

アルカリ骨材反応によるRC床版の損傷と補修

神戸第一建設部	設計課	山口良弘
保全施設部	保全技術課	杉江功
大阪第二建設部	工事第一課	丸山悟

.....

要 約

本報告は、道路橋RC床版にアルカリ骨材反応によると思われるひびわれが発生した事例について、10年間に及ぶ追跡調査結果と、その結果に基づいた健全度判定と補修の考え方を報告している。

ひびわれが発見されたのは定期点検であるが、その状況は通常の活荷重による直交2方向と異なり、しかも建設時の同一工区内に集中する傾向があった。その後の追跡調査からは、ひびわれ密度とその増加傾向、橋軸方向と橋軸直角方向のひびわれ密度の比なども特異な傾向を示すことがわかった。また、実橋での静的載荷試験からは、ひびわれの進展に伴う剛性の低下がないことが確認されている。

これらの調査結果から、床版の耐荷力は低下していないものの、耐久性の観点からアルカリ骨材反応の今後の進行を防ぐために、防水を主な目的として床版上面の防水層の設置と、床版下面のひびわれ注入を伴う鋼板接着を行うことが重要であるとの結論を得た。

キーワード：アルカリ骨材反応、促進膨張試験、化学法試験、RC床版、ひびわれ、耐荷力、鋼板接着

1. まえがき

まえがき

アルカリ骨材反応（日本での反応はほとんどがアルカリシリカ反応：ASRである）による道路構造物のひびわれ損傷が問題となり、既に20年以上が過ぎている。しかし、これらは比較的部材厚の大きい橋脚、擁壁、主桁などが対象であり、部材厚の小さいRC床版や高欄に関する報告は極めて少ない。阪神高速道路公団ではRC床版の点検を2～3年に1度の頻度で実施している。この内、昭和58年の定期点検において、通常の直角に交わる2方向のひびわれと様相の異なる120°に交わるひびわれが多数発見された。これらは建設後、数年経過した床版のひびわれであるが、この原因は活荷重や乾燥収縮ではなく、ASRによるのでは

ないかと考えられた。しかし、ASR橋脚に生じたひびわれに比べるとその幅は小さく、コア採取による膨張量試験および化学法試験によっても、明確にASRと特定することは出来なかった。そこで、これらの損傷がASRによるものか否か、ASR床版とすれば発生状況や今後の進行状況がASR橋脚の場合とどのように異なるのかなどを把握するため、追跡調査を行うこととした。

以下、これらの調査結果と、損傷の原因と程度の判定、および補修の考え方について述べる。

1 調査の概要

床版の追跡調査を行っているのは、阪神高速道路神戸西宮線（以後、西宮線）の管理番号（以後、略）西S-22で3パネル、阪神高速道路大阪松原線（以後、松原線）の松S-434、583、584で各1パネルの合計6パネルであり、西宮線では平成5年度に3パネルにおいてコア採取を行っている。各パネルの調査実施状況は表-1に示すとおりである。これらのパネルはそれぞれ昭和58年、62年の定期点検で損傷の程度が大きく、特に橋軸直角方向のひびわれよりも斜めあるいは橋軸方向のひびわれが目立っているもの、および亀甲状のひびわれが発生しているものを選んだものである。表-1に示す調査ではひびわれ状況、ひびわ

れ密度、ひびわれ幅、ひびわれ深さおよび静的載荷試験による床版たわみ量を測定している。また、コア採取した供試体の圧縮強度、化学分析およびコア膨張量、化学法等のASR試験を実施している。調査対象床版の諸元は表-2に、また調査対象の代表として松S-583、584の構造一般図を図-1に示す。

どの径間も阪神高速道路では最も一般的なI型プレートガーダー構造であり、設計示方書も交通荷重の増大に比して床版の耐力不足との判断から、床版厚を厚く設定した昭和48年以降のものを用いている。なお、松S-583の一部は他路線からの渡り線の拡幅区間にあたり、本線供用後12年経た平成4年に供用を開始している。

