

論文 格子等価連続体モデル (LECOM) による初期応力を考慮した RC 構造の解析

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 構造物に生じる劣化，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，コンクリート打込み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構築を行った。解析モデルは，経時変化解析，瞬間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モデル(LECOM)を導入すると共に，瞬間解析では，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 構造物の計算を行った結果，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，耐震性能に影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：格子等価連続体モデル (LECOM)，材齢依存性，非直交多方向ひび割れ

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いつ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，打込み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地震力が作用する。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であると考えられる。

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 構造の耐荷力解析，地震応答解析を統一的に評価可能な解析モデルの構築を行った。解析モデルの構築は，経時変化を伴う温度応力解析と，ある任意時刻瞬間での構造解析モデルに大別され，構成式の記述にあたって

は，当研究室で開発が進められている格子等価連続体モデル¹⁾ (Lattice Equivalent Continuum Model, 以下 LECOM) を導入している。温度応力解析では材齢に依存したモデルになっており，構造解析では，温度ひび割れに非直交するひび割れの発生を許容できるように，従来モデル¹⁾の改良を行った。構築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，耐震性能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，統一解析手法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

*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 工学研究科 土木工学専攻 助手 工博(正会員)

*3 名城大学 理工学部建設システム工学科 助教授 工博(正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 工博(正会員)

围内では、打込み後の温度応力問題、初期欠陥を有する構造物の耐荷力、耐震性能を統一的に評価する解析手法の構築を行った。なお、経時変化解析と、瞬間解析間におけるデータのやりとりは、時間依存の構成則の構築時にひずみを無視したため基本的に応力情報のみである⁵⁾。

2.2 格子等価連続体モデル (LECOM)

格子等価連続体モデルのコンセプトは、RC要素が有する異方性とその耐荷機構を、コンクリート(ひび割れが進行する軸)、及び補強材の格子成分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 smeared crack model ,smeared 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 RC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。格子等価連続体モデルによる 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

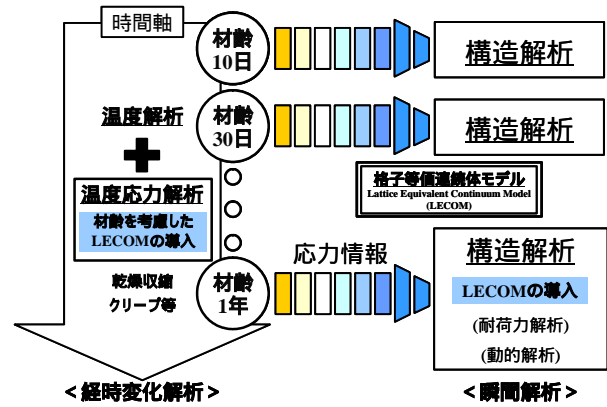


図 - 1 時間軸に対する解析の流れ

面座標系に想定することにより構築される^{1), 2)}。

2.3 LECOM の遷移材齢時コンクリートへの適用

図 - 2 に示すように、縦軸を応力 σ 、横軸をひずみ ε 、奥行きを材齢 t とした 3 次元を想定する。また、丸印は応力経路の変化を図示している。この経時変化では例えば n ステップの時刻を t_n と表記し、 n ステップの時刻がコンクリートにひび割れが生じるステップと仮定している。その際の材齢を考慮した LECOM 構成則について以下記述する。ただし、本研究ではひずみを無視し、応力の値のみから経路を決定すると仮定して構築を行った。

図 - 2 には、ひび割れが生じると仮定した時刻 $t = t_n$ での格子における応力 ひずみ 材齢関係と LECOM 構成則を図示している。このステップは逐次弾性で求めた応力が、時間依存の LECOM 構成則の引張強度を超えた場合である。図中の矢印 に示すように、応力点はまず連続

