

非破壊弾性波計測に基づく補修コンクリート構造物の安全性診断法の開発

新潟大学自然科学系（農学部） 鈴木哲也・稲葉一成
株式会社福田組 藤井伸之・西脇健志・小嶋篤志

キーワード：道路橋，維持管理，損傷度診断，Acoustic Emission，AE パラメータ

1. はじめに

道路工に代表される既存施設に衝撃荷重が作用する供用条件では，構造部材の損傷状況を含めた状態評価が不可欠である。本報では，「北陸地域の活性化に関する助成事業」の援助を受けて実施した，損傷が顕在化した既設道路橋コンクリート梁部材を対象に弾性波法による非破壊診断の試みを報告する。弾性波計測には，筆者らの研究蓄積^{1),2),3)}のある AE (Acoustic Emission) を援用した。その際，衝撃荷重を道路上で発生させた後に梁部材の変形挙動と AE を検出した。

2. 計測橋梁と非破壊状態評価方法

計測に供試した実橋梁は昭和 26 年 10 月に竣工したコンクリート橋である (図 1)。本計測ではコンクリート梁部材において，ひび割れ損傷や浮きが顕在化した部位の自動車走行時の変形挙動と AE 特性から損傷状況の評価を試みた。図 2 に計測梁部材の損傷状況を示す。計測項目は，動ひずみ (ポリエステルゲージ，東京測器社製)，橋軸直角方向変位 (CDP-50-D，東京測器社製) および AE (SAMOS System, PAC 社製) である。AE 計測と動ひずみ計測は損傷状況の異なる 6 か所 (Ch. 1~6) で行った。計測部位の中で損傷の顕在化していない計測中央部 Ch. 4 において軸方向変位を計測した。AE 計測は，しきい値 38 dB, プリアンプおよびメインアンプで 60 dB の増幅を行った。

非破壊状態評価においては，コンクリート梁に橋軸直角方向に数 mm の変位を発生させることを目的に積載状況の異なるダンプトラック (無積載 (3t)，半載 (5t)，全載 (10t)) および軽車両 (無積載，全載)



図 1 計測対象橋梁



図 2 梁損傷状況



図 3 橋梁下部における計測状況



図 4 実験状況 (DT)



図 5 実験状況 (コンパクタ)



図 6 実験状況 (高圧水噴射)

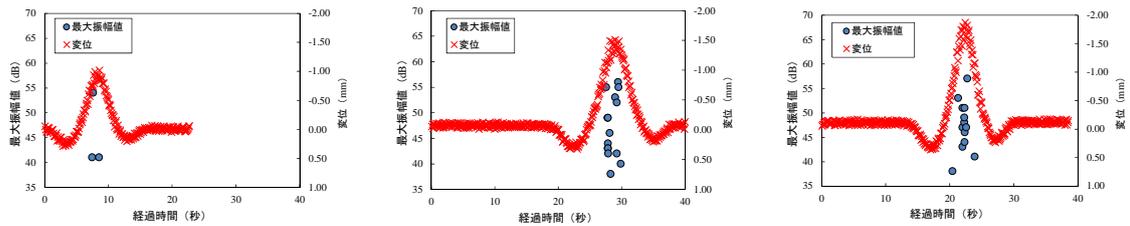


図7 ダンプトラック走行時 (10 km/h) の橋軸直角方向変位挙動と AE (Ch. 4) との関係

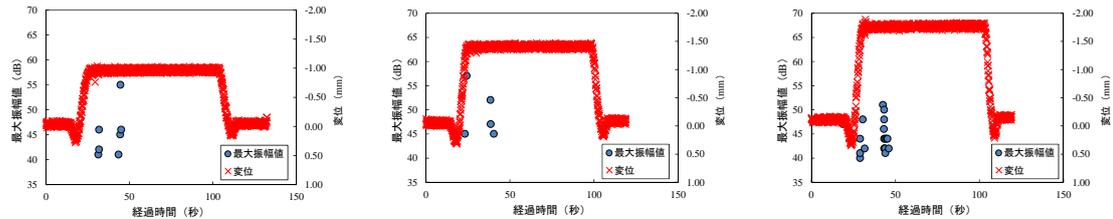


図8 計測点一時停止に伴う橋軸直角方向変位挙動と AE (Ch. 4) との関係 (ダンプトラック)

