

# 論文 収縮低減型混和剤を用いたコンクリートの収縮ひび割れ発生条件に関する実験的研究

本間 敏明\*1・今本 啓一\*2・小川 亜希子\*3・西 祐宜\*4

**要旨:** 拘束度を一定に制御可能な一軸拘束試験装置を使用して、拘束度が50~80%の範囲における載荷時材齢および収縮低減型混和剤を使用した場合の乾燥収縮ひび割れ発生性状へ及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、載荷時材齢が1~7日の範囲では載荷時材齢が長くなるほど、ひび割れ発生日数は長くなる傾向を示しひび割れ抵抗性は増大する。収縮低減型混和剤を使用した場合、収縮低減効果により可視的なひび割れが発生しない場合も含めてひび割れ発生日数は大幅に長くなり、ひび割れ抵抗性は高いことが確認できた。  
**キーワード:** 一軸拘束試験装置, 拘束度, 収縮低減型混和剤, 載荷時材齢, 応力強度比, 直接引張試験

## 1. はじめに

2009年版JASS5では、計画供用期間が長期および超長期の構造物では乾燥収縮ひずみについて $800 \times 10^{-6}$ 以下と規定しており、耐久性確保のための収縮ひび割れを抑制することが課題となっている。しかし、JASS5では乾燥収縮ひずみの規制値のみを満足しただけでは、ひび割れを回避することが充分でなく、設計及び施工における有効な対策を講じる必要性を指摘している。また、コンクリートの収縮ひび割れの発生は、乾燥収縮ひずみのみで決定されるわけではなく、静弾性係数およびクリープなどのコンクリートの諸物性、実構造物を対象とした場合の部材に対する拘束条件などによって影響を受けることも周知の事実である。特に、これらコンクリート物性値が経時変化しながら、相互作用を及ぼし複雑に変化するため、ひび割れ発生の有無および発生時期を予測することが極めて困難である。

近年、乾燥収縮ひずみの低減に有効な収縮低減剤が再び注目され、JASS5においても品質基準が規定され、収縮ひび割れの一方策として期待されている。そこで本研究では、精度の高いひび割れ発生の有無および発生時期の予測を可能としたひび割れ制御手法の確立、およびひび割れ発生メカニズムの解明を目的として、拘束度を一定に制御可能な一軸拘束ひび割れ試験装置によって拘束度を50~80%の範囲に設定した場合、コンクリートの乾燥開始材齢(同材齢時を載荷時材齢とした)および収縮低減型高性能AE減水剤(以下、収縮低減剤とする)がコンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生性状へ及ぼす影響を実験的に検討した。また、前報<sup>1)</sup>に引き続きコンクリートにおける応力強度比によるひび割れ発生条件への影響を検討するために、ひび割れ発生強度を直接引張強度と割裂

表-1 使用材料

W	水	上水道水
C	セメント	普通ポルトランドセメント 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
G	粗骨材	青梅産碎石(硬質砂岩), 表乾密度 $2.66\text{g}/\text{m}^3$ , 吸水率0.59%, 粗粒率6.69
S	細骨材	掛川産砂, 表乾密度 $2.58\text{g}/\text{m}^3$ , 吸水率2.04%, 粗粒率2.82
Ad	混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
SRA		収縮低減型高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物, グリコールエーテル系誘導体)

表-2 調合およびフレッシュコンクリートの試験結果

記号	W/C (%)	単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				Ad (%)	SRA (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
		W	C	G	S					
N1	45	180	400	972	724	0.8	20.5	4.4	22.0	
N7						0.6	21.5	4.2	22.0	
SRA7						1.1	0.05	18.0	4.1	23.5

表-3 試験項目

フレッシュコンクリート	スランブ(JIS A 1101) 空気量(JIS A 1128, JIS A 1116) コンクリート温度
硬化コンクリート	圧縮強度(JIS A 1108)(気中養生) 割裂引張強度(JIS A 1113)(気中養生) 直接引張強度(気中養生) 静弾性係数(圧縮: JIS A 1149, 引張: 埋込み型ひずみゲージ) 自由収縮ひずみ(埋込み型ひずみゲージ) 拘束収縮ひずみ(埋込み型ひずみゲージ) 収縮拘束荷重(ロードセル)

