

論文 AE 法による輪荷重走行を受けるバックルプレート床版の破壊機構に関する検討

菊池 亮*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・関口 幹夫*4

要旨: 本研究は清洲橋バックルプレート (BP) 床版を対象に, 将来の補修を想定した供試体に対し輪荷重走行試験を行い, アコースティック・エミッション (AE) 法を適用し, BP 床版の疲労耐久性, 破壊機構について検討を行ったものである。その結果, 走行初期では, 供試体底部に多数の AE 源が位置標定され, コンクリートと BP の剥離が確認された。走行を重ねると, コンクリート上面にひび割れが発生し, BP が局部的に変形するため生じる W 型のたわみ分布が確認された。また, コンクリートの押し抜きせん断に伴うと推察される AE 源がせん断スパンに集中し, その後, 供試体全体に AE 源が拡大する BP 床版の破壊形態の特徴を得た。

キーワード: BP 床版, 輪荷重走行試験, せん断ひび割れ, AE 法, AE 源位置標定, 鋼板の剥離

1. はじめに

橋梁の老朽化対策は我が国の喫緊の課題であり, 橋梁の定期点検要領に従った点検, グレーディングが実施され, 維持管理計画が策定されている。東京都が管理する清洲橋 (図-1), 永代橋, 勝鬨橋は, 国の重要文化財に指定された橋梁であり, これらは目標年数を定めず, 長期保全・活用が望まれている。清洲橋や永代橋には, 国内の道路橋では数少ないバックルプレート (以下, BP) 床版が採用されている。BP 床版の構造形式は, 凹みのある鋼板 (BP) の上に, コンクリートが直接打設された形式であり, ずれ止めとしてのスタッドや形鋼が施されていない非合成構造が特徴である。

既往の報告¹⁾によると, 清洲橋や永代橋では, 供用から 60 年経過した昭和 62 年に BP の腐食進行が確認され, BP 全面で約 2mm 減耗していたものの, その後の補修から約 30 年経過した現状では, 健全性に問題があるとは

考えられない。しかしながら, BP 床版の疲労耐久性および破壊機構については未解明な点が多いことから, 東京都は清洲橋 BP 床版と同形状かつ, 将来の補修を想定した供試体に対して輪荷重走行試験を実施している。

本研究では, BP 床版の破壊機構解明の一検討および今後の維持管理を戦略的に実施するための基礎検討として, 非破壊検査手法のアコースティック・エミッション (以下, AE) 法を BP 床版の輪荷重走行試験時に適用した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-2 に供試体の概要と AE センサ位置を示す。BP の材質は一般構造用鋼材 SS400 で, 板厚は将来の補修限界相当の 4.5mm である。表-1 にコンクリートの配合を示す。結合材には普通ポルトランドセメント, 粗・細骨材には人工軽量骨材を用いた。設計基準強度は 36N/mm²



図-1 清洲橋

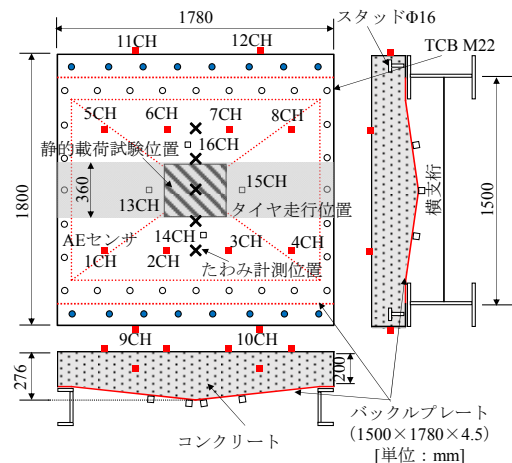


図-2 供試体の概要と AE センサ位置

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域教授 博士 (工学) (正会員)

*4 東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (非会員)

表-1 コンクリートの計画配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
15	21	38.6	5.0	45.0	175	453	510	446	6.342

表-2 AE 計測条件

	しきい値	増幅	バンドパスフィルタ	サンプリング周波数	1 波形のサンプリング数
輪荷重走行試験	75dB	40dB	10~400kHz	1MHz	4096 個
静的載荷試験	40dB				1024 個



