

論文 初期応力を考慮した RC 建造物の耐荷力解析手法の構築

伊藤 睦^{*1}・石川 靖晃^{*2}・上田 尚史^{*3}・田辺 忠顕^{*4}

要旨：本研究では、初期応力解析と耐荷力解析との連成解析が可能な解析ツールの構築を行った。3次元材齢依存型連続体構成モデルの構築は、格子等価連続体モデルに Bazant らの Solidification theory の概念を導入することにより行った。構築した構成モデルの応答結果や、既往の実験結果と解析結果の比較から、現状のモデルの妥当性ならびに精度向上に必要な内容の検討を行った。新たに構築した解析ツールを使用して、幾つかの外乱作用を想定した数値解析例を実施することにより、構築した解析ツールは、初期応力解析と耐荷力解析との連成解析も含めて、様々なシナリオの下での数値解析が実行可能であることを確認した。

キーワード：初期応力解析, 耐荷力解析, 連成解析, 格子等価連続体モデル, Solidification concept

1. はじめに

昨今の社会情勢の影響もあり、コンクリート建造物の維持管理が益々重要となっている。既設建造物の維持管理対策を検討するためには、任意時刻までに既設建造物に生じた材料劣化・損傷状況を適切に評価すること、その上で、その時刻に建造物が保有する構造性能を評価することが求められる。

任意時刻における建造物の劣化・損傷状況を数値解析的に予測するためには、第一に、コンクリート打込み後から硬化するに至る若材齢時の初期応力問題を適切に解かなければならない。初期応力問題は、具体的には水和や日射熱による温度変化、乾燥収縮および自己収縮等に起因するひび割れ問題であるが、これらはいずれも時間依存性であり、時間に関する微分方程式を解いて初期ひずみを算出し、その時点での材料特性に基づいて初期応力を解く(初期応力解析)ことになる。他方、任意時刻における構造性能照査(耐荷力解析)は、瞬間的な性能を評価するので、動的解析においても地震作用時間は極めて短いので、材料特性に時間依存性は存在しない。

数値解析的に任意時刻の建造物の損傷状況ならびに構造性能を予測するためには、初期応力解析と耐荷力解析とを有機的に連成して解かなければならない。連成が必要となる主たる要因は、若材齢時コンクリートの物性が時間の経過とともに変化することに起因するので、初期応力解析と耐荷力解析との連成には、コンクリート打込み後から硬化に至るまでの挙動を統一的に表現可能な構成則の開発が必要となる。

この種の構成則に関する既往の研究に、Ishikawa らによる一軸モデル¹⁾や、國枝らによる2次元 RBSM 解析²⁾が挙げられるが、3次元連続体問題までは適用されてい

ない。加えて、初期応力問題と耐荷力解析との連成がなされていない状況である。そこで本研究では、著者らが主に耐荷力解析用のコンクリート構成モデルとして開発を進めている格子等価連続体モデル³⁾に、Bazant らがコンクリートのクリープ問題を解くために提案した Solidification theory⁴⁾の概念を導入することで、材齢依存型3次元連続体構成モデルを構築するとともに、初期応力解析と耐荷力解析との連成が可能な解析ツールの構築を行った。現状の構成モデルについて、簡単な数値解析例により、その挙動特性等について議論するとともに、既往の実験の数値解析を実施することで、モデルの適用性、今後の課題について検討を行った。さらに、温度応力による初期応力解析と耐荷力解析とを連成させた数値解析を行い、解析ツール全般の有用性について検討した。

2. 材齢依存型構成モデル

著者らはこれまで、初期応力解析と耐荷力解析を連成させた数値解析手法³⁾を提案し、いくつかの実事例にも適用している。この手法では、構成モデルに時間軸を導入する手法として、以下を用いていた。

