

埼玉大学大学院 学生員 浅賀 宏美
埼玉大学工学部 正員 町田 篤彦

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物が地震などによる動的外力を受ける場合の変形・破壊性状・減衰等はまだ明らかにされていない。これを明らかにする一段階として、鉄筋コンクリート部材が正負繰返し載荷される場合の挙動を解析する手法につき研究した。すなわち、繰返し載荷時の応力-歪関係を用い、ヒビフレを含めたコンクリートの材料の非線形性および鉄筋とコンクリートの付着を考慮した有限要素法による弾塑性解析を行なったのである。

2. 解析手法

平面応力状態を想定し、三角形要素でモデル化する。

1) コンクリート

コンクリートの最大主引張応力度が次式を満足するとクラックを生じる。

$$\max(G_1) = G_t \quad G_1: \text{主応力}, G_t: \text{引張強度}$$

圧縮による破壊条件はドラッカー・プラガーの降伏条件より

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} |G_0| \quad \text{--- ①}$$

ここで

$$\alpha = 0.07 \quad (\text{Kupfer 等の実験結果による}), G_0: \text{降伏応力}$$

$$J_1 = G_x + G_y$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \{ (G_x - G_y)^2 + G_x^2 + G_y^2 + 7x_{xy}^2 \}$$

$\sqrt{3}J_2$ は等方性材料の相当応力 $\bar{\sigma}$ に一致することより

$$\text{①に } \bar{\alpha} = \frac{2}{\sqrt{3}} \alpha, \bar{f} = \sqrt{3} f \text{ を代入すると}$$

$$\bar{f} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\alpha} (G_x + G_y) + \bar{\sigma} = |G_0|$$

一軸応力状態の応力-ヒズミ関係は図3に示す。

構成方程式は次のように表わされる。

弾性域では

$$\{G\} = \{D_e\} \{\varepsilon\} \quad \text{--- ②}$$

ここで

$$\{D_e\} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} E: \text{ヤング率} \\ \nu: \text{ポアソン比} \end{array}$$

塑性域では、山田の塑性増分理論に従って、

応力増分とヒズミ増分の関係は

$$\{dG\} = \{D_p\} \{d\varepsilon\}$$

ここで

$$\bar{S}_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\bar{\sigma}'_x + \nu \bar{\sigma}'_y) + \bar{\alpha} \frac{E}{1-\nu} \bar{\sigma}$$

$$\bar{S}_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu \bar{\sigma}'_x + \bar{\sigma}'_y) + \bar{\alpha} \frac{E}{1-\nu} \bar{\sigma}$$

$$\bar{S}_3 = \frac{E}{1+\nu} \tau'_{xy} \quad H' = (1 - \frac{2}{3} \bar{\alpha})^2 H_0$$

$$\bar{S} = \frac{4}{9} \bar{\sigma}^2 H' + \bar{S}_1 \bar{\sigma}'_x + \bar{S}_2 \bar{\sigma}'_y + 2 \bar{S}_3 \tau'_{xy} + \bar{\alpha} \bar{\sigma} (\bar{S}_1 + \bar{S}_2)$$

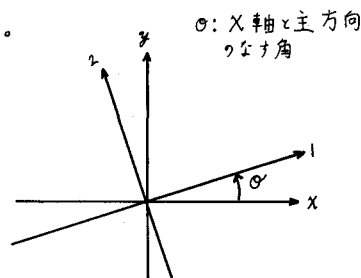


図1 コンクリートクラック

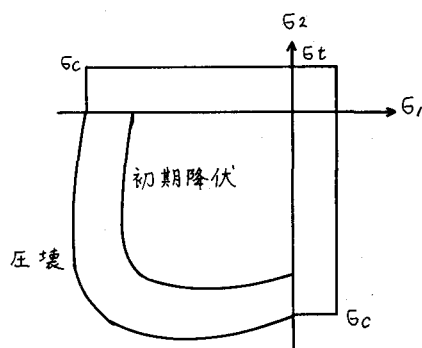


図2 降伏と圧壊曲面の仮定

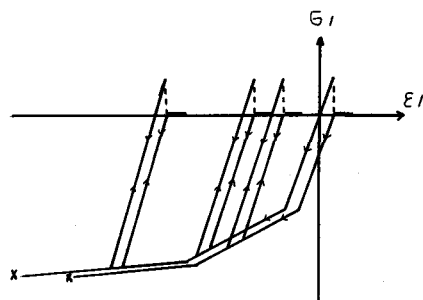


図3 コンクリートの応力-ヒズミ関係

$$[D_p] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{s}_1^2 & \bar{s}_1\bar{s}_2 & \bar{s}_1\bar{s}_3 \\ \bar{s}_1\bar{s}_2 & \bar{s}_2^2 & \bar{s}_2\bar{s}_3 \\ \bar{s}_1\bar{s}_3 & \bar{s}_2\bar{s}_3 & \bar{s}_3^2 \end{bmatrix}$$

