

論文 初期応力を考慮した格子等価連続体化法による RC 構造の解析手法の構築

野田智也*¹・伊藤 睦*²・石川靖晃*³・田辺忠顕*⁴

要旨：本研究は、時空間上で RC 構造物に生ずる劣化、損傷現象を全て統一的に評価することを主たる目的とするが、その第一歩として、コンクリート打設後の温度応力による初期欠陥、その後の耐荷力計算を統一的に評価可能な解析モデルの提案を行った。解析モデルの構築は、温度応力解析、構造解析モデルに大別され、双方に初期応力を考慮した格子等価連続体化法構成式を導入すると共に、構造解析モデルでは、非直交多方向ひび割れを許容している。構築した解析モデルを用いて RC 部材の耐荷力計算を行った結果、温度ひび割れによる初期欠陥の考慮の有無が、構造物の耐荷力に影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：遷移材齢時コンクリート、初期欠陥、材齢依存性、格子等価連続体化法(LECM)

1. 序論

近年、社会資本施設の設計は、ライフサイクルコストを最小にすることを目的とすることから、その供用期間の全ての事象を解析的に追求めることが主たる研究となりつつある。厳しい自然環境にさらされる RC 構造物には、打設後の温度応力による初期欠陥、クリープ、乾燥収縮、アルカリ骨材反応や鉄筋の腐食等の作用が働き、またある特定の時刻には地震力も作用することとなる。しかしながら従来の研究では、これら各種作用は各々独立に取り扱われているのが現状であり、時空間上で RC 構造物に生じる劣化、損傷現象を統一的に予測しうる解析モデルの構築が必要と考えられる。

そこで本研究では、その第一歩として、遷移材齢時コンクリートの初期応力問題から、初期欠陥を有する RC 構造の耐荷力計算を統一的に評価可能な解析モデルの構築を目的とする。解析モデルの構築は、温度応力解析、構造解析モデルに大別され、構成式の記述にあたっては、

両解析モデルとも、当研究室で開発が進められている格子等価連続体化法¹⁾ (Lattice Equivalent Continuous Model, 以下 LECM) の概念を導入している。加えて構造解析では、温度ひび割れに非直交するひび割れを考慮するために、非直交多方向ひび割れを許容できるように、従来のモデル¹⁾の改良を行った。また本研究では、初期応力を考慮した格子等価連続体化法構成式を導入した解析モデルを用いて、温度ひび割れによる初期欠陥の考慮の有無が、RC 構造物の耐荷力に及ぼす影響を解析的に評価した+

2. 解析手法

2.1 統一解析手法の概略

図-1 に、本解析の流れの模式図を示す。解析の流れは、大きく温度応力、乾燥収縮、クリープ問題など、長期に渡り構造物に生ずる作用を評価する経時変化解析と、ある任意時刻瞬間での構造物の耐荷力、耐震性能を評価する瞬間解析に分けられる。本研究の主たる目的は、時

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院助手 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

*3 名城大学助教授 理工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*4 名古屋大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

間軸に沿って RC 構造物に生じる様々な作用を、統一的に評価することであるが、本論文範囲内では、図中太字で示すように、打設後の温度応力問題、初期欠陥を有する構造物の耐荷力を統一的に評価する解析手法の構築を目指す。この時、経時変化解析とある任意時間の構造解析間におけるデータのやりとりは、基本的に応力の情報のみとしている。なお、本論文範囲内であっても、図-1 に示すように、経時変化に伴う温度解析、温度応力解析プログラム、ある時刻での耐荷力を評価する構造解析プログラムの構築が必要とされる。以下にそれぞれの概略と格子等価連続体化法について示す。

2.2 格子等価連続体化法 (LECM) 構成式

格子等価連続体化法のコンセプトは、鉄筋コンクリート要素が有する異方性と RC 部材内の力の流れを、コンクリート、及び補強材の格子成分(ひび割れが進行する軸)を想定することにより表現しようとするものである。RC 要素構成式構築の理論的概念は、コンクリート、補強筋ともそれぞれ **smearred crack model**, **smearred reinforcement model** と等価である。格子等価連続体化法の特徴は、格子成分応力と全体応力場の関連に、**kinematics** 型の **micro-plane** を用いることにより、RC 要素の耐荷機構を形成するコンクリート、及び補強筋の局所座標方向を、破壊の進行に応じて自由に与えることが可能な点である。また、その構成式は、ひび割れが発生した鉄筋コンクリート要素の複雑な特性に及ぼす要因を、コンクリート、及び補強筋格子成分を用いると共に、それらの方向角を破壊の進行に応じて操作することや、格子成分の応力-ひずみ関係を適切に評価することで、自由に表現することが可能となる。