表-1 調査実施状況

調査対象箇所	竣工年度	昭和58	59	60	61	62	63	平成2	3	4	5
大阪西宮線	L-4	昭52				定	●	定		定	
	L-6	昭52				定	●	定		定	
	N-1	昭52				定		定		定	
	A-1	昭52				定		定		定	●
西S-23	A-1	昭52				定		定		定	●
	A-1	昭52				定		定		定	●
松原線	松S-434	E-1	昭54	定		定		定		定	
	松S-583	J-6	昭54	定	●	定		定		定	
	松S-584	A-6	昭54	定		定		定		定	

※定：調査実施年度、●：コア採取年度、定：定期点検実施年度、補：補修実施年度をそれぞれ示す

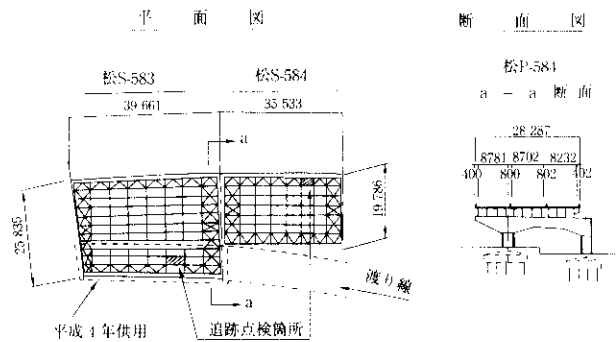


図-1 構造一般図（松S-583,584）

表-2 対象床版諸元一覧表

項目	西S-22	松S-434	松S-583	松S-584
所在地	尼崎市南城内	松原市平野西6丁目	松原市大堀町	同左
建設工区	南城内工区(西)	喜連第1工区	松原8工区	同左
構造形式	鋼I型単純合成桁	鋼I型単純合成桁	同左	同左
供用開始	昭和56年月	昭和55年3月	同左	同左
設計示方書	昭和48年道路橋示方書	昭和48年道路橋示方書	同左	同左
設計荷重	TL-20(TT-43)	TL-20(TT-43)	同左	同左
支間長	38m	44m	37m	40m
パネル長	4.663m	5.380m	4.920m	4.310m
床版厚	22cm	22cm	19cm	同左
舗装厚	75mm	75mm	同左	同左
主桁間隔	3.500m	3.600m	2.177~2.337m	2.455~2.555m
主桁本数	15本	6本	12本	8本
車線数	11	4	同左	同左
対象橋脚	西P-22~23	松P-434~584	松P-583~584	松P-584~585
鉄筋	主筋	D19@250 (SD295)	D19@250 (SD295)	同左
	引張	D19@125 (SD295)	D19@125 (SD295)	同左
	圧縮	D16@250 (SD295)	D16@250 (SD295)	同左
	引張	D16@125 (SD295)	D16@125 (SD295)	同左
許容応力度	σ_{sa}	1400 kgf/cm ²	1400 kgf/cm ²	同左
	σ_{ca}	90 kgf/cm ²	90 kgf/cm ²	同左
	σ_{ck}	320 kgf/cm ²	320 kgf/cm ²	同左
施工業者	鹿島建設(株)	松村・三菱共同企業体	大旺・井上共同企業体	同左
使用骨材	家島・宝塚産	不明	不明	不明

2 調査結果

2-1 定期点検結果

阪神高速道路公団の床版のひびわれに関する判定基準は、床版のひびわれは通常まず橋軸直角方向に発生し、これが進展して床版がスリット化するとともに、橋軸方向のひびわれが発生し、これらの密度および幅が大きくなっていくという考え方によっている。このため、0.1mm 程度以上の集中的、または亀甲状のひびわれがあるものは全てBランク以上の判定となる。

