

コンクリートの体積変化現象における骨材の影響

コンクリート研究室： 小野 秀晃
指導教官： 下村 匠

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) が支配的になると考えられる¹⁾。ペーストの体積変化ひずみ、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内部拘束効果の有無が異なる。

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、コンクリートの配合を示す。

(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、ゴ

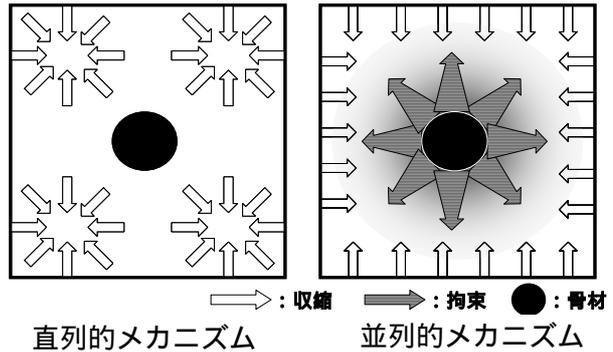


図 - 1 複合メカニズム



図 - 2 ゴム製骨材の写真

表 - 1 骨材の物性

	弾性係数 N/mm ²	粗粒率 (FM)	単位容積質量 kg/m ³
天然骨材	50000 ~ 100000 ¹⁾	1.96 ²⁾	2.62
ゴム製骨材	10 ~ 1000 ¹⁾	1.96	1.26

1 一般的な値 2 粒度調整後

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	単位量 (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		

ム製骨材を使用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。

3. 実験方法

3.1 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 のボルトを打ち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。

3.2 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 体製作した。打ち込み後、材齢 14 日まで 20 ± 2 の恒温室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 、 $60 \pm 5\%RH$ 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。

4. 実験結果

4.1 自己収縮

図 - 4 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

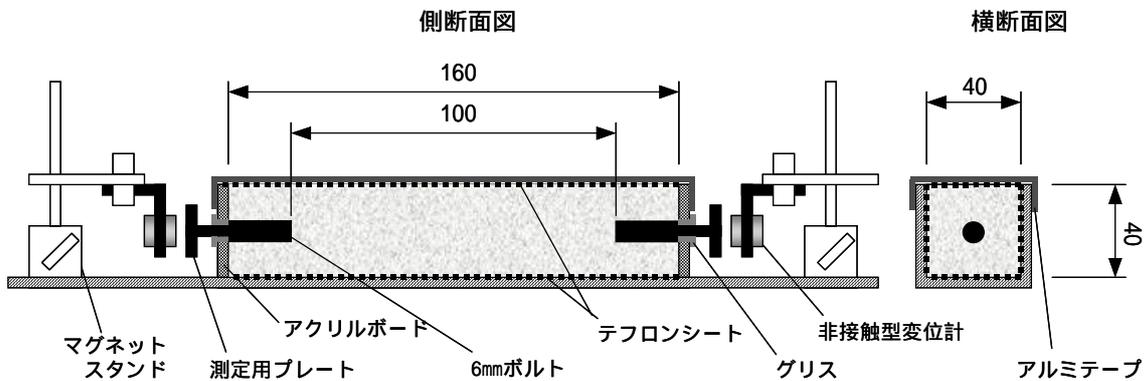


図 - 3 自己収縮供試体と測定概略

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 - 4 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。

4.2 乾燥収縮および逸散水量

実験結果を図 - 5 および図 - 6 に示す。

図 - 5 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。ゴム製骨材を使用した配合は、直感的には理解し難い結果となった。

