

微視的機構モデルによる コンクリートの乾燥収縮挙動の解析

下村 匠¹・福留和人²・前川宏一³

¹正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科 (〒113東京都文京区本郷七丁目3-1)

²正会員 株式会社間組 技術研究所 (〒305茨城県つくば市刈間字西向515-1)

³正会員 工博 東京大学助教授 工学部総合試験所 (〒113東京都文京区弥生二丁目11-16)

本論文は、著者らが提案している細孔組織構造と組織中の微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデルの検証について論じたものである。配合、供試体寸法、環境条件を種々変化させた乾燥収縮試験の結果から、逆解析によりモデル中の材料パラメータの同定を行い、種々の条件下における乾燥収縮挙動に対する提案手法の適用性、ならびにモデルを構成する個々の微視的機構の仮定の妥当性について検討した。

Key Words : *drying shrinkage test, micromechanical material parameters, back analysis*

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、ひび割れ、寸法変化、応力状態の変化をもたらすことにより、耐久性をはじめとする構造物の諸性能を、しばしば著しく低下させる原因となる。そのため、コンクリートの乾燥収縮挙動を適切に予測することは、古くから工学上重要な課題となっている。一方、型枠内への自己充填性能を有するハイパフォーマンスコンクリートが開発され、その普及が着実に進みつつある¹⁾。ハイパフォーマンスコンクリートを用いた場合、実構造物中のコンクリートの品質から、施工の良否の影響が排除されることになるので、適切な評価手法を用いて構造物の耐久性能を合理的に評価する可能性が大きく開かれることになる。

コンクリートの使用材料、配合、構造物の形状、大きさ、力学的境界条件、構造物が置かれる環境条件を適切に考慮し、精度と適用範囲に優れた予測を行うためには、現象のメカニズムに立脚した予測手法を構築することが有効かつ不可欠であるとの認識から、著者らは、コンクリートの細孔組織構造と組織中における微視的現象の機構の表現に基づいたコンクリートの乾燥収縮モデルを提案した²⁾。本論文は、種々の条件のもとに行ったモルタルおよびコンクリートの乾燥収縮に関する系統的実験の結果に基づいて行う、提案モデルの検証について論じるものである。

著者らが提案した乾燥収縮モデルは、乾燥収縮現

象において重要な役割を果たすと考えられるコンクリート中の硬化セメントペーストの微視的構造を、細孔の半径と容積の関係を表わす分布密度関数により表現し、組織中における水蒸気と液状水の熱力学および力学的平衡、移動現象、ならびに水分との相互作用による組織の変形を、それぞれのメカニズムの仮定に基づき定式化し、組み合わせたものである。個々の微視的現象の表現を単純化し、全体を構成したことに特徴があり、このことにより、有限要素法などの数値計算に適し、また材料パラメータの同定が容易となる。

提案手法の妥当性は、用いた個々の微視的メカニズムに関する仮定が適切であるかどうか依存している。本研究では、使用材料、配合、乾燥開始材齢、供試体寸法、環境条件を変化させた系統的な乾燥収縮試験と、逆解析による材料パラメータの同定を行う。一連の結果に基づき、材料パラメータの値を適当に定めることにより、提案手法は種々の条件下における供試体の乾燥収縮挙動を統一的に表現することが可能か、同定された材料パラメータと実験条件との関係は物理的意味に照らし合わせて合理的であるかという観点から検討を加える。

2. 実験方法

使用材料、配合、養生、供試体寸法、乾燥環境の諸条件を以下の範囲において変化させた34体のモル

Table 1 Mix proportion of concrete and mortar

Name of mix proportion	V _w /V _p [vol%]	W/C,MC [%]	V _{grs} [vol%]	Unit weight [kg/m ³]											
				W	C	MC	L18	L7	L4	S6	FA	S	G	Ad.	
MS100C	100	33.5	62.1	172	—	513	28	—	—	—	—	—	828	827	8.12
MS100M	100	33.5	45.5	247	—	738	40	—	—	—	—	—	1191	—	11.67
MS60L740C	100	55.8	62.1	172	—	308	17	184	—	—	—	—	828	827	7.64
MS60L740M	100	55.8	45.5	247	—	443	24	265	—	—	—	—	1191	—	10.98
MS40L460C	100	83.9	62.1	172	—	205	11	—	276	—	—	—	828	827	7.38
MS40L460M	100	83.9	45.5	247	—	295	16	—	397	—	—	—	1191	—	10.62
MS60S640M	100	55.8	45.5	247	—	443	24	—	—	288	—	—	1191	—	11.33
OPCM	173	55.0	53.7	250	455	—	—	—	—	—	—	—	1407	—	1.14
S5P10	100	31.6	35.0	325	—	1030	—	—	—	—	—	—	917	—	10.30
S5P9	90	28.4	35.0	308	—	1084	—	—	—	—	—	—	917	—	10.84
S5P8	80	25.3	35.0	289	—	1144	—	—	—	—	—	—	917	—	11.44
S7P10	100	31.6	49.0	255	—	808	—	—	—	—	—	—	1284	—	8.08
S3P10	100	31.6	21.0	395	—	1252	—	—	—	—	—	—	550	—	12.52
G0	85	89.7	47.0	234	261	—	—	—	—	241	242	1231	—	7.44	
G25	85	89.7	54.9	198	220	—	—	—	—	203	204	1045	407	6.27	
G50	85	89.7	62.9	161	180	—	—	—	—	166	166	862	813	5.12	

Note) V_w/V_p : volumetric ratio of water and powder materials (C, MC, L18, L7, L4, S6 and FA)
W/C,MC : water-cement (C or MC) ratio by weight
V_{grs} : volumetric ratio of sand + gravel
C : ordinary portland cement, specific gravity 3.17[g/cm³]
MC : moderate heat cement, specific gravity 3.15[g/cm³]
L18 : lime stone powder, specific gravity 2.68, blane value 18000
L7 : lime stone powder, specific gravity 2.67, blane value 7000

L4 : lime stone powder, specific gravity 2.67, blane value 4000
S6 : blast furnace slag, specific gravity 2.91, blane value 6000
FA : fly ash, specific gravity 2.19
S : river sand, specific gravity 2.62, water absorption 1.54[%], maximum solid volume 70[%], FM 3.01
G : crashed gravel, specific gravity 2.71, water absorption 0.6[%], maximum solid volume 61[%], FM 6.85
Ad. : super plasticizer, AE-admixture in OPCM

タルおよびコンクリート供試体の乾燥収縮試験を行った。

- 水粉体体積比 : 85~173[%]
- 水セメント比 : 25~90[%]
- 単位骨材体積率 : 粗・細骨材をあわせ21~62[%]
- 養生条件 : 乾燥開始材齢16時間~34日
- 供試体寸法 : 4×4×16[cm]と10×10×40[cm]
- 環境条件 : 真空乾燥と相対湿度約60[%]

実験に使用したモルタルおよびコンクリートの配合を Table 1 に、各供試体の実験条件を Table 2 に示す。配合はハイパフォーマンスコンクリートの配合を中心に設定した。すなわち、普通ポルトランドセメント、中庸熟ポルトランドセメント、石灰粉、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなど各種の粉体を組み合わせて使用したこと、水粉体比の小さい配合を中心に実験を行ったことに特色がある。ハイパフォーマンスコンクリートは、最も重要な性質である自己充填性の要件から、水粉体比が小さく、その変化の幅も小さい。それゆえ、使用粉体の種類と混合比が、硬化後のコンクリートの品質を実質的に左右する要因となる。なお上記の水セメント比は重量比であり、粉体中のセメントに関して算出した値である。標準養生の28日圧縮強度を測定した配合についてその結果を示すと、MS100Cは54.2[MPa]、