図-2は西宮線で追跡調査している西-S22の全床版パネルの過去3回の定期点検結果を示している。また、表-3はこの周辺の建設工区毎の平成4年度の定期点検における各判定ランク（各判定基準は、阪神高速道路公団『道路構造物の点検標準（土木構造物編）H4.4』P.69表-3.3.1による）のパネル数をまとめたものである。各工区の床版は全て同一示方書で設計され、なお同一時期に建設されたものである。図-2からは床版の損傷がかなりのスピードで進行していることが、また表-3からは西S-22を含む南城内（西）工区の損傷パネル数が他工区と比べて突出していること

がわかる。この現象は松原線においても同様であることを確認している。

2-2 ひびわれに関する調査結果

(1) ひびわれ状況

追跡調査している床版について、ひびわれ進展状況の調査結果の例を図-3に示す。全体的には、橋軸方向と橋軸直角方向のひびわれを明確に判別できず、斜めに伸びるものが目立っている。また、ASR特有の3方向のひびわれが約120°に交わる状況もよくみられる。ただし、ハンチ部については断面変化方向のみにしかひびわれが現れていないのも特筆される。

ひびわれ状況の変化は4~5年間のものだが、新しいひびわれが古いひびわれの間に発生していく様子がよくわかる。ひびわれ幅は最大で0.3mmあるが、ほとんどは0.2mm以下で、松原線では0.1mm以下の微細なひびわれが多数を占めている。このように、ひびわれ幅自体はそれほど大きくならず、この点でASR橋脚などに生じたひびわれとは様子が異なる。また、ASR損傷の著しい橋脚にみられたひびわれ部でのコンクリート表面のずれも観察されていない。

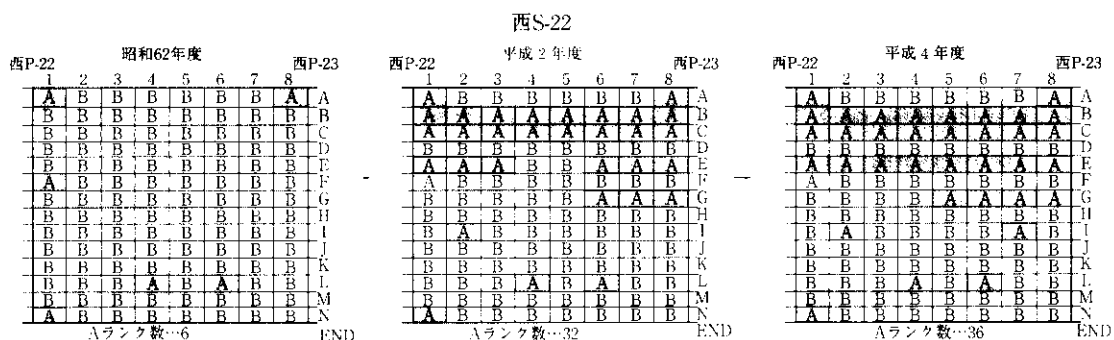


図-2 定期点検結果の推移

表-3 平成4年度定期点検結果一覧表（西宮線）

区	径間数	パネル数 全数	判定ランク				OK	損傷発生率 Aランク パネル全数
			A	B	C	一般部		
東本町	13	546	3	7	69	467	0.55%	
南城内東	5	548	4	4	34	506	0.73%	
南城内(西)	6	672	91	395	185	1	13.50%	
西本町第1	7	460		2	22	436	0.00%	
西本町第2	9	378		1	6	371	0.00%	
西本町第3	9	378			37	341	0.00%	
西本町第4	15	745	1	5	154	585	0.13%	
道意東(東)	3	126		15	61	50	0.00%	
道意東(西)	3	168	1	13	40	114	0.60%	

※西S-22は南城内(西)工区に含まれる

写真-1は調査床版を検査路から撮影したものである。微細なひびわれもチョーキングしているので多少誇大表現に見えるが、ひびわれ密度としてはかなり大きいことがよくわかる。また、写真-2はいわゆる活荷重の繰り返し作用による床版のひびわれ損傷の例(Aランク)を撮影したものであるが、橋軸直角方向のひびわれが卓越し、その密度もかなり写真-1より小さいことがわかる。

