

論文 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

山梨 竜揮^{*1}・久保 善司^{*2}・鳥居 和之^{*3}・山田 卓司^{*4}

要旨:近年,過大なASR膨張により著しい劣化を生じたコンクリート構造物が報告されている。そのため,ASRにより劣化したコンクリート構造物に対する補修・補強を含めた維持管理手法の確立が急務とされている。一方,第三者影響が大きい構造物に対する剥落防止対策も重要となっている。そこで,ASR劣化構造物の剥離・剥落防止対策としてFRPシート貼付けの適用性について検討した。その結果,FRPシートの機械的性質がASR膨張を生じたコンクリートとFRPシート界面の性状に与える影響は大きいことが明らかとなった。

キーワード:ASR,FRPシート,剥離・剥落,界面性状,補修

1 はじめに

アルカリ骨材反応(以下,ASRと略する)および鉄筋腐食はコンクリート構造物の代表的な劣化原因として挙げられ,これらの構造物に対する,補修・補強を含めた維持管理手法の確立が急務とされている。近年では,ASRによる過大な膨張を生じ,内部コンクリート強度の低下,コンクリートと鉄筋の付着低下,鉄筋の破断・降伏などに至る,著しく劣化したコンクリート構造物も報告されている¹⁾。

一方,都市部やトンネル構造物においては,種々の劣化原因によってコンクリート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,第三者に対する安全性を確保する必要があり,既往の補修対策とは異なる対策が要求されている。剥落の原因として劣化を伴わない場合には,比較的容易に対策を講じることができる。しかし,劣化を伴う場合には,対策後における劣化因子の侵入や残存した劣化因子の存在によって,対策後に再劣化することもある。したがって,対策後の補修性能の耐久性が要求される²⁾。近年では,トンネル構造物や第三者影響の大きい構造物の剥落防止対策を念頭においた,FRPシートの貼付けおよび繊維補強モルタルを

用いた対策に関する検討がなされており^{3)~5)},実構造物での適用も行われている。これに対して,ASR膨張によって剥離・剥落が生じる場合には,構造物中から劣化因子である反応性骨材およびアルカリ分を除去することは現状の技術では困難であり,適切な剥離・剥落防止対策が見出されていないのが現状である。

そこで,種々の機械的性質が異なるFRPシートを用いて,ASR劣化構造物の剥離・剥落防止対策に対するFRPシートの適用性について検討した。さらに,適用後のFRPシートと躯体との一体性の観点から,ASR膨張に伴うシートと躯体との界面の微視的構造の変化に着目し,FRPシートの機械的性質が補修後の界面性状および補修性能に与える影響についても検討した。

2 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1)コンクリート

ASR膨張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早月川産川砂(比重2.60,吸水率1.91%)を用いた。粗骨材として非

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻 (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 金沢大学 工学部土木建設工学科教授 工学博士(正会員)

*4 (財)日本塗料検査協会 技術開発部 (正会員)

反応性の早月川産川砂利（比重2.66，吸水率1.13%）を，反応性骨材として能登半島産両輝石安山岩碎石（比重2.65，吸水率2.19%）を用いた。反応性骨材の粗骨材量に対する割合はペシマムとなる50%とした。添加アルカリとしてコンクリートのフレッシュ性状に与える影響が小さい亜硝酸ナトリウム

を用いた。等価アルカリ量は 8kg/m^3 に設定し，砂置換により添加した。コンクリートの配合を表-1に示す。なお，剥離強さ試験においては，コンクリート中のアルカリ濃度がコンクリートとシートとの界面の付着性状に与える影響を検討するため，亜硝酸ナトリウムおよび反応性骨材を混入しない非反応性コンクリートも用意した。

(2)FRPシート

使用されるFRPシートの弾性係数，引張強度および破断伸度などの機械的性質は，ASR膨張を生じたコンクリート構造物の剥離・剥落防止効果に影響を与えるものと考えられる。そこで，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），炭素繊維シートよりも弾性係数は小さいものの，破断伸度の大きいアラミド繊維シート（AF），炭素繊維シートよりも弾性係数および引張強度の大きいポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール繊維（PBO），大きな追従性が期待できる2種類のポリエチレン繊維シート（1方向および2方向，PE1およびPE2）の機械的性質の異なる計6種類のシートを用意した。FRPシートの機械的性質を表-2に示す。なお，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。

