

## 10. 24 年供用した鋼コンクリート合成床版の重錘落下たわみ法による評価

Evaluation of Falling Weight Deflectometer Method of Steel Plate-Concrete Composite Slab for 24 Years

技術支援課 関口 幹夫、橋原 正周  
 (社)日本橋梁建設協会 橋 吉宏

### 1. はじめに

東京都土木技術支援・人材育成センター(旧・東京都土木技術研究所)では、鋼板接着補強床版を含む R C 床版の劣化度の判定に床版たわみ法<sup>1)</sup>を提案しており、実用的な簡便性から衝撃加振装置(IIS)による橋面でのたわみ計測方法(以下、重錘落下たわみ法という)を開発している<sup>2)</sup>。

現在、鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版と略記する)は、底鋼板が存在するのでコンクリート床版下面のひび割れの目視確認はできない。このため社団法人日本橋梁建設協会の文献<sup>3)</sup>の鋼コンクリート合成床版の維持管理では、当センター開発の重錘落下たわみ法<sup>4,5)</sup>を採用し、床版劣化度の判定として床版たわみを指標としている。本報告は、社団法人日本橋梁建設協会との共同研究として、重錘落下たわみ法による計測方法と荷重車を使用した静的載荷試験を供用中の合成床版に適用して検証を行った結果である。

ここで計測対象とした橋梁は、東京都西多摩建設事務所管理の国道 411 号線の青梅市軍畑に位置する「鎧橋」であり、合成床版施工直後に荷重車による静的載荷試験<sup>6)</sup>が実施されているので、供用 24 年を経過した現状の健全度についても考察を行った。

### 2. 鎧橋の概要

鎧橋は、主径間の 2 径間連続トラスと側径間の活荷重合成 1 桁から構成されている。計測対象の活荷重合成 1 桁部は、谷側半幅員に 3 主桁橋で支間長 18.0m、床版支間 1.8m であり、昭和 60 年 11 月(1985

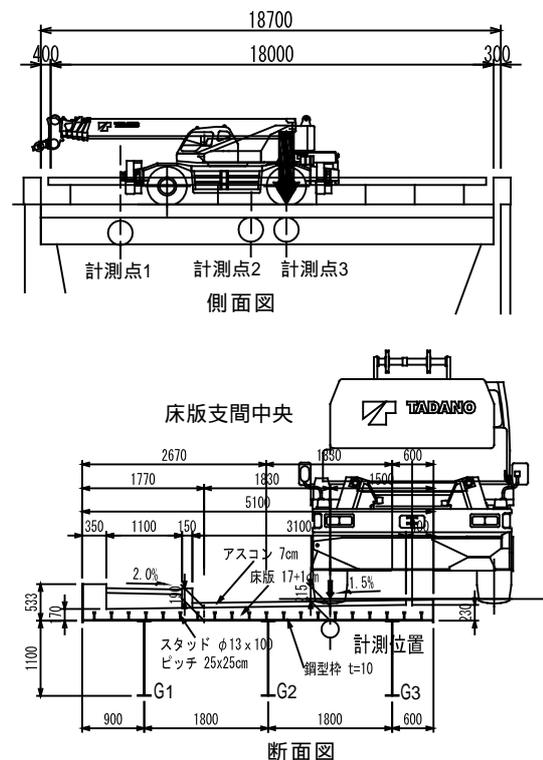


図 - 1 鎧橋一般図と床版たわみ計測点

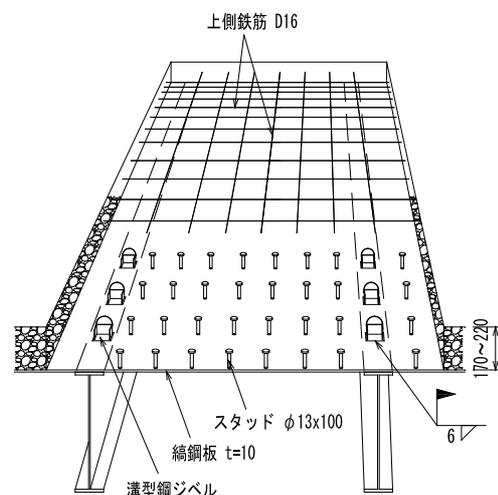


図 - 2 合成床版の概要

年)に床版厚 18cm の鋼コンクリート合成床版に打替えられている<sup>6)</sup>。図 - 1 に鎧橋の一般図とたわみ計測点を図 - 2 に合成床版の概要を示す。合成床版の底鋼板には、板厚 10 mm の縞鋼板 (材質 SM41A) を用い、スタッドは 13×100 mm、スタッド間隔が 250 mm のロビンソン型の合成床版である。コンクリートの設計基準強度は 300kgf/cm<sup>2</sup> で、早強セメントによる膨張コンクリート (膨張材量 30kg/m<sup>3</sup>) で施工されている。なお、国内での同タイプの場所打ち合成床版の施工例としては、首都高速道路の枝川ランプ橋に試験施工された事例<sup>7,8)</sup>に次ぐ二例目である。また、現状の一方交通量は 3000 台/日、大型車混入率は 8.5% である。

### 3. 計測点とたわみの計測方法

たわみの計測点は、竣工時の計測箇所と同一条件となるように配置した。重錘落下たわみ法による床版たわみ計測箇所は、図 - 1 に示す G2～G3 桁間の床版中央で、底鋼板に施工継手のない支間 1/8L の計測点 1 と 3/8L の計測点 2 の 2 箇所である。

荷重車 (ラフタ クレーン) による静的载荷の主桁のたわみ計測点は、計測点 1 (1/8L) と計測点 3 (1/2L) である。これらの計測点において、以下の 3 方法で床版たわみを計測して検討する。なお、重錘落下たわみ法による計測方法の詳細は、文献 2) に記述されている。

#### 3.1 方法 1 (IIS センサー法)

重錘落下たわみ法の計測は、写真 - 1 に示す当センター開発の衝撃加振機によるたわみ計測装置 (Impulse Input System Apparatus<sup>2)</sup>以下「IIS」と略す)を用いた。IIS は、床版支間中央で質量 980N の重錘を自由落下させて、衝撃荷重出力と主桁上と床版中央に設置した変位速度センサーからたわみを計測する装置である。

また、舗装用の重錘落下たわみ測定機である FWD (Falling Weight Deflectometer)を利用する方法も実施した。これは、IIS が RC 床版のたわみ計測用であり、これまでの実施例から床版剛性が大きい合成床版への適用では、衝撃加振力が不足することが考



写真 - 1 方法 1 の IIS



写真 - 2 方法 1 の Kuab 社製 FWD (FWD-K)



写真 - 3 方法 1 の CalBro 社製 FWD (FWD-C)



写真 - 4 方法 2 および方法 3 の床版下面変位計

えられる。このため衝撃加振力が IIS よりも大きい FWD を用いた。また、FWD での橋梁床版でのたわみ計測値は、桁のたわみ成分が含まれ実用的精度の計測はできないので、IIS センサーを併用して FWD の载荷版中心から約 20 cm 位置に設置して計測する。ただ

