

西灣大橋結構健康監測 季度數據分析報告 (2021 年第 2 季度)

中鐵大橋勘測設計院集團有限公司

2021 年 07 月

摘要：西灣大橋健康監測系統是 2018 年起安裝在西灣大橋上，主要對橋址處對橋樑功能和安全性能有較為明顯影響的環境荷載源以及部件的結構回應等進行實時監測、對橋樑結構安全進行評估的一套監測系統。通過對西灣大橋 2021 年 4 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日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、梁端位移、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。目前大橋系統監測時間段範圍內未發現異常。

系統概況

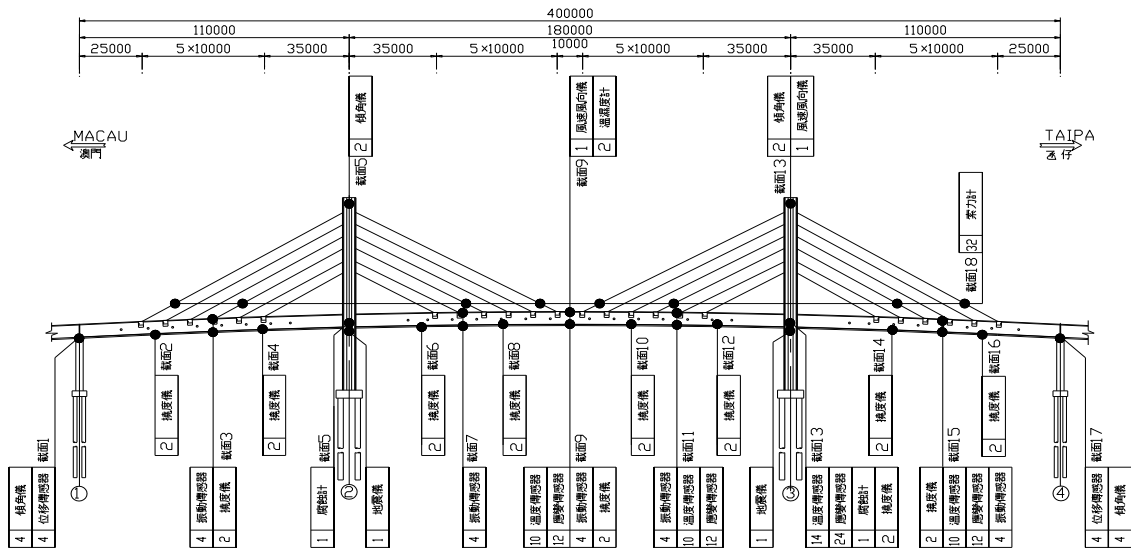
系統共由四個子系統組成，其中自動化監測子系統用於荷載源、結構回應資料的採集，並將獲取的資料作一定處理後，統一存儲在資料存儲與分析子系統中，然後借助軟體中植入的數學工具進行相應的統計分析，結合各特徵參數設定的安全閾值實現系統的綜合預警和狀態評估功能，並由使用者介面子系統完成人機交互工作（包括監測結果、評估結論的圖表顯示，人工資訊的錄入，指令的輸入等）。監測系統測點如下所示：

表 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 號墩近五跨連續梁各跨跨中 |
| | | 位移感測器 | 8 | 1/17 | 主橋主樑梁端 |
| | | 傾角儀 | 12 | 1/5/13/17 | 主塔頂部、主橋主樑梁端 |
| | 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 |
|-----------|------|-------|------|----------------------------|---------------------------------|
| 耐久性 監測 | 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 跨連續梁跨中 |
| | 腐蝕性能 | 腐蝕計 | 2 | 5/13 | 主墩承台 |
| | 合計 | | 219 | | |

澳門西灣大橋監測測點總佈置圖一



澳門西灣大橋監測測點總佈置圖二

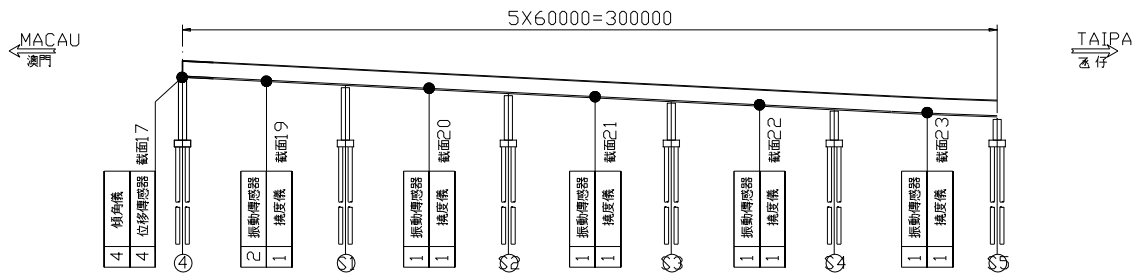


圖 1 測點總佈置圖

一、監測依據

- (1) 《公路橋涵設計通用規範》(JTJ021-89)；
- (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) 《屋宇結構及橋樑結構之安全及荷載規章》第 56/96/M 號法令。

1. 環境監測數據分析

1.1. 風速風向監測數據分析

1.1.1. 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，圖 1-1 為 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日 10min 平均風速變化趨勢圖。

從圖中可以看出：2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日大橋主跨跨中 10min 平均風速最大值為 11.29m/s，塔頂 10min 平均風速最大值為 16.76m/s。

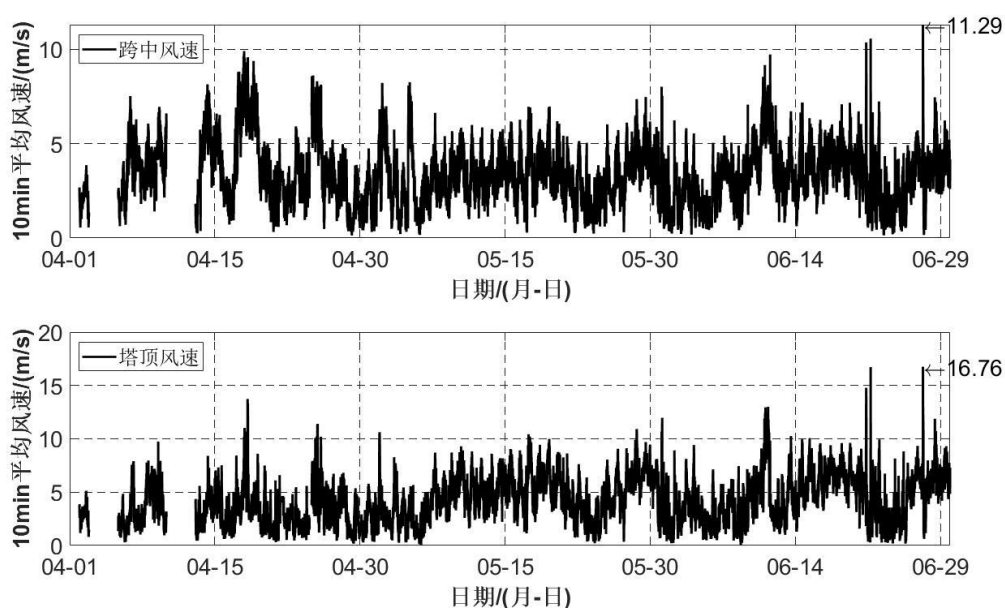
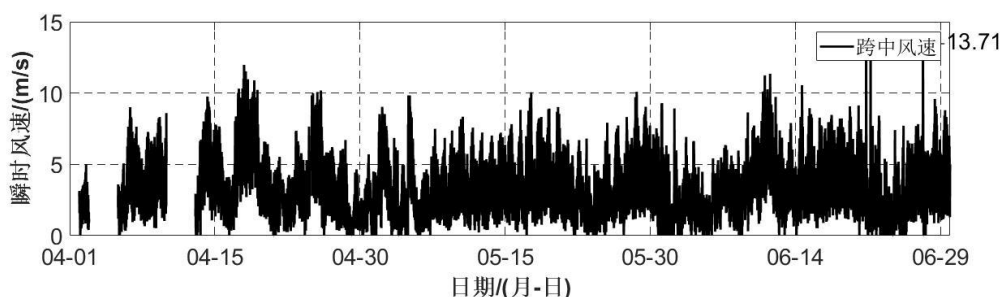


圖 1-1 10min 平均風速趨勢圖

1.1.2. 瞬時風速分析

圖 3-2 為 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日瞬時風速趨勢圖，從圖中可以看出：4 月 1 日至 6 月 30 日有效監測風速中大橋主跨跨中最大瞬時風速為 13.71m/s，塔頂最大瞬時風速 19.53m/s。



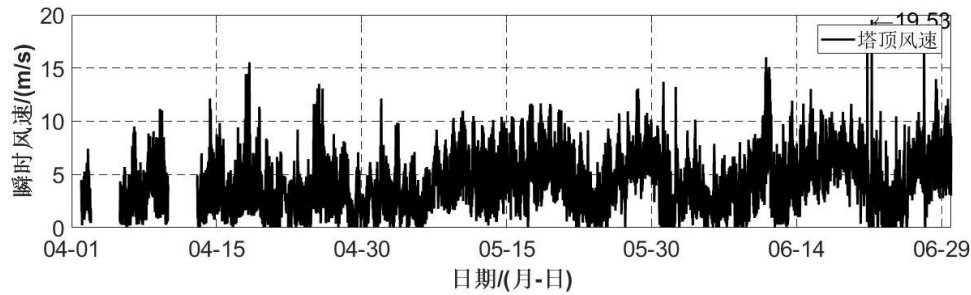


圖 1-2 瞬時風速變化趨勢圖

1.1.3. 風速風向玫瑰圖分析

風速風向玫瑰圖分別如圖 1-3 所示，可以看出，統計時段內，橋址附近主導風向為北風、西南風。

a)主跨跨中風向玫瑰圖

b)主塔塔頂風向玫瑰圖

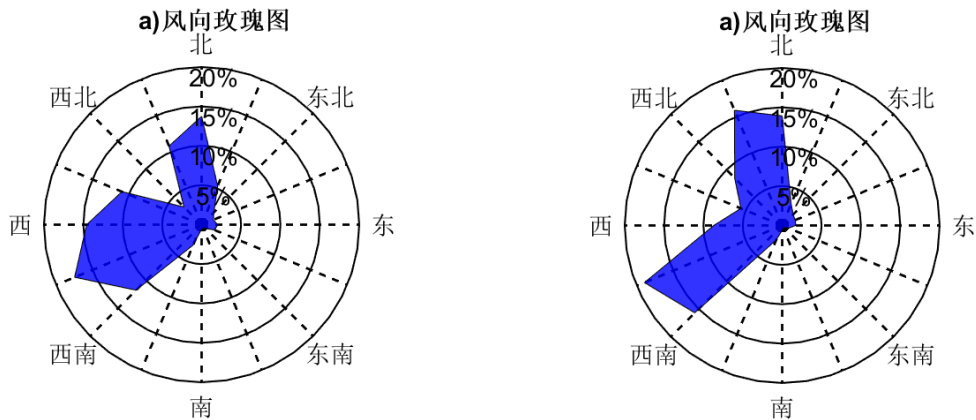


圖 1-3 風速風向玫瑰圖

1.2. 橋址溫濕度監測數據分析

對大氣溫度監測數據進行趨勢分析，圖 1-4 為 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日箱梁內溫度的變化趨勢圖。從圖中可以看出：大氣最高溫度為 34.26℃，最低為 17.29℃，變化幅度 22.68℃，箱樑內溫度同大氣溫度保持相近的變化趨勢，樑內溫度變化幅度保持在 16.91℃左右。

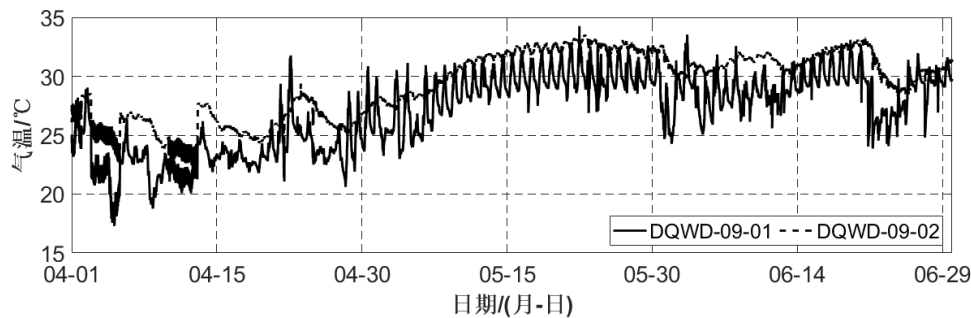


圖 1-4 大氣溫度變化趨勢圖

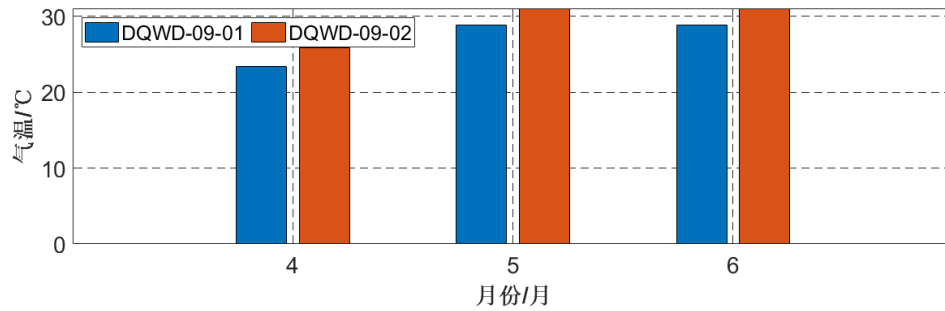


圖 1-5 月平均溫度變化趨勢圖

表 1.1 大氣溫度特徵參數表/°C

| 序號 | 最高溫度 | 最低溫度 | 變化幅度 | 月平均溫度 | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 4 月 | 5 月 | 6 月 |
| DQWD-09-01 | 34.26 | 17.29 | 16.97 | 23.45 | 28.84 | 28.83 |
| DQWD-09-02 | 33.53 | 22.39 | 11.14 | 25.88 | 31.04 | 31.06 |