(3)膨張段階

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，補修後の膨張進行にともなうFRPシートの補修効果を，劣化初期の段階（ひび割れ発生程度，膨張量 $500\sim 1000\mu$ ）とさらに膨張が進行した段階の異なる膨張段階

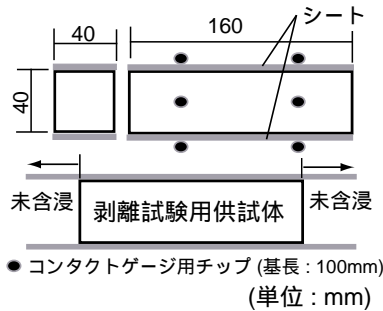


図-1 供試体概要

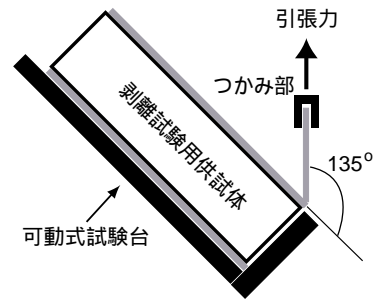


図-2 剥離強さ試験

表-1 示方配合

コンクリート	W/C (%)	単位量:kg/m ³						単位量:cc/m ³	
		W	C	S	Gn	Gr	NaNO ₂	WRA	AEA
反応性	55	168	305	937	499	499	13.9	763	610
非反応性	55	168	305	937	998	-	13.9	763	610

Gn:非反応性粗骨材，Gr:反応性粗骨材，WRA：減水剤，AEA:AE助剤

表-2 FRPシートの機械的性質

シート	炭素繊維		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 ²)	4201	2819	3140	1850	1750	4410
弾性係数 (N/mm ²)	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	1670	2900	1370	722	195	1360

において検討した。

2.3 供試体

供試体として角柱供試体（ $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ ）を用いた。打設1日後脱型し，2週間の湿布養生を行い，養生終了後，FRPシートの貼付けを行った。ディスクサンダによる下地処理を行い，プライマー塗布1日後，樹脂を含浸し，シートを貼り付けた。貼付け後，FRP層の養生を1週間行い，促進環境（ 40°C ，100%R.H.）下に暴露した。供試体の概要を図-1に示す。

2.4 測定項目

(1)膨張量

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を用いて，暴露開始後より経時的に測定した（測定位置；図-1参照）。

(2)剥離強さ試験³⁾

FRP層の接着界面に対して 135° の角度で 100mm/min の載荷速度で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-2参照）に準拠し，剥離強さを求めた（見かけの剥離強さは，剥離に要した仕事量として算出した）。

(3)界面の観察

界面を含む試料を供試体中央部より採取し、試料をエタノールに24時間浸漬後、真空乾燥を行い、蛍光塗料を含むエポキシ樹脂を試料に含浸させて観察用試料を作製し、蛍光顕微鏡による界面の観察を行った。また、同位置より採取した試料について、界面近傍の微小硬度測定を行った。

なお、養生直後および劣化初期段階において、FRPシートとコンクリート界面近傍の蛍光顕微鏡観察および微小硬度測定を行い、界面の微視的構造の変化を把握した。剥離強さ試験も同様の段階において実施した。

3. 結果および考察

3.1 膨張挙動

(1)自由膨張量

シートを貼付けていないコンクリート供試体の表面ひずみ(自由膨張量)の経時変化を図-3に示す。いずれのFRPシートを適用したのものにもひび割れが確認された暴露73日後の自由膨張量は900 μ 程度であった。

(2) FRPシートの膨張抑制効果

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10日後の膨張量が300 μ 程度の段階においては、シートの種類にかかわらず、ほぼ同程度の膨張量を示した。膨張初期段階(300 μ)においては、貼り付けられたシートの引張剛性にかかわらず、躯体の膨張に追従しているものと考えられる。いずれのシートも初期には緩みのある状態で貼り付けられているものと考えられる。

