

3章 BWIMシステムの適用性に関する調査

3.1 調査項目

橋梁部材の応答から車両重量を測定する手法に関しては、橋梁部材応答の特性、算定上の仮定などが、手法の算定精度や適用範囲に大きな影響を及ぼす。ここでは、様々な車両走行条件、橋梁構造条件に対して、算定精度および適用条件に関する調査を実施した。

表-3.1.1 に当システムの算定精度に対する影響要因、表-3.1.2 にここで実施した一連の試験ケースの一覧、表-3.1.3 に試験で使用した橋梁の諸元、表-3.1.4 に試験で使用した車両の諸元、図-3.1.1 に試験車両の概要、図-3.1.2 に走行パターン、図-3.1.3 に各橋梁の測定位置を示す。

表-3.1.1 算定精度に対する影響要因

基本条件	<p>【車両条件】</p> <ul style="list-style-type: none">一般的諸元を有する 6 軸までの大型車 <p>【橋梁条件】</p> <ul style="list-style-type: none">RC 床版を有する鋼単純鉄桁橋 <p>【計測条件】</p> <ul style="list-style-type: none">主桁支間中央、橋梁入口部床版下面 <p>(算定アルゴリズムの構築、機器の構成上、標準とした条件)</p>
影響要因	<p>【車両条件】</p> <ul style="list-style-type: none">軸数走行位置走行速度車両振動の大小連行、並走の有無 <p>【橋梁条件】</p> <ul style="list-style-type: none">主桁材料主桁形式荷重分配単純・連続の別直橋・斜橋の別支間長床版支間 <p>【計測条件】</p> <ul style="list-style-type: none">主桁の計測位置床版の計測位置

表-3.1.2 試験ケース

検証項目		橋梁条件						交通条件			主桁計測位置
		橋梁名	支持条件	主桁	床版	斜角	車線	車両No.	バターン走行	速度(km/h)	
基本のケース	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T25	単独	40	ずれなし	L/2
橋梁条件	橋梁形式	福岡橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	T15b	単純	40	ずれなし
								T20f			
		北陸橋	単純	鋼箱	RC	84°	片側1	Tr35b			
								T15b	単純	40	ずれなし
	斜角	岩屋高架橋	連続	PCT (間詰め)	RC	74°	片側3	T20f			
								Tr35b			
		試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a T25	単純	40	ずれなし
車両走行条件	車両軸数の違い	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a T25 Tr35a Tr42a Tr42a Tr45			
								Tr45	単独	40	ずれなし
								Tr45			
	連行・並走	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a T25	単独	40	ずれなし
								T15a/ T25			
								完全並走 50%並走 連行並走 連行	20	10	
	走行速度の違い	福岡橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	T15b T20f	単独	40	ずれなし
								T15b/ T20f			
								完全並走 連行並走 連行			
		試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	T15a T25 T35a	単独	20 20 30 40 40 80	ずれなし
								T35a			
								Tr35a Tr45 Tr35a Tr45			
ひずみゲージ貼付条件	走行位置のずれ	試験橋梁	単純	鋼	RC	90°	2	Tr35a Tr45 Tr35a Tr45	単独	80	ずれなし
								Tr35a			
								Tr45			
								Tr35a	500mmずれ	L/2	
	福岡橋	連続	鋼	RC	90°	片側2	T15a T25 T15a T25 T15a T25	単独	40	ずれなし	L/2
							T15a				L/4
							T25				L/8
							T15b T20f T15b T20f T15b T20f				L/2

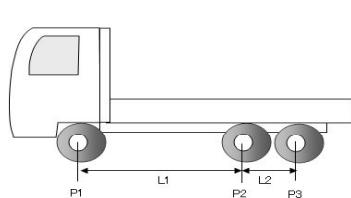
注) 表中網掛け部が比較対照の着目条件項目

表-3.1.3 橋梁緒元

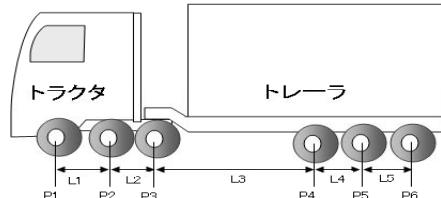
項目	試験橋梁	福岡橋	北陸橋	岩屋高架橋	住吉川橋	芦屋川橋	甲子橋	小山高架橋	蓮沼橋
橋梁諸元	単純・連続の別	単純	連続	単純	連続	単純	連続	単純	連続
	桁形式	鋼桁橋	鋼鉄桁	鋼箱桁	PCT桁橋	鋼桁橋	鋼桁橋	鋼鉄桁	鋼鉄桁
	床版形式	コンクリート床版							
	支間長(m)	30.0	40.9	53.4	21.4	24.0	33.4	27.6	27.6
	車線	2車線	片側2車線	片側1車線	片側3車線	片側3車線	片側2車線	片側2車線	片側2車線
		車線数変化なし							
	斜角(度)	90	82	84	74	74	96	90	60
	主(げた)	著しい変断面なし							
交通条件	大型車交通量 (台/日/方向)	-	2500	-	7500	7000	10000	10000	6500
	車線変更	-	頻繁に生じない	生じない	頻繁に生じない	頻繁に生じない	頻繁に生じる	頻繁に生じない	頻繁に生じない
	速度変化	-	要因なし	要因あり (信号・勾配)	要因なし	要因なし	要因あり (信号)	要因なし	要因なし
橋梁の状態	主(げた)	著しい錆等(はなし)	著しい錆等(はなし)	著しい錆等(はなし)	著しい錆等(はなし)	著しい錆等(はなし)	著しいさび等なし	著しいさび等なし	著しいさび等なし
	床版	ひび割れや漏水は少ない							
		鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着などによる補修なし	鋼板接着による補修無し	鋼板接着による補修無し	鋼板接着による補修無し
	支承	著しい損傷なし							
路面の状態	伸縮装置	車両進入側で著しい不連続となっていない							
	舗装表面	著しい凹凸なし	段差有り(車両進入側)	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし	著しい凹凸なし
その他	計測作業上の 条件	1)床版下面、主(げた)下面 へのゲージ貼付が可能							
		2)データ収録機器等まで の配線および機器類の配 置が可能							
事前計測	試験車両	T25	T20f	T20f	T20e	T20d	T20g	T20a	T20b
									T20c

表-3.1.4 試験車両諸元

車種	車両No.	軸数	総重量 (t)	軸重(t)						軸距(m)				
				P1	P2	P3	P4	P5	P6	L1	L2	L3	L4	L5
トラック	T15	a	3	14.10	5.14	4.48	4.48	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		b	3	15.13	5.13	5.00	5.00	—	—	—	3.20	1.30	—	—
	T20	a	3	20.00	5.62	7.19	7.19	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		b	3	20.01	5.92	7.05	7.05	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		c	3	20.15	5.45	7.35	7.35	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		d	3	20.56	5.02	9.58	6.01	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		e	3	20.71	5.15	9.68	5.88	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		f	3	21.15	5.27	7.94	7.94	—	—	—	3.20	1.30	—	—
		g	3	21.41	4.85	9.58	5.98	—	—	—	3.20	1.30	—	—
トラクタ+トレーラ	T25	3	25.01	6.29	9.36	9.36	—	—	—	—	3.20	1.30	—	—
	Tr35	a	4(2+2)	33.62	6.35	9.03	9.55	8.70	—	—	3.16	8.14	1.50	—
		b	4(2+2)	35.39	6.28	9.98	9.33	9.81	—	—	3.18	7.79	1.30	—
	Tr42	a	5(2+3)	41.81	6.80	11.33	8.54	8.10	7.03	—	3.60	7.21	1.32	1.32
		b	5(2+3)	42.05	6.70	11.52	6.00	7.84	9.99	—	3.18	7.25	1.32	1.32
	Tr45	6(3+3)	44.22	5.51	7.10	7.26	6.34	8.66	9.35	2.96	1.30	7.00	1.32	1.32

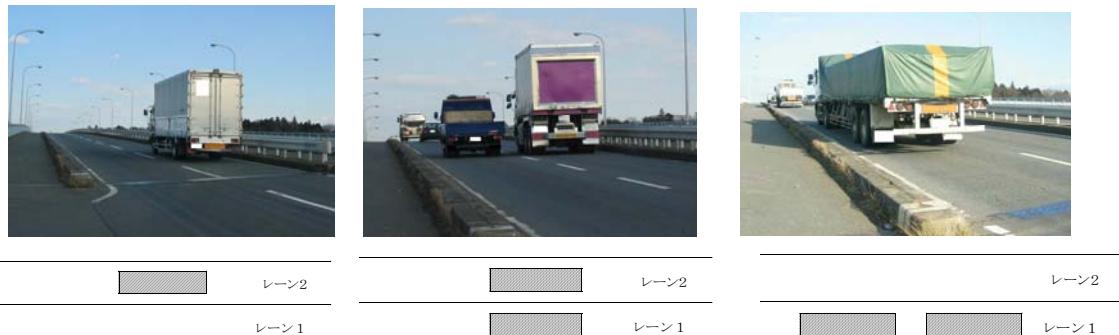


(a) 3 軸 トラック



(b) トラクタ+トレーラ

図-3.1.1 荷重車の概要



(1) 単独

(2) 並走

(3) 連行



(4) 連行並走



(5) 50%連行並走
走行パターン

表-3.1.5 測定位置一覧

番号	種類	設置場所		
Gn-L/2	ひずみゲージ	支間の 1/2 地点の Gn 桁下フランジ(n : 主桁番号)		
Gn-L/4	〃	〃 1/4	〃	
Gn-L/8	〃	〃 1/8	〃	
m-IN	高感度ひずみ計	レーン m 走行位置直下の床版橋軸方向ひずみ入側(m:レーン番号)		
m-OUT	〃	〃	出側	〃
2-UP	〃	箱桁上フランジ下面		

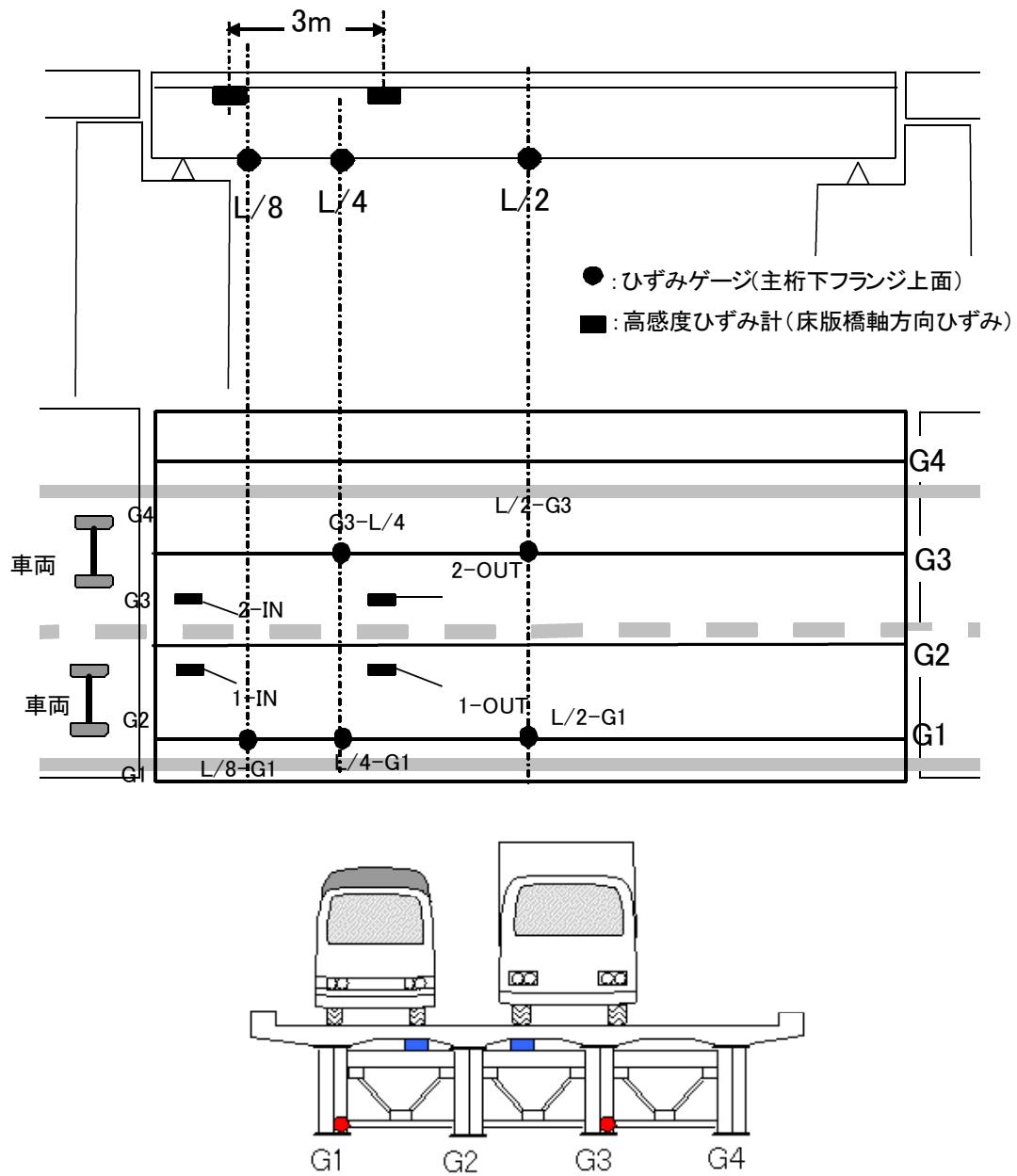
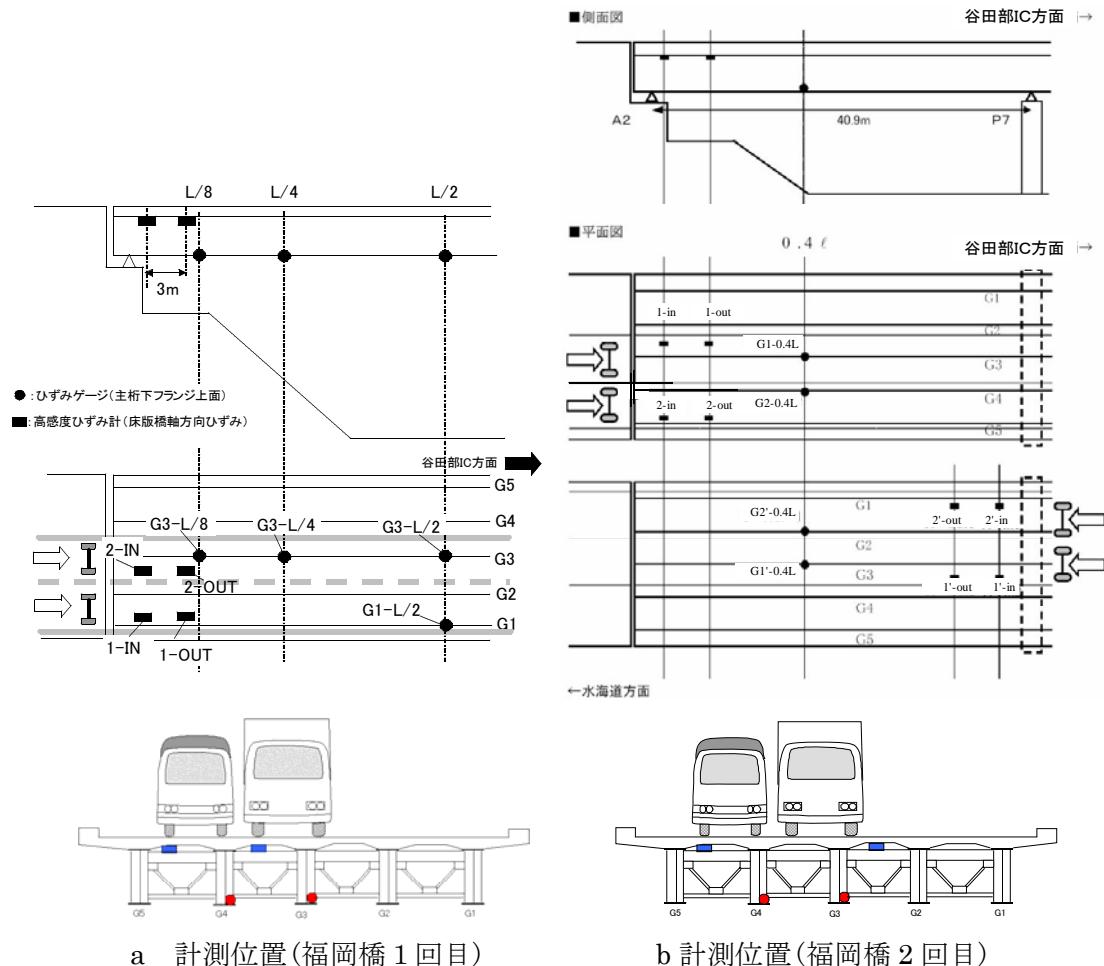
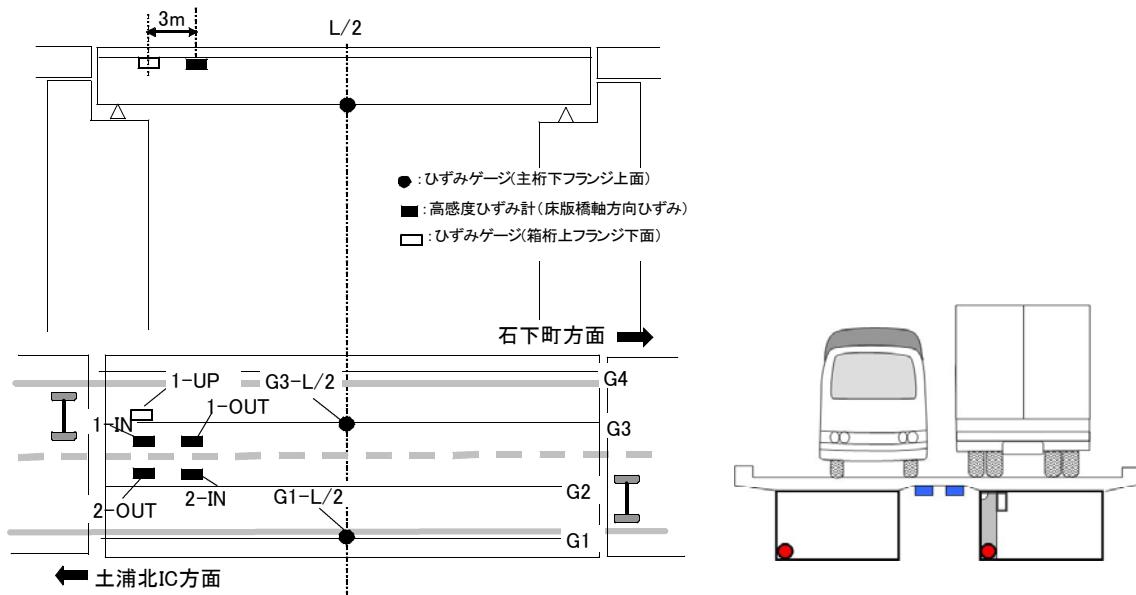


図-3.1.3(1) 計測位置(試験橋梁)



c 橋梁位置
図-3.1.3(2) 福岡橋



a 測定位置



b 橋梁位置

図-3.1.3(3) 北陸橋

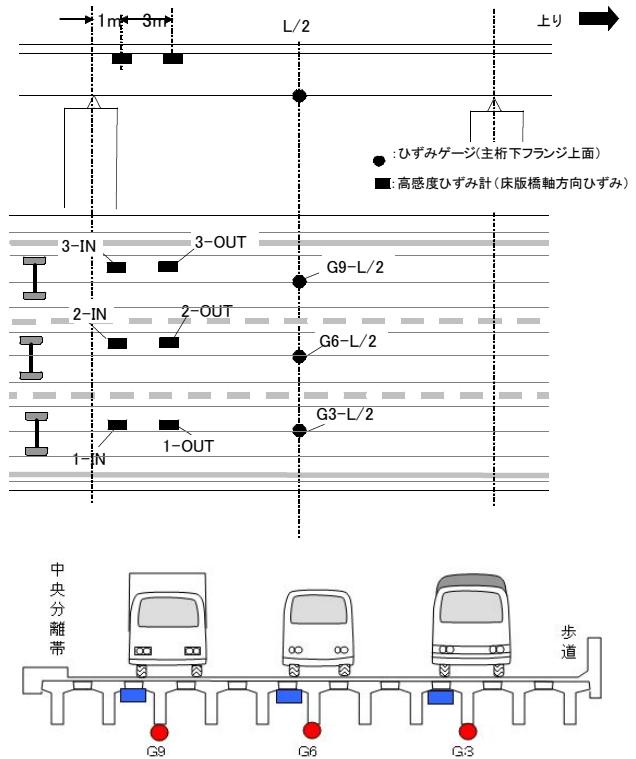


図-3.1.3(4)-a 測定位置(岩屋高架橋)

