

論文

[1105] 初期応力を考慮した若材令コンクリートの水分移動特性に関する解析的研究

大下英吉*1・谷口幸弘*2・田辺忠顕*3

1. はじめに

コンクリート中の水分移動に関する研究は、硬化コンクリートのクリープの解明を例にとるまでもなく、過去多くの実績が積み重ねられている。しかし、これらの研究とは別に、放射性廃棄物の地中処分に関してコンクリート中の水分拡散問題が、新たな視点から見直されつつある。即ち、現時点よりも詳細な水分移動モデルの構築がコンクリートについてもなされなければならなくなりつつある。この事情は、何も廃棄物処理の問題にのみ対応しているものではなく、大深度地下空間へのコンクリート構造物やコンクリートを主体とした海洋構造物など土圧や水圧のような多くの外力を受ける構造物の設計に際して、十分な安全性を確保するとすれば、必ず解決しなければならない問題なのである。

そこで本研究では、提案している2相飽和多孔質材料としてのコンクリートの変形特性に関する解析理論[1]に水和による体積収縮項を加え、養生中に生じる初期応力を考慮した理論の提案を行う。さらに、水分移動特性を内部に発生する間隙水圧として捉え、解析理論の妥当性を既往の実験結果[2]との比較により検証することを目的とする。

2. 二相飽和多孔質材料としての若材令コンクリートのモデル化

筆者らは、若材令コンクリートを骨材とセメントペーストおよびそれらの空隙には水が満たされている若材令コンクリートのモデル化を行った[1]。しかし、そのモデル化のうち間隙水の質量保存則では、水和による体積収縮を考慮していないものであった。特に若材令コンクリートでは、水和反応によりその体積が収縮することは周知のことであるが[3]、その際に生じるコンクリート供試体内部の応力状態は、初期応力として非常に重要な特性の一つであるが、現状では実測方法の困難さ等の問題により、あまり十分には研究されていない。

2. 1 水和による体積収縮を考慮した間隙水の質量保存則

水和反応による体積収縮は次式のように表わすことができる。

$$\frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_H}{dt} \quad (1)$$

ここで、 η は水和反応によりゲル空隙となる割合、 γ_p はセメントの完全水結合比であり0.25～0.38の値を取り、 ρ_w は水の密度、 C_H は単位体積当たりのセメント中で水和しているセメントの重量である。なお、(1)式は単位セメント当たりのセメントの体積収縮であり、これを単位コンクリート当たりのもの書き直すと、次式のようなになる。

*1 広島大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

*2 広島大学学生 工学部土木工学科、（学生会員）

*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

$$\frac{\eta\gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_H}{dt} \frac{C}{\rho_c} \quad (2)$$

ここで、 C は 1m^3 当たりのセメント量、 ρ_c はセメントの密度である。
本研究では、 C_H に河角らの研究[4] を参考にすることとした。彼らは、水和速度が未水和水内のセメント量に依存すると仮定することにより、 C_H を次のような式で表わしている。

$$\frac{dC_H}{dt} = k_0(1-n_0)t^{-n_0}(W-\gamma_p C_H)(C-C_H) \quad (3)$$

ここで、 C, W は、それぞれ 1m^3 当たりのセメント量、水量である。また、 t は材令 (日) であり、 k_0, n_0 は材料定数である。(3)式 を初期条件 $t=0$ において $C_H=0$ の下に解くと次式のようになる。

$$C_H = \frac{1 - \exp\left[\left(\gamma_p C - W\right)k_0 t^{1-n_0}\right]}{1 - \gamma_p \frac{C}{W} \exp\left[\left(\gamma_p C - W\right)k_0 t^{1-n_0}\right]} \times C \quad W/C \neq \gamma_p \quad \text{の時} \quad (4)$$

$$C_H = \frac{\gamma_p k_0 t^{1-n_0}}{1 + \gamma_p k_0 t^{1-n_0}} \quad W/C = \gamma_p \quad \text{の時} \quad (5)$$