図 - 6 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。

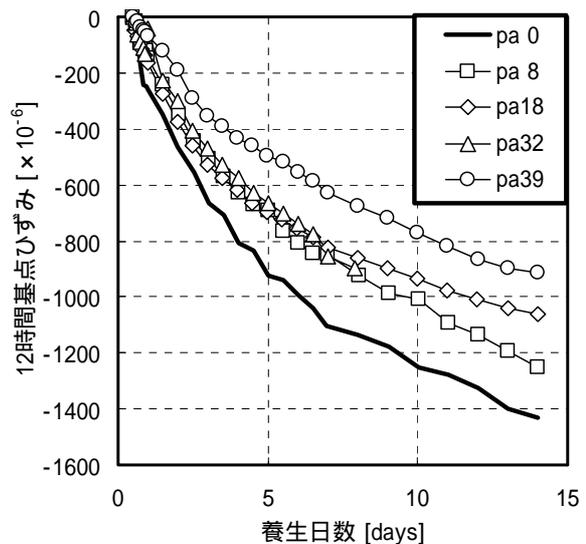


図 - 4 自己収縮試験結果

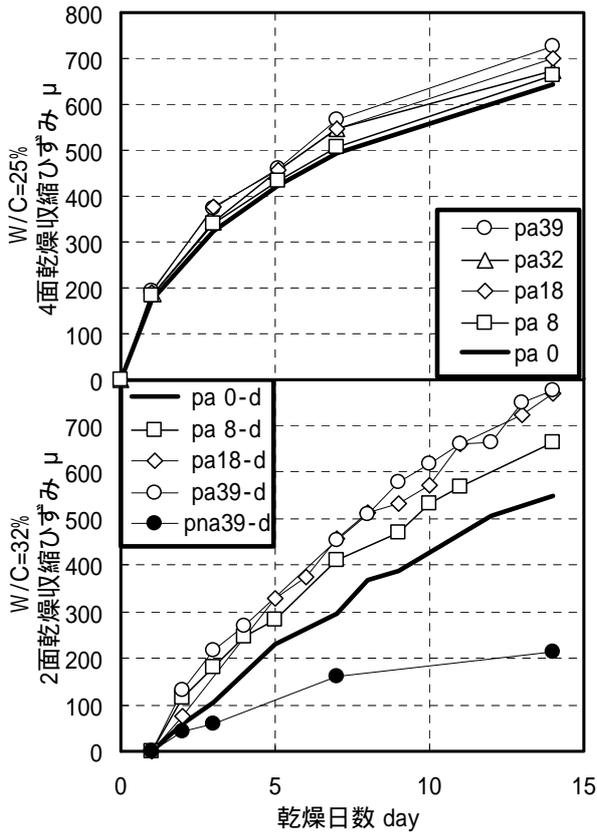


図 - 5 乾燥日数と乾燥収縮

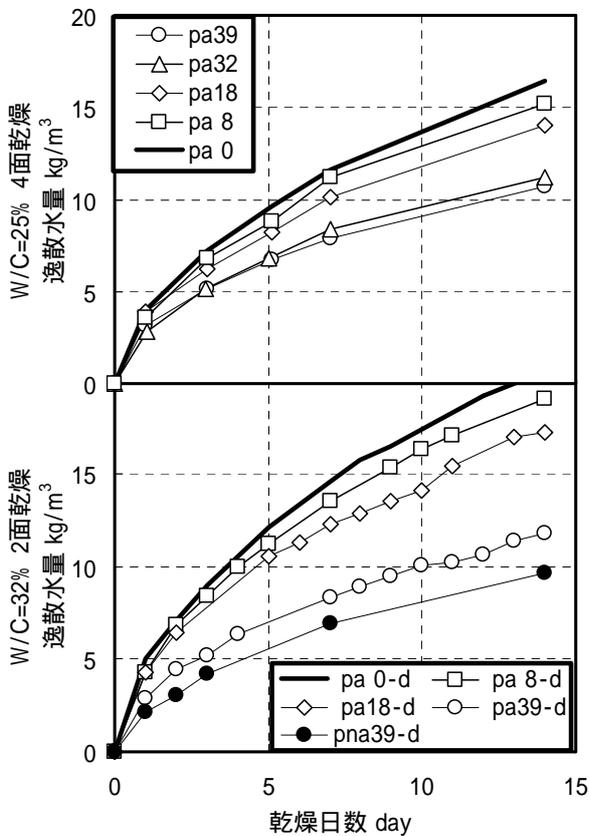


図 - 6 乾燥日数と逸散水量

5. 実験結果における骨材の役割に関する検討

5.1 自己収縮

図 - 7 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(c/p)と骨材体積率の関係である。図 - 7 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(1)および式(2)より求めた。

$$\text{直列計算値} = 1 - pa \quad (1)$$

$$\text{並列計算値} = \frac{1 - pa}{\left(\frac{E_{ag}}{E_p} - 1\right) pa + 1} \quad (2)$$

