

# 報告 道路橋上部工の通年の変位計測による車両重量と頻度分布の取得

坂口 淳一\*1・高橋 佑弥\*2・國行 雅希\*3

**要旨：**構造解析を用いた道路橋 RC 床版の土砂化の発生や疲労損傷に伴う破壊の予測において、活荷重の詳細な情報は予測精度の向上に有用な可能性がある。著者らは実橋りょうを対象に 1 年間にわたる変位の計測を行い、その計測値から通行した約 200 万台の車両重量とその頻度分布を得た。本稿では、変位から車両重量への変換に必要な荷重車を用いた計測の内容や、通年での連続した変位の計測値から車両重量を推定するための構造物の温度変化に関する補正方法等の車両重量の算出方法の詳細と、その算出結果を報告する。  
**キーワード：**計測, モニタリング, 車両重量, 活荷重, 土砂化, 疲労損傷

## 1. はじめに

道路橋の RC 床版においては、活荷重の繰返し作用によって引き起こされるコンクリートの疲労損傷や土砂化の発生の顕在化が、老朽化した構造物の増加に伴い進んでいる。これらの材料損傷は、車両の走行への悪影響や部材の耐荷力の低下を引き起こす安全性に関わる問題である。コンクリートの土砂化についても、近年、その発生・進展プロセスの解明が進められている<sup>1)</sup>。

コンクリートの疲労損傷や土砂化を含む種々の材料の経時変化を考慮した構造解析技術を基幹として、構造物の材料劣化や損傷および対策等の履歴を時間軸上で追跡し、構造物の管理・運用の合理化を図る先進的なメンテナンスサイクルの構築が進められている<sup>2), 3), 4)</sup>。その構築に向けた課題の一つとして、応答評価手法に見合った作用の設定が挙げられており、荷重・作用データの蓄積とモデル化方法の整理の必要性が指摘されている<sup>4)</sup>。活荷重の繰返し作用による RC 床版コンクリートの土砂化の発生や疲労損傷に伴う破壊を定量的に評価する際にも、実際に走行している車両に応じた作用の想定が予測精度の向上に繋がるものと考えられる。

このような背景のもと、土砂化の発生や疲労損傷に伴う破壊の予測を行う際の活荷重のモデル化方法の検討に用いるために、著者らは実橋りょうを対象に 1 年間にわたる変位の計測を行い、その計測値から通行した全車両の重量を得た。本稿では、変位の計測方法や計測値から車両重量への推定方法とその結果を報告する。

## 2. 対象構造物

対象とする構造物は、片側 1 車線のコンクリート単純桁（スパン 20.2m）である。主桁下フランジのコンクリートにはプレストレスが導入されている。供用開始から 50 年以上が経過しており、過去には RC 床版上面にコンクリートの土砂化が発生して補修工事が行われている。

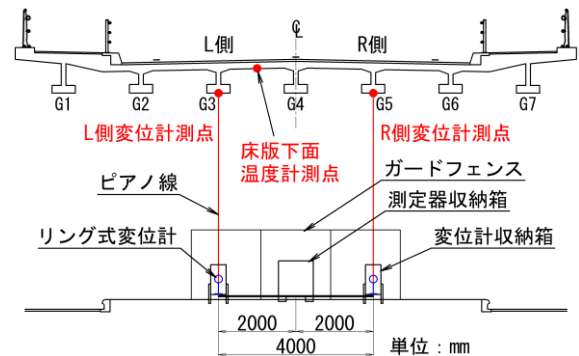


図-1 計測設備



(a) 変位計

(b) 計測設備全体

写真-1 計測設備

## 3. 計測設備

計測設備を図-1 に示す。各車線の車両の走行位置の直下となる G3 桁と G5 桁の下面（以後、L 側計測位置と R 側計測位置と呼ぶ）にピアノ線を固定し、これを地上に設置したリング式変位計に繋いで鉛直方向の変位を計測した。計測点の橋軸方向の位置は、交差道路との関係から支間中央から 2.5m 起点方の位置である。また、図-1 中に示す床版下面の位置の表面に熱電対を設置し、断熱材を用いて熱電対を外気から断熱することで、コンクリート表面の温度を計測した。変位計と熱電対を有線で動ひずみレコーダに接続して、計測開始から 1 年にわたり連続して 50Hz でデータを収録した。写真-1 (b) の

