

論文

[1193] 若材令壁状コンクリート構造物の飽和透水性材料としての温度応力解析

石川靖晃*1・大下英吉*2・田辺忠顕*3

1. 序論

若材令コンクリートの挙動は温度応力の研究の進展と共に、一層注目をあびるようになってきており、クリープ現象、ヤング率変化など時間依存性挙動をいかに的確に把握するか、そしてそれを温度応力解析に生かすか今後の大きな問題となってきた。若材令コンクリートは含水比がかなり大きいと、間隙水の移動が若材令時のクリープ現象等にかかなり影響を及ぼすと思われる。そのため著者らは若材令コンクリートを3相透水性材料としてモデル化し、その挙動の解明を行ってきた。本研究では実際に若材令コンクリートの間隙水流出実験を行って、モデルの正当性を確かめると共に、同モデルを実際のマスコンクリートに適用して数値実験を行い、温度応力挙動を検討した。

2. 若材令コンクリート間隙水流出量実験

若材令コンクリートを飽和透水性材料として数理モデル化するためには、実際現象として若材令コンクリート内部に水が存在し、変形に応じて間隙水が移動するかどうかを確認する必要がある。そこで次に述べるような簡単な実験を行った。

表-1 モルタルの配合

単位量 (kg/m ³)		
W	C	S
368	587	1175

表-2 実験結果 (質量の単位はg、圧縮強度の単位はkgf/cm²)

材令 12 時間後				
載荷前質量	ピーク載荷時質量	質量差	質量差の全体に対する体積比 (%)	圧縮強度
426.08	425.73	0.35	1.78×10^{-1}	5.13
433.18	432.93	0.25	1.27×10^{-1}	6.76
424.46	424.18	0.28	1.43×10^{-1}	5.54
材令 24 時間後				
載荷前質量	ピーク載荷時質量	質量差	質量差の全体に対する体積比 (%)	圧縮強度
426.29	426.12	0.17	8.66×10^{-2}	26.31
421.76	421.59	0.17	8.66×10^{-2}	26.21
425.97	425.81	0.16	8.15×10^{-2}	30.68
材令 36 時間後				
載荷前質量	ピーク載荷時質量	質量差	質量差の全体に対する体積比 (%)	圧縮強度
421.94	421.71	0.23	1.17×10^{-1}	51.81
421.73	421.53	0.20	1.02×10^{-1}	54.50
430.75	430.53	0.22	1.12×10^{-1}	52.32
材令 48 時間後				
載荷前質量	ピーク載荷時質量	質量差	質量差の全体に対する体積比 (%)	圧縮強度
422.13	421.83	0.30	1.52×10^{-1}	63.39
424.37	424.11	0.26	1.32×10^{-1}	78.07
427.02	426.66	0.36	1.83×10^{-1}	74.87

まず、表-1 に示す配合でφ5cm × 10cm のモルタル供試体を 12 本作製した。用いたセメントは、普通ポルトランドセメントであり、細骨材は最大粒径 2mm の、粒が揃ったものを用いた。水に

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 広島大学助手 工学部第4類、工修 (正会員)

*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

関しては、水道水を用い、脱気水は用いなかった。ミキサーで3分間練り混ぜ、室温15～16°Cの部屋で12時間気中養生した。また、打設6時間後 $W/C = 30\%$ のセメントペーストでキャッピングを行った。気中養生後、脱型し、水温13～15°Cで水中養生を行った。 $W/C = 62.7\%$ と貧配合ではあるが、あくまでも、水分移動を測定するが為に、あえて混和剤などは投入しなかった。

材令12、24、36、48時間に各々3本ずつ水中から取り出し、供試体を乾いた布で拭き取り、0.01gの精度で測定可能な電子秤で各々の質量を測定した。次に、万能試験機を用いて一軸状態ではば一定荷重速度で単調载荷した。荷重がピークに達したら、载荷を止めて、再度乾いた布で供試体を拭いた。そして、再度電子秤で質量を測定した。実験結果を表-2に示す。

表-2からわかるように、データによるばらつきが比較的少なく、原始的な手法を用いた割には精度良く質量差が測定できたと思われる。どの材令においても、0.2～0.3g程度の質量差、すなわち間隙水の流出量が確認された。この事は実際現象においても確かに間隙水の移動が起きることを示している。

