

[1137] 発水剤によるアルカリ骨材膨張の抑制

正会員 ○宮川豊章(京都大学工学部)

久田 真(京都大学工学部)

正会員 菅島章文(京都大学工学部)

正会員 藤井 学(京都大学工学部)

1. はじめに

一般にアルカリ骨材反応によってコンクリート構造物に損傷が生じるのは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り、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と考えられる。損傷を生じている構造物の補修を行う場合には、現段階では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、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は、①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、②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、の2側面からの配慮が必要である。

近年の報告によると、②の水分逸散効果が大きなことを特徴とする発水剤による表面処理仕様の効果が注目され、種々の検討が行われ始めている。^{1,2)}アルカリ骨材反応による膨張現象は、環境条件に大きく影響を受け、しかも長期間にわたって進行することが知られている。しかし、わが国における環境条件を適切に考慮し、長期間の検討を行っ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

本研究ではまず、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表面処理という厳しい条件を選び、わが国の環境条件を考慮した環境下において各種表面処理方法の長期的な効果を検討し、特に発水系の表面処理仕様の特徴を把握することを試みた。次いで、発水剤を現場で適用する場合、表面処理の施工面積率、対象となるコンクリート構造物の表面積と体積との比が水分逸散効果に大きな影響を与えるものと考え、両者を要因としてとりあげ、これらの影響を実験的に検討することとした。

3. 実験概要

本実験は、環境条件として京都における室外環境とわが国における最大の促進環境をシミュレーションした乾湿環境の2条件を採用し、環境作用の評価と発水剤を中心とする各種表面処理仕様の効果を比較、検討したシリーズ1と、シリーズ1で良好な効果のみられた発水剤(シラン)仕様を中心とし、室外環境において表面積と体積の比を、乾湿環境において施工面積率をそれぞれ要因として検討したシリーズ2からなる。

3. 1 環境条件

環境条件としては下記の2種類を選んだ。

- ①室外環境：日光、風雨等自然環境の影響を直接受けるよう京都市内の室外に静置した。
- ②乾湿環境：わが国における各地方の平均気温および平均湿度の最大値はそれぞれ25℃およびRH80%程度であることを考慮して、本研究では40℃、RH100%と20℃、RH60%とを12時間おきに繰返

すことによって、気温および湿度の平均が30℃、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程度の温湿度環境に近いものと考えられる。

3.2 実験要因

(1) 表面処理仕様

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、無機系の計5種類を選んだ。以下に各々の特徴を述べる。

- ①エポキシ・ライニング：水分の侵入を防ぐが内部からの水分逸散も小さく、遮水性能が高い。
- ②ポリブタジエン・ウレタン・ライニング：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も若干小さい。伸び能力はエポキシより大きい。
- ③メチル・メタクリレート含浸：コンクリート内部の空隙充填効果によって含浸層での遮水性が期待できる。
- ④シラン・モノマー含浸：遮水性の点では上記3種のものには劣るが、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特性を持つ。
- ⑤無機系含浸：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。
- ⑥シラン・モノマー含浸、ポリマー・セメント・モルタル併用：シリーズ2でのみ用いた仕様であり、④のシランを下塗として、耐候性および中性化防止の観点から1.2mmのPCM（アクリル系ポリマー・セメント・モルタル）を塗布した。

(2) 表面積と体積の比（S/V）

コンクリート構造物の寸法、形状は多岐にわたっている。構造物の表面積が体積に対して大きければ水分逸散の可能な面は広く発水剤の持つ発水効果は有効に働くが、これが小さければ水分逸散による膨張抑制効果は少ないものと考えられる。本実験では、シリーズ2において、表面積と体積との比（S/V）を0.45（供試体寸法：10×10×40cm）、0.32（同：15×15×40cm）、0.25（同：20×20×40cm）の3種類に設定し、比較、検討を行った。なお、シリーズ1においてはすべてS/Vが0.45（供試体寸法：10×10×40cm）の供試体を用いた。

(3) 施工面積率

シリーズ1では全て供試体の全面に表面処理を施したが、コンクリート構造物の中には基礎構造物などのように全面が地表面上ではなく、一部が地中あるいは水中にあって、全面に表面処理を施すことができない場合がある。そのような場合を想定し、シリーズ2においては表面処理を部分的にしか行わない供試体を用いて、部分補修の効果についての検討を行うこととした。施工面積率としては、全面処理の1、部分処理の13/18、1/2および表面処理を行わない0の4種類を設定した（図1参照）。

