

嘉樂庇總督大橋結構健康監測
2020年7月至2021年6月
第四次監測數據分析簡報
(2021年3月至2021年6月)



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.....	7
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.....	10
1.5.1. 主跨牛腿應變分析.....	10
1.5.2. 主跨箱樑應變分析.....	11
2. 環境分析	11
2.1. 風速風向.....	11
2.2. 環境溫濕度.....	13
2.3. 結構溫度.....	14
3. 結論及建議	15
3.1. 橋樑結構響應.....	15
3.2. 環境.....	16
3.3. 結論及建議.....	16



圖目錄

圖 1	伸縮縫寬度變化圖（2021 年 3 月）	3
圖 2	伸縮縫寬度變化圖（2021 年 4 月）	4
圖 3	伸縮縫寬度變化圖（2021 年 5 月）	5
圖 4	伸縮縫寬度變化圖（2021 年 6 月）	6
圖 5	主跨撓度最大值最小值逐月變化.....	7
圖 6	南灣湖樁柱傾角與環境溫度變化趨勢.....	10
圖 7	3 月份十分鐘風玫瑰圖.....	12
圖 8	4 月份十分鐘風玫瑰圖.....	12
圖 9	5 月份十分鐘風玫瑰圖.....	12
圖 10	6 月份十分鐘風玫瑰圖.....	12
圖 11	3 至 6 月份結構混凝土溫度（℃）變化圖	14



表目錄

表 1	伸縮縫寬度變化統計(mm)	2
表 2	主跨撓度統計(分鐘, mm)	7
表 3	主跨箱樑振動振幅統計(m/s ²)	8
表 4	主跨箱樑振動頻率統計(Hz)	8
表 5	主跨柱墩傾斜統計(度)	9
表 6	南灣湖柱墩傾斜統計(度)	9
表 7	主跨牛腿應變統計(με)	10
表 8	主跨箱樑應變統計(με)	11
表 9	陣風風速統計(m/s)	12
表 10	跨中環境溫度 (Temp.) 統計	13
表 11	跨中環境濕度 (Humidity) 統計	14

嘉樂庇總督大橋結構健康監測

第四次監測數據簡報

(監測期 2021 年 3 月至 2021 年 6 月)

2020 年 7 月至 2021 年 6 月年度

1. 橋樑結構響應分析

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 2021 年 3 月至 2021 年 6 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，最大值為 206.76mm，最小值為 5.01mm，單月寬度變化最大達到 160.90 mm；C 墩位移最大值為 138.46mm，最小值為-29.96mm，單月寬度變化最大 120.84 mm；B 墩位移最大值為 44.34mm，最小值為-6.08mm，單月寬度變化最大 34.03mm。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 5 月份的 5.86mm。

從統計圖表可以看出，隨著氣溫升高，各伸縮縫的寬度都在減少，寬度變化值也在減少。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。

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
2021年03月	44.34	14.27	30.07	206.76	45.86	160.90
2021年04月	37.15	6.94	30.21	171.67	10.52	161.15
2021年05月	27.95	-6.08	34.03	125.36	5.01	120.35
2021年06月	21.87	-5.99	27.86	120.33	5.14	115.19

	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
2021年03月	5.69	3.43	2.26	138.46	20.12	118.34
2021年04月	5.36	3.04	2.32	112.93	-7.91	120.84
2021年05月	4.62	-1.24	5.86	78.95	-29.96	108.91
2021年06月	3.24	-1.64	4.88	73.61	-28.66	102.27

