剛体バネモデルを用いたモルタルの時間依存破壊解析

Time-dependent Fracture Analysis of Mortar by Rigid Body Spring Model

北海道大学大学院環境創生工学専攻 ○学生員 松本浩嗣(Koji Matsumoto) 北海道大学大学院環境創生工学専攻 正 員 佐藤靖彦(Yasuhiko Sato) 北海道大学大学院環境創生工学専攻 正 員 上田多門(Tamon Ueda)

1. はじめに

コンクリート構造物の長期耐久性能に及ぼす要因の中 でも、力学的損傷を引き起こす疲労およびクリープは主 たる劣化要因のひとつである。これらを解析的に評価す べく、著者らは、疲労荷重に対するコンクリート構成モ デルの開発を行ってきた。その結果、ひずみを4成分に 分離した変形モデルを提唱するに至り、コンクリートの 疲労寿命、終局ひずみの評価が可能となった¹⁾。しか しながら、時間依存的な塑性ひずみ成分については適切 に定式化されていないのが現状である。これを解決する ためには、より詳細な破壊メカニズムに対する検討が必 要であるが、それらは微視的現象であるがゆえ、実験的 観測のみからは困難である。

長井らは,離散解析手法のひとつである剛体バネモデ ル(以下, RBSM)を用い,骨材界面やモルタル脆弱部に おけるひび割れ発生,ひび割れ近傍における応力集中に 伴う応力再配分,ひび割れ進展などのコンクリートの微 視的破壊メカニズムを数値的に再現することに成功して いる²⁾。本研究では,疲労破壊メカニズムを解析的に 解明すべく,RBSM の時間依存問題への拡張を目指し た。すなわち,連結バネの構成則に時間の影響を導入し, 時間依存問題に対する RBSM 構成モデルを構築した。 また,コンクリート解析の前段階として,クリープ載荷, 繰り返し載荷を受けるモルタルの時間依存破壊解析を行 った。

2. 解析手法

RBSM (<u>Rigid Body Spring Model</u>)は川井ら(1977)によっ て開発された離散解析手法である。個別要素法などの一 般的な離散解析と比べて, RBSM は微小変形問題に適 している。コンクリートおよびモルタルに対しては, Bolander, 斉藤, 上田, 長井らによって適用された。

RBSM では,解析対象は多角形要素に分割され,各 要素の境界面はバネで連結される。各要素の重心は,鉛 直,水平,回転方向に対する3つの自由度を持つ。図-1に示すように,要素の境界面には直方向,せん断方向 にバネが連結されている。ひび割れは要素の境界面に沿 って発生するため,要素形状が破壊の進展方向に影響す る。これを避けるため,要素分割に Voronoi 分割を用い, 要素形状にランダム性を与えた。

解析においては、仮想仕事の原理より剛性マトリクス を構成し、修正 Newton-Raphson 法を非線形計算に用い た。各要素に生じる残差力の二乗和と内力の二乗和との 比が 10⁻⁵ となったときを収束判定としているが、400 回 を収束計算の最大回数と設定しており、繰返し回数が 400回に達した時点で次のステップへ移行する。また、 収束計算終了後に各要素に生じている残差力は、次ステ ップに足し合わせている。

3. 構成モデル

RBSM では, 直方向, せん断方向に対する構成モデ ルが必要となる。本研究では, 各々に対して時間依存型 構成モデルを構築する。

3.1 直方向

著者らは、コンクリートの疲労載荷試験を通じ、4 つ のひずみ成分で構成された力学モデルを、疲労構成モデ ルとして提案している。これに基づき、図-2に示す4 成分系力学モデルを RBSM 時間依存構成モデルとする。 すなわち、全ひずみは弾性、粘弾性、塑性、粘塑性成分 の和で表される。

(1) 弾性ひずみ

弾性ひずみは、弾性バネ要素によって記述され、応力 --ひずみ関係は Fick の法則に従う。

$$\sigma_{el} = k_l \varepsilon_e \tag{1}$$

ここに, σ_{el} : 弾性バネの応力, k_l : 弾性バネの弾性係数, ϵ_i : 弾性ひずみ

(2) 粘弾性ひずみ

粘弾性ひずみは、弾性バネ要素およびそれに並列に連結したダッシュポット要素によって記述される。モルタルに生じる時間依存変形のうち、損傷に影響を与えない成分に相当する。ダッシュポットの応力-ひずみ関係は Newtonの粘性法則に従う。

$$\sigma_{e2} = k_2 \varepsilon_{ve} \tag{2}$$

$$\sigma_{\nu l} = c_l \frac{d\varepsilon_{\nu e}}{dt} \tag{3}$$



ここに、 σ_{e2} : 粘弾性バネの応力, k_2 : 粘弾性バネの弾性 係数, ε_{ve} : 粘弾性ひずみ, σ_{v1} : 粘弾性ダッシュポットの 応力, c_1 : 粘弾性ダッシュポットの粘性係数, $d\varepsilon_{ve}/dt$: 単 位時間当たりの粘弾性ひずみ増分(ひずみ速度)