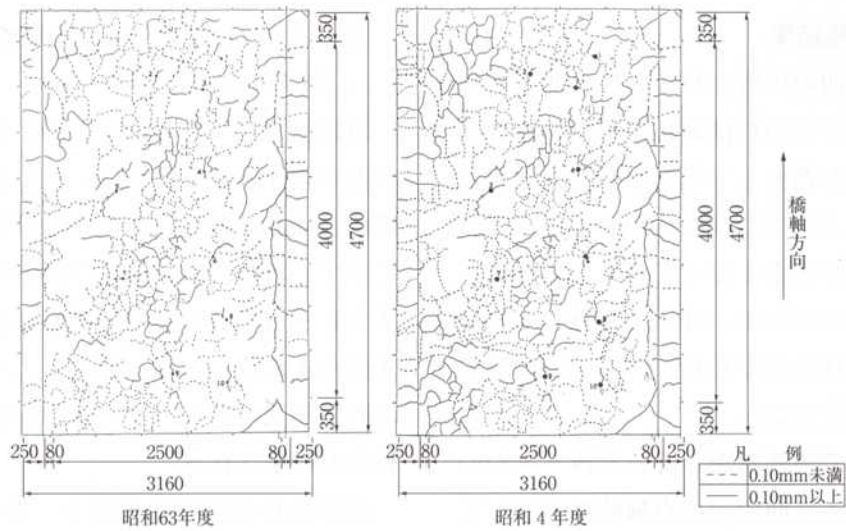


図-3 ひびわれ状況図 (西S-22 L-4)



写真-1 ひびわれ状況 (松S-584 A-6)
(ひびわれ密度 21.3m/m²)



写真-2 活荷重によるひびわれ状況の代表例

(2) ひびわれ密度

A S R 損傷と考えられる床版6パネルの他に、通常の損傷床版においても追跡調査を行っている。図-4はこれらの床版について、0.05mm以上のひびわれ密度の経年変化を示したものである。通常の床版についてもかなりのデータが集められているが、その最大値は11m/m²程度である。これに対して、今回の調査6パネルはそのほとんどが12m/m²以上であり最大値は21m/m²を超えている。

ひび割れ密度の増加傾向はどちらの床版でもあまり変わらず、スピードは小さいものの今後とも

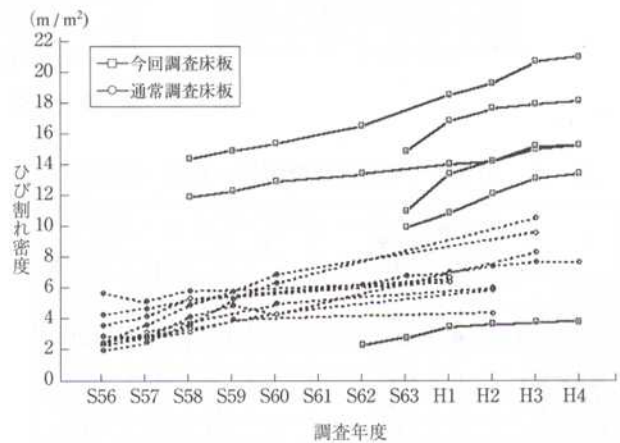


図-4 ひびわれ密度経年変化図

増加する様子が伺える。ひびわれ密度の大きい調査床版はその初期値も全て $10\text{m}^2/\text{m}^2$ 以上であり、供用開始が昭和55年から56年であることを考えると、特に昭和58年から調査を行っている松原線のように、建設後比較的早い段階で相当なひびわれが生じていたことになる。

