

内部損傷を有するコンクリート床版の 打音特性に関する基礎実験

北川 真也¹・木村 定雄²・歌川 紀之³・森山 守⁴

¹正会員 佐藤工業株式会社 土木事業本部 設計部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-19)
E-mail: s.kitagawa@satokogyo.co.jp

²正会員 金沢工業大学教授 環境・建築学部 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)
E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³正会員 佐藤工業株式会社 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10)
E-mail: utagawa@satokogyo.co.jp

⁴正会員 中日本高速道路株式会社 金沢支社 (〒910-2177 福井県福井市稲津町16-7)
E-mail: m.moriyama.aa@c-nexco.co.jp

寒冷地や沿岸部における道路橋のコンクリート床版は、塩害を主とする環境作用の影響が強く、コンクリートの鉄筋腐食に伴う劣化対応も増加している。とくに、路面の凍結防止のために施される塩化カルシウムの散布が床版の劣化を促進させることが知られている。しかしながら、舗装面下にあるコンクリート床版の劣化損傷の程度を把握することが困難な場合が多い。そこで、対象となる劣化損傷を推定するため、比較的簡易で取扱いが可能な非破壊試験である打音法に着目し、道路橋を模擬した試験体を用い、アスファルト舗装面からの打音によってコンクリート床版上側部の劣化損傷を検知する手法について検討した。その結果、振幅値比に着目することで劣化損傷範囲を、周波数および周波数振幅に着目することで劣化損傷状態の種類を判別できる可能性を確認した。

Key Words : non-destructive testing, impact acoustics method, RC bridge slab, maintenance

1. はじめに

近年、日本国内における多くの社会資本は、更新時期を迎えており、延命化や長寿命化を図るための対策が重要な課題となっている。とくに、道路橋においては、老朽化が著しく、車両重量制限による通行規制を実施している箇所も年々増加しており¹⁾、限られた予算制約の中で対策が施されている。また、最近では適切な予防保全を行い、延命化や長寿命化を図る動きがあり²⁾、中でも、早期に劣化損傷状態を的確に把握するための技術開発が要請されている。

ここで、コンクリート床版における主な劣化損傷を整理してみる。一般には、繰返し荷重による疲労が主な原因の一つとされている³⁾。これに加え、寒冷地のように積雪や凍結のおそれがある地域では、融雪剤や凍結防止剤の散布が行われており、散布剤の成分に含まれるNaClやCaCl₂の舗装下への浸透によって、塩害を伴う劣化損傷の事例が報告されている⁴⁾。この劣化損傷プロセスを

示したのが図-1である⁵⁾。塩分を含む水分がアスファルト舗装の亀裂やポットホールなどから浸透し、アスファルト舗装内やコンクリート床版面に滞水する。このため、浸透部から最も近い位置にあるコンクリート床版の上側鉄筋の近傍において劣化損傷が顕著になることが多い。筆者らは、実橋の劣化損傷状態を調査し、上記の劣化損傷プロセスを確認した。コンクリートの劣化損傷は鉄筋

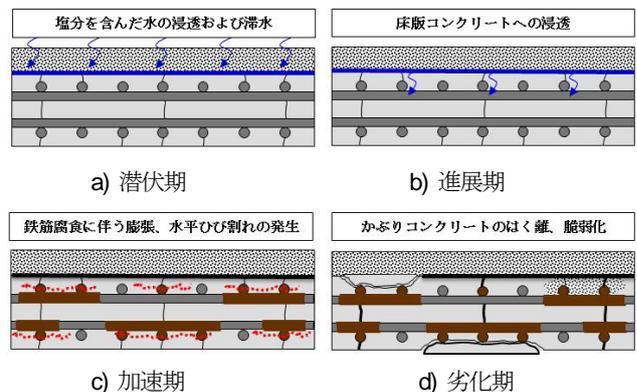


図-1 コンクリート床版の劣化損傷プロセス

の腐食を主要原因として、鉄筋が膨張することで水平方向にひび割れが発生する(写真-1a, 図-1c)。次に、水平方向ひび割れからはく離したかぶりコンクリートが水によって洗われカルシウム成分が溶出することで脆弱化する(写真-1b, 図-1d)。一般にこれらの劣化損傷は、コンクリート床版下面からの点検では、床版厚が大きい場合や、桁が存在することなどにより、発見することは相当に困難であり、アスファルト舗装面からの点検によって、これらの劣化損傷状態を把握することが要求される。写真-2は舗装の補修計画前に実施されている点検であり、叩き点検や目視点検によって床版の劣化損傷もあわせて調査している。しかしながら、これらの点検は、アスファルト舗装面から実施しているため、アスファルト混合物のはく離やアスファルト混合物の変状(たとえば、アスファルト混合物のひび割れ、ポットホールなど)を確認することは可能であるが、アスファルト舗装下面のコンクリート床版の劣化損傷状態を正確に捉えるのは難しい。そのため、写真-2b)に示したように、舗装補修の施工段階で、アスファルト舗装を撤去した後、コンクリート床版面から、再度叩き点検や目視点検を実施して床版の劣化損傷状態を推定している。これらは、補修計画において補修材料の種類やその数量を確定するために必要な点検であるが、点検者の技量に依存しているため、面方向と深さ方向の定量的な状態を把握することは難しく、さらに労力も多大となる。そこで、筆者らは、アスファルト舗装面からの調査によってコンクリート床版表層部もしくは内部の劣化損傷状態を定量的に検知することを目的として、非破壊検査技術に着目した。

一般に、検討されている非破壊検査技術は、レーダー法⁶⁾、赤外線法⁷⁾、衝撃弾性波法⁸⁾および打音法がある。筆者らは点検の容易さから打音法に着目した。打音法は叩き点検を応用した技術であり、比較的簡便に扱うことができる非破壊検査である。これまで、筆者らは、コンクリート構造部材の表層部や内部に存在するはく離や空洞といった欠陥を対象に打音法を適用してきている⁹⁾。コンクリート構造物を対象とした打音法の適用性については、過去、多くの研究や検討が実施されており、測定技術にかかわる基本的な手法は確立されている^{10), 11), 12)}。ここで、本稿で対象とするコンクリート床版の劣化損傷検知にかかわる既往の研究について鑑みる。アスファルト舗装面から打音法を適用してコンクリート床版の劣化損傷検知を試みた研究は散見される^{13), 14), 15)}。これらによると、打撃時に発生する振動の大きさと受信波の大きさの振幅値比を指標として劣化損傷検知を試みている。その結果、振幅値比の違いによって、アスファルト舗装下面に存在する何かしらの劣化損傷を捉えることが可能であることが示唆されている。しかしながら、劣化損傷状態を詳細に判別するまでには至っていない。そこで、



a) コンクリート床版鉄筋位置におけるひび割れ



b) コンクリート床版の脆弱化

写真-1 道路橋コンクリート床版における劣化損傷



a) アスファルト舗装面からの点検



b) アスファルト舗装撤去後における点検

写真-2 道路橋上面からの点検状況

筆者らはコンクリート表層および内部に劣化損傷を有するコンクリート床版とアスファルト混合物を舗装した二層構造のモデル試験体を製作し、アスファルト舗装面から打音法を適用して劣化損傷状態を詳細に判別することを目的とし、判別のための評価指標として、振幅値比

