

論文 弾性波法による鋼板接着補強 RC 床版のせん断ひび割れ進展評価

齋藤 孝文*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・関口 幹夫*4

要旨： 輪荷重走行を受ける鋼板接着補強 RC 床版は押抜きせん断破壊を呈することが知られている。本研究では鋼板接着補強 RC 床版のせん断ひび割れの進展評価を目的とし、輪荷重走行下にある鋼板接着補強 RC 床版に AE 法と衝撃弾性波法を適用した。その結果、本実験の鋼板接着補強 RC 床版は補強後から鋼板剥離が生じる段階において、せん断ひび割れが生じている可能性があり、その後劣化が表面化する前に押し抜かれる領域のコンクリートは塊として挙動し、樹脂再注入後もせん断ひび割れは走行回数の増加と共に進展し、最終的にたわみやひずみの急激な変化と共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： 鋼板接着補強 RC 床版, 輪荷重走行試験, 衝撃弾性波法, アコースティック・エミッション

1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路橋 RC 床版では、これまでに多くの補修・補強が施されてきた。補強工法の中でも、鋼板接着補強工法は多数の施工実績を有するが、鋼板接着補強された RC 床版について、鋼板剥離を示唆する不良音や漏水などの劣化の進行が確認されている。

一方、近年では新しい点検手法として、鋼板仮止め用アンカーボルトにセンサを設置し、3次元 AE トモグラフィ解析²⁾や、衝撃弾性波法による評価³⁾を実施することで、内部コンクリートの健全性が検討されている。

田中ら⁴⁾によれば、輪荷重走行を受ける鋼板接着補強 RC 床版は、補強初期は版としての耐荷挙動を示すが、走行を重ねるとコンクリートにせん断ひび割れが生じ、床版ははり状化する。はり状化した床版は、アーチ機構を形成し上縁付近のコンクリートが大きな圧縮疲労を受け、さらにせん断ひび割れは進展し、押抜きせん断破壊に至る破壊過程を経ることが報告されている。このことから、せん断ひび割れの進展を把握することが鋼板接着補強 RC 床版の劣化評価には重要である。

菑澤ら⁵⁾は、AE モニタリングによる鋼板接着補強 RC 床版のコンクリート内部の疲労損傷過程について検討を行った。結果として、鋼板接着補強 RC 床版は、1)補強前の疲労損傷が起点となり、コンクリート中に局所的なひび割れが進行、2)疲労損傷が蓄積されていくと、たわみや鋼板剥離が増加し、床版全体の損傷として表面化、3)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疲労損傷過程が示された。

本研究では、コンクリート内部を調査できる非破壊試験法である AE 法および衝撃弾性波法を、輪荷重走行疲労を受ける鋼板接着補強 RC 床版に適用し、床版コンクリート内部のせん断ひび割れの進展について検討した。

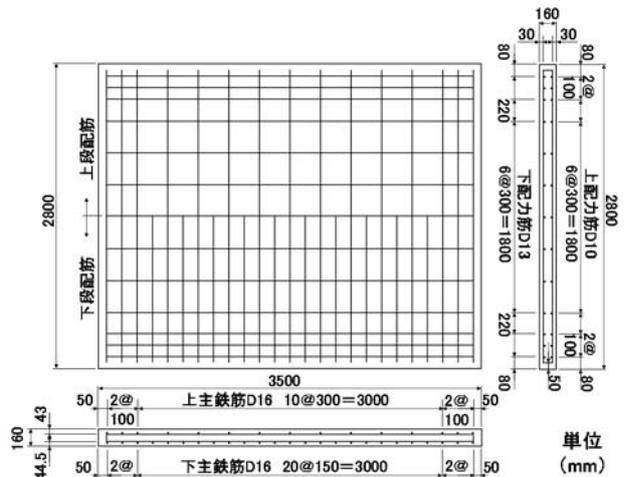


図-1 供試体寸法および配筋図

2. 実験概要

2.1 供試体概要

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。RC 床版に対し、事前走行 120 回(160kN)を実施した後、鋼板接着補強を施した。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 23.9N/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)、1200×2000×4.5mm を 1 枚(図-2 中の S2)、さらに添接板として 400×2000×4.5mm を 2 枚(図-2 中の J1)をアンカーボルトおよびエポキシ樹脂にて接着した。

2.2 実験方法

輪荷重走行試験には、航空機用ゴムタイヤを装着した

*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

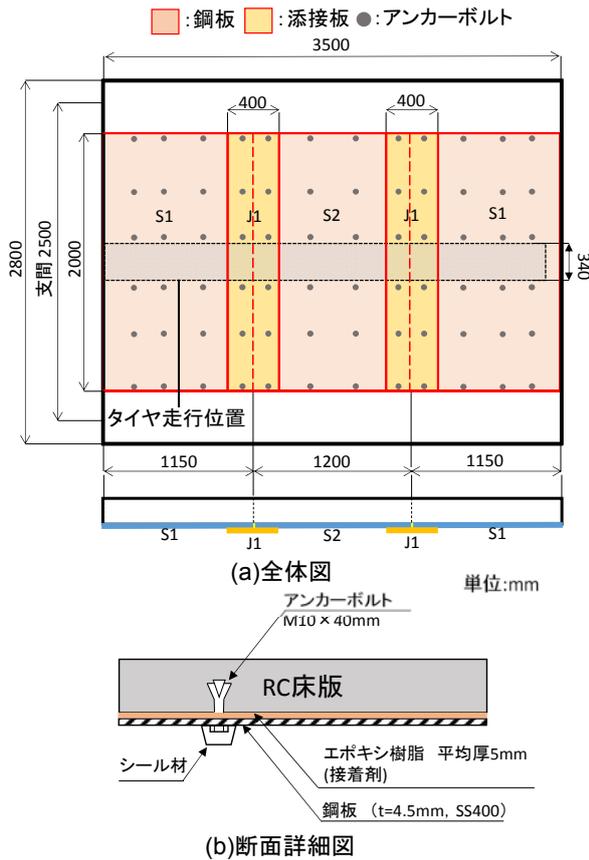


図-2 RC床版の鋼板接着補強概要

自走式の輪荷重走行試験機を用いた。輪荷重は図-2(a)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。

実験手順は、AE計測と同時に輪荷重走行を所定の回数まで実施した後、床版上面ひび割れの目視調査と床版下面のたたき検査による鋼板の剥離調査、および衝撃弾性波法による弾性波の計測を行った。その後、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ることで静的載荷試験を行い、床版のたわみと鋼板ひずみを計測した。

表-1にAE法および衝撃弾性波法の計測条件を、図-3にAEセンサ設置位置と床版たわみおよび鋼板ひずみの計測位置を示す。なお、AEセンサの接着には、ホットメルト接着剤を用い、供試体が破壊するまで貼付し続けた。衝撃弾性波法では、弾性波の入力をφ19.7mmの鋼球を各センサの近傍にて打撃することで行った。たたき検査は、点検ハンマで鋼板全体を100×100mmあたり3.4回打撃することで行い、異音が生じた箇所はより詳細に打撃確認を行った。

輪荷重走行は、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⁶⁾、走行回数30万~45.2万回のみ180kNで走行した。また、本実験では、供試体に鋼

表-1 計測条件

試験名	しきい値	増幅	バンドパスフィルタ	サンプリング周波数
AE法	60dB	40dB	20kHz~400kHz	1MHz
衝撃弾性波法	60dB	40dB	1kHz~400kHz	

□: 上面センサ * : 下面センサ × : たわみ・鋼板ひずみ計測位置

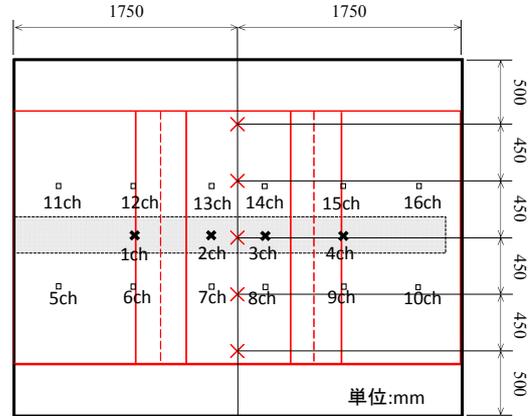


図-3 AEセンサの設置位置と床版たわみおよび鋼板ひずみ計測位置

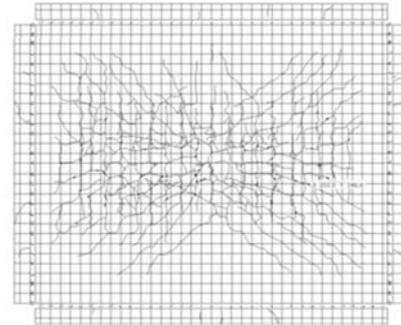


図-4 床版下面ひび割れ図(事前走行終了時)

板接着補強を実施する前に、160kNで120回の事前走行による疲労損傷を与えた。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10m²/m²であるが⁷⁾、実験では実橋よりもひび割れ幅の小さいひび割れも測定できることを考慮し、本実験では16m²/m²を目標ひび割れ密度とした。その後、供試体に鋼板接着補強を施し、鋼板の剥離面積が全体の45%(使用限界と考えられる剥離面積30%⁷⁾の1.5倍)に達する段階(45万2000回走行)まで走行した後、鋼板の剥離部に樹脂の再注入を実施した。

3. 実験結果

3.1 補強前の事前走行

図-4に事前走行終了時(160kN, 120回走行)の床版下面のひび割れ図を示す。事前走行終了時のひび割れ密度は15.2m²/m²、たわみは約7mmまで進展し、ひび割れは下面全体に格子状に広がっていることがわかる。

3.2 鋼板接着補強後

図-5に鋼板の剥離面積および床版中央のたわみの補強前からの推移を示す。本実験は走行回数61万7169回で床版が押抜きせん断破壊し、終了した。写真-1に床

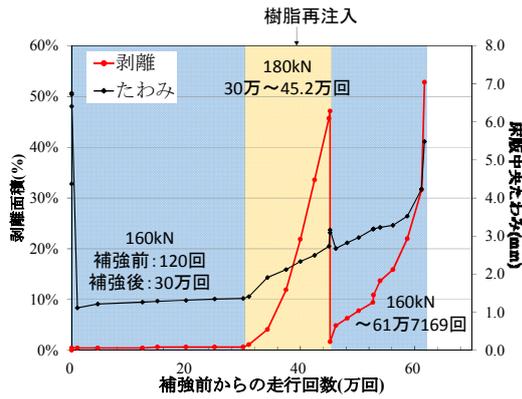


図-5 鋼板の剥離面積および床版中央たわみの推移

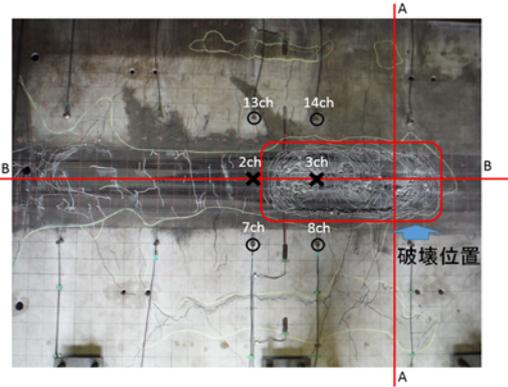


写真-1 床版破壊状況

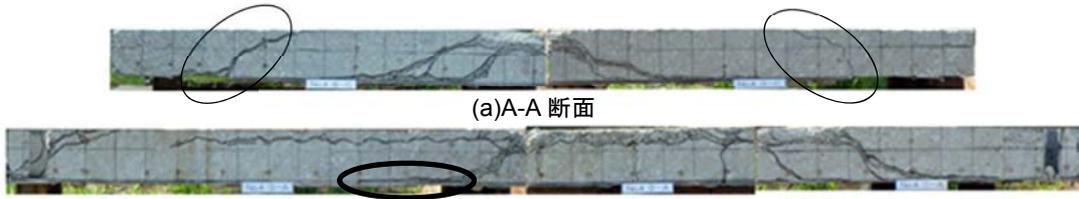


写真-2 破壊後の床版断面

版上面での破壊状況を、写真-2 に破壊後の床版断面を示す。破壊した床版は、破壊領域の上面コンクリートが土砂化していた。また、破壊後の断面写真から、破壊原因となったせん断ひび割れのほかに鋼板端部からのせん断ひび割れも確認された(写真-2(a))。

(1) 床版たわみおよび鋼板ひずみ

図-6 に各走行回数後に静的荷重試験で計測した橋軸直角方向の床版たわみと鋼板ひずみを示す。なお、鋼板ひずみは、鋼板が接着された段階から計測した。未補強時 120 回走行後(事前走行終了時)では、床版中央たわみは約 7mm まで増加しており、全計測結果の中で最も大きくなった。鋼板接着補強後、たわみは 1mm 程度まで回復し、30 万回走行までは微増する傾向を示し、鋼板ひずみも同様の傾向を示した。荷重が 180kN に増加した後、床版たわみの増加傾向は大きくなった。鋼板ひずみは荷重の増加直後に大きく増加し、30 万~40 万回走行まではほぼ変化していないが、40 万~45 万 2000 回走行にかけて、ひずみ分布が V 型から W 型に変化した。これは、せん断ひび割れおよび鋼板の剥離の発生・進展に伴い、剥離位置の鋼板に引張応力が集中したためと考えられる。その後、鋼板の剥離部に樹脂の再注入を実施した結果、たわみとひずみは回復するが、58 万 7000 回走行から急激に増加し、61 万 7169 回走行で床版は破壊に至った。

(2) 鋼板剥離

図-7 に各走行回数後にたたき検査で調査した剥離位置を示す。走行荷重 160kN の補強後から 30 万回走行まで、鋼板の剥離はほとんど確認されなかった。その後走行荷重が 180kN に増加すると、37 万 5000 回走

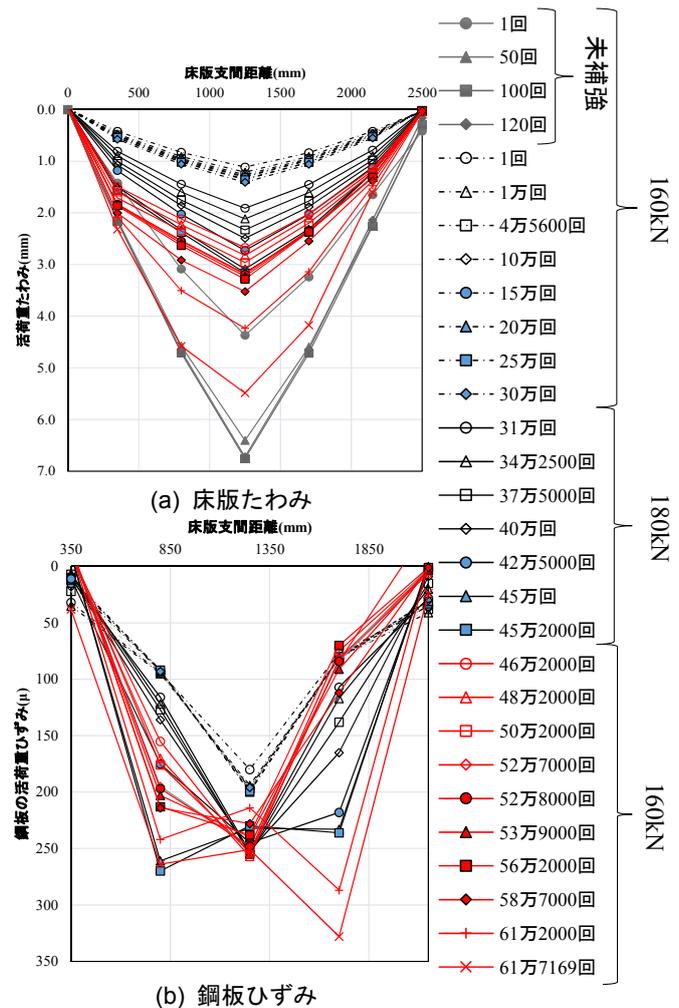


図-6 床版たわみおよび鋼板ひずみ分布

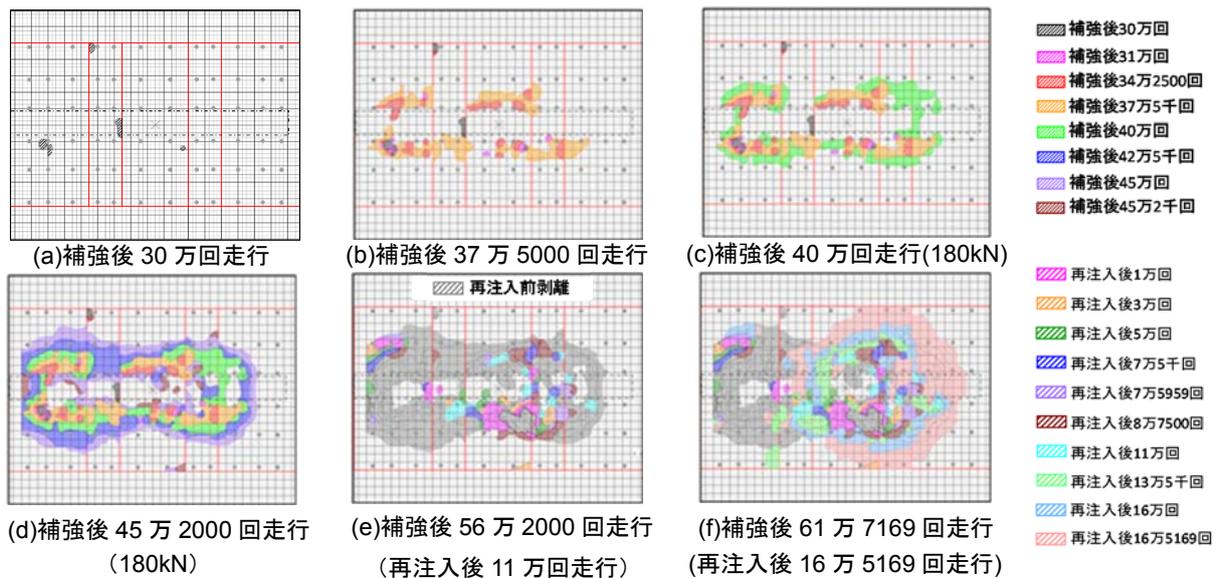


図-7 鋼板剥離の推移

行後に走行位置に沿うように鋼板の剥離が確認された。その後、40万回走行までに走行位置を囲む形で鋼板の剥離が進展し、45万2000回走行までに剥離面積は著しく増加した。また、この段階で樹脂の再注入を行い、鋼板の剥離面積は47.15%から1.66%まで回復した。樹脂再注入後に走行を再開すると、鋼板の剥離は56万2000回走行まで、床版中央のやや右側で進展し、その後再注入前の剥離領域の外側端部方向へ進展し、最終的に52.81%の剥離が生じ、床版は破壊した。

4. 衝撃弾性波法の適用結果およびAE源位置標定結果

(1) 衝撃弾性波法の適用結果

図-8に鋼板接着補強後からの衝撃弾性波法による弾性波速度の推移を示す。弾性波の計測対象は図-8(a)に示す、予め弾性波の伝搬経路中にせん断ひび割れが発生・進展すると予想されるセンサ間とした。なお、3chは破壊時に押し抜かれる領域直下に位置している(写真-1)。

図-8(b), (c)より、弾性波速度は補強後30万回走行まで約4000m/sでほぼ変化せず、走行荷重が増加した直後に500m/s程度低下し、40万回走行まではほぼ一定の速度を示している。これは荷重が増加したことにより、急激にひび割れが発生したためと考えられる。その後、40万回走行以降、速度は低下傾向を示す。3.2(1)で述べたように、40万~45.2万回走行では鋼板ひずみがV型からW型へ変化し、せん断ひび割れが発生・進展していると考えられるため、40万回走行からの速度の低下傾向はせん断ひび割れが進展した結果を表していると考えられる。その後、樹脂再注入により速度は30万回走行時と同程度まで回復するが、その後走行回数の増加に伴い速度は低下し、破壊時には約1500m/sまで低下した。伝搬経路別では、2,7,13chの速度は破壊の直前に大きく低下し、

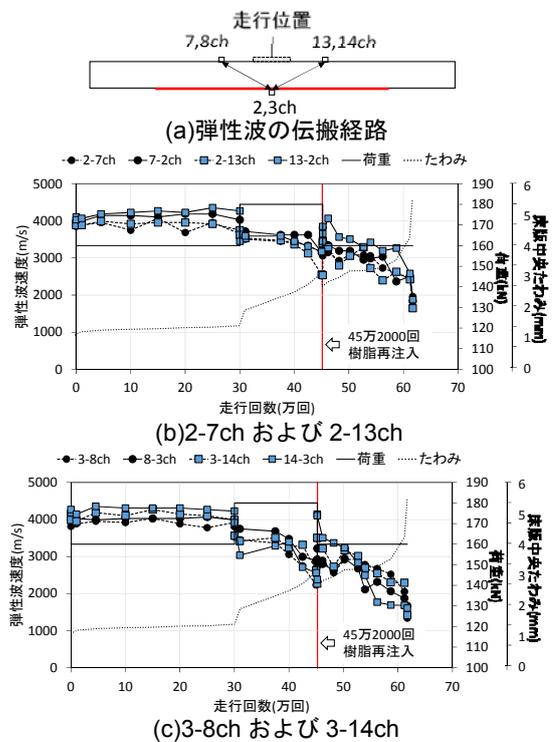


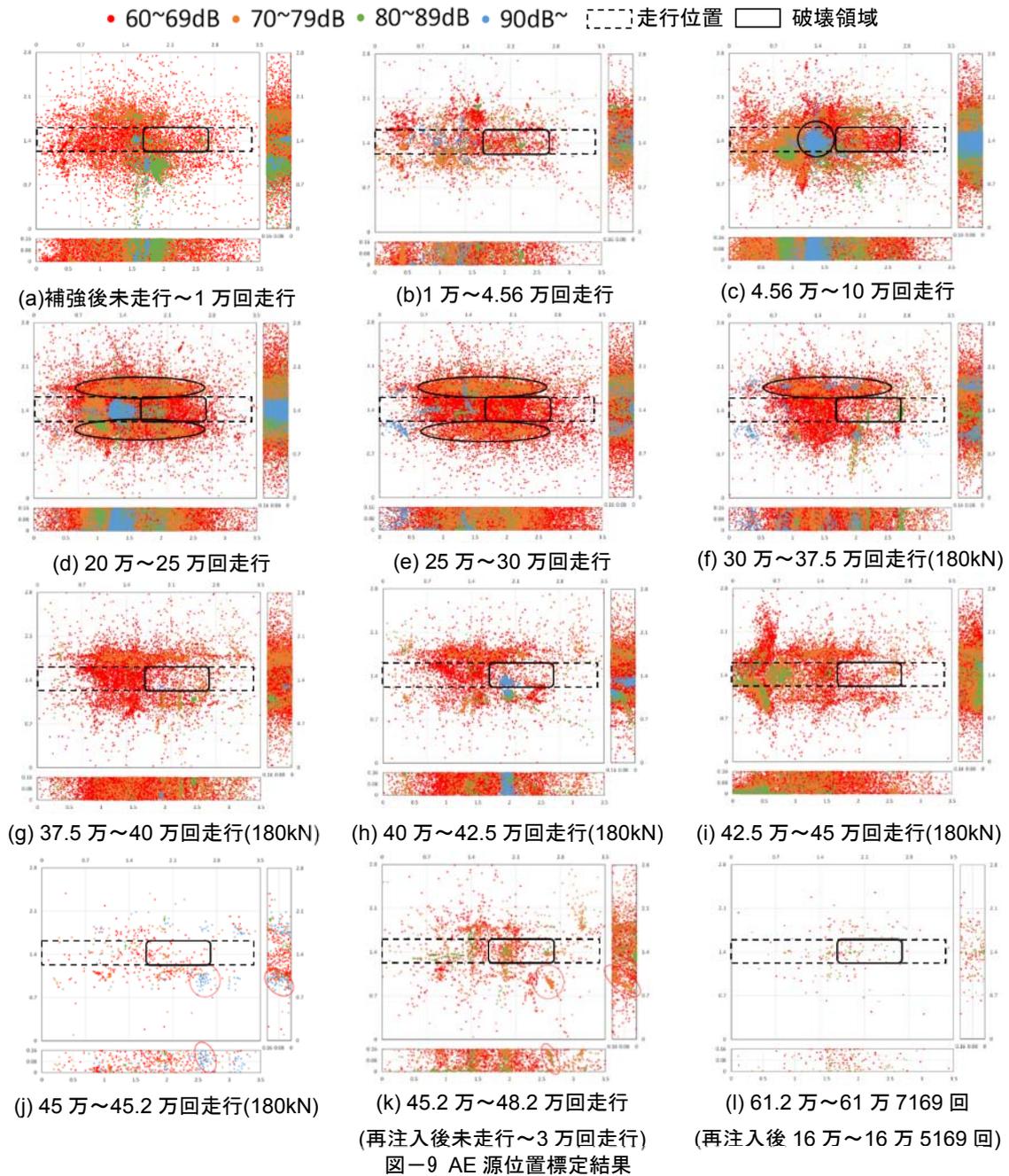
図-8 鋼板接着補強後の弾性波速度の推移

3,8,14chの速度は走行回数の増加と共に低下した。このことから、せん断ひび割れは3,8,14chの断面で著しく進展した後に、2,7,13chの断面側に進展し、床版は押抜きせん断破壊を呈したと考えられる。

(2) AE源位置標定結果

図-9に補強後の輪荷重走行試験中に計測されたAE源の振幅値別位置標定結果を示す。また、図-9中の四角の表示部分は、破壊時に抜け落ちた領域を示している。なお、計測機器に不調が生じたため、AE計測が実施できなかった48.2万~61.2万回走行のAE源位置標定結果については本稿に掲載していない。

補強後から1万回走行では、振幅が90dB以上のAE源



が床版中央に分布している。補強初期の鋼板接着補強RC床版は版としての耐荷挙動を示すことから⁴⁾、この段階では床版中央に曲げひび割れが発生していると考えられる。1万~4.56万回走行では90dB以上のAE源の分布が散乱し、この間に床版のひび割れ発生挙動が変化している。4.56万~10万回走行では70dB以上のAE源が床版の左側に多く分布していることがわかる。また、90dB以上のAE源が集中している位置(図-9(c)中、丸の表示範囲)について、写真-2(b)で確認できる床版中央付近の貫通ひび割れの供試体底面端部の位置とほぼ一致することから、4.56万回以降から、このひび割れの形成となる微細ひび割れが蓄積し始めたと考えられる。また、10万~20万回走行においても図-9(c)と類似した分布を示し、こ

の間も局所的に貫通ひび割れに繋がる微細ひび割れが発達したと考えられる。20万~25万回走行では、90dB以上のAE源が20万回走行までと同様の分布をしていると同時に、30万回走行までにおいて走行位置の外側で走行位置に沿う様に70dB以上のAE源が分布し始めている(図-9(d)中、楕円の表示範囲)。このことから、20万~30万回走行の間に、床版の耐荷挙動は田中ら⁴⁾が示唆しているはり状化後のタイドアーチへと移行していると推察される。

走行荷重が180kNに引き上げられた30万~45.2万回において、床版コンクリートがアーチ機構を形成し、上面コンクリートが圧縮疲労を受けながら疲労損傷が蓄積すると同時に、図-9(f)~図-9(j)の破壊領域(最終的に押

し抜かれる領域)では、AE 源の検出数が顕著に減少した。ここで、本研究での AE 源位置標定では、AE 波はセンサに対し最短距離で直線的に伝搬すると仮定し、健全時から破壊に至るまで一定の速度を用いて発生源を算出している。そのため、AE 波の伝搬経路が直線とならず、位置標定精度は破壊の進行に伴いやや低下する可能性が含まれる。健全時と比較して伝搬経路が著しく異なり、各センサへの到達時間差が大きく異なる場合には、計算上位置標定はできないと考えられ、破壊位置での AE 源が検出されなかった可能性がある。

一方、塩谷ら⁸⁾によれば、実床版での AE 計測結果において、大規模な損傷が生じている領域では内部摩擦が少なくなり、AE が生じにくくなる結果が示されている。したがって、本実験での 30 万回走行以降における破壊領域の AE 源の減少傾向は、せん断ひび割れが卓越し始めることで、コンクリート中に不連続部が生じ、この領域内で発生した AE 信号が AE センサに到達するまでに大きく減衰し、センサ位置でしきい値 60dB を超える信号として検出されなかった可能性が示唆される。このことは、図-6 の鋼板ひずみ分布において 40 万回走行以降にせん断ひび割れの形成が示唆されており、さらに、図-8 の弾性波速度の低下傾向が 30 万回走行以降から発生している点からも推察される。したがって、荷重を 180kN に引き上げた 30 万回走行以降から、せん断ひび割れの形成に繋がる微小破壊が継続したと考えられる。

樹脂再注入後の 45.2 万~61 万 7169 回走行について、45.2 万~48.2 万回走行では、図-9(k)の丸の表示部分に着目すると、樹脂再注入前にひび割れが発達したと考えられる位置(図-9(j))に、70dB 以上の AE 源が集中していることが確認できる。このことから、樹脂再注入後の早期段階で、再注入前に発生したひび割れが進展していると考えられる。また、ここまでの AE 計測にて、上面側のセンサで卓越した AE ヒット数を検出する傾向は確認できず、床版の土砂化を示唆する AE は確認できなかった。これは、土砂化により発生した AE 信号がセンサに到達するまでに減衰し、しきい値 60dB を超える信号として検出されなかった可能性があり、本実験結果と土砂化には有意な関係性が得られなかった。61.2 万~61 万 7169 回走行(破壊)では、走行回数が少ないため(0.5 万回)、AE 源の数も少なく、破壊直前のコンクリートのひび割れ進展を詳細に把握できない。しかし、前述のように弾性波速度の低下傾向から、樹脂注入後、床版内部のせん断ひび割れが著しく進行し、破壊に至ったと考えられる。

5.まとめ

本実験では、AE 法および衝撃弾性波法を輪荷重走行疲労を受ける鋼板接着補強 RC 床版に適用し、せん断ひ

び割れの進展評価について検討した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1)本供試体では、補強後から鋼板剥離が生じる段階までに、床版のひび割れ挙動は曲げひび割れを形成後、せん断ひび割れに繋がる微細ひび割れの集積へと移行し、せん断ひび割れは鋼板剥離の発生と同じ時期に生じる可能性が示唆された。
- (2)床版のたわみや鋼板ひずみとして劣化が表面化する前に、本供試体では押し抜かれる領域のコンクリートが塊として挙動し、その領域の AE 源の発生数は突然減少し、最終破壊へ繋がる可能性が示唆された。
- (3)樹脂の再注入後は、床版たわみや鋼板ひずみから大きな変化は確認できないが、弾性波速度の低下傾向から走行回数の増加と共にせん断ひび割れは進展しており、最終的にたわみやひずみの急激な変化と共に床版は押抜きせん断破壊を呈する。

参考文献

- 1) 前川敬彦 ほか：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，pp13-18，2012.6
- 2) 茅野茂 ほか：鋼板接着補強された RC 床版の AE トモグラフィによる損傷評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 17 巻，pp.291-296，2017.11.
- 3) 石田卓也 ほか：鋼板接着補強された RC 床版の衝撃弾性波法による損傷評価手法に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 16 巻，pp.125-130，2016.10.
- 4) 田中良樹，村越潤：繰り返り移動荷重を受ける鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の挙動，土木学会構造工学論文集，Vol.59A，pp.1124-1137，2013.3.
- 5) 葦澤洋平，大野健太郎，宇治公隆，関口幹夫：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1987-1992，2017
- 6) 関口幹夫：輪荷重走行試験機を用いた道路橋床版の共通試験，都土木技術センター年報，pp.67-78，2006.
- 7) 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.
- 8) 塩谷智基，麻植久史塩谷智基，麻植久史，西田孝弘，宮田弘和：AE 法および AE トモグラフィにより推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2085-2090，2016.