格子等価連続体化法による RC 構成式は、コンクリートと補強筋による耐荷機構をモデル化した **Main lattice** 成分と、ひび割れ面におけるせん断伝達をモデル化した **Shear lattice** 成分を、ひび割れ面座標系に想定することにより構築される^{1), 2)}。なお、構造解析の場合には、材齢が

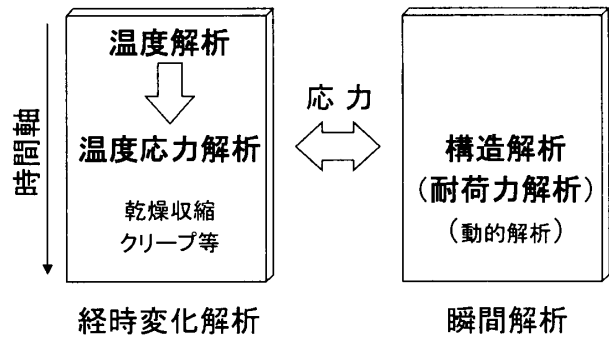


図-1 時間軸に対する解析の流れ

一定であることから、各格子成分に一軸の応力-ひずみ関係を仮定することにより、応力計算は要素の変形に伴う全ひずみを用いて評価することが可能である。

2.3 遷移材齢時コンクリートへの LECM の導入

遷移材齢時コンクリートのみで構成される構造体のある位置での三次元応力場における応力-ひずみ関係を考える。但し、コンクリートの降伏は最大主応力が引張強度を超えたときのみ起こるとし、圧縮域では降伏は生じないと仮定する。またこの位置では、 $n-1$ ステップまでは弾性体であると仮定する。このとき遷移材齢時コンクリートでは弾性係数等の材料特性は材齢に依存するため、弾性域でのトータル応力は次式のように時間ステップ毎の接線弾性マトリックスを用いて与えられる。

$$\{\sigma_{n-1}\} = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta\{\sigma_k\} = \sum_{k=0}^{n-1} [E(t_k)] \cdot \Delta\{\varepsilon_k^e\} \quad (1)$$

$$\{\varepsilon_{n-1}^e\} = \sum_{k=0}^{n-1} \Delta\{\varepsilon_k^e\} \quad (2)$$

ここで、 $\{\sigma_{n-1}\}$ および $\{\varepsilon_{n-1}^e\}$ はそれぞれ $n-1$ ステップ間までのトータル応力およびトータル弾性ひずみ、 $\Delta\{\sigma_k\}$ および $\Delta\{\varepsilon_k^e\}$ はそれぞれ k ステップにおける応力増分および弾性ひずみ増分であり、 $[E(t_k)]$ は k ステップにおける接線弾性応力ひずみマトリックスである。さらに t_k は k ステップ目の材齢である。 n ステップ目においても式(1)、(2)と同じ考え方で、 $\{\sigma_n\}$ および $\{\varepsilon_n^e\}$ を算定し、 $\{\sigma_n\}$ の主応力 $\{\sigma_{pn}\}$ 中の成分の

