

論文 各種対策工によるアルカリシリカ反応の膨張抑制効果に関する研究

野島 昭二^{*1}・宮永 憲一^{*2}・宮原 茂禎^{*3}・丸屋 剛^{*4}

要旨：アルカリシリカ反応（ASR）による膨張に対して良好な抑制効果を有する対策工法を見出すことを目的として、反応性骨材とアルカリで反応性を高めたコンクリートに対して各種の対策工を実施したのちに、40℃の蒸気養生と気中乾燥を繰り返しながら ASR による膨張ひずみを計測した。対策工としては表面被覆、表面含浸材を 4 種類、塗膜、防水透湿シートの合計 7 種類を試験した。その結果、本研究での試験条件下においては表面被覆およびシラン系表面含浸材において膨張抑制効果が確認された。

キーワード：コンクリート、アルカリシリカ反応、抑制対策、膨張ひずみ、表面被覆、表面含浸材

1. はじめに

コンクリート構造物のアルカリシリカ反応（ASR）による劣化は 1980 年頃から問題視されるようになり、1986 年の JIS により ASR の試験法や抑制対策が示されるようになった¹⁾。現在のコンクリート標準示方書²⁾では対策としてアルカリ総量の抑制、混合セメントの使用、「無害」の骨材の使用が優先順位を付けて規定され、構造物の設計・計画段階での ASR の対策方法は確立されるに至っている。しかし、規準の制定前に整備されて ASR に対する対策が十分採られていない構造物や、冬季に凍結防止剤が散布される山間部などの構造物においては、ひび割れを中心とする変状が顕在化している構造物が存在する。2000 年頃には ASR により劣化した構造物の鉄筋の曲げ加工部や圧接箇所の一部で鉄筋が破断した事例が報告され³⁾、ASR が構造物に深刻なダメージを与える劣化である可能性が示された。これを受けて、鉄筋ひずみと構造成能に関して研究が行われるようになり、現在では鉄筋のひずみが 1000 μ 以下であれば、耐震性能は低下しないことなどが報告されている⁴⁾。

ASR の劣化は発生するか否かの事前の予測が困難で、何らかの方法でそれがわかっても対策する方法が確立されていないため、変状を確認しながら事後維持管理を行うのが一般的になっている⁵⁾。事後対策により ASR の進行を完全に防止するのは容易ではないが、現状では、コンクリート中へのアルカリや水分の浸透を抑制することで進行を遅らせることを目的とした対策が取られることが多く、ひび割れの処理とあわせて表面被覆が多く採用されている。近年ではシラン系の表面含浸材を適用する事例も増加しているようである。これまでに多くの対策工法や材料が提案されているが、その良否に関しては統一した見解が得られておらず、それを確認するための試

験方法も定められていない。

本研究は、ASR の予防保全および事後対策に適した対策工法を選定することおよび、対策工の効果を評価できる促進試験方法を提案することを最終的な目標として、反応性骨材を使用しかつ、予めアルカリを添加したコンクリートに対して表面被覆、表面含浸材、塗膜、防水透湿シートなど、7 種類の対策工を施したのち、ASR の促進養生を行いながら膨張ひずみを計測することにより、各対策工の膨張抑制効果について調査した。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの材料および配合

コンクリートの使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。コンクリートは呼び強度 24N/mm² 相当のものとし、試験練りにより水セメント比を 60%に決定した。ASR を発生させるために反応性骨材とアルカリを使用し、反応性を有する安山岩碎石（G1）を反応性のない粗骨材（G2 および G3）と 50%ずつ混合した。細骨材には無害の骨材を使用した。アルカリには試薬の水酸化ナトリウムを

表-1 使用材料

項目	記号	品名（ASR の区分）	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
粗骨材	G1	碎石（無害でない）	2.61	1.56
	G2	5号碎石（無害）	2.65	0.64
	G3	6号碎石（無害）	2.64	0.79
細骨材	S	山砂（無害）	2.60	1.99
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³ , アルカリ量 0.54%		
AE 減水剤	add1	リグニンスルホン酸とポリオール の複合体		
AE 剤	add2	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤		
NaOH		試薬特級（顆粒）		