クラック発生後の応力増分 $\times$ ヒズミ増分の関係は

$$\{\Delta\sigma\} = [D_c]\{\Delta\varepsilon\}$$

ここで

$$[D_c] = [T]^T [D_0] [T] \quad [T] = \begin{bmatrix} c & s & cs \\ s & c & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2-s^2 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} c = \cos\theta \\ s = \sin\theta \end{matrix}$$

$\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$ の場合

$$[D_0] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \beta \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \beta: \text{逓減係数}$$

クラック発生後、応力 σ_2 を解放し、応力再分配を行なう。応力再分配は、次式より求まる等価節点力 $\times$ 外力 $\times$ 、クラックが発生した要素に加える。

$$\{F\} = t \Delta [C^{-1}]^T [B]^T [T] \{\sigma_p\}$$

ここで

$\{F\}$: 等価節点力, t : 板厚, Δ : 要素面積,

$[C]$: 変位未定係数マトリクス, $[B]$: ヒズミ未定係数マトリクス,

$\{\sigma_p\} = [-\sigma_1, 0, 0]^T$

2) 鉄筋

一軸応力状態の応力-ヒズミ関係は図4に示す。

弾性域では④で表わし、塑性域ではフォン・ミーゼスの降伏条件を用い①において $\alpha=0$ とすると、

$$f = \sqrt{J_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} |\sigma_1|$$

応力増分 $\times$ ヒズミ増分の関係は

$$\{\Delta\sigma\} = [D_p]\{\Delta\varepsilon\}$$

$[D_p]$ はコンクリートの $[D_p]$ を $\alpha=0$ とする事より得る。

3) 付着要素

鉄筋とコンクリートを結合するにボンド・リンクを

用いる。応力-ヒズミ関係は

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_s \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = [D] \{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & -s & c & s \\ s & -c & -s & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_2 \\ \bar{\varepsilon}_3 \\ \bar{\varepsilon}_4 \end{Bmatrix}$$

3.

実験は、図6に示す繰返し載荷を受ける引き抜き試験を行なう。なお、解析結果 $\times$ 実験結果についての報告は、当日行なう。

参考文献 1) 松石・岩田・橋原：鋼板とコンクリートの構成される複合構造の有限要素法による非線形解析

日本鋼構造協会第11回大会研究集会

2) 黒正・渡口：有限要素法による鉄筋コンクリート部材の二次元解析(1/1. 仮定 $\times$ 解析手法)

日本建築学会論文報告集 第189号、昭和46年11月、p51~57

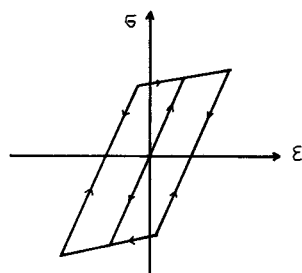


図4 鉄筋の応力-ヒズミ関係

$\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ の場合

$$[D_0] = 0$$

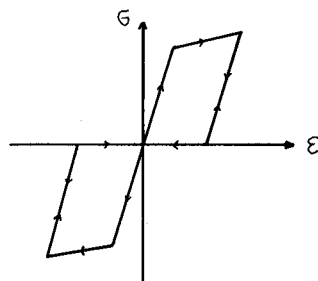


図5 接線方向のバネ剛性

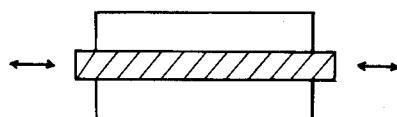


図6 実験方法

K_s : 接線方向のバネ剛性

K_n : 垂直方向のバネ剛性

θ : コンクリート $\times$ 鉄筋のなす角

$c = \cos\theta, s = \sin\theta$