

## 論文 ASR 膨張が FRP シートによる剥落防止効果に与える影響

前原 祐樹\*1・久保 善司\*2・山田 卓司\*3・鳥居 和之\*4

**要旨:** 近年, 過大な ASR 膨張により著しく劣化したコンクリート構造物が報告されており, ASR により劣化したコンクリート構造物に対する維持管理手法の確立がきわめて重要となっている。また, 著しい劣化を生じていない構造物においても, 第三者への被害が懸念される場合, 剥落防止対策が必要とされる。そこで, ASR により劣化したコンクリート構造物における剥落防止対策手法として用いられる FRP シートの補修効果について, ASR 膨張が与える影響を検討した。その結果, FRP シートの付着性能に影響を与えるシートに発生する拘束力が, FRP シートの機械的性質により異なることが明らかとなった。

**キーワード:** ASR, FRP シート, 剥落防止, 膨張抑制, 界面性状

### 1. はじめに

近年, コンクリート構造物の劣化損傷例が数多く報告され, コンクリート構造物の維持管理の必要性が認識されつつあり, コンクリート構造物の補修・補強を含めた維持管理対策の確立が急務とされている。アルカリ骨材反応 (以下 ASR と略す) はコンクリート構造物の代表的な劣化原因の一つとして挙げられる。ASR による劣化が生じた構造物においては, 劣化因子がコンクリート中に存在し, 現状の技術では取り除くことが困難であるため, これまで多くの補修対策が検討されているものの有効な補修対策が見出されていないのが現状である<sup>1), 2)</sup>。

一方, 都市部の道路交差部におけるコンクリート構造物, あるいはトンネル内壁のコンクリート部材などにおいて, コンクリート片の剥落が生じた場合, 第三者に対して被害を与える可能性は高く, 安全性の確保が必要となり, 既往の補修対策とは異なる対策が要求されている。近年では, 都市部の道路交差部やトンネル構造物の剥落防止を念頭においた補修対策が検討されている<sup>3), 4)</sup>。劣化原因が ASR である場合,

補修後の再膨張による影響が予想されるため, 躯体との一体性を保つためには, 膨張抑制能力も要求される。既往の ASR を想定した検討においては, 膨張量が小さい段階での検討であり, さらに膨張量が大きい段階での剥落防止対策に関する検討が必要とされている<sup>5)</sup>。

そこで, より大きな膨張段階を対象として, ASR 膨張が FRP シートによる剥落防止効果に与える影響について検討することとした。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

##### (1) コンクリート

ASR による劣化を検討するために, 反応性骨材を用いたコンクリートを用意した。セメントとして普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として非反応性の手取川産川砂(密度  $2.61\text{g/cm}^3$ , 吸水率 1.21%)を用いた。粗骨材として非反応性の手取川産川砂利(密度  $2.61\text{g/cm}^3$ , 吸水率 1.21%)および反応性のグリーンガラス(密度  $2.47\text{g/cm}^3$ , 吸水率 0%)を用いた。添加アルカリとして, 過大な膨張が期待できる水酸化

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 金沢大学 工学部土木建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

\*3 (財) 日本塗料検査協会 技術開発部 (正会員)

\*4 金沢大学 工学部土木建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

ナトリウムを用いた。等価アルカリ量は  $8\text{kg/m}^3$  に設定し、砂置換により添加した。コンクリートの示方配合を表-1 示す。

表-1 示方配合

| G <sub>max</sub> | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |       | AE 減水剤 (cc/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-----------------------------|
|                  |         |         | W                       | C   | S   | GG  | G   | NaOH  |                             |
| 10               | 55      | 49.2    | 190                     | 345 | 450 | 852 | 479 | 7.652 | 1725                        |

GG：グリーンガラス

(2) FRP シート

FRP シートとして高強度および高弾性の2種類の炭素繊維シート (CFn および CFh),

アラミド繊維シート(AF), 繊維方向が一方向および二方向の2種類のポリエチレン繊維シート (PE1 および PE2), およびポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール繊維シート(PBO)の計6種類を用意した。FRP シートの機械的性質を表-2 に示す。また、シート貼付けには、エポキシ系のプライマーおよび含浸樹脂を用いた。