引張強度とした場合の差異についても検討した。

\*1 東京理科大学助教 工学部建築学科 工修 (正会員)  
 \*2 東京理科大学准教授 工学部建築学科 博士(工学) (正会員)  
 \*3 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)  
 \*4 フローリック 技術本部 コンクリート研究所(正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料・調査および試験体

コンクリートの使用材料を表-1, 調合を表-2, 試験項目を表-3に示す。実験は, シリーズI~IIIに分かれており, 載荷時材齢および収縮低減剤使用によるひび割れ発生性状への影響を検討するために各シリーズにおいてW/Cは45%, 単位水量は180kg/m<sup>3</sup>とそれぞれ一定とし, シリーズI (N1)では載荷時材齢1日, シリーズII (N7)では載荷時材齢7日, シリーズIII (SRA7)では載荷時材齢7日とし収縮低減剤を使用した。フレッシュコンクリートの目標スランプ値は18±2.5cm, 目標空気量は4.5±1.5%とした。自由収縮供試体は500×100×100mmの角柱供試体, 拘束収縮供試体は, 図-1に示すように945×100×100mmの角柱供試体とした。直接引張強度供試体は, 図-2に示す500×100×100mmの角柱供試体の中央部分を両端から各10mmすぼめてあり, 中央部の試験長は280mm, 断面は100×80mmとした。拘束収縮供試体および直接引張強度供試体の引張載荷方法は, 両端にボルトを各4本埋込み, 載荷板(鋼板)を介してボルトの付着力によって引張力を伝達する方法とした。ひずみ測定は, 自由収縮供試体, 拘束収縮供試体および直接引張強度供試体の内部中央に埋込ゲージを埋設して行った。

### 2.2 収縮拘束試験および強度試験

実験に使用した供試体は, 打設後ビニールシートで覆い封緘養生とし, 乾燥開始材齢である1日および7日で脱型し試験に供した。乾燥収縮試験および拘束収縮試験は, 恒温恒湿室内(温度20±1℃, 湿度60±5%)で行った。拘束収縮試験は, 図-3に示す一軸拘束ひび割れ試験装置を使用した。この装置は, 自由収縮ひずみに対する拘束引張ひずみの比率として定義される拘束度を0~100%の範囲で継続して制御が可能で, ロードセルにより試験体の引張荷重を直接測定することができる。拘束度は, 各シリーズにおいて80, 60, 50%の3水準とした。各条件下において拘束供試体は1体, 自由収縮供試体は3体とした。自由収縮ひずみ, 拘束収縮ひずみおよび収縮を拘束する引張力としての拘束収縮荷重を30分間隔で自動計測した。強度試験は経時変化の影響を検討するために, 脱型後, 恒温恒湿室内での気中養生後にシリーズIは材齢1, 4, 7, 14日, シリーズII, IIIは材齢7, 14, 28, 56日に実施し各3~6体とした。圧縮強度試験, 割裂引張強度試験および圧縮静弾性係数試験は, φ100×200mmの円柱供試体を使用しJIS A 1108, JIS A 1113およびJIS A 1149に準拠して実施した。直接引張強度試験は, 偏心載荷を避けるため供試体両端にユニバーサルジョイントを介して, 割裂引張試験における載荷速度のJIS規定値である毎秒0.06±0.04N/mm<sup>2</sup>に適合させるために毎秒0.02N/mm<sup>2</sup>で載荷した。引張静弾性係数は埋込ゲージ

