

論文

[1088] ひずみ空間での塑性理論に基づいた劣化コンクリートの圧縮軟化挙動の解析

日高英介*1・Ahmed. M. FARAHAT*2・大津政康*3

1. はじめに

ひびわれは、コンクリート構造物の性質上、避けることのできない現象である。そのために、最終的な耐荷力やそれに追従する挙動を予測する場合には、初期欠陥として存在する微小ひびわれを考慮する必要があると考えられる。健全なコンクリートにおいては、弾性領域においては初期欠陥はないと仮定でき、その圧縮軟化挙動は応力空間とひずみ空間における塑性理論によってすでにモデル化されている[1][2][3][4]。そこで、これを初期欠陥を持つコンクリートの圧縮軟化挙動の解明に適用することを試みる。

本研究では、提唱中のコンクリートの圧縮軟化挙動の解明のためのひずみ空間塑性モデル[5]を、劣化コンクリートの圧縮軟化挙動の予測に適用した。そのため凍結融解作用により、コンクリートを劣化させる実験を行った。これらの供試体の一軸圧縮試験に対して、劣化コンクリートの圧縮軟化挙動に対するモデルの適用性を検討するための数値シミュレーションを行った。さらに、A E法を用いて、破壊過程における初期欠陥の影響、すなわち劣化コンクリートにおける塑性仕事の増分をA E頻度から定量的に考察しようと試みた。

2. モデルおよび解析手法

2. 1 モデル

本解析には、ひずみ空間塑性モデルを適用する。これは応力空間における Druker-Prager型の破壊曲面をひずみ空間に適用したもので、図-1にその模式図を示す。

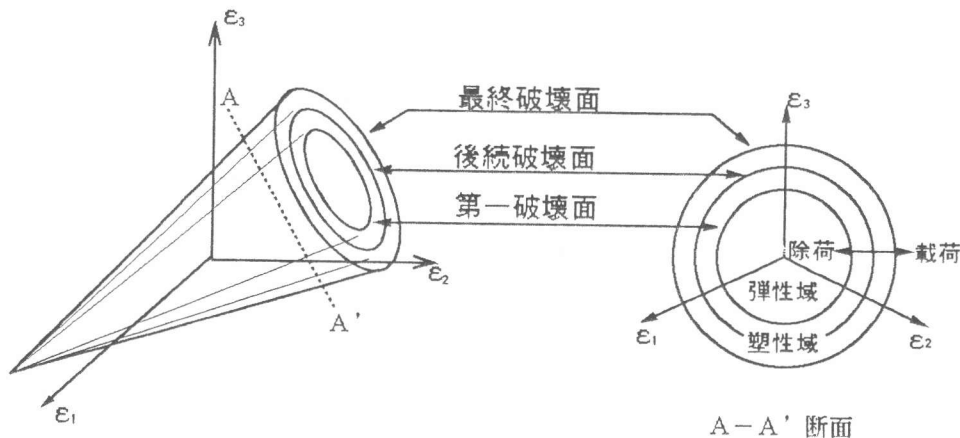


図-1 ひずみ空間での破壊曲面

- * 1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)
- * 2 カイロ大学講師 土木工学科、工博 (正会員)
- * 3 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

ここで、ひずみ空間塑性モデルの特徴は軟化領域において、破壊曲面の拡大縮小の変化で、載荷、除荷の区別が明確になることである。これに対して、応力空間塑性モデルでは、軟化領域において、載荷、除荷ともに応力が減少するために破壊曲面は縮小する。これについては、既に、LADE型の破壊曲面をひずみ空間に適用したモデルが存在する[4]。しかし非常に複雑でパラメータの数も多いため、単純でパラメータの数の少ない Drucker-Prager型のものを用いることにする。

2. 2 解析手法

応力状態から塑性領域にあることを判定するための破壊関数 F と、塑性ひずみを流れ則から決定するための塑性ポテンシャル関数 G は、次に示すように、全ひずみ ε_{ij} 、塑性ひずみ ε_{ij}^p 、載荷パラメータ $K(W_p)$ の関数であると仮定されている。

$$F = F(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, K(W_p)) = 0 \quad (1)$$

$$G = G(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, K(W_p)) = 0 \quad (2)$$

塑性理論の Il'yushin の原理、流れ則からひずみ空間における弾塑性に関する式が次のように得られる。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} \quad (3)$$

