

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15068

研究課題名(和文) 光学的元素分析手法に基づくコンクリートの強度推定法の開発

研究課題名(英文) Estimation of strength of concrete by optical analysis of elements

研究代表者

江藤 修三 (Eto, Shuzo)

一般財団法人電力中央研究所・グリッドイノベーション研究本部・主任研究員

研究者番号：00556748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：粗骨材の分布の影響を受けずに非破壊でコンクリートの強度を推定する方法を開発した。本方法では、光計測(レーザー誘起ブレイクダウン分光法; LIBS)により、非破壊でコンクリートの圧縮強度を推定する。これは、コンクリートの圧縮強度と相関のあるモルタルの硬さを直接推定する方法であり、超音波法等の従来の非破壊検査法にて計測値のばらつきの原因となる粗骨材の分布の影響を受けない特長がある。推定では、モルタルをLIBSで計測したデータを抽出し、多変量解析により回帰式を作成した。その結果、破壊試験により求めた圧縮強度と推定値は概ね一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来行われている、小寸法のコンクリート試験体を用いた破壊試験や、超音波法などの非破壊試験法では、粗骨材の偏在により試験体ごとの計測結果が大きくなる原理的課題があった。本研究では、これらの方法と原理が全く異なるLIBSに着目した。LIBSにて元素組成を分析するのではなく、プラズマ温度などのプラズマの物性と材料の機械特性の関係性に注目している研究例は少なく、本研究により機械特性の推定を行うために必要な計測条件を明らかにすることができた。本方法を用いて、超音波法等の従来法では適用が困難であった鉄筋コンクリート構造物の隅角部や煙突等へ適用することで、効率的な非破壊検査が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A non-destructive method for estimating the strength of concrete without the influence of coarse aggregate distribution has been developed. In this method, the compressive strength of concrete is estimated nondestructively by optical measurement (laser induced breakdown spectroscopy; LIBS). This method directly estimates the hardness of mortar, which is correlated with the compressive strength of concrete, and is not affected by the distribution of coarse aggregate, which causes variation in measurement values in conventional non-destructive inspection methods such as ultrasonic methods. In the estimation, data from mortar measured by LIBS were extracted, and regression equations were created by multivariate analysis. As a result, the estimated values generally agreed with the compressive strength determined by destructive testing.

研究分野：プラズマ分光学

キーワード：レーザー誘起ブレイクダウン分光法 コンクリート 圧縮強度 自己吸収 部分的最小二乗法 主成分分析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリートの圧縮強度は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を評価する上でコンクリートの諸物性の中でも最も重要な指標の一つであり、破壊試験による評価方法が JIS A 1108 で規定されている。本試験法では、直径 100 mm の円柱状のコンクリート試験体（標準コア）を使用する必要があるため、構造物への損傷を低減するために直径 100 mm 以下の試験体（小径コア）を用いて圧縮強度を評価する方法が研究されている。これまでの研究より、標準コアと小径コアの圧縮強度の相関は良好であり、小径コアから圧縮強度を推定することが可能となっている。一方、本試験法ではコンクリートの圧縮強度のばらつきが原理的に大きくなる。これは、骨材の偏在により、試験体の割裂状況が不均一になる場合があるためである。圧縮強度を推定する非破壊検査方法（超音波法や打音法）でも、骨材の偏在により超音波や音波の伝搬経路が影響を受けるため、推定値にばらつきが生じる。このように、骨材の偏在に起因する圧縮強度の計測結果のばらつきは破壊試験及び非破壊試験に共通する課題であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、光学的元素分析法（レーザ誘起ブレイクダウン分光法；LIBS）に着目し、元素の発光強度の観点からコンクリートの圧縮強度を推定する方法の確立を目的とした。これは、レーザによって生成したプラズマの物性とモルタル内部の化学結合とに相関があるという仮定の下、ミクロな物性（化学結合状態の強さ）からマクロな物性（圧縮強度）を推定することに特徴があり、粗骨材の空間分布の影響を受けにくい圧縮強度の推定方法の開発を目指した。

### 3. 研究の方法

寸法の異なるコンクリート試験体（主にコア試験体）を製作し、それらを LIBS で計測することにより、各元素の発光強度の特徴を明らかにすると共に、圧縮強度と相関のある元素の輝線を用いて圧縮強度推定を行った。実験では、水とセメントの重量比を変えることにより、圧縮強度の異なるコンクリートコアを製作し、一つを LIBS で計測し、他の 3 つのコンクリート試験体を JIS 規格に準拠した圧縮強度試験に供することで、LIBS の計測結果と圧縮強度との相関を調べた。実験では、図 1 に示す様なコンクリートコアを直接計測可能な LIBS 装置を用いた。

