

コンクリートの微視的な破壊進展挙動の再現に関する基礎的研究

茨城大学 学生会員 ○ 増田 開
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリート内で生じたひび割れは、骨材の介在により伝達、阻止および分散を繰り返すことで、破壊進行領域を形成し、局所化した後、巨視的なひび割れへと発展する。このような一連のひび割れ発生・進展挙動は非常に複雑なため正確に再現した例はない。また、ひび割れ発生・進展挙動は粗骨材の介在により生じる応力集中が主な原因であると考えられてきた。しかし、近年の研究より粗骨材周辺には、遷移帯、潜在ひび割れなどの力学的弱部の存在が実験により示された^{1) 2)}。

そこで本研究では、コンクリートの破壊力学を考慮した損傷モデルを用いて、ひび割れ進展挙動を再現し、破壊進展機構の特性を明確にすることを目的とする。また、その過程で応力集中のみを評価対象にしたモルタル-骨材の二相モデルと力学的弱部を評価対象に加えたモルタル-骨材-界面の三相モデルを比較することで弱部を定義する必要性について検討する。

2. コンクリートの破壊力学を考慮した損傷モデル

2.1 応力-ひずみ関係式

損傷モデル³⁾は、破壊面における結合力を応力により判定しており、損傷係数 D を用いた次式で表される。

$$\sigma = (1 - D)c : \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソル、 D は損傷係数である。

2.2 等価ひずみ

多次元モデルにおいて、テンソルで表されるひずみをスカラーである等価ひずみに次式で変換して用いる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1 \right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (2)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひずみテンソルの第1不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第2不変量である。

2.3 損傷係数

損傷の度合いを示す損傷係数 $D(\kappa)$ は、変形履歴における等価ひずみの最大値 κ を用いた次式で表される。

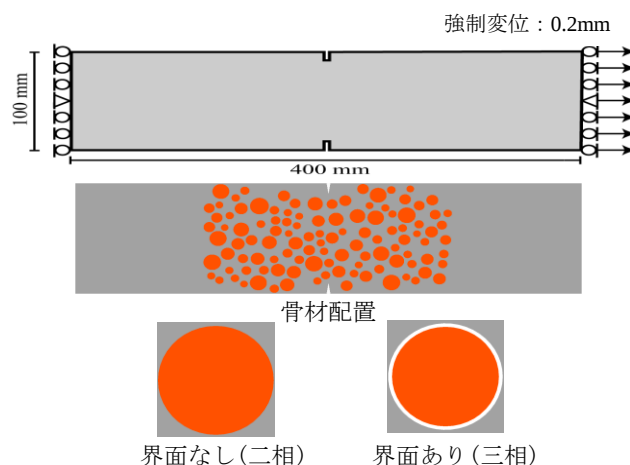


図-1 解析モデル

表-1 材料パラメータ

	モルタル	骨材	界面
ヤング率 E	20 GPa	60 GPa	20 GPa
ポアソン比 ν	0.2	0.2	0.2
圧縮引張強度比 k	10	10	10
破壊発生ひずみ κ_0	2.5×10^{-4}	-	2.0×10^{-4}
破壊エネルギー G_f	0.09 N/mm	-	0.22 N/mm

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp \left[- \frac{E \kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0) \right] \quad (3)$$

ここで κ_0 は破壊発生ひずみ、 G_f は破壊エネルギー、 h_e は要素長さである。

3. 数値解析および実験結果との比較

3.1 解析条件

本研究で使用した二次元の二相モデルおよび三相モデルを図-1に示し、使用したパラメータを表-1に示す。ここで本研究では、粗骨材の最大粒径を 15 mm とし、切欠きから左右に 100 mm の範囲でモルタルの面積:粗骨材の面積が 3:2 になるように粗骨材を配置している。また、粗骨材は破壊しないものと仮定した。

界面に関しては、界面幅を 0.5 mm とし、破壊発生ひずみをモルタルの 80 % とすることで、力学的弱部を表現した。また、破壊エネルギーは骨材の機械的かみ合わせなどの影響を考慮した値とした。

切欠きは、深さ 10 mm、幅 3 mm とした。また、解析モデルには三角形要素を用い、節点数 25660、要素数 50836 である。

キーワード ひび割れ、コンクリート、微視構造、損傷モデル

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部 TEL. 0294-38-5004 FAX. 0294-38-52

3.2 解析結果

図-2 に二相モデルと三相モデルの 100~120/500step における等価ひずみの可視化によるひび割れ進展挙動と 120/500step における損傷分布を示す。なお、示した図はひび割れ進展挙動や損傷箇所を十分に評価できる切欠きを中心とした 100 mm の範囲である。

