



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 19-3

研究テーマ

各種道路橋床版における疲労損傷の
非破壊検査システムに関する研究開発

研究代表者：大阪大学教授	鎌田 敏郎
共同研究者：大阪工業大学教授	松井 繁之
大阪大学教授	金 裕哲
大阪大学教授	久保 司郎
神戸大学教授	阪上 隆英
京都大学准教授	塩谷 智基
大阪大学准教授	田川 哲哉
大阪大学助教	崎野 良比呂
大阪大学特任助教	廣畑 幹人
大阪大学特任助教	内田 慎哉
大阪大学助教	大西 弘志

平成 22 年 6 月

新道路技術会議

目 次

概要（様式3の公表用資料）	1
第1章 はじめに	3
第2章 衝撃弾性波法に基づくRC床版内部に生じる水平ひび割れの検出手法	4
2.1 はじめに	4
2.2 RC床版の水平ひび割れの検出における手法の選定	4
2.3 アスファルト舗装を有するRC床版の水平ひび割れの検出への 衝撃弾性波法の適用	11
2.4 3次元衝撃応答解析による弾性波の入力/受振位置と水平ひび割れとの 平面的な位置関係が周波数スペクトルに与える影響	17
2.5 3次元衝撃応答解析を援用した衝撃弾性波法に基づく道路橋切り出しRC床版の 水平ひび割れの検出手法	20
2.6 まとめ	24
第3章 弾性波トモグラフィ計測に基づくRC床版内部の損傷評価手法	26
3.1 概要	26
3.2 弾性波トモグラフィ計測	26
3.3 モデル床版供試体計測	27
3.4 原位置切出し床版の計測	29
3.5 表面波速度トモグラフィ	30
3.6 まとめ	32
第4章 赤外線サーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂の遠隔検出手法	34
4.1 はじめに	34
4.2 自己相関ロックインサーモグラフィ	35
4.3 実橋鋼床版のビード貫通型疲労き裂検出	35
4.4 デッキ貫通型疲労き裂の検出（1）	43
4.5 デッキ貫通型疲労き裂の検出（2）	49
4.6 まとめ	52
第5章 電場指紋照合法による鋼床版の疲労き裂の検出手法	53
5.1 はじめに	53
5.2 電場指紋照合法	53
5.3 試験体	54
5.4 実験結果	55
5.5 まとめ	58
第6章 まとめ	59

研究成果概要

平成19年度採択分
平成22年6月30日作成

研究課題名 各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムに関する研究開発

研究代表者及び共同研究者

- ・研究代表者氏名（ふりがな） 鎌田 敏郎（かまだ としろう）
- ・共同研究者氏名（ふりがな）松井 繁之（まつい しげゆき）、金 裕哲（きん ゆうてつ）、久保 司郎（くぼ しろう）、阪上 隆英（さかがみ たかひで）、塩谷 智基（しおたに ともき）、田川 哲哉（たがわ てつや）、崎野 良比呂（さきの よしひろ）、廣畑 幹人（ひろはた みきと）、内田 慎哉（うちだ しんや）、大西 弘志（おおにし ひろし）

研究代表者所属研究機関・役職 大阪大学・教授

【研究の概要】

道路橋に使用される主要な床版（RC床版、鋼床版）に発生する疲労損傷の中で、現場での目視確認が困難な為大きな問題となっている損傷を対象とし、高精度検出できる効率の高い非破壊検査システムを構築する。

【キーワード】

道路橋床版、非破壊検査、衝撃弾性波法、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法、電場指紋照合法、弾性波トモグラフィ法

（研究開始当初の背景・動機）

近年、道路橋において種々の損傷が発生し、それらを修繕維持する業務が急増している。

現在、この問題に対応する為、道路橋床版の中でも特に鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の損傷に対する種々の補修・補強工法が既に開発されており、それらの対策によって床版の延命が計られている。これらの補強方法の中の主なものに上面増厚工法がある。上面増厚工法は広く全国的に採用された工法であるが、採用され始めて約20年が経過した現在、各道路管理機関において補強部の再損傷が懸念され出している。

また、最近では我国のみならず、世界的な問題として鋼床版の疲労現象が顕在化している。複雑な溶接構造である鋼床版では各溶接継手部で疲労き裂が発生し、その補修や予防対策について現在、鋭意研究が進められている。しかし、鋼床版における疲労損傷の検出技術に関しては研究が進んでおらず、鋼床版の疲労損傷を確実に検出できる非破壊検査技術の開発が急務となっている。

（研究の目的）

本研究課題では道路橋床版の中でもRC床版と鋼床版を研究対象とした次の各項の技術開発を行うことを目的とした。

① 上面増厚補強を施されたRC床版の再損傷

を検出するための非破壊検査技術。

② 鋼床版の疲労損傷、特にデッキプレートとトラフリブの接合部を起点として発生する疲労亀裂を高精度で検出できる非破壊検査技術。

（研究の方法）

本研究課題では研究グループをRC床版担当と鋼床版担当に分けて研究を進めた。

RC床版のグループではモデル床版や実橋梁から切り出した床版等を用いた実験的研究を進めるとともに、損傷を有するRC床版の振動解析なども行い、検査手法の高度化を目指した研究を展開した。

鋼床版のグループではモデル床版を用いた輪荷重走行試験や小型モデルを用いた疲労試験、さらには現場での実測を通じてより高精度で効率の良い検査手法を確立する為の研究を実施した。

（研究の主な成果）

本研究の成果の概要を研究項目ごとに示す。

1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法による、RC床版内部に発生する水平ひび割れの検出に関する研究では次のような知見や成果を得た。

- ・衝撃弾性波法を用いることにより、アスファルト舗装面から水平ひび割れを検出することが可能である。

- ・衝撃弾性波法を適用した場合の RC 床版内部での弾性波の挙動を、3次元衝撃応答解析により再現することにより、「I：弾性波の入力方法」、「II：受信方法」および「III：周波数分析方法」の最適な組み合わせを決定するための方法を提案した。

2) 弾性波トモグラフィ法

モデル床版による弾性波トモグラフィ計測および、実橋梁より切り出した床版での同計測により以下の知見が得られた。

- ・疲労による床版内部の損傷進展は、弾性波の低速度領域の拡大として評価可能である。
- ・アスファルト層の有無が弾性波トモグラフィ結果に与える影響を検討した結果、アスファルトがある場合でも、弾性波トモグラフィにより実際の内部劣化を反映した速度性状が得られている可能性が高い。
- ・削孔により床版内部性状を観察した結果、アスファルト層（と遮水層）がある場合でも、弾性波トモグラフィにより劣化程度が推定できる可能性が確認できている。

3) 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法

室内実験および実橋梁に対する現場試験を通じて、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法についての以下の知見を得た。

- ・中型以上の車両による载荷により引き起こされるき裂先端応力場変動に伴う熱弾性温度変動の検出により、疲労き裂を検出できる。
- ・溶接ビード貫通き裂はもとより、溶接ビードの裏面からデッキプレートに至るデッキ貫通き裂の検出が可能である。
- ・防食塗装の下で発生・進展する疲労き裂に対して自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法は検出能力を有している。
- ・被測定物との距離が長い場合や反射鏡を使った測定経路においても、き裂の検出が可能である。

4) 電場指紋照合法 (FSM)

本研究において実施された一連の研究により、下記のような知見を得ることができた。

- ・電場指紋照合法による計測結果から得られるFC値の評価レンジを変化させるなどの工夫をすることにより、疲労きれつを精度よく発見できる可能性があることが確認できた。
- ・センシングピンの配置をUリブを跨ぐ配置とした場合でも精度良くき裂の発生が検知でき、進展についてもモニタリングできることが確認できた。

(主な発表論文)

1. 前 裕史, 鎌田敏郎, 内田慎哉: 衝撃弾性波法に

よるコンクリート版厚推定手法へのウェーブレット解析および自己相関係数の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1697-1702, 2010.

2. 内田慎哉, 鎌田敏郎, 山本健太, 前 裕史, 大西弘志: 弾性波の入力方法が道路橋 RC 床版における水平ひび割れの評価に与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.31-38, 2009.
3. 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 玉越隆史, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による鋼床版デッキ貫通型疲労き裂の検出, 日本機械学会論文集 (A 編), 76-766, pp.723-729, 2010-6
4. Yui Izumi, Takahide Sakagami, Shiro Kubo: Nondestructive Evaluation of Fatigue Cracks in Steel Bridges by Infrared Thermography, 2008 International Orthotropic Bridge Conference, 2008.8.25-29, Sacramento, USA., Proc. of 2008 International Orthotropic Bridge Conference, 2008-8, pp.502-513 (CD-ROM).
5. 吉見晋平, 塩谷智基, 桃木昌平, 蔡華堅, 鎌田敏郎: AE 法による床版疲労破壊モニタリング, JSNDI, 第 16 回 AE 総合コンファレンス論文集, pp. 65-68, 2009. 8.

(今後の展望)

本研究の成果が橋梁の維持管理の実務で有効に活用されるためには、今後、この技術を適切に運用するためのマニュアルの整備が必要となるものと思われる。そのためには、引き続き、国土技術政策総合研究所殿等の強力なリードによって、使い勝手が良く、技術を効果的に活用できるマニュアルの作成に取り組んでいただくことが重要と考えられる。

(道路政策の質の向上への寄与)

本研究の成果を活用することにより、供用中の橋梁群の維持管理コストを大幅に低減することができるだけでなく、これまでの技術では適切な診断ができなかった疲労損傷に関しても確認が容易となることから、床版の損傷に対して早期の対応が可能になり、橋梁の損傷に起因する道路ネットワークの機能低下リスクをより小さくすることができる。

また、本提案技術の実用化により橋梁点検業務の効率が飛躍的に向上するため、各道路管理者が構築している道路維持管理システムの運営あるいは橋梁長寿命化修繕計画の策定が容易となり、アセットマネジメントに基づく維持管理作業を実現することができる。すなわち、これらの非破壊検査技術を導入することにより、アセットマネジメントに基づくライフサイクルコストの最適化を実現することが可能となる。

第1章 はじめに

道路ネットワークを形成する様々な構造物群の中でも、橋梁は道路ネットワークが機能を維持する為には重要な要の構造物である。しかし、近年、これらの橋梁において種々の損傷が発生し、それらを修繕維持する業務が急増している。わが国における既存橋梁のストックの量とその構成を鑑みたとき（図1.1）、今後、10年を出ずして供用期間50年を超過した、いわゆる老朽化橋梁の急増とそれに伴う橋梁損傷の増加は避けることができない問題となるのは確実な状況である。

道路橋に発生する深刻な損傷を調査した結果によると、その約50%は床版の劣化・損傷に関するものであることは広く知られている。現在では床版の損傷に対応するための種々の補修・補強工法が既に開発されており、それらの対策によって床版の延命が計られている。

床版の中でも鉄筋コンクリート床版を対象としてこれまでに開発されてきた主な補強方法には縦桁増設工法、鋼板接着工法、上面増厚工法がある。これらの内、上面増厚工法は広く全国的に採用された工法であるが、採用され始めて約20年が経過した現在、補強部の再損傷が深刻な課題になっている。現在ではまだ適用区間の1%程度で発生しているに過ぎないと言われているが、今後増加する傾向にある。本提案課題ではこの問題に対応するための第一歩として、上面増厚補強を施された鉄筋コンクリート床版の補強部における再損傷を検出するための非破壊検査システムの技術開発を第一の研究目的とする一連の研究を展開した(第2章～第3章)。

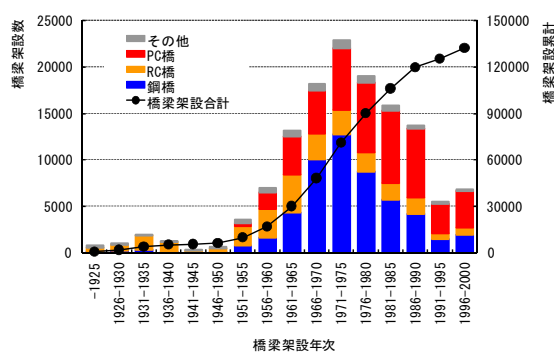


図 1.1 我が国における道路橋整備状況

また、最近では我国のみならず、世界的な問題として、鋼床版の疲労現象が顕在化している。複雑な溶接構造である鋼床版では縦リブと横リブの交点、縦リブのデッキプレートとの隅肉溶接部、トラフリブ（Uリブとも呼ぶ）の溶接継手部等で疲労き裂が発生し、その疲労き裂の補修や予防対策について現在、鋭意研究が進められている。補修方法については2, 3の有効な方法が提案されている。しかしながら、鋼床版における疲労損傷の調査手法に関しては整備が進んでおらず、鋼床版の疲労損傷の簡易な検査手法による検出、並びにき裂発生と進展を予測する非破壊検査法の開発が急務となっている。以上のことから、本研究では鋼床版疲労損傷の発生と進展を把握できる非破壊検査法の開発ならびに疲労き裂のモニタリング手法に関する技術開発を第二の研究目的とした研究を推進した（第4章～第5章）。

第2章 衝撃弾性波法に基づく RC 床版内部に生じる水平ひび割れの検出手法

2.1 はじめに

近年、道路橋 RC 床版において、既設コンクリートと上面増厚コンクリートの界面、あるいは既設コンクリート内部の鉄筋位置において、疲労による水平状のひび割れが発生する事例（図-2.1 参照）が顕在化している²⁻¹⁾。このような水平ひび割れの発生や進展は、床版の下面や上面からの外観目視では判断することが極めて困難である。そのため、非破壊により水平ひび割れを評価する手法の確立が望まれている。

そこで、本章では、まず、一般的な道路橋 RC 床版の厚さを想定したコンクリート版供試体を作製し、衝撃弾性波法、Electro Magnetic Hammer Method（以降、EMH 法）および超音波法の 3 つの異なる弾性波法により水平ひび割れを模擬した人工欠陥の検出を試みた。各手法の特徴ならびに適用可能な人工欠陥の大きさや深さに関する考察に基づき、検出できる守備範囲が広い手法の選定を行なった（2.2）。続いて、アスファルト舗装を有する供試体を作製し、アスファルト舗装面から選定した手法により人工欠陥の検出を試みた（2.3）。次に、アスファルト舗装を有する供試体の条件を基に設定したモデルにおいて 3 次元衝撃応答解析を行ない、解析結果と 2.2 の測定結果とを比較することにより、解析モデルの妥当性を検証した。さらに、弾性波の入力/受振位置とひび割れとの平面的な位置関係が測定結果に与える影響を解析により把握することを試みた（2.4）。

以上の検討結果を踏まえて、衝撃応答解析に

より「I：弾性波の入力方法」、「II：弾性波の受振方法」および「III：周波数分析方法」の最適な組み合わせを決定する方法についての検討を行なった。この結果に基づき、供用中の道路橋から切り出した RC 床版を対象として、水平ひび割れの検出を試みた（2.5）。最後に、2.6 で結論を示した。

2.2 RC 床版の水平ひび割れの検出における手法の選定

(1) 各種弾性波法による水平ひび割れの検出原理

a) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法により RC 床版内部の水平ひび割れを検出する原理を示した概念図を図-2.2 に示す。この手法では、鋼球を用いて床版の表面

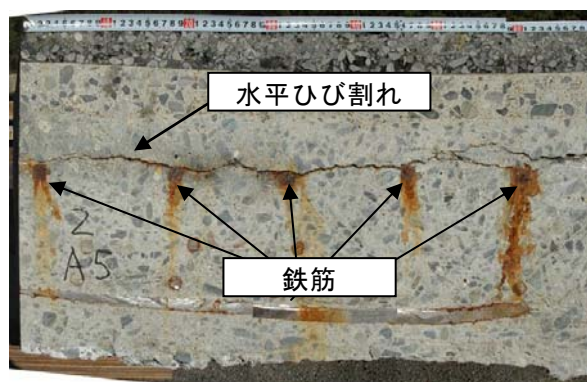


図-2.1 道路橋 RC 床版内部の水平ひび割れの発生状況

を打撃することにより床版内部に弾性波を伝播させ、床版表面と底面で生じる多重反射、あるいは床版表面と水平ひび割れの間で多重反射する波を、表面に設置したセンサにより受信し、この受信波を周波数分析することにより算出されるピーク周波数（図-2.2 中の f_T および f_d ）に基づき、床版の版厚： T や水平ひび割れまでの深さ： d を推定することができる。床版の版厚や水平ひび割れに相当する理論上のピーク周波数は、既往の研究²⁻²⁾によれば、以下の式により算出することができる。

$$f_T = C_p / 2T \quad (1)$$

$$f_d = C_p / 2d \quad (2)$$

ここで、 f_T ：RC床版の厚さに相当する縦波の版厚共振周波数、 f_d ：水平ひび割れの深さに相当する縦波の欠陥共振周波数、 C_p ：コンクリートの縦波の伝播速度である。これより、コンクリートの縦波の伝播速度を測定あるいは一般的な値と仮定すれば、周波数スペクトル上におけるピークの周波数の値から、水平ひび割れまでの深さを推定することが可能である。したがって、衝撃弾性波法による計測では、版厚あるいは欠陥による共振現象を如何にして励起させ、これらの共振現象で生じるピークを周波数スペクトル上で抽出するかが極めて重要となる。Sansalone らの既往の研究²⁻²⁾によれば、版厚あるいは欠陥による共振現象を励起させるには、鋼球による弾性波の入力において、入力される波の上限周波数が版厚や欠陥共振周波数以上となるように、鋼球の直径を選定する必要がある

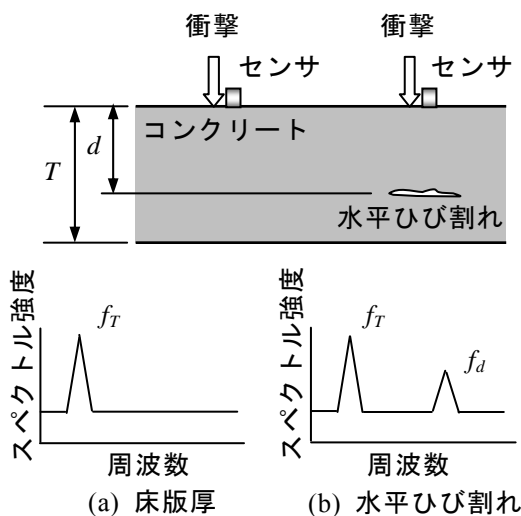


図-2.2 衝撃弾性波法による水平ひび割れの検出原理

と述べている。ここで、鋼球の打撃によって生じる弾性波の周波数特性は、使用する鋼球の直径に影響を受けることが知られている。図-2.3に、鋼球打撃によって生じた衝撃力とコンクリートと鋼球との接触時間との関係を示す。横軸の接触時間は、鋼球直径の大きさによって、その値が変化する。Herzの接触理論によれば、接触時間と鋼球直径との関係は、次式により定義されている。

$$T_c = 0.0043D \quad (3)$$

ここで、 T_c ：接触時間（s）、 D ：鋼球直径（m）である。

続いて、図-2.4に、衝撃力の時間関数（図-2.3参照）の周波数スペクトルを示す。この図には、Sansalone らが便宜上定義した入力される弾性波の上限周波数と鋼球直径との関係式²⁻²⁾を併せて示している。両者の関係式を、式(4)に示す。

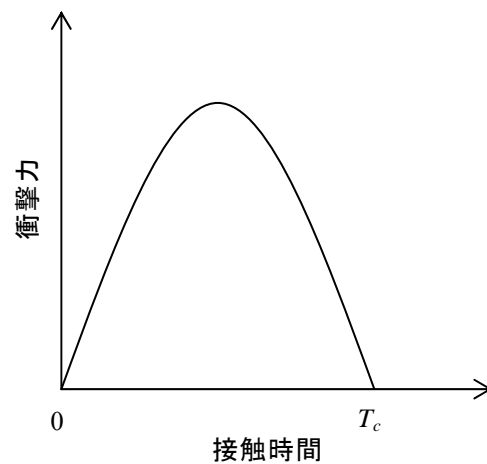


図-2.3 衝撃力と接触時間との関係

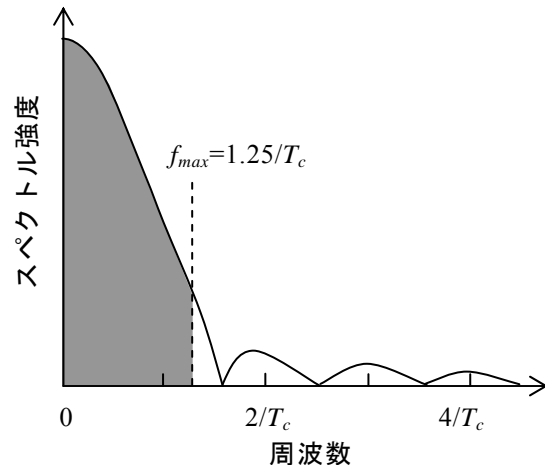


図-2.4 衝撃力の時間関数の周波数スペクトル

$$f_{max} = 291/D \quad (4)$$

ここで、 f_{max} ：入力される弾性波の上限周波数 (Hz) である。したがって、RC 床版内部の水平ひび割れを把握するには、欠陥共振周波数： f_d を十分に上回ることが可能な弾性波を入力する必要がある²⁻²⁾。

b) EMH 法

EMH 法により床版内部の水平ひび割れを検出する原理を図-2.5 に示す。この手法は、水平ひび割れの上側にあるコンクリート薄板部分をたわみ振動（膜振動）させ、その振動特性から水平ひび割れを検出するものである。具体的には、まず、薄板部分を膜振動させるために、コンクリート表面に設置した発信子により 1kHz から 10kHz へ連続的に変化する周波数スイープ波を入力する。続いて、励起した膜振動を受振子により時刻歴応答波形として記録し、これを高速フーリエ変換 (FFT) することにより、周波数スペクトルを算出する。得られた周波数スペクトルに対して帯域積分を行い、振動レベルを算出する。以下に振動レベルの算定式を示す。

$$E = \int_{f_1}^{f_2} G(f)^2 df \quad (5)$$

ここで、 E ：振動レベル、 f_1 ：下限周波数、 f_2 ：上限周波数、 $G(f)$ ：周波数 f における周波数スペクトルのゲインである。算出した振動レベルを、著者らの既往の研究結果²⁻³⁾である欠陥直径および深さの関係式に代入することにより、床版表面から水平ひび割れまでの深さを把握することができる。

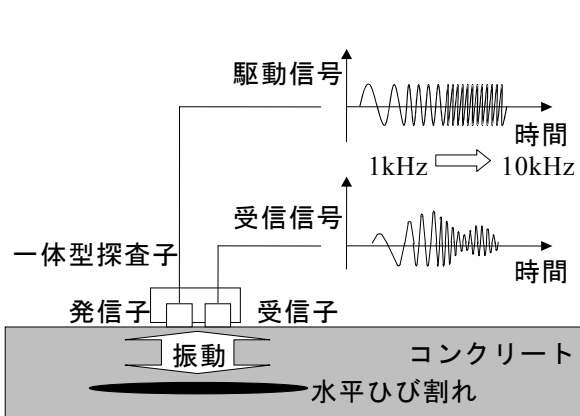


図-2.5 EMH 法による水平ひび割れの検出原理

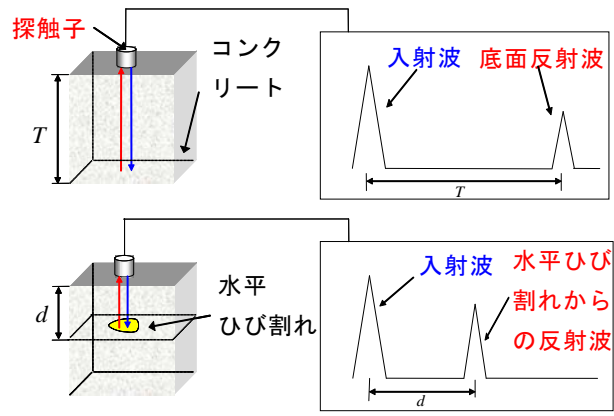
c) 超音波法

超音波法の一探触子一面配置により水平ひび割れを検出する原理を図-2.6 に示す。探触子から連続波をコンクリートへ発信し、水平ひび割れで反射する波を探触子により受信、このときの時刻にコンクリートの縦波の伝播速度を掛けることにより、床版表面から水平ひび割れまでの深さを推定することができる。

(2) 計測概要

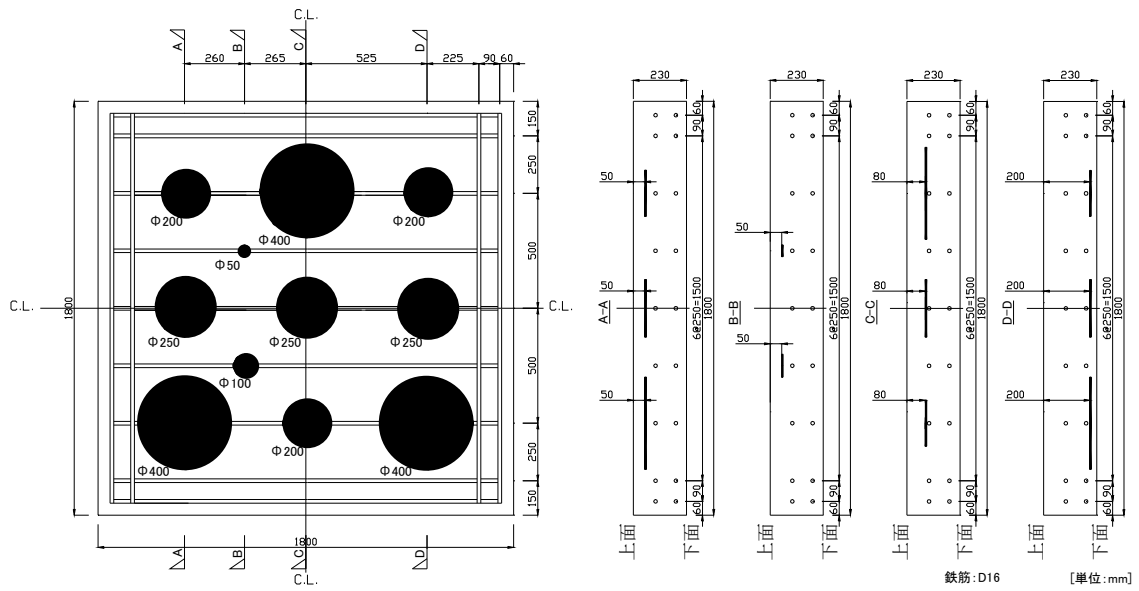
a) 供試体

図-2.7 に供試体の概要を示す。供試体は、入力した弾性波が側面において反射することを極力避けるため、長さおよび幅を 1800mm とした。供試体の版厚は、一般的な道路橋 RC 床版の厚さとなるように、高速道路調査会 上面増厚工法設計施工マニュアル²⁻⁴⁾を参考に、230mm と 280mm の 2 種類に設定した。版厚の異なる供試体を、それぞれ「230mm 供試体」および「280mm 供試体」と呼ぶ。供試体の内部には、水平ひび割れを模擬するために、厚さ 6mm かつ直径が 50, 100, 200, 250 および 400mm の 5 種類の円盤状の発砲スチロールを人工欠陥として設置した。人工欠陥の設置位置は、230mm 供試体では上面から 50, 80 および 200mm (図-2.7 (a) 参照)、280mm 供試体については上面から 100, 130 および 250mm (図-2.7 (b) 参照) とした。人工欠陥の配置状況の一例を図-2.8 に示す。また、本研究では、人工欠陥までの深さにバリエーションを設けるため、いずれの供試体についても図-2.9 に示すとおりに設置し、下面側からの計測も行えるように工夫した。したがって、対象とした人工欠陥の深さと直径の全バリエーションは 33 ケースである (表-2.1 参照)。

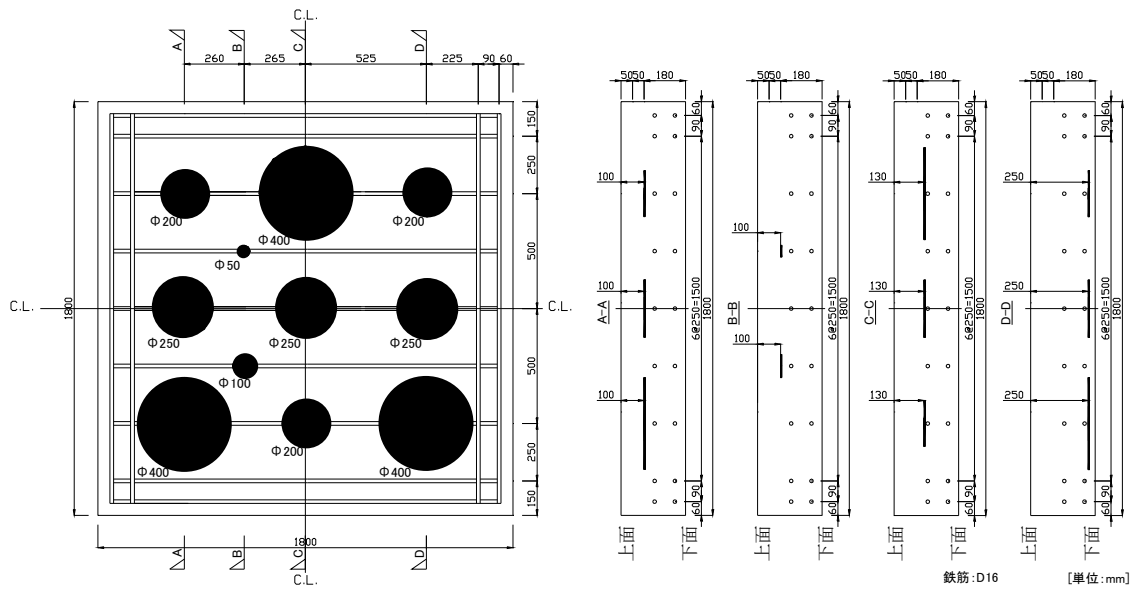


[単位：mm]

図-2.6 超音波法による水平ひび割れの検出原理



(a) 230mm 供試体



(b) 280mm 供試体

図-2.7 供試体概要



図-2.8 人工欠陥の配置状況の一例



図-2.9 供試体設置状況

b) 各種弾性波法による計測

衝撃弾性波法の計測状況を図-2.10 に示す。弾性波の入力および受信位置は、いずれの供試体においても、人工欠陥中央直上のコンクリート表面で行った。弾性波の入力には、直径3.2mmの鋼球を使用した。この鋼球により入力される弾性波の上限周波数は、式(4)より90.9kHzとなる。これに対して、欠陥共振周波数が最も高くなる欠陥深さ30mmでの f_d は、式(2)より63.3kHzを得る。この値は、コンクリートの縦波の伝播速度： C_p を3800m/sとして算出している。速度の算出方法については、2.2 (3) (a)で詳細に説明する。以上より、鋼球直径3.2mmを使用すれば、設定した欠陥深さに相当する共振周波数： f_d を

表-2.1 230mm および 280mm 供試体における人工欠陥深さと直径との関係

深さ (mm)	直径 (mm)				
	50	100	200	250	400
30	—	—	●	●	●
50	●	●	●	●	●
80	—	—	●	●	●
100	●	●	●	●	●
130	—	—	●	●	●
150	—	—	●	●	●
180	●	●	●	●	●
200	—	—	●	●	●
250	—	—	●	●	●

—：欠陥未設置， ●：欠陥設置



図-2.10 衝撃弾性波法の計測状況

十分に上回ることが可能な弾性波を入力することができる。一方、弾性波の受信には、約0～1MHzの間でフラットな応答感度を有するコンニカル型高感度変位センサを使用した。センサで受信した信号は、サンプリング時間1 μ s、サンプリング数5000点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録し、その後、FFTにより周波数スペクトルを算出した。なお、弾性波の入力位置と受信位置との距離は約50mmとした。

図-2.11にEMH法の計測状況を示す。いずれの供試体においても、発・受振一体型センサは、人工欠陥直上のコンクリート表面に設置した。エアークンプレッサによりセンサとコンクリートとを吸着させた上で、発信子からスイープ波をコンクリートへ入力した。

超音波法の計測状況を図-2.12に示す。衝撃弾性波法およびEMH法と同様に、人工欠陥の中心位置と探触子の中心位置とが一致するように、コンクリート表面に直径56mmの探触子(実効周波数：500kHz)を設置した。



図-2.11 EMH法の計測状況



図-2.12 超音波法の計測状況

(3) 計測結果および考察

a) 衝撃弾性波法

230mm および 280mm 供試体において得られた周波数スペクトルの一例として、供試体表面から深さ 30, 80, 100 および 130mm のそれぞれの位置に直径 200mm の人工欠陥がある場合の周波数スペクトルを図-2.13 に示す。図中の矢印は、理論上のピーク周波数である版厚共振周波数： f_T を示している。一方、破線は、人工欠陥に相当する理論上のピーク周波数である欠陥共振周波数： f_d を示している。版厚および欠陥共振周波数を算出するにあたり、コンクリートの縦波の伝播速度は、以下の方法で測定した。すなわち、まず、各供試体において人工欠陥を設置していない5箇所において、衝撃弾性波法による測定を行なった。測定により得られた受信波形に対してFFTを行い、周波数スペクトルを算出した。その後、周波数スペクトル上でピークを判読し、その値と版厚から速度を算出した。さらに、得られた値を平均して、コンクリートの縦波の伝播速度を 3800m/s を得た。

図によれば、深さが 80, 100 および 130mm のケースでは、 f_d 位置近傍にピークが出現していることが確認できる。したがって、これらのケースでは、人工欠陥を検出することが可能であった。また、これらのケースでは、 f_T よりも周波数の低い位置においても、ピークが出現している。このピークは、版厚に相当する共振周波数だと考えられる。供試体内部に人工欠陥が設置されている場合、弾性波が欠陥を迂回して伝播する。そのため、欠陥が無い場合の弾性波の伝播距離（打撃点から供試体底面までの最短距離）と比較して、伝播距離が長くなる。この理由により、版厚共振周波数： f_T が低周波数側へシフトしたと考察できる²⁻²⁾。