\*1 (株) HRC 研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 (株) HRC 研究所 計測技術部

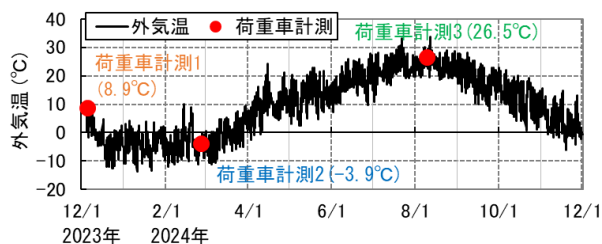


図-2 計測期間および荷重車計測時の外気温

表-1 荷重車計測における軸重の計測結果

荷重車計測	車輪	軸重 (kN)				
		乗用車	ダンプトラック※			
		空車時	積載時			
荷重車1	荷重車2	荷重車3				
1 2023/12/05 (計測開始時)	前輪	7.85	49.92	54.13		
	後輪	9.71	34.13	79.63		
	前後		32.07	82.18		
合計	17.56	116.12	215.94			
2 2024/2/26 (冬季)	前輪	13.14	49.62	56.98		
	後輪	10.00	31.38	77.96		
	前後		29.71	76.00		
合計	23.14	110.71	210.94			
3 2024/8/9 (夏季)	前輪	13.73	49.43	56.68		
	後輪	9.32	34.03	82.77		
	前後		31.87	80.51		
合計	23.05	115.33	219.96			

※ダンプトラックの後輪は、ダブルタイヤの2軸式

ように変位計およびレコーダを風雨雪からの防護のために収納箱に格納し、設備全体をガードフェンスで囲った。

#### 4. 荷重車による車両重量と鉛直変位の関係の取得

##### 4.1 荷重車を用いた計測の実施内容

軸重を計測した荷重車の走行を行い、そのときの変位を計測した（以後、荷重車計測と呼ぶ）。この荷重車計測から得られる車両重量と鉛直変位の関係を用いることで、1年間にわたる変位の計測値の中で、通過する個々の車両によって生じる最大変位からその車両重量を推定する。

表-1に示すとおり、変位の計測開始時の荷重車計測に加えて、温度による影響を確認するために冬季と夏季にも荷重車計測を行った（以後、荷重車計測1~3と呼ぶ）。変位の計測期間の外気温の時刻歴と、荷重車計測を行った3回の日時の外気温を図-2に示す。図に示す外気温は、図-1に示す測定器収納箱の位置に日陰となるように設置した温度計により計測された外気温である。

また、乗用車とダンプトラックの空車時および積載時の3水準の車両重量で荷重車計測を行うことで、車両重量の大きさに対する剛性（車両重量/鉛直変位）の変化を確認した。乗用車には2軸のバンを用いた。ダンプトラックには3軸の車両を用いており、砂利の積載によって空車時と積載時の重量を調整した。

