

## 移動載荷試験によるD-RAP工法の補強効果の確認

### Repairing effect of D-RAP method on the damaged slabs against fatigue under Wheel Running

細江 育男<sup>1</sup>，安井 昌幸<sup>2</sup>，渡辺 泰行<sup>3</sup>，渡辺 孝治<sup>4</sup>，北村 元<sup>5</sup>，松井 繁之<sup>6</sup>  
Ikuro HOSOE, Masayuki YASUI, Yasuyui WATANABE, Takaharu WATANABE, Hazime KITAMURA and Sigeyuki Matui

<sup>1</sup> 大日コンサルタント株式会社 構造部 (〒500-8384 岐阜県岐阜市藪田南3-1-21)

<sup>2</sup> 名古屋ロード・メンテナンス株式会社 (〒461-0004 愛知県名古屋市東区葵3丁目2番10号)

<sup>3</sup> 日本道路公団 名古屋管理局 保全第1課 (〒491-8526 愛知県一宮市丹陽町)

<sup>4</sup> 日本道路公団 名古屋管理局 羽島管理事務所 (〒501-6236 岐阜県羽島市江吉良町字鍵田2578-1)

<sup>5</sup> 日本道路公団 静岡建設局 沼津工事事務所 (〒410-0011 静岡県沼津市岡宮字焼土手1300-1)

<sup>6</sup> 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2番1号)

Various repairing methods of damaged deck slab have been developed for repairing of damaged RC slabs. Recently, D-RAP method has newly been proposed. It belongs to the top face reinforcing method, where after removal of asphalt pavement, deteriorated concrete slab surface is cut out and then pre-fabricated panels are glued on the deck slab in two layers with epoxy resin mortar. "D-RAP" means Deck Restoration by Adhesive Panels. The method has been applied in several deteriorated bridge deck restorations of Japan Highway. Various tests were made to evaluate the mechanical behavior of slabs reinforced by D-RAP method. Fatigue tests on full scale model slabs were carried out using Wheel Running Machine of Osaka University. The test results showed that the D-RAP method is an effective reinforcing method for deteriorated slabs. D-RAP method increases load-carrying capacity and fatigue strength as high as newly constructed slabs.

Key Words : D-RAP method, fatigue strength, Wheel Running Method

#### 1. まえがき

自動車輪荷重の著しい増大が原因と考えられる床版コンクリートが部分的に抜け落ちる現象が、道路を維持管理するうえで大きな問題となっており、かなりの年月が経過した。その間、自動車輪荷重の走行による損傷・劣化に関する研究も進み、各種の補強工法が提案され実際に施工が行われてきた。

しかし、現在でも床版破壊のメカニズムが完全に解明されたとはいえず、これらの新しい工法は、自動車輪荷重を想定した床版の疲労試験により、補強効果を確認したうえで採用されてきた。

このD-RAP工法も床版を補強する新しい工法の1つであり、補強の効果を確かめる目的で、輪荷重走行試験機による疲労実験を実施した。

#### 2. D-RAP工法の概要と試験の目的

D-RAP工法とは、プレキャスト板とエポキシ樹脂により、損傷劣化したRC床版の上面を約30mm増し厚することにより、補強するものである。(図-1)

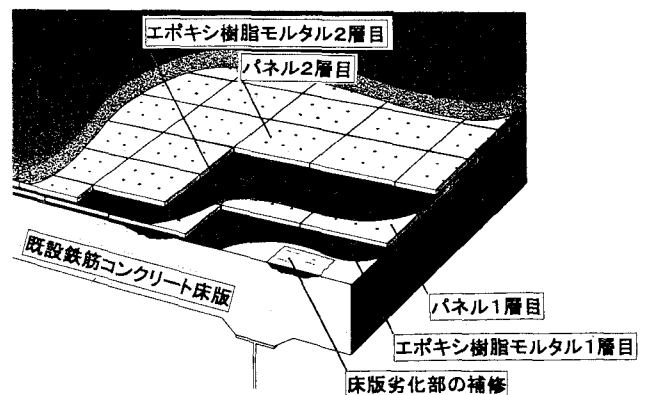


図-1 D-RAP工法の概要

このD-RAP工法は、エポキシ樹脂による確実な接着と、床版上面の防水効果を期待して開発された工法であり、日本道路公団名古屋管理局内に検討委員会を設置して、平成4年より研究が進められてきた。

