様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６ 年　５ 月 １６ 日現在

機関番号：１０１０１
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：２１Ｈ０１４０２

研究課題名（和文）放射線技術の活用によって生産性を著しく高めるコンクリート新材料開発手法の提案

研究課題名（英文）Radiation technology for new concrete material development that significantly increases productivity

研究代表者

杉山　隆文（Sugiyama, Takafumi）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：７０２６１８６５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　12,670,000円

研究成果の概要（和文）：新材料や新工法の開発において、放射線技術を積極活用することで、研究に要する時間を著しく短縮して研究生産性を向上させる手法を研究した。長期に渡って進行するセメント水和物の溶脱について、1か月間の溶出実験を実施し、非破壊CT-XRD連成法を適用することで、溶出領域と非溶出領域を分離できることを明らかにした。また、これまで困難であったコンクリート内部の骨材を分離して、その空間配置を可視化した。さらに、３DCP（コンクリートプリンティング）の積層造形後の内部空隙をCT法から調べ、造形方法の影響を研究した。これらにより、「土木構造材料開発におけるデジタルエンジニアリング」の構築に資する手法を研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
コンクリートは、地球上で大量に使用され、その使用環境も多岐に及んでいる。その結果、コンクリート材料は多様化して、要求性能を満足する品質の確保やより一層の品質向上が図られている。耐久的なコンクリートの性能を照査するために、長い研究期間や多くの実験が繰り返されてきた。将来にわたり、研究生産性を確保しながら向上するには、マテリアルズインフォマティクス（ＭＩ）の手法に資するデジタルエンジニアリングの構築が必要である。本研究は、放射線技術を積極利用することで、コンクリートの強度や耐久性を支配する内部構造を透視して、それらをデジタルデータとして解析することで研究生産性の向上を目指す手法を研究した。

研究成果の概要（英文）：While new materials and construction methods for concrete are being researched,we have researched a method that can significantly shorten the time required for research and development and improve research productivity by actively utilizing radiation technology. Regarding the alteration of pore structure due to the leaching of cement hydrates, we conducted a one-month laboratory leaching experiment and applied a non-destructive CT-XRD coupled method. It was revealed that the eluted region and non-eluted region inside the hardened cement matrix can be separated. Additionally, we were able to separate the aggregate inside the concrete, which had been difficult until now, and visualize its spatial arrangement. Furthermore, the internal voids after additive manufacturing in 3DCP (concrete printing) were examined, and the influence of the lamination method was studied. In this way, "digital engineering in civil engineering structural material development" was proposed.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：Ｘ線ＣＴ　コンクリート　放射線技術　生産性

※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。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

安全で安心な社会活動を持続可能とするために、現在社会が直面する諸課題の中で、社会インフラの維持管理・更新、防災・減災、エネルギー問題、産業競争力強化などの各種施策を着実に遂行するには、社会基盤構造物の安定的な利用、建設が欠かせない。土木基幹材料であるコンクリートを用いた構造物は、供用される環境が多岐にわたり、例えば地下構造物や海上、海底構造物として、補修や補強が困難な過酷な環境下でも構築される。その結果、高度な要求性能を満足しなければならない場合もある。また、建設後長期間が経過したものも多く、今後も引き続き利用していく上では、適切な維持管理・更新が必要である。

新設構造物や既設構造物の補修補強における新材料や新工法の研究開発を継続的にかつ効率的に実施することの必要性は論を待たない。生産年齢人口の減少や環境問題への対応など、社会環境が変化する時代において、研究開発の現場における研究生産性の向上は必須である。材料開発の現場では、情報処理技術を有効に活用し材料開発を進めていくマテリアルズインフォマティクス（ＭＩ）の分野が開発されている。コンクリート材料の研究においても、数多くの実験を繰り返すことなく、デジタルデーデータに基づくＭＩの考えの下、研究生産性を向上する手法へのシフトが必要である。

