道路橋の橋脚の損傷検査技術に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 6
担当チーム：寒地構造チーム
研究担当者：畠山 乃、佐藤 京、寺澤 貴裕

【要旨】
地震後の橋脚に対して供用安全性を迅速に判断するには、土中や水中に位置する橋脚柱基部に対し目視を要しない非破壊調査手法が有用である。本研究では、異なる損傷程度の橋脚模型に対して、衝撃作用による損傷部からの反射波の分析や、模型全体の衝撃応答へのベイズ推定による損傷検知手法に関する検討を行った。前者の検討では応答周波数の変化による損傷進展状態の把握は困難であった。後者の検討では評価指標の変化から損傷状態を把握でき、橋脚柱基部の損傷状態の把握手法として有意性があることが確認できた。
キーワード：RC 橋脚、非破壊検査、衝撃弾性波、ベイズ異常検知

1. はじめに

大規模地震時に塑性化を考慮する部材として設計された橋脚は、地震後の供用安全性を道路管理者が迅速に判断する際に、特に柱基部の損傷度合いについて確認が必要である。しかしながら、柱基部の多くは土中や水中に位置し、確認には土砂掘削や仮設工等が必要となることから時間を要する。そこで、迅速な橋脚柱基部の損傷状態把握方法として、非破壊検査技術を用いることが有用であると考える。

RC 構造物の非破壊検査技術の 1 つである衝撃弾性波法は、亀裂幅に対応した反射波成分への着目により、RC 杭の損傷検知手法として活用されている [1]。RC 橋脚に対する既往研究 [2]では、柱高さ 1m の試験体を用いて反射波の振幅変化時刻と亀裂発生位置の関係性について検討されている。

一方、五井ら [3]は計測した加速度から固有周期や減衰定数、モード形状等の構造物の振動を表す複数の指標を組み合わせた特徴量を抽出し、その特徴量の統計的な変動程度の評価によって構造物の損傷程度を検知する手法を提案している（以後、ベイズ異常検知）。本手法は PC 桁を対象に一定の成果が得られている [4]。

表-1　材料諸元

コンクリート	軸方向鉄筋			
最大圧縮強度 (N/mm²)	径	種別	かぶり (mm)	降伏点 (N/mm²)
24.89	D13	SD345	40	372

帯鉄筋				
径	種別	間隔 (mm)	降伏点 (N/mm²)	有効長 (mm)
D10	SD345	150	392	520

そこで本研究では、非破壊検査による RC 橋脚柱基部の損傷状態の把握を目的とし、損傷程度を段階的に大きくした橋脚柱部の模型試験体に対し、衝撃弾性波による損傷部からの反射波に含まれる周波数分析やベイズ異常検知の適用に関する検討を行った。

2. 反射波に含まれる周波数の分析

2.1　調査概要

調査対象の構造諸元を図-1、用いた材料諸元を表-1 に示す。調査対象には正負交番載荷によって段階的に損傷を与えた。正負交番載荷は柱基部の軸方向鉄筋ひずみが降伏に達した時点の柱部天端の水平変位（$1\delta_y$＝10.5mm）を基準とし、限界状態 2 に相当する水平変位（$3\delta_y$）まで実施した。なお、上部構造の重量に相当す

