

論文 種々の発水系材料による ASR 膨張抑制効果について

久保 善司^{*1}・外岡 広紀^{*2}・林 大介^{*3}・坂田 昇^{*4}

要旨：近年，過大な ASR 膨張を生じ，鉄筋の破断に至る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 劣化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。シラン系表面処理には水分制御による ASR 膨張抑制効果が期待されている。一方，それらの材料の適用後の耐久性の問題とともに，性能向上を目的とし，異なる分子量のシラン・シロキサンを複合した材料の検討も始められている。そこで，種々の発水系材料の ASR 膨張抑制効果について検討を行った。その結果，膨脹初期段階におけるこれらの発水材による抑制効果が明らかとなった。

キーワード：シラン，シロキサン，表面処理，水分制御，ASR 膨張抑制効果

1. はじめに

鉄筋腐食，アルカリ骨材反応などの種々の劣化原因による劣化事例が多数報告され，コンクリート構造物はメンテナンスフリーであるとの認識が払拭され，コンクリート構造物の維持管理手法の確立が重要となっている。近年では，アルカリ骨材反応（以下，ASR と略する）においては，過大膨張により，コンクリート強度の低下，コンクリートと鉄筋との付着低下，鉄筋の破断などを生じて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⁾。過大膨張を生じた場合も含めて ASR 劣化構造物の補修・補強対策技術は確立されていないのが現状である。

コンクリート中の水分逸散が可能な環境条件においては，シラン系表面処理が有効であるとされている。溶媒等を使用しない 100% シラン系発水材の分子量，適用量，補修時の含水状態，および適用されるコンクリートの水セメント比等が与える影響については既往の研究がなされており，耐久性および発水性の観点から含浸性に優れたシランに優れた性能が期待できるとされている^{2),3)}。一方，これらのシラン系材料の短所として，適用後の表面処理効果の耐久性の問題があり，経年的に内部の含浸層が低下し，表面処理効果が低下すると報告されている⁴⁾。また，実

環境下における実構造物を想定した供試体における検討においては，屋外暴露 5 年後においても発水効果は認められるものの，発水効果の低下が確認されている。近年では，短所である耐久性の改善と性能向上を目的とし，揮発性の低い高分子のシロキサンと浸透性に優れたシランを複合したシラン・シロキサン系材料が開発され，それらの性能評価がされている⁵⁾。また，コンクリートの耐久性向上の観点からも，浸透性吸水防止材が注目されつつあり，その性能評価に関する検討が必要とされている^{6),7)}。

本研究では，既往の溶媒等を使用しない 100% シランにおいて優れた発水性が期待できるシランに加えて，異なる分子量のシランを組み合わせ適用したもの，さらには，近年開発されたシラン・シロキサン系材料について，これらの発水系材料による ASR 膨張抑制効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

セメントとして普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として手取川産の非反応性骨材（密度：2.61g/cm³，吸水率：1.21%）を用いた。粗

*1 金沢大学 工学部土木建設工学科助手 博士（工学）（正会員）

*2 金沢大学大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻（正会員）

*3 鹿島建設（株）技術研究所 材料・LCE グループ 研究員（正会員）

*4 鹿島建設（株）技術研究所 材料・LCE グループ グループ長 工博（正会員）

骨材として手取川産の非反応性骨材(密度：2.60g/cm³，Gmax:10mm)および常願寺産の反応性骨材(密度：2.60g/cm³，Gmax:10mm)を用いた。発水材料のコンクリートへの浸透性が高くなることと，水セメント比によるペシマムを考慮して，水セメント比を55%とした。等価アルカリ量は短期間に大きな膨張が得られるように8kg/m³に設定した。添加アルカリとして水酸化ナトリウムを用いた。発水系材料の発水効果とASR膨張抑制効果を評価するため，コンクリートとして反応性および非反応性のものを用意した。表-1に配合を示す。

(2) 発水材

親水基がエトキシであるシランは，多量の適用量を必要とするものの，優れた含浸性を持ち，高い含水常態においても適用が可能であるとされ，その発水性に優れるとされている。既往の検討結果を基に，分子量220のものと，これよりも揮発性の低い分子量248のものを用意した。揮発性が高い分子量220のものは適用量が大きいという欠点を持つため，これらを改善する手段として，分子量220と分子量248を組み合わせて適用する(220+248)ものも用意した(220のものを所定量適用し，その後，248のものを適用する)。さらに，近年，開発された市販のシラン・シロキサン複合タイプ⁶⁾のものを用意した。

