

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289133

研究課題名(和文) 透視技術を核としたコンクリート構造物の革新的検査・健全度診断法の開発

研究課題名(英文) Development of an innovative inspection and soundness diagnosis method for concrete structures using perspective technology

研究代表者

杉山 隆文(SUGIYAMA, TAKAFUMI)

北海道大学・工学(系)研究科(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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：非破壊診断法としてX線CTに着目して、コンクリート構造体の内部状態を透視することで、変質の機構解明が一層進展することを示した。

コンクリート内部の異型鉄筋を、その節が明確なほど画像化できた。また、電食による腐食鉄筋の断面減少量を計算して、通電初期には断面の一部が腐食し、その後全断面に広がることを明らかにした。道路橋RC床版の下面よりコアを採取して、ひび割れ長さが増加するほど塩化物イオンは深部まで浸透するが、ひび割れ幅の影響は大きくないことを示した。さらに、炭酸化して通水を受けると、初期にポルトランドライトが消失して、やがて溶脱による骨材周辺がぜい弱化し、ペースト自体が流出することを示した。

研究成果の概要(英文)：This research has focused on X-ray CT as a nondestructive diagnostic method for concrete structures. Varied mechanisms of the alteration due to load application, water attack, carbonation, freezing and thawing action and the reinforcement corrosion were clarified.

Deformed reinforcing bar embedded in concrete was clearly extracted. In addition, the amount of cross section reduction of electrically corroded rebar was calculated. A part of the cross section corroded in the early period and then spread over the entire cross section. The core was collected from the bottom surface of the road bridge RC slab, and as the crack length increased, chloride ions permeated deep. However, the influence of the crack width was not large. Furthermore, when carbonated and passed through water, the portlandite in the cracked concrete disappeared relatively earlier. With continuous water flow the surroundings of the aggregate eventually weakened, and the paste itself flowed out due to the leaching.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート X線CT 劣化機構 非破壊診断

1. 研究開始当初の背景

社会基盤施設であるコンクリート構造物の耐久性をより一層向上することや経年変化した既設コンクリート構造物の長寿命化を実現するには、劣化・損傷の機構を詳細に理解することが重要である。これらは、ひび割れや鋼材腐食などであるが、構造物表面のひび割れ情報が内部と異なることや、顕在化した時には腐食が相当程度進行していることが考えられる。したがって、コンクリート構造物内部で生じる変質を合理的に評価することが必要となる。そのために、コンクリート内部組織の可視化を可能にして、これに基づいた劣化予測法を開発することが必要である。従来、X線による透視は、いわゆる影絵のようなレントゲン写真であり、透視方向の奥行情報が2次元で表現されており、画像の鮮明さも不十分で、的確な画像診断を困難にしていた。しかし、最近X線CT装置の進歩発展は目覚ましく、コンクリート構造の診断が可能になってきた。しかし、ひび割れや水和物の変質の追跡には、装置のさらなる改良に加えて、これを促すための基礎研究が不足している。また、高性能X線源の利用も可能になりつつあり、3次元透視技術のより一層の発展が期待されるようになった。合わせて、膨大なデータの演算方法の高度化も必要である。しかし、コンクリート分野ではX線CTの利点を十分に生かしているとは言えず、ほとんどブラックボックスである内部構造の理解に対して、X線CTを用いた基礎研究の進展が必要である。

2. 研究の目的

透視技術として、客観性の高い画像診断技術であり医療分野で急速に発展したX線CTをコンクリート分野に利用することで、従来推測の範囲であった劣化損傷の機構を明らかにすることを目的とする。X線CTは、産業用にも発展しており、土木分野では最近地盤工学で開発が行われており、その装置や画像処理技術の改良と操作の簡便さが日々高度化して、診断結果の客観性も向上している。本研究課題では、コンクリート構造物内部で生じる劣化と損傷を忠実に透視する方法を研究する。また、X線CTの特長である非破壊診断法としての優位性も明らかにする。

コンクリート工学分野においても透視化が有望であるX線CT法に着目して、先行研究を高度化するとともに、実験室内における各種劣化損傷機構の解明のための解析手法について研究する。さらに、実用化に向けた取り組みを行うとともに、実構造物レベルの非破壊診断法としての開発につながることを目標とする。X線CTは非破壊で内部構造を観察できることが特長であり、経時変化に伴う劣化損傷の進展を明確に捉えることで、従来発見できない現象を明らかにする。