これに対して、深さ 30mm の場合では、 f_T よりも低い周波数帯域においてのみ、ピークが複数出現していることがわかる。通常、浅い位置に比較的規模の大きい欠陥が存在する場合、コンクリート表面と欠陥との間で生じる波の多重反射による共振現象よりも、欠陥上部のコンクリートのたわみ振動（膜振動）が卓越することが知られている²⁻⁵⁾。しかも、たわみ振動は、周波数の低い帯域においてピークが出現するため、版厚共振周波数との区別が困難な場合が多い。したがって、衝撃弾性波法による測定において、たわみ共振周波数と考えられるピークを確認した場合は、欠陥検出は困難であるとした。

図-2.14 に、欠陥深さごとに周波数スペクトル上で出現したピークの周波数を判読した値と欠陥共振周波数： f_d (図中の実線)との関係を、欠陥直径ごとに示す。まず、欠陥直径が 50mm の場合、深さに関わらず、ピークの値と版厚共振周波数の値が異なっており、欠陥を検出することが困難であった。欠陥の直径が小さいため、弾性波の反射が十分ではなかったことが原因と考えられる。続いて、直径が 100mm の場合においても、直径 50mm の場合と同様に、反射源が小さいため、欠陥検出が困難な場合（深さ：50 および 180mm）があった。さらに、直径 200, 250 および 400mm で、深さ 30mm にある欠陥においても、欠陥を検出することができなかった。コンクリート表面から浅い位置に欠陥があるため、たわみ振動が支配的であったと想定される。なお、それ以外の直径および深さの人工欠陥については、 f_d とピーク周波数とがほぼ同じ値であり、欠陥検出が可能であった。

b) EMH 法

EMH 法によって得られた周波数スペクトルの一例を図-2.15 に示す。図より、たわみ共振に相当する単独のピークが明瞭に出現していることが確認できる。230mm および 280mm 供試体において、得られた周波数スペクトルから式(3)により振動レベルを算出し、既往の研究に基づき欠陥深さを求めた結果を、実際の深さと併せて表-2.2 に示す。表中の太枠内（直径 200, 250, 400mm, 深さ 30, 50, 80, 100, 130, 150, 180,

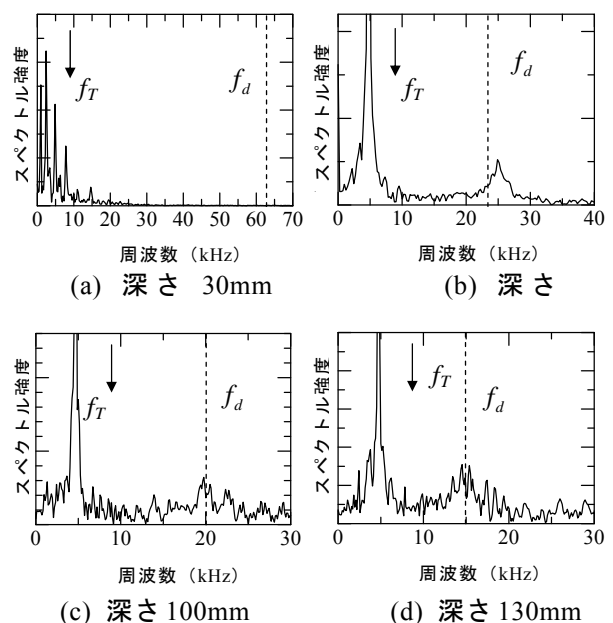


図-2.13 衝撃弾性波法により得られた周波数スペクトルの一例

200) の範囲においては、実際の深さと推定深さとがほぼ等しくなった。しかしながら、太枠以外の欠陥では、推定結果は実際と異なる結果になった。これは、欠陥直径が小さく、あるいは欠陥深さが大きいため、原理上、たわみ共振を励起させることが困難であったのが主な原因と考えられる。

c) 超音波法

深さ 30, 80, 100mm および 130mm の位置にある直径 400mm の欠陥に対して超音波法により測定した結果を図-2.16 にそれぞれ示す。なお、コンクリートの縦波の速度は、衝撃弾性波法により求めた 3800m/s を採用した。いずれの深さにおいても、入射波に加えて、欠陥からの反射エコーを確認することができる。しかも、反射エコーの出現位置は、実際の欠陥深さの位置と概ね一致した。なお、深さが 150, 180, 200 および 250mm の場合では、反射エコーの出現を確認することは困難であった。

(4) 各手法により検出可能な欠陥直径と深さの関係

衝撃弾性波法, EMH 法および超音波法により検出可能な人工欠陥の直径と深さの関係を表-2.3~2.5 にまとめて示す。衝撃弾性波法および

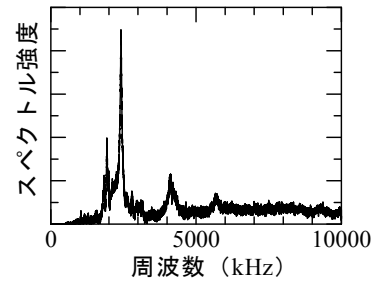


図-2.15 EMH 法により得られた周波数スペクトルの一例

表-2.2 EMH 法による欠陥深さの推定値

深さ (mm)	直径 (mm)				
	50	100	200	250	400
30	—	—	30	30	30
50	200	190	50	40	40
80	—	—	80	80	80
100	180	200	100	100	110
130	—	—	120	130	100
150	—	—	150	150	140
180	230	250	170	180	180
200	—	—	210	200	190
250	—	—	180	190	180

— : 欠陥未設置

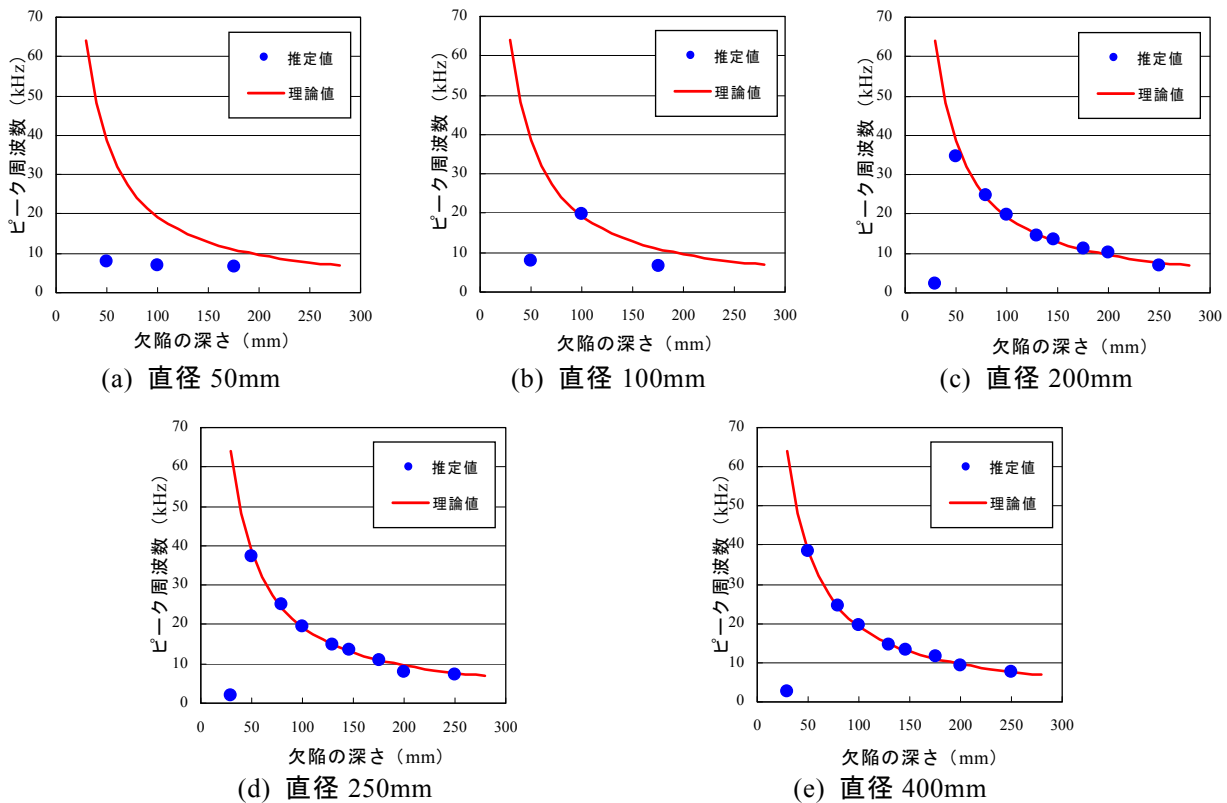


図-2.14 ピーク周波数 (推定値) と欠陥共振周波数 (理論値) との関係

EMH 法では、欠陥直径が約 200mm 以上であれば、今回設定した深さに対して欠陥を検出することが概ね可能であった。これに対して、超音波法では、深さが 130mm までであれば、欠陥直径の大きさによらず欠陥を検出できることがわかった。3 つの原理の異なる弾性波法を比較すると、人工欠陥を推定する手法としては、衝撃弾性波法が欠陥深さおよび直径に対する検出範囲が最も広いことが明らかとなった。

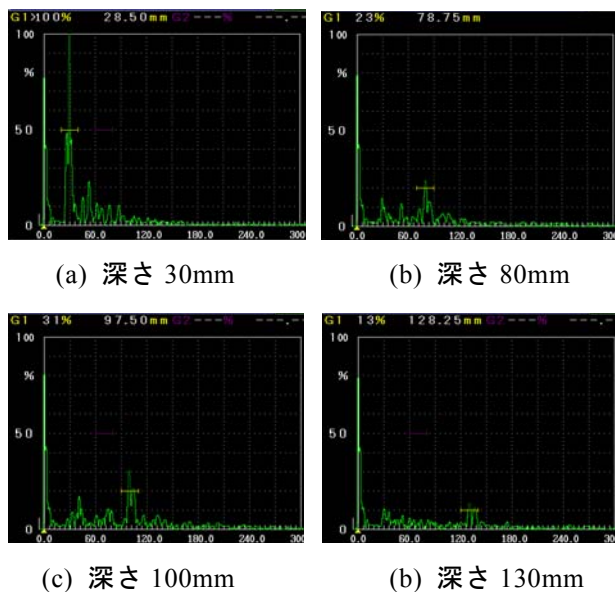


図-2.16 超音波法による測定結果の一例

表-2.3 衝撃弾性波法により検出可能な欠陥深さと直径との関係

深さ (mm)	直径 (mm)				
	50	100	200	250	400
30	—	—	○	○	○
50	△	△	◎	◎	◎
80	—	—	◎	◎	◎
100	△	◎	◎	◎	◎
130	—	—	◎	◎	◎
150	—	—	◎	◎	◎
180	△	△	◎	◎	◎
200	—	—	◎	◎	◎
250	—	—	◎	◎	◎

— : 欠陥未設置, ◎ : 検出可能,
○ : たわみ共振現象を利用すれば評価可能
△ : 現状では困難

2.3 アスファルト舗装を有する RC 床版の水平ひび割れの検出への衝撃弾性波法の適用

前節での検討結果、水平ひび割れを検出できる守備範囲が最も大きい手法は、衝撃弾性波法であることが明らかとなった。しかしながら、アスファルト舗装の有無が衝撃弾性波法による

表-2.4 EMH 法により検出可能な欠陥深さと直径との関係

深さ (mm)	直径 (mm)				
	50	100	200	250	400
30	—	—	◎	◎	◎
50	△	△	◎	◎	◎
80	—	—	◎	◎	◎
100	△	△	◎	◎	◎
130	—	—	◎	◎	◎
150	—	—	◎	◎	◎
180	△	△	◎	◎	◎
200	—	—	◎	◎	◎
250	—	—	△	△	△

— : 欠陥未設置, ◎ : 検出可能,
△ : 現状では困難

表-2.5 超音波法により検出可能な欠陥深さと直径との関係

深さ (mm)	直径 (mm)				
	50	100	200	250	400
30	—	—	◎	◎	◎
50	◎	◎	◎	◎	◎
80	—	—	◎	◎	◎
100	◎	◎	◎	◎	◎
130	—	—	◎	◎	◎
150	—	—	△	△	△
180	△	△	△	△	△
200	—	—	△	△	△
250	—	—	△	△	△

— : 欠陥未設置, ◎ : 検出可能,
△ : 現状では困難

版厚推定や欠陥検出に与える影響についての検討は行っていない。そこで、本節では、アスファルト舗装および水平ひび割れを人工的に模擬した RC 供試体を作製し、舗装面から衝撃弾性波法により水平ひび割れを検出することを試みた。ここでは、弾性波の入力方法および受信方法の違いが周波数スペクトルに与える影響についての検討も併せて行なった。以下にその詳細を示す。なお、ここでは、アスファルト舗装を有す供試体（詳細は 2.3 (2) a) 参照）を対象に、EMH 法と超音波法による計測もそれぞれ実施した。しかしながら、EMH 法ではセンサを舗装面に吸着させることが困難であり、超音波法ではいずれの人工欠陥の場合でも欠陥からの反射エコーを確認することができなかった。そのため、これらの結果については割愛することとした。

(1) 衝撃弾性波法によるアスファルト舗装面からの水平ひび割れの検出原理

衝撃弾性波法によりアスファルト舗装面から RC 床版内部の水平ひび割れを検出する原理を示した概念図を図-2.17 に示す。この場合の検出原理は、RC 床版のそれ (2.2 (1) a) 参照) と同じであるが、アスファルト部分を含む床版の全厚や水平ひび割れに相当する理論上のピーク周波数を算出するためのそれぞれの式が異なる。これらの算出式を以下に示す。

$$f_r = \frac{1}{\frac{2T_1}{C_{p1}} + \frac{2T_2}{C_{p2}}} \quad (6)$$

$$f_d = \frac{1}{\frac{2T_1}{C_{p1}} + \frac{2(d-T_1)}{C_{p2}}} \quad (7)$$

ここで、 C_{p1} ：アスファルトの縦波の伝播速度、 C_{p2} ：コンクリートの縦波の伝播速度、 T_1 ：アスファルト舗装の厚さ、 T_2 ：コンクリートの厚さである。

(2) 計測概要

a) 供試体

ここでは、既設コンクリート上面に増厚補強を行い、その上にアスファルト舗装を施した道路橋 RC 床版 (図-2.1 参照) を模擬した供試体を作製することとした。作製にあたっては、高速道路調査会 上面増厚工法 設計施工マニュアル

ル²⁻⁴⁾を参考に、供試体の全厚および各層の厚さを決定した。具体的な作製手順としては、まず、既設コンクリートの厚さを 180mm とし、普通コンクリートを打設した。その後、打設面側のコンクリート表面をチップング処理し、厚さ 50mm の鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚を行なった。さらに、増厚上面にアスファルト舗装を 50mm で施工した。したがって、供試体の全厚は、280mm である。供試体の長さと同様に、1800mm とした。図-2.18 に供試体の概要を示す。図-2.19 に供試体の設置状況を示す。供試体内部には、水平ひび割れを模擬するため、厚さ 6mm、直径 200、250 および 400mm の円盤状の発泡スチロールを人工欠陥として設置した。人工欠陥の設置位置は、供用中の道路橋 RC 床版で発生する水平ひび割れの位置を考慮して、深さに 3 つのバリエーションを設けた。すなわち、上面増厚と既設コンクリートの界面、既設コンクリートの上縁側および下縁側の鉄筋に相当する位置に欠陥をそれぞれ設置した。したがって、欠陥の設置深さは、アスファルト舗装面からそれぞれ 100、130 および 250mm である。表-2.6 に、人工欠陥の深さと直径の全バリエーションを示す。

b) 衝撃弾性波法による計測

衝撃弾性波法による計測状況を図-2.20 に示す。弾性波の入力および受信は、人工欠陥上のアスファルト表面で行った。入力する弾性波の

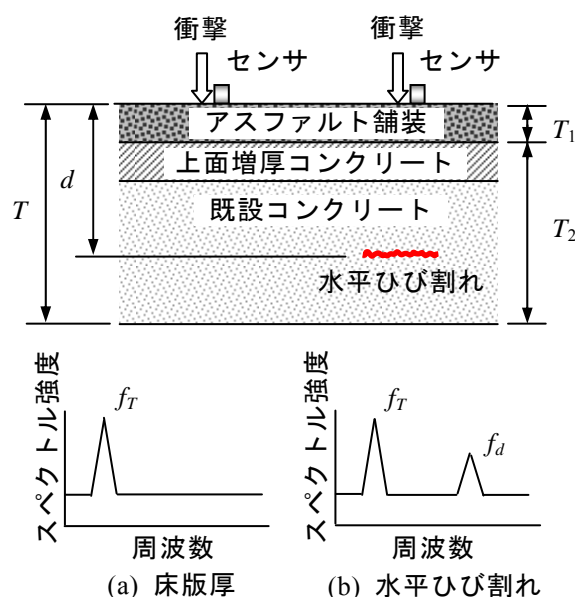


図-2.17 衝撃弾性波法によりアスファルト舗装面から水平ひび割れを検出する原理

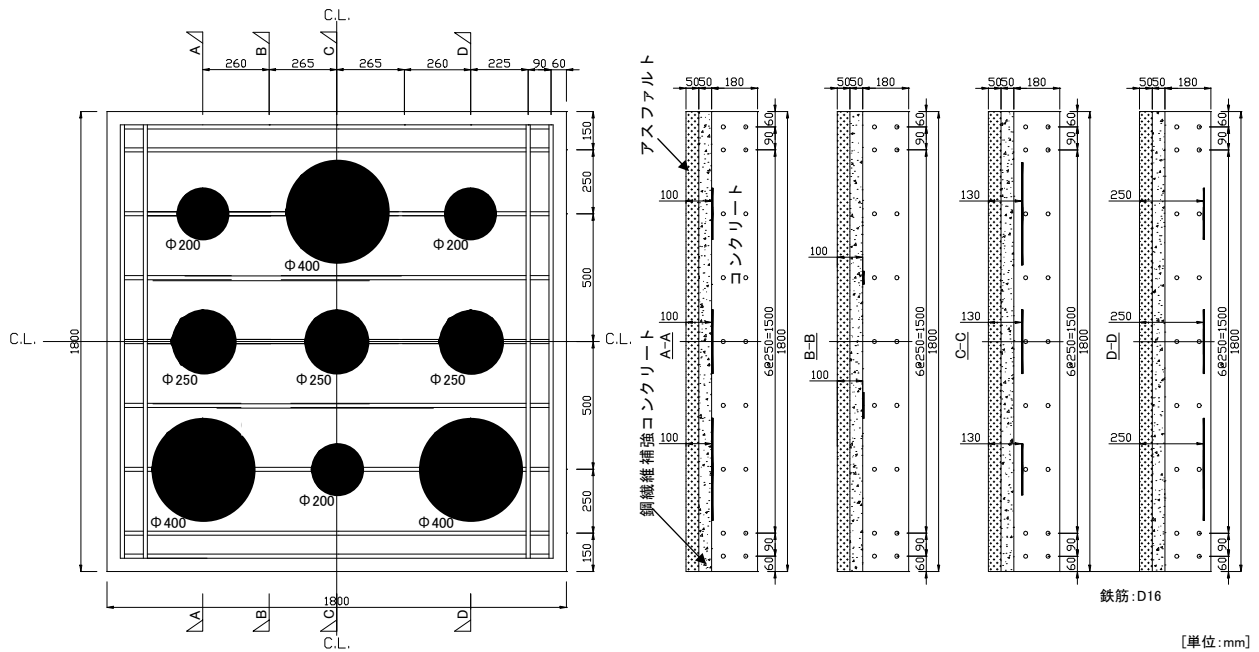


図-2.18 供試体概要



図-2.19 供試体設置状況



図-2.20 衝撃弾性波法による計測状



表-2.6 人工欠陥の深さと直径の全バリエーション

直径 (mm)	深さ (mm)		
	100	130	250
200	●	●	●
250	●	●	●
400	●	●	●

表-2.7 鋼球直径と接触時間および上限周波数の関係

鋼球の直径: D (mm)	4.0	6.4	11.0	15.7	30.0
接触時間: T_c (μsec)	17.2	27.5	47.3	67.5	129.0
上限周波数: f_{max} (kHz)	72.8	45.5	26.5	18.5	9.7

表-2.8 弾性波の受振に使用した各センサの特徴

	加速度センサ	変位センサ
形状		
感度 ($\text{mV}/\text{m}/\text{s}^2$)	0.3±20%	—
周波数応答	0.003~30kHz	0~1 MHz

周波数の違いが人工欠陥の検出に与える影響について検討するため、直径の異なる5種類の鋼球(4.0, 6.4, 11.0, 15.7および30.2mm)を使用した。各鋼球直径に対応する接触時間および上限周波数を表-2.7にそれぞれ示す。一方、弾性波の受信には、前述のコンカル型高感度変位センサに加えて、0.003~30kHzの間でフラットな応答感度を有する加速度センサも併せて使用した。使用した各センサの特徴を表-2.8にまと

めて示す。センサで受信した信号は、サンプリング時間 $1\mu\text{s}$ 、サンプリング数 10000 点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。記録した波形に対して、FFT を行い、周波数スペクトルを算出し、波形収集装置に波形とともに記録した。なお、弾性波の入力位置と各センサの設置位置との距離はそれぞれ約 50mm である。

(3) 弾性波の入力・受信方法の違いが周波数スペクトルに与える影響

供用中の道路橋 RC 床版において、アスファルト舗装面から衝撃弾性波法により水平ひび割れを効率良く検出することを視野に入れた場合、弾性波の入力に使用する鋼球の種類や使用するセンサの種類は、極力少ない方が望ましい。一般的な道路橋 RC 床版の版厚は、マニュアルなどで規定されている場合がほとんどである。さらに、床版内部で発生する水平ひび割れの位置は、供用中の RC 床版の切断結果²⁻¹⁾より明らかになっている。そこで、ここでの検討では、まず、共振周波数が最も小さくなる場合を想定して、人工欠陥が無い場所での計測を行なった。続いて、共振周波数が最も大きくなると思われる深さ 100mm (直径は 200mm) の位置にある人工欠陥での測定を行なった。この両者を評価することが可能な鋼球やセンサを選定することができれば、深さ 130 および 250mm の位置にある欠陥 (これらの欠陥共振周波数は、深さ 100mm のそれよりも小さい) に対しても十分適用が可能であると考えられる。

図-2.21 に、鋼球直径およびセンサ種類ごとに得られた周波数スペクトルをそれぞれ示す。図中には、鋼球直径およびその鋼球直径における弾性波の上限周波数を併せて示している。また、図中の矢印は、供試体の版厚に相当する理論上のピーク周波数である版厚共振周波数 ($f_T=6.5\text{kHz}$) を示している。一方、破線は、人工欠陥に相当する理論上のピーク周波数である欠陥共振周波数 ($f_d=16.1\text{kHz}$) を示している。版厚および欠陥共振周波数を算出するにあたり、コンクリートの縦波の伝播速度は、以下の方法で測定した。すなわち、まず、普通コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの伝播速度は、アスファルトを施工する前 (鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚を実施した段階) に、人工欠陥を設置していない鋼繊維補強コンクリート表面の 5 箇所において、衝撃弾性波法による測定を行なった。測定により得られた受信波形

に対して FFT を行い、周波数スペクトルを算出した。その後、周波数スペクトル上でピークを判読し、その値と版厚から速度を算出した。さらに、得られた値を平均して、普通および鋼繊維補強コンクリートの縦波の伝播速度 3902m/s を得た。続いて、アスファルトの伝播速度は、アスファルト舗装表面に探触子を 2 つ設置し、超音波法により算出することとした。5 箇所計測を行い、その平均値を求めた結果、2730m/s となった。この値は、既往の研究成果²⁻²⁾で示されているアスファルトの伝播速度 (2800m/s) とほぼ同じ値であったため、本研究におけるアスファルトの伝播速度は、測定結果である 2730m/s を採用した。

人工欠陥が無いアスファルト舗装面において、変位センサで受信した場合の周波数スペクトル (図-2.21 (a)) に着目すると、いずれの鋼球直径においても、 f_T よりも高い周波数の波を入力しているため、 f_T とほぼ同じ位置にピークが確認できる。しかしながら、鋼球直径 30.2mm の場合は、 f_T よりも低い周波数領域において、 f_T 位置に出現したピークの強度と同程度の強度を持つ複数のピークが出現している。そのため、鋼球直径 30.2mm の場合は、図上で判読したピークから版厚を推定することは困難であると考えられる。これに対して人工欠陥がある場合 (図-2.21 (b)) では、いずれの鋼球直径においても、 f_T よりも低い周波数 (約 4.6kHz) において強度の大きい明瞭なピークが出現している。この現象は、2.2 (3) a) に示す「230mm 供試体」および「280mm 供試体」で得られた周波数スペクトル (図-2.13 参照) と同じである。通常、弾性波の伝播経路上に人工欠陥が存在する場合、欠陥を迂回して波が伝播する。そのため、人工欠陥がある場合の波の伝播経路は、欠陥が無い場合のそれ (打撃点から供試体底面までの最短距離) と比較して長くなる。図-2.22 に、人工欠陥により弾性波が迂回する概念図を示す。アスファルト部分の弾性波の伝播距離は、破線理論から 70.7mm となる。一方、普通および鋼繊維補強コンクリート部分については、277.4mm を得る。これより、打撃点から供試体底面までの人工欠陥を迂回した場合の距離は、348.1mm となる。この距離に相当する版厚共振周波数を式(6)により算出すると、約 5.2kHz を得る。この版厚共振周波数は、図上で判読したピーク (約 4.6kHz) に近い値であった。以上のことから、人工欠陥が存在する場合は、版厚共振周波数： f_T が低周

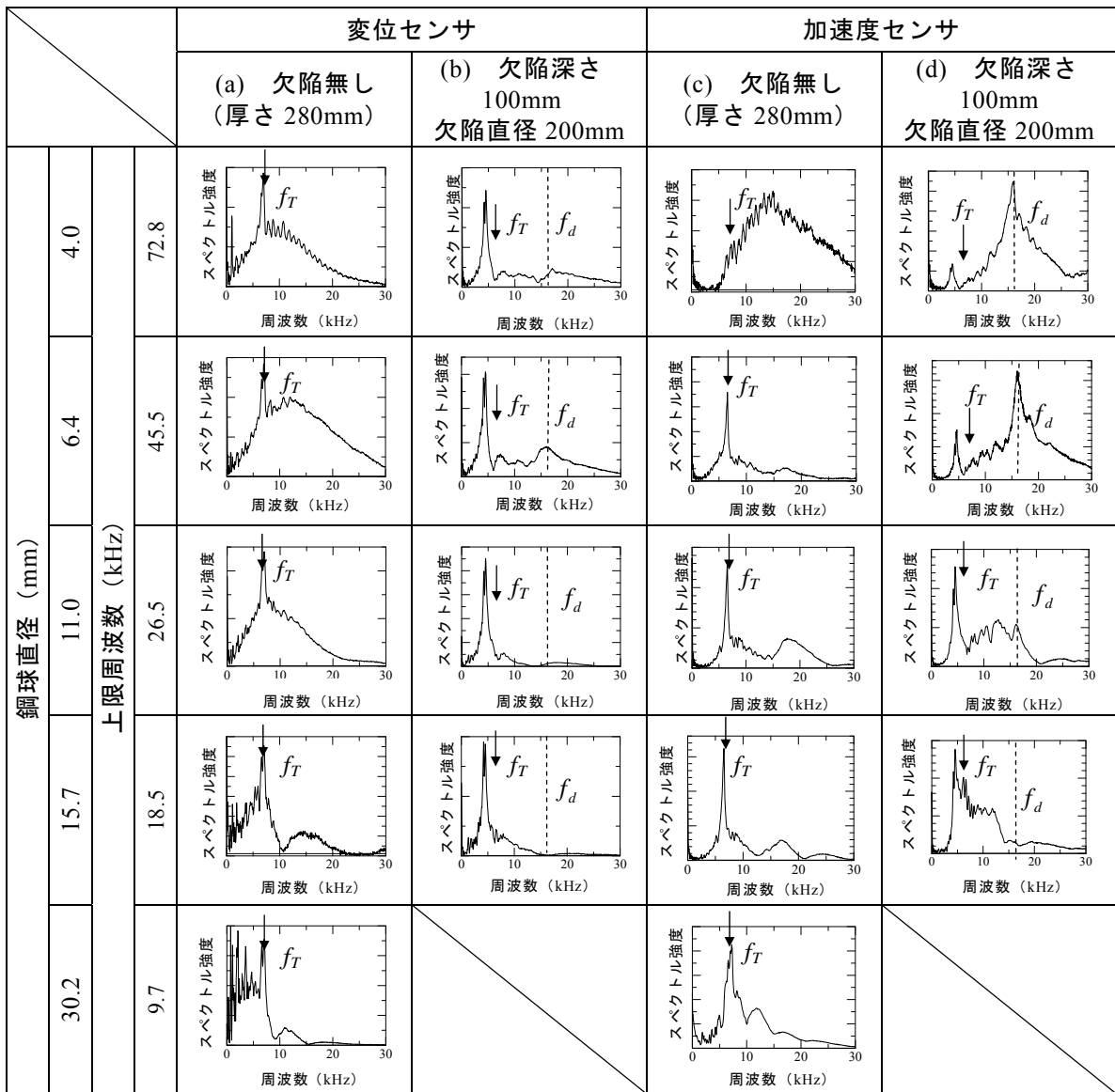


図-2.21 鋼球直径およびセンサ種類ごとの周波数スペクトル

波数側へシフトしたものと考察できる²⁻²⁾. 続いて、図-2.21 (b)における欠陥共振周波数： f_d 近傍のピークの出現状況に着目する。鋼球直径 4.0, 6.4, 11.0 および 15.7mm をそれぞれ使用した場合は、 f_d を上回る弾性波を入力している。したがって、これらケースでは、周波数スペクトル上のピークと f_d が一致すると考えられる。しかしながら、実際は、鋼球直径 4.0 および 6.4mm の場合のみ、一致する結果となった。この理由については今後詳細に検討する必要があるものの、変位センサを使用する場合は、4.0 および 6.4mm の鋼球を使用することにより、版厚および水平ひび割れの両者を検出できることが明らかとなった。

次に、加速度センサで受信した場合の周波数スペクトルに着目する。人工欠陥が無い場合(図

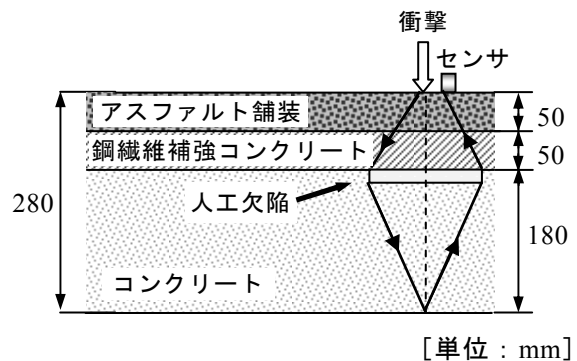


図-2.22 欠陥による弾性波の迂回

-2.21 (c) では、いずれの鋼球直径の場合においても f_T を含む弾性波を入力しているにも関わらず、周波数スペクトル上のピークと f_T が一致したケースは、鋼球直径が 6.4, 11.0, 15.7 およ

び 30.2mm の場合であった。これに対して、人工欠陥がある場合（図-2.21 (d)）では、いずれの鋼球直径の場合においても、 f_T より低い周波数においてピーク（約 4.6kHz）が出現している。これは、変位センサの場合と同様、弾性波が人工欠陥を迂回したことにより、伝播経路が長くなったことが原因と考えられる。次に、図-2.21 (d)における f_d 周辺の周波数帯域に着目する。 f_d を含む弾性波を入力しているケース（鋼球直径：4.0, 6.4, 11.0 および 15.7mm）のうち、人工欠陥の検出が可能であった場合は、鋼球直径が 4.0 および 6.4mm のみであった。しかしながら、欠陥検出が可能であったケースにおいて出現したピークの強度は、変位センサで受信した際のピーク（図-2.21 (b)に示す鋼球直径 4.0 および 6.4mm おいて f_d 近傍に出現したピーク）の強度よりも大きいため、図上でピークの出現を容易に把握することが可能であった。したがって、アスファルト舗装面からの計測により、人工欠陥を検出する場合は、変位センサよりも加速度センサの方がより適切であると考えられる。その際に使用する鋼球は、版厚と欠陥の両者を評価することが可能である直径 6.4mm が適切であることも明らかになった。しかしながら、版厚推定および人工欠陥の検出における鋼球直径と入力する弾性波の上限周波数との関係（式(4)参照）は、既往の研究と異なる結果となった。そのため、一般的な道路橋 RC 床版に生じる水平ひび割れを、アスファルト舗装面から衝撃弾性波法により検出する場合、弾性波の入力方法は、以下の要領で決定することが望ましい。すなわち、まず、水平ひび割れが生じていないと想定される箇所において、直径の異なる複数の鋼球を使用して、衝撃弾性波法による計測を行なう。続いて、鋼球の打撃面から水平ひび割れの発生位置までが最も小さくなる箇所においても同様に計測を実施する。その後、両者で得られた各波形を周波数分析する。最後に、周波数スペクトル上において版厚共振周波数および欠陥共振周波数が確認できる条件のうち、直径が最も小さい鋼球を選定する。これにより、使用する鋼球の種類を少なくすることが可能となり、効率よく、水平ひび割れを検出することができると考えられる。ただし、供用中の道路橋 RC 床版では、事前に水平ひび割れ発生の有無がわからないため、衝撃応答解析を援用することにより、弾性波の入力に使用する鋼球の直径を決定する必要がある。解析により鋼球直径を選定

する方法については、2.5 で詳細に説明する。なお、受信センサの選定についても、鋼球直径の選定と同様に、解析を援用するのが望ましい。これについては、2.5 に鋼球直径の選定方法と併せて示している。