また、 γ_p, η には、W. Czernin[3] により報告された値を用いることとした。彼は、ポルトランドセメントは完全な水和に至るまでに、その重量の $1/4$ の水と化学的に結合し、またゲル水で乾燥蒸発した後のセメントゲルは、その容積の $1/4$ にも達する微細に分布された空隙”ゲル空隙”を含んでいると報告している。

既往の研究に水和による体積収縮の項を考慮すると、間隙水の質量保存則は次のようなマトリックスで表わすことができる。

$$-H\{\bar{p}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{g_p\}}{dt} + \{f_p\} = 0 \quad (6)$$

ここで、

$$H = \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k' \nabla \bar{N} d\Omega, S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega, \quad W = \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega$$

$$f_p = \int_{\Omega} \bar{N}^T q d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k' \nabla \gamma z d\Omega, \quad g_p = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\eta\gamma_p}{\rho_w} \frac{C}{\rho_c} C_H d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma} \bar{N}^T (\{v\}^T \bullet n) d\Gamma$$

である。なお、 L^T, S マトリックスは、文献[1] に記載されたものである。

2. 2 二相多孔質材料の支配方程式

力の釣合い式と間隙水の質量保存則とを満足する連成方程式は、次のようなマトリックス形式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \{f_p\} + \frac{d\{g_p\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

3. 解析に用いる材料定数

若材令コンクリートの材料特性は、水和反応が急激に進行することにより、時間とともにその性質が顕著に変化する。したがって、養生中におけるコンクリート供試体の応力状態を予測する初期応力解析では、解析に用いる各材料定数は水和反応率を考慮したものでなくてはならない。なお、材令が3日における実験結果との比較を行う解析理論の検証では、実験所要時間が約30分と短いことより、その間における各材料定数は一定と仮定した。

3. 1 コンクリートの力学的特性

本解析を行う際、圧縮強度や弾性係数などの各材料定数を、解析ステップ毎に知る必要がある。そこで本研究では、過去の実験結果[5]を用いることとした。

図-1および2は、それぞれ圧縮強度、弾性係数を表わしている。圧縮強度に関しては、図-1に示すように材令が1, 1.5, 2, 3日で、それぞれ 49, 73, 99, 124 kgf/cm^2 という結果を得ている。また、弾性係数に関しては、図-2に示すように各材令で、それぞれ 5.5×10^4 , 6.5×10^4 , 8.0×10^4 , 9.3×10^4 kgf/cm^2 である。なお、圧縮強度および弾性係数とも実験結果がない材令では、2点間の実験結果を線型補間することにより決定した。

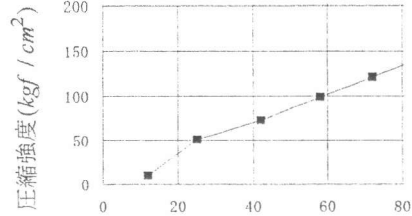


図-1 圧縮強度試験結果 有効材令 (hours)

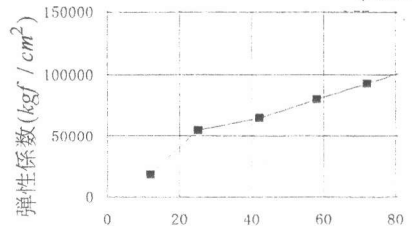


図-2 弾性係数試験結果 有効材令 (hours)

3. 2 コンクリートの透水係数

本研究では、村田[6]行った硬化したコンクリートの透水試験結果から、T. C. Powers[7]が行った透水係数と材令との実験結果を外挿することにより決定した。初期応力解析では、材令が3日における内部応力を求めるが、その間の透水係数は両結果を補間して用いた。また、解析理論の検証では、解析中の透水係数は $1.05 \times 10^{-7} cm/sec$ の一定値とした。なお、T. C. Powersが行った実験は、 $W/C = 0.70$ のコンクリートに対する結果であるが、本研究では配合によらず透水係数の減少率と材令関係は一定であるものとする。

