

友誼大橋結構健康監測系統 2021 年度服務

數據分析簡報

(第二季度)



中交公路規劃設計院有限公司

二零二一年八月

目 錄

1 監測數據分析.....	1
1.1 結構響應數據分析.....	1
1.1.1 支座伸縮縫位移對稱性分析.....	1
1.1.2 主梁結構應變分析（剔除溫度效應）.....	2
1.1.3 動力特性分析.....	7
1.2 環境溫濕度分析.....	19
1.2.1 環境溫度.....	19
1.2.2 環境濕度.....	21
2 結論與建議.....	23

1 監測數據分析

友誼大橋監測系統監測數據分為結構回應類資料與環境類資料兩大類。結構回應類分為靜力回應和動力回應，靜力回應主要包括應變、撓度等；動力回應主要體現在主橋振動和斜拉索振動。

本數據分析簡報對大橋支座伸縮縫、主梁應變、動力特性以及環境溫濕度進行分析與評估。

本次報告為八月份編制，監測分析數據的時間涵蓋 7 月份。

1.1 結構響應數據分析

結構響應分為靜力回應和動力回應，靜力回應主要包括結構應變、位移等；動力回應主要體現在主橋振動特性。

1.1.1 支座伸縮縫位移對稱性分析

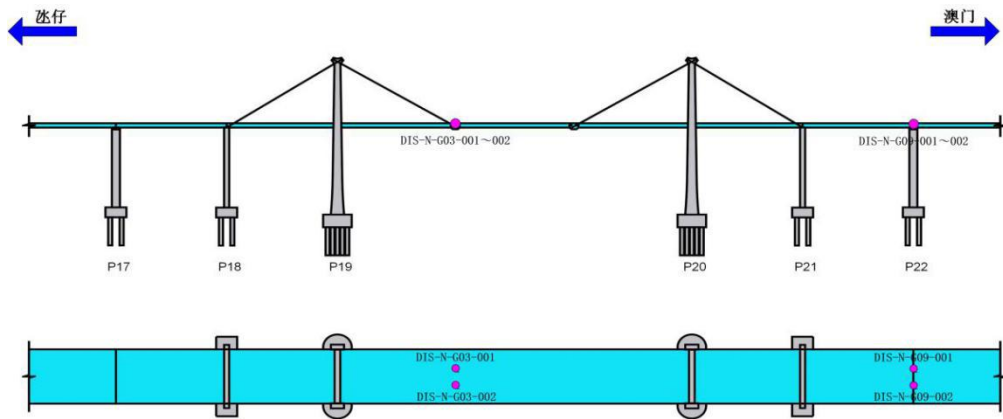


