

論文 コンクリートの収縮現象における骨材の役割

小野 秀晃^{*1}・下村 匠^{*2}

要旨：コンクリートの収縮現象において，コンクリート中の骨材が果たす役割であるペーストの変形拘束効果と体積希釈効果について，骨材弾性係数と骨材体積率を変数とした実験により検討した。水分逸散および自己収縮では，骨材はコンクリート単位体積中におけるペースト濃度を希釈する働きが卓越することを実験的に明らかにした。乾燥収縮では，骨材による体積希釈効果に加えて，体積変化の空間的勾配に起因した内部拘束の影響が無視できないことを実験と解析により明らかにした。

キーワード：乾燥収縮，自己収縮，複合則，内部拘束

1. はじめに

コンクリートの収縮現象のいくつかの側面は，体積変化を生じるペーストと，体積希釈効果および変形拘束効果を有する骨材の二相材料として考える複合則によって表現できることが指摘されている¹⁾。図 - 1 に示すように，コンクリート中の骨材周辺では，骨材がペーストの収縮変形を拘束する効果（＝並列的メカニズム）が卓越し，骨材から離れた部分では，骨材による拘束は小さく，骨材はコンクリート単位体積あたりのペーストの体積を希釈する効果（＝直列的メカニズム）が支配的となると考えられる¹⁾。ペーストの非拘束収縮ひずみ，ペーストの弾性係数，骨材の弾性係数および骨材体積率を入力値として与え，コンクリートの収縮を計算するモデルはいくつか提案されているが，いずれのモデルにおいても，ある程度妥当性が認められることが実証されている²⁾。

本研究では，コンクリートの収縮現象におけるペーストと骨材の複合関係の実態について，理解をより深めるために，極端な条件による実験を企画した。すなわち，弾性係数が通常の骨材よりも著しく小さいゴム製骨材を用い，骨材混入量を変化させ，乾燥収縮および自己収縮試験を行った。骨材の弾性係数は並列的メカニズ

ムによる骨材の収縮拘束効果に影響を及ぼすと考えられる。自己収縮と乾燥収縮はいずれもコンクリート中のペーストの収縮に起因する現象であるが，有限供試体中の不均一な収縮分布による空間的な内部拘束の有無が異なる。

2. 骨材の物性および配合

表 - 1 に実験に用いた骨材の物性を示す。ゴム製骨材とは，廃タイヤを加工したものであり，本来，リサイクル材として検討されているものである。その写真を図 - 2 に示す。実験に用いた天然骨材の粒度は，ゴム製骨材の粒度構成を基準とし，ほぼ同じになるよう調整を施した。

表 - 2 に，配合を示す。

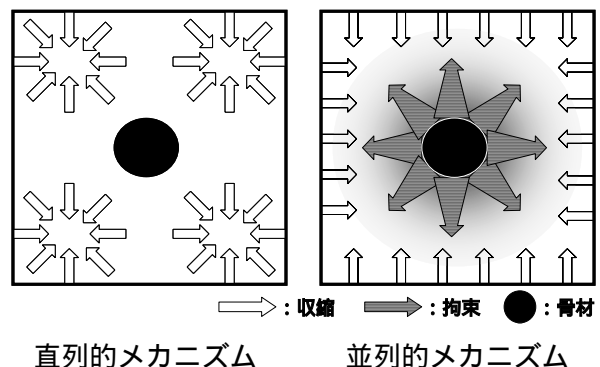


図 - 1 複合メカニズム

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 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 博士(工学) (正会員)

(1) シリーズ pa

シリーズ pa は、W/C=25%のペーストに、ゴム製骨材を混入したコンクリートである。流動性確保のため、高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸塩系)を単位セメント量の 0.7%添加した。骨材体積率をパラメータとし、5 種類のコンクリートを作製した。本シリーズでは、乾燥収縮試験および自己収縮試験を実施した。

