

論文 微細な損傷を有するコンクリート円柱供試体の圧縮破壊特性に関する解析的研究

大垣 志穂*1・斉藤 成彦*2・渡辺 忠朋*3

要旨: アルカリシリカ反応や凍害等では、コンクリート内に発生した多数の微細なひび割れがコンクリートの圧縮破壊特性に影響を及ぼす。材料劣化の生じたコンクリート構造物の構造性能を評価するためには、これらの微細な損傷がコンクリートの力学特性に及ぼす影響を定量化することが求められる。本研究では、微細な損傷を有するコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験のメソスケール解析を実施し、モルタルの損傷、骨材界面の損傷、および骨材内部の損傷が圧縮強度や弾性係数に与える影響について明らかにした。

キーワード: 損傷、不連続面、圧縮強度、メソスケール解析、剛体バネモデル

1. はじめに

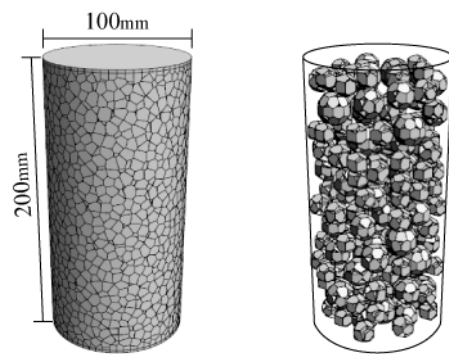
有限要素法に代表される非線形数値解析手法を用いて材料劣化の生じたコンクリート構造物の構造性能を定量的に評価するためには、損傷が生じたコンクリートの力学特性を定量的にモデル化する必要がある。例えば、アルカリシリカ反応や凍害等が生じたコンクリートでは、コンクリート内に多数発生した微細なひび割れが強度や弾性係数の低下を引き起こすことが知られている。しかしながら、促進劣化試験等では材料劣化の状態や程度を制御することが難しく、材料損傷と力学特性の関係を定量的に評価することは困難な場合が多い。

著者ら¹⁾は、数値解析を用いて微細な損傷を有するコンクリート円柱供試体の一軸圧縮破壊特性について検討を行った。予め微細なひび割れを不連続面としてモルタル中に導入し、損傷率と圧縮強度や弾性係数の低下との関係について調べた。解析には、コンクリートを骨材、モルタル、モルタル-骨材界面からなる三相材料としてモデル化するメソスケール解析を適用した。メソスケール解析は、メソスケール（骨材粒レベル）での比較的簡易な力学モデルにより、マクロスケールでのコンクリートの平均的な力学挙動を再現しようとするもので、コンクリート供試体に対して多くの実績がある²⁾³⁾⁴⁾。メソスケール解析の結果より、モルタル中に導入した不連続面の量が増えるにつれて、圧縮強度や弾性係数が低下することが確認できた。また、打設時にラミネート片を混入することで不連続面を模擬したコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を実施し、解析と同様の傾向を示すことが確認された。本研究では既往の研究¹⁾を進展させ、モルタル損傷の導入範囲の影響について検討するとともに、モルタル-骨材界面に導入した損傷の影響、および骨材

内部に導入した損傷がコンクリート円柱供試体の圧縮破壊特性に及ぼす影響について、解析的に検討を行った。

2. 解析手法

解析対象は、図-1に示す直径 100mm、高さ 200mm のコンクリート円柱供試体で、Voronoi 分割を適用した 3 次元剛体バネモデルによりモデル化した。剛体バネモデルは材料を離散的に扱う解析手法の一つであり、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。各要素には 3 次元剛体変位の 6 自由度を配置し、要素境界面上に垂直バネ、せん断バネ、回転バネからなるバネ系を設け、対象とする材料の特性を導入し、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。剛体バネモデルは、要素間のすべりやひび割れ等の不連続現象を比較的容易に表現できるが、ひび割れが要素境界面に沿って発生するため、ひび割れの進展が要素分割に大きく依存する。



a) 要素分割図 b) 骨材分布図
図-1 コンクリート円柱供試体概要

*1 山梨大学大学院 医工農学総合教育部工学専攻土木環境工学コース (学生会員)

*2 山梨大学大学院 総合研究部教授 博士(工学) (正会員)

