

[1110] アルカリ骨材膨張による損傷を受けたコンクリート構造物の補修

正会員 ○宮川豊章（京都大学工学部）

菅島章文（京都大学工学部）

正会員 小林和夫（京都大学工学部）

正会員 岡田 清（福山大学工学部）

1. はじめに

アルカリ骨材反応による損傷を受けたコンクリート構造物は、ひびわれ、変形などの外観的なダメージは顕著であるものも多い。しかし、構造系として考えた場合、耐荷特性に大きな低下は認められないことが通例である。したがって、補修を検討する際には、鉄筋、あるいはP C鋼材の腐食など、ひびわれから浸透する水分が誘発する他の劣化を防止しなければならないことは当然であるが、補修後のアルカリ骨材膨張の進行を抑制することが主な目的となる。

一般にアルカリ骨材反応による損傷が生じるのは①限界量以上の反応性シリカ量②十分なアルカリ量③十分な水分の3者がそろって存在する場合であると考えられている。したがってその膨張損傷を防止するためにはこれらの内いずれかを満足しないようにすればよい。損傷を生じている構造物の補修を行う場合、①、②のコンクリート中の反応性シリカやアルカリについてはあらたに侵入、増加しないように配慮することは可能であろうが、これらを外部に取り出し減少させることは極めて困難である。現在の技術では③の水分についてのみが制御可能であろうと考えられる。コンクリート中の水分制御法としては、種々の合成樹脂材料によって表面処理を施すのが一般的であるが、膨張抑制効果を期待する場合に要求される性能として次の2側面を考慮する必要がある。すなわち、外部からの水分の供給を遮断し、コンクリート中の水分量を膨張を生じる限界量以上にしないという面と、内部からの水分の逸散を促進させるなどして水分量を限界量以下にするという面の両者である。これまでに、補修方法として表面処理法が検討されてきた例はあるものの、種々の表面処理材料をその置かれる環境条件等との適応性をも考慮にいれて、比較検討した報告はほとんど見られないのが現状である。

2. 研究目的

アルカリ骨材反応による膨張には、温湿度など環境条件がきわめて大きな影響を与えることが知られており、その補修法の検討に際して環境条件への配慮を欠かすことはできない。本研究では、アルカリ骨材反応によるコンクリート膨張能力が非常に大きく、しかも残存膨張能力が十分にある時点における補修という厳しい条件を選び、わが国の環境条件を考慮した種々の環境下での水分制御に注目した各種補修方法の効果を実験的に検討することとした。

3. 実験概要

1) 環境条件

環境条件としては下記の4種類を選んだ。

① 室外

日光、風雨等自然環境の影響を直接受けるよう室外に静置した。

② 乾湿

わが国における各地方の平均気温及び平均湿度の最大値はそれぞれ25℃及びRH80%程度である

ことを考慮して、本研究では40°C、RH100%と20°C、RH60%とを12時間おきに繰り返すことによって気温及び湿度の平均が30°C、RH80%となるように設定した。これはわが国で実際に生じ得る最大の促進環境に近いものと考えられる。

③ 乾湿部分浸漬

杭等の地中部のように、構造物の一部に補修困難な部分があり、そこから水分が多量に供給される可能性が高い場合、補修効果が低下することが考えられる。その様な場合を想定して、供試体長手方向 1/4には表面処理を施さず水中に浸漬した状態を設定した。なお、その他の環境条件としては②の乾湿と同一とした。

④ 促進

アルカリ骨材反応における典型的な反応膨張促進環境として ASTM C227（モルタルバー法）を参照し、40°C、RH100%を設定した。

2) 補修方法

主に遮水性に期待する系としてエポキシ、ウレタン、メチルメタクリレート、発水性の高い系としてシラン、無機系の5種類を選んだ。以下にそれぞれの特徴及び仕様を述べる。

① エポキシライニング（以後エポキシと略記）

水分の侵入を防ぐが内部からの水分逸散も小さく、高い遮水性を持つ。伸び能力は130%(20°C)で比較的小さく、ひびわれ追従性はあまり期待できない。プライマー、パテ及び中塗りについてはエポキシを用い、上塗りについては耐候性上アクリル・ウレタンを用いた。中塗り膜厚は従来の実績を参考として240 μ mとし、その他の仕様については「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」に従った。