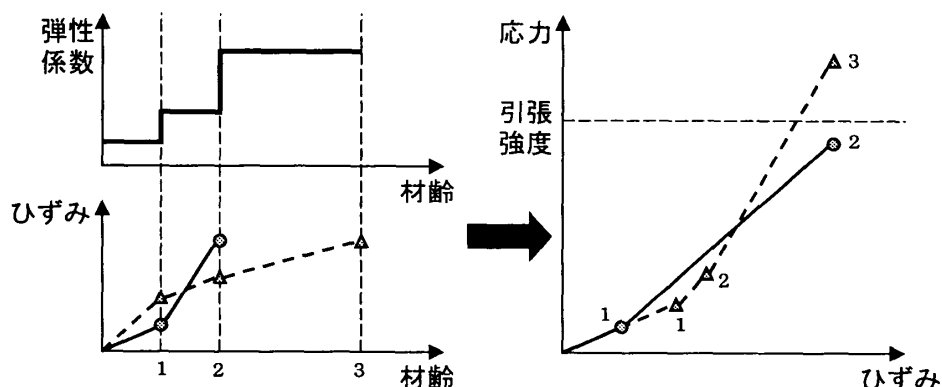


図-2 材齢依存性がある場合の応力ひずみ関係

うち、最大のものが n ステップ目の引張強度 $f_t(t_n)$ を超えたと仮定する。その際、主応力方向に連続体と等価な格子を配置する(3次元の場合は3本の格子)。主応力と応力との関係は適当な座標変換マトリックス $[T]$ を用いて、次式で表される。

$$\{\sigma_n\} = [T]^T \{\sigma_{pn}\} \quad (3)$$

一方、通常の LECM、即ち硬化コンクリートに対する LECM は各々の格子に対してトータル成分で記述された適当な応力-ひずみ関係を単純に挿入することで達成されるが、逆に遷移材齢時コンクリートの場合は、図-2 に示すように応力-ひずみ関係が材齢依存となるため、予め格子の応力-ひずみ関係を与えることができない。故に、最大主応力方向の格子については引張軟化以降の応力ひずみの考えを、次式の応力-ひずみ関係で記述することとした。

$$\varepsilon_{pcr} = \varepsilon_{p(n-1)} + \frac{f_t(t_n) - \sigma_{p(n-1)}}{E_L(t_n)} \quad (4)$$

$$\sigma_p = f_t(t_n) g(\varepsilon_p - \varepsilon_{pcr}) \quad (5)$$

ここで、 ε_{pcr} は引張強度に達した格子における引張強度に達したときのひずみであり、 $E_L(t_n)$ は材齢 t_n のときの接線弾性係数である。また、 σ_p および ε_p は n ステップ時の引張強度に達した格子に作用する応力、ひずみである。3本の格子の応力、ひずみを配置することで、 $\{\sigma_{pn}\}$

および $\{\varepsilon_{pn}\}$ が得られる。また、 $g(\varepsilon_p - \varepsilon_{pcr})$ は引張軟化を表す関数である。引張軟化の度合いについても材齢に依存する可能性があるが、ここでは引張軟化を表す関数は材齢依存しないと仮定する。その他の格子の応力ひずみ関係は次式で応力とひずみを関連づけることとした。

$$\sigma_p = \sigma_{p(n-1)} + E_L(t_n)(\varepsilon_p - \varepsilon_{p(n-1)}) \quad (6)$$

式(3)~式(6)から、 n ステップでのトータル応力およびトータルひずみが算定される。 $n+1$ ステップ以降は、逐次弾性に従い次式でのトータル応力を算定するものとする。

$$\{\sigma_{n+1}\} = \{\sigma_n\} + [E_L(t_{n+1})] \{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\} \quad (7)$$

このとき引張強度は材齢 t_{n+1} で評価することに注意する必要がある。

$$\sigma_p = f_t(t_{n+1}) g(\varepsilon_p - \varepsilon_{pcr}) \quad (8)$$

さらに、式(5)および式(6)を比較し、小さいほうを格子に作用する応力とする。後は、式(1)、(3)を用いて前のステップと同様にトータル応力を算定する。以上のことを全てのステップで行いことにより、材齢の変化を考慮に入れた LECM が達成されることとなる。

2.4 構造解析モデルの概要

本研究では、3次元温度解析プログラムを構築し、打設後の温度変化の評価を行った。

構造解析では、図-1 に示すように、温度応力解析結果より、応力データを引き継ぎ、引き

継いだ内部応力状態を初期値として、構造物の耐荷力の評価を行う。

外部拘束条件の違いにより、温度応力解析におけるひび割れ発生状況は異なるものの、一般には、図-3 に示すような壁構造の温度応力解析を行うと、温度ひび割れは水平方向に発生する。その一方で、図に示すような外力を作用させた場合には、斜めひび割れが発生する。一般に、固定ひび割れモデルでは、最初に発生したひび割れ方向を固定することから、このような第2の斜めひび割れを評価することは不可能であるが、本研究では、温度ひび割れとは異なる方向のひび割れを許容するために、2.3 節で示した格子等価連続体化法構成式を、非直交多方向ひび割れを評価できるように、構成式の改良を行った³⁾。