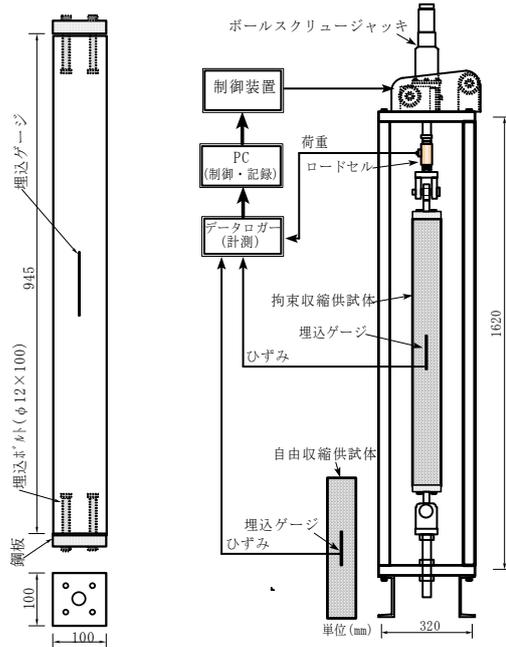


図-1 拘束収縮供試体

図-3 一軸拘束ひび割れ試験装置

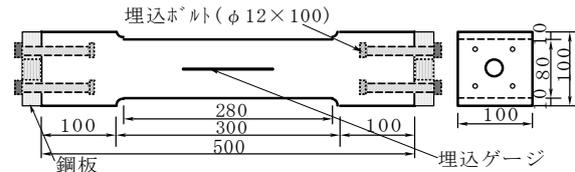


図-2 直接引張強度供試体

表-4 拘束収縮試験および圧縮強度試験結果

シリーズ	拘束度 (%)	実測拘束度 (%)	ひび割れ発生時					圧縮強度試験 (N/mm <sup>2</sup> )					
			ひび割れ発生日数 (日)	自由収縮歪 (μ)	拘束収縮歪 (μ)	拘束引張歪 (μ)	拘束引張力 (N/mm <sup>2</sup> )	1日	4日	7日	14日	28日	56日
			(日)	(μ)	(μ)	(μ)	(N/mm <sup>2</sup> )						
I	80	79	2.2	-162	-34	128	1.37	13.5	28.0	32.7	34.9	/	/
	60	60	9.3	-340	-137	203	1.65						
	50	49	11.2	-383	-194	189	1.61						
II	80	79	4.0	-175	-36	139	1.71	/	/	35.1	41.5	42.7	41.7
	60	60	19.2	-408	-162	246	1.74						
	50	50	11.8	-316	-159	157	1.71						
III	80	81	12.1	-235	-45	190	1.71	/	/	36.4	41.5	43.3	44.1
	60	60	13.6	-276	-110	166	1.48						
	50	50	ひび割れ発生せず										

により引張ひずみを計測し, 引張強度の1/3応力での割線弾性係数として算出した。

## 3. 実験結果及び考察

フレッシュコンクリートの試験結果を表-2に示す。ほぼ目標とする品質のコンクリートが得られた。

### 3.1 圧縮強度および引張強度

表-4に圧縮強度試験, 図-4に割裂引張強度試験および直接引張強度試験の各結果(平均値)を示す。圧縮強度および割裂引張強度において, N7, SRA7はいずれの

材齢においてもほぼ同等であり、圧縮強度および割裂引張強度は収縮低減剤使用による影響を受けないことが分かった。N1とN7の比較ではN1の養生期間が1日であったことに起因して、材齢7、14日において圧縮強度および割裂引張強度は5~7%、11~16%それぞれ低い。

一方、直接引張強度においては、N1は材齢の経過に伴って強度は増進しているが、材齢7日ではN7より35%程度の著しく低い結果となり、乾燥開始材齢の影響が認められた。N7、SRA7は、乾燥開始材齢3日の場合<sup>1)</sup>と同じく、材齢14日において、乾燥状態に曝されることで供試体表面に乾燥収縮による引張応力の発生が原因と考えられる強度低下が生じ、7日強度より約15%、約35%それぞれ低い。しかし材齢28日、56日強度は7日強度と同等までそれぞれ増大し、N7、SRA7は大差ない結果を示している。これより乾燥開始初期は収縮低減剤使用により強度は約10~20%低下するものの、材齢28日以降はほぼ影響を受けないと考えられる。なお、N1の強度が乾燥状態に曝された場合に強度低下を生じなかったのは、養生期間が僅かであったことより強度が極めて低く、コンクリート内部の組織形成も不十分で、強固でなく、乾燥によって表面に生ずる引張応力も小さくほとんど影響をおよぼしていないと考えられる。

### 3.2 静弾性係数

図-5に圧縮および引張における静弾性係数の経時変化を示す。N1の圧縮静弾性係数は材齢の経過に伴って増加しているが、材齢7、14日では乾燥開始材齢の影響を受け、N7より約10%低く示されている。N7とSRA7の圧縮静弾性係数においては、N7は各材齢において若干ばらつきは見られるが、両者ともに材齢7日以降ほぼ一定値(約28KN/mm<sup>2</sup>)を示しており、収縮低減剤による影響は見られていない。