MS60L740Cは33.0[MPa]、MS40L460Cは19.6[MPa]である。

打設後の供試体は、ポリエチレンシートで包み、乾燥開始時まで乾燥および吸湿しない状態に保った。乾燥を開始する材齢は16時間から34日の間で変化した。乾燥を開始する材齢に達したら、長さ変化測定用のコンタクトチップを供試体の相対する側面2面にエポキシ系接着剤を用いて接着した後、所定の乾燥条件のもとで乾燥を開始した。以降適切な時間ごとに、供試体の重量と長さ変化を測定した。乾燥収縮ひずみは、乾燥開始時の長さを基準として算出した。

供試体の乾燥を行う環境条件は、真空乾燥と相対湿度約60[%]の2種類とした。真空乾燥は、排気速度約50[l/min]の真空ポンプを接続した容量約20[l]のガラス製デシケータの中で供試体を乾燥させる方法であり^{3),4)}、供試体の乾燥収縮挙動が顕著に取り出せること、環境条件の制御が容易であることを考慮し採用した。相対湿度60[%]のもとでの乾燥は、空調設備のある室内または、恒温恒湿槽内において行った。なお供試体の作製、養生、乾燥はすべて、温度約20[°C]のもとで行った。乾燥収縮試験を終了した供試体は、原則として110[°C]の乾燥炉において2日以上乾燥させ、乾燥後の重量を測定した。

Table 2 Test series

Name of specimen	Mix proportion	Size [cm]	Testing age[day]	Drying condition
MS16	MS100M	4x4x16	0.67(=16[hr])	Vacuum dry
MS2	MS100M	4x4x16	2	Vacuum dry
MS7	MS100M	4x4x16	7	Vacuum dry
MSM	MS100M	4x4x16	7	60[%RH]*
MSC	MS100C	10x10x40	7	60[%RH]*
L72	MS60L740M	4x4x16	2	Vacuum dry
L77	MS60L740M	4x4x16	7	Vacuum dry
L7M	MS60L740M	4x4x16	7	60[%RH]*
L7C	MS60L740C	10x10x40	7	60[%RH]*
L42	MS40L460M	4x4x16	2	Vacuum dry
L47	MS40L460M	4x4x16	7	Vacuum dry
L4M	MS40L460M	4x4x16	7	60[%RH]*
L4C	MS40L460C	10x10x40	7	60[%RH]*
S62	MS60S640M	4x4x16	2	Vacuum dry
S67	MS60S640M	4x4x16	7	Vacuum dry
OP2	OPCM	4x4x16	2	Vacuum dry
OP7	OPCM	4x4x16	7	Vacuum dry
S5P10	S5P10	4x4x16	2	Vacuum dry
S5P9	S5P9	4x4x16	2	Vacuum dry
S5P8	S5P8	4x4x16	2	Vacuum dry
S7P10	S7P10	4x4x16	2	Vacuum dry
S3P10	S3P10	4x4x16	2	Vacuum dry
S5P10S	S5P10	4x4x16	34	60[%RH]**
S5P10L	S5P10	10x10x40	34	60[%RH]**
G02	G0	4x4x16	2	Vacuum dry
G07	G0	4x4x16	7	Vacuum dry
G015	G0	4x4x16	15	Vacuum dry
G015N	G0	4x4x16	15	60[%RH]**
G252	G25	4x4x16	2	Vacuum dry
G257	G25	4x4x16	7	Vacuum dry
G2515	G25	4x4x16	15	Vacuum dry
G502	G50	4x4x16	2	Vacuum dry
G507	G50	4x4x16	7	Vacuum dry
G5015	G50	4x4x16	15	Vacuum dry

Note) 60[%RH]* : Temperature controlled room
60[%RH]** : Temperature controlled chamber

3. 解析方法

(1) 微視的機構に基づく乾燥収縮モデル

解析に用いる乾燥収縮モデルの定式化の詳細については別報²⁾に示したので、ここでは概要のみを述べる。

コンクリート中の硬化セメントペースト組織の、半径(壁間距離の1/2) r [m]と、その半径を有する部分の空間の容積の分布密度 dV_v/dr [m³/m³·m]の関係を次の連続関数により表現する。

$$\frac{dV_v}{dr} = V_0 B C r^{C-1} \exp(-B r^C) \quad (1)$$

ここに、 V_0 : 単位体積中の総細孔容積[m³/m³]
 B, C : 分布形状を決定するパラメータ

である。Fig.1は式(1)により表現される細孔容積分布を例示したものである。パラメータ C が一定のもと

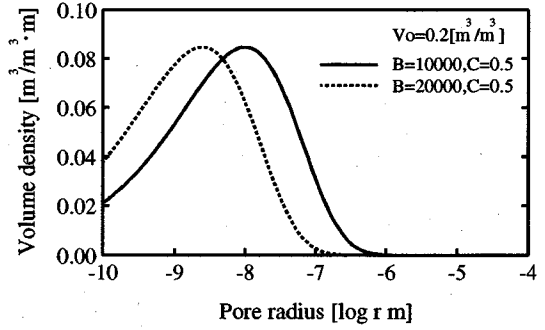


Fig.1 Modified pore size distribution

では、 B の値が大きいくほどピークの位置は微小細孔側にシフトし、組織が緻密であることを表す。

細孔組織中の気相部分は、水蒸気と乾燥空気の理想混合気体により満たされるとする。水蒸気の分圧 P_v [Pa]と密度 ρ_v [kg/m³]は、次の理想気体の状態方程式により関係づけられる。

$$P_v = \rho_v \frac{RT}{M_w} \quad (2)$$

ここに、 M_w : 水の分子量[kg/mol]
 R : 気体定数[J/mol·K]
 T : 絶対温度[K]

である。

細孔組織中において気液界面の形成される細孔の半径 r_s [m]と相対湿度 P_v/P_{v0} の関係は、次のKelvinの式により与えられるとする⁵⁾。

$$\ln \frac{P_v}{P_{v0}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT \rho_L r_s} \quad (3)$$

ここに、 ρ_L : 液状水の密度[kg/m³]

γ : 液状水の表面張力[N/m]

である。気相の圧力 P_G [Pa]と液相の圧力 P_L [Pa]の関係は、次のLaplaceの式により与えられるとする⁵⁾。

$$P_G - P_L = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (4)$$

細孔組織中における水蒸気の移動は、水蒸気の分圧勾配を駆動力として生じるとし、組織の屈曲の程度と水蒸気の拡散に有効な空間容積を考慮した次式により移動流束 J_v [kg/m²·s]が与えられるとする⁶⁾。

$$J_v = -K_v V_G D_{v0} \text{grad} \rho_v \quad (5)$$

ここに、 K_v : 水蒸気移動に関する材料係数

- V_G : 単位体積中における気相の体積
[m³/m³]
 D_{VO} : 水蒸気と乾燥空気相互拡散
係数[m²/s]

である。係数 K_V は、経路の屈曲や連結の程度によって決定される、組織の水蒸気移動に対する抵抗性を表現し、その値が小さいほど移動抵抗が大きいことを表す。

細孔組織中の液状水の移動は、液状水の圧力勾配を駆動力として生じるとし、多孔体中の層流の取扱いに準じた次式により移動流束 J_L [kg/m²·s] を表す⁷⁾。

$$J_L = \int_0^{r_s} \left[\rho_L \frac{dV_{(r)}}{dr} \left\{ -K_L \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left(-\frac{2\gamma}{r_s} \right) \right\} \right] dr \quad (6)$$

