

論文 一軸拘束試験によるコンクリートの収縮ひび割れ発生性状の研究

本間 敏明*1・今本 啓一*2・小川 亜希子*3・石川 寛範*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、拘束度を60～80%の範囲に設定した場合の水セメント比および骨材種の違いが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、水セメント比を低くした場合、ひび割れ発生期間はやや長くなりひび割れ抵抗性は増大する。普通コンクリートと人工軽量粗骨材を使用した軽量のコンクリートとの比較では、軽量コンクリートのひび割れ発生時の応力強度比が0.25～0.3程度低下したにもかかわらず、ひび割れ発生期間は1.5～3倍程度大幅に長くなり、軽量コンクリートのひび割れ抵抗性が高いことが明らかとなった。

キーワード: 一軸拘束試験装置, 拘束度, 水セメント比, 軽量コンクリート, 応力強度比, 直接引張強度

1. はじめに

2006年版鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説(以下、収縮ひび割れ指針とする)では、ひび割れ制御設計方法に関して従来の仕様設計に新たに性能設計が加わった。性能設計を実施するには、対象とするコンクリート部材の乾燥収縮ひずみ、部材内部に発生する収縮拘束応力および部材に対する拘束度などの予測が必要となる。なかでも、コンクリート内部に発生する引張応力の予測には経時変化する引張静弾性係数、引張クリープひずみなどのコンクリートの引張に関する諸物性値が明らかとなっていることが、精度の高いひび割れ発生の有無および発生時期を予測するうえで重要となる。しかし、ひび割れ指針で推奨しているこれら諸物性値は、圧縮に関する物性値を採用しているなど、実構造物への適用性とその精度に課題がある。また、ひび割れ発生条件も応力強度比(収縮拘束応力に対する同材齢時の引張強度の比)で0.7程度としているがその根拠は明らかではなく、ひび割れ発生メカニズムについてもいまだ解明されていない。そこで本研究では、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60～80%の範囲に設定した場合、水セメント比および骨材種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、各種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引張強度とした場合の差異についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料・調合および試験体

- *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
- *4 ALA協会 (正会員)

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
粗骨材	青梅産碎石(硬質砂岩), 表乾密度2.66g/m ³ , 吸水率0.70%, 粗粒率6.69
	膨張頁岩系人工軽量骨材, 表乾密度1.64g/m ³ , 吸水率25.5%, 粗粒率6.28
細骨材	大井川水系陸砂, 表乾密度2.58g/m ³ , 吸水率2.31%, 粗粒率2.86
混和剤	AE減水剤(リグニンスルホン酸系), 空気量調整剤

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(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
		W	C	G	S	AE減水剤	空気量調整剤			
N60	60	300	972	806	0.75	1.8	20.0	3.4	20.5	
							19.5	3.0	24.0	
							19.0	3.2	24.0	
N45	45	180	400	724	1.0	2.8	19.0	5.7	22.0	
							19.5	4.7	22.5	
							20.0	4.4	22.5	
L45	45	604					14.0	2.7	19.5	
							15.0	3.5	19.0	
							15.0	4.0	19.5	

表-3 試験項目

フレッシュコンクリート	スランプ(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 3,7,14,28日) 割裂引張強度(JIS A 1113)(気中養生 3,7,14,28日) 直接引張強度(気中養生 3,7,14,28日) 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)

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、水セメント比および骨材種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単位水量は 180kg/m^3 一定とし、シリーズIではW/C60%の普通コンクリート、シリーズIIではW/C45%の普通コンクリート、シリーズIIIではW/C45%の軽量コンクリートとした。フレッシュコンクリートの目標スランプ値は $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。自由収縮供試体は $500 \times 100 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体、拘束収縮供試体は、図-1に示すように $945 \times 100 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体とした。直接引張強度供試体は、図-2に示すとおり $500 \times 100 \times 100\text{mm}$ 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 $100 \times 80\text{mm}$ 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荷重方法は、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、打設後表面を平滑にした後ビニールシートで覆い、打設後3日で脱型し試験に供した。乾燥収縮試験及び拘束収縮試験は、恒温恒湿室内(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$)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¹⁾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、2ヶ月程度以内でのひび割れ発生を想定したため高めに設定し、各シリーズにおいて80, 70, 60%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材齢3, 7, 14, 28日に実施し各3体とした。圧縮強度試験および割裂引張強度試験は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用してJIS A 1108, JIS A 1113に準拠して実施した。直接引張強度試験は、偏心荷重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荷重速度のJIS規定値である毎秒 $0.06 \pm 0.04\text{N/mm}^2$ に適合させるために毎秒 0.025N/mm^2 で荷重した。

