

衝撃荷重載荷試験を用いた道路橋 RC 床版の健全性診断

齊藤 創太*・佐藤 昌宏*・石原 晃一**・吉沼 志織**
平良 譲治***・野瀬 晴生***・小松 武弥***

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部

** 日本工営(株) 道路事業部

*** 内閣府 沖縄総合事務局 石垣港湾事務所

石垣市にある人工島(南ぬ浜町)と市街地を結ぶ「サザンゲートブリッジ」は、1993年に供用開始された PC3 径間連続箱桁橋及び RC 床版単純ローゼ桁橋で構成される道路橋である。2020 年の定期点検において、RC 床版下面に橋軸直角方向のひび割れや 2 方向ひび割れのほか、一部において剥離、うきが確認された。床版の劣化状態を詳細に評価するために衝撃荷重載荷試験を実施し、健全性診断及び補修等の必要性和緊急性についての判定を行った結果、現状では緊急補修の必要性はないと判断する。

キーワード : RC 床版, 衝撃荷重載荷試験, 加速度計, たわみ, 見かけの弾性係数, 健全性診断

1. はじめに

「サザンゲートブリッジ」は、石垣市にある人工島(南ぬ浜町)と市街地を結ぶ PC3 径間連続箱桁橋及び RC 床版単純ローゼ桁橋で構成される道路橋(橋長 438m, 1993 年供用開始)である(写真-1)。2020 年の近接目視による定期点検において、RC 床版下面に橋軸直角方向のひび割れや 2 方向ひび割れのほか、一部において剥離、うきが確認され、橋梁定期点検要領¹⁾における健全性区分Ⅱ(予防保全段階)と診断された。また、2018 年には南ぬ浜町にクルーズ船ターミナルが暫定供用開始されており、今後の同地区の整備に伴い、サザンゲートブリッジの交通量増加が見込まれる。そのため、補修の必要性をより詳細に評価することが望ましいと判断した。そこで、本稿では、床版の劣化状態を評価するために衝撃荷重載荷試験を実施し、健全性診断及び補修等の必要性和緊急性についての判定を行った結果について報告する。

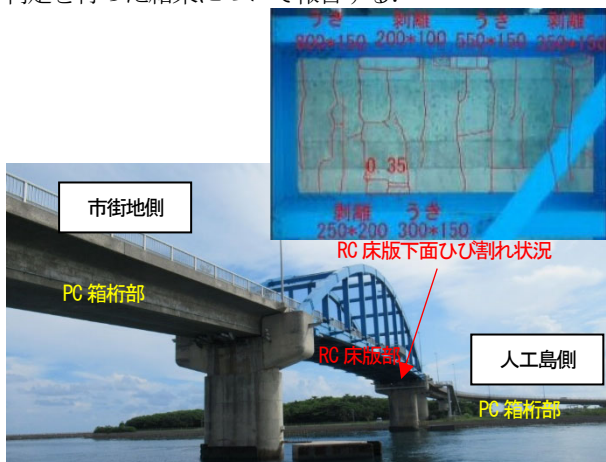


写真-1 サザンゲートブリッジ全景

2. 試験内容

2.1 衝撃荷重載荷試験の概要

損傷が確認された橋梁床版の耐荷性能を簡便に把握する手法として、衝撃荷重載荷試験機 SIVE (Self-propelled Impact Vibration Equipment) が開発されている²⁾。この試験機は写真-2 に示すとおり、載荷部と移動用のフォークリフトで構成されており、ホイスにより 250kg の重錘を 15~20cm の高さから落下させることで、載荷部に約 70kN の衝撃荷重を作用させることが可能である。本試験機の特徴として、重錘が荷重伝達部分に接触する位置での緩衝材に制振ゴムを採用し、重錘の跳返りを抑制することで床版本体の振動が収束するまでの振動波形が取得できることが挙げられる。