② ポリブタジエン・ウレタン・ライニング（以後ウレタンと略記）

水分制御に関する特徴はエポキシとほぼ同様であるが、遮水効果はエポキシより若干小さい。伸び能力は400%(20°C)で比較的大きく、ひびわれ追従性はかなり期待できる。プライマー、パテ及び中塗りについてはポリブタジエン・ウレタンを用い、上塗りについては耐候性上アクリル・ウレタンを用いた。中塗り膜厚は270 μ mとしその他の仕様については「道路橋の塩害対策指針(案)同解説」にほぼ従った。

③ メチル・メタクリレート含浸（以後MMAと略記）

コンクリート中の空隙充填効果によって含浸コンクリート層での遮水性が期待できる。含浸量は実績から210g/m³とし、30 μ mのアクリル・ウレタンによる上塗りを施した。

④ シラン・モノマー含浸（以後シランと略記）

上記3種の遮水系には劣るがコンクリート表面での防水性に加えて、コンクリート内部から水蒸気を逸散させることができ、発水性を持つ。含浸量としてはLudwigの報告[1]をもととして約130g/m³とした。

⑤ 無機系含浸（以後無機と略記）

珪酸塩系のものでシランと同様に発水性を持つがその効果はシランより小さい。無機系であるため耐候性はよいと考えられている。含浸量としては実績より約80g/m³とした。

3) 補修時期

新設構造物に対する予防保全的な使用の可能性も考慮して、コンクリート打設後約2週間の20°Cでの密封養生を行った後、室内に静置し高周波水分計による表面水分率が現場での補修上しばしば目安とされる10%となった時点で各種の表面処理を適用した。なお、表面処理を行わない供

試体については試験開始時まで密封養生を継続した。

4) コンクリート供試体

反応性コンクリート配合としては、細骨材は非反応性骨材を用い従来の実績から反応性粗骨材量をほぼベシマムとし

表1 コンクリートの示方配合

種類	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C	細骨材率 (%)	単位数 (kg/m ³)				混和剤 (/m ³)	
						W	C	S	G	Vinsol (cc)	食塩 (kg)
反応性	20	7±1	4±1	0.50	4.4	176	352	754	961	106	10.37
非反応性	20	7±1	4±1	0.50	4.4	176	352	754	1010	88	0.0

さらに等価ナトリウム量を8kg/m³とした。また比較用として非反応性骨材のみを用いた非反応性コンクリートを作製した。それぞれの示方配合を表1に示す。供試体としては10×10×40cmの角柱供試体とし、長手方向側面の相対する2面にひずみ測定用プラグを埋め込んだ(測長20cm)ものを用いた。なお、乾湿部分浸漬については水線から上20cmについてのひずみを測定した。供試体の外観を図1に示す。また、供試体の

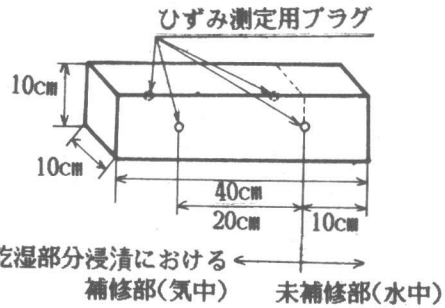


図1 供試体の外観

4. 実験結果及び考察

各環境下に46週間暴露した後の供試体の外観変化を表3に示す。室外、乾湿、乾湿部分浸漬ではシランは比較的良好な外観を保っていたが、エポキシ、ウレタンについてはふくれなどの変状がみられた。特にエポキシは室外以外の環境においてはライニング面にひびわれが生じており、ひびわれ追従性に関してはウレタンに比べて劣ることが認められた。一方、MMA、無機を用いたものも表面に多くのひびわれ、ゲルなどがみられ、外観上損傷は大であった。

