

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360175

研究課題名(和文) マルチスケール非破壊検査法の提案 - 逆均質化法の新導入

研究課題名(英文) Multi-scale non-destructive simulation using an inverse homogenization method

研究代表者

京谷 孝史 (Takashi, Kyoya)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00186347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、動弾性体積積分法(EFIT)と有限要素法を用いた逆均質化法という数理的手法を用いて、構造物の劣化・損傷の根源となるマイクロクラックの分布を同定するものである。ここでは異方性材料剛性を所与とし、それと等価な材料剛性を持つマイクロクラックの分布を最適化アルゴリズムを用いて求める一連の手法を提案し、その同定性能の検証を行った。

これまでのトポロジー最適化を適用した非破壊検査シミュレーションに関する研究では、数カ所の材料損傷部の位置しか同定できなかったが、本手法により、損傷部分の方向を再現できるようになったことは、この分野において一歩前進するものである。

研究成果の概要(英文)：This research takes numerical approaches; EFIT and the inverse homogenization method using the finite element method; aimed at identifying the distribution of micro-cracks, which cause degradation of, and damage to, structures. The research proposed a series of methods using optimization algorithms to calculate the micro-crack distribution with material stiffness equivalent to that of the given anisotropic material, and examined how well the methods modeled the distribution. While previous studies on non-destructive testing simulation by means of topology optimization are able to identify only a few damaged parts in material, this method is able to reproduce the directions of damaged parts, micro-cracks: this improvement is a step forward in the development of this field.

研究分野：応用力学

キーワード：micro-crack topology optimization inverse-homogenization non-destructive simulation

1. 研究開始当初の背景

トンネルや橋梁などの土木構造物に内在する材料亀裂や劣化・損傷は、構造物のもつ性能を著しく低下させる要因となることから、それらを早期に発見するための非破壊検査法の開発が盛んに進められている。

しかし、土木構造物に用いられる従来型の非破壊検査法は既に大きく進展した亀裂の場所等を推定することは可能であるが、本来最も重要な、材料の強度低下を誘発する微細亀裂(マイクロクラック)の計測やマイクロ領域における材料の劣化・損傷程度を評価することはできない。

そのため、別の方法として最近取りざたされている、「コンピュータを活用した新しい非破壊検査法」、すなわち、「非破壊検査シミュレーション」に関する研究開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は新しい数値的アプローチによって、微細亀裂の幾何学的配置や劣化・損傷したマイクロ構造の物理定数を同定できるマルチスケール非破壊検査法の開発を目的とする。具体的には以下の2つのテーマについて研究開発を行った。

- (1) 弾性波を用いた数値実験に基づく均質体表面のひび割れ深さ評価法の開発
- (2) 材料微細構造の損傷および劣化などによって生じたマイクロクラックの分布同定法の開発

3. 研究の方法

(1) 研究目的(1)に対する研究方法

概要

弾性波を用いたひび割れ深さの評価法は、主にP波を用いる方法と表面波による方法の2つに分類することができる。コンクリート材料を対象とした研究では、比較的不具合の生じにくい表面波に着目した検査方法の利用される。

しかし、こうした供試体に対する弾性波実験では、供試体寸法に制約があることから計測結果が供試体の境界面での反射波の影響を受けることは避けられず、しかも供試体内部における波動伝播の様子や境界面での反射を詳細に把握することが困難であるため、その影響を十分に考慮したデータ解析ができない。そのため、これまでさまざまなひび割れ推定式が提案されてきたが供試体の境界面(側面や底面)における反射波の影響、すなわち供試体寸法の影響を受けているといえる。

そのため、本研究では数値シミュレーションを活用したひび割れ深さ推定式の提案おこなった。ここでは、動弾性有限積分法(Elasto-dynamic finite integration technique: 以下EFITと略す)を用いて、境界面(側面)における反射の影響を受けない

程度に十分大きな3次元直方体モデル(図-1)に対する数値シミュレーションを実施し、ひび割れで散乱・回折する弾性波の波長とその減衰の様子についての分析結果からひび割れ深さの推定式を定式化した。

