

道路橋鋼床版の診断・補強技術

Inspection and Retrofitting Methods for Orthotropic Steel Decks of Road Bridges

天野 哲也 AMANO Tetsuya JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 生産技術研究部
栗原 康行 KURIHARA Yasuyuki JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(副課長)

要旨

診断技術としての超音波探傷、補強技術としての当て板補強および SFRC 舗装を取り上げ、それらの適用性や有効性を検討した。診断技術については、クリーピング波法の場合、高さ 2 mm 程度の人工きずが検出可能であることが確認できた。一方、補強技術については、応力低減率が当て板補強で 56% 程度、SFRC 舗装で 95% となり、これらは FEM 解析とほぼ一致することが確認できた。

Abstract:

This paper shows the validity of ultrasonic testing as an inspection method and attached plate and SFRC pavement as retrofitting methods for orthotropic steel decks. It is clarified that the inspection method could detect an artificial defect of within 2 mm height by creeping wave technique. It is also clarified that there is stress reduction ratio of 56% by the retrofitting method using an attached plate and 95% by the SFRC pavement method, which approximately correspond to FEM analysis.

1. はじめに

近年、厳しい交通荷重により道路橋鋼床版の各部で疲労損傷が顕在化してきている。特に、断面形状が U 型の縦リブ（以下、U リブ）を用いた鋼床版においては、デッキプレートと U リブの溶接部からデッキプレート内に進展したき裂が、表面まで貫通したものが発見されている。このようなき裂は交通障害を生じさせる恐れがあるため健全性を評価できる診断技術、および、短時間で施工が可能な補強技術が求められており、診断技術として超音波探傷法¹⁾、補強技術として当て板工法、鋼繊維補強コンクリート (steel fiber reinforced concrete) 舗装工法²⁾（以下、SFRC 舗装工法）などが提案されている。

本報では、診断技術として実用的と思われる超音波探傷法についての検出限界や診断方法に関する検討結果、および当て板補強工法、SFRC 舗装工法についての溶接部ルート近傍の局部曲げ作用応力の低減効果、耐久性の検討結果について述べる。

2. 検討対象とした疲労き裂

鋼床版の補剛縦リブには、ねじりや曲げの剛性が大きい、溶接長が少ない、溶接歪が少ないなど利点から閉断面形式

の U リブが多く用いられている。

U リブを用いた鋼床版の疲労損傷のうち、デッキプレートと U リブの溶接部に確認されているき裂の模式図を Fig. 1 に示す。この溶接部では、溶接部ルートを起点としてデッキプレートへ進展するき裂と溶着金属内へ進展するき裂の 2 パターンのあることが確認されている。いずれの場合もき裂は、U リブ間を車輪が通過した場合に大きな局部曲げがデッキプレートと U リブの溶接部ルート近傍に作用するため進展すると言われている³⁾。これらのき裂のうち、デッキプレートへ進展するものを放置した場合には、路面陥没などの恐れがあり、道路橋の安全や円滑な交通の流れを確保するため、早期の発見と迅速な補強が望まれて

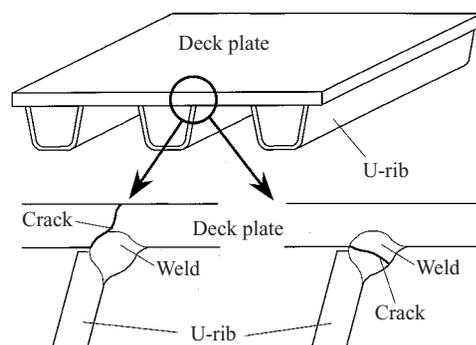


Fig. 1 Schematic diagram of fatigue crack in weld between deck plate and U-rib

いる。

3. 診断技術の検討

3.1 人工きず試験片による確認試験

デッキプレート貫通き裂の超音波探傷手法は、探傷面が限定されていることなどを考慮すると、Fig. 2 に示すような表面波法、もしくは斜角法とするのが適切と考えられる。表面波法は、探傷面もしくはその近傍を伝播する超音波を利用する手法で、表面近傍のきずの検出に対して有効である。斜角法は検査対象物内を斜め方向に伝播する超音波を利用する手法で、溶接部の非破壊検査によく利用されている方法である。これらのうち、表面波法としてクリーピング波法、表面 SH 波法、斜角法として屈折角 70° の横折斜角法について確認試験を行った。