- ここに、 K_L : 液状水移動に関する材料係数
 μ : 液状水の粘性係数[Pa·s]

である。係数 K_L は、組織の液状水移動に対する抵抗性を表現し、水蒸気移動に関する係数 K_V と同様、その値が小さいほど液状水が移動抵抗が大きいことを表す。

コンクリートと雰囲気との境界における水分移動は、表面より距離 h [m] の面において雰囲気との湿度平衡が常に満足されると仮定し^{8),9)}、固体と流体間の熱伝達境界と類似の扱いにより、境界における移動流束を評価する。

水分の逸散にともなうコンクリートの体積変化は、細孔組織中に発生する毛管力に起因する応力による材料の変形として表現する^{10),11)}。

$$\epsilon_{sh} = \frac{1}{E_s} \left\{ -\frac{2\gamma}{r_s} \int_0^{r_s} \frac{dV_{(r)}}{dr} dr \right\} \quad (7)$$

- ここに、 ϵ_{sh} : 乾燥収縮ひずみ
 E_s : 毛管力に対する弾性係数[Pa]

である。 E_s は、モデルにより評価される毛管力に起因する応力とコンクリート微小体積要素の乾燥収縮ひずみの間に関係づける係数であり、その値が大きいほど材料の変形抵抗性が大きいことを表す。

(2) 計算方法

提案した乾燥収縮モデルにより、コンクリート微小体積要素の水分の移動特性、収縮特性が評価される。これらを解析対象の各部分に適用し、与えられた初期条件と境界条件のもとで、対象構造体中の水分移動解析と応力解析を行うことにより、乾燥収縮挙動の数値シミュレーションを行うことができる。

数値計算法は、有限要素法、差分法など一般的な解法を用いることが可能である。本研究では、単純な

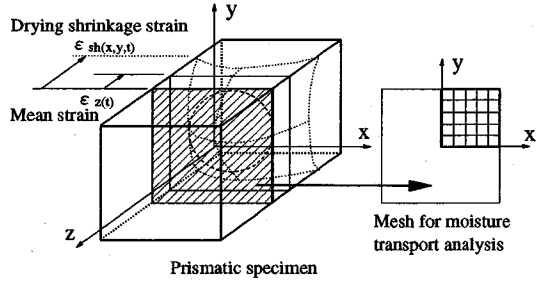


Fig.2 Analytical procedure

Table 3 Physical constants

Molecular weight of water M_W	0.01802[kg/mol]
Gas constant R	8.31453[J/mol·K]
Density of liquid water ρ_L	1000[kg/m ³]
Saturated vapor pressure P_{VO}	2338[Pa]
Surface tension of liquid water γ	0.0727[N/m]
Diffusivity of vapor and dry air D_{VO}	0.000022[m ² /s]
Viscosity of liquid water μ	0.00098[Pa·s]

形状の角柱供試体のみを解析対象としたことから、簡易な解法を用いることを考え、供試体内の水分の移動は2次元差分陰解法により計算し、供試体の収縮ひずみは長手方向の一様な変形を仮定することにより計算した。計算の時間間隔、空間の刻み間隔は、収束性を確認した範囲に設定した。計算方法の概略をFig.2に示す。

本研究における一連の計算ではTable 3に示した物理定数値を用いた。水分移動の境界条件として与える表面の境界層 h の厚さは0.75[mm]とした^{8),9)}。真空乾燥の環境条件は、取扱いの簡便性から、逸散水量がほぼ等価である相対湿度1[%]を近似的に与えた。

(3) 材料パラメータの同定

提案モデルでは、材料の特性は以下の6個の定数により表現される。

- V_O : 単位体積中の総細孔容積[m³/m³]
 B, C : 細孔容積分布の形状を決定するパラメータ
 K_V : 水蒸気移動に関する材料係数
 K_L : 液状水移動に関する材料係数
 E_s : 毛管力に対する弾性係数[Pa]

本研究では、実験結果として得られる角柱供試体の乾燥収縮挙動から、逆解析に基づく以下の方法により各材料パラメータの値を同定する¹²⁾。

1) 炉乾燥により細孔中の液状水がすべて逸散すると仮定し、供試体の体積、初期重量、炉乾燥重量より単位体積中における総細孔容積 V_O を算出する。

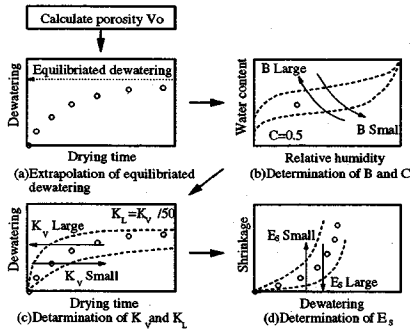


Fig.3 Determination of material parameters

2) 乾燥時間と逸散水量の関係の測定結果より、試験を行った環境における平衡逸散水量を外挿により推定する (Fig.3(a)) .

3) 相対湿度と平衡液状水量の関係が、実験より得た点を満足するように、細孔容積分布の形状を決定するパラメータ B, C を定める (Fig.3(b)) . ただし、ひとつの平衡点を満足する B, C の組み合わせは無数に存在するので、 $C=0.5$ と固定し、 B のみ変化させる。 $C=0.5$ としたのは、平均的な分布幅を与えると考えたことと、数値計算上の便宜を考慮してのことである。

4) 供試体の水分逸散過程の解析を行い、乾燥時間と逸散水量の関係の計算結果が実験結果に近づくように、コンクリート中の水蒸気移動に関する係数 K_V 、液状水移動に関する係数 K_L を定める (Fig.3(c)) . ここで、これらの2数は、物理的意味より相関が深いと考えられることから、 $K_L = K_V / 50$ なる関係を仮定する。

5) 供試体の収縮過程の解析を行い、逸散水量と収縮ひずみの関係の計算結果が実験結果と近づくように、毛管力に対する弾性係数 E_S を決定する (Fig.3(d)) .

なお以上の同定操作は、材料特性は時間的に一定との仮定に基づいている。現実には、乾燥期間中であってもセメントの水和反応の進行により細孔組織が緻密化し、材料特性が変化すると考えられるため、この仮定は正しくない。しかし、その変化を合理的に表現することは現時点では困難であるため、ここでは本仮定を設ける。そして本仮定が同定結果に及ぼす影響については、後に検討を加えることにする。