D-RAP工法の実用化に向けて、エポキシ樹脂モルタルやプレキャスト板の性能などの材料に関する検討から始まり、コンクリートとプレキャスト板の接着や静的耐力に関する力学的な検討と、2点交互繰り返し载荷による床版疲労試験をこれまでに実施してきた。また、施工に関しても1万㎡を超える試験施工による結果から、各種の改良が加えられてきた。

2点交互繰り返し载荷による床版疲労試験の結果では、D-RAP補強床版は同厚のRC床版と同じ疲労耐力のあることが既に確認されている<sup>1)</sup>。

しかし、この試験方法では、実際の床版に発生するうねり現象を再現できない問題がある。

疲労による損傷の過程を正確にとらえ、また、相対評価としてではなく、補強したことによる疲労耐力の向上が目標とする年数を満足できるか推定するためには、輪荷重重走行試験機により疲労試験を実施する必要があった。

### 3. 試験概要

#### (1) 材料

##### a) プレキャスト板

スレート板は、横幅300mm×縦長450mm×厚さ12mmのノンアスベストスレート板を使用した。板の配合は、重量比 69:4:1:1:12.5:12.5 (セメント:ガラス繊維:パルプ:ビニロン:けい酸カルシウム:炭酸カルシウム)である。スレート板の性能を表-1に示す。

表-1 スレート板の性能

状態	比重 ( $g/m^3$ )	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (Gpa)	長さ変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	層間離強度 (MPa)	吸水率 (%)
乾燥	1.71	30.4 [18.8]	32.9 [24.9]	0.162	107.9	2.2	16.2
湿潤	1.71	19.7 [18.8]	15.8 [13.9]	—	72.9	1.0	—

PIC板は、PP繊維で補強したポリマー含浸コンクリート板の意味であり、セメント(普通ポルトランドセメント)、細骨材(川砂)、粗骨材(硬質砂岩7号砕石)、混和材(デンカCSA#20)、混和剤(マイティ150)、PP繊維(バルチップ25mm 20d)が主材料となっている。PIC板の性能を表-2に示す。

表-2 PIC板の性能

状態	比重 ( $g/m^3$ )	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (Gpa)	長さ変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	層間離強度 (MPa)	吸水率 (%)
乾燥	2.35	30.6	46.4	0.0037	107.0	4.31	0.93

#### b) 接着剤

接着剤は、エポキシ樹脂を使用する。配合は、重量比 3:1:12 (主剤:硬化剤:珪砂)である。エポキシ樹脂の性能を表-3に示す。

表-3 エポキシ樹脂の性能

比重 ( $kg/m^3$ )	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	付着強度 (MPa)
1.75	81.6	23.5	4440	Min. 3.1

#### (2) 供試体寸法

供試体の寸法は図-2に示す通りである。床版支間長は1.8mで、基本となる床版厚は17cmである。D-RAP補強を行うと、プレキャスト板とエポキシ樹脂厚で3cmの増厚となり、総厚20cmの床版となる。

コンクリートは、圧縮強度26.5MPa、圧縮弾性係数23.2GPaを使用し、鉄筋はSD295を使用した。

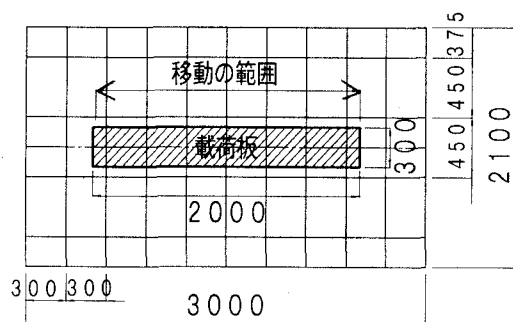
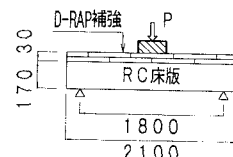


