

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：33910

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820197

研究課題名(和文) 時間依存性構造解析手法の高精度化と耐久性力学問題への適用

研究課題名(英文) Application to Durability Mechanics of Concrete Structures and improvement accuracy of time-dependent structural analysis method

研究代表者

伊藤 睦 (ITO, Atsushi)

中部大学・工学部・准教授

研究者番号：00345927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：これまでに開発した時間依存型構造解析手法を高精度化するために、若材齢コンクリートと鉄筋間の付着挙動特性を評価するための両引き試験を行った。実験結果を用いて載荷材齢を考慮できる付着応力-すべり関係を構築し、本解析手法に導入した。耐久性力学問題まで適用できるように、別途実施した若材齢RC はりの曲げ載荷実験の数値シミュレーションにより解析手法の妥当性を検証し、温度解析・湿気移動解析を併用した既往の実験のひび割れ幅解析ならびに初期応力状態下で残存する構造性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to develop a constitutive model considering the hardening process for early age concrete, in order to predict the thermal crack of mass concrete structures and the durability of existing concrete structures, furthermore to improve the precision of the capacity of structures with initial stress. In this study, experimental and analytical study on the concrete behavior and bond behavior between concrete and reinforcement including softening region for early age concrete.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：若材齢コンクリート 構成則 数値解析 ひび割れ予測

1. 研究開始当初の背景

アセットマネジメント等にあるように、既設構造物を長寿命化するために、各種環境作用ならびに地震力等の外力作用を考慮して、コンクリート構造物の将来の機能低下予測や構造性能を精度良く評価する技術の開発が求められている。

これまで、コンクリート構造物の各種 FEM 解析技術の開発を行ってきたが、任意時刻の既設構造物の構造性能や、その後の機能劣化予測にこれまでの技術を適用するためには、解析の出発点である、照査を実施する時刻までに構造物に生じた応力状態や損傷状況を妥当な精度で知ることが必要となる。実構造物の非破壊検査等により、表面ひび割れや変形等の情報を得ることは可能であるが、これら情報を解析モデルに反映することは難しく、また調査では、内部の応力状態を知ることができない。そのため、コンクリート打込み後から照査を実施する時間までに構造物に生じた応力状態や損傷状況を、妥当な精度で予測するための解析技術の開発が必要であり、申請者はこれまでの解析技術を拡張することで、若材齢時から硬化時までの挙動を統一的に評価可能なコンクリートモデルの開発や、初期応力解析と耐荷力解析を連成して解くことができる解析ツールの開発を進めている。

耐久性力学問題は、コンクリート分野の全てを網羅する課題であり、個々の劣化現象の検討やその損傷が構造性能に及ぼす影響を確認する実験などは数多くなされている。若材齢コンクリートの挙動評価に関する研究は、過去には、引張(曲げ)について国枝らの研究、圧縮について石川らの研究、付着挙動について三村らの研究があるが、現在においても、若材齢コンクリートの応力-ひずみ関係に関する知見は、非常に少ない。特に、三村らの付着応力-すべり関係に関する研究では、軟化挙動までは評価されていない。加えて、これらの実験では、例えば、材齢 1 日で所定の損傷を導入した後に、荷重を除去した状態で養生をし、再度荷重載荷を行うというように、養生中の応力状態はゼロであったり、ひび割れが完全ではないにしろ、閉じた状態で養生が行われている。クリープの問題もあるが、硬化過程に作用する応力状態や導入されているひび割れ幅が、硬化後の応力-ひずみ関係に影響を及ぼすことは、十分に考えられるので、安全側の解を予測する解析モデルの構築に当たっては、このような硬化過程に作用する応力やひび割れ損傷が、硬化過程や硬化後の挙動に及ぼす影響を確認しておかなければならない。また、初期ひび割れ幅を精度よく予測するためには、若材

