

論文 等価連続体化法による RC 柱の非線形動的解析

木全 博聖*1・Phamavanh Kongkeo*2・石川 靖晃*3・田辺 忠顕*4

要旨: 鉄筋コンクリート構造物の非線形解析手法のひとつである等価連続体化法を用いて、日本、アメリカ合衆国、ヨーロッパ、ニュージーランドの耐震設計基準により試設計された 16 本の柱の非線形動的解析を行った。その結果、等価連続体化法を動的解析へ適用する事が可能であることを確認できた。そして、解析結果を比較することにより 4 力国の耐震設計基準の特徴について考察を行った。

キーワード: 等価連続体化法, 平面格子, 耐震設計基準

1. はじめに

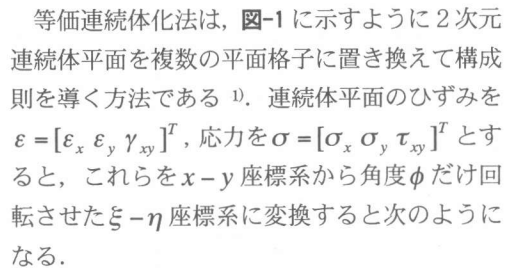
鉄筋コンクリート (RC) 構造物の性能照査や合理的な設計手法の確立のためには、より高度な解析技術が要求される。コンクリートの構成則に関する研究はこれまでも数多く行われており、その中には高精度な解析が可能なモデルが存在するものの、こういったモデルは厳密な理論構成の上に成り立っているためにその理論が複雑であり、解析上、仮に問題が発生してもその把握が難しい。また、計算時間や収斂性などに問題点を抱えている場合もある。

等価連続体化法は、RC 部材のひび割れたコンクリート部分と鉄筋を格子に置き換えることにより等価な連続体構成式を導く方法である。格子の材料モデルは単純な一軸応力-ひずみ関係を用いるために、通常の塑性解析のような複雑な理論を必要とせず、計算時間の短縮も期待できる。さらに、不具合が生じた時の問題の所在点がわかりやすいという特徴もある。本手法の妥当性は、柱やはり等の静的繰り返し実験の検討によって既に確認されている¹⁾²⁾。

RC 構造物の非線形動的解析が非常に重要である事は言うまでもないが、本研究では等価連続体化法を動的解析に適用し、その有用性を確

認する。解析対象とする構造物は、JSCE コンクリート委員会耐震設計基準国際比較検討委員会において、4 力国の耐震設計基準に基づいて設計された計 16 本の柱である。解析結果より、各設計基準の特徴についての考察も行う。

2. 等価連続体化法

等価連続体化法は、に示すように 2 次元連続体平面を複数の平面格子に置き換えて構成則を導く方法である¹⁾。連続体平面のひずみを $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}]^T$ 、応力を $\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]^T$ とすると、これらを $x-y$ 座標系から角度 ϕ だけ回転させた $\xi-\eta$ 座標系に変換すると次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi} \\ \varepsilon_{\eta} \\ \gamma_{\xi\eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \sin^2 \phi & \sin\phi\cos\phi \\ \sin^2 \phi & \cos^2 \phi & -\sin\phi\cos\phi \\ -2\sin\phi\cos\phi & 2\sin\phi\cos\phi & \cos^2 \phi - \sin^2 \phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\xi} \\ \sigma_{\eta} \\ \tau_{\xi\eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \sin^2 \phi & 2\sin\phi\cos\phi \\ \sin^2 \phi & \cos^2 \phi & -2\sin\phi\cos\phi \\ -\sin\phi\cos\phi & \sin\phi\cos\phi & \cos^2 \phi - \sin^2 \phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

n 本の格子の軸方向ひずみおよび応力成分を $\{\hat{\varepsilon}\} = [\varepsilon_1 \cdots \varepsilon_i \cdots \varepsilon_n]^T$, $\{\hat{\sigma}\} = [\sigma_1 \cdots \sigma_i \cdots \sigma_n]^T$

*1 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院学生 工学研究科地圏環境工学専攻
 *3 名城大学専任講師 理工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *4 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)