図-2 供試体の寸法

#### (3) 配筋

配筋は、名神高速道路の床版鉄筋比を想定して決定した。主鉄筋はD16@100、配力筋はD13@150となっており、圧縮側はこれの倍ピッチとした。配筋状態を図-3に示す。

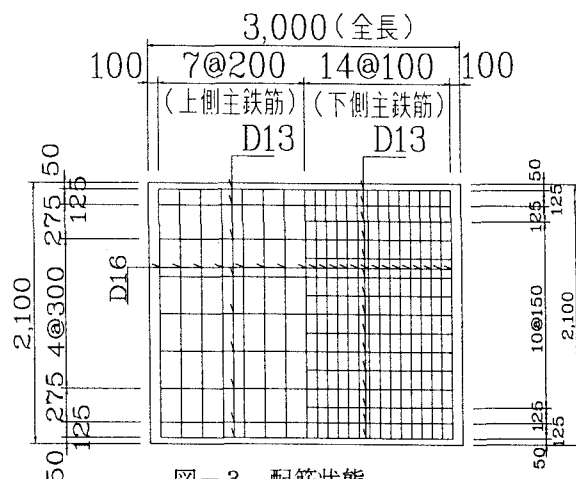


図-3 配筋状態

(4) 供試体の種類

供試体の種類を表-4に示す。基本的には無補強が2体、スレート板によるD-RAP補強が3体、P I C板によるD-RAP補強が1体の計6体の試験を実施した。スレート板によるD-RAP補強うち、1体のみ損傷を与えた後にD-RAP補強を行っている。(損傷を与えるまでがNo.3で補強後はNo.3'となる。)

表-4 供試体の種類

番号	補強の有無	荷重	プレキャスト板の種類	試験数	備考
No.1-1	無補強	176KN	——	1体	損傷なし
No.1-2	無補強	147KN	——	1体	損傷なし
No.2-1	D-RAP補強	176KN	スレート板	1体	損傷なし
No.2-2	D-RAP補強	147KN	スレート板	1体	損傷なし
No.3	無補強	147KN	——	1体	理論たわみ×64%まで損傷を与え補強。計測初期値はゼロ補正
No.3'	D-RAP補強	176KN	スレート板		
No.4	D-RAP補強	176KN	PIC板	1体	損傷なし

(5) 荷重

鉄輪による荷重の場合、タイヤによる荷重に比べて接地面積が小さく、舗装や空気による荷重の緩和がないため、荷重条件が厳しいといえる。過去の実績から、176KN (18tf) で50万往復の荷重に耐えられれば十分に耐力があるといえる。また、D-RAP補強床版の疲労試験結果を既往の床版疲労試験データと比較することも考慮して、147KN (15tf) と176KNで試験することにした。

(6) 測定項目

荷重回数、支間中央のたわみ、主鉄筋・配力筋のひずみ、を測定した。破壊モードの確認として、床版下面のクラックと床版を切断した内部のクラックを記録した。

また、プレキャスト板の剥離を調べる目的で、プレキャスト板上面のタタキ調査と床版下面からの弾性波による内部損傷調査を行った。

4. 試験結果

(1) 荷重回数と破壊モード

荷重回数の結果を表-5に示す。No.1-1, No.1-2, No.2-1, No.4 供試体は、破壊するまで荷重を行った。

No.2-2 供試体はまだかなり健全な(おそらく数十万往復はもつ)状態で荷重を終了している。

No.3' 供試体については後少しで破壊する(おそらく2万往復はもたない)状態で、荷重を終了することにした。

表-5 荷重回数

番号	P=147KN	P=176KN
No.1-1		1.2万往復(破壊)
No.1-2	5.4万往復(破壊)	
No.2-1	4.0万往復	50.2万往復(破壊)
No.2-2	50.8万往復(破壊手前)	
No.3	1.4万往復	
No.3'		37.0万往復(破壊手前)
No.4		20.4万往復(破壊)

破壊モードは、押し抜きせん断破壊であったが、D-RAP補強床版では、プレキャスト板がコンクリートと同時に破壊することはなかった。スレート板を使用したものでは板の内部に剥離が生じたり、エポキシ樹脂トコンクリートの界面で剥離が生じて、その後コンクリート床版が破壊する傾向にあった。また、P I C板を使用した試験は1体しか行ってないが、この結果では床版破壊後も板そのものは健全に残っていた。図-4、図-5に床版下面のひび割れ発生状況を示す。

