

論文 高強度コンクリートの乾燥収縮と自己収縮による拘束応力

林田都芳*1・大野義照*2・中川隆夫*3・劉 勇*4

要旨:高強度コンクリートにおいて、シール期間あるいは乾燥開始時期を変えて、自由収縮試験および内部拘束型の収縮拘束試験を行い、自己収縮と乾燥収縮およびそれらによる拘束応力やひび割れ発生などについて検討した。その結果、乾燥下の自己収縮はシール養生下の自己収縮より小さかった。また、拘束鉄筋 D25 を用いた拘束試験では、自己収縮のみではひび割れは発生せず、自己収縮に乾燥収縮が加わった場合では、ほぼ全てにひび割れが発生した。逐次計算によるクリープ解析により求めた収縮応力は、ほぼ実測値と対応していた。

キーワード:自己収縮, 乾燥収縮, 収縮応力, 拘束試験, クリープ解析

1. はじめに

高強度コンクリートでは、若材齢時における自己収縮が極めて大きいため、ひび割れ発生の原因となる。既報では、コンクリート試験体をアルミテープで覆い、自己収縮のみを発生させ、自己収縮ひずみおよびそれらによる拘束応力などを検討してきた^{1), 2)}。一方、実際のコンクリート部材では養生後、気中に置かれるため、自己収縮と同時に乾燥収縮も生じる。したがって、乾燥条件下における自己収縮、あるいは自己収縮と乾燥収縮の分離について検討する必要がある。

本報では、高強度コンクリートにおいてシール期間あるいは乾燥開始時期を変えて、自由収縮試験および内部拘束型の収縮拘束試験を行い、自己収縮と乾燥収縮およびそれらによる拘束応力やひび割れ発生などについて調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および試験体の種類

コンクリートは、普通ポルトランドセメント、海砂7:山砂3の混合砂の細骨材、碎石の粗骨材、高性能減水剤を用いた、レディミクストコンクリートを使用した。コンクリートの調合および強度

試験結果をそれぞれ表-1, 2に示す。なお、強度試験用の供試体は封かん養生とした。

試験体の形状を図-1に、試験体の種類を表-3に示す。拘束試験体は試験体長1.0m、拘束鉄筋としてD25を埋設した内部拘束型の試験体を用いた。また、鉄筋の中央10cm区間は、リブとふしを切除し、テフロンシート(厚さ0.1mm)を三重巻にして付着を切っている。付着を切った区間の拘束鉄筋比(リブ・ふしを除いた鉄筋断面積/コンクリート断面積)は、4.14%である。コンクリート試験体の形状は、全長にわたって断面が10

表-1 コンクリート調合表

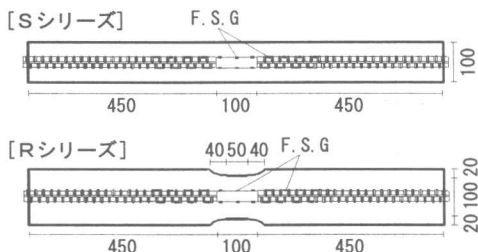
W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
24	42.9	729	175	625	871

表-2 コンクリート強度

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
0.34	2.1	0.3	2.1
1	51.1	2.6	30.9
3	67.3	4.1	36.3
7	71.2	4.1	38.8
14	79.4	5.2	39.6
28	87.4	4.9	40.0

*1 大阪大学院生 大学院工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *2 大阪大学教授 大学院工学研究科建築工学専攻 工博 (正会員)
 *3 大阪大学技官 大学院工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *4 大阪大学院生 大学院工学研究科建築工学専攻

＜拘束試験体一例＞



＜自由収縮試験体＞

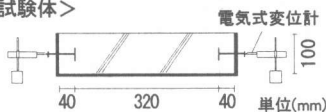


図-1 試験体の形状

表-3 試験体の種類

＜拘束試験体＞

試験体記号	鉄筋径	くびれの有無	乾燥開始材齢
S-n	D25	無	シール
S-1			1(日)
S-3			3
S-7			7
R-n	有	有	シール
R-1			1
R-7			7

