

損傷の蓄積したコンクリートにおける波長の異なる弾性波の伝搬特性に関する 実験的検討

Propagation Characteristics of Elastic Waves with Different Wavelengths in Deteriorated Concrete Core Samples

○梅澤輝*, 向井萌華**, 柴野一真**, 鈴木哲也***

○Hikaru UMEZAWA*, Moeka MUKAI**, Kazuma SHIBANO** and Tetsuya SUZUKI***

1. はじめに

近年、農業水利施設の経年劣化が社会的問題として注目されており、効率的な維持管理や更新が技術課題となっている。コンクリート構造物においてはこれらの変状を評価する上で、構造物に損傷を与えることなく比較的簡便に試験を行うことのできる非破壊検査技術はより注目度を増してきている。弾性波法は非破壊検査技術の一種であり、広く用いられている。その評価精度は波長や粗骨材分布などの内部特性の違いによって影響を受けるが、損傷を評価する上で適切な波長は明確になっていない¹⁾。本研究では既設水利構造物から採取したコンクリートコアを用いてX線CT計測を行い内部構造の定量化を行った後、入力波長や評価手法の異なる三種類の弾性波法に基づく試験を実施し、内部構造と各試験法の関係を考察した。

2. 実験および解析手法

コンクリートコアは新潟県上越市にある矢代川頭首工と谷浜頭首工よりそれぞれ左岸堰柱、右岸堰柱、底部の3箇所から計27本（供試体長さ：169.7 mm~242.5 mm）採取を行った。コンクリートコアはX線CT計測により内部構造の可視化と、ひび割れ、空隙、粗骨材の定量評価を行った。本研究において算出したX線CT計測による指標は、各内部構造の面積率と重心角度（弾性波の入力方向に対し直交する面を0°とした）である。X線CT計測後、三種類の弾性波法に基づく試験（共鳴振動法、超音波伝搬速度試験、Acousto-Ultrasonic法）により損傷度評価を試みた。共

鳴振動法はJIS A 1127²⁾に基づき縦振動を用いて1次共鳴周波数の計測および動弾性係数 E_D の算出を行った。入力周波数は500~20000 Hzである。超音波伝搬速度試験ではP波伝搬速度の測定を行い、動弾性係数 E_d の算出を行った（式（1））。入力周波数は54, 150 kHzである。

$$E_d = \frac{V_p^2 \rho (1 - 2\gamma)(1 + \gamma)}{(1 - \gamma)}, \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度（ m^2/kg ）、 γ はポアソン比（=0.2）である。Acousto-Ultrasonic法は材料の不均一性に基づく超音波の減衰特性を用いて、損傷度の評価を行う手法である³⁾。送信用探触子から励起した超音波は近傍のAEセンサ（Ch1）および100 mm離れたAEセンサ（Ch2）により受信される。入力周波数は54, 150, 500 kHzおよび2 MHzである。本研究においてはAMP（最大振幅値）の減衰率を評価値とした。これら三種類の非破壊試験法により得られた評価指標を目的変数、X線CT計測による指標を説明変数とした重回帰分析を実施し、各試験法と内部構造の関連性の考察を行った。

3. 結果および考察

E_D とX線指標の関係における重回帰分析

Table 1 重回帰分析の決定係数
Coefficient of determination for multiple regression analysis

周波数	E_d	AMP
2 MHz	-	0.227*
500 kHz	-	0.259**
150 kHz	0.821***	0.446***
54 kHz	0.802***	0.692***