これに対して、劣化初期以降、FRPシートの種類によって膨張量が大きく異なり、FRPシートの機械的性質がASR膨張に与える影響が顕著となった。シートの引張剛性がASR膨張に与える影響を図-5に示す。劣化初期および暴露373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、引張剛性が大きいものほど、膨張量は小さくなった。また、暴露373日後においては、劣化初期より引張剛性による影響が顕著と

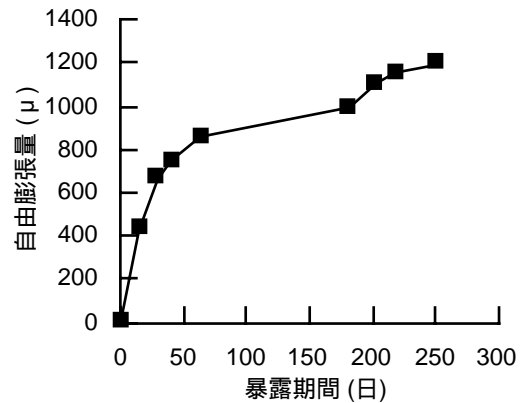


図-3 自由膨張量

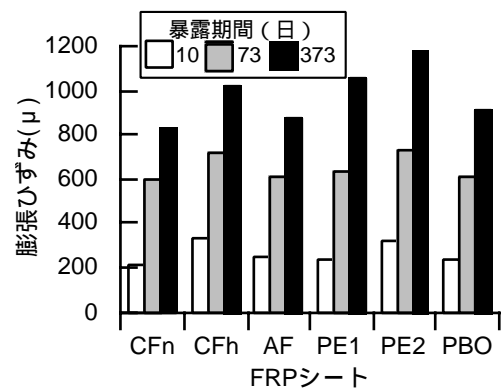


図-4 シートがASR膨張に与える影響

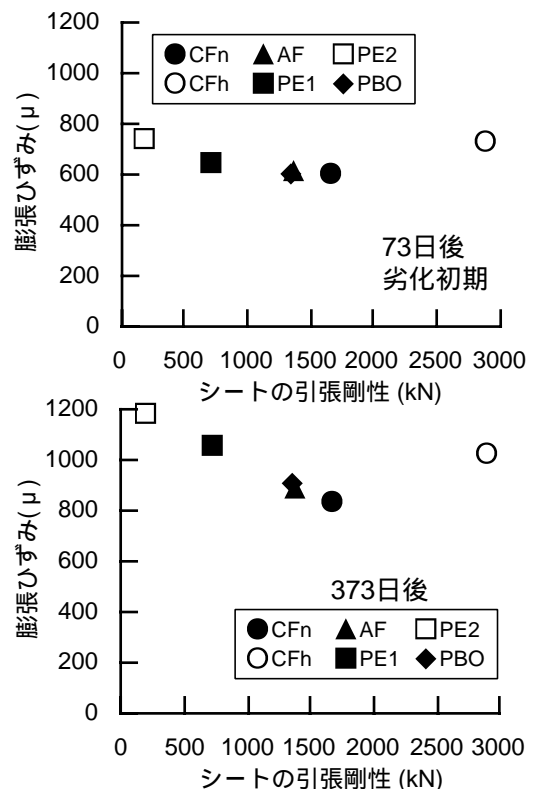


図-5 引張剛性がASR膨張に与える影響

なり、引張剛性の大きいもほど、膨張抑制効果が大きくなった。

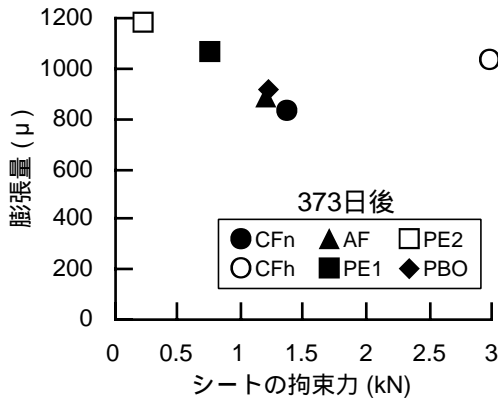


図-6 シートの拘束力がASR膨張に与える影響

一方、高弾性タイプの炭素繊維のものについては、引張剛性の小さいポリエチレンのものと同程度または若干小さい膨張量となった。シートの拘束力（シートのひずみに引張剛性を乗じたもの）がASR膨張（暴露373日後）に与える影響を図-6に示す。高弾性タイプの炭素繊維のものは、計算上のシートの拘束力は大きなものの、シートの負担力の小さなものと同程度の膨張量となった。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ひずみが他のものより大きかったことが原因と考えられる。

