

論文 超軽量コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性に関する実験的研究

桜本文敏*¹・北村浩一郎*²

要旨：本研究は、比重が1.2程度、圧縮強度が30N/mm²前後の構造用超軽量コンクリートについて、その乾燥収縮ひび割れ抵抗性を実験的に検討したものである。実験は、水セメント比・セメント種類・骨材種類・収縮低減剤の有無などをパラメータとした8条件の調査で行った。主な試験項目は、鉄筋拘束型ひび割れ試験、打込み時からの長さ変化試験である。その結果、以下のことが明らかとなった。①水セメント比を大きくした場合や低熱セメントを用いた場合にひび割れ低減効果が認められた。②軽量1種および普通コンクリートに比べてひび割れ発生材齢は早く、ひび割れが発生しやすいことが確認された。

キーワード：軽量コンクリート、ひび割れ、乾燥収縮、引張強度

1. はじめに

筆者らはこれまでに比重1.0~1.2で強度20~30N/mm²の構造用超軽量コンクリートを開発している¹⁾。本コンクリートは水セメント比が40%以下と小さく、自己収縮の影響が予想されることや、圧縮強度に対して引張り強度が小さいこと（普通コンクリートでは圧縮強度に対する引張り強度の比は概ね1/10であるが、本コンクリートは約1/15）などから、超軽量コンクリートの乾燥収縮ひび割れ実験を行なうこととした。新しいコンクリートを実用化する上でひび割れ抵抗性を確認するのは極めて重要なことである。

2. ひび割れ試験方法

本実験では、「JCI自己収縮応力試験方法(案)」²⁾に準じてひび割れ試験を行なうこととした。試験体の形状を図-1に示す。これは柱状のコンクリート供試体の断面中央部に軸方向に異形鉄筋を埋め込んだものであるが、埋め込み鉄筋（拘束鉄筋）の中央部を平滑にし、更にテフロンシートを巻き付け中央部の付着を切るなどの工夫をしている。本試験方法は拘束鉄筋

の歪みを測定することにより容易にコンクリートの応力を推定できることや、ひび割れ発生の確認が容易であること、JIS A 1129の長さ変化試験（乾燥収縮試験）の結果との対応が可能であることなど利点の多い試験方法である。

試験方法名からも分かるとおり、本試験方法は自己収縮によるひび割れについて試験するものであるため、コンクリートの乾燥を防止した状態で試験を行うことになっているが、本実験では所定材齢から乾燥させた状態で試験を行なうこととした。したがって、乾燥収縮と自己収縮の影響を含めた試験方法となる。

以下に、JCI案に示す試験条件と異なる条件を示す。

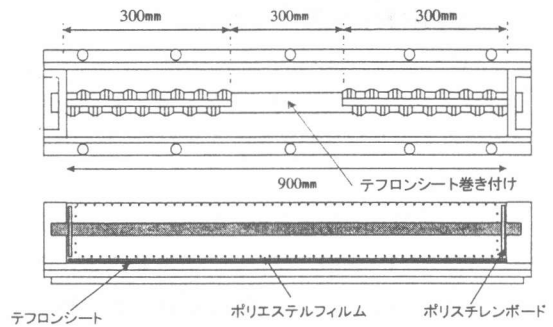


図-1 ひび割れ試験方法

*1 鹿島建設（株）技術研究所 建築技術研究部 主管研究員 工修（正会員）

*2 鹿島建設（株）関西支店 建築部生産計画室

(1) 供試体の形状

JCI 案では、供試体は中央 300mm の試験区間に対して両側に各 600mm の定着区間を有している。試験方法としてはより小さい方が簡便であること、定着区間が 300mm でも拘束応力の違いは 10%程度であること²⁾から、本実験では定着区間を 300mm とし、全長を 900mm とした。

(2) 拘束鉄筋の径

JCI 案では、拘束鉄筋として D32 を用い、中央部はリブと節を取り除き、直径 31mm の円断面とすることとなっている。しかし、実際に切削をしてみると、リブと節を完全に取り除くには直径 28mm 程度にしななければならないことが分かったため、中央部の鉄筋径は 28mm とした。