ここに、 pa : 骨材体積率

E_{ag} : 骨材の弾性係数

E_p : ペーストの弾性係数

図 - 7 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。

5.2 逸散水量

図 - 8 は、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たもので、式(1)より求めた。

図 - 8 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。このことは、主としてコンクリートにおけるセメントペースト中の空隙が、コンクリート中の水分の存在および移動の場として機能していると考えてよいことを示している。

5.3 乾燥収縮

図 - 9 は、材齢 28 日 (封緘養生 14 日 + 乾燥 14 日) における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(c/p)と骨材体積率の関係である。図中の直列および並列は、5.1 と同様、式(1)および(2)より求めた。

図 - 9 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解釈されている。

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、 c/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。

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 - 7 より、供試体内部に体積変化の空間的勾配がないと考えられる自己収縮においては、ゴム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されることが明らかとなった。このことより、一般的には体積変化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。

$$sh_c = (1 - pa) sh_p \quad (3)$$

ここに、 sh_c ：コンクリートの非拘束収縮ひずみ

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。

$$sh_p(x) = ax^2 + b \quad (4)$$

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。

$$E_c = \left(\frac{1 - pa}{E_p} + \frac{pa}{E_{ag}} \right)^{-1} \quad (5)$$

コンクリートは、引張側に引張強度による応力

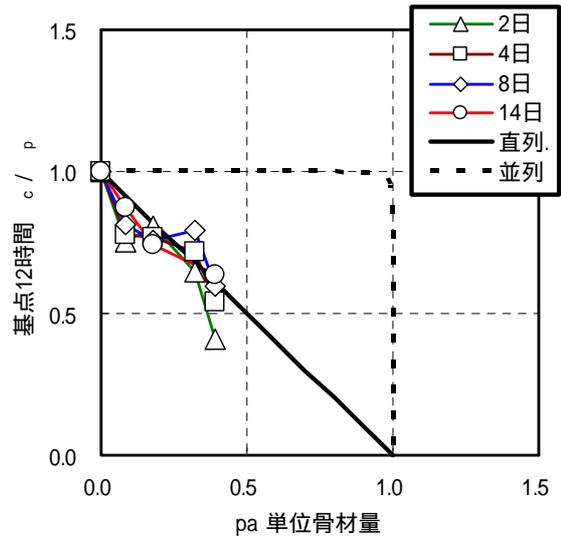


図 - 7 骨材体積量と自己収縮の関係

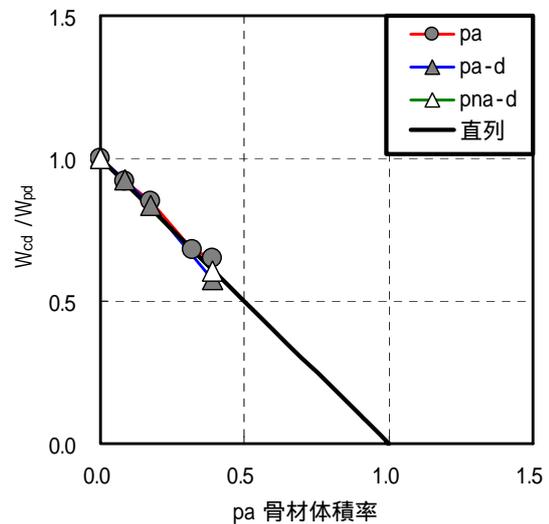


図 - 8 骨材体積率と逸散水量の関係

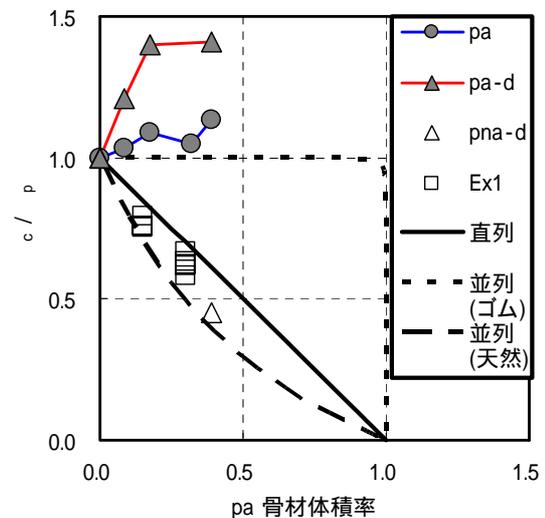


図 - 9 骨材体積率と乾燥収縮の関係

