

論文 骨材の性質に着目したコンクリートの収縮の検討

尾口 佳丈*1・田中 泰司*2・下村 匠*3

要旨：コンクリートの収縮現象における骨材の役割を再整理することを目的として、骨材の弾性係数、収縮量、逸散水量を変数とした実験を行い、それらがコンクリートの収縮に与える影響を二相複合モデルを介して検討した。弾性係数の異なる人工材料を使用した実験から、乾燥収縮では骨材の体積希釈効果が骨材の拘束効果よりも卓越することが示された。種々の骨材を用いた実験により、骨材の収縮は極度に大きくなければ必ずしも考慮する必要がないことが示された。また、骨材によるセメントペーストの体積希釈効果と変形拘束効果、及び骨材の収縮以外に、セメントペーストと骨材の境界付近で生じる化学的な現象がコンクリートの収縮に影響を与える可能性が示唆された。

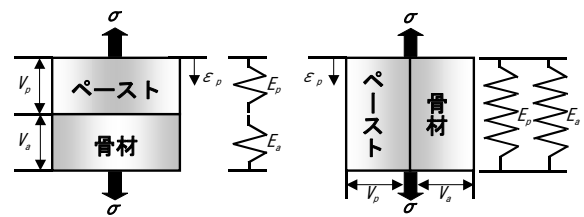
キーワード：骨材、収縮、弾性係数、複合則、逸散水量

1. はじめに

コンクリート構造物の収縮ひび割れの発生や長期変形を予測するには、コンクリートの収縮性状の合理的評価が不可欠である。コンクリートは自己収縮や乾燥収縮の発生源となるセメントペーストをマトリクスとし、その中に骨材が散在する複合材料と考えることができる。コンクリートの収縮現象におけるそれぞれの相の役割を的確に考慮することが重要である。

これまでに著者らは骨材の役割について、図-1に示すように、直列、並列の2つの理想化された状態を考え、それらの組み合わせにより実際のコンクリートの収縮を表現するモデルを提案した¹⁾。ここに、直列メカニズムとは、コンクリート中のペーストが骨材に置き換わることに比例してコンクリートの収縮量が減少するという、いわば骨材によるセメントペーストの体積希釈効果であり、並列メカニズムとは、骨材が近接したセメントペーストの収縮を拘束する効果である。著者らは検討の結果、コンクリートの自己収縮、乾燥収縮では直列メカニズムが卓越し、これに少々の並列メカニズムを加味することで実際の収縮現象を表現できることを明らかにしてきた¹⁾²⁾。

ここで、これまでの検討では、骨材の乾燥収縮はセメントペーストの収縮に比べて無視できるほど小さいと考え、骨材自身は収縮しないものとして扱ってきた。一般に用いられている骨材の場合、この仮定に則っても不都合はないと考えられる。しかしながら一方、収縮が大きい骨材の存在は従来指摘されていた³⁾⁴⁾⁵⁾。また近年、骨材自身の収縮を考慮することでコンクリートの収縮量の算定精度が向上するとの報告もある⁶⁾⁷⁾⁸⁾。コンクリートの収縮のコントロールが求められる一方で、良質な



a)完全直列複合則 b)完全並列複合則

図-1 骨材-ペースト二相複合構成モデル

骨材が枯渇しつつある現在、骨材が無収縮であるという前提を見直し、骨材の収縮特性も考慮して、コンクリートの収縮を評価できるモデルを検討することは意義がある。

そこで本研究では、コンクリートの収縮現象における骨材の役割を再整理するために、諸性質が異なる種々の材料を骨材として用いた収縮試験を実施した。弾性係数の異なる人工材料を骨材として用いた自己収縮試験、乾燥収縮試験、収縮特性の異なるいくつかの天然骨材を用いた乾燥収縮試験を行い、コンクリートの収縮現象における骨材とセメントペーストの複合関係、ならびに骨材の弾性係数、収縮特性がコンクリートの収縮に及ぼす影響について検討を行った。

2. 使用骨材物性および配合

2.1 弾性係数シリーズ

弾性係数シリーズでは、粗骨材の弾性係数がコンクリートの自己収縮および乾燥収縮に与える影響を検討する。モルタル一定の条件で様々な粗骨材を混合して作製したコンクリートの自己収縮試験および乾燥収縮試験を実施した。骨材の収縮や吸脱水の影響を排除するため

