

## 2. 荷重評価WG 調査研究報告書

活荷重評価とセンシング技術に関する研究

## 荷重評価 WG メンバー

WG 長	佐々木栄一	東京工業大学
部会員	佐藤 豪	JFE エンジニアリング (株)
〃	田代 大樹	大日本コンサルタント (株)
〃	増田 和裕	川田テクノシステム (株)
〃	古川 聖	(株) 横河ブリッジ

## 荷重評価 WG 目次

はじめに .....	2-1
§ 1 活荷重評価に関するレビュー .....	2-2
§ 2 活荷重分析の考え方、ばらつきの要因 .....	2-31
2-1 活荷重の分析方法 .....	2-31
2-2 影響線ベースによる分析方法のフロー .....	2-35
2-3 ばらつきの要因 .....	2-40
§ 3 加速度計測に基づく変位ベースの B-WIM 手法に関する実験的検討 .....	2-42
3-1 実験の概要 .....	2-42
3-2 加速度計測結果からの変位への変換手法の検討 .....	2-47
3-3 変位挙動に関するまとめ .....	2-52
3-4 変位ベースの B-WIM に関する検討 .....	2-55
3-5 Excel による B-WIM .....	2-60
§ 4 簡易な B-WIM に関する検討 .....	2-77
4-1 キャリブレーションフリーの B-WIM .....	2-77
4-2 発電に着目した荷重評価の可能性 .....	2-80

## はじめに

WG2 (荷重評価 WG) においては、実荷重と設計荷重の違いを Bridge - Weigh - In - Motion (B-WIM) などのセンシング技術を利用して評価することを目標として、以下のような活動を行った。すなわち、これまでの B-WIM 技術のレビューを行い、現状や課題、ばらつきの要因等について整理するとともに、簡易な計測による B-WIM 技術の確立のため、加速度計測に基づく B-WIM 技術について具体的に実験により検討を実施した。また、より B-WIM 技術における計測を簡易にするためのキャリブレーションフリーに向けた検討や、発電デバイス適用による発電量ベースの方法等についても議論を行った。ここでは、検討の結果を報告書としてまとめる。

### 【WG2 (荷重評価 WG) の活動内容】

- 1) 既往の B-WIM 技術・適用事例に基づき、センシングを利用した活荷重分析の考え方を整理する。
- 2) センシングに基づく活荷重評価結果の精度・ばらつきについて要因と影響の程度を検討する。
- 3) 加速度計などの計測データに基づく、B-WIM の手法を提案し、適用性について検討する。
- 4) 簡易な活荷重評価方法について考え方を整理するとともに、手法について提案を行う。

## §1 活荷重評価に関するレビュー

既往の B-WIM 技術・適用事例について，活荷重分析の考え方等を整理するため，我が国での検討を中心にレビューを実施した．表 1-1-1 にレビュー対象とした文献等の一覧を示す．各文献についてレビューフォーマットを用いて，概要をまとめることを行った．

表 1-1-1 レビュー対象文献等リスト

文献 番号	論文名	著者							発表年 登録年	掲載誌
		1	2	3	4	5	6	7		
1	Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridges	F. Moses							1979	ASCE Transportation Engineering Journal, pp. 233-249
2	走行車両の重量測定	三木 千壽	村越 潤	米田 利博	吉村 洋司				1987.4.	橋梁と基礎, Vol.21, No.4, pp.41-45
3	RC床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究	松井 繁之	Ahmed EL-HAKIM						1989	構造工学論文集, Vol.35-2, pp. 407-418
4	鋼床版部材を用いた走行車両の輪重推定	小塩 達也	山田 健太郎	貝沼 重信	小幡 敏幸	古市 亨			1998	構造工学論文集, Vol.44A, pp. 1141-1151
5	鋼桁橋の縦荷を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発	小塩 達也	山田 健太郎	小林 直人	水野 良浩				2001	構造工学論文集, Vol.47, pp.1083-1091
6	BWIMによる大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価	小塩 達也	山田 健太郎	深津 伸					2002	構造工学論文集, Vol.48A, pp. 1055-1062
7	支点反力によるBWIMを用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析	小塩 達也	山田 健太郎	若尾 政克	因田 智博				2003	構造工学論文集, Vol.49A, pp.743-753
8	橋梁部材の影響面積を用いた走行車両の重量推定に関する研究	小塩 達也	山田 健太郎	新海 英昌	矢島 正美	水野 良浩			1999	土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.54, pp. 456-457
9	光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発	三木 千壽	水ノ上 俊雄	小林 裕介					2001.9.	土木学会論文集, No.686/VI-52, pp. 31-40
10	リアルタイム全自動処理Weigh-In-Motionによる長期交通荷重モニタリング	小林 裕介	三木 千壽	田辺 篤史					2004	土木学会論文集 第772号/I-69, pp.99-111
11	2径間連続鋼桁橋を用いたBWIMの精度	山口 栄輝	松尾 一志	河村 進一	小林 裕介	森 昌文	百田 国廣	西之原 達志	2004	応用力学論文集, Vol.7, pp.1135-1140
12	FBG光ファイバセンサによるWeigh-In-Motionシステムの構築	小林 裕介	三木 千壽	佐々木 栄一					2003	応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016
13	鋼床版の疲労へのSFRC舗装による予防補強とその健全性モニタリング	三木 千壽	鈴木 啓悟	加納 隆史	佐々木 栄一	石田 稔	高森 博之		2006	土木学会論文集A, Vol. 62, No. 4, pp.950-963
14	影響線の重ね合わせを用いたWIMシステムについて	石尾 真理	中谷 昌一	玉越 隆史	中洲 啓太				2002	土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.57, pp. 1447-1448
15	多様な橋梁条件に対するWIMの適用性に関する調査	石尾 真理	中谷 昌一	玉越 隆史	中洲 啓太				2003	土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.58, pp. 799-800
16	GAを適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究	米田 昌弘	枝元 勝哉						2003	構造工学論文集II, Vol.49, pp.755-765
17	遺伝的アルゴリズムを適用したBridge Weigh-in-Motionシステム	米田 昌弘	枝元 勝哉						2004	構造工学論文集II, Vol.50, pp.707-718
18	影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用	坂柳 皓文	佐々木 栄一	チャンベン・ティールラボン	鈴木 啓悟	石川 裕治	山田 均	勝地 弘	2008	構造工学論文集, pp.582-589
19	大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察	石尾 真理	中谷 昌一	玉越 隆史	中洲 啓太				2004	土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59, 1-562, pp1121-1122
20	鋼桁橋の垂直補剛材ひずみを用いたBWIM	山口 栄輝	内藤 靖	松尾 一志	松木 勇太	高木 良久	河村 進一		2010	土木学会論文集F, Vol.66, No.2, pp.251-260
21	鋼床版における通行車両軸重算出手法	鈴木 啓悟	吉川 将大						2013	土木学会論文集A2, Vol. 69, No. 2, pp. 1761-1768
22	交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム	鈴木 啓悟	佐々木 栄一	三木 千壽	山田 均	高岡 愛	宮崎 早苗		2008	応用力学論文集, Vol.11, pp.997-1004
23	道路橋の交通特性評価手法に関する研究	玉越 隆史	中洲 啓太	石尾 真理	中谷 昌一				2004	国土技術政策総合研究所資料 第188号
24	制御理論を用いたWeigh-In-Motionに関する基礎的検討	鈴木 健吾	丸山 収	関屋 英彦	小西 拓洋	三木 千壽			2016	土木学会論文集A2, Vol. 72, No. 2, pp. 1.45-1.51
25	橋梁の活荷重応答計測に必要なS/N比に関する研究	関屋 英彦	木村 健太郎	丸山 収	三木 千壽				2016	構造工学論文集, Vol.62A pp.174-184
26	橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案	関屋 英彦	横関 耕一	木村 健太郎	小西 拓洋	三木 千壽			2016	土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 1, pp.61-74
27	MEMS加速度センサを用いた変位計測に基づくPortable-Weigh-In-Motionシステムの提案	関屋 英彦	小西 拓洋	木ノ本 剛	三木 千壽				2016	土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 3, pp.364-379

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	1	発表年	1979		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	車両重量推定	軸重	車重	ひずみ	Trafficセンサ
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		
文献名	Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridges, ASCE Transportation Engineering Journal, pp. 233-249				
著者名	F. Moses				
概要	<p>橋梁や舗装のメンテナンスのため、トラック軸重および車重は重要な情報である。本論文では、道路橋梁に設置された交通センサとひずみゲージを用いて軸重および車重を取得するシステムについて述べている。結果として、キャリブレーション用のトラックや任意交通を対象として分析したところ、トラック総重量および軸重はよく推定できているという報告である。</p>				
対象橋梁	桁橋				
使用センサ	ひずみゲージ	Trafficセンサ			
センサ設置位置	下フランジ上面				
分析方法	<p>本論文では、重量推定アルゴリズムが記述されている。橋梁応答の動的成分をフィルターにより除去し、最小二乗法により等価な静的輪重を得る。ここでは、システムに自己平衡型信号処理装置、磁気テープ装置、AD変換機、および現場データを磁気テープに記録するためのミニコンピュータを利用している。出力はそのあとデジタルコンピュータに移される。3径間連続のケースについても示している。</p> <p>この論文では、さらに、継続的なWeigh-in-Motionデータの取得や現地での荷重データ取得のための改善点についても述べている。</p>				
	<p>FIG. 3.—Arrangement of Strain Gages in Typical Instrumented Bridge: (a) Midspan Elevation; (b) Plan View</p>				
	<p>FIG. 4.—Illustration of Strain Response Record</p>				
	<p>FIG. 8.—Schematic of Bridge Layout and Strain Gage Locations on Test Span I-271 near Cleveland, Ohio</p>				
特長	WIMの概念を最初に提案した内容である。				
課題					
その他メモ					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	2	発表年	1987		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	車両重量測定	ひずみゲージ	光電スイッチ	車両重量頻度分布	
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		その他
文献名	走行車両の重量測定, 橋梁と基礎, Vol. 21, pp. 41-45				
著者名	三木千壽, 米田利博, 村越潤, 吉村洋司				
概要	<p>本論文は、ひずみゲージによる応力測定と、簡便な走行車判別装置（光電スイッチ）から得られる交通流のデータを元にして、走行車両の重量解析を試みている。</p> <p>測定橋梁は東名高速道路の片山高架橋であり、ひずみゲージの取り付け位置を図1, 2, 光電スイッチの設置位置を図3に示す。各計測データは図7のように使用している。</p> <p>図10はひずみ変動波形と車両重量の計算例であるが、実測値（軸重計）と解析値を比較すると、本解析法が実用上十分な精度を持つことを確認している。波形1は走行車線および追越し車線に複数台の車両が同時に橋上を走行しているが、妥当な結果が得られている。</p> <p>車両重量頻度分布（図12）について、実測値と解析値とで、車両数2.0%、重量の平均値2.3%、重量の3乗平均値0.6%の誤差が見られたが、本線軸重計の精度から考えて十分に良好な値である。</p>				
対象橋梁	RC床版桁橋				
使用センサ	溶接ひずみゲージ	光電スイッチ			
センサ設置位置	下フランジ下面	垂直補剛材上端部			
分析方法	重量測定の基本原理はMosesによって提案されている方法とほぼ同じである。				
特長	各種の目的でしばしば実施されるような通常の応力測定に若干工夫をすることにより車両重量を得ようとするもの。測定箇所近傍に軸重計があり、それと比較して、妥当性を示している。				
課題	<p>本論文では桁橋で実験したが、測定されるひずみは構造形式によって異なる。ほかの構造形式でも車両重量の測定に適しているか、調査する必要がある。</p> <p>影響線の計算は対象とする橋梁の構造解析から求めることができるが、種々の計算上の仮定から実際の橋梁の影響線と必ずしも一致しない。さらに車両が高速で走行しながら通過するので、ひずみの変更には動的な効果が含まれる。よって、試験車から影響線をキャリブレーションしている。構造解析で得られる影響線の形状との違い、動的効果の取り扱いおよび解析への影響について調べる必要がある。</p>				
その他メモ					

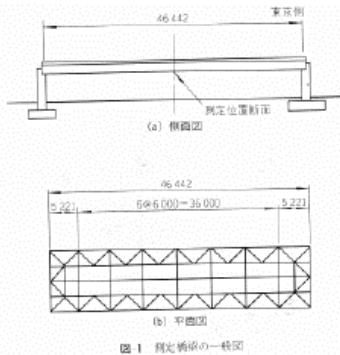


図1 測定橋梁の概観

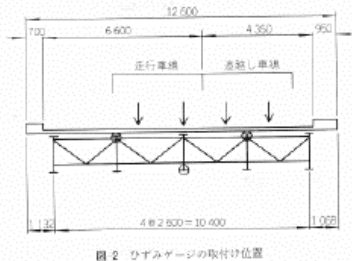


図2 ひずみゲージの取り付け位置

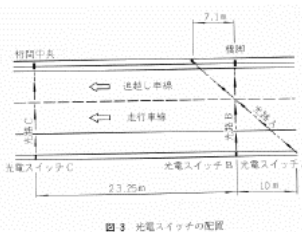


図3 光電スイッチの配置

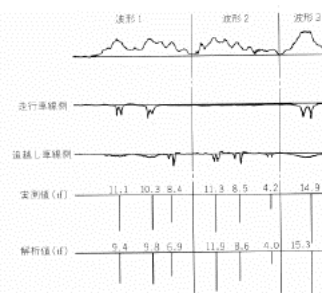


図10 ひずみ変動波形と車両重量の計算例

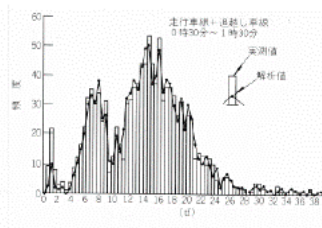


図12 車両重量の頻度分布

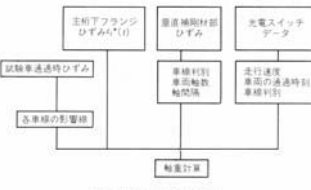
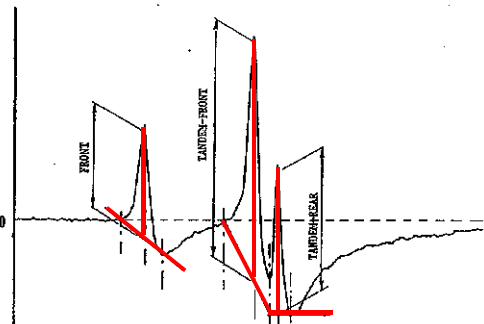
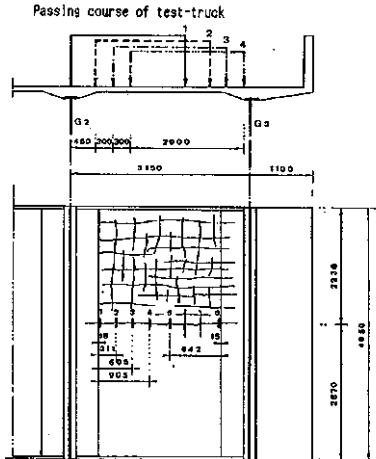
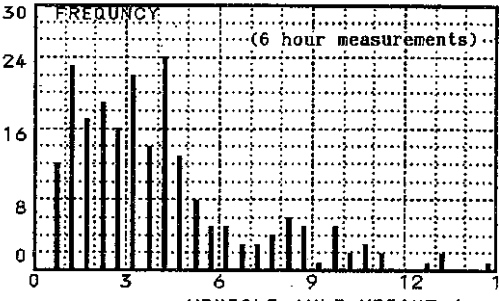
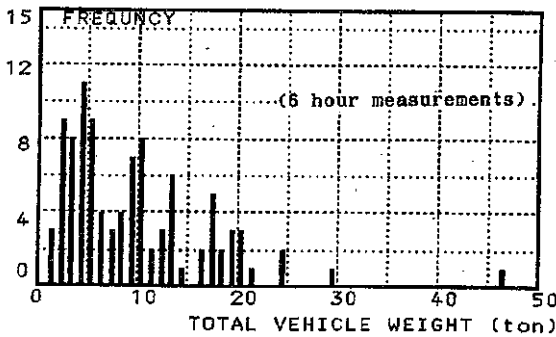


図7 測定データの処理手順



WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	3	発表年	1989			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	輪荷重	RC床版	ひびわれ開閉量			
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	RC床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 407-418, 1989. 3					
著者名	松井 繁之, Ahmed EL-HAKIM					
概要	<p>本論文はRC床版の主鉄筋方向のひびわれ開閉量に着目し, 軸重の算出方法を提案するものである. 実橋での現場計測結果についても報告されている.</p> <p>RC床版下面の主鉄筋方向のひびわれ開閉量は, 影響を受ける範囲が非常に狭いため, タンデム軸の2軸に対応したほぼ独立した応答が得られる. この応答は, 床版作用による板曲げひずみと, 桁の上フランジとしての軸圧縮ひずみの成分からなるが, 測定した応答波形から板曲げひずみのみを取り出す簡便な方法が提示されている.</p> <p>現場計測: 谷町高架橋(大阪市内の主要幹線道路上) 橋梁諸元: 単純合成3主桁桁, 支間長20m, 主桁間隔3.15m, 2車線</p>					
対象橋梁	鉄桁	RC床版				
使用センサ	ひずみゲージ(パイゲージ)					
センサ設置位置	床版下面					
分析方法	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 橋軸直角方向に6箇所パイゲージを設置し, ひびわれ開閉量を測定する(Fig. (5)).</li> <li>2) 測定値から板曲げ成分だけを取り出す方法はFig(12)の通り. タンデム軸が1.3m程度(後輪タンデム車の標準)の場合, 軸に対応した読みとり方を工夫している.</li> <li>3) 橋軸直角方向の走行位置を推定するため, あらかじめ試験車で走行位置を変えた測定をしておき, 影響線を算出しておく.</li> <li>4) 走行位置と軸重をパラメータにし, 6箇所の測定位置に対応する推定値を算出する.</li> <li>5) 最小自乗法により測定値との誤差を小さくする走行位置と軸重の値を算出する.</li> <li>6) 走行車両の形式(何軸車か?など)はビデオで確認しているとされる.</li> </ol>					
	 <p>Fig. (12) Reading method for pulse heights</p>		 <p>Fig. (5) Position of gages and test-truck passing courses</p>			
	 <p>Fig. (15) Distribution of axle weights</p>					
特長	タンデム軸の分離に成功している.					
課題	現行設計荷重より大きい軸重を持つトラックが測定されており, 今後とも自動車荷重の測定を進めていく必要がある.					
その他メモ						

文献番号	4	発表年	1998			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	鋼床版	温度補正	軸重計測			
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			

文献名 鋼床版部材を用いた走行車両の軸重推定, 構造工学論文集 Vol. 44A, pp. 1141-1151, 1998.  
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/1998/44-A3-1141.pdf>

著者名 小塩達也, 山田健太郎, 貝沼重信, 小幡敏幸, 古市亨

<目的>  
 鋼床版の縦リブに着目し, 自動車走行時のひずみ波形を測定, これを解析することで走行車両の速度, 軸重, 軸距などの荷重状態を測定し, 交通荷重の実態を把握するシステムの構築を行った。  
 <測定位置>  
 主桁系応力成分を除去するために, 主桁曲げモーメントの小さい桁端部に近い床版パネルとし, 車両のジョイント通過による衝撃が少ないと考えられる橋梁の出口側端部とした。また測定を離れた2断面で行い, ピーク発生の時間差により走行速度を推定した。

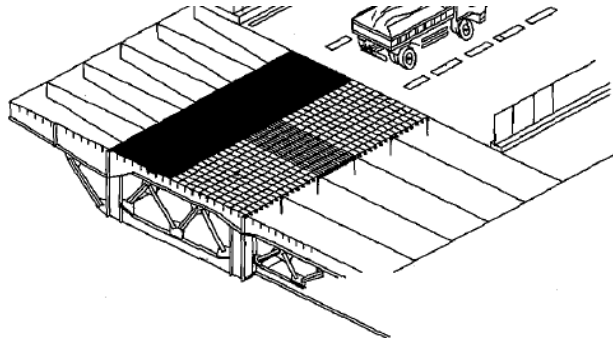


図4 有限要素モデルと実構造

対象橋梁	鋼床版					
使用センサ	溶接ひずみゲージ	温度ゲージ (アスファルト舗装)				
センサ設置位置	縦リブ下面					

縦リブ曲げ応力の影響面を求めめるため, 鋼床版主桁ウェブ間5.5m, ダイアフラム間7.7mの鋼床版パネルを有限要素法プログラム上でモデル化し, デッキプレート上の各節点に単位荷重を載荷し, 着目するリブの応力影響面を作成した。  
 測定した2断面の時間差から軸間距離を測定, 大型自動車のカタログ値を参考にして車種を推定した。  
 軸重値は, 計測した6本のリブのうち最も大きいピークを示したリブでの測定値と, 推定した走行位置, タイヤ形状で軸重が1tonfとしたときの解析応力値との比を基に推定する。

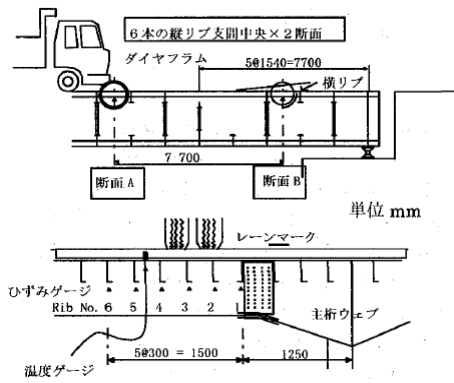


図2 ひずみゲージ貼付位置

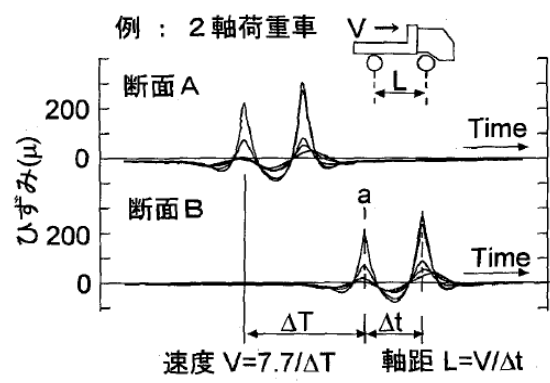


図6 2軸荷重車による波形の例

特長 鋼床版縦リブのひずみを計測することで軸重を計算している。  
 荷重車による動的荷重試験, 静的荷重試験を行うことで, キャリブレーションの精度を向上させている。

課題 荷重車の測定結果に基づくキャリブレーションを一般車両の測定と平行して多数行うことで, 荷重速度やアスファルト温度などに応じた補正も可能である。

その他メモ

文献番号	5	発表年	2001			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	応答波形積分	車両総重量				
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1083-1091, 2001. <a href="http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2001/47-A3-1083.pdf">http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2001/47-A3-1083.pdf</a>					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 小林直人, 水野良浩					
概要	<p>&lt;目的&gt;                  重量検出部材を鋼プレートガーダー橋とし, 簡易に設置・計測ができる交通荷重のモニタリング手法を開発した. また, 複数橋梁で荷重車によるキャリブレーションを行い, 推定の精度を把握した.</p>					
	<p>名古屋 ← → 一宮</p> <p>ch10, ch6, ch3, ch2, ch9, ch5, ch1, ch8, ch4, ch7</p> <p>2700, 2700</p> <p>5250, 5400, 5400, 5250</p> <p>P11-P12下り線の平面図および測定点</p>			<p>ひずみゲージ</p> <p>ブリッジボックス</p> <p>動ひずみアンプ DRA101-C</p> <p>GP-IB 回線</p> <p>ノートパソコン</p> <p>橋面監視カメラ</p> <p>AV ケーブル</p> <p>テレビビデオデッキ</p> <p>計測基地</p> <p>図 1 測定システム</p>		
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ					
センサ設置位置	増設縦桁下フランジ	主桁支間中央下フランジ (参考)				
分析方法	部材応答波形の積分値を用いて車両総重量を推定する. 増設縦桁を重量検出部材とする. 縦桁が主として真上を走行する荷重にのみ応答するため, 橋面上の同時載荷による影響が少ないと考えられるため. 荷重車を走行させ, 各測定点の応答波形を測定して単位重量当たりの影響面積を求める. 荷重車で求めた単位車両総重量当たりの影響面積を平均してキャリブレーション値とする.					
	<p>ひずみ(μ)</p> <p>ch1 (走行車線)</p> <p>測定開始点 (P10付近)からの第一軸の距離 (m)</p> <p>図 5 ひずみ波形の例 (枇杷島高架橋, 3軸ダンプ走行時)</p>			<p>推定車両総重量(kN)</p> <p>車両総重量 (kN)</p> <p>○ 3軸貨物 (239kN)</p> <p>◇ 3軸ダンプ (195kN)</p> <p>+20%</p> <p>+10%</p> <p>-10%</p> <p>-20%</p> <p>図 6 車両総重量の推定精度 (亀山大橋 : 大阪行き)</p>		
特長	増設縦桁をはかりとして, ひずみ応答の積分値を用いて, 車両総重量, 通過速度, 最速軸距を求めている.					
課題	測定点を出口側端部の縦桁として実証実験を行い, 推定精度を向上させる.					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

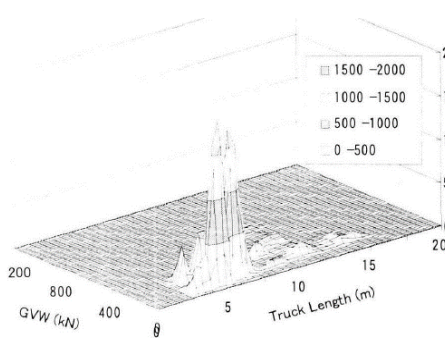
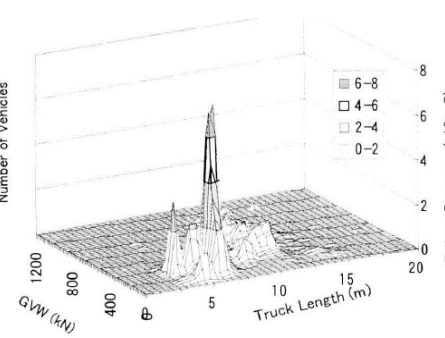
文献番号	6	発表年	2002			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	疲労損傷度分析					
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	BWIMによる大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1055-1062, 2002. <a href="http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2002/48A-2-1055.pdf">http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2002/48A-2-1055.pdf</a>					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 深津伸					
概要	鋼 I 桁橋の縦桁を利用したBWIMシステムを用いて, 実橋梁で荷重モニタリングを実施. 車両毎の縦桁の疲労損傷度を計算し, 車両の種類や積載状態が道路橋の疲労損傷にどのような影響を与えるか分析した. (分析方法は, 「鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発」で用いたもの) 車両総重量, 最速軸距と疲労損傷度の分布から予想し, 疲労損傷への寄与率が高い自動車の形態と, その車種に対応するおおよその制限値を割り出した. 制限値以上に積載した過積載の車両群が疲労損傷のおよそ半分をもたらしていると考えられる.					
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ					
センサ設置位置	下フランジ下面					
分析方法	<p>変動応力を受ける継手の疲労損傷度は次式で表される.</p> $D = \sum (n_i / N_i)$ <p>ここに,  <math>n_i</math>: 構造物が受けた応力範囲 <math>\sigma_i</math> の頻度  <math>N_i</math>: 疲労設計曲線より与えられる <math>\sigma_i</math> に対応する一定振幅応力での疲労寿命                  縦桁の疲労強度として, 縦桁のウェブとフランジの溶接部分の損傷を想定し, 日本鋼構造協会の疲労設計指針に設定されている D 等級 (200万回疲労強度: 100MPa) を用いた.</p>   <p>図 18 最速軸距, 車両総重量と台数分布      図 19 最速軸距, 車両総重量と疲労損傷度分布</p>					
特長	BWIMで測定した車両総重量から, 橋梁に与える疲労損傷度を分析している.					
課題						
その他メモ						

表 1 疲労損傷から見た代表荷重

車種	最速軸距(m)	総重量(kN)	制限値
3,4 軸貨物トラック	6.0~7.5	200~260	220~250
3 軸ダンプトラック	4.0	200~260	200
3,4 軸貨物トラック	4.0~5.5	180~240	200
5 軸セミトレーラートラック	10.0~13.0	300~480	270~300

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

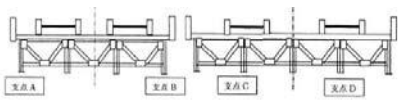
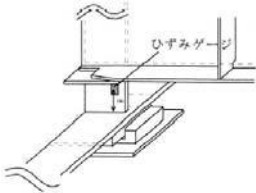
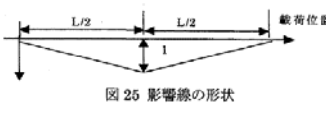
文献番号	7	発表年	2003			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	疲労損傷度分析	支点反力				
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	支点反力によるBWIMを用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析, 構造力学論文集, Vol. 49A, pp. 743-753, 2003. <a href="http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2003/49-A2-0743.pdf">http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2003/49-A2-0743.pdf</a>					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 若尾政克, 因田智博					
概要	<p>本研究は、プレートガーダー橋の支点反力に着目し、単一の測定点から軸重の通過の検出と軸重の推定を行う。また、一般車両の軸重測定結果から、車両荷重の統計と構造物の疲労を考慮した加重特性の分析を行う。支点反力を直接計測するのは困難であるため、端部垂直補剛材に生じるひずみを測定する。既知荷重を持つ荷重車の軸重とひずみ量を比較し、橋梁上の軸重とひずみの関係を求めてキャリブレーションを行う。また、荷重特性と疲労損傷度の影響をマイナーの累積被害則に基づいて分析している。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>4主桁橋      5主桁橋 図3 4主桁, 5主桁の橋梁の測定例</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図4 端部垂直補剛材へのひずみゲージ貼付位置</p> </div> </div>					
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ					
センサ設置位置	桁端部垂直補剛材					
分析方法	<p>マイナーの示した累積被害則によれば、変動応力を受ける継手の疲労損傷度は次式で与えられる<sup>1)</sup>。</p> $D = \sum (n_i / N_i) \quad (1)$ <p>ここに、  <math>n_i</math> : 構造物が受けた応力範囲 <math>\sigma_i</math> の頻度  <math>N_i</math> : 疲労設計曲線より与えられる <math>\sigma_i</math> に対応する一定振幅応力での疲労寿命          また、作用応力範囲と破断回数との関係は、</p> $\Delta\sigma^m \cdot N_f = \text{一定} \quad (2)$ <p>であたえられることが多い。応力範囲の <math>m</math> 乗に反比例して破断回数が決まるということは、(1)式の各項の疲労損傷度は、応力の <math>m</math> 乗に比例する。このことから、疲労損傷と荷重の関係は、鋼部材の場合は3乗則(<math>m=3</math>)、アスファルト舗装の場合は4乗則(<math>m=4</math>)などと呼ばれている<sup>14)</sup>。</p> <p>橋梁上の走行荷重と部材への繰り返し荷重の関係は、影響線の長さ、形状が大きく関連し、部材によっては軸重ごとの繰り返しを受けるもの、隣接軸重群(タンデム軸など)ごとに繰り返しを受けるもの、車両ごとに繰り返しを受けるものなどがある。</p> <p>本研究では、影響線の長さと同損傷の「べき乗則」のみを考慮した車両ごとの相対的な疲労損傷度を計算し、車種、積載状態などで分類した車両群がトータルの疲労損傷度に対してどのような寄与率を持つかを比較する。</p> <p>まず、縦距の最大値を1とした無次元量の影響線を仮定する。測定された荷重群を影響線に載荷して荷重の変動波形を求め、波形に対してレインフロー計数法により荷重範囲を計数する。荷重範囲から次式で定義される疲労損傷指標を計算する。</p> $\text{疲労損傷指標 } DI = \sum W^m n \quad (3)$ <p><math>W</math> : 荷重範囲  <math>n</math> : 繰り返し数  <math>m</math> : べき指数</p> <p><math>m</math> は式(2)における <math>m</math> で、作用繰り返し荷重 (<math>S</math>) と破断回数 (<math>N</math>) の関係を示す S-N 線図の片対数紙上の傾きである。疲労損傷指標 <math>DI</math> に対し、影響線縦距(応力/荷重)および疲労強度(S-N 線図)が得られれば、マイナー則により <math>DI</math> から疲労損傷度 <math>D</math> が次式(4)で計算できる。なお、ここでは影響線上への複数車両の同時載荷は考慮していない。</p> $D = \frac{DI \cdot \left(\frac{\sigma}{W'}\right)^m}{\sigma^m N} \quad (4)$ <p>影響線の形状は図25のように単純桁のスパン中央曲げモーメントの影響線を仮定した。</p> <p>照査対象とした部材と影響線長等を表1に示す。べき指数3を用いる鋼部材の疲労について、フィンガージョイント、床版部材(継手等)に対応する短い影響線から、主桁など長いものまでを対象とした。また、鋼部材のほか、アスファルト舗装、鉄筋コンクリート床版<sup>10)</sup>も想定し、べき指数を設定した。</p>					
特長	通過時刻の検出と軸重推定をひとつの測定点で同時にでき、分離計算も必要なく、測定が簡便である。主桁の配置によっては、隣り合う車線の影響を無視でき、各々の車線の軸重に対して独立した軸重の測定が可能である。					
課題	極端に荷重の大きい車両の有無によって疲労損傷の大きさが影響を受けるため、疲労劣化予測を行うには、発生確率の少ない特殊な荷重についても考慮する必要がある。					
その他メモ						

表1 照査の対象部材と影響線長、重み指数

べき指数 m	影響線長 L(m)	対象部材
3	0.4	フィンガージョイント
	2.5	床版部材(継手等)
	10, 20 30, 60	主桁など
4	0.4, 2.0	アスファルト舗装
12	0.4, 2.0	鉄筋コンクリート床版





