

論文 3次元 FEM 解析による超高強度コンクリートの若材齢ひび割れ発生時期と位置の評価

渡邊 湊^{*1} 堀川 真之^{*2} 田嶋 和樹^{*3}・白井 伸明^{*4}

要旨：本研究は、超高強度コンクリートの自己収縮等の体積変化が RC 部材や構造物の耐震性能に及ぼす影響を評価する手法の確立が目的である。本報では、超高強度コンクリートの若材齢ひび割れに着目した 2 種類の実験に着目し、3 次元 FEM 解析によるひび割れの評価を試みた。その結果、ひび割れ発生時期を評価するためには、ヤング係数の発現やコンクリートの温度履歴の評価が重要であることを確認した。また、ひび割れ位置を評価するためには、支保工等の養生時の外部拘束条件の影響を考慮する必要があることを示した。

キーワード： 超高強度コンクリート 3次元 FEM 解析 ひび割れ 若材齢期間 熱伝導解析

1. はじめに

1980 年代後半から進められた NewRC プロジェクトの成果により、我が国では RC 建造物の高層化が進められてきた。これに伴い、高強度のコンクリートの需要が高まり、近年では圧縮強度が 100MPa を超えるものも使用されている。一方、このような超高強度コンクリートについては、未だ研究段階の分野が残されている。とりわけ、若材齢期間の挙動については未解明な点が多い。

日本コンクリート工学会に設置された自己収縮評価委員会¹⁾では、超高強度コンクリートを用いた実大門型フレームを作成して若材齢ひび割れの観察を行っており、材齢 7 日の脱型時点において断面を貫通するひび割れを確認している。また、この原因として、コンクリートの収縮に伴う主筋の拘束応力の評価が重要であることを指摘している。特に、超高強度コンクリートにおいては、顕著な水和発熱による温度ひずみおよび自己収縮ひずみの影響が大きい。一方、名古屋大学の丸山ら²⁾は、超高強度コンクリートの若材齢期間に着目した実験を通じて、この期間に生じたコンクリート表面および鉄筋周りのひび割れを確認している。そして、これらのひび割れが RC 部材の曲げ耐力の低下あるいは付着劣化によるせん断耐力の低下を引き起こす可能性を指摘している。

筆者らは、若材齢挙動と長期挙動を経た RC 部材および構造物の耐震性能評価を目的とした研究を進めており、既報³⁾において超高強度 RC 柱を対象とした実験の 3 次元 FEM 解析結果を報告している。解析結果から、若材齢期間に生じるコンクリートの収縮が主筋に圧縮応力度を累積させ、主筋の早期の圧縮降伏を引き起こす一因となることを確認している。しかし、本解析手法では、若材齢期間においてひび割れの発生を考慮しておらず、今後の課題として残されている。

本研究の目的は、FEM 解析を通じて、若材齢期間に発生するひび割れの発生時期および発生位置を評価する手法を構築することである。本報では、超高強度コンクリートの若材齢ひび割れに着目した 2 つの実験に着目し、FEM 解析によって若材齢ひび割れの発生時期および発生位置の評価を試みる。

2. FEM 解析によるひび割れ発生時期の評価

2.1 解析対象実験概要

Sule⁴⁾らが行った収縮ひび割れ試験を対象に 3 次元 FEM 解析を行った。図-1 に試験体概要を示す。実験は、コンクリート打設直後から材齢 7 日までの期間に行われた。計測項目は、①温度、②軸方向変位、③荷重の 3 つである。軸方向変位は逐次測定され、初期状態の距離 750mm を保つように、随時アクチュエーターを介して荷重が入力されている。また、その際の荷重も逐次ロードセルにより計測されている。温度は、図中に示す位置において、熱電対によって測定される。試験体の養生方法としては、半断熱養生が採用されている。この養生方法では、試験体中心部の温度を逐次熱電対によって測定し、測定した温度と型枠を通る管の水温が等しくなるよう調節される。