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 助教 博(工) (正会員)

*3 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 准教授 博(工) (正会員)

に粗骨材には人工材料を主として用いた。表-1に実験に用いた使用骨材の一覧と物性を示す。スチール、ガラス、プラスチックは、非吸水材料で、かつ弾性係数がおよそ一桁ずつ異なる球状の材料である。またペースト骨材とは、事前に硬化させた10mmの立方体のセメントペースト(水セメント比は30%)である。骨材の吸脱水の影響を確認するために、ペースト骨材は表面に含浸系の表面保護材でシールを施したものの(吸水率12.1%)と、施さないもの(吸水率14.1%)の2種類を用いた。比較検討用の砕石(信濃川水系の安山岩)は、24時間吸水後に表乾状態にして用いた。砂には密度2.65g/cm³の陸砂を使用した。

表-2にコンクリートの配合を示す。弾性係数シリーズでは、水セメント比を32%とし、単位水量および細骨材体積率を一定とした。コンクリート中における粗骨材体積率は28%とし、表乾状態で練り混ぜを行った。

2.2 骨材種類シリーズ

骨材種類シリーズでは、産地、種類の異なる天然骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮試験を行った。表-3に粗骨材として実験に用いた岩石の物性を示す。新潟県内4箇所から玉砂利を数種類ずつ採取し、それらから骨材単体の乾燥収縮試験および強度試験用のコアを採取した。また、これらを粉砕して4.75~9.52mmにふるい分けすることでコンクリート用の砕石を作製した。また、これらの骨材に加え、比較検討用としてレンガおよび石灰石を試験した。なお、細骨材には密度2.65g/cm³の陸砂を使用した。

表-2にコンクリートの配合を示す。骨材種類シリーズの配合は弾性係数シリーズと同様に水セメント比32%とした。使用した骨材は、花崗岩、流紋岩、チャート、石灰岩、レンガの5種類であり、骨材体積率は28%とした。花崗岩、流紋岩では、骨材体積率14%の試験体も作製した。

3. 実験方法

3.1 弾性係数シリーズ

(1) 自己収縮試験

図-2に自己収縮試験の概略を示す。試験体寸法は40×40×160[mm]の角柱供試体とした。長さ変化測定は、渦電流式の非接触変位計を用いて測定を行った。試験体はテフロンシートでコの字型に囲んだ型枠にコンクリートを打設し、打設面にテフロンシートを敷設し、その上からアルミテープで封緘した。室温20℃、湿度60%RHの室内で材齢28日まで計測を行った。

(2) 乾燥収縮試験

長さ変化の測定にはコンタクトゲージ法を用いた。供試体は、40×40×160[mm]の角柱供試体とし、各配合1体とした。試験体は打設翌日まで封緘養生を行い、脱枠

表-1 使用骨材の物性

骨材	記号	密度 g/cm ³	弾性係数 N/mm ²	寸法 mm
砕石	N	2.64	70×10 ³	9.52~4.75
スチール	S	7.63	21×10 ⁴	10
ガラス	G	2.55	80×10 ³	10.5
プラスチック	P	1.63	16×10 ²	8
ペースト骨材(無)	C1	2.33	24×10 ³	10
ペースト骨材(有)	C2	2.10	24×10 ³	10

表-2 コンクリートの配合

シリーズ	配合名	骨材	粗骨材 体積率 (%)	w/c (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	AD	G
弾性 係数	P	モルタル	—	32	301	968	1015	9.68	-
	PN	砕石	28%	32	217	700	734	7.00	731
	PS	スチール							2114
	PG	ガラス							706
	PP	プラスチック							452
	PC1	ペースト骨材(無)							645
	PC2	ペースト骨材(有)							582
骨材 種類	M	モルタル							—
	MA-14	花崗岩(AG-A)	14%	32	258	832	870	8.32	330
	MB-14	流紋岩(AG-B)							382
	MA-28	花崗岩(AG-A)	28%	32	217	700	734	7.00	654
	MB-28	流紋岩(AG-B)							756
	MD-28	チャート(AG-D)	751						
	MJ-28	石灰石(IT-J)	540						
	MK-28	レンガ(K)	573						

