

報告編號：橋隧健字 2024 年第 0802 號

西灣大橋結構健康監測（2024）
季度數據分析報告（簡本）
(2024 年第 1 季度)

監測時間：2024 年第 1 季度

項目名稱：西灣大橋結構健康監測（2024）

委託單位：公共建設局

監測單位：中鐵大橋勘測設計院集團有限公司澳門分公司

簽發日期：2024 年 4 月 18 日

中鐵大橋勘測設計院集團有限公司澳門分公司

2024 年 4 月

信息簡表

項目名稱	西灣大橋結構健康監測（2024）			
監測內容	風速風向監測、環境溫濕度監測、地震船撞監測、結構溫度監測、支座位移監測、主樑撓度監測、樑端傾角監測、主塔傾角監測、主樑應力監測、斜拉索索力監測、主樑振動監測、混凝土腐蝕監測。			
監測時間	2024 年第 1 季度			
監測環境	橋址處自然環境			
監測依據	(1) 《公路橋梁結構監測技術規範》（JT/T 1037-2022）； (2) 《公路橋樑抗風設計規範》（JTG/TD60-01-2004）； (3) 《公路斜拉橋設計細則》（JTG/TD65-01-2007）； (4) 《公路橋涵養護規範》（JTGH11-2004）； (5) 《公路橋樑技術狀況評定標準》（JTG/TH21-2011）； (6) 《公路橋樑承載能力檢測評定規程》（JTG/TJ21-2011）； (7) 《公路橋涵設計通用規範》（JTJ021-89）； (8) 《屋宇結構及橋樑結構之安全及荷載規章》第 56/96/M 號法令。			
主要設備	序號	名稱	型號	設備編號
	1	風速風向儀	HD2003.1	FS/FX-m-n
	2	大氣溫度計	YGM430	DQWD-m-n
	3	大氣濕度計	YGM430	DQSD-m-n
	4	位移計	KYDM	WY-m-n
	5	傾角儀	LCF100	QJ-m-n
	6	撓度計	EJA110A	ND-m-n
	7	索力振動感測器	DH105E	SL-m-n
	8	地震儀	DH610Z	DZY-m-n
	9	腐蝕計	CorroRisk	FSJ-m-n
	10	光纖光柵應變感測器	BGK-FBG-4150	YB-m-n
	11	光纖光柵應變感測器	BGK-FBG-4150T	WD-m-n; YB-m-n
	12	振動感測器	DH610	JSD-m-n; SD-m-n
	13	光纖光柵解調儀	BGK-FBG-8600	BGK-FBG-01
	14	振動調理儀	DH3817J	DH-01
15	信號採集卡	ADAM4117	ADAM-01-01	

目 錄

季度數據分析報告	1
目 錄	I
圖表檢索	III
1. 橋樑概況	1
1.1. 總體	1
1.2. 監測系統概況	1
2. 數據分析總體說明	2
2.1. 監測依據及參考資料	2
2.2. 監測內容	2
2.3. 數據說明	3
2.3.1. 數據完整性和有效性分析	3
2.3.2. 10min 平均監測數據	4
2.3.3. 斜拉索索力	4
3. 環境監測數據分析	5
3.1. 風速風向監測數據分析	5
3.1.1. 10min 平均風速分析	5
3.1.2. 風向玫瑰圖分析	5
3.2. 橋址溫濕度監測數據分析	5
4. 結構溫度監測數據分析	7
4.1. 溫度監測測點佈置	7
4.2. 結構溫度時變規律分析	7
5. 結構傾角及位移監測數據分析	8
5.1. 傾角監測測點佈置	8
5.1.1. 結構傾角監測數據分析	8
5.2. 支座位移監測數據分析	10
5.2.1. 支座位移監測數據分析	11
6. 豎向撓度監測數據分析	13
6.1. 監測測點佈置	13
6.2. 主樑豎向撓度變化規律分析	13
7. 應力數據分析	16
7.1. 監測測點佈置	16
7.2. 應力數據分析	16
8. 索力監測數據分析	18
8.1. 監測測點佈置	18
8.2. 拉索索力分析	18
8.2.1. 有限元計算分析	18
8.2.2. 加速度 RMS 時程分析	19
8.2.3. 拉索監測索力分析	19
9. 振動監測數據分析	21

9.1. 監測測點佈置	21
9.2. 有限元計算分析	21
9.3. 加速度監測數據分析	22
10. 監測結論與建議	23
10.1. 監測結論	23
10.2. 建議	23

圖表檢索

圖 1-1 西灣大橋地理位置示意圖	1
圖 1-2 澳門西灣大橋	1
圖 2-1 測點總體佈置圖	3
圖 3-1 110min 平均風速趨勢圖	5
圖 3-2 主跨跨中風向玫瑰圖	5
圖 3-3 大氣溫度變化趨勢圖	5
圖 3-4 箱梁內部大氣相對濕度趨勢圖	6
圖 4-1 結構溫度監測測點佈置圖/mm	7
圖 4-2 結構溫度監測測點斷面佈置圖/mm	7
圖 4-3 西灣大橋結構溫度時程	8
圖 5-1 結構傾角監測測點佈置圖	8
圖 5-2 傾角時程圖	9
圖 5-3 傾角同結構溫度相關性分析	10
圖 5-4 結構位移監測測點佈置圖	11
圖 5-5 支座位移季度相對變化趨勢	11
圖 5-6 支座位移同大氣溫度相關性分析	12
圖 6-1 主樑豎向撓度監測點佈置圖	13
圖 6-2 同截面上下游測點撓度時程圖	13
圖 6-3 同截面上下游測點撓度時程圖	14
圖 6-4 同截面上下游測點撓度時程圖	14
圖 6-5 溫度作用引起樑體變形相關性	15
圖 7-1 主樑應力監測點佈置圖	16
圖 7-2 主樑應力監測點斷面圖	16
圖 7-3 主樑應力時程圖	17
圖 8-1 索力測點佈置	18
圖 8-2 結構縱向計算總體模型	18
圖 8-3 运营阶段斜拉索索力图/kN	19
圖 8-4 拉索加速度 RMS 時程圖	19
圖 8-5 拉索索力時程圖	20
圖 9-1 動力響應測點佈置	21
圖 9-2 結構縱向計算總體模型	21
圖 9-3 加速度 RMS 時程圖	22
圖 9-4 加速度合成功率譜	22
表 2.1 西灣大橋主橋結構健康監測系統測點統計一覽表	2
表 2.2 數據完整性和有效性統計表	3

1. 橋樑概況

1.1. 總體

澳門位於我國東南沿海珠江口的西岸，北邊以關閘為界與珠海經濟特區的拱北相連，東隔伶仃洋與香港相望，南面則瀕臨浩瀚的南海。西灣大橋作為澳門的第三大橋，其建設的目的是為了緩解兩島之間日益繁忙的交通，並在颱風來臨時為緊急過橋車輛提供兩條避颱風車道，以彌補嘉樂比大橋和友誼大橋該方面的不足。橋下主孔通航淨空 150m（淨寬）×28m（淨高），用以滿足海輪 4000DWT 級通航要求。



圖 1-1 西灣大橋地理位置示意圖

澳門西灣大橋為連接澳門半島與氹仔島之間的第三座跨海大橋，大橋採用分離式單箱雙幅雙層通行形式，在箱樑頂層設置雙向六車道，箱內底層設置兩條輕軌和兩條避颱風車道。



圖 1-2 澳門西灣大橋

1.2. 監測系統概況

西灣大橋結構健康監測系統共由四個子系統組成，其中自動化監測子系統用於荷載源、結構響應資料的採集，並將獲取的資料作一定處理後，統一存儲在資料存儲與分析子系統中，然後借助軟體中植入的數學工具進行相應的統計分析，結合各特徵參數設定的安全閾值實現系統的綜合預警和狀態評估功能，並由使用者介面子系統完成人機交互工作（包括監測結果、評估結論的圖表顯示，人工資訊的錄入，指令的輸入等）。

2. 數據分析總體說明

2.1. 監測依據及參考資料

- (1) 《公路橋梁結構監測技術規範》(JT/T 1037-2022)；
- (2) 《公路橋樑抗風設計規範》(JTG/TD60-01-2004)；
- (3) 《公路斜拉橋設計細則》(JTG/TD65-01-2007)；
- (4) 《公路橋涵養護規範》(JTGH11-2004)；
- (5) 《公路橋樑技術狀況評定標準》(JTG/TH21-2011)；
- (6) 《公路橋樑承載能力檢測評定規程》(JTG/TJ21-2011)；
- (7) 《公路橋涵設計通用規範》(JTJ021—89)；
- (8) 《屋宇結構及橋樑結構之安全及荷載規章》第 56/96/M 號法令。

2.2. 監測內容

西灣大橋結構健康監測系統的監測內容包括代表外部激勵的荷載源監測、反映大橋工作狀態的結構響應監測以及針對養護管理方面的監測三部分內容。

荷載源：主要監測橋址處對橋樑功能和安全性能有較為明顯影響的各類荷載源，具體包括地理環境（地震）、大氣環境（強風、大氣溫濕度）、交通環境（通航區域的船舶撞擊）。

結構響應：主要監測關鍵部位、主要構件、相對“薄弱”區域的力學回應監測，包括位移、傾角、撓度、應力、索力、動力性能以及混凝土腐蝕情況等。

養護管理：除對結構的直觀回應如結構應力、橋樑變形、索力等關注外，還根據橋樑養護管理的需求，為既有病害的跟蹤監測預留介面。

表 2.1 西灣大橋主橋結構健康監測系統測點統計一覽表

類型	項目	感測器	測點數量	監測截面編號	監測截面
荷載源 監測	環境風荷載	風速風向儀	2	9/13	主塔頂部、主樑中跨跨中
	大氣溫濕度	溫濕度計	2	9	主樑中跨跨中截面
	地震與船舶撞擊	地震儀	2	5/13	主塔下橫樑
結構響應 監測	變形	撓度儀	29	2/3/4/5/6/8/9/10/ 12/13/14/15/16/ 19/20/21/22/23	基準點（每幅各一個）， 邊跨四等分主樑截面、主 跨六等分主樑截面、4 號 墩近五跨連續樑各跨跨中
		位移感測器	8	1/17	主橋主樑樑端
		傾角儀	12	1/5/13/17	主塔頂部、主橋主樑樑端
	結構溫度	溫度感測器	44	9/11/13/15	邊跨跨中、中跨跨中、中 跨 3/4 截面，主塔支座處 主樑截面
	結構應變	應變感測器	60	9/11/13/15	邊跨跨中、中跨跨中、中 跨 3/4 截面，主塔支座處 主樑截面

類型	項目	感測器	測點數量	監測截面編號	監測截面
	索力	索力計	32	18	典型拉索
	動力性能	振動感測器	26	3/7/9/11/15/19/20/21/22/23	邊跨跨中截面、中跨四等分主樑截面、4 號墩近 5 跨連續樑跨中
耐久性監測	腐蝕性能	腐蝕計	2	5/13	主墩下橫樑
	合計		219		