文献番号	8	発表年	1999			
分類	WIM分析方法					
キーワード	応答波形積分	車両総重量				
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	橋梁部材の影響面積を用いた走行車両の重量推定に関する研究, 土木学会第54回年次学術講演会, 1999. <a href="http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/1999/54-1A/54-1A-0456.pdf">http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/1999/54-1A/54-1A-0456.pdf</a>					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 新海英昌, 矢島正美, 水野良浩					
概要	No.6「鋼I桁橋の縦桁を用いたBridge Weigh-in-Motionシステムの開発」で用いられている理論の紹介. 部材応答波形の積分値を用いて車両総重量を推定する.					
対象橋梁	下路ワーレントラス					
使用センサ						
センサ設置位置	垂直材	縦桁				
分析方法	<p><b>2. 推定理論</b> 橋面上を走行する荷重によって橋梁部材に生じる応答波形 <math>R</math> は、影響線 <math>y = f(x)</math> の線形和で表示できる。 <math>N</math>軸のトラックが橋面上を走行する場合、先頭軸の位置を <math>x</math>、先頭軸から各軸までの距離を <math>X_n</math>、各軸の軸重を <math>W_n</math> とすれば、載荷位置の関数で表示した応答波形は各軸による影響線の和として以下のように表される。</p> $R = \sum_{n=1}^N W_n \cdot f(x - X_n) \quad (1)$ <p><math>R</math> の積分値を応答波形の影響面積 <math>A</math> と定義する。</p> $A = \int_{-\infty}^{+\infty} R dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \sum_{n=1}^N W_n \cdot f(x - X_n) \right] dx \quad (2)$ <p>この式は次式のように変形できる。</p> $A = \sum_{n=1}^N \left[ W_n \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - X_n) dx \right]$ $= \sum_{n=1}^N W_n \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = GVW \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (3)$					
図1	<p>図1 影響面積と総重量</p>					
特長	部材の応答波形の積分値を用いて、車両総重量を推定している。逆解析的な他の手法と比較して、測定、キャリブレーション、解析の手法が単純である。					
課題	車両速度が重量の推定値に直接的に影響するため、試験車両を用いて速度の影響を現地で検証する必要がある。推定精度と走行位置の関係を試験車両を用いて検証する必要がある。					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	9	発表年	2001		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	光通信網	動態観測	リアルタイム	疲労損傷度評価	
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外 その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		
文献名	光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp. 31-40 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2001/686/2001_686_31/_pdf				
著者名	三木千壽, 水ノ上俊雄, 小林 裕介				
概要	<p>全国の一般国道に約10,000km整備されている道路管理用光通信網を利用し, 鋼橋の健全度評価を目的とした動態観測データをリアルタイムに専門家のいる遠隔地へ転送できるシステムを構築した. モニタリングシステムの概要を図-7に示す.</p> <p>橋梁上を通過する大型車の重量をWIMのコンセプトを用いてリアルタイムに算定するとともに, 疲労損傷度評価を行うシステムを構築した. 計測対象は大坂橋であり, 同橋梁におけるセンサの位置を図-8に, データ処理方法を図-13に示す. トリガーを掛けて, 20tf超の大型車通過時のデータのみ保存しているが, サンプル周波数を1kHzとしているため, データ容量が大きくなってしまふ. そのため, WIMの結果のみを保存している.</p> <p>長期遠隔モニタリングを開始した結果,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・動態観測により大型車重量の大坂橋における通行特性(曜日別・重量別・車線別通過台数など), 主桁の大型車重量による疲労損傷度を確認できた. 例を図-17, 図-18に示す.</li> <li>・ピーク記憶型ひずみセンサにより, 今回の計測中に橋梁に地震等の大きな外力の作用が無かったことが確認できた(図-20).</li> <li>・ひずみゲージおよび物体温度計によるモニタリングでは, 温度上昇に伴って主桁が橋軸方向に圧縮力を受けていることが確認できた(図-21).</li> </ul>				
対象橋梁	RC床版版桁橋				
使用センサ	溶接ひずみゲージ	ピーク記憶型ひずみセンサ	物体温度計	加速度計	
センサ設置位置	下フランジ上面	垂直補剛材上端部			
分析方法	重量測定の基本原理はMosesによって提案されている方法とほぼ同じである.				
特長	道路管理用光通信網を利用し, 大量の測定データを遠隔地へリアルタイムに転送できる. ひずみの生データの保存は大容量となるため, WIMより重量算定を行い, 結果のみを保存している.				
課題	論文の計測結果は3週間の計測データを使用している. 本システムの5年間のメンテナンスフリーを目的としており, センサ, 機器, システムのメンテナンスについては今後の計測の中で明らかにしていく, としている.				
その他メモ					

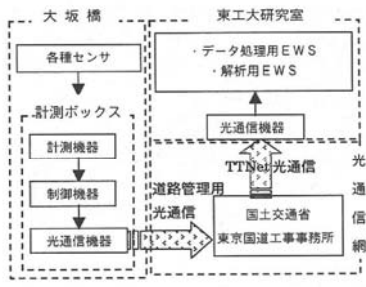


図-7 モニタリングシステムの概要

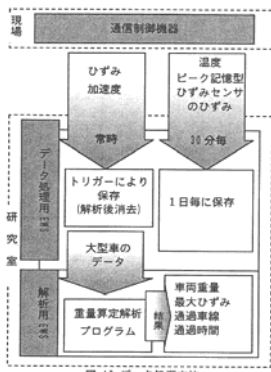


図-13 データ処理方法

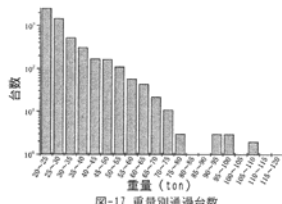


図-17 重量別通過台数

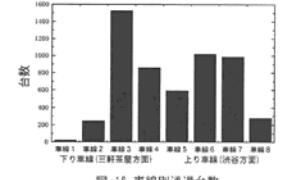


図-18 車線別通過台数

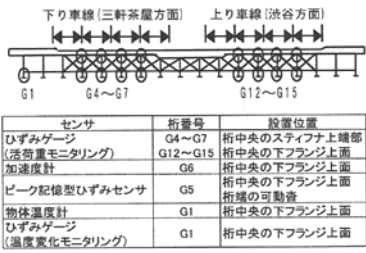


図-8 センサの位置

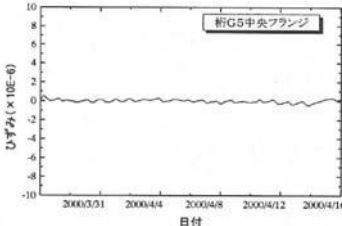


図-20 ピーク記憶型ひずみセンサ

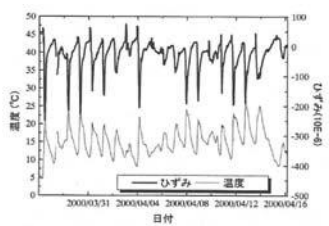


図-21 温度とひずみの関係

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	10	発表年	2004		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	全自動	リアルタイム	温度ひずみ	長期モニタリング	
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外 その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		
文献名	リアルタイム全自動処理Weigh-In-Motionによる長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集 第772号/I-69, pp. 99-111 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2004/773/2004_773_99/_pdf				
著者名	小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史				
概要	<p>長期にわたって継続的に交通荷重をモニタリングするために、全自動かつリアルタイムのWIMシステム（図-5）を構築した。このシステムでは、以下の新しい技術を用いた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・測定ひずみに含まれる温度変動によって生じるひずみを算出し、測定ひずみから温度ひずみを差し引くことで、活荷重によるひずみ変動を常時得ることのできるシステムとした。温度ひずみの算出に、測定ひずみにおける頻度分布の最頻値を利用することによって、処理の高速化を図った（図-7）。</li> <li>・WIMの解析に必要な橋梁上における車両の走行位置を、鉸桁橋では主桁の鉛直スティフナにおける応答ひずみから、鋼床版箱桁橋では床版下面のトラフリップにおける応答ひずみから算出することを可能にした。また、その算出過程では、車両が通過した際のひずみ波形のピークを、波形の2階微分を利用して検知し、橋軸方向に離れている2箇所の測定点を通過した時間差を、相関関数を用いて検知したことにより、その過程を自動化することができた（図-13）。</li> </ul> <p>構築したWIMのシステムを一般国道にある大坂橋、玉川高架橋、荒川河口橋に適用し、交通荷重を長期にわたってモニタリングした。その結果、1) 長期間にわたり、交通量、重量頻度分布、荷重損傷度に大きな変動の傾向がないこと、2) 同一路線でも、2橋の間で交差する幹線道路からの交通の流入・流出により20tf以上の大型車の割合が異なること、3) 100tf付近の荷重を検出し、トラッククレーンが旋回体およびブームを載せたまま走行していることの推定（図-19）、4) 20tf以上の大型車は通勤時間を避けて走行すること、5) 一般国道246号（大坂橋・玉川高架橋）より、一般国道357号（荒川河口橋）の方が疲労にとって厳しい環境にあること（図-21）などが示された。</p>				
対象橋梁	RC床版鉸桁橋	鋼床版箱桁橋			
使用センサ	溶接ひずみゲージ				
センサ設置位置	下フランジ（鉸桁）	垂直補剛材上端部（鉸桁）	トラフリップ下面（鋼床版）	横リブ下面（鋼床版）	
分析方法	重量測定の基本原理はMosesによって提案されている方法とほぼ同じである。				
特長	全自動かつリアルタイムに車両重量を算出することによって、長期にわたって継続的に交通荷重を遠隔モニタリングすることができる。 温度ひずみは測定ひずみの最頻値とし、活荷重によるひずみ=測定ひずみ-温度ひずみとして算出している。 車軸位置の算出のために必要な車両速度について、2箇所の測定点の直上を通過した時間差を相関関数により、算出し、その時間差と2箇所の距離から速度を算出している。				
課題	論文では触れていない。 走行車線の特定および走行速度を求めるために、ひずみゲージの数が車線数×2箇所と多くなっている。長期モニタリングによるゲージのメンテナンスを考えると、もっと少なくできないか。				
その他メモ					

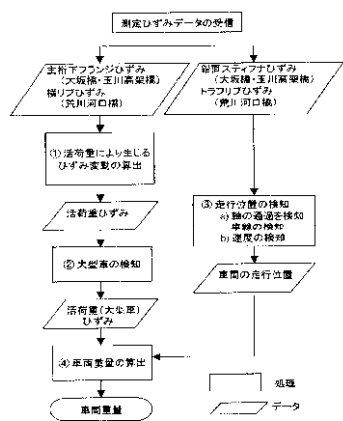


図-5 Weigh-In-Motionにおける電算処理フロー

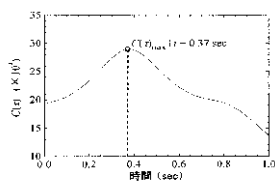


図-10 相関関数による時間差の算出

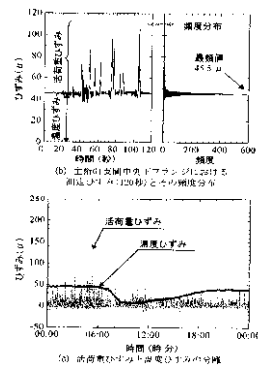


図-7 活荷重ひずみの最頻値を用いた温度ひずみの算出 (例示)

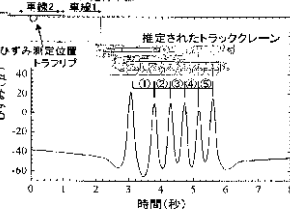


図-19 トラフリップのひずみ波形による軸間算出

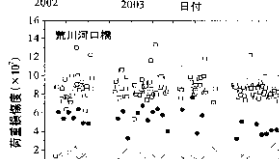
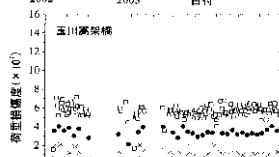
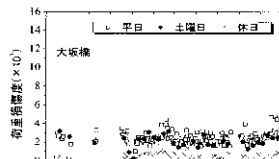


図-21 荷重出度



文献番号	11	発表年	2004		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	BWIM	交通荷重	連続鋼桁	斜橋	
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外 その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		
文献名	2径間連続鋼桁橋を用いたBWIMの精度, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 1135-1140, 2004. 8 https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/7/0/7_0_1135/_pdf				
著者名	山口 栄輝, 松尾 一志, 河村 進一, 小林 裕介, 森 昌文, 百田 国廣, 西之原 達志				
概要	<p>本論分は、斜角を持つ2径間連続鋼桁橋にBWIMを適用し、車両総重量の推定精度を検討するものである。                  現場計測：篠栗橋(九州北部地方の主要幹線道路)                  橋梁諸元：2径間連続5主桁橋、橋長68.5m、主桁間隔2.3m、2車線(片側歩道あり)、斜橋                  下フランジ下面と垂直補剛材に設置したひずみゲージの値を用いて、車両総重量を推定している(文献-2、文献-9のBWIM手法と同じ)。下フランジ下面のひずみゲージでは橋軸方向の直ひずみを測定しており、この値を用いて車両総重量を推定している。垂直補剛材のひずみゲージでは鉛直方向の直ひずみを測定しており、この値を用いて車軸数、走行車線、走行速度を推定している。                  単独走行時の車両総重量の推定誤差は走行速度に関わらず5%以内であった。連行走行時やすれ違い走行時の場合は最大で11%程度であった。論文では推定時に2つの断面位置での測定値を用いると精度が落ちると報告されている。また車両速度の推定には、ばらつきが見られた。</p>				
対象橋梁	鋼桁	RC床版			
使用センサ	ひずみゲージ				
センサ設置位置	垂直補剛材	下フランジ下面			
分析方法	<p>1) ある時間tに橋梁上の地点x<sub>n</sub>に車軸が位置している時、測定点iに生じるひずみε<sub>i</sub>(t)は次式で表せる。</p> $\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_A} A_n I_i(x_n(t)) \quad (1)$ <p>NA: 橋梁上にある車軸数, An: 車軸nの重量, Ii: 測定点iのひずみ影響関数</p> <p>2) 算出されたε<sub>i</sub>(t)と実測値ε<sub>i</sub>* (t)との差の自乗和は次のようになる。</p> $E = \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_S} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (2)$ <p>3) 式(2)の停留条件(微分が0)を満たすAnが車軸nの推定重となる(Anを未知数とする連立1次方程となる)。</p> <p>4) 影響線関数はd次の多項式を用いて表現できる。係数a<sub>j</sub>l重量が既知の車両を用いた走行試験の結果得られるひずみε<sub>i</sub>* (t)から最小自乗法により求められる。</p> $I_l(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_d x^d \quad (3)$ $F = \sum_{j=1}^{N_S} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (4)$				
特長	変形挙動が複雑な斜橋でBWIMの精度を検討している。				
課題	大量のデータにも対応できるようにシステムの自動化が課題である。				
その他メモ	<ul style="list-style-type: none"> <li>推定時に2箇所の断面を使用した場合に精度がなぜ落ちるか良く分からなかった。</li> <li>この論文では、影響線関数を車両重量が既知である車両の実測データから求めている。</li> <li>車線内での車両の走行位置も精度に影響を及ぼすと思われる。</li> <li>車軸重量については特に述べられていない。</li> </ul>				

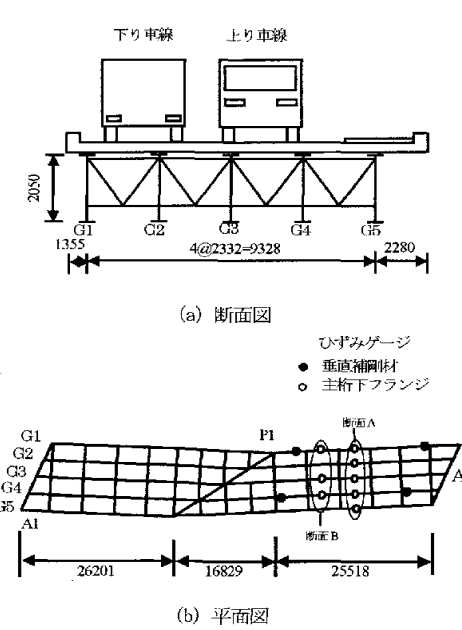
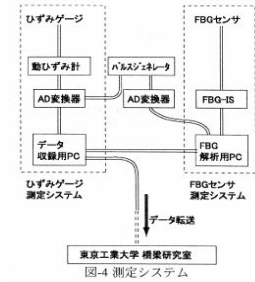
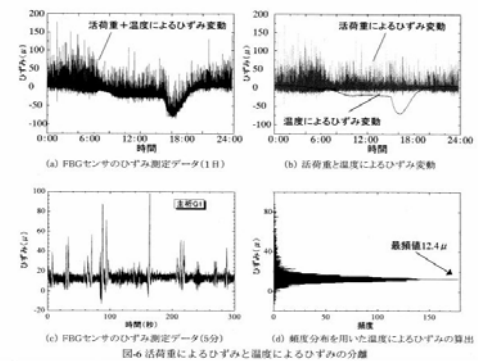
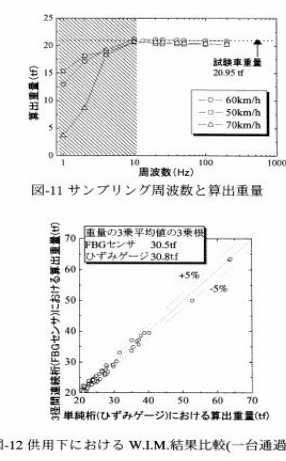
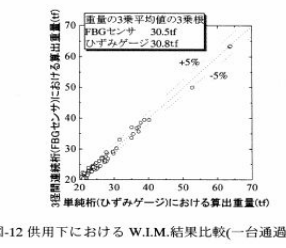
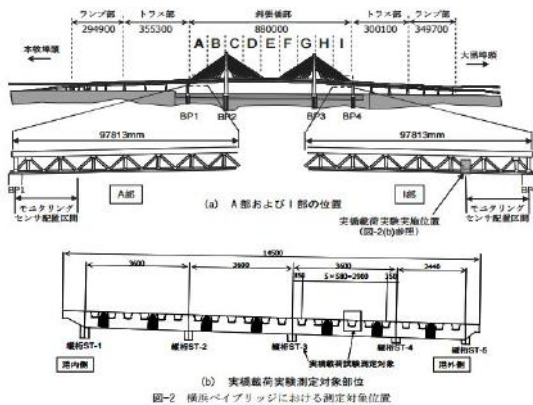
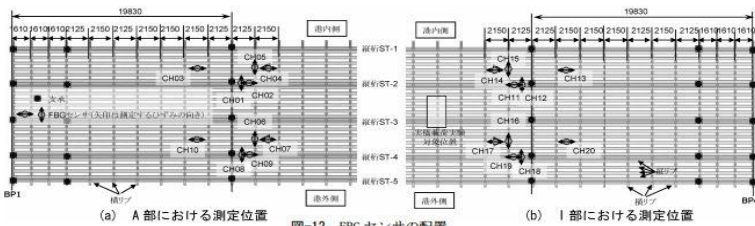
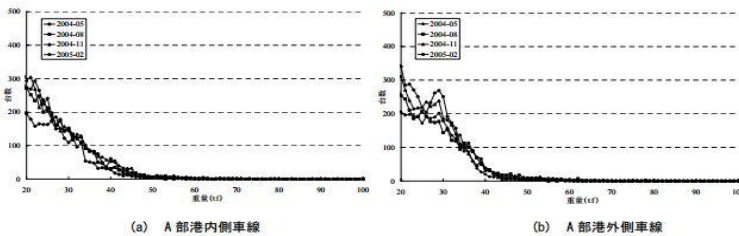


図-2 篠栗橋 (単位: mm)

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	12	発表年	2003		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	光ファイバセンサ	ひずみ	温度	サンプリングレート	
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外 その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		
文献名	FBG光ファイバセンサによるWeigh-In-Motionシステムの構築, 応用力学論文集, Vol. 6, pp. 1009-1016 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/6/0/6_0_1009/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/6/0/6_0_1009/_article/-char/ja/</a>				
著者名	小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一				
概要	本論文は, 光ファイバセンサ (FBGセンサ) を利用して, 橋梁を対象としたWeigh-in-Motionの構築を試みた論文である。実橋梁にFBGセンサを設置して, データの特性やデータ処理方法について検討したものであり, 比較のために従来のひずみゲージでのWeigh-in-Motion結果との比較を行っている (図-12)。				
対象橋梁	桁橋				
使用センサ	光ファイバひずみセンサ (FBG)				
センサ設置位置	下フランジ下面				
分析手法	<p>本論文で用いているデータ分析手法は, 三木ら (文献2) のものと同様である。しかしながら, 光ファイバを用いていることから, 温度補償の影響の観点からの取得したひずみデータの特性などを確認して, 分析を行っている。本論文においては, 図-4のようなシステムを新たに構築して計測を行っている。ひずみデータには, 活荷重によるひずみと温度によりひずみが重なっており, それを分離してWeigh-in-Motionに用いている (図-6)。また本論文では, サンプリングレートのについても言及しており, 10Hz以上であれば問題ないとしている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="287 985 542 1265">  <p>図-4 測定システム</p> </div> <div data-bbox="574 940 1053 1299">  <p>図-6 活荷重によるひずみと温度によるひずみの分離</p> </div> <div data-bbox="1085 918 1372 1377">  <p>図-11 サンプルング周波数と算出重量</p> </div> <div data-bbox="1085 1131 1372 1377">  <p>図-12 供用下における W.I.M. 結果比較 (一台通過時)</p> </div> </div>				
特長	FBGセンサを用いてWeigh-in-Motionシステムを構築した。				
課題	FBGセンサを設置する際に用いる接着剤の耐久性。				
その他メモ					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	13	発表年	2006			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	鋼床版	SFRC舗装	光ファイバセンサ	ひずみ		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼床版の疲労へのSFRC舗装による予防補強とその健全性モニタリング, 土木学会論文集A, Vol. 62, No. 4, pp.950-963 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceja/62/4/62_4_950/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceja/62/4/62_4_950/_article/-char/ja/</a>					
著者名	三木 千壽, 鈴木 啓悟, 加納 隆史, 佐々木 栄一, 石田 稔, 高森 博之					
概要	<p>本論文では、鋼床版構造の疲労損傷への予防的な補強対策として、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 舗装による合成鋼床版化を考え、その効果についてFEM解析および実地応力測定により検証したものである。実地応力測定は、実際にSFRC舗装鋼床版構造が採用された横浜ベイブリッジ下層部 (国道357号線, 平成16年4月開通) を対象として実施している (図-2)。合成鋼床版構造では、SFRC舗装のひび割れやデッキプレートとの接着切れにより合成効果が低下する可能性が懸念されることから、継続的に合成効果の機能健全性を評価することを目的として、光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムを構築している。</p>					
対象橋梁	鋼床版					
使用センサ	光ファイバーひずみセンサ (FBG)					
センサ設置位置	縦リブ下面	横リブ下面				
分析方法	<p>本論文で構築しているWeigh-in-Motionは、SFRC舗装による鋼床版構造の合成化の長期安定性を監視するためのものであり (図-20)、直接荷重を求めるために構築されたものではないが、すべてのセンサを光ファイバとし、システム統一している点に特徴がある。本論文で用いているデータ分析手法は、三木ら (文献2)、小林ら (文献11) のものと同様である。センサ位置は、車両重量分析用として横リブ下面、車両通過検知および速度検知用に縦リブ下面を利用している。</p>  <p>図-2 横浜ベイブリッジにおける測定対象位置</p>  <p>図-12 FBGセンサの配置</p>  <p>図-20 各月の第4週目の車両重量分布の比較</p>					
特長	全てFBGセンサで計測システムを統一した。					
課題						
その他メモ						

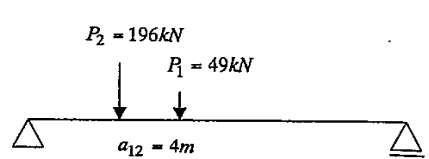
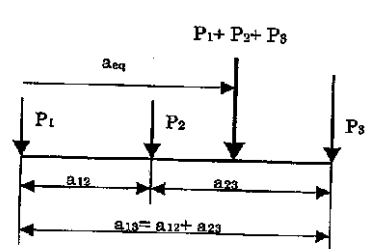
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

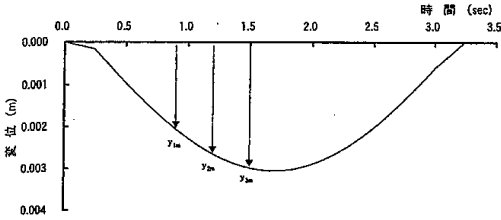
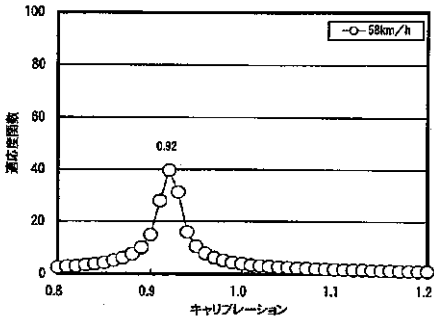
文献番号	14	発表年	2002			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	Weigh-in-motion	車両重量計測	自動車荷重	維持管理		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	影響線の重ね合わせを用いたWIMシステムについて, 土木学会第57回年次学術講演会, Vol. 57, I-724, pp. 1447-1448, 2002. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2002/57-1/57-1-0724.pdf					
著者名	石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太					
概要	<p>&lt;目的&gt; 本研究は、既往のWIMシステムにおいて課題であった対応可能な走行パターンが限定的であることや、併走走行時の精度、多車線への応用等の限界に対して、併走走行状態や軸重計測共に精度よく計算できる新システムを構築したものである。</p> <p>&lt;国総研橋梁研究室WIMの変遷&gt; 開発当初、多主桁のひずみから車両の重量を逆算するための影響線を補間する多項式を仮定して、計算プログラムを作成したが、他車線の各主桁の影響線からの逐次処理は、当時のパソコンの計算能力からみて困難であり、解析処置上、軸重値が確定できない等の問題があった。そこで、軸重の特定と現地での逐次処理を可能にするために、一車線ごとの影響線を用いて計算する方法を開発し、隣接する車線の影響については、車両の位置と諸元による幾つかの走行パターンによる影響線の係数を用意した。しかし、対応できるパターン数や併走走行時の精度、多車線への応用等に限界があったことから、併走走行状態および軸重計測の精度向上を目指した新システムを構築している。</p> <p>&lt;試験橋梁への適用&gt; 国総研構内の試験橋梁（鋼単純桁橋）にて検証試験を実施し、単独走行および連行走行においては、車両重量や軸重を精度良く計算できることが確認された。</p>					
	<p>図-9 本システムと測定値による総重量計測結果の比較</p>					
対象橋梁	コンクリート床版・鋼単純桁橋					
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	RC床版下面	下フランジ上面				
分析方法	<p>&lt;車両の判定&gt; 本システムでは、車両の判別のために床版下面のひずみ応答から軸数・軸距・走行速度を計算し、現存する車両から判別する「1台判別ロジック」を構築した。</p> <p>&lt;車両重量の計算方法&gt; 車両重量の計算方法には、主桁のひずみ応答を用いることとし、車両が走行することによって生じる主桁の影響線にあらかじめ求めた係数を乗じることでひずみ応答の理論値を計算し、計測されたひずみ応答との誤差が最少となる総重量を計算する。総重量は車両の判定ロジックにより求めた軸距、軸数で分離して軸重量を算出する。併走走行の場合については、試験車両を異なる車線で走行させた影響線を求めておき、総重量から各軸重を分離して算出する。</p>					
	<p>図-1: ひずみゲージの取付位置</p>			<p>図-2: 走行時の床版下面より計測したひずみ波形例と処理方法</p>		
<p>図-3: 車両重量の計算概要</p>						
特長	「1台判別ロジック」による軸間距離から判別するアルゴリズムを構築することで精度向上を図っている。					
課題	併走走行状態（連行併走、併走50%、併走走行）については、併走する車両同士の距離が近いいため、2台を1台として計算した後の分離において誤差が大きくなっている。最適化法によって誤差を最少にする条件の算出方法をさらに合理的にさせることで、より精度の高い軸重および総重量の計測を可能にすることが課題である。さらに、WIM共通の課題である渋滞時や車線変更、橋梁上での速度変化等への対応について検討する必要がある。					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

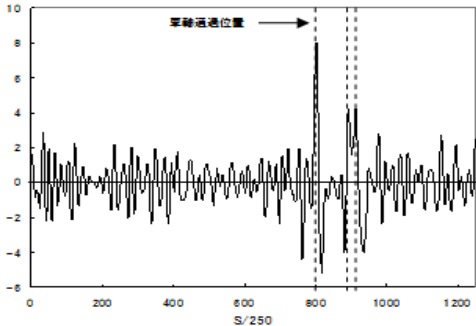
文献番号	15	発表年	2003		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	Weigh-in-motion	車両重量計測	自動車荷重	維持管理	
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		その他
文献名	多様な橋梁条件に対するWIMの適用性に関する調査, 土木学会第58回年次学術講演会, Vol. 58, I-400, pp. 799-800, 2003. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2003/58-1/58-1-0400.pdf				
著者名	石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太				
概要	<p>&lt;目的&gt; 国総研が開発したWIMについて, 鋼連続鈹桁橋, 鋼単純箱桁橋, 単純PCT桁橋に対する適用性を調査した結果報告である。</p> <p>&lt;鋼連続鈹桁橋&gt; 連続桁の場合, 影響線において隣接支間を走行する車両の影響を受けることから, 影響線を一次式で近似する本システムにおいては誤差の要因となるが, 総重量の算定精度に及ぼす影響は必ずしも大きくない。</p> <p>&lt;鋼単純箱桁橋&gt; 輪荷重通過位置が箱桁部に位置する場合, 直接RC床版下面にセンサーを設置することができないため, 主桁上フランジにおいてひずみ計測を実施している。上フランジのひずみはRC床版下面と比べて応答が小さいものの, 各軸の影響は独立しており, 車軸の判別に支障はなく, 総重量も十分な精度で算定されている。</p> <p>&lt;連続PCT桁橋&gt; コンクリート橋の場合, 鋼桁と比較して一般に応答振幅が小さくなるが, 床版, 主桁ともにひずみゲージで十分検知可能な大きさの応答振幅が得られ, 総重量の算出精度にも大きな影響はなかった。</p>				
対象橋梁	RC床版・鋼連続鈹桁橋	RC床版・高単純箱桁橋	連続PCT桁橋		
使用センサ	ひずみゲージ				
センサ設置位置	RC床版下面 (不可の場合, 上フランジ下面)	下フランジ上面			
分析方法	<p>&lt;分析方法&gt; あらかじめ重量等の諸元が既知である車両を用いて, 主桁 (支間中央部) のひずみの影響線を一次式で求めておき, 測定対象となる車両の各車軸分の影響線を重ね合わせたものと実測されたひずみとの誤差が最少となるように軸重および総重量を求めるものである (図-1参照)。また, 重量算出にあたって, 車軸の判定はひずみ応答が鋭敏なRC床版下面の波形を利用して行う (図-2参照)。</p> <p>&lt;本システムの採用に適した橋梁条件&gt; ①ひずみ応答を安価なセンサーで検知できるような十分な大きさの応答振幅を有していること。 ②車軸に対する応答が鋭敏で各軸の影響が独立して生じる部材が存在すること。 ③主桁のひずみ応答を一次式の影響線の重ね合わせにより表現できること。</p>				
	<p>図-1 システムの概要 (重量算出)</p>		<p>図-2 システムの概要 (車軸の判別)</p>		
特長	「1台判別ロジック」による軸間距離から判別するアルゴリズムを構築することで精度向上を図っている。				
課題	特に記載なし				
その他メモ	本プログラムを配布し, 全国規模の通行実態調査を実施する予定。				



文献番号	16	発表年	2003			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	維持管理	遺伝的アルゴリズム	モニタリングシステム	同定		
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	GAを適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 755-765, 2003. 3					
著者名	米田 昌弘, 枝元 勝哉					
概要	<p>本論分は交通荷重の推定に遺伝的アルゴリズム(以下GAと表記する)を適用する手法を報告するものである。車両が橋梁に進入してから退出するまでの時刻歴応答(加速度を電氣的に積分した変位波形,あるいはひずみから算出したモーメント波形)から交通荷重をGAを用いて推定している。GAの詳細については述べられていないが,GAを適用することで少ないデータ数で車両速度や車両総重量,等価軸距(図-5)を推定できる可能性がある,としている。検討は全て解析的に行われている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図-1 2軸車を対象とした予備検討モデル</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図-5 等価軸距の定義</p> </div> </div>					
対象橋梁	特に想定せず					
使用センサ	特に想定せず					
センサ設置位置	支間中央					
分析方法	<p>遺伝的アルゴリズム(文献17より) :</p> <p>遺伝的アルゴリズムとは,生物の進化の過程で起こる自然淘汰,交叉,突然変異などの遺伝的仕組みを模擬した手順のことで,具体的には,仮想生物(個体)を想定し,コンピュータ内でその遺伝子(染色体)を0と1の2進数列で表示(本研究では一つの未知量を24ビットで表示)する。そして,遺伝的仕組みを模擬したプログラムで仮想生物(個体)を何世代にもわたって進化させ,環境に最も適合する個体を探索し,その遺伝子(染色体)から最適解を求めようとするものである。</p> <p>遺伝的アルゴリズムを適用して橋梁交通荷重を推定する場合,軸重と軸間距離(たとえば,2軸車であれば,前輪と後輪の軸重<math>P_1, P_2</math>および軸間距離<math>a_{12}</math>)から構成された一つの個体(<math>P_1, P_2</math>および<math>a_{12}</math>はそれぞれ24ビットで表示されていることから,この場合の一つの個体は24+24+24ビットで構成されている)が環境に適合する程度(<math>a_{12}</math>だけ離れた軸重<math>P_1, P_2</math>によって生じる応答の解析値と実測値が一致する程度)は,次式で定義した目的関数<math>J_{GA}</math>の逆数(適応度関数)で評価される。</p> $J_{GA} = \sum_{i=1}^n  CAL \times R_{c,i} / R_{m,i} - 1.0  \quad (1)$ <p>ここに, <math>CAL</math> はキャリブレーション値, <math>R_{c,i}</math> は解析値, <math>R_{m,i}</math> は計測されiデータの個数である。なお,先の論文では単純桁形式のみ</p>					
特長	パラメータを全て振って最適値を算出するより,GAを用いた方が少ない労力で最適値が求められる(と思われる)。					
課題	実橋への適用。					
その他メモ	GAを用いれば,軸重や軸間距離の推定が困難であるものの総重量は十分な精度で推定できる,と述べられているが,軸重や軸間距離の推定が困難であるのは測定しているパラメータ(支間中央の変位と曲げモーメント)のためということはないか?					