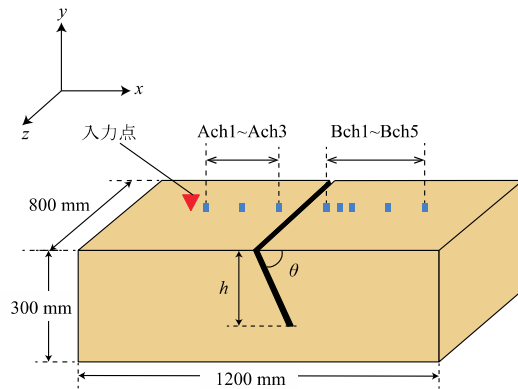


図-1 解析モデル

EFITによるひび割れで散乱・回折する弾性波の数値実験

図-1に示すような十分な大きさを有する供試体モデル(1200×800×300 mm)を準備し中央に開口ひび割れを設けた。ひび割れの深さhは5 mm, 10 mm, 30 mmの3段階、角度30°~150°の範囲で30°刻みの5段階で変化させた。また、比較のための参照値としてひび割れのない健全モデルを用意し、それを加えた合計16個(3×5+1)のモデルにおいて解析を行った。解析においては、直方体モデルの上面下面側面すべて応力フリーの自由境界条件とした。なお、側面の境界における反射については供試体モデル寸法が十分に大きいことから、その影響は小さいことを事前に確認している。

供試体の構成材料としては石膏とコンクリートの二種類を想定した。石膏の材料定数は、密度=1800kg/m³, P波速度c_L=3200 m/s, S波速度c_T=1600 m/sであり、コンクリートは密度=2300kg/m³, P波速度c_L=4650 m/s, S波速度c_T=2650m/sである。

入力波は、ひび割れから160mm離れたところから与えることとし、入力点からひび割れまでの間にAch1からAch3までの受信点を、また、ひび割れで散乱・回折した波を受信するためにBch1からBch5までの受信点を配置した。入力波としてはリッカー波を応力の変動分として与えた。これにより多くの数値実験を行い、ひび割れ付近で生じる散乱回折現象を把握した(図-2)。

