

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1050 June 2003

アルカリ骨材反応が発生したコンクリートに対する表面被覆の
適用性に関する実験的検討

濱田 秀 則

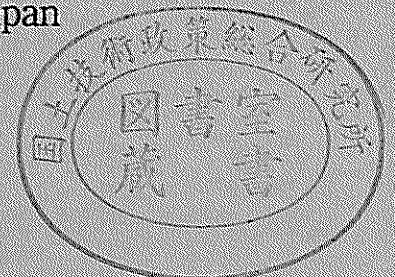
Tarek U. M

山路 徹

小牟禮 建 一

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. 序 論	4
2. 表面被覆による無筋コンクリートのASR膨張の抑制に関する実験	5
2.1 序節	5
2.2 実験方法	5
2.3 実験結果および考察	7
2.4 まとめ	12
3. 持続荷重およびASRの影響下にあるRCはりおよびRC柱の内部応力に及ぼす 表面被覆の効果に関する実験	13
3.1 序節	13
3.2 実験方法	13
3.3 実験結果および考察	16
3.4 結果の解析	19
3.5 まとめ	23
4. 結 論	23
謝 辞	23
参考文献	24
付録 A 本文に掲載していない実験データの補足	25
付録 B 反応性骨材の種類および我が国における分布の状況	28

An Experimental Study on Application of Surface Coating to ASR-occured Concrete

Hidenori HAMADA*
Tarek U. M.**
Toru YAMAJI***
Kenichi KOMURE****

Synopsis

It is more than 30 years since ASR (Alkali Silica Reaction) problem was recognized in Japan. In port and harbor structures, the first report on the ASR problem was issued as a PHRI technical note more than 10 years ago¹⁾. In the last decade, the concern to the ASR problem in the concrete engineering field was dissipated. However, in recent years, a serious real structures' damage due to ASR was newly found, and, the significance of the ASR problem is recognized again. The research work described in this report, is focused on the effectiveness of surface coating on the prevention of ASR reaction and expansion. The main objectives of this study are, 1) to check the effectiveness of surface coating on the expansion prevention for ASR affected concrete, and 2) to check the effectiveness of surface coating on the internal stress of ASR-affected RC beams and RC columns under sustained load. The main conclusions obtained in this study are as follows:

- 1) The ASR-affected concrete located under very severe wetting conditions in which concrete surface is always wetted, such as submerged or tidal zones, could not be thoroughly protected from expansion by surface coating.
- 2) The best surface coating material is varied depending on the environmental conditions. Therefore, the choice of coating material should be based on these conditions.
- 3) Under mild wetting conditions in which concrete surface is exposed to wetting and drying, surface coating can protect concrete from ASR reaction and expansion.
- 4) Surface coating effects can be obtained when concrete is coated before the initiation of ASR reaction and expansion.
- 5) Surface coating effects can be obtained when all area of concrete surface is coated.

Key Words: Alkali-aggregate reaction, surface coating, concrete expansion, expansion prevention, internal stress

* Chief of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Researcher (Senior) of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Researcher of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
**** Trainee of Material Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
Originally from SHO-BOND Corporation
3-1-1, Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5061 Fax : +81-46-844-0255 e-mail : hamada@pari.go.jp

アルカリ骨材反応が発生したコンクリートに対する 表面被覆の適用性に関する実験的検討

濱田 秀則*
Tarek U. M. **
山路 徹***
小牟禮建一****

要 旨

アルカリ骨材反応（以後、本文においては ASR と称する）に関する問題は、我が国においても発生後既に 30 年程度が経過した。港湾構造物においても、約 10 数年前に実構造物における発生事例を報告した¹⁾。その後、ASR の問題は港湾分野のみならずコンクリート工学分野全体においても鎮静化した感がある。しかし、近年、新たに ASR による構造物の被害事例が報告されるに至り、その問題の重要性が改めて認識されてきた。すなわち、ASR の問題は必ずしも十分に解決されている訳ではないのである。

本研究は、ASR が発生しているコンクリートに対して表面被覆を施した場合の反応抑制効果を検討したものである。本研究は以下の二つの項目で構成されている。一つは、表面被覆による無筋コンクリートの膨張抑制に関する実験であり、もう一つは、持続荷重下における RC はりおよび RC 柱の内部応力に及ぼす表面被覆の効果に関する実験である。

上記の二つのシリーズの実験結果を総合的に考察し、以下の結論を得ることができた。

- 1) 海中中部、干満部あるいは波浪の影響を常時受ける飛沫部のように、常にコンクリート表面が湿潤状態にあるような環境下においては、表面被覆により ASR の反応および膨張を十分に抑制することは困難である。
- 2) 異なる材料により構成される塗膜はその物性が各々異なるため、その効果を十分に得るためには、施工環境、暴露環境に適した材料の選定を行うことが極めて重要である。
- 3) コンクリート表面が海水に接する環境であっても、海中中部あるいは干満部のように常に湿潤状態にある環境以外の場合、表面被覆により ASR の反応および膨張を抑制することは可能である。
- 4) 表面被覆の効果を最大限に得るためには、ASR の反応および膨張が開始される前に被覆を施すことが重要である。
- 5) 表面被覆を実施する際には、コンクリート表面の一部でも開放部分が存在すると被覆の効果は大きく低下する。

キーワード：アルカリ骨材反応，表面被覆，コンクリート膨張，膨張抑制，内部応力

* 地盤・構造部材料研究室 室長

** 地盤・構造部材料研究室 研究官（シニア）

*** 地盤・構造部材料研究室 研究官

**** 地盤・構造部材料研究室 研修生（ショーボンド建設株式会社）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail：hamada@pari.go.jp

1. 序 論

アルカリ骨材反応（本文においては以後 ASR と称する）に関する問題は、我が国においても発生後既に 30 年程度が経過した。港湾構造物においても、約 10 数年前に実構造物における発生事例を報告した¹⁾。その後、しばらくの間、ASR の問題は港湾分野のみならずコンクリート工学の分野全体においても鎮静化した。しかし、近年、新たに実構造物の被害事例が報告されるに至り、その問題の重要性が改めて認識された。

港湾空港技術研究所における ASR に関する研究の流れを図-1 に示す。1990 年に広島港および苅田港において実構造物の調査を行い、港湾構造物における ASR の被害を確認した¹⁾。その後、ASR に対する関心は鎮静化したものの、近年、新たに ASR による実構造物の被害事例が報告されるに至り、改めて研究課題として浮上するに至った。2000 年に岩波らは、ASR が発生した RC 部材の力学特性および補強工法に関する実験的検討を行い、1)ASR が発生した RC 部材においては破壊過程および破壊形態が異なってくることを、塑性変形性能やエネルギー吸収性能が低下すること、2)ASR により損傷した RC 部材に対して、PC 巻立て補強が有効であること、等を示した²⁾。

一方、著者らは ASR による膨張が生じた RC 部材の鉄

筋ひずみおよびコンクリートひずみの特性に関する実験、ならびに ASR が発生したコンクリートに対する補修方法としての表面被覆の効果について、実験的に検討を行っている。前者の結果については、間もなく港湾空港技術研究所報告として取りまとめる予定であり³⁾、本報告では、後者の表面被覆の効果に関する実験的検討の結果を取りまとめるものである。最終的には、図-1 に示すように、「ASR が発生した港湾コンクリート構造物に対する技術的対応の体系化」を行う予定である。

本文で述べる実験は2つのシリーズに分かれている。一つは、2. で述べる「表面被覆による無筋コンクリートの ASR 膨張の抑制に関する実験」である。このシリーズにおいては、数種類の異なる塗装を施した無筋コンクリート供試体（10×10×40cm 角柱形）の高温海水噴霧、高温清水噴霧、常温水中養生を行い、その時の膨張性状を試験した。その結果に基づき、ASR による膨張抑制対策としての表面被覆の効果を検討した。なお、本試験ではコンクリートの置かれる環境として、海中部、干満帯、あるいは地下水中といった常に湿潤状態にある環境を想定した。二つ目は、3. で述べる「持続荷重および ASR の影響下にある RC はりおよび RC 柱の内部応力に及ぼす表面被覆の効果に関する実験」である。このシリーズにおいては、表面被覆を施し、かつ持続荷重の状態にある RC 供試体の内部応力の経時変化を求め、表面被覆の効果を生

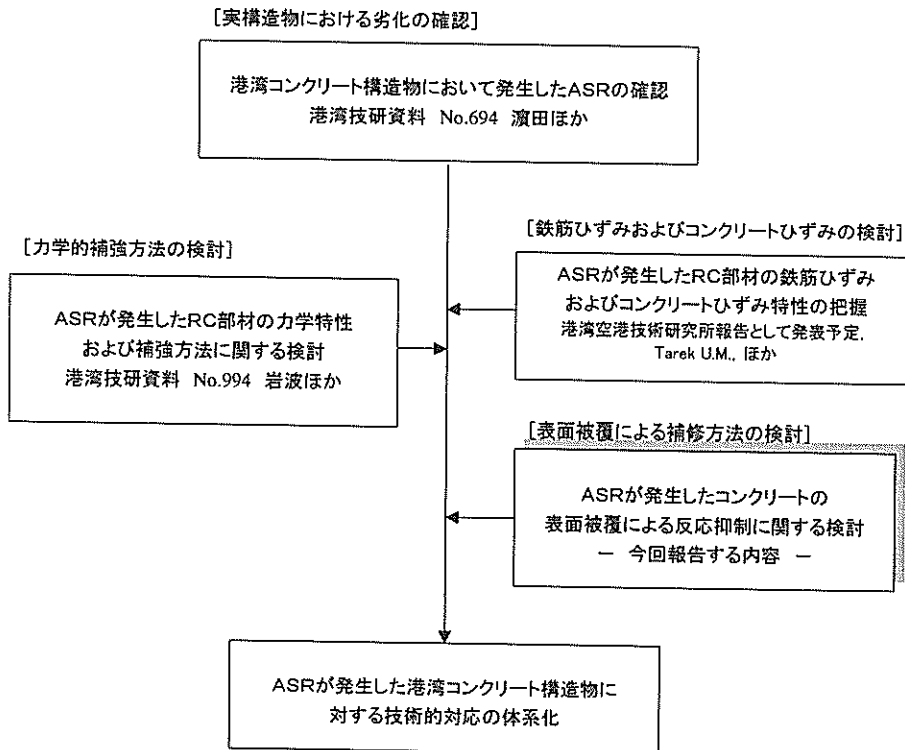


図-1 港湾空港技術研究所における ASR に関する研究の流れ

部応力の観点から考察した。本試験で対象としている環境は、コンクリート表面がある程度湿潤状態にあるものの、常に水中に没している環境に比べると、幾分乾燥しているような環境である。この2つのシリーズの実験結果を総合して、ASRに対する表面被覆の効果を考察するものである。

2. 表面被覆による無筋コンクリートのASR膨張の抑制に関する実験

2.1 序 節

ASRにより劣化したコンクリート、あるいは劣化が予想されるコンクリートの補修方法あるいは膨張抑制方法として、コンクリートの表面を何らかの材料により被覆し、コンクリート中への水分の浸透を防止する方法がある。表面被覆工法の実構造物への適用も徐々に増えつつある。しかし、この種の施工例は、陸上構造物の場合が大半であり、港湾構造物のような海洋環境下における構造物に対しての適用事例はまだ少ない。それは、海洋環境の場合、コンクリートの表面被覆を実施するに際して以下に示すようないくつかの問題点が生じるためである。すなわち、①コンクリートが乾燥している状態での施工が難しい、②表面被覆の施工の前後を通じて構造物は絶えず海水に曝されている、③条件次第では構造物は常に海水に浸っている、といった問題点である。本実験では、主に港湾構造物を念頭において、表面被覆を施した反応性骨材含有コンクリートが、海洋環境下、特に海中部あるいは干満部のような湿潤条件の厳しい環境下においてどのような性状を示すのかを把握することを目的に、供試体による実験的検討を実施した。本章においては、その試験結果をとりまとめ、反応性骨材含有コンクリートに表面被覆を施すことの効果に関して考察を行う。

2.2 実験方法

(1) 概要

本実験は、供試体による実験的検討である。数種の異なる要因で製作した供試体を3つの異なる環境に暴露し、その性状の変化を調べた。実験の要因と水準を表-1に示す。

(2) 供試体

a) コンクリートの使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント、練混ぜ水は水道水を使用した。反応性細骨材として山形県産安山岩砕砂（密度 2.64g/cm^3 、F.M.2.88）を、また反応性粗骨材として同県産安山岩砕石（密度 2.71g/cm^3 ）を使用した。非反応性細骨材として神奈川県産川砂（密度 2.46g/cm^3 、F.M.2.89）を、非反応性粗骨材として、山梨県産安山岩砕石（密度 2.70g/cm^3 ）を使用した。使用に先立ち、反応性骨材に対しては、潜在反応性試験（JIS A 5308-化学法）を実施し、粗骨材、細骨材ともに「無害ではない（有害）」領域に属し、両骨材ともに反応性を有することを確認した。コンクリートの配合を表-2に示す。反応性骨材を使用した場合と非反応性骨材を使用した場合と同一の配合とした。

b) アルカリ量の調整

使用セメントのアルカリ量は等価 Na_2O 換算で0.47%である。ASRを促進させるために、練混ぜ水に NaOH を添加し、コンクリート中のアルカリ量を1.5%（ Na_2O 換算）に調整した。

c) コンクリートの初期養生および初期膨張量

材齢1日で脱型した後、非反応性骨材含有コンクリートについては $20\pm 3^\circ\text{C}$ の常温水中養生を行い、反応性骨材含有コンクリートについては、 40°C の高温高湿養生を行った。初期養生期間が1ヶ月を経過した時点で、反応性骨材含有コンクリートの膨張率が0.05%に達したため、その時点で初期養生を打ち切り、塗装を実施した。

d) 塗装材料および仕様

塗装材料の選定に際しては、市販の対ASR用塗装材料の中から、比較の実績がありかつ将来的に継続使用が可

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
表面被覆材料	5種類
骨材種類	反応性、非反応性
被覆時のコンクリートの表面含水量	$5\pm 2\%$ 、 $10\pm 2\%$
供試体暴露（養生）環境	高温海水噴霧（ 60°C ） 高温清水噴霧（ 60°C ） 常温水中養生（ 20°C ）

表-2 コンクリートの配合

G_{\max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				F_c' (N/mm^2)
					W	C	S	G	
20	10 ± 2	2 ± 1	45	40	230	450	692	1062	42

能と思われる材料を選定した。表-3に塗装材料および塗装仕様を示す。これらの仕様はいずれも塗装材料製造者の定める標準仕様である。また、塗装仕様4番においては、当時としては比較的新しい材料であるフッ素樹脂が上塗り材として使用されている。なお、塗装作業は塗装材製造者の擁する専門の作業員が実施した。

e) 塗装時のコンクリート表面の含水量

表-1に示すとおり、塗装を実施する際のコンクリート表面の含水量として2水準（高含水量水準として $10 \pm 2\%$ 、低含水量水準として $5 \pm 2\%$ ）を設定した。コンクリート表面の含水量の測定は、モルタル乾燥度計（ケット化学研究社製）を用いて行った。

(3) 供試体の暴露環境

表-1に示すとおり、供試体の暴露環境として3水準を設定した。高温海水噴霧とは 60°C に熱せられた海水が絶えず供試体にスプレーされる環境であり、高温清水噴霧とは 60°C の水道水が絶えず供試体にスプレーされる環境である。これに対して、常温水中養生は 20°C の水道水中に継続的に浸せざるものである。このような環境下で約2年間強、暴露試験を継続した。

(4) 暴露期間中に実施した試験

a) 物理的試験（長さ変化、質量変化、超音波伝播速度）

高温噴霧室から供試体運び出し、 20°C 、60%R.H.の恒温恒湿室に24時間静置した後に、各種の計測を実施した。長さ変化の測定には2ダイヤルゲージ式の水平型コンパレータを用いた。供試体の質量の測定は、水平台ばかりを使用し、最小0.1g単位まで読み取った。超音波伝播速度の測定は、供試体の長手方向の両端に測定端子を押し当てた状態で超音波伝播時間を測定した。超音波伝播時間の測定値は幾分ばらつく傾向があったが、測定時に示す最小伝播時間（最大伝播速度）を読み取った。