圖 1.1.1-1 內主橋梁端位移計監測點佈置圖

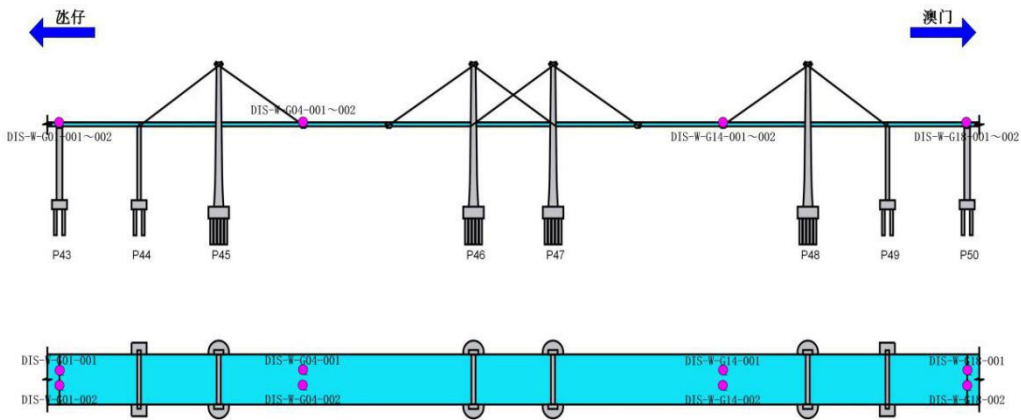


圖 1.1.1-2 外主橋梁端位移計監測點佈置圖

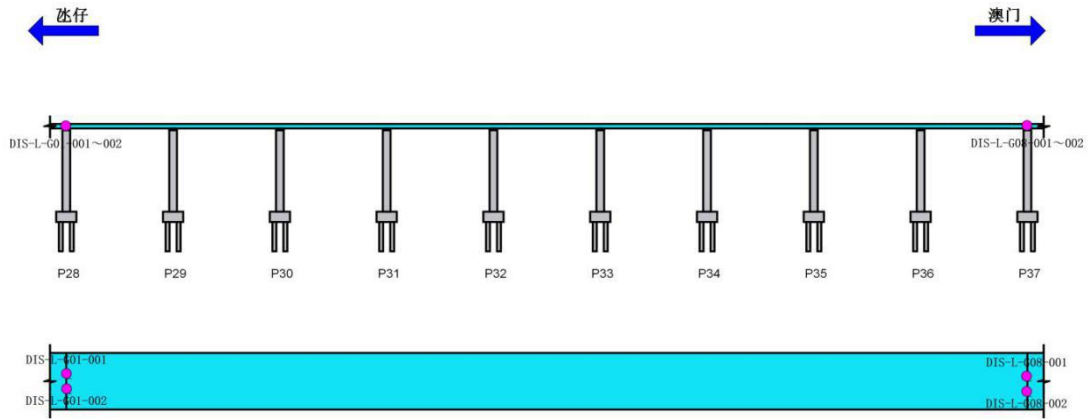


圖 1.1.1-3 連續梁梁端位移計佈置圖

將同一截面的上下游感測器位移監測值繪製在同一幅圖中，檢查橋樑結構的縱向變形對稱性。

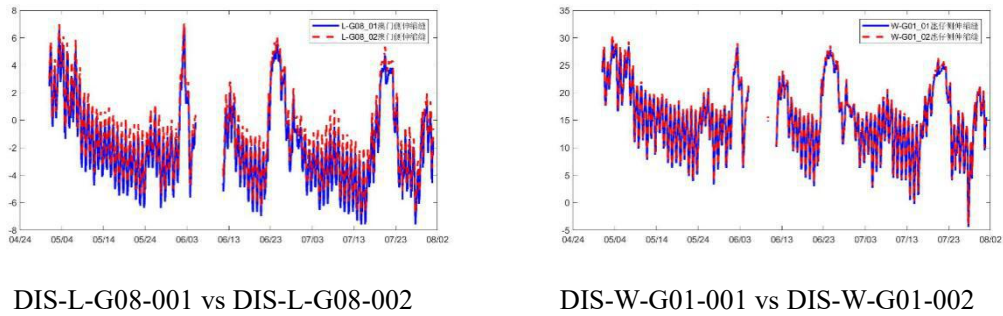


圖 1.1.1-4 上下游位移對稱圖

通過上下游的位移計數值對比可以看出，同一截面的上下游感測器的位移變化趨勢、大小保持一致，具有較好的對稱性。

1.1.2 主梁結構應變分析（剔除溫度效應）

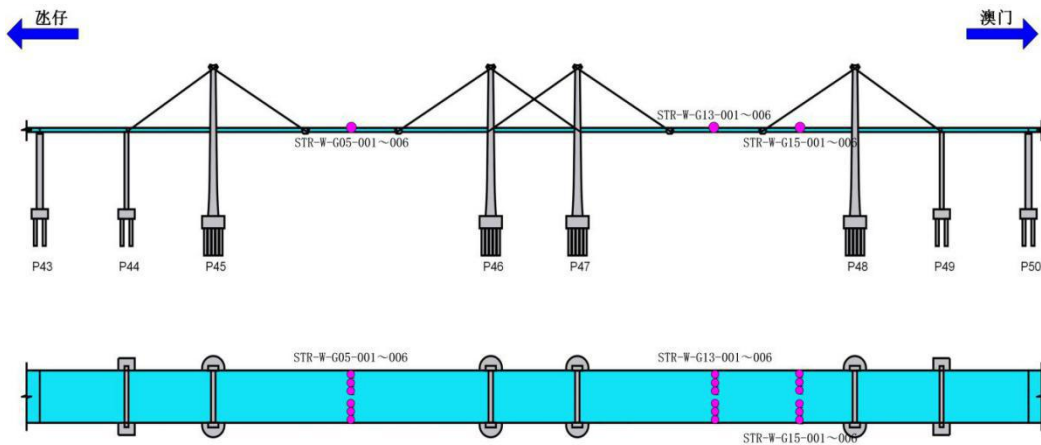


圖 1.1.2-1 外主橋應變監測點佈置圖

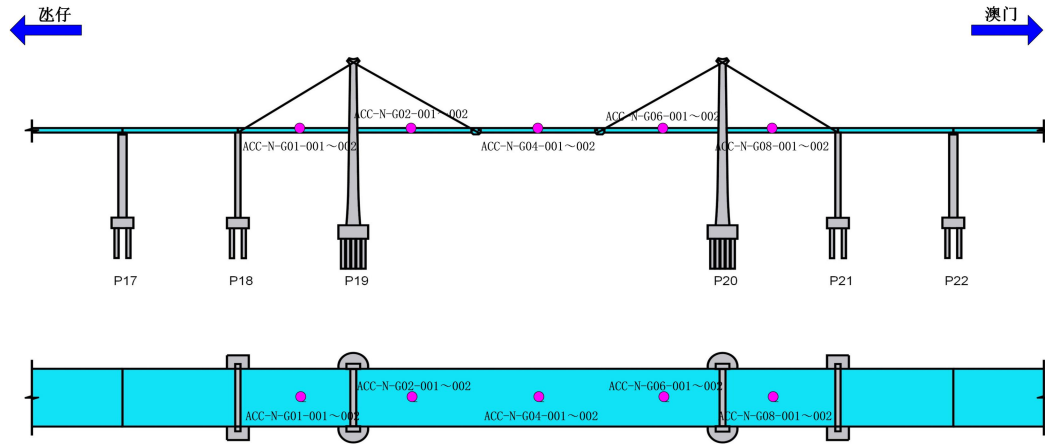


圖 1.1.2-2 內主橋應變監測點佈置圖

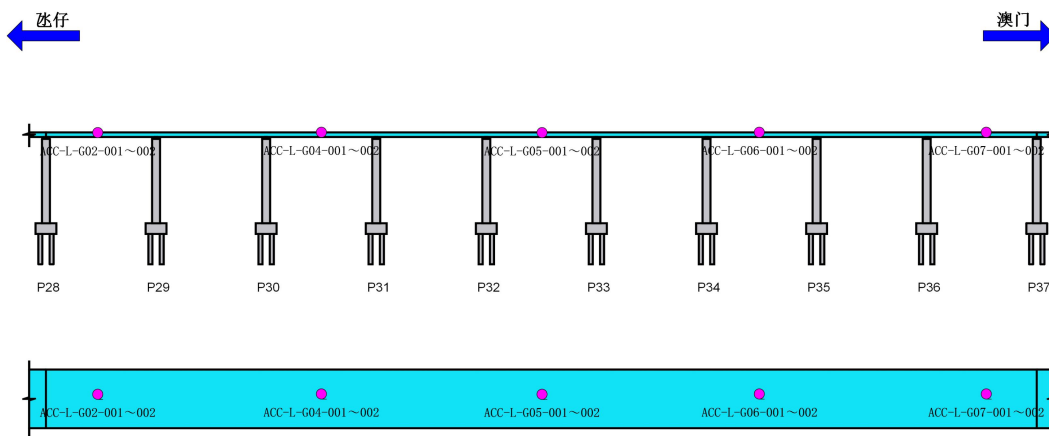
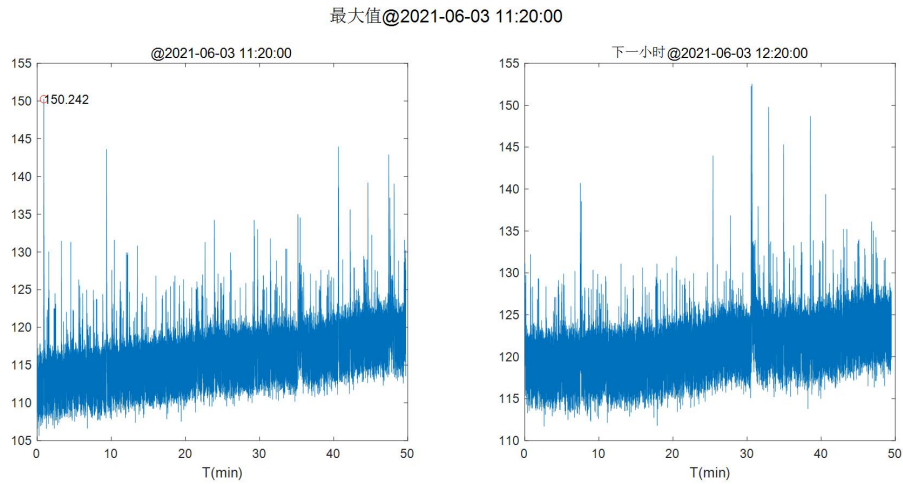


