

収縮が拘束されたコンクリート一軸供試体における引張変形成分の実験的検討

コンクリート研究室 相馬 直樹

指導教員 下村 匠

要旨： 拘束鋼材の脱着を可能にした一軸拘束収縮試験体を用いて、自己収縮と乾燥収縮がバネ拘束されたコンクリート一軸供試体の引張変形に含まれる瞬間弾性成分、遅れ弾性成分、非回復変形を実験的に抽出した。 載荷経路によりそれらの成分がどう変わるかを検討した。 既往の研究における試験結果と併せて、収縮が拘束されたコンクリートの持続引張変形成分を検討した結果、持続載荷されたコンクリートに導入される引張応力が大きいほど、除荷時の瞬間弾性ひずみおよび非回復ひずみは大きくなり、収縮の種類・割合や載荷履歴の影響を受けないことを明らかにした。

キーワード： 自己収縮, 乾燥収縮, 有効ひずみ, 一軸拘束収縮試験

1. はじめに

コンクリートは温度変化に伴う温度収縮, 水和の進行による巨視的な自己収縮, 水分逸散に伴う乾燥収縮などの収縮現象を示す。 これらの収縮が拘束された場合, 拘束条件に応じた引張応力および引張有効ひずみがコンクリートに導入される。 これらがコンクリートの引張強度あるいは引張限界ひずみなどの限界値に達した時点でひび割れが生じるものと考えられる。 そのため, 収縮が拘束されることによって生じる収縮ひび割れの発生予測を行うためには, コンクリートの応力と有効ひずみの関係を定量的に把握する必要がある。

乾燥収縮は, 進行速度が緩慢であることによる影響, コンクリートの材料・配合の影響, 水分移動により生じる空間的不均一性の影響などを受ける。 これらの影響を考慮した引張変形特性とひび割れ発生条件を明らかにすることが重要である。 青木は, 乾燥収縮を対象として, その収縮速度に準ずる時間スケールや, 乾燥条件により内部拘束の影響を変化させてコンクリートの時間依存性を有する引張変形特性とひび割れ応力について検討した。¹⁾

自己収縮は材料的な均一条件と水和反応の空

間的一様性が保たれば内部拘束の影響を受けない。 しかし, 拘束を受けた場合若材齢時のコンクリートに持続引張応力を作用させることにより硬化後の変形特性に影響することがあるため, 乾燥収縮に関する検討を行う上では自己収縮の影響も考慮する必要がある。

収縮が拘束されたときの有効ひずみの導入特性を明らかにするために佐藤は JIS 一軸拘束収縮試験を応用して乾燥期間中に拘束解放および吸湿させる実験を行った。 この実験により有効ひずみには, 瞬間弾性ひずみ, 時間依存性回復ひずみ, 非回復ひずみが含まれることを明らかにした。²⁾

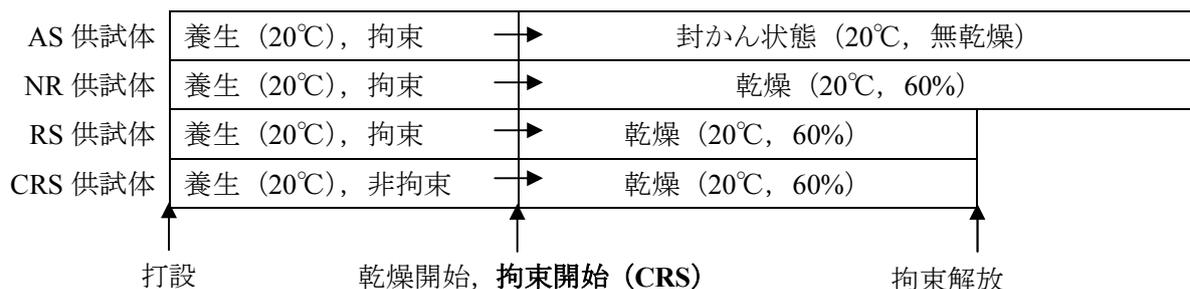
本研究は乾燥収縮のみではなく打設直後からの自己収縮も含め, 拘束条件と養生条件を変化させたそれまでに導入された引張応力と有効ひずみの成分を検討する。 それに加えて過去の実験結果と併せて収縮拘束によりコンクリートに導入された引張変形成分について検討する。

