論文 膨張材を混和した低水結合材比シリカフュームセメントモルタルの 自己収縮及び線膨張係数に及ぼす骨材量の影響

張 玉露*1·寺本 篤史*2·大久保 孝昭*3

要旨:石灰系早強性膨張材を使用した水結合材比16.5%のシリカフュームセメントペースト及び細骨材混和率15%, 30%,45%の高強度モルタル試験体を作製し,若材齢における自己収縮ひずみ及び線膨張係数に及ぼす骨材量の影響に関し,既存の複合則理論の適用性を検証した。その結果,1)骨材はモルタルの線膨張係数及び自己収縮ひずみ に拘束効果を与えること,2)複合則理論は,自己収縮に対して概ね適用可能であったが,線膨張係数に適用できな い複合則モデルも存在していること,また3)膨張材による膨張を含むセメントペーストの自己収縮に対して,骨 材は膨張側と収縮側に関わらず,ほぼ同程度な抑制効果を与えることを明らかにした。 キーワード:高強度コンクリート,膨張材,骨材,水和圧理論,複合則モデル

1. はじめに

高強度コンクリートの自己収縮に起因する収縮ひび割 れは,構造物の使用性及び耐久性に影響を与える可能性 があり,調合段階に自己収縮を低減させる対策の一つと して膨張材を用いた研究が多数行われている。

膨張材が自己収縮を低減させるメカニズムとしては, 膨張材の水和反応により生成した水和物が,水和収縮を 補う以上に空隙を形成させ体積増加を引き起こすという 説が提唱されている¹⁾。

著者らは、膨張材及び収縮低減剤による高強度セメン トペーストの若材齢体積変化に関する検討²⁾を行い、エ トリンガイト石灰複合型および石灰系早強性膨張材を用 いた場合、いずれの膨張材種類についても材齢約 24 時 間以降において自己収縮低減量と水酸化カルシウムの生 成量に高い相関性があることを明らかにした。この結果 は、材齢 24 時間以降の自己収縮ひずみ低減作用に関し ては、エトリンガイトより水酸化カルシウムの生成のほ うが貢献していることを示すものであった。

一方,コンクリートはセメントペーストと骨材の複合 材料であるため,セメントペーストで得られた知見をコ ンクリートに応用するためには,骨材がコンクリートの 自己収縮に及ぼす影響を検討する必要である。

セメントペーストあるいはモルタルの体積変化量から コンクリートの体積変化を推定する試みとしては複合則 理論に基づく研究が行われている。

従来,コンクリートの体積変化に関する複合則の研究 としては,乾燥収縮を対象とした検討が多く,例えば, 仕入ら³⁾は,セメントペースト量とコンクリートの乾燥 収縮の関係を検討して,乾燥収縮量をセメントペースト の量による評価理論式を導出した。実験による検証結果 から、コンクリートとモルタルの乾燥収縮量は骨材量お よび骨材の収縮量が一定ならば、セメントペースト量の 増加に比例して増加することを示した。また後藤ら⁴は、 上記に挙げた様々な複合則式を利用して、コンクリート の乾燥収縮に及ぼす骨材の影響を考察し、コンクリート の乾燥収縮には骨材の容積含有率や弾性係数のほかに骨 材自体の体積変化も重要な役割を果たしていることを指 摘した。江口ら⁵は、コンクリートの乾燥収縮予測につ いて、既存の複合モデルを基盤として提案された予測式 の適用性を実験データで確認したうえで、既存式を時間 依存型に拡張し、材齢因子も考慮含めて収縮予測式を提 案した。それ以外にも様々な複合則理論が提示されてお り、既存の複合則式を整理し、**表-1**にまとめた。

以上の既往の研究は、乾燥収縮を対象としたものであ るが、コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材の影響に関 する検討は比較的少ない。著者らのは既往の研究におい て、経時的に収縮を示すセメントペーストを用いて、乾 燥収縮と同様の複合則理論を用いることでモルタルおよ びコンクリートの自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響を 評価できることを示した。

