

アルカリ骨材反応に関する調査と対策

工 務 部 設 計 課 江 見 晋
同 部 同 課 古 池 正 宏
保 全 施 設 部 保 全 技 術 課 沖 野 真
同 部 同 課 冨 田 穰

要 約

日本では品質管理の対象外に置れていたアルカリ反応骨材による被害を松原線鉄筋コンクリート橋脚に見出してから、その原因の追求、反応性骨材の膨張特性調査研究を進めてきた。

本報文は、昭和57年度より委員会を組織して実施してきた調査研究の成果が、工用骨材管理（昭和59年10月）、コンクリート構造物の管理指針（昭和60年6月）の形で暫定的ではあるが実施に移されたのを機会に、これらの成果をとりまとめるとともに、今後の検討課題や継続業務の中間報告を行うものである。

内容は、アルカリ骨材反応による損傷状況と用いられた骨材の膨張特性ならびに損傷調査、阪神間骨材に対する判定手法の適用性、予防対策としての工用骨材管理とその状況、その他の予防対策手法の検討、損傷構造物の耐荷力および管理指針の施行と補修検討についてアルカリ骨材反応に関する検討事項を中間的に総括したものである。

まえがき

昭和57年5月阪神高速道路大阪松原線における点検で発見された鉄筋コンクリート橋脚の異常ひびわれを、従来日本では例の少ないアルカリ骨材反応によるものと判定し、研究を進めてから4年目に入っている。この間、公団がアルカリ骨材反応による損傷と示したことにより、同じコンクリート構造物損傷である「塩害」に続くコンクリートクライシスとして社会的に取上げられ、我国での研究への取組みは急速な展開がなされようとしている。

本報告は、公団でのこれまでの調査・研究の成果を中間的にとりまとめるとともに、現時点での

問題点や今後の課題を示したものである。

内容は、アルカリ骨材反応のメカニズム、反応判定法、供試体レベルでの反応部材の耐荷性状、防止対策や補修対策の検討を中心とした「反応性骨材コンクリート調査研究委員会」および、実橋における耐荷力評価と補修対策の検討を中心とした「コンクリート構造物の健全度に関する調査研究委員会」（いずれも岡田清京都大学教授を委員長とする）での調査・研究よりまとめたものである。

これまでのアルカリ骨材反応に関する調査研究の経緯の概略を表1に示す。現在、阪神公団では暫定的ではあるが、工用骨材管理については昭和59年10月より、損傷構造物の管理指針については、昭和60年6月より実施している。

表-1 調査・研究の経緯

	昭和57年度	昭和58年度	昭和59年度	昭和60年度
損傷 反応特性	R C橋脚損傷調査 (松原線) ↓ コアの膨脹特性 (AS Rと判断)	→反応性骨材の特性 (分析、ASTM適用)	損傷構造物の実態調査 コアによる調査・分析 粗骨材(5種)の特性	} 管理指針(案) (60.6) 細骨材の特性
判定手法 骨材管理 予防対策		阪神間骨材調査 (粗骨材43)	→骨材管理案(59.10) アルカリ量の分布 コンクリートバーの特性 AS R予防対策	セメントのアルカリ量 →(継続) ブリージングによる アルカリ量
耐荷性状		AS R供試体による 調査(R C梁の静的 耐力)	→拘束試験による物性 R C梁・P C梁の動的耐力 実橋脚の耐力	鉄筋拘束の少ない部材 耐力 →(継続)
補修	採取コアの補修効果		補修橋脚の追跡 コーティング材の補修効果	→(継続) →補修工法

1. アルカリ骨材反応構造物の損傷状況

本章では、アルカリ骨材反応機構の一般的説明のあと、阪神公団で最初に反応性骨材による損傷であると判断した主として橋脚の損傷状況を示す。

1-1 アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応とは、骨材中のある種の鉱物とコンクリート中のアルカリ性の細孔(溶液との化学反応であり、構造物の損傷は、この反応によるコンクリート内部での反応生成物質の吸湿に伴う膨張によりコンクリートにひびわれが生じること起因する。これらの反応は、骨材中の鉱物の種類によって

- アルカリシリカ反応
- アルカリ炭酸塩岩反応
- アルカリシリケート反応

の3分類されているが、当公団でのこれまでの調査では、すべてアルカリシリカ反応であるので、本報文ではアルカリ骨材反応としてアルカリシリカ反応(略称「AS R(Alkali-Silica Reaction)」)を取扱う。

AS Rによる損傷には、アルカリ、シリカ、水の3要因が同時に存在することが必要条件である。

かつ、ひびわれを生じさせる膨張の支配的要因は、アルカリ濃度の他、反応性骨材の混入量がある(最も反応を生じさせる混合比をベシム量と言う)。

1-2 AS Rによる構造物の損傷

アルカリ骨材反応による損傷として最初に認められた事例は、大阪松原線のR C橋脚6基である。これらについては一部報告されており¹⁾、膨張性ひびわれによる早期劣化であること、フライアッシュが用いられていたこと等から、ひびわれ発生に特色があることが示されている。

これらのAS R損傷に対し現在図-1の調査を立案・実施しているが、AS R損傷を生じている構造は、橋脚、P C桁、擁壁であり、そのうち橋脚での発生率が高い。

図-1に示す調査は、耐荷性、耐久性に関する項目の他、AS R確認調査から構成されているが、調査結果については既に詳細に報告されている²⁾ので主要な事項のみ以下に列記する。