コンクリート躯体の膨張ひずみとシートのひずみの関係を図-7に示す。劣化初期以降の領域においては、躯体のひずみに対してシートのひずみが若干小さくなるものもあったものの、いずれのものもコンクリート躯体とシートのひずみは同程度であった。今回の検討の範囲においては、膨張量が比較的小さかったこともあり、躯体とシートはほぼ一体となった状態で膨張したものと考えられる。このため、高弾性タイプの炭素繊維シートのを除き、シートの引張剛性が大きいものほど、膨張抑制効果が大きい結果となったものと考えられる。

3.2 剥離強さ

剥離強さ試験結果を図-8に示す。なお、炭素繊維の高弾性タイプのもの、および劣化初期時の高強度タイプのものは、剥離試験中につかみ部のシートの破断が生じたため、剥離試験を行うことができなかった。今回は、試験の実施が可能であったシートのみを検討の対象とした。

一方向のポリエチレン繊維のを除き、反

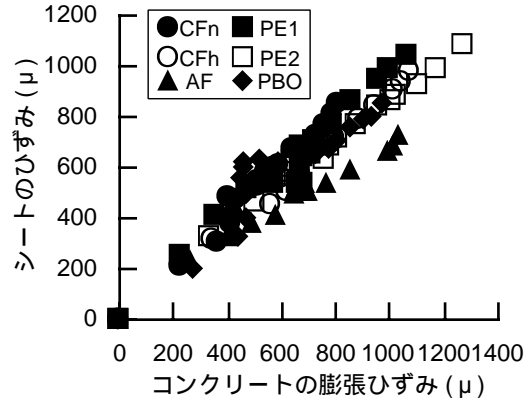


図-7 膨張ひずみとシートひずみの関係

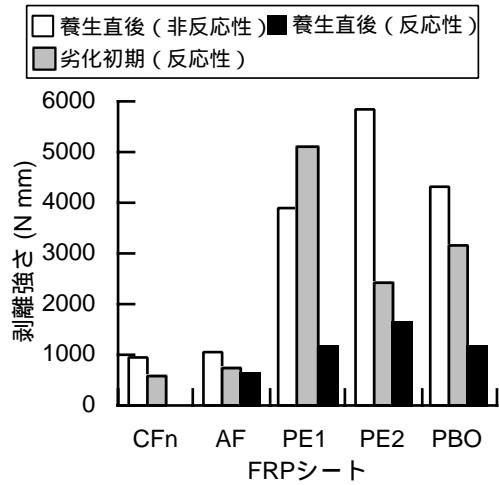


図-8 剥離強さ

応性の養生直後の剥離強さは、非反応性の養生直後のものより小さくなった。膨張を促進するために添加したアルカリによってFRPシートと躯体との界面の付着力が低下したものと考えられる。

反応性のものについては、シートの種類にかかわらず、劣化初期のもの剥離強さは、養生直後のものより小さくなった。ASR膨張に伴い、躯体とFRPシートとの界面の付着性能が低下したものと考えられる。ただし、剥離強さそのものについては、シートを剥離させる試験方法の特性によって、シートの種類（繊維の柔軟性）ごとに大きく異なるため、剥離強さそのものを直接比較することは困難であるものと考えられる。

そこで、養生直後の剥離強さから劣化初期の剥離強さを引いたものを剥離強さ減少量として求め、これを指標とした。ASR膨張と剥離強さ減少量の関係を図-9に示す。膨張量と剥離強さ減

