## AE アクティビティーを用いた鉄道構造物の損傷定量化方法

| 飛島建設技術研究所 | 正会員 | 塩谷 | 智基,中西 | 互 康博 | 尊  |    |
|-----------|-----|----|-------|------|----|----|
| 鉄道総合技術研究所 | 正会員 | 羅  | 休,羽矢  | 洋,   | 稲葉 | 智明 |

1. はじめに 著者らは,鉄道構造物の AE 法による損傷評価を目的に室内や原位置 AE 計測を通じ,その可能性を 検討してきた.室内実験<sup>1)2)</sup>では,逆T型の模型コンクリート杭およびフーチングを用い,水平交番繰返し載荷によ り杭体の損傷を進行させ,鉛直繰返し載荷により得られた AE アクティビティーに基づいた損傷評価を試みた.原 位置 AE 計測<sup>3)4)</sup>では,損傷を有するコンクリート橋脚を対象に AE 法の損傷評価手法としての適用性/妥当性を検討 してきた.これらの AE 法による損傷評価の基準となる考え方に「カイザー効果に着目した AE アクティビティー の定量化方法」があり,ここではその考え方を整理し,改めて実構造物への適用性を論じる.

2. カイザー効果から派生した Felicity 比, Load 比そして RTRI 比 1950 年代ドイツの Kaiser により見いだされた カイザー効果<sup>51</sup>は,「金属材料の引張試験において履歴最大荷重(応力)まで AE が発生しない現象」とされ,土木 分野では岩盤の初期地圧推定手法として多くの研究者により実施検証されてきた<sup>6</sup>.また,米国の Fowler は,タン クの健全性指標にカイザー効果を応用した Felicity 比<sup>7)</sup>を提案し,実構造物の健全性診断に適用した.Felicity 比は, 「内部構造が安定な材料(健全な材料)ではカイザー効果が成立(履歴最大荷重まで AE 発現がない)し,不安定 化が進むにつれカイザー効果が成立しないようになる(つまり,履歴最大荷重より小さな荷重レベルから AE 発現 が見られる)」と説明でき, Felicity比 =  $P_{AE} / P_{1st}$  (1)である.ここで,  $P_{AE}$ はAEが発生した荷重レベル,  $P_{1st}$ は履 歴最大荷重である.(1)式より,健全な材料ではFR=1あるいは1以上,不健全な材料でFR<1となることがわ かる.一方, Felicity 比をコンクリート構造物の劣化指標に適用する試みが日本非破壊検査協会「コンクリート構造 物のアコースティック・エミッション試験法<sup>8)</sup>」規格化原案作成委員会 ( 委員長 : 大津政康 ) によりなされ , Felicity 比を改めた Load 比が解説中で紹介されている.Load 比は,基本的に(1)式に準じるが AE アクティビティー評価に ヒット以外の如何なる AE パラメータを用いることもできる.ここで,(1)式は「最大履歴荷重」を用いているの で,実構造物への適用限界が容易に推察される.すなわち,実構造物では過去の最大荷重の推定は実務上困難とい え, AE アクティビティーに関連づける荷重を含めた変形挙動に最大履歴の推定は期待できない.そこで著者らは, Load 比を改めた RTRI 比<sup>4)</sup>を提案している. RTRI 比は AE アクティビティーと比較するパラメータに荷重以外に変 形など(例えば,クラックの開口など)を用いることを許容し,さらに最大履歴荷重を改め「計測期間での最大値」 に基づき算出するものである.

