

論文

FWD を用いた床版の健全度判定方法に関する一提案

東山浩士*, 塚本真也**, 増戸洋幸***

*博 (工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

** 博 (工), 東亜道路工業株式会社, 技術本部技術研究所 (〒300-2622 つくば市要 315-126)

*** 修 (工), 東亜道路工業株式会社, 技術本部技術研究所 (〒300-2622 つくば市要 315-126)

道路橋床版の効率的な健全度判定が求められており, その方法のひとつとして, 床版上面側から重錘を落下させ, たわみを測定する Falling Weight Deflectometer (FWD) がある. しかし, FWD を活用するためには, 得られたたわみを健全度評価指標とした何らかの判定区分の設定が不可欠である. 本研究では, 道路橋示方書の変遷を考慮した床版断面について, 既往のひび割れ密度やたわみによる劣化度といった判定方法と整合させながら, 弾性有限要素解析結果を用いた検討を行い, 実測結果に対して健全度判定方法の提案を試みた.

キーワード: FWD, 載荷点たわみ, たわみ面積, 健全度判定区分

1. はじめに

わが国の高度経済成長期から今日に至るまでに多くの道路橋 (橋長 2 以上) が建設され, そのうち建設後 50 年以上を経過する割合は, 2023 年に約 39%, 2033 年に約 63% に上る²⁾. また, 平成 26 年度から道路橋の定期点検 (5 年に 1 度) が義務付けられた. このような背景および現状から, 道路橋床版の維持管理において効率的かつ適切な健全度判定が求められる.

輪荷重走行試験による鉄筋コンクリート床版 (以下, RC 床版と称す) の劣化現象から, RC 床版の劣化度を評価するために, たわみやひび割れ密度に基づく評価指標が提案されている³⁾. これらはいずれも床版下面からの調査・測定が必要であることから, 費用と時間を要することになる. 一方, Falling Weight Deflectometer (FWD) を用いて得られたたわみに関する研究が 2003 年頃から始められ⁴⁾, 実橋での測定データの信頼性や精度検証などに関する研究⁵⁾⁶⁾が進められてきた. また, FWD による床版の健全度評価指標に関する提案もなされており, 山口ら⁷⁾はたわみ曲線の形状に基づく先鋭度とたわみによる劣化度との関係を提案している. また, 横山ら⁸⁾はたわみ曲線から床版の見かけのヤング係数と曲率の関係を提案している.

一方, 著者ら⁹⁾¹⁰⁾はたわみ曲線の積分値をたわみ面積と定義し, 載荷点たわみとの関係性により健全度判定を試みてきた. また, FWD による測定は床版上面側から実施され, 床版上のアスファルト舗装の変形を含めた測定となることから, 床版自体のたわみを精度よく得るため

には何らかの補正を施す必要がある. これらの補正については解析的検討を行い, 舗装厚と舗装内部の平均温度をパラメータとした補正手法を提案¹¹⁾し, 実橋での測定データによる検証を行ってきた⁶⁾. FWD による道路橋床版の健全度判定方法を構築するために残された課題としては, 既設道路橋床版において測定されたデータに対して簡易に健全度を評価できる判定区分の設定がある.

そこで本研究では, 健全度判定方法を提案するために昭和 39 年 (S39) の鋼道路橋設計示方書, 昭和 48 年 (S48) および平成 6 年 (H6) の道路橋示方書 (以下, 道示と称す) に基づいて RC 床版の断面諸元を決定し, 薄板理論に基づく弾性有限要素解析により単純支持した RC 床版のたわみを求めた. 次に, 松井ら³⁾が提案しているたわみによる劣化度とひび割れ密度による劣化度との関係を基に, RC 床版に対する健全度判定区分を設定するとともに, 実橋での測定データとの整合性を検討した.

2. 対象とする RC 床版の解析

2.1 適用示方書と床版断面

これまでの道示の変遷から, S39, S48 および H6 の道示を適用して, 床版支間 2 m, 3 m および 4 m について検討することにした. まず, 単純版としての最小全厚を式(1)より求めた. ただし, H6 道示では大型車の交通量に関する係数を 2,000 台/日として乗じた.

$$t = 40L + 110 \quad (1)$$

ここで, t は最小全厚 (mm), L は床版支間 (m) である.