(3) 発水材の適用量

適用量は目的に応じて定められるものであり，ASR膨張抑制においては優れた性能が要求されるものと考えられる。そこで，シラン単体で用いるものについては，既往の検討結果を参考に，適用可能最大量とし，組み合わせで用いるものについては，各分子量の最大量の半分とさらに半分のものの2種類とした。複合タイプのものは，標準適用量とそれの2倍のものを用意した。表-2に発水材の種類および適用量を示す。

2.2 供試体

供試体は，10 × 10 × 40cmのコンクリート供試体を用いた。打設1日後，脱型し，2週間湿布養生後，ディスクサンダによる下地処理を行った。シラン含浸処理時の含水状態として，ASR劣化構造物の含水状態は高いものと考えられるた

表-1 示方配合

コンクリート	W/C	単位量:kg/m ³						単位量
	(%)	W	C	S	Gn	Gr	NaNO ₂	cc/m ³
反応性	55	190	345	915	-	911	7.65	701
非反応性	55	190	345	915	911	-	7.65	701

Gn:非反応性粗骨材，Gr:反応性粗骨材，WRA：減水剤

表-2 発水材の種類と適用量

発水材の仕様	分子量	適用量	備考
220	220	800	イソブチルトリエトキシシラン
248	248	200	ヘキシルトリエトキシシラン
200+248(500)	220	400	
	248	100	
200+248(250)	220	200	
	248	50	
複合タイプ(400)	-	400	シラン(分子量約250)シロキサン
複合タイプ(200)	-	200	シラン(分子量約250)シロキサン

め，補修時の含水状態は若干高めに設定し，表面水分率(高周波水分率計)5～5.5%となるまで室内で静置し，その後，含浸処理を実施した。適用量は質量管理を行い，所定の適用量となるまで刷毛塗りまたはローラーを用いて含浸した。含浸終了後，促進環境下(40・100%R.H.と20・60%R.H.の12時間ごとの繰り返し環境)に暴露した。なお，供試体は同一要因につき，3体を用意し，1体を発水層測定用とした。

2.3 測定項目

発水層：含浸終了後の内部に形成された発水層を，含浸終了後，供試体を割裂し，その断面を霧吹きを用いて湿らせ，濡れ色を示さない範囲を発水層として測定した。供試体1体につき，24箇所測定し，その平均値を求めた。

質量減少率：供試体質量を感量0.1gのはかりにより測定した。暴露開始時からの質量変化を暴露開始時の質量で除したものを質量変化率として求めた。質量増加を正とした。

超音波パルス伝播速度：暴露後の供試体長手方向(40cm)の超音波パルス伝播速度を経時的に測定した。

ひずみ：供試体両側面にコンタクトゲージ測定用チップを貼付け(基長250mm)，暴露開始時からの膨張ひずみを測定した。

なお，質量減少率，超音波パルス伝播速度およ

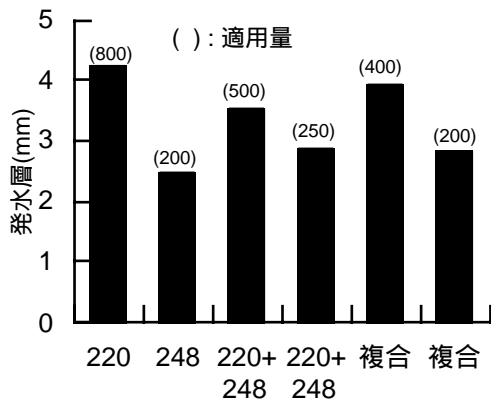


図-1 発水層

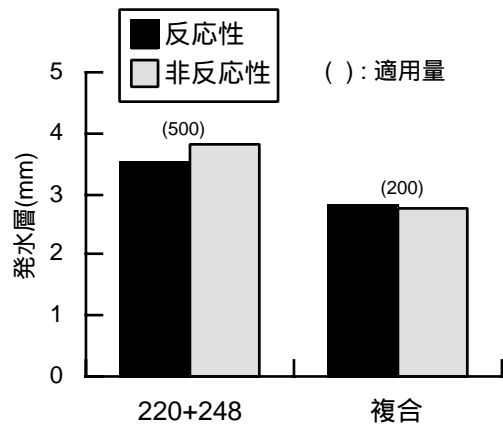


図-2 発水層 (コンクリートの影響)