試験には、デジタル探傷器（三菱電機(株)製 UI-23）、クリーピング波探触子 5C10×5LAD90、表面 SH 波探触子 5C5×5SHA90、斜角探触子 5C10×10A70 を用い、Fig. 3 に示すような中央に放電加工スリットを有する平板に U リブを想定した板材を溶接した試験片を用いた。試験片の塗膜は、エポキシ樹脂とポリウレタン樹脂の 2 層塗り、厚さは、膜厚計（(株)ケット科学研究所製 LZ-300C）で測定した結果、110~180 μm の範囲であった。この範囲での膜

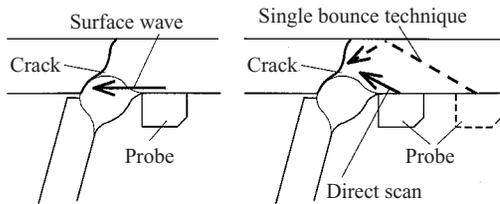


Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic testing

厚がエコー高さに及ぼす影響は、別途行った試験結果から 3 dB 程度と推測される。

Fig. 4 は、きず長さ $L = 30$ mm の場合の各手法の探傷波形の例で、(a), (b), (d) はきず高さが 2 mm, (c) はきず高さが 6 mm の場合を示してあり、(a), (b), (c) は、溶接止端に探触子の先端を接触させた状態での波形、(d) は最大エコー高さでの波形である。また、図中の矢印はきずエコーを示している。同図より、(b) の表面 SH 波法と (d) の斜角一回反射法ではきず以外のエコーは無視できる程度であり、きずエコーの識別が比較的容易であるといえる。(a) のクリーピング波法では、きず以外のエコーが (b) や (c) に比べやや大きく、きずエコーの幅が (b) に比べ大きくなっている。一方、(c) の斜角直射法では、ややノイズが多いもののきず高さが 6 mm 以上の場合にはエコーの識別は可能と考えられる。

Fig. 5 に、きず長さ $L = 30$ mm できず高さ h の異なる試験片を用いて、きず高さとの関係性を調べた結果を示す。横軸はきず高さ、縦軸は一回反射法でのエコー高さを基準として相対エコー高さを示してある。なお、図中のデータは、Fig. 4 の場合と同様に、クリーピング波法、表面 SH 波法、斜角直射法では、溶接止端に探触子先端を接触させた状態でのエコー高さ、一回反射法では最大エ