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，圖 3-6 為 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日大氣相對濕度和箱梁內濕度的變化趨勢圖。可以看出，橋址環境濕度較大，在統計的 91 天的有效數據中，有大約 76 天大氣相對濕度在 70% 以上，占 84.86%；樑內大氣濕度最高 100%，平均濕度 72.84%左右。

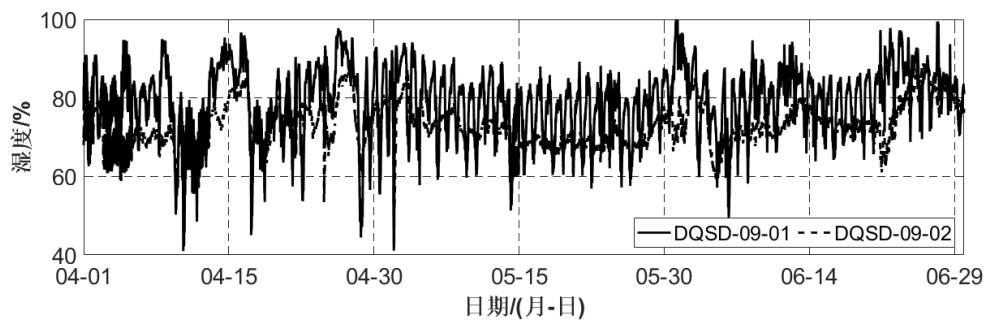


圖 1-6 大氣相對濕度趨勢圖

2. 結構溫度監測數據分析

2.1. 溫度監測測點佈置

傳感器沿橋軸對稱佈置在主跨跨中上、下游邊梁處，其結構溫度監測測點佈置如圖 2-1。

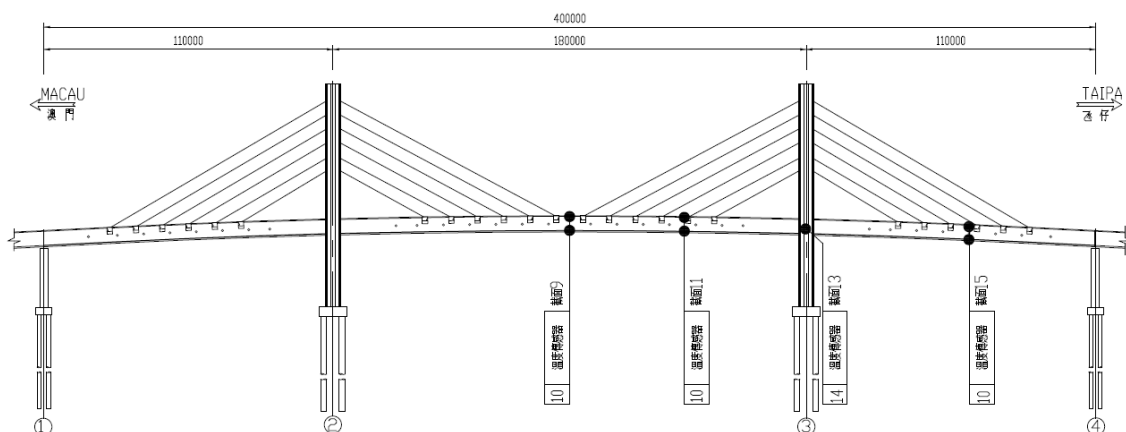


圖 2-1 結構溫度監測測點佈置圖/mm

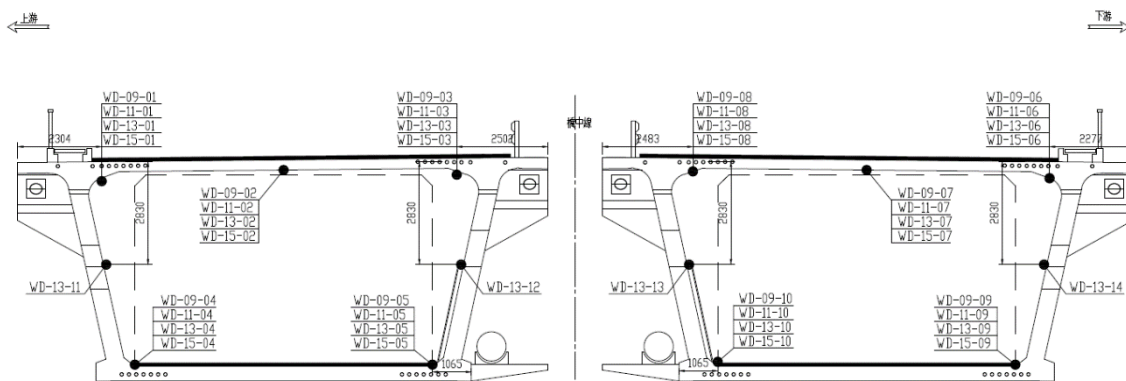
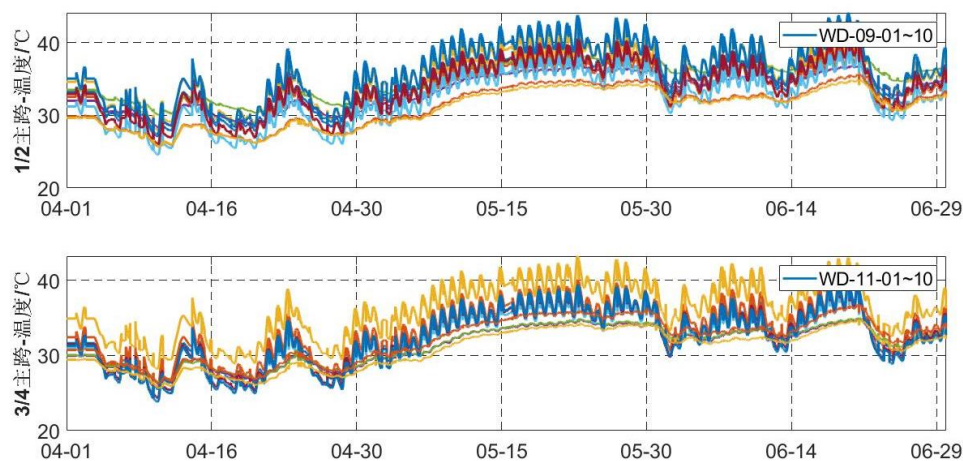


圖 2-2 結構溫度監測測點斷面佈置圖/mm

2.2. 結構溫度時變規律分析

從 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日的溫度監測結果序列如圖 2-3 所示。



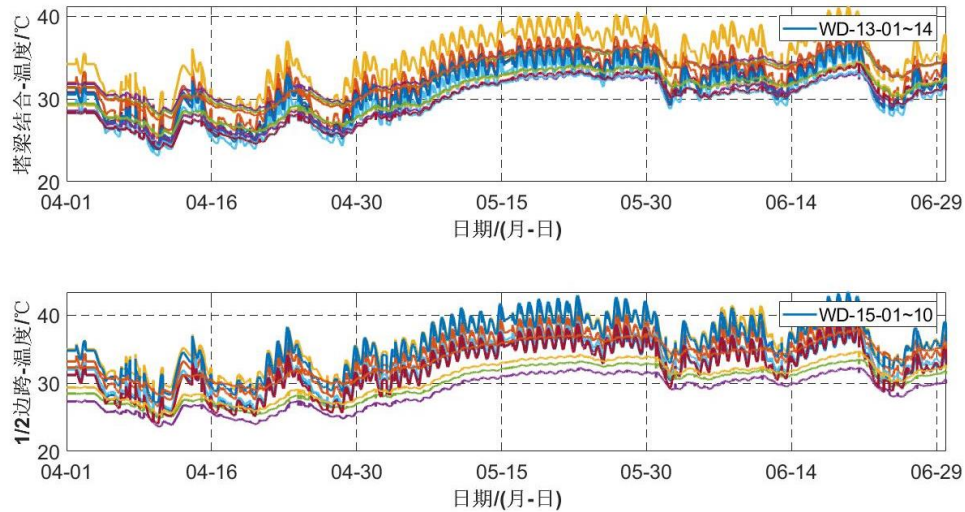


圖 2-3 西灣大橋結構溫度時程

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 44.09℃(WD-09-08)，最低 23.12℃(WD-13-06)；溫度變化幅度為 8~17℃，各溫度樣本序列的季度特徵如表 2.1 所示。

表 2.1 溫度樣本序列的相關統計參數/℃

| 測點 | 序號 | 最高溫度 | 最低溫度 | 變化幅度 |
|---------------|----------|-------|-------|-------|
| 主跨跨中 截面 | WD-09-01 | 40.61 | 27.03 | 13.58 |
| | WD-09-02 | 39.71 | 26.03 | 13.68 |
| | WD-09-03 | 42.55 | 27.92 | 14.63 |
| | WD-09-04 | 36.87 | 28.26 | 8.61 |
| | WD-09-05 | 38.41 | 29.98 | 8.43 |
| | WD-09-06 | 39.14 | 24.51 | 14.63 |
| | WD-09-07 | 41.04 | 25.86 | 15.18 |
| | WD-09-08 | 44.09 | 27.32 | 16.77 |
| | WD-09-09 | 35.64 | 25.65 | 9.99 |
| | WD-09-10 | 34.88 | 25.69 | 9.2 |
| 3/4 主跨 截面 | WD-11-01 | 39.04 | 25.48 | 13.55 |
| | WD-11-02 | 40.13 | 25.74 | 14.39 |
| | WD-11-03 | 43.21 | 28.15 | 15.06 |
| | WD-11-04 | 34.83 | 26.22 | 8.61 |
| | WD-11-05 | 34.99 | 26.49 | 8.5 |
| | WD-11-06 | 38.74 | 24.35 | 14.39 |
| | WD-11-07 | 39.56 | 24.31 | 15.25 |
| | WD-11-08 | 39.95 | 23.83 | 16.12 |
| | WD-11-09 | 36.75 | 26.31 | 10.45 |
| | WD-11-10 | 34.69 | 25.66 | 9.04 |
| 3#塔塔梁 結合截面 | WD-13-01 | 36.87 | 24.37 | 12.5 |
| | WD-13-02 | 38.08 | 25.2 | 12.87 |
| | WD-13-03 | 41.22 | 27.57 | 13.65 |
| | WD-13-04 | 36.37 | 28.21 | 8.16 |

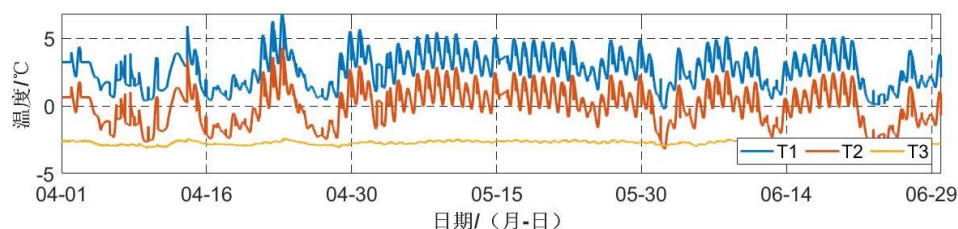
| 測點 | 序號 | 最高溫度 | 最低溫度 | 變化幅度 |
|------------|----------|-------|-------|-------|
| | WD-13-05 | 36.26 | 28.01 | 8.25 |
| | WD-13-06 | 36.5 | 23.12 | 13.38 |
| | WD-13-07 | 37.28 | 24.02 | 13.26 |
| | WD-13-08 | 37.16 | 23.83 | 13.33 |
| | WD-13-09 | 37.77 | 27.45 | 10.32 |
| | WD-13-10 | 34.59 | 25.53 | 9.06 |
| | WD-13-11 | 33.31 | 24.61 | 8.7 |
| | WD-13-12 | 34.22 | 25.55 | 8.66 |
| | WD-13-13 | 33.5 | 24.2 | 9.3 |
| | WD-13-14 | 34.37 | 23.96 | 10.41 |
| 邊跨跨中 截面 | WD-15-01 | 38.43 | 25.1 | 13.32 |
| | WD-15-02 | 40.83 | 26.56 | 14.27 |
| | WD-15-03 | 42.77 | 28.3 | 14.48 |
| | WD-15-04 | 32.31 | 23.59 | 8.72 |
| | WD-15-05 | 33.5 | 24.88 | 8.62 |
| | WD-15-06 | 39.53 | 25.32 | 14.2 |
| | WD-15-07 | 39.34 | 24.03 | 15.31 |
| | WD-15-08 | 43.4 | 27.07 | 16.34 |
| | WD-15-09 | 37.97 | 28.31 | 9.66 |
| | WD-15-10 | 34.71 | 25.35 | 9.36 |