２．研究の目的

多様化するコンクリート材料や工法が研究される中で、放射線技術を積極活用することで、研究に要する時間を著しく短縮することで、研究生産性を向上させる新たな手法を開発する。コンクリートの強度や耐久性は、微細組織における空隙構造に支配されることから、空隙構造を定量的に調べることを目的とした。具体的に、長期耐久性が特に要求される地下構造物のコンクリートとして、水と接することでセメント水和物が溶脱して、これが継続することでさらなる溶脱が生じて空隙が粗大化する現象を対象とした。溶脱現象の解明には多くの先行研究があるが(1)、実験に要する期間が比較的長期に及び､劣化状況の把握には通常破壊試験が採用される。そこで、実験期間を短縮して、非破壊試験によるマイクロメートルオーダーでの微細構造観察を実施した。すなわち、本研究の主題である放射線技術として、非破壊 CT-XRD 連成法によって、従来法に対する優位性を明らかにした。また、コンクリート内部の骨材分布は、ひび割れの進展や物質移動における阻害物または空隙や組成が異なる遷移帯の形成に影響を及ぼす。そこで、放射線の優れた透過性を利用する X 線 CT 法による非破壊透視技術を活用して、ブラックスボックスである構造体内部を立体的に画像として把握した。これまで平面で行ってきた画像処理手法では分離抽出が困難であった粗骨材であったが、ここでは、セメントペーストやモルタルマトリクスから骨材を分離する新しい手法を開発した。いずれも放射線技術が可能にする非破壊試験であり、継続的に劣化や損傷したコンクリート供試体の測定が可能である。これにより、同一供試体を用いて経時的な変質を調べることが可能となる。

３．研究の方法

溶出試験開始から 28 日経過した供試体に対して、大型放射光施設 SPring8 の白色 X 線回析ビームライン BL28B2 を用いて非破壊 CT-XRD 連成法(2)によって分析した。X 線 CT の撮影ではシリコン単結晶を用いて白色光から単色光へ変換して、その際のエネルギーは 25keV、解像度は 2.46 μm/pixel、露光時間は 400ms である。また、関心領域に対して、XRD 分析を行った。

粗骨材の空間配置に関する可視化実験では、供試体を 4 つの layer に分けて撮影を行い、1024×1024×3680 ボクセルの画像を得た。解像度は 1 ピクセル 57μm である。マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いた。X 線源発生装置から X 線が照射され、供試体の透過前後の X 線減衰比を検出器により取得して、供試体を 360 度回転することですべての角度からの撮影を行い、再構成処理によって断面画像の数値データを取得した。

４．研究成果

（１） 非破壊ＣＴ－ＸＲＤ連成法と数値解析による溶脱現象の理解

直径 3 ㎜、高さ 6 ㎜の微小供試体に対する CT 断面画像から、2 値化処理によって、非溶脱領域と溶脱領域が分離できることがわかった。また、供試体の円縁周辺部で水酸化カルシウムの溶出に伴い空隙が増加することを明らかにした。これより、微小供試体を用いてわずか 1 か月程度の溶出試験から、セメント水和物の溶脱現象をマイクロメートルオーダーで把握できることを明らかにした。また、溶出状況を数値シミュレーションで模擬するために、供試体をセメントペースト、遷移帯、骨材に分離した。そして、SiTraM3D から、720 時間後の水酸化カルシウムの溶出を 3 次元で模擬した(3)。なお、骨材形状に関してスムージング処理を行ったため、SiTraM3D の

骨材形状は実際の骨材形状とは若干異なっている。遷移帯領域は、骨材の外周表面部から供試体表面部にわたる密度比を算出することで、遷移帯幅を 25μm と定めた。また、遷移帯の拡散係数はマトリックスの 10 倍とし、空隙率は 2 倍で設定した。さらに、遷移帯ではセメント水和物である CH、C-S-H の濃度が低下すると仮定して、周囲のセメントペーストのそれぞれ 60%とした。
　図 1 は、骨材の 3 次元分布および模擬計算結果である。3 次元模擬計算結果から、円柱供試体の上面、下面、側面から固相の水酸化カルシウムが減少していることがわかる。図左の 2 次元画像は供試体の高さ方向における 653 層目の結果である。この結果から、X 線 CT 画像から得られた溶脱領域とほぼ一致していることが確認できた。このように、取得したデジタルデータは数値シミュレーションのメッシュによるモデル化と親和性があり、劣化予測モデル（今回は SiTraM3D）を併用することで、将来予測が可能となることを示すことができた。