1) ひびわれ調査

ひびわれは、部材の軸方向に鉄筋に沿って卓越する傾向にあり、最大ひびわれ幅は4~5mmに達している。また、深さは主鉄筋のかぶりの範囲に及ぶものが多い。

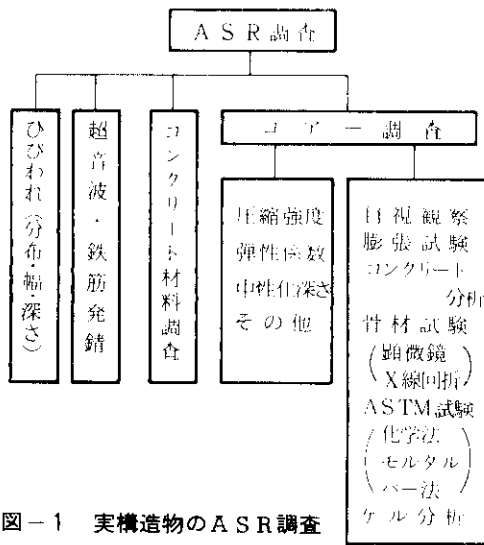


図-1 実構造物のASR調査

ASRによるひびわれ発生の特色として、伸縮継手漏水部等雨水の影響のある乾湿繰返しの多い場所に多い。

2) 損傷コンクリートの物性調査

シュミットハンマーによる測定、超音波伝播速度調査の結果橋脚梁の強度は、施工時の現場採取時の供試体の圧縮強度 ($\sigma_{c0} = 332 \text{ kg/cm}^2$) 対し、30%程度低目の値 (1 橋脚30ヶ所の測定結果) がでていた。また、超音波伝播速度も、ひびわれの多い梁については、1,200 ~ 1,500 m/sec と健全な場合の場程度と低い値を示した。また、同じ橋脚のコアの圧縮強度は、上記 σ_{c0} 強度の約80%であった。

3) 採取コアによる岩石学的分析

ASR損傷橋脚の採取コアによると、岩石は急冷された火成岩、堆積岩で、その岩種は流紋岩質溶結凝灰岩、古銅輝石安山岩が特定された。古銅輝石安山岩には、ASRを起すシリカの形態として含水珩酸ガラスが50~60%含まれており、粉末X線回折より回折角22度付近に反応性シリカ鉱物の α クリスタバライトが確認された。また、凝灰岩では、石英、長石類が主要鉱物であった。

4) コアの浸出ゲル調査

ASRにより浸出するゲルおよび骨材の周辺にできる反応リングをコア試験片より観察、検査

した。写真-1、2は、それぞれ浸出ゲルの状況、反応リングの状況である。ゲルを重量法による化学分析をした結果を表-2に示すが、多量の SiO_2 と少量の K_2O 、 Na_2O 、 CaO からなりたっている。



写真-1 反応ゲルの浸出

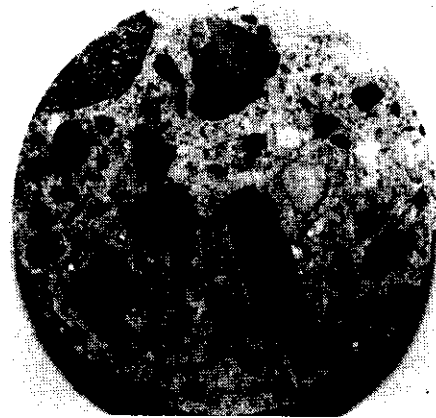


写真-2 反応リング

表-2 析出ゲルの化学分析結果

化学成分	含有量 (%)
SiO_2	78.64
CaO	0.61
Na_2O	1.53
K_2O	2.24
合計	83.02

5) 採取コアによる膨張性試験

構造体として拘束されていたコアは、採取後解放され膨張するが、ASR構造物では、この解放膨張量がASR損傷履歴と対応すると考えられる。また、解放膨張量が収束したコアを促進養生した促進(残存)膨張量は、構造物が今後どのように反応→膨張→損傷するか、または反応が終局に達しているかを示唆すると考えられる。

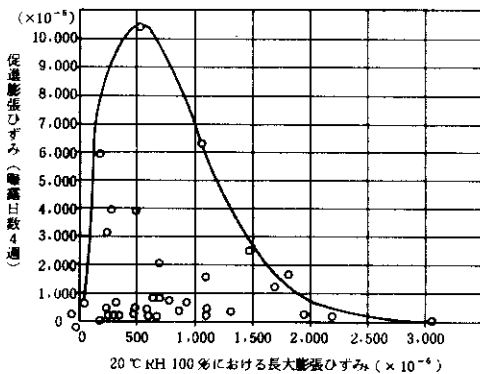
① 解放膨張量測定結果

12橋脚より採取したコア(φ10 cm×25 cm)での最大膨張量は、ひずみ度で $3,070 \times 10^{-6}$ 程度である。

② 促進膨張量

促進膨張量は4週間で最大 $10,400 \times 10^{-6}$ に達するものもあり、この量の大きなものは実橋脚も今後膨張を継続すると考えた方が良くと思われる。

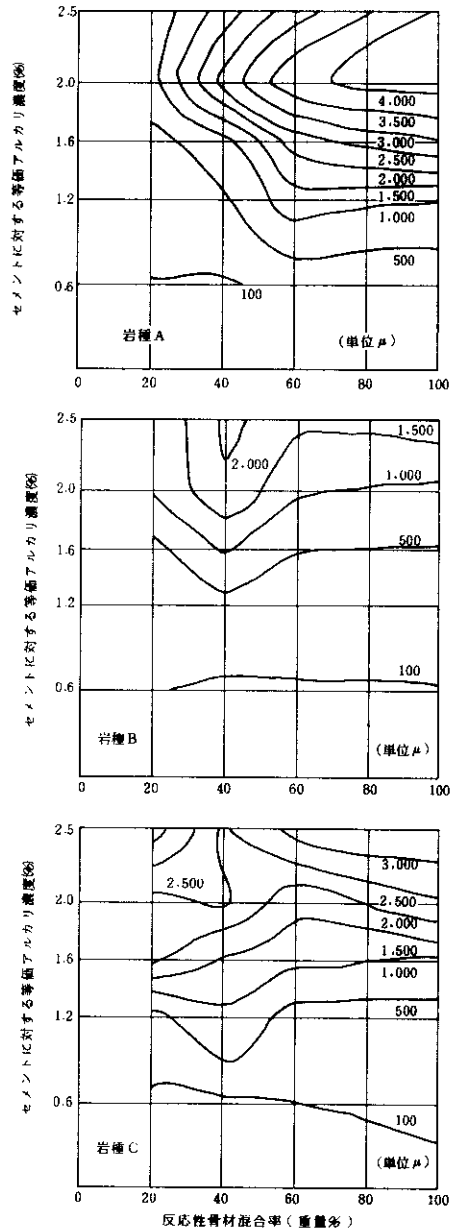
図一2より、解放膨張量の比較的小さいコアの中に促進膨張量の大きなコアがみられるが、開放膨張量は実損傷の程度と現時点では必ずしも結びついていなかった。また促進膨張量は維持補修への有益なデータとして位置付けられる。