し、荷重計は FWD のデータを用いる。計測に用いた FWD は、写真 - 2 に示す Kuab 社製（複重錘式、重錘質量 350kg、載荷板 300 mm、最大載荷荷重 98kN、以下 FWD-K と略記する）と写真 - 3 に示す Carl Bro Pavements 社製（単重錘式、重錘質量 400kg、載荷板 300 mm、最大載荷荷重 147kN、以下 FWD-C と略記する）の 2 機種を用いた。なお、写真 - 3 の FWD-C では、主桁 G2 位置に別途 FWD センサーを設置して計測し、主桁の変位成分を補正する方法も試行する。

### 3.2 方法 2（衝撃載荷の床版下面リング式変位計による方法）

方法 1 のたわみ計測と同時に写真 - 4 に示す床版下面の主桁に固定された門形フレームに、リング式

表 - 1 IIS 計測結果

計測位置	落下高 (mm)	計測項目		計測値			
				1回目	2回目	3回目	平均
計測点2	470	たわみ (mm)	IIS	0.022	0.021	0.022	0.022
			下面	0.015	0.015	0.014	0.015
		荷重 (kN)	34.77	34.25	34.14	34.39	
3/8L	710	たわみ (mm)	IIS	0.027	0.028	0.028	0.028
			下面	0.019	0.018	0.019	0.019
		荷重 (kN)	45.79	45.70	45.02	45.51	
計測点1	470	たわみ (mm)	IIS	0.026	0.025	0.025	0.025
			下面	0.016	0.017	0.016	0.016
		荷重 (kN)	34.38	34.30	34.23	34.30	
1/8L	710	たわみ (mm)	IIS	0.033	0.033	0.035	0.034
			下面	0.021	0.021	0.022	0.021
		荷重 (kN)	45.63	45.53	45.53	45.56	

表 - 2 FWD-K の計測結果

計測位置	設定荷重 (ton)	計測項目		計測値			
				1回目	2回目	3回目	平均
計測点2	5.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.395	0.407	0.401	0.401
			IIS	0.030	0.029	0.031	0.030
		下面たわみ (mm)	0.032	0.032	0.032	0.032	
	7.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.506	0.512	0.518	0.512
			IIS	0.038	0.035	0.037	0.037
		下面たわみ (mm)	0.043	0.043	0.043	0.043	
10.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.644	0.647	0.640	0.644	
		IIS	0.052	0.051	0.051	0.051	
	下面たわみ (mm)	0.057	0.056	0.057	0.057		
計測点1	5.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.164	0.165	0.164	0.164
			IIS	0.033	0.034	0.034	0.034
		下面たわみ (mm)	0.030	0.030	0.030	0.030	
	7.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.228	0.232	0.226	0.229
			IIS	0.045	0.046	0.045	0.045
		下面たわみ (mm)	0.042	0.042	0.041	0.042	
	10.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.273	0.275	0.276	0.275
			IIS	0.063	0.064	0.064	0.064
		下面たわみ (mm)	0.054	0.055	0.054	0.054	
			荷重 (kN)	85.51	85.66	85.51	85.56



写真 - 5 荷重車によるたわみ計測

変位計（ひずみゲージ式精度 1/500 mm）を設置して動的に変位を計測する。

### 3.3 方法 3（荷重車による静的載荷方法）

荷重車による方法は、写真 - 5 に示す総重量 372.4kN のラフタークレーンを用いて静的なたわみを計測する。計測は、写真 - 4 のリング式変位計を用いて後輪をたわみ計測点に載荷して行い、タイヤの接地面積は 35 × 39cm、後輪重は 93.4kN である。

## 4. たわみ測定結果

### 4.1 IIS センサー法のたわみ計測結果

計測点 1(1/8L)および計測点 2(3/8L)における IIS の計測結果を表-1 に示す。IIS センサーを併用した FWD-K の計測結果を表 - 2 に FWD-C の計測結果を表 - 3 に示す。

IIS の重錘質量は、FWD の約 1/4 の 980N と小さいため、落下高さ 47 cm での衝撃荷重は約 34kN で、たわみ量は 0.02 mm 台、落下高さ 71 cm での衝撃荷重は約 45kN で、たわみ量は約 0.03 mm であった。

FWD の衝撃荷重は、設定荷重よりいずれも小さい。設定荷重 10t での FWD-K の衝撃荷重は約 85kN、FWD-C の衝撃荷重は約 98kN であり、機種によって違いがある。この違いは、FWD-K は舗装計測のノーマル仕様であるが、FWD-C はバッファの仕様(硬さ)を変更している影響と思われる。設定荷重 10t での IIS センサーのたわみ量は、FWD-K は FWD-C に比べ荷重も小さく、たわみ量も小さい。FWD-K の計測点 2 のみ下面のたわみ量が上面の IIS センサーより大きく、IIS や FWD-C の関係と異なっている。上面と下面のたわみ量の差は、FWD-K が最も小さい。全体的な傾

表 - 3 FWD-C の計測結果

計測位置	設定荷重 (ton)	計測項目		計測値			
				1回目	2回目	3回目	平均
計測点2 3/8L	10.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.572	0.579	0.578	0.576
			FWD補正	0.133	0.129	0.128	0.130
			IIS	0.061	0.062	0.062	0.062
		下面たわみ (mm)	FWD	0.052	0.053	0.053	0.053
			荷重 (kN)	97.64	98.44	98.57	98.22
	12.5	上面たわみ (mm)	FWD	0.691	0.709	0.743	0.714
			FWD補正	0.180	0.208	0.227	0.205
			IIS	0.077	0.079	0.077	0.078
		下面たわみ (mm)	FWD	0.066	0.065	0.065	0.065
			荷重 (kN)	123.96	124.53	124.53	124.34
15.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.822	0.805	0.781	0.803	
		FWD補正	0.239	0.221	0.200	0.220	
		IIS	0.091	0.094	0.089	0.091	
	下面たわみ (mm)	FWD	0.075	0.074	0.073	0.074	
		荷重 (kN)	146.41	146.59	146.72	146.57	
計測点1 1/8L	10.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.280	0.270	0.270	0.273
			FWD補正	0.082	0.082	0.082	0.082
			IIS	0.061	0.063	0.063	0.062
		下面たわみ (mm)	FWD	0.048	0.049	0.049	0.049
			荷重 (kN)	94.95	95.68	95.97	95.53
	12.5	上面たわみ (mm)	FWD	0.350	0.350	0.350	0.350
			FWD補正	0.099	0.100	0.099	0.099
			IIS	0.078	0.080	0.078	0.079
		下面たわみ (mm)	FWD	0.065	0.065	0.065	0.065
			荷重 (kN)	123.82	124.33	123.57	123.91
15.0	上面たわみ (mm)	FWD	0.400	0.410	0.410	0.407	
		FWD補正	0.116	0.117	0.117	0.117	
		IIS	0.095	0.095	0.094	0.095	
	下面たわみ (mm)	FWD	0.073	0.073	0.072	0.073	
		荷重 (kN)	145.85	146.57	145.96	146.13	

