

論文 材齢極初期における壁状マスコンクリート構造物の塑性局所挙動に関する解析的検討

石川 靖晃^{*1}・藤原 武司^{*2}・田邊 忠顕^{*3}

要旨:打設直後から自己収縮を受ける材齢極初期の壁状マスコンクリート構造物に対して数値解析を行い、Fresh 時のコンクリートに局所的な初期欠陥が起こり得るかどうか解析的に検討を行った。その結果、Fresh 時の欠陥はひび割れのような軟化は伴わないことが解析的に確認された。さらには、コンクリートと地盤との付着性状は引張塑性局所挙動に大きく影響を及ぼすことも解析的に確認された。

キーワード: Fresh コンクリート, 局所的な初期欠陥, 塑性, 自己収縮

1. はじめに

近年、コールドジョイントに起因するコンクリートの剥落事故が煩雑に生じており、Fresh 時のコンクリートに生じる局所的な初期欠陥が大きな問題となっている。従来、打設直後の Fresh コンクリートは、均質な半流動体であり、初期欠陥は存在しないとみなされることが一般的なコンクリート技術者の見解であったが、これらの事故を機に Fresh 状態のコンクリートに生じる初期欠陥位置の予測制御技術の開発が早急に熟望視されている。そのためには、実験的あるいは客観的な理論的検証の元において Fresh 時のコンクリートの初期欠陥の同定が必要不可欠になると思われる。

特に理論的検証を行う前の問題として、予め解析的に本当に Fresh 時の初期欠陥が表現できるかどうかを確認する必要がある。

本研究では、著者らが開発した Fresh 状態から固体へ遷移する過程におけるコンクリートの構成則モデル¹⁾を用いて、打設直後から自己収縮を受ける材齢極初期のコンクリートに対して変形解析を行い、Fresh 時のコンクリートに局所的な初期欠陥が起こり得るかど

うか解析的に検討を行った。

2. 半流動体状態におけるコンクリートの構成則モデル¹⁾

現在まで著者らは Fresh 時から材齢の経過につれ固体化していく過程におけるコンクリートいわゆる遷移材齢時コンクリートの構成則モデルを開発している¹⁾(図-1)。

このモデルの特徴はコンクリートの応力ひずみ成分として弾性、塑性、粘弾性および粘塑性成分全てが考慮されていることである。即ち、コンクリートに生じる全ひずみ増分 $d\{\varepsilon\}$ は

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon^e\} + d\{\varepsilon^p\} + d\{\varepsilon^{ve}\} + d\{\varepsilon^{vp}\} + d\{\varepsilon^0\} \quad (1)$$

で表わされる。ここで、上付き沿え字 e, p, ve, vp および 0 はそれぞれ、弾性、塑性、粘弾性、粘塑性および応力に依存しないひずみ成分を表わしている。本研究ではひずみは全て工学ひずみを表わすものとする。尚、本論文では $\{\}$ は列ベクトルであり、 $[\]$ は行列を表わすものとする。

粘弾性ひずみ成分に関してはクリープ係数

^{*1} 名城大学講師 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

^{*2} 名城大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

^{*3} 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

$\phi(t, t') = \phi_0(t')(t - t')^m$ を Dirichlet 級数近似することにより通常全体形で表わされる粘弾性ひずみが増分形で定式化可能となる。ここで t および t' は材齢および載荷材齢であり、 $\phi_0(t')$ および m はクリープ試験から得られる定数である。最終的に粘弾性ひずみは増分形で

$$d\{\varepsilon^{ve}\} = [L_1]d\{\sigma\} + \{L_2\} \quad (2)$$

で表わされる。ここで $d\{\sigma\}$ は時間増分 dt 間における応力増分である。また、 $[L_1]$ は dt 間における粘弾性コンプライアンス行列であり、 $\{L_2\}$ は前ステップまでの応力履歴によって生じる粘弾性ひずみ成分である。式(2)の詳細については文献¹⁾を参照されたい。

