

論文 鋼コンクリート合成床版の輪荷重走行試験におけるアコースティックエミッションの観察

重石 光弘^{*1}・伊藤 剛^{*2}・橘 吉宏^{*3}・松井 繁之^{*4}

要旨：近年，道路橋床版として鋼コンクリート合成床版の利用が多くなっており，同時にその疲労による損傷や劣化を検査する手法が望まれている。そこで，一般的な形式の縮小鋼コンクリート合成床版供試体を用いた輪荷重走行載荷による疲労試験を実施し，より実橋の供用状態に近い状態の中でのアコースティックエミッションの計測観察を行った。その結果，輪荷重によるコンクリート部の損傷ひび割れが顕著になるにつれ，大きな AE エネルギーを示す AE 事象の発生が実際に床版に生じたひび割れ位置に多く観察され，AE パラメータとしては，比較的長周期で長時間，かつ大振幅の AE の発生が頻発することが確認された。

キーワード：合成床版，輪荷重走行試験，疲労，診断，アコースティックエミッション

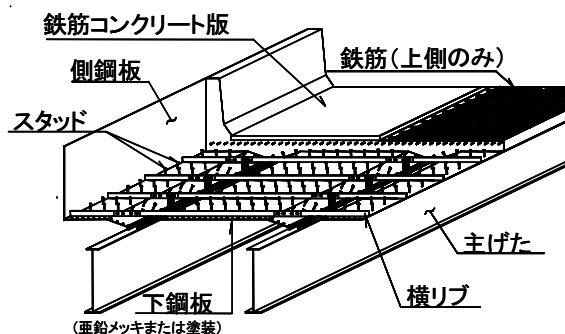
1. はじめに

既設道路橋の鉄筋（RC）コンクリート床版の取替えや，将来における床版の取替え，あるいは拡幅への対応として床版のプレキャスト化が進められている。このような需要に応えるため図－1に示すような鋼・コンクリート（SC）合成床版の採用が増加している。しかし，維持管理における目視観察は，RC 床版であれば床版下側からそれが可能であるが，SC 合成床版は下面が鋼板で覆われており，当然，上側は舗装や交通があるためそのコンクリート部の状態や損傷

を容易に確認することができない。そこで，SC 合成床版の維持管理における点検手法の確立が急務となっている。

筆者らは，材料に局所的な変形や割れの進展が生じた際に放射される弾性波を捉え，材料や構造物のリアルタイムな健全性調査や監視を行うアコースティックエミッション（AE）法に着目し，図－1に示すようなロビンソン型 SC 合成床版の供用中健全性診断手法への適用研究を進めてきた^{1), 2)}。これらでは，SC 合成床版を模した梁供試体の段階繰返し曲げ載荷試験や，SC 合成床版縮小供試体の段階繰返し押抜きせん断載荷あるいは促進疲労載荷試験における AE 計測を行い，これらの損傷過程における AE 発生挙動の特異性が確かめられた。

そこで，本研究では，SC 合成床版が道路橋床版として供用され，上載動荷重となる車両の輪荷重による劣化損傷を再現するため，室内における実物 SC 合成床版の縮小供試体を用いた輪荷重走行試験を実施し，AE 連続測定による SC 合成床版の劣化進行過程を観察した。



