

論文 乾燥による内部損傷と母材の強度変化がコンクリートの構造応答に及ぼす影響に関する解析的検討

小川 浩太^{*1}・篠野 宏^{*2}・丸山 一平^{*3}

要旨: コンクリートの乾燥による強度及び剛性低下は多く研究されており, 乾燥による骨材周囲の内部損傷がコンクリートの強度増加・剛性低下に影響を与えることは明らかにされているが, それを数値解析的に検討したものは少ない。本研究では, 3次元 RBSM (剛体バネモデル) を使用した解析により, 極乾燥下における母材モルタルの強度増加を考慮した材料特性値を用いて, 既往の研究から算出したモルタルの収縮量をインプットとした乾燥解析を行った後, 1軸載荷試験解析を行うことで, 既往の実験結果の全体的なトレンドを再現した。

キーワード: 乾燥, 剛体バネモデル, 圧縮強度, ヤング率, 内部損傷, コンクリート

1. はじめに

近年, 環境負荷を低減するため, 建築構造物の長寿命化が望まれている。建築物の健全性評価において, 現時点での性能評価に加え, 継続的に供用を継続した際の性能予測を行い, 必要とする供用期間内で要求性能が満足することを確保することが求められる。コンクリート構造物に対して, 乾燥の影響は多くの構造物の長期間の供用において一般的に作用する要素の一つである一方, 強度および剛性について変化を生じさせることがわかっている¹⁾。

特に強度および剛性の低下については, 従来研究においてモルタルと骨材の体積変化の差に起因して, 骨材周囲に微細な損傷が生ずること, その損傷が強い影響を及ぼすことが明らかになっている。

また, コンクリートの圧縮強度については, この骨材周囲の微細ひび割れとは別に, ペースト自体の乾燥による変質による強度の変化が, 乾燥によるコンクリートの圧縮強度に大きく影響を及ぼすことも明らかになっている。

そこで, 本研究では, モルタル・セメントペーストが収縮した際のコンクリートの構造応答を解析的に評価する手法を確立することを目的とし, 数値解析的にコンクリートに及ぼすモルタルと骨材要素の体積比の差が, コンクリートの圧縮強度試験における強度と剛性に及ぼす影響について再現可能かどうかを, コンクリートをモルタルと粗骨材の二相モデルとした剛体バネモデル²⁾により検討した。加えて, モルタル・セメントペーストの乾燥による物性の変質を与えた時に, 微細ひび割れを考慮して実験で示された強度の増大と剛性の低下を表現でき

るかについても検討を行った。

2. 解析概要

2.1 3次元 RBSM (剛体バネモデル)

Rigid Body Spring network Model (RBSM) とは, 対象とする物体を個別要素に分割した時の各要素を剛体と仮定し, 各要素間に設置したバネにより対象を離散化する手法である²⁾。バネに非線形な構成則を与えることにより, 解析対象の破壊挙動を表現することが可能である。本研究では, ボロノイ分割を解析対象に用いた上で, 図-1に示すように, 要素境界に表面力の評価点として複数の積分点を設け, 積分点1つに対し境界面の接線方向に圧縮力と引張力を負担するバネを一つ, 要素面接線方向にせん断力を負担するばねを要素面の積分点に設置した³⁾。既往の研究では, 要素境界面の重心に回転バネを設けることで曲げモーメントの伝達を表現しているが⁴⁾, 複数の積分点を設けることで回転バネを設けることなく曲げモーメントの伝達を表現可能である。このことから, 垂直バネ・せん断バネの軟化を考慮するだけで, 回転バ

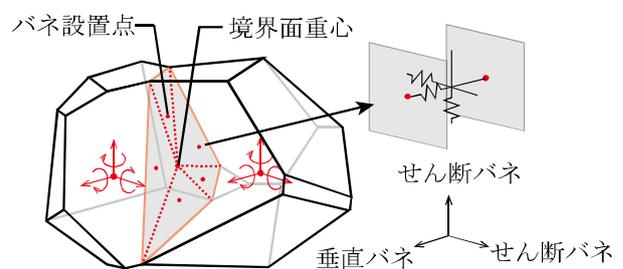


図-1 要素間に設置したばね³⁾

*1 名古屋大学 社会環境工学科 (学生会員)