注：變化幅度=|最高溫度-最低溫度|

2.3. 截面溫度梯度分析

將 3#塔塔梁結合截面頂板底面、腹板、底板頂面作為主樑的特徵高度點，以各組測點的平均值作為特徵高度點的溫度代表值，用特徵高度點之間的溫差來描述主樑截面的溫度梯度。頂板底面與腹板、頂板底面與底板頂面、腹板與底板頂面之間的溫差分別記為 T1、T2、T3，對 2019 年第 4 季度的監測數據進行分析，溫度梯度時程曲線如圖 2-4 所示。從圖中可以看出：主樑截面不同位置結構溫度梯度變化幅度不同，頂板與腹板和底板的溫差變化幅度較大，腹板與底板的溫差變化幅度較小。

a) 東幅橋



b) 西幅橋

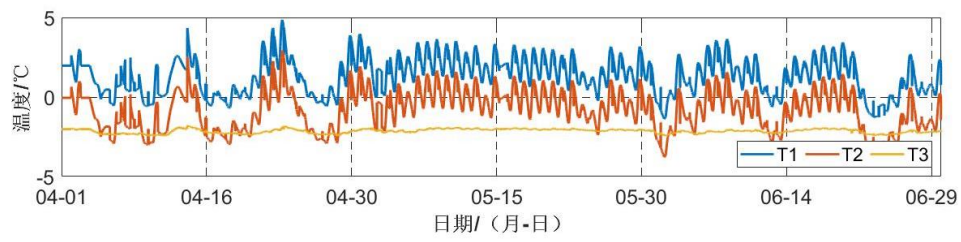


圖 2-4 西灣大橋結構溫度梯度時程

3. 結構傾角及位移監測數據分析

3.1. 傾角監測測點佈置

傳感器對稱佈置在南北塔下橫樑塔內和塔頂處，其監測測點佈置如圖 3-1。

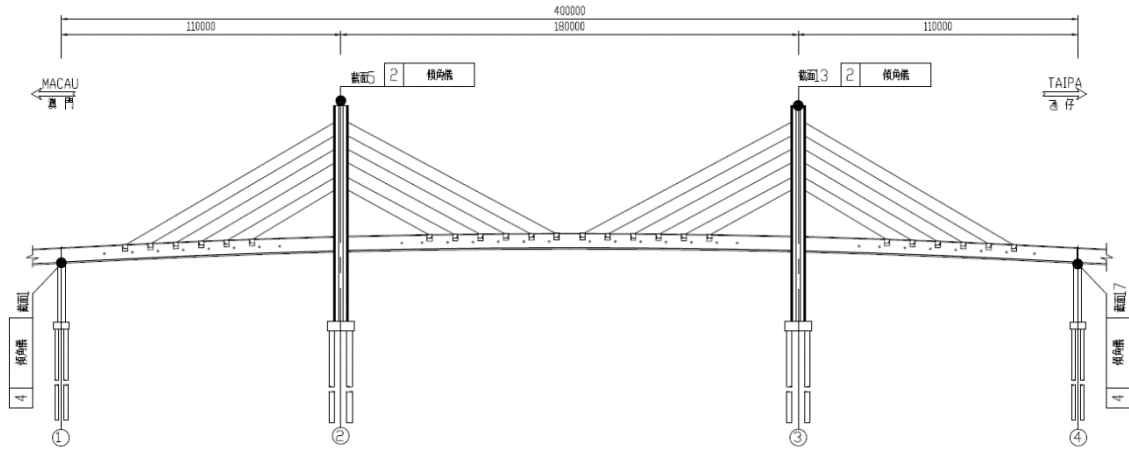
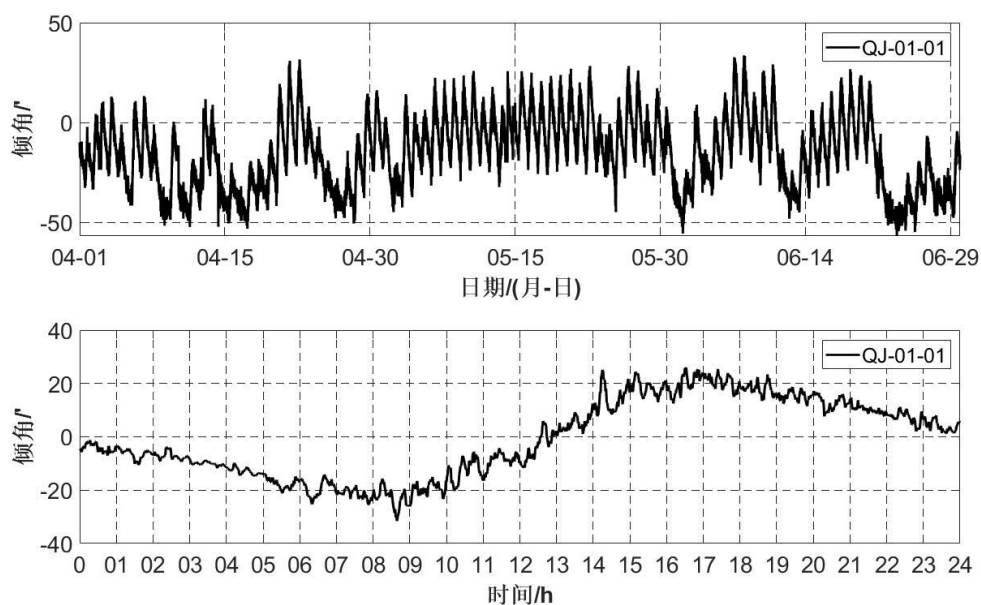


圖 3-1 結構傾角監測測點佈置圖

3.1.1. 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 3-2 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 2 季度的變化特性，可以看出，梁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值 $185.54''$ (QJ-13-01)，梁端傾角最大值 $617.18''$ (QJ-17-04)。



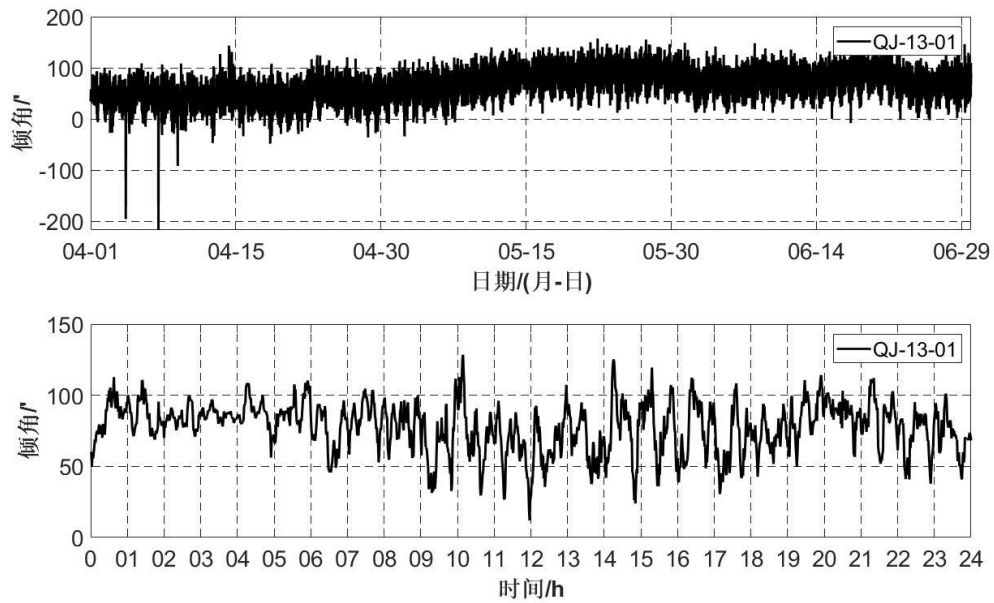
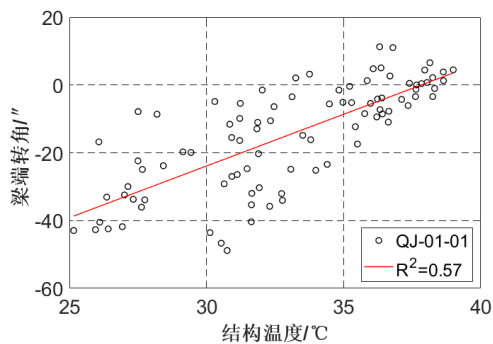


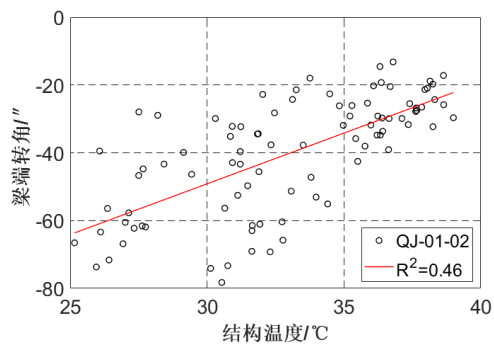
圖 3-2 傾角時程圖

2) 相關性分析

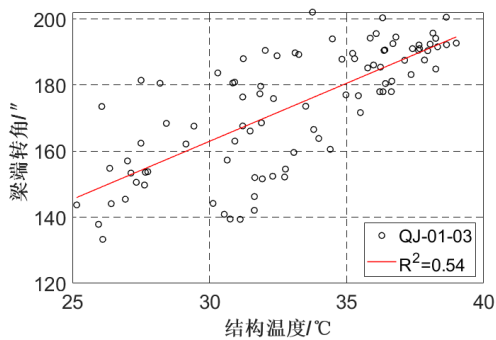
溫度變化是大跨橋樑的重要荷載源之一，常常引起橋樑線形的改變，分析梁端傾角同大氣溫度的之間的相互關係，利用最小二乘法對相關特性進行線性擬合，不難發現其各變量之間存在一定線性相關性，得到線性函數表達式及其擬合優度值 R^2 如圖所示。



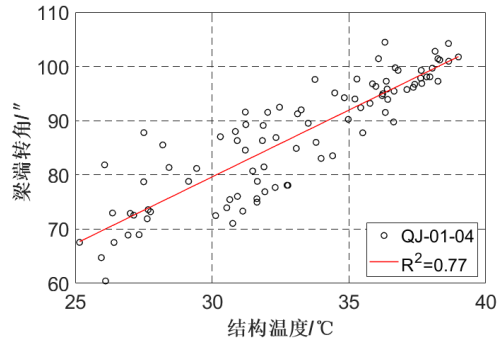
(a) QJ-01-01 同溫度相關性



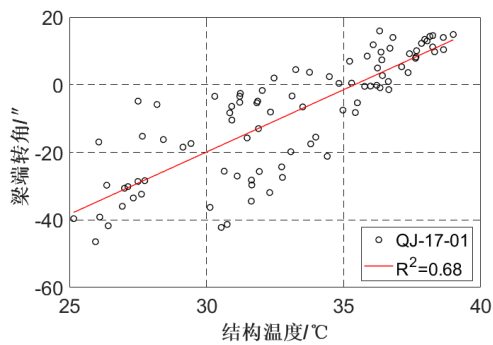
(b) QJ-01-02 同溫度相關性



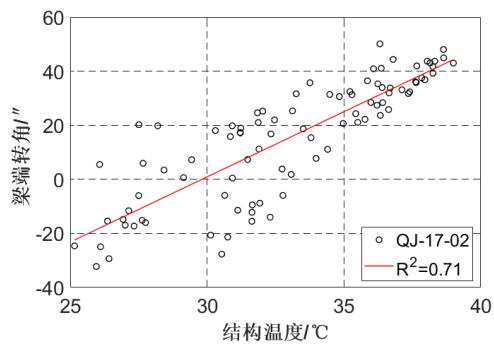
(c) QJ-01-03 同溫度相關性



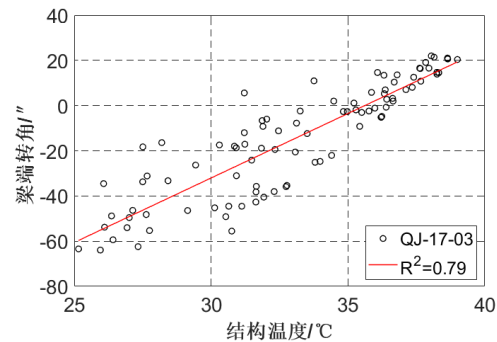
(d) QJ-01-04 同溫度相關性



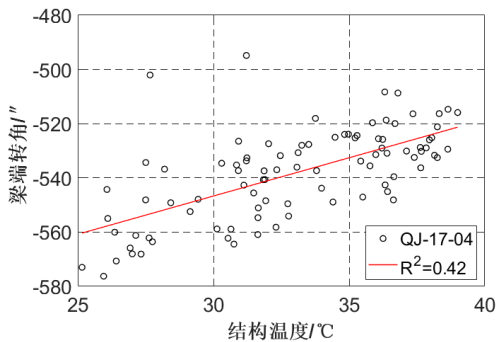
(e) QJ-17-01 同溫度相關性



(f) QJ-17-02 同溫度相關性



(g) QJ-17-03 同溫度相關性



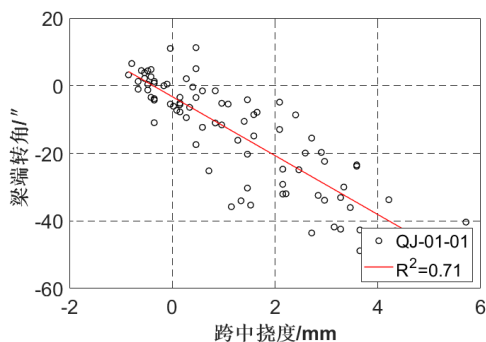
(h) QJ-17-04 同溫度相關性

圖 3-3 傾角同結構溫度相關性分析

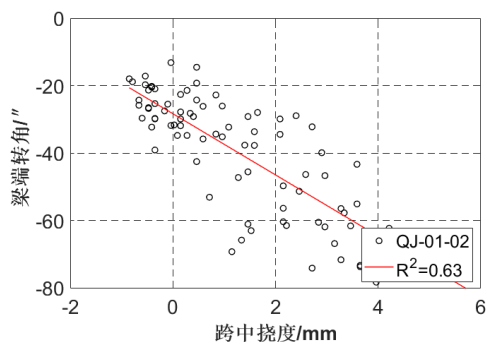
表 3.1 梁端傾角與環境溫度的相關性分析統計表

| 測點編號 | 位置 | k | b | R ² |
|----------|--------------|------|---------|----------------|
| QJ-01-01 | 澳門側主樑梁端上游側外側 | 3.05 | -115.41 | 0.57 |
| QJ-01-02 | 澳門側主樑梁端上游側內側 | 2.99 | -138.92 | 0.46 |
| QJ-01-03 | 澳門側主樑梁端下游側內側 | 3.51 | 57.64 | 0.54 |
| QJ-01-04 | 澳門側主樑梁端下游側外側 | 2.46 | 5.68 | 0.77 |
| QJ-17-01 | 氹仔側主樑梁端上游側外側 | 3.69 | -130.57 | 0.68 |
| QJ-17-02 | 氹仔側主樑梁端上游側內側 | 4.82 | -143.69 | 0.71 |
| QJ-17-03 | 氹仔側主樑梁端下游側內側 | 5.71 | -203.27 | 0.79 |
| QJ-17-04 | 氹仔側主樑梁端下游側外側 | 2.82 | -631.31 | 0.42 |