表-3 塗装材料および塗装仕様

番号	工程	使用材料	塗装回数	使用量(kg/m ²)
1	下塗り	シラン系浸透剤	2	0.3
	中塗り	アクリル系ポリマーセメント	1	1.5
	上塗り	シリカ変性アクリル樹脂	1	0.1
	"	シリコンエマルジョン	1	1.0
	"	シリカ変性ウレタン樹脂	1	0.25
2	下塗り	シリコン変性ウレタン樹脂	2	0.3
	下地処理	ポリマーセメント	1	1.5
	プライマー	エポキシ樹脂	1	0.2
	中塗り	アクリルゴム	2	2.0
	上塗り	アクリルウレタン樹脂	2	0.3
3	下塗り	亜硝酸塩スチレンブタジエン共重合体樹脂	1	11.3
	中塗り	エポキシ樹脂	1	0.25
	上塗り	アクリルシリコン樹脂	2	0.25
4	下地処理	エポキシ樹脂パテ	1	0.3
	下塗り	エポキシ樹脂プライマー	1	0.2
5	上塗り	フッ素樹脂	2	0.3
	下地処理	エポキシ樹脂パテ	1	0.3
	下塗り	エポキシ樹脂プライマー	1	0.15
	上塗り	アクリルシリコン樹脂	2	0.3

b) 塗膜の外観観察

観察に先立ち、供試体表面を湿った布で拭き、軽度の付着物を落とした。その後、目視により塗膜表面の変状をチェックし、写真撮影を行った。

c) 塗膜中に溜まっている溶液の分析

塗膜が膨れている部分に溜まっている溶液のCaおよびClの定量分析を実施した。まず初めに、塗膜の膨れ箇所から外部から注射針を差し込み溶液を抜き取った。カルシウムについてはICP（Inductivity Coupled Plasma）により、また塩化物イオンについてはイオンクロマトグラフィーにより定量分析を実施した。

d) 塗膜の剥離箇所の顕微鏡観察

一部の供試体において塗膜に剥離が生じていた。この剥離の箇所（何層目と何層目の間）を特定するために、剥離している箇所を鋭利なカッターナイフで切り出し、実体顕微鏡による断面の観察を行った。

e) コンクリート中への塩化物イオンの浸入状況

図-2に示すように、供試体の中央部より、 $50 \times 50 \times 10\text{mm}$ の平板試料を切り出し、塩化物イオンのEPMA面分析を実施した。

(5) 暴露終了後に実施した試験

a) 圧縮強度試験

試験方法の概要を図-3に示す。図に示すように4分割した試験片のうち中央部の二片を用いて、圧縮強度試験を行った。試験は、JIS A 1108に準じた。なお、荷荷はディスクグラインダーを用いて塗膜を除去し、コンクリートを露出させた面に対して行った。

b) 塗膜の付着強度試験

付着強度試験を実施した位置を同じく図-3に示す。図に示すように、4分割した試験片のうちの端部の二片を用いた。測定は、JIS A 6910に準じて行った。まず初めに、塗膜表面に 40mm 四方の大きさの、コンクリートに至るまでの切り込みを導入し、この箇所と同寸法（ $40 \times 40\text{mm}$ ）の接着板を樹脂系接着剤により接着した。接着剤の硬化後、接着板を鉛直に引き上げた。破断時の荷重を接着面積で除して付着強度とした。また、同時に目視観察を行い、破断箇所の特定を行った。

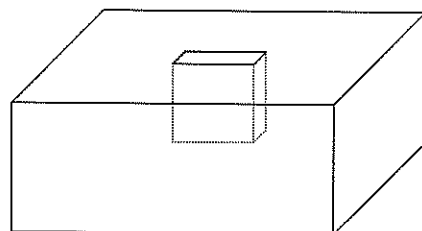


図-2 EPMA 面分析用試料の採取

2.3 実験結果

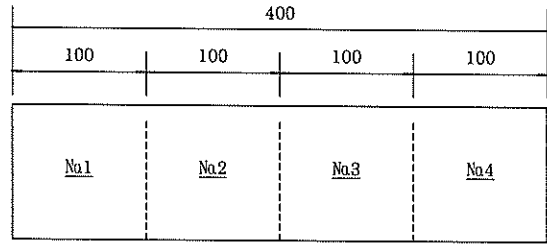
(1) 暴露期間中の長さ変化

a) 無塗装供試体の長さ変化

図-4に無塗装供試体の長さ変化を示す。高温海水噴霧、高温清水噴霧ともに極めて初期に膨張が進行しているのが特徴である。また、高温海水噴霧と高温清水噴霧で膨張特性はほぼ等しく、海水の影響は特に認められない。一方、常温水中養生の場合、高温海水噴霧と高温清水噴霧と比較して膨張の進行速度は小さいが、最終膨張量は両者とほぼ等しくなる。このように高温環境下に置くことにより、反応速度を高める結果となったが、最終的な膨張量を増大させる効果は有しない結果となった。

b) 塗装供試体の長さ変化

図-5～図-7に、塗装時の表面水分量が5%の場合の、反応性骨材が使用された塗装供試体の長さ変化を示す。高温海水噴霧と高温清水噴霧の場合、必ずしも塗装により膨張が抑制されている訳ではない。暴露開始初期は、無塗装供試体の膨張が先行するが、最終的には塗装供試体



No.1, 4 : 塗膜の付着強度試験
No.2, 3 : 圧縮強度試験、静弾性係数試験

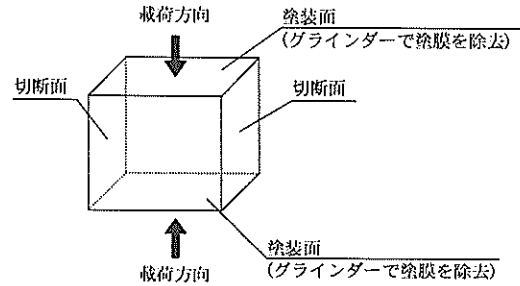


図-3 切断後供試体の用途および圧縮強度試験、静弾性係数試験概要

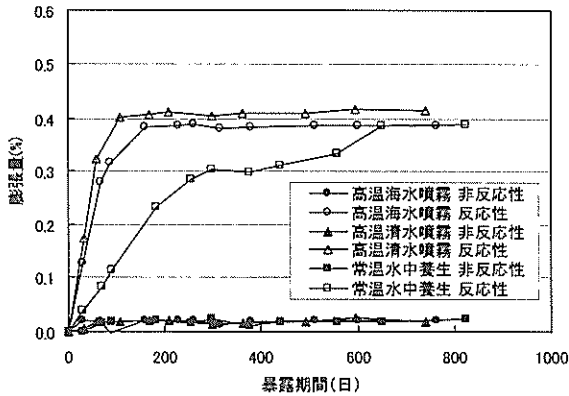


図-4 無塗装供試体の長さ変化

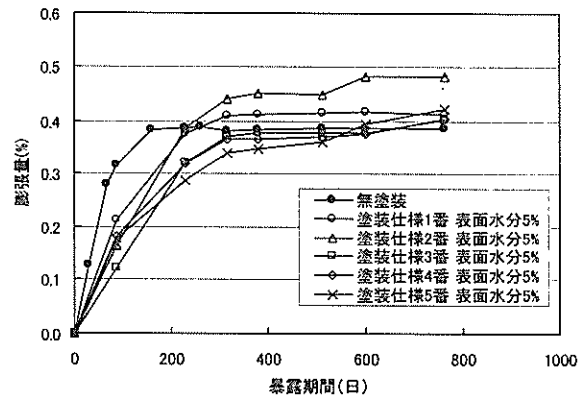


図-5 塗装供試体の長さ変化
(反応性・表面水分5%・高温海水噴霧)

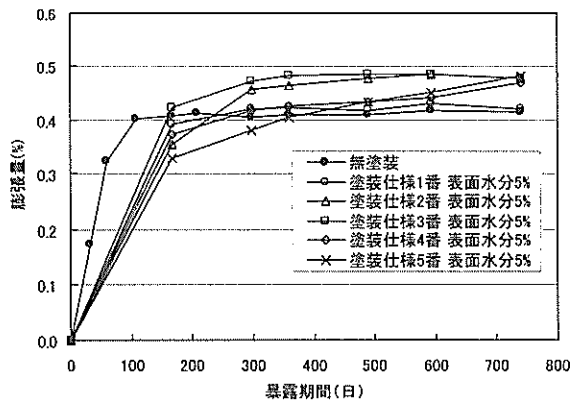


図-6 塗装供試体の長さ変化
(反応性・表面水分5%・高温清水噴霧)

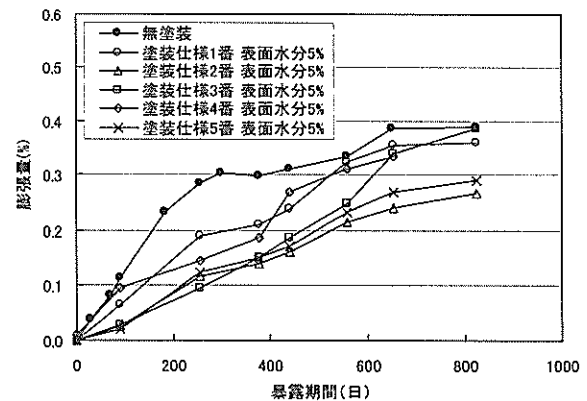


図-7 塗装供試体の長さ変化
(反応性・表面水分5%・水中養生)

も同等の膨張量に達する。

常温水中養生の場合には、高温海水噴霧や高温清水噴霧に比べて膨張の進行速度は遅いものの、やはり膨張を抑制することはできなかった。

巻末の付図-A. 1～付図-A. 5に、塗装供試体の長さ変化に関する全データを示す。塗装仕様1番から5番のすべての場合において、塗装時の含水率10%の方が5%よりも最終膨張量は大きくなる傾向にある。これより、表面被覆の効果をより確実なものとするために、塗装時のコンクリート表面は可能な限り乾燥させておく方が望ましいと言える。しかし、いずれの暴露をした場合でも、塗装により完全に膨張を抑制することは困難と考えられる。

(2) 暴露期間中の質量変化

a) 無塗装供試体の質量変化

図-8に無塗装供試体の質量変化を示す。高温海水噴霧、高温清水噴霧および常温水中養生の相違の影響、また、非反応性と反応性の骨材の相違による影響もほとんど認められない。いずれの供試体の場合も、最終的には1.5～

1.8%の質量増加を示す。供試体の質量が10kg程度であることから、質量増加量は150g程度にもなる。しかも、供試体の質量増加は暴露開始後、極めて短期間のうちに進んでいる。

図-9に無塗装供試体の場合の膨張量と質量変化率の関

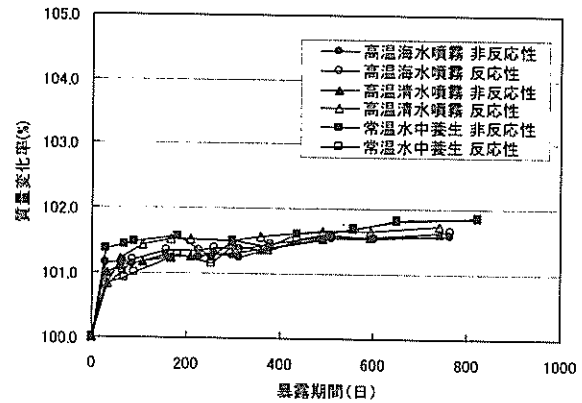


図-8 無塗装供試体の質量変化

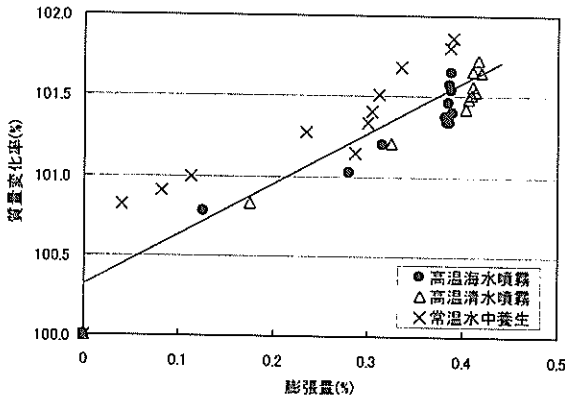


図-9 無塗装供試体の膨張量と質量変化率の関係

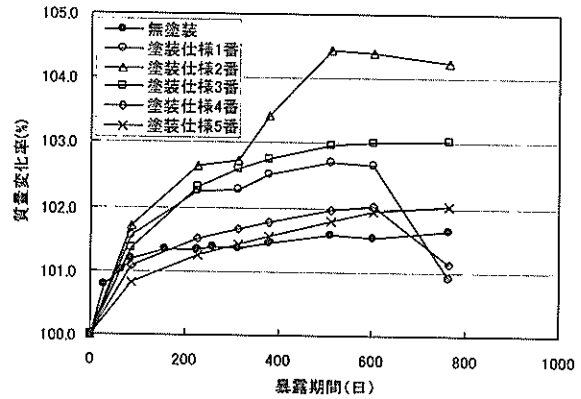


図-10 塗装供試体の質量変化 (反応性・表面水分5%・高温海水噴霧)

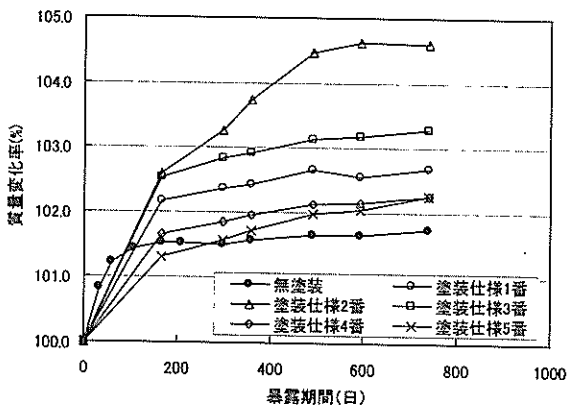


図-11 塗装供試体の質量変化 (反応性・表面水分5%・高温清水噴霧)

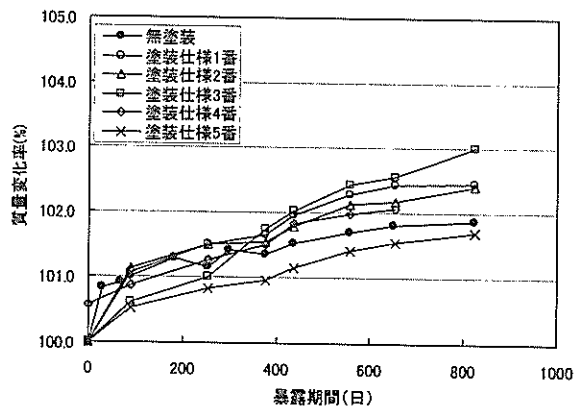


図-12 塗装供試体の質量変化 (反応性・表面水分5%・常温水中養生)

係を示す。図よりわかるとおり、両者にはほぼ明確な関係が存在することから、供試体の吸水量が多くなるほど、膨張量も大きくなると言える。

b) 塗装供試体の質量変化

図-10～図-12に、塗装時の表面水分量が5%の場合の、反応性骨材が使用された塗装供試体の質量変化を示す。高温海水噴霧と高温清水噴霧はほぼ同様の傾向を示している。すなわち、塗装仕様2番と3番の場合に質量増がかなり大きい。これは、塗膜自体の吸水量がかなり大きいためと思われる。無塗装供試体に比べて、塗装供試体において質量増加率が大きくなっていることから、今回用いた材料による塗膜の遮水効果は小さいと判断される。