*3 北武コンサルタント(株) 取締役副社長 博士(工学) (正会員)

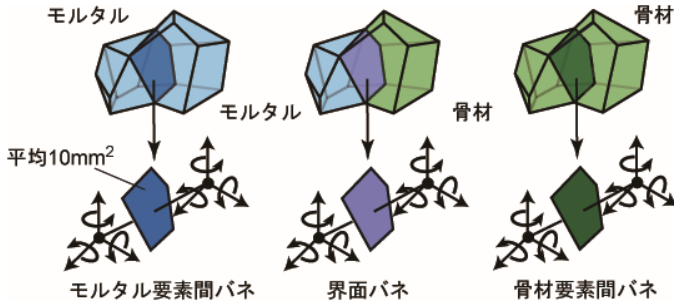


図-2 バネのモデル化

表-1 バネの材料特性

	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	破壊エネルギー (N/m)
モルタル	$E_m = 20.0$	3.0	100.0
骨材	$E_a = 60.0$	-	-
界面	E_m と E_a の 重み付き平均	1.5	10.0

そこで、計算幾何学の概念である Voronoi 多面体を用いてランダムな要素分割を施すことで、ひび割れの要素依存性を低減した。コンクリート供試体は、モルタル要素間バネ、骨材要素間バネ、モルタル要素-骨材要素間(界面)バネによる3相材料としてモデル化した(図-2)。メソスケール解析を用いることで、モルタルや界面に発生する微細なひび割れの進展を表現することができる。既往の研究⁴⁾に基づき、図-3に示すように、垂直バネには破壊エネルギーを用いた引張軟化1/4モデルを導入し、圧縮応力下では破壊は生じないものとした。また、せん断バネにはモール・クーロン型の破壊基準を導入し、せん断すべり破壊を考慮した。回転バネは、垂直バネが引張強度に達した時に応力を開放し、その後のバネ剛性を0とした。なお、図中の f_t は引張強度で、 ϵ_1 、 ϵ_2 は破壊エネルギーより算出でき、 $c = 2.0f_t$ 、 $\phi = 37^\circ$ である。バネの材料特性を表-1に示す。供試体内には、粒径12mm以上(最大寸法20mm)の粗骨材をランダムに生成して、体積比で30%を配置することでモデル化した。圧縮破壊解析は、載荷板の回転を拘束した変位制御により行い、載荷板とコンクリート供試体の間には摩擦を考慮した。

3. モルタルの損傷の影響

3.1 既往の研究の再評価

既往の研究¹⁾では、コンクリート円柱供試体を用いてコンクリート内部に生じたひび割れが圧縮破壊特性に与える影響について検討するため、予め比較的微細な不連続面を一定量導入した円柱供試体の解析を行った。解析対象は、図-1に示す直径100mm、高さ200mmのコン