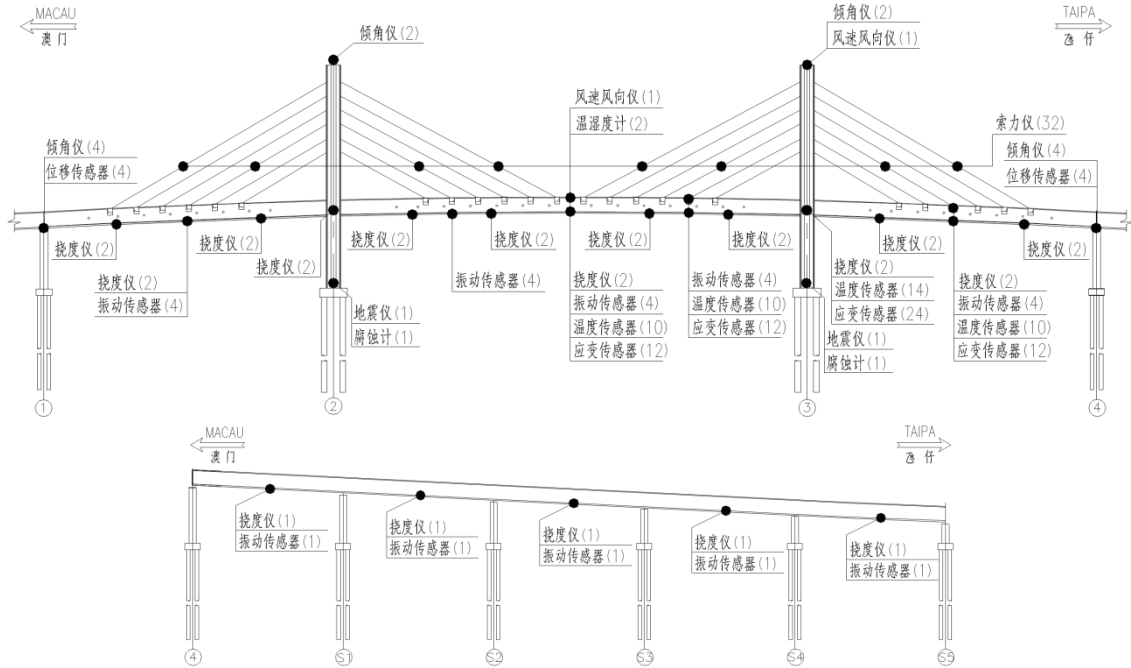


圖 2-1 測點總體佈置圖

2. 3. 數據說明

2. 3. 1. 數據完整性和有效性分析

本次數據分析是針對 2024 年第 1 季度監測數據進行分析，所有監測數據的有效性和完整性匯總見表 2.2 所示。

表 2.2 數據完整性和有效性統計表

類型	項目	感測器	測點數量	完整性/%	測點存活率/%	備註
荷載源監測	環境風荷載	風速儀	2	100	100	
		風向儀		100	100	
	大氣溫濕度	溫度計	2	100	100	
		濕度計	2	100	100	
	地震與船舶撞擊	地震儀	2	100	100	
結構響	變形	撓度儀	29	99	100	
		位移感測器	8	100	100	

類型	項目	感測器	測點數量	完整性/%	測點存活率/%	備註
應 監 測		傾角儀	12	99	100	
	結構應變	應變感測器	60	92	100	
	結構溫度	溫度感測器	44	98	100	
	索力	索力計	32	50	100	采集站断 电
	動力性能	加速度感測器	26	33.3	100	采集站断 电
速度感測器		33.3		100	采集站断 电	
耐久 性 監 測	腐蝕性能	腐蝕計	2	100	100	

說明：數據的完整性=實測數據量/理論數據量*100%

測點存活率=（安裝測點數-缺失測點數）/安裝測點數*100%

2.3.2. 10min 平均監測數據

以每天 00:00:00 的監測數據為起點，每 10min 的監測數據取算術平均值，計算公式如下：

$$V_j = \frac{\sum_{i=600 \times (j-1)+1}^{600 \times j} V_i}{600}, (i=1,2,3,\dots,86400 \quad j=1,2,3,\dots,144)$$

式中， V_i 為實測數據， V_j 為 10min 平均監測數據。

2.3.3. 斜拉索索力

索力 T 計算公式如下：

$$T = K \frac{1}{m^2 - n^2} \left(\frac{m^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 f_m^2}{m^2} \right)$$

式中， $K=4ML^2$ ， M 為索的線密度， L 為索的有效長度， f_m 、 f_n 分別為索第 m 、 n 階頻率。

3. 環境監測數據分析

3.1. 風速風向監測數據分析

3.1.1. 10min 平均風速分析

為了準確地描述橋址的平均風速特性，取 10min 平均風速作為大橋平均風速的代表值，對平均風速進行統計分析，下圖為 10min 平均風速變化趨勢圖，測點 FS-09-01 位置為跨中橋面，測點 FS-13-01 位置為氹仔側塔頂。

從圖中可以看出：2024 年第 1 季度大橋主跨跨中 10min 平均風速最大值為 9.9m/s，塔頂 10min 平均風速最大值為 11.7m/s，本季度無颱風事件。

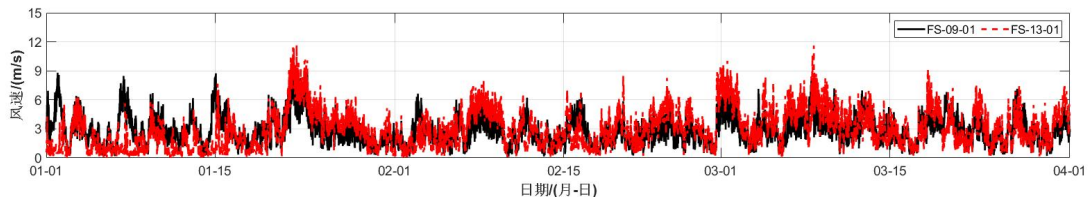


圖 3-1 10min 平均風速趨勢圖

3.1.2. 風向玫瑰圖分析

風向玫瑰圖分別如下圖所示，可以看出，統計時段內，橋址附近主導風向為東風。

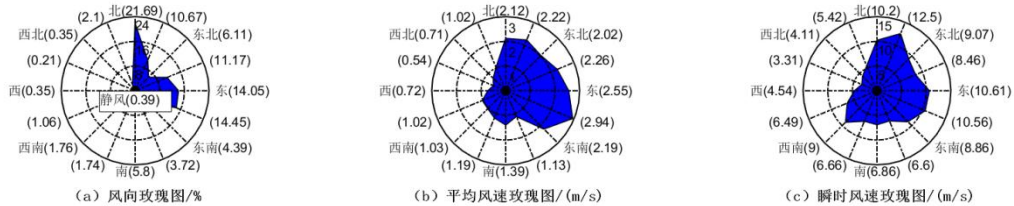


圖 3-2 主跨跨中風向玫瑰圖

3.2. 橋址溫濕度監測數據分析

測點 DQWD-09-01 和 DQSD-09-01 位置為跨中橋面，測點 DQWD-09-02 和 DQSD-09-02 位置為跨中箱梁內。對大氣溫度監測數據進行趨勢分析，下圖為 2024 年第 1 季度大氣溫度和箱樑內溫度的變化趨勢圖。

從圖中可以看出：大氣最高溫度為 28.5°C，最低為 4.9°C，最大變化幅值為 23.6°C，橋面無明顯溫度驟變事件；大氣平均溫度保持在 18~20°C。

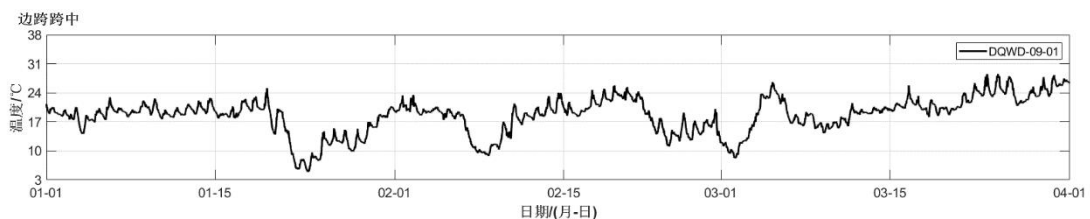


圖 3-3 大氣溫度變化趨勢圖

對大氣相對濕度監測數據進行趨勢分析、統計數據特徵參數，下图為 2024 年第 1 季度箱梁內濕度的變化趨勢圖。可以看出，箱梁內部濕度变化相对较为稳定，在統計的 91 天的有效數據中，有大約 69 天大氣相對濕度在 70% 以上，占 76%，對混凝土結構以及鋼構件防腐存在不利影響。

