

## 報告

## 損傷状態が異なる RC 床版の衝撃荷重載荷試験

角間恒\*, 横山広\*\*, 榎谷浩\*\*\*, 久保善司\*\*\*\*, 栗橋祐介\*\*\*\*\*, 畠山乃\*\*\*\*\*

- \*博(工), 寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)  
 \*\*博(工), 大日本コンサルタント, インフラ技術研究所 (〒102-0075 東京都千代田区三番町 6-3)  
 \*\*\*工博, 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
 \*\*\*\*博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
 \*\*\*\*\*博(工), 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
 \*\*\*\*\*寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

道路橋 RC 床版を計画的かつ効率的に維持管理・更新していくためには、多様化する損傷状態を的確に把握するとともに、残存する性能に基づき対策の優先順位付けを行うことが求められる。本稿では、床版の耐荷性能を簡便に把握する手法として小型 FWD による衝撃荷重載荷試験に着目し、諸元や損傷状態の異なる床版試験体に対する輪荷重走行試験を行う過程において、静的載荷試験および衝撃荷重載荷試験によるたわみ計測を行い、両者から得られる床版剛性を比較した結果について報告する。

キーワード: RC 床版, 輪荷重走行試験, 衝撃荷重載荷試験

## 1. はじめに

鋼橋の RC 床版 (以下、床版) は、大型車の繰返し走行に加え、橋面からの水の浸入やそれに伴う材料劣化の影響を受けることで、下面のひび割れや上面の土砂化、内部の水平ひび割れといった様々な損傷状態を呈する。膨大な数の損傷した床版を計画的かつ効率的に維持管理・更新していくためには、損傷状態を的確に把握するとともに、残存する耐荷性能や耐久性能に基づき対策の優先順位付けを行う必要がある。

床版の耐荷性能の把握では、これまで荷重車を用いた載荷試験が多く採用されてきた。一方、より簡便な手法として車載型や自走型の試験装置を活用した衝撃荷重載荷試験<sup>1)</sup>があり、さらに近年では、可搬型の小型 FWD を活用して実橋床版の劣化状況の把握を試みた事例<sup>2)</sup>も報告されている。こうした中、著者らも、既報<sup>3)</sup>において、小型 FWD による実橋切出し床版のたわみ計測を行っているが、車載型や自走型の試験装置と比較して研究事例が少なく、たわみ計測における適用性が十分に検討されているとは言い難い状況にある。

そこで本稿では、小型 FWD による床版のたわみ計測に関する基礎的検討として、諸元や損傷状態が異なる床版試験体に対する輪荷重走行試験を行う過程において、静的載荷試験および小型 FWD による衝撃荷重載荷試験を実施し、両者から得られる床版剛性を比較した結果を報告する。なお、本稿において輪荷重走行試験結果に関する詳細な分析を行っていないことを予め断っておく。

## 2. 試験方法

## 2.1 試験体

本研究には、3 シリーズ合計 8 体の実物大の床版試験体を使用した。表-1 および表-2 は各シリーズおよび各試験体の概要であり、以下にその内容を概説する。

## (1) シリーズ 1

シリーズ 1 の 3 体は、平面寸法 2800mm×3000mm であり、床版厚および鉄筋量は昭和 47 年道路橋示方書に準ずる。本シリーズは、ASR が進行した床版の輪荷重走行下での押抜きせん断破壊や土砂化に対する耐久性を把握することが目的であり、普通骨材を使用して健全状態を模した 1-1 に対し、1-2 および 1-3 では、試験体の一部または全体のコンクリートに反応性の細骨材を使用している。また、ASR 促進のためにコンクリートに NaCl を添加し、これに伴って鉄筋には腐食防止のためのエポキシ樹脂塗装を行っている。なお、1-3 は既報<sup>4)</sup>の試験結果を再掲するものであり、ASR 促進による試験体の損傷状況については、文献 4 を参照されたい。また、1-2 の反応性骨材使用範囲については、製作時期、コンクリート配合、養生方法が 1-3 と同じであることを記しておく。

