

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760332

研究課題名（和文） ASR 膨張メカニズム解明を目指したシンクロトロン放射光の適用

研究課題名（英文） Study on ASR Mechanism by Using Synchrotron Radiation

研究代表者

水田 真紀（MIZUTA MAKI）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：00411257

研究成果の概要（和文）：

アルカリシリカ反応（ASR）とは、コンクリート中で生じるセメント由来のアルカリと骨材中のシリカの反応である。この反応により生成されるゲルには膨張性があることから、コンクリートにひび割れを発生させ、構造全体に影響を及ぼす恐れがある。そこで本研究では、X線吸収微細構造（XAFS）測定を行い、疑似的に生成したゲルの化学状態を同定した。さらに、ASR 膨張した RC 梁の実験より、耐荷力やコンクリート - 鉄筋間の付着に影響する膨張レベルを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

The Alkali-Silica Reaction (ASR) is known as a reaction which occurs in concrete between the highly alkaline cement and reactive silica aggregates and causes serious expansion and cracking in concrete, resulting in critical structural problems. In this study, the ASR was confirmed in the artificial condition by using the X-ray Absorption Fine Structure (XAFS) spectroscopy. And, the experiments of RC beams clarified the effect of ASR expansion on loading capacity and bond performance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：コンクリート工学

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：ASR・XAFS・放射光・膨張・付着・a/d・破壊形式

1. 研究開始当初の背景

我が国で 1950 年代に発見された ASR によるコンクリート構造物の早期劣化の問題は、未だに解決の糸口を見出せないでいる。現在、JIS では ASR を生じる恐れのある骨材の評価方法を規定しているが、無害と判定された骨材を用いた構造物に多数のひび割れが発生

したり、コンクリート内部に配置されている鉄筋が破断したりする事例が数多く報告されている。さらに、膨張を拘束するような補修を施しても継続的に膨張している構造物もあり、ASR により劣化したコンクリート構造物の合理的な補修・補強方法も定まっていないのが現状である。

このような社会的背景と、今なお ASR メカニズムを定義する複数の説があることを鑑みると、従来の手法では ASR の本質的な原因究明には至らず、新たな手法を模索する必要がある。さらに、補修・補強後も構造物の安全性を確保するためには、ASR 膨張が構造物の破壊までの挙動に与える影響を定量的に評価しなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、ASR がコンクリートを異常膨張させるメカニズムを解明することを目的としている。目的達成のための本研究の特長の一つは、コンクリートのように結晶構造を持たないアモルファス材料の化学状態分析を可能にする、シンクロトロン放射光を照射する XAFS 分析を行う点である。もう一つは、コンクリート内の化学反応についての化学的な情報と、強度などの物理的な情報を関連付ける点である。

3. 研究の方法

(1) ASR による生成物の化学状態分析

ASR が発生する 2 つの状態について試料を作製し、XAFS 分析を行った。各分析で用いた試料作製方法を以下に示す。ここで、いずれの試料についても、反応性骨材として北海道産安山岩を用い、粒径を 20 ~ 40 μm に揃えた。

理想的な ASR 発生環境

骨材の粉末を 1mol/L の NaOH 水溶液中にステンレス製容器内で浸漬させ、7 日間 40 に保持し、十分に反応させた。そして、NaOH 水溶液の上澄み液を注射器で採取し、これを溶液試料とし、XAFS 分析を行った。また、浸漬後の粉末試料を約 12 時間自然乾燥させ、反応後の粉末試料も分析した。

疑似的な ASR 発生環境

セメントペーストを硬化させたブロックを 2 か月程度蒸留水に浸漬し、セメント由来のアルカリが溶け込んだ水溶液（以下、セメントアルカリ水溶液と称す）を作製した。そして、その水溶液の中に骨材の粉末を浸漬し、40 で 60 日間ステンレス製容器の中に保管し、反応させた。項と同様、溶液と粉末の 2 種類の試料について XAFS 分析を実施した。

(2) ASR 膨張が RC 梁の曲げおよびせん断耐荷性状に及ぼす影響

供試体一覧を表-1 に示す。また、図-1 に供試体寸法および配筋図、図-2 に荷重条件を示す。実験要因は、材料的要因となるコンクリートの膨張量と、構造的要因である荷重条件とした。ここで、反応性骨材には(1)と同じ北海道産安山岩を使用した。