向は単重錘式の IIS と FWD-C に類似性があり、複重錘式の FWD-K は異なる傾向が観られる。

#### 4.2 下面リング式変位計のたわみ計測結果

IIS および FWD の衝撃荷重作用時に同時に計測した下面リング変位計のたわみ(表 - 1~3 の測定項目で「下面または下面たわみ」と表記)は、IIS センサーのたわみより小さい。この理由は、機種によって載荷時間が異なるほか、IIS センサーの計測値には、舗装の鉛直変位成分を含むが、下面リング式変位計では舗装の鉛直変位成分が含まれないという違いが考えられる。

IIS センサーと下面リング変位計の計測値と荷重の関係を図 - 3 ~ 図 - 5 に示す。両者とも荷重との関係で高い相関関係がある。理論上は荷重装置に関わらず回帰式の荷重 0 のたわみは 0 となる。しかし、何れの方法も誤差は生じているが、高い精度であることが分かる。

#### 4.3 FWD センサーたわみ計測結果

FWD センサーによるたわみ計測値は、表 - 2 および

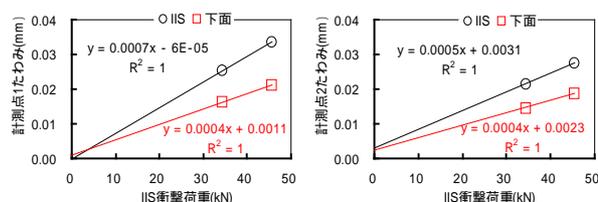


図 - 3 IIS の計測結果

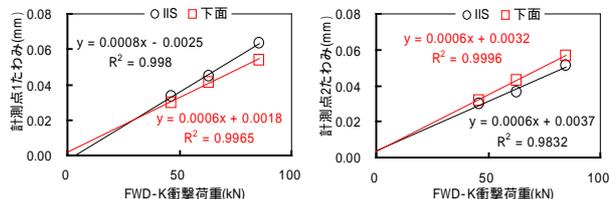


図 - 4 FWD-K の計測結果

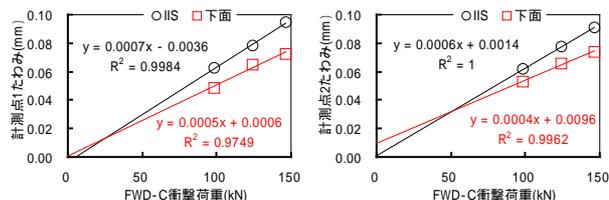


図 - 5 FWD-C の計測結果

表 - 3 に示したが、機種にかかわらず IIS センサーのたわみ量より一桁大きい値で計測されている。FWD センサー計測値は、主桁の変位成分を含む値であり、そのままでは使えないことが分かる。また、今回新たな試みとして、FWD-C でセンサーの一個を G2 主桁上に配置して計測し、主桁のたわみ量を補正した計測値 (FWD 補正と標記) も表 - 3 に示した。しかし、IIS または下面リング式変位計の 2 倍ほど大きい値であり、実用的な範囲での精度は期待できない。

#### 4.4 たわみ計測方法の比較

図 - 6 と図 - 7 に計測点 1 と計測点 2 の IIS と FWD の IIS センサーと下面リング変位計の計測結果およびラフタ クレーン静的載荷の結果を併せて示す。計測値は、それぞれの計測方法で 3 回実施した平均値をプロットしている。グラフの横軸は、載荷板に作用する衝撃荷重の最大値であり、方法 3 の静的載荷は輪荷重の値である。

方法 1 の IIS の速度センサーを用いた床版たわみ計測は、衝撃加振の方法 (IIS、FWD) にかかわらず、荷重 - 床版たわみの関係に線形性があり、総ての荷重レベルで安定している。

方法 2 の下面変位計の計測は、衝撃加振の方法によって傾向が変わるので、何らかの補正が必要であ

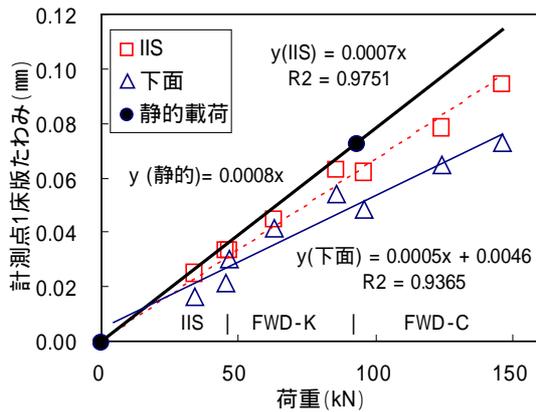


図 - 6 計測点1の荷重とたわみ量の関係

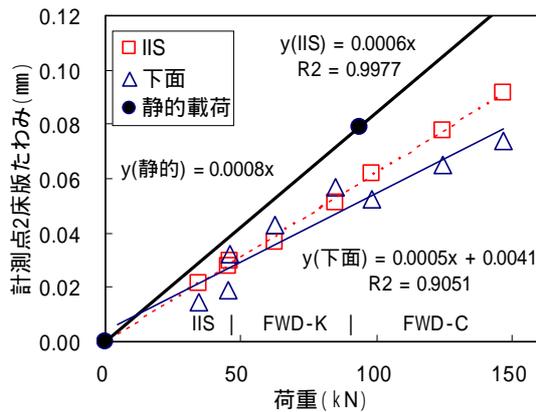


図 - 7 計測点2の荷重とたわみ量の関係

ることがわかる。方法1の動的な計測方法と方法3の従来からの静的なたわみ測定方法との比較を行うと、93.4kNの荷重では方法1のたわみ量が0.01~0.02mm程度小さい傾向であった。この原因は、床版自体の剛性が大きいために衝撃荷重のエネルギーが床版で総て消費されず、一部は主桁で消費されているためと推察される。

一方、IISセンサーおよび下面リング変位計の計測値と荷重の関係では、図-6~7からも明らかとなり両者とも高い相関関係がある。理論上は荷重装置に関わらず回帰式の荷重0のたわみ量は0となる。IISセンサーの回帰式の原点は0である。下面変位計の回帰式の原点は0ではないが誤差は少ない。また、回帰式の決定係数( $R^2$ )は0.9以上であり、高い相関関係あることが分かる。なお、計測精度を厳密に検証するには計測値自体が非常に小さいため無理がある。しかし、一般に床版たわみの計測精度は1/100mmあれば十分であることを考慮すると、方法1のIISセンサーをFWDに併用する方法は、十分に適用性があると評価できる。

表 - 4 各測定機の測定値の変動係数

測定機	計測項目	計測点2 (3/8L)			計測点1 (1/8L)			平均
		470	710		470	710		
IIS	落下高さ(mm)	470	710		470	710		
	IIS	0.027	0.021		0.023	0.034		0.026
	下面	0.039	0.031		0.035	0.027		0.033
FWD-K	荷重	0.010	0.009		0.002	0.001		0.006
	設定荷重(t)	5.0	7.0	10.0	5.0	7.0	10.0	
	FWD	0.015	0.012	0.005	0.004	0.013	0.006	0.009
	IIS	0.033	0.042	0.011	0.017	0.013	0.009	0.021
FWD-C	下面	0.000	0.000	0.010	0.000	0.014	0.011	0.006
	荷重	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001
	設定荷重(t)	10.0	12.5	15.0	10.0	12.5	15.0	
	FWD	0.007	0.037	0.026	0.021	0.000	0.014	0.017
FWD C	FWD補正	0.020	0.115	0.089	0.000	0.006	0.005	0.039
	IIS	0.009	0.015	0.028	0.019	0.015	0.006	0.015
	下面	0.011	0.009	0.014	0.012	0.000	0.008	0.009
	荷重	0.005	0.003	0.001	0.006	0.003	0.003	0.003

