

RC はりの載荷試験における 鉄筋劣化の超音波探傷試験に関する研究

永松牧子*・海部貴裕**・浦田幹康***

岡本賢治****・鶴田健*****・松田浩*****

Research into Ultrasonic Test for Deterioration of Rebar at Loading Test for RC Beam

by

Makiko NAGAMATSU*, KAIBE**, Mikiyasu URATA***, Kenji OKAMOTO****
Ken TSURUTA*****, Hiroshi MATSUDA*****

In this study, in order to clarify the possibility of internal damage in concrete structures, loading tests and ultrasonic testing technique were conducted on concrete materials. In addition, the correlation between the internal damage condition of concrete and the ultrasonic signal was investigated. As a result, a correlation was obtained between the damage state inside the concrete and the sound pressure and velocity of ultrasonic waves. It was clarified that the damage condition inside concrete can be estimated by evaluating sound pressure and velocity. Furthermore, it's suggested that the ultrasonic testing technique could be used to detect the damage of the concrete before it appears on the surface.

Key words : *ultrasonic wave, ultrasonic testing technique, sound pressure, concrete material, PIC*

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の長寿命化や維持管理の重要性が注目されているが¹⁾、過酷な環境下では RC 構造物の劣化損傷として鉄筋腐食によるひび割れが問題となっている。構造物の主鉄筋近傍で水平方向のひび割れが生じた場合、材料内部の鉄筋とコンクリートの付着力が著しく低下することが主要因と考えられる。

以上の問題から、損傷程度を定量的に評価可能な技術として超音波探傷技術に注目した。超音波探傷技術は打音法などと比較し、使用できる周波数帯のバリエーションも多く、超音波を合成して映像化できるた

め、損傷の定量評価性に優れる。ただし、一般的なコンクリート構造物の超音波探傷技術の用途は、外表面側に発生しているひび割れの深さ計測での使用が多く²⁾⁻⁷⁾、内部の損傷評価に用いられている例は少ない。

そこで本研究では、コンクリート構造物の内部損傷の推定の可否を明らかにするため、RC はりの載荷試験および超音波探傷試験を実施し、コンクリート内部損傷状態と超音波信号の相関有無を調査した。ここで、試験体にはひび割れを模擬したモデル損傷を挿入した。また、デジタル画像相関法（以下、DICM⁸⁾）を適用し、内部損傷と外面ひずみ状況の相関有無を検証した。

令和元年 7 月 12 日受理

* 長崎大学大学院工学研究科 (Nagasaki University, Graduate School of Engineering Master's Degree)

** 日本工営株式会社 (Nippon Koei, Ltd)

*** 三菱重工業株式会社 (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)

**** マテラス青梅工業株式会社 (Materasu Oume Industry, Ltd)

***** 長崎大学大学院教授 (Nagasaki University, Graduate School, Professor)

2. 試験条件および計測条件

2.1 試験の条件

試験体の概要を Table 1 に、試験体の断面および側面図を Fig. 1, 2, 3 に示す。また、試験体に用いた 2 種のコンクリートである現場打ちコンクリートおよび高強度高耐久性の特性を有する樹脂含浸コンクリート (以下、PIC) ⁹⁾ の強度を Fig. 4 に示す。

試験体寸法は W200×H175×L1800mm であり、主鉄筋は D19 を 3 本使用し、2 点荷法によりせん断破壊することを意図して製作している。試験体 A は無損傷ならびに PIC で補強していない通常の RC はりである。試験体 B は、試験体 A の主鉄筋上にスチレンボード (W160×H1×L305mm) を導入して、鉄筋定着部の損傷を模擬した試験体である。試験体 C は損傷モデルを導入した RC に、PIC 板 (t20×H175×L900) を埋設型枠として用いて補強した RC はりである。PIC 板と現場打ちコンクリートとの一体化を図るために、PIC 板 1 枚につきボルトを 8 本取り付けて固定した。