＜自由収縮試験体＞

試験体記号	乾燥開始材齢	試験体記号	シール開始材齢
a-1	1(日)	b-1	1(日)
a-3	3	b-3	3
a-7	7	b-7	7

×10cmと一様なもの (Sシリーズ)と、中央区間は10×10cmとして両端の定着部の幅を14cmに広げたもの (Rシリーズ) の2種類である。定着部の断面を大きくした理由は、鉄筋の断面積は、リブとふしが切削されている中央部分よりも切削されていない定着部の方が大きく、したがって定着部の拘束鉄筋比が大きくなるので、ひび割れの発生位置が定着部になる可能性が大であること、およびコンクリート表面はアルミ箔でシールされているため、ゲージを貼付している中央試験区間にひび割れが生じないとひび割れの発生を確認できないためである²⁾。また、拘束試験体の数は各種類とも3体である。

自由収縮試験体は、断面 10×10cm、長さ 40cm

の角柱体とし、乾燥開始材齢を 1, 3, 7 日としたもの (a シリーズ) とシール開始材齢を 1, 3, 7 日としたもの (b シリーズ) を各 2 体製作した。

クリープ試験体は、断面 10×10cm、長さ 50cm の角柱体で、4 体 (载荷材齢 2 種類、各 2 体) 製作した。

2.2 試験方法、測定方法および測定項目

試験は、20±2℃、R.H.60±5%の恒温・恒湿室で実施した。試験体の製作および試験は、JCIの「コンクリートの自己収縮試験方法 (案)」³⁾ならびに「自己収縮応力試験方法 (案)」³⁾に準拠し、コンクリートの打設終了後直ちに表面仕上げを行い、ポリエステルフィルム (厚さ0.1mm) で表面を覆い、さらに湿布で覆った。打ち込み後、材齢 1 日で脱型し、S-1、R-1 以外の拘束試験体、ならびに a-3、a-7 および b-1 試験体は直ちに全面をアルミ箔粘着テープ (厚さ0.05mm) でシールした。その後、各乾燥開始材齢時にシールをはがし、気乾状態とした。ただし、S-n、R-n、b-1 試験体は全期間シールした。また、b-3、b-7 試験体は、脱型後気乾状態とし、各シール開始材齢時にシールした。

拘束試験体のコンクリートの収縮応力は、鉄筋中央部に対面に貼付した箔ゲージ (F.S.G) による鉄筋ひずみ測定値から求めた。また、試験区間および定着部のふし間に貼付した F.S.G により、中央部の鉄筋ひずみ分布を調べた。

自由収縮試験体の収縮ひずみは、材齢 1 日までは両端部に埋設したゲージプラグ間 (検長:32cm) の変位を電気式変位計 (500×10⁻⁶/mm) で測定した。脱型後は、試験体の 4 側面において検長 30cm のコンタクトストレインゲージ (C.S.G) で変位の測定を行った。クリープ試験は材齢 1 日および 7 日に 2 体一組で持続応力 (6N/mm²) を载荷した。変位の測定は、自由収縮試験体と同様に C.S.G で行った。コンクリート温度は各試験体において断面中央に熱電対を埋設して測定した。

凝結の始発および終結時間は、6 時間および 8

時間であった。

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリート内部温度、自己収縮ひずみ、クリープ係数

コンクリートの打込時温度は 20℃で、材齢 12 時間で内部温度は最大 33~35℃になった。その後材齢 4 日に室温に低下した。

凝結の始発（6 時間）からの自己収縮ひずみを図-2に示す。自己収縮ひずみは材齢 1 日で 348×10^{-6} と急激に増加した後、7 日で 471×10^{-6} 、28 日で 537×10^{-6} と緩やかに増加している。図中の曲線は最小二乗法で求めた近似曲線であり、以下の式で表される。

$$\varepsilon_f(t) = \frac{(t-0.26)^{0.6}}{1.43+1.62(t-0.26)^{0.6}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここに、 t : コンクリート材齢(日)

載荷材齢 1 日、7 日のコンクリートの材齢 28 日におけるクリープ係数は 0.5 および 0.4 であり、最小二乗法で求めた近似曲線は次のとおりである。

$$\phi_1(t) = \frac{(t-1)^{0.6}}{0.796+1.75(t-1)^{0.6}} \quad \text{載荷材齢 1 日 (2-a)}$$

$$\phi_7(t) = \frac{(t-7)^{0.6}}{1.48+1.99(t-7)^{0.6}} \quad \text{載荷材齢 7 日 (2-b)}$$