図-5は最新年度の調査から 0.05mm 以上のひびわれについて、橋軸方向と橋軸直角方向のひびわれ密度を比較したものである。通常床版（特に昭和46年以前の設計示方書で設計されたもの）のひびわれ損傷は、配力筋不足などにより、まず橋軸直角方向のひびわれが発生し、これが床版のスリット化をもたらした後、橋軸方向つまり主筋に対してひびわれが発生する。このため、図-5の黒丸で示したように、橋軸直角方向のひびわれが卓越するのが普通である。ところが、今回の調査床版では必ずしもこのような傾向はみられない。これは 0.1mm 以上のひびわれでみても同じであった。通常ASRによるひびわれは、プレストレスなど拘束する方向性がなければ、発生する方向に特に規則性はないが、この調査でも同じことがいえる。

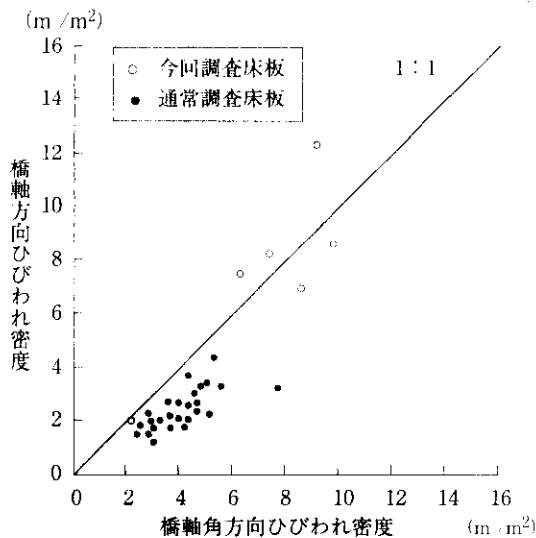


図-5 ひびわれ密度比較

(3) ひびわれ幅

各パネルでは、追跡調査開始年度にひびわれ幅が 0.1mm 以上であったひびわれを対象に、コンタクトストレインゲージにより10測点でひびわれ幅

の測定を行っている。

調査結果からは、温度が若干影響しているのではないかと考えられるが、いずれにしてもそれほど大きな変化はみられない。

(4) ひびわれ深さ

ひびわれ深さはひびわれ幅 0.2mm 以上のひびわれを対象とし、各パネルで10測点を選定して超音波を利用した表面波法により測定を行っている。

これらひびわれ深さ測定値の平均値の経年変化を図-6に示す。調査初年度にひびわれ深さは 5cm を超え、すでに鉄筋のかぶり（ 3cm ）以上に進展していたことがわかる。その後の増加はそれほど大きくないものの、鉄筋の腐食については注意する必要がある。

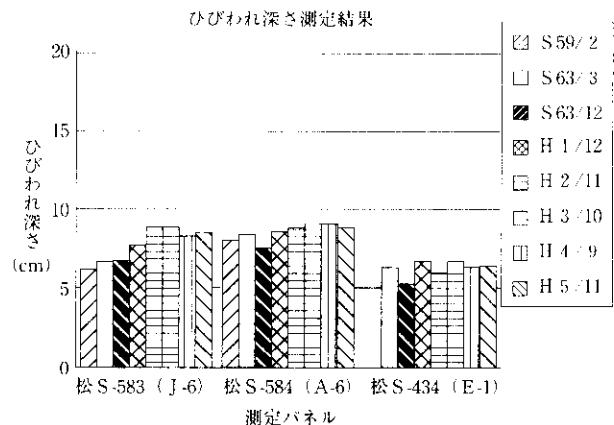


図-6 ひびわれ深さ測定結果

2-3 コア採取による試験

表-4に床版から採取したコアにより実施した各試験結果を示す。なお、床版におけるデータ数が少ないため、平成5年度に新たに西宮線からコア採取し、データの充実をはかっている。

圧縮強度はどれも設計強度 $300\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上を示し、超音波伝播速度および静弾性係数はともに、 $4300\text{m}/\text{sec}$ および $26 \times 10^4 \text{kgf}/\text{cm}^2$ でコンクリートの品質としては健全であると思われる。