(3) 供試体の養生方法

供試体の養生は、材齢 1 日 (24 時間) まで封緘養生とするが、その後は型枠を脱型し、20℃・60%RH の条件下で乾燥させるものとした。

3. 実験計画

3.1 コンクリートの種類

表-1 に実験に供したコンクリートの種類を示す。GS35 を標準調合として、それに対して、水セメント比・収縮低減剤の使用・セメントの種類・粗骨材の種類の影響が把握できるように計画した。また、比較用に軽量 1 種コンクリートと普通コンクリートを加え、計 8 種類のコンクリートについて試験を行った。

3.2 使用材料と性質

(1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた。

(2) 骨材

使用した骨材の性質を表-2 に示す。超軽量骨材 (記号: G・S・A) は、いずれも納入された状態 (ほぼ絶乾状態) で練混ぜに供した。細骨材 G は微粒分が少ないため、それを補うため軽量微粉 (記号 MC) を使用した。軽量 1 種コンクリート用の軽量粗骨材 (記号: M) は、十分に湿潤させた状態で使用した。

表-1 コンクリートの種類

番号	記号	W/C(%)	セメント	細骨材	粗骨材	収縮低減剤		
①	GS35	35	普通	G	S	-		
②	GS40M	40						
③	GS45M	45						
④	GS35T	35				低熱	A	-
⑤	GS35L							
⑥	GA35	35	普通		A			
⑦	LC1	53.6	普通	陸砂	M	-		
⑧	NC	56.7			碎石	-		

表-2 骨材の物理的性質

種類	記号	原料・産地	粒径範囲	絶乾比重	表乾比重	吸水率
微粉	MC	-	~0.3	0.770	0.774	0.50
細骨材	G	廃ガラス	~5.0	0.716	0.794	10.85
	陸砂	新潟産	~5.0	2.58	2.62	1.55
粗骨材	S	膨張頁岩	5~15	0.892	0.987	10.62
	A	真珠岩	5~10	0.885	0.905	2.30
	M*1	膨張頁岩	5~15	1.27	1.39	9.61
	碎石	奥多摩産	5~20	2.62	2.65	0.95

*1) 使用時(湿潤状態)の比重は1.67、含水率は31.5%である

表-3 調合表

記号	W/C (%)	空気量 (%)	単位量(上段:kg、下段: l)*1				
			水 (W)	セメント (C)	微粉 (M)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)
GS35	35	7.3	180	514	-	235	293
			180	163	-	328	329
GS40M	40	6.9	180	450	39	206	302
			180	142	51	288	339
GS45M	45	6.5	180	400	40	211	309
			180	127	52	295	347
GS35T	35	7.3	180*2	514	-	235	293
			180	163	-	328	329
GS35L	35	7.3	180	514	-	236	294
			180	160	-	330	330
GA35	35	7.3	180	514	-	235	291
			180	163	-	328	329
LC1	53.6	5.0	166	310	-	854	457
			166	98	-	326	360
NC	56.7	4.5	178	314	-	852	935
			178	99	-	325	353

*1) 超軽量コンクリートは、空気量を除いて表示している

*2) 収縮低減剤 6kgを含む

表-4 試験項目一覧

分類	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101	
	スランプフロー	JAS 5T-503	
	単位容積質量	JIS A 1116	
	空気量	JIS A 1116	質量方法
	練上がり温度	-	デジタル温度計による
強度性状	圧縮強度	JIS A 1108	材齢: 1, 3, 7, 28日 材齢1日で脱型後 20℃・60%RH
	割裂引張強度	JIS A 1113	
	曲げ強度	JIS A 1106	
	弾性係数	JIS原案	
ひびわれ	発生日数	目視・鉄筋歪	歪の急激な減少時
	発生位置	目視	
	発生時応力	鉄筋歪	WSGによる連続測定
長さ変化	長さ変化率	JCI自己収縮法	20℃・60%RH

(3) 混和剤

収縮低減剤は、低級アルコールのアルキレンオキシド付加物を使用した。また、その他にポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と空気量調整剤を用いた。

3.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-3 に示す。軽量 1 種および普通コンクリートは、超軽量コンクリートと同様、圧縮強度が 30N/mm^2 程度になるよう調合を定めた。

3.4 練混ぜ方法

コンクリートは容量 100 リットルの水平 2 軸型強制攪拌ミキサにより練混ぜた。練混ぜは、モルタルを 30 秒間先練りした後、粗骨材を投入し 120 秒行った。