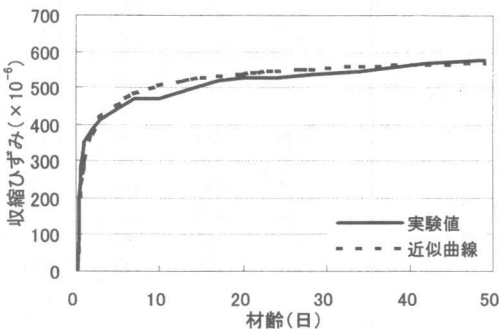


図-2 自己収縮ひずみ

3.2 全収縮ひずみ

乾燥開始材齢の異なる場合の全収縮ひずみの経時変化を図-3に示す。図中の点線はシール養生下の自己収縮ひずみを示す。材齢 28 日における全収縮ひずみは、乾燥開始材齢 1 日および 3 日で

780×10^{-6} 、7 日で 735×10^{-6} と乾燥開始材齢が遅くなると全収縮ひずみは若干小さくなっている。材齢 28 日における自己収縮ひずみの全収縮ひずみに対する割合は開始材齢 1 日および 7 日でそれぞれ 69%、73%となっている。図-4にシール開始材齢の異なる場合の収縮ひずみの経時変化を示す。シール開始 1 日と 3 日の収縮ひずみはほぼ同様の経時変化を示している。一方、シール開始 7 日では乾燥期間が長いので、全収縮ひずみは小さくなっているが、7 日以降の収縮量を比較すると開始材齢 7 日の方が 1 日より若干小さい。

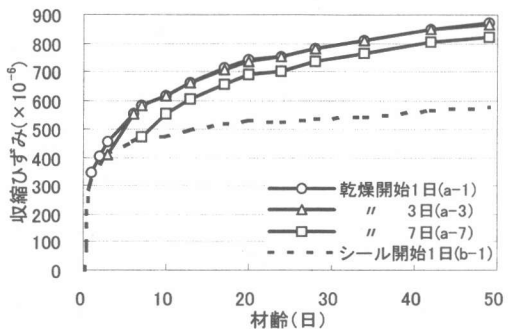


図-3 全収縮ひずみ（乾燥開始材齢の異なる場合）

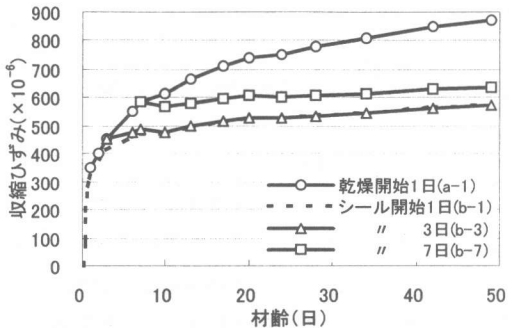


図-4 全収縮ひずみ（シール開始材齢の異なる場合）

3.3 自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの分離

JCI の自己収縮研究委員会では、高強度コンクリートの場合、水和進行が速いため、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの「重ね合わせ」が成り立つものと仮定して両ひずみを分離している³⁾。一方、初期材齢に乾燥を受ける場合、「重ね合わせ」によると自己収縮ひずみを過大評価することが報告されている⁴⁾。そこで、乾燥下にあるコンクリ

ートの材齢 t 以降の自己収縮ひずみを、材齢 t まで乾燥下であり、それ以降シールされた試験体の収縮ひずみとしてとらえた。本実験では、材齢 3 日までを b-1 試験体、3 日から 7 日までを b-3 試験体、それ以降を b-7 試験体の収縮ひずみとし、「逐次」求めた。得られた収縮ひずみをシール養生の自己収縮ひずみと比較して、**図-5** に示す。両者を比較すると、逐次求めた自己収縮ひずみの方が小さい値を示している。材齢 28 日における両自己収縮ひずみの全収縮ひずみに対する割合はそれぞれ 60% および 69% であった。同図には、2 つの方法で分離した乾燥収縮ひずみも示している。