N1、N7およびSRA7の引張静弾性係数においても圧縮静弾性係数の場合と同等の傾向を示している。N1の引張静弾性係数は、材齢7、14日でN7より16%、7%低く、N7とSRA7は各材齢において一定かつ同等であり、圧縮静弾性係数とほぼ同値であった。

### 3.3 自由収縮ひずみ

表-4にひび割れ発生時の拘束収縮試験結果を示す。図-6に自由収縮ひずみの経時変化を示す。自由収縮ひずみはN1>N7>SRA7の順に小さく、材齢14、28、49日におけるN1とN7およびN7とSRA7の収縮ひずみを比較すると、N1はN7より22%、13%、15%それぞれ大きく、SRA7はN7より30%、20%、9%小さい。これより、乾燥開始材齢を早めることで自由収縮ひずみが大きく増大すること、および収縮低減剤使用により、乾燥開始初期から中期の期間で顕著な収縮低減効果を確認できた。

### 3.4 拘束引張ひずみおよび引張クリープひずみ

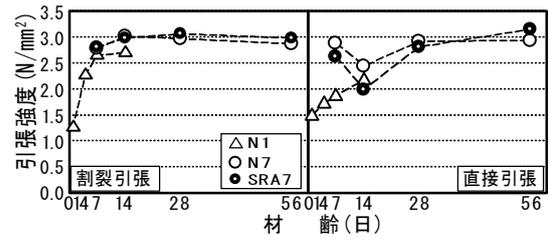


図-4 引張強度と材齢の関係

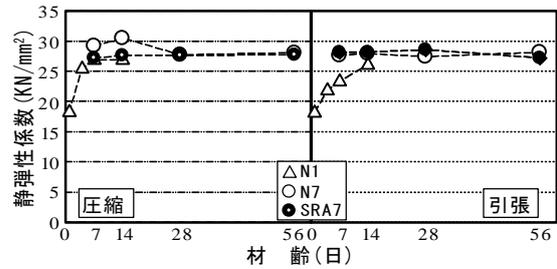


図-5 静弾性係数と材齢の関係

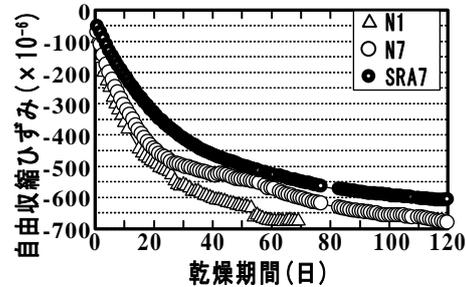


図-6 自由収縮ひずみの経時変化

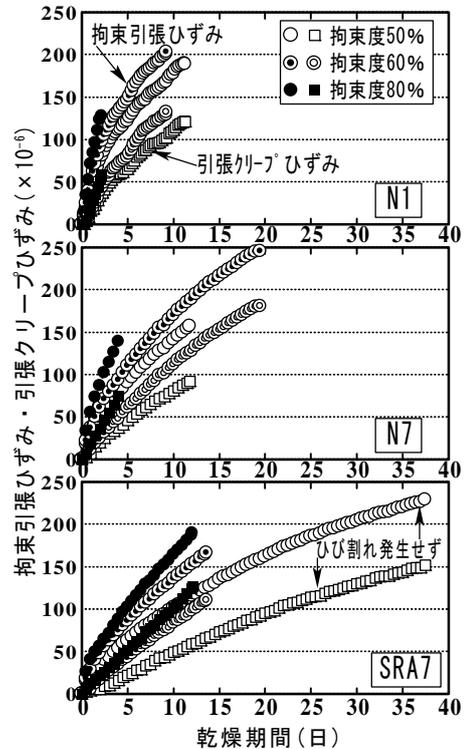


図-7 拘束引張ひずみ・引張クリープひずみの経時変化

図-7に拘束引張ひずみおよび引張クリープひずみの試験結果を示す。なお自由収縮ひずみと拘束状態の収縮ひずみの差で算出される拘束引張ひずみは、ひび割れ発生までの結果を示しており、SRA7の拘束度50%を除いて、いずれのコンクリートにおいてもひび割れが発生した。引張クリープひずみは、拘束引張ひずみから引張弾性ひずみを差し引いて算出した推定値であり、引張弾性ひずみは拘束引張応力を引張静弾性係数で除して算出した。なお、経時変化する弾性係数の実験値が無い場合は補間して求めた。拘束引張ひずみおよび引張クリープひずみは、拘束度が低いほど、荷重材齢が長くなると、また収縮低減剤を使用した場合それぞれ緩やかに増進する傾向を示す。ひび割れ発生時の各引張ひずみは、N1およびN7は拘束度60%、SRA7は拘束度80%がそれぞれ最大となり拘束度の影響は見られなかった。