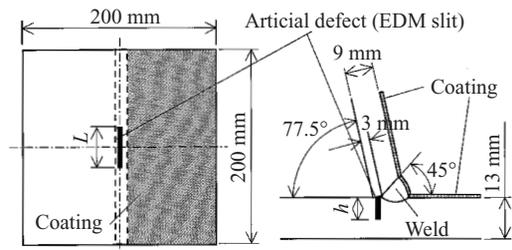


Fig.3 Shape of test pieces

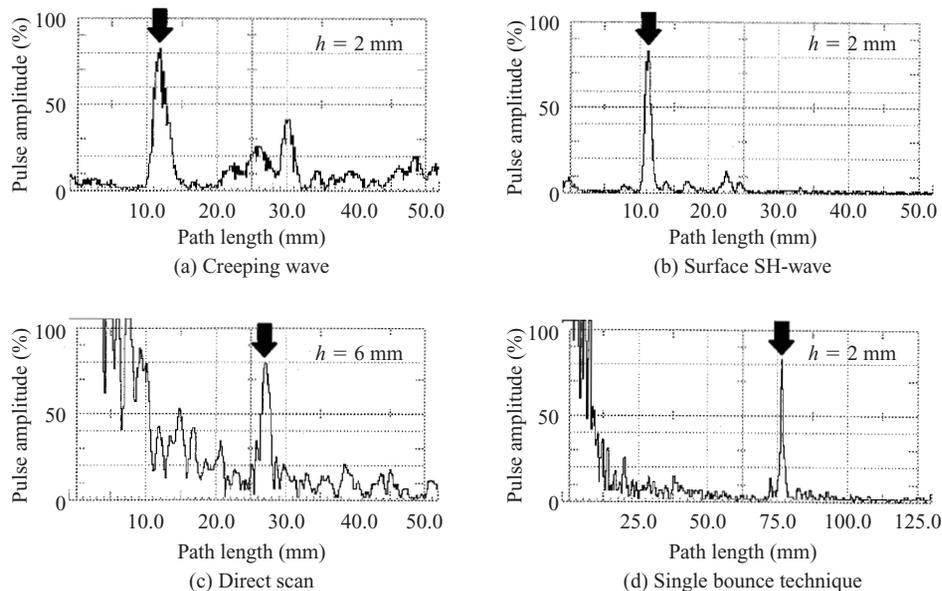


Fig.4 Examples of A-scan display

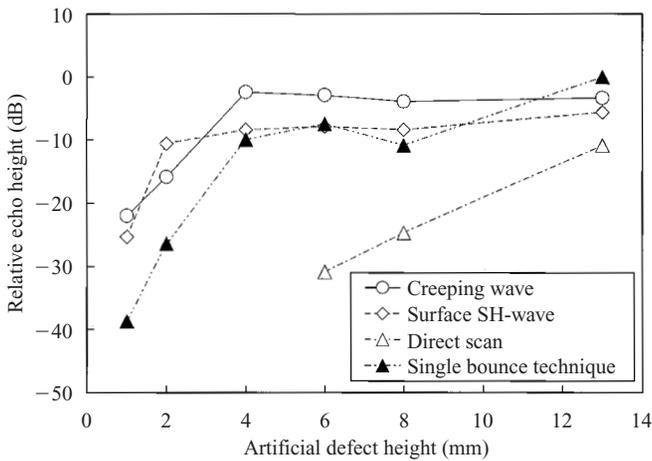


Fig. 5 Relation between artificial defect height and echo height

コー高さを示している。また、きず高さ 13 mm のデータは試験片端部の角部で測定したものであり、きず長さが無限大に相当する。同図より、クリーピング波法、斜角一回反射法ではきず高さ 4 mm、表面 SH 波法ではきず高さ 2 mm でエコー高さが飽和していることが分かる。また、斜角直射法では、きず高さ 6 mm 以上ではきず高さに対してエコー高さが正比例する傾向が認められる。なお、斜角直射法では、前述のように、きず高さ 6 mm 以下ではデータを取ることができなかった。これらのことから、クリーピング波法、斜角一回反射法では 4 mm 以上、表面 SH 波法では 2 mm 以上のきず高さの場合、検出は可能であるがエコー高さからきずの高さを評価するのは難しいと考えられる。一方、斜角直射法では、きず高さが一定以上（本試験では 6 mm であるが、接近限界に依存する）の場合には、エコー高さによってきずの高さを評価できる可能性が見出された。

Fig. 6 に各探傷法の SN 比をまとめた結果を示す。横軸はきず高さ、縦軸は各探傷法での最大と思われるノイズエコー高さと各きずのエコー高さを示してある。ここで、