表-1 対象とする RC 床版の断面諸元

適用道示	床版支間 (m)	床版厚 (mm)	下側主鉄筋 (mm)	下側配力鉄筋 (mm)
S39	2	170	R16@125	R13@250
	3	190	R19@125	R13@200
	4	220	R19@125	R13@200
S48	2	190	D19@150	D16@125
	3	230	D19@125	D16@125
	4	270	D19@100	D16@120
H6	2	240	D19@150	D16@100
	3	290	D19@125	D16@125
	4	340	D19@100	D16@125

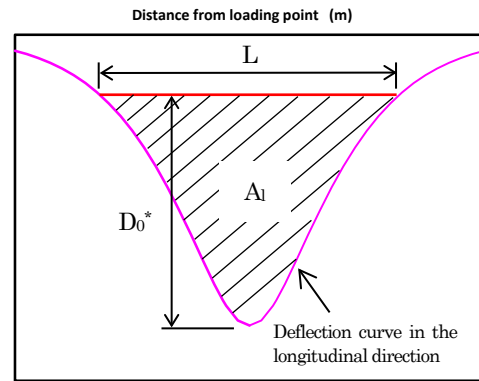


図-2 橋軸方向のたわみ面積¹⁰⁾

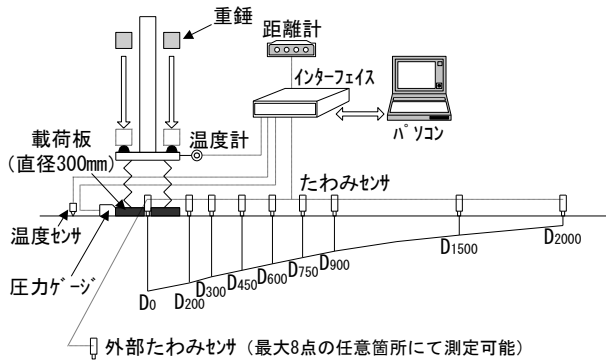


図-1 FWD 装置の概念図⁹⁾

RC 床版の断面諸元を決定するにあたり、設計曲げモーメントは、死荷重として舗装 (80 mm 厚) および床版コンクリートを考慮し、活荷重に対して各道示の曲げモーメント式を用いた。ただし、H6 道示では床版支間に応じて主鉄筋方向の曲げモーメントの割増しを行った。鉄筋配置は鉄筋の許容応力度を満足するとともに、道示の構造細目 (鉄筋の種類および配置) に準拠した。すなわち、S39 道示および S48 道示の許容応力度は 140 N/mm^2 、H6 道示の許容応力度は 140 N/mm^2 に 20 N/mm^2 の余裕を考慮した。なお、S39 道示の配力鉄筋量は主鉄筋量の 25% とした。対象とする RC 床版の断面諸元 (上側鉄筋量は下側鉄筋量の 50% である) を表-1 に示す。

2.2 解析方法

解析モデルの床版支間は 2 m、3 m および 4 m であり、辺長比 1:3 の相対 2 辺単純支持版 (単純版) とし、床版中央に部分分布荷重を作用させた。ただし、載荷面は、FWD に用いられる載荷板が直径 300 mm の円形板を想定していることから、その面積と等価な正方形板に置換し、床版厚の 1/2 の距離だけ離れた範囲まで 45° 分布させた相似な形状とした。なお、床版コンクリートのヤング係数 E_c は 25 kN/mm^2 、ヤング係数比 n は 8 とした。