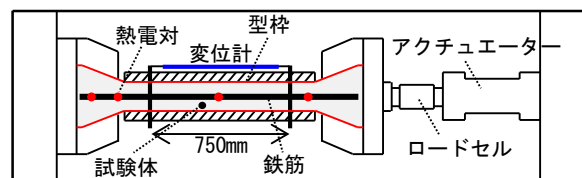


図-1 試験体概要⁴⁾

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 工学部建築学科助教 修士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

図-2 に試験体寸法および配筋を示す。試験体断面には、四隅に径 8mm の異形鉄筋が配筋されている。表-1 に試験体のコンクリートの調合を示す。水セメント比は 26%，混和剤には高性能 AE 減水剤が使用されている。圧縮強度は材齢 28 日時点の 150×150×150 の立方体圧縮強度試験において 100.7MPa である。

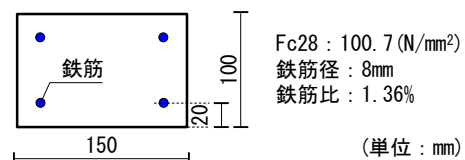


図-2 試験体寸法

2.2 FEM 解析の概要

本解析では、①熱伝導解析、②応力解析の 2 段階の解析を実施する。熱伝導解析では、コンクリートの温度に依存した自由ひずみの履歴を求める。算出された自由ひずみの履歴は、応力解析において各要素に入力される。なお、解析には DIANA9.5⁵⁾を用いる。

表-1 コンクリートの調合 (kg/m³)

水	セメント	シリカ フューム	細骨材	粗骨材	高性能 AE減水剤
125	475	50	797	973	11

2.2.1 熱伝導解析

熱伝導解析では、最初に、実験において採用された半断熱養生の状態を模擬するため、境界条件に関する検討を行った。図-3 に設定した境界条件を示す。熱伝達率および外気温の設定をパラメータとして、①、②の 2 つのモデルについて検討を行った。各解析に用いたパラメータを表-2 に示す。モデル①では、外気温度として実験結果の内部温度履歴を与えている。一方、モデル②では、実測された温度履歴を用いず、外気温度を 20℃一定とし、試験体内部節点と外部節点の節点温度が等しくなるように設定した。なお、熱伝導解析に用いる各種熱的特性値に関しては、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⁶⁾から決定した。また、断熱温度上昇曲線は、河野ら⁷⁾の式に基づいて決定した。図-4 に得られた断熱温度上昇曲線を示す。

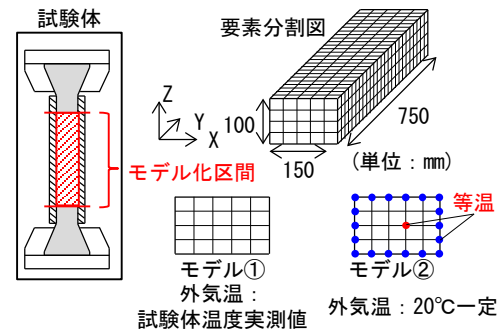


図-3 熱伝導解析モデル

表-2 熱伝導解析に用いたパラメータ

密度 (kg/m ³)	2375
比熱 (J/(g・K))	1.01
熱伝導率 (J/(sec・m・K))	2.4
熱容量 (kJ/(m ³ ・K))	2400
熱伝達率 (J/(sec・m ² ・K))	端部 0.0
	その他 14.0(モデル①) 2.0(モデル②)
アレニウス定数	10000
外気温度	試験体温度実測値 (①) 20℃一定 (②)

図-5 に解析から得られた温度-材齢関係を示す。モデル①に関しては、全体的に実験結果と良い対応を示した。ただし、事前に試験体の温度履歴が得られていることが前提となる点には注意が必要である。今後、実験の温度履歴を必要としないモデル化手法の検討が必要であろう。今回は実験結果を良好に模擬したモデル①の解析結果を採用し、今後の検討を進めることにする。