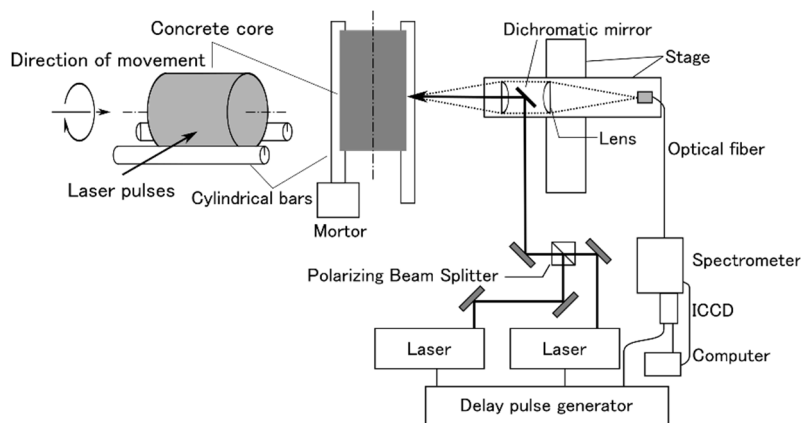


図 1 レーザ誘起ブレイクダウン分光法の実験配置図

### 4. 研究成果

LIBS で計測される元素の原子線とイオン線の強度比は、プラズマの原子励起温度と相関がある。一方、材料の表面でレーザ誘起プラズマが生成する場合、断熱圧縮によるプラズマ中の原子の加熱により、材料が硬いほど、原子励起温度が増加する。そのため、コンクリートに含まれる元素で、イオン線と原子線が同時に計測可能な条件を調べた。文献調査の結果より、カルシウムの原子線とイオン線が候補の一つに考えられたが、LIBS の計測結果より、カルシウムの発光強度が実際よりも低くなる自己吸収と呼ばれる現象が生じ、スペクトル形状が骨材とモルタルとで異なることが分かった。本結果を踏まえ、骨材とモルタルのスペクトルを別々に取り扱い、圧縮強度を推定する解析方法を考案した。本解析方法では、まず骨材とモルタルのスペクトル形状の違いを利用して、レーザ照射ごとに得られるスペクトルをモルタルもしくは骨材のスペクトルとして分類した。そして、圧縮強度の指標の候補であるカルシウムの発光強度の比（発光強度比）を求めた結果、骨材由来のスペクトルより求めた発光強度比のコンクリート圧縮強度依存性は、モルタル由来のスペクトルより求めた依存性と異なることが分かった。これは、モルタルと骨材の圧縮強度が異なること、モルタルと骨材の組成が異なることが原因であると考えられた。次に、モルタルに分類されたスペクトルデータと水素のアルファ線から求めた電子密度を用いて、自己吸収を考慮する解析方法を用いた。その結果、自己吸収を考慮して求めた強度比はコンクリー

トの圧縮強度に概ね比例することが分かり、本解析方法を用いてコンクリートの圧縮強度が推定できると考えられた。しかし、カルシウムのスペクトルの自己吸収が著しいために、カルシウムの発光強度比がコンクリートの圧縮強度に比例しない場合も確認され、更に改善が必要であることも分かった。これらの結果より、自己吸収が弱い元素の輝線を含むスペクトルを計測し、単一波長の発光強度だけでなく、計測されるスペクトル全体の形状を加味して解析できる部分的最小二乗 (PLS) 回帰を用いてコンクリートの圧縮強度推定を行うことを図2に示す様に考案した。

本改良方法では、まずモルタルのデータを抽出し、抽出したデータに対して PLS 回帰を行った。抽出では、骨材とモルタルとのスペクトル形状の違いに着目し、多変量解析 (主成分分析) により求めた指標を用いて、機械学習 (単純ベイズ分類) を適用することにより、モルタルと種類の異なる骨材 2 つの 3 つに分類した。次に、モルタルに分類されたスペクトルデータを用いて PLS 回帰によって得られる回帰式を用いて圧縮強度を推定した。その結果、破壊試験により求めた圧縮強度と推定値は概ね一致した。これより、LIBS によりコンクリートの圧縮強度を非破壊で推定することが可能であることを実験的に示した。

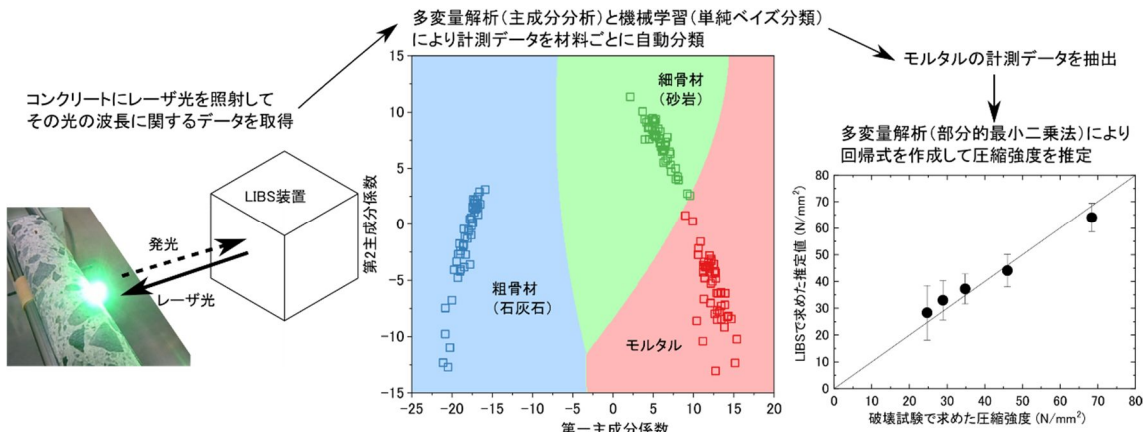


図 2 圧縮強度推定方法の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shuzo Eto, Taku Otsuka
2. 発表標題 Characteristics of self-absorption of spectra measured by LIBS for estimation of compressive strength of concrete
3. 学会等名 LIBS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江藤修三, 大塚拓
2. 発表標題 コンクリートの強度推定に向けたレーザ誘起ブレイクダウン分光法による発光スペクトルの特性
3. 学会等名 第6回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江藤修三, 大塚拓
2. 発表標題 レーザ誘起ブレイクダウン分光法及び発光線の自己吸収の補正によるコンクリートの圧縮強度推定
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江藤修三, 大塚拓
2. 発表標題 レーザ誘起ブレイクダウン分光法によるコンクリートの圧縮強度推定に向けた自己吸収の影響が小さい計測条件の探索
3. 学会等名 第6回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 コンクリートの圧縮強度推定法	発明者 江藤修三	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-094764	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大塚 拓  (Otsuka Taku)	一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・主任研究員  (82641)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------