本研究の目的は健全度判定区分の検討であることから、全断面有効状態と引張側コンクリートを無視した状態の 2 つのケースについてそれぞれの解析を行った。

2.3 解析結果

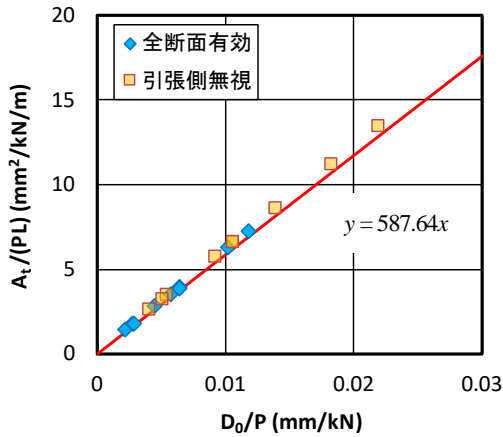
著者ら^{9),10)}は図-1 に示すように、FWD により得られる橋軸直角方向および橋軸方向の床版たわみ曲線の積分値をたわみ面積と定義し、それぞれ A_r および A_l で表してきた。 A_r は主桁間 (床版支間 L) のたわみ曲線から算出される。また、 A_l はその算出範囲を検討した結果¹⁰⁾、図-2 に示すように、載荷点前後 $L/2$ の範囲を算出範囲とすることで安定したたわみ面積が得られた。図-3 に本解析より得られた全断面有効状態および引張側コンクリートを無視した状態のたわみ面積と載荷点たわみの関係を示す。なお、実線は既往研究¹⁰⁾において解析した結果の近似式である。橋軸直角方向、橋軸方向のいずれにおいてもたわみ面積を荷重 (P) と床版支間 (L) で除し、載荷点たわみを荷重 (P) で除した関係は線形であり、全断面有効状態、引張側コンクリートを無視した状態ともに同一の直線上にプロットされる。

ここで、対象橋梁床版の供用開始時、すなわち、全断面有効状態のたわみが測定されていれば、それを初期値として定期的に測定されるたわみから健全度の変化を監視していくことが可能であり、健全度判定区分を設定しておけば適切な維持管理が可能となる。しかし、既設道路橋床版においては、初期値がなく、床版の断面諸元も明確ではないことが多い。そこで、たわみ面積と載荷点たわみの関係を健全度評価指標とした RC 床版の健全度判定方法を検討する。

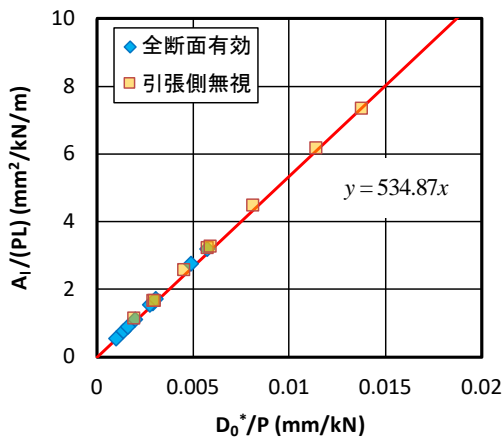
3. 健全度判定方法および実測たわみとの整合性

3.1 既往の劣化度

松井ら³⁾はたわみによる劣化度 (D_c) とひび割れ密度による劣化度 (C_d) の関係が線形であり、ひび割れ密度が 10 m^2 に達したときにたわみによる劣化度が 1.0 となることを実橋床版における測定結果から明らかにした。なお、たわみによる劣化度は式(2)より求めることができる。



(a) 橋軸直角方向



(b) 橋軸方向

図-3 たわみ面積と載荷点たわみの関係

$$D_c = \frac{w - w_0}{w_c - w_0} \quad (2)$$

ここで、 w は実測たわみ、 w_0 は全断面有効と仮定した等方性版のたわみ、 w_c は引張側コンクリートを無視した直交異方性を考慮した版のたわみである。

また、玉越ら¹²⁾は RC 床版の疲労に対する健全度判定区分を、I : $0 \leq C_d < 3 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、II : $3 \leq C_d < 6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、III : $6 \leq C_d < 8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、IV : $8 \leq C_d < 9 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、V : $9 \text{ m}^2/\text{m}^2 \leq C_d$ のように設定している。そこで、これらを参考にしたたわみによる劣化度とひび割れ密度による劣化度の関係についての健全度判定区分は図-4 のように表すことができる。

