

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

キーワード：非破壊検査法，打音法，メンテナンス

杉山弘晃*1，北川真也*2，有馬直秀*3，木村定雄*1

1. はじめに

近年，高度経済成長期に急速に整備された社会資本の老朽化によって，限られた予算制約のもとで維持管理費が増大するなどの社会的問題を起している．とりわけ，道路橋の老朽化は著しく，アセットマネジメントの考え方¹⁾に基づく最適管理が要請されている．アセットマネジメントの計画プロセスでは，既存の構造物の状態を監視し，損傷モニタリング結果を的確に評価することが求められる．ここで，道路橋の鉄筋コンクリート床版の劣化損傷をみると，活荷重の繰返し作用による疲労損傷の可能性が高いことが挙げられている．

一方，北陸地域の劣化損傷の特徴として，寒冷地や積雪地帯における凍結防止剤の使用が原因となる塩害劣化が報告されており，床版上側鉄筋部での劣化が顕在化してきている²⁾．このような床版の劣化は表層に舗装が存在するため，目視で確認することが困難であり，現状，叩き検査によって損傷状態を推定している．しかしながら，叩き検査は点検者の経験や感覚に頼る検査法であるため，劣化損傷の定量的な推定精度が劣ることが知られている³⁾．そこで，筆者らは非破壊検査法の一つである打音法に着目した．

打音法は，コンクリート内部の浮きやはく離を検知する非破壊検査法である⁴⁾．これまでに，筆者らは打音法を用いて，舗装と床版にかかわる損傷の種類やその程度を検知することを検討してきた．その結果，アスファルト舗装上部からの打撃による検知では，アスファルトとコンクリート床版の合成構造の場合，その振動特性がコンクリート構造のみの場合と異なることなどを明らかにした⁵⁾．その一方で，検査者の慣れやアスファルト表面の凹凸による打撃力のバラツキなどが検知精度に影響を及ぼす可能性があると考えられた．そこで，アスファルト舗装と床版を模擬した供試体を用いたモデル実験により，損傷検知の分析に採用すべき打音情報（インパクト強度や受信強度）の信頼性について検討した．本報告は打音法における①打撃数の影響，②劣化損傷の種類がインパクト強度や受信強度に及ぼす影響を検討し，劣化損傷の分析に採用すべき打音情報の信頼性について述べるものである．

2. 現場調査結果に基づく床版の劣化損傷の種類

床版の劣化損傷の種類は，これまでの現場点検や補修実績からある程度明らかとなっている．写真-1は，アスファルト舗装を剥いだ後の床版の劣化損傷の例を示したものである．

調査結果によると，床版の劣化損傷は図-1に示す3種類が挙げられる．すなわち，①雨水などの浸入によりアスファルト舗装と床版とがはく離している状態，②雨水とともに凍結防止剤が床版部に達し，鉄筋腐食により鉄筋位置ではく離ひび割れが発生する状態，③鉄筋腐食が進行し，かぶり部コンクリートが脆弱化する状態が挙げられる．なお，本研究ではアスファルト舗装と床版上部の劣化損傷を対象としており，一般的な塩害劣化である床版下部の劣化損傷は検討から除外する．

3. 打音法の原理と劣化損傷の検知方法

打音法は物体をインパクトハンマーで打撃し，それにより

生じる物体の表面振動のうち，板としての曲げ振動に起因する音響放射をマイクロフォンで計測して，得られる打音情報から，基本的に



写真-1 床版劣化損傷の例

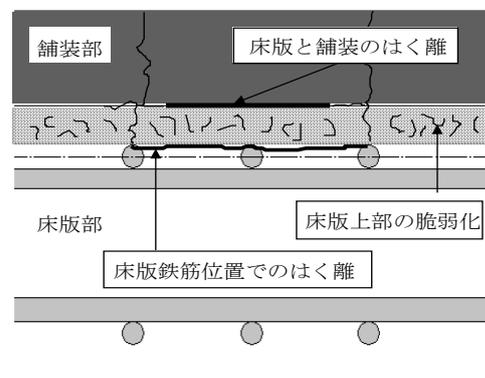


図-1 床版の劣化損傷の分類



写真-2 打音法の計測システム

*1：金沢工業大学，*2：佐藤工業(株)，*3：中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店

板の曲げ振動理論によると、部材厚と振幅値比には強い相関があり、振幅値比は式(1)に示すように、加力振幅最大値(インパクト強度, A_i)と打音最大振幅値(受信強度, A_m)によって表される。