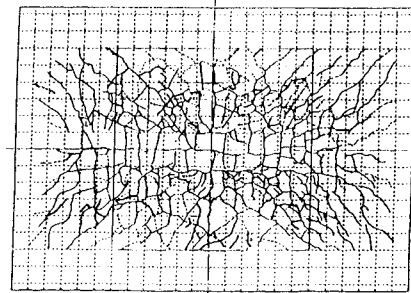
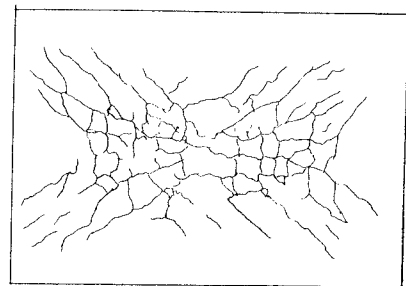
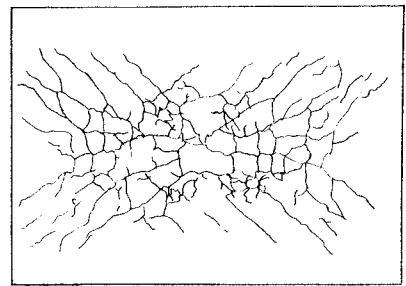


図-4 No.1-1 ひび割れパターン図



供試体番号 No.3



供試体番号 No.3'

図-5 No.3, No.3' ひび割れパターン図

(2) たわみの比較

まず、無補強床版とスレート板によるD-RAP補強床版のたわみを比較する。比較する供試体は、同じ荷重 P=176KN により載荷し、両方とも破壊まで至った No.1-1, No.2-1 供試体とする。

計測位置は床版下面中央であり、疲労載荷を中断して床版中央に静的載荷 (P=176KN) を行い、この時のたわみ分布を比較する。(図-6)

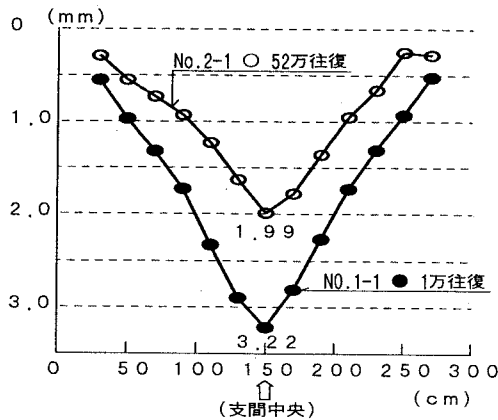


図-6 たわみ分布 (1)

この図から、無補強床版 (17cm の RC 床版) の 1 万往復後で、床版中央に発生した 3.22 mm のたわみが、D-RAP 補強床版では 5 2 万往復後でも 1.99 mm となり、D-RAP 補強によるたわみ剛性の向上が確認できた。

つぎに、損傷を与えた無補強床版と、これにスレート板によるD-RAP補強したものとの比較した。供試体番号は No.3 と No.3' である。(図-7)

この図から、損傷床版に載荷荷重 P=147KN の 1.4 万往復後に発生していた 1.9 mm のたわみが、D-RAP 補強後は載荷荷重 P=176KN の 34.5 万往復後でも 2.26 mm となり、損傷床版に対してもD-RAP補強によるたわみ剛性の向上が確認できた。

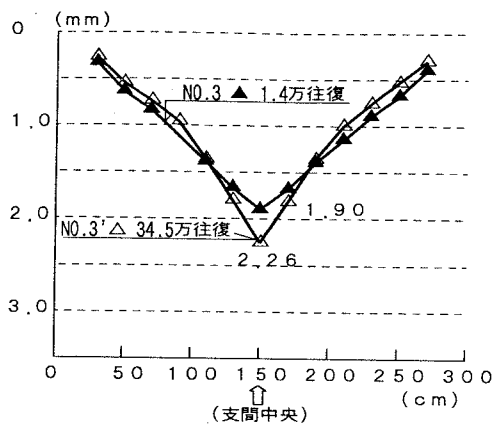


図-7 たわみ分布 (2)