図－1 鋼・コンクリート合成床版の構造図
（ロビンソン型）

*1 (国)熊本大学 工学部環境システム工学科助教授 工博（正会員）

*2 川田工業(株) 橋梁事業部技術部技術開発課 工修

*3 川田工業(株) 橋梁事業部技術部技術開発課課長 工博（正会員）

*4 (国)大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博（正会員）

2. SC 床版の中間支点部輪荷重走行試験

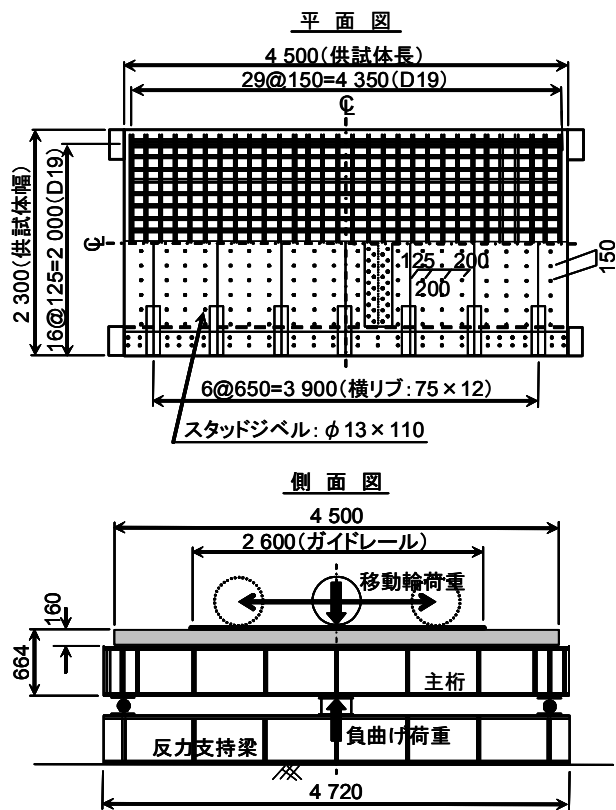
2.1 供試体と載荷方法

(1) 供試体

供試体寸法は、設備の制約から図－2に示すような幅 2.30m、長さ 4.50m、床版支間長 2.00m とし、コンクリートの設計基準強度は、 $\sigma_{ck}=30\text{N/m}^2$ とした。また、後述する中間支点部における実橋でのひび割れ性状を再現するため、床版厚を 16.0cm（およそ実橋の 2/3 程度）とした。表－1に供試体の諸元を示す。

表－1 鋼・コンクリート合成床版供試体諸元

底鋼板厚	6mm
主筋方向鋼材量 (単位断面あたり)	主鉄筋：D19@150 (20.1cm ²) 底鋼板：1 000×6 (60.0cm ²)
配力筋方向鋼材量 (単位断面あたり)	配力筋：D19@125 (22.9cm ²) (主筋方向と同一)
鉄筋比	主鉄筋方向：1.3% 配力筋方向：1.5%
かぶり	主鉄筋：30mm 配力筋：49mm



図－2 鋼・コンクリート合成床版供試体の基本寸法 (mm) と輪荷重走行試験方法

(2) 載荷方法

本研究では SC 合成床版を鋼製連続合成鋼桁橋に採用すると想定した。すると支点間上載荷重による曲げモーメントは、中間支点部で最大となる負曲げ領域を形成する。さらに主桁拘束による引張作用力との重ね合わせによって、床版上部には無視できない引張応力が発生することがある。よって SC 合成床版の場合、上部のコンクリートにひび割れを誘起させて、床版劣化を加速させる原因にもなり得ると考えられる。そこで本研究における載荷方法は、実橋床版との相似率を考慮し、設計曲げモーメントならびに設計荷重とを対応させて再現する事を試みた。すなわち、SC 合成床版を図－2に示すように、両端支持された 2 本の鋼桁にスタッドジベルによって剛結し、両鋼桁の支間中央下部に配したトルクアップジャッキを用いて荷重 294kN（合成後死荷重と合成後活荷重の重ね合わせ時に相当）で鋼桁を持ち上げ、負曲げ領域を模擬した。そして、載荷輪荷重を 196kN（設計輪荷重 2 輪分に相当）で一定にして、支間中央を中心とする 1/2 支間の距離を往復移動載荷した。

(3) AE 計測

実橋の維持管理業務における AE 計測は、対象物の供用期間中の適当な時間間隔で随時行い、橋面上の走行車両によって励起される AE 事象を捉えて対象構造物の劣化状態を推察するものとする。よって本研究においても、輪荷重載荷は中断せずに任意の走行回数に達した時点で、一定時間の AE 計測を行い、SC 合成床版供試体の劣化進行過程における各回の AE 計測により観測された AE 事象の発生挙動、AE 波形の特徴、および AE 発生位置を観察した。使用した AE 計測機器ならびに計測条件を表－2に示す。