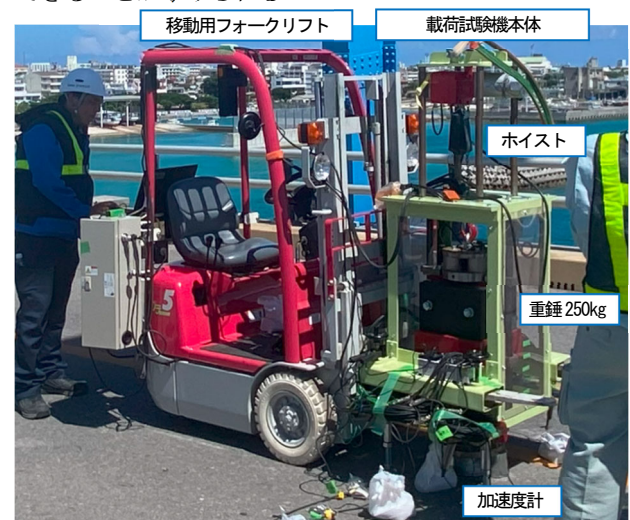


写真-2 衝撃荷重載荷試験機

2.2 衝撃荷重試験の実施方法

縦桁（主桁）と横桁で囲まれた床版パネル（8,860mm×2,250mm）舗装面の中央点に衝撃荷重を作用させ、パネル中央の載荷点、パネル端部の主桁上、載荷点と主桁との中間部に設置した加速度計（1パネルあたり5点）で衝撃荷重作用時の加速度波形を取得した（図-1）。

試験は昼間に2車線のうち1車線を交通規制し、交通振動の影響を回避するため、車両通行の無い状態で実施した。図-2に示す30パネルのすべてにおいて、1パネルあたり3～4回載荷を行った。なお、同図には、床版パネルNo.と載荷位置、加速度計設置位置を示した。

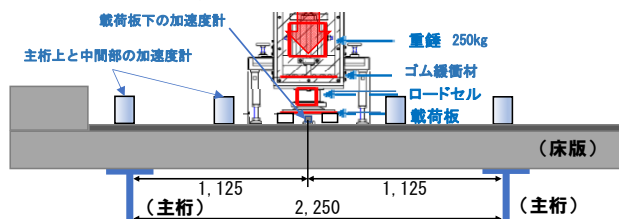


図-1 計測機器設置図

2.3 試験結果の活用方法

衝撃荷重載荷試験は、試験で得られるたわみ分布と解析値を比較することで床版の剛性を評価するものであるが、解析値は橋梁諸元から板理論やFEM解析により算出する必要があり、境界条件等が不明であるため計測現場で容易に求めることが難しい。これに対し、横山らは試験結果から簡便かつ迅速に剛性を評価する手法として、床

版の見かけの弾性係数に着目した健全性診断手法の適用性について検討し、その有効性を示している³⁾。本稿では、この手法に基づき、床版の見かけの弾性係数に着目する。

3. 試験結果と考察

3.1 衝撃荷重載荷試験結果の整理方法

加速度計より得られた加速度波形（図-3(a)）を2階積分することでたわみ波形（図-3(b)）に変換する。この処理を全計測位置で実施し、載荷点のたわみが最大となる時刻でのパネル毎の橋軸直角方向のたわみ分布図を図-3(c)のように作成する。

3.2 見かけの弾性係数に着目した健全性の診断

(1) 見かけの弾性係数

板の曲げ剛性は式(1)で求めることができる。

$$D = \frac{E_c t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

ここに、

D : 板の曲げ剛性 (kN・mm)

E_c : 床版の見かけの弾性係数 (kN/mm²)

t : 板厚 (mm)

ν : ポアソン比

本検討では、ひび割れ進展等による床版の曲げ剛性の減少を式(1)より床版の見かけの弾性係数の減少として捉えることとする。つまり、得られた見かけの弾性係数に応じて健全性の程度を評価することとする。

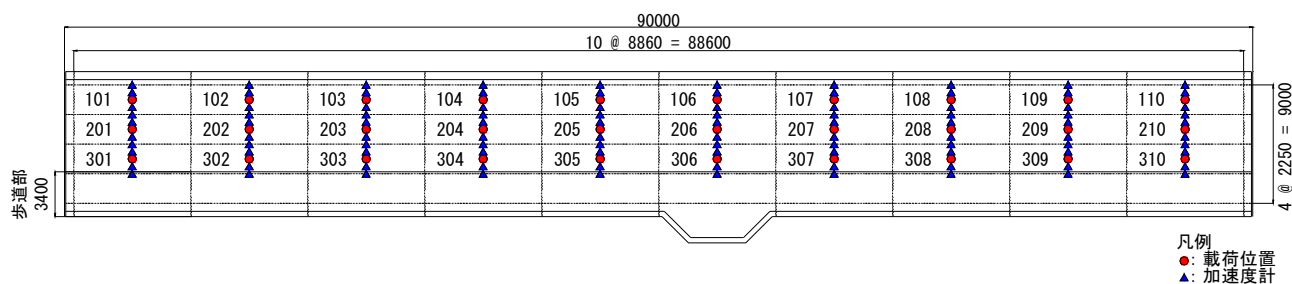


図-2 計測位置平面図及び床版パネルNo.

