

I-156

コンクリートの軟化を考慮した
鋼・コンクリート合成部材の繰返し弾塑性曲げ解析建設省 正員○藤巻浩之 京都大学工学部 正員 古田 均
京都大学工学部 正員 杉浦邦征 京都大学工学部 正員 渡邊英一

1. 序論

近年、コンクリート最大耐荷点以降のいわゆる軟化域が注目を集めている。本論文においては、遷移関数を導入することにより、軟化域を含むコンクリートの一軸構成式を構築することを試みた。さらに有限要素法を用いて、鋼とコンクリートから成る合成部材の繰返し弾塑性曲げ解析を行った。

2. 構成式の定式化

コンクリートの損傷過程を表すのに、図-1に示すようなひずみと繰返し数を変数とする遷移関数を用いる。コンクリートを構成する各要素は、当初全てが健全なA₁要素であり、それがひずみの進行と共にA₂要素へと遷移し、さらに繰返し数の増加と共にA₁, A₂両要素がB要素へと遷移するものとする。3要素の1軸力学特性は図-2に示す通りであり、A₁, A₂要素については降伏前(状態1)、降伏後・破壊前(状態2)破壊後(状態3)の3つの状態を考えた。

(a) 単純載荷時包絡線の定式化

A₁, A₂要素間の遷移のみ考慮する。まず、A₁要素自身がひずみ ε のみを変数とする不可逆遷移関数

$$\lambda_{12}(\varepsilon) = a_{12} b_{12} \varepsilon^{b_{12}-1} \quad [1]$$

$$\lambda_{23}(\varepsilon) = a_{23} b_{23} \varepsilon^{b_{23}-1} \quad [2]$$

に従い、状態1から状態2・状態2から状態3へと遷移するものとする。ここで、A₁要素が状態1, 2, 3にある確率を P_{a1} , Q_{a1} , R_{a1} とすると、以下の微分方程式

$$dP_{a1}/d\varepsilon = -\lambda_{12} \cdot P_{a1} \quad [3]$$

$$dQ_{a1}/d\varepsilon = -\lambda_{23} \cdot Q_{a1} + \lambda_{12} \cdot P_{a1} \quad [4]$$

が導かれ、これを解くことにより各状態の確率

$$P_{a1}(\varepsilon) = \exp(-a_{12} \varepsilon^{b_{12}}) \quad [5]$$

$$Q_{a1}(\varepsilon) = a_{12} b_{12} \exp(-a_{23} \varepsilon^{b_{23}}) \cdot \int \varepsilon^{b_{12}-1} \exp(a_{23} \varepsilon^{b_{23}} - a_{12} \varepsilon^{b_{12}}) d\varepsilon \quad [6]$$

$$R_{a1}(\varepsilon) = 1 - P_{a1}(\varepsilon) - Q_{a1}(\varepsilon) \quad [7]$$

が得られる。A₂要素についても全く同様である。

さらに、図-1中の遷移関数[8]によるA₁A₂間の遷移により、コンクリートを構成する各要素がA₁, A₂各々にとどまる確率 P_1 , P_2 が次のように得られる。

$$P_1(\varepsilon) = \exp(-a_a \varepsilon^{b_a}) [9], \quad P_2(\varepsilon) = 1 - P_1(\varepsilon) [10]$$

以上より、A₁, A₂要素から成る系全体として負担する応力を求め、最大圧縮応力度ならびにその時のひずみ度で無次元化を行うと、単純圧縮時包絡線式

$$\eta = E \exp(-a \xi^b) \{ (\xi + \xi_{y1} a \xi^b) \exp(-a \xi^b) + \alpha \cdot \{ 1 - \exp(-a \xi^b) \} \{ \xi - \xi_{y1} + (\xi_{y2} - \xi_{y1}) a \xi^b \} \},$$

$$\eta = \sigma / \sigma_0, \quad \xi = \varepsilon / \varepsilon_0,$$

$$\xi_{y1} = \varepsilon_{y1} / \varepsilon_0, \quad \xi_{y2} = \varepsilon_{y2} / \varepsilon_0 \quad [11]$$