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。各シリーズ3バッチ(1バッチ $0.05 \sim 0.055\text{m}^3$)に分けて打設した。軽量コンクリートの空気量およびスランプ値が

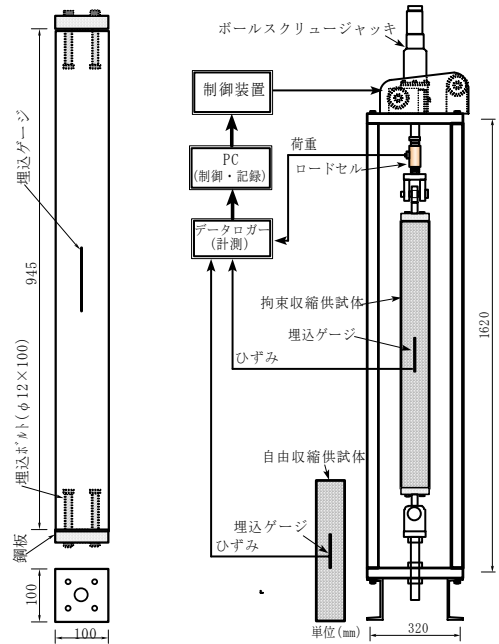


図-1 拘束収縮供試体

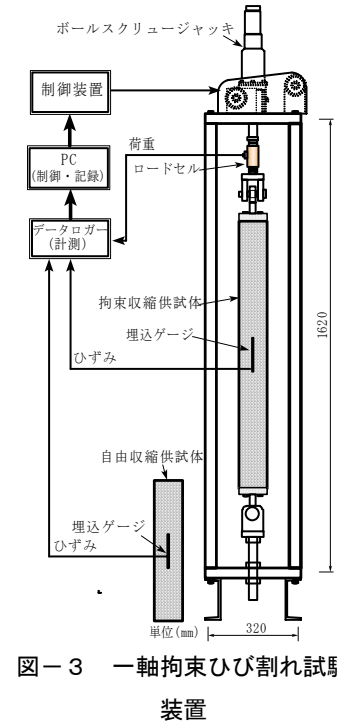


図-3 一軸拘束ひび割れ試験装置

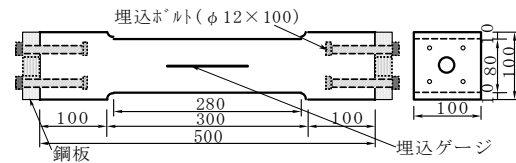


図-2 直接引張強度供試体

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 (%)	ひび割れ発生時						圧縮強度 (N/mm ²)			
		実拘束度 (%)	ひびわれ発生期間 (日)	自由収縮ひずみ (μ)	拘束収縮ひずみ (μ)	拘束引張ひずみ (μ)	拘束引張応力 (N/mm ²)	3日	7日	14日	28日
I	80	79	3.0	-126	-27	99	1.27	13.6	20.0	22.8	27.5
	70	71	6.5	-205	-60	145	1.20				
	60	59	8.4	-239	-98	141	1.22				
II	80	79	5.7	-218	-45	173	1.86	22.8	32.3	36.0	39.0
	70	71	6.6	-234	-67	167	1.69				
	60	59	12.9	-331	-135	196	1.80				
III	80	82	12.2	-184	-34	150	0.90	21.3	28.6	35.9	40.0
	70	69	18.5	-242	-74	168	1.07				
	60	61	18.6	-244	-95	149	0.91				

やや小さかったが、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を示す。結果は、供試体3体の平均値である。圧縮強度は材齢の経過ともなって増大しており、N45およびL45はいずれの材齢においても大差ない結果となった。