$$\text{振幅値比} = A_m / A_i \quad (1)$$

部材厚さや水平ひび割れ面深さ等の損傷深さの推定は、この振幅値比を部材厚の既知なコンクリート供試体を用いたキャリブレーションから式(2)によって与えられる。

$$\log_{10} h = P_1 - P_0 \log_{10} \text{振幅値比} \quad (2)$$

ここで、式(2)中の h は部材厚、 P_1, P_0 はキャリブレーションによって得られる校正係数である。本研究では厚さの異なる幾つかのコンクリート供試体を用いてキャリブレーションを行い、 $P_1 = 1.843, P_0 = 0.447$ を得ている。

4. モデル実験の概要

4.1 実験ケースおよび供試体概要

打音法における①打撃数の影響、および②劣化損傷の種類がインパクト強度や受信強度に及ぼす影響を把握するため、表-2 に示す実験を行った。表-2 中の供試体種類は、図-2 に示す床版の劣化損傷をモデル化したものである。供試体の基本的な仕様は、コンクリート厚を 200mm、アスファルト舗装厚を 75mm とし、奥行き×幅は 900×900mm とした。なお、各種の模擬損傷は中央部の 400×400mm の平面位置に設けた。ここで、“一体化”はアスファルトとコンクリートとが一体化した健全な状態をモデル化したものである。“分離化”はアスファルトとコンクリートの間に薄シートを挿入して舗装はく離をモデル化したものである。“水平はく離”はコンクリート内の

表-1 計測システムの仕様

システム構成	機器	機器仕様	
打撃	インパクトハンマー	周波数範囲	8Hz
		感度	1.259mV/N
打撃音測定	1/2インチプリアンプ 一体型マイクロフォン	周波数範囲	20Hz~10kHz
		音圧感度	-31.7dBV/Pa
収録	モバイルパソコン	ウルトラモバイル PC CF-UI	
	AD 変換装置	インプットレンジ	-5V~5V
		サンプリング周波数	48kHz

表-2 モデル実験のケース

供試体種類 (劣化損傷モデル)	打撃数(回) (1 測点あたり)	雰囲気温度(℃) (アスファルト 中心温度)	測定箇所
一体化 275	10 100 1000	20(21.1~22.2)	供試体 中心部 付近
分離化 75			
水平はく離 105			
水平はく離 155			
脆弱化 75~105			
脆弱化 75~155			