コンクリートの膨張量として、0、1000、2000 $\times 10^{-6}$ の 3 水準を設定した。膨張量が 1000 および 2000 $\times 10^{-6}$ の供試体を ASR シリー

表-1 供試体一覧

供試体名	膨張量 ($\times 10^{-6}$)	a/d	使用鉄筋
ST-r-3.5	0	3.5	9
ST-d-3.5	0		D10
ASR1000-3.5	1000		
ASR2000-3.5	2000		
ST-r-1.1	0	1.1	9
ST-d-1.1	0		D10
ASR1000-1.1	1000		
ASR2000-1.1	2000		

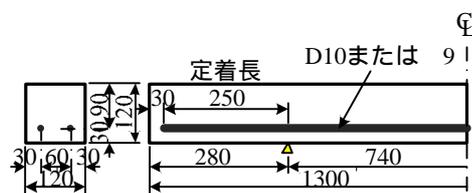


図-1 供試体寸法および配筋図

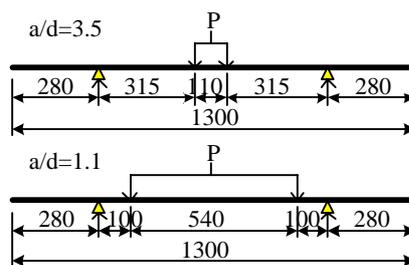


図-2 荷重条件

ズ、膨張量が 0 の供試体を ST シリーズと呼ぶことにする。ここで、膨張量は、RC 梁供試体と同時に作製した 100 \times 100 \times 400 (mm) の角柱コンクリートの長軸方向に 100 (mm) 間隔で 3 点に取り付けたコンタクトチップ間の距離を測定した値とし、3 体の平均値とした。

ASR 膨張によるコンクリートの劣化の影響を観察するため、圧縮型の破壊を生じるせん断スパン有効高さ（以下、a/d）が 3.5 および 1.1 となる 2 種類の荷重条件を設定した。ここで、コンクリートの膨張量が 0 であれば、a/d=3.5 の場合は、主鉄筋降伏後、コンクリートの圧縮破壊が生じる曲げ破壊を想定した。また、a/d=1.1 の場合は、せん断ひび割れ発生後もタイドアーチ的な性状を示すことから、コンクリートの圧縮破壊により終局に達する、せん断圧縮破壊を生じる荷重条件である。また、コンクリートと鉄筋の付着あるいは定着が十分でない場合、RC 梁が破壊するまでの挙動を確認するため、ST シリーズでは異形鉄筋（記号 d）以外に丸鋼（記号 r）も使用した。