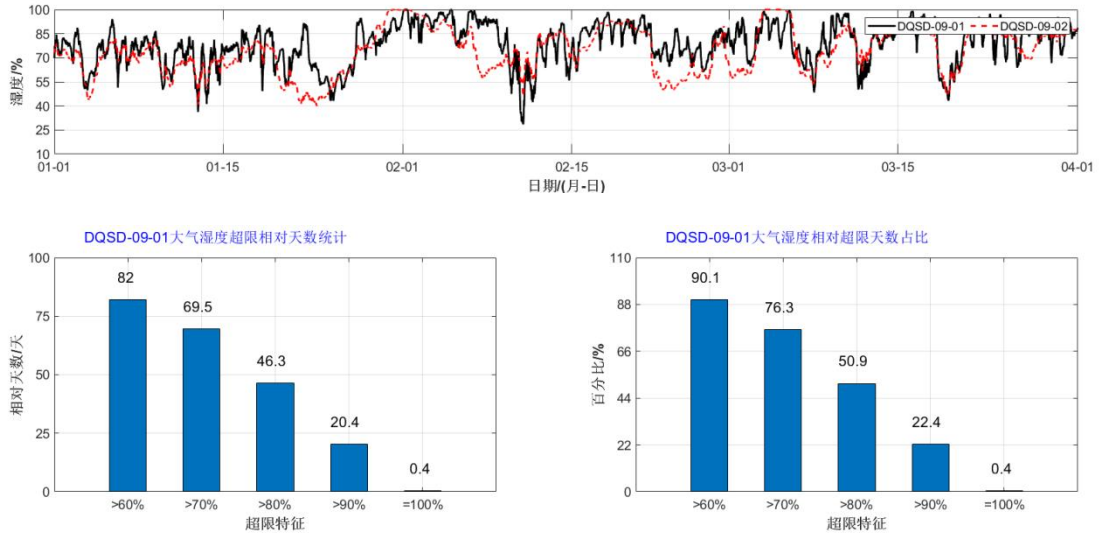


圖 3-4 箱梁內部大氣相對濕度趨勢圖

4. 結構溫度監測數據分析

4.1. 溫度監測測點佈置

傳感器沿橋軸對稱佈置在主跨跨中上、下游邊樑處，其結構溫度監測測點佈置如圖 4-1。

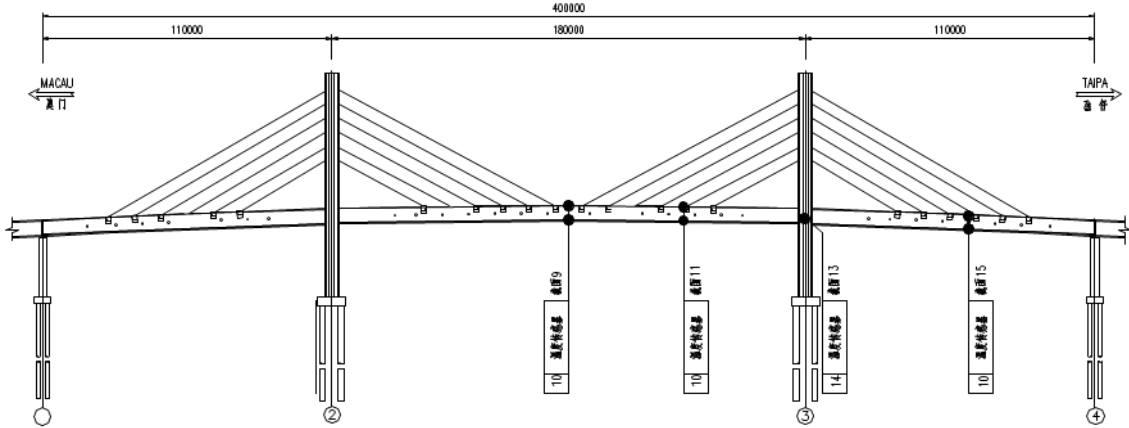


圖 4-1 結構溫度監測測點佈置圖/mm

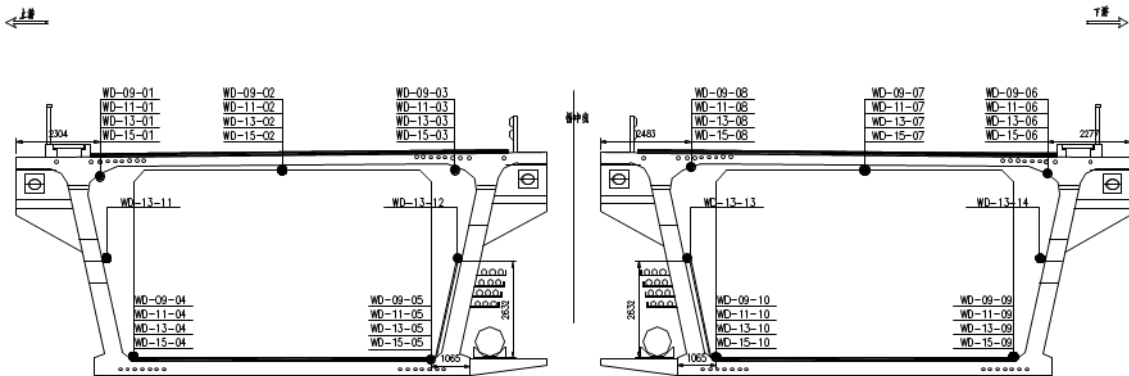
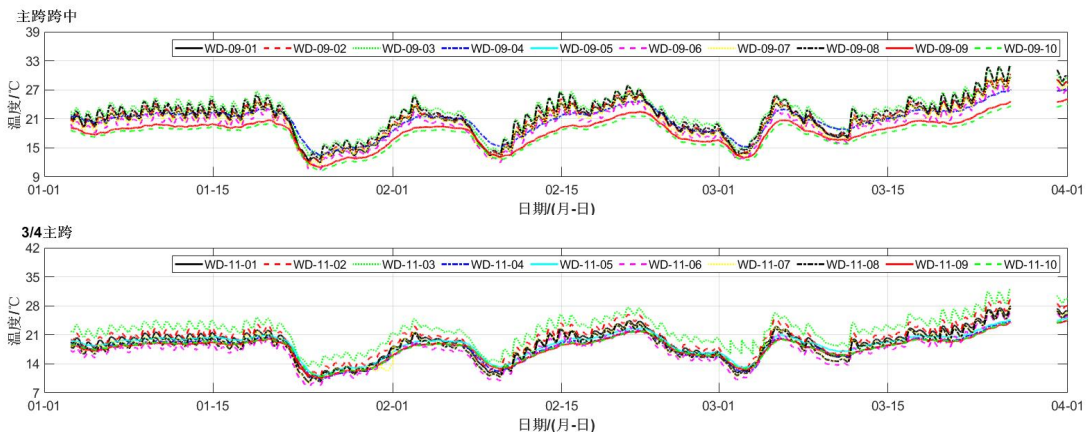


圖 4-2 結構溫度監測測點斷面佈置圖/mm

4.2. 結構溫度時變規律分析

從 2024 年第 1 季度的溫度監測結果序列如下圖所示。



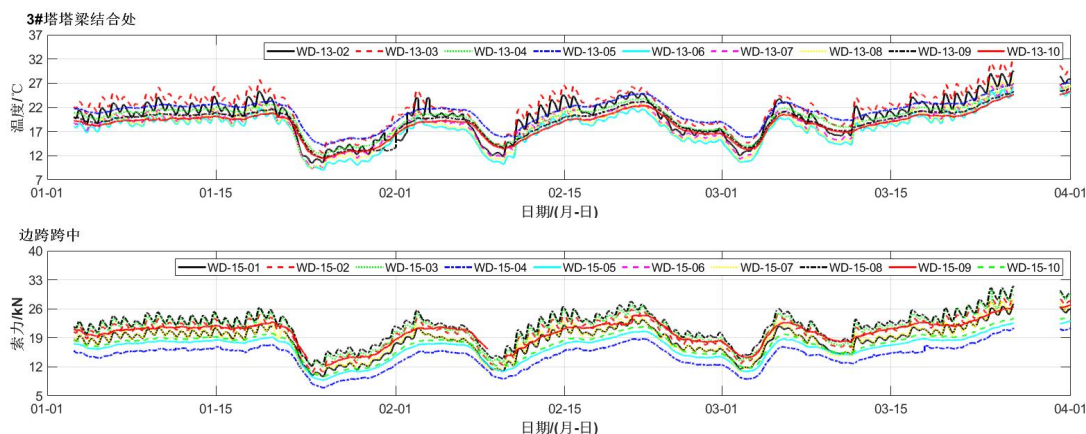


圖 4-3 西灣大橋結構溫度時程

從圖中可以看出：同一截面各測點的溫度變化具有較一致的規律，且溫度整體變化趨勢符合實際大氣溫度走勢；結構溫度最高 32.1°C (WD-11-03)，最低 7°C (WD-15-04)；平均溫度為 17~22°C，各測點溫度變化較為穩定，未出現溫度驟變事件。

5. 結構傾角及位移監測數據分析

5.1. 傾角監測測點佈置

傳感器對稱佈置在左右幅樑端和塔頂處，其監測測點佈置如圖 5-1。

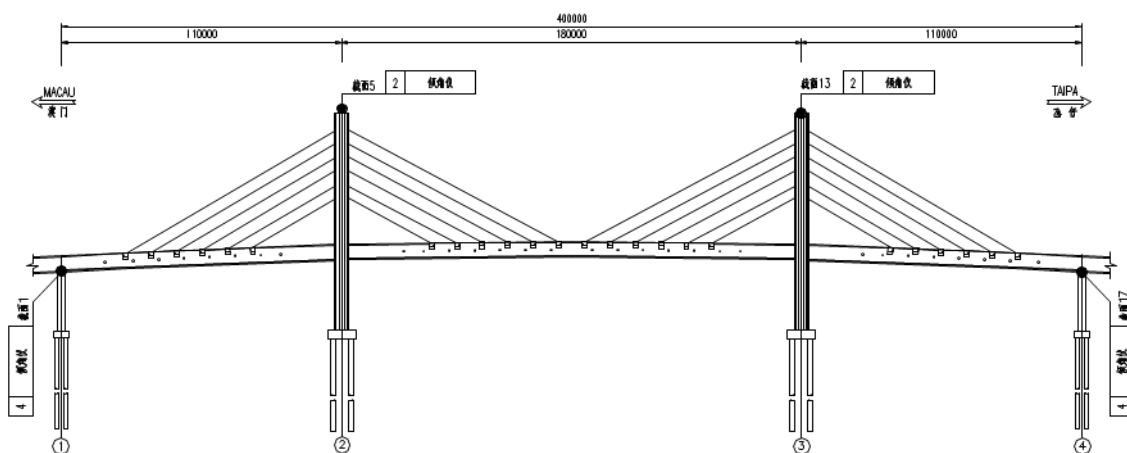


圖 5-1 結構傾角監測測點佈置圖

5.1.1. 結構傾角監測數據分析

1) 傾角變化趨勢及特徵值分析

主橋各測點偏角變化時程如圖 5-2 所示，可以看出，一個日曆天內，由於白天車流量變多，活載和溫度效應明顯，在上午 7 時後傾角時程出現密集的毛刺，進一步分析傾角第 1 季度的變化特性，可以看出，樑端傾角變化受溫度影響呈現正弦式變化趨勢，而主塔傾角受活載影響更大。塔頂順橋向傾角最大變化幅值 1.01rad‰ (QJ-13-01)，主樑梁端同截面各測點時變規律相似，未發生明顯翹曲；樑端傾角最大變化幅值 1.47rad‰ (QJ-17-03)，處於變化幅值閾值 5.6rad‰ 以內。

主塔塔頂傾斜時變規律相似，未發現明顯主塔過度傾斜事件。

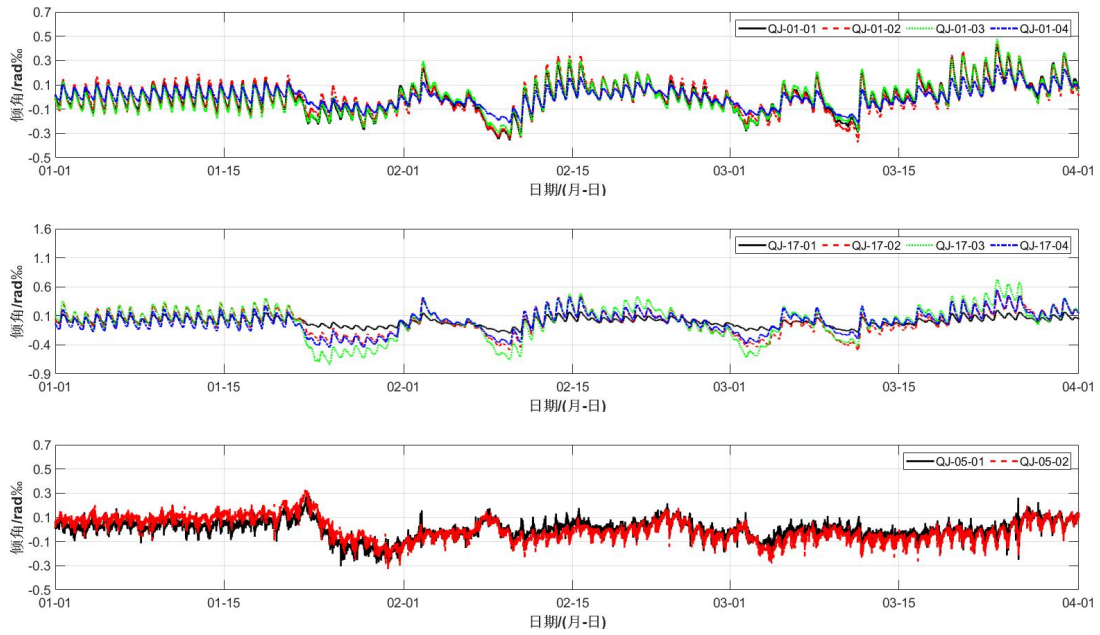
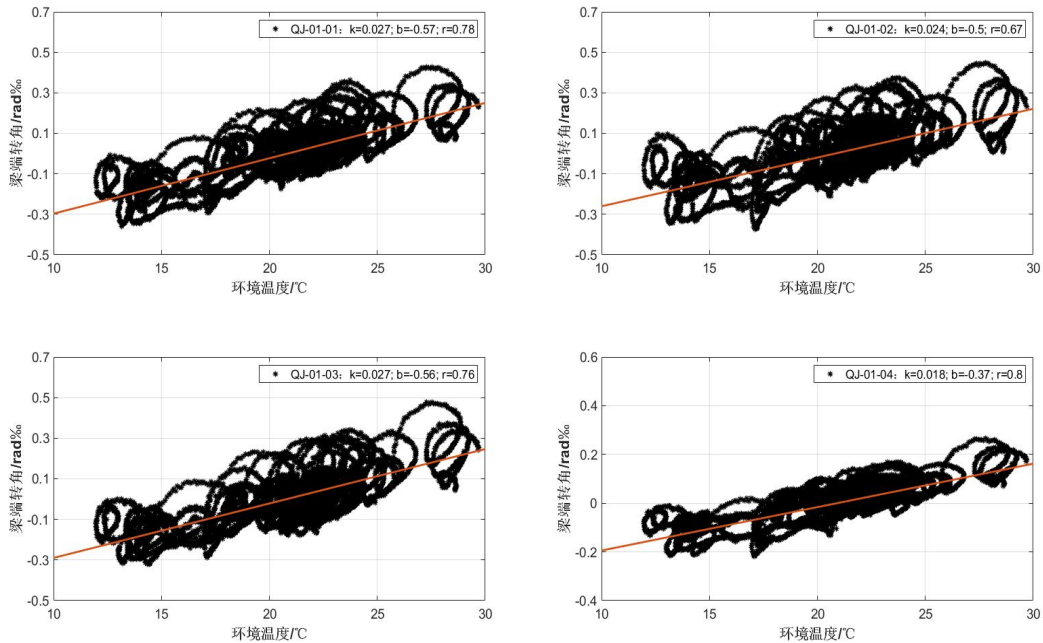