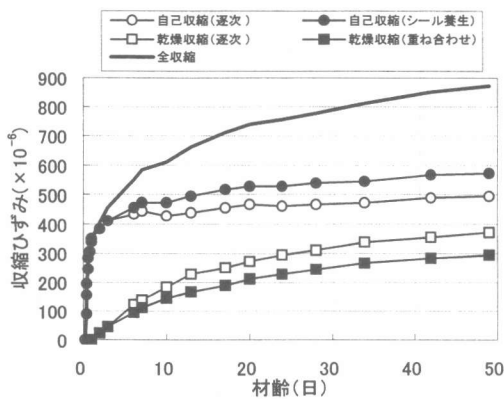


図-5 自己収縮と乾燥収縮の分離

3.3 中央鉄筋ひずみ

鉄筋中央部のひずみの経時変化を**図-6**に示す。急激なひずみの減少はひび割れの発生を表している。ひび割れは、自己収縮のみ発生させた S-n, R-n 試験体および乾燥開始 7 日の S-7 試験体のうち 2 体を除く 13 体に発生した。**表-4**は、ひび割れ発生時の対応する自由収縮試験体の全収縮ひずみ、拘束試験体の拘束ひずみ（全収縮ひずみ - 拘束試験体中央部の鉄筋ひずみ）、コンクリートの収縮応力などを示したものである。乾燥開始材齢が早いほど早期にひび割れが発生する傾向がある。また、試験体形状によるひび割れ発生時期への影響は小さい。一様断面試験体では、ひび割れ発生時のひずみの減少量が小さい試験体もみられ

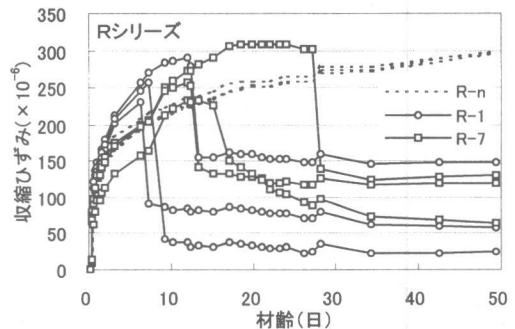
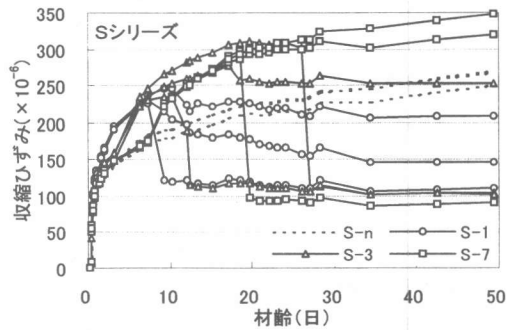


図-6 中央鉄筋ひずみの経時変化

表-4 ひび割れ発生状況

試験体名	ひび割れ発生材齢	全ひずみ (10^{-6})	拘束ひずみ (10^{-6})	拘束率	収縮応力 (N/mm^2)
S-1	9	456	225	49%	2.03
	12	491	245	50%	2.19
S-3	9	456	233	51%	2.02
	27	613	312	51%	2.70
	19	573	297	52%	2.46
S-7	12	488	252	52%	2.11
	-	-	-	-	-
S-7	20	534	238	45%	2.62
	-	-	-	-	-
R-1	13	508	228	45%	2.49
	7	428	198	46%	2.04
	9	456	201	44%	2.27
R-7	28	580	280	48%	2.67
	13	449	196	44%	2.25
	17	501	276	55%	2.01

るが、ひび割れが断面を貫通していないためであった。S-7 試験体では、中央の試験区間にひび割れが発生せずに定着部に発生した試験体があった。これは、前述のように定着部の拘束鋼材比が大きくなることによるものと考えられる。一方、定着部の断面を大きくした試験体では、試験区間の方が定着部よりも拘束鋼材比が大きいため、先に試

験区間にひび割れが発生した。

3.4 中央部の鉄筋ひずみ分布

試験区間に発生する収縮応力への、変断面の影響を調べるための資料として、拘束試験体の試験区間および定着部の鉄筋ひずみ分布を図-7に示す。(a)図は材齢1日まで、(b)図はそれ以降のひずみ分布を示している。(a)図から0.3日~0.4日の間から鉄筋に収縮ひずみが生じ始めたことが分

