

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560691

研究課題名(和文)クラックパスの制御に基づくコンクリート補修材料の付着性向上技術開発

研究課題名(英文)Development of related technology to enhanced adhesive performance of repair material for concrete based on a new concept of controlled crack path

研究代表者

山田 寛次(YAMADA, KANJI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：50315628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：破壊靱性試験とFEM解析により補修材の界面付着性を高める検討を行った。鋼繊維と骨材を含む新規補修材を用いて基盤コンクリートとの付着試験を行った。その結果、付着の曲げ強度の最大値は4.84MPaで、補修材部破壊が全破面中の81%となり、基盤強度の79%、補修材強度の68%に相当する。また界面破壊が最も少ない水準では破面の96.1%が補修材部を壊していた。以上の事から補修材を壊すことで界面の付着強度を基盤と同程度に高めるという目標はほぼ達成できた。あわせて局部引張モデルのFEM解析を行って実験結果が正しいことを確かめた。

研究成果の概要(英文)：The author investigated in order to enhance the adhesive performance of concrete-repair interface by means of fracture toughness test and FEM analysis. The specimen with steel fiber and aggregate marked the maximum strength showing 4.84MPa with the repair-fracture ratio reaching 81%, which is 79% of the strength of matrix and 68% of the strength of repair. The maximum repair-fracture ratio reached 96.1%. Then the purpose of the study for achieving high adhesive performance in the interface was duly attained with fracturing the repair avoiding the interface-fracture. Also the author resorted to FEM analysis for verifying the experimental results.

研究分野：建築材料学

キーワード：補修 補強 界面 付着 強度 靱性

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでに蓄積された大量のコンクリート造インフラを効果的に補修・補強しながら使用することは、経済面だけでなく地球環境的側面からも我国の建設分野において重要な課題である。従来この分野では、カタログデータ提示ばかりで基礎的な研究はほとんどない。特に下地コンクリートと後施工の補修材料との界面の付着破壊は、強度・靱性が格段に低下するため避けなければならないが、そのためには界面近傍で亀裂進展を支配するメカニズムを解明する必要がある。

2. 研究の目的

クラックパスを制御する技術を確立することで補修材料の界面付着破壊を減じ、力学的性能を格段に向上させることを目的とする。

3. 研究の方法

補修材を用いた試験体による破壊靱性試験を行い、強度と靱性、補修材部を壊した面積率(%)を評価する。あわせて補修部と界面、基盤部を表現したメソモデルを構築し、FEM解析を行い、界面近傍で亀裂進展を支配するメカニズムを解明する。

4. 研究成果

(1) 市販補修材を用いた破壊靱性試験
 ポリマーモルタル系市販補修材(AG)をPP(ポリプロピレン)、SF(鋼)、VF(ビニロン)繊維などで変性し(表-1)、補修材としてモルタルに塗布し、図-1に示す試験体を作成し、破壊靱性試験を行った。
 その結果、図-2に示す結果が得られ、界面強度は基盤強度、補修材強度のいずれよりも低いものであることが判明した。つまり市販の補修材は弱い基盤コンクリートを対象とする付着強度が低いものである。

表-1 実験に用いた補修材

基材	W/C	混和材
AG	50%	PP, SF, VF (0~1.14%) 水酸化カルシウム(0~25%) 砂(0~25%)