文献番号	17	発表年	2004			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	維持管理	遺伝的アルゴリズム	モニタリングシステム	同定		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	遺伝的アルゴリズムを適用したBridge Weigh-in-Motionシステム, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.707-718, 2004.3					
著者名	米田 昌弘, 枝元 勝哉					
概要	<p>本論分は交通荷重の推定に遺伝的アルゴリズム(以下GAと表記する)を適用する手法を報告するものである。文献16に続く論文である。解析上の剛性と実際の剛性の違いから、変位の実測値は解析値より小さくなることが多い。このときの比率をキャリブレーション値(CAL, 補正係数)とし、その推定誤差の影響を検討している。3径連続橋に対する数値解析例も示している。</p> $\left. \begin{aligned} y_{1m} &= CAL \times y_{1c} \\ y_{2m} &= CAL \times y_{2c} \\ y_{3m} &= CAL \times y_{3c} \end{aligned} \right\}$					
対象橋梁	特に想定せず					
使用センサ	特に想定せず					
センサ設置位置	支間中央					
分析方法	<p>1) 実際のCALが0.9のとき、60km/hで走行させたつむりの試験車量が、実際には58km/hで走行した場合などのCALの推定値を算出している。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図-4 静的変位応答波形 (TYPE-1 車両が走行した場合)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図-5 キャリブレーションと応度関数の関係 (TYPE-1 車両, 単純桁, 58km/h)</p> </div> </div> <p>遺伝的アルゴリズム:</p> <p>遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化の過程で起こる自然淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的仕組みを模倣した手順のことで、具体的には、仮想生物(個体)を想定し、コンピュータ内でその遺伝子(染色体)を0と1の2進数列で表示(本研究では一つの未知量を24ビットで表示)する。そして、遺伝的仕組みを模倣したプログラムで仮想生物(個体)を何世代にもわたって進化させ、環境に最も適合する個体を探索し、その遺伝子(染色体)から最適解を求めようとするものである。</p> <p>遺伝的アルゴリズムを適用して橋梁交通荷重を推定する場合、軸重と軸間距離(たとえば、2軸車であれば、前輪と後輪の軸重<math>P_1, P_2</math>および軸間距離<math>a_{12}</math>)から構成された一つの個体(<math>P_1, P_2</math>および<math>a_{12}</math>はそれぞれ24ビットで表示されている)から、この場合の一つの個体は24+24+24ビットで構成されているが環境に適合する程度(<math>a_{12}</math>だけ離れた軸重<math>P_1, P_2</math>によって生じる応答の解析値と実測値が一致する程度)は、次式で定義した目的関数<math>J_{GA}</math>の逆数(適応度関数)で評価される。</p> $J_{GA} = \sum_{i=1}^n  CAL \times R_{c,i} / R_{m,i} - 1.0  \quad (1)$ <p>ここに、CALはキャリブレーション値、<math>R_{c,i}</math>は解析値、<math>R_{m,i}</math>は計測された応答、nはGAで利用する計測データの個数である。</p>					
特長	パラメータを全て振って最適値を算出するより、GAを用いた方が少ない労力で最適値が求められる(と思われる)。					
課題	実橋への適用。					
その他メモ	60km/hで走行させたつむりの試験車量が、実際には58km/hで走行した場合を考える。先頭軸が15m, 20m, 25mの位置に達したと思った時刻には実際の車両はその少し手前にいることになる。計測される変位は、解析値より、さらに小さくなると思われる。よってCALの値は0.9より小さく推定されるのでは(本論分では0.92と推定されている)?					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	18	発表年	2008																																																																	
分類	WIM分析方法	WIM事例																																																																		
キーワード	影響線	車軸位置情報	Wavelet変換																																																																	
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他																																																														
特許等	特許申請	特許番号	実用新案																																																																	
文献名	影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用, 構造工学論文集, pp. 582-589 https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/54A/0/54A_0_582/_article/-char/ja/																																																																			
著者名	坂柳皓文, 佐々木栄一, チャンペン・ティラポン, 鈴木啓悟, 石川裕治, 山田均, 勝地弘																																																																			
概要	<p>本論文は、影響線を利用したWeigh-in-Motionのデータ分析手法の精度向上を目的として、影響線長の長いセンサ位置での情報から直接車両通過時間等の車両情報を取得する手法を提案した内容である。従来の方法では、影響線長の短いセンサ位置での情報を用いて車両の平均的な速度を取得して、影響線長の長いセンサ位置でのデータで車両の重量を分析するが、平均的な速度を用いているために、影響線長の長いセンサ位置における車両通過時間がずれてしまうため、Weigh-in-Motion分析結果の精度を低下させる恐れがある。本論文では、Wavelet変換を利用している。</p>																																																																			
対象橋梁	鋼床版																																																																			
使用センサ	光ファイバーひずみセンサ (FBG)																																																																			
センサ設置位置	縦リブ下面	横リブ下面																																																																		
	<p>鋼床版構造では、横リブ下面のひずみを用いて車両重量を分析するが、比較的影響線長が長く、車軸の影響が重なり合い、そのひずみ情報から、直接車軸の通過時間を取得することが困難であったが、Wavelet変換を行うことにより、その時間を取得して、車両重量分析の精度を向上させる提案である。</p>																																																																			
分析方法	 <p>図-9 横リブのひずみ波形と車軸通過時刻</p>	<p>表-1 軸間隔比の比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1軸-2軸目</th> <th>2軸-3軸目</th> <th>1軸-3軸目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>軸間隔計測値</td> <td>0.816</td> <td>0.184</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>本研究手法</td> <td>0.805</td> <td>0.195</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>縦リブ</td> <td>0.838</td> <td>0.162</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		1軸-2軸目	2軸-3軸目	1軸-3軸目	軸間隔計測値	0.816	0.184	1	本研究手法	0.805	0.195	1	縦リブ	0.838	0.162	1	<p>表-2 軸重算出結果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1軸目</th> <th>2軸目</th> <th>3軸目</th> <th>総重量</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>停止時</td> <td>6.25</td> <td>7.205</td> <td>7.205</td> <td rowspan="2">20.76(t)</td> </tr> <tr> <td>重量計測値</td> <td>6.25</td> <td colspan="2">14.41</td> </tr> <tr> <td>Weigh-In-Motion</td> <td>7.259</td> <td>9.196</td> <td>4.284</td> <td rowspan="2">20.74(t)</td> </tr> <tr> <td>本研究手法</td> <td>7.259</td> <td colspan="2">13.48</td> </tr> <tr> <td>Weigh-In-Motion</td> <td>7.16</td> <td>5.270</td> <td>5.510</td> <td rowspan="2">17.94(t)</td> </tr> <tr> <td>従来手法</td> <td>7.16</td> <td colspan="2">10.78</td> </tr> </tbody> </table>		1軸目	2軸目	3軸目	総重量	停止時	6.25	7.205	7.205	20.76(t)	重量計測値	6.25	14.41		Weigh-In-Motion	7.259	9.196	4.284	20.74(t)	本研究手法	7.259	13.48		Weigh-In-Motion	7.16	5.270	5.510	17.94(t)	従来手法	7.16	10.78		<p>表-3 車両辞書データベース例</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1-2軸間</th> <th>1-3軸間</th> <th>1-4軸間</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3軸車 大型トラック</td> <td>5870 (mm)</td> <td>7070 (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3軸車 大型ダンプ</td> <td>3200 (mm)</td> <td>4520 (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4軸車 大型トラック</td> <td>1850 (mm)</td> <td>6230 (mm)</td> <td>7430 (mm)</td> </tr> </tbody> </table>		1-2軸間	1-3軸間	1-4軸間	3軸車 大型トラック	5870 (mm)	7070 (mm)		3軸車 大型ダンプ	3200 (mm)	4520 (mm)		4軸車 大型トラック	1850 (mm)	6230 (mm)	7430 (mm)
	1軸-2軸目	2軸-3軸目	1軸-3軸目																																																																	
軸間隔計測値	0.816	0.184	1																																																																	
本研究手法	0.805	0.195	1																																																																	
縦リブ	0.838	0.162	1																																																																	
	1軸目	2軸目	3軸目	総重量																																																																
停止時	6.25	7.205	7.205	20.76(t)																																																																
重量計測値	6.25	14.41																																																																		
Weigh-In-Motion	7.259	9.196	4.284	20.74(t)																																																																
本研究手法	7.259	13.48																																																																		
Weigh-In-Motion	7.16	5.270	5.510	17.94(t)																																																																
従来手法	7.16	10.78																																																																		
	1-2軸間	1-3軸間	1-4軸間																																																																	
3軸車 大型トラック	5870 (mm)	7070 (mm)																																																																		
3軸車 大型ダンプ	3200 (mm)	4520 (mm)																																																																		
4軸車 大型トラック	1850 (mm)	6230 (mm)	7430 (mm)																																																																	
特長	Wavelet変換を用いて新しいひずみデータ処理手法を提案している。																																																																			
課題																																																																				
その他メモ																																																																				



WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	19	発表年	2004			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	自動車荷重	車両重量計測	維持管理			
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工學論文集	応用力學論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察, 土木学会第59回年次学術講演会, Vol. 59, 1-562, pp. 1121-1122, 2004.					
著者名	石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太					

<目的>  
 国総研が開発したWIMを用いて、30mの単純桁橋を試験対象に、3軸車および5軸トレーラの走行速度を変化させた場合の軸重と部材応答特性について検討している。

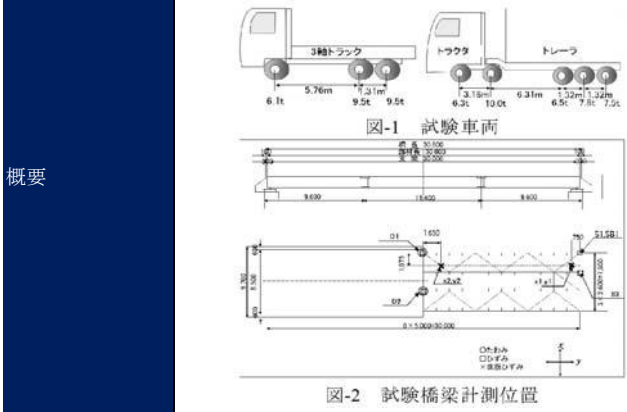


表-1 計測記号

測点記号	種類	単位
D1	G1 桁たわみ	mm
D2	G2 桁中央たわみ	mm
X1	床版ひずみ(橋軸直角方向)	μ
X2	支間中央床版ひずみ(橋軸直角方向)	μ
Y1	床版ひずみ(橋軸方向)	μ
Y2	支間中央床版ひずみ(橋軸方向)	μ
S1	G1 支承部補剛材ひずみ	μ
S2	G2 支承部補剛材ひずみ	μ
SB1	端対傾構ひずみ	μ

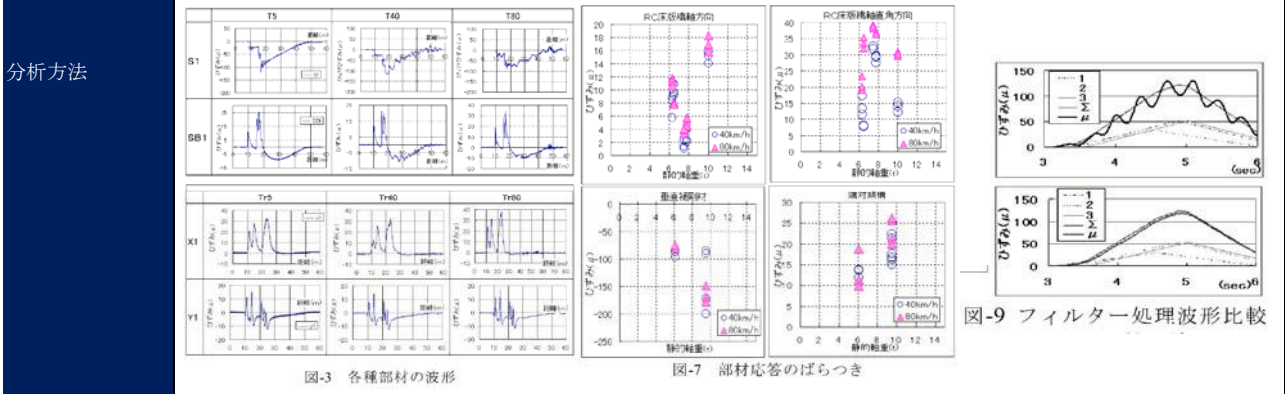
表-2 計測ケース

車両	走行速度		
	5km/h	40km/h	80km/h
3軸トラック	T-5	T-40	T-80
5軸トレーラ	TR-5	TR-40	TR-80

対象橋梁	RC床版・鋼単純鉋桁橋			
使用センサ	ひずみゲージ			
センサ設置位置	RC床版下面	垂直補剛材	端対傾構	

<車軸の位置を特定する部材の検討>  
 車両重量(軸重)を推定する部材の選定について、床版ひずみ(X1, Y1)、支承部補剛材ひずみ(S1)、端対傾構ひずみ(SB1)を比較したところ、床版の橋軸方向ひずみが各車軸に対して最も精度良く検出できることがわかった。(図-3参照)

<重量算出に用いる部材の検討>  
 影響範囲が短い部材を用いて、軸重等の諸元が既知の荷重車による応答との相関から車両重量を求める方法について検討している。本手法の場合、処理速度が早く、他車線の影響などの制約が少ないと考えられるが、直接的に軸重を算出する部材応答値が車両振動や、路面凹凸等の動的軸重の影響を受けることから、静的軸重値を精度良く推定することは困難であった。(図-7参照)また、主桁のひずみ応答による方法では、振動の影響を受けにくく、顕著な振動成分が現れた場合でも適切なフィルター処理を行うことで振動成分を除去して重量を算出できることがわかった。(図-9参照)



特長  
 計測位置に影響範囲の短い部材を数箇所選定して比較・検討している。  
 動的な振動成分に対するフィルター処理の有効性について検討している。

課題  
 車軸位置の特定においては、床版の橋軸方向ひずみ以外に着目する場合は注意が必要。  
 影響範囲が短い部材を用いた重量算出では、ばらつきが大きく、静的軸重値の推定精度は悪い。  
 動的な振動成分が顕著な部材を用いる場合は、適切なフィルター処理を実施する必要がある。

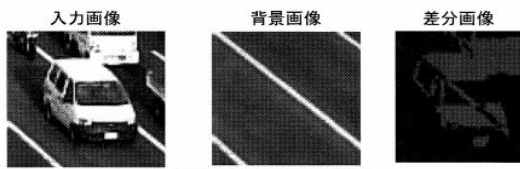
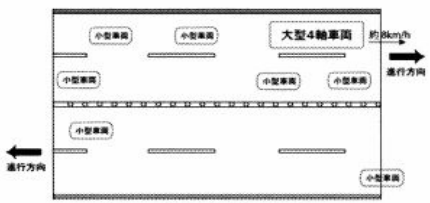
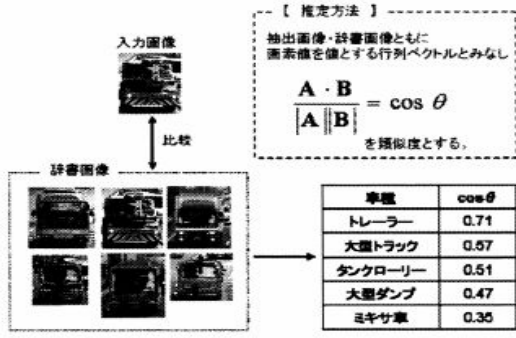
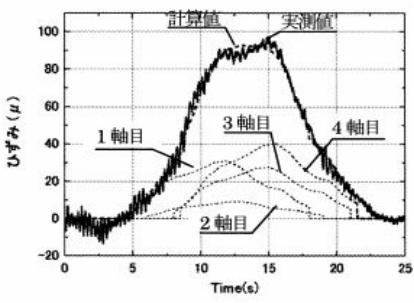
その他メモ  
 大型車の通行実態について、全国多数地点で統一的手法によって簡便に得ることを目的として開発しており、計測時の誤差の影響がなるべく少ない波形を得ることを目標としている。

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	20	発表年	2010		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	BWIM	交通荷重	垂直補剛材	積分法	3次元FEM
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		
文献名	鋼I桁橋の垂直補剛材ひずみを用いたBWIM, 土木学会論文集F, Vol. 66, pp. 251-260, 2010. 5 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejf/66/2/66_2_251/_pdf				
著者名	山口 栄輝, 内藤 靖, 松尾 一志, 松木 勇太, 高木 良久, 河村 進一				
概要	<p>本論分は、斜角を持つ2径間連続鋼鉄桁橋にBWIMを適用し、車両総重量の推定精度を検討するものである。対象とした橋梁は文献-11と同じであるが、文献-11の後に下り線が施工され、上下分離の各2車線の橋梁となった。</p> <p>現場計測：篠栗橋（九州北部地方の主要幹線道路）                  橋梁諸元（上り線）：2径間連続5主鉄桁、橋長68.5m、主桁間隔2.3m、2車線（片側歩道あり）                  橋梁諸元（下り線）：2径間連続5主鉄桁、橋長79.3m、主桁間隔2.4m～2.6m、2車線（片側歩道あり）</p> <p>文献-11では、下フランジ下面と垂直補剛材にひずみゲージを設置していた。本論分では垂直補剛材のひずみゲージのみを用いて車両総重量を推定している。同時に文献-5に示された、積分法BWIMの手法も採用しており、本論分でのBWIMをBWIM-IT (BWIM by Integration Method with Transverse Stiffeners) と呼んでいる。</p> <p>検討の結果、併走走行時に車両総重量の推定精度が低下することがあることが判明した。これは、横桁や対傾構により隣接車線の車重が垂直補剛材のひずみに影響することに起因する。3次元FEMで垂直補剛材に作用するひずみを算定すれば、BWIM-ITに使用する最適な垂直補剛材を選ぶことが可能になり、実用十分な精度で車両総重量が推定できるようになる。</p>				
対象橋梁	鉄桁	RC床版			
使用センサ	ひずみゲージ				
センサ設置位置	垂直補剛材				
分析方法	<p><math>n</math> 軸の車両が走行する際、着目点に発生するひずみ <math>g(x)</math> は一般に次式で与えられる。</p> $g(x) = \sum_{k=1}^n W_k \cdot f(x - L_k) \quad (1)$ <p>ここに、<math>x</math>は車両の第1軸（先頭車軸）の位置、<math>W_k</math>は車両の第<math>k</math>軸（<math>k</math>番目車軸）の軸重、<math>f(x)</math>は影響線関数、<math>L_k</math>は車両の第1軸と第<math>k</math>軸の距離である。<math>g(x)</math>を次のように積分して得られる<math>A</math>の値は、<math>x - g(x)</math>において、<math>x</math>軸と<math>g(x)</math>に囲まれた領域の面積であり、影響面積と呼ばれる。</p> $A = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx = \sum_{k=1}^n W_k \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = W \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad (2)$ <p>ここに、<math>W</math>は車重であり、上式より、影響面積は車重<math>W</math>に比例することが理解される。したがって、車重<math>W</math>が既知である車両の影響面積<math>A</math>を測定しておけば、任意の車重は、その影響面積<math>A</math>を算出することにより、次式で求めることができる。</p> $W = \frac{A}{A_c} \cdot W_c \quad (3)$ <p>通常、走行車両によって橋梁部に発生するひずみの測定結果は、時刻歴応答として記録される。そのため、車両が速度<math>V</math>で走行している場合、式(2)の影響面積<math>A</math>は一般に次のように計算される。</p> $A = V \int_{-\infty}^{\infty} r(t) dt \quad (4)$ <p>ここに、<math>r(t)</math>はひずみの測定値（時刻歴応答）である。式(4)から理解されるように、積分法BWIMでも、車両走行速度を把握する必要がある。</p>				
特長	変形挙動が複雑な斜橋でBWIMの精度を検討している。また、1車線当たり2本の垂直補剛材でひずみ測定を行えばよく、多元連立1次方程式を解くといった演算も不要となる。				
課題					
その他メモ	<ul style="list-style-type: none"> <li>この論文では、影響線関数を車両重量が既知である車両の実測データから求めている。</li> <li>車線内での車両の走行位置も精度に影響を及ぼすと思われる。</li> <li>車軸重量については特に述べられていない。</li> </ul>				

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

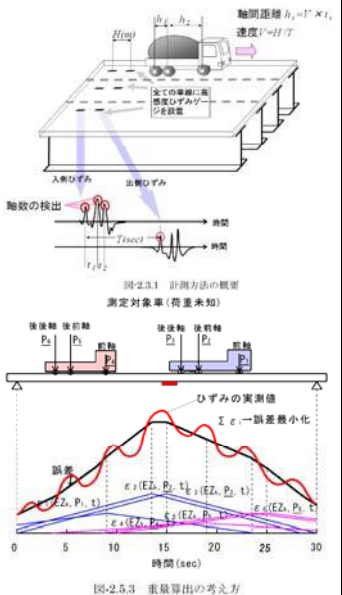
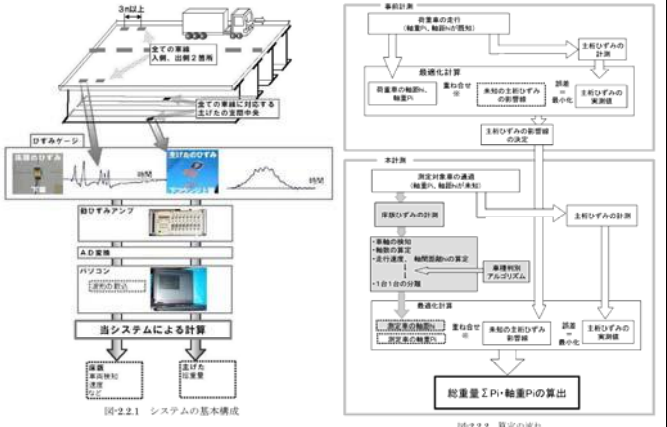
文献番号	21	発表年	2013			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	bridge weigh-in-motion	axle weight	orthotropic steel deck	fatigue damage		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼床版における通行車両軸重算出手法, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 69, No. 2 (応用力学論文集Vol. 16), pp. I_761-I_768, 2013. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/69/2/69_I_761/_pdf					
著者名	鈴木啓悟, 吉川将大					
概要	<p>&lt;目的&gt; 重量車両の軸重把握を目的として, Uリブ型の縦リブを有する鋼床版のひずみ応答を利用した軸重算出用BWIMを構築し, 停止時軸重が既知である車両3種を走行させた精度検証を実施した。</p> <p>&lt;解析手法&gt; Mosesの手法をベースとして, 影響線を最少二乗法によって誤差二乗和が最少となるように再構成ひずみを測定ひずみ履歴にカーブフィッティングさせる計算であり, 縦リブ2箇所, 横リブ1箇所の1レーンあたり計3箇所での動的なひずみ測定を行いデータ処理に用いる。具体的には, 軸重が既知の車両を走行させて算出できる影響線を利用し, 鋼床版縦リブの活荷重ひずみ応答から軸重を算出し, 横リブのひずみ応答を用いて算出軸重を補正する手法としている。なお, 横リブの活荷重ひずみが20<math>\mu</math>以上を記録した車両に対して軸重算出計算を実施。</p> <p>&lt;精度検証&gt; 鋼床版橋において, 本研究の開発手法である縦リブ2箇所, 横リブ1箇所のセンサ群を設置し, 縦リブ停止状態で軸重を計測した車両を用いた走行試験を行い, 本手法の算出精度を検証している。</p> <p>&lt;実働荷重下の軸重算出&gt; 実際の鋼床版橋において, 本研究の開発手法を適用した1週間の動的ひずみ計測を実施し, 重量車両を対象として軸重頻度分布, 特徴的な車両の軸重などを明らかにした。</p>					
対象橋梁	鋼床版橋					
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	縦リブ	横リブ				
分析方法	<p>予め軸重が既知の車両を走行させ, 縦リブと横リブの影響線を算出しておく。動ひずみ計測で得られた生データについては, 館石らの提案したFFTを利用する手法を用いて, 縦リブを8Hz以下のローパス, 横リブを4Hz以下のローパスフィルタをかけ, 縦リブデータから軸数, 軸間隔, 速度を検出し, 求めた軸数・軸間隔に合わせて軸数分の影響線を配置する。次に縦リブでBWIMを行い, 仮軸重を算出し, 仮軸重を合計して仮車両重量を算出する。一方で, 横リブBWIMにより, 車両重量を算出し, 縦リブBWIMによって求めた仮車両重量で割った係数を補正係数として, 仮軸重に掛け合わせて軸重を算出する。なお, 横リブBWIMにおいては, 他車線の影響が入りやすいため, 対向車線を通過したときの影響線も求め, 計算処理により対向車線車両の影響分を分離する。また, 動ひずみ計測の生データには温度変化に伴うひずみ値の変動量が含まれていることから, 5分毎にデータを区切り, 生データの最頻値(モード値)を求めて活荷重ひずみを抽出している。</p>					
	<p>図-4 軸重算出フロー</p>					
特長	<p>鋼床版(Uリブ型)における軸重算出用BWIMとして, 1レーンあたりのひずみ計測箇所を3に抑えたこと。小林らの手法による横リブ軸重BWIMに比べて, 標準偏差が小さく, 誤差のばらつきが小さい(概ね20%以内)。95%信頼係数の基づく, 検証実験85回による母集団誤差標準偏差の信頼限界について, 誤差平均は-3.53~-0.66%, 誤差の標準偏差が5.82~7.87%程度となり, 標本の標準偏差の小ささが本手法の信頼区間を狭めることに貢献している。</p>					
課題	<p>誤差が20%を超えた時のデータについて, 横リブBWIMの算出車両重量において, すれ違い走行による逆車線車両が影響していると考えられる。また, 縦リブのひずみ応答においても, 近接する各軸の影響が混在しており, 走行に伴う動的な効果により, 同じ車両でも走行回によって各軸の及ぼしあう影響が異なることも要因の一つである。つまり, 重量車両同士のすれ違いの状況によっては誤差が大きくなる場合がある。</p>					
その他メモ	<p>実働荷重下における1週間の軸重算定結果によると, 道路運送車両法の定める100kNをこえる軸重が多数記録され, 1793回の違反軸重の通過が認められた。さらに, 床版設計用のT荷重200kNを超える軸重(最大293.1kN)も31回の通過が認められた。</p>					

文献番号	22	発表年	2008															
分類	WIM分析方法	WIM事例																
キーワード	交通状況分析	低速	画像解析															
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他												
特許等	特許申請	特許番号	実用新案															
文献名	交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム, 応用力学論文集, Vol.11, pp.997-1004 https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/11/0/11_0_997/_article/-char/ja/																	
著者名	鈴木啓悟, 佐々木栄一, 三木千壽, 山田均, 高岡愛, 宮崎早苗																	
概要	<p>渋滞時などの低速走行状態にある車両の重量を分析する方法が確立されていないという状況を踏まえ、本論文では、低速走行状態と高速走行状態のひずみ履歴の差から交通状態を自動判別する方法を提案するとともに、低速走行状態でのWeigh-in-Motionの方法として画像処理による車両位置検出を利用したものを開発している。また、どのような車種であるのかについても車両辞書を利用して特定できるようにしている。</p>																	
対象橋梁	桁橋																	
使用センサ	溶接ひずみゲージ	光ファイバーひずみセンサ (FBG)																
センサ設置位置	主桁下フランジ																	
分析方法	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図-7 車両有無判別 (画像処理法)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図-13 対象車両と通行状況</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図-8 車種判別処理</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>車種</th> <th>cos θ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>トレーラー</td> <td>0.71</td> </tr> <tr> <td>大型トラック</td> <td>0.57</td> </tr> <tr> <td>タンクローリー</td> <td>0.51</td> </tr> <tr> <td>大型ダンプ</td> <td>0.47</td> </tr> <tr> <td>ミニバナー</td> <td>0.35</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図-14 BWIM カーブフィッティング (データ補間)</p> </div> </div>						車種	cos θ	トレーラー	0.71	大型トラック	0.57	タンクローリー	0.51	大型ダンプ	0.47	ミニバナー	0.35
車種	cos θ																	
トレーラー	0.71																	
大型トラック	0.57																	
タンクローリー	0.51																	
大型ダンプ	0.47																	
ミニバナー	0.35																	
特長																		
課題	画像処理の条件設定, タイムインターパスなど.																	
その他メモ																		



WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	23	発表年	2004		
分類	WIM分析方法	WIM事例			
キーワード	Weigh-in-motion	車両重量計測	自動車荷重	維持管理	
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外
特許等	特許申請	特許番号	実用新案		その他
文献名	道路橋の交通特性評価手法に関する研究—橋梁部材を用いた車両重量計測システム (Bridge Weigh-in-Motion System) —, 国土技術政策総合研究所資料 第188号 平成16年7月 http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0188pdf/ks0188.pdf				
著者名	玉越 隆史, 中洲 啓太, 石尾 真理, 中谷 昌一				
概要	<p>&lt;目的&gt; 全国レベルで大型車の通行実態の傾向を把握するため、橋梁部材の応答特性を実測データに基づいて分析し、簡便に均質なデータを取得できる通行車両の重量計測システムの提案。</p> <p>&lt;システムの基本構成&gt; 測定に用いる機器は、ひずみゲージ、同ひずみアンプ、パソコンなど汎用的を使用し、安価で手軽に測定ができるシステム構成である。</p> <p>&lt;算定の流れ&gt; 軸重、軸距等の諸元が既知である車両を用いて、主桁のひずみの影響線を求める事前計測を行う。それに続いて、通過が確認された車軸の軸重(未知量)と事前計測で求めた影響線(既知量)との線形和が、主桁のひずみの実応答に等しくなるとして、互いの差が最少となるように連立方程式を作成し、各車両の軸重、総重量などを求める本計測を行う。なお、車両通過の有無の検出、走行速度、軸距等の算定は、車軸の通過に対して鋭く上がった影響線形状となる床版のひずみ実応答を利用し、軸重別から一台一台の車両への分離は別途作成した車両判別アルゴリズムを使用する。</p>				
対象橋梁	コンクリート系床版・鋼単純桁橋	(連続でも可)	(箱桁形式、PCT桁形式でも可)		
使用センサ	ひずみゲージ				
センサ設置位置	床版下面	上フランジ下面	下フランジ上面		
分析方法	<p>&lt;車軸の検知&gt; 車両の検知は、図-2.3.1に示すような車軸の通過に対し、各軸毎に独立した応答変化を示す部材を用いることとし、走行方向に間隔において2カ所測定すれば、センサ間の距離と通過時間の差から走行速度や軸間距離を算出できる。</p> <p>&lt;車両重量の算出&gt; ①事前計測(影響線の算出) 橋梁を両端単純支持の一本梁とし、荷重車による主桁ひずみの影響線をあらかじめ算出する。当システムでは、主桁断面係数Z、曲げ剛性EIといった諸量は構造条件やゲージ位置等の条件に応じて固有の値が定まるとなり、荷重車の軸数がn、橋梁の車線数をmとすると、k車線に設置したひずみゲージ位置に生じるひずみε<sub>k</sub>は、各軸重P<sub>i</sub>kにより生じるひずみε<sub>i</sub>(x<sub>i</sub>)の計算値の重ね合わせで(式3)のように表すことができる。</p> <p>そして、(式4)に示すように各車線毎に荷重車の各軸分を重ね合わせたひずみの計算値ε<sub>k</sub>と荷重車走行時のひずみの実測値dkとの差が最少となるように連立方程式を作成し、ひずみの影響線を設定する。</p> <p>②本計測(一般車両の重量算出) 未知の重量P<sub>i</sub>kを荷重車を用いて求めた主桁のひずみの計算値ε<sub>k</sub>(x)との誤差sk(x)が最少となるように車線毎の道の軸重P<sub>i</sub>kを計算する。なお、計算においては、位置xの代わりに時間tを用いて行う。</p> <p>&lt;各種の処理&gt; ・ノイズの処理→不感帯により一定の値に達しない応答は対象外とする。 ・温度変化に対する処理→極大点間の中点の前後0.5秒の平均値を無載荷状態として自動0点シフトとする。 ・隣接軸の処理→隣接する車軸の重量比率は1.0~1.1の車両が90%近いことから、軸間距離1.6m以内は同一として仮定する。</p>				
特長	床版ひずみ計測結果に基づく「車両判別アルゴリズム」により車種特定し、車両毎の重量の算出精度を向上させている。ただし、次ページに示す本システムの適用条件内における算出精度の向上であることに留意する必要がある。				
課題	一般交通条件下での実測結果から、各橋梁で3%のエラーが生じている。エラー内容としては、総重量において負の値を算出しているもので、交通量の多い橋梁などにおいて、橋梁上の他の車両の影響を受けてRC床版下面で計測した波形に乱れが生じたことが原因であった。そのため留意点として、同一床版内に複数車線の高感度ひずみ計を設置しないこと、可能な限り両サイドの車輪直下に高感度ひずみ計を設置することが示されている。また、感度が良すぎるひずみ計を設置することについても、他車線の影響が大きくなり、小さすぎると車両軸を取りこぼしてしまう可能性があるため、感度の設定においては細心の注意が必要とのこと。				
その他メモ	付属資料として、国総研BWIM(2004.4版 Ver1.1)のプログラム本体がCD-Rで配布されている。				



WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	24	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	Moving Load	Weigh-In-Motion	Structural Health monitoring	Control Theory		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	制御理論を用いたWeigh-In-Motionに関する基礎的検討, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 72, No. 2 (応用力学論文集Vol. 19), I_45-I_54, 2016 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/72/2/72_I_45/_pdf					
著者名	鈴木 健吾, 丸山 収, 関屋 英彦, 小西 拓洋, 三木 千壽					
概要	<p>&lt;目的&gt; BWIMの省力化を目的として, 制御理論を用いて1自由度移動荷重-梁系における梁の応答から移動荷重の梁に対する荷重効果および車両重量を同定する手法の基礎的検討を行う。</p> <p>&lt;試案結果&gt; (1) 路面凹凸なし ・荷重効果推定結果と梁の変位応答結果の比較より, 荷重外力については精度良く推定できた。 ・車両重量推定結果と梁の変位応答結果の比較より, 測定地点を支間中央とすれば2次振動の影響を受けることなく, 梁に対して1次振動のみで荷重効果・車両重量の推定が可能であるといえる。 (2) 路面凹凸あり ・実橋梁における舗装面に生じる凹凸や伸縮継手付近に生じる段差などが生じているため, 梁に路面凹凸を考慮して同様の試算を行い, 荷重推定が有効であるか検討した。 ・路面凹凸は既往の研究を踏まえて, 比較的良好な路面凹凸を表す<math>n=2.0</math>としたパワースペクトル密度で与えた。 ・荷重効果推定結果と車両重量推定結果ともに, 路面凹凸のない場合に比べて波形の乱れが大きい様子から, 路面凹凸が梁の表面応答に影響を及ぼしていることが読み取れる。しかし, 車両重量に関しては自己ノイズの少ない区間では平均5.0%の誤差で収まっていることから, 車両重量の解析は十分可能であるといえる。</p>					
	<p>図-1 1自由度系移動荷重および梁のモデル</p>		<p>図-11 車両重量推定結果 <math>W_c</math> (<math>z_1=30\text{m}</math>)</p>		<p>図-19 車両重量推定結果 <math>W_w</math> (<math>z_1=30\text{m}</math>)</p>	
対象橋梁	梁による基礎検討段階であることから, 特に指定なし。					
使用センサ	変位計, 速度計を想定					
センサ設置位置	支間中央					
分析方法	<p>&lt;移動荷重および梁の振動方程式&gt; 1自由度振動系としてモデル化した移動荷重の梁との連成振動を図-1のような対象モデルを考える。1自由度移動荷重の鉛直変位を<math>u(t)</math>とし, 梁の<math>n</math>次振動モードによる観測点<math>z_1</math>での動的たわみを<math>y_n(z_1, t)</math>とすると, 移動荷重の振動方程式は式(1)で与えられる。また, 観測点<math>z_1</math>での梁の動的たわみを<math>y(z_1, t)</math>とすると, <math>n</math>次振動モードに対する梁の振動方程式は式(2)~(4)で与えられる。 &lt;移動荷重-梁系振動方程式の状態空間表示&gt; ここでは, 梁の3次振動モード成分までを考慮して応答計算を行い, それを観測データとして用いる。また, 移動荷重による荷重効果を推定する際に, 梁に対しては1次振動まで考慮した定式化とした。 &lt;同定問題の定式化&gt; ・式(10)において, 荷重効果の時間関数<math>d(t)</math>を精度良く同定するために式(13)のような定式化を行う。 ・式(13)に, 式(10)より与えられる拘束条件を考慮して時間方向の積分値を最小とする問題を考える。 ・式(15), (16)について, 境界条件および未定の2点境界値問題より等価な荷重効果(式(18))及び車両重量(式(19))を求める。</p> $\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\beta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d_1(z, \dots, t) \quad (9)$ $\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{X}(t) + \mathbf{G} \mathbf{d}(t) \quad (15)$ $\mathbf{X}(t) = \Phi(t) \mathbf{X}(0) + \Gamma(t) \mathbf{d}(t) \quad (10) \quad \mathbf{d}(t) = \frac{1}{2} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G}^T \lambda(t) \quad (16)$ $\mathbf{L}(\mathbf{X}(t), \mathbf{d}(t)) = (\mathbf{Y}(t) - \mathbf{C}\mathbf{X}(t))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y}(t) - \mathbf{C}\mathbf{X}(t)) + \mathbf{d}(t)^T \mathbf{W} \mathbf{d}(t) \quad (13) \quad \lambda(t) = -\mathbf{A}^T \lambda(t) - 2\mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{Y}(t) - \mathbf{C}\mathbf{X}(t)] \quad (17)$ $W_c = m_c (g - \ddot{u}(t)) \varphi_1(vt) \varphi_1(z_1) \quad (18)$ $W_w = m_w (g - \ddot{u}(t)) \quad (19)$					
特長	1自由度移動荷重-梁系において, 梁の変位・速度応答を観測データとした, 梁に対する移動荷重の荷重効果および車両重量の同定を制御理論により実施している。					
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・等価な車両重量の推定において, 3次振動までの観測データに対し1次振動のみの考慮で推定したため, 2次振動による推定値のずれが生じた。</li> <li>・路面凹凸なしの結果について, 荷重効果推定結果 (<math>W_e</math>) および車両重量推定結果 (<math>W_w</math>) の曲線に細かな上下動が見られるが, これは式(13)で与えた重み<math>R</math>と<math>W</math>の設定によるものであり, 最適な重みについての検討が不十分である。</li> </ul> <p>→あくまで断面が均一な単純梁を対象とした研究段階の検討であり, 高次振動や車両連成振動等の種々のノイズを含んだ実測値による推定制度の検証は未実施であることから, 実用段階には至っていない。</p>					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	25	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	MEMS加速度センサ	S/N比	パワースペクトル密度			
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	橋梁の活荷重応答計測に必要なS/N比に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 62A, pp. 174-184, 2016. https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/62A/0/62A_174/_pdf/-char/ja					
著者名	関屋英彦, 木村健太郎, 丸山收, 三木千壽					
概要	<p>外力に対する応答を計測するには一般的に変位計やひずみゲージが用いられているが, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進歩に伴い, 新たに MEMS加速度センサを用いた計測手法が提案されている. MEMS加速度センサは磁石等を用いることによって, 塗膜の上から取り付けが可能であり, 施工性に優れている. さらに, MEMS加速度センサは安価で小型なことから構造物のヘルスマonitoringへの活用が期待されている.</p> <p>本研究では, まず 10 種類の加速度センサを用いて静置試験を行うことによって, 同一条件下における各加速度センサの自己ノイズレベルを評価し, さらに, 各加速度センサの自己ノイズが二階積分結果に与える影響について評価を行った. 次に, 9 種類の加速度センサを用いて実橋梁実験を行い, その加速度応答を比較・検証することによって, 各加速度センサの計測精度の検証を行った. 最後に, 加振入力振動数および振幅をパラメトリックに変化させた定常加振実験を実施し, 低振動数域を精度良く測定するために必要なS/N比を明らかにした.</p>					
対象橋梁	鋼単純合成I桁橋	加振器				
使用センサ	MEMS加速度センサ					
センサ設置位置	主桁下フランジ					
分析方法	<p>本研究では, まず10種類の加速度センサを用いて同時に静置試験を行うことによって, 同一条件下における各加速度センサの自己ノイズレベルの把握を行った. 鋼板にそれぞれの加速度センサを螺子で固定し, 建物1階の床の上に静置する方法で行った.</p> <p>また, 供用中の橋梁に9種類のMEMS加速度センサと1種類のサーボ式加速度センサを主桁橋軸中央下フランジに L型鋼製治具を用いて設置した. 本橋梁は土工部から高架橋に移る箇所に位置しており, 土工部に三脚を置くことによって, 接触式変位計を用いた変位計測が可能であった. そのため, 加速度応答と変位応答の関係を検討することを目的とし, 複数の加速度センサを固定したL型鋼製治具の真下に接触式変位計を設置した.</p> <p>次に加振器を用いて, 振動数と振幅をパラメトリックに変えていき, 異なるS/N比における定常加振実験を行うことによって, MEMS 加速度センサを用いて低振動数域の変位応答を精度良く測定するために必要なS/N比を明らかにする. 静置試験の結果より, サーボ式加速度センサも一定の自己ノイズを有しており, サーボ式加速度センサの計測結果が真値になるとは限らない. したがって, 本研究では, 各加速度センサの計測結果を二階積分することによって, 変位波形を算出し, その変位波形とレーザー変位計結果の比較することで精度良く計測を行うために必要なS/N比の検証を行った.</p> <p>それぞれの加速度センサによって得られた変位応答算出結果より, 1.0Hz以下の低振動数域において, S/N比が概ね11[dB]を上回った加速度センサA, B, Hとサーボ式加速度センサの変位応答算出結果は接触式変位計結果と良い一致を示した. しかしながら, 加速度センサDは, 1.0Hz以下の低振動数域において, S/N比が概ね11[dB]を上回っているが, 変位応答算出結果は接触式変位計結果と大きく異なる結果となった. この理由は, 加速度センサ D の分解能 (745 [<math>\mu\text{m}/\text{s}^2</math>]) が低周波数帯の加速度計測 (全振幅 0.1 [mm], 周波数 0.1 [Hz]) の場合, 発生する加速度は 19.7 [<math>\mu\text{m}/\text{s}^2</math>]である.) に対して, 大き過ぎたためだと考えられる. したがって, 橋梁の加速度記録から変位応答の算出を目的とした場合, 十分小さい分解能を有する加速度センサを選定する必要がある.</p>					
特長	  <p>複数のMEMS加速度センサを同一条件で比較し, 低振動数域を精度良く測定するために必要なS/N比を明らかにし, 実橋梁における加速度記録を二階積分することによって変位応答を算出することで, その性能を評価している.</p>					
課題	橋梁の活荷重に対する計測を長期間にわたって継続的に精度良く行なうためには, 自己ノイズや分解能の仕様に加えて, 温度変化に伴う感度特性の変化や加速度センサの姿勢等によって生じるゼロ点不均衡といった長期安定性に優れた加速度センサを使用することも重要である.					
その他メモ						



WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	26	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	加速度から変位	加速度	自由振動仮定法	測定誤差	車軸検知	
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案, 土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 1, pp61-74 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/72/1/72_61/_pdf					
著者名	関屋 英彦, 横関 耕一, 木村 健太郎, 小西 拓洋, 三木 千尋					
概要	<p>本論分は、加速度記録を数値積分して変位を算出する手法を提案し、センサの測定誤差が変位応答算出結果に及ぼす影響を数式的に明らかにしたものである。</p> <p>論文では、8種類のMEMS加速度センサと、1種類のサーボ式加速度センサの静置した状態でのノイズレベルを測定している。ノイズレベルはセンサによって大きく異なり、それが加速度を数値積分して算出した変位応答の精度に大きく影響する。</p> <p>また、測定誤差の影響をより小さくする変位算出方法として自由振動仮定法を用いた手法を提案している。さらに実橋梁において実証試験を行い、提案した手法の有効性を示している。</p>					
対象橋梁	鉄桁	RC床版				
使用センサ	MEMS加速度計	サーボ式加速度計	接触式変位計			
センサ設置位置	主桁下フランジ	主桁端部垂直補剛材上部				
分析方法	<p>1) センサのノイズレベル 静置した状態でMEMS加速度センサ(A~H)とサーボ式加速度センサのノイズレベルを測定し、ノイズレベルの小さい加速度センサを特定している。 ノイズレベルの小さい(200[μG/√Hz]以下)加速度センサ: センサA, B, Cとサーボ式センサ</p> <p>2) 測定誤差が変位応答算出結果に及ぼす影響 加速度波形を積分して変位応答を算出する際、初期速度推定法(別論文で提案されている手法)と自由振動仮定法を用いた場合、測定誤差がどの程度影響するかを数式的に導いている。 初期速度推定法: <math>\sqrt{T^3 / (48 \times fs)}</math>      ここに T: 積分時間[s] 自由振動仮定法: <math>\sqrt{T^3 / (192 \times fs)}</math>      fs: サンプリング周波数[Hz] 自由振動仮定法の方が誤差の影響を小さく抑えることができるが、一方で速度の初期/末期条件に含まれる誤差、変位の末期条件に含まれる誤差が新たな誤差要因として加わる。</p> <p>3) 実橋梁における実証試験 MEMS加速度センサ(A~H)とサーボ式加速度センサを同一橋梁に設置し、初期速度推定法と自由振動仮定法で変位応答を算出している。またその結果を、接触式変位計の測定結果と比較し、精度を検証している。1)でノイズレベルの小さかったセンサの場合、接触式変位計の最大変位6.8[mm]に対して誤差が0.34[mm](5.0%)以内に収まることが示されている。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>自由振動仮定法を用いた変位算出方法</p> <p>(1) 加速度を計測する。 (2) 加速度応答のフーリエ変換結果から1.0Hz以下の成分を取り除く(活荷重による影響と直流成分を取り除く)。 (3) (2)の結果を積分する。 (4) (3)の結果を積分する。 (5) (3)、(4)を逆フーリエ変換し、活荷重の影響を除去した自由振動の速度波形と変位波形を算出する。 (6) (1)の加速度波形から、車両が進入して退出するまでを取り出し、積分して速度波形を算出する。 (7) (6)の速度波形の最初と最後の速度が、(5)の速度波形の車両進入時、退出時の速度となるように(6)の波形を調整する(線形成分を加減算する)。 (8) (7)で調整した速度波形を積分して変位波形を算出する。 (9) (8)の変位波形の最初と最後の変位が、(5)の変位波形の車両進入時、退出時の変位となるように(8)の波形を調整する(線形成分を加減算する)。</p> </div>					
特長	<ul style="list-style-type: none"> <li>・9個のセンサを同一条件で静置試験することにより、カタログ値ではないノイズレベルの比較を行っている。</li> <li>・加速度波形を積分して変位応答を算出する場合の測定誤差の与える影響について考察している。</li> <li>・測定誤差が小さい場合、手法の違いによる誤差の影響も小さくなる。</li> <li>・1.0Hz以下の静的たわみ成分と1.0Hz以上の動的たわみ成分についても変位応答算出結果が示されている。</li> </ul>					
課題	<p>自由振動仮定法は、車両通過前後における橋梁の自由振動の速度および変位の時間平均が0になるという仮定を用いている。しかし通常の道路橋では偏心走行の影響を受け、必ずしもこの仮定が成り立たないと考えられる。今後は車線ごとに変位を計測しこの問題を解決する手法を確立することを目指す。</p>					
その他メモ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車両の進入, 退出は加速度記録に25Hzのハイパスフィルタを通した波形により求めている。</li> <li>・対象橋梁は支間長35m, 総幅員18.3mの単純合成6種I桁橋。固有振動数は2.0Hz~4.0Hz。</li> </ul>					



WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	27	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例	その他			
キーワード	MEMS加速度センサ	変位計測	Portable-Weigh-In-Motion			
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	MEMS加速度センサを用いた変位計測に基づくPortable-Weigh-In-Motionシステムの提案, 土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 3, 364-379, 2016 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/72/3/72_364/_pdf">https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/72/3/72_364/_pdf</a>					
著者名	関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽					
概要	MEMSセンサによるモニタリングシステムの1つとして, 可搬型車両重量推定システム (Portable-Weigh-In-Motionシステム) の開発を行った. 具体的には, まず自由振動仮定法において重要となる車両検知の精度向上を目的とし, 車両通過時の応答の鮮鋭化の検討を行った. その上で, その鮮鋭化された応答から, 車両が橋梁に進入した瞬間および退出した瞬間の検知, 車軸数の特定, 走行車線の特定を行い, その精度について検証した. 次に, 車両検知応答を用いることによって, 全自動にて, 加速度記録から車両通過時の変位応答を算出し, 車両の種類や走行速度の違いによる変位応答算出結果の精度について検証を行った. 最後に, 加速度記録から算出した変位応答を用いたPWMシステムを構築し, 実橋梁実験において, ひずみゲージによるWIM結果と本システムの結果を比較検証することにより, 本システムの実用性を示した.					
対象橋梁	RC床版桁橋					
使用センサ	MEMS加速度センサ					
センサ設置位置	支間中央上流10m ランジ (変位応答 算出用)	端補剛材 (車両検 知用)				
分析方法	1) 車両通過時の応答の鮮鋭化 加速度の2乗の二次微分フィルタ (下式) を適用することによって, 車両通過時の応答の鮮鋭化を行っている.					
	$A_{dd} = (A_{(i)} - A_{(i-1)}) - (A_{(i+1)} - A_{(i)})$ $= -A_{(i-1)} + 2A_{(i)} - A_{(i+1)}$					
	<p>ここで, <math>A_{dd}</math>: 加速度応答の差分の変化量 <math>A_{(i)}</math>: <math>i</math>番目の加速度応答値</p>		<p>図-6 二次微分フィルタ適用結果</p>		<p>図-9 第3車走行時加速度応答</p>	
	2) 車両走行車線の特定 複数主桁の端補剛材に設置したMEMS加速度センサ (車両検知センサ) の応答は, 走行車線によって応答が異なるため, 複数主桁の応答を一括に処理することにより, 複数車線における走行車線の特定を行うことができる (図-9) .					
	3) 車軸数の判定 デザインデータブックの車両軸間距離および車両走行速度を基に, 車軸検知区間と車軸非検知区間を設定することで, 車軸の判定を可能とした (図-11) .					
4) 変位応答算出 上記で構築した車両検知システムと自由振動仮定法を用いて, 全自動にて加速度記録から変位応答を算出する (図-16) .						
5) 試験車両重量の推定 Mosesの手法をベースとし, 各軸の影響線を軸重倍し, 足し合わせたものと, 実測値の誤差二乗和が最小となるように計算することで, 各軸重を算出している. 各軸重の総和が車両重量となる. 影響線は変位の影響線を使用している (図-16) .						
						<p>図-11 車軸数判定アルゴリズム</p>
特長	MEMS加速度センサを用いて, 車両検知の精度向上策を適用することにより, 精度の高いWIMを実現している.					
課題	本論文の車両検知システムは, 一定の閾値を用いて車両通過時の応答を検知していることから, 渋滞時や低速車両走行時は, 車両通過時の応答が小さくなり, 車両検知の精度が低下することが考えられる. また, 車両が並走した場合, 車両が走行していない車線において, 車両が走行したと判定する誤検知が14台 (5%) あった. 今後, 渋滞時や低速車両走行時の車両検知精度向上および, 車両並走時の誤検知率の減少が課題である.					
その他メモ						

## §2 活荷重分析の考え方、ばらつきの要因

### 2-1 活荷重の分析方法

橋梁構造物の損傷において、設計荷重を上回る過大な車両の走行による疲労が大きく関わっていると考えられている。構造物を管理する上で、走行する自動車荷重を把握することが重要となっている。

走行中の車両荷重を計測するシステムは Weigh-in-Motion(WIM)と呼ばれ、従来は路面に軸重計を埋め込んで直接車両重量を計測していたが、装置自体が高価であり、設置やメンテナンスに多大なコストを必要とする。それに対し、橋梁を秤に見立てて、車両走行により橋梁部材に生じるひずみや変位を測定し、その応答値により間接的に荷重を推定する Bridge Weigh-in-Motion(B-WIM)が提案されている。

B-WIM による荷重推定には、Moses<sup>1)</sup>によって提案された手法がよく用いられる。Moses の解析法は、車両通過時に橋梁部材に生じるひずみと影響線を利用する。

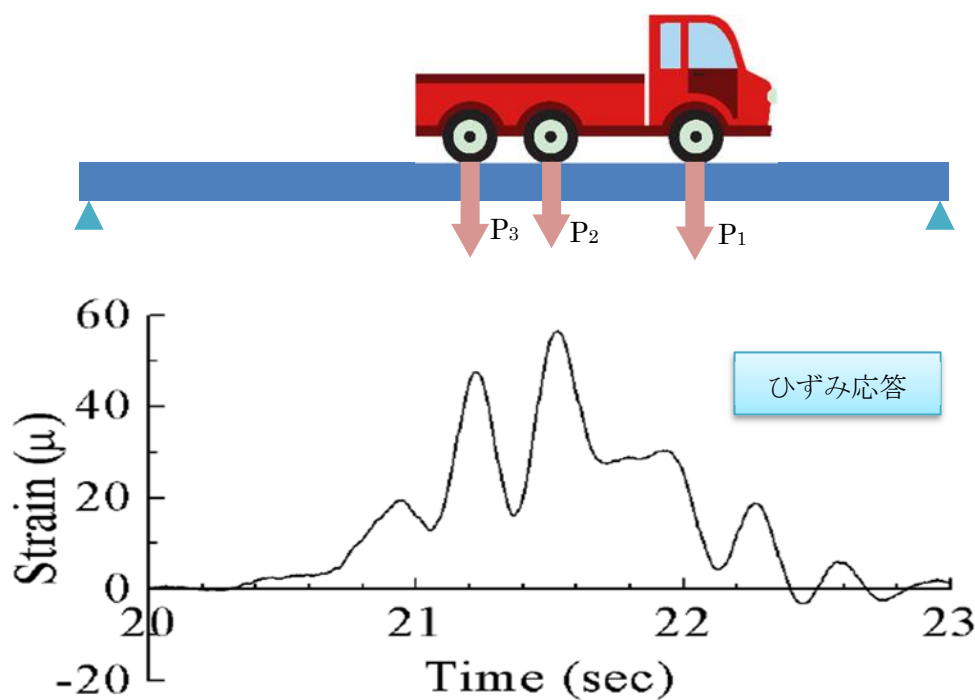


図 2-1-1 B-WIM のイメージ

影響線を利用する B-WIM の解析手順は以下のようなフローになる．ここでは、ひずみを計測する場合について説明する．

(1) 影響線の算出

対象橋梁において、軸重と軸間隔が既知の車両を走行させ、ひずみを計測する．計測データを元に影響線を求める．

(2) 速度検知

車両の速度を測定するために、対象橋梁の 2 箇所にゲージを設置する．測定データを微分することで、車軸の通過時刻を求める．

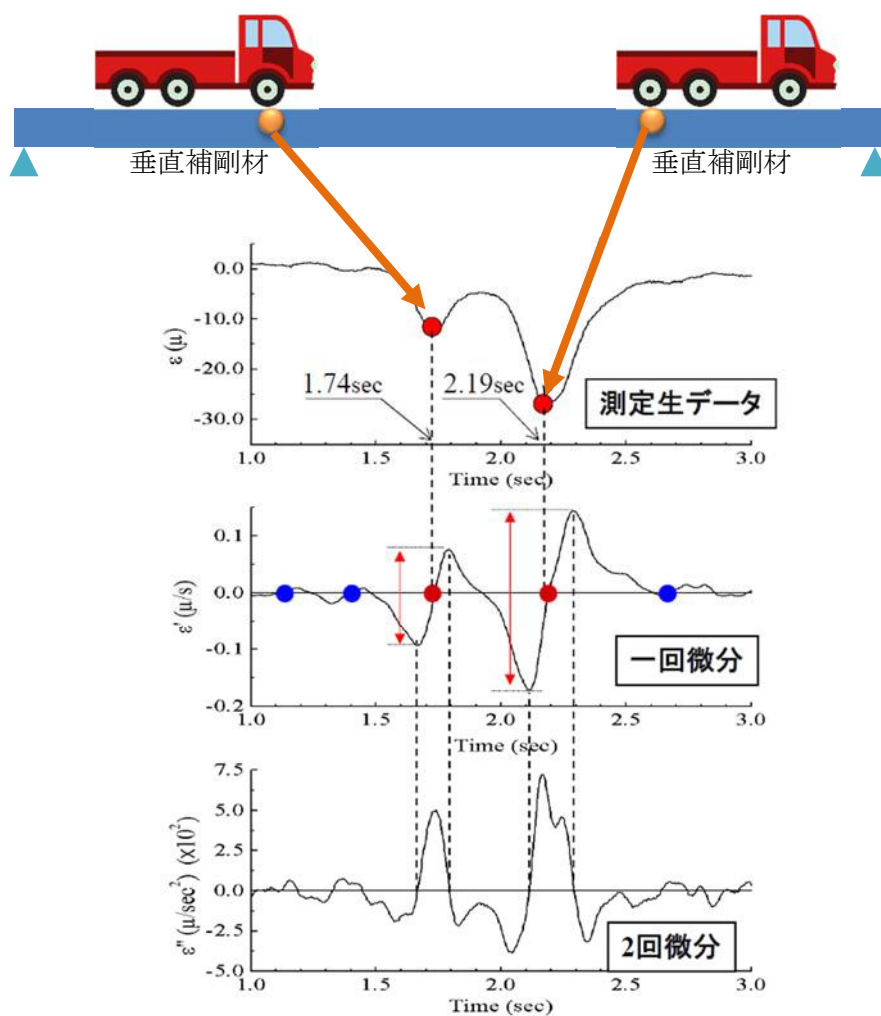


図 2-1-2 車両速度の測定方法

車両の速度は次式で求められる。

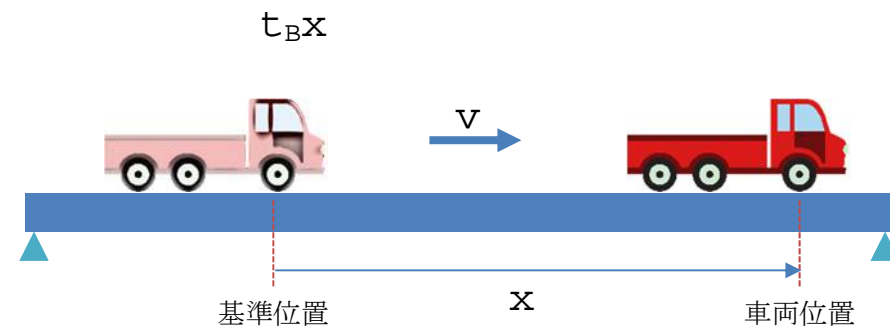
$$V = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

$\Delta L$  : ゲージ間隔

$\Delta t$  : 時間ずれ

(3) 任意時刻の位置を特定

指定時刻の車両位置は次式で求められる。



$$x = v \times (t - t_B)$$

$x$  : 車両位置 (m)

$v$  : 車両速度 (m/s)

$t_B$  : 基準位置を通過した時刻 (s)

$t$  : 時刻 (s)

(4) 軸重を決定

影響線から推定されるひずみと実測値との誤差が最小になるように、未知の軸重を決定する。

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{ax}} A_n \cdot I_{ni}$$

$$E = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_T} [\underbrace{\varepsilon_i(j\Delta t)}_{\text{推定値}} - \underbrace{\varepsilon_i^*(j\Delta t)}_{\text{実測値}}]^2 \rightarrow \text{最小化}$$

$i$  : position

$j$  : data number

$N_G$  : 測定点数

$N_T$  : データセット数

B-WIMによる解析の利点には以下のものが挙げられる。

- ・ 運転者が走行中に気付きにくい。
- ・ 路面を傷付けない。
- ・ 軸重計に比べ安価である。
- ・ 高速走行中の車両重量を計測可能である。

一方で以下のような欠点も存在するため、利用に際しては留意する必要がある。

- ・ キャリブレーション試験が必要。
- ・ 渋滞時の測定に向いていない。
- ・ 車両が連行あるいは並走している場合に精度が落ちる。
- ・ 影響線を利用する場合、影響線が変化する状況（アスファルト剛性が変化するなど）に対応できない。

#### 【参考文献】

- 1) Moses, F. : Instrumentation for Weighting Trucks-In-Motion for Highway Bridge Loads, FGWA/OH-83/001

## 2-2 影響線ベースによる分析方法のフロー

B-WIM の一般的な方法として、影響線を用いた分析方法がある。ここでは、影響線を用いた一般的なデータ分析手法のフローを概説するとともに、その手法の課題を解決するための Wavelet 変換を用いた影響線ベースのデータ分析方法について紹介する。

### (1) 一般的なデータ分析方法

影響線を用いた Weigh-in-Motion には、以下に示す 2 つのタイプのひずみデータを組み合わせて利用しているのが一般的である<sup>1)</sup>。

＜影響線ベースの Weigh-in-Motion に用いられるひずみデータ＞

タイプ①：影響線長の長いひずみ波形データ

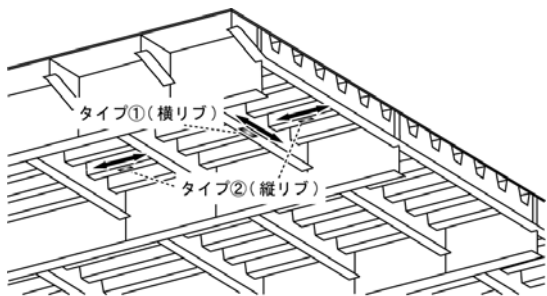
(鋼桁橋では桁下フランジ，鋼床版構造では横リブ)

タイプ②：影響線長の短いひずみ波形データ

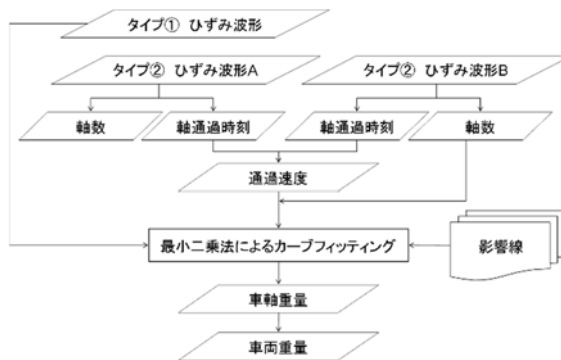
(鋼桁橋では鉛直スティフナー，鋼床版構造では縦リブ)

一般的な影響線ベースによる Weigh-in-Motion の事例として、鋼床版を有する鋼道路橋を対象とした場合のセンサ配置，データ分析の流れ等を図 2-2-1 に示す。タイプ①のデータは、橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けにくいことから、車両軸重量の逆解析に用いられているデータであるが、このタイプのデータでは、図 2-2-1 (c) に示すように車軸の通過によるひずみ波形のピークが明瞭に見られないため、車両軸重量分析に必要な車軸通過時刻をタイプ②のデータから推定している。タイプ②の方のデータでは、車軸通過に伴うひずみ波形のピークが明瞭に顕れるため(図 2-2-1 (d))、車軸数や各車軸のセンサ直上の通過時刻といった情報が取得できる。そのため、同一車線上の複数個所で計測すればデータの相関分析により測定区間内の平均的な車両速度を算出することができ、各車軸位置の通過時刻歴を推定することができる。そのうえで、推定した各車軸の位置に速度補正した影響線を配置し(図 2-2-1 (e))、実ひずみとの誤差二乗和が最小になるように、最小二乗法を用いてカーブフィッティングを行う(図 2-2-1 (f))。このカーブフィッティングは軸毎の時刻歴上に配置された影響線を軸重倍し、計算値ひずみを導いている。

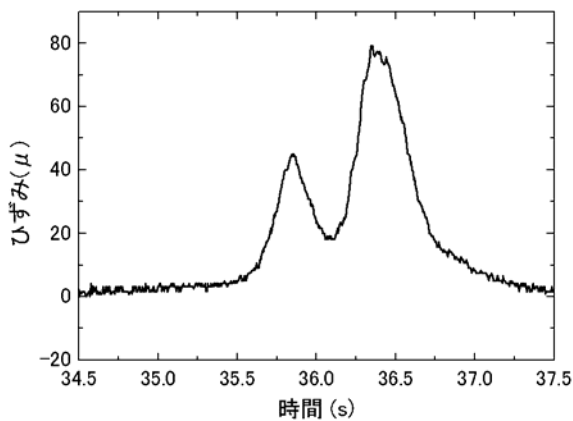
従って、上記のような当該データ分析プロセスを適用する場合、センサ配置としては、各車線について、車軸数、平均車両速度、車軸位置推定のため、タイプ②のデータ測定点が 2 箇所、車軸重量逆解析のためのタイプ①のデータ 1 箇所の最低計 3 箇所 (3 チャンネル) のひずみデータを取得することが必要である。また、この際、車軸位置の推定誤差を最小限に抑えるため、タイプ②のデータ測定点間距離が短く設定するのが望ましいとされている。これは、影響線がピークを有する形状であるため、車両重量を分析する際の車軸位置推定のわずかな誤差が車軸重量推定精度を大きく低下させる原因ともなり得ることに起因するが、根本的に走行中の速度変化には対応が難しい等の課題が指摘されているので留意が必要である。



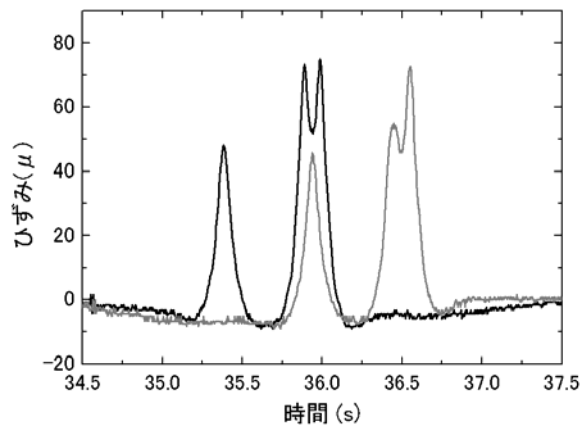
(a) センサ配置



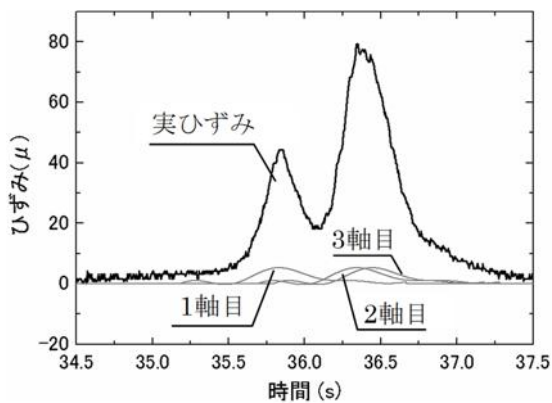
(b) 処理フロー



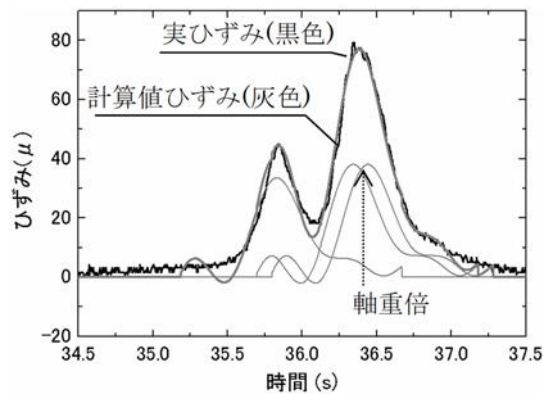
(c) タイプ①のひずみ波形(3軸車両)



(d) タイプ②のひずみ波形(3軸車両)



(e) 軸時刻歴に対する影響線の配置



(f) 最小二乗法を用いたカーブフィッティング

図 2-2-1 鋼床版を対象とした Weigh-in-Motion データプロセス

(2) Wavelet 変換によるデータ分析手法

正確な車軸位置情報分析を目的として、従来、タイプ②のデータから得ていた車軸位置、車軸数、車軸間隔、車両速度等の車両情報を、影響線長の長いデータ（タイプ①のデータ）から Wavelet 変換により直接的に取得するプロセスを導入する手法<sup>2)</sup>が提案されている。本手法は、橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けにくく、かつ、速度検出による車両軸位置の推定を行う必要もなくなるため、車軸重量分析の安定的な精度確保を図るとともに、システム上必要となるセンサ数の減少を実現することができると思われる。

図 2-2-2 に本手法のデータ分析の流れを示す。図 2-2-2 は最小チャンネル数となる 1 チャンネルでシステムを構成した場合のセンサ配置、データ分析手法を示している。

タイプ①のデータである、横リブフランジの橋軸直角方向（横リブの軸方向）でのデータに対して、Wavelet変換を行うと軸通過情報を示すピークを有する波形が得られる。例えば、図2-2-3(a)は、前1軸後2軸の3軸車両通過時の横リブフランジで得られたひずみ波形の例であるが、その波形に対して、文献20)に示したWavelet変換適用条件（逆双直交Wavelet: rbio2.4, サンプリングレート250Hzに対してスケール15に着目）を適用すると、図2-2-3(b)に示す波形が得られる。