Table 1 試験体概要

試験体	定着部損傷	PIC 板
A	—	—
B	有り	—
C	有り	有り

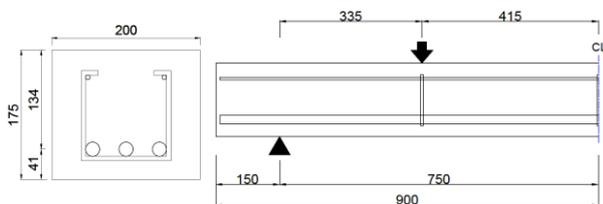


Fig. 1 試験体 A の断面・側面図



Fig. 2 試験体 B の断面・側面図

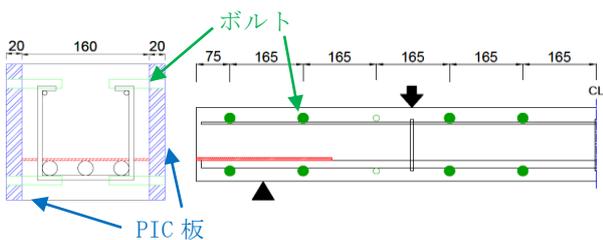


Fig. 3 試験体 C の断面・側面図

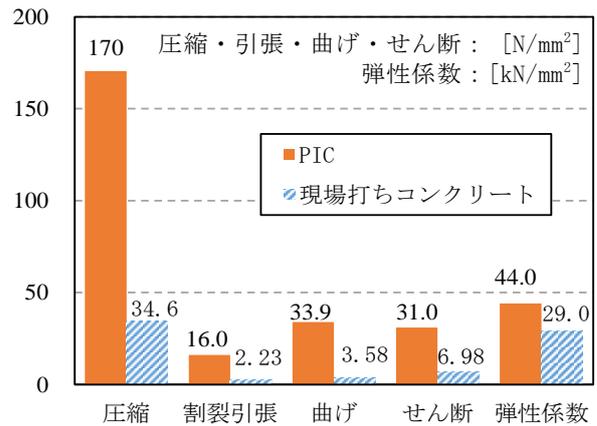


Fig. 4 強度試験 ¹⁰⁾ 結果のまとめ

2.2 計測条件

Table 2 に超音波探傷条件を示す。周波数は、一般的にコンクリート検査に使用される周波数の中でも高い周波数帯である 500kHz とし、波長分解能を上げて損傷に対する感度を高く設定した。また、超音波探傷法は 2 つの探触子を用いた透過法とし、コンクリート内の透過路程を短くして距離減衰を小さくした。

Fig. 5 に計測位置および探傷状況を示す。超音波探傷位置はひび割れ発生が想定されるせん断スパン内の 200mm 範囲を 50mm ピッチで配置し、荷重試験条件ごとに音圧レベル・透過音速について調査した。ここで、音圧は使用した探傷期の感度 (dB) とした。また、コンクリート表面のひずみ分布の計測のために DICM を側面側に適用し、超音波探傷試験によるコンクリート内部損傷結果と比較した。このようにせん断試験時に超音波探傷法と DICM を組み合わせて導入することで、コンクリート内部および外表面の損傷状態を同時に調査できる実験系とした。

Table 2 超音波探傷条件

周波数	500 kHz
フィルター	200kHz-1200 kHz
変換器の直径	1.0 inch
計測法	透過法

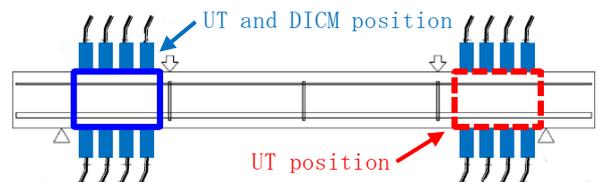


Fig. 5 計測位置

3. 載荷試験結果および超音波探傷結果

3.1 載荷試験結果

Table 3 に載荷試験結果を Fig. 6 に載荷試験の荷重-変位曲線を, Fig. 7, 8, 9 に載荷試験後の試験体のひび割れ状況を示す. すべての試験体においてせん断破壊を呈しており, 鉄筋定着部損傷がない試験体 A は 181kN でせん断圧縮破壊をし, 試験体 B は 98.8kN, 試験体 C は 192kN でせん断斜引張破壊を呈した.