コンクリート構造物の劣化損傷として、荷重によるひび割れ、通水作用による水和物の変質、内部鉄筋の腐食および腐食によるひび割れ、高温作用によるひび割れと水和物分解、耐凍害性能を対象とする。

3. 研究の方法

実現象を忠実に再現するように模擬供試体を作製した。セメントペースト、コンクリート、鉄筋コンクリートを基本として、これらの構成として、セメント水和物、気泡、空隙、骨材、鉄筋を対象とした。実験装置を工夫して供試体を準備した。また、実構造物からコアを採取して、内部のひび割れ幅やその長さを調べた。実験供試体に対して、荷重作用によりひび割れを導入した。その際、割裂や曲げ試験を用いてひび割れを発生させた。最大ひび割れ幅は0.5~1.0mm程度とした。また、GOTOクラックを検証するため、引張作用を受ける鉄筋周辺のひび割れについて可視化に挑戦した。従来、荷重作用下でのその場観察の際、反力を得るため特殊な載荷治具が必要であり、その有用性は十分でなかった。そこで、本研究では、CT測定中でも応力状態が持続するスリープ鉄筋を考案した。

セメント水和物の溶脱を調べる実験では、炭酸化と純水を用いて連続的に作用させた。これは、通水作用による溶脱に及ぼす炭酸化の影響を調べるためである。凍結融解の繰り返し作用では、一般の試験方法では実環境より著しく過酷な条件であることが指摘されているために、温度操作や乾燥度を工夫した。さらに、高温下で損傷させる模擬供試体にも実現象の再現を念頭に工夫した。

試料のスケールアップを図るために、別機関のCTスキャンの利用を行い、産業利用のX線発生器の電圧をkVからMVまでの強度を試行した。また、水和物組織の結晶を同定するためにX線回折を連成させた新しい手法である非破壊CT-XRD連成法の開発を継続して実施した。このため、大型放射光施設のビームラインを利用した。

X線CTは、主として構成物質の密度を反映した「CT値」として取得される。画像は再構成の結果として得られるが、取得した多量なデータを処理するための手法を効率化する演算処理技術について、特に投影像の再構成における中心軸決定法、規格化手法、擬像処理と再構成関数の同定、逆投影法、X線吸収係数分布図の取得、輝度分布による閾値決定における既存技術を高度化し、多元的数値演算処理法を試行した。画像解析に基づく組織構造を構成するために取得する三次元画像は、既存ソフトであるImageJおよびX線CT研究会で開発された画像解析技術(Slice)を適宜改良、発展させながら使用することとした。