N1およびN7の比較においては、拘束度60%、80%ではN7の各引張ひずみは大きくなり、荷重材齢の影響が見られるが限定的である。N7、SRA7の各引張ひずみは拘束度60%と80%において、ひずみの大小関係は逆の結果となり、収縮低減剤の影響は拘束度によって異なる結果となった。

### 3.5 収縮拘束応力および応力強度比

図-8に収縮拘束応力の経時変化を示す。図中には直接引張強度と割裂引張強度の結果もあわせて示している。ひび割れは、SRA7(拘束度50%)を除いていずれのコンクリートにおいても最大応力時に発生し、引張強度をいずれも下回った。なおSRA7は、荷重後37.5日で最大応力を示した後は徐々に応力は減少し、可視ひび割れ発生の可能性は低いと判断し荷重後56日で試験を終了した。ひび割れ発生時の応力はN1の拘束度80%を除いて、N1、N7は拘束度によらずほぼ一定値を示しており、N1は約1.65N/mm<sup>2</sup>、N7は約1.7N/mm<sup>2</sup>である。SRA7の応力は拘束度80%では1.7N/mm<sup>2</sup>程度であるが、拘束度60%では幾分低く1.5N/mm<sup>2</sup>程度であった。

図-9、図-10にひび割れ発生強度を直接引張強度および割裂引張強度を基準とした場合の応力強度比(引張強度に対する同材齢時の収縮拘束応力の比。以下 $\sigma/F_t$ とする)の経時変化を示す。なお、経時変化する引張強度の実験値が無い場合は補間して求めた。直接引張強度を基準とした $\sigma/F_t$ は、いずれのコンクリートにおいても幾分ばらつきは見られるが、拘束度によらずほぼ一定値を示し、N1、N7、SRA7はそれぞれ平均値で0.81、0.64、0.69であった。N7はN1より0.17程度低く、筆者らの既往の研究<sup>1)</sup>では、乾燥開始材齢3日の $\sigma/F_t$ は0.8程度であったことから乾燥開始材齢が長くなると $\sigma/F_t$ は低下する傾向を示した。SRA7の $\sigma/F_t$ はN7より若干高いが、収縮低減剤の影響はほとんど受けていないと考えられる。なお、N7の拘束度60%は荷重後12日で最大値を示し、7日後に