##### 4.2 変位の計測結果の補正と最大変位

荷重車を走行させたときの鉛直変位の計測も図-1に

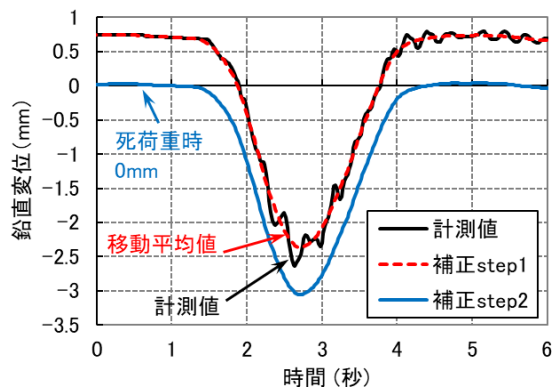
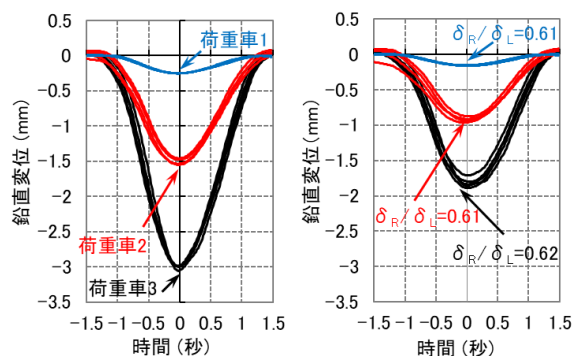


図-3 変位の計測値の補正方法



(a) L側計測点 (走行側) (b) R側計測点

図-4 荷重車走行時の鉛直変位の時刻歴の例 (荷重車計測1, 荷重車L側走行時)

示す計測設備を用いた。計測された変位の時刻歴には、図-3中の計測値（図中の黒線）に見られるとおり車両走行に伴う主桁のたわみによる変位の他に、構造物または車両の振動による周期の短い振動が含まれる。また、計測の開始から1年間連続して計測を続けるため、温度の変化によるピアノ線の伸縮や構造物の変形、地盤の凍上等の影響を受けて、車両が走行していない死荷重時の変位も経時的に変化するものと考えられる。これらに対する補正として、周期の短い振動については計測値を移動平均することで取り除いた（図-3中の補正step1）。ここでは、計測値の周波数分析結果に基づき3Hzと5Hzの周期で2回の移動平均を行っている。死荷重時の変位については、車両の走行によって変位が増加する前後の変位が0mmになるように計測値をシフトした（図-3中の補正step2）。これらの補正を、L側とR側の変位計測位置での計測値それぞれに対して行った。

以上の補正を加えた後の荷重車走行時の鉛直変位の時刻歴の例として、荷重車計測1で図-1のL側の車線に荷重車を走行させたときの鉛直変位の時刻歴を図-4に示す。荷重車計測では3つの水準の車両重量ごとに5回の走行を行っており、車両重量ごとに最大変位が概ね一致していることが図から確認できる。