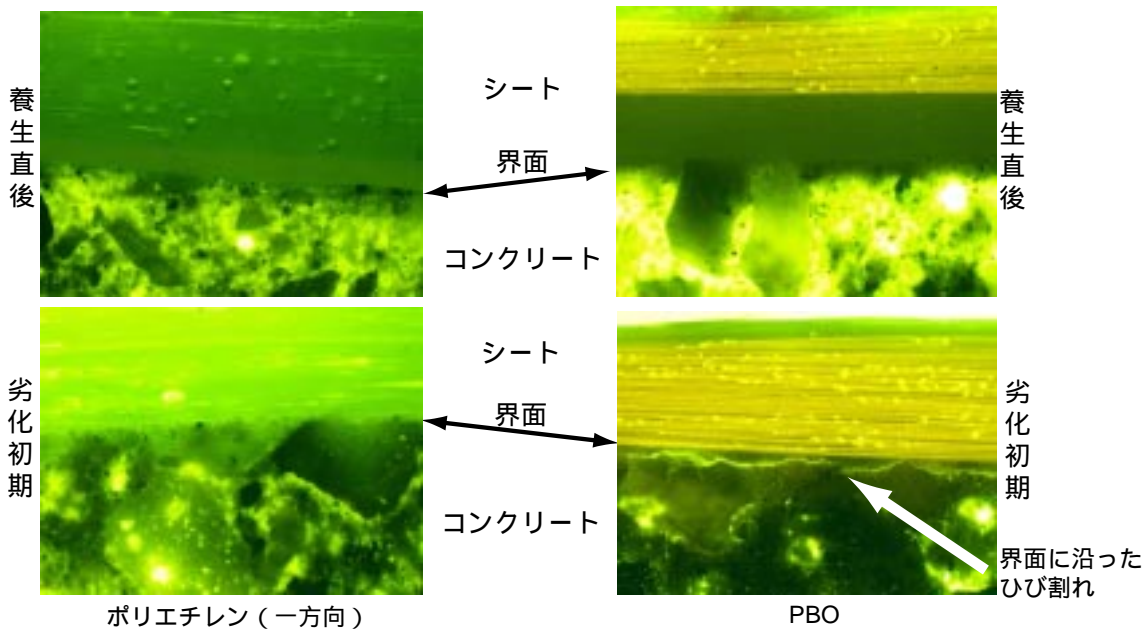


図-10 界面の蛍光顕微鏡観察画像

少量には明瞭な関係は認められなかった。劣化初期時において剥離強さ試験の実施が可能であったシートの膨張量に大きな差がなかったためと考えられる。今後より大きな膨張段階における検討が必要である。膨張段階や剥離強さの評価方法などに関する、更なる検討が必要であるものの、剥離強さ試験によってASR膨張にともなう付着性能の低下の把握が可能であった。したがって、補修後の劣化進行が生じた場合のFRPシートの付着性能の評価手法として剥離強さ試験の適用可能性が示唆されたものと考えられる。

3.3 界面性状

(1) 蛍光顕微鏡観察

劣化初期においては、ポリエチレン繊維のものを除き、FRP層とコンクリートの界面に沿ったひび割れが観察された。ポリエチレン繊維およびPBO繊維のものの界面の蛍光顕微鏡観察画像を図-10に示す。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、膨張に対する拘束力が小さくなるものの、界面に発生する付着力も小さくなり、界面に沿ったひび割れが生じなかったものと考えられる。これに対して、弾性係数および引張剛性の大きい、PBO繊維および炭素繊維のものには、界面に沿った顕著なひび割れが観察された。

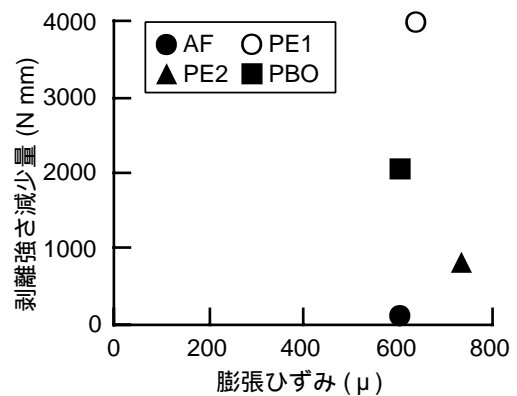


図-9 ASR膨張量と剥離強さ減少量の関係

また、引張剛性が同程度のアラミド繊維とPBO繊維を比較した場合には、PBO繊維のもののひび割れが顕著であった。剥離強さ減少量に違いが現れた原因はこの界面性状の違いにあるものと考えられる。全体の引張剛性が同じ場合でも、使用される繊維およびその樹脂の機械的性質によって、界面に発生する付着力が異なり、その違いが界面性状に現れたものと考えられる。