Table 3 載荷試験の結果

	設計値・ 実験値	Pcr	Py	Pu	Vc	破壊 形式
A	設計値	24.7	199	186	80.5	せん断 圧縮
	実験値	29.0	—	—	<u>181</u>	
	実/設	1.2	—	—	2.2	
B	実験値	19.7	—	—	<u>98.8</u>	せん断 斜引張
	B/A	68%	—	—	55%	
C	実験値	29.9	—	—	<u>192</u>	せん断 斜引張
	C/A	103%	—	—	106%	
	C/B	152%	—	—	194%	

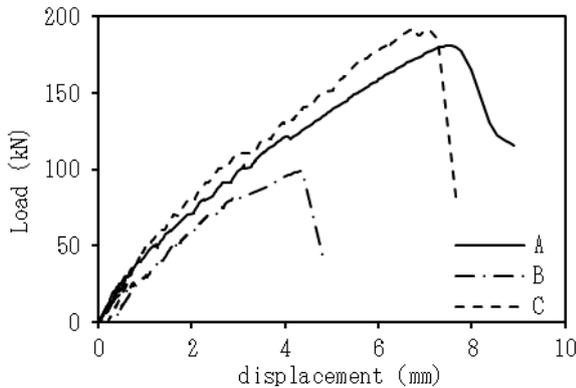


Fig. 6 荷重-変位曲線



Fig. 7 試験体 A のひび割れ図



Fig. 8 試験体 B のひび割れ図



Fig. 9 試験体 C のひび割れ図

3.2 超音波探傷試験結果

Fig. 10, 12, 14 に各試験体の主ひずみのコンター図を, Fig. 11, 13, 15 に各試験体における載荷荷重と音圧レベルの関係を示す. 試験体 A は, 荷重 80kN を境界に音圧レベルが顕著に向上する傾向にあることがわかった. これは, 超音波が透過するために必要な音圧強度が増加していることを示している. すなわち, 荷重が増加したことにより, コンクリート内部にひび割れ等の損傷が発生し, 超音波が透過し難い状況であったものと考えられる.

次に, 超音波音圧値と DICM によるコンクリート表面のひずみ分布計測と比較した. 荷重 80kN 時におけるコンクリート表面には, せん断ひずみの兆候は認められなかった. これらより, 超音波探傷法を適用することで, コンクリートの損傷を材料表面に顕在化する前に検知できる可能性が示唆された. なお, 試験体 B も試験体 A と同様の傾向にあり, 荷重 60kN を境界に音圧レベルが向上した. また, 試験体 C においては, 荷重 100kN において音圧レベルが向上する傾向にあり, 破断荷重の約 1/2 の荷重時から損傷を検知できる可能性が示唆された. また, 最大値ベースによると 130kN 時の音圧レベルは初期値と比較し, 約 1.3 倍となった.

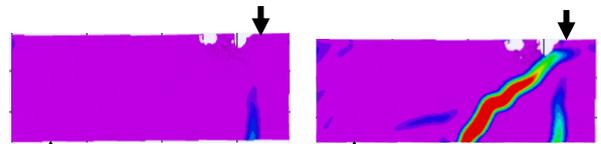


Fig. 10 試験体 A の主ひずみコンター図
(左: 80kN, 右: 180kN)

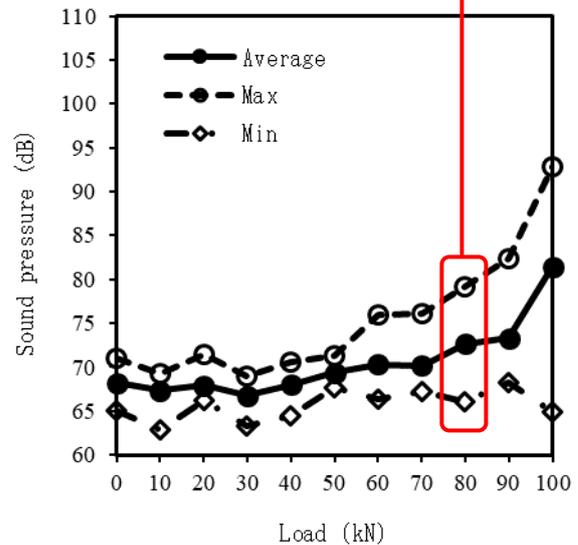


Fig. 11 荷重と音圧の関係 (試験体 A)

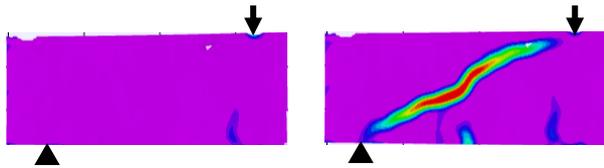


Fig. 12 試験体 B の主ひずみコンター図
(左: 60kN, 右: 80kN)