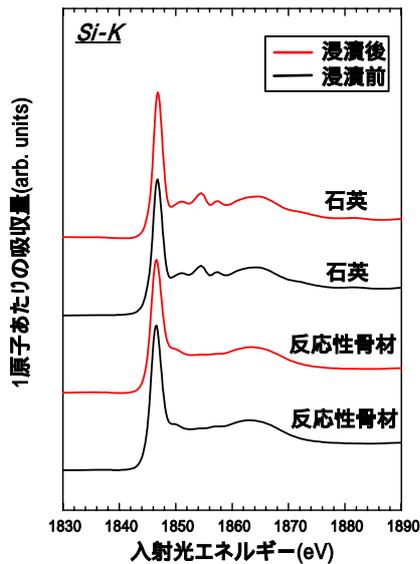


図-3 XAFSスペクトルの浸漬前後の比較

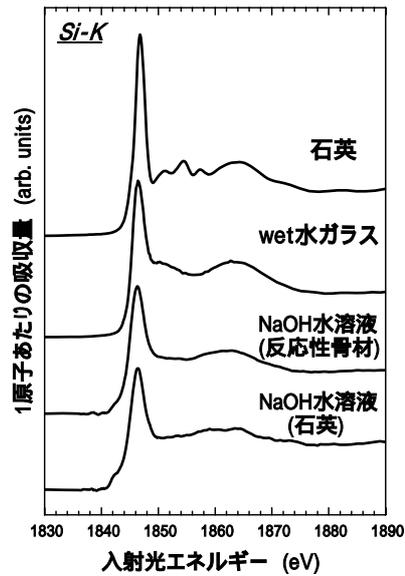


図-4 浸漬後のXAFSスペクトル

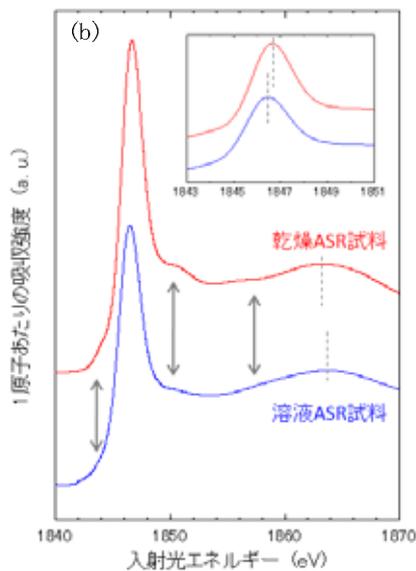
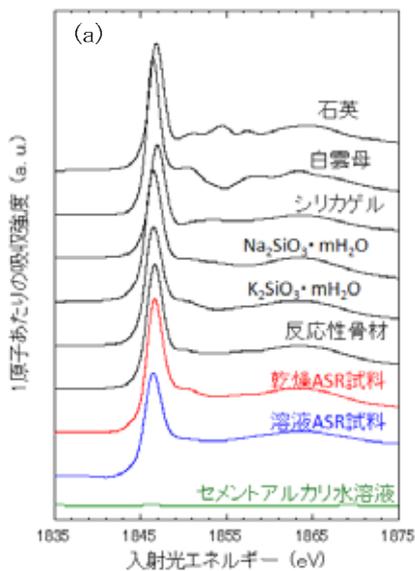


図-5 各試料のXAFSスペクトルの比較

4. 研究成果

(1) ASRによる生成物の化学状態分析 理想的なASR発生環境

図-3より、反応性骨材および比較用石英の粉末試料において、NaOH水溶液浸漬前後でスペクトルに大きな変化は見られなかった。しかし、測定に先立ちJIS A 1145(化学法)およびJIS A 1146(モルタルパー法)を行った結果、測定に用いた反応性骨材は「無害でない」と判定されたため、ASRが生じていないとは考え難い。よって、化学法では十分に反応しているはずの条件にも拘らず、XAFSスペクトルには大きな変化がなかったのは、反応によってできた生成物が溶液中に流れ出てしまい、粉末試料表面に生成物が残らなかったためであると推察される。つまり、生成物が粉末試料表面にほとんど残らなかったことで、測定試料中の粉末に対する生成物の割

合が極めて小さくなり、浸漬前後のスペクトルに違いが現れなかったと考えられる。

一方、反応性骨材および石英を浸漬させたNaOH水溶液の上澄み液(溶液試料)についてそれぞれSi K吸収端スペクトルを測定した結果、いずれもNaOH水溶液には本来含まれていないSiO₂的なスペクトルが得られた(図-4)。比較のため、NaOH水溶液浸漬後の石英粉末とゾル状のウェットな水ガラスの結果も併せて示している。

反応性骨材および石英を浸漬させたNaOH水溶液のスペクトルは、いずれも水ガラスとスペクトル形状が似ており、ASR反応によってできた生成物のスペクトルであると考えられる。ここで、得られたスペクトルがNaOH水溶液中に浮遊した粉末試料を反映していた可能性を否定するため、図-3の石英のスペクトル(NaOH浸漬石英)と石英を浸漬させた