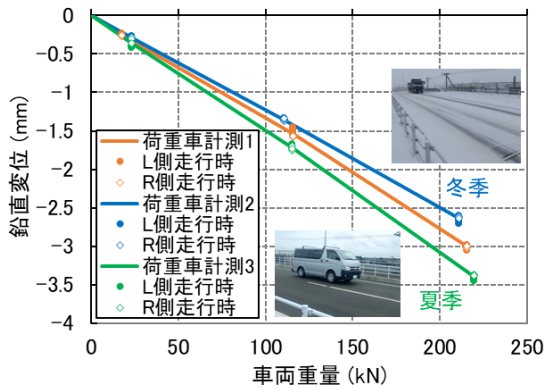


図-5 鉛直変位-荷重車の車両重量の関係

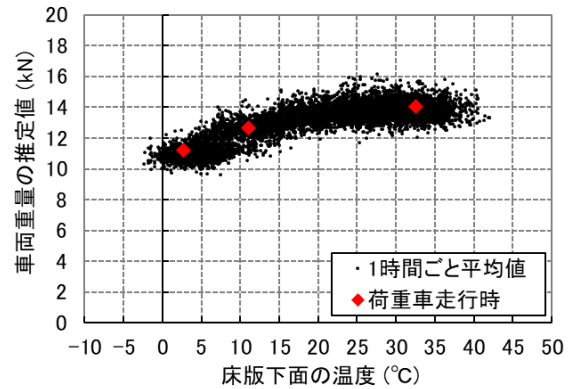


図-7 温度に関する補正前の車両重量の推定値 (35kN以下の車両の1時間ごとの平均値)の分布

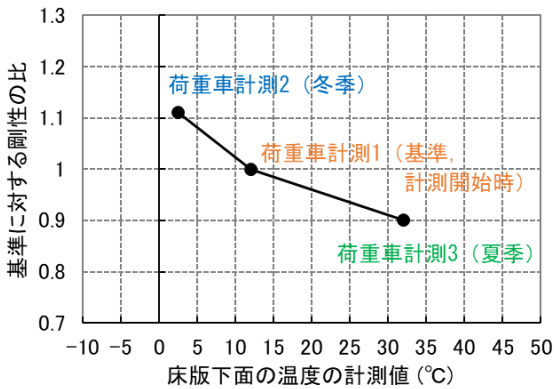


図-6 床版下面の温度と剛性の変化 (ダンプ積載)

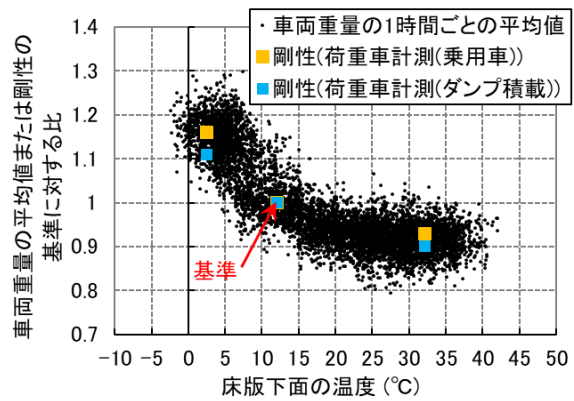


図-8 車両重量の推定値の基準に対する比の分布

### 4.3 車両重量と鉛直変位の関係

荷重車計測 1~3 の 3 回から得られた鉛直変位と車両重量の関係を図-5 に示す。図の横軸に示す車両重量は表-1 中に軸重の合計として示した各荷重車の総重量を示している。縦軸に示す鉛直変位は図-4(a) に例を示した荷重車走行側の計測点の鉛直変位から最大変位を抽出したものである。図より、本検討で荷重車計測に用いた車両重量の範囲では、荷重車計測 1~3 ごとに鉛直変位と車両重量は比例の関係にある。ただし、計測する季節によって剛性に違いが見られ、温度の低い冬季で剛性が高く、夏季には剛性が低くなる傾向が見られた。

図-6 には、床版下面の温度の計測値と荷重車計測時の剛性の変化の関係を示す。図の縦軸には、ダンプトラック積載時のときの荷重車計測 1 を基準とした荷重車計測 2 と 3 の剛性(車両重量/鉛直変位)の比を示している。横軸には図-1 に示した床版下面の温度計測位置における荷重車計測時の温度の計測値を示している。図より、季節により基準の 1 割程度の剛性の変化が見られる。その変化は、温度の変化に対して低温側でやや大きい傾向が見られる。

なお、温度の変化に対して構造物の剛性が変化する要因としては、アスファルト舗装の弾性係数の変化<sup>5)</sup>に加えてコンクリートの弾性係数の変化の影響が考えられる。

アスファルト舗装の無い鉄道 PRC 桁においても、気温とともにたわみが変化することが報告された事例がある<sup>6)</sup>。なお、対象構造物の RC 床版の厚さは 170mm 程度、アスファルト舗装の厚さは 75mm 程度である。