圖 1.1.2-3 連續梁應變監測點佈置圖

1.1.2.1 外主橋應變統計分析

表 1.1.2-1 單點統計最值表

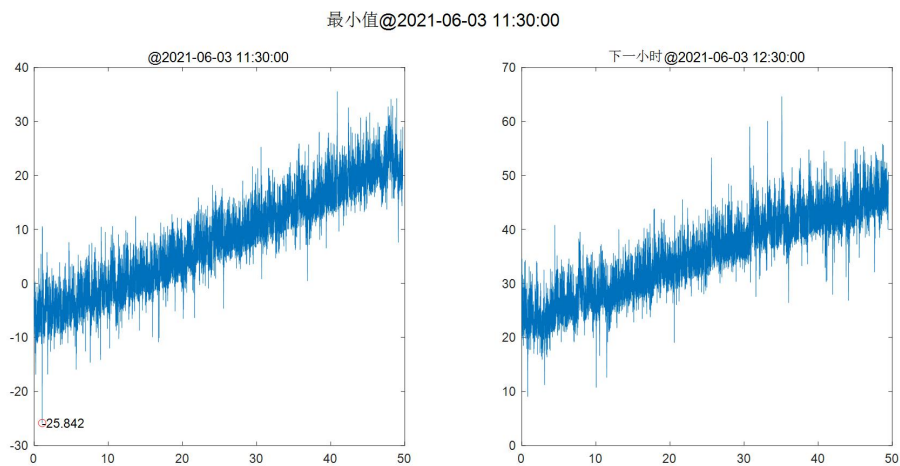
各最值	編號	最大值	時間	最小值	時間	變化量 / $\mu\epsilon$	位置
最大值	STR-W-G 15-006	34.0	2021-06- 03 11:20	-10.9	2021-05-1 3 11:00	44.9	外主橋 G15 截面
最小值	STR-W-G 05-006	22.0	2021-06- 11 13:30	-21.5	2021-06-0 3 11:30	43.4	外主橋 G05 截面
變化量最 大值	STR-W-G 15-006	34.0	2021-06- 03 11:20	-10.9	2021-05-1 3 11:00	44.9	外主橋 G15 截面



最大值一小時原始時程圖

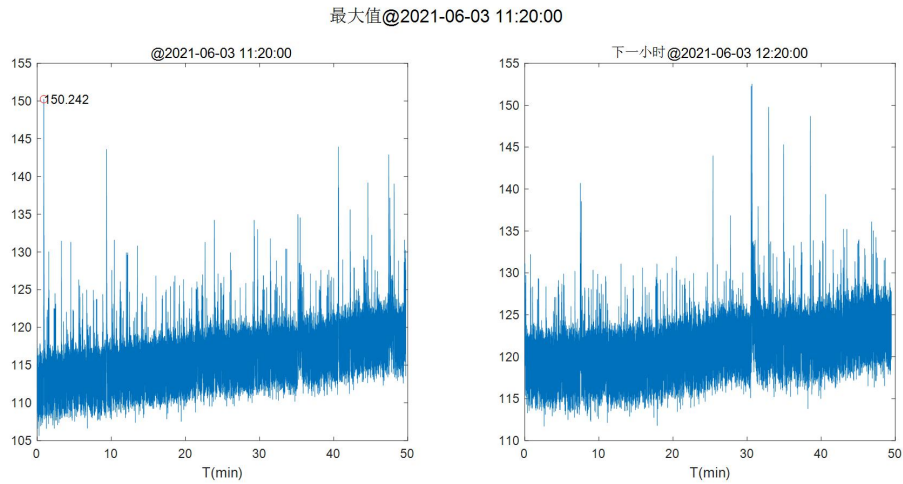
圖 1.1.2-4 應變最大值時程圖

以上分析表明，外主橋最大應變為 $34.02\mu\epsilon$ ，發生在外主橋 G15 截面（感測器編號：STR-W-G15-006），時間為 2021-06-03 11:20；對應時刻原始數據分析表明，該時段應變波動正常，最大暫態應變為 $150.24\mu\epsilon$ ，應變在 $105.64\sim 150.24\mu\epsilon$ 之間波動。



最小值一小時原始時程圖

以上分析表明，外主橋最小應變為 $-21.47\mu\epsilon$ ，發生在外主橋 G05 截面（感測器編號：STR-W-G05-006），時間為 2021-06-03 11:30；對應時刻原始數據分析表明，該時段應變波動正常，最小暫態應變為 $-25.84\mu\epsilon$ ，應變在 $-25.84\sim 35.53\mu\epsilon$ 之間波動。



最大值一小時原始時程圖

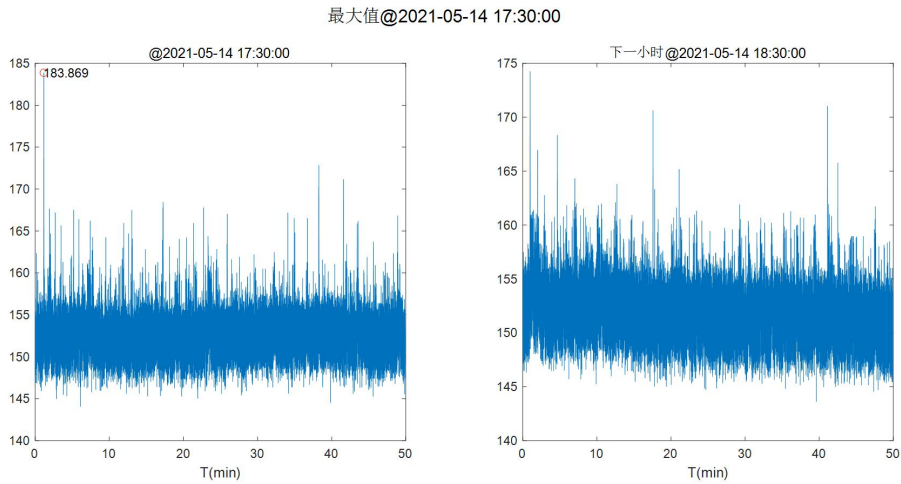
圖 1.1.2-5 應變變化值最大值時程圖

以上分析表明，外主橋最大應變變化為 $44.92\mu\epsilon$ ，發生在外主橋 G15 截面（感測器編號：STR-W-G15-006）；對應時刻原始數據分析表明，最大值對應時段應變波動正常，最大暫態應變為 $150.24\mu\epsilon$ ，應變在 $105.64\sim 150.24\mu\epsilon$ 之間波動；最小值對應時段應變波動正常，最小暫態應變為 $156.88\mu\epsilon$ ，應變在 $108.33\sim 156.88\mu\epsilon$ 之間波動。