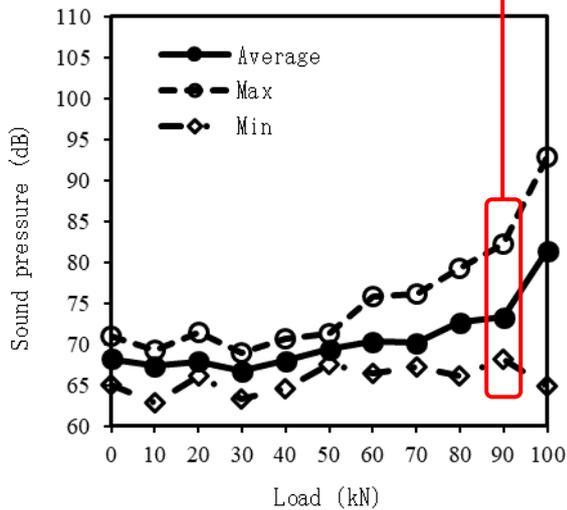


Fig. 13 荷重と音圧の関係 (試験体 B)

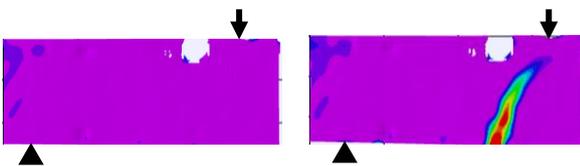
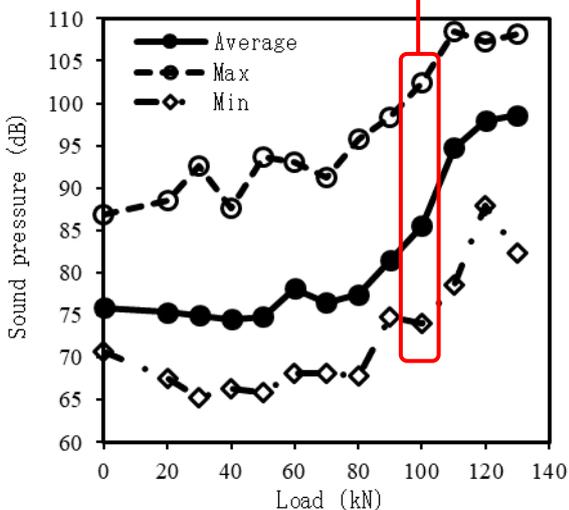


Fig. 14 試験体 C の主ひずみコンター図
(左: 100kN, 右: 190kN)



1000 μ 20000 μ
コンター図のレンジ

Fig. 15 荷重と音圧の関係 (試験体 C)

Fig. 16, 17, 18 に各荷重と超音波音速の関係を示す。試験体の初期状態における音速の最小値は 4100~4200m/s であったが、負荷が大きくなるに従い、超音波透過音速は遅延傾向にあり、3800~4000m/s まで音速が遅延していることがわかった。まず、試験体 A は、最小値ベースで初期値 4140m/s から荷重 100kN 時では 3889m/s であり、251m/s の音速低下がみられた。次に、試験体 B は、最小値ベース初期値 4136m/s から荷重 60kN 時では 3991m/s であり、145m/s の音速低下がみられた。また、試験体 C は、最小値ベースで初期値 4088m/s から荷重 130kN 時では 3851m/s であり、237m/s の音速低下がみられた。コンクリート材料自体にミクロ的な音速は変わらないと考えられるが、内部のひび割れが発生したことにより、載荷前と比較して超音波の伝搬経路が異なったことが考えられる。

以上のように、超音波探傷にてコンクリート内部の損傷状態と超音波挙動には相関関係が得られており、音圧および音速を評価することでコンクリート内部の損傷状態を推定できる可能性が示唆された。

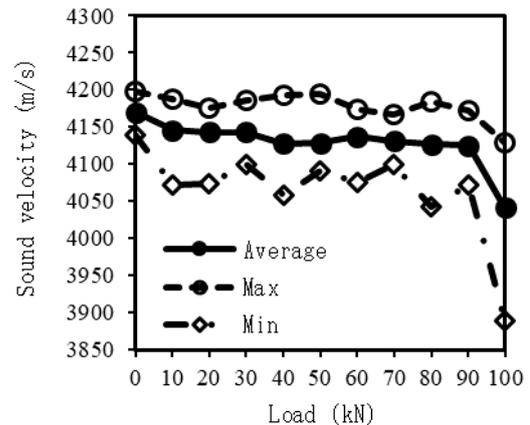


Fig. 16 荷重と超音波音速の関係 (試験体 A)