図-3 輪荷重走行試験状況

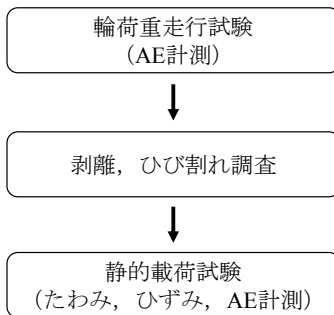


図-4 実験フロー

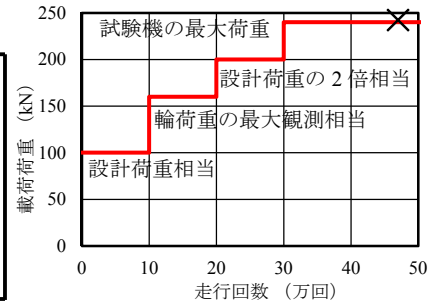


図-5 輪荷重走行試験の
載荷プログラム

(将来の補修を想定した高強度タイプ)であり、28日封緘養生での圧縮強度は 47.5N/mm²、弾性係数は 17.0kN/mm²である。コンクリートはBP上に直接打設し、支持桁上のスタッド(φ16×100mm)で浮き上がり防止した。また、コンクリート床版内には、上面から50mmの位置に、異形棒鋼D6を150mm間隔で配置した。

AE計測には、コンクリートに12個、底面のBPに4個の60kHz共振型のプリアンプ内蔵型AEセンサを使用した。表-2にAE計測条件を示す。後述する輪荷重走行試験では、試験機から発生するノイズが大きいため、しきい値を75dBに設定した。

2.2 実験内容

図-3に輪荷重走行試験状況を示す。載荷にはゴムタイヤの自走式走行載荷装置(最大荷重250kN)を用いた。図-4に実験フローを示す。実験は3ステップから構成され、1) 図-5に示すように、10万回の走行ごとに段階的に荷重レベルを上げ、床版支間中央に繰り返しタイヤを走行(2~3km/h:24時間で8000~9000回往復)させる輪荷重走行試験、2) 所定回数の走行終了後、試験機を停止し、供試体底面に、たたき検査によるコンクリートとBPの剥離調査、目視検査によるコンクリート上面のひび割れ調査を実施、3) タイヤを床版中央に移動させ、図-6に示すように、輪荷重走行試験で載荷を行った荷重まで、段階的に荷重レベルを上げて載荷を行い、BP床版のたわみとひずみを計測する静的載荷試験である。たわみの計測は、供試体中央部にはリング型変位計(容量

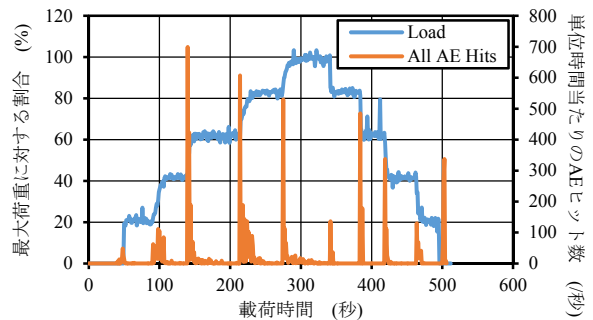


図-6 静的載荷試験の載荷プログラム

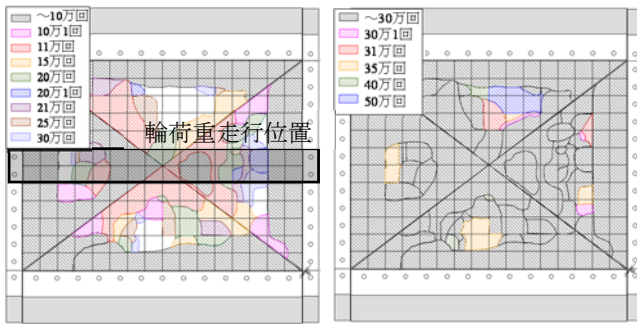
10mm)、他の4点には高感度変位計(容量25mm)を使用し、0.001mmの精度所定の荷重時にデータロガーに記録した。なお、輪荷重走行試験において累計40万回の走行までは、各荷重レベルで1回、1万、5万、10万回ごと、40万回以降は5万回ごとに走行を停止し、各試験を行った。輪荷重走行試験、静的載荷試験では、載荷中にAE計測を行った。なお、静的載荷試験では、最大荷重保持時間内に発生するAE信号を検討の対象とし、荷重の増減時に発生するAE信号については、本検討の範囲外とした。また、46万回走行後に試験機のトラブルにより試験が一端中断した(図-5中の×の時点)が、3ヵ月後に試験を再開した。なお、50万回走行まで繰り返し実験を実施したが、供試体は破壊に至っていない。