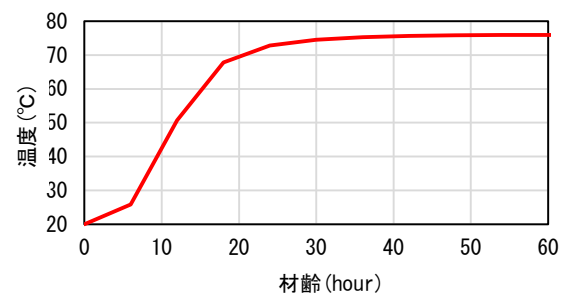


図-4 断熱温度上昇曲線

2.2.2 自由ひずみの計算

実験の自由ひずみは、解析対象試験体とは別に作成された無筋試験体の全ひずみを自由ひずみとしている。解析における自由ひずみとしては、自己収縮ひずみと温度ひずみを考える。なお、乾燥収縮ひずみの影響は、若材齢期間に顕著となるその他のひずみと比較して小さいと考え、本検討においては考慮していない。また、自由ひずみの算出においては、重ね合わせの原理が成立すると仮定し、自己収縮ひずみと温度ひずみを足し合わせて自由ひずみを求める。なお、本解析における材齢始発点は打設直後と仮定している。自己収縮ひずみは寺本ら⁸⁾が提案する次式を用いて算出した。

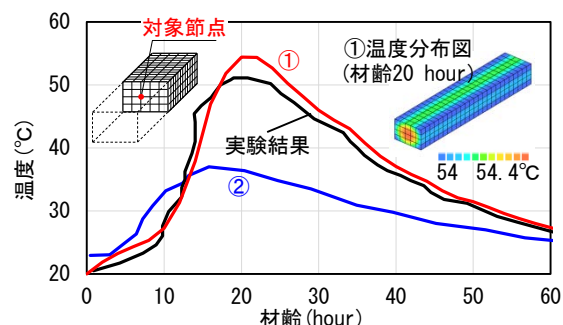


図-5 温度-材齢関係

$$\Delta \varepsilon_c = \Delta \varepsilon_p(t_e) \frac{(1 - V_a)(K_a / K_p + 1)}{\{1 + K_a / K_p + V_a(K_a / K_p - 1)\}} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_p(t_e)$ ：セメントペーストの自己収縮ひずみ $[\times 10^{-6}]$ 、 K_a ：骨材の体積弾性係数[GPa]、 K_p ：セメントペーストの体積弾性係数[GPa]、 V_a ：骨材体積比である。また、表-3 に自己収縮ひずみの算出に用いたパラメータを示す。

一方、温度ひずみは温度増分と線膨張係数の積として求められるが、ここではコンクリートの線膨張係数の材齢依存性⁸⁾を考慮した。図-6 に線膨張係数と材齢の関係を示す。また、鉄筋の温度ひずみについては、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}[1/^\circ\text{C}]$ として求めた。

図-7 にコンクリートの自由ひずみおよび鉄筋の温度ひずみの推移を示す。なお、実験結果として示した自由ひずみの履歴は、解析対象試験体と等しい調合および養生条件下で作成・管理された無筋試験体において測定されたコンクリートのひずみ値を示している。計算により求められたコンクリートの自由ひずみは、実験結果と良好に対応していることが確認でき、自由ひずみの算出手法の妥当性が確認できる。

2.2.3 応力解析

(1) 基本モデル

図-8 に要素分割図および境界条件を示す。なお、応力解析においては、実験における変位測定区間のみを解析対象とした。コンクリートは8節点ソリッド要素、鉄筋はトラス要素でモデル化した。境界条件は、モデル端部のY軸方向およびモデル底面のZ軸方向の変位を拘束している。表-4 に解析に用いた各種材料特性値を示す。基本モデルにおいては、コンクリートの圧縮側および引張側共に弾性体を仮定した。つまり、ひび割れの発生を考慮していない。また、ヤング係数については材齢依存性を考慮し、CEB-FIP モデルコード⁹⁾の次式を用いて算出した。

$$E_c(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t_e)} E_{c28} \quad (2)$$