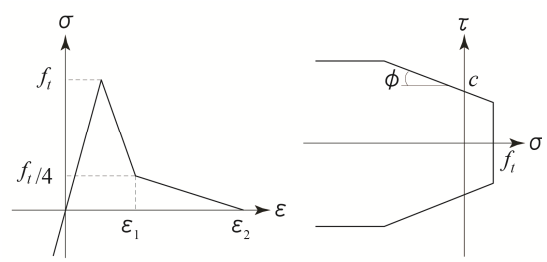


図-3 バネの応力-ひずみ関係

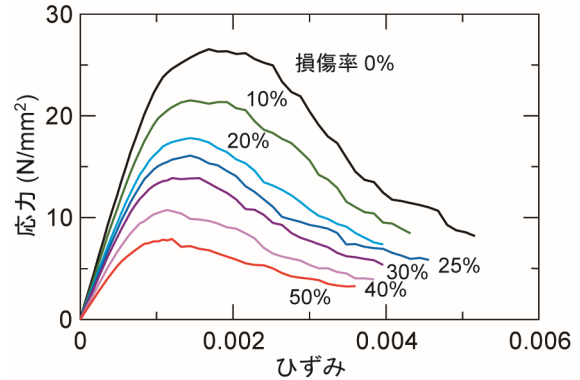


図-4 応力-ひずみ関係¹⁾

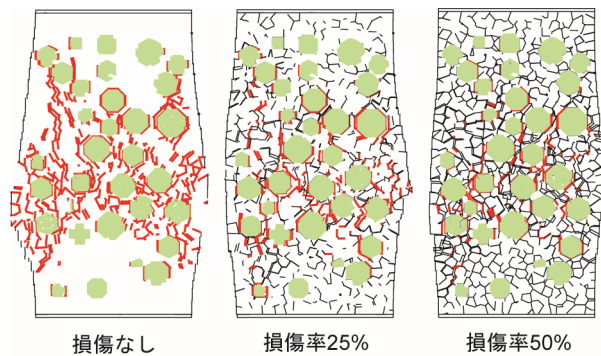


図-5 ひび割れ性状(最大応力後50%)¹⁾

クリート円柱供試体を用い、予め一定数のモルタル要素間バネを取り除くことにより不連続面を導入した。その際、予め導入する微細な不連続面を定量的に扱うため、モルタル要素間バネの面積(平均10mm²)を用いて損傷率を定義した。すなわち、解析に用いた円柱供試体モデルのモルタル要素間バネの総面積(約 5×10^5 mm²)を基準とし、損傷率に値するバネをランダムに抽出して取り除くことにより不連続面を生成した。

解析より得られた応力-ひずみ関係を図-4に示す。いずれの供試体も最大応力に達した後、ひずみの増大とともに応力が低下しており、圧縮応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係をよく表している。また、モルタル要素間バネの損傷率が増加するにつれて、最大応力と弾性係数の低下が見られる。

損傷率25%および50%の供試体について、最大応力の50%まで応力が低下した時点でのひび割れ性状を図-5に示す。損傷率25%および50%の供試体は、予め導入し

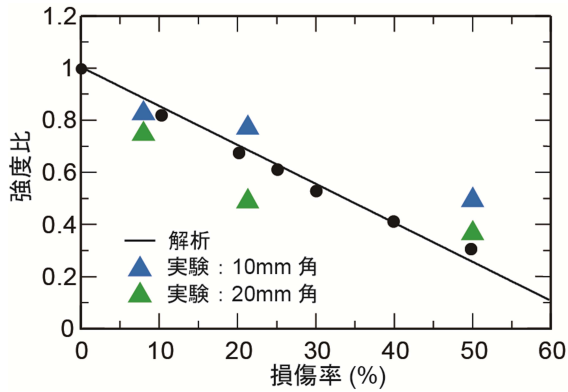


図-6 強度比-損傷率関係

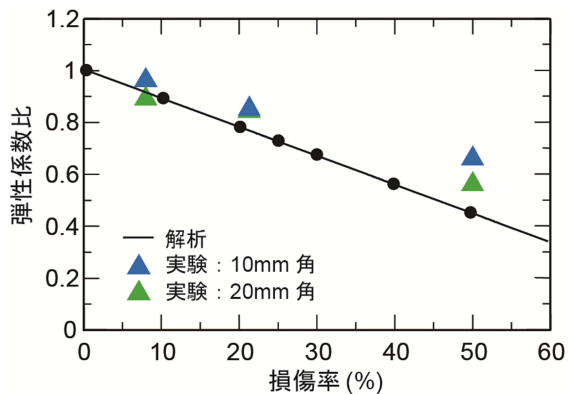


図-7 弾性係数比-損傷率関係

表-2 供試体諸元

試験体名	損傷率 (%)	ラミネート片 (mm)
D0	0	—
D8L10	8	10×10
D8L20		20×20
D21L10	21	10×10
D21L20		20×20
D50L10	50	10×10
D50L20		20×20

た不連続面（黒色）と荷重により生じた新たなひび割れ（赤色）が連結することにより破壊に至っている。また、損傷率が大きくなるにつれて、応力伝達のない不連続面が広く分布することにより、供試体の体積膨張が小さくなっていることがわかる。

図-6 および図-7 に、損傷のない供試体で正規化した強度および弾性係数と損傷率との関係を示す。図中の直線は近似直線である。不連続面を導入した供試体の強度および弾性係数は、損傷率の増加とともに、ほぼ線形的に低下していることが確認できる。また、弾性係数の低下率は強度のものより小さい。これより、モルタルの損傷はコンクリート供試体を破壊に至らしめるひび割れの形成に直接関与することから、強度への影響が大きかったものと考えられる。

