論文 剛体バネモデルによる疲労荷重を受けるモルタルの損傷度評価

松本 浩嗣*1·佐藤 靖彦*2·上田 多門*3

要旨:著者が提案している剛体バネモデルの時間依存構成モデルを改良し、モルタルの時間依存破壊シミュ レーションを高ひずみ速度域に拡張した。これにより、ひずみ速度の増加がモルタルの強度増進に与える影 響、さらには、実際の疲労載荷速度下におけるモルタルの破壊過程が再現可能となり、実験結果を良好に表 すことができた。また、残存強度変化を調べることで、疲労荷重下におけるモルタルの累積損傷度の評価を 行った。モルタルの累積損傷は載荷回数に対して線形ではなく、ある時点を境に急激に増加することを確認 した。

キーワード:剛体バネモデル,時間依存,疲労,ひずみ速度,応力-ひずみ,残存強度,累積損傷

1. はじめに

水

W

284.6

試験名

F90(1)STA

F90(1)

F90(2)STA

F90(2)

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。現在、疲労に対する設計は、 S-N 曲線とマイナー則を用いて疲労寿命を算出すること により行われている。しかしこの方法では、載荷途中に おける残存強度が不明であり、また、ひび割れ、変形な どの性能指標も不明であることから、補修の必要性、耐 久性、使用性などの構造性能を評価することができない。

これを解決すべく,筆者らは、コンクリートの疲労、 クリープ問題に対する解析的研究を行ってきた。既往の 研究において、離散解析手法のひとつである剛体バネモ デルに対する時間依存構成モデルを構築し、疲労および クリープ荷重を受けるモルタルの破壊シミュレーショ ンを可能とした¹⁾。しかし、載荷速度の大きい条件に適 用できないことが難点であった。

そこで本報では,疲労試験において一般的な数 Hz オ ーダーの載荷速度に対するシミュレーションを可能と すべく,前報で示した解析モデルに改良を行った。その 上で,高載荷速度の疲労荷重を受けるモルタルの破壊シ ミュレーションを行い,実験結果との比較を行った。

2. モルタルの疲労載荷試験

2.1 概要

本研究では、解析結果との比較用として、モルタルの 高応力疲労試験を別途行った。実験に用いたモルタルの 配合とサイズを表-1、図-1にそれぞれ示す。図-1 に示すように、供試体の4つの側面に荷重軸方向および 荷重軸直角方向にそれぞれ8個,検長30[mm]のひずみゲ ージを貼り付けた。供試体上部、下部に配したひずみゲ ージで、それぞれ上半分、下半分のひずみを測定した。 また、図-2に載荷方法を示す。供試体端部の摩擦を取 り除くため、上下面にはテフロンシートを挿入した。

表-2に、本研究で行った試験の一覧を示す。試験に は疲労試験と静的試験の二種類があり、静的試験は疲労 試験用の供試体の静的圧縮強度を調べるため、養生条件



表一	1	モル	タルの)配合
	単位	立量	[kg/m ³⁻	

セメント

C

474.3

表-2 試験一覧

試験種類

静的

疲労

静的

疲労

*2 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻准教授 工博 (正会員)

細骨材

S

1388.7

載荷条件

単調載荷

 $\sigma_{upp}/f'_{c}=0.9, \sigma_{low}/f'_{c}=0$

単調載荷

 $\sigma_{upp}/f'_{c}=0.9, \sigma_{low}/f'_{c}=0$

*3 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻教授 工博 (正会員)

が疲労試験と同じ供試体を用いた。試験体の養生期間は, F90(1)STA, F90(1)が35日間, F90(2)STA, F90(2)が59日 間である。疲労試験における上限応力比,下限応力比は それぞれ静的圧縮強度の90%,0%とし,荷重は周波数 1[Hz]のサイン波を圧縮方向に与えた。なお,結果のバラ ツキを検証するため,同じ条件の試験を2体行っている。

測定には、100Hz サンプリングシステム ADREC を用 いた。これにより、実際の載荷速度下においてモルタル が破壊に至るまでのすべてのひずみ、荷重の変化を測定 し、コンピュータに保存した。また、環境作用の影響を 取り除くため、温度 T=20 [℃]、相対湿度 R.H.=40%の一 定温湿度の元で試験を行った。

2.2 実験結果

(1) 静的圧縮強度および疲労寿命

表-3に、実験で得られた静的圧縮強度および疲労寿命(=破壊に至るまでの載荷回数)を示す。両供試体とも、疲労寿命はおよそ1,000 サイクル程度であった。

(2) 破壊領域の応カーひずみー時間関係

各測定点のひずみ変化を検証した結果,ひずみが破壊 に至るまで増加し続ける点と,破壊前に減少傾向を示す

試驗名	圧縮強度		試驗名	疲労寿命				
1.0001	[MPa]			[サイクル]				
F90(1)STA	31.33		F90(1)	986				
F90(2)STA	34.46		F90(2)	1394				

