

論文 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果

五十嵐 心一*1・川村 満紀*2・神崎 暁史*3

要旨: 人工軽量骨材の貯水機能を利用して、低水セメント比の高強度コンクリートの自己収縮を抑制する効果について実験的に検討した。飽水した人工軽量骨材で粗骨材の全量または一部を置換することにより、自己収縮の発生は完全に抑制され、強度低下も小さい。しかし、軽量骨材の初期含水率が低い場合は、十分に保水させても自己収縮の抑制効果は小さく、また、骨材近傍に多数の未水和セメント粒子が残存していた。コンクリート打設時に形成された軽量骨材周囲におけるモルタルマトリックスの組織の相違が、初期の吸排水に関わる水分移動特性を変化させ、これがその後の自己収縮抑制効果に影響を及ぼすようである。

キーワード: 自己乾燥, 自己収縮, 人工軽量骨材, 内部貯水, 高強度コンクリート

1. はじめに

低水セメント比の高強度コンクリートに特徴的な現象である自己収縮が拘束されると、発生する引張応力によって若材齢コンクリート内部にひび割れを生じる可能性がある。このようなひび割れはコンクリートの強度だけでなく、耐久性にも重大な影響を及ぼしうると考えられ、自己収縮を効果的、合理的に抑制、もしくは低減する方法が検討されている。それらの方法としては、収縮を直接低減させようとする方法と、収縮の原因となる自己乾燥を抑制しようとする方法とが挙げられる。前者としては、予め膨張剤を添加して、事前に膨張を生じさせ、その後の収縮を補償する方法があり、田澤ら¹⁾は種々の膨張剤の収縮抑制効果について明らかにし、10%程度の使用でほぼ完全に抑制できることを示している。一方、自己収縮は自己乾燥にともなう毛細管張力の発生によって説明されることから、コンクリート内部に存在する水の表面張力の減少を通して毛細管張力を低減し、結果として自己収縮を低減させる収縮低減剤も開発されている²⁾。

一方、自己収縮の原因となる自己乾燥状態そのものの発生を抑制することで、自己収縮を低

減することに関しても、2,3)の方法が試みられている。例えば著者ら³⁾は、高強度コンクリートの打設直後のプラスチックな状態から水分を供給して、内部相対湿度の低下を緩和することにより、自己収縮は著しく低減することを示している。しかし、この場合、初期からの給水効果はコンクリート断面寸法に依存し、常に内部が自己乾燥になることを効果的に妨ぐことはできない。これに対して、低水セメント比を保持したままコンクリート断面全体に水分を効果的に供給する手法として、飽水した軽量骨材^{4),5),6)}や吸水性ポリマー⁷⁾を混入する方法が提案されている。この方法では、自己乾燥による湿度勾配が生じた場合に、貯水槽として機能していた骨材やポリマーからマトリックスに向かって水分供給が行われることによって自己乾燥を緩和し、自己収縮を低減することを意図している。これらの研究により、軽量骨材の混入量および軽量骨材の水分飽和度の相違が自己収縮低減効果に及ぼす影響が明らかにされている^{4),5)}。軽量骨材の使用により効果的な抑制が達せられる一方において、高強度コンクリートに軽量骨材を混入することは、強度低下を引き起こす可能性がある。さらに、場合によっては、軽量骨材

*1 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 博(工) (正会員)

*2 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻

が周囲の水分を吸水したままで水分の放出を行わず、十分な自己乾燥抑制機能を発揮しないことも考えられる⁸⁾。この場合、水分の吸収と放出効果、これによる内部相対湿度低下の抑制は、骨材自体の特性だけではなく、マトリックスの水分拡散性能にも影響され、初期における骨材周囲のマトリックスの組織形成も重大な要因となりうると考えられる。

