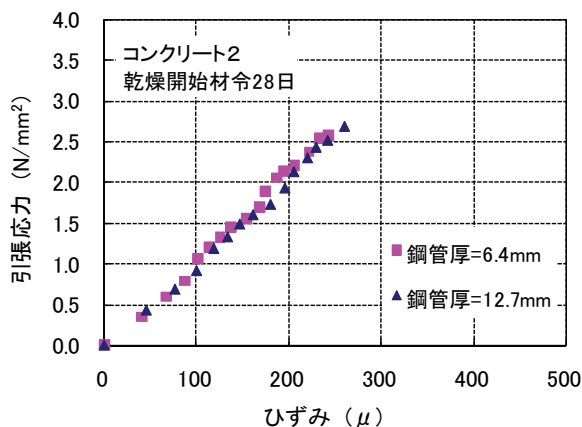


図-16 シリーズ4の引張応力-ひずみ関係

実験から得られた引張応力-ひずみ関係は、ほぼ直線の形状となっている。また、拘束度による違いは見られない。ひび割れ発生時の引張強度は、コンクリート1の乾燥開始材令1日目で約 2.5 N/mm²、コンクリート2においては、乾燥開始材令の増加とともに約 2.2 N/mm² から約 2.7 N/mm² に順に大きくなっている。引張強度の大き

さは、ひび割れ発生時における円柱供試体の圧縮強度と比較すると、圧縮強度の 1/12~1/13 であり、割裂試験によるものと同程度の結果となった。

図-13 から図-16 の応力-ひずみ関係を直線とした傾きをヤング係数とした場合、それらの値はシリーズ1から3では 7 kN/mm² 程度、シリーズ4では 10 kN/mm² 程度である。通常のコンクリートの圧縮試験方法によるもの、例えば土木学会コンクリート標準示方書³⁾の圧縮強度が 18 N/mm² の時の 25 kN/mm² よりも小さくなっている。これは、引張クリープの影響を表しているものと思われる。

以上のことから、コンクリートの自由収縮ひずみおよび円環状のコンクリートの収縮を内側で拘束する鋼管のひずみを測定することによって、収縮が拘束される応力履歴下での引張応力-ひずみ関係を測定できるものと思われる。

この試験方法によるクリープ係数などの定量的な検討は今後の課題としたい。

5. 結論

円環状のコンクリートの収縮を内側で拘束する鋼管のひずみ変化を測定する実験結果から、以下の結論が得られた。

- (1) 円環状のコンクリートの収縮を内側で拘束する鋼管のひずみ変化を測定することによって、若材令において収縮が完全に拘束される応力履歴下での応力-ひずみ関係を求めることができる。
- (2) 収縮が拘束される応力履歴下における応力-ひずみ関係は、ほぼ直線の形状となった。
- (3) 収縮が拘束される応力履歴下における引張強度は、割裂試験によるものと同程度であった。
- (4) 収縮が拘束される応力履歴下におけるヤング係数は、圧縮試験方法によるものよりも小さい値が得られた。

謝辞：実験の実施にあたっては、高知工科大学COE職員の宮地日出夫氏をはじめコンクリート研究室の皆様にご協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 特集*コンクリート構造物の収縮ひび割れの予測と制御, コンクリート工学, Vol. 43, No. 5, 日本コンクリート工学協会, 2005. 5
- 2) 川本脩万: 応用弾性学, 共立出版, pp. 67-70, 1968
- 3) 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, p. 44, 2008. 3