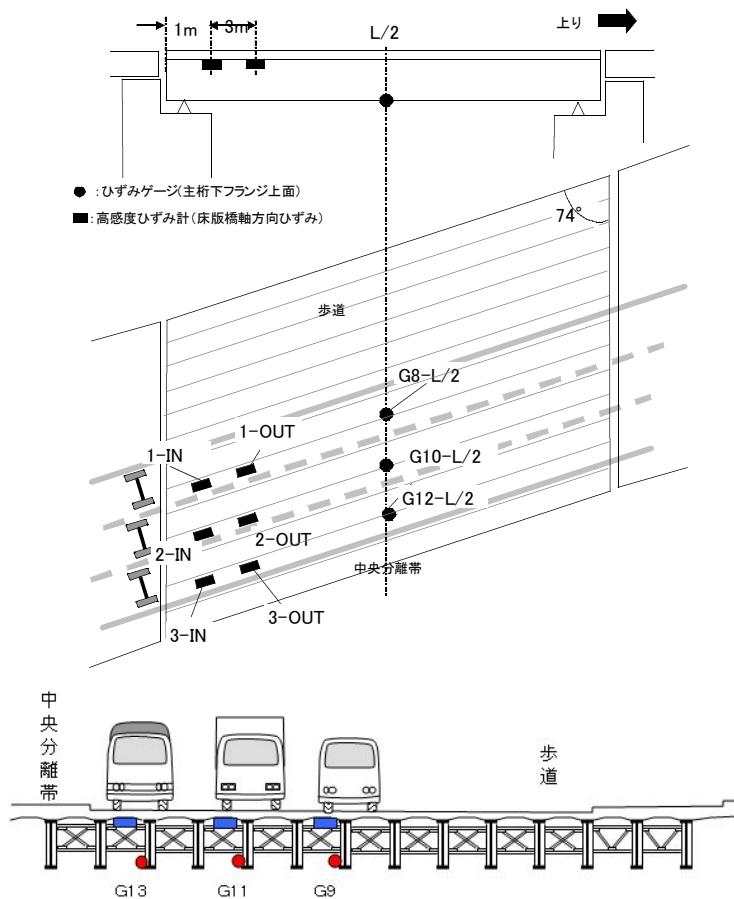


図-3.1.3(5)-a 測定位置(住吉川橋)

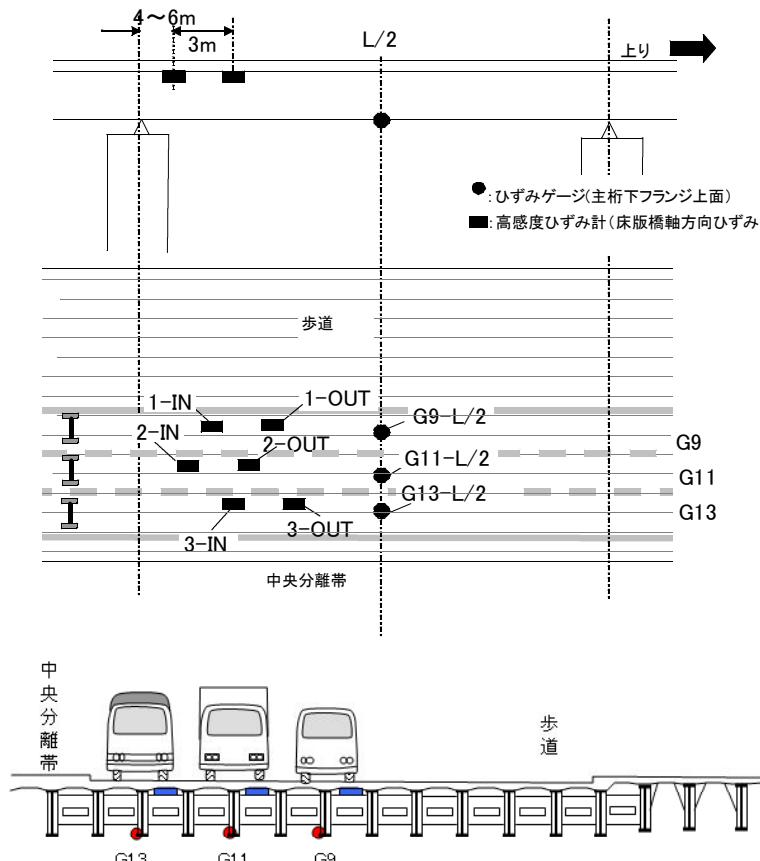
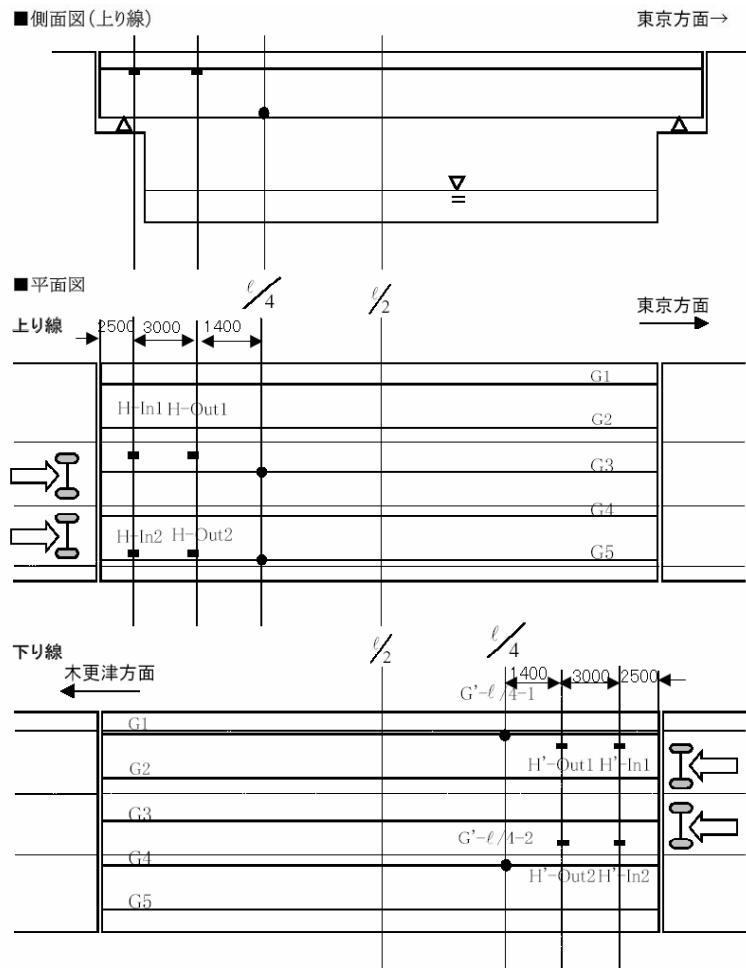


図-3.1.3(6)-a 測定位置(芦屋川橋)



図-3.1.3(4,5,6)-b 橋梁位置(岩屋高架橋、住吉川橋、芦屋川橋)

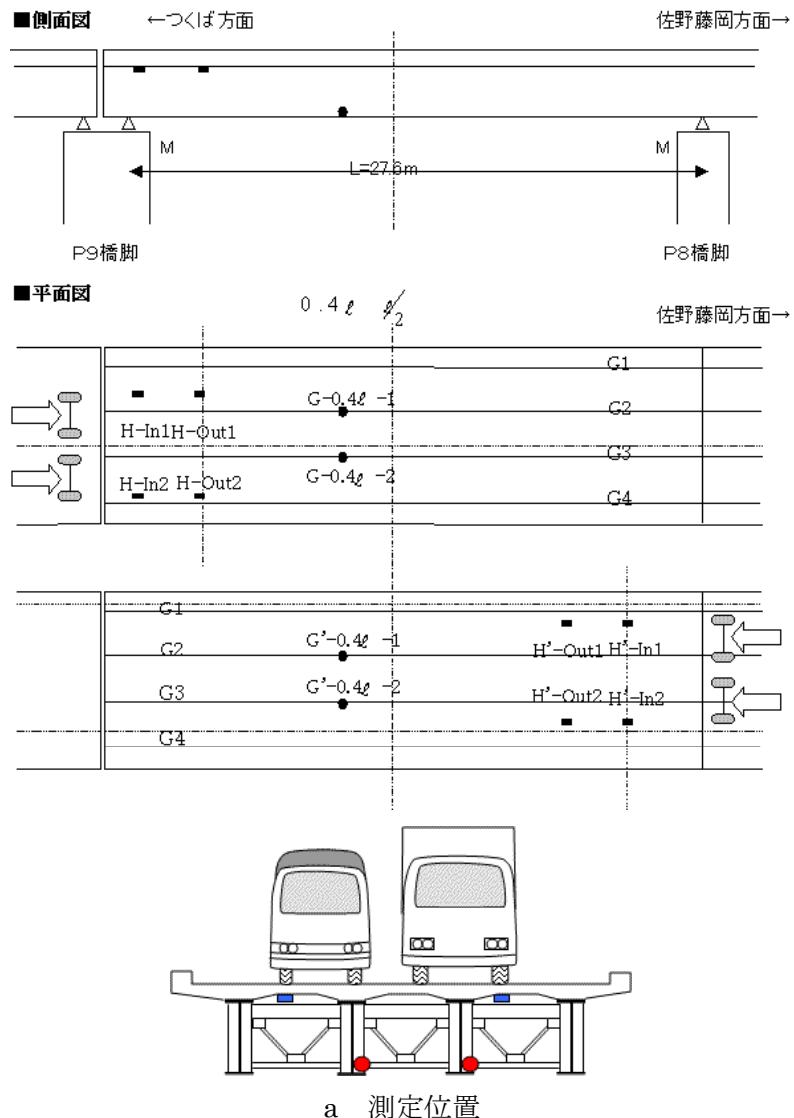


a 測定位置



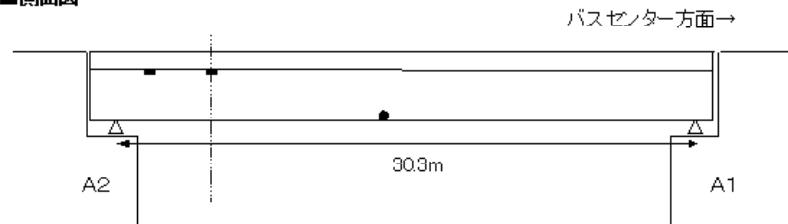
b 橋梁位置

図-3.1.3(7) 甲子橋

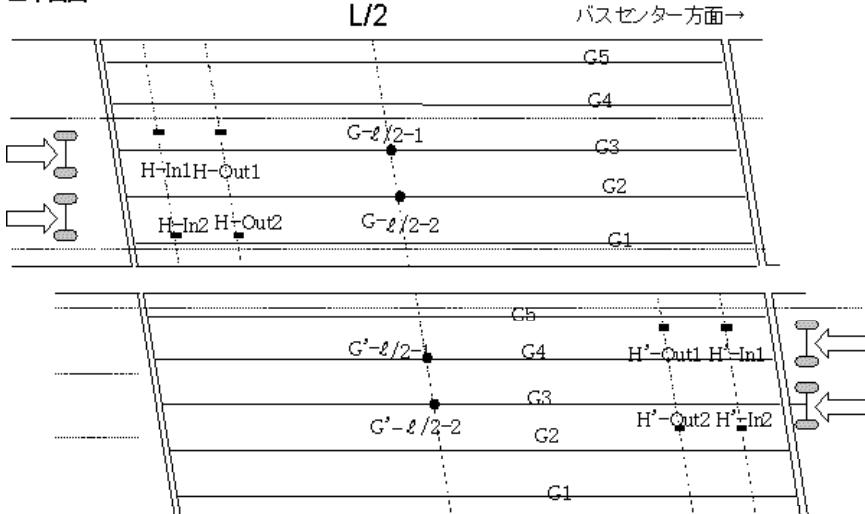


b 橋梁位置
図-3.1.3(8) 小山高架橋

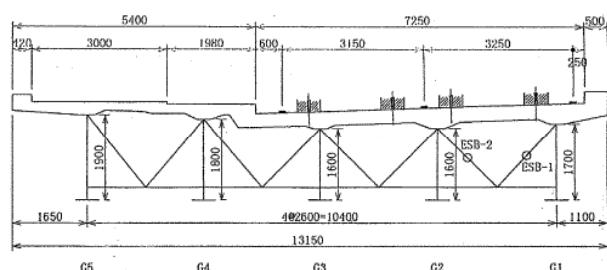
■側面図



■平面図



←国総研方面



a 測定位置



b 橋梁位置

図-3.1.3(9) 蓮沼橋

3.2 橋梁の条件

3.2.1 単純・連続の違い

表-3.2.1 に、単純桁および連続桁の各着目位置における曲げモーメントの影響線と3軸トラック通過時の曲げモーメントの例を示す。当システムでは、測定に用いる桁が単純桁であると仮定し、主桁のひずみの影響線を一次式で近似している。しかしながら、連続桁の場合は、表-3.2.1 からもわかるように、影響線が一次式にはならず、他径間に存在する車両の影響も受けることから、連続桁に適用する場合には誤差が生じる可能性がある。

表-3.2.1 曲げモーメントの影響線と3軸トラック走行時波形の例

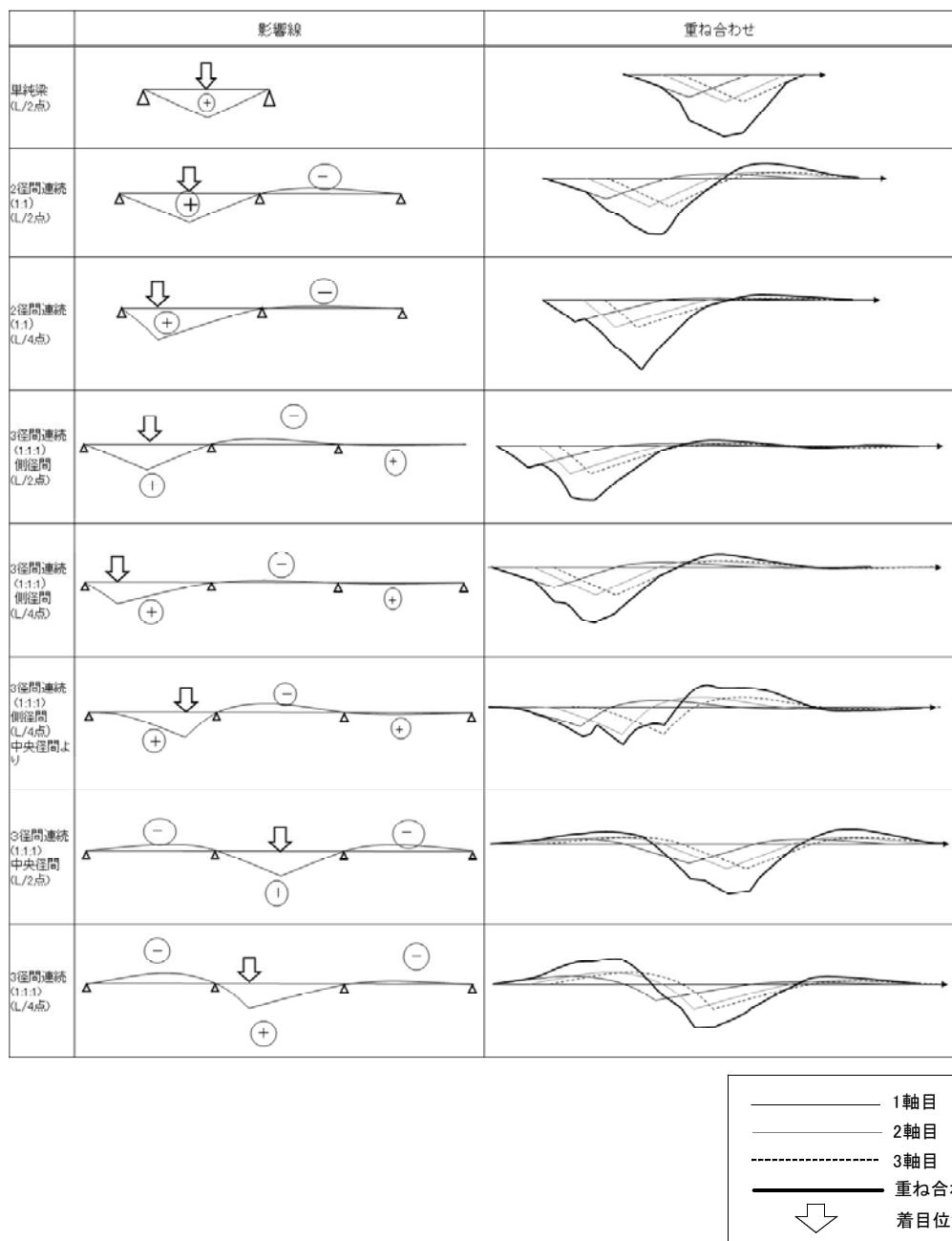


図-3.2.1 には、3軸トラックが単純桁（試験橋梁）および連続桁（福岡橋）を通行した際の主桁のひずみ波形の例を示す。これらの結果より、連続桁の場合、単純桁よりもひずみの実測値と影響線を一次式で近似した当システムでの計算値との相違が大きくなっていることがわかる。

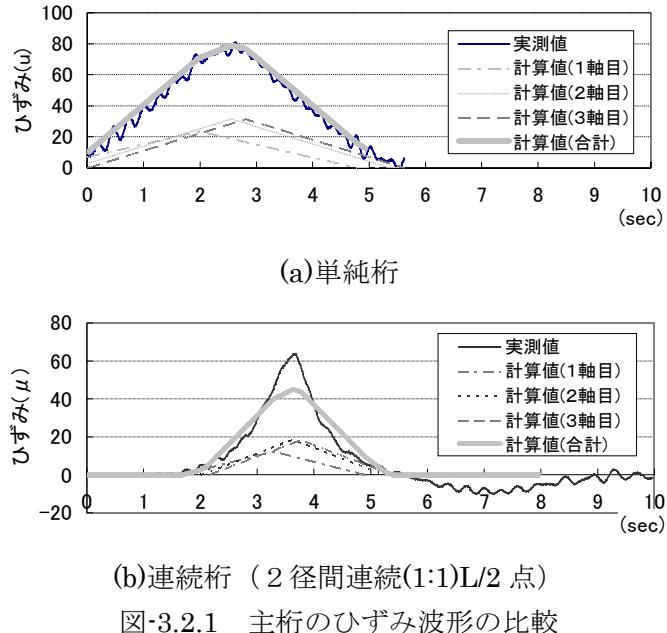


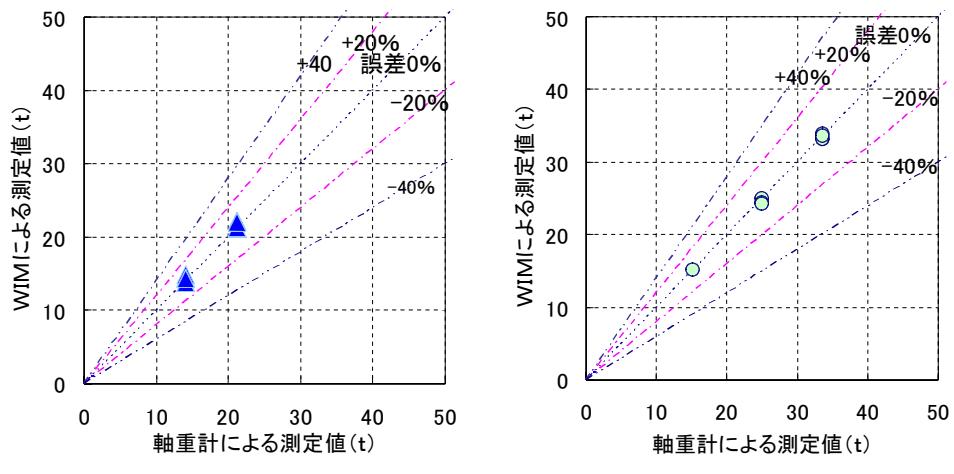
図-3.2.1 主桁のひずみ波形の比較

表-3.2.1 に連続桁（福岡橋）において、3種類の車両が複数回走行したときの車両総重量、軸重等の測定結果を、図-3.2.2 および図-3.2.3 に、それぞれ総重量および軸重について、本システムによる測定値と軸重計での計量値との関係を示す。これらの結果より、計算に用いる主桁のひずみ波形には、連続桁であることによる計算値の実測値との差が生じていたものの、総重量や軸重の計算結果には、大きな影響を及ぼしていないことがわかった。