図一4によればN60およびN45の割裂引張強度は、圧縮強度と同様に材齢とともにほぼ増進しているが、L45は材齢14日において、3日強度と比較して30%の顕著な低下を示した。しかし、L45は材齢28日において再び増大しN45と同程度となった。これは既往の研究²⁾でも類似の報告があり、軽量コンクリートでは軽量骨材の保水性が高いため供試体内部と表面では乾燥程度に大きな差が生じ、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が発生し、この状態で引張力を与えることで引張強度が見かけ上低下したと考えられる。材齢28日で再び増大に至ったのは、材令の経過に伴ってコンクリート内部の水和反応が進展し、コンクリート組織が強固かつ緊密になったことおよび乾燥が供試体全体にわたり、表面の引張応力がほぼ解消したためと考えられる。

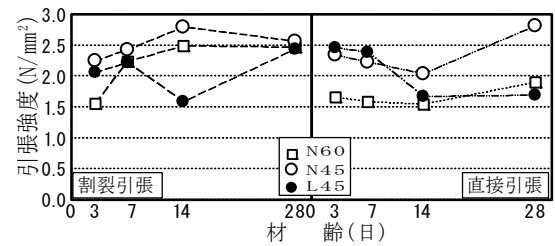
直接引張強度においては、N60、N45は材齢3日以降徐々に強度が低下し、材齢14日で3日強度より7%、13%それぞれ強度低下を示したが、材齢28日では増大し3日強度より約15%、約20%それぞれ高い結果となった。これは、普通コンクリートの割裂引張強度では見られなかったが、直接引張強度特性が供試体の最弱部分で破壊すること、および割裂引張強度は断面の中心を通る荷重軸上の引張応力で評価され、供試体表面の乾燥による影響を受けにくいことなどが考えられる。一方、L45はN60、N45と同様に材齢の経過に伴って徐々に強度が低下し、3日強度と比較して、14日および28日において約30%の大幅な低下となり、28日においても強度の増加は認められなかった。しかし、L45のみ材齢56日強度試験を実施した結果、大幅に強度が増大しN45の28日強度と同程度となり、軽量コンクリートの直接引張強度が増加に転じる時期は普通コンクリートと比較して大幅に遅れることが明らかとなった。なお、直接引張強度試験の破断位置に関して、供試体中央部をすぼめた付け根で破断した割合は約56%で、破断位置による強度差は認められなかった。

3.2 静弾性係数

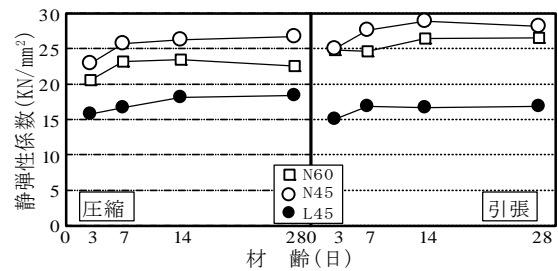
図一5に圧縮および引張における静弾性係数の経時変化を示す。両者の静弾性係数は材齢の経過に伴ってほぼ増加しており、各材齢において引張静弾性係数は圧縮静弾性係数と比較して、N60では15%程度、N45では8%程度大きく、既往の研究³⁾で示されている結果と類似の傾向となった。一方、L45の引張静弾性係数は各材齢において、圧縮静弾性係数より僅かに低い値を示し、軽量粗骨材の剛性が影響したと考えられる。

3.3 自由収縮ひずみ

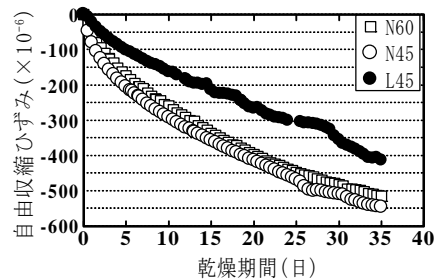
表一4にひび割れ発生時の拘束収縮試験結果を示す。図一6に自由収縮ひずみの試験結果を示す。材齢35日における自由収縮ひずみを比較すると、N60とN45はほぼ同程度となり、L45が最小でN45より約25%低い結果と