(4) 衝撃弾性波法により検出可能な欠陥直径と深さの関係

前項での結果を踏まえて、弾性波の入力には鋼球直径 6.4mm を、受信には加速度センサを使用することとした。図-2.23 に、対象とした人工欠陥（表-2.6 参照）で測定された各周波数スペクトルを示す。図中には、 f_T を矢印、 f_d を破線で示している。いずれの場合についても、 f_d と周波数スペクトル上におけるピークは、おおよそ一致していることがわかる。ここで、欠陥直径 200mm における深さ 100 および 130mm に着目すると、深さが大きくなると、 f_T が卓越し、 f_d が相対的に減衰している。しかも、このような傾向は、欠陥直径が 250 および 400mm の場合もほぼ同様であることがわかる。通常、鋼球打撃により入力された弾性波は、球面波として伝播する。欠陥深さが小さい場合、弾性波が反射する割合は、供試体底面よりも欠陥において大きくなる。そのため、周波数スペクトル上において、 f_T が f_T よりも卓越したものと考察できる。続いて、深さ 130mm かつ直径 200, 250 および 400mm の周波数スペクトルに焦点を当てると、欠陥直径が大きくなるにしたがって、 f_d が f_T よりも卓越する。これは、欠陥直径が大きくなることにより弾性波の反射限も大きくなったことに起因している。また、この傾向は、深さ 100mm の場合でも同じであった。なお、欠陥深さが 250mm（直径 200, 250 および 400mm）の場合では、弾性波の反射限である欠陥の深さと供試体底面（深さ 280mm）がほぼ同じ深さにあるため、周波数スペクトル上において、 f_T と f_T の両者を同時に確認することはできなかった。

図-2.23 の結果に基づき、衝撃弾性波法により検出可能な欠陥直径と深さとの関係を表-2.9 に示す。ここでは、周波数スペクトル上において、 f_d 位置近傍にピークの出現を確認したものを、欠陥検出可能 (◎) とした。ただし、図-2.23 に示す深さ 250mm のピーク周波数は、欠陥の深さと供試体底面（深さ 280mm）がほぼ同じ深さにあるため、図-2.21 における欠陥が無い場合（鋼球直径 6.4mm）でのピーク周波数とほぼ同じ値である。そのため、欠陥無しとの判別は

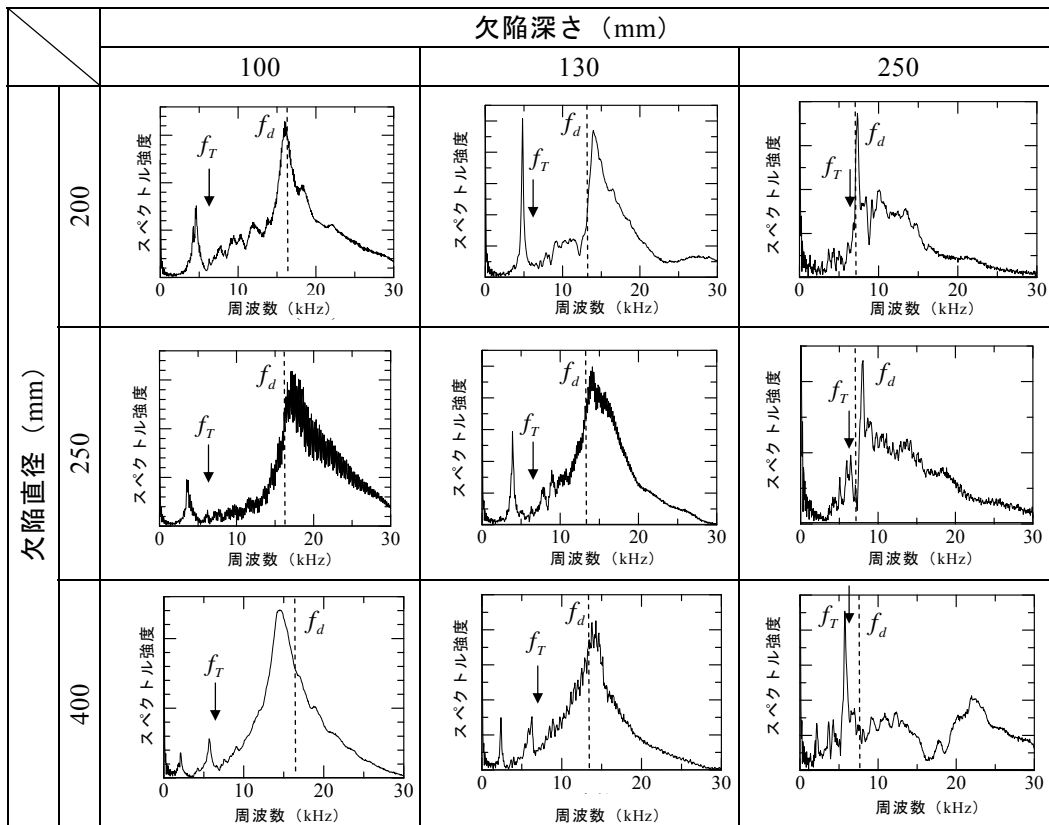


図-2.23 実験により得られた周波数スペクトル

現状では困難であるものの、ピークの出現の有無を判断基準にした場合は、評価可能 (○) とした。

2.4 3次元衝撃応答解析による弾性波の入力/受振位置と水平ひび割れとの平面的な位置関係が周波数スペクトルに与える影響

(1) 解析による実験結果の妥当性の検証

a) 解析概要

図-2.23 に示す実験で得られた周波数スペクトルの妥当性を検証するため、3次元衝撃応答解析を行った。アスファルト舗装を有する供試体 (図-2.19 参照) を模擬した解析モデルの一例を図-2.24 に示す。モデル寸法は、長さ 1800mm×幅 1800mm×高さ 280mm である。モデル内部には、人工欠陥を模擬するために円盤状の空隙部を設けている。空隙までの深さおよび空隙直径は、供試体における人工欠陥の直径と深さの関係と同じである (表-2.6 参照)。これを「欠陥モデル」と呼ぶ。また、比較用に、空隙部がない「健全モデル」の解析も併せて行った。したがって、解析対象としたモデルは、全 10 ケースである。なお、コンクリートおよびアス

表-2.9 検出可能な欠陥直径と深さとの関係

深さ (mm)	直径 (mm)		
	200	250	400
100	◎	◎	◎
130	◎	◎	◎
250	○	○	○

◎ : 検出可能,

○ : 検出可能 (健全との判別は困難)

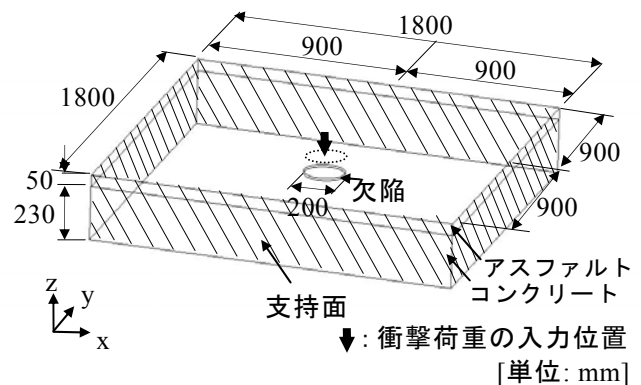


図-2.24 解析モデルの一例

ファルトの材料定数は、表-2.10 のとおりである。

要素は8節点ソリッドとした。要素一辺の長さは約10mmである。モデルの支持は、図-2.24 に示す1800mm×1800mm（図中の斜線部分）の4面とした。支持面の境界条件としては、斜線部分にある全ての節点の変位（x,y,z方向）を固定した。

鋼球打撃による弾性波の入力を模擬するため、図-2.25 に示す波形を与えた。荷重の継続時間は、Sansalone らの研究成果²⁻²⁾を参考に、前述の式(3)から求めた。鋼球直径6.4mmの場合の荷重継続時間は27.5μsとなる。一方、最大荷重： F_{max} (N) は、次式²⁻⁶⁾により算出した。

$$F_{max} = \frac{m\sqrt{2gH}}{0.637T_c} \quad (8)$$

ここで、 m ：鋼球の質量 (kg)， g ：重力加速度 (m/s)， H ：鋼球の落下高さ (m) である。これより、直径6.4mmの鋼球を高さ0.1mから落下させたときの最大荷重は、159.8Nとなる。荷重の入力位置は、図-2.24 に示すモデル中央（欠陥中央の直上）の1接点とした。出力位置は、入力位置よりy方向へ50mm移動した節点とした。

b) 解析による波の伝播状況

直径200mm、表面から深さ130mmの位置に欠陥を設けた解析モデルでの波の伝播状況を、各接点の加速度の分布として表示したものを図-2.26 に示す。コンクリート中を球面波として伝播した波が欠陥部に到達すると、欠陥部で波が一部反射（経過時間：59μs）した後、欠陥の両端部において波が回折（経過時間：84μs）していることが確認できる。経過時間が119μsになると、欠陥を回折した波がモデル底面において反射するとともに、欠陥とモデル上面との間で反射を繰り返していることがわかる。次節では、このような波の伝播挙動を時刻歴応答波形として抽出した後に、FFTにより算出した周波

表-2.10 解析モデルの物性値

物性値	アスファルト	コンクリート
弾性係数(GPa)	10.0	33.5
ポアソン比	0.02	0.20
密度 (t/m ³)	1.01	2.20

数スペクトルの特徴について説明する。

c) 解析で得られた周波数スペクトル

解析により得られた周波数スペクトルを図-2.27 に示す。欠陥深さが100および130mmの周波数スペクトルでは、ピーク周波数と f_d はほぼ一致していることが確認できる。しかも、これらの周波数スペクトルは、実験で得られた周波数スペクトル（図-2.23 参照）に類似した形状であることも、同時に確認できる。したがって、3次元衝撃応答解析で設定したモデルやその境界条件などは、適切であったと考えられる。なお、欠陥深さが250mm（直径200，250および400mm）の周波数スペクトルでは、いずれの場合においても、 f_d 近傍においてピークの出現を確認することはできなかった。しかも、実験の周波数スペクトルと比較しても、スペクトル形状が顕著に異なっていることもわかる。この原因については、現時点では不明なため、今後さらに詳細に検討する予定である。

(2) 弾性波の入力/受振位置が周波数スペクトルに与える影響

2.3 および 2.4 (1)では、衝撃弾性波法により検出可能な欠陥直径と深さとの関係を実験およ

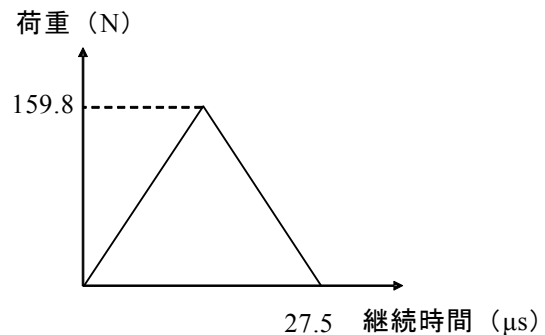


図-2.25 入力波形

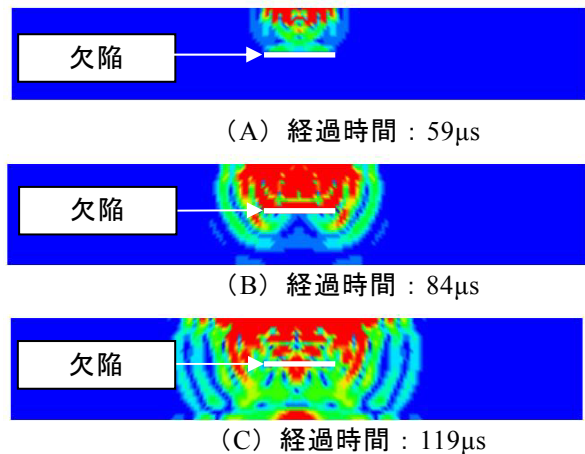


図-2.26 波の伝播状況

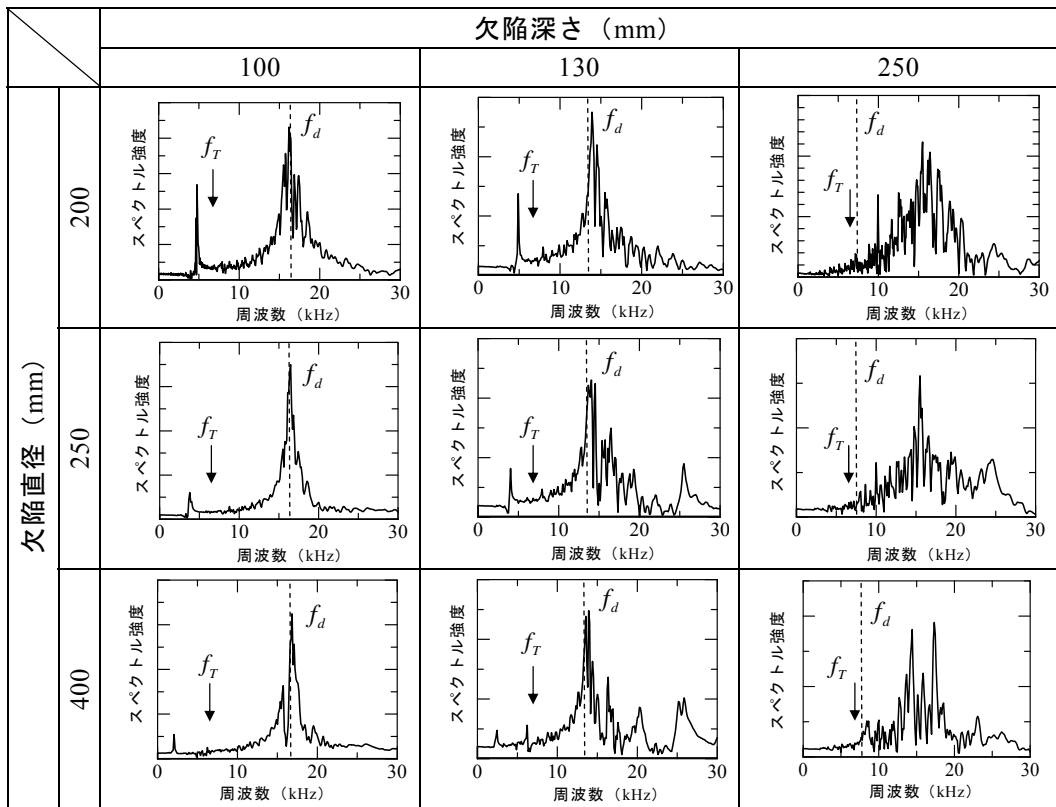


図-2.27 解析により得られた周波数スペクトル

び解析により把握するために、便宜的に、欠陥中心のアスファルト表面を打撃あるいは衝撃入力する条件に限定していた。しかしながら、供用中の道路橋 RC 床版への適用を考えた場合、通常、欠陥の位置は不明である。そこで、ここでは、欠陥上部のアスファルト表面における打撃および受信点の平面的な位置関係が周波数スペクトルに与える影響を、衝撃応答解析により把握することを試みた。

a) 解析概要

解析モデルは、直径 200mm の欠陥を深さ 130mm の位置に設置した「欠陥モデル」とした。モデル寸法および解析条件は、2.4 (1) a) と同じである。ただし、衝撃荷重の入力位置については、図-2.28 に示すとおり、計 6 点とした。すなわち、欠陥部中心直上のアスファルト面の節点を A、節点 A からモデル端部側へ 50mm 移動した節点 B、欠陥端部の直上の節点 C、節点 C からモデル端部へ 20mm ピッチで移動した点 D および E、さらに E から 60mm 移動した点 F である。出力位置は、各衝撃荷重の入力位置より y 方向へ 50mm 移動した節点である。

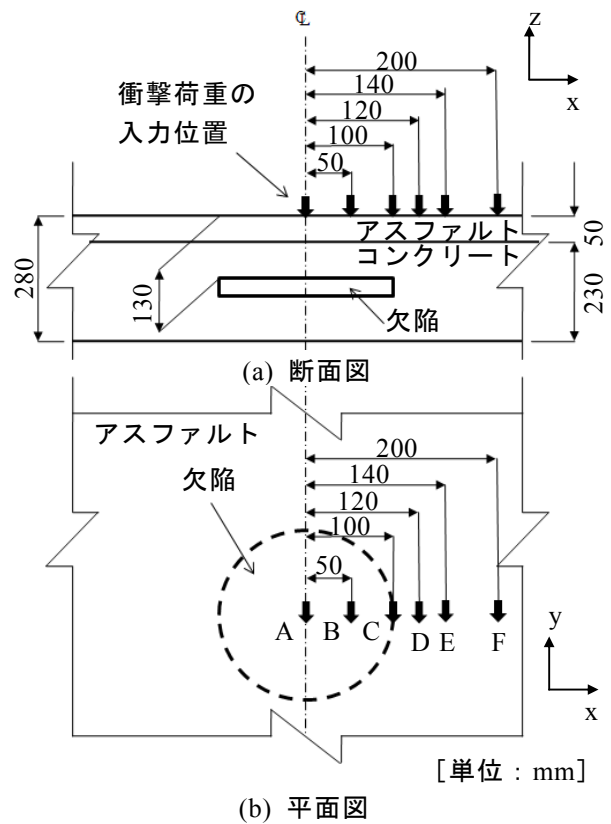


図-2.28 解析における衝撃荷重の入力位置

b) 解析結果および考察

図-2.29 に解析により得られた周波数スペクトルを欠陥中心位置から打撃点までの距離と併せて示す。図中には、 f_r を矢印、 f_d を破線でそれぞれ示している。欠陥上において打撃を行った場合、すなわち、図における欠陥の中心位置から打撃点までの距離が 0、50 および 100mm では、周波数スペクトル上の f_d 位置に、単独の鋭いピークの出現を容易に判読できる。しかしながら、打撃点の距離が 120 および 140mm と大きくなると、周波数スペクトル上のピークが f_d よりも高い周波数帯域へシフトしていることがわかる。さらに、欠陥中心から 200mm 離れた位置での周波数スペクトルでは、 f_r 位置近傍にピークが出現している。したがって、このピークは版厚共振周波数： f_r と考えられ、この位置では欠陥を検出することは困難であった。

以上のことから、本研究の範囲内では、衝撃弾性波法による鋼球打撃位置が、欠陥上のアスファルト面であれば、周波数スペクトル上に出現したピークを頼りに、欠陥を検出できると考えられる。

2.5 3次元衝撃応答解析を援用した衝撃弾性波法に基づく道路橋切り出しRC床版の水平ひび割れの検出手法

ここでは、道路橋 RC 床版の内部に発生する水平ひび割れを衝撃弾性波法により効率よく適確に検出し、しかも各種様々な寸法の道路橋 RC 床版へ適用できる手法となるように高度化するため、3次元衝撃応答解析により、「I: 弾性波の入力方法」、「II: 弾性波の受信方法」および「III: 周波数解析方法」の最適な組み合わせを決定する方法についての検討を行なった。提案した手法の妥当性を検証するため、供用中の道路橋から切り出した RC 床版に対して水平ひび割れの検出を試みた。以下にその詳細を示す。

(1) 道路橋から切り出した RC 床版の概要

道路橋から切り出した RC 床版の概要および寸法を図-2.30 に示す。対象とした RC 床版は、アスファルト舗装（厚さ：60mm）を有する鋼繊維補強コンクリートで増厚（増厚コンクリートの厚さ：60mm）補強されたものである。床版の幅、長さおよび厚さは、それぞれ 2400mm、6000mm および 320mm である。

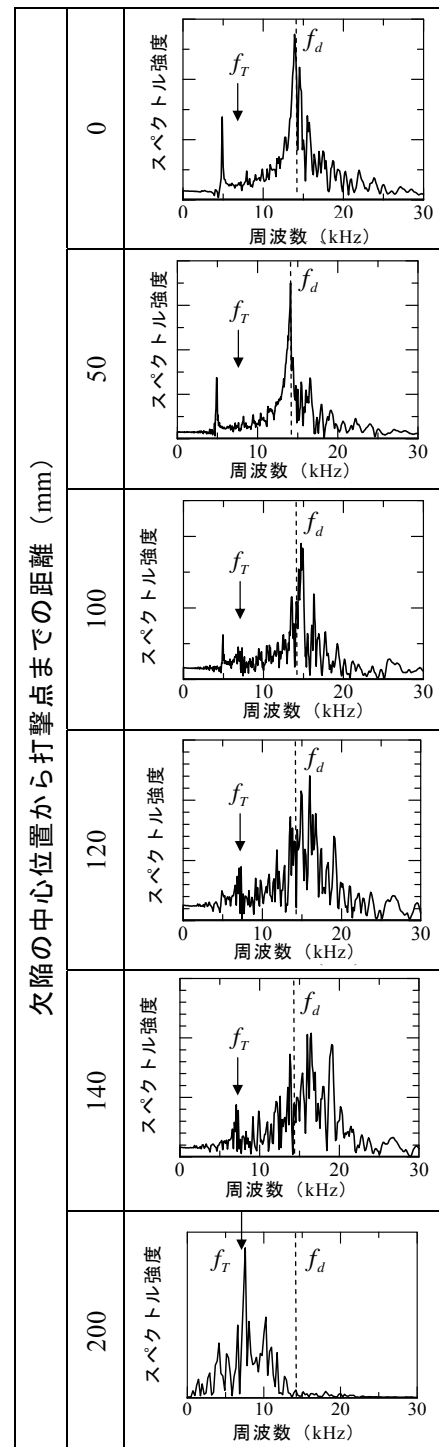


図-2.29 欠陥中心位置から打撃点までの距離ごとの周波数スペクトル

(2) 衝撃応答解析を援用した衝撃弾性波法の概要

a) 解析概要

解析モデルの寸法は、対象とする切り出し RC 床版の寸法と同じにすることが望ましい。しかしながら、解析の制約上、同じ寸法にすることは不可能であるため、設定できる範囲内で最も寸法が大きくなるように、幅と長さをそれぞれ

2000mmとした。一方、版厚は、対象とする RC 床版と同じ 320mmとした。モデルの内部には、水平ひび割れを模擬した円盤状の空隙部(以降、「欠陥モデル」と呼ぶ)を設けた。空隙直径は 200mmとした。一方、空隙の設置深さは、衝撃弾性波法の計測面(ここでは、床版下面から計測を行なう)から水平ひび割れが発生すると想定される深さ(引張および圧縮側鉄筋位置、既設コンクリートと上面増厚コンクリートの界面)のうち、その値が最も小さくなると考えられる引張側鉄筋までの距離に相当する 60mmとした。また、比較のため、空隙部がないモデル(健全モデル)も併せて作成した。欠陥モデルおよび健全モデルの両者を評価できる「I:弾性波の入力方法」、「II:受振方法」および「III:周波数解析方法」の最適な組み合わせを決定できれば、供用中の道路橋 RC 床版において衝撃弾性波法により水平ひび割れを効率良く検出できると考えられる。加えて、この両者のモデルを評価することができれば、圧縮側の鉄筋位置や既設コンクリートと上面増厚コンクリート界面に生じる水平ひび割れも検出できると考えられる。

モデルの要素は 8 節点ソリッドとした。要素一辺の長さは約 10mm である。モデルの支持は、

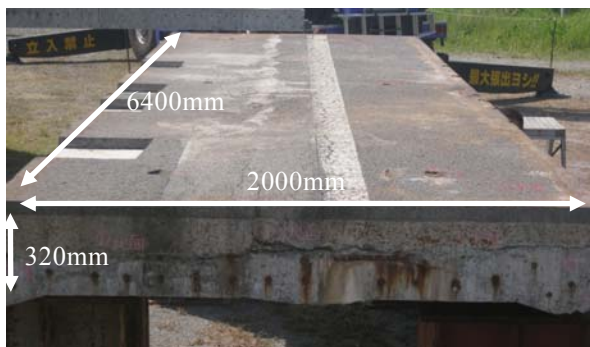


図-2.30 道路橋から切り出した RC 床版の概要

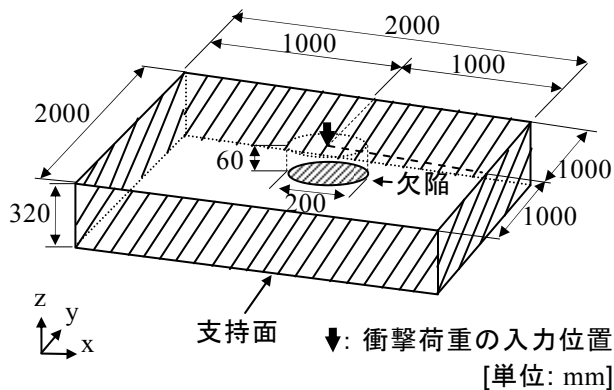


図-2.31 欠陥モデルの概要

図-2.31 に示す 2000mm×320mm の 4 面(図中の斜線部分)とした。支持面の境界条件としては、斜線部分にある全ての節点の変位(x, y, z 方向)を固定した。衝撃力は、図-2.31 に示すモデル中央の 1 節点に入力した。出力位置は、荷重の入力位置より y 方向へ 50mm 移動した点である。

b) 弾性波の入力方法の選定

「I:弾性波の入力方法」を決定するため、弾性波の入力に使用する鋼球直径を 3.2, 6.4 および 12.8mm の 3 種類とした。入力波形は、図-2.25 と同じある。横軸の荷重継続時間は式(3)により、縦軸の最大荷重は式(8)によりそれぞれ算出した。

衝撃応答解析により得られた周波数スペクトルを図-2.32 に示す。図中には、 f_T を矢印、 f_d を破線でそれぞれ示している。なお、ここで示している周波数スペクトルは、出力する波の種類を加速度、周波数解析方法を FFT としたものである。欠陥モデルにより得られた周波数スペクトル(図-2.32 (a))に着目すると、鋼球直径に関わらず、 f_T の付近にピークの出現が確認できる。しかしながら、鋼球直径 3.2mm の場合では、 f_T 位置近傍のピーク以外にも複数のピークが出現しているため、それらのピークを欠陥に相当

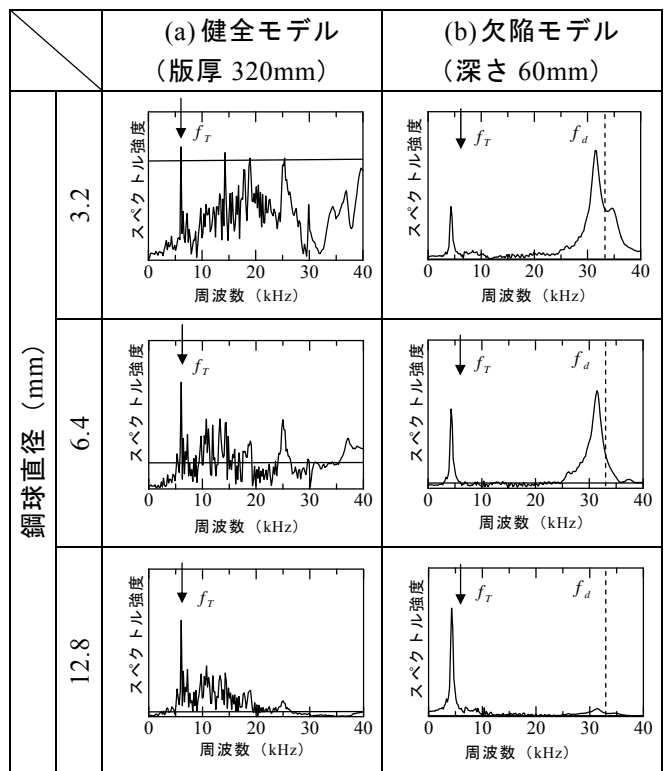


図-2.32 鋼球直径ごとの周波数スペクトル

するピークとして判定する可能性がある。したがって、版厚を適切に推定することが可能な鋼球直径は、6.4 および 12.8mm であると考えられる。

続いて、欠陥ありのモデルにより得られた周波数スペクトル（図-2.32 (b)）に着目する。鋼球直径 12.8mm を除けば、いずれの場合においても、 f_d 近傍にピークが出現している。したがって、周波数スペクトル上において版厚共振周波数および欠陥共振周波数が確認できる条件のうち、直径が最も小さい 6.4mm の鋼球が適切であると判断した。

c) 弾性波の受信方法の選定

「II：弾性波の受振方法」を決定するため、鋼球直径の選定に用いた解析モデル（図-2.31 参照）に対し、出力する波の種類を変化させて比較および検討を行なった。ここでは、出力する波の種類を加速度および変位の 2 種類とした。一方、対象とする鋼球直径は、版厚と欠陥の両者を評価できると考えた鋼球直径 6.4mm とした。健全モデルおよび欠陥モデルで得られた周波数スペクトルを図-2.33 に示す。図中には、 f_T を矢印、 f_d を破線でそれぞれ示している。周波数分析手法は FFT である。なお、図-2.33 (a) および (b) に示す加速度の周波数スペクトルは、図-2.32 の鋼球直径 6.4mm の場合と同じである。変位波形の周波数スペクトルでは、健全モデルでは、 f_T 位置近傍にピークが出現しているものの、欠陥モデルでは、 f_d の周辺にピークの出現を確認することができなかった。これに対して、加速度波形の周波数スペクトルでは、前述のとおり、 f_T およびの f_d に相当する位置にピークがそれぞれ出現している。

以上のことから、健全モデルおよび欠陥モデルにおいて、版厚および欠陥の両者を評価するにあたっては、出力する波の成分は加速度が適切であると考察できる。

d) 周波数分析方法の選定

「III：周波数分析方法」を決定するため、図-2.31 に示すモデルに対して解析を行ない、得られた変位波形および加速度波形に対して、2 種類の異なる周波数分析方法により周波数スペクトルをそれぞれ算出した。適用した周波数分析方法は、FFT と最大エントロピー法 (MEM 法) である。なお、弾性波の入力は、鋼球直径 6.4mm とした。加速度で出力した場合の周波数スペクトルを図-2.34 に示す。図-2.35 には、変位波形に対する結果を示している。図中には、 f_T を矢

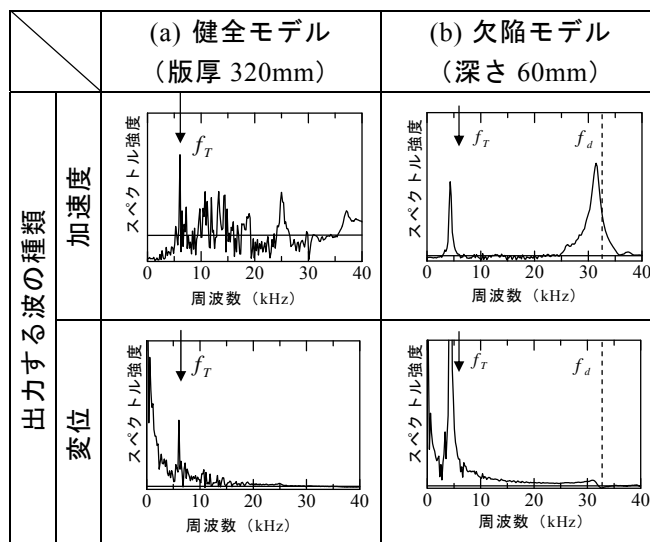


図-2.33 出力する波の種類を変化させた場合の周波数スペクトル

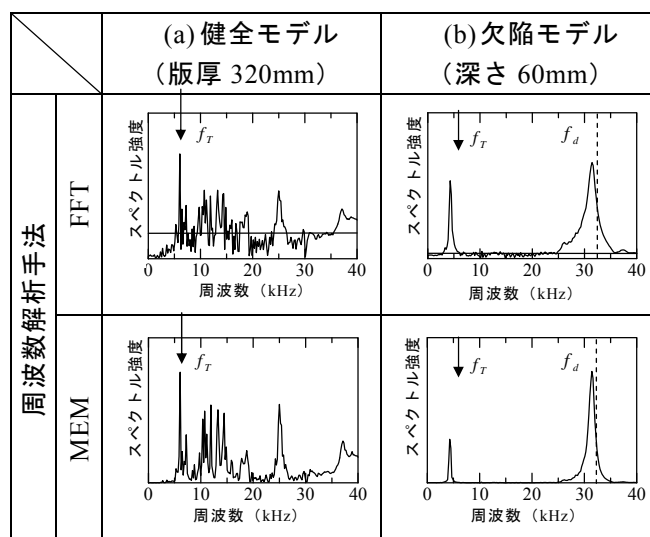


図-2.34 異なる周波数解析手法を用いた場合の周波数スペクトル (加速度で出力)

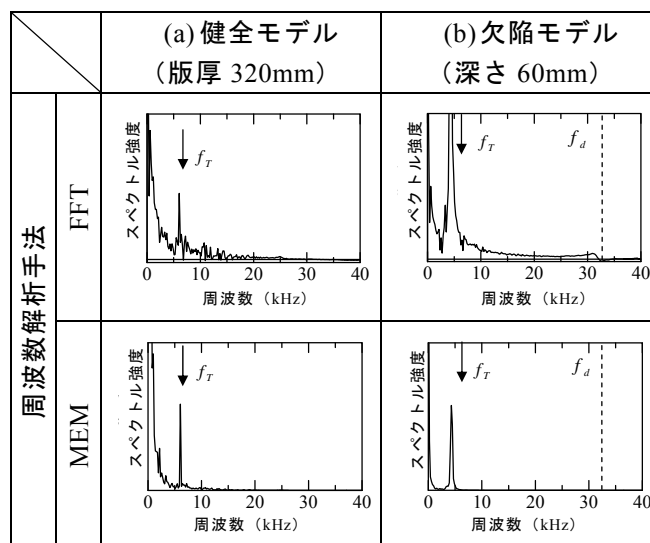


図-2.35 異なる周波数解析手法を用いた場合の周波数スペクトル (変位で出力)

印, f_d を破線でそれぞれ示している. いずれの場合においても, 周波数分析手法として MEM を使用することにより, ピークの形状が鋭くなり, かつ, ピーク周波数以外の周波数帯域における周波数成分の強度が若干ではあるが小さくなっていることがわかる. したがって, 版厚や欠陥共振周波数に相当するピークを周波数スペクトル上で判読するには, FFT よりも MEM が好ましいと考えられる.