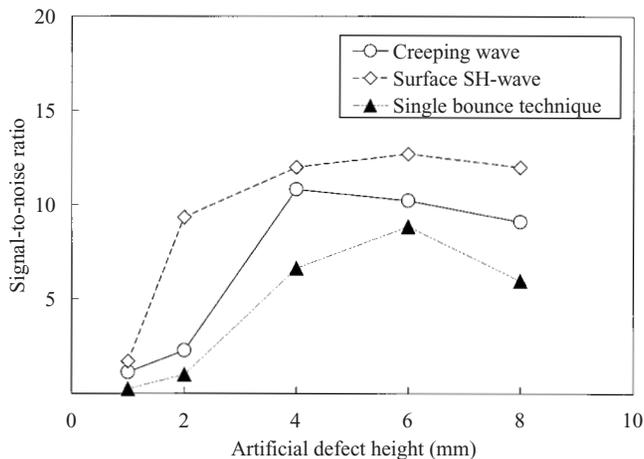


Fig. 6 Relation between artificial defect height and signal-to-noise ratio

ノイズは溶着金属のルート部、Uリブの板端部、溶接止端からのエコーとした。SN 比の観点から各探傷法を評価すると、表面 SH 波法は SN 比が大きく検出法として優れていることが分かる。また、検出可能なきずの下限値について、SN 比 4 を判断基準とすると、表面 SH 波法で 1 mm 程度、クリーピング波法で 2 mm 程度、斜角一回反射法で 3 mm 程度であると推定される。

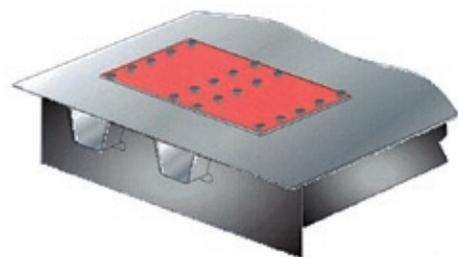
3.2 き裂診断方法

表面 SH 波法は、検出性能は優れているものの、粘度の大きな接触媒質を用いる必要があるため探触子走査が困難であり、エコーが安定するまでに時間を要するなどの問題がある。したがって、橋梁鋼床版のような広範囲な探傷には不向きで、補助的な手段として用いるのが適当と考えられる。確認試験および前述の表面 SH 波法の特性を考慮し、1 mm 程度の小さなき裂を診断する場合はクリーピング波法と表面 SH 波法の併用、2 mm 以上のき裂を診断する場合にはクリーピング波法と斜角直射法の併用する診断方法を提案する。なお、きず評価では、その傾き、発生位置などにより誤差が生じるため、寸法はあくまで目安である。

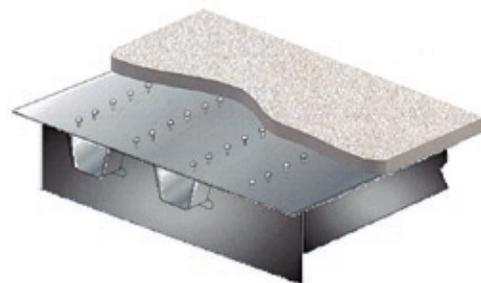
4. 補強技術の検討

4.1 補強技術概要

補強工法として有力な「当て板補強工法」, 「SFRC 舗装工法」(Fig. 7) について検討を実施した。当て板補強工法とは、当て板をデッキプレート上面に設置し、ボルトによ



(a) Attached plate



(b) SFRC pavement

Fig. 7 Reinforcement

り接合する工法, SFRC 舗装工法とは, SFRC をずれ止めや接着剤などによりデッキプレート上面に舗装する工法である。これらについて, 解析的・実験的な検討により応力低減効果および耐力の検討を実施した。

4.2 実物大試験体による載荷実験

実験は, 「当て板補強試験体」および「SFRC 舗装試験体」に対して実施した。鋼床版試験体の寸法は2体とも同一で, Uリブ幅 320 mm × 高さ 250 mm × 板厚 8 mm, デッキプレート板厚 12 mm である。Fig. 8 に示す当て板試験体は, 端部にテーパを設けた幅 1 235 mm × 長さ 1 215 mm × 板厚 12 mm の鋼板を, 接着剤およびトルシアボルト (M20) で鋼床版試験体に接合したものとした。Fig. 9 に示す SFRC 試験体は, Table 1 に示す諸元で打設