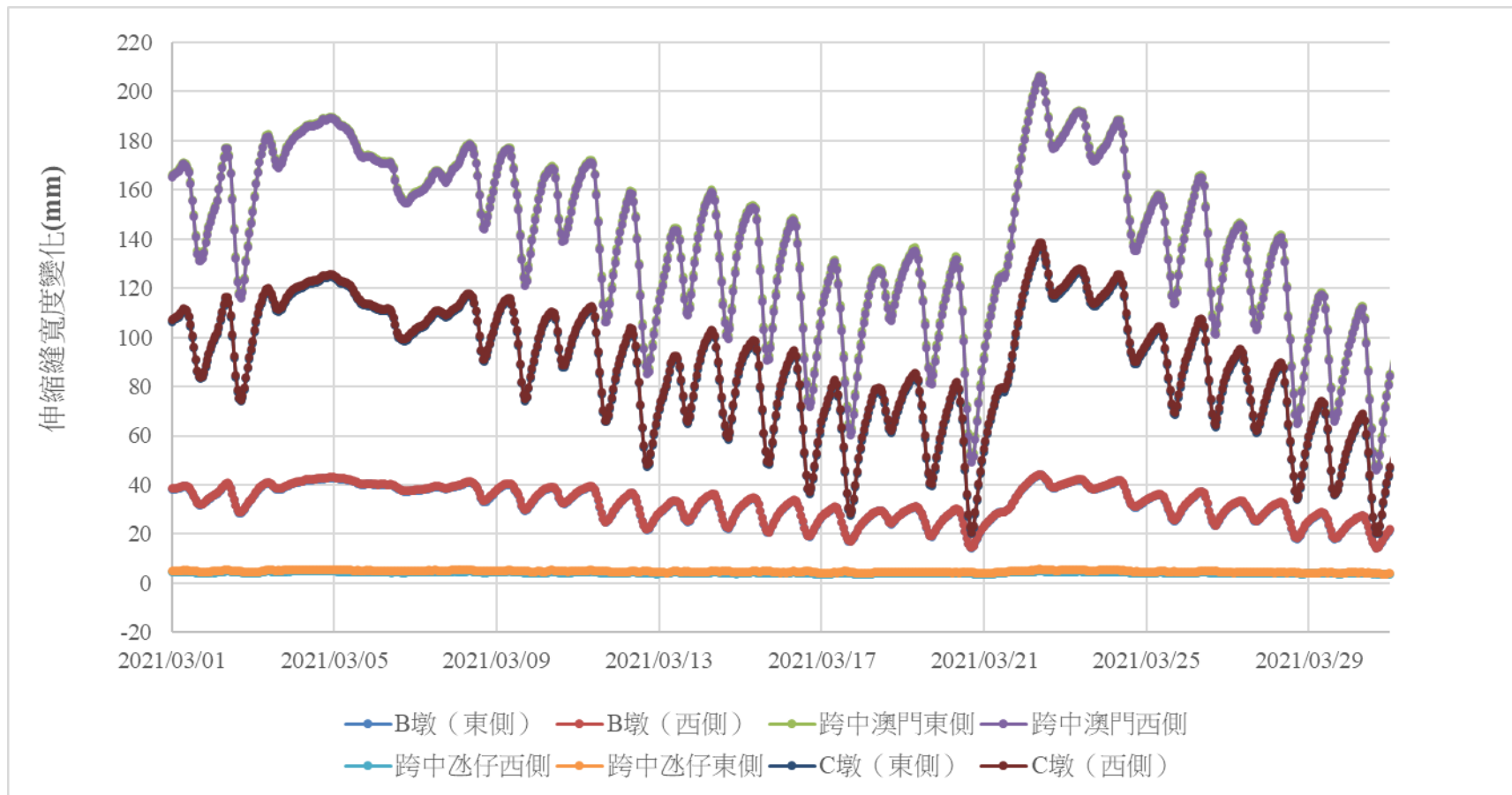


圖 1 伸縮縫寬度變化圖 (2021 年 3 月)