(振動の大きさ)と周波数を取り上げ、それらの基本特性を明らかにする。

2. 打音法

一般に、叩き点検は打撃によって発生する音を、清音、濁音もしくは異音として点検者自身の耳によって判断する。しかし、個人によって聞き取れる音質の範囲は異なるため、点検者によっては音の変化を捉えきれない。また、長時間にわたる点検作業においては、耳が慣れてしまい、健全と欠陥を判別する異音を判別できなくなる可能性がある。このように、叩き点検は点検者の技量によって判断するため、結果にバラツキが生じる。そこで、これらの問題を解決したのが打音法である。打音法は音響機器を用いた方法であり、叩く動作は叩き点検と同じである。ハンマや鋼球を対象物を打撃し、その際に発生する音をマイクロホンによって検知し、打撃波と受信波の波形情報を分析することで、欠陥の有無を判定する手法である¹⁰⁾。得られた波形はデジタルデータであり、周波数等による分析処理を行うため、点検者の叩き方を含めた技量差による影響を極力低減できる特徴がある。

(1) 測定原理

打音法は打撃により部材内を振動して伝搬する固体音を検知し分析することで、コンクリート内部の損傷や欠陥の状態を推定するものである。打撃により発生した固体音は、打撃された対象物の曲げ振動とほぼ同等の周波数分布であることが知られている。したがって、たとえば、振動計のように、対象物の表面に直接センサを設置する必要はなく、ある程度、表面から離れた位置にマイクロホンを設けても音圧データから振動を検知することができる¹⁰⁾。物体内を伝播する波には、縦波、表面波および曲げ波などある。打音法はとくに曲げ波に着目し、曲げ波によって発生する曲げ振動(たわみ振動)の波形情報を分析する。曲げ波は部材が薄いほど卓越しやすく、部材が厚くなると表面波が卓越する。このため、表面波速度を超えない範囲で曲げ波速度を観測することが原則であり、測定可能な部材厚さには限界がある。ここで、コンクリート部材を対象として、部材厚と打撃による入力周波数(以下、打撃周波数とする)が異なる場合の曲げ波速度および表面波速度と部材厚さの関係を図-2に示す¹⁶⁾。打撃周波数は、打撃に用いる鋼球やハンマの重量が軽いほど大きくなり、重いほど小さくなる。また、曲げ波速度 C_B (m/sec)は、式(1)により与えられる¹⁷⁾。

$$C_B = \sqrt{\left(2\pi h f \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}\right)} \quad (1)$$

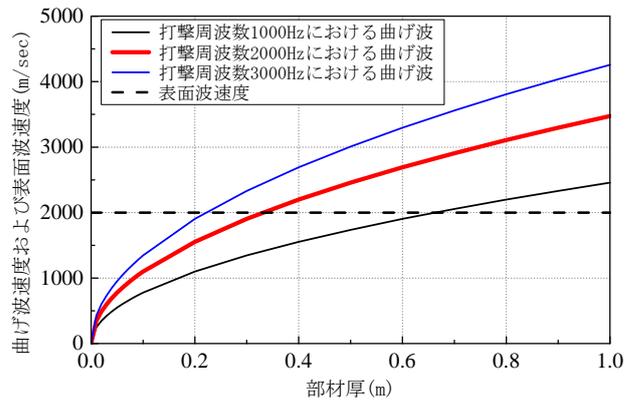


図-2 曲げ波速度および表面波速度と部材厚の関係(コンクリートの場合)¹⁶⁾

ここで、 h は部材厚(m)、 f は打撃周波数(Hz)、 E は弾性係数(N/m^2)、 ρ は密度(kg/m^3)、 ν はポアソン比である。コンクリート部材を対象とすると、概ね弾性係数は $25GN/m^2(25kN/mm^2)$ 、密度は $2350kg/m^3$ 、ポアソン比は0.2となる。

表面波速度を2000m/sと仮定した場合、図-2に示すように、打撃周波数が3000Hz程度の場合、表面波速度以下で観測することができる曲げ波速度が部材厚0.2m程度となる。また、打撃周波数が1000Hz程度の場合、理論上、0.6m程度まで測定することが可能である。ただし、重めの鋼球やハンマを用いた場合、打撃対象の表面に損傷を与える可能性がある。そこで、本検討では、アスファルト混合物が打撃対象であることと、アスファルト舗装下面のコンクリート床版中の損傷位置への適用性を考慮して、0.3m程度まで測定可能な重さ約250gのハンマ(打撃周波数が2000Hz程度かつ通常用いられる12ポンドの点検ハンマーと同程度)を用いることとする。

(2) 評価方法

物体内を伝搬する波は、波の種類にかかわらず様々な情報を内包している。指標には、振幅、波長、周波数および減衰がある。本検討では、波形情報をより簡便に取り扱うことを目指し、振動の大きさを示す振幅および周波数を劣化損傷検知のための打音特性評価指標とする。

3. 実験概要

本実験では、アスファルト舗装を有するコンクリート床版を模擬した試験体を用いて、アスファルト混合物とコンクリート間のはく離、コンクリート床版鉄筋位置の水平ひび割れ、コンクリート床版かぶりコンクリートの脆弱化といった劣化損傷状態を再現し、劣化損傷検知における打音法の特長について検討する。



写真3 試験体写真

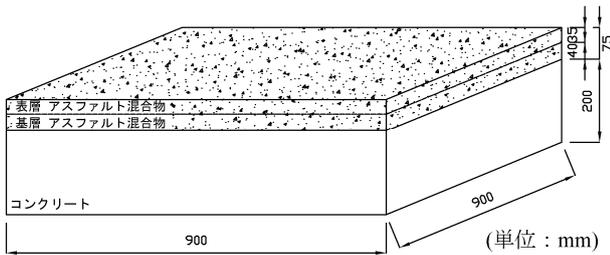


図3 試験体の概要



写真4 アスファルト混合物舗設状況

(1) 試験体の概要

試験体の概要を写真-3および図-3に、試験体の断面図および試験体ケースを図-4および表-1に示す。試験体の平面寸法は、試験体端部の自由振動の影響を小さくするため、幅900mm、奥行き900mmとした。アスファルト混合物厚およびコンクリート厚は、実際の道路橋を参考にし、アスファルト混合物厚75mm（表層厚35mm、基層厚40mm）およびコンクリート厚200mmとした¹⁴⁾。アスファルト混合物の舗設状況を写真-4に示す。コンクリート床版面およびアスファルト混合物基層面には、浸透性カオチン乳剤を塗布した。締固めには、質量1300kgのコンバインド振動ローラを用いた。なお、基層と表層のアスファルト混合物層が一体となる弾性体をモデル化するため、基層および表層ともにストレートアスファルトを用いた。劣化損傷のモデル化は、アスファルト混合物のはく離、