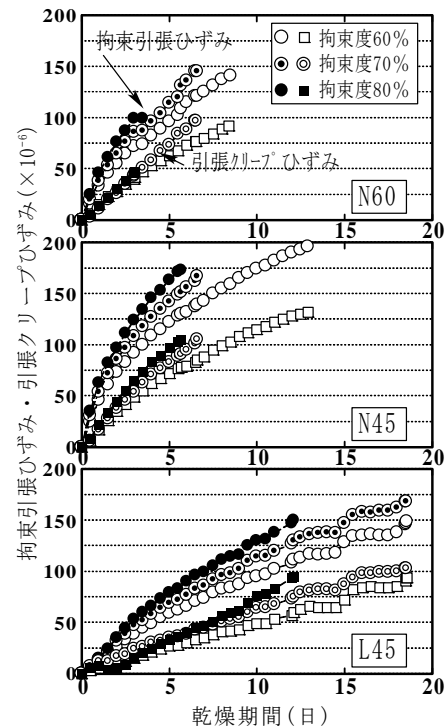
図一4 引張強度と材齢の関係



図一5 静弾性係数と材齢の関係



図一6 自由収縮ひずみの経時変化



図一7 拘束引張ひずみ・引張クリープひずみの経時変化

なった。L45が小さいのは軽量骨材の保水性が高いため乾燥が遅れたことに起因する。

3.4 拘束引張ひずみおよび引張クリープひずみ

図-7に拘束引張ひずみの試験結果を示す。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、すべてのコンクリートにおいてひび割れが発生した。なお、ひび割れ発生位置は、いずれの供試体も両端のボルト付着部分を除いた部分(供試体試験長745mm)であった。拘束引張ひずみは、拘束度が低いほど緩やかに増進しひずみも大きくなる傾向を示している。ひび割れ発生時の拘束引張ひずみはN60が最小で、N45がL45よりやや大きい。ひび割れ発生までの期間は、N60, N45, L45の順に延びており、特にL45が大幅に増加した。N60とN45の比較から、水セメント比を小さくすることによって長期伸びひずみは増大することが認められる。

図-7には、引張クリープひずみの経時変化もあわせて示している。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、引張弾性ひずみは引張静弾性係数(引張強度の1/2応力までの割線弾性係数)を用いて求めた。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。引張クリープひずみは拘束引張ひずみと類似な傾向を示しており、拘束引張ひずみは引張クリープひずみの影響を顕著に受けており、拘束引張ひずみ成分の大半を占めていることが明らかとなった。

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。なお、実験値は所定の拘束度が安定する普通コンクリートでは1.5日以降、軽量コンクリートでは2.5日以降の結果を表示している。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おり、実験値がない場合は補間して求めた。ひび割れは、L45(拘束度60%)を除いていずれのコンクリートにおいても最大応力時で発生し、引張強度をいずれも下回った。最大応力値は、拘束度によらずほぼ一定値で、N60, N45, L45はそれぞれ約1.2N/mm²、約1.8N/mm²、約1.0N/mm²であった。なお、L45の拘束度60%の応力は、佐藤らの研究⁹⁾でも見られるように最大応力時にひび割れは発生せず、最大応力時から約5日後にひび割れが生じたが、最大応力時にひび割れを誘発する比較的大きな微細ひび割れが内部に発生したと考えて、この時点を目撃ひび割れ発生時とした。

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の経時変化を示す。直接引張強度を基準としたひび割れ発生時の応力強度比は、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、収縮拘束応力と同様に拘束度によらずほぼ一定値を示し、平均値で示すとN60, N45, L45はそれぞれ0.78, 0.83, 0.57となり、普通コンクリート