塗装仕様1番から5番までを比較してみると、仕様4番と5番において質量増加率が比較的小さい。常温水中養生の場合、高温海水噴霧および高温清水噴霧に比べると、質量増加率が幾分小さい。また、高温海水噴霧および高温清水噴霧において見られた、塗装仕様2番の質量増の傾向は、常温水中養生においては認められない。これより、

高温高湿環境の場合に、塗装仕様2番が大幅な吸水性を示すものと考えられる。すなわち、高温高湿環境が想定される場合には、塗装仕様2番の使用は好ましくないと言える。

(3) 暴露期間中の超音波伝播速度

a) 無塗装供試体の超音波伝播速度

図-13に無塗装供試体の超音波伝播速度を示す。長さ変化や質量変化に比べると、データが比較的大きくばらついている。これは、超音波伝播速度の計測精度によるものであり、今回の計測データによると、±5%程度の誤差は常時生じうるものと思われる。ASRによるひびわれが発生している供試体の場合でも、超音波伝播速度の低下はほとんど認められないことから、ASRによるひび割れの影響はコンクリートの表層部に限定され、コンクリート内部の劣化はさほど大きくないものと考えられる。

b) 塗装供試体の超音波伝播速度

図-14～図-16に塗装供試体の超音波伝播速度の計測結果を示す。図よりわかるように、いずれの環境の場合も

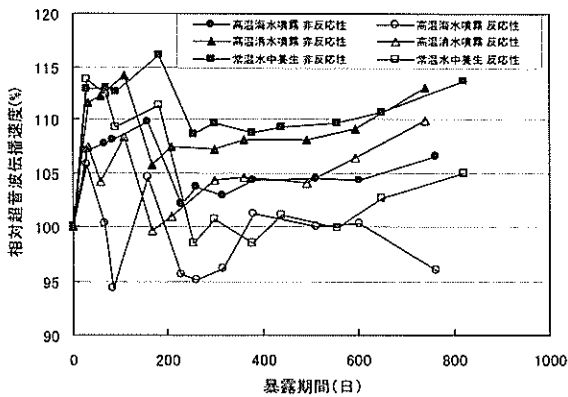


図-13 無塗装供試体の超音波伝播速度

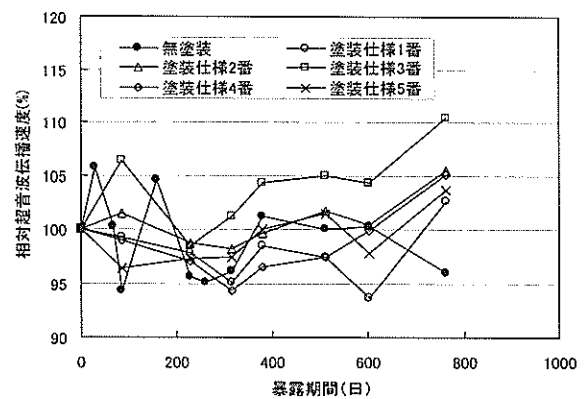


図-14 塗装供試体の超音波伝播速度
(反応性・表面水分5%・高温海水噴霧)

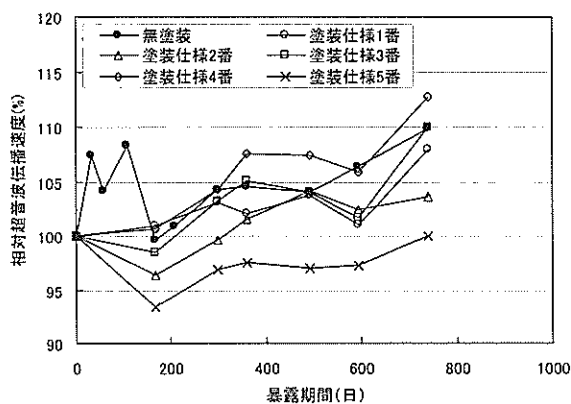


図-15 塗装供試体の超音波伝播速度
(反応性・表面水分5%・高温清水噴霧)

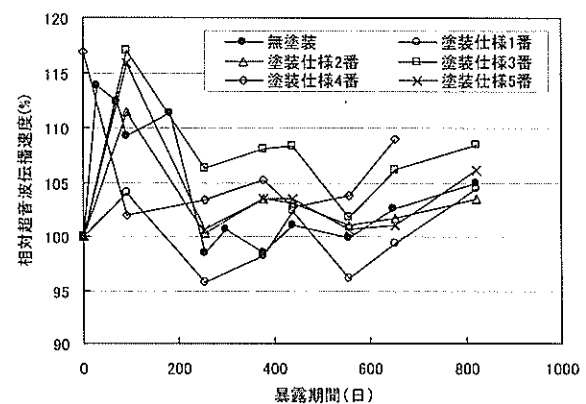


図-16 塗装供試体の超音波伝播速度
(反応性・表面水分5%・常温水中養生)

比較的ばらついているものの、超音波伝播速度に大きな低下の傾向は見られない。これより、塗装供試体の場合でも、ASRによるひび割れは供試体内部には及んでいないものと思われる。

(4) 塗膜の外観観察

ほぼ1年間の暴露が経過した時点で、一部の塗膜に表-4に示すような変状が確認された。写真-1に塗膜の膨れの一例を示す。これは塗膜中に水分が溜まっているためと考えられた。写真-2に塗膜の割れの一例を示す。塗膜表面の付着物による汚れは、海水噴霧の場合に特に顕著であった。

(5) 塗膜中に溜まっている溶液の分析

表-5に分析結果を示す。いずれの場合も塩化物イオン(Cl⁻)の濃度が低いのが特徴であり、一部の溶液(特に常温水中養生供試体)でCa濃度がかなり高いという特徴も認められる。これより、少なくとも塗膜外部からの塩化物イオンの浸入は遮断されていることが推察され、また、高濃度のCaはコンクリート中より移動してきたものであると考えられる。塗膜間における溶液貯留のメカニズムは現時点では明確に説明することはできない。

(6) 塗膜の剥離箇所の顕微鏡観察

写真-3に剥離箇所の顕微鏡観察の一例を示す。塗膜の剥離はいずれの場合も上層部(上塗り部)と中間層(中塗り部)の間において生じていた。また、先に述べた塗膜中の溶液の貯留はこの剥離部において生じていた。

(7) コンクリート中への塩化物イオンの浸入状況

写真-4および写真-5にEPMAの面分析の結果を示す。写真はいずれも上部がコンクリート表面である。無塗装供試体の場合、表面から約2.5cmの深さまで塩分が浸透している。一方、塗装供試体の場合、表面近傍(数mm以内)に塩化物イオンが集積している部分があるが、極めて低濃度である。これより、表面被覆を施すことにより、コンクリート中への塩化物イオンの浸入が抑制されていることがわかる。ただし、海水の浸透は生じていることから、塗膜は塩化物イオンの侵入のみを抑制していると考えられる。

表-4 塗膜の変状とその有無(暴露1年)

塗装仕様	変状の種類		
	塗膜の膨れ	塗膜表面の汚れ	塗膜表面の割れ
1	あり	あり	—
2	あり	あり	—
3	—	—	あり
4	—	あり	—
5	—	—	—

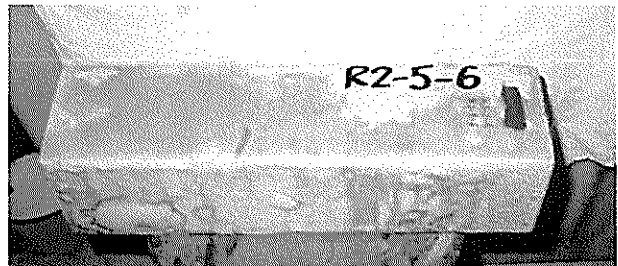


写真-1 塗膜に生じた膨れの例(塗装仕様2番)

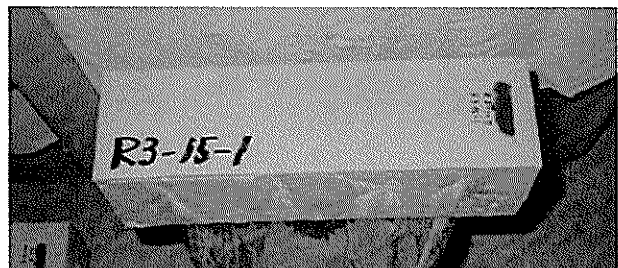


写真-2 塗膜に生じた割れの例(塗装仕様3番)

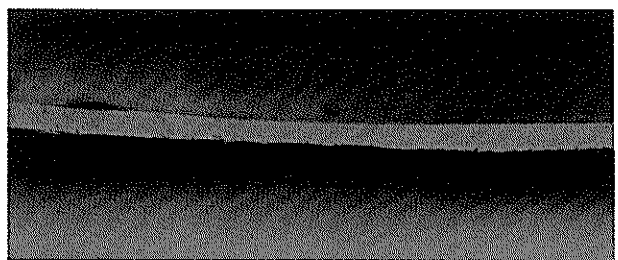


写真-3 はく離した塗膜の断面(塗装仕様2番)

表-5 塗膜中溶液のCl⁻, Caの定量分析

		Cl ⁻ (mg/l)			Ca(mg/l)		
		海水噴霧	清水噴霧	水中養生	海水噴霧	清水噴霧	水中養生
塗装材 1	非反応性	53	9	11	10	10	
塗装材 2	非反応性	798	52	252	770	1800	7300
	反応性	79	89	242	780	310	6200

海水の標準値: Cl⁻ = 17000mg/l, Ca = 350mg/l

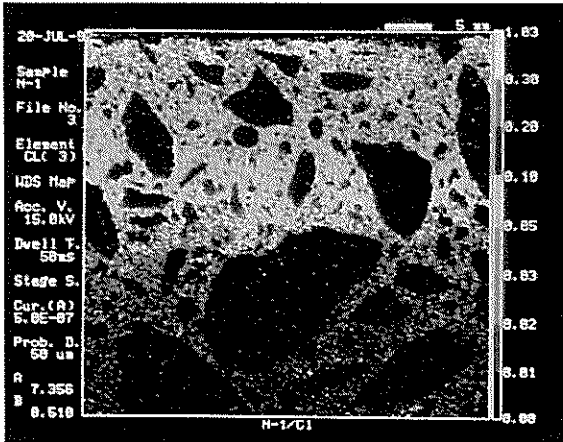


写真-4 無塗装供試体の EPMA 分析写真

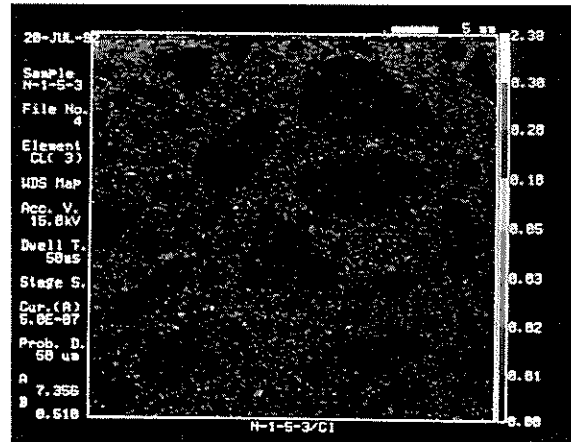


写真-5 塗装供試体の EPMA 分析写真

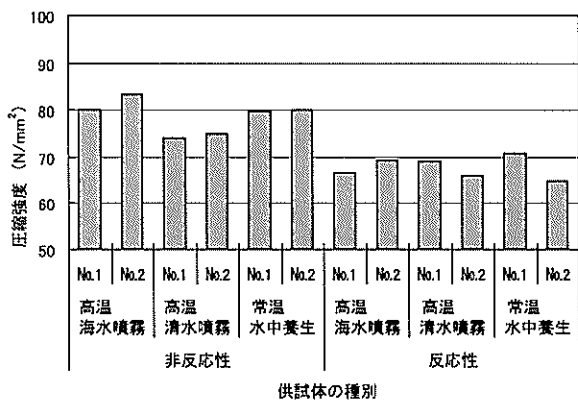


図-17 無塗装供試体の圧縮強度 (暴露終了後)

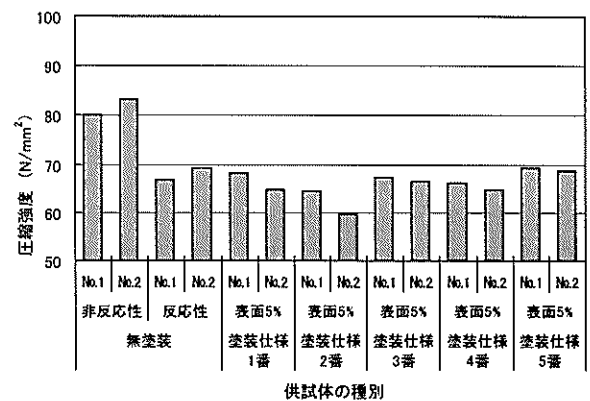


図-18 塗装供試体の圧縮強度 (反応性・表面水分 5%・高温海水噴霧)

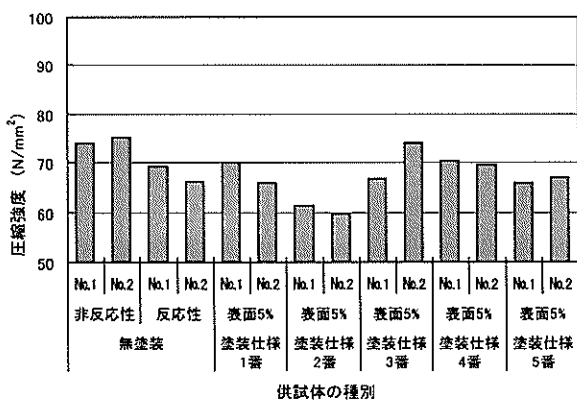


図-19 塗装供試体の圧縮強度 (反応性・表面水分 5%・高温清水噴霧)

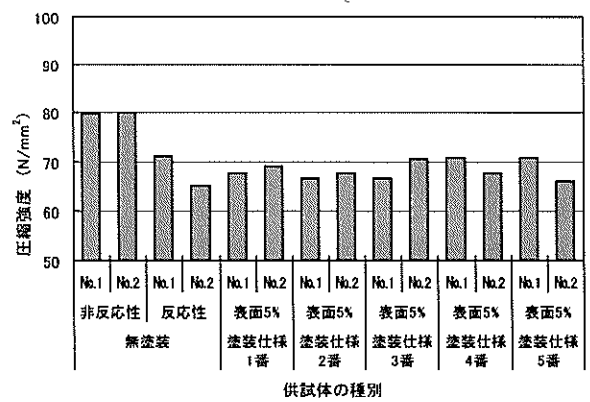


図-20 塗装供試体の圧縮強度 (反応性・表面水分 5%・常温水中養生)

(8) 暴露終了後の圧縮強度

a) 無塗装供試体

図-17に暴露終了後の無塗装供試体の圧縮強度を示す。反応性と非反応性とを比べると、明らかに反応性の方が強度は低下している。しかし、反応性の場合でも、60N/mm²

以上の強度を残しており、大幅に低下している訳ではない。非反応性の場合、高温清水噴霧の供試体において幾分強度が低くなる傾向を示すが、反応性の場合はそのような傾向は見られない。このことから、ASRによるひび割れは供試体の比較的表層部においてのみ生じている

が、供試体の内部は十分な強度を残しているものと考えられる。

b) 塗装供試体

図-18～図-20に反応性骨材が使用され、表面水分が5%の場合の、暴露終了後の塗装供試体の圧縮強度を示す。塗装を施した場合でも、非反応性に比べると反応性の方が幾分強度は低くなるが、大幅な強度低下ではない。このことから、ASRによるひび割れは供試体の表層部において発生しており、内部は比較的健全な状態にあると考えられる。

巻末の付図-A. 6～付図-A. 10に圧縮強度の全データを示す。塗装時の表面含水率の影響を見てみると、塗装仕様1番において5%の方が10%に比べて圧縮強度が低くなる傾向を示す。しかし、その他の塗装仕様2番～5番においては、5%と10%で大きな相違は見られず、ほぼ同等の圧縮強度となっている。塗装時のコンクリートの含水率は、コンクリートの圧縮強度に対してほとんど影響を及ぼしていないと言える。