既往の研究では、打設時にラミネート片を混入するこ

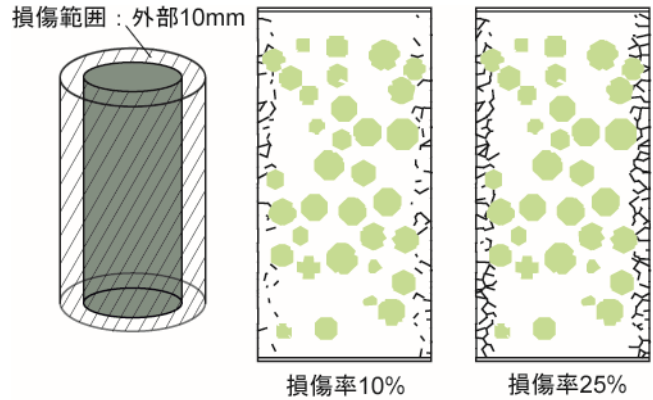


図-8 外部損傷（外部 10mm）の解析モデル

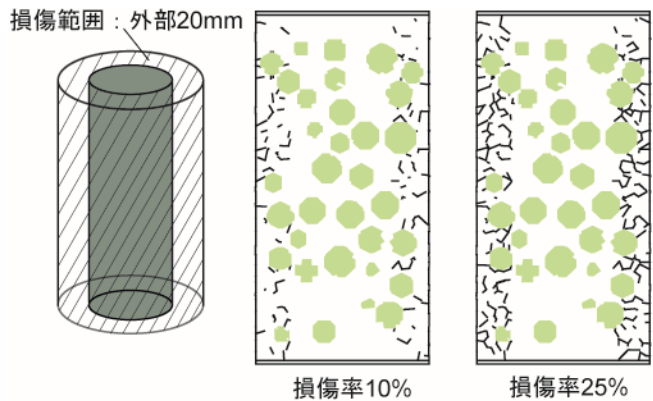


図-9 外部損傷（外部 20mm）の解析モデル

とで不連続面を模擬したコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を実施し、解析結果の妥当性を検証している¹⁾。既往の実験では、損傷率と強度および弾性係数との関係は、解析結果と同様の傾向を示すことが確認されたが、ラミネート片の混入量の算定を低く見積もっていたため、再度実験を行った。実験では、損傷率の異なる4種類の供試体を作成した（表-2）。実験より得られた強度比および弾性係数比と損傷率との関係を図-6 および図-7 に示す。解析での不連続面にはせん断抵抗がないのに対し、本実験での不連続面には、比較的平滑なポリエステル製ラミネートを使用したため、実験結果にはばらつきがあるものの、解析結果と同様の傾向を示していることが分かった。このことから、微細な不連続面を導入した解析は、実際の現象を比較的好く表していることが確認できた。

3.2 損傷範囲の影響

前節の解析は、モルタル損傷を円柱供試体の全域にわたって平均的に導入した場合について検討を行ったものである。そこで、供試体外周部分と供試体内部に損傷の範囲を限定することで、損傷範囲が供試体の力学特性に与える影響について検討を行った。外部損傷は表面から深さ 10mm, 20mm, 内部損傷は中心から半径 40mm の範囲に損傷を導入し、損傷率の異なる数種類の供試体につ