劣化・損傷したセメント硬化体の作製にあたって、想定される劣化要因は、荷重による

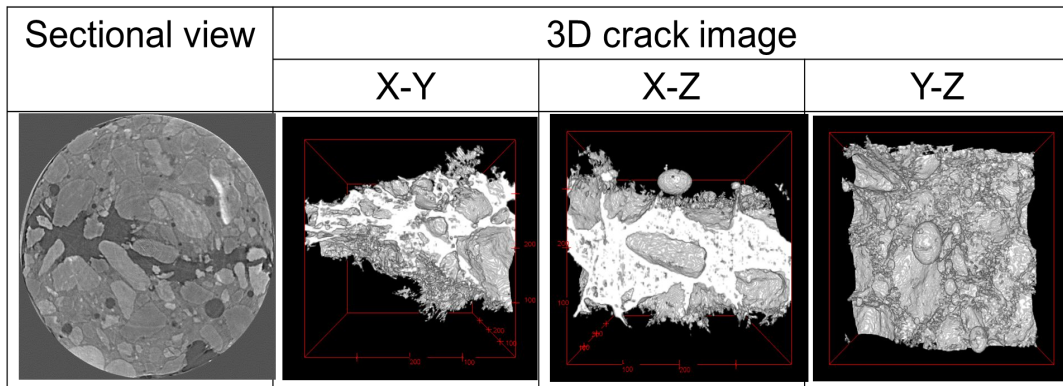


図1 コンクリートのひび割れ中の連続通水作用による内部劣化

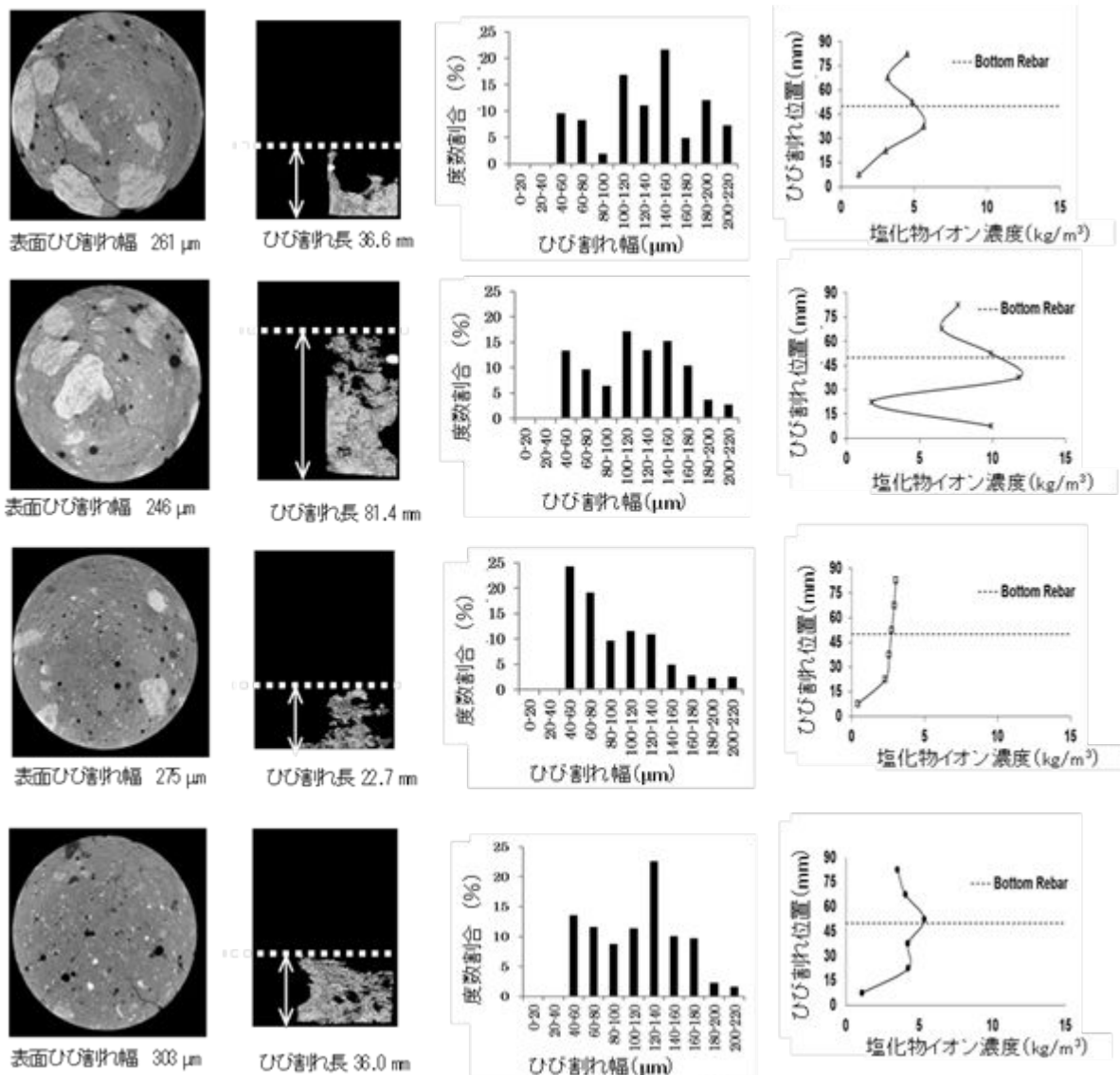
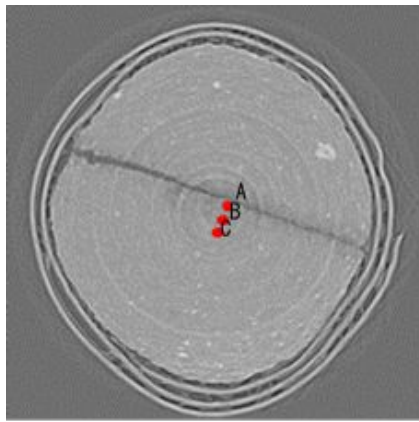