表-3 圧縮強度および疲労寿命

点があり,破壊の局所化が認められた。非破壊領域の影響を取り除くため,破壊領域に位置する点のひずみのみ 整理した。すなわち,破壊領域のひずみを破壊領域に位 置する測定点から得られたひずみの平均値として求め た。また,応力は作用荷重を供試体断面積で除すことで 求めた。

図-3に破壊領域の応力-ひずみ関係およびひずみ ー時間関係を示す。載荷回数の増加に伴って、内部剛性 は低下し、非線形性は増加する傾向がある。荷重軸方向 ひずみと荷重軸直角方向ひずみを比較すると、載荷初期 では軸方向ひずみの方が大きいが、破壊が進展するに従って、軸直角方向ひずみが大きくなっている。これらの 傾向は、既往の研究^{2),3)}で報告されているものと一致す る。また、ひずみの時間変化は、初めほぼ直線的に増加 した後、破壊点付近で加速度的に増加し、破壊に至って いる。この傾向は、著者らが行ったコンクリートの高応 力疲労試験⁴の結果と一致する。

3. 剛体バネモデルによるモルタルの疲労解析 3.1 概要

剛体バネモデル(以下, RBSM) は離散解析手法のひ とつである。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。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





図-4 RBSM 時間依存構成モデルの概要:力学モデルと材料定数決定フロー

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、100 回 を収束計算の最大回数と設定しており、繰返し回数が 100 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。

3.2 構成モデル

(1) 概要

本研究では, RBSM の時間依存構成モデルとして,前 報¹⁾において構築した4成分系力学モデルを採用した。 **図-4**にその概念図を示す。4成分系力学モデルは,弾 性ひずみ,粘弾性ひずみ,塑性ひずみ,粘塑性ひずみか ら成るモデルあり,各成分は弾性バネ要素,スライダー 要素,ダッシュポット要素の組み合わせで記述される。 ここに,直方向に配するスライダーはひび割れの引張軟 化特性,せん断方向に配するスライダーはひび割れ間の せん断伝達特性を表す。各要素の材料定数は,モルタル の配合条件および養生期間から求める。 しかしながら,前報で構築した本モデルは,高ひずみ 速度域(静的載荷よりも大きい速度)に適用できない。 そこで,本節では,4成分系力学モデルを高ひずみ速度 域へ拡張すべく,モデルの修正を行う。

(2) ダッシュポット要素に対する擬塑性モデルの導入

ひび割れ間の粘性を表す粘塑性成分のダッシュポッ ト要素は、ひずみ速度がモルタルの強度変化に与える影 響を支配する。ダッシュポット要素に対して Newton の 粘性法則(応力とひずみ速度が線形関係)を与えていた 前報のモデルでは、強度変化がひずみ速度の対数倍に比 例するという実験結果を適切に表現することができな かった⁴⁾。そこで本研究では、ダッシュポット要素に対 して、図-5に示す非線形の粘性法則(擬塑性モデル)



を導入した。すなわち,ダッシュポットの応力は,ひず み速度の対数倍に比例するとした。

$$\sigma_{\nu 2} = \begin{cases} \alpha \ln(\beta \dot{\varepsilon}_{\nu p} + 1) & (\dot{\varepsilon}_{\nu p} > 0) \\ 0 & (\dot{\varepsilon}_{\nu p} = 0) \\ -\alpha \ln(-\beta \dot{\varepsilon}_{\nu p} + 1) & (\dot{\varepsilon}_{\nu p} < 0) \end{cases}$$
(1)

ここに, σ_{v2} : 粘塑性成分のダッシュポットの応力, $\dot{\epsilon}_{vp}$: 粘塑性成分のひずみ速度, α , β : 定数

定数 α , β の値は, Jingyao ら⁵⁾, Li ら⁶⁾, Shraddhakar ら⁷⁾の実験で得られたモルタルの圧縮強度-ひずみ速度関係に基づき, α =0.6, β =5000 と定めた。

(3) 経路依存型スライダーモデルの導入

前報¹⁾において,時間の経過,除荷・再載荷に伴う連 結バネの応力解放・再分配が,モルタル全体のひび割れ 伝播,破壊を生じさせることを論じた。中程度のひずみ 速度域(静的載荷とほぼ同じ速度)においては,ダッシ ュポットの粘性効果によって連結バネの応力解放が生 じる。ところが,高ひずみ速度域ではダッシュポットの 変形がほとんど生じず,連結バネからの応力解放が生じ ないため,破壊の進展を表現することができない。