4. 諸条件に対する適用性に関する検討

(1) 配合条件；水セメント比

前章に述べた方法に基づき、各供試体の実験結果か

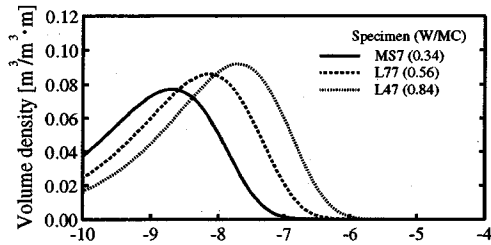
Table 4 Material parameters

Name of specimen	V_0 [m ³ /m ³]	B	C	K_V	K_L	E_S [MPa]
MS16	0.228	8600	0.5	0.50	0.010	14000
MS2	0.204	12000*	0.5	0.15	0.0030	14000
MS7	0.182	22200	0.5	0.10	0.0020	17000
MSM	0.182*	22200	0.5	0.030	0.00060	7000
MSC	0.127*	22200	0.5	0.040	0.00080	7000
L72	0.225	7600	0.5	0.25	0.0050	14000
L77	0.204	11800	0.5	0.12	0.0024	16000
L7M	0.204*	11800	0.5	0.050	0.0010	7000
L7C	0.141*	11800	0.5	0.050	0.0010	7000
L42	0.232	5000	0.5	0.30	0.0060	10000
L47	0.218	7100	0.5	0.20	0.0040	12000
L4M	0.218*	7100	0.5	0.050	0.0010	5000
L4C	0.151*	7100	0.5	0.050	0.0010	5000
S62	0.215	15400	0.5	0.18	0.0036	15000
S67	0.191	27700	0.5	0.080	0.0016	20000
OP2	0.209	9800	0.5	0.18	0.0036	13000
OP7	0.182	17000	0.5	0.12	0.0024	14000
S5P10	0.253*	15400	0.5	0.12	0.0024	14000
S5P9	0.232*	18500	0.5	0.11	0.0022	15000
S5P8	0.209*	19500	0.5	0.090	0.0018	15000
S7P10	0.198*	15400	0.5	0.12	0.0024	14000
S3P10	0.307*	15400	0.5	0.12	0.0024	14000
S5P10S	0.222*	28500	0.5	0.0075	0.00015	8000
S5P10L	0.222*	28500	0.5	0.0075	0.00015	8000
G02	0.192	9900	0.5	0.25	0.0050	12000
G07	0.162	19400	0.5	0.15	0.0030	15000
G015	0.145	24300	0.5	0.15	0.0030	20000
G015N	0.145*	24300	0.5	0.10	0.0020	8000
G252	0.166	9900	0.5	0.25	0.0050	12000
G257	0.142	19400	0.5	0.15	0.0030	15000
G2515	0.128	24300	0.5	0.15	0.0030	20000
G502	0.136	9900	0.5	0.25	0.0050	12000
G507	0.117	19400	0.5	0.15	0.0030	15000
G5015	0.106	24300	0.5	0.15	0.0030	20000

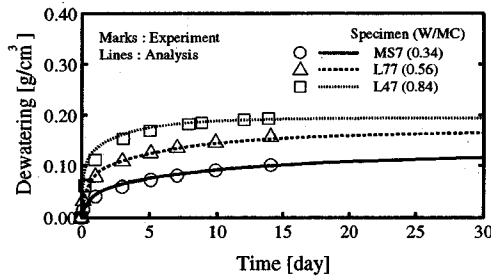
Note) *: not measured value

ら材料パラメータの値を同定することができた。各材料パラメータの値を Table 4 にまとめて示す。これらの値を用いて計算した各供試体の乾燥収縮挙動を、実験結果とともに、主要な実験条件ごとにまとめて示す。ここでの計算は、計算結果が実験結果に近づくよう材料パラメータの値を定めて行っていることに他ならないが、一定の手順にしたがい論理的に定めた値を用いて、統一的方法により諸条件下の乾燥収縮挙動を良好に再現し得ることは、合理的で精度の高い材料モデルであるための条件であることに変わりはない。

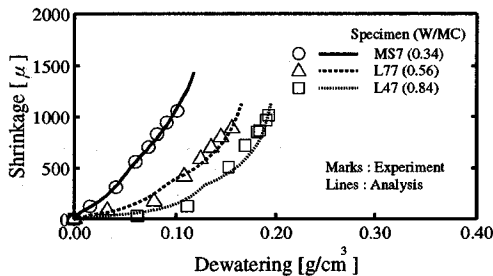
Fig.4はセメントを石灰粉により置換することにより水セメント比を変化させた3体のモルタル供試体の結果である²⁾。乾燥時間と逸散水量の関係 (Fig.4(a))、逸散水量と収縮ひずみの関係 (Fig.4(b))、それらの所産として得られる乾燥時間と収縮ひずみの関係 (Fig.4(d)) とともに、計算結果は実験結果と良好に一致している。同定された材料パラメータは、水セメント比が小さいほど細孔構造が緻密であり



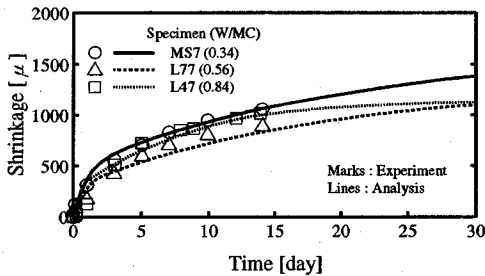
(a) Analytical pore size distribution



(b) Time-Dewatering relation



(c) Dewatering-Shrinkage relation

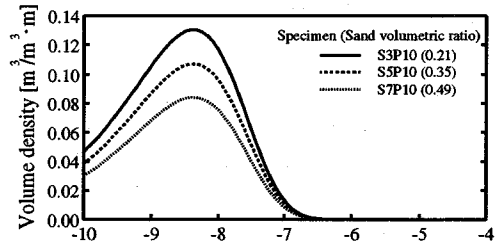


(d) Time-Shrinkage relation

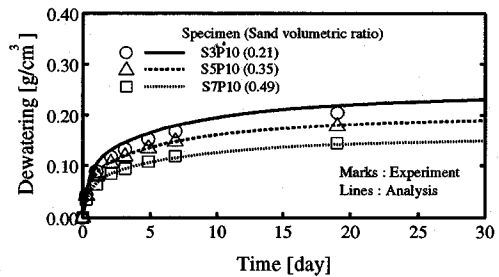
Fig.4 Experimental and analytical results of different water-cement ratio cases

(Fig.4(a)), 組織内部の水分移動抵抗性が大きく、毛管力に対する組織の変形抵抗性が大きいことを表している。この傾向は、それぞれの材料パラメータが持つ物理的意味に合致するといえる。

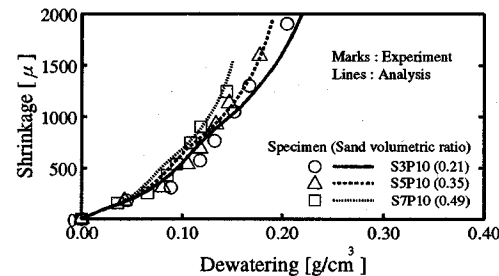
(2) 配合条件；骨材量



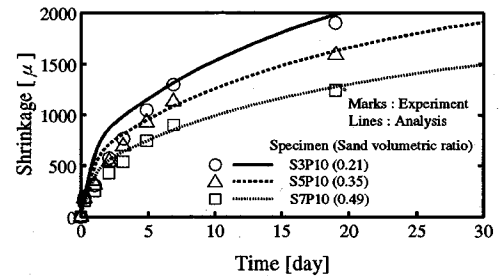
(a) Analytical pore size distribution



(b) Time-Dewatering relation



(c) Dewatering-Shrinkage relation



(d) Time-Shrinkage relation

Fig.5 Experimental and analytical results of different sand volumetric ratio cases

Fig.5, Fig.6は骨材量の影響について検討を行った例である。Fig.5はセメントペースト部分の配合が等しく細骨材量が異なる3体のモルタル供試体の結果をFig.6はモルタル部分の配合が等しく粗骨材量が異なる3体のコンクリート供試体の結果を示している。いずれのシリーズも、計算結果は実験結果を良好に再

