

変動繰返し荷重下におけるコンクリート角柱供試体のメソスケール解析

パシフィックコンサルタンツ株式会社 雨宮 和弘

1. はじめに

現在、疲労に対する設計基準は、 $S-N$ 曲線と線形累積損傷則に基づいて疲労寿命を算出することにより行われている。これらの方法では疲労による変形、ひび割れ分布などの性能指標を評価するには至っていない。本研究は、3次元剛体バネモデルによるメソスケール解析を用いて、疲労荷重を受けるコンクリート供試体の破壊性状の把握、および疲労破壊メカニズムを数値的に再現し、異なる変動荷重を加えた際の線形累積損傷測の適用性を検証した。

2. 解析概要

解析モデル	バネモデル	材料モデル
3次元剛体バネモデル	繰返し応力を考慮したバネ	メソスケールモデル

2.1 3次元剛体バネモデル

本研究では、コンクリートを骨材、モルタル、および界面からなる3相材料として扱い、解析手法には、材料を離散的に扱う手法の一つであるRBSMを用いた。RBSMは、図-1のように対象物を有限個の要素に分割し、要素自身を剛体と仮定し、要素間に分布するバネのエネルギーを評価することで、材料の力学挙動を追跡する方法である。要素境界面上に垂直バネ、せん断バネおよび回転バネからなるバネ系を設け、このバネに蓄えられるエネルギーを評価することによって材料の挙動を予測する。

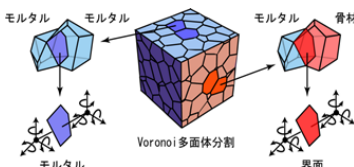


図-1 3次元剛体バネモデル

2.2 繰返し応力を受けるバネのモデル化

本研究では、夏¹⁾や雨宮²⁾の提案した要素間の垂直バネとせん断バネに対して、繰返し応力の影響を消費エネルギーに基づく損傷度に応じて除荷・再負荷時の剛性を変化させることによりモデル化した。

図-2ではせん断応力がせん断強度 τ_f に達するまでの総仕事量を式(1)で求め T とし、せん断応力増加時の仕事量(青い部分)を W とする

$$T = \frac{1}{2} \times \tau_f \times \frac{\tau_f}{G_f} \quad (1)$$

T と W からせん断応力を受けるせん断バネの剛性を低減する係数 F を式(2)から求める。

$$F = 1.0 - \frac{W}{T} \times W_k \quad (2)$$

最後に、せん断バネの弾性係数 G_f に剛性を低減する係数 F を乗じ、下限応力から上限応力に上昇するときの弾性係数を式(3)の G とする。

$$G = F \times G_f \quad (3)$$

また、損傷度を調整するために式(2)では係数 W_k を設定したが、 $W_k = \alpha \times N^\beta$ とし α 、 β を損傷パラメータ、 N は繰返し回数とした。

α 、 β は2要素供試体の解析からMaekawaら³⁾の $S-N$ 曲線と比較することで同定した。

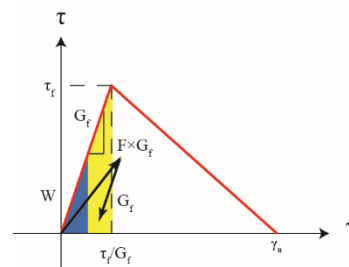


図-2 せん断バネの材料モデル

2.3 コンクリートのメソスケールモデル

解析対象は、隣接する要素がモルタル同士の場合には、バネにモルタルの材料特性を導入し、モルタルと骨材の場合には、界面の特性を導入した。材料特性を表-1に示す。界面の材料特性に関する情報は少ないため、本研究では、単純に、引張強度はモルタルの半分とした。

表-1 材料特性

	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
モルタル	$E_m=20.0$	$f_m=3.5$
骨材	$E_a=60.0$	-
界面	E_m と E_a の重みつき平均	$f_a=1.75$

2.4 解析概要

荷重を与える供試体を図-3に示す。作用荷重は、静的圧縮強度(36.3 N/mm²)に対して上限応力比 90%~60%、下限応力比を 10%とし、応力振幅は 80%~50%とした。

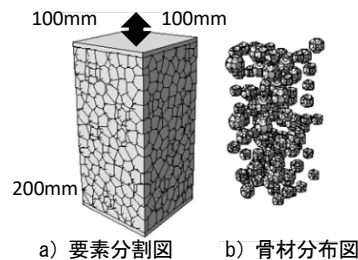


図-3 供試体概要

3. 繰返し荷重による疲労破壊の再現

繰返し応力の影響を考慮した材料バネモデルを用いて、コンクリート角柱供試体に疲労荷重を与え、コンクリートの疲労破壊メカニズムを数値的に再現することを試みた。

3.1 解析結果

(1)平均応力-平均ひずみ関係

図-4は応力振幅の上下限2つの解析ケースにおける平均応力-平均ひ

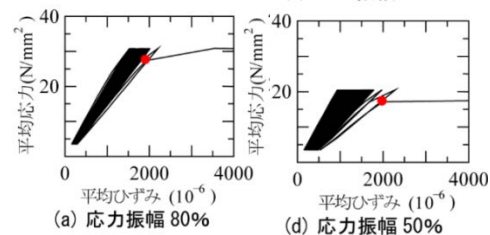


図-4 平均応力-平均ひずみ関係

※ここでは供試体の上端変位を高さと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する。

ずみ関係を示す。2 ケースとも載荷回数に伴う剛性の減少や、下限応力時の残留変位の増大を表現することができた。疲労破壊に至るまでの変位はほぼ同様の値となった。

(2)内部損傷断面図

応力振幅の上下限 2つの内部損傷断面図を図-5に示す。赤い領域が骨材、黒い線がひび割れを表している。疲労破壊の内部損傷断面図から、一軸圧縮破壊とは異なり、供試体全体にひび割れが発生して破壊に至ることが分かる。界面から発生したひび割れがモルタルに進展し、モルタル全体に微細なひび割れが生じて破壊した。ひび割れ