本研究においては、軽量粗骨材の含水状態および混入率の変化にともなう自己収縮抑制効果の変化を実験的に明らかにする。さらに、含水した軽量骨材の自己収縮抑制効果の変化を、電子顕微鏡観察および蛍光顕微鏡観察により明らかにされた骨材周囲やモルタルマトリックス全体の微視構造の特徴と関連付けながら考察し、コンクリートの配合および軽量骨材の特性が、その貯水および給水機能によって自己収縮（変形）を抑制する効果におよぼす影響について検討する。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。使用した天然骨材は石川県手取川産の川砂利および川砂であり、天然粗骨材の最大寸法は10mmである。使用した人工軽量粗骨材は膨張頁岩系非造粒型骨材であり、JIS A 5002によると区分M（密度1.0以上1.5未満）に相当する。この中から、粒径が5~10mmの部分を選り分けて使用した。軽量粗骨材の天然粗骨材と

表-1 コンクリートの配合

記号	単位量(kg/m ³)						
	W	C	SF	S	G	LWA	SP(%)
PC-NWA	146	581	0	559	1086	0	1.7
PC-LWA25	146	581	0	559	814	149	1.5
PC-LWA48	146	581	0	559	572	284	1.5
PC-LWASSD	146	581	0	559	0	596	1.4
PC-LWAD	146	581	0	559	0	562*	1.5
SF-NWA	142	510	57	559	1086	0	2.6
SF-LWA25	142	510	57	559	814	149	2.7
SF-LWA48	142	510	57	559	572	284	2.7
SF-LWASSD	142	510	57	559	0	596	2.5
SF-LWAD	142	510	57	559	0	562*	2.5

SF: シリカフェューム LWA: 軽量骨材 SP: 高性能減水剤
*: 30分吸水率補正

の置換率(体積)は25%、48%および100%とした。軽量粗骨材の含水状態は、飽水状態と部分吸水状態の2種類に変化させた。飽水骨材としては、24時間吸水させてから表面の水分を拭き取ったものを使用した(24時間吸水率:10.4%、密度1.41g/cm³)。部分吸水状態には、吸水速度が初期の乾燥状態によって異なることを考慮し、事前に100℃の炉にて24時間乾燥した骨材を使用した。この場合、吸水率試験によって求めた30分間吸水させたとき(密度1.33 g/cm³)の吸水率(7.2%)に相当する水量(37.7kg/m³)を、練り混ぜ水に余分に加えた。使用したシリカフェュームは市販の粉体品(比表面積20.0 m²/g)である。水セメント比は0.25であり、シリカフェュームの置換率は10%とした。ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用して、スランプ値が10±2cmになるようにした。以上の配合を表-1に示す。

2.2 一軸引張型拘束試験³⁾

練り混ぜたコンクリートを図-1に模式的に示した恒温室(18℃)内に置かれた拘束試験装置の型枠(供試体寸法:50×50×1018mm)に打設し、直ちに密封した。2本の供試体のうち、1本の供試体(非拘束供試体)は自由な収縮変形を許しその収縮量を自動計測した。一方、拘束供試体では拘束開始材齢を12時間とし、収縮ひずみが10×10⁻⁶に達するたびに、モーターの駆動により初期位置まで供試体を引き戻し、その

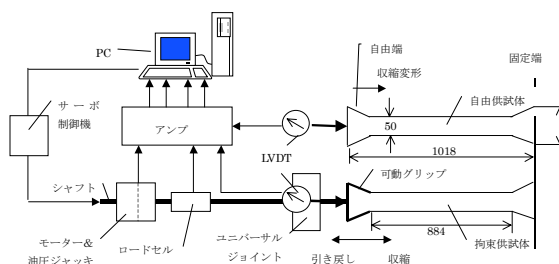


図-1 収縮拘束試験装置

過程でのグリップの変位と拘束応力の変化を連続的に自動計測した。

2.3 強度試験

JSCE-F506 に従って直径 50mm，高さ 100mm の円柱供試体を作成しただちに密封して，18℃の恒温室に静置した。材齢 24 時間にて脱型し，再び密封して 18℃の恒温室にて密封養生を継続した。所定材齢にて JIS A 1113 に従って圧縮強度試験を行った。また BS 1881 に従って，一軸引張型拘束試験終了後の供試体の割裂引張強度を求めた。

