

コンクリートのひずみ軟化を考慮した充填鋼管柱の三次元有限要素解析

○名古屋大学 学員 前田欣昌
名古屋大学 正員 水野英二

1. まえがき

近年、高強度で大きな靱性が得られるコンクリート充填鋼管柱が注目されている。しかし、その破壊メカニズムの定量的な解明に際しては、コンクリートと鋼管の間に作用する拘束圧の影響を考慮して、不均質であり、かつひずみ軟化を伴うコンクリートの耐力特性を適切に評価しなければならない。

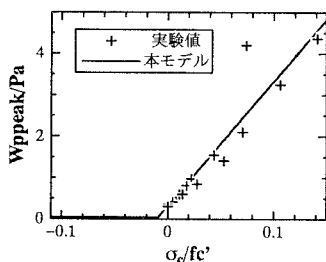
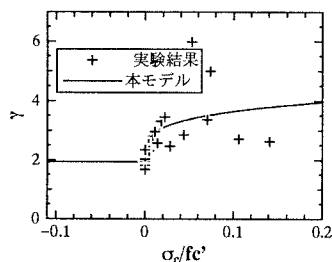
本研究では、まず、筆者らにより開発されたコンクリートの圧縮軟化型構成モデルを引張挙動も適切に再現できるように拡張する。次に、このモデルを三次元有限要素解析プログラム（F E A P）に組み込み、中心軸圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の三次元有限要素解析を行う。

2. ひずみ軟化型コンクリート構成則

本研究のひずみ軟化型構成則モデルは、ひずみ空間で定義した塑性理論に基づいている¹⁾。また、負荷曲面としてLade型負荷曲面を用いた。式(1)に、ひずみ空間で定義された無次元化Lade型負荷関数を示す。

$$f = \left(\frac{3K\bar{I}_1}{f_c'} + \frac{a}{f_c'} \right)^3 - \left[27 + f_p \left(\frac{1}{\left(\frac{3K\bar{I}_1}{f_c'} + \frac{a}{f_c'} \right)^m} \right) \right] \times \left[\frac{1}{27} \left(\frac{3K\bar{I}_1}{f_c'} + \frac{a}{f_c'} \right)^3 - \frac{1}{3} \left(\frac{3K\bar{I}_1}{f_c'} + \frac{a}{f_c'} \right) \left(\frac{2G\sqrt{J_2}}{f_c'} \right)^2 + \frac{2}{3\sqrt{3}} \cos 3\theta \left(\frac{2G\sqrt{J_2}}{f_c'} \right)^3 \right] = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\bar{I}_1$ 、 J_2 、 θ はそれぞれ弾性ひずみの第1次不変量、偏差弾性ひずみの第2次不変量、Lode角である。K、Gはそれぞれ体積弾性係数、せん断弾性係数であり、aは静水圧軸上の引張強度で、本研究では $0.3f_c'$ (f_c' :一軸圧縮強度)としている。mは負荷曲面の曲率に関するパラメータで $m = 1$ とした。

図-1 $Wp_{peak}/Pa - \sigma_c/fc'$ 関係図-2 $\gamma - \sigma_c/fc'$ 関係

また、 f_p はコンクリートの損傷度を表す強度パラメータで、降伏曲面では $f_p(\text{最大}) = \eta_1 = 224.5$ であり、一般に塑性仕事量 W_p の関数で表される。さらに、本研究では $f_p - W_p$ 関係の決定に、ピーク耐力までの塑性仕事量 $W_{p,peak}$ を大気圧 Pa で無次元化したパラメータ $W_{p,peak}/Pa$ と、 f_p の脆曲度合いに影響する無次元パラメータ γ の2つを用いた。 $W_{p,peak}/Pa$ と γ は、コンクリートの強度と作用している拘束圧に関係することが実験結果より分かっているので、拘束圧を等価拘束圧の概念（文献1を参照）に拡張し、等価拘束圧を強度で除した無次元量 σ_c/fc' の関数として表した。図-1、図-2、図-3にそれぞれ $W_{p,peak}/Pa - \sigma_c/fc'$ 関係図、 $\gamma - \sigma_c/fc'$ 関係図、 $f_p - W_p$ 曲線の概念図を示す。この $f_p - W_p$ 曲線を適切に決定することにより、コンクリートのひずみ軟化挙動を再現することが可能となる。

解析例として、図-4に一軸引張解析結果を示す。図中、解析結果を実線で実験結果を印で示してある。本モデルにより、コンクリートの引張軟化挙動が精度良く再現できることが分かる。

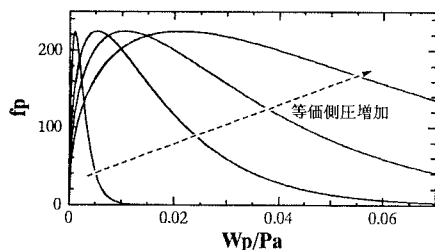
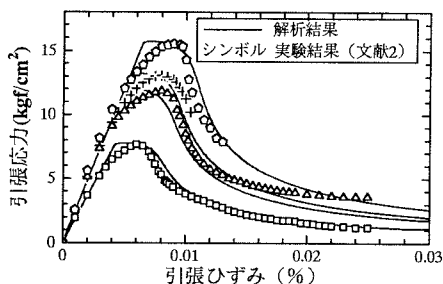
図-3 $f_p - W_p/Pa$ 関係の概念図