*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

*3 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授・博士 (工学) (正会員)

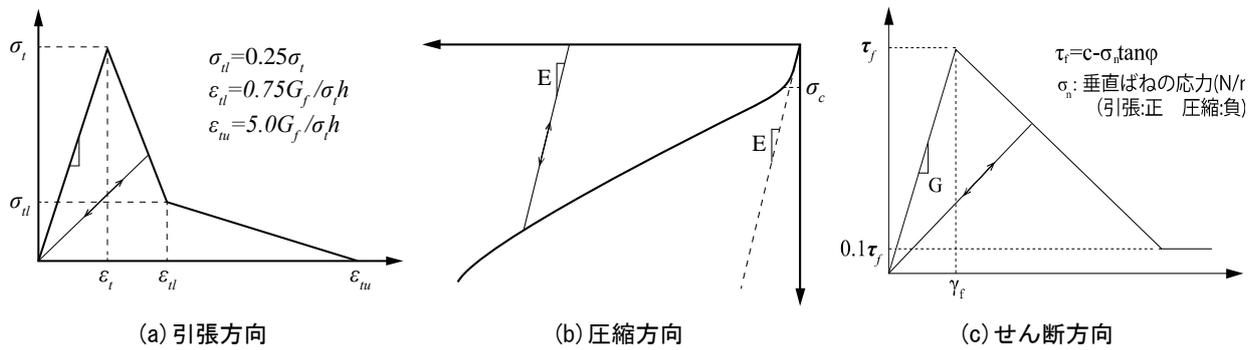


図-2 モルタル・粗骨材要素の材料構成則

表-1 材料の力学的特性

	垂直バネ			
	ヤング率 E*(N/mm ²)	引張強度 Ft*(N/mm ²)	破壊エネルギー Gf*(N/m)	圧縮強度 Fc*(N/mm ²)
モルタル	18	3.5	70	46.7
粗骨材	70	200	—	200
界面	※a	※a	7	46.7

※a 図-3 参照

表-2 材料パラメータ

垂直バネ				せん断バネ		
ヤング率 E(N/mm ²)	引張強度 ft(N/mm ²)	破壊エネルギー Gf(N/m)	圧縮強度 fc(N/mm ²)	粘着力 c(N/mm ²)	内部摩擦角 phi (degree)	eta=G/E(-) (G:せん断剛性)
1.4E*	0.8Ft*	0.5Gf*	1.5Fc*	0.14Fc*	37	0.35

ネの非線形性に相当する挙動を評価できる。

RBSM は不連続な要素を用いる解析であるため、ひび割れなどの要素間が不連続である挙動を比較的簡単に再現できる。そのため、本研究で用いるような円柱試験体の圧縮試験の破壊挙動など、FEM では解析が困難なものも解析可能である。一方で、要素境界面をひび割れ面として扱うため、ひび割れの発生・進展が要素分割の大きさ・配置に大きく影響を受ける等のデメリットも有している。本研究では要素分割依存性を低減するためにポロノイ分割を用いた⁵⁾。

2.2 材料構成則

材料の構成則については、要素をモルタル要素・粗骨材要素・モルタルと粗骨材の界面の3つにモデル化した。また、本研究では十分水和した状態のコンクリートを対象としていると仮定し、载荷中の水和とクリープは影響していない。

(1) モルタル要素・粗骨材要素

図-2 にモルタル要素・粗骨材要素の垂直方向のバネ、

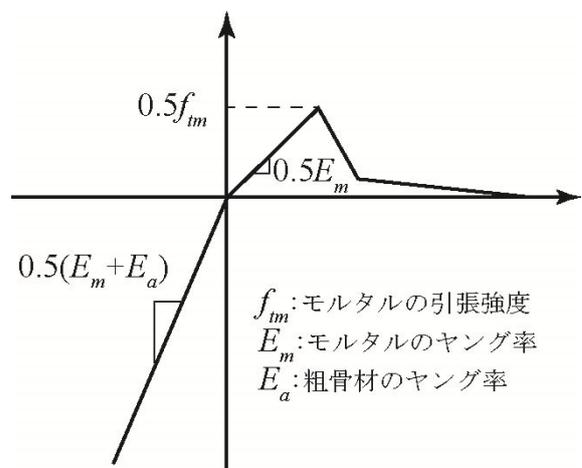


図-3 モルタル・粗骨材要素界面の構成則

接線方向のせん断バネの構成則を示す。また、表にモルタル要素と粗骨材要素に用いた材料の力学的特性を示す。引張の挙動は破壊エネルギーを軟化勾配とした原点指向の1/4引張軟化モデルであり、圧縮の挙動は静水圧試験