部の深さ 30mm および 80mm までを細骨材と粗骨材を用いて土砂化を模擬したものである。

4.2 打音測定の概要

打音法による打撃位置と損傷範囲の関係を写真-3 に示す。本実験は劣化損傷の位置を推定することではなく、劣化損傷

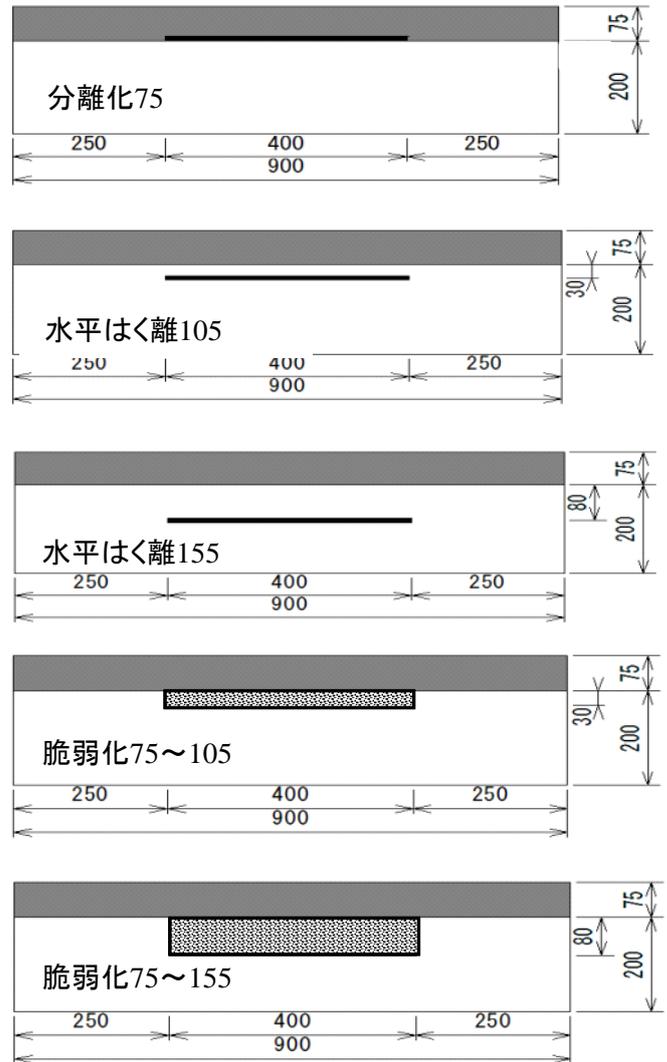


図-2 劣化損傷のモデル化