ここで、 E_{c28} ：材齢 28 日におけるヤング係数、 $\beta_{cc}(t)$ ：時間依存係数であり、次式により求められる。

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e}} \right) \right] \quad (3)$$

ここで、係数 s はセメント種類によって変化する係数である。本解析では、実験で用いられているセメント種類に合わせて、0.38 を採用した。図-9 にヤング係数の発現傾向を示す。図中には材料試験結果も併せて示すが、計算結果は材料試験結果と概ね近い値を示した。

応力解析においては、先に求めた自由ひずみを導入する。なお、各要素間でひずみ差が小さいことから、断面

表-3 自己収縮の算出に用いたパラメータ

水結合材比	0.24
凝結に関する係数	17
練りあがり温度による係数	1
骨材体積比	0.68
骨材の線膨張係数 $(\times 10^{-6})$	7.6
練りあがり温度 $(^\circ\text{C})$	20

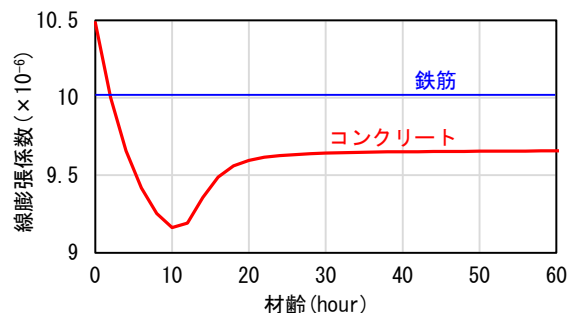


図-6 線膨張係数の推移

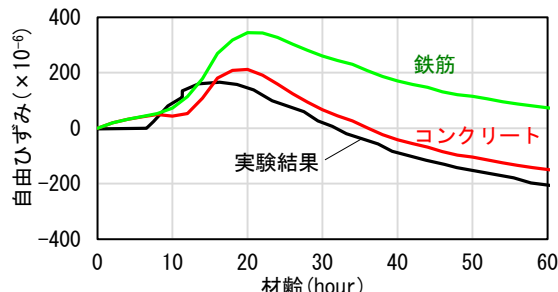


図-7 自由ひずみ履歴

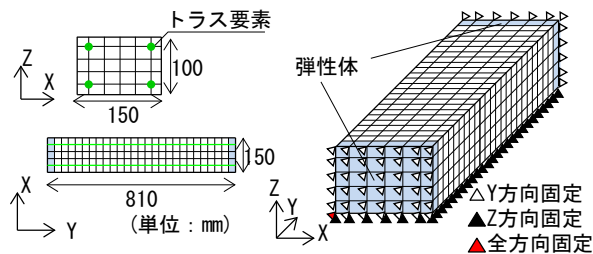


図-8 応力解析の要素分割図・境界条件

表-4 応力解析に用いたパラメータ

材齢28日の圧縮強度 (N/mm ²)	80.0	
引張強度 (N/mm ²) (全材齢一定値)	4.4	
材齢28日のヤング係数 (kN/mm ²)	44.3	
若材齢クリープの パラメータ	q	3.0
	d	0.4
	p	0.3

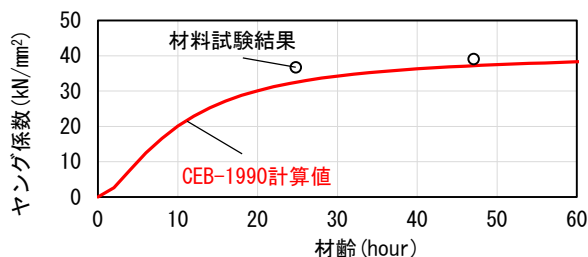


図-9 材齢の進行に伴うヤング係数の発現

内のひずみ差により生じる応力の影響は極めて小さいとし、全要素で試験体中心要素のひずみと等しい値を用いることで簡略化を図った。

若材齢時においては、クリープひずみについても考慮する必要がある。本検討では、Bazant & Osman¹⁰⁾の二重べき乗則(Double power law)を採用した。クリープ関数 $J(t, \tau)$ は次式により求めた。

$$J(t, \tau) = [1 + q\tau^d(t - \tau)^p] / E(\tau) \quad (4)$$

ここで、 τ : 荷重開始材齢[日]、 t : 任意材齢[日]、 E : 荷重時の弾性係数[kN/mm²]である。式中のパラメータ q, d, p は、De Borst ら¹¹⁾の研究を参考にして決定した。