の応力-体積ひずみ関係から得られた逆 S 字の曲線でモデル化した。せん断方向の構成則に関しては、既往の研究より、モールクローン型のせん断強度・破壊基準を設定した。尚、図中に使用される記号と表で使用される記号はそれぞれ対応関係にある。

(2) モルタル-粗骨材要素界面

モルタル-粗骨材界面の構成則を図-3 に示す。既往の研究から⁶⁾、骨材界面の特性を評価することは、二相材料としてモデル化した場合に重要な位置付けとなることが明らかになっている。本研究では既往研究の値を参照することとした。引張域のヤング率・引張強度はモルタル要素の値の 0.5 倍、圧縮強度、せん断ばねの構成則はモルタル要素と同値とし、圧縮域のヤング率はモルタル要素と骨材のヤング率の平均値とした。破壊エネルギーは界面に関する情報が少ないため、遷移帯の存在を仮定して 1/10 とした。

(3) 材料パラメータ

既往の研究で示される通り³⁾、RBSM では、力学挙動を仮定したバネと、そのバネで連結された複数の剛体要素の相互作用で巨視的な材料応答を表現している。そのため、実験で得られた物性値がそのままバネの物性値になる訳ではない。よって本研究では、引張・圧縮・静水圧载荷の既往の試験を再現した解析を行い、実験値を解析値が合うように感度解析を行った値を用いることにした。そのパラメータを、表-2 に示す。表中の記号は図-1 と対応しており、*がつく記号が実験値、図-2 に示される斜体の記号がバネの物性値である。

2.3 収縮解析の考え方

本研究では、乾燥収縮に起因するコンクリート中のひび割れの影響を解析するため、2.1 節で示したモルタル要素境界のバネを、収縮ひずみ量に対応した等価接点力を母点に対する垂直バネに与えて収縮させることによってモルタル・セメントペーストの収縮挙動を表現した。骨材中の収縮は生じないものと考え、骨材要素間の要素面に接続されるバネのひずみは 0 とした。また、収縮の際には部材の拘束による影響を無視するため、両端は拘束せず回転方向のバネのみ拘束し、自由収縮の状態を模擬した。

3. 载荷試験による実験の概要

ここでは解析対象および物性値の算定根拠となる著者らの既往研究について概要を説明する¹⁾。解析対象の試験体は、φ5x10cm の大きさのコンクリート試験体であるが、モルタルの物性値を決定した実験はφ10×1cm のコンクリート薄板によって実施したものである。コンクリートの粗骨材に変質凝灰岩を碎石として使用した。変質凝灰岩は質量の 90% 以上が石英であり、収縮をほとん