表-2 FRP シートの機械的性質

| シート                       | 炭素   |      | アラミド | ポリエチレン |      | PBO  |
|---------------------------|------|------|------|--------|------|------|
|                           | 高強度  | 高弾性  |      | 1方向    | 2方向  |      |
| 引張強度(N/mm <sup>2</sup> )  | 4201 | 2820 | 3140 | 1850   | 1750 | 4410 |
| 弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> ) | 250  | 445  | 178  | 70.0   | 25.0 | 265  |
| 破断伸度(%)                   | 1.5  | 0.7  | 1.8  | 2.7    | 6.5  | 2.0  |
| 引張剛性(kN) <sup>*1</sup>    | 1672 | 2900 | 1376 | 724    | 196  | 1356 |

\*1：弾性係数にシート断面積を乗じた

(3) 試験時期

剥離・剥落防止対策として、FRP シートを適用した場合、対策後において ASR 膨張が進行し、FRP シートと母材コンクリートとの付着性能が低下することが予想される。そこで、補修後の ASR 膨張の進行に伴う FRP シートの効果を、膨張進展期(膨張量 1000~1500 μ 程度)と膨張がほぼ終息した段階の膨張終息期(膨張量 2000~3000 μ 程度)の2段階において検討した。また、比較のため、養生直後のものも用意した。

2.2 供試体

供試体として角柱供試体(40×40×160mm)を用いた。打設1日後に脱型し、2週間の湿布養生を行い、養生終了後、シートの貼付けを行った。FRP シートの貼付けは、ディスクサンダによる下地処理を行い、プライマーの塗布1日後、樹脂を含浸し、FRP シートを貼り付けた。FRP 層の養生を1週間行い、促進環境(40℃・100% R.H)に暴露した。暴露開始後より、供試体表面の膨張ひずみを経時的に測定した。また、所定の膨張段階において付着性能試験(剥離強さ試



写真-1 シート貼付け供試体

験)を行った。供試体の概要を写真-1 に示す。

2.3 測定項目

(1) 膨張量

ASR 膨張に対する FRP シートの膨張抑制効果を検討するために、側面およびシート面にコンタクトチップを貼り付け、コンクリートおよび FRP シートの表面ひずみをコンタクトゲージ(基長 100mm)を用いて測定した(測定位置:写真-1 参照)。なお、側面(2箇所)の膨張量の平均値を「コンクリートひずみ」とし、また、シート面(2箇所)の膨張量の平均値を「シートひずみ」と定義した。

(2) 剥離強さ試験<sup>6)</sup>

FRP 層の接着界面に対して 135° の角度で 100mm/min の载荷速度で FRP 層を剥離させて行う、見かけの剥離強さ試験方法(日本塗料検査協会案, 図-1 参照)に準拠し、剥離強さを求めた。剥離強さの算定方法として、供試体からシートを引き剥がす時の単位面積あたりの仕事量

(剥離時の荷重－変位曲線の面積を剥離面積で除した)を見かけの剥離強さとして求めた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 膨張挙動

##### (1) 自由膨張量

シートの貼付けを行わなかったものの表面ひずみ(自由膨張)の経時変化を図-2に示す。FRPシートを適用したものに、目視によるひび割れが確認された暴露51日後を膨張進展期と、膨張がほぼ終息したものと判断した暴露92日後を膨張終息期とした。なお、暴露51日後および暴露92日後における自由膨張量はそれぞれ2200 $\mu$ 程度および3500 $\mu$ 程度であった。

##### (2) シートとコンクリートの一体性

コンクリートとシートのひずみ差の経時変化を図-3に示す。コンクリートとシートのひずみ差はコンクリートの膨張ひずみからシートひずみを引くことにより算出した。ポリエチレン繊維のものを除き、炭素繊維、アラミド繊維およびPBO繊維については膨張が大きくなるにつれて、コンクリートとシートとの間にひずみ差を生じた。1方向および2方向のポリエチレン繊維を比較すると、1方向のポリエチレン繊維のものはコンクリートとシートとの間のひずみ差がわずかに生じた。

