

嘉樂庇總督大橋結構健康監測

2023年7月至2024年6月

第三次監測數據分析簡報

(2024年01月至2024年03月數據)

目錄

1. 橋樑結構響應分析	1
1.1. 伸縮縫位移分析.....	1
1.2. 主跨撓度分析.....	6
1.3. 主跨振動分析.....	8
1.4. 傾斜分析.....	9
1.4.1. 主跨傾斜分析.....	9
1.4.2. 南灣湖樁柱傾斜分析.....	9
1.5. 應變分析.....	11
1.5.1. 主跨牛腿應變分析.....	11
1.5.2. 主跨箱樑應變分析.....	11
2. 環境分析	12
2.1. 風速風向.....	12
2.2. 環境溫濕度.....	14
2.3. 結構溫度.....	15
3. 結論及建議	16
3.1. 橋樑結構響應.....	16
3.1.1. 伸縮縫位移.....	16
3.1.2. 主跨撓度.....	16
3.1.3. 主跨振動.....	16
3.1.4. 墩柱傾斜.....	16
3.1.5. 跨中應變.....	16
3.2. 環境.....	17
3.2.1. 風速.....	17
3.2.2. 環境溫度.....	17
3.2.3. 環境濕度.....	17

3.2.4. 結構溫度.....	17
3.3. 總結.....	17

圖目錄

圖 1 伸縮縫寬度變化圖（2024 年 01 月）.....	3
圖 2 伸縮縫寬度變化圖（2024 年 02 月）.....	4
圖 3 伸縮縫寬度變化圖（2024 年 03 月）.....	5
圖 4 主跨撓度最大值最小值逐月變化.....	7
圖 5 南灣湖樁柱傾角與環境溫度變化趨勢（2023 年 4 月~2024 年 03 月）.....	10
圖 6 2024 年 01 月十分鐘風玫瑰圖.....	13
圖 7 2024 年 02 月十分鐘風玫瑰圖.....	13
圖 8 2024 年 03 月十分鐘風玫瑰圖.....	13
圖 9 本次監測期結構混凝土溫度（ $^{\circ}\text{C}$ ）變化圖.....	15

表目錄

表 1	伸縮縫寬度變化統計(mm)	2
表 2	年度伸縮縫寬度統計(mm)	2
表 3	主跨撓度數值統計(每分鐘採樣, mm)	6
表 4	主跨箱樑振動統計(m/s ²)	8
表 5	主跨箱樑振動頻率統計(Hz).....	8
表 6	主跨柱墩傾斜統計(度)	9
表 7	南灣湖柱墩傾斜統計(度)	10
表 8	主跨牛腿應變最大值最小值統計(με).....	11
表 9	主跨箱樑應變數值統計(με)	12
表 10	陣風風速統計(m/s)	12
表 11	跨中環境溫度(°C) 數值統計	14
表 12	跨中環境濕度(%RH) 數值統計	14

嘉樂庇總督大橋結構健康監測

第三次監測數據分析簡報

(監測期: 2024 年 01 月至 2024 年 03 月)

2023 年 7 月至 2024 年 6 月年度

1. 橋樑結構響應分析

嘉樂庇大橋結構響應監測項目包含位移伸縮縫位移監測、主跨撓度監測、主跨振動監測、墩柱傾斜監測、混凝土應變監測等 5 項。

1.1. 伸縮縫位移分析

嘉樂庇大橋共有三處伸縮縫採用滾軸式支承，分別位於 B 墩、跨中澳門側及 C 墩；跨中氹仔側則是簡支支座。透過監控伸縮縫位移量可判斷滾軸支承的位移是否在安全範圍內，簡支支座是否存在過大的位移等。

“+”號表示伸縮縫寬度增加，“-”號表示伸縮縫寬度減小。

表 1 統計了 2024 年 01 月至 2024 年 03 月四條伸縮縫跨度變化的最大值及最小值。平均位移變化量最大的伸縮縫為跨中澳門側，位移最大值為 323.27mm，最小值為 41.24 mm，單月寬度變化最大 250.72 mm；B 墩位移最大值為 63.57mm，最小值為 10.50mm，單月寬度變化最大 48.29mm；C 墩位移最大值為 221.91mm，最小值為 11.48mm，單月寬度變化最大 186.18mm。跨中氹仔側為簡支支座，相對只有微小的位移，本次監測期間單月寬度變化值最大為 1 月份的 3.83mm。表 2 則列出各伸縮縫於過去一年中的最大及最小值。

圖 1 至圖 3 把四條伸縮縫的寬度變化放在了一張圖中，可以直觀的看到四條伸縮縫位移的對比。氣溫上升引致橋體結構混凝土膨脹而使伸縮縫的寬度減少，氣溫下降則使伸縮縫的寬度增加。從圖形分析伸縮縫的寬度變化反映溫度變化趨勢，東西兩側變化一致，無發現異常情況。

表 1 伸縮縫寬度變化統計(mm)

	B墩			跨中 澳門側		
	最大值	最小值	變化值	最大值	最小值	變化值
2024年01月	63.57	22.76	40.81	323.27	110.07	213.20
2024年02月	58.11	22.74	35.37	288.19	101.91	186.28
2024年03月	58.79	10.50	48.29	291.96	41.24	250.72