3. 除荷過程での AE アクティビティー 例えば,鉄筋コンクリート構造物では,その破壊が終局に向うにつれ,ク ラック種別が mode I (tensile)卓越型から mode II (shear)卓越型に移行することが知られている.ここで,除荷時のク ラック変形は, mode I がクラック面の '開口/閉口変形', mode II が 'ずれ変形' といえ,ずれ変形の AE 挙動が閉 口過程での AE 挙動に比べ高いアクティビティーとなることが容易に推察できる.換言すると,除荷過程での AE アクティビティーが高い材料は,終局に近い損傷状態と予測され,除荷過程での AE 挙動に着目した劣化診断指標 が湯山ら<sup>9)</sup>,塩谷ら<sup>10)</sup>により提案されている.同様の考え方は,前述の試験規格解説にも Calm 比として紹介され, 「除荷時に発生した AE 発生数 / 履歴サイクル中の AE 発生総数」として定義される.ここで,著者らが既報<sup>4)</sup>で述 べた Calm 比は,RTRI 比と同様に計測期間中に得られる変形挙動に基づき算出されいるので,本来の Calm 比の定 義とは異なることに注意されたい.

4. 損傷励起方向と AE アクティビティー 例えば,通常の岩盤は 三軸応力下に存在し,3種類(方向)の初期地圧が存在する.した がって,カイザー効果で岩盤の初期地圧を推定する場合,通常3 方向のコア採取と採取方向に対応した軸載荷が行われる. すなわ ち,岩盤の初期地圧推定を行う場合,"損傷を与えた(有する)方 向と室内で再現される荷重軸の方向は合致していることが試験条 件"とされる、図1に既報<sup>1)2)</sup>の逆T型模型杭の繰返し載荷実験で 得られた AE 挙動を示す.実験は水平方向からの繰返し交番載荷 (部材角 1/600-3/300)により実施され,各部材角で2回の繰返し 交番載荷が与えられている 図1の縦軸は初期の AE 発生総数に対 する 2回目載荷時の AE 発生総数の比で,横軸は部材角である.同 図の水平方向試験結果より,1/100部材角で2回目 AE 発生総数が 急激に増加,つまり加速度的損傷進行が推定され,それ以降の部 材角では連続的な損傷進行が明らかである.一方,各部材角に対 応した鉛直載荷の繰返しで得られた試験結果より,損傷の進行が 予測困難といえる.1/100 部材角は鉄筋の降伏点と合致しており,



**キーワード**: AE,鉄道構造物,劣化評価,カイザー効果,Felicity比,load比,Calm比,RTRI比 連絡先: 〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472 Tel.04-7198-7553 水平繰返しによる AE 発現は合理的結果と考えられる.これらより, AE 法を損傷診断に適用する場合,損傷励起の方向とカイザー効果 検討に付加する荷重方向を一致することが重要であるといえる. 図2に同供試体のLoad比とCalm比(1は載荷過程 AE 総数を基準, 2 は載荷除荷過程 AE 総数を基準)を示す.部材角1/200で1以上 の Load 比が以降の部材角で連続的に低下する様子が見られる.-方,Calm 比は算出に用いる AE 基準総数によりバラツキが見られ るほか,部材角の進行に伴う明確な増加傾向が見られない.前述の通り除荷過程の AE 発生メカニズムはせん断クラックのずれ変 形により得られることから,既報<sup>2)</sup>の通り本試験で与えた破壊が主 に曲げ破壊であったことに起因した結果といえる.