3 温度解析の概要と解析結果

図-4 に、本研究で想定した解析モデルと幾何学的境界条件、及び温度境界条件を示す。想定した解析対象は、側面 2000mm×2000mm、厚さ 200mm の壁式構造である。また、温度境界は、面内を断熱境界と仮定しており、実構造物としては考えられない温度境界ではあるが、これは意図的に温度ひび割れが発生しやすい条件とするためである。また、表-1 に温度解析

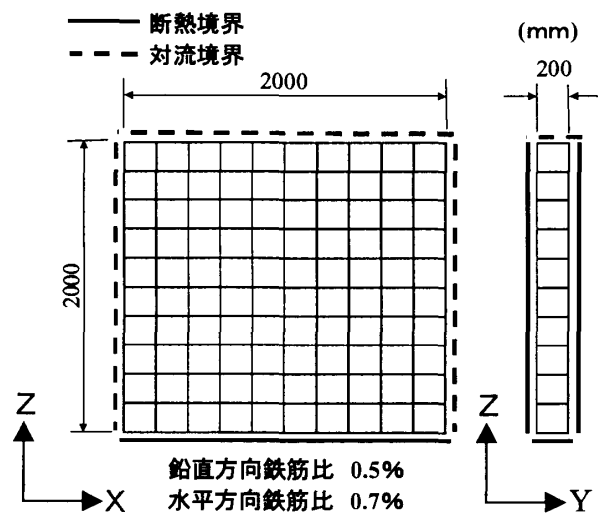


図-4 解析モデル寸法および温度境界条件

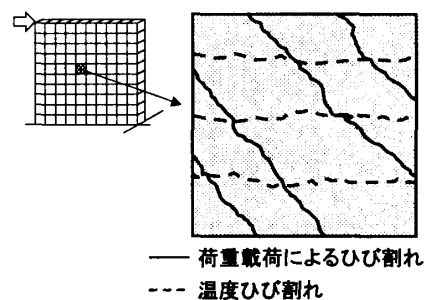


図-3 温度ひび割れと荷重載荷によるひび割れ発生状況の模式図

における諸元を示す。なお、温度解析、後述する温度応力解析は、材齢が 30 日まで行うこととした。

図-5 に温度解析から得られた温度履歴を示す。図示した温度変化は、それぞれ図中の点のものを示している。内部の温度は初期温度から約 35°C 上昇している結果が得られた。

4 温度応力解析の概要と解析結果

表-2 に、温度応力解析に使用した物性値等の諸元を示す。なお、温度応力解析では、外部拘束として、図-4 に示す解析モデルの下面のみ z 方向に固定した Case1 と、上面、下面双方を z 方向に固定した Case2 の 2 種類の境界条件

表-1 温度解析条件

比熱 [J/kg/°C]	1150.0
熱伝導率 [W/m]	2.80
密度 [kg/m ³]	2350.0
熱伝達率 [W/m ²]	14.0
初期温度 (°C)	20.0
外気温 (°C)	20→10
断熱温度	T _∞ 45.0
上昇式	γ _a 0.8

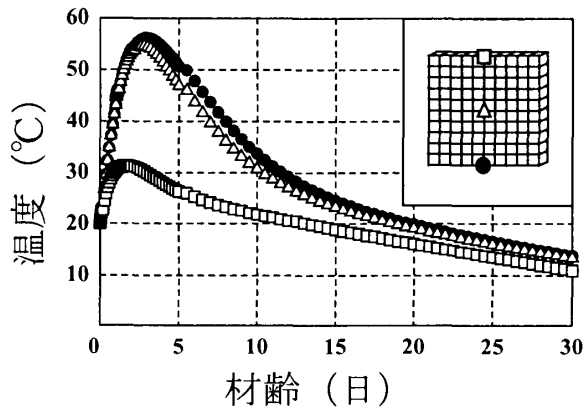


図-5 温度解析結果

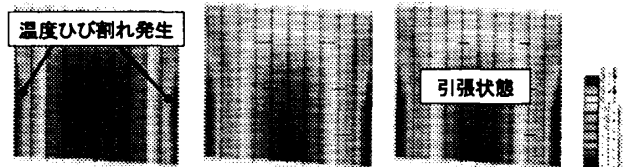
を用いて解析を行った。なお、Case2 は、外部拘束を強くすることにより、温度応力が高い応力レベルで発生させることを意識した幾何学的境界条件である。