3. 実験結果

3.1 力学的挙動

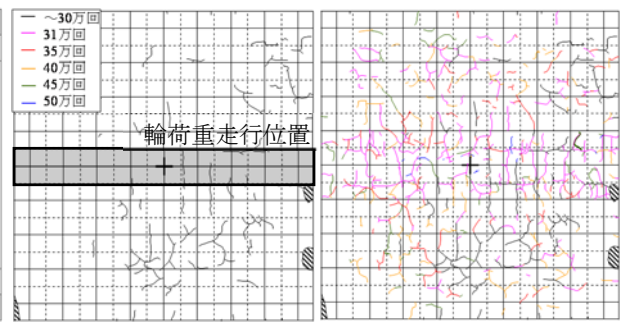
(1) 剥離状況およびひび割れ状況

図-7にコンクリートとBPの剥離状況、図-8にコン



(a) ~30 万回走行 (b) ~50 万回走行

図-7 コンクリートとBPの剥離



(a) ~30 万回走行 (b) ~50 万回走行

図-8 コンクリート上面のひび割れ図

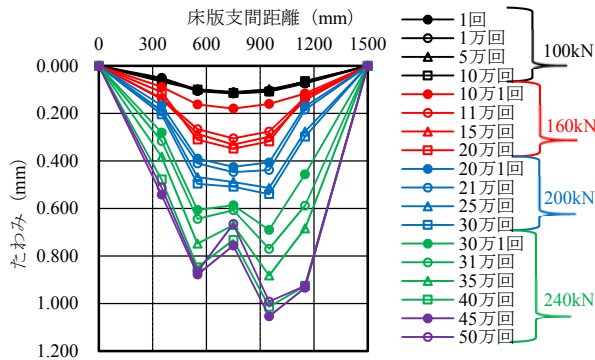


図-9 たわみ分布

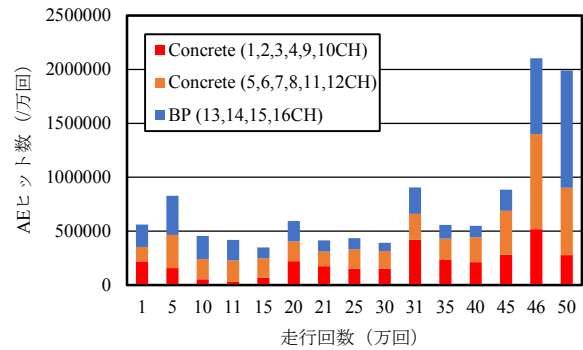
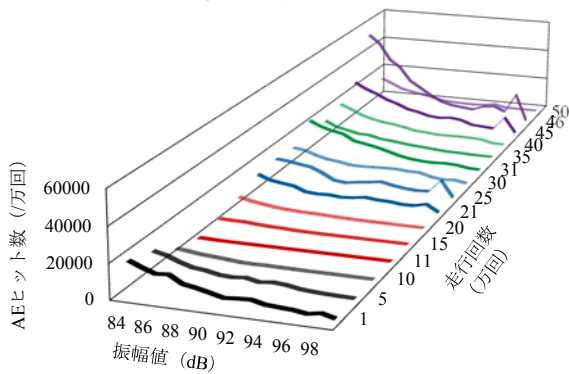
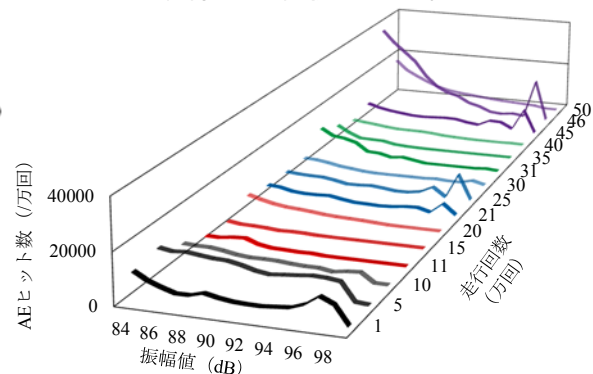