### 4.4 鉛直変位による車両の走行車線の判定

図-4(b) 中に示したとおり、荷重車が走行していない R 側では荷重車の車両重量の大小に関わらず車両が走行する L 側の 6 割程度の変位が生じた。本検討で対象とした構造物は左右対称な断面の構造であり、この比率は逆側の車線を車両が走行した場合も同様であった。6 章に示す長期の変位計測から車両重量の推定を行う際には、L 側と R 側の計測点の鉛直変位の比率をもとに、両側を車両が走行しているすれ違い状態にあるかの判定を行い、すれ違い状態にないと判定された場合には鉛直変位の大きい方を車両が走行している側の車線とした。L 側と R 側の鉛直変位の差が小さく、すれ違い状態にあると判定された場合には、走行側に対する非走行側の鉛直変位の比を 0.61 と仮定して、重ね合わせたときに L 側と R 側の鉛直変位となるように、それぞれの車線の車両重量を求めた。ここでは、計測点 2 点の鉛直変位から、鉛直変位の大きい方に対する小さい方の比率が 0.7 を超えた場合にすれ違い状態にあると判定した。

## 5. 構造物の温度に関する補正

### 5.1 変位の計測値を用いた温度による剛性の変化の検証

図-6 に示したとおり温度によって構造物の剛性が変化することから、この影響を考慮して鉛直変位から車両重量に換算する必要がある。荷重車計測が3回の実施に限られていることから、ここでは1年間の変位の計測値をもとに温度に対する剛性の変化を検証することを試みた。図-7 に、35kN以下の重量の車両の平均重量を1時間ごとに算出した結果を示した。車両重量の推定には、荷重車計測1の鉛直変位と車両重量の関係(図-5の橙線)を用いており、温度による剛性の変化の影響は考慮されていない。横軸には、車両の平均重量を算出した時刻の床版下面の温度を示している。図中に示した荷重車走行時のプロットは、荷重車走行を実施した時刻の35kN以下の重量の車両の平均値を示している。図より、車両重量の推定値は、床版下面の温度が15℃より大きい範囲(以降、高温時と呼ぶ)で一定となり、これより低い範囲では変化する傾向が見られる。

ここで、実際には35kN以下の乗用車の重量の平均値は季節によらず一定であると仮定すれば、図に見られる車両重量の推定値の温度に応じた変化は図-6に示す温度による構造物の剛性の変化が現れているものと考えられる。図-8に、荷重車計測1を行った時刻を基準として、車両重量の推定値の比の分布を床版下面の温度に対して示した。図中に重ねて示した荷重車計測から得られた剛性の比(図-6)と概ね一致している。このことは、構造物の温度に対する剛性の変化は、温度に対して非線形であることを裏付けている。

### 5.2 温度に関する補正係数

前節での検証から、温度の変化に対する構造物の剛性の変化は、高温時では小さい傾向が確認された。そこで、図-9に示す2ケースの補正係数を用いて図-7に示した35kN以下の車両の1時間ごとの平均値を補正したときに、一定値に近い分布に補正できる補正方法を確認した。補正方法のCase1は荷重車計測から得られた3点を結んだものであり、Case2は高温時を一定としたものである。なお、35kN以下の車両をもとに補正結果を比較することから、荷重車計測1~3で乗用車を走行させたときの剛性の比をもとに補正係数の大きさを設定している。

補正した結果を図-10に示す。図-7の分布が床版下面の温度によらず一定となる傾向に補正された。全体の平均値に対する平均二乗誤差を確認すると補正Case2の誤差が小さいことから、次章に示す約1年間の車両重量の推定にはCase2の補正方法を用いることとした。