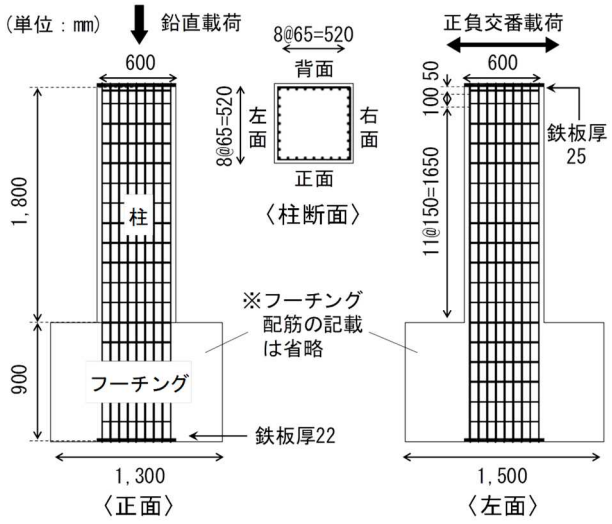

図-1　調査対象の構造諸元

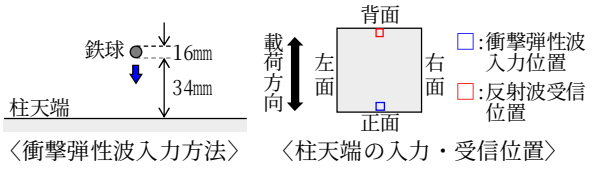

図-2　衝撃弾性波入力位置及び反射波受信位置

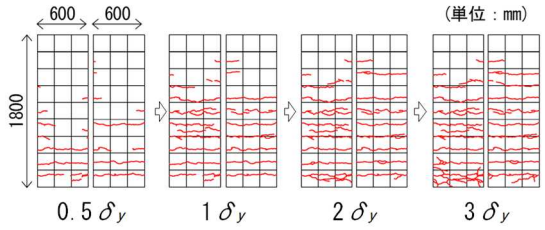

図-3　柱側面部の損傷進展図（左：正面、右：背面）

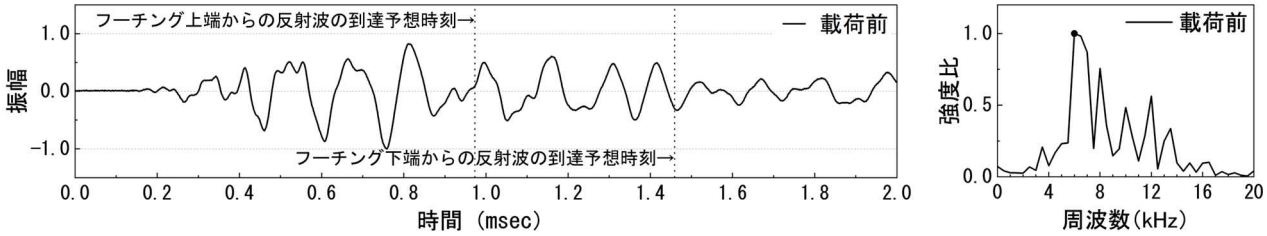

図-4　載荷前の記録波及び FFT 結果（左：時刻歴波形、右：FFT 結果）

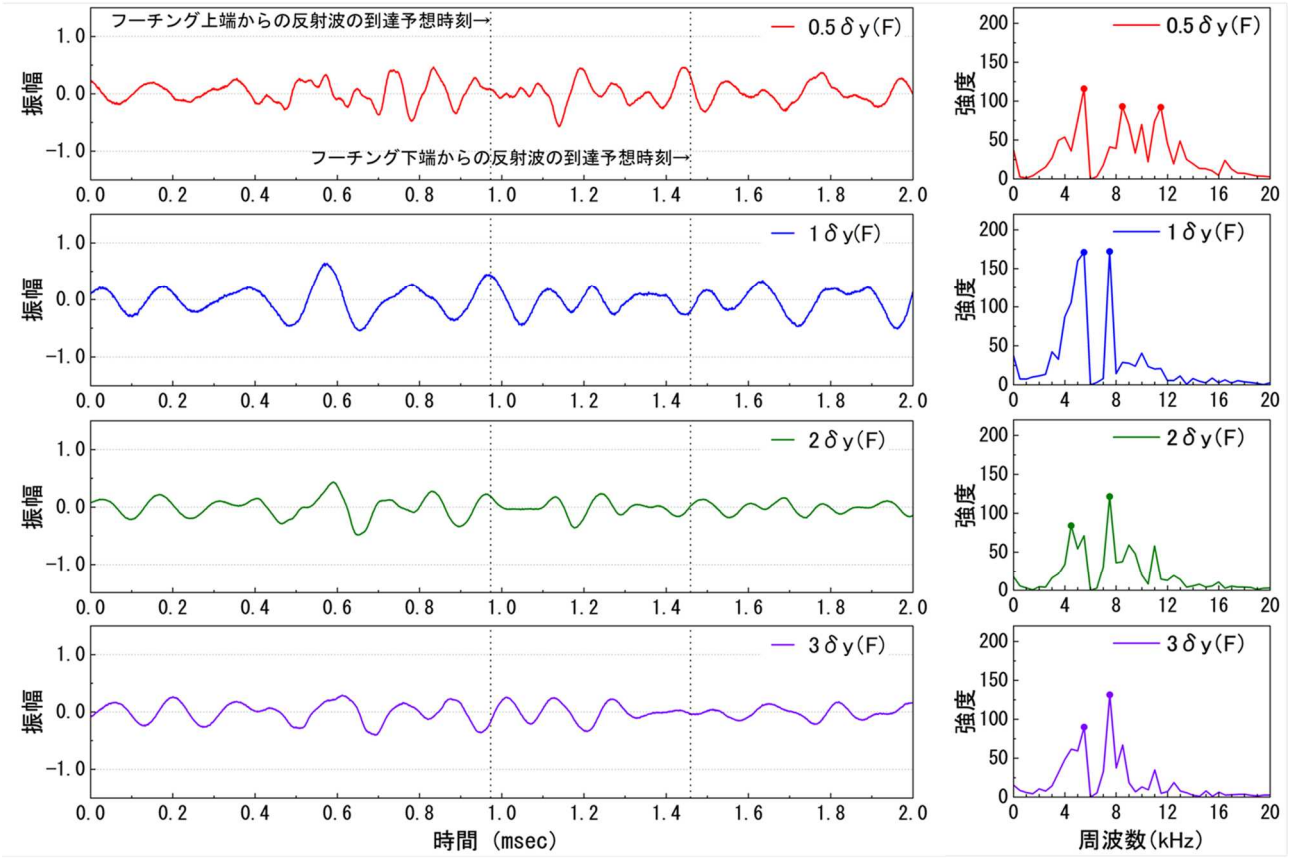

図-5　各載荷ステップ後の反射波及び FFT 結果（左：時刻歴波形、右：FFT 結果）

る 360kN の鉛直力も加えた。

2.2　計測方法

衝撃弾性波の入力位置と反射波の受信位置を図-2 に示すように設定した。衝撃弾性波は、直径 16mm の鉄球を柱天端の 34mm 上方から自由落下させることで入力した。なお、鉄球接触時刻を確認するため、衝撃弾性波の入力位置近傍にも受信センサを設置した。

受信センサは共振周波数 70kHz の AE センサを用いた。増幅アンプは 2kHz～1.2MHz の周波数帯域で高い精度を確保できるプリアンプを用いた。A/D 変換器は分解能が 14 ビット、サンプリングレートが 100MHz のものを用いた。なお、計測は正負交番載荷前（以後、載荷前）と各正負交番載荷ステップ（以後、載荷ステップ）後に実施し、サンプリング 1MHz でデータ収録し

た。

2.3　分析結果

正負交番載荷による損傷進展図を図-3、載荷前の記録波形を図-4 の左図に示す。同図の点線は、各断面変化面（フーチング上端・下端）を経由し受信センサへ到達する反射波の予想時刻である。これら到達時刻は、衝撃弾性波の入力位置と調査対象の断面変化面、受信位置の 3 点間最短距離、及び透過法により計測した弾性波速度（3700m/s）から算出した。また、図-4 の右図には載荷前の記録波の 0～2msec の区間を対象に実施した FFT の結果を示す。同図では各周波数の強度を最大卓越周波数である 6kHz の強度で除した強度比として示している。