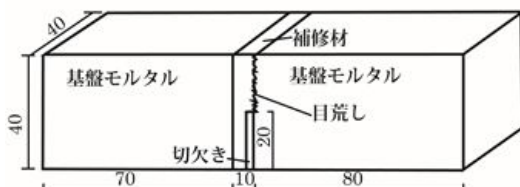


図-1 補修材を塗布した界面付着試験体

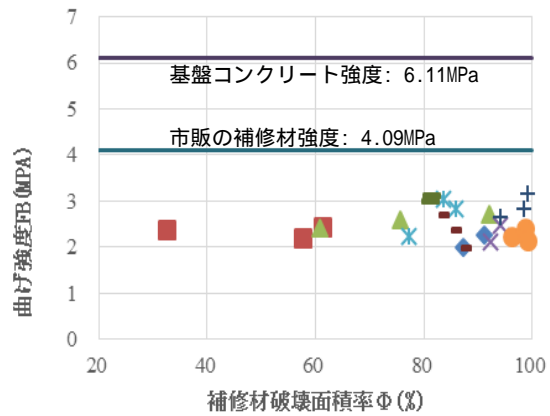


図-2 市販補修材による界面強度

(2) 新規補修材を用いた破壊靱性試験

新規補修材

セメントペーストと短繊維、骨材からなる新規補修材を調合した。骨材はアルミナ(A)、鉄(F)、ガラス(G)、ポリカーボネイト(PC)、ジルコニア(Z)とし粒径はそれらに添字としてa=0.1mm, b=0.2mm, c=0.8mmを付加して表す。実験に用いた新規補修材を表-2に示す。これらの曲げ強度と破壊エネルギーをマップとして図-3に示す。強い物では市販補修材の2倍以上の強度を出していることが分かる。

新規補修材による界面付着試験

表-2の中から性能の良い物を選び表-3に示す。これらを補修材にして、図-1に示す界面付着試験体を製作した。モルタル基盤の試験体はH2、コンクリート基盤の物はH4と名付けた。その結果を図-4に示す。

表-2 一体打ちの新規補修材

基材	W/C	繊維	骨材
Mr	42%	-	Fa(0~10%), PC(0~10%)
C	50%	SF(0~1%)	Ab(0~20%), Ac(0~20%) Fa(0~30%), Fb(0~20%) Fc(0~20%), Gb(0~20%) Gc(0~20%), PC(0~30%) Za(0~15%)
C	40%	SF(0~1%) PE(0~1.6%)	-

表-3 界面付着試験に用いた新規補修材

基材	W/C	繊維	骨材
Mr	42%	-	-
C	40%	SF(0~1%), PE(0~1.6%)	Fa(0~15%), PC(0~15%)
C	50%	SF(1%)	Fb(0~30%), Fc(0~15%)
C	55%	SF(1%)	Fa(0~15%)

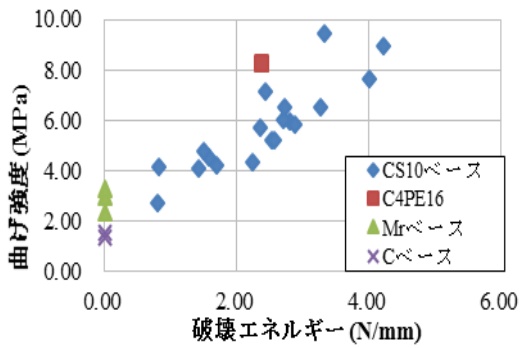


図 - 3 新規補修材の性能マップ

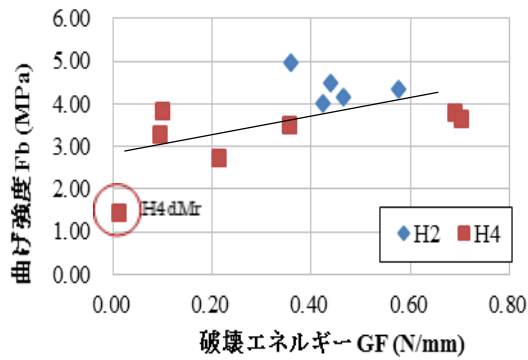
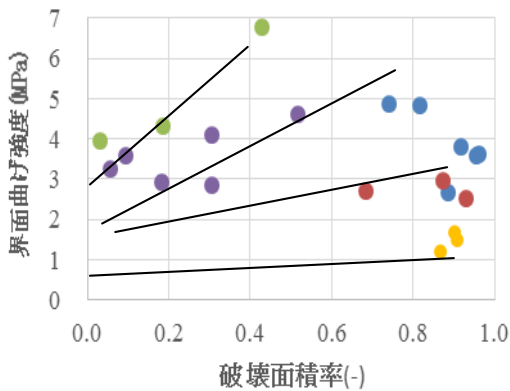