の限界値を設けた弾性体とする。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_e & (\varepsilon_e \leq \varepsilon_t) \\ 0 & (\varepsilon_e > \varepsilon_t) \end{cases} \quad (6)$$

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

$$\varepsilon_t = f_t / E_c$$

なお、直列モデルであるので、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。ゴム製骨材に相当する弾性係数である $E_{ag}=1000 \text{ N/mm}^2$ および天然骨材に相当する弾性係数である $E_{ag}=100000 \text{ N/mm}^2$ の解析結果を図 - 11 に示す。本研究の実験結果で見られた傾向、すなわち、弾性係数の著しく小さな骨材を用いたコンクリートでは、骨材量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。また、コンクリートがペーストの乾燥収縮量を上回る現象を理解するため、それぞれの解析における骨材体積率ごとの応力およびひずみ分布を併せて示した。

6.3 解析の考察

図 - 11 より得られた傾向を表 - 3 に示す。

表 - 3 に示したように、コンクリートの非拘束収縮ひずみは、天然骨材およびゴム製骨材が混入されることにより、ペースト濃度が希釈されるため、骨材体積率の増加に伴い減少することがわかる。

コンクリートの引張限界ひずみの変化は、コンクリートの弾性係数の変化に起因している。ペーストより弾性係数が大きな骨材が混入された場合、コンクリートの弾性係数は増加し、一方、ゴム製骨材のように弾性係数の小さい骨材が混入された場合は、コンクリートの弾性係数は小さくなる。コンクリートの引張限界ひずみ - コンクリートの弾性係数は、反比例関係にあるため、骨材体積率の増加に伴い、天然骨材では減少、ゴム製骨材では、増加することとなる。

これらの考察から、一般的なコンクリートでは、

体積希釈効果およびコンクリートの引張限界ひずみが低下するため、供試体のひずみも減少する。

一方、弾性係数が著しく小さい骨材では、体積率の増加に伴い、コンクリートの引張限界ひずみは増加し、入力される非拘束収縮ひずみは減少することとなる。つまり、引張限界ひずみの増加、

ペースト濃度希釈効果による非拘束ひずみの減少、ひび割れ発生に伴う応力開放と内部拘束の変化、の3者のバランスによって供試体のひずみは決定する。

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、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いて、ゴム製骨材は、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。この傾向を、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。
- 4) 自由収縮供試体においても、乾燥収縮の空間的ひずみ勾配によって発生する応力を無視することはできない。