3. 3 塑性域におけるコンクリートの粘着力と初期内部摩擦角

本研究における塑性モデルには、Drucker-Pragerタイプを用いている。したがって、粘着力および初期内部摩擦角などの材料定数を決定しなくてはならない。名古屋大学では、 W/C が 0.55 で寸法が $\phi 5cm \times 10cm$ のセメントペースト供試体の三軸圧縮試験[5]を材令0.5、1、1.5、2日において実施

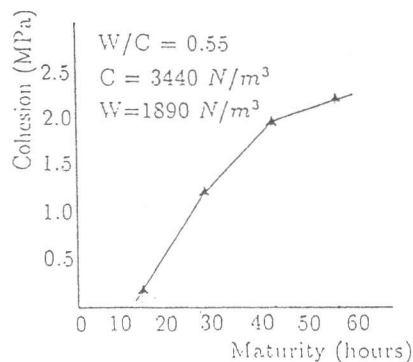


図-3 有効材令～粘着力

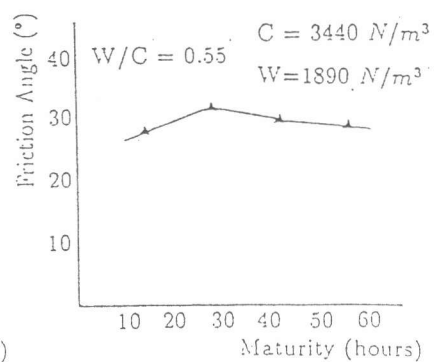


図-4 有効材令～初期内部摩擦角

し、有効材令と粘着力および初期内部摩擦角との関係を求めている。それぞれの関係を、図-3、4に示す。図-3の粘着力～有効材令関係では、各材令における粘着力はコンクリートの圧縮強度の約 $1/4$ となっている。また、図-4の初期内部摩擦角～有効材令関係では、初期内部摩擦角

は $27^{\circ} \sim 31^{\circ}$ の範囲内にあり、有効材令に対してほとんど変化していない。この結果のみで、一般的な配合における粘着力と初期内部摩擦角を同定することはできないが、水セメント比が既往の実験とほぼ同程度であることから、粘着力には圧縮強度の1/4、初期内部摩擦角には 29° を設定した。

4. 養生中に生じる空隙の初期応力

セメントと水との水和反応によってできる生成物は、主にセメントゲルからなっている。しかし、両物質がセメントゲルになる時、ゲルを構成するゲル水の体積の約1/4が初期の体積から減少すると言われている[3]。これは、一般に“水和による収縮”と呼ばれているものである。

既往の実験的研究では、荷重直後全応力は緩やかに発生することに対し、空隙水圧はあるひずみ状態に達した後、急激に発生するという傾向を示していた。これは、水和による収縮により、内部空隙に負の符号を持つ応力状態が存在しているものと、筆者らは想定している。したがって、荷重荷重により内部空隙に発生していた負の符号を持つ応力と荷重応力の一部とが打ち消し合い、内部の応力がゼロあるいは正となるひずみ、すなわち水分の移動が生じるひずみ状態から、空隙水圧が発生するという実験的見解を持っている。そこで本章では、3章で上述した材料定数を用いて、初期応力を推定することとした。なお、既往の実験は材令が3日の供試体に対して行われたため、その材令で生じる初期応力を推定することにする。また、2章の材料定数 k_0, n_0 は、(4)式を単位セメント量で除した値、すなわちセメントの水和進行率が材令6日の時点で、約50% [4] となるように設定し、それぞれ $6.219 \times 10^{-4}, 8.928 \times 10^{-3}$ とした。解析では、境界条件として、供試体内部で空隙水圧はどこも同じとし、また水の体積弾性係数は、 22000 kgf/cm^2 とした。