表－2 AE 計測機器と計測条件

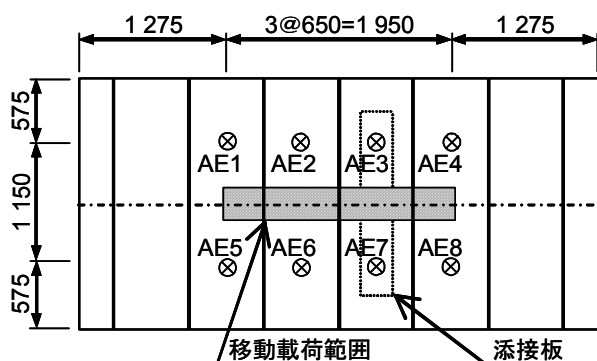
AE センサ	圧電素子・150kHz 共振型
AE 信号プリアンプ	下限 10kHz・増幅率 40dB
AE 信号記録装置	4ch DSP 方式・検出閾値 45dB

中間支点部，および輪荷重移動範囲の交差する位置，すなわち SC 合成床版供試体の中央部でのひび割れ損傷程度を観察するため，AE センサは実橋においても設置可能な底鋼板の下面に図－3 に示すように配置した。ただし，本研究では4チャンネルのAE信号記録装置を使用しており，有意なAE波を可能な限り検出して詳細，かつ正確なデータ収集を行うために床版中央部により近いAEセンサ2，3，6，および7の組合せによる同時AE計測（以降，近接計測とする）と，やはり，実橋のAE計測では可能な限り計測範囲を広げたいため，床版中央より遠ざけたAEセンサ1，4，5，および8の組合せによる同時AE計測（以降，広範計測とする）を実施した。

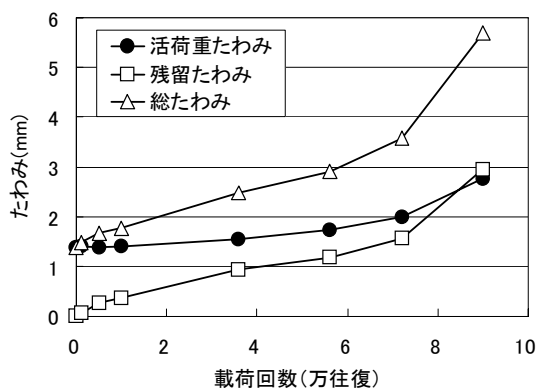
2.2 輪荷重走行試験結果

(1) 床版のたわみ剛性とひび割れ状況

適当な走行回数時点で実施した輪荷重静的載荷による床版中央部でのたわみ量の増加傾向を図－4 に示す。載荷回数初期においては活荷重



図－3 AE センサの配置 (mm)

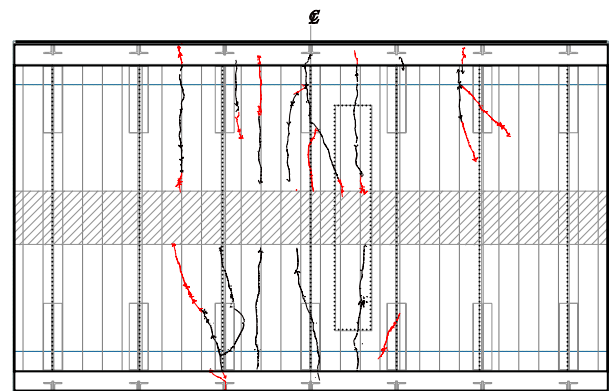


図－4 床版供試体中央部におけるたわみの載荷回数に伴う変化

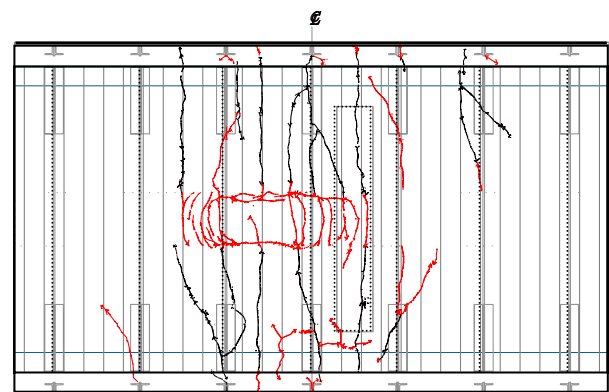
によるたわみ変化はあまり見られないものの，残留たわみは一定の増加を示し，床版中央部が輪荷重により損傷が進行していることが伺える。