シートの弾性係数および引張剛性の大きいものは、膨張が大きくなると、シートとコンクリートとの間にずれが生じやすく、早期にシートとコンクリート間の一体性が失われやすいものと考えられる。これに対して、シートの弾性係数および引張剛性の小さいポリエチレン繊維のものは、コンクリートの膨張に対する追従性が高いものと考えられる。

#### 3.2 機械的性質の影響

シートおよびコンクリートの膨張量には差が認められたため、FRPシートの膨張抑制効果は、コンクリートの膨張量によって判断し、考察することとした。FRPシートがASR膨張に与える影響を図-4に示す。シートの種類にかかわら

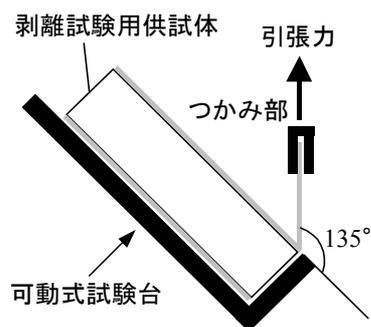


図-1 剥離強さ試験

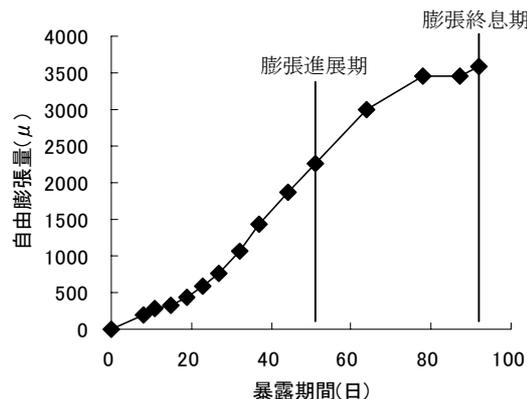


図-2 自由膨張量

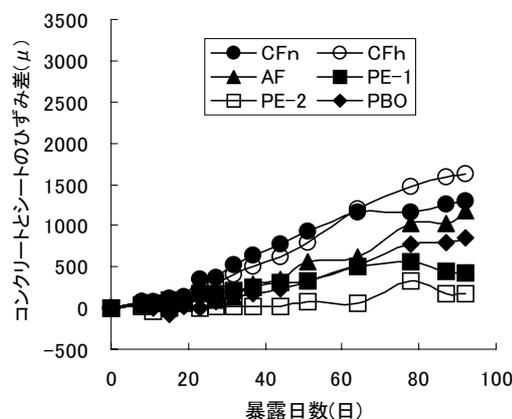


図-3 コンクリートひずみとシートひずみの関係

ず、暴露日数の経過とともに、膨張量が大きくなった。また、暴露8日後の膨張量が250 $\mu$ 程度の膨張段階では、シートの種類にかかわらず、膨張量は同程度であった。この段階においては、貼り付けられたシートの弾性係数や引張剛性などの機械的性質にかかわらず、躯体の膨張に追従しているものと考えられる。いずれのシートも微視的には緩みのある状態で貼り付けられており(施工上は密着している状態である。),シート本来の引張剛性が発揮されず、その緩みが

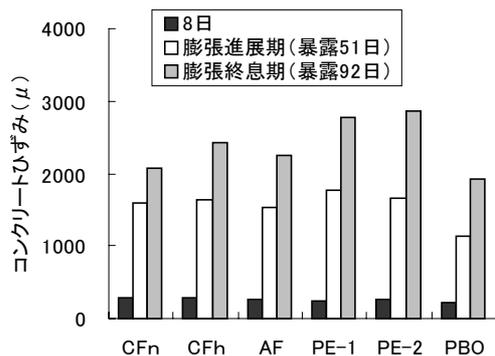


図-4 シートが ASR 膨張に与える影響

なくなるまでは同程度の膨張を示したものと考えられる。これに対して、膨張が大きくなった膨張進展期以降では、シートの機械的性質が ASR 膨張に与える影響は顕著となった。