びびずみの測定値は、同一要因に2体の平均値を求め、さらに、測定値のばらつき等を考慮するため、移動平均(測定日とその前後の3つの測定値の平均)で整理した。

3. 結果および考察

(1) 含浸性状

含浸処理終了後の発水層を図-1に示す。シラン単体のものについては、分子量の小さい220のもの発水層が大きく、既往の検討結果と一致した。組み合わせて適用した220+248のものは、分子量220と248の中間程度の発水層となった。浸透性の高い220のものと組み合わせることにより、248のものを単体で用いた場合よりも大きな発水層が得られたものと考えられる。一方、複合体タイプのものについては、比較的小さな適用量で大きな発水層が形成されており、シランとシロキサンを複合したことによる所期の効果が発揮されたものと考えられる。

適用量の影響については、220+248および複合体タイプのいずれのものも、適用量が高いものの方が発水層が大きくなる結果が得られた。耐久性の観点からは、大きな含浸量および発水層が必要とされており、耐久性が要求される場合には、含浸可能な範囲において適用量を増すことで耐久性の確保が可能であるものと考えられる。

コンクリートの反応性が発水層に与える影響を図-2に示す。コンクリートの反応性の影響については、養生直後において含浸処理したため、ひび割れやゲルなどの影響がなかったため、反応性および非反応性のコンクリートにおいて発

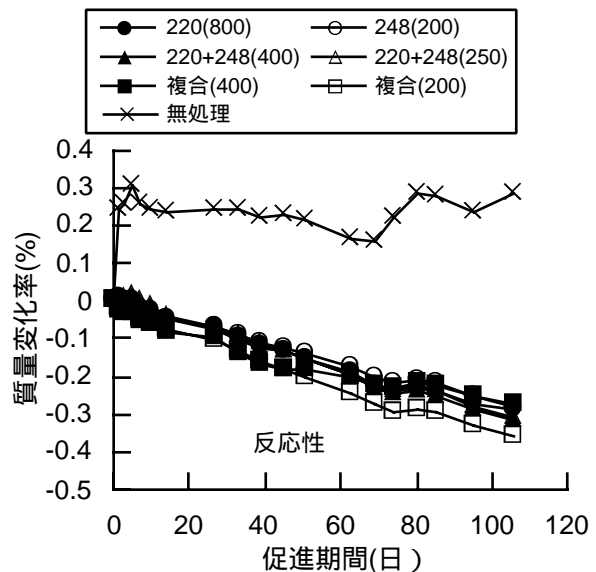


図-3 質量変化率の経時変化 (反応性)

水層の形成に顕著な影響は認められなかった。ただし、いずれのコンクリートにおいてもASR膨張を促進するため、多量のアルカリが添加されており、添加アルカリの有無は含浸性に影響を与える可能性があるものと考えられる。

(2) 質量変化率

質量減少率の経時変化を図-3および図-4に示す。無処理のものは、暴露直後に質量増加を示し、暴露60日後以降、再び質量増加の傾向を示した。これに対して、含浸処理されたものは、発水材の種類にかかわらず、質量減少を示した。無処理のものは、暴露直後において水分を吸水した後、高い含水状態を維持しながら、ASRが進行し、60日後さらにゲルの吸水による膨張を生じたものと考えられる。含浸処理されたものは、乾湿環境下においても発水効果を示し、内部の水分を逸散させたものと考えられる。

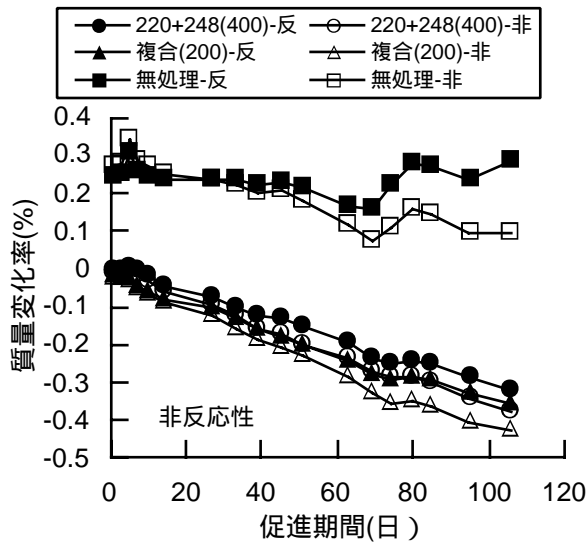


図-4 質量変化率の経時変化（非反応性）

非反応性のものでは、無処理のものは暴露直後に質量増加を示し、暴露60日程度で質量変化率が一定となった。暴露直後においては、表層部が乾燥しているため、毛細管現象によって内部への吸水が一時的に生じるものの、外部環境と平衡する含水状態へと移行したものと考えられる。