	跨中 氹仔側			C墩		
	最大值	最小值	變化值	最大值	最小值	變化值
2024年01月	7.19	3.36	3.83	221.91	62.18	159.73
2024年02月	6.67	3.95	2.72	194.17	51.92	142.25
2024年03月	6.89	3.62	3.27	197.66	11.48	186.18

表 2 年度伸縮縫寬度統計(mm)

	B墩		跨中 澳門側		跨中 氹仔側		C墩	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
2023.04~2024.03	63.57	-15.06	323.27	-4.93	7.19	-2.91	221.91	-43.35

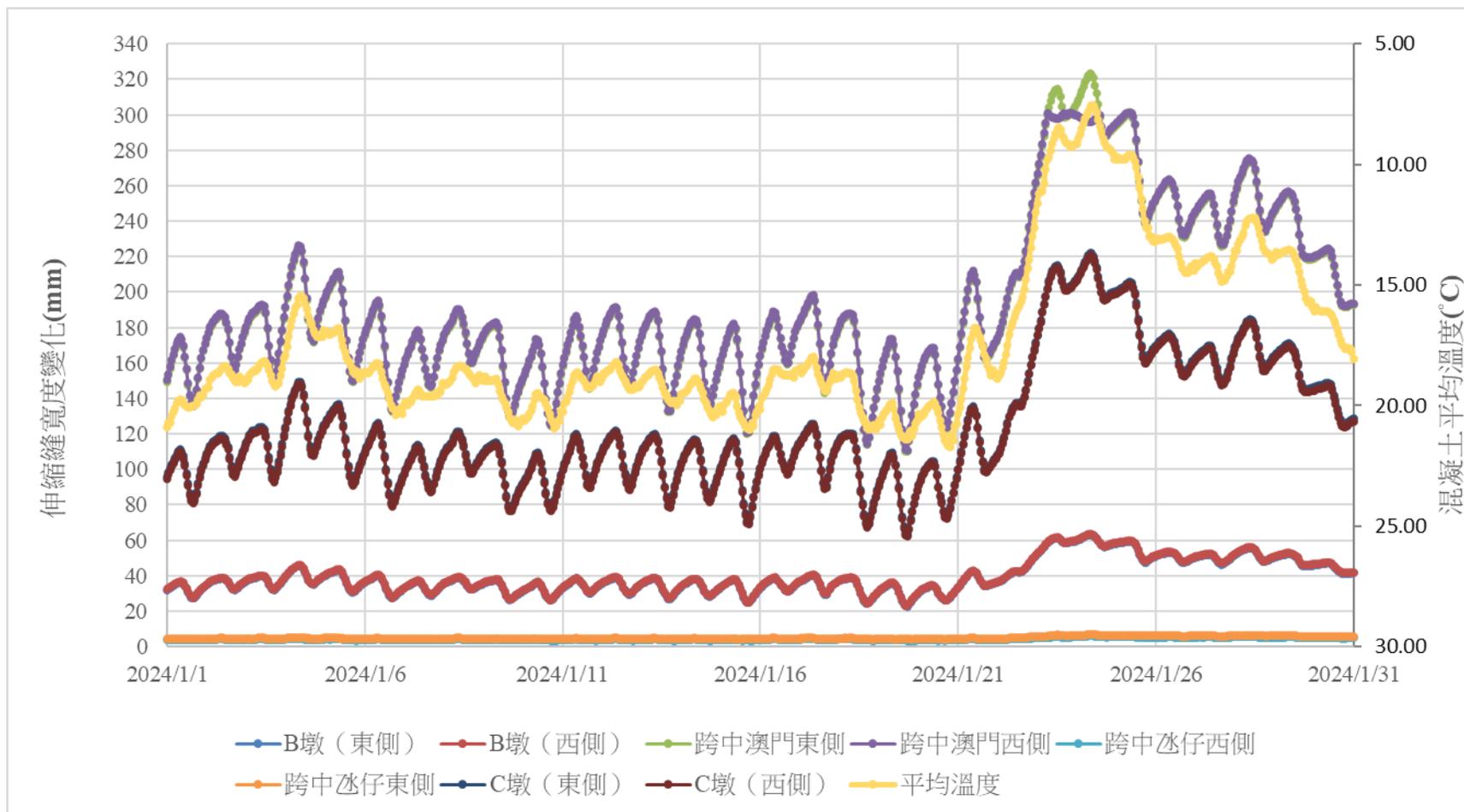


圖 1 伸縮縫寬度變化圖 (2024 年 01 月)