図一2 20℃RH100%と促進養生とにおける最大膨張ひずみの対比

2. 反応性骨材の膨張特性と判定試験法

アルカリシリカ反応に関する試験は、反応性骨材の種類、膨張特性への適用性、試験に要する時間等、各国の状況にあった試験法が検討され、アメリカ、イギリス、ドイツ、デンマーク、カナダ、



図一3 等膨張線図(材令3M)

中国でそれぞれ実施されている。

本章では、被害の確認された古銅輝石安山岩に適合する試験方法を決め、この試験による阪神間における骨材の反応(膨張)状況を示す。

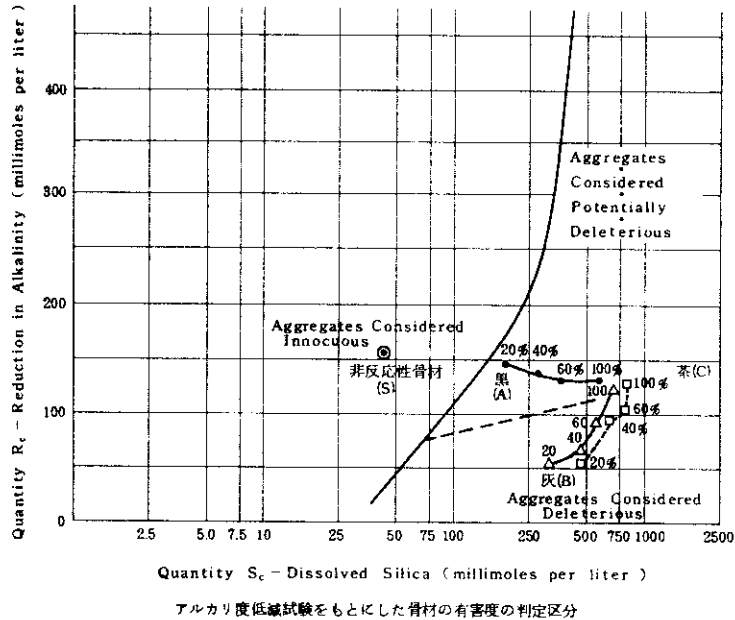


図-4 ASTM C 289による試験結果

2-1 古銅輝石安山岩に対する試験

古銅輝石安山岩の膨張特性をアメリカのASR判定手法であるASTMによる方法で検討したのが図-3（モルタルバー法）、図-4（化学法）であり、鉱物種類と色より分類したA（黒色）、B（灰色）、C（茶）に対しそれぞれの特性を示した。これらの図で、特にベシマムとアルカリ濃度を反応要因としてとらえた。総括的には、現在最もASR損傷の発生している古銅輝石安山岩においては、骨材A、Cの含有量の多い骨材で、アルカリ量の多い場合（等価アルカリ量がセメント重量比0.6%以下では膨張しない）に問題があると言える。

以上のASTM法は、化学分析の知識、設備とか、判定に時間が要する（6ヶ月）ことに難点があり、より実施容易なドイツ法の適用性を検討した。

ドイツ法は、反応性細骨材に対してはNaOH溶液で溶解させ、その減少量の程度で判定するもので、検討の結果、重量の減少傾向は骨材の反応、非反応性と合わなかった。

このため、我国がアメリカ西海岸と同じく環太

平洋造山地帯の一部に位置すること、上述の古銅輝石安山岩に対する結果より、今後の検討にはASTMの判定試験を適用するものとした。

2-2 ASTM試験法による阪神間骨材の膨張特性

2-2-1 阪神間骨材調査

昭和58年時点の建設工事に使用されているセメント、細・粗骨材、混和剤について、図-5の調査フローを策定し、表-3の調査を実施した。これらの調査によると、対象生コンクリート工場は、兵庫・大阪地区170工場のうち35社、プラント船2を加え37ヶ所である。細骨材数は、海砂37、山砂13、海砂単独使用は24、海砂・山砂混合使用は13で山砂単独使用はなかった。また、粗骨材は、山砂利1、碎石41、混合使用1の計43で、その岩種として流紋岩および流紋岩を主体とするもの33、硬質砂岩10であった。細・粗骨材とも、単一産地より購入されている傾向であった。

なお、海砂の塩分は、分析結果によると、すべて0.1%以下、セメントのアルカリ分は、ヒアリ

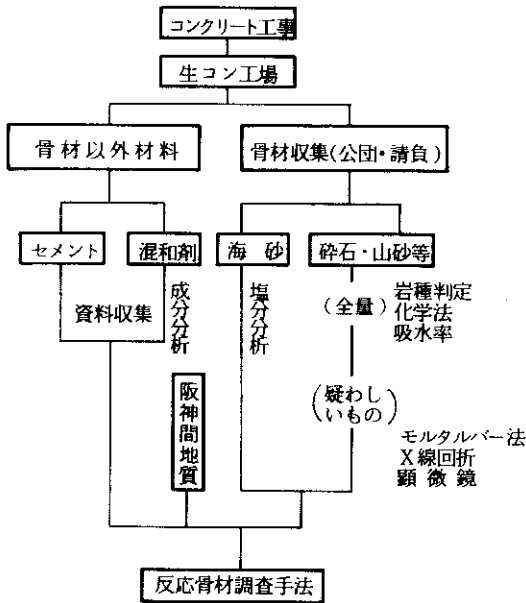


図-5 調査の流れ図

ング結果より最大1.0%（セメント重量比率）であった。セメントのアルカリ分については、後述2-3-3の関連より、昭和60年度分析中であるが、上記1.0%を大きく越えないと推定される³⁾。

2-2-2 ASTM試験法による骨材の膨張特性

収集骨材を用いて阪神間骨材の膨張性状をASTMの試験法により検討した。

まず、ASTMC-227は、指定粒度に細粒化した骨材でモルタルバーを作成し、38℃RH100%の促進養生を行い、膨張ひずみを測定するものである。また、ASTMC-289は粉砕した骨材を1N-NaOH溶液に入れ、骨材より溶解したシリカ量Scと消費されたアルカリの減少量Rcを測定し、図-4に示す判定図より判定するものである。