齢コンクリートと鉄筋間の付着特性を軟化域も含めて明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

- そこで本研究では、以下を目的とした。
- ①若材齢コンクリートと鉄筋間の付着挙動の実験的解明と付着構成モデルの開発
 - ②初期ひび割れ幅とその損傷状態での残存性能が評価できる解析ツールの開発と検証

3. 研究の方法

研究目的①では、載荷材齢を変化させることで、軟化領域も含めて、若材齢から硬化までに至る付着挙動特性の時間的変化を明らかにする実験を実施した。ここでは、別途実施する圧縮試験結果を使用して、若材齢時から硬化に至るまでのコンクリートの強度発現状況と、付着強度、初期剛性ならびに軟化勾配との関係を明らかにすることを目的とした。上記の実験結果を基に、材齢変化が考慮できる若材齢コンクリートと鉄筋間の付着モデルの開発を行った。

両引き試験には、表-1 の配合を使用して、図-1 に示す諸元の試験体を使用した。本研究では、材齢 1 日、2 日、3 日、7 日、10 日、13 日、16 日、20 日、23 日、27 日、31 日に両引き試験およびテストピースの圧縮試験を実施した。

表-1 コンクリートの配合

W/C	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
55	170	309	820	895

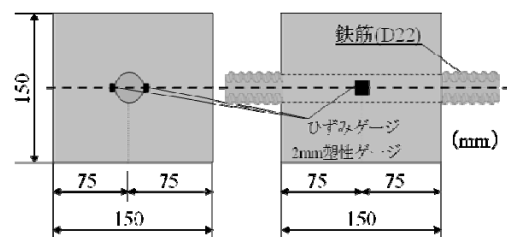


図-1 試験体諸元

研究目的②では、異なる載荷材齢と載荷履歴での RC はりの載荷実験を実施するとともに、上記の付着モデルを解析ツールに導入し、実験の数値解析を行うことで、予測される挙動、ひび割れ幅について解析ツールの妥当性の検証した。既往の実験の温度ひび割れ問題への適用とその状態での残存構造性能を解析的に評価した。

数値解析手法の妥当性を検証するための実験データを取得するために、載荷材齢を変化させた RC はりの載荷実験を行った。使用したコンクリートの配合とはりの諸元をそれぞれ表-2 および図-2 に示す。載荷実験は、それぞれ材齢 2 日、4 日、7 日、14 日、28 日、28 日に実施した。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 mm	W/C %	単位置 (kg/m ³)			
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
15	63	203	322	749	1020

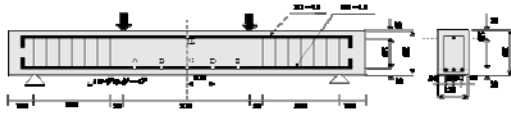


図-2 RC はりの諸元

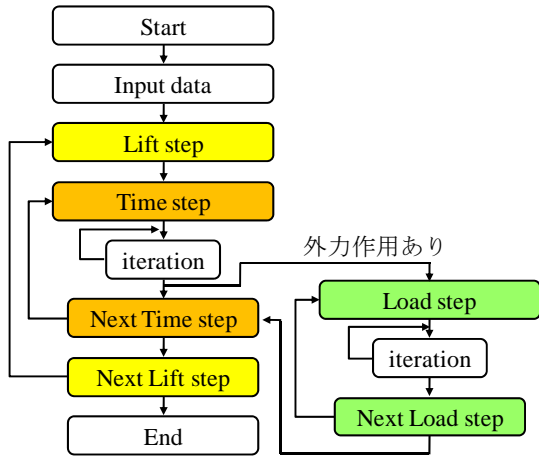


図-3 数値解析のフロー

乾燥収縮や温度応力解析の初期応力解析と、外力作用時の挙動を評価する耐荷力解析との連成解析手法の構築には、図-3 に示す解析フローとした。

4. 研究成果

① 荷重材齢を変数とした両引き試験結果

荷重材齢を変化させた両引き試験結果を以下に示す。図-4 は、圧縮強度と材齢の関係である。図-5 は、両引き試験から得られた各材齢の付着応力-すべり関係である。なお、本研究では付着応力とすべりをそれぞれ次式で定義した。