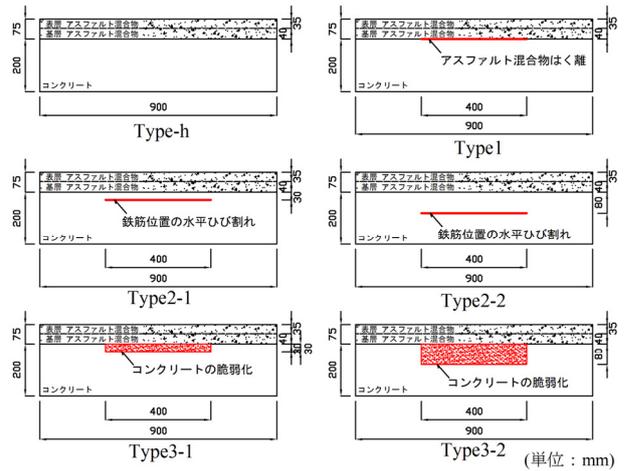


図4 試験体の断面図

表-1 試験体ケース

ケース	劣化損傷の種類別	劣化損傷までの深さ Dep. (mm)
Type-h	健全（一体化）	275
Type1	アスファルト混合物のはく離	75
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	105
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	155
Type3-1	コンクリートの脆弱化	75~105
Type3-2	コンクリートの脆弱化	75~155

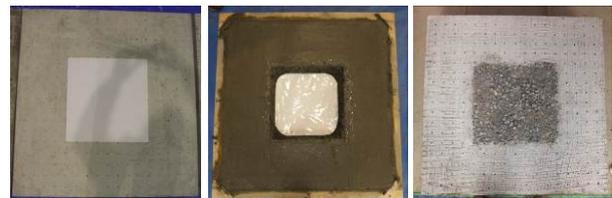


写真5 模擬劣化損傷の設置状況

く離、コンクリート内の水平ひび割れおよびかぶりコンクリートの脆弱化を想定した。Type1はアスファルト混合物のはく離をモデル化したものである。はく離面積は、400mm×400mmとし、写真-5a)のように、ろ紙(厚さ0.2mm)を埋設することではく離を模擬した。Type2はコンクリート内の水平ひび割れ面をモデル化したものであり、水平ひび割れの発生する深さ位置を鉄筋位置として2種類とした。Type2-1はアスファルト混合物表面から105mmの位置とし、Type2-2はアスファルト混合物表面から155mmの位置とした。水平ひび割れ面の面積は、400mm×400mmとし、写真-5b)に示すようにビニールで覆

表-2 コンクリートの仕様

W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	Ad
54.5	43.9	157	288	558	239	1032	2.88

Ad : AE減水剤

表-3 コンクリート強度試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	密度 (kg/m ³)
37.2	27.0	2293

養生条件 : 28日, 水中養生

表-4 アスファルト混合物の仕様

6号 碎石 (%)	7号 碎石 (%)	荒砂 (%)	細砂 (%)	中目砂 (%)	石粉 (%)
36.0	22.0	16.0	11.0	9.0	6.0

混合物名 : 密粒度アスファルト混合物(13)

アスファルト : ストレートアスファルト60-80

表-5 マーシャル試験結果 (最適アスファルト量における)

項目	測定値	規格値
最適アスファルト量 (%)	5.8	—
基準密度 (g/cm ³)	2.322	—
理論密度 (g/cm ³)	2.434	—
空隙率 (%)	4.6	3~5
飽和度 (%)	74.0	70~85
骨材間隙率 (%)	17.7	—
安定度 (kN)	12.20	6.00以上
フロー値 (1/100cm)	30	20~40
スティフネス (kN/m)	4067	—

われたろ紙(厚さ1.0mm)を埋設することで水平ひび割れを模擬した。Type3は、かぶりコンクリートが脆弱化した状態をモデル化したものである。Type3-1は脆弱化の厚さを30mm, また、Type3-2はその厚さを80mmとした。脆弱化の面積は400mm×400mmとし、写真-5c)に示すように乾燥した砂と碎石を混ぜた試料を試験体内に埋設することで模擬した。また、図-4および表-1中のType-hはア



写真-6 測定機器



図-5 マイクロホンの構造

表-6 測定機器仕様一覧

	特性	
	インパクトハンマー	周波数
	感度	1.25(mV/N)
フード付マイクロホン	周波数	20(Hz)~20(kHz)
	感度	26(mV/Pa)
AD変換器	サンプリング周波数	48(kHz)

スファルト混合物とコンクリートが一体化した健全な状態をモデル化したケースである。試験体に用いたコンクリートの仕様、アスファルト混合物の仕様および各々の試験結果は表-2, 表-3, 表-4および表-5に示すとおりである。

(2) 測定機器

本実験で用いた打音法の測定機器を写真-6に示す。ここで、インパクトハンマーおよびマイクロホンは、幾つかの仕様があるが、本実験で用いた仕様は表-6に示すとおりである。ハンマは内部に加速度センサーを有して打撃力が取得可能なインパクトハンマーであり、打撃音の受信はフード付マイクロホンとしている(図-5参照)。フードはゴム製であり、その内側にコルクを詰めている。これは測定の対象となるコンクリート表面以外の外部からの振動音およびフード内での共振を抑えるためである。

