

# 第二阪和高架橋で発生したコンクリートのひび割れ原因の考察と対応について

増田 寛四郎

近畿地方整備局 大阪国道事務所 管理第二課 (〒536-0004大阪府大阪市城東区今福西2-12-35)

供用開始から間もないコンクリート橋において、ひび割れが発生し、学識経験者を含めた特別委員会により詳細調査が行われている。しかし、その後の定期点検で、新たなひび割れが発見され、先の点検と比較した結果、損傷が進行している可能性があることを確認した。

本論文では、特別委員会の報告を補完する形で、各種追加試験を実施し、ひび割れの原因特定と補修工法の選定についてとりまとめたものである。検討の結果、進展するひび割れの原因は乾燥収縮によるものであり、その要因は、骨材組合せ及び単位水量と推測した。

キーワード コンクリート道路橋、乾燥収縮、劣化進行予測、維持管理、長寿命化

## 1. はじめに

コンクリート構造物は、適切な設計、施工を行えば高耐久性が期待できるため、公共構造物に広く使用されている。しかし、建設後の比較的早い段階で、予期せぬひび割れが生じるという事態は、その原因によってはコンクリート構造物の信頼性を揺るがしかねず、原因を究明した上で適切な補修対策が必要となる。

本論文では、第二阪和高架橋に発生したひび割れの原因を、各種試験により明らかにし、対策案を取りまとめた結果について報告する。

## 2. 背景

### (1)対象橋梁

第二阪和国道は、大阪と和歌山を結ぶ約53kmの幹線道路で、一般国道26号の慢性的な渋滞の解消を主な目的とした道路である。

本論文の対象橋梁は図-1の6橋(合計2,039m)で、2001年から2002年にかけて供用を開始した。対象橋梁の諸元を表-1に示す。

### (2)既往の調査・点検

対象橋梁に対し、以下の調査・点検が実施されている。

供用2年後に実施された第1回橋梁定期点検(以下「H17点検」)で、予期せぬ多数のひび割れが確認された。

それを受け、2008(平成20)年度に、学識経験者を含む「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会( (社)土木学会)」(以下、「特別委員会」)により詳細調査が行われた。その結果、劣化原因は乾燥収縮であり、緊急を要するひび割れでは無いと提言され、補修対策の提案も含めて2010(平

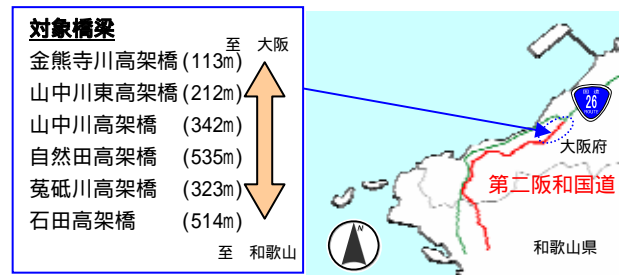


図-1 位置図

対象橋梁	
金熊寺川高架橋 (113m)	至 大阪
山中川東高架橋 (212m)	
山中川高架橋 (342m)	
自然田高架橋 (535m)	
菟砥川高架橋 (323m)	
石田高架橋 (514m)	至 和歌山

表-1 対象橋梁諸元

橋梁名	上部工形式	供用年次
金熊寺川	ボス箱	2001(H13)
山中川東	ボス箱, プレT	2002(H14)
山中川	ボス箱	2001(H13)
自然田	プレT, プレビーム	2002(H14)
菟砥川	ボス箱, プレT, プレビーム	2002(H14)
石田	プレT	2001(H13)

成22年3月に委員会報告書<sup>1)</sup>としてとりまとめられた。

しかし、2010(平成22)年度の第2回橋梁定期点検(以下「H22点検」)において、新たなひび割れが発見され、H17点検とH22点検を比較した結果、損傷が進行している可能性があることを確認できた(図-2参照)。

