論文　ＲＣ道路橋解体桁の繰返し曲げ載荷におけるアコースティック・エミッション

重石　光弘[*1]・牧角　龍憲[*2]・園田　佳巨[*3]・杣　辰雄[*4]

要旨：実際に供用されてきた鉄筋コンクリート道路橋の架け替え事業にともなって解体された主桁を供試体として，段階的に載荷最大荷重を上げていく多段階繰り返し曲げ載荷試験を実施し，ひび割れの発生や欠陥部面の擦過などを原因とするアコースティック・エミッション（AE）を検出した。繰返し曲げ載荷によってもたらされる損傷の進行にともなう AE 発生挙動をカイザー効果に基づいたAEパラメータであるCalm比とLoad比により考察した結果，曲げ載荷による主桁の残留たわみとの比較から、繰返し曲げ載荷により主桁に生じる損傷過程が Calm 比と Load 比との相関図により示された。

キーワード：鉄筋コンクリート桁，繰返し曲げ載荷，アコースティック・エミッション

1. はじめに

これまでに数多く建造され，供用されてきた多くのインフラストラクチャが，経年劣化により更新の時期を迎えつつある。しかしながら，経済情勢の変容は，これらのインフラストラクチャに対し，新設ではなく，補修・補強による延命化よって機能維持させる必要性をもたらした。そこで，構造物の維持・管理の第一段階である「検査技術」と「評価手法」が，これらの維持・管理の成否の鍵となるものと考えられ，コンクリート構造物への維持・管理の必要性が高まるにつれて，欠陥および損傷検査の主な試験・評価法として強度特性以外を対象とした非破壊試験法に期待が高まっている。

アコースティック・エミッション（AE）法は，これからの構造物の維持・管理においては，構造物の全体あるいは部材における異状を検知したり，その部位を特定したりする有効な手段として期待されている[1)]。その一方では，現場適用のための試験方法と手順やその有効性については，構造物の種類や環境条件，使用機材の相違もあって，AE 法をコンクリート構造物の試験・評価に適用するための具体的かつ統一的な見解が得られていなかった。そのような要請に応えるために日本非破壊検査協会では「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）」[2)]を策定した。これは，コンクリート構造物の初期点検および供用中における健全性を評価・判定するための AE 計測に基づく調査方法についての指針を規定したものであるが，実際のコンクリート構造物への AE 法の適用事例は未だ十分に多いとは言い難く，健全度の評価基準も明白でない。

そこで本研究では，NDIS2421 に紹介されている発生挙動に関する AE パラメータである、Calm 比と Load 比に着目した AE 法によるコンクリート橋梁の健全度評価手法の実用化について検討を行うこととし，48 年間にわたり供用された実際の鉄筋コンクリート（RC）道路橋を解体して得た主桁部材（以下，解体桁と表記）に対し，多段階繰返し曲げ載荷試験を実施して，その際の AE 発生挙動と損傷の進行過程を観察した。

*1 熊本大学　工学部環境システム工学科助教授　博(工)（正会員）
*2 九州共立大学　工学部土木工学科教授　工博（正会員）
*3 九州大学大学院　工学研究院建設デザイン部門助教授　博(工)（正会員）
*4 中央コンサルタンツ株式会社　福岡支店技術監理部部長