(9) 暴露試験終了後の塗膜の付着強度

図-21～図-23に反応性骨材が使用され、表面水分が5%の場合の、暴露終了後の塗膜の付着強度を示す。また、巻末の付図-A. 11～付図-A. 15に各塗膜の付着強度の全データを示す。高温海水噴霧、高温清水噴霧、常温水中養生すべてにおいて付着強度そのものは十分な値を保持している。以下、塗装仕様ごとに考察する。

塗装仕様1番（付図-A. 11）の場合、高温海水噴霧と高温清水噴霧の場合に、塗装時の表面含水率5%と10%の差が認められ、10%の方が値がわずかに低くなる傾向にある。

塗装仕様2番（付図-A. 12）の場合、高温海水噴霧において、高温清水噴霧および常温水中養生よりも付着強度が幾分低くなる傾向にある。また、常温水中養生の場合は、明らかに反応性の方が非反応性に比べて付着強度が低くなる傾向を示す。

塗装仕様3番（付図-A. 13）の場合、高温海水噴霧、高温清水噴霧に比較して、常温水中養生の付着強度の方が低い傾向にある。この傾向は塗装仕様3番のみに見られるものである。また、塗装時の表面含水率が5%と10%の差が明確に出ており、10%の方が明らかに低下している。

塗装仕様4番（付図-A. 14）の場合、非反応性に比べて反応性の方が付着強度は低下している。また、塗装時の表面含水率が5%と10%の差が明確に出ており、10%の方が明らかに低下する傾向にある。

塗装仕様5番（付図-A. 15）の場合、高温海水噴霧、高温清水噴霧に比べて明らかに常温水中養生の方が付着強度は低下している。また、非反応性と反応性を比較して

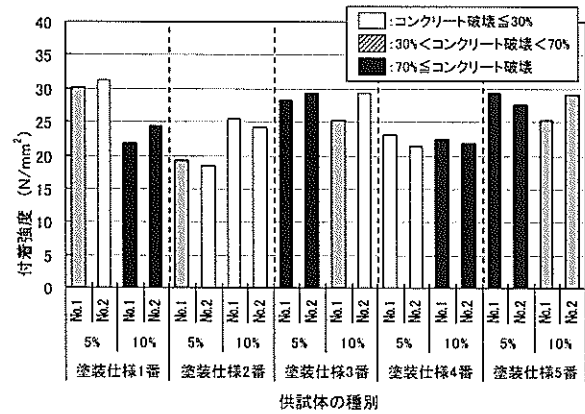


図-21 暴露終了後の塗膜の付着強度 (5%・高温海水噴霧)

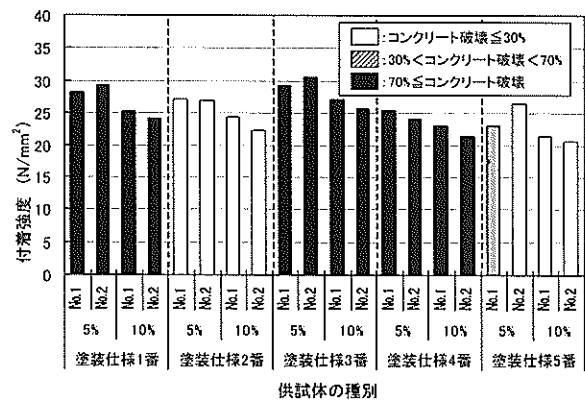


図-22 暴露終了後の塗膜の付着強度 (5%・高温清水噴霧)

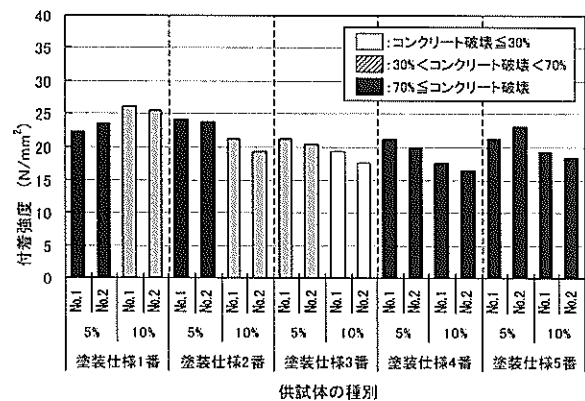


図-23 暴露終了後の塗膜の付着強度 (5%・常温水中養生)

みると、反応性の方が付着強度は低くなる傾向にある。塗装時の表面含水率5%と10%を比較してみると、10%の方が付着強度は低下する傾向にある。

全体的に、いずれの塗装仕様の場合でも付着強度の大

幅な低下はないが、付着強度に差が出てきているのは明らかである。塗装仕様ごとにその特徴を明確に把握し、適材適所で用いていくことが重要であると考えられる。

(10) 付着強度試験結果に基づく ASR によるコンクリート強度の低下に関する考察

図-21～図-23 に示した付着強度試験結果に基づき、ASR によるコンクリート強度の低下に関して考察する。

まず、高温清水噴霧の場合（図-22）、塗装仕様 1 番、3 番、4 番については、コンクリート破壊が破壊形態の主となっていることから、付着強度がほぼコンクリート強度を表していると考えられる。これらはいずれも表面水分が 5% 時よりも 10% 時の方がコンクリート強度が小さくなる傾向がうかがえ、表面含水率が高い時に塗装を行った時ほど ASR の進行が顕著となり、コンクリート強度が低下しているものと考えられる。また、塗装仕様 2 番、5 番では、ほとんどが塗膜の破壊となっており、また付図-A. 12 および付図-A. 15 と比べ、比較的小さい強度での破壊となっていることから、塗膜自体の劣化、もしくは付着力の低下が見て取れる。

次に、常温水中養生の場合（図-23）、塗装仕様 3 番を除く全てにおいて、付着強度がほぼコンクリート強度を表していると考えられる。この場合でもやはり、表面水分が 5% の時よりも 10% 時の方がコンクリート強度が小さくなる傾向が見られ、ASR による強度低下がうかがわれる結果となっている。また、高温海水噴霧、高温清水噴霧の場合と比較して、総じて強度が小さく評価されており、常温水中養生の供試体が最も ASR による強度低下が大きい結果となった。

高温海水噴霧の場合（図-21）、塗装仕様 1 番～4 番において塗膜での破壊が見られることから、塗膜の劣化が進行している可能性がある。また、塗装仕様 4 番の表面水分 10% の場合と比較すると、強度的には高温清水噴霧と同等であり、常温水中養生の場合よりは大きくなった。

2.4 まとめ

5 種類の異なる塗装材料を用いて表面被覆を行った無筋 ASR 供試体の促進養生試験を行い、以下のような結果を得た。

- 1) 今回の実験条件の場合、いずれの材料を用いて表面被覆を行っても、ASR によるコンクリートの膨張を抑制することはできなかった。
- 2) 常温水中養生 (20℃) に比べて、高温海水噴霧 (60℃)、高温清水噴霧 (60℃) の場合に膨張速度が大きくなるものの、最終膨張量は三者とも同等であった。
- 3) 高温海水噴霧と高温清水噴霧を比較する限りにおい

ては、海水の影響による ASR の反応促進および膨張促進は認められなかった。

4) 表面被覆を施しても、コンクリート中への水分の浸入を抑制することはできなかった。しかし、塩化物イオンの浸入は抑制されていた。

5) ASR によるひび割れはコンクリート表層部分に限られており、そのために超音波伝播速度の大幅な低下は生じていなかった。

6) 塗装材料の種類によっては、形成された塗膜の間に溶液が貯留する場合があった。これにより、塗膜自身の劣化が生じていた。

7) 上塗り材として使用する材料の種類により、塗膜の汚れの程度が異なるものとなった。

8) 本実験で実施した促進試験の結果によれば、海中部あるいは干満部といった常時水中にあるような環境下においては、表面被覆の適用は難しいものと判断された。

3. 持続荷重および ASR の影響下にある RC はりおよび RC 柱の内部応力に及ぼす表面被覆の効果に関する実験⁴⁾

3.1 序節

2. においては、無筋コンクリート供試体を用いて膨張促進試験を行った。一般に、コンクリートの表面被覆のアルカリ骨材反応抑制効果は、無筋コンクリートの膨張量という観点から論じられていることが多く、構造的な観点から表面被覆の効果を論じた例は比較的少ない。そこで、アルカリ骨材反応の影響下にある RC はりおよび RC 柱の持続荷重下における内部応力の特性、ならびにコンクリートの表面被覆がそれら内部応力の状況にどのような影響を及ぼすのかを実験的に検討した。本章ではその実験の概要と結果をまとめる。

3.2 実験方法

(1) 供試体の概要

a) はり供試体

図-24 にはり供試体の形状および寸法を示す。断面寸法は、150×205mm、長さが 2438mm である。図に示すとおり、引張補強として D20mm の異形鉄筋が 2 本、圧縮補強として D12mm の異形鉄筋が 2 本配置されている。使用した鉄筋の弾性係数は 196kN/mm²、降伏点は 510N/mm² であり、降伏点ひずみは 2550μ である。また、鉄筋の引張強度は 630N/mm² である。供試体の両側のせん断区間には 100mm 間隔でスターラップ (D6mm の異形鉄筋) が配置されている。表-6 に供試体の種別を示す。はり供試体は全部で 4 体

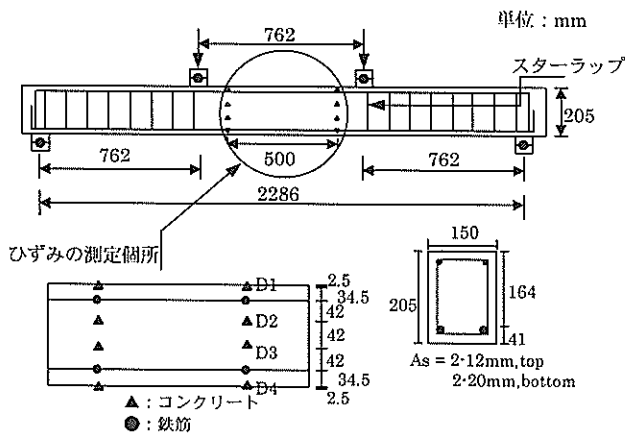


図-24 はり供試体の形状、寸法、持続載荷方法およびひずみ測定箇所

あり、そのうち2体（供試体B2およびB4）に表面被覆を施した。コンクリートの表面被覆の詳細については後述する。

b) 柱供試体

図-25に柱供試体の形状および寸法を示す。断面寸法は205×205mm、高さは1525mmである。図に示すとおり、軸方向補強としてD20mmの異形鉄筋が4本、D16mmの異形鉄筋が2本配置されている。また、D6mmの異形鉄筋により製作したフープ筋11本が等間隔に配置されている。使用した鉄筋の機械的性質ははり供試体の場合と同様である。同じく表-6に供試体の種別を示す。柱供試体は全部で4体あり、そのうち2体（供試体C2およびC3）に表面被覆を施した。

(2) コンクリート用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（ASTM Type I，等価 $\text{Na}_2\text{O}=0.92\%$ ）を使用した。粗骨材は碎石（最大寸法10mm，比重2.62），細骨材は天然砂（比重2.60）を使用した。反応性骨材として非晶質Fused silicaを使用し，全骨材に対して15%（質量）に相当する量を細骨材に置換した。Fused silicaとは人工合成骨材の一種であり，熱膨張係数が $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ （0～1000℃），密度が $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，硬度が6～7（Mohs' scale）という物性を有している。使用したFused silicaの粒度分布を表-7に，化学成分を表-8に示す。Fused silicaの物理的性状は，文献^{5), 6)}に掲載されている。今回の実験の場合と同様に，Fused silicaを全骨材に対して15%置換して用いたコンクリートの膨張性状の一例を図-26に示す。温度20℃，相対湿度96%という環境に保存された場合，約6ヶ月で0.5%（5000 μ ）の膨張量に達し，以後膨張量は一定となるという特性を有している。

コンクリートの練混ぜ水は水道水を使用した。コンクリートの配合および材齢28日の圧縮強度（12本平均値）

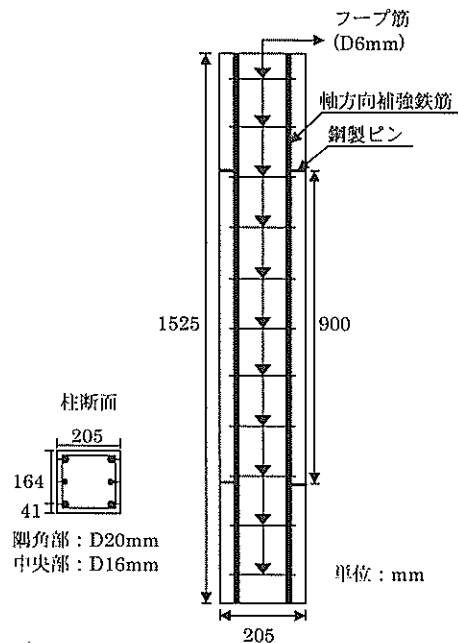


図-25 柱供試体の形状および寸法

表-6 供試体の種別

種別	番号	コンクリートの表面被覆	養生の状態
はり	B1	なし	乾燥状態を継続
	B2	載荷，暴露開始前に実施（全面塗装）	NaCl 溶液による湿潤状態
	B3	なし	NaCl 溶液による湿潤状態
	B4	載荷，暴露中に実施（上面は非塗装）	NaCl 溶液による湿潤状態
柱	C1	なし	乾燥状態を継続
	C2	載荷，暴露開始前に実施（全面塗装）	NaCl 溶液による湿潤状態
	C3	載荷，暴露中に実施（全面塗装）	NaCl 溶液による湿潤状態
	C4	なし	NaCl 溶液による湿潤状態

表-7 非晶質 Fused silica の粒度分布

ふるい目(mm)	1.00	0.71	0.50	0.30	0.106	0.075
通過率(%)	96	72	51	30	9	5

表-8 非晶質 Fused silica の化学成分

化学成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
濃度(%)	>99.5	0.02	0.05	0.05	<0.04	>0.05	<0.01	<0.05

表-9 コンクリートの配合および圧縮強度

セメント	水	粗骨材	細骨材	非晶質 Fused silica	σ_{28} (kg/m ³)(N/mm ²)
350	210	1250	314	276	45.6

を表-9に示す。強度試験用供試体（100mm立方体）の養生ははり供試体および柱供試体と同一である。コンクリート中の総アルカリ量は Na_2O 換算で 3.43kg/m^3 （0.14%）である。

(3) コンクリート表面被覆材料

使用した被覆材料の仕様を表-10に示す。表に示されるとおり、被覆膜は3層構造となっており、全膜厚は約1mmである。主膜を構成する中塗り材はアクリルゴム系の材料であり、その組成は54%（質量）がアクリルゴム、残りの46%が無機系フィラーおよび顔料である。なお、この塗装材料は2. で述べた実験で使用した塗装仕様の2番に相当する。

(4) 供試体の履歴

打設後24時間で脱型し、その直後にひずみ測定用のゲージプラグを所定の位置に装着した。装着後にひずみ測定用ゲージプラグ間の距離の初期値を計測した後、材齢7日までポリエチレンシートを覆った湿潤養生を行い、その後実験室内での気中養生に移行した。

a) はり供試体

はり供試体の履歴を図-27に示す。4体の供試体のうち、供試体B2においては材齢28日から材齢49日にかけて供試体の6面全部に表面被覆を施した。B1およびB2は材齢54日、B3およびB4は材齢36日において荷重を開始した。その後、供試体は持続荷重の状態を保持した。図-27に示すとおり、B1は常時乾燥状態にあり、B2、B3およびB4はNaCl溶液による湿潤状態に置いた。ここでいう湿潤状態とは、40℃の4%NaCl溶液を供試体表面に継続的に供給し、コンクリート表面を湿潤状態に保持するものである。なお、供試体を保存しておいた実験室は平均気温が約15℃、相対湿度が約70%である。図-27に示すとおり、途中数回湿潤状態が中断しているが、この間は供試体は室内での気中乾燥状態に置かれていた。また、B4においては、材齢