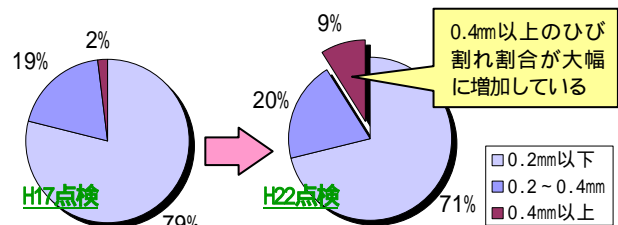


図-2 ひび割れ進展状況

### (3)使用骨材

対象橋梁で使用されている骨材産地の組合せは、委員会報告書と竣工図書を調査した結果、表-2のとおりであ

った。本論文では、骨材組合せを ~ の記号で表す。  
骨材の産地は図-3のとおり、近畿地方から九州地方の  
広範囲に及んでいる。

表-2 骨材の組み合わせ

骨材 組合せ (産地)	記号							
	細骨材	(海砂)	A	C	C	H	F	A
		(砕砂)	B	E	-	E	E	-
粗骨材	B	E	D	E	G	E		
骨材 使用状況	上部工	×						×
	下部工						×	

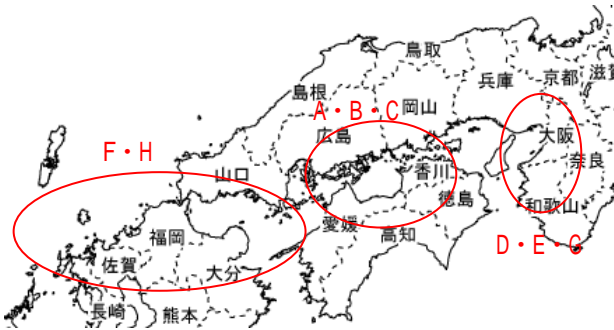


図-3 骨材産地

(4)近畿地方整備局での乾燥収縮に対する取り組み<sup>2)</sup>

2007年にコンクリート標準示方書が改訂され、設計編  
において設計上の収縮ひずみの最終値は最大1,200 μ 程  
度を想定するという考えが明らかにされた。また施工編  
においては、レディーミクストコンクリートの受け入れ  
基準として1,000 μ を越えないことが標準と規程された。

第二阪和国道は2007年以前に設計・施工が完了している  
ため、これらの規程は反映されておらず、ひび割れが発生  
した橋梁から採取した試料により乾燥収縮試験を実施した  
ところ、最終収縮ひずみが1,000 μ を越える結果となった。

第二阪和国道で確認されたひび割れの主要原因は、コン  
クリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる骨材が使用され  
たものと推定されたが、他の地域のコンクリートにも同  
一の産地、あるいは同じ性状を示す骨材が使用されてい  
る可能性がある。

そのような骨材を使用して製造されたコンクリートは、  
設計で想定している物性値との乖離が大きいいため、運用  
可能な具体的な作業手順（対策フロー）が定められた。

対策フローの中で、最終乾燥収縮ひずみが $8 \times 10^4$ 以上  
(従来は1,000 μ 以上)の場合は、そのレディーミクスト  
コンクリートの使用を原則として認めないこととしている。  
対策フローは、本検討の対象橋梁への調査・試験・解析  
を実施した結果に基づき、使用材料に起因する収縮が構  
造物の性能に悪影響を与えることが無いように、暫定的  
に特別委員会でとりまとめたものである。

3. 調査・試験計画

(1)発生している損傷の整理

H17点検とH22点検結果から、発生しているひび割れ

の進行状況について整理を行った。

a)上部工

使用骨材の組合せによって、損傷進行状況が異なって  
いる。特に および の組合せで進行が顕著である(表-  
3参照)。

また、同じプレビーム桁であっても、自然田高架橋で  
は損傷が進行しているが、菟砥川高架橋では、あまり損  
傷は進行していない。この違いは、使用している骨材組  
合せが異なるためと考えられる(図-4参照)。