含浸処理されたものでは、反応性のものと同様に、発水材の種類にかかわらず、質量減少を示した。

発水材の仕様が質量変化率に与える影響を図-5に示す。シラン単体のもの、220+248のもの、および複合タイプのいずれにおいても同程度の質量変化率を示した。非反応性のものについては、反応性のものより若干大きな質量減少を示した。反応性のものについては、ASRによる影響を受けているものと考えられる。本研究における促進環境下においては、発水材の仕様の違いにより、発水効果による質量減少に顕著な違いを生じていないものの、発水効果による水分逸散が可能であったことから、実環境においては優れた発水効果を持つものと考えられる。また、今後のASR膨張の進行に伴い、仕様の違いが顕著となることも予想されるため、暴露を継続し、これらの影響を明らかにする必要がある。

(3) 超音波パルス伝搬速度

超音波パルス伝搬速度の経時変化を図-6および図-7に示す。反応性のものについては、含浸

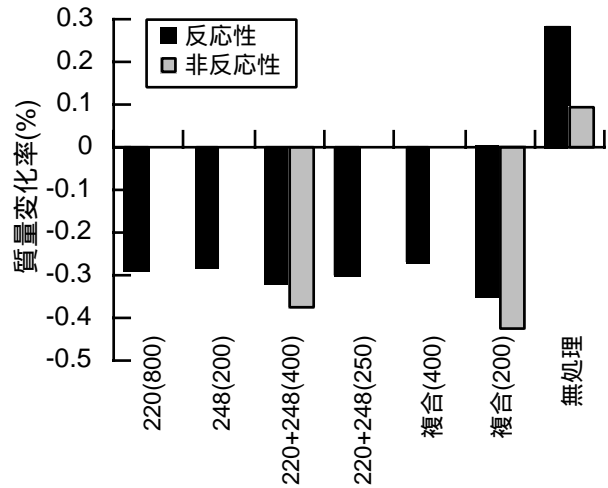


図-5 発水材の仕様が質量減少率に与える影響

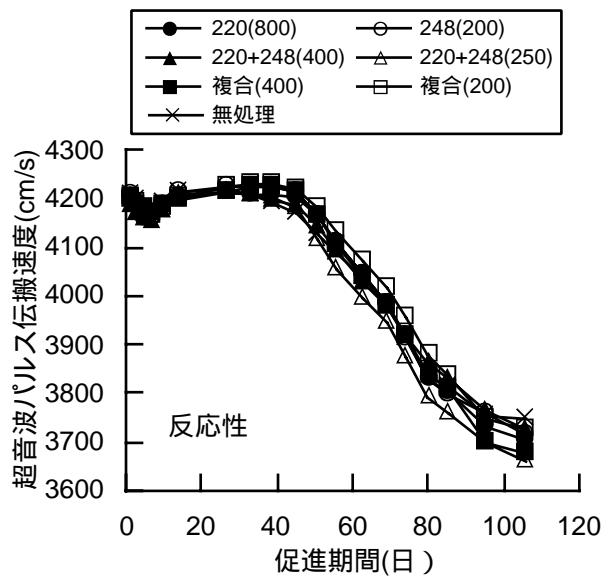


図-6 超音波パルス伝播速度の経時変化(反応性)

処理の有無にかかわらず、暴露40日以降に超音波パルス伝播速度が小さくなった。この時期よりASR膨張が生じて、内部のコンクリートに微細なひび割れが生じ始め、膨張が進展したものと考えられる。含浸処理されたものにおいては、発水材の仕様による影響は認められなかった。今後の暴露を継続し、発水材の仕様による影響を明らかにする必要がある。

一方、非反応性のものには、含浸処理の有無にかかわらず、暴露40日後以降の超音波パルス伝播速度の低下は認められず、反応性のものの超音波パルス伝播速度の低下が、ASR膨張によるものであることを裏付ける結果が得られた。