表2 供試体の種類、本数および略称

環境	コンクリート表面処理	なし		ライニング		含浸		
		反応性	非反応性	反応性		反応性		
		供試体略称	反応性	非反応性	エポキシ	ウレタン	MMA	シラン
条件	室外	2	2	2	2	2	2	2
	乾湿	2	2	2	2	2	2	2
	乾湿部分浸漬	2	2	2	-	-	2	-
	促進	2	2	2	-	-	-	2

表3 供試46週における供試体の外観

環境	供試体	反応性	非反応性	エポキシ	ウレタン	MMA	シラン	無機
		室外	大ひびわれ多	良	ふくれ	ふくれ多	ひびわれ(ゲル)	良
条件	乾湿	ひびわれ多	良	ふくれひびわれ	ふくれ多	ひびわれ(ゲル)	ひびわれ少	ひびわれ多
	乾湿部分浸漬	小ひびわれ多	良	ふくれひびわれ(ゲル)	-	-	ひびわれ少	-
	促進	大ひびわれ多	良	ひびわれ(ゲル)	-	-	-	ひびわれ(ゲル)

1) 膨張ひずみ

ひずみの経時変化を供試体2本の平均で図2～5に示す。さらに46週のひずみ測定値をもとに、下式により膨張抑制効果膨張抑制効果Eeを算定し、アルカリ骨材膨張に対する補修効果を評価する上での指標とした。

$$Ee = \varepsilon_r / \varepsilon_{rr}$$

ここに、 $\varepsilon_r = \varepsilon - \varepsilon_{nn}$; アルカリ骨材反応による膨張量、 ε ; 各供試体のひずみ(膨張を+)、 ε_{nn} ; 同一環境下における非反応性供試体のひずみ、 ε_{rr} ; 同一環境下における反応性無処理供試体の ε_r

算定したEeを表4に示すがEeが1より小さいほど、膨張抑制効果が大きいと考えられる。室外では無機を除く4種の表面処理のEeが0.15以下であり膨張抑制効果が大であった。エポキシ、ウレタンともこの環境下ではまだライニング層にひびわれは生じておらず、その優れた遮水性により膨張の大部分を補修時の内部水分のみによるものに抑制することが可能であったと考えられる。MMAも同様に膨張抑制効果がみられるが、徐々に膨張傾向にあるのは表面に生じたひびわ

れからの水分侵入により遮水性能が低下したためと考えられる。無機はシランのような発水性を持ち、耐候性もよいと考えられているが、本実験においては、無処理のものと同様に夏期（測定25~45週前後）に急激な膨張を示しており、シランと比較して効果はかなり小さいようである。

乾湿においてはシランが他の表面処理に比べて特に小さいEeを示した。この環境ではコンクリート内部の水分を逸散させる機会があり、シランの発水性の高さがこの大きな効果に結びつくものと考えられる。しかしシランも若干の膨張傾向にあるため、さらに効果を高めるためには、今後その使用量、上塗り剤の適用等の検討が必要であろう。MMAの遮水性能も初期の段階では膨張遅延効果があるが、長期的には低下が著しい。無機はこの環境でもほとんど効果が認められない。エポキシとウレタンに関しては、前者が早期段階から大きな膨張傾向にあるのに対し、後者は遅れて膨張し始める。これは、ウレタンの透湿度が比較的大きく、若干の発水性を持つことに加え、ひびわれ追従性の高さからエポキシより長い期間高い遮水性を保つことによると考えられる。しかしウレタンも樹脂の微小ひびわれなどの劣化は避けがたいようであり、20週目前後からはやはり膨張を示している。

以上より、エポキシ、ウレタン、MMAなどのように水分制御を主として遮水性に頼る補修は、コンクリートを十分乾燥させた上で実施した場合は大きな効果が期待できるが、本実験程度の含水率（表面水分率10%）における補修では発水性を持った補修の方が効果的であると考えられる。また遮水性に頼る補修を行う際には、アルカリ骨材反応による膨張が進行性であることを考慮して、ひびわれ追従性の優れた樹脂の方が適している。