(3) 道路橋から切り出した RC 床版に対する提案した手法の適用性

a) 計測概要

図-2.36 に衝撃弾性波法による計測点を示す. 計測面は, 床版底面のコンクリート表面である. 計測点は, 合計で 33 点である. 弾性波の入力は, 解析結果に基づき鋼球直径 6.4mm を使用した. 弾性波の受振には, 弾性波入力と同様に, 解析結果に基づき加速度センサを用いた. センサの感度は, 0.003~30kHz の間でフラットな応答を示すものである. センサで受信した信号は, サ

ンプリング時間 1 μ s, サンプリング数 10000 点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した. 記録した波形に対して, 周波数分析を行い, 周波数スペクトルを算出した. 適用した周波数分析手法は, 解析結果に基づき MEM とした. なお, 弾性波の入力位置とセンサの設置位置との距離は約 50mm である.

b) 計測結果および考察

特徴的な周波数スペクトルが得られた計測箇所の結果の一例を図-2.37 に示す. 図中には f_T を矢印で示している. なお, この版厚共振周波数は, コンクリートの縦波の伝播速度を 4000m/s と仮定して算出した.

図より, 「計測箇所: A7」では, 周波数スペクトル上のピークと f_T が概ね一致していることがわかる. したがって, この箇所では, 水平ひび割れが発生していないものと推察される. これに対して, 「計測箇所: A5」および「計測箇所: A9」では, 版厚共振周波数よりも高い周波数領域に, 単独のピークが出現している. 周波数スペクトル上でピークの周波数の値を読み取

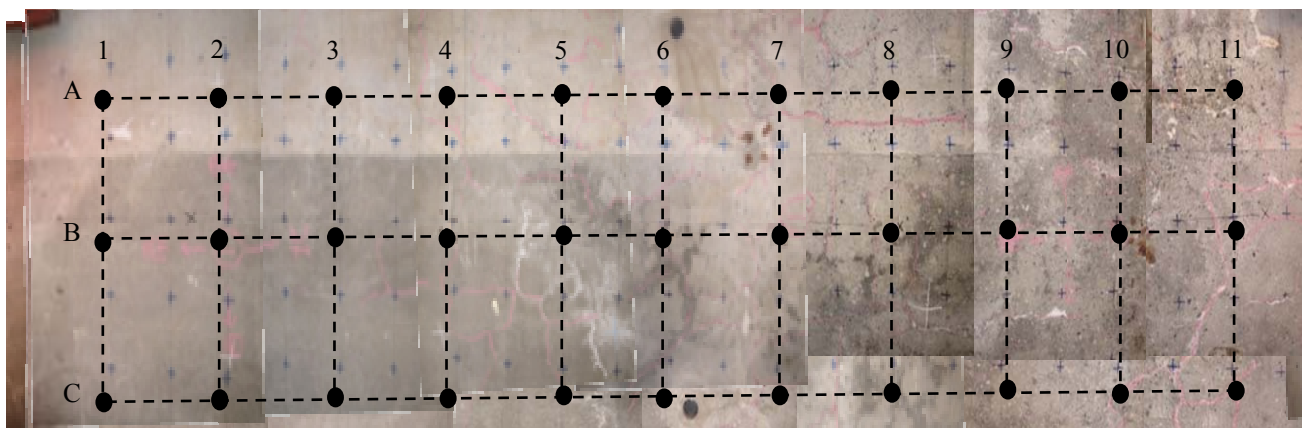


図-2.36 衝撃弾性波法による計測点

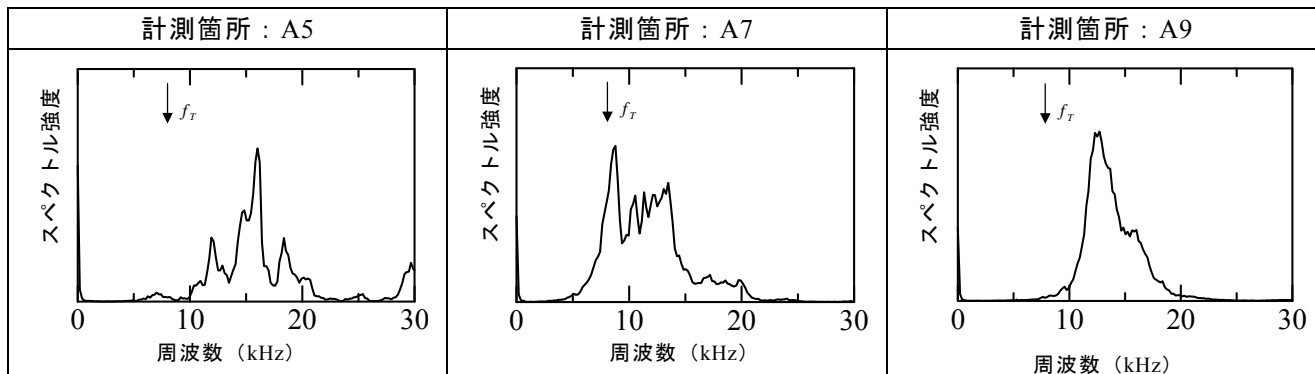


図-2.37 計測により得られた周波数スペクトルの一例

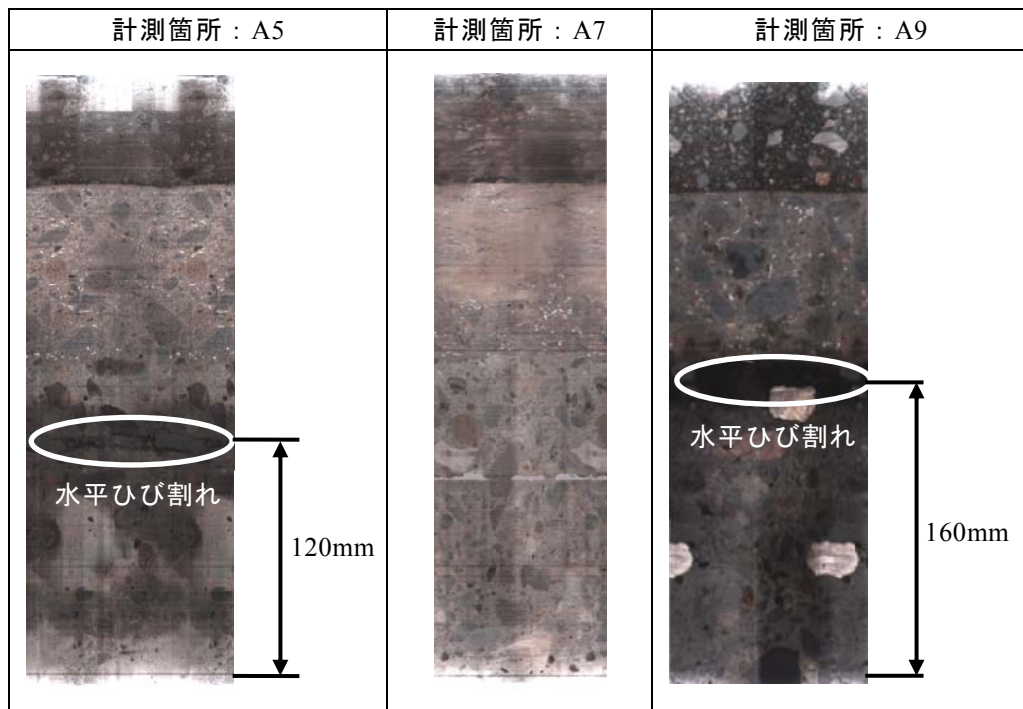


図-2.39 スキャナーにより把握した水平ひび割れの発生状況

った結果、「計測箇所：A5」で約 16kHz、「計測箇所：A9」では約 12kHz であった。これは、コンクリートの縦波の伝播速度：4000m/s とすると、式(2)より、床版底面から「計測箇所：A5」で約 125mm、「計測箇所：A9」で 167mm の位置に弾性波の反射源があることとなる。すなわち、床版下面から約 125mm または約 167mm の位置に、水平ひび割れがそれぞれ発生している可能性がある」と推察できる。

計測によって推定した結果の妥当性を検証するため、図-2.37 に示す 3 箇所において、直径 25mm の削孔を行なった。削孔後は、孔内に棒状のスキャナーを挿入し、内部のひび割れの発生状況を撮影した。撮影状況を図-2.38 に示す。得られた画像を図-2.39 に示す。図-2.39 (a)より、「計測箇所：A5」では、床版下面から 120mm 付近に水平ひび割れが発生していた。一方、「計測箇所：A7 (図-2.39 (b)参照)」では、水平ひび割れは発生していなかった。また、「計測箇所：A9 (図-2.39 (c)参照)」では、下面から約 160mm に水平ひび割れが発生していることが確認できた。以上のことから、衝撃弾性波法による推定結果は、削孔による目視結果とよく一致していることが明らかとなった。これより、本研究で提案した「3次元衝撃応答解析を援用した衝撃弾性波法」は、道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出において、相応の適用性を有していることが明らかとなった。



図-2.38 棒状のスキャナーによる撮影状況

2.6 まとめ

本章で得られた結論を以下に示す。

- 1) 一般的な道路橋 RC 床版の厚さを想定して作製したコンクリート版供試体に対して、衝撃弾性波法、EMH 法および超音波法を適用した結果、水平ひび割れを模擬した人工欠陥を検出できる守備範囲が最も大きい手法は、衝撃弾性波法であることが明らかとなった。

- 2) しかも，衝撃弾性波法であれば，アスファルト舗装面から水平ひび割れを検出することが可能であることもわかった．
- 3) 衝撃弾性波法を適用した場合の RC 床版内部での弾性波の挙動を，3次元衝撃応答解析により再現する上で必要となる解析モデルや衝撃入力の設定方法について詳細な検討を行い，これらに適した条件を見出した．
- 4) 衝撃応答解析により，「I：弾性波の入力方法」，「II：受信方法」および「III：周波数分析方法」の最適な組み合わせを決定するための方法を提案した．
- 5) 道路橋から切り出した RC 床版を対象に，解析結果に基づき衝撃弾性波法を適用した結果，水平ひび割れの有無やその深さを推定することが可能であった．しかも，衝撃弾性波法により推定した結果と削孔により実測した結果は，おおむね一致した．
- 6) 以上のことから，本研究で提案した「3次元衝撃応答解析を援用した衝撃弾性波法」は，道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出において，相応の適用性を有していることが明らかとなった．

参考文献

- 2-1)たとえば，内田慎哉，鎌田敏郎，三山 敬，肥田研一，六郷恵哲，：インパクトエコー法に基づく RC 床版内部の水平ひび割れの検出，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，pp.7-8，2007
- 2-2)Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-254, 1997
- 2-3)例えば，服部晋一，鎌田敏郎，島田隆史，西田久雄：低周波弾性波による増厚施工後の大型 RC 床版供試体における欠陥の非破壊評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.1727-1732, 2003
- 2-4)財団法人 高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル，p.10, 1995.11
- 2-5)土木学会コンクリート委員会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 61, pp.48-49, 2009
- 2-6)白鳥雅也，桧貝 勇，岡村雄樹：軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, 1992

第3章 弾性波トモグラフィ計測に基づくRC床版内部の損傷評価手法

3.1 概要

疲労損傷断面の進展過程を可視化する目的で、弾性波トモグラフィ計測を疲労レベルに応じて実施し、目視できない内部損傷を速度構造の変化としてとらえる技術（破壊面や内部貫通亀裂が低速度タイとして可視化可能かどうか）を検討する。ここでは、モデル床版の疲労過程（輪荷重走行による繰返し载荷）の3段階（健全、1万回走行、2万回走行）に同手法を適用し、実際のクラック進展の可視化に有効な励起弾性波の周波数や励起方法について検討する。さらに、実際に原位置より切り出された床版（上面増厚工法が施されている現場切り出し床版）を対象に、特に現場適用に向けての本手法の有効性を検討する。具体的には、床版下面や切断面より観察されるひび割れより判断される劣化程度と速度構造の比較検討、アスファルト層による影響、さらに実験的に実施した一方面からの表面波を用いたトモグラフィ計測である。

3.2 弾性波トモグラフィ計測¹⁾²⁾

弾性波トモグラフィは、調査断面を多数の格子状のセルに分割し、セル内の伝播速度が一定であると仮定し、調査断面を透過させた多数の波線の伝播時間を用いてそれぞれの伝播速度を求め、その分布より調査内断面の伝播速度の2次元もしくは3次元分布を求める手法である。弾性波トモグラフィ解析の手順を図-3.1に示す。弾性波トモグラフィは、弾性波を用いるためX線とは異なり、発振点と受振点の間に異なるインピーダンス（密度と伝播速度の積）を有する媒質や、ひび割れなどの空隙が存在している場

合、波動は屈折または回折する。そのため、伝播経路は直線経路を示さず、それらは未知とな

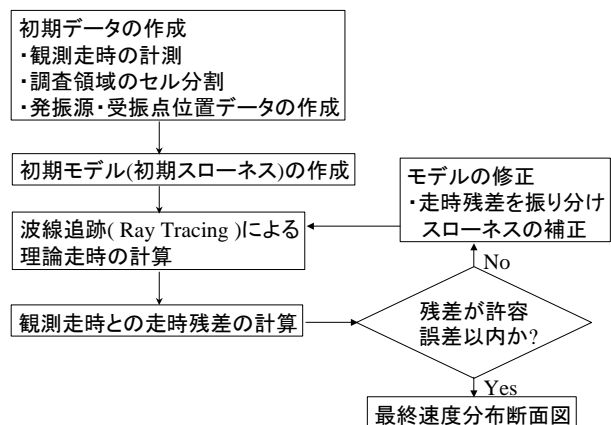


図-3.1 弾性波トモグラフィ解析フロー

り、速度分布を求める逆解析過程で波動の伝播経路の計算、すなわち、波線追跡（レイトレーシング）を行わなければならない。そこで、解析には初期条件として観測走時の計測、調査領域のセル分割、発振源および受振点の位置データを作成し、初期モデル（初期スローネス分布）を与える。以下、レイトレーシングについて詳述する。

発振点から全節点に向かい波を放射させる。次に、発振点からの理論走時を計算し、その走時値と波の射出方向を示す値とをその節点に記憶させる。波の到達した節点から再び全節点に波を放射し、発振点からの理論走時を求める。到達した節点にすでに他方から波が到達していれば、最も小さい走時がその節点の走時として採用される。以上の操作を繰り返し、発振点

から各節点に記憶されている波線の方向を順次たどることで波線経路，理論走時が求められる。

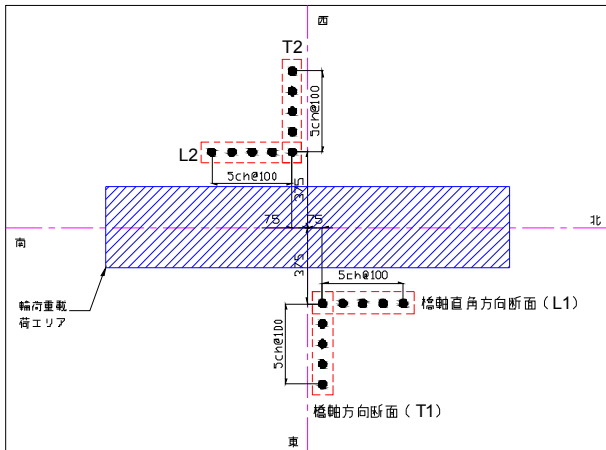


図-3.2 トモグラフィセンサ配置

3.3 モデル床版供試体計測

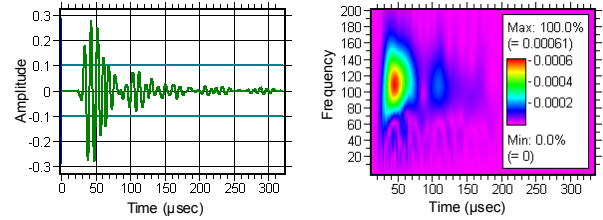
(1) 試験概要

輪荷重による床版の疲労損傷の進行状況を評価するために，床版（2300 x 3000 x 200 mm）の特定断面における弾性波速度構造の変化を2次元的に調査した．図-3.2に試験体のセンサ配置図を示す．床版の中心から橋軸方向に75 mm，橋軸直角方向に375 mmの箇所を基準として主鉄筋方向の断面（T1，T2）および配力筋方向の断面（L1，L2）それぞれ二箇所ずつ計測した．センサは試験体の上面，下面5個ずつ，計10個を設置し，同一面のセンサの間隔は100 mmとした．

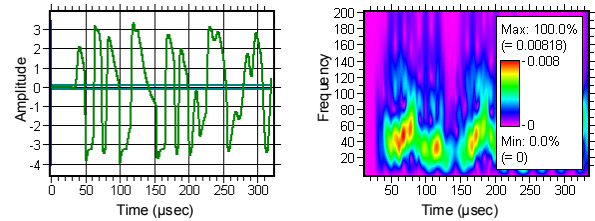
弾性波の励起方法は，パルス発信器（日本フィジカルアコースティクス社製），ペンシル芯圧折，および鋼球ハンマ打撃（直径8 mm）によって行った．弾性波の受振用センサは60 kHz共振型AEセンサを使用した．信号の収録にはAE計測システム（MISTRAS：日本フィジカルアコースティクス）を用い，サンプリング周波数8 MHz，データ数2048，しきい値60 dBとして特性パラメータおよび，信号波形を収録した．図-3.3にパルス発信器および鋼球ハンマによって励起された弾性波の振幅－時間関係および周波数－時間関係を示す．なお，波形分析から，異なる励起方法による弾性波の卓越周波数は，パルス発信器で約100～130 kHz，ハンマ打撃で30～60 kHzであった．

図-3.4に試験体の調査断面の弾性波透過波線経路を示す．波線数は，50波線である．計測の手順を図-3.5に示す．まず一個のセンサを発振点としてそのセンサの近傍で各種弾性波を励

起する．励起された弾性波を発振点のセンサおよび対面側の受信点に配置されたセンサで収録する．収録された波形を重合処理し，発振点と受信点の初動の到達時間差を求める．弾性波の励起は，全てのセンサで行い，全ての波線における初動時間差を取得し，そのデータを入力値として解析し，調査断面の速度構造（トモグラム）を算出する．解析モデルのセル分割を図



(a) パルス発信



(b) 鋼球ハンマ（φ 8 mm）打撃

図-3.3 異なる励起方法による弾性波の特性

3.6に示す．調査断面の節点数は45個，要素数は32個である．

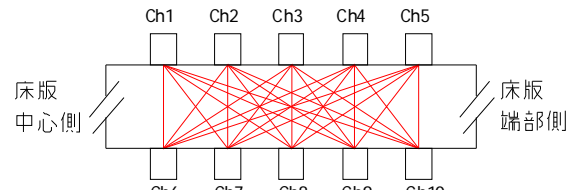


図-3.4 弾性波透過波線経路

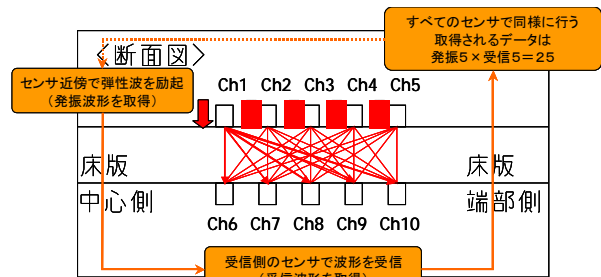


図-3.5 計測手順

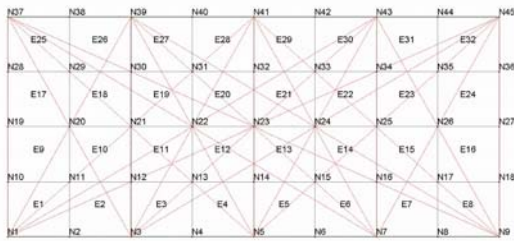
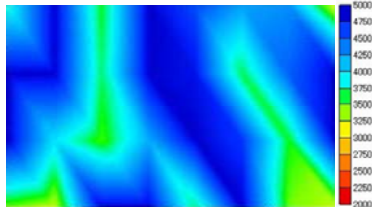
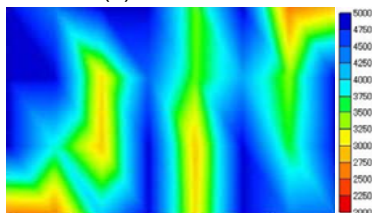


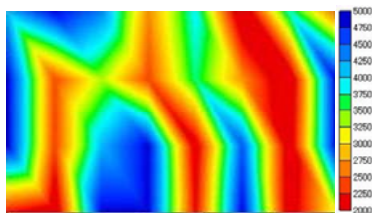
図-3.6 解析モデルのセル分割



(a) 初期载荷後



(b) 10000回走行後



(c) 20000回走行後

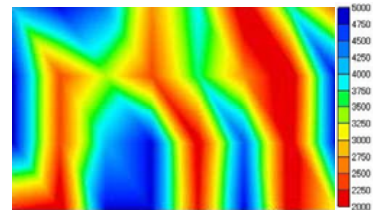
図-3.7 パルス発信器によるトモグラム

(2) 試験結果

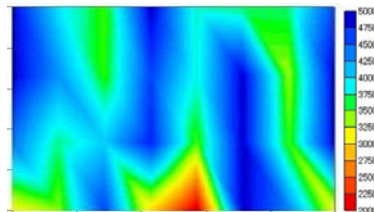
パルス発信器により励起した弾性波によるトモグラムの一例としてL1断面の結果を図-3.7に示す。疲労载荷前（载荷回数0回）の調査断面におけるセルの弾性波速度は概ね3000 m/s以上であり、健全性評価指標の参考として用いられる、米国材料学会（ASTM）が定める弾性波速度とコンクリートの品質良否評価より、健全な状態であることが推定された。载荷回数10000回往復終了後の速度構造より、複数のセルの速度が载荷前に比べ低くなった。その原因は、载荷によってひび割れが発生し、弾性波が屈折または回折したことで直線経路での所要到達時間より多くの時間を要したことが考えられる。特に、2500 m/sec以下の低速度領域が広く認められ、疲労損傷を顕著に受けたと考えられる。载荷回数20000回往復終了後の計測結果より、低速度領域（<3000m/sec）の更なる拡大が認められ、疲労損傷の進展が推定された。

励起方法による結果の違いを検討するため

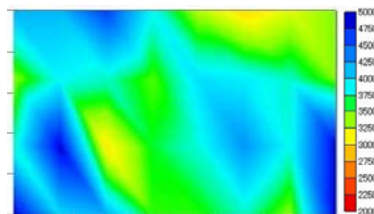
に図-3.8に20000回走行後に各打撃方法で得られたトモグラムを示す。同図より同じ損傷断面でも弾性波の励起方法により推定される内部速度が異なることがわかる。また、低速度領域はパルサー励起での結果が最も広い範囲で認められ、次いでペンシル芯圧折、鋼球打撃となった。このことは、図-3.3で示した励起周波数が



(a) パルサー励起



(b) ペンシル芯圧折



(c) 鋼球打撃

図-3.8 打撃方法によるトモグラム（20000回走行後）



写真-3.1 床版No. 1とNo. 2寸法



写真-3.2 床版 No. 1の切断面



写真-3.3 床版 No. 2の切断面

高周波であるもの（波長が短いもの）がより敏感に損傷を評価可能であることを示唆した結果と

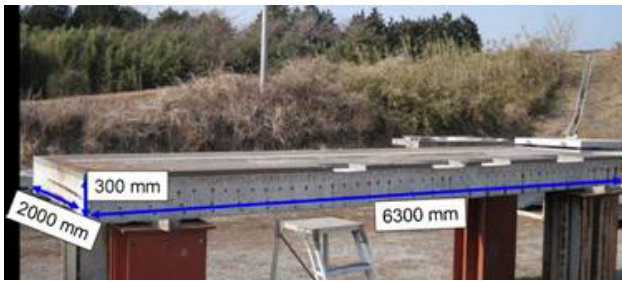


写真-3.4 床版No. 3

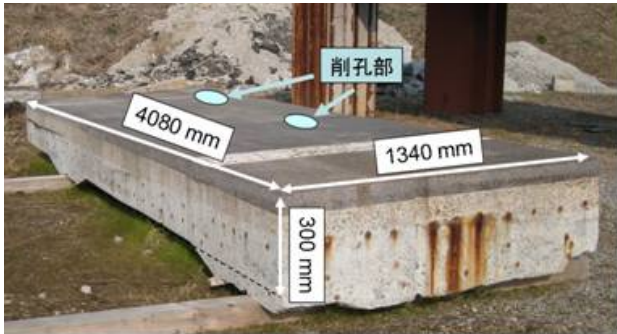


写真-3.5 床版 No. 4



写真-3.6 床版切断面

いえる。

3.4 原位置切出し床版の計測

(1) 試験概要

合計4体の切出し床版を対象とし計測を実施した。その内、No. 1とNo. 2は青津橋から切り出された幅2300 mm、長さ3000 mm、厚さ200 mmの床版である（写真-3.1参照）。写真-3.2および写真-3.3に示すように、床版No. 1の側面には水平ひび割れの発生が確認でき、一方で床版No. 2の側面では確認できなかった。

床版No. 3は幅2000 mm、長さ6300 mm、厚さ300 mm（+アスファルト層50 mm）で、床版No.4は幅4080 mm、長さ1340 mm、厚さ300 mm（+アスファルト層50 mm）である（写真-3.4、写真-3.5参照）。これらの床版は既存床版層、上面増圧層、防水層、およびアスファルト層の4層構造になっていることが特徴である（写真-3.6参照）。また床版No. 4の一部は実験後に削孔されており、実験結果との比較が可能となる。

表-3.1 各床版でのトモグラフィ計測

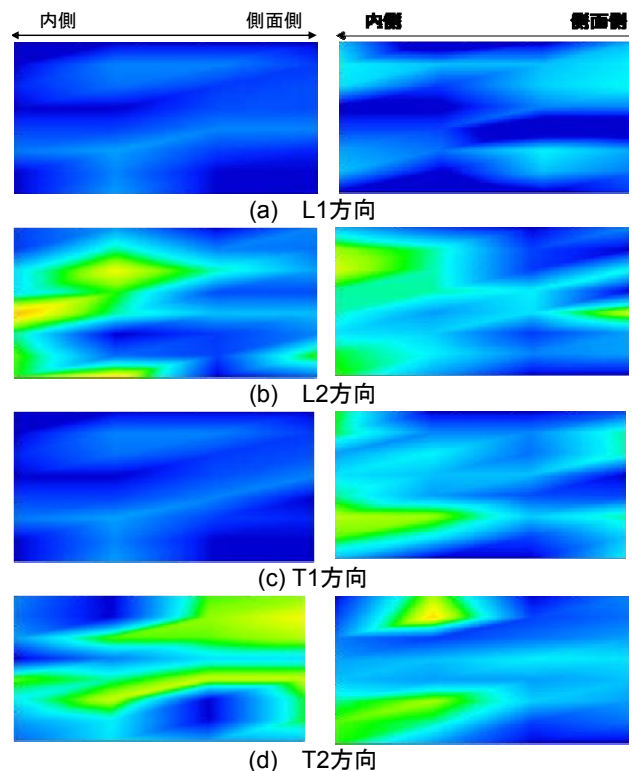
供試体番号	断面トモグラフィ	平面トモグラフィ
No. 1	○	○
No. 2	○	○
No. 3	○*1	○
No. 4	○*2	×

*1: アスファルト層の有無による影響検討

*2: 削孔部分と断面トモグラフィ結果比較

(2) 試験結果

一例として床版No. 1および、No. 2の8 mmハンマによる各断面の速度構造を図-3.9に示す。同(i)b, 床版No. 1のL2方向の断面より、水平方向に3,000 m/sec以下の低速度帯が存在し、この領域はほぼ側面で観察されるひび割れの位置に対応している。ここで、低速度帯は床版No. 1に限らずNo. 2でもL2, T1, T2の各断面に認められることから、「側面の目視観察より推定されるひび割れ性状（劣化性状）」は必ずしも内部と一致するものではないといえる。



(i) 床版No. 1 (ii) 床版No. 2

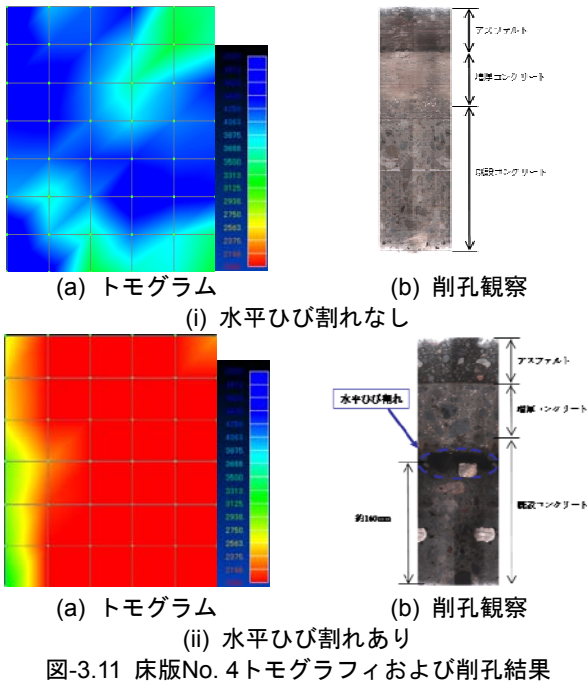
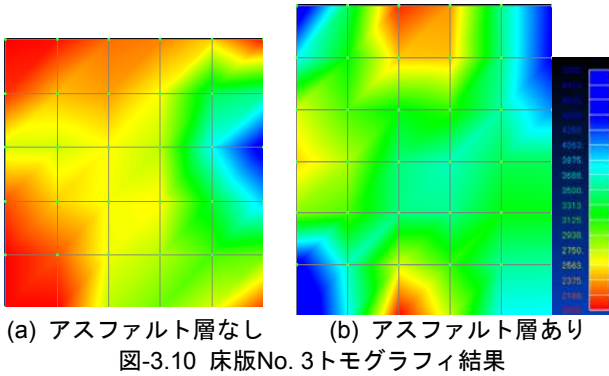
図-3.9 床版No. 1, 2のトモグラフィ結果

8 mmハンマ、速度構造のカラー分類は図3.7参照

床版No. 3では、アスファルト層を含む断面と含まない断面に断面トモグラフィ法を適用し、アスファルト層の有無がトモグラフィ結果に与える影響を検討した。ここで、センサは側面から230 mmの位置に50 mm間隔で、上面6個、下面6個設置した。アスファルト層での弾性波

の減衰を考慮し、弾性波の励起は、エネルギーの大きい弾性波が発信可能な直径25 mmハンマを用いた。

アスファルト層を含まない断面のトモグラフィ結果を図-3.10aに、アスファルト層を含む断面のトモグラフィ結果を図-3.10bに示す。同a, アスファルト層がない場合、明瞭な水平方向に卓越した低速度層は確認できず、斜め右上方に



向かう低速度域が確認できた。同bアスファルト層がある場合、上部の低速度層（中央部）が一部確認できるが、それ以深で水平方向に卓越した低速度層は認められなかった。以上のような結果を得た要因としては、水平ひび割れ深さが計算に用いたセル寸法に近いことや、表面で観察されるひび割れ性状と内部のひび割れ性状の違いなどが挙げられる。いずれにせよ、アスファルトがある場合でも、アスファルト表面から励起させた弾性波が底面に到達し、また透過した弾性波到達時間よりユニークな速度分布が得られたことから、アスファルト層がある

場合にも、弾性波トモグラフィにより実際の内部劣化を反映した速度性状が得られている可能性が高いと考えられる。

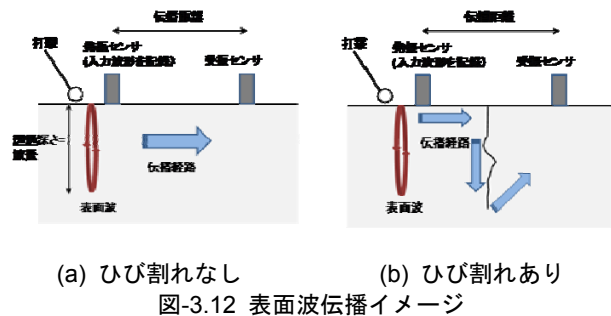
床版No. 4では、水平ひび割れが明らかな断面と、それが観察されない断面を対象にトモグラフィ計測を実施した。

鋼球直径25 mmでの断面トモグラフィと削孔結果を図-3.11に示す。同(i)は“切断面より”水平ひび割れが観察されない場合、(ii)が観察される場合を示す。削孔結果より、床版内部で(i)では水平ひび割れが観察されず、(ii)で（下面から160 mmの位置）明瞭な水平ひび割れが観察され、切断面と同様のひび割れ性状が内部でも確認できた。トモグラムより内部ひび割れが観察されない断面 (i) aでは、ほぼ全領域で高い速度構造が得られたが、水平ひび割れが観察される断面 (ii) aでは、低速度域が水平方向に確認されないものの、ひび割れがない(i)aと比較すると、明らかに広範囲にわたる低速度域が確認できた。以上より、アスファルト層（と遮水層）がある場合でも、弾性波トモグラフィにより劣化程度が推定できる可能性が確認できた。ここで、低速度域が水平ひび割れ範囲のみではなく、全領域で得られた原因として、水平ひび割れが断面を分離するほど大規模に発達していた結果、全ての弾性波伝播経路で速度低下が得られ、その結果、速度推定計算時に全てのセルに低速度が振り分けられたことが考えられる。

3.5 表面波速度トモグラフィ

(1) 概説

表面波は励起周波数に深さ方向の波動エネルギー影響範囲が依存するという特長を有しており、ひび割れ深さを合理的に推定できる非破壊検査手法として近年注目されている³⁾。図-3.12に表面波の伝播イメージを示す。



