

エンドクロニック理論を用いたコンクリートの材料非線形解析

東北学院大学 学生会員 ○小山秀和

東北学院大学 正 会 員 石川雅美

1. はじめに

構造物内部のコンクリートは、一般に三次元的な応力状態にあると言える。とりわけ、側面を鋼板で巻き立てられた鉄筋コンクリート柱部材では軸方向力の増加とともに強い拘束圧を受け極めて複雑な応力状態となる。

鉄筋コンクリート部材の終局耐力および塑性変形挙動は、コンクリート材料のひずみ軟化が大きく影響する。側圧が $20(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 以下の低側圧が作用する応力 - ひずみ関係では、破壊の局所化を伴いひずみ軟化が支配的となるため、最大耐力以降のひずみ軟化挙動の予測が重要となる。

最大耐力以降の応力 - ひずみ関係を表すコンクリートの構成モデルとして Z.P. Bazant らが提案したエンドクロニック理論^{[1][2][3]}がある。エンドクロニック理論は、多軸応力下におけるコンクリート力学特性や最大圧縮強度後に生じるひずみ軟化挙動の解析にも適用できるという利点を持っている。

本研究では、エンドクロニック理論を有限要素法に組み込み、ひずみ軟化域を含むコンクリートの材料非線形解析を行った。有限要素法に組み込む上で、塑性応力の収束計算が大きな問題となったが、この塑性応力を等価節点力として解除し、これを確実に収束させるアルゴリズムを確立した。小阪らが行った三軸圧縮応力試験の実験結果^[4]とエンドクロニック理論を組み込んだ有限要素法と比較した結果、十分な軟化領域を含める実験値とほぼ一致する結果が得られた。

2. エンドクロニック理論の概要

エンドクロニック理論では、静水圧下で生ずる非弾性体積変化とせん断による体積減少の2つを考慮している。

増分形の $\sigma - \varepsilon$ 関係を、偏差成分と体積成分に分解し、弾性成分と非弾性成分の和としている。

$$de_{ij} = \frac{ds_{ij}}{2G} + de_{ij}'' \quad , \quad d\varepsilon = \frac{d\sigma}{3K} + d\varepsilon'' \quad (1)$$

式(1)の増分非弾性偏差ひずみ de_{ij}'' と増分非弾性体積ひずみ $d\varepsilon''$ を式(2)に示す。

$$de_{ij}'' = \frac{s_{ij}}{2G} dz \quad , \quad d\varepsilon'' = d\lambda + \frac{\sigma}{3K} dz' + d\lambda' \quad (2)$$

式(2)の増分イントリシクタイム dz と dz' は

$$dz = \frac{d\zeta}{z_1} \quad , \quad dz' = \frac{d\zeta'}{z_2} \quad (3)$$

$$d\zeta = \frac{d\eta}{f(\eta, \varepsilon, \sigma)} \quad , \quad d\zeta' = \frac{d\eta'}{h(\eta')} \quad (4)$$

$$d\eta = F(\varepsilon, \sigma) d\zeta \quad , \quad d\eta' = H(\sigma) d\zeta' \quad (5)$$

$$d\zeta = \sqrt{\frac{1}{2} de_{ij} de_{ij}} \quad , \quad d\zeta' = |d\varepsilon_{kk}| \quad (6)$$

となり、式(4)の体積減少硬化関数 $h(\eta')$ と体積減少軟化関数 $H(\sigma)$ は

$$h(\eta') = 1 + \frac{\eta'}{\beta_3} + \left(\frac{\eta'}{\beta_4} \right)^2 \quad , \quad H(\sigma) = b_1 \left\{ \frac{I_1(\sigma)}{b_2 - I_1(\sigma)} \right\}^2 \quad (7)$$