を 10 km/h で走行させた。走行試験後に舗装面上で、振動コンパクタ (3.0Robin EH0.9.2, 三笠産業株式会社製) および高圧水噴射 (水圧: 14 MPa) で計測対象に微弱な表面振動を与え、構造体中を伝搬した波形情報を AE で検出した。振動コンパクタおよび高圧水噴射は、橋梁変形を期待するものではなく、発生させた振動および波動現象の伝搬過程における特徴量抽出を目的としている。計測実施状況を図 3～図 6 に示す。

計測結果は、コンクリート梁部材の変形と AE パラメータの関係を中心に解析的検討を実施した。採用した AE パラメータは、AE 発生頻度と検出波の最大振幅値である。

なお、以下に示す結果および考察では、ダンプトラック、振動コンパクタおよび高圧水噴射による検討結果を提示する。

3. 結果および考察

3.1 ダンプトラック走行時の橋軸直角方向変位挙動と AE (Ch. 4) の関係

検討結果を図 7～図 9 に示す。図 7 は走行速度 10 km/h で通過した無積載、半載および全載で通過した際の計測結果である。図 8 は走行速度 10 km/h で変位計測点まで走行し、一時停止 (60 秒) 後、通過した際の計測結果である。図 9 は図 7 (全載条件) と同一条件であるが走行速度のみ 40 km/h に変更したものである。

検討の結果、図 7 に示す梁部材の変形挙動へ載荷重が及ぼす影響が明確に確認された。無積載の場合、橋軸直角方向に約 1.0 mm の変位が確認されたのに対して載荷重の増加に伴い最大約 2.0 mm の変形が計測点通過時に確認された。ダンプトラックの通過が変位挙動へ及ぼす影響は、図 7～図 9 の比較により走行速度の増加に伴い突発的変形挙動が確認された (図 7 と図 9 の比較)。本試験条件の範囲では変位挙動の相違は確認されなかったが、AE 発生頻度の顕著な増加が検出された。

突発的変形挙動と比較して計測点における一時停止の影響は、橋軸直角方向の変位挙動が通過計測時と同様に約 1.0～2.0 mm の範囲で計測値が確認された。車両停止期間中は同一変位が継続して確認されたが、

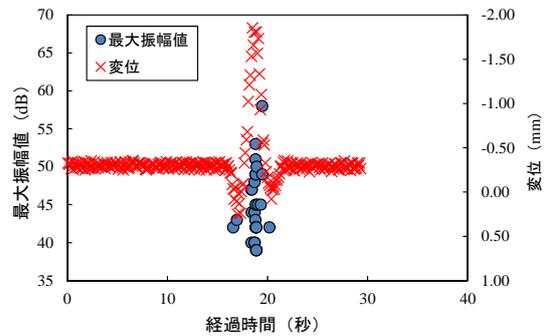


図9 40 km/h 走行時の橋軸直角方向変位挙動と AE (Ch. 4) との関係 (ダンプトラック)

AE パラメータは車両停止直後にのみ計測され、停止期間中の顕著な AE 発生は確認されなかった。本計測では、計測対象である既設橋梁の損傷実態を考慮し、現状よりも損傷を進行させないことを前提に衝撃荷重レベルを調整した。その結果、各種荷重条件における変位挙動が確認されたのは、ダンプトラック通過時のみであり、そ以外の実験条件では AE のみ検出された。