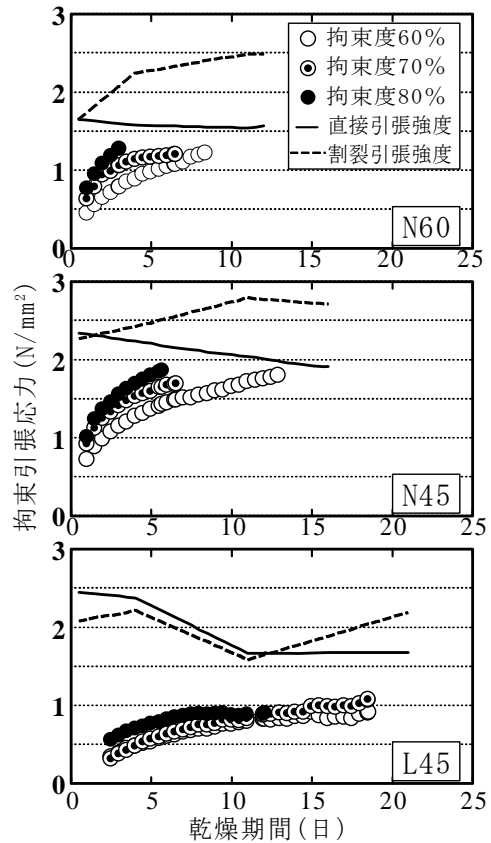


図-8 拘束引張応力の経時変化

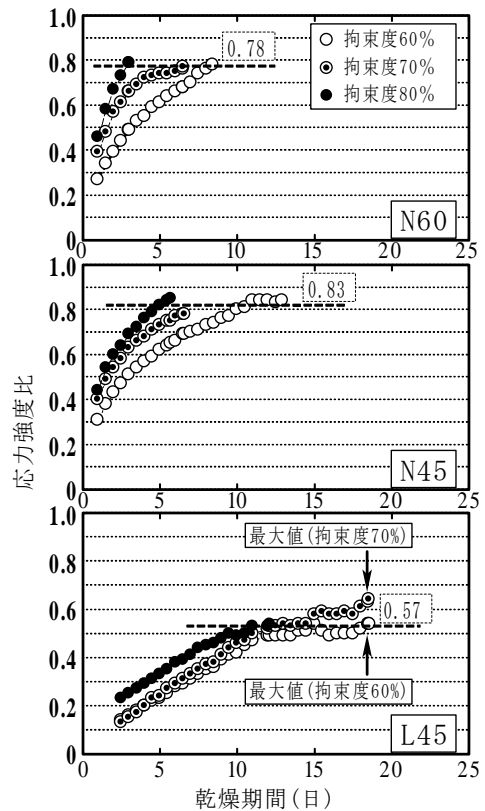


図-9 応力強度比(直接引張)の経時変化

においてはN45がやや大きいのが概ね0.8程度、軽量コンクリートにおいては0.5~0.6程度の低い結果となった。

一方、図-10によれば割裂引張強度を基準とした応力強度比は各拘束度間のバラツキが大きく、N60, N45, L45は平均値でそれぞれ0.54, 0.68, 0.53となり、直接引張強度の場合と比較して、拘束度が低いほど小さくなる傾向が見られ、いずれのコンクリートにおいても低い値を示し、特にN60, N45では大きな差が認められた。これは、経時変化する引張強度特性の差異が顕著に影響を及ぼした結果である。また、図-9においてL45の応力強度比が最大値を示す時点は、図-8に示す収縮拘束応力の場合と一致しているが、図-10では3日程度早く現れていることなど、直接引張強度を基準とした応力強度比の経時変化は、ひび割れ発生時付近の挙動をより正確に表現しているのが分かる。

3.6 ひび割れ発生期間

図-11にひび割れ発生期間と拘束度の関係を示す。ひび割れ発生期間は、拘束度が低いほど長くなり、N60とN45の比較ではN45がやや長くなり、水セメント比を小さくすることでひび割れ抵抗性が幾分高くなることが示された。この原因を検討するために、図-12にひび割れ発生期間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。ひび割れ発生期間は、拘束引張ひずみおよび引張クリープひずみが大きくなるほど長くなり、N60よりN45のほうが両ひずみともに大きいことが分かる。なお、普通コンクリートの実験データに限定すれば、ひび割れ発生期間と両ひずみとの間には相関関係が見られ、引張クリープひずみとの相関関係が幾分高い結果が得られた。また、3.5で示したN45のひび割れ発生時の応力強度比がやや大きいこともひび割れ発生抵抗性増大に寄与していると考えられるが、今後さらに詳細に検討していく必要がある。