図-10 輪荷重走行試験における検出 AE ヒット数



(a) コンクリート



(b) BP

図-11 輪荷重走行試験における振幅値別検出 AE ヒット数

リート上面のひび割れ状況を示す。ここで、コンクリートとBPの剥離調査はテストハンマーによるBP床版底面の打音検査にて、剥離位置を特定した。載荷初期(1万回, 5万回走行時)では供試体の外側, 11万回走行時には底面中央からコンクリートとBPの剥離が生じ, 走行回数を重ねるにつれて剥離の進展が確認された。50万回走行時には全面剥離となった。また, 図-8に示すように, 30万回走行後, コンクリート上面にひび割れが確認され, 走行回数を重ねるにつれてひび割れが進展し, ひび割れはタイヤの走行面に集中している。

(2) 静的載荷試験によるたわみ分布

図-9に最大荷重保持時間内の活荷重たわみを示す。荷重の増加, 走行回数を重ねるにつれて, たわみが増加することが分かる。30万回走行時には, 走行直下よりも中央両サイドでたわみが大きくなり, 荷重レベルを上げた30万1回走行時にはW型の分布となり, 走行回数を

重ねるにつれて, W型の分布が顕著となっている。これは, BPとコンクリートの付着切れが生じ, せん断ひび割れ発生位置でBPが局部的に変形するためW型のたわみ分布を示すと報告されている内容と一致する。30万回走行時には, コンクリート上面のひび割れやコンクリートとBPの剥離も確認されたことから, 内部にはせん断ひび割れが発生している可能性がある。また, 50万回走行時のたわみが45万回走行時に比べ小さいが, 3ヶ月間の実験中断期間内で, コンクリート内部の開いていたひび割れが時間の経過に伴い閉じ, 剛性の大きなBPと共にたわみが回復したためと考えられる。

3.2 輪荷重走行試験

(1) 検出 AE ヒット数

図-10に輪荷重走行試験中(75dB以上)の検出AEヒット数, 図-11に85dB以上の比較的振幅値の大きいAE信号を対象とした振幅値別の検出AEヒット数を示す。