解析結果を図-5および6に示す。図-5は、材令～空隙水圧関係を、図-6は、材令～全応力関係と材令～有効応力（コンクリート骨格に作用する応力）関係を、それぞれ実線と一点鎖線で示している。図-5に示す材令～空隙水圧関係では、空隙水圧は負圧となり、その値は材令すなわち水和反応の進行により放物線的に上昇し、材令が3日では約 22.0 kgf/cm^2 の負圧を生じている。

さらに、材令～有効応力関係では、有効応力は圧縮となり、材令による変化は空隙水圧と同じ傾向を示している。供試体に外力が作用していないことから、全応力はゼロすなわち有効応力の値は空隙水圧と同じである。なお、符号に関する定義は、有効応力と全応力は引張を正に、また空隙水圧は圧縮を正にしている。液相（水）および固相（コンクリート骨格）に生じる上記のような応力状態は、次のような理由によるものと考えられる。寸法が大きい供試体を水中養生した場合、表層のみに水分が浸透して飽和状態となるが、内部には浸透しにくい状態となる[8]。したがって、内部の空隙は収縮を生じようとするが、周囲のセメントゲルの拘束効果により、空隙内部の応力状態は負圧となるものと思われる。また、空隙の収縮を拘束するセメントゲルスなわち骨格には、逆に圧縮応力が作用することになるものと思われる。水和による収縮で発生する内部応力は、水和反応が起こる限り発生するものであり、特に若材令時のような水和反応率が大きい材令では、空隙水圧と有効応力との応力の打ち消し合いは無く、内部で釣合い状態にあるものと思われる。すなわち、液

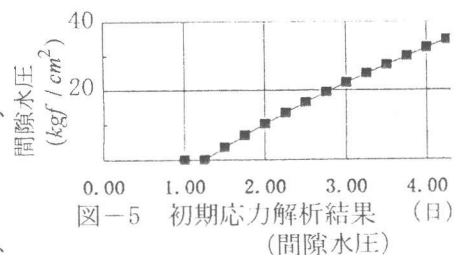


図-5 初期応力解析結果 (日)
(空隙水圧)

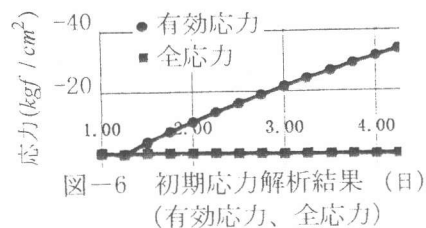


図-6 初期応力解析結果 (日)
(有効応力、全応力)

相には負の圧力が、固相には圧縮力が初期応力として存在し、圧縮の荷重载荷により初めて、液相に存在していた負圧の初期応力と载荷による圧縮応力とが打ち消し合うものと想定する。したがって、本研究では、液相の初期応力が载荷による間隙水圧発生を遅延させるものとして捉え、また固相の初期応力は5章の解析では無視することにした。なお、これら初期応力の定量的な評価は、余り研究が進んでいないが今後の一つの重要な研究課題であると思われる。

5. 実験結果の解析的評価

既往の実験では、コンクリート打設後1日において脱型が行われ、その後養生方法が①2日間水中養生、②2日間気中養生という2種類の養生が行われた後、材令が3日の時点で間隙水圧測定が行われた。また、試験体はコンクリート脱型後（材令1日）、一軸圧縮強度に対し0、30、90%の処女荷重が導入されたものである。このような養生方法の違いや処女载荷応力導入の目的は、間隙水圧やコンクリートの応力特性に及ぼす影響を実験的に評価するためであった。しかし、本解析モデルでは、コンクリートが水で完全に飽和されていることを前提条件としているため、養生方法の違いすなわちコンクリートの含水率の違いを考慮することはできない。不飽和コンクリートに対する解析理論の構築は、今後の課題である。また、処女载荷が行われた試験体に対する本解析手法の適用方法は、まず事前解析として、処女载荷応力導入材令時（材令1日）に一軸圧縮状態で弾塑性解析を行い、強度の60、90%における損傷パラメータ[1]を求める。次に、その損傷パラメータを初期値として、間隙水圧測定材令（材令3日）における本解析を実施する。なお、本解析では、境界条件として横方向変位を拘束し、間隙水圧は供試体内部では一定であるとした。また、塑性域における粘着力と初期内部摩擦角に関しては、粘着力はゼロに、初期内部摩擦角は 29° とした。

