

論文 鋼板接着補強 RC 床版の AE 計測による疲労損傷過程の考察

菫澤 洋平*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・関口 幹夫*4

要旨：本研究では鋼板接着補強 RC 床版の疲労損傷過程を把握することを目的とし、輪荷重走行下にある鋼板接着補強 RC 床版のアコースティック・エミッション (AE) 計測を実施した。その結果、補強後の初期段階では、たわみや鋼板剥離は劣化現象として顕在化しないが、コンクリート内部では疲労損傷が蓄積し、かつ局所的に進行することが AE 計測結果から認められた。また、鋼板剥離部に樹脂の再注入を実施した結果、たわみは回復したもののコンクリート内部の損傷は蓄積したままであるため、補強後の初期段階から疲労損傷が蓄積していた領域を中心として、最終的に押抜きせん断破壊を呈することがわかった。

キーワード：RC 床版、鋼板接着補強、鋼板剥離、輪荷重走行試験、アコースティック・エミッション

1. はじめに

既設の道路橋鉄筋コンクリート (RC) 床版において、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書により設計された RC 床版(以下、39 床版)は、鉄筋量や床版厚の不足、また、交通量の増大や車両の大型化等により供用開始数年で陥没が起こるなど、多数の損傷事例が報告された¹⁾。このようなことから、39 床版には様々な補修・補強がなされてきた。中でも、鋼板接着補強工法は、床版下面に鋼板をエポキシ樹脂で接着することにより、曲げ耐力および押抜きせん断耐力を向上でき、また、床版下面から施工するため交通規制を必要としない利点を有することから、昭和 40 年代後半から昭和 60 年代にかけて多数採用されてきた。しかしながら、橋梁の維持管理において、道路橋 RC 床版の劣化度は床版下面のひび割れ密度で評価されるが²⁾、現行の鋼板接着補強 RC 床版では、床版下面からコンクリートの目視が不可能となり、コンクリートの劣化状態を把握することが困難となる課題が生じている。現状の維持管理では、鋼板の浮きを打音検査で調査しているが、鋼板の浮きと床版の疲労耐久性の低下度合には明確な相関が認められないため³⁾、鋼板の浮きだけでは床版の劣化度を評価することは難しいと考えられる。以上のことを踏まえると、鋼板接着補強 RC 床版の劣化度を適切に評価するには、床版コンクリート自体の損傷を把握することが肝要である。

本研究では、鋼板接着補強後のコンクリートの損傷過程を把握することを目的とし、非破壊検査手法の一つであるアコースティック・エミッション法(以下、AE 法)を用いて、輪荷重走行下にある鋼板接着補強 RC 床版の疲労損傷過程を検討した。また近年、既設の鋼板接着補強 RC 床版の鋼板剥離部に、樹脂を再注入することで、耐久性の回復に一定の効果があることが示されており⁴⁾、本

研究においても樹脂の再注入を実施し、その後の RC 床版の疲労損傷過程についても考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

鋼板接着補強を施す供試体は、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準じて設計した、長さ 3500mm、幅 2800mm、厚さ 160mm の RC 床版である。供試体寸法および配筋図を図-1 に示す。コンクリートは設計基準強度 18N/mm² の普通コンクリート(粗骨材最大寸法 20mm、スランプ 8cm)であり、封緘養生後の材齢 28 日における圧縮強度は 24.4N/mm²、弾性係数は 29.8kN/mm² である。

図-2 に鋼板接着補強の詳細を示す。鋼板には SS400 を使い、1150×2000×4.5mm を 2 枚(図-2 中の S1, S2)、1200×2000×4.5mm を 1 枚(図-2 中の S3)、さらに添接板として 400×2000×4.5mm を 2 枚(図-2 中の J1, J2)をアンカーボルトおよびエポキシ樹脂にて接着した(図-2(b))。また、鋼板の浮きの促進を目的として、図