## (2) シリーズ 2

シリーズ 2 の 2 体は、平面寸法 2800mm×3000mm であり、床版厚および鉄筋量は昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準ずる。本シリーズもシリーズ 1 と同様、ASR が床版の耐久性に与える影響を把握することが目的であり、試験体コンクリートに反応性の骨材 (2-1 では粗骨

表-1 試験体一覧

シリーズ	適用 示方書	試験体名	床版コンクリート <sup>※</sup>			輪荷重走行プログラム			衝撃荷重載荷 での重錘質量 (kg)
			劣化状態	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	環境	荷重 (kN)	走行回数 (万回)	
1	S47	1-1	健全	41.7	31.2	乾燥	200	92.3	25
		1-2	ASR(一部)	43.6	17.0	乾燥	200	50.0	25
		1-3	ASR(全体)	39.5	12.7	水張り	200	24.1	10, 15, 25
2-1	43.5	27.1		乾燥	140	90.0	10, 15, 25		
2	S39	2-2	ASR(全体)	26.8	10.2	水張り	165	4.5	10, 15, 25
		3-1		健全	38.0	27.9	水張り	100	26.5
3	S39	3-2	実環境で 劣化	39.8	28.7	乾燥	100	105.5	10
		乾燥				100	0.5	10	
		乾燥				100	0.5	10	

※1: 2-2は試験体と同時に製作したテストピースによる値、3-2~3-3は健全部から採取したコアによる値

表-2 試験体の基本諸元

シリーズ	寸法			主鉄筋 <sup>※1</sup>			配力鉄筋 <sup>※1</sup>			支持間隔	
	走行直角 方向	走行方向	厚さ	径	かぶり	間隔	径	かぶり	間隔	単純支持	弾性支持
1	2800	3000	200	D19 (D19)	40 (40)	125 (250)	D16 (D16)	58 (58)	100 (200)	2500	2825
2	2800	3000	190	D16 (D16)	30 (30)	150 (300)	D13 (D13)	44.5 (44.5)	300 (300)	2500	2825
3	2300	3000	170 <sup>※2</sup>	D16 (D16)	40 (40)	100 (200)	D13 (D13)	55 (55)	180 (180)	2000	2850

※1: 括弧内は上側鉄筋の諸量 ※2: 健全状態(土砂化発生前)の厚さ

(単位: mm)

材および細骨材, 2-2 では細骨材)を使用したうえでNaClを添加し, また, 鉄筋にはエポキシ樹脂塗装を行っている. なお, 2-1 および 2-2 は既報<sup>4)</sup>の試験結果を再掲するものであり, ASR 促進による試験体の損傷状況については, それぞれ文献5 および 4 を参照されたい.

### (3) シリーズ3

シリーズ3は, シリーズ2と同様, 昭和39年鋼道路橋設計示方書に準拠した試験体であるが, 試験体寸法や支持間隔が異なる. 3-2 および 3-3 は実橋から切出して整形した試験体であり, 3-1 はこれらの健全状態を模して製作した試験体である. なお, 3-2 および 3-3 は, 凍害および ASR の影響を受けて層状ひび割れが発生し, さらに 3-3 においては土砂化により床版厚が 15mm 程度減少した状態の試験体に対して試験を行ったものであり<sup>9)</sup>, 詳細については文献6を参照されたい.