(2) シリーズ pa-d, pna-d

シリーズ pa-d およびシリーズ pna-d の違いは、骨材がゴム製および天然であることである。これら 2 つのシリーズは、W/C=32%のペーストに、骨材を外割りにて添加したコンクリートであり、骨材体積率をパラメータとし、シリーズ pa-d は、4 種類、シリーズ pna-d は 1 種類製作した。

本シリーズは、乾燥収縮試験のみ実施した。

表 - 1 骨材の物性

	弾性係数 N/mm ²	粗粒率 (FM)	最大寸法 mm	密度 g/cm ³
天然骨材	50000 ~ 70000 ¹	1.96 ²	10 ²	2.62
ゴム製骨材	10 ~ 1000 ¹	1.96	10	1.26

1 標準的な弾性係数

2 粒度調整後



図 - 2 ゴム製骨材の写真

3. 実験方法

3.1 乾燥収縮試験

供試体は、40x40x160[mm]とし、シリーズ pa は各配合 1 体、シリーズ pa-d は、各配合 2 体作製した。打ち込み後、材齢 14 日まで 20±2 の恒温室内にて封緘養生を行い、その後シリーズ pa は、40x160[mm]の 4 側面、シリーズ pa-d は、40x160[mm]の対面 2 側面を乾燥面とし、それ以外の面はアルミテープで乾燥を防止し、20±2、60±5%RH の恒温恒湿室にて乾燥した。

乾燥開始時から、コンタクトゲージ法による長さ変化の計測、および重量変化の計測を行い、収縮ひずみと逸散水量の経時変化を算出した。

表 - 2 実験を行ったコンクリートの配合

シリーズ	配合名	骨材	骨材体積率	W/C	単用量 (kg/m ³)				測定項目
					W	C	Ag	SP	
pa	pa 0	ゴム	0%	25%	429	1765	0	12.4	乾燥収縮と自己収縮
	pa 8		8.4%		393	1617	106	11.3	
	pa18		17.6%		353	1454	223	10.2	
	pa32		32.0%		292	1200	404	8.4	
	pa39		39.1%		261	1075	494	7.5	
pa-d	pa 0-d	ゴム	0%	32%	503	1571	0	乾燥収縮	
	pa 8-d		8.4%		461	1439	106		
	pa18-d		17.6%		414	1294	223		
	pa39-d		39.1%		306	957	494		
pna-d	pna39-d	天然	39.1%		306	957	1025		

3.2 自己収縮試験

供試体と測定方法の概略を図 - 3 に示す。供試体は、40x40x160[mm]とした。測定は、JCI 自己収縮研究委員会による提案法³⁾を参考にしたが、打ち込み時からの体積変化を測定するため、渦電流方式非接触型変位計を用いて行った。そ

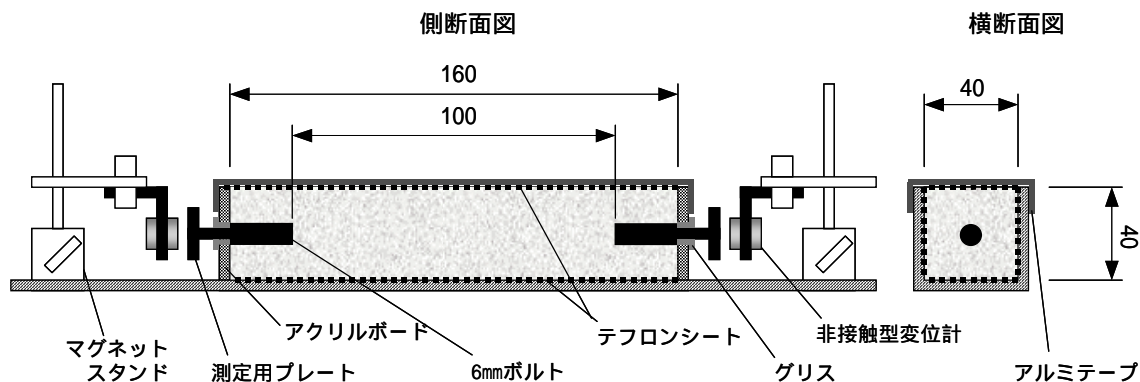


図 - 3 自己収縮供試体と測定概略

のため、測定用プレートを添付し、型枠端板との摩擦を取り除いた定着区間が 30mm のボルトを打込み時に供試体両端部に埋め込んだ。さらに、供試体からの水分逸散を防止するため、型枠端板の孔にグリスを充填させ、供試体上面部をテフロンシートで覆い、その上からアルミテープで封緘した。

