

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560432

研究課題名(和文) 時間依存型構造解析手法の高精度化と耐久性照査技術への応用

研究課題名(英文) Application to durability verification and improvement accuracy of time-dependent structural analysis method

研究代表者：

中村 光 (NAKAMURA HIKARU)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60242616

研究成果の概要(和文)：ひび割れ進展を高精度に評価可能な剛体バネモデルを用いた3次元時間依存型構造解析手法を開発し、コンクリート構造物の劣化予測手法としての適用性を検討した。開発した手法が、耐久性の主な問題である鉄筋腐食によるひび割れ進展挙動を精度よく評価できることのみならず、実構造物からのコンクリート片剥落現象まで評価できることを示した。また、コンクリートが火災の影響を受けた時の問題に適用し、耐久性および安全性に問題となる爆裂現象を再現できることを示すとともに、爆裂現象発生メカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A 3-dimensional time-dependent structural analysis method was developed based on Rigid Body Spring Method, which is applicable to simulate cracking behavior of concrete accurately. The applicability of the developed method on the degradation prediction of concrete structures was verified. The method was applied to the phenomenon of rebar corrosion problem and fire proof problem, which both are important problem for durability verification of concrete structures. The method could evaluate not only corrosion crack propagation behaviors but also spalling of concrete block from an existing structure. Regarding the fire proof problem, the explosive spalling behavior could be simulated due to fire and the mechanism was clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：剛体バネモデル、トラスモデル、鉄筋腐食、腐食ひび割れ、コンクリート剥落、トンネル火災、爆裂、蒸気圧応力

1. 研究開始当初の背景

現在、高度成長期に構築されたコンクリート構造物の劣化が顕在化し始め、既設構造物の劣化度の評価や劣化進展を予測し、LCC・LCA・アセットマネジメント等の手法とともに構造物の維持管理を適切に行っていくことが大きな社会的要求となっている。一方、新設構造物に対しては、高品質・高寿命化を

はかり、社会的コストを考慮しながら、必要な社会資本の構築と維持管理を行っていく必要がある。これらの要求に技術的に応えるための重要な要件としては、新設・既設構造物を問わず、(a)どの様な劣化・損傷が生じるか、(b)劣化・損傷がいつ生じるか、(c)生じた劣化・損傷がどの様に進行するか、(d)劣化・損傷が進行した場合、耐力などの構造

性能にどのような影響を与えるか、等を明らかにすることがある。劣化予測に関連し、土木学会コンクリート標準示方書で記載されている事項は、例えば、鉄筋腐食に関しては塩化物イオン濃度の侵入速度の算定方法と腐食発生限界濃度が、中性化に関しては中性化進展深さの算定方法が与えられているが、これらは上述の(a) (b)に関連する劣化発生に関する情報（予防保全）を与えるのみである。それに対し、膨大なコンクリート構造物を適切に維持管理するためには、事後保全も含めた、上述の(c) (d)の技術の構築と発展が必要と認識され研究されているが、未だ不十分な状況である。特に、多様なコンクリート構造物の長期の性能予測を考えれば、解析的手法の構築が不可欠と考えられるが、実験的な検討に比べ著しく遅れているのが現状である。したがって、耐久性照査技術を確立し高度化していくためには、本研究で目的とする上述の(a)～(d)の要件を全て考慮可能な解析手法を早急に開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時間依存型構造解析手法の開発を行い、耐久性照査技術を確立することである。このために、以下の事項について明らかにする。

(1) 2次元剛体バネモデルトラスモデルを3次元に拡張し、時間依存型構造解析手法の構築とその耐久性照査技術としての適用性・有用性を示す。

(2) 物質移動現象として、塩化物イオン・熱・水分を対象とし、既往の実験結果との比較から物質移動の影響のモデル化を行い、手法の高精度化を図る。

(3) 開発した手法を実構造物に適用し、耐久性照査技術への応用とその利用方法を提案する。

3. 研究の方法

本研究の方法は大きくは以下の3つに分類される。

(1) 研究代表者は、剛体バネモデルとトラスモデルを融合した2次元の時間依存型構造解析手法を開発してきた。しかしながら、多様な諸元を有する実コンクリート構造物への適用を考える場合は3次元化が必須である。そこで、図1に示すような3次元剛体バネモデルを用いた構造解析手法を開発するとともに、トラスモデルを組み合わせた時間依存型構造解析手法へと発展させる。