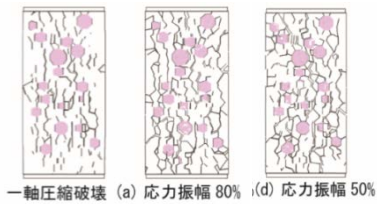


図-5 内部損傷断面図

び割れは、一軸圧縮破壊の軸方向のひび割れと異なり、方向性を持たないことが確認できる。

(3) S-N曲線

疲労解析によって得られた応力振幅 S と繰返し回数 N の関係を表した S-N 図を Maekawa らの解析結果、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾と比較したものを図-6に示す。2要素供試体により同定した損傷パラメータを用いて、コンクリート供試体の S-N 曲線を再現することができた。多要素数での解析結果でも、Maekawa らの解析結果に近い傾向を示した。

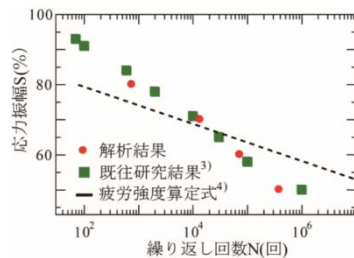


図-6 応力振幅—繰返し回数関係

4. 変動繰返し荷重下での線形累積損傷測の適用性

4.1 解析概要

異なる変動荷重の組み合わせを受ける場合の疲労寿命評価である線形累積損傷測の適用性を検討するために応力振幅 90%と 85%に変動させた疲労解析を行った。解析ケースを表-2に示し、累積損傷度 D は式(4)のように算出した。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

ここで、 D : 累積損傷度、 n_i : 応力範囲 $\Delta\sigma_i$ が作用した回数、 N_i : 疲労設計曲線における応力範囲における応力範囲に対する寿命(一定繰返し応力範囲 $\Delta\sigma_i$ が作用したときの寿命に相当する繰返し数)である。

4.2 累積損傷度の解析結果

表-2に示したように、F8590、F9085ともに破壊時の累積損傷度は $D < 1$ となった。しかし、先行応力が大きい F9085 の累積損傷度 D は 1に近い値で疲労破壊しているのに対し、

先行応力の小さい F8590 は F9085 より小さい累積損傷度で破壊している。同様の条件である応力振幅を与えた解析結果⁵⁾の累積損傷度 D も表-2に示すが、先行応力が大きい場合にマイナー則が疲労寿命を過大評価する傾向にあることを示している。このことから、本解析では先行応力が小さい場合にマイナー則が疲労寿命を過大評価する傾向にある可能性を示しており、既往の研究と相違があった。

表-2 マイナー則の適用性を検討する解析ケース

解析ケース	荷重パターン	繰返し回数(回)	メソスケール解析の D	既往解析 ⁵⁾ の D
F90	静的強度の 90% 応力振幅	25	1	1
F85	静的強度の 85% 応力振幅	54	1	1
F8590	F85 で $D = 0.5$ 後、F90 で一定	29 (27+2)	0.58	1.39
F9085	F90 で $D = 0.5$ 後、F85 で一定	36 (12+24)	0.92	0.83

5. まとめ

- (1) メソスケール疲労解析より得られた平均応力-平均ひずみ関係は、繰返し応力による剛性の減少や残留変位の増大といった疲労破壊の特徴を表現できており、2要素モデルで同定した損傷パラメータを用いることで、コンクリート角柱供試体の疲労破壊の損傷を表現することが可能となった。
- (2) 供試体内部の損傷状況から、供試体内に発生するひび割れは方向性を持たず、微細なひび割れが供試体全体に進展し破壊に至ることが分かった。
- (3) 線形累積被害則に関する検討では、解析の結果と既往の研究との相違があり、疲労実験の結果と比較するなど今後更なる検討が必要である

参考文献

- 1) 夏氷欣: 疲労荷重を受けるコンクリート角柱供試体のメソスケール解析, 山梨大学卒業論文, 2014
- 2) 雨宮和弘: コンクリート角柱供試体のメソスケール疲労解析, 山梨大学卒業論文, 2015
- 3) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: Multi-scale modeling of structural concrete, Taylor & Francis, Inc., pp459-468, 2009
- 4) (社)土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編: 標準], pp.213, 2012
- 5) 古内仁, 中村拓郎, 松本浩嗣: 鉄筋コンクリート構造の疲労破壊 —破壊機構と性能評価の将来像を探る—, コンクリート技術シリーズ, 109, 土木学会, pp72-77, 2015.9