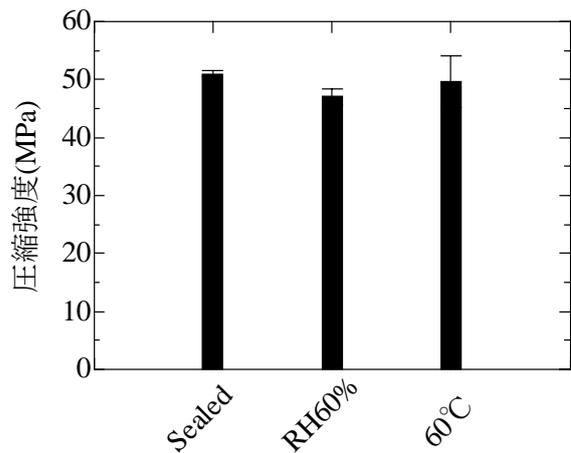


図-4 実験による圧縮強度¹⁾

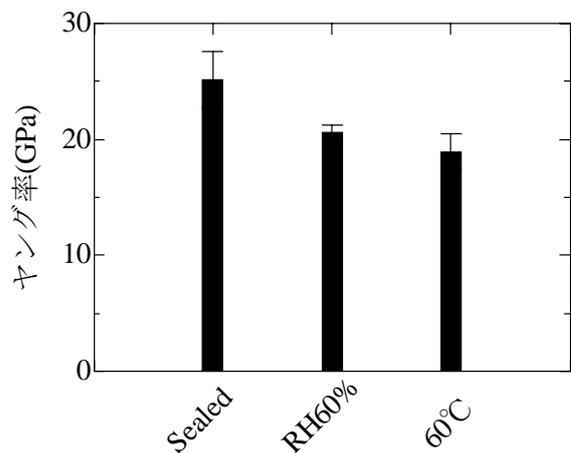


図-5 実験によるヤング率¹⁾

ど生じないことを確認している。これを粗骨材に用いてコンクリートを作製した。最大骨材寸法は 2.0cm である試験体は打込み後、材齢 180 日まで 20°C で封緘養生を行った。その後、脱型と研磨を行い、20°C 一定下で異なる湿度で恒量になるまで乾燥させた。また、あわせて、90°C までの範囲で乾燥炉によって一定温度下で恒温になるまで乾燥させた。炉内の空気は室内空気を熱したものとなっている。加熱試験体については、外気と同じ温度になるまで放置した後、载荷試験を行った。

図-4、図-5 に、本試験によるコンクリートの各乾燥条件下における圧縮強度、ヤング率をそれぞれ示す¹⁾。この実験から、圧縮強度は乾燥により一回低下したのち強度は増大する一方、ヤング率は乾燥にともない低下し続けることが確認できる。

4. RBSM による解析

RBSM を用いた解析により、上述した実験値の乾燥によるヤング率低下、強度推移の傾向を再現し、圧縮強度・ヤング率・荷重変位関係を評価する。

4.1 解析対象

解析には3章の荷重試験と同様に、 $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ の円柱試験体を使用した。試験体に1軸圧縮応力を与えることで、荷重-変位関係を評価した。

図-6 に解析に用いた試験体中心の断面の要素を示す。要素分割は3Dで行い、ポロノイ分割におけるバネの平均長さを2mmとした。図中に灰色の点線で示されるのがモルタル要素、黒の実線で示されるのが粗骨材要素である。試験体中に球を挿入し、球内部にポロノイ点を持つ要素を粗骨材要素に変換することで粗骨材要素を設定した。また、粗骨材の全長がおおよそ $G_{\text{max}}=20 \text{mm}$ を超えないように球の最大半径を10mmに設定し、ランダムに半径・中心座標を設定した。また、実験の調合に合わせるため、粗骨材要素の全体積が全要素の体積の40%程度になるよう粗骨材の体積比を設定した。このように、実験と同様な条件を与えることで、実際のコンクリートと同様な特性を示すと仮定した。

4.2 乾燥収縮ひずみの設定

各乾燥条件によるコンクリート内部のひび割れは、モルタル要素境界面バネの収縮により評価できるものとし、乾燥条件ごとにモルタル要素-モルタル要素境界、モルタル要素-粗骨材要素境界のバネのひずみが最大値に達するまで 100μ ずつ収縮させた。既往の研究から⁷⁾、コンクリート全体の収縮ひずみを再現するためには、粗骨材界面に存在する遷移帯の影響を考慮することの必要性が明らかになっている。この状況を勘案して、コンクリートの骨材損傷の程度について遷移帯の影響を考慮するために、モルタル要素境界面バネの収縮ひずみに対して一律に 300μ のひずみを低減して、入力値とすることとした。遷移帯を考慮しない場合のモルタル要素境界面バネの収縮ひずみのインプットに対するコンクリートの収縮ひずみの結果を図-7に示す。ここに示されるようにコンクリートの収縮は著しく小さい。しかし、この結果に遷移帯で骨材の拘束影響を緩和する 300μ 分を考慮すると、おおよそ実験で得られたコンクリートの乾燥収縮ひずみを再現できる。よって、実際に検討したモルタル要素境界面バネの収縮ひずみと乾燥条件の対応は、封緘状態で収縮量 0μ 、RH60%で 900μ 、 60°C で 2100μ とすることとした。