3.5 試験項目および方法

試験項目を一覧にして表-4 に示す。試験は、フレッシュ性状・強度性状・ひび割れ性状・長さ変化について行った。

ひび割れ性状は、ひび割れ発生日数・発生位置・発生時のコンクリート応力（拘束鉄筋の歪みから換算）について測定した。試験体は各調合毎で 3 本とした。

長さ変化は、JCI「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」²⁾ に準じて行ない、養生方法はひび割れ試験と同一とした。この方法は、無拘束状態における凝結以降の長さ変化を測定するものである。試験体は各調合毎に 1 体とした。

4. 実験結果

4.1 フレッシュ性状

超軽量コンクリートのスランプは 21~24cm、スランプフローは 35~50cm の範囲にあり、良好なワーカビリティを有していた。軽量 1 種は 7cm、普通コンクリートは 18.5cm と計画どおりのスランプが得られた。

4.2 強度性状

図-2 に圧縮強度の経時変化を示す。圧縮強度は材齢 28 日でいずれのコンクリートもほぼ

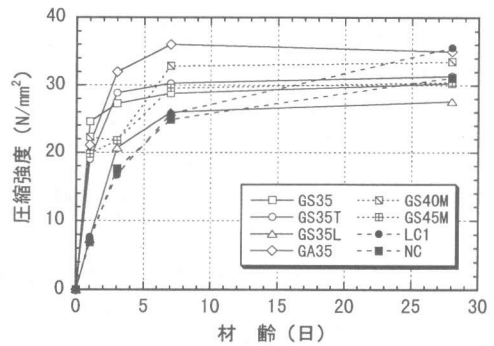


図-2 圧縮強度の経時変化

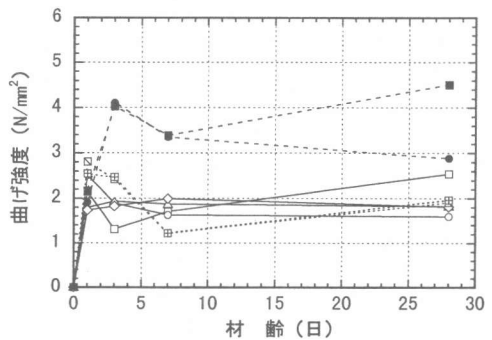


図-3 曲げ強度の経時変化

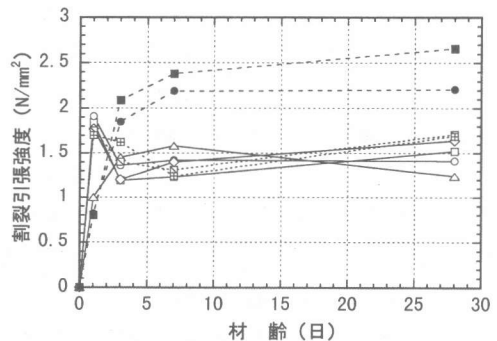


図-4 割裂引張強度の経時変化

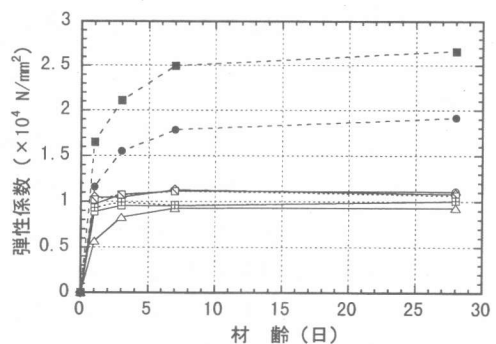


図-5 弾性係数度の経時変化

30N/mm²となっており、所期の計画どおりのコンクリートが得られている。超軽量コンクリートの圧縮強度は初期材齢での強度発現が大きく、材齢7日以降の強度増加はあまり認められない。

図-3 に曲げ強度の経時変化を示す。圧縮強度と異なり、いずれのコンクリートも経時に伴い一度強度が低下しているのが分かる。これは、コンクリートが乾燥する際、表面での収縮が内部コンクリートの拘束を受けて引張縁応力が発生するためであると考えられているが、それを実証する形となった。また、超軽量コンクリートの曲げ強度は、軽量1種や普通コンクリートに比べて小さく、50~70%程度となっている。