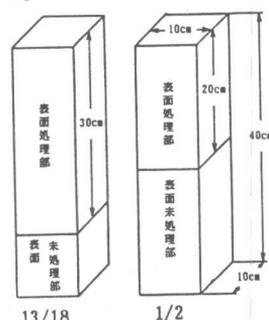


図1 施工面積率
13/18、1/2の供試体の仕様

3.3 補修時期

新設構造物への予防保全的な使用も考慮して、コンクリート打設後約2週間、20℃での密封養生を行った後、室内に静置し表面水分率が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。

3.4 コンクリート供試体

反応性コンクリートの配合としては、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

材量をほぼペシマムとした。さらに、NaClの添加により等価アルカリ量を $8\text{kg}/\text{m}^3$ とした。また比較用供試体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。なお、供試体としては主として $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体とし、長手方向側面の相対する

表1 コンクリートの示方配合

シリーズ	種別	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランパの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G (反応性)	粗骨材 G (非反)	ゲインツ (cc)
1	反応性	20	9±1	4±0.5	50	44	176	352	754	—	1010	88①
	非反応性	20	—	4±0.5	50	44	176	352	754	468	493	106②
2	反応性	20	9±1	4±0.5	50	44	176	352	783	—	1010	35.2③
	非反応性	20	—	4±0.5	50	44	176	352	783	468	493	35.2③

(注)コンクリート練り混ぜ時の投入量：反応性：水+N a C l →ウィンソル ①は0.025%、②は0.003%、③は0.01%

2面にひずみ測定用プラグを埋め込んだ(基準測長：20cm)ものを用いた。供試体の一覧をその略称および本数とともに表2に示す。

表2 供試体一覧および略称

(シリーズ 1、普通ポルトランドセメント使用)

使用骨材	非反応性	処 理					
		無 処 理		ラ イ ニ ング		含 浸	
表面処理	無 処 理	ウレタン	エポキシ	MMA	シランA	シランB	無 機
補 修	な し	な し	ウレタン	エポキシ	MMA	シランA	シランB
略 称	非反応性	無処理	ウレタン	エポキシ	MMA	シランA	シランB
本 数	2	2	2	2	2	2	2
乾湿環境	2	2	2	2	2	2	2

4. シリーズ1の結果および考察

—各種表面処理仕様の特性—

供試約100週後の供試体の外観を表3に示す。すでに報告した46週後の結果³⁾と比べると、外観の損傷程度は大きくなったものの基本的な傾向には大きな変化は認められない。室外では非反応性を除いては代表的な発水剤であるシランのみ良好な外観を保っており、乾湿ではシランも含めて非反応性を除く全てにひびわれ等の損傷が生じた。エポキシ、ウレタンのライニング系についてはふくれなどの変状が前報³⁾よりも大きくなっていた。特にエポキシはライ

(シリーズ 2)

① S/Vによる比較 (普通ポルトランドセメント使用、室外環境)

S/V寸法 (cm)	0.25		0.32		0.45	
	有	無	有	無	有	無
補修の有無	2	2	2	2	2	2
本 数	2	2	2	2	2	2

② 施工面積率による比較 (普通ポルトランドセメント使用、乾湿環境)

施工面積率	1	13/18	1/2	0
本 数	2	2	2	2

表3 供試体外観：シリーズ1

(シリーズ 1、普通ポルトランドセメント使用)

ニング面のひびわれが多く、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、外観上の損傷は大きかった。

使用骨材	非反応性	反 応 性					
		ラ イ ニ ング		含 浸			
表面処理	無 処 理	ウレタン	エポキシ	MMA	シランA	シランB	無 機
補 修	な し	な し	エポキシ	ウレタン	MMA	シランA	シランB
環 境	室外環境	変化なし	大きいひびわれ多数	ライニングのふくらみ、ひびわれあり	ライニングのふくらみ、ひびわれあり	大きいひびわれ多数	変化なし
条 件	乾湿環境	変化なし	大きいひびわれ多数	ライニングのひびわれ多数、ゲル	ライニングのふくらみ多数、ひびわれ、ゲル	ひびわれあり	大きいひびわれあり
					大きいひびわれあり	大きいひびわれあり	ひびわれあり

4. 1 ひずみ

種々の表面処理供試体のひずみの経時変化を図2、3に示す。室外環境に比べて、乾湿環境では膨張速度が大きく、約2倍程度となっているが、最終膨張量としては両者ともほぼ同程度である。

