

若材齢期間の高強度コンクリートを対象とした 3 次元 FEM 解析

3-D FE Analysis of Early Age High Strength Concrete

○渡邊 湊¹, 堀川 真之¹, 田嶋 和樹², 長沼 一洋², 白井 伸明²*Minato Watanabe¹, Masayuki Horikawa¹, Kazuki Tajima², Kazuhiro Naganuma², Nobuaki Shirai²

Abstract: : The objective of this study is to evaluate the effect of long-term behavior for the RC structures made of high strength concrete on the earthquake-resistant performance quantitatively. In this paper, the 3-dimensional FE analysis was conducted, especially, by paying attention to the crack generation in concrete at the early age period. The analytical model adopted could simulate the observed stress development in concrete. This indicates validity of the model. Finally, the exact evaluation of the temperature history and the time-dependent Young's modulus is particularly important to simulate the timing of crack occurrence.

1. はじめに

1980 年代後半から始まった NewRC プロジェクトにより、高強度材料の開発が行われた。これを契機に高強度材料を用いた建設が広く行われるようになり、高層の集合住宅には居住性や耐久性の観点から高強度コンクリートが用いられるようになった。高強度コンクリートに対する需要が高まる一方で、近年行われた研究では、若材齢期間に生じる初期不整が確認されており、耐震性能への影響が懸念されている。筆者ら^[1]は、前述の若材齢期間に生じる応力状態の評価を目的に、丸山ら^[2]が行った実験に対する解析的検討を行っている。その結果、材齢の進展に伴う鉄筋周りのコンクリートの応力進展を確認し、コンクリートに引張強度に近い応力が作用していることを明らかにした。また、コンクリートのひび割れによる応力状態の変化を考慮することを今後の課題として残した。本報では、若材齢期間におけるひび割れのシミュレーションを目的とし、応力・ひび割れに対する 3 次元 FEM 解析を行った。

2. 実験概要

解析対象実験として、必要な材料データ等の情報が不足がなく記述されていることから、Sule^[3]の実験を選択した。試験体の概要を fig.1 に示す。解析対象実験では 2 種類の調合の試験体を作成している。Tab.1 にコンクリートの調合を示す。材齢 28 日時点で材料試験を実施しており、HSC 試験体は圧縮強度が 100MPa、NSC 試験体は 36MPa 程度である。NSC 試験体はプレーンコンクリートであり、HSC 試験体は主筋が 4 本配筋されている。

3. 解析概要・結果

NSC, HSC 試験体を対象とした熱伝導解析及びひび割れ解析を行った。

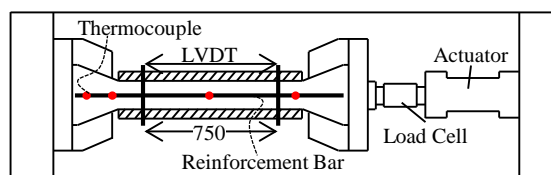


Figure 1. Configuration of Experiment

Table 1. Mixture of Concrete (kg/m³)

	W	C	G	S	SF	add
NSC	175	350	828	1012	-	-
HSC	125	475	973	797	50	11

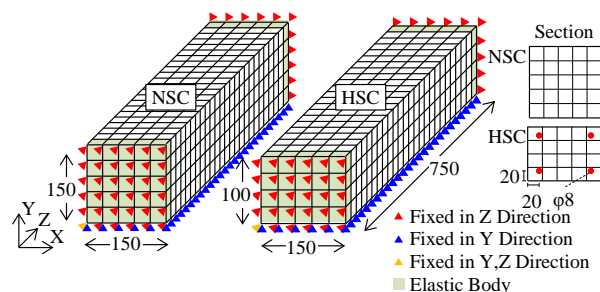


Figure 2. FEM Mesh Division and Boundary Condition

3. 1. 熱伝導解析

本解析では実験における変位測定区間のみをモデル化している。コンクリートは 8 節点ソリッド要素、境界要素は 4 節点四辺形要素を用いた。熱的特性値はマスコンクリートの温度ひび割れ制御設計指針(案)・同解説^[4]を参考に決定した。Tab.2 に解析に用いた各種熱的特性値を示す。熱伝達率は、端部のみ断熱境界を仮定し、熱伝達率を 0 とした。断熱温度上昇曲線は、河野ら^[5]の式を用いた。また、本実験では半断熱養生が採用されており、試験体中心に設置された熱電対の測定温度と型枠の温度が常に等しい温度となるように調節されている。この半断熱養生による温度履歴を模擬するため、境界要素に実験結果の温度履歴を与えている。