ASTMC-227では、アルカリ量が指定されていないので、本検討ではセメント重量比として1.2%と2%を用いた。

図-6、表-4に両判定結果を組合せて示した。調査結果として、

表-3 調査項目

材 料	項 目	数
粗 骨 材	1 目視による岩種判定	43
	2 物理的性質の測定（比重・吸水率）	43
	3 ASTM C-289（化学法）	43
	4 顕微鏡による岩種判定	13
	5 粉末X線回折および同定	13
	6 ASTM C-227（モルタルバー法）	13
海 砂	7 塩分の測定	38
細 骨 材 （山砂）	8 比重・吸水率の測定	11
	9 ASTM C-289（化学法）	6
混 和 剤	10 Ca, Na, K, Cl 量の測定	13
セメント	11 アルカリ分(R ₂ O)のヒアリング	10

表-4 ASTM判定結果

（試料数）

化 学 法 (ASTMC-289)	判 定		粗骨材	細骨材
	無 害	有 害		
モルタルバー法 (ASTMC-227)	等 価 アルカリ濃度	1.2 %	3ヶ月 無害	8
			3ヶ月 有害	1
	2.0 %	3ヶ月	無害	12
			有害	3
	6ヶ月	3ヶ月	無害	13
			有害	3
6ヶ月	6ヶ月	無害	9	
		有害	1	
6ヶ月	6ヶ月	無害	4	
		有害	5	
6ヶ月	6ヶ月	無害	9	
		有害	1	
6ヶ月	6ヶ月	無害	4	
		有害	5	

注) 粗骨材はモルタルバーを13試料のみ実施

1) 化学法では、19試料が有害または潜在的有害と判定され、これは全体の約40%を占めた。殆ど全ての試料は溶解シリカ量Sc、アルカリ濃度減少量Rcがおおよそ100mmol/l以下の範囲で、有害なものはSc ≥ 50である。また、同一産地、同一岩種の試料が必ずしも有害と判定されていない。

2) モルタルバー法では、粗骨材については、化学法で無害とされた骨材はいずれも無害といえる（8試料）、化学法で有害と判定された骨材のうち、アルカリ濃度2%の場合、モルタルバー法においても有害と判定される試料がある（4試料）。

3) 岩石学的試験ではすべての試料が流紋岩系系統であると思われること、化学法、モルタルバー法による結果との相関性を認めにくい。α-クリ

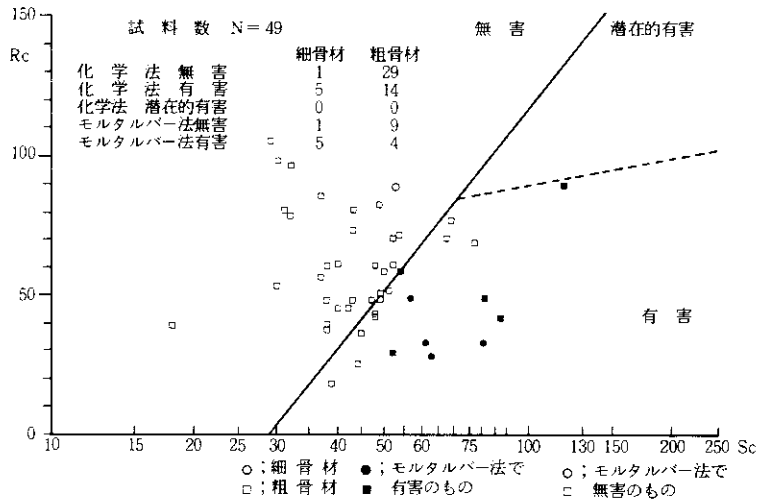


図-6 ASTM法による判定状況

ストバライトは確認されなかった。

2-3 反応性骨材の判定手法と課題

前節の結果、ASTMの判定試験により阪神間の骨材の反応特性が示めされることがわかったが、ASTMの判定法には次のような問題が考えられる。

(1) 岩石学的試験

岩石のアルカリ反応の潜在性を判断しうが、その岩石の反応性を予測することはできない。

(2) 化学法

化学法における反応条件は実際のコンクリート内部のものとは異なり、ASRによる膨張の程度を示しえない。また、判定線はアメリカでの現場の経験に基づいたものであることに考慮すべきで、かつ境界線上の判定がむづかしい。

(3) モルタルバー法

実際のコンクリートの膨張との関連が不十分である。遅延性の膨張挙動の骨材に合わない。実際の工事では、骨材混合が変動レベシマムに近づく可能性がある。現実の乾湿繰返しの環境は試験条件よりもASR反応を助長するので本試験法は危険側の可能性がある。

これらの課題のうち、現在検討中のものを以下に示す。

2-3-1 コンクリートバーにおける膨張特性

モルタルバーの膨張量は、骨材が細粒化されており実構造物の反応と比較して促進されたものと考えられる。本節では、実構造物のASRをモデル化するものとしてコンクリートバーによる膨張特性を把握するものとした。検討に際しては、前節2-1と同様に骨材混合率、等価アルカリ量を要因とし、コンクリートバーは100×100×400mmで鉄筋拘束をして40℃RH100%の促進養生を実施した。反応性骨材として古銅輝石安山岩を用いた。図-7は等膨張線を示しているが、図-3に比して、膨張量の値が小さいこと、ベシマムが30～60%にあること、等価アルカリ量が3kg/m³以下では殆ど膨張しないことが言えるが、昭和60年度も実験中である。

2-3-2 阪神間での反応性粗骨材の膨張性状

阪神間で反応性骨材の疑いのある粗骨材5種の反応性や膨張の程度を検討した。

表-5は、使用骨材の化学法、モルタルバー法(3ヶ月、12W)の結果、表-6はコンクリートバー法の結果でセメント量をパラメータにしている。表-5、6より、コンクリートバー法の膨張