例えば、計測対象にひび割れや空洞などの欠陥が存在している場合、表面波は反射、または散乱するため、伝播経路は最短距離の直線には

ならない。その結果、波の初動、あるいは位相が遅れ、受振点まで長い伝播時間を要することになり、伝播経路を直線と仮定して計算すると伝播速度は低下することになる。これらの特徴を利用して各センサで収録した波形データから、表面波の初動成分を抽出し卓越周波数に応じた伝播速度（位相速度）を算出して、その位相速度を観察データとしてトモグラフィ解析⁴⁾を実施する。ここで、直径8 mm、15 mmおよび、25 mmの鋼球ハンマにより励起させた表面波の卓越周波数および波長は、それぞれ12 kHz (0.19 m)、9.5 kHz (0.24 m)、8.3 kHz (0.27 m)であり、これらに相当する深度近傍が表面波の最大影響深度とまず考えることができる。

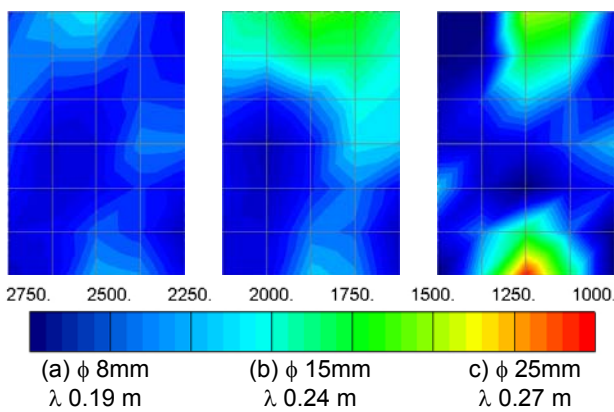


図-3.13 床版No. 1の表面波位相速度分布

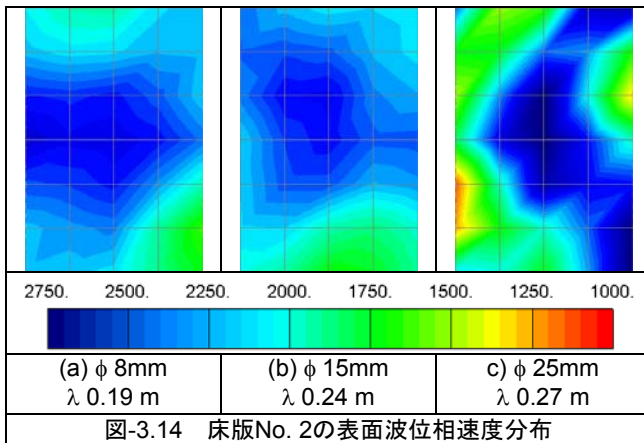


図-3.14 床版No. 2の表面波位相速度分布

(2) 解析結果

床版No. 1とNo. 2の鋼球ハンマ直径毎の位相速度分布を図-3.13および、図-3.14に示す。劣化度が大きいとされるNo. 1床版において、8 mm鋼球（波長0.19 m）を用いた場合、ほぼ全ての領域で健全時の表面波速度に相当する速度値が得られた。図-3.13b, cより、鋼球径を大きくすること、つまり、表面波の波長を長くすることで、低速度が得られるようになることがわかる。例えば、相対的に低い速度域となる1750 m/s

以下に着目すると、図-3.13bより、上部に低速度域が得られ、さらに図-3.13cより上部に加え下部にも低速度域が確認できた。現在、波長の影響深度までは議論できるが、ここで示した低速度域がどの程度の深度に相当するかを特定することはできない。しかし、表面より深くなるほど、損傷領域が現れ、さらに複数となることは以上の結果から確認できた。同様に図-3.14より表面波の波長が大きくなると（影響深度増）低速度領域が拡大している様子（図-3.14b右下部）、さらに別の大きな低速度領域（図-3.14c左部）が確認できた。劣化程度の違いにより速度構造の明確な違いが確認できなかったことから、目視で得られる劣化程度と表面波に基づく速度構造は必ずしも対応しないことがここでも推察された。



(a) 計測エリアA (b) 計測エリアB
写真-3.7 床版No. 3の床版底面の劣化状況

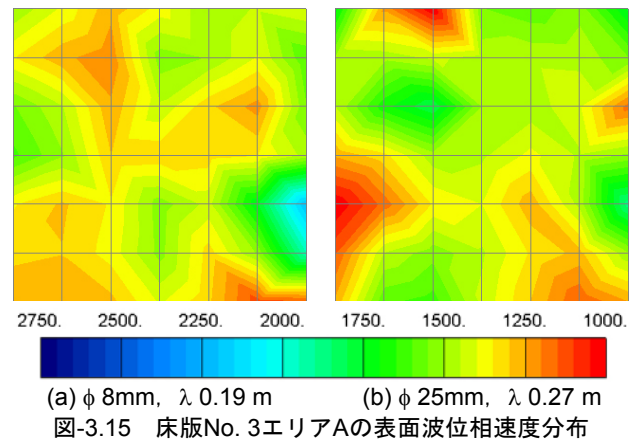


図-3.15 床版No. 3エリアAの表面波位相速度分布

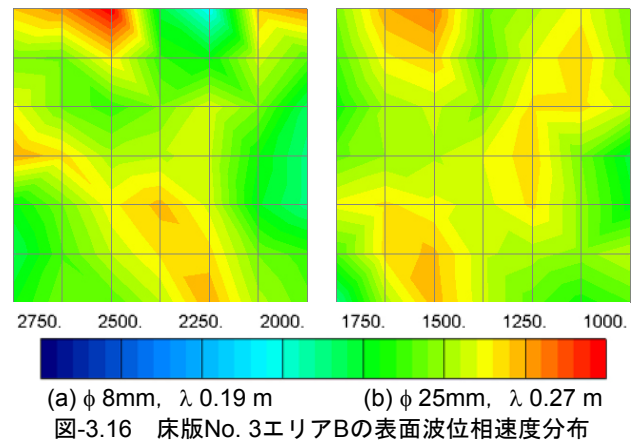


図-3.16 床版No. 3エリアBの表面波位相速度分布

床版No. 3では底面から観察される劣化状況が測定範囲により異なっていた(写真-3.7参照)ことから、計測エリアを劣化の程度により、A(劣化小)、B(劣化大)と区分し、それぞれで表面波トモグラフィを実施した。図-3.15にエリアAでの表面波速度分布を示す。同aより、目視ではほぼ良好と判断される床版でも、その影響深度が床版厚さの約半分程度の表面波で、全体的に低速度、かつ部分的には1250 m/s以下の領域が確認された。さらに床版厚相当の波長による表面波、同bを用いることで、左下部などで著しい速度低下を示す領域も確認できた。以上より、床版表面(下面)では観察できない内部の損傷を表面波速度は評価できるものと思われる。

図-3.16にエリアBでの結果を示す。同aより、上下の一部に高い速度領域が確認できるが全体的に低速度を示す結果となった。この領域では表面波影響深度を深くしても(同b参照)、浅い深度との明確な違いが速度構造で確認できなかった。

図-3.15と図-3.16を比較すると、むしろ表面に顕著なひび割れなどが観察されない前者エリアA(写真3.7a参照)の方が、ひび割れが確認できる後者エリアB(写真3.7b参照)に比べ全体的に低速度を示した。つまり、床版表面の劣化と内部の劣化は必ずしも対応していないことが改めて示唆された。

3.6 まとめ

モデル床版の疲労による弾性波トモグラフィ計測および、実橋梁より切り出した床版での同計測により以下の知見が得られた。

- ・疲労による床版内部の損傷進展は、弾性波の低速度領域の拡大として評価可能であった。

- ・トモグラフィにより得られる弾性波速度は、励起させた弾性波周波数に依存し、高周波になるほど小規模の損傷に対応していた。

- ・内部の弾性波速度は側面の目視観察より判断されるひび割れ性状(劣化性状)と必ずしも一致するものではなかった。つまり、側面(切断面)から観察される水平ひび割れは、必ずしも内部にまで及んでいない場合や、反対に内部に生じていても側面に達していないひび割れの存在も示唆され、このような内部損傷の可視化に弾性波トモグラフィは有効な手法と考えられた。

- ・アスファルト層の有無が弾性波トモグラフィ結果に与える影響を検討した結果、アスファ

ルトがある場合でも、アスファルト表面から励起させた弾性波が底面まで到達すること、また透過した弾性波到達時間よりユニークな速度分布が得られたことから、弾性波トモグラフィにより実際の内部劣化を反映した速度性状が得られている可能性が高いことがわかった。

- ・削孔により床版内部性状を観察した結果、アスファルト層(と遮水層)がある場合でも、ひび割れが観察されない断面では、ほぼ全領域で高い速度構造が得られた。さらに、水平ひび割れが観察される断面においては明瞭な水平方向の低速度域は確認されないものの、水平ひび割れがない場合と比較すると、明らかに全領域の低速度が確認できた。よって、アスファルト層がある場合でも、弾性波トモグラフィにより劣化程度が推定できる可能性が確認できた。

- ・一対の面からの弾性波の励起やセンサ設置が不要な一方向からの表面波を利用したトモグラフィを現場から切り出した劣化床版に適用した。その結果、表面での目視から判断される劣化程度と速度構造は必ずしも一致しないことがわかった。表面波位相速度を利用した本手法は、内部の劣化状況の定性的推察は可能といえるが、定量的な事項、つまり、損傷程度やその深度までは推定することができない。一方、本手法は透過波を用いた既往の手法と異なり、一方向での計測のみで内部が調査可能となることから、今後さらに様々な励起方法、周波数、波長と得られる速度(位相速度)を検討し、深度方向の定量的損傷評価が可能となれば広く様々な構造物の劣化評価に適用される可能性があるものと考えている。

参考文献

- 1) Shiotani, T. and Aggelis, D.G.: Damage quantification of aging concrete structures by means of NDT, Engineering Technics Press Proceedings of Structural Faults and Repair 2006 (CD-ROM).
- 2) Kobayashi, Y., Shiotani, T. and H. Shiojiri: Damage identification using seismic travel time tomography on the basis of evolutionary wave velocity distribution model, Engineering Technics Press, Proceedings of Structural Faults and Repair 2006 (CD-ROM).
- 3) Shiotani, T. and Aggelis, D.G.: Determination of surface crack depth and repair effectiveness using Rayleigh waves, IA-FraMCos, Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures-Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures- Carpinteri, et al. (eds), Taylor & Francis Group, Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp. 1011-1018, 2007.
- 4) Chai, H.K., Momoki, S. Aggelis D.G. and Shiotani, T.:

Characterization of deep surface-opening cracks in concrete:
Feasibility of impact-generated R-waves, ACI Materials
Journal, in print.

第4章 赤外線サーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂の遠隔検出手法

4.1 はじめに

経年鋼橋梁の構造健全性を保証するためには、疲労によるき裂発生・進展を的確にモニタリングすることが重要となる。しかしながら、供用中の鋼橋梁に対しては、検査のための足場が必要、効率的な検査法がないなど、一般に構造健全性を担保するために必要な非破壊試験を行うことは容易ではない。

構造部材に存在する応力集中部あるいはき裂を検出・計測する一つの方法として、ロックイン赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性温度変動の測定がある。この方法の特徴としては、全視野測定を行うことができるため、熱弾性温度変動分布画像をもとに応力集中部あるいはき裂先端近傍の特異応力場を検出できることが挙げられる。このため、ひずみゲージあるいは超音波法などの点測定による検査方法よりも効率的にき裂の検出・計測を行うことができると考えられる。

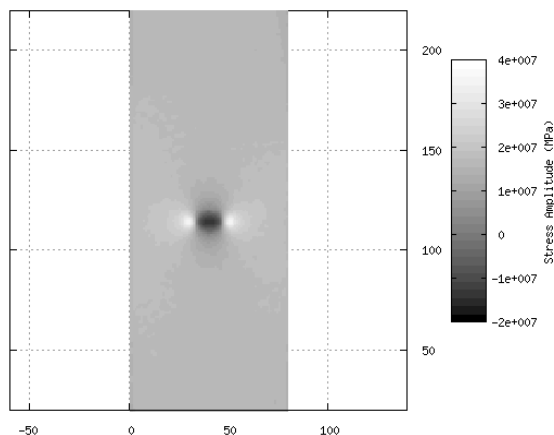


図4.1 き裂先端付近の熱弾性温度変動分布

一例として、き裂状欠陥を有する平板の応力分布を、ロックイン赤外線サーモグラフィにより計測した結果を示す。幅80mm、長さ450mm、板厚6mmのアルミニウム合金平板中に存在する、長さ16mmの中央き裂周辺の応力分布の測定結果を図1に示す。中央き裂の両端には、き裂先端の特異応力場による顕著な応力集中が見られる。また、中央き裂の上下には圧縮応力の集中域も検出されている。このような、き裂周辺の応力場の特徴をもとに、き裂の検出が可能となる。

熱弾性応力計測においては、赤外線サーモグラフィの計測分解能と同程度の微小な温度変動を計測するため、赤外線サーモグラフィによる温度変動計測データから一定周波数の負荷荷重変動に同期する信号のみをロックイン処理により抽出する信号ノイズ比改善が行われてきた。このため、従来型のロックイン赤外線サーモグラフィには、ひずみゲージやロードセルなどによる負荷荷重変動に関する外部参照信号を入力する必要があった。しかしながら、遠隔から鋼橋梁の応力集中部やき裂の検出を行う場合には、負荷荷重信号を引き出すことが不可能な場合が多く、仮に参照信号を引出せたとしても遠隔非接触測定が可能な赤外線サーモグラフィの利点を活かすことができない。また、荷重荷重形態は橋梁の場合には橋梁上を通過する車両によるランダム荷重負荷である。このような理由により、疲労き裂の遠隔計測のためには、従来のロックイン赤外線サーモグラフィを適用することができない。そこで、著者らは、負荷荷重変動に関する参照信号を外部から入力することなく任意の荷重変動に対して熱

弾性温度変動分布をロックイン計測できる、新しい手法、すなわち、計測対象とする構造物の一部領域の熱弾性温度変動データからロックイン処理のための参照信号を自己生成する自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を開発してきた。

本研究課題においては、研究室レベルでの試験体に対する実験および実橋梁に対する現場試験を通じて、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂検出性に及ぼす影響因子に関する検討を行った。

4.2 自己相関ロックインサーモグラフィ

き裂を有する部材に繰返し応力が作用する場合には、き裂先端付近においては、特異応力場により応力変動が周辺よりも大きくなる。き裂先端付近と遠方応力作用部における変動波形が相似であり、位相差がほとんど生じていなければ、ロックイン処理に用いる参照信号として、遠方応力が作用する部分から取得した赤外線強度変動波形の信号を使用することができる。これにより、外部から荷重信号を取得することなしに、ロックイン処理を行うことができる。これが、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法である。

供用中の橋梁に対して、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法によるき裂検出を行う場合、熱弾性温度変動の原因となる繰返し荷重は、橋梁を走行する車両から受ける輪荷重である。したがって、熱弾性温度変動のロックイン処理方法を、ランダムな荷重に対応させる必要がある。本研究では、ランダム荷重に対応したロックイン処理として、最小二乗近似法を用いた。以下にその方法の概要を示す。

物体に f という信号を持つ負荷荷重がかかっている場合を考える。この時、熱弾性温度変動により物体から発せられる赤外線強度 y_n は、以下のような式により近似できる。以下に示す n はフレーム番号を表しており、 N は全フレーム数を表している。

$$Y_n = A + Bf_n \quad (1)$$

ここで、 Y_n は赤外線強度の近似値、 f_n は視野内において指定した部分の参照信号を表している。 Y_n と y_n の差の二乗の和 Δ^2 を求める。

$$\Delta^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - Y_n)^2 \quad (2)$$

Δ^2 の値が最小であれば、 Y_n は y_n の近似であるといえる。そこで、 Δ^2 を A と B で偏微分し、その値を0にするとという条件から、 A および B の値を求める。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta^2}{\partial A} &= \frac{\partial}{\partial A} \sum_{n=1}^N (y_n - A - Bf_n)^2 = 0 \\ \frac{\partial \Delta^2}{\partial B} &= \frac{\partial}{\partial B} \sum_{n=1}^N (y_n - A - Bf_n)^2 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

この方程式は次のように解くことができる。

$$\begin{bmatrix} N & \sum f_n \\ \sum f_n & \sum (f_n)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_n \\ \sum y_n f_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、 B の値は以下のように求めることができる。

$$B = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum y_n \\ \sum f_n & \sum y_n f_n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum f_n \\ \sum f_n & \sum (f_n)^2 \end{vmatrix}} = \frac{N \sum y_n f_n - \sum y_n \sum f_n}{N \sum (f_n)^2 - (\sum f_n)^2} \quad (5)$$

以上の計算を、赤外線サーモグラフィで得られる全ピクセルの赤外線強度変動データに対して行うことにより、自己生成された参照信号と最も相関の高い赤外線強度変動値を抽出することができる。特に B は、熱弾性温度変動値の参照信号に対する相対的な比、すなわち参照信号を自己生成するために用いた領域での作用応力に対する比を表す。したがって、係数 B の分布を画像化することにより、相対応力分布画像を求めることができる。

4.3 実橋鋼床版のビード貫通型疲労き裂検出

供用中の実橋梁において、床版上を走行する車両から受ける実働輪荷重による熱弾性温度変動をもとに、鋼床版の疲労き裂を検出する実験を行い、き裂検出性に及ぼす諸因子の影響を検討した。

(1) 車両の走行位置および速度の影響

本実験では交通規制下の鋼床版に対し、荷重車による走行試験を行なったため、車両の走行位置および走行速度の情報を得ることができた。走行速度については、荷重車の運転手に走行速度を指定することにより情報を得た。走行位置については、き裂直上の路面に、き裂の位置をスケールおよび養生テープを用いて正確にマークし、マークに対する荷重車の走行位置をビデオカメラで計測することにより情報を得た。試験に用いた荷重車の概観を、図4.2に示す。車両は、前輪1軸、後輪2軸のダンプカーであった。後2軸の車輪は、ダブルタイヤとなっていた。車両の自重は10tで、測定時には10tの積載物を載せ、総重量20tとした。タイヤ幅は、全てのタイヤで25cm、後輪ダブルタイヤの間隔は10cmであった。荷重車を走行させた路面の様子を図4.3に示す。図4.4には測定箇所概観を

示す. 図4.3に示した路面に貼られた緑色の養生テープの直下に, 図4.4に示したデッキプレート・トラフリップ間のビード貫通き裂が存在する. 図4.3に示したスケールテープ上を荷重車が通過するときの様子をビデオカメラで撮影し, ビデオの静止画像から走行位置情報を取得した. 走行位置を示す値としては, 図4.5に示すように, き裂位置から後輪外側タイヤまでの距離を用いた.



図4.2 荷重車による载荷

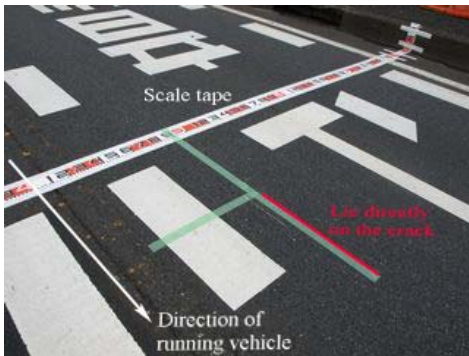


図4.3 走行位置検出用路面マーキング



図4.4 測定対象とした溶接部

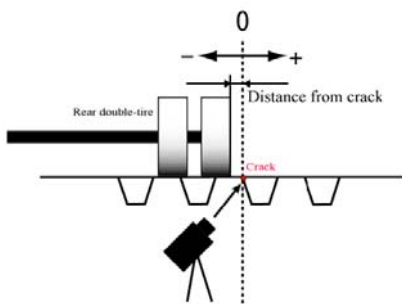


図4.5 走行位置の表示方法

表 4.1 荷重車走行条件

	車速 (km/h)	走行位置 (cm)
No. 1	60	+1
No. 2	20	+1
No. 3	60	+66

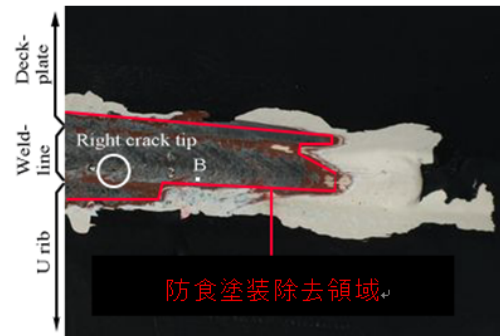
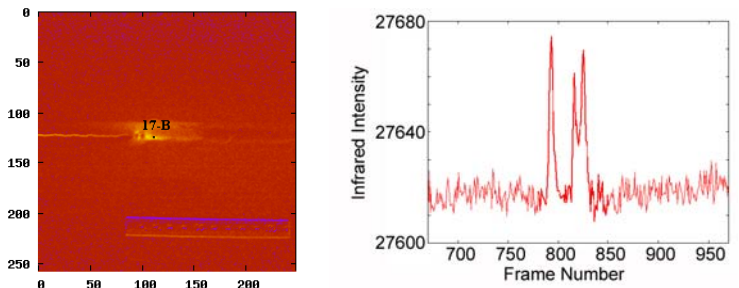
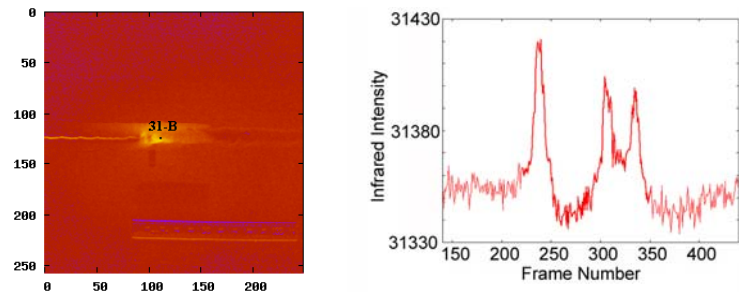


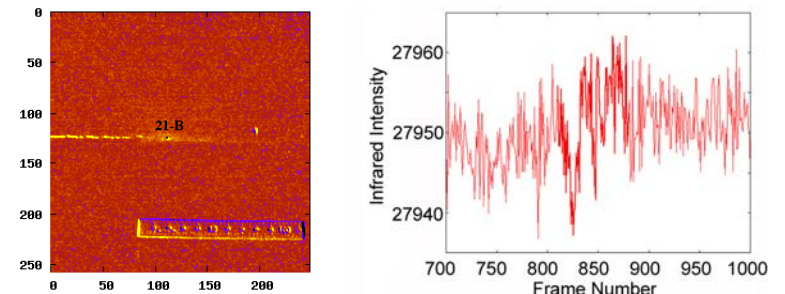
図4.6 疲労き裂右端



(a) 走行条件 No.1



(b) 走行条件 No.2



(c) 走行条件 No.3

図 4.7 自己相関ロックイン測定結果
および赤外線強度変動波形

様々な走行条件での測定結果の中から, 表4.1に示す走行条件により, き裂右先端を測定した

データを示す。き裂右端付近の拡大写真を図4.6に示す。健全な溶接部に点Bを定め、自己相関ロックイン処理では、点Bにおける赤外線強度変動を参照信号として用いた。溶接部のビード貫通き裂は、図において左から右に進展しており、目視により確認できた裂先端位置は図中にき裂右端と示した所であった。自己相関処理結果および赤外線強度変動波形を図4.7に示す。赤外線強度変動波形に現れた3つのピークは、荷重車の前後輪の荷重によるものである。図4.7(a)および(b)の自己相関処理画像においては、き裂先端の応力集中部が同程度に鮮明に現れている。車両の走行速度により、輪荷重による赤外線強度変動周期は変化するが、自己相関処理による相対応力分布は変化せず、き裂検出性には影響しないことがわかる。これに対して、図4.7(c)では、き裂先端の応力集中部が確認しにくくなっており、走行車両がき裂から離れた位置を通るとき、き裂の検出性が低下することが示された。

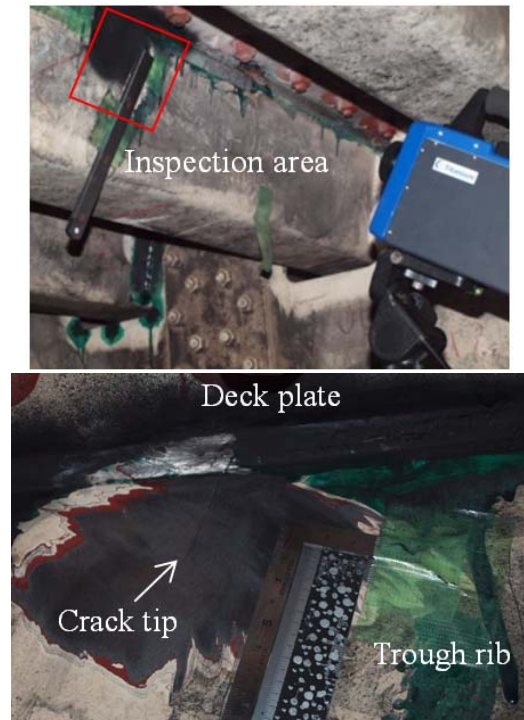


図4.8 測定対象

(2) 車両重量の影響

供用下の道路橋を対象とし、様々な重量の走行車両による欠陥検出性の検討を行った。測定対象としては、鋼床版のデッキプレートおよびトラフリブ間の溶接部に発生した4つの異なるき裂を対象とした。測定対象としたき裂含む測定領域の一例を図4.8に示す。このき裂は、デッキプレートおよびトラフリブ間の溶接部に発生し、その後溶接部からトラフリブ側面へと屈曲進展したき裂である。検査面は、赤外線放射率向上のため黒色塗料を塗布し、防食塗装膜を除去した状態で測定を行った。荷重源は、荷重車および一般車両である。荷重車は、前輪1輪、後輪2輪（ダブルタイヤ）の総重量20.1tのダンブカーであった。道路上を走行する荷重車および一般車の可視計測と鋼床版に発生したき裂を含む領域に対する赤外線計測を同時に行った。測定後、可視計測データと赤外線計測データを同期させ、車両の通過に伴う赤外線強度変動波形とその荷重源となる車両の特定を行った。毎秒113フレームで測定した時系列赤外線データに対して、撮影画像内の揺れを画像処理により補正した後自己相関ロックイン処理を施し、き裂先端部での応力集中部の検出を行った。一般車両の重量については、可視計測より得られた画像を基に車種を推定し、その重量を概算した。赤外線サーモグラフィとしては、計測波長領域7.7-9.3 μm 、温度分解能25mK のMCTセンサを搭載した機種を用いた。

表4.2 測定条件

		重量 (トン)	軸重 (トン)
普通車	総重量	2.0	1.0
	車両重量	1.5	0.75
中型車	総重量	7.8	4.88
	車両重量	3.4	2.13
大型車	総重量	24.8	9.84
	車両重量	8.6	3.41
荷重車	総重量	20.1	8.68

様々な測定結果の中から、代表的な普通自動車（総重量 5t 未満）、中型トラック（総重量 5t 以上 11t 未満）、大型トラック（総重量 11t 以上 25t 未満）および荷重車による測定結果を示す。対象としたき裂は図 4.8 に示したものである。各車両の総重量および車両重量を表 4.2 に示す。ここで総重量とは、車両重量に最大積載重量を加えた重量を示している。表 4.2 に示した測定条件により得られた自己相関ロックイン処理結果および赤外線強度変動波形を図 4.9 に示す。自己相関ロックイン処理に用いる参照信号は、それぞれき裂先端近傍部において取得した。各赤外線強度変動波形に現れたピークは、各車両の前後輪の荷重によるものである。表 1 および図 4.9 に示した軸重は、各軸について得られた赤外線強度変動波形の変動幅の比より求めた値の最大値を示している。図 4.9 より、車両重

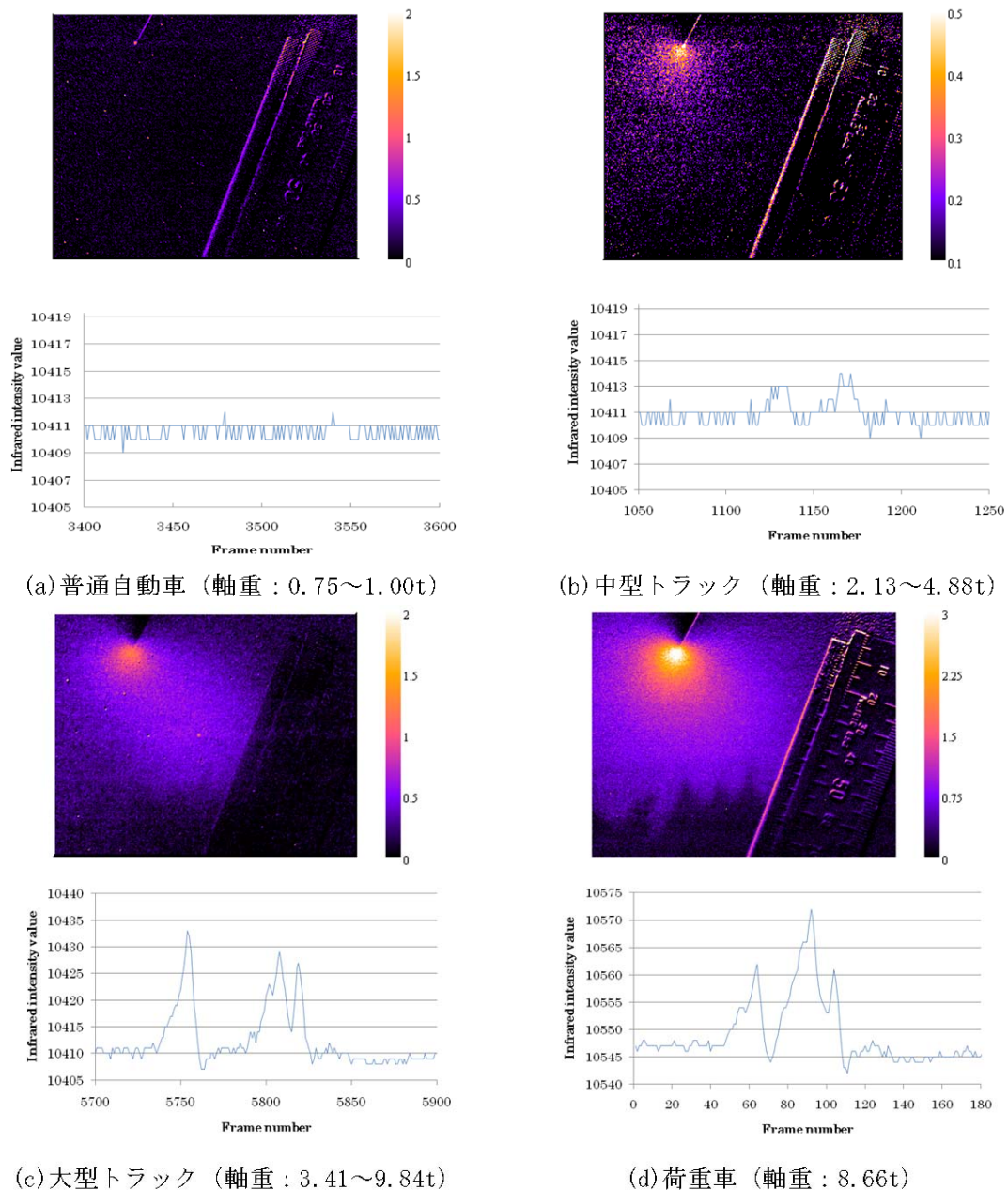


図 4.9 自己相関ロックイン処理結果および赤外線強度変動波形

量が大きくなるに従い赤外線強度変動波形の変動幅が大きくなることからわかる。また、それに伴い、普通自動車によるロックイン処理結果では確認できなかったき裂先端部の応力集中部が、中型トラック、大型トラックおよび荷重車によるロックイン処理結果では鮮明に現われているのが確認できる。この結果から、総重量 10t に満たない中型トラックであってもき裂検出が可能であることが示された。

欠陥検出を行う際の荷重源とした車両の種類、台数およびき裂検出の可否について表4.3に示す。表4.3より3軸以上の大型トラックでは、全て欠陥検出が可能であったことがわかる。一方、総重量2t程度の普通自動車では全て欠陥検出は不可能であった。小型・中型トラックにつ

いては、大半の車両で欠陥検出が可能であったが、1台のみ検出できないものがあった。これは、荷重の積載量不足もしくは車両の走行位置が、き裂が存在する位置から離れていた可能性が考えられる。

表4.3 車両の種類と検出結果

種類	台数	検出可能台数
普通自動車 (総重量 5t 未満)	9	0
中型トラック (総重量 5t～11t)	12	11
大型トラック (総重量 11t～25t)	17	17