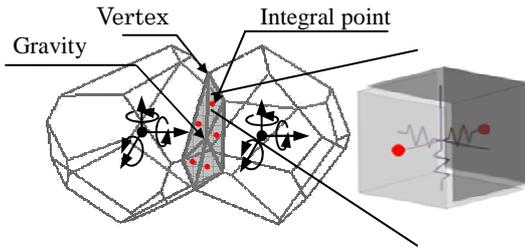


図1 3次元剛体バネモデル

(2) コンクリート構造物の耐久性で最も問題となる鉄筋腐食問題を取り上げ、鉄筋腐食ひび割れを高精度に評価可能にするため、構造解析における構成モデルの見直しを行うとともに、腐食膨張圧のモデル化を行う。まず、電食実験を行い、腐食ひび割れ進展挙動を詳細に観察し、改良したモデルにより実施した実験を解析することで、その精度評価を行う。さらに、図2に示すような実構造物のコンクリート片剥落現象のシミュレーションの可能性を検討し、耐久性照査技術としての有用性を検討する。

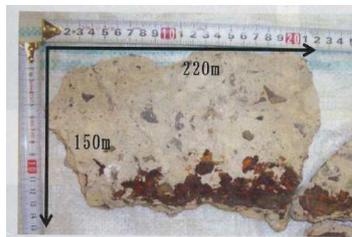


図2 鉄筋腐食による剥落事例

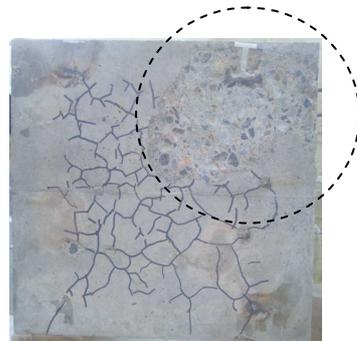


図3 高温加熱による爆裂

(3) 火災後のコンクリート構造物の耐久性と安全性に影響を及ぼす図3のような爆裂現象が評価可能なように、構造解析手法を動的解析に拡張する。また、火災の影響評価には

熱・水分の評価が重要なため、熱と水蒸気の移動のモデル化を行う。さらに高精度化した火災の影響評価手法を用い、爆裂現象のメカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 3次元剛体バネモデルの開発

剛体バネモデルを3次元に拡張するとともに、拘束効果を含むコンクリートの3次元挙動を再現可能な構成モデルを開発した。さらに、その適用性を様々な部材や荷重条件で確認した。その一例として、図4に示すようなモデルにより片持ちはり解析した場合、図5に示すように荷重変位関係を非常に精度よく評価できるとともに、図6に示すようにコンクリートのひび割れ発生や圧縮破壊性状の再現を可能にした。

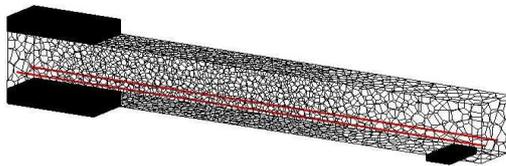


図4 片持ちはりのモデル

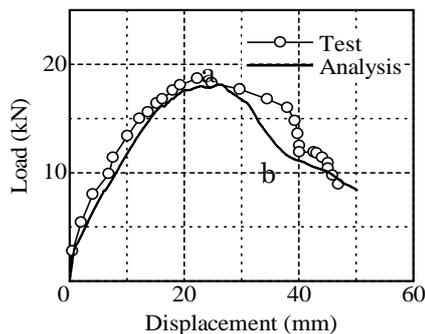


図5 荷重-変位関係

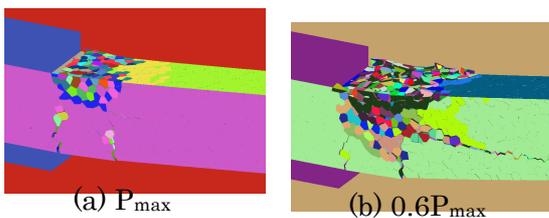


図6 基部の損傷状況

(2) 鉄筋腐食問題への耐久性照査技術の適用

① 電食実験による腐食ひび割れ進展挙動の評価

腐食ひび割れ進展挙動を図7のような電食実験により確認した。実験は、同一供試体を複数作成し、異なる腐食量に対し、表面ひび割れの経時変化を測定するとともに、実験終了後供試体を切断し、内部ひび割れの進展挙