解析結果及び最大温度時の温度分布図を fig.3 に示す。NSC, HSC 試験体共に実験結果の温度履歴を良好に模擬することができた。

3. 2. ひび割れ解析

Fig.2 に HSC, NSC 試験体の要素分割図及び境界条件を示す。コンクリートの自由ひずみは、HSC 試験体は自己収縮ひずみと温度ひずみを足し合わせた値を用いた。自己収縮ひずみ、線膨張係数は寺本ら^[6]の式から算出した。一方、NSC 試験体は自己収縮の影響が小さいことから、温度ひずみのみを用いた。Fig.4 にコンクリートのヤング係数の発現及び引張側構成則を示す。コンクリートの力学的特性は CEB-1990^[7]から算出した。ヤング係数は時間依存性を考慮し、ステップ毎に変化させている。1 ステップ当たり 2 時間で計算を行った。ひび割れモデルは固定多方向ひび割れモデルを用いている。引張強度 f_t は材齢 3 日時点の値を用いており、NSC は 2.3MPa, HSC は 4.4MPa である。破壊エネルギー G_f は大岡らの式^[8]を用いて計算した。要素代表長さ h は要素と等価な体積を持つ球の直径とした。HSC 試験体の鉄筋は埋め込み鉄筋要素を用い、力学的特性は実験の材料試験の結果を用いた。

fig.5 に NSC 及び HSC 試験体の応力-材齢関係のグラフを示す。応力はモデル端部節点の Z 軸方向力の合計を断面積で除すことで求めた。NSC 試験体は応力を過大評価する結果となった。応力の過大評価の原因として、ヤング係数の発現速度を過大評価していることが考えられる。HSC 試験体については応力進展の傾向を概ね模擬することができた。解析におけるひび割れが 40 時間程度で生じており、実験のひび割れ発生タイミングと近い値を示した。圧縮側の応力の過大評価については、最大温度およびヤング係数の過大評価が原因であると考えられる。また、ひび割れ位置は、実験では試験体中心に発生しているのに対し、解析では全要素にひび割れが発生していたため、鉄筋の付着すべりについて考慮する必要がある。

4. まとめ

熱伝導解析から、解析結果が実験結果の温度履歴を概ね模擬し、解析モデルの妥当性が確認された。ひび割れ解析結果から、HSC 試験体は実験結果のひび割れのタイミングを概ね模擬することができた。NSC 試験体については応力を過大評価する結果となったため、ヤング係数の評価について検討を行う必要がある。今後の展望として、ヤング係数の再検討及び付着すべり関係を考慮した改良モデルの構築を行う。

Table2. Assumed Values of Parameter for Thermal Analysis

	NSC	HSC
Density (kg/m ³)	2349.6	2374.5
Specific Heat(J/kg · K)	1089.7	1011.0
Thermal Conductivity (J/sec · m · K)	1.5	2.4
Heat Capacity (J/m ³ K)	2560598.1	2400663.8
Heat Transfer Coefficient (J/sec m ² K)	Edge	0.0
	Others	14.0
Arrhenius Coefficient	10000.0	10000.0

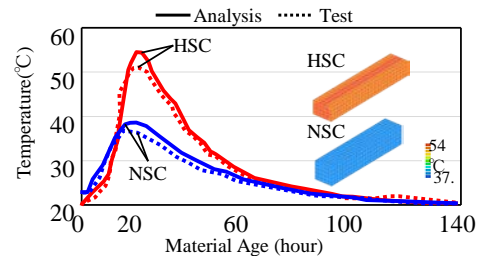


Figure3. Comparison of Temperature at Central Element

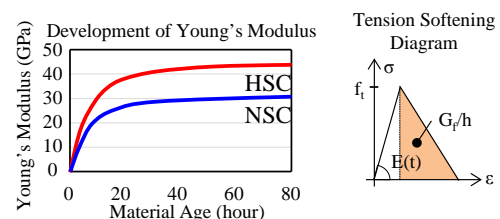


Figure4. Material Property of Concrete for Stress Analysis

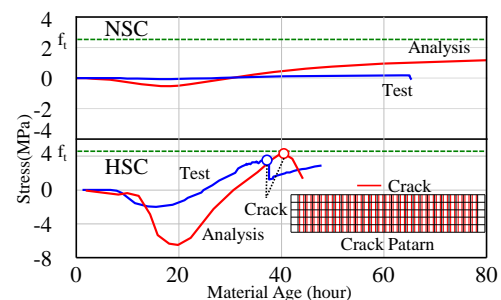


Figure5. Comparison Between Test and Calculation
Longitudinal Stress

5. 参考文献

- [1] 丸山一平ほか：温度履歴が RC 柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討，日本建築学会構造系論文集.vol.73,pp.1035-1042,2008
- [2] 堀川真之ほか：3 次元 FEM による若材齢挙動を考慮した高強度 RC 柱の応力解析，日本建築学会構造系論文集.vol80,pp.1447-1457,2015
- [3] M.S.Sule, van Breugel, : Effect of reinforcement on Early age cracking in high strength Concrete, HERON, Vol. 49, No. 3,2004.
- [4] 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，2008
- [5] 河野政典ほか：シリカフェームを使用した 100N/mm² 級高強度コンクリートの発熱・強度特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.2,1998
- [6] 寺本篤史ほか：超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 654 号，pp.1421-1430，2010.8
- [7] Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft, Chapters 1 - 3, 1991.7
- [8] 大岡督尚ほか：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響，日本建築学会構造系論文集，第 529 号，99.1-6. 2000.3