図-4 に割裂引張強度の経時変化を示す。超軽量コンクリートにおいては、曲げ強度の場合と同様、経時に伴う一時的な強度低下が認められるが、軽量1種および普通コンクリートにはそれが認められない。表面乾燥に伴う引張りや曲げ強度の低下現象は超軽量コンクリートの方が敏感であることが明らかとなった。なお、超軽量コンクリートの引張強度は、軽量1種や普通コンクリートの60~80%程度となっている。

図-5 に、弾性係数の経時変化を示す。弾性係数は圧縮強度と同様の増加傾向を示しているが、その値には大きな違いがあり、超軽量コンクリートの値は普通コンクリートの40%程度、軽量1種コンクリートの55%程度となっている。

4.3 コンクリートの収縮性状

図-6. a~6. cに無拘束状態におけるコンクリートの収縮歪みの経時変化を示す。これらの図から、水セメント比が大きくなると、収縮歪みは小さくなるのが分かり、特に水セメント比が45%の場合で顕著である。また、低熱セメントを用いた場合は、材齢28日で400 μ と、超軽量コンクリートの中では最も小さい収縮歪みを示している。なお、最も小さいのは軽量1種コンクリートであり、材齢28日で約300 μ となっているが、これは、十分に湿潤にした軽量骨材から水分が供給されるためと考えられる。

4.4 ひび割れ性状

図-7. a~7. hに、ひび割れ試験における各試験体のコンクリート応力の経時変化（+方向が引張り側）を示す。コンクリート応力は、拘束鉄筋の歪み値に鉄筋断面積を乗じて断面力を求め、その力をコンクリート断面が受け持つものとして算出した。いずれのコンクリートも、型枠脱型時期（材齢1日）から急激に引張り側に応力が增大している。ひび割れは、超軽量コンクリートでは、材齢2日程度から8日程度まで

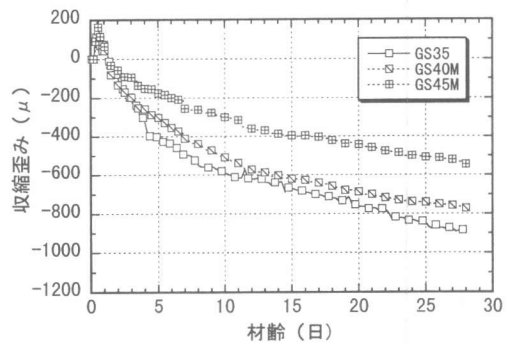


図-6. a 材齢と収縮歪みの関係

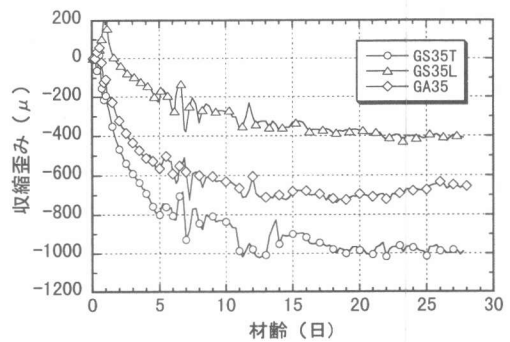


図-6. b 材齢と収縮歪みの関係

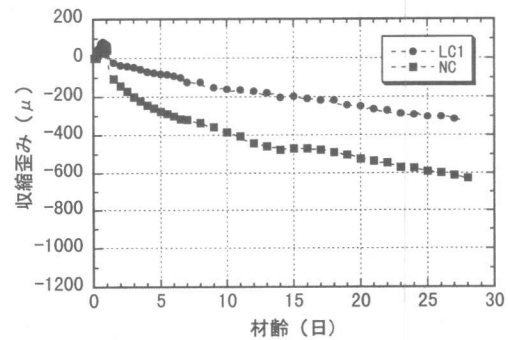


図-6. c 材齢と収縮歪みの関係

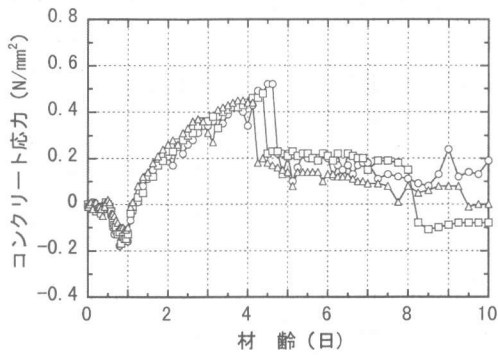


図-7.a 材齢とコンクリート応力の関係 (GS35)