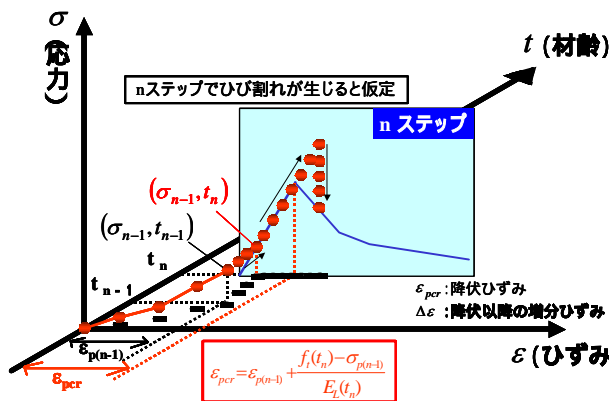


図 - 2 $t = t_n$ における応力ひずみ算定過程の概念

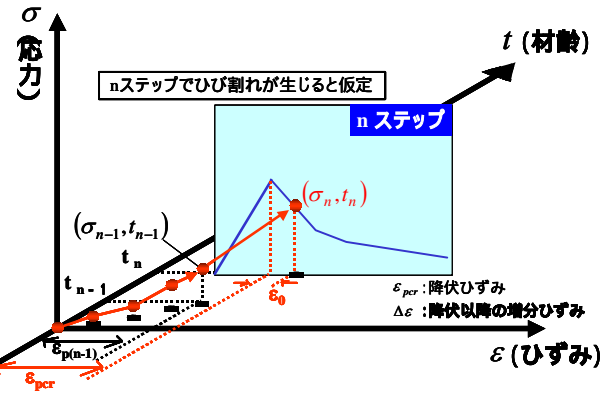


図 - 3 $t = t_n$ における応力ひずみ算定概念

を保つため時刻 $t = t_{n-1}$ の応力値をそのままの状態
 で時刻 $t = t_n$ の LECOM 構成則上にプロットする。
 次に矢印 に示すように逐次弾性で求まる
 応力値まで上昇させ、引張強度を超えた分は
 矢印 のように LECOM 構成則の軟化勾配ま
 でリターンマッピングさせる。このような応力
 の求め方によって、図 - 3 に示すような応力
 (σ_n, t_n) が得られる。

このように、ひずみを無視し、応力値のみを使用
 し材齢を考慮した LECOM 構成則を構築するこ
 とで、材齢とひび割れの双方を考慮できる一軸の
 応力 ひずみ関係を得ることができ、材齢を考慮
 した LECOM 構成式が構築される⁵⁾。

2.4 構造解析モデルの概要

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
 耐荷力などの評価を行う。また、図 - 4 に示す
 ように、温度変化により発生するひび割れ方向
 と、外力が作用した時発生するひび割れ方向は
 必ずしも直行しない。一般の固定ひび割れモデ
 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 のひび割れを評価
 することは、従来のモデルでは不可能であるが、
 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
 価連続体モデルを、非直交多方向ひび割れを評
 価できるように改良を行った³⁾。

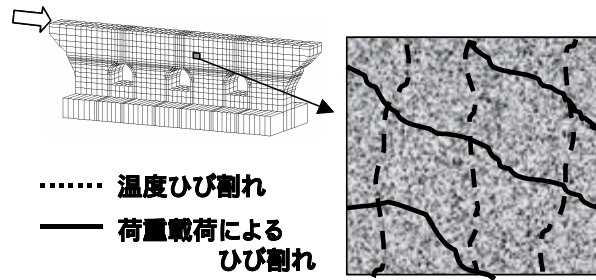


図 - 4 温度ひび割れと荷重荷重による
 ひび割れ発生状況の模式図

3. 温度解析の概要と解析結果

図 - 5 に、本研究で想定した構造の解析モデ
 ルを示す。想定した解析対象は、高さ 8940mm、
 幅 29500mm、奥行き 8400mm の橋脚構造である。
 なお本研究では橋壁上部工の解析に着目するた
 め、橋壁上部工を打込んだ日からを材齢とし、
 温度境界条件で、養生期間及び熱伝達率を変化
 させることで、型枠の影響を考慮している。ま
 た、温度解析における諸元は、比熱 1200.0J/kg/、
 熱伝導率 2.70W/m、密度 2276.0kg/m³、初期温度
 20 とした。なお、温度解析、後述する温度応
 力解析は各時期に適当な外気温変化を仮定し、
 材齢 105 日まで行った。図 - 6 に温度解析から
 得られた材齢半日から 75 日までの温度分布を
 示す。構造内部温度は材齢 3 日で初期温度から
 約 45 上昇する結果が得られた。