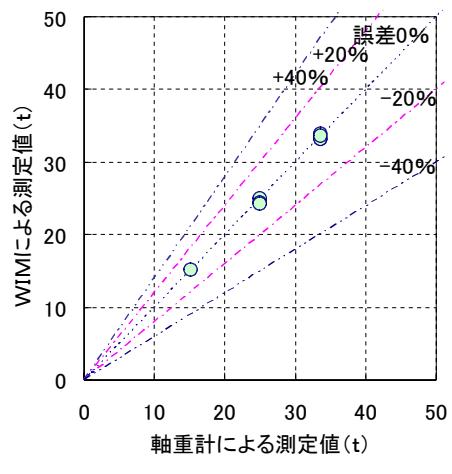
したがって、連続橋においても他径間の影響を受けにくい計測位置を選定する等の配慮をすることにより、十分適用が可能であるといえる。

表-3.2.2 連続橋における重量算出結果の例

車両 No.	算出 方法	車両 総重量 (t)	総重量 精度(%)	軸重 (t)				軸間距離(m)		
				P1	P2	P3	P4	L1	L2	L3
T15b	BWIM	14.9	106	4.0	5.4	5.4		3.2	1.4	
		14.5	103	7.0	3.8	3.8		3.1	1.4	
		13.8	98	4.0	4.9	4.9		3.2	1.3	
		13.7	97	3.8	4.9	4.9		3.2	1.2	
		14.3	101	3.9	5.2	5.2		3.2	1.3	
	軸重計	14.10	—	5.14	4.48	4.48		3.2	1.3	
T20f	BWIM	21.2	100	5.5	7.9	7.9		3.2	1.3	
		22.2	105	5.4	8.4	8.4		3.3	1.3	
		22.2	105	5.2	8.5	8.5		3.1	1.4	
		22.0	104	5.2	8.4	8.4		3.2	1.3	
		21.3	101	5.2	8.1	8.1		3.3	1.3	
	軸重計	21.15	—	5.27	7.94	7.94		3.2	1.3	
T35b	BWIM	31.7	90	4.8	6.4	10.3	10.3	3.2	7.8	1.5
		34.3	97	8.5	13.5	6.1	6.1	3.2	7.7	1.5
		27.0	76	9.3	15.1	6.3	6.3	3.2	8.0	1.4
	軸重計	35.387	—	6.28	9.98	9.98	9.81	3.18	7.79	1.3

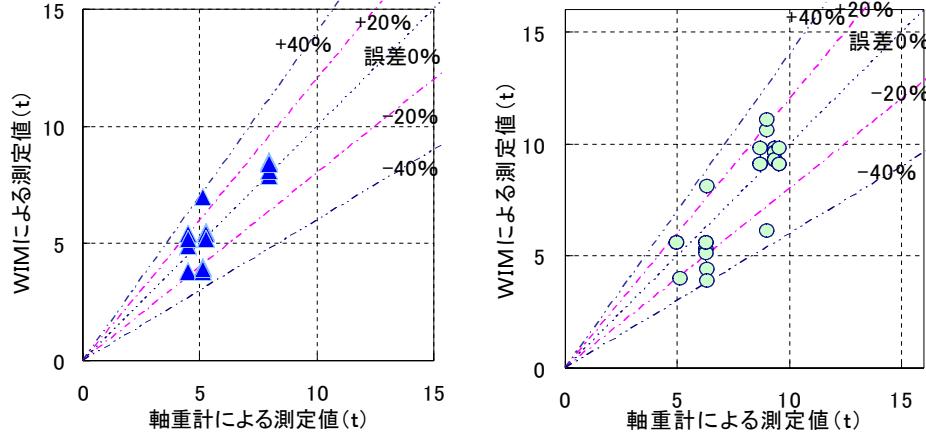


(a) 連続鋼桁橋(福岡橋)

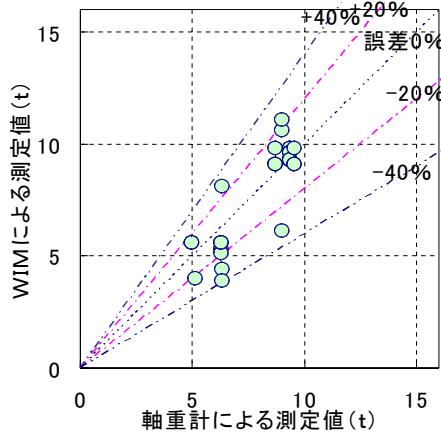


(b) 単純鋼桁橋(試験橋梁)

図-3.2.3 総重量精度(単純・連続の別)



(a) 連続鋼桁橋(福岡橋)



(b) 単純鋼桁橋(試験橋梁)

図-3.2.3 軸重精度(単純・連続の別)

3.2.2 主桁形式の違い (I桁・箱桁の別)

当システムでは、車軸の検出や軸距の算定に、輪荷重直下のRC床版下面橋軸方向のひずみを用いている。したがって、図-3.2.4の(a)や(b)に示すように、輪荷重直下のコンクリートが露出していない場合には、車軸通過時の床版のひずみ応答の検出が難しく、計測が困難となる可能性があると懸念される。また、箱桁の場合、I桁と比較して桁全体の剛性が高いため、応答が小さくなる可能性がある。

図-3.2.5は、同一車両が通過したときの各部材のひずみ応答の例を示したものである。(a)のようなRC床版下での計測では、車軸の通過に伴う明瞭なピークが取得されるが、このように、隣接する車線を走行する車両との距離が近い位置にひずみゲージを設置した場合、隣接車両の影響が生じる可能性があるので注意が必要である。(b)のように桁上フランジでの計測では、床版のコンクリートで直接測定した場合と比較して応答量は小さいものの、各車軸毎に独立した応答となっている。そのため、各車軸の検出が可能な場合もあることがわかる。(c)の垂直補剛材上端部では、車軸のピークが明瞭に取得されていないため、この場合、車軸の検知への利用には適さないことがわかる。

以上のことから、鋼箱桁橋の場合でも計測に適切な部材を選定することにより、十分に適用が可能であることが確認された。図-3.2.7及び図-3.2.8に鋼版桁橋及び鋼箱桁橋におけるしたときの車両総重量、軸重の測定結果の比較例を示す。

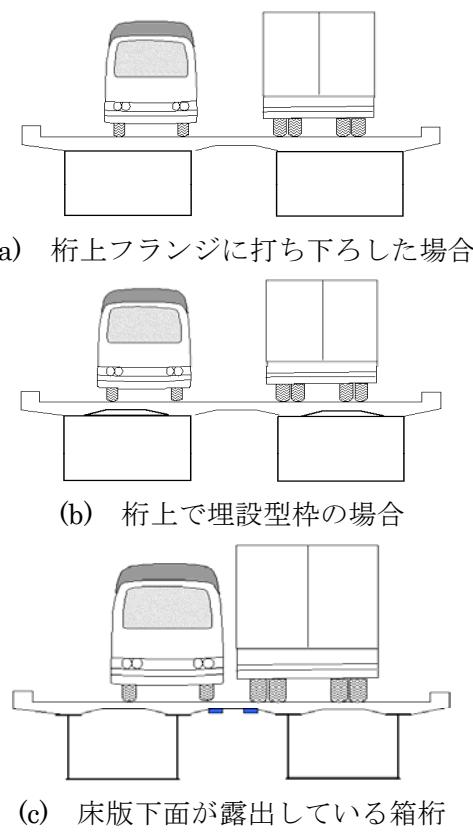


図-3.2.4 箱桁の形式

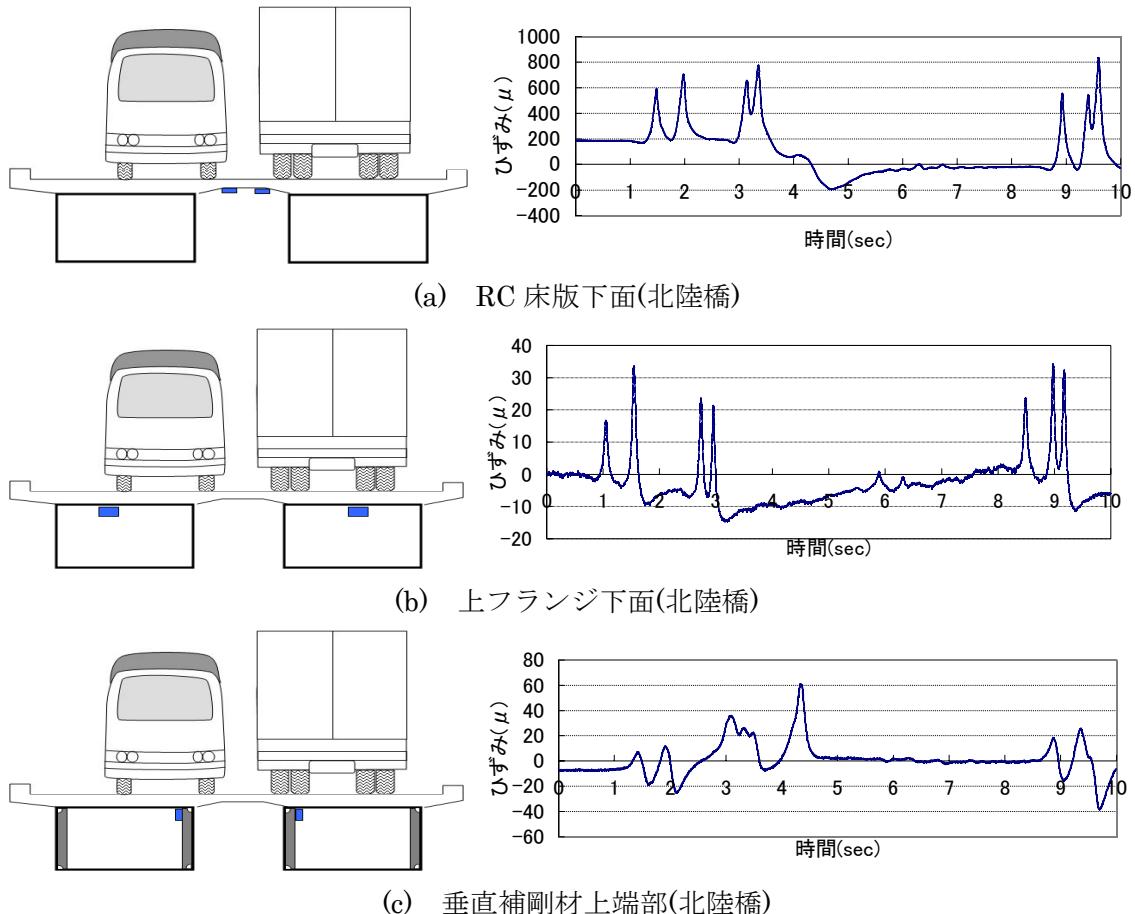


図-3.2.5 鋼箱桁橋において車両の検知に用いるひずみ

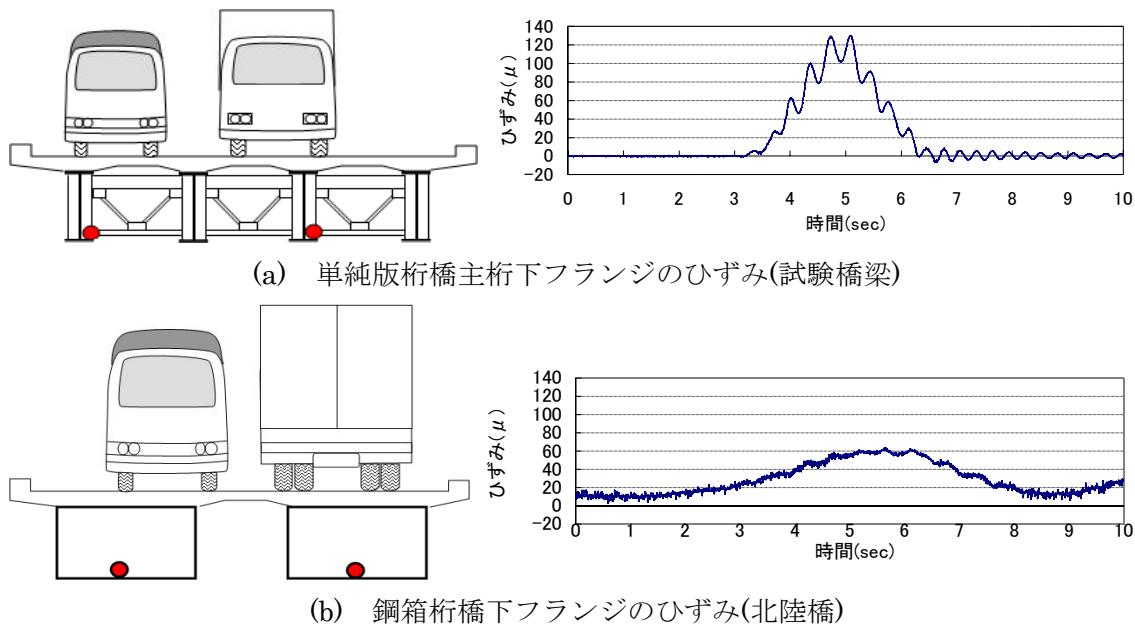


図-3.2.6 鋼箱桁橋において重量計算に用いるひずみ

表-3.2.3 鋼箱桁橋の軸重算出精度

車両No.	算出方法	回数	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)			
					P1	P2	P3	P4
T15b	BWIM	1	12.7	90	10.2	1.3	1.3	
		2	12.7	90	16.3	-1.8	-1.8	
		3	12.3	87	14.7	-1.2	-1.2	
		4	13.5	96	1.0	6.2	6.2	
		5	15.0	106	-0.7	7.9	7.9	
		6	13.1	93	0.1	6.5	6.5	
	軸重計		14.10	—	5.14	4.48	4.48	
T20f	BWIM	1	19.1	90	14.1	2.5	2.5	
		2	21.0	99	12.2	4.4	4.4	
		3	20.3	96	11.4	4.5	4.5	
		4	21.3	101	3.7	8.8	8.8	
		5	21.7	103	8.0	6.8	6.8	
		6	21.5	102	-4.4	13.0	13.0	
	軸重計		21.15	—	5.27	7.94	7.94	
T35b	BWIM	1	34.0	96	9.3	14.2	5.2	5.2
		2	32.7	92	8.8	13.7	5.1	5.1
		3	34.6	98	8.4	12.5	6.8	6.8
		4	35.4	100	8.9	13.7	6.4	6.4
		5	33.1	94	7.1	6.3	9.8	9.8
	軸重計		35.387	—	6.28	9.98	9.33	9.81

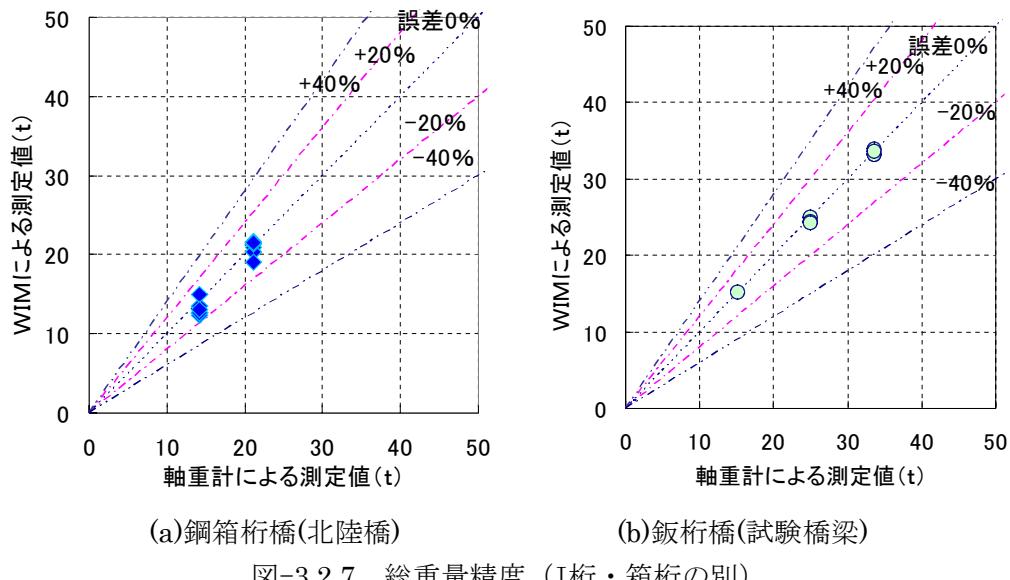


図-3.2.7 総重量精度 (I桁・箱桁の別)

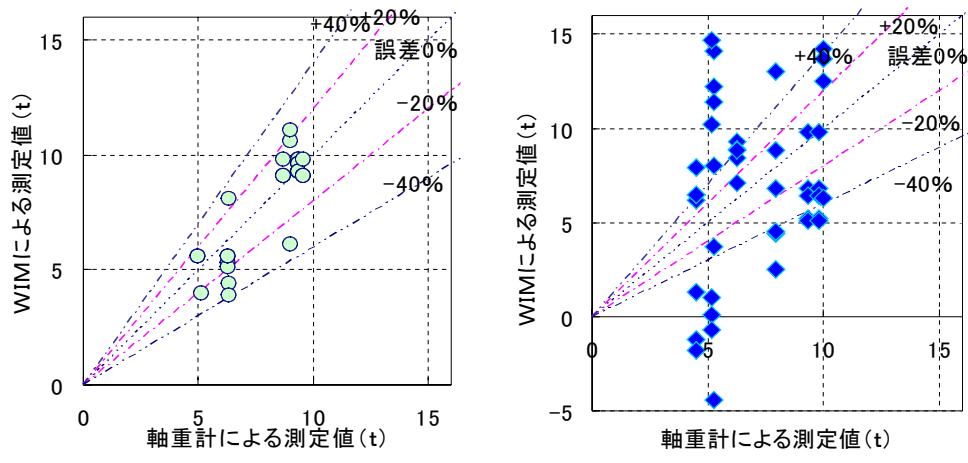


図-3.2.8 軸重精度 (I桁・箱桁の別)

表-3.2.3 に示すとおり、本計測例では一部で軸重が負と推計されるケースが存在する。これは、本計測で用いた鋼箱桁橋(北陸橋)は、キャンバーが大きい上、信号が近接して存在していたため、速度変化の影響を強く受けている可能性がある。したがって、鋼箱桁橋(北陸橋)の軸重精度については、「3.3.3.2 速度変化」において別途考察する。

3.2.3 主桁材料の違い（鋼・コンクリートの別）

主桁材料がコンクリートの場合、一般に主桁のひずみ応答量が鋼桁の場合よりも小さく、ノイズ等の外乱の影響が相対的に大きくなり、算定精度が低下することが懸念される。しかしながら、図-3.2.9に示すようにひずみの応答量が鋼桁の場合と大差がない場合もあり、PCT桁橋（岩屋高架橋）であっても総重量および軸重の算定精度に悪影響を及ぼしていないことが確認できた。