$$\tau = A_s (\sigma_{s1} - \sigma_{s2}) / ul$$

$$s = \delta - \Delta$$

ここで、 A_s : 鉄筋公称断面積(mm²), u : 鉄筋公称周長(mm), $\sigma_{s1} = P/A_s$: 試験体の荷重端の応力(N/mm²), $\sigma_{s2} = E_s \varepsilon$: 試験体中央の鉄筋の応力(N/mm²), Δ : コンクリート表面から変位計が取り付けられている位置までの鉄筋の伸び量(mm)である。

各材齢の付着応力-すべり関係を各材齢の付着強度および付着強度時のすべり量で無次元化した結果、材齢 2 週間程度までおよび材齢 2 週間から 1 ヶ月程度までの付着応力-すべり関係の形状は、ほぼ同一であることが明らかとなった。材齢 2 週間までは、付着強度を急激に付着応力が低下するのに対して、材齢 2 週間以降では、それまでと比較して、付着強度時のすべり量の約 2 倍から 2.5 倍程度で付着強度を失う。

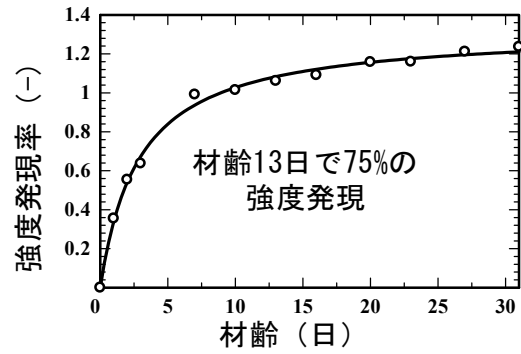


図-4 圧縮強度の材齢変化

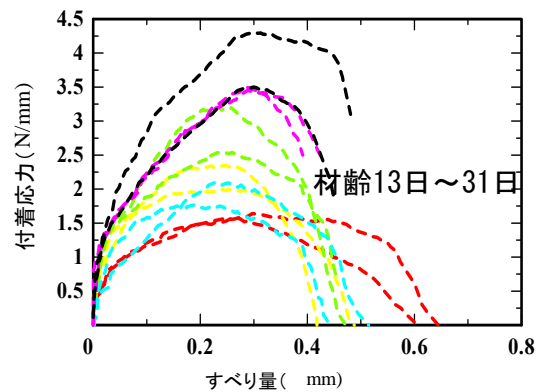
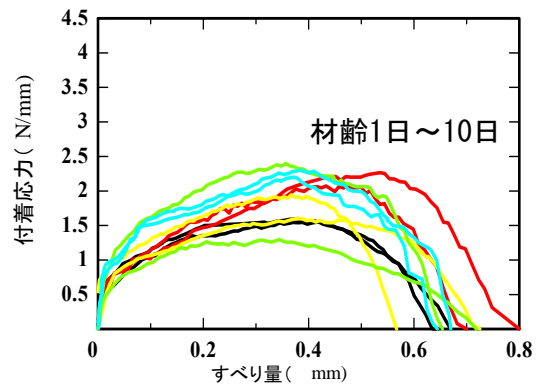