2.4 蛍光顕微鏡観察

一軸引張型拘束試験終了後の供試体中心部から，厚さが約 10mm の薄板を切り出した。切り出された薄板をエタノールに 24 時間浸漬して水分との置換を行った後，蛍光染料を含有したエポキシ樹脂を含浸させた。エポキシ樹脂の硬化後，耐水研磨紙を用いて表面を注意深く研磨して，蛍光顕微鏡用試料とした。

2.5 電子顕微鏡観察

拘束試験終了後の供試体から，所定材齢にて厚さ約 10mm，直径 25mm 程度の円盤状試料を切り出した。円盤状試料をエタノールに 24 時間以上浸漬して水分との置換を行った後，エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後，表面を研磨し，反射電子像観察試料とした。

軽量骨材近傍にて反射電子像（1148×1000 画素）をコンピュータに取り込み，取り込んだ画像中のグレーレベルで白色に相当する未水和セ

メント粒子を抽出するよう二値化し，画像解析装置を用いて，その個数および面積率を求めた。

3. 結果

3.1 骨材の含水状態の影響

図-2 は粗骨材として人工軽量骨材を使用したコンクリートの自己変形を普通骨材を使用したコンクリートと比較したものである。普通骨材を使用したコンクリートは材齢 24 時間まで急激に自己収縮が進行するのに対して，軽量骨材コンクリートは骨材の含水状態によって，対照的な挙動を示している。つまり，完全に飽水した骨材を使用した場合は，打設直後から急激な膨張を示し，24 時間以降も緩やかに膨張が継続し，収縮は完全に抑制されている。しかし，部分吸水骨材を使用した場合は，打設後には急速に収縮が進行するが，終結前後の材齢から膨張に転じ，24 時間以降はほぼ一定の変形量を保持している。この場合の収縮およびその後の膨張量はシリカフェュームの混入の有無により異なり，シリカフェュームを混入したほうが小さな変形量を示している。

3.2 軽量骨材の置換率の影響

図-3 は飽水した骨材の体積率を変化させたときの，自己変形の変化を示したものである。シリカフェューム混入，無混入いずれの場合も，軽量骨材の置換率の増大とともに，自己収縮は減少しており，飽水した骨材の体積率が 48% 程度になると全量を置換した場合とほぼ同様の