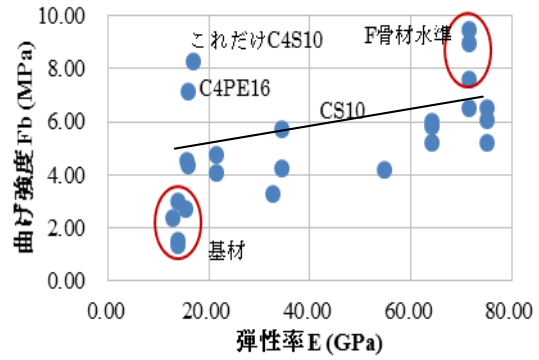
図 - 4 界面付着試験結果の性能マップ

界面強度決定のメカニズム

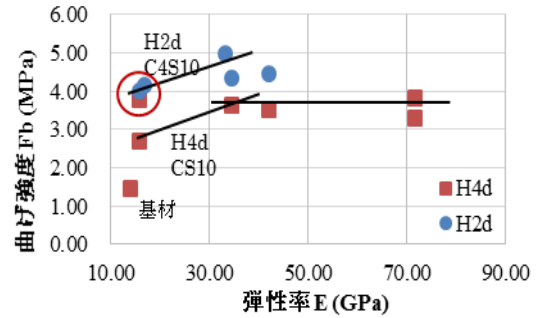
図 - 5 に補修材弾性率と強度との関係を示す。これから分かるように界面強度においても補修材の弾性率に関係している。その理由は図 - 6 に示すように、界面強度は補修材強度にも、更には基準補修材(SFを含む基材)の強度にも関係しているためである。つまり両者の強度を高めないと界面強度は上昇しない。このことは図 - 7 に示す界面強度と補修材破壊面積率(Φ)との関係にも見られる。つまり強度の高い補修材はグラフ上で上位に位置しかつ傾きも急である。ただしこれらは基盤が十分強い場合である。



● C4S10 ● CS10 ● C4S10PE ● C4S10Fb ● C4S10Mr
図 - 7 界面強度と補修材破壊面積率

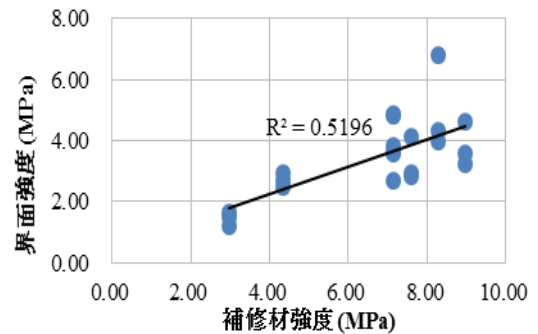


(a) 補修材の強度と弾性率の関係

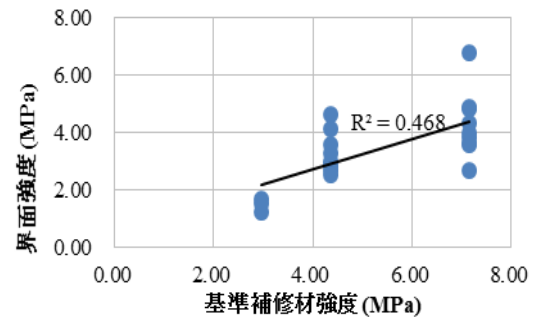


(b) 界面強度と補修材弾性率との関係

図 - 5 補修材の弾性率と強度との関係



(a) 補修材強度と界面強度との関係



(b) 基準補修材強度と界面強度との関係

図 - 6 界面強度と補修材および基材強度

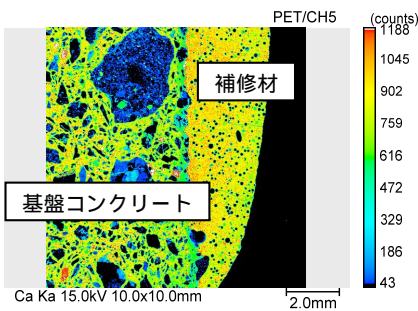
(3) 界面の観察

破壊靱性試験後の試験体から界面近傍の基盤と補修材とが付着している部分を切り出して、研磨し、電子顕微鏡観察を行った。図 - 8 (a)はCa カラーマップで、基盤コンクリート近くにCaが多いことが分かる。また(b)は倍率を上げた界面近傍の反射電子像で、界面には水酸化カルシウム(CH)が濃縮し、30 μ m程度の層をなしていることが分かる。また図に白く写る丸い骨材は壁効果により、界面には到達していない。