とおくと、

$$\{\hat{\varepsilon}\} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_1 & \sin^2 \alpha_1 & \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos^2 \alpha_i & \sin^2 \alpha_i & \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos^2 \alpha_n & \sin^2 \alpha_n & \sin \alpha_n \cos \alpha_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$= [L_\varepsilon] \{\varepsilon\}$$

$$\{\hat{\sigma}\} = \begin{bmatrix} r_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & r_n \end{bmatrix} \{\hat{\varepsilon}\} = [R] \{\hat{\varepsilon}\}, \quad r_i = \frac{E_i A_i}{b_i} \quad (4)$$

となる。また応力の回転マトリクスより、連続体の応力 $\{\sigma\}$ は格子の応力 $\{\hat{\sigma}\}$ により表すことができる。

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_1 & \cdots & \cos^2 \alpha_i & \cdots & \cos^2 \alpha_n \\ \sin^2 \alpha_1 & \cdots & \sin^2 \alpha_i & \cdots & \sin^2 \alpha_n \\ \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 & \cdots & \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \cdots & \sin \alpha_n \cos \alpha_n \end{bmatrix} \{\hat{\sigma}\} = [L_\sigma] \{\hat{\sigma}\} \quad (5)$$

式(5)に式(3)、(4)を代入すると、

$$\{\sigma\} = [L_\sigma] [R] [L_\varepsilon] \{\varepsilon\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (6)$$

となり、連続体の2次元平面の応力-ひずみマトリクス $[D]$ は次のように得られる。

$$[D] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n r_i \cos^4 \alpha_i & \sum_{i=1}^n r_i \sin^2 \alpha_i \cos^2 \alpha_i & \sum_{i=1}^n r_i \sin \alpha_i \cos^3 \alpha_i \\ \sum_{i=1}^n r_i \sin^4 \alpha_i & \sum_{i=1}^n r_i \sin^3 \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^n r_i \sin^2 \alpha_i \cos^2 \alpha_i \\ \text{sym.} & & \end{bmatrix} \quad (7)$$

$[D]$ マトリクスは応力状態により更新され、連続体平面要素の剛性マトリクスが逐次導かれる。

今回の解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の一軸繰り返し構成則を図-2に示す。

3. 4 各国耐震設計基準による柱の試設計

日本 (JSCE コンクリート標準示方書, 以下 JSCE), アメリカ合衆国 (Caltrans), ヨーロッパ (Euro Code8, 以下 EC8), ニュージーランド (New Zealand Standard, 以下 NZ) の各設計基準を用いて単柱の試設計を行った³⁾。柱の設計はそれぞれ別の設計者が、各基準の条件

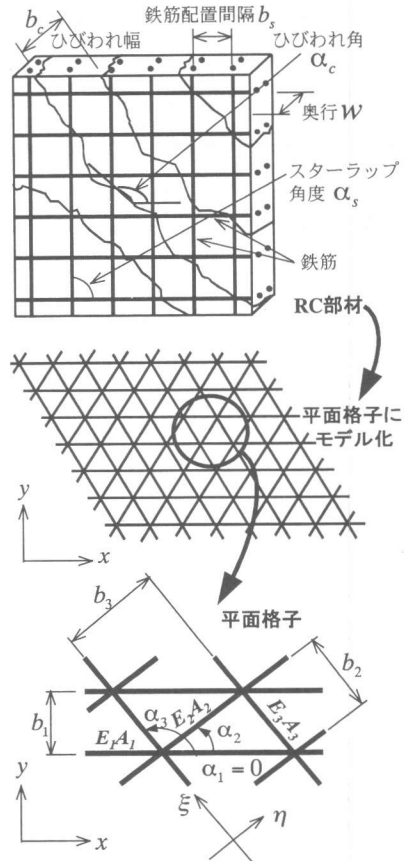
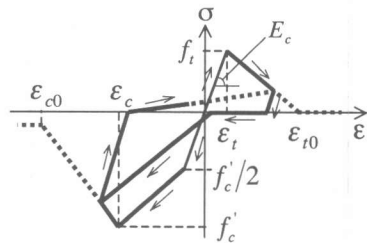
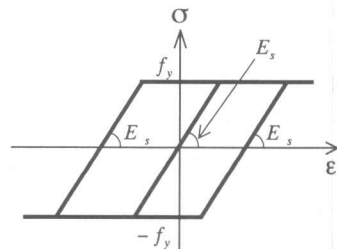


図-1 連続体平面と平面格子



(a) コンクリートの圧縮・引張



(b) 鉄筋の圧縮・引張

図-2 材料の構成則