また、床版の支間が小さくかつ桁と一体となっているPCT桁橋間詰め部（支間1.06m）は、鋼桁橋のRC床版に比べて荷重に対する応答が小さく認識が困難と思われたが、車両がゲージ位置を通過する前後個々の軸に対応するひずみ応答のピーク値の突出は小さくなるものの、車軸の分離や位置の特定は可能であった。

表-3.2.4、図-3.2.10に総重量の算定結果、図-3.2.11に軸重の算定結果を示す。

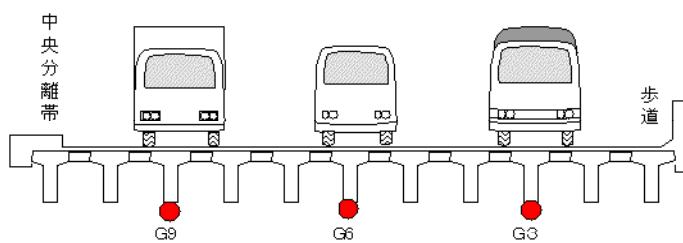


図-3.2.9 コンクリート橋計測位置（主桁）

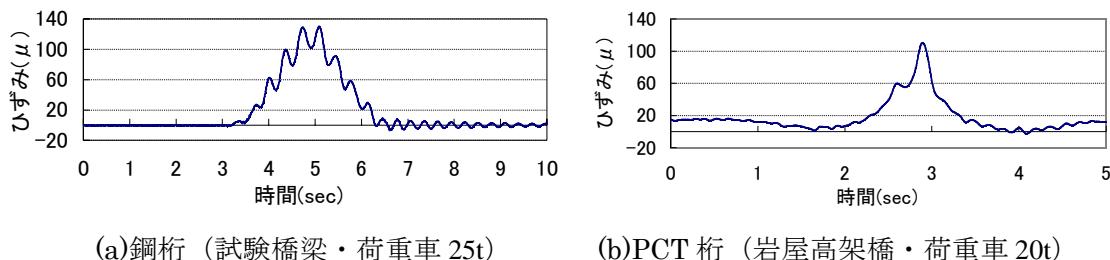


図-3.2.10 鋼桁とコンクリート桁の下フランジのひずみ波形の比較

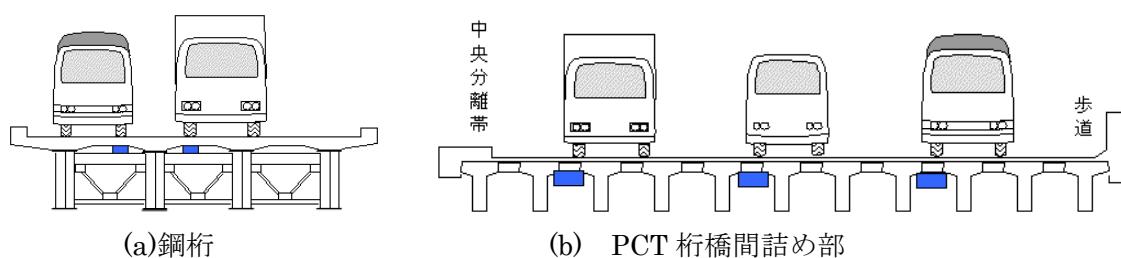


図-3.2.11 計測位置（床版）

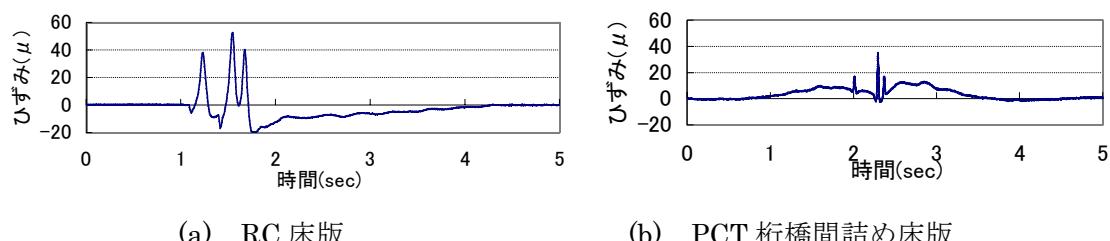


図-3.2.12 床版下面橋軸方向ひずみ

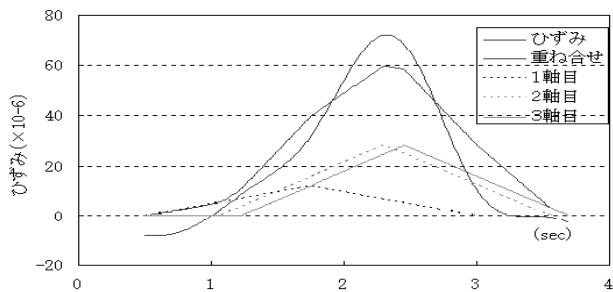
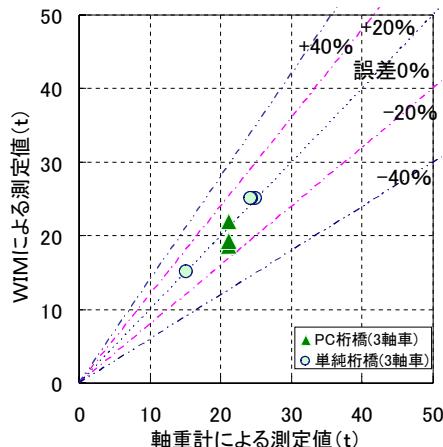


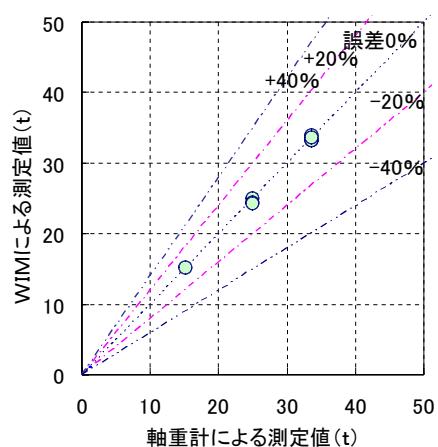
図-3.2.13 計算値と実測値

表-3.2.4 PCT 桁橋重量算出精度

車両 No	計測方法	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
				P1	P2	P3
T20f	BWIM	18.7	88	3.2	7.7	7.7
		19.2	91	3.6	7.8	7.8
		21.9	104	5.2	8.3	8.3
		19.4	92	2.0	8.7	8.7
	軸重計	21.15	—	5.27	7.49	7.49

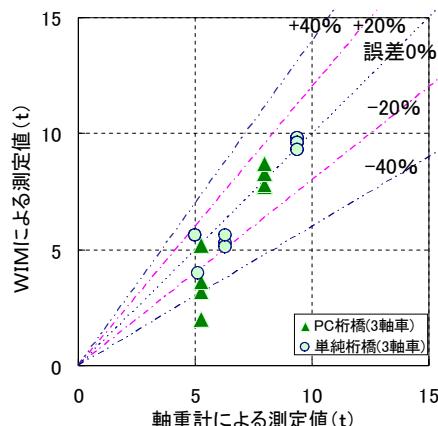


(a)PCT 桁橋(岩屋高架橋)

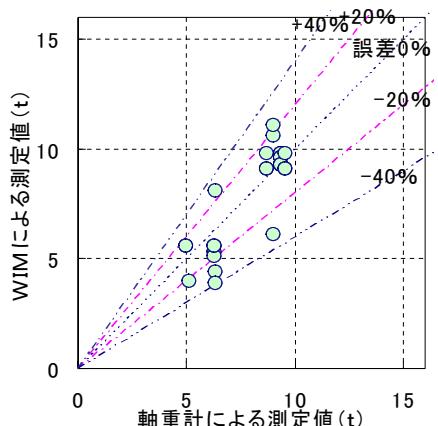


(b)鋼桁橋(試験橋梁)

図-3.2.13 総重量精度



(a)PCT 桁橋(岩屋高架橋)



(b)鋼桁橋(試験橋梁)

図-3.2.14 軸重精度

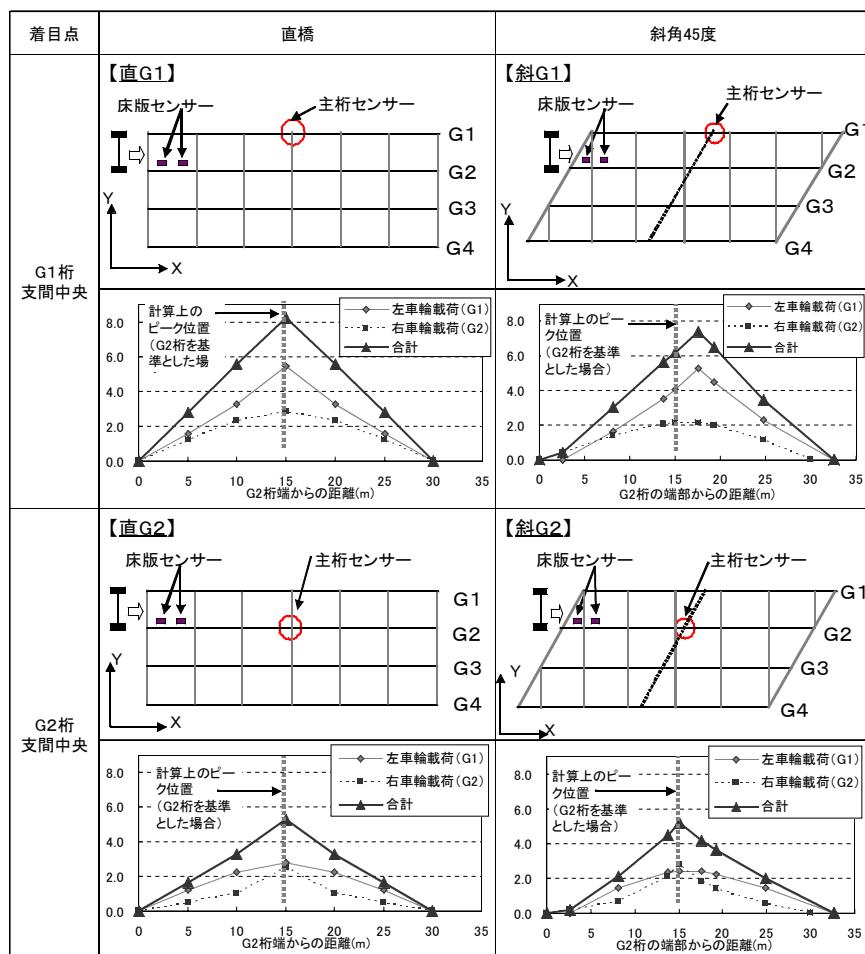
3.2.4 直橋・斜橋の違い

斜角を有する橋梁は、主桁位置に着目した場合と実際の車輪通過位置に着目した場合とで、橋梁部通過のタイミングが異なっている。そのため、計算上、桁を一本の棒として扱う当システムでは、理論上の主桁のひずみ応答と実際の応答との間に差が生じ、算定精度に影響を及ぼすことが懸念される。

表-3.2.4 は、斜角の有無と主桁支間中央部におけるひずみとの関係を格子モデルを用いて算定したものである。斜角がない場合は、常に輪荷重が支間中央部にきたときにひずみ応答のピークを生じているのに対し、斜角を有する場合は、ひずみ応答のピークを生じる位置が変化している様子がわかる。図-3.2.14 は、斜橋（蓮沼橋）における主桁のひずみ応答の例である。計算値と実測値は進入時のタイミング差により、初期の波形の勾配に若干の差が生じている。

図-3.2.15 に総重量の算定結果、図-3.2.16 に軸重の算定結果を示す。これらによると 60° 程度の斜角を有する場合でも、実用上問題のない精度で測定できており、斜角を有する橋梁でも十分に適用できる場合があることが示された。

表-3.2.4 主げたに設置するひずみゲージの斜角による影響



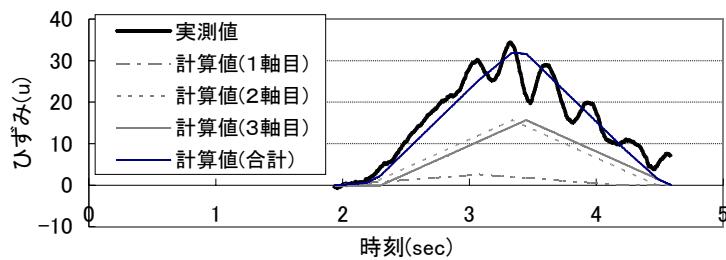
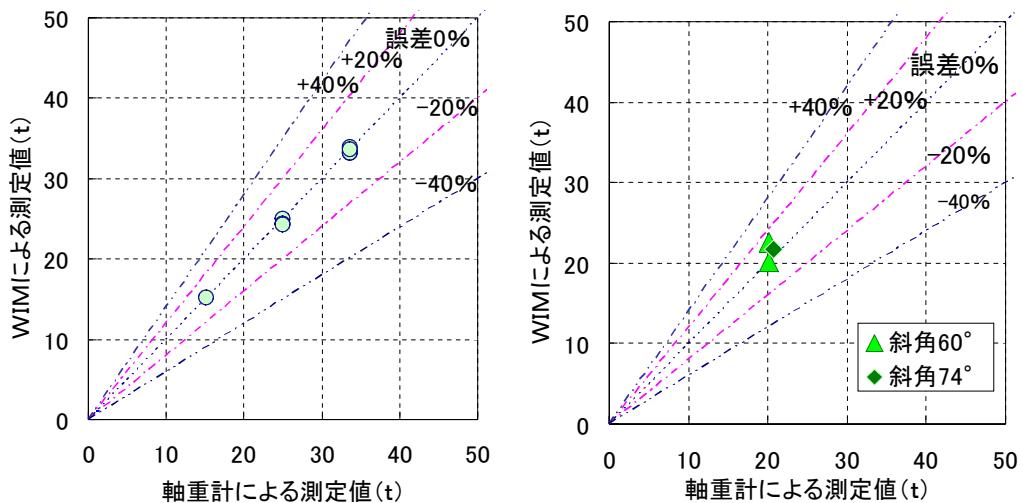


図-3.2.14 主桁のひずみ応答波形の例（斜橋）

表-3.2.5 軸重算出結果の例（斜角の有無の影響）

調査橋梁	車両No.	測定方法	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
					P1	P2	P3
試験橋梁	T15a	BWIM	14.9	106	4.0	5.4	5.4
			14.5	103	7.0	3.8	3.8
			13.8	98	4.0	4.9	4.9
			13.7	97	3.8	4.9	4.9
			14.3	101	3.9	5.2	5.2
	T25	BWIM	14.10	—	5.13	5.00	5.00
			21.2	100	5.5	7.9	7.9
			22.2	105	5.4	8.4	8.4
			22.2	105	5.2	8.5	8.5
			22.0	104	5.2	8.4	8.4
	蓮沼橋	BWIM	21.3	101	5.2	8.1	8.1
			25.01	—	6.29	9.36	9.36
住吉川橋	T20c	BWIM	20.15	100	5.4	7.3	7.3
			22.6	112	5.4	9.0	9.0
	軸重計	軸重計	20.15	—	5.45	7.35	7.35



(a) 直橋(試験橋梁)

(b) 斜橋(蓮沼橋,住吉川橋)

図-3.2.15 総重量精度

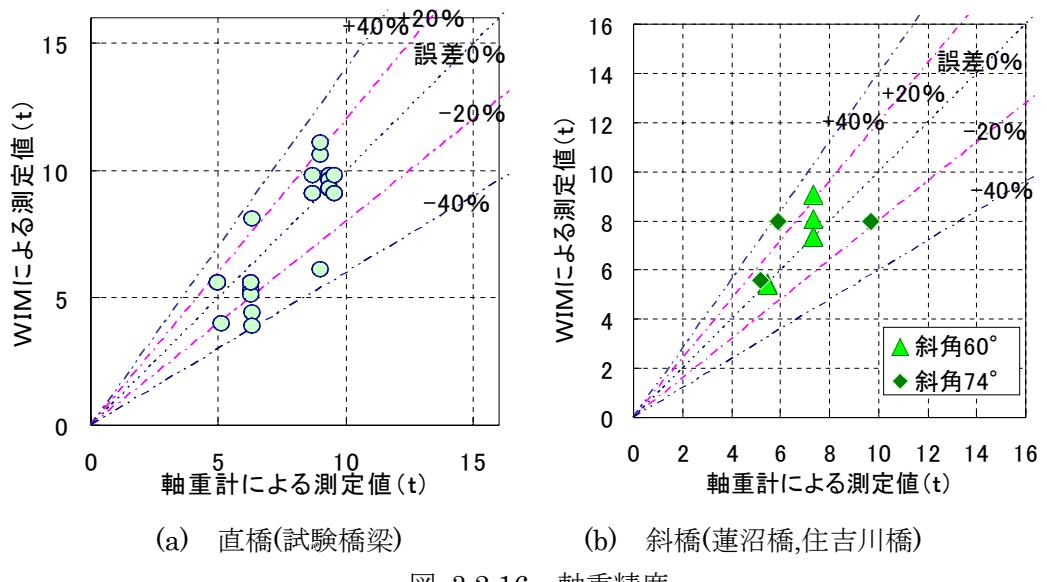


図-3.2.16 軸重精度

3.2.5 荷重分配効果の影響

当システムでは、主桁のひずみの影響線を一次式で近似しているが、横桁や対傾構などによる荷重分配効果により、厳密には主桁ひずみの影響線は一次式とはならず、誤差の原因となる可能性がある。

図-3.2.18 に、単純鋼 I 枠橋（橋長 30m, 主げた本数 4 本, 横桁（対傾構）数 7 本）を模擬した格子モデルを用いて、荷重分配効果や集中荷重の載荷位置の違いと影響線形状との関係を計算した結果を示したものである。格子モデルの概略および一覧をそれぞれ図-3.3.17、表-3.3.8 に示す。

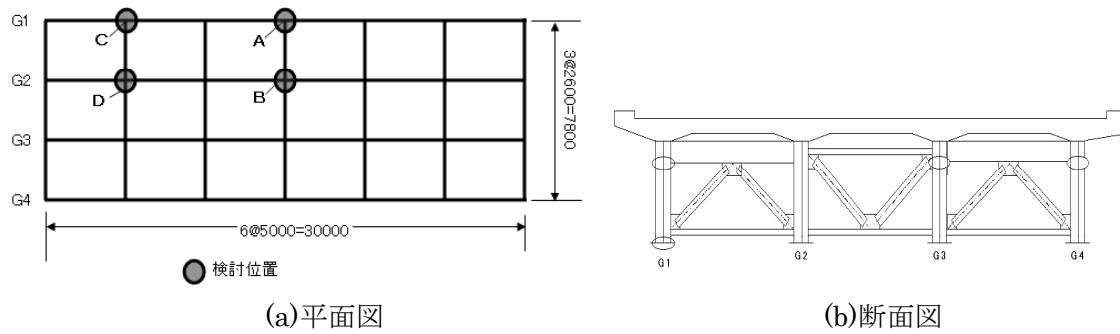


図-3.2.17 格子モデルの概略

表-3.2.8 モデル一覧

モデル	端横桁(A1)	中間横桁	端横桁(A2)	その他
モデル 01	フルウェブ	フルウェブ	フルウェブ	対傾構
モデル 02	対傾構	対傾構	対傾構	対傾構
モデル 03	フルウェブ	フルウェブ	フルウェブ	フルウェブ
モデル 04	対傾構	フルウェブ	対傾構	対傾構
モデル 05	フルウェブ	対傾構	フルウェブ	対傾構

図-3.2.18 の結果から、G1 枠の支間中央部のひずみに着目した場合については、荷重分配効果による主桁ひずみの影響線形状に大きな違いは見られていない。一方、G2 枠や主桁端部付近のひずみに着目した場合は、載荷条件によって、影響線形状が大きく変化する場合があり、誤差の原因となる可能性がある。