3.2 各健全度判定区分におけるたわみ

たわみによる劣化度は式(2)より算出することができ、全断面有効と仮定した等方性版のたわみ (w_0) と引張側コンクリートを無視した直交異方性を考慮した版のたわみ (w_c) を用いて、各健全度判定区分の境界にあたるたわみはそれぞれ次式で求めることができる。

$$\text{健全度判定区分 I} \sim \text{II} \\ w_{D_c=0.3} = 0.7w_0 + 0.3w_c \quad (3)$$

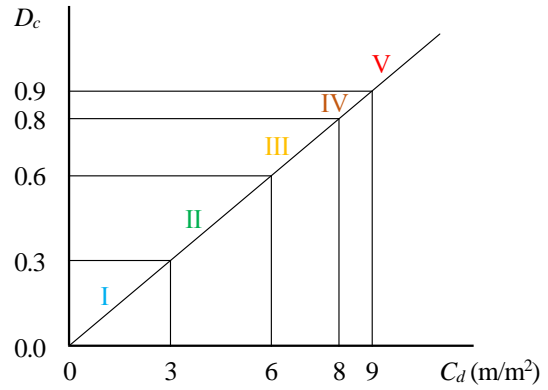


図-4 健全度判定区分

健全度判定区分 II ~ III

$$w_{D_c=0.6} = 0.4w_0 + 0.6w_c \quad (4)$$

健全度判定区分 III ~ IV

$$w_{D_c=0.8} = 0.2w_0 + 0.8w_c \quad (5)$$

健全度判定区分 IV ~ V

$$w_{D_c=0.9} = 0.1w_0 + 0.9w_c \quad (6)$$

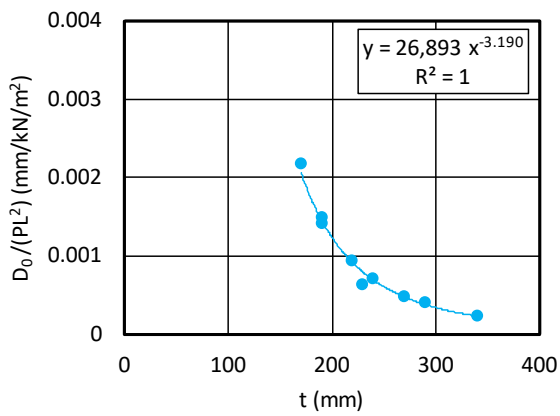
上述したように、既設道路橋床版においてはたわみの初期値がないことがほとんどであり、床版の断面諸元も明確ではないことが多いことから、引張側コンクリートを無視した直交異方性を考慮した版のたわみを得ることは困難な場合がある。しかし、床版厚およびコンクリートのヤング係数に関する情報を得ることができれば全断面有効と仮定した等方性版のたわみは数値解析から求めることは容易である。そこで、表-1 に示した 9 つの RC 床版に対する解析たわみを用いて、式(3)から式(6)より各健全度判定区分の境界にあたる載荷点たわみを算出した。ただし、実橋床版の床版厚は実測あるいは設計図書などから得られることを前提とする。限られた解析ケースによる検討ではあるが、各健全度判定区分の境界にあたる載荷点たわみと床版厚の関係 (橋軸直角方向) を図-5 に示す。載荷点たわみは FWD による載荷点たわみのことであるので、ここでは D_0 と表現する。各健全度判定区分の境界にあたる載荷点たわみと床版厚の関係は、載荷点たわみ (D_0) を荷重 (P) および床版支間 (L) の 2 乗で除した値に対して床版厚 (t) の指数関数として表すことができる。川名ら¹³⁾は栈橋床版で実施した FWD を用いた測定結果から載荷点たわみが床版厚の 3 乗に反比例することを示しており、本解析はそれらとよく一致している。各健全度判定区分に対する関係式は以下となる。

健全度判定区分 I ~ II

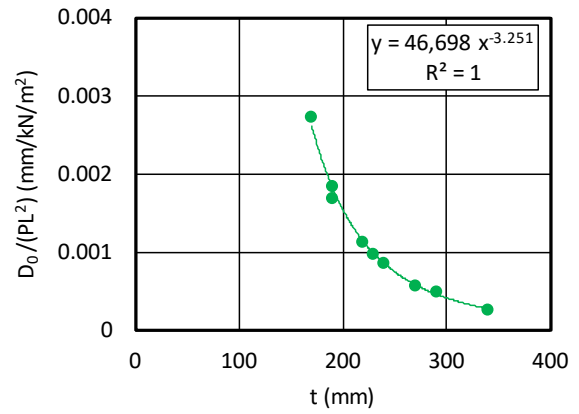
$$\frac{D_{0, D_c=0.3}}{PL^2} = 26,893t^{-3.190} \quad (7)$$