一方、ASR橋脚から採取したコアでは、圧縮強度 $150\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度、超音波伝播速度 $1500\text{m}/\text{sec}$ 程度、静弾性係数 $1.8 \times 10^4 \text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度とかなりコンクリートの品質に問題のあるものもあった。

これは、コンクリート内に微細なひびわれが存

表-4 コア分析試験結果一覧表

コア採取年度	昭和59年度	昭和63年度	平成5年度
コア採取箇所	松S-583	松S-22	西S-22,23,24
物理性状		圧縮強度 3体平均: 390kgf/cm ² 超音波伝播速度 3体平均: 4310m/s 静弾性係数 3体平均: 26.7×10 ⁴ kgf/cm ²	3伝平均: 396kgf/cm ² 3伝平均: 4490m/s 3伝平均: 25.3×10 ⁴ kgf/cm ²
コア膨張量	3体の平均: 163(開放)+225(残存) = 338×10 ⁻⁶ (図-7参照)	2体の平均: 68(開放)+137(残存) = 205×10 ⁻⁶ (図-7参照)	3体の平均: 103(開放)+267(残存) = 370×10 ⁻⁶ (図-7参照)
X線回折		クリストバライト等の有害結晶成分は認められない。 ただし、雲母の量が若干多い。	
化学法		溶解シリカ濃度Sc 3伝平均: 224m mol/l アルカリ濃度減少量Rc 3伝平均: 68m mol/l Sc/Rc 3伝平均: 3.29m mol/l	
化学分析	等伝アルカリ量 0.173% < 0.25%	等伝アルカリ量 0.15% < 0.25%	
岩種判定		流紋岩質熔結凝灰岩	熔結凝灰岩
反応促進試験			10日目にゲル化が確認された

在し、みかけの強度などを低下させたためと考えられるが、この点は床版と大きく異なる点である。

また、化学分析法ではコンクリート中の等価アルカリ量が、0.25%を超えると著しい膨張を起こすことが確認されている¹⁾が、これまでの分析ではそれほど大きな値は検出されなかった。

岩種判定において、調査対象床版の使用骨材がこれまでに反応性骨材と認められている流紋岩質熔結凝灰岩であると判定されたものの、X線回折からは、反応性鉱物として挙げられているクリストバライトなどは認められなかった。

西宮線の調査対象床版に用いられている家島宝塚産の骨材は、他の建設工区でJISに定められた化学法によって有害と判定されたこともあり、今回も同じ結果が得られている。

図-7は膨張量試験によるコア膨張量の測定結果である。

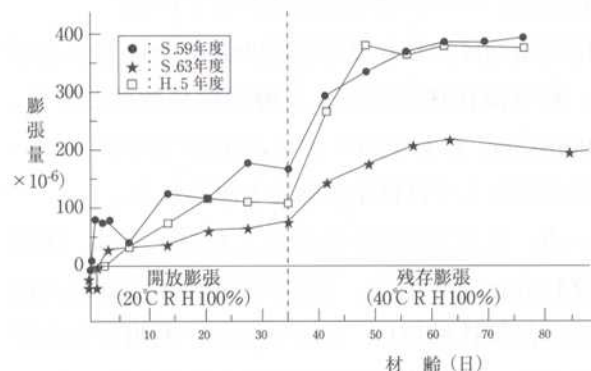


図-7 コア膨張量測定結果

阪神高速道路公団における規定¹⁾では、図-7に示すように35日までを開放膨張、それ以後70日までを残存膨張、これらの合計を全膨張量としているが、膨張はどれもほぼ採取後60日で一定になった。また、全膨張量は150~400×10⁻⁶程度にとどまり、橋脚での値と比べるとかなり小さいものであった。

上記の規定では床版、高欄など薄い部材は対象外としながらも、全膨張1000×10⁻⁶をASR判定の基準値としている。この点からすると、これらの床版のひびわれがASRによるものとするれば、その判定値を新たに設定する必要がある。