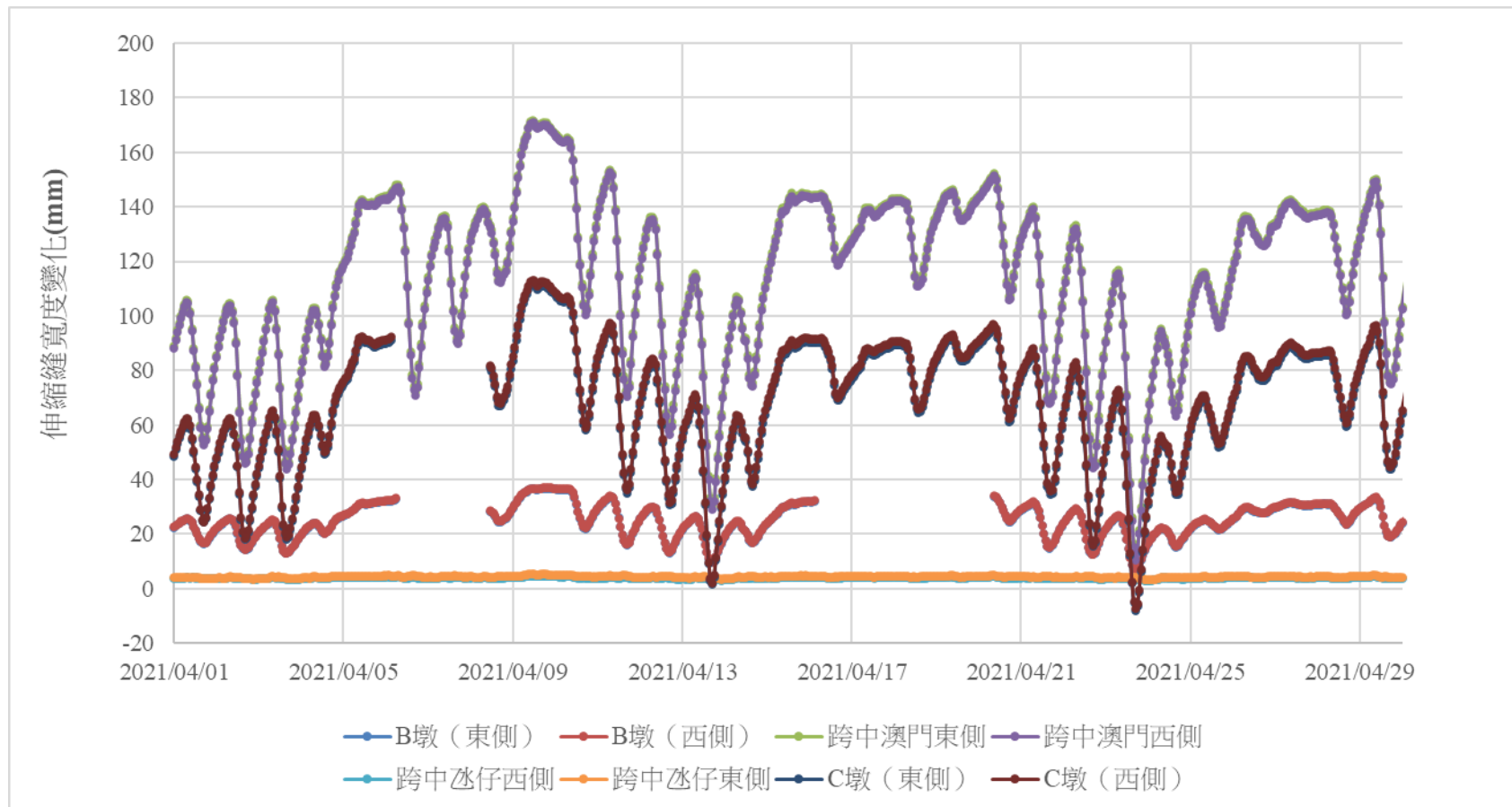


圖 2 伸縮縫寬度變化圖 (2021 年 4 月)

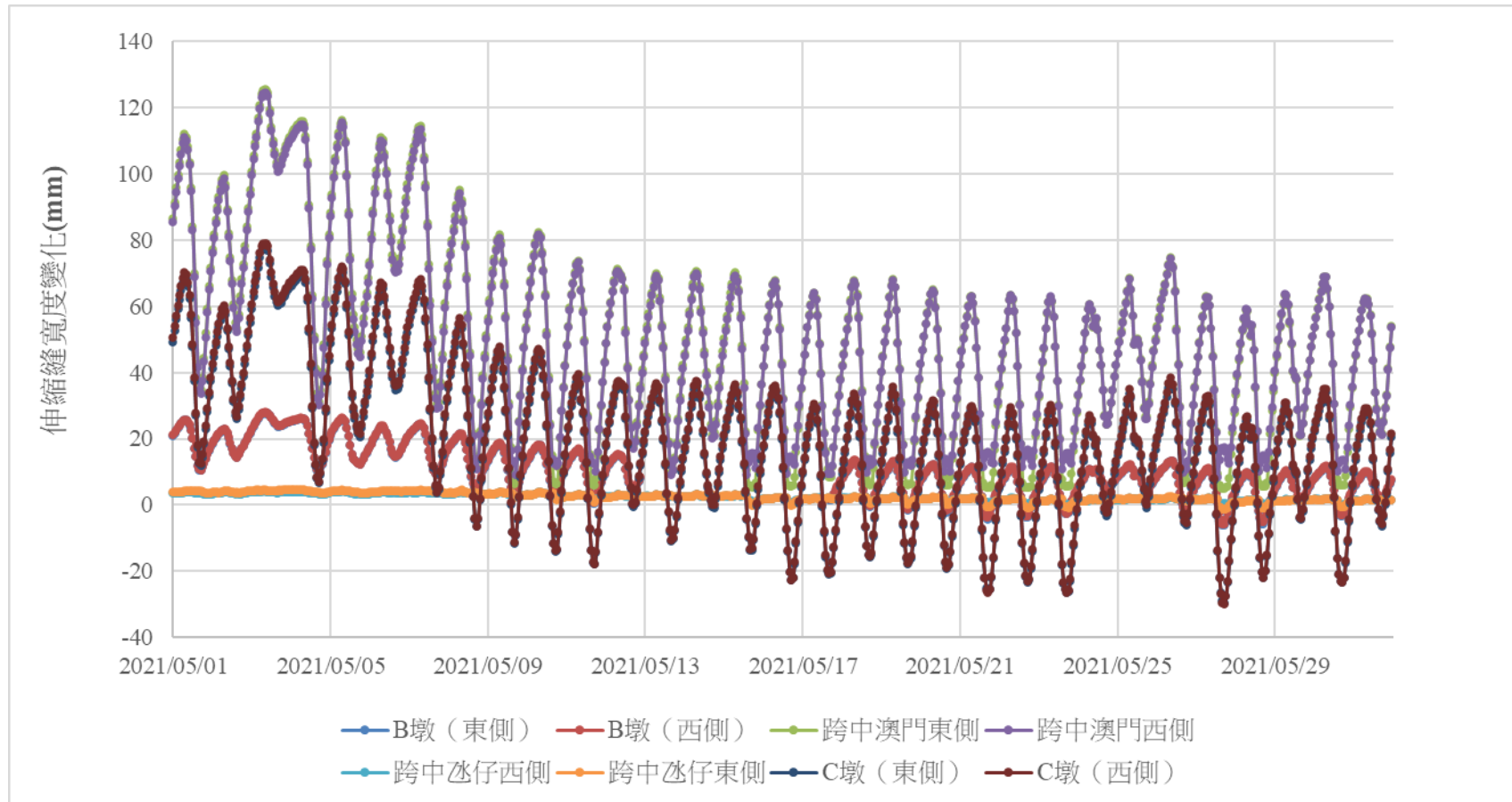


圖 3 伸縮縫寬度變化圖 (2021 年 5 月)