3. 間隙水流出実験に対する解析理論と解析結果

3.1 力の釣合式について

若材令コンクリートを弾性体の骨材と弾塑性体のセメントペーストから成る弾塑性多孔質材料と捉え、間隙には水が満たされていると仮定する。さらに、固相(骨材、セメントペースト)、液相(水)を $1-\xi:\xi$ の比率で並列に配置し、さらに固相については骨材とセメントペーストを $V_A:V_C$ の比率で直列に配置するというものである。ここで ξ は間隙率であり、 V_A, V_C はそれぞれ骨材、セメントペーストの体積である。故に固相に作用する剛性マトリックス D_T は次式で表される。

$$D_T = (1-\xi)D_S \quad (1)$$

ここで D_S は固相自体の剛性マトリックスであり

$$D_S = \left[\frac{V_A}{V} D_A^{-1} + \frac{V_C}{V} D_C^{-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

と表される。ここで D_A, D_C はそれぞれ骨材の弾性マトリックス、セメントペーストの弾塑性マトリックスであり、 $V = V_A + V_C$ である。さらに、セメントペーストに関してはDrucker-Prager typeの破壊基準を用いている。また、コンクリートに作用する全応力 $\{\sigma\}$ と固相に作用する有効応力 $\{\sigma'\}$ および間隙水圧 p の間には以下の関係がある。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p, \quad \{m\} = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T \quad (3)$$

ここで、間隙水圧は圧縮を正にとる。また、固相の圧縮を考慮にいれた全ひずみ増分 $d\{\varepsilon\}$ は次式で表される。

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon'\} + d\{\varepsilon^{pr}\} + d\{\varepsilon^T\} \quad (4)$$

ここで $d\{\varepsilon'\}$ 、 $d\{\varepsilon^{pr}\}$ 、 $d\{\varepsilon^T\}$ は、それぞれ弾塑性ひずみ増分、間隙水圧によるひずみ増分、温度ひずみ増分を表している。 $d\{\varepsilon^{pr}\}$ 、 $d\{\varepsilon^T\}$ については

$$d\{\varepsilon^{pr}\} = -D_S^{-1}\{m\}dp, \quad d\{\varepsilon^T\} = \{m\}\alpha dT \quad (5)$$

と表される。ここで、 α は固相の線膨張係数、 dp, dT はそれぞれ間隙水圧増分、温度増分である。また、 $d\{\sigma'\}$ と $d\{\varepsilon'\}$ との間には

$$d\{\sigma'\} = D_T d\{\varepsilon'\} \quad (6)$$

の関係がある。最終的に仮想仕事の原理を用いて力の釣合式を書くと

$$\int_{\Omega} \delta\{\varepsilon\}^T d\{\sigma\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta\{u\}^T \{b\} d\Omega - \int_{\Gamma} \delta\{u\}^T \{t\} d\Gamma = 0 \quad (7)$$

となる。ここで $\{b\}, \{t\}$ はそれぞれ物体力、表面力、 Ω, Γ はそれぞれ領域、力学的境界である。

3.2 間隙水の質量保存則について

間隙水が Darcy の法則に従うと仮定すると、間隙水の移動速度は次式で表される。

$$\{v\} = -k\nabla \left(\frac{\gamma z + p}{\gamma} \right), \quad \nabla^T = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\} \quad (8)$$

ここで z は鉛直上向き方向の座標であり、 k, γ はそれぞれ透水係数、水の単位体積重量である。また、質量保存則は次のように書ける。

$$(\text{流体の蓄積の速度}) = q - \nabla^T \{v\} \quad (9)$$

左辺の項はさまざまな要因によって構成されている。それは、(1) 蓄積の速度に起因する全ひずみの変化、(2) 間隙水圧の変化に起因する粒子体積の変化、(3) 水の体積変化、(4) 水の温度による体積変化、(5) 有効応力の変化によって生じる固相粒子の圧縮であり、これらを式 (9) に考慮することにより次式のような最終的な質量保存則を得る。

$$\xi\{m\}^T \frac{d\{\varepsilon\}}{dt} + \frac{\xi}{k_f} \frac{dp}{dt} - 3\{\xi\mu - (1-\xi)\alpha\} \frac{dT}{dt} - \nabla^T \frac{k}{\gamma} \nabla(\gamma z + p) - q = 0 \quad (10)$$

ここで、 k_f, μ はそれぞれ水の体積弾性係数、線膨張係数であり、 q は外部からの流入量である。式 (7)(10) を適当な補関数を用いて離散化し、適当な境界条件の下に解けば、解が得られる。

3.3 解析結果

以上の理論を用いて流出量解析を行った。解析モデルは、近似的に $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の直方体を用いた。解析条件として、表面の間隙水圧を 0 とし、外部からの流入は起こらないと仮定した。初期粘着力、セメントの弾性係数、間隙率および透水係数以外の値は材令に依らず一定とした。それらの物性値を表-3 に示す。