(4) ひずみ

ひずみの経時変化を図-8に示す。反応性のもの

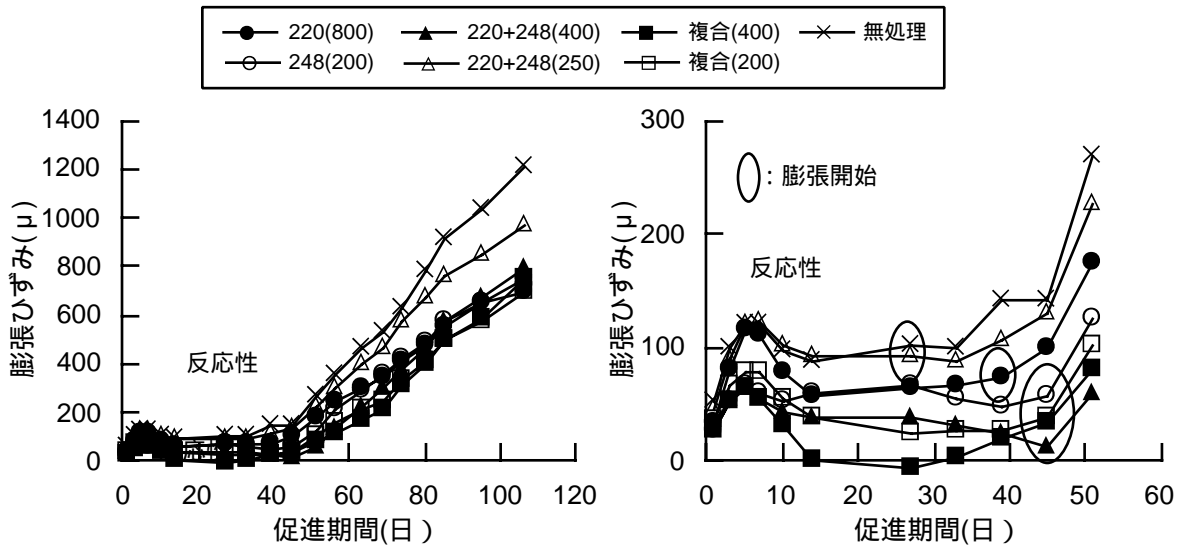


図-8 ひずみの経時変化

のでは、含浸処理の有無にかかわらず、暴露後膨張を生じた。含浸処理されたものの膨張は無処理のものより小さくなっており、発水効果による膨張抑制効果が認められる。一方、非反応性のもものでは(図-9参照)、含浸処理したものは水分逸散に伴う収縮が認められた。無処理のものはほとんどひずみに変化が認めなかった。

本研究においては、含浸処理時の含水状態を高く設定しているため、既往の研究²⁾で報告されていると同様に、厳しい促進環境において長期間膨張を完全に抑制することは困難であったものと考えられる。質量減少率の結果からは、含浸処理したのものには、発水効果による質量減少が認められており、含浸処理されたものの本研究の暴露期間における膨張は内部の水分による可能性が高いものと考えられる。発水材による水分逸散能力にも限界があり、本研究で設定した促進環境においては、内在した水分を短期間に十分に逸散させることができなかったものと考えられる。

無処理および220+248の適用量の小さい(250g/m²)のものは、暴露約30日後、分子量220のものは暴露約40日後において膨張が生じ始めた。その他のものについては、暴露約45日後において膨張が生じており、発水材による膨張遅延効果が認められるとともに、発水材による仕様の影響が認められる。

発水材の仕様がひずみに与える影響を図-9に

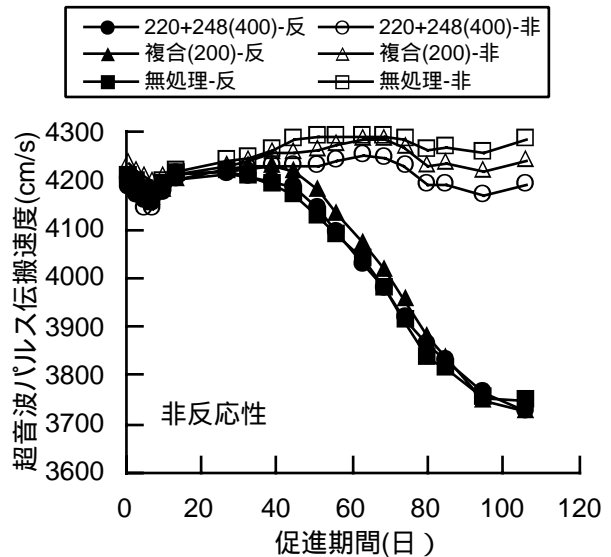


図-7 超音波パルス伝播速度の経時変化(非反応性)