より表される。式(2)のダイレイタンシーは

$$d\lambda = l(\lambda) \cdot L \left\{ J_2(\varepsilon), I_1(\sigma), \lambda \right\} d\zeta \quad , \quad d\lambda' = l'(\lambda') L'(\lambda', \varepsilon, \sigma) d\zeta \quad (8)$$

$$l(\lambda) = 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad , \quad l'(\lambda') = c_6 \left(1 - \frac{|\lambda'|}{\lambda_0} \right) \quad (9)$$

$$L(\lambda, \varepsilon, \sigma) = \frac{c_3}{1 - c_1 I_1(\sigma)} \times \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2 + \left\{ \frac{c_4 J_2(\varepsilon)}{c_2^2 + J_2(\varepsilon)} \right\}^2 \right] \quad , \quad L'(\lambda', \varepsilon, \sigma) = \frac{\sigma_{\min} g_3^{1/3}}{1 + \left| \frac{g_3}{c_8} \right|} \quad (10)$$

$$g_3 = |c_7 \sigma_{\min}|^{1/3} - \sqrt{J_2(\varepsilon)} \quad (11)$$

と表され、式(1)、式(2)の弾性係数 G, K は

$$G = \frac{1}{1 + c_5 \lambda} \frac{E_0}{2(1 + \nu)} \quad , \quad K = \frac{1}{1 + c_5 \lambda} \frac{E_0}{3(1 - 2\nu)} \quad (12)$$

である。

ここに、 $z_1, z_2, b_1, b_2, \beta_3, \beta_4, c_1 \sim c_8$: 材料定数、 $F(\varepsilon, \sigma)$: ひずみ軟化関数、 $f(\eta, \varepsilon, \sigma)$: ひずみ硬化関数、 E_0 : 初期弾性係数、 ν : ポアソン比である。

3. 解析モデル

Z 軸方向より荷重を載荷し、側圧 σ_L を X 方向と Y 方向より載荷する。解析モデルは単純化した 1 要素モデルとし図-3.1 に示す。

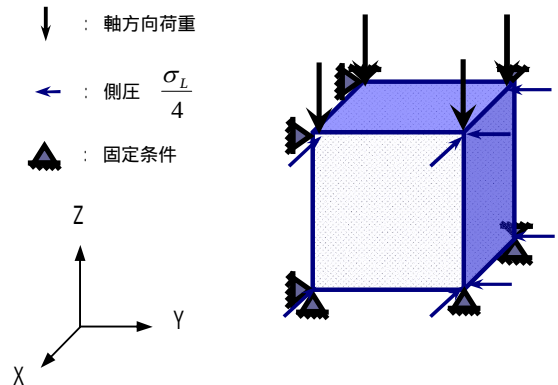


図-3.1 解析に使用したモデル

4. 解析条件

以下に、解析使用した各パラメータを示す。一軸圧縮強度、要素寸法及び側圧 σ_L は、小阪らの実験^[4]に合わせて設定している。ここで、初期弾性係数については、一軸圧縮強度の関数として与えている。

一軸圧縮強度	: 260(kgf/cm ²)
初期弾性係数	: 214298.5(kgf/cm ²)
要素数	: 1
要素寸法	: 10cm × 10cm × 10cm
側圧 σ_L	: 0,1,2,4,8,16(kgf/cm ²)

5. 小阪による三軸圧縮試験の概要

小阪らの実験^[4]は、側圧の大きさの違いによるコンクリートの塑性変形挙動に与える影響を明らかにしたものである。コンクリート供試体に一定の側圧をかけ、側圧を 1,2,4,8,16(kgf/cm²) とかえて圧縮試験を行い、側圧が最大強度やひずみ軟化域に及ぼす影響について調べたものである。