乾湿部分浸漬においてもエポキシとシランに膨張抑制効果の相違が顕著に現れている。水分逸散の小さいエポキシでは水中の非ライニング部分より浸透した水分がコンクリート

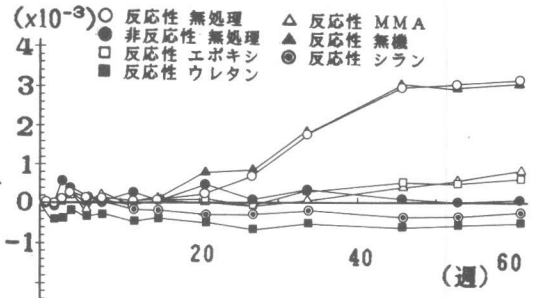


図2 ひずみの経時変化 室外

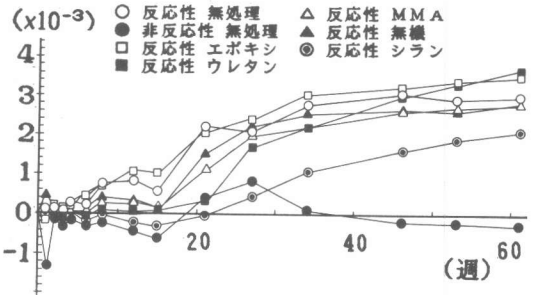


図3 ひずみの経時変化 乾湿

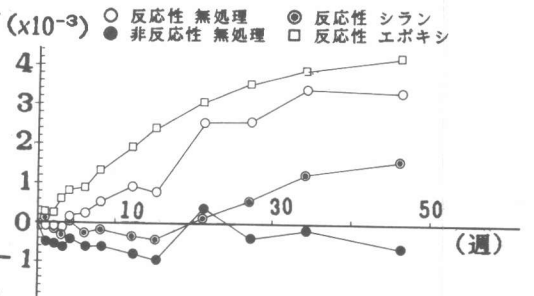


図4 ひずみの経時変化 乾湿部分浸漬

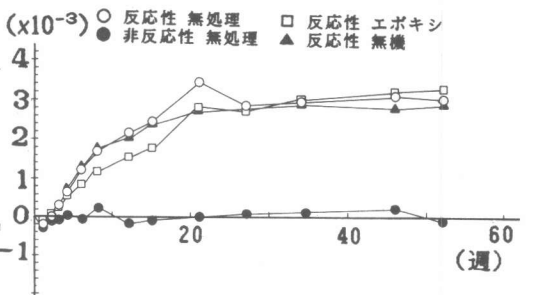


図5 ひずみの経時変化 促進

表4 46週測定時における膨張抑制効果Ee

環境	供試体	反応性	非反応性	エポキシ	ウレタン	MMA	シラン	無機
		1	0					
室外	反応性	1	0	0.15	-0.25	0.10	-0.17	1.02
	非反応性	0	0	0.15	-0.25	0.10	-0.17	1.02
乾湿	反応性	1	0	1.05	0.98	0.86	0.55	0.86
	非反応性	0	0	1.05	0.98	0.86	0.55	0.86
乾湿部分浸漬	反応性	1	0	1.23	-	-	0.56	-
	非反応性	0	0	1.23	-	-	0.56	-
促進	反応性	1	0	1.03	-	-	-	0.92
	非反応性	0	0	1.03	-	-	-	0.92

内部に蓄積され、むしろ、ある程度の水分逸散が可能な無処理のものよりも膨張している。これに対し、発水の特徴とするシランでは大きな膨張抑制効果を示している。これよりシランは、表面処理不可能な部分から多量の水分が供給される場合においても、膨張抑制効果を期待できる可能性は高い。