表-5 使用骨材の性質

骨材の種類別	骨材の産地	表乾比重	FM	化学法試験結果				モルタルバー膨張量 (3ヶ月) (×10 ⁻⁶)	
				溶解シリカ量 Sc (ミリモル/ℓ)	アルカリ濃度 減少量 Rc (ミリモル/ℓ)	Sc Rc	判 定	等価Na ₂ O = 1.2%	等価Na ₂ O = 2.0%
粗骨材	垂水	2.60	7.81	81	48	1.69	有害	523	1,672
	豊島	2.55	6.62	775	170	4.56	潜在的有害	1,100	3,900
	風吹	2.60	7.38	118	88	1.34	潜在的有害	385	940
	神ノ島	2.62	7.31	52	29	1.79	有害	372	850
	加古川	2.61	7.26	67	70	0.96	有害	308	480
	高槻	2.69	6.65	43	152	0.28	無害	17*	-
細骨材	垂水	2.55	2.96	44	25	1.75	有害	-	-
	室水	2.54	2.33	28	70	0.40	無害	-	-

* 等価Na₂O = 0.95%

表-6 コンクリートバーの膨張量

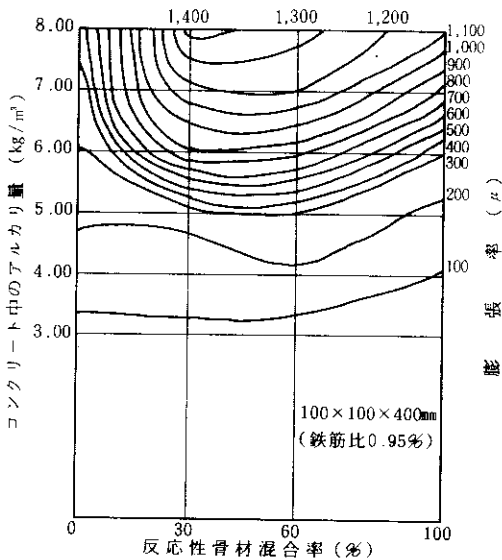


図-7 コンクリートバー等膨張線図(54週)

量は、モルタルバー法(1.2%)より伸びる可能性があり、特にセメント量が500 kg/m³以上になると(等価アルカリ濃度1.2%とすると、6 kg/m³以上の等価アルカリ量となる)膨張量は急激に伸び、アルカリ総量での規制の必要性が伺われる。コンクリートバーの膨張量は、特に豊島産、続いて垂水産が大きい。

なお、細骨材に関しては、主流を占める海砂に

粗骨材	細骨材	単位セメント量 (kg/m ³)	各材令(週)における膨張量(×10 ⁻⁶)									
			4w	6w	8w	10w	12w	14w	16w	18w	24w	
垂水	垂水	300	124	166	142	154	154	160	154	160	166	
		350	136	178	160	184	160	206	184	202	214	
		400	118	172	160	160	196	214	220	226	274	
		500	107	178	196	202	226	273	297	416	761	
		600	118	196	206	237	291	392	530	688	1,210	
		700	118	196	206	237	291	392	530	688	1,210	
豊島	室水	300	77	36	60	54	54	83	101	89	137	
		350	42	6	24	42	36	54	68	72	120	
		400	24	54	95	89	78	119	142	148	190	
		500	178	518	753	1,024	1,172	1,340	1,442	1,506	1,667	
		600	601	1,066	1,386	1,684	1,833	2,006	2,148	2,249	2,512	
		700	601	1,066	1,386	1,684	1,833	2,006	2,148	2,249	2,512	
垂水	室水	350	220	220	190	190	214	202	220	226	268	
		400	101	101	89	101	113	95	137	149	190	
		500	143	107	125	155	179	179	226	238	470	
		600	95	83	101	131	166	178	256	328	619	
		500	36	48	60	66	89	83	95	130	173	
		600	24	54	60	59	88	94	166	178	303	
神ノ島	室水	500	60	54	72	92	113	119	156	178	310	
		600	6	6	12	48	83	89	131	160	351	
		500	68	148	160	166	184	244	238	286	339	
		600	72	95	107	161	166	232	244	332	523	
		350	18	12	12	24	18	0	48	83	71	
		500	30	-24	-12	24	24	24	49	48	48	

は膨張性が無かったこと、工所用骨材管理の過程で化学法で有害となる山砂は、海砂との混合使用では化学法は無害であった。

2-3-3 判定に用いるアルカリ量

ASRに影響の大きいアルカリ量は、ASTMC

- 227 では規定されていない。前述の検討ではセメント量に対する等価アルカリ濃度を1.2%、2.0%を標準としたが、これは、セメント中のアルカリ分を約1%強、海砂によるものを0.1%とし合計を1.2%として、また、後者は、松原線RC橋脚よりのコアでの分析値より⁴⁾2.0%と設定したものである。このことからわかるように、材料からのアルカリ量と、コアでの分析値と数値がかなり異なっており、これは1つには、分析法の差や、骨材中のアルカリ分の問題があると考えられ、セメントのアルカリ分析、水和反応によるアルカリ量の変化を昭和60年度実施中である。

3. アルカリ骨材反応の予防対策

3-1 予防対策の手法

ASR 損傷予防の手法として、①アルカリ、シリカ（骨材）、水の3要素を1つ排除する、②ASR 膨張を制御するの2つがある。

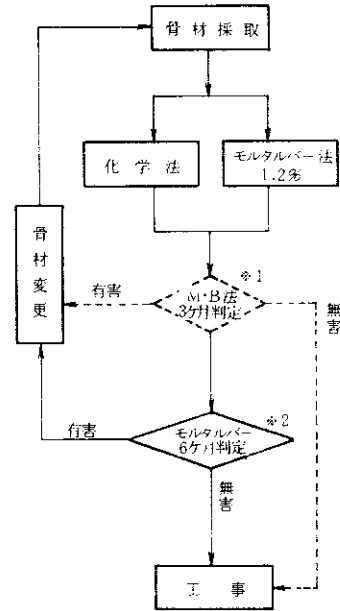
①の反応要素の排除は、低アルカリセメント、非反応性骨材の使用であるが、水は練混ぜ水のみによってもASRが進行することも考えられ排除は困難であろう（練混ぜ水によるASR検討を昭和60年度実施中）。