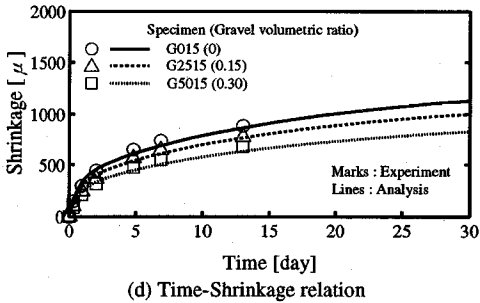
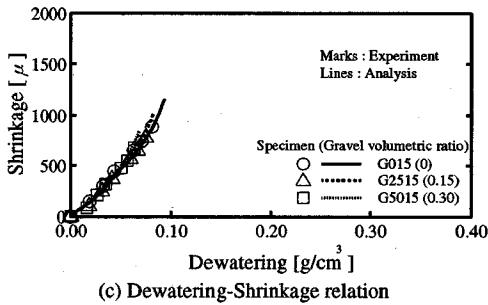
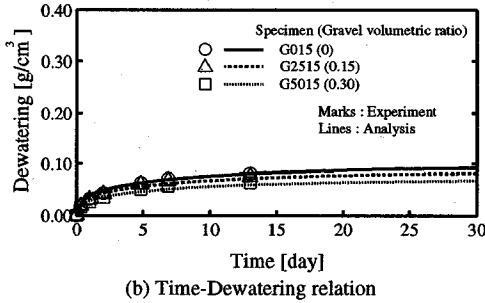
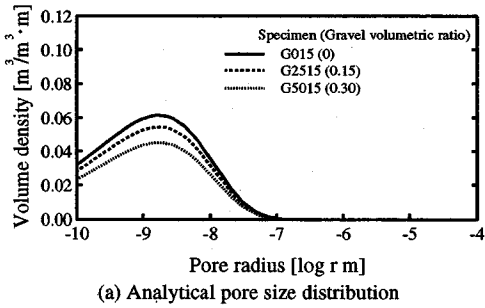


Fig.6 Experimental and analytical results of different gravel volumetric ratio cases

現している。

同定された材料パラメータは、それぞれの3供試体間において単位体積中の総細孔容積 V_o が異なるのみである。コンクリート中のセメントペースト部分の配合が同じであるなら、硬化セメントペーストの組織構造を同じとして扱い、コンクリートの乾燥収

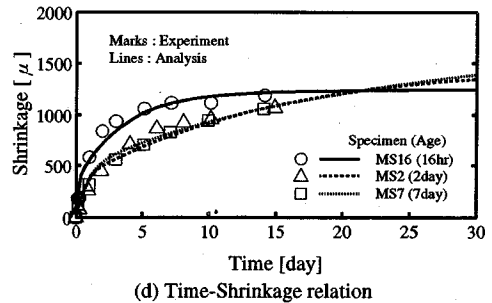
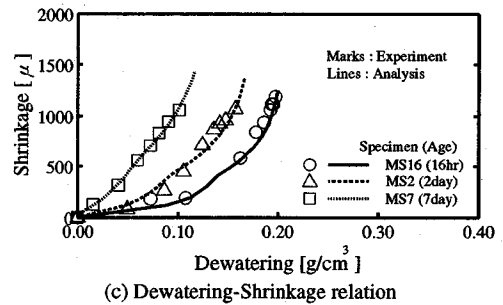
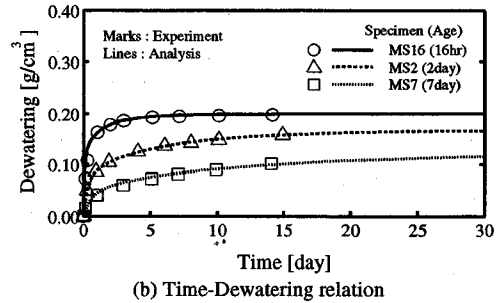
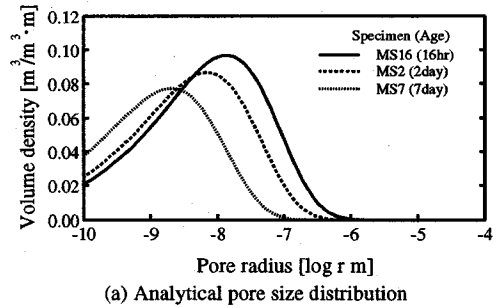
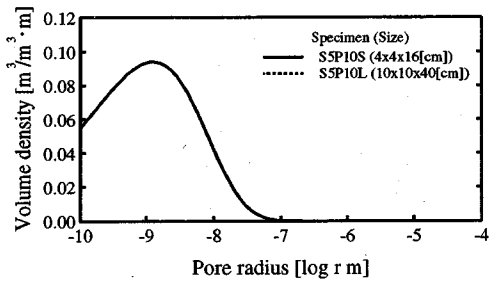
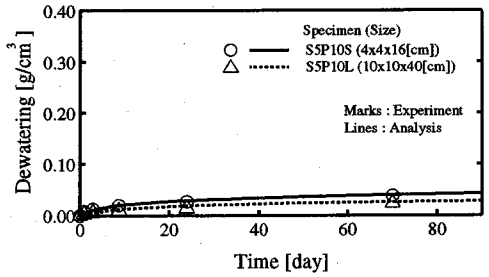


Fig.7 Experimental and analytical results of different aged specimens

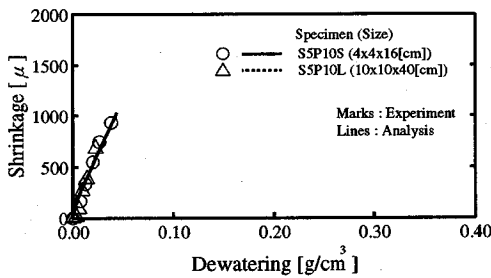
縮特性を、概ね適切に評価できることを本結果は示している。ただしこれは、水粉体比が重量比で約30 [%]と比較的小さい範囲における議論である。水粉体比の大きい配合では、既往の研究^{13),14)}において指摘されている骨材界面の遷移帯空隙が顕著となるなど、骨材がコンクリート中の硬化セメントペーストの



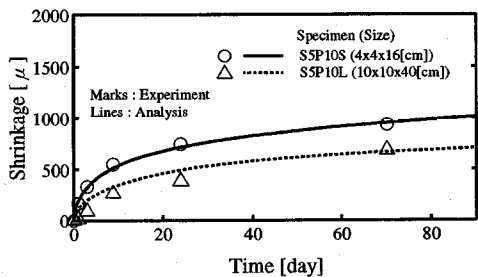
(a) Analytical pore size distribution



(b) Time-Dewatering relation

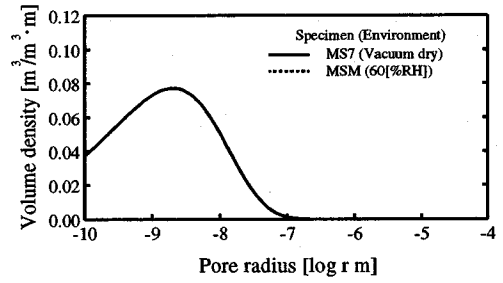


(c) Dewatering-Shrinkage relation

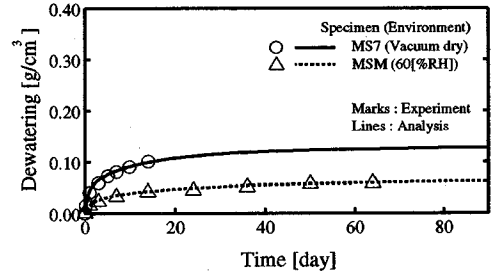


(d) Time-Shrinkage relation

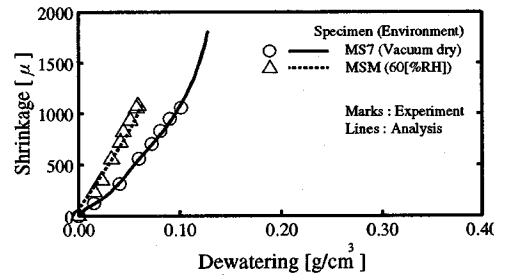
Fig.8 Experimental and analytical results of different sized specimens