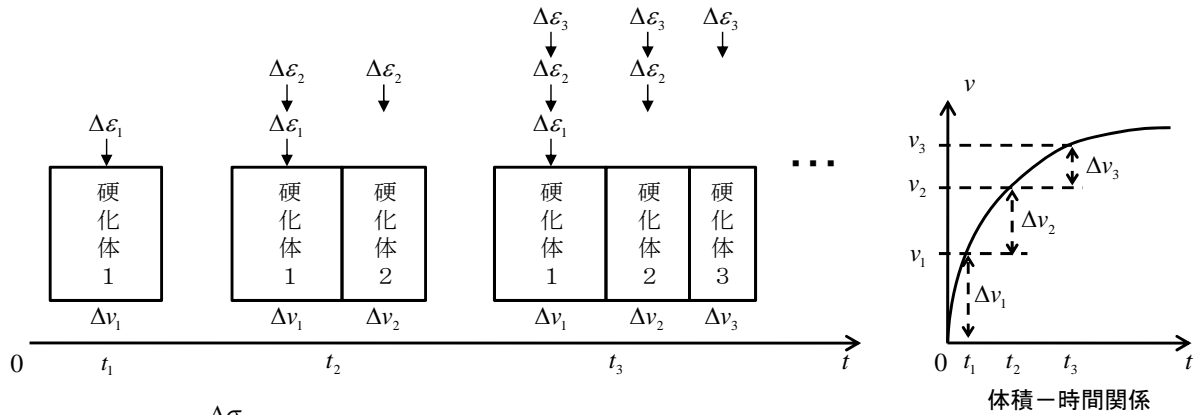
応力-ひずみ関係に代表される若材齢コンクリートの材料特性は、時間の経過とともに変化するので、応力経路は、時間軸上にも変動することになる。そのため、時刻 t_n での応力増分を算出するためには、時刻 t_{n-1} での応力を時刻 t_n における応力-ひずみ関係上に位置させる必要がある。この手法の一つとして、既往のモデルでは、時刻 t_{n-1} での応力を、ひずみの情報とは無関係に時刻 t_n における応力-ひずみ関係の envelope 上に位置させることで、構成モデルに時間軸を導入した。この手法は、耐力的に安全側の解を与えるが、応力の除荷、再載荷経路

*1 中部大学 工学部都市建設工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 名城大学 理工学部建設システム工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*4 社会基盤技術評価支援機構・中部専務理事 工学博士 (正会員)



$$\sigma_3 = \sum \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot \Delta\varepsilon \cdot \Delta v(t)$$

$$= E \cdot \Delta\varepsilon_1 \cdot \Delta v_1 + E \cdot \Delta\varepsilon_2 \cdot \Delta v_1 + E \cdot \Delta\varepsilon_3 \cdot \Delta v_1 \\ + E \cdot \Delta\varepsilon_2 \cdot \Delta v_2 + E \cdot \Delta\varepsilon_3 \cdot \Delta v_2 \\ + E \cdot \Delta\varepsilon_3 \cdot \Delta v_3$$

$$= \Delta v_1 \cdot E \cdot \Delta\varepsilon_1 + (\Delta v_1 + \Delta v_2) \cdot E \cdot \Delta\varepsilon_2 + (\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3) \cdot E \cdot \Delta\varepsilon_3$$

$$= v_1 \cdot E \cdot \Delta\varepsilon_1 + v_2 \cdot E \cdot \Delta\varepsilon_2 + v_3 \cdot E \cdot \Delta\varepsilon_3 = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3$$

Solidification modelによる計算

硬化体1の応力

硬化体2の応力

硬化体3の応力

増分型逐次線形計算

図-1 Solidification theory の概念に基づいた応力算定 (弾性状態)

を適切に表現できない点、ひび割れ面でのせん断伝達挙動を適切に表現することができない点といった難点があった。そこで本研究では、この問題点を解決するための一手法として、構成モデルに Bazant らの Solidification theory⁴⁾の概念を導入することで、材齢依存型構成モデルを構築することとした。これにより、初期応力がある場合にも、無い場合にも、また繰返し応力場であっても、せん断剛性も含めて任意の硬化過程で3次元連続体構成モデルを記述することが可能となる。

2.1 Solidification concept の導入

Bazant らは、若材齢時コンクリートのクリープ挙動を表現するために、Solidification theory⁴⁾を提案している。構成モデルへの Solidification theory の概念の導入は、クリープ関数を応力-ひずみ関係に置き換えるとともに、適当な体積と時間の関係を定義することで可能となる。なお、Bazant らのクリープ解析では、力の釣合い条件のみで問題を解くことが可能であるため、変形に関する制約条件を課していないが、時間の経過とともに随時生成される硬化体毎の応力依存性ひずみ増分を決定するためには、変形に関する制約条件が必要となる。そこで、ある時刻までに生成しているいくつかの硬化体に対して、ある時間 step 内で生じる応力依存性ひずみ増分は等しいとする Kinematic 的な制約条件^{1),2)}を仮定した。

図-1 に、Solidification concept を導入した弾性状態での一軸応力算定手順を示す。ここで、図の式中の E は、完全硬化時コンクリートのヤング係数を意味し、材齢の影響は、各硬化体の体積割合 Δv_i により考慮される。また Δv_i は、別に規定した体積と時間の関係から求めることができる。前述の変形に関する制約条件を設けたこと

により、各硬化体のある時間間隔内の応力依存性ひずみ増分が決定されるので、各硬化体の応力算定が可能となり、要素の応力は各硬化体の応力の和で求めることができる。また、図中の式に示すように、Solidification concept を使用した弾性状態での応力算定は、一般的な増分型の逐次線形計算と等価になる。このように、Solidification concept を用いた一軸応力算定は、材料非線形も踏まえて次式のように記述できる。

$$\Delta\sigma_n = \sum_i \Delta v_i F_i (\Delta\varepsilon_n) \quad (1)$$

ここで、 i は硬化体の番号であり、 Δv 、 F はそれぞれ硬化体の体積割合、応力-ひずみ関係である。式(1)において決定すべき関数は、 v と F であるが、それぞれの関数は、次を満足する必要がある。関数 v は、十分に時間が経過した際は、 $v=1.0$ である必要がある。関数 F は、初期ひずみによる損傷がゼロの場合には、実験で求められる硬化コンクリートの応力-ひずみ関係に一致する必要がある。関数 v には、既往の強度発現式等を用いることが可能であるが、例えば、圧縮強度と引張強度の強度発現には差異が見られることから、モデルの高精度化のためには、関数 v を材料物性値毎に設定する必要があるかもしれない。なお、 Δv と $\Delta\{\varepsilon\}$ は時々刻々と変化するので、式(1)は、厳密には積分形式で記述される必要があるのであるが、ここでは時間間隔が十分に小さいものとして、和の形で表現している。このように、Solidification concept を使用する利点は、各硬化体に仮定する F に時間項が含まれない点である。その一方で、時間の経過とともに次々と硬化体が生成されるので、計算量と記憶量が多くなる点が難点である。この一軸モデルの多次元連続体構成モ

デルへの拡張は、後述する格子等価連続体モデルによる。

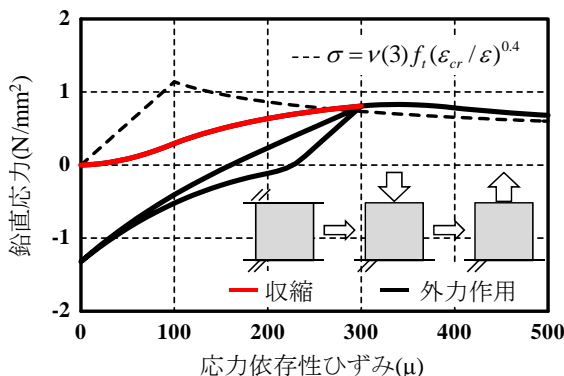
2.2 格子等価連続体モデル (LECOM)

3次元格子等価連続体モデル³⁾は、要素内の力の流れに沿った局所座標系に設定した3本の Main Lattice とひび割れ面を介して伝達されるせん断能力と直応力を評価するために、1ひび割れ面に対して4本設定される Shear Lattice を用いることにより、コンクリートの多軸挙動をそれぞれの格子に想定した応力-ひずみ関係の組合せにより表現するモデルである。応力算出の流れとして、ひび割れ発生前など材料挙動がほぼ弾性とみなせる応力状態では、弾性の応力-ひずみマトリクス $[D_e]$ を使用し、ひび割れの発生など構成則の切り替え判定が満足された後は、LECOM を使用する。また、正負交番載荷等により、最初に発生したひび割れとは異なる方向のひび割れの発生を許容している。その場合、第1ひび割れと第2ひび割れの交差角が22.5度以上の場合のみ、第2のひび割れ発生を許容し、新たな一対の Main Lattice と Shear Lattice 群を設定して応力計算を実施する。

Solidification concept に基づく3次元連続体構成モデルの構築は、LECOM を構成する格子群に式(1)を適用することにより可能となる。そのため、本構成モデルは、変形の適合性も十分考慮されており、連続体においても理論的瑕疵無く適用することができる。なお、構成則の切り替えは、全ての硬化体に対して構成則の切り替え判定を実施し、いずれかの硬化体が切り替え判定を満足した際に、全ての硬化体の構成則を LECOM に切り替えた。

(1) 応力-ひずみ関係 F

2.1 の関数 F に関する制約条件を満足する簡便な手法として、本研究では、関数 v を唯一として、応力-ひずみ関係 F には、Main Lattice, Shear Lattice とも、硬化コンクリートの応力-ひずみ関係³⁾を仮定した。例として、図-2 に引張を受ける際の Main Lattice の応力-ひずみ関係を示す。なお、構成モデルの応答を理解しやすくするために、ここでは除荷、再載荷経路を、図に示すように簡便な履歴経路と仮定している。



(2) 本構成モデルの応答

以上に示した Solidification concept を導入した LECOM が、初期ひずみや外力作用によりどのような応答を示すのかを探るために、簡単な数値計算を実施した。

1cm 角の立方体コンクリート要素の上下を鉛直方向に拘束したモデルに対して、以下の外乱を作用させた。

Case1 では、 $10\mu/0.1\text{day}$ 増分で、3日間強制的に収縮ひずみを与えた後に、要素上端に鉛直方向への強制変位を作用させる。Case2 では、 $-10\mu/0.1\text{day}$ 増分で、3日間強制的に膨張ひずみを与えた後に、要素上端に鉛直方向への強制変位を作用させる。Case3 では、 $10\mu/0.1\text{day}$ 増分で、3日間強制的に収縮ひずみを与えた後に、要素上端に水平方向への強制変位を作用させる。なお、材料物性値は、弾性係数、圧縮強度、引張強度をそれぞれ、 30kN/mm^2 , 30N/mm^2 , 3N/mm^2 とし、応力-ひずみ関係には、要素寸法に依存しない tension stiffening model を使用した。また、体積と時間の関係には、Ishikawa らの圧縮試験¹⁾より得られた強度発現式である式(2)を使用した。本式は、材齢3日で硬化時強度の約4割、材齢91日で10割の強度発現を算出する式である。

$$v(t) = \frac{t}{4.889 + t} \quad (2)$$

図-3、図-4 に各 Case の応力-ひずみ関係応答を示す。図では、初期ひずみ作用時の挙動を赤線で、外力作用時の挙動を黒線で示している。また、Case1, 2 では図

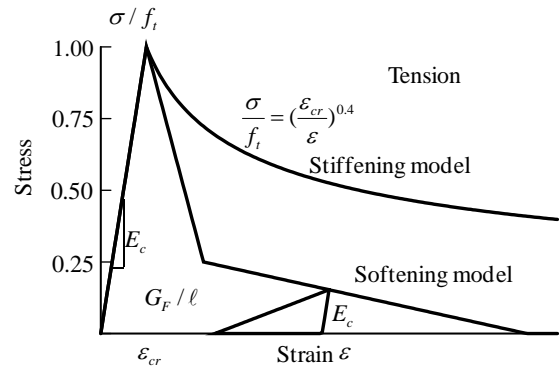


図-2 応力-ひずみ関係の例

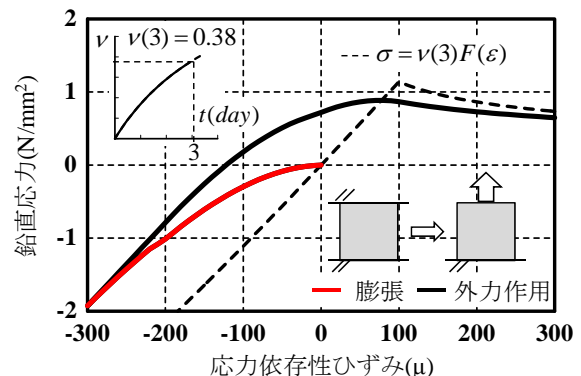


図-3 本構成モデルの応答 (左: Case1, 右: Case2)

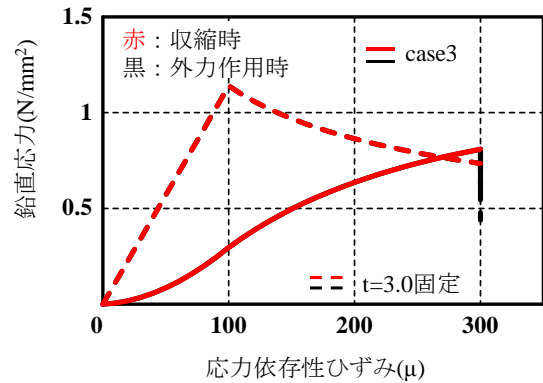
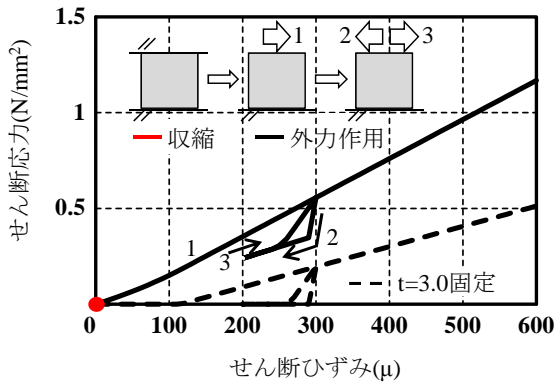


図-4 本構成モデルの応答 Case3 (左：せん断応力，右：鉛直応力)

図-2に示す応力-ひずみ関係に、式(2)より得られる $t=3$ 日時の $\nu(3)$ を乗じた応力-ひずみ関係を示し、Case3 では、 $t=3$ 日と固定したコンクリートに 300μ の収縮ひずみを与えてひび割れを導入した後に、水平方向に荷重載荷した場合の結果を破線で示した。各硬化体に図-2のような簡便な履歴挙動を仮定しても、3日までに生成される30個の硬化体に生じている応力依存性ひずみの差異により、複雑な応答を示す。得られた履歴挙動が妥当であるのかを実験等により検討する必要があるが、繰返し挙動も含めた鉛直方向の応答を探る Case1, 2 (図-3) では、初期応力解析時の増分型の逐次線形的挙動が表現できていること、耐荷力解析時には、外力作用時の材齢の応力-ひずみ関係に漸近する応答が得られていることから、本計算範囲内では、妥当な応答と考えられる。

収縮ひずみにより強制的にひび割れを発生させ、ひび割れ面を介して伝達されるせん断能力と直応力の応答を探る Case3 (図-4) では、せん断剛性が、 $t=3$ 日と固定した破線の応答値と比較してやや高い。これは、材齢3日までに生成された30本の硬化体の内、ひび割れが発生していない10本の硬化体が、弾性のせん断抵抗を示すためである。またこれにより、ひび割れ面を介して伝達される直応力も小さめに評価している。なお、破線のせん断応力-ひずみ関係において、せん断ひずみが 100μ 程度以下でせん断応力がゼロである理由は、ひび割れ面が接触していないためである。

ひび割れ面のせん断伝達挙動は、ひび割れ面におけるせん断変位とひび割れ開口変位によって評価される。本研究では、式(1)をそのまま使用しているので、特に各硬化体に発生しているひび割れ幅と要素全体のマクロなひび割れ幅との関連を評価していない。Outputとして得られるマクロなひび割れ幅を評価するためにも、実験等を通じて、各硬化体に発生しているひび割れ幅と要素全体のマクロなひび割れ幅との関連を明確にする必要がある。また、その結果に応じては、2.1に示した関数 ν 、 F に関する制約条件を満足しつつも、新たに生成した硬化体

に、それまでの損傷を反映させる必要性も考えられる。

3. 既往の実験への適用

構成モデルの妥当性を検証するために、國枝らによる実験²⁾の数値解析を行った。この実験では、若材齢コンクリートの硬化過程と載荷履歴を考慮した載荷実験がなされている。図-5に解析モデルを用いて試験体寸法を示す。なお、MODE I破壊が卓越するので、解析モデルは、奥行き方向の分割数を1としている。数値解析で使用する材料物性値は、実験で得られた材齢28日時での値である圧縮強度 29 N/mm^2 、弾性係数 27 kN/mm^2 とし、引張強度ならびに破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書式から算定した。また、関数 ν には、國枝らが提案する式(3)を使用した。

$$\nu(t) = \frac{t}{(t+0.6) \cdot 0.979} \quad (3)$$

式(3)は、弾性係数、曲げ強度ならびに破壊エネルギーの試験結果から導かれており、材齢4日で約9割、材齢28日で10割の硬化体が生成される式となっている。

図-6に実験値と解析値の荷重-CMOD関係の比較を示す。図のタイトルにおいて、例えば(a)シリーズ $1^{0.24}-28^{0.5}$ は、材齢1日でCMOD 0.24 mm まで1次載荷した後、荷重を除荷し、材齢28日にCMOD 0.5 mm まで2次載荷することを意味する。図中の破線は、荷重除荷時のCMOD位置を意味し、プロット○、□ならびに△は、各材齢での載荷開始CMOD位置である。また、図には、式(3)で求められる各材齢時の硬化体割合を記した。

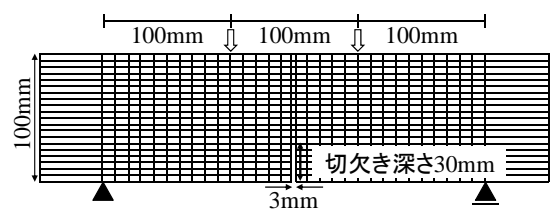
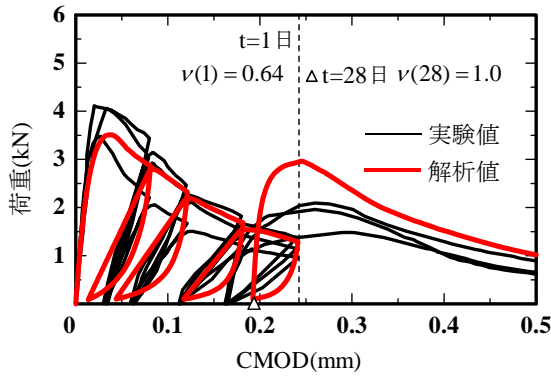
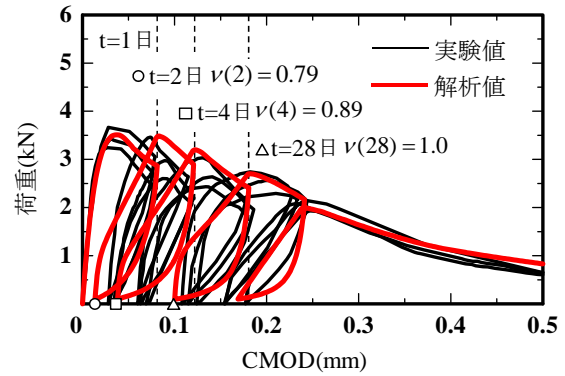


図-5 試験体寸法 (解析モデル)



(a) シリーズ $1^{0.24}-28^{0.5}$



(b) シリーズ $1^{0.08}-2^{0.12}-4^{0.18}-28^{0.5}$

図-6 実験値と解析値の比較

いずれのケースにおいても、解析値は実験値を概ね再現している。64%の硬化体生成時に比較的大きな損傷の1次載荷を実施した図-6(a)では、解析値は2次載荷時の耐力を過大評価している。この傾向は、図-6(b)では見られないので、材齢極初期に比較的大きな損傷が導入された場合には、その後生成される硬化体の関数 F には、損傷の影響を反映させる必要があると考えられる。解析値の繰返し挙動には、材齢の影響が反映されているが、若材齢コンクリートにおいても、硬化コンクリートの履歴挙動に確認されるような、除荷剛性の低下やひび割れ面の接触による圧縮応力の伝達等々をモデル化する必要があるものと考えられる。また、解析対象とした引張が卓越する挙動については、関数 ν は、唯一であっても問題ないと考えられる。