#### 4.5 測定値の変動

表-1~3の3回の計測値の変動係数は、表-4に示すとおりである。IISセンサーの変動は、IISでは2.6%、FWDに併用しても2.1%以下である。荷重の変動は、IISでは0.6%であり、FWDでは0.3%以下で、FWDの方が変動は少ない。

一方、FWDセンサーの変動は、FWD-Kは0.9%であり、FWD-Cは1.7%であった。また、FWD-Cによる主桁のたわみ補正結果は、3.9%と他の方法に比べ悪い結果になっている。その原因は、計測点1の設定荷重12.5tと15tの値が8.9%以上であり、大きい変動になっていることが影響している。なお、変動が8.9%以上になった原因は特定できないが、センサーの設置不具合または計測システムの調整に問題があった可能性がある。

#### 5. たわみの補正

##### 5.1 IISセンサーたわみの補正

衝撃荷重によるIISセンサーのたわみ量は、静的荷重のたわみ量との関係から補正する。これは、鋼合成床版の剛性がRC床版に比べて特に大きく、主桁の剛性が比較的小さいからである。このため、衝撃荷重の作用時間が十分に小さいことから、衝撃荷重のエネルギーは、床版の変形以外に主桁の変形に消費されると推察される。すなわち、衝撃荷重を割引いて静的荷重に換算する必要がある。

図-8に計測点1のIISの補正式を示した。衝撃荷重の発生機構に関わらず衝撃荷重(P)をP/1.15に割引くことで補正できる。また、図-9に示す計測

表 - 5 荷重車の諸元

年度	S60		H21
車両タイプ	2軸ダンブ	3軸ダンブ	2軸ラフタ
前軸荷重(kN)	45.1	60.3	185.6
後軸荷重(kN)	153.8	140.1	186.7
総重量(kN)	198.9	200.4	372.4
ホイールベース(mm)	4500	4175	4900
前輪中心間隔(mm)	1840	2010	2495
後輪中心間隔(mm)	1830	1950	2495

注: 3軸の後軸重は合計、ホイールベースは後軸中心

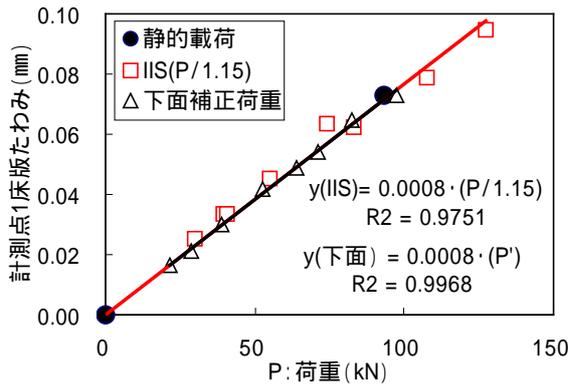


図 - 8 計測点 1 の補正

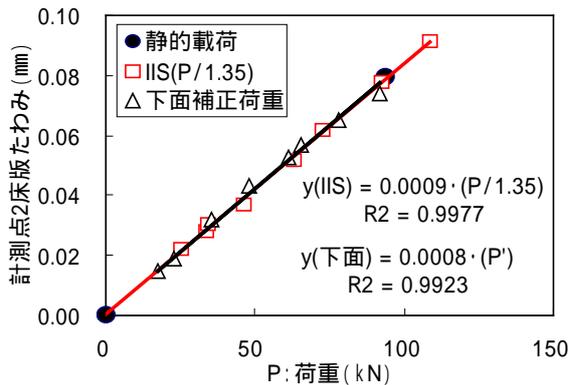


図 - 9 計測点 2 の補正

点2では衝撃荷重(P)をP/1.35に割引くことにより、ほぼ静的荷重時のたわみ量に高い精度で換算することができる。なお、計測位置で割引く率が異なっている。この原因は、主桁のたわみに起因する曲げ成分が精度よく補正されていないことによるものと推察される。したがって、静的荷重によるキャリブレーションでは、支間中央と桁端部の2箇所を実施することが望ましい。

### 5.2 下面リング変位計のたわみ補正

衝撃荷重による下面リング変位計のたわみ量を静的荷重時のたわみ量に補正する方法は、IISセンサーでの一律な割引では正しく補正できない。これは下面たわみ量が図-6および図-7に示したように荷重発生機構によって傾向が異なるためである。図-8および図-9に示した補正式の補正荷重(P'=P/ )は、計測点1の は、IISが1.6、FWD-Kが1.2、FWD-Cが1.5とした場合である。また、計測点2の は、IISが2.0に、FWD-Kが1.3に、FWD-Cが1.6とした場合に静的荷重に高い精度で補正できる。なお、 が機種により一定でないことに特に注意する

必要がある。

## 6. 静的荷重の解析

静的荷重のたわみとひずみの測定結果についてFEM解析と厚板理論による多層板解析を行い比較検討する。また、24年前の竣工時(S60)に行った測定値についても再現解析を行う。表-5に荷重車の諸元を示す。

### 6.1 FEM解析

図-10に示すとおり橋梁全体を立体として、床版を図-11に示すシェル要素でモデル化した。コンクリートのヤング係数は、施工時の品質管理記録から膨張材入の早強コンクリート設計基準強度(  $\sigma_{ck}$  ) 300kgf/cm<sup>2</sup>で、材齢7日の圧縮強度は340~360kgf/

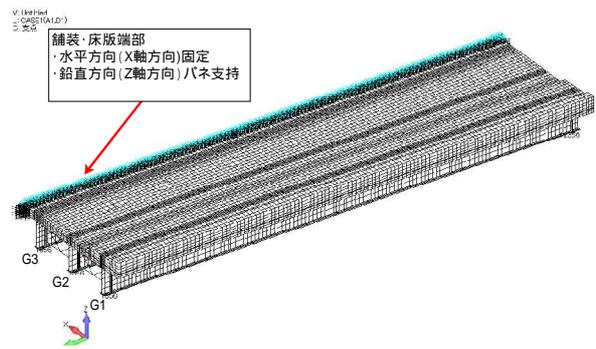


図 - 10 FEM 全体モデル図

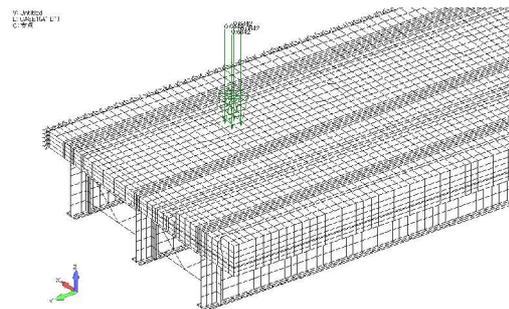


図 - 11 床版詳細モデル

cm<sup>2</sup>であったが、ヤング係数（EC）は不明である。設計基準強度 300kgf/cm<sup>2</sup>でのヤング係数の目安は、昭和53年道示によれば300,000kgf/cm<sup>2</sup>（30kN/mm<sup>2</sup>）、ポアソン比は全断面有効時 0.17（ひび割れ時 0.2）に仮定できる。