一軸圧縮強度 F'_c : 260(kgf/cm²)
供試体寸法 : 10cm × 10cm × 10cm

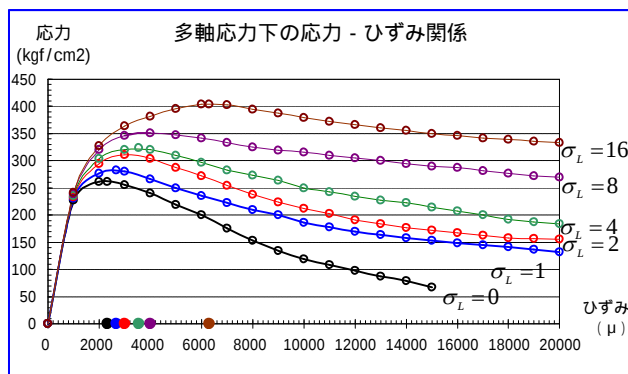


図-5.1 小阪による三軸圧縮試験

6. 解析結果

図-6.1 に各側圧に対する解析結果と小阪らの実験結果の比較を示す。

実験: ○ 解析: —

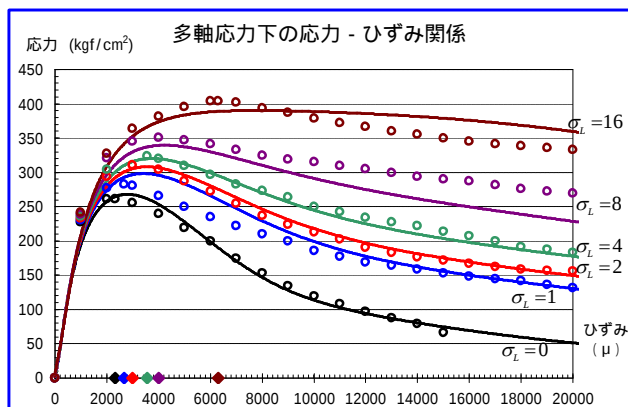


図-6.1 小阪らの実験と解析結果の比較

7. 考察

図 6-1 より、側圧 1(kgf/cm²)を除いて低側圧载荷では、最大応力やひずみ軟化現象を良好に表しており、実験結果と解析結果を比較するとほぼ一致する結果となった。側圧が増えるとともに、一軸圧縮強度に比べ最大応力値も大きくなっておりエンドクロニックモデルでの、側圧の増大による多軸効果を確認することができた。

しかし、側圧 8,16(kgf/cm²)のように側圧が大きくなるにつれ最大応力には達しない結果となっている。側圧 8(kgf/cm²)では、ひずみ軟化域での応力減少を過大に評価しており実験結果との差異がみられる。側圧 16(kgf/cm²)については、最大応力以降の応力低下が少なく、ひずみ軟化現象があまりみられない。また、ひずみが 8000(μ)付近で最大応力となっており、実験とは異なる結果を示している。全体的に、1500(μ)まで低ひずみ領域における応力値が低く、最大応力に達するひずみが実験値と比べ増加傾向を示している。

8. 結論

本研究では、コンクリート材料の構成モデルとしてエンドクロニック理論を有限要素法に組み込み、応力 - ひずみ関係について検証した。

解析結果より、コンクリートのひずみ軟化現象を表現することができ、一軸圧縮強度に比べ多軸効果も確認できた。特に、側圧が 0~4(kgf/cm²)の低側圧载荷での応力 - ひずみ関係を比較すると、実験結果と一致しており良好な結果を得る事ができた。

さらに、16(kgf/cm²)のように側圧が大きくなると拘束効果を課題に評価し、最大応力以降のひずみ軟化挙動があまり見られない事や最大応力値に達するひずみの増加などの問題点が挙げられる。これらの問題点には、多軸応力場に対する材料パラメータの違いが考えられる。改善するために、エンドクロニック理論で使用している各材料パラメータ特性の検討が必要であると考えられる。

【参考文献】

- [1] 谷川恭雄, 山田和夫: エンドクロニック理論のコンクリート工学への適用, コンクリート工学, Vol.21, No.1, pp.31-42, 1983
- [2] RC FEM 研究会(野口博他): 鉄筋コンクリートの有限要素解析に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.23, No.12, pp.38-63, Dec.1985.
- [3] 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫: エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析, 日本建築学会論文報告集, 第 330 号, 昭和 58 年 8 月, pp.9-23
- [4] 小阪義夫, 谷川恭雄, 畑中重光: 低側圧 3 軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.257-260, 1984.