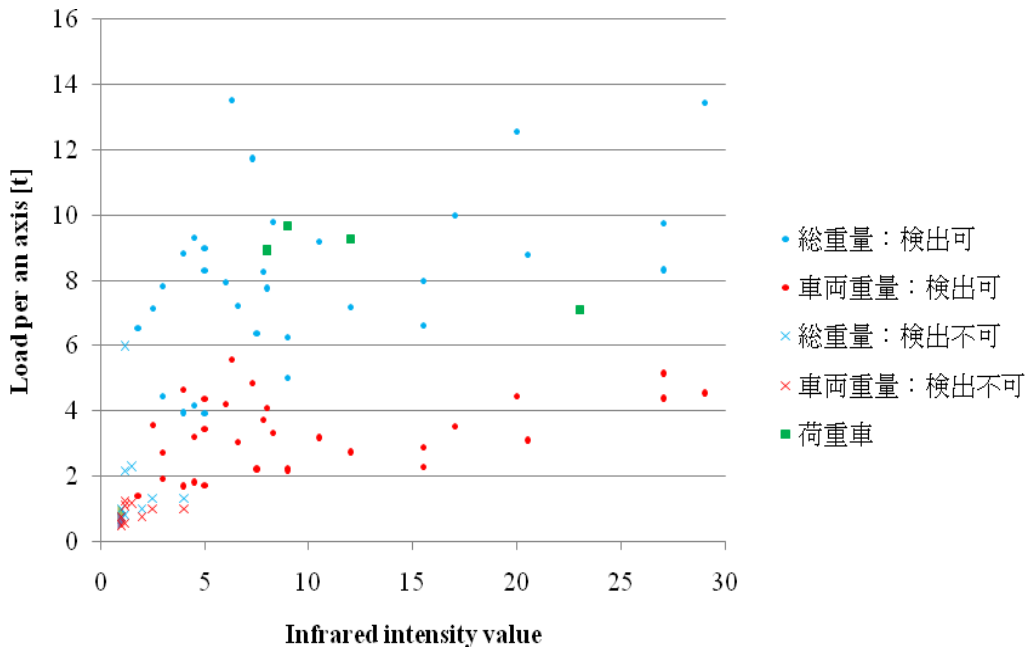


図4.10 赤外線強度値変動幅と一軸あたりの荷重の関係

赤外線強度値の変動幅と一軸あたりの重量の関係を図4.10に示す。ここで一般車については、荷重積載量が不明なため、空車時の車両重量および総重量の値を示し、き裂検出が可能であったものについては・印、不可であったものについては×印で示す。図4.10より、一軸あたり2t未満の車両については、欠陥検出が困難であることがわかる。そのため、欠陥検出には少なくとも一軸あたり2t以上の荷重が必要であると推測される。荷重車について着目すると、いずれの場合も欠陥検出は可能であったが、同一の荷重車を用いたにも関わらず、赤外線強度値の変動幅には大きな差がみられる。これは、検査面の表面状態の影響および前述の走行位置の影響によるものと考えられる。

(3) 防食塗装膜および走行速度の影響

防食塗装膜および車両の走行速度が自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによるき裂検出性に与える影響について検討した。

赤外線計測状況を図4.11に示す。対象とするき裂は、図4.12に示すような溶接ビード上を橋軸方向に進展し、その後トラフリブ側へ屈曲したき裂とした。計測には、表4.4に示すように、重量が異なる3台の荷重車を用いた。さらに車両の走行速度を変えた実験、および膜厚250 μ mの防食塗装膜を疲労き裂上に塗布する前後において、2度の計測を実施し、それらがき裂検出性に与える影響を検討した。き裂上に施した防食塗装の詳細を表4.5に示す。

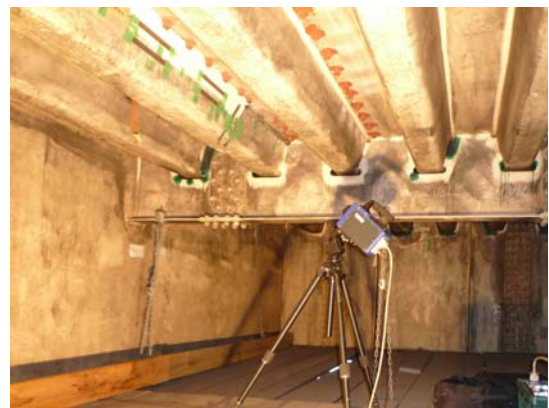


図4.11 測定対象

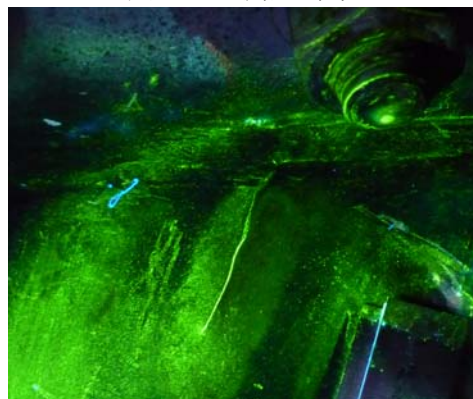


図4.12 屈曲き裂（磁粉探傷結果）

表4.4 荷重車の重量

	荷重車 1	荷重車 2	荷重車 3
前輪	2.3t	3.3t	4.7t
後輪	2.7t	6.7t	9.1t
後輪	—	—	7.6t

表4.5 防食塗装の仕様

工程	塗料名	標準塗布量 (g/m ²)	標準膜厚 (μm)
下塗	有機ジンクリッチペイント	600	75
下塗	変性エポキシ樹脂塗料下塗	240	60
下塗	変性エポキシ樹脂塗料下塗	240	60
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30
上塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	140	25
合計標準膜厚			250

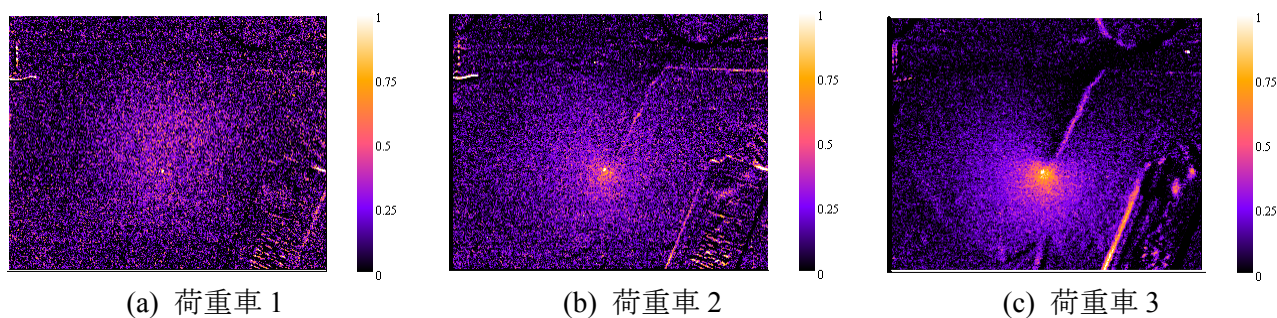


図 4.13 防食塗装膜塗布前のロックイン計測結果 (車両速度約 50km/h)

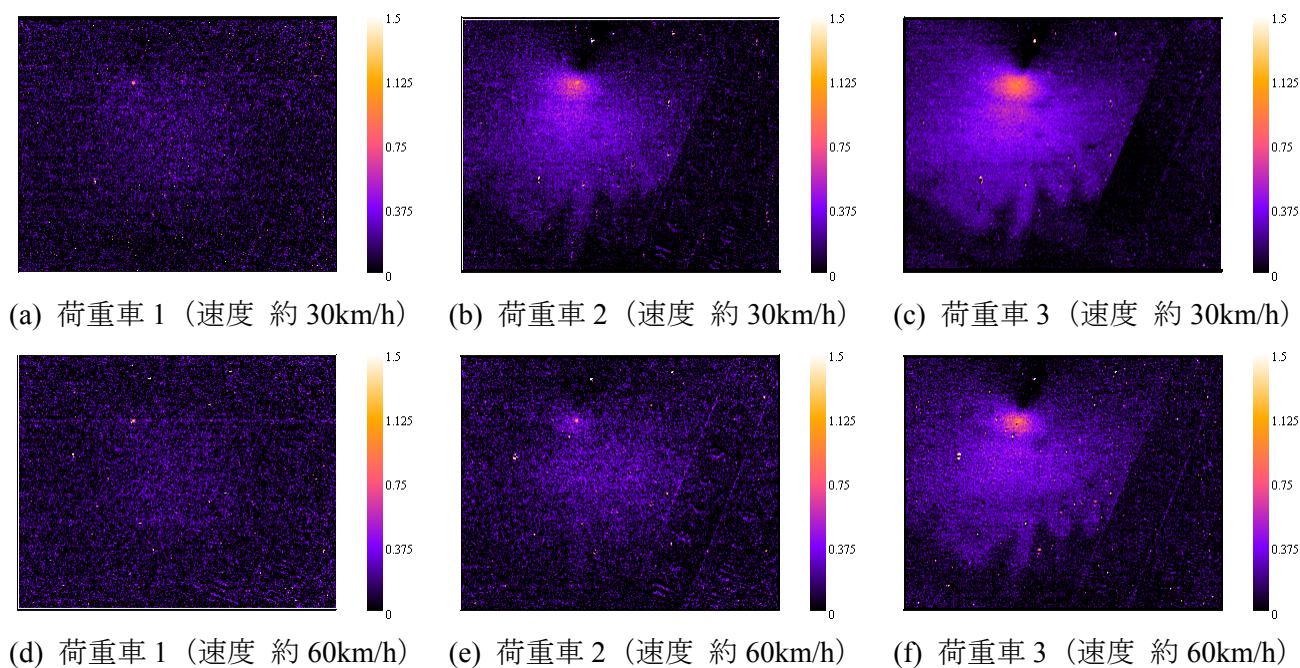


図 4.14 防食塗装膜塗布後のロックイン計測結果

さらに、防食塗装後の計測時には、反射防止のためのつや消し黒色塗料を施さずに計測を実施し、現場計測での反射の影響についても検討を行った。荷重車の輪荷重載荷による測定面の応力変動に伴う温度変動を、撮影速度113 Hzで連続的に計測した。得られた時系列温度変動データに対して、自己相関ロックイン処理を施し、き裂先端における応力集中部の検出を行った。

防食塗装前および後のロックイン処理結果をそれぞれ図4.13および図4.14に示す。図の画

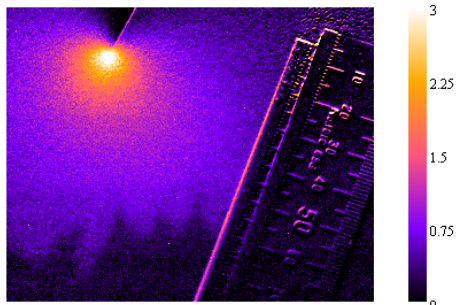
像のコントラストは参照信号取得点に対する相対応力分布を示している。参照信号は、き裂先端付近から取得した。また図4.14の防食塗装後の結果においては、2種類の走行速度において得られた結果を示している。図4.14より、防食塗装有、反射防止のつや消し黒色塗料なしの状態でも、き裂先端付近の熱弾性温度変動の局所的増大が鮮明に検出できており、これをもとにき裂の検出が可能であることが分かった。車両の軸重の影響については、車両が大型になり軸重が大きくなるほど、き裂の検出性は向上し

ていることが分かる。

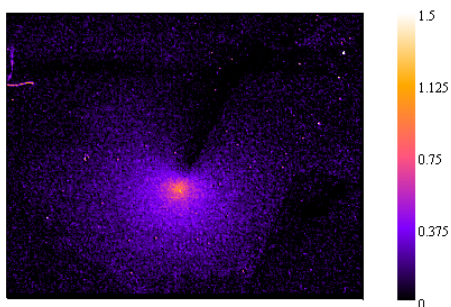
次に車両速度の影響について考える。図4.14の防食塗装後の実験結果を見ると、車両速度が大きくなるにつれて、ロックイン処理画像が不鮮明になっていることがわかる。この原因としては、車両速度の増大に伴い载荷荷重変動の卓越周波数が大きくなったことにより、鋼板素地表面の熱弾性温度変動の周波数も大きくなり、防食塗装の低い熱伝導性により温度変動が温度計測面である防食塗装表面に現れにくくなったものと考えられる。しかしながら、一般国道の最高速度60km/hでも十分にき裂の検出が可能であることが明らかになった。

(4) 外気温の影響

前項において測定の対象とした疲労き裂に対しては、同じ重量の荷重車を用いて、外気温が全く異なる6月および2月に熱弾性温度変動測定を行っている。屈曲き裂を対象として、き裂検出結果を比較したものを図4.15に示す。図より、2月の実験結果においては、6月の実験結果に比べて、測定された熱弾性温度変動が同じ重量の荷重車を用いたにもかかわらず、半分程度に小さくなり、き裂検出性が悪化していることがわかる。季節による路面温度の違いにより、アスファルト舗装の剛性が変化したことが実働応力そのものに影響を及ぼしたのではないかと推察される。



(a) 夏季（6月）の測定結果



(b) 冬季（2月）の測定結果

図4.15 季節によるき裂検出性の違い

(5) 遠隔からのき裂検出性

供用下の道路橋鋼床版（図4.16）において、望遠レンズを用いた遠隔からの赤外線計測を図4.17に示すように実施した。対象としたき裂は、図4.18に示すような、デッキプレートとトラフリブ間の溶接ビード上に発生した疲労き裂である。疲労き裂検出を行った部位を図4.19に示す。デッキプレートおよびトラフリブの板厚はそれぞれ12mmおよび8mmであり、一般的な鋼床版で用いられているものと同等である。図4.19よりこの部位は片側3車線の内、中央の車線を走行する車両の左車輪による輪荷重の影響を強く受ける位置にあることがわかる。



図4.16 測定対象とした鋼橋



図4.17 遠隔からの赤外線計測

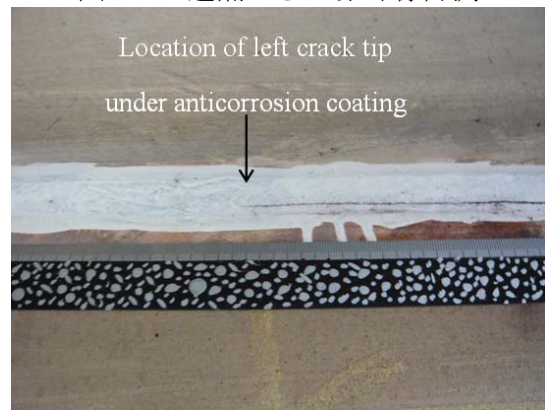


図4.18 塗装割れ（き裂）左端部

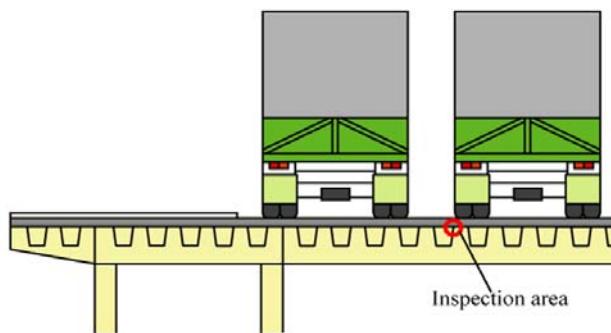


図4.19 検査対象部と走行レーンの位置関係

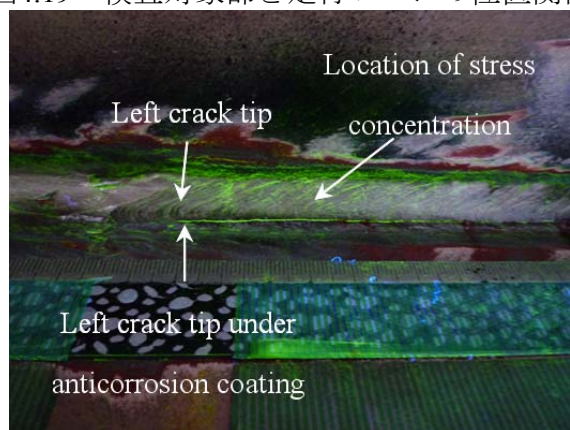


図4.20 磁粉探傷結果

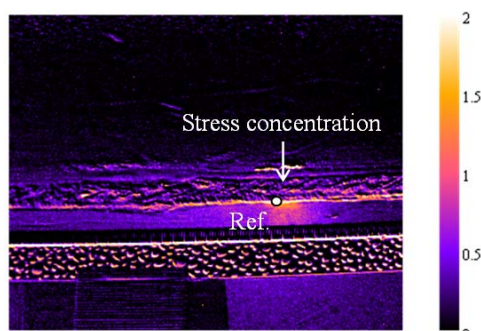
塗膜割れ左端を含む領域において塗膜を除去し、磁粉探傷試験を行った結果を、図4.20に示す。

実験においては、比較のため高所作業車を用いて検査箇所へ接近して行った近距離計測と、地上からの遠距離計測（8m、および12m）を実施した。

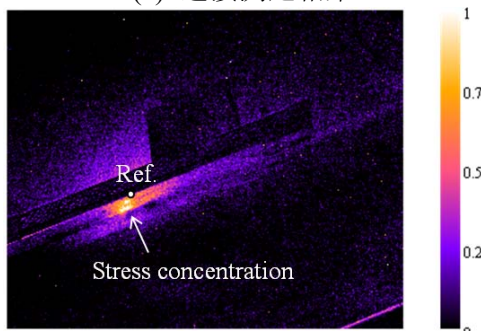
床版上を車両が通過したときに発生するき裂先端近傍での熱弾性温度変動を赤外線サーモグラフィにより計測した。得られた時系列の赤外線計測データに対して、自己相関ロックイン処理を施し、き裂先端近傍の相対応力分布を求めた結果を図4.21に示す。自己相関ロックイン処理に用いた参照信号は図中Ref.と示す点において取得した。ロックイン処理に用いた各参照信号取得点を含む領域での赤外線強度値変動の波形を図5.22に示す。いずれの波形からも、前一輪、後一輪の車両が通行したことがわかる。計測距離が長いほど、赤外線強度変動の波形の振幅は小さくなっているようにも見えるが、荷重源となる車両の重量も不確定なので、比較はできない。自己相関ロックイン処理結果に注目すると、計測距離が長いほど、自己相関ロックイン処理画像の領域全体にムラが現れていることがわかる。特にこの傾向は計測距離が12mの結果で顕著である。この結果の原因の一つと

して、大気中の水蒸気や炭酸ガスにより赤外線が吸収され、減衰した影響が考えられる。また、近距離計測時に比べ、計測距離12mの際の方が、赤外線強度値の振幅が小さく、荷重レベルが小さいことがわかる。これにより、S/N比が低下したことも原因の一つと考えられる。

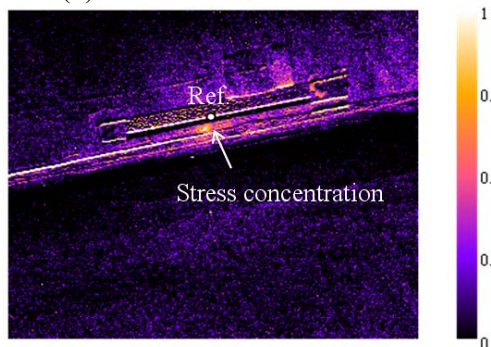
しかしながら、いずれの結果においても、デッキプレートとトラフリブの溶接部のトラフリブ側で局所的に相対応力値が高くなっていることが確認できる。これにより、擬似黒体化塗料なし、防食塗装ありの測定対象の遠隔計測という、現場での最も厳しい条件下においてもき裂検出が可能であることが確認された。以上より、計測距離が長くなることで、赤外線の減衰による影響はみられるものの、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィにより、遠隔からのき裂位置同定が可能であることが示された。



(a) 近接測定結果



(b) 距離8mでの遠隔測定結果



(b) 距離12mでの遠隔測定結果

図4.21 遠隔からのき裂測定結果

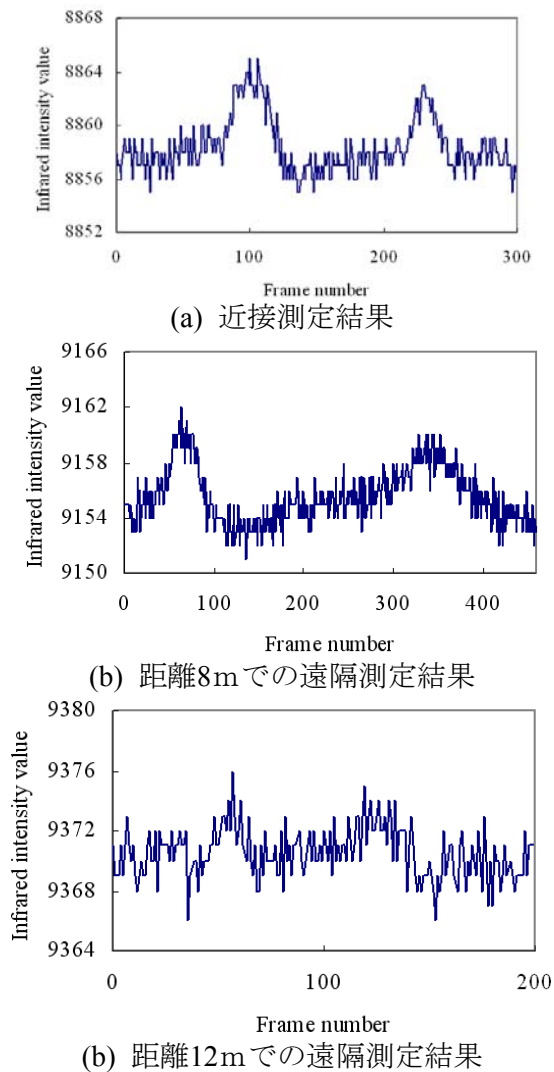


図4.22 赤外線強度変動波形の比較

4.4 デッキ貫通型疲労き裂の検出（1）

前節では、供用中の道路鋼床版において問題となる疲労き裂のうち、溶接ビード貫通き裂のように、検査表面にき裂が開口しているき裂に対して、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによるき裂の検出および評価が十分に可能であることを示した。しかしながら、実橋梁

で問題となっている疲労き裂には、溶接ビード貫通き裂の他に、図4.23に示すようなデッキ貫通き裂がある。デッキ貫通き裂は、検査可能な表面にき裂が開口していないためその検出が困難であること、さらには進展すると路面陥没の恐れがあるなど、道路鋼床版の維持管理において深刻な問題を引き起こしている疲労損傷形態のひとつである。

これまでに用いられているデッキ貫通き裂の検出手法としては、内部き裂の検出に有効な超音波探傷法がある。しかしながら、超音波探傷法は点計測型および接触型の非破壊検査手法であるため、鋼橋梁のような大型構造物の検査には多くの時間と労力を要する。また、検査のためには足場や高所作業車を必要とする。したがって、検査すべき橋梁の全てに対して超音波探傷法を適用するのは事実上不可能である。

そこで、デッキ貫通き裂に対する自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用性を検証するため、鋼床版を模した試験体を用いた疲労試験中にき裂検出を行った結果を示す。

(1) 試験体および試験方法

定点载荷疲労試験に使用した試験体の概要を図4.24に示す。トラフリブ・デッキプレート溶接部の溶け込み量は50～75%とした。本実験では、鋼床版に施された防食塗装がき裂検出性に及ぼす影響を検討するため、塗装の種類を無塗装を含め3種類とした試験体を用いた。防食塗装の詳細を表4.6に示す。無塗装とは、供試体の表面にブラスト処理を施した後、プライマーとして無機ジンクリッチペイントを塗布しただけの状態を意味している。

定点载荷疲労試験に使用した試験装置を図4.25に示す。試験機は、容量200kNのサーボパルサーであり、図4.26に示すような荷重伝達用フレームを介して試験体への载荷を行った。

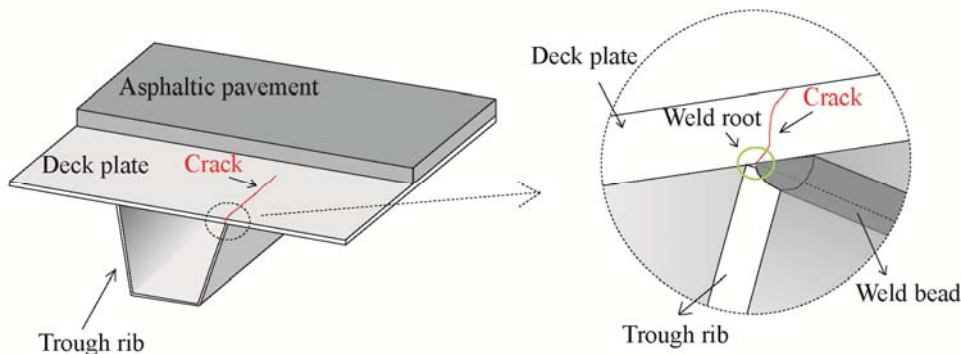
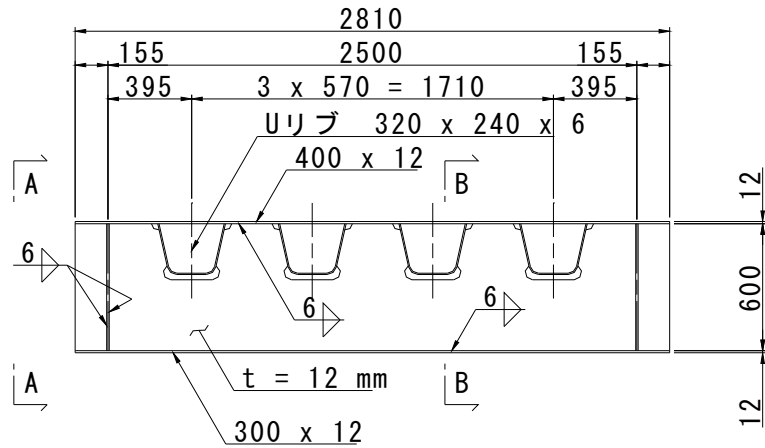
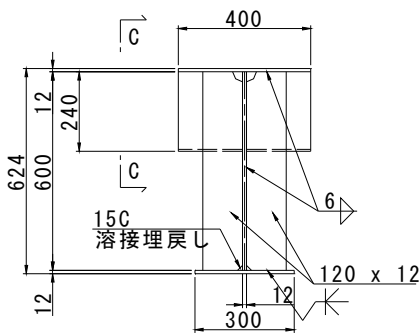


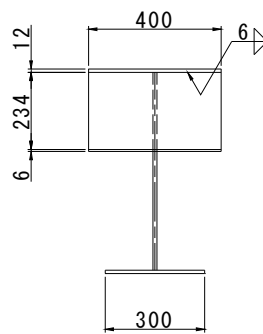
図4.23 デッキ貫通き裂



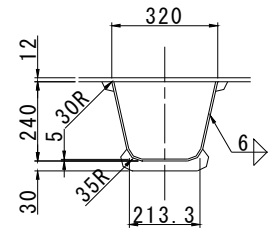
(a) 橋軸直角方向断面図



(b) 断面図(A-A)



(c) 断面図(B-B)



(d) トラフリップ詳細

図 4.24 定点載荷疲労試験用の試験体概要図

表 4.6 要素試験体に適用した塗装系（塗装あり試験体）

	工程	塗料名	標準塗布量 (g/m ²)	標準膜厚 (μm)
軽防食 塗装	2次素地調整	溶接部およびプライマー損傷部は G-a 活膜部はスweepブラスト(Sa1 程度)		
	第1層	有機ジンクリッチペイント	700	75
	第2層	シリコン変性アクリル樹脂塗料用 中塗	170	30
	第3層	シリコン変性アクリル樹脂塗料用 上塗	140	25
	合計標準膜厚			
重防食 塗装	2次素地調整	ブラスト処理(Sa2.5)		
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	600	75
	ミストコー ト	エポキシ樹脂塗料下塗	160	-
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540	120
	中塗	フッ素樹脂塗料用中塗	170	30
	上塗	フッ素樹脂塗料用中塗	140	25
	合計標準膜厚			

載荷時に使用した載荷板としては、載荷面積 250mm×250mm のゴム板と衝撃緩衝用のベニヤ板および鋼板を組み合わせたものを用いた。

それぞれの厚さは、ゴム板が 10mm、ベニヤ板は厚さ 36mm(12mm×3)、鋼板が 12mm であった。ゴム板は、荷重を載荷面積に対して適度に

分布させるために用いた。また、事前の荷重試験により、これらの板の組み合わせにより、十分な応力分散効果があることを確認している。



図 4.25 定点荷重疲労試験機



図 4.26 荷重伝達フレーム

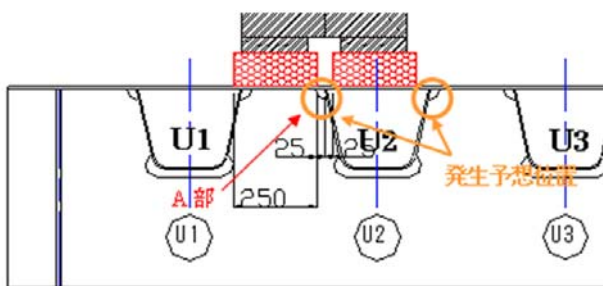


図 4.27 荷重位置および疲労き裂発生予想箇所

疲労き裂進展試験においては、荷重 $P_{max}=-15kN$, $P_{min}=-150kN$, すなわち応力比 $R=0.1$ として、荷重速度 $3.0Hz$ による繰返し荷重を行った。荷重位置としては、デッキプレート貫通き裂を発生・進展させることを本試験では目的としていることから、図4.27に示すように、デッキ・トラフリブ間の溶接部の直上をダブルタ

イヤがまたぐように設定した。

(2) 赤外線計測方法

疲労き裂進展試験中、定期的に赤外線計測を実施し、き裂発生による計測面の応力分布の変化を観察した。計測箇所は、図4.27に示した、き裂発生が予測されるA部とした。赤外線計測状況を図4.28に示す。荷重の大きさおよび周波数を変えた場合の計測、および計測距離や拡大率の異なる赤外線レンズを用いた計測を実施し、それらがき裂の検出性に及ぼす影響について検討した。赤外線計測においては、温度分解能 $0.025^{\circ}C$ 、波長域 $7.5 \sim 9.1 \mu m$ の MCT アレイセンサ搭載の赤外線カメラを用いた。繰返し荷重による測定面の応力変動に伴う温度変動を、撮影速度 $113 Hz$ で 2000 フレームの赤外線画像として計測した。得られた時系列赤外線データの 200 フレーム分のデータに対して自己相関ロックイン処理を施し、測定面における相対応力分布を求めた。

赤外線計測面の状態としては、現場における計測環境を考慮して、赤外線の放射率向上を目的として通常施される疑似黒体化塗料は用いず、無塗装の場合のプライマー素地および防食塗装が施された表面、それぞれそのままの状態

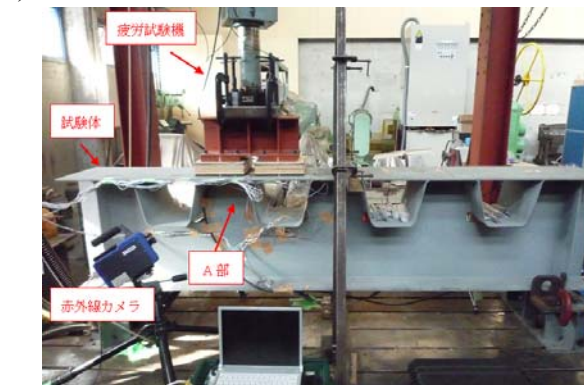


図4.28 赤外線計測の状況

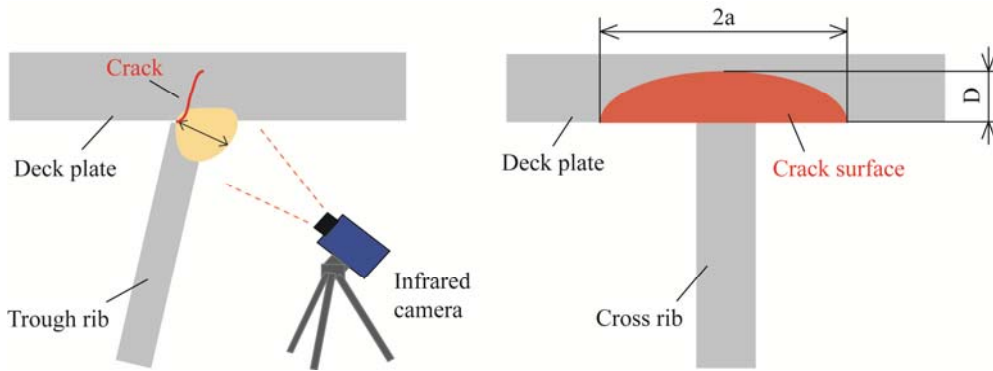
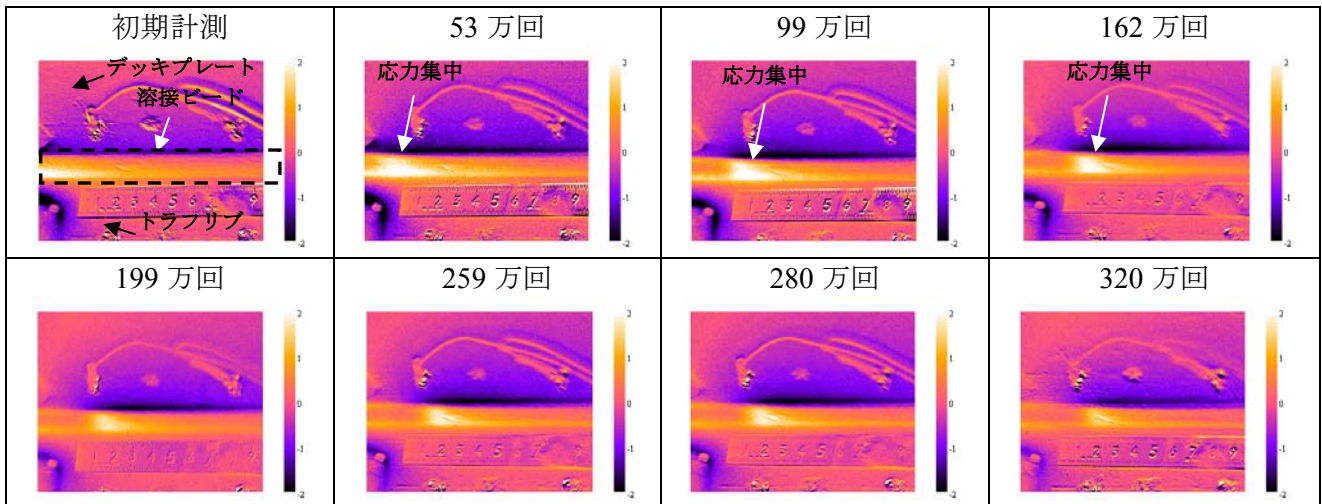


図4.29 デッキ貫通き裂と計測面の位置関係

表 4.7 無塗装試験体における荷重回数毎のロックイン処理結果
($P_{max}=-5kN$, $P_{min}=-50kN$, 荷重周波数 3Hz)



(3) 無塗装試験体に対する実験結果

無塗装試験体における荷重回数毎のロックイン処理結果を表4.7に示す. 荷重は $P_{max}=-5kN$, $P_{min}=-50kN$, 荷重周波数は 3Hz とした. 表 4.7 に示したロックイン画像からもわかるように, 繰り返し荷重 53 万回の時点で, 溶接部上において相対応力分布の変化が検出された. さらに荷重回数の増加に伴い, 応力集中部の位置はき裂の進展方向 (半楕円き裂長手方向) に移動した.