示す。無処理のものが1200 μ程度の膨張を示しているのに対して、220+248の適用量の小さい(200g/m²)のものを除き、含浸処理されたものは、700 μ程度の膨張に抑制された。膨張の完全な抑制はできなかったものの、膨張が生じた後も発水効果によって膨張抑制能力が発揮されたものと考えられる。また、本実験の暴露期間においては膨張遅延効果に差が認められたものの、その後の抑制量については220+248の適用量の小さいものものを除き、顕著な違いが認められなかった。一方、220+248の適用量の小さいものは、膨張が他の処理されたものより大きく1000 μ程度の膨張となった。220のものは浸透性に優れるものの、揮発性が大きいため、適用量に対し

て有効に含浸される量が小さい。今回の組み合わせにおける適用割合においては、220の割合が大きかったため、揮発する割合が多くなり、他のものより発水効果が小さくなった可能性が高い。ただし、現時点では、質量変化率は同程度であったことからその差は顕著ではないものと考えられる。

今回検討の対象とした発水材は既往の研究を基に優れた発水性能が期待されるものを選択したため、その性能の差が現時点では顕著となって現れていない可能性があり、今後の実験の継続によってこれらの発水材の仕様による影響を明らかにする必要がある。

5. まとめ

(1) 異なる分子量を組み合わせることで適用することにより、含浸性能の改善が可能であった。市販の複合体タイプのものについては、比較的小さな適用量で大きな発水層が形成されており、シランとシロキサンを複合したことによる所期の効果が発揮されたものと考えられる。

(2) また、それらの適用量を大きくすることで、大きな発水層が得られた。耐久性の観点からは、大きな含浸量および発水層が必要とされており、耐久性が要求される場合には、含浸可能な範囲において適用量を増すことで耐久性の確保が可能であるものと考えられる。

(3) 促進環境下において、いずれの発水材においても発水効果による水分逸散が認められたため、検討の対象とした発水材は、実環境においては優れた発水効果を持つものと考えられる。

(4) 含浸処理されたものの膨張は無処理のものより小さくなっており、発水効果による膨張抑制効果が認められた。しかし、現段階においては発水材の仕様がASR膨張抑制効果に与える影響は顕著でなく、今後の実験の継続によってこれらの発水材の仕様による影響を明らかにする必要がある。

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

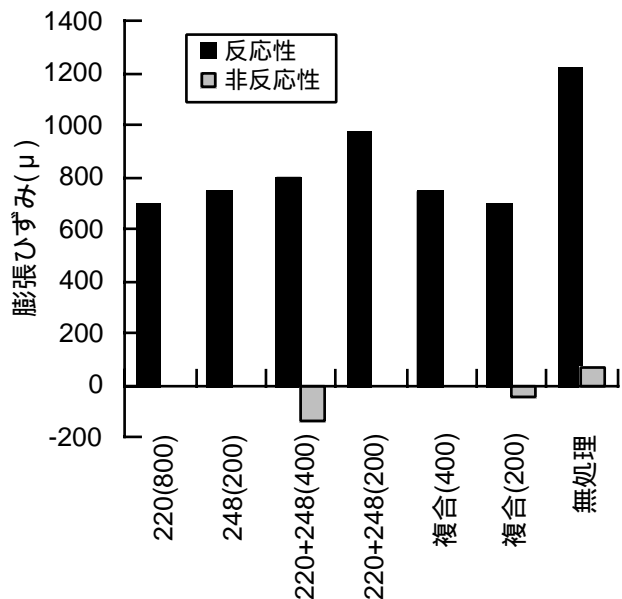


図-9 発水材の仕様がひずみに与える影響

術、コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002.6

2) 久保ほか：ASRにより劣化したコンクリート構造物のシラン系表面処理による補修効果の検討, 土木学会論文集, No.690/V-53, pp.95-107, 2001.11

3) 久保ほか：シラン含浸コンクリートの発水性能評価, 材料, Vol.52, No.9, pp.1095-1100, 2003.9

4) 久保ほか：シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vo.23, No.1, pp.421-426, 2001.6

5) 久保ほか：シラン系表面処理の耐久性と再含浸効果について, 土木学会第57回年次学術講演会概要集第5部, pp.573-574, 2002.9

6) 林ほか：シラン・シロキサン系撥水材の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vo.22, No.1, pp.301-306, 2000.6

7) 松田ほか：撥水・浸透系防止塗膜の暴露試験1年目の評価について, 土木学会コンクリートの表面被覆および表面改質に関するシンポジウム論文集, pp.37-44, 2004.2

8) 片脇ほか：土木構造物におけるコンクリートの表面被覆および表面改質技術について, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.3-11, 2004.10