図-10 に応力解析より得られたコンクリートの応力度-材齢関係を示す。なお、解析結果に示す応力度は、実験の条件と合わせ、モデル端部の反力を試験体断面積で除した平均応力度を示している。また、図中には、CEB-FIP モデルコード⁹⁾に基づき評価した引張強度の発現傾向を併せて示す。解析結果は実験結果の応力度履歴の傾向を良好に模擬しているが、実験結果に比べて遅れが見られる。ひび割れ発生時期に着目すると、解析結果の応力度履歴が引張強度の発現曲線と材齢 50 時間程度で交わるのに対し、実験では材齢 37 時間ほどでひび割れの発生が確認されている。

(2) ひび割れ考慮モデル

前述した基本モデルを改良し、応力解析においてひび割れ発生を考慮する。コンクリートの引張強度は、図-10 に示した引張強度の発現曲線と解析結果の応力度履歴の交点から評価した。図-11 に引張側構成則および要素代表長さの概念図を示す。軟化域においては破壊エネルギーを考慮し、大岡らの式¹²⁾より算出した。要素代表長さは、各要素と等しい体積をもつ球の直径 ($L_c = 2 \cdot (3V/4\pi)^{1/3}$) とした。また、ひび割れモデルは固定ひび割れモデルとし、釣合反復手法は初期剛性法を採用した。

図-12 にコンクリートの応力度-材齢関係を示す。解析結果が示すひび割れ発生時期は、実験結果のひび割れ発生から 10 時間程度遅れる結果となった。この原因は、前述したような解析結果に見られる応力度履歴の遅れであり、その要因は計算により求めたヤング係数の発現傾向にあると考えられる。特に、材齢 10 時間付近の応力度履歴が過小評価されているため、極初期のヤング係数の上昇勾配の評価が課題であると考えられる。また、本解析では分散ひび割れモデルを採用し、完全付着を仮定していることから、ひび割れは試験体全要素に同ステップで生じる結果となった。解析対象実験において生じた局所的なひび割れを表現するためには、付着応力度分布を仮定するなど、何らかの初期不整を考慮する必要であると考えられる。図-13 に鉄筋の応力度-材齢関係を示す。