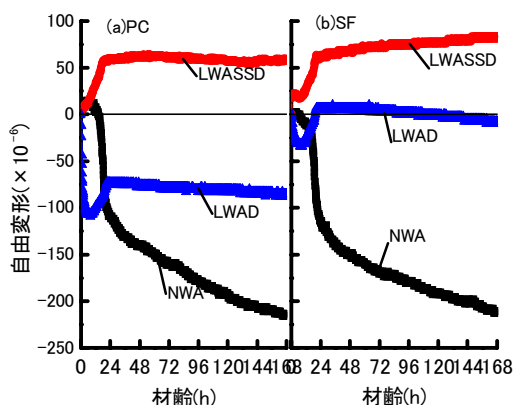


図-2 軽量骨材の含水状態による変化

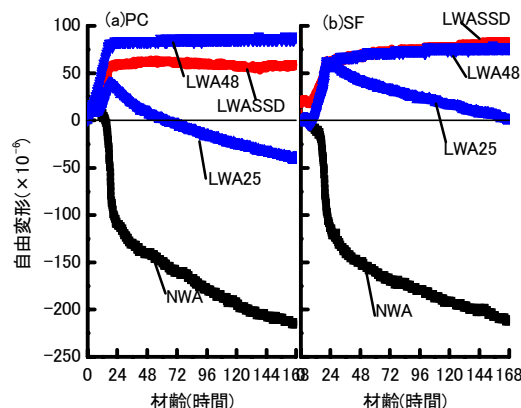


図-3 飽水軽量骨材の混入率による変化

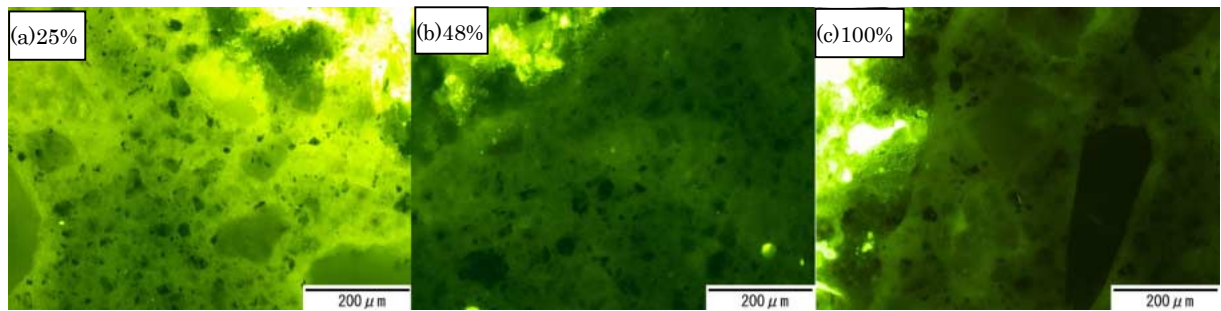


図-4 飽水骨材置換率の変化にともなう蛍光像の変化

自己収縮抑制効果が得られる。置換率 25% の場合は、材齢 1 日程度までの急激な自己収縮の発生は抑制され、初期には膨張を示しているが、その後は継続して単調に収縮しており、その収縮速度は普通骨材を使用したコンクリートと同程度となっている。したがって、置換率 25% 程度では、初期の膨張により自己収縮が補償されているだけであり、自己収縮の発生そのものを抑制するには不十分であるといえる。

3.3 蛍光顕微鏡観察

図-4 は飽水した軽量骨材の置換率を変化させたときの蛍光顕微鏡像を示したものである。置換率の増大にともない蛍光顕微鏡像は暗くなり、48% の置換率においては、全量を飽水骨材で置換した場合と同様の暗さとなっている。すなわち、モルタルマトリックスの組織のポロシティは両者において同程度になっていると判断される。著者らは普通骨材を使用したコンクリートの打設直後から水分を与えると、内部相対湿度の低下が抑制され、水和反応も進行するために、緻密な組織が形成されることを示しているが³⁾、飽水した骨材をある程度の量以上混入することにより、同じ効果が得られることがわかる。

3.3 軽量骨材を使用したコンクリートの強度特性

表-2 は自己収縮試験と同じ密封養生を行ったコンクリートの材齢 7 日における圧縮強度および割裂引張強度を示したものである。粗骨材の全量を軽量骨材に置換すると、圧縮強度は約

15% 程度低下するが、骨材の 25% および 48% を軽量骨材で置換した場合は、圧縮強度の低下はほとんど認められない。割裂引張強度に関しては、圧縮強度に比べると軽量骨材置換率の増大にともなう強度の低下割合が大きいようであり、48% の置換率では、普通骨材を使用した場合に対して約 30% 程度の低下を生じている。

4. 考察

4.1 骨材の初期含水状態と自己収縮抑制効果

飽水した軽量骨材の使用によって自己収縮の抑制を目的とする場合、その最適混入量を合理的に決定することが重要となる。この混入量の決定の方法として、Bentz & Snyder ら⁶⁾は化学収縮に相当する空隙を満たすのに必要な水分を、軽量骨材に貯水させるという考え方を提案している。一方、Jensen & Hansen ら⁷⁾は Powers のモデルを基にした連行すべき水量の計算方法を示している。本研究における水結合材比が 0.25

表-2 コンクリートの強度試験結果

記号	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
PC-NWA	67.2	4.99
PC-LWA25	64.1	4.08
PC-LWA48	61.1	3.49
PC-LWASSD	51.8	3.12
PC-LWAD	50.0	2.92
SF-NWA	65.1	5.03
SF-LWA25	60.0	3.98
SF-LWA48	60.4	3.41
SF-LWASSD	52.4	3.03
SF-LWAD	59.7	2.69