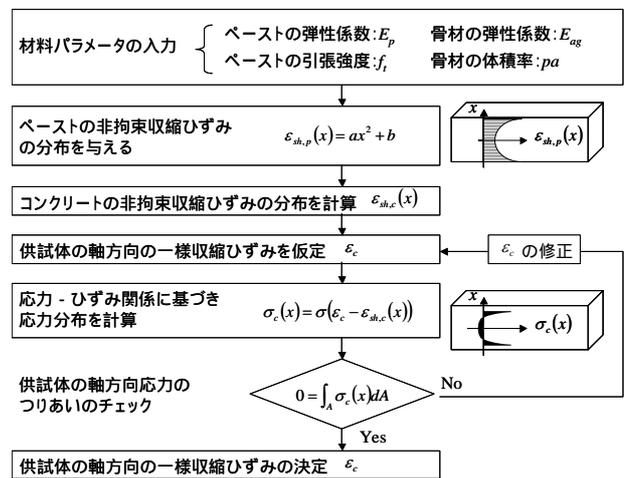
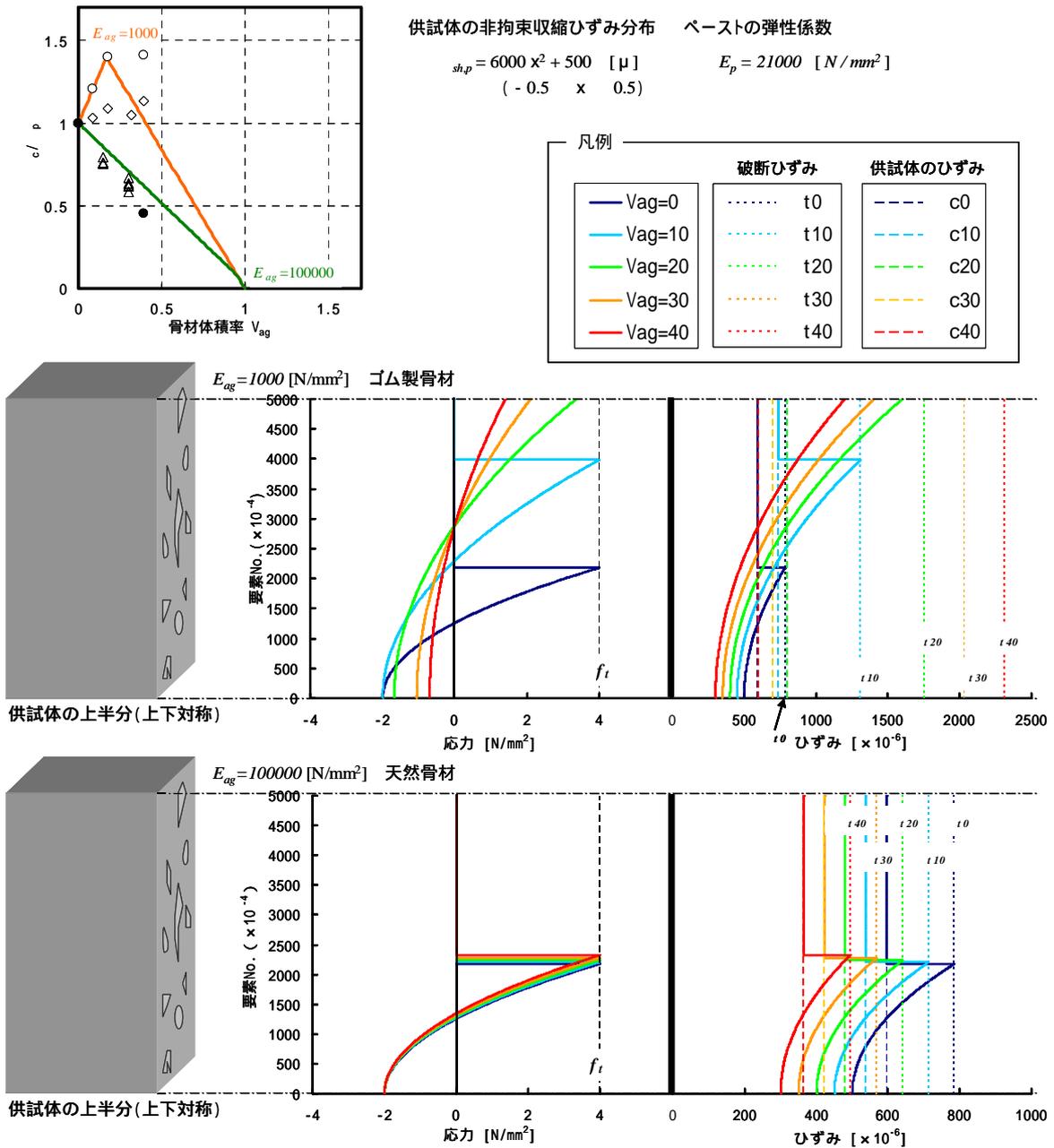


図 - 10 コンクリート自由収縮角柱供試体の収縮ひずみの算定フロー

表 - 3 骨材体積率増加に伴う変化

骨材	天然 ゴム製	非拘束 収縮ひずみ	コンクリートの 引張限界ひずみ	供試体の ひずみ
		$\varepsilon_{sh,c}$	ε_t	ε_c
		減	減	減
		減	増	増 or 減



謝 辞

ゴム製骨材は交通工学研究室 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