(3) 測定方法

a) 打撃点および設置方法

打撃点およびマイクロホンの設置位置を図-6に示す。図中の格子点が打撃点である。マイクロホンのフードは、基本的に打撃点から右側に離隔10mmの位置に設置した。また、点A-1隅角部や点Q-9の辺部は、フードが試験体の内側になるよう設置した。なお、試験体はコンクリート床面上に平置きした。

b) 測定環境

アスファルト混合物は、温度により弾性係数が変化することが知られている¹⁸⁾。本検討では、アスファルト混合物とコンクリートの二層構造を対象とした基本的な打音特性を把握するため、一般的な範囲で用いられる弾性係数¹⁸⁾の平均温度としてアスファルト混合物温度が20°Cとなる一定の環境下で測定を実施した。

c) 測定回数

打音の測定回数は、図-6の試験体の点A-1から点Q-17の合計289点を各々10回ずつとした。

4. 実験結果とその考察

(1) 劣化損傷状態ごとの振幅と振幅値比の特性

図-7に打撃波形と音圧の受信波形の例を示す。これらの打音情報から、曲げ振動を基本とする情報を抽出する。打撃力は、打撃者の叩き方や対象物表面の凹凸状態に応じて変化する。したがって、それらの応答となる受信波形もその影響を受ける。この影響を抑制するため、音圧振幅と打撃力の比を振幅値比と定め、無次元化した指標として打音情報を取り扱う。振幅値比 A は式(2)によって与えられ、図-7に示す受信波形の負の第一波目の音圧振幅 A_m を打撃力 A_i で除した値である¹²⁾。

$$A = A_m / A_i \quad (2)$$

なお、各々の打撃点において打撃力が1~2Vと安定する打撃を10回ずつ行い^{19), 20)}、個々に算定される振幅値比を

平均し、平均振幅値比としてこれを取り扱うこととする。

a) 受信波形の振幅

試験体の点I-9 (中心点) において測定された打撃波形および受信波形を図-8に示す。打撃波形は約1Vであるのに対し、受信波形の振幅は試験体ごとに異なっている。Type-h(健全(一体化))は、受信波形の振幅が小さい。Type1(アスファルト混合物のはく離、Type3-1(コンクリートの脆弱化)およびType3-2(コンクリートの脆弱化)は、振幅が大きい。一方、Type2-1(鉄筋位置の水平ひび割れ)およびType2-2(鉄筋位置の水平ひび割れ)の振幅をみると、

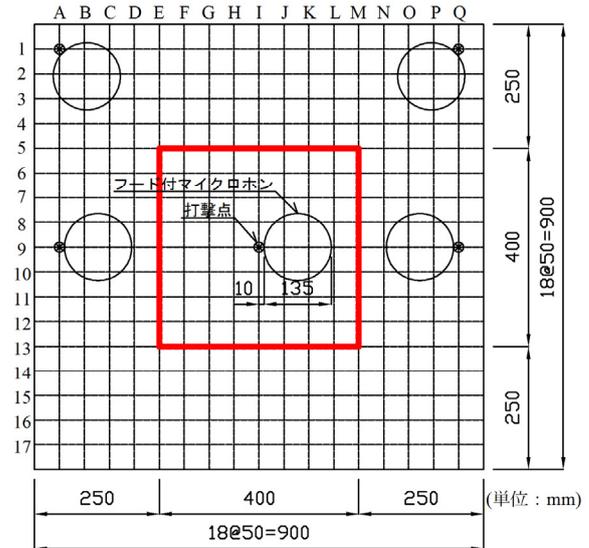


図-6 打撃点およびマイクロホンの設置位置

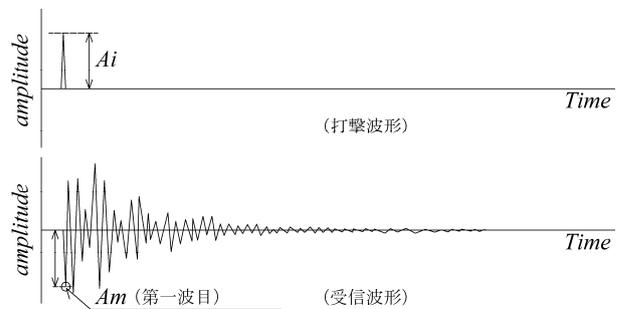


図-7 打撃波形と受信波形の例

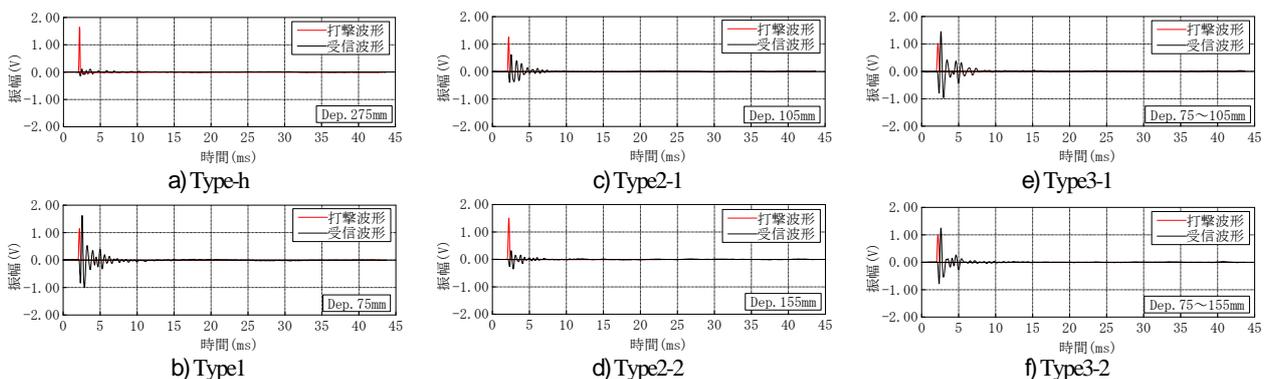


図-8 打撃波形および受信波形の代表例 (点I-9)

表-7 平均振幅値比 (点I-9)

ケース	劣化損傷の種類別	平均振幅値比A
Type-h	健全 (一体化)	0.102
Type1	アスファルト混合物のはく離	0.615
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.404
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.200
Type3-1	コンクリートの脆弱化	0.551
Type3-2	コンクリートの脆弱化	0.784

Type-hより大きいですが、Type1、Type3-1およびType3-2より小さい。これらの結果から、劣化損傷の有無によって、得られる受信波形の振幅値は異なる特性を有していることが明らかとなった。しかし、振幅値のみでは、劣化損傷の状態を判別するまでの特性は有していない。

b) 中心位置における平均振幅値比

次に、平均振幅値比の特性について検討する。試験体の中心位置において測定された波形より得られる平均振幅値比を表-7に示す。点I-9 (中心点) における平均振幅値比は、Type-hの0.102に比べて、Type1が0.615、Type3-1が0.551およびType3-2が0.784であり、劣化損傷の状態に関わらず劣化損傷が存在することによって振幅値比は大きくなる。また、Type2-1が0.404、Type2-2が0.200とType-hの0.102より大きいですが、Type1より小さい。これは、振動の大きさが曲げ振動を生じる部材厚さに関係することを意味している。すなわち、はく離や損傷の存在によって、見掛けの部材厚が小さいと曲げ振動が大きく、また、見掛けの部材厚が大きいと曲げ振動が小さくなる特性を有しているためと考えられる。一方、Type3-1およびType3-2の平均振幅値比に見られるように、コンクリートが脆弱化した場合には、平均振幅値比がばらつく傾向がある。