健全度判定区分 II ~ III

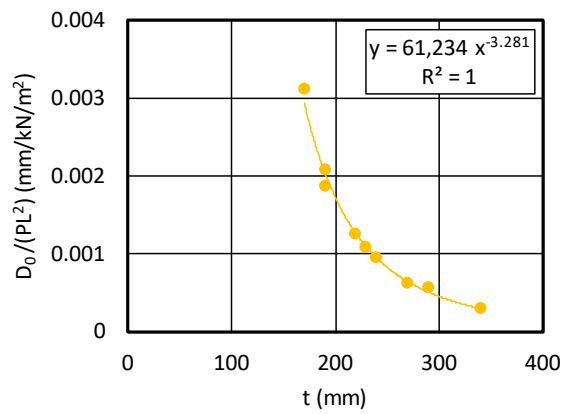
$$\frac{D_{0, D_c=0.6}}{PL^2} = 46,698t^{-3.251} \quad (8)$$



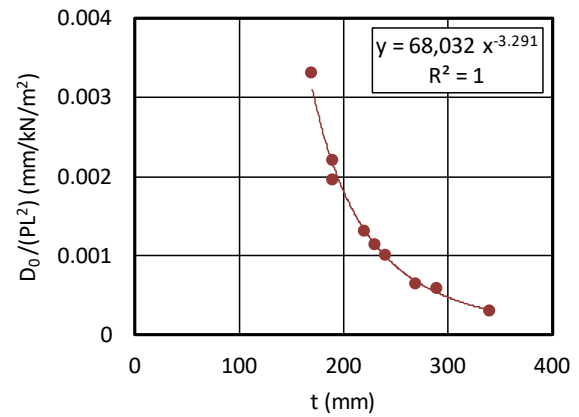
(a) 健全度判定区分 I ~ II



(b) 健全度判定区分 II ~ III



(c) 健全度判定区分 III ~ IV



(d) 健全度判定区分 IV ~ V

図-5 各健全度判定区分の境界にあたる載荷点たわみと床版厚の関係 (橋軸直角方向)

健全度評判定分 III ~ IV

$$\frac{D_{0, D_c=0.8}}{PL^2} = 61,234t^{-3.281} \quad (9)$$

健全度判定区分 IV ~ V

$$\frac{D_{0, D_c=0.9}}{PL^2} = 68,032t^{-3.291} \quad (10)$$

ここで、 D_0 は載荷点たわみ (mm)、 P は載荷荷重 (kN)、 L は床版支間 (m)、 t は床版厚 (mm)である。

著者ら¹⁰⁾は橋軸方向に対する載荷点たわみとたわみ面積を図-2のように定義した。そこで、上記の橋軸直角方向と同様に、橋軸方向に対しても各健全度判定区分の境界にあたる載荷点たわみ (D_0^*) についての関係式を求めると、以下の式で表すことができる。

健全度判定区分 I ~ II

$$\frac{D_{0, D_c=0.3}^*}{PL^2} = 9,734t^{-3.124} \quad (11)$$

健全度判定区分 II ~ III

$$\frac{D_{0, D_c=0.6}^*}{PL^2} = 23,902t^{-3.245} \quad (12)$$

健全度判定区分 III ~ IV

$$\frac{D_{0, D_c=0.8}^*}{PL^2} = 37,059t^{-3.302} \quad (13)$$

健全度判定区分 IV ~ V

$$\frac{D_{0, D_c=0.9}^*}{PL^2} = 43,842t^{-3.321} \quad (14)$$

上述した内容は、単純版の解析結果に対する検討である。連続版については、既往研究⁹⁾において、3本主桁および4本主桁で支持された場合の解析を行い、たわみ面積と載荷点たわみの関係を求めている。その結果、図-6に示す載荷状態について単純版の載荷点たわみと比較すると、その比は、図-6(b)および図-6(d)の側径間に載荷した場合はそれぞれ0.793、0.783、図-6(c)の中央径間に載荷した場合は0.656であった。これらの比を式(7)から式(10)、あるいは式(11)から式(14)より得られる載荷点たわみに考慮することで連続版に対する健全度判定区分が設定できる。