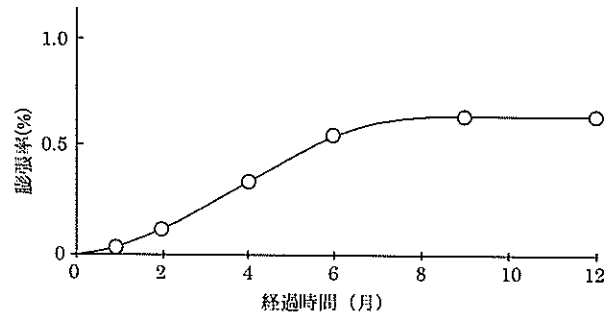


図-26 Fused silica を用いたコンクリートの膨張曲線の一つ例

表-10 コンクリート表面被覆材料の仕様

	主成分	塗布量 (kg/m ²)	形成膜厚 (μm)
下塗り材	合成樹脂系	0.3	30
中塗り材	アクリルゴム系	1.7	900
上塗り材	アクリルウレタン系	0.3	100

215日から230日にかけて表面被覆を実施した。この場合はB2とは異なり供試体の上面（荷重面）を除く5面に表面被覆を施した。表面被覆を施した時点で引張端のコンクリートひずみは2000μに達していた。

b) 柱供試体

柱供試体の履歴を同じく図-27に示す。図に示すとおり、供試体C2においては材齢28日から材齢44日にかけて供試体の4側面全部に表面被覆を施した。また、C1は材齢57日、C2は材齢76日、C3は材齢58日およびC4は材齢41日において荷重を開始した。その後、供試体は持続荷重の状態を保持した。図-27に示すとおり、C1は常時乾燥状態にあり、C2、C3およびC4はNaCl溶液による湿潤状態に置いた。また、C3においては、材齢303日から317日にかけて表面被覆を実施した。この場合もC2と同様に供試体の4側面全部

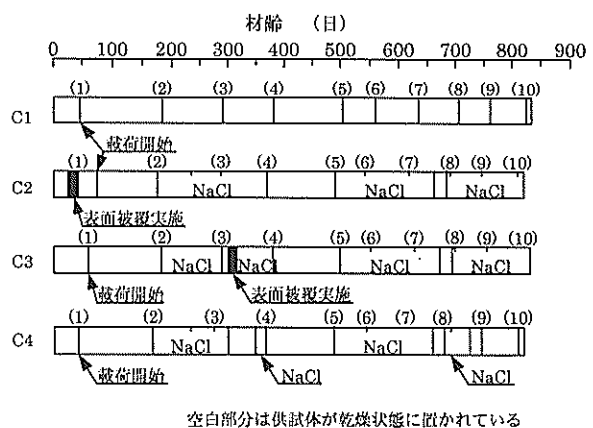
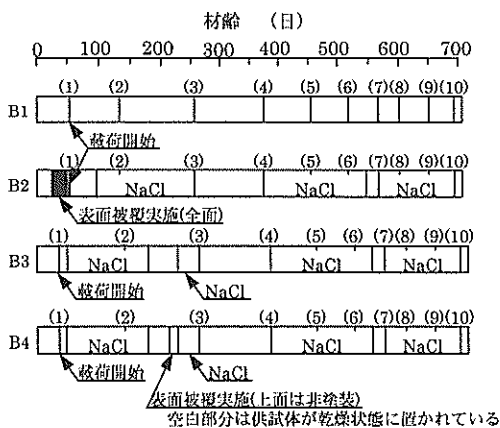


図-27 はり供試体および柱供試体の履歴

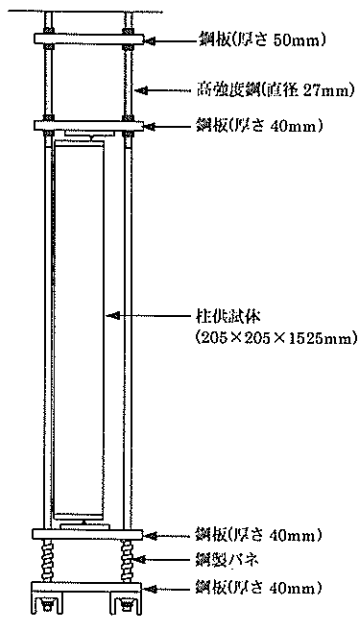


図-28 柱供試体の持続荷重方法

に表面被覆を実施した。表面被覆を施した時点で引張端のコンクリートひずみは 400μ 、圧縮端のコンクリートひずみは 1600μ に達していた。

(5) 持続荷重方法

a) はり供試体

図-24に供試体の荷重方法も示しているが、荷重点間距離が762mm、支点間距離が2286mmの三等分点荷重である。鋼製治具により、B1とB2、およびB3とB4を二体一組として固定し持続荷重状態とした。持続荷重時の荷重はBS (British Standard) 8110に従って算出した終局曲げ耐力の50%とし、持続荷重時の最大曲げモーメントが $15783\text{kN}\cdot\text{mm}$ となるように荷重を $P = 41.4\text{kN}$ と設定した。

b) 柱供試体

図-28に柱供試体の持続荷重方法を示す。偏心距離40mmの偏心圧縮荷重とした。持続荷重時の荷重はBS 8110に従って算出した終局曲げ耐力の42.6%とし、 $P = 412\text{kN}$ と設定した。

(6) 計測項目およびその方法

a) はり供試体

定期的に供試体中央部の曲げ区間でのコンクリートひずみおよび鉄筋ひずみを計測した。コンクリートの場合も鉄筋の場合も、ダイヤルゲージ式ひずみ計を使用した。コンクリートのひずみ計測用ゲージプラグは、コンクリートの表面に樹脂系接着剤を用いて装着した。なお、表面の塗装を実施する際にはゲージプラグの部分だけは塗装を実施していない。図-29に鉄筋のひずみ計測用ゲージプラグの装着方法を示す。鉄筋軸方向に対して垂直に長

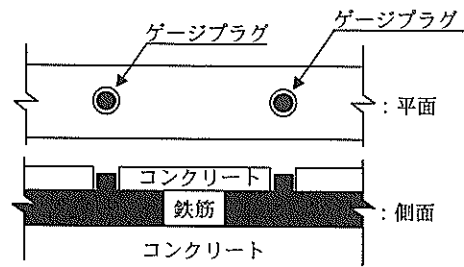
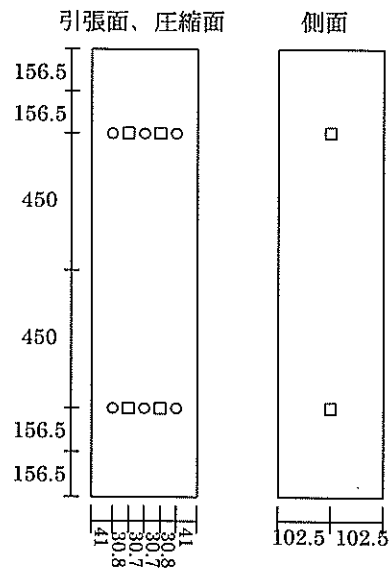


図-29 鉄筋のひずみの測定法



ひずみの測定箇所

- : コンクリートひずみ
- : 鉄筋ひずみ

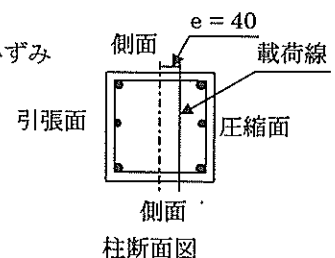


図-30 柱供試体のひずみの測定箇所

さ3cmの短鉄筋を溶接し、その短鉄筋の端部にゲージプラグを接着剤にて装着した。なお、この短鉄筋の端部は供試体完成時においてもコンクリート表面に露出させておき、コンタクトゲージにて直接計測できるようになっている。コンクリートの場合も鉄筋の場合もスパンが500mmのダイヤルゲージ式ひずみ計を使用した。図-24にひずみの計測箇所も示しているが、黒三角印(▲)で示すD1~D4がコンクリートひずみの測定箇所であり、黒丸印(●)の2ヶ所が鉄筋ひずみ(引張鉄筋および圧縮鉄筋)の測定箇所を示している。なお、これらのひずみの測定ははりの両側面において実施し、その平均値を測定値として取り扱った。

b) 柱供試体

柱供試体の場合は、スパン900mmのダイヤルゲージ式ひずみ計を使用した。コンクリートおよび鉄筋のひずみの測定方法は基本的にははり供試体の場合と同様である。図-30にひずみの測定箇所を示す。図中、四角印(□)で示す箇所がコンクリートひずみの測定箇所を示しており、丸印(○)で示す箇所が鉄筋ひずみの測定箇所を示している。圧縮面および引張面はコンクリートひずみを2ヶ所、鉄筋ひずみを3ヶ所測定し、これらの平均値を計測値とした。また、2つの側面においてはコンクリートひずみを1ヶ所測定し、これら2つのデータの平均値を計測値として取り扱った。

3.3 実験の結果および考察

(1) 初期弾性変形

a) はり供試体

図-31に中立軸から圧縮領域にかけての初期弾性ひずみ(载荷により生じたひずみ)を示す。なお、本文中で示す中立軸とは断面内においてひずみが零となる軸のことである。図中の8データのうち4データは実測値(B1, B2, B3, B4)であり、他の4データは計算値である。計算値はひずみの平面保持を仮定し、かつコンクリートの引張応力を零と仮定して算出したものである。4つの計算値は、計算に用いたコンクリートの弾性係数(E_c)がそれぞれ異なっている。材齢28日でのコンクリートの圧縮強度よりBS(British Standard)および土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾に従って弾性係数を算出すると、 $E_c=29\text{kN/mm}^2$ (BS)、 $E_c=32\text{kN/mm}^2$ (標準示方書)となる。この両値を用いてひずみを計算すると、図よりわかるとおり、実験値に比べて計算値が小さくなる。これより、実際の供試体のコンクリートの弾性係数(E_c)は計算値より小さいことが推定される。 $E_c=29\text{kN/mm}^2$ 以下の範囲で、コンクリートひずみを試算した結果、 $E_c=22\sim 23\text{kN/mm}^2$ の時の計算値と実験値がよく一致した。図-31に $E_c=22\text{kN/mm}^2$ および $E_c=23\text{kN/mm}^2$ を用いて算出したひずみを示しているが、実験値とほぼ一致している。本実験と同様の反応性骨材を用いた同配合のコンクリートによる既往の結果⁶⁾によると、20℃、96%R.H.の養生下において、コンクリートの動弾性係数は約15~20%の低下を示している。これより、载荷を開始した時点(B1およびB2の場合材齢54日、B3およびB4の場合36日)でコンクリートは既にASRの影響を受けてその弾性係数は22~23kN/mm²まで低下していたことが推察される。なお、図-31よりわかるとおり、4つの供試体間で初期弾性変形の性状には大きな差は認められなかった。

b) 柱供試体

表-11に载荷により柱供試体に生じたコンクリートの圧縮縁および引張縁での縁ひずみ(初期弾性ひずみ)を示す。図-32に、初期弾性変形の解析に用いたコンクリートのひずみ分布および仮定応力分布のモデルを示す。図

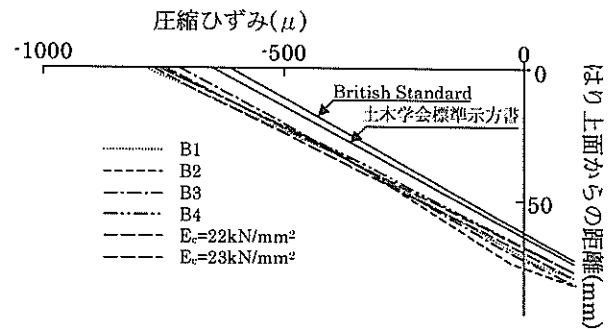


図-31 はり供試体の初期弾性変形

表-11 柱供試体の初期弾性変形時のコンクリートの縁ひずみ (×10⁻⁶)

	コンクリート縁ひずみ	
	引張縁	圧縮縁
C1	220	-829
C2	170	-873
C3	213	-784
C4	184	-775
平均	196.8	-815.3

(引張ひずみを+, 圧縮ひずみを-と表示する)

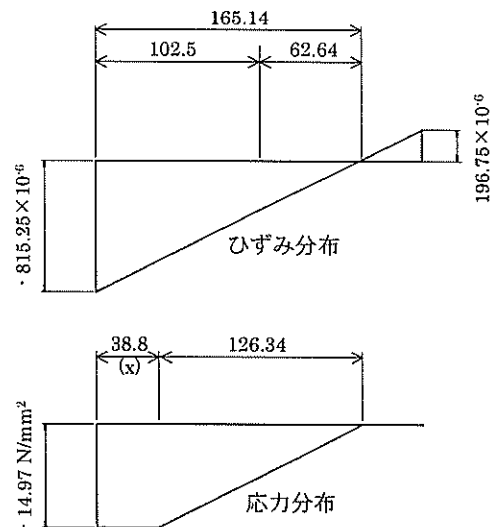


図-32 柱供試体の初期弾性変形の解析に用いたコンクリートのひずみ分布および応力分布

に示すとおり、ひずみ分布は直線を仮定し、圧縮縁ひずみを -815.3μ 、引張縁ひずみを 196.8μ （いずれも4供試体の実測値の平均）とした。この場合、中立軸高さは 165.1mm である。一方、コンクリートの応力分布はある領域まで、「 $\sigma = E\varepsilon$ 」の線形関係が成立し、コンクリートの応力がある σ に達した後は応力は一定であると仮定した。この応力分布は先に示したはり供試体の場合に仮定した応力分布とは異なる。はり供試体の場合も厳密には圧縮縁近傍では応力がほぼ一定となる領域が存在すると思われるが、圧縮領域自体が柱供試体に比べてかなり小さくなるためその誤差は小さいものと判断し、圧縮端まで線形の応力分布を仮定した。また、はり供試体の場合と同様に柱供試体においてもコンクリートの引張応力は零と仮定した。

このモデルにおいては、圧縮縁ひずみおよび引張縁ひずみを実測され、それより中立軸深さが計算される。一方、コンクリートの弾性係数 (E_c) とコンクリートの最大応力が一定となる区間の長さ (x) が未知数となる。なお、コンクリートの最大圧縮応力 (σ) はコンクリートの最大応力が一定となる区間の長さ (x) の関数となる。また、供試体に作用する外力モーメントを正確に計算するために、荷重を行った直後に柱供試体の中央部のたわみ量を実測した。この結果を図-33に簡潔に示す。図に示すとおり、柱の中央部において 5mm のたわみが生じていた。したがって、外力モーメントは(1)式のように計算した。

$$412 (\text{kN}) \times 45 (\text{mm}) = 18540 (\text{kN}\cdot\text{m}) \quad (1)$$

このモデルにおいて、柱の断面における軸方向のつり合い式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & (\text{鉄筋応力の合力}) + (\text{コンクリート応力の合力}) \\ & + (\text{外力: } 412\text{kN}) = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

また、モーメントのつり合い式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & (\text{鉄筋応力によるモーメント}) \\ & + (\text{コンクリート応力によるモーメント}) \\ & + (\text{外力モーメント: } 18540\text{kN}\cdot\text{mm}) = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

この(2)式および(3)式を連立方程式として解くことにより、2つの未知数 x および E_c を求めた。その結果、図-32に示すように、コンクリートの最大応力が一定となる区間の長さ x は 38.8mm と算出され、コンクリートの弾性係数は、 $E_c=24\text{kN/mm}^2$ と算出された。この弾性係数の値は、はり供