No.3 供試体の損傷の程度については、JH の損傷判定基準でいう A ランクを想定している。実際には、右記で定義される劣化度  $D_0$  が 0.64 になるまで損傷を与えた<sup>2)</sup>。

$$D_0 = \frac{W - W_0}{W_c - W_0} = \frac{1.9 - 0.64 \text{ mm}}{2.6 - 0.64 \text{ mm}} = 0.64$$

$W_0$  : コンクリートの全断面を有効と仮定した等方性版の理論たわみ

$W_c$  : 引張側コンクリート無視の状態での直交異方性を考慮した理論たわみ

ここまでは、D-RAP 補強によるたわみの変化に着目したものであったが、さらに上層に接着するプレキャスト板の違いに着目し、No.2-1 (図-8) と No.4 (図-9) を比較することで、載荷回数とたわみの変化に相違があるかみる。

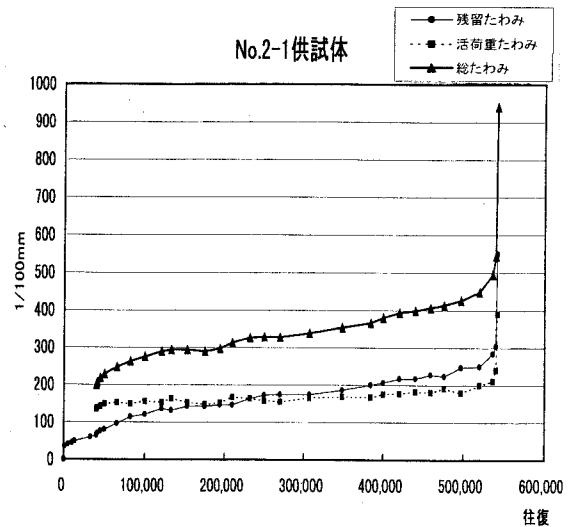


図-8 No.2-1 たわみの増加

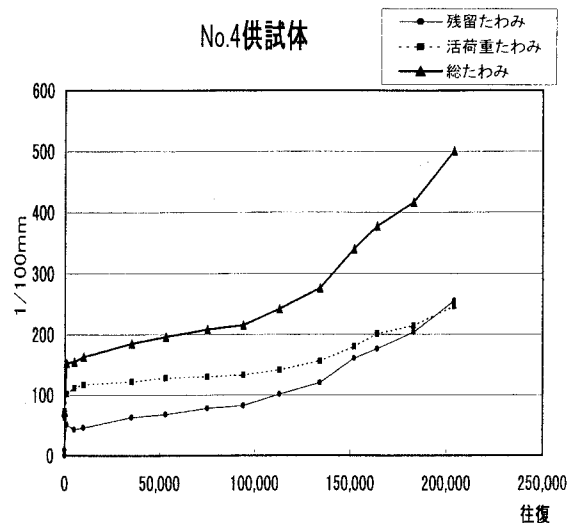


図-9 No.4 たわみの増加

2つのグラフを比較すると、疲労載荷回数が異なることから載荷途中のたわみ増加の勾配は異なるものの、破壊直前での活荷重たわみの絶対値は約 2.5 mm で、スレート板でD-RAP補強した場合とPIC板の場合では差がないことが確認できた。

(3) 鉄筋ひずみの比較

鉄筋ひずみは、主鉄筋30箇所、配力筋16箇所で計測している。ここでは、床版に損傷を与える過程の鉄筋応力と、D-RAP補強を実施した後の鉄筋応力に着目し、床版下面中央の主鉄筋ひずみを比較した。