しかし,膨張材を用いた高強度コンクリートのように, 材齢によって収縮と膨張が変化するような複雑な体積変 化が生じる場合における骨材の拘束効果に関しては更な る検討が必要である。

本研究では、自己収縮ひずみが卓越する極低水セメン ト比かつ、膨張材を使用した調合においても、細骨材混 和率が異なるセメントペースト並びにモルタル試験体を 作製し、7日間の自己収縮ひずみ及び線膨張係数を計測 し、これらの若材体積変化に対する細骨材の拘束効果の 影響を検討した。

*1 広島大学 工学研究科 (学生会員)
*2 広島大学 工学研究科社会環境空間部門 助教 博(工)(正会員)
*3 広島大学 工学研究科社会環境空間部門 教授 博(工)(正会員)

モデル名	提案年	複合則理論式	備考
Ono	1953	$\epsilon_c / \epsilon_p = \{1+(mn-1) V_a \} / \{1+(n-1) V_a\}$	$m{=}\epsilon_{a}/\epsilon_{p}, n{=}E_{a}/E_{p},$
Pickett	1956	$\epsilon_{c}/\epsilon_{p}=(1-V_{a})^{\alpha}, \alpha=3(1-v_{c})/\{1+v_{c}+2(1-2v_{c}) E_{c}/E_{a}\}$	$K_a = E_a/(3-2\nu_a), K_p = E_p/(3-2\nu_p)$
Fulton	1961	$\epsilon_{c}/\epsilon_{p} = \{1+(mn-1) V_{a}\}/\{1+(n-1) V_{a}\}$	ε _c , ε _p , ε _a :コンクリート, セメントペー
Hansen-Nielsen	1965	$\epsilon_{\! c}\!\! / \! \epsilon_{\! p} \!\!=\!\! (1\!\!-\!\!m) \; \{ n\!\!+\!\!1\!\!-\!\!(n\!\!-\!\!1) \; V_a{}^2 \!\!-\!\!2n V_a \} / \! (n\!\!+\!\!1) \!\!+\!\!m, \hspace{0.2cm} n \!\geq\!\! 1$	スト,骨材のひずみ
		$\epsilon_{c}\!/\epsilon_{p}\!\!=\!\!(1\!-\!m)\{n\!+\!1\!-\!(n\!-\!1)V_{a}\}/\{n\!+\!1\!+\!(n\!-\!1)V_{a}\}\!+\!m,\ n\!\leq\! 1$	E _a , E _p :骨材とセメントペーストのヤン
Kawase	1966	$\epsilon_{0}/\epsilon_{p}=1-3n(1-m)(1-\nu_{p}) V_{a}/\{2(1-V_{a})+2n(1-2\nu_{p}) V_{a}+n(1-\nu_{p})\}$	グ係数
Patten	1968	$\epsilon_{c}/\epsilon_{p} = \{2+(n-1) V_{a}\}(1-V_{a})/\{2 (n-1) V_{a}\}$	v _c , v _p :コンクリートとセメンペースト
C and CA	1971	$\epsilon_c / \epsilon_p = \{n+1+(2mn-n-1) V_a / \{n+1+(n-1) V_a\}$	のポアソン比
Hobbs	1974	$\epsilon_{c}/\epsilon_{p} = ((2mn-n+1)Va+n+1)/\{n+1+V_{a}(n-1)\}$	Va:骨材体積比
Kishitani-Baba	1975	$\epsilon_{\!\!\!\!\!/} \epsilon_p \!\!=\!\!\{1 \!$	

表-1 既存複合則理論式のまとめ^{例えば1)}

2. 実験概要

2.1 使用材料及び調合

本実験の調合条件を表-2 に,使用した材料の概要を 表-3 に示す。水結合材比 16.5%の超高強度セメントペ ースト,及び全容積に対して 15%, 30%, 45%の細骨材を 混和した超高強度モルタル試験体を作製した。

