

報告 非破壊検査測定器によるコンクリート浮き部の検出方法の検証

北川 真也*1・野嶋 潤一郎*2・鈴木 世二*3

要旨：社会基盤であるトンネル，橋梁，栈橋等は，様々な要因によって劣化し老朽化が進んでいる。老朽化した構造物は，長寿命化を図るため部分的な補修・補強が行われている。補修・補強を行うには，劣化範囲を適正に選定する必要があるが，技術者の技量に左右されやすい点検や調査が行われている。そこで，筆者らは，劣化範囲を定量的に選定するため，反発度法，超音波法，打音法の3種類の非破壊検査手法に着目し検証実験を行った。実験の結果，打音法を用いることで劣化範囲を定量的に判断することが可能であることがわかり，実構造物による検討においても十分適用可能であることがわかった。

キーワード：調査診断，浮き範囲選定，非破壊検査方法，モニタリング，打音法

1. はじめに

塩害劣化を受けた鉄筋コンクリート構造物の断面修復による補修範囲の選定は，従来，熟練調査技術者が打検ハンマーを用いてコンクリート表面を打診し，打撃音と指触感覚により，浮きの有無，範囲および浮き厚さを識別している。この調査方法は，調査技術者の技量や経験に左右されることから，定性的な感覚による判断となり，再現性に乏しく定量的なデータを取得することが困難である。また，補修を実施するには，浮き範囲の選定は重要な要素であるため，調査精度の向上は必要不可欠となっている。そこで，筆者らは，調査精度の向上を図るため，反発度法，超音波法，打音法の3種類の非破壊検査手法に着目し，コンクリート浮き範囲の検出の適用性に関する検討を行った。

2. 非破壊検査方法

3種類の非破壊検査手法について概要を示す。

2.1 反発度法¹⁾

調査技術者は打検ハンマーの打撃音や指触振動により浮き範囲を判断する。その打検ハンマーに着目し，一般的な反発度測定器(以下，リバウンドハンマー)を用いて，反発度を測定，反発度から表面強度を推定し，浮きと健全部の表面強度の差より浮きの有無を検出する。

2.2 超音波法^{2), 3)}

コンクリート中を伝播する弾性波速度は，密実性，含水率，空気層，異物により左右され，剥離層が生じている浮き部では空気層が介在しているため，伝播速度が遅くなることが予想される⁴⁾。この影響に着目し，超音波法を用いたコンクリート中の伝播速度(透過法)の差により浮きの有無を検出する。

2.3 打音法^{5), 6), 7), 8)}

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既往の研究により知られている(参考文献5参照)。打撃により観測される波動には，縦波，表面波，曲げ波などがある。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手法である。ここで，図-1は，打撃力を一定とし，部材厚さを変化させたときの曲げ振動の大きさを示したものである。部材厚さが薄い場合は曲げ振動が大きく，厚い場合は，曲げ振動が小さくなることを示しており，得られた振幅値を用いることで，部材厚さを推定することが可能である。

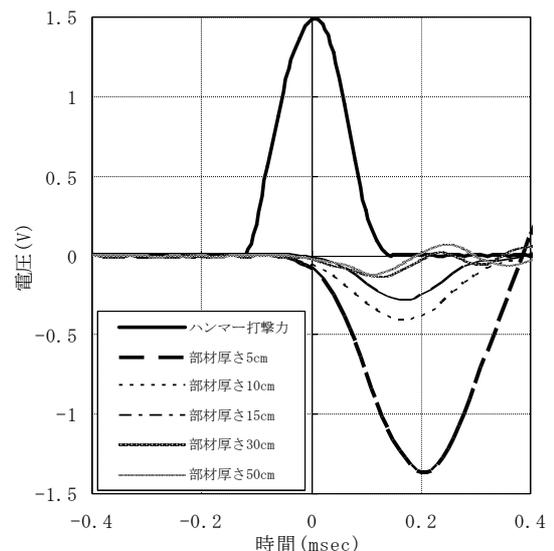


図-1 板厚が異なる場合に得られる打音法結果図

*1 佐藤工業(株) 土木事業本部 設計部 設計第二課 副課長 (正会員)