2. RC 道路橋解体桁の繰り返し曲げ載荷試験

2.1 RC 道路橋解体桁について

一般国道として供用された RC 道路橋の架け替えにより切り出された主桁を供試体とする繰返し曲げ載荷試験中の AE 計測を実施した。

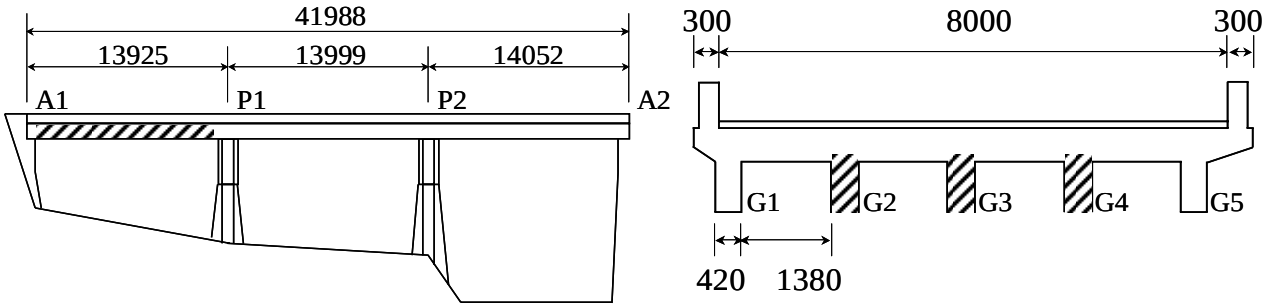
この RC 道路橋は、二等橋（T-9）として 1954（昭和 29）年に竣工された鉄筋コンクリート T 桁道路橋であり、道路線形の変更による供用停止および解体された 2002（平成 14）年までの間におよそ 48 年が経過したものである。供用中の一般図と横断図を**図－１**に示す。

載荷試験および AE 計測には、解体撤去された RC 道路橋の**図－１**に示す A1-P1 径間の吊り主桁部(G2，G3，G4)から幅 0.8m，長さ 13.94m で切り出した 3 体の解体桁を用いた。

2.2 載荷試験および AE 計測方法

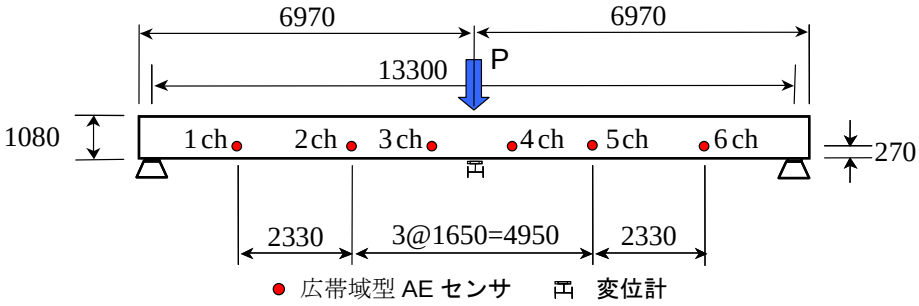
切り出された解体桁は，最寄りのプレストレストコンクリート製品工場に輸送され，**図－２**に示すように床版部および中間桁などを切除して整形した後に，油圧ジャッキを備えた鋼製門形フレームによる大型載荷試験装置によって曲げ載荷試験に供された。載荷位置にはロードセル，載荷位置下方には変位計を設置した。

AE 計測では解体桁の側面に設置した 6 個の AE センサによって、載荷試験中に解体桁から発生する AE 波を検出した。AE 計測に用いた機材は，ディジタル方式 8 チャンネル同時サンプリング AE 計測装置にプリアンプと 6 個の広帯域型圧電素子センサを接続したものである。通常 AE センサは、曲げによるひび割れが最も発生しやすい試験体の下面に設置することが多いが，既に試験体下面に微細なひび割れが多く発生しており，試験中にコンクリートの剥離が生じる可能性もあったため，センサの落下を考慮して桁の側面，下面より高さ 270㎜ に設置した。また，AE の発生挙動を適正に把握するためには，より多くの AE を検出する必要があると判断し，プリアンプのセンサ出力信号増幅率を 40dB とした上で，検出閾値はセンサ出力に対し 38dB とした。**図－３**に G4 桁の漸増繰返し曲げ載荷状況と AE 検出度数を示す。G2 桁と G3 桁の場合もほぼ同じ傾向であり，本論では G4 桁について述べる。