主桁のたわみ量の検討では、計測点 1（1/8L）と計測点 3（1/2L）で検討する。計算では、山側の擁壁との縦目地で接続されている状態から、G3 桁側張出し床版が擁壁に接触又は弾性支持されていると推察されたので、縦目地の張出し床版端部の鉛直方向の支持条件をバネ支持に仮定し、そのバネ剛性（バネ値 K）を変化させて解析的に検討する。バネの状態 1 は、フリーの状態のバネ値 K=0.0kN/mm<sup>2</sup>に仮定する。

表 - 6 FEM 解析による主桁のたわみ計算結果

主桁	計測位置	ケース1		ケース2		ケース3	
		L/8	L/2	L/8	L/2	L/8	L/2
G1	計測値	0.15	0.36	0.33	0.80	0.38	0.85
	k=0.0kN/mm <sup>2</sup>	0.23	0.51	0.69	1.66	0.89	2.22
	k=0.1kN/mm <sup>2</sup>	0.16	0.33	0.47	1.07	0.60	1.45
	k=1000kN/mm <sup>2</sup>	0.07	0.09	0.17	0.32	0.21	0.44
G2	計測値	0.31	0.46	0.71	1.34	0.76	1.69
	k=0.0kN/mm <sup>2</sup>	0.47	0.66	1.10	2.18	1.30	2.94
	k=0.1kN/mm <sup>2</sup>	0.35	0.40	0.75	1.34	0.84	1.83
	k=1000kN/mm <sup>2</sup>	0.15	0.06	0.21	0.24	0.18	0.36
G3	計測値	0.36	0.62	0.89	1.93	1.02	2.50
	k=0.0kN/mm <sup>2</sup>	0.57	0.76	1.32	2.52	1.53	3.40
	k=0.1kN/mm <sup>2</sup>	0.42	0.42	0.85	1.44	0.93	1.98
	k=1000kN/mm <sup>2</sup>	0.05	0.01	0.05	0.03	0.03	0.07

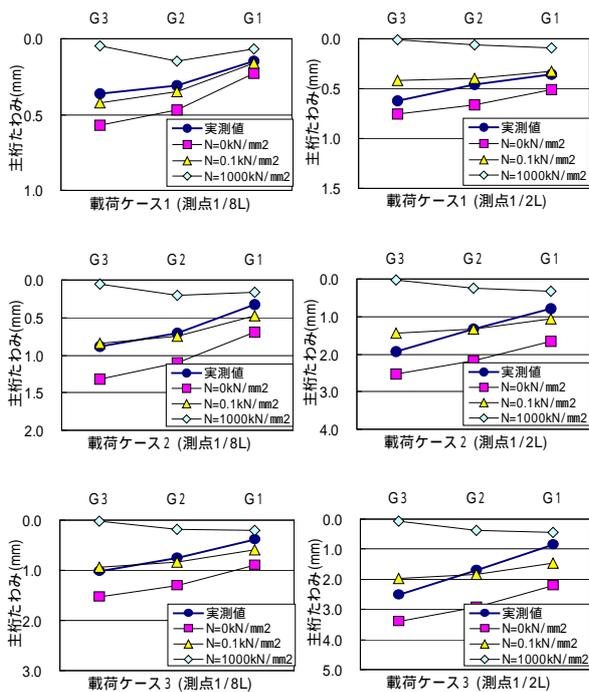


図 - 12 縦目地の K 値と主桁たわみの関係

状態 2 は、ゆるい弾性支持状態としてバネ値 K=0.1kN/mm<sup>2</sup>に仮定する。状態 3 は、固定に近い状態のバネ値 K=1000kN/mm<sup>2</sup>に仮定する。また、载荷ケース 1 は、後輪 1 輪のみ計測点 1 に载荷する場合である。载荷ケース 2 は、後輪が計測点 2 に载荷（前輪も作用）载荷ケース 3 は、後輪のみ支間中央の計測点 3 に载荷（前輪も作用）とする。

各载荷ケースのコンクリートのヤング係数を 32 kN/mm<sup>2</sup>に仮定した場合の主桁のたわみの計算結果を表 - 6 および図 - 12 に示す。また図 - 13 に载荷ケース 1 の全体変位図を示した。図 - 12 より G1 ~ G3 桁の何れの载荷ケースの実測値に近い解析条件は、バネ剛性を 0.1kN/mm<sup>2</sup>に仮定した状態 2 であり、縦目地部はゆるい弾性支持状態であることが解析的に確認できた。また、図 - 13 よりバネ値が小さい場合に、主桁の剛性が小さいことから G2 と G1 桁での首振り現象が顕著に生じる解析結果となっている。

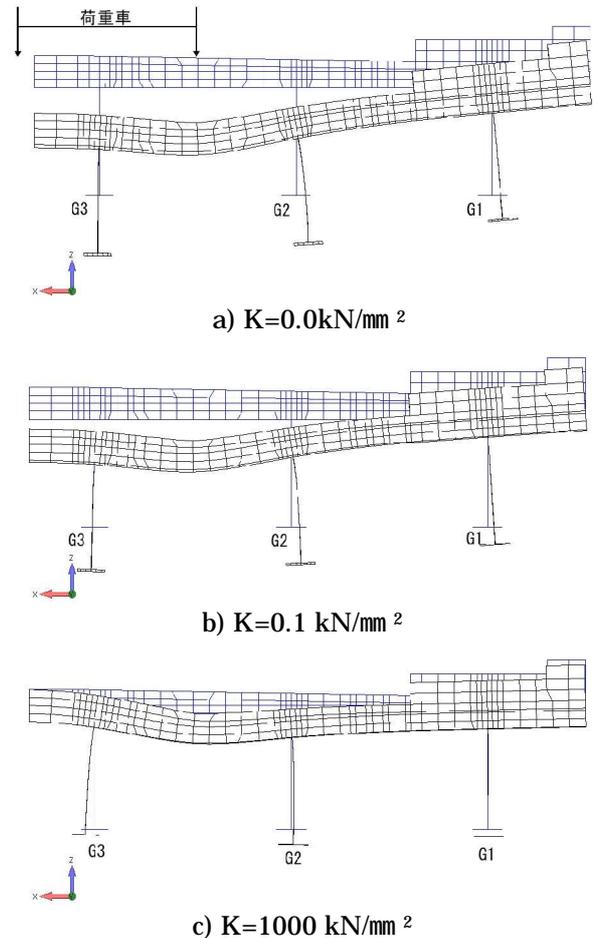


図 - 13 FEM 解析による縦目地の剛性評価

表 - 7 FEM 解析による床版のたわみ計算結果

G2桁からの距離(mm)		0	495	900	1305	1800
計測値 (mm)	計測点1	0.000	0.051	0.073	0.037	0.000
	計測点2	0.000	0.060	0.079	0.040	0.000
計測点 1の 計算値 (mm)	EC=24	0.000	0.074	0.104	0.068	0.000
	EC=28	0.000	0.067	0.094	0.061	0.000
	EC=32	0.000	0.062	0.087	0.057	0.000
	EC=35	0.000	0.059	0.072	0.054	0.000