*2 (株) 開発設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 設備保全技術部 課長 博士(工学) (正会員)

*3 (株) シーテック 代表取締役社長 (正会員)

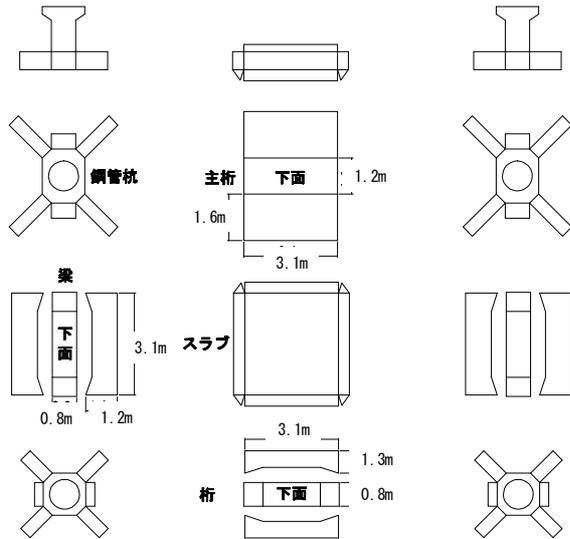


図-2 栈橋上部工(主桁, 梁, 桁)の測定部材の展開図

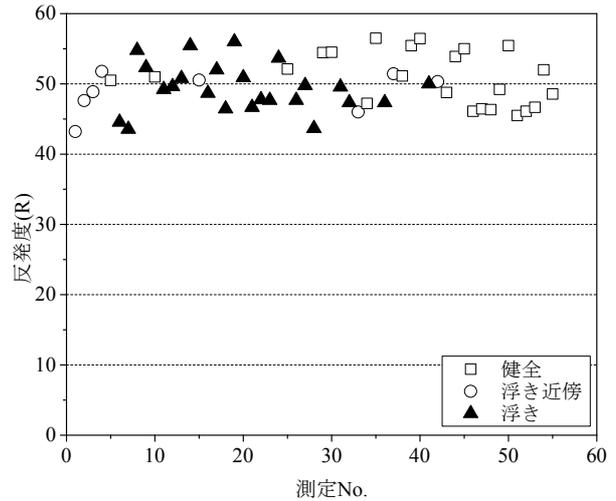


図-3 反発度の差 (7BL, 部位 30~36)



写真-1 反発度法による測定状況



写真-2 超音波法による測定状況

表-1 反発度結果

ブロック	部位 (桁)	浮き	反発度 (R)
7	12~18	浮き	49
		健全	51
		浮き周辺	51
	8~14	浮き	44
		健全	48
		浮き周辺	48
	30~36	浮き	49
		健全	50
		浮き周辺	49
	平均	浮き	47
		健全	50
		浮き周辺	49

3. 検証結果

3.1 反発度法

リバウンドハンマーを用いた反発度法による浮きの有無の検証は、図-2に示した実構造物(栈橋上部工の主桁側面, RC 部材)を対象に行った。反発度測定状況を写

真-1に、測定された反発度を表-1および図-3に示す。なお、表-1の部材番号は鋼管杭の栈橋法線方向の通り番号に対応した主桁の名称番号である。

反発度は、表-1に示すように浮き部(打検ハンマーによる調査員の判断)は健全部に対して幾分小さい値であるが、5%程度の差に過ぎず、浮き部近傍は健全部と同等な値であった。また、測定ブロック 7BL のうち部位 30~36における反発度をプロットした図-3より、健全、浮き近傍および浮きに反発度の差を確認することはできないことがわかる。打検ハンマーによって検出された「浮き」は、健全部と明確な差がないことになり、人間による打撃音や振動感触のほうがリバウンドハンマーより浮きと健全の差を検知しやすい手法であると考えられる。なお、リバウンドハンマーの打撃面積や打撃力の改善により、人力ハンマー打検に類似できた場合、その差が明確となる可能性はあると考えられる。

