

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360187

研究課題名(和文)透視技術の利用による機能性コンクリートの検査・健全度診断用物性学的評価手法の開発

研究課題名(英文)Development of visualization technique relating to physical property for the diagnosis of concrete structure

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) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートは主幹建設材料として様々な構造物に利用されてきた。中には長年の利用によりひび割れや変質が顕在化して、安全性が不安視される構造物も存在する。このため維持管理により傷みの激しいコンクリートを的確に見つけ出し、対策を施すことが肝要である。

そこで、コンクリート分野では未開発の透視技術に着目して、簡単にコンクリート内部のひび割れや欠陥が合理的に判定可能であるかを研究した。その結果、X線CT法は有用な可視化手法であり、ひび割れの立体画像の取得とその幅が数十 μm 程度まで検出可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Concrete is a primary construction material and hence has been used for varied types of structural members under diverse environments. It has been found that some concrete structures exhibit deterioration with cracks and alteration. For upgrading these degraded concrete the technology of diagnosis needs to be further developed first so that one can take next proper action for repairing.

Visualization technique is now popular because rational evaluation can be made through image analysis and similar methods. To do so a X-ray Computed Tomography (XRCT) is considered promising tool. It can enable to obtain three dimensional images of internal microstructure and cracks. Then this research aims to clarify the capacity of the XRCT using mortar specimens. It was found that the 3D crack image could be obtained and the crack geometry such as crack width distribution with 10 micrometers or larger was quantified.

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：X線CT コンクリート 検査 診断

1. 研究開始当初の背景

(1) コンクリートの用途拡大を背景に、コンクリートには多機能性が求められており、適材適所に利用されるコンクリート材料が開発されて利用されている。また、コンクリート構造物の延命化についても表面保護材や含浸材などの補修材料の開発や実利用が進められている。これらの多機能セメント系硬化体の安定的で確実な普及には、その材料・配合の特徴を踏まえた、作業性、力学的安定性、初期欠陥の発生抑制、高耐久化が不可欠である。これに合わせて検査手法や健全度診断技術の高度化も必要になる。これは、従来のコンクリートとは異なる組織構造を有する材料について、新しい評価技術の確立が必要であることを意味している。従来から非破壊（微破壊）検査は種々提案されて実用化されている。これらの高度化に向けた次のステップは、透視技術（イメージング技術）である。

(2) 検査や診断においては、コンクリートの強度や耐久性などの物性に影響を及ぼす微細組織構造や水和物形態の詳細な解明が必要となる。空隙構造は、水銀圧入法による細孔径分布測定で定量化されるが、インクボトル効果や高圧による空隙構造の破壊が指摘されている。水和物形態の解明には、国内・国外を問わずに、電子顕微鏡、反射電子像、電子線マイクロアナライザー（EPMA）があり、コンクリート水和組織の限定された領域を二次元で観察するものである。これらの情報を、三次元空間で投影できる技術が必要である。著者らは既に放射光施設のビームラインやマイクロフォーカス（微焦点）装置を使用して、高分解能 X 線 CT 法による空隙の抽出技術を開発してきた。高分解能 X 線 CT 法は、熟練度が要求される試料準備が不要であり、非破壊でコンクリートの微細組織を高い解像度で立体的に可視化できる有望な計測技術である。

(3) これまで基礎研究を積み重ねてきた X 線 CT 法を、透視技術として実用的な評価手法へとさらに高度利用するために研究を行うものである。空隙、ひび割れ、水和物を含めたコンクリート組織構造の三次元構造解析や水和物形態の同定を可能にする手法を開発する。組織構造の透視化によって、力学的性質、物質移動性、物理化学的特性などの物性学的性質を予測し、多機能コンクリートの検査・健全度を評価する新しい手法を目指すものである。

2. 研究の目的

(1) コンクリート構造物は様々な原因によりひび割れが生じることがある。ひび割れを有する構造物では、構造物の美観の低下に加え、ひび割れから塩分が侵入することで生じる塩害、ひび割れから二酸化炭素が侵入して生

じる中性化、ひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食速度に影響を及ぼすなど様々な問題が生じる。コンクリートの物質移動性において、内部に発生したひび割れの形状や経路が及ぼす影響は大きく、3次元での物質移動のメカニズムの解明が求められている。立体透視図に関しては、X 線 CT 法の利用が有効と考えられ、セメント系材料への適用が増えつつある。