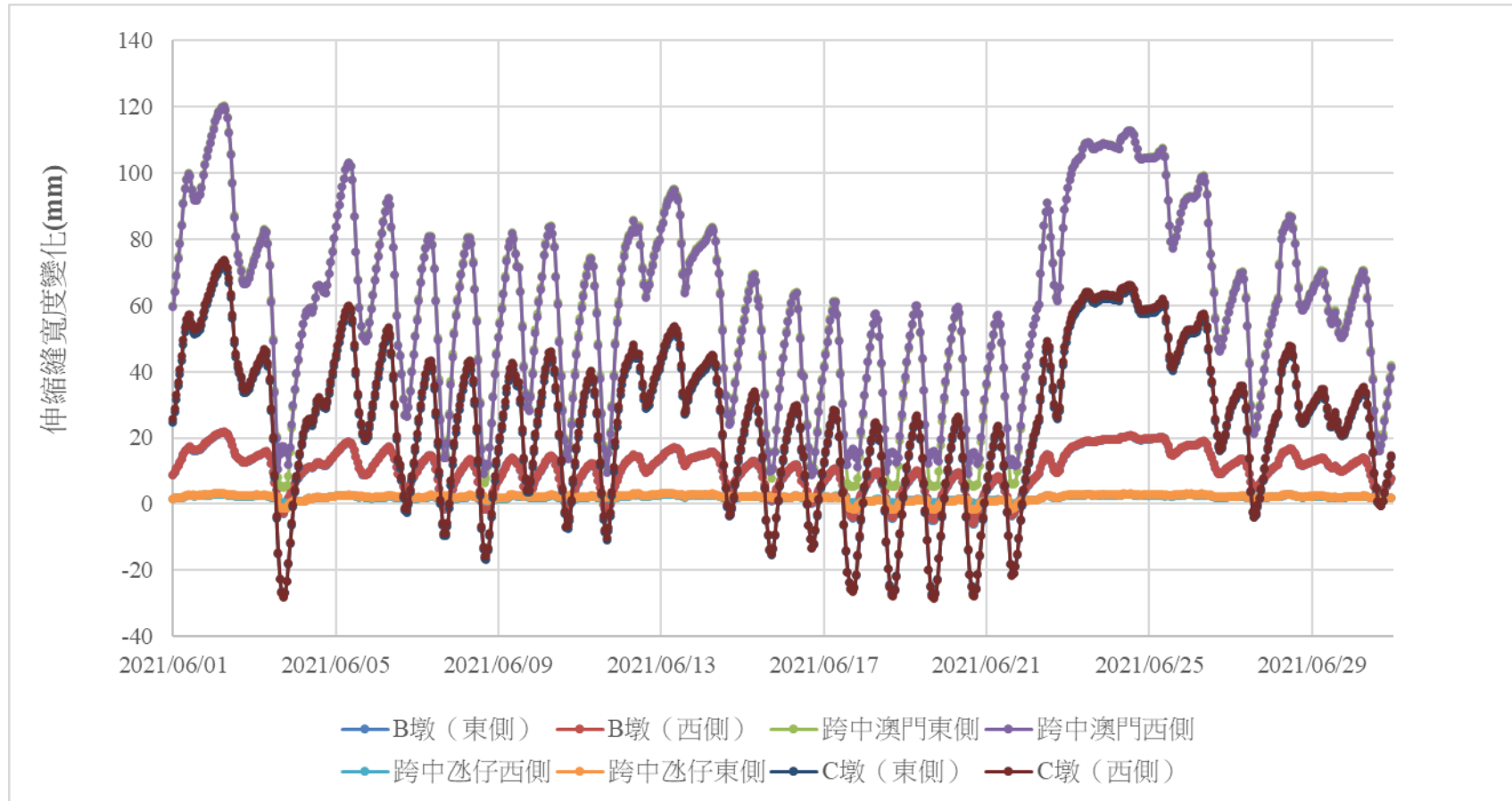


圖 4 伸縮縫寬度變化圖 (2021 年 6 月)

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 2 主跨撓度統計(分鐘，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)
2021年03月	21.76	-12.62	12.90	-8.56	29.94	-18.56	13.76	-13.34
2021年04月	28.44	-14.67	16.68	-9.17	31.51	-15.87	16.58	-11.68
2021年05月	26.94	-13.75	14.72	-9.43	25.69	-13.22	12.13	-10.65
2021年06月	22.82	-14.51	14.61	-11.27	35.55	-19.95	18.64	-15.90