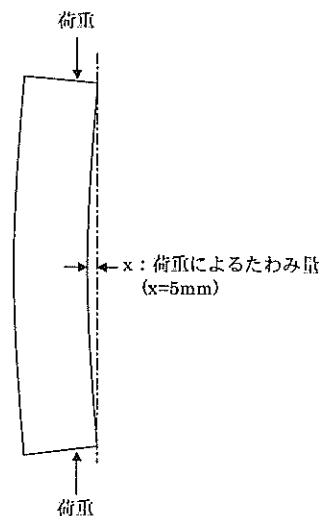


図-33 荷重による柱供試体の弾性変形たわみ

試体において算出された初期弾性係数の $E_c=23\text{kN/mm}^2$ とほぼ一致している。これより、柱供試体の場合も荷重を開始した時点でコンクリートは既にASRの影響を受けてその弾性係数は約 24kN/mm^2 まで低下していたものと思われる。なお、4つの供試体間で初期弾性変形の性状に大きな差は認められなかった。

(2) コンクリートおよび鉄筋のひずみの経時変化

a) はり供試体

図-34に、はり供試体のコンクリートおよび鉄筋のひずみの経時変化を示す。暴露期間を示す(1), (3), (6), (10)は図-27中に示す数字と対応している。この図より、B1の圧縮ひずみは他の3つの供試体のそれに比べて大きく、引張ひずみは小さいことがわかる。これは、B1が常に乾燥状態に置かれているため、コンクリートに乾燥収縮が生じていること、ならびにASRによる膨張がB2, B3, B4に比べて小さくなっていることに起因する。また、この図よりわかるもう一つの特徴はB3とB4のひずみ量はほぼ同程度であるが、B2のそれはB3, B4に比べて引張ひずみが小さくなっている点である。B2は比較的初期の材齢（暴露開始前、荷重前）で表面被覆を実施しており、このために引張ひずみが抑制されているものと考えられる。一方、B4の場合ASRによる膨張がかなり進んだ時点で表面被覆を実施していることと、上面が非塗装であることから、膨張ひずみの抑制にはその効果を認めることはできない。また、上述のひずみ分布より明らかとなっており、ASRの影響を大きく受けているはり（B2, B3, B4）は、影響の小さなはり（B1）に比べて持続荷重下において中立軸の位置がより圧縮側に存在する。

b) 柱供試体

図-35に柱供試体のコンクリートおよび鉄筋のひずみ

の経時変化を示す。暴露期間を示す(1), (3), (6), (10)は図-27中に示す数字と対応している。この図より、C1の圧縮ひずみは他の3つの供試体のそれに比べて大きく、引張ひずみは小さいことがわかる。これは、C1が常に乾燥状態に置かれているため、コンクリートに乾燥収縮が生じていること、ならびにASRによる膨張がC2, C3, C4に比べて小さくなっていることに起因する。また、この図よりわかるもう一つの特徴はC3とC4のひずみ量はほぼ同程度であるが、C2のそれはC3, C4に比べて圧縮ひずみが幾分大きく、引張ひずみが小さくなっている点である。C2は比較的初期の材齢（暴露開始前、載荷前）で表面被覆を実施しており、このために引張ひずみが抑制されているものと考えられる。一方、C3の場合ASRによる膨張がかなり進んだ時点で表面被覆を実施しているために膨張ひずみの抑制にはその効果を認めることはできない。また、上述のひずみ分布より明らかとなり、ASRの影響を大きく受けている柱（C2, C3, C4）は影響の小さな柱（C1）に比べて持続荷重下において中立軸の位置がより圧縮側に存在する。

(3) コンクリート表面のひびわれの状況

塗装なしの供試体に関し、ASRによりコンクリート表面に発生したひびわれの状況は、はり供試体と柱供試体でほぼ同様であった。ひびわれ発生の経過は以下のとおりである。最初のひびわれははりおよび柱の軸方向かつ埋設鉄筋に沿った位置に発生した。その後、同方向のひびわれの本数が増加した。さらに時間が経過した後、方向性のない無数のひびわれがコンクリート全面に発生した。常時乾燥状態にあるB1およびC1の場合は他の供試体に比べてひびわれの本数は少なかった。

また塗装ありの供試体では、塗膜の表面にはひびわれ

は発生していなかったが、塗膜の内側のコンクリート表面には発生していたものと思われる。なお、はり供試体の場合は中央部の曲げ区間に数本の曲げひびわれが発生していた。

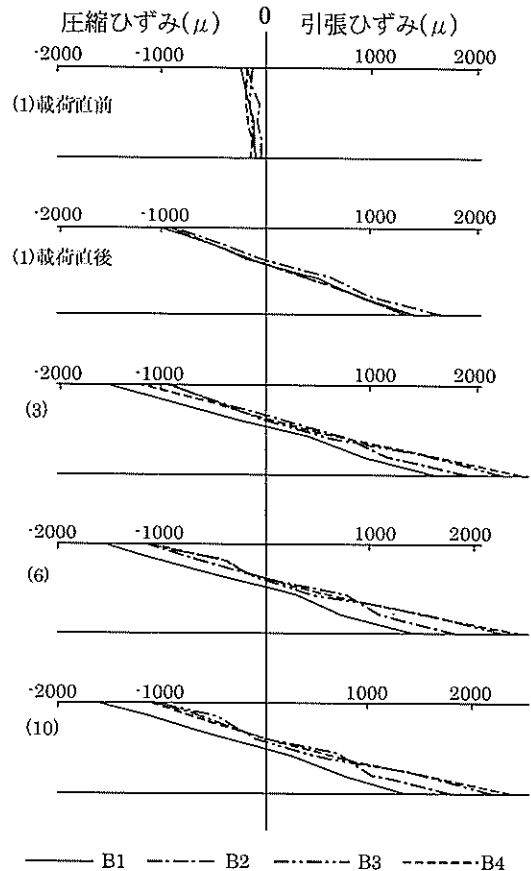


図-34 はり供試体のひずみ分布の経時変化

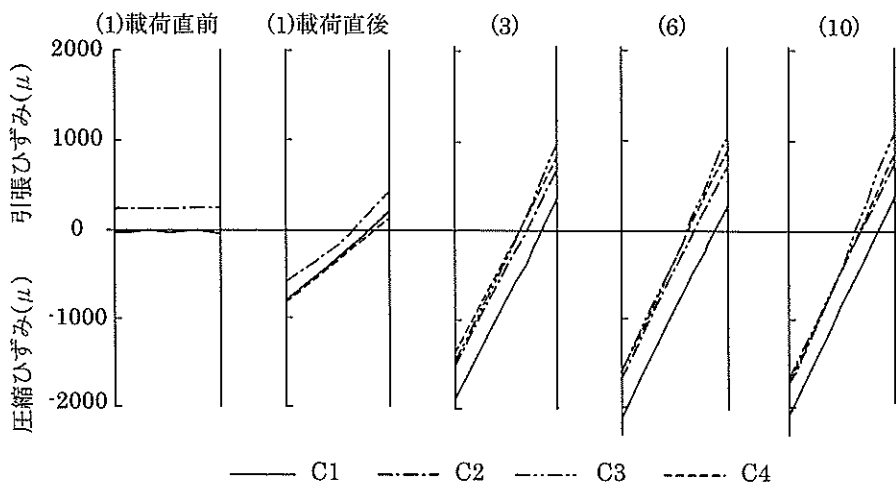


図-35 柱供試体のひずみ分布の経時変化

3.4 結果の解析

(1) 解析のモデルおよび計算手順

a) はり供試体

図-34にはり供試体のひずみ分布の経時変化を示したが、この図より持続荷重を受けている状態でコンクリートのひずみは圧縮端から引張鉄筋の位置まではほぼ平面保持を満足していることがわかる。このことを考慮し、図-36に示すような解析モデルを設定した。図に示すように、全ひずみは、初期弾性ひずみ、クリープひずみおよびASRによるひずみが加算されたものと仮定した。なお、B1の場合のようにASRよりも乾燥収縮が卓越すると予想される場合は、ASRによる膨張ひずみが負値として算出されることになる。また、応力の計算に際してはコンクリートの引張応力は零と仮定した。また、ASRにより断面中央にはり軸方向の仮想的な集中荷重が作用するものと仮定した。以後、この集中荷重を「仮想外力」と称する。なお、B1の場合は乾燥収縮による仮想圧縮力が作用するものとする。

図-37にASRにより膨張したRCはりのひずみのモデルを示す。この図に基づき仮想外力の考え方を以下に示す。図に示すように、鉄筋による拘束がない場合は $(\Delta l_1 + \Delta l_2)$ の膨張量が予想されるが、鉄筋による拘束があるために実際は (Δl_1) だけ膨張するものとする。この時、コンクリートには圧縮応力が生じており、これを一種のケミカルプレストレスと考えることもできる^{8), 9)}。一方、ASR発生以前を初期値とすれば、引張外力によりコンクリートおよび鉄筋が (Δl_1) 伸びたことと同等であると考えられる。この仮定の引張外力を本解析においてはASRによる仮想外力と称し、考察の一助とするものである。

このモデルに基づき解析を実施する際には、コンクリートおよび鉄筋のひずみは実測されるので平面保持の仮定のもとに中立軸高さを算出することができる。一方、コンクリートの弾性係数 (E_c) および仮想外力が未知数として残る。それに対して、断面における軸方向力のつり合い式およびモーメントのつり合い式が成立する。したがって、この両式を連立方程式として解くことにより、コンクリートの弾性係数 (E_c) および仮想外力を算出した。また、求めたコンクリートの弾性係数 (E_c) よりクリープ係数を算出した。なお、クリープ係数の算出にあたっては、 E_c の初期値として 23kN/mm^2 を用いた。

b) 柱供試体

柱供試体の場合もひずみ分布は平面保持をほぼ満足していることを考慮し、図-38および図-39に示すような解析モデルを設定した。図-38に示すように、全ひずみは、

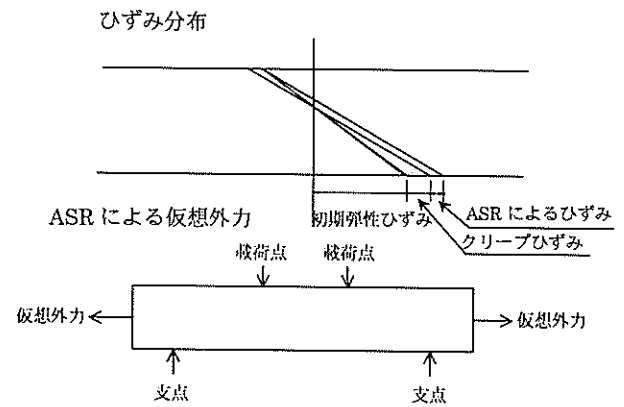


図-36 はり供試体の解析モデル

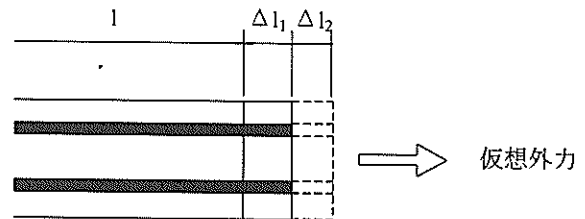


図-37 ASRにより膨張したRC部材のひずみモデル

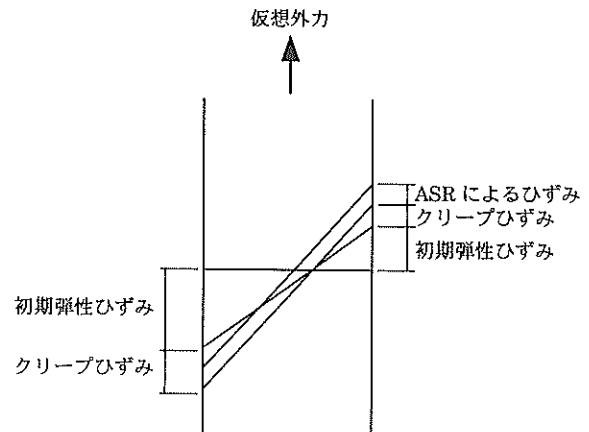


図-38 柱供試体の解析モデル (ひずみの分布および構成)

初期弾性ひずみ、クリープひずみおよびASRによるひずみが加算されたものと仮定した。なお、C1の場合のようにASRよりも乾燥収縮が卓越すると予想される場合は、ASRによる膨張ひずみが負値として算出されることになる。また、ASRにより断面中央に軸方向の仮想外力が作用するものと仮定した。図-39にひずみ分布と応力分布のモデルを示す。初期弾性変形の解析の場合と同様に、ひずみは直線分布、コンクリートの応力はある一定値までは $\sigma = E_c \epsilon$ の線形関係が成立し、その後は一定値をとるものと仮定した。解析の手順ははり供試体の場合とは

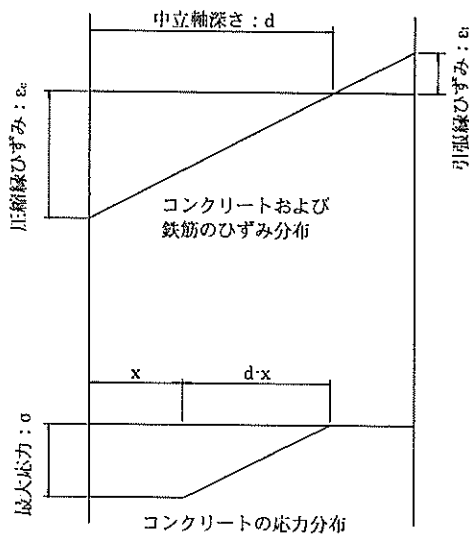
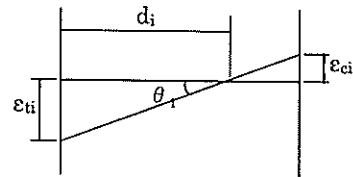


図-39 柱供試体の解析モデル
(コンクリートのひずみ分布および応力分布)

初期弾性変形



解析時のひずみ分布

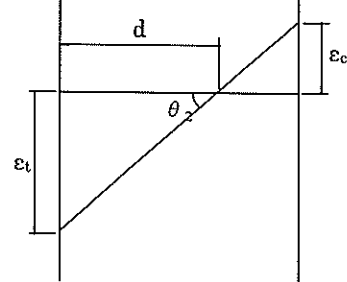


図-40 コンクリートの弾性係数算定の考え方

若干異なる。解析の手順を以下に示す。まず、初期弾性ひずみの回転角と解析を実施する時点でのひずみの回転角を比較することによりコンクリートの弾性係数を算出した。図-40にその考え方を示す。この図に基づき以下の(4)式によりコンクリートの弾性係数を、(5)式によりクリープ係数を算出した。

$$E_c' = (\tan \theta_1) / (\tan \theta_2) \cdot E_c$$

$$= (d \cdot \varepsilon_{ii}) / (d_i \cdot \varepsilon_i) \cdot E_c \quad (4)$$

ここに、 E_c' : 解析時のコンクリートの弾性係数
 E_c : コンクリートの弾性係数の初期値
 d : 解析時の中立軸深さ
 d_i : 初期弾性変形の中立軸深さ
 ε_i : 解析時のコンクリートの圧縮端ひずみ
 ε_{ii} : 初期弾性変形のコンクリートの圧縮端ひずみ

$$\phi = E_c / E_c' - 1 \quad (5)$$

ここに、 ϕ : クリープ係数

なお、クリープ係数の算出に際しては、 E_c の初期値として24kN/mm²を用いた。

このモデルにおいては、コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみを実測され、それより平面保持の仮定のもとに中立軸深さを算出することができる。解析を実施する際には、コンクリートの最大応力が一定となる区間の長さ(x)と仮想外力の2つが未知数として残ることになる。それに対して、断面における軸方向力のつり合い式およ