4. 温度応力解析の概要と解析結果

表 - 1 に、温度応力解析に使用した物性値等
 の諸元を示す⁶⁾。幾何学的境界条件は構造物底
 面の橋軸直交方向を可動式固定端、橋軸方向及

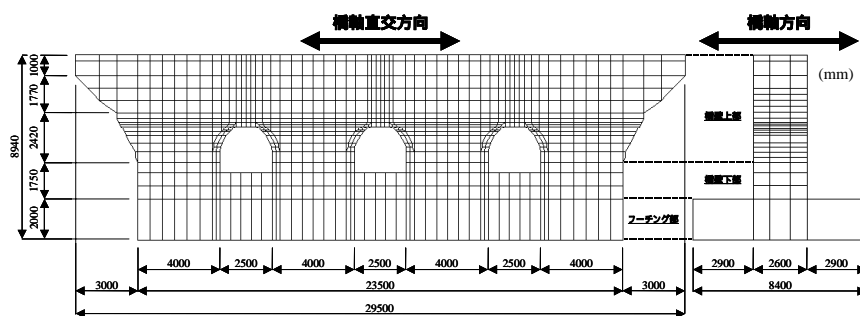


図 - 5 解析モデルの寸法と要素分割図

表 - 1 温度応力解析の諸元

コンクリートのヤング係数 E_c [MPa]	$E_c = (E_{c1} \cdot t) / (E_{c2} + t)$
E_{c1}	3.0×10^4
E_{c2}	2.0
圧縮強度 f_c [MPa]	$f_c = (f_{c1} \cdot t) / (f_{c2} + t)$
f_{c1}	20
f_{c2}	2.0
引張強度 f_t [MPa]	$f_t = (f_{t1} \cdot t) / (f_{t2} + t)$
f_{t1}	2.5
f_{t2}	1.0
鉄筋のヤング係数 [MPa]	2.1×10^5
鉄筋の降伏強度 [MPa]	295.0

(t : 材齢(日))

び鉛直方向は固定端とした。解析結果を図 - 7 に示す。図には、上部工打設後の材齢 15 日から材齢 20 日、25 日、35 日、45 日、75 日までの橋軸直交方向成分のコンクリートの応力分布図を示している。温度応力解析の結果、構造物内部の温度が最大になる材齢 3 日では温度応力の変化があまりなかったものの、コンクリートの温度が低下した材齢 15 日では中央の開口部の上側で、温度応力が引張強度に到達し、鉄筋も降伏する結果が得られた。材齢が進むにつれ、両側の開口部の上にも引張応力が発生し、約 2.0MPa の残留応力がひび割れを考慮した温度応力解析から予測された。温度応力解析から得られた材齢 105 日での初期ひび割れ状態を図 - 8 に示す。温度応力の分布図からも推測できるように開口部の付近でひび割れが卓越していることが確認できる。なお、材齢 105 日での温度および温度応力状態は材齢 75 日のものと同等であった。

5. 静的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て静的解析を行った。荷重載荷は、部材上面を一様に橋軸直交方向および橋軸方向に変位制御でそれぞれ載荷し、構造物底面は、完全固定する幾何学的境界条件を採用することにした。解析結果から予測された荷重 - 変位関係および変形図について初期応力考慮の有無で比較したものを図 - 9、図 - 10 に示す。図には耐力解析で最初に鉄筋が降伏した荷重 - 変位点と降伏箇所を丸印で表示し、変形図は各解析ケースのポストピーク領域のものである。橋軸直交方向に載荷した図 - 9 の荷重 - 変位関係からは、温度変化による初期応力を考慮することにより、初期応力を考慮していない場合と比較して、構造物の最大耐力と初期剛性が低下していることが確認できる。初期応力を考慮した場合、最初の鉄筋は、温度ひび割れが発生した左開口部で集中的に降伏しているな