1.1.2.2 連續梁應變統計分析

表 1.1.2-2 單點最值表

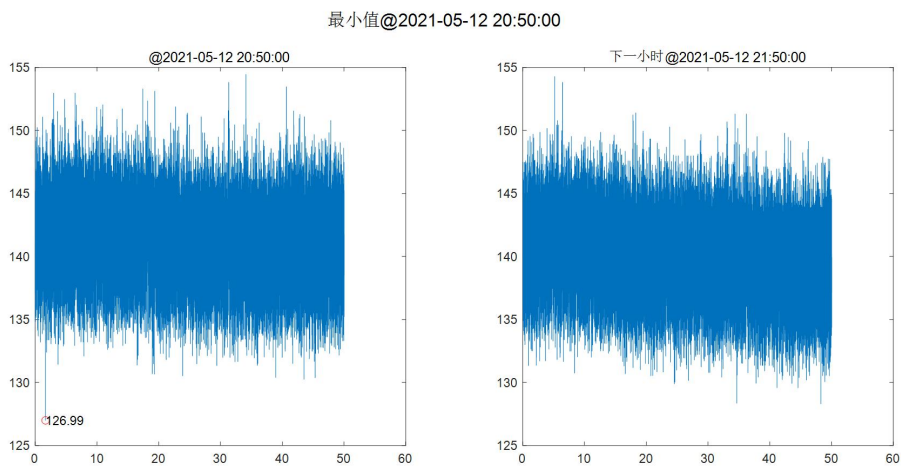
各最值	編號	最大值	時間	最小值	時間	變化量 / $\mu\epsilon$	位置
最大值	STR-L-G 02-002	29.1	2021-05- 14 17:30	-9.3	2021-05- 14 11:40	38.4	連續梁 G02 截面
最小值	STR-L-G 04-001	21.0	2021-05- 07 08:00	-14.8	2021-05- 12 20:50	35.7	連續梁 G04 截面
變化量 最大值	STR-L-G 02-002	29.1	2021-05- 14 17:30	-9.3	2021-05- 14 11:40	38.4	連續梁 G02 截面



最大值一小時原始時程圖

圖 1.1.2-6 應變最大值時程圖

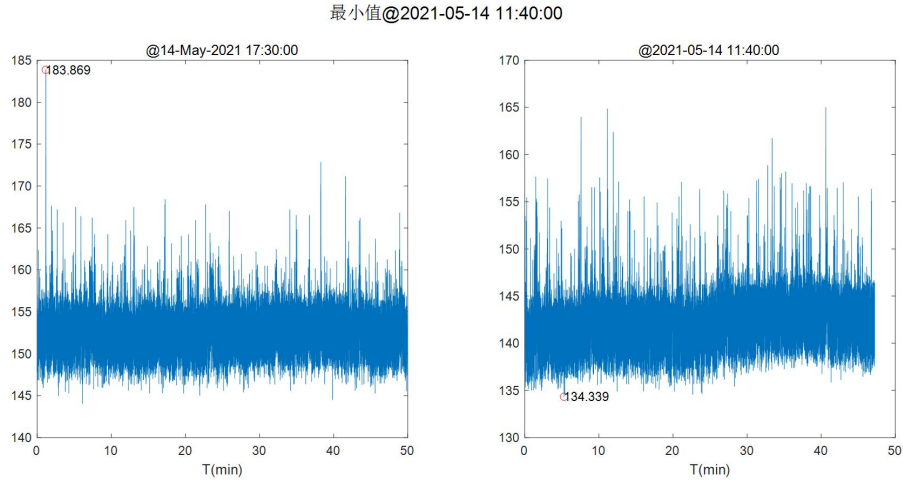
以上分析表明，連續梁最大應變為 $29.11\mu\epsilon$ ，發生在連續梁 G02 截面（感測器編號：STR-L-G02-002），時間為 2021-05-14 17:30；對應時刻原始數據分析表明，該時段應變波動正常，最大暫態應變為 $183.87\mu\epsilon$ ，應變在 $144.06\sim 183.87\mu\epsilon$ 之間波動。



最小值一小時原始時程圖

圖 1.1.2-7 應變最小值時程圖

以上分析表明，連續梁橋最小應變為 $-14.75\mu\epsilon$ ，發生在連續梁 G04 截面（感測器編號：STR-L-G04-001），時間為 2021-05-12 20:50；對應時刻原始數據分析表明，該時段應變波動正常，最小暫態應變為 $126.99\mu\epsilon$ ，應變在 $126.99\sim 154.45\mu\epsilon$ 之間波動。



變化值最大值一小時原始時程圖

圖 1.1.2-8 應變變化值最大值時程圖

以上分析表明，連續梁橋最大應變變化為 $38.44\mu\epsilon$ ，發生在連續梁 G02 截面（感測器編號：STR-L-G02-002）；對應時刻原始數據分析表明，最大值對應時段應變波動正常，最大暫態應變為 $183.87\mu\epsilon$ ，應變在 $144.06\sim 183.87\mu\epsilon$ 之間波動；最小值對應時段應變波動正常，最小暫態應變為 $165.01\mu\epsilon$ ，應變在 $134.34\sim 165.01\mu\epsilon$ 之間波動。

1.1.3 動力特性分析

1.1.3.1 外主橋模態識別結果

採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的外主橋 01:00~02:00 時長 1 小時的主梁振動數據，測點佈設如圖 1.1.3-1 所示。