c) 平均振幅値比の分布

図-9は平均振幅値比の分布結果を示したものであり、図中の赤実線で囲まれた範囲内が劣化損傷範囲である。図-9より、健全部と劣化損傷部を判別する平均振幅値比を0.2と仮定した場合、劣化損傷範囲を明確に検知することができる。Type1とType3-1およびType3-2の結果を比較すると、平均振幅値比がほぼ同じであることから、アスファルト混合物とコンクリートのはく離現象とかぶりコンクリートの脆弱化現象は同等の曲げ振動となる特性を有している。Type2の結果をみると、Type2-1ではコンクリート版の鉄筋位置 (アスファルト面から105mmの深さ) に存在する水平ひび割れ面の劣化損傷範囲を検知している。一方、Type2-2では、ひび割れ面の深さが155mmと深いことから、検知精度が劣る。また、すべての結果において、モデル化した劣化損傷範囲に比べて狭い範囲を検知している。この理由として、劣化損傷部と

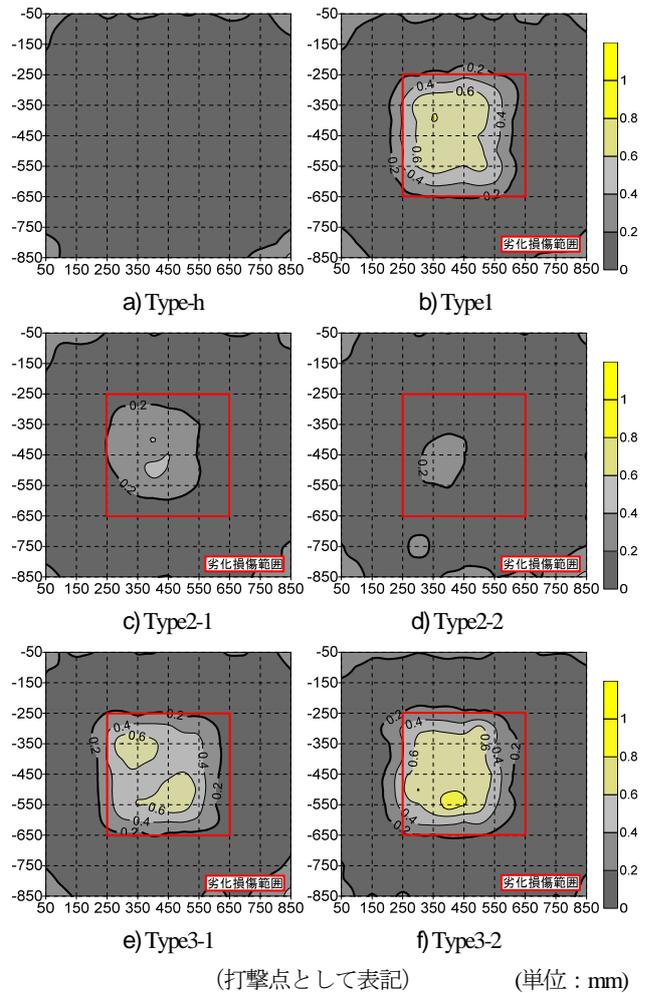


図-9 平均振幅値比の分布

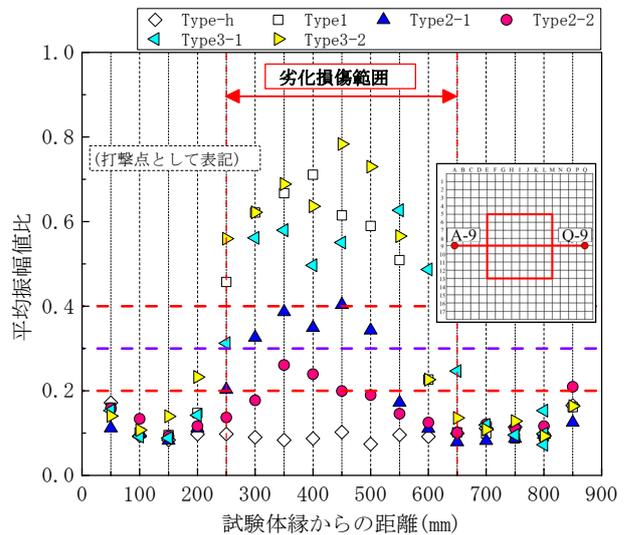


図-10 平均振幅値比の分布 (各試験体の点A-9から点Q-9)

健全部の境界の影響を受けていることが考えられる。そこで、点A-9から点Q-9の軸線上における平均振幅値比の分布を調べた。図-10はその結果である。図-10より、健全部の平均振幅値比を0.20未満、鉄筋位置の水平ひび割れ (深さ155mm) を0.200~0.300、鉄筋位置の水平ひび

表-8 受信波形の平均ピーク周波数および平均周波数振幅 (点I-9)

ケース	劣化損傷の種類別	平均ピーク周波数 (Hz)	平均ピーク周波数振幅 (V)
Type-h	健全 (一体化)	914	0.0096
Type1	アスファルト混合物のはく離	1336	0.0960
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	1430	0.0711
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	1758	0.0118
Type3-1	コンクリートの脆弱化	1102	0.0373
Type3-2	コンクリートの脆弱化	1125	0.0796

割れ (深さ105mm) を0.300~0.400, アスファルト混合物のはく離およびコンクリートの脆弱化を0.400以上とすることで, 劣化損傷状態を判別することができる. 次に, 劣化損傷中心部付近 (350~550mm) と健全部の境界付近 (250~350mmおよび550~650mm) との平均振幅値比を比べると, 境界付近では平均振幅値比が小さくなる傾向にある. これは, 下部層に劣化損傷がある場合, その表層部の曲げ振動が支配的となり, 劣化損傷の境界が支点となるためと考えられる. なお, 試験体端部は, 固体境界の自由振動の影響を受け若干大きくなる傾向がある. また, 健全な試験体を除くすべての結果から, 劣化損傷検知位置が左側 (点A-9) に寄る結果となっている. これは, 打撃点とマイクロホン設置位置が関係しており, 打撃点に対し右側にマイクロホンを設置したためである.

以上の結果より, 劣化損傷状態や境界の影響によって得られる振幅値比の特性が異なることがわかった. ただし, コンクリートの脆弱化については, アスファルト混合物のはく離現象と同等の振幅値比であるため, 判別できるまでの特性は有していない.