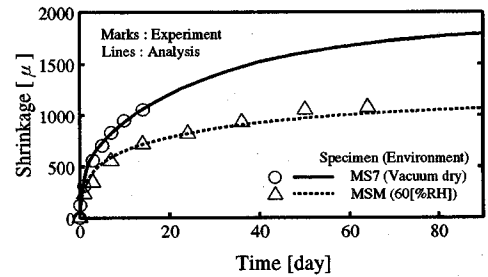
(a) Analytical pore size distribution



(b) Time-Dewatering relation



(c) Dewatering-Shrinkage relation



(d) Time-Shrinkage relation

Fig.9 Experimental and analytical results of different environment cases

組織構造の形成過程に影響を及ぼす可能性があるため、同様の考え方は適用できないと思われる。

(3) 養生条件

Fig.7は乾燥開始材齢が異なる場合の結果である¹²⁾。同定された材料パラメータは、乾燥開始材齢が早いほど

組織構造が粗く、水分移動抵抗性が小さく、毛管力に対する変形抵抗性が小さい結果となっている。

(4) 供試体寸法

Fig.8は供試体寸法が異なる場合の結果である。材料パラメータは同一の値が得られている。提案乾燥収

縮モデルは、コンクリート微小体積要素の特性を規定するものであり、理論的には任意の形状と大きさの対象に適用可能な手法である。本結果は2種類の大きさのケースについてのみの検証であるが、手法の妥当性を示唆するものであるといえる。

(5) 環境条件

Fig.9は環境条件が、真空乾燥と相対湿度60[%]と異なる場合の結果である。それぞれのケース実験結果に対し計算結果が近づくように定めた材料パラメータは、水分の移動に関する係数 K_V （および K_L ）、毛管力に対する弾性係数 E_S は環境条件によって異なった値が得られた。このことについては次章において考察を加える。

5. 同定された材料パラメータに関する検討

(1) はじめに

一連の実験結果と計算結果との間に認められた適合性が、偶然によるものではなく、適切な仮定に基づき実現されていることを確認しなければならない。提案モデルは、複数の仮定の組み合わせにより構成されている。それらはコンクリートの組織構造、コンクリート中の微視的現象に関するものであり、対象がきわめて微視的で測定が容易でない現象であるので、個々の仮定を実験により直接検証することは困難である。本研究では、種々の条件下における実験結果より同定した諸材料パラメータの値の大きさ、相互関係、実験条件との関係を検討することにより、間接的に個々の仮定の妥当性を検証するという方法をとる。本章では一連の実験結果より得たすべての材料パラメータ (Table 4) より総合的に検討する。

(2) 細孔容積分布密度関数に関する検討

細孔容積分布密度関数に関連する材料パラメータは、以下の3個である。

- V_0 : 単位体積中の総細孔容積[m³/m³]
- B, C : 細孔容積分布の形状を決定するパラメータ

これらのうち、総細孔容積 V_0 は基本的に打ち込み直後の重量と炉乾燥後の重量とより決定した実測値である。

一連の実験では、吸水率の低い良質の天然骨材を用いたので、モデル化の対象とした細孔すなわちセメントペースト中の水隙の容積を、ほぼ妥当に測定し得ているものと考えられる。

細孔容積分布密度関数の形状を決定するパラメータのうち、分布のなだらかさを決定するパラメータ

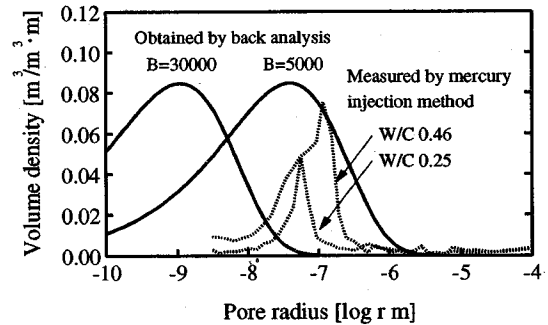


Fig.10 Comparison of analytical and measured pore size distribution

C を0.5と固定し、パラメータ B を平衡液状水量より同定した。このようにして得られた B の値の範囲は、前章 Table 4 に示したように、全ケースについて5000から30000の間であり、10000から20000近辺が多い。細孔容積分布のピークを与える細孔半径は、 B, C の値の組み合わせにより決定され、 $C=0.5$ という条件下では、 $B=10000$ のとき 10^{-8} [m]、 $B=20000$ のとき 2.5×10^{-9} [m]となる (Fig.10)。

同定された細孔容積分布密度関数の妥当性を検討する際に参考となるのが、水銀圧入法、ガス吸着法などの測定技術により得られる細孔容積分布であろう。Fig.10には、水銀圧入法により得られた代表的な細孔容積分布を示してある²⁾。これらと、同定された細孔容積分布密度関数とを比較すると、分布のピークを与える細孔半径の大きさが、水銀圧入法により測定された結果では 10^{-7} [m]近辺であるのに対し、同定された細孔容積分布では、これより1から1.5オーダー程度微小細孔側にあることがわかる。このことについて以下の考察を加える。

水銀圧入法では、細孔組織中の流体の圧力と界面半径の関係 (式(4))に基づき、水銀の圧力と浸入体積の測定結果より細孔容積分布を導出するのに対し、本同定方法では、蒸気圧と界面半径の関係 (式(3))に基づき、水蒸気圧と凝縮した水の体積の関係より導出していることになる。すなわち両者はともに仮定に基づくものであることに変わりはない。水銀圧入法では、測定する細孔の半径が小さいほど、水銀の圧力を高めなければならないため、測定が困難となること、水銀の浸入により、組織の変形、破壊を起こす可能性があること、閉塞により水銀の浸入できない細孔は測定されないことが指摘されている¹⁵⁾。

一方、毛細管凝縮理論に基づく方法では、固体表面の水分子の吸着層の厚さを考慮しない場合、吸着水を凝縮水として算入してしまうために、半径の小さい細孔容積を過大に評価してしまうことになる¹⁵⁾。

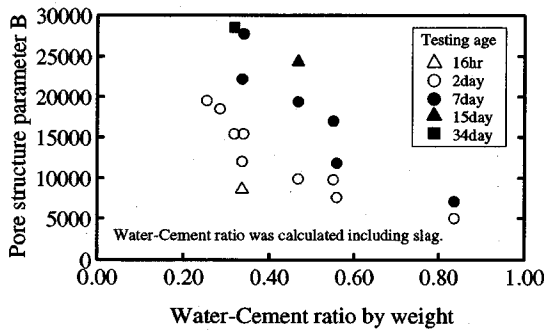


Fig.11 Relation between water-cement ratio and pore structure parameter B

したがって、水銀圧入法では実際の細孔容積分布のうち、小さい半径の範囲の細孔が精密に測定されていない可能性があり、本手法により同定された細孔容積分布は、実際の細孔容積分布に比べ、小さい半径の範囲の細孔容積を過大に評価している可能性がある。以上の考察は、Fig.10にみられる傾向を妥当に説明し得るものである。