はじめに 100/500step において、両モデルとも切欠き先端よりひび割れが発生しており、そのひび割れは粗骨材を避けて進行している。加えて、三相モデルでは、粒径が大きな粗骨材周辺に微細なひび割れの発生が確認できる。次に、110/500step において、二相モデルでは切欠きから進展したひび割れが粗骨材を迂回しながら進展しているのに対して、三相モデルでは切欠きから進展したひび割れ以外にも、粗骨材周辺で発生していた微細ひび割れが連結することによりある程度の長さを持ったひび割れに発展している事が確認できる。最終的に 120/500step において、二相モデルでは局所化し、一本の巨視的なひび割れに成長していることから、ひび割れの開口の挙動は示せている。しかし、閉口の挙動はあまり明瞭でない。一方、三相モデルでは、局所化による開口の挙動に加えて 110/500step で存在していた微細ひび割れの分布が確認できなくなっていることから、閉口の挙動も示せている。また、図-3 をみると、広い範囲に損傷が生じていることが確認できる。しかし、ひび割れ進展挙動には表れていないため、この損傷の広がりには破壊進行領域と判断できる。

3.3 実験結果との比較

秋田らによる実験⁴⁾と数値解析により得られた荷重-変位関係を図-3 に示す。実験値と二相モデル、三相モデルを比較した際、二相モデルは、剛性は一致したが、強度や軟化勾配に差異が認められた。三相モデルは、剛性および強度は一致しており、軟化勾配は多少の差異はあるものの骨材の配置や形状により軟化勾配は変動することから許容できる範囲であると考えられる。以上より、三相モデルの方がより実験結果に近い結果を示すことができ、この解析の妥当性を示すことができた。

4. おわりに

本研究では、コンクリートの破壊力学を考慮した損傷モデルを用い、遷移帯や潜在ひび割れなどの力学的弱部を界面として定義した三相モデルの数値解析を行うことで、ひび割れの発生から進展、局所化までの一連の挙動を再現することに成功した。

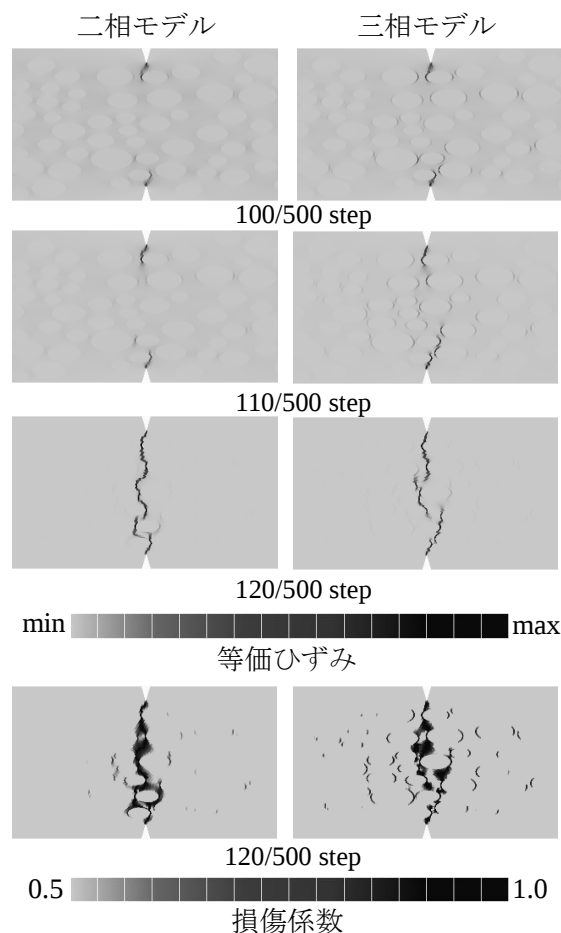


図-2 ひび割れ進展挙動と損傷分布

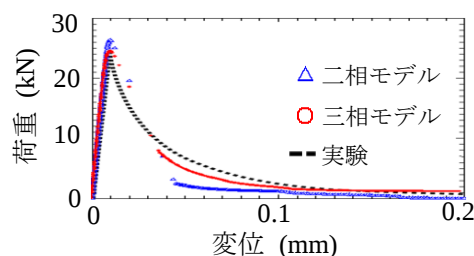


図-3 荷重-変位関係

参考文献

- 1) 小野貴史, 大下英吉: 破壊エネルギーの局所化を考慮した骨材・セメントペースト・遷移帯の3連力学モデルの構築に関する研究, 中央大学理工学研究所論文集, 第11号, 2005.
- 2) 中本純次, 正木亮, 高木啓太: コンクリートの乾燥収縮性におよぼす粗骨材の影響, 日本材料学会, Vol.61, No.10, pp819-824, 2012
- 3) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, JSCES, No.20130015, 2013.
- 4) 秋田宏, 小出英夫, 三橋博三: コンクリートの直接引張試験における4つの誤解, コンクリート工学論文集, 第16巻第1号, 2005.