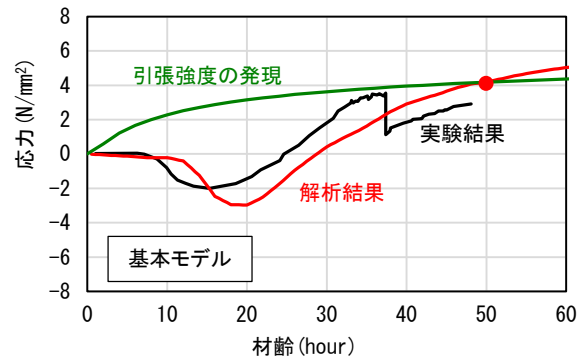


図-10 コンクリートの応力度-材齢関係

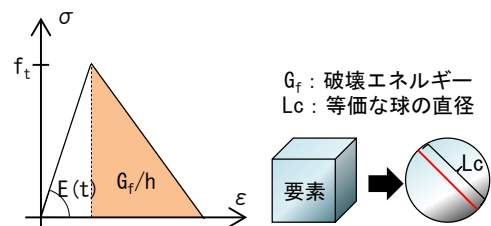


図-11 引張側構成則

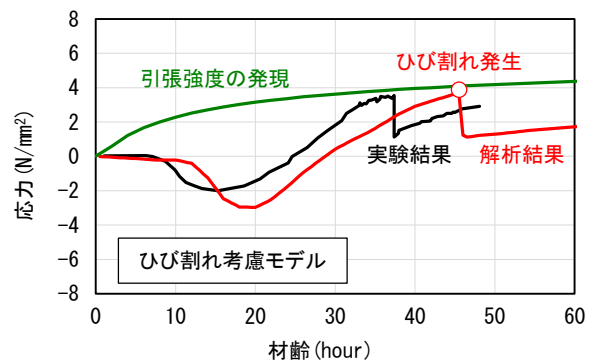


図-12 コンクリートの応力度-材齢関係

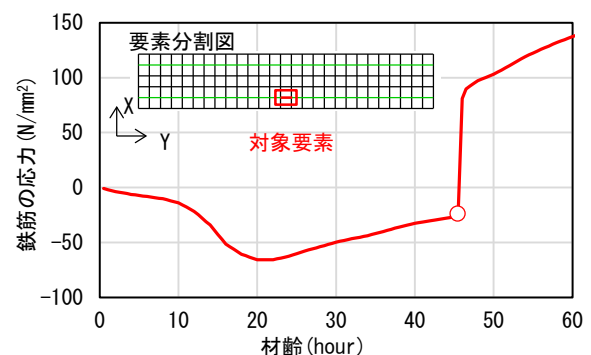


図-13 鉄筋の応力度-材齢関係

コンクリートにひび割れが発生した後、鉄筋の応力度は圧縮から引張へ転化し、引張力応力度に対して抵抗する傾向が確認できる。

3. FEM 解析によるひび割れ発生位置の評価

3.1 解析対象実験の概要

自己収縮評価委員会が実施した超高強度コンクリートを用いた実大 RC 門型フレームを解析対象とした¹⁾。図-14 に実験の流れおよび観察されたひび割れ図を示す。

また、図-15に試験体の概要、表-5にコンクリートの調合を示す。なお、材齢 28 日における圧縮強度は 136 N/mm^2 であった。実験はコンクリート打設から材齢 28 日まで行われた。型枠には塗装合板が使用され、試験体天端には養生シートが用いられた。脱型は材齢 7 日に行われた。脱型と同時にひび割れの観測が行われ、材齢 14 日にはコア抜きが行われている。また、材齢 28 日には、ひび割れ幅が測定された。本実験では、試験体各所で測定された温度およびひずみと材齢の関係が報告されている。

3.2 熱伝導解析

前述した手法①と同様の手法を用いて熱伝導解析を実施する。図-16に要素分割図と境界条件を示す。コンクリートは 8 節点ソリッド要素、熱伝達境界は 4 節点四辺形要素でモデル化した。表-6に熱伝導解析に用いたパラメータを示す。熱的特性値に関しては、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⁶⁾を参考に決定した。熱伝達率は、実験で用いられた塗装合板の型枠の値を用いた。断熱温度上昇曲線は、河野ら⁷⁾の式を用いて算出した。なお、鉄筋の影響は、コンクリートの密度項に累加することで考慮している。図-17に解析結果の温度-材齢関係を示す。なお、解析結果は、図-15の No.3 における断面の中心に該当する要素の平均温度を出力している。解析結果は実験結果を良好に模擬したが、材齢二日程で実験結果との差異が見られた。

3.3 応力解析

前述した手法と同様の手法を用いて応力解析を実施する。応力解析の要素分割図および境界条件は図-16に示した通りであり、鉄筋をトラス要素でモデル化し、コンクリート-鉄筋間では完全付着を仮定した。境界条件はスタブ下面の節点を全方向固定とした。表-7に解析に使用した材料特性のパラメータを示す。引張強度は実験結果の割裂強度を用いた。反復計算手法には線形剛性法を用いた。また、実験において測定時間間隔が明記されていないため、解析時間は 1 ステップ当たり 2 時間と仮定し、コンクリート打設から材齢 7 日目までのシミュレーションを行った。