この方法は実効上の確実性が高いが、対策用低アルカリセメントの値段、場合によっては骨材の地方材料活用性の点に問題がある。

次に②については、①より確実性がおちると考えられ、また我国の骨材に対する今後の調査・研究に負うところが多いが、①より合理的なものと位置付けてよいと思われる。②の対策を以下に示す。

- 高炉スラグ・フライアッシュによる膨張抑制（抑止メカニズムは十分わかっていない）
 - 含有アルカリ量を低減する配合
 - 水分・塩分の浸透をさける（初期欠陥のない密なコンクリートを作ること、また、排水処理を検討することや表面処理による防水）
- ②の対策事例としては英国のガイダンスがある。

3-2 阪神公団の予防対策



*1: 止むを得ない場合はモルタルバー3ヶ月で判定 無害 < 500 μ ≤ 有害
 *2: 判定基準 無害 < 1,000 μ ≤ 有害

図-8 工所用骨材管理

3-2-1 工所用骨材管理

ASR 防止措置として、第2章で示した阪神間骨材調査の結果等、前述委員会でのこれまでの調査研究成果を参考にし、阪神高速道路の社会的重要性ならびに必要とされる耐久性確保のため暫定的に、昭和59年10月より工所用骨材管理を実施した。

図-8は暫定管理フローであるが、

①原則として反応性骨材を用いない。②ASTMC-227（等価アルカリ濃度：1.2%）ならびにASTMC-289を準用し判定する。③判定に用いるセメントは1種類とし、使用骨材混合率によるものとし運用上

④現時点ではASRに関する技術的データ収集の段階でもあり、小規模工事を除いた全コンクリート工事に実施する。⑤管理時期は、当初ならびに施工量の $\frac{1}{2}$ 程度の頃の2回とするものとした。

図-9は、昭和59年10月より昭和60年8月までの骨材管理結果であり、化学法ではかなりの割合で有害、また、モルタルバー法による有害は1例

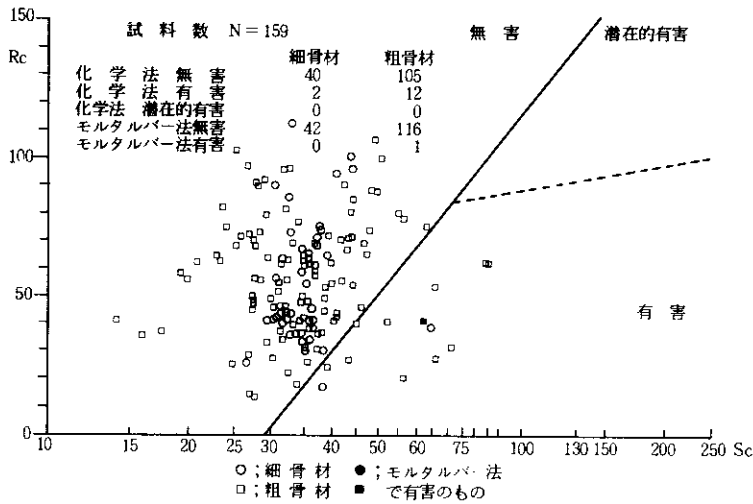


図-9 工専用骨材管理結果(59.10~60.8)

例のみである。

これまでの調査ならびに骨材管理の結果、①モルタルバー6ヶ月の判定期間の工程への影響がある場合が多い、②化学法で有害と判定された試料で、溶解シリカ量(Sc)が50 mmol/l未満のものでモルタルバー法で有害となったものがない、③モルタルバー法において3ヶ月の膨張量500 μ以下の試料は1例を除いて6ヶ月で1,000 μ以下の膨張量である、④反応へのアルカリ量の影響を考えると使用セメントのアルカリ量が不明である等の状況がある。

3-2-2 予防対策検討

ASR膨張制御方策の検討にあたり、

①スラグ混入量、②フライアッシュ混入量、を対象とし環境条件(塩水半浸のケースは外部よりのアルカリ分の供給を想定)を組合せた。これらの結果は、昭和60年度実施中の実構造物での反応レベルを想定したコンクリートバーによる検討と合せて別途報告したい。

4. アルカリ骨材反応構造物の耐荷性状

本章では、ASRによる損傷が構造物の耐荷力に与える影響を、供試体と実構造物より検討する。

4-1 反応性骨材を用いた供試体の耐荷力

対象構造物として橋脚や桁を考え、比較的鉄筋拘束のある曲げ挙動を検討することとし、RC梁、PC梁供試体を用いた。ただし、本報文中では、RC梁供試体での中間結果までを示す。

4-1-1 RC梁部材の静的保有耐荷特性

RC梁の静的保有耐荷特性は、すでに報告されている⁵⁾ので、結果を要約し示す。

① ASRによる膨張が主鉄筋やスターラップ筋によって拘束され、いわば一種のケミカルプレストレスとして部材内部に圧縮応力が誘起される。

② ケミカルプレストレスを考慮して算定した降伏耐力、終局耐力は、非反応性部材と大差ないことが実験で確認された。また、この実験での部材破壊は曲げ破壊であった。

③ 部材の荷重-たわみ関係の初期弾性領域における勾配はほぼ同じであるが、直線区間は反応性部材の方がやゝ長くなる。全荷重領域での関係は大差ない。

4-1-2 RC梁部材の動的保有耐荷特性

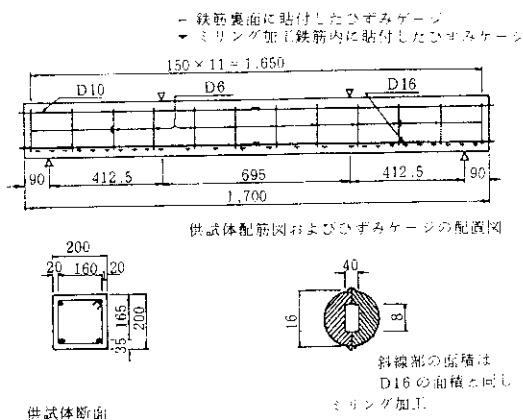
1) 実験概要

供試体は、静的耐荷試験と同じ20×20×170 cmで、引張側D16、圧縮側D10、主鉄筋比は

表一 8 疲労試験結果

シリーズ	供試体	破壊時上限荷重	繰返回数	破壊箇所	
非反応性	No. 1	10.85 t	28,500	M	
	No. 2	10.85	17,400	S	
反	A	(養 生 中)			
		No. 2			
応	B	No. 1	11.85	5,000	M
		No. 2	10.85	100,000	M
性	C	No. 1	10.85	49,800	M
		No. 2	10.85	72,000	M