5. 原位置 AE 計測に基づく損傷定量化 通常 AE 計測は超音波領 域の弾性波計測であるが,励起される弾性波のエネルギーが高い 場合,センサや器械の応答特性より低い周波数の波動(例えば100 Hz 以下の列車振動)に応じた AE 信号を検出することがある.こ こでは,検出AE信号がすなわち損傷部位からのAEのみを反映す るわけではないので,衝撃振動試験結果との比較検討および,AE 発現列車荷重検討のために実施した無筋コンクリート橋脚 3P の計 測結果<sup>11)</sup>に基づき以下に考察を行う.図3は,列車通過にともない その進行方向に対して橋脚両側面のクラックを跨ぎ設置したゲ ージの動的変形挙動(1 kHz サンプリング)である.同図より最初 に列車通過の影響を受ける橋脚左側 ゲージ1 が圧縮変形,同時 に右側の ゲージ3が引張変形することがわかる.これは,"同じ 断面でも列車通過で生じる変形様式が場所により異なること"さ らには既述の"RTRI比 Calm 比を実現象にあわせてどう求めるか" という疑問を示唆している.図4は, ゲージ1と3の「和」,つ まり両者の変形が符号逆で同値に生じた場合に零,どちらかが卓 越する場合はその値を示す図といえる.図4より,ピークを示す 時刻が明らかとなり,それは列車重心が橋脚直上に至った時間で あることがわかる.以上から,計測対象橋脚は,列車通過により 左側に傾く挙動と右側に傾く挙動が明らかとなり,その片方向毎 の挙動と AE アクティビティーに基づき損傷を評価するか、あるい は左右の挙動を一つのサイクルとして評価するか ,AE 源位置とと もに多くの事例を通じて検討する必要がある.図5に得られたAE パラメータの累積変動を示す.例えば RTRI 比を求める場合, AE ヒットを例として図中 i を AE 発現位置とするか ii とするかで,そ れぞれ 0.76, 0.44 と得られる RTRI 比が大きく異なる. 一方, イベ ント(AE源が橋脚内で特定できたデータ)を対象とした場合,RTRI 比は 0.80-0.86 (エネルギー)となる. 同様な議論は Calm 比も同様 でパラメータにより 0.94-3.70 までばらつく結果となった.

<u>6. まとめ</u> 1) 4 章より Calm 比と load 比(RTRI 比)を組合わせた 損傷評価手法の限界が示唆された.2) 合理的な AE による損傷評 価手法を確立するためには,多くの原位置 AE 計測を通じて損傷と AE アクティビティーをさらに比較検討する必要がある.



図5 種々の AE パラメータ変動 (左上: 拡大図)

## 参考文献

1) 羅,羽矢,棚村,塩谷,三輪,中西:列車荷重を利用した基礎の損傷探知法に関する基礎的研究(その1 模型杭による AE 破壊実験概要), 第 56 回土木学会年次学術講演会概要集,CD版,pp. 326-327,2001.2) 塩谷,三輪,中西,羅,羽矢,棚村:列車荷重を利用した基礎の損傷探 知法に関する基礎的研究(その2 AE 破壊実験の結果解析と考察),第 56 回土木学会年次学術講演会概要集,CD版,pp. 328-329,2001.3) 羅, 羽矢,稲葉,塩谷,中西:2次起因の AE を利用した損傷探知法の検証および鉄道現場への適用事例(その1 模型実験の結果および現場実験の 概要),第 57 回土木学会年次学術講演会概要集,CD版,pp. 371-372,2002.4) 塩谷,中西,羅,羽矢,稲葉:2次起因の AE を利用した損傷探 知法の検証および鉄道現場への適用事例(その2 現場実験の結果および評価法の提案),第 57 回土木学会年次学術講演会概要集,CD版,pp. 373-374,2002.5) V.J. Kaiser, Knowledge and research on noise measurements during the tensile stressing of metals, Arkiv für das Eisenhuttenwesen, 24, pp. 43-44,1953.6) 例えば、金川林仲佐:岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み,土木学会論文報告集,第 258号,pp.63-75,1977. 7) T.J. Fowler, Experience with acoustic emission monitoring of chemical process industry vessels, Progress in AE III, JSNDI, pp. 150-162, 1986.8) 日本非 破壊検査協会:コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法,NDIS2421,平成 12 年 7 月.9) S. Yuyama, T. Okamoto, T. Kamada, M. Ohtsu, T. Kishi, A proposed standard for evaluating structural integrity of reinforced concrete beams by acoustic emission, JSNDI, Progress in AE VIII, pp. 295-304, 1996. 10) T. Shiotani, M. Shigeishi, M. Ohtsu, Acoustic emission characteristics of concrete-piles, Construction and Building Materials Vol. 13, Elsevier Science Ltd., pp. 73-85, 1999. 11) 羅,羽矢,稲葉,塩谷,中西:鉄道橋梁下部工の損傷調査における AE 法の適用性に関する検証,第 58 回土木学会年次学術講演会概要集,投稿中.