これらのことから、損傷を有する既設橋梁の施設機能診断においては既存施設における破壊進行は調査後の供用に影響することから、調査診断において現況の損傷実態の正確な把握とその際に損傷を進行させないことは不可欠な技術課題であると言える。既存施設を破損しない範囲内での施設機能診断において、AE パラメータを用いた梁部材の損傷度評価は、突発的変形挙動に起因する AE を抽出・評価することができ、その有効性は高いと推察される。同様の指摘は重石ら^{4),5),6),7)}や Gostautas⁸⁾による各種構造形式の既設橋梁において実施されている AE 計測結果における考察においても指摘されている。これら既往研究の多くは、各種荷重条件での自動車荷重による AE 発生を評価している（本研究でのダンプトラックおよび軽車両の実験ケース）。そこで、本研究では既存施設に対して、より安全かつ波動入力の均質性を考慮した振動コンパクタおよび高圧水噴射による AE 計測を試みた。

3.2 既設橋梁中を伝搬する振動・波動特性に基づく実態評価

図 10～図 13 に示す。図 10 は振動コンパクタによる振動入力と各 AE 計測チャンネルにおける検出波の最大振幅値と計測開始からの経過時間の関係である。図 12 は 14 MPa の高圧水噴射による同様の関係である。図 11 および図 13 は Ch. 3（ひび割れ損傷）とその近傍 Ch. 2（無損傷）の計測結果を比較したものである。

検討の結果、図 10 に示す Ch. 1～Ch. 6（ひび割れ部 Ch. 3 を除く）の振幅値分布は、振動コンパクタを Ch. 1 から Ch. 6 方向に移動（図 5 参照）させた際、振動コンパクタが計測点直上に位置した際に 80～100 dB の検出波の振幅値の最大値を観測した。最大振幅値のチャンネル毎の相違は、計測点近傍の浮きや波動伝搬経路に依存するものと推察される。ひび割れ損傷が顕在化している Ch. 3 では、77 dB が確認された。Ch. 1～Ch. 6 と比較すると Ch. 3 に対して Ch. 1:1.13 倍、Ch. 2:1.08 倍、Ch. 4:1.10 倍、Ch. 5:1.10 倍、Ch. 6:1.19 倍であった。振動コンパクタ通過時の一連の検出波特性は、Ch. 2 と Ch. 3 では異なり、Ch. 3 において AE 検出

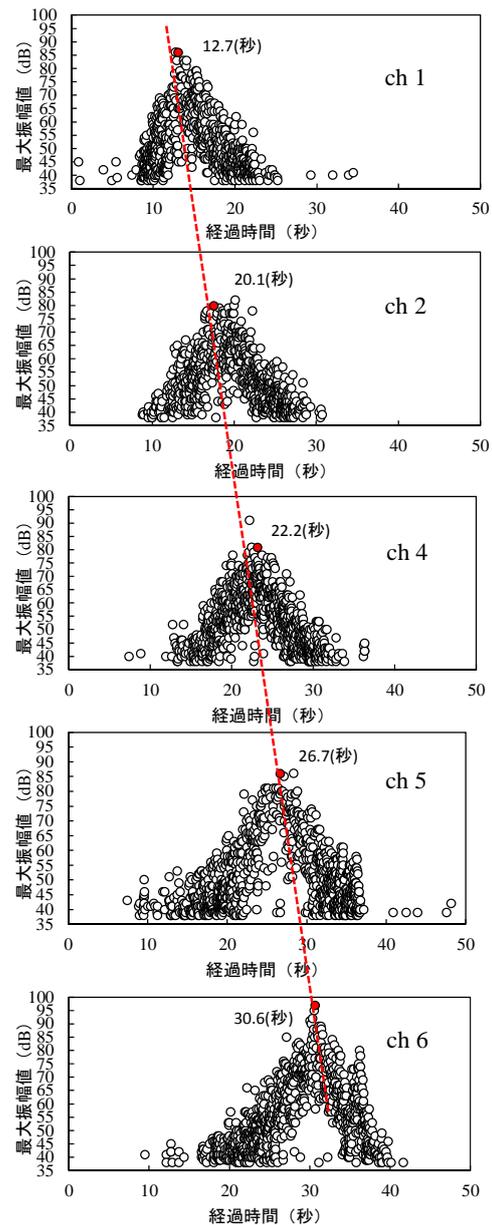


図 10 検出波の最大振幅値分布
(入力：振動コンパクタ，チャンネル別)