本計測と並行して実施した電場指紋照合法 (FSM) によるき裂検出, およびひずみゲージによるひずみ計測においても, ほぼ同じ荷重回数の時にき裂発生に伴う反応を検知しており, 繰り返し荷重 53 万回の時点でき裂が発生したことに間違い無く, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により, デッキ貫通疲労き裂の検出が可能であることが実証された.

(4) 軽防食試験体に対する実験結果

軽防食塗装試験体においても, A部の計測を実施した. 疲労試験では, デッキ上面にき裂が現れ, さらにそのき裂が進展するのを確認できる段階に至るまで, 計299万回の荷重を行った. 赤外線計測結果を, 表4.8に示す. 表4.8に示した自己相関ロックイン画像からもわかるように, 繰り返し荷重27万回の時点で, 相対応力分布の変化が検出された. この場合にも, 本計測と並行して実施したFSMおよびひずみゲージによっても, ほぼ同じ荷重回数の時にき裂発生に伴う反応を検知した. このことから, 試験対象に軽防食塗装が施されている場合においても, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により, デッキ貫通疲労き裂の検出が可能であることが実証された. また, 表からわかるように, 検出された応力集中部の位置は, 荷重回数の増加に伴って横リブから遠ざかる方向に移動していることがわかる. この場合にも, 繰

り返し荷重負荷により疲労き裂が進展し、測定面に最も近い応力集中部であるき裂前縁部が輪荷重の載荷回数に応じて移動していることがわかる。

(5) 重防食試験体に対する実験結果

重防食塗装試験体における載荷回数毎のロックイン処理結果を表4.9に示す。無塗装試験体の場合と同様、載荷荷重を $P_{max}=-5kN$ 、 $P_{min}=-50kN$ 、荷重周波数を3Hzとした。FSMおよびひずみ計測では、60～70万回でき裂発生に伴う計測値の変化を検出していた。しかし、表4.9に示した自己相関ロックイン画像によれば、初期状態から60～70万回、さらには100万回の手前まで、き裂検出に伴うロックイン処理値の変化が現れていないことが分かる。き裂発生前から低いロックイン処理値となっていることから、き裂発生点である横リブとの交差部で塗膜が厚くなっていた可能性がある。このようなき裂検出の誤判定を防ぐためには、赤外線画像とロックイン処理画像を比較し、測定面の各領域での熱伝導特性の違いを評価する必要がある。載荷回数103万回を超えると、き裂発生による応力変化が検知できており、重防食塗装下にお

いても、き裂の検出が可能であることが分かった。

重防食塗装試験体において、荷重周波数を変化させたときのロックイン処理結果を表4.10に示す。載荷荷重は $P_{max}=-5kN$ 、 $P_{min}=-23kN$ 、荷重周波数は1Hz、5Hz、10Hzおよび15Hzとした。表より、荷重周波数が大きくなるに伴い、応力集中部が不鮮明になり、き裂の検出が困難となっている。しかしながら、荷重周波数15Hzの場合にもき裂発生による応力集中を検知できたことは、高速車両の走行時に想定される卓越周波数が比較的高い応力変動にも本手法が対応できることを示しており、本手法の実用性が明らかになった。

軽防食塗装試験体および重防食塗装試験体に対して、赤外線強度振幅と載荷周波数の関係を求めた結果を図4.30に示す。図よりわかるように、軽防食塗装の場合にも、重防食塗装の場合にも、載荷周波数が高くなると自己相関ロックイン処理で得られる赤外線強度振幅の値が小さくなっており、このことがき裂の検出性低下に影響していることがわかる。

表 4.8 軽防食試験体における載荷回数毎のロックイン処理結果

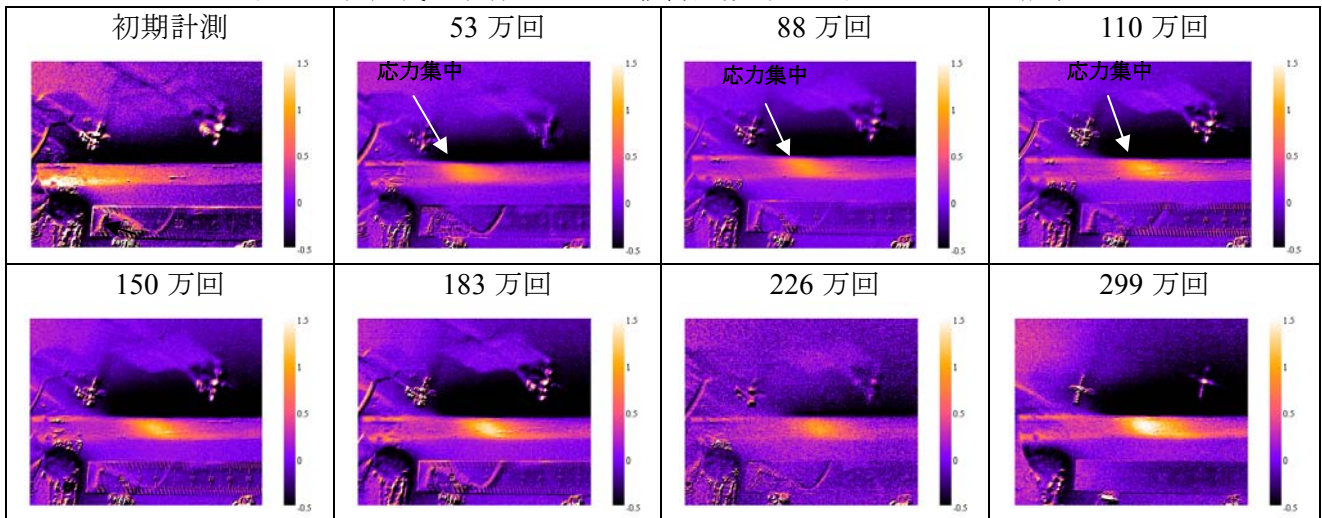


表 4.9 重防食塗装試験体における載荷回数毎のロックイン処理結果
($P_{max}=-5kN$ 、 $P_{min}=-50kN$ 、荷重周波数 3Hz)

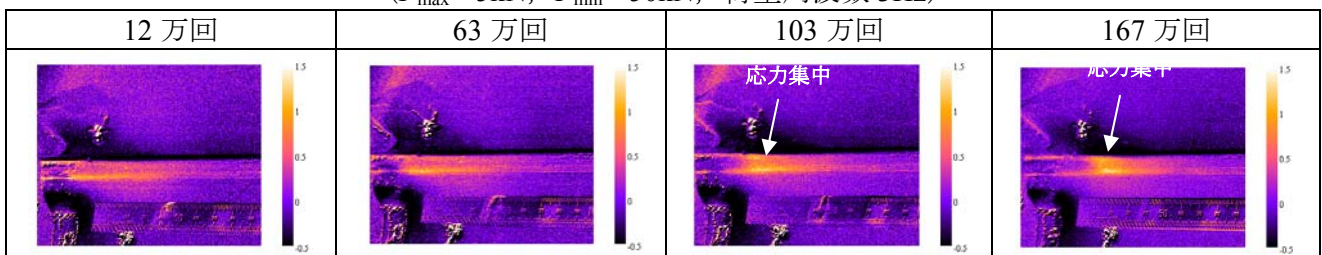
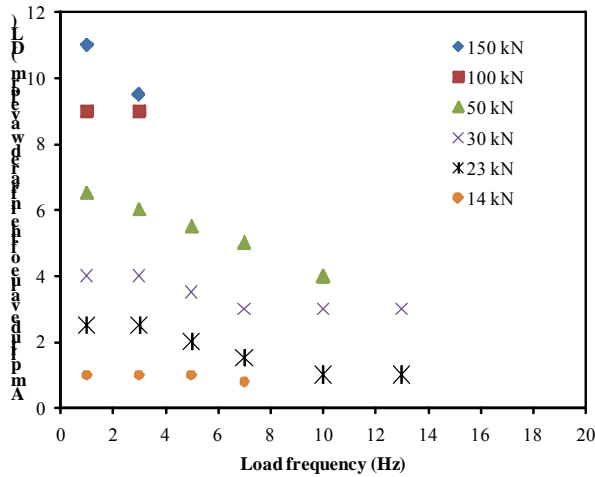
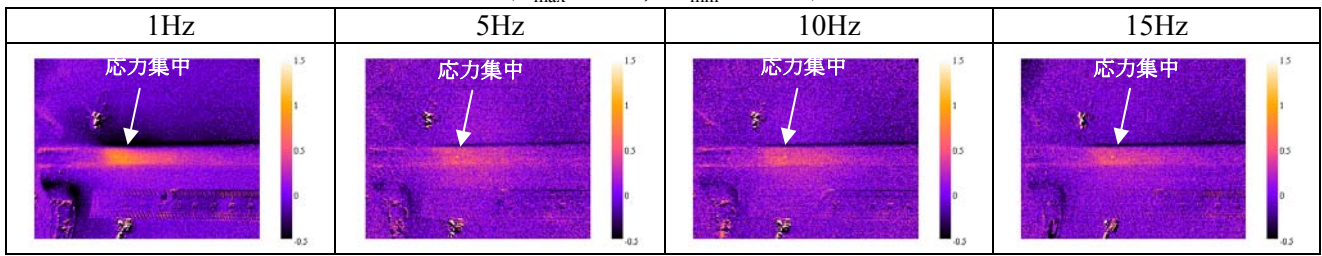
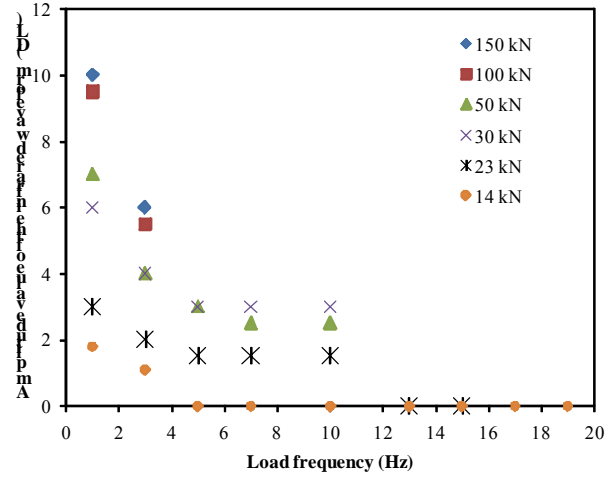


表 4.10 重防食塗装試験体における荷重周波数毎のロックイン処理結果
($P_{max}=-5kN$, $P_{min}=-23kN$)



(a) 軽防食塗装試験体



(b) 重防食塗装試験体

図4.30 赤外線強度振幅と載荷速度（周波数）の関係

(6) 計測距離および計測装置の空間分解能がき裂検出性に及ぼす影響の検討

前項において示した、無塗装、軽防食塗装および重防食塗装の3体の試験体において、き裂が十分に進展したと思われる疲労試験最終時に、計測距離および拡大率の異なるレンズを用いた計測を実施し、計測距離および計測装置の空間分解能がき裂検出性に及ぼす影響を検討した。

試験装置の概要を図4.31に示す。様々なものが置かれた実験室において、試験体から赤外線カメラまでの所定の計測距離を確保することは困難であった。このため、遠隔からの計測においては、図に示したように反射鏡を用いることにより、所定の計測距離を確保できるようにした。なお、このような反射鏡を用いた計測は、赤外線カメラを設置する空間がない現場においても有用である。

無塗装試験体に対して得られた遠隔計測結果を表 4.11 に示す。表中に示した自己相関ロックイン赤外線画像において、反射鏡を用いた遠隔計測結果では、視野が左右反転していることに注意が必要である。

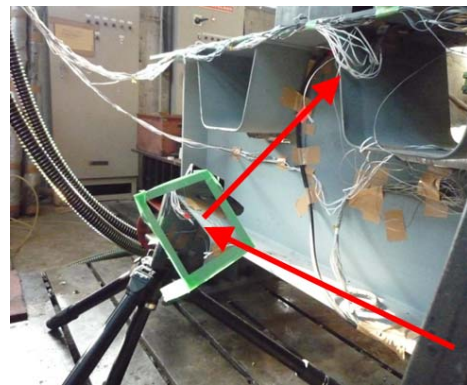


図4.31 反射鏡による計測

表に示した計測結果より、遠隔からの計測あるいは望遠レンズの焦点距離を小さくすることによる空間分解能の悪化により、き裂検出性が悪化していることがわかる。しかしながら、空間分解能が悪くなっても、負荷レベルが大きければ、応力変化部位を検知可能であり、遠隔からのき裂検出は可能であると言える。

本計測結果から判断すれば、最も検出が困難な重防食塗装が施された場合においても、計測距離12m、100mmレンズ（4.0mm/pixel）による計測までは、き裂検出が可能であると判断できる。

表 4.11 無塗装試験体における遠隔計測結果（载荷速度 3Hz）

近距離 50mm lens (0.37 mm/pixel)	計測距離 5m 200mm lens (0.51 mm/pixel)	計測距離 12m 200mm lens (2.0 mm/pixel)
計測距離 12m 100mm lens (4.0 mm/pixel)	計測距離 12m 50mm lens (8.0 mm/pixel)	計測距離 12m 25mm lens (16.0 mm/pixel)

4.5 デッキ貫通型疲労き裂の検出（2）

デッキ貫通き裂に対する自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用性を検証するため、鋼床版を模した試験体を用いた輪荷重走行疲労試験中にき裂検出実験を実施した。

本実験に用いた鋼床版試験体の概要を図4.32に示す。鋼床版試験体の材質はSM400Aである。デッキプレート（厚さは12mm）であり、平面寸法は2810mm×3880mmである。トラフリブは、U320mm（幅）×240mm（高さ）×6mm（板厚）である。また、デッキプレートとトラフリブ間の溶接溶け込み量は75%であり、これは実橋梁の鋼床版で規定されている溶け込み量と同等である。これらの仕様は通常の道路鋼床版と同じである。

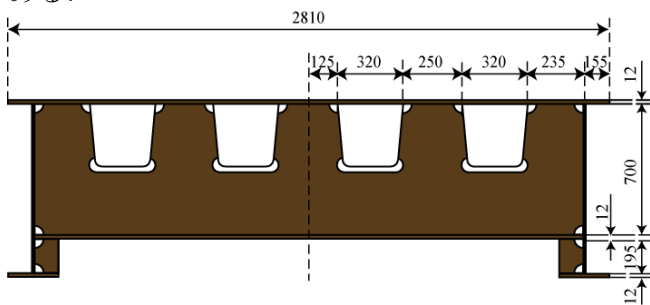


図4.32 鋼床版試験体

本実験は、道路橋床板を走行する自動車の輪荷重載荷を模擬した輪荷重走行試験機により

行った。試験機の写真および概要図を図4.33に示す。この試験機は、油圧ジャッキにより一定の荷重載荷を持続したまま、毎分30往復の移動速度で床版中央から橋軸方向に±1000mmの範囲を繰返し往復運動することができる機構となっている。

鋼床版試験体と各測定箇所（No.1からNo.3）の位置および輪荷重の載荷位置の関係を図4.34に示す。測定箇所 No.1 から No.3 を測定する際の荷重は60kN、80kN、100kN および 120kN とした。高速道路における法定荷重は120kNである。ゆえに120kN以下の荷重でき裂検出が可能であれば、実構造物においても十分にき裂検出が可能であるといえる。

輪荷重は鋼床版上を往復運動する。輪荷重走行試験機の輪荷重部には鉄輪が用いられており、このまま試験体に載荷すると鉄輪接地部分は線状となるため線荷重となる。これを自動車のタイヤと同様の面荷重とするため、試験体上面に鉄輪と同じ幅の載荷ブロックを敷き、その上から鉄輪で輪荷重負荷を与えた。

測定に用いた赤外線サーモグラフィはCedip社製 Titanium530L（計測波長域7.7μm～9.3μm）である。赤外線サーモグラフィのフレームレートは113Hzとし、一回の撮影で2000フレーム連続撮影を行った。測定の際は、赤外線放射率を向上させるため、検査面に擬似黒体化塗料すな

わちつや消し黒色塗料を塗布して撮影を行った。

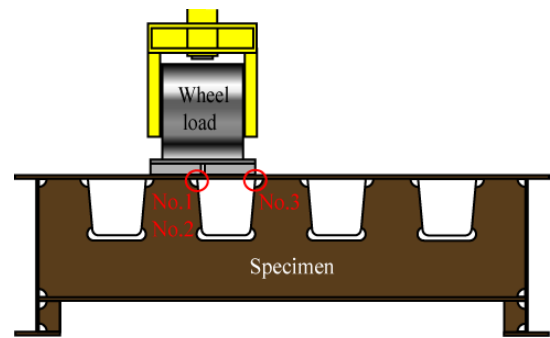


図4.34 輪荷重載荷位置

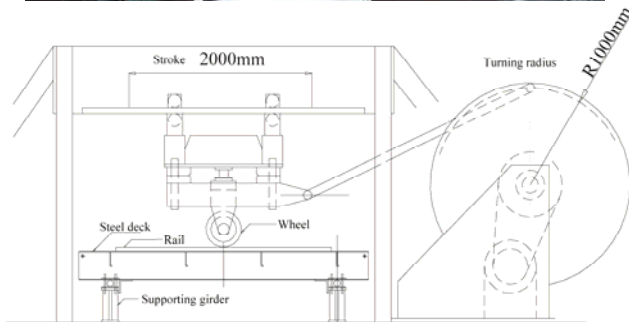


図4.33 輪荷重試験装置

図4.34に示した測定箇所No.1に対する実験結果を示す。負荷荷重を60kNおよび120kNとして測定を行った際に得られた時系列赤外線データに対して自己相関ロックイン処理を施した結果を、図4.35および図4.36にそれぞれ示す。

自己相関ロックイン処理に用いる参照信号は、各画像中にRef. と示した点において取得した。いずれの負荷荷重においても、載荷開始直後に測定された時系列赤外線データに対する自己相関ロックイン処理結果においてデッキプレート、トラフリブおよび横リブ交差部に応力集中部が現れていることが確認できる。載荷回数を重ねるにつれ、その応力集中部が横リブから遠ざかる方向へと移動していく様子が確認された。また、いずれの載荷回数においても、負荷荷重が大きいほど、応力集中部がより鮮明に現れているといえる。これは前節で示したように、載荷荷重が増加することにより、信号レベルが大きくなったこと、および赤外線サーモグラフィ固有のノイズは載荷荷重に因らないことから、結果的にS/N比が良くなり、ロックイン処理の精度が向上したためであると考えられる。

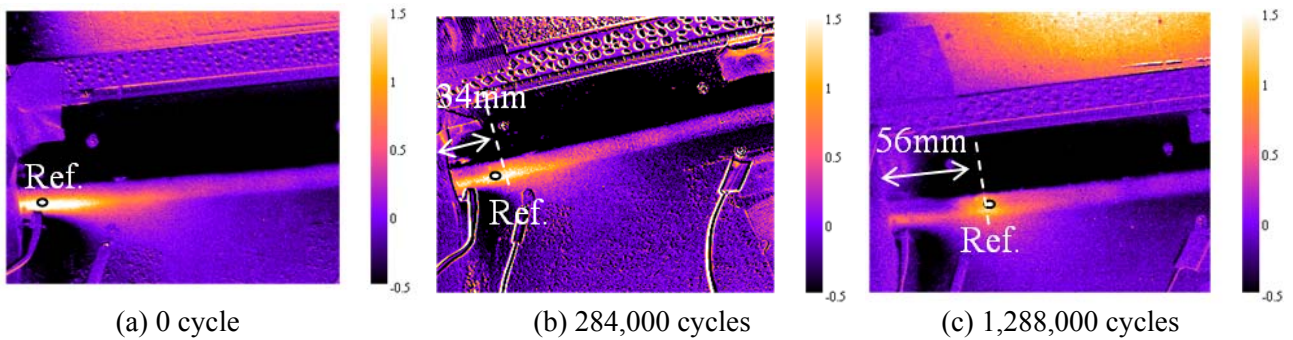


図4.35 自己相関ロックイン処理結果（測定箇所No.1，載荷荷重60kN）

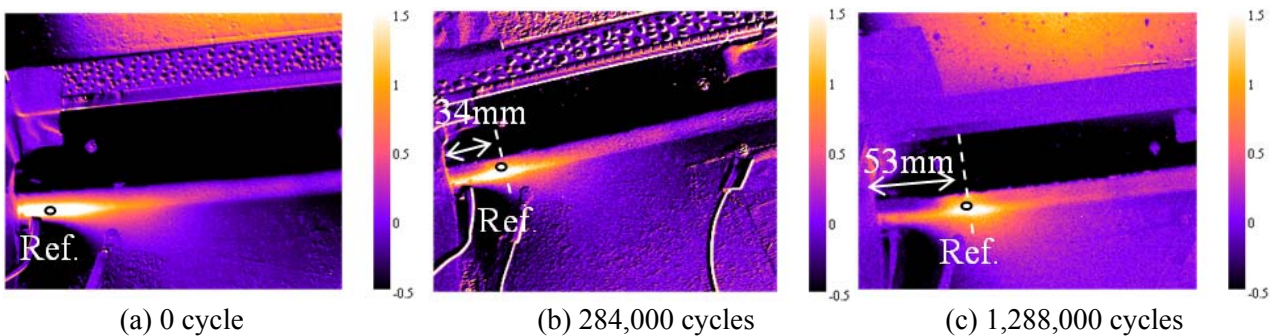


図4.36 自己相関ロックイン処理結果（測定箇所No.1，載荷荷重120kN）

表4.12 自己相関ロックインサーモグラフィにより測定された応力集中部の位置

Number of load cycles	Distance from cross rib to stress concentration zone obtained by the self-reference lock-in thermography [mm]			
	60[kN]	80[kN]	100[kN]	120[kN]
0				
284,000	34	32	34	34
838,000	56	52	50	50
1,171,000	56	55	56	56
1,288,000	56	56	55	53

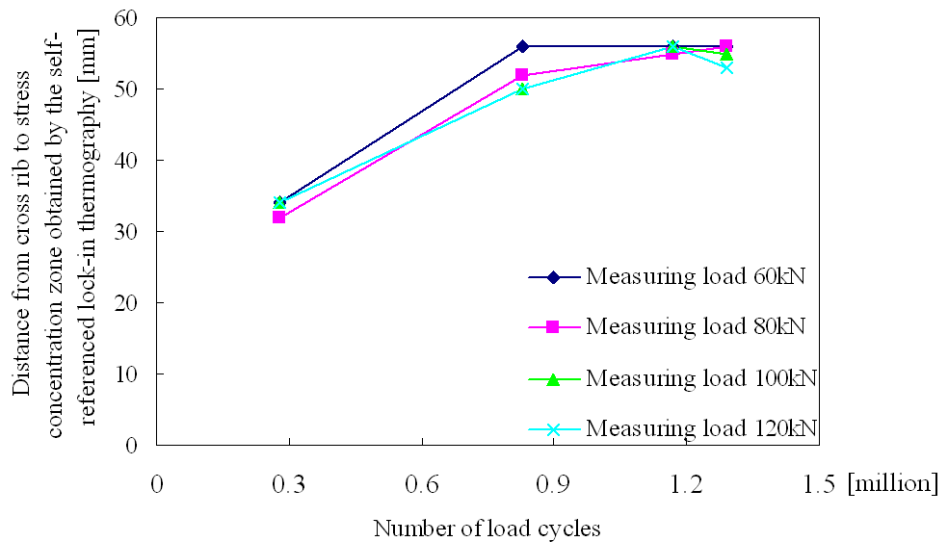


図4.37 自己相関ロックインサーモグラフィにより測定された応力集中部の位置

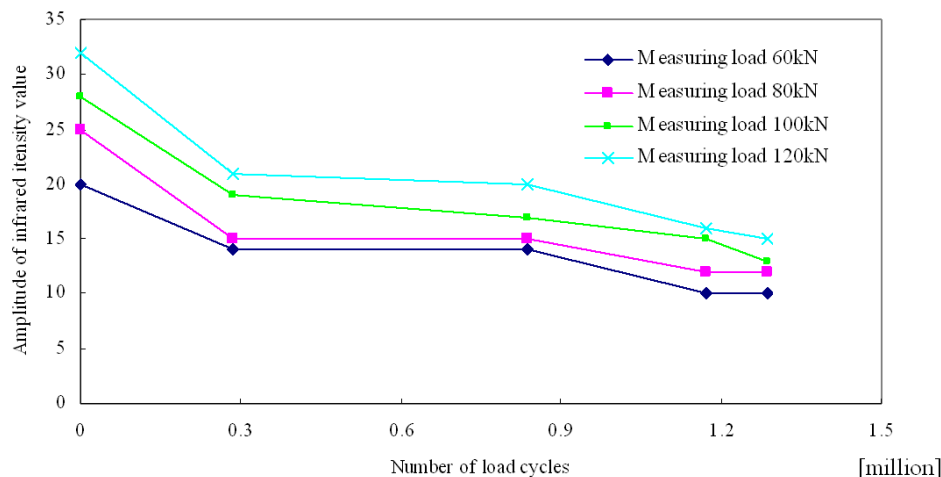


図4.38 き裂先端の赤外線強度値の変化

荷重載荷回数に対する横リブ中心から応力集中部までの距離の変化を表4.12に示す。応力集中部の位置としては、図4.35および図4.36に示したように、検査面表面に貼り付けられたスケールを用いて、横リブ中心から応力集中部の中心までの距離を読み取った。載荷回数開始直後は、応力集中部が横リブに隠れてしまうため、その位置を特定することができなかった。

荷重条件の違いによっては、横リブ中心からの応力集中部の距離に1mm～4mm程度の誤差

が見られる。この理由としては、応力集中部の中心位置の読み取り誤差の影響が大きいと考えられる。負荷荷重によって応力集中部の位置を読み取る際に多少の誤差は生じるものの、いずれの負荷荷重から得られた結果においても、応力集中部の位置の変動の傾向はほぼ同じであった。ゆえに、応力集中部の位置を求める際、荷重の大きさはそれほど影響を及ぼさないと考えられる。

表4.12をグラフ化したものを図4.37に示す。

これらより、60kN、80kN、100kN、120kNいずれの荷重条件においても荷重載荷回数が117万回にいたるまでは応力集中部がデッキプレート、トラフリブ溶接部に沿うように、横リブから遠ざかる方向へと移動していくのがわかる。これは加えられた輪荷重負荷により生じた疲労き裂が、輪荷重の載荷回数に応じて進展していく過程を示していると考えられる。一方、荷重載荷回数が117万回から129万回にかけては、応力集中部の位置は停滞している。一部後退しているものもあるが、き裂先端位置が後退することはあり得ないため、前述したように読み取り誤差の影響であると考えられる。応力集中部の移動がみられなかったことから、この間き裂は橋軸方向へ進展しなかったと推測される。デッキ貫通き裂の断面形状は半楕円形であると推測され、応力集中部が停滞するということは、き裂がデッキプレート表面へと進展している可能性も考えられる。

赤外線測定時の各載荷荷重における、荷重載荷回数および応力集中部での赤外線強度変動波形の振幅の関係を図4.38に示す。図4.38より、応力集中部の移動が確認された載荷回数117万回以前の赤外線強度値変動波形の振幅に対して、応力集中部の移動が確認されなかった117万回以降の赤外線強度値変動の振幅は小さくなっていることがわかる。このことから、載荷回数に伴ってき裂先端近傍に働く応力が小さくなったため、き裂は進展せず応力集中部も移動しなかった可能性があると考えられる。

4.6 まとめ

本研究課題においては、研究室レベルでの試験体に対する実験および実橋梁に対する現場試験を通じて、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂検出性に及ぼす影響因子に関する検討を行った。

初年度には、主に疲労き裂の発生・進展が報告、モニタリングされている橋梁の鋼床版を対象に、荷重車による載荷の下での実験を実施し、荷重車の走行速度や走行位置がき裂検出性に及ぼす影響について検討した。2年目には、鋼橋梁における重要な破壊形態であるデッキ貫通型疲労き裂の検出性に関する検討を、実験室レベルの輪荷重走行試験により行った。また、実橋梁を対象に遠隔計測を行い、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による遠隔からの疲労き裂検出の可能性を証明した。さらに、遠隔計測時のき裂検出性を向上させる方法として、位置補正による振動除去手法に関しても

検討を行った。最終年度においては、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔検出法の実用化を行うための基礎検討の最終段階として、同手法による疲労き裂検出性に影響を及ぼす諸因子に関してより詳細な検討を加えることにより、同手法による疲労き裂検出限界の明確化を行った。鋼床版を模擬した要素試験体を用いて、デッキ貫通き裂検出に関する実験的検討を行った。溶接部の裏面から発生する半楕円き裂のき裂前縁における応力の集中をき裂開口面の裏側の計測面における熱弾性温度変動により検出できることを証明し、さらに計測面に施された防食塗装がき裂検出性に及ぼす影響の検討、さらには計測距離および空間分解能がき裂検出性に及ぼす影響の検討を行った。さらに、実橋梁の鋼床版に対する現場実験において、疲労き裂検出性に影響を及ぼす諸因子の詳細な検討を行い、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂検出限界を検討した。車両重量、車両速度および防食塗装膜の有無がき裂検出性に与える影響を検討した。

本研究の結果、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔検出において、同法が有する以下の優位性を確認した。

- (1) 疲労き裂の発生・進展が問題となる道路鋼床版において通行する車両の大多数を占めていると考えられる中型以上の車両による載荷により引き起こされるき裂先端応力場変動に伴う熱弾性温度変動の検出により、疲労き裂を検出できる。
- (2) 計測面にき裂が開口する溶接ビード貫通き裂はもとより、溶接ビードの裏面からデッキプレートに至るデッキ貫通き裂の検出が可能である。
- (3) 防食塗装の下で発生・進展する疲労き裂に対しても、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法は検出能力を有している。
- (4) 反射防止のつや消し黒色塗装なしの状態でも、き裂先端付近の熱弾性温度変動の局所的増大を検出でき、これをもとにき裂の検出が可能である。
- (5) 被測定物と赤外線カメラの間の距離が長くなっても、反射鏡を使った測定経路でも、き裂の検出が可能である。

以上の検討結果より、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔検出法は、道路構造物の維持管理手法として確立実用化する価値が高いと結論づけられる。

第5章 電場指紋照合法による鋼床版の疲労き裂の検出手法

5.1 はじめに

近年、橋梁の高経年化、通行車両の重量化および交通量の増加に伴い、橋梁部材の損傷事例が数多く報告されている^{5.1)}。

鋼床版、中でも、Uリブを用いた床版に注目すれば、図5.1に示す種々の箇所において疲労き裂の発生が確認されている。これらのうち、デッキプレートとUリブの溶接ルート部(図5.1①)から発生、デッキプレート板厚方向に進展するき裂(図5.2)は、床版の剛性低下、路面陥没による事故を誘発する原因となるため、この種のき裂の発生を早期に検出すること

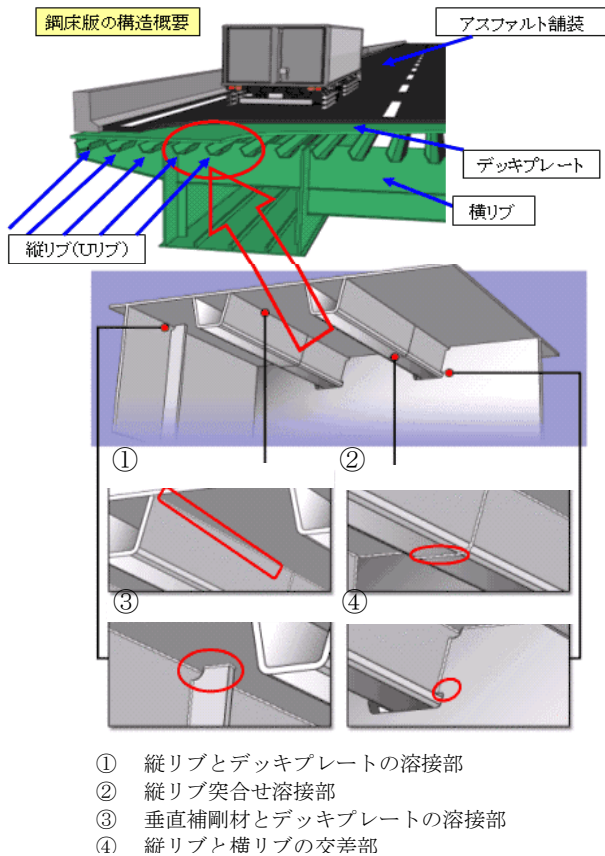


図 5.1 Uリブを有する鋼床版における疲労き裂発生箇所^{5.2)}

は重要である。

ところが、この種のき裂はUリブの内側に発生するため、床版下面からは目視では検出できない。き裂がデッキプレートを貫通してはじめて、床版上面からの検出が可能となるが、この場合、舗装を取り除いた上での点検が必要となる。このため、Uリブの内側に発生し、デッキプレート板厚方向に進展する疲労き裂が高精度に検出できる手法の確立が強く望まれている。