一方、N45とL45の比較では図-9および図-10に示されているように、L45のひび割れ発生時の応力強度比が大きく低下しているにもかかわらず、ひび割れ発生期間はいずれの拘束度においても1.5~3倍程度の大幅な増大を示した。この原因を明らかにするために、図-13にひび割れ発生期間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。両者には良好な相関関係が見られ、単位クリープひずみが増加するほどひび割れ発生期間は長くなり、L45はN45よりいずれの拘束度においても1.5~2.0倍程度大きく、このことが拘束引張応力の応力緩和に大きく影響を及ぼしたと推察される。さらに図-14にひび割れ発生時の自由収縮ひずみと拘束度の関係を示す。これによると、拘束度70%では同程度であるが拘束度80%、60%ではL45のほうがそれぞれ約15%、約25%小さく、収縮拘束応力低減の一要因と考えられる。また、図-15に示した自由収縮ひずみをひび割れ発生期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）

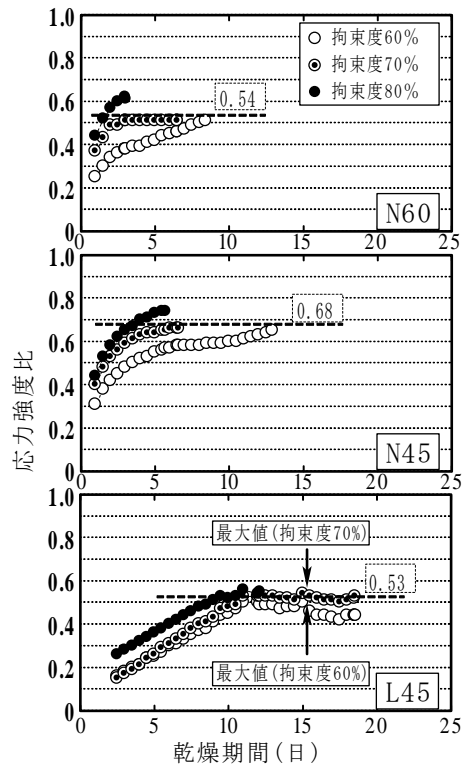


図-10 応力強度比(割裂引張)の経時変化

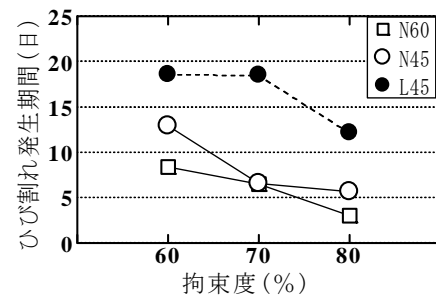


図-11 ひび割れ発生期間と拘束度の関係

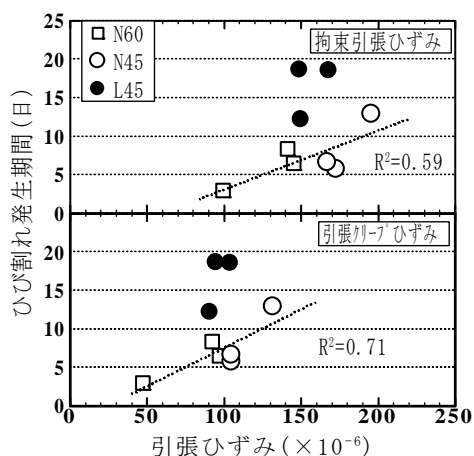


図-12 ひび割れ発生期間と拘束引張ひずみ・引張クリープひずみの関係

とひび割れ発生期間の関係を見ると、両者には高い相関関係が認められ、収縮速度が低いほどひび割れ発生期間は長くなり、L45の収縮速度が極めて低い値を示した。

すなわち収縮速度が低下すること、およびL45の引張静弾性係数がN45のそれより40%程度低いことなどによって、漸増する拘束引張応力の低減に顕著な影響を及ぼしているのが分かった。