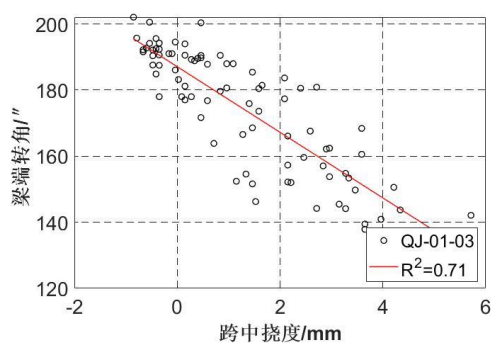
進一步分析主塔傾角與梁端傾角同主跨跨中撓度之間的內在聯繫如圖 3-4 所示。



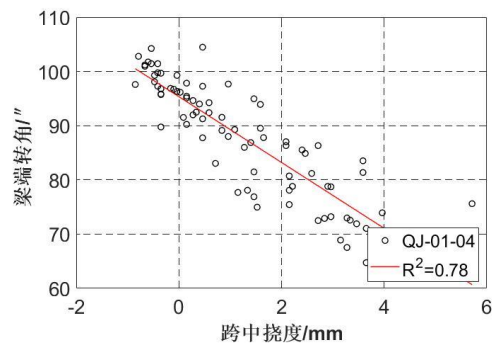
(a) QJ-01-01 同跨中撓度相關性



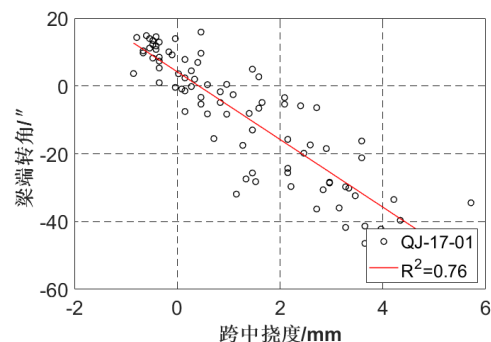
(b) QJ-01-02 同跨中撓度相關性



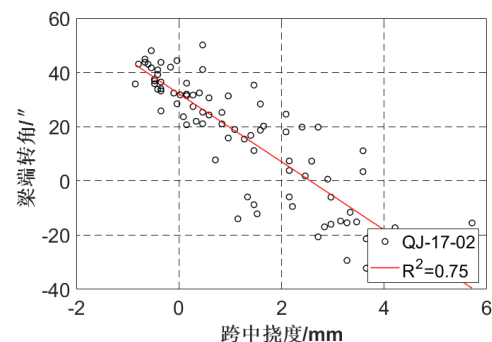
(c) QJ-01-03 同跨中撓度相關性



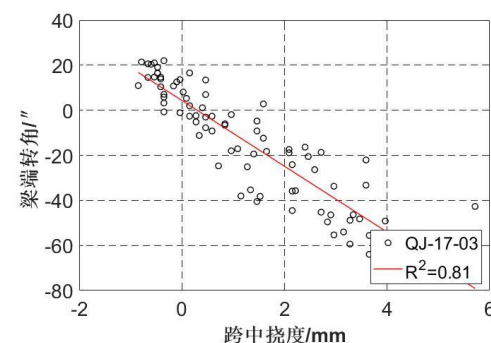
(d) QJ-01-04 同跨中撓度相關性



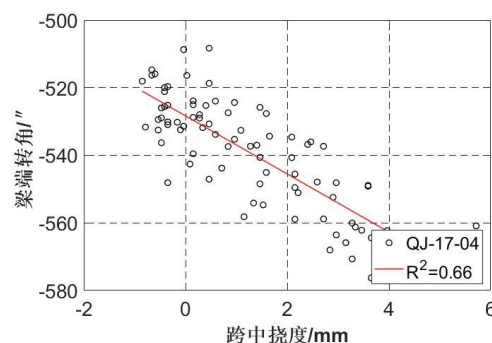
(e) QJ-17-01 同跨中撓度相關性



(f) QJ-17-02 同跨中撓度相關性



(g) QJ-17-03 同跨中撓度相關性



(h) QJ-17-04 同跨中撓度相關性

圖 3-4 傾角同撓度相關性分析

表 3.2 梁端傾角同主跨跨中撓度的相關性分析統計表

| 測點編號 | 位置 | k | b | R ² |
|----------|--------------|--------|---------|----------------|
| QJ-01-01 | 澳門側主樑梁端上游側外側 | -8.72 | -3.23 | 0.71 |
| QJ-01-02 | 澳門側主樑梁端上游側內側 | -9.07 | -28.34 | 0.63 |
| QJ-01-03 | 澳門側主樑梁端下游側內側 | -9.93 | 187.08 | 0.71 |
| QJ-01-04 | 澳門側主樑梁端下游側外側 | -6.07 | 95.35 | 0.78 |
| QJ-17-01 | 氹仔側主樑梁端上游側外側 | -9.99 | 4.2 | 0.76 |
| QJ-17-02 | 氹仔側主樑梁端上游側內側 | -12.56 | 32.15 | 0.75 |
| QJ-17-03 | 氹仔側主樑梁端下游側內側 | -14.61 | 4.34 | 0.81 |
| QJ-17-04 | 氹仔側主樑梁端下游側外側 | -8.6 | -528.34 | 0.66 |

3.2. 結構位移監測數據分析

傳感器對稱佈置在南北梁端處，其監測測點佈置如圖 3-5。

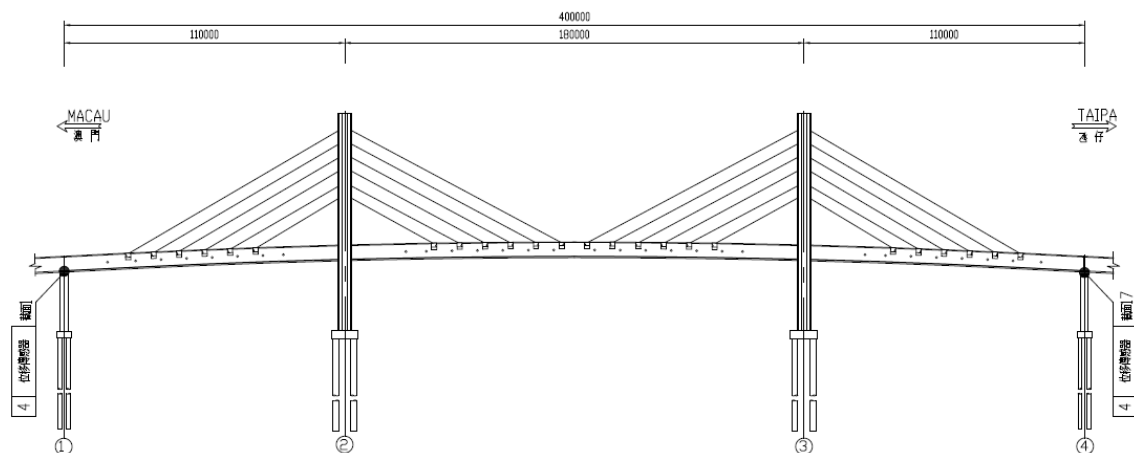
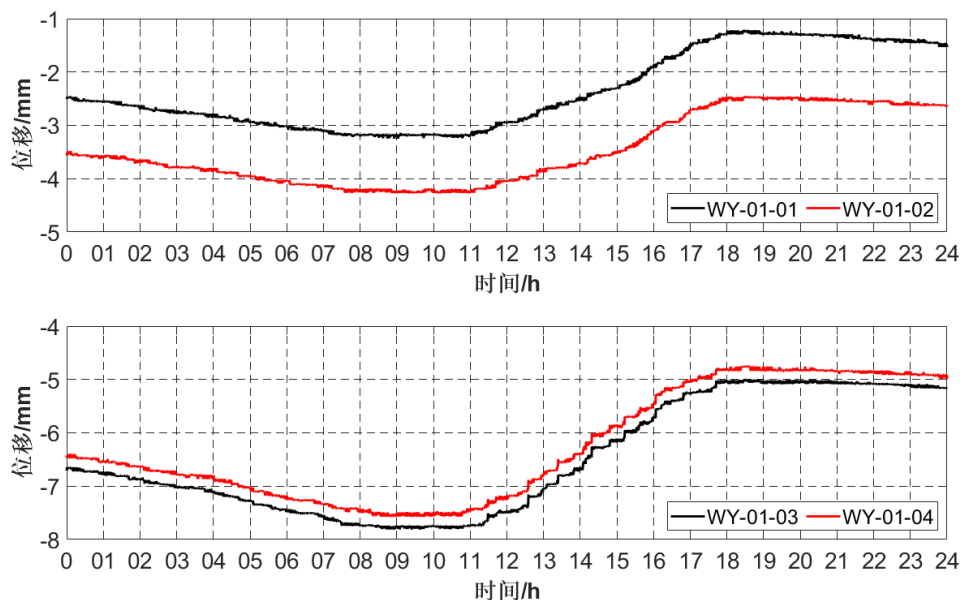


圖 3-5 結構位移監測測點佈置圖

3.2.1. 結構位移監測數據分析

1) 支座位移日變化趨勢

考察支座縱向位移運動的日變化特徵，取 2021 年 5 月 15 日支座位移一天中的變化情況，如圖 3-6 所示。從圖中可以看出：澳門側(WY-00-01/02)和氹仔側(WY-17-01/02)一天中支座位移呈現出單週期正弦曲線的變化特徵，同一側上下游支座位移變化基本一致，澳門側上下游支座位移存在 0.2-0.6mm 左右差值，氹仔側上下游支座位移保持一致。



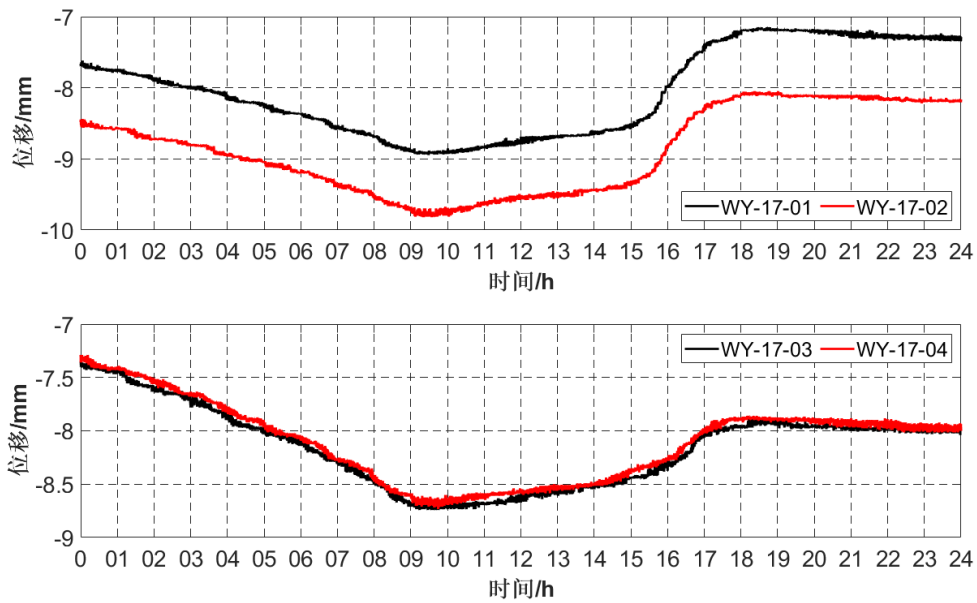
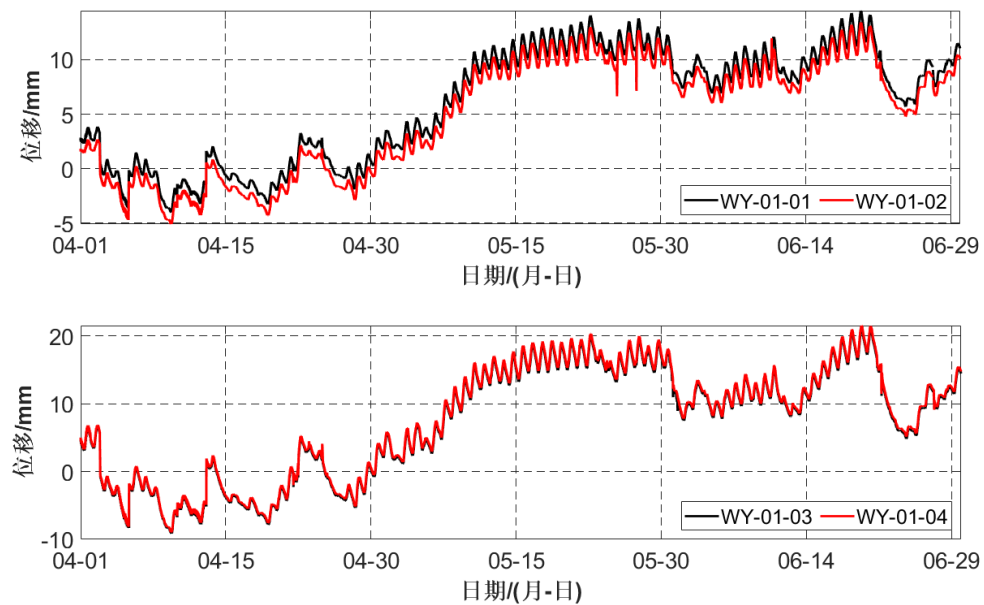