(2) 荷重作用、収縮作用、熱作用などを受けたひび割れを有するコンクリート中の物質移動性に関する研究は、これまでも数多くの報告がなされている。しかし、ひび割れに関する物質移動現象の考察では、コンクリート表面のひび割れ幅やその長さとの関係で議論されるなど限定的であり、ひび割れ内部の物質移動のメカニズムの解明が求められている。そこで、ひび割れ内部の詳細な把握のために、X 線 CT 法の利用が有効であると考えられ、高解像度でひび割れを含む空隙を 3次元可視化する手法を開発する。また、画像解析を通じて、ひび割れの定量化を試みる。さらに、ひび割れ中およびひび割れ壁面から硬化体マトリックスへの物質移動性を把握する。

3. 研究の方法

(1) 普通ポルトランドセメントを使用した普通モルタルおよびセメントの一部をフライアッシュ（JIS II 種）で置換したフライアッシュモルタルを作製した。細骨材の粒径は 1.7mm 以下とした。一部のモルタルには粒径が 0.5mm 以下の石灰石を用いた。各フレッシュモルタルを 40×40×160mm の型枠に打ち込み、24 時間後に脱枠し、水中養生を 170 日から 320 日間行った。そして、高さ 20mm、幅 10mm、長さ 60mm の直方体をマイクロカッターにより切り出した。曲げ試験時の急激な破壊を防ぐために、供試体の側面に FRP シートを貼付し、三点曲げ試験時の曲げひび割れを制御しながら発生させた。そして、微焦点 X 線 CT を用いて内部画像を撮影し、ひび割れを 3次元で可視化した。また、実構造物として 4 年間供用された機能性インターロッキングブロック舗装からコア採取した試料についても微焦点 X 線 CT を用いてその内部構造を透視した。

(2) ひび割れ中に浸透する水分の移動を可視化するため、X 線造影剤としても利用開発された炭酸セシウム水溶液を用いた。X 線 CT 撮影では、空気などの X 線を吸収しないものは黒の色調で、反対に密度が大きい物質で X 線が吸収されやすいものは、白の色調で表される。セメントの主構成成分の中で原子番号が大きいのはカルシウムであり、セシウムはそれよりも原子番号が大きく、炭酸セシウムの密度はモルタルおよびコンクリートの使用材料の密度よりも大きいことから、撮影さ

れた画像において白く表示される。そこで、炭酸セシウム水溶液の浸漬試験を行った。炭酸セシウムの濃度は、質量パーセントで 40% である。供試体の引張縁を底面として、ここから 2mm の高さまで浸漬させた場合と供試体全体を浸漬させた場合の 2 通りで試験を行った。なお、浸漬時間は 24 時間である。炭酸セシウムをトレーサとしてひび割れ中の物質移動性を可視化する研究では、曲げひび割れ、割裂ひび割れ、スリットで模擬したひび割れなどを対象に、水溶液浸漬前後で X 線 CT 撮影を行い、トレーサの移動性を可視化した。

(3) 引張荷重を受けるセメント硬化体の内部構造変化を大型放射光施設 (SPring 8) の放射光を用いて調べた。断面寸法が 1×1 mm で長さ 15 mm の角柱モルタル供試体を作製した。変位における基点としてフライアッシュ粒子をマーカとして利用した。その場試験装置として、微小引張試験装置を設計、製作した。電気信号を荷重へ変換する制御法でモルタル硬化体を数段階に分けて引張荷重を増加した。各段階で、ピクセルサイズが $0.5 \mu\text{m}$ である X 線 CT 撮影を行った。

4. 研究成果

(1) CT 画像からひび割れ部だけを抽出することができた。二値化された関心領域に SPring 8 が提供する SLICE プログラムを用いてクラスターラベリングを行った。この手法を用いることで数多く存在する空隙を大きさの昇降順に並べることができる。これにより、最も連続性が大きいとみなされたクラスターをひび割れとして抽出した。また、ひび割れ部分とその他の空隙を区別する技術を開発した。固体部分を白色、ひび割れ部分を黒色、その他の空隙部分を灰色で表示した (図 1)。このようにして抽出したひび割れを画像処理して、3 次元透視図を作成した (図 2)。