*1 （株）高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室（正会員）

*2 （株）高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室（正会員）

*3 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 課長代理（正会員）

*4 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 室長（正会員）

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単用量 (kg/m ³)						add1 C×%	add2
					W	C	G1	G2	G3	s		
20	8	4.5	60.0	44	165	275	518	207	311	804	0.25	0.5A

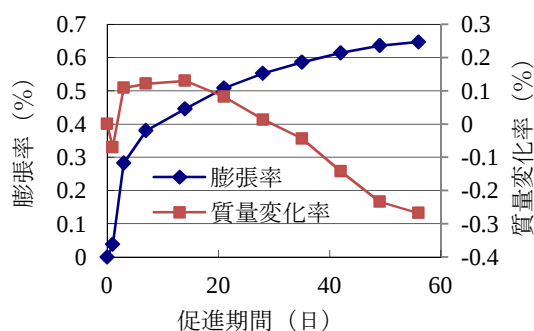
アルカリとして NaOH をセメント×2.5% (eq.Na₂O) 添加

用い、Na₂O 換算でセメントの 2.5mass% となるように添加した。ここでは、水酸化ナトリウムはコンクリートの単用量に含めず、練混ぜ直前に水に溶かして使用した。

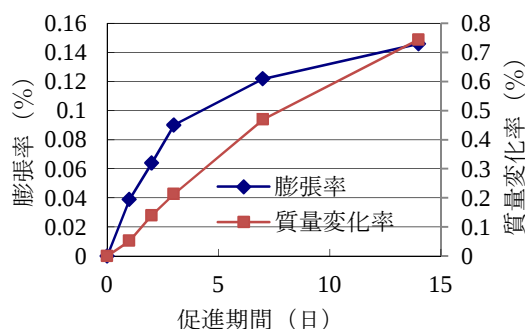
本コンクリートを ASTM C1260 (80℃, 1mol/l の NaOH 水溶液に浸漬) および JIS A 1804 (迅速法: 150kPa, 127℃ で 4 時間煮沸) の条件で促進膨張させたときの膨張率を図-1 に示す。ここで、JIS A 1804 は、150kPa で 4 時間の煮沸、降温を 1 サイクルとしてそれを 14 サイクルまで繰り返したものである。これらの試験規格は骨材の判定試験としてモルタルバーを製作して行うものであるが、結果が早期にえられることから、著者らはコンクリートの残存膨張量を確認するための試験法として検討している^{6),7)}。ここでは、製作したコンクリートブロックから採取した φ50×150mm のコアを試料とした。いずれの方法によっても大きな膨張率が得られており、対策効果を確認する目的に十分適したコンクリートとなっていると判断した。

2.2 対策工の種類と実験ケース

本研究では、表-3 に示すように、対策工の種類と施



a. ASTM C1260 による方法



b. JIS A 1804 による方法

図-1 コンクリートの促進膨張試験結果

工時期をパラメータとした。対策工としては、表面含浸材を 4 種類 (シラン系 2 種類, けい酸塩系 2 種類), 表面被覆, 塗膜および防水透湿シートの合計 7 種類を選定した。

表面被覆は、エポキシ樹脂系の下塗りを 1 層, アクリルゴム系の中塗を 2 層, アクリルウレタン系の上塗を 2 層の合計 5 層で施工する工法で、すでに汎用されており実績も多いものを採用した。研磨により表面のレイタンスを除去したのちに施工を行った。

表面含浸材はシラン系, けい酸塩系それぞれ 2 種類ずつを評価した。シラン系 A はアルキルアルコキシシランおよびシロキサン, シラン系 B はアルキルアルコキシシランを主成分とするもので、両者とも実績の多い材料である。また、けい酸塩系 A はけい酸リチウム系, けい酸塩系 B はけい酸ナトリウム系であり、主成分の異なる表面含浸材を試験した。

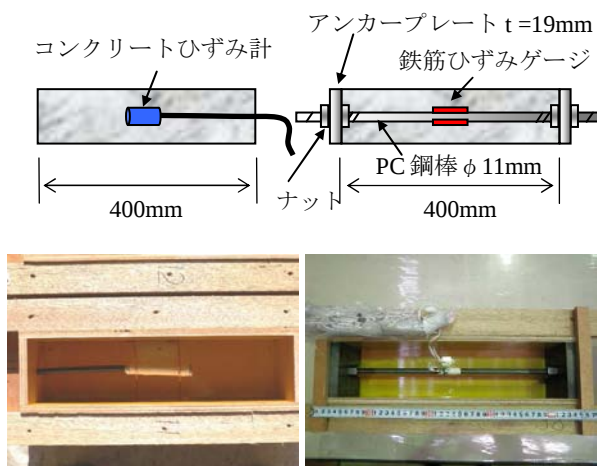
塗膜は、水は遮断するが水蒸気は通す性質を持つ水性塗料で、構造物表面の汚れ防止などの目的で市販されている塗膜である。刷毛やローラーによる 1 回塗りで施工できて簡便であるため、今回 ASR 抑制対策としての適用性を評価することとした。