そこで本研究では、除荷・再載荷を受けた時、スライ ダー要素自体に応力解放を生じるように、図-6に示す 経路依存型モデルを直方向連結バネに導入した。*do*は除 荷・再載荷で解放される応力であり、以下の式で与えた。

$$\Delta \sigma = \begin{cases} c_y \cdot \sigma_{unenv} (\sigma_{unenv} - \sigma_{re}) & (\sigma_{re} > \sigma_r) \\ c_y \cdot \sigma_{unenv} (\sigma_{unenv} - \sigma_r) & (\sigma_{re} \le \sigma_r) \end{cases}$$
(2)

ここに, *c_y*: 応力解放の大きさを表す定数, *σ_{unenv}*: 包絡 線(経路[B])上の除荷点応力, *σ_{re}*: 再載荷点応力, *σ_r*: 残 留開口変位指示応力(前報¹⁾参照)

定数 cyの値は、除荷・再載荷に伴うひび割れ伝播速度



図-6 経路依存型スライダーモデル

を支配する。そこで本研究では、 c_y に関するパラメトリック解析を実施し、第2章で得た疲労寿命との比較することで、 c_y =0.17と定めた。

ひずみ速度の異なる条件下での単調載荷解析 4.1 概要

高ひずみ速度域に対する本解析モデルの妥当性を検 証するため、ひずみ速度の異なるモルタルの単調載荷解 析を行った。図-7に、本解析で用いたモルタルモデル を示す。対象とするモルタルの寸法は、第2章で行った 実験供試体に合わせて、75 [mm] x 150 [mm]とした。

解析パラメータは作用ひずみ速度で、40(静的),400, 4000,40000 [mic/sec]の4ケースとした。

図-4に示したように、すべての材料特性値はモルタ ルの配合および養生期間から求められる。本解析におけ るそれらの入力値は、前節の載荷試験 F90(1)STA, F90(1) と同様に、表-1に示した配合と養生期間 35 日である。

4.2 解析結果と考察

供試体の上端変位を高さで除した値を平均ひずみ,上端に作用する荷重を断面積で除した値を平均応力と定義する。図-8に,解析で得られた平均応力-平均ひずみ関係を示す。既往の研究^{5,6,7}で報告されているよう





図-10 残存強度の算定と破壊の判定方法

に,ひずみ速度の増加とともに,ピーク時の応力,ひず みが増加する結果が得られた。

図-9に、ひずみ速度とピーク時の応力(=圧縮強度) との関係を、Jingyao ら⁵、Li ら⁶、Shraddhakar ら⁷⁾の実 験結果とともに示す。ただし、応力は、40 [mic/sec]時の 値で正規化している。実験と同様に、強度がひずみ速度 の対数倍に比例する結果が得られた。

以上から,本解析モデルは高ひずみ速度域に対しても 適用可能であるといえる。

5. 疲労解析

5.1 概要

第2章で行ったモルタルの疲労試験に対する破壊シ ミュレーションを行い,解析モデルの妥当性を検証する とともに,損傷過程の評価を行う。

解析に用いたモルタルモデルおよび配合,養生期間の 入力値は,前節の単調載荷解析と同様のものを用いた。

作用荷重は,上限応力が前節で行った40[mic/sec]条件 下におけるピーク時応力の90%(26.1x0.9=23.5 [MPa]),下 限応力が0,載荷速度1[Hz]のサイン波とした。

5.2 残存強度の算定および破壊の判定方法

本研究では,残存強度の変化を逐次求めることによっ て,疲労荷重下における損傷過程の評価および破壊の判 定を行う。図-10に,その概念図を示す。

疲労解析で,モルタルが完全除荷された点(図の A 点)

において、一旦、解析中のすべてのデータを保存し、擬 似単調載荷解析を行う(図の太線)。この擬似単調載荷 は、疲労載荷に準じた載荷速度で行う。具体的には、疲 労載荷における応力振幅と初期載荷で得られたモルタ ルの弾性係数から、これに対応するひずみ速度を算定し、 擬似単調載荷の載荷速度として与えた。擬似単調載荷で 得られるピーク時応力 P_{max}は、A 点での残存強度に相当 する。このとき、残存強度が作用応力を上回っていたな らば、"未破壊"と判定し、A 点で保存したデータを呼び 出し、疲労解析を再開する。その後、一定サイクルを経 た B 点において、擬似単調載荷で得たピーク時応力が作 用応力を下回ったならば、"破壊"と判定し、すべての 解析を終了する。本研究では、この擬似単調載荷を全疲 労サイクル毎に行う。