圖 5-2 傾角時程圖

2) 相關性分析

溫度變化是大跨橋樑的重要荷載源之一，常常引起橋樑線形的改變，分析樑端傾角同結構溫度之間的相互關係，利用最小二乘法對相關特性進行線性擬合，不難發現其各變量之間存在一定線性相關性，得到線性函數表達式及其擬合優值 R 如圖所示。



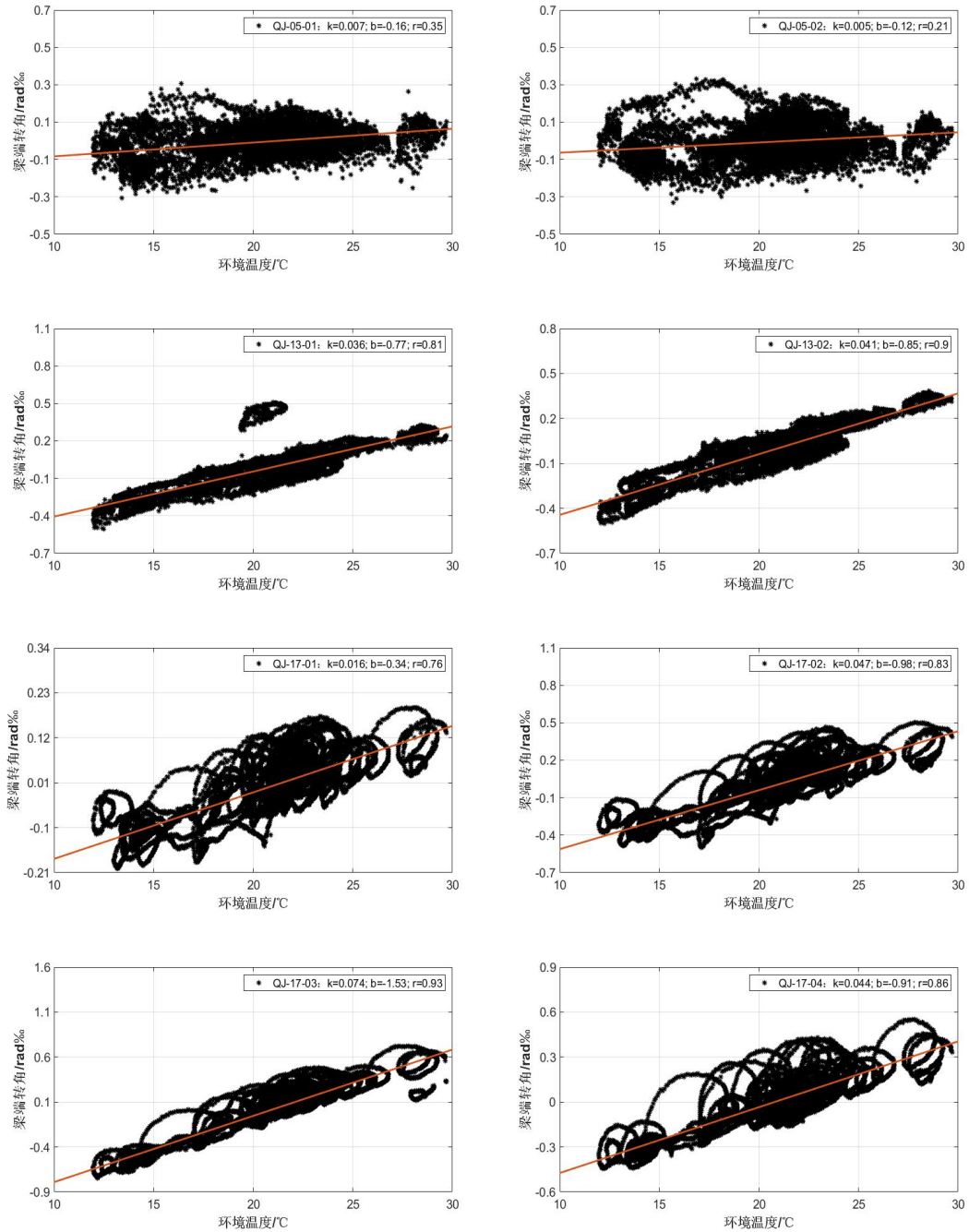


圖 5-3 傾角同結構溫度相關性分析

5.2. 支座位移監測數據分析

傳感器對稱佈置在南北樑端處，其監測測點佈置如圖 5-4。

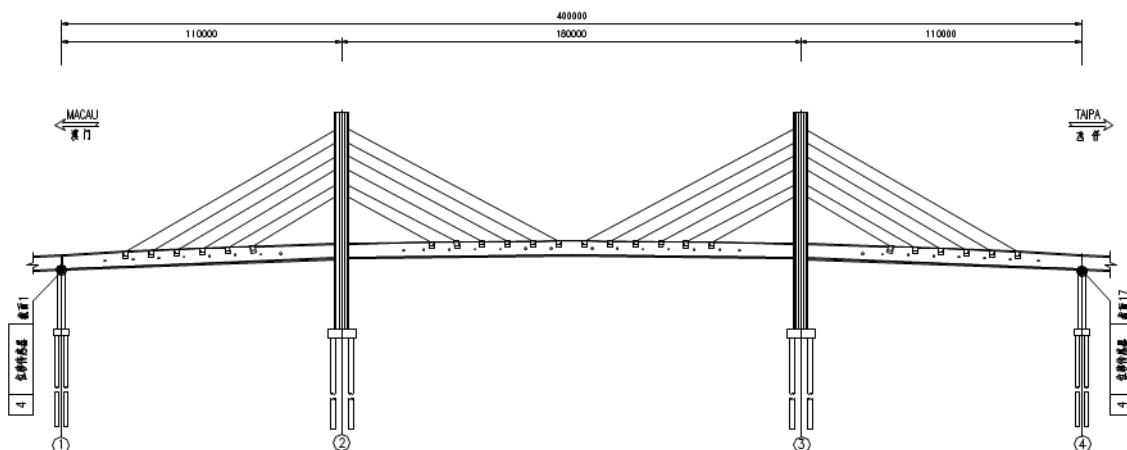


圖 5-4 結構位移監測測點佈置圖

5.2.1. 支座位移監測數據分析

以本系統支座位移初始值為基準做出支座位移在 2024 年第 1 季度監測到的相對變化情況如下。

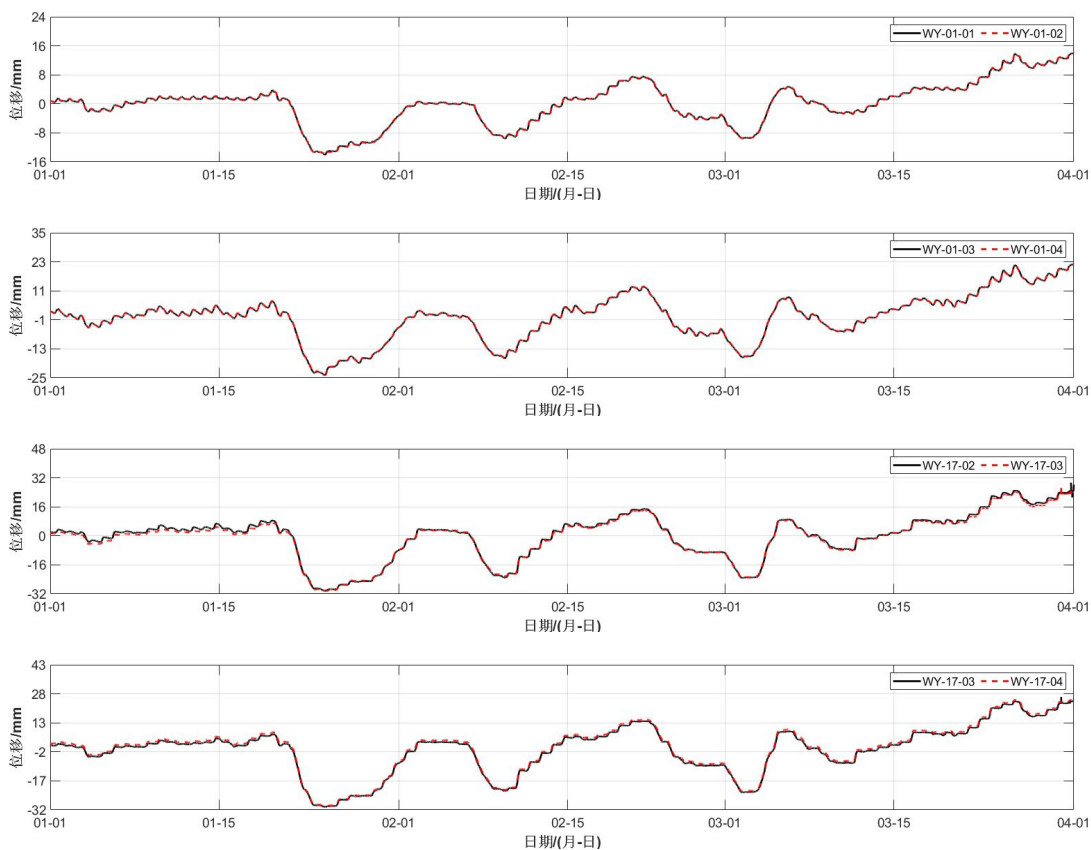


圖 5-5 支座位移季度相對變化趨勢

從圖中可以看出：四個傳感器測得支座位移變化趨勢大致一致，並且時變規律一直，變化幅值處於閾值 0~158mm 以內；同截面支座位移最大日變化值相似，表明主樑同截面縱向伸縮協調，支座位於正常工作狀態。

溫度變化是大跨橋樑的重要荷載源之一，常常引起大的變形和橋樑線形的改變，因而對溫度的監測不可忽視。西灣大橋對溫度的監測包含混凝土結構溫度和

大氣溫度。進一步研究支座位移同大氣溫度相關性，如圖 5-6 所示為溫度和支座位移的相關性散點圖。從圖中可以看出：大氣溫度與支座位移均表現出良好的相關性，進一步利用最小二乘法對相關特性進行線性擬合，得到線性函數表達式及其擬合優度值 R，擬合優度值 R 越接近 1，說明相關性越好。