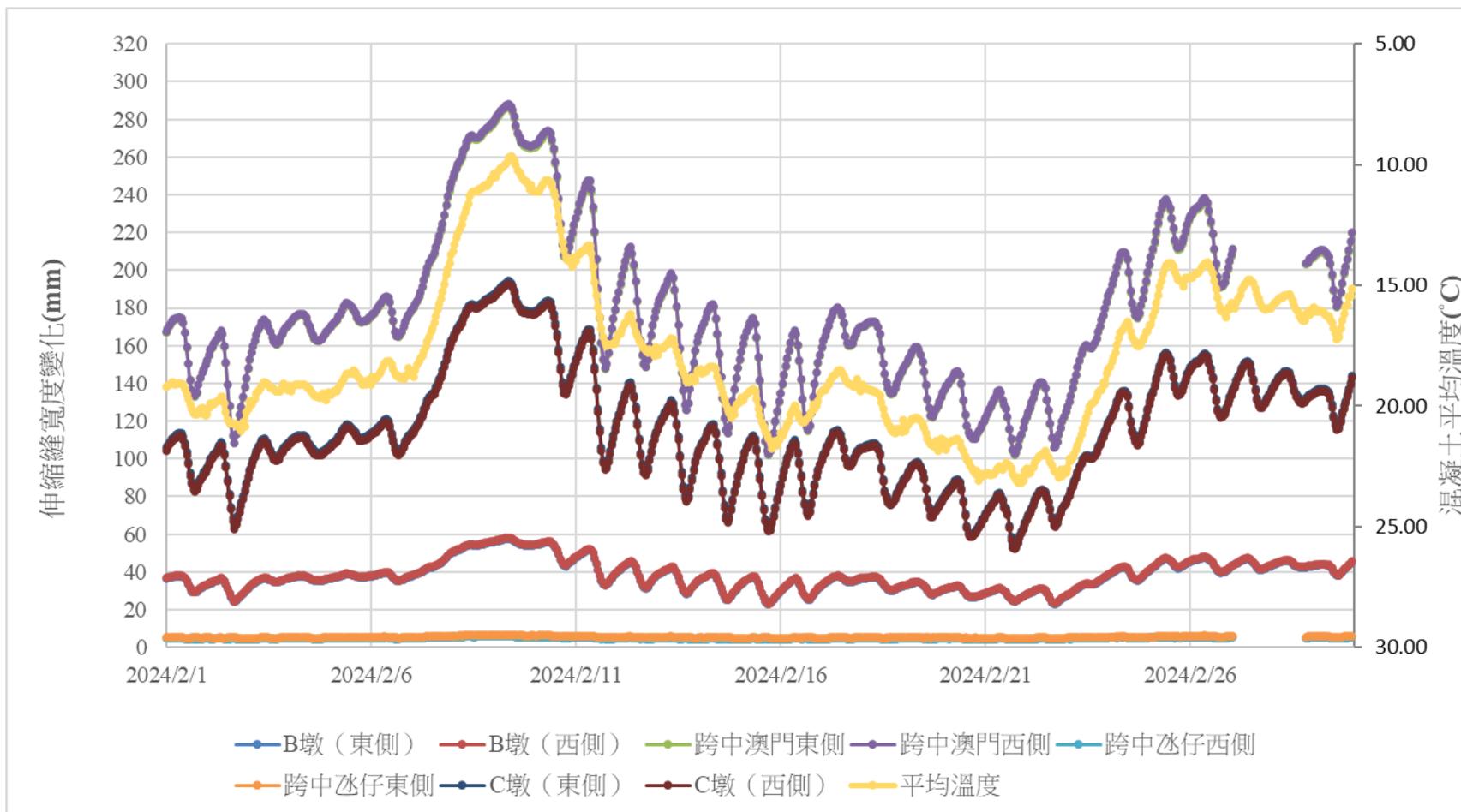


圖 2 伸縮縫寬度變化圖 (2024 年 02 月)