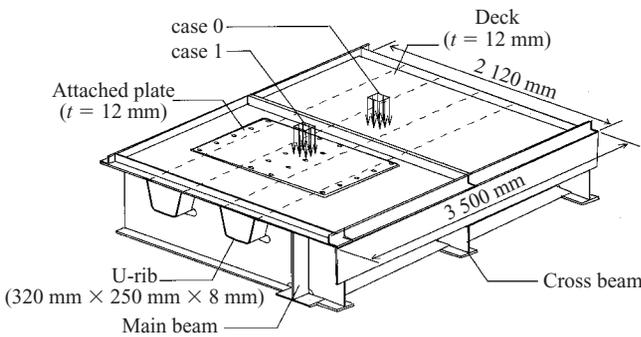


Fig.8 Specimen (Attached plate model)

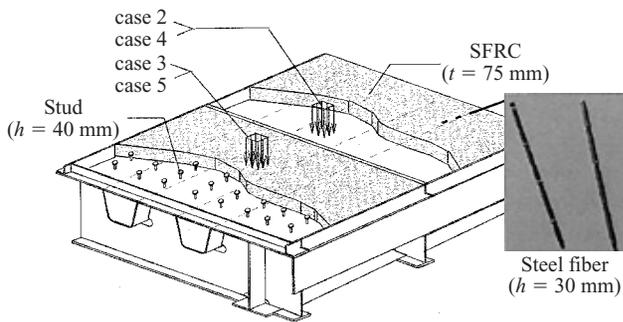


Fig.9 Specimen (SFRC pavement model)

Table 1 Principal elements of SFRC

Item	Detail
Concrete material	Ultimate high-early strength concrete
Ration of steel fiber	1.5% (1.2 kN/m ³)
Length of steel fiber	30 mm
Bulk of concrete	0.50 m ³
Concrete strength at 3 h (Compression)	29.7 N/mm ²
Slump	8 cm
Maximum dimation of aggregates	20 mm
Temperature	19°C

Table 2 Load cases

Load case	Condition	Maximum load (kN)
case 0	No-reinforcement	45
case 1	Attached plate	45
case 2	SFRC (No-stud)	45
case 3	SFRC (Stud)	45
case 4	SFRC (No-stud)	1 065
case 5	SFRC (Stud)	1 527

したが, 試験体の半面は, ずれ止め (小径スタッド: 高さ 40 mm, φ9.5 mm, 250 mm ピッチ⁴⁾) あり, もう一方の面は, ずれ止めなしとした。載荷実験は Table 2 に示す 6 ケースとし, トラック後輪の荷重を想定し, Uリブ間中央部に硬質ゴム (200 mm × 200 mm) を介して載荷した。case 0~3 は, 45 kN までの弾性載荷であり, 局部曲げによる発生応力の低減効果を比較した。case 4, 5 では, SFRC の耐力試験を実施した。

4.3 載荷実験の結果と考察

Fig. 10 および Table 3 に弾性載荷 (45 kN) 時の局部曲げによる応力分布および補強による応力低減効果を示す。無補強時, 最大歪の発生したゲージ番号 3 に着目すると, 当て板による応力低減率は 56% (Fig. 11 に示す当て板とデッキプレートの接触は考慮するが摩擦は 0 と仮定した FEM 解析では, 48% の応力低減率) となった。一方, SFRC による応力低減率は 95% (Fig. 12 に示す完全合成を仮定した FEM 解析では, 96% の応力低減率) となった。また, ずれ止めの有無による応力低減への影響はほとんど見られなかった。一方, Photo 1 に示す耐力試験は, Fig. 13 に示すようにずれ止め有りの場合, 最大耐力 1 527 kN で SFRC 床版の載荷板周辺の圧壊が生じ (Photo 2(a)), ずれ止めなしの場合, 最大耐力 1 065 kN で SFRC 床版を横断するき裂が生じた (Photo 2(b))。