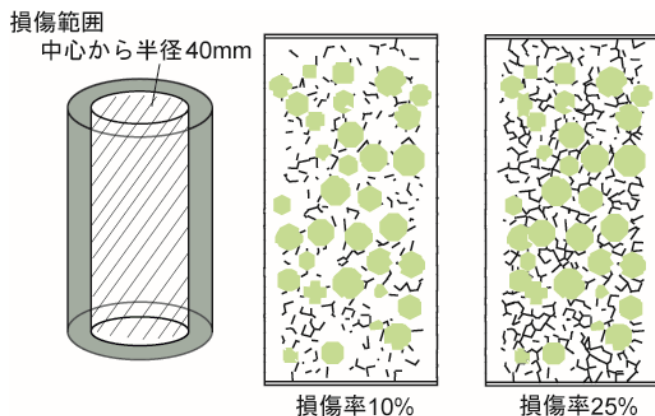


図-10 内部損傷の解析モデル

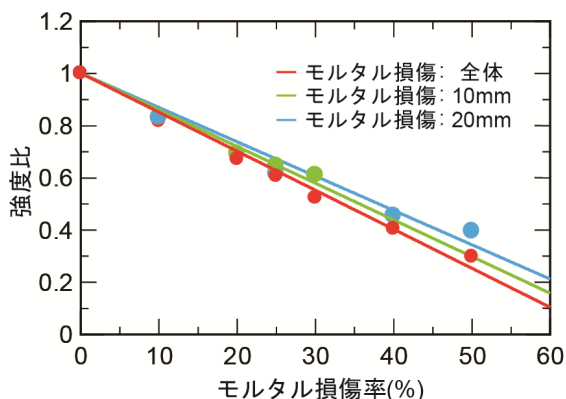


図-11 強度比-損傷率関係 (外部損傷)

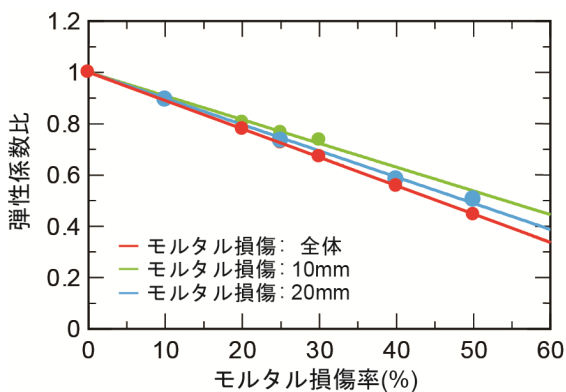


図-12 弾性係数比-損傷率関係 (外部損傷)

いて解析を行った (図-8 から図-10)。なお、外部損傷 20mm と内部損傷 40mm は、同体積の範囲に損傷を導入したことになる。

解析より得られた強度比および弾性係数比と損傷率との関係を図-11 から図-14 に示す。供試体外部に損傷を導入した供試体では、全体に損傷を導入した供試体と比較して強度および弾性係数の低下が若干ではあるが小さくなることが分かった。また、モルタル損傷率が 30% における外部損傷 10mm の強度比 0.61 は、もともと供試体の半径が 40mm しかないとした場合の強度の低下率 0.64 を超える低下を示している。これは、供試体外部に損傷を導入した場合には、供試体の表面に脆弱な (骨材) 界

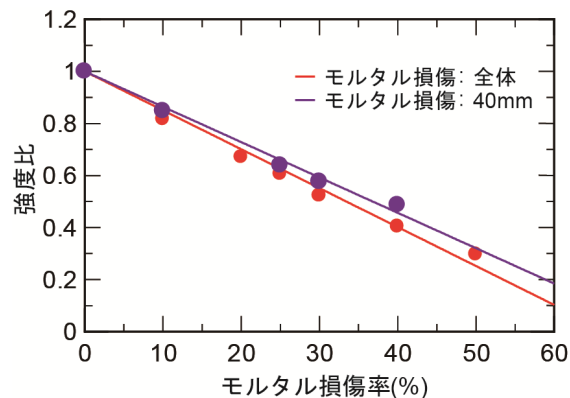


図-13 強度比-損傷率関係 (内部損傷)

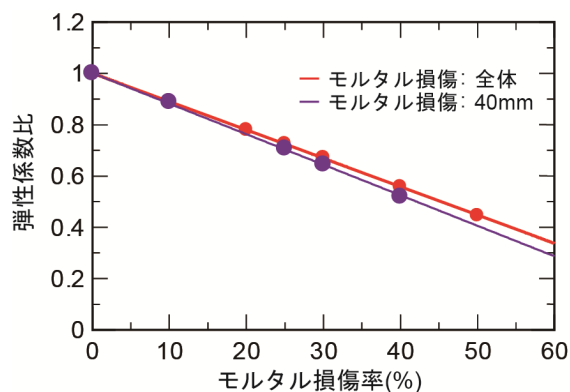


図-14 弾性係数比-損傷率関係 (内部損傷)