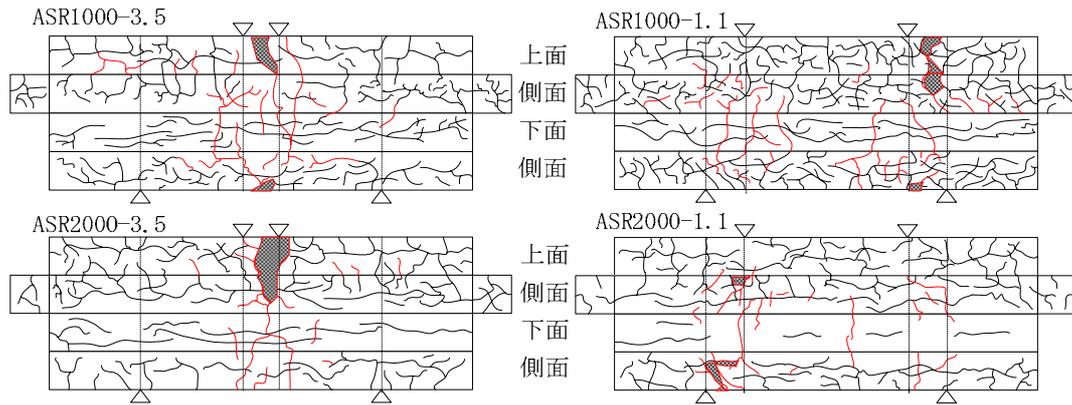


図-6 ひび割れ状況

表-2 載荷試験結果

供試体名	曲げ：最大荷重(kN)			せん断：最大荷重(kN)			圧縮強度 (N/mm ²)	破壊形式
	実験	計算	実験/計算	実験	計算	実験/計算		
ST-r-3.5	23.47	23.54	0.99	-	-	-	39.7	曲げ引張破壊
ST-d-3.5	31.47	28.17	1.12	-	-	-	39.7	
ASR1000-3.5	32.53	26.68	1.20	-	-	-	23.1	
ASR2000-3.5	39.33	26.25	1.50	-	-	-	20.6	
ST-r-1.1	-	-	-	61.20	58.13	1.05	39.7	鉄筋降伏後 コンクリートの 圧縮破壊
ST-d-1.1	-	-	-	93.20	61.16	1.52	39.7	
ASR1000-1.1	-	-	-	91.47	42.60	2.14	23.1	
ASR2000-1.1	-	-	-	90.33	39.46	2.28	20.6	

NaOH 水溶液のスペクトルを比較した。比較用試料に石英を選択したのは、図-4 のように反応性骨材に比べてスペクトル形状の特徴が明確であるため、浮遊粉末試料を反映しているかどうかを判定できると考えたためである。その結果、石英を浸漬させた NaOH 水溶液のスペクトルは、明らかに NaOH 浸漬石英のスペクトルとは異なっており、採取した溶液試料に石英粉末が含まれていないことがわかった。よって、本研究で得られた生成物は、水ガラスとスペクトル形状が似ていることや、水溶液中に溶解していることから、水ガラスに近い水溶性のシリカゾルであると考えられる。

疑似的な ASR 発生環境

図-5(a)に ASR 試料と比較試料の Si K 吸収端 XAFS スペクトルを示す。溶液試料、粉末試料のいずれのスペクトルも、比較試料と同じ SiO₂ 型であることが分かった。また、同条件で測定したセメントアルカリ水溶液からは Si が検出されなかったため、両試料中の Si は ASR による生成物であると判断できる。

図-5(b)は両試料のスペクトルを拡大したものであり、両者を比較すると様々な点に僅

かな違いがあることが分かった。まず、吸収端付近の最も大きなピークは溶液 ASR 試料に比べ乾燥 ASR 試料ではわずかに高エネルギー側にシフトしており、これは Si-O 間距離が乾燥 ASR 試料の方が短いことを表している。その他、図中に矢印で示す箇所のピークの現れ方が異なり、これは Si-O の外側の構造が両試料で異なることを意味している。以上の測定結果から同じ ASR 生成物でも含水状態にある場合と乾燥状態にある場合ではその化学状態が異なること、つまり別の物質であることがわかった。

(2) ASR 膨張が RC 梁の曲げおよびせん断耐荷性状に及ぼす影響

載荷実験前のひび割れ状況

図-6 に、載荷実験を実施する前のひび割れ状況を示す。ここで、載荷実験時に生じたひび割れも同図に赤色で示しており、載荷実験前に発生していたひび割れと区別している。