表-3 使用岩石の物性

採取 場所	No.	岩種	密度 g/cm ³	弾性係数 N/mm ²	乾燥収縮 ひずみ μ(28日)	吸水率 %
AG	A	花崗岩	2.36	21×10 ³	62	1.9
	B	流紋岩	2.73	79×10 ²	506	39.8
	C	花崗岩	3.00	-	326	-
	D	チャート	2.71	53×10 ³	394	1.4
	E	粘板岩	2.71	-	71	-
UO	F	頁岩と砂岩の互層	2.57	-	181	-
	G	斑レイ岩	3.43	-	206	-
TO	H	安山岩	2.62	-	197	-
	I	安山岩	3.01	-	215	-
IT	J	石灰岩	1.95	97×10 ³	33	1.2
-	K	レンガ	2.07	13×10 ³	22	12.6

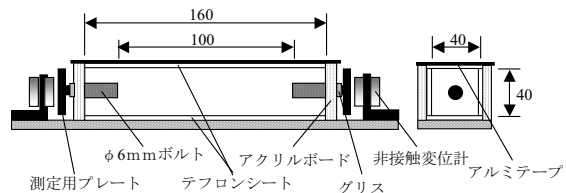


図-2 自己収縮試験概略

後すみやかにビニール袋で覆い、封緘養生を続けた。打設から14日後にビニール袋から取り出し、端面をアルミテープでシールし、同時にコンタクトチップを基長100mmで貼り付け、室温20℃、湿度60%RHの室内で乾燥を開始し、長さ変化の計測を行った。

3.2 骨材種類シリーズ

長さ変化の測定にはダイヤルゲージ法を用いた。供試体は弾性係数シリーズと同様に40×40×160[mm]の角柱供試体とし、各配合1体とした。養生方法も弾性係数シリーズと同様とした。打設から14日後にビニール袋から取り出し、全面を開放し、室温20℃、湿度60%RHの室内で乾燥を開始し、長さ変化と重量変化の計測を行った。

骨材の乾燥収縮は玉砂利からφ45mmのコアを採取し、コンタクトチップを基長100mmで貼り付け24時間吸水後にコンタクトゲージ法により測定した。室温20℃、湿度60%RHの室内で長さ変化と重量変化の計測を行った。

4. 実験結果

4.1 弾性係数シリーズ

(1) 自己収縮試験

自己収縮試験結果を図-3に示す。ここで自己収縮ひずみは打設5時間後を基準値として示した。図-4に材齢28日目の自己収縮量と骨材の弾性係数の関係を示す。人工材料を用いた場合(PS, PG, PP)には、骨材の弾性係数が大きいほど自己収縮が直線的に小さくなった。

通常の場合(PS, PG, PP)には、プラスチック(PP)を用いた場合と同程度の自己収縮となり、セメントペースト骨材を用いた場合(PC1, PC2)には自己収縮が小さくなった。セメントペースト骨材では骨材から周辺のセメントペーストに水が供給されたことで、セメントペーストの自己乾燥が抑えられ自己収縮が低減したものと考えられる。この仮説は、セメントペースト骨材に含浸材を塗布した場合(PC2)に、自己収縮が大きくなったことから検証できる。

(2) 乾燥収縮試験

封緘養生14日後を基長とした乾燥収縮ひずみの経時変化を図-5に、乾燥日数28日目の乾燥収縮量と骨材の弾性係数の関係を図-6に示す。なお、図-6中の直列複合則、並列複合則は、骨材を無収縮材料と仮定し、コンクリートを粗骨材-モルタルの二相複合材料とみなして算出した計算値であり、それぞれ式(1)および式(2)より求めた。

$$\text{直列複合則: } \varepsilon_c = \varepsilon_m (1 - V_{ag}) \quad (1)$$

$$\text{並列複合則: } \varepsilon_c = \frac{\varepsilon_m \cdot E_m (1 - V_{ag})}{(E_{ag} - E_m) \cdot V_{ga} + E_m} \quad (2)$$