(a) 立面図　　(b) 断面図

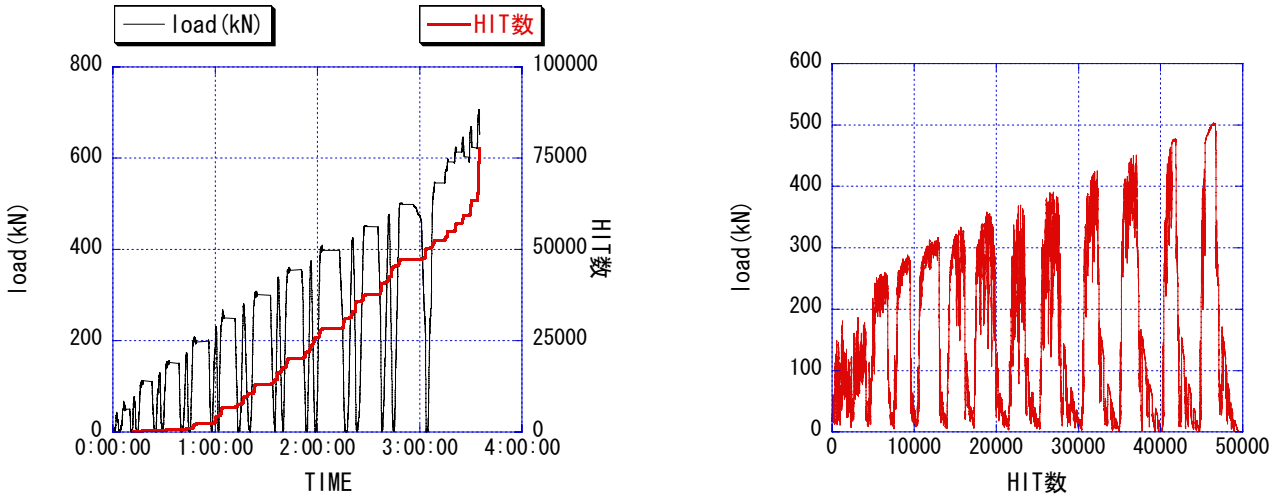
図－１　解体桁を切り出した RC 道路橋の供用中における一般図



(a) 載荷試験概略

(b) 載荷状況写真

図－２　解体桁の繰返し曲げ載荷試験の概要



(a) 載荷荷重と AE 検出度数の時系列結果　　(b) 載荷荷重と AE 検出度数の関係

図－３　G4 桁の繰返し曲げ載荷試験結果

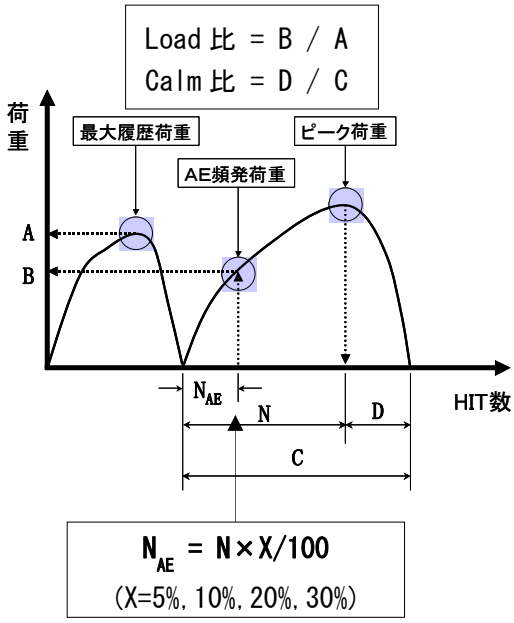
3. Load 比と Calm 比による繰り返し曲げを受ける RC 解体桁の損傷過程の観察

3.1 本試験に用いた Load 比と Calm 比の定義

Load 比と Calm 比は，NDIS2421 に示された AE パラメータであり，AE を発生させることとなる荷重や温度などが繰り返し作用する際のそれらの作用パラメータと AE の発生挙動が，材料の品質やそれらの作用による損傷程度と関係があることに着目したものである。