3.2 超音波法

超音波法による浮きの有無の検証は、反発度法と同箇所を対象に行った。超音波法による測定状況および測定方法を、写真-2および図-4に示す。超音波法では、コ

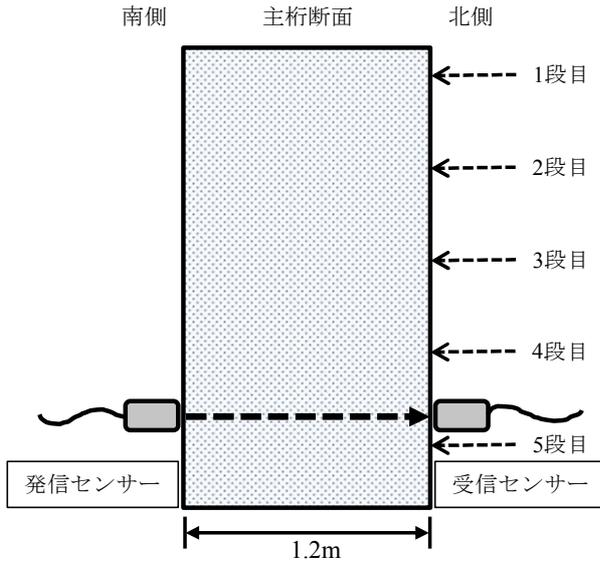
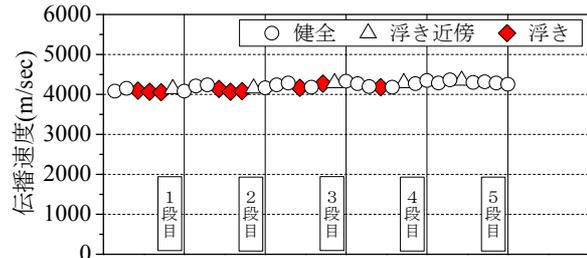


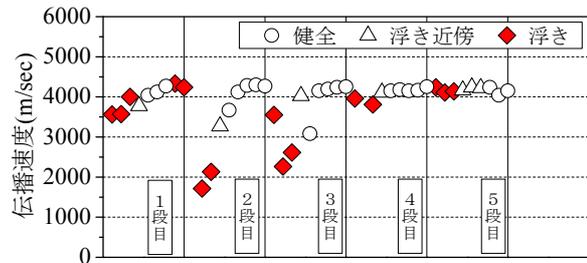
図-4 超音波法による測定方法（透過法）

表-2 伝播速度測定結果

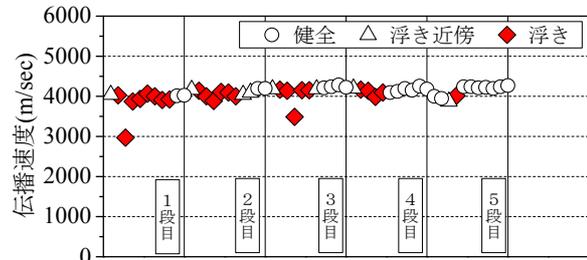
部材	部材変状	超音波伝播速度 (m/sec) 【測定平均値】
主桁 12~18	浮き	4125
	健全	4240
	浮き近傍	4242
主桁 8~14	浮き	3482
	健全	4112
	浮き近傍	3973
主桁 30~36	浮き	3976
	健全	4173
	浮き近傍	4097
全測定	浮き	3861 (92.5%)
	健全	4175 (100%)
	浮き近傍	4104 (98.3%)
1段目	浮き	3838
	健全	4020
	浮き近傍	4040
2段目	浮き	4038
	健全	4196
	浮き近傍	4101
3段目	浮き	4019
	健全	4240
	浮き近傍	4181
4段目	浮き	4097
	健全	4167
	浮き近傍	4196
5段目	浮き	4013
	健全	4232
	浮き近傍	3871
測定段毎 の平均値	1段目	3966
	2断面	4033
	3断面	4091
	4断面	4111
	5段目	4105