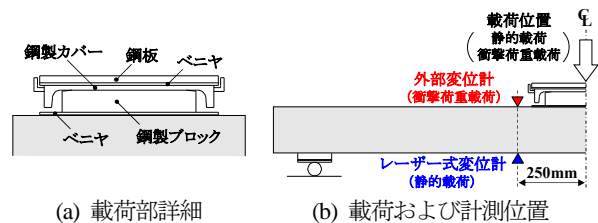


図-1 荷重および計測方法

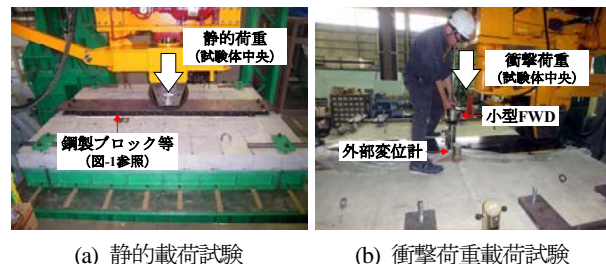


写真-1 試験状況

## 2.2 載荷方法

### (1) 輪荷重走行試験および静的載荷試験

輪荷重走行試験には, 寒地土木研究所所有のクランク式の輪荷重走行試験機を使用した. 試験体の支持は, 走行直角方向端部を単純支持, 走行方向端部を弾性支持とし, 支持間隔は表-2 に示すとおりとした. また, 試験体四隅には浮き上がり防止材を設置している.

輪荷重の載荷には鉄輪を使用した. 走行範囲は試験体中央から前後1m(全長2m)とし, 幅300mm×長さ120mmの鋼製ブロック等(図-1(a))を介して, 表-1中に示す輪荷重を作用させた. また, 水張り環境下で試験を実施した1-3, 2-2, 3-1では, 試験体上面の走行範囲全長にわたって幅1500mmの堤を設置し, 湛水状態を保った状態で輪荷重を走行させた.

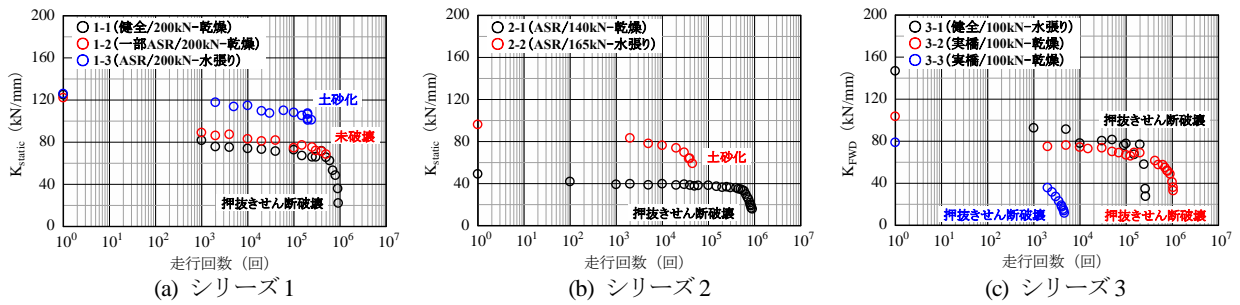
計測項目は荷重および試験体下面のたわみとし, 所定の走行回数において輪荷重走行を停止させた状態で試

験体中央に荷重を静的に作用させ, 試験装置の台車部に内蔵した油圧計の値から荷重を, 試験体下面に設置したレーザー式変位計によりたわみを計測した(図-1(b), 写真-1(a)).

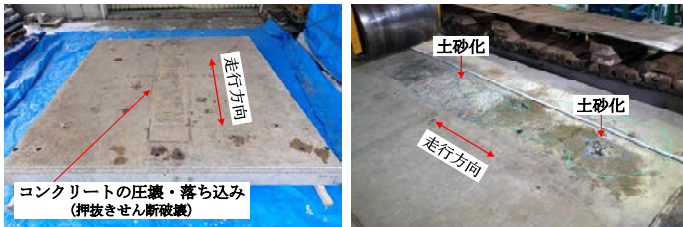
### (2) 衝撃荷重載荷試験

衝撃荷重載荷試験では, 東京測器研究所のFWD-Light(KFDT-100A)を使用し, 試験体中央において, 高さ500mmから10~25kgの重錘を図-1(a)に示す鋼板上に直接落下させることで衝撃荷重を作用させた. 表-1に使用した重錘質量を示す. なお, 水張り環境下で輪荷重走行試験を実施した試験体では, 走行を停止して上面の湛水を解消した後に衝撃荷重載荷試験を実施している.