実験結果と解析結果の比較を、図-7～10に示す。図-7、8は、それぞれ気中養生を行った供試体に関する全応力～全ひずみ関係および間隙水圧～全応力関係を示している。また、図-9、10は、水中養生を行った供試体に関する結果である。実線、点線、一点鎖線は解析結果を、○、●、◎は実験結果をそれぞれ表わしている。図-7、8の気中養生の供試体に対する実験および解析結果は、本解析理論の適用範囲が飽和状態に限ることより、全応力、間隙水圧とも全く異なったものとなっている。図-8から間隙水圧は、実験結果ではどの処女载荷応力比でも緩やかに上昇し、その後、ピークとなった後に急激にあるいは徐々に低下することに対し、解析結果では、養生による初期応力がゼロとなるひずみにおいて急激に発生している。これらの違いは、主に含水率が低いことや、供試体内部のマイクロあるいはマクロクラックの進展により水分が主にクラックに沿って移動すること等によるものであると想定される。したがって、载荷応力のほとん

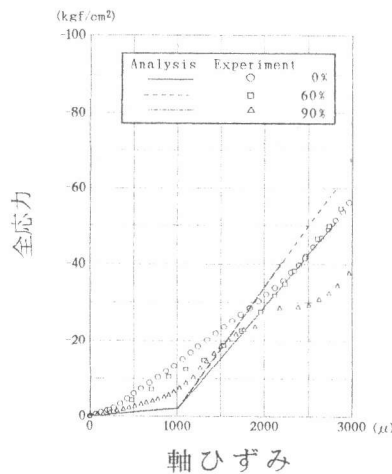


図-7 実験結果との比較（全応力）
（水中養生期間：0日）

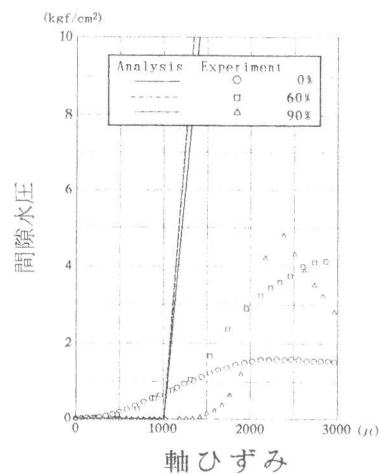


図-8 実験結果との比較（間隙水圧）
（水中養生期間：0日）

どは、養生による初期応力がゼロとなるひずみにおいて急激に発生している。これらの違いは、主に含水率が低いことや、供試体内部のマイクロあるいはマクロクラックの進展により水分が主にクラックに沿って移動すること等によるものであると想定される。したがって、载荷応力のほとん

どが固体相（コンクリート骨格）のみによって負担され、図-7に示す全応力～全ひずみ関係における勾配は、解析結果に比べ小さいものとなっていることが予想される。

図-9、10の水中養生の供試体に対する結果は、気中養生の供試体に比べ飽和度が高いことより、実験と解析結果で比較的良好な一致が見られる。図-10に示す間隙水圧～全ひずみ関係から、