のシリカフェーム無混入コンクリートの場合、Bentz らの方法によると、コンクリート単位体積当たり、約 $21\text{kg}/\text{m}^3$ の水量が必要であり、Jensen らの方法によると約 $26\text{kg}/\text{m}^3$ の水量を軽量骨材に保水させる必要がある。本研究におけるコンクリートの配合では、粗骨材の全量を飽水した軽量骨材で置換して使用した場合は、約 $56\text{kg}/\text{m}^3$ の水量が貯水され、また、48%および25%置換率ではそれぞれ約 $27\text{kg}/\text{m}^3$ および $14\text{kg}/\text{m}^3$ の水量を保持している。すなわち、置換率48%以上において自己収縮が完全に抑制された本実験結果と、それらの理論値の間に矛盾はないようである。また、保水させた水分の全量が有効とはならないこと、およびそのような軽量骨材混入による強度の低下もかなり小さかったことを考慮すると、骨材体積の50%程度を置換することは、自己収縮抑制に対する合理的な手段のように思われる。

しかし、30分吸水率を見込んだ場合においても、約 $38\text{kg}/\text{m}^3$ の水量が余分に含まれており、自己収縮の抑制には十分な量が連行されていたことになる。しかし、この場合は、**図-2**に示したように、コンクリート打設直後から急激な収縮を示し、その後いくらか膨張を示してはいるが、全体としては収縮が相殺されるにはいたっていない。

図-5に軽量骨材-モルタルマトリックス界面領域の反射電子像を示す。軽量骨材を予め飽水させておいた場合は、界面近傍領域において

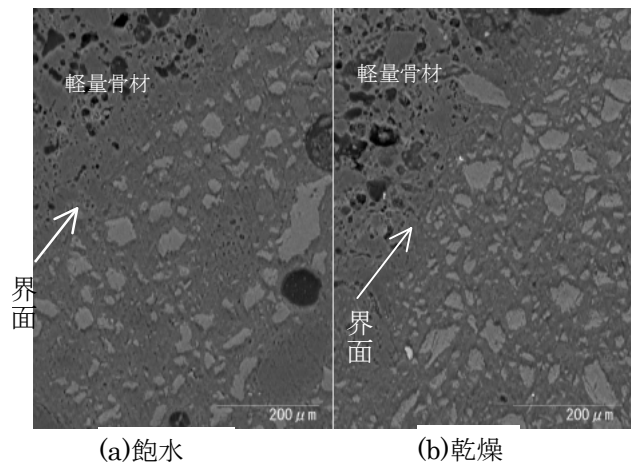


図-5 軽量骨材-モルタルマトリックス界面領域

もセメントの水和反応が十分に進行しているようであり、未水和セメント粒子個数が界面から離れた領域よりも少なく、骨材近傍での自己養生効果⁹⁾も示唆される(**図-5(a)**)。これに対して、軽量骨材を乾燥状態で混入し、練り混ぜ過程から吸水を開始した場合は(**図-5(b)**)、モルタルマトリックス全体の未水和セメント粒子濃度が大きくなる傾向が観察され、軽量骨材近傍においても、比較的小さな未水和粒子が多数残存していることがわかる。**図-6**は骨材近傍の領域(幅約 $200\mu\text{m}$)内の未水和セメント粒子濃度を示したものであるが、部分吸水骨材使用の方が、セメント粒子濃度は大きい。乾燥した骨材が周囲のマトリックスから水分を吸収することにより骨材周囲が局部的に低水セメント比になり、粒子密度は増大するとともに、組織が緻密になると考えられる。さらに、初期吸水により微細なセメント粒子が骨材に向かって移動し⁶⁾、これによっても界面領域内での粒子の充填密度が増大すると考えられる。これらが湿度勾配が生じた後での放水効果を制限し、結果として自己収縮の抑制効果が小さくなったものと考えられる。