図-5 付着応力-すべり関係

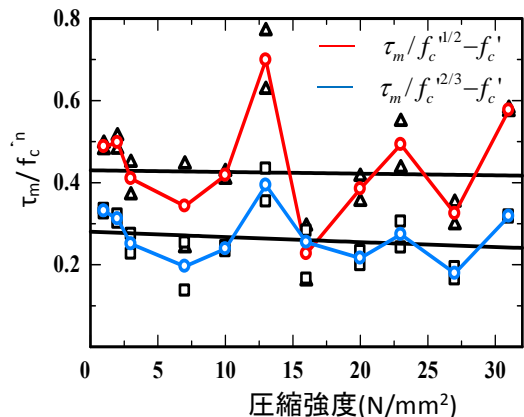


図-6 付着強度と圧縮強度の関係

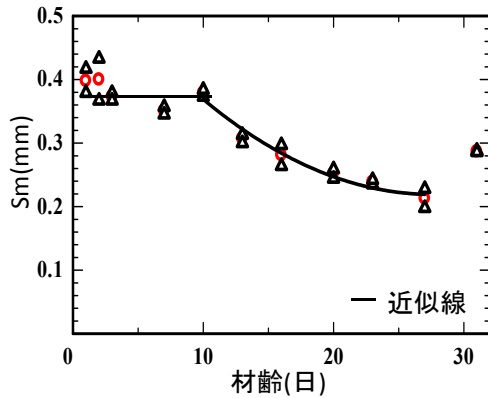


図-7 付着強度時のすべり量の材齢変化

図-6 と図-7 は、それぞれ各材齢の付着強度と圧縮強度との関係および各材齢の付着強度時のすべり量と材齢との関係である。この結果、実験データに多少のばらつきが確認されるものの、各材齢の付着強度を圧縮強度の2/3乗で無次元化した値と各材齢の圧縮強度は、ほぼ一定関係にあることが明らかとなった。また、付着強度時のすべり量は、圧縮強度との相関が低く、材齢の経過とともに小さくなることが確認された。

以上の実験結果から得られた知見と既往の Solidification concept を使用して、材齢依存型付着応力-すべりモデルを構築した。

②初期応力解析と耐荷力解析との連成解析

構築した解析手法の妥当性を検証するための実験データを取得することを目的に、載荷材齢を変化させた RC はりの載荷実験を実施した。なお、養生中の乾燥収縮が進行するように、水セメント比の大きいコンクリートを使用し、試験体は材齢1日で脱型した後機中養生とした。なお、比較検討を行うために、材齢28日まで水中養生したはりの載荷実験も実施した。また、載荷試験を行う直前まで、試験体内の鉄筋のひずみを計測するとともに、はりの載荷実験と同時に、テストピースの圧縮試験を実施した。図-8 に、圧縮強度と材齢の関係を示す。この結果、本研究で使用したコンクリートは、材齢2週間ではほぼ材齢28日での圧縮強度が発現する結果が得られた。

図-9 に、各材齢の荷重-変位関係の比較を示す。なお、荷重-変位関係の変位は、スパン中央のたわみから、支点上部で計測した沈下量を差し引いた値である。材齢2日および材齢4日ではせん断圧縮破壊し、それ以降は、曲げ引張破壊する実験結果が得られた。各材齢の圧縮強度とコンクリート標準示方書に示されているせん断圧縮耐力評価式および曲げ耐力評価式を使用して、各材齢の各種耐荷力を算定した結果、若材齢コンクリートはり部材の耐荷力についても、既往の算定式で予測することが可能であることが明らかとなった。