ここで、 D_{ijkl}^e は弾塑性剛性マトリックスで、次のようになる。

$$D_{ijkl}^e = D_{ijkl}^e - D_{ijkl}^p \quad (4)$$

D_{ijkl}^e 、 D_{ijkl}^p はそれぞれ弾性剛性テンソル、塑性剛性テンソルであり、 D_{ijkl}^p は、次のように得られる。

$$D_{ijkl}^p = \frac{\frac{\partial G}{\partial \varepsilon_{ij}} \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{kl}}}{-\frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{mn}} C_{mnpq}^e \frac{\partial G}{\partial \varepsilon_{pq}} - \frac{\partial F}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial W_p} \sigma_{mn} C_{mnpq}^e \frac{\partial G}{\partial \varepsilon_{pq}}} \quad (5)$$

(5) 式において、 C_{mnpq}^e は弾性コンプライアンスである。破壊関数 F と塑性ポテンシャル関数 G は応力空間における Drucker-Prager 型のを、ひずみで変換して決定する。応力空間からひずみ空間に変換すると、前述の F と G は次のような形に書き換えられる。

$$F = \alpha A \bar{I}_1 + \sqrt{B \bar{J}_2} - K = 0 \quad (6)$$

$$G = \alpha A \bar{I}_1 + C \sqrt{B \bar{J}_2} - K = 0 \quad (7)$$

ここで、 $A = 3K$ 、 $B = 4\mu^2$ で、 K は体積弾性係数、 μ はせん断係数、 C はダイレイタンスーパラメータである。また $C=1.0$ のとき、 G と F は等しくなり関連流れ則を満たすことになる。なお、ひずみテンソルの不変量 \bar{I}_1, \bar{J}_2 は次の式より求められる。

$$\bar{I}_1 = \epsilon_{ij} - e_{ij}^p \quad (8)$$

$$\bar{J}_2 = \frac{1}{2} (\epsilon_{ij} - e_{ij}^p)(\epsilon_{ij} - e_{ij}^p) \quad (9)$$

ここで、 e_{ij} は偏差ひずみテンソル、 e_{ij}^p は塑性偏差ひずみテンソルである。また、2つの材料パラメータ α 、 K は実験で得られた降伏曲面上の可能な限りのデータを近似することにより得られる。载荷パラメータ K は弾性域以降に蓄積された塑性仕事 (W_p) の関数であると仮定する。そして、 K は硬化領域では増加し、軟化領域では減少すると考える。これらのことを踏まえて、あらかじめ K_0 として定義された K の最大値を知ることにより、 K は次のように決定した。

$$K = K_0 \cdot \exp\{(\beta W_p)^\gamma - \xi\}^2 \quad (10)$$

ここで、 β 、 γ 、 ξ は各供試体ごとの係数である。また、 $K_0 = 0.335 f'_c$ は圧縮強度に対する K の最大値である。また塑性仕事 (W_p) は塑性ひずみ増分を $d\epsilon^p$ として次の式から得られる。

$$W_p = \int dW_p = \int \sigma d\epsilon^p \quad (11)$$

3. 実験概要

供試体は全て直径10cm、高さ20cmの円柱供試体で、計10本の供試体を4つのグループに分類して、一軸圧縮試験を行った。その際、同時にAEの発生頻度を圧縮過程全域で計測した。供試体の配合は表-1に示しており、空気量5%、スランプ値8cmとなっている。表-2の分類は、Aが健全なコンクリート、B、C、Dは劣化コンクリートで、順に40、80、120サイクルの凍結融解過程下におかれたものを表している。これより、劣化程度について言えば、これらの供試体で80サイクルと120サイクルでの劣化はあまり差は生じていなかったと考えられる。

表-1 配合設計

単位重量 (kg/m³)			
水	セメント	細骨材	粗骨材
172	378	735	1027

表-2 凍結融解劣化の供試体

	供試体数	サイクル数	相対弾性係数
A	2	0	1.000
B	3	40	0.853
C	3	80	0.767
D	3	120	0.749

4. 実験結果および考察

4. 1 実験結果

このモデルには、 α 、 β 、 γ 、 ξ 、 C の4つのパラメータがある。そして、健全なコンクリートで数値シミュレーションを行った結果、 $\gamma=0.4$ 、 $\xi=0.75$ 、 $\beta=1.4\sim 1.9$ 、 $C=0.9\sim 1.0$ が各供試体に対して共通な値であるとわかった。図-2、3、4、5は健全なコンクリート、また劣化コンクリートの一軸圧縮試験結果と解析結果とを比較したものである。図では、軸応力と軸ひずみ、軸応力と体積ひずみの関係を表している。図-2は健全なコンクリートのもので、図-3、4、5は、順に40、80、120サイクルの凍結融解過程下での劣化コンクリートのものである。表-3は各供試体のヤング係数(E)、ポアソン比(ν)、一軸圧縮強度(f_c)、また、解析曲線と実験結果とを合わせるために各供試体ごとに決定した材料パラメータを示している。これからも80サイクルと120サイクルの結果に大きな差はないことがうかがえる。