4. 実験結果

4.1 乾燥収縮および逸散水量

実験結果を図 - 4 および図 - 5 に示す。

図 - 4 は、乾燥日数と供試体の収縮ひずみの関係である。pa0, pa0-d (これらを以下、ペーストと呼ぶ) を基準に各配合の供試体の収縮ひずみを見ると、天然骨材を使用した pna39-d が、小さな収縮ひずみとなったが、ゴム製骨材を使用した配合の供試体の全てが、ペーストより大きな収縮ひずみを呈した。本傾向は、直感的に理解し難い結果であるが、W/C が異なる供試体においても同様の傾向が確認された。この現象のメカニズムについては 6 章において力学モデルを用いて検討する。

図 - 5 は、乾燥日数と逸散水量の関係である。ペーストとその他の配合を比較すると、骨材体積率が大きいほど逸散水量が小さくなった。

4.2 自己収縮

図 - 6 に pa シリーズの自己収縮試験の結果を示す。図中縦軸の収縮ひずみは、打ち込みから 12 時間後の測定点間距離を基準として求めたひずみである。なお、pa32 は、実験不具合のため 8 日以降のデータがない。

図 - 6 より、ゴム製骨材を使用したコンクリートの自己収縮は、骨材体積率が大きくなるにしたがい小さくなる結果が得られた。この傾向は、天然骨材を用いた既往の報告⁴⁾と一致する。