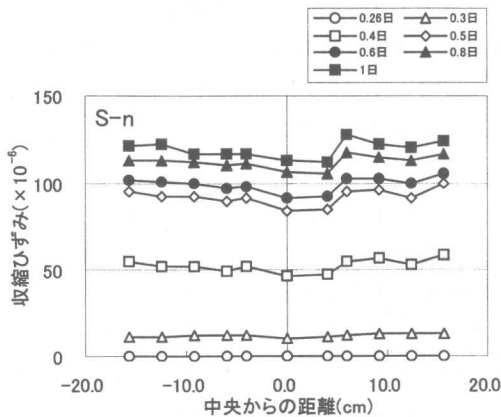


図-7(a) 中央部の鉄筋ひずみ分布 (材齢1日まで)

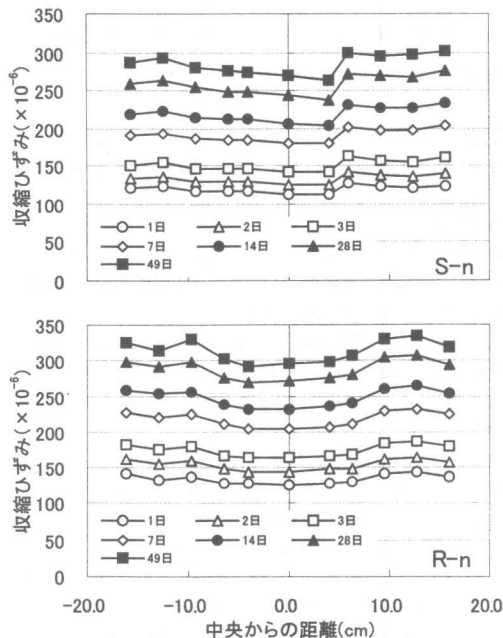


図-7(b) 中央部の鉄筋ひずみ分布 (材齢1日以降)

かる。コンクリートの収縮はそれ以前から生じているが、コンクリートの強度およびヤング係数が小さく、応力は生じていない。(b)図によると、定着部断面を大きくしたR-n試験体では、断面が大きくなるにつれて拘束鉄筋比が小さくなるため、鉄筋ひずみは大きくなっている。S, R両者の試験区間の収縮ひずみを比較するとR試験体の方が大きい値を示している。これは、鉄筋のコンクリートへの固定端が中央10cm区間の両端ではなく、くびれに沿ってコンクリート断面が大きくなる定着部にあり、一様断面の場合より拘束鋼材比が小さくなることによるものと考えられる²⁾。

3.5 コンクリートの収縮応力

中央鉄筋ひずみより算出したコンクリートの収縮応力の経時変化を図-8に示す。収縮応力は自己収縮の経時変化に応じて材齢4日まで急速に大きくなっている。乾燥開始材齢が遅いほどひび割れ発生直前の収縮応力が大きい傾向にあった。これは、材齢の経過にともなうコンクリートの引張強度の増大やコンクリート断面内応力の均等化によるものが考えられる。材齢28日における一様断面試験体S-nでは、 2.10N/mm^2 の収縮応力が生じている。これは材齢28日の割裂引張強度の42.9%である。両端の定着部を大きくした試験体では、前述の理由から、一様断面の場合よりコンクリートの収縮応力は大きくなっている。図中の点線は逐次計算法⁵⁾による解析値である。

解析において、コンクリートの自己収縮ひずみ $\epsilon_f(t)$ は図-2に示した実験値の収縮応力発生時からの経時変化を近似した式(3)を用いた。ただし、前述の鉄筋ひずみの発生時期から収縮応力の発生時を0.35日とする²⁾。乾燥開始材齢1日および7日以降の気乾状態では、「重ね合わせ」に基づいて乾燥収縮ひずみを求め近似した(式(4),(5))。クリープ係数は、前記の荷材材齢1日のクリープ曲線(式(2-a))を基準曲線とし、荷材時材齢の影響 $\kappa(\tau)$ は、文献6)からの式(6)を用いた。ヤング係数は表-2の実験値をほぼ近似しているMC90の