室外ではシランおよびウレタンの膨張抑制効果が大

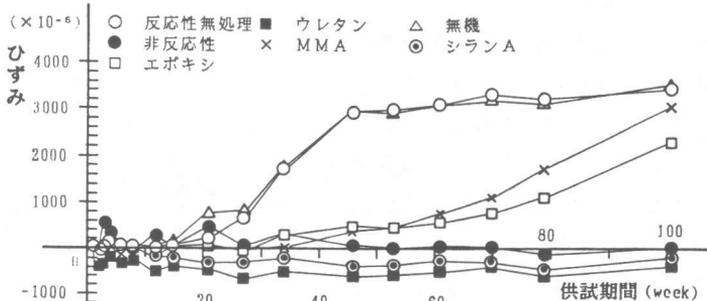


図2 ひずみの経時変化(シリーズ1)：室外環境

であった。エポキシ、MMAは60週付近から徐々に膨張傾向を示し、長期においてはあまり抑制効果はみられない。これらは比較的初期からひびわれが生じており、ひびわれからの水分侵入により抑制効果が低下したためと考えられる。ウレタンは、現在の段階では効果が大きいものの、ひびわれが生じ始めており、乾湿環境の膨張傾向を考慮すると今後さらに継続的な測定が必要

であるものと考えられる。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な膨張傾向を示しており、同じ発水系のシランと比較してその効果はかなり小さいようである。

乾湿では反応性を有する

供試体の全てが膨張を生じ、ほぼ一定値に収束したが、シランが他の表面処理に比べて小さい膨張を示し、その膨張量は無処理のものに比べて約2/3程度である。これはシランの持つ発水性の効果によるものと考えられる。しかしシランにも膨張が生じているため、さらにその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ると考えられ、これについてはシリーズ2において述べる。エポキシとウレタンに関しては、最終的な膨張量はほぼ同程度であり、長期的な膨張抑制効果はどちらも小さいものと考えられ、むしろ表面処理を施していないものに比べて膨張量は大きくなっている。これはエポキシやウレタンのもつ遮水効果がコンクリート内部の水分を逸散させずかえてアルカリ骨材膨張を促進させたものとも考えられる。

4.2 重量変化率

ひずみと重量変化率の相関関係を図4、5に示す。ここでは、重量増加にともないひずみも増加する傾向を示しており、コンクリート内部水分量の増加がアルカリ骨材反応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ついては、反応性の粗骨材からマイクロクラックがしばしば発生する目安とされる0.05%⁴⁾程