それぞれの調合には、自己収縮低減を目的として、結 合材の質量に対して 3%の石灰系早強性膨張材を混和し た。本論文ではそれぞれの記号を S0, S15, S30, S45 と 表記する。また、後の考察で使用するため、膨張材及び 骨材両方を混和しないセメントペースト試験体(以下, PL と表記する)も作製した。

セメントペースト,モルタルの流動性を確保するため に結合材質量に対して 3.1%のポリカルボン酸系高性能 減水剤(記号 SP)を混和した。

2.2 実験方法

(1) 体積変化測定試験

本実験では、寸法が380mm×60mm×9mmの試験体を

表-2 調合条件					
パッチ名	W/B(%)	S(Vol%)	EX/B(%)	SP(%)	
PL		-	-		
S0		-	3		
S15	16.5	15	3	3.1	
S30		30	3		
S45		45	3		

表-3 使	した材料概要
-------	--------

材料	種類	物理的性質
セメント	シリカフュームプレミ	密度:3.16g/cm3
(C)	ックスセメント(SFPC)	比表面積:6690cm²/g
細骨材		密度:2.61g/cm3
(S)	4447	吸水率:1.07%
膨張材	早強性膨張材	密度:3.19g/cm3
(EX)	(石灰系)	比表面積:4520cm ² /g
減水剤(SP)	ポリカルボン酸系高性能減水剤	

用い,温度を制御しながら試験体の長さ変化を測定する 手法として,文献 [¬]に使用された方法と同様のレーザー 変位による非接触方式の長さ変化試験装置を使用した。 セメントペーストとモルタルの試験体は打設後封緘し, 20℃,30℃一定温度条件をベースとして,所定の材齢に 温度パルスを導入し,温度パルスを与えた材齢のひずみ と温度の関係から文献 [¬]と同様の計算方法によって,線 膨張係数の経時変化を得た。得られた線膨張係数値を使 用して,温度パルス部分の温度ひずみを取り除き,試験 体の自己収縮ひずみの経時変化を取得した。

(2) 超音波伝播速度試験

複合則理論には、セメントペースト及び骨材の剛性が 必要となる。本研究では、セメントペーストの剛性の経 時変化を確認すること、および本実験で使用した骨材の 剛性を推定する目的として、セメントペーストについて は材齢1,2,3,7日に、各細骨材混和率のモルタルにつ いては材齢7日に超音波伝播速度試験を実施した。測定 に使用した試験体の寸法は150mm×50mm×50mmの角柱 試験体であり、トランスデューサー間の距離は150mmで ある。送受信のトランスデューサー間の距離は150mmで ある。送受信のトランスデューサーは縦波用54kHzを使 用し、超音波測定器Pundit PL-200によって超音波の伝 播時間を計測した。得られた時間から縦波の伝播速度を 計算し、試験体の動弾性係数を弾性理論式⁸によって算 出した。材齢7日の各試験体の弾性係数を図-1に示す。

本実験から取得した動弾性係数及びセメントペースト の値から,弾性係数の複合則モデルの一つである Hashin-Hasen モデルによって骨材の弾性係数の推定を行った。 骨材体積比と動弾性係数の関係を Hasin-Hansen モデルに よって最小二乗回帰し,最も実験値と適合する骨材の動 弾性係数として 54GPa を得た。なお、図-1には Hashin-Hasen モデルによる推定の結果も併せて示した。3 節以 降の考察では骨材の弾性係数としてこの値を使用するこ ととした。



(3) 質量含水率及び結合水量測定試験

水和圧理論による考察を行うため、所定の材齢におい て質量含水率及び結合水量を測定した。封緘中のセメン トペーストをハンマーで約 1g 程度の塊になるように粉 砕し、その時点の質量を測定した。次に、定温乾燥機に より 105℃で 24 時間以上乾燥させ、絶対乾燥状態質量を 測定し、その材齢の質量含水率を算出した。また、105℃ 乾燥後試験体を 1000℃で 3 時間加熱した質量を測定し、 試験体 105℃乾燥後の質量との差分から強熱減量を算出 し、その材齢の結合水量とした。質量含水率、結合水量 の測定は秤量には 0.1mg まで測定可能な電子天平を用い て、試験片 3 体を測定し、平均値を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 線膨張係数