2. 実験概要

2.1 実験条件

自己収縮および乾燥収縮を断続的に拘束可能なコンクリート一軸拘束収縮試験体を用いて試験を行った。 各実験の流れを表—1 に示す。

表—1 各一軸拘束収縮試験体と実験の流れ



拘束条件が異なる実験の供試体概要を表—2 に示す。供試体数は、各試験一体ずつとした。実験に用いたコンクリートの配合および使用材料を表—3 に示す。実験には自己収縮が比較的大きいと考えられる高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートを使用し、打設直後からの自己収縮、乾燥収縮が拘束されることにより、コンクリートに導入される応力と有効ひずみについて検討することとした。

一軸拘束収縮試験と自由収縮試験の供試体は、打設後ポリエチレンシートを用いて乾燥を防ぎ、温度 20°C の室内に静置した。コンクリート打設から 24 時間後に打設面をアルミテープにより封かんし、同室内で所定材齢まで静置した。養生日数を変化させたのは全収縮のうち乾燥収縮と自己収縮の割合を変化させるためである。

2.2 打設後から拘束する一軸拘束収縮試験

拘束条件に問わず、実験では図—1 に示す JIS 一軸拘束収縮試験体の応用型を使用している。試験体は、拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性を評価するために用いられる試験を佐藤が応用し、図—2 に示すような工夫を定着区間に施したものである³⁾。

表—1 で示した RS 供試体は、NR 供試体と同じ環境で乾燥させコンクリートの引張応力が 2.2、3.0 および 3.2MPa に達したときにコンクリートを一軸拘束している鋼材を取り除き、瞬間的に除荷することによってその時点での引張変形成分を検討する試験体である。コンクリートと拘束鋼材を直接定着させずに、両者間に厚さ約 4

mm の鋼板を挟んでいる。AS 供試体は、打設から 24 時間乾燥させない状態に保った後脱型し、ただちにアルミテープにより封かんしたものである。終始乾燥させないので、自己収縮による応力のみが導入される。

表—2 供試体概要

供試体名	養生日数	乾燥後拘束日数	拘束解放応力
AS	2 日	45 日	—
NR-2	2 日	3 日	—
NR-23	23 日	63 日	—
RS2.2-7	7 日	0 日	2.2MPa
RS3.0-7	7 日	65 日	3.0MPa
RS3.2-23	23 日	19 日	3.2MPa
CRS-2.6-2	2 日	34 日	2.6MPa
CRS2.4-7	7 日	81 日	2.4MPa
CRS-23	23 日	63 日	—

表—3 コンクリートの配合および使用材料

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	BB	S	G	SP
26.5	187	369	336	728	778	5.29

W：水道水

C：普通ポルトランドセメント

BB：高炉スラグ微粉末

S：細骨材（密度）

G：粗骨材（密度）

SP：高性能 AE 減水剤

2.3 乾燥開始時から拘束する一軸拘束収縮試験

試験期間中に生じる自己収縮に伴う応力導入は、乾燥により生じる引張応力および有効ひずみに影響を与えるものと考えられる。乾燥以前に導入された応力が乾燥以降の引張変形特性にどの程度影響を与えるのかを検討することを目的として養生期間中のコンクリートに収縮応力が導入されない一軸拘束収縮試験を行った。

養生期間中の応力導入を排除する方法として、定着区間の鋼材を乾燥開始時に溶接することが好ましいと考えられたが、同一の型枠を用いて簡単に操作できることから JIS 一軸拘束収縮試験体の応用型を用いることとした。方法としては、打設後から硬化が始まると考えられる時点までボルトとナットを接合することにより仮止めし、乾燥開始まではボルトからナットを緩めて拘束を解除し、乾燥開始と同時にナットを締めて拘束を開始する。