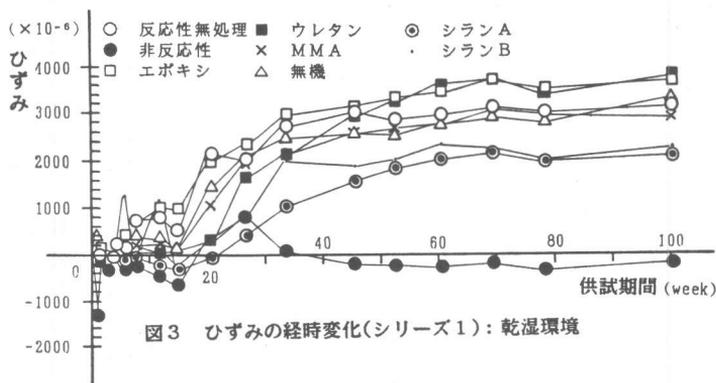


図3 ひずみの経時変化(シリーズ1): 乾湿環境

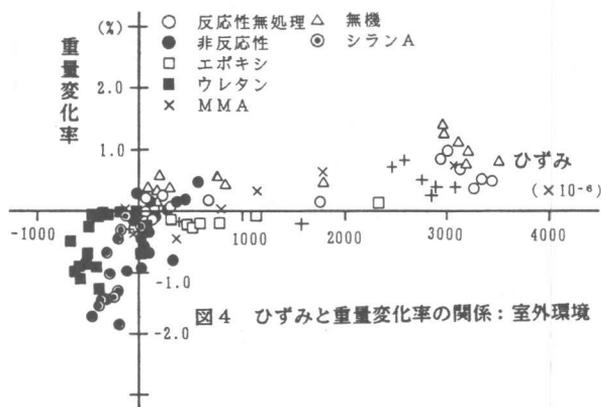


図4 ひずみと重量変化率の関係: 室外環境

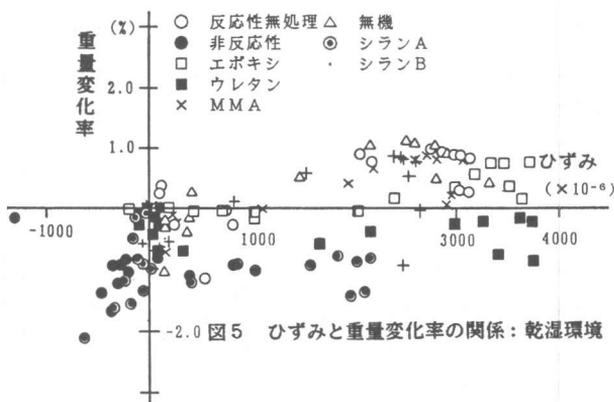


図5 ひずみと重量変化率の関係: 乾湿環境

度以上の大きな膨張が認められる。したがって、重量変化率によって膨張の進行程度を考える場合には、重量増加率0.4%程度を臨界量としてとり扱ってよいものと考えられる。また、シランの乾湿には、重量増加を伴わない膨張も認められるが、これはシランのもつ発水性能によって、膨張後にコンクリート内部の水分が逸散したためと考えられる。ウレタンにも、シランと同様の現象がみられ、このことからウレタンにも若干の発水性があると考えられることができる。

5. シリーズ2の結果および考察-S/Vおよび施工面積率の影響-

5.1 表面積と体積の比(S/V)の影響

供試約60週後の供試体の外観を表4に示す。無処理のものには全てひびわれが生じており、表面処理を施したものについてはひびわれは認められなかった。

S/Vを変化させた供試体のひずみの経時変化を図6に示す。また、最終のひずみおよび重量変化率測定

値をもとに、下式により膨張抑制効果Eeおよび水分増加抑制効果Ewを算定し、アルカリ骨材膨張に対する表面処理効果を評価する上での指標とした⁴⁾。

$E_e = \varepsilon_r / \varepsilon_{rr}$ [$\varepsilon_r = \varepsilon - \varepsilon_{nn}$; 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} ; 同一環境下の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]

$E_w = w - w_r$ [w ; 各供試体の重量変化率, w_r ; 同一環境の反応性無処理の重量変化率]

S/Vとこれらの指標との関係を図7に示す。表面無処理の供試体では、いずれも顕著な膨張を示してはいるものの、必ずしもS/Vの影響は明かではない。これに対して、表面処理を行った供試体においては著しい膨張はみられず、S/Vの増加にともなって膨張は減少する傾向にあり、とくにS/Vが最大の0.45(10×10×40cm)では最も小さな膨張量を得た。これらの結果はEe、Ewからも明らかであり、前回の報告に

比べてより明確なものになっている。したがって、S/Vが大きな程膨張抑制効果は大きいと考えられるが、その定量的な検討が今後の課題であると考えられる。

5.2 施工面積率の影響

供試約60週後の供試体の外観を表5に示す。

表面無処理部分には全てひびわれがみられたが、表面処理部についてはみられなかった。表面処理部と無処理部との境界部にはひびわれの存在が認められることから、これらの結果は表面

表4 供試体外観：表面積と体積の比の影響
S/Vによる影響(普通ポルトランドセメント使用、室外環境)

S/V (寸法(cm))	0.25 (20×20×40)		0.32 (15×15×40)		0.45 (10×10×40)	
	有	無	有	無	有	無
補修の有無	有	無	有	無	有	無
外観	変化なし	ひびわれ多数	変化なし	ひびわれ多数	変化なし	大きいひびわれ多数

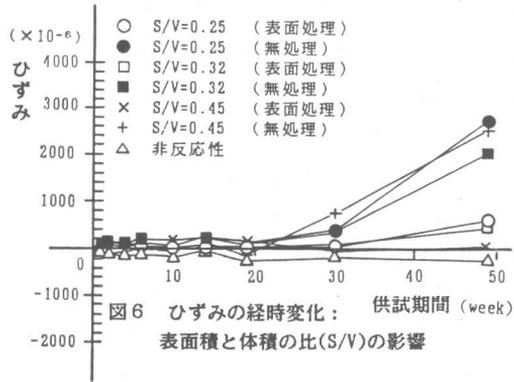


図6 ひずみの経時変化： 供試期間 (week)
表面積と体積の比(S/V)の影響

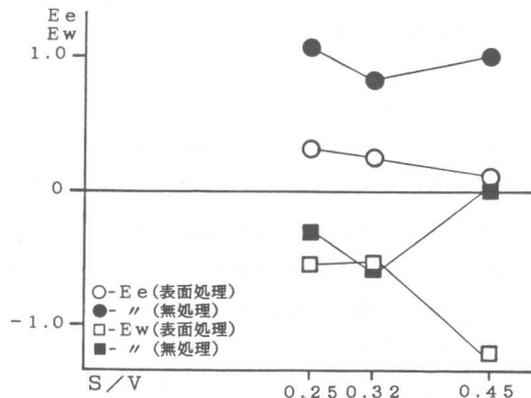


図7 表面積と体積の比(S/V)がEe、Ewに与える影響

表5 供試体外観：施工面積率の影響
施工面積率による影響(普通ポルトランドセメント使用、乾湿環境)