図-6は、健全なコンクリートと劣化コンクリートの、AEの発生頻度と塑性仕事との得られた関係を示したものである。

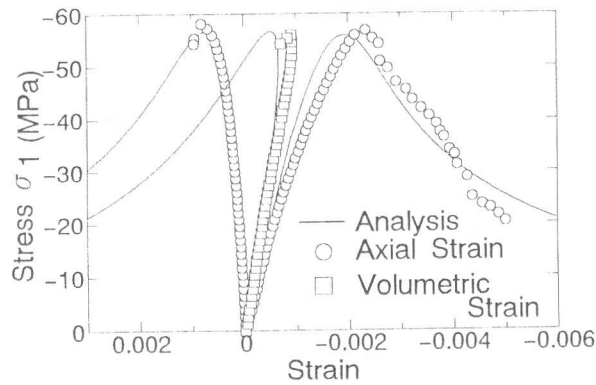


図-2 応力-ひずみ曲線 (0サイクル)

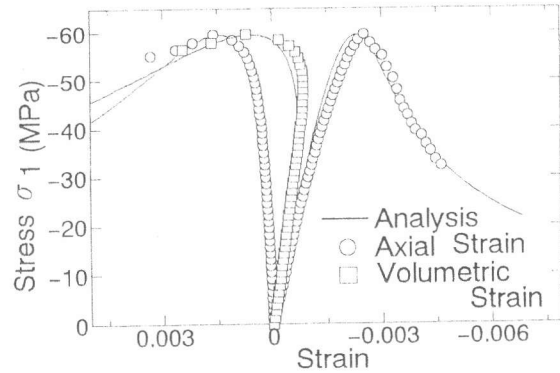


図-3 応力-ひずみ曲線 (40サイクル)

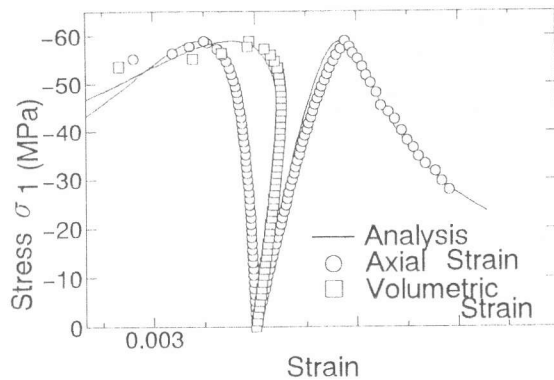


図-4 応力-ひずみ曲線 (80サイクル)

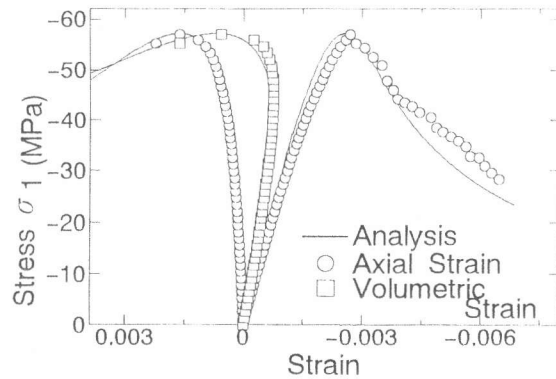


図-5 応力-ひずみ曲線 (120サイクル)