2.3 応力と有効ひずみの算定

各拘束条件下における一軸拘束収縮試験拘束収縮試験体の断面平均コンクリート応力は式(1)で求める。

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

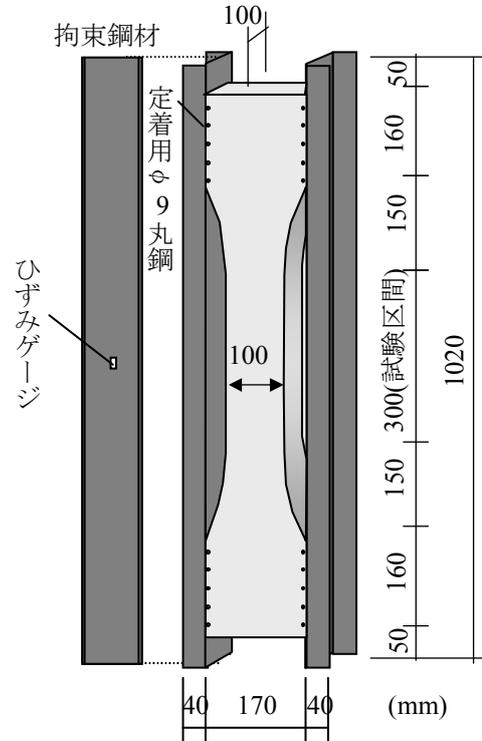
ここに、 σ_c : 試験区間のコンクリート断面の応力、 A_s : 拘束鋼材の断面積、 A_c : 試験区間のコンクリート断面積、 E_s : 拘束鋼材の弾性係数、 ε_s : 拘束鋼材のひずみである。

コンクリートの有効ひずみについては式(2)で求める。

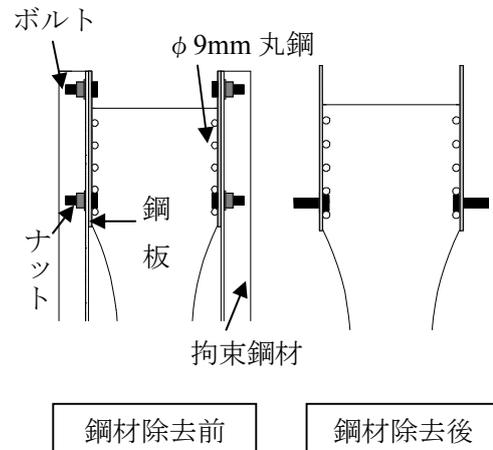
$$\varepsilon'_{ef} = -\varepsilon_c + \varepsilon'_{sh} \quad (2)$$

ここに、 ε_e : 試験区間のコンクリートの有効ひずみ（伸張を正）、 ε_c : 試験区間のコンクリートひずみ（収縮を正）、 ε_{sh} : 自由収縮試験体のひずみ（収縮を正）である。なお、拘束鋼材の着脱のない試験体については試験区間のコンクリートひずみのかわりに拘束鋼材のひずみを用いている。拘束鋼材の着脱を行う試験体のコンクリートひずみ

についてはコンクリートに貼り付けたひずみゲージを用いている。なお、養生期間中の自由収縮供試体のひずみの測定は非接触変位計を用いた。



図—1 拘束されたコンクリートの乾燥収縮試験方法供試体 (JIS)



図—2 一軸拘束収縮試験体応用型 (定着部)

3. 実験結果

3.1 打設後から拘束する一軸拘束収縮試験

(1) ひずみの経時変化

表—3 に各乾燥開始材齢における強度試験結果を示す。各養生条件における自由収縮ひずみの経時変化を図—3 に、NR-23 および RS3.2-23 供試体の拘束鋼材のひずみ、自由収縮ひずみの経時変化を図—4 に示す。一軸拘束収縮試験体の定着区間を工夫した RS 供試体の鋼材ひずみの経時変化は NR 試験体とほぼ同一の傾向を示しており、既往の試験方法³⁾における結果を再確認することが出来た。