また、このようなEFITによる数値実験を様々なひび割れパターンで実施し、得られたデータをグラフ化し、その傾向を把握した。

図-3は参考として、減衰指標Fとひび割れ深さと波長の比をプロットしたものであり、これによって、具体的な近似曲線を求め、数式化する作業をおこなった。

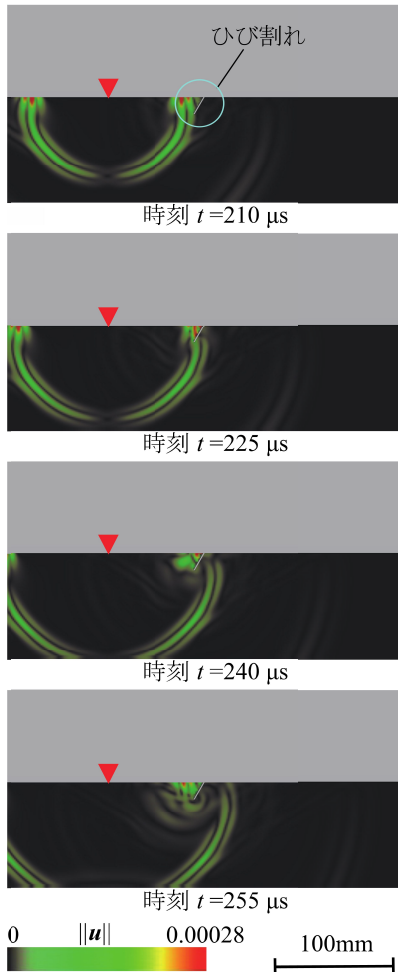


図-2 EFIT による弾性波の散乱回折シミュレーション

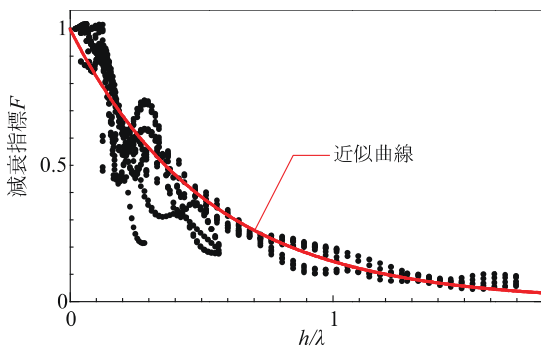


図-3 EFIT による弾性波の散乱回折シミュレーション

(2) 研究目的(2)に対する研究方法
概要

コンクリートのひび割れについては、肉眼で認識できる比較的大きなひび割れと、それが困難なマイクロクラックと呼ばれる微小ひび割れがある。前者については構造物の力学的安定性などに直接的に影響するもので、ひび割れの大きさや発生場所によっては構造

物に甚大な被害を及ぼすものである。一方、マイクロクラックは、マクロクラックほどの影響力はないものの、構造物の劣化開始時期や劣化速度に関わる重要な要素であると考えられている。

ところで、マイクロクラックの検出法については、コンクリート表面を染料で処理して直接観察する方法や超音波などを用いて間接的に検出する方法、ステレオ写真を用いる方法などがあるが、これらは検出領域が限定的であり、実構造物への適用には不向きである。つまり、マイクロクラックに関してはその重要性が指摘されながらもいまだに実構造物に対して有効な検査方法が確立されていないのが現状である。

そこで、本研究は非破壊検査シミュレーションに関する研究開発の立場から、異方的な弾性材料剛性テンソルが所与であるとした上で、マイクロクラック分布を同定する手法の開発に挑戦した。具体的には、トポロジー最適化に基づく逆均質化法という手法を応用することでこれを可能にした。

逆均質化法を用いたマイクロクラック分布の同定法

本研究で述べる逆均質化法は、観測剛性 D と等価なマクロ材料剛性 C^H を与えるミクロ構造のトポロジーを求める最適化問題であり、そこで得られたトポロジーをマイクロクラックの分布と見立てるものである。本研究では有限要素法を用いてミクロ構造の境界値問題を解くことを前提とし、ユニットセル内の各要素における正規化された材料密度を設計変数として定義した。

また、逆均質化法を用いたマイクロクラック分布の同定問題を等式制約条件付きの最適化問題として定式化した。

本最適化問題では、観測剛性 D とマクロ材料剛性 C^H がほぼ同値となることを最優先して、これを等式制約条件に組み込んだ。具体的には各成分の二乗誤差の合計が零となるように設定した。なお、一般的なトポロジー最適化では、材料体積量（あるいは質量）を制約条件に組み込むことが多いが、マイクロクラック分布を求める当該逆問題においては、材料あるいはクラックの体積量に制約を課すことに対して、工学的な意味は見いだせない。そこで、本研究では固体材料の体積量最大化、言い換えればマイクロクラック量最小化として目的関数に組み込んだ。

よって、この問題設定は等式制約条件を満足するマイクロクラック分布のうち、マイクロクラック量が最小のものを求めるという最適化問題であると解釈できる。このような問題設定のもと、勾配基本法に基づく最適化アルゴリズムを用いてこの同定問題を解いた。