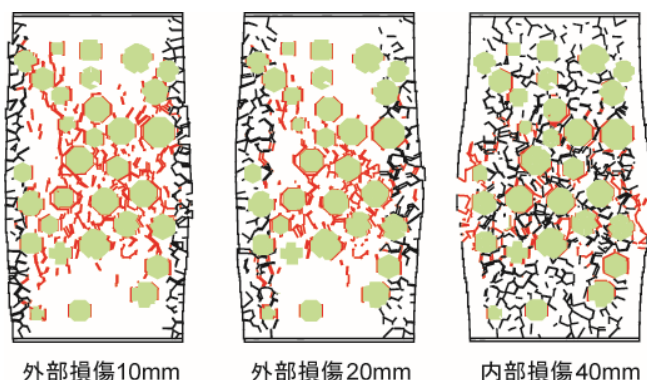


図-15 ひび割れ性状 (最大応力後 80%)

面が露出している供試体を作成したことになるため、破壊が進展しやすく、より大きな強度低下を生じたものと考えられる。

供試体内部に損傷を導入した供試体は、全体に損傷を導入した供試体と比較して強度の低下は小さくなるが、弾性係数については低下が大きくなることが分かった。これらの結果から、モルタルの損傷は供試体内の空間分布によらず損傷率が同じであれば、同程度の強度および弾性係数の低下を生じることが確認された。

損傷率 25% の供試体に対して最大応力後 80% 時のひび割れ性状を図-15 に示す。供試体内部に損傷を導入した供試体では、外周部にひび割れが達するまでに内部の変形が進むため、供試体の膨張が若干大きくなっている

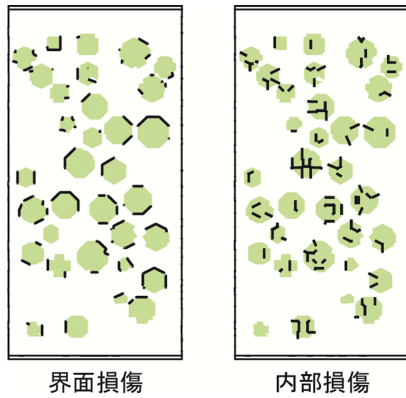


図-16 骨材損傷供試体 (損傷率 25%)

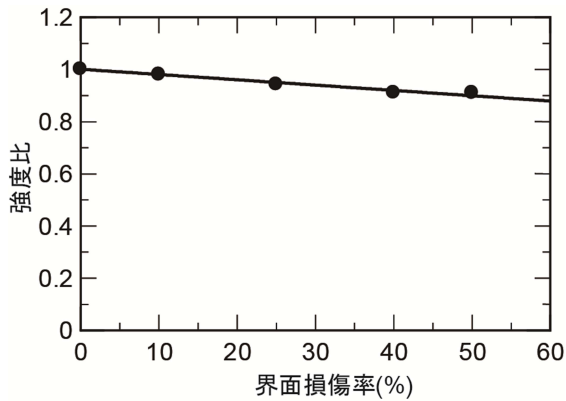


図-17 強度比-損傷率関係

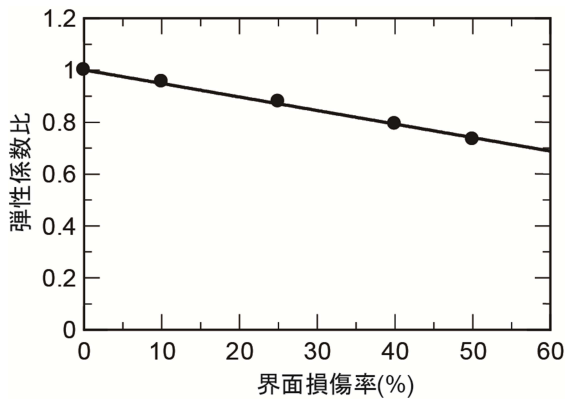


図-18 弾性係数比-損傷率関係

ことが確認できる。

4. 骨材損傷の影響

4.1 モルタル-骨材界面の損傷の影響

前章では、モルタルに導入した損傷の影響について検討を行ったが、本章では骨材に関する損傷がコンクリートの圧縮破壊特性に与える影響について検討を行った。まず、本節ではモルタル-骨材要素間の界面バネの総面積 (約 $1.5 \times 10^5 \text{mm}^2$) を基準とし、設定した損傷率 (界面損傷率と呼ぶ) に達するまで、モルタル-骨材界面バネをランダムに取り除くことで、骨材界面の損傷の影響について調べた。界面損傷を与えた供試体モデルの例を図-16に示す。