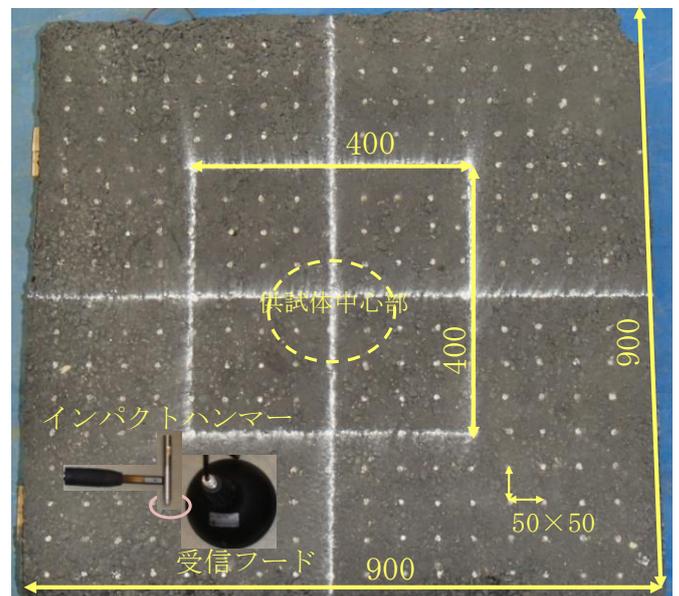


写真-3 打撃位置と劣化損傷範囲

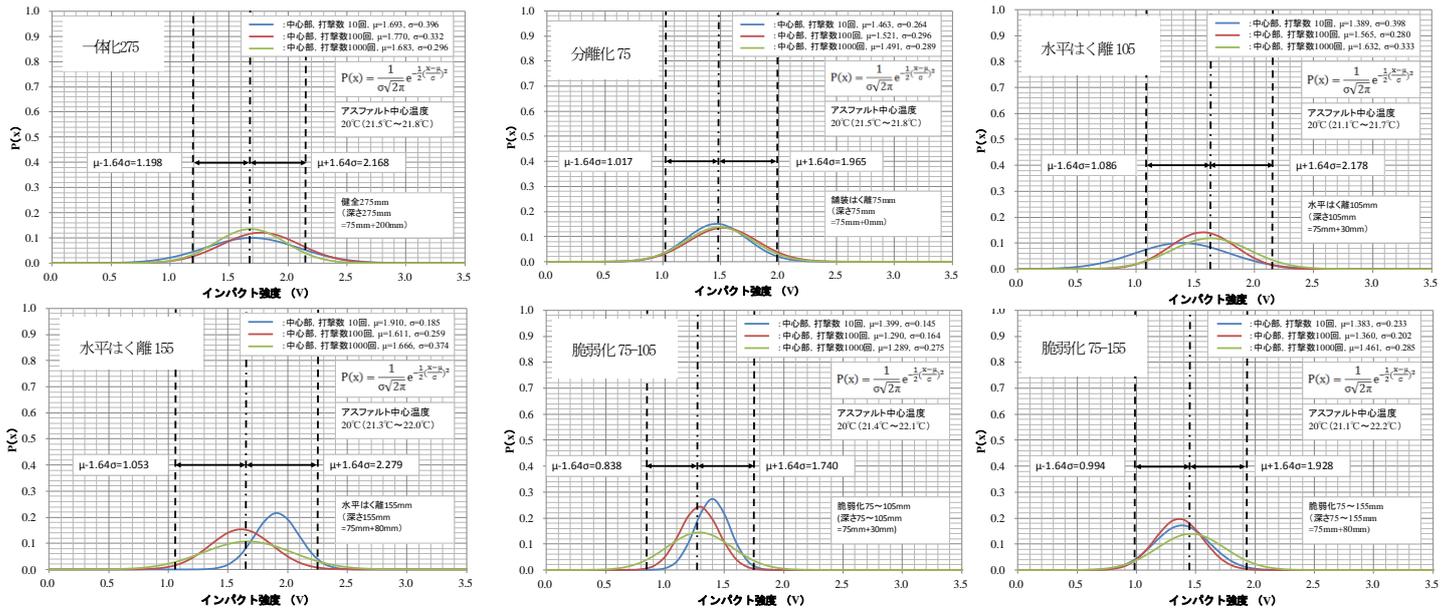


図-3 打撃数の影響(インパクト強度の確率分布)

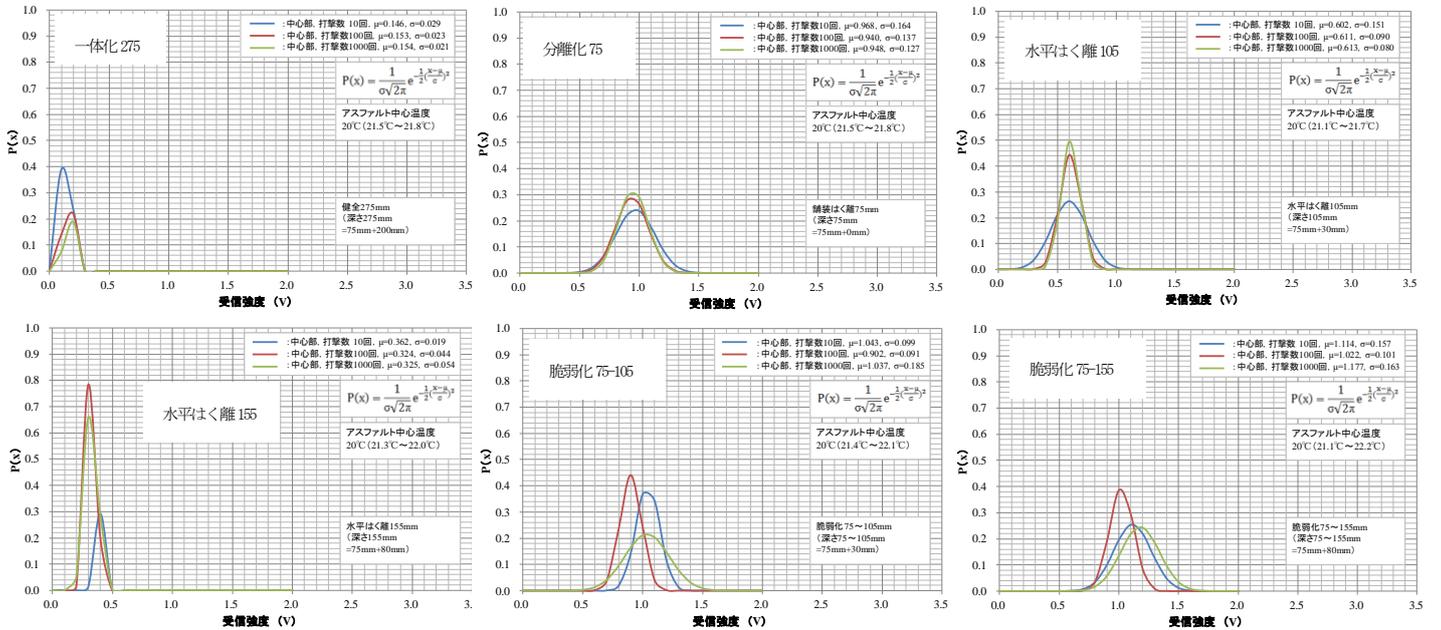


図-4 打撃数の影響(受信強度の確率分布)