すべての供試体で、下面を除く面に多数のひび割れが亀甲状に発生した。また、供試体下面には、鉄筋に沿った軸方向のひび割れが卓越して生じており、いずれの膨張量におい

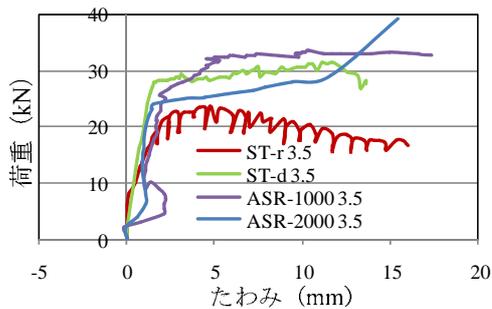


図-7 荷重-たわみ関係 (a/d=3.5)

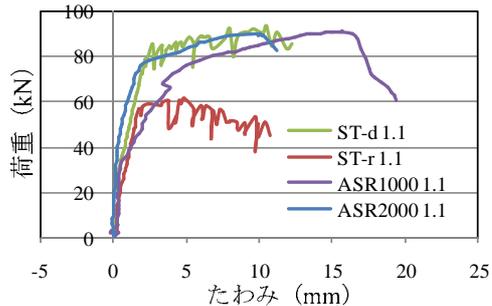


図-8 荷重-たわみ関係 (a/d=1.1)

ても、軸直角方向のひび割れはほとんど観察されなかった。これらの結果から、ASR 膨張によって、表-2 に示すコンクリートの圧縮強度が低下した結果と同様、ASR によるコンクリートの劣化が進行していることを確認できた。さらに、供試体が上に凸状に反り上がり、鉄筋とコンクリートの付着が ASR 膨張を拘束している様子がうかがえた。

載荷実験結果 (a/d=3.5 の場合)

図-7 に荷重 - たわみ関係を示す。ここで、比較のため、図には ST シリーズの実験結果もあわせて表示した。また、ひび割れ状況については、図-6 を参照することにする。

表-2 に示すとおり、ASR1000、ASR2000 供試体ともに、曲げ引張破壊を生じ、最大荷重も ST-d 供試体を上回った。また、ひび割れ状況から、ASR1000 供試体には曲げスパンに複数のひび割れ、せん断スパンにもひび割れが発生しており、ST-d 供試体と同程度の付着があるものと推測できる。それに比べ、ASR2000 供試体が発生したひび割れの本数は減少し、ST-r 供試体と同程度であったことから、コンクリートが健全なとき場合よりも付着が悪くなっている可能性がある。

図-7 の ASR1000 供試体を ST-d 供試体と比較すると、鉄筋が降伏し始める 30(kN)あたりまでは傾きが緩やかだが、その後は良く似た挙動を示した。そして、ASR2000 供試体についても、ST-r 供試体よりも ST-d 供試体に近い挙動を示したが、鉄筋降伏後の挙動は、他の供試体とは少し異なり、コンクリートの圧縮破壊の前に急激に荷重が増加した。このように、ASR シリーズについて、載荷荷重が

10(kN)程度までの初期段階で不安定な挙動を示し、破壊前に急激な荷重増加が見られたのは、供試体が反っていた影響があったものと考えられる。このように、ASR によって膨張量が 2000×10^{-6} もあり、鉄筋に沿ったひび割れが発生し、さらに、圧縮強度が健全な初期状態の 50%程度まで低下しても、a/d=3.5 の曲げ破壊を生じる載荷条件では、破壊形式が変化したり、耐荷荷重が減少したりする劣化程度ではないことを確認した。

載荷実験結果 (a/d=1.1 の場合)

図-8 に荷重 - たわみ関係を示す。項と同様に、比較のため、ST シリーズの実験結果もあわせて示し、ひび割れ状況についても、図-6 を参照することにする。

図-6 の支持スパン内のひび割れ発生状況を見ると、ASR1000 供試体が発生したひび割れは ST-d 供試体よりもわずかに少なく、ASR2000 供試体のひび割れは ST-r 供試体と同程度だった。このことから、膨張量が 1000×10^{-6} 程度であれば、健全なコンクリートと鉄筋の付着と同程度の性能を見込めるが、膨張量が 2000×10^{-6} 程度になると、丸鋼との付着ほど悪くなる可能性があることがわかった。また、ASR1000、ASR2000 供試体ともに、ST-d 供試体と同様、鉄筋が降伏した後、載荷点付近のコンクリートが圧壊し、破壊した。