本モデルにおける細孔容積分布密度関数は、実際の細孔組織の幾何構造そのものを表現するものではなく、材料の挙動と、その現象の機構の仮定から導出される材料の特性に他ならない。ただしこの解釈は、水銀圧入法で得られた細孔容積分布についても、同様に成り立つものである。重要なのは微視的現象の機構の仮定であり、これらが実現象に忠実であるほど、同定される細孔容積分布は、実際の細孔組織の幾何構造に近づくことになる。

実験条件と、同定された細孔容積分布密度関数との関係について検討する。変化させた実験条件のうち、硬化セメントペーストの細孔組織構造の形成に与える影響が大きいと考えられる水セメント比と乾燥開始材齢を選び、同定されたパラメータ B との関係を示す。すべてのケースについてプロットしたのがFig. 11である。ここで、水セメント比は重量比であり、高炉スラグを用いた場合は、その重量をセメントの重量に含めて整理している。検討の結果、本整理法に則った方が、すべての実験結果を妥当に説明し得ることが明らかとなったためであり、このことは高炉スラグの潜在水硬性を評価しているに他ならないと考えられる。Fig.11には、水セメント比が小さいほど、また乾燥開始材齢が遅いほど、同定されるパラメータ B が大きい、すなわち細孔容積分布が細孔半径の小さい方にシフトするという傾向が明確に現れている。これは、一般的な知見より予測される組織の緻密さの傾向と合致する、きわめて合理的な傾向である。

以上の考察より、本モデルにおいて用いた細孔容積分布密度関数は、実際の細孔容積分布そのものを忠実に表すものではないが、細孔組織の緻密さの傾向を合理的に表現するものであることが結論される。

(3) 水分の移動に関する係数に関する検討

水分の移動に関する特性を表す以下の2つの材料係数について検討する。

K_V : 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数

K_L : 液状水移動に関する特性を表す材料係数

一連の同定操作では、これら2数を独立に扱うのではなく、 $K_L = K_V / 50$ なる関係を仮定した。これは、本条件のもとで描いた、コンクリート中の液状水量あるいは相対湿度と水分拡散係数の関係が、既往の研究^{8),16)}において示されているこれらの関係の傾向と合致することをふまえたうえで、未知数の数を減らし同定操作を簡略化することを意図して設けた仮定である。本仮定は、飽水状態からの供試体の水分逸散過程では、含水状態が高い乾燥初期に液状水移動が卓越し、乾燥が進むにつれ水分の移動の主たるメカニズムは水蒸気移動に移行することを意味している。解析結果では、ほぼすべての供試体の水分逸散挙動を、乾燥初期からその後全乾燥期間にわたり適切に追従し得ていることより、 $K_L = K_V / 50$ とした仮定は不合理ではないと考えられる。

実験条件と、同定された水蒸気移動に関する係数 K_V との関係について検討する。前節の結果 (Fig. 11) より、同定された細孔容積分布密度関数のパラメータ B と実験条件 (水セメント比および乾燥開始材齢) との相関が高いことが確認されているので、ここでは、材料定数相互の関係を検討する意味からも、パラメータ B と係数 K_V との関係について検討する。同定されたパラメータ B と係数 K_V との関係をすべてのケースについてプロットしたのがFig.12である。本図では、環境条件に関して区別してプロットしてある。同定された組織構造の緻密さを表すパラメータ B と、組織内部の水蒸気移動抵抗性を表す係数 K_V は強い相関を示すこと、および相対湿度60[%]のもとでの乾燥挙動より導出した係数 K_V は、真空乾燥の場合に比べて小さい値となっていることがわかる。

パラメータ B が大きいほど、すなわち細孔容積分布が細孔半径の小さい方にシフトするほど、水蒸気移動に関する係数 K_V が小さい、つまり水蒸気移動に対する抵抗性が大きいという傾向がFig.12に認められる。組織が緻密であるほど、組織内部の物質移動抵抗性が高いというこの傾向は、物理的意味に照ら

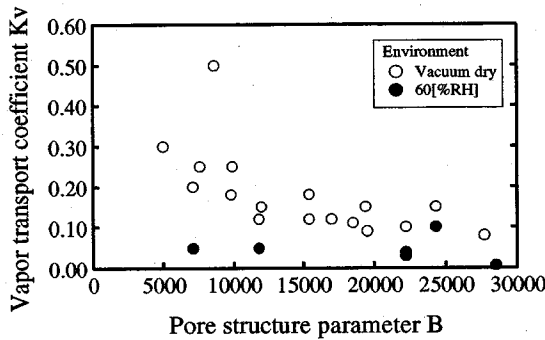


Fig.12 Relation between pore structure parameter B and vapor transport coefficient K_v

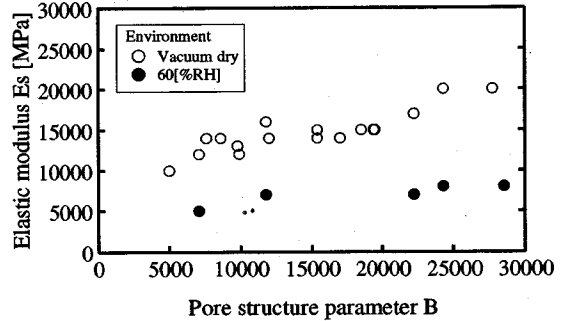


Fig.13 Relation between pore structure parameter B and elastic modulus E_s

し合わせて合理的である。

相対湿度60[%]のもとでの乾燥挙動より導出した係数 K_v が、真空乾燥の場合に比べて小さい値となっていることについては、計算を行う上で設けた簡略化のための仮定、すなわち、セメントの水和にともなう乾燥期間中の組織構造変化がないとしたこと、および真空乾燥の環境条件を平衡逸散水量がほぼ等価な全圧1[atm]相対湿度1[%]の環境として水分逸散挙動を解析したことに起因する実現象との差異が、同定した材料パラメータの違いとして評価されたためと解釈している。水分の逸散が緩慢な相対湿度60[%]の環境下では、乾燥期間中の水和の進行は真空乾燥の場合よりも顕著で、組織の緻密化が進むと考えられる。また現実には気体の分子拡散係数は、圧力が低いほど大きいことが知られている⁶⁾。これらの要因はいずれも、真空乾燥の試験結果より導出した係数 K_v を、大きく評価させる方向に作用する。

係数 K_v と同様の定義による多孔体の屈曲度は、多くの多孔体の場合、0.1から0.7程度となることが知られている⁶⁾。本解析により得られた係数 K_v の値は、真空乾燥の実験結果より同定した場合には概ね0.1から0.3程度、相対湿度60[%]の場合では0.05程度となっている。

(4) 毛管力に対する弾性係数に関する検討

毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s についても、水分の移動に関する係数の場合と同様、パラメータ B との相関を調べる方法により検討する。同定されたパラメータ B と弾性係数 E_s との関係はすべてのケースについてプロットしたのがFig.13である。本図においても、環境条件に関して区別してプロットしてある。同定されたパラメータ B と弾性係数 E_s は強い相関を示すこと、真空乾燥の場合と相対湿度60[%]のもとでの乾燥の場合とでは、 E_s の値が異なることがわかる。

同定されたパラメータ B と弾性係数 E_s の相互関係は、組織が緻密であるほど弾性係数の値が大きいという傾向を示し、水分の移動に関する係数の場合と同様、物理的意味に合致した合理的な関係である。