5. 実験結果における骨材の役割に関する検討

5.1 逸散水量

図 - 7 は、材齢 28 日 (封緘養生 14 日 + 乾燥

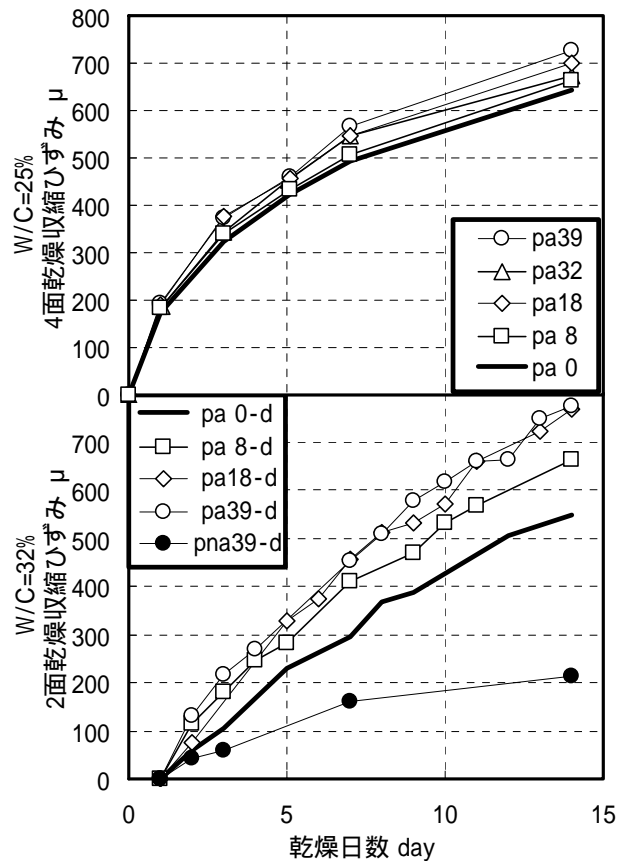


図 - 4 乾燥日数と乾燥収縮

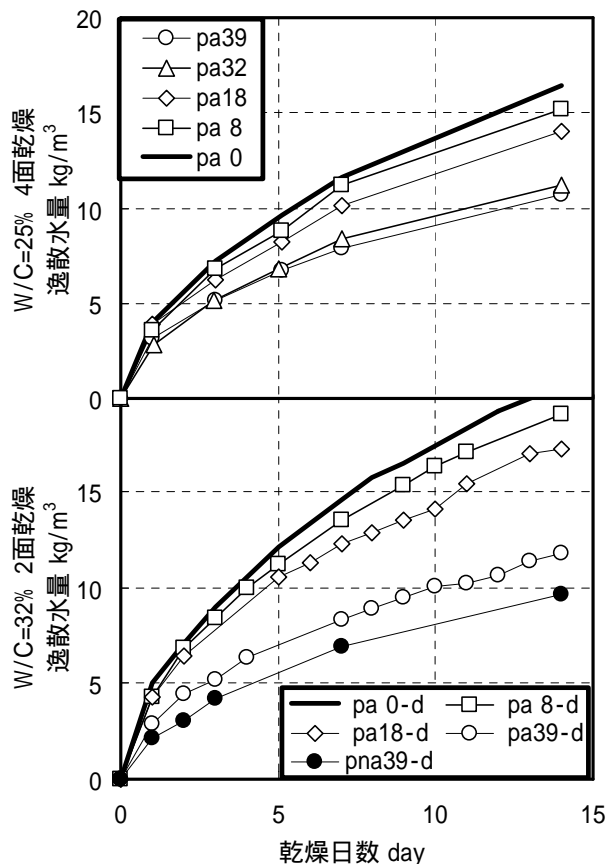


図 - 5 乾燥日数と逸散水量

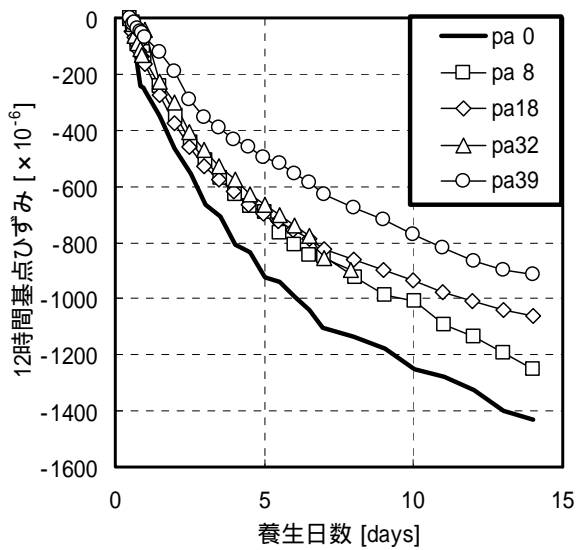


図 - 6 自己収縮試験結果

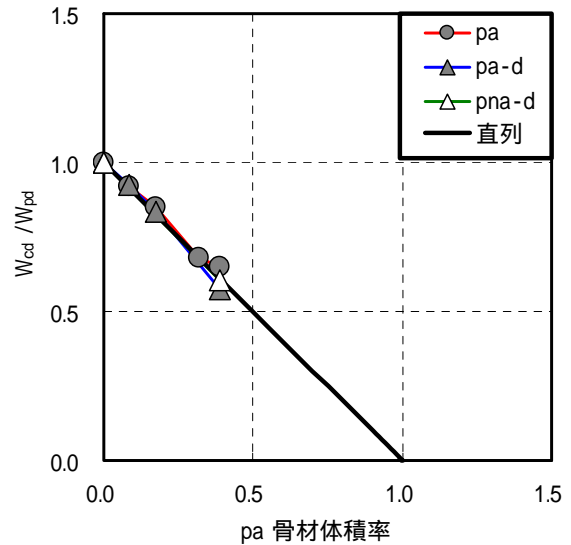


図 - 7 骨材体積率と逸散水量の関係

14日) 乾燥によるコンクリートの逸散水量とペーストの逸散水量の比(W_{cd} / W_{pd})と骨材体積率の関係である。図中の計算値は、骨材の役割として体積希釈効果のみを考え、式(1)より求めた。