この関係はカイザー効果，およびフェリシティ効果として一般的に知られているが，図－３の右図(b)では，繰返し載荷の最大荷重が 150kN までの繰返しでは，載荷荷重の変動に対しても AE 検出度数（HIT 数）に顕著な増加が認められず，健全な弾性体では最大履歴荷重を超えるまでは AE の発生は僅少であるとする，いわゆるカイザー効果が認められ，この G4 桁に大きな損傷が生じていないことを示すものである。一方，繰返し載荷の最大荷重が 200kN を上回る載荷段階以降は，最大履歴荷重を上回らないうちから AE の発生が認められ，除荷の際にも AE の発生が大きく増加する傾向となっている。

Load 比と Calm 比は，このような AE の発生挙動を AE の検出度数と AE を発生させた作用パラメータの数値を用いて定量的に表現するもので，今回の試験ではそれぞれ図－４のように定義した。また，ここで Load 比の定義に忠実に AE の発生が認められた時点の荷重を用いると，今回のような実大寸法の試験体では，再載荷の開始直後に AE が検出されてしまって，これではいずれの載荷時にも Load 比がほぼ 0 に等しくなってしまう。よって，各載荷段階の載荷時における総 AE 度数 N に対して X%が発生した時点の荷重(N_{AE})を「AE 頻発荷重(B)」と定義して、X を 5%、10%、20%、30%とした場合の AE 頻発荷重により Load 比を求めることとした。