表-3 骨材組合せごとの損傷進行状況

骨材 組合せ	構造形式	評価指数(1部材平均)		損傷進展 比(%)
		H17点検	H22点検	
自然田高架橋	プレ	7.4	8.9	121
	ボス箱	3.7	7.9	215
	プレビーム	255.4	771.8	302
菟砥川高架橋	プレ	2.9	3.8	133
	ボス箱	0.7	6.5	875
自然田高架橋	プレ	3.7	3.7	100
	ボス箱	0.4	0.6	139
	プレビーム	35.0	35.1	100

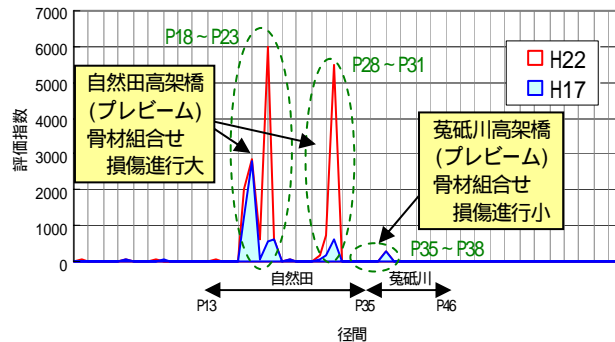


図-4 H17点検とH22点検の損傷状況比較

b)下部工

端支点橋脚、中間支点橋脚で顕著な差は見られないた  
め、伸縮部からの漏水による影響は小さいと考えられる。  
橋梁定期点検の損傷図からは、損傷は特定の方に偏  
っておらず全面に発生している。また錆汁の発生は認め  
られなかった。

上部工と比較すると、全体的に損傷の進行程度は低い  
結果であった。

(2)試験項目の選定

ひびわれの発生原因は、コンクリートの材料、配(調)  
合、施工・使用環境、構造、外力など様々であるが、一  
般的なものとしては、「中性化」、「塩害」、「ASR」  
が挙げられる。

特別委員会では、コンクリートの「乾燥収縮」ひずみ  
が大きくなる特定の骨材使用が原因としているが、確証  
を得るにはサンプル数が少ないことにも言及している。

a)中性化

特別委員会により十分に中性化残りがいることが確認  
されており、ひびわれの発生原因は、中性化によるもの  
で無いと判断した。

しかし、理論値よりも中性化は進行していることから、追加試験を実施することが必要と考えた。

b) 塩害

特別委員会により塩分含有量試験が実施されており、塩分濃度が0.14kg/m<sup>3</sup>と腐食発生限界濃度1.2kg/m<sup>3</sup>に対して十分小さな値となっていたため、ひびわれの発生原因は、塩害によるもので無いと判断した。

c) ASR

特別委員会において、岩種判定、骨材試験および残存膨張量の測定(JCI-DD2)が実施されている。残存膨張量の測定結果は、いずれも判定基準0.05%を下回ったが、0.047%の膨張量となった試料もあった。

特別委員会の調査時点では、ひびわれの進行が確認されていなかったため、ASRの疑いは低いと結論付けていた。

しかし、H2点検で新たにひびわれの進行が確認されたことから、遅延膨張性骨材によるASRの可能性が考えられた。

微細な結晶粒や歪んだ結晶格子をもつ石英が反応性鉱物である骨材は、膨張が非常にゆっくり進行するなどの理由により、JCI-DD2法では抽出できない要因がある。

よって、遅延膨張性骨材によるASRの検証可能なカナダ法(NBRI法)によるコアの促進養生試験を実施し、遅延性膨張骨材によるASRがひびわれの原因である可能性について検証した。

d) 乾燥収縮

特別委員会において、ひびわれの主原因は、特定の骨材の使用による乾燥収縮としている。

本検討で、骨材の組合せがひび割れの進行に影響していると考えられたが、特別委員会では、上部工・下部工のすべての骨材組合せに対する試験は実施されていなかった。よって追加試験を行い補完した。

e) DEF(エトリンガイトの遅延生成)