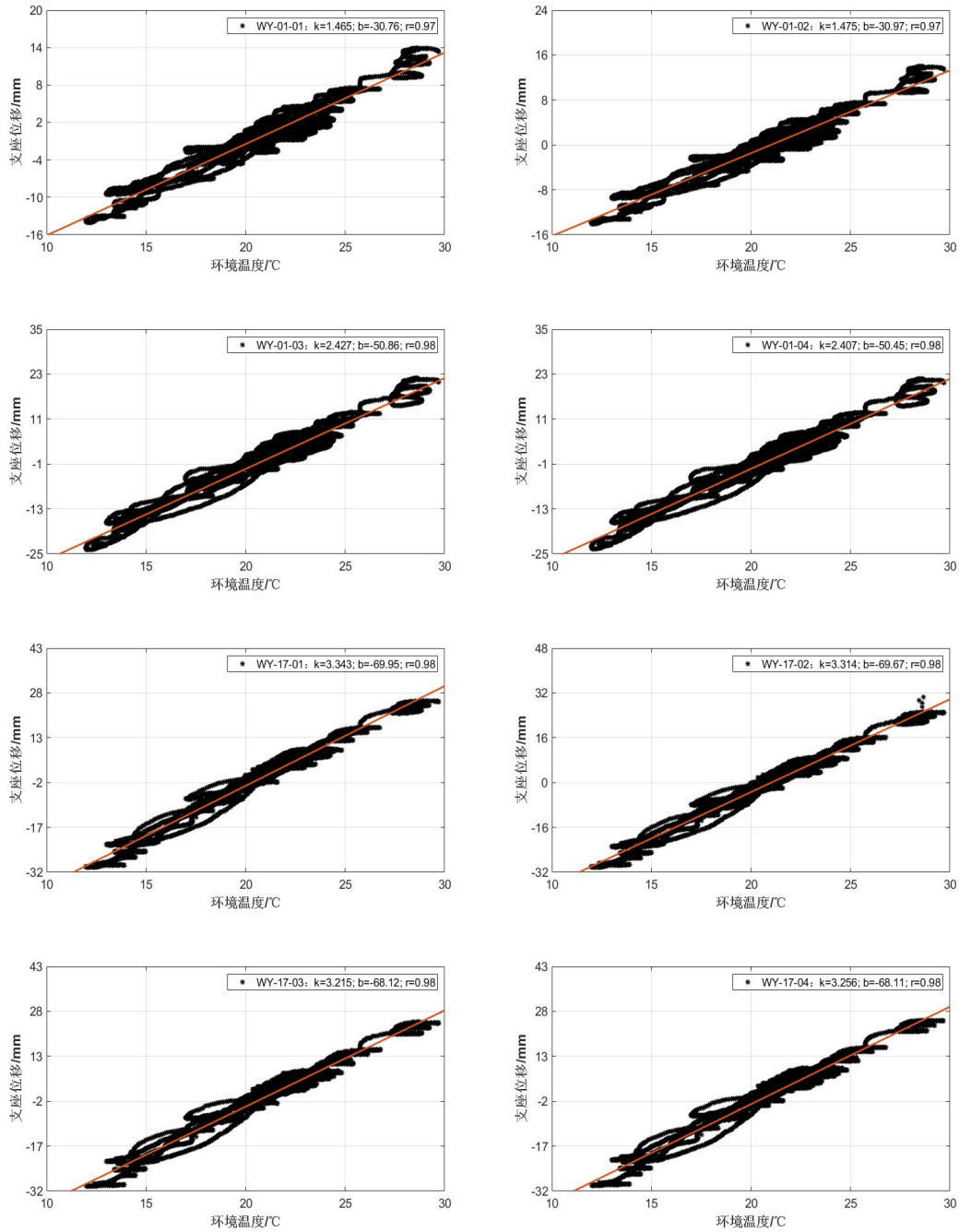


圖 5-6 支座位移同大氣溫度相關性分析

6. 豎向撓度監測數據分析

6.1. 監測測點佈置

主樑豎向撓度監測點佈置在上、下游主跨六等分點、邊跨四等分點，基準點安裝在西灣側主塔塔樑結合處，各測點佈置如圖 6-1 所示。

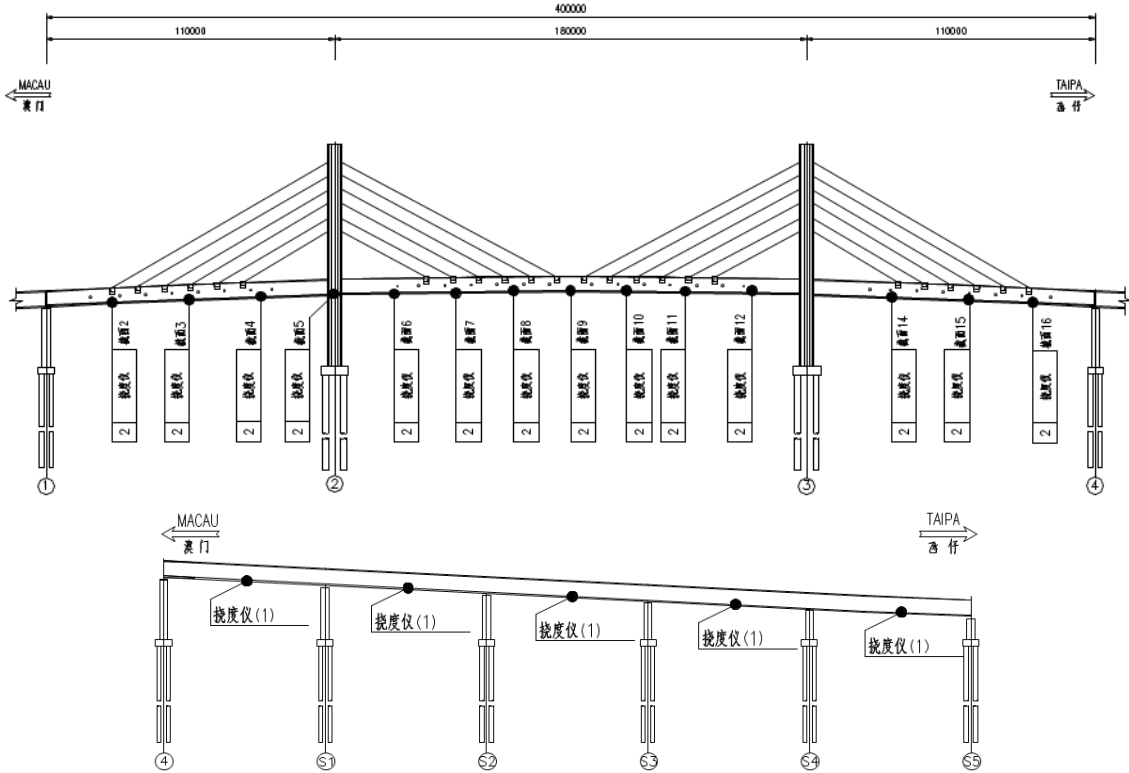


圖 6-1 主樑豎向撓度監測點佈置圖

6.2. 主樑豎向撓度變化規律分析

取本系統撓度測點相對高程初始值為基準值，得到主樑各測點豎向位移變化時程如圖所示（其中 ND-02-01 為上游且 ND-02-02 為下游，測點位置以此類推）。可以看出，同一截面，上下游測點位移基本一致，各跨跨中撓度測點豎向位移時程曲線均表現出隨溫度變化的正弦曲線規律，將溫度變形與活載變形分離，進一步分析，邊跨中豎向位移同溫度有明顯正相關性，而主跨跨中豎向位移呈現明顯相關。

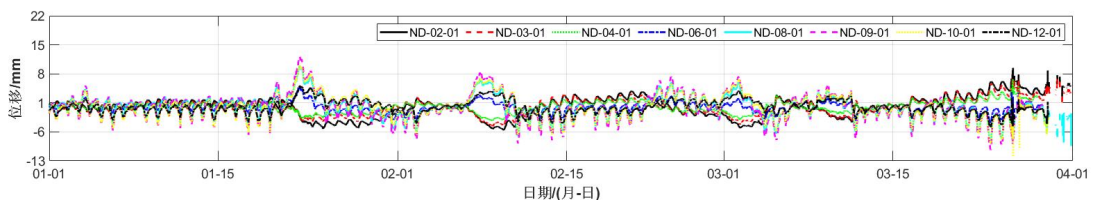


圖 6-2 同截面上下游測點撓度時程圖

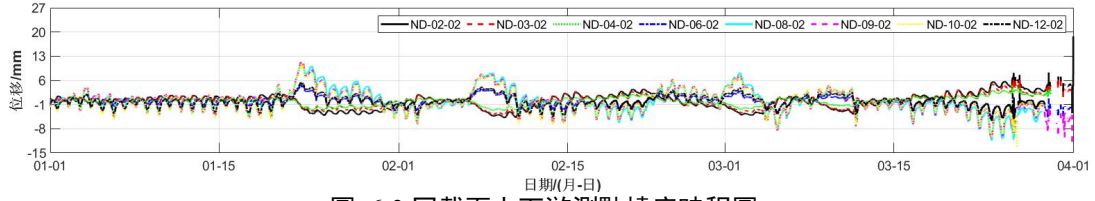


圖 6-3 同截面上下游測點撓度時程圖

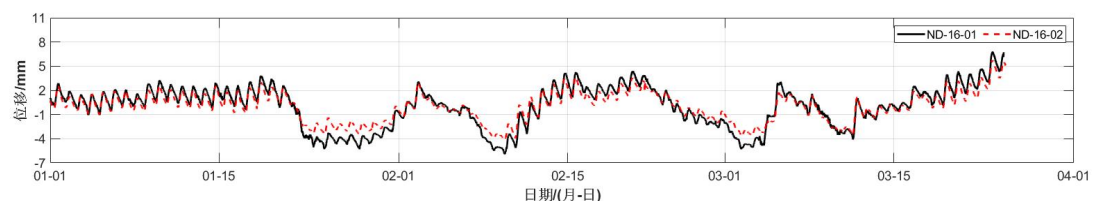
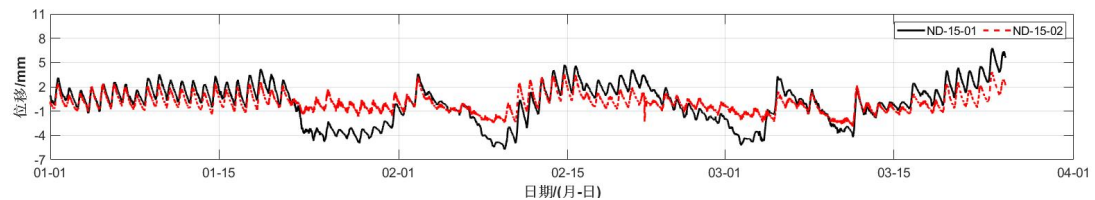
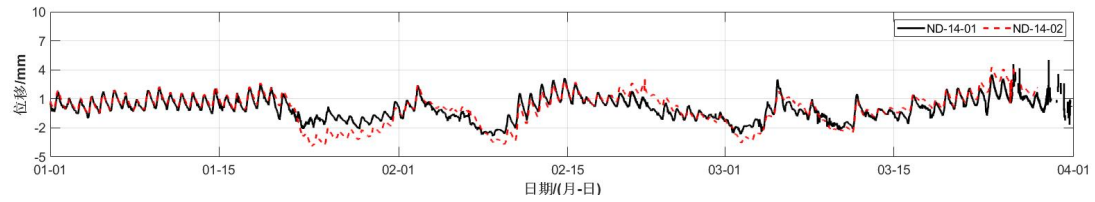
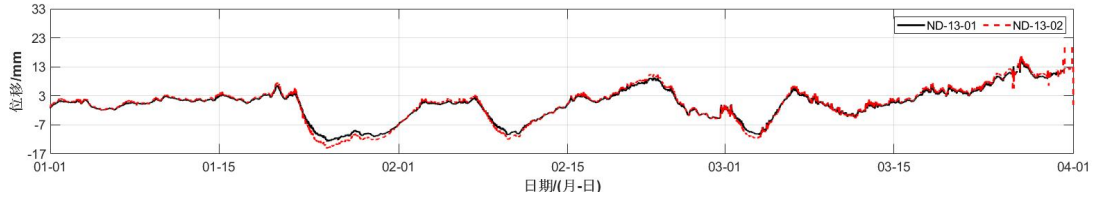
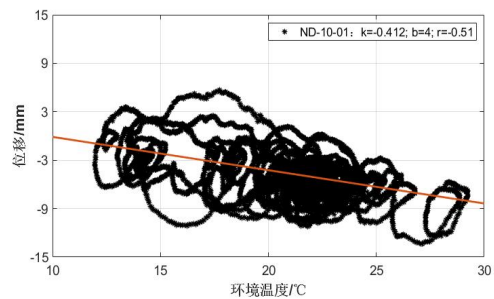
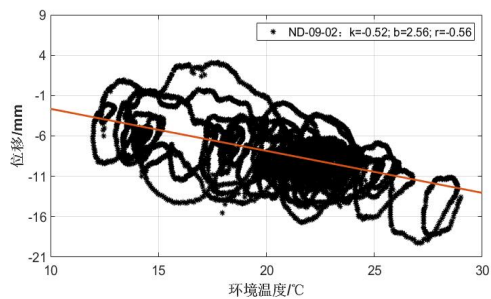
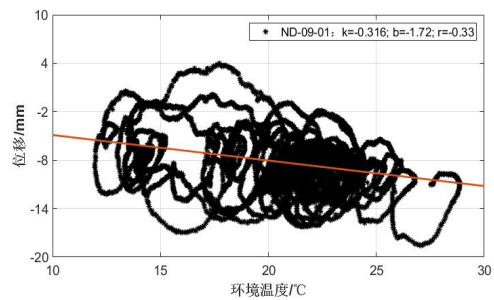
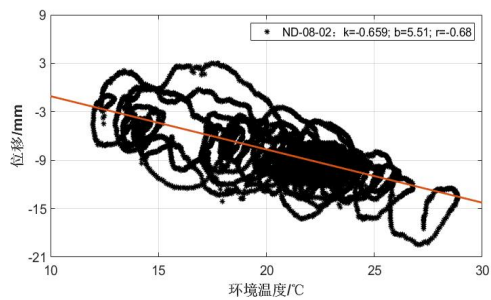