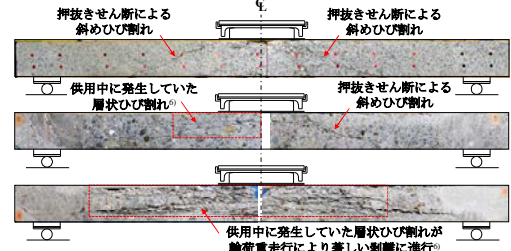
計測項目は荷重および試験体上面のたわみとし, 小型FWDの載荷部に内蔵された荷重計により衝撃荷重を, 試験体上面に設置した外部変位センサ(KFDST-1A)によりたわみを計測した(図-1(b), 写真-1(b)).



図一 床版剛性の推移



(a) シリーズ2の上面 (左から2-1, 2-2)



(b) シリーズ3の切断面 (上から3-1, 3-2, 3-3)

写真一 試験体の損傷状況例

### 2.3 試験結果の比較方法

静的載荷試験および衝撃荷重載荷試験による結果の比較は、次式で定義する床版剛性により行った。

$$K_{\text{static}} = P_0 / w_{250} \quad (1)$$

$$K_{\text{FWD}} = P^*_0 / w^*_{250} \quad (2)$$

ここで、 $K_{\text{static}}$ ：静的載荷による床版剛性 (kN/mm)、 $P_0$ ：静的荷重 (kN)、 $w_{250}$ ：載荷位置から走行直角方向に250mmの位置での試験体下面たわみ (mm)、 $K_{\text{FWD}}$ ：衝撃荷重載荷による床版剛性 (kN/mm)、 $P^*_0$ ：衝撃荷重波形のピーク値 (kN)、 $w^*_{250}$ ：載荷位置から走行直角方向に250mmの位置で計測した試験体上面たわみ波形のピーク値 (mm) であり、衝撃荷重載荷では1回の計測につき3~5回の重錘落下を行い、異常値を除外した後の平均値を比較対象とした。床版剛性の評価に $w_{250}$ および $w^*_{250}$ を使用したのは、衝撃荷重載荷において、鋼製ブロックの跳ね上がり等の影響により載荷位置での試験体上面のたわみを正確に取得できないためである。上記2式により試験結果の比較を行うことについては議論が必要であるが、ここでは簡便のため、同じ位置の上下面で計測したたわみをもって床版剛性を定義した。