式(7)を用いた。計算値はほぼ実測値と対応している。

$$\varepsilon_f(t) = \frac{(t-0.35)^{0.6}}{3.36 + 2.08(t-0.35)^{0.6}} \times 10^{-3} \quad \dots(3)$$

$$\varepsilon_f'(t) = \frac{t-1}{39.3 + 2.63(t-1)} \times 10^{-3} \quad \dots(4)$$

$$\varepsilon_f''(t) = \frac{t-7}{28.3 + 3.19(t-7)} \times 10^{-3} \quad \dots(5)$$

$$\kappa(\tau) = \frac{6}{5 + \sqrt{\tau}} \quad \dots(6)$$

$$E_c(t) = E_{28} \cdot \exp(0.0622(1 - \sqrt{\frac{28 - a_E}{t - a_E}})) \quad \dots(7)$$

ここに、 t : コンクリート材齢(日)
 $\kappa(\tau)$: 載荷時材齢 τ の影響係数
 E_{28} : 材齢28日のヤング係数
 a_E : 凝結時間の影響による係数で0.35とする

4. まとめ

本実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 乾燥開始材齢が遅くなるほどコンクリートの全収縮ひずみは小さくなった。材齢28日における自己収縮ひずみの全収縮ひずみに対する割合は開始材齢1日、7日でそれぞれ69%、73%であった。
- 2) シール開始材齢の異なる試験体の収縮ひずみを用いて求めた乾燥開始材齢1日の自己収縮ひずみは、シール養生下における自己収縮ひずみよりも小さい値を示した。
- 3) 拘束鉄筋D25を用いて拘束試験を行った結果、自己収縮のみを発生させた試験体ではひび割れは発生しなかった。一方、材齢1, 3, 7日から気乾状態においた試験体ではほぼすべてにひび割れが発生した。
- 4) 収縮応力は、材齢0.3~0.4日から発生し材齢4日まで急増した。一樣断面試験体の材齢28日におけるコンクリートの収縮応力は、2.10N/mm²であり、割裂引張強度の42.9%であった。
- 5) 逐次計算によるクリープ解析により求めた収縮応力は、ほぼ実測値と対応していた。

謝辞 本研究の実施に際して、協力を得たタイコー(株)千里工場長 植木憲一氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川隆夫, 大野義照: コンクリートの自己収縮応力試験方法に関する実験コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.751-756, 1998
- 2) 林田都芳, 大野義照, 中川隆夫: コンクリートの自己収縮応力試験における拘束鉄筋と試験体長の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.733-738, 1999
- 3) J C I, 自己収縮研究委員会: 報告書, 1996.11
- 4) 楊楊, 佐藤良一, 久我英之: 高強度コンクリートの収縮に及ぼす乾燥の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.685-690, 1999
- 5) 太田寛ほか: コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験, 第3回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.25-28, 1981
- 6) A.M.Neville: Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed; North-Holland, 1970

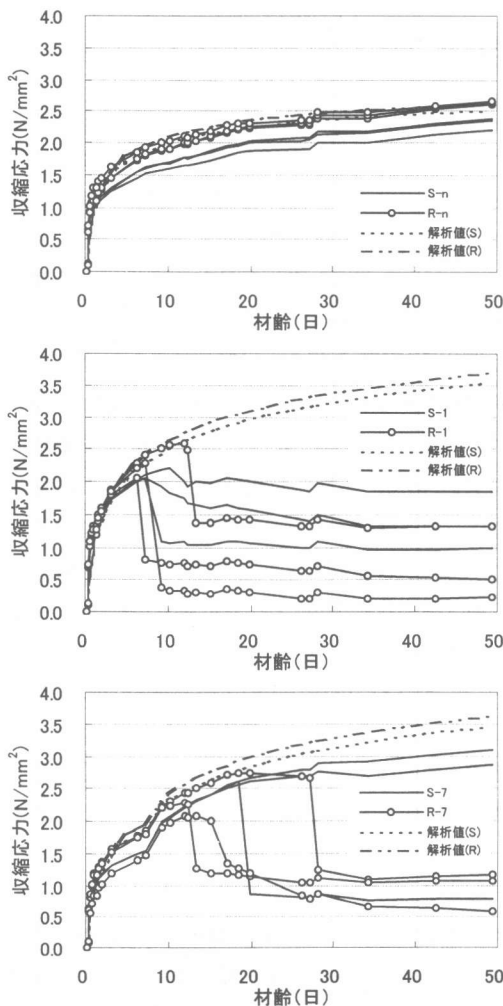


図-8 コンクリートの収縮応力