各載荷ステップ後に計測した記録波から損傷による反射波を強調するため、図-4 の右図の FFT における周波数毎の強度比を逆数とし係数（以後、強調係数）に用いた。各載荷ステップ後に計測した記録波に強調係数を適用した結果（以後、反射波）を図-5 の左図に示す。

反射波に含まれる周波数の変化を確認するため、反射波の 0～2msec の区間に対して FFT を実施した結果を図-5 の右図に示す。全載荷ステップ後において 4.5kHz または 5.5kHz の周波数が卓越しているため、入力による影響であると考えられる。また、0.5δ_yでは 8.5kHz 及び 11.5kHz の周波数が卓越している一方、1～3δ_yでは 7.5kHz の周波数が卓越している。図-3 と照らし合わせると、0.5δ_y時点の損傷は柱基部近傍に生じているが、1～3δ_yでは柱上方まで損傷範囲が広がっているため、損傷の進展が卓越周波数の変化として表れていると考えられる。しかしながら、損傷の進展状況が不明な場合、上述のような判断が困難であるため、反射波に含まれる周波数変化だけでは損傷状態の把握は困難であると言える。

3．ベイズ異常検知の適用に関する検討

本手法における損傷検知までの大まかな手順を次に示す [3,4]。1）構造物の加速度に関する多変量自己回帰モデルを仮定する。2）ベイズの定理より、健全または初期状態の加速度データを用いたモデルパラメータの事後分布を推定する。3）事後分布に対する主成分分析によって構造物の振動特性を表す特徴量を抽出する。4）多変量自己回帰モデルのモデル次数を決定する。5）損傷程度を検知したい時点での加速度データに対し、特徴量の統計的変動程度を評価した異常検知指標を算出する。