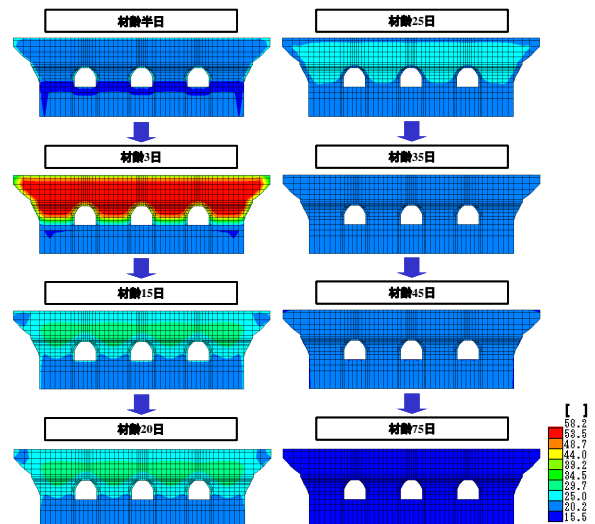


図 - 6 温度解析結果（構造物内部）

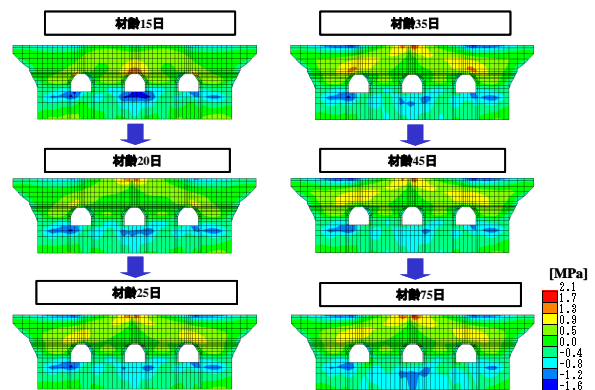


図 - 7 温度応力解析結果（橋軸直交方向）

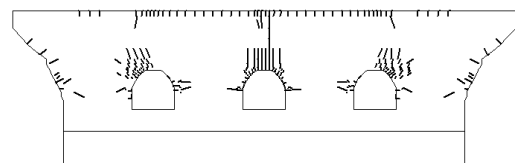


図 - 8 初期ひび割れ状態（材齢 105 日）

ど、内部挙動は初期応力の考慮の有無で大きく変化している。また、初期応力考慮の変形図では、開口部両脇などより広い範囲の要素でエネルギーが吸収されていることも予測されており、これは温度ひび割れが発生した方向に、さらに延長したひび割れが発生している状況からも確認することができる。橋軸方向に載荷した図 - 10 においても、同様の傾向が確認できる。変形図からは初期応力を考慮することにより、基部の損傷領域の範囲が広がっている。ひび割れ発生状況からもわかるように、広範囲の要素にひび割れが分散することが予測されており、その結果ポストピーク領域の荷重低下が緩やかにな