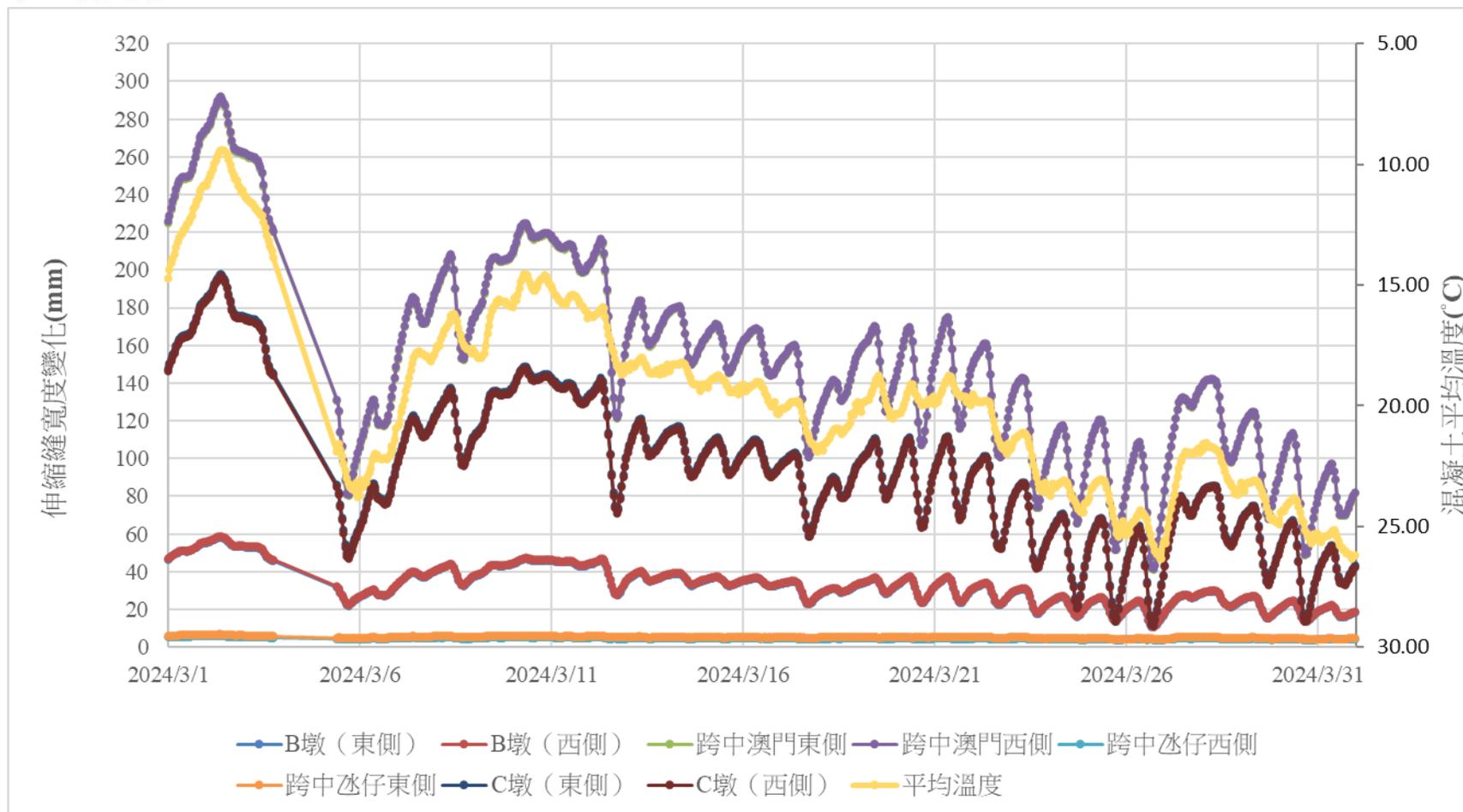


圖 3 伸縮縫寬度變化圖 (2024 年 03 月)

1.2. 主跨撓度分析

主跨跨中為箱型懸臂樑，內部有預應力鋼筋，因此主跨箱樑樑端的振動較為明顯。為盡量捕捉到撓度振動的駐值，撓度監測採樣頻率為 10Hz。因為大量的監測數據及報告篇幅的限制，本報告只選擇每小時和每分鐘的部分數據予以展示。撓度值為“正”表示下撓，撓度值為“負”表示上拱。

表 3 主跨撓度數值統計(每分鐘採樣，mm)

	主跨澳門側		主跨澳門側1/2處		主跨氹仔側		主跨氹仔側1/2處	
	最大值 (下撓)	最小值 (上拱)	最大值 (下撓)	最小值 (上拱)	最大值 (下撓)	最小值 (上拱)	最大值 (下撓)	最小值 (上拱)
2024年01月	35.78	-20.24	25.24	-11.80	37.27	-11.66	15.79	-12.21
2024年02月	37.98	-22.77	26.32	-13.08	38.94	-14.46	16.26	-13.63
2024年03月	35.29	-19.92	24.42	-11.76	36.35	-11.18	15.52	-11.68

表 3 統計了 2024 年 01 月至 2024 年 03 月主跨撓度每分鐘數值的最大最小值。本次監測期間主跨澳門側箱樑端的最大值（下撓）為 37.98mm，最小值（上拱）為 -22.77mm；氹仔側樑端的最大值（下撓）為 38.94mm，最小值（上拱）為 -14.46mm。撓度數據以下撓為正，因此本節之圖表均設定縱軸向下為正。圖 4 顯示了由 2022 年 4 月至 2024 年 03 月的每月主跨撓度的最大及最小值。圖中可看出上拱（三角形標示）基本維持平穩，而下撓（正方形標示）之最大值在 2022 至 2023 年有輕微增加的趨勢，目前趨勢已收斂回穩。