昭和59,63年度の試験では、コア表面にゲルは発見されなかった。平成5年度でもコア表面にゲルは発見できなかったが、コアを幅1cmにスライスしたところ、その断面にゲルを確認することができた(写真-3)。これは、これまでASRと判定するのに最も躊躇していた点に答えを出している。



写真-3 コア断面にゲルが発生(養生10日目)

2-4 床版のたわみ

床版のたわみは3軸のダンプカーに土砂を積み、総重量を20tfとした試験車を、図-8のように載荷して測定していた。

図-9は西宮線におけるケース2のたわみ量測定結果を示しており、等方性板で全断面有効とした理論値と引張側コンクリートを無視した理論値および舗装の表面温度を併記している。実測たわみ量は全断面有効の理論値に近い。また、温度差による舗装剛性の変化の影響などを考慮すれば、たわみの経年変化はかなり小さく、現在のところ耐荷力はそれほど問題ないようである。

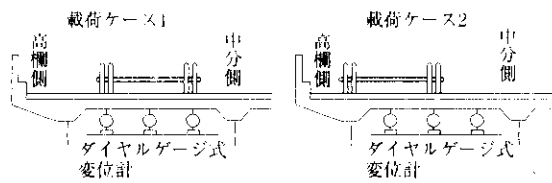


図-8 各載荷ケースの載荷位置

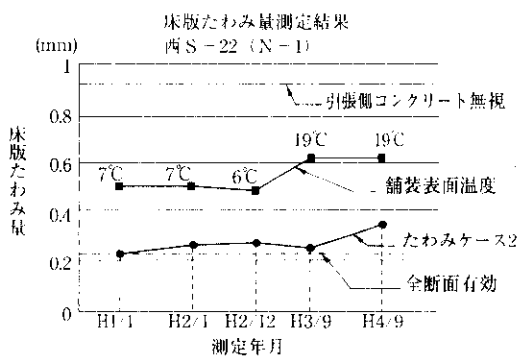


図-9 たわみ量測定結果の代表例

3 健全度判定と補修

3-1 損傷原因

10年に及ぶ床版の追跡調査を行ってきたが、これまで経験してきたASR橋脚によるひびわれといくつかの相違点があったこと、および促進養生によってもコア膨張が小さく、ゲルが確認できなかったことから、対象床版の損傷は明確にASRによるものと判定することはできなかった。

しかし、主に耐久性の面から補修は必要と考えられ、このため現段階における最も適切な判定が

求められた。その結果、これらの床版に発生しているひびわれは、下記に示す理由によりASRによるものと判断された。

- 1) 平成5年度のコア試験で反応リングが確認された。
- 2) 建設時の隣接工区のうち、同一業者の工区だけに床版の損傷が集中している。これらはすべてひびわれ損傷であり、漏水、遊離石灰、錆汁などは観測されなかった。
- 3) 施工後、10年以上経過しても新しいひびわれの発生が見られる。これらは120°で交差し、亀甲状を呈した典型的なASRひびわれのものが多く、活荷重の繰り返し作用による直交2方向のひびわれとはかなり様子の違うものであった。
- 4) 松S-583では、未供用で活荷重の作用していないパネルについても損傷が発生し、進行している。
- 5) 通常の床版のひびわれより、ひびわれ密度がかなり大きく、必ずしも橋軸方向のひびわれが卓越しているわけではない。
- 6) 西宮線から採取された骨材はこれまでASR損傷の疑いのあった家島宝塚産であり、また、化学法によって有害と判定された。
- 7) コンクリート材料としての品質や強度は健全であり、配合設計および施工には問題がなかったと考えられる。

以上を総合すると、乾燥収縮、温度、荷重作用、材料不良、施工不良、鉄筋腐食による膨張などひびわれの原因と考えられるものは全て除外される。

一方、ASR床版と判定するにしても、ASR橋脚の判定基準と比較するとひびわれ幅とコア膨張量に依然疑問点が残るが、以下のようなことがその原因ではないかと推測される。