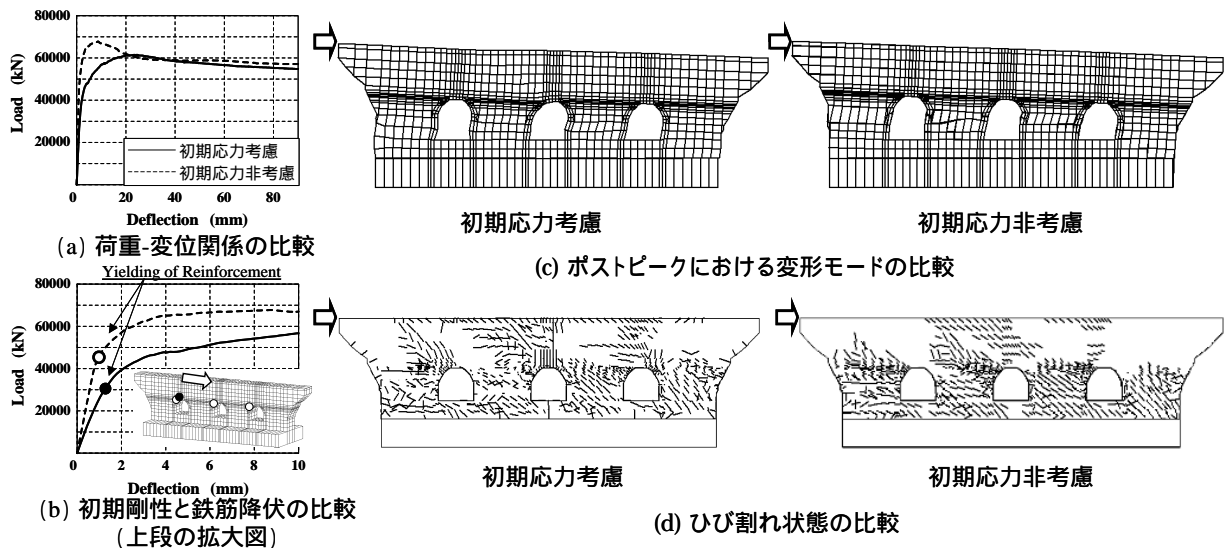


図 - 9 静的解析結果 (橋軸直角方向)

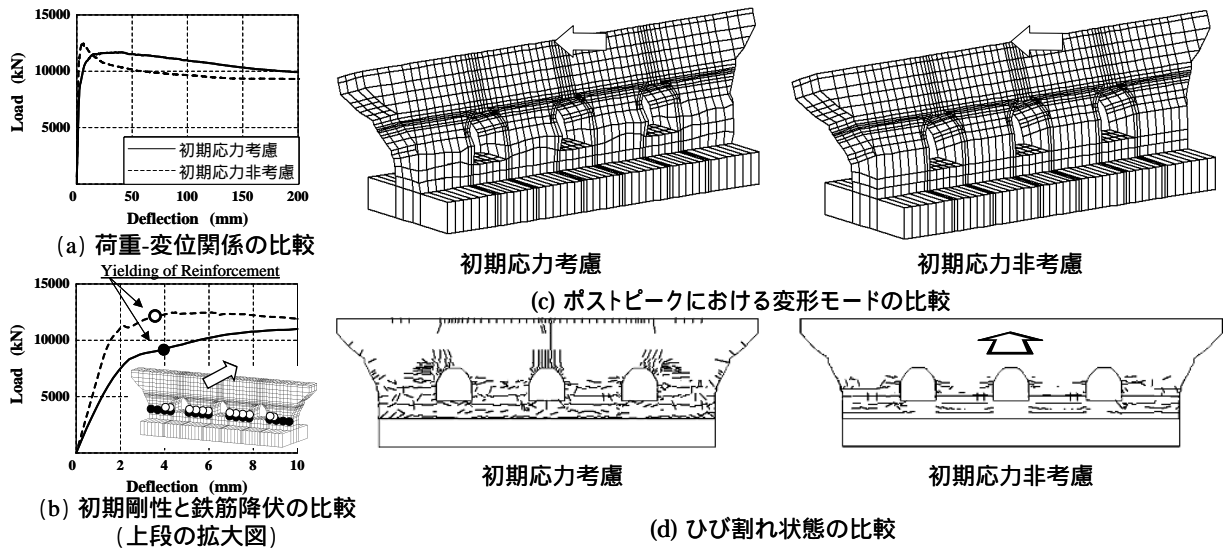


図 - 10 静的解析結果 (橋軸方向)

ったものと推測できる。

6. 動的解析の概要と解析結果

静的解析と同様に、温度応力解析より引き継ぎ、初期欠陥がどのように応答に影響するか評価した。入力地震波には、図 - 11 に示すコンクリート示方書のレベル2地震動、内陸型 (最大加速度 749gal) を用い、入力方向は橋軸直角方向、橋軸方向である。なお、構造物の上部工重量(2500 ton)は、5等分して支承箇所分散させ地震波は解析モデル底面より直接入力した。地震応答解析から得られた時刻歴変位・加速度応答の結果を図 - 12, 図 - 13 に示す。橋軸直角方向における時刻歴変位応答では、小さな振幅