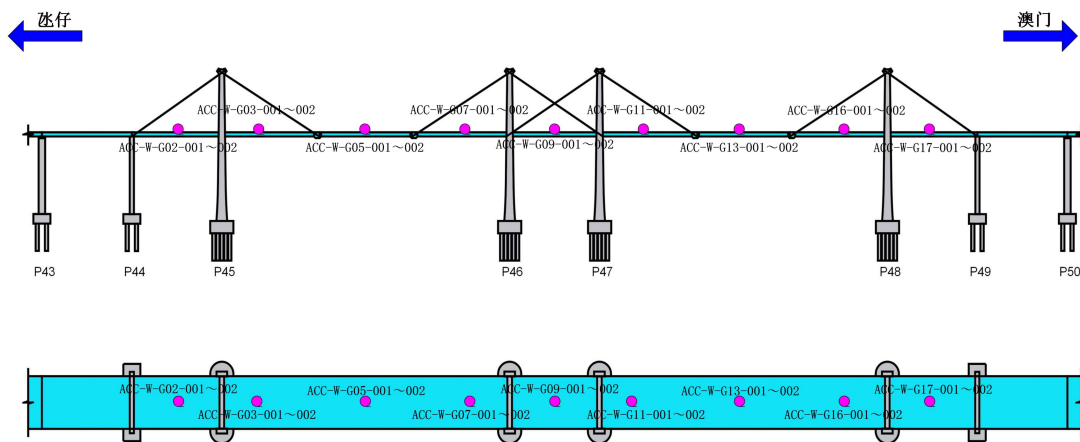


圖 1.1.3-1 外主橋加速度計佈置圖

首先根據測點佈設建立外主橋模態分析模型如下：

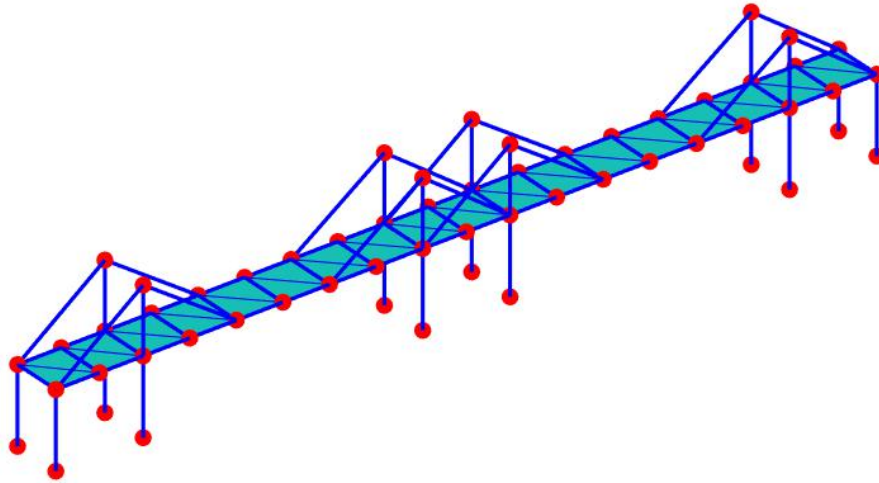


圖 1.1.3-2 外主橋模態識別模型

模態分析方法採用頻域分解法（FFD），模態頻率峰值拾取如下圖所示：

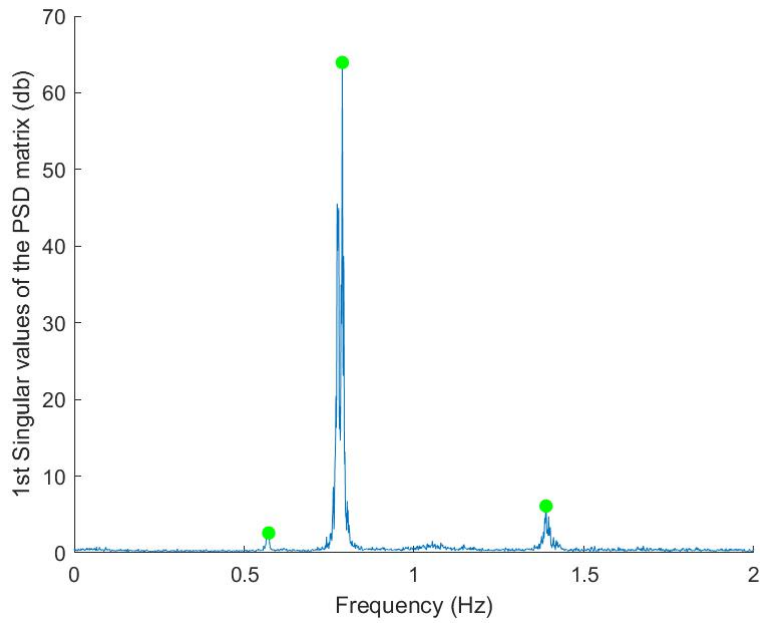


圖 1.1.3-3 外主橋模態頻率峰值拾取

實測振型和頻率詳見下表。

表 1.1.3-1 外主橋動力特性監測結果

階次	2021 年第二季度實測模態頻率	2021 年第一季度實測模態頻率	2020 年第一季度實測模態頻率	2020 年第二季度實測模態頻率	2020 年第三季度實測模態頻率
1	0.5695	0.5744	0.5711	0.5663	0.5664
2	0.7890	0.7788	0.7907	0.7896	0.7721

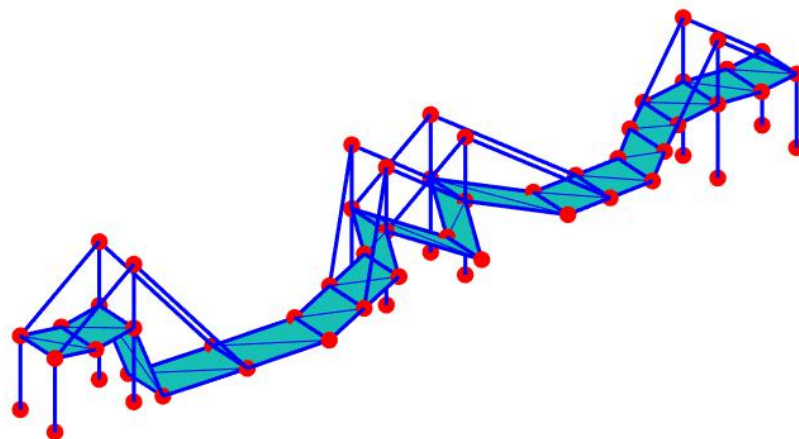


圖 1.1.3-5 第一階振型

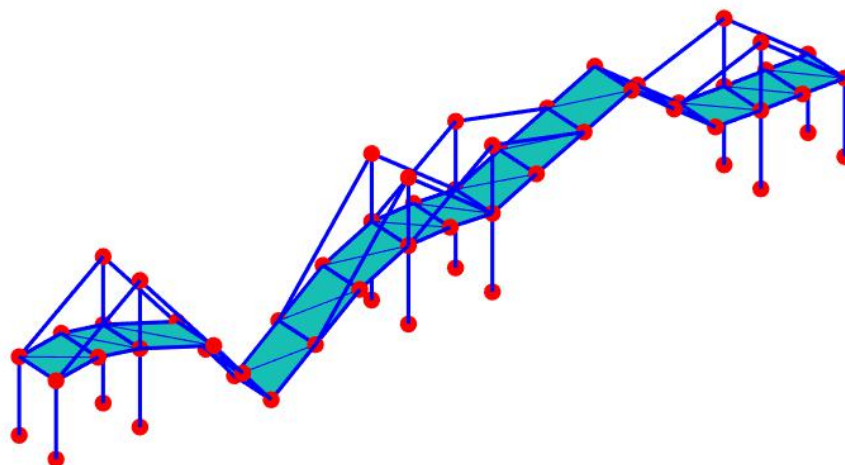


圖 1.1.3-6 第二階振型

1.1.3.2 內主橋模態識別結果

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的內主橋 01:00~02:00 時長 1 小時的主梁振動數據，測點佈設如圖所示。