一般にDEF (Delayed Ettringite Formation) は、初期強度発現性を向上させるため蒸気養生された二次製品で見られる損傷である。

しかし最近、ごく稀ではあるが現場打ちコンクリートでも発生しているケースが見られる。よって、DEFが本ひび割れの原因である可能性も考えられた。したがって、粉末X線回折と偏光顕微鏡観察により、エトリンガイトの生成有無を確認した。

4. 調査・試験結果

(1) 試験実施数量

本検討での調査・試験の実施数量は表-4の通りである。

表-4 試験実施数量

調査・試験項目	単位	実施数量
ひび割れ密度	箇所	27
促進膨張試験(カナダ法)	試料	27
粉末X線回折	試料	9
偏光顕微鏡観察	試料	1
乾燥収縮試験	試料	15
中性化試験・かぶり測定	試料	27

(2) 試験結果概要

a) ひび割れ密度

損傷を定量的に評価するために、ひび割れ密度調査を行った。コア採取箇所近傍で範囲を設定してひび割れ長さを計測し、密度を算出した。

試験結果を用いて、「損傷程度」と乾燥収縮試験から求めた「最終収縮ひずみ」の相関を確認した。

b) 促進膨張試験(カナダ法)

全ての試料で、膨張率が0.1%以下となり無害となった(図-5参照)。よって、ひび割れの原因が遅延膨張性骨材によるASRである可能性は無いと判断した。

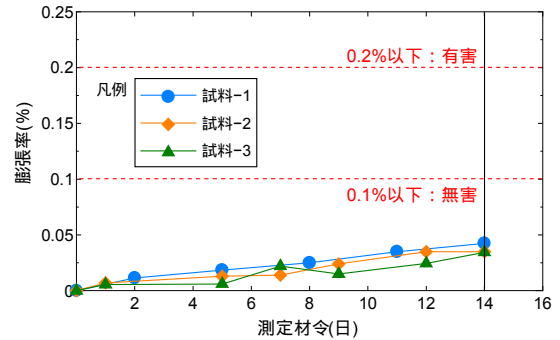


図-5 促進膨張試験結果(抜粋)

c) 粉末X線回折・偏光顕微鏡観察

いずれの試料でもエトリンガイトの生成は確認されなかった(図-6参照)。よって、損傷の原因がDEFである可能性は無いと判断した。

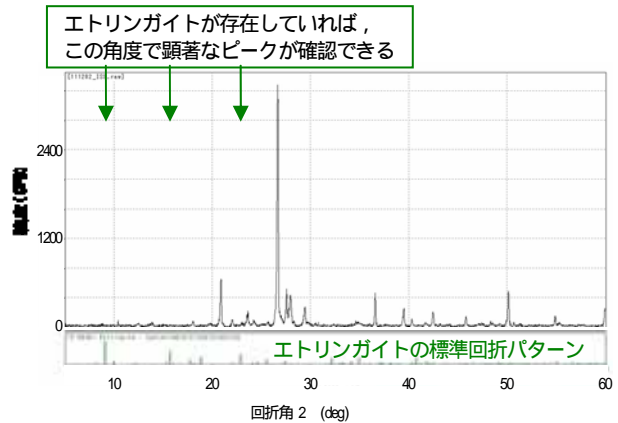


図-6 粉末X線回折試験結果(抜粋)

d) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、特別委員会にて提案されている実橋梁からの採取コアから作成した試料を用いる方法とした。乾燥収縮の進行は(式-1)の双曲線で近似できる<sup>3)</sup>。

$$e_{ds}^{\zeta}(t, t_0) = \frac{e_{ds\infty}^{\zeta}(t - t_0)}{b + (t - t_0)} \quad (式-1)$$