相対湿度60[%]のもとでの乾燥挙動より同定した弾性係数 E_s が、真空乾燥での乾燥挙動より同定した場合に比べて、その値が約1/3から1/2程度となっている理由は、毛管力による組織の時間依存性変形の影響であると解釈している。前章において示した実験結果より明らかのように、真空乾燥と相対湿度60[%]の環境とでは乾燥速度が異なっている (Fig.9 (b))。その場合、逸散水量と収縮ひずみの関係は、2つの環境で異なるという実験結果が得られている (Fig.9(c))。このことは、外力による変形と同様、毛管力による変形にも時間依存性変形成分が含まれることを示しているものと思われる^{11),17)}。毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係を線形弾性により与えた場合、時間依存性変形は弾性係数の低下として評価されることになる。乾燥速度の早い真空乾燥と、緩慢な相対湿度60[%]のもとでの乾燥とでは、観察される変形に含まれる時間依存性変形成分の割合が異なることとなる¹⁸⁾。時間依存性変形を弾性係数の低下として評価した場合の低下割合が1/3から1/2程度になるということは、クリープ係数が1から2であることに相当し、一般のコンクリートのクリープ係数に近い値である¹⁹⁾。

乾燥速度が異なる条件下での乾燥収縮挙動を統一的に記述することは、時間依存性を考慮した定式化を行うことにより可能であると考えている^{18),20)}。ここでは、構成式をできるだけ単純化するため、毛管力と収縮ひずみの関係を線形弾性により与えた。ただし通常的环境湿度の変動の範囲では、乾燥速度の変化の幅が本実験よりも十分小さく、速度依存性の影響は小さいと考えられる。

なお水分の移動に関する係数の場合と同様、同定さ

れる弾性係数の値には、乾燥期間中の組織構造の変化がないと仮定したの影響も含まれていることになる。これは、乾燥速度の緩慢な相対湿度60[%]のもとの乾燥より得られる弾性係数を、大きく評価させる方向に作用するはずである。それにもかかわらず、相対湿度60[%]のもとの乾燥より得られる弾性係数の方が、真空乾燥よりも小さい傾向となっているのは、時間依存性変形によるみかけの弾性係数の低下が、セメントの水和にともなう弾性係数の増進よりも卓越したためであると考えている。

Fig.13に示されるように、同定された毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s の値は、真空乾燥の場合で概ね10000[MPa]から20000[MPa]程度となっており、外力に対するコンクリートの静弾性係数の一般的な値の1/3から2/3程度の大きさである。この傾向は、コンクリートの乾燥収縮の機構を毛細管張力理論に基づき検討した既往の研究にも報告されている¹⁰⁾。毛管力による作用を、材料に発生している平均的な応力として評価する際の仮定、および毛管力による変形と外力による変形とのメカニズムの本質的な違いなどが理由として考えられる。

6. まとめ

本研究では、種々の条件のもとでコンクリートおよびモルタルの乾燥収縮試験を行い、著者らが提案したコンクリート中の微視的機構に基づく乾燥収縮モデルの検証を行った。本研究において得られた結果をまとめる。

- 1) 角柱供試体を用いた乾燥収縮試験の結果から、逆解析により乾燥収縮モデルの材料パラメータを同定する方法を提案し、種々のケースについて材料パラメータを論理的に決定し得ることを示した。
- 2) 材料パラメータの値を適切に定めることにより、提案モデルは種々の条件下における供試体の乾燥収縮挙動を良好に予測し得ることを示した。
- 3) 同定した細孔容積分布は、用いた微視的機構の仮定に起因して、微小な細孔を現実よりも過大に評価している可能性があるが、組織の緻密さの程度を表現する指標と考えてよいことを考察した。
- 4) 同定したコンクリート中の水分の移動に関する係数は、その値の大きさの範囲、組織の緻密さを表すパラメータとの相関が合理的であることから、仮定した水分移動モデルが妥当であることを考察した。
- 5) 同定した毛管力に対する弾性係数は、組織の緻密さを表すパラメータと合理的な関係にあり、その大きさは一般のコンクリートの静弾性係数の概ね

1/3から2/3程度となった。また、毛管力に対する弾性係数は乾燥速度に依存することを示し、これは毛管力による組織の変形に時間依存性成分が含まれるためであると考察した。

本研究により、提案乾燥収縮モデルを構成する個々の仮定の妥当性が明らかとなった。本モデルは、コンクリート構造の乾燥収縮挙動を、現象のメカニズムに立脚して予測を行う際の基礎となり得ることが結論される。

参考文献

- 1) 岡村 甫, 前川宏一, 小沢一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.
- 2) 下村 匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, 投稿中
- 3) 山中克夫, 小沢一雅, 國島正彦: コンクリート構造物の耐久性性能の定量評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.487-492, 1989.
- 4) 下村 匠, 陳 丙学, 小沢一雅: 真空乾燥法によるコンクリートの乾燥収縮試験とその予測モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.391-396, 1991.
- 5) 小野 周: 表面張力, 物理学 One Point 9, 共立出版, 1980.
- 6) 小宮山宏: 速度論, 朝倉書店, 1990.
- 7) 日野幹雄: 明解水理学, 丸善, 1983.
- 8) Bazant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, *Materials and Structures*, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.
- 9) 沼尾達弥, 三橋博三, 福沢公夫: 加熱乾燥を受けるコンクリートの水分逸散過程に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.441, pp.1-7, 1992.
- 10) 岸谷孝一, 馬場明生: 建設材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.
- 11) 長滝重義, 米倉亜州夫: コンクリートの乾燥収縮及びクリープの機構に関する考察, コンクリート工学, Vol.20, No.12, pp.85-95, 1982.
- 12) 下村 匠, 福留和人, 小沢一雅: 細孔構造モデルによるコンクリートの乾燥収縮特性の評価, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.167-174, 1993.
- 13) 羽原俊祐: コンクリートの構造とその物性, セメント・コンクリート, No.549, pp.31-43, 1992.
- 14) 羽原俊祐: コンクリートの構造とその物性, セメント・コンクリート, No.550, pp.50-63, 1992.
- 15) 後藤誠史, 大門正機, 近藤連一: 細孔径分布, 多孔材料-性質と利用-近藤連一編, 第3章, 技報堂出版, pp.45-74, 1973.
- 16) 阪田憲次, 蔵本 修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1982.
- 17) 田中弘文: セメント硬化体の組織と物性, 多孔材料-性質と利用-近藤連一編, 第13章, 技報堂出版, pp.299-339, 1973.
- 18) 福留和人, 下村 匠: 時間依存性変形を考慮したコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.944-945, 1992.
- 19) 阪田憲次: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測, コンクリート工学, Vol.31, No.2, pp.5-14, 1993.
- 20) 田中哲也: 乾湿にともなうコンクリートの体積変化における経路依存性, 東京大学土木工学卒業論文, 1993.

(1994. 4. 6 受付)

ANALYSIS OF DRYING SHRINKAGE BEHAVIOR OF CONCRETE BY THE MICROMECHANICAL MODEL

Takumi SHIMOMURA, Kazuto FUKUDOME and Koichi MAEKAWA

Drying shrinkage behavior of mortar and concrete specimen under various conditions are analyzed by the drying shrinkage model which is based on simplified micromechanical behavior of water in pore structure in concrete. Systematic shrinkage tests were carried out. Material parameters concerning micromechanism in concrete are identified by back analysis. It was verified that the proposed model can rationally simulate drying shrinkage behavior of specimen considering mix proportion of concrete, size of specimen and environmental conditions. The reasonableness and the applicability of the micromechanical assumptions on pore size distribution, transport of water in concrete and volumetric change due to drying was discussed on the basis of the results of the back analysis.