## 6. 活荷重の推定結果

以上のとおり得られた補正方法等を用いて鉛直変位の

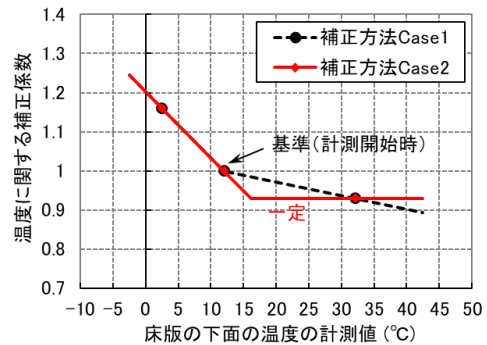
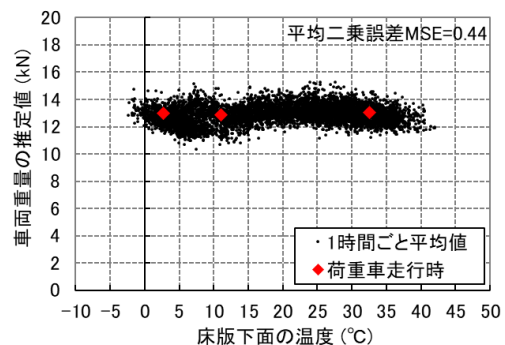
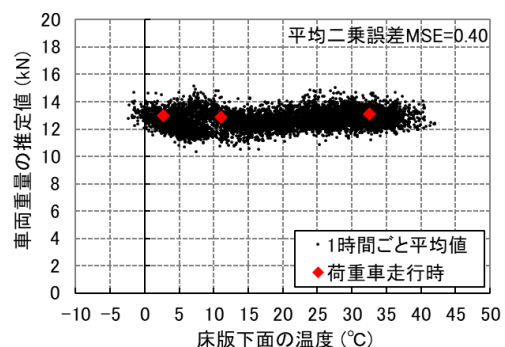


図-9 補正係数(35kN以下の車両による比較用)



(a) 補正方法 Case1



(b) 補正方法 Case2

図-10 温度に関する補正後の車両重量(35kN以下の車両の1時間ごとの平均値)の分布

計測値から車両重量を推定した結果を図-11に示す。図には、L側走行車両とR側走行車両の車両重量の推定値の時刻歴を、計測開始から月ごとに示している。

以下に、車両重量の推定値の算出の流れをまとめる。算出過程の鉛直変位に関する参考図を図-12に示す。判定に用いた閾値は構造物のスパンや断面等の条件により変わるため別構造で行う場合には設定が必要である。

- (1) 鉛直変位の計測値から周期の短い振動を除去し、死荷重時が0mmとなるように補正する(4.2節)。
- (2) 死荷重時(0mm)から0.1mm以上鉛直下向きに変位した場合に車両が走行していると判定し、1台の車両の走行によって生じる鉛直変位の時刻歴から最大変位を抽出する。