防水透湿シートは、ポリテトラフルオエチレンを延伸加工することにより、水は遮断するが水蒸気は通すような微細な孔構造にしたシートで、防寒着などの衣類に使用されているものである。本研究では、これと不織布を熱溶着したシートを用いて、コンクリートに接着することにより ASR 抑制対策としての適用性を試験した。

対策工の実施時期は 2 種類とした。一方は新設構造物の予防保全を想定して、試験体の製作後すぐに対策工を

表-3 対策工の種類と対策時期

対策種類		施工時期	ケース計
表面被覆		予防, 事後	2
表面含浸剤	シラン系 A	予防, 事後	2
	シラン系 B	予防, 事後	2
	けい酸塩系 A	予防, 事後	2
	けい酸塩系 B	予防のみ	1
塗膜		予防, 事後	2
防水透湿シート		予防, 事後	2
比較用		—	1
計			14 ケース



a. 無拘束供試体 b. 拘束供試体

図-2 試験体の概要

実施し、その後 ASR の促進養生を行い膨張挙動を観察するケース（以降、予防対策とする）、もう一方はある程度 ASR が進行した構造物に事後対策を行うことを想定して、促進養生によりある程度の膨張ひずみを発生させた時点で対策工を行ったのちに、再度促進養生を行うケース（以降、事後対策とする）である。けい酸塩系 B については予防対策のみを実施した。

2.4 試験体の製作および ASR の促進養生

試験体の概要を図-2 に示す。寸法は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ とし、中心部にひずみ計を埋設した試験体（以降、無拘束試験体とする）および、2 枚のひずみゲージを設置した PC 鋼棒と、試験体両端に設置したアンカープレートで ASR による膨張を拘束する試験体（以降、拘束試験体とする）の 2 種類を製作し、対策工の効果を比較した。

試験体は、コンクリートを打設後、材齢 7 日で脱型し、アルカリの溶出を避けるために水中養生ではなく、ビニル袋に密封して 20°C の室内で材齢 28 日まで養生した。

試験の手順を図-3 に示す。予防対策を行う試験体は 28 日の養生後に上述の方法で各対策工を実施した。事後対策を行う試験体は 40°C の蒸気養生環境で前養生して ASR を促進した。ひずみを計測しながら、無拘束試験体は概ね 1000μ となる 21 日まで、拘束試験体では 400μ と



写真-1 試験体のシール

なる 7 日まで対策前の養生を行ったのち、対策工を施した。事後対策試験体は 7 日間の促進養生後に微細なひび割れが発生しているものがあったが、幅はほとんどが 0.1mm 以下であり、アルカリシリカゲルの滲出も見られなかった。

対策工においては、写真-1 に示すように、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の試験体の両端面と側面の端部 1cm はエポキシ樹脂でシールして端部の影響を排除したのちに、側面 4 面に対策工を行った。また、対策直前には試験体の表面水分量を計測して、メーカーによる推奨値がある場合には、それを満足していることを確認したうえで施工した。表面被覆、表面含浸材、塗膜はメーカー推奨の施工方法に準じて実施した。

ここで防水透湿シートは、コンクリートにエポキシ樹脂系接着材を塗布して貼り付けたが、接着剤がシートの透湿を阻害するのを最小限に抑えるため、図-4 のように $10 \times 40\text{cm}$ のコンクリート面の周囲と中央部のみに、 5mm の幅で接着材を塗布したのちにシートを貼付した。

対策後の ASR の促進養生は、予防対策、事後対策ともに、3 日間の 40°C の蒸気養生による促進と、4 日間の気中乾燥を繰り返すことにより行った。気中乾燥は試験体中の水分（水蒸気）を排出するために設定したもので、