各調合における線膨張係数の経時変化を 20℃条件で は図-2, 30℃条件では図-3 にそれぞれ示す。

いずれの調合,温度条件についても,線膨張係数は材 齢極初期から材齢約 20 時間程度にかけて,硬化に伴い 急激に減少し,20℃条件ではその後ほぼ一定値を,30℃ 条件では緩やかに増大傾向を示した,本論文では線膨張 係数変化傾向が転じる時点を"変曲点"と呼ぶ。この"変 曲点"後の増大傾向は,Bjøntegaard らの研究⁹によって, モルタルの自己乾燥に起因する相対湿度の低下により生 じていると考えられており,本実験では,20℃条件と比 較して自己乾燥速度が大きい 30℃条件で顕著な増大傾 向がみられたものと推察される。

図-2,図-3の全体的な傾向をみると、いずれの温度 条件においても細骨材の混入率が大きいほど線膨張係数 の値が小さくなる結果であった。この結果は、温度変動 による体積変化も、乾燥収縮などと同様に、骨材がセメ ントペーストの体積変化を拘束していることを意味する。

そこで本研究では、細骨材が温度変動によるモルタル の体積変化に拘束効果を確認するため、それぞれの線膨 張係数の経時変化における"変曲点"及び材齢7日の線 膨張係数値を取り出し、骨材体積比との関係を整理した。



図-5 線膨張係数と骨材比の関係(7日値)

その結果が図-4,図-5である。

図より、いずれの材齢においても、細骨材混和量と線 膨張係数には一様の関係がみられ、この関係性は複合則 理論の一つである Hobbs モデル¹⁰に基づく推定値と概ね 一致することが明らかになった。なお、細骨材の線膨張 係数は計測していないが、実測値と Hobbs モデルが最も 適合するよう細骨材の線膨張係数を 11(×10℃)と仮定 した。

図-6 は,表-1 にまとめた様々な複合則モデルを用い,細骨材の線膨張係数を11(×10⁻⁶℃)と仮定した場合の 線膨張係数の推定値と実験値の関係である。

同図に示すように、骨材の線膨張係数を11(×10-6/℃)と 仮定した場合、複合則モデルによっては良い一致を示す ものと、線膨張係数を過小に評価するものがみられた。 実際の骨材の線膨張係数値は測定していないため、本考 察は、各モデルの推定精度を評価するものではないが、 各モデル間で、推定値に大きな差異が生じることが分か る。この原因として、既存の複合則モデルの多くは乾燥 収縮を対象として提案されたものであることが考えられ る。すなわち、乾燥収縮による体積変化では、骨材の乾 燥収縮と比較してセメントペーストのそれは圧倒的に量 が大きいのに対して、温度変動による体積変化は骨材と セメントペーストでせいぜい数倍程度の違いしかなく, 骨材の体積変化はセメントペーストに対して無視できな い量発生する。そのため、線膨張係数の推定には、骨材 の実測値の計測並びに使用する複合則モデルを慎重に選 定することが必要不可欠であると考える。

3.2 自己収縮ひずみ

本実験で得られた自己収縮ひずみの経時変化を図-7, 図-8に示す。いずれの養生温度でも収縮開始から約24 時間頃まで,自己収縮ひずみが急激に増加し,その後あ る程度の膨張の傾向を示した。この急激な収縮後の膨張 はセメントや膨張材の水和によって生成される膨張性水 和物によるものと考えられている¹⁾。

細骨材が自己収縮ひずみ量に及ぼす影響に着目すると, 細骨材も膨張材も混和してない PL に対して,結合材質 量に対して 3%の膨張材添加した場合,自己収縮ひずみ を低減し,さらに骨材の混和量の増加に従って自己収縮 ひずみ量は小さくなった。しかし,上述の材齢約 24 時間 後の膨張量もまた低減されており,図-7,図-8のよう な複雑な体積変化を示す中で,骨材がセメントペースト の体積変化をどのように拘束しているのかは現状よくわ かってない。