ここに、 ε_c : コンクリートのひずみ

ε_m : モルタルのひずみ

V_{cp} : 骨材体積率

E_m : モルタル弾性係数

E_{ag} : 骨材弾性係数

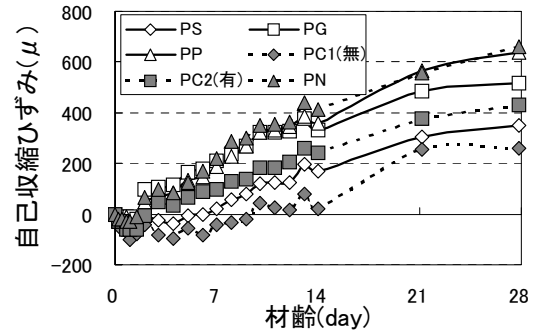


図-3 自己収縮試験結果

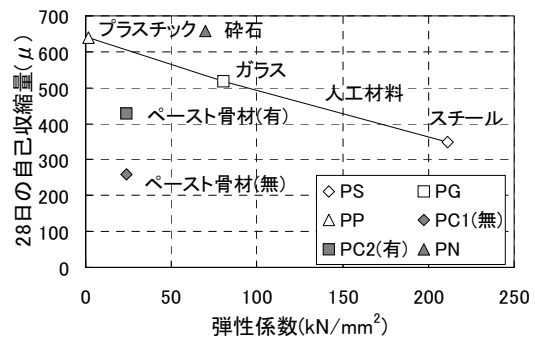


図-4 自己収縮量-骨材弾性係数関係

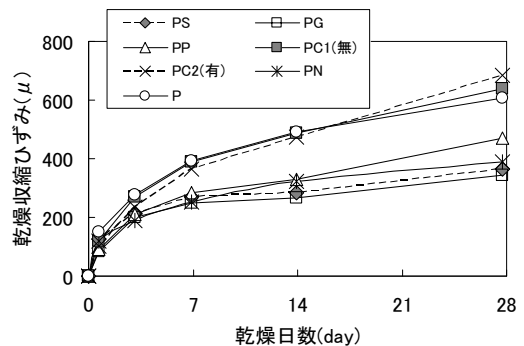


図-5 乾燥収縮の経時変化

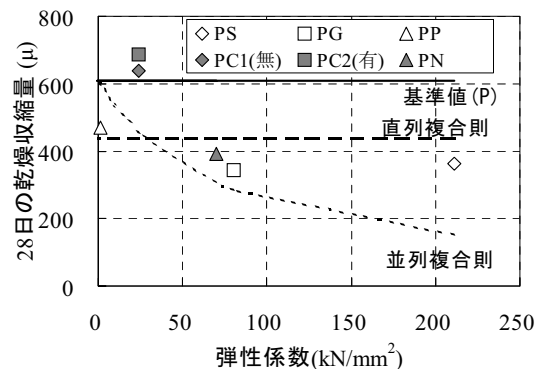


図-6 乾燥収縮量-骨材弾性係数関係

である。コンクリートのひずみ ϵ_c を求めるために必要な諸数値には、モルタル単体の収縮試験と、モルタル、骨材の圧縮試験の結果を用いた。

図-5、図-6より、人工材料を粗骨材として用いたコンクリート(PS, PG, PP)と碎石を用いたコンクリート(PN)の乾燥収縮量は基準となるモルタルPの半分程度となっていることがわかる。ただし、自己収縮の場合と異なり、骨材の弾性係数による違いは比較的小さかった。自己収縮は、ペーストの弾性係数が小さい初期材齢に進行することから、骨材とペーストの弾性係数の差が乾燥収縮の場合に比べて大きい。このことが骨材の弾性係数の感度に影響を与えていると考えられる。

式(1)(2)と図-6に明らかなように、直列複合則では骨材はコンクリート中において増量材として働くためにその体積率のみがコンクリートの収縮に影響し、弾性係数は影響しない。一方、並列複合則では骨材はセメントペーストの収縮の拘束材として働くために体積率と弾性係数が影響する。図-6によると、人工材料および碎石の試験結果は、直列モデルによる計算結果に近いが、少し並列モデルによる計算結果に近づいている。一方、セメントペースト骨材は、基準値であるモルタル試験体(P)と同等の乾燥収縮ひずみを示している。これは、ペースト骨材も周囲のセメントペーストと同様に乾燥収縮したことが理由と考えている。

4.2 骨材種類シリーズ

(1) 骨材単体の乾燥収縮試験

玉砂利から採取した岩石コア供試体の乾燥収縮試験の経時変化を図-7に、岩石コア供試体の乾燥収縮ひずみ-逸散水量関係を図-8に示す。骨材の種類によって大きく傾向が異なる結果となった。おおまかに以下の4つに分類できる。1)逸散水量が大きい収縮が小さい骨材(K)、2)逸散水量、収縮ともに大きい骨材(B)、3)逸散水量が少ない収縮が大きい骨材(C, D, F, G, H, I)、4)逸散水量、収縮ともに少ない骨材(A, E, J)、である。