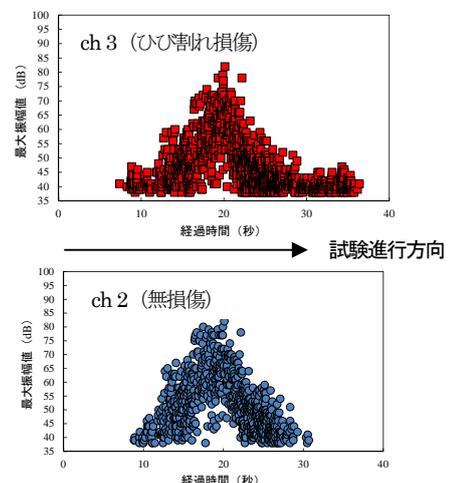


図 11 検出波の最大振幅値分布の比較

時間の増加と検出時間内の最大振幅値分布のばらつきが増加が確認された。このことから、計測部位の損傷状況は、異時点間の検出波の AE パラメータ（最大振幅値）の特徴を無損傷部と比較することで非破壊検出が可能であると推察される。

同様の傾向は、図 12 および図 13 に示す高圧水噴射による検討においても確認された。振動コンパクタと比較して同一時刻における検出波の最大振幅値分布が狭いことから舗装面で入力された弾性波情報はほぼ均質であったと推察される。

以上のことから、既設橋梁の損傷状況を AE パラメータにより評価する場合、波動や振動の入力方法に応じた検出波動の特徴量を評価することにより損傷状況を評価できるものと推察される。本論では 4 種類の波動・振動入力を試みた。今後の技術課題として、より詳細な損傷度評価においては検出波の周波数情報などを詳細分析し、損傷実態との比較検証による評価精度の向上は可能であると推察される。

4. おわりに

本試験では、既設コンクリート橋梁部材の損傷実態評価を載荷状態の異なる条件で AE 計測により実施し、異時点間の AE パラメータの比較検討からひび割れ損傷が卓越した部位と無損傷部位との比較検討を試みた。以下に本試験により明らかになった事項を列挙する。

- (1) 積載条件の異なるダンプトラックを計測橋梁に通過させた場合、本試験条件では橋軸直角方向の変位挙動は最大 2.0 mm であり、内在する損傷を進展させる程度の変位は確認されなかった。その際、AE は移動荷重が計測点通過時に検出され、積載規模の増加に伴い AE 発生頻度の増加が確認された。
- (2) 移動荷重を計測点で一時停止させた場合、本試験では変形は継続したが、AE の検出は停止直後にのみ確認された。
- (3) 振動コンパクタと高圧水噴射を用いた場合、計測橋梁の橋軸直角方向変位および動ひずみ計測に変化は確認されなかった。AE は、各チャンネルで検出し、無損傷部とひび割れ損傷が顕在化した部位における異時点間の AE パラメータの相違が確認された。このことから、AE パラメータの部位による相違を