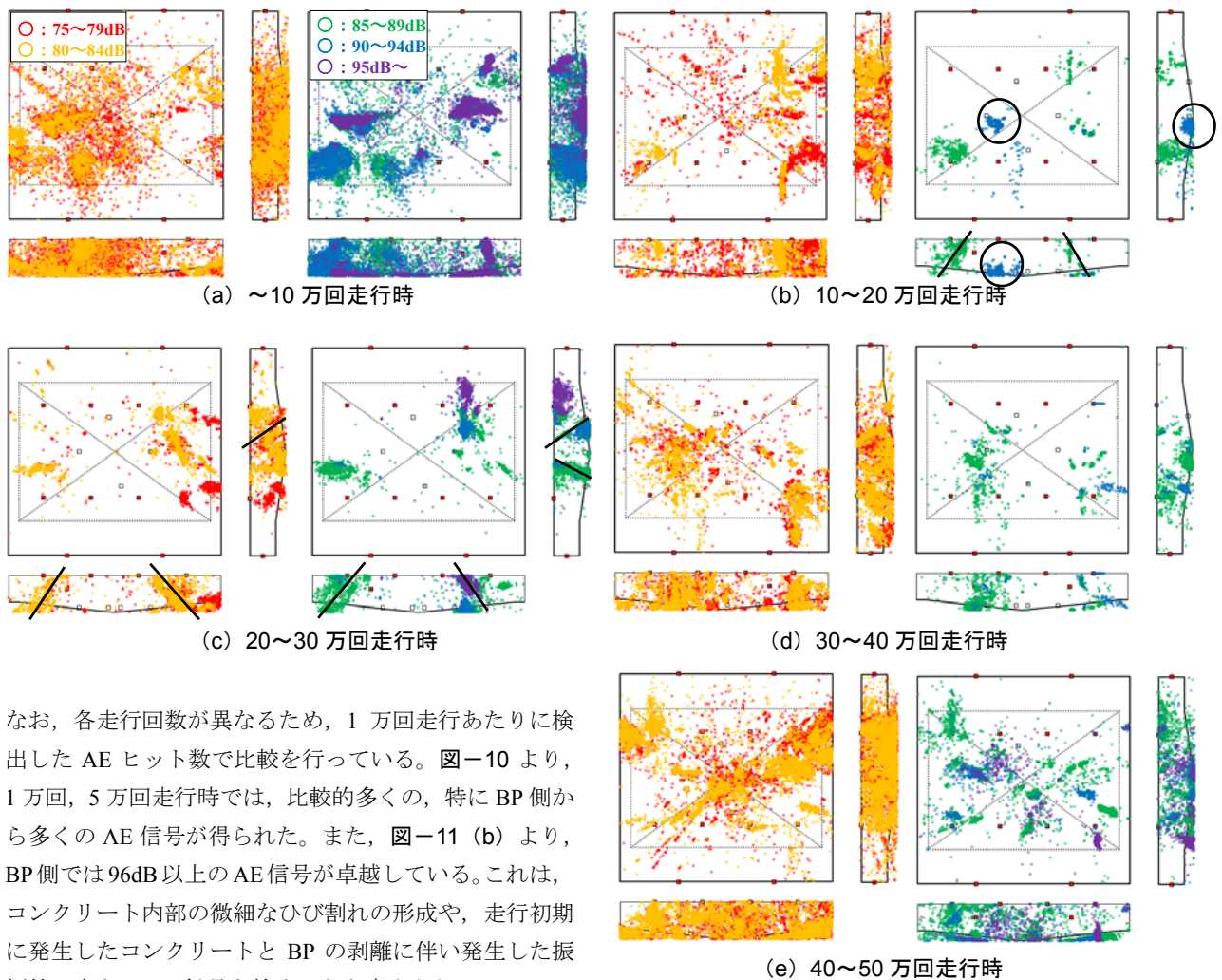


図-12 AE 源位置標定結果

なお、各走行回数が異なるため、1 万回走行あたりに検出した AE ヒット数で比較を行っている。図-10 より、1 万回、5 万回走行時では、比較的多くの、特に BP 側から多くの AE 信号が得られた。また、図-11 (b) より、BP 側では 96dB 以上の AE 信号が卓越している。これは、コンクリート内部の微細なひび割れの形成や、走行初期に発生したコンクリートと BP の剥離に伴い発生した振幅値の大きい AE 信号を検出したと考えられる。

21 万回、25 万回走行時には 98dB の AE 信号が再び増加し、31 万回走行時以降、徐々に AE ヒット数が増え、46 万回以降急激に AE ヒット数が増加している。これは、30 万回走行後、コンクリート上面にひび割れが確認されたことから、それ以前にコンクリート内部においてひび割れの発生や進展が生じ、振幅値の大きい AE 信号を検出したと考えられ、後述する AE 源位置標定結果においてこれらの詳細が明らかとなっている。45 万回、46 万回走行時には、再び 98dB の AE 信号が卓越し、コンクリートに貼付したセンサにおいて多くの AE 信号が検出されていることから、内部のひび割れが急激に進展したと考えられる。50 万回走行時には、75~83dB の AE 信号が増加したことから、コンクリート内部の既存ひび割れの擦れによる影響と考えられる。既存ひび割れの滑動については、静的載荷試験結果にて後述する。

(2) AE 源位置標定結果

図-12 に輪荷重走行試験における振幅値別 AE 源位置標定結果を示す。載荷初期では、床版全域に多数の AE 源が発生しているが、75~84dB の AE 源は比較的全面に広がっているのに対し、85dB 以上の AE 源は局所的に集中していることが分かる。特に 95dB 以上の AE 源が供試