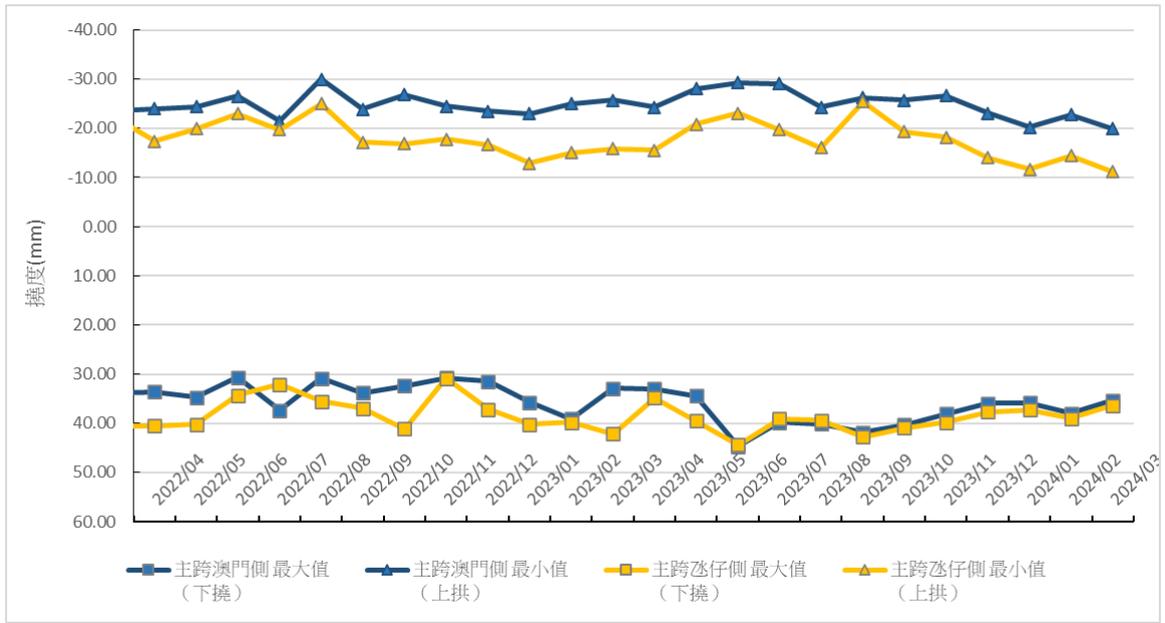


圖 4 主跨撓度最大值最小值逐月變化

1.3. 主跨振動分析

振動監測採用單向加速度計，主跨澳門側箱樑端和主跨氹仔側箱樑端的振幅最大，也最容易捕捉到懸臂箱樑豎向振動的第一階振動頻率。

表 4 為 2024 年 01 月至 2024 年 03 月每月某一日 08:30 二分鐘內交通早高峰時段的主跨箱樑樑端的振動加速度的最大值和最小值。從表 4 可以看出，樑端振動的加速度幅值大約在 $\pm 0.7\text{m/s}^2$ 以內。

主跨澳門側和氹仔側箱樑在豎直方向上第一階和第二階的自振頻率，統計在表 5 中。從表中看出，箱梁豎向振動第二階頻率為 2.0Hz 左右，箱梁第一階豎向振動為 1.55Hz 左右，與歷史數據相比皆無明顯變化，說明大橋主跨結構剛度維持正常。

表 4 主跨箱樑振動統計(m/s^2)

	主跨澳門側箱樑端		主跨氹仔側箱樑端	
	最大值	最小值	最大值	最小值
2024/1/31 8:30:00	0.3467	-0.4056	-0.4056	-0.578
2024/2/29 8:30:00	0.2991	-0.4549	0.3191	-0.5075
2024/3/31 8:30:00	0.4114	-0.4254	0.547	-0.4424

表 5 主跨箱樑振動頻率統計(Hz)

	主跨澳門側箱樑		主跨氹仔側箱樑	
	第一階	第二階	第一階	第二階
2024/1/31 8:30:00	1.54	2.04	1.54	2.04
2024/2/29 8:30:00	1.54	2.04	1.56	2.04
2024/3/31 8:30:00	1.53	2.05	1.53	2.05

1.4. 傾斜分析

柱墩的傾斜監測採用 MEMS 單軸傾斜儀，安裝於主跨 P23 柱、P24 柱以及南灣湖中 4 個墩柱，所有數值“+”表示向澳門方向傾斜，“-”表示向氹仔方向傾斜。

1.4.1. 主跨傾斜分析

表 6 為主跨 P23 柱和 P24 柱最近 3 季監測期間最大值和最小值的統計。本次監測期間 P23 柱的傾斜值保持穩定在 0.2~0.5 度左右。P24 柱的傾斜值大致穩定在 $\pm 0.2^\circ$ 之間，並無異常趨勢發生。

1.4.2. 南灣湖樁柱傾斜分析

2024 年 01 月至 2024 年 03 月南灣湖內 4 支排樁 L、M、N 和 O 的傾角變化趨勢統計於表 7 中。

圖 5 顯示了由 2023 年 4 月至 2024 年 03 月各排樁角度對比環境溫度變化趨勢，可看出的大約一年的尺度下，角度變化與氣溫變化而引起的結構變形高度相關，且變化幅度保持在 0.5 度以內，暫時無發現異常傾斜趨勢。

表 6 主跨柱墩傾斜統計(度)

	主跨P23柱		主跨P24柱	
	最大值	最小值	最大值	最小值
2023年07-09月	0.49	0.24	0.15	-0.13
2023年10-12月	0.46	0.31	0.14	-0.15
2024年01-03月	0.45	0.29	0.17	-0.19

表 7 南灣湖柱墩傾斜統計(度)

	L墩		M墩		N墩		O墩	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
2023年07-09月	0.25	-0.02	0.06	-0.20	-0.05	-0.38	0.08	-0.24
2023年10-12月	0.39	0.09	0.19	-0.16	0.08	-0.26	0.23	-0.17
2024年01-03月	0.53	0.25	0.34	0.04	0.28	-0.07	0.44	0.07