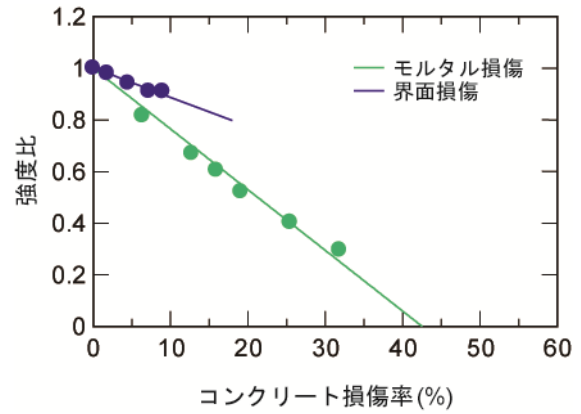


図-19 強度比-損傷率関係

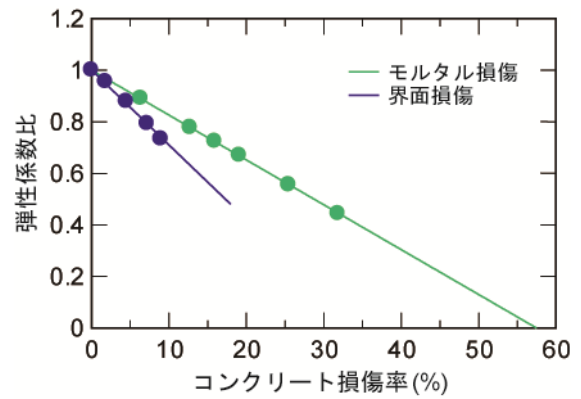


図-20 弾性係数比-損傷率関係

解析より得られた強度比-損傷率関係を図-17に、弾性係数比-損傷率関係を図-18に示す。モルタルに損傷を導入した場合に比べて、骨材界面に損傷を導入した場合には、強度の低下よりも弾性係数の低下が大きいことが確認できる。これは、コンクリートの弾性係数は骨材の弾性係数に大きく依存しているため、界面の損傷によって骨材による抵抗が小さくなったことが原因と考えられる。

モルタルに損傷を与えた場合の結果と骨材界面に損傷を与えた場合の結果について、モルタル要素間バネ、骨材要素間バネ、およびモルタル-骨材要素間バネの総面積 (約 $8.4 \times 10^5 \text{mm}^2$) に対して損傷率 (コンクリート損傷率と呼ぶ) を算定することで、コンクリートの損傷率と強度比および弾性係数比の関係を求めたものを図-19および図-20に示す。これより、モルタルの損傷は強度の低下に、骨材界面の損傷は弾性係数の低下に大きな影響を及ぼすことが確認できる。

4.2 骨材内部の損傷の影響

本節では、骨材の内部に損傷を導入した場合について検討を行った。骨材内部のバネの総面積 (約 $1.4 \times 10^5 \text{mm}^2$) を基準とし、設定した損傷率 (骨材損傷率と呼ぶ) に達するまで、骨材要素間バネを取り除いた。骨材内部に損傷を与えた供試体モデルの例を図-16に示す。