圖 6-4 同截面上下游測點撓度時程圖



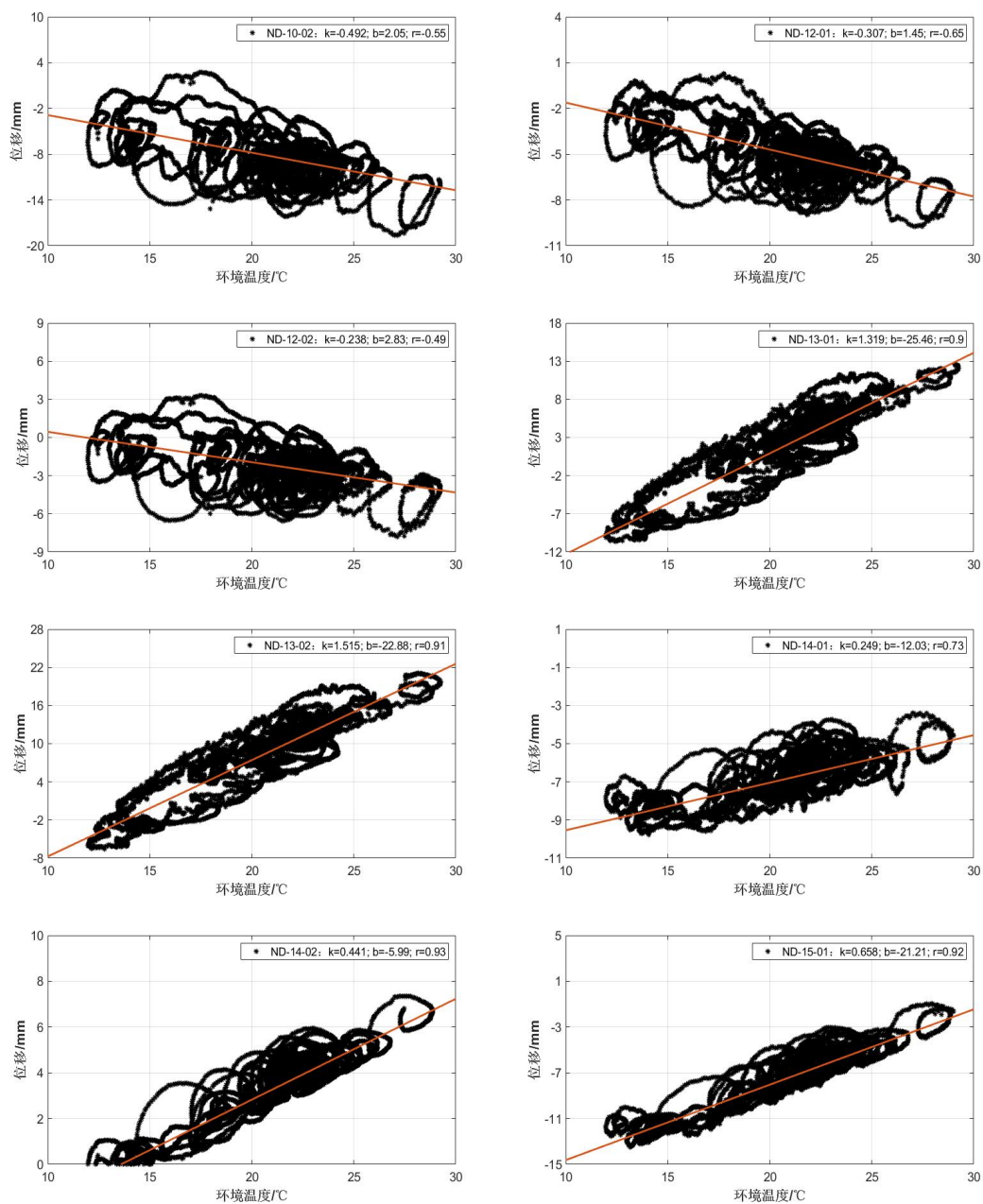


圖 6-5 溫度作用引起樑體變形相關性

7. 應力數據分析

7.1. 監測測點佈置

結構應變監測屬結構響應類監測，結構應變（應力）是結構整體和局部受力安全狀態的直接反應，是結構狀態監測最重要的監測項目之一。結構損傷和破壞最主要的形式是強度破壞，而強度破壞的本質原因是材料應變（應力）過大。因此，對結構關鍵斷面應變的監測對於分析結構受力狀態、保障結構安全顯得尤為重要。

應變監測測點分佈在主橋主跨跨中和 3/4 截面和 3#塔樑結合和邊跨跨中截面箱樑的頂板、底板和腹板，具體測點佈置如圖 7-1、圖 7-2 所示。

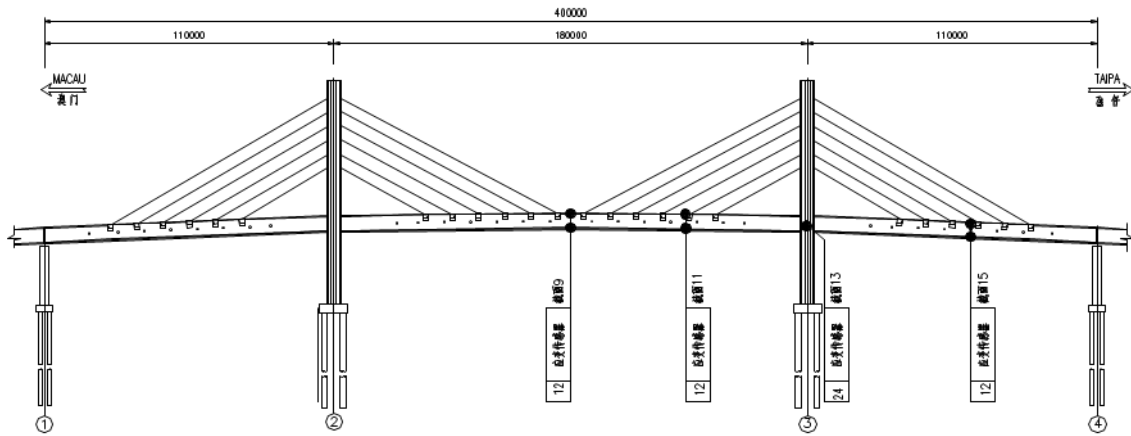


圖 7-1 主樑應力監測點佈置圖

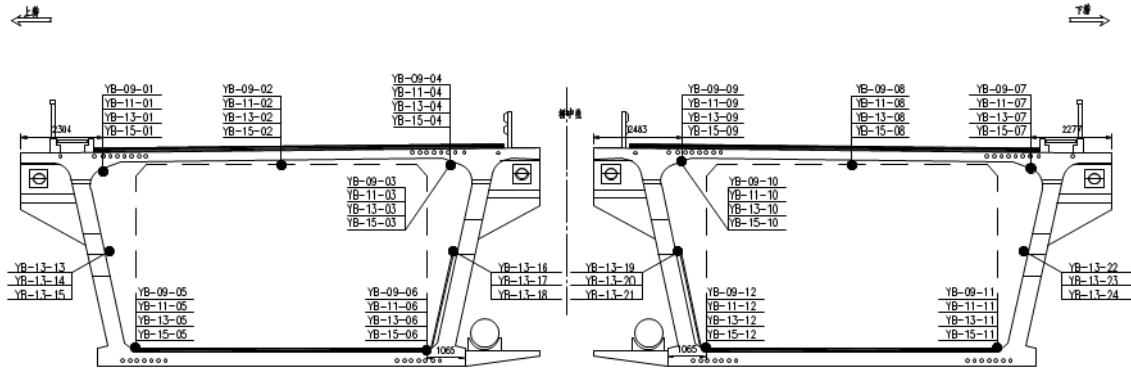
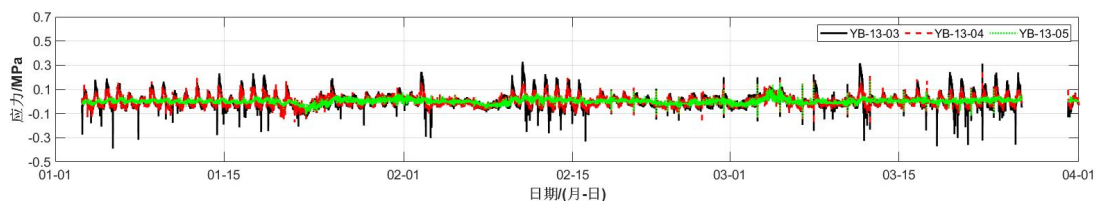


圖 7-2 主樑應力監測點斷面圖

7.2. 應力數據分析

將主樑應變監測數據計算轉換為應力監測數據，並對數據重採樣，主樑典型截面混凝土應力季度變化時程曲線如圖 7-3 所示，可以看出，季度變化呈現正弦式大波浪的變化形式，主樑混凝土應力主要受溫度影響，活載產生的影響較小。