圖 3-6 支座位移日變化趨勢

2) 支座位移季節變化趨勢

以本系統支座位移初始值（2018 年 4 月 1 日 00:00:00~00:10:10 時間段（空氣溫度為 9.51℃））為基準做出支座位移在 2021 年第 2 季度監測到的變化情況如下。



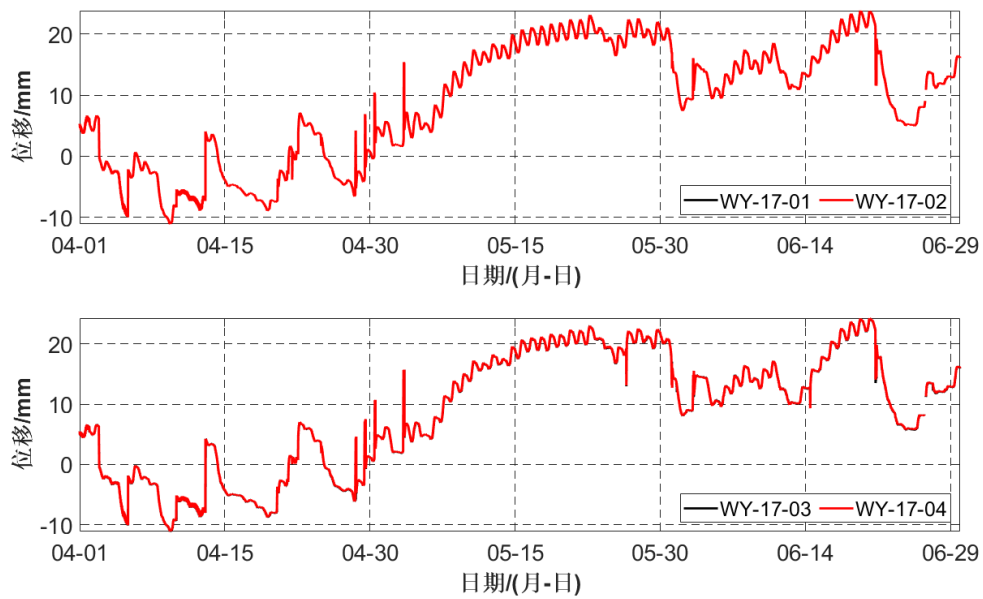


圖 3-7 支座位移季度變化趨勢

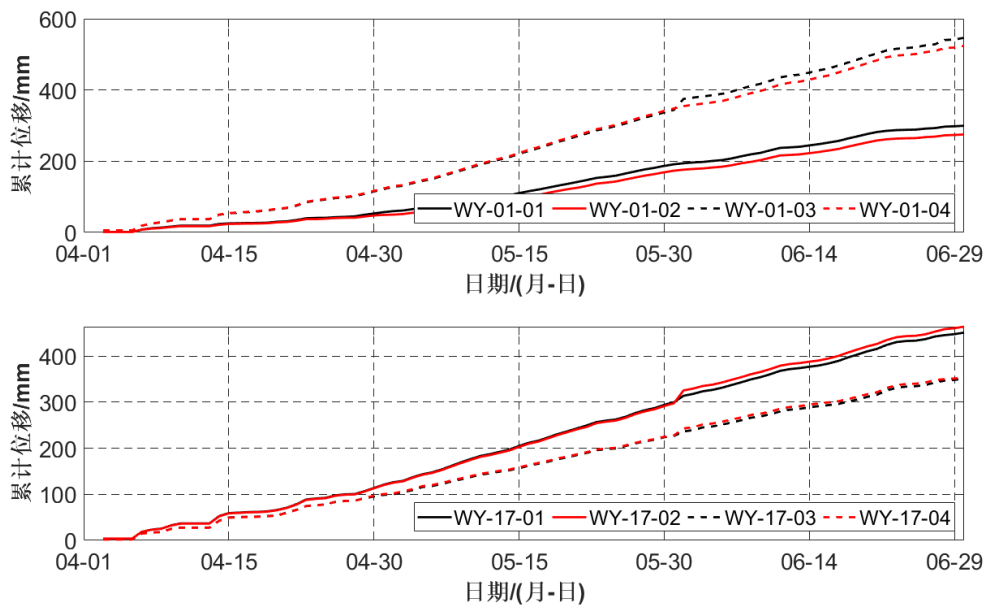


圖 3-8 支座累計位移

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，隨著氣溫降低，支座位移在緩慢減小，位移變化無異常。

3) 支座位移與溫度相關性分析

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

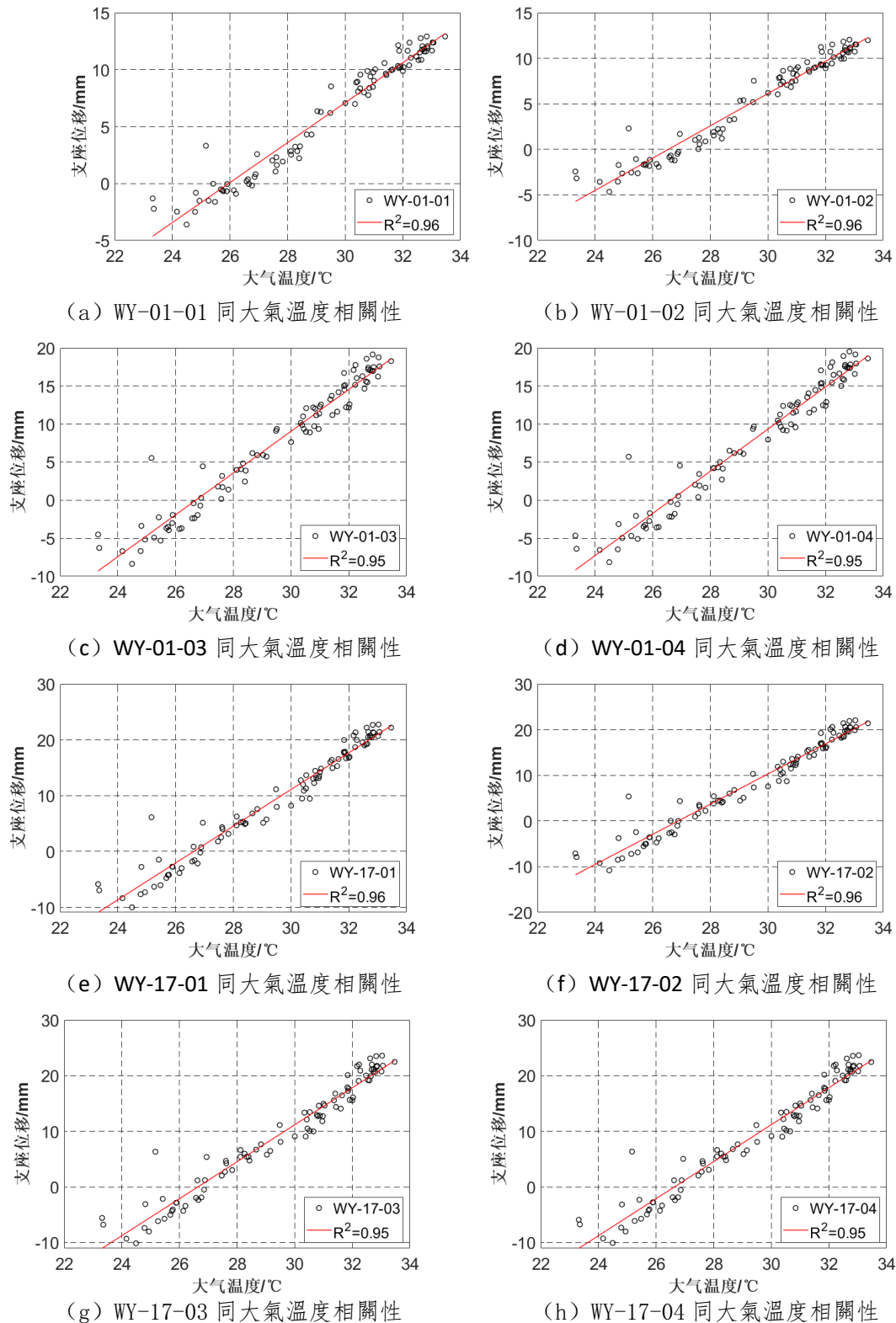
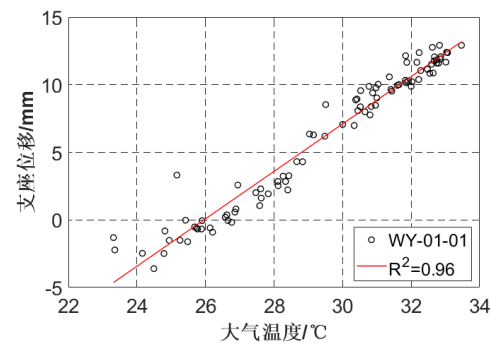
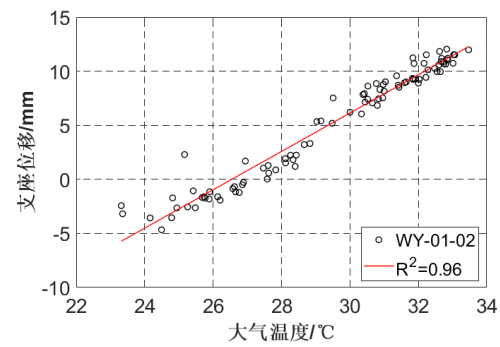


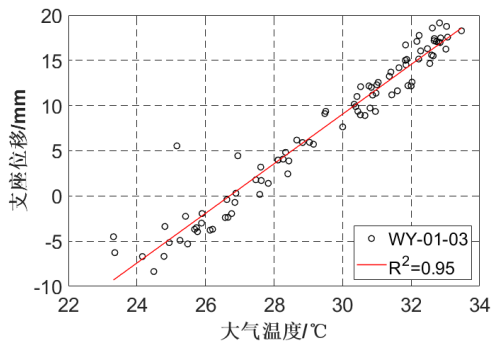
圖 3-9 所示為溫度和支座位移的相關性散點圖。從圖中可以看出：大氣溫度與支座位移均表現出良好的相關性，進一步利用最小二乘法對相關特性進行線性擬合，得到線性函數表達式及其擬合優度值 R^2 ，擬合優度值 R^2 越接近 1，說明相關性越好。



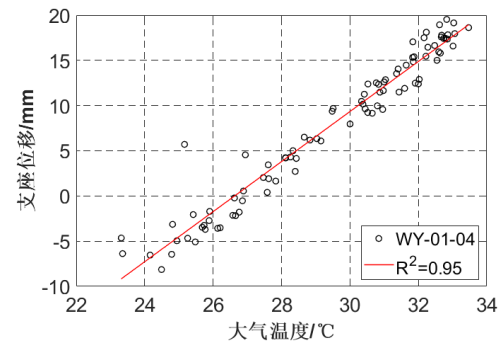
(a) WY-01-01 同大氣溫度相關性



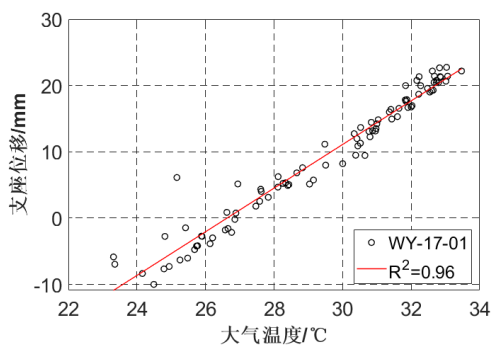
(b) WY-01-02 同大氣溫度相關性



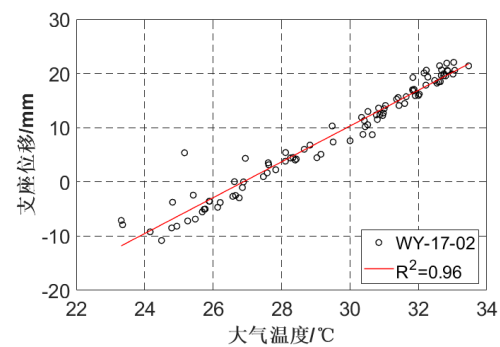
(c) WY-01-03 同大氣溫度相關性



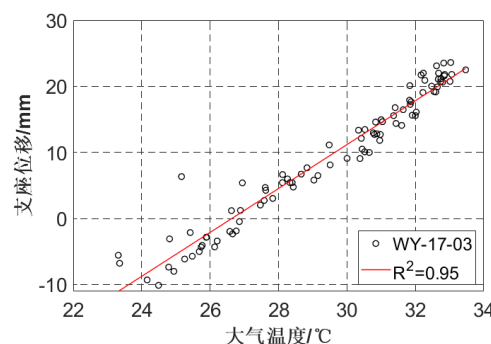
(d) WY-01-04 同大氣溫度相關性



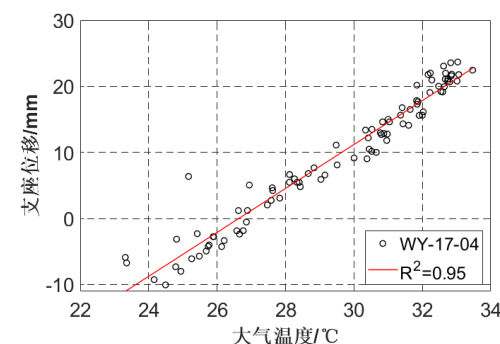
(e) WY-17-01 同大氣溫度相關性



(f) WY-17-02 同大氣溫度相關性



(g) WY-17-03 同大氣溫度相關性



(h) WY-17-04 同大氣溫度相關性

圖 3-9 支座位移同大氣溫度相關性分析

表 3.3 支座位移同大氣溫度的相關性分析統計表

| 測點編號 | 位置 | k | b | R ² |
|----------|--------------|------|--------|----------------|
| WY-01-01 | 澳門側主樑梁端上游側外側 | 1.75 | -45.54 | 0.96 |