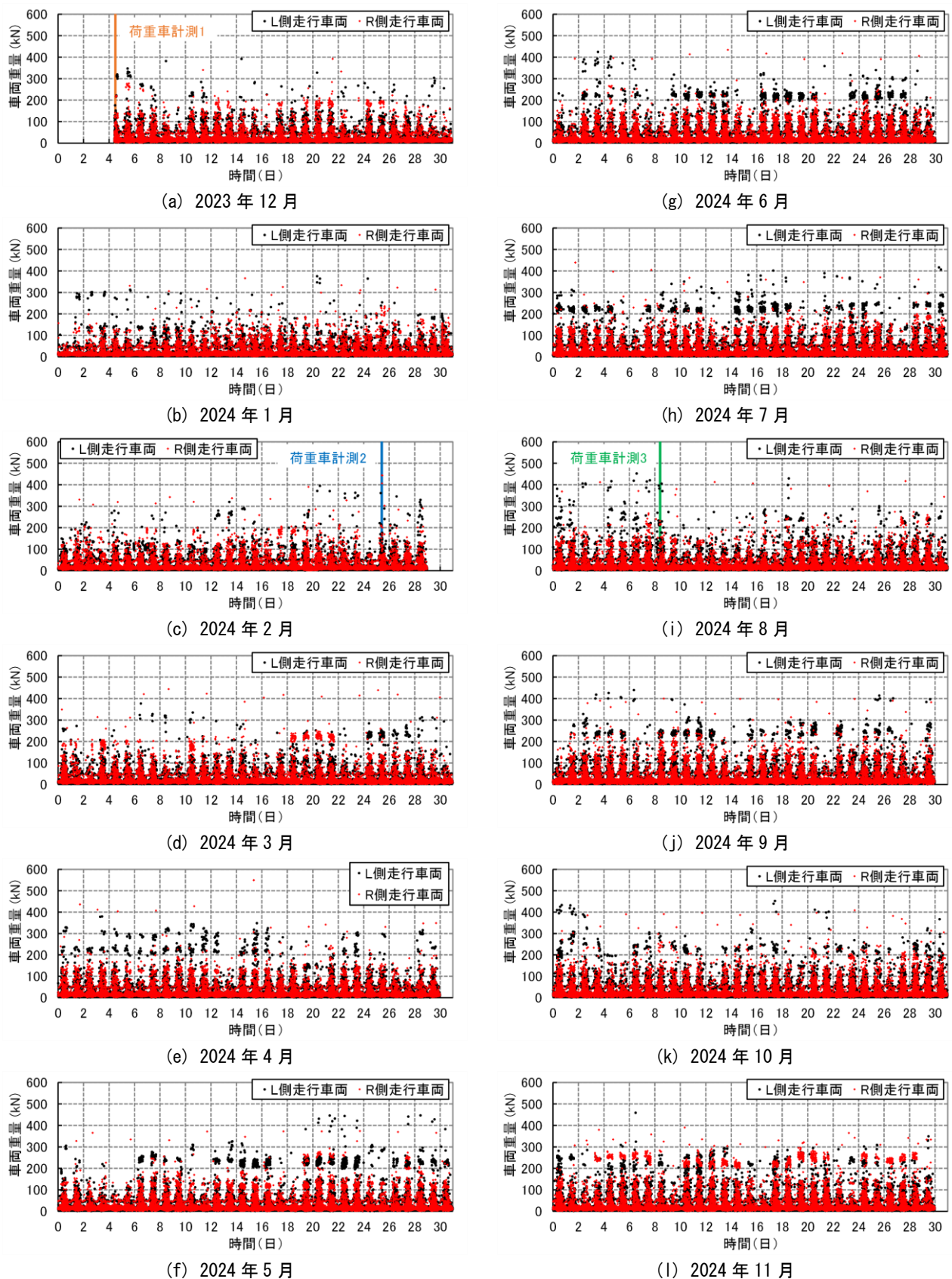
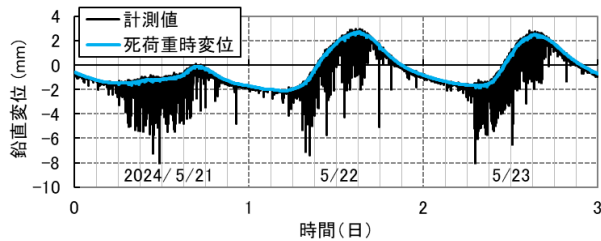


図-11 月ごとの車両重量の推定値の時刻歴

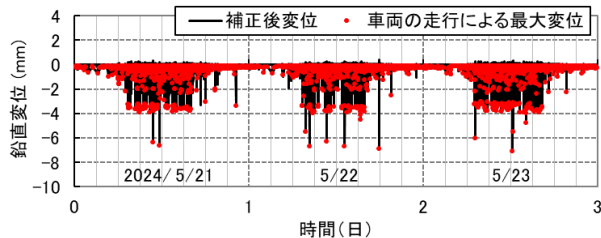
(3) 最大変位時のL側計測点とR側計測点の鉛直変位の比から車両がすれ違い状態にあるかを判定する。すれ違いではない片車線のみでの走行の場合には、走行

車線を判定する(4.4節)。

(4) 図-5に示した荷重車計測1による鉛直変位と車両重量の関係を用いて、車両走行による最大変位から



(a) 計測値と死荷重時の鉛直変位



(b) 死荷重時に関する補正後の鉛直変位と最大変位

図-12 車両重量の推定に用いる最大変位の抽出

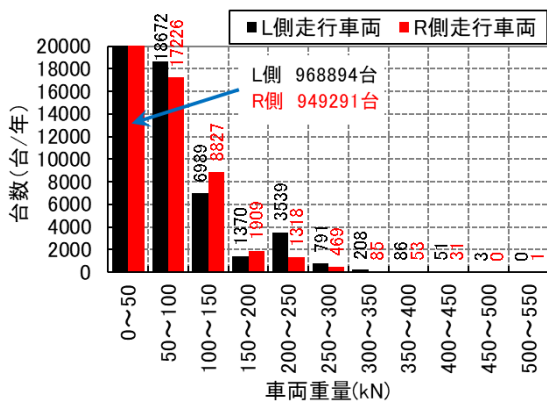


図-13 車両重量ごとの台数 (1年あたり)