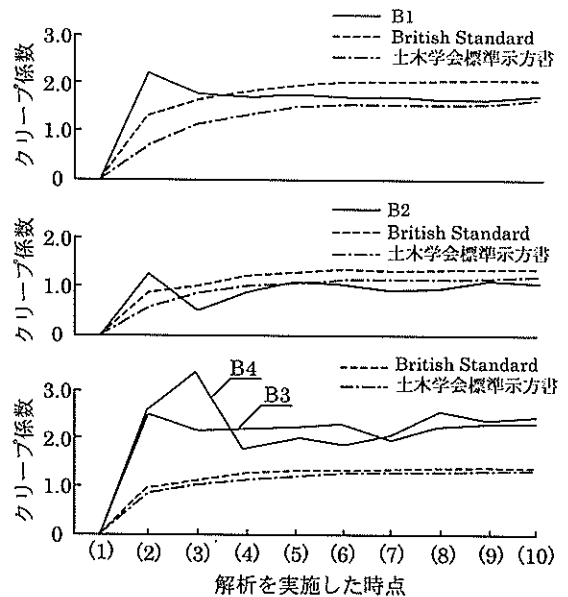


図-41 はり供試体のクリープ係数の経時変化

びモーメントのつり合い式が成立する。したがって、両式を連立方程式として解くことによりコンクリートの最大応力が一定となる区間の長さ(x)および仮想外力を算出した。なお、モーメントのつり合い式は、最終的にxの3次方程式となるため、厳密にはxの近似値を求めた。この場合の計算誤差は1mm未満である。なお、外力モーメントとして、18540kN・mmを用いた。

(2) クリープ係数

a) はり供試体

図-41に、算出したクリープ係数の経時変化を示す。図中の解析を実施した時点を示す(1)~(10)は図-27に示す番

号と対応している。図中には、BS-8110および土木学会標準示方書⁷⁾に従って計算した結果も併せて示す。なお、計算の際のB1の環境相対湿度を70%とし、B2, B3, B4の環境相対湿度を90%とした。図-41よりわかるとおり、クリープ係数はB1で2.0程度、B2で1.0程度となり、この両供試体は計算値とよく一致している。一方、B3およびB4のクリープ係数は、2.0~2.5となり計算値の約2倍の値を示している。これより、B3およびB4においてはASRの影響によりコンクリートの弾性係数が大きく低下していること、一方、B2の場合表面被覆の効果によりASRによる弾性係数の低下が抑制されていることがわかる。

b) 柱供試体

図-42に算出されたクリープ係数の経時変化を示す。図中には、BS-8110および土木学会標準示方書⁷⁾に従って計算した結果も併せて示す。なお、計算の際のC1の環境相対湿度を70%とし、C2, C3, C4の環境相対湿度を90%とした。図-42よりわかるとおり、クリープ係数はC1で1.5程度、C2で1.0程度となり、この両供試体は計算値とよく一致している。一方、C3およびC4の場合、クリープ係数は約1.5となり計算値に比べ約50%程度大きくなっている。これより、C3およびC4においてはASRの影響によりコンクリートの弾性係数が低下していること、一方、C2の場合表面被覆の効果によりASRによる弾性係数の低下が抑制されていることがわかる。

c) はり供試体と柱供試体の比較

はり供試体B1, B2および柱供試体C1, C2について見ると、いずれも計算値とほぼ一致しており、両者の解析結果に相違点はないと言える。一方、はり供試体B3とB4、および柱供試体C3とC4について見てみると、いずれの場合も計算値よりも解析値の方が大きくなっており、ASRによるコンクリートの弾性係数の低下が生じていることが示されている。しかし、B3, B4の方がC3, C4に比べて幾分かクリープ係数が大きく算出されている。この理由として以下の二点が考えられる。一点目は両者の解析モデルの相違である。はり供試体の解析においてはコンクリートの圧縮領域全域で、「 $\sigma = E\varepsilon$ 」の線形関係が成立すると仮定したが、実際には圧縮縁近傍ではこの線形関係は成立していない。このために、はり供試体B3およびB4の解析においてコンクリートの弾性係数を幾分か小さく算出し、その分クリープ係数が大きくなったものと考えられる。しかしながら、初期弾性変形のところで述べたとおり、はり供試体においては圧縮領域が小さいためこの解析モデルに起因する誤差はさほど大きくない。もう一点は、柱供試体の方がはり供試体に比べてより大きな圧縮力を受けている点である。部材断面に作用する圧

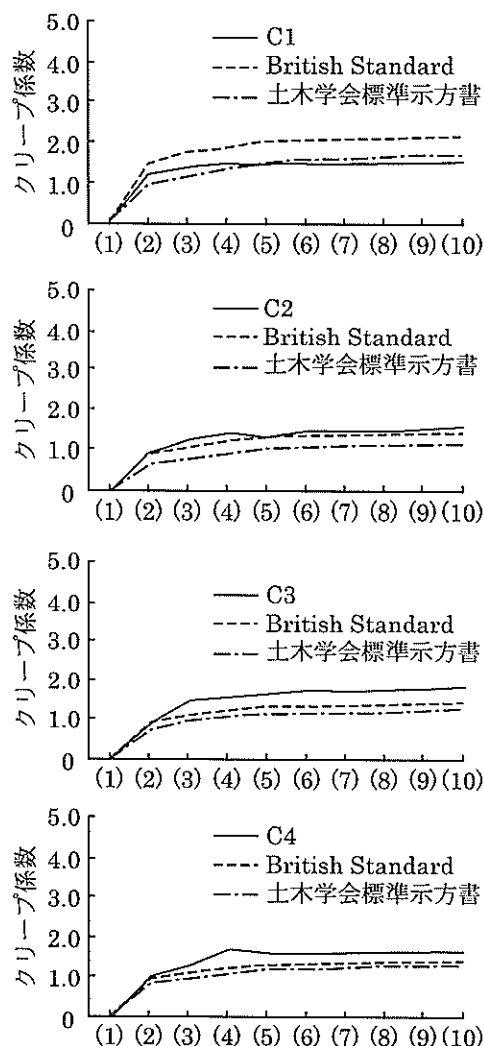


図-42 柱供試体のクリープ係数の経時変化

縮力がASRの影響を抑制したとも考えられる。前者の理由よりも後者の方が影響の程度は大きいものと思われる。いずれにしても、柱供試体に比べてはり供試体の方がASRによる弾性係数の低下は大きなものとなった。

(4) 仮想外力

a) はり供試体

図-43に仮想外力の経時変化を示す。仮想外力の方向は、B2, B3, B4では引張方向、B1では圧縮方向である。B3, B4はほとんど等しい大きさの引張力となっており、B4に施された表面被覆の効果は全く認められない。これは、表面被覆を実施した時期が遅かったこと、ならびに供試体上面は被覆されておらずNaCl溶液の浸透を完全に止めることができなかったことがその原因であると考えられる。一方、B2の場合引張方向外力が示されているものの、B3, B4に比べるとその大きさは極めて小さく、表面被覆の効果を確認することができる。またB1においてはASRによる膨張よりも乾燥収縮の方が卓越したものと考

えられる。

b) 柱供試体

図-44に仮想外力の経時変化を示す。外力の方向は、C2, C3, C4では引張方向, C1では圧縮方向である。C3, C4について見ると、解析実施時期(8), (9), (10)においてその差が生じている。これは、その間C4が乾燥状態に置かれているためである。解析実施時期(7)以前では両者でほぼ等しい大きさの引張力が示されており、C3に施された表面被覆の効果は認められなかった。これは、表面被覆を実施した時期が遅かったことがその原因であると思われる。一方、C2の場合引張方向外力が示されているものの、C3, C4に比べるとその大きさは小さく表面被覆の効果を確認することができる。C1においては圧縮方向外力となっているが、B1の場合と同様にASRよりも乾燥収縮の方が卓越したためと思われる。

c) はり供試体と柱供試体の比較

はり供試体の解析結果と柱供試体の解析結果を比較してみると二点ほど相違点がある。一つは、B2に作用する仮想外力とC2に作用する仮想外力を比べた場合、C2の方がその値が大きく、両者で表面被覆の効果に差が生じている点である。その理由として、C2において材齢初期、すなわち表面被覆を実施してから載荷を開始するまでの間に比較的大きな膨張が生じていたことが挙げられる。図-32に示されるように、C2においては載荷を実施する前に既に軸方向の膨張量が200 μ に達していた。この現象はB2においては生じていない。したがって、このC2において見られた初期の膨張が、ASRの影響を受け、かつ材齢初期に表面被覆を行ったコンクリートに共通に見られるものかは判断できない。しかし、図-44に示されており、この初期膨張により約70kNの仮想外力がC2に作用していると算出されており、この70kNがB2とC2のそれ以降の解析結果の相違となっている。解析実施時期(2)以後の変化量、変化傾向はB2およびC2でほぼ一致しており、この間については、表面被覆の効果はB2とC2で同等であると言える。

二つ目の相違点は、B3とB4において算出された仮想外力よりもC3およびC4において算出された仮想外力の方が大きくなっている点である。この主な理由は解析モデルにあると考えられる。前述したとおり、本解析においてははり供試体の場合も柱供試体の場合もコンクリートの引張応力は零と仮定した。しかし、図-37に示すとおり、本研究で用いた仮想外力はコンクリートの全断面に作用するものである。したがって、解析を実施する際に、仮想外力を含めて軸方向力のつり合いを考える場合はコンクリートは全断面有効と考える必要がある。しかし、モ

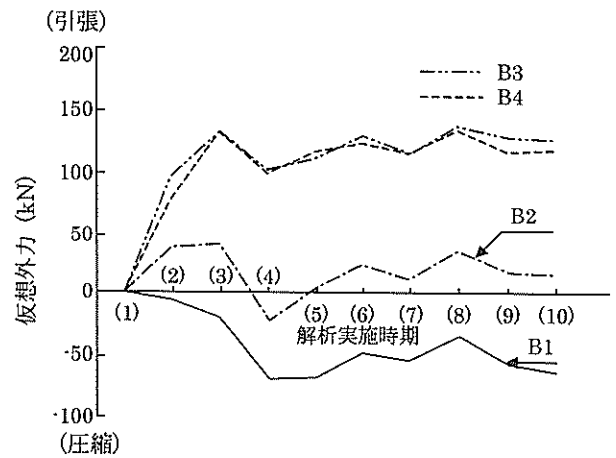


図-43 はり供試体の仮想外力の経時変化

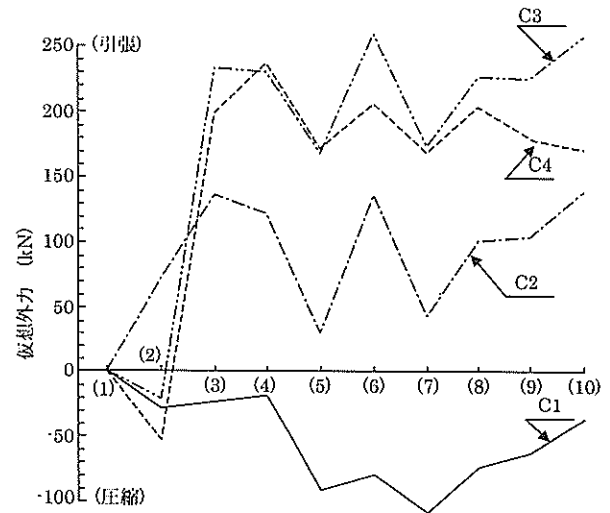


図-44 柱供試体の仮想外力の経時変化

メントのつり合い式と軸方向力のつり合い式とでモデルを統一する必要があるため、軸方向力のつり合い式を立てる場合にもコンクリートの引張応力は零として取り扱った。先にも述べたが、はり供試体に比べて柱供試体の方がコンクリートの圧縮領域が約2倍ある。この両者の相違により、柱供試体において算出された仮想外力がはり供試体において算出された仮想外力よりもかなり大きくなっているものと考えられる。

3.5 まとめ

上記の実験より得られた知見を以下に列挙し総括する。

- 1) ASRの影響を受けているコンクリートでは、比較的初期の材齢時（この場合は材齢約50日）において既に弾性係数が低下していた。
- 2) 曲げ載荷時のRCはりおよび偏心圧縮載荷時のRC柱

においてASRが発生するとコンクリートの引張ひずみおよび引張鉄筋のひずみが増大し、ASRの影響を受けていない場合に比べて中立軸が圧縮側に存在する。

3)ASRが生じたコンクリートにおいては、弾性係数の低下(クリープ係数の増大)が生じる。その程度は、はり供試体の方が柱供試体よりも大きかった。

4)早期材齢でコンクリートに表面被覆を施すことによりASRの影響を抑制することができる。具体的には、コンクリートの弾性係数の低下(クリープ係数の増大)を抑制し、ASRによる膨張量を抑制する。

5)同一の材料を用いてコンクリートの表面被覆を実施しても、その時期、あるいは方法(全面被覆あるは部分被覆、等)が異なるとASRの抑制効果も異なるものとなった。

6)コンクリートが常時乾燥環境下(70%R.H.)にある場合は、ASRによる膨張よりも乾燥収縮の方が卓越した。

4. 結論

上記の2. および3. に取りまとめた2つのシリーズの実験結果を総合的に考察し、以下の結論を得た。

1) 海中部、干満部あるいは波浪の影響を常時受ける飛沫部のように、常時コンクリート表面が湿潤状態にあるような環境下においては、表面被覆によりASRの反応および膨張を十分に抑制することは困難である。

2) 異なる材料により構成される塗膜はその物性が各々異なるため、その効果を最大限得るためには、施工環境、暴露環境に適した材料の選定を行うことが極めて重要である。

3) コンクリート表面が海水に接する環境であっても、常時水中に接していない場合は、表面被覆によりASRの反応および膨張を抑制することは可能である。

4) 表面被覆の効果を最大限に得るためには、可能な限りASRの反応および膨張が開始される前に被覆を施すことが重要である。

5) 表面被覆を実施する際には、コンクリート表面の一部でも開放部分が存在すると被覆の効果は大きく低下することになる。

謝 辞

本研究を開始した時期は比較的早く、本文の2. にまとめた実験は1990年より供試体の作成を開始した。供試体の作成に際して、反応性骨材の選定、供試体の促進養生方法などに関し、関東学院大学の小倉盛衛先生のご指導をいただいた。また、本文の3. にまとめた実験は第一著者

が1992年から1993年にかけて英国シェフィールド大学に滞在した際に実施したものである。その際に、同大学のSwamy教授のご指導を仰いだ。ここに記して、両教授に厚くお礼申し上げる次第である。

(2003年 2月 14日受付)

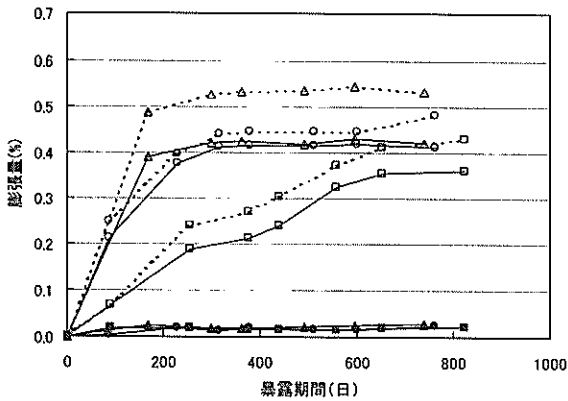
参考文献

- 1) 福手勤・瀨田秀則・山本邦夫：港湾コンクリート構造物に発生した亀甲状のひびわれの原因調査および対策に関する考察，港湾技研資料，No.694，Mar.1991.
- 2) 岩波光保・横田弘・鳥居和之・鈴木義晃・奥山和俊：アルカリ骨材反応により損傷したコンクリート部材の力学挙動と補強方法に関する提案，港湾技研資料，No.994，June 2001.
- 3) タレク ウディン モハメッド・瀨田秀則・山路徹：ASRが発生したコンクリートの特性および内部鉄筋ひずみとコンクリート表面ひずみの関係，港湾空港技術研究所報告，第42巻，第2号，2003.6. (予定)
- 4) 瀨田秀則，R.N.Swamy，谷川伸，Jaw-Chang Laiw：持続荷重およびASRの影響下にあるRCはりおよびRC柱の内部応力に及ぼす表面被覆の効果，コンクリート工学論文集，第6巻，第2号，1995年7月
- 5) R.Narayan Swamy and M.M.Al-Asali：Expansion of Concrete Due to Alkali-silica Reaction, *ACI Materials Journal*, January-February 1988
- 6) R.N.Swamy and M.M.Al-Asali：Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, *ACI Materials Journal*, September-October 1988
- 7) コンクリート標準示方書(設計編)，土木学会，昭和61年
- 8) 例えば，小柳治・六郷恵哲・内田裕市・長瀬道雄：著しいAAR損傷を生じたRCはりの挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，1993
- 9) 例えば，小柳治・六郷恵哲・石田裕哉：アルカリ骨材反応によるひびわれとRC部材の性状，セメント技術年報，39，昭和60年
- 10) 岸谷孝一・西澤紀昭・小野紘一・川村満紀・田村博・中野錦一：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「アルカリ骨材反応」，技報堂出版，1986.5
- 11) 総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」，建設省，平成元年