界面観察の結果、シートの機械的性質が界面の性状に与える影響は大きいことが明らかとなった。FRPシートの引張剛性の大きいものほど抑制効果は大きいものの、界面に沿ったひび割れが顕著となるため、膨張が大きくなった場合には、躯体との一体性・付着性能が低下し、剥落防止性能に影響を与える可能性がある。した

がって、膨張抑制の観点のみでなく、躯体との付着性能の確保の観点も踏まえたFRPシートの材料選択が必要であり、今後より大きな膨張段階における検討を行うことで適切な材料選択を行うことが可能となるものと考えられる。

(2) 微小硬度測定

養生直後および劣化初期における高強度タイプの炭素繊維シートのもの微小硬度測定結果を図-11に示す。シートの種類にかかわらず、養生直後および劣化初期の界面近傍の微小硬度の顕著な変化は認められなかった。剥離試験および蛍光顕微鏡観察においては、ASR膨張によりその付着性状あるいは界面性状の変化が把握されたものの、これらの界面近傍の変化は、微小硬度測定によっては把握することができなかったものと考えられる。今後より大きな膨張段階で同様の試験を行い、これらの関係を把握することが必要であると考えられる。

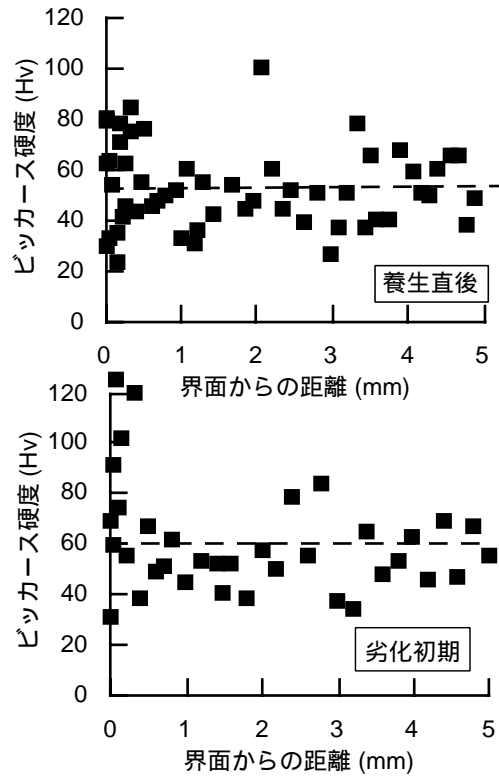


図-11 微小硬度測定結果

5. まとめ

(1) FRPシートを適用したものの最大の膨張量で約 1200 μ程度の範囲においては、FRPシートの引張剛性が大きいものほど膨張が小さく、ASR膨張抑制効果が期待される。

(2) シートの種類にかかわらず、ASR膨張によって剥離強さは減少し、付着性能の低下が剥離試験によって確認された。

(3) 蛍光顕微鏡による躯体とFRPシートの界面性状の観察結果から、FRPシートの引張剛性の大きいものほど界面に沿ったひび割れは顕著となるため、膨張が大きくなった場合には、躯体との一体性・付着性能が低下し、剥落防止性能に影響を与える可能性がある。

(4) FRPシートの機械的性質が界面の性状に与える影響は顕著であり、膨張抑制の観点のみでなく、躯体との付着性能の確保の観点も踏まえて、FRPシートの適切な材料選択が必要である。

参考文献

1) 久保ほか：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) 山辺ほか：断面修復材の長期付着性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.439-444、2001.6
 3) 紫桃ほか：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、Vol.1、pp.155-162、2001.10
 4) 平石ほか：剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.469-474、2001.6
 5) 呉ほか：連続繊維シート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
 6) 樺山ほか：コンクリート構造物の塗料系防食材の性能評価手法、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