車両重量を算出する。すれ違い状態の場合には、重ね合わせたときにL側とR側の鉛直変位となるようにそれぞれの車線の車両重量を算出する(4.4節)。

- (5) 算出された車両重量に、床版下面の温度の計測値を用いて温度の影響に関する補正を加える(5.2節)。

図-13に、約1年間の計測期間の間の車両重量ごとの累計台数の分布を示した。図より、50kN以下の車両は片車線あたり年間約100万台の走行が確認された。車両重量が大きくなるにつれて台数が減少し、最大の車両重量の推定値は約550kNであった。また、L側では車両重量200~250kNの台数が多い等、車線による車両重量の傾向の違いが捉えられている。

なお、本検討では車両1台あたりの総重量の推定を行ったが、例えばこれに画像計測を組み合わせればタイヤ接地位置の情報を取得できる<sup>7)</sup>ほか、個々の車両の軸数や軸距の情報も取得が可能となる。また、床版の変位やひずみ等のセンサーデータを組み合わせれば、車両の総重量を軸重に分解することもできる可能性があるが今後の課題とする。

## 7. まとめ

本検討では、1年間にわたる実橋りょうの変位の計測値から通行した約200万台の車両個々の重量を推定し、車両重量とその頻度分布を得た。本稿では、変位から車両重量への変換に必要な荷重車を用いた計測の内容や、通年での連続した変位の計測値から車両重量を推定するための構造物の温度変化に関する補正方法等の車両重量の算出方法の詳細を示した後に、その算出結果を示した。

今後は、本検討から得られた活荷重情報を、活荷重の繰返し作用による土砂化の発生や疲労損傷に伴う破壊を数値解析で予測する際の作用のモデル化に関する検討等に活用し、供用中の構造物から得られる情報の将来予測を含めた性能評価への活用に繋げたい。

## 謝辞

本検討は東京大学社会連携講座「インフラ材料・構造の次世代性能評価技術の開発」において実施した研究の一部であり石田哲也教授、土屋智史博士よりご指導頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

## 参考文献

- 古川智也, 高橋佑弥: 道路橋鉄筋コンクリート床版上面における土砂化発生特徴に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.421-426, 2021.7
- SIP 第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」サブ課題B 先進的なインフラメンテナンスサイクルの構築, [https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip\\_3/keikaku/09\\_smartinfra.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/09_smartinfra.pdf) (閲覧日: 2025年1月10日)
- 第3期SIPでワクワクする建設業へ「箱庭」と「技術パッケージ」でインフラメンテナンスを戦略的に転換 東京大学石田哲也教授に聞く, コンクリートテクノ, Vol.43, No.2, pp.10-13, 2024.2
- 土屋智史, 石田哲也: 先進的なメンテナンスサイクルの構築に向けたマルチスケール統合解析の活用, コンクリート工学, Vol.62, No.5, pp.438-444, 2024.5
- 日本道路協会: 舗装設計便覧, 2006.
- 内田雅人, 原田悟, 井口重信, 築嶋大輔: PRC単純T形桁におけるコンクリート弾性係数の特性分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.459-464, 2016.7
- 高橋佑弥, 猪瀬咲友, 石田哲也, 土屋智史, 米田大樹: フルスケールモデルと車両画像検知を活用した床版疲労性能評価解析手法に関する検討, 土木学会第78回年次学術講演会, V-527, 2023.9