| | | | | |
|----------|--------------|------|--------|------|
| WY-01-02 | 澳門側主樑梁端上游側內側 | 1.77 | -47.05 | 0.96 |
| WY-01-03 | 澳門側主樑梁端下游側內側 | 2.75 | -73.3 | 0.95 |
| WY-01-04 | 澳門側主樑梁端下游側外側 | 2.77 | -73.75 | 0.95 |
| WY-17-01 | 氹仔側主樑梁端上游側外側 | 3.29 | -87.64 | 0.96 |
| WY-17-02 | 氹仔側主樑梁端上游側內側 | 3.3 | -88.82 | 0.96 |
| WY-17-03 | 氹仔側主樑梁端下游側內側 | 3.32 | -88.45 | 0.95 |
| WY-17-04 | 氹仔側主樑梁端下游側外側 | 3.32 | -88.53 | 0.95 |

4. 豎向撓度監測數據分析

4.1. 監測測點佈置

主樑豎向撓度監測點佈置在上、下游主跨八等分點、邊跨四等分點，基準點安裝在西灣側主塔塔梁結合處，各測點佈置如圖 4-1 所示。

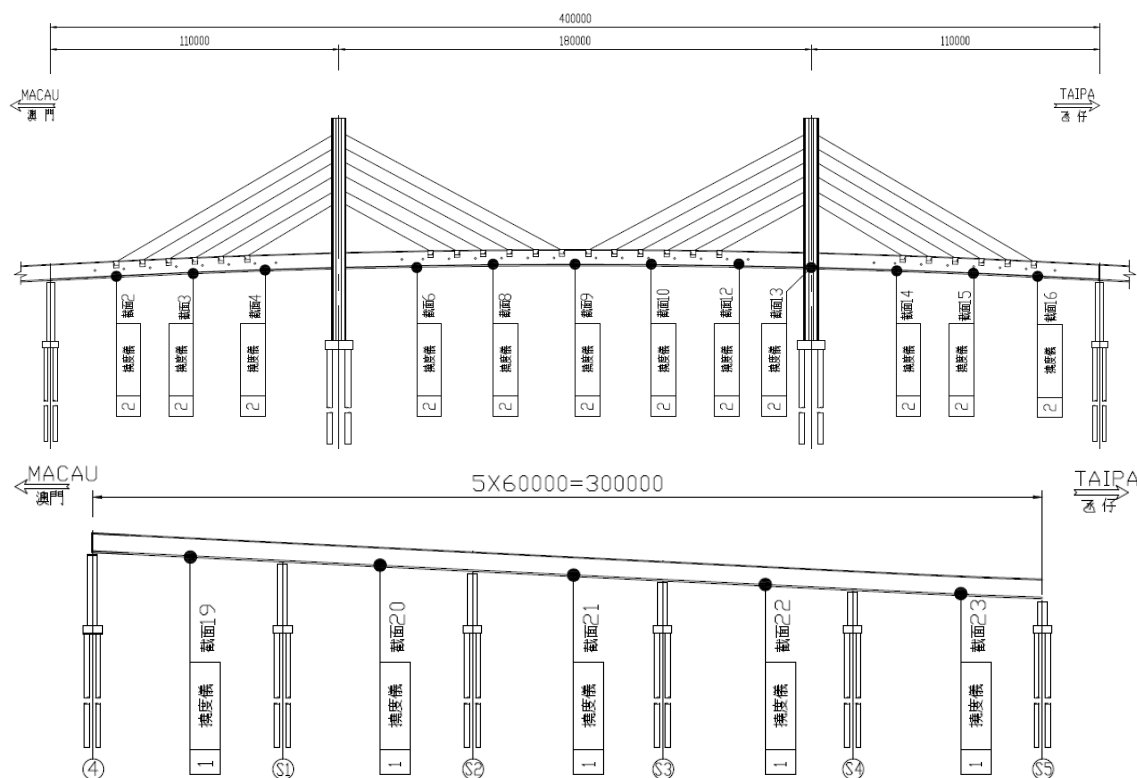
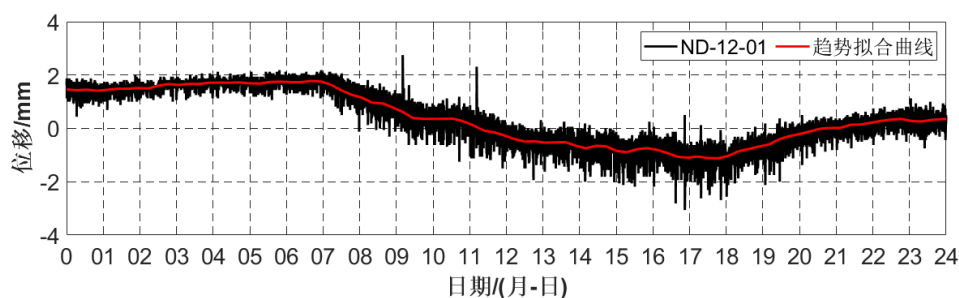


圖 4-1 主樑豎向撓度監測點佈置圖

4.2. 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。可以看出，由於白天車流量變多，在上午 6 時後出現密集的毛刺，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一天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負相關。



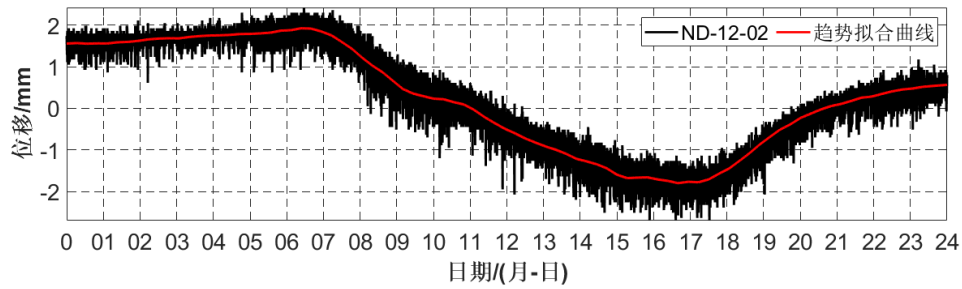


圖 4-2 主跨跨中測點位移時程

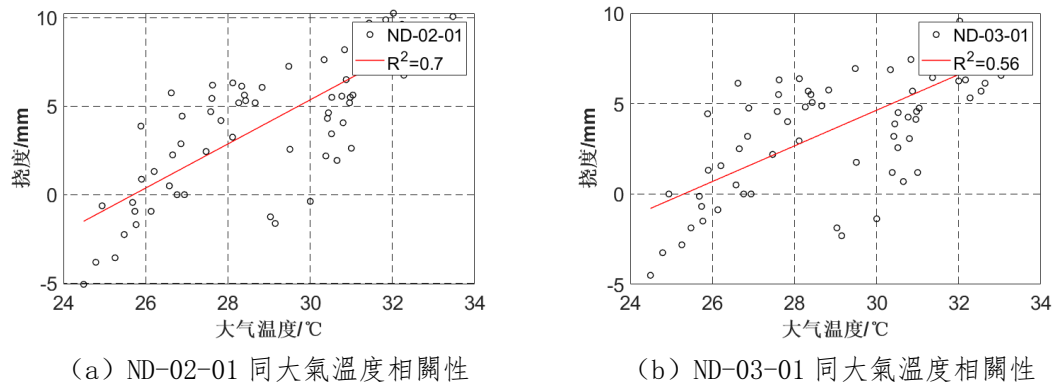


圖 4-3 溫度作用引起梁體變形相關性

各測點的位移最值見圖 4-4，可以看到斜拉橋主樑豎向位移 17.3 mm，最小 -23.1mm，結構運營正常。

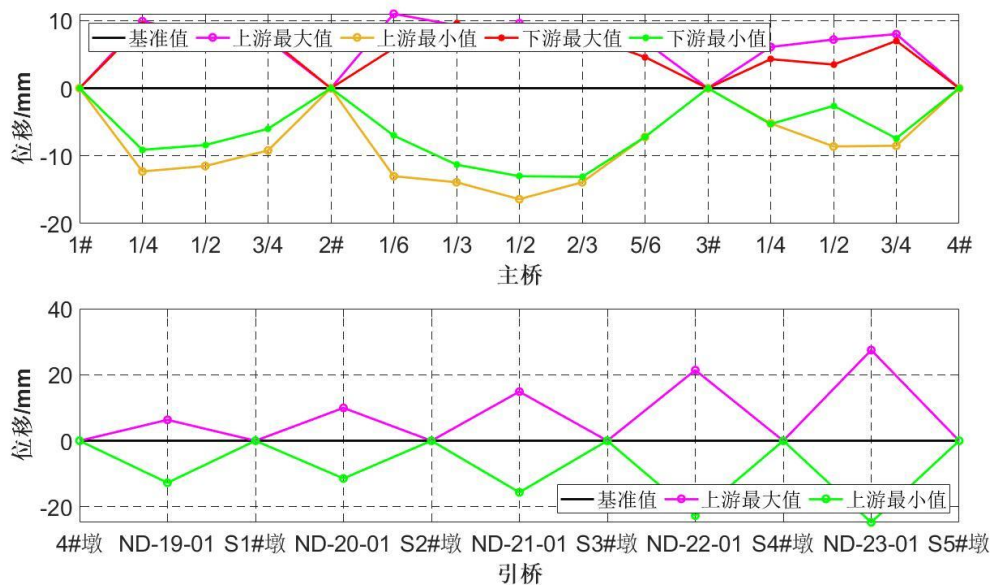


圖 4-4 主樑豎向位移統計分佈

4. 3. 主樑線形分析

2021 年 3 月 26 日，對撓度傳感器進行維護，維護後初始值調整，以穩定後 3 月 26 日 00:00:00 至 01:00:00 時段監測數據的平均值作為新相對高程初始值，

取 2021 年 5 月 15 日 00:00:00 至 01:00:00 時段監測數據的平均值（環境溫度 28.4℃），作為本季度主樑代表線形，將結果同本系統相對高程初始值（環境溫度 31.8℃）相比較，可以看出，上下游對應測點同初始值基本重疊，主樑整體線形良好。

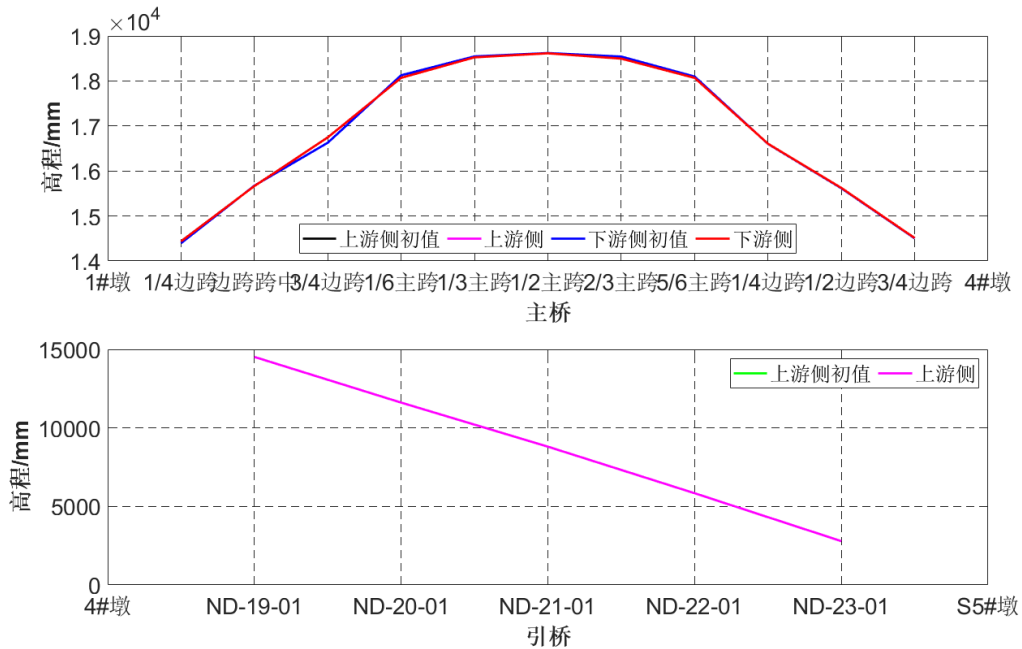


圖 4-5 主樑線形

5. 應力數據分析

5.1. 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#塔梁結合和邊跨跨中截面箱梁的頂板底板和腹板，具體測點佈置如圖 5-1、圖 5-2 所示。