(部材 12~18)



(部材 8~14)



(部材 30~36)

図-5 伝播速度測定結果

ンクリート表面に発信センサーを接触させ、反対側の面に受信センサーをセットし、主桁断面を透過する方向の伝播速度を測定した。測定位置は反発度法による測定と同様に、一定間隔(20cm 間隔)の格子ポイント上とし、図-4 に示した上部から5段分を測定対象とした。

超音波法による伝播速度測定結果は表-2 および図-5 に示すように、反発度測定と同様、打検ハンマーにより浮きと判別した部位とそれ以外の健全と判別した部位、浮き部近傍の3種部位が伝播速度にてどのような差が生じるかを検証した。その結果、健全部が4175m/secであるのに対して、浮き部が3861m/sec、健全部の浮き近傍が4104m/secであり、健全と比較して、浮き部が92.5%程度、浮き近傍が98.3%である。この値が有意な差であるかの判断は困難であるが、健全部と比較して、超音波の伝播を阻害する剥離層や微細ひび割れの存在により伝播速度に差が生じている可能性がある。なお、主桁高さ方向の段数毎の全平均値を整理すると、下段の4段目および5段目が最も大きく4100m/sec以上で、上段ほど小さい傾向にあり、1段目は3966m/secで、5段目の97%程度であった。これはコンクリートの密実性に起因した品質の差であると考えられる。

3.3 打音法

打音法による検証は、模擬試験体および実構造物（図-2）を対象に行った。打音法測定機器を写真-3に示す。

3.3.1 試験体での検証

試験体での検証は、コンクリート内部に空洞を模擬した試験体を用いて空洞位置の検出可否の検証を行った。



写真-3 打音法測定機

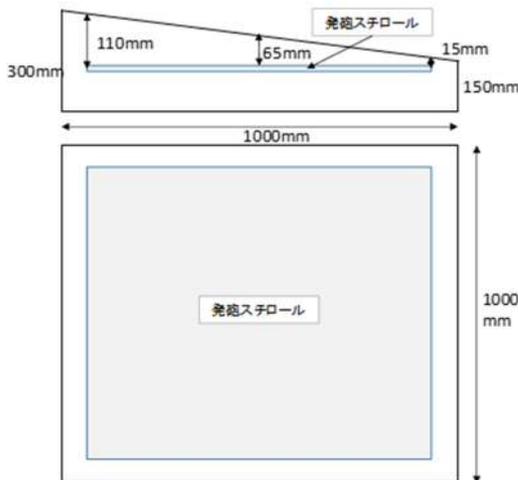


図-6 浮き模擬試験体



写真-4 模擬試験体

模擬試験体は、コンクリート内部に発砲スチロールを埋め込むことで空洞を模擬している。図-6および写真-4に模擬試験体概要を示す。試験体上面は図-6に示したように斜形とし、コンクリート内部の発砲スチロールを水平方向に埋設したことで、コンクリート上面からの模擬空洞の位置が50mm間隔で15~110mmと深さが変化する形態となっている。空洞位置の検出可否評価方法は、部材厚さを推定する方法で行った。2.3節に示したとおり、曲げ振動の大きさによって、部材厚さを評価することが可能である。部材厚を推定するための推定式を式(1)に示す。なお、詳細については、参考文献8を参照されたい。

$$\text{Log}_{10}h = P_1 - P_0 \log_{10}A \quad (1)$$

ここに、 h : 部材厚(mm)

A : 振幅値比(= F_{\max}/P_{\max})

P_{\max} : 最大打撃力 (V)