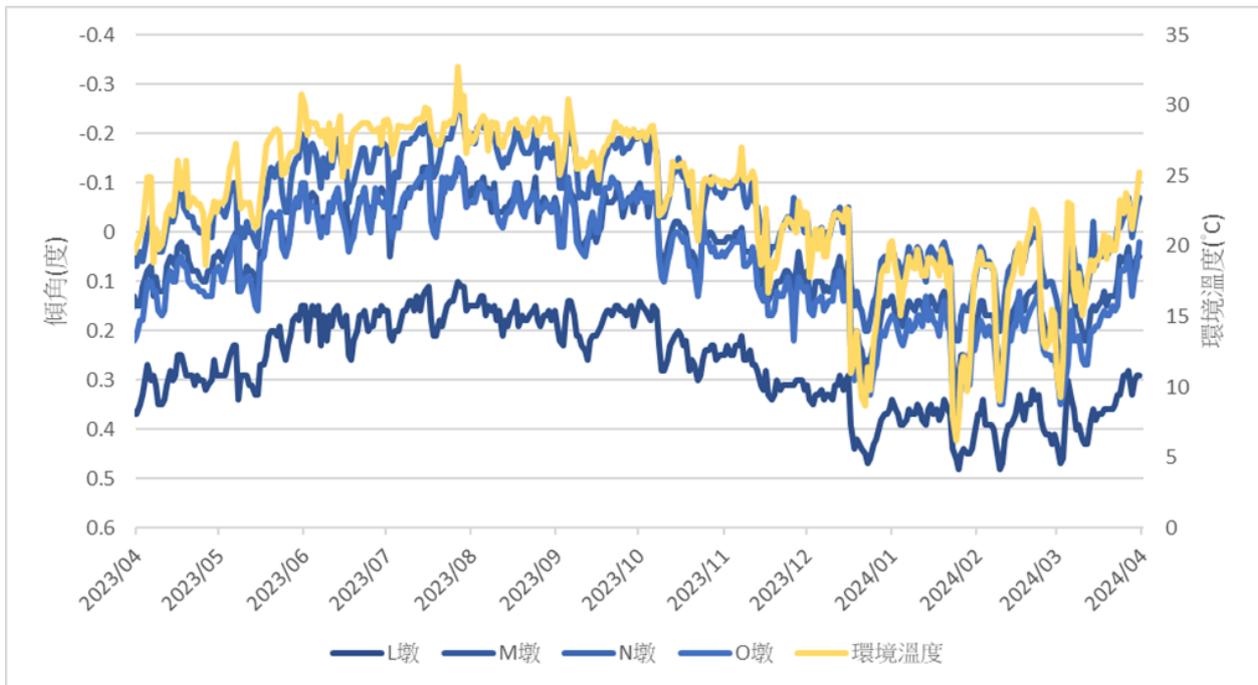


圖 5 南灣湖樁柱傾角與環境溫度變化趨勢 (2023 年 4 月~2024 年 03 月)

1.5. 應變分析

應變監測採用光纖光柵應變計，合計 20 個，安裝於大橋主跨結構關鍵區域。所有應變數值“+”表示應變計伸長，“-”表示應變計縮短。

1.5.1. 主跨牛腿應變分析

表 8 為主跨澳門側和氹仔側上下牛腿 2024 年 01 月至 2024 年 03 月的應變每月最大值最小值統計。與環境溫度交叉分析可知所有牛腿的應變與溫度變化趨勢呈現高度相關性，混凝土線膨脹係數大約為 $10\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ，當溫度上升 10°C 時，混凝土會產生 $+100\mu\epsilon$ 的變化，基本與數據吻合，因此基本判斷本監測週期中，牛腿應變均在正常範圍內，沒有發現異常情況。

表 8 主跨牛腿應變最大值最小值統計($\mu\epsilon$)

	澳門側 東牛腿		澳門側 西牛腿		氹仔側 東牛腿		氹仔側 西牛腿	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
2024年01月	-26.21	-269.4	-66.68	-261.54	-71.95	-254.63	-89.3	-432.4
2024年02月	-7.59	-239.54	-39.2	-208.51	-42.3	-218.98	-80.09	-376.66
2024年03月	25.01	-245.17	5.16	-215.74	-2.7	-214.69	-37.48	-382.73

1.5.2. 主跨箱樑應變分析

表 9 為主跨箱梁內應變花 2024 年 01 月至 2024 年 03 月的應變數值統計。與環境溫度交叉分析可知所有箱梁的應變與溫度變化趨勢呈現高度相關性，混凝土線膨脹係數大約為 $10\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ，當溫度上升 10°C 時，混凝土會產生 $+100\mu\epsilon$ 的變化，因此基本判斷本監測週期中，牛腿應變均在正常範圍內，沒有發現異常情況。

表 9 主跨箱樑應變數值統計(με)

	P23墩箱梁 東側		P23墩箱梁 西側		P24墩箱梁 東側		P24墩箱梁 西側	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
2024年01月	-41.6	-219.01	-75.03	-295.08	-57.95	-252.16	-57.95	-282.61
2024年02月	-20.22	-204.14	-57.87	-285.19	-38.17	-227.99	-38.17	-252.23
2024年03月	32.74	-197.98	-12.88	-275.67	8.45	-226.49	8.45	-253.72

2. 環境分析

橋樑外部環境及荷載主要包括風速風向、大氣溫濕度、結構溫度和交通荷載。

2.1. 風速風向

風速風向採集儀器採用超聲波風速風向儀 1 台，安裝於橋面東側，位於 P22 號柱墩的上方。

表 10 為 2024 年 01 月至 2024 年 03 月的陣風風速統計。圖表中可看出，大多數時間陣風風速均維持在 15m/s 以下，本次監測期間 1 分鐘最大陣風風速為 13.1 m/s，屬於正常範圍。

表 10 陣風風速統計(m/s)

	最大陣風風速 (分鐘)	最大陣風風速 (十分鐘)	最大陣風風速 (小時)
2024年01月	12.2	9.6	8.7
2024年02月	8.1	7.6	7.6
2024年03月	13.1	11.9	8.9

圖 6 為 2024 年 01 月的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為東南偏東 (ESE)，風速大部分落在 [2-4m/s] 區間。

圖 7 為 2024 年 02 月的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為東南偏東 (ESE)，風速大部分落在 [0.5-2m/s]、[2-4m/s] 區間。

圖 8 為 2024 年 03 月的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為東南偏東 (ESE)，風速大部分落在 [2-4m/s] 區間。