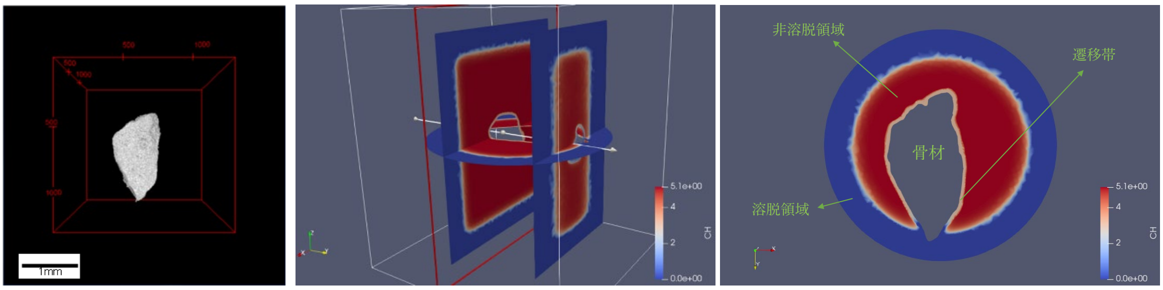

図 1　供試体の透視画像ならびに水酸化カルシウムの溶出シミュレーション

（２）X 線 CT 法による粗骨材の空間配置
　水セメント比 0.5 で粗骨材に石灰石骨材を用いた円柱供試体（直径 56.4mm、高さ 250mm）に対して、X 線 CT 撮影によって得られた tiff 画像を用いて、画像解析ソフト Fiji によりフィルタ処理した後に、三次元解析プログラム slice を用いて二値化画像を取得した。なお、計算処理負荷低減のため、二値化画像は 1024pix×1024pix を 128pix×128pix にデータ低減した。ここで、開発した ADI 法[4]は、粗骨材の二値化画像を入力画像として、各ピクセルの粗骨材らしさ ADI（Aggregate Distribution Index）を新たに定義して計算するアルゴリズムである。
　従来手法および提案手法によって抽出された粗骨材の三次元表示画像を図 2 に示す。これより、従来手法では粗骨材周辺の微粒分が粗骨材表面に粗骨材と分離されずにノイズとして抽出されていることがわかる。既往の研究において二次元で行ってきた画像処理手法では、X 線 CT 画像の三次元化において骨材の分離抽出が難しい場合があった。本研究で提案した ADI を用いて三次元での数値計算を行うことにより、ノイズを低減して粗骨材のみの抽出を行うことができた。また、関心領域の大きさを変化させることで特性の違う抽出結果を取得でき、粗骨材の中心座標を求めることができた。提案手法の適用により、鉄筋コンクリート内の空間における粗骨材の配置を把握する上で非常に有用と言える。

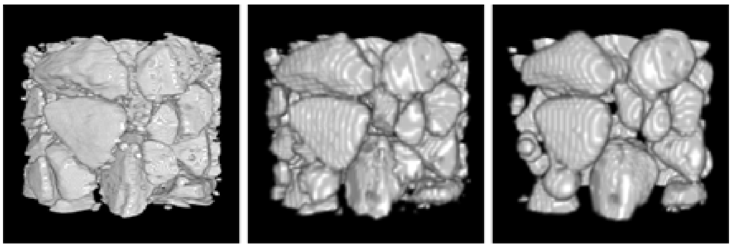
図 2　ADI による粗骨材の空間配置（左：従来法、右 2 つは ADI 法）

<引用文献>
(1) K. Haga、S. Sutou、M. Hironaga、S.Tanaka、S. Nagasaki、 Effect of porosity on leaching of Ca from hardened ordinary Portland cement paste、Cement and Concrete Research 35(9)、1764-1775、 September 2005
(2) T. Sugiyama、T. Hitomi、K. Kajiwara ; Nondestructive Integrated CT XRD Method for Research on Hydrated Cement System、 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures、 24-26 July 2014、Purdue University West Lafayette、USA、2014
(3) 成田陽大、タンエイギョウ、杉山隆文、CT 画像解析と数値計算によるコンクリートの遷移帯物性値の推定、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023－01、札幌
(4) 中瀬皓太、冨樫佑介、橋本勝文、杉山隆文、齊藤亮介、三次元画像解析による X 線 CT 法を用いたコンクリート内部の粗骨材の抽出、令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会、2022-09、京都府