施工面積率	1	13/18	1/2	0
外観	ゲル多数 ふくらみ多数	PCM部一表面の変化なし、内部ひびわれ露出部一ひびわれあり	PCM部一表面の変化なし、内部ひびわれ露出部一ひびわれ多数	大きいひびわれ多数

処理部でコンクリートに全くひびわれが生じていないことを意味するものではなく、PCMのひびわれ追従能力が大きな事を意味しているものと考えられる。

施工面積率を変化させた供試体のひずみの経時変化を図8に、また5.1と同様に膨張抑制効果 E_e および水分増加抑制効果 E_w を算定し、施工面積率との関係で図9に示す。全面に施工したものの抑制効果については、無処理のものひずみの1/2程度となっており、これはシリーズ1における2/3より小さく、PCMを併用したことによる抑制効果と考えられる。一般に、施工面積率の増大にともなって膨張量は減少する傾向にある。特に、施工面積率を13/18とした場合には全面補修とほぼ同様の効果が得られた。しかし、今回の実験では、供試約70週付近で環境シミュレーション装置が故障し、湿度のきわめて低い期間があったため、今後さらに長期の計測が必要であると考えられる。

6. まとめ

- 1) 今回用いた乾湿環境における膨張促進程度は京都の室外自然環境の約2倍程度である。
- 2) 発水性に期待するシランによる表面処理は、今回用いた遮水性に期待する表面処理に比べてアルカリ骨材膨張抑制効果が大きい。またシランによる表面処理は、本実験で採用したアクリル系ポリマー・セメント・モルタルを塗布することにより、アルカリ骨材膨張抑制効果を一層大きくすることが可能である。
- 3) 重量変化率0.4%がアルカリ骨材膨張の急激な進行の上で1つの目安と考えられる。
- 4) 発水性能に期待する材料を用いた表面処理の対象となるコンクリート構造物の、表面積と体積との比(S/V)が大きな程表面処理の膨張抑制効果および水分増加抑制効果は大きい。
- 5) 施工面積率も膨張抑制効果および水分増加抑制効果に大きな影響を与え、本実験で用いた表面処理仕様および供試体寸法の場合、施工面積率 13/18以上であれば全面処理とほぼ同様の効果を得ることができた。

【参考文献】

- [1]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、pp.187-188、1985
- [2]G.Hoppe:Rehabilitation of an Arch Bridge、Proc. of the 7th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction、Ottawa、pp.199-203、1986
- [3]宮川豊章、菅島章文、小林和夫、岡田 清: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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9-1、pp.621-626、1987
- [4]R.Turriziani:Internal Degradation of Concrete、Proc. of the 8th Int. Conf. on the Chemistry of Cement、pp.388-442、1986

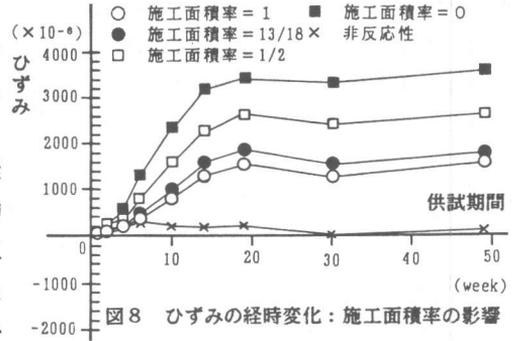


図8 ひずみの経時変化：施工面積率の影響

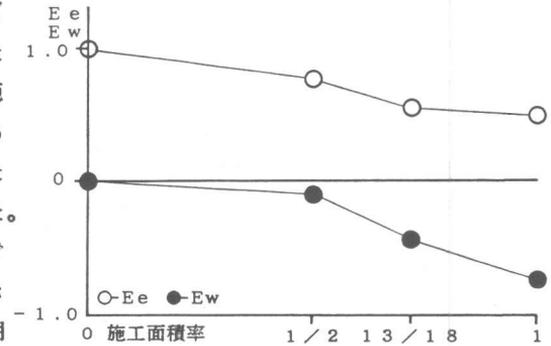


図9 施工面積率が E_e, E_w に与える影響