## 3. 試験結果

### 3.1 輪荷重走行試験

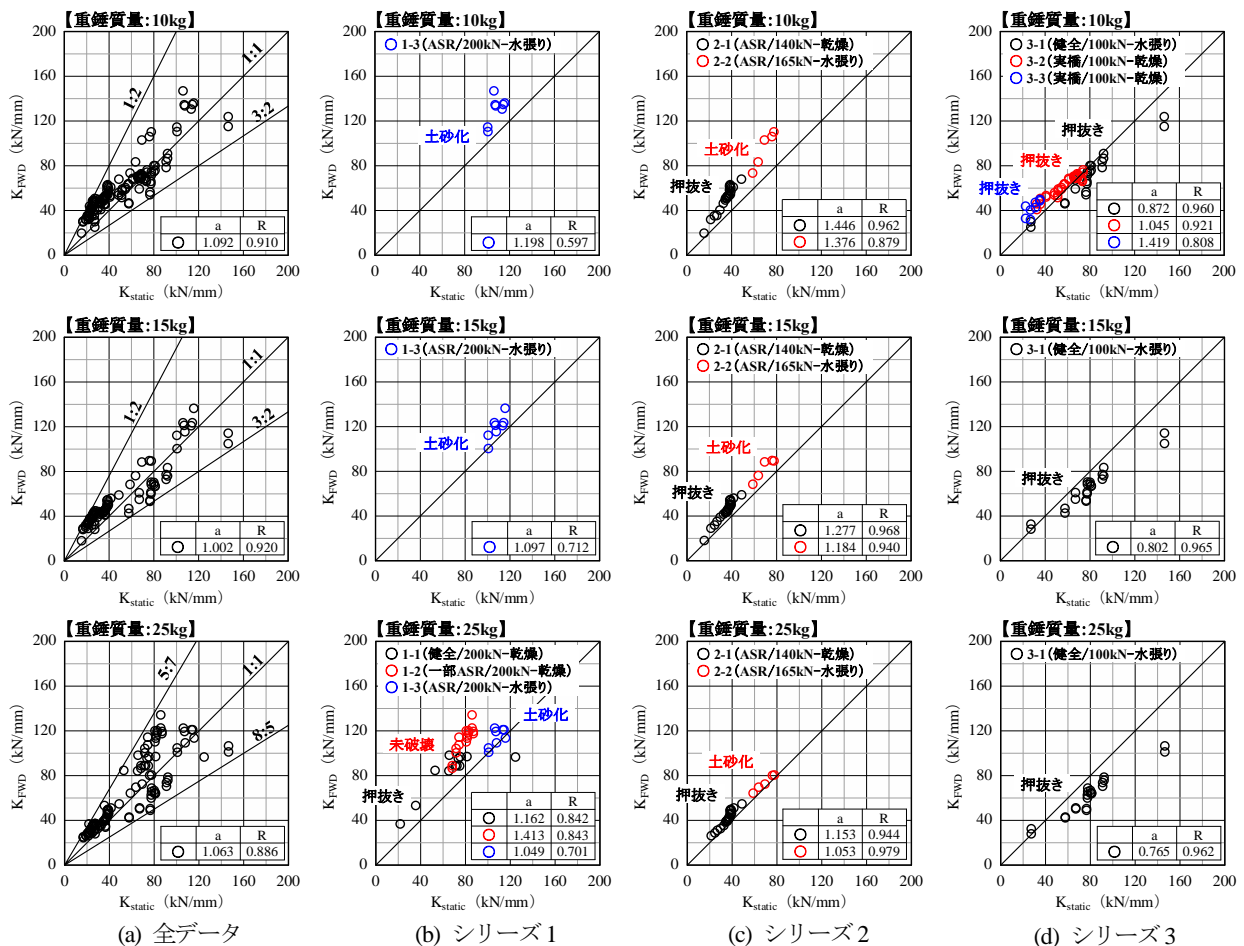
図一は静的載荷試験により取得した $K_{\text{static}}$ の推移であり、図中には各試験体の試験終了時の損傷・破壊形態も記している。図より、いずれの試験体も走行回数の増加とともに床版剛性が低下し、1-1, 2-1, 3-1, 3-2, 3-3は押抜きせん断破壊に至った時点で、1-3および2-2は試験体上面の土砂化が著しく進行して走行不能となった時点で試験を終了した。また、1-2は走行回数90万回の時点で未破壊のまま試験を打ち切った。

写真一は試験終了時の試験体損傷状況の例であり、シリーズ2(写真一(a))では、試験環境の違いにより上面の損傷状態が明らかに異なり、水張り環境とした2-2において輪荷重走行部に著しい土砂化が発生しているのがわかる。また、シリーズ3(写真一(b))では、試験開始時における層状ひび割れの発生状況によって試験体毎に内部の損傷状況が大きく異なるものであった<sup>9)</sup>。

### 3.2 衝撃荷重載荷試験

図一は輪荷重走行試験の各段階で計測した $K_{\text{static}}$ および $K_{\text{FWD}}$ を比較した結果であり、図中には、 $K_{\text{FWD}}-K_{\text{static}}$ 関係を原点をとる一次式により線形近似した際の近似式の傾きおよび相関係数も併せて示している。図一3(a)には本試験の範囲内で取得した $K_{\text{FWD}}-K_{\text{static}}$ 関係の全データを重錘質量別に示す。全体的な傾向として、小型FWDは走行回数の増加に伴う床版剛性の低下を捉えているものの、 $K_{\text{FWD}}$ と $K_{\text{static}}$ の比( $K_{\text{FWD}}/K_{\text{static}}$ )は0.63~2.00と大きなばらつき範囲にあり、小型FWDによって床版剛性を定量的に捉えられているわけではない。