主桁ひずみの測定箇所を選定する際には、こうした主桁ひずみの応答特性に十分配慮する必要がある。

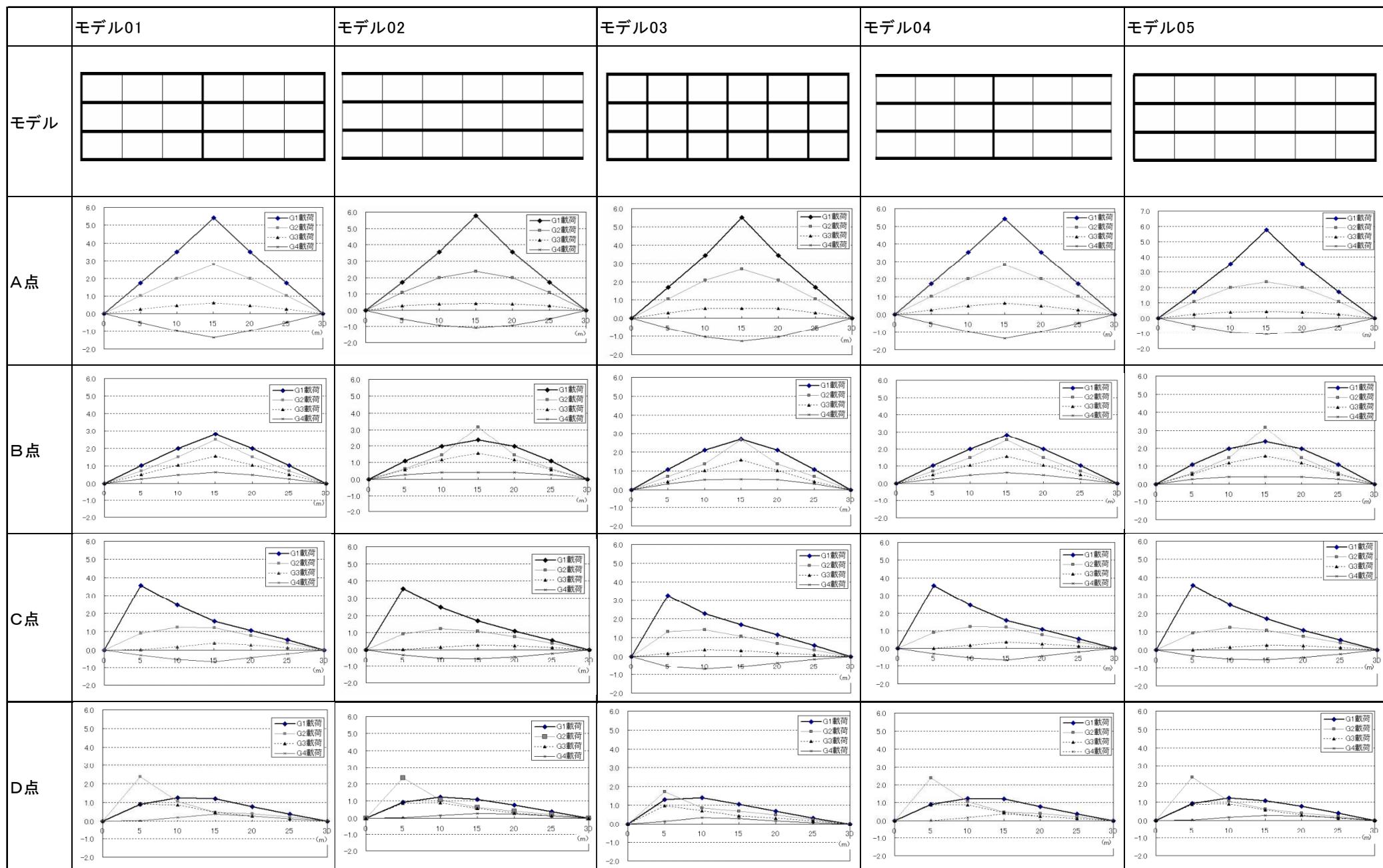


図-3.2.18 荷重分配効果の相違と影響線形状の関係

3.2.6 支間長の違い

当システムでは、橋梁上に同時載荷される車軸数が多くなると、主桁の応答値から各軸重を算定する際の未知数が増え、算定精度が低下する可能性がある。したがって、複数の車両が同時載荷される可能性が高まる支間長の長い橋梁に適用する場合には注意が必要である。

表-3.2.8 に、橋梁の支間長の違いによって、同時載荷される確率がどのように変化するのかを調査するため、大型車の連行走行や並列走行の発生率を示す。福岡橋と北陸橋を比較すると、計測台数、車線数、分析時間がほぼ同じであるにもかかわらず、支間長が長くと連行・並走率が高くなっている。また、岩屋高架橋、住吉川高架橋、芦屋川橋について比較しても同様のことがいえる。さらに、2車線の橋梁上に大型車混入率を考慮して車両を発生させ、連行・並走率を算出した結果を表-3.2.9 に示す。ここからも、支間長、大型車混入率が増加するほど、連行・並走率が大きくなるといえる。

以上のことから、本システムの適用にあたってはなるべく同時載荷されうる軸数が小さくなるよう、支間 30m 程度の単純桁橋を選定するのがよい。

表-3.2.8 連行並走率

橋梁名	福岡橋	北陸橋	岩屋高架橋	住吉川高架橋	芦屋川橋
支間長(m)	40.9	53.4	21.4	24.0	33.4
車線数	2車線	2車線	3車線	3車線	3車線
分析時間	6時間	6時間	12時間	12時間	12時間
計測台数	554	683	1103	2073	2065
単独走行台数	430	345	865	1321	867
連行対象台数	46	256	8	88	172
並走対象台数	78	82	230	664	1026
単独走行率(%)	78	51	78	64	42
連行対象率(%)	8	37	1	4	8
並走対象率(%)	14	12	21	32	50

表-3.2.9 連行並走率シミュレーション結果(くりかえし数 100 回の最大値)

連行 並走率 (%)	支間長(m) 大型車混入率(%)	30	40	50	60
		20	6	6	6
連行率	30	10	11	11	11
	40	16	16	17	17
	20	5	6	6	5
並走率	30	10	10	11	12
	40	15	15	17	16

3.3 車両の走行条件

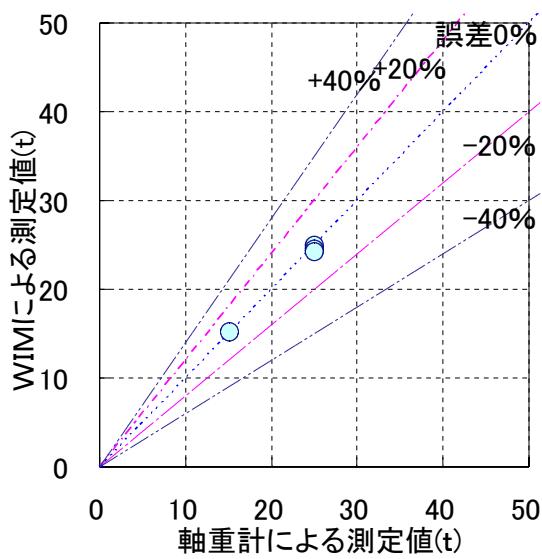
3.3.1 車両の軸数

橋梁上に同時載荷される車軸数が多くなると、主桁のひずみから各軸重を算定する過程で、未知数が多くなるため、精度の低下を生じる場合がある。ここでは、最大6軸を有する車両の単独走行時を対象として軸数と算定精度の関係を調査した。

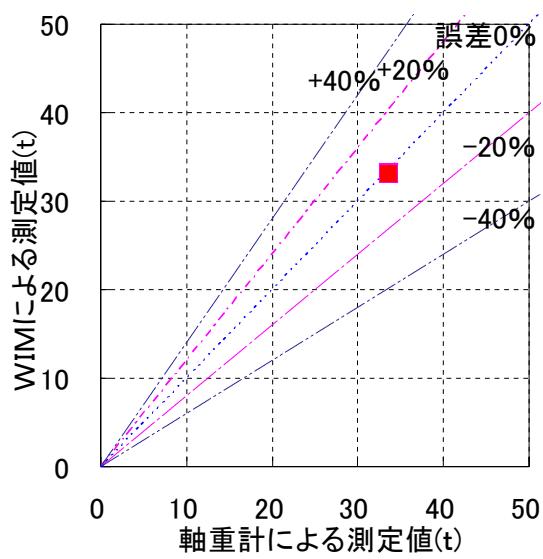
表-3.3.1、図-3.3.1、2に3軸車から6軸車までの車両の軸重算出結果を示す。車両軸重の相違が総重量の算出精度に及ぼす影響は少ないものの、軸数が多い車両で軸重算出結果がばらついており、精度の低下がみられる。

表-3.3.1 車軸数と軸重算出精度の検証結果の例

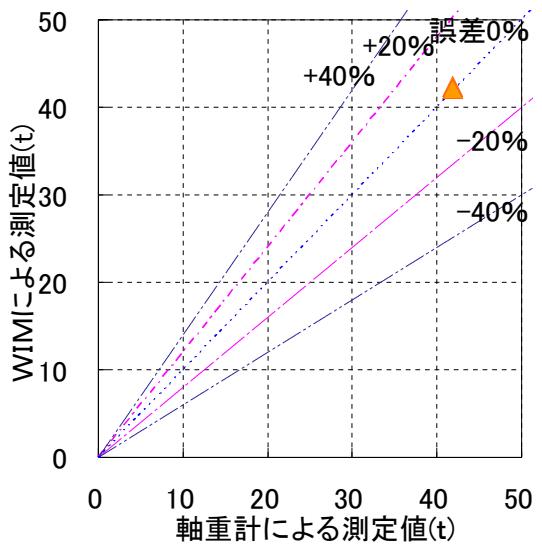
車両NO	軸数	計測方法	総重量(t)	精度(%)	P1(t)	P2(t)	P3(t)	P4(t)	P5(t)	P6(t)
T25	3	BWIM	24.2	97	5.6	9.3	9.3			
		軸重計	25.01	—	6.29	9.36	9.36			
Tr35a	4	BWIM	33.2	99	4.4	10.6	9.1	9.1		
			33.1	98	3.9	11.1	9.1	9.1		
		軸重計	33.62	—	6.35	9.03	9.55	8.70		
Tr42a	5	BWIM	42.4	101	5.1	12.9	8.1	8.1	8.1	
			42.1	101	4.1	14.7	7.8	7.8	7.8	
		軸重計	41.81	—	6.80	11.30	8.54	8.10	7.03	
Tr42b	5	BWIM	40.3	96	4.0	13.1	7.7	7.7	7.7	
			41.4	98	7.2	8.3	8.6	8.6	8.6	
		軸重計	42.05	—	6.70	11.50	6.09	7.75	10.00	
Tr45	6	BWIM	45.5	103	5.1	6.6	6.6	9.1	9.1	9.1
			45.3	102	4.5	6.9	6.9	9.0	9.0	9.0
		軸重計	44.22	—	5.51	7.10	7.26	6.34	8.67	9.35



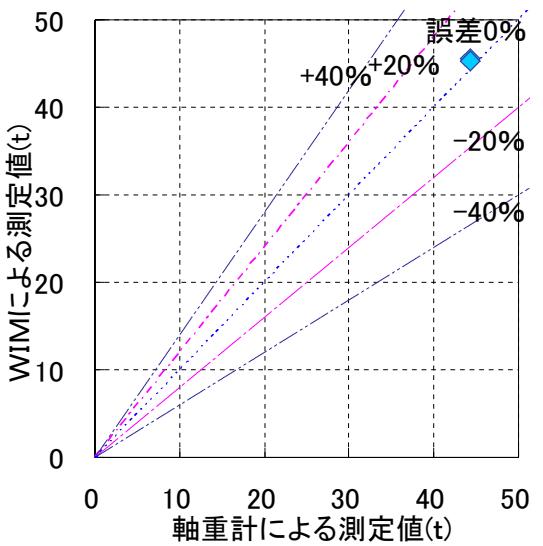
(a) 3 軸車



(b) 4 軸車



(c) 5 軸車



(d) 6 軸車

図-3.3.1 総重量精度

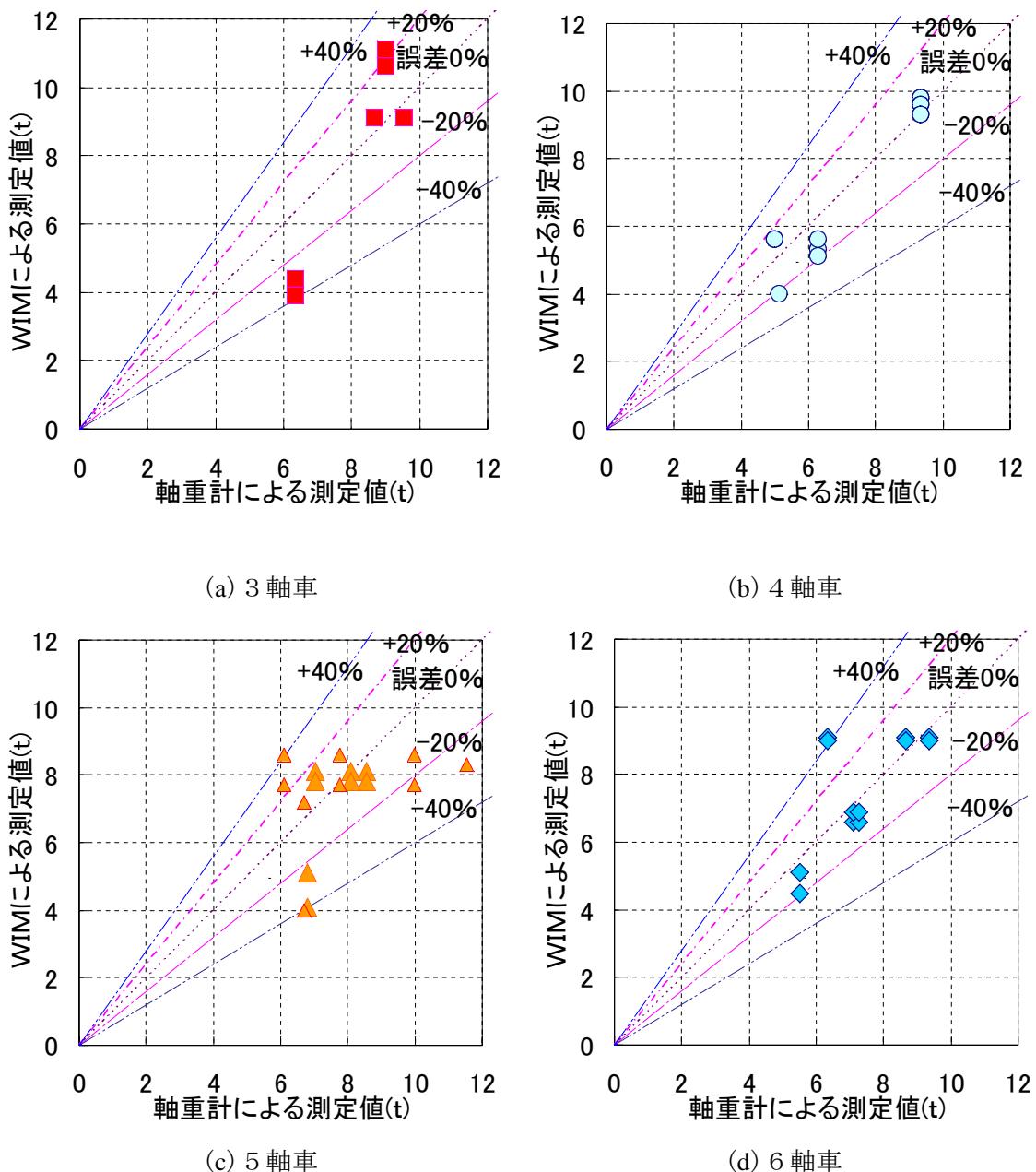


図-3.3.2 軸重精度

3.3.2 連行・並走条件

橋梁上を複数の車両が走行する場合、主桁のひずみ応答値から各軸重を算定する課程で未知数が多くなる。また、複数の車軸が近接して通過した場合、他車両の影響が主桁のひずみ応答に現れ、精度低下が生じる場合がある。実交通においては、複数の車両が同時載荷される場合もあるため、2台の試験車両を単独走行、連行走行、並走走行、連行並走の4パターンで走行させ、精度の検証を行った。

図-3.3.3に各種走行条件におけるひずみ応答波形の例、表-3.3.2から表-3.3.3および図-3.3.5から図-3.3.8に車両重量の算定結果を示す。これらの結果より、連行並走走行時に精度が悪くなるケースが見られる。

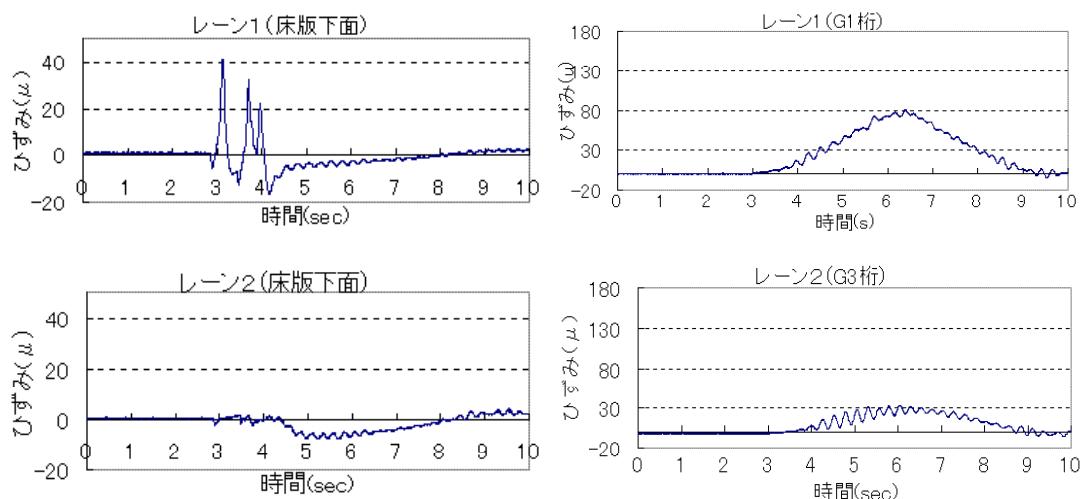


図-3.3.3(1) 単独走行（車両 No.T15a 試験橋梁走行時）

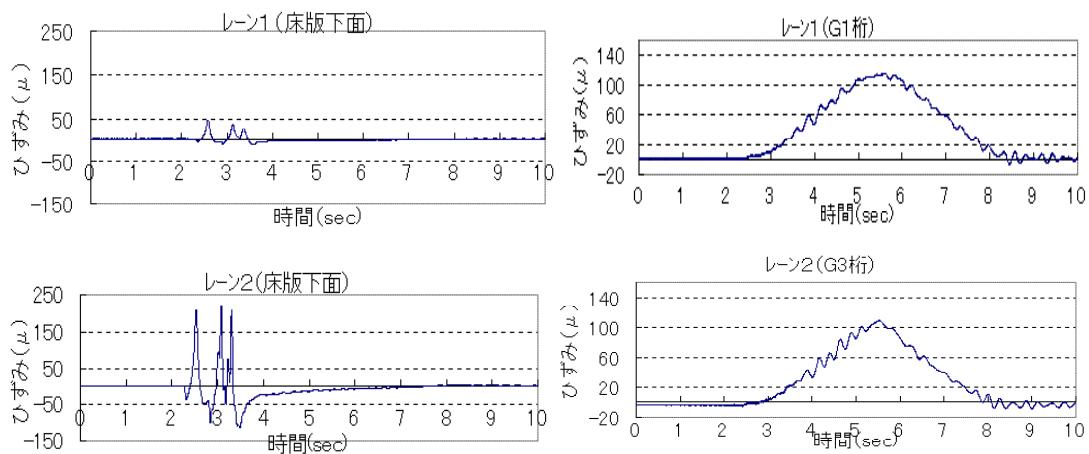


図-3.3.3(2) 並行走行（車両 No.T15a, T25 試験橋梁走行時）

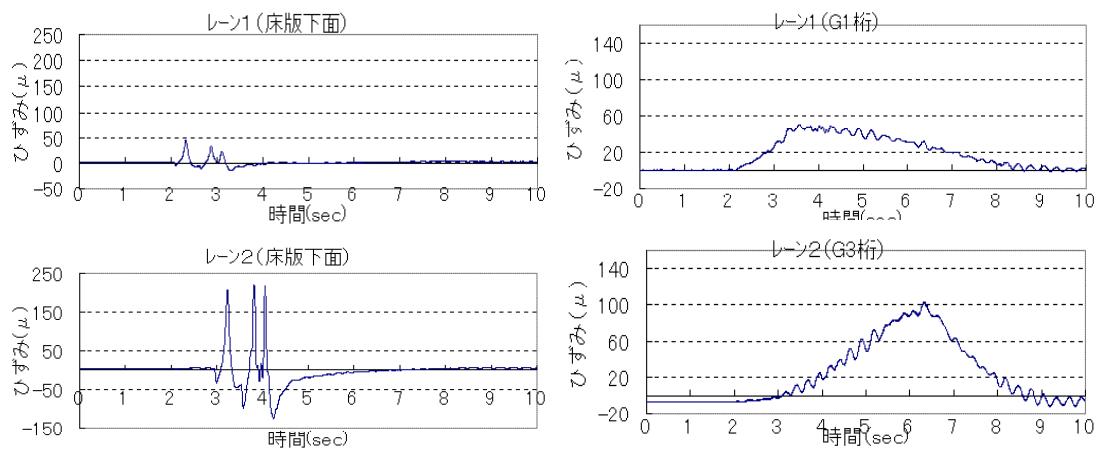


図-3.3.3(3) 連行並走 (車両 No.T15a,T25 試験橋梁走行時)