が求まる。但し、遷移パラメータを一定値 $a = a_{12} = a_{23} = a_a$, $b = b_{12} = b_{23} = b_a$ とした。式[11]は

$$\eta(\xi=1) = 1, \quad \partial \eta / \partial \xi (\xi=1) = 0 \quad [12]$$

を満足しなければならないので、 b , ξ_{y1} , ξ_{y2} を決定することにより、他のパラメータ a , E が決定できる。

(b) 繰返し時の定式化

A₁, A₂要素間遷移に加え、図-1中の繰返し数 n を変数とする遷移関数[13]・[14]によるB要素への遷移も関与する。定式化においては下の仮定を用いる。

- ・ひずみ ε と繰返し数 n は独立な変数。
- ・第2相対特異点 $(-\xi_{y2}, -\eta_{y2})$ がひずみの可逆限。
- ・除荷中には各要素間遷移は全く行われず、除荷点における遷移状態が除荷の終了まで保存される。
- ・塑性ひずみ点近傍では、除荷曲線の傾きはゼロ。
- ・ $(n-1)$ 回繰返し載荷と過去の履歴により、各要

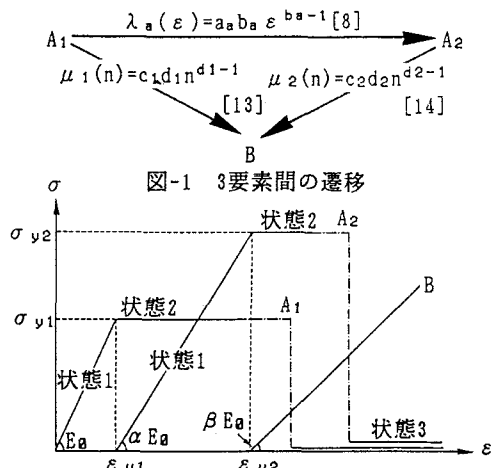


図-1 3要素間の遷移

図-2 3要素の一軸力学特性

素間遷移が行われた後、系全体が改めて単純載荷を受けた時の曲線として、 n 回目繰返し時の再載荷曲線を定義する。

よって3つの各要素にとどまる確率 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} 、 ϕ_b は、簡単のため $c=c_1=c_2$ 、 $d=d_1=d_2$ とし、式[3][4]同様に微分方程式を解くことにより求められる。

$$\phi_{a1}(\varepsilon, n) = \phi_{a11}(\varepsilon) \phi_{a12}(n) \quad [15]$$

$$\phi_{a11}(\varepsilon) = \exp(-a\varepsilon^b), \quad \phi_{a12}(n) = \exp(-cn^d)$$

$$\phi_{a2}(\varepsilon, n) = \phi_{a21}(\varepsilon) \phi_{a22}(n) \quad [16]$$

$$\phi_{a21}(\varepsilon) = 1 - \phi_{a11}(\varepsilon), \quad \phi_{a22}(n) = \exp(-cn^d)$$

$$\phi_b(\varepsilon, n) = 1 - \phi_{a1}(\varepsilon, n) - \phi_{a2}(\varepsilon, n) \quad [17]$$

前掲の仮定と式[15]～[17]より、

$$\cdot \text{塑性ひずみ度} \quad \xi_p(n) = \xi_r(n) \cdot$$

$$\{1 - \phi_{a1}(\xi_r(n), n) - \phi_{a2}(\xi_r(n), n)\} \quad [18]$$

$$\cdot \text{除荷曲線} \quad \eta = \eta_r(n) - E \bar{\xi}_1 \exp(-a \bar{\xi}_1^b) \cdot$$

$$\{(1 - \alpha) \exp(-a \bar{\xi}_1^b) + \alpha\} \quad [19]$$

$$\cdot \text{再載荷曲線} \quad \eta = E[\phi_{a1} \bar{\xi}_3 \rho_{a1} + \{\phi_{a1} \xi_{y1} +$$

$$\alpha \phi_{a2}(\bar{\xi}_3 - \xi_{y1})\} \rho_{a2} + \{\phi_{a1} \xi_{y1} + \alpha \phi_{a2}$$

$$(\xi_{y2} - \xi_{y1}) + \beta \phi_b(\bar{\xi}_3 - \xi_{y2})\} \rho_b] \quad [20]$$