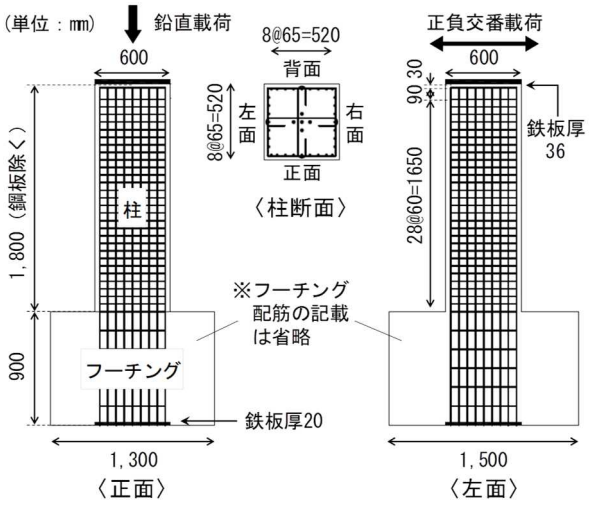

図-6　調査対象の構造諸元

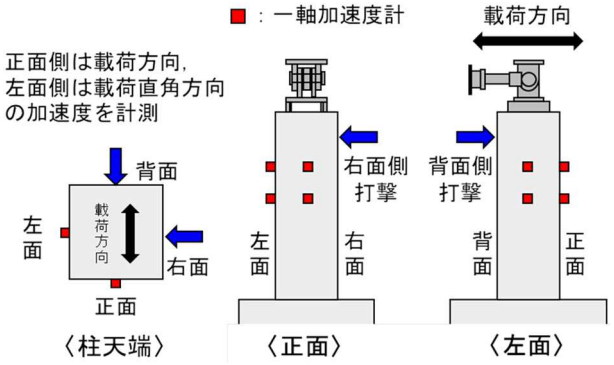

図-7　加速度計設置位置

3.1　調査概要

図-6 に調査対象の構造諸元を示す。調査対象は 2.の調査対象と概ね同様な構造諸元であるが、本調査対象には別目的の試験を兼ねているため、柱断面中央に太径鉄筋（D32）を 5 本設けている。また、調査対象には正負交番載荷によって段階的に損傷を与えた。正負交番載荷は柱基部の軸方向鉄筋ひずみが降伏に達した時点の柱部天端の水平変位（1δ_y＝5.8mm）を基準とし、1.5δ_yまで実施した。なお、上部構造の重量に相当する 360kN の鉛直力も加えた。

3.2　計測方法

載荷方向と載荷直角方向の一軸加速度計を図-7 に示す 4 か所に設置した。一軸加速度計は感度が 5pC/(m/s^2)、共振周波数約 32kHz のものを用いた。「pC/(m/s^2)」は電荷感度である。正負交番載荷前（以後、載荷前）と各正負交番載荷ステップ（以後、載荷ステップ）後に背面側及び右面側を各 100 回程度ハンマーで打撃した。サンプリング周波数 5kHz で 1 秒間計測した各打撃時の加速度応答をベイズ異常検知の加

速度データとして用いた。

3.3　適用結果

図-8、9 に背面側打撃と右面側打撃に対するベイズ異常検知の適用結果を示す。縦軸は健全時からの特徴量の変化程度を表す異常検知指標、横軸は載荷ステップを表している。図-10 に柱側面部の損傷進展図を示す。異常検知結果より、背面側、右面側打撃の結果ともに載荷前の異常検知指標は 0 付近を示すが、0.5δ_yでは増加している。以降の損傷進展においても評価指標の上昇が確認できるため、損傷の進展を異常検知指標の変化として捉えられていることがわかる。また、載荷方向と同じ背面側打撃による結果の方が載荷方向と直角な右面側打撃による結果に対し、損傷の進展に伴う異常検知指標の変化が明瞭に表れていることが確認できる。本研究の調査対象においては、ベイズ推定に基づく損傷状態の把握が有用であることが示された。