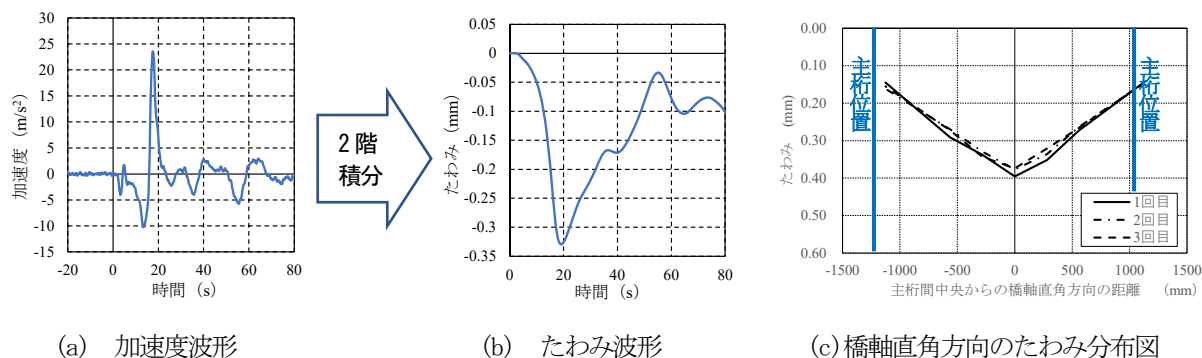


図-3 取得データ例

次に、既往研究³⁾より、弾性係数と曲率の関係を示す曲線の係数 α は、床版の厚さにより一義的に近似できることが分かっている。弾性係数と曲率の関係を示す曲線の係数 α は床版厚さ t と次の関係で示される (式(2))。

$$t = 643.13\alpha^{-0.396} \quad (2)$$

$$E_c = \alpha/C \quad (3)$$

ここに、 t ：床版厚さ (mm)

α ：弾性係数と曲率の関係を示す曲線の係数

E_c ：床版の見かけの弾性係数 (kN/mm²)

C ：曲率 (1/mm)

既往研究⁴⁾により、道路橋床版の曲率を算出する際には、曲率の計算区間を荷重の載荷幅とすることでその精度が確保されることが分かっているため、載荷幅中央部と端部におけるたわみ差及びその距離より算出した曲率を用いて見かけの弾性係数を算出することとする。

(2) 健全性診断の流れ

衝撃荷重載荷試験結果から載荷板幅の範囲でのたわみ分布を三角形形状として曲率を計算後、式(2)より弾性係数と曲率の関係を示す曲線の係数 α を算出する。その後、式(3)より得られた見かけの弾性係数の値より健全性を診断する³⁾。ここで、見かけの弾性係数がひび割れや劣化が生じていない全断面有効状態である床版コンクリートのヤング係数に相当する 25.5kN/mm²を上回る場合を健全な状態とする。そして、既往研究³⁾に基づき $E_c=13.3\text{kN/mm}^2$ の場合を劣化初期状態 (鉄筋とコンクリートのヤング係数比 $n=15$ に相当) $E_c=6.67\text{kN/mm}^2$ (ヤング係数比 $n=30$ に相当) を終局限界状態に近い状態と設定する。既往研究³⁾において、 $E_c=13.3\text{kN/mm}^2$ ではたわみ増加が比較的小さく、 $E_c=6.67\text{kN/mm}^2$ ではたわみの増加傾向が顕著になっている結果が示されている。また、輪荷重走行試験結果に曲率を適用した検討⁴⁾の結果では、全ての供試体で $E_c=6.67\text{kN/mm}^2$ を超えてから終局限界状態に至っていることが明らかとなっている。

これらのことから、表-1 に示すとおり、本検討では載荷試験結果による健全性の区分として、見かけの弾性係数が 13.3～6.67kN/mm² の範囲にある場合を補修・補強など何らかの対策が必要な状態で、橋梁定期点検要領に示されている早期措置段階に相当するものとする。見かけの弾性係数が 6.67kN/mm² よりも下回る場合には、緊急に補強等の対策が必要で、損傷が必要であれば打ち替えも考慮しなければならない緊急措置段階に相当する状態であると設定する。

(3) 健全性の診断結果

表-2 に曲率から得られた見かけの弾性係数の一覧を示す。東側の床版パネル (No. 101～110) の見かけの弾性係数はほとんどが 13.3kN/mm² 以上であり、健全性区分はⅡ相当である。中央と西側の床版パネル (No. 201～210, 301～310) の見かけの弾性係数については健全性区分Ⅱ相当である 13.3kN/mm² 以上の割合と健全性区分Ⅲ相当である 13.3kN/mm² 以下の割合が約半分ずつであり、全体的には