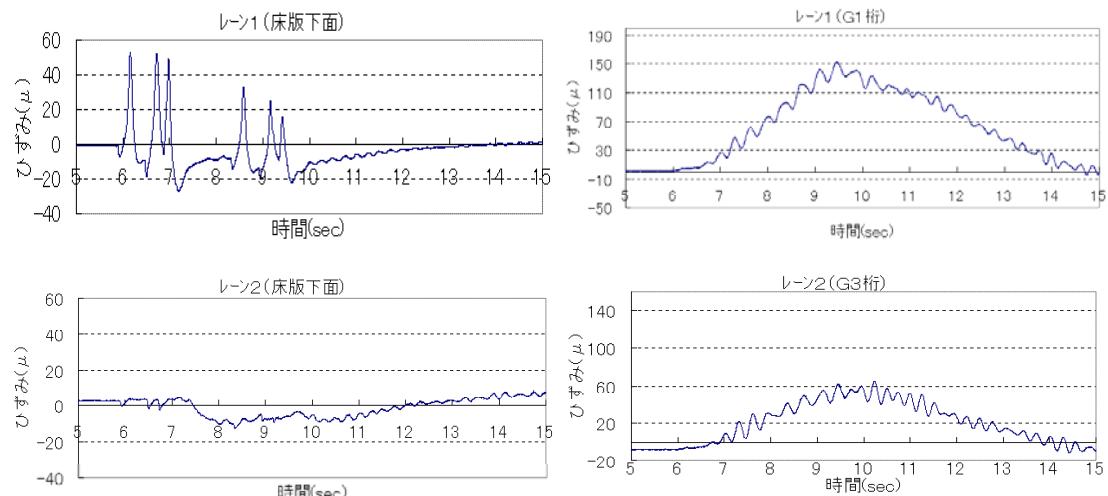


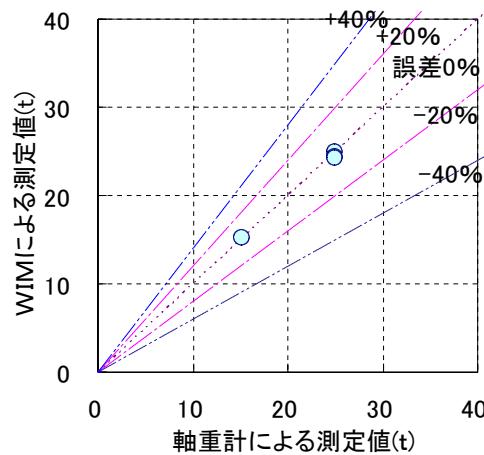
図-3.3.3(4) 連行走行 (車両 No.T15a,T25 試験橋梁走行時)

表-3.3.2 重量算出結果一覧（試験橋梁）

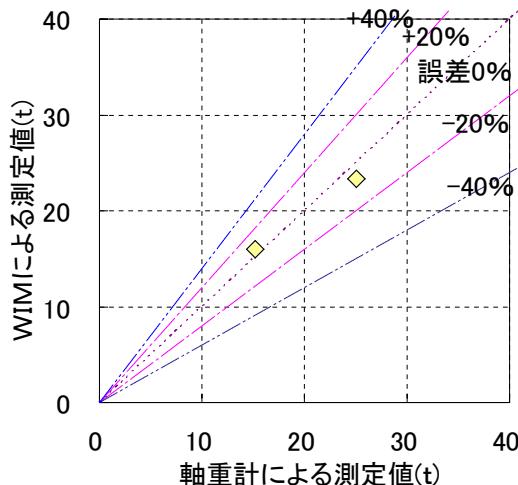
車両No	計測方法	走行条件	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
					P1	P2	P3
T15a	BWIM	単独走行	15.2	100.5	4.0	5.6	5.6
		完全並走	16.1	106.2	4.2	5.9	5.9
		50%並走	15.5	102.5	4.3	5.6	5.6
		連行並走	10	65.9	0.5	4.7	4.7
		連行走行	16.6	109.8	4.5	6.1	6.1
		軸重計	-	15.13	-	5.13	5.0
T25	BWIM	単独走行	24.9	99.6	5.3	9.8	9.8
		完全並走	23.3	92.8	4.3	9.5	9.5
		50%並走	23.5	93.7	5.5	9.0	9.0
		連行並走	26.5	105.4	4.8	10.8	10.8
		連行走行	24.7	98.2	5.6	9.5	9.5
		軸重計	-	25.01	-	6.29	9.36

表-3.3.3 重量算出結果一覧（福岡橋）

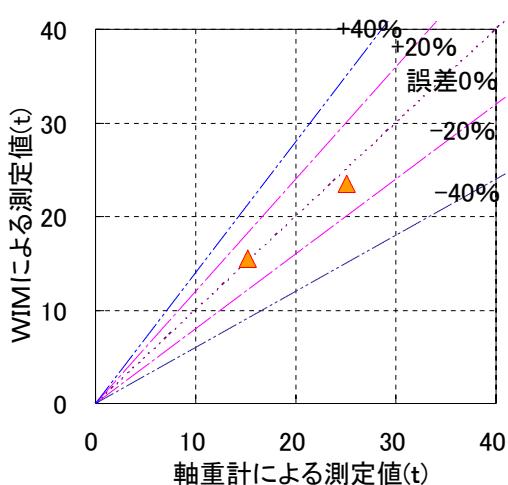
車両No.	計測方法	走行条件	計測No.	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)		
						P1	P2	P3
T15b	BWIM	完全並走	1	16.7	118	3.8	6.4	6.4
			2	15.1	107	3.3	5.9	5.9
			3	15.3	109	3.4	5.9	5.9
		連行並走	1	35.8	254	9.2	13.3	13.3
			2	27.3	194	9.5	8.9	8.9
		連行走行	1	11.5	82	3.0	4.2	4.2
			2	12.8	91	3.2	4.8	4.8
			3	9.1	65	2.7	3.2	3.2
		軸重計		14.1	-	5.14	4.48	4.48
T20f	BWIM	完全並走	1	20	95	5.2	7.4	7.4
			2	22.8	108	5.9	8.4	8.4
			3	22.8	108	5.9	8.5	8.5
		連行並走	1	1.1	5	3.3	1.4	-
			2	6.8	32	7.6	-0.8	-
		連行走行	1	26.2	124	6.9	9.7	9.7
			2	22.6	107	5.9	8.4	8.4
			3	23.5	111	5.6	9.0	9.0
		軸重計		21.15	-	5.27	7.94	7.94



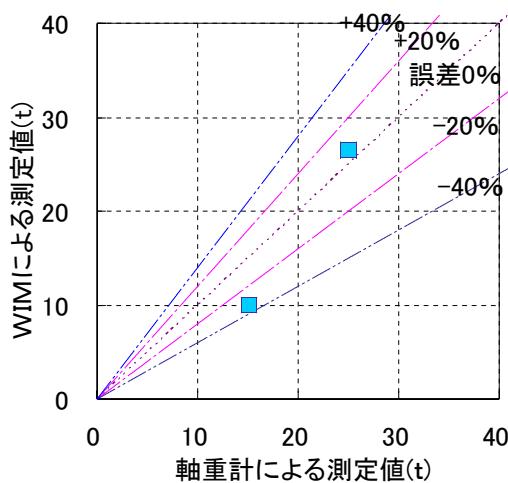
(a) 単独走行(車両 No.T15a, T25)



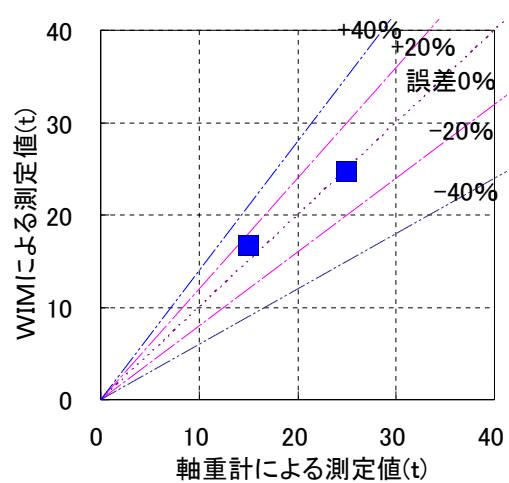
(b) 完全並走(車両 No.T15a, T25)



(c) 50 %並走(車両 No.T15a, T25)

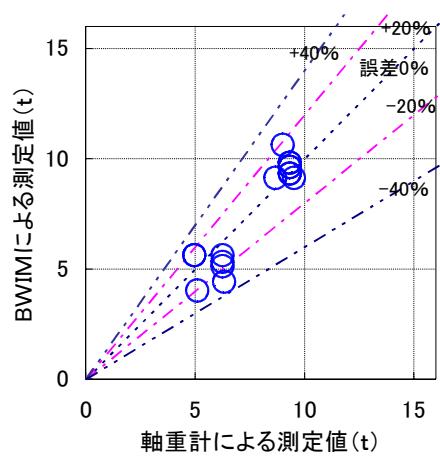


(d) 連行並走(車両 No.T15a, T25)

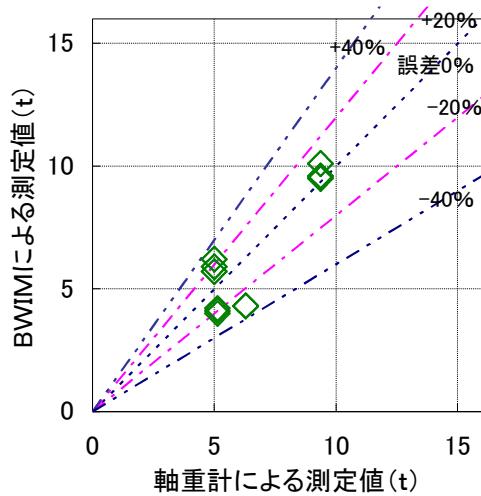


(e) 連行走行(車両 No.T15a, T25)

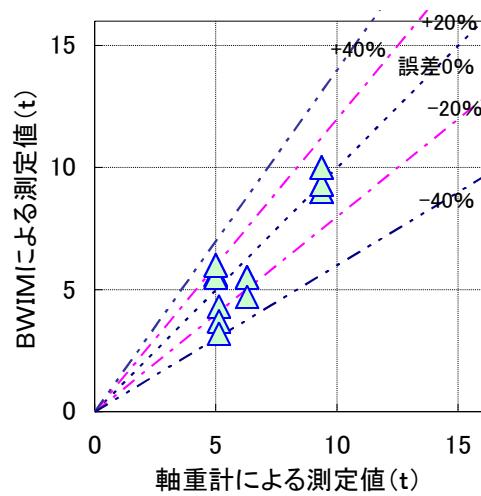
図-3.3.5 連行・並走条件 総重量精度 (試験橋梁)



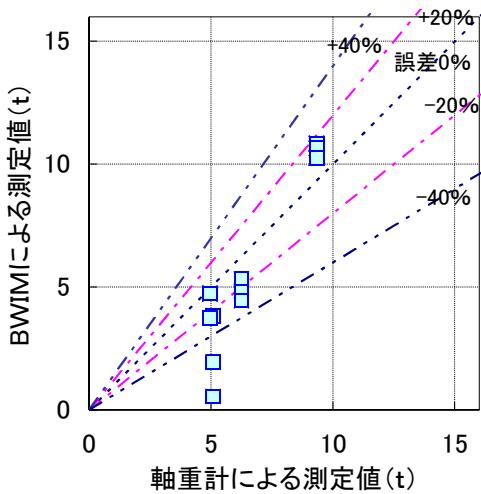
(a) 単独走行(車両 No.T15a,T25)



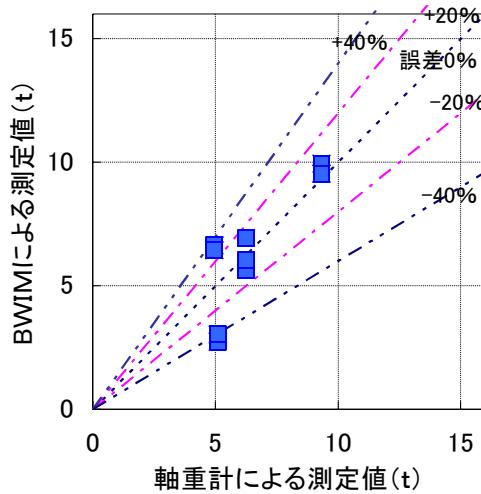
(b) 完全並走(車両 No.T15a,T25)



(c) 50 %並走(車両 No.T15a,T25)



(d) 連行並走(車両 No.T15a,T25)



(e) 連行走行(車両 No.T15a,T25)

図-3.3.6 連行・並走条件 軸重精度 (試験橋梁)

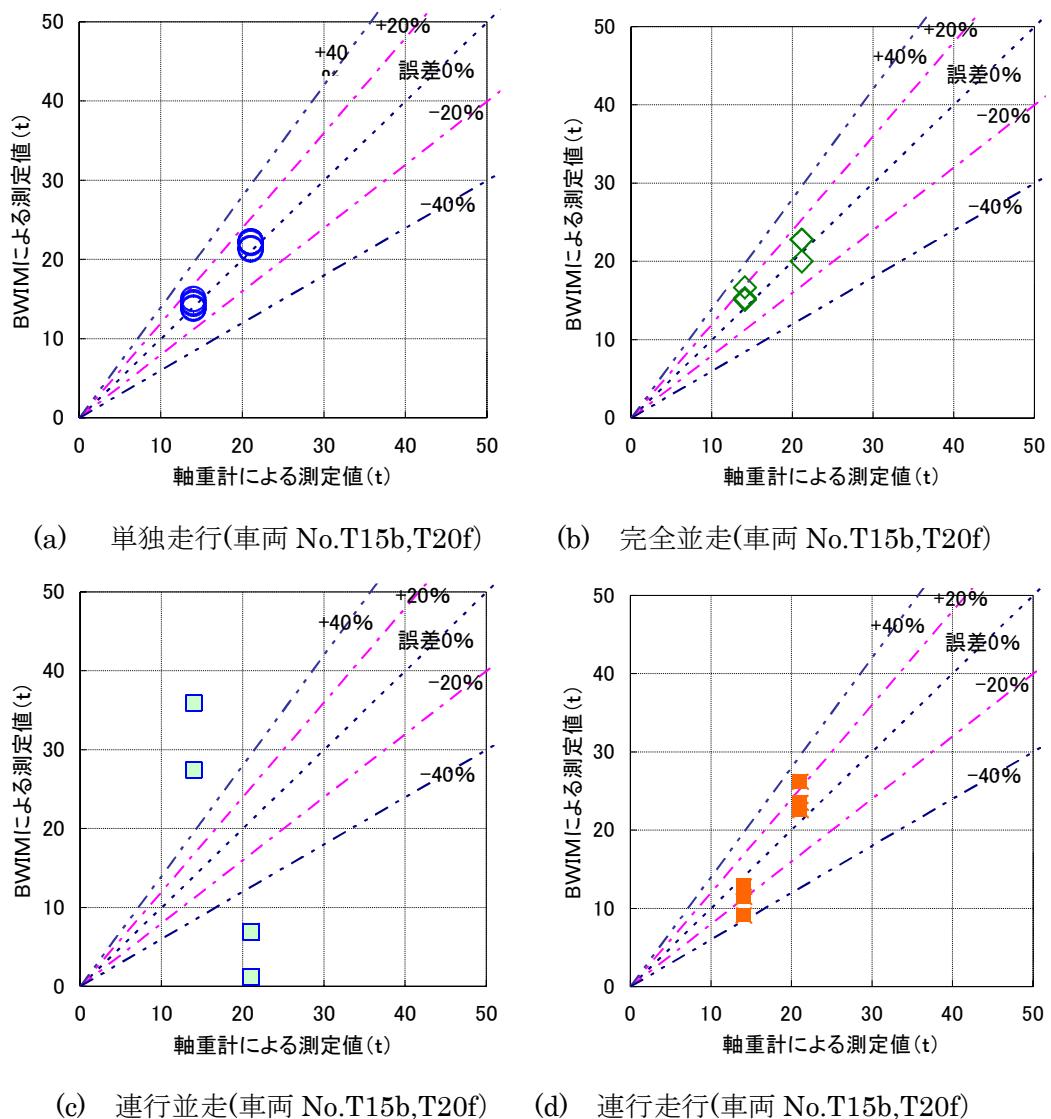
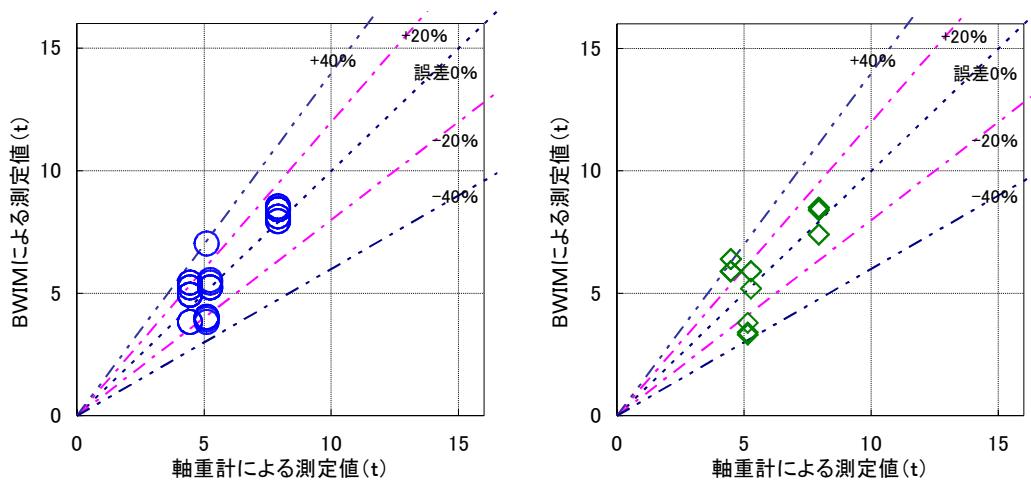
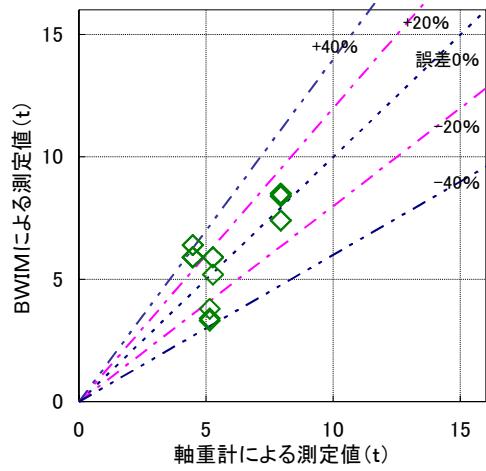