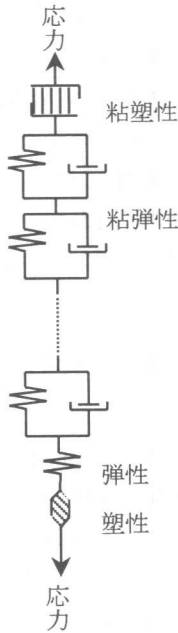


図-1 遷移材齢時コンクリートの構成則モデルの概念図

塑性ひずみに関しては古典塑性理論による関連流れ則に従うと仮定すれば

$$d\{\varepsilon^p\} = \lambda(\partial F / \partial \{\sigma\}) \quad (3)$$

で与えることができる。ここで F は降伏関数である。等方硬化を仮定した場合、 F は一般的には応力 $\{\sigma\}$ および等価一軸塑性ひずみ ε_{ep} の関数であり、多くの場合は、

$$F = f(\{\sigma\}) - k(\varepsilon_{ep}) \quad (4)$$

の形で表現することができる。

一方で、半流動体であるコンクリートは材齢 t によってその物性は極度に变化する。故

表-1 同定された材料パラメータ¹⁾

弾性ひずみ		
弾性係数(MPa)	(5.030×10 ⁴ ×T)/	
T:材齢 (日)	(2.911+T)	
ポアソン比	0.17	
塑性ひずみ		
$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k(\varepsilon_{ep})$		
$k(\varepsilon_{ep}) = \left(\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \sigma_{eq}, \quad \alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)}$		
$\sigma_{eq} - \sigma_0 = \frac{\xi_1 \varepsilon_{ep}}{1 + \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} - 2 \right) \frac{\varepsilon_{ep}}{\varepsilon_{ep, \max}} + \left(\frac{\varepsilon_{ep}}{\varepsilon_{ep, \max}} \right)^2}$		
σ_0 (MPa)	(18.31×T)/(8.154+T)	
ξ_1	1.314×10 ⁵ exp(-0.937/T ²)	
ξ_2	1.333×10 ⁴ exp(-0.700/T ²)	
$\varepsilon_{ep, \max}$	2.637×10 ⁻³ exp(-1.002T)	
$\theta = 27^\circ$		
粘弾性ひずみ		
$\phi_0(t')$	m	クリープポアソン比
0.3~1.2	0.3	0.17
粘塑性ひずみ		
$\gamma(t) = 3.3e^{-0.75t} / day, \quad t: \text{材齢 (日)}$		
$n = 2.0$		

に、塑性流れが生じ応力が降伏曲面に留まる

ためには

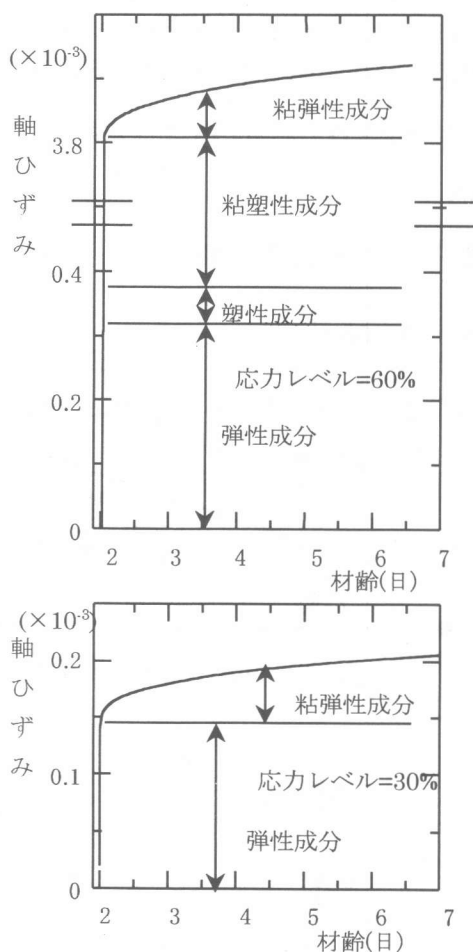


図-2 一軸持続载荷での軸ひずみ材齢関係

$$\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T d\{\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ep}} d\varepsilon_{ep} + \frac{\partial F}{\partial t} dt = 0 \quad (5)$$

の条件を満たす必要がある。但し上付き沿え字 T は転置を表す。

粘塑性ひずみ成分に関しては Perzyna らにより

$$d\{\varepsilon^{vp}\} = \begin{cases} \gamma \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right)^n \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} dt & F \geq 0 \\ 0 & F < 0 \end{cases} \quad (6)$$