4.2 マトリックスの配合と有効率

一般に、シリカフェームを混入したコンクリートの方が組織は緻密であり、より微細な細孔組織が形成され、骨材からマトリックスへの水分の拡散性はシリカフェーム無混入の場合より

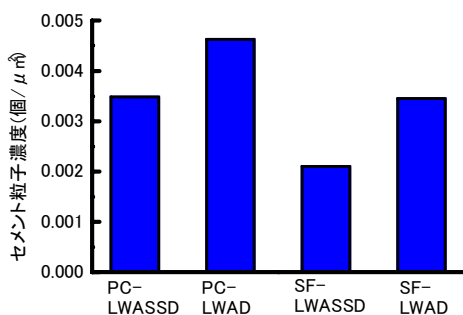


図-6 未水和セメント粒子濃度

も小さくなると考えられる。その結果、同水量の貯水であっても、自己収縮の抑制機能に劣ることが考えられる。しかし、**図-2** および **図-3** に示したように、概してシリカフェーム混入系の方が、同じ水分貯水量にもかかわらず、自己収縮の抑制効果は大きい。この理由についてはさらに検討を要するが、壁効果のためにセメント粒子では効果的に充填することができない軽量骨材表層殻の凹凸部や近傍領域をシリカフェーム粒子が充填し、これによって練り混ぜ時の初期吸水が制限されること、および周囲の細孔組織が微細であるため、マトリックス側への水分の吸引効果（毛管張力の増大）がより強く作用し、内部相対湿度の低下を緩和したことが考えられる。

5. 結論

- (1) 飽水した軽量骨材を使用した高強度コンクリートでは、自己収縮は完全に抑制される。
- (2) 飽水した軽量骨材を普通骨材と置換して使用すると、置換率の増大とともに自己収縮の抑制効果は大きくなる。また、置換使用した場合は、圧縮強度の低下も小さい。
- (3) 骨材の含水状態により、自己収縮の抑制効果は異なり、これは練り混ぜ初期に形成される骨材周囲の組織の特性に依存する。
- (4) コンクリート打設初期の軽量骨材の吸水により、骨材周囲は局所的に低水セメント比になり、未水和セメントが多数残存する。
- (5) シリカフェームの混入による軽量骨材近傍の効果的充填と微細な組織形成が初期の水分移動に影響を与える。しかし、周囲の組織が緻密であっても、必ずしも貯水された水分の有効率が低下するとは限らない。

謝辞：本研究を行うにあたり、貴重な助言を賜ったテクニオン-イスラエル工科大学 K. Kovler 博士に謝意を表します。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) (研究代表者 五十嵐心一, 平成 12-13 年度)

の交付を受けて行われたものであり、併せてここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 田澤栄一：水和反応によるセメントペーストの自己収縮，セメントコンクリート，No. 565, pp. 35-44, 1994.
- 2) Shah, S.P., Weiss, W.J. and Yang, W.: Shrinkage cracking - Can it be prevented?, Concrete Int., ACI, Vol.20, No.4, pp.51-55, 1994.
- 3) 森下隆志，五十嵐心一，川村満紀：若材齢における高強度コンクリートの微視的構造が自己収縮拘束挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.709-714, 2001.
- 4) Takada, K, et al: Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete, Proc. of Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, JCI, pp.221-230, 1998.
- 5) Kondo, K. et al: Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.4, pp.611-614, 1999.
- 6) Bentz, D.P. and Snyder, K.A.: Protected paste volume in concrete, Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.11, pp.1863-1867, 1999.
- 7) Jensen, O.M. and Hansen, P.F.: Water-entrained cement-based materials, I .Principles and theoretical background, Cement and Concrete Research, Vol.31, No.4, pp.347-654, 2001.
- 8) Merikallio, T et al: Drying of lightweight concrete produced from crushed expanded clay aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.9, pp.1423-1433, 1996.
- 9) Weber, S. and Reinhardt, H.W.: A new generation of high performance concrete with autogenous curing, Advanced Cement-based Materials, No.6, pp.59-68, 1997.