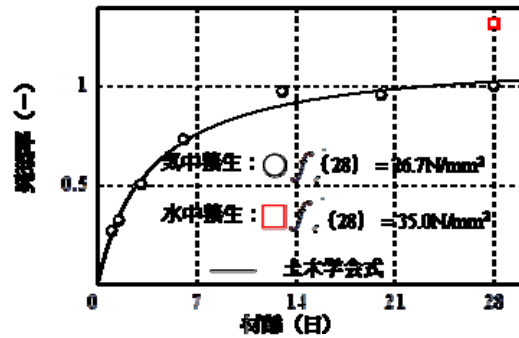


図-8 圧縮強度の材齢変化

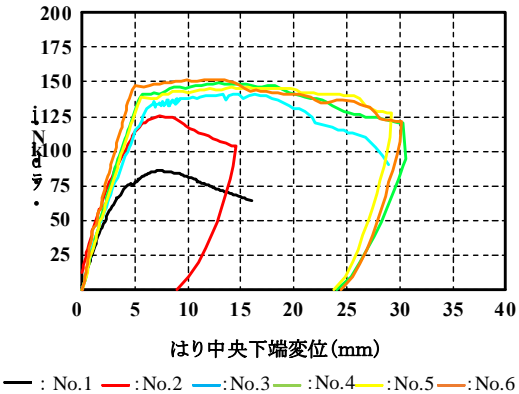


図-9 各材齢の荷重-変位関係

養生期間中の鉄筋ひずみの計測を行った結果、材齢28日において、機中養生の場合は約 280μ 程度、水中養生では約 100μ 程度の圧縮ひずみが生じていることが確認された。なお、ひび割れを目視で確認したが、明確なひび割れは確認できなかった。

構築した解析手法を用いて、実験の数値シミュレーションを実施した。実験結果と解析結果の荷重-変位関係の比較を図-10に示す。数値解析では、温度解析、湿気移動解析を実施することで、内部の温度変化および湿度変化を評価した後、これらの値の変化から求められる初期ひずみを用いた初期応力解析を実施した後に、所定の材齢で載荷解析を実施した。

図-10より、本解析手法は、載荷材齢による荷重-変位関係の変化を妥当な精度で予測可能であることが確認された。なお、解析は、ポストピーク挙動を予測できていない傾向があるが、これは、コンクリートの圧縮モデルにおいて、圧縮軟化挙動を考慮していないことや、破壊エネルギーを過大評価したためであると考えられる。図-11に解析で予測された破壊性状を示すが、材齢2日、4日では、斜めひび割れの発生に伴うせん断変形の卓越が確認でき、これは、実験で確認された破壊モードと同一である。以上のことから、本研究で開発した解析手法は、概ね材齢に伴う挙動の変化を予測可能であると考えられる。なお、本検討範囲内では、付着モデルの考慮の有無は、ほとんど解析結果に影響を及