$e_{ds}^{\zeta}(t, t_0)$  : コンクリートの材令  $t_0$  から  $t$  までの乾燥収縮ひずみ

$e_{ds\infty}^{\zeta}$  : 乾燥収縮ひずみの最終値

$b$  : 乾燥収縮の経時変化特性を表す項

試験結果を回帰分析し双曲線の係数を算出し、劣化予測を行った(図-7参照)。その結果、骨材組合せごとに異なった劣化予測曲線が得られた。

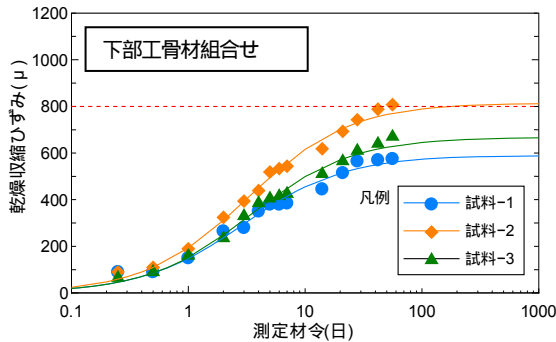


図-7 乾燥収縮試験結果(抜粋)

e) 中性化試験・かぶり測定

採取したコアに対するフェノールフタレイン法により中性化試験を行った。また電磁波レーダ法により鉄筋のかぶりを測定した。

中性化深さと中性化期間の関係式はコンクリート標準示方書に示されている。関係式中の中性化速度係数**b**は、実測値から求めるのが原則であるが、水結合材比より求めることもできる<sup>4)</sup>。

表-5 中性化試験結果(抜粋)

骨材組合せ	中性化深さ y	経過年 t	実測値係数 b	理論値係数 b	比
上部工	11.0	10.9	3.33	0.84	3.96
	8.4	10.7	2.32	0.03	77.33
	7.8	11.4	2.31	0.03	77.00
	11.9	10.7	3.67	0.66	5.56
	8.9	10.7	2.97	0.84	3.54
	11.5	10.8	2.98	0.84	3.55

表-5に示すとおり、実測値から計算した中性化速度係数は理論値よりも大きくなっている。単位結合材料が多いIPC上部工でも中性化が進行しているため、中性化速度が速くなっている要因について分析を行った。

(3) 試験・調査結果のまとめ

- 試験・調査結果より以下の点が明らかになった。
- 1: ひび割れの原因はASR, DEFである可能性は無い。
- 2: 乾燥収縮の進行は、骨材の組合せによって異なる。
- 3: 中性化は理論値よりも進行している。

5. 調査・試験結果の分析

(1) 損傷状況と試験結果の分析

a) コンクリート打設時からの最終収縮ひずみ推定

本検討における乾燥収縮試験は、竣工後10年以上経過した部材から採取したコアで実施しているため、試験開始時には、水分損失により、乾燥収縮が進行していると考えられる(図-8)。