(2) 乾燥収縮試験

花崗岩、流紋岩、チャート、石灰岩、レンガの5種類の骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮試験の結果を図-9に示す。粗骨材を添加した場合には基準となるモルタル試験体(M)に比べて収縮量が小さくなったが、骨材の種類によって比較的大きな差が生じた。骨材コアの乾燥収縮試験結果との相関は確認できなかった。

乾燥開始からの逸散水量の経時変化を図-10に示す。吸水率が極端に大きな骨材を使用した場合(MB-28, MK-28)には、モルタルよりも逸散水量が大きくなった。また、骨材の吸水率が小さい場合(MA-28, MJ-28)にはコンクリートの逸散水量は小さくなることから、コンクリートの逸散水量に対する骨材の吸水率の影響が大きい

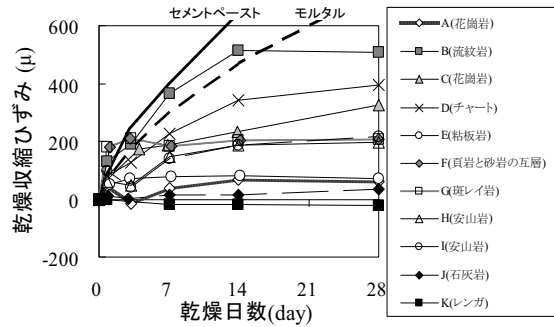


図-7 骨材コアの乾燥収縮の経時変化

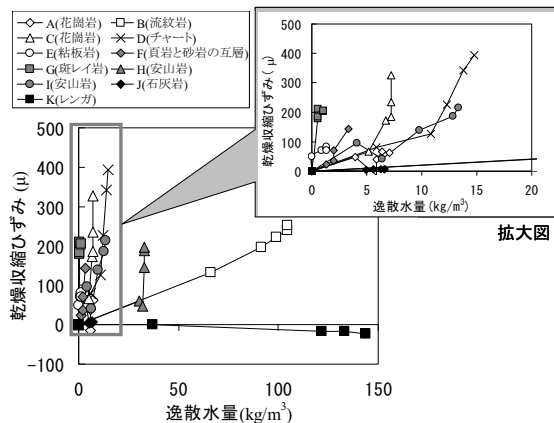


図-8 乾燥収縮ひずみ-水分逸散量関係

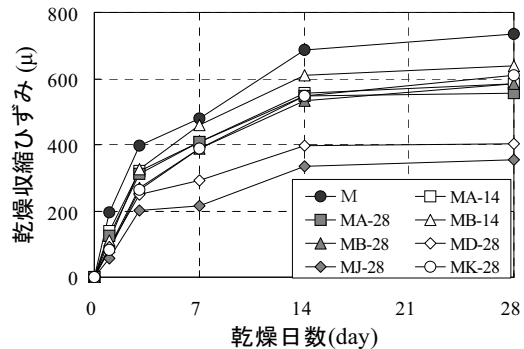


図-9 乾燥収縮の経時変化

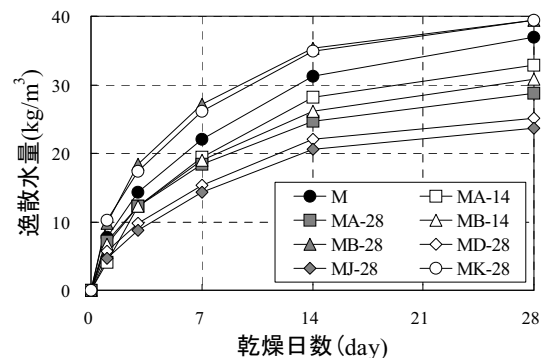


図-10 逸散水量の経時変化

ことがわかる。

5. 骨材の収縮がコンクリートの収縮に及ぼす影響の検討

5.1 検討方法

本研究で行った実験により得られた各種骨材の乾燥収縮特性がその骨材を用いたコンクリートの収縮性状に及ぼす影響について、各種複合モデルを用いて検討する。検討の手順は以下である。