表-3 物性値諸元

骨材弾性係数	ポアソン比	水の体積弾性率	$V_A : V_C$
$3.0 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$	0.17	$2.2 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$	2.4:1

セメントペーストの初期粘着力は近似的にコンクリートの一軸圧縮強度の半分の値とした。セメントの弾性係数は材令 0.5, 1, 1.5, 2 日でそれぞれ 2500, 5000, 7500, 10000kgf/cm^2 と推定した。間隙率は図-1 のように材令と関連づけた。透水係数は材令 0.5, 1, 1.5, 2 日でそれぞれ $1.5 \times 10^{-5}, 5.9 \times 10^{-6}, 2.3 \times 10^{-6}, 9.3 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ と推定した。解析結果を図-2 に示す。実験値と解析値の比較は流出量の全体に対する体積比に対して行われた。また、液相固相共に非圧縮と仮定した場合 [1] の解析結果も一緒に示した。材令 0.5 日以外は、実験値は本モデルによる固相液相の圧縮を考慮した解析値と固相液相共に非圧縮と仮定した場合の解析値との間に存在しているし、材令が経つ毎に上昇している。流出量は弾性域では増えていくが降伏域に達すると塑性体積膨張による吸い込みのため流出量は減少する。材令が経つにつれ初期粘着力は上昇し、弾性係数の増加の程度によっては弾性ひずみ限界値が増加し得るため、解析においては材令が経つにつれ流出量は増加している。

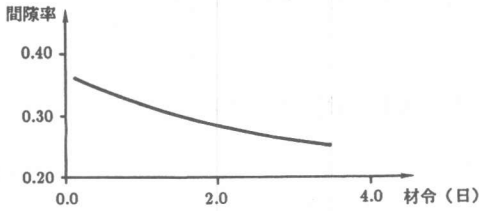


図-1 間隙率-材令関係

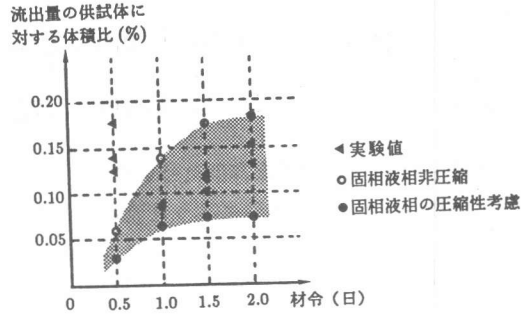


図-2 解析結果

4 マスコンクリート（壁状構造物）に対するモデルの適用

4.1 解析対象モデル

次に、3相透水性材料モデルを図-3に示す壁状コンクリートの温度応力解析に適用した。壁状構造物を3次元8節点アイソパラメトリック要素に分割して温度解析、次に温度応力解析を行った。また、解析対象の壁状構造物は下部が既設コンクリートで上部は若材令コンクリートとし、打継面は完全に付着していると仮定した。さらに、間隙水が変形に及ぼす影響のみを知りたいがために、上部および下部コンクリートの材料パラメータは弾性係数以外はすべて材令に依らず一定と仮定した。変位境界としては、自由な曲げ変形および軸変形ができるように支点を単純支持とした。温度境界としては、底面部は温度固定境界とし、上面部および側面部は熱伝達境界とした。さらに間隙水圧に関する境界条件として上部コンクリートについては間隙水圧は表面部において大気圧に等しいとし、下部コンクリートについては、全節点の間隙水圧が大気圧に等しいとした。表-4に解析に用いた物性値を示し、図-4にセメントペーストの弾性係数-材令関係を示した。