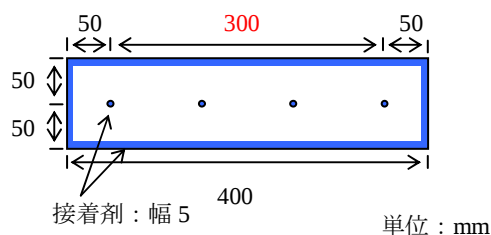


図-4 防水透湿シートの接着方法

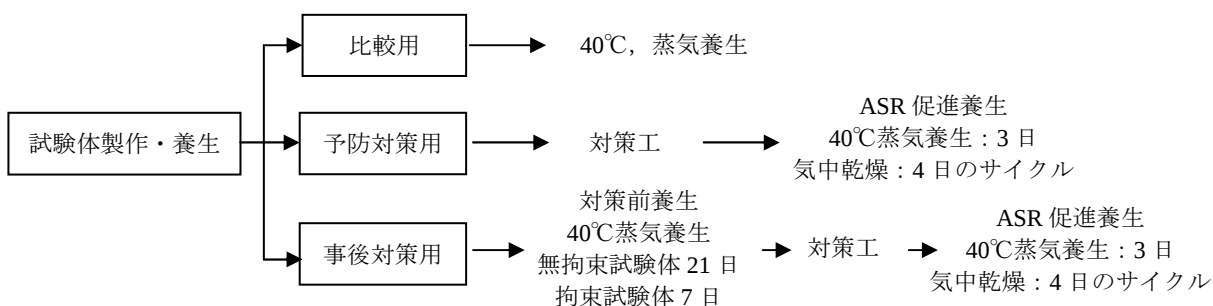


図-3 試験手順



a. テントの外観



b. 試験体設置状況



c. パイプヒーター

写真－2 促進養生の方法

透湿する性能をもつ表面含浸材、塗膜および防水透湿シートと、透湿がほぼ見込めない表面被覆の差を評価することを目的とした。比較用試験体は試験体製作・養生後、 $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ の蒸気養生で促進を継続した。

対策前後の ASR の促進養生は、写真－2 に示す専用のテントを用いて行った。テント内の壁・天井を断熱材で覆い、内部に煮沸式のパイプヒーターを設置して蒸気養生期間中は 40°C を下回ると作動するよう設定して所定の環境を維持した。

対策工の効果は促進養生期間中の試験体の膨張ひずみで評価した。無拘束供試体は中央に設置したコンクリートひずみ計を、拘束試験体は PC 鋼棒に設置したひずみゲージを 4 時間毎に計測した。

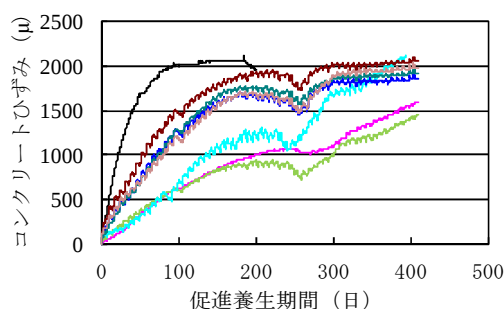
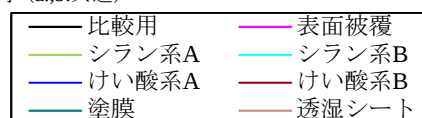
3. 実験結果および考察

3.1 試験体の膨張ひずみ

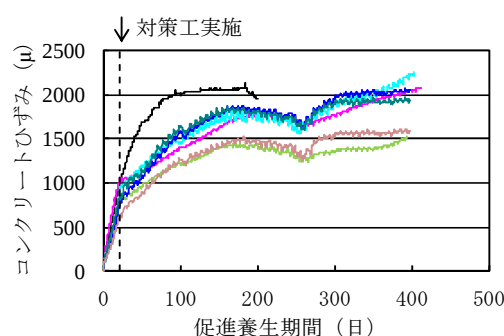
無拘束試験体に配置したコンクリートひずみ計により計測した各試験体の膨張ひずみを、予防対策と事後対策に分けて図－5 に示す。いずれのケースも各ケース 3 本の平均値を示した。無拘束供試体はコンクリートの線膨張係数を $10\mu/\text{C}$ と仮定して温度補正を行った。