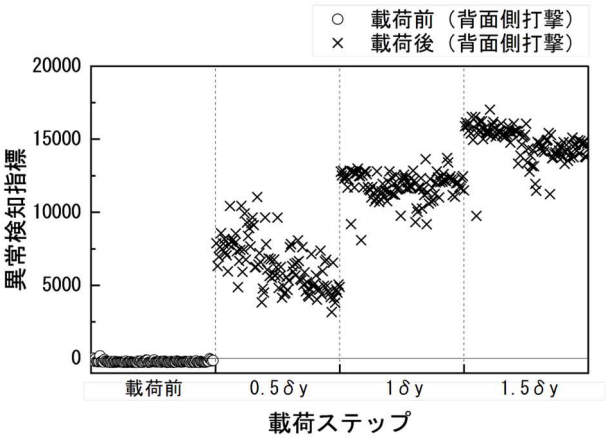

図-8　背面側打撃による異常検知結果

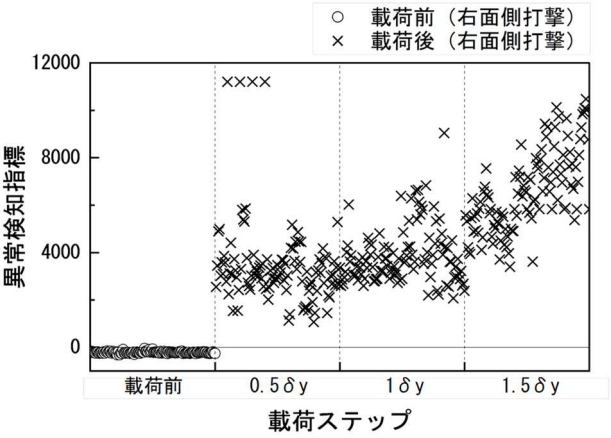

図-9　右面側打撃による異常検知結果

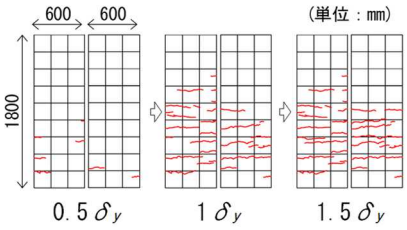

図-10　柱側面部の損傷進展図（左：正面、右：背面）

4. まとめ

本研究では、非破壊検査による RC 橋脚柱基部の損傷状態の把握を目的に、橋脚柱部の模型試験体に対し、衝撃弾性波よる損傷部からの反射波の周波数分析やベイズ異常検知の適用に関する検討を行った。

反射波に含まれる周波数の分析では、損傷による反射波を強調するため、損傷前の記録波の FFT 結果を各周波数の強調係数として用いた。反射波に含まれる卓越周波数の変化と損傷の進展状況を比較し、損傷の変化との対応を確認できた。一方で、損傷の進展状況が不明な場合、周波数の変化だけでは損傷状態を把握することは困難であることがわかった。

ベイズ異常検知の適用に関する検討では、構造物の振動特性を表す特徴量の変動程度を統計的に評価することにより、損傷の進展を評価指標の変化として捉えることができた。特に本研究の調査対象では、損傷を生じさせた載荷方向に打撃を与えた時の加速度データを用いることにより、損傷の進展に伴う評価指標の変化を明瞭に確認できることがわかった。本手法は橋脚柱基部の損傷状態を把握する手法として有効である可能性が高いことを確認できた。

謝辞

本研究のベイズ異常検知の適用に関する検討において、京都大学大学院地球環境学堂の髙瀬客員教授ならびに河邊研究員、同大学院工学研究科の五井助教（現岐阜大学工学部准教授）には多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

1) 特許庁：特許第 2877759 号，杭または構造物の動的診断方法（特許権者：株式会社青木建設），1999 年 1 月 22 日取得.
2) 山崎ら：損傷 RC 柱の打撃法に依る損傷評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.45A，p337-345，1999.3.
3) 五井ら：橋梁振動の多変量自己回帰モデルのベイズ推論に基づく異常検知, 材料, Vol.67, No.2, pp143-150, 2018.2.
4) 河邊ら：供用下の PC 橋梁におけるベイズ異常検知法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp583-588，2021.

FUNDAMENTAL STUDY ON DAMAGE INSPECTION TECHNIQUES FOR ROAD BRIDGE PIERS

Research Period: FY2022-2024
Research Team: Structures Research Team,
Cold-Region Construction Engineering Research Group
Author: HATAKEYAMA Osamu
SATO Takashi
TERASAWA Takahiro

Abstract: To promptly assess the serviceability of bridge piers after an earthquake, non-destructive testing methods are valuable for the pier column bases located underground or underwater. In this study, investigations were conducted on damage detection methods for pier specimens with varying degrees of damage, focusing on the analysis of reflected waves from damaged areas caused by impact and on Bayesian estimation of the overall impact response of the specimen. In the former study, it was difficult to assess the progression of damage based on changes in response frequency. In the latter study, the damage state could be identified from changes in evaluation indices, confirming the effectiveness of this method for assessing the damage state at the pier column base.

Keywords: RC bridge pier, Nondestructive testing, Impact elastic wave, Bayesian anomaly detection method.