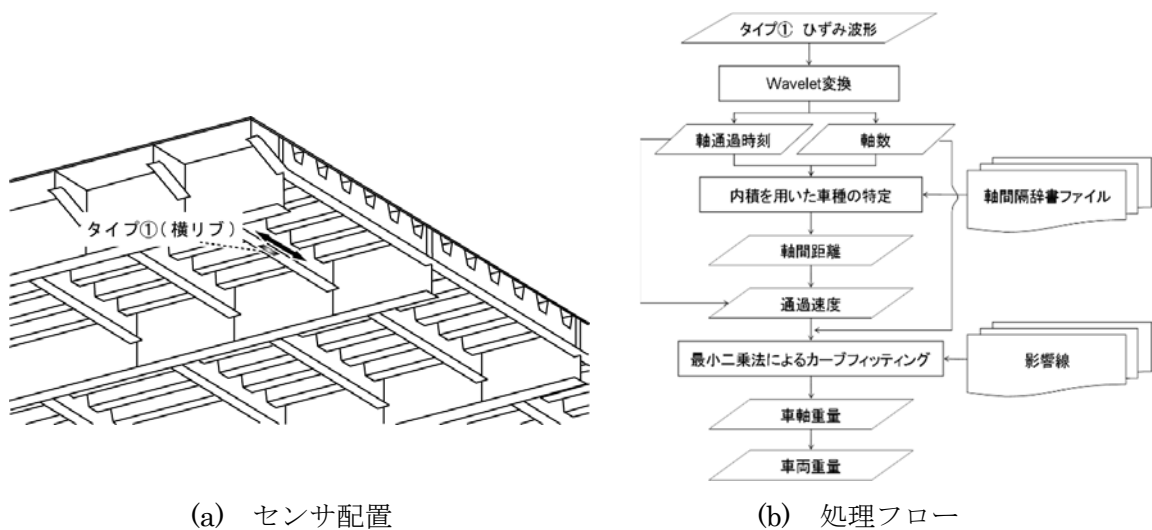


図 2-2-2 Wavelet 変換を用いた Weigh-in-Motion

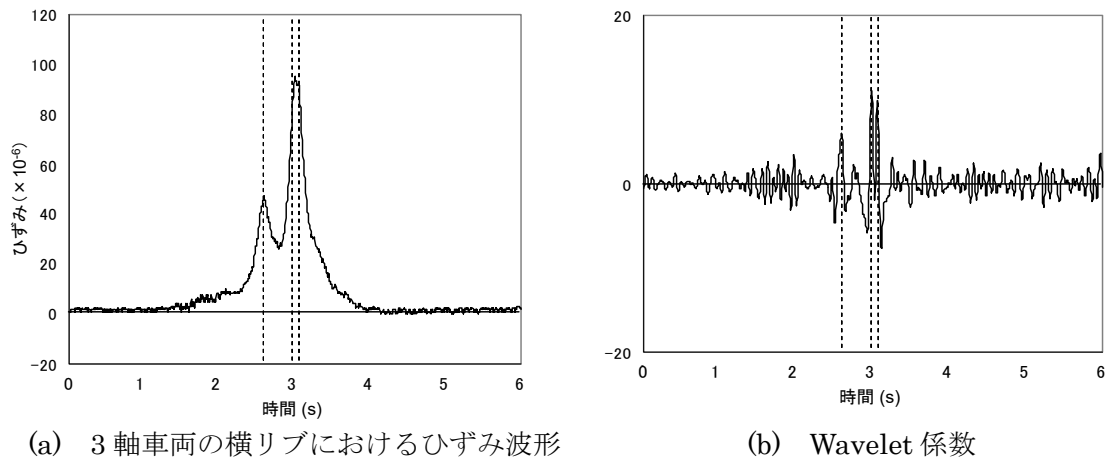


図 2-2-3 Wavelet 変換による軸通過時刻の取得



次に、図 2-2-3 (b) に示すような Wavelet 変換後の波形のピークの発生時刻を各軸の通過時刻とし、この情報から、車種、車両軸間隔、車両速度を分析する。車種判別では、タンクローリーなど我が国で走行している殆どの車種について、車軸間隔等のデータを格納した車両辞書データベース<sup>3)</sup>を利用し、さらにそのデータベースに格納された軸間距離のデータから車両軸間隔、さらには、速度を分析する。表 2-2-1 にデータベースに格納されている軸間隔情報の例を示す。データベースには 1 軸目の車軸を起点とした時の各車軸までの距離が格納されている。本事例の車両データとしては、3 軸車と 4 軸車のものとして、それぞれ 96 種、28 種の車種を格納したデータベースを利用した。横リブの実測ひずみ波形を Wavelet 変換することによって得られた各軸の通過時間から車軸間の時間の比を求め、車軸間隔の比、例えば、1 軸-2 軸間の距離と 2 軸-3 軸間の距離の比を求めている。その比は、ベクトルとして、(1 軸-2 軸間の距離, 1 軸-3 軸間の距離) というベクトルで表し、これを正規化し、単位ベクトルとする (ベクトル A) (図 2-2-4)。一方、車両辞書データベースから得られる全ての車種の軸間隔の比も同様に正規化した単位ベクトル (ベクトル B) で表す。その上で、これら 2 つのベクトルの内積を取り、その値から車種の判別を行う。求めた内積値は 2 つのベクトルのなす角  $\theta$  のコサイン値となり ((1)式)、軸位置情報と車両データベースの車軸間隔が似ていれば、0 から 1 の範囲でより 1 に近い値を示す。車両辞書ファイルに格納されている車種のうち、このコサイン値が最も大きいものを該当車種とした<sup>3)</sup>。

$$\cos\theta = \frac{A \cdot B}{|A||B|} \quad (1)$$

表 2-2-1 車両辞書データベース例

	1 - 2 軸間	1 - 3 軸間	1 - 4 軸間
A 社製 3 軸大型トラック	5870	7070	-
B 社製 3 軸大型ダンプ	3200	4520	-
B 社製 4 軸大型トラック	1850	6230	7430
C 社製 4 軸タンクローリー	3160	10650	12050

(軸間単位 : mm)

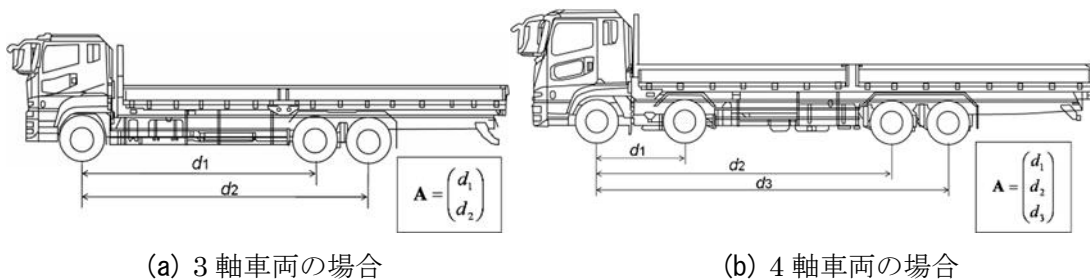


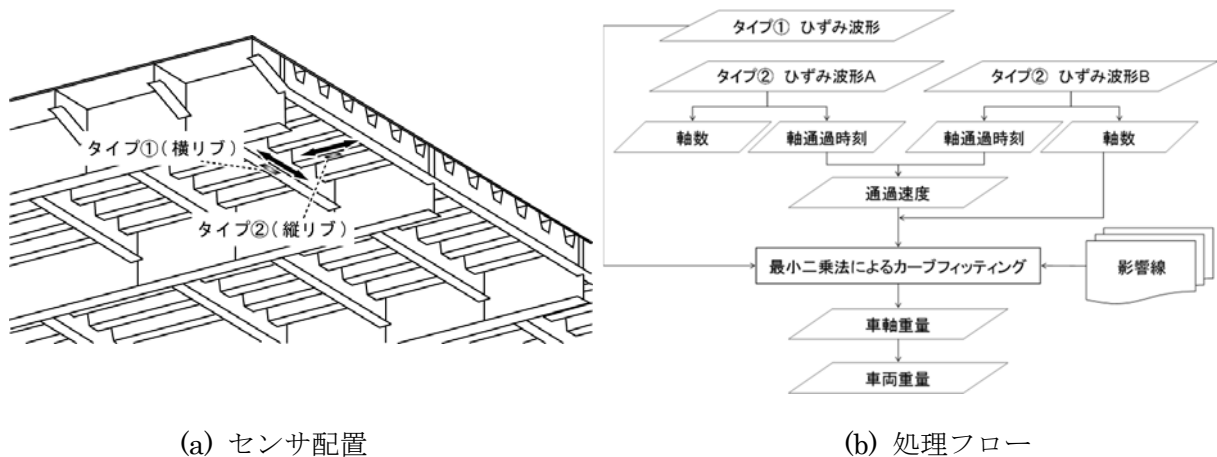
図 2-2-4 ベクトル A

さらに、このような車種判別によって車種を特定することができれば車軸間隔の距離情報を得ることができることから、横リブにおける実測ひずみ波形を Wavelet することによって得られた車軸

間距離を横リブ実測波形上での車軸の時間間隔を除すことにより車両の速度を検知することが可能になる。

従って、タイプ①のデータである、横リブフランジにおけるひずみ波形を Wavelet 変換し車両辞書ファイルとの照合を行うことにより、車軸重量を分析するために必要な情報である、車軸通過時刻（車軸位置）、影響線補正のための速度を取得することができ、すなわち、1チャンネルの情報で車軸重量、その合計である車両重量を分析することが可能である。

さらには、車両辞書ファイルを用いない場合として、図 2-2-5(a)に示すように縦リブのひずみセンサを 1 つ追加し、図 2-2-5(b)のようなデータ処理を行うことにより、2チャンネルで車軸重量、車両重量を分析可能である。すなわち、縦リブのひずみ波形に見られるピークと、横リブのひずみ波形を Wavelet 変換した波形のピークの通過時間から、速度を検出する方法である。この場合も、速度は、車両重量分析の際の影響線補正に用いるもので、横リブでの計測波形における車軸通過時刻は、Wavelet 変換した波形から得られることから、従来よりも精度向上を期待でき、かつ、チャンネル数は 3チャンネルから 2チャンネルに低減できると考えられている。



(a) センサ配置

(b) 処理フロー

図 2-2-5 車両辞書ファイルを利用しない 2チャンネルシステム

以上、これまで多く適用例のあるケースとして、ひずみ情報を用いた手法について説明しているが、Weigh-in-Motion は荷重に対する応答を用いたものであり、変位等の情報からも分析可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史: リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集 第 772 号/I-69, pp.99-111, 2004.
- 2) 坂柳皓文, 佐々木栄一, 山田均, 勝地弘: 影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.582-589, 2008.
- 3) 竹本健一, 石川裕治, 宮崎早苗, 佐々木栄一, 三木千壽: ひずみセンサと定点カメラによる車種判別手法, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), 2006.7.

## 2-3 ばらつきの要因

影響線ベースの B-WIM の精度のばらつきの要因としては、車両走行速度の評価、低速走行、走行車線の特定、車両の並走走行、センサ設置位置などが挙げられる。以下に、詳細を述べる。

### 2-3-1 車両走行速度の評価

影響線がピークを有する形状であるため、車両重量を分析する際の車軸位置推定のわずかな誤差が車軸重量推定精度を大きく低下させる原因となり得る。車軸位置推定のためには車両走行速度を適切に評価する必要がある。

影響線長の短いセンサ位置での情報を用いて車両の平均的な速度を取得して、影響線長の長いセンサ位置でのデータで車両の重量を分析する方法が一般的であるが、平均的な速度を用いているために、影響線長の長いセンサ位置における車両通過時間がずれてしまい、B-WIM 分析結果の精度を低下させる恐れがある。

この問題の解決策として、Wavelet 変換を導入して速度を適切に評価するという方法<sup>1)</sup>がある。

### 2-3-2 低速走行

渋滞時や低速車両走行時は、車両通過時の応答が小さくなり、B-WIM の精度が低下することが報告されている<sup>2)</sup>。低速走行状態での B-WIM の方法として、画像処理による車両位置検出を利用したものが開発されている<sup>3)</sup>。

### 2-3-3 車両重量

車両重量が軽いと、車両通過時の応答が小さくなり、B-WIM の精度が低下する。B-WIM は大型車を対象にすることが多いが、乗用車等の軽い車両に対しては不向きであると考えられる。

### 2-3-4 走行車線の特定

B-WIM を行うには、走行車線を特定する必要がある。一定の閾値を用いた車両通過時の応答を検知する車両検知システムでは、車両が並走した場合や、車両が走行していない車線において、車両が走行したと判定する誤検知が報告されている<sup>2)</sup>。また、車線変更を行った場合、走行車線の特定が困難であり、B-WIM の結果のばらつきに影響を与えられられる。

### 2-3-5 車両の併走走行

車両が併走して走行した場合、単独で走行した場合と応答が異なるため、B-WIM の結果のばらつきに影響を与える。この問題の解決策として、試験車両を異なる車線で走行させた影響線を求めておき、総重量から各軸重を分離して算出するなどの方法がとられている<sup>3,4)</sup>。

### 2-3-6 センサの設置位置

車両重量算出用のセンサの設置位置について、影響線長の短い部材にセンサを設置した場合、処理速度が速く、他車線の影響などの制約が少ないと考えられるが、直接的に軸重を算出する部材応答値が車両振動や、路面凹凸等の動的軸重の影響を受けることから、静的軸重値を精度よく推定すること

が困難である。影響線長の長い部材にセンサを設置した場合は、振動の影響を受けにくく、顕著な振動成分が現れた場合でも適切なフィルタ処理を行うことで、振動成分を除去して重量を算出できる  
5)。

#### 【参考文献】

- 1) 坂柳皓文, 佐々木栄一, チャンペン・ティーラポン, 鈴木啓悟, 石川裕治, 山田均, 勝地弘 : 影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.582-589, 2008.
- 2) 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽 : MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 3, pp.364-379, 2016.
- 3) 鈴木啓悟, 佐々木栄一, 三木千壽, 山田均, 高岡愛, 宮崎早苗 : 交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム, 応用力学論文集 , Vol.11, pp.997-1004, 2008.
- 4) 石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太 : 影響線の重ね合わせを用いた WIM システムについて, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部, Vol.57, pp. 1447-1448, 2002.
- 5) 石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太 : 大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59, 1-562, pp1121-1122, 2004.

### §3 加速度計測に基づく変位ベースのB-WIM手法に関する実験的検討

ここでは、簡易な計測によるB-WIM手法として、加速度計測に基づく変位ベースのB-WIM手法の構築のため、実橋梁における計測を行い、実験的な検討を行った。これまでも加速度計測に基づく変位ベースのB-WIM手法の検討がなされているが、低速走行が主となる一般道であり、かつ、連続橋梁というこれまでもB-WIMでは精度確保が容易でなかったケースを対象に検討を行うこととした。

以下に、その検討内容を述べる。まず、実験の概要を述べるとともに加速度計測結果（データ）からの変位への変換手法に関する検討を行い、求められた変位挙動の特徴を述べるとともに、変位ベースのB-WIM手法の構築について述べる。また、これまで基本的にMATLABによるコーディングを主としてきたが、分析をより汎用的にするため、加速度計測後の一連の計算プロセスをエクセルで行うことができるようエクセルでの分析を試みた。

#### 3-1 実験の概要

##### 3-1-1 対象橋梁

対象橋梁は、横浜市内の鋼道路橋であり、1973年に完成した2径間連続鋼床版箱桁中路式の橋梁である。片側1車線の計2車線の対面交通となっている。図3-1-1から3-1-3に対象橋梁の図面を示す。対象橋梁は両サイドエキスパンションジョイント、支承部は両端がそれぞれ可動、固定となり、中間支点は回転自由の状況であった。図3-1-4に対象橋梁の全体写真、図3-1-5にエキスパンションジョイントの状況、図3-1-6に支承の状況を示す。

##### 3-1-2 現場計測

対象橋梁を対象とした現場計測は、平成28年9月6日11:12~20:06に実施した。計測に当たって外形100×80×50mmの無線加速度計を片側11台ずつ計22台桁の上面に設置した。またビデオカメラを1台設置し、通行車両の確認のため、撮影を行った。加速度計はMEMS加速度計であり、サンプリング周波数100Hzでの計測となっている。使用した加速度計の写真を図3-1-7に、仕様を表3-1-1に示す。また図3-1-8にセンサ設置位置を示す。

現場計測においては、キャリブレーションのため、図3-1-9に示す軸重(表3-1-2)が既知の試験車両の走行試験を行った。走行試験の状況を図3-1-10に示す。

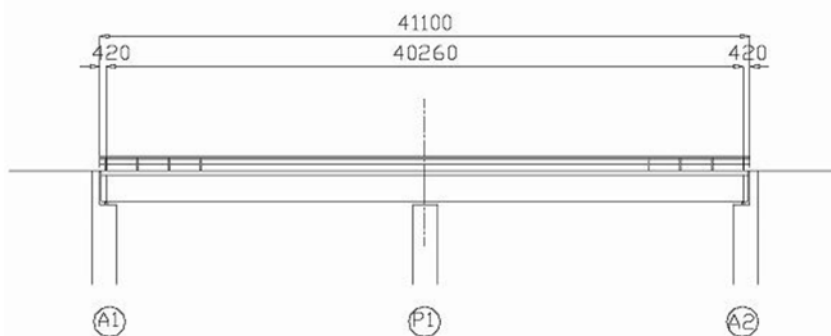


図3-1-1 対象橋梁側面図

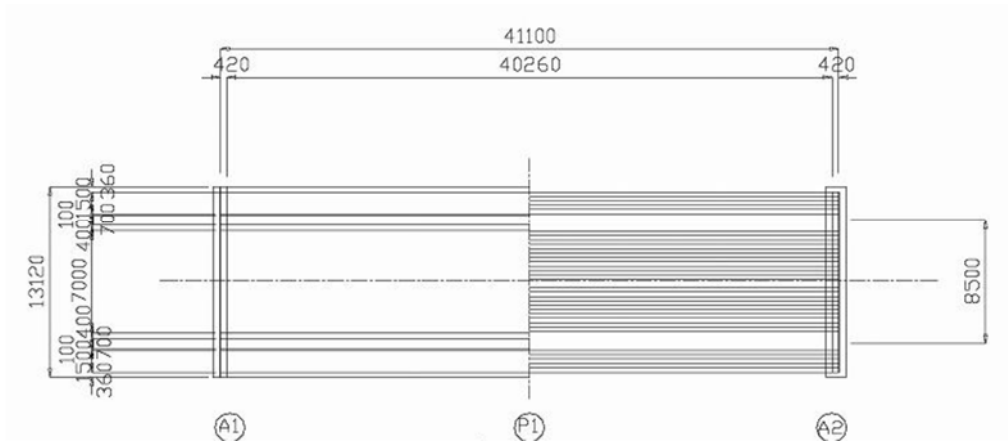


図 3-1-2 対象橋梁平面図

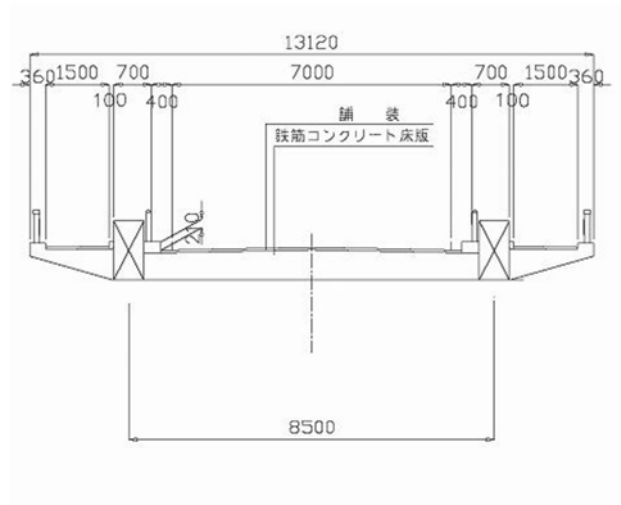


図 3-1-3 対象橋梁断面図



図 3-1-4 対象橋梁の外観写真



図 3-1-5 対象橋梁のエキスパンジョイントの状況



(a) 固定支承



(b) 可動支承



(c) 中間支点

図 3-1-6 対象橋梁の支承の状況

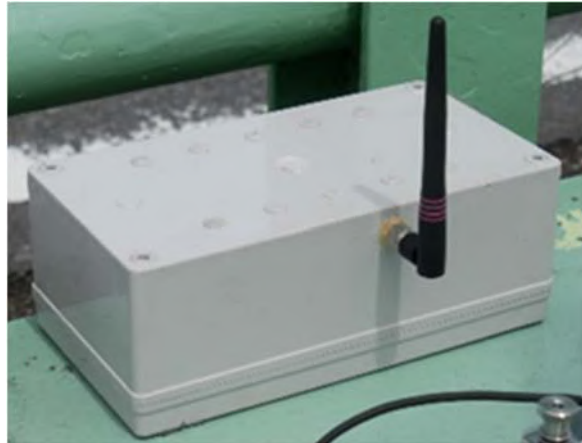


図 3-1-7 加速度計 (加速度センサノード)

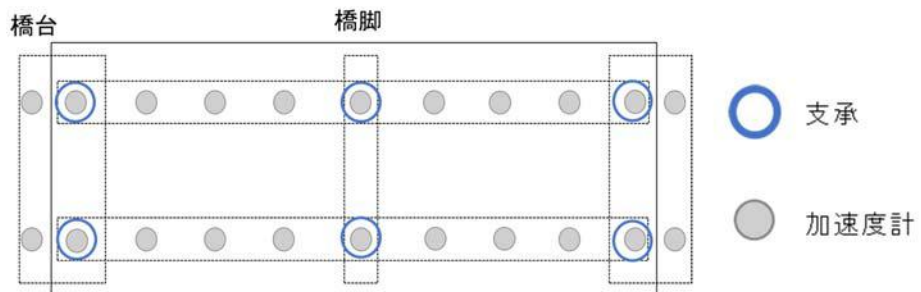


図 3-1-8 加速度計設置位置

表 3-1-1 加速度センサの仕様

センサタイプ	型番	検出範囲 [G]	周波数帯域 [Hz]	サンプリング 周波数[Hz]	分解能 [ $\mu$ G/LSB]	ノイズレベル [ $\mu$ G/ $\sqrt$ Hz]
MEMS	m-a351	$\pm 5.0$	10	100	0.06	0.5

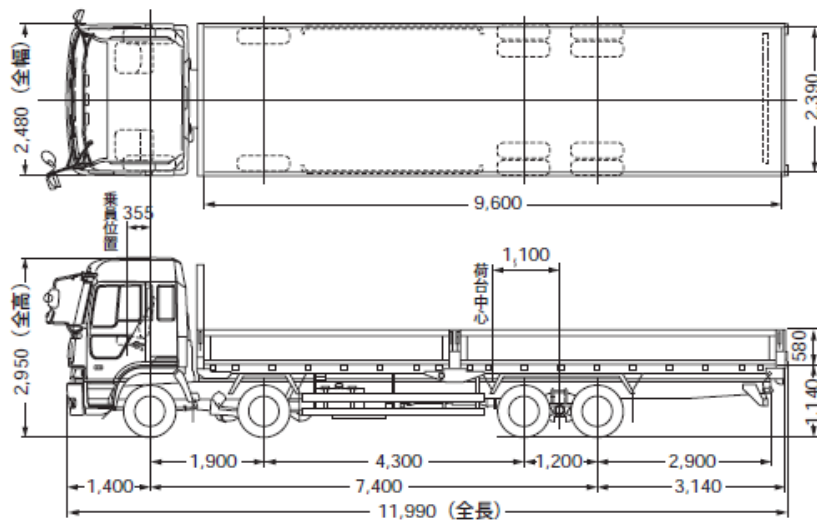


図 3-1-9 使用した試験車両





図 3-1-10 試験車両による走行試験の状況の例

表 3-1-2 試験車重量

前2軸重量 (tonf)	8040
後2軸重量 (tonf)	10910
総重量 (tonf)	19710

### 3-2 加速度計測結果からの変位への変換手法の検討

橋梁に設置した加速度計から変位を算出するためには、加速度計で得られた加速度データを積分する必要がある。しかしながら加速度データを積分する際にノイズが含まれている場合、そのまま積分するだけでは正しい変位の値を求めることができない。また、橋梁における変位には車両が通過した際の活荷重によって生じる強制振動による変位と、橋梁の自由振動による変位がある。本研究では車両重量分析を目的としており、ノイズを取り除き、活荷重によって生じる強制振動を抽出する必要がある。ここでは、加速度パワースペクトルに着目したノイズ除去周波数帯の評価、強制振動による変位算出の概要について記述する。

#### 3-2-1 加速度パワースペクトルによるノイズ除去周波数帯の評価

加速度データを積分し変位を算出する方法として主に、数値積分、周波数積分、ウェーブレット変換<sup>2)</sup>を用いたものなどがある。また、橋梁の挙動における境界条件を利用した変位分析方法<sup>3),4)</sup>や傾斜情報を利用した変位分析方法も提案されている<sup>5)</sup>。本検討ではセンサの性能を考慮して、計算が容易な数値積分を用いて変位算出を行うこととした。数値積分を行う際には、低周波数の影響が大きく出るためデータをフィルタリングする必要がある。

図 3-2-1 に試験車両が通過した際の支間中央部(図 3-2-2)の加速度データの例を示す。このデータの変位を求めるにあたり、フィルタリングを行わず数値積分を行うと、図 3-2-3 のように発散してしまい正しい変位の値を求められない。そこで、図 3-2-4 に示す計測全時間の加速度のパワースペクトルの低周波数帯を拡大した図 3-2-5 に基づき、ノイズ除去のための低周波数を決定することとした。ここで、加速度のパワースペクトルを算出する際、本検討では窓関数としてハン窓を用い、データ長を 1000 秒、オーバーラップ長を 900 秒とした。低周波領域を拡大した図 3-2-5 から、0.1Hz 以下の周波数帯でハイパスを用いることが適当であると考えられたため、ここでは、0.03Hz、0.05Hz、0.1Hz の 3 つの周波数帯でハイパスフィルタを用いたときの変位の値を比較し、フィルタリングをする周波数を決定することとした。フィルタの種類は時間的な位相差が生じない FIR フィルタ<sup>6)</sup>を採用した。表 3-2-1 に各周波数のフィルタ次数、図 3-2-6 に上記の 3 つの周波数帯でフィルタリングを用いたときの変位結果を示す。図 3-2-6 から 0.1Hz でハイパスを用いると 0.1Hz の波の影響が強くなるのがわかる。0.03Hz と 0.05Hz でハイパスを用いたときの結果は大きくは変わらないが、切り取る周波数帯は可能な限り少ないほうが真値に近づくと考えられるため、本検討では、0.03Hz のハイパスを用いることとした。

#### 3-2-2 強制振動変位の算出

上記により、橋梁における変位を算出したが、橋梁における変位には活荷重によって生じる強制振動による変位と、橋梁の自由振動による変位があるが、本検討は、B-WIM 手法による車両重量分析を目的としているため、強制振動による変位を対象としており、その抽出が必要となる。強制振動の抽出はノイズの除去と同様、加速度のパワースペクトルから行うこととした。図 3-2-7 に 0Hz~3Hz を拡大したパワースペクトルを示す。図 3-2-7 から 0~1Hz 付近にパワースペクトルの山があり、この周波数帯が走行車両による強制振動による成分であると考えられる。そこで、ノイズ除去と強制振動の抽出を考慮して 0.03Hz~1.0Hz のバンドパスを用いることによって強制振動の変位の算出を

行った。図 3-2-8 に 0.03Hz のハイパスを用いた変位，0.03Hz~1.0Hz のバンドパスを用いた変位を重ね合わせた結果，表 3-2-2 にフィルタ次数，図 3-2-9 にフィルタリングを示す。図 3-2-9 から橋梁の自由振動の成分が取り除かれ，強制振動の成分が抽出できていることがわかる。このバンドパスを用いた，試験車が通過した付近の 5 分間の変位波形を図 3-2-10 に示す。150 秒付近で試験車両が通過しており，110 秒付近で試験車通過時と同じような小さな波形が確認できる。これは普通乗用車が単独で橋を通過したときの波形であり，試験車以外の車両が通過した場合でも橋梁の鉛直変位の時刻歴波形を確認できていることを示す。このバンドパスをすべての加速度センサから得られた計測データに用い，変位を算出することとした。

以上，ここでは加速度パワースペクトルに注目したノイズ除去周波数帯の評価，強制振動による変位算出の概要について記述した。加速度パワースペクトルから，ノイズ除去のために 0.1Hz 以下でハイパスを用いることが適当だと考えられた。0.03Hz，0.05Hz，0.1Hz の 3 つのハイパスを用い，変位を算出した結果，0.03Hz のハイパスを用い変位を算出することでノイズが除去できると考えられた。また，加速度のパワースペクトルから 0~1.0Hz 付近にパワースペクトルの山があり，この周波数帯が走行車両による強制振動だと考えられるため，ノイズ除去も考慮して，0.03Hz~1.0Hz のバンドパスを用いることでノイズを除去し，強制振動による変位を算出できることを示した。

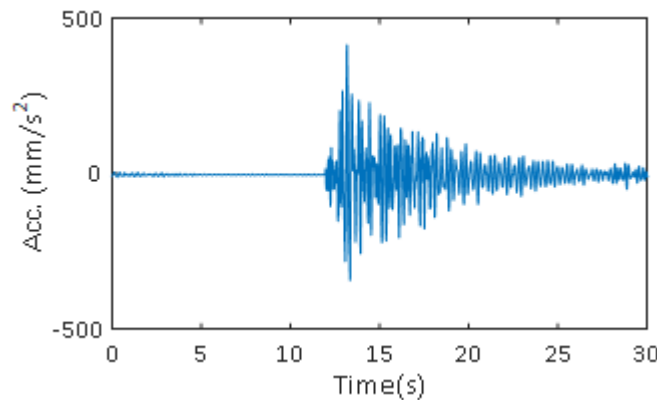


図 3-2-1 試験車両が通過時の加速度波形

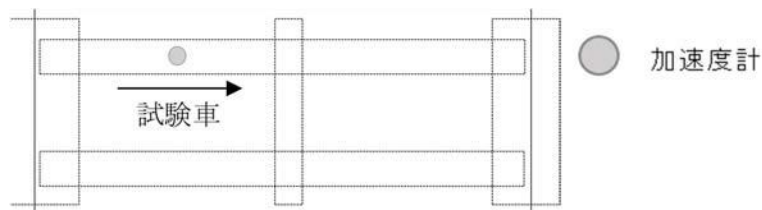


図 3-1-2 加速度パワースペクトル算出対象とした加速度計位置

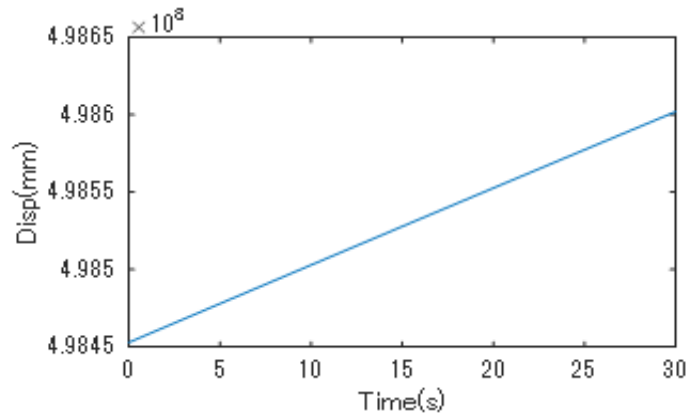


図 3-2-3 フィルタを適用せず算出した変位履歴の例

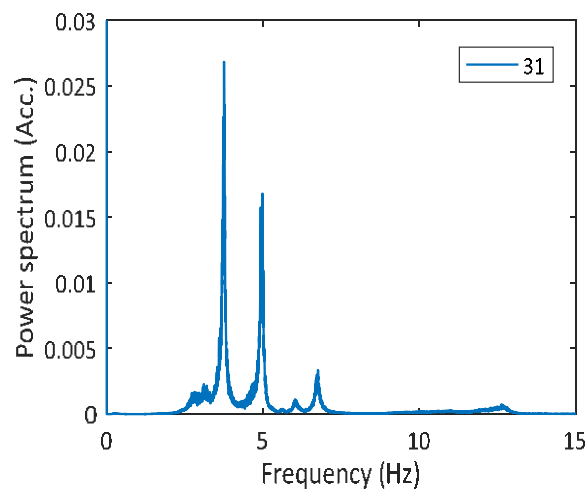


図 3-2-4 計測全時間のパワースペクトル

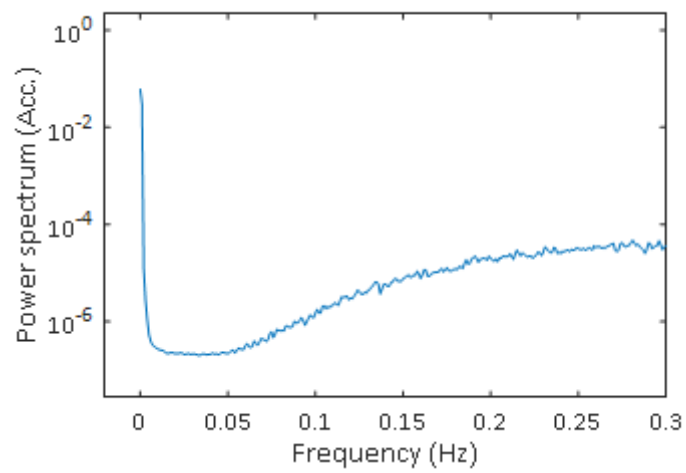


図 3-2-5 計測全時間のパワースペクトル (0.3Hz 以下)

表 3-2-1 フィルタ次数

Cut Frequency [Hz]	Filter Type	Filter Order [Times]
0.03	FIR high pass	50000
0.05		50000
0.1		10000

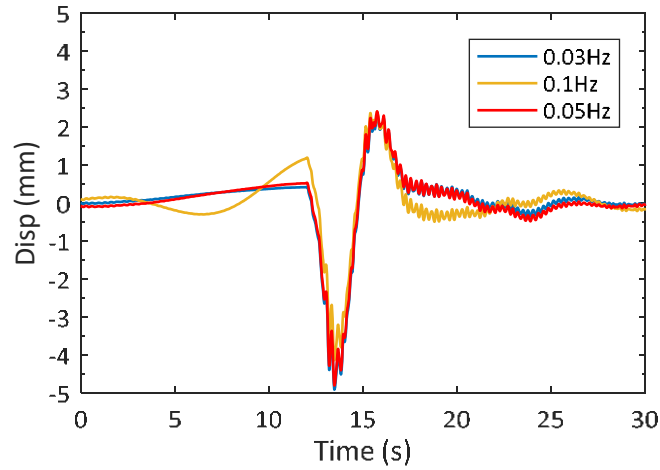


図 3-2-6 フィルタを適用して算出した変位履歴の例

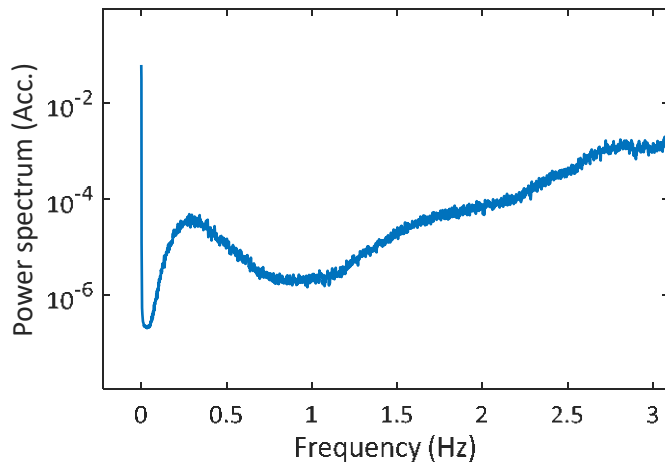


図 3-2-7 計測全時間のパワースペクトル (3Hz 以下)

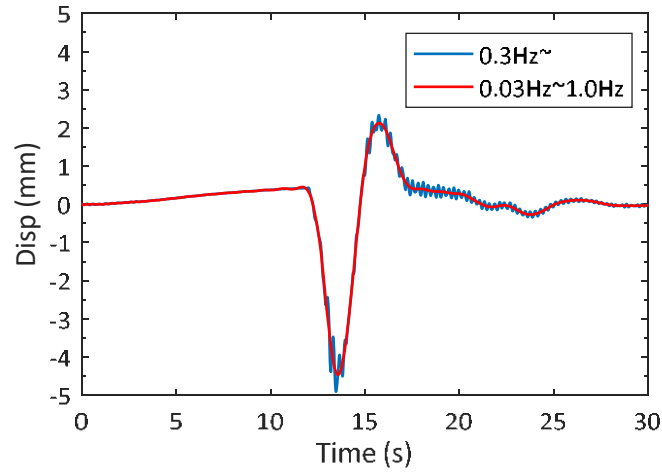


図 3-2-8 バンドパスフィルタを用いて算出した変位履歴の例

表 3-2-2 フィルタ次数

Pass Frequency [Hz]	Filter Type	Filter Order [Times]
0.03-0.1	FIR high pass	50000