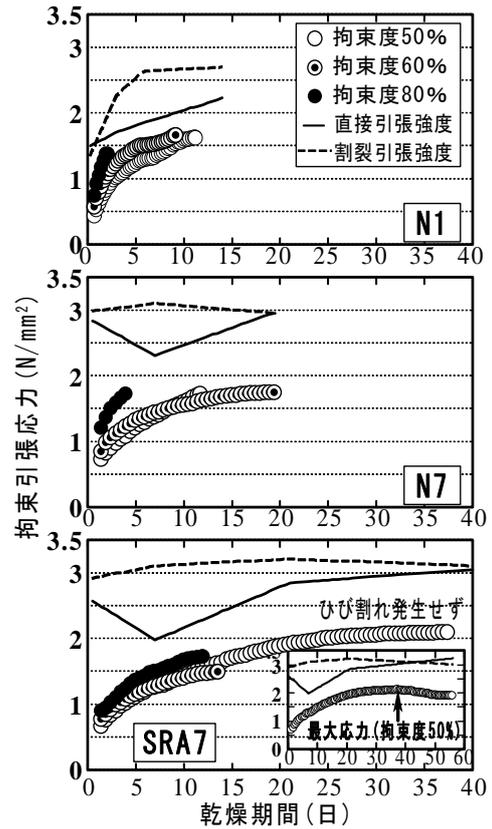


図-8 拘束引張応力の経時変化

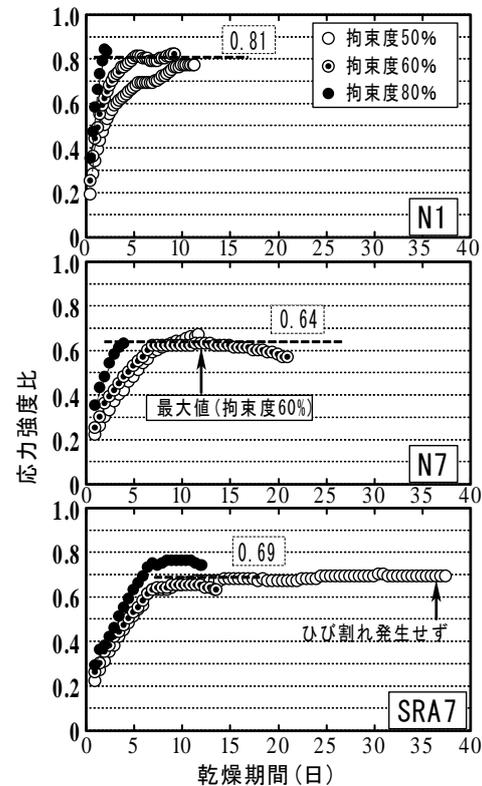


図-9 応力強度比(直接引張)の経時変化

ひび割れが発生した。ひび割れ発生に至らなかったSRA7の拘束度50%は、荷重後12日以降0.7程度の一定値で推移し、30日以降は僅かに低下し続けた。これは、図-7

に示したSRA7の引張クリープが継続的に増進していることが影響していると考えられる。

一方、図-10によれば割裂引張強度を基準としたN1, N7, SRA7の $\sigma/F$ は、平均値でそれぞれ0.64, 0.56, 0.53となり、直接引張強度の場合と比較して、いずれのコンクリートにおいても低い値を示し、特にN1, SRA7では0.15程度の大きな差が認められる。これは、経時変化する引張強度特性の差異が影響を及ぼした結果である。

### 3.6 ひび割れ発生日数

図-11にひび割れ発生日数と拘束度の関係を示す。なお荷重時材齢3日のN3は、同じ調査条件で実施した既往の研究結果<sup>1)</sup>である。ひび割れ発生日数はN7の拘束度60%を除いて、拘束度が低いほど長くなる傾向を示している。N1とN7の比較では拘束度50%では同等であるが、拘束度60%, 80%においては乾燥開始材齢が長くなるとひび割れ発生日数は遅くなり、ひび割れ抵抗性能が高くなるのが分かった。一方、SRA7とN7を比較すると、拘束度80%においてはSRA7のひび割れ発生日数は大幅に伸びているが、拘束度60%ではN7が長い。しかし、SRA7の拘束度50%はひび割れが生じなかったことから、収縮低減剤を使用したSRA7のひび割れ抵抗性は高いと判断される。

拘束度の影響に関しては、同じ拘束試験機を使用した佐藤らの研究<sup>2)</sup>によると、荷重時材齢7日(W/C47%), 拘束度60%において4試験体中3体はひび割れが生じていること、および拘束度40%ではひび割れが発生していない結果を踏まえて、拘束度が40%を越え60%付近の範囲において、一定拘束度でのひび割れ発生の有無が混在しており、今後さらに検討する必要があると考えられる。

図-12にひび割れ発生日数とひび割れ発生時の拘束引張ひずみおよび引張クリープひずみの関係を示す(N3の◇はW/C60%)。ひび割れ発生日数と両ひずみとの間には線形の相関関係が見られ、図中に示した回帰式で近似でき、引張クリープひずみとの相関関係が高く示されている。これらの関係は、引張ひずみがある限界ひずみ(引張伸び能力)に達した場合にひび割れが発生するとの考え方にに基づき、ひび割れ発生の有無および時期を予測する上で有用であることを意味している。3.4で示したように荷重時材齢および収縮低減剤による両引張ひずみへの影響が拘束度の差によって異なる結果が見られ、限定的である。