F_{\max} : 第一波目における打撃音 (V)

P_1, P_0 : 実験により求められる係数

打音法による空洞位置の測定結果は表-3に示すように、実測値に対して数ミリの差が生じているが、コンクリート上面からの空洞位置の差異を検出することが可能であり、インパクトハンマーにより空洞の有無およびコンクリート表面からの位置を確認することができる。なお、両端部での誤差が大きい傾向にあるのは、中央部と辺縁部の境界条件の違いによる影響であると考えられる。

3.3.2 実構造物での検証

実構造物での検証は、図-2に示した実構造物のうち桁および梁を対象に測定を行った。検証方法は、写真-5に示すように部材側面を調査技術者がハンマー打検し、浮き範囲を選定しマーキングする。次いで、格子ポイントを測定点とし、写真-6に示すようにインパクトハンマーによりコンクリートを打検し、マイクロフォンによ



写真-5 調査技術者による打検状況

表-3 試験体による空洞位置の検証結果

種別	試験体厚(mm)		測定値 (mm)	差 (mm)
	空洞位置	中央値		
空洞あり	15~25	20	31	11
	60~70	65	65	0
	80~90	85	90	5
	95~105	100	127	27
空洞なし	200	200	263	63



写真-6 打音法測定状況

表-4 梁1側面(5ブロック)を対象とした打音法による測定結果

測定結果(推定部材厚さ)(mm)																		
測定行	測定列																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
A	199	183	228	228	170	126	166	128	109	185	123	133	103	150	131	162	113	
B	234	221	212	212	175	157	96	100	96	110	118	128	129	182	159	160	133	
C	256	229	244	244	219	250	307	251	254	150	211	187	225	220	243	227	245	
D	232	269	185	185	167	159	215	252	211	209	187	181	179	141	178	182	240	
平均值	浮き(斜字)			162														「打検ハンマーによる調査員が浮きと判断した範囲の測定値」
	健全(直字)			223														

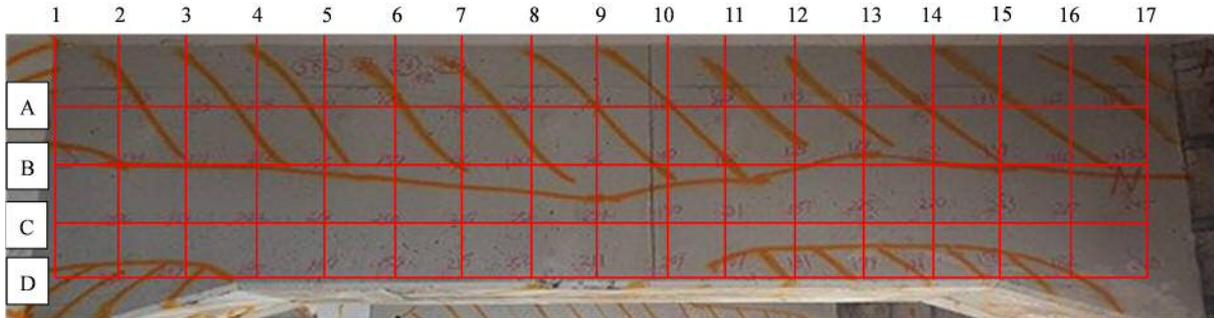


写真-7 梁1側面(5ブロック)ハンマー打検結果(斜線:浮き範囲,赤数字:打音法測定値)

表-5 梁2側面(5ブロック)を対象とした打音法による測定結果

測定結果(推定部材厚さ)(mm)																			
測定行	測定列																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
A	246	184	256	339	446	493	436	347	367	367	367	367	228	166	320	352	182	217	
B	207	110	252	299	371	350	335	311	303	303	312	140	134	253	325	88	179		
C	184	103	333	290	377	372	364	364	372	372	372	356	349	360	339	372	215	113	
D	249	198	267	337	291	308	335	275	276	276	276	326	333	281	308	295	294	304	
平均值	浮き(斜字)			216															「打検ハンマーによる調査員が浮きと判断した範囲の測定値」
	健全(直字)			336															