図2 RC床版内のひび割れ長さとその幅および塩化物イオン濃度分布の関係

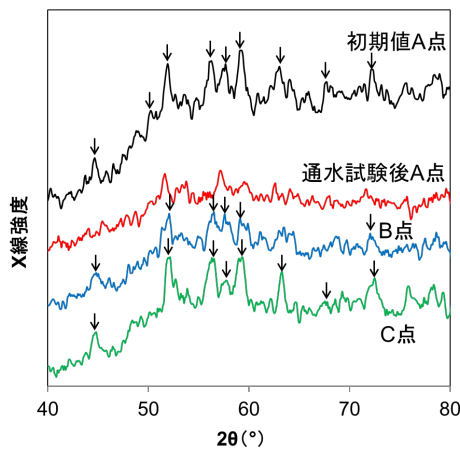
ひび割れ、通水作用による水和物の変質、凍結融解の繰り返しによるスケーリングやひび割れ、高温作用によるひび割れと水和物分解、内部鉄筋の腐食である。また、本研究課題の特長である時間軸評価の導入を具現化するために、各種作用を継続することで同一試料を繰り返し測定に供した。

4. 研究成果

図1は、コンクリートに生じたひび割れ内部を連続通水させて、セメント水和物の溶脱および骨材とペーストマトリックスの変質を調べた結果である。通水作用により、ひび割れ幅の拡大と骨材周囲のセメントペース



(a) CT 断面画像



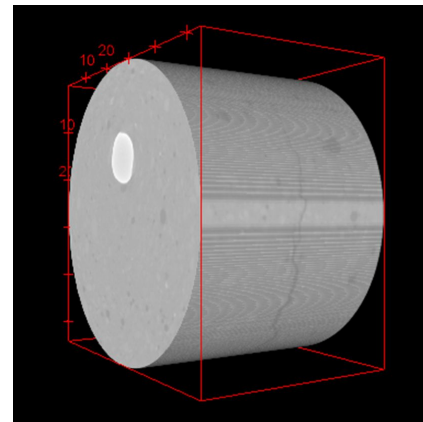
(b) X線回折結果(矢印はポルトランドイト)

図3 非破壊 CT-XRD 連成法による結果

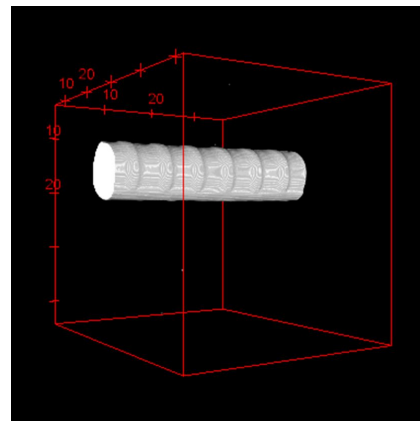
トの消失を明らかにした。通水時の水圧による影響も考えられた。また、ポルトランドイトの消失をX線回折で明らかにした。これより、溶脱により骨材周辺の組織がぜい弱化し、セメントペースト自体が容易に流出したことが考察された。

凍結融解作用や凍結防止剤散布による劣化損傷の機構解明のために、経年劣化した道路橋 RC 床版の下面よりコンクリートコアを採取して、ひび割れ状況と塩化物イオンの浸透性について調べた。図2は、その結果である。これまで困難であった内部ひび割れの長さおよびその幅の分布を定量化して、塩化物イオン濃度との関係を調べた。塩化物イオンは、ひび割れ長さが増加するとその浸透距離は増加することを明らかにして、ひび割れ幅よりも長さが内部浸透には影響が大きいことを示した。また、気泡やひび割れを含めた空隙、骨材、モルタルの3相を分離抽出し、これらを3次元で可視化する透視技術を深化することができた。骨材周辺のひび割れ状況やひび割れと連結した気泡の空間分布も調べた。