(2) 応力—有効ひずみ関係

NR, RS シリーズの有効ひずみの経時変化を図—4 に示す。拘束解放後に瞬間的にひずみが生じた後に、時間の経過に伴い回復するひずみが生じ、最終的に回復しないひずみ成分があることが分かる。図—5 に NR, RS シリーズの応力—有効ひずみ関係を示す。拘束解放時の応力が大きいほど、瞬間弾性ひずみと非回復ひずみが大きくなることが本研究においても確認された。また、RS シリーズのうち RS2.2-7 については、拘束解放後に有効ひずみの回復が収束した段階で拘束鋼材の取り付けにより再拘束した。再拘束した後の挙動としては、非回復ひずみが既に解放されており、遅れ弾性ひずみが小さいために、再載荷時の剛性は除荷剛性とほぼ同じ傾きを示した。

3.3 乾燥開始時から拘束する一軸拘束収縮試験

(1) ひずみの経時変化

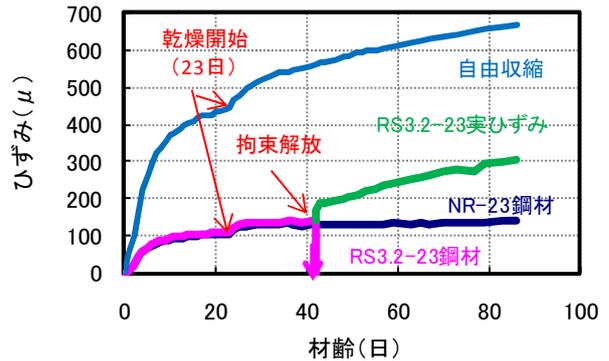
図—6 に NR-23 および CRS-23 供試体の拘束鋼材のひずみと自由収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥開始時に定着区間をボルト接合することで拘束鋼材を取り付ける CRS23 では、乾燥前に供試体を拘束していないので拘束鋼材のひずみは当然生じない。

(2) 応力—有効ひずみ関係

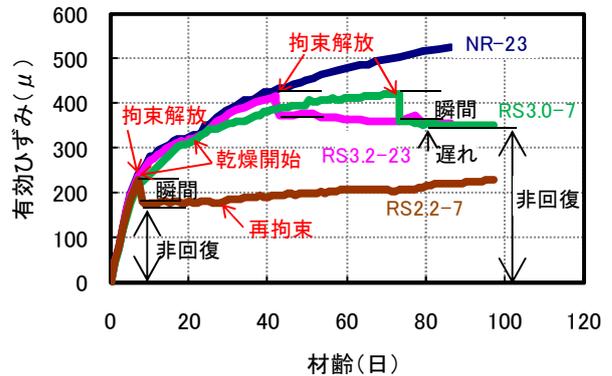
図—7 に NR, CRS シリーズの応力—有効ひずみ関係を示す。CRS シリーズでは乾燥開始以前に

表—3 強度試験結果

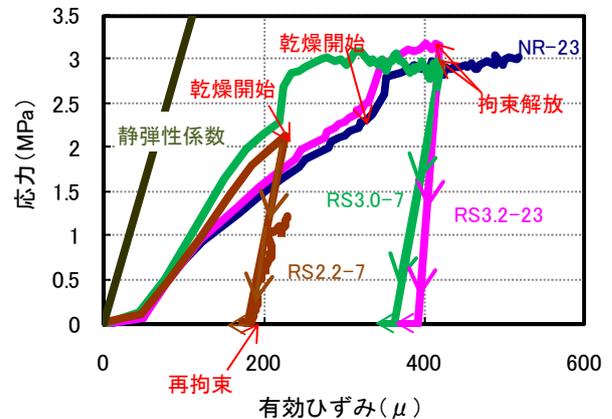
材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 (MPa)
2	45.0	2.59	22231
7	51.5	3.44	35556
23	63.1	3.06	28888



図—3 ひずみの経時変化



図—4 有効ひずみの経時変化



図—5 応力—有効ひずみ関係

応力が導入されないが、CRS シリーズに比べて養生中拘束を行った NR シリーズの剛性が低いことは、供試体に先行導入された応力により材料内部に損傷を与えたことよりも、CRS シリーズの拘束開始材齢が異なることが強く影響している。CRS シリーズにおいても、乾燥途中で拘束を解放することによって、有効ひずみを実験的に抽出することに成功した。