体底面に集中している。載荷初期の振幅値が大きい現象として、コンクリートと BP の剥離が考えられ、走行初期に床版外側で剥離が生じたことと対応している。

10~30 万回走行時には、走行初期ほど AE 源は発生していないが、供試体底面中央部で AE 源が集中する領域（図-12 (b) 中の○の部分）がある。これは、走行初期にコンクリートと BP の付着切れが生じたため、両者の一体性が失われ、供試体底面に曲げひび割れが形成されたと考えられる。これは、BP 床版に静的載荷試験を実施した際のひずみ分布と対応している。また、底面のせん断スパンから上面中央に向かって斜めに進展する AE 源も確認でき（図-12 (b, c) 中の○の部分）、この時点で主要なせん断ひび割れが形成され始めたと考えられる。

コンクリート上面にひび割れが確認できた 30 万回走行以降、コンクリート上面から発生する AE 源 (75~84dB) も多くなり、40~50 万回走行時は、再びコンクリート内部から発生する比較的振幅値の大きい AE 源も多くなる。既往の研究によると、橋軸方向のひび割れの断面は図-13 に示すように、いくつかのコンクリート塊に細分化することが分かっており、これらを形成するひび割れの

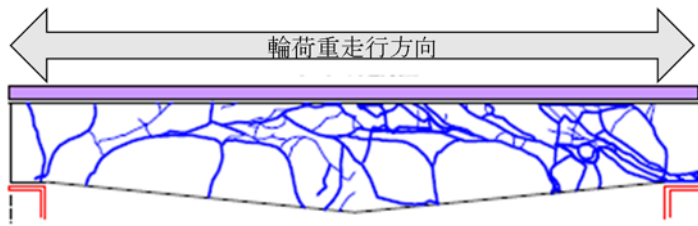


図-13 橋軸方向のひび割れの断面¹⁾

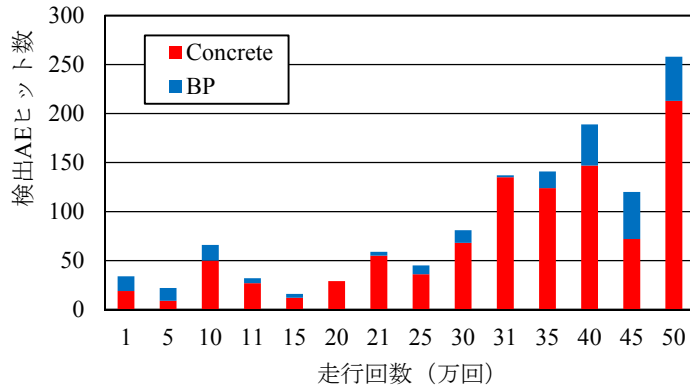


図-15 静的載荷試験における検出 AE ヒット数

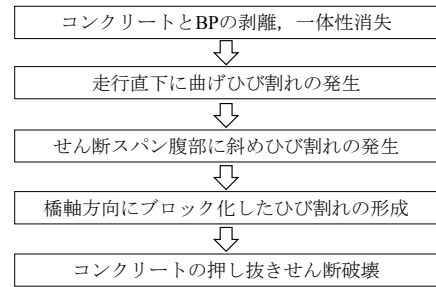


図-14 BP床版の破壊形態

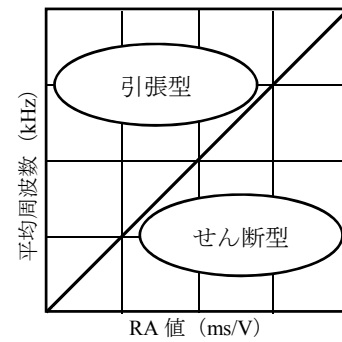


図-16 ひび割れ判定

進展が 40～50 万回走行のうちに急激に進展したと考えられる。

輪荷重走行試験の結果から、図-14 に示すような BP 床版の破壊形態が考えられる。はじめに、輪荷重走行により微細なひび割れがコンクリート内部に発生、蓄積すると共に、コンクリートと BP 間に剥離が生じ、床版の一部で一体性が失われる。ここで、剥離状況(図-7(a) : 30 万回走行まで) から分かるように、剥離は先に床版の外側と中央部から発生し、その後、せん断スパンで生じ、全面剥離に至る。コンクリート内部のひび割れは中央部の剥離発生後、供試体底面に曲げひび割れが発生し、走行を重ねるにつれてせん断ひび割れが発生し始める。その後、床版底面で発生したひび割れは上面に進展すると共に、コンクリート内部にブロック化したひび割れが形成される。最終的にはコンクリートの押し抜きせん断破壊を呈すると考えられる。また、本研究の AE 法による BP 床版の破壊形態の検討は、既往の研究¹⁾による三次元 FEM 解析による BP 床版の破壊形態と類似している。