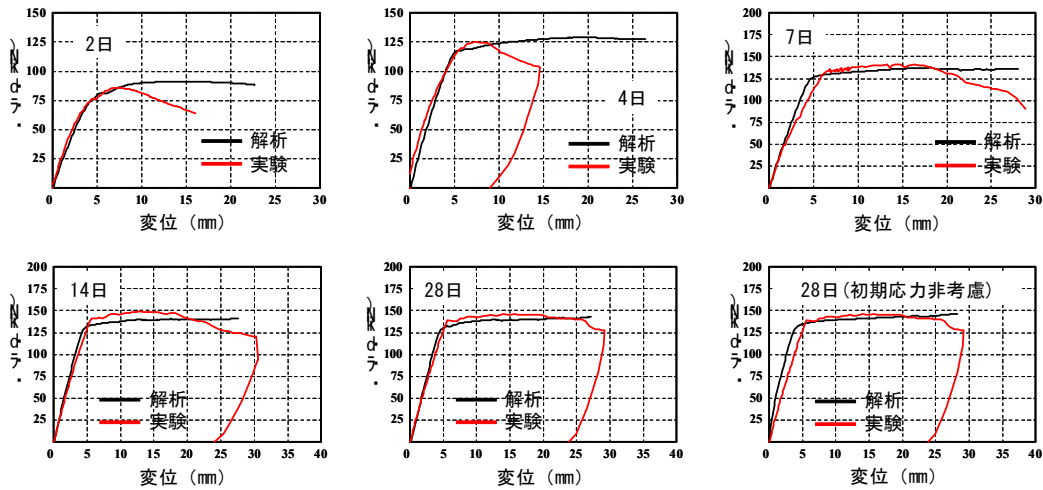


図-10 実験結果と解析結果の比較

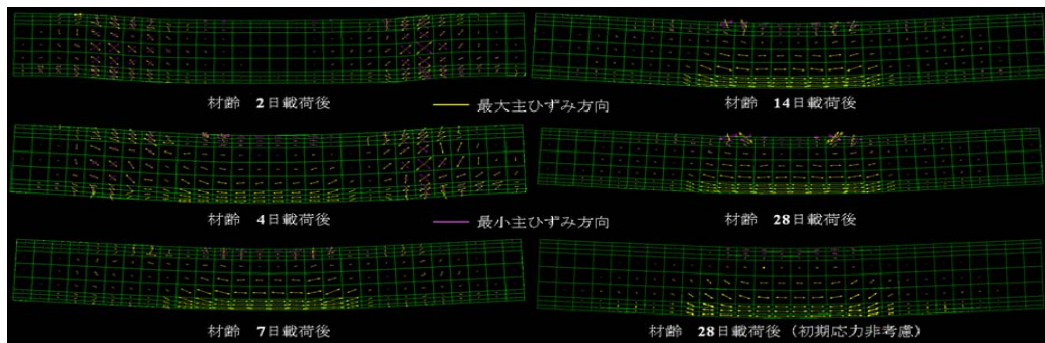


図-11 解析で予測された各材齢の破壊性状

ばさなかった。

コンクリートの乾燥収縮解析では、まず、湿気移動解析により水分移動に関する拡散方程式を解くことにより部材内部の水分量分布を推定し、その情報を基に乾燥収縮ひずみを求める必要がある。また、この乾燥収縮ひずみを初期ひずみとして応力解析を実施することになる。このため、乾燥収縮挙動を精度よく予測するためには、コンクリート内部の相対湿度変化、乾燥収縮ひずみおよびコンクリートの挙動を適切にモデル化する必要がある。しかしながら、特に材齢初期の乾燥収縮ひずみを評価する研究が実施されておらず、数値解析では、学協会で示されている硬化したコンクリート用の乾燥収縮ひずみ評価式を使用することになるが、この式を若材齢コンクリートに適用すると、若材齢時からひび割れが生じる解析解をとる傾向となる。そこで、本研究では、若材齢コンクリートの乾燥収縮実験を対象として、湿気移動解析で使用する各種材料物性値および乾燥収縮ひずみ評価式についても検討を行った。検討は、テストピースの自由収縮ひずみおよび内部の湿度変化の計測を行うとともに、実験で得られた湿度変化と収縮ひずみ挙動と解析結果のそれらとをカーブフィッティングすることにより、湿気移動解析に使用

するパラメータおよび若材齢コンクリートの乾燥収縮ひずみ評価式に関する知見を得た。図-12 および図-13 に検討結果の一例を示す。この結果、解析で使用するパラメータを適宜設定することや、若材齢コンクリートの乾燥収縮ひずみ評価式を圧縮強度の関数とすることで、概ね予測可能である結果が得られたが、更なる検討を要する。