(2) 劣化損傷状態ごとの周波数特性

ハンマおよびマイクロホンから得られる打撃波形と受信波形の周波数分析を行うことによって, コンクリート内の劣化損傷状態ごとの周波数特性について検討する. 周波数分析は, サンプリング数を2048個とし, 高速フーリエ変換 (FFT) により周波数分布を求める. また, 各々の打撃点において打撃力が1~2Vと安定する打撃を10回ずつ行い^{19), 20)}, 個々に得られる周波数を平均し, 平均周波数としてこれを取り扱うこととする.

a) 中心位置における平均周波数

周波数分析の結果のうち, 試験体の点I-9 (中心点)

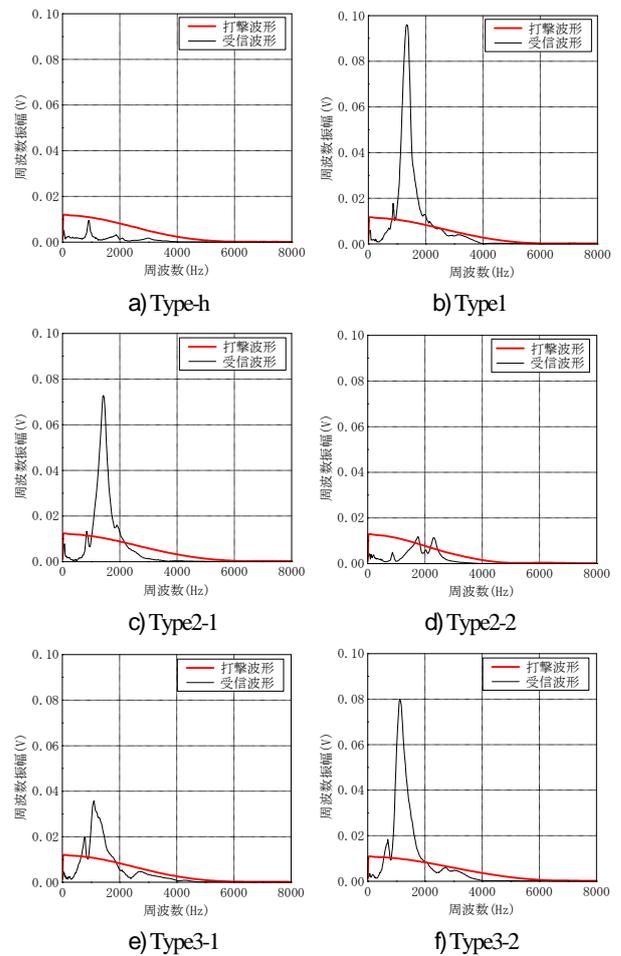


図-11 平均周波数分布 (点I-9)

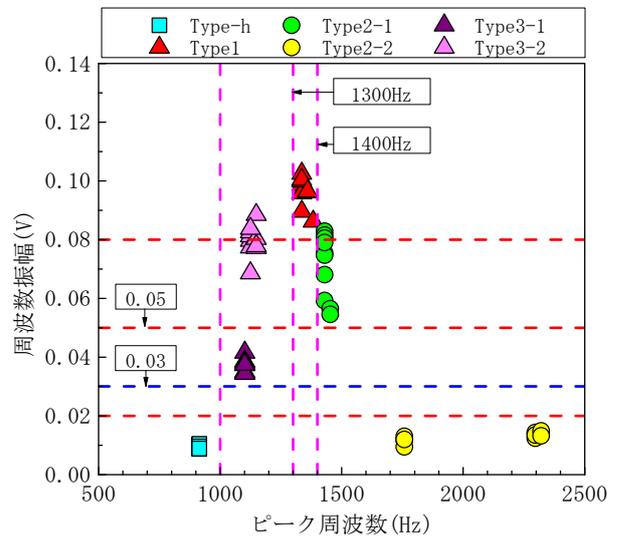


図-12 ピーク周波数と周波数振幅の関係 (点I-9)

の打撃波形および受信波形の平均周波数分布を図-11に, 受信波形の平均ピーク周波数およびその平均周波数振幅の関係を表-8に示す. また, 試験体の点I-9 (中心点) の打撃10回分におけるピーク周波数と周波数振幅の関係を図-12に示す. 図-11より, 打撃波形の平均周波数およびその平均周波数振幅は, すべてのケースにおいてほぼ同じである. 一方, 受信波形のそれらを見ると, Type-hは

平均ピーク周波数が914Hz, 平均周波数振幅が0.0096Vであり, 劣化損傷を有するすべてのケースと比べて小さな値となっている. Type1は1336Hz, Type3-1が1102HzおよびType3-2が1125Hzであり, アスファルト混合物がはく離している場合が最も高い. なお, コンクリートの脆弱化の厚さの差異による平均ピーク周波数の差は小さい. 一方, 平均周波数振幅をみると, Type1が0.0960Vと最も大きく, Type3-1が0.0373VおよびType3-2が0.0796Vであり, コンクリートの脆弱化範囲が深さ方向に広がるほど平均周波数振幅が大きくなる傾向がある. 次に, Type2の受信波形をみると, 平均ピーク周波数はType2-1が1430Hz, Type2-2が1758Hzであり, アスファルト混合物がはく離しているType1を基準とすると大きくなる傾向がある. また, それらの平均周波数振幅は, Type2-1が0.0711V, Type2-2が0.0118Vとなり, 水平ひび割れの位置が深くなるほど平均周波数振幅が小さくなり, 健全なType-hの結果に近づく傾向がある. 上述した結果は10回分の測定値を平均したものであり, 個々の測定結果における分布を示したものが図-12である. 図-12より, 健全全部は, ピーク周波数および周波数振幅が1000Hz以下かつ0.02V未満, アスファルト混合物のはく離は, 1300Hz~1400Hzかつ0.08V以上, 鉄筋位置の水平ひび割れ(深さ105mm)は, 1400Hz以上かつ0.05V以上, 鉄筋位置の水平ひび割れ(深さ155mm)は, 1400Hz以上かつ0.02V未満, コンクリートの脆弱化は, 1000Hz~1300Hzかつ0.03V以上と判別することができる.

以上より, 測定値にバラツキはあるものの, ピーク周波数と周波数振幅に劣化損傷状態ごとに異なった特性を有していることがわかった.

b) 平均周波数振幅の分布

平均ピーク周波数時における平均周波数振幅の分布を図-13に示す. 図-13より, 劣化損傷範囲を明確に示すことができおり, Type2-2については, 図-9に示した平均振幅値比の指標としたものに比べて劣化損傷部を表現している. ここで, 各試験体の点E-9から点M-9の軸線上における平均ピーク周波数と平均周波数振幅の関係を図-14に示す. 図-14と図-12とを比較すると, 打撃点が劣化損傷部内で異なると周波数振幅にバラツキが生じる. 一方, 打撃点が劣化損傷部のどの位置においてもピーク周波数に大きな差異がないことがわかる. また, Type-hおよびType2-2は, 健全部の層厚が厚く, 周波数振幅を指標とした劣化損傷検知の精度が劣る. このことは, 既往の知見と一致する¹⁶⁾.