無拘束の比較用試験体は 40°C の蒸気養生で促進養生を行ったが、期間 100 日で 2000μ の膨張ひずみが発生し、その後は収束した。予防対策を施した (図－5 a.) 無拘束試験体の中では、特に表面被覆とシラン系 A で膨張ひずみの増加速度が緩やかになっており、対策の効果が確認された。けい酸塩系表面含浸材、塗膜および防水透湿シートはそれらに比べて対策効果が顕著でなかった。シラン系 B も 100 日程度までは表面被覆やシラン系 A と同様のひずみの推移であったが、その後もひずみが増加し続け、400 日では他の工法と同等に 2000μ のひずみを示した。

凡例 (a.,b.共通)



a. 予防対策試験体



b. 事後対策試験体

図－5 無拘束試験体の膨張ひずみ計測結果

シラン系表面含浸材の効果の持続性に差があったものと考えられる。シラン系 A は表面からの含浸深さが大きいことを確認しており、ごく表面において撥水効果がなくなっても内部ではそれが維持されて、シラン系 B よりも水の浸透が抑制されたと推察している。

事後対策を行った試験体は蒸気養生による前養生を行った 21 日までは比較用とほぼ同様の膨張ひずみで推移し、対策後に膨張速度が小さくなる傾向を示した (図－5 b.)。対策工を行う前のひずみが同一ではないが、後述するように、工法により対策後の傾きが異なり表面被覆やシラン系表面含浸材では小さくなっていた。

ここで、予防対策、事後対策ともに促進期間 200 日を過ぎた時点から一旦収縮が生じていた。これは季節が春から夏に差しかかりテント内の温度が日によって 30°C 以上まで上昇したため、設置したパイプヒーターの稼働による水分の供給時間が短くなり、試験体がやや乾燥したことが原因と考えられた。そのため、 40°C での養生時にパイプヒーターでの加温とあわせてスプレーによる水の供給も行った。その後は膨張ひずみが回復する傾向を示している。