(3) 塑性ひずみ

塑性ひずみはスライダー要素によって記述され,メソ スケールにおける静的引張軟化特性を表す。長井らの構 成モデルに基づき,図-3に示す応力-ひずみ関係とし た。

$$\varepsilon_{p} = 0 \qquad (経路A)$$

$$\sigma_{p1} = f_{t1} \left(1 - \frac{\varepsilon_{p}}{w_{u1}} (h_{1} + h_{2}) \right) \quad (経路B)$$

$$\sigma_{p1} = \frac{\sigma_{un1} - \sigma_{r1}}{\varepsilon_{un1}} \varepsilon_{p} + \sigma_{r1} \qquad (経路C)$$

$$\sigma_{p1} = 0 \qquad (経路D)$$

$$(4)$$

ここに, ε_p : 塑性ひずみ, σ_{p1} : 塑性スライダーの応力, f_{t1} : 塑性スライダーの引張強度, w_{u1} : 応力伝達限界開口 変位, σ_{t1} : 残留ひずみ指示応力

(4) 粘塑性ひずみ

粘塑性ひずみはスライダー要素およびそれに並列に連結したダッシュポット要素によって記述され、メソスケールにおける時間依存的な引張軟化特性を表す。スライダー要素は塑性ひずみと同様、図-3に示す応力-ひずみ関係とする。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{vp} &= 0 & (羅 B A) \\ \sigma_{p2} &= f_{t2} \bigg(1 - \frac{\varepsilon_{vp}}{w_{u2}} \big(h_1 + h_2 \big) \bigg) & (羅 B B) \\ \sigma_{p2} &= \frac{\sigma_{un2} - \sigma_{r2}}{\varepsilon_{un2}} \varepsilon_{vp} + \sigma_{r2} & (羅 B C) \\ \sigma_{p2} &= 0 & (経 B D) \\ \sigma_{v2} &= c_2 \frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} & (6) \end{aligned}$$

(5) 各ひずみ、応力成分の関係

各ひずみ,応力成分間には,以下の関係が成り立つ。

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_e + \mathcal{E}_{ve} + \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_{vp}$$

 $\sigma = \sigma_{e1} = \sigma_{e2} + \sigma_{v1} = \sigma_{p1} = \sigma_{p2} + \sigma_{v2}$

(6) 粘性低減モデル

開口変位に伴い,ひび割れ面における粘性抵抗が減少 することを考慮する。粘塑性ダッシュポットの粘性係数 を,粘塑性ひずみの増加に伴って線形に減少すると仮定 した。

$$c_{2} = c_{2i} \left(1 - \frac{\varepsilon_{vp}}{w_{u1}} (h_{1} + h_{2}) \right)$$
(7)

3.2 せん断方向

せん断方向に対しても直方向と同様,図-2に示す力 学モデルを採用した。各弾性バネ,ダッシュポットの応 カーひずみ関係は,直方向と同様に記述できる。

$$\tau_{e1} = k_3 \gamma_e \tag{8}$$

$$\tau_{e2} = k_4 \gamma_{ve} \tag{9}$$



$$\tau_{v1} = c_3 \frac{d\gamma_{ve}}{dt} \tag{10}$$

$$\tau_{\nu 2} = c_4 \frac{d\gamma_{\nu p}}{dt} \tag{11}$$

ここに, τ_i: せん断方向の各応力成分, γ_i: せん断方向の 各ひずみ成分, k_i: 各バネの弾性係数, c_i: 各ダッシュポ ットの粘性係数

スライダー要素は、メソスケールにおけるひび割れ面 のせん断伝達特性を表しており、図-4に示す剛塑性モ デルを応力-ひずみ関係とした。 τ_{max} は直方向の塑性、 粘塑性ひずみで定まる値であり、長井らの研究に基づき、 次式のように定めた。

$$\tau_{\text{maxl}} = \pm \left[0.1 \, \mathrm{l} f_{l1}^{3} \left(-\sigma_{\rho l} + f_{l1} \right)^{0.6} + f_{l1} \right] \times \left(1 - \frac{\varepsilon_{\rho}}{w_{ul}} (h_{l} + h_{2}) \right) \qquad (12)$$

$$\tau_{\max 2} = \pm \left[0.1 \, l f_{t2}^{3} \left(-\sigma_{p2} + f_{t2} \right)^{0.6} + f_{t2} \right] \times \left(1 - \frac{\varepsilon_{vp}}{w_{u2}} \left(h_{1} + h_{2} \right) \right) \quad (13)$$

また,以下の関係が成り立つ。

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_{ve} + \gamma_p + \gamma_{vp} \tag{14}$$

$$\tau = \tau_{e1} = \tau_{e2} + \tau_{v1} = \tau_{p1} = \tau_{p2} + \tau_{v2}$$
(15)