の形で与えられている²⁾。ここで γ は粘性係数であり、

$$f_0 = k(0) \quad (7)$$

である。

応力に依存しないひずみ成分は、温度、乾燥収縮、自己収縮等の要因で決定されるが、本研究では自己収縮のみが生じると仮定した。即ち、応力に依存しない成分とは自己収縮を表わすものとする。

以上の式から、応力増分 $d\{\sigma\}$ と全ひずみ増分 $d\{\varepsilon\}$ とを関連付けることができる。即ち半流動体のコンクリートの増分型構成則が得られることになる。詳細な式の形は文献¹⁾に掲載されている。

ここで構築された構成則モデルを数値解析に適用するためには客観的に材料パラメータを同定する必要があるが、その手法については既に文献¹⁾で構築済みである。本研究では文献¹⁾で得られた材料パラメータをそのまま以降に述べる数値解析に用いる。表-1 に同定された材料パラメータの一覧を示す。

3. 遷移材齢時コンクリートの粘性挙動に関する数値解析例

まず、2.の構成則を用いて、持続応力を遷移材齢時コンクリート供試体に作用させた場合の変形解析を行った。図-2 では材齢 2 日で一軸状態で応力を強度の 30%と 60%まで作用させ、その後の応力を一定に保った場合での数値計算例を示している。

応力レベルが 60%の場合は、応力レベルが 30%の場合と比較して载荷直後に粘塑性ひずみが非常に大きく発生していることがわかる。そして材齢が数分経過すると持続応力はコンクリート硬化による降伏関数の拡大で自然に弾性領域に含まれ、粘塑性ひずみは消滅する。実際にそうなるかは今後実験などにより詳細に検討していかなければならないが、本研究で用いた遷移材齢時コンクリートの変

形モデルの特徴は応力依存性変形成分を個々に解析的に評価できることであり、遷移材齢時コンクリートの初期応力問題を従来の方法よりもより精度良く評価することが可能であると思われる。

4. 自己収縮によるコンクリートの局所的な初期欠陥に関する解析的検討

4.1 解析方法

打筋後から自己収縮を受けるコンクリートの変形解析を 2. の構成則を FEM 応力解析に導入ことにより行った。解析対象は図-3 に示すような剛体上に打設された無筋のマスコンクリート壁および地盤である。

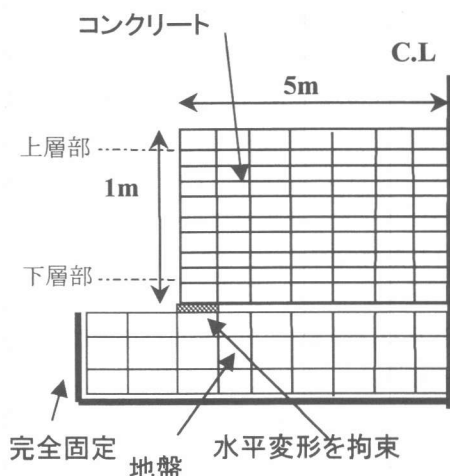


図-3 解析対象コンクリート壁

地盤とコンクリートの境界面には石川ら³⁾によって構築された水平境界面モデルを導入した。その際、全ての境界面要素では鉛直方向剛性は無限大とした一方で、水平方向剛性は壁端部の境界面要素のみ無限大と与え、他の境界面要素は 0 とした。このように境界面に対して剛性を与えた理由は、実際問題としてはコンクリートが地盤に様に付着していることは無いからであり、その状況を最も簡単に擬似させたかったためである。

解析においては自重を考慮し、2 次元平面応力状態により行った。

計算においては一様な打設コンクリートと仮定した。コンクリートに作用する見かけの自己収縮ひずみ $d\{\varepsilon^0\}$ に関しては文献⁴⁾によれば