注) 破壊形式はすべて主鉄筋の疲労破断
破壊箇所 M: 曲げスパン, S: セン断スパン



図一 10 モデル供試体の詳細

1.2%である。また、スターラップはD6を15cmピッチとした。

本実験にあたっては、反応性膨張レベルをA、B、Cの3レベルとし、ASRの進行程度による動的耐荷力を評価するものとした。

図一10は、供試体配筋とケージ配置図である。

現在、C、Bレベル(スターラップの測定ひずみが順に500 μ 、1,000 μ のもの、なおAは1,500 μ 以上の最大膨張)まで実験が完了している。

2) 付着試験(静的)

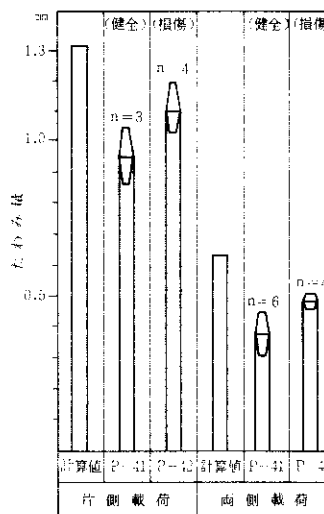
付着応力は、図一10のようにゲージを貼付けて鉄筋ひずみを測定し、ひずみから算定した。表一7はその結果であり、B、Cシリーズとも非反応性のもと変化なく、付着は健全な状態で保たれていたと考えられる。

表一 7 付着(静的)試験結果

荷 重	実 験 値			
	非反応性	反応性A	反応性B	反応性C
ひびわれ荷重	2.00 t	(養 生 中)	2.00 t	2.00 t
設 計 荷 重	-		-	-
主鉄筋降伏荷重	11.50		11.50	11.50
終 局 荷 重	13.75		13.30	13.75

注: 破壊はいずれも曲げスパン内でのコンクリートの圧縮破壊

3) 疲労試験



図一 11 実構脚載荷測定結果(片持梁先端)
(P-41,42 構造条件同じ)

表一8に示した繰返回数は、終局荷重での値であり、それまでに数10万回の繰返しを与えているため、これら部材間での疲労寿命には著しい差はないと考える。また、すべて鉄筋の疲労破断によって梁は疲労破壊した。

4-2 実構造物の耐荷力

ASR損傷構造物の供用上、耐荷力の評価のより説得力ある検討は、実構造物の載荷測定を実施することである。

実橋脚の耐荷力評価は、載荷測定による梁のたわみ性状を健全な橋脚と比較して行った。図-11はその結果の例で、たわみ量は大差なく健全な橋脚と同程度の剛性が保持されていると判断した。

4-3 反応性部材耐荷力の今後の課題

供試体や実構造物による耐荷力、たわみ性状検討の結果、ASR部材は非反応性部材と同様な性状を示すと評価されたが、これらの結果に対して次のような検討・裏付けが必要である。

- ① 鉄筋拘束の少ない部材に対しても同様な結果がえられるか
- ② ケシカルプレストレスの長期的継続
- ③ 実構造物での弾性係数の低下が少なく、一方コアの弾性係数の低下が大きい理由
- ④ 降伏鉄筋を持つRC構造物の耐荷特性

これらのうち、③については、拘束の有無によるものと考え、軸筋やワープ筋で拘束された供試体(φ15cm×30cm)を用い、強度、弾性係数の差を検討中である。また、④は、1,000μ程度の引張ひずみを受けた状態を初期値として荷重を受けた場合のRC構造物の挙動についてである。これについては初期ひずみレベルを $3\varepsilon_y$ (ε_y :降伏ひずみ)までの5段階のそれぞれRC梁を作成・載荷し、耐荷力を検討した結果、最終耐荷力に違いのないことを確めている⁶⁾。

5. 反応性骨材による損傷構造物の補修

ASR損傷構造物の耐荷性状は現在のところ健全な構造物と比べて問題はない。従って、損傷構造物の管理に対しての考え方は、耐久力に主眼を置くこと、すなわちひびわれを通しての①水分の新たな供給とASRの進行・ゲルの吸水膨張の防止、②中性化の進行や鉄筋の発錆の阻止、さらに橋脚梁端部のような鉄筋拘束の少ない部分のかぶりコンクリートの欠落防止や外観性が主体になると思われる。

5-1 骨材反応に対するコンクリート構造物の管理指針(暫定案)

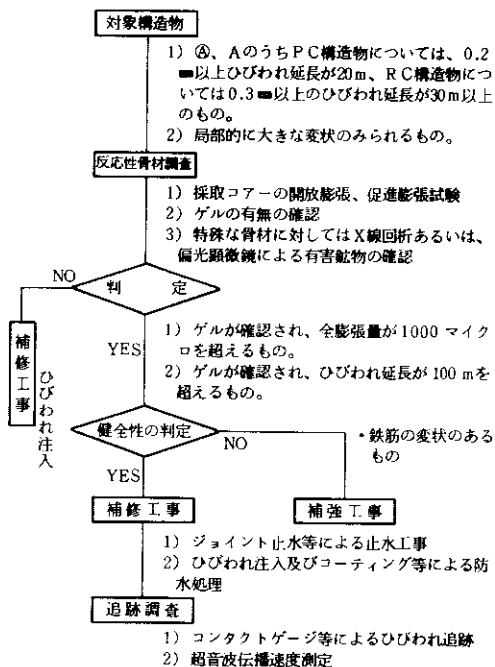


図-12 構造物の反応性骨材調査フロー

松原線のRC橋脚において異常ひびわれを発生して以来、その原因追求を初めとし反応性骨材による損傷のメカニズムに合った維持補修の考え方の確立をめざして検討を進めてきたが、これらの成果より暫定的ではあるが、補修に対する判断基準をとりまとめ、管理指針の形で昭和60年6月より施行に移した。この管理指針案は当然我国最初のものである。