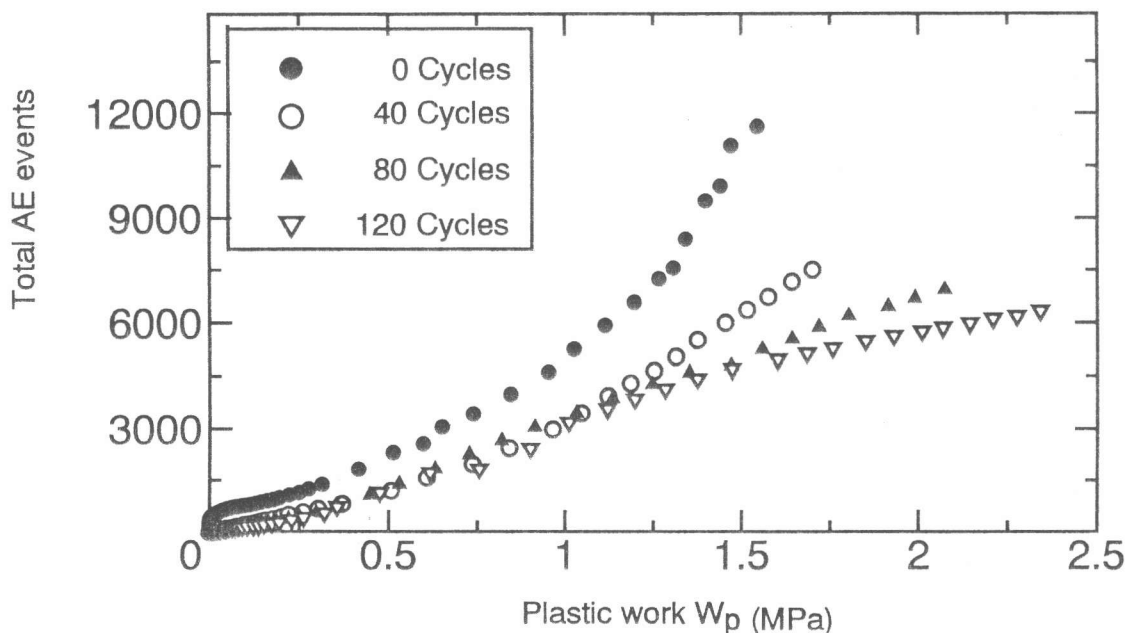


図-6 AE頻度-塑性仕事関係図

表-3 コンクリート物性値

	E (MPa)	ν	f'_c (MPa)	β	γ	ξ	C
健全	40132.45	0.190	56.77	2.0	0.40	0.75	1.0
劣化(40 サイクル)	34235.50	0.175	59.63	1.5	0.40	0.75	1.0
劣化(80 サイクル)	30774.09	0.199	58.85	1.6	0.40	0.75	1.0
劣化(120 サイクル)	30049.58	0.186	57.03	1.6	0.40	0.75	1.0

4. 2 考察

図-2, 3, 4, 5, および表-3より、パラメータ β については健全なコンクリートと劣化コンクリートとは若干の違いが認められる。一方、 γ , ξ , Cについては全てが同じ値となっていることがわかる。したがって、初期欠陥の影響は軟化域の勾配と相関のあることが言える。

AE頻度については、図-6より一定のAE発生頻度に対する塑性仕事は凍結融解過程のサイクル数に比例して増加していることが認められる。その程度は力学的特性と同様に80サイクルと120サイクルに本質的な差はみられない。いづれにしても、AE計測で得られたAE頻度の総数と、供試体中で消費された塑性仕事との間に明確な相関性のあることが認められた。

5. 結論

(1) 新しいひずみ空間塑性モデルを用いて、劣化コンクリートの圧縮軟化挙動をシミュレートすることができた。初期欠陥を考慮した場合にも、健全なコンクリートのためのモデルが材料パラメータに若干の変化を加えることにより、劣化コンクリートにも使用可能であることが認められた。

(2) A E の発生頻度を計測した結果、塑性仕事と強い相関があるということが明らかになった。コンクリートの劣化は材料に取り込まれる不可逆なエネルギーが劣化度に比例して増加している現象である。したがって、A E 発生頻度と塑性仕事の関係をさらに追求することにより、A E 頻度から材料の初期劣化の度合いを定量的に評価することが可能と考えられる。

参考文献

- (1) Chen, W. F. (1982), "Plasticity in Reinforced Concrete," *McGraw-Hill, New York*.
- (2) Tanabe, T. and Wu Z. S. (1992), "An Application of Work Hardening and Strain Softening Plasticity to Uniformly Cracked Reinforced Concrete Elements," *Proc. of the 3rd International Conference on Computational Plasticity, Fundamental and Application*, Pineridge Press, Sawnsea, UK, pp.1705-1716.
- (3) Wu, Z. S. Farahat, A. M. and Tanabe, T. (1993), "Modeling of Concrete Discontinuities with Dilatancy and Surface Degradation," *Journal of Material, Concrete Structures and Pavements*, JSCE, No. 472/V-20, pp. 119-129.
- (4) Mizuno, E. and Hatanaka, S. (1992), "Compressive Softening Model for Concrete," *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 118, pp. 1546-1563.
- (5) Farahat, a. m., Kawakami, M. and Ohtsu, M. (1993), "Strain-Space Plasticity Model for Triaxial Behavior of Concrete," *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kumamoto University*, Vol. 38, No. 3, pp. 1-24.
- (6) Farahat, A. M., Kawakami, M. and Ohtsu, M. (1994), "Strain-Space Plasticity Model for the Compressive Hardening-Softening Behavior of Concrete," *Journal of Construction and Building Materials*, UK. (To be appeared).