図一3(b)~(d)は、 $K_{\text{FWD}}-K_{\text{static}}$ 関係をシリーズおよび試験体別に区別したものである。まず試験体別に $K_{\text{FWD}}-K_{\text{static}}$ 関係を見ると、同一の重錘質量の下で $K_{\text{FWD}}$ と $K_{\text{static}}$ の間には概ね比例関係が成立する様子が見受けられる。また、1-3, 2-1, 2-2, 3-1の結果からは、重錘質量を小さくするにつれて $K_{\text{FWD}}-K_{\text{static}}$ 関係の線形近似式の傾き $a$ が増加、すなわち小型FWDが床版剛性を相対的に大きく評価していることがわかる。これは、重錘質量によって衝撃荷重の作用時間が変化することや、荷重-たわみ関係の非線形性等が影響していると考えられる。さらに、シリーズ別に $K_{\text{FWD}}-K_{\text{static}}$ 関係の傾きを見たとき、同一の重錘質量の場合、シリーズ3においてシリーズ1および2と比較して傾きが小さくなっている。シリーズ3では他のシ



※図中の表は、 $K_{FWD}$ - $K_{static}$  関係を原点を通る一次式により線形近似した際の近似式の傾き (a) および相関係数 (R) を表す。

図-3 床版剛性の比較

リーズと比べて単純支持間隔が短く、また床版厚が小さいことが衝撃荷重載荷時の応答に影響を及ぼした可能性があるが、詳細は今後検討したい。

次に、試験体の損傷形態の影響に着目すると、例えばシリーズ2では、2-1と2-2で最終的な損傷・破壊形態が異なるにも関わらず  $K_{FWD}$ - $K_{static}$  関係の傾きが概ね一致している。同様のことは、輪荷重走行による損傷・破壊形態が異なる1-1と1-2、3-1~3-3にも言える。このことから、試験体の諸元（ここでは、平面寸法、配筋、支持条件）や重錘落下条件が同一であれば、損傷状態によらず  $K_{FWD}$  から  $K_{static}$  を推定できると示唆される。

#### 4. おわりに

本研究では、諸元や損傷状態が異なる床版試験体の輪荷重走行試験を行う過程において、静的載荷試験および小型 FWD による衝撃荷重載荷試験を実施し、両者から得られる床版剛性の比較を行った。その結果、現時点で衝撃荷重載荷試験を実施して得られるたわみから床版剛性を定量的に評価することは難しいが、床版の断面諸元や支持間隔等の影響を加味することで、今後、床版剛性を推定できるようになる可能性があることを示した。また、本報告の範囲において、床版の損傷状態が両試験

から得られる床版剛性の相関関係に与える影響が小さいことを示唆した。

#### 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) 例えば、千葉ら：小型 FWD 試験で得られた応答加速度を用いた床版の劣化判定手法の検討, 構造工学論文集 Vol.68A, pp.638-648, 2022.3.
- 3) 角間ら：静的および衝撃荷重載荷試験による撤去床版のたわみ評価, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.147-150, 2018.10.
- 4) 横山ら：道路橋床版の土砂化対策としての断面修復に関する実験的研究, 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.225-230, 2020.10.
- 5) 横山ら：AI 画像分析による反応性骨材使用 RC 床版の疲労劣化検知に関する研究, 構造工学論文集 Vol.67A, pp.628-635, 2021.3.
- 6) 角間ら：凍害・ASR が複合的に生じる環境下で49年間供用された実橋 RC 床版の構造性能評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.76, No.1, pp.21-40, 2020.2.

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)