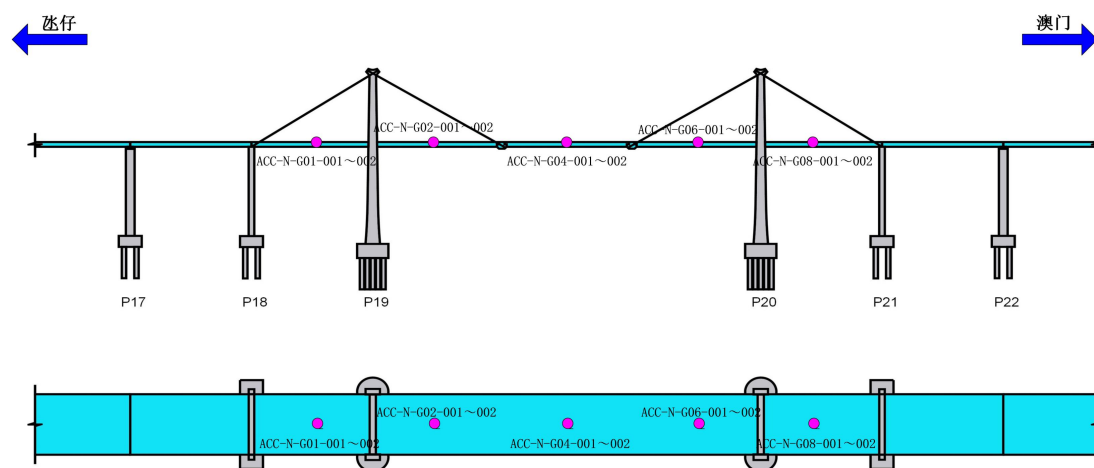


圖 1.1.3-7 內主橋加速度計佈置圖

根據測點佈設建立內主橋模態分析模型如下：

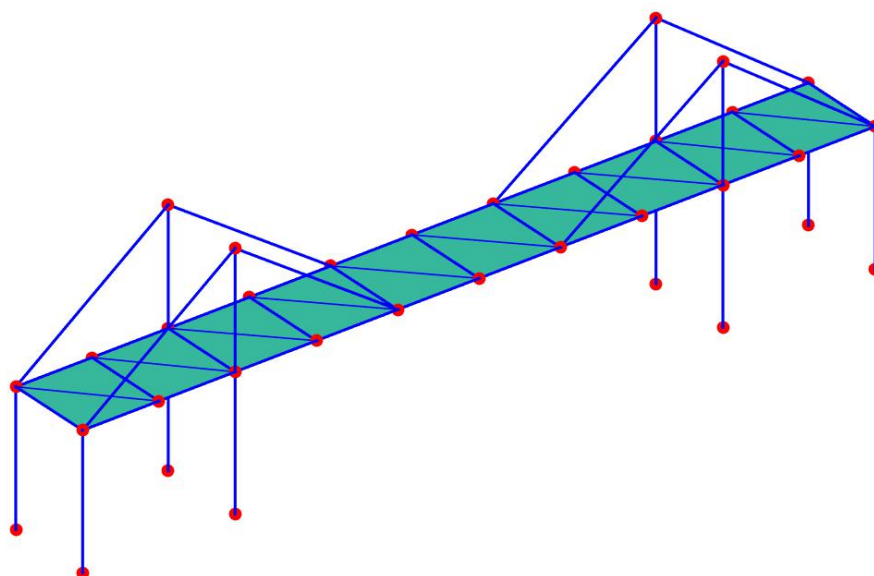


圖 1.1.3-8 內主橋模態識別模型

模態分析方法採用頻域分解法（FFD），模態頻率峰值拾取如圖所示：

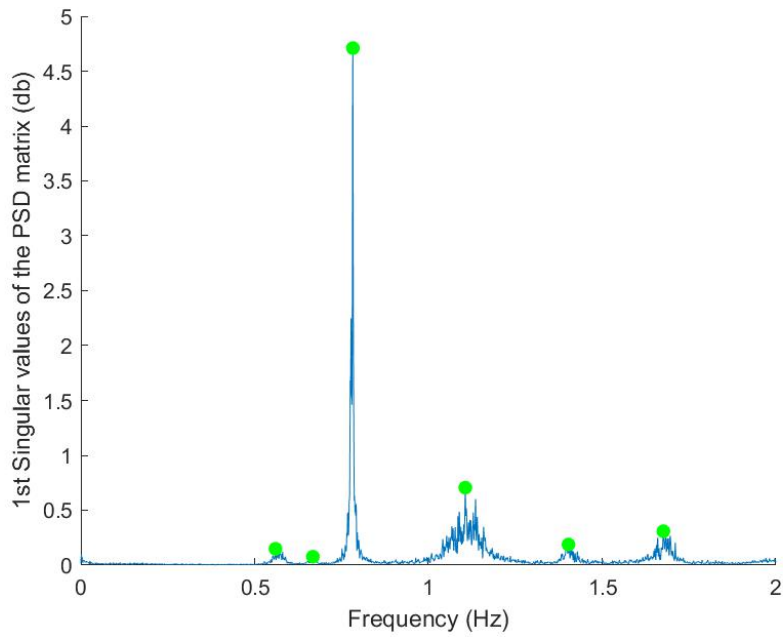


圖 1.1.3-9 內主橋模態頻率峰值拾取

實測頻率詳見下表。

表 1.1.3-2 內主橋動力特性監測結果

階次	2021 年 5~7 月 實測模態頻率 (Hz)	2021 年 1~4 月 實測模態頻率 (Hz)	2020 年第一 季度實測模態 頻率 (Hz)	2020 年第二 季度實測模態 頻率 (Hz)	2020 年第三 季度實測模態 頻率 (Hz)
1	0.5694	0.5692	0.58	0.57	0.56
2	0.6701	0.66697	0.66	0.67	0.67
		-	0.72	0.74	-
3	0.7820	0.7849	0.78	-	0.78
		-	0.81	0.81	0.81
		-	1.00	1.00	1.01
4	1.1125	1.1069	1.20	1.20	-
5	1.4038	1.4047	1.39	1.39	1.39
6	1.6812	1.6838	-	1.68	1.68