走行回数が3.6万回の時点からは，残留たわみの増加はやや鈍化するものの，代わって活荷重によるたわみの増加がやや大きくなっており，さらに，走行回数が7.2万回の時点からは，活荷重によるたわみ増加はますます大きくなるとともに，残留たわみの増加も再び大きくなるという結果を得た。

図－5は，輪走行荷重走行試験の初期（1000回載荷時点）と，9.0万回載荷時点で床版コンクリートの上面に発生したひび割れの様子を示したものである。輪荷重走行試験の開始に先立ち，中間支点部に負曲げ載荷を導入したため，既に供試体コンクリートの表面には橋軸横断方向に長く連続したひび割れが数箇所発生していたことが分かっており，図－5 (a) に示す，1000回載荷時点によるひび割れは，これらのひび割れが



(a) 1000 回載荷時点



(b) 9.0 万回載荷時点

図－5 床版供試体に生じた載荷回数に伴うひび割れの発生状況

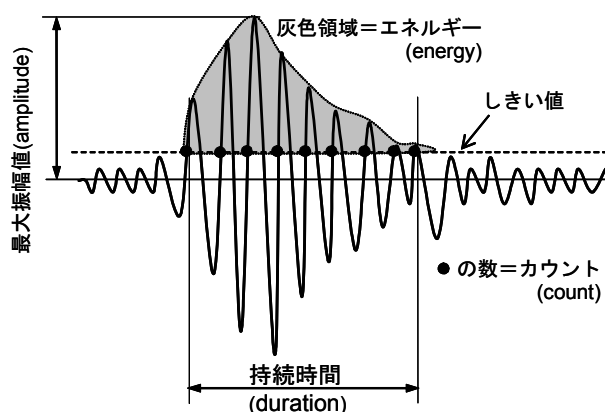
さらに開口したり，進展したりしたものである。主にこれらのひび割れが供試体中央に対し図中左側に偏在する理由は，右側には床版セグメントをつなぐ添接板が存在するためと考えられる。また，これらの長く連続したひび割れは底鋼板の垂直補剛リブの間で生じていることがわかる。

輪荷重載荷回数が 9.0 万回となった試験終了時では，図－5 (b)に示すような輪荷重走行方向に沿った長円形を成すひび割れが供試体中央部から図中左側にかけて発生していた。図－4に示された供試体中央部の総たわみの増加は，このような局所的な損壊による剛性低下を示したものである。

(2) AE 計測結果

AE 計測は，輪荷重走行試験中の任意の回数に達した時点で随時行った。実際に AE 計測を行った時点は，輪荷重走行試験開始前，載荷回数がそれぞれ 9000 回，1.9 万回，2.9 万回，5.5 万回，6.9 万回に達した時点であり，これらの時点から輪荷重載荷が 140 回繰り返される間に検出される AE の記録を行った。ただし，図－3に示した AE センサ 1，4，5，および 8 による広範計測はこれらの時点のすべてにおいて実施したが，AE センサ 2，3，6，および 7 の組合せによる近接計測は，輪荷重走行試験開始前と載荷回数が 2.9 万回に達した時点では実施していない。