収縮を考慮する際の収束計算は、 100μ ごとの等価接点力を与え不釣合力が収束するまで収束計算を行った。

乾燥終了後、モデルの端部の母点に対して、y方向強制変位を与えることで、1軸圧縮試験を行った。なお、

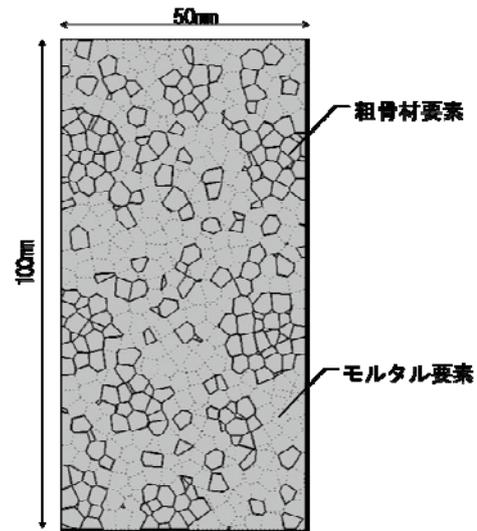


図-6 解析対象

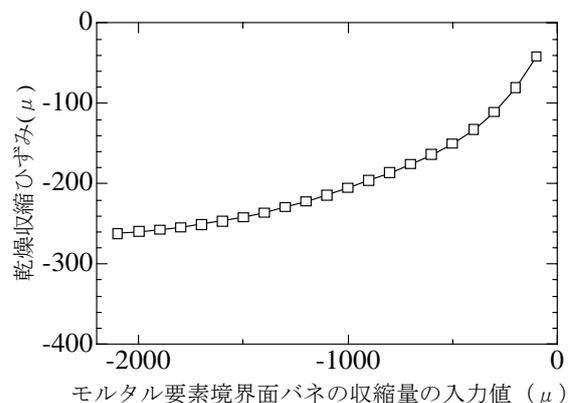


図-7 解析における収縮ひずみ

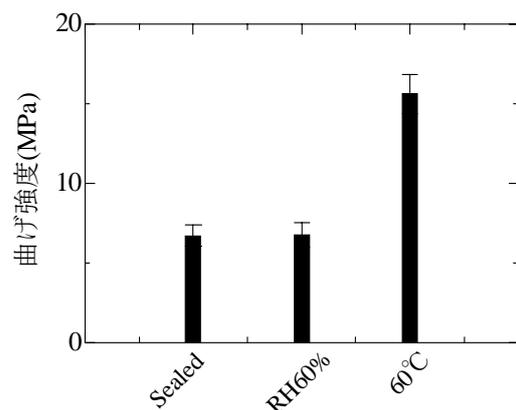


図-8 実験によるペーストの曲げ強度⁹⁾

荷重試験は変位制御で実施し、ひずみで 100μ ごとに、荷重点の力を算出した。

4.3 低湿度下におけるセメントペーストの強度増加

実験結果に示されるように^{1),8)}、乾燥が進行するほど、

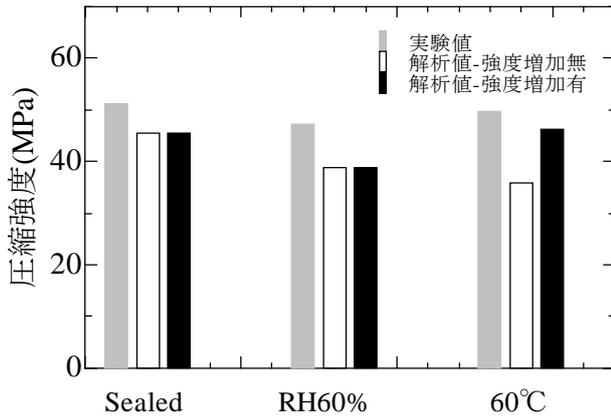


図-9 各乾燥下におけるモルタルの圧縮強度

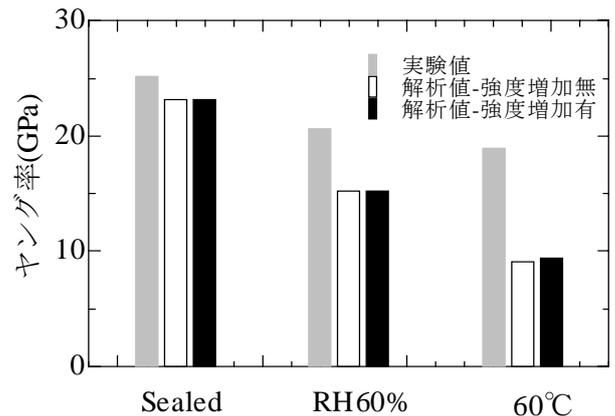


図-10 各乾燥下におけるモルタルのヤング率

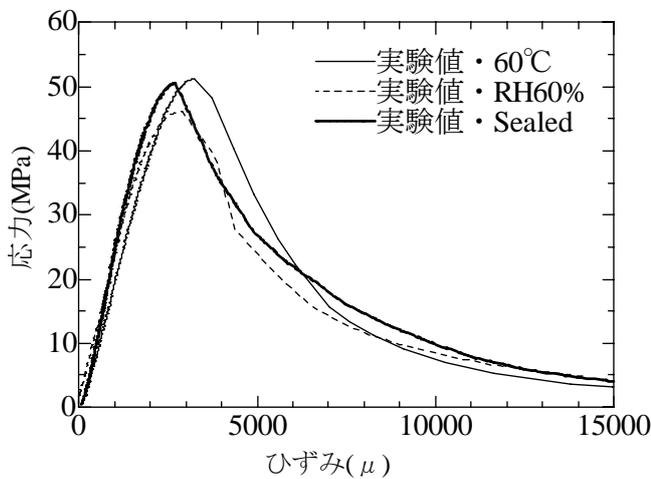