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期間を評価する場合、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指標となり得ることが示唆されたが、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。また、経時変化する直接引張強度および引張静弾性係数の予測が可能になれば、さらに高精度な実構造部の内部応力の予測ならびにひび割れ発生の有無および発生時期の予測が可能となると考えられることから、今後はこれらの定量化が課題である。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

- (1) 材齢3日で乾燥下に保存した直接引張強度は、材齢の経過とともに徐々に強度低下し、材齢14日以降に強度が再び増進する。普通コンクリートでは材齢28日には割裂引張強度と同程度となるが、軽量コンクリートでは大幅に遅れる。
- (2) 普通コンクリートの引張静弾性係数は、いずれの材齢においても圧縮静弾性係数より大きく、水セメント比が大きいほどその差は大きい。軽量コンクリートにおいては引張静弾性係数が若干小さい。
- (3) 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は、拘束度が高くなるほど、水セメント比が大きいほど、また普通コンクリートより軽量コンクリートのほうが低下する傾向がある。
- (4) 拘束引張応力は、拘束度が低くなるほど緩やかに漸増する。ひび割れ発生時の応力は拘束度によらず概ね一定値となり、その値は水セメント比が小さいほど、軽量コンクリートより普通コンクリートの場合が大きい。
- (5) ひび割れ発生時の応力強度比は、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普通コンクリートでは約0.8、軽量コンクリートでは0.5~0.6程度となった。ひび割れ発生強度を割裂引張強度とした場合は拘束度、水セメント比、骨材種の影響を受け、直接引張強度の場合より低い値を示した。
- (6) ひび割れ発生期間は、拘束度が低くなるほど、水セメント比が小さいほど、また普通コンクリートより軽量コンクリートのほうが長くなる。これらの原因として、ひび割れ発生時の引張クリープひずみおよび引張単位クリープひずみならびに平均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。

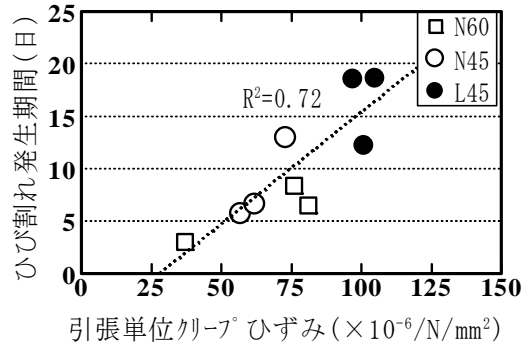


図-13 ひび割れ発生期間と引張単位クリープ

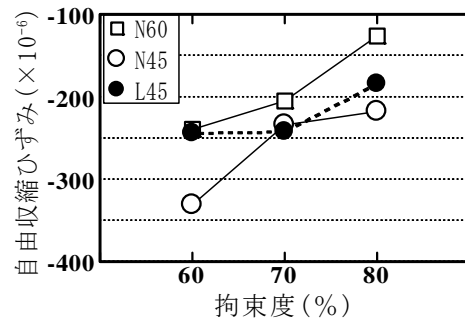


図-14 ひび割れ発生時の自由収縮ひずみと拘束度の関係

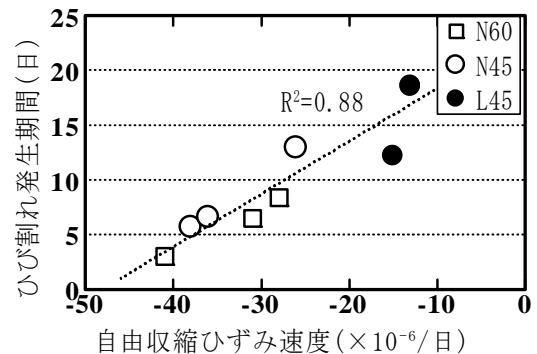


図-15 ひび割れ発生期間と収縮速度の関係

参考文献

- 1) 佐藤嘉昭ほか：ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発 日本建築学会構造系論文 第616号、pp.1-7 2007年6月
- 2) セメント協会：コンクリートパンフレット 第79号 人工軽量骨材コンクリート pp.51~52 昭和49年
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ —メカニズムと対策技術の現状— pp.72~73 2003年
- 4) 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 第73巻 第634号、pp.2051-2060、2008年12月