動を評価した。また、供試体は、寸法、かぶり、鉄筋本数、腐食領域などを変化させ、多数の要因の影響について検討した。

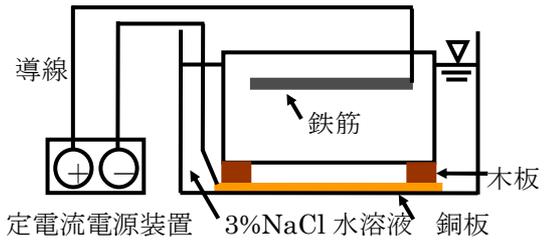


図7 電食実験概要

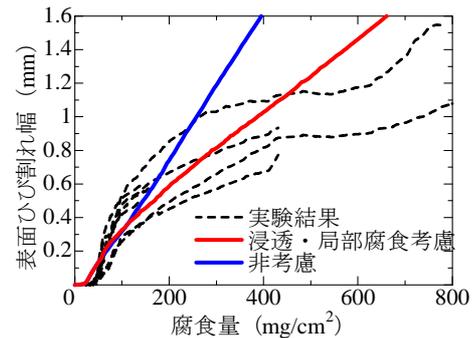
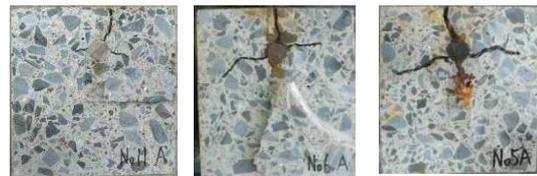
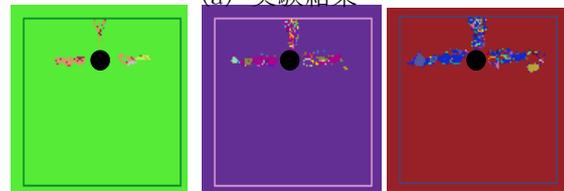


図8 表面ひび割れ幅の変化



(a) 実験結果



(b) 解析結果

0.54mm 0.94mm 1.52mm

表面ひび割れ幅

図9 断面内のひび割れ進展挙動

図8に断面寸法150×150mmでD19鉄筋をかぶり30mmで配置した場合の腐食量と表面ひび割れ幅の関係を、図9に供試体内部のひび割れ状況を示す。図8のようにひび割れ幅の経時変化を計測した例は少なく、ひび割れ幅の増加傾向を実験的に明らかにした。また、内部ひび割れに対しても、図9に示すようにひび割れは供試体表面側から鉄筋に向かって進展するとともに、表面ひび割れ幅が小さい領域でも、内部ひび割れはかなり進展することを実験的に明らかにした。また、供試体寸法やかぶりの相違がひび割れ進展挙動に

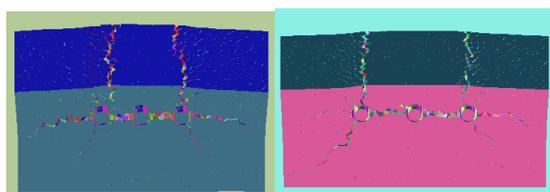
及ぼす影響についても明らかにした。

②腐食膨張モデルの開発

実験で得られたひび割れ進展挙動は、既往の腐食膨張モデルで再現することができなかったため、新たなモデルの開発を行った。開発したモデルは、コンクリート、腐食層、鉄筋をモデル化した3相モデルであり、さらに実験の観察状況を考慮し、鉄筋の局部腐食や腐食生成物のひび割れ部への浸透までも考慮可能なものである。

③鉄筋腐食によるひび割れ進展シミュレーション

3次元剛体バネモデルに腐食膨張モデルを組み合わせ、電食実験の解析を行った。解析結果を図8、図9で実験値と比較するが、表面ひび割れ幅の変化や内部ひび割れの進展挙動を開発した手法により適切に評価出来ることが分かる。さらに、開発した手法を複数鉄筋の場合など実構造物に近い条件で解析し、その妥当性を評価した。複数鉄筋の場合の解析では、図10に示すように鉄筋間隔の相違の影響、内部ひび割れの結合や相互作用を解析的にも明らかにした。



(a) 30mm 間隔 (b) 50mm 間隔

図10 複数鉄筋による腐食ひび割れ

④実構造物のコンクリート片剥落現象のシミュレーション

図2に示したRC床版からのコンクリート片の剥落現象を諸元等を考慮した簡易モデルにより再現し、耐久性照査技術としての実用性について検討した。剥落したコンクリート片は200mm四方程度の大きさであり、床版は、厚さ230mmでかぶり30mmでD19鉄筋が配置されていたため、図11に示すような諸元で鉄筋一本のみが配置されている簡易モデルを仮定した。また、剥落片の鉄筋腐食領域を設定した。図12に腐食量が250~300mg/cm²での表面と内部ひび割れ状況を示す。腐食量300mg/cm²は、質量減少量7.89%に対応し、図8,9に示す電食実験によれば、表面ひび割れ、内部ひび割れともある程度進展した状態にあたる。図12の表面ひび割れ発生領域は、剥落したコンクリート片の大きさと近いものであり、シミュレーションの妥当性が示されている。図13に変形挙動を示