図-18に Z 軸方向ひずみ-材齢関係を示す。なお、解析結果は、実験の埋め込み型ひずみ計設置位置に該当する要素の Z 軸方向ひずみを出力している。解析結果は、実験結果における収縮側のひずみと良い対応を示したが、膨張側のひずみにおいて実験結果との差が見られた。

図-19に解析結果と実験結果のひび割れ位置の比較を示す。解析結果では、梁端および柱脚にひび割れが発生しており、実験結果とは発生位置が異なっている。ここで、試験体作成時に設置された支保工等の影響について考える。なお、報告書には支保工に関する記述が無い

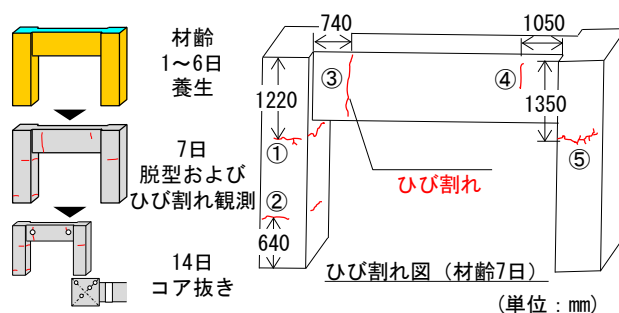


図-14 実験の流れ及びひび割れ図

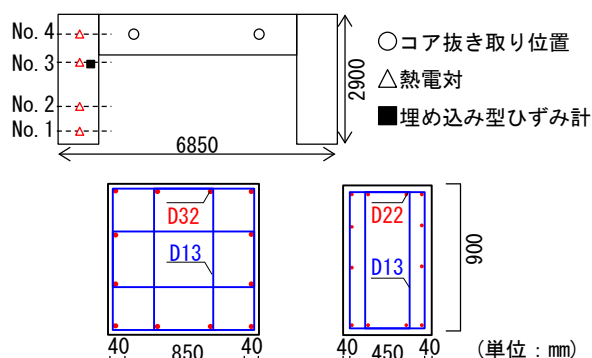


図-15 試験体概要

表-5 コンクリートの調合 (kg/m^3)

水	セメント	シリカ フューム	細骨材	粗骨材	混和剤
165	645	72	682	842	25.2

表-6 熱伝導解析に用いたパラメータ

密度 (kg/m^3)	2375
比熱 ($\text{J/(g} \cdot \text{K)}$)	1.05
熱伝導率 ($\text{J/(sec} \cdot \text{m} \cdot \text{K)}$)	1.5
熱容量 ($\text{kJ/(m}^3 \cdot \text{K)}$)	2400
熱伝達率 ($\text{J/(sec} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K)}$)	2.0
アレニウス定数	10000

表-7 応力解析に用いたパラメータ

材齢28日の圧縮強度 (N/mm^2)	80.0
引張強度 (N/mm^2) (全材齢一定値)	6.7
材齢28日のヤング係数 (kN/mm^2)	44.3
若材齢クリープのパラメータ	q, d, p 3.0, 0.4, 0.3

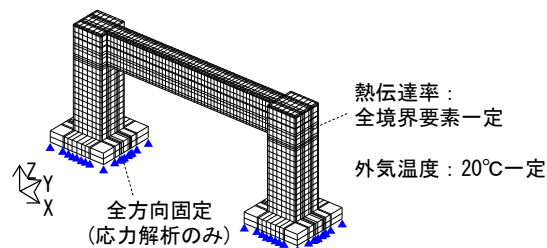


図-16 境界条件および要素分割図

ため、支保工の位置を 3 パターン仮定し、追加解析を行った。この時、支保工は Z 軸方向の変形を完全に拘束すると仮定した。図-20に追加解析より得られたひび割れ図を示す。なお、解析結果ではひび割れは左右対称に生

じていたため、左半分のひび割れ図のみを示す。支保工がない場合、解析では柱頭に生じたひび割れは再現できなかったが、支保工を設けることにより、これらのひび割れを再現することができた。また、その発生量は支保工の位置によって変化することが確認できる。一方、解析から得られるひび割れはいずれも部材端部に集中しており、実験において観察されたひび割れ位置とは若干異なっている。これらの原因を検討するためには、試験体の不均質さを考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