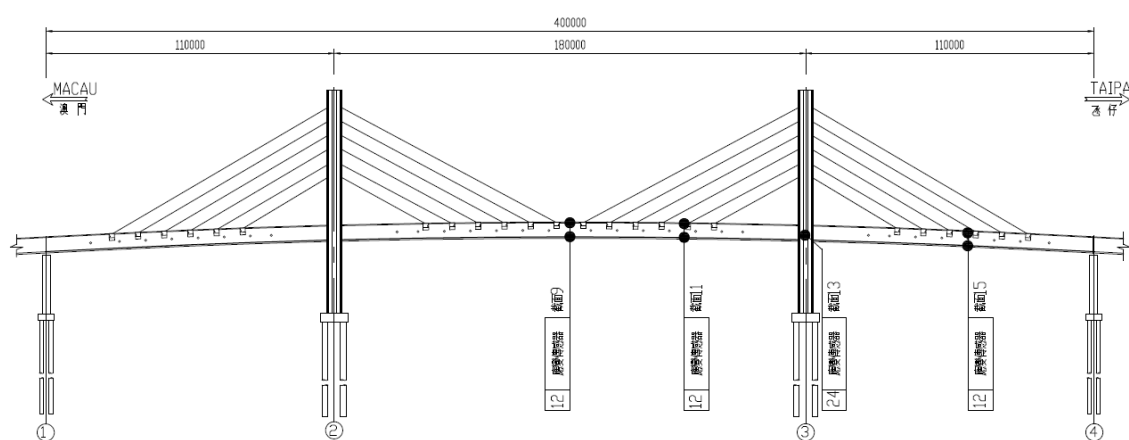


圖 5-1 主樑應力監測點佈置圖

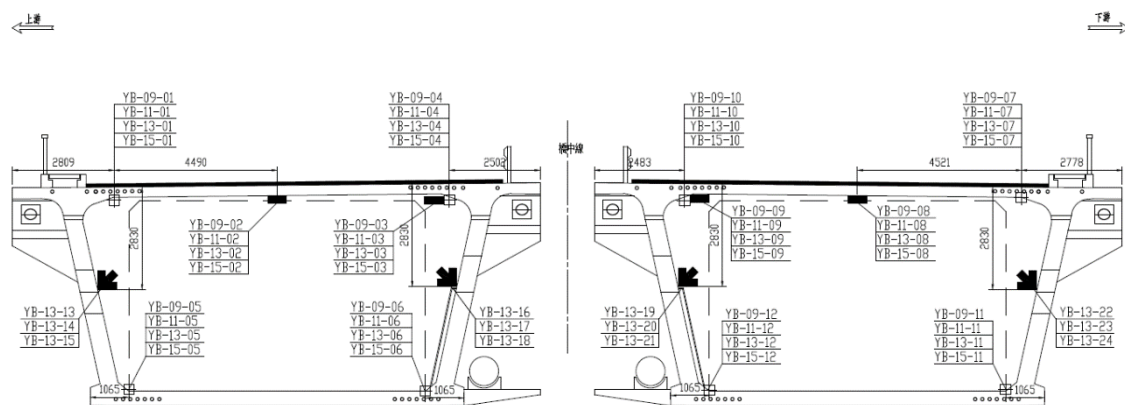


圖 5-2 主樑應力監測點斷面圖

5.2. 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 5-3 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。主橋主跨跨中和 3/4 截面和 3#塔梁結合和邊跨跨中截面箱梁的頂板底板和腹板各測點的混凝土應力極值應力均在限值之內。

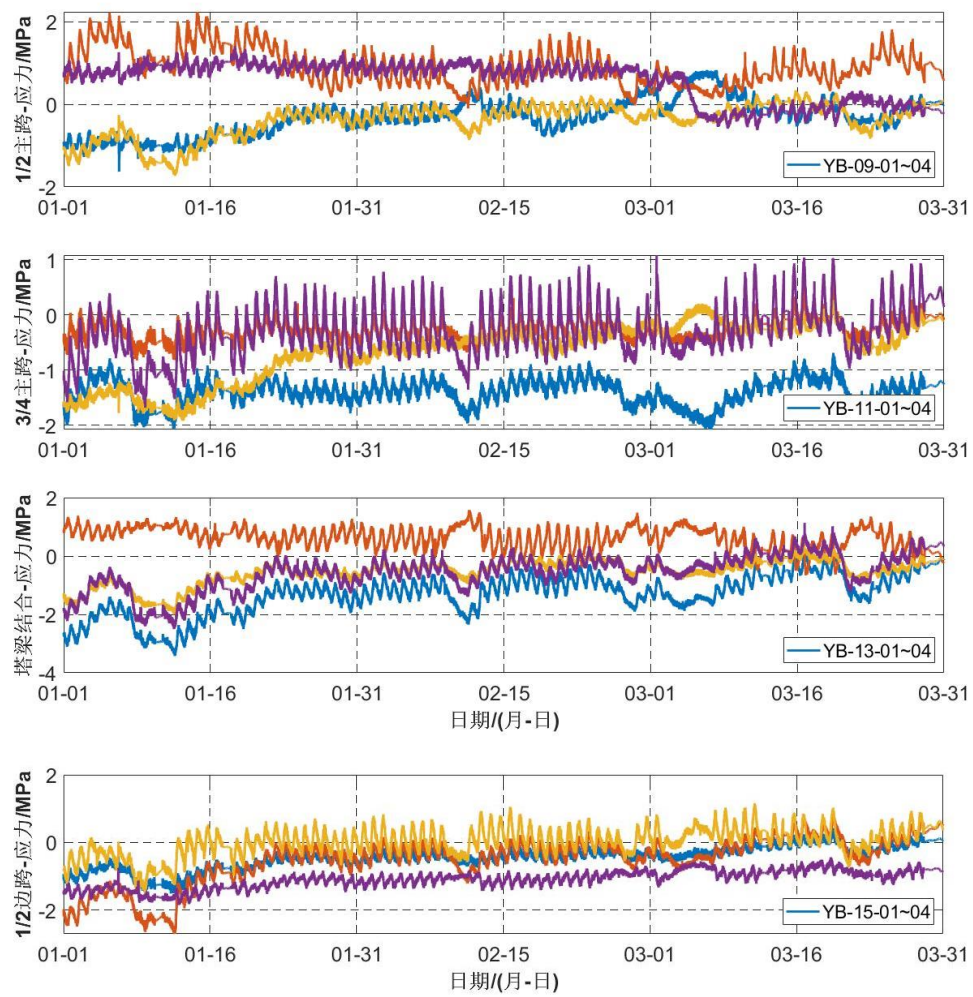


圖 5-3 主樑應力時程圖

6. 索力監測數據分析

6.1. 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 6-1 所示，下游側測點沿橋軸對稱佈置。

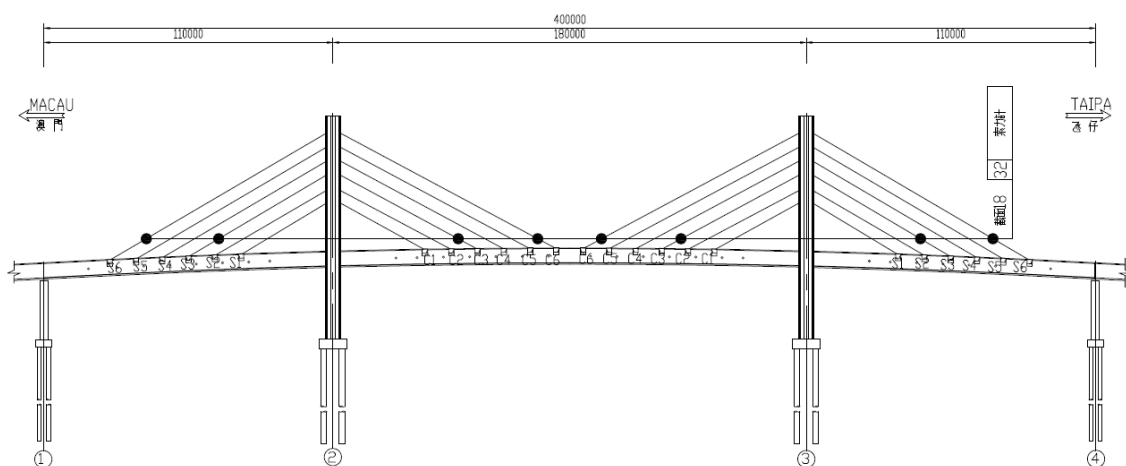


圖 6-1 索力測點佈置

6.2. 拉索索力分析

6.2.1. 加速度時程及頻譜分析

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時程（8 月 5 日）和頻譜功率譜圖分別如圖 6-2、圖 6-3 所示。

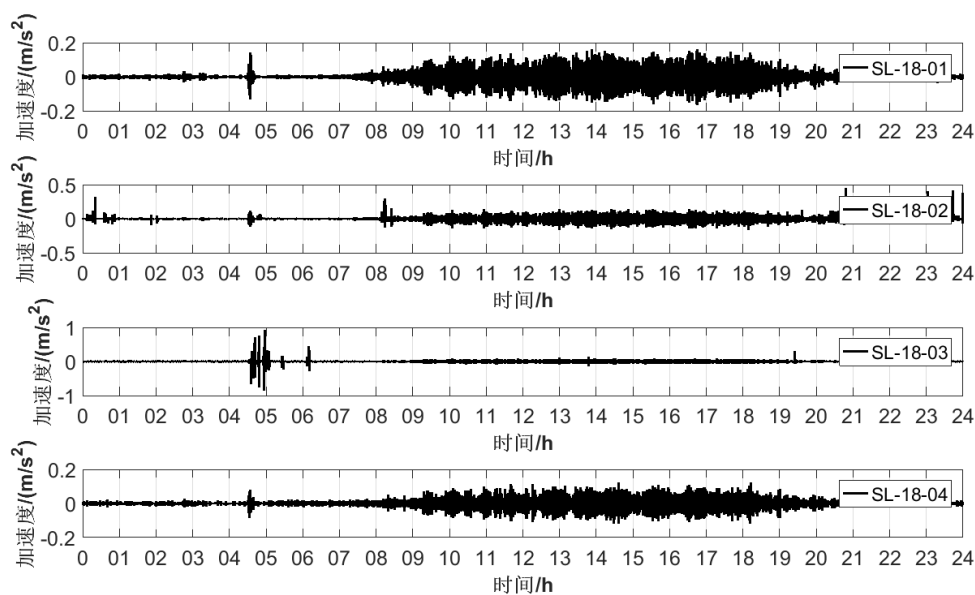


圖 6-2 拉索加速度時程圖

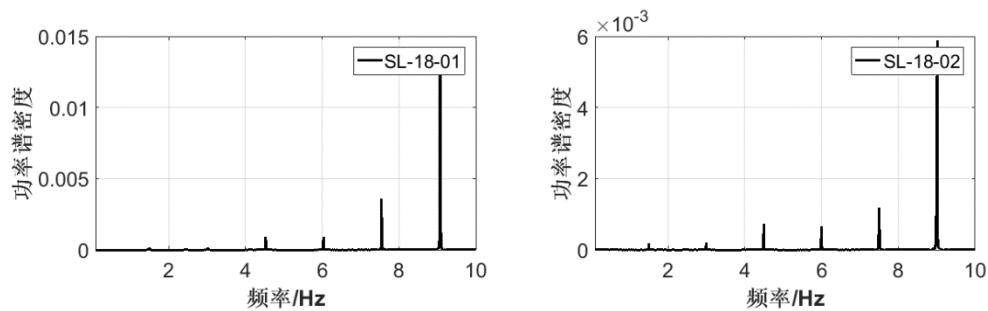


圖 6-3 拉索加速度功率譜圖

6.2.2. 拉索振動頻率分析

將 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日每天 00:00~01:00 振動時程數據分析獲取拉索基頻，典型的基頻時程如圖 6-4a 所示，頻次圖如圖 6-4b 所示。取各斜拉索基頻頻次最高的值作為本期監測斜拉索基頻，各傳感器測得斜拉索基頻基本穩定。

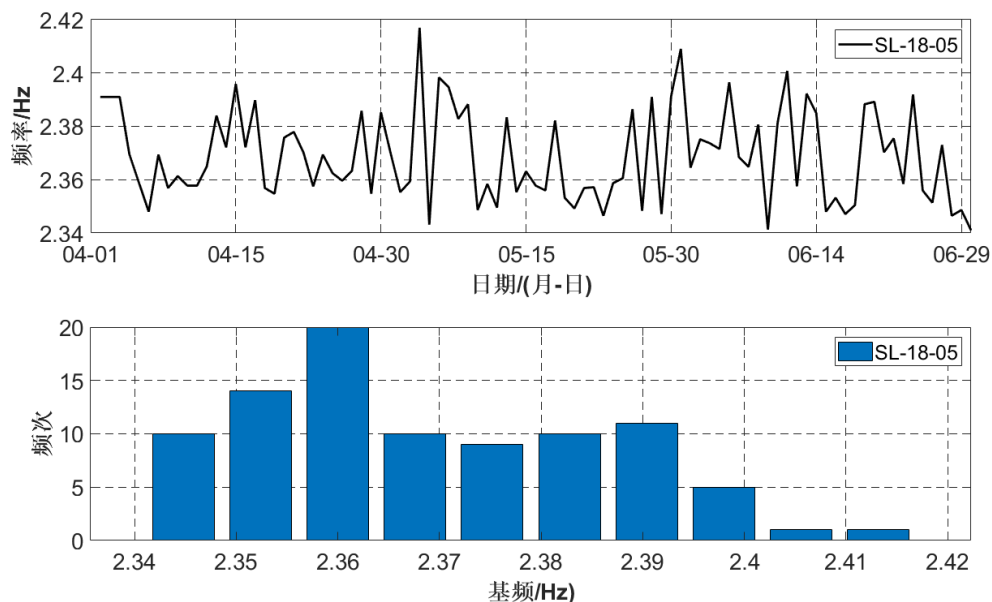


圖 6-4 拉索基頻分佈圖

6.2.3. 拉索監測索力分析

將 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日每天 00:00~01:00 振動時程分析獲取拉索索力，典型的索力時程如圖 6-5a 所示，頻次圖如圖 6-5b 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，得出各傳感器測得斜拉索基頻基本穩定。