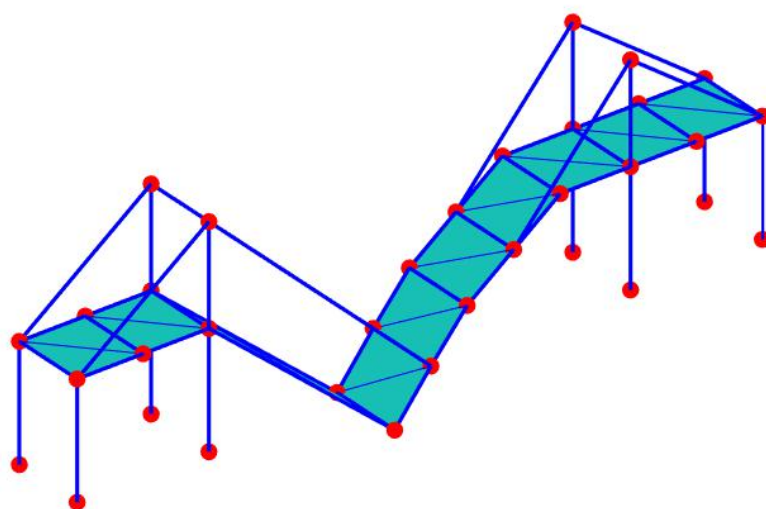


圖 1.1.3-10 第一階振型

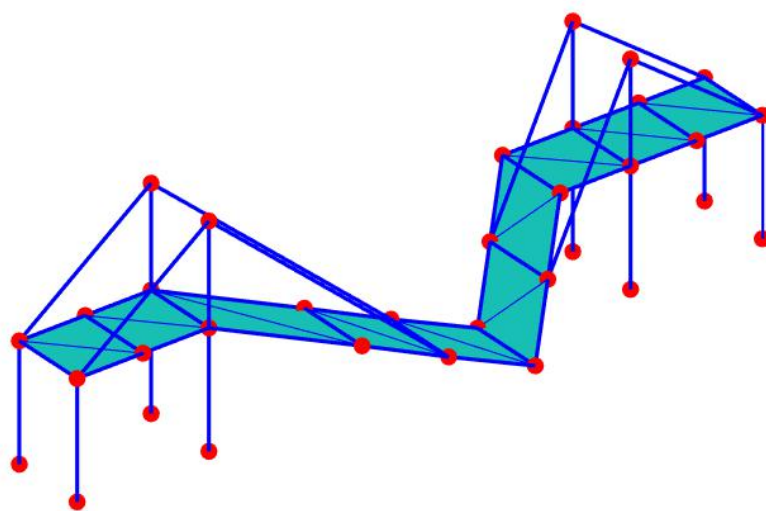


圖 1.1.3-11 第二階振型

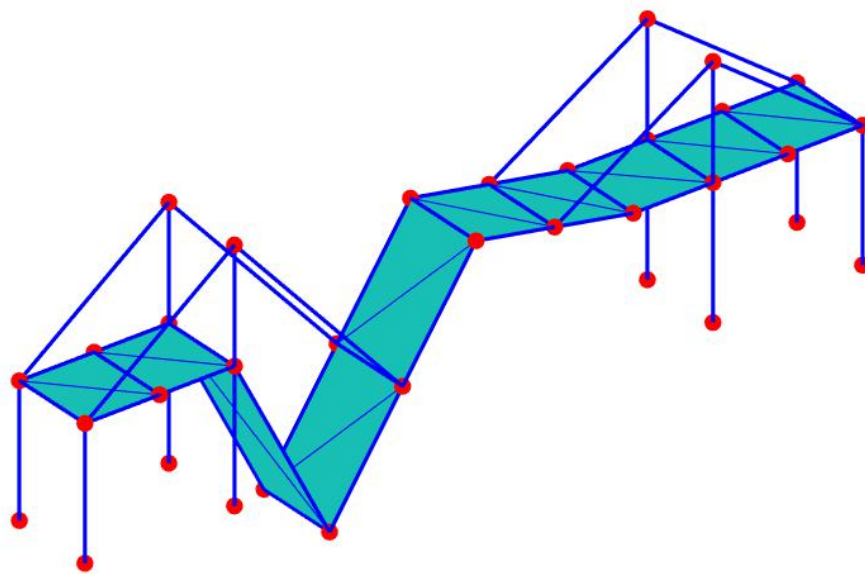


圖 1.1.3-12 第三階振型

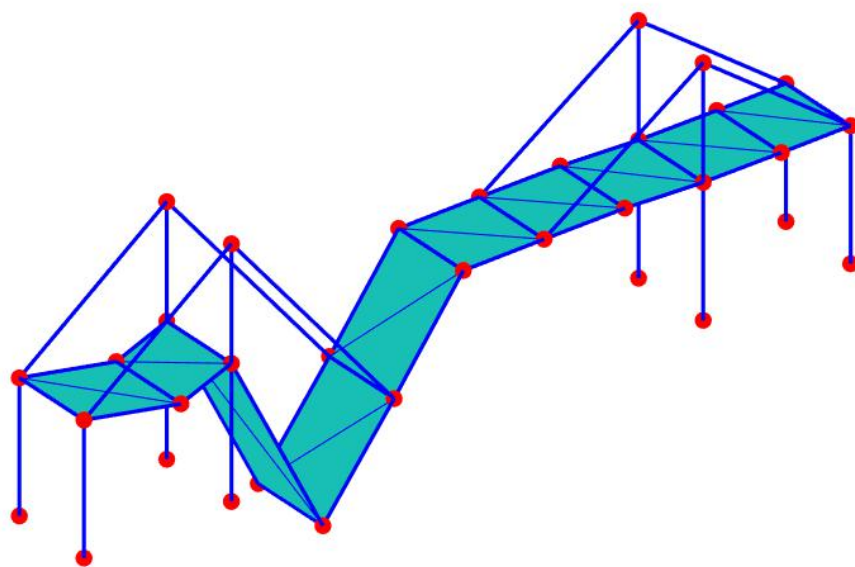


圖 1.1.3-13 第四階振型

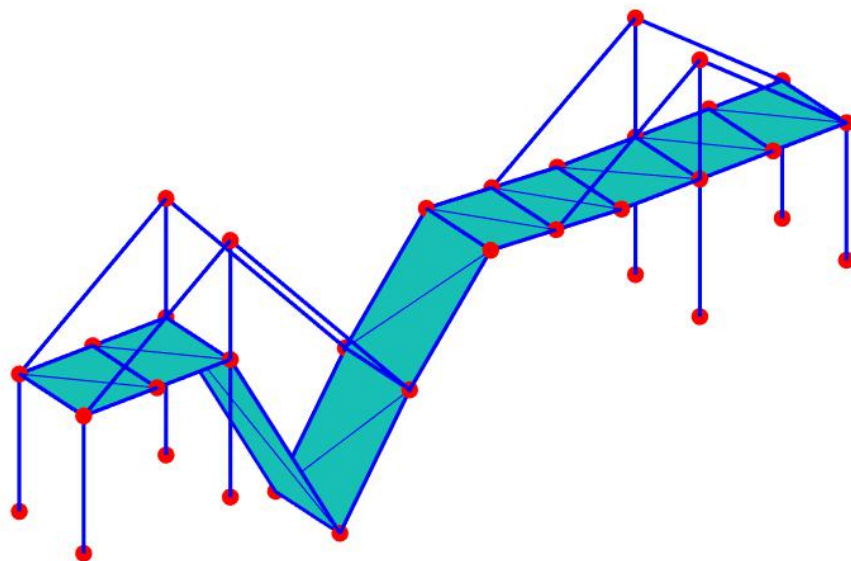


圖 1.1.3-14 第五階振型

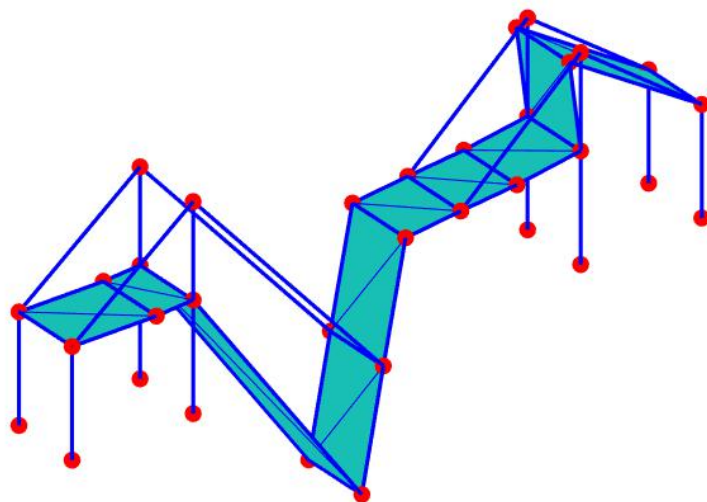


圖 1.1.3-15 第六階振型

1.1.3.3 連續梁橋模態識別結果

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的連續梁橋 10:00~11:00 時長 1 小時的主梁振動數據，測點佈設如圖所示。