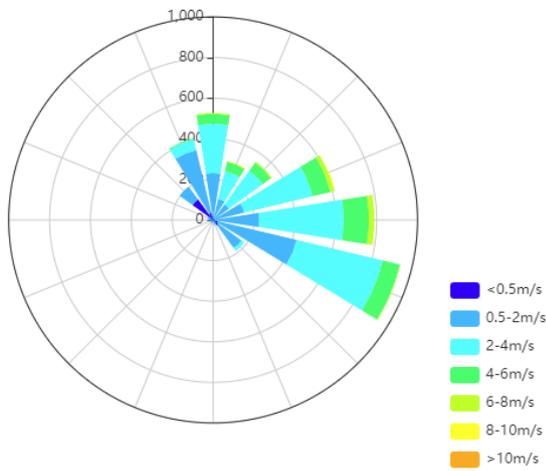


圖 6 2024 年 01 月十分鐘風玫瑰圖

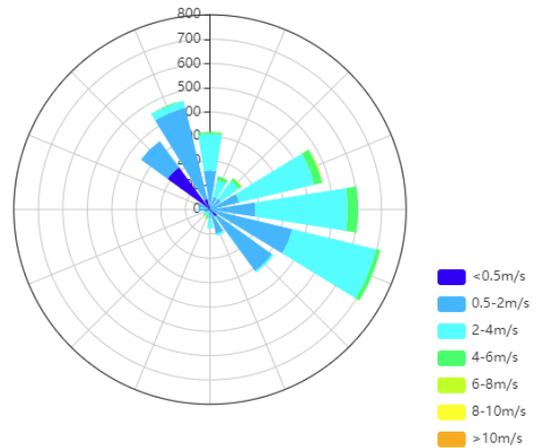


圖 7 2024 年 02 月十分鐘風玫瑰圖

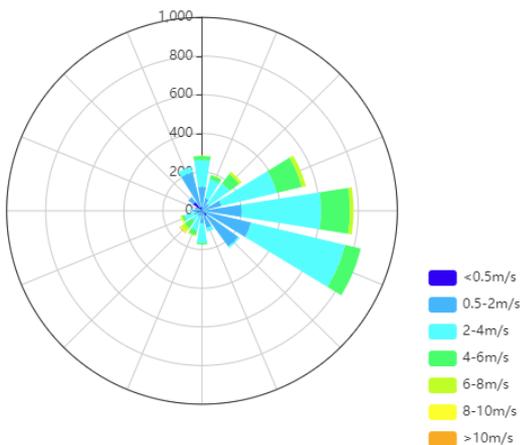


圖 8 2024 年 03 月十分鐘風玫瑰圖

2.2. 環境溫濕度

環境溫濕度監測採用超聲波風速風向儀 1 台，安裝於橋面東側，位於 P22 號柱墩的上方。表 11 為 2024 年 01 月至 2024 年 03 月橋樑跨中附近環境溫度統計數據。本次監測期間溫度最大值為 26.8 °C（2024-03-26 14:00），最小值 4.3°C（2024-01-24 07:00）。單月最大溫差之月份為 3 月，變化量 19.3°C。

表 11 跨中環境溫度（°C）數值統計

	跨中環境 溫度(°C)				
	最大值	發生時間	最小值	發生時間	變化量
2024年01月	22.9	2024/1/20 15:00	4.3	2024/1/24 07:00	18.6
2024年02月	23.1	2024/2/20 16:00	8.3	2024/2/9 08:00	14.8
2024年03月	26.8	2024/3/26 14:00	7.5	2024/3/2 06:00	19.3

表 12 為 2024 年 01 月至 2024 年 03 月橋樑跨中附近環境濕度（Humidity）統計數據。本次監測期間濕度最大值為 100%，最小值為 19.1%。單月濕度差最大之月份為 2 月，變化量 80.9%。

表 12 跨中環境濕度（%,RH）數值統計

	跨中環境 濕度(%,RH)				
	最大值	發生時間	最小值	發生時間	變化量
2024年01月	91.5	2024/1/28 04:00	32.2	2024/1/13 19:00	59.3
2024年02月	100.0	2024/2/4 22:00	19.1	2024/2/11 15:00	80.9
2024年03月	97.8	2024/3/18 09:00	34.4	2024/3/20 12:00	63.4

2.3. 結構溫度

結構溫度監測採用埋入式溫度計 3 個，分別埋入在 B 墩、跨中和 C 墩的混凝土內。本次監測期間最大值為 26.9°C (2024-03-26 19:00)，最小值為 10.0°C (2024-03-02 08:00)。單月最大溫差為 3 月，變化量 16.9°C。對照環境溫度，B 墩混凝土溫度均在正常範圍內，無異常情況發生。