促進では、無機が無処理のものと同様に膨張し15週目で膨張能力を消費し尽くしているが、エポキシには初期の膨張遅延効果がみられる。外部から絶えず水分を供給される環境では、防水能力では劣る発水系では膨張抑制は困難であり、これは筆者らがシランについてすでに報告しているところである [2]。したがって、このような環境下では高い遮水性を持つ補修が効果的である。

2) 重量変化率

各環境条件下での重量変化率の経時変化を供試体2本の平均で図6～9に示す。また、ひずみと重量変化率の相関関係を図10に示す。さらに、46週の測定より得られた重量変化率より次式により水分増加抑制効果Ewを算定した。

$$Ew = w - w_r$$

ここに、w;各供試体の重量変化率、w_r;同一環境条件下における反応性無処理の重量変化率

算定したEwを表5に示すが、Ewが大きな負の値を示すほど、抑制効果は大であると考えられる。またEwと前項のEeとの相関を図11に示す。

図10によると、長期的に見た場合、重量変化率とひずみとの間に明かな相関関係がみられ、重量増加にともないひずみも増加する傾向にある。これは46週におけるEeとEwの相関関係からも明かであり、コンクリート中の水分量増加がアルカリ骨材反応による膨張に直接大きな影響を与えることを表している。また、重量が0.4%以上増加したものに特に大きな膨張が認められる。したがって重量変化率においてアルカリ骨材反応の進行を考える場合、重量増加率0.4%を目安とすることができそうである。

重量が減少しても膨張をしめすものも認められるが、これは乾湿、乾湿部分浸漬のシラン、乾湿のウレタンにあたる。シランについてはその発水性能により初期の重量減少が他のものに

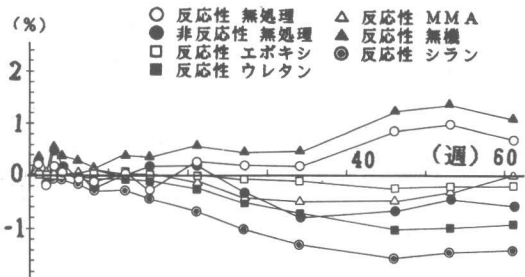


図6 重量変化率の経時変化 室外

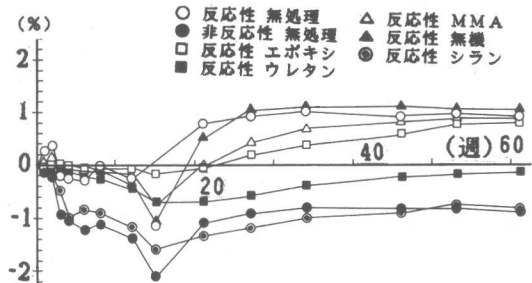


図7 重量変化率の経時変化 乾湿

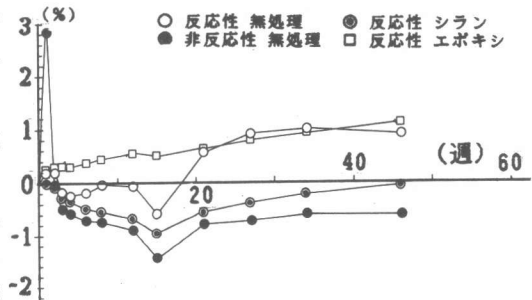


図8 重量変化率の経時変化 乾湿部分浸漬

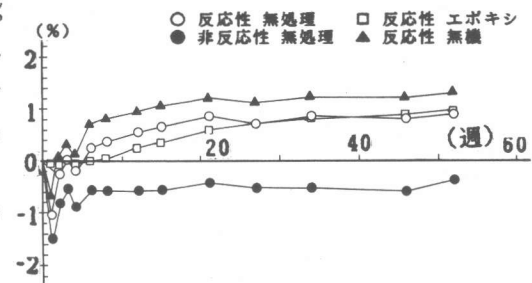


図9 重量変化率の経時変化 促進

比べて大きいためであり、発水性能の低下によるものと思われる膨張開始期から重量も増加傾向にある。乾湿のウレタンも同様に初期に大きな重量減少を示している。また室外においてもウレタンは長期的に重量減少を示している。この様な水分逸散が可能な環境では、ウレタンは優れた遮水性とともに若干の発水性を持つ。しかしこの効果も膨張を抑制できるほど大きくはないようである。また、エポキシ、ウレタン MMAなどの遮水性を持つ表面処理を施したものについては、全面に処理を行っていない乾湿部分浸漬を除いて膨張の初期段階において、膨張量の増加が重量増加に結び付かない期間が認められる。これは表面処理による遮水効果により、表面処理時にコンクリートに含まれていた内部水分のみにより膨張が進行している段階であると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に記す。