実環境を模擬して炭酸化作用と通水作用を受けたセメントペーストの変質現象の解明を目的に、非破壊 CT-XRD 連成法を用いた微視的機構を研究した。図3はその結果を示



(a)鉄筋コンクリートの CT 画像



(b) 異形鉄筋の抽出 (D10)

図4 鉄筋コンクリートからの鉄筋の抽出

している。初期の炭酸ガス注入では十分な炭酸化は生じないことや、短期間の通水作用で水酸化カルシウムは溶脱すること、通水作用を継続することでひび割れ周辺でカルサイトが生成することを明らかにした。この成果は、非破壊 CT XRD 連成法のセメント硬化体の劣化を微視的に解明することに役立つと考えられる。

従来、コンクリート中の鉄筋周辺の空間情報は、レントゲン写真を応用して取得した2次元画像によってのみ透視観察できた。しかし、3次元的にコンクリート内部を透視して鉄筋を可視化することに成功した(図4参照)。すなわち、セメント水和物、骨材と比較して著しく大きな密度である鉄筋に対して、アーチファクトを生じることなく、コンクリート内部の鉄筋を抽出できて、異型鉄筋の節やリブが明確に画像化できた。

コンクリート構造物の耐久性を低下させるもっと大きな原因は、鉄筋腐食である。鉄筋腐食は電気化学的なプロセスで進行して、鉄筋周囲に腐食酸化物が経時的に成長する。すなわち、鉄筋の断面欠損量、ひび割れ分布、腐食生成物の進展機構、鉄イオンの拡散を把握する透視技術を研究した。図5は、鉄筋腐食による断面欠損の状態を示している。腐食実験の後に、実際に断面減少した鉄筋をはつ

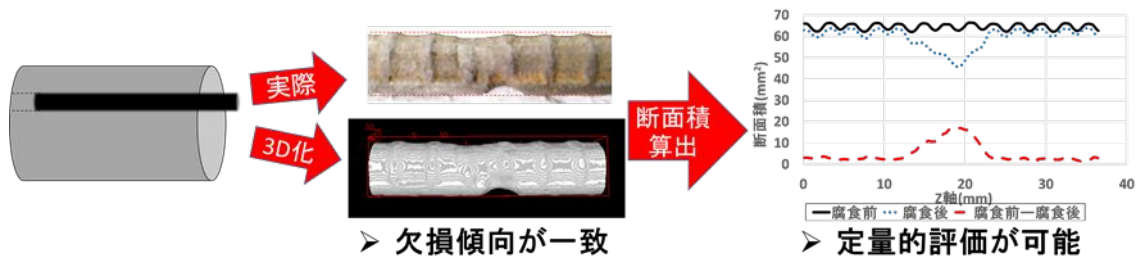


図5 腐食した鉄筋のCT画像と実際との比較および断面欠損の定量化

り取り CT 画像と比較しており、的確に断面減少をとらえていることが分かった。合わせて、断面減少量を定量化する手法を開発した。このように、腐食発生位置および断面減少が著しい箇所を的確に把握することができた。このことは、構造体の腐食による耐久性低下や力学性能の低下を非破壊で予測することができると考えられて、本手法の可能性を大きく飛躍させることにつながると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

高橋駿人、志村和紀、杉山隆文、田中大之：X線CT法を用いた引張力を受けた異形鉄筋周辺のひび割れに関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, 2017(査読有)(印刷中)

杉山隆文、X線を用いた透視技術によるコンクリート構造の非破壊診断、電力土木、No.386, pp.3-8, 2016

Henry, M., Hashimoto, K., Darma, I.S., and Sugiyama, T. (2016). Cracking and chemical composition of cement paste subjected to heating and water re-curing. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 14, pp. 134-143. (査読有)

高橋駿人、志村和紀、杉山隆文、田中大之：X線CT法を用いた鉄筋埋設モルタルのひび割れおよび電食試験による腐食鉄筋の観察、コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No.1, pp.2163-2168, 2016(査読有)