このような背景のもと、鋼床版に生じる疲労き裂の検知、進展のモニタリングに対し、電位差法を応用した非破壊検査手法である電場指紋照合法(FSM)の適用に関する研究^{5.3)}がなされてきている。大阪大学においても本研究で先行して実施された研究において本手法は優れた実績を残している^{5.4)}ことから、本研究ではFSMの高精度化、効率化を目的とした研究を実施することとした。

5.2 電場指紋照合法

(Field Signature Method; FSM)

電場指紋照合法は電位差法の原理を用いて鋼部材の腐食や摩耗に伴う減肉を検査するために開発された検査手法である。通常の電位差法では部材表面のき裂を検出することを目的として使用されるが、FSMでは表面だけでなく部材内部や裏面に存在する損傷を検出することを目的としている手法である。特に、検査対象物の表面にセンシングピンをマトリ

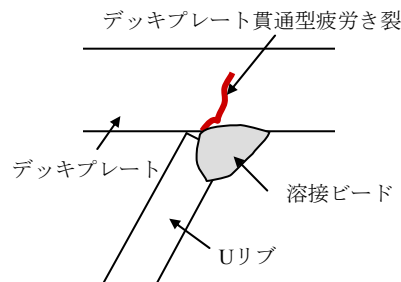


図 5.2 デッキプレート貫通型疲労き裂

ックス配置することにより、センシングピンで作られたマトリックス内に発生する損傷を検出することができ、さらにはPCと連携させることにより電位差の測定結果を一括処理できるという特徴も有している手法である。

FSM ではモニタリングエリア内に疲労によるき裂が発生・進展するとセンシングピン間の電位差に変化が生じ、この変化から亀裂の発生および進展を知ることになる。ここで、センシングピン間に生じる電位差の変動は非常に微弱であるため、温度や湿度変化による影響を受ける。これを補正するためにFSM では照合対（対象部材とは別の鋼板に設置したセンシングピンの対またはモニタリング個所から十分に離れた遠方（電極付近）に設置したセンシングピンの対）を設け、照合対における電位差との比較を行う。

FSM で得られる電位差の変動を電場指紋指数（FC 値）に変換して表現することにより、疲労亀裂発生・進展の有無の判断に用いる。測定時間 i におけるセンシングピン間の電場指紋係数 FC 値は次の式により与えられる。

$$FC \text{ (ppt)} = (Bs/As \times Ai/Bi - 1) \times 1000 \quad (5.1)$$

ここで、As：モニタリング開始時のセンシングピン間の電位差

Bs：モニタリング開始時の照合対の電位差

Ai：時間 i におけるセンシングピン間の電位差

Bi：時間 i における照合対の電位差

本研究業務では直流パルス電流の印加や電位差測定のため、電極（直径6mm）およびセンシングピン（直径3mm）をスタッド溶接により取り付けている。実構造物への適用を考えた場合、スタッド溶接を施工する時に塗装が障害になることが考えられるが、溶接をはがすことなくスタッド溶接等で電極やセンシングピンを取り付けることができれば塗装を除去するなどの手順が不要となる可能性がある。

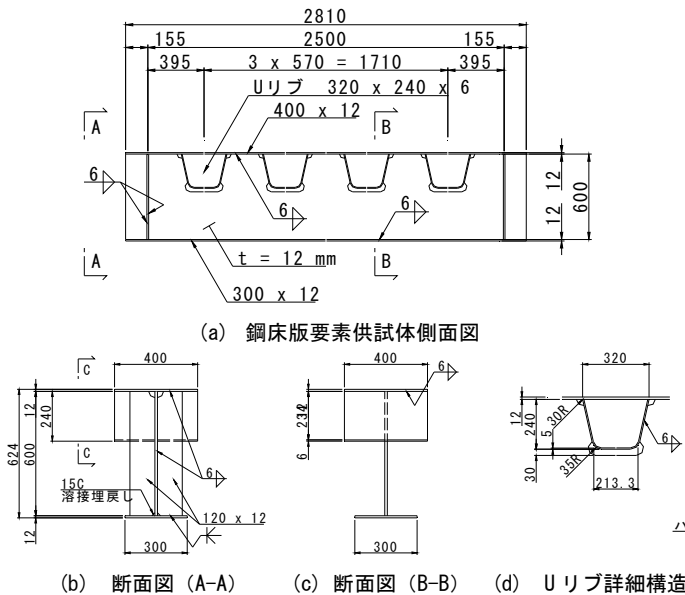


図 5.3 鋼床版要素供試体

5.3 試験体

本研究業務では、一部の研究課題に対して要素モデル供試体を採用し、研究を実施した。この要素モデル供試体は鋼床版供試体のうちの一部を取り出した形状を持たせている（図5.3）。この供試体の長さは2810mm、支点間隔2500mm、橋軸方向の長さであるデッキプレート幅は400mmである。デッキプレートには厚さ12mmのSM400A材を用いている。Uリブの寸法は320×240×6とし、Uリブ間隔は570mmとしている。

本研究業務において実験に使用した鋼床版供試体の形状を図5.4、5.5に示す。この供試体は幅2810mm、長さ3880mmの平面形状を有し、全高は953mmである。使用鋼材はSM400Aである。デッキプレート厚は12mmであり、主桁間隔は2500mmである。デッキプレートの下面には断面形状320mm×240mm×6mmのUリブを4本配置しており、Uリブの配置間隔は570mm（＝Uリブウェブ溶接間隔約150mm）に設定されている。この供試体のUリブの溶接に際しては溶接の溶け込み量を20%、75%以上の2通りに設定している。（この管理値は床版ごとに決定している。）本研究業務において供試体に与えられた境界条件は単純支持である。

以上の2種類の供試体の内、鋼床版要素供試体は200kNサーボパルサー、鋼床版供試体は輪荷重走行試験機を用いてデッキプレートとUリブの間の溶接部から疲労亀裂を発生させ、その発生・進展状況をFSMにより検出することにより、より高精度・高効

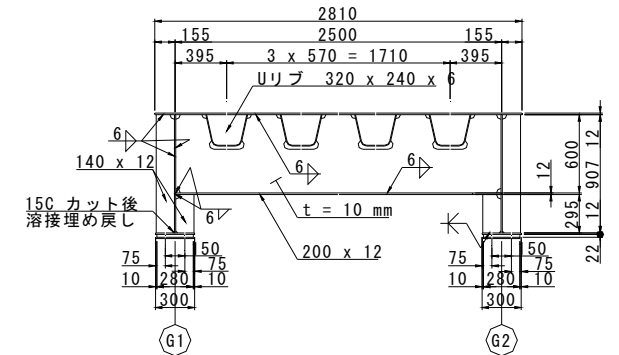
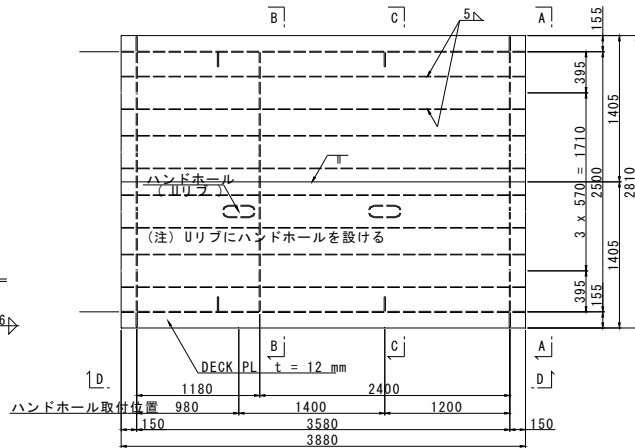
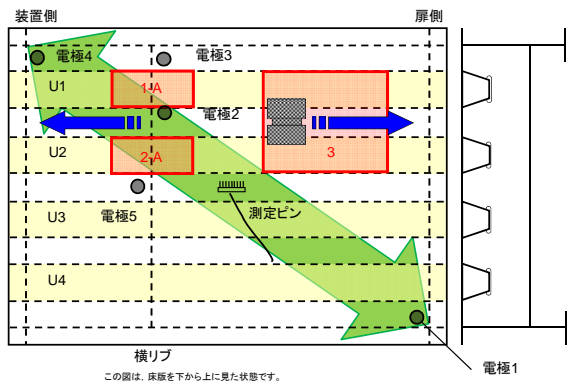


図 5.4 鋼床版供試体断面図



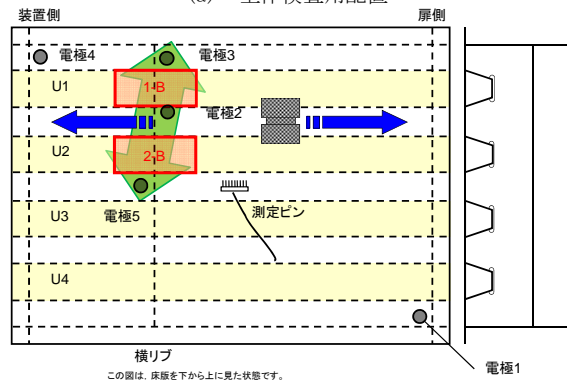
2 - DECK PL 1405 x 12 x 3880 (SM400A)
4 - Uリブ PL 320 x 240 x 6 x 3880 (SM400A)

図 5.5 鋼床版供試体平面図



この図は、床版を下から上に見た状態です。

(a) 全体検査用配置



この図は、床版を下から上に見た状態です。

(b) 局所検査用配置

図 5.6 電極配置の違い (試験体 2, 走行位置 1,2)

率の計測手法を見出すことを目的とした研究を実施した。

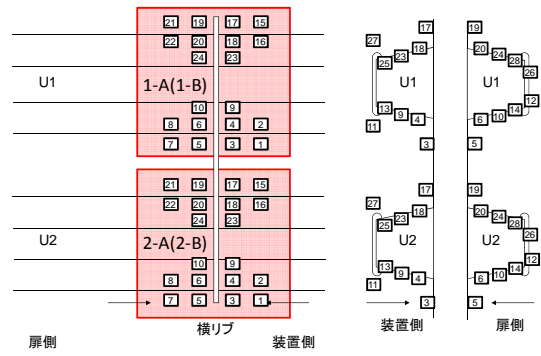
5.4 実験結果

(1) 鋼床版供試体を用いたFSM計測実験

従来、電場指紋照合法では対象物に設置する電極 (ピン) の数を測定精度の低下を招かない範囲で削減することにより測定の対象範囲を拡大し、効率化を図ってきた。これに対し、本研究業務では鋼床版に発生する疲労亀裂の発生部位や進展方向、進展速度等のFSMを活用することにより得られる情報の質を保ちつつ、より効率的な測定を実現するための手法について検討を行っている。本年度の業務においては、ピンの配置のみに着目するのではなく、パルス電流を印加する位置を変更することによる効率化が実現できるのか、という点についてその実現性を検討することにした。

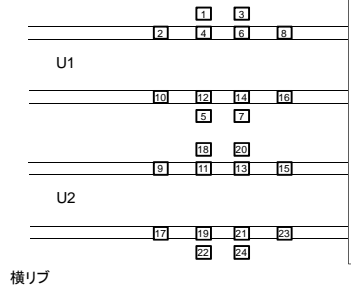
FSM 測定において、電極ピンのペアをどのように設定するかは測定精度や取得情報の性格に大きな影響を与える。しかしながら、詳細な情報を獲得することにこだわりすぎると単位面積当たりの電極ピンの数量が増えてしまい、1 回の測定でデータを取得できる範囲が限定されてしまう傾向にある。このような傾向は FSM の長所である電極ピンの離散配置による広範囲にわたる測定を妨げる要因となる。そこで、本研究業務においては次の 2 種類の電極配置を組み合わせることによる効率化に関して検討した。

- ① 全体状況を把握するための電極配置 (図 5.6(a))
- ② 局所状況を監視するための電極配置 (図 5.6(b))



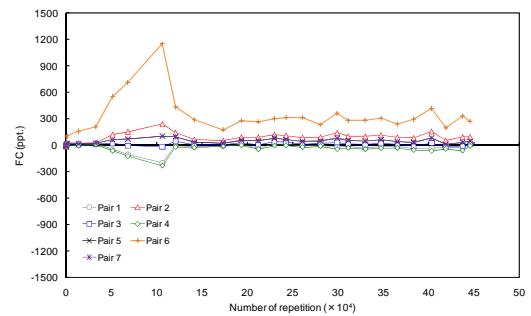
この図は、床版を下から上に見た状態です。

図 5.7 測定ピンの配置 (エリア 1、エリア 2)

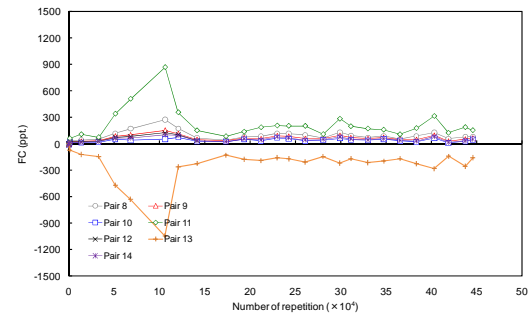


この図は、床版を下から上に見た状態です。

図 5.8 測定ピンの配置 (エリア 3)



(a) U1 左側

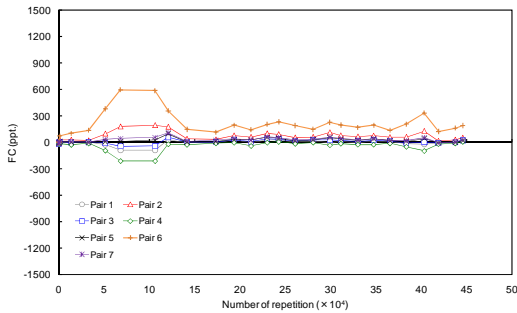


(b) U1 右側

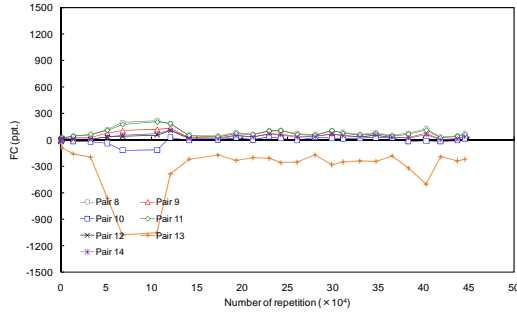
図 5.9 全体検査用配置測定結果 (試験体 2, 測定エリア 1-A)

この検討ではパルス電流印加電極の配置と測定ピンでの計測結果の違いについて確認することが主な目的であることから、図 5.6 に示されたモニタリング区画のうち、より電流の流れの影響を受けるエリア (図 5.6 中のエリア 1-A, 1-B, 2-A, 2-B) にあたる部分で計測された結果を主に確認することにした。

これらの結果を確認すると、全体検査用配置で測定された値では状態の変化を示す測定値の変動は小さくなる傾向にある (図 5.9, 図 5.10 参照)。このよ



(a) U1 左側



(b) U1 右側

図 5.10 全体検査用配置測定結果
(試験体 2, 測定エリア 2-A)

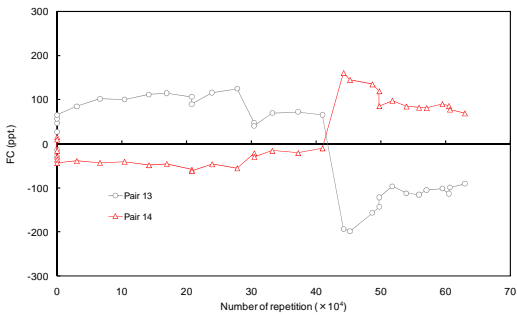


図 5.11 全体検査用配置測定結果
(試験体 2, 測定エリア 2-A)

うな状況でも比較的データの乱れが確認される部分もあった(図 5.11)。このような状況から全体的に検査をする場合には測定値を評価するためのレンジの取り方などデータの処理方法に工夫が必要である可能性を示唆している。

次に、鋼床版において疲労損傷の早期発生が懸念される部位に強い電流を印加し、亀裂発生による電位の変動を際立たせるようにして測定を行った結果の一例を図 5.12 に示す。

局所的にパルス電流を印加した場合の測定結果をみると、全体的に電流を印加した時よりも亀裂の発生によると思われる測定値の変動が明確になっている部分もあることがわかった。特に、全体的な計測では異常を見出すことがきわめて困難であった部分における測定値では一部のデータに明確な変動が見出すことができている。この手法による精度の向上はできていると判断できる。また、試験結果においてもより単調な増減の傾向を明確に示すようになっており、データの処理方法さえ工夫すれば亀裂の発生時期も検出可能であると思われる、良好な測定結果を得ることができている。

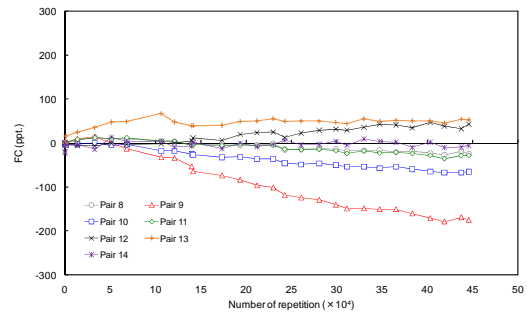


図 5.12 局所検査用配置測定結果
(測定エリア 2-B)

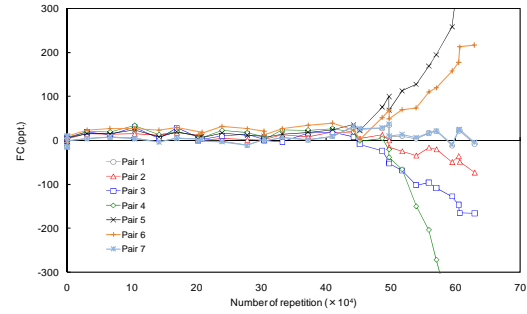


図 5.12 局所検査用配置測定結果
(測定エリア 2-B)

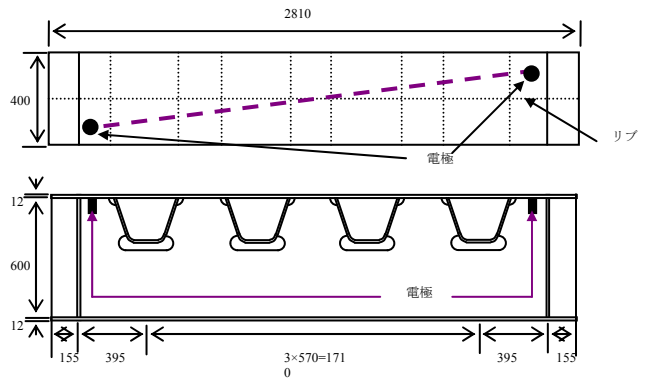


図 5.13 電極の位置

このような結果は実験開始前からある程度予想できる範囲内の事象ではあるが、これをもって電流の局所的な印加による計測をするということになると、電極数や電流の印加回数が大幅に増加することとなり、測定の効率化という命題の解決に反する結果となってしまふ。このことから、今後の研究では、全体的な電流の印加をベースとしつつ、精度を向上させるための方策について検討を行うべきであると考えられる。

(2) 鋼床版要素供試体を用いたFSM計測実験

電場指紋照合法によるモニタリング効率を向上させる(測定対象範囲を拡大させる)ため、センシングピンの離散配置を行っても検出精度を低下させない技術の確立を目的とした研究開発を実施する。

パルス電流を印加する電極の位置を図 5.13 に示す。4つのUリブを含む供試体全幅をモニタリングエリアとするよう電極を取付けた。電極の間隔は約2500mmである。センシングピンの配置および Pair

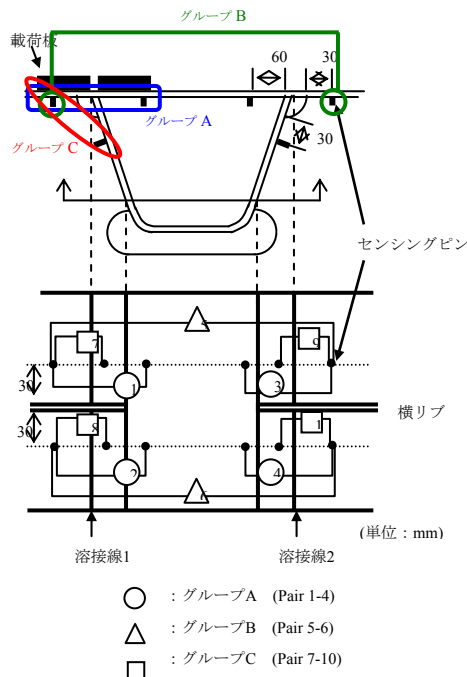


図5.14 センシングピンの配置およびPairの構成

の構成を図 5.14 に示す. 構成した Pair は以下の 3 つのグループに分類する.

グループ A は, U リブの内側と外側のデッキプレート下面に設置したピンで構成する Pair(1-4)である. 実構造物では U リブ内側にピンを設置することはできないが, この Pair の構成によりき裂を高精度に検出できるため, 基準となる Pair として設定した.

これに対し, グループ B および C は実構造物において適用可能な Pair 構成である.

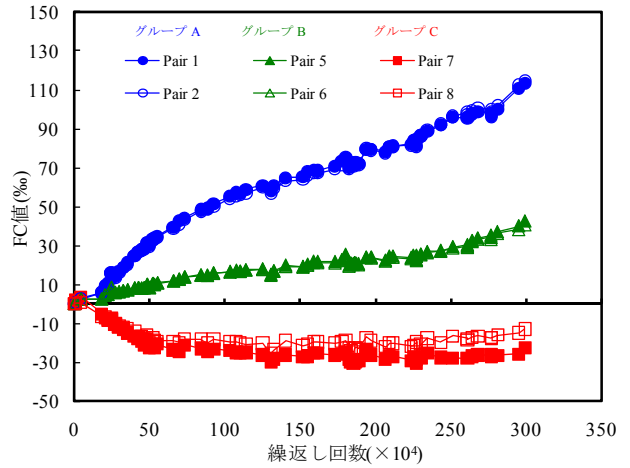
グループ B は, デッキプレート下面に設置したピンで U リブを跨ぐように構成する Pair(5, 6)である. この Pair 構成では, センシングピン間隔が大きい(約 400mm), 高精度にき裂が検出できるか否かを検証するために設定した.

グループ C は, U リブ外側のデッキプレート下面と U リブ側面に設置したピンで構成する Pair(7-10)である. この Pair 構成では, デッキ貫通き裂を確実に挟み込むことができないが, この状態でも高精度にき裂を検出できるか否かを検証するために設定した.

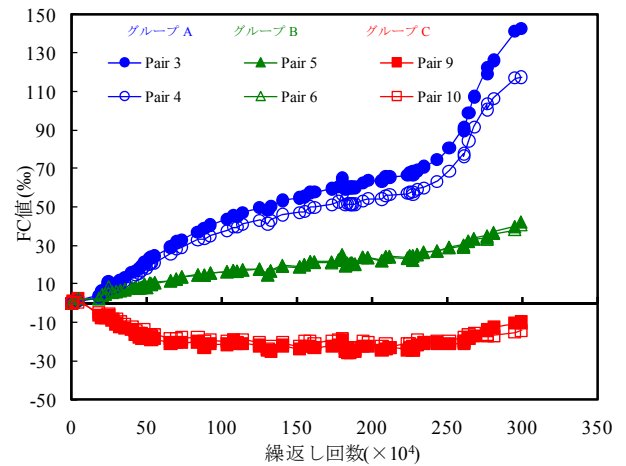
グループ A と, グループ B および C のモニタリング結果とを比較・検討することで, グループ B, C によりデッキ貫通き裂が精度良く検出できるか否かを明らかにすることとした.

実験の結果の内, 溶接線 1, 2 におけるグループ A, B および C によるモニタリング結果を図 5.15 に示す. 溶接線 1 におけるモニタリング結果(図 5.15(a))に注目すると繰返し回数約 25 万回より, 基準としたグループ A, グループ B の FC 値が増加しはじめた. その後, 試験を終了した 299 万回まで FC 値は増加し続けた.

グループ B の FC 値は基準としたグループ A よりもやや小さいが, グループ A とほぼ同じ挙動を示し



(a) 溶接線 1



(b) 溶接線 2

図 5.15 FSM 測定結果 (要素試験体)

ている. U リブを跨ぐグループ B(間隔 400mm)により, デッキ貫通き裂の発生が検知できると共に, 進展がモニタリングできることを結果は示唆している.

グループ C の FC 値は, 繰返し回数 25 万回より減少し, その後, ほぼ一定となった. き裂発生に伴う電場の変化によりグループ C の FC 値が減少したと推測されるが, グループ C によりデッキ貫通き裂が検出できるか否かについては, さらなる検討が必要である.

続いて, 溶接線 2 におけるモニタリング結果(図 5.15(b))に注目すると各グループの FC 値は, 溶接線 1 におけるモニタリング結果とほぼ同じ挙動を呈した. 溶接線 1, 2 において, ほぼ同時にき裂が発生, 進展したことが FC 値の挙動より予測できる.

目視点検により, 繰返し回数 194 万回ではじめて, 溶接線 1 のデッキプレート上面に疲労き裂を確認した. その後, 約 260 万回で溶接線 2 の上面においても疲労き裂を確認した.

以上, モニタリングエリアを床版全幅(幅 2500mm)としても, U リブを跨ぐ Pair(グループ B; 間隔 400mm)により, 精度良くき裂の発生が検知, 進展がモニタリングできることがわかった.

5.5 まとめ

本研究において実施した一連の実験的研究により得られた知見は次のとおりである。

- 1) 電場指紋照合法により鋼床版中の疲労き裂を精度よく発見する手法を検討するために実施した実験の結果によれば、パルス電流を印加する電極と損傷発生位置の関係により検出の容易さに差が出るものの、計測結果から得られるFC値の評価レンジを変化させるなどの工夫をすることにより、疲労き裂を精度よく発見できる可能性があることが確認できた。
- 2) 電場指紋照合法による疲労き裂のモニタリング効率向上のため、センシングピンの配置とき裂の検出精度に関する検討を実施した結果によれば、モニタリングエリアを床版全幅(幅2500mm)とした場合でも、Uリブを跨ぐPair(間隔400mm)により、精度良くき裂の発生が検知、進展がモニタリングできることを確認した。

参考文献

- 1)土木学会鋼構造委員会，鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集第410号，pp.25-36，1989
- 2)阪神高速道路株式会社 HP：
<http://www.hanshin-exp.co.jp/company/index.html>
- 3)金 裕哲，奥 健太郎：電場指紋照合法による疲労き裂の発生と進展の監視，溶接技術，vol.55，pp.73-78，2007
- 4)金 裕哲，麻 泰宏，奥 健太郎：FSMによる鋼床版の疲労き裂発生と進展の監視，溶接学会論文集第25巻第4号，pp.542-547，2008

第6章 まとめ

6.1 はじめに

本研究では、道路橋で用いられる主な床版のうち、鉄筋コンクリート床版と鋼床版において発生する、目視検査による確認が困難な損傷を非破壊検査により検出する為の技術を確立する為の研究を実施した。本研究で検出対象とした損傷は次の通りである。

(鉄筋コンクリート床版)

- ・上面増厚補強された床版の補強部と既存コンクリートの間に発生する水平ひび割れ
- ・鉄筋コンクリート床版の圧縮側鉄筋付近に発生する水平ひび割れ

(鋼床版：トラフリブを有する鋼床版)

- ・デッキプレートとトラフリブとの間の溶接部において溶接ビードを破断する疲労き裂
- ・デッキプレートとトラフリブとの間の溶接部のルート部からデッキプレートを破断するように進展する疲労き裂

本章ではこれらの損傷を検出する為に実施された研究で得られた知見を示す。

6.2 衝撃弾性波法に基づく RC 床版内部に生じる水平ひび割れの検出手法

RC 床版内部に発生する水平ひび割れを検出する為に衝撃弾性波法に着目して実施した一連の研究で得られた知見は次の通りである。

- 1) コンクリート版供試体に対して、衝撃弾性波法、EMH 法および超音波法を適用した結果、水平ひび割れを模擬した人工欠陥を検出できる範囲が最も大きい手法は

衝撃弾性波法である。

- 2) 衝撃弾性波法を用いればアスファルト舗装面から水平ひび割れを検出することが可能である。
- 3) 衝撃弾性波法を適用した場合の RC 床版内部での弾性波の挙動を、3次元衝撃応答解析により再現する上で必要となる解析モデルや衝撃入力 of 適切な設定方法・条件を見出した。
- 4) 衝撃応答解析により、「I：弾性波の入力方法」、「II：受信方法」および「III：周波数分析方法」の最適な組み合わせを決定するための方法を提案した。
- 5) 道路橋から切り出した RC 床版を対象に、解析結果に基づき衝撃弾性波法を適用した結果、水平ひび割れの有無やその深さを推定することが可能であった。しかも、衝撃弾性波法により推定した結果と削孔により実測した結果は、おおむね一致した。このことから、本研究で提案した「3次元衝撃応答解析を援用した衝撃弾性波法」は、道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出において、相応の適用性を有していることが明らかとなった。

6.3 弾性波トモグラフィ計測に基づく RC 床版内部の損傷評価手法

繰返し荷重の作用を受けるモデル床版に対する弾性波トモグラフィ計測および、実橋梁より切り出した床版での同計測により以下の知見が得られた。

- 1) 疲労による床版内部の損傷進展は、弾性波の低速度領域の拡大として評価可能である。
- 2) トモグラフィにより得られる弾性波速度は、励起させた弾性波周波数に依存し、高周波になるほど小規模の損傷に対応していた。
- 3) 内部の弾性波速度は側面の目視観察より判断されるひび割れ性状（劣化性状）と必ずしも一致するものではなかった。つまり、側面（切断面）から観察される水平ひび割れは、必ずしも内部にまで及んでいない場合や、反対に内部に生じていても側面に達していないひび割れの存在も示唆され、このような内部損傷の可視化に弾性波トモグラフィは有効な手法と考えられた。
- 4) アスファルト層の有無が弾性波トモグラフィ結果に与える影響を検討した結果、アスファルトがある場合でも、アスファルト表面から励起させた弾性波が底面まで到達すること、また透過した弾性波到達時間よりユニークな速度分布が得られたことから、弾性波トモグラフィにより実際の内部劣化を反映した速度性状が得られている可能性が高いことがわかった。
- 5) 削孔により床版内部性状を観察した結果、アスファルト層（と遮水層）がある場合でも、ひび割れが観察されない断面では、ほぼ全領域で高い速度構造が得られた。さらに、水平ひび割れが観察される断面においては明瞭な水平方向の低速度域は確認されないものの、水平ひび割れがない場合と比較すると、明らかに全領域の低速度が確認できた。よって、アスファルト層がある場合でも、弾性波トモグラフィにより劣化程度が推定できる可能性が確認できた。
- 6) 一対の面からの弾性波の励起やセンサ設置が不要な一方向からの表面波を利用したトモグラフィを現場から切り出した劣化床版に適用した。その結果、表面での目視から判断される劣化程度と速度構造は必ずしも一致しないことがわかった。表面波位相速度を利用した本手法は、内部の劣化状況の定性的推察は可能といえるが、定量的な事項、つまり、損傷程度やその深度までは推定することができない。一方、本手法は透過波を用いた既往の手法と異なり、一方向での計測のみで

内部が調査可能となることから、今後さらに様々な励起方法、周波数、波長と得られる速度（位相速度）を検討し、深度方向の定量的損傷評価が可能となれば広く様々な構造物の劣化評価に適用される可能性があるものと考えている。

6.4 赤外線サーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂の遠隔検出手法

本研究においては、研究室レベルでの試験体に対する実験および実橋梁に対する現場試験を通じて、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂検出性に及ぼす影響因子に関する検討を行った。その結果、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔検出において、同法が有する以下の優位性を確認した。

- 1) 疲労き裂の発生・進展が問題となる道路鋼床版において通行する車両の大多数を占めていると考えられる中型以上の車両による载荷により引き起こされるき裂先端応力場変動に伴う熱弾性温度変動の検出により、疲労き裂を検出できる。
- 2) 計測面にき裂が開口する溶接ビード貫通き裂はもとより、溶接ビードの裏面からデッキプレートに至るデッキ貫通き裂の検出が可能である。
- 3) 防食塗装の下で発生・進展する疲労き裂に対しても、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法は検出能力を有している。
- 4) 反射防止のつや消し黒色塗装なしの状態でも、き裂先端付近の熱弾性温度変動の局所的増大を検出でき、これをもとにき裂の検出が可能である。
- 5) 被測定物と赤外線カメラの間の距離が長くなっても、反射鏡を使った測定経路でも、き裂の検出が可能である。

以上の検討結果より、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔検出手法は、道路構造物の維持管理手法として確立実用化する価値が高いと結論づけられる。

6.5 電場指紋照合法による鋼床版の疲労き裂の検出手法

本研究において実施した電場指紋照合法について実施された一連の実験的研究により得られた知見は次の通りである。

- 1) 電場指紋照合法により鋼床版中の疲労き裂を精度よく発見する手法を検討するために実施した実験の結果によれば、パルス電流を印加する電極と損傷発生位置の関係により検出の容易さに差が出るものの、計測結果から得られるFC値の評価レンジを変化させるなどの工夫をすることにより、疲労き裂を精度よく発見できる可能性があることが確認できた。
- 2) 電場指紋照合法による疲労き裂のモニタリング効率向上のため、センシングピンの配置とき裂の検出精度に関する検討を実施した結果によれば、モニタリングエリアを床版全幅(幅2500mm)とした場合でも、Uリブを跨ぐPair(間隔400mm)により、精度良くき裂の発生が検知、進展がモニタリングできることを確認した。

6.6 まとめ

本研究で実施した一連の研究により、技術開発の対象である衝撃弾性波法、弾性波トモグラフィ法、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法、電場指紋照合法により目視検査での検出が困難な損傷の検出が可能であることが確認できた。

今後は実橋梁を対象とした計測実績を重ね、様々な材料・構造条件あるいは環境条件下において確実にしかも効率的に損傷検出が可能となるよう技術の改良を継続することが重要である。

様式4(背表紙)

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート

No.19-3

各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムに関する研究開発

2010.6