- 1) モルタル供試体の乾燥収縮試験結果より、乾燥収縮—時間関係を $\varepsilon_m(t) = \alpha(1 - e^{-\beta t})$ の形式の指数関数により近似する。ここに α, β は実験定数、 t は時間である。
- 2) 骨材単体の乾燥収縮試験結果より、乾燥収縮—時間関係を、1)と同形式の関数により近似する。
- 3) 上記 1)2)より計算される各時間におけるモルタルと骨材単体の収縮ひずみとコンクリート中のモルタルと骨材の体積率(および並列複合則の場合はモルタルと骨材の弾性係数も)を各種の複合則に適用して、各時間におけるコンクリートの収縮ひずみを計算する。

ここでの検討では、問題を単純化するために、モルタル・コンクリートの場合は $40 \times 40 \times 160$ [mm] の角柱供試体、骨材の場合は $\phi 45$ mm の収縮を材料の収縮特性とみなし、供試体内部での収縮の空間分布は考慮しない。つまり、 $40 \times 40 \times 160$ [mm] の角柱供試体を一要素として収縮を計算する。また、骨材単体の試験で得られた骨材の収縮、骨材からの水分逸散が同一乾燥時間におけるコンクリート中でも生じているものと仮定する。

検討する複合則は、既述の骨材の収縮を考慮しない直列複合則(式(1))、骨材の収縮を考慮しない並列複合則(式(2))、骨材の収縮を考慮した直列複合則(式(3))、骨材の収縮を考慮した並列複合則(式(4))の4通りとする。

$$\varepsilon_c = (1 - V_{ag}) \varepsilon_m + V_{ag} \varepsilon_{ag} \quad (3)$$

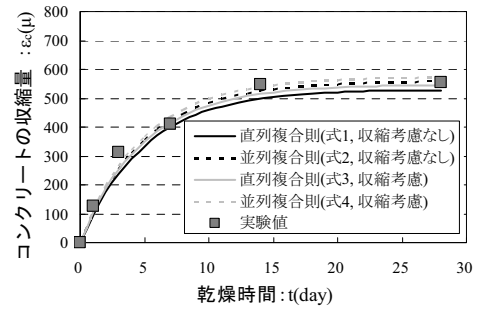
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ag} + \frac{(\varepsilon_m - \varepsilon_{ag}) \cdot E_m (1 - V_{ag})}{(E_{ag} - E_m) \cdot V_{ag} + E_m} \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon_m, \varepsilon_{ag}$ はそれぞれ 1)2)で近似した各時間におけるモルタルおよび骨材の収縮ひずみ、 E_m, E_{ag} はそれぞれモルタルおよび粗骨材の弾性係数である。

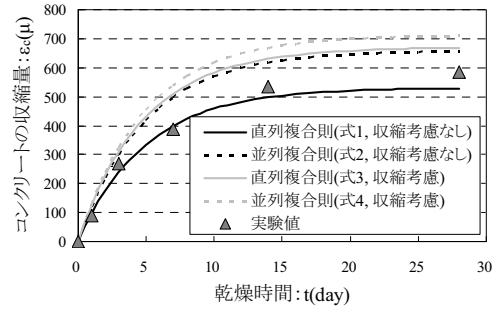
5.2 検討結果

各種骨材を用いたコンクリートの収縮の実験値と各種複合則により求めた計算値の比較を図-11に示す。

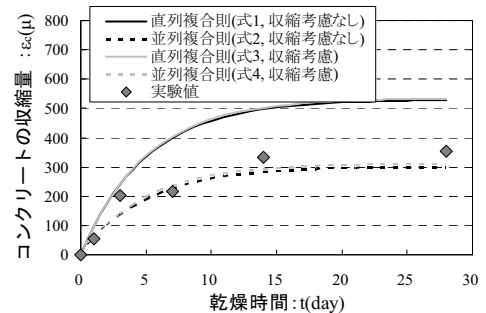
a) MA-28(花崗岩)の結果に見られるように、収縮の小さい骨材を使用した場合に当然ながら複合モデルによる計算結果においても骨材の収縮の影響は小さい。



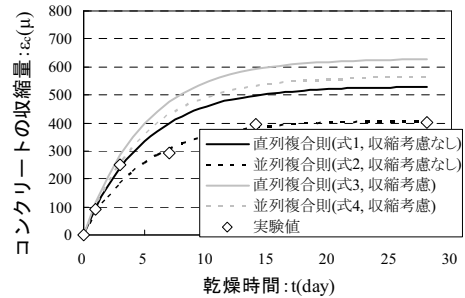
a) MA-28(花崗岩)