5. 劣化損傷状態の推定

これまでの検討結果より, 振幅値比, ピーク周波数お

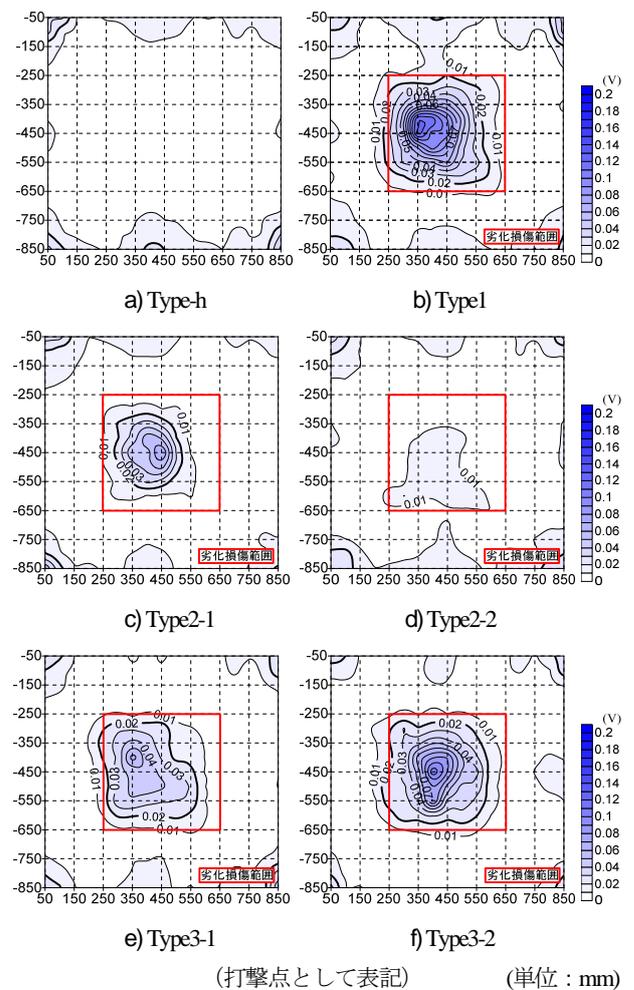


図-13 平均周波数振幅の分布 (平均ピーク周波数時)

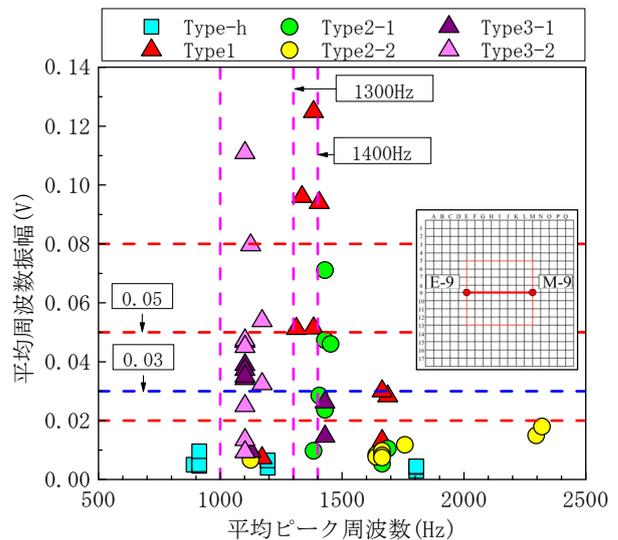


図-14 平均ピーク周波数と平均周波数振幅の関係 (各試験体の点E-9から点M-9)

よびピーク周波数振幅を評価指標とすることで, 振幅値比は劣化損傷範囲を, ピーク周波数およびピーク周波数振幅は劣化損傷状態を推定可能な打音特性を有していることがわかった. そこで, 得られた打音特性から劣化損

表-9 劣化損傷ごとの打音特性

ケース	劣化損傷の種別	振幅値比	周波数	
			ピーク周波数	ピーク周波数振幅
Type-h	健全 (一体化)	0.200未満	1000Hz未満	0.02V未満
Type1	アスファルト混合物のはく離	0.400以上	1300~1400Hz	0.08V以上
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.300~0.400	1400Hz以上	0.05V以上
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.200~0.300		0.02V未満
Type3-1	コンクリートの脆弱化	0.400以上	1000~1300Hz	0.03V以上
Type3-2	コンクリートの脆弱化			

傷状態の推定について考察する。表-9は、本検討結果から得られた劣化損傷状態ごとの打音特性についてまとめたものであり、図-15は、打音特性による劣化損傷状態を推定するための基本的なフローである。表-9および図-15より、劣化損傷状態の推定について以下に記述する。

- 1) 振幅値比が0.200未満であり、ピーク周波数が1000Hz未満および周波数振幅が0.02V未満の場合、健全と推定する。
- 2) 振幅値比が0.400以上であり、ピーク周波数が1300Hz~1400Hzの範囲およびピーク周波数振幅が0.08V以上の場合、アスファルト混合物のはく離による劣化損傷と推定する。
- 3) 振幅値比が0.300~0.400の範囲であり、ピーク周波数が1400Hz以上およびピーク周波数振幅が0.05V以上の場合、鉄筋位置の水平ひび割れ(深さ105mm)による劣化損傷と推定する。
- 4) 振幅値比が0.200~0.300の範囲であり、ピーク周波数が1400Hz以上およびピーク周波数振幅が0.02V未満の場合、鉄筋位置の水平ひび割れ(深さ155mm)による劣化損傷と推定する。
- 5) 振幅値比が0.400以上であり、ピーク周波数が1000~1300Hzの範囲およびピーク周波数振幅が0.03V以上の場合、コンクリートの脆弱化による劣化損傷と推定する。