(2) 三点曲げ試験から曲げひび割れを導入したコンクリートはりに対して X 線 CT により透視した。その結果、透視画像から計測した引張縁のひび割れ幅は、顕微鏡の計測値とほぼ等しい結果となった。これより、X 線 CT を用いて作成したひび割れの 3 次元透視図は実際のひび割れにほぼ等しいことを検証した。ただし、ひび割れ幅が $10 \mu\text{m}$ 程度と 1pixel サイズの $22 \mu\text{m}$ より小さい場合、撮影した断面画像でひび割れを検出することが出来なかった。ひび割れ幅が $40 \mu\text{m}$ 以下のような小さい供試体ではひび割れの 3 次元画像の作成は困難であると考えられる。供試体寸法と解像度のバランスを考慮することが必要であることがわかった。曲げひび割れは、引張縁でひび割れ幅が最大となり、圧縮側で小さくなる形状を可視化できた。

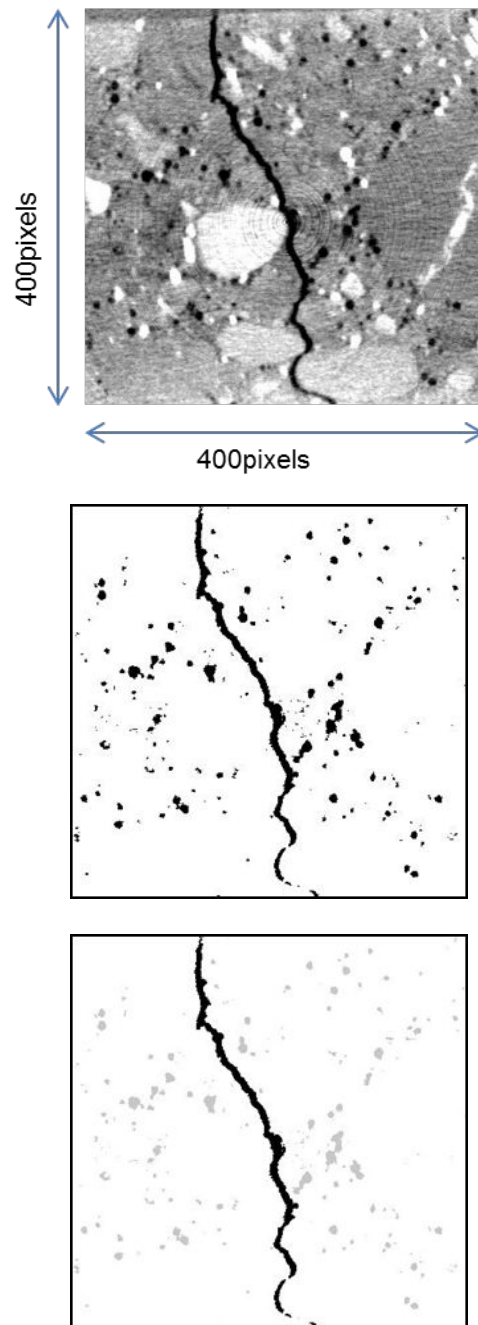


図 1 画像解析によるひび割れ抽出 (上から関心領域、二値化処理後、分離後)

(3) 積雪寒冷地で実車両荷重を 4 年間受けた機能性コンクリートブロックの内部構造の透視画像を取得した。コンクリートの配合は表層では水セメント比が 0.27 で、基層では 0.3 である。微細ひび割れなどの損傷は認められなかった。ブロックの表層 16mm における断面および高さ方向の各 CT 画像を分析対象とした。その結果、比較的大きな不規則形状の空隙が、骨材周辺に存在していることが明らかになった。しかし、4 年経過後でもひび割れは観察されず、強度低下もないことから、CT 画像結果と物性とは整合しており、耐久性のあるブロックであることを示した。