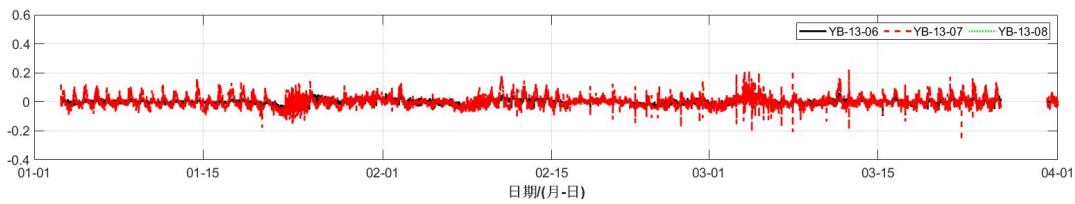


圖 7-3 主樑應力時程圖

8. 索力監測數據分析

8.1. 監測測點佈置

全橋在 32 根典型拉索佈置索力傳感器，上游側測點佈置如圖 8-1 所示，下游側測點沿橋軸對稱佈置。

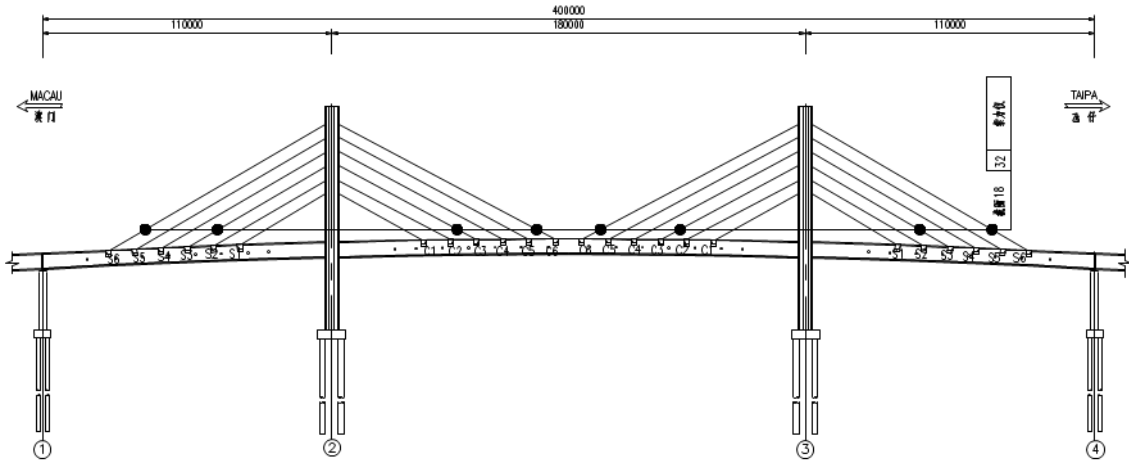


圖 8-1 索力測點佈置

8.2. 拉索索力分析

8.2.1. 有限元計算分析

建立三維杆系有限元計算模型中，共劃分橋面梁單元 236 個，主塔梁單元 154 個，斜拉索桁架單元 96 個，進行理論計算。

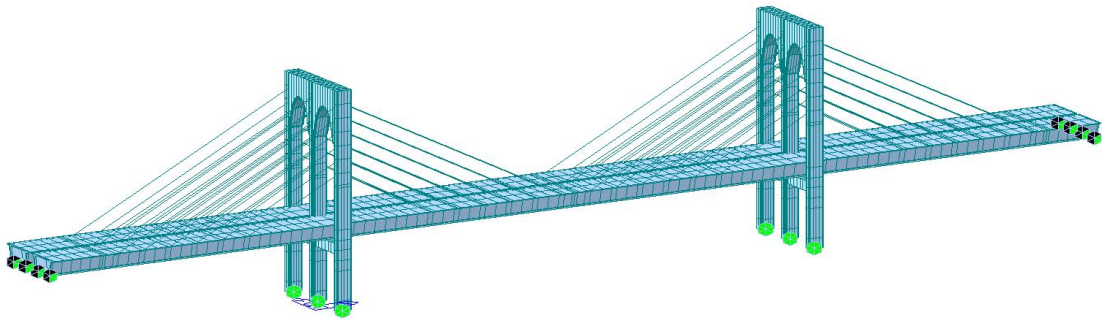
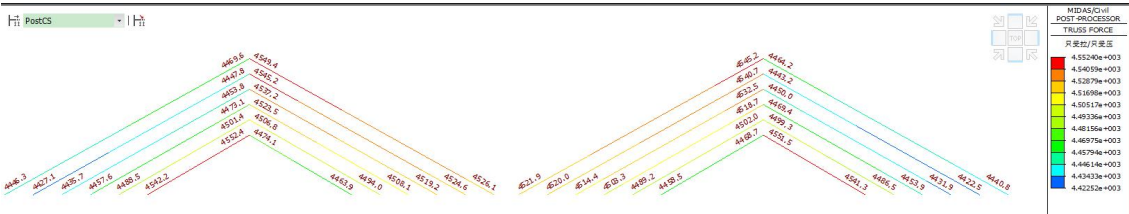


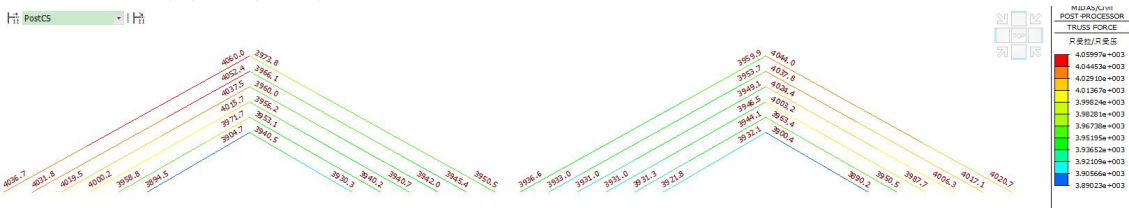
圖 8-2 結構縱向計算總體模型

在運營荷載作用下，斜拉索索力變化計算結果見圖 8-3。

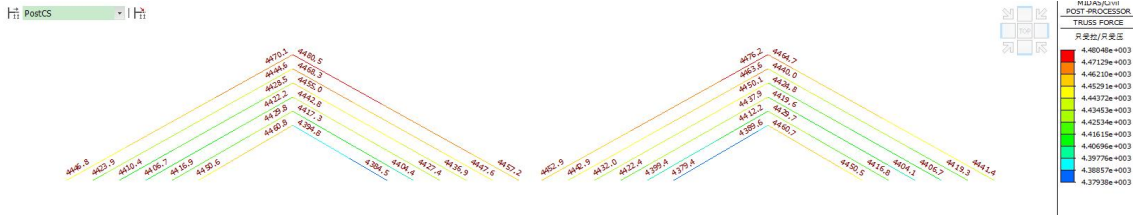
1) 中間索面索力最大值/kN



2) 中間索面索力最小值/kN



3) 邊索面索力最大值/kN



4) 邊索面索力最小值/kN

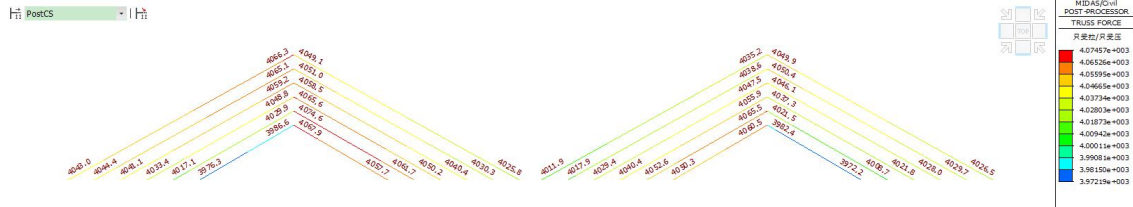


图 8-3 运营阶段斜拉索索力图/kN

8.2.2. 加速度 RMS 時程分析

對拉索振動監測數據進行分析，典型的拉索測點振動加速度 RMS 時程如圖 8-4 所示，拉索索力加速度 RMS 時程無明顯異常。

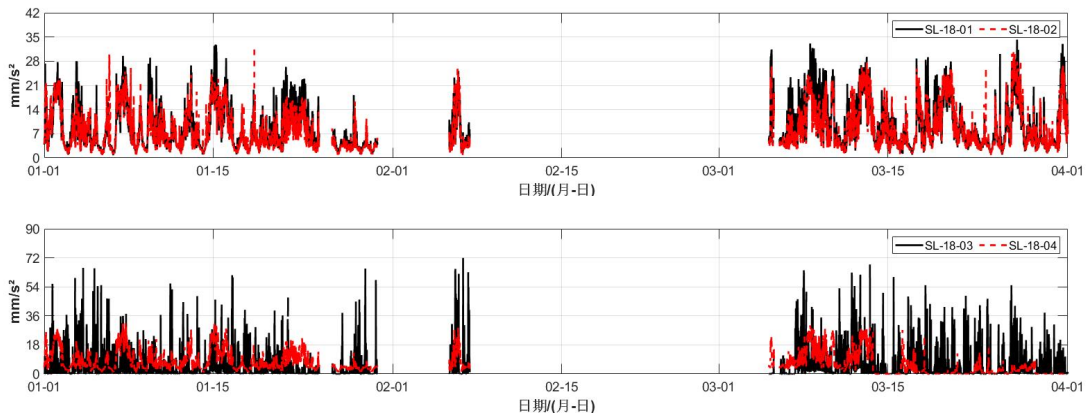
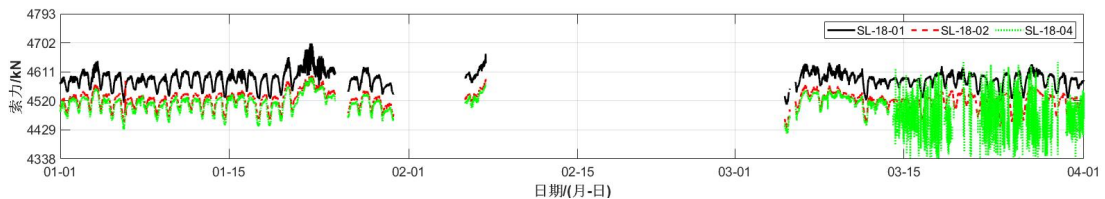


圖 8-4 拉索加速度 RMS 時程圖

8.2.3. 拉索監測索力分析

將 2024 年第 1 季度振動時程分析獲取拉索索力，典型的索力時程如下圖所示。取各斜拉索監測索力頻次最高的值作為本期監測斜拉索索力值，可以看出各傳感器測得斜拉索基頻基本穩定，本期較上期索力偏差範圍-0.98%~1.89%，較計算索力偏差範圍-6.1%~5.32%。



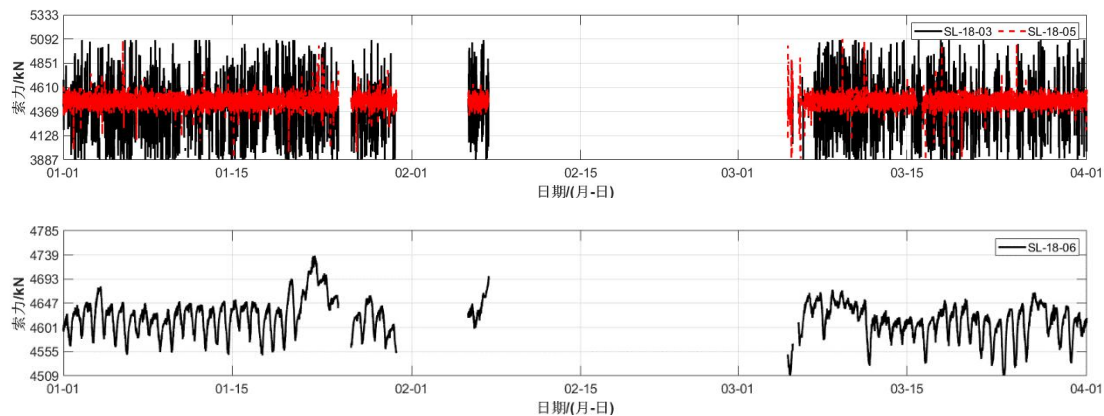


圖 8-5 拉索索力時程圖

9. 振動監測數據分析

9.1. 監測測點佈置

全橋在邊跨的跨中及主跨 4 等分點上下游共佈置 20 個主樑振動測點，南引橋 P4#墩至 S5#墩上游側各跨跨中共佈置 6 個振動測點，各上游側測點佈置如圖 9-1 所示，下游側測點沿橋軸對稱佈置。