図-4 一軸引張試験のシミュレーション

3. コンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析

3.1 解析手法

今回、解析対象として、中心軸圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管柱を用いた。その材料・形状データを表-1に示す³⁾。また、図-5には供試体の要素分割図を示した。供試体は、軸対象、上下対象を仮定し1/8モデルを用いた。要素数はコンクリート部分が60要素、鋼管部分が48要素、付着要素部分が48要素である。図中黒く塗りつぶしてある要素が鋼管部分で、斜線部分が付着要素、無地がコンクリート部分である。ここで、付着要素厚は鋼管の板厚の1/200と設定した。

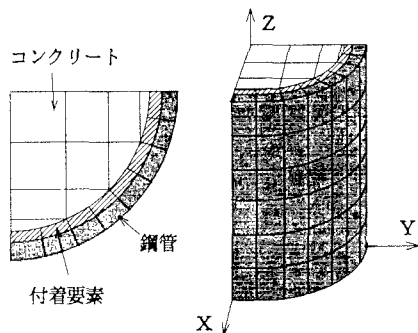


図-5 コンクリート充填円形鋼管柱の要素分割図

また、コンクリート部分には本ひずみ軟化型構成則を組み込んだ三次元Solid Elementを、鋼管部分にはDrucker-Pragerモデル（完全弾塑性モデル）を組み込んだ三次元Solid Elementを用いた。付着要素の役割は、鋼管とコンクリートの肌離れを目的としているため、要素の伸び縮みに内力があまり関与しないように、また、塑性ひずみを生じさせないように、言い換えれば常に弾性域内にとどまるように、付着要素の材料定数（ヤング率 E_i とポアソン比 ν_i 、i:interface elementのi）を鋼管の材料定数の1/1000倍（ $E_i=1/1000E_s$ ）と1/100000倍（ $E_i=1/100000E_s$ ）の二つのパターンを考え、要素タイプはDrucker-Pragerモデルを組み込んだ三次元Solid Elementを用いた。また、境界条件として、上下端部拘束を考慮する場合と考慮しない場合の2パターンを考えた。付着要素2パターンと境界条件2パターンの組合せで、計4ケースの解析を行う。

表-1 コンクリート充填円形鋼管柱材料・形状データ³⁾

D(mm)	H(mm)	t(mm)	D/t	σ_{sy} (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	ν_s	f_c' (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	ν_c
150	450	2.0	75	2400	2.1×10^6	0.3	171	2.355×10^5	0.2

D:内径 H:鋼管柱高さ t:板厚 D/t:幅厚比 σ_{sy} :鋼の降伏応力 E_s :鋼のヤング率 ν_s :鋼のポアソン比
 f_c' :コンクリートの一軸圧縮強度 E_c :コンクリートのヤング率 ν_c :コンクリートのポアソン比

3.2 解析結果

図-6に4ケースの解析結果と実験結果との比較を示す。図より、端部条件に関係なく付着要素の材料定数として $E_i=1/100000E_s$ を用いた方が、耐力が低くなっている。それは $E_i=1/100000E_s$ の方が、載荷初期段階でのポアソン比の違いによるコンクリートと鋼管の肌離れが大きく、コンクリートの拘束効果が遅れるため、最終的に作用する拘束圧が $E_i=1/1000E_s$ の場合に比べ小さくなるからである。また、端部拘束を考慮した方が、考慮しないケースより耐力が大きくなっている。端部拘束効果によりコンクリート部分の耐力が増したというよりもむしろ、鋼管が拘束され鋼管部分の耐力が増した一方、コンクリートはフープ効果が弱まったため、コンクリート部分の耐力が減少したことが解析結果より分かった。コンクリートと鋼管の耐力分担については当日報告する。

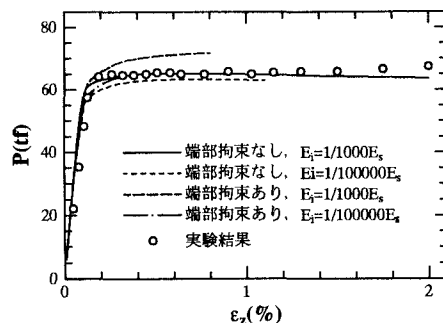


図-6 コンクリート充填円形鋼管柱の三次元有限要素解析

5. まとめ

中心軸圧縮を受けるコンクリート充填鋼管柱の有限要素解析に付着要素を導入することにより、拘束効果を適切に評価することができた。

謝辞：ひずみ軟化型構成モデルのパラメータ決定に際し、三重大学建築学科の畑中重光助教授よりご助言いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水野英二・畑中重光：塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性のモデル化、コンクリート工学論文集、Vol. 2(2)、1991、pp. 85-95。
- 2) Hughes, B. P. and G. P. Chapman: The Complete Stress-Strain Curve for Concrete in Direct Tension, RILEM Bull. 30, 1966、pp. 95-97。
- 3) 富井政英・崎野健治・森下陽一：コンクリート充填鋼管構造の設計上の問題点、カラム、No. 73、1979、pp. 91-98。