図-13にひび割れ発生日数とひび割れ発生時の引張単位クリープひずみの関係を示す。両者には高い相関関係が見られ、単位クリープひずみが増加するほどひび割れ発生日数は長くなっている。荷重時材齢および収縮低減剤による影響は図-12の場合と同様であり、図-8に示されるN7, SRA7の拘束応力が経時変化し増大するのを緩和している一原因と推察される。

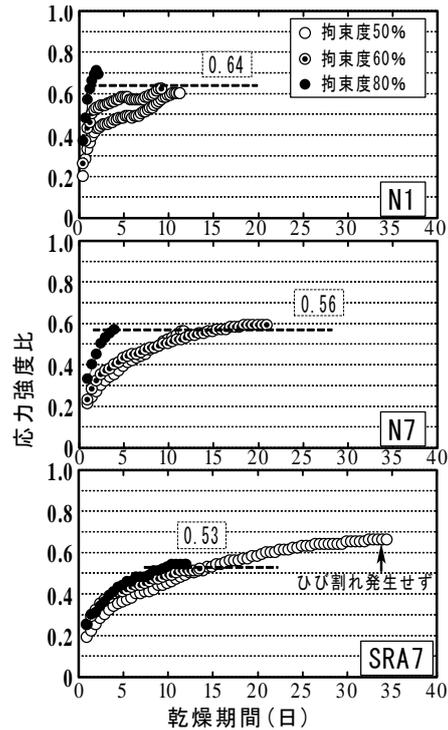


図-10 応力強度比(割裂引張)の経時変化

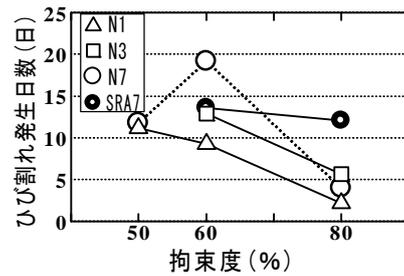


図-11 ひび割れ発生日数と拘束度の関係

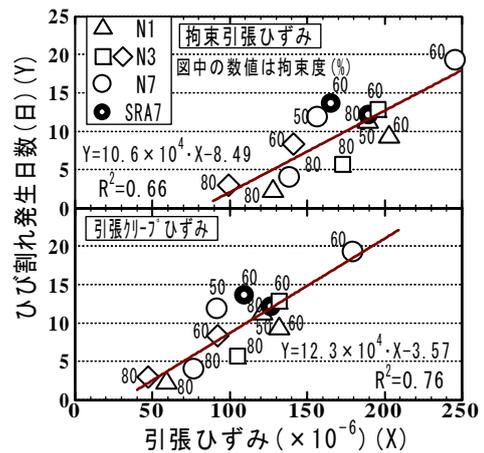


図-12 ひび割れ発生日数と拘束引張ひずみ・引張クリープひずみの関係

図-14にN1およびN7のひび割れ発生時の自由収縮ひずみの比較を示す。N7の自由収縮ひずみはいずれの拘束度においてもN1より20~25%程度低く(左図), SRA7の場合にはN7より15~35%程度それぞれ低い(右図)。すなわち乾燥開始材齢を遅らせること、および収縮低減剤の使用に

よって自由収縮ひずみは低減し、その結果拘束引張応力の材齢に伴う発現が徐々に低下し、ひび割れ発生日数が長くなることが認められた。

図-15に自由収縮ひずみをひび割れ発生日間で除した平均自由収縮ひずみ速度（以下、収縮速度と示す）とひび割れ発生日数の関係を見ると、両者には良好な相関関係が認められ、図中に示した指数関数で近似できる。N7の収縮速度はいずれの拘束度においてもN1より低く、SRA7の拘束度80%における収縮速度はN7より低い。すなわち、乾燥開始材齢が伸びたことおよび収縮低減剤の使用によって、収縮速度が低下するのに伴い拘束引張応力の発現速度が低くなったことが、ひび割れ発生日数が長くなったことの一原因と考えられる。

以上より、ひび割れ発生時期を予測する際に重要となるひび割れ発生日数に影響する諸特性を検討した結果、ひび割れ発生時の引張クリープひずみ、引張単位クリープひずみおよび収縮速度などの諸特性が影響されることを示したが、拘束度によってそれらの影響は限定的であり、今後さらに実験データの収集を図ることが必要と考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