No.3の鉄筋ひずみを図-10に示す。

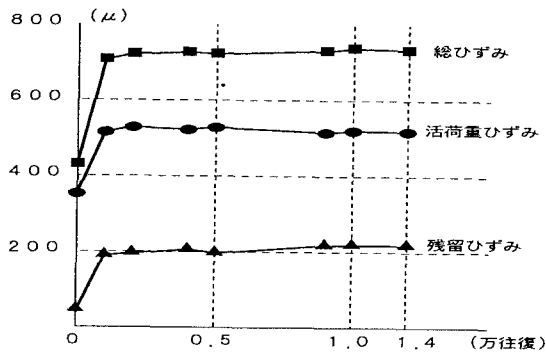


図-10 No.3床版中央主鉄筋ひずみ

この図から、床版に損傷を与える段階で鉄筋の総ひずみは約700μであり、設計で考える許容応力度の137.2MPaを少し超えた程度であることが判る。

No.3'の鉄筋ひずみを図-11に示す。

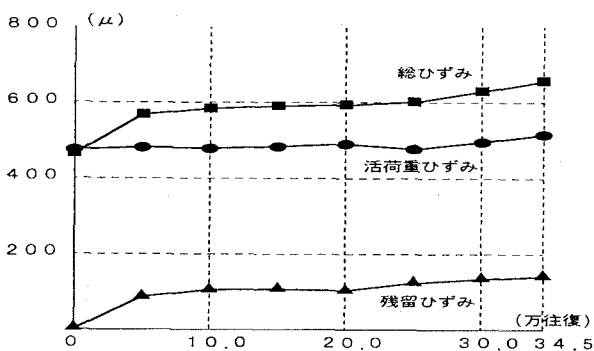


図-11 No.3'床版中央主鉄筋ひずみ

損傷床版にD-RAP補強を実施すると、損傷を与えた時の残留分を200μ見込んで800μとなるが、鉄筋応力度では166.6MPa以下であり、鉄筋の発生応力としては比較的小さいといえる。

No.1-1, No.2-1の破壊したケースにおいても、床版下面中央の鉄筋応力度は降伏まで達していない。他の箇所においても同様に降伏まで達していない。

(4) ひび割れの様子とスレート板の剥離

各供試体で床版下面のひび割れの特徴に、大きな差はなかった。載荷板の下に格子状に発生したひび割れが、床版端部に向けて放射状に広がっている。

床版中央1㎡当たりのひび割れ密度は、No.1-1が16.1m/㎡, No.2-1が17.9m/㎡, No.3'が16.4m/㎡であった。

No.2-1の載荷終了後のひび割れを図-12に、No.3'の載荷終了後のひび割れを図-13に示す。

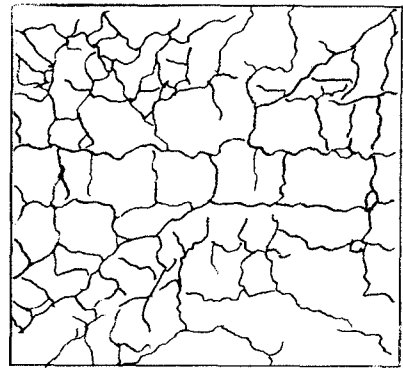


図-12 No.2-1床版下面

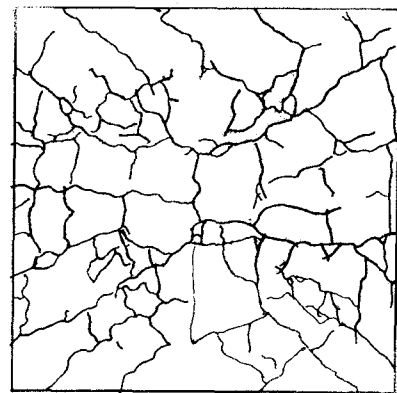


図-13 No.3'床版下面

また、載荷が終了した後、No.2-1, No.3'供試体を床版中央付近で主鉄筋方向に切断し、それぞれ3個の梁を切り出した。

No.2-1の切断部を写真-1と図-14に、No.3'の切断部を写真-2と図-15に示す。



写真-1 (No.2-1)

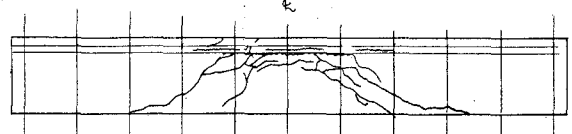


図-14 (No.2-1)



写真-2 (No.3')