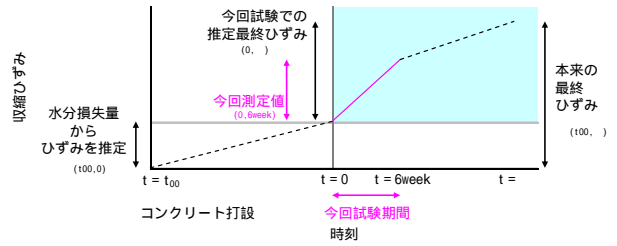


図-8 最終乾燥収縮ひずみ推定の概要

よって、以下の仮定に基づいて補正を行い、本来の最終乾燥ひずみを推定した。

- 1: 水分損失と乾燥収縮ひずみは比例する。
- 2: 水分量はコア表面からの距離に比例する。
- 3: 打設直後の水分量は、コア最深部の水分量に等しい

本来の最終収縮ひずみを推定した結果、次頁の表-6に示すとおり、いくつかの試料で最終収縮ひずみが $8 \times 10^4$ となっている。

表-6 最終収縮ひずみ推定結果

骨材組合せ	最終収縮ひずみ	
	上部工	下部工
	-	789
	1,090	847
	671	899
	782	1,172
	656	-
	-	462

b) 「最終収縮ひずみ」と「損傷程度」の相関分析

「最終収縮ひずみ」と「損傷程度」の相関について分析を行った。損傷程度は「ひび割れ密度」とした。

ピアソンの相関分析より、有意な相関関係があること、やや強い正の相関があることを確認した。よって、乾燥収縮がひび割れの原因であると判断できる。

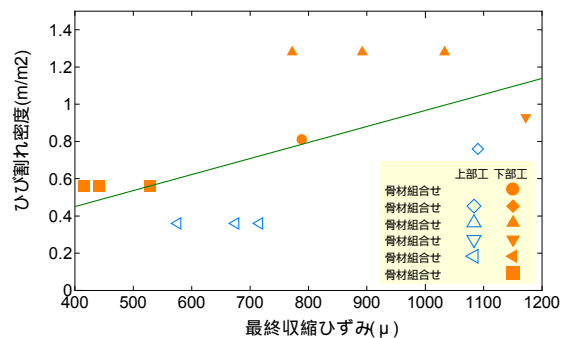


図-9 「最終収縮ひずみ」と「ひび割れ密度」の散布図

c) 「推定単位水量」と「最終収縮ひずみ」の相関分析

中性化速度係数の算出式により、実測値から求めた中性化速度係数から単位水量を推定した。

いずれの試料でも配合設計の単位水量165~173kg/m<sup>3</sup>に

比較して、推定単位水量は $194 \sim 266 \text{ kg/m}^3$ と大きな値(1.2~1.6倍)となった。

続いて、推定した単位水量と最終収縮ひずみとの相関について分析を行った。

図-10に示すとおり骨材組合せごとに分布図を作成すると、単位水量比が大きくなると、最終収縮ひずみが大きくなる傾向が見られた。その傾向は、上部工・下部工に関わりなく確認できた。