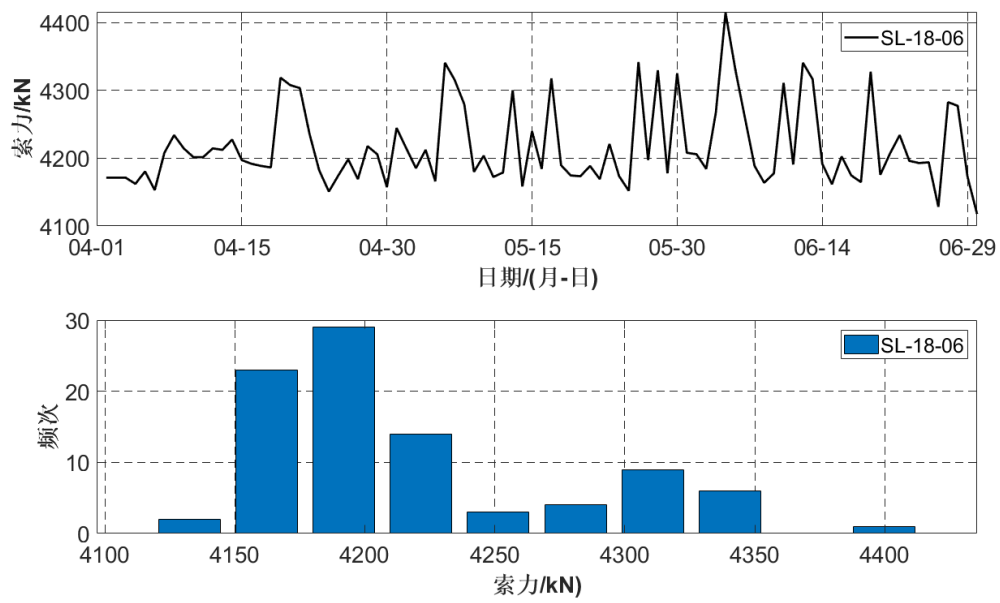


圖 6-5 拉索索力時程及頻次分佈圖

7. 振動監測數據分析

7.1. 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 7-1 所示，下游側測點沿橋軸對稱佈置。

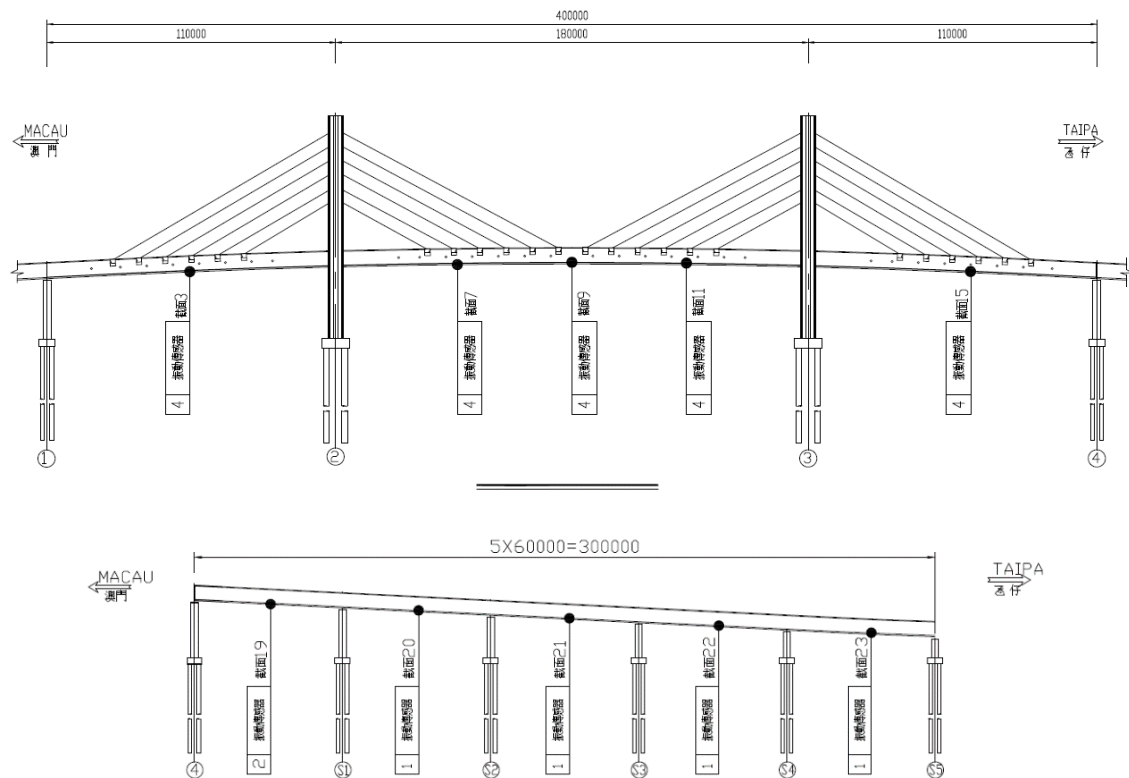


圖 7-1 動力響應測點佈置

7.2. 加速度監測數據分析

以部分傳感器在 2 月 15 日的加速度監測數據為例進行分析，其加速度變化時程曲線如下圖所示。可以看出，由於白天車流量變多，在上午 6 時後加速度響應非常明顯。採用峰值法辨識西灣大橋結構的振動頻率，得到橋樑前 2 階豎彎頻率 0.772Hz、1.031Hz，與計算模態頻率較為接近，橫彎頻率測量值 0.636Hz、1.060Hz。

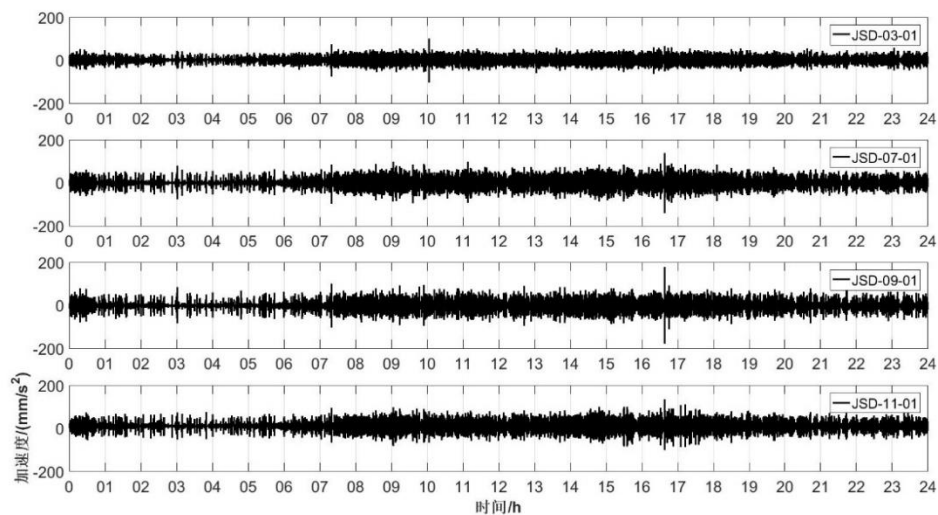


圖 7-2 加速度監測時程圖

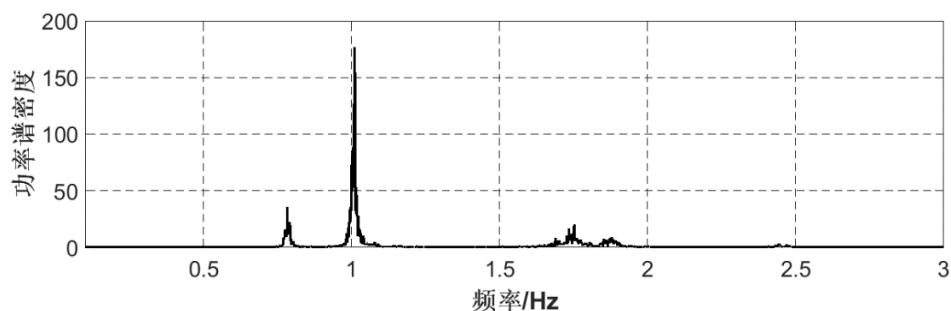


圖 7-3 豎向加速度合成功率譜

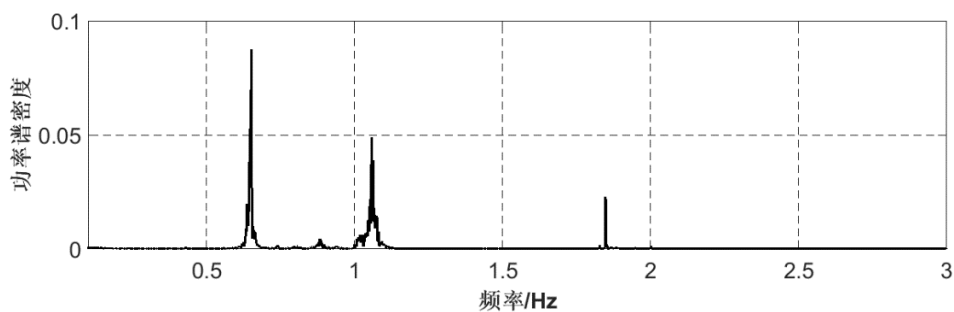


圖 7-4 橫向速度合成功率譜

本季度每日凌晨溫度區間為 $24^{\circ}\text{C}\sim 34^{\circ}\text{C}$ ，將該溫度區間每隔 1°C 等間距劃分，計算對應時刻主樑自振頻率，進一步分析主樑自振頻率同溫度間的相關變化規律。得到二者之間相關散點分佈圖如圖 7-5 所示，可以看出，頻率與溫度的相關性散點分佈比較離散，呈現明顯的帶狀分佈特徵，其中規律有待進一步數據累積研究。

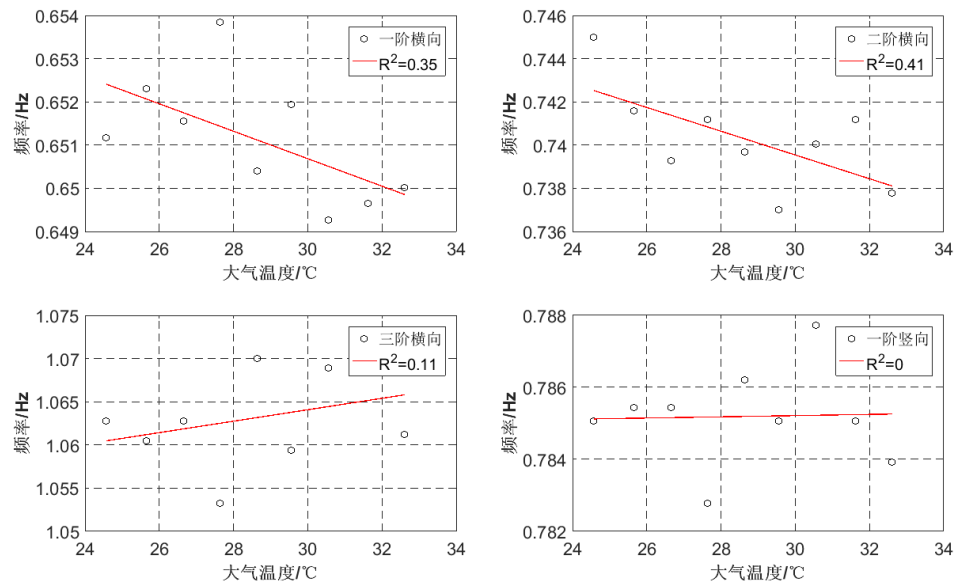


圖 7-5 主樑各階頻率同溫度相關性

8. 腐蝕計數據分析

由於監測週期較短、無法得出結果，故暫不分析混凝土監測數據，在年度分析報告中做具體分析。

9. 監測結論與建議

9.1. 監測結論

通過對西灣大橋 2021 年 4 月 1 日至 6 月 30 日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、梁端位移、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，最大平均風速 16.76m/s，最大瞬時風速 19.53m/s，橋址附近主導風向為北風、西南風；

(2) 橋址處外部環境溫度變化較大，大氣最高溫度為 34.26℃，最低為 17.29℃，樑內溫度變化平緩，同大氣溫度保持相近的變化趨勢；環境及樑內大氣相對濕度較高，有大約 76 天大氣相對濕度在 70%以上，占 84.86%；樑內大氣濕度最高 100%，平均濕度 72.84%左右；

(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 44.09℃（WD-09-08），最低 23.12℃（WD-13-06）；溫度變化幅度為 8~17℃；

(4) 梁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；梁端傾角同溫度及跨中撓度間保持較高的線性相關性；

(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；同一位置梁端上下游位移基本無偏差，位移變化無異常；

(6) 主樑豎向位移變化正常，主要受溫度影響；梁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) 監測斜拉索基頻、索力同初始監測值相比，僅有小幅偏差，基本保持穩定；

9.2. 建議

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。