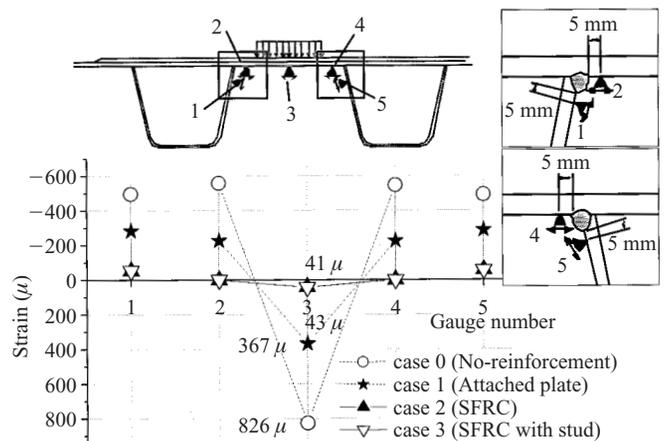


Fig. 10 Strain graph in elastic loading

Table 3 Stress diminishing on deck plate

Case	Condition	FEM		Experiment	
		Stress (MPa)	Diminishing ratio (%)	Stress (MPa)	Diminishing ratio (%)
case 0	No-reinforcement	182	—	165	—
case 1	Attached plate	94	48	73	56
case 2	SFRC pavement (No-stud)	9	96	8	95
case 3	SFRC pavement (Stud)	9	96	9	95

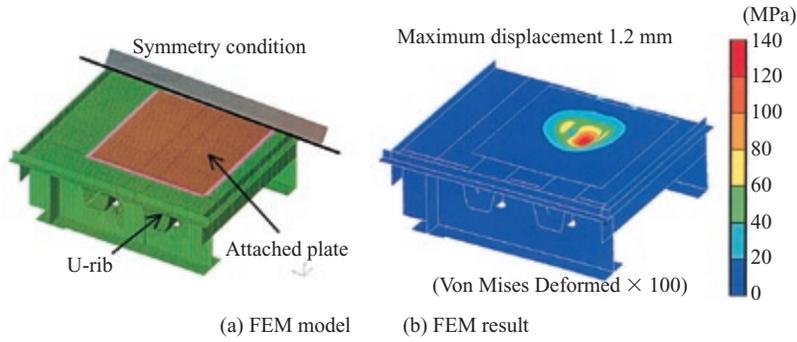


Fig. 11 FEM model (Attached plate model)

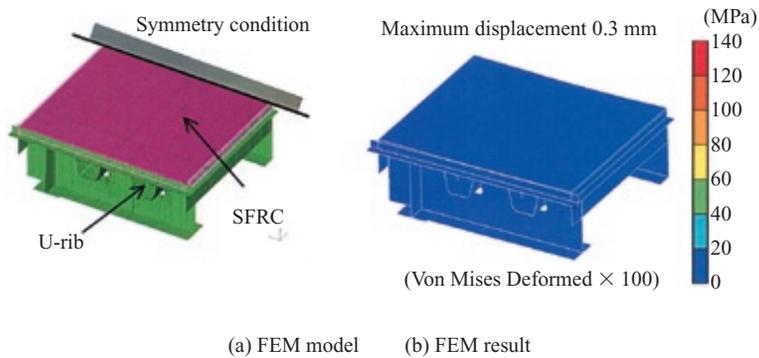


Fig. 12 FEM model (SFRC pavement model)