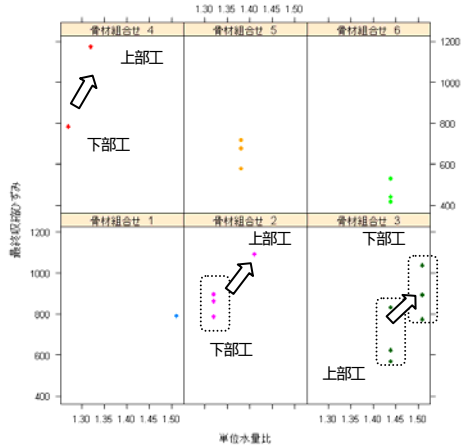


図-10 「単位水量比」と「最終収縮ひずみ」の散布図

特別委員会においても、水セメント比の推定を行っており、配合設計よりも水セメント比が多くなっているサンプルがあった。

なお、本検討で推定した単位水量は、中性化速度係数から求めたものであり、ひび割れの影響などにより、実際の単位水量よりも大きな値となっている可能性はある。

(2) 損傷原因の確定

以上より、第二阪和高架橋に発生しているひびわれの主原因は「乾燥収縮」であると結論づけた。

また、ひびわれの進行状況の差異は、使用されている骨材組合せの違いに依存することが明らかとなった。

その他の要因として、単位水量が多かったことも損傷の進展を助長した可能性が考えられる。

6. 損傷への対策

(1) 損傷の進行予測・対策シナリオの選定

a) 乾燥収縮による損傷の対策シナリオ

部材表面の乾燥収縮ひずみから、(式-1)を逆算して乾燥収縮の経時変化特性を表す項を求め、乾燥収縮による損傷の進行を予測する(図-11参照)。

乾燥収縮による損傷の対策シナリオは、図-12に示すフローにより選定する。

最終乾燥収縮ひずみが $8 \times 10^{-4}$ 以下の場合、現行規程を満足すると考え、乾燥収縮に対する補修検討は不要と判断した。

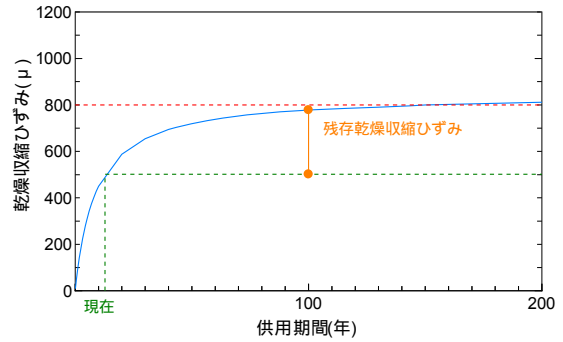


図-11 乾燥収縮による損傷の進行予測例

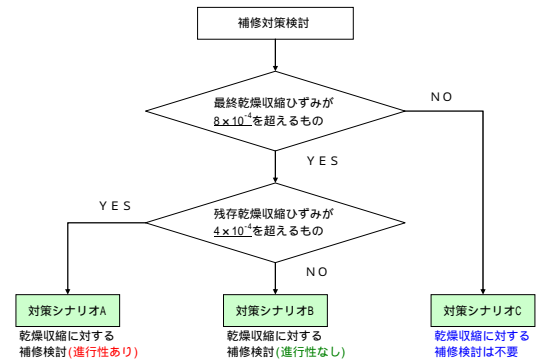


図-12 乾燥収縮による損傷の対策シナリオ選定フロー

部材表面の乾燥収縮ひずみは $4 \times 10^{-4}$ となった時、幅0.2mm、間隔0.5mのひび割れが発生し対策が必要<sup>5)</sup>とした。

よって、残存収縮ひずみが $4 \times 10^{-4}$ 以下の場合、補修を行えば、供用100年の間に対策が必要なひび割れが新たに発生しないと考えられ、進行性なしとして補修計画を立案した。逆に、残存収縮ひずみが $4 \times 10^{-4}$ 以上の場合、進行性ありとして、補修計画を立案した。

b) 中性化による損傷の対策シナリオ

実測した中性化深さから求めた中性化速度係数を用いて、中性化による損傷の進行を予測する。

中性化による損傷の対策シナリオは、図-13に示すフローにより選定する。

供用期間100年の間に中性化残りが10mm以下に達する場合は、中性化による損傷への対策が必要と考え、補修計画を立案した。

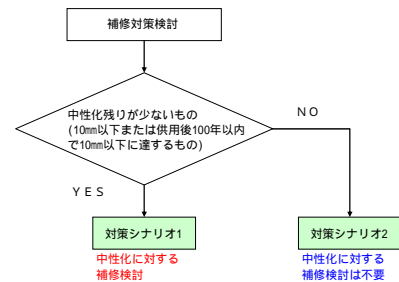


図-13 中性化による損傷の対策シナリオ選定フロー

c) 複合劣化による損傷の対策シナリオ

乾燥収縮と中性化の対策シナリオを組み合わせる複合

劣化による損傷の対策シナリオを策定し、表-7に示すA-1~C-2までの6通りの対策シナリオとする。

表-7 複合劣化による損傷の対策シナリオ

対策シナリオ	乾燥収縮		中性化	
	対策必要		対策不要	対策必要
	進行性あり	進行性なし		
A-1				
A-2				
B-1				
B-2				
C-1				
C-2				