実験結果では、養生中に生じる初期応力と載荷応力とが打ち消し合うひずみにおいて飽和状態となり、間隙水圧はどの載荷処女応力比ともほぼ同じ勾配で急激に発生している。解析結果は、このような傾向をよく捉えており、逆に言うとも実験結果が解析結果と良く一致していることから、飽和状態であるということが言えるものと思われる。また、図-9に示す全応力～全ひずみ関係においても、解析結果は実験結果と比較的良好に一致しており、本解析理論は、本研究の範囲内においてはその妥当性は十分であるものと思われる。しかし、養生中の初期応力に関する評価は、実験結果と解析結果における全応力あるいは間隙水圧が発生するひずみの相違から、十分であるとは言えず、今後、より高精度な定量的評価を行う必要があるものと思われる。

6. 結論

本研究では、提案している2相飽和多孔質材料としてのコンクリートの变形特性に関する解析理論を、養生中に生じる初期応力をも考慮できるように拡張した理論の提案を行い、既往の実験結果との比較により本解析理論の妥当性を検証した。以下に、その結果をまとめる。

1) 材令が3日の時点で養生中に生じるコンクリート内部の応力（初期応力）状態は、空隙には約 22.0 kgf/cm^2 の負圧が生じ、固体相にはそれに釣合う圧縮力が作用している。

2) 本解析理論は、完全飽和状態を仮定しており、その妥当性は飽和度が高い水中養生の供試体における実験結果において確認された。また、飽和度が非常に低い気中養生の供試体との大きな差異は、本解析理論を不飽和状態に適用できるように拡張させる必要があることを示している。

参考文献

- 1) 大下英吉, D.R.Loluliyana, 田辺忠顕: 弾塑性多孔質材料のクリープ性状に及ぼす間隙水圧の影響に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp585-590, 1992
- 2) 谷口幸弘: 若材令コンクリートの水分移動に関する基礎的研究, 広島大学卒業論文, 1994
- 3) 徳根吉郎訳: セメント・建設技術者のためのコンクリート化学, 技報堂, 1989
- 4) 河角ほか: 高温下におけるコンクリートのクリープ, 電力中央研究所報, No.380037, Feb., 1981
- 5) 井上健: 若材令コンクリートの变形挙動に関する研究, 名古屋大学修士論文, 1990
- 6) J.Murata: Studies on the Permeability of Concrete, Trans. of JSCE, No.77, pp.285-298, Nov., 1961
- 7) T.C.Powers, L.E.Copeland, J.C.Hays and H.M.Mann: Permeability of Portland Cement Paste, ACI Journal, No.51-14, pp285-298, Nov., 1954
- 8) 宮沢伸吾: 自己収縮および乾燥収縮によるコンクリートの自己応力に関する研究, 広島大学博士論文, 1992

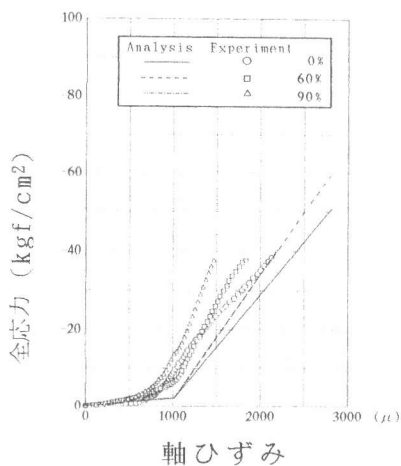


図-9 実験結果との比較（全応力）
（水中養生期間：2日）

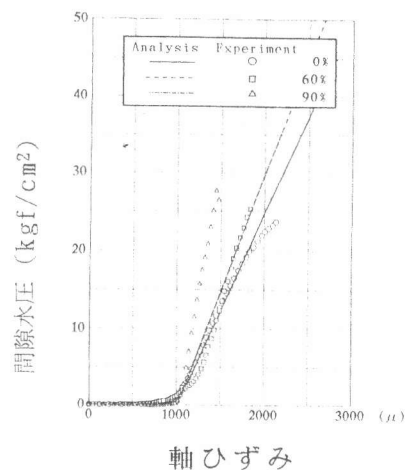


図-10 実験結果との比較（間隙水圧）
（水中養生期間：2日）