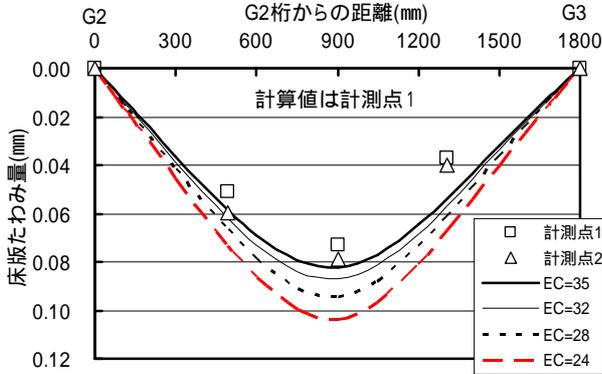


図 - 14 床版たわみの計測値と FEM 計算値

一方、床版のたわみの計測点 1 の計算結果は、表 - 7 および図 - 14 示すようにヤング係数を 24 ~ 35 に仮定し、全断面有効として感度解析を行った。図 - 14 によると各計測点の計測値は、ヤング係数  $EC=35\text{kN/mm}^2$  の計算値より全体にやや小さい傾向にある。また、床版厚は、施工時の記録より +10 mm のはらみ出しを考慮した場合の  $EC=32\text{kN/mm}^2$  の計算値は 0.08 mm であり、約 8% 小さく算定されるのでヤング係数は  $32\text{kN/mm}^2$  程度と推定できる。

## 6.2 リブ付き多層板解析

厚板理論に基づくリブ付き多層板解析<sup>9)</sup>の解析条件を表 - 8 に示す。なお、FEM 解析で G3 桁の張出し床版の縦目地部は、ゆるい弾性支持状態にあることが確認できたので、G3 桁と床版の取り付け条件は固定版に仮定し、G2 桁との取り付けは単純支持として計算する。なお、固定版近似の方法は、リブ付き多層板解析の G3 直近のリブの剛性を無限大に、G2 直近のリブの剛性は小さく設定して近似した。

## 6.3 静的载荷床版たわみの多層板解析結果

たわみの多層板解析結果と計測値を表 - 9 に示す。多層板の解析では、舗装 + RC 床版 + 底鋼板の剛性状態を完全合成、舗装非合成、底鋼板非合成の 3 パターンで計算した。計測値に概ね一致するコンクリー

表 - 8 多層板解析条件

	単位	H21 载荷試験			S60 载荷試験		
		設計		実施	設計		実施
舗装厚	mm	70			0		
床版厚	mm	215	225		215	225	
底鋼板厚	mm	10			10		
アスファルトヤング係数	$\text{kN/mm}^2$	2.0			2.0		
コンクリートヤング係数	$\text{kN/mm}^2$	24.0	28.0	32.0	24.0	28.0	32.0
鋼板ヤング係数	$\text{kN/mm}^2$	200			200		
アスファルトポアソン比		0.35			0.35		
コンクリートポアソン比		0.17			0.17		
鋼板ポアソン比		0.30			0.30		
輪荷重	kN	93.4			76.93		
载荷面積	$\text{mm}^2$	$350 \times 390 = 136,500$			$500 \times 200 = 1,000$		

表 - 9 H21 静的载荷のリブ付き多層板解析結果

G2桁からの距離(mm)		0	498	900	1303	1800
たわみ測定値(mm)	計測点1	0.000	0.051	0.073	0.037	0.000
	計測点2	0.000	0.060	0.079	0.040	0.000
底鋼板下面計算値(mm)	EC=24完全合成	0.000	0.061	0.084	0.049	0.000
	EC=24舗装非合成	0.000	0.069	0.096	0.055	0.000
	EC=24鋼板非合成	0.000	0.106	0.143	0.081	0.000
	EC=28完全合成	0.000	0.055	0.076	0.044	0.000
	EC=32完全合成	0.000	0.050	0.069	0.040	0.000

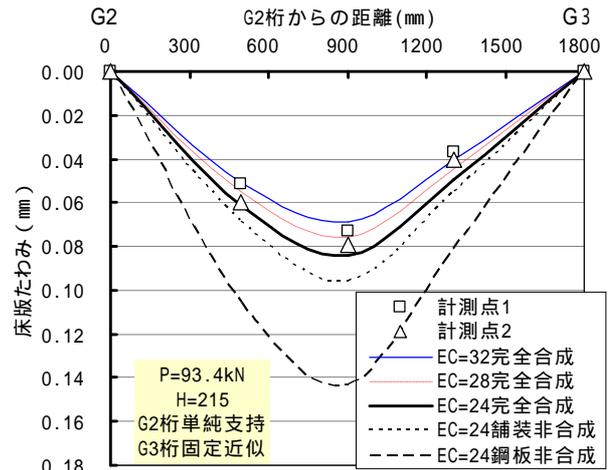


図 - 15 多層板解析による床版のたわみの比較

ト床版の換算ヤング係数 (EC) は、図 - 15 より 28 ~ 32  $\text{kN/mm}^2$  で完全合成の状態であることが判る。G3 側の計測値が G2 側に比べ全体的に小さく、G3 側の張出し床版の縦目地が弾性支持状態であることを考慮して、G3 桁と床版の取り付け条件を固定近似した解析値と計測値の傾向はほぼ一致している。

図 - 16 には、底鋼板のひずみ計測点 2 の計測値と計算値の比較を示す。竣工時で計測した断面内の鉄筋位置およびコンクリート面でのひずみの計算値も示している。底鋼板のひずみは、コンクリートのヤング係数を  $EC=30 \sim 35\text{kN/mm}^2$  に仮定した計算値より小さい結果であった。