$$d\{\varepsilon^0\} = \eta \gamma_p / (3\rho) dC_H \{m\} \quad (8)$$

$$\{m\} = \{111000\}^T$$

と表される。尚、 C_H 、 γ_p 、 ρ および η は

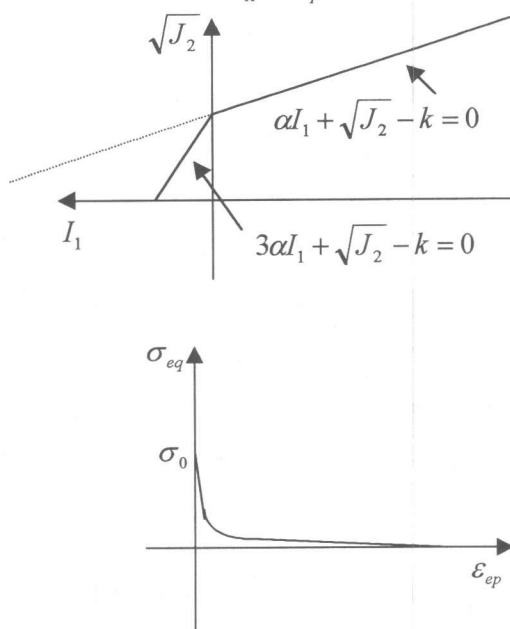


図-4 引張側に修正された Drucker-Prager 則

それぞれ、水和セメント量、完全結合水量、水の密度および材料定数である。本研究では簡単のため、

$$\{\varepsilon^0\} = -1.0 \times 10^{-4} \cdot t \{m\} \quad (9)$$

と材齢 t (日) に対して直線的に変化するものとして与えた。この仮定は、打設直後から自己収縮ひずみが直線的に発現することを意味している。それは実際現象と若干異なるが、

工学的に安全側の結果になり得ると思われるため、この仮定は解析上不益をもたらすことはないと思われる。また、本研究では主として自己収縮による初期欠陥について論じるため、Drucker-Prager 則を引張子午線上で Mohr-Coulomb の六角錐に合わせて解析を行う脚ち、

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k(\varepsilon_{ep}) \quad (10)$$

で与えられる Drucker-Prager 則において、

$$\alpha = 2 \sin \theta / \{\sqrt{3}(3 + \sin \theta)\} \quad (11)$$

と α を決定した。しかし、式(10)はコンクリートの引張破壊を過大評価することは経験的に知られている。そこで、 $I_1 > 0$ のとき $\alpha = 3\alpha$ として、引張側の降伏を早めるようにした(図-4)。

等価一軸応力ひずみ関係については

$$\sigma_{eq} = \sigma_0 \exp(-\mu \varepsilon_{ep}) \quad (12)$$

で仮定し、急激なひずみ軟化を表現することとした。ここで μ はひずみ軟化の程度を表わす定数である。他の物性値については文献⁹⁾で同定されたものを用いた。

また $\mu = 1.0 \times 10^4$ とした。

また、地盤は弾性係数 1.0×10^3 MPa、ポアソン比 0.17 の弾性体と仮定した。

解析期間は打設直後から材齢 0.5 日まで行った。尚、非線形解析手法として修正 Newton Raphson 法を用いた。

4.2 塑性局所挙動に対する解析的検討

図-5 に壁上層部および下層部における水平方向応力依存性ひずみの分布を示す。但し水平方向応力依存性ひずみ成分とは水平方向の全体ひずみから水平方向の自己収縮ひずみを差し引いたものであり、応力変化に直接影響を及ぼすひずみである。

材齢の経過と共に下層部において壁端部から 0.8m 付近即ちコンクリートと地盤が付着

している場所において、引張ひずみが大きく発生しており、材齢 0.5 日では他の場所に比べ倍近く引張ひずみが発生していることがわかる。

本解析では自己収縮ひずみを材齢に対して比例的に与えているが、壁端部以外の領域においては材例の経過に伴う引張ひずみの増加割合が減少しており、局所化に伴う unloading 現象が生じていることも伺える。