- 1) 骨材の最大粒径が橋脚の40mmに対して床版では25mmと小さく、膨張が分散する。
- 2) 部材厚や鉄筋径が小さく、かぶりも橋脚の10cmに対して3cmと小さく、拘束力の違いによりひびわれが分散する。
- 3) ASRではあるが、その反応の度合いが小さい。

3-2 健全度判定

損傷の程度の調査結果をまとめると以下のようになる。

- 1) ひびわれ密度はかなり大きく、残存膨張量は小さいが、今後ともひびわれ損傷は進行する傾向にある。
- 2) ひびわれ幅はほとんど0.2mm以下で、最大でも0.3mmである。周辺は腐食環境ではないが、コンクリート標準示方書などでは、補修の必要な値である。
- 3) 漏水、遊離石灰、錆汁などは観察されていない。
- 4) コンクリートの圧縮強度は設計値以上で、載荷試験結果から床版の剛性も低下していない。

以上より、耐荷力は現在のところ問題はないが、ひびわれ密度がさらに大きくなり、鉄筋の腐食が始まれば、鉄筋の膨張によりコンクリート片の落下などが心配される。つまり、耐久性に対しては何らかの対策が必要であるといえる。

3-3 補修の概要

これまでの調査結果から、ASRによるRC床版の損傷は、特にその膨張量が小さい場合に耐荷力的には問題ないことがわかった。しかし、ひびわれ密度の増大や鉄筋の腐食などを防ぎ、今後の耐久性の低下を止めるために補修を行うこととした。

一般に、ASRにおける反応生成物は吸湿性があり、水を吸収して膨張する。このため、現在ASRに対する補修は防水対策に主眼がおかれている。そこで、今回の補修では、ASR損傷の抑制および鉄筋の防錆を目的として、床版上面には防水層を設置し、床版下面からは鋼板接着によってひびわれに樹脂注入を行うこととした。

橋脚におけるひびわれ注入は、通常低圧注入工法が使われているが、床版の場合ひびわれの本数が多く、その1本毎にシールをする作業量などを考慮して鋼板接着時の樹脂注入を利用することとした。もちろん、鋼板接着は床版の耐荷力を増大させるとともに、万一、ASRによるひびわれが進行した場合にも、コンクリート片の落下を防ぐなど、予防保全的な役割を持っている。図-10に、

補修の概念図を示す。

ASR橋脚補修用の注入材は、補修後の膨張にもある程度追随できるように、伸び率100%以上の柔軟型エポキシ樹脂を用いるが、鋼板接着には同2%以下の接着型エポキシ樹脂を使用している²⁾。

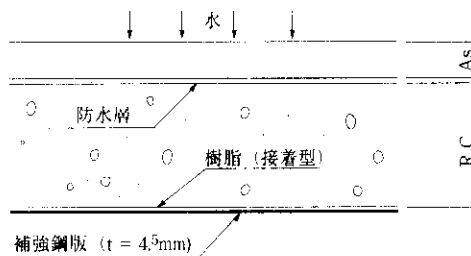


図-10 補修の概念図

しかし、追跡調査結果からひびわれ幅の変化量は、5年間でも $50 \times 10^{-6} \text{m}$ 程度と小さいので、伸び率2%以上の接着型で特に問題はないと考えられる。

まとめ

今回の調査結果から、ASRによるRC床版の損傷は、配筋および拘束条件の違いから、橋脚などの事例とはかなり状況が異なり、しかも耐荷力にはあまり影響しないことがわかった。しかし、今後の損傷の進展や耐荷力・耐久性の低下については未知であり、今後も定期的な追跡調査を継続し、ASR床版の損傷状態の推移を見守ることが必要と考えている。

最後に、一連の調査およびその評価について、随時適切にご指導を頂いた阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」(委員長 岡田 清 京都大学名誉教授)の委員の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：アルカリ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) 1985.6
- 2) 杉江 功他：アルカリ骨材反応と補修、コンクリート工学、Vo31、No7、1993.7