マイクロクラック同定計算例

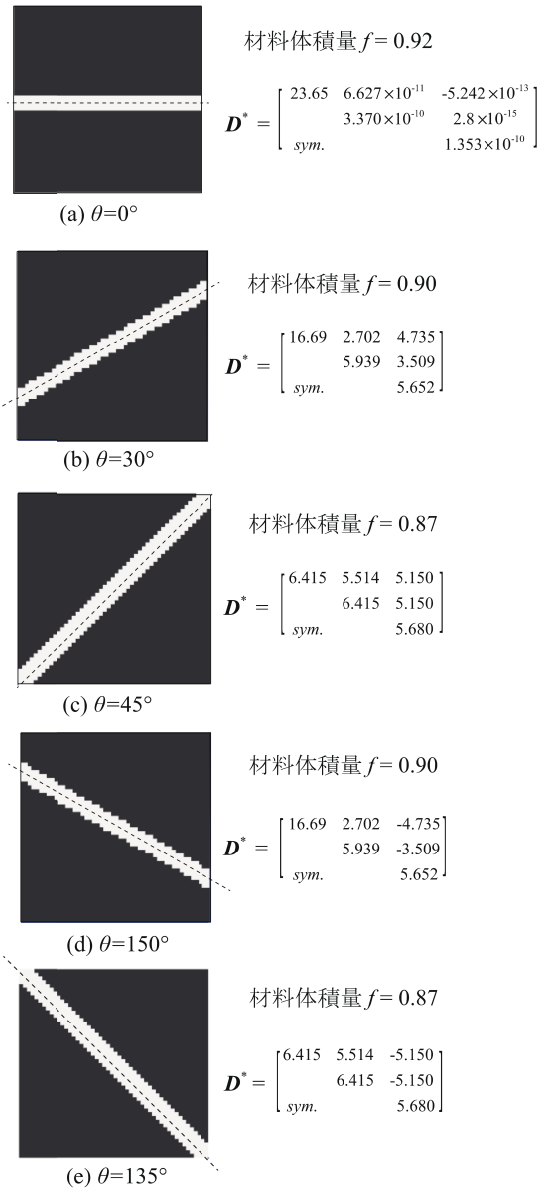


図-4 所与のクラック分布と観測剛性

本計算例では、図-4 に示すように一方向の単純なマイクロクラックを対象にひび割れ角度 $\theta = 0, 30, 45, 150, 135^\circ$ の5 ケースについて同定を行った。ターゲットとなる観測剛性 D については、図-4 に示す5つのマイクロクラック分布を準備し、それぞれの観測剛性 D を均質化法によって求め、これを所与として扱うものとした。また、 f は目的関数値である材料体積量を示しており、 $f=1$ のときはマイクロクラックの存在しない健全な状態を意味する。

図-5 は、その同定結果である。まず、図-5 に示す $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ の同定結果について観察すると得られた均質化材料剛性 C^H は、いずれの成分も観測剛性 D のそれと非常に近い値となっており、最大でも0.1%の誤差である。