菊池玲子、高橋駿人、杉山隆文：非破壊CT-XRD連成法を用いた流水によるセメント硬化体ひび割れ近傍の溶脱現象の観察、コンクリート工学年次論文集、Vol.38, No.1, pp.1095-1100, 2016(査読有)

桃野英太郎、Idrees Zafar、杉山隆文：自然電位法および分極抵抗法を用いたRC床板内に2段配筋された鉄筋の腐食診断についての実験的考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.38, No.1, pp.1239-1244, 2016(査読有)

高橋駿人、志村和紀、杉山隆文、田中大之：ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響評価に関するX線CT法の利用、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、第16巻、pp.377-380, 2016(査読有)

H. Takahashi and T. Sugiyama, Investigation of alteration in deteriorated mortar due to water attack using non-destructive integrated CT-XRD method, Proceedings of the 11th fib International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, pp. 445-451, 2016(査読有)

T. Sugiyama, T. Hitomi and K. Kajiwara, Non-destructive Integrated CT-XRD Method Developed for Hardened Cementitious Material, Proceedings of 2nd International Conference on Tomography of materials and Structures (ICTMS 2015), pp.560-564, 2015.

J.C. Kuri, I. Zafar, T. Sugiyama, Application of X-ray CT to the Observation of Cracking in a Corroded RC Bridge Slab, Proceedings of 2nd International Conference on Tomography of materials and Structures (ICTMS 2015), pp. 583-587, 2015.

高橋駿人、土生侑佑、志村和紀、杉山隆文：X線CT法を利用した気泡分布測定、JCI-C86、「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会」シンポジウム、pp.59-64、公益社団法人日本コンクリート工学会、2015。(査読有)

〔学会発表〕(計11件)

若松和哉：非破壊CT-XRD連成法を用いた塩水作用を受けたセメント硬化体中の鋼材腐食観察、土木学会北海道支部平成28年度年次技術研究発表会、北見工業大学、北見、2017年2月4-5日

T. Sugiyama：Study on Leaching of Hydrated Cement System by Non-destructive Integrated CT-XRD Method, 4th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste / Cement Interactions 2016, May 22-25, 2016, Murten, Switzerland

高橋駿人：セメントペースト中の鋼材腐食観察における非破壊CT-XRD連成法の適用について、第70回セメント技術大会、東京、2016年5月10-12日

村上竜裕：道路橋床板における非破壊診

断を想定した腐食判定について、第 70 回セメント技術大会、東京、2016 年 5 月 10-12 日

高橋駿人：非破壊 CT-XRD 連成法を用いたモルタルの変質観察、土木学会北海道支部 平成 27 年度年次技術研究発表会、札幌、2016 年 1 月 30-31 日

桃野英太郎：自然電位法を用いた RC 床版内に 2 段配筋された鉄筋の腐食診断、第 69 回セメント技術大会、東京、2015 年 5 月 12-14 日

土生侑祐：凍結融解作用を受けるセメントペーストの温度変形特性、第 69 回セメント技術大会、東京、2015 年 5 月 12-14 日

菊池玲子：非破壊 CT-XRD 連成法を用いた流水によるひび割れ中の溶脱現象の考察、第 69 回セメント技術大会、東京、2015 年 5 月 12-14 日

Jhutan Chandra Kuri, Investigation on Cracked Cement Paste Subjected to Water Flow by Non-destructive Integrated CT-XRD Method、International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS)、Japan Concrete Institute, Nagasaki, Japan, June 1-3, 2015 (Nagasaki Brick Hall)
Michael HENRY, Cracking and chemical composition of cement paste subjected to heating and water re-curing, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS)、Japan Concrete Institute, Nagasaki, Japan, June 1-3, 2015 (Nagasaki Brick Hall)

Jhutan Chandra Kuri, Investigation on the effect of water flow on cement paste microstructure using Non-Destructive Integrated CT-XRD Method, 70th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, Sept. 16-18, 2015, Okayama Univ. Okayama, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山隆文 (SUGIYAMA Takafumi)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70261865

(2) 研究分担者

志村和紀 (SHIMURA Kazunoroi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60187474

ヘンリー マイケル (HENRY Michael)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：80586371

(3) 研究協力者

プロメンティリア マイケル (PROMENTILLA Michael)
De La Salle University