1) 外部からの水分侵入を防止あるいは内部からの水分逸散によりコンクリートの含水量を制御することによって、アルカリ骨材反応による膨張を制御することが可能である。

2) 主として遮水性能に期待する表面処理は、コンクリートが乾燥状態にある場合あるいは外部からコンクリート全面での水分侵入が予想される様な場合にはアルカリ骨材膨張に対する抑制効果を示す。コンクリートの含水率が高い場合には高い遮水性能を有していても内部水分のみで膨張する可能性がある。しかしこの場合にも、進行するひびわれに十分追従し得る高い伸び能力を持った樹脂などを使用する等、遮水性の低下を防げば、ある程度の効果は期待できる。また、部分的な未補修部分から水分浸透の可能性がある場合、コンクリート表面の遮水性が逆効果となる可能性がある。なお、今回用いた仕様の内ではポリブタジエン・ウレタン・ライニングが最も効果的であった。

3) 主として発水性能に期待する表面処理は、コンクリートからの水分逸散が期待できるような環境条件であれば、一部の未補修部分から水分の供給があってもアルカリ骨材膨張に対する抑制効果が高い。しかしコンクリート全表面から多量の水分が供給される様な場合では防水性能が遮水系より劣るためその効果は減少する。なお、今回用いた仕様の内では無機系よりシランの方が効果的であった。

参考文献; [1] U. Ludwig: Theoretical and practical research on the alkali-silica reaction, Proc. of 5th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/24, 1981

[2] 岡田清、小林和夫、宮川豊章、井上晋、楠基: アルカリ骨材反応による損傷を受けたコンクリート構造物の補修、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第5部、p.p.187-188、昭和60年9月

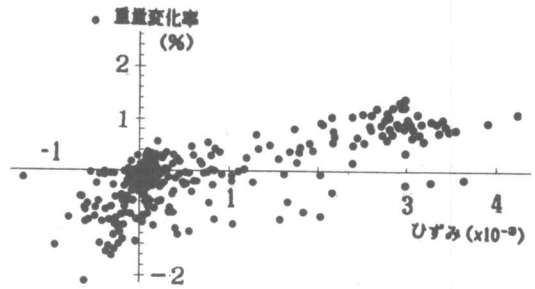


図10 ひずみと重量変化率の相関関係

表5 46週測定時における水分増加抑制効果Ew

環境条件	供試体	反応性	非反応性	エポキシ	ウレタン	MMA	シラン	無機
		0						
環境	室外	0	-1.53	-1.10	-1.84	-1.31	-2.40	0.37
	乾湿	0	-1.73	-0.32	-1.14	-0.07	-1.81	0.21
	乾湿部分浸漬	0	-1.51	0.20	-	-	-0.96	-
条件	促進	0	-1.40	0.10	-	-	-	0.42

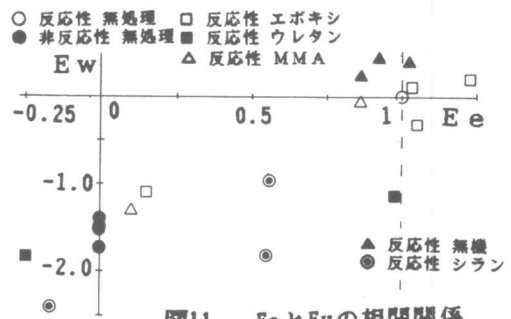


図11 EeとEwの相関関係