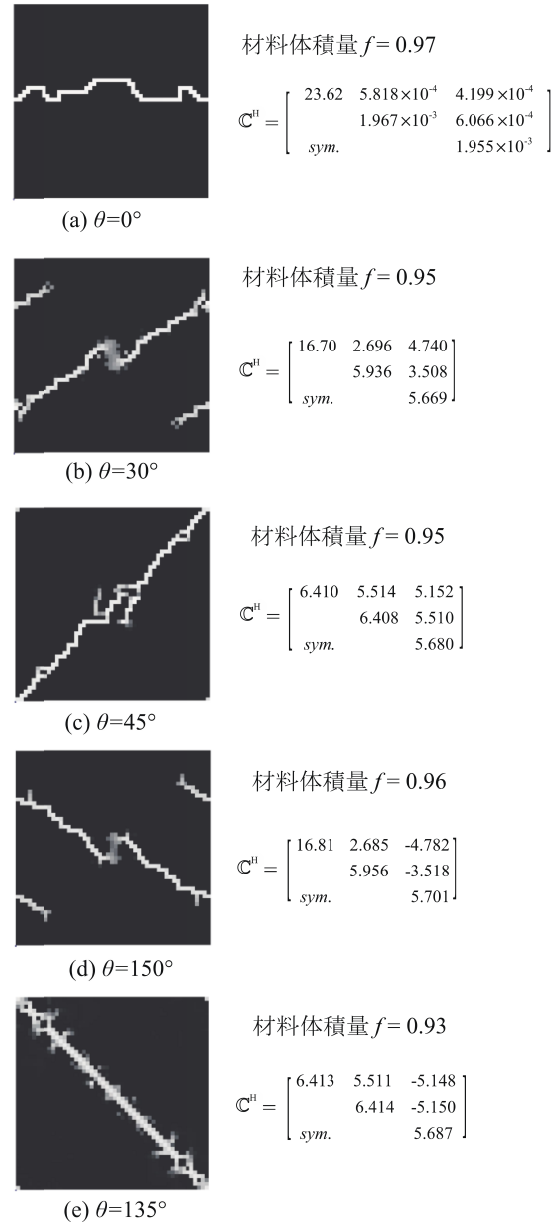


図-5 同定したクラック分布と均質化剛性

一方、同定されたマイクロクラック分布については、上記のマクロ材料剛性の同定精度が非常に高いにも関わらず、所与の分布どおりにはなっていない。しかし、いずれの場合もマイクロクラックの角度は再現できているといえる。次に、 $\theta = 150^\circ$ と $\theta = 30^\circ$ 、あるいは $\theta = 135^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ の観測剛性および均質化剛性の成分をそれぞれ比較すると、(1, 3)成分と(2, 3)成分の符号が異なっているだけで、その成分の大きさはほぼ同じとなっていることが分かる。これは、力学的にも正しいもので均質化解析の妥当性と同定精度の高さを裏付けるものであると言える。

その結果、 $\theta = 150^\circ$ と $\theta = 135^\circ$ のマイクロクラック分布も所与の角度を再現できていると言える。 $\theta = 0^\circ$ の同定結果も同様に、所

与の分布を正確に表すことはできないがマイクロクラック分布の方向は再現できているといえる。なお、マクロ材料剛性行列の同定精度については、(1, 1)成分は他のケースと同様に0.1%程度の僅かな誤差しかなく、精度よく同定できており、それ以外の成分については、観測剛性行列の成分があまりにも小さな値であるため、小数点以下の桁数に隔たりがあるように見えるがほぼ零であることから精度よく同定できていると言える。

この結果は、本手法が設計変数の初期値依存性による影響が少ない手法であることを示唆するものである。

これについては、前述のように材料体積量に制約を課していないこと、すなわち、本最適化問題の設定として材料体積量が最適化計算の中で変化する自由度の高い同定が行われている結果であると言える。

4. 研究成果

(1) 研究目的(1)に対する研究成果

本研究では、EFITを用いた数値実験を行い、得られた結果を分析して、減衰指標とひび割れ深さの関係式を定式化して、それに基づくひび割れ深さ推定法を提案した。

以下に本研究で得られた知見を述べる。

ひび割れで散乱・回折する際の表面波の減衰は、ひび割れ深さと波長の相対関係で決まり、ひび割れ角度の影響は小さい(図-3)。

減衰指標 F は、ある程度ひび割れから離れた位置で受振したデータをもとに計算すれば、受振位置による影響を受けない。

ひび割れ深さ h 、減衰指標 F 、波長 λ の関係は、石膏とコンクリートという材料の違いに依らず、同じ式 $h = -0.52 \log(F)$ で表される。

(2) 研究目的(2)に対する研究成果

本研究では有限要素法を用いた逆均質化法という数理的手法を用いて、構造物の劣化・損傷の根源となるマイクロクラックの分布を同定した。ここでは異方性材料剛性を所与とし、それと等価な材料剛性を持つマイクロクラックの分布を最適化アルゴリズムを用いて求める一連の手法を提案し、その同定性能の検証を行った。本研究の問題設定では、制約条件式の設計変数に関する感度の符号が正負混在することになるため、一般のトポロジー最適化で広く用いられる最適性規準法を適用することはできない。

本研究では、そのような条件下でもロバストかつ精度よく解を求めることが可能な MMA と呼ばれる最適化アルゴリズムを適用した。

以下に本研究で得られた知見を述べる。

本研究で導出した感度式と最適化アルゴリズムの MMA により、ターゲットとなるマイクロクラック分布が複雑な場合であってもその所与の観測材料剛性 D に対して、ほぼ同値となる均質化材料剛性 C^H が得られることを確認した。