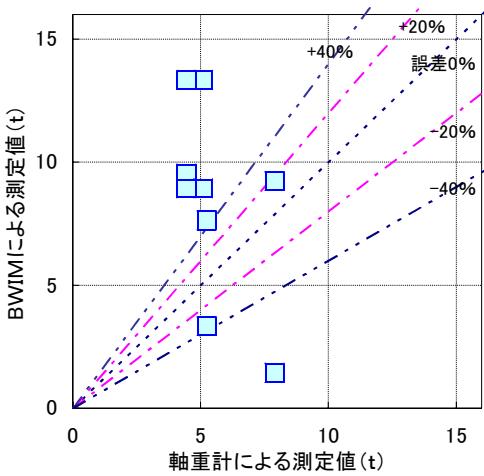
図-3.3.7 連行・並走条件 総重量精度 (福岡橋)



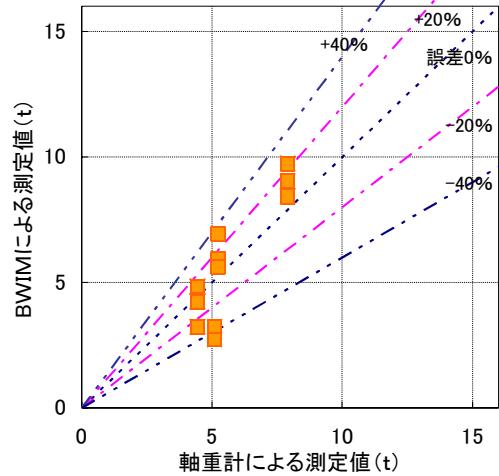
(a) 単独走行(車両 No.T15b, T20f)



(b) 完全並走(車両 No.T15b, T20f)



(c) 連行並走(車両 No.T15b, T20f)



(d) 連行走行(車両 No.T15b, T20f)

図-3.3.8 連行・並走条件 軸重精度 (福岡橋)

3.3.3 走行速度の条件

(1) 走行速度

図-3.3.9 に、図-2.3.5 に示した 3 軸 トラック および 5 軸 トレーラ がそれぞれ低速、40, 80km/h で走行したときの応答波形の例を示す。また、表-3.3.4 および図-3.3.11 に車両重量の測定結果を示す。

これらの結果から、車両振動特性の違いを反映し、主桁をはじめとする応答時間の中井部材の応答波形は、走行速度によって異なっていることがわかる。しかしながら、車両重量の算定結果に顕著な影響は表れていない。このことから、主桁のような応答時間の長い部材の実測波形の計算波形の誤差を最小化する当システムにおいては、走行速度の変化による部材応答特性の変化に対する重量算定の感度は小さいと言える。

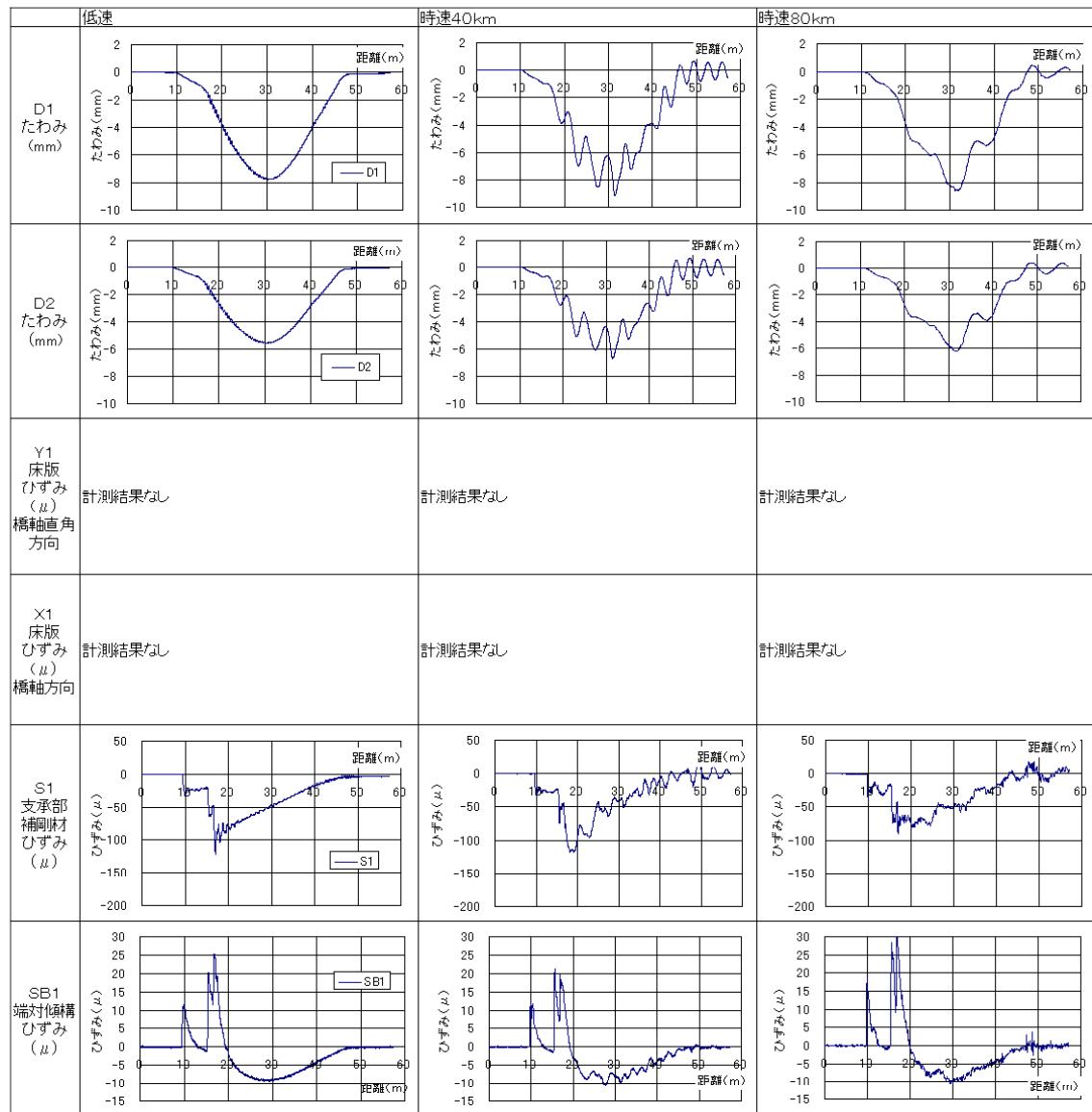


図-3.3.9 試験橋梁各部の応答（3 軸 トラック）

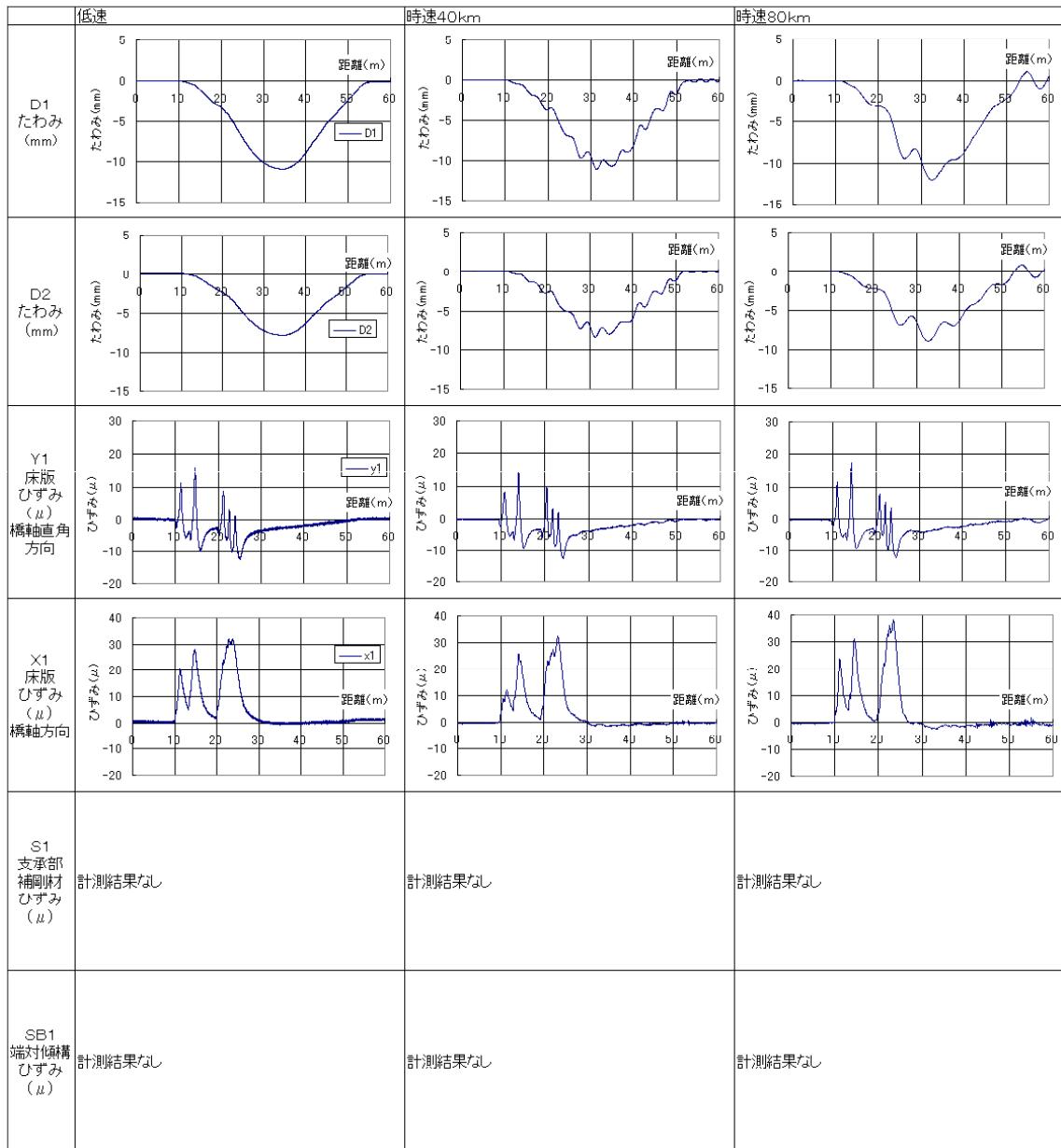


図-3.3.10 試験橋梁各部の応答（5軸トレーラ）

表-3.3.4 重量算出結果一覧(case4-2-1 ~ 6)

車両No	計測方法	総重量	精度	P1	P2	P3	P4	P5	P6	速度
T25	BWIM	24.9	100	5.3	9.8	9.8				19.1
		24.4	98	5.1	9.6	9.6				30.0
		24.2	97	5.6	9.3	9.3				40.7
	軸重計	25.01	-	6.29	9.36	9.36				-
Tr35	BWIM	33.2	99	4.4	10.6	9.1	9.1			43.0
		33.1	98	3.9	11.1	9.1	9.1			45.0
		33.9	101	8.1	6.1	9.8	9.8			80.9
		33.6	100	9.1	4.6	10.0	10.0			78.3
	軸重計	33.62	-	6.35	9.03	9.55	9.55			-

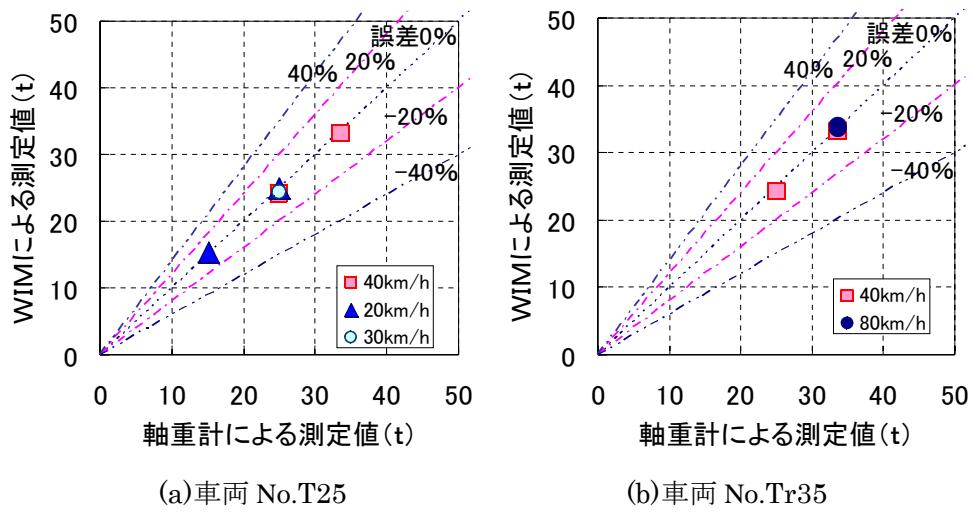


図-3.4.11 速度に対する総重量精度

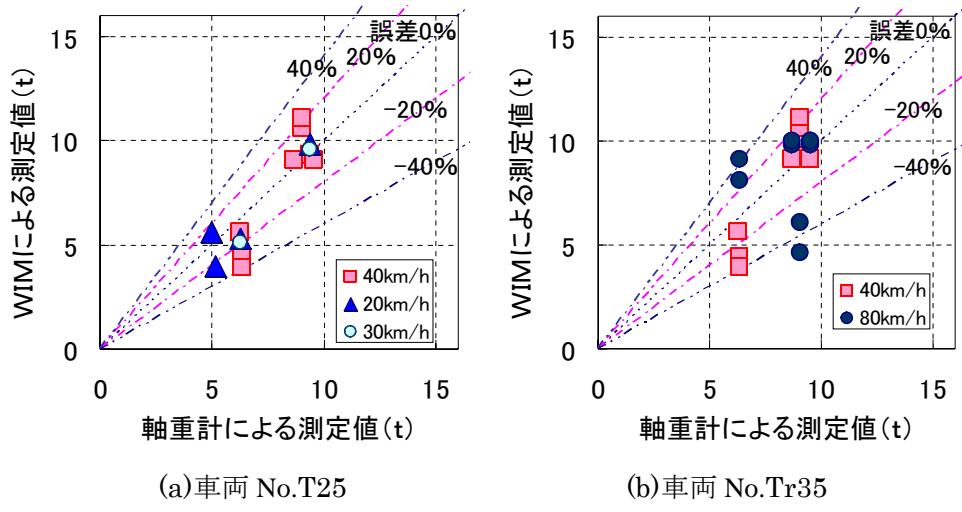


図-3.3.12 速度に対する軸重精度

(2) 走行速度の変化

車両が橋梁上を等速走行すると仮定している当システムにおいては、橋梁上で車両が速度変化を生じると、主桁ひずみの応答形状が、計算値に対してずれ、誤差の原因となる。

今回の一連の計測の中では、北陸橋が信号の近くに位置し、車両が方向により加速もしくは減速しながら走行する例が見られた。図-3.3.13 に北陸橋の主桁のひずみ応答の例を示す。これによると、図-3.3.14(a)のように橋梁通過中に速度変化を生じたことが原因と見られるひずみ応答の計算値に対するずれが生じていることがわかる。その場合、表-3.3.4、図-3.3.15 に示すように、速度を等速であると補正したケースに対し、軸重の精度が著しく低下している。

したがって、当システムにより精度良く重量を算出するためには、計測に用いる橋梁を選定する際、橋梁上での速度変化が極力起こらないような橋梁を選定することが必要である。

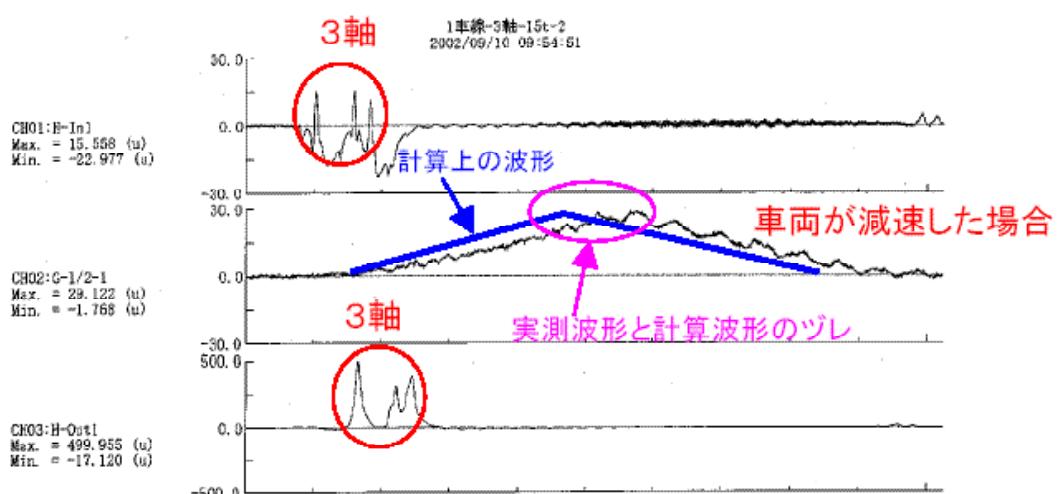
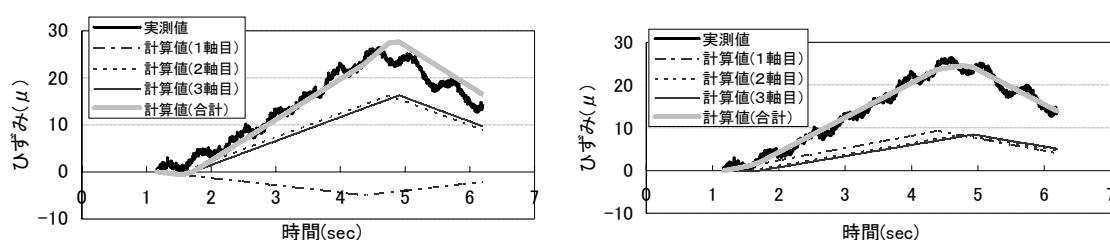


図-3.3.13 中途で速度変化したときの波形



(a) 橋梁通過中に速度変化した波形の例

(b) 橋梁を等速度で通過した波形の例

図-3.3.14 重量算出の計算

表-3.3.4 算出結果の例

計測方法	総重量(t)	精度(%)	P1(t)	P2(t)	P3(t)
BWIM	13.1	92.7	15.63	-1.28	-1.28
軸重計	14.1	-	5.14	4.48	4.48

3.3.4 車両振動による影響

主桁のように車両の通過に対する応答時間が長い部材では、車体振動の影響が部材応答に顕著に現れることがある。ここでは、車両振動に伴う主桁のひずみ波形の乱れが、当システムを用いた車両重量の算出精度に与える影響について確認する。

図-3.3.16 に試験橋梁における無載荷時（車両が通過していない状態）のひずみ応答波形、図-3.3.17 にその波形の周波数分析結果を示す。これらより、試験橋梁では、車両の通過に対する外乱の作用により、固有振動数が 2Hz を超える成分が卓越した振動を生じやすいことがわかる。