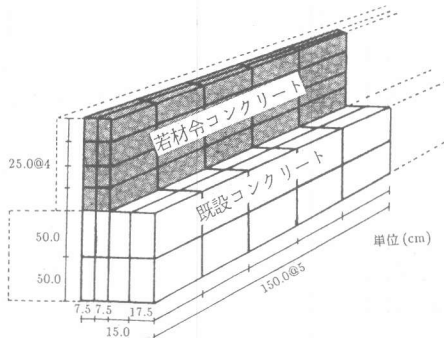


図-3 解析対象壁状構造物

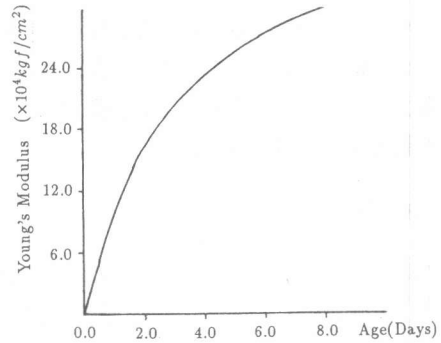


図-4 弾性係数（セメントペースト）

表-4 解析に用いた物性値

弾性係数（骨材）	弾性係数（下部）	ポアソン比	$V_A : V_C$
$2.0 \times 10^5 (kgf/cm^2)$	$3.0 \times 10^5 (kgf/cm^2)$	0.16	7 : 3
初期粘着力	初期内部摩擦角	終局内部粘着力	外気温
$10.0 (kgf/cm^2)$	30.0(度)	35.0(度)	30.0(°C)
間隙率	体積弾性率（水）	線膨張係数（固相）	最高温度
0.1	$2.2 \times 10^4 (kgf/cm^2)$	$1.0 \times 10^{-5} (1/K)$	60.0(°C)
線膨張係数（水）	一軸引張強度	単位体積重量（水）	単位セメント量
0.0(1/K)	$20.0 (kgf/cm^2)$	$1.0 \times 10^{-3} (kgf/cm^3)$	$370.0 (kg/m^3)$

4.2 間隙水が変形に及ぼす影響

壁状構造物内の変形を調べるために、図-5に示す3つの断面をとりだしてみた。

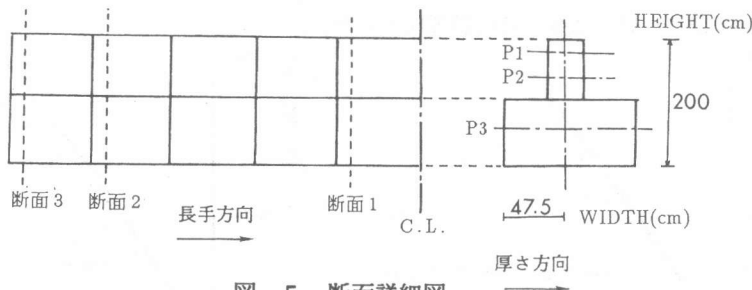


図-5 断面詳細図

図-6、7に材令0.5日後の厚さ方向に関する長手方向全ひずみ分布を示す。 k は透水係数であり、ここでは $k = 1.0 \times 10^{-9}(\text{cm/s})$ としている。ここでわかることは、厚さ方向に関しては長手方向全ひずみはほぼ一定値をとることである。故に、長手方向の全ひずみに関しては厚さ方向に平均をとったものを用いても差し支えないと思われる。

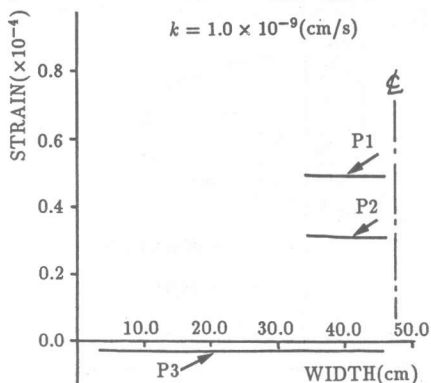


図-6 全ひずみ (厚さ方向分布)
(断面1、材令0.5日)

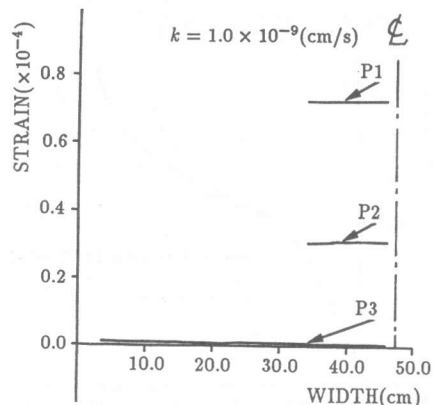


図-7 全ひずみ (厚さ方向分布)
(断面3、材令0.5日)

材令0.5日後の断面1と断面2および断面3における長手方向の全ひずみの厚さ方向における平均値と鉛直方向座標における分布を図-8~10に示した。ここで $k = \infty$ は、従来の、間隙水を考慮しない場合の解析結果である。図-8~10において、断面1では、全ひずみはほぼ直線分布をなしており、双方の解析結果も一致している。断面2および断面3においては、下部コンクリートでは従来の解析とほぼ同じであるが、若材令コンクリート部分ではかなり異なり全ひずみは従来の解析で得られたものよりも収縮の傾向にある。これは、材令初期に構造物の温度膨張に伴い、構造物の若材令部分の内部間隙に負圧が生じるためである。さらに、断面2では、全ひずみは双方共に大体直線的ではあるが、断面3においては、全ひずみはもはや直線的でなく曲線状に分布している。しかしながら、ともかく長手方向の全ひずみ分布に関しては構造物の端部以外ではほぼ直線分布を示し、従来の解析とほとんど差がないことが示された。このことは、マスコンクリートの温度応力簡易算定法のひとつである Compensation Plane 法 (CP法) [2] の基本仮定である平面保持の法則は若材令コンクリートで成り立つかどうか議論されてきているが、本研究の結果が示したものは若材令コンクリートにおいても、長手方向に関しては平面保持の法則は適用できることを示している。一方、間隙水圧に着目してみると図-11に示したように、高さ方向に初期に負圧、0.5日ぐらいで正圧に転じ、有効応力に影響を与えていることがわかる。このモデルでは、厚さ30cmと