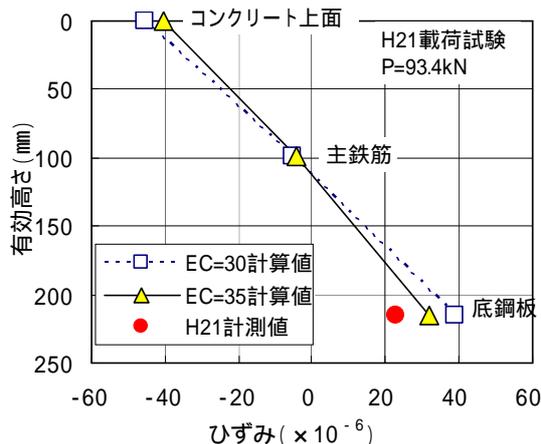


図 - 16 底鋼板の橋軸直角方向ひずみ

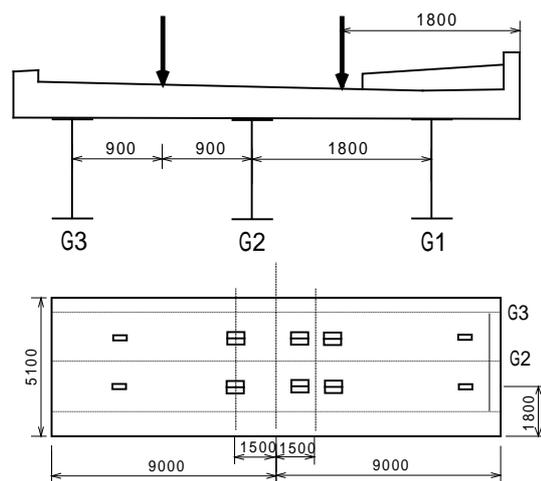


図 - 17 竣工時の載荷ケース

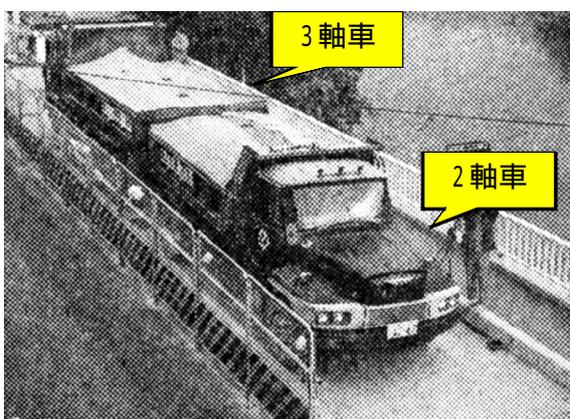


写真 - 6 竣工時の載荷試験状況

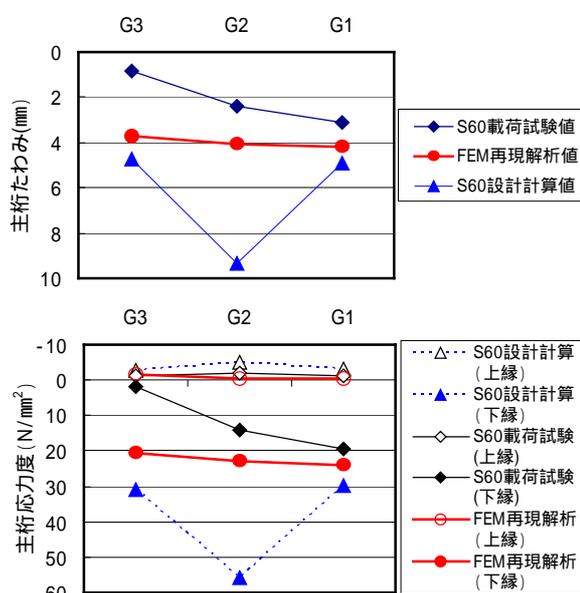


図 - 18 竣工時の載荷試験の FEM 検証

また、主桁上縁・下縁の応力度についても G3 桁が小さく、たわみ同様に現状の状態と比較すると、縦目地はより固定に近い支持状態にあったと推定される。

#### 6.4 FEM 解析による竣工時載荷試験の検証

竣工時の載荷試験の検討では、縦目地の支持条件は考慮していない。そこで、FEM 解析による再検証を行う。竣工時の荷重車の諸元は文献 6) より、表 - 5 に示した値である。2 軸車と 3 軸車を写真 - 6 に示す従列載荷で、主桁のたわみとひずみを計測している。計測位置は計測点 3 (1/2L) である。

主桁のたわみと主桁の上縁・下縁の応力度の解析は、図 - 17 に示す載荷ケースで、床版コンクリートのヤング係数は  $EC = 32 \text{ kN/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.17 として計算している。解析結果を図 - 18 に示す。S60 設計計算値は、当時の単純版での計算結果であり G2 桁を跨ぐ様に載荷しているため G2 桁のたわみが G1 および G3 桁の約 2 倍の値になっている。G2 桁のたわみ計測値は、床版の剛性が大きいために荷重分配効果が期待できることから S60 設計計算たわみより小さい。また、たわみ計測値は、FEM 解析値に近いが縦目地がゆるい弾性支持の現状解析値より小さい。

#### 6.5 多層板解析による竣工時床版の再現解析

竣工時の載荷試験では、計測点 2 に 2 軸ダンプの後輪を載荷して床版のたわみ、橋軸直角方向の底鋼板のひずみ、床版内圧縮側鉄筋ひずみ、コンクリート上面のひずみを計測している。多層板解析での再現計算では、表 - 10 および図 - 19 に示すとおりコンクリートのヤング係数  $EC = 35 \text{ kN/mm}^2$  の再現計算値とたわみ計測値は測定値が小さいことから、よく一致しているとは言い難いが、各ひずみの計測値とはよく一致している。このヤング係数は、現状のヤング

表 - 10 竣工時載荷試験多層板解析による再現解析

実施年	条件	輪荷重	たわみ	コンクリート上面	主鉄筋	底鋼板下面
		(kN)	(mm)	ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )		
S60	計測点2	76.93	0.04(0.06)	-43.1	-16.8	26.3
	計算値		0.084	-39.3	-8.6	27.6

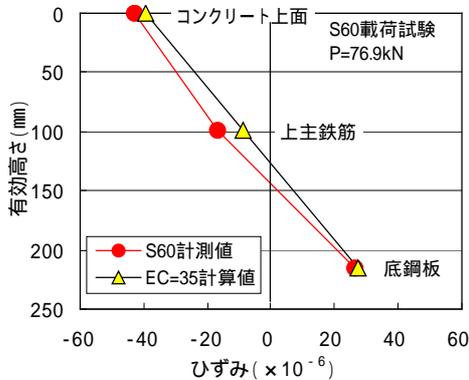


図 - 19 多層板解析による床版のひずみ

係数の推定値 28 ~ 32 kN/mm<sup>2</sup> よりやや大きいと推察できるが、24 年経過していることを考慮するとほぼ妥当な値と考えられる。

## 7. その他の調査結果

### 7.1 底鋼板点検孔 (モニタリング用ハッチ) のひび割れ状態

鋼コンクリート合成床版は、底鋼板があるため内部のコンクリートの状態を確認できないことが、維持管理上の課題の一つに挙げられている。本橋では、内部のコンクリート下面のモニタリング用として、支点部から約 1m 離れた歩道近くに直径 30 cm のハッチを 2 箇所設けている。24 年経過時点のコンクリート面の状態は、写真 - 6 に示すとおりひび割れの発生がなく、また雨水等の侵入も確認できない健全な状態である。また、底鋼板パネルの凹部には直径 1 cm の水抜き穴も設けている。写真 - 7 の 1 箇所所施工時に生じたと考えられる少量の遊離石灰の痕跡が確認できたが、他は健全な状態である。したがって、コンクリート床版のひび割れは存在しないものと推察される。