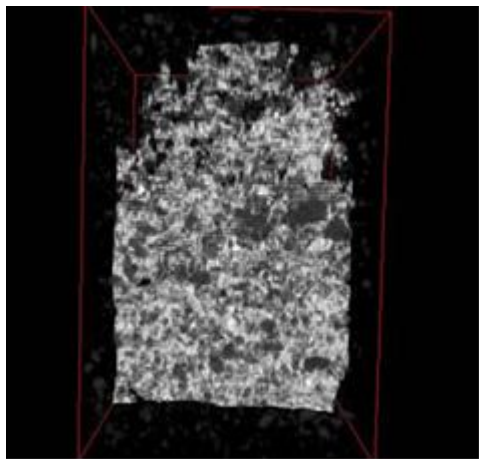
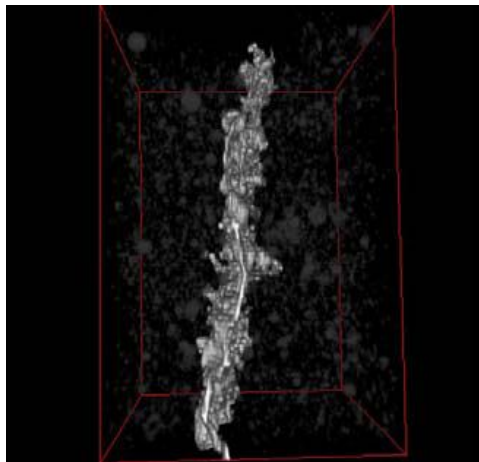


図2 曲げひび割れの透視画像（上図 XZ 方向、下図 YZ 方向）

(4)図 3、4 は、フライアッシュモルタルの引張試験から得られた基点フライアッシュ粒子の抽出と荷重下での座標の変位である。微小引張試験装置をその場試験として、ビームライン内のステージにセットして、荷重を作用中に CT 画像を取得したものである。このように透視技術の応用として、内部変位を追跡できることを示して、外観観察では捉えることができない内部構造を定量的に可視化できることを明らかにした。

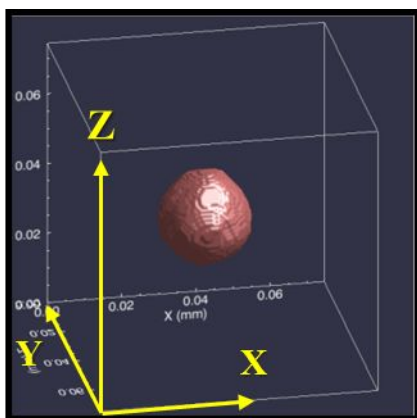
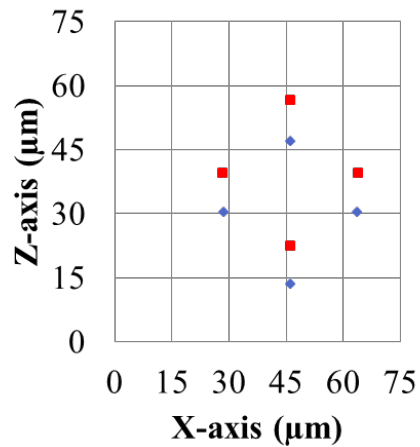


図3 基点フライアッシュ粒子の抽出



◆ 0 N ■ 4.27 N
図4 引張荷重下の内部測定点座標変位

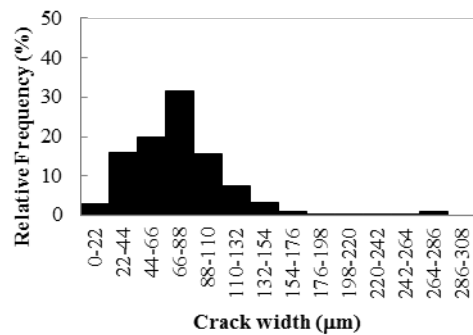


図5 ひび割れ幅分布

(5)曲げひび割れを生じたモルタルはりの X 線 CT データを分析して、画像解析処理から曲げひび割れ幅の分布を計算した。その結果を図 5 に示す。ひび割れ空間に仮想球を連続分布させその直径からひび割れ幅を計算している。図 5 から 66~88 μm を頂点としたひび割れ幅ヒストグラムを得ることができた。

(6) 図 6 は曲げひび割れを生じたモルタルはり中央部の X 線 CT 画像である。画像を見ると、2mm 浸漬においてひび割れ中に炭酸セシウム水溶液が浸透していることが分かる。浸漬高さが 2mm よりも超えて炭酸セシウム水溶液が浸透している。この供試体の引張縁のひび割れ幅は 154~176 μm であるが、毛細現象が生じた可能性がある。他の供試体でも同様の結果が得られた。ひび割れ部の周辺領域にも炭酸セシウム水溶液が浸透しており、連結空隙中へも移動しているのが分かる。供試体底面から炭酸セシウム水溶液が浸透していないが、炭酸セシウム水溶液は FRP シート補強の際に供試体底面に付着したプライマーにより、浸透が遮断されたと推察される。ひび割れ幅が 10 μm 程度と小さく X 線 CT でひび割れを検出することが出来なかった供試体でも、他の供試体と同様、炭酸セシウム水溶液が特定の領域に浸透していた。ひ