$$\xi_r(n), \eta_r(n): \text{除荷時ひずみ度と応力度}$$

$$E = \eta_r(n) / [\bar{\xi}_2 \exp(-a \bar{\xi}_2^b)]$$

$$\{(1 - \alpha) \exp(-a \bar{\xi}_2^b) + \alpha\} \quad [21]$$

$$\bar{\xi}_1 = \xi_r(n) - \xi \quad [22], \quad \bar{\xi}_2 = \xi_r(n) - \xi_p(n) \quad [23]$$

$$\bar{\xi}_3 = \xi - \xi_p(n-1) \quad [24], \quad \rho_{a1} = \exp(-a \bar{\xi}_3^b) \quad [25]$$

$$\rho_{a2} = a \bar{\xi}_3^b \exp(-a \bar{\xi}_3^b) \quad [26]$$

$$\rho_b = 1 - \rho_{a1} - \rho_{a2} \quad [27]$$

コンクリートの引張域力学特性は引張限界までは弾性体、それ以降は1/3モデル¹⁾を用い、トリリニアとした。鋼材は全て完全弾塑性体として取り扱う。

3. 数値解析例

まず、Scavuzzoらによる実験結果²⁾との照査を行った結果を図-3に示す。実験結果との最小二乗法により $b=0.92$ 、 $c=0.06$ 、 $d=0.6$ と決定し、他のパラメータは $\xi_{y1}=0.25$ 、 $\xi_{y2}=0.5$ 、 $\alpha=\beta=0.5$ と設定した。

さらに、片持ちばりの繰返し弾塑性曲げ解析を行った。6つのモデルタイプの概要を図-4に、タイプ別の靱性率 ϕ_{y2}/ϕ_{y1} を表-1に示す。ここで、 ϕ_{y1} 、 ϕ_{y2} はM- ϕ 包絡線上昇・下降域それぞれにおいて、 M_y に最初に達したときの相対曲率として定義した。

表-1 タイプ別の靱性率

タイプ	1	2	3	4	5	6
靱性率	2.03	1.86	2.67	2.23	2.53	1.16

4. 結論

遷移関数によるコンクリートの定式化は良好な結果が得られた。繰返し曲げ解析においては、鋼薄肉皮膜装着による強度・靱性の向上が見られた。

<参考文献>

- 1) 六郷・内田・小柳: コンクリートの引張軟化特性と試験法, 構造工学論文集Vol. 36A, pp325-334, 1990. 3.
- 2) Scavuzzo, R. et al.: Stress Strain Curves for Concrete under Multiaxial Load Histories, Dep. of Civil, Environmental, and Architectural Engineering Univ. of Colorado, Boulder, 1983.

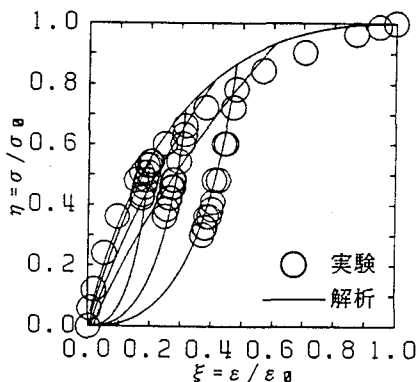


図-3 実験との照査

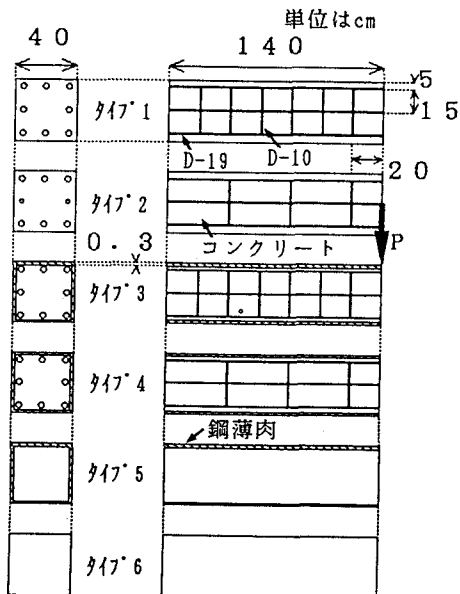


図-4 繰返し曲げ解析モデル