直方向と同様に,開口変位に応じた粘性係数の低減を 行う。粘性係数は,直方向の粘塑性ひずみに対し,線形 に減少するとした。 (16)

$$c_4 = c_{4i} \left(1 - \frac{\varepsilon_{vp}}{w_{u1}} (h_1 + h_2) \right)$$

3.3 材料定数

長井らは、モルタルが不均質材料であることを考慮し、 引張強度、弾性係数に対して位置によるバラツキを与え ている。本研究もこれに従い、引張強度、弾性係数、さ らには粘性係数に対して、長井らと同様の確率密度関数 を用い、バラツキを与えた。

また、メソスケールにおける引張強度、弾性係数に対しても、巨視的圧縮強度との関係が長井らにより提案されており、本研究でもこれを用いて、塑性スライダー引張強度 f_{11} および弾性バネ定数 k_1 , k_3 を決定した。なお、本研究における目標圧縮強度は 35(MPa)である。

さらに、他の材料定数に対しては、以下の値を用いた。

$$k_{2} = k_{1}$$

$$c_{1AVE} = 1000000 \text{ (MPa} \cdot \text{sec})$$

$$w_{u1} = 0.03 \text{ (mm)}$$

$$\sigma_{r1} = f_{t1} / 3$$

$$f_{t2} = 0.9 f_{t1}$$

$$w_{u2} = 0.03 \text{ (mm)}$$

$$\sigma_{r2} = f_{t2} / 3$$

$$c_{2iAVE} = 100000 \text{ (MPa} \cdot \text{sec})$$

$$k_{4} = k_{3}$$

$$c_{3AVE} = 1000000 \text{ (MPa} \cdot \text{sec})$$

$$c_{4iAVE} = 100000 \text{ (MPa} \cdot \text{sec})$$

4. モルタルの時間依存破壊解析

4.1 解析概要

解析に用いたモルタル供試体を図-5に示す。供試体 サイズは 100(mm)x200(mm)であり、Voronoi 分割による 総要素数は 3200(40x80)個である。荷重は、供試体上面 に均等に与えた。また、他の境界条件として、上面を横 方向に、下面を横方向および垂直方向に固定した。

解析は、クリープ載荷と繰り返し載荷の2ケース行った。各解析で与えた荷重履歴を図-6に示す。両ケースとも、荷重が 3000(N)までは 50(N/sec)の速度で処女載荷を行い、その後、クリープ載荷は一定荷重、繰り返し載荷は荷重振幅 3000(N)、周波数 0.01(Hz)の繰り返し荷重を与えた。

4.2 解析結果

(1) 平均応力-平均ひずみ関係

作用荷重を断面積で除した値を平均応力,上端変位を 供試体高さで除した値を平均ひずみとする。計算で得ら れた平均応力-平均ひずみ関係を図-7に示す。繰り返 し載荷解析に着目すると,載荷回数に応じてひずみが増 大し,内部剛性が減少していることがわかる。この傾向 は,著者らが行った実験結果と一致する。

(2) 平均ひずみの時間変化

計算で得られた平均ひずみの時間変化を図-8に示す。 両ケースとも、時間の経過に伴ってひずみが増大してい る。また、ひずみ増分が徐々に小さくなる段階、ひずみ







が線形に増加する段階,ひずみが急激に増大する段階, の3段階に区分することができ,この傾向は実験的事実 と一致する。



(b) 繰り返し載荷

図-9 ひび割れおよび応力分布の時間変化

(3) ひび割れおよび応力分布の時間変化

計算で得られたひび割れおよび応力分布の時間変化を 図-9に示す。応力分布図は、赤色部は圧縮応力、青色 部は引張応力が発生していることを示している。両ケー スとも、処女載荷時にはひび割れはほとんど発生せず、 応力は均一に分布しているが、破壊の進行に伴ってひび 割れが発生し、応力分布が不均一に変化している。これ は、時間の進行に伴うひび割れの発生、応力解放・再配 分といった微視的破壊現象によるものである。

5. 結論

本研究では以下の知見を得た。

 4成分系力学モデルを構成則として利用した RBSM 解析により、クリープ荷重、繰り返し荷重を受ける モルタルの応力-ひずみ性状、ひずみの時間変化に 対する実験的傾向を表すことができる。

 これは、時間依存載荷における微視的破壊メカニズムが再現可能となったことを意味しており、将来、 任意の応力状態、載荷履歴を受けるコンクリートに対する性能評価へと発展し得る。

参考文献

- 1) 松本浩嗣,佐藤靖彦,立石晶洋: 圧縮疲労荷重下に おけるコンクリートの変形モデルについて,日本コ ンクリート工学協会「コンクリート構造物の長期性 能照査支援モデル」に関するシンポジウム委員会報 告書/論文集,pp.331-338,2004
- 2) Kohei NAGAI, Yasuhiko SATO and Tamon UEDA: Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, October 2004