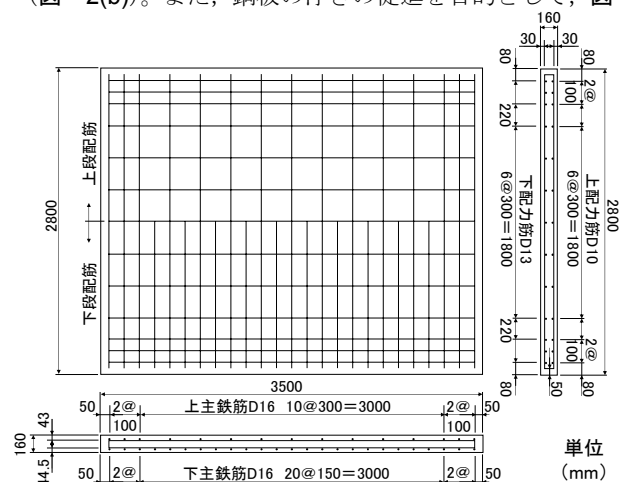


図-1 供試体寸法および配筋図

*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

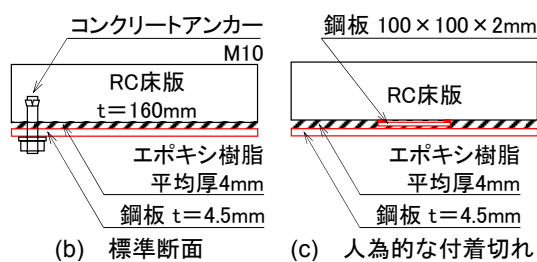
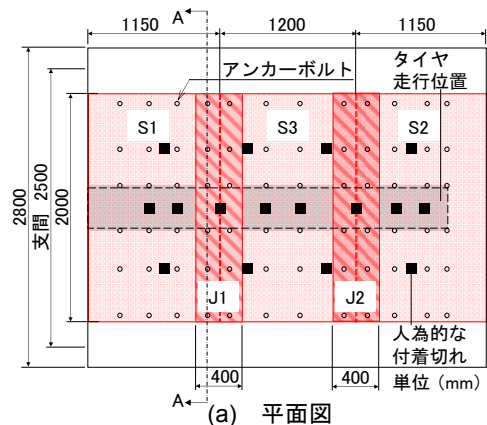


図-2 鋼板接着補強の詳細

表-1 AE 計測条件

閾値	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
60dB	40dB	10~400kHz	1MHz	1024個

→2(c)に示すように所定の位置にあらかじめ人為的な付着切れ (100×100×2mm) を設けた。

2.2 実験方法

試験には、航空機用ゴムタイヤを装着した自走式の輪荷重走行試験機を用いた。輪荷重は、図-2 に示すように供試体上の支間中央部を走行し、床版右端から 350mm は走行していない。支持条件は、橋軸方向を支間 2500mm で単純支持とし、橋軸直角方向を弾性支持とした。

本実験では、輪荷重走行試験中に AE 計測を実施した。AE 計測には、プリアンプ内蔵型 AE センサ (60kHz 共振) を 16 個使用した。表-1 に計測条件、図-3 にセンサ配置図を示す。図中の×は床版上面に設置したセンサであり、○が下面センサである。

実験フローは、所定の走行回数終了後に、床版上面ひび割れの目視調査と床版下面の打音検査による鋼板の剥離調査を実施し、その後床版中央にて静的載荷試験を行った。静的載荷試験は、輪荷重走行試験機を用いて床版中央にて輪荷重走行試験と同じ荷重まで段階的に荷重を増加させ、床版たわみを計測した。図-4 に鋼板接着補強後からの荷重と走行回数の関係を示す。また、図中には鋼板接着補強後の床版支間中央のたわみを併せて示す。本実験の載荷荷重は、過去の軸重の観測結果の最大値に相当する 160kN を基本荷重とし、走行回数 10 万回から 16.3 万回までは、設計荷重の 2 倍相当にあたる 200kN で載荷した。

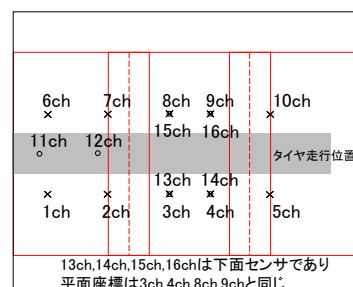
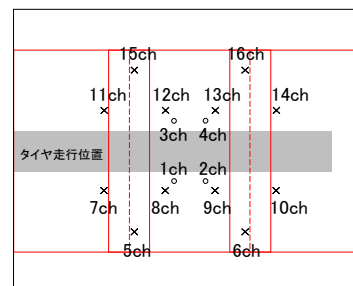
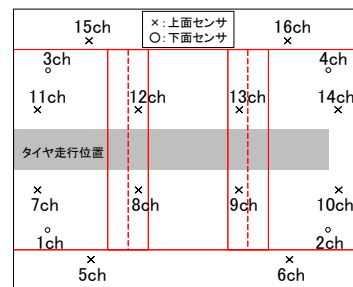
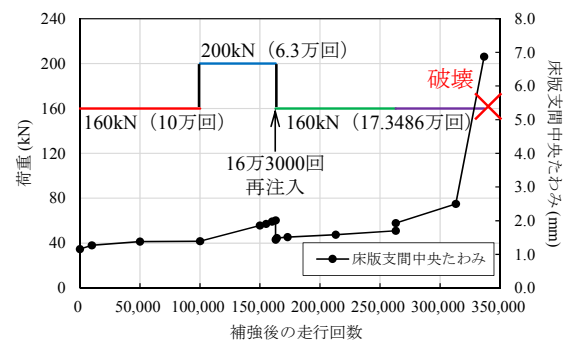


図-3 センサ配置図



なお、本実験では RC 床版の鋼板接着補強に先立ち、目標ひび割れ密度を 16m/m² とし、予備的に荷重 160kN、走行回数 2000 回として載荷し、ひび割れを導入した。ここで、東京都の実橋における床版補強の目安は、ひび割れ密度約 10m/m² であるが⁵⁾、実験では実橋よりもひび割れ幅の小さい微細なひび割れも測定できることを考慮し、16m/m² を目標ひび割れ密度とした。なお、ひび割れ密度の算出には、格子密度法を用い、格子間隔は 100mm とした。その後、供試体に鋼板接着補強を施し、既往の研究成果⁵⁾より、剥離面積率 30%が使用限界の目安とされていることから、本研究では剥離面積率が 30%に達した時

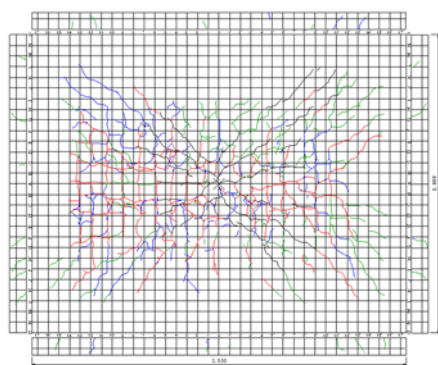


図-5 予備載荷後の床版下面ひび割れ

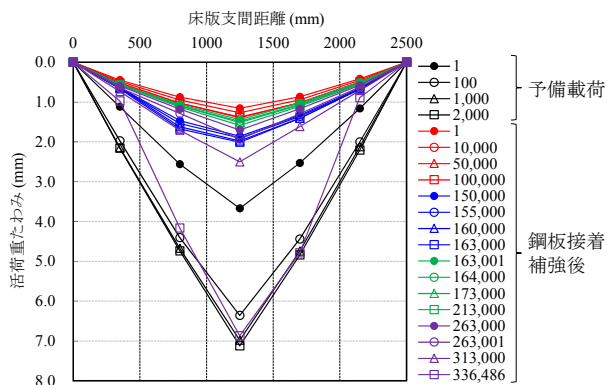
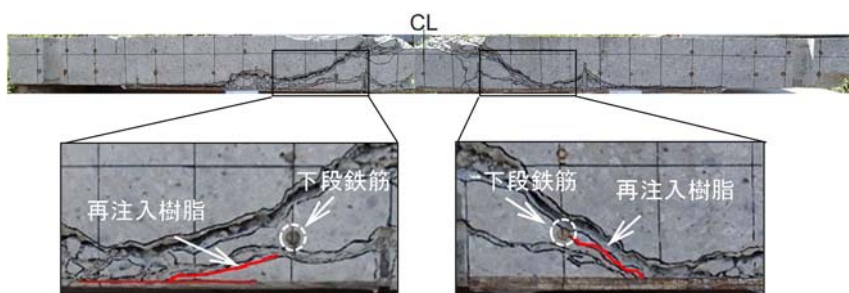


図-6 床版たわみ



(a) A-A 断面 (図-2, 写真-1(b)参照)



(b) 床版上面

写真-1 試験終了時の状況

点で、樹脂の再注入を行った。

3. 実験結果

3.1 補強前の予備載荷

予備載荷 (160kN, 2,000 回走行) 終了時の床版下面のひび割れ図を図-5 に示す。床版下面の広範囲に格子状のひび割れが発生しており、この時のひび割れ密度は 14.8m^2 であった。また、3.2 節で後述するが、このときの支間中央のたわみは約 7mm (図-6) であり、たわみの最大値を示した。

3.2 鋼板接着補強後

(1) 走行回数および破壊状況

本実験の RC 床版は鋼板接着補強後から 336,486 回で写真-1(a)に示すように押抜きせん断破壊を呈し、床版上面は広範囲にわたりコンクリートが砂利化し、最大 35mm 陥没した (写真-1(b))。また、一部のひび割れには注入した樹脂が充填されていたが、その位置は下段鉄筋までであった (写真-1(a)の矢印)。

(2) 床版たわみ

輪荷重走行回数と供試体橋軸直角方向のたわみの関係を図-6 に示す。走行回数は予備載荷と補強後で分けて示す。予備載荷 (2000 回走行) においてたわみは 7mm まで増加したが、その後、鋼板接着補強によりたわみは約 1mm まで大幅に回復した (補強後 1 回走行)。補強後の 160kN 載荷では、たわみはほとんど増加せず、補強後 10 万回走行後からは荷重を 200kN に引き上げたため、補強

後 10 万回から 15 万回にかけては、たわみが僅かに増加し、2mm 程度のたわみとなった。樹脂再注入後は荷重を 160kN に引き下げたためたわみは小さくなり、その後、破壊直前 (補強後 31.3 万回) からたわみが急増し、最終的に押抜きせん断破壊に至った。

(3) 鋼板剥離

鋼板とコンクリートの剥離の進展状況を図-7 に示す。補強後 5 万回までは、剥離の進行はほとんど確認できず、10 万回走行後に剥離の進行が見られた。この剥離は、タイヤ走行直下を囲むような形で発生した。その後は荷重を 200kN に増加させたことで、15 万回走行後にタイヤ走行直下を囲むように急激に剥離が進展した。それ以降は、15 万回走行で発生した剥離の外側へ進展するように拡大している。補強後 16.3 万回走行終了時点で鋼板の剥離面積は 33.43%に達し、この時点で鋼板剥離部に対し樹脂の再注入を実施した。補強後 31.3 万回後 (再注入後 15 万回走行後) に、再注入前と同様に、タイヤ走行直下を囲むように剥離が発生した。その後、剥離は急激に進行し、押抜きせん断破壊が生じた。試験終了時の鋼板の剥離面積は 51.76%であった。

4. AE 計測結果

4.1 AE ヒット数と鋼板剥離面積

図-8 に輪荷重走行試験中の AE ヒット数と鋼板剥離面積の推移を示す。なお、試験ごとに走行回数が異なるため、1000 回走行あたりの AE ヒット数に換算している。

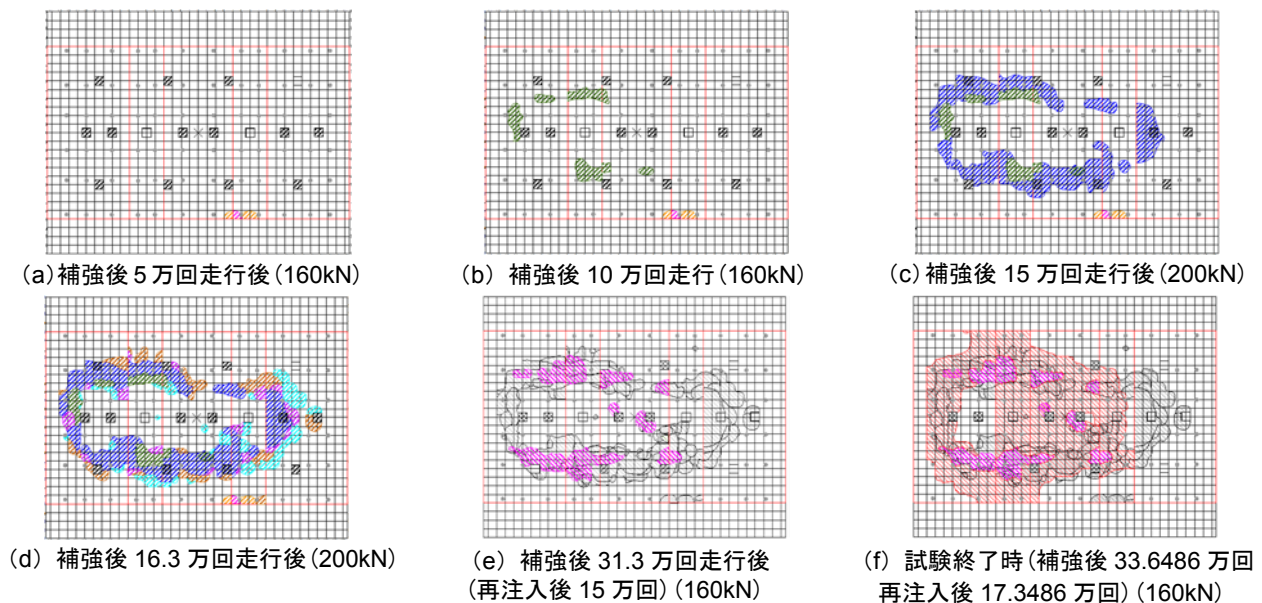


図-7 鋼板とコンクリートの剥離

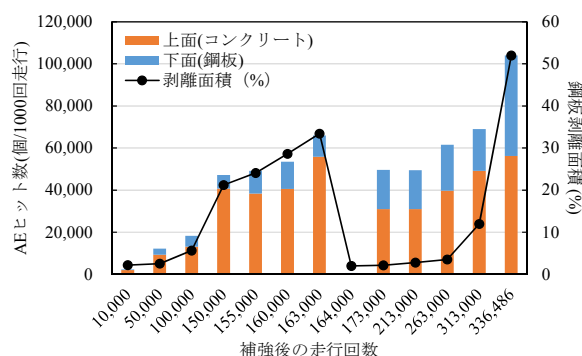


図-8 輪荷重走行試験における AE ヒット数

さらに、床版上面と下面でセンサ設置数が異なるため、1 センサあたりのヒット数に換算している。

試験の各段階において走行回数が増えるにつれて AE ヒット数が増加しており、床版の疲労損傷が進行していることが推察できる。なお、10 万回から 15 万回にかけて急激に AE ヒット数が増加しているのは、荷重を 160kN から 200kN に引き上げたためである。また、樹脂の再注入を行った直後の 16.3 万回から 16.4 万回にかけて AE ヒット数が大幅に減少していることが確認できる。これは荷重を 200kN から 160kN に下げたことによるカイザー効果の現れに加え、樹脂を再注入することにより、既存のひび割れに樹脂が浸入し、ひび割れを埋めたことで、ひび割れ面の摩擦等により生じる AE が抑制されたためであると考えられる。

ここで、AE ヒット数と鋼板の剥離面積の推移を比較すると、再注入前までは走行回数の増加に伴い AE ヒット数と鋼板剥離面積は増加し、両者には相関が見られ、また、コンクリート側の AE ヒット数が大半を占めるため、コンクリートの損傷が鋼板剥離を誘発する要因であると考えられる。一方、樹脂の再注入後は鋼板剥離面積は増加していないが、AE ヒット数はコンクリート面お

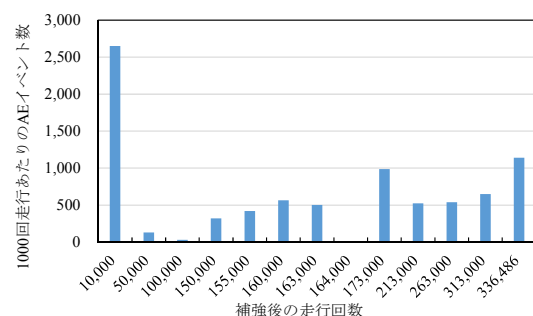


図-9 輪荷重走行試験における AE イベント数

よび鋼板面において多数検出されている。これは、内部コンクリートの微細ひび割れの形成に伴う AE ヒット数が蓄積されていること、および鋼板剥離部に樹脂が再充填されたことにより、発生した AE 波が鋼板面のセンサに伝搬しやすくなったためであると考えられる。よって、打音検査による剥離部の検出のみならず、AE ヒット数によるコンクリートの損傷過程の把握も重要である。

4.2 AE イベント数

図-9 に輪荷重走行試験中の AE イベント数を示す。AE ヒット数と同じく、1000 回走行あたりの検出個数に換算している。AE イベント数は AE ヒット数とは異なり、補強初期に最も多く検出され、その後は減少する傾向にあった。この理由として、補強初期は床版内部にひび割れなどの損傷が少なく、発生した AE 波がコンクリート中を伝搬する際にひび割れ等の影響を受けにくく、AE 波は比較的伝搬しやすいが、走行回数を重ねるとコンクリート中に微細なひび割れが多数形成され、AE 波が伝搬経路中のひび割れ等の影響により減衰することで受信できるセンサ数が少なくなったため、位置標定が困難になったと考えられる。このことは、樹脂再注入後の AE イベント数の発生挙動にも現れており、再注入を行った直後の 17.3 万回時に多くの AE イベントが同定され、

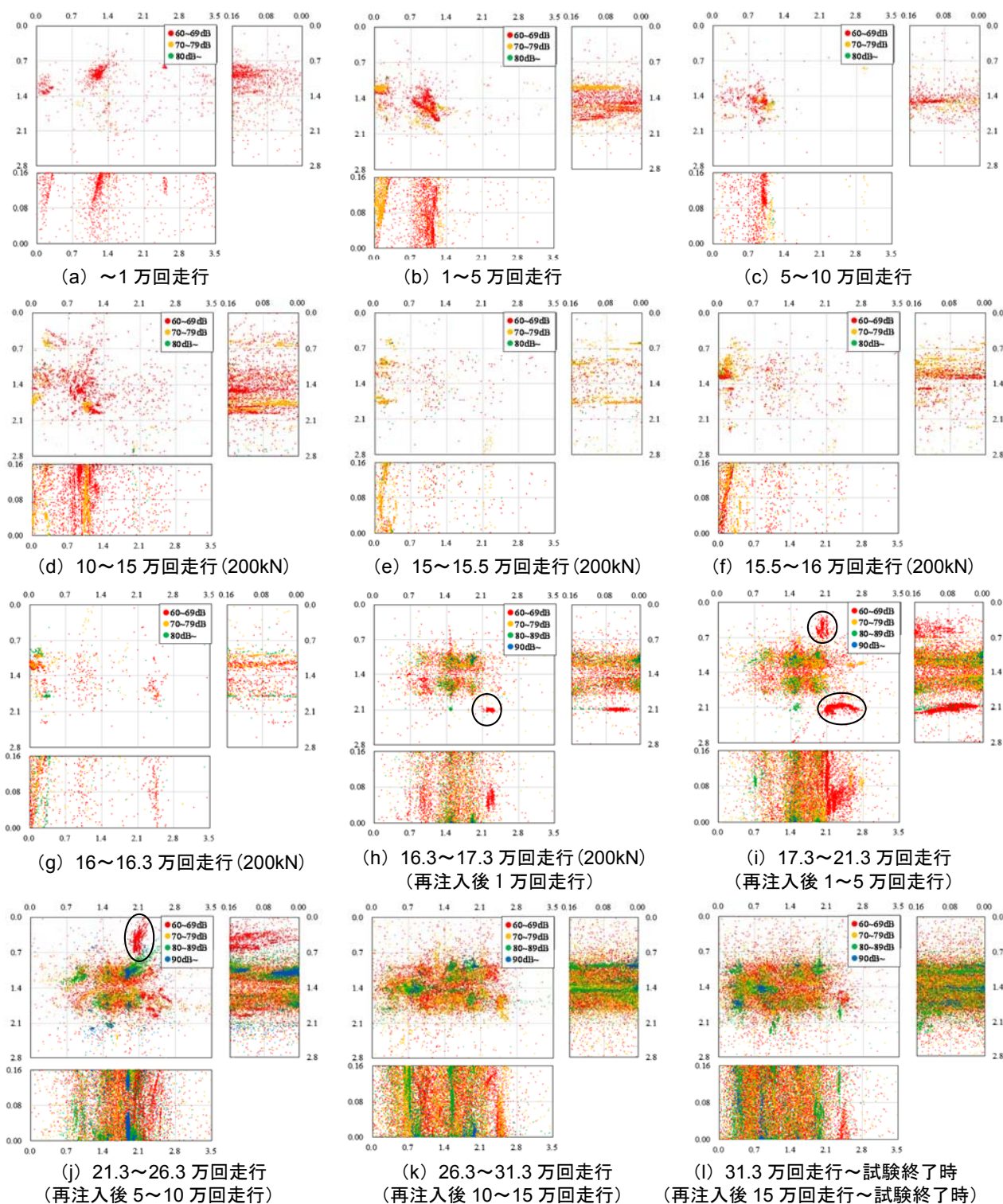


図-10 AE 源位置標定結果

その後破壊直前までは減少傾向にあることがわかる。そのため、図-8 で示した AE ヒット数の挙動とは異なる傾向となった。したがって、AE イベント数だけで損傷を判断するのではなく、AE ヒット数の推移と併せて床版の損傷過程を把握する必要があると考えられる。

4.3 AE 源位置標定結果

図-10 に鋼板接着補強後の振幅値別 AE 源位置標定結果を示す。補強初期 1 万回 (図-10(a)) から AE 源は床

版内にて局所的に発生しており、さらに、床版下面と上面を結ぶように AE 源が発生していることから、微細ひび割れが床版内に多数形成されていると推察される。5 万回以降から再注入を実施する前まで (図-10(b)~(g)) は、走行回数の増加および鋼板の剥離面積の増大とともに、供試体中にプロットされる AE 源の数は減少傾向にあるものの、タイヤ走行直下に AE 源が集中している。次に、樹脂の再注入を行った直後 (図-10(h)) は、補強

後の載荷初期 1 万回走行時と同様に、AE 源は床版下面と上面を結ぶように発生している。このように、再注入後の載荷初期の段階からコンクリート内部の損傷は局所的に進行しており、損傷は押抜きせん断破壊を呈する領域に集中している。しかしながら、床版下面と上面を結ぶ押抜きせん断ひび割れのような大きなひび割れは、この時点ではまだ明確に形成されていないと思われる。その根拠として、試験終了後の断面調査（写真-1(a)）では、再注入の樹脂は下段鉄筋の高さまでにしか充填されていないのが確認できるためである。

再注入後はタイヤ走行直下から離れた箇所（図-10 (h, i, j) 中の○印）でも AE 源が集中的に発生している。これは、再注入により再注入前に形成されたひび割れが埋まり、それまで損傷していなかったコンクリート部に新たなひび割れが発生したためであると考えられる。また、17.3 万回（再注入後 1~5 万回）以降から床版下面と上面を結ぶように振幅値の比較的大きい AE 源（80~89dB(図中の緑)、90dB~(図中の青)) が発生しており、21.3 万回から破壊時までその傾向が顕著になっている。よって、この時点から床版下面と上面を結ぶ貫通ひび割れにつながる微細ひび割れが集積されたと推察できる。既往の研究において、貫通ひび割れを生じた場合は、コンクリート床版の疲労耐久性が大きく低下することが報告されており⁹⁾、本研究において 31.3 万回走行後（再注入後 15 万回走行以降）から、たわみ、鋼板剥離面積が急激に増加しており、コンクリート中の疲労破壊が 21.3 万回以降から決定的となり、脆性的に破壊が進行したと考えられる。

4.4 鋼板接着補強 RC 床版の疲労損傷過程

本研究の範囲で得られた知見より、鋼板接着補強 RC 床版の疲労損傷過程は、図-11 のようにまとめられる。すなわち、1) 鋼板接着補強 RC 床版では、補強により床版全体の曲げ剛性および耐荷力が向上し、たわみが著しく回復する。一方、補強後初期段階では、たわみや鋼板剥離は劣化現象として顕在化しないが、コンクリート内部には補強前の疲労損傷が蓄積しており、これらが起点となりコンクリートの微細ひび割れの発達は局所的に進行する。2) コンクリートの疲労損傷が蓄積されていくと、たわみや鋼板の剥離面積が増加し、床版全体の損傷として表面化する。3) 鋼板剥離部に樹脂の再注入を実施すると、たわみは回復し、再注入前と同程度の輪荷重走行回数に耐えることから、樹脂の再注入は床版の疲労耐久性の向上に一定の効果が期待できる。4) 樹脂の再注入によりたわみは回復するが、コンクリート内部の微細ひび割れ領域までには樹脂は充填されず、コンクリート内部の疲労損傷は蓄積されるため、床版下面と上面を結ぶ貫通ひび割れが形成され、最終的に押抜きせん断破壊を呈する。

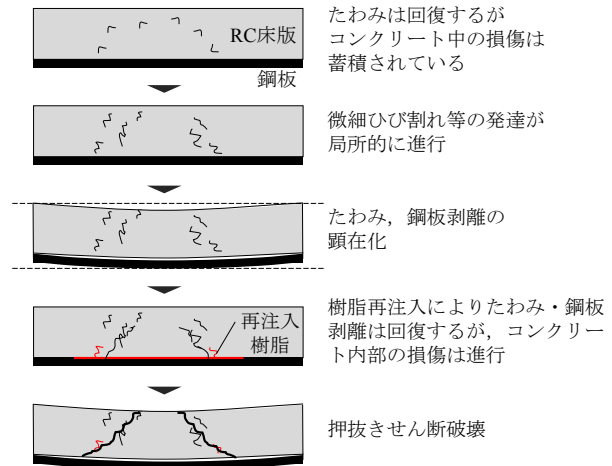


図-11 鋼板接着補強 RC 床版の疲労損傷過程

5. まとめ

本研究では、輪荷重走行試験下にある鋼板接着補強 RC 床版に対し、AE 計測を実施した。その結果、AE 法を用いることにより、床版たわみや鋼板剥離が顕在化する以前に、載荷初期からコンクリートの損傷が蓄積し、最終的に押抜きせん断破壊を呈する箇所に集中することが明らかとなった。また、樹脂の再注入には一定の効果があるが、コンクリートの疲労損傷は蓄積しており、それらが貫通ひび割れを形成し、破壊に至ることが示された。

謝辞 本研究の遂行に際し、首都大学東京の上野敦准教授には多数の助言を頂いた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料，第 28 号，p.1，2002.3
- 2) 土木学会：2013 年度制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.232-247，2013.10
- 3) 前川敬彦，久利良夫，佐々木一則，飛ヶ谷明人，青木康素：鋼板接着補強 RC 床版の維持管理に関する検討，第七回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.13-18，2012.6
- 4) 佐野正ほか：浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.67, No.1, pp.27-38, 2011.1
- 5) 関口幹夫，國府勝郎，青木孝憲：重錘落下たわみによる RC 床版の健全度評価法，東京都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.79-92，2005.
- 6) 宮川史，石尾真理：既設道路橋コンクリート床版の耐久性評価に関する実証的研究，国土交通省国土技術研究会論文集，pp.35-40，2013.11