3.3 実測たわみとの整合性

著者ら⁹⁾は建設後30年(測定時)が経過した橋長30.6

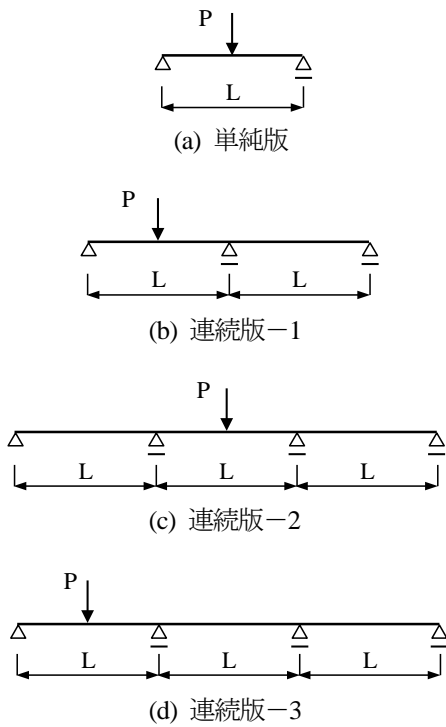


図-6 連続版に対する荷状態⁹⁾

m, 主桁間隔 (床版支間) 2.6 m, 設計床版厚 210 mm の単純活荷重合成鋼桁橋 (K 橋) に対して FWD 試験を実施した。本対象橋梁はある施設内に建設された橋梁であることから交通量はほとんどなく、床版下面のひび割れは橋軸直角方向に発生している程度であった。よって、国総研資料¹²⁾による健全度判定区分はⅡ判定程度であるといえる。また、建設後 46 年 (測定時) が経過した橋長 120 m, 主桁間隔 (床版支間) 2.5 m, 設計床版厚 190 mm の単純ランガ橋 (Y 橋) でも FWD 試験を実施した⁹⁾。本橋の一部の床版パネルは下面に炭素繊維シート接着が平成 29 年 10 月に実施されており、さらに、平成 30 年の調査では床版上面の一部にコンクリートの砂利化やはく離が発生していた。床版下面のひび割れ発生状況を調査していないため健全度は明確ではないが、炭素繊維シート接着が実施されていることから、未接着の床版の健全度判定区分はⅢ判定程度であると想定される。

これら 2 橋の FWD による測定結果に対して、本論文で提案した健全度判定方法により判定した結果を図-7 に示す。Y 橋は床版上面コンクリートの補修工事に合わせて実施したので補修前後の結果を併記した。

K 橋は、橋軸方向において 1 パネルのみがⅢ判定となったが、それ以外の 11 パネルについては、橋軸直角方向、橋軸方向ともにⅠ～Ⅱ判定であり、床版下面のひび割れ状況からの目視による判定区分とよく一致している。また、Y 橋は、炭素繊維シート未接着の一部のパネルにおいてⅣ判定となっているが、概ねⅡ～Ⅲ判定となっている。一方、床版上面コンクリートのはく離箇所をポリマーセメントで断面修復した後は、Ⅰ～Ⅱ判定となり補修による健全度の回復が確認できる。