本研究では、次節以降の考察において、セメントペー スト及びモルタルの自己収縮ひずみを、収縮要因と膨張 材の膨張効果による要因を分離し、その各要因それぞれ において骨材の拘束効果を確認する。

4. 複合則理論に基づく評価

4.1 セメントペースト自己収縮ひずみの分離

本研究では Maruyama ら¹¹⁾が提唱した「セメントペー ストに働く収縮駆動力がセメントペースト表層の水の吸 着厚さに依存し,吸着厚さの小さい程大きな収縮駆動力



(水和圧)が有する」という水和圧理論を用い,自己収 縮ひずみ全体から,膨張・収縮の要因を分離した。 材齢 24 時間以前のような極若材齢において,自己収 縮ひずみの収縮機構を水和圧理論で検証した事例はま だなく,材齢1日前後で自己収縮メカニズムが異なる可 能性があることから,本論文は,水和圧理論が適用可能 と考えられる材齢24時間以降の自己収縮ひずみを対象 として検証した。

PL の調合において、本実験に取得した自己収縮ひずみ、超音波伝播速度及び質量含水率と結合水量のデータを用い、水和圧理論¹¹⁾を適用させた水和圧曲線及びそれに近似させた回帰曲線を図-9に示す。なお、図中の黒点は実験値であり、実線はそれぞれの近似曲線である。近似曲線の適用範囲は、図中に示す 18< e <36(Å)である。

膨張材を混和した場合,水和圧曲線の導出に際し,膨 張圧の影響が避けられないため,適切な水和圧曲線を描 くことができない。そこで本研究では,膨張材を混和し たセメントペーストも PL と同じ水和圧曲線を有すると 仮定し検討を行う。

膨張材を混和したセメントペーストの水の吸着厚さ の経時変化を図-10に示す。図-9に示す水和圧曲線と 図-10に示す吸着厚さの値を用いて各材齢における水 和圧を推定し,水和圧によって生じる試験体の変形の経 時変化を逆算し,これを自己収縮ひずみ中の収縮成分と した。次に,実験による得られた自己収縮ひずみと上記 計算により得られた収縮成分との差分を,膨張材によっ て生じた膨張ひずみ成分とした。

図-11 は, 膨張材のみ混和したセメントペースト (S0) の自己収縮ひずみを水和圧理論に基づき収縮成分と膨 張成分に分離した結果である。同図には,参考として材 齢 24 時間 (赤線)以前の数値も示しているが本節の検証 には使用していない。

本論文では,分離した収縮成分,膨張成分それぞれに 対して骨材の拘束効果の影響について複合則モデルに よる評価を行う。

4.2 モルタルの自己ひずみに及ぼす骨材の影響

4.1 項の検討によって, S0 の収縮成分および膨張成分 を得た。ここで,各細骨材混和量のモルタルの収縮成分 を推定するために,著者らの既往の研究¹¹⁾で,超高強度 コンクリートの自己収縮に適応可能であることが分か っている Hobbs モデルを用いた。

S0の収縮成分の値および図-1から推定された骨材の 弾性係数を使用して各細骨材混和量のモルタルの収縮 ひずみを推定した。そして,推定した収縮ひずみ成分と 実験によって得られた自己収縮ひずみとの差分がモル タルの膨張ひずみ成分の計算値とした。得られた結果に ついて,20℃条件を図-12,30℃条件を図-13に示す。

図に示すように、収縮側の複合則モデルに基づき,膨 張側の拘束効果に関しても、推定値と計算値が比較的良 い一致を示している。このことは、骨材によるセメント







図-12 材齢7日の自己ひずみと骨材混和量の関係(20°C)



図-13 材齢7日の自己ひずみと骨材混和量の関係(30℃)