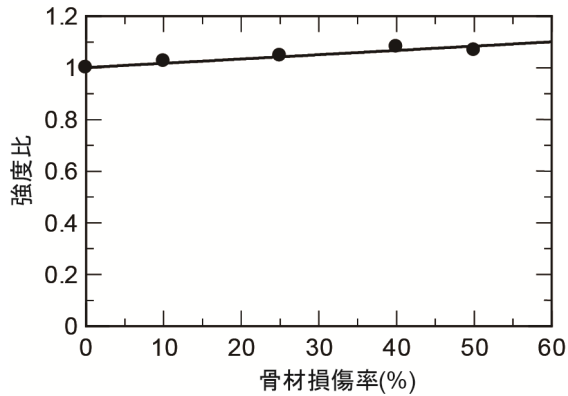


図-21 強度比-損傷率関係

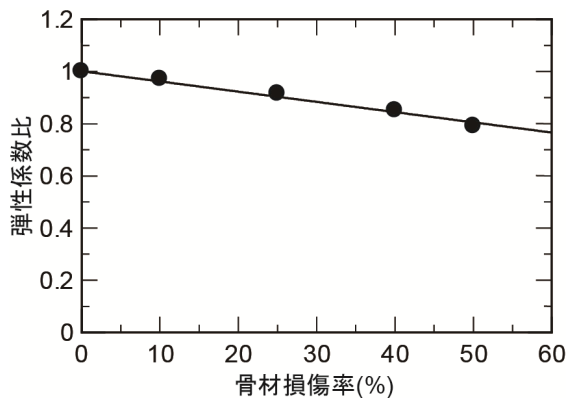


図-22 弾性係数比-損傷率関係

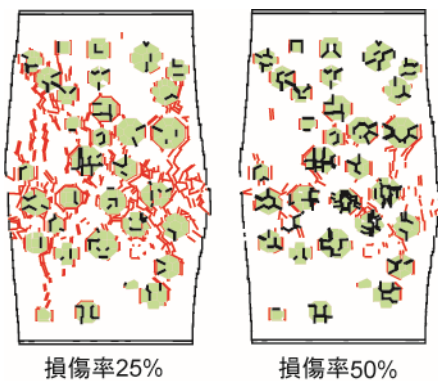


図-23 ひび割れ性状

解析より得られた強度比-損傷率関係を図-21に、弾性係数比-損傷率関係を図-22に示す。骨材に損傷を導入した場合は、損傷率が大きくなるにつれて強度が増加することが確認できる。これは、骨材に損傷がない場合には、強度および弾性係数の大きい骨材がコンクリートに不均一な変形を生じさせることで、界面およびモルタルに微細なひび割れを発生させているためである。一方、骨材が損傷している場合には、コンクリート内の変形が比較的均一になることで、界面やモルタル部分の微細ひび割れの形成が難しくなったと考えられる。つまり、コンクリートからモルタルの挙動に近づいたため、弾性係

数は低下するものの強度は上昇したものと考えられる。図-23に、解析より得られた最大応力後80%時でのひび割れ性状を示す。損傷率が増加するにつれて、骨材内部のひび割れがマクロなひび割れに進展するため、モルタル部分のひび割れが減少していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、コンクリート軸圧縮試験のメソスケール解析により、予め導入した微細な損傷が圧縮破壊特性に与える影響について検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) モルタルの全域に損傷を導入した解析では、モルタル損傷率の増加に伴い圧縮強度および弾性係数が低下し、ラミネート片を用いて予め不連続面を導入した実験結果は、解析結果と同様の傾向を示すことが確認できた。
- (2) モルタル損傷を供試体外周または供試体内部の限られた範囲に導入した結果、供試体内の損傷の空間分布によらず損傷率が同じであれば、同程度の強度および弾性係数の低下が生じることが分かった。
- (3) モルタル-骨材要素間の界面に損傷を導入した結果、弾性係数の低下が大きくなることが分かった。これより、モルタル損傷は強度の低下に、骨材界面の損傷は弾性係数の低下に大きく寄与することが確認できた。
- (4) 骨材内部に損傷を導入した結果、骨材の変形によりコンクリート供試体内の変形が均一化することで、モルタルのひび割れが抑制され、弾性係数は低下するものの強度が若干増加することが確認できた。

参考文献

- 1) 大垣志穂, 斉藤成彦, 渡辺忠朋: 微細な不連続面を有するコンクリート円柱供試体の圧縮破壊特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp85-90, 2017
- 2) Nagai, K., Sato, Y., and Ueda, T.: Three-dimensional meso-scopic analyses of mortar and concrete model by rigid body spring model, FraMCoS-5, Vol.1, pp.353-360, 2004
- 3) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元RBSMによる横拘束コンクリートの1軸圧縮破壊解析, 土木学会論文集E, Vol.66, No.4, pp.433-451, 2010.11
- 4) Saito, S. and Higai, T.: 3D discrete simulations of fracture in concrete specimens, FraMCoS-6, Vol.1, pp.85-91, 2007