す。コンクリート片が剥落する現象まで、シミュレーションが可能であり、耐久性技術として実構造物へも適用性を有することが確認された。

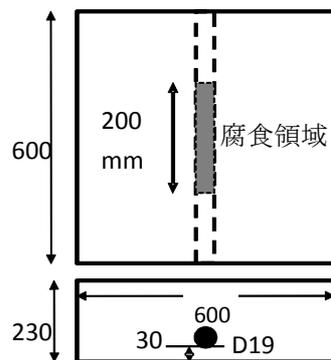


図11 基部の損傷状況

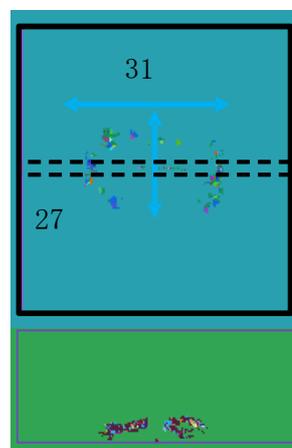


図12 ひび割れ進展状況



図13 かぶり剥落シミュレーション

(3) 火災問題への耐久性照査技術の適用

①物質移動との統合解析手法の構築

剛体バネモデルに、図14に示すように物質移動を簡易に表現できるトラスネットワークモデルを組み合わせた3次元の時間依存構造解析手法の構築を行った。物質移動では、コンクリート中の物質移動とは別に、ひび割れ部の物質移動も考慮できるモデルである。統合解析手法は、図15の解析フローにより、熱伝導、蒸気圧移動の物質移動現象と、それ

に伴う応力発生を取り扱うことができる。

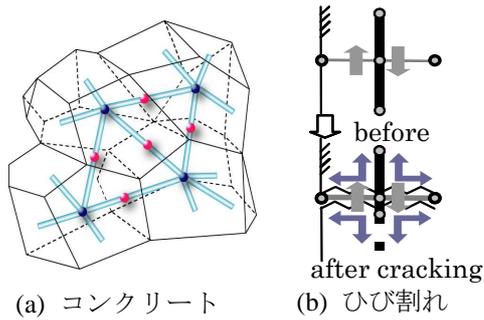


図14 トラスネットワークモデル

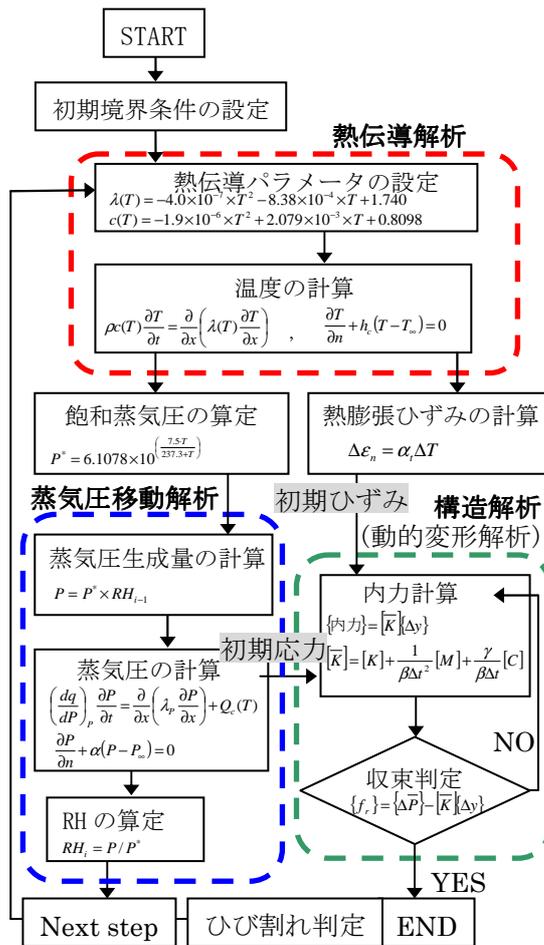


図15 解析フロー図

②火災時爆裂シミュレーション

図16に示すようなコンクリートスラブの高温加熱実験を行い、実験的に爆裂現象を確認するとともに、開発した手法で火災時爆裂現象のシミュレーションを試みた。

図17に爆裂直前の解析より得られた温度分布と蒸気圧分布を示すが、表面より10mmほど内部の位置で蒸気圧が分布し、この蒸気圧により表面部のコンクリートが爆裂することが予想できる。また、蒸気圧が最大とな