*第一建設工業株式会社（前新潟大学農学部） Daiichi Kensetsu Corporation

**新潟大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Niigata University

***新潟大学自然科学系（農学部） Institute of Agriculture, Niigata University

キーワード：コンクリート、損傷、X線CT法、弾性波法、波長

Table 2 標準化回帰係数
Standardized regression coefficients

目的変数 周波数	E_D	E_a		AMP			
		54 kHz	150 kHz	54 kHz	150 kHz	500 kHz	2 MHz
粗骨材重心角度	1.548	1.065	1.173	-3.384	4.790	2.103	5.185
粗骨材面積率	-0.431	2.272***	1.839	-3.562	-1.293	1.296	2.172
ひび割れ重心角度	1.594	2.490**	4.219***	4.019	-5.020	-6.848	-6.352
ひび割れ面積率	-5.958***	-4.043***	-7.229***	20.093***	14.320***	12.823**	13.172**
空隙重心角度	-1.921	0.478	0.834	1.965	4.422	1.855	5.164
空隙面積率	-0.212	-2.931***	-3.325***	-6.706*	7.503*	10.155*	8.604**

*10%水準の有意差 **5%水準の有意差 ***1%水準の有意差

の決定係数は 0.504 であり、有意差検定の結果 1%水準での有意差が確認された。 E_d および AMP と X 線指標の関係における重回帰分析の決定係数を Table 1 に示す。 E_d は 150 kHz よりも 54 kHz における決定係数が高く 0.821 となった。AMP は 54 kHz における決定係数が最も高く 0.692 となった。150, 500 kHz, 2 MHz と周波数を高くするにつれ決定係数は減少し、モデルの説明力は低下した。

Table 2 にそれぞれの重回帰式における説明変数の標準化回帰係数の一覧を示す。 E_D および E_d において負の標準化回帰係数を示す変数は動弾性係数を低下させる働きをするため、弾性波の減衰 (E_D : 1 次共鳴振動数の低下, E_d : 伝搬速度の低下) の要因と考えられる。AMP は減衰率を使用しているため、正の標準化回帰係数を示す変数が弾性波の減衰 (最大振幅値の減少) の要因と考えられる。 E_D における標準化回帰係数のうちひび割れ面積率のみで有意水準が確認されたが、決定係数は 0.504 と共鳴振動法と比較し低い数値となった。これは共鳴振動法が 1 次元の棒部材を仮定しており、ポアソン比を考慮していない計測手法であることに由来すると考えられる。音響インピーダンスに差がある界面が存在した場合、弾性波は反射・透過、散乱により特性が変化し、一般にその影響度合いは波長に依存し変化することが考えられる。 E_d は 54 kHz と 150 kHz の間において決定係数の差異は見られないが、ひび割れ角度回帰係数の絶対値は 54 kHz よりも 150 kHz において大きくなっている。これは伝搬経路上に存在するひび割れの角度が弾性波の入力方向に対して平行である場合、伝搬速度を低下させないことを示しており、その傾向は波長

が短くなると強くなると考えられる。AMP の決定係数は高い周波数を用いるほどモデルの説明力が低下している。ひび割れ面積率が AMP の差分値を増加させる主な要因であることがわかるが、500 kHz および 2 MHz においては有意水準が低下している。このことより AMP の減衰要因は 2 MHz のような高い周波数においてはひび割れ面積率が単純な減衰の要因とはならず、内部構造が複雑に減衰に寄与しているものと考えられる。その複雑さは波長に依存して変化し、高い周波数を用いるほど顕著であることが考えられる。

4. おわりに

本研究では弾性波法による評価値と X 線 CT 指標の関連性を明らかにすることを試みた。その結果、 E_d のひび割れ面積率は伝搬速度を低下させる要因であるが、ひび割れ重心角度が入力方向に対し平行な場合、伝搬速度の低下を抑制させることが示され、その度合いは波長に依存して変化することが示唆された。AMP は 54 kHz のような低い周波数ではひび割れが減衰の要因として卓越するが、500 kHz や 2 MHz のような高い周波数においては、使用した X 線 CT 指標のみでは再現が困難であり、より複雑な要因が作用して減衰していると推察される。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会弾性波法の非破壊検査研究小委員会 (2007): コンクリート中の弾性波伝搬挙動に影響を与える要因, pp. 8-11.
- 2) 日本工業規格 (2010): 共鳴振動法によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法, JIS A 1127.
- 3) Hardy Jr, H. R. (2003): Acoustic Emission / Microseismic Activity: Principle, Taylor and Francis, pp. 249-251.