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計7件（うち査読付論文　7件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 中瀬皓太，冨樫佑介，橋本勝文，杉山隆文，齊藤亮介	４．巻 22
２．論文標題 コンクリート内部の粗骨材分布に関するX線CT画像の三次元画像解析手法の構築	５．発行年 2022年
３．雑誌名 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	６．最初と最後の頁 243-248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 Yingyao Tan, Takafumi Sugiyama, and Katsufumi Hashimoto	４．巻 III
２．論文標題 Evaluation of transport properties in ITZ with coupled CT image analysis and simulation	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Proceedings on 16th International Congress on the Chemistry of Cement, ICCC 2023	６．最初と最後の頁 229-232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 Yingyao Tan, Takafumi Sugiyama, and Katsufumi Hashimoto	４．巻 -
２．論文標題 Evaluation of Alteration in Cement Paste Due to Calcium Leaching with Integrated CT-XRD Method and Its Effect on Ionic Diffusions	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Proceedings on 16th International Conference on Durability of Building Materials and Components (XVI DBMC)	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 Hayato Takahashi, Suhas S. Joshi, Kohei Nagai, Yoshitaka Kato	４．巻 -
２．論文標題 Study on 3D Mesoscale Structural Analysis on Cracking Behavior by SCDA Towards the Better Demolition	５．発行年 2024年
３．雑誌名 Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2024. (in printing)	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 Wang Ni、Sugiyama Takafumi	4．巻 75
2．論文標題 Corrosion evaluation of steel bars in steam-cured concrete under chloride attack and alkali?silica reaction	5．発行年 2023年
3．雑誌名 Magazine of Concrete Research	6．最初と最後の頁 433～446
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jmacr.22.00004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 中瀬皓太，橋本勝文，杉山隆文，河野克哉	4．巻 45
2．論文標題 建設用3Dプリンタの積層経路が異なるモルタル積層体の圧縮破壊時におけるひび割れ進展挙動と変形分布の関係	5．発行年 2023年
3．雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6．最初と最後の頁 1600-1605
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 Yingyao Tan, Takafumi Sugiyama, Katsufumi Hashimoto	4．巻 369
2．論文標題 Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation	5．発行年 2023年
3．雑誌名 Construction and Building Materials	6．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conbuildmat.2023.130526	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計10件（うち招待講演　2件／うち国際学会　2件）

1．発表者名 中瀬皓太、冨樫佑介、橋本勝文、杉山隆文、齊藤亮介
2．発表標題 三次元画像解析によるX線CT法を用いたコンクリート内部の粗骨材の抽出
3．学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4．発表年 2022年

１．発表者名 小塚寛太、松本浩嗣、齊藤亮介
２．発表標題 ナノインデンターによる鋼材-セメントペースト界面 の物性評価
３．学会等名 令和5年度土木学会第78回年次学術講演会，広島，2023年9月
４．発表年 2023年

１．発表者名 中瀬皓太、橋本勝文、杉山隆文
２．発表標題 3DPコンクリートの残存空隙の検出を目的とした弾性波トモグラ フィの適用
３．学会等名 令和5年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、札幌、2024年1月
４．発表年 2024年

１．発表者名 中瀬 皓太、吉原 伶、橋本勝文、杉山隆文、齊藤亮介
２．発表標題 鉄筋近傍の粗骨材配置が付着割裂破壊性状に及ぼす影響の評価
３．学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会、広島、2023年9月
４．発表年 2023年

１．発表者名 Tan Yingyao, Anna Tomo, Takafumi Sugiyama and Katsufumi Hashimoto
２．発表標題 Characterizing porosity and component change of hardened cement paste deteriorated by leaching with non-destructive integrated CT-XRD method
３．学会等名 76th RILEM Annual Week and International Conference on Regeneration and Conservation of Structures (ICRCS2022)（国際学会）
４．発表年 2022年

１．発表者名
成田陽大、タンエイギョウ、杉山隆文

２．発表標題
ＣＴ画像解析と数値計算によるコンクリートの遷移帯物性値の推定

３．学会等名
令和4年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会

４．発表年
2023年

１．発表者名
Shensi Gong, Kanji Yanaga, Daisuke Ibaraki, Takafumi Sugiyama

２．発表標題
Frost-Resistance Evaluation of Fly Ash Concrete with L-grade Recycled Coarse Aggregate

３．学会等名
令和4年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会

４．発表年
2023年

１．発表者名
Takafumi Sugiyama, Michael Angelo B. Promentilla

２．発表標題
Application of X-ray computed tomography for concrete durability research

３．学会等名
Frontiers of Concrete Technology, 4th JSCE Concrete Committee Webinar（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
杉山隆文

２．発表標題
多様化するコンクリートの特性評価

３．学会等名
第34回秋季シンポジウム、公益社団法人日本セラミックス協会（招待講演）

４．発表年
2021年

１．発表者名 塘安奈、タンエイギョウ、杉山隆文
２．発表標題 非破壊CT-XRD連成法を用いた水と接するコンクリートのカルシウムイオン溶出による変質状況の実験的研究
３．学会等名 令和3年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会
４．発表年 2022年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	松本　浩嗣 (Matsumoto Koji) (10573660)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	高橋　駿人 (Takahashi Hayato) (30861786)	東京理科大学・創域理工学部社会基盤工学科・助教 (32660)	

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