4. 有効ひずみの成分に関する検討

4.1 既往の研究結果

本研究で行った一軸拘束収縮試験の結果より得られた拘束解放時における有効ひずみの成分の検討を既往の試験結果（以下、W/C55%）⁴⁾と併せて行う。なお、既往の試験では表—4 に示す物性値のコンクリートを使用している。

4.2 瞬間弾性ひずみ

図—9 に除荷時におけるコンクリートの引張応力と瞬間弾性ひずみの関係を示す。拘束解放によって回復する瞬間弾性変形成分は、その拘束解放時のコンクリート応力と相関関係が見られる。この結果はそれまでに導入された応力や有効ひずみの履歴に問わず、その時点の応力により決定されるということを実験の範囲で検証できたことを示している。また、図中に示した乾燥開始時から収縮拘束を行っているケース（CRS シリーズ）も同様の傾向を示すことから、瞬間弾性ひずみはそれまでに拘束していた収縮の種類や割合による影響は受けないことが明らかとなった。

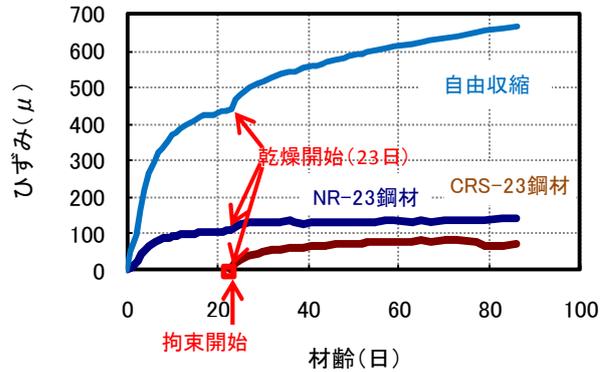
図中に示した静弾性係数は、乾燥開始時の静弾性係数試験の結果であるが、除荷剛性には変形成分として瞬間弾性変形のみが含まれるため、静弾性係数よりも大きな値を示すことが確認された。

4.3 遅れ弾性ひずみ

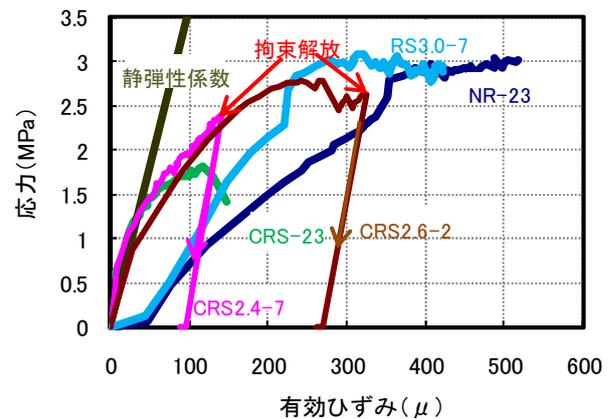
図—10 に拘束解放時の応力—遅れひずみ関係を示す。クリープひずみのうち、時間依存性回復変形成分である遅れ弾性ひずみは、応力との相関がないように見られる。

表—4 既往の研究における物性値

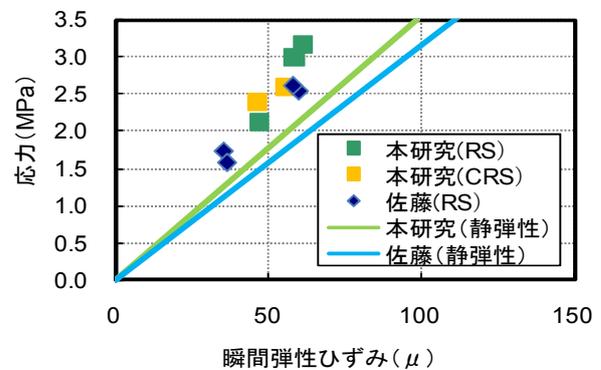
材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
15	28.6	1.6	31.1
23	31.2	3.1	33.1