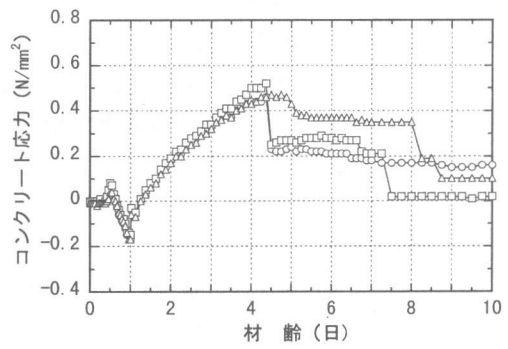


図-7.b 材齢とコンクリート応力の関係 (GS40M)

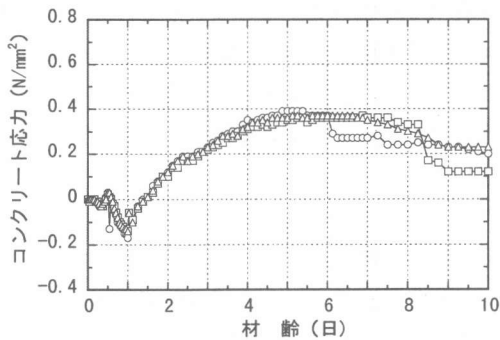


図-7.c 材齢とコンクリート応力の関係 (GS45M)

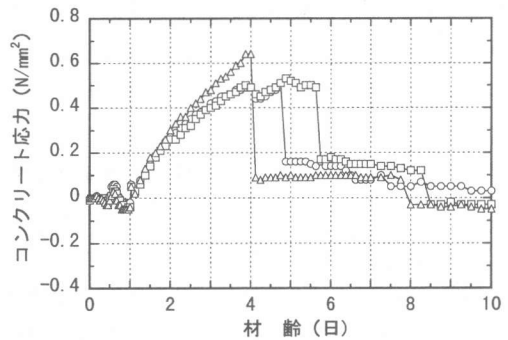


図-7.d 材齢とコンクリート応力の関係 (GS35T)

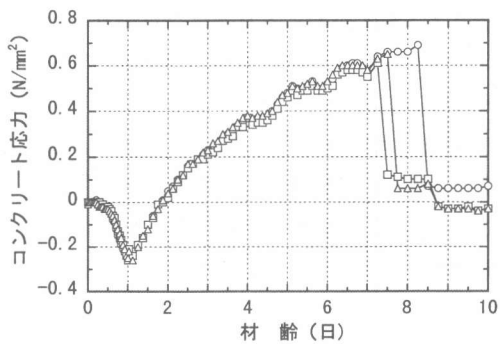


図-7.e 材齢とコンクリート応力の関係 (GS35L)

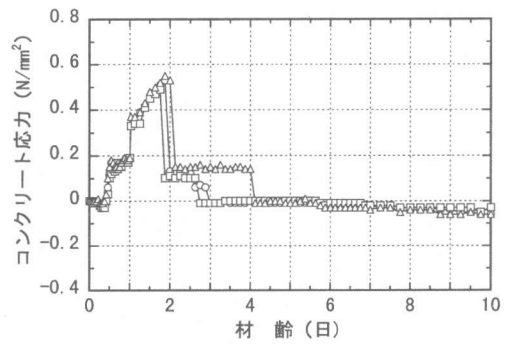


図-7.f 材齢とコンクリート応力の関係 (GA35)

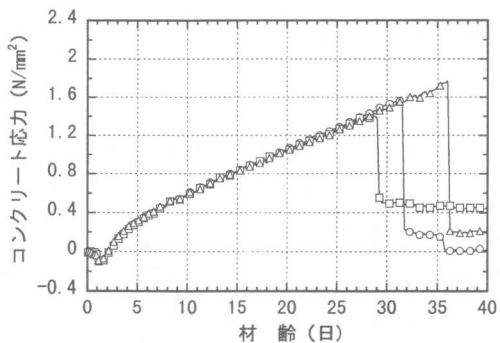


図-7.g 材齢とコンクリート応力の関係 (LC1)