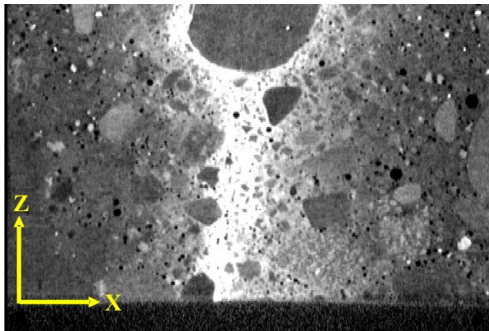
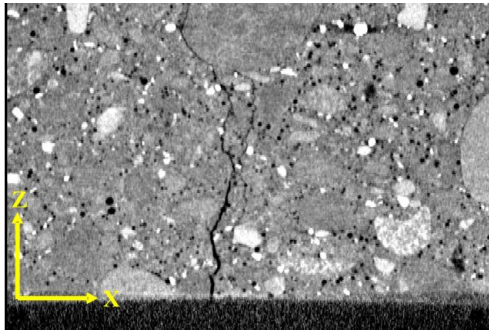


図 6 曲げひび割れ(上図)および炭酸セシウムの移動の可視化(下図)

ひび割れ抽出が困難な場合でも、炭酸セシウムはそのひび割れ中を移動したと考えられる。また、断面画像の圧縮縁に近づくにつれて炭酸セシウムが広がっていることが確認された。別の供試体では、ひび割れ上部で炭酸セシウムが枝分かれして広がっていることも観察された。ひび割れ上部で X 線 CT では検知できない微細なひび割れが数カ所発生していることが推察された。普通モルタル(P)とフライアッシュモルタル(F)を比較すると、それぞれひび割れ幅は異なるが、F に比べて P の方が炭酸セシウム水溶液のモルタルへの浸透が大きく、比較的広範囲に広がっていることが観察された。これは F はフライアッシュを混合しているため、水密性が高く、浸透が抑制されたためと考えられる。このように炭酸セシウム水溶液は、ひび割れ幅以上に浸透の拡がりを見せており、ひび割れ部だけでなく、ひび割れ面を通じてマトリックスに存在する微細な連続した空隙へも移動していることが可視化できた。したがって、コンクリート中の物質移動性も模擬できると考えられ、ひび割れ空間と物質移動性を定量的に研究することが可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

M. Henry, I.S. Darma and T. Sugiyama, Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT,

Construction and Building Materials, 査読有、2014

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.007>

I.S. Darma, T. Sugiyama and M.A.B. Promentilla, Application of X-Ray CT to Study Diffusivity in Cracked Concrete Through the Observation of Tracer Transport, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有、11、2013、pp.266-281、<http://dx.doi.org/10.3151/jact.11.266>

I.S. Darma, S. Ikeda and T. Sugiyama, Investigation of cesium diffusion in cracked concrete by using microfocus X-ray CT, Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, 査読有、Nagoya, Japan, 2013, ISBN: 978-4-9905958-2-1 C3051

M. Henry, I.S. Darma and T. Sugiyama, Characterization of crack geometry in fire-damaged high-strength concrete under re-curing using X-ray CT, Proceedings of Japan Concrete Institutes, 査読有、35、2013、1177-1182.

M. Henry, T. Sugiyama, T. Iyoda and K. Sato, Observation of recycled aggregate structure using X-ray CT, 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction(EASEC-13), 2013 (in USB)

M. Henry, I.S. Darma, Y. Haraguchi and T. Sugiyama, Analysis of cracking in high-strength cementitious materials under heating and re-curing using X-ray CT, 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT3), 査読有、2013 (in CD-ROM)

吉川昂純、杉山隆文、I. S. Darma、志村和紀: X 線 CT による曲げひび割れ及び炭酸セシウム水溶液の移動の可視化、コンクリート工学年次論文集、査読有、34(1)、2012、pp. 1810-1815

I.S. Darma, T. Sugiyama, T. Hitomi and K. Shimura, Phases analysis on fly ash concrete by using synchrotron X-ray computed microtomography, Proceedings of Japan Concrete Institutes, 査読有、34(1)、2012、pp. 202-207