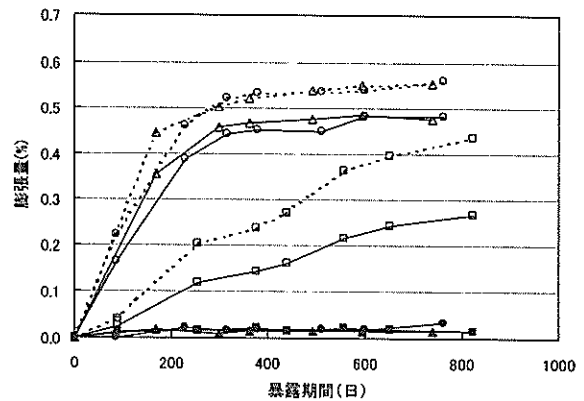
付録 本文に掲載していない実験データの補足

なお、付図-A. 1～付図-A. 5における凡例は、付表-A. 1に示すとおりである。

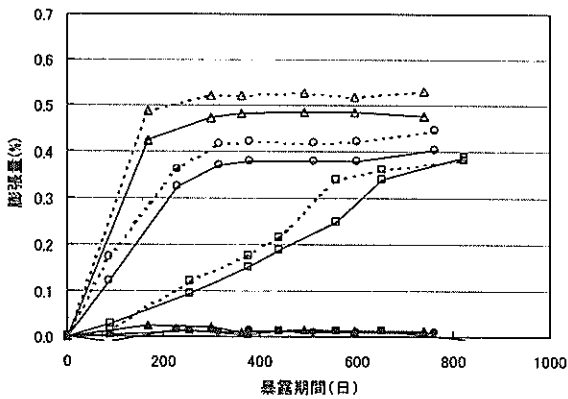
以下に、本文中に示さなかった各塗装仕様ごとの長さ変化（付図-A. 1～付図-A. 5）、圧縮強度（付図-A. 6～付図-A. 10）、付着強度（付図-A. 11～付図-A. 15）に関する全データを示す。



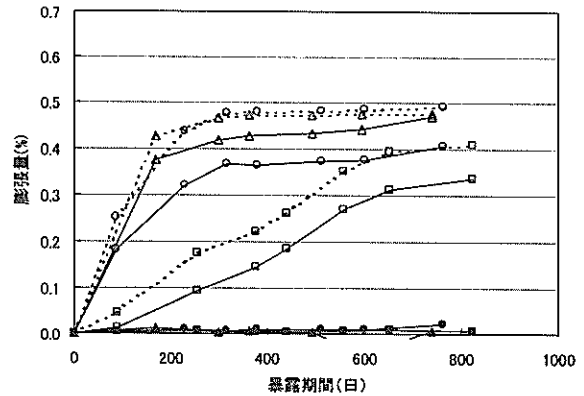
付図-A. 1 塗装仕様1番の長さ変化



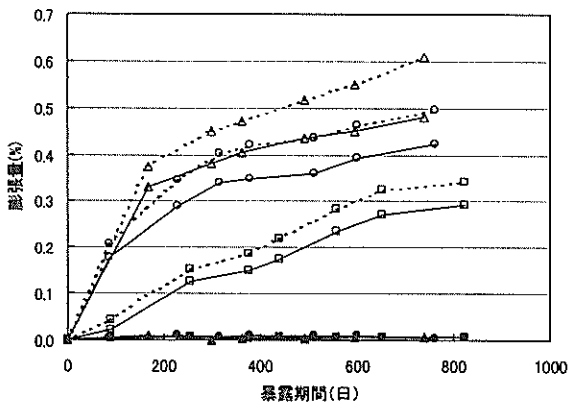
付図-A. 2 塗装仕様2番の長さ変化



付図-A. 3 塗装仕様3番の長さ変化



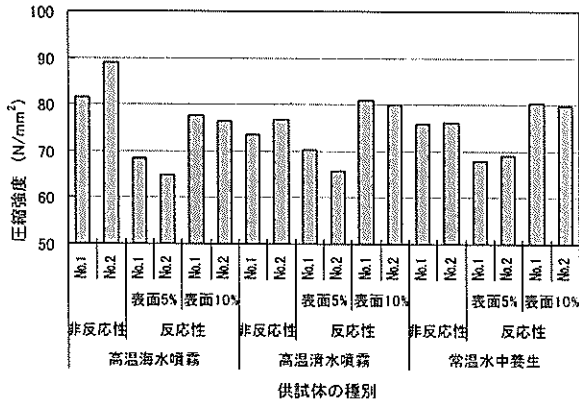
付図-A. 4 塗装仕様4番の長さ変化



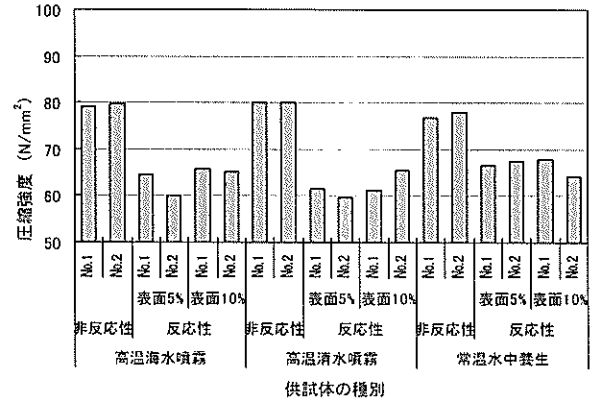
付図-A. 5 塗装仕様5番の長さ変化

付表-A. 1 長さ変化の図における凡例

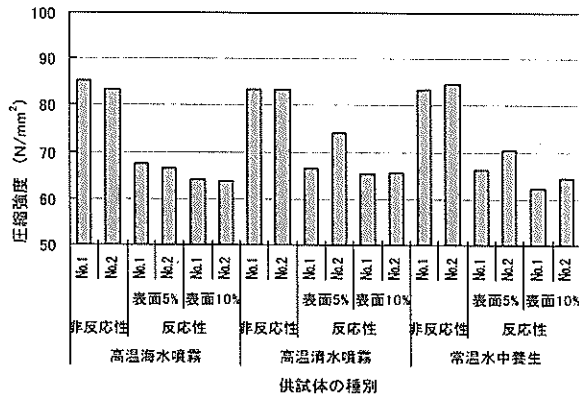
種類	養生条件	反応性・非反応性	表面水分
●	高温海水噴霧	非反応性	—
○		反応性	5% 10%
△	高温清水噴霧	非反応性	—
△		反応性	5% 10%
■	常温水中養生	非反応性	—
□		反応性	5% 10%



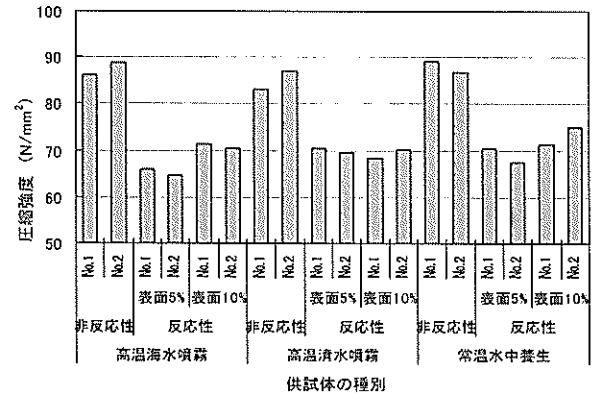
付図-A. 6 塗装仕様 1 番の圧縮強度



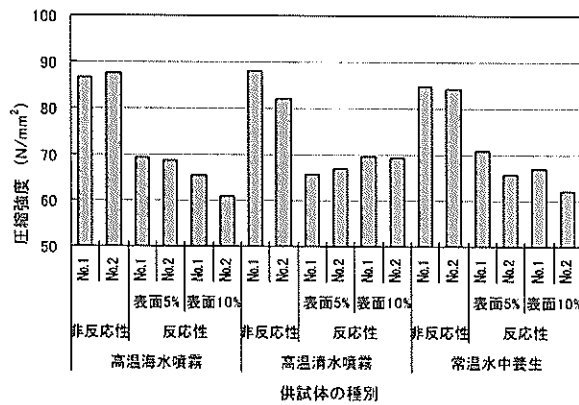
付図-A. 7 塗装仕様 2 番の圧縮強度



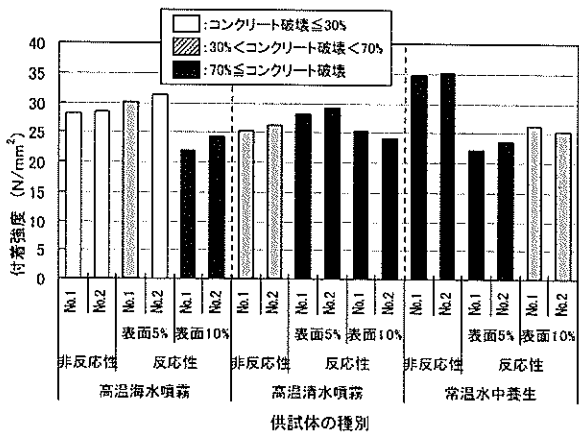
付図-A. 8 塗装仕様 3 番の圧縮強度



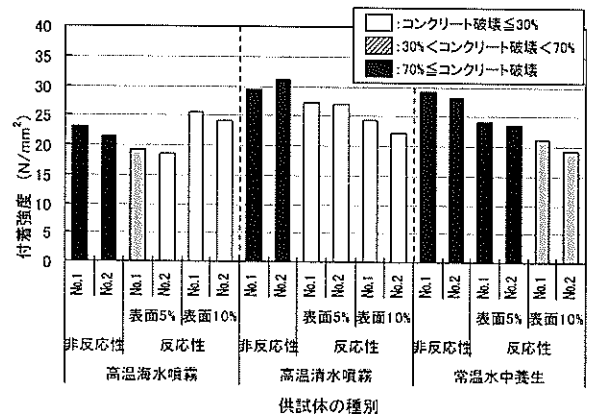
付図-A. 9 塗装仕様 4 番の圧縮強度



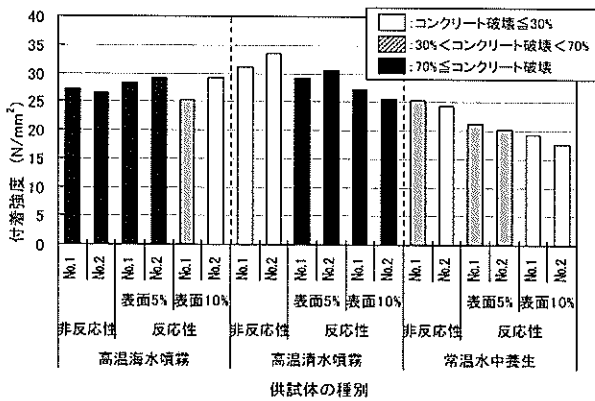
付図-A. 10 塗装仕様 5 番の圧縮強度



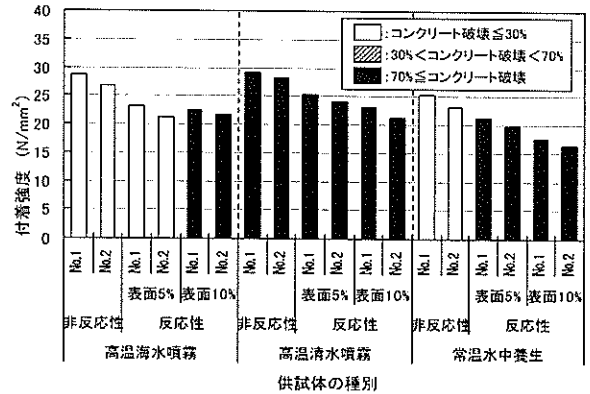
付図-A.11 塗装仕様1番の付着強度



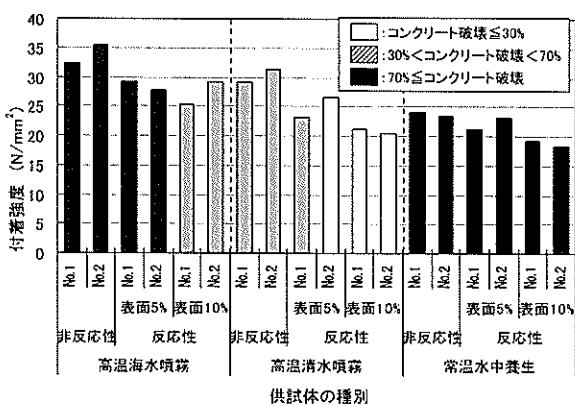
付図-A.12 塗装仕様2番の付着強度



付図-A.13 塗装仕様3番の付着強度



付図-A.14 塗装仕様4番の付着強度



付図-A.15 塗装仕様5番の付着強度

付録B 反応性骨材の種類および我が国における分布の状況

前述のように、我が国においてもASRの被害は重要視されている。ここで、参考までにASRに対する反応性が認められている骨材の種類⁹⁾を付表-B.1に、また我が国におけるこのような反応性骨材の分布¹⁰⁾を付図-B.1に示す。

これらの図表に示された骨材が必ず反応性を呈するわけではないが、反応性を示す骨材は多種存在し、また国内に広く分布していることが理解できる。このような反応性骨材が使用された、もしくは今後使用される危険性がある構造物においては、ASRに対する注意を要するものと考えられる。



付図-B.1 日本国内における ASR 反応性骨材分布図¹⁰⁾

付表-B.1 反応性が認められている岩種⁹⁾

No	岩石名	No	岩石名
1	Andesites (安山岩類)	20	Opal (オパール)
2	Arenite (アレナイト)	21	Opal silicious limestone (含オパールけい質石灰岩)
3	Argillite (アージライト)	22	Opaline chert (オパール質チャート)
4	Arkose (花崗砂岩)	23	Opaline sandstone (オパール質砂岩)
5	Basalt (玄武岩)	24	Opaline shale (オパール質頁岩)
6	Beekite (ビーカイト)	25	Phyllite (千枚岩)
7	Chalcedony (玉髄)	26	Quartzite (けい石)
8	Chalcedonic chert (玉髄質チャート)	27	Quartz sandstone (石英砂岩)
9	Charnockite (紫蘇輝石花崗岩)	28	Quartzarenite (石英質アレナイト)
10	Chert (チャート)	29	Quartzwacke (石英質ワケ)
11	Chlorite sandstone (緑泥石砂岩)	30	Rhyolites (流紋岩類)
12	Dacite (石英安山岩)	31	Rhyolites-obsidian (流紋岩-黒耀岩)
13	Flint (火打石)	32	Schist (片岩)
14	Granite (花崗岩)	33	Siltstone (シルト岩)
15	Granite gneiss (花崗片麻岩)	34	Slate (粘板岩)
16	Granodiorite gneiss (花崗内緑片麻岩)	35	Subarenite (サブアレナイト)
17	Greywacke (グレイワケ)	36	Subgreywacke (サブグレイワケ)
18	Hornfels (ホルンフェルス)	37	Vein quartz (脈状石英)
19	Novaculite (隠微晶質石英)	38	Volcanic glass sand (火山ガラス)

港湾空港技術研究所資料 No.1050

2003.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 0468(44)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 アベイズム株式会社

Copyright © (2003) by PARI

All right reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。