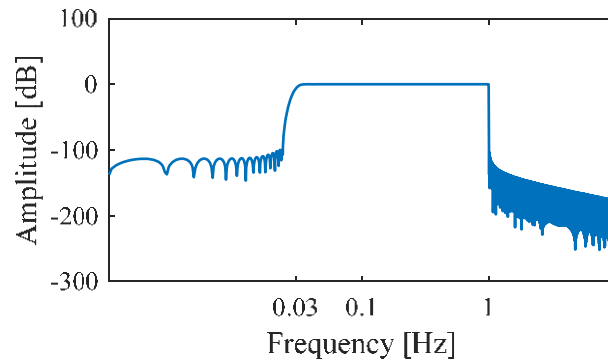


図 3-2-9 フィルタリング

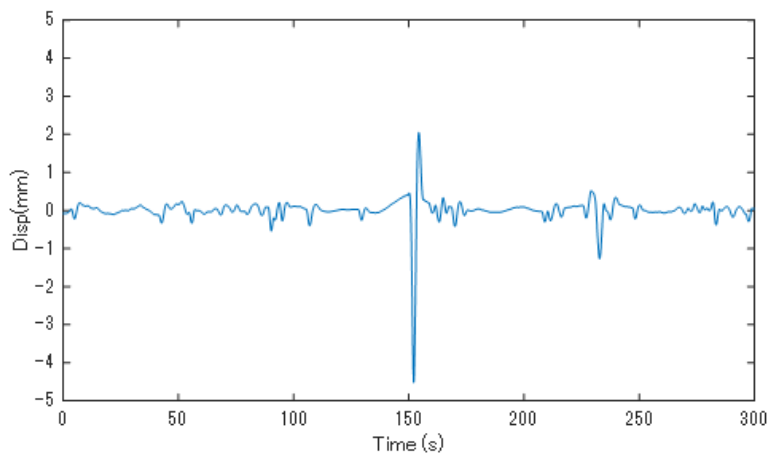


図 3-2-10 連続的な変位算出結果の例 (5 分間)

### 3-3 変位挙動に関するまとめ

3-2 で示した 2 階積分による加速度計測データからの変位分析を、設置した複数の加速度計の計測データに適用し、車両通行に伴う橋梁の変位挙動について検討した。計測は一般車が走行している状態も含めて連続的に行っているが、ここでは、重量既知の試験車両が通過した際の各加速度計位置での変位算出結果の例を示し、橋梁の変位挙動について示す。なお、ここで示す時刻歴は、いずれも縦軸が変位 (mm)、横軸が時間 (秒) で示されている。

図 3-3-1 は、試験車両が通過した側の桁に設置された加速度計のデータを用いて算出した変位履歴の例である。連続桁であり、変位が正 (上方)、負 (下方) に入れ替わっている様子がいずれの変位履歴にも見ることができる。最初に通過する側の径間に設置した加速度計位置ではまず下方に変位が生じ、2 つ目の径間を試験車両が通過した際に、逆に上方に変位が生じている。逆に、2 つ目の径間に設置された加速度計位置では、当然ながらその逆の挙動となっている。このように、連続橋の挙動を加速度計から算出した変位履歴からも確認することができる。なお、図 3-3-1 においては、図中の②と③位置の間にも加速度計が設置されていたが、計測の不具合によりデータが取得できていないため、この図からその位置の結果が抜けている。

図 3-3-2 に図 3-3-1 と同じ時間帯で、反対車線側のセンサで取得した変位履歴を示すが、図 3-3-1 同様の変位挙動を確認できる。また、図 3-3-1 及び図 3-3-2 のケースで試験車両が走行した車線とは異なるもう一方の車線を通り抜けた際の変位挙動を図 3-3-3 及び図 3-3-4 に示す。他方の車線を通り抜けた場合も連続桁における変位挙動を捉えられていることがわかる。変位履歴を用いた B-WIM 手法の構築においては、どの位置の加速度計のデータも活用可能である。

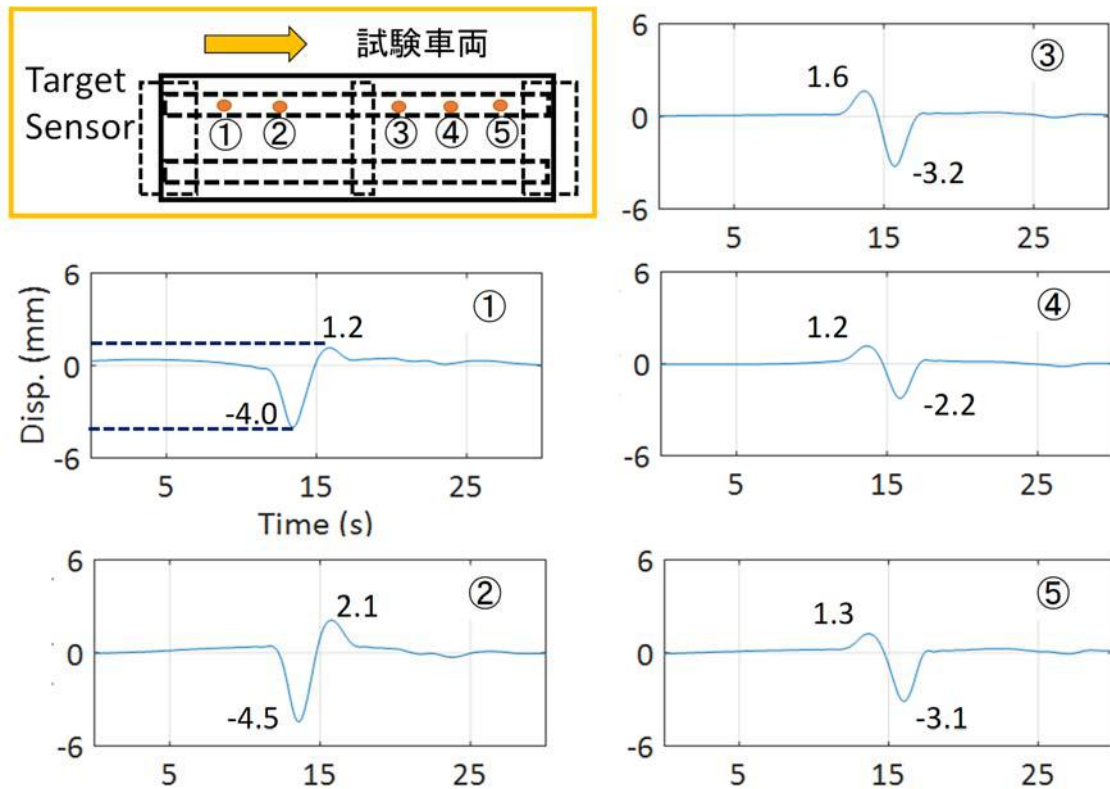


図 3-3-1 試験車両が通過した際の変位挙動の例 (車両通過側センサ)



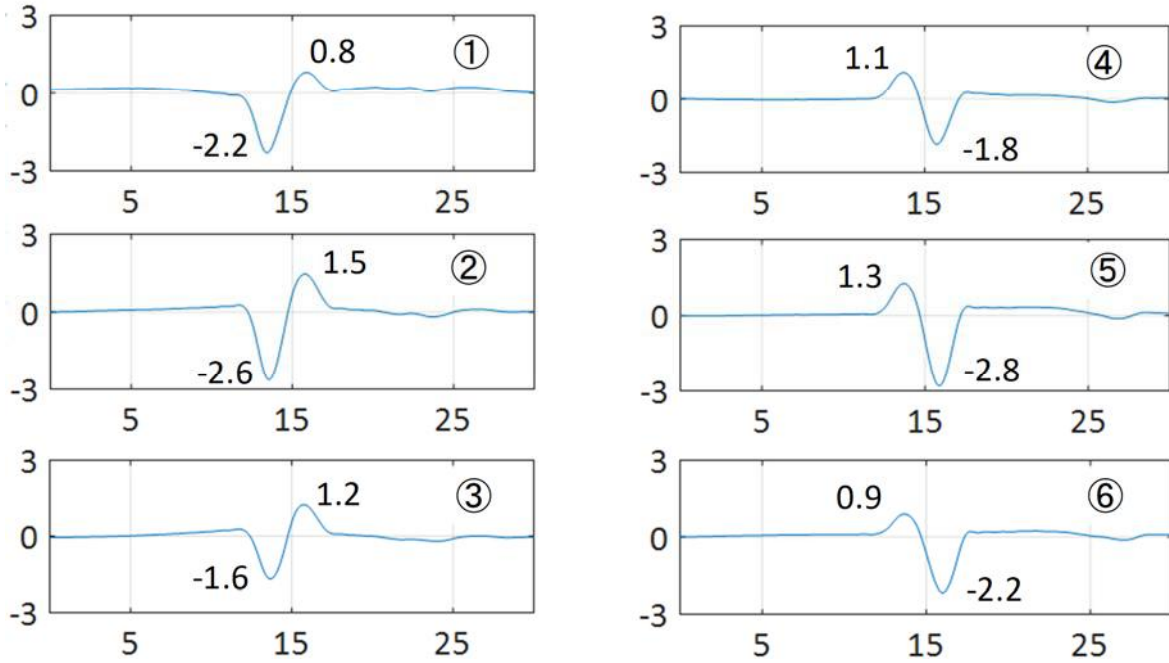
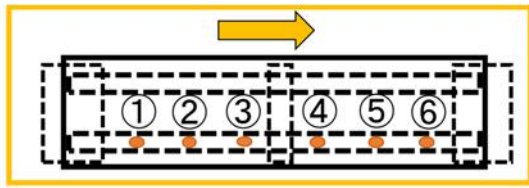


図 3-3-2 試験車両が通過した際の変位挙動の例（車両通過の反対車線側センサ）

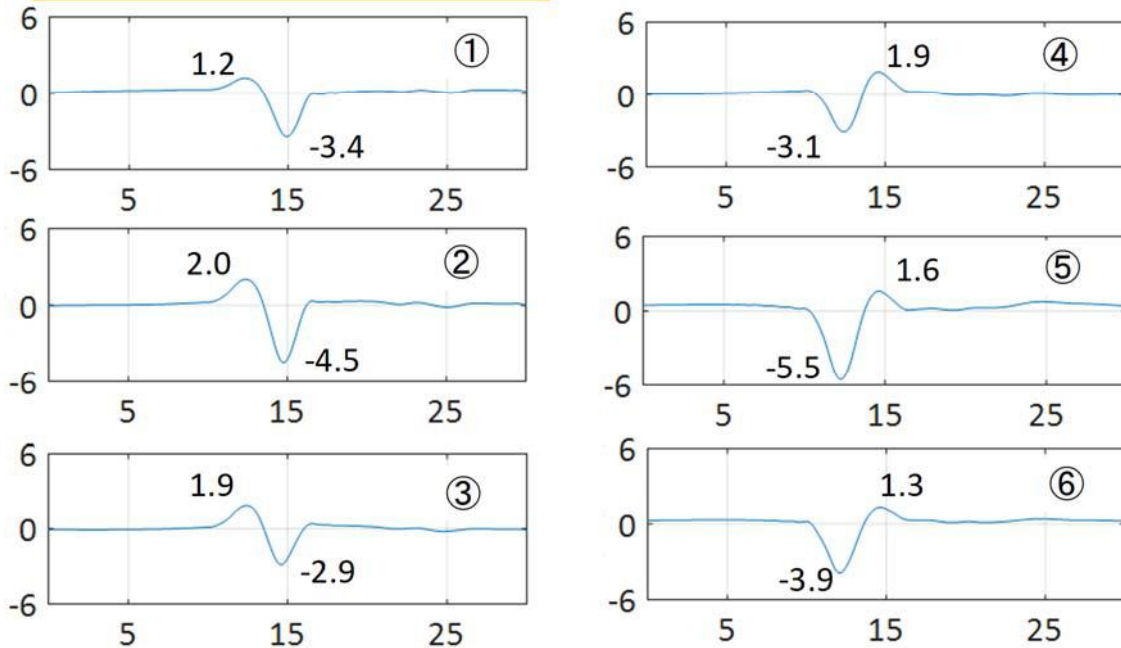
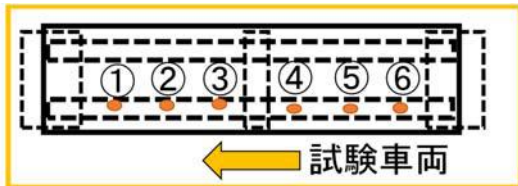


図 3-3-3 試験車両が通過した際の変位挙動の例（他方の車線通過時，走行車線側センサ）

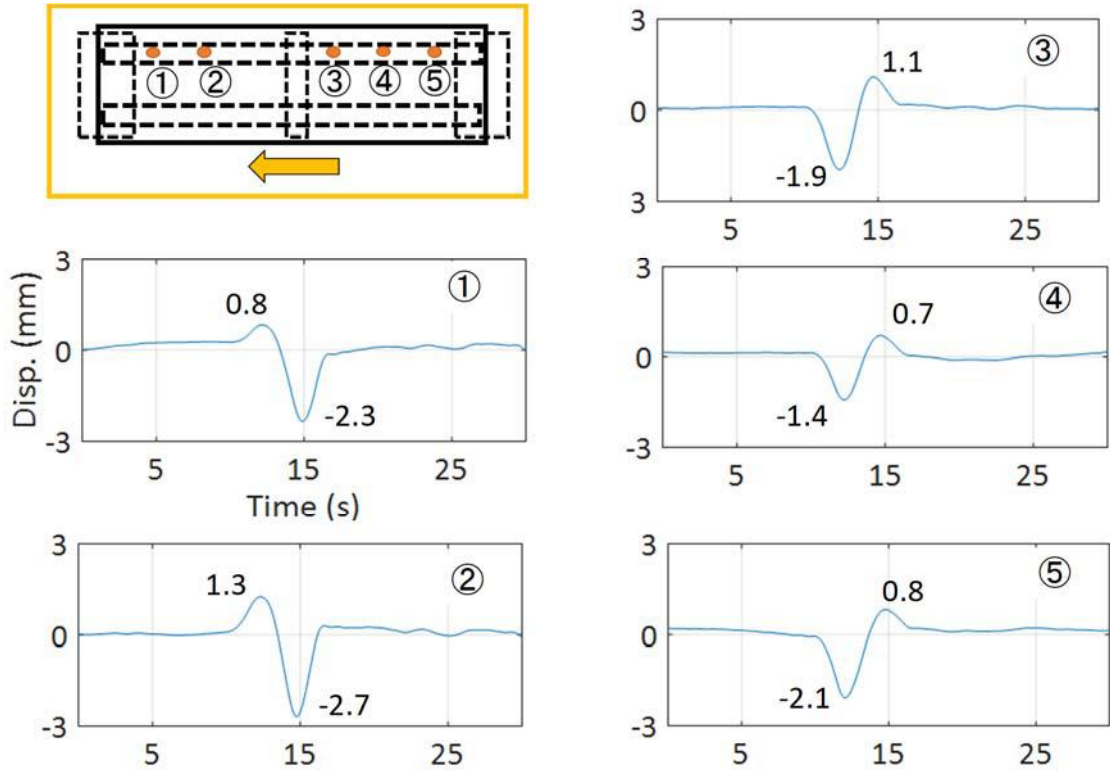


図 3-3-4 試験車両が通過した際の変位挙動の例 (他方の車線通過時, 反対車線側センサ)

### 3-4 変位ベースのB-WIMに関する検討

ここでは、3-2に示した変位算出方法により加速度計のデータから求めた変位に基づき、車両の重量を分析するB-WIMについて検討する。ここでは、影響線を用いた手法について示す。対象橋梁は、これまでのB-WIM手法で精度確保が容易でないとされてきた連続橋であり、3-3に示したように、変位が正負入れ替わる挙動を示す。連続桁においても影響線を適切に同定し、分析に適用することにより安定した精度でB-WIM手法を実現できると考えられる。

#### 3-4-1 影響線の同定

影響線を用いたB-WIMの基本となる影響線の同定をまず行う。影響線の同定方法としては、館石ら<sup>7</sup>が示したFFTを用いる手法を用いることとした。以下のその手法の概要を示す。

車両走行速度が既知の場合、着目位置での変位の影響線は時間の関数として表すことができ、これを $i_d(t)$ とする。試験車両の軸重を $P_j$ 、各軸間の間隔 $\tau_j$ とする。このとき、着目位置の変位は各車軸によって生じる変位波形の重ね合わせにより、次式で表すことができる。

$$\text{disp}(t) = \sum_{j=1}^n P_j \cdot i_d(t - \tau_j)$$

$n$ : 車軸数

これをフーリエ変換し次式を得る。

$$\begin{aligned} \text{Disp}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \text{disp}(t) e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-i2\pi f \tau_j} \int_{-\infty}^{\infty} i_d(t) e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-i2\pi f \tau_j} I_d(f) \end{aligned}$$

ここに

$$I_d(f) = \frac{\text{Disp}(f)}{\sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-i2\pi f \tau_j}}$$

すなわち、変位の影響線は $I_d(f)$ を逆フーリエ変換することにより、変位の影響線 $i_d(t)$ を求めることができる。本手法では車軸数 $n$ は試験車両の詳細図から4とする。軸間間隔 $\tau_j$ は図3-4-1に示す支承部B上に加速度計データを用いて取得することとした。図3-4-2に支承部Bの加速度計で取得したデータの例を示す。影響線を用いたB-WIMの一般的な手法を適用し、上記で得られた影響線を速度に応じて伸縮し、時間軸を支承部の加速度データから時間軸をあわせ、影響線を最小二乗法によりカーブフィッティングさせることで車両重量を算出することとした。またその際用いる速度は図3-

4-1 に示す支承部 A と支承部 B の加速度計のデータから一軸目の通過時間をそれぞれ取得し、その時間差を用いて、橋梁を通過している間等速と仮定することにより算出した。

実際に、上記の方法により影響線の同定を行った。図 3-4-3 に影響線同定を行ったセンサの設置位置、図 3-4-4 に影響線同定に用いた変位-時間グラフ、図 3-4-5 に同定された影響線を示す。また、表 3-4-1 に影響線同定に用いた軸間隔  $\tau_j$  を示す。速度は上記の通り、図 3-4-1 に示す A と B の加速度データから橋梁を通過している区間は等速と仮定し、一軸目の通過時間をそれぞれ取得することで算出し、その結果、速度 7.90 (m/s) が得られた。

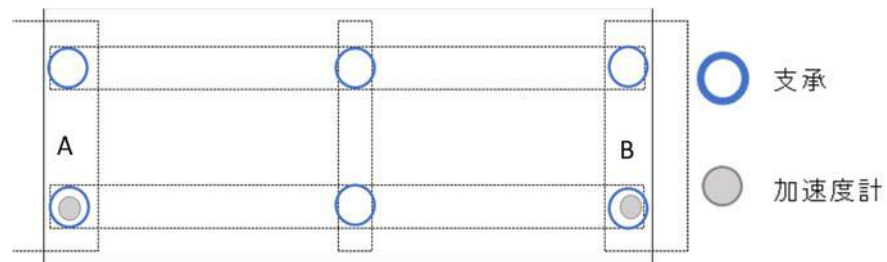


図 3-4-1 軸間隔，速度算出に用いた加速度計の位置

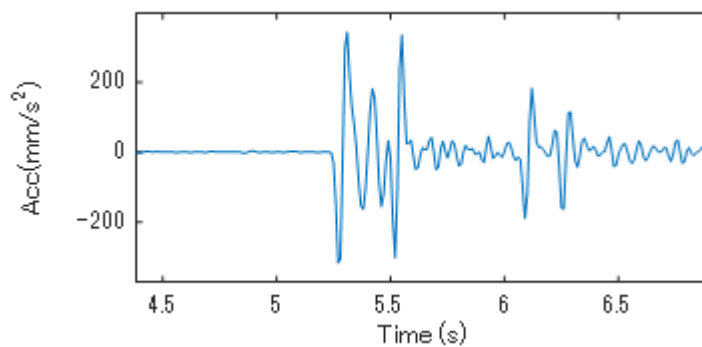


図 3-4-2 支承部 B における加速度計データの例

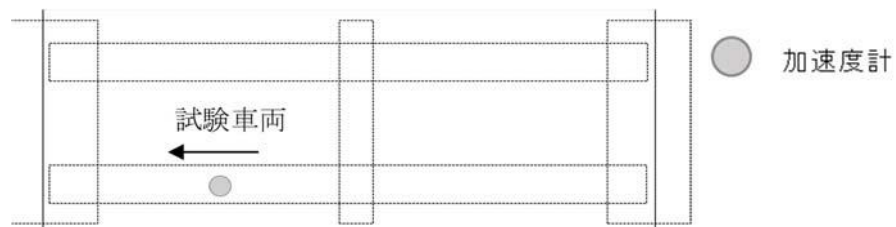


図 3-4-3 影響線同定に用いた加速度計の位置

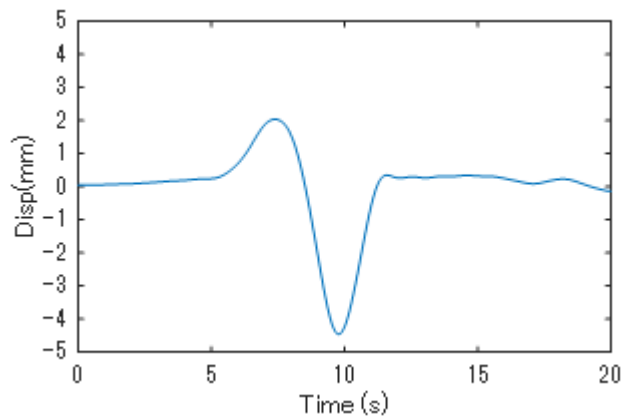


図 3-4-4 影響線同定に用いた変位履歴

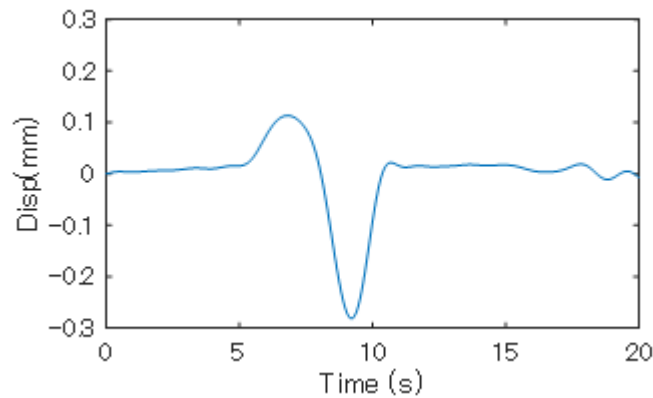


図 3-4-5 同定された影響線

表 3-4-1 軸間間隔

$\tau_2$	0.25[s]
$\tau_3$	0.82[s]
$\tau_4$	0.99[s]

### 3-4-2 変位ベースのB-WIM手法による車両重量分析結果

変位履歴を用いた車両重量分析の精度を確かめるため、試験車両が単独で走行した際の 3 ケースデータを用いた重量分析結果を表 3-4-2、図 3-4-6~8 に示す。重量算出車両の速度を表 3-4-3 に示す。なお、図中の **real** は測定された試験車が走行したときの変位データ、**layered** は最小二乗法によって算出された軸重と影響線を掛け合わせて足したものを示している。表 3-4-2 に示すように総重量の誤差はそれぞれ 2.3%、4.4%、3.9%となり、総重量の誤差は 3 ケースとも 5%以内に抑えられていることがわかる。また、3 ケースの平均値をとると、20.40(tonf)となり、誤差は 3.5%と精度が高い結果が得ることができている。一般的に B-WIM の誤差は 10%以内に収まればよいとされており、十分な精度の結果が得られたといえる。また Case1 は影響線算出車両よりも遅い速度、Case2,

Case3 は影響線算出車両より早い速度で走行していたが、どちらのケースも高い精度が得られており、車両重量分析精度は速度によらず高精度を達成できることが確認された。

表 3-4-2 車両重量分析結果

	Case 1	Case 2	Case 3	Real
P <sub>1</sub>	7.14	2.69	5.69	
P <sub>2</sub>	1.69	9.30	4.35	
P <sub>3</sub>	3.99	-6.44	1.31	
P <sub>4</sub>	7.33	15.02	9.12	
Total [tonf]	20.16 (+2.3%)	20.57 (+4.4%)	20.47 (+3.9%)	19.71

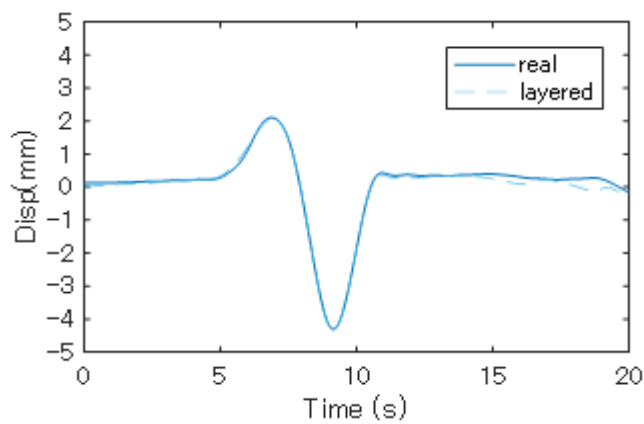


図 3-4-6 B-WIM 手法適用結果 (Case 1)

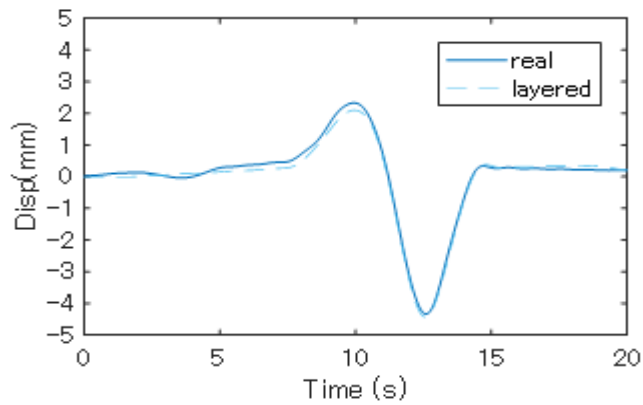


図 3-4-7 B-WIM 手法適用結果 (Case 2)

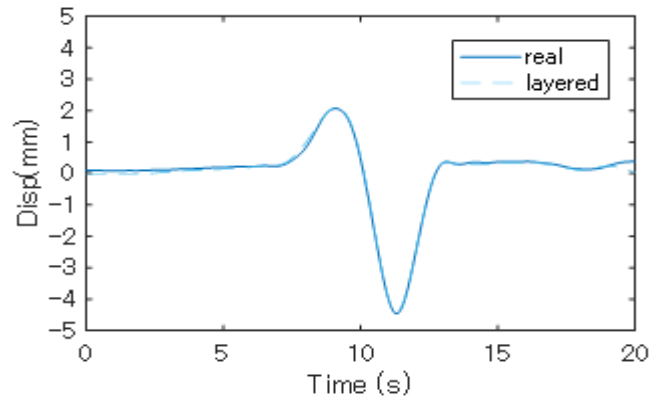


図 3-4-8 B-WIM 手法適用結果 (Case 3)

表 3-4-3 試験車走行速度

	Case 1	Case 2	Case 3
Velocity [m/s]	7.06	8.53	8.42



### 3-5 Excel による B-WIM

#### 3-5-1 はじめに

3-2 から 3-4 で述べた B-WIM の一連の作業を、Microsoft Excel を用いて簡易的に実施した。

- 1) 加速度計の設置位置とチャンネル番号を図 3-5-1 に示す(この図は図 3-1-8 にチャンネル番号や方向を追記したものである)。
- 2) 試験車量が、対象橋梁上をコンビニから駅方面に単独で走行した 14:33 付近、15:17 付近、18:50 付近のデータを使用する。
- 3) 第 1 径間支間中央の加速度記録(ch23)を時間積分し、変位データを算出する。
- 4) 車軸の対象橋梁への進入時間は、ch21 の加速度記録から判断する。
- 5) 退出時間は、ch29 の記録が途中で取れなくなったため、ch9 の加速度記録から判断する。
- 6) 14:33 付近の変位データから影響線を求め、14:33、15:17、18:50 の試験車量の軸重を推定し精度を確認する。
- 7) 試験車量の詳細を図 3-5-2 に示す(図 3-5-2 と同じ)。車軸は 4 軸あるが、前 2 軸、後 2 軸の軸重と全体の車両重量のみ計測できた。軸重計量器の影響で前 2 軸と後 2 軸の軸重の合計が、車両重量と一致していない。本検討では、各軸の軸重を表 3-5-1 の値とした。
- 8) 3-4 では影響線の同定に、試験車量が対象橋梁を通過した前後の時間も含めたデータを用いている(例えば図 3-4-4)。本検討では、試験車量が通過した部分のデータを切り取って使用した(例えば後述する図 3-5-7)。

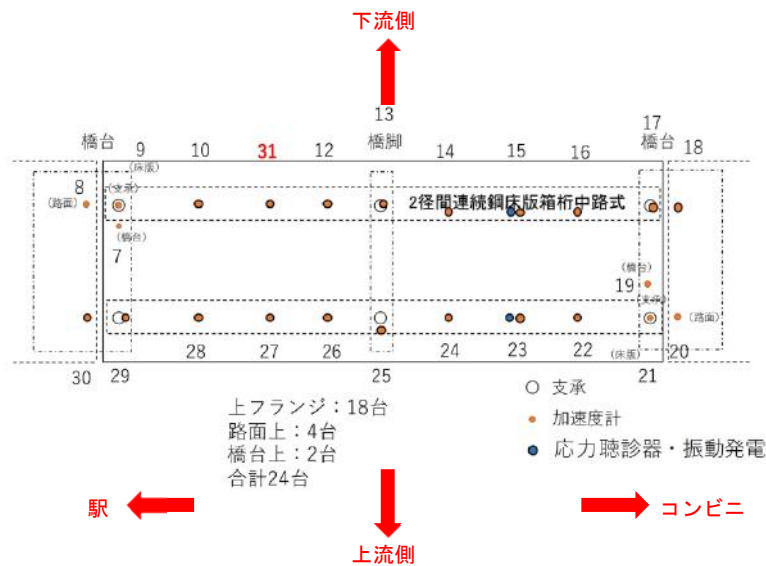


図 3-5-1 加速度計の位置とチャンネル番号

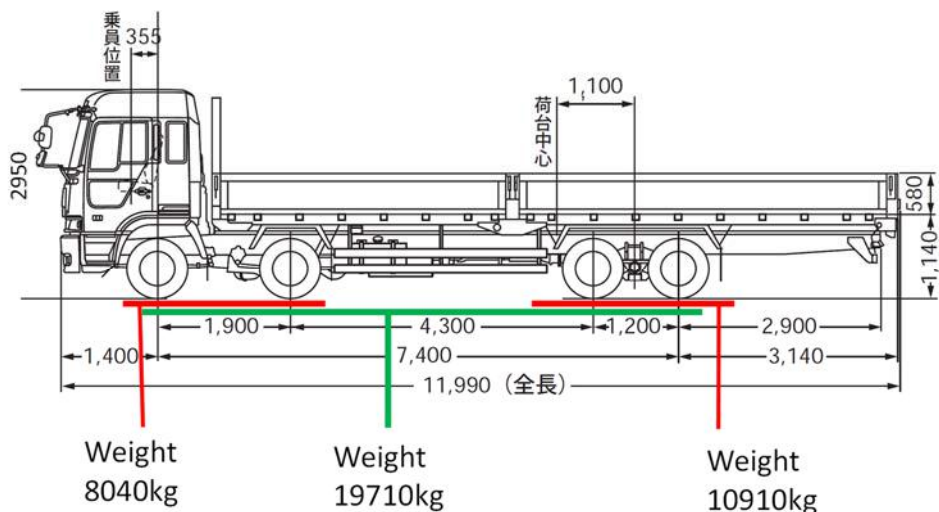


図 3-5-2 試験車量

表 3-5-1 軸重

p1	4181
p2	4181
p3	5674
p4	5674
合計	19710

### 3-5-2 データの取得

今回の実験では各チャンネルで 320 万 4905 行のデータを計測した. この中から必要な時刻付近のデータを取り出すには WG3 の結果が参考にできるが, 活動が平行していて WG2 の準備も整わなかったため, 独自に Excel に取り込んだ.

- 1) 各チャンネルを 1 つの Excel ブックに保存する.
- 2) Excel のシートには行数制限があるため, 1 シートに 90 万行保存する(90 万行 x 3 シート + 50 万行 x 1 シート).
- 3) 列の構成は基データ(テキストデータ)と同じとする.