表 2 統計了 2021 年 3 月至 2021 年 6 月主跨撓度每分鐘數值。可以看到本次監測期間主跨澳門側樑端的最大值（下撓）為 28.44mm，最小值（上拱）為-14.67mm；氹仔側樑端的最大值（下撓）為 35.55 mm，最小值（上拱）為 -19.95mm。圖 4 顯示了由 2020 年 9 月至 2021 年 6 月，每月主跨撓度的最大及最小值。撓度數據以下撓為正，因此本圖表設定縱軸向下為正。圖中可看出上拱程度基本維持平穩，而下撓程度之最大值有輕微增加的趨勢。

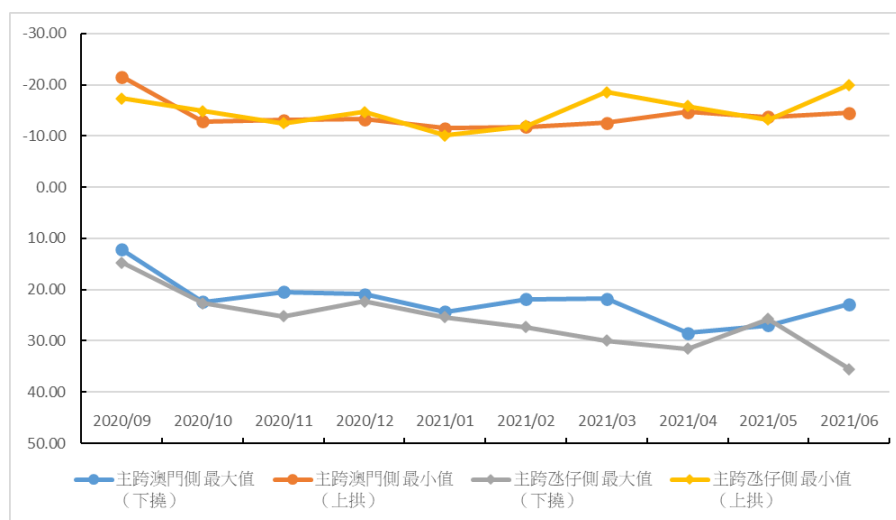


圖 5 主跨撓度最大值最小值逐月變化

1.3. 主跨振動分析

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 3 為 2021 年 3 月至 2021 年 6 月每月最後一日 08:30:00 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。從表中可以看出，樑端振動的加速度幅值大約在 $\pm 1.1 \text{ m/s}^2$ 之間。

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 4 中。從表中看出，箱梁豎向振動第二階頻率為 1.98-2.04Hz，箱梁第一階豎向振動為 1.50Hz 左右，與歷史數據相比皆無明顯變化，說明本監測期間大橋主跨結構剛度維持正常。

表 3 主跨箱樑振動振幅統計(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
2021/3/31 8:30:00	0.4361	-0.4012	0.8801	-0.8829
2021/4/30 8:30:00	0.429	-0.3732	1.1151	-1.1103
2021/5/31 8:30:00	0.4015	-0.3403	1.1583	-1.1831
2021/6/30 8:30:00	0.6413	-0.7009	1.0584	-0.8171

表 4 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
2021/3/31 8:30:00	1.54	2.04	1.54	2.04
2021/4/30 8:30:00	1.59	2.02	1.59	2.02
2021/5/31 8:30:00	1.53	1.98	1.55	1.98
2021/6/30 8:30:00	1.55	2.04	1.51	2.02

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 5 為主跨 P23 柱和 P24 柱 2021 年 3 月至 2021 年 6 月傾斜值的統計，本次監測期間 P23 柱的傾斜值保持穩定在 0.3~0.5 度左右。P24 柱的傾斜值保持穩定在 $\pm 0.15^\circ$ 之間，並無異常趨勢發生。

1.4.2. 南灣湖樁柱傾斜分析

2021 年 3 月至 2021 年 6 月南灣湖內 4 隻排樁 L、M、N 和 O 的傾斜數據統計於表 6 中。圖 6 顯示了由 2020 年 8 月至 2021 年 6 月的南灣湖排樁對比環境溫度變化趨勢，可看出的大約一年的尺度下，角度變化是與氣溫變化而引起的結構變形高度相關，暫時無發現異常傾斜趨勢，但仍需累積更多數據以了解南灣湖排樁角度的長期變化趨勢。

表 5 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
2020年8-9月	0.41	-0.23	0.12	-0.13
2020年10-11月	0.47	0.10	0.11	-0.13
2020年12月 -2021年2月	0.47	0.31	0.08	-0.11
2021年3-6月	0.48	0.26	0.11	-0.14

表 6 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
2020年8-9月	0.18	-0.16	0.06	-0.19	0.05	-0.22	0.09	-0.24
2020年10-11月	0.42	0.06	0.23	-0.12	0.13	-0.17	0.22	-0.13
2020年12月 -2021年2月	0.56	0.30	0.38	0.07	0.30	-0.05	0.44	0.06
2021年3-6月	0.43	0.17	0.23	-0.09	0.16	-0.16	0.28	-0.10