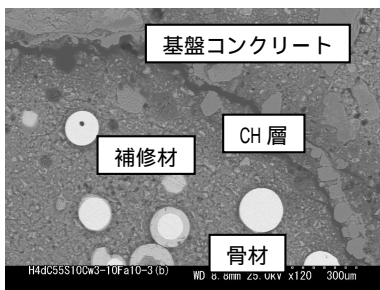
(4) FEM 解析

解析の内容

前項の電子顕微鏡観察結果を模式的に書くと図 - 9 のようになる。つまり基盤に接してCH濃縮層(LB)、そのLBに接して壁効果層(LWE)が存在する。これを3つの部分に分けてモデル化してFEM解析を行った。



(a) Ca カラーマップ



(b) 界面近傍の反射電子像

図 - 8 界面近傍の電子顕微鏡観察結果

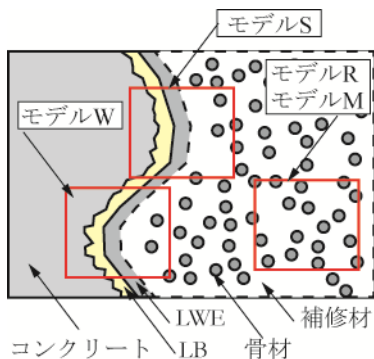
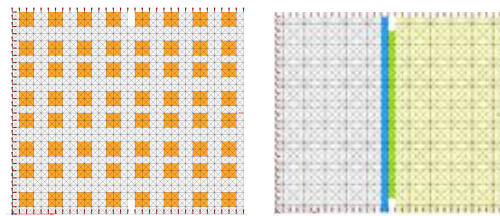


図 - 9 界面近傍の電子顕微鏡観察結果

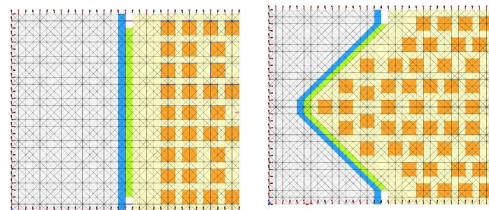
モデルR, Mは補修材のバルク部で、モデルWは界面の目荒らしによる凹凸部、モデルSは界面の平坦な部分である。これらが左右に引張応力を受けた場合を解析した。

解析メッシュは図 - 10 に示すとおりで、幅6.4mm、高さ5.6mmの範囲である。二次元要素を用いて基盤、LB、LWE、補修材に異なった構成則を適用した。構成則には既往の研究[1]で逆解析により求めた引張軟化曲線を簡略化したものを適用した。その一例を図 - 11 に示す。特にLBの物性値が挙動に与える影響を調べるために、引張強度が補修材(5.21MPa)より高い場合(6.21MPa: 119%)、95%の強度(4.95MPa)の場合、さらに低く82%の強度(4.278MPa)の場合の3通りの解析を行った。

その時、それぞれに対して、骨材を配置した場合と配置しない場合を解析した。骨材の物性値には高剛性の効果を調べるために鉄を想定した。



(a) モデルMまたはR (b) モデルS-N



(c) モデルS-A (d) モデルW-A

図 - 10 解析メッシュ

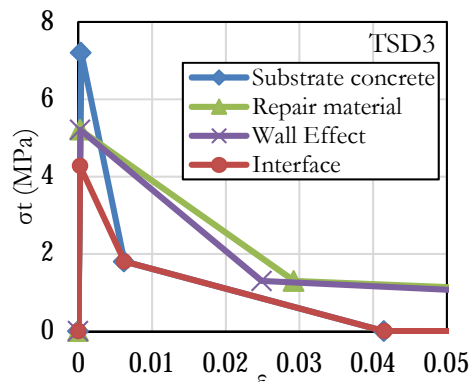
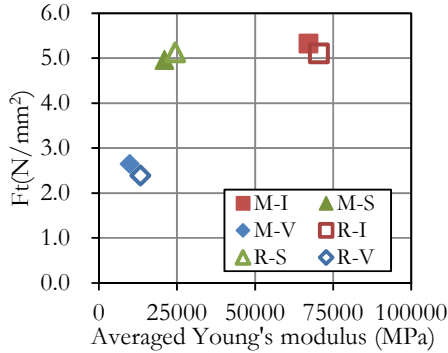