健全性Ⅲ相当であると評価できる。個々のパネルに着目すると、No. 102, 202, 210 の3パネル (赤枠部) の見かけの弾性係数は 10.0kN/mm² を下回っており、他パネルと比較してやや小さい値となっている。

3.3 補修等の必要性和緊急性の判定

(1) 衝撃載荷試験結果による健全性の診断

載荷試験による健全性診断の結果より、No. 102, 202, 210 の床版パネルについては見かけの弾性係数の値が他のパネルと比較して小さくなっているが、健全性区分Ⅳに相当する $E_c=6.67\text{kN/mm}^2$ を下回ってはならず、健全性区分Ⅲ相当であると判断できる。

(2) 詳細調査によるその他の試験結果

詳細調査において、圧縮強度試験 (JIS A 1108 : 2018) 及び全塩化物イオン量試験を実施した。上部工の複数箇所採取したコンクリートコアで圧縮強度試験を実施した結果 (コア3体の平均圧縮強度) を表-3 に示す。圧縮強度試験の結果、RC 床版部の平均圧縮強度 (赤枠部) は設計基準強度である 24N/mm² を十分満足していることが確認された。

表-1 健全性の区分

健全性区分	定義	床版の見かけの弾性係数 E_c (kN/mm ²)
I 健全	道路橋の機能に支障が生じていない状態。	25.5以上
II 予防保全段階	道路橋の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。	25.5未満 13.3以上
III 早期措置段階	道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。	13.3未満 6.67以上
IV 緊急措置段階	道路橋の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。	6.67未満

表-2 曲率から求めた見かけの弾性係数

東側					中央				
測定位置	中央部でのたわみ計測値	載荷板端部とのたわみ差	曲率	床版の見かけの弾性係数	測定位置	中央部でのたわみ計測値	載荷板端部とのたわみ差	曲率	床版の見かけの弾性係数
No.	mm	mm	1/mm	kN/mm ²	No.	mm	mm	1/mm	kN/mm ²
101	0.3288	0.0307	8.664E-07	22.04	201	0.3768	0.0516	1.459E-06	13.09
102	0.4199	0.0709	2.005E-06	9.53	202	0.4536	0.0787	2.223E-06	8.59
103	0.3779	0.0462	1.305E-06	14.63	203	0.4105	0.0660	1.865E-06	10.24
104	0.3559	0.0396	1.119E-06	17.07	204	0.3561	0.0376	1.064E-06	17.95
105	0.3955	0.0456	1.288E-06	14.83	205	0.4502	0.0651	1.840E-06	10.38
106	0.3809	0.0491	1.388E-06	13.76	206	0.4024	0.0491	1.389E-06	13.75
107	0.4074	0.0438	1.237E-06	15.44	207	0.3725	0.0287	8.104E-07	23.57
108	0.3612	0.0358	1.012E-06	18.86	208	0.3664	0.0466	1.317E-06	14.50
109	0.3464	0.0343	9.692E-07	19.70	209	0.3942	0.0439	1.241E-06	15.38
110	0.3640	0.0442	1.250E-06	15.28	210	0.5124	0.0929	2.626E-06	7.27

西側 (歩道側)					西側 (歩道側)				
測定位置	中央部でのたわみ計測値	載荷板端部とのたわみ差	曲率	床版の見かけの弾性係数	測定位置	中央部でのたわみ計測値	載荷板端部とのたわみ差	曲率	床版の見かけの弾性係数
No.	mm	mm	1/mm	kN/mm ²	No.	mm	mm	1/mm	kN/mm ²
301	0.3247	0.0306	8.647E-07	22.09	306	0.3622	0.0562	1.587E-06	12.03
302	0.3848	0.0567	1.604E-06	11.91	307	0.3467	0.0441	1.248E-06	15.31
303	0.3394	0.0573	1.620E-06	11.79	308	0.3828	0.0505	1.427E-06	13.38
304	0.3494	0.0460	1.301E-06	14.68	309	0.3551	0.0482	1.362E-06	14.02
305	0.3873	0.0545	1.540E-06	12.40	310	0.3521	0.0551	1.557E-06	12.26

床版厚さ t 200mm	見かけの弾性係数による健全性区分の凡例			
曲線の係数 α 19.0977	I	II	III	IV
載荷距離 266mm	25.5以上	13.3以上25.5未満	6.67以上13.3未満	6.67未満