図―４　漸増繰り返し載荷における Load 比と Calm 比の定義概念図

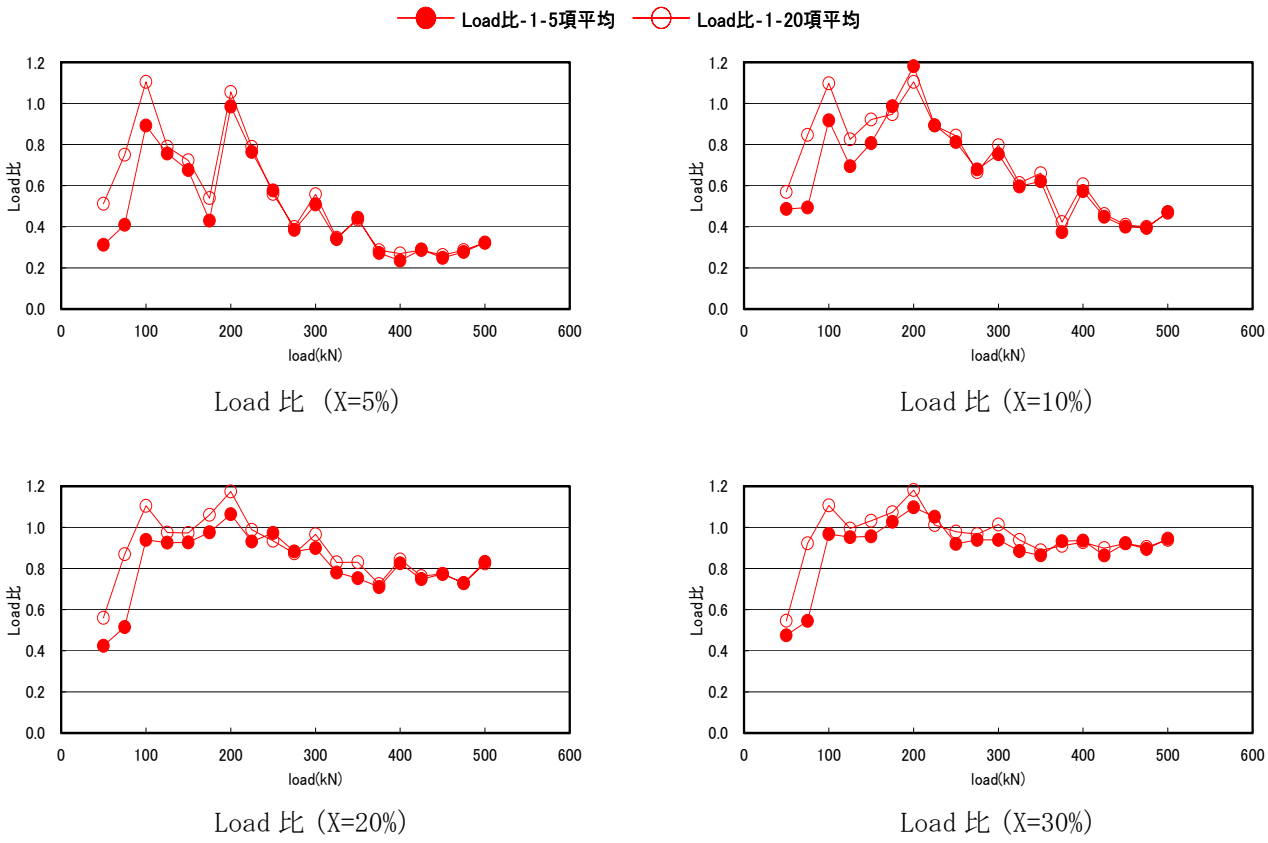
3.2 G4 桁の漸増繰返し載荷における Load 比

今回の実験において，ロードセルからの信号には非常に多くのノイズが含まれていた。これは計測上の単純な不具合であるが，実構造物における現場計測においては他の場合であっても多少のノイズが入る可能性は十分に考えられる。ノイズが含まれたままでは，Load 比を求めるに必要な最大履歴荷重および AE 頻発荷重の値を一意的に得ることが不能である。そこで，計測された荷重値に含まれたノイズが除去するために平滑化を行うとともに，この処理が Load 比にどのような影響を及ぼすか検討することにした。

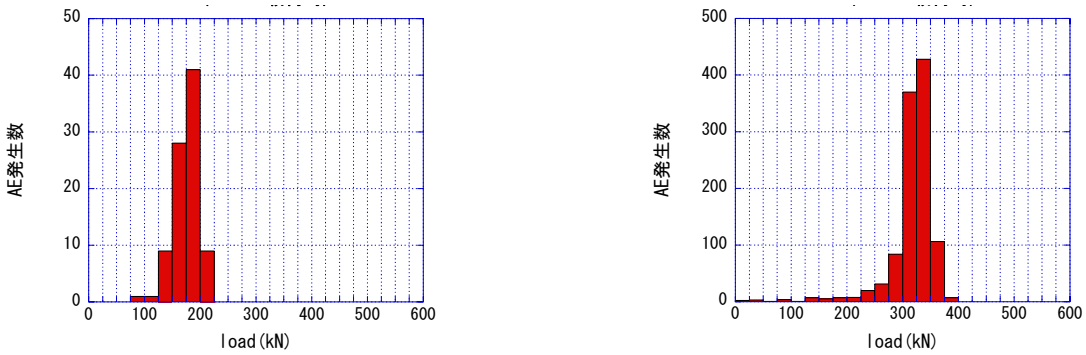
今回は平滑化処理として，Load 比を求める際に用いた荷重値に対し，5 項移動中央平均、および 20 項移動中央平均を適用した。その結果，G4 解体桁の漸増繰返し曲げ載荷過程における Load 比は**図－５**のようにそれぞれ求められた。

まず，5 項移動中央平均を適用した場合においても 20 項移動中央平均を適用した場合においても，すべての結果に大きな差異が無かったことが確認され，今後の他の試験においても今回のような荷重値にノイズ等の変動がある場合でも適宜平滑化を行うことが許されると考えられる。

また，AE 頻発荷重を定義する X を 5%，または 10%として求めた Load 比は，最大載荷荷重が 200kN 以降，大きくなるにつれて減少する傾向にある。しかしながら，X を 20%，または 30%として求めた Load 比は，最大載荷荷重が 200kN より大きくなっても，それ以降も最大載荷荷重に関わらずほぼ一様な値となってしまう結果となっている。すなわち，AE 頻発荷重を定義する X を必要以上に大きくすれば AE 頻発荷重は最大履歴荷重に近づくことになることが判明した。今回の検討では，AE 頻発荷重を定義する X を 5%として求めた Load 比は，最大 1.1 程度から最小 0.3 と最も大きな落差を示しており，G4 解体桁の繰り返し載荷による損傷過程を最もよく表現する結果となった。