る深さは、実験で観察された爆裂深さとも一致しており、妥当な結果が得られていると考えられる。

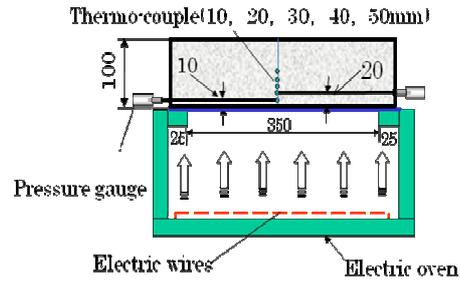


図16 加熱実験概要

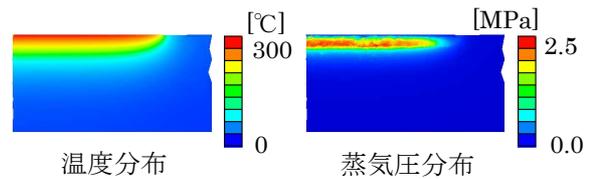


図17 爆裂直前の温度と蒸気圧分布

図18に爆裂発生時の挙動を示す。爆裂現象を、開発した手法により直接的に再現できていることが分かる。このように、爆裂現象を直接的に再現したシミュレーションは過去に例がなく、新たな火災問題に対する耐久性照査技術を提示できたと考えられる。

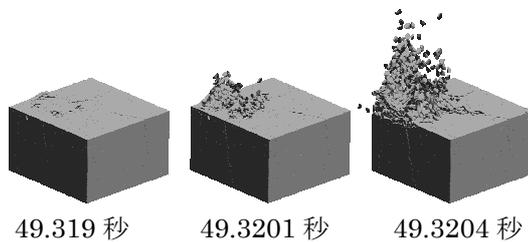


図18 爆裂時の挙動

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6件)

- ① 河村圭亮、K. K. TRAN、中村光、国枝稔、鉄筋腐食に伴うコンクリート表面および内部ひび割れ進展挙動、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol132 No.1、2010、1007-1012
- ② K. K. TRAN、H. NAKAMURA、K. KAWAMURA、M. KUNIEDA、Quantitatively Evaluation of Crack Propagation due to Rebar Corrosion、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol132 No.1、2010、1043-1048
- ③ 中島浩亮、中村光、国枝稔、山本佳士、3次元RBSMを用いたコンクリートの耐

火性能評価手法の開発、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 31No. 1、2009、937-942

- ④ 河村圭亮、中村光、国枝稔、上田尚史、鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.31 No. 1、2009、1075-1080
- ⑤ 河村圭亮、中村光、国枝稔、上田尚史、腐食ひび割れ進展解析における鉄筋腐食膨張圧のモデル化に関する研究、コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集、査読有、第8巻、2008、285-292
- ⑥ 山本佳人、中村光、黒田一郎、古屋信明、3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析、土木学会論文集E、査読有、Vol. 64No. 4、2008、612-630

[学会発表] (計9件)

- ① H. Nakamura、Analysis on Cracking Propagation during Life of Concrete Structures Using RBSM、2nd International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies、2010.6.29、Università Politecnica delle Marche(Italy)
- ② H. Nakamura、M. Kunieda、Crack Propagation Simulation during Life Cycle of Concrete Structures、Long-term behavior of concrete: Design and validation, Telford Advanced Research Workshop、2009.12.10、University of Glasgow (U.K.)
- ③ H. Nakamura、M. Kunieda、K. Nakashima、N. Ueda、Y. Yamamoto、Development of Fire Explosion Simulation Method Based on Rigid Body Spring Method、1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure、2009.9.5、Ramada Treff HotelLeipzig (Germany)

[その他]

ホームページ等

<http://concrete-lab.civil.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 光 (NAKAMURA HIKARU)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60242616

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

国枝 稔 (KUNIEDA MINORU)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60303509
山本 佳士 (YAMAMOTO YOSHIHITO)
防衛大学校・システム工学群・助教
研究者番号：70532802
上田 尚史 (UEDA NAOSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20422785