4. 初期応力解析と耐荷力解析の連成解析

初期応力解析と耐荷力解析を連成させるために、本研究では、新たに応力計算プログラムを以下のように再構築した。プログラムの構成は、図-7のフローに示すように、Input dataを読み込み後、解析対象のメッシュや変位境界を決定する Lift step、解析対象の時系列挙動を解く Time step、およびある時刻での外力作用を想定する場合には、その挙動を評価する Load step となる。非線形解析における Iteration step は、Time step、Load step に属する。なお、応力算定に使用する構成則は、上記 step によらず、全て同一である。このプログラムの流れにより、Input data で、初期応力解析や耐荷力解析のシナリオを想定すれば、1回の計算実行で、初期応力解析と耐荷力解析の連成が可能となる。

構築した解析ツールを用いて、数値解析例を実施した。解析対象モデルは図-8に示すように、地盤の上に打設された壁状構造物である。フーチング打設から14日後に壁が打設される。想定するシナリオは、Case1では、まず温度解析を実施し、得られた温度履歴を用いて初期応

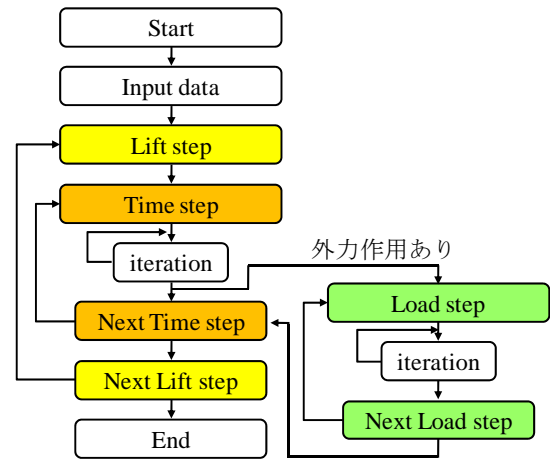


図-7 解析プログラムのフロー

力解析を行い、所定の時期に荷重500kNを作用させた後、荷重作用状態の下、引き続き温度応力解析の実行とした。Case2は、温度応力は考慮せず、材齢によるコンクリートの材料特性値のみを考慮した耐荷力解析とし、Case3は、初期応力損傷ゼロとした、完全硬化後に荷重が作用した場合の耐荷力解析とした。解析に使用したパラメータを表-1に示す。なお、関数 ν が不明であるので、ここでは、関数 ν を式(2)と仮定し、補強鉄筋とコンクリート間の付着は、完全付着と仮定した。

図-9に、別途実施した温度応力解析で得られた壁長手方向の中央断面の各点での最大主応力-経過時間関係を示す。得られた結果から、Case1での荷重作用時期は、応力が大きくなる18日(壁打設後4日)とし、Case2についても、同日とした。図-10に各Caseの解析で得られた図-8中の荷重-変位関係の比較を示す。初期応力による損傷の有無、荷重を作用させる材齢の違いにより、剛性に差異が見られる結果が予測された。Case1では、荷重作用後の硬化と水和の進行により、変形が戻る結果が予測された。ここでは、詳細な考察を割愛するが、構築した解析ツールにより、想定したシナリオの解析が、Input data操作のみで実行可能であることを確認した。

表-1 解析に使用した条件と材料諸元

物性値		壁	フーチング	地盤
熱伝導率	W/m ² C	2.7	2.7	3.5
比熱	kJ/kg ² C	1.1	1.1	1.5
単位体積重量	kg/m ³	2350	2350	2600
初期温度	°C	30	30	20
終局断熱温度上昇量	°C	52.9	45.0	-
温度上昇速度定数	γ	2.182	1.537	-
ポアソン比		0.2	0.2	0.25
ヤング係数	N/mm ²	30000	30000	100000
熱膨張係数	1/°C	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶
熱伝達率	壁	上面	14W/m ² C	
		側面	3日まで8W/m ² C, 3日以降14W/m ² C	
	フーチング	上面	14W/m ² C	
		側面	1日まで8W/m ² C, 1日以降14W/m ² C	
地盤	14W/m ² C			
圧縮強度	N/mm ²	35	30	10
引張強度	N/mm ²	3.5	3	2