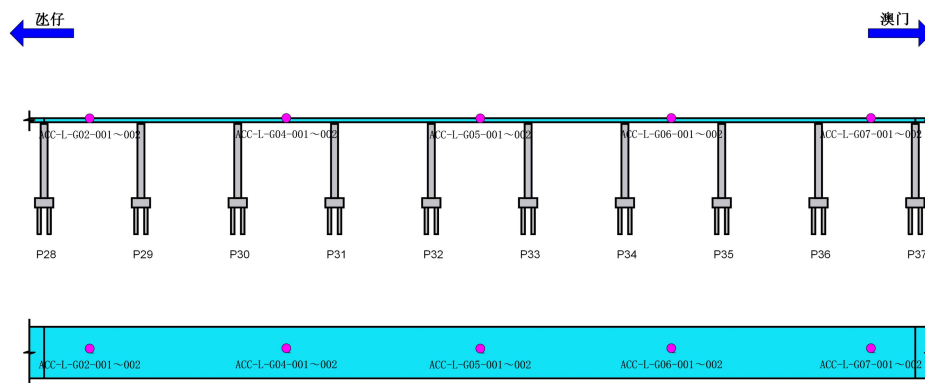


圖 1.1.3- 16 高架連續梁振動監測點佈置圖

分析採用澳門友誼大橋結構健康監測系統監測到的主梁振動數據。首先根據測點佈設建立高架連續梁橋模態分析模型如下：

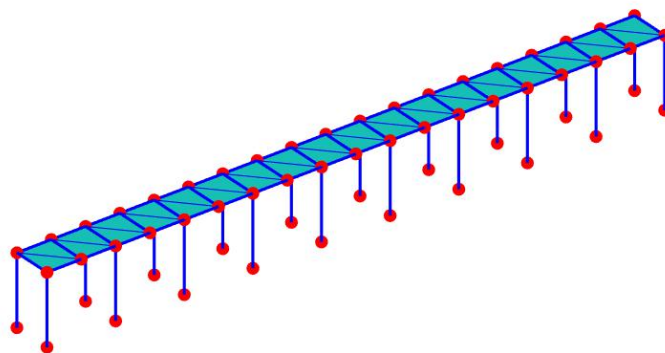


圖 1.1.3- 17 高架連續梁模態識別模型

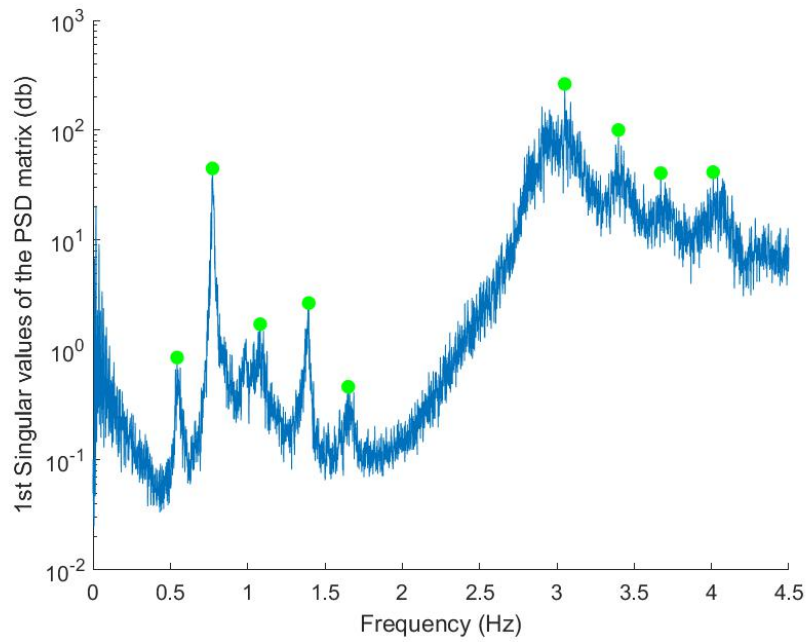


圖 1.1.3-18 連續梁模態頻率峰值拾取

實測振型和頻率詳見下表。

表 1.1.3-3 連續梁動力特性監測結果

階次	2021 年 5~7 月實測模態頻率 (Hz)	2021 年 1~4 月實測模態頻率 (Hz)	2020 年第一季實測模態頻率 (Hz)	2020 年第二季實測模態頻率 (Hz)	2020 年第三季實測模態頻率 (Hz)
	0.5513	0.5532	0.57	0.56	0.57
1	0.7739	0.7779	0.78	0.78	0.78
2	1.0788	1.0808	1.07	1.09	1.10
3	1.3913	1.4040	1.39	1.39	1.40
	165.09	1.6765	1.67	1.66	1.68
4	3.0511	3.0799	3.07	2.94	3.07
6	3.3928	3.4005	3.44	3.45	3.40
7	3.6721	3.7354	3.71	-	3.68
8	4.0191	4.0779	4.01	4.01	4.02

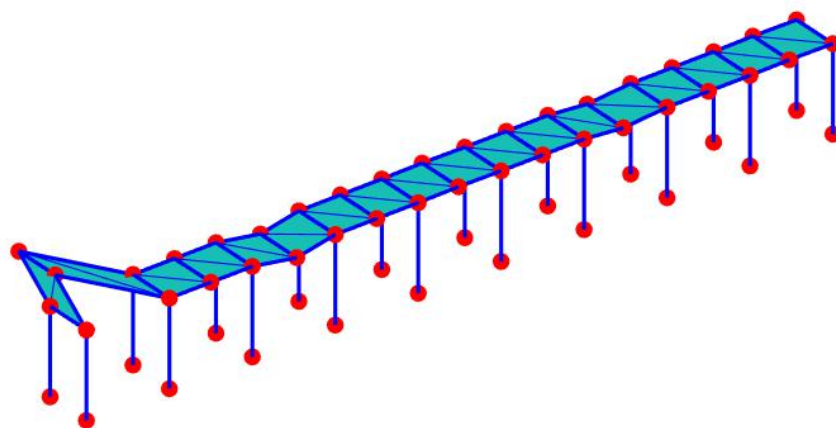


圖 1.1.3-19 連續梁第 3 階模態

