

## 非均質材料に対するマイクロブレンモデルの適用

○名古屋大学工学部 学生会員 山田浩司  
 名古屋大学工学部 学生会員 Farahat, A. M  
 名古屋大学工学部 正会員 二羽淳一郎

## 1. はじめに

コンクリートを非均質材料としてマイクロブレンモデルの適用を試みた。コンクリートは、骨材相互の接触及び骨材とモルタル塊の接触の2通りの接触を持つと理想化する。最終的には、任意の体積標本内でのすべての接触が及ぼす影響の和として、材料の接線剛性マトリックスを陽な形で求めるための定式化を行った。さらに、コンクリート材料の非均質性とひずみ分布の非一様性にまで言及した。そして、実験データとの比較を行った。

## 2. 解析理論

領域  $V$  において釣りあい状態の応力を  $\sigma_{ij}$  とすると、平均応力は式 (1-a) のように定義される。ここで、ガウスの発散定理と力の釣りあい式を用いると式 (1-b) が得られる (図-1)。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dv \quad (1-a) \quad \bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^n f_i^m l_j^m \quad (1-b)$$

ただし、 $\sigma_{ij}$  は、応力、領域内の平均応力、 $V$  は領域の体積、 $f_i$  は接点力ベクトル、 $l_j$  は接点ベクトル、 $n$  は接点の総数である。

今、式 (1-b) を骨材、モルタル塊の両方に適用すると、どのような体積についても平均応力増分が次のように得られる。

$$\Delta \bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \left[ \sum_{C_1} \Delta f_i^{c_1} l_j^{c_1} + \sum_{C_2} \Delta f_i^{c_2} l_j^{c_1} + \sum_{C_2} \Delta f_i^{c_2} l_j^{c_2} \right] \quad (2)$$

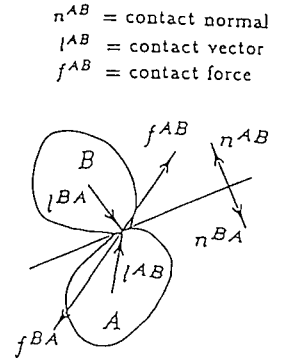


図-1 接点の主方向, 接点ベクトル, 接点力ベクトル

ただし、 $\Delta \bar{\sigma}_{ij}$  は平均応力増分、 $C_1$  は骨材相互の総接点数、 $C_2$  は骨材とモルタル塊との総接点数である。接点の角度の分布を、ある決まった間隔で有限個に分割すると、式 (2) の  $\Delta \bar{f} l$  が計算できる。そして式 (2) は次のように表される。

$$\Delta \bar{\sigma}_{ij} = \frac{C_1 \bar{l}_1}{V} \int_0^{2\pi} \Delta \bar{f}_i^{c_1}(\theta) n_j(\theta) E(\theta) d\theta + \frac{C_2 \bar{l}_1}{V} \int_0^{2\pi} \Delta \bar{f}_i^{c_2}(\theta) n_j(\theta) E(\theta) d\theta + \frac{C_2 \bar{l}_2}{V} \int_0^{2\pi} \Delta \bar{f}_i^{c_2}(\theta) n_j(\theta) E(\theta) d\theta \quad (3)$$

ここで、 $E(\theta)$  は接点数の存在確率密度関数、 $n_j$  は  $l_j$  方向の単位ベクトルである。

今、接点において、平均接点力の増分は、平均相対変位と関係がある。また、接点の微視的なひずみは巨視的なひずみのある決まった成分に等しいと仮定すると、 $\sigma - \varepsilon$  関係は次のように得られる。

$$\Delta \bar{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \Delta \bar{\varepsilon}_{kl}$$

$$\text{ここで、} D_{ijkl} = \eta_1 \int_0^{2\pi} (k_n a_{ijkl} + k_s b_{ijkl})^{c_1} \bar{E}(\theta) K d\theta + \eta_2 \int_0^{2\pi} (k_n a_{ijkl} + k_s b_{ijkl})^{c_2} \bar{E}(\theta) d\theta \quad (4)$$

$$a_{ijkl} = n_i n_j n_k n_l, \quad b_{ijkl} = t_i n_j t_k n_l, \quad \bar{E}(\theta) = 2\pi E(\theta) = 1 + A \cos^2 \theta - A \sin^2 \theta$$

$$\eta_1 = C_1 \bar{l}_1 \bar{a}_1 / 2\pi V, \quad \eta_2 = C_2 \bar{l}_1 \bar{a}_2 / 2\pi V + C_2 \bar{l}_2 \bar{a}_2 / 2\pi V$$