圖 9 為本次監測期間混凝土溫度變化圖。混凝土溫度對照環境溫度均在正常範圍內，無發現異常。

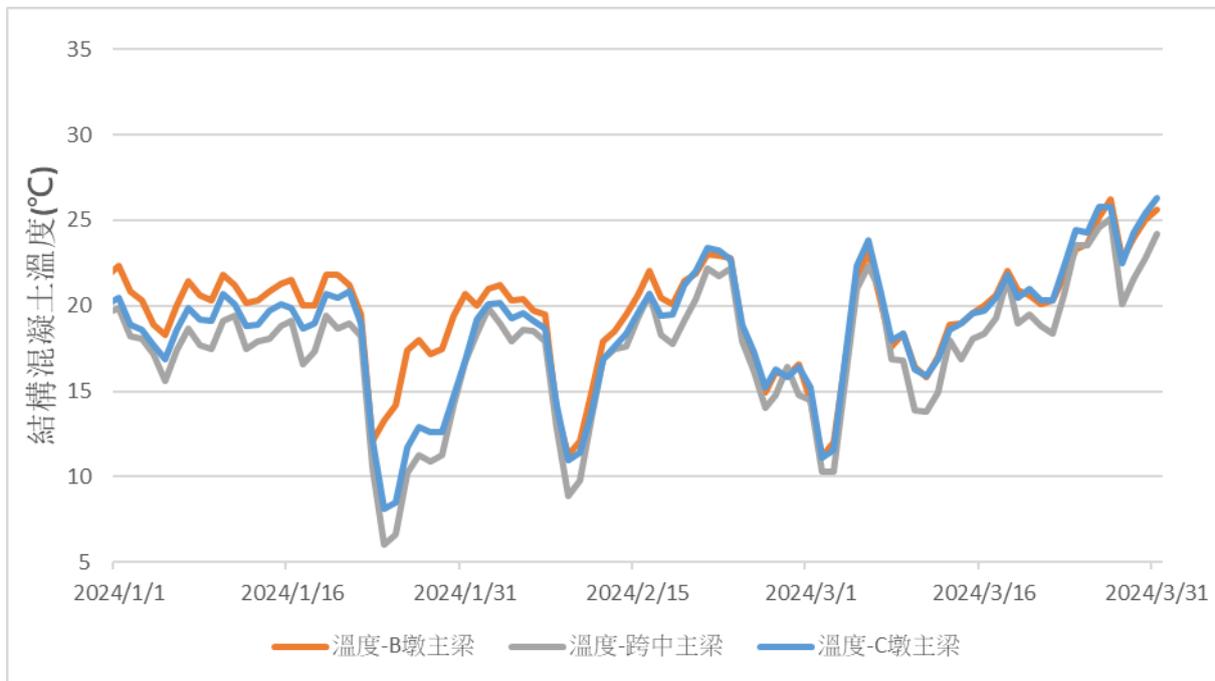


圖 9 本次監測期結構混凝土溫度 (°C) 變化圖

3. 結論及建議

3.1. 橋樑結構響應

3.1.1. 伸縮縫位移

B 墩、跨中澳門側、C 墩三個滾軸支座的伸縮縫位移變化趨勢一致，單月寬度變化最大值 B 墩為 48.29mm，跨中澳門側為 250.72mm，C 墩為 186.18mm。隨溫度的升降可變形往復，東西兩側保持變形一致，無異常。跨中氹仔側簡支形式支座的伸縮縫單月寬度變化最大值為 3.83mm，無異常。

3.1.2. 主跨撓度

主跨最大撓度（每分鐘）澳門側箱樑端最大撓度為 37.98mm（下撓）至-22.77mm（上拱），上下振動幅度為 60.75mm；氹仔側箱樑端最大撓度為 38.94mm（下撓）至-14.46mm（上拱），上下振動幅度為 53.40mm。箱樑基本圍繞平衡位置做往復振動，LECM 將密切關注其變化趨勢。

3.1.3. 主跨振動

主跨箱樑振動加速度在 $\pm 0.7\text{m/s}^2$ 之間。澳門側和氹仔側的箱樑自振頻率維持第一階 1.5Hz 和第二階 2.0Hz 左右，與歷史數據及有限元分析相比較無明顯變化，說明大橋主跨結構剛度維持正常，無異常。

3.1.4. 墩柱傾斜

主跨 P24 墩柱的傾斜變化比較小（ $\pm 0.2^\circ$ ），無異常；主跨 P23 墩的傾斜值在本次期間均保持穩定在 0.2 至 0.5 度左右。分析全年數據顯示，主跨 P23、P24 全年大致保持恆定，而南灣湖中 4 根墩柱傾斜度變化與氣溫變化而引起的橋樑整體變形呈高度正相關，且變化幅度均保持在 0.5 度以內，暫時無發現異常傾斜趨勢。

3.1.5. 跨中應變

本次監測期間所有牛腿的表面應變與溫度變化趨勢呈現高度相關性。基本判斷本次監測週期中，跨中澳門側和氹仔側箱樑內應變花應變均在正常範圍內，無異常；上下牛腿根

部受拉剪區域應變均在正常範圍內，無異常。

3.2. 環境

3.2.1. 風速

本次監測期間並無颱風吹襲或極端天氣狀況發生，3 月的陣風最高風速（分鐘）達到 13.1m/s。大部分時段的風速都處於 0 ~ 15m/s 區間。

3.2.2. 環境溫度

環境溫度最大值 26.8°C，最小值 4.3°C，未見極端異常天氣。

3.2.3. 環境濕度

環境最大濕度 100%，最小濕度 19.1%，未發生異常。

3.2.4. 結構溫度

B 墩最高溫度 26.9°C，跨中最高溫度 25.8°C，C 墩最高溫度 27.5°C，無發現異常。

3.3. 總結

綜上所述，嘉樂庇總督大橋在 2024 年 01 月至 2024 年 03 月期間各項監測數據基本正常，從所獲得的監測資料分析大橋結構基本無異常狀態。

嘉樂庇總督大橋結構健康監測系統於 2020 年 7 月完成安裝部署，2020 年 11 月對稱重系統進行了部分傳感器更換、補膠及重新校準等工作，目前已累積超過三年數據，進入第四年監測週期，累積更長期監測數據後將可以進行更進一步的長期趨勢分析。建議貴局繼續維持大橋健康監測及定期維護保養。