5.3 解析結果と考察

(1) 疲労寿命

本解析では、443 サイクル目における擬似単調載荷に おいて残存強度が作用応力を下回り、破壊と判定した。 すなわち、本解析で得られた疲労寿命は443 サイクルで ある。第2章で示した実験結果と比較すると、解析で得 られた疲労寿命は約 1/2 程度となった。前述した、ひび 割れ伝播速度を支配する係数 *c*,を定めるためのパラメト リック解析をさらに多く実施し、より適切な値を定める ことで、その精度は高まると考えられる。

(2) 破壊領域の応カーひずみー時間関係

図-7のA-B間およびB-C間の長さ変化を調べたところ,B-C間のみが破壊まで変形し続けた。すなわち,第2章で示した実験結果と同様に,本解析においても破壊の局所化が下部に認められた。そこで,B-C間およびD-E間の相対長さ変化をそれぞれ,本解析における破壊領域の荷重軸方向ひずみ,荷重軸直角方向ひずみとした。

図-11に,解析で得られた破壊領域における応カ-ひずみ関係を示す。解析で得られた応カ-ひずみ曲線の 形状は,実験結果と同様,載荷回数に伴う内部剛性の減 少,非線形性の増加を示している。また,荷重軸方向ひ ずみと荷重軸直角方向ひずみの関係も,実験結果と同様 に,載荷初期では荷重軸方向ひずみが大きいが,破壊が



図-11 破壊領域における応カーひずみ関係(疲労解析)



進行するに従って荷重軸直角方向ひずみが大きくなる 傾向が得られた。

図-12に、解析で得られた破壊領域におけるひずみ ー時間関係を示す。ひずみの時間変化は、第2章で示し た実験結果と同様に、初めほぼ直線的に増加した後、破 壊点付近で加速度的に増加し、破壊に至っている。

以上から、本解析モデルは、疲労荷重を受けるモルタ ルの変形性状を良好に表現できるといえよう。

(2) 残存強度の経時変化

図-10に示した方法を用いて得られた,載荷回数と 残存強度との関係を図-13に示す。残存強度は,疲労 寿命の1/2の載荷回数付近まで緩やかな低下を示した後, 徐々にその低下速度を早め,破壊直前で急激に低下して 作用上限応力を下回り,破壊点に達している。このこと から,残存強度が材料の損傷を表す指標であるとすれば, 疲労荷重下においてモルタルに生じる累積損傷は載荷 回数に対して線形ではなく,ある地点から二次関数的に 増加するものと考えられる。なお,載荷回数380付近で 残存強度が一時的に低下しているが,その原因について は現在のところ不明であり,今後の検討課題である。

6. 結論

本研究により、以下の結論が得られた。

(1) 擬塑性モデルをダッシュポット要素に,経路依存型 モデルをスライダー要素に適用した4成分系力学 モデルを用いた RBSM 解析によって,高ひずみ速度 域におけるモルタルの強度増加,疲労性状を適切に 表現できる。



(2) 擬似単調載荷を用いた手法により、疲労荷重を受けるモルタルが破壊に至るまでの残存強度変化を求めた。その結果、モルタルに生じる累積損傷は載荷回数に対して線形とはならず、ある地点から二次関数的に増加することが解析的に示された。

参考文献

- 松本浩嗣,佐藤靖彦,上田多門:剛体バネモデルに よる持続および繰り返し荷重を受けるモルタルの 時間依存破壊解析,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.811-816, 2007
- 松下博通,牧角龍憲:繰返し圧縮応力を受けるコン クリートの変形性状,コンクリート工学年次論文集, Vol.1, pp.77-80, 1979
- 六車熙, 富永恵: Repeated Over-Load を受けるコン クリートの力学的性質の履歴現象について, 材料, 日本材料学会, Vol.19, No.200, pp.1-10, 1970
- Koji MATSUMOTO, Yasuhiko SATO and Tamon UEDA: Fatigue Behavior of Concrete under High Stress Level, *Proceedings of JSCE Hokkaido chapter*, Vol.61, V-35, 2005
- Jingyao Cao and D.D.L. Chung: Effect of strain rate on cement mortar under compression, studied by electrical resistivity measurement, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp.817-819, 2002
- Li Zhaoxia and Huang Yaoping: Effect of Strain Rate on the Compressive Strength Surface Cracking and Failure Mode of Mortar, *ACI Material Journal*, Vol.95, No.5, pp.512-518, 1998
- Shraddhakar Harsh, Zhenjia Shen and David Darwin: Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression, *ACI Material Journal*, Vol.87, No.5, pp.508-516, 1990