通常 AE 計測によって得られる情報は AE パラメータで整理され，時系列あるいは異種パラメータ相関などの統計解析が行われる³⁾。AE パラ

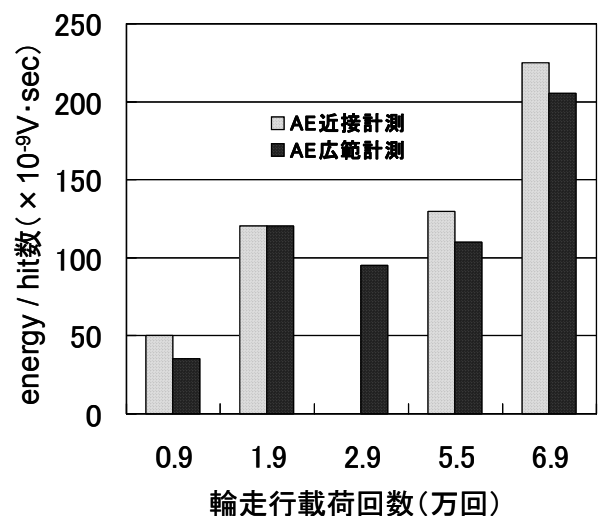


図－6 1 ヒット (hit) における AE パラメータ

メータは，AE 信号の検出時間，および各観測点でのそれらの相対時間差から得られる AE 発生源の位置標定結果の他，図－6に示すような AE 信号の尖頭値検波度数である AE ヒット (hit) 数や包絡線検波出力の時間積分で表される AE エネルギー (energy) などの AE 信号波形の特徴を数量的に表したものである。

輪荷重走行試験中において継続して AE を連続計測すれば供試体の材料劣化あるいは構造欠陥の発現を捉えることは十分に可能であると考えられるが，前述したように，本研究は連続 AE 計測によらず，試験中の任意の時点で AE 計測を随時実施し，供試体に生じる変状を検知できるかを試みるものである。そこでここでは，AE 計測結果として，各 AE 計測において検出された AE 度数に対する，その計測中に計測された総 AE エネルギーの割合，すなわち 1 つの AE 度数あたりの平均 AE エネルギー (energy/hit 数) となる AE パラメータを図－7に示す。

これらより，試験の初期段階では非常に小さな値を示していた平均 AE エネルギーは，載荷回数の進捗につれて大きな値を示すようになることがわかる。しかも，供試体中央部に近いセンサで行った AE 近接計測においても，また供試体中央部と離れたセンサで行った AE 広範計測であつてもその傾向に大きな違いは見られない。

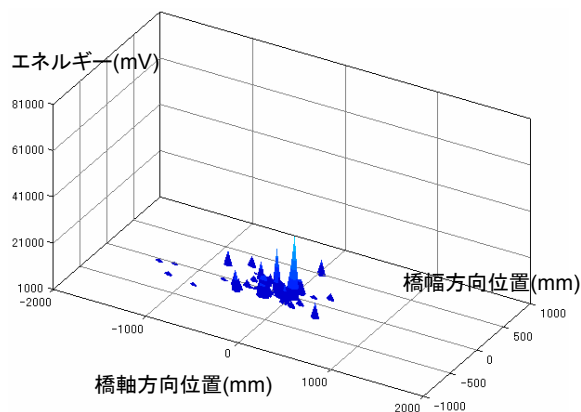


図－7 輪荷重走行試験中の平均 AE エネルギー (energy/hit 数) の推移

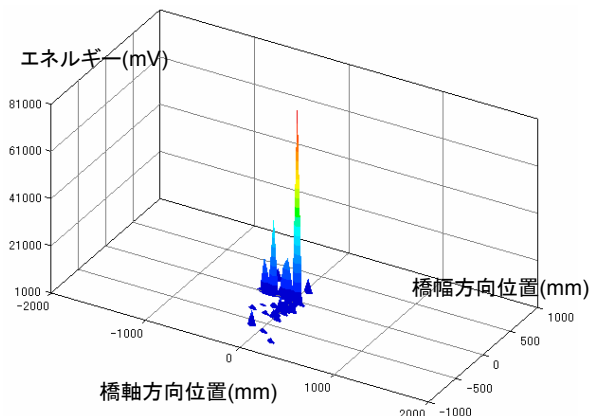
さらに、各 AE 計測において 4 つの AE センサによる AE 発生源の平面位置標定の結果を図-8に示す。これらの