- (1) 圧縮強度および割裂引張強度は収縮低減剤の影響を受けないが、直接引張強度は材齢初期において若干影響を受け、幾分強度が低くなる。乾燥開始材齢7日において、直接引張強度は材齢の経過とともに徐々に低下し、材齢14日以降に強度が再び増進する。
- (2) 乾燥開始材齢7日における圧縮および引張静弾性係数は、収縮低減剤の影響を受けない。
- (3) 収縮低減剤を用いた場合、自由収縮ひずみは乾燥初期から中期の期間で著しく低下し、収縮低減効果を確認できた。
- (4) 拘束引張ひずみ、引張クリープひずみおよび拘束引張応力は拘束度が低くなり、載荷時材齢が長くなると、また収縮低減剤を用いると緩やかに漸増する。ひび割れ発生時の引張応力は拘束度によらず概ね一定値となる。
- (5) ひび割れ発生時の $\sigma/F$ は、ひび割れ発生強度を直接引張強度とした場合、拘束度によらず概ね一定値となり、載荷時材齢が長くなると幾分低くなり、収縮低減剤を混和した影響はほとんど見みられない。ひび割れ発生強度を割裂引張強度とした場合は、直接引張強度の場合より $\sigma/F$ は0.1~0.15程度低い値を示す。
- (6) ひび割れ発生日数は、拘束度が低くなるほど、載荷時材齢が長くなるほど、また収縮低減剤を混和した場合に長くなる傾向がある。特に、収縮低減剤を使用した場

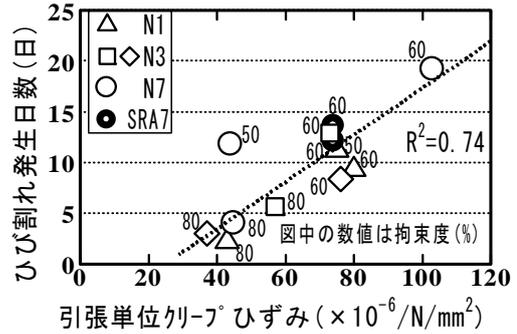


図-13 ひび割れ発生日数と引張単位クリープひずみの関係

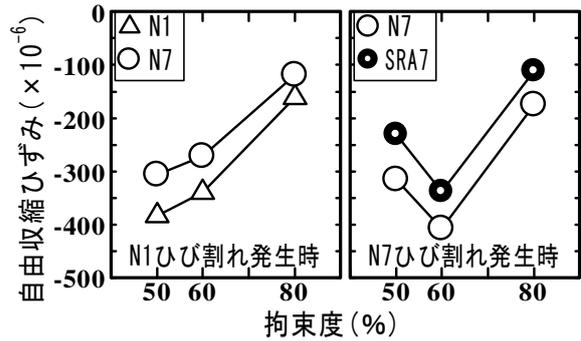


図-14 ひび割れ発生時の自由収縮ひずみの比較

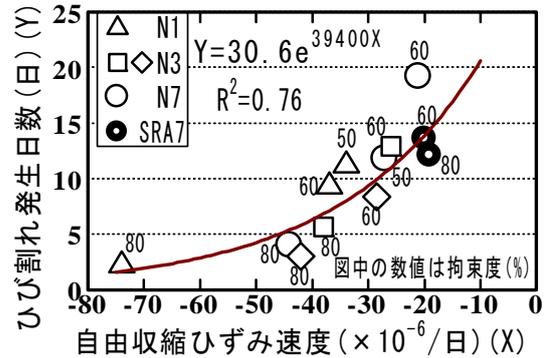


図-15 ひび割れ発生日数と収縮速度の関係

合は拘束度が低いとひび割れが生じない場合があり、ひび割れ抵抗性能が高い。これらの原因として、限定的ではあるがひび割れ発生時の引張クリープひずみ、引張単位クリープひずみおよび自由収縮ひずみ速度などの諸特性が影響することを示した。

#### 参考文献

- 1) 本間敏明ほか：一軸拘束試験機によるコンクリートの収縮ひび割れ発生性状の研究 コンクリート工学年次講演会論文集 Vol.31、No.1、pp.637~642 2009
- 2) 佐藤嘉昭ほか：コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第73巻 第634号、pp.2051-2060、2008年12月