3.3 静的載荷試験結果

(1) 検出 AE ヒット数

図-15 に静的載荷試験における検出 AE ヒット数を示す。なお、最大荷重保持時間内に発生した AE 信号を検討の対象とした。走行の初期では、検出した AE 信号は少ないが、コンクリート上面にひび割れが確認できた 30 万回以降、AE ヒット数が多くなっており、40 万回以降 BP での AE ヒット数が顕著に多くなっている。静的載荷試験における検出 AE ヒット数の推移からも床版の劣化進行状況が推定できると考えられる。

(2) RA 値と平均周波数の関係

図-16 に示すように、AE パラメータの RA 値(立ち上がり時間/最大振幅値)と平均周波数(AE カウント数/信号継続時間)の関係から、検出した AE が新たなひび割れの形成に伴って発生する引張型か、既存のひび割れの滑動に伴って発生するせん断型かの判定を行うことが可能である²⁾。図-17 に静的載荷試験における最大荷重保持時間内に検出した AE 信号の RA 値と平均周波数の関係を示す。走行初期の静的載荷試験では、引張型に分類される AE 信号の割合が多く、10 万回走行時にはせん断型の AE 信号を検出している。40、50 万回走行時では、せん断型に分類される AE 信号も多いことが分かる。走行初期においては、微細なひび割れの形成に伴い発生した引張型の AE 信号を検出し、走行回数を重ねるにつれて、コンクリート内部のひび割れが増加し、既存のひび割れの滑動に伴って発生するせん断型の AE 信号を検出したと考えられる。

4. まとめ

本研究では輪荷重走行を受ける BP 床版の破壊形態および AE 特性について検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 輪荷重走行試験において、走行初期からコンクリートと BP 間の剥離が発現し、走行を重ねるにつれて剥離の進展が確認された。その後、BP 床版がせん断ひび割れ発生位置で局部的に変形する W 型のたわみ分布となり、コンクリート上面にひび割れが確認された。また、BP 床版が破壊に至る前に、全面