拘束試験体で測定した PC 鋼棒の引張りひずみを予防対策と事後対策に分けて図－6 に示す。拘束供試体につ

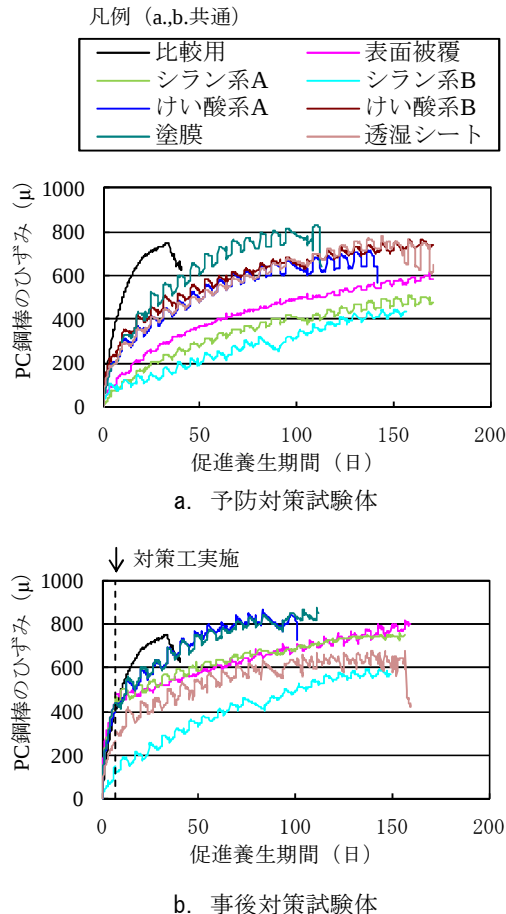


図-6 拘束試験体の膨張ひずみ計測結果

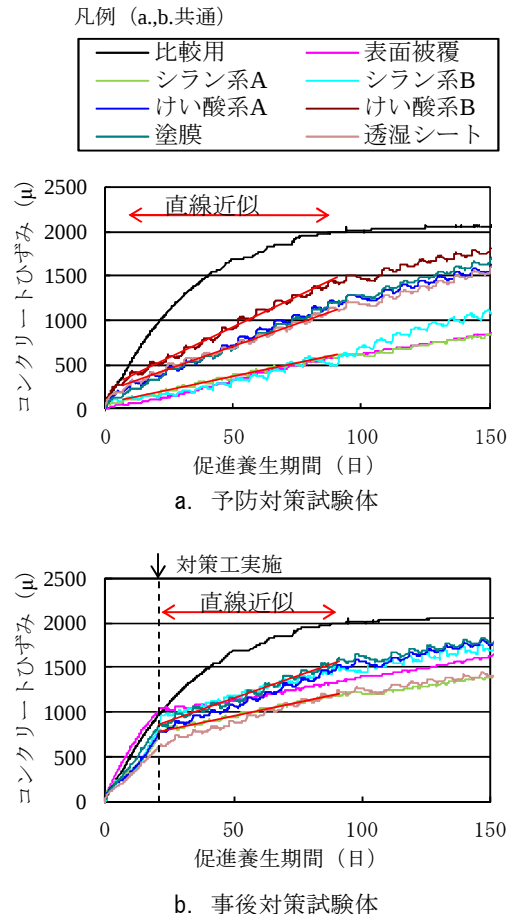


図-7 直線近似による膨張速度の算出

いては対策後の乾湿繰返しの温度変化によりひずみ計測値に凹凸が現れたが、試験体個々の温度が得られていないため温度補正は実施していない。膨張を拘束した比較用供試体は1ヶ月でPC鋼棒に750 μ の引張りひずみが発生した。その後はPC鋼棒とコンクリートの付着が切れて低下した。予防対策した拘束試験体においても無拘束試験体と同様に、表面被覆およびシラン系表面含浸材でひずみの増加速度が緩やかになっており、ASRによる膨張の抑制効果が高いことが示された。塗膜は40日、2種類のけい酸塩系表面含浸材と防水透湿シートは約70日程度でひずみが600 μ に達し、その後、700~800 μ で付着切れを生じた。

3.2 膨張速度による対策効果の評価

上述の試験データを膨張速度として定量化することで各対策効果の評価を試みた。図-7は無拘束試験体の試験結果(図-5)の横軸を拡大して示したものである。予防対策を施した供試体は7日から100日程度までのひずみは時間に対してほぼ一定の傾きで増加しており、図中赤線で示したように、この範囲では概ね直線による近似が可能であると考えられた。そこで、促進7日から91日の傾きを膨張速度として求めることで対策効果を比較した。事後対策供試体でも同様に21日で行った対策工以

降、直線的にひずみが増加する傾向であったため、21~91日における傾きを膨張速度として評価した。拘束供試体は7日で事後対策を行ったため、7~91日における傾きで評価した。

各種対策工の膨張速度を図-8に示す。予防対策と事後対策では同様の傾向がみられ、予防対策で効果があったものは事後対策においても良好な膨張抑制効果を示した。対策効果が特に高かったものはシラン系表面含浸材と表面被覆であり、その他の工法の半分程度の膨張速度に抑えられていた。参考として、比較用試験体は気中乾燥を行わず40℃の蒸気養生環境で促進したものである

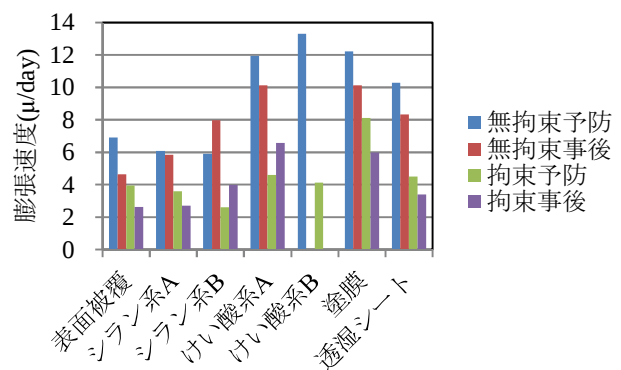


図-8 直線近似による膨張速度の算出

が、この膨張速度は無拘束試験体で $33\mu/\text{day}$ (7 日から 1500μ となる 40 日までを直線近似)、拘束試験体で $25\mu/\text{day}$ (7 日から 600μ となる 14 日までを直線近似) であった。これを基準として考えると、表面被覆とシラン系表面含浸材は予防・拘束試験体ともに、比較用の 20% 以下、その他の工法では概ね 30% 以上であった。