の種類や劣化損傷深さを実験要因として、打音情報を評価する上で、打音結果の精度を向上させる要因を把握することを主な目的としている。そこで、打撃点となる測点は供試体中心部付近のみとした。

5. モデル実験の結果およびその考察

5.1 打撃数の影響

“一体化”，“分離化”，“水平はく離”および“脆弱化”の打撃数の影響を分析した結果を図-3に示す。図中の μ はインパクト強度の平均値、 σ は標準偏差である。これらの結果をみると、インパクト強度の母集団が正規分布として表現でき、かつ概ね中心極限定理に従うことから、同一条件の測点における打撃数10回の結果は、概ね打撃数1000回の母集

団に属している。ここで、正規分布に従うインパクト強度の分布から損傷検知に採用すべきインパクト強度の信頼性区間を定義する。すなわち、インパクト強度の信頼性区間として上下限の5%棄却領域 ($\mu - 1.64\sigma \leq \mu \leq \mu + 1.64\sigma$) を考慮すると、最小値として約1Vから最大値として約2Vの範囲がインパクト強度の信頼性区間となる。また、この信頼性区間は“一体化275”を除く劣化損傷モデルケースにおいてほぼ適用可能と考えられる。次に、受信強度の分析結果を図-4に示す。これらをみると、インパクト強度の結果と同様に正規分布によって表現でき、概ね中心極限定理に従う。ここで、インパクト強度の信頼性(上下限5%棄却)を考慮した場合の受信強度のボラティリティー σ を調べた結果が表-3である。すべての劣化損傷モデルケースにおいて、 σ が小さくなり、受

信強度の信頼性も高まることがわかる。

5.2 劣化損傷の種類がインパクト強度や受信強度に及ぼす影響

インパクト強度の信頼性区間とそれに対応する受信強度を用いて劣化損傷深さを式(2)によって推定し、実劣化損傷深さと比較した。図-5は推定劣化損傷深さの確率分布を示したものである。また、図-6は各劣化損傷種類ごとの平均値 μ を用いた推定劣化損傷深さと実劣化損傷深さとの関係を示したものである。劣化損傷深さが約150mmの深さまでの浅層部においては、ボラティリティーも小さく精度よくその深さを推定することが可能であることがわかる。一方、200mmを超える深層部においては、その推定精度が劣ることがわかる。このことは、既往の研究結果とも一致する⁶⁾。また、深層部の推定精度が劣る原因として、アスファルトとコンクリートのヤング係数が異なることも一因と考えられる⁷⁾。他方、のかぶりコンクリートの脆弱化をモデル化したケースは、アスファルトがはく離したケースと同程度の深さとして検知する傾向がある。

6. まとめ

本モデル実験で得られた打音法による損傷検知精度の信頼性にかかわる知見をまとめると以下のとおりである。

- ①劣化損傷の種類にかかわらず、インパクト強度は正規分布で表現でき、概ね中心極限定理に従う。この場合、インパクト強度の信頼性区間は1V~2Vとすることが適切である。
- ②劣化損傷の種類にかかわらず、受信強度は正規分布で表現でき、概ね中心極限定理に従う。また、インパクト強度の信頼性区間として1V~2Vを採用することで、受信強度のボラティリティーが小さくなる。
- ③インパクト強度と受信強度の信頼性を考慮して、劣化損傷深さを推定した結果、その深さが約150mmまでの浅層部においては、精度よく深さを推定することが可能である。一方、200mmを超える深層部においては、その推定精度が劣る。また、かぶりコンクリートが脆弱化した場合はアスファルトとコンクリートとはく離した深さと同程度の検知精度となる傾向がある。