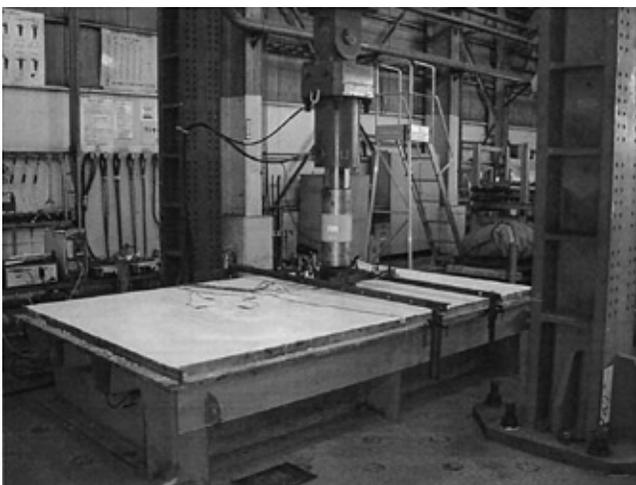


Photo 1 Experiment of ultimate strength

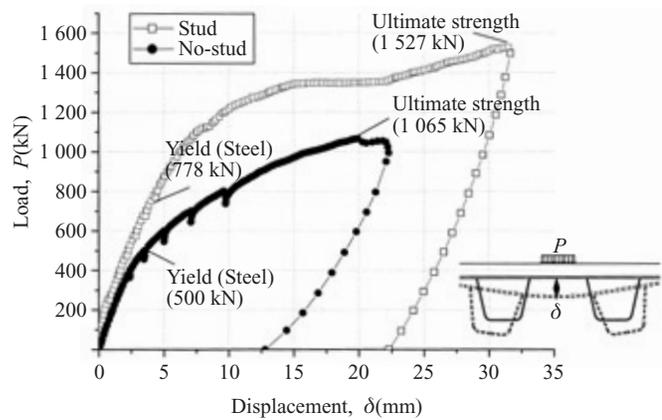


Fig. 13 Load-displacement graph in ultimate strength (SFRC pavement)

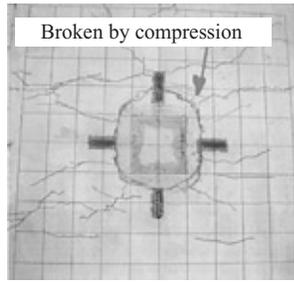
5. おわりに

Uリブを用いた鋼床版のデッキプレート貫通き裂の診断

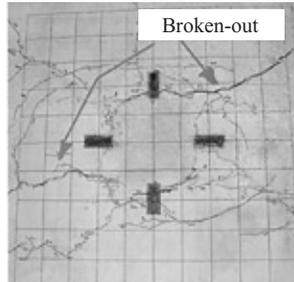
技術，補強技術に関して検証を行い，以下の結果を得た。

(1) 診断手法について

(a) デッキプレート貫通き裂の検出・評価は，クリーニング波法によりき裂の有無の検査を行い，小さ



(a) Stud



(b) No-stud

Photo 2 Condition of broken deck slab

なき裂まで評価する場合には表面 SH 波法，大きなき裂を評価する場合には斜角直射法を用いる方法が有効である。

- (b) 屈折角 70° の斜角直射法において，溶接止端に探触子先端を接触させた場合には，きず高さが 6 mm 以上ではきず高さとエコー高さは正比例する。
- (c) デッキプレート貫通き裂の検出下限値は，表面 SH 波法を用いた場合で 1 mm 程度，クリーピング波法で 2 mm 程度，斜角一回反射法で 3mm 程度である。

(2) 補強技術について

- (a) 当て板の応力低減効果は 56% で，デッキプレートと当て板が重ね梁的な挙動をしているということで，おおむね説明できる。
- (b) SFRC の応力低減効果は 95% となり，SFRC 版とデッキプレートとの完全合成的な挙動として説明が可能である。
- (c) SFRC を舗装した鋼床版では，ずれ止めの有無による応力低減効果の差は微小であるが，終局耐力に大きな差が生じた。

参考文献

- 1) 村越潤，有馬敬育，藤木修，鋼床版の疲労亀裂に対する超音波探傷法の適用性に関する基礎検討，土木技術資料，vol. 46，no. 11，2004，p. 34-39.
- 2) 加形護，児玉孝喜，中丸貢，西川隆晴，石田稔，栗原和彦，SFRC 舗装による鋼床版の疲労損傷対策，橋梁と基礎，2004-10.
- 3) 三木千壽，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝，鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，no. 780，I-70，2005-1.
- 4) 名古屋高速道路公団，舗装設計基準，1999-04.



天野 哲也



栗原 康行