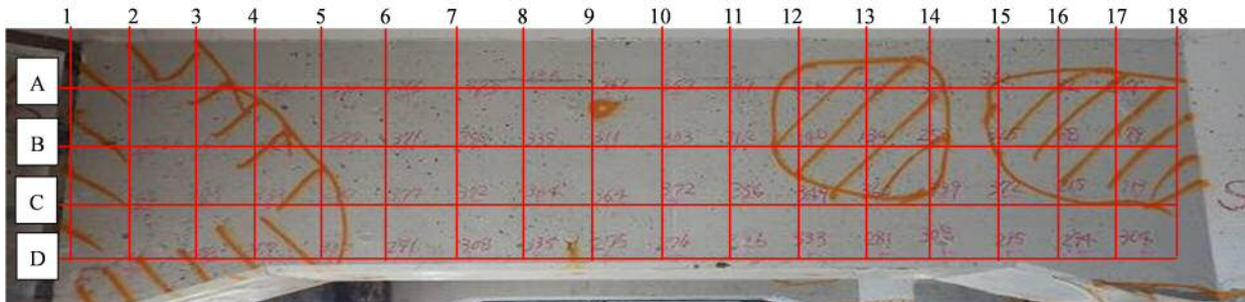


写真-8 梁2側面(5ブロック)ハンマー打検結果(斜線:浮き範囲,赤数字:打音法測定値)

り曲げ振動によって発生した音を捉え、部材厚を計測し、健全と浮きの差異を検証した。

表-4 および表-5 は、検証を行った実構造物のうち梁側面を対象に打音法による測定を行い、測定によって得られた推定部材厚さ(mm)をまとめた一覧表である。写真-7および写真-8は、同梁部材を調査技術員がハンマー打検し、浮き範囲(斜線部)であると識別した箇所を示したものである。打音法の結果とハンマー打検によって識別された範囲を比較すると、打音法によって得られた推定部材厚さ(表中の斜字)は小さい結果となっており、ハンマー打検による識別範囲と一致していることが分かる。この結果より、打音法によって得られたデータから部材の浮きを検知することが可能であることがわかった。

表-6 棧橋上部工打音法測定結果

BL	部材	位置	測定結果(部材厚さ:mm)						
			健全部			浮き部			差(平均値)
			最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	
9	桁	No.29-35	344	194	321	272	150	199	122
	梁	No.33-32	316	178	251	343	72	182	69
	梁	No.35-36	248	248	248	206	116	155	93
	主桁	No.36-30	318	191	267	267	84	172	95
5	梁	No.23-24	256	150	223	269	96	162	61
	桁	No.22-28	356	239	316	287	122	195	121
	主桁	No.36-30	350	248	306	338	94	241	65
4	梁	No.12-11	493	256	336	349	88	216	120
	主桁	No.32-26	405	229	320	354	92	172	148
	主桁	No.12-6	355	301	326	319	154	214	112
平均值			344	223	291	300	107	191	101

表-6は、検証を行った栈橋上部工の9、5および4ブロックの全10部材を対象とした結果をまとめたものである。浮き部はハンマー打検により調査技術員が浮きと判断した箇所であり、健全部はそれ以外の範囲となる。なお、検証時においては、調査技術員がハンマー打検により浮きと判断した範囲においても、素人が容易に判別できる浮き音と熟練者でなくては判別できない浮き音が存在していた。