図－５　G4 桁の漸増繰返し曲げ載荷過程における Load 比



(a) 200kN 載荷時　　(b) 350kN 載荷時

図－６　G4 桁の漸増繰返し曲げ載荷過程における各載荷段階における荷重に関する AE 頻度

この AE 頻発荷重を定義する X を定義するためには，図－６に示すような，繰返し載荷におけるそれぞれの段階ごとの載荷荷重に対する AE 検出度数の頻度分布を参考に決定することが必要と考えられる。すなわち，今回の G4 桁の試験の場合，図－６に例として示した，(a) 200kN を最大荷重とする載荷段階における場合でも，(b) 350kN を最大荷重とする載荷段階における場合でも，その前段階の最大荷重を超える以前から AE の検出が認められていることは確かではあるが，それでもやはり，AE 検出度数の頻度傾向は，その段階の最大荷重までに指数的に増加している。したがって，AE 頻発荷重を決定する X を過分にとれることは，AE 頻発荷重をその載荷段階の最大荷重と近い荷重とみなしてしまうこととなる。

3.3 G4 桁の漸増繰返し載荷における Calm 比

一方，Calm 比については，載荷段階の荷重値でなく，「載荷開始時刻」，「最大荷重載荷時刻」，「除荷終了時刻」のいずれも 3 つの時間が既知であれば，その間の AE 検出度数から求めることができ，載荷荷重などの外部パラメータについての特別な継続計測の必要もなく，比較的簡易に求められるものである。

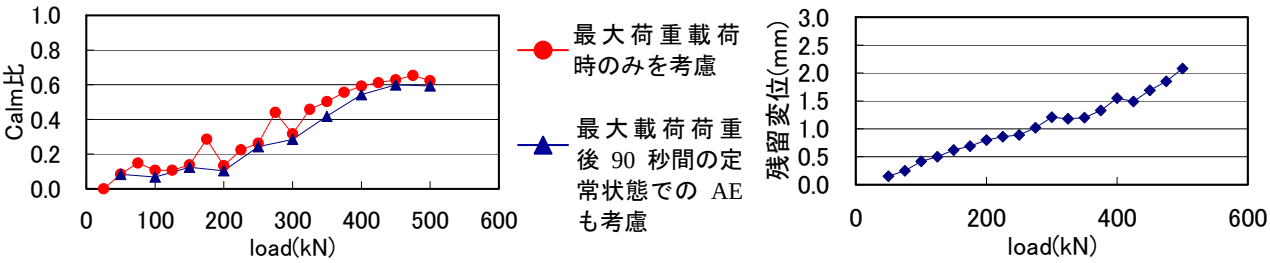
G4 解体桁の漸増繰返し曲げ載荷過程における Calm 比は図－７のように求められた。

ここで，G4 解体桁の漸増繰り返し曲げ載荷試験では図－３のように各載荷段階における最大荷重載荷時点からおよそ 90 秒の間一定としているため，最大荷重となった時点を Calm 比の定義における除荷開始時点とした場合（●印）と、最大荷重載荷時点から 90 秒間の一定荷重載荷状態の後，真の除荷開始時点を用いた場合（▲印）の比較を行っている。