表-3 採取したコンクリートコアの平均圧縮強度

採取したコンクリートコアの平均圧縮強度 (N/mm ²)					
RC床版端部			RC床版中央部		
1体目	2体目	3体目	1体目	2体目	3体目
41.0	37.4	34.5	33.5	35.5	34.1
37.6			34.4		

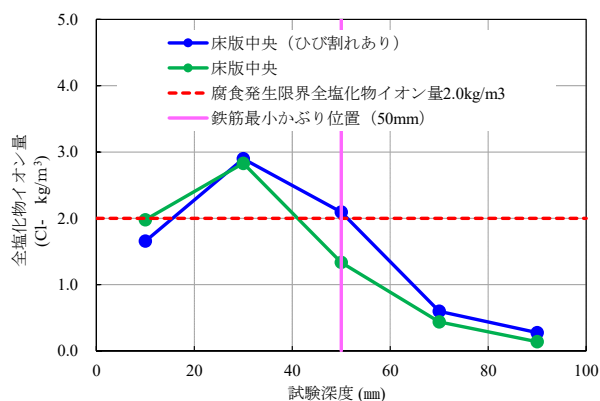


図-4 全塩化物イオン量試験結果

図-5 床版下面状況 (No. 210 パネル)
※ひび割れの一部を赤線表示

全塩化物イオン量試験結果を図-4 に示す。ひび割れのある箇所の RC 床版下面については、鉄筋最小かぶりである 50mm の深さまで設計で想定する腐食発生限界塩化物イオン量である 2.0kg/m^3 ⁵⁾ に達していたが、それ以深の塩化物イオン量は低い結果であった。

(3) 現況評価及び補修等の必要性と緊急性の判定

全パネルのうち、見かけの弾性係数が最も小さい値となった No. 210 パネルの下面状況を図-5 に示す。横断方向の 1 方向ひび割れに加えて、部分的に橋軸方向のひび割れが発生している状況である。

以上より、今後の対策の方向性としては、床版コンクリートの性能劣化につながる舗装面からの水分供給を防止する措置を講じつつ、定期的なモニタリング(定期点検時の近接目視等による劣化進行有無の確認)を継続することが望ましいと判断する。また、主な水分供給は舗装面からである点、RC 床版にはエポキシ樹脂塗装鉄筋が使用されている点から、現時点では床版下面のひび割れ補修までは不要であると判断し、補修等の必要性と緊急性については、橋梁定期点検要領¹⁾における対策区分 B (状況に応じて補修を行う必要がある)と判定する。

4. まとめ

- 1) 衝撃荷重載荷試験結果から計算した曲率を用いて床版の見かけの弾性係数を算出し、RC 床版の健全性を診断した結果、全体的には健全性Ⅲ相当であると評価できる。
- 2) No. 102, 202, 210 の 3 パネルの見かけの弾性係数は 10.0kN/mm^2 を下回っており、他のパネルと比較して小さい値となったが、健全性区分Ⅳに相当する $E_s=6.67\text{kN/mm}^2$ を下回ってはならず、緊急的な対策は不要であると判断する。
- 3) 見かけの弾性係数が最も小さい値であった No. 210 パネル下面を外観目視した結果、横断方向の 1 方向ひび割れが主体で、部分的に橋軸方向のひび割れが確認された。
- 4) 今後の対策の方向性としては、床版コンクリートの性能劣化につながる舗装面からの水分供給を防止する措置を講じつつ、定期的なモニタリングを継続することが望ましいと判断する。

謝辞

本稿は、内閣府 沖縄総合事務局 石垣港湾事務所発注の「令和 5 年度 石垣港臨港道路(橋梁)改良検討業務」の成果の一部をとりまとめたものである。業務実施にあたり検討委員会が開催され、東京工業大学の岩波委員長、琉球大学の富山委員、芝浦工業大学の穴見委員、港湾空港技術研究所の川端委員から貴重なご意見、ご指導をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・技術課:橋梁定期点検要領, 2019.
- 2) Nga Thu NGUYEN, Hiroshi MASUYA, Chen XU, Hiromitsu KAITI, Takafumi YAMAGUCHI, Hiroshi YOKOYAMA: SELF-PROPELLED IMPACT VIBRATION EQUIPMENT FOR THE UTILIZATION OF INSPECTION OF BRIDGE DECK, 第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 89-92, 2016.
- 3) 横山広, 牧祐之, 角間恒, 深田宰史, 枅谷浩: 道路橋床版の曲率を用いた劣化度評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 553-554, 2018.
- 4) 横山広, 角間恒, 佐藤孝司, 枅谷浩: 活荷重作用時の道路橋床版の曲率に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 1296-1303, 2017.
- 5) 公益社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 600-601, 2018.