ではあるが、初期応力の考慮の有無が応答変位量に影響を与えることを確認できる。静的解析で得られた構造物の初期剛性から構造物の固有周期を算出した結果、初期応力非考慮では 0.04 秒、考慮では 0.06 秒となっており、初期応力の影響により構造物の周期が長くなったことが、その要因の一つとして推測される。

橋軸方向では、初期応力考慮の有無によらず応答変位が大きくなっているが、初期応力を考慮することにより、最大応答変位が若干大きくなっている。静的解析結果の初期剛性から計算した固有周期は、非考慮で 0.12 秒、考慮で 0.16 秒程度である。入力した地震動の卓越周期は 0.1 から 0.7 秒であることから、応答変位が大き

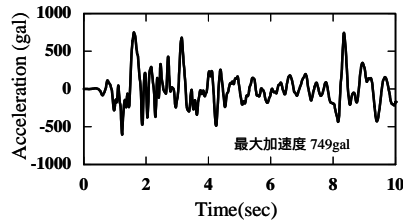


図 - 11 入力地震波

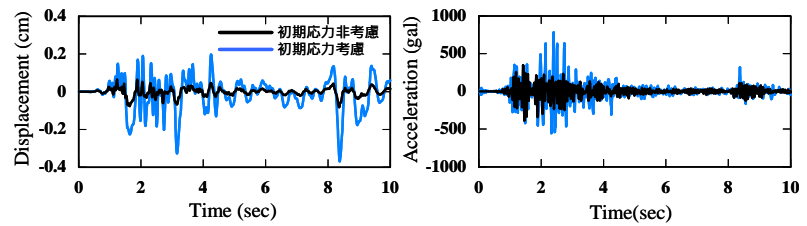


図 - 12 時刻歴変位・加速度応答（橋軸直交方向）

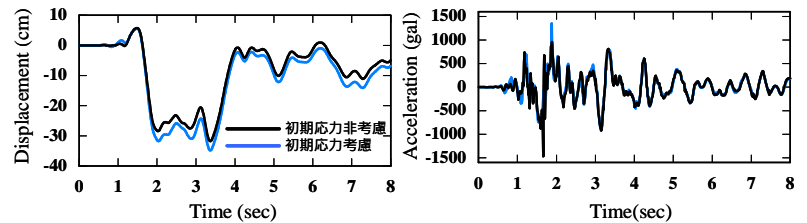


図 - 13 時刻歴変位・加速度応答（橋軸方向）

なったものと推測できる。

7. 結論

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、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、LECOM 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。加えて構造解析では、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う格子等価連続体モデルの拡張を行った。

構築した解析モデルを使用して、初期欠陥を有する RC 構造解析を行った結果、初期欠陥の有無が、予測される耐荷力、応答に影響を及ぼす結果が予測されたため、温度応力による初期欠陥を考慮する必要性を確認した。

8. 今後の課題

初期応力を考慮することにより、応答変位や応答加速度が影響を受けることは確かであるが、どのように影響を受けるかは、地震動の特性や構造物の特性によって異なるので、現段階では一般的な LECOM 構成則を導くことができない。今後、上述のような大型構造物を解析するため大型計

算機を開発し、実現象と比較することにより一般的な結論を導くことが検討課題である。

参考文献

- 1) Tanabe,T. and S,I,Ahamed.: 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, pp.1003-1008, 2001.7
- 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, pp.1153-1158, 2002.6
- 4) 野田智也, 伊藤睦, 石川靖晃, 田邊忠顕: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.25-30, 2003.6
- 5) 田辺忠顕: 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, 技報堂出版, 2004, 7 章
- 6) 石川靖晃: 不飽和多孔質材料としての遷移材齢時コンクリートの構成則ならびに構造挙動に関する研究, 名古屋大学博士論文, 1999