シートの引張剛性が ASR 膨張に与える影響を図-5 に示す。膨張進展期(暴露 51 日後)および膨張終息期(暴露 92 日後)のいずれにおいても、高弾性タイプの炭素繊維のものを除き、FRP シートの引張剛性の大きいものほど、膨張量が小さくなった。膨張進展期と膨張終息期を比較すると、膨張終息期では引張剛性による影響が顕著となり、引張剛性の大きいものほど膨張抑制効果が大きくなった。

一方、高弾性タイプの炭素繊維シートでは、高強度の炭素繊維およびアラミド繊維のものと同程度の膨張量となった。この原因についてシートの拘束力から検討することとした。

### 3.3 シートの拘束力

シートの見かけの拘束力(シートひずみに引張剛性を乗じたもの)が ASR 膨張に与える影響を図-6 に示す。膨張進展期以降、シートの拘束力が大きいものほど膨張量は小さくなる傾向が見られたもののばらつきが生じていた。初期の緩みのある状態から、シートの剛性が発揮されるまでの拘束力にはばらつきがあるものと考えられる。

そこで、シート拘束力が発揮される時点を目安にするため、自由膨張量からコンクリートの膨張ひずみを引いたものを膨張抑制量として求め、拘束力との関係について検討した。膨張

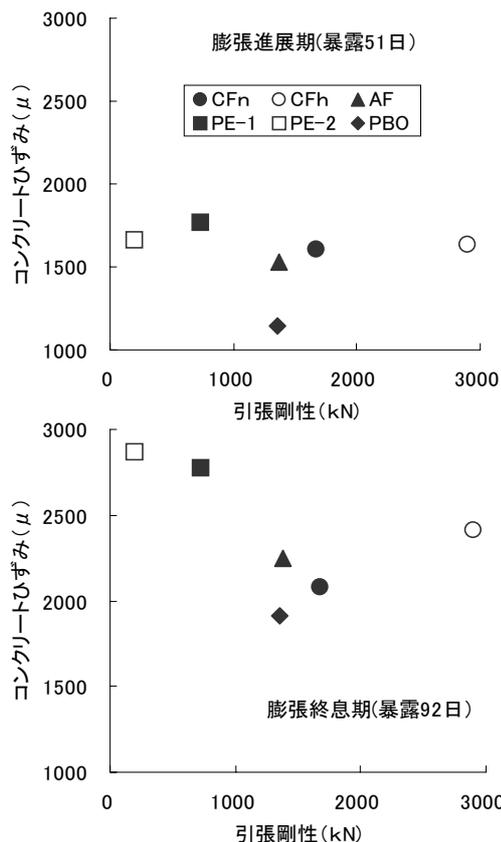


図-5 引張剛性が ASR 膨張に与える影響

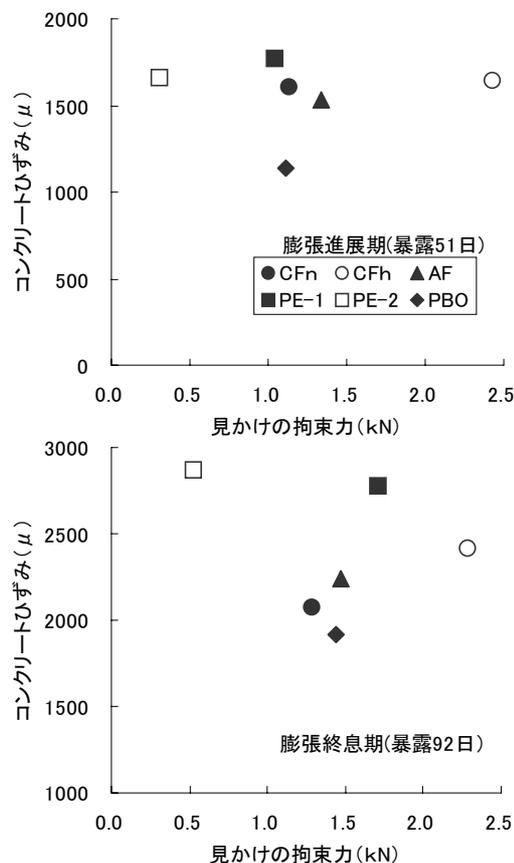


図-6 見かけの拘束力が ASR 膨張に与える影響

量が小さい段階では自由膨張量と FRP シートを貼り付けたコンクリートの膨張量は等しく、シートが膨張を拘束せず、緩みが解放されている状態にあり、更に膨張量が大きくなった時点から、膨張抑制量は大きくなった。したがって、後者の状態から拘束力が発揮されるものと考えられる(図-7 参照)。なお、前