図—6 ひずみの経時変化



図—7 応力—有効ひずみ関係



図—9 応力—瞬間弾性ひずみ関係

遅れ弾性ひずみについては、佐藤の試験結果においても応力の影響が認められなかった。

4.4 非回復ひずみ

図一10 に拘束解放時の応力と非回復ひずみの関係を、図一11 に応力の時間積分値と非回復ひずみの関係を示す。非回復ひずみについては、載荷履歴よりも、拘束解放時のコンクリート応力との関係が深いことがわかる。これより非回復ひずみは、瞬間弾性ひずみと同様に載荷履歴ではなく、それまでに拘束したコンクリートの引張応力が関係していることが明らかとなった。

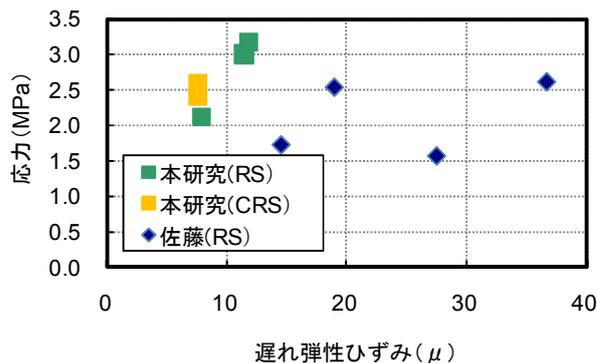
5. まとめ

拘束条件を変化させたコンクリートの一軸拘束収縮試験を行い、既往の実験結果と併せて引張変形成分を検討することにより以下の知見を得た。

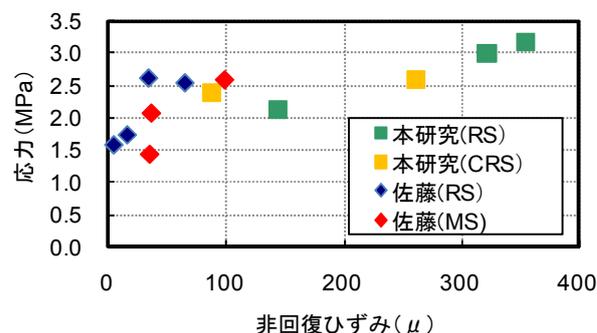
- (1) 再載荷時の剛性はすでに非回復ひずみが解放されているため、除荷時の剛性とほぼ同じくなる。
- (2) 除荷剛性には変形成分として、瞬間弾性変形のみ含まれるため、静弾性係数よりも大きな値を示すことが確認された。
- (3) 持続載荷されたコンクリートに導入される引張応力が大きいほど、除荷時の瞬間弾性ひずみおよび非回復ひずみは大きくなり、それまでに拘束した収縮の種類・割合と載荷履歴の影響を受けないことを確認することができた。
- (4) 遅れ弾性ひずみに及ぼす応力や載荷履歴による影響は認められなかった。

参考文献

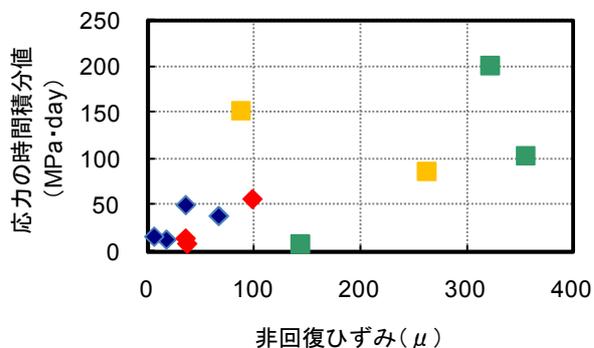
- 1) 青木優介, 下村匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, No.732/5-59, pp.135-148, 2003.5



図一10 応力—遅れ弾性ひずみ関係



図一11 応力—非回復ひずみ関係



図一12 応力の時間積分値—非回復ひずみ関係

- 2) 佐藤誠二, 下村匠: 乾燥収縮が拘束されたコンクリート一軸供試体の応力—有効ひずみ関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, Page509-514, 2006.7
- 3) 佐藤誠二: 乾燥収縮が断続的に拘束されたコンクリートにおける変形と応力の導入, 長岡技術科学大学修士論文, 2006.3