$$W_{cd} / W_{pd}(pa) = 1 - pa \quad (1)$$

ここに、 pa : 骨材体積率

W_{cd} : コンクリートの逸散水量

W_{pd} : ペーストの逸散水量

図 - 7を見ると、ゴム製骨材コンクリートおよび天然骨材コンクリートともに、計算値によく一致している。すなわちコンクリート中の水分移動現象においては、骨材の役割として体積希釈効果が支配的であるといえる。つまり、コンクリート中では主としてコンクリートにおけるセメントペーストが、水分の存在および移動の場として機能していることを示している。

5.2 乾燥収縮

図 - 8は、材齢 28 日(封緘 14 日 + 乾燥 14 日)時のコンクリートの収縮ひずみとペーストの収縮ひずみの比($\varepsilon_c / \varepsilon_p$)と骨材体積率の関係である。

図 - 8 中の直列および並列とは、ペーストと骨材の二相材料としての複合則計算値であり、それぞれ式(2)および式(3)より求めた。

$$\text{直列: } \varepsilon_c / \varepsilon_p(pa) = 1 - pa \quad (2)$$

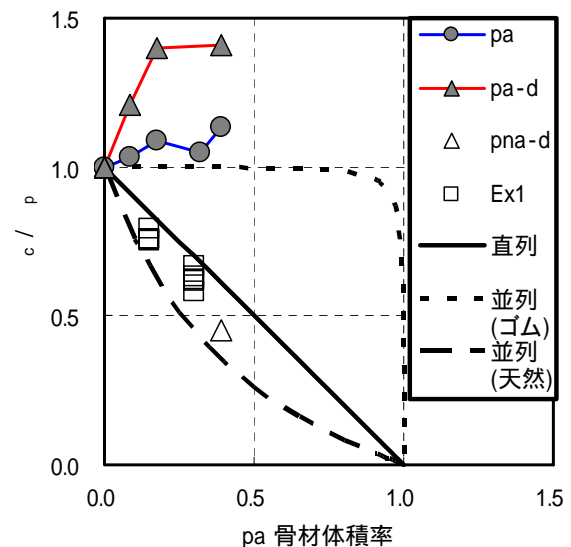


図 - 8 骨材体積率と乾燥収縮の関係

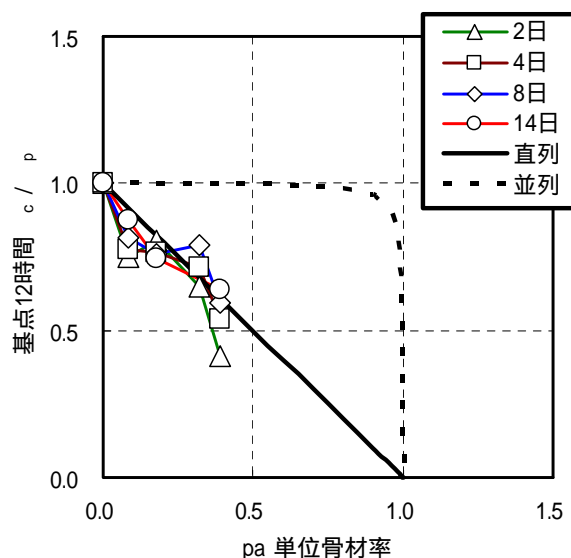


図 - 9 骨材体積率と自己収縮の関係

$$\text{並列： } \varepsilon_c / \varepsilon_p (pa) = \frac{1 - pa}{\left(\frac{E_{ag}}{E_p} - 1 \right) pa + 1} \quad (3)$$