ペーストの拘束は,膨張材の膨張効果及び自己収縮に対 してほぼ同程度の抑制効果を有していることを意味する。 次に上記と同様の作業を Hobbs モデル以外の複合則モ デルで実施した結果を取りまとめたものが図-14 であ る。また,各モデルを使用した場合の推定値と計算値の 相関性を示すため,**表-4**に決定係数を示す。

図に示すように、使用したモデルによってはある程度 ばらつきが見られるものの、膨張ひずみの計算値と推定 値は概ね良い相関を示している。

以上の検証より、本実験で用いた、膨張材を混和した 超高強度セメントモルタルに対して、材齢約 24 時間以 降の自己収縮ひずみは、膨張成分、収縮成分を含めて、 ある一定の誤差範囲内において既存の複合則モデルを適 用することが可能であった。

5. 結論

本研究では、石灰系早強性膨張材を混和した超高強度 セメンペーストとモルタルを用いて、若材齢に生じる体 積変化のうち、自己収縮ひずみおよび線膨張係数に対し て、既存の複合則モデルの適用性を検証した。その結果 以下の知見が得られた。

- 骨材はモルタルの線膨張係数及び自己収縮ひずみ を拘束するが、線膨張係数と自己収縮ひずみでは、 セメントペーストの体積変化に対する骨材自身の 体積変化の割合に大きな差異があり、乾燥収縮や自 己収縮に対して適用可能であった既存の複合則モ デルも、線膨張係数には適用できない場合がある。
- 骨材の混和による拘束は、膨張材の膨張効果及びセメントペーストの自己収縮に対して働くが、膨張側収縮側によらず、その抑制効果はほぼ同程度であることが明らかになった。

参考文献

- 日本建築学会:膨張材・収縮低減剤を使用したコン クリートに関する技術の現状,日本建築学会,pp.14-18, 2013
- 2) 寺本篤史,張玉露,大久保孝昭,丸山一平:膨張材 種類が低水結合材比シリカフュームセメントペース トの若材齢体積変化に及ぼす影響,コンクリート工 学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.525-530, 2016
- 仕入豊和:セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮の関係に関する実験研究,日本建築学会関東支部第30回技術研究発表会,pp.13-16,1961.6
- 後藤幸正,藤原忠司:コンクリートの乾燥収縮に及 ぼす骨材の影響,土木学会論文報告集,No.286, pp.125-137, 1979
- 5) 江口清,寺西浩司:複合モデルを基盤としたコン クリートの乾燥収縮予測式,日本建築学会構造系論 文集, No.557, pp.15-22, 2002.7



図-14 膨張ひずみの計算値と推定値の関係

モデル名	R ² 值	モデル名	R ² 值
Kishitani-Baba	0.794	Pickett	0.704
C and CA	0.711	Patten	0.678
Kawase	0.879	Fulton	0.822
Hansen	0.669	Ono	0.822
Hobbs	0.696		

表-4 膨張ひずみの推定値と計算値の R²値

- 6) 寺本篤史,丸山一平,五十嵐豪:超高強度コンクリ ートの自己収縮に及ぼす骨材量および骨材寸法の影響,日本建築学会東海支部研究報告集,No.48, pp.37-40, 2010
- 7) 寺本篤史,宮治友也,丸山一平,鈴木雅博:超高強 度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.633-638, 2007
- 8) 三木幸蔵:わかりやすい岩石と岩盤の知識、鹿島出 版会, pp. 128-129, 1978
- Sellevold,E.J. and Ø.Bjøntegaard, Coefficient of thermal expansion of cement and concrete: Mechanisms of moisture interaction, Materials and Structures, Vol.39 pp.809-815(2006)
- D. W. Hobbs: Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.405-450, 1974
- I. Maruyama: Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration pressure, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No.2, pp.187-200, 2010
- 寺本篤史,丸山一平,谷村充,三谷裕二:超高強度 コンクリートの自己収縮予測式の提案,日本建築学 会構造系論文集, Vol.75, No.654, pp.1421-1430, 2010
- 13) 例えば、川瀬清孝:コンクリートの長さ変化率の推定式、日本建築学会論文報告集、p.28, 1996.10