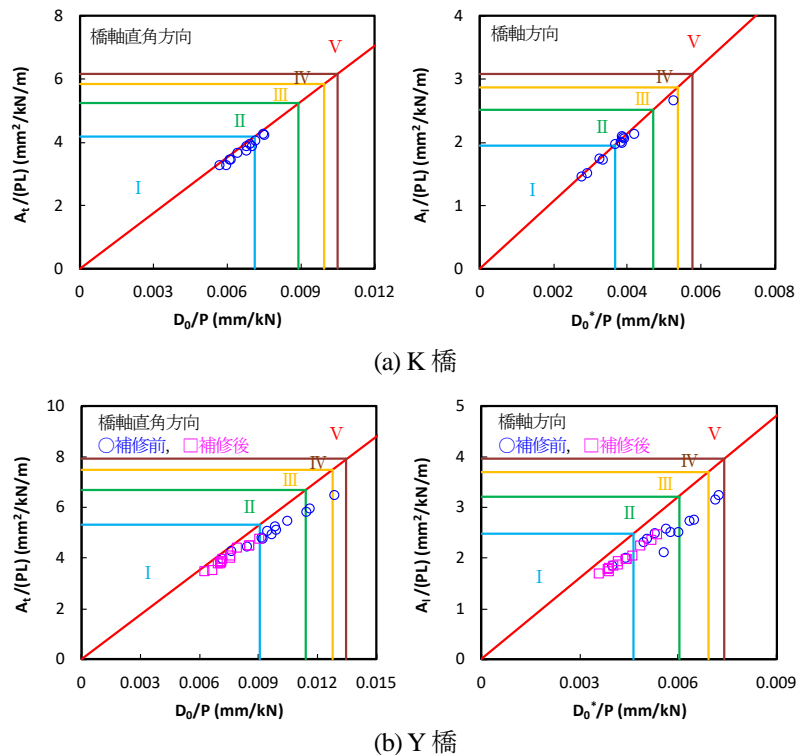


図-7 健全度判定結果

4. FWD による健全度判定方法の流れ

著者らのこれまでの研究成果を踏まえ、FWD を用いた道路橋 RC 床版の健全度判定方法についての流れをまとめると図-8 のとおりである。以下、フローに沿った具体的な内容を述べる。

- ① 主桁上を含み、橋軸直角方向および橋軸方向にたわみ測定センサーを設置した後に重錘を落下させ、たわみを取得する。
- ② 取得したたわみには主桁の変形が含まれることから、その影響を除去するために主桁上で測定したたわみを差し引いて補正する。
- ③ 重錘落下時に荷板周辺のアスファルト舗装が局部的に変形することから、床版自体のたわみを取得するためにアスファルト舗装内部の平均温度を推定する。平均温度の推定方法については現在研究中であるが、既往研究¹⁴⁾を参照されたい。
- ④ 荷点から橋軸方向に 200 mm 離れた位置のたわみ $D_{200_{as}}$ とアスファルト舗装の舗装厚および平均温度からなる補正式を用いて同位置における床版たわみ $D_{200_{con}}$ を算出する。補正方法は既往研究¹¹⁾を参照されたい。
- ⑤ さらに、床版支間に関する補正係数を用いて $D_{200_{con}}$ から荷点たわみ $D_{0_{con}}$ を算出する。これによりアスファルト舗装がない床版自体の荷点たわみが得られる。補正方法は既往研究¹¹⁾を参照されたい。
- ⑥ 荷点から橋軸方向および橋軸直角方向に 200 mm 以上離れた箇所のたわみについては上記と同様の補正