想定したシナリオ

- Case1: 壁打設後4日で外力作用(連成解析)
 - Case2: 材齢のみ考慮して、壁打設後4日で外力作用
 - Case3: 完全硬化後に外力作用
- *Case2, 3では初期応力ゼロ

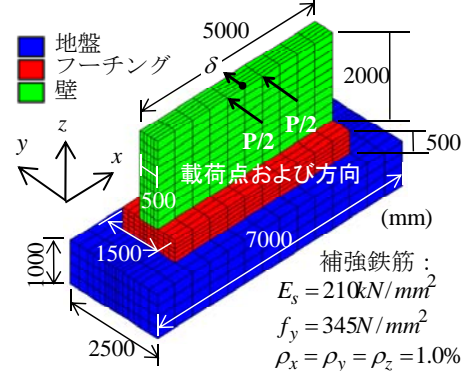


図-8 解析モデルと想定シナリオ

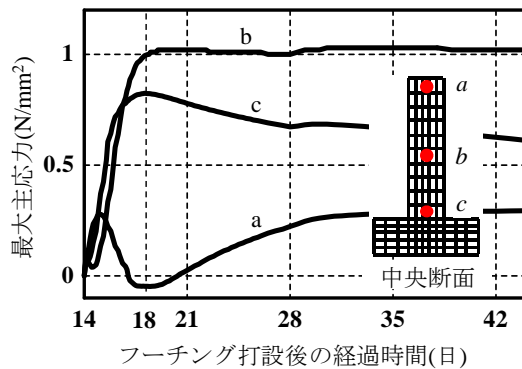


図-9 最大主応力-経過時間関係(温度応力解析)

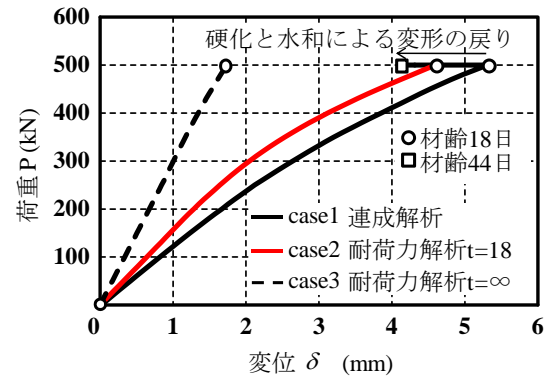


図-10 荷重-変位関係の比較

5. まとめ

本研究では、任意のシナリオの下での初期応力解析と耐荷力解析との3次元連成解析が実施可能な解析ツールの構築を行った。材齢依存型3次元連続体構成モデルの構築は、LECOMにSolidification conceptを導入することにより行った。

- (1) 構築した構成モデルは、MODE Iの破壊挙動を妥当な精度で予測可能なことを確認した。モデルの精度向上には、関数Fに生成までに導入された損傷の影響を考慮する必要があると考えられる。
- (2) 構築した解析ツールは、連成解析も含めた任意の想定外乱作用時の問題を、一つの解析プログラムで解くことが可能であることを確認した。

今後の展望として、構成モデルの精度向上は、Solidification conceptの範囲内で、様々な手法により可能である。そのためには、各種材料・材齢ごとの付着挙動も含めた応力-ひずみ関係が必要である。また、各硬化体のひび割れ幅とマクロなひび割れ幅との関連を検討する必要がある。

謝辞: 3章の実験データを名古屋大学大学院国枝准教授よりご提供頂いた。解析ツールの構築に当たっては、LECOM研究会の委員、(株)ホクト・システムに多大なるご助言を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Ishikawa, Y. et al.: Modeling of uni-axial constitutive law in early age concrete based on solidification concept, Proc. of Concreep7, pp.393-398, 2005
- 2) 国枝 稔ほか: 若材齢コンクリートの硬化過程および荷重履歴を考慮したひび割れ構成則に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.127-142, 2007.2
- 3) 田辺忠頭ほか: 初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム, 技法堂出版, pp.201-314, 2004.3
- 4) Bazant, Z. P. and Prasannan, S.: Solidification theory for concrete creep I: Formulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1691-1703, 1989