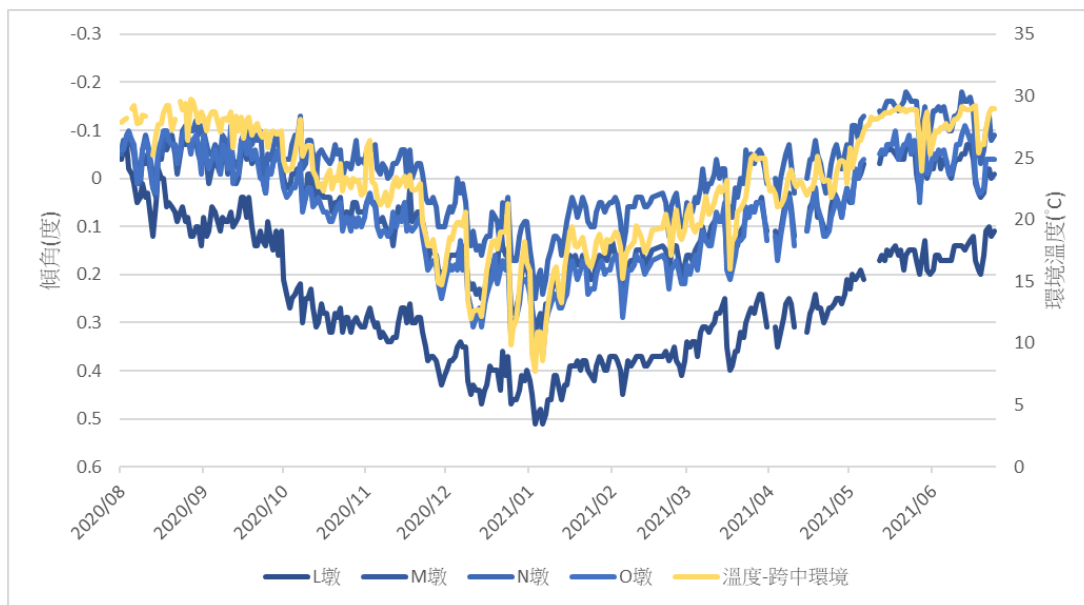


圖 6 南灣湖樁柱傾角與環境溫度變化趨勢

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 7 為主跨澳門側和氹仔側上下牛腿 2021 年 3 月至 2021 年 6 月的應變統計。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 $10\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ，當溫度升高 10°C 時，混凝土會產生 $+100\mu\epsilon$ 的變化，基本和表 7 中數據吻合。因此可判斷本監測週期中牛腿應變均在正常範圍內，沒有異常情況發現。

表 7 主跨牛腿應變統計($\mu\epsilon$)

	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
2021年03月	-13.5	-132.87	-0.71	-141.04	8.21	-134.11	-11.47	-174.63
2021年04月	-0.98	-102.89	26.55	-95.2	19.22	-100.21	10.14	-126.12
2021年05月	38.78	-50.62	58.82	-54.81	59.27	-48.65	47.79	-63.04
2021年06月	40.47	-43.36	61.6	-47.25	51.97	-42.13	44.07	-61.87

1.5.2. 主跨箱樑應變分析

表 8 為主跨箱梁內應變花 2021 年 3 月至 2021 年 6 月的應變統計，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 $10\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ，當溫度升高 10°C 時，混凝土會產生 $+100\mu\epsilon$ 的變化，基本和表 8 中數據吻合。因此可判斷箱樑應變均在正常範圍內，沒有發現任何異常。

表 8 主跨箱樑應變統計($\mu\epsilon$)

	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
2021年03月	6.97	-116.03	5.34	-134.8	3.01	-121.56	-1.81	-140.71
2021年04月	27.61	-89.19	40.44	-104.08	32.25	-96.78	18.56	-109.03
2021年05月	74.2	-47.32	93.05	-45.28	69.55	-37.86	66.27	-42.61
2021年06月	76.25	-38.37	92.9	-44.95	73.7	-38.46	69.1	-37.7

2. 環境分析

橋樑外部環境及荷載主要包括風速風向、大氣溫濕度和結構溫度。

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 9 為 2021 年 3 月至 2021 年 6 月的陣風風速統計。圖表中可看出，陣風風速多數維持在 20m/s 以下，本年度 6 月份本澳氣象局曾發布多次暴雨警告信號，隨之測得較強的風速，例如 6 月 1 日(24.2 m/s)、6 月 13 日(21.5 m/s)、6 月 25 日(26.4 m/s)。本次監測期間最大陣風風速為 26.4 m/s ，無強烈風吹襲嘉樂庇總督大橋。

表 9 陣風風速統計(m/s)

單位: 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)
2021年03月	14.81	14.81	9.6
2021年04月	14.51	9.5	8.72
2021年05月	19.58	14.82	10.75
2021年06月	26.4	21.25	16.1