多くのケースでは事後対策のほうが予防対策よりも膨張速度が小さくなり、事後対策でも対策種類に応じた効果が得られる結果となった。シラン系 B やけい酸塩系 A の拘束試験体では事後対策のほうが膨張速度が大きくなっているがその原因は特定できなかった。

けい酸塩系表面含浸材は撥水作用をもたず、表面の組織を緻密化することで耐久性の向上を図るものであるが、顕著な効果は確認できなかった。塗膜は透湿性を有する新しいタイプの材料であったが、本研究では十分な効果が得られなかった。防水透湿シートはシートの端部から水分が浸入しないように細心の注意を払って施工したが、他の材料と比較すると施工がやや難しく、また優れた効果は得られなかった。

このように、一般的には表面含浸材よりも表面被覆のほうが防水性は優れると考えられるが、シラン系表面含浸材は表面被覆と同等と、予想された以上の効果が得られた。これは、防水効果では表面被覆に劣るものの、乾燥時にコンクリート中の水分を排出する効果が現れたためであると推察される。ただし、本実験ではコンクリートにはアルカリを練り込んでいるため、外部からのアルカリの浸透の抑制効果は考慮されていない。外部からのアルカリの遮断や、効果の持続性の問題などから、シラン系表面含浸材に表面被覆と同等の ASR の膨張抑制効果を求めるのは難しいとしても、費用対効果や使用場所を考慮すれば有用な対策となる可能性がある。

対策効果は、膨張ひずみが促進養生期間に対して直線的に増加する 7~100 日程度の膨張速度を指標として定量化できた。一方、図-5a に示したシラン系 B ように、100 日を超える長期において対策効果がなくなるケースも確認された。試験方法としてはできるだけ短期間で評価できるものが望ましいが、必要に応じて試験を継続することで効果の持続期間も評価可能と考えられた。

また、本研究では、対策後の ASR の促進養生を乾湿繰り返しとした。乾燥の工程を加えることにより水分の排出の効果もあわせて試験することができるため、単に高温の蒸気養生により促進試験するよりも対策工法の良否を判定する方法として有効であると考えられた。

4. まとめ

本研究は、良好な ASR 対策工を見出すことを目的として、反応性骨材とアルカリで膨張性を高めたコンクリー

トに対して表面被覆、表面含浸材 4 種類、塗膜、防水透湿シートの 7 種類の対策工を施した。対策後に促進養生を行いながら膨張ひずみを計測することにより各種対策工の ASR による膨張の抑制効果を評価した。得られた結果を以下に示す。

- 1) コンクリートひずみ計を埋設した無拘束試験体および、PC 鋼棒とアンカープレートで膨張を拘束した拘束試験体を用いた試験方法によって、対策工の種類による ASR の膨張挙動の差異を計測することができた。
- 2) 膨張曲線の一部を直線近似した膨張速度を用いることで、対策の効果を定量的に評価することが可能である。
- 3) 本実験の試験条件下では、予防対策と事後対策の両方で表面被覆およびシラン系表面含浸材が良好な膨張抑制効果を示した。表面被覆は水分の浸透を防止することにより、シラン系はそれに加えて乾燥時に水分を排出することにより効果が得られたと推察した。
- 4) 湿潤環境下の促進養生に乾燥工程を加えることにより、水分の浸透抑制だけでなく排出作用も含めて、対策効果の良否を検証することができる。

今後は本試験結果を参考に外部から供給されるアルカリの浸透抑制効果も含めて対策効果を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書、2008
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】、2012 年制定
- 3) 鳥居和之、池富修、久保善司、川村満紀：ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証、コンクリート工学論文集、Vol.23, No.2, pp.595~600, 2001
- 4) 長田光司、小野聖久、丸屋剛、池田尚治：アルカリ骨材反応で変状を起こしたコンクリート部材の耐震性能、コンクリート工学テクニカルレポート、Vol.44, No.3, pp.34-42, 2006.3
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書【維持管理編】、2007 年制定
- 6) 大脇 英司、宮原 茂禎、上東 泰、野島 昭二：促進膨張試験によるコンクリートコアのアルカリ骨材反応性の検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部、Vol.58, pp.137-138, 2003
- 7) 野島昭二、竈本武弘、宮原茂禎、丸屋剛：ASR を生じたコンクリート構造物の鉄筋ひずみとコアの残存膨張、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, No.2, pp.1267-1272, 2009