打音法により得られた測定結果を整理すると、表-6に示すように、健全部の平均が291mm、浮き部の平均値が191mmで、その差は約100mmである。構造物の部材厚さは主桁が1.2m、桁および梁は0.8mであり、打音法によって測定可能な部材厚250mm程度を超えている。そのため、健全部における測定結果は、実測値との差が大きくなっている。そこで、ここでは、健全部と浮き部の数値差を用いることによる検証を行った。検証結果より、打音法による測定値では健全部に対して浮き部が30%程度の差が生じているため優位な差であると判断することができる。この値は61mm~148mmと測定部材によって異なり浮き部での測定値の差に左右されている。浮き部が素人でも判別できるような薄層の浮きでは、部材厚が小さく測定されるため、健全部との差が明確となる。一方、浮き層が鉄筋付近に生じている場合、測定部材が厚いため、測定結果も大きい傾向にあり、健全部との差が小さくなる。しかし、技術者による判断が困難な浮きに対しても、打音法による測定値に差が得られた場合、定量的な判断により浮きの有無を検出することが可能である結果と考えられる。

6. まとめ

コンクリート構造物の劣化(浮きの有無、範囲)は、熟練技術者によるハンマー打検により判断するのが一般的である。本報告はハンマー打検法に代わる非破壊検査方法の確立を目指し、3種類の非破壊検査手法について有効性を検証した。

表-7に各手法における評価値の差を示す。結果より、反発度法および超音波法は、健全部と浮き部で幾分の差が生じる結果であり、有効な差を得るには至っていない。一方、インパクトハンマーを用いた曲げ振動を音により捉える手法である打音法は、浮きの有無および範囲を検出することが可能であることがわかった。これにより、限定された熟練調査技術者に頼ることなく、劣化による浮きや施工欠陥による空洞等の検知が可能となり、定量的なデータを得る可能性が見出された。また、劣化範囲や断面修復補修後のモニタリングが可能となり、経年変化を把握することが出来る。更に、劣化部位の断面修復補修工事において、調査技術者による劣化範囲選定の精

表-7 検証結果による評価値の差

測定方法	健全部と浮き部(調査員による打検)との差
反発度法	5.00%
超音波法	7.50%
打音法	30.00%

度向上を図るための有効な手段であると考えられる。

今後の課題として、以下の項目が挙げられる。

- 1) 打音法により得られた部材厚は、健全部や欠陥境界部では実測値と乖離しているケースがある。そこで、曲げ振動補正係数等により、実測値に近似させる方法やAIによる欠陥推定方法を検討する⁹⁾。
- 2) 各部材により健全と浮きの閾値を設定し、浮き範囲の検出を一般作業員でも可能にする。
- 3) 測定値をモニターでマップ化し、浮き範囲を視的化する。
- 4) 浮きでの値を測定器が識別し、ランプやブザー方式にし、現場で簡易に判別できる手法とする。

最後に、本報告にあたり測定構造物をご提供頂き、またご指導賜りました電源開発(株)の和田重久様には深謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会:2018年制定 コンクリート標準示方書[規準編], 土木学会規準および関連規準, pp.364-367, 2018.
- 2) 笠井芳夫, 池田尚治:コンクリートの試験方法(下), 技術書院, 1993年
- 3) 日本非破壊検査協会:超音波パルス透過法によるコンクリートの音速測定方法, NDIS 2416-1993
- 4) 鎌田ら:コンクリートの非破壊試験の理論と実際, コンクリート工学, Vol51, No.4, pp.340-347, 2013.4
- 5) 歌川ら: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.
- 6) 佐藤工業(株):コンクリート健全性評価システム, <https://www.satokogyo.co.jp/technology/detail.php?id=55&parent_id=26&category_id=45>
- 7) 北川ら:健コン診断ポータブルの開発-打音法によるコンクリート診断技術-, 佐藤工業技術研究所報, No.34, pp.9-15, 2009.
- 8) 北川ら:打音法を用いた道路橋鉄筋コンクリート床版の劣化検知について, 佐藤工業技術研究所報, No.37, pp.29-35, 2012.
- 9) 黒田ら:試験体で得られた学習データを用いた打音診断システムの開発, 土木学会西部支部平成30年度技術発表論文集, 2018.