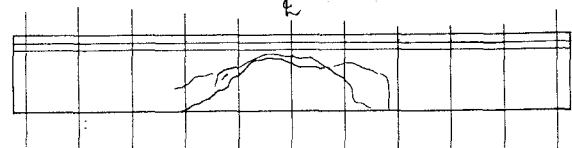


図-15 (No.3')

床版内部のクラック状況とプレキャスト板付近の剥離状況を調べた結果、床版上面から床版面にたいして、 $25^{\circ}$ ～ $45^{\circ}$ で床版下面に延びたせん断クラックが確認できた。

また、No.2 供試体の1層目エポキシ樹脂とコンクリートの界面および、プレキャスト板の内部で剥離の生じたことが確認できた。

もともとスレート板は、抄造式といって紙を抄いて作るときと同じ製法により作られるため、剥離に対する抵抗が小さいという課題がある。

また、12mmのスレート板は、6mmの板を重ねて圧着して作られている。スレート板内部に剥離が生じるのは、こういった製造方法が原因である。

#### (5) タタキ調査と内部損傷調査

荷重の途中において、床版上面に貼り付けたプレキャスト板が剥離していないか調べる目的で、10万往復ごとに上面からのハンマーによるタタキ調査と、下面からの弾性波による内部損傷調査を行い、途中段階では板の剥離がないことを確認した。

弾性波による測定の原理は、床版下面を打撃することによりコンクリート表面に発生した衝撃波が、コンクリート内部で反射波として繰り返す周波数特性から、卓越したモードを求めて、クラック(剥離)の位置を推定するものである。

今回の試験において、タタキ調査の結果と弾性波による調査結果の比較を行ったところ、ある程度の相関が認められた。

### 5. まとめ

#### (1) D-RAP補強の効果について

今回の試験結果により、176KN 荷重の無補強床版とスレート板によるD-RAP補強の比較で、荷重回数的大幅な増加と、たわみ剛性の改善が確認できた。

床版に損傷を与えないケースでは約40倍、床版に損傷を与えたケースでは約30倍の荷重回数の増加と、荷重履歴が50倍でもたわみ量が約60%に低減できた。

このことから、D-RAP補強の効果は大きいといえる。大阪大学の輪荷重走行試験機で行う疲労試験の場合、おおよそ1日2万台(大型車混入率考慮)で50年分の疲労が、147KN 荷重で80万往復の試験に相当すると考えられており、このことからD-RAP補強は、橋梁の耐用年数を満足するに十分な、使用期間の延長がはかれるものであるといえることができる。

#### (2) プレキャスト板の違いについて

これまで、D-RAP工法に使用するプレキャスト板は、表-1に示したノンアスベストスレート板が一般的であった。この理由は、主に①コスト②加工性③重量、などの経済性および施工性の条件と、なるべくコンクリートに近い弾性係数をもっているものがよいという判断からであった。

今回1体ではあったが、スレート板以外のPIC板による疲労試験を実施した。

結果としては、損傷を与えない場合に、176KNの荷重で荷重を行って、20.4万往復で破壊に至っている。これはスレート板によるものと比較すると、約2/5の疲労寿命となる。

ただし、疲労試験はその性格上バラツキが多いということもあり、1体の疲労試験で結論は出せず、供試体数を増やして確かめる必要がある。

### 6. 今後の課題

これまでの研究結果から、D-RAP工法の有効性は確認できたといえる。ただし、エポキシ樹脂やプレキャスト板等の材料については、まだまだ改良の余地は十分ある。

特にスレート板については、目地部などの施工不良等による水の侵入に対し、板そのものが弱くなるという課題のあることが、これまでの試験施工から判っている。

ただし、床版に対する防水効果としては、エポキシ樹脂層が有効に働いていることも確認した。(現在は板そのものを保護する目的で、D-RAP工法には防水工を行っている。)

今後、耐水性が高くコンクリートとの馴染みがよい、プレキャスト板の開発が望まれる。

### 参考文献

- 1) 細江, 安井, 江口, 青木, 小柳: D-RAP工法と床版疲労試験, 土木学会第52回年次学術演説会 概要集I-(A), pp348~349, 1997.9
- 2) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集 第374号/I-6, pp419~426, 1976年10月