小さく間隙水圧の絶対値が小さくなるので、ひびわれに及ぼす実質的な影響は少ないが、より大きな幅のマスコングリートであって間隙水圧が有効応力に大きく影響してくる場合も考えられる。しかし、この場合については今後の検討課題としたい。

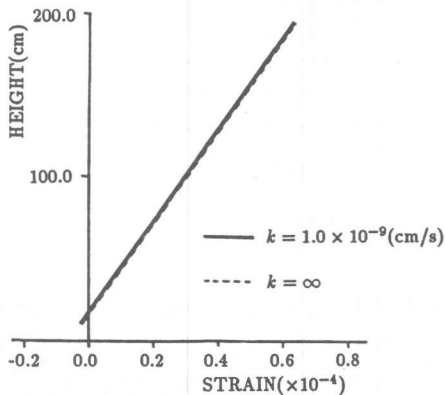


図-8 全ひずみ (長手方向分布)
(断面1、材令0.5日)

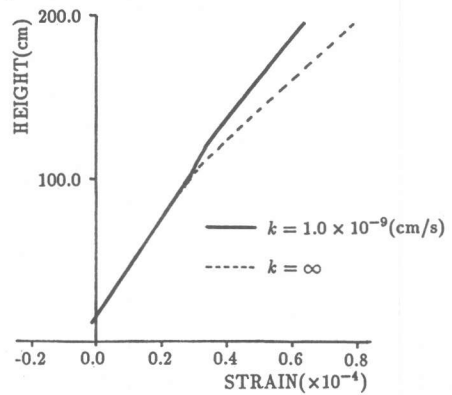


図-9 全ひずみ (長手方向分布)
(断面2、材令0.5日)

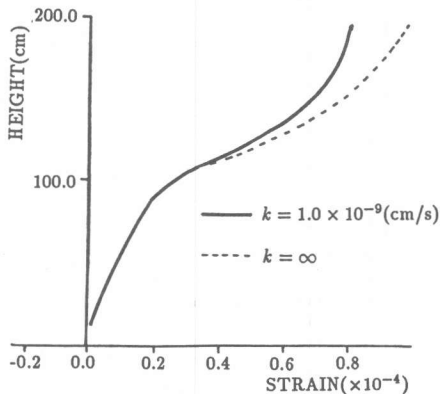


図-10 全ひずみ (長手方向分布)
(断面3、材令0.5日)

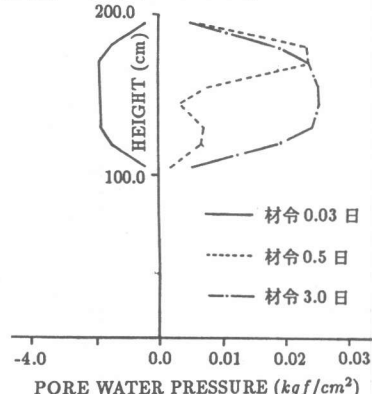


図-11 間隙水圧 (長手方向分布)
(断面1)

5 結論

若材令コンクリートにおける間隙水流出実験の結果、若材令コンクリートの3相透水モデルの妥当性がある程度得られたが、数量的検討が不十分であり、さらに検討を続けたい。また、そのモデルをマスコングリートに適用した結果、数値解析的に、仮に材料がかなりな非線形材料であっても、長手方向に関しては構造物端部を除き平面保持の仮定が成り立つことが示された。ひびわれに影響を及ぼす間隙水圧、有効応力に関しては、その影響があり得る示唆がみられたがこれも今後検討を続けたい。

参考文献

- [1] 石川靖晃、D.R.Lokuliyana、田辺忠顕：温度応力を受ける若材令コンクリートの挙動解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14-1、pp.1109-1114、1992
- [2] 日本コンクリート工学協会、マスコングリートの温度応力委員会：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案、JCI,1985