Case1, Case2 の幾何学的境界条件を用いて温度応力解析を行った結果を、それぞれ図-6, 図-7 に示す。図には、初期温度がもっとも高くなる材齢 2 日と、材齢 10 日, 20 日, 30 日時のコンクリート、補強筋の z 方向の応力分布を示している。温度応力解析の結果、Case1 では、材齢 2 日頃に、両脇のコンクリートの引張応力が、材齢 2 日での引張強度に到達することにより降伏することが確認されたが、その他の個所について、コンクリートの温度ひび割れは確認されなかった。また、材齢 30 日での鉄筋の残留応力も、最大で約 20MPa 程度とであった。

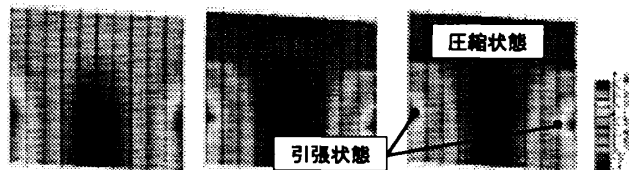
一方、意図的に外部拘束を大きくして初期ひび割れを発生させた Case2 では、2 日頃では外部拘束により、両脇のコンクリート部は圧縮状態であるものの、材齢が進むにつれてコンクリートが冷えることから、両脇、内部など多くの個所で連続的に温度ひび割れの発生が確認された。その結果、Case2 の z 方向鉄筋の応力分布には、材齢 30 日において、コンクリートと鉄筋が完全付着という条件下で解析されているため下端部両脇で約 270MPa の残留応力が温度応力解析の結果予測された。

表-2 温度応力解析条件

コンクリートのヤング係数 [MPa]	$E_c=(E_1 \cdot t)/(E_2+t)$
E_1	3.0×10^4
E_2	2.0
圧縮強度 f_c [MPa]	$f_c=(f_{c1} \cdot t)/(f_{c2}+t)$
f_{c1}	20.0
f_{c2}	2.0
引張強度 [MPa]	$f_t=(f_{t1} \cdot t)/(f_{t2}+t)$
f_{t1}	2.00
f_{t2}	2.0
鉄筋のヤング係数 [MPa]	2.1×10^5
鉄筋の降伏強度 [MPa]	295.0

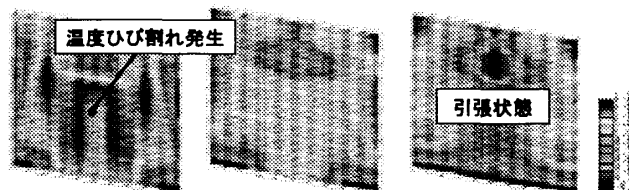


コンクリートの応力分布 (鉛直方向)

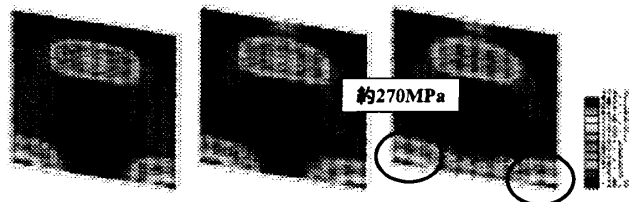


鉄筋の応力分布 (鉛直方向)

図-6 Case1 応力発生状況 (材齢 2, 10, 30 日)



コンクリートの応力分布 (鉛直方向)



鉄筋の応力分布 (鉛直方向)

図-7 Case2 応力発生状況 (材齢 2, 20, 30 日)