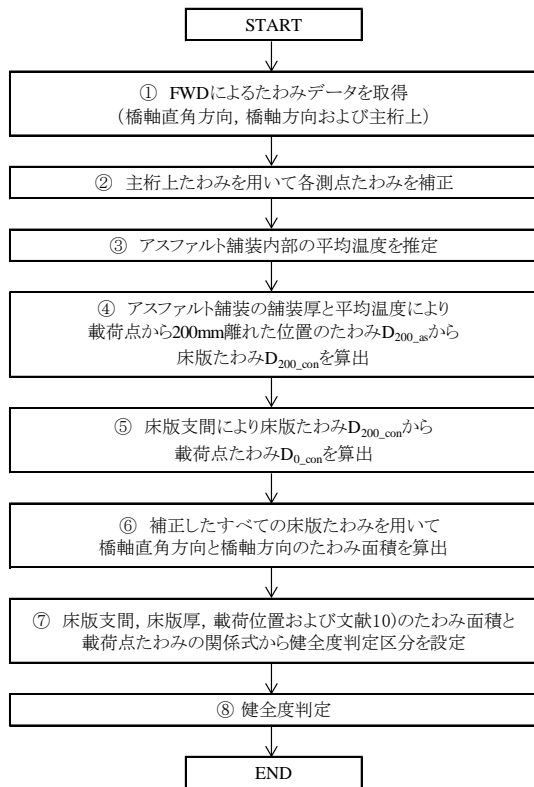


図-8 FWDによる健全度判定方法のフロー

を行う。一連の操作を行うことにより、各測点における床版たわみが求まり、さらに、たわみ面積を算出できる。

- ⑦ 健全度判定区分を設定するための荷重点たわみは式(7)から式(14)による。さらに、たわみ面積は荷重点たわみとの関係¹⁰⁾から算定し、健全度判定区分を設定する(連続版の場合は荷重位置に応じて補正を行う)。それぞれの方向について実測データをプロットして健全度を判定する。

5. まとめ

本研究では、FWDを用いたRC床版の健全度判定方法を提案し、実橋2橋での測定結果を基に整合性を確認した。その結果、得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 9つのRC床版断面に対する荷重点たわみと床版厚の関係を弾性有限要素解析により求め、たわみによる劣化度とひび割れ密度による劣化度の関係を用いて、荷重点たわみを評価指標とする健全度判定区分の設定方法を示した。
- (2) 実橋におけるFWDによる測定結果から健全度判定を行った結果、概ね妥当な健全度を判定することができたといえる。ただし、本論文では限られた範囲の検討であることから、今後もデータを蓄積し、判定精度の確認を行っていく必要がある。

なお、本論文に用いたデータの一部は、土木学会鋼構

造委員会「道路橋床版の点検診断の高度化と長寿命化技術に関する小委員会」内の床版評価分科会活動における成果であることを記しておく。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報，2019.
- 2) 国土交通省：令和元年度版国土交通省白書，2019.
- 3) 松井繁之，前田幸雄：道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第374号/I-6，pp.419-426，1986.
- 4) 関口幹夫，國府勝郎：FWDによる床版の健全度評価手法の検討，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.145-150，2003.
- 5) 関口幹夫：FWDによる床版たわみ測定手法の検討，土木学会第58回年次学術講演会，CS6-051，2003.
- 6) 増戸洋幸，梅田 隼，塚本真也，東山浩士：FWDによる道路橋床版の健全度評価手法に関する検討，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19巻，pp.623-628，2019.
- 7) 山口恭平，早坂洋平，曾田信雄，大西弘志：FWDを用いた既設RC床版の健全度評価手法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.61A，pp.1062-1072，2015.
- 8) 横山 広，牧 祐之，角間 恒，深田幸史，榎谷 浩：道路橋床版の曲率を用いた劣化度評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.64A，pp.551-559，2018.
- 9) 東山浩士，塚本真也，阿部長門，関口幹夫：FWDによる道路橋床版の健全度評価指標の一提案，第17回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，Vol.17，pp.273-278，2017.
- 10) Higashiyama, H., Mashito, H., Tsukamoto, M., Abe, N., Sekiguchi, M. and Nagami, T.: Study on Soundness Evaluation of Bridge Slabs by Falling Weight Deflectometer, International Journal of GEOMATE, Vol.15, Issue 51, pp.106-112, 2018.
- 11) 東山浩士，増戸洋幸，塚本真也，阿部長門，関口幹夫：FWDを用いたRC床版の健全度評価における舗装たわみの温度補正に関する解析的検討，第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.249-254，2018.
- 12) 玉越隆史，大久保雅憲，渡辺陽太：道路橋の計画的な管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)—，国土技術政策総合研究所資料，No.523，2009.
- 13) 川名 太，前川亮太，鈴木紀慶：FWD試験による栈橋上の舗装構造評価のための基礎的検討，舗装工学論文集，Vol.15，pp.193-199，2010.
- 14) 増戸洋幸，榎本勇太，塚本真也，東山浩士：コンクリート床版上におけるアスファルト混合物層の平均温度推定に関する検討，土木学会第74回年次学術講演会概要集，CS8-09，2019.

(2020年7月17日受付)