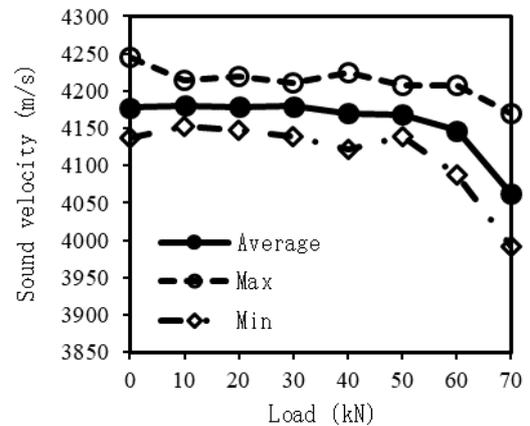


Fig. 17 荷重と超音波音速の関係 (試験体 B)

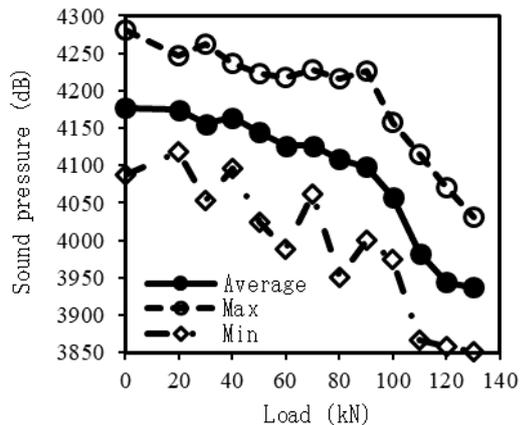


Fig. 18 荷重と超音波音速の関係 (試験体 C)

4. まとめ

コンクリート構造物の内部損傷の推定可否を明らかにするために、普通コンクリートおよびPIC施工コンクリートについて、荷重試験および超音波探傷試験を実施し、コンクリートの内部損傷状態と超音波信号の相関有無を調査した。その結果、コンクリート内部の損傷状態と超音波挙動には相関関係が得られており、音圧および音速を評価することでコンクリート内部の損傷状態を推定できることを明らかにした。さらに、超音波探傷技術を適用することで、コンクリートの損傷を材料表面に顕在化する前に検知できる可能性が示唆された。

今後、内部損傷評価精度の更なる高精度化に向けて、コンクリート内部欠陥をイメージング可能な超音波探傷手法の検討を進める。

参考文献

- 1) Matsui S.: Road bridge floor version life extension technology, Morikita publishing Co. Ltd, pp. 1, 2016
- 2) Shivprakash Iyer,:Evaluation of ultrasonic and imaging systems for concrete pipes, Automation in Construction, pp. 149-164, 22(2012)
- 3) Lotfaooah pahalavan : Interaction of ultrasonic wave with partially-closed cracks in concrete structures, Construction and Building Material, pp. 899-906, 2018
- 4) D.G. Aggelis : Repair : Evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements, Cement & Concrete Composites, pp700-711, 2007
- 5) Murakami Y.: Measurement of Crack Depth of Concrete by Ultrasonic Wave Method and Transmission Performance of Cracks, Technical Research Report of HAZAMA Corporation, pp. 1-9, 2011
- 6) Kamada T.: Present and future of non-destructive inspection for diagnosis of concrete structure, SEGJ, Vol.60, pp. 253-263, 2007
- 7) Kakei R.: Surface crack-depth evaluation method for homogeneous body based on numerical examination using EFIT, JSCE, Vol.70, pp. 10-21, 2014
- 8) Demizu A.: Fundamental on improvement in strain measurement accuracy of Digital Image Correlation Method, JSCE, Vol.68, pp. I683-I690, 2012
- 9) Koyanagi W.: Application of Resin Concrete and Polymer Impregnated Concrete, JSMS, Vol.41, No.470, pp.1709-1716, 1992
- 10) Concrete standard specification, JSCE, pp. 269, 2012