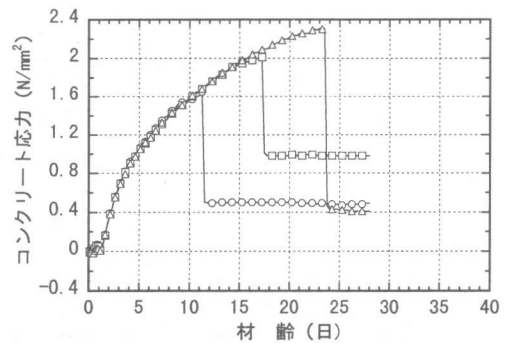


図-7.h 材齢とコンクリート応力の関係 (NC)

に発生しており、これは、軽量1種コンクリートの29~36日、普通コンクリートの11~24日と比べてかなり早くなっている。なお、ひび割れはいずれも試験体中央部分（付着喪失部分）に発生していた。

5. 結果の検討

表一5にひび割れ発生時の各種データを示す。標準試験体のGS35と比べると、水セメント比が大きくなるとひび割れ発生材齢は遅くなることが分かる。また、低熱セメントを用いた場合も同様である。これらは無拘束における収縮歪みの傾向と合致している。一方、骨材種類を変えたGA35では発生材齢が1.88日と極めて早くひび割れが発生しており、骨材種類の選定が重要であることが示唆された。なお、収縮低減剤を用いた場合には特に効果は認められなかった。

軽量1種および普通コンクリートと超軽量コンクリートの間で発生材齢に大きな違いが認められたが、これは、拘束度の違いにも影響されていよう。すなわち、本試験はコンクリートの収縮を鉄筋が拘束するものであるが、その程度（拘束度R）は鉄筋とコンクリートの断面積および弾性係数によって(1)式のとおりに定まってくる。

$$R = E_s \cdot A_s / (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c) \quad \dots (1)$$

E_s ：拘束鉄筋の弾性係数 (N/mm²)

A_s ：拘束鉄筋の断面積 (mm²)

E_c ：コンクリートの弾性係数 (N/mm²)

A_c ：コンクリートの断面積 (mm²)

表一5 ひび割れ発生時における各種データ

試験体	材齢*1 (日)	引張応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	応力強度比 (-)	収縮歪 (μ)
GS35	4.38	0.48	1.20	0.40	391
GS40M	4.59	0.48	1.37	0.35	286
GS45M	7.17	0.38	1.29	0.29	239
GS35T	4.79	0.56	1.39	0.40	745
GS35L	7.67	0.65	1.57	0.41	277
GA35	1.88	0.52	1.56	0.33	300
LC1	32.17	1.58	2.21	0.71	357
NC	17.33	1.99	2.52	0.79	491

*1) 引張り応力の明らかな低下が認められない場合は、最大引張り応力の0.9倍を下回った時点とした。

ここで、コンクリートの弾性係数として、材齢7日での値（超軽量コンクリートは平均して 1.0×10^4 、軽量1種は 1.78×10^4 、普通コンクリートは 2.50×10^4 N/mm²)を代入して拘束度を求めると、それぞれ57.9%、43.6%、35.0%となり、弾性係数の小さい方が大きな拘束を受けることになる。本実験結果もその影響を受けていると考えられる。

ひび割れ発生時の引張り応力は、超軽量コンクリートで0.5N/mm²前後であり、これは応力強度比（ひび割れ発生時の引張り応力をその時点での引張り強度で除した値）にすると、0.3~0.4程度であり、軽量1種コンクリートの0.71、普通コンクリートの0.79に比べて1/2程度になっている。

6. まとめ

超軽量コンクリートの収縮ひび割れ試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 水セメント比が35~45%の範囲において、水セメント比が大きくなるとひび割れ発生材齢は遅くなり、これは収縮歪みが小さいことに起因している。

(2) 普通セメントと比較して、低熱セメントを用いた場合のひび割れ低減効果が認められた。

(3) 異なる粗骨材を用いた場合のひび割れ発生材齢は大きく異なり、骨材選定の重要性が示唆された。

(4) 普通コンクリートまたは軽量1種コンクリートに比べて、ひび割れ発生材齢は早く、ひび割れが発生しやすいことが確認された。

<参考文献>

- 1) 桜本文敏、依田和久他：超軽量高強度コンクリートの開発、日本建築学会学術講演梗概集(その1)~(その8)、1997.9~1999.9
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、1996.11、pp199~201、pp90、pp195~198