(2)補修工法の選定

供用期間(100年)の間に耐久性に影響がある損傷を発生させないことを維持管理目標として補修工法の選定を行った。

a)乾燥収縮に対する補修工法の選定

乾燥収縮による損傷の進行が予測される対策シナリオAに対しては、エポキシ樹脂注入材3種を使用し、進行の恐れがない対策シナリオBおよびCに対しては、エポキシ樹脂注入材1種を使用する。

表-8 エポキシ樹脂注入材の要求性能<sup>6)</sup>

	土木補修用エポキシ樹脂注入材	
	1種	3種
ひび割れ進行区分	進行が止まった	進行している
ひび割れ幅(mm)	0.2~5.0	
伸び率(%)	-	100以上

b)中性化に対する補修工法の選定

対策シナリオIに対しては、中性化による損傷を顕在化させないことを目的に表面保護工を実施する。

大きな乾燥収縮が生じている構造物に対して、透湿性の無い表面保護工を適用した場合、内部水分の移動により自己収縮と同様の応力が発生し、貫通ひび割れが生じる恐れがあるため、対策シナリオAおよびBに用いる材料は、水蒸気透過性を要求性能とした。

また、第三者被害が想定される箇所については、はく落抵抗性を要求性能とした。

表面保護工法は、表-9に示す要求性能を担保出来る工法を選定できるように、図-13に示す選定フローに従って選定を行った。

表-9 表面保護工(表面被覆工)の要求性能

要求性能	準拠基準	判定
二酸化炭素透過防止性	JIS A1171	1mm以下
水蒸気透過性	JSCE-K522-2006	高透湿性 15g <sup>2</sup> ・日以上
ひび割れ追従性	JSCE-K532-2007	高追従 1.00mm以上 中追従 0.40~1.00mm
はく落抵抗性	-	1.5kN以上 <sup>7)</sup>

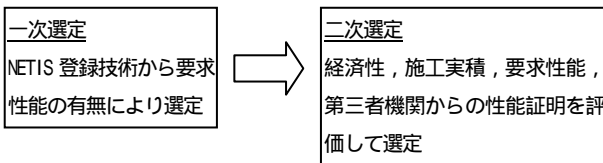


図-13 表面保護工の選定フロー

7.まとめ

(1)結論

特別委員会報告書と本検討で得られた結果から、進展するひび割れの劣化原因は乾燥収縮によるものであり、損傷の進行原因は特定産地の骨材組合せと判断した。

また、配合設計より単位水量が多かったと推測でき、それも損傷進行の一因となった可能性が考えられる。

今後、本検討に基づき、対象橋梁の長寿命化を主眼とした保全対策を進めていく予定である。

(2)今後の展望

レディーミクストコンクリートの受け入れ規程値である $8 \times 10^{-4}$ は、第二阪和国道に対する調査結果から得られた暫定値である。

今回の検討では、骨材の組合せに着目し、対象橋梁で使用されている骨材組合せ6パターン全てに対して試験を行ったが、骨材の組合せは他にも考えられる。骨材組合せによっては、さらに大きな進展が生じる可能性があるため、今後も施工事例を収集していくことにより、規定値の精度を高めていく必要がある。

(3)おわりに

2010年にコンクリート構造物の収縮ひずみに関して、コンクリート標準示方書の品質管理基準が試行的に制定されたが、要因となった事象が本論文の対象橋梁であることから、その背景を知ることによって技術部局の技術向上に資すれば幸いである。

謝辞：今回の検討にあたり協力頂いた京都大学大学院宮川豊章教授と岡山大学綾野克紀教授に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (社)土木学会：第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会報告書，2010
- 2) 国土交通省近畿地方整備局：橋梁上部工への「コンクリートの長さ変化試験」の試行導入について，2010
- 3) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書設計編，pp47,2008
- 4) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書維持管理編，pp92-93,2008
- 5) 国土交通省：橋梁定期点検要領(案)，
- 6) 建設省：建設省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(土木構造物に関する研究成果)，pp237,1989
- 7) 日本道路公団：コンクリートはく落防止対策マニュアル，pp35,2000