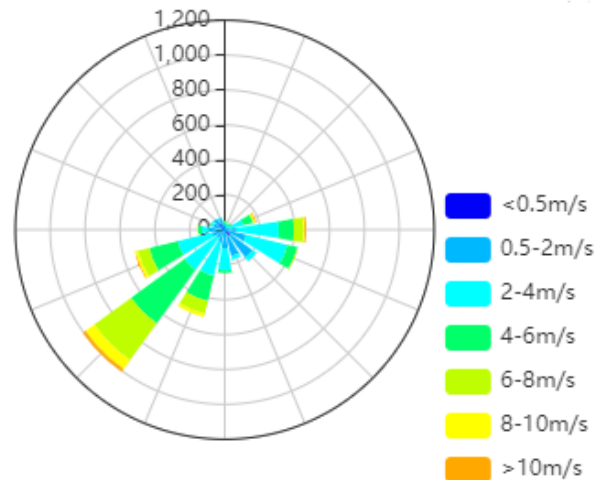
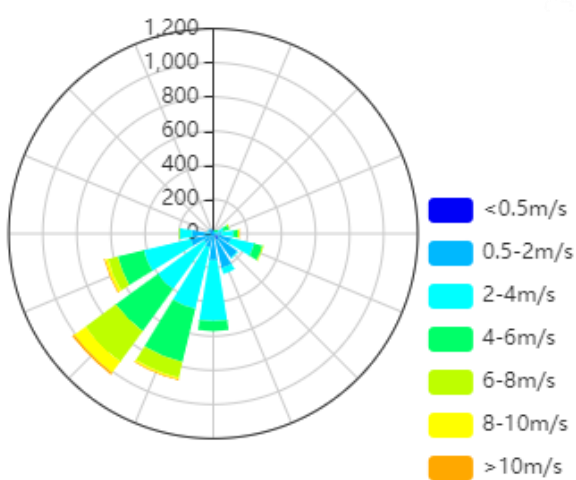
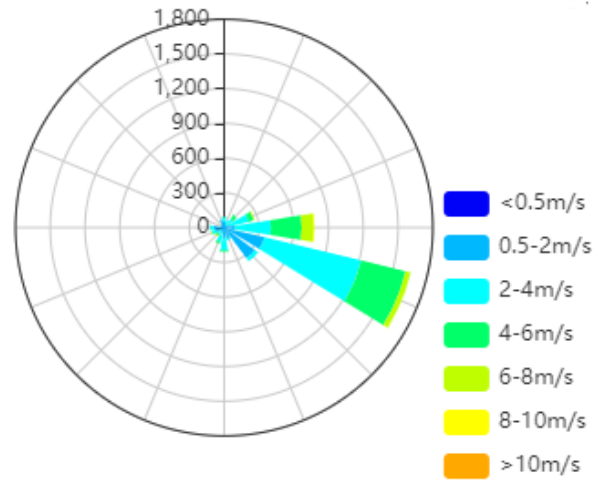
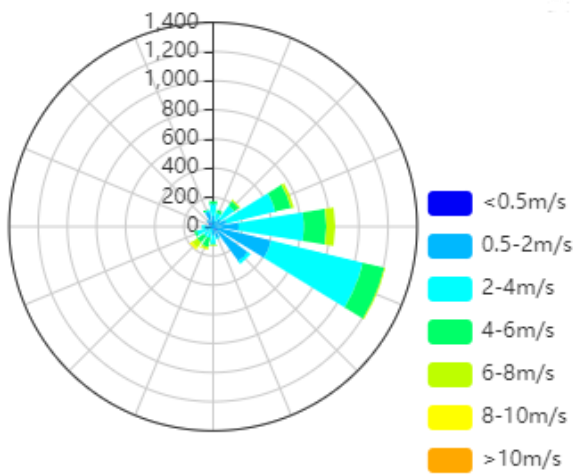


圖 7 為 3 月份的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為東及東偏南方向(E、ESE)，風速大部分落在 [2-4m/s]區間。

圖 8 為 4 月份的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為東偏南方向 (ESE)，風速大部分落在[2-4m/s]和[4-6m/s]區間。

圖 9 為 5 月份的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為西南及南偏西方向 (SW、SSW)，風速大部分落在[2-4m/s]和[4-6m/s]區間。

圖 10 為 6 月份的十分鐘風玫瑰圖，橋面監測到的風向主要為西南方向 (SW)，風速大部分落在[4-6m/s]和[6-8m/s]區間。

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 號柱墩上方。表 10 為橋樑跨中附近 2021 年 3 月至 2021 年 6 月環境溫度統計數據。本次監測期間溫度最大值為 31.3 °C (2021-05-30 14:00)，最小值 14.9°C (2021-03-22 07:00)。單月最大溫差為 3 月(變化量 11.6°C)。隨著時間進入夏季，氣溫逐步上升，溫差縮小。

表 10 跨中環境溫度 (Temp.) 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
2021年03月	26.5	2021-03-30 11:00	14.9	2021-03-22 07:00	11.6
2021年04月	29.3	2021-04-23 15:00	18.2	2021-04-09 09:00	11.1
2021年05月	31.3	2021-05-30 14:00	22.6	2021-05-04 22:00	8.7
2021年06月	31.0	2021-06-18 13:00	23.2	2021-06-22 19:00	7.8