既往の実験結果と解析結果の比較検討を実施するため、壁式構造物の温度応力解析を実施した。本検討では、要素寸法やその他解析条件が解に及ぼす影響を検討した。

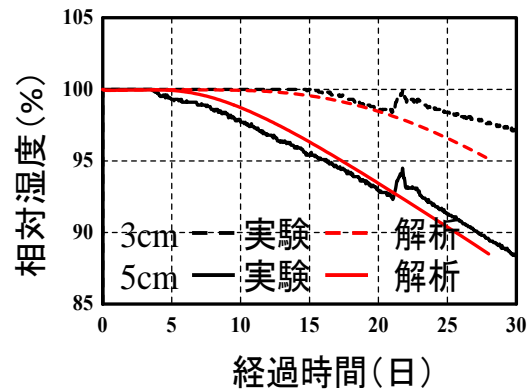


図-12 相対湿度の経時変化の比較

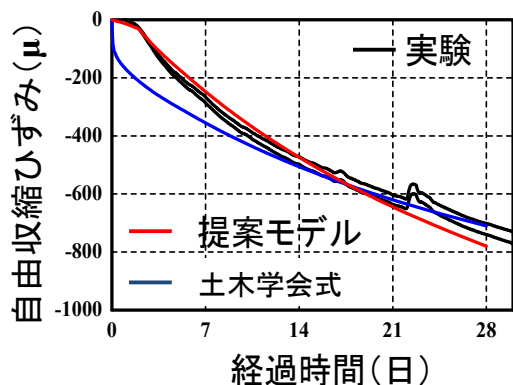


図-13 自由収縮ひずみの実験結果と解析結果の比較

温度応力解析を比較検討事例と選択した理由は、初期ひずみを算定するための試験体内部の温度変化がおおよそ妥当な精度で予測可能であるためである。

検討結果の一例を図-14 に示す。図は、2種類のメッシュ分割を用いるとともに、コンクリートの引張破壊エネルギーを恣意的に変化させた際の解析結果である。構造解析において、破壊エネルギーは荷重-変位関係に見られる解の要素寸法依存性を低減させるために使用されているが、本解析のように、荷重といった外力作用が生じない場合には、破壊エネルギーを導入しても解の要素寸法依存性を低減できないことが明らかとなった。なお、別途、付着モデルの考慮の有無の検討も行ったが、破壊エネルギーが解に及ぼす影響が大きく、本検討範囲内では、予測されるひび割れ幅に、付着モデルはほとんど影響しない結果が得られた。

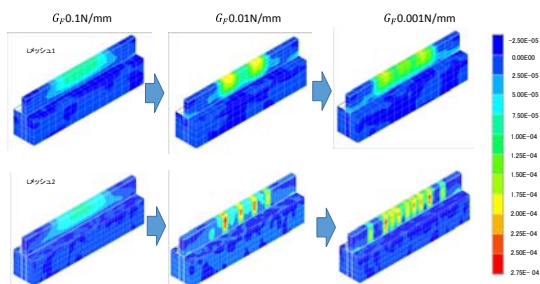


図-14 解析モデルと破壊エネルギーが解に及ぼす影響

以上のように、本研究では、当初目的とした研究内容を概ね達成することができた。しかしながら、解析手法の更なる高精度化には、湿気移動解析や乾燥収縮ひずみの評価式、若材齢時のコンクリートの応力-ひずみ関係などに対して更なる検討を要する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①石川靖晃, 伊藤睦, 荒畑智志, 河合真樹, 原健悟: コンクリート構造物建設工程シミュレータの開発 - 各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォーム -, コンクリート工学, Vol.53, No.2, pp.172-180, 2015
- ②伊藤睦, 副田周希: 若材齢コンクリートの硬化過程を考慮した圧縮および付着挙動に関する実験的研究, 中部大学工学部紀要, 49 巻, pp.10-17, 2014
- ③本田直樹, 伊藤睦: 硬化過程のコンクリートと鉄筋間の付着応力-すべり関係の材齢変化, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.409-412, 2014
- ④波多野純基, 伊藤睦: 若材齢鉄筋コンクリートはり部材の曲げ挙動特性に関する実験的研究, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.413-418, プレストレストコンクリート工学会, 2014
- ⑤河合真樹, 堅田茂昌, 伊藤睦: コンクリート製高架水槽 RC 脚壁のひび割れ性状の評価, 平成 26 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, pp.392-393, 公益社団法人日本水道協会, 2014.10
[学会発表] (計 4 件)
- ①波多野純基, 伊藤睦: 若材齢鉄筋コンクリートはり部材の曲げ挙動特性に関する実験的研究, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2014.10.24, 岩手県・盛岡市
- ②本田直樹, 伊藤睦: 硬化過程のコンクリートと鉄筋間の付着応力-すべり関係の材齢変化, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2014.10.24, 岩手県・盛岡市
- ③副田周希, 伊藤睦: 両引き試験による若材齢コンクリートと異形鉄筋間の付着応力-すべり関係の評価, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.415-416, 2014.3.7, 岐阜県・岐阜市
- ④山口崇文, 伊藤睦: 載荷材齢と載荷履歴を変数とした若材齢 RC はりの載荷実験, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会, 2014.3.7, 岐阜県・岐阜市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤睦 (ITO, Atsushi)
中部大学・工学部・准教授
研究者番号: 00345927

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし