

論文

床版の傾斜角の動的波形計測による 道路橋RC床版の劣化評価に関する研究

近藤貴之*, 後藤俊吾**, 小野聖久***, 菅沼久忠****

*中日本高速道路(株), 技術本部環境・技術企画部 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19)

** 中日本高速道路(株), 八王子支社高速道路事業部 (〒192-8648 東京都八王子市宇津木町231)

***中日本高速道路(株), 技術本部環境・技術企画部 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19)

****(株)T T E S, (〒153-0051 東京都目黒区上目黒3丁目)

RC床版を維持管理するためには床版の劣化状況を適切に評価する必要があり, 方法としては床版のたわみを用いた劣化度評価が考えられている. 一般的なたわみの計測は変位計を設置し測定するが, 測定に大がかりな設備が必要になるなどの課題がある. 本研究では, 傾斜が測定可能な加速度計を用いて, 床版の傾斜角や傾斜角から求めた床版たわみの動的波形に着目することにより床版の劣化状況の評価を検討するものである.

キーワード: RC床版, 加速度, たわみ, 傾斜角

1. はじめに

東・中・西日本高速道路株式会社が管理する高速道路は, 昭和38年の名神高速道路・栗東インターチェンジ(IC)～尼崎IC間の開通から60年を経た現在, 延長9,000kmを超える. これらの高速道路ネットワークを構成している構造物は供用年数の経過とともに劣化が進行し, 特に輪荷重が直接載荷される床版は, 変状が顕在化している.

一般に道路橋のRC床版は輪荷重が直接作用することから疲労が進行しやすい部材であり, 雨水や凍結防止剤などの浸入を絶えず受ける過酷な環境にあること, 他の部材と比較して部材厚が薄いことから, 劣化因子の影響を受けやすい部材である. これらの劣化が進行し床版の抜け落ちなどの変状が生じた場合は, 走行安全性に直接影響を及ぼし第三者被害を生じさせる恐れがある. 特に, 昭和42年以前に設計されたRC床版は, 現行の基準と比較して配力鉄筋量が少なく床版厚が薄いことから, せん断剛性が低いため疲労による変状の進展が早く, 床版防水などの対策が施されていない場合には急激に劣化が進行し床版の抜け落ちが発生する恐れがある. したがって, RC床版の維持管理を適切に行うためには, 抜け落ちの前兆が現れる前段階から劣化の進行程度を把握し健全度を評価することが重要である.

道路橋RC床版の健全度の評価はひび割れ密度による評価方法や床版のたわみによる評価方法が提案されてい¹⁾. 床版下面のひび割れ密度による評価方法は, ひび

割れを目視で確認し, 単位面積あたりのひび割れ延長を測定する方法で有効な方法ではあるが, 床版下面に疲労によるひび割れ以外のひび割れがある場合などは, 抜け落ちに対する評価として適切な評価とならない場合がある.

たわみによる評価手法は, 一般に接触型変位計を用いて直接床版に生じたたわみを計測する手法(以下, 変位計手法)が用いられている. しかし, 変位計手法は桁作用のたわみを控除するために桁間に不動梁を設置する必要があり, 計測に大規模な設備が必要になるため, たわみの計測に時間と労力が必要となる. また, 主桁間隔が広い床版においては同手法での計測は困難になる可能性がある.

筆者らは, これまでたわみを簡易に測定する方法として, 加速度センサを用いた橋梁のモニタリングの検討を行ってきた²⁾. 加速度センサには重力加速度が測定できる機能を有しているものがあり, その機能を活用し, 設置箇所の傾斜角変化を高精度で測定することにより, たわみを推定する手法である(以下, 加速度手法). 本研究では, この技術を応用して, 床版の健全度を評価する方法について検討を行った.

2. 試験の方法

加速度計を用いた床版モニタリングの可能性を検証するため, 中央自動車道 落合川橋(下り線)から撤去した床版(図-1)を用いて輪荷重走行試験を実施した. 落

合川橋は園原 IC から中津川 IC 間に位置する橋長 239m の鋼 3 径間逆ローゼ橋で、供用は 1975 年（昭和 50 年）であり、供用から 44 年後に床版取替を実施した。適用道路橋示方書は昭和 47 年版である。当該区間の断面交通量は 2018 年時点での 24,600 台/日で大型車混入率は 40% であった。当該橋梁は過去に床版防水工の施工は行われているが、床版下面の補強や上面の床版増厚は実施されていない。

試験に用いた輪荷重走行試験の仕様および概要を表-1、図-2 に示す。輪荷重走行試験機は 2 軸 2 輪（輪幅 500mm）走行台車の重量は 314kN（輪荷重 157kN）の試験機を使用した。輪荷重走行試験では、3 枚の撤去床版を橋軸方向に並べて設置し、各試験体間に間詰コンクリートを打設して連続化して、各試験体の端部には弾性支持梁を設けた。走行台車の走行範囲は輪荷重 2 輪が撤去床版を通り抜ける範囲とした。なお、本試験機は屋外に設置されており、試験体には降雨により上面から水分が供給される。

試験に用いた試験体は前述の既設橋梁の追越し車線の床版を切り出したものであり、寸法は約 4000mm × 約 2000 mm である。試験体はそれぞれ損傷の度合いが異なっており、損傷度合いに応じて損傷小、損傷中、損傷大（以下、試験体 A, B, C）に分類した。撤去床版の上面の損傷状況を図-3 に示す。試験体 A の試験体上面には浮きやはく離、ひび割れは確認できない。試験体 B の試験体は部分的に浮きが確認でき橋軸方向にひび割れが確認できる。このひび割れは床版下面まで貫通したものであった。試験体 C の試験体は比較的大きな浮きが確認された。本試験ではこれらの試験体について押し抜きせん断破壊するまで輪荷重走行試験を実施した。

表-1 試験機の仕様

型式	電動ウインチ駆動方式
載荷方法	2 軸 2 輪
タイヤ配置	ホイールベース 1400mm、トレッド 1750mm
載荷速度	2500 往復/日

3. 傾斜角による床版たわみの計測

本試験では加速度センサを用いた構造物変形の計測技術を RC 床版に適用し、RC 床版のたわみの計測を実施した。一般的に、加速度センサを用いた計測の場合、二階積分を活用したたわみ測定が行われている。しかしこの方法を床版に適用した場合、床版のたわみだけでなく、桁のたわみを含めたたわみ量の測定となるため、床版の健全度の評価としては課題が残る。今回適用した方法は、計測に複数個の加速度センサを用いて、各加速度センサの傾斜角に着目してたわみを算出する技術である。本手法では時刻 t において、空間方向にデータ処理を行う。

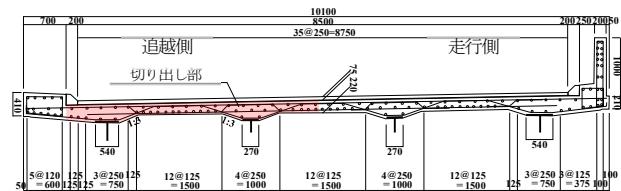


図-1 撤去した床版の寸法



図-2 輪荷重試験機の概要

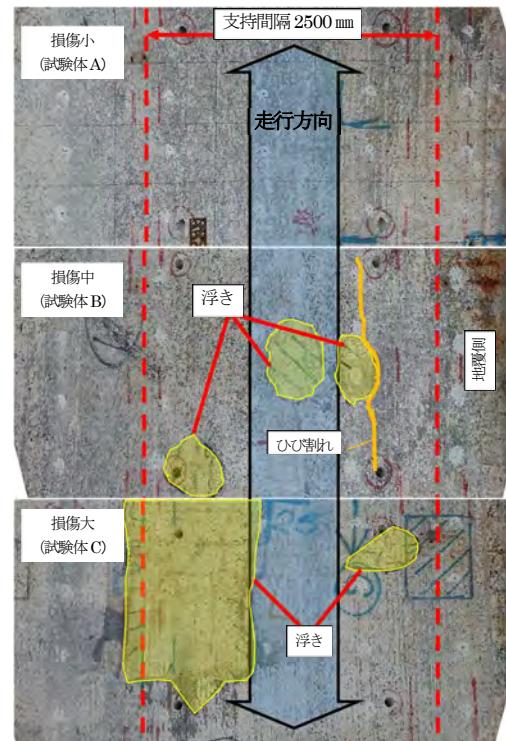


図-3 試験体上面の状況

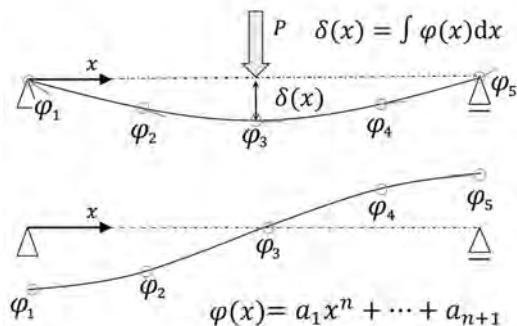


図-4 傾斜角からたわみを算出する技術の概要

図-4 に本手法の概要を示す。橋軸直角方向位置 x における床版のたわみ関数 $\delta(x)$ は、橋軸方向の傾斜角関数 $\varphi(x)$ の積分で表される。

$$\delta(x) = \int \varphi(x)dx \quad (1)$$

橋軸方向桁全体の傾斜角を多項式関数として定義すると $\delta(x)$ は(2)式で表される。合わせて傾斜角関数 $\varphi(x)$ はその微分として(3)式で定義される。

$$\delta(x) = (a_1/n + 1)x^{n+1} + (a_2/n)x^n + \dots + a_{n+1}x \quad (2)$$

$$\varphi(x) = a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_{n+1} \quad (3)$$

ここで a_n は n 次関数の係数である。計測位置 x_i における計測データの傾斜 φ_i を用いて、上記の関係より最小二乗法を用いて各次数の係数 a_n を求めることで、床版のたわみ $\delta(x)$ を算出する。同処理をデータ取得時刻ごとに行い、橋軸直角方向位置 x での動的変化を取得している。

各計測点における橋軸方向の傾斜角は加速度を用いて、次の式より算出している。

$$\varphi_i(x) = \arcsin(Ax/G) \quad (4)$$

$\varphi_i(x)$ 、 Ax は計測位置 x_i における橋軸直角方向の傾斜角および橋軸直角方向加速度、 G は重力加速度である。

このように本技術は、従来の加速度センサで得られる二階積分による任意の点の変位ではなく、複数個の加速度センサから得た傾斜角関数の一階積分により、たわみを算出することで、従来の加速度センサでは不明である連続的なたわみ変形を算出し、主桁間に発生する床版の変形挙動を把握できることが特徴である。

輪荷重走行試験時における動的なたわみ波形や傾斜角を把握するため、各撤去床版試験体（試験体 A、試験体 B、試験体 C）に加速度センサを橋軸方向および橋軸直角方向に設置して、常時計測を実施した。計測位置を図-5 に示す。加速度センサは分解能 $0.06\mu\text{G}/\text{LSB}$ のものを使用している。加速度センサの設置は、試験体下面にアンカーを用いて既に発生しているひび割れを避けるように設置した。設置状況を図-6 に示す。また、比較のため試験体には接触型変位計を設置した。

4. 測定結果

4.1 たわみの計測結果

図-7 に変位計手法により測定した静的活荷重たわみの測定結果を示す。なお、この測定結果は両輪が床版上に載荷された状態での値を示している。試験体 A の試験体の活荷重たわみは試験を終了する 22 万回の載荷時点でも顕著なたわみの増加はなく健全な状態を保っていた。試験体 B および試験体 C の試験体は輪荷重走行試験で押し抜きせん断破壊に至った試験体である。試験体 B のたわみの変化は、3.5 万回程度まではたわみが増加してい



図-5 加速度センサ取付位置図

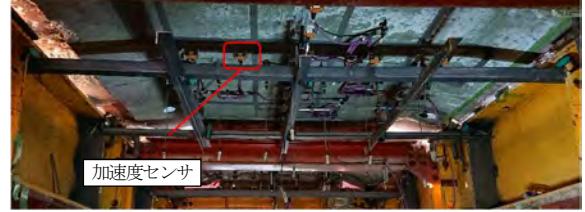


図-6 加速度センサ取付状況

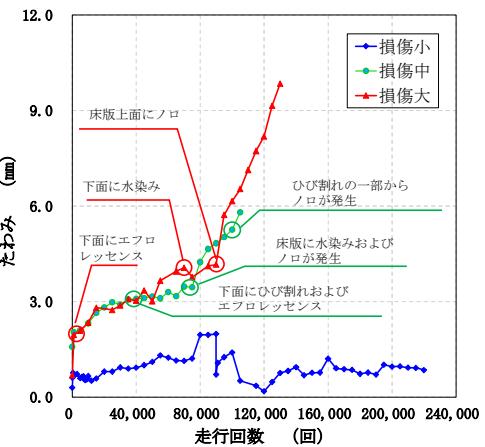


図-7 活荷重たわみの計測結果

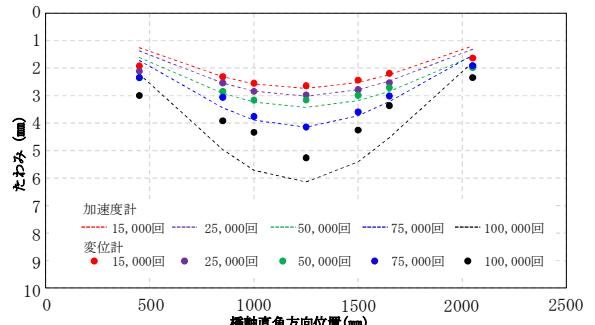


図-8 変位計手法と加速度計手法のたわみ値の比較

たが 3.5 万回～6.5 万回程度ではたわみの増加が緩やかになり、その後たわみは急激に増加し 10.5 万回程度で破壊に至った。この傾向は試験体 C の試験体についても同様であった。

図-8 に試験体 B に設置した変位計手法によるたわみ計測の結果と加速度センサより求めたたわみ計測の結果の比較を示す。7.5 万回までは、加速度センサによるたわみ計測と変位計手法の結果が同等であった。しかしながら、10 万回におけるたわみは加速度センサの計測結果と変位計手法とは乖離する結果が得られた。この結果は、菊池ら²⁾による報告と同様の傾向であった。これは、床

版が劣化したことで連続性が失われたためであると考えられる。加速度センサによるたわみは傾斜角から算出されており床版が不連続になることで傾斜角にずれが生じ、推定精度が低下したことが主要因として考えられる。なお、不連続になった構造体から加速度手法で得られた変位は、変位計手法による結果より大きい値を示すことが確認された。

4.2 たわみの動的波形

加速度センサにより求めた試験体中央のたわみの動的計測波形を図-9～図-11に示す。なお、データは試験体の外観に変状が確認できたときの回数を抽出している。25秒間に2回たわみが発生しているのは、試験機の載荷台車が往復したためである。試験体Aは、走行回数13万回時点では、動的波形のたわみ形状が放物線に近い形状となっていた。その後、21.5万回時点ではたわみが増加するとともに最大値付近での放物線の形状がゆるやかになる傾向が見えるが、波形の形状に顕著な変化は生じていない。

試験体Bでは走行回数1.5万回の時点でのたわみのピークが2つになる波形であることが確認できる。この波形は、破壊直前の10万回時点では、より顕著になっている。試験体Cについて同様の波形に着目すると、試験開始時点ではたわみのピークが1つであったが、輪荷重走行回数が増加するとともに、徐々に1つから2つに変化していることが確認できる。これらの結果は、劣化が進展していない段階では、走行台車の両輪が床版に載荷されるタイミングで最大たわみが生じるが、劣化が進展すると台車の前輪あるいは後輪が中央に載荷される場合にたわみが大きくなっていると考えられる。一般的なRC床版の輪荷重走行試験では、床版下面に格子状のひび割れが生じ、繰り返し荷重によりひび割れが細分化され、亀甲状ひび割れとなり、その後橋軸直角方向のひび割れが上面まで貫通し、はり状化現象が生じて、最終的には押抜き破壊に至ることが知られている³⁾。したがって、今回計測されたたわみのピークが1つから2つに変化する挙動は、版として挙動していた床版の連続性が分断され、はり状化したことが顕著に表れていると考えられ、直接たわみ量を測定し、床版の状態を推定するのではなく、たわみの動的波形形状を観察することにより、床版の劣化状況を評価することができる可能性がある。

4.3 輪荷重の移動による傾斜角

図-12～図-14に加速度センサから得られた載荷回数に応じた、橋軸直角方向の傾斜角の経時変化を示す。試験体Aでは、載荷回数が増加すると傾斜角は微増しているものの、試験終了まで顕著な傾斜角の変化は確認できない。一方、試験体Bおよび試験体Cでは載荷回数の増加に伴いハンチ部の内側で傾斜角が最大となることが確認できる。これはたわみ形状が放物線形状からすり鉢

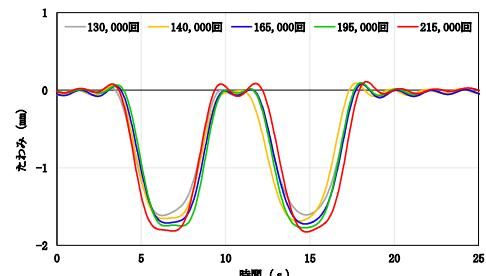


図-9 試験体Aの動的たわみ波形

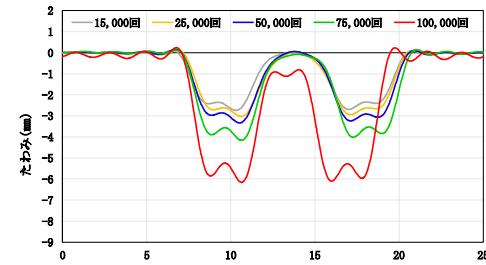


図-10 試験体Bの動的たわみ波形

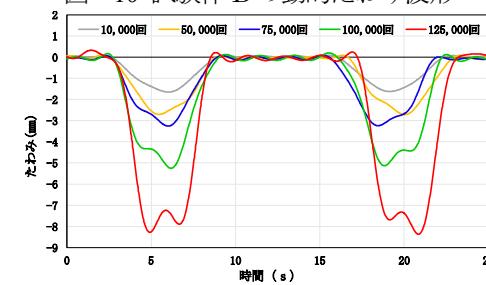


図-11 試験体Cの動的たわみ波形

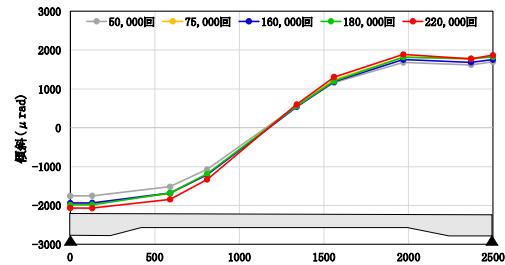


図-12 試験体Aの傾斜角の分布

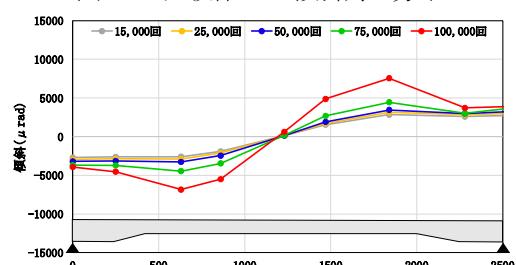


図-13 試験体Bの傾斜角の分布

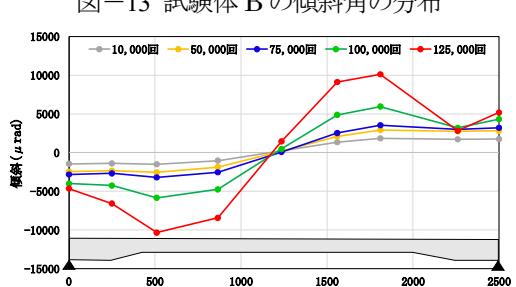


図-14 試験体Cの傾斜角の分布

形状(図-15)に変化していることを表している。

図-16～図-18には支間中央の加速度センサにおける橋軸方向の傾斜角の動的波形を示す。試験体Aでは顕著な変化は見られないが、試験体Bおよび試験体Cの試験体では、載荷回数が増加するにつれて、傾斜角の正負が交番するような形状に変化していることが確認できる。この挙動は試験体が不連続化し、はり状化したことより、車輪通過の影響によって傾斜角の正負が入れ替わったため発生したものと考えられる。傾斜角の経時変化についてもたわみの動的波形と同様に変化に伴う、形状の変化を分析することで床版の劣化状況の評価することができる可能性がある。

5. 動的波形と床版劣化過程

一般的に、実橋におけるRC床版のひび割れ損傷は図-19に示すように、段階I：一方向ひび割れ、段階II：二方向ひび割れ、段階III：亀甲状ひび割れ、段階IV：陥没破壊のように進行することが知られている³⁾。押し抜きせん断破壊に至った試験体(試験体B、試験体C)の活荷重たわみの経時変化および外観の変化を図-7に示しているが、床版下面のひび割れ状況を観察した結果から、載荷回数に応じた段階を推定し表-2のように整理した。

試験体Bは走行回数4万回時点では床版下面にひび割れおよびエフロレッセンスの滲出が確認され、その後、7万回付近で水染みおよびノロの発生が見られ、たわみが急増しているのが確認できる。一方、加速度計で測定した床版の動的たわみは1.5万回時点では2山の形状となっており、破壊直前の10万回付近では2山の形状のままたわみが増加した。橋軸方向の傾斜角波形に着目すると、たわみが急増する7万回付近から振幅が大きくなり、正負が交番するような挙動であった。

試験体Cにおける劣化の過程は試験開始直後に床版下面からエフロレッセンスの滲出が確認され、7.5万回付近で床版下面に水染みが確認された。その後、たわみが急増をはじめ12.5万回程度の載荷で破壊に至った。破壊時の床版上面の状況は床版上面にひび割れが発生し、はく離したコンクリートが砂利化している状況であった。たわみの動的波形をみると、たわみが急増した7.5万回付近で2山に分かれるような傾向がみられ、橋軸方向の傾斜角の動的波形は10万回程度から正負が交番するような挙動を示していた。動的波形に着目すると試験体B、試験体Cのいずれも破壊が生じる直前には橋軸直角方向のたわみ波形は2山の形状となり、橋軸方向の傾斜角については正負が交番するような挙動を示しており、これらの挙動を観察することで床版の抜け落ちを事前に検知できる可能性がある。

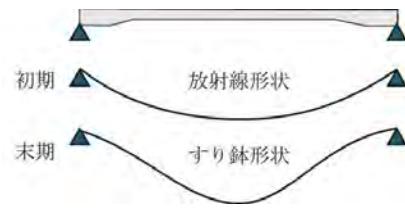


図-15 劣化進行に伴う床版の変形形状イメージ

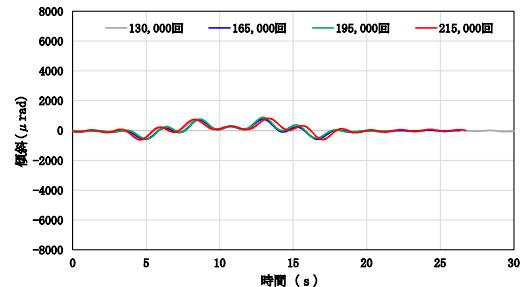


図-16 試験体Aの橋軸方向傾斜角の動的波形

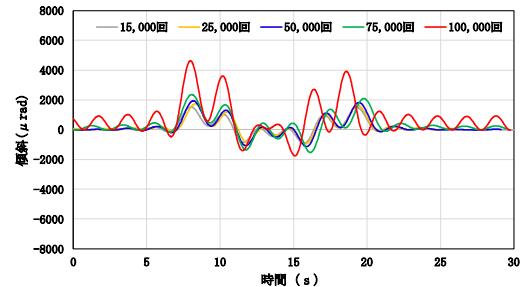


図-17 試験体Bの橋軸方向傾斜角の動的波形

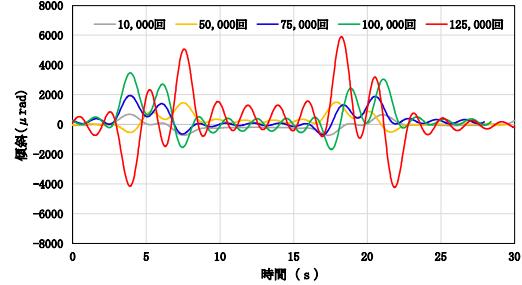


図-18 試験体Cの橋軸方向傾斜角の動的波形

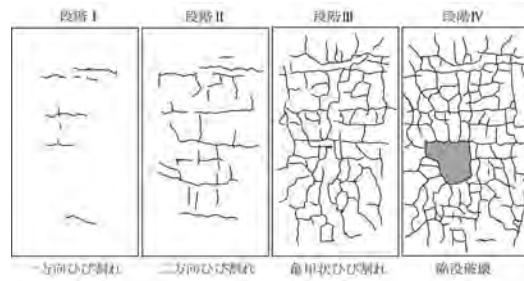


図-19 ひび割れ進行過程のイメージ³⁾

表-2 下面のひび割れ状況から推定する劣化段階

	段階I	段階II	段階III	段階IV
試験体B	～2万回	～6.5万回	～10万回	10万回～
試験体C	～1万回	～5万回	～12.5万回	12.5万回～

6. 結論

実橋から撤去した RC 床版を用いて輪荷重走行試験を実施し、複数個の加速度センサによる傾斜角より床版のたわみを算出する方法（加速度手法）について評価を行った。結果、以下の知見を得ることができた。

- ・ 本稿加速度計を用いて従来の二階積分による算出手法とは異なる方法ではあるが、たわみ形状を把握することが可能である。
- ・ 変位計手法と加速度手法を比較すると載荷回数が少なく、たわみが小さい範囲において両者の値は乖離が少ないが、床版の劣化度が大きくなりたわみが大きくなると乖離が大きくなつた。その際、加速度手法の方が大きい値を示す傾向があつた。
- ・ たわみの動的波形の結果より、輪荷重が 2 軸の載荷試験では床版の疲労損傷が増すにつれて、波形のピークが一つから二つに分かれることが確認された。これは、床版のひび割れ進展に伴う分断により床版の梁状化が進行していると示唆される。
- ・ これらの結果から、直接たわみ量を推定するのではなく、たわみの動的波形形状により、床版の劣化状況を評価することができる可能性がある。
- ・ また、床版の傾斜角での評価についても検討を行つた。その結果、以下の知見を得ることができた。
- ・ 傾斜角の動的波形は RC 床版の劣化過程に応じて傾向が異なることが確認できた。

- ・ 橋軸直角方向の傾斜角の最大となる位置は、劣化が進行するにつれて、支点付近から内側に移動することが確認できた。これはたわみ形状が放物線形状からすり鉢形状に変化していることを表している。
- ・ 橋軸方向の傾斜角の動的波形は、劣化が進行すると振幅が大きくなり、正負が交番するような波形となることが確認できた。
- ・ これらの結果から、傾斜角を動的に計測することで、たわみでの評価と同様に劣化の評価が可能であることが示唆された。また、たわみの算出は複数個のセンサが必要になるが、傾斜角の算出によればセンサの個数を削減し、効率良く測定が可能であると考えられる。ただし、実橋においては交通荷重の載荷重量および載荷位置がランダムであり、輪荷重走行試験のように定常で載荷されていないため、このような現象が現れるかは不明であり、今後検討が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020, 2020.10.
- 2) 菊地新平他：特殊加速度センサを用いた RC 床版のたわみ計測の適用性に関する検討、土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会、CS9-10, 2020.9.
- 3) 松井繁之；道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版、2007.10.

(2024 年 7 月 12 日受付)