管理指針(暫定案)の考え方を図-12に示す。

なお、図-12の対象損傷構造物は当公園の点検仕様での補修を要するランクA以上である。

5-2 補修材料とその効果

補修工法としては、ひびわれ注入工、表面被覆工が考えられるが、現在、後者の研究から進めている。

5-2-1 コーティングによる膨張抑止効果

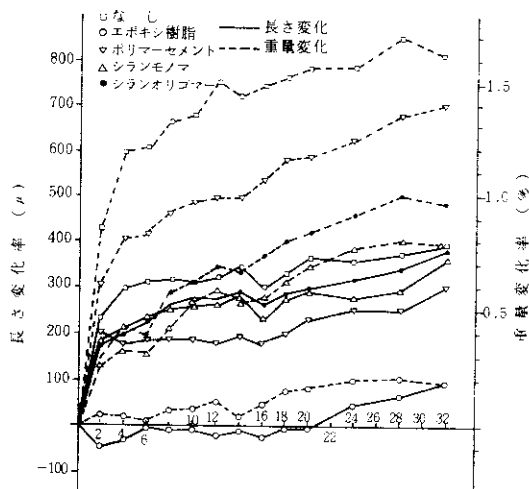
AS R 損傷に対する補修材料の持つべき要件としては、防水による膨張抑止性、コンクリートとの接着性、ひびわれ追従性、施工性、経済性の他材料自身の耐久性が必要で、さらには再補修時の要件も AS R の特性より検討しておく必要がある。(コンクリート構造物の補修用樹脂材料の研究は今後の進展が望まれるが、当公団でも(社)日本材料学会に委託し基礎的研究を継続している。

AS R 損傷に対するコーティング材料の補修効果の検討として、100 × 100 × 400 mm の無拘束コンクリートバーを用い、ヘアークラックが生じた

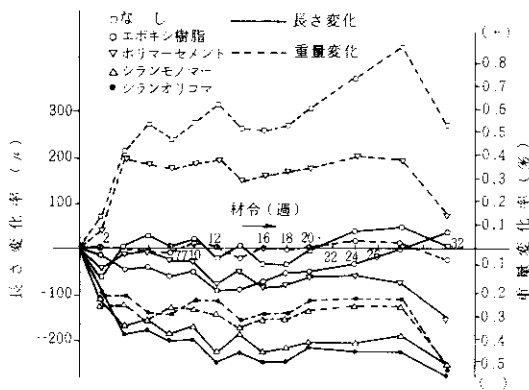
時点でコーティングし、その後、自然暴露と40℃RH 100%の促進養生および膨張量測定をしている。図-13は、32週までの結果である。

エポキシ樹脂(膜厚60μ)は、養生条件の差が少なく膨張抑止効果がみられる。一方、シラン系(含浸系)は、コンクリート内部水の発散効果を示しているが養生条件により効果の差がある。本検討は継続中であり詳細には別の機会に示したい。

なお、実橋脚に対してもすでに試験的にエポキシ樹脂、シラン、ポリマーセメント、アクリルウレタンを用い補修しているが、上記の研究成果により補修材料の選定を考えたい。



(1) 室内(20℃)→促進(40℃RH 100%)



(2) 屋外暴露→屋外暴露

図-13 補修材料による防水効果

5-3 補修についての今後の課題

コンクリート構造物の損傷については、補修すべき事例が増加しており今後大きな問題となると思われる。AS R 損傷も含め、補修の考え方を初め維持補修全般に渡る広範な検討が望まれる。AS R 損傷に対しても先ず AS R 損傷に対する最適補修とは何をどうすることなのかという考え方から明確にしていく必要がある。当公団の管理方針(暫定案)では、これまでの成果から補修工法を示しているが、現在も研究を進め、より最適補修をめざしている。すなわち、補修工法としての防水工法を主体とし、表面処理時期、表面水分量、塗布量をパラメータとして AS R 部材の膨張あるいはひびわれ発生の抑止効果を明確にすべく研究に入っている。

あとがき

阪神公団における過去3ヶ年と現在の調査・研究成果の概要を示した。

アルカリ骨材反応に対する取組みについては、反応性骨材を用いるようになった社会的背景、アルカリ骨材反応のもたらす社会的損害の規模、アルカリ骨材反応の持つ問題の波及する範囲等々の状況があるが、阪神公団では阪神地域での検討を進めてきた。

これまでの成果や今後の課題をふまえ、アルカリ骨材反応の問題対応の最終的な姿をどこに、ど

のように追っていくのか、今後の取組みの困難さが認識される。

しかしながら、今やアルカリ骨材反応は、コンクリート構造物の早期劣化による耐久性に係わる全国的な問題としての認識が明確になってきている。そして、建設省、土木研究所（昭和60年度より3ヶ年計画の総合プロジェクト体制）や日本コンクリート工学協会等々での全国組織での取組みがスタートされており、当公団の先駆としての役割はほぼ果たされたと思われ、今後は残された課題への取組みやこれらの上位組織の研究に協力していくべきものと考えている。

最後になりましたが、アルカリ骨材反応の原因が究明され、また暫定的とはいえ骨材管理・補修管理指針が実施されたのも、「反応性骨材コンクリート調査研究委員会」、「コンクリート構造物の健全度に関する調査研究委員会」の岡田清委員長を始め委員の方々の御尽力によるものであり、こゝに深謝いたします。

参考文献

- 1) 江見、山内、「高速道路におけるアルカリ骨材反応の実例と対策」月刊建設 1985.7
- 2) アルカリ骨材反応に関するシンポジウム テキスト (社)日本材料学会 1985.7
- 3) アルカリ骨材反応についての見解：セメント協会 1983.10.25
- 4) 反応性骨材コンクリートの調査研究報告書 昭和58年3月 阪神・管理技術センター
- 5) 同上2)
- 6) 水元・徳林：初期鋼材ひずみを有するコンクリート梁の力学特性 第17回技術研究発表会