次に、図-8 に示す荷重 - たわみ関係について考察する。ディープビーム特有のタイドアーチ機構が形成されていたと考えられる ST-d 供試体の最大荷重の 60%、60(kN)までの ASR シリーズの挙動に着目すると、ASR1000 供試体は、ST-d 供試体とほぼ同じ挙動を示した。このことから、膨張量が 1000×10^{-6} 程度であれば、コンクリートと鉄筋の付着は、コンクリートが健全な場合とほぼ同等であると考えられる。また、コンクリートストラットは、載荷荷重により生じたアーチ状の圧縮応力を受け持っていたと予想される。ただし、圧縮強度が健全なときの約 60%に低下していたことから、載荷実験前に ASR 膨張で生じていたひび割れの影響を受けて、健全なコンクリートの場合よりもストラットの範囲が広がったという可能性も考えられる。一方、ASR2000 供試体は、ST-d 供試体よりも、さらに ST-r 供試体よりも、傾きが緩やかになっていた。このことから、コンクリートの圧縮強度の低下とともに、付着も悪くなっていたものと予測される。このように、ディープビーム的な性状を示す a/d=1.1 の載荷条件では、膨張量が 1000×10^{-6} 程度であれば健全なコンクリートと同等の付着、膨張量が 2000×10^{-6} 程度になると幾分付着が悪くなる傾向があることがわかった。しかし、本研究で設定した膨張量 2000×10^{-6} までであれば、破壊形式や耐荷荷重が変化しないことを確認することができた。

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6件)

著者名: I.Gusti Made Shota Sattwa、水田真紀、葛目和宏、児島孝之、論文標題: ASR 膨張した RC 梁の付着および破壊形式への a/d の影響、雑誌名: コンクリート工学年次論文集、査読: 有、巻: 34、発行年: 2012、ページ: CD-ROM

著者名: M.Mizuta、K.Ohda、K.Nakanishi、T.Ohta、T.Kojima、論文標題: Chemical State Analysis of Alkali Silica Gel by Using Soft X-ray XAFS、雑誌名: Proceedings of the 2nd International Conference on Microdurability "Microstructure related durability of cementitious composites"、査読: 有、発行年: 2012、ページ: CD-ROM

著者名: 水田真紀、藤井洋介、葛目和宏、児島孝之、論文標題: 付着劣化を模擬した ASR 劣化コンクリート梁の破壊挙動、雑誌名: コンクリート工学年次論文集、査読: 有、巻: 32、発行年: 2010、ページ: 631 - 636

著者名: K.Ohda、Y.Yagi、K.Nakanishi、T.Ohta、M.Mizuta、T.Kojima、論文標題: Chemical State Analysis of Cement Aggregates Deteriorated by Alkali Silica Reaction by Using Soft X-ray XAFS、雑誌名: 立命館大学 SR センター 紀要、査読: 有、巻: 12、発行年: 2010、ページ: 165 - 168

著者名: M.Mizuta、T.Kojima、S.Yamamura、K.Kuzume、論文標題: Quantitative Evaluation of Multiplier Effect of Concrete Expansion and Reinforcement、雑誌名: Proceedings of 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies、査読: 有、発行年: 2010、ページ: CD-ROM

[学会発表](計6件)

発表者名: 吉田貴彦、発表標題: XAFS 測定による膨張性 ASR ゲルの化学状態分析、学会名等: 平成 23 年度土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会、発表年月日: 2011 年 9 月 9 日、発表場所: 愛媛大学 (愛媛県)

発表者名: 太田航介、発表標題: XAFS による疑似的発生環境における ASR 生成物の化学状態分析、学会名等: 平成 22 年度土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会、発表年月日: 2010 年 9 月 3 日、発表場所: 北海道大学 (北海道)

6. 研究組織

(1)研究代表者

水田 真紀 (MIZUTA MAKI)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号: 00411257

(2)研究協力者

中西 康次 (NAKANISHI KOJI)
立命館大学・SR センター・
研究者番号: 70572957

葛目 和宏 (KUZUME KAZUHIRO)
(株)国際建設技術研究所・代表取締役社長
研究者番号: なし

(3)連携研究者

太田 俊明 (OHTA TOSHIAKI)
立命館大学・立命館グローバル・イノベーション機構・教授
研究者番号: 80011675

児島 孝之 (KOJIMA TAKAYUKI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 10066706