- 1) 熱伝導解析において、試験体内部温度を外気温に用いることで半断熱養生条件をモデル化できた。ただし、今後は内部温度履歴が与えられていない場合のモデル化を検討する必要がある。
- 2) 本手法により、コンクリートの応力履歴およびひび割れ時期を概ね評価できた。また、ヤング係数発現のモデル化の精度が重要であることを確認した。
- 3) ひび割れ位置の評価では、支保工等による養生中の拘束条件の影響を受けることを確認した。また、コンクリートの不均質性や付着応力度分布の影響の検討が必要である。

謝辞

本研究の一部はH27年度日本大学理工学部学術賞指定研究費の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) JCI 自己収縮評価委員会：鉄筋拘束による自己収縮応力および内部拘束応力の検討，JCI 自己収縮研究委員会報告書，pp.172-190，1996.11
- 2) 丸山一平，鈴木雅博，勅使川原正臣，佐藤良一：超高強度コンクリート柱の断面内応力に関する解析的検討—超高強度コンクリートを用いたRC柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その2—，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第637号，pp.425-1042，2009.3
- 3) 堀川 真之，渡邊 湊，田嶋 和樹，白井 伸明：3次元FEMによる若材齢挙動に起因する初期応力を考慮した高強度RC柱の短期水平荷重解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.457-462，2015
- 4) M.S.Sule, van Breugel, : Effect of reinforcement on Early age cracking in high strength concrete, HERON, Vol. 49, No. 3, 2004
- 5) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's

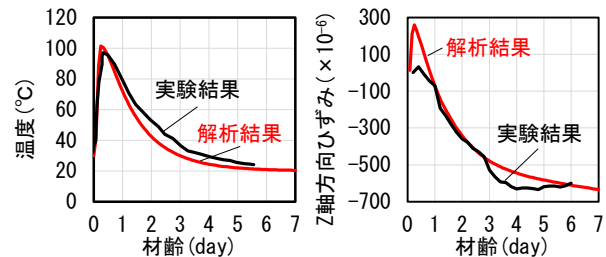


図-17 温度—材齢関係 図-18 Z軸ひずみ—材齢関係

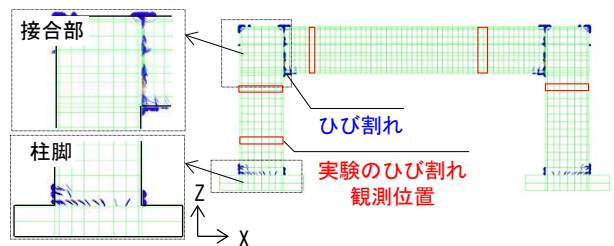


図-19 ひび割れ位置の比較

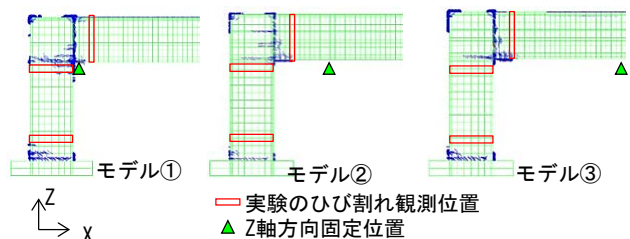


図-20 支保工の位置がひび割れ位置に与える影響

Manual, TNO Building and Construction Research, 2010

- 6) 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指針(案)・同解説，2008
- 7) 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，2006
- 8) 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
- 9) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft, Chapters 1 – 3, 1991.7
- 10) Bazant, Z.P., Osman, E. : Double power law for basic creep of concrete, Materials and Structures, RILEM, Paris, Vol.9, pp.3-11, 1976
- 11) de Borst, R. and van den Boogaard, A.H., : Finite-Element Modeling of Deformation and Cracking in Early-Age Concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.120, No.12, pp.2519-2533, 1994.12
- 12) 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，pp.1-6，2000.3