ここに、 ε_c : コンクリートのひずみ
 ε_p : ペーストのひずみ
 E_{ag} : 骨材の弾性係数
 E_p : ペーストの弾性係数

図 - 8 を見ると、天然骨材コンクリートの実験値は、直列計算値と並列計算値の間に位置する。これは、既往の多くの実験結果においても認められる傾向である。図中には Ex1 で示した著者らの既往の実験結果¹⁾も示している。この結果は、コンクリートの収縮における骨材の役割として、体積希釈効果（直列的メカニズム）と変形拘束効果（並列的メカニズム）が共存することを意味すると著者らは解釈している。

一方、ゴム製骨材コンクリートの結果を見ると、それらの乾燥収縮は、ペーストの乾燥収縮より大きいため、 $\varepsilon_c / \varepsilon_p$ が 1 以上となり、直列および並列的メカニズムを考える既往の複合モデルの延長では解釈できない結果となった。

5.3 自己収縮

図 - 9 は、材齢 2, 4, 8, 14 日におけるコンクリートの実測自己収縮とペーストの実測自己収縮の比と骨材体積率の関係である。図中の直列および並列は、5.2 と同様、式(2)および(3)より求めた。図 - 9 において、直列計算値と実測値を比較すると、材齢初期では、ややバラツキが見られるものの、材齢の進行に伴い直列計算値に近づくことがわかる。

つまり、自己収縮の場合、乾燥収縮とは異なり、ゴム製骨材の役割は体積希釈効果で説明できる結果となった。

6. 骨材の役割に関する力学モデルによる検討

6.1 仮定

本研究で得られた実験結果は、統一的な説明を行うことは直感的には困難である。そこで、有限供試体の乾燥収縮現象と自己収縮現象にお

ける相違点である体積変化の内部拘束を考慮することで、シンプルな力学モデルにより実験結果の統一的な説明を試みる。

以下の仮定を設ける。

まず、図 - 9 より、供試体内部に体積変化が一様に生じる、自己収縮においては、ゴム製骨材を用いた場合であっても、ペーストと骨材の複合関係は直列モデルで表せることが明らかとなった。このことより、一般には不均一な水分分布に起因した非拘束収縮ひずみの空間的勾配がある乾燥収縮現象においても、局所的にはペーストと骨材の複合関係は直列モデルで表されると仮定する。

$$\varepsilon_{sh,c} = (1 - pa)\varepsilon_{sh,p} \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh,c}$: コンクリートの非拘束収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh,p}$: ペーストの非拘束収縮ひずみ
 乾燥収縮において、有限角柱供試体内の非拘束収縮ひずみの空間的分布を、簡単のため 2 次曲線で与える。軸方向のひずみのみを考え、厚さ方向には一様な現象とする。

$$\varepsilon_{sh,p}(x) = ax^2 + b \quad (5)$$

ここに、 x : 角柱供試体の座標 (-0.5 x 0.5)
 a, b : 任意の定数

直列モデルの仮定により、コンクリートの弾性係数 E_c は以下で表される。

$$E_c = \left(\frac{1 - pa}{E_p} + \frac{pa}{E_{ag}} \right)^{-1} \quad (6)$$

コンクリートは、引張側に引張強度による応力の限界値を設けた弾性体とする。クリープは考慮しない。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_e & (\varepsilon_e \leq \varepsilon_t) \\ 0 & (\varepsilon_e > \varepsilon_t) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの応力

ε_e : コンクリートの有効ひずみ

$$\varepsilon_e = \varepsilon_c - \varepsilon_{sh,c}$$

ε_t : コンクリートの引張限界ひずみ

$$\varepsilon_t = f_t / E_c \quad (f_t : \text{ペーストの引張強度})$$

なお，直列モデルであるため，応力，強度はペースト，コンクリートに共通である。

自由収縮角柱供試体の変形には，平面保持の仮定が成り立つとする。

6.2 解析結果

図 - 10 に示したフローにしたがい，コンクリート角柱自由収縮供試体の収縮ひずみの計算を行った。骨材の弾性係数を変化させて行った解析結果を図 - 11 に示す。本研究の実験結果で見られた傾向，すなわち，弾性係数が通常範囲の骨材を用いたコンクリートでは，乾燥収縮においても直列的な挙動を示すこと，弾性係数の著しく小さな骨材を用いたコンクリートでは，骨材料の少ない範囲においてペーストより大きなひずみを呈することが表現できた。