### 7.2 伸縮装置部の漏水状況

伸縮装置は、写真 - 8 に示す一般的なゴムジョイントであった。写真 - 9 に示すとおり奥多摩側でゴムの劣化による漏水跡が裏面の端横桁に有り、写真



写真 - 6 点検孔の状態



写真 - 8 伸縮装置状態



写真 - 9 端横桁の漏水による汚れ

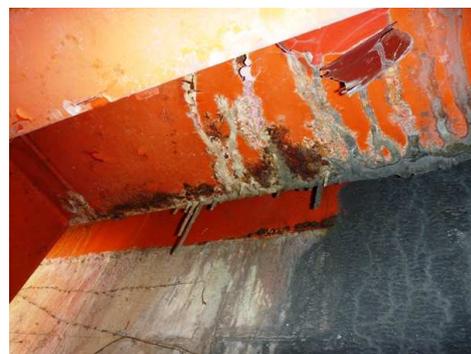


写真 - 10 伸縮装置取付け部底鋼板の発錆と漏水による汚れ

- 10 に示す端横桁と伸縮装置取付け部の底鋼板に錆びが発生している。錆びの状態は特に悪い状態ではないが、伸縮装置の交換と錆びの発生している底鋼板および端横桁の再塗装が必要である。

### 7.3 叩き点検その他の調査結果

写真 - 11 に示すようにハンマーによる底鋼板の浮き・はく離の点検を行ったが、浮やはく離は全く確認されなかった。

また、写真 - 12 の打音法と写真 - 13 の弾性スイープ波法も適用した。打音法は、インパルスハンマーで底鋼板を叩き反射音を集音して波形解析から内部の浮きの状態を確認する方法である。弾性スイープ波法は、底鋼板を弾性スイープ波の発生する探触子で起動し、反射音を集音して波形解析から内部の異常を推定する方法である。何れの方法でも浮き等の異常は確認できなかった。

底鋼板(チェッカープレート 10 mm)の板厚の確認は、写真 - 14 に示す超音波板厚計(ゼネラルエレクトリック社製)で測定したが、10 mmの計測値であり減厚なしを確認した。凹凸のあるチェッカープレートでも精度の高い計測が可能であった。

### 8. まとめ

床版の剛性が大きい鋼板コンクリート合成床版に当センター開発の IIS による重錘落下たわみ法を適用して、衝撃荷重の発生機構が異なる FWD と IIS センサーを併用する方法の適用性を検証した。その検討結果から、以下の知見が得られた。

- (1) IIS センサーを用いた IIS および FWD による衝撃荷重 20 ~ 150kN の範囲での動的たわみ量は、静的載荷試験による静的荷重と静的たわみ量に対して、計測点 1 (1/8L) では、衝撃荷重 (P) を  $P/1.15$  に割引くことで相関決定係数  $R^2=0.975$  となり、計測点 2 (3/8L) では、 $P/1.35$  のとき相関決定係数  $R^2=0.998$  となる。計測位置によって割引率は異なるが、静的載荷によるキャリブレーションを行うと、高い精度で静的載荷の荷重とたわみの関係に換算することができる。したがって、静的載荷時の FEM 解析や多層



写真 - 11 叩き点検



写真 - 12 打音法



写真 - 13 弾性スイープ波法



写真 - 14 超音波板厚計

- 弾性理論による信頼性の高い検討が可能である。
- (2) 衝撃荷重による下面リング変位計のたわみ量は、IIS センサーのたわみ量に比べ全体的に小さい計測値となる。また、衝撃荷重の発生機構により傾向が異なる。したがって、IIS センサーで行った一律の補正では誤差が生じやすく、機種ごとにキャリブレーションが必要である。
- (3) FWD センサーによるたわみ計測値は、支持桁のたわみ成分を含むため、主桁がたわむ床版のたわみ計測には適さない。また、FWD-C で G2 桁上に FWD センサーを配置して、桁のたわみ成分を

補正する方法を試みたが、その補正值は IIS たわみ量の 2 倍程度大きい値であり、実用的な精度での計測は困難である。

- (4) 荷重車が G2 桁を跨ぐように載荷する静的載荷時の主桁のたわみは、G3 桁側から G1 桁側に大きく傾く変形状態であり、G3 桁張出し床版と擁壁の縦目地が、ゆるい弾性支持状態であることが FEM 解析で明らかとなった。また、竣工時の載荷試験の主桁たわみ量の FEM での再現解析では、縦目地は現状に比べより固定に近い支持状態であったと推定される。
- (5) FEM による床版のたわみ解析では、コンクリートのヤング係数を 35 kN/mm<sup>2</sup> に仮定した場合に計測値と計算値は概ね一致する。
- (6) リブ付き多層板による床版のたわみ解析では、縦目地のゆるい弾性支持条件を近似する方法として、G3 桁を固定近似に G2 桁を単純支持に近似するリブ剛性を与え、コンクリートヤング係数は、FEM 解析に近い 32 kN/mm<sup>2</sup> のとき計測値と計算値はよく一致する。
- (7) リブ付き多層板による竣工時の静的載荷時の床

版たわみと床版断面のひずみの再現解析では、たわみおよびひずみの計測値は、コンクリートのヤング係数を 35kN/mm<sup>2</sup> に仮定した場合に計測値と計算値はよく一致する。

- (8) 竣工時と今回の載荷試験のたわみおよびひずみの FEM 立体解析とリブ付き多層板解析のいずれの結果も床版の剛性はほとんど変化がなく、極めて健全な状態を維持していることが確認できた。

## 9. あとがき

FWD の衝撃加振力を利用した IIS センサーを併用するたわみ計測方法は、合成床版においてもキャリブレーションを適切に行えば、十分高い精度で適用できることが確認できた。この方法は、足場を必要とせず、対象とする床版支間部のみの通行規制で床版たわみが計測できるため、詳細調査の合理化の観点から有効な方法である。

最後に、計測にあたっては、東京都西多摩建設事務所の関係者各位に多大なご協力をいただき、ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 関口幹夫、國府勝郎、青木孝憲(2005)：重錘落下たわみによる RC 床版の健全度評価法、平 17. 都土木技研年報、PP.79-92
- 2) 関口幹夫(2005)：重錘落下たわみによる RC 床版の健全度評価要領(案)、平 17. 都土木技研年報、PP.257-262
- 3) 社団法人日本橋梁建設協会(2007)：鋼・コンクリート合成床版維持管理の計画資料、平成 19 年 3 月、PP.37
- 4) 関口幹夫(2003)：FWD による床版たわみ測定手法の検討、土木学会第 58 回年次学術講演概要集、CS-6-051、平成 15 年 9 月
- 5) 関口幹夫(2004)：FWD による床版の健全度評価手法の検討、土木学会構造工学論文集、Vol.50A、PP.697-706
- 6) 関口幹夫(1987)：鋼板合成床版による合成桁橋の補修、昭 62. 都土木技研年報、PP.193-203
- 7) 新津敬治、浅島弘光、大貫一生、落合正利(1984)：鋼製型枠合成床版を用いた合成桁の設計・施工、橋梁と基礎、Vol.14、11、PP.42-49
- 8) 林暢彦、野呂直以、吉良浩二(2008)：供用 27 年を経た鋼・コンクリート合成床版の経年調査結果、土木学会鋼構造委員会第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集、PP.243-248
- 9) 関口幹夫、横山広、堀川都志雄(2008)：リブ付き多層板解析による各種補強床版の実測たわみの評価、土木学会構造工学論文集、Vol.54A、PP.442-451