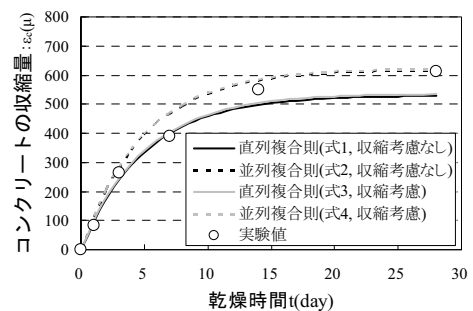
b) MB-28(流紋岩)



c) MC-28(チャート)



d) MJ-28(石灰岩)



e) MK-28(レンガ)

図-11 乾燥収縮量—時間関係

b)のMB-28は、収縮が比較的大きく弾性係数の小さな流紋岩を粗骨材として用いたケースである。この場合にも、実験値は収縮を考慮しない直列モデルによる計算結果にむしろ近くなった。このことは、単体ではある程度収縮する骨材を用いたとしても、それが必ずしもコンクリートの収縮量の増大につながるわけではないこと、あるいは直列モデル並列モデルのいずれも骨材とモルタルの両者が収縮する場合のコンクリートの収縮を表せないことの二通りの可能性を示唆している。今後の検討課題である。

石灰岩、レンガはいずれも単体での収縮が小さかったが、e)のレンガを使用したコンクリート(MK-28)では他の多くの場合と同じように実験値が直列モデルによる計算結果と並列モデルによる計算結果の間に位置したのに対し、d)の石灰岩を使用したコンクリート(MJ-28)の収縮の実験値は直列モデルによる計算結果よりも小さくなった。同様の結果はチャートを使用した場合(MD-28)にも観察された。石灰岩やチャートを使用した場合、予想よりも収縮が小さくなった理由は明らかではないが、骨材表層の水酸化カルシウムの配向性の影響⁹⁾など、ここでのモデルで考慮していない収縮低減機構が働いている可能性もある。これらのように複合モデルの予測値と異なる傾向が得られる条件を特定するためには、種々の岩種骨材を対象としてさらに検討を重ねる必要がある。

6. 結論

本研究において以下の知見が得られた。

- 1) 骨材によるコンクリートの収縮低減のメカニズムとして、骨材によるセメントペーストの体積希釈効果(直列メカニズム)と骨材によるセメントペーストの収縮拘束効果(並列メカニズム)を考えた場合、乾燥収縮では直列メカニズムが卓越し、並列メカニズムがわずかに認められる結果となった。これは従来⁹⁾の知見と整合する。
- 2) 乾燥収縮に比べ、自己収縮では骨材の弾性係数の影響が大きかった。セメントペーストと骨材の弾性係数の比が材齢によって異なること、多少とも並列メカニズムが存在することがその理由として考えられる。
- 3) 収縮の小さい一般の骨材を使用する場合、従来どおり骨材を無収縮と考えて、コンクリートの収縮を予測して問題はないことが示された。
- 4) 種々の骨材を用いたコンクリートの収縮試験によって、複合則による予測値とおおむね一致する骨材と予測値と異なる傾向を示す骨材の両方が存在することが確認された。

謝辞

本研究の実施にあたり、新潟県生コンクリート工業組合 長井齋氏、電気化学工業株式会社 盛岡実氏、長岡市立科学博物館 加藤正明氏に御助力を得ました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小幡 浩之ほか：骨材-ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析，コンクリート工学年次論文集，vol.21，pp.781-786，1999
- 2) 小野 秀晃ほか：コンクリートの収縮現象における骨材の役割，コンクリート工学年次論文集，vol.27，pp.457-462，2005
- 3) Torben C. Hansen and Knud E. C. Nielsen: Influence of aggregate properties on concrete shrinkage, Journal of ACI, Vol.62, No.7, pp. 783-794, July, 1965
- 4) 後藤 幸正ほか：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，第 286 号，pp.125-137，1979.6
- 5) 後藤 幸正ほか：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集，第 247 号，pp.97-108，1976.3
- 6) 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制御設計・施工指針(案)・同解説，2006
- 7) 浅本 晋吾ほか：骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析，土木学会論文集 E，vol.63，No.2，pp.327-340，2007.6
- 8) 今本 啓一ほか：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響，日本建築学会構造系論文集，第 606 号，pp.9-14，2006.8
- 9) 内川 浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33，No.9，pp.5-17，1995.9