今後は、アスファルト舗装と床版コンクリートのはく離現象と床版コンクリートのかぶり部が脆弱化した現象をより適切に判別する手法について検討する予定である。

参考文献

- 1) KBRC：アセットマネジメントサマースクール-国際規格化ISO5500Xに向けて-，2011.8.
- 2) 例えば，石川ほか：凍結防止剤による塩害を受けた道路鋼橋RC床版の鉄筋腐食の実態と自然電位測定の実用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.1453-1458, 2011.
- 3) Shinya Kitagawa, Sadao Kimura, Mamoru Moriyama:

表-3 インパクト強度の信頼区間が受信強度へ及ぼす影響

供試体種類	打撃数 (回) (1測点あたり)	標準偏差 σ	
		5%棄却前	5%棄却後
健全275	1000	0.027	0.021
舗装はく離75	1000	0.162	0.127
水平はく離105	1000	0.122	0.080
水平はく離155	1000	0.081	0.054
脆弱化75~105	1000	0.240	0.185
脆弱化75~155	1000	0.216	0.163

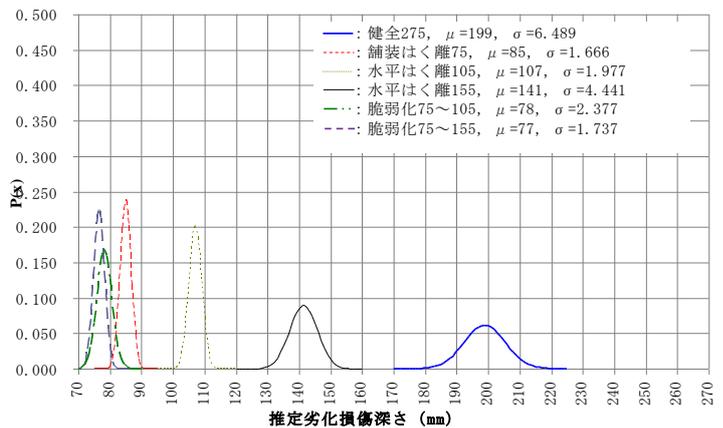


図-5 推定劣化損傷深さの確率分布

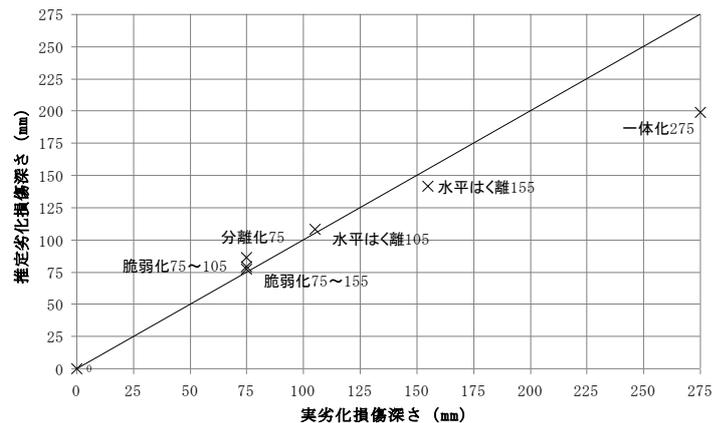


図-6 推定劣化損傷深さと実劣化損傷深さとの関係

DETERIORATED DETECTION OF THE REINFORCED CONCRETE SLAB OF A HIGHWAY BRIDGE USING IMPACT ACOUSTICS METHOD, 7th Conference on Our World in Concrete & Structures, pp. 29-31, August 2012, Singapore

- 4) NDIS2426-3：コンクリート構造物の弾性波による試験方法(第3部打音法)，2009
- 5) 例えば，倉橋，北川，森山，木村：橋梁RC床版の損傷検知に関する打音法のキャリブレーションの影響，土木学会第67回年次学術講演会概要集，V-035, 2012-9
- 6) 歌川，伴，北川：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，V-383, 2003.9.
- 7) 杉山，北川，森山，木村：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，投稿中，2013.