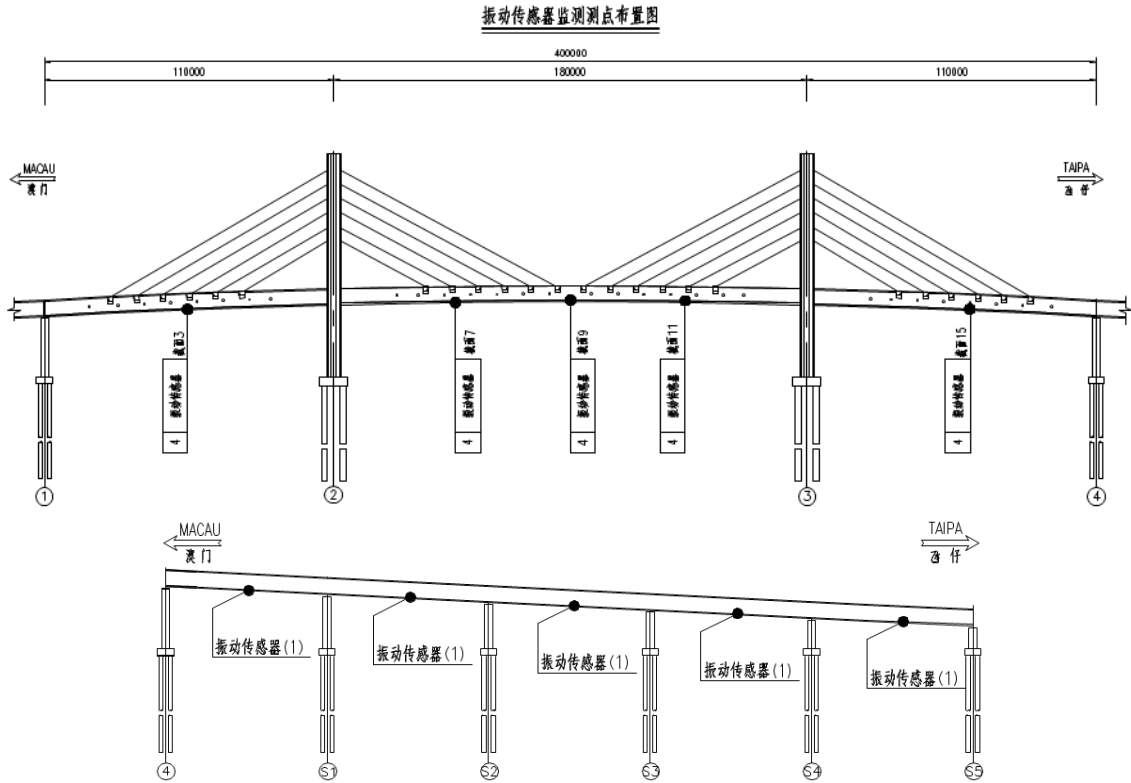


圖 9-1 動力響應測點佈置

9.2. 有限元計算分析

建立三維杆系有限元計算模型中，共劃分橋面梁單元 236 個，主塔梁單元 154 個，斜拉索桁架單元 96 個，進行理論計算。

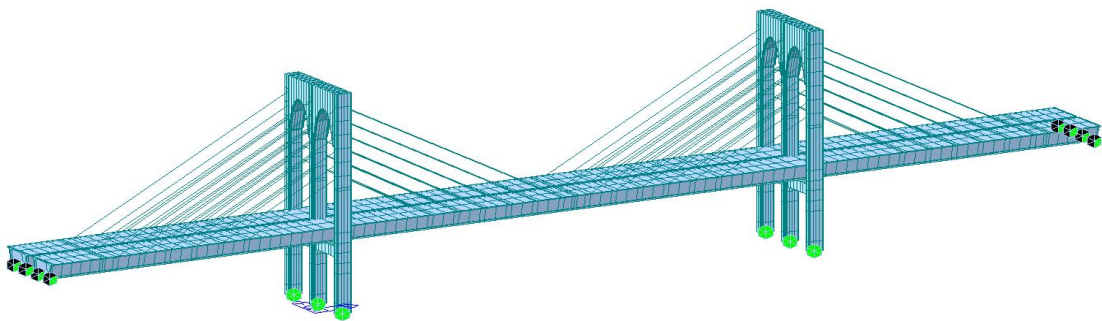
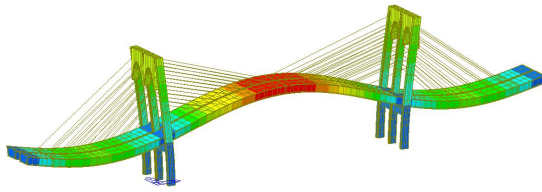
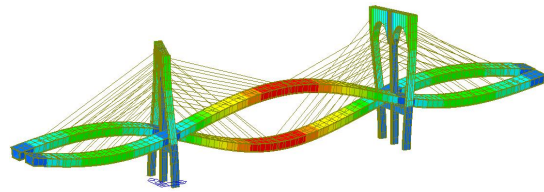


圖 9-2 結構縱向計算總體模型

主橋模態計算



主梁一阶竖弯 (0.759Hz)



主桥二阶竖弯 (0.959Hz)

9.3. 加速度監測數據分析

以部分傳感器本季度加速度 RMS 值監測數據為例進行分析，其加速度 RMS 變化時程曲線如下圖所示。主樑加速度 RMS 峰值無明顯突變，不存在異常撞擊或振動事件。

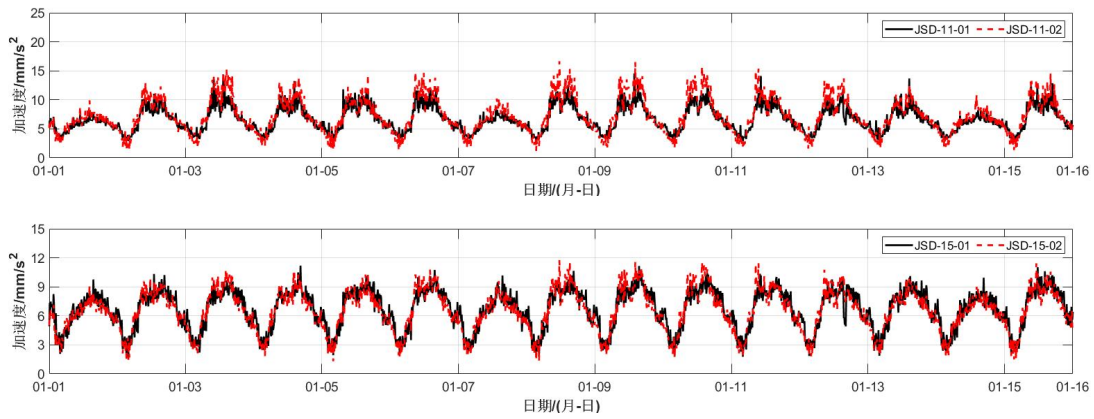


圖 9-3 加速度 RMS 時程圖

採用峰值法辨識西灣大橋結構的振動頻率，得到橋樑前两阶頻率 0.78Hz、1.01Hz，與計算模態頻率（一阶 0.76 Hz，二阶 0.96 Hz）較為接近。

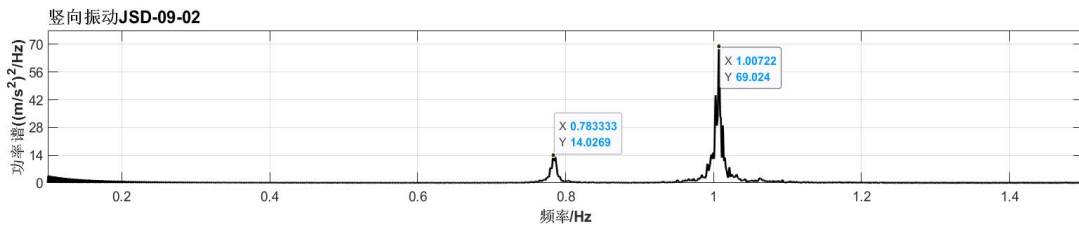


圖 9-4 加速度合成功率譜

10. 監測結論與建議

10.1. 監測結論

通過對西灣大橋 2024 年第 1 季度期間的監測數據進行分析，橋址處環境變化正常，橋樑總體狀況良好，結構溫度變化正常，傾角、樑端位移、主樑豎向位移變化正常，主樑線形同初始狀態保持基本一致，測得斜拉索基頻、索力同初始監測值相比變化較小，橋樑振動頻率識別正常，頻率波動小。具體得出的主要結論如下：

(1) 橋址風速和大氣溫度符合正常季節氣候變化，大橋主跨跨中 10min 平均風速最大值為 9.9m/s，塔頂 10min 平均風速最大值為 11.7m/s，本季度無颱風事件；

(2) 橋址處外部環境溫度變化較大，最高溫度為 28.5°C，最低為 4.9°C，最大變化幅值為 23.6°C，橋面無明顯溫度驟變事件；在統計的 91 天的有效數據中，有大約 69 天大氣相對濕度在 70% 以上，占 76%，對混凝土結構以及鋼構件防腐存在不利影響；

(3) 結構溫度整體變化趨勢符合實際大氣溫度走勢，結構溫度最高 32.1°C (WD-11-03)，最低 7°C (WD-15-04)；平均溫度為 17~22°C，各測點溫度變化較為穩定，未出現溫度驟變事件；

(4) 樑端傾角變化受溫度影響呈現正弦式變化趨勢，而主塔傾角受活載影響更大；樑端傾角同溫度及跨中撓度間保持一定的線性相關性；主塔塔頂傾斜時變規律相似，未發現明顯主塔過度傾斜事件；

(5) 主樑支座位移受溫度影響較大，同溫度的線性擬合效果較好；同一位置樑端上下游位移基本無偏差；四個傳感器測得支座位移變化趨勢大致一致，並且時變規律一直，同截面支座最大日變化值相似，表明主樑同截面縱向伸縮協調，支座處於正常工作狀態；

(6) 主樑豎向位移變化正常，主要受溫度影響；樑體線形同初始狀態基本一致；

(7) 主樑應力季度變化呈現正弦式大波浪的變化形式，主樑混凝土應力主要受溫度影響，活載產生的影響較小；

(8) 拉索索力加速度時程無明顯異常；斜拉索基頻、索力同初始監測值相比，僅有小幅偏差，本期較上期索力偏差範圍 -0.98%~1.89%，較計算索力偏差範圍 -6.1%~5.32%；

(9) 主樑加速度峰值無明顯突變，無異常撞擊或振動事件；採用峰值法辨識西灣大橋結構振動頻率，與計算模態頻率接近，未發現結構整體剛度有明顯劣化。

10.2. 建議

根據分析結果，對大橋的後期管養建議如下：

(1) 目前大橋系統監測時間段範圍內未發現異常，建議繼續觀測。