表 3-5-2 計測データの列構成

列数	1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目
内容	チャンネル番号	計測時間	x方向加速度	y方向加速度	z方向加速度	制御信号

加速度の単位: G(重力加速度)  
 x 方向: 橋軸直角軸方向(上流側が正)  
 y 方向: 橋軸方向(駅側が正)  
 z 方向: 鉛直方向(下向き正)

### 3-5-3 変位データの算出

第1 径間支間中央(ch23)の z 方向加速度記録を時間積分し、z 方向の変位データを算出する。

- 1) 着目している時刻付近のデータを 65536 行取り出す。後に示す 5) でデータを高速フーリエ変換するため、データ数を 2 の階乗とした。
- 2) z 方向加速度記録( $a_{ccz,i}$ )から、平均値を減じ(以降、平均値処理)、980 を乗じて単位を  $\text{cm/s}^2(\text{gal})$  に変換する。

$$a_i = \left( a_{ccz,i} - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_{ccz,k} \right) \times 980 \quad (1)$$

ここに、

$$N=65536$$

- 3) 式(1)を時間積分して速度データ( $v_{o,i}$ )を算出する。

$$v_{o,i+1} = \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)\Delta t + v_{o,i} \quad (2)$$

- 4) 速度データを平均値処理し、さらに平均加速度法で変位データ( $d_{o,i}$ )を算出する。

$$v_i = v_{o,i} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} v_{o,k} \quad (3)$$

$$d_{o,i+1} = \frac{1}{2}(v_{i+1} + v_i)\Delta t + d_{o,i} \quad (4)$$

- 5) 変位データを高速フーリエ変換し、0.03Hz~1Hz 以外の成分を 0 にして逆フーリエ変換する。

⇒ i.e. 0.03Hz ~ 1Hz のバンドパスフィルター(BPF)を通す。BPF の範囲は、3.2 での検討結果に合わせた。

$$d_{o,i} \rightarrow \text{BPF (0.03Hz} \sim \text{1Hz)} \rightarrow d_i \quad (5)$$

加速度を積分する際、速度と変位の初期値( $v_{o,0}$ ,  $d_{o,0}$ )が必要となる。今回はいずれも 0 とした。時間積分の式(2)を展開すると

$$\begin{aligned} v_{o,i+1} &= \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)\Delta t + v_{o,i} \\ &= \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)\Delta t + \frac{1}{2}(a_i + a_{i-1})\Delta t + v_{o,i-1} \\ &= \frac{1}{2}(a_{i+1} + 2a_i + 2a_{i-1} + \dots + 2a_1 + a_0)\Delta t + v_{o,0} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、全ての  $v_{o,i}$  に初期値  $v_{o,0}$  が含まれていることが分かる。よって平均値処理(式(3))を実施すると初期値の影響は無くなる。フーリエ係数の振動数 0 の成分は平均値そのものであるから、BPF(式(5))を通した  $d_i$  も初期値の影響は除かれている。

18:50 付近のデータに 1)から 5)の処理をした結果を図 3-5-3 に示す。

積分したままの速度データ(青線)がほぼ 0[cm/s]から-1[cm/s]となり 27900[s]付近で再度 0[cm/s]に戻っている。これは加速度がこの範囲では大きく見ると単調に増加しており、平均値処理した結果、ある値-a[cm/s<sup>2</sup>]から+a[cm/s<sup>2</sup>]に変化するようなデータとなったためと考えられる。速度は初期値 0[cm/s]で、加速度は-a[cm/s<sup>2</sup>]から徐々に大きくなり、0[cm/s<sup>2</sup>]を経て+a[cm/s<sup>2</sup>]になる。よって速度も一度減少し、また 0[cm/s]に戻っている。

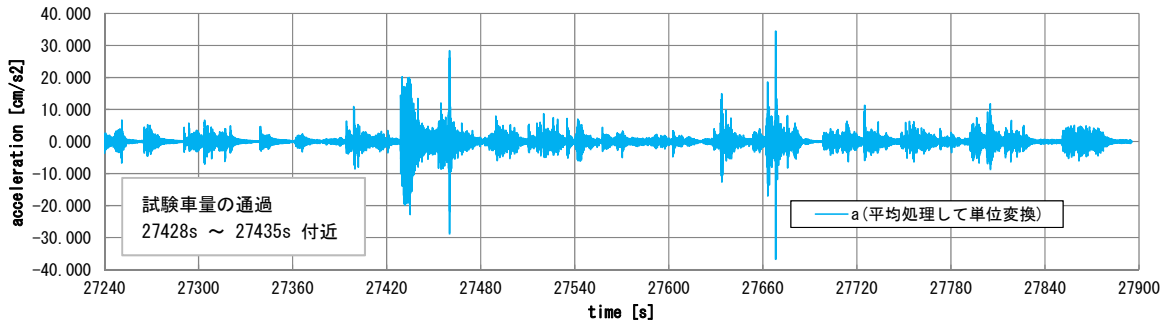


図 3-5-3a 加速度記録

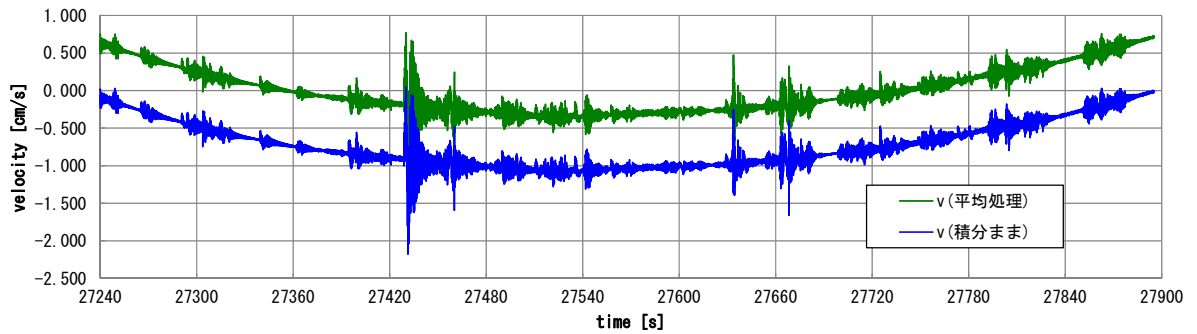


図 3-5-3b 速度データ

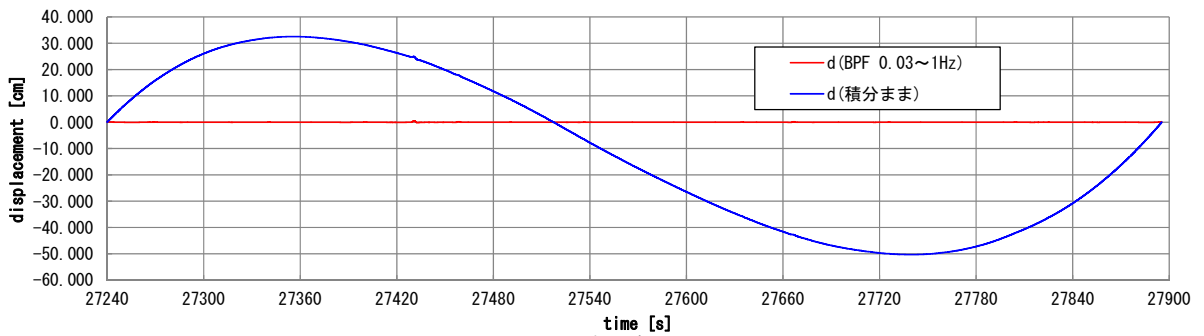


図 3-5-3c 変位データ

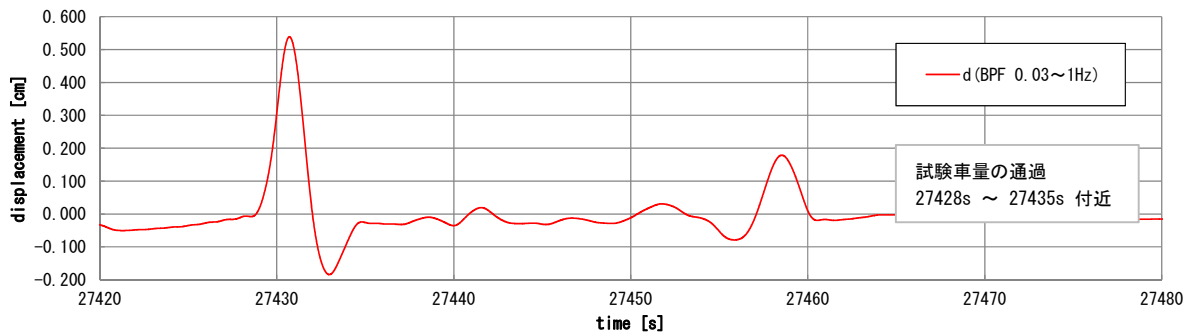


図 3-5-3d 変位データ (BPF 処理したもののみ)

図 3-5-3 加速度記録の処理 (18:50 付近)

参考に、2)で加速度記録を平均値処理し単位変換した後に BPF(0.01Hz~10Hz)を通し、3)以降の処理をした場合の結果を図 3-5-4 に示す。最終的に得られる変位データ(図 3-5-4d)は BPF を通さない結果(図 3-5-3d)とほぼ同じで有意な差が無い。実際にグラフを重ねると一致する。

よって本検討では、BPF 処理を変位データを算出した後に 1 度だけ実施することとした。

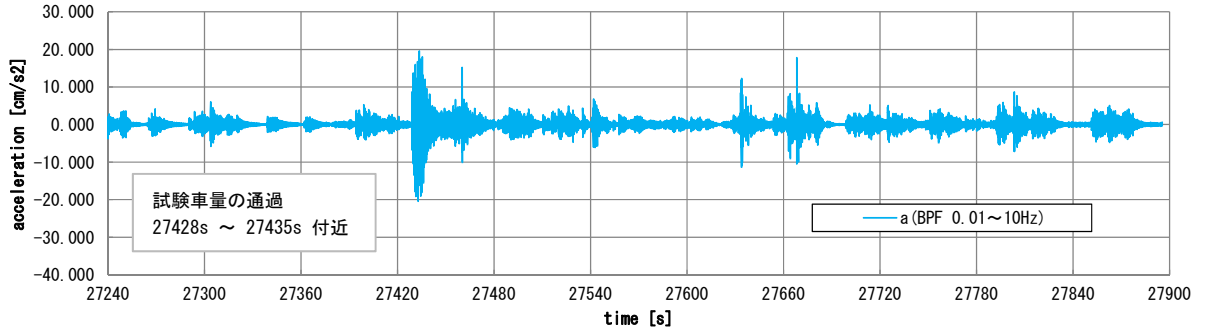


図 3-5-4a 加速度記録

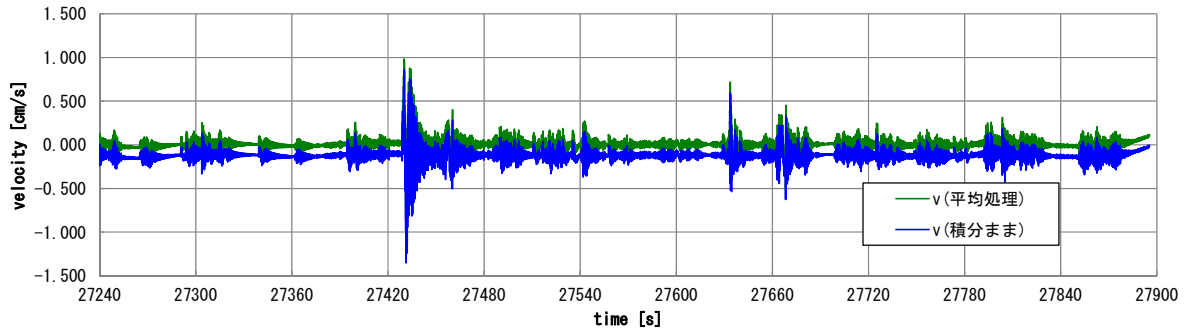


図 3-5-4b 速度データ

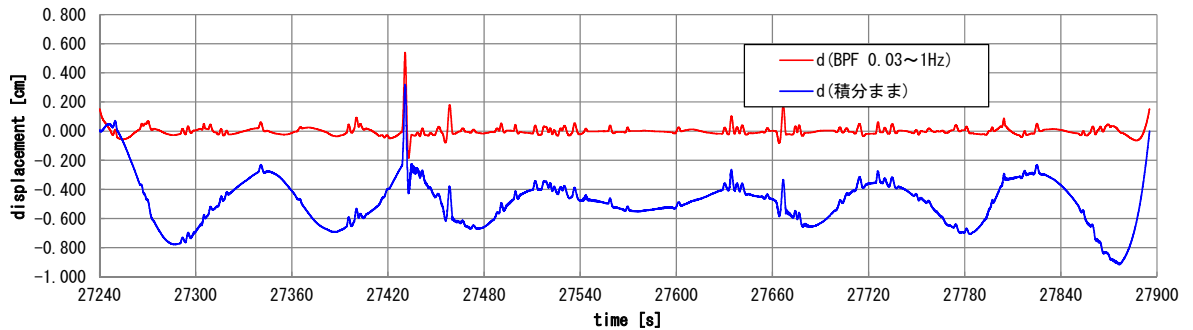


図 3-5-4c 変位データ

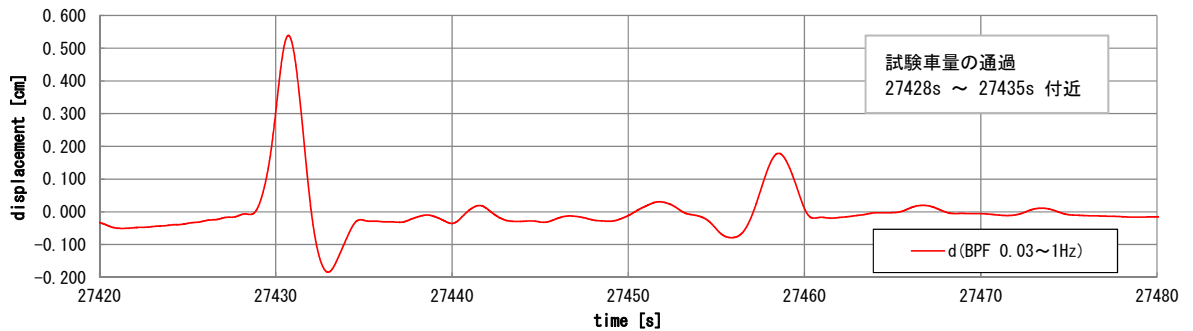


図 3-5-4d 変位データ (BPF 処理したもののみ)

図 3-5-4 加速度記録の処理(18:50 付近、加速度記録を BPF 通してから積分)

図 3-5-5, 図 3-5-6 に 14:33, 15:17 付近の加速度記録から得られた変位データを示す。

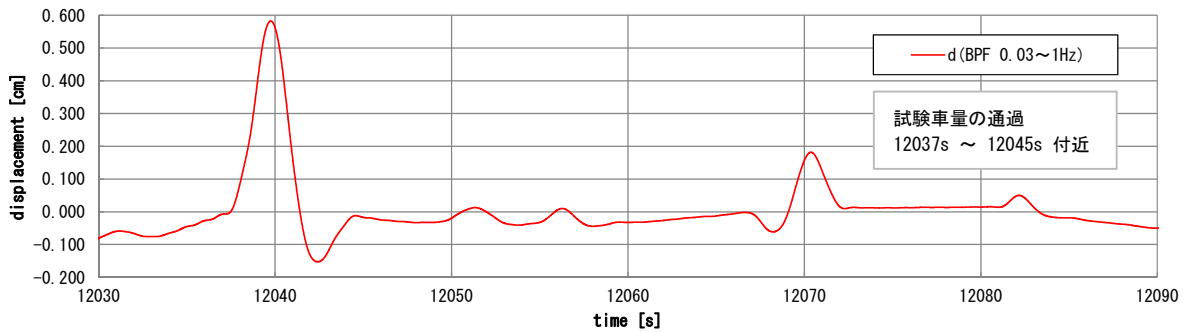


図 3-5-5 変位データ (14:33 付近)

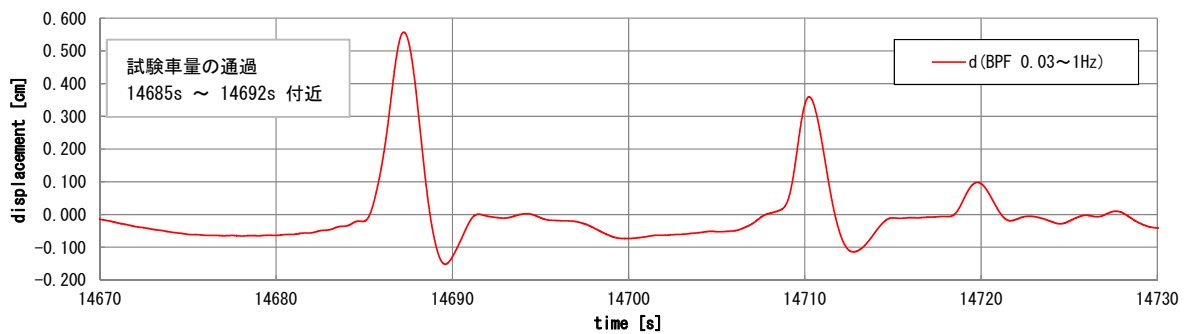


図 3-5-6 変位データ (15:17 付近)

#### 3-5-4 試験車量走行時データの抽出

3-5-3 で得られた変位データ(図 3-5-3d, 図 3-5-5, 図 3-5-6)から, 試験車量走行時のデータを抽出する。

- 1) 試験車量の橋梁への進入は, ch21 加速度記録の立上り時とした。
- 2) 試験車量第 4 軸の橋梁からの退出は, ch9 加速度記録から判断した。ただし, 加速度記録がきれいに 0 になっておらず通過時の特定が難しかったため, 加速度記録のピーク時とした。
- 3) 軸間の距離と軸通過時間より, 試験車量の速度を算出した。
- 4) 変位データは, 試験車量の進入, 退出時に 0[cm]となるべきであるが, 実際には何らかの値を持っている。これは変位データに残るドリフト成分の影響と考えられる(図 3-5-3d, 図 3-5-5, 図 3-5-6 参照)。
- 5) 本検討では試験車量の進入, 退出時の変位を 0[cm]に補正するため, 変位データに 1 次関数を加算した。

$$\text{補正值: } \Delta(t) = \frac{(-d_1) - (-d_0)}{t_{end} - t_{start}}(t - t_{start}) + (-d_0) \quad (7)$$

ここに, ※つまり,  $-d_0 \sim -d_1$ を結ぶ 1 次関

$$d(t = t_{start}) = d_0$$

$$d(t = t_{end}) = d_1$$



試験車量走行時の変位データと車軸通過時間，車両速度を図 3-5-7～図 3-5-9，表 3-5-3～表 3-5-5 に示す。

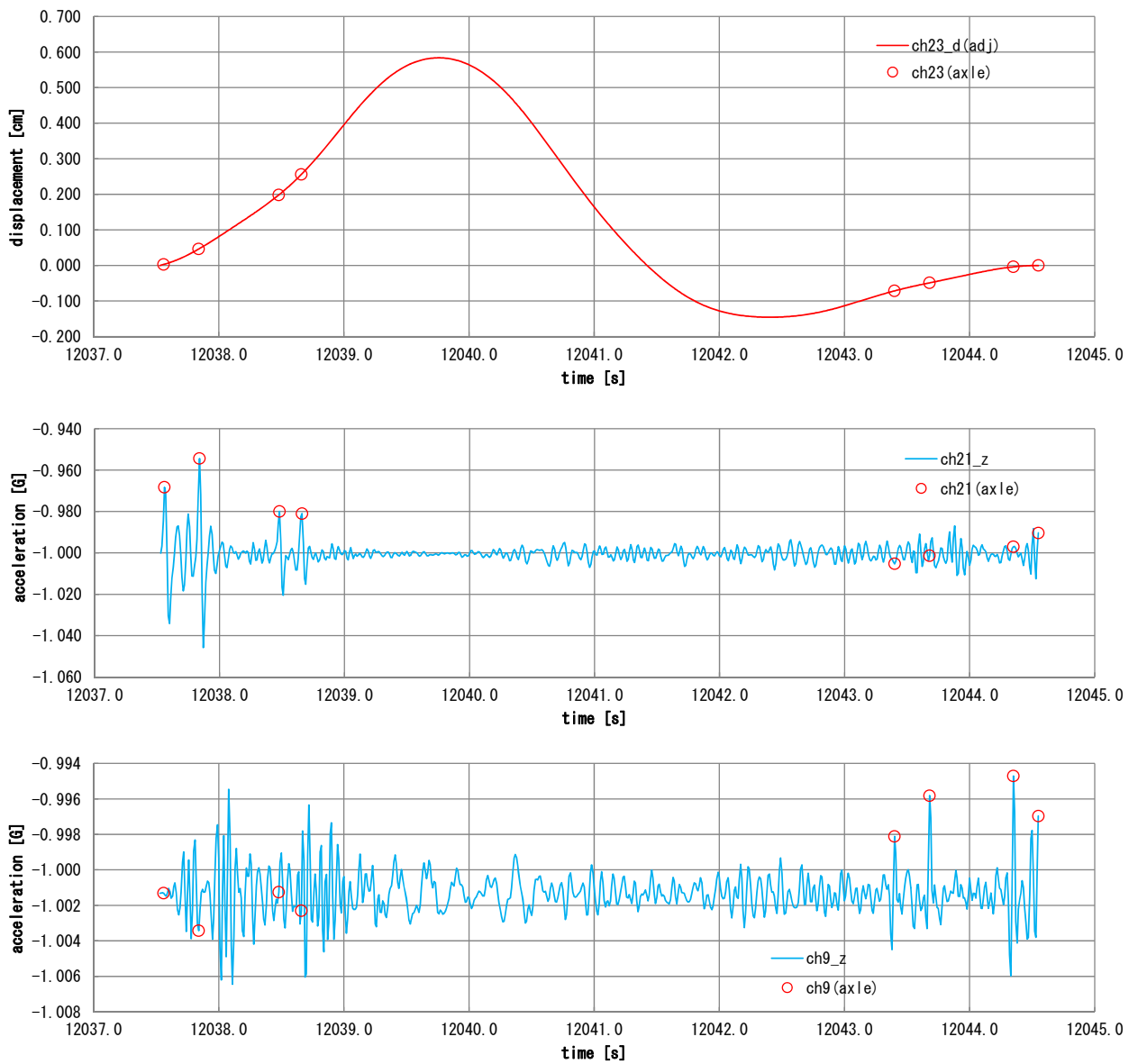


図 3-5-7 試験車量走行時データ (14:33 付近，上段：ch23 変位，中段：ch21 加速度，下段：ch9 加速度)

表 3-5-3 車軸通過時間と車両速度 (14:33 付近)

Axle Number	Distance [m]	Entering			Exiting		
		Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]
1st	0.0	12037.56		0.00	12043.40		0.00
2nd	1.9	12037.84	24.4	0.28	12043.68	24.4	0.28
3rd	4.3	12038.48	24.2	0.92	12044.35	23.1	0.95
4th	1.2	12038.66	24.0	1.10	12044.55	21.6	1.15
Average			24.2			23.0	

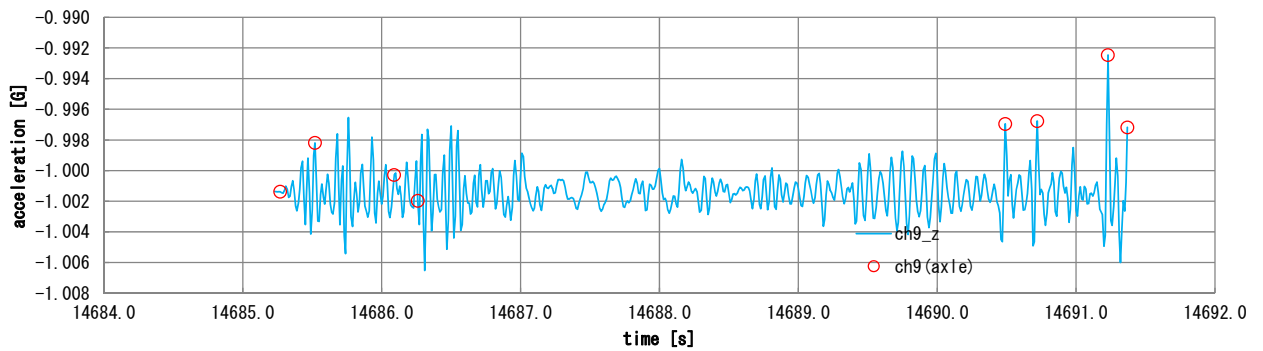
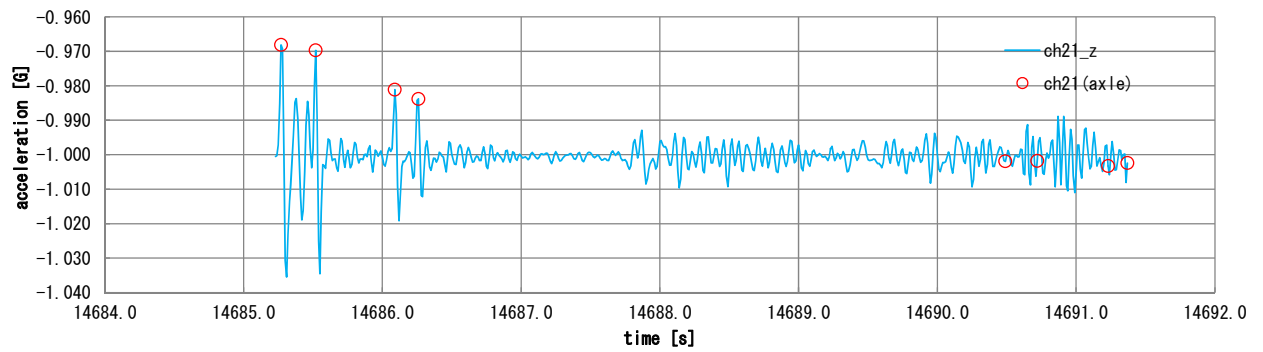
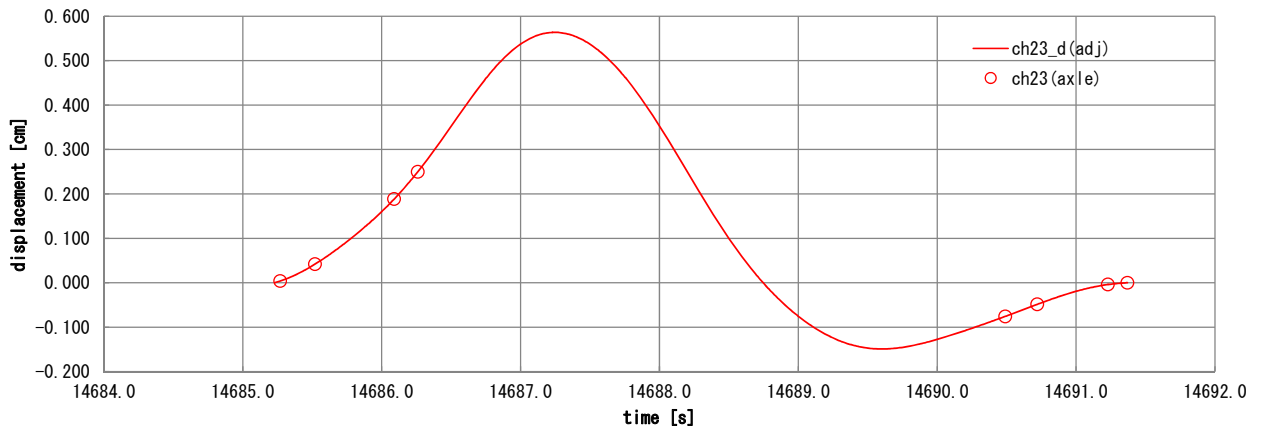


図 3-5-8 試験車量走行時データ (15:17 付近, 上段: ch23 変位, 中段: ch21 加速度, 下段: ch9 加速度)

表 3-5-4 車軸通過時間と車両速度 (15:17 付近)

Axle Number	Distance [m]	Entering			Exiting		
		Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]
1st	0.0	14685.27		0.00	14690.49		0.00
2nd	1.9	14685.52	27.4	0.25	14690.72	29.7	0.23
3rd	4.3	14686.09	27.2	0.82	14691.23	30.4	0.74
4th	1.2	14686.26	25.4	0.99	14691.37	30.9	0.88
Average			26.6			30.3	

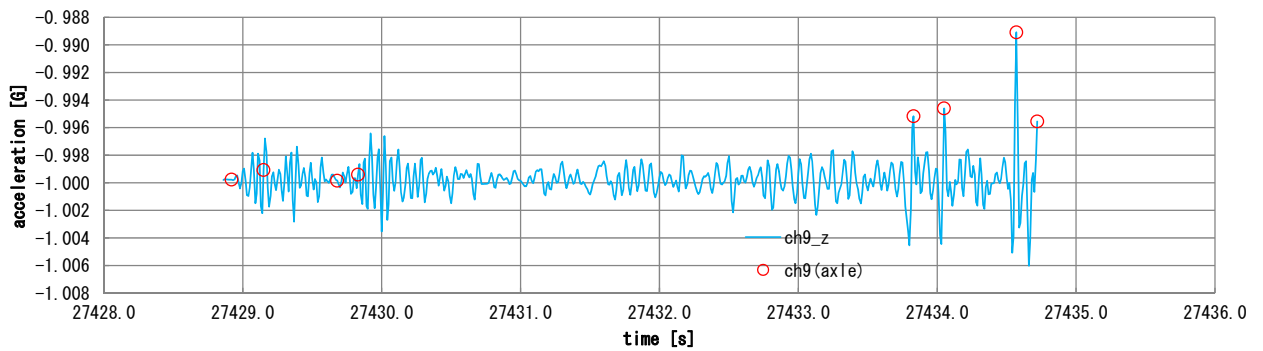
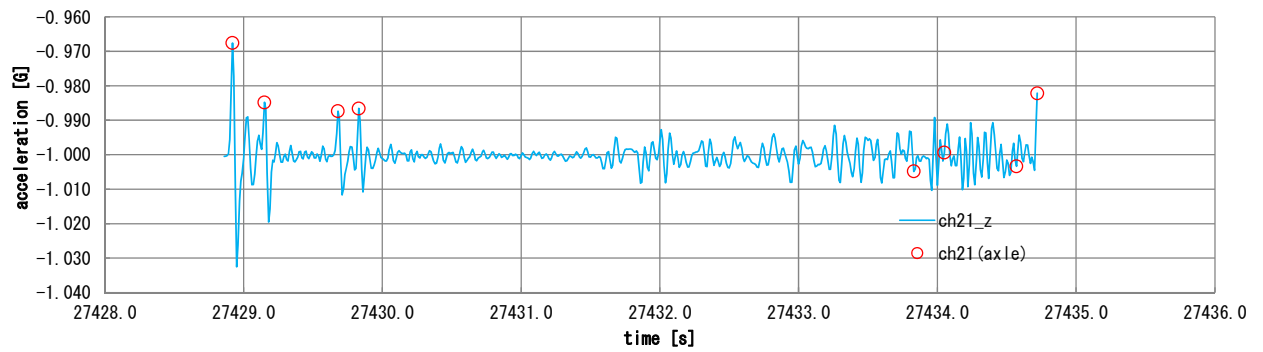
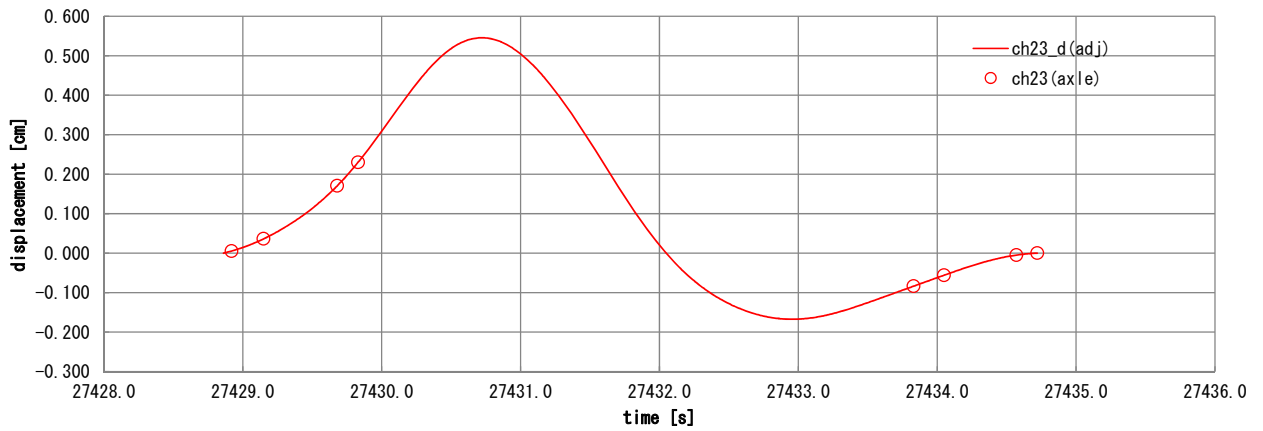


図 3-5-9 試験車量走行時データ (18:50 付近, 上段: ch23 変位, 中段: ch21 加速度, 下段: ch9 加速度)

表 3-5-5 車軸通過時間と車両速度 (18:50 付近)

Axle Number	Distance [m]	Entering			Exiting		
		Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]
1st	0.0	27428.92		0.00	27433.83		0.00
2nd	1.9	27429.15	29.7	0.23	27434.05	31.1	0.22
3rd	4.3	27429.68	29.2	0.76	27434.57	29.8	0.74
4th	1.2	27429.83	28.8	0.91	27434.72	28.8	0.89
Average			29.2			29.9	

### 3-5-5 影響線

14:33 の変位データ(図 3-5-7)と車軸通過時間の情報(表 3-5-3)より影響線を算出する。

- 1) 以下の参考文献の手法を用いる。⇒参考文献 7)

鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析

館石和雄・竹之内博行・三木千尋, 土木学会論文集 No.507/I-30, P109-119, 1995.1

- 2) (以下 3-4-1 の繰返しとなるが)着目位置での影響線を $i_\varepsilon(t)$ とすると, その位置での変位は各車軸によって生じる変位の重ね合わせとなる。

$$d(t) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot i_\varepsilon(t - \tau_i) \quad (8)$$

ここに,

$n$ : 車軸数(今回は 4)

$P_i$ : 軸重(表 3-5-1 の通り)

$\tau_i$ : 車軸  $i$  の通過時間(表 3-5-3 の Lag Time)

- 3) この時, 影響線 $i_\varepsilon(t)$ のフーリエ変換 $I_\varepsilon(f)$ は式(8)の両辺をフーリエ変換することにより次式となる。

$$I_\varepsilon(f) = \frac{D(f)}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-i2\pi f \tau_i}} \quad (9)$$

ここに,

$D(f)$ :  $d(t)$ のフーリエ変換

- 4)  $I_\varepsilon(f)$ を逆フーリエ変換することにより影響線 $i_\varepsilon(t)$ を求めることができる。

$$i_\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{\infty} I_\varepsilon(f) \cdot e^{i2\pi f t} df \quad (10)$$

このようにして求めた影響線を図 3-5-10 に示す。

赤点線は式(10)そのもの, 青実線は第 1 軸が橋梁を退出した後の影響線を 0 としたものである。上記の手法では $d(t)$ が周期関数であると仮定してしまうため, 実際には車軸が橋梁を退出した後も赤点線のように値が発生してしまう。また  $t=0$  の時にも値を持つてしまう。

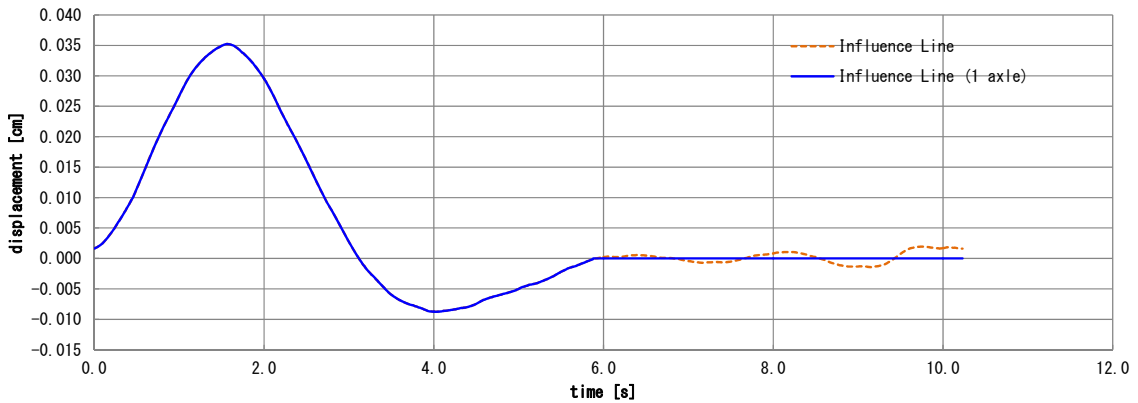


図 3-5-10 影響線

影響線を青実線とし、式(8)で変位を算出した結果が下図の青点線である。図 3-5-10 で  $t=6s$  付近以降の値を切り捨てた影響で、式(8)で算出した変位(青点線)が、積分して算出した変位(赤実線)と若干合わない。