述のシートとコンクリートの一体性に関する検討においてずれが生じ始めた時期と拘束力が発揮される時期はほぼ同時期であった。緩みがなくなるのと同時に拘束力が発揮されることが確認された。

そこで、引張剛性とシートひずみから計算された見かけの拘束力から、膨張抑制量の増加開始時のシートの拘束力を減じて、拘束力を修正した。なお、膨張抑制量の増加開始時のシートの拘束力を表-3 に示す。修正後のシートの拘束力が ASR 膨張量に与える影響を図-8 に示す。膨張進展期においては、拘束力が大きいものほど膨張ひずみは小さく、シートの拘束力に応じて膨張が抑制されている傾向が見られるものばらつきが生じていた。膨張終息期以降も、1 方向のポリエチレン繊維のものを除いて、同様の傾向が認められた。1 方向のポリエチレン繊維のものは、拘束力が大きいにもかかわらず、膨張が抑制されなかった。膨張が大きくなるに従い、1 方向のポリエチレン繊維の機械的性質(弾性係数)が低下し、実際の拘束力は修正後の値より小さくなったという可能性が推察される。しかし、この原因についてはポリエチレン繊維シートの性質を詳細に検討し、明らかにする必要があります。

### 3.4 剥離強さ試験

剥離強さ試験結果を図-9 に示す。FRP シートの種類によって剥離強さは顕著に異なるものの、シートの種類にかかわらず、膨張進展期のものの剥離強さは、養生直後のものより小さく

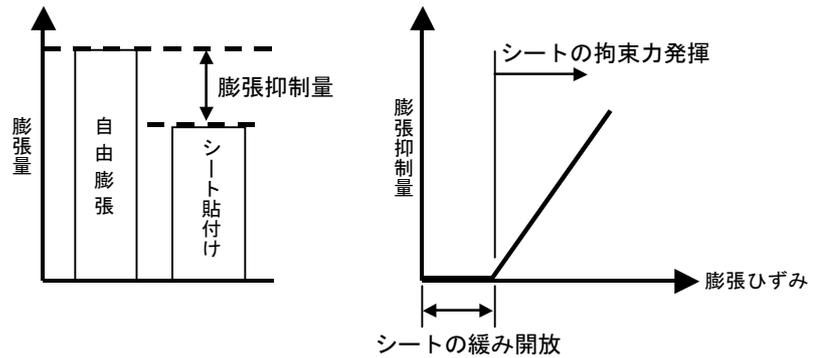


図-7 拘束力発揮までの概念図

表-3 膨張抑制量増加開始時の拘束力

| シート      | CFn | CFh | AF  | PE1 | PE2 | PBO |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 拘束力 (kN) | 0.7 | 1.4 | 0.7 | 0.4 | 0.1 | 0.5 |

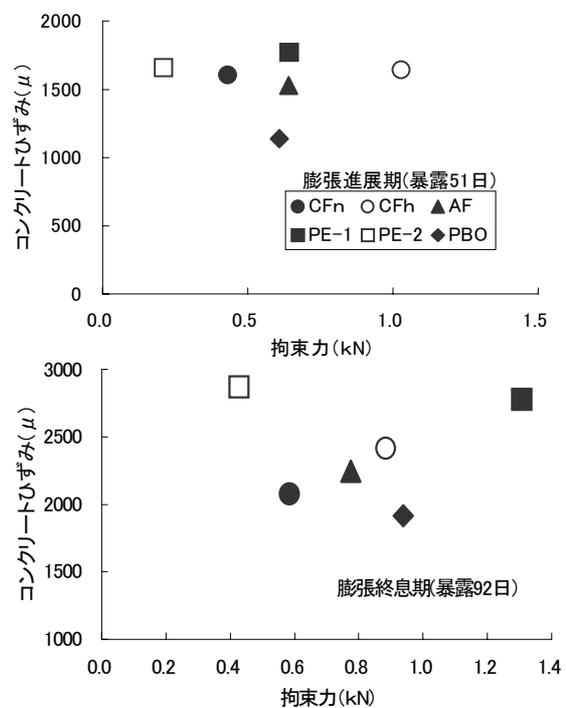


図-8 拘束力が ASR 膨張に与える影響(修正後)