ターゲットとなるマイクロクラック分布が一方の単純な場合は、その方向(角度)を正しく同定できることが確認された。

ただし、複雑なマイクロクラック分布を同定する場合は、大まかな分布を再現できるが細部まで再現することはできないことが明らかになった。

提案手法においては、設計変数の初期値の違いによる同定結果への影響は小さいことが確認された。

これまでのトポロジー最適化を適用した非破壊検査シミュレーションに関する研究では、数カ所の材料損傷部の位置しか同定できなかったが、本手法により、損傷部分(マイクロクラック)の方向を再現できるようになったことは、この分野において一歩前進するものである。

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 2 件)

加藤準治、河西亮輔、京谷孝史、寺田賢二郎、逆均質化法を用いた微細亀裂分布の同定、土木学会論文集 A2, Vol. 72, No.1, pp. 27-37, 2016, (査読有り)。

河西亮輔、加藤準治、中畑和之、京谷孝史、小川淳、EFIT による数値実験に基づく均質体表面のひび割れ深さ評価法の提案、土木学会論文集 A2, Vol. 70, No.1, pp. 10-21, 2014, (査読有り)。

[学会発表](計 8 件)

加藤準治、河西亮輔、京谷孝史、寺田賢二郎、逆均質化法を用いた微細亀裂分布の同定、第 18 回応用力学シンポジウム、2015 年 5 月 16, 17 日、金沢大学(石川県・金沢市)。

鶴之沢均、加藤準治、高瀬慎介、寺田賢二郎、京谷孝史、弾性波動を利用した非破壊検査における粒子フィルタ適用性の検討、第 69 回土木学会年次学術講演会、2014 年 9 月 10~12 日、大阪大学(大阪府・豊中市)、(全 2 頁)。

河西亮輔、加藤準治、高瀬慎介、京谷孝史、寺田賢二郎、均質化法を用いた非破壊検査シミュレーションの基礎的検討、第 19 回日本計算工学会講演会、2014 年 6 月 11-13 日、広島国際会議場(広島県・広島市)、(全 4 頁)。

鶴之沢均、河西亮輔、加藤準治、高瀬慎介、寺田賢二郎、京谷孝史、弾性波伝播特性を利用した粒子フィルタによる介在物の材料パラメータ同定、土木学会東北支部技術研究発表会、2014 年 3 月 8 日、八戸工業大学(青森県・八戸市)、(全 2 頁)。

河西亮輔、加藤準治、中畑和之、寺田賢二郎、京谷孝史、トンネル覆工コンクリ

ートの弾性ひび割れ照査に関する数値解析的研究,土木学会第68回年次学術講演会,2013年9月4~6日,日本大学(千葉県・津田沼市), (全2頁).

岩館礼,河西亮輔,京谷孝史,加藤準治,寺田賢二郎,村上章,粒子フィルタによるトンネル覆工の健全度評価に関する研究,第18回日本計算工学会講演会,2013年6月19~21日,東京大学生産技術研究所(東京都), (全4頁).

河西亮輔,加藤準治,中畑和之,寺田賢二郎,京谷孝史,トンネル覆工コンクリートの弾性波ひび割れ照査に関する数値解析的研究,土木学会東北支部技術研究発表会,2013年3月9日,東北大学(宮城県・仙台市), (全2頁).

河西亮輔,加藤準治,中畑和之,寺田賢二郎,京谷孝史,トンネル覆工コンクリートの弾性波ひび割れ照査に関する数値解析的研究,第62回理論応用力学講演会,2013年3月6~8日,東京工業大学(東京都), (全2頁).

(2)研究分担者

加藤 準治 (KATO, Junji)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00594087

寺田 賢二郎 (TERADA, Kenjiro)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号: 40282678

(3)連携研究者

中畑 和之 (NAKAHATA Kazuyuki)
愛媛大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 20380256

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

京谷 孝史 (KYOYA, Takashi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00186347