しかしながら，図－７ではこれらの間には大きな差違は見られず，厳密な除荷開始時点は必ずしも必要ではないことが示されている。

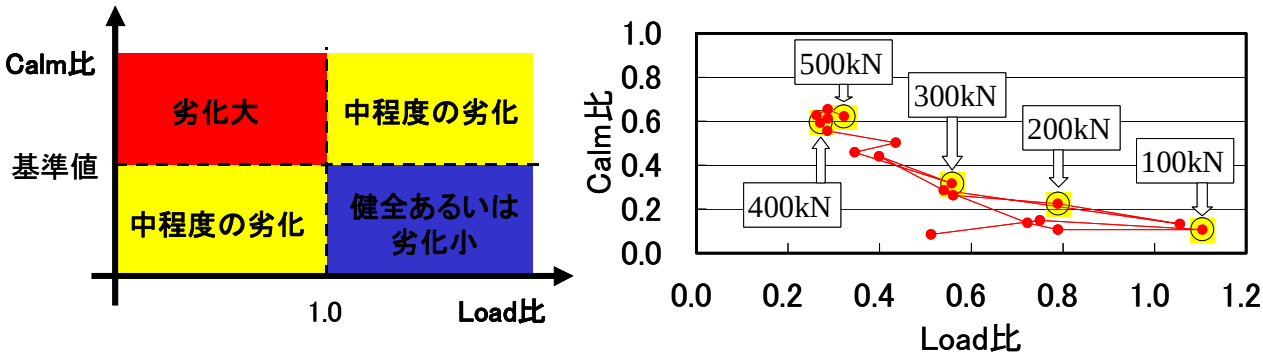
また，図－７右図(b) は G4 解体桁の曲げ支間中央下面に設置した変位計が示した，各載荷段階後に桁に生じた残留変位の推移である。

これは，漸増繰り返し曲げ載荷によって受けた G4 桁の損傷推移を示すものであり、左図に示



(a) Calm 比　　(b) 載荷位置下面の残留変位

図－７　G4 桁の漸増繰返し曲げ載荷過程における Calm 比と支間中央の残留変位量の推移



(a) Load 比－Calm 比相関図　　(b) G4 桁試験結果

図－８　NDIS2421 における Load 比と Calm 比による健全度判定のための相関図と G4 桁の漸増繰り返し曲げ載荷過程における Load 比と Calm 比との相関推移

した Calm 比の推移と非常によく一致しているため，Calm 比は G4 桁の繰返し曲げ載荷による損傷過程を非常によく表していると考えられる。

4. Load 比と Calm 比の相関判定について

NDIS2421 においては，Load 比と Calm 比を用いたコンクリート構造物の健全度の判定法として，これらの相関を示す**図－８**左図(a) のような図化を用いることが，判定対象構造物の健全度の評価に有効であると提案されている。

そこで，今回の G4 桁の試験結果を用いて，これを試み，**図－８**右図(b) を得た。G4 桁が漸増繰り返し載荷の最大荷重が段階的に増加していく過程で，Calm 比が大きくなる傾向に反し，Load 比は小さくなる傾向を示しており，**図－８**左図(a) に示される健全か劣化小の状態から劣化大の状態に遷移する傾向が伺える結果となった。

5. まとめ

本研究では，実際に供用された後に撤去された RC 道路橋から採取した主桁の漸増繰り返し曲げ載荷試験と AE 計測を実施し，社団法人日本非破壊検査協会により策定された，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 NDIS2421：2001 に準じた Load 比と Calm 比によるコンクリート橋梁の健全度評価法について検討を行った。

まず，Load 比の算出においては AE 発生荷重を厳密に適用すれば，今回の試験体のように実構造物規模の計測では，Load 比が常に 0 に近い値となってしまうため，AE 発生荷重に代えて，AE 頻発荷重の概念を新たに導入した。また，繰返し載荷試験の結果から得られた荷重値にノイズが生じてしまったため，これに対して移動平均による平滑化を適用した結果，5 項移動中央平均の場合でも 20 項移動中央平均の場合でも目立った大きな差異は認められないことが分かった。

そして、Calm 比の算出においては，載荷荷重各段階の最大荷重において一定にした状態での AE の算入を考慮すべきか検討を加え，載荷荷重においては厳密な最大荷重載荷時点と除荷開始時点がさほど必要でないことが判明した。

さらに Load 比と Calm 比の相関推移が NDIS2421：2001 に示されたように，構造物の損傷過程を表現することが可能であることが確かめられた。

最後に，本研究を遂行するにあたり，貴重な計測機会を与えていただいた国土交通省九州地方整備局大分工事事務所に御礼を申し添えたい。

参考文献

1) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，2001.3
2) 社団法人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 NDIS2421:2001，2001.8