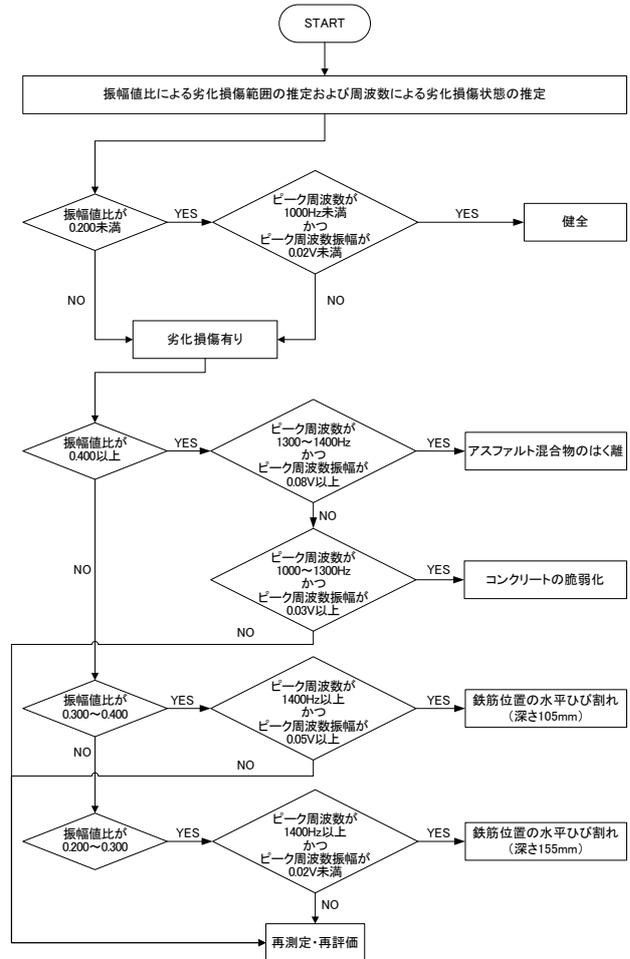


図-15 打音特性による劣化損傷状態の基本的な推定フロー

6. まとめ

本文では、コンクリート表層および内部に劣化損傷をモデル化したコンクリート版にアスファルト混合物を舗設した二層構造の試験体を用いて、劣化損傷検知に関する基本的な打音特性について検討した。以下には、得られた知見を示す。

- 1) 劣化損傷状態ごとにおける振幅値比の特性は、劣化損傷状態により異なる特性を有しており、振幅値比を用いることで劣化損傷の有無およびその範囲を判別できる可能性を確認した。
- 2) 劣化損傷状態ごとにおける周波数特性は、劣化損傷状態により異なる特性を有しており、健全、ア

スファルト混合物のはく離、鉄筋位置の水平ひび割れおよびコンクリートの脆弱化を判別できる可能性を確認した。

本研究では、打音法を用いてアスファルト舗装面上からコンクリート床版内の劣化損傷検知を可能にする手法について検討した。一方、アスファルト混合物は、その温度依存性により、弾性係数が大きく変化することが知られている。打音法の基本原理となる板の曲げ振動の特性を考えるとアスファルト混合物の弾性係数の変化が強く影響するものと考えられる。そこで、今後は、アスファルト混合物の温度依存性を考慮した劣化損傷の推定法について検討する所存である。

謝辞：本研究においては，金沢工業大学木村研究室学生一同にご協力を頂きました。ここに記して，感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，p.1，2014.4.
- 2) たとえば，国土交通省：社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置，p.1，pp.7-8，2013.3.
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編]，pp.57-60，pp.216-219，2012.
- 4) たとえば，有馬直秀，石川裕一，足立嘉文：北陸地域における道路鋼橋 RC 床版の健全度評価法に関する提案，第七回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.131-136，2012.6.
- 5) 本莊清司，中野将宏，藤原規雄，葛目和宏，牧博則：凍結防止剤によって塩害劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査，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，第 10 巻，pp.51-56，2010.10.
- 6) たとえば，森田英明，大野敦弘：スケルカ技術を活用した橋梁床版劣化診断システムの開発と適用，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，pp.311-312，2011.9.
- 7) たとえば，小出博，中馬勝己：赤外線サーモグラフィによる橋梁調査について，非破壊検査，第 63 巻 6 号，pp.278-281，2014.6.
- 8) 中山和也，鎌田敏郎，内田慎哉，大西弘志：衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.2113-2118，2009.
- 9) たとえば，北川真也，鍋谷雅司，歌川紀之：打音法を利用したコンクリート表層部健全性診断機器の開発，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，pp.315-316，2010.9.
- 10) 伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究，東京大学学位論文，1997.
- 11) 鎌田敏郎，浅野雅則，国枝稔，六郷恵哲：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用，土木学会論文集，No.704/V-55, pp.65-79，2002.5.
- 12) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波法による試験方法—第 3 部：打音法，NDIS 2426-3，2010.
- 13) 大住圭太，林成浩，岡崎健一：床版上面の層状ひび割れ検出手法に関する検討，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，pp.285-286，2009.9.
- 14) Kitagawa, S., Kimura, S. and Moriyama, M. : Deteriorated detection of the reinforced concrete slab of a highway bridge using impact acoustics method, 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, DVD-ROM, 2012.
- 15) 強瀬義輝，宮原史，水口知樹，石尾真理，玉越隆史：鋼板接着補強した RC 床版の調査点検手法に関する実験的研究，第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.105-110，2014.10.
- 16) 歌川紀之，伴享，北川真也：打音法における欠陥検知に関する一考察，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，pp.765-766，2003.9.
- 17) 飯田一嘉，大橋心耳，岡田健，麦倉喬次：現場実務者と設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック，エヌ・ディー・エス，pp.42-45，2000.5.
- 18) 日本道路協会：舗装設計便覧，pp.116-118，2006.2.
- 19) 杉山弘晃，北川真也，森山守，木村定雄：打音法による損傷検知の精度向上のためのインパクト強度の信頼性に関する検討，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，pp.701-702，2013.9.
- 20) 杉山弘晃，北川真也，有馬直秀，木村定雄：打音法による橋梁床版の損傷検知の信頼性に関する検討，第 1 回北陸橋梁保全会議報文集，A-7, p.9，2013.11.

(2015. 7. 23 受付)

IMPACT ACOUSTICS CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE SLAB WITH INSIDE DAMAGE

Shinya KITAGAWA, Sadao KIMURA, Noriyuki UTAGAWA
and Mamoru MORIYAMA

Applicability of the impact acoustics method for finding inside damages of a reinforced concrete slab of a highway bridge is examined. Six test specimens made of 75 mm thick asphalt concrete and 200 mm thick concrete beneath it are used. They have inside damage either delamination of asphalt concrete, horizontal crack along the reinforcement, or weakening of cover concrete. Impact forces are given at the grid point with 50 mm distance and acoustics are measured beside the impact position. Then, amplitude ratio (ratio of amplitude of acoustic pressure to the impact force), peak Fourier amplitude and corresponding frequency are investigated. These values are found to depend on damaged area. It is found that there are strong correlation between them and size and type of the deteriorated. Finally, a simple chart is proposed to estimate the existence of deteriorated areas and types of deterioration in the concrete slab.