5. 耐荷力解析の概要と解析結果

温度応力解析により評価された初期欠陥、残留応力を引き継ぎ、非直交多方向ひび割れを許容した構成式を使用した耐荷力解析を行った。図-8 に予測された荷重-変位関係の比較を示す。図には、Case1, 2 の結果とともに、初期欠陥をまったく考慮しない解析結果を併せて示す。また、図-9 に各解析ケースにおけるポストピーク領域の変形図、Case2 では、解析終了時の変形図を示す。なお、荷重の载荷は、部材状面を一樣に x 方向に変位制御で载荷し、構造物上面は、z 方向に固定する幾何学的境界条件を採用することとした。

図-8 に示す荷重-変位関係を比較した結果、初期欠陥が比較的少なかった Case1 では、予測された耐荷力は、初期欠陥を全く考慮しない場合の耐荷力とほぼ同等であった。また、図-9 に示す変形図にも大きな違いは見られなかった。その一方で、意図的に温度ひび割れを発生させた Case2 では、多くの個所で温度ひび割れが確認され、高い応力レベルの残留応力が発生したため、予測された荷重-変位関係は、剛性も低く、耐荷力も非常に低く予測される結果となった。変形図を比較しても、中心部で破壊したと思われるため、下部までせん断ずれが生じていないと予測される。

6. まとめ

本研究では、時空間上で RC 構造物に生じる劣化、損傷現象を統一的に予測しうる解析モデルの構築を主眼とし、その第一歩として、遷移材齢時コンクリートの初期応力問題から、初期欠陥を有する RC 構造の耐荷力計算を統一的に評価可能な解析モデルの構築を行った。解析モデル構築にあたっては、温度解析プログラムの構築とともに、格子等価連続体化法に基づき、遷移材齢時のひずみ軟化挙動も考慮した構成モデルを提案した。加えて耐荷力解析においては、温度ひび割れと非直交するひび割れを適切に評価するために、多方向ひび割れを許容できるよ

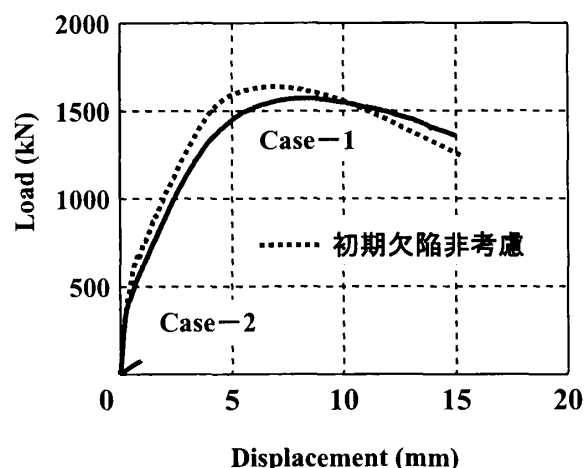


図-8 耐荷力解析結果の比較

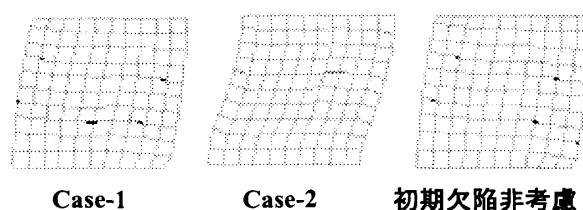


図-9 各ケースにおける破壊時の変形図の比較

う格子等価連続体化法構成式の拡張を行った。

構築した解析モデルを使用して、極端な境界条件の下、初期欠陥を有する RC 構造の耐荷力計算を行った結果、初期欠陥の有無、度合いにより、予測される耐荷力に違いが見られた。

参考文献

- 1) Tada-aki, Tanabe, Ahamed Syed Ishtiaq: Development of Lattice Equivalent Continuum Model for Analysis of Cyclic Behavior of Reinforced Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads Volume 2, pp.105-123, 1999.10.
- 2) 舟田武, 田辺忠顕: 格子等価連続体化法によるひび割れ面のせん断伝達モデル, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.3, pp1003-1008, 2001
- 3) Kongkeo PHAMAVANH, 伊藤睦, 田辺忠顕: RC 部材の非線形動的解析における格子等価連続体化法, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.2, pp1153-1158, 2002