一方、壁上層部においては、特に引張ひずみは局所的に発生しておらず、主として、壁下層部においてひずみ局所化が生じていることが伺える。

続いて、壁端部の引張ひずみが大きく発生した場所での水平応力および水平方向応力依存性ひずみ関係を図-6 に示す。

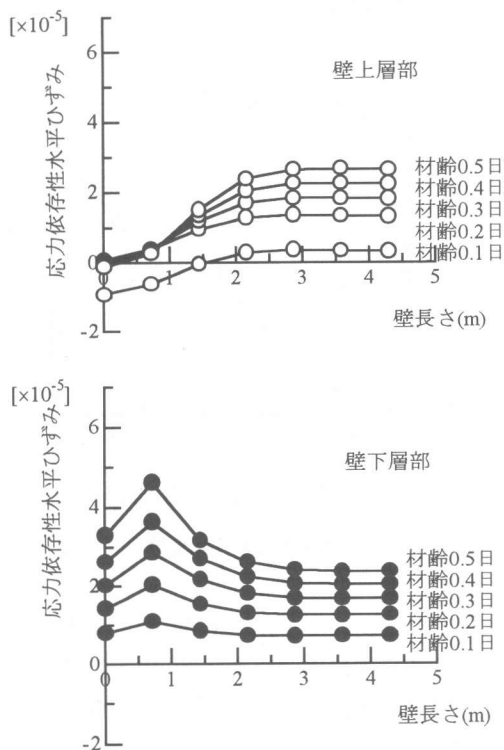


図-5 水平方向応力依存性ひずみ分布

図-6 の応力ひずみ関係においては、引張軟化と再硬化が何度も生じている様子が伺える。このような挙動は硬化コンクリートには見られない現象である。この理由は、3.で示したように、一端降伏し塑性流れが生じたとしても、材齢による（コンクリートの水和による硬化による）降伏曲面の拡大が生じるためである。即ち、降伏曲面の硬化による拡大の程度と引張塑性ひずみによる軟化との相互作用によって、ここで示した解析ケースのように引張軟化が生じないことも解析的には有り得るのである。

本解析では、壁端部の水平剛性を 0 とした解析即ちコンクリートと地盤間のすべりを完全に許容する場合の解析についても行ったが、壁のどの場所においても塑性挙動は生じなかった。このことは、コンクリートと地盤の付着性状が塑性局所挙動に大きく影響を及ぼしていると言えよう。

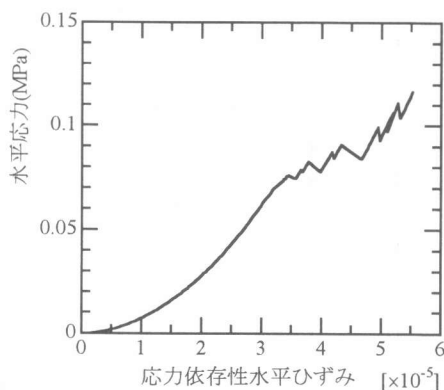


図-6 局所化領域での水平応力水平方向
応力依存性ひずみ関係

以上の解析だけで一般的な塑性局所挙動を論じることは勿論不十分であり、他の要因についても更に検討を必要とすることは言うまでも無い。さらに解析に対する何らかの実験的検証も当然必要ではある。

5. おわりに

以上から以下のような結論を得た。

- ・材齢極初期において、粘塑性ひずみは時間ステップによっては極めて大きく発生することが示された。
- ・自己収縮を受ける材齢極初期のコンクリートにおいてはたとえ引張軟化モデルを採用しても材料が強時間依存性のため、ひずみ軟化が生じないことが解析的にあり得る。
- ・コンクリートおよび地盤間の境界面の付着性状が初期欠陥に影響を及ぼし得ることが解析的に示された。

構造物の形態等や環境条件によっても初期欠陥発生位置および時間は様々に変化するとと思われるが、これらについて今後更に検討する必要があることは言うまでもない。

いずれにしても、実際に以上に述べたような現象が実際に起こり得るかは実測を行ってみたいとわからないことであるが、本研究が、従来全く未知であった初期欠陥の理論的検証への布石になり得ることは確かであると思われる。

参考文献

- 1) TANABE, T., ISHIKAWA, Y. and ANDO, N.: Visco-elastic and Visco-plastic Modeling of Transient Concrete, Proceedings of the EURO-C 1998 Conference on Computational Modelling of Concrete Structures /Badgastein /Austria, pp441-453, 31 March- 3 April, 1998
- 2) Perzyna, P.: Fundamental Problems in ViscoPlasticity, Adv. Appl. Mech., 9, pp. 243-377, 1966.
- 3) 石川靖晃, 田辺忠顕: 時間依存性を考慮する境界面モデルの開発およびその層打ちコンクリート構造物温度応力解析への適用, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.175-187, Feb., 1998
- 4) 大下英吉, 田邊忠顕: コンクリート内部に発生する間隙水圧の予測とその影響評価に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.29-41, Nov., 1995