図では床版全体を $20 \times 10\text{mm}$ のメッシュで座標区分された平面とし、AE 発生源の位置標定結果を、これらの升目毎にプロットしている。また、各升目に位置標定された各 AE 事象の AE エネルギーの和を四角錐の高さで表した。

床版供試体とその中央部において部分剛性を急速に失われつつあると考えられる 6.9 万回時点での AE 発生源の位置は、いずれの場合でも中央部に集中して分布していることが確認できる。また、AE エネルギーはその部位において非常に大きな値を示していることがわかる。さらに、床版中間支点部に対し図中左側に、橋軸方向に分布が認められるほか、AE 近接計測の結果はそ



(a) AE 近接計測による結果



(b) AE 広範計測による結果

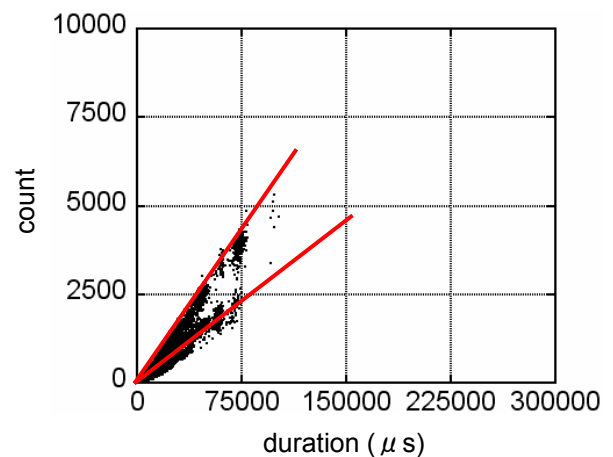
図-8 6.9 万回載荷時点における 2 次元 AE 発生源位置標定結果とそのエネルギー

の傾向がより明瞭で、図-5 (b)に示された 9.6 万回時点における床版中央部に認められた長円形のひび割れに囲まれた領域とほぼ一致している。なお、AE 遠隔計測において図-8 (b)中の床版中央より下側に分布する AE 発生源は、載荷幅の外側に位置する。しかしこの部位は、図-5 (b)に示すように橋軸直交方向のひび割れの間に橋軸方向に進展するひび割れも発生していることが観察されており、これを AE として捉えたものと考えられ、非常に興味深い。

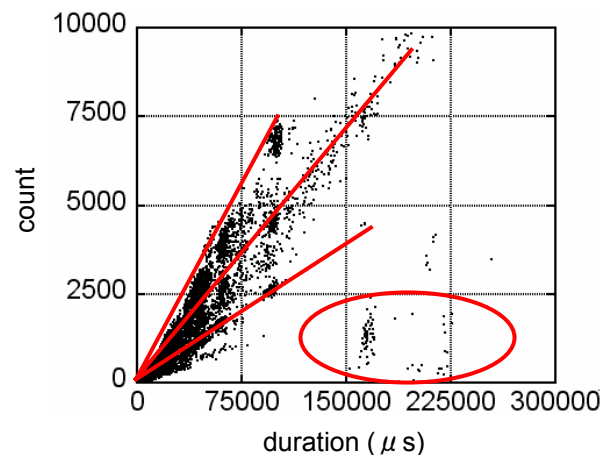
3. AE による SC 床版供試体の損傷過程の考察

3.1 AE カウント数-AE 継続時間の関係

輪荷重走行試験の各時点における AE 計測によって、図-9に示す AE カウント数 (count) と AE 継続時間 (duration) の関係において明瞭



(a) 2.9 万回載荷時点における結果



(b) 6.9 万回載荷時点における結果

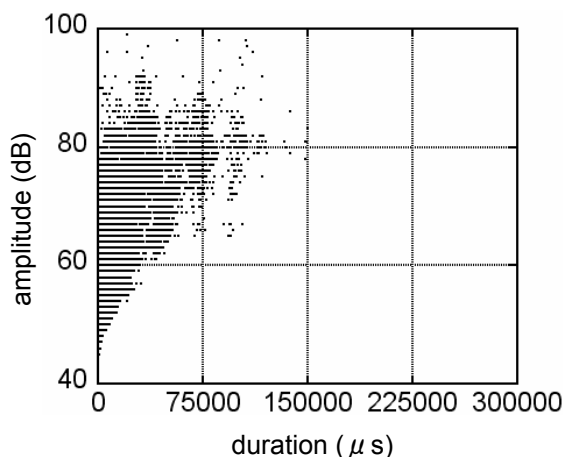
図-9 AE カウント数-AE 継続時間の関係 (AE 広範計測による場合)