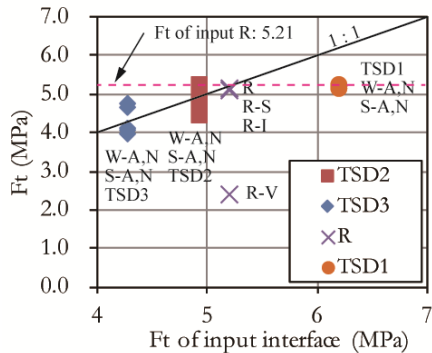
図 - 11 モデルに与えた引張構成則

解析結果と考察

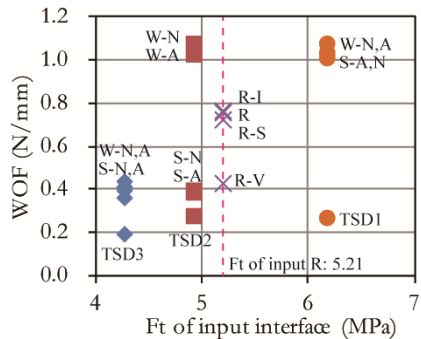
図 - 1 2 (a)はモデルの平均弾性率と強度との関係を示す。ポイドによって平均弾性率が低下する場合は極端に強度が低下するが、骨材の弾性率により強度は多少の影響を受け、高剛性骨材によって強度は向上する結果となった。これは図 - 5 (a)の実験結果と符合する。ただし実験ではもっと強い関係が得られた。その理由は実験は曲げで評価しているのに対し、解析では純引張で評価したためであると考えられる。



(a) モデルの平均弾性率と強度との関係



(b) LB にインプットした引張強度とモデルの全体強度との関係



(c) LB にインプットした引張強度とモデル全体のワークオブラクチャとの関係

図 - 1 2 FEM 解析結果

なお実験では、図 - 5 (b)に示すように界面強度でも平均弾性率との関係が認められたが解析ではほとんど影響がなかった。つまり図 1 2 - (b)に示すように、平均弾性率の高い骨材ありの場合(W-A, S-A)と比較して骨材なし(W-N, S-N)は、ほとんど差異がない。その理由も上記に準じていると考えられる。

図 - 1 2 (b),(c)は LB にインプットした引張強度とモデルの全体強度または破壊仕事(ワークオブラクチャ)との関係を示す。図 - 1 2 (b)から、LB の強度が上がれば全体強度は上がるが、補修材以上になっても補修材で壊れるため強度は向上しないことが分かる。また凹凸がある方(W-A, N)が凹凸のない方(S-A, N)よりも強度が高い。しかし LB の強度が高くなると最も弱い補修材だけを壊すので強度はほとんど同じとなる。

しかし破壊仕事の場合は、傾向が異なり、LB の強度が補修材に近いか高くなることにより、補修材以上の靱性を発揮する結果となった。これは LB の強度が補修材に近づくとも終局に至るまでに破壊する要素の数が増えるためである。例えば LB の $F_t=4.95\text{MPa}$ の終局ひび割れ分布図を図 - 1 3 に示すが、ひび割れの範囲に対応してエネルギーが吸収されていることが分かる。

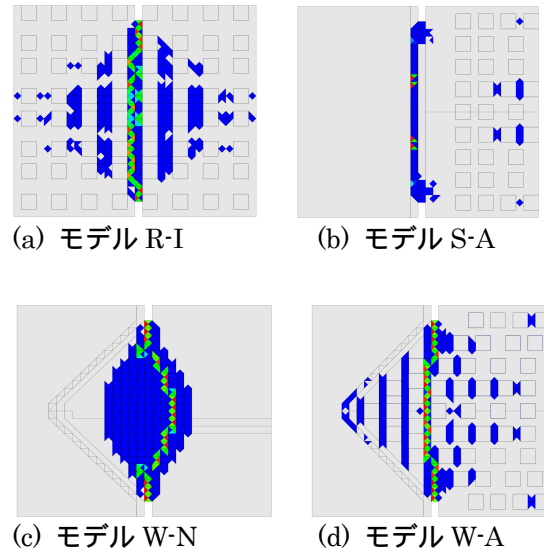


図 - 1 3 LB の $F_t=4.95\text{MPa}$ の終局ひび割れ分布図

(5) 界面強度決定メカニズム

界面は基盤、二層からなる界面、補修材の三つからなる。強度が最弱リンクモデルに従うと考えれば図 - 1 4 のように表される。

ここでは試験体 H4dCS10Fbc30-3 を例に示す。基材は CS10 で $F_b=4.35\text{MPa}$ 、補修材は $F_b=7.61\text{MPa}$ 、基盤は 6.11MPa で最終的な破壊は $2.85\text{MPa}(\Phi=0.31)$ である。