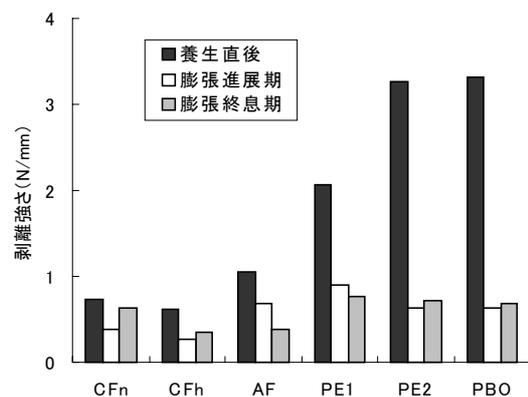


図-9 剥離強さ

なった。膨張進展期の段階において、1000～1500  $\mu$  程度膨張しており、コンクリートとシート界面の付着性能の低下が生じたためと考えられる。また、ポリエチレン繊維のものは、コンクリートとシートの膨張量の差がなく、一体性は保たれていたものの、膨張進展期の剥離強さは減少しており、付着性能は膨張によって低下しているものと考えられる。

ただし、剥離強さ試験時においては、樹脂含浸されていない部分を掴み部に固定し、剥離させるため、剥離強さを求める際の変位には、FRP層の剥離部分の変位のみでなく、掴み部から供試体端部までの未含浸部の繊維の伸びも含まれる。また、試験体と剥離方向の引張軸の角度を一定としても、FRPシートごとに剥離部分近傍の角度は異なっていた。したがって、剥離強さは、界面の剥離強さだけでなく、繊維あるいはFRPシートの弾性係数などの影響を受けるものと考えられ、その試験方法に改良の余地がある。ASR膨張に伴うシートとコンクリート界面における付着性能評価方法については、その他の力学的試験を実施し、剥離試験結果との関連性についてより詳細な検討を行う必要がある。

#### 4. まとめ

- (1) シートとコンクリートとの一体性については、引張剛性の小さいものは、ASR膨張に対する追従性が高く、これに対して引張剛性の大きいものでは、一体性が失われやすかった。
- (2) 高弾性タイプの炭素繊維シートを除き、引張剛性の大きいものほど、高い膨張抑制効果が得られた。膨張抑制に本質的に寄与するシートの拘束力の発揮されるに至るシートの挙動は、シートの機械的性質により異なった。
- (3) 緩みのある状態ではシートの拘束力は発揮されず、その緩みがなくなるとずれが生じ始め、シートの拘束力が発揮された。なお、修正を行ったシートの拘束力が大きいもの

ほど、膨張抑制量は大きくなった。

- (4) 剥離強さ試験の結果からシートの種類にかかわらず、ASR膨張によってシートとコンクリート界面の付着性能は低下することが明らかとなった。しかし、剥離試験を用いた付着性能評価方法には検討の余地がある。
- (5) ASR膨張に伴い発生するシートの拘束力の挙動は把握できたものの、これらの拘束力がシートとコンクリートの界面の付着性状に与える影響は十分に明らかにされなかった。これらの関係については更なる検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 久保善司, 鳥居和之: アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002.6
- 2) 土門勝司ほか: 各種補修工法によるアルカリ骨材反応抑制効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, 2001
- 3) 紫桃孝一郎ほか: 既設コンクリート構造物のコンクリート片はく落防止に関する検討, 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, 第1巻, pp.155-162, 2001
- 4) 呉智深ほか: 連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.469-474, 2001.6
- 5) 山梨竜揮ほか: ASR劣化コンクリート構造物におけるFRPシートを用いた剥落防止対策について, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 6) 樺山好幸ほか: コンクリート構造物の塗装系防食材の性能評価手法の提案, 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, Vol.2, pp.353-360, 2002.10