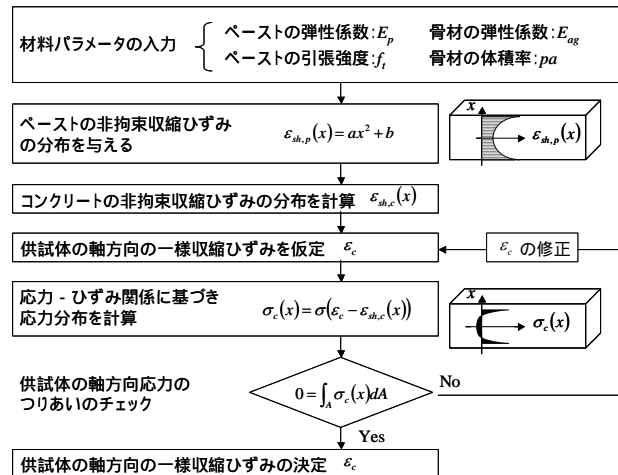


図 - 10 コンクリート自由収縮角柱供試体の収縮ひずみの算定フロー

7. まとめ

本研究において以下の知見が得られた。

- 1) コンクリートの水分逸散では，水分移動はペースト部分において起こり，骨材はペーストの体積濃度を希釈する働きをする。
- 2) コンクリートの自己収縮における骨材の役割として，ペーストの体積濃度を希釈する働きが卓越する。
- 3) ゴム製骨材を使用したコンクリート供試体の乾燥収縮は，ペーストの乾燥収縮よりも大きくなった。この傾向は，直列モデルと乾燥収縮の内部拘束を考慮した力学モデルにより表現できた。

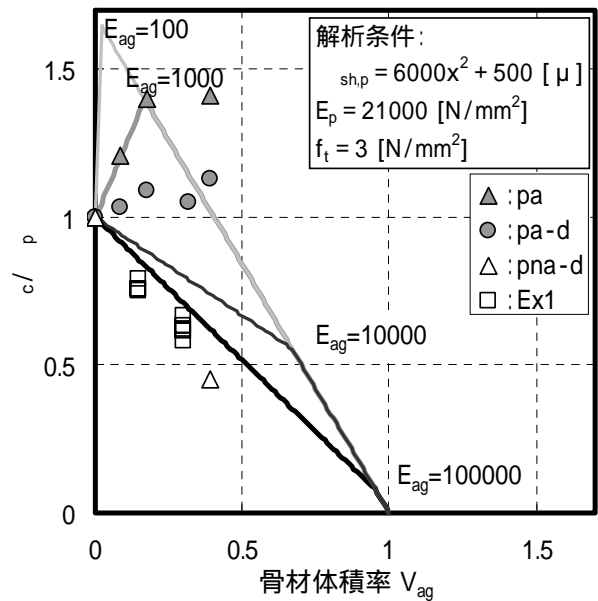


図 - 11 乾燥収縮解析結果

謝辞

ゴム製骨材は長岡技術科学大学丸山暉彦教授にご提供いただいた。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高嶋 豊，小幡浩之，下村 匠：骨材 - ペースト複合モデルによるコンクリート有限供試体の時間依存変形の解析，コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム，pp291-298，2001

- 2) D.W.HOBBS：Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete，Journal of ACI,vol.71，No.9，pp445-450，1974
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，p51-54，2002
- 4) 宮澤伸吾，北田悦子，井田敦師：コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材混入量の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，1998