LB では補修材の基材部分のみが強度に関係

すると考えられ、CH 生成により強度低下する。LWE および補修材部分では主要な繊維や骨材が入った全補修材が強度に関係する。但し LWE では壁効果やポイドによりそこから強度低下する。

図 - 6 で見たように補修部強度は補修材強度にもまたその基材強度とも相関があることから、以上の事は裏付けされている。

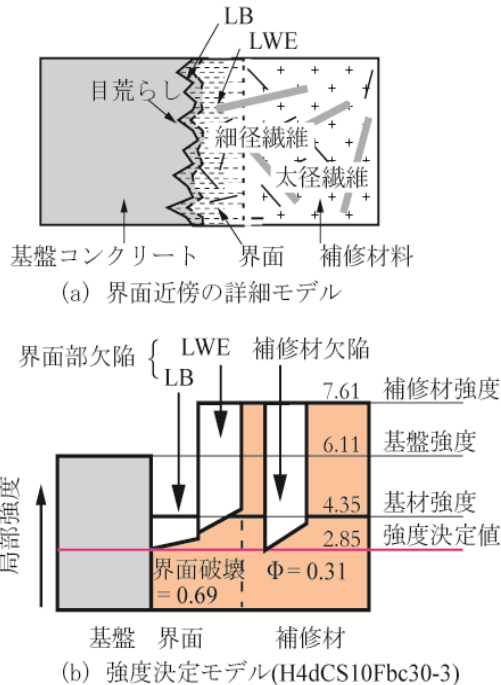


図 - 14 界面強度決定のモデル

(6) まとめ

鋼繊維と骨材を含む新規補修材の物性値を調べた。最大の強度は鋼繊維 1%と鉄骨材を 30%含む水準で得られ、平均 8.96MPa である。

またそれらを用いて基盤コンクリート、モルタルとの付着試験を行った。その結果、付着の曲げ強度の最大値は 4.84MPa であり、基盤強度の 79%、補修材強度の 68%である。また界面破壊が最も少ない水準では破面の 96.1%が補修材部を壊していた。

以上の事から補修材を壊すことで界面の付着強度を基盤と同程度に高めるという目標はほぼ達成できた。あわせて FEM 解析を行って実験結果が正しいことを確かめた。

引用文献

[1] 佐藤あゆみ: 非均質性を考慮したコンクリートの破面解析の提案, 秋田県立大学博士論文, 2012.2

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 3 件)

佐藤美穂, 佐藤あゆみ, 山田寛次: FEM 解析による補修材とコンクリートとの付着強度向上の検討、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、査読有、第 14 巻、pp.257-264, 2014.10

M. Satoh, K. Yamada and A. Satoh: Fractography-Based Discussion on Repair-Concrete Interface, Proceedings of 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SceScm 2014), on CD Rom 8 pages, 2014.9.

K. Yamada, A. Satoh and M. Satoh: A new concept of repair-conscious concrete toward sustainability, Proceedings of international symposium on sustainability (Eco Crete 2014), on CD Rom 8 pages, 2014.8.

〔学会発表〕(計 3 件)

山田寛次: FEM 解析による補修材とコンクリートとの付着強度向上の検討、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム、(2014/10/31)「九州大学医学部百年講堂(福岡県・福岡市)」

M. Satoh, K. Yamada and A. Satoh: Fractography-Based Discussion on Repair-Concrete Interface, 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SceScm 2014), (2014/9/23-25), 「Gadjah Mada University Club Hotel (Yogyakarta, Indonesia)」

K. Yamada: A new concept of repair-conscious concrete toward sustainability, Proceedings of international symposium on sustainability (Eco Crete 2014), (2014/8/11-15), 「HARPA (Reykjavik, Iceland)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 寛次 (YAMADA KANJI)

秋田県立大学・建築環境システム学科・教授
研究者番号: 50315628

(2) 研究分担者

石山 智 (ISHIYAMA SATORU)

秋田県立大学・建築環境システム学科・助教
研究者番号: 80315647