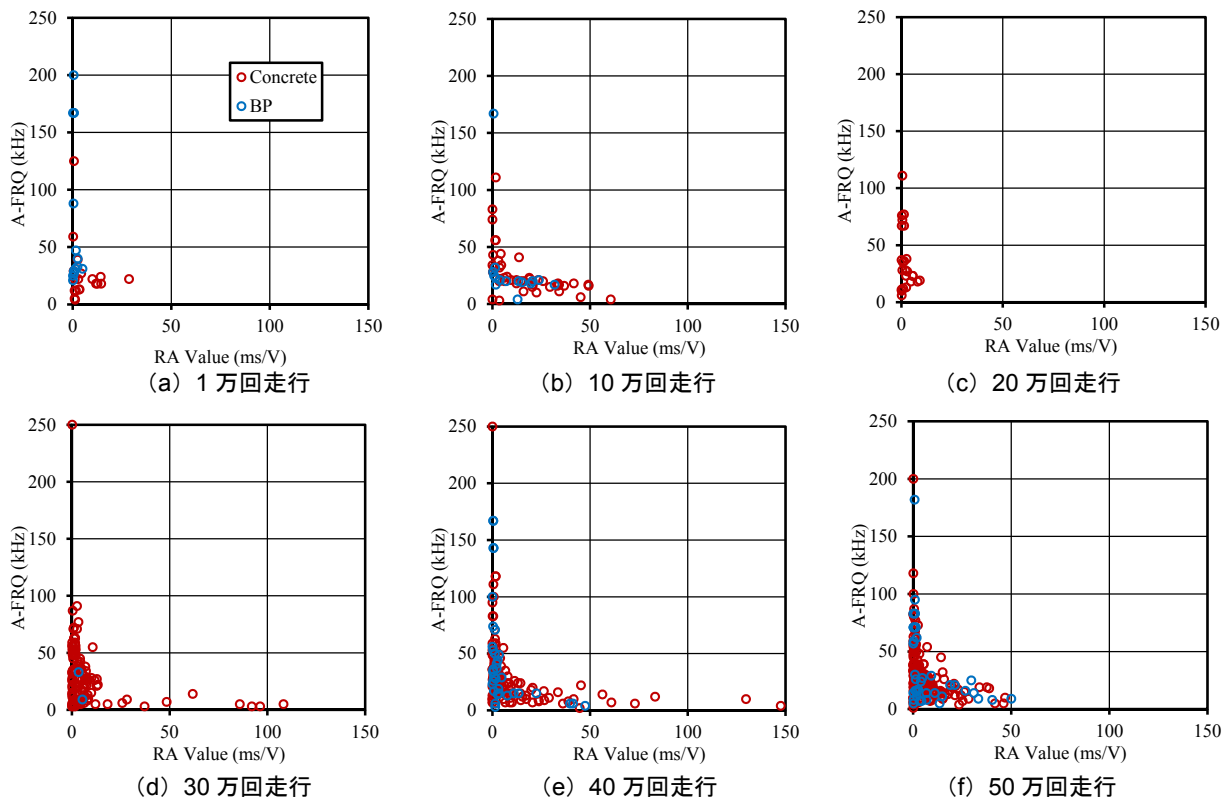


図-17 RA値と平均周波数分布によるひび割れ判定

- 剥離となった。
- (2) 輪荷重走行試験にAE法を適用した結果、走行初期には、微細ひび割れを形成する75~84dBのAE源が供試体全面から検出され、コンクリートとBPの剥離に伴って発生する85dB以上のAE源が供試体底面から検出された。走行を重ねるにつれて、曲げひび割れ、せん断ひび割れの形成に伴って発生する比較的振幅値の大きいAE源が検出され、その後、供試体内部全域にわたってAE源を検出したことから、内部のひび割れが急激に進展したと考えられる。輪荷重走行中のBP床版にAE法を適用することで、コンクリートとBPの剥離の有無、コンクリート内部のひび割れの発生、進展といった破壊過程がモニタリング可能である。
- (3) 静的載荷試験にAE法を適用した結果、走行を重ねるにつれて、検出AEヒット数が増加した。また、走行初期では引張型のAE信号が検出され、走行を重ねるにつれて、せん断型のAE信号が増加する傾向が確認された。特にコンクリート上面にひび割れが確認された30万回およびBP床版のたわみがW型を呈した30万1回走行以降でAE信号が急増し、せん断型のAE信号が増加したことから、静的載荷試験時にAE法を実施することで、BP床版内のコンクリートの疲労劣化を推定することが可能と考

えられる。

- (4) BP床版の破壊形態は、走行初期にコンクリート内部に微細なひび割れが形成されると共に、コンクリートとBPの剥離が生じ、一体性が失われる。次に、微細ひび割れの蓄積によって、走行面直下に曲げひび割れ、せん断スパンに斜めひび割れが発生する。その後、コンクリート内部のひび割れは進展し、橋軸方向にブロック化したひび割れを形成し、最終的にはコンクリート部の押し抜きせん断破壊を呈すると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、首都大学東京の上野敦准教授には、多数の助言をいただいた。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 関口幹夫, 大石雅登, 内山博文, 藤山知加子, 真部洋大: バックルプレート床版の静的破壊機構と疲労耐久性に関する実験的検討, 都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.121-136, 2013.
- 2) 社団法人日本建材産業協会: コンクリートの非破壊検査法, 技報堂出版, p47-64, 2003.