$k_n, k_s$  は、次のように定義された接点の主方向、せん断方向の剛性で、次のように定義される。

$$k_n = \frac{d\sigma_n}{d\varepsilon_n}, \quad k_s = \frac{d\tau_{nt}}{d\varepsilon_{nt}}$$

### 3. 接触面での $\sigma_n - \varepsilon_n$ 関係

骨材とモルタル塊との接触

$$\text{for } \varepsilon_n \geq 0 \quad \sigma_n^{am} = E_2 \varepsilon_n^{am} e^{-k_1 (\frac{E_2}{E_1})^p (\varepsilon_n^{am})^p}$$

$$\text{for } \varepsilon_n \leq 0 \quad \sigma_n^{am} = E_2 \varepsilon_n^{am} e^{k_c (\varepsilon_n^{am})^{p_1}}$$

骨材相互の接触

$$\text{for } \varepsilon_n \geq 0 \quad \sigma_n^{aa} = E_1 \varepsilon_n^{aa} e^{-k_1 (\varepsilon_n^{aa})^p}$$

$$\text{for } \varepsilon_n \leq 0 \quad \sigma_n^{aa} = -C_1 + C_2 \tan^{-1} [C_3 (\varepsilon_n - C_4)] \quad (9)$$

$$C_1 = -0.27 f'_c, \quad C_2 = 0.87 f'_c$$

$$C_3 = 1.15 \left( \frac{E_1}{f'_c} \right), \quad C_4 = -\frac{1}{C_3} \tan \left( \frac{C_1}{C_2} \right)$$

### 4. このモデルの立証と今後の課題

このモデルの材料パラメータを適度な値に選ぶと、図-3のようにEvansやKupferの実験データと一致することが確かめられる。現在、独自の実験を行いこのモデルのパラメータの値の評価を行います。

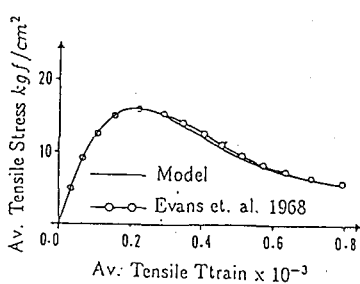


図-3 (a) 1軸引張

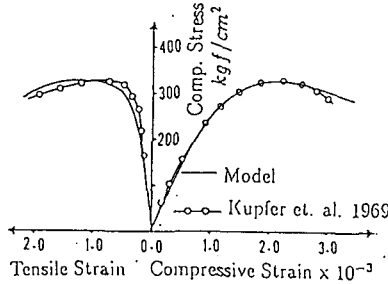


図-3 (b) 1軸圧縮

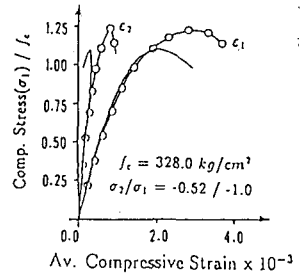


図-3 (c) 2軸圧縮

### 5. 参考文献

- (1) Farahat, A. M., Wu, Z. S., and Tanabe, T., "Development of Microplane Model of Concrete with Plural Types of Granular Particles," Proceeding of JSCE, 1991-08, No. 433, Vol. 15, pp. 231-238.
- (2) Farahat, A. M., Wu, Z. S., and Tanabe, T., "Observation of the microstructural behavior of concrete", International Symposium on Concrete Engineering, Nanjing, China, 1991, Vol. 1, pp. 289-294.