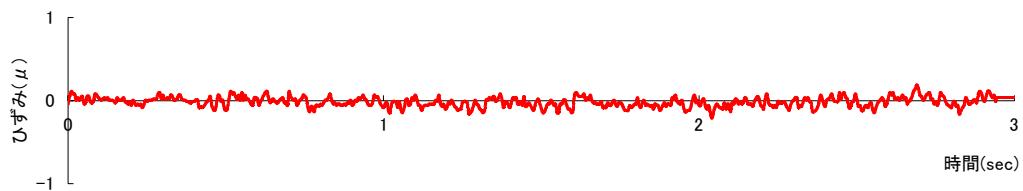


図-3.3.16 無載荷時のひずみ応答波形

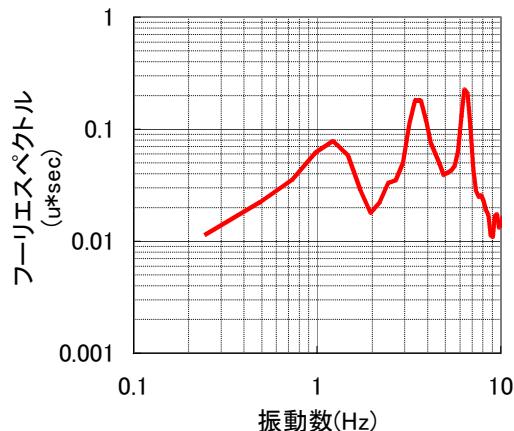
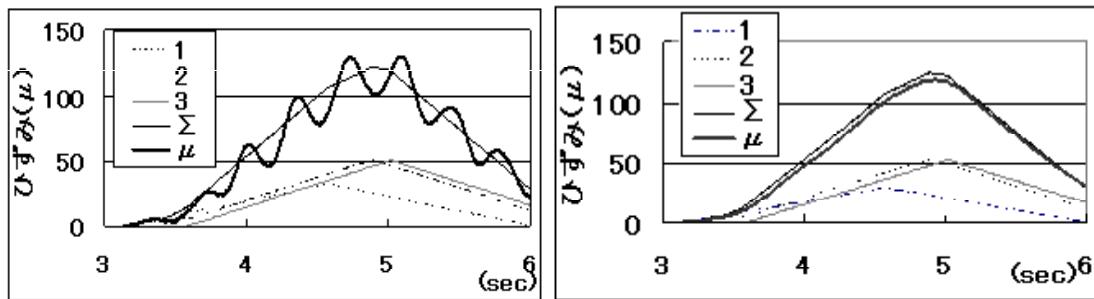


図-3.3.17 フーリエスペクトル処理結果

図-3.3.18 に、主桁の振動の影響を取り除くため、ローパスフィルタ処理により 2Hz 以上の高周波成分を除去した波形（以下、「処理波形」という）を示す。次に、実測波形と処理波形それぞれを用いて、車両の総重量と軸重を計算した結果を表-3.3.3 に示す。これによると、車両振動の影響の有無によって、車両の軸重や総重量の算定結果に顕著な相違が生じていないことがわかる。

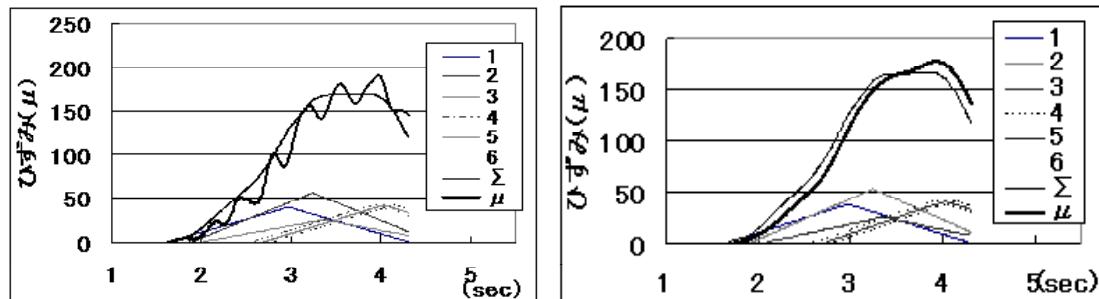
このことから、主桁のような応答時間の長い部材の実測波形の計算波形の誤差を最小化する当システムにおいては、走行速度の変化による部材応答特性の変化に対する重量算定の感度は小さいと言える。



(a) フィルターなし

(b) フィルターあり

図-3.3.18(1) 計算ひずみと実測ひずみの比較 (試験橋梁 L/2 点・3 軸車)



(a) フィルターなし

(b) フィルターあり

図-3.3.18(2) 計算ひずみと実測ひずみの比較 (試験橋梁 L/2 点・6 軸車)

表-3.3.3 重量算出結果

車両NO	軸数	計測方法	総重量(t)	精度(%)	P1(t)	P2(t)	P3(t)	P4(t)	P5(t)	P6(t)
T25	3	BWIMフィルターなし	25.53	102	6.1	9.71	9.71			
		BWIMフィルターあり	25.84	103	5.57	10.14	10.14			
		実軸重	25.01	-	6.29	9.36	9.36			
Tr45	6	BWIMフィルターなし	47.03	106	7.53	10.69	4.85	7.99	7.99	7.99
		BWIMフィルターあり	46.09	104	7.31	10.17	4.92	7.9	7.9	7.9
		実軸重	44.23	-	5.51	7.10	7.26	6.34	8.67	9.35

3.3.5 車両走行位置

車軸の検知に適した部材は、荷重に対する応答範囲が狭く、車輪の通過位置がばらつくことにより、設置したひずみゲージが適切に応答せず、適切に測定できない可能性があることが懸念される。ここでは、車輪の通過位置を橋軸直角方向に 500mm ずらした場合の重量算定の可否について調査した。

図-3.3.18 に、床版下面に設置したひずみゲージの直上を車輪が通過した場合、図-3.3.19 には、床版下面のひずみゲージに対し、車輪の通過位置を 500mm ずらした場合の床版下面の橋軸方向のひずみを示す。これらの結果によると、車輪の走行位置に関係なく、入口側、出口側ともに 4 つの車軸のピークが分離されており、500mm 程度の走行位置のずれによる重量算出精度への影響も顕著でないといえる。

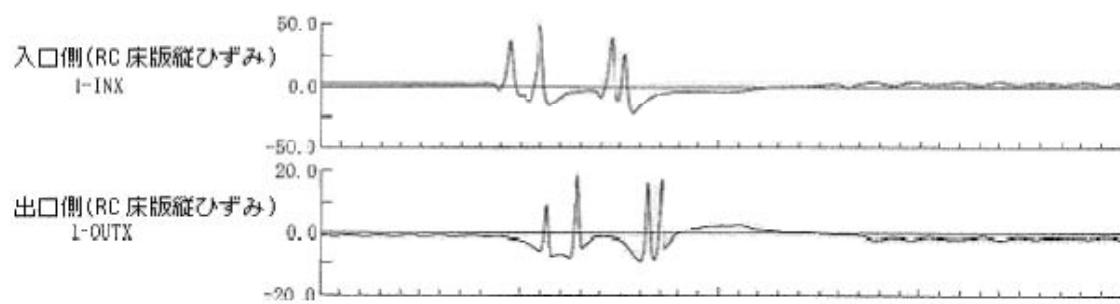


図-3.3.18 走行位置をずらしたケース

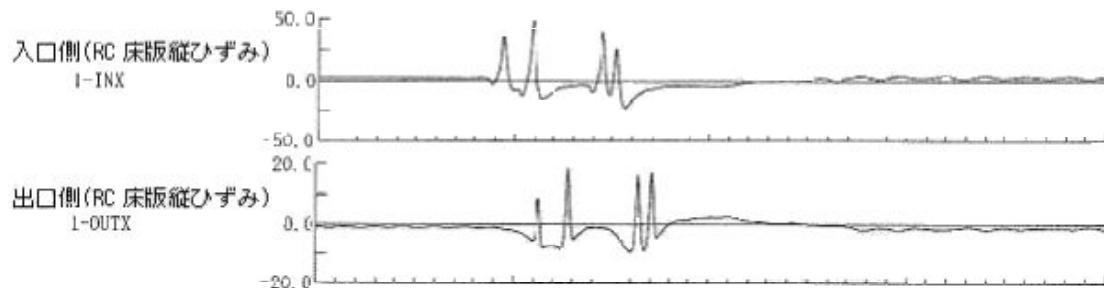


図-3.3.19 想定した位置を走行したケース

表-3.5.1 重量算出結果一覧

車両No	算定方法	走行位置のズレ(mm)	総重量(t)	精度(%)	軸重(t)					
					P1	P2	P3	P4	P5	P6
Tr35a	BWIM	500	33.9	101	8.1	6.1	9.8	9.8		
		0	33.6	100	9.1	4.6	10.0	10.0		
	軸重計	-	33.62	-	6.35	9.03	9.55	8.70		
Tr45	BWIM	0	46.1	104	11.5	2.8	2.8	9.6	9.6	9.6
		500	45.5	103	11.8	2.4	2.4	9.6	9.6	9.6
		0	45.4	103	9.1	4.0	4.0	9.5	9.5	9.5
	軸重計	-	44.22	-	5.51	7.10	7.26	6.34	8.67	9.35

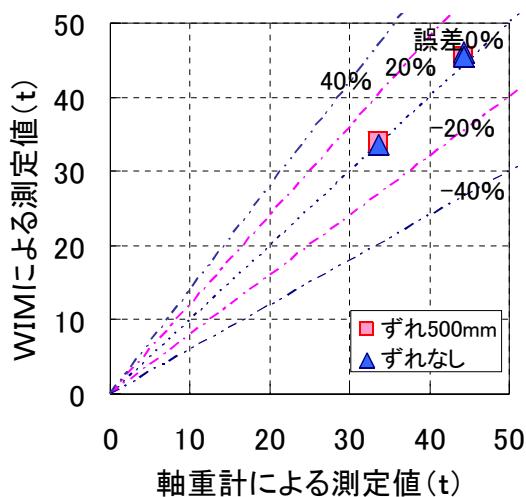


図-3.5.6(1) 総重量精度

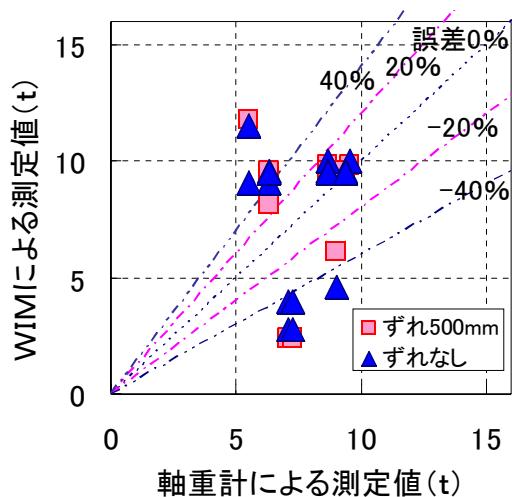


図-3.5.6(2) 軸重精度

3.4 計測の条件

3.4.1 主桁の計測位置

車両重量を算出する際、主桁のひずみは、最も大きな応答が得られる支間中央にて測定することが望ましい。しかしながら、橋梁によっては、桁下の状況から、主桁の支間中央部にひずみゲージを設置することができない場合もある。ここでは、主桁の支間中央部でひずみ測定ができない場合の適用性を確認するため、支間長を L として、桁端部からの距離が $L/2, L/4, L/8$ の各点でひずみ測定を行った場合の算定精度について調査した。

図-3.4.1 に、主桁下フランジのひずみゲージ設置状況、図-3.4.2 に、車両 T25 が試験橋梁上を走行したときの、主桁下フランジ各点におけるひずみの計算値および実測値、表-3.4.1、図-3.4.2、図-3.4.3 に、主桁下フランジ各点のひずみを用いて、車両重量を算定した結果を示す。これらの結果から、 $L/8$ 点や $L/4$ 点においても、 $L/2$ 地点と同等の精度で重量の算出が十分可能な場合があることがわかった。



図-3.4.1 主桁下フランジのひずみゲージ設置状況

表-3.4.1 計算値と実測波形

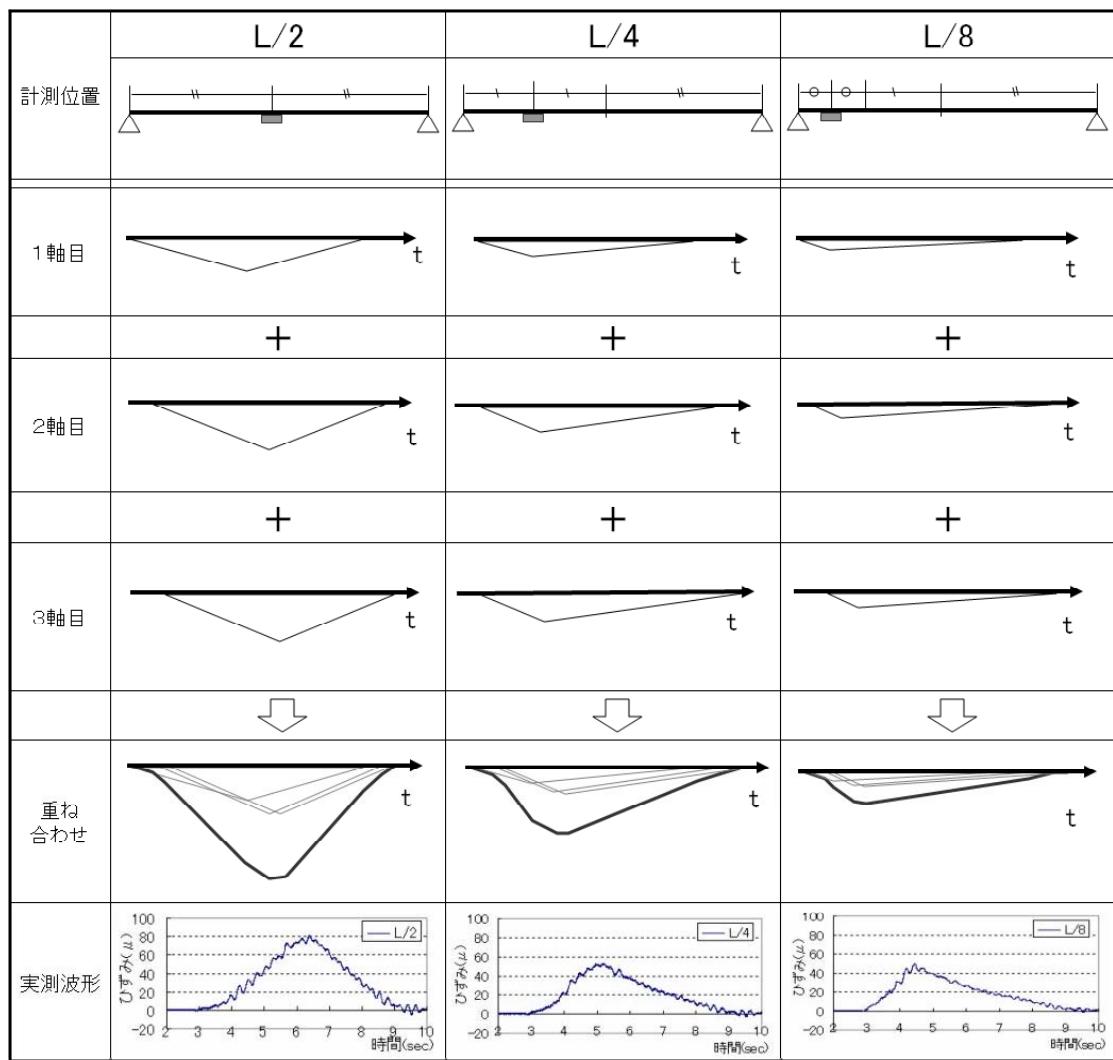


表-3.4.2 主桁の計測位置結果一覧

計測位置	計測方法	総重量 (t)	精度 (%)	P1 (t)	P2 (t)	P3 (t)
L/2	BWIM	15.2	100.5	4.0	5.6	5.6
L/4		15.2	100.5	5.4	4.9	4.9
L/8		15.0	99.1	5.4	4.8	4.8
軸重計		15.13	-	5.13	5.00	5.00
L/2	BWIM	24.9	99.6	5.3	9.8	9.8
L/4		24.6	98.4	5.9	9.3	9.3
L/8		24.6	98.4	5.7	9.4	9.4
軸重計		25.01	-	6.29	9.36	9.36

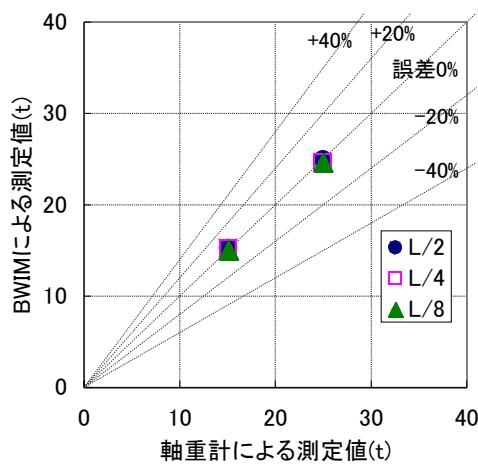


図-3.4.2 総重量精度

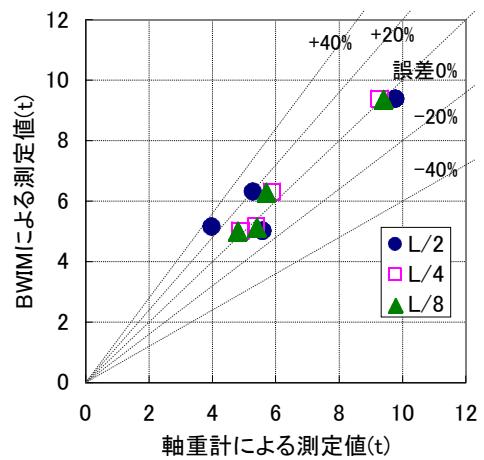


図-3.4.3 軸重精度

3.4.2 床版の計測位置

床版のひずみ測定にあたっては、各車軸の影響が明瞭に分離された応答波形を得ることが条件となるが、自動車荷重による影響範囲が狭いだけでなく、ひび割れの存在など部材の状態によっても、応答性状が敏感に変化するので、コンクリート床版であっても適用が限定される場合がある。

1) ひずみの影響範囲

床版のひずみは荷重に対する影響範囲が狭いため、車両走行位置直下から大きく外れると、微細なひび割れ等の影響で応答が出ない場合がある。例として、床版の入側、出側それぞれ車線に対して同じ位置で計測した波形を図-3.4.4に示す。同じ車両が通過した際にも、床版の計測位置周りのひび割れ状況などの影響によって応答の大きさが大きく異なっていることがわかる。

したがって、写真-3.4.1(1)のようにいくつかの高感度ひずみゲージを 200mm 程度ずつ離して設置し、応答の大きさを確認しておくことで、感度のよい計測位置を円滑に選定することが必要である。

2) 床版のひび割れ

写真-3.4.1(2)のように微細なひび割れに囲まれている場合は、ひび割れの状態にもよるが、ひび割れをまたいで設置する方が大きな応答が取得できる場合がある。

3) ハンチ

ハンチ部は床版が厚くなっているため応答が鈍い上、路面に対して斜めに位置しているため、応答が複雑になっている可能性がある。したがって、写真-3.4.1(3)のようにハンチは避けて設置するのが望ましい。

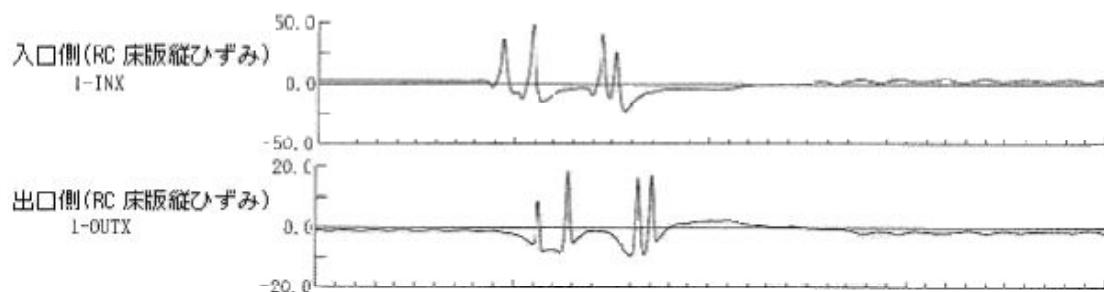


図-3.4.4 床版下面入側、出側のひずみ波形



(1)200mm ずつ離して設置

(2)ひび割れをまたいで設置

(3)ハンチを避けて設置

写真-3.4.1 高感度ひずみ計設置方法