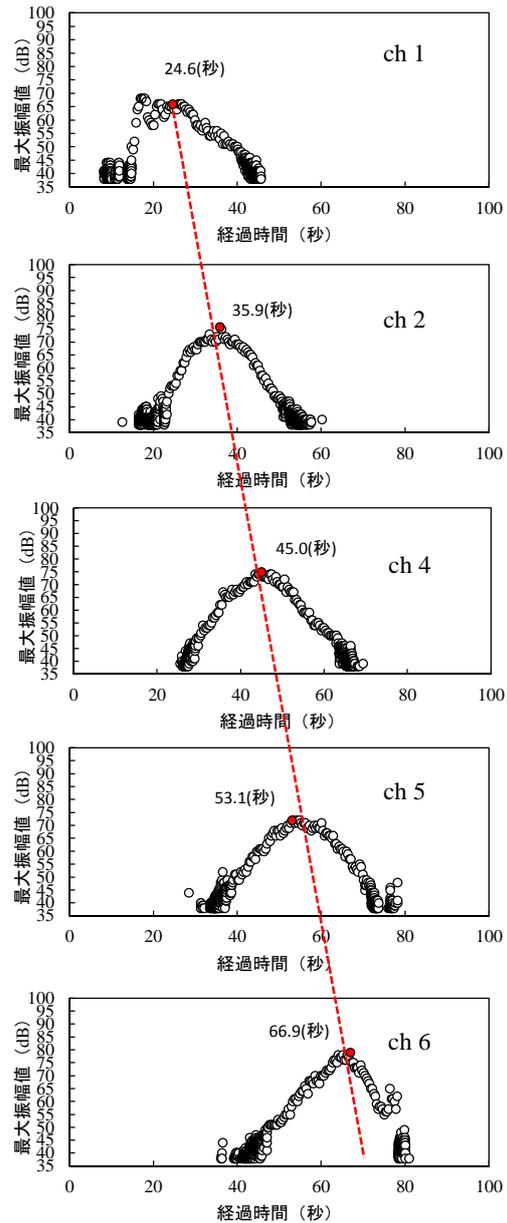


図 12 検出波の最大振幅値分布
(入力：高圧水噴射 14MPa, チャンネル別)

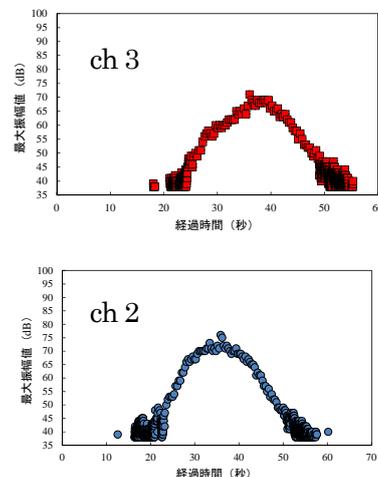


図 13 検出波の最大振幅値分布の比較(高圧水噴射)

精査することにより、コンクリート損傷の有無や健全性など既存施設の実態評価が可能になるものと推察される。

参考文献

- 1) 西脇健志, 藤井伸之, 小嶋篤志, 鈴木哲也: 既設橋梁 RC 部材から採取したコンクリートの材質評価の試み, コンクリート工学年次論文集, 38 (2), 1513-1518, 2016.
- 2) Suzuki, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M.: Relative Damage Evaluation of Concrete in a Road Bridge by AE Rate - Process Analysis, *Materials and Structures*, 40(2), pp. 221-227, 2007.
- 3) 鈴木哲也: 損傷指標による 87 年間供用された道路橋 RC 床版の材質評価, 農業農村工学会論文集, 2016 (掲載許可)
- 4) 重石光弘, 中島猛, 大津政康: 鉄筋コンクリート道路橋主桁の繰返し曲げ荷重における Calm 比と Load 比について, 第 14 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.165-168, 2003.
- 5) Shigeishi, M.: A Report of the Development of Acoustic Emission Application for Inspection of Bridge Superstructure, A Material of the Technical Committee on Acoustic Emission, *Journal of JSNDI*, 121, pp. 15-22, 2004.
- 6) Ito, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M.: Acoustic Emission in Fatigue Process of Steel Plate-Concrete Composite Slab, *Progress in Acoustic Emission XI*, pp. 132-137, 2002.
- 7) Shigeishi, M., Makizumi, T., Jo, H. and Ueda, J.: AE Monitoring of a Reinforced Concrete Road Bridge, *Structural Faults and Repair* 11, 2003.
- 8) Gostautas, R., Valatka, T., Banakiewicz, P. and Zhou: Remote Structural Health Monitoring of a Fracture Critical Bridge, *Progress in Acoustic Emission XV*, pp. 187-192, 2010.