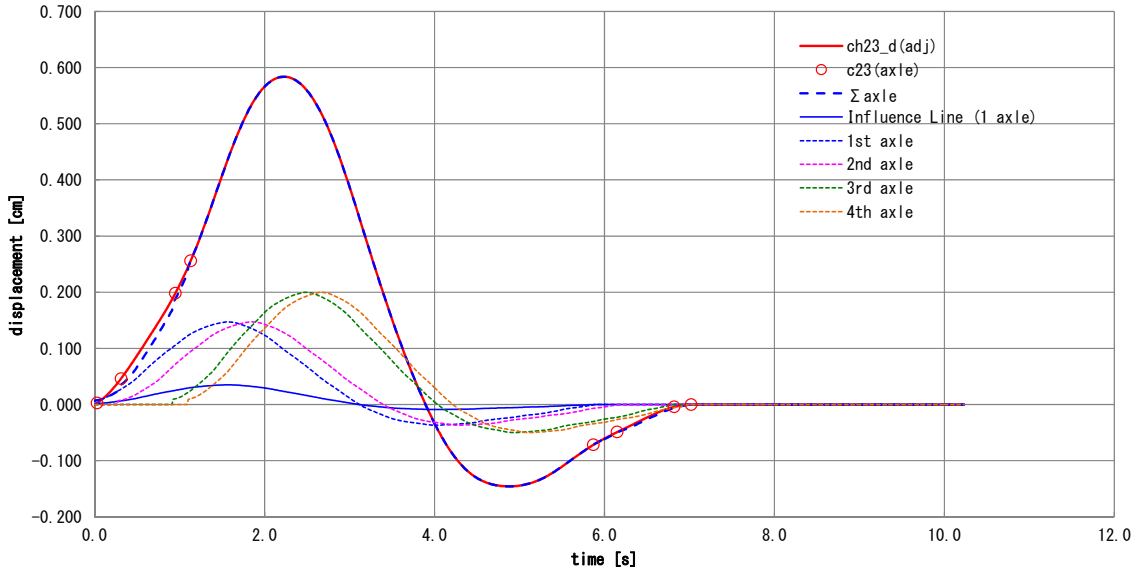


図 3-5-11 影響線と影響線で算出した変位

ここでは、 $t=0s$  の時に影響線が 0 となるように  $t=0s \sim 1s$ (影響線のピーク位置を考慮してそれを超えないように範囲を設定した)の間で影響線を補正した。最終的に軸重の推定に用いた影響線を図 3-5-12(青線)に示す。図 3-5-13 がその影響線で算出した変位(青点線)と、積分で算出した変位(赤実線)の比較である。

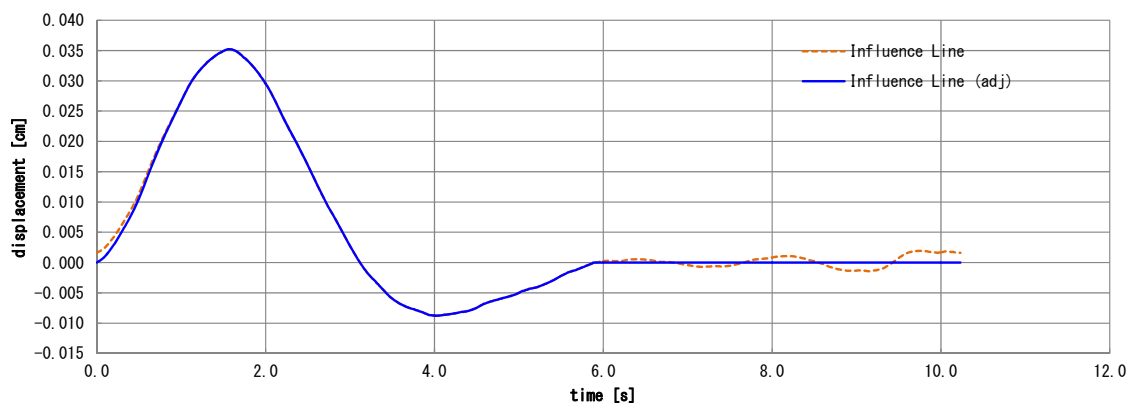


図 3-5-12 影響線

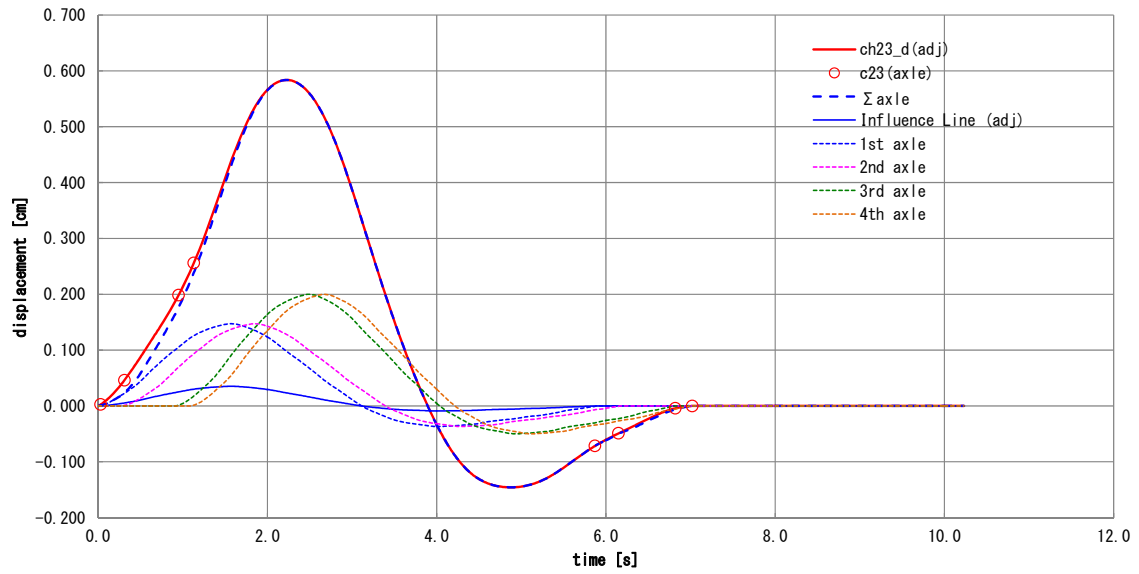


図 3-5-13 影響線と影響線で算出した変位

### 3-5-6 軸重の推定

3-5-5 で算出した影響線を用いて軸重を推定した。

- 1) 軸重の推定には条件のない間接測定における最小二乗法を用いる。
- 2) 変位データ  $d(t)$  を  $N$  個の要素を持つベクトル，第  $i$  軸が橋梁に進入した時間に合わせた影響線を  $i_i(t)$  とすると，軸重  $P$  は以下のように算出できる。

$$d(t) = P_1 i_1(t) + P_2 i_2(t) + P_3 i_3(t) + P_4 i_4(t) \quad (11)$$

$$= [i_1(t) \quad i_2(t) \quad i_3(t) \quad i_4(t)] \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix}$$

$$= IP$$

$$I^t d = I^t IP \quad (12)$$

$$\therefore P = (I^t I)^{-1} I^t d \quad (13)$$



(1) 14:33 の変位データ

14:33 の変位データから改めて軸重を推定した結果を表 3-5-6 に示す。表 3-5-6 には実際の軸重(表 3-5-1)との比較も示す。また推定した軸重と影響線より式(8)で算出した変位を図 3-5-14 の青点線で示す。図 3-5-14 の赤実線は積分して求めた変位(図 3-5-7 上段と同じ)である。変位のピーク値の比較を表 3-5-7 に示す。

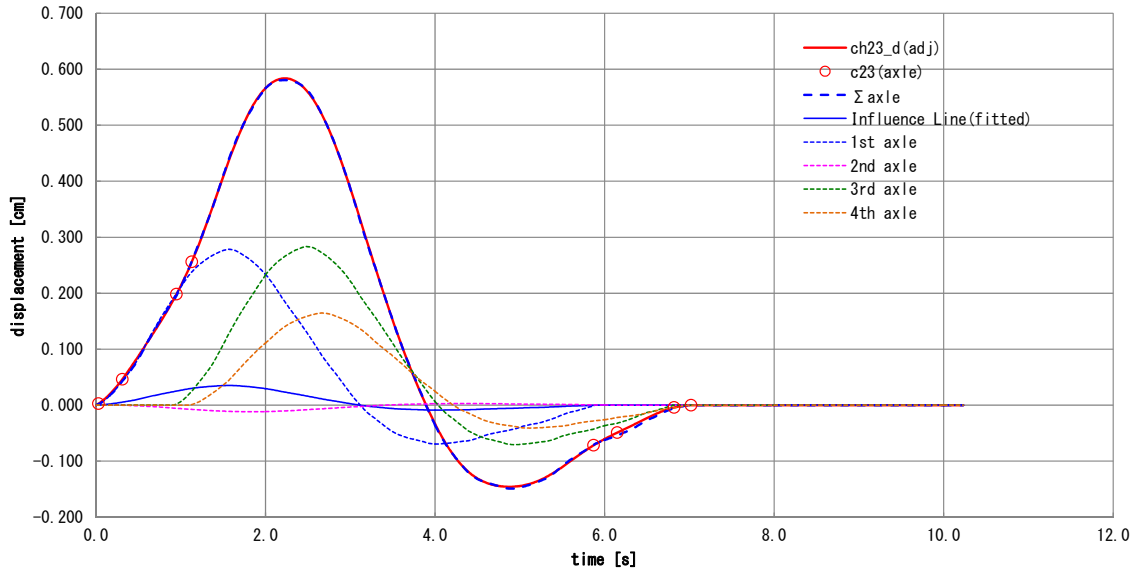


図 3-5-14 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(14:33)

表 3-5-6 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error Est/Act
1st	7.90	4.18	
2nd	-0.34	4.18	
front total	7.57	8.36	0.91
3rd	8.04	5.67	
4th	4.67	5.67	
rear total	12.71	11.35	1.12
Total	20.28	19.71	1.03

表 3-5-7 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference Est/Int
1st Span	0.58	0.58	0.99
2nd Span	-0.15	-0.15	1.02

今回用いた影響線で変位を算出すると、本来は図 3-5-13 に示すように積分で求めた変位と誤差が生じる。しかし、式(13)では変位が合うように軸重を推定しているため、推定された軸重は実際の軸重と合わず、10%前後の誤差が生じている。誤差が発生する要因としては、そもそも各車軸の軸重が正確に分かっている訳ではなく、

$$\text{第 1 軸の軸重} = \text{第 2 軸の軸重}$$

$$\text{第 3 軸の軸重} = \text{第 4 軸の軸重}$$

として影響線を求めている影響も大きいと考えられる(表 3-5-1)。

一方変位の方は非常によく一致している(表-7)。また車両重量についてもよく一致している(推定値 20.28[tonf])。

(2) 15:17 の変位データ

15:17 の変位データから軸重を推定した結果を図 3-5-15, 表 3-5-8, 表 3-5-9 に示す. ここでは車両の速度が違っているため, 影響線の作用時間を調整している(図 3-5-16).

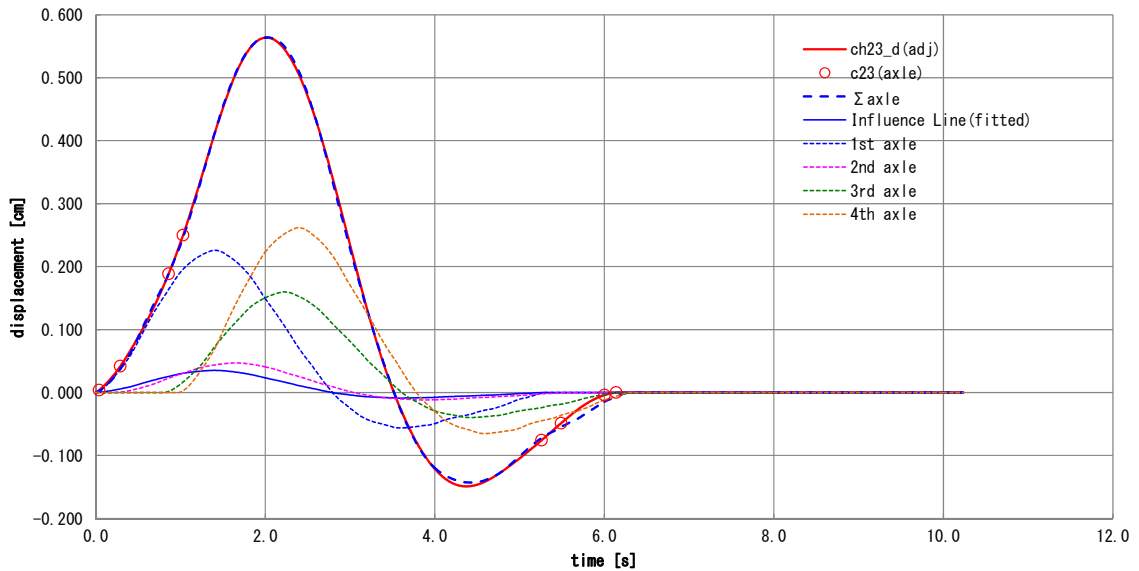


図 3-5-15 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(15:17)

表 3-5-8 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error Est/Act
1st	6.42	4.18	
2nd	1.34	4.18	
front total	7.75	8.36	0.93
3rd	4.54	5.67	
4th	7.43	5.67	
rear total	11.97	11.35	1.05
Total	19.73	19.71	1.00

表 3-5-9 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference Est/Int
1st Span	0.56	0.56	1.00
2nd Span	-0.14	-0.15	0.96

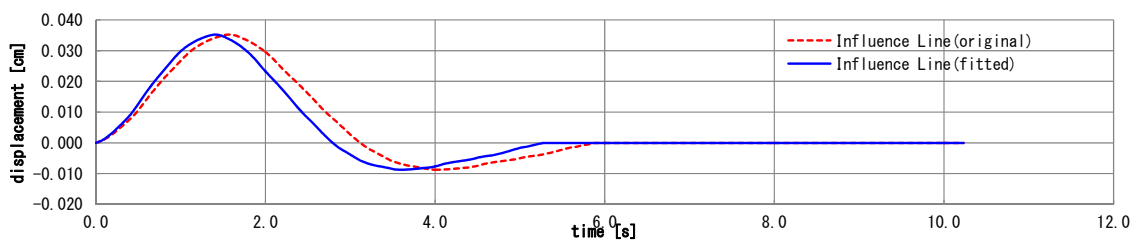


図 3-5-16 影響線の作用時間の調整(15:17)

各軸の軸重はそれほど良く一致していないが, 前 2 軸の合計と後 2 軸の合計, 全体重量, 変位は良く一致している.

### (3) 18:50 の変位データ

18:50 の変位データから軸重を推定した結果を図 3-5-17、表 3-5-10、表 3-5-11 に示す。ここでも影響線の作用時間を調整している(図 3-5-18)。

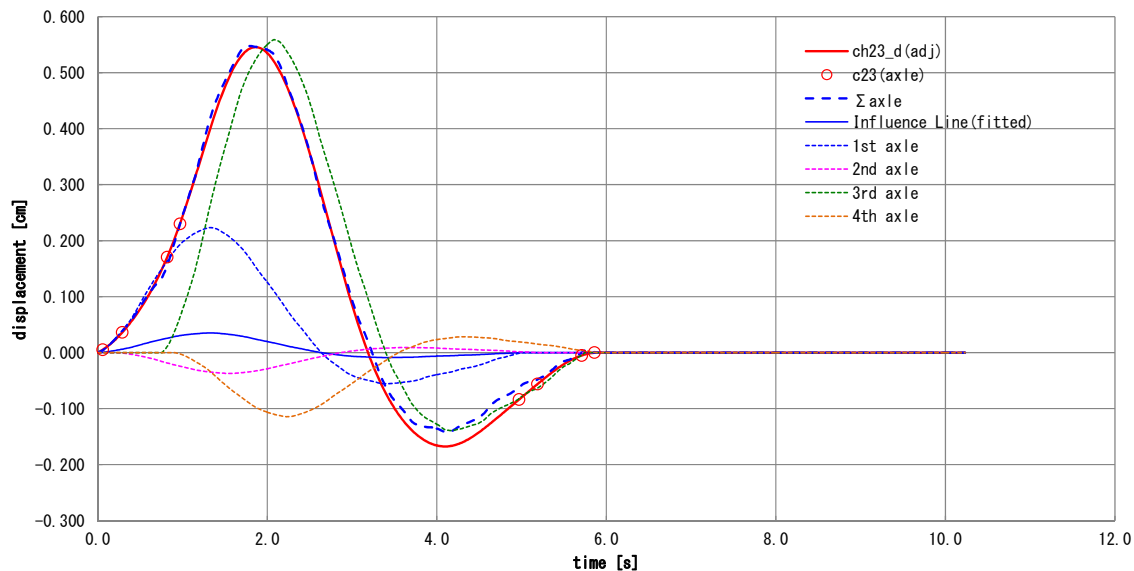


図 3-5-17 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(18:50)

表 3-5-10 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error Est/Act
1st	6.34	4.18	
2nd	-1.05	4.18	
front total	5.29	8.36	0.63
3rd	15.86	5.67	
4th	-3.24	5.67	
rear total	12.62	11.35	1.11
Total	17.91	19.71	0.91

表 3-5-11 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference Est/Int
1st Span	0.55	0.55	1.00
2nd Span	-0.14	-0.17	0.85

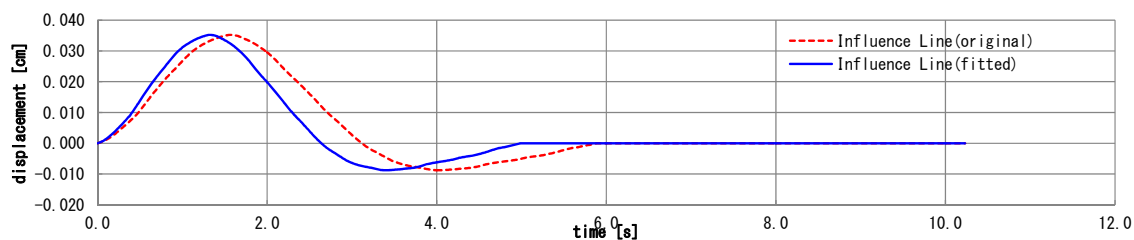


図 3-5-18 影響線の作用時間の調整(18:50)

このデータでは軸重の精度はあまり良くなく、変位も第 2 径間の値が悪い。全体重量は 10%以内となっておりまずまずである。

もともと、積分して求めた変位データの第 2 径間の値(-0.17[cm])が、14:33、15:17 のものと比べて大きい。軸重はここに引っ張られて精度が落ちたと考えられる。なぜ第 2 径間の変位が他の時間の

データと比べて大きかったのかは不明であるが、図 3-5-3 を見ると、試験車量が退出した後に変位が 0 に戻っておらず、積分した結果にドリフトの影響が大きく入り込んでいるものと考えられる。

#### (4) 14:33 の変位データ (影響線のリンク効果を考慮した場合)

以上(1)～(3)は影響線を図 3-5-12 の青実線とした場合の結果である。物理現象としては意味が無いが、フーリエ変換時のリンク効果を無視せず、影響線を図 3-5-12 の赤点線として軸重を推定した結果を図 3-5-19、表 3-5-12、表 3-5-13 に示す。

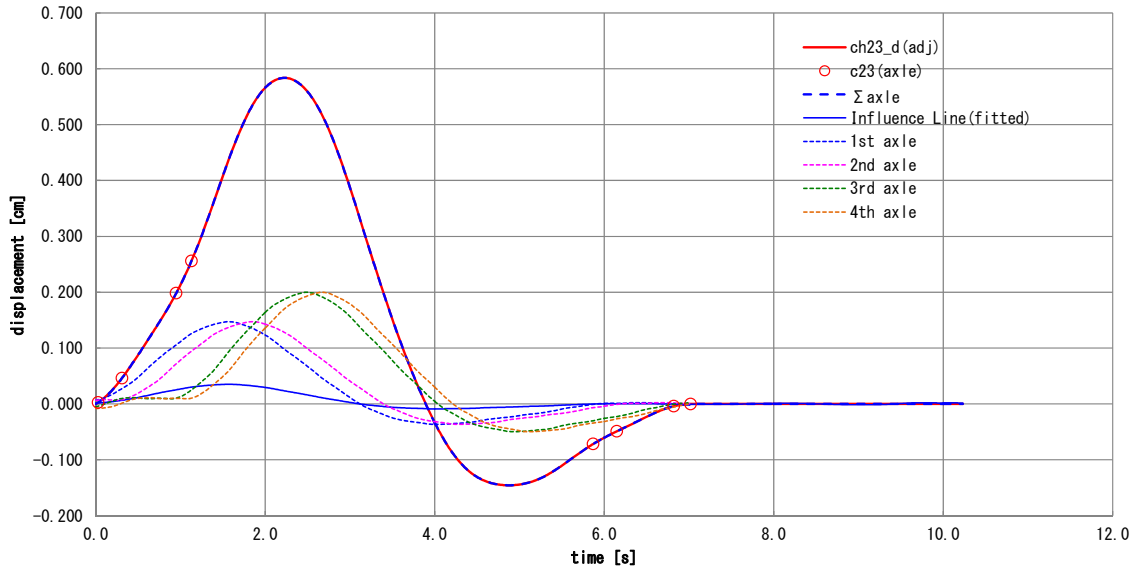


図 3-5-19 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(14:33)

表 3-5-12 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error Est/Act
1st	4.18	4.18	
2nd	4.18	4.18	
front total	8.36	8.36	1.00
3rd	5.67	5.67	
4th	5.67	5.67	
rear total	11.35	11.35	1.00
Total	19.71	19.71	1.00

表 3-5-13 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference Est/Int
1st Span	0.58	0.58	1.00
2nd Span	-0.15	-0.15	1.00

数学的には当たり前かもしれないが、軸重も変位もぴったり一致する。

#### 3-4-7 まとめ

本検討では B-WIM の一連の作業を Microsoft Excel で実施し、まずまずの精度が出ることを確認した。作業をして感じたことを以下にまとめる。

- 1) 今回は BPF を実現するためにデータを一度フーリエ変換した。直接、時刻歴上で BPF を実現できればデータの扱いがもう少し自由になると思われる。
- 2) 軸重の頻度分析をするには、車両通過時のデータの取り出しを自動化する必要がある。

- 3) 2 径間でまとめて影響線を求めたが、径間ごとに分けても良かった。そうすれば走行中に速度が変わっているような場合でも精度が上がると予想できる。

#### 【参考文献】

- 1) 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽 : MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 3, pp. 364-379, 2016.
- 2) Park K-T., Kim S-H., Park H-S., and Lee K-W. : The determination of bridge displacement using measured acceleration, Engineering Structures 27, pp. 371-378, 2005.
- 3) 関屋英彦, 横関耕一, 木村健太郎, 小西拓洋, 三木千壽 : 橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 1, pp. 61-74, 2016.
- 4) Yutaro Umekawa, Eiichi Sasaki, George Minesawa: Evaluation of Vehicular Induced Displacement by Using Wavelet Transformation from Wireless Acceleration Measurement, pp. 260-267, IABSE Workshop Helsinki, 2015.
- 5) Nagayama, T, and Zhang C.: A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement, 構造工学論文集 A, Vol.63, pp. 209-215, 2017.
- 6) イブ・トーマス, 中村尚五: デジタル信号処理, 東京電気大学出版局, 1999.
- 7) 舘石和雄, 竹之内博行, 三木千寿: 鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析, 土木学会論文集 No.507/I-30, 109-119, 1995.

## §4 簡易な B-WIM に関する検討

### 4-1 キャリブレーションフリーの B-WIM

一般的な B-WIM 手法である影響線を用いた方法は、影響線を求めるためにキャリブレーション試験を行う必要がある。キャリブレーション試験は、重量が既知の試験車両を用いて実施するが、橋梁上のほかの車両の走行がないフリーな状況でのデータ取得が必要であり、かつ、そのデータが車線ごとに複数回分のデータがあることが望ましい。また、橋梁の振動数等の振動特性は温度の影響を受けるとの指摘もあることから、本来はキャリブレーション試験は様々な温度条件下で実施する必要性があるとも考えられる。このようなキャリブレーション試験は、B-WIM 手法の適用上障壁となる可能性もある。そこで、試験車両を準備してのキャリブレーション試験を必要としない、キャリブレーションフリーの B-WIM 手法について検討することとした。すなわち、キャリブレーション試験を実施せず、できる限り精度の良い影響線を同定することができないかという試みである。ここでは、キャリブレーションフリーの B-WIM 手法の実現例として、通常多く走行している普通乗用車通行時のデータを数多く利用して、普通乗用車の平均重量とされている 1.42 トンという情報を用いて影響線を取得しようとする方法について提案する。この方法によれば、温度が異なる状況での影響線同定なども可能となる可能性があり、よりアダプティブな B-WIM の構築が期待できる。提案手法の適用性検討のため、3 章で取得した加速度計による計測データを用いる。

#### 4-1-1 普通乗用車通過時のデータを用いた影響線の同定

影響線を同定する際に、その誤差を最小限に抑えるためより多くの普通乗用車通過時のデータを用いて、平均化することで、普通乗用車の平均重量に近づくと考えられる。ここでは、3 章で実施した加速度の連続計測データから、普通車が単独で走行した全データの速度を補正して足し合わせ、その平均を取ることで普通乗用車通過時の代表的な時系列データとして用いることとした。普通乗用車の平均重量は、国土交通省の自動車燃費一覧（平成 24 年 3 月）<sup>1)</sup>に掲載されたガソリン乗用車車両重量中の中間値を平均したものの 1.42ton に、乗員の重量を考慮し 1.5ton として考えることとした。影響線の同定の際には、平均されたデータを 0.75ton ずつの 2 軸にわけて用いることとした。

図 4-1-1 に普通車 88 台分を平均した変位データ、図 4-1-2 に同定された影響線を示す。影響線同定に用いる加速度計位置は図 3-4-3 で示した。また、影響線同定に必要な軸間隔は 3-4-1 同様にエクスパンジョイントを通ったときの衝撃に着目し、支承部 B の加速度データから取得した。速度は図 3-4-1 に示す A と B の加速度データから橋梁を通過している区間は等速と仮定し、一軸目の通過時間をそれぞれ取得することで算出し、9.0(m/s)として用いた。

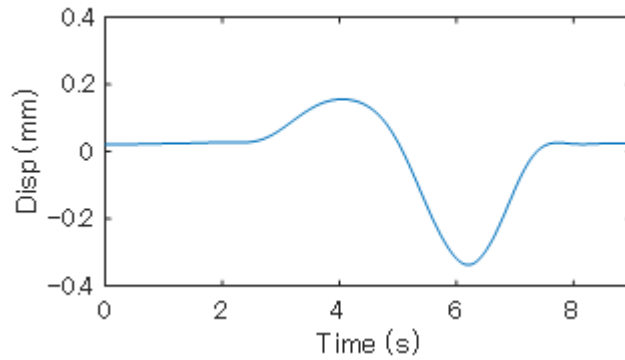


図 4-1-1 普通乗用車通過時のデータ 88 台分を平均化した変位履歴

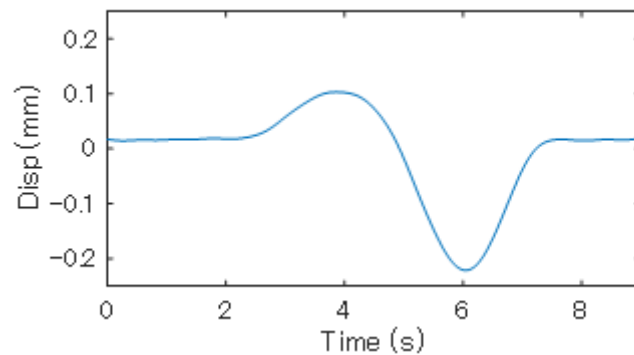


図 4-1-2 普通乗用車通過時のデータから同定された影響線

#### 4-1-2 車両重量分析結果

3-4-2 同様、現場測定で用いた試験車両が単独で走行した 3 ケースを用いて、車両重量分析を行うこととした。その結果を図 4-1-3~5、表 4-1-1 に示す。図中の real は測定された試験車が走行したときの変位データ、layered は最小二乗法によって算出された軸重と影響線を掛け合わせて足したものを示している。

表 4-1-1 に示すように総重量の誤差はそれぞれ 1.8%、5.6%、5.6%となり、総重量の誤差は 3 ケースとも 6%以内に抑えられていることがわかる。また、3 ケースの平均値をとると、20.56(tonf)となり、誤差は 4.3%と精度が高い結果が得ることができている。またこの手法においても表 3-4-3 に示すように、異なる試験車両の速度条件においても高い精度を得ることができると確認された。

表 4-1-1 車両重量分析結果

	Case 1	Case 2	Case 3	Real
P <sub>1</sub>	-1.57	-8.68	-3.41	
P <sub>2</sub>	8.77	22.18	12.83	
P <sub>3</sub>	18.08	-3.64	10.42	
P <sub>4</sub>	-5.22	10.95	0.97	
Total [tonf]	20.07 (+1.8%)	20.81 (+5.6%)	20.81 (+5.6%)	19.71



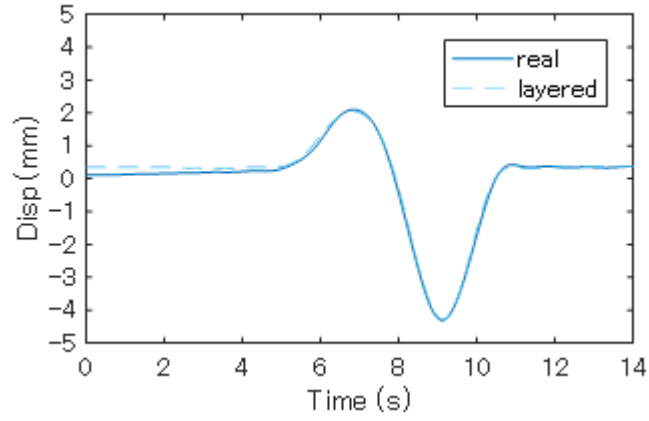


図 4-1-3 キャリブレーションフリーの B-WIM 手法適用結果 (Case 1)

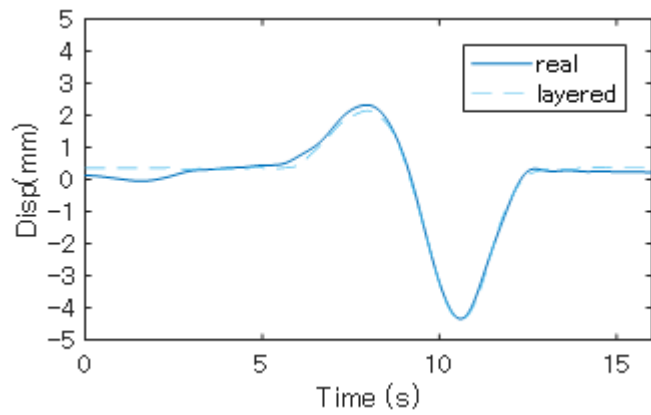


図 4-1-4 キャリブレーションフリーの B-WIM 手法適用結果 (Case 2)

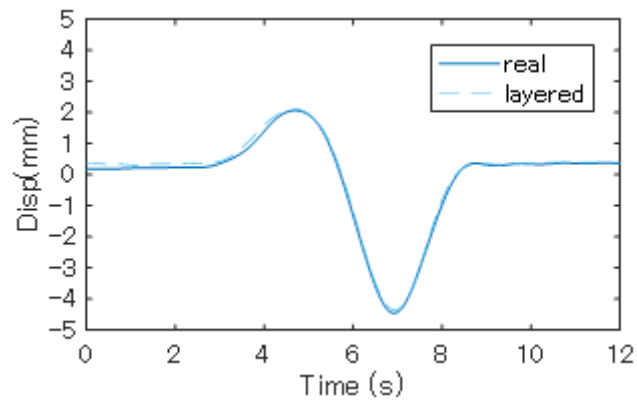


図 4-1-5 キャリブレーションフリーの B-WIM 手法適用結果 (Case 3)

## 4-2 発電に着目した荷重評価の可能性

近年、橋梁の振動を利用した環境発電技術の検討がなされている。竹谷ら<sup>2)3)</sup>は、橋梁における低周波振動、温度等による振動特性の微変動に対応できるロバスト性の高い、橋梁振動発電デバイスの設計手法を提案し、その手法に基づいて実際に発電デバイスを開発し、実橋梁において発電・蓄電が可能であることを示している。当該研究の中で、図4-2-1のように、大型車交通量と橋梁振動発電デバイスによる発電量は高い相関があることを示している。橋梁振動を利用した発電においては、通過する大型車の重量により発電量が異なると考えられ、このことを利用して、発電量の情報から大型車の重量や交通量について考察することが今後可能になる可能性もあると考えられる。

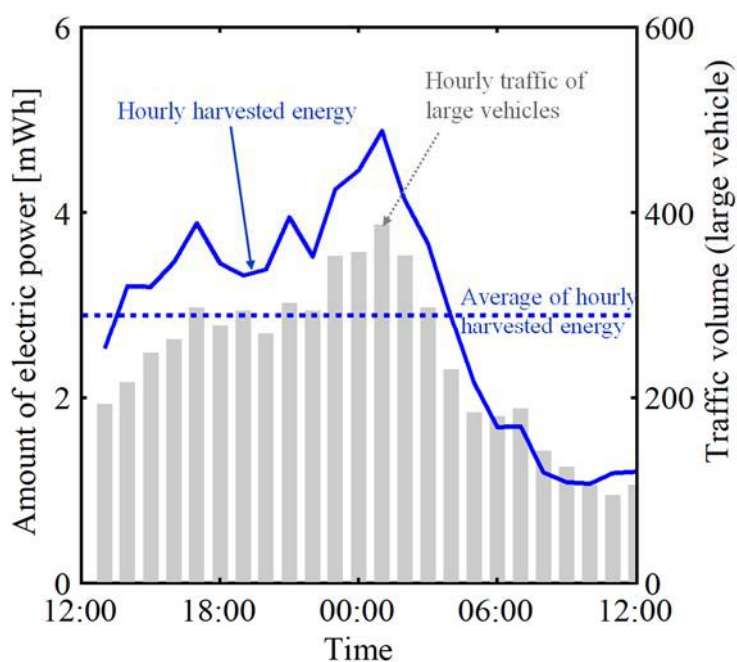


図4-2-1 発電量と大型車交通量の関連性について<sup>3)</sup>

### 【参考文献】

- 1) 国土交通省自動車局：[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000240963.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000240963.pdf)
- 2) 竹谷晃一，佐々木栄一，岩吹啓史，長船寿一，洞宏一，名見耶武：橋梁振動を対象とした同調質点系発電デバイスの開発と実橋梁への適用，土木学会論文集A1，Vol. 72，No. 2，pp. 290-301，2016.
- 3) Koichi Takeya：Design and Development of Vibration Energy Harvesters using Tuned-Mass Systems for Bridge Structures，Doctoral Dissertation，Tokyo Institute of Technology，2017.