古村惇朗、杉山隆文: フライアッシュコンクリート中の腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する実験的考察、コンクリート工学年次論文集、査読有、34(1)、2012、pp. 1012-1017

池田昇平、杉山隆文、吉川昂純、志村和紀、炭酸セシウムをトレーサーとした X 線 CT によるひび割れ中の物質移動の解明、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、12、2012、pp.207-214

〔学会発表〕(計 14 件)

原口雄人、杉山隆文、人見尚、梶原堅太郎：非破壊 CT-XRD 連成法によるひび割れを有するセメント硬化体の溶脱現象の観察、第 68 回セメント技術大会、2014 年 5 月 13-15 日、ホテルメトロポリタン、東京

金子幹、Idrees Zafar、杉山隆文：曲げひび割れがコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究、平成 25 年度土木学会北海道支部 論文報告集 第 70 号、E07 (in CD-ROM、4 頁) 2014 年 2 月 1-2 日、札幌コンベンションセンター、札幌

渡辺洋文、志村和紀、杉山隆文：凍結融解作用を受けるセメントペーストのひずみ挙動、土木学会北海道支部 平成 25 年度論文報告集、第 70 号、E-11 (in CD-ROM、4 頁) 2014 年 2 月 1-2 日、札幌コンベンションセンター、札幌

高井康宏、志村和紀、杉山隆文：積雪寒冷地インターロッキングブロック舗装の基礎研究、土木学会北海道支部 平成 25 年度論文報告集、第 70 号、E-25 (in CD-ROM、4 頁) 2014 年 2 月 1-2 日、札幌コンベンションセンター、札幌

T. Sugiyama、Change of microstructure of hardened cement paste with a low alkali binder due to leaching、3rd International Workshop Mechanisms and modelling of waste/cement interactions Workshop、May 6-8 2013、Ghent University(Belgium)

I.S. Darma、Structural Response in Microstructure of Concrete under Tensional Force Observed by Synchrotron X-Ray Computed Microtomography、1st International Conference on Tomography of Materials and Structures、July 1-5、2013、Ghent University(Belgium)

池田昇平、杉山隆文、人見尚、梶原堅太郎、非破壊 CT-XRD 連成法による通水を受けたひび割れを有するセメント硬化体の変質観察、第 67 回セメント技術大会、2013 年 5 月 13-15 日、ホテルメトロポリタン 東京都

佐藤恭平、マイケルヘンリー、杉山隆文、伊代田岳史、X 線 CT を用いた再生骨材の構造観察、第 68 回土木学会年次学術講演会、2013 年 9 月 4-6 日、日本大学 千葉

原口 雄人、マイケルヘンリー、イヴァン サンディ ダルマ、杉山隆文、火害を受けたセメントペーストのひび割れ性状に及ぼす再養生の影響、第 68 回土木学会年次学術講演会、2013 年 9 月 4-6 日、日本大学、千葉

M. Henry、I.S. Darma、Y. Haraguchi、T. Sugiyama、Effect of heating and re-curing on cracks in high-strength concrete、第 68 回土木学会年次学術講演会、2013 年 9 月 4-6 日、日本大学、千葉

高橋正行、杉山隆文、吉川昂純、志村和紀：X 線 CT 法を利用したモルタル内部のひび割れの可視化、土木学会北海道支部、平成 23

年度論文報告集、第 68 号、2012 年 2 月 2-3 日、E-6 (in CD-ROM、4 頁) 札幌かでの 27、札幌

T.Sugiyama、Visualization of microcracks and the penetration of a contrast medium in concrete、CT Scan WORKSHOP - Development on non-medical environment、March 6-9、2012、INRS-ETE (Canada)

T. Sugiyama、Three dimensional change of pore structure in deteriorated cement paste by accelerated calcium Leaching、The 1st China-Japan Workshop on High Performance Concrete Materials

/Structures for Sustainable Infrastructures (招待講演) 2012 年 7 月 22-24 日、Dalian University of Technology (China)

杉山隆文、L 型コンクリートブロックの積雪寒冷地道路舗装への適用第 66 回セメント技術大会、2012 年 5 月 29~31 日、ホテルメトロポリタン、東京都

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 Kazunori)
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・助教
研究者番号：80586371