な変化が見られた。

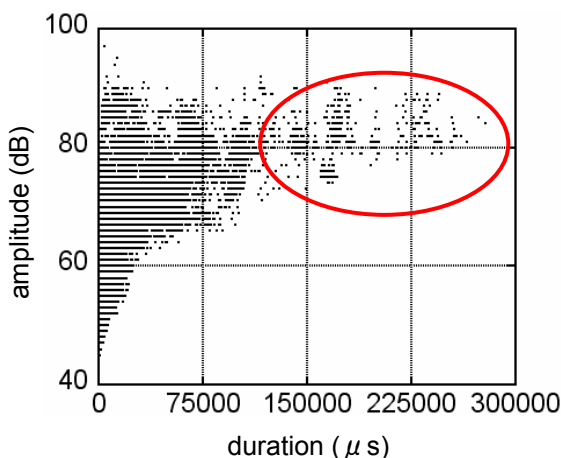
載荷回数の進捗に従って、両者間には比例的な関係を示すようになる。その際、図中の実線のように複数の傾きを持つ進展パターンがみられる。また、載荷回数が 6.9 万回に達した時点では円内に示されるような、AE 継続時間の大きさに比べて AE カウント数が著しく小さい AE の発生が確認できた。

3.2 AE 最大振幅値－AE 継続時間の関係

AE カウント数と AE 継続時間の関係と同じく、明らかな変化が見られた AE 最大振幅値 (amplitude) と AE 継続時間の関係を図-10 に示す。輪荷重走行試験初期の段階では AE 継続時間は小さいが AE 最大振幅値は広範囲の値で発生している。載荷回数の進捗に伴い、AE 最大振幅値も AE 継続時間もともに高い値を示す AE が



(a) 1.9 万回載荷時点における結果



(b) 6.9 万回載荷時点における結果

図-10 AE 最大振幅値－AE 継続時間の関係
(AE 近接計測による場合)

発生するようになることが確認された。

4. まとめ

本研究では、一般的な形式の縮小鋼コンクリート合成床版供試体を用いた輪荷重走行載荷試験を実施し、アコースティックエミッション法による鋼コンクリート合成床版の損傷や劣化を検査する手法への適用性を実験的に考察した。

その結果、輪荷重載荷回数の進捗に伴うコンクリート部の損傷ひび割れは中間支点部により負曲げ領域となる床版供試体中央部において顕著となり、アコースティックエミッションの計測結果から AE の平均エネルギーの増加が劣化損傷の進行を表していることを示唆した。

また、AE 発生源の 2 次元位置標定の結果は床版供試体中央部に生じた長円形の陥没ひび割れの位置と一致しており、かつ AE エネルギーが高い AE 事象がこの領域に発生していることが確認された。

そして、AE パラメータ解析により、それらは比較的長周期で長時間、かつ大振幅の AE 波形の特徴があることが確認された。

よって、このような特徴を示す AE を計測監視することにより鋼コンクリート合成床版の劣化損傷を検知できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 重石光弘, 大津政康, 伊藤 剛, 伊藤博章, 橘 吉宏: 鋼コンクリート合成部材の疲労損傷過程におけるアコースティックエミッション, コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集, Vol.1, pp.479-486, 2003.7
- 2) 島崎 潤, 重石光弘, 伊藤 剛, 伊藤博章: 鋼・コンクリート合成床版の繰返し載荷試験における AE 発生挙動, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, Disk 2, 2004.9
- 3) 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