表 11 為 2021 年 3 月至 2021 年 6 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 94.78% (2021-06-01 07:00)，最小值為 38.92% (2021-05-03 01:00)。濕度差最大之月份為 5 月，變化量 51.56%。

表 11 跨中環境濕度 (Humidity) 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
2021年03月	91.30	2021-03-06 14:00	42.60	2021-03-22 21:00	48.70
2021年04月	92.88	2021-04-27 08:00	45.76	2021-04-29 19:00	47.12
2021年05月	90.48	2021-05-04 03:00	38.92	2021-05-03 01:00	51.56
2021年06月	94.78	2021-06-01 07:00	51.88	2021-06-06 16:00	42.90

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 34.5°C (2021-06-17 12:00)，最小值為 18.7°C (2021-03-22 11:00)。單月最大溫差為 3 月，變化量 10.3°C。對照環境溫度，C 墩混凝土溫度均在正常範圍內，無異常情況發生。

圖 11 為 2021 年 3 月至 2021 年 6 月混凝土溫度變化圖，可以看出 C 墩的混凝土溫度最高，跨中其次，B 墩最低。B 墩因為在南灣湖位置，周圍有建築遮擋，因此造成混凝土溫度最低。

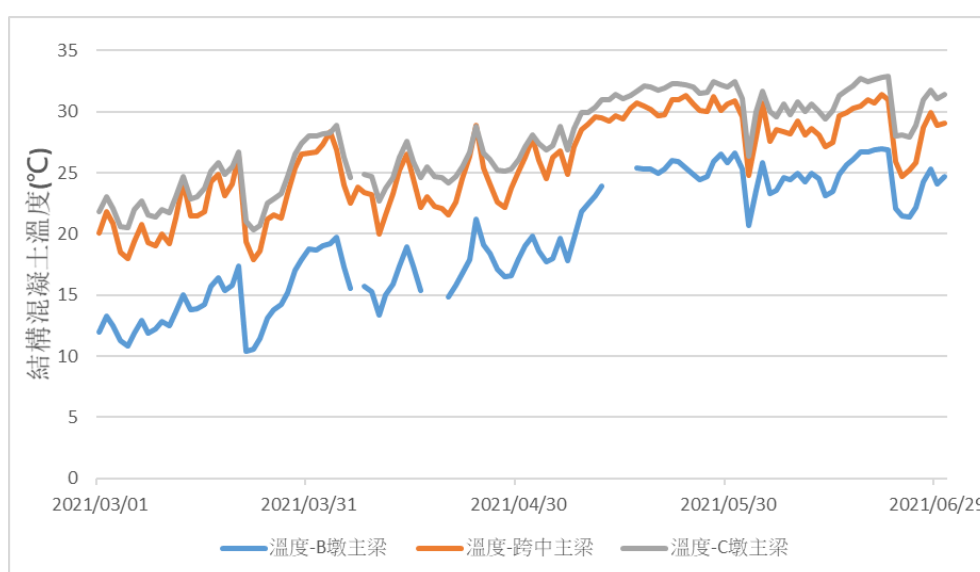


圖 11 3 至 6 月份結構混凝土溫度 (°C) 變化圖

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。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變化幅度最大為 5.86cm，無異常。

3.1.2. 主跨撓度

箱樑基本圍繞平衡位置做往復振動，與過往數據無明顯變化，主跨箱樑結構呈彈性狀態，無異常。

3.1.3. 主跨振動

主跨箱樑振動加速度在 $\pm 1.1\text{m/s}^2$ 之間，由於橋樑原有結構特性所致，振動幅度較大，需要在以後的監測中格外注意。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，與過往數據無明顯變化，無異常。

3.1.4. 墩柱傾斜

主跨 P24 墩柱的傾斜變化比較小 ($\pm 0.15^\circ$)，無異常；主跨 P23 墩的傾斜值在本次監測期間均保持穩定在 0.3 至 0.5 度左右。南灣湖中 4 根墩柱傾斜度變化大致與氣溫變化而引起的橋樑整體變形呈正相關，仍需累積更多數據以了解角度的長期變化趨勢。

3.1.5. 跨中應變

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，最大陣風風速為 26.4 m/s。大部分時段的風速都處於 0~10m/s 區間。

3.2.2. 環境溫度

環境溫度最大值 31.3 °C，最小值 14.9 °C，未見極端異常天氣。

3.2.3. 環境濕度

環境最大濕度 94.78%，最小濕度 38.92%，未發生異常。

3.2.4. 結構溫度

在同樣的天氣情況下，C 墩的混凝土溫度最高，其次是跨中，B 墩的混凝土溫度最低。C 墩最高溫度 31.8 °C，B 墩最低溫度 8.8°C。無異常。

3.3. 結論及建議

綜上所述，嘉樂庇總督大橋在 2021 年 3 月至 2021 年 6 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。