図-11 実験による応力-ひずみ関係

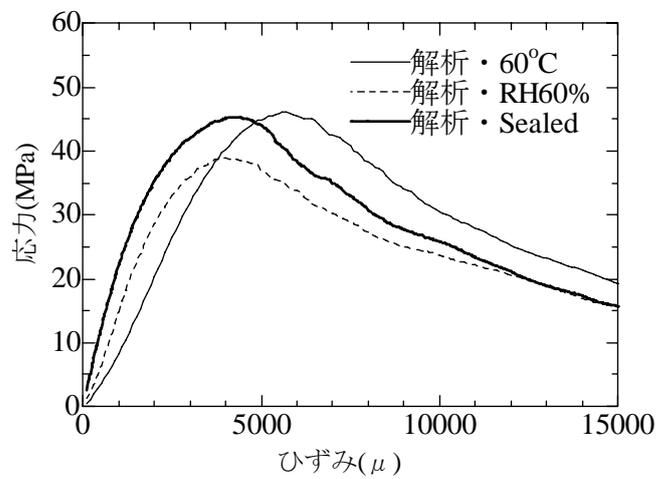


図-12 解析による応力-ひずみ関係

圧縮強度・ヤング率が低下する傾向にある。これは、乾燥収縮が進行するほど、コンクリート内にクラックが生じ、負担できる応力が減少していくためである。しかし、RH40%以下の乾燥条件では、コンクリートの強度が増加する傾向にあり、この傾向はペーストと同様である。この結果から、本研究では、収縮量2100 μ モルタル要素面に接続されるバネの内、ひび割れが発生していないバネを強度増加させた。強度増加はモルタルの引張強度・粘着力において行い、母材の強度増加を行うことで、コンクリート内にひび割れが入りつつも強度が上昇する現象を再現した。

図-8は、伊藤らの研究によるモルタルの各湿度・温度下におけるセメントペーストの曲げ強度である⁹⁾。この実験によると、60°Cのペーストの引張強度は封緘状態の強度より、約2.0倍程度大きくなっている。この実験結果を適用し、乾燥後のRH20%におけるバネの引張強度は2.0倍に強度増加するとした。また、同様の考え方から、実験値の傾向に整合するようにパラメータを変更し、

粘着力を3倍、内部摩擦角は1倍に設定し、乾燥により変化していると仮定した。

4.4 解析結果

(1) 圧縮強度・ヤング率

図-9、図-10に、実験値と、モルタル要素境界面バネの乾燥収縮だけをパラメータとした、強度増加無し解析、4.2節に述べた物性変化を適用した強度増加有りの解析の圧縮強度・ヤング率のそれぞれの比較、図-11に3章に示した実験における応力-ひずみ関係、図-12に本研究における載荷試験解析の応力-ひずみ関係を示す。図-9、図-10に示す強度増加を考慮しない解析においては、乾燥が進行するほど圧縮強度とヤング率は同様に低下していく結果となった。しかし、この傾向は上述した実験の結果を再現しておらず、実験結果を再現するためには、モルタル要素境界面バネ、すなわち、セメントペーストの強度特性を考慮する必要があることが本解析から明らかとなった。図-9、図-10で示す強度増加を考慮した解析においては、乾燥終了後、バネの引張強度を2.0倍、

粘着力を3倍に強度増加を行っているため、試験体全体の強度も上昇している。一方で、ヤング率は一定のまま設定しているため、図から示される通り全体のヤング率も変化しない。また、図-11と図-12の応力ひずみ関係を比較すると60℃においてポストピークのひずみが大きくなっていることも確認できる。従って、モルタル要素境界面バネの物性値を設定することで、実験で確認されたものと同様に、乾燥が進むほどクラックがコンクリート内に入ることによりヤング率が低下するが、強度は上昇するという、セメントペーストの強度増加に起因するコンクリートの圧縮強度の増加現象を再現することができた。

5.まとめ

本研究は、異なる乾燥条件を受けたコンクリートの圧縮強度・ヤング率の低下及び応力-ひずみ関係を解析により再現することを目的とした。解析手法には剛体バネモデルを用いた。また、粗骨材要素とモルタル要素、その界面をそれぞれモデル化し、乾燥によるセメントペーストの物性変化を考慮した。

(1)解析により、モルタルの収縮を骨材が拘束することにより生じるコンクリートの内部損傷と、乾燥によるモルタル自身の物性変化を考慮し載荷試験解析を行った結果、実験結果と同様のコンクリートの荷重-変形関係の傾向を再現することができた。

(2)ヤング率の低下は、収縮の進行によるひび割れの増加のみで評価できるが、強度の変化はモルタルの物性値の変化も考慮する必要があると確認された。これは実験結果から示されている仮説と一致した。

今後の検討として、現在はコンクリートの荷重-変形関係において、全体のトレンドを再現することを目的としているため、強度・ヤング率・ポストピーク等の値が実験値に完全には整合できていない。よって、実験をさらに厳密に再現するため、今後、母材の物性値のパラメータについて、更なる数値的検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Ippei Maruyama, Hiroshi Sasano, Yukiko Nishioka, Go Igarashi : Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying heating up to 90°C, Cement and Concrete Research 66 (2014) 48-63
- 2) Kawai, T. :New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engineering and design, Vol48, pp.297-229, 1978
- 3) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古谷信明 : 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.No.4, pp.612-630, 2008
- 4) S.Saito, H.Hikosaka : Numerical analysis of reinforced concrete structure using spring network models, Journal of Materials, Concrete Structure Pavements , Japan Society of Civil Engineers. No.627 V-44, pp.289-303,1999.8
- 5) J.E.Bolander,S.Saito : Fracture analyses using spring networks with random geometry, Engineering Fracture Mechanics,Vol.61, issues5-6, pp.569-591, 1998
- 6) Jianzhuang Xiao, Wengui Li, David A.Lange, Surendra P.Shah : Properties of interfacial transition zone in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation, Cement and Concrete Composites, Vol.37, pp.276-292
- 7) G.Appa.Rao, B.K.Raghu.Prasad : Influence of interface properties on fracture behavior of concrete, Sa dhana, Vol.36, Part.2, pp.193-208, 2011
- 8) Ippei Maruyama, Ai Sugie : Numerical Study on Drying Shrinkage of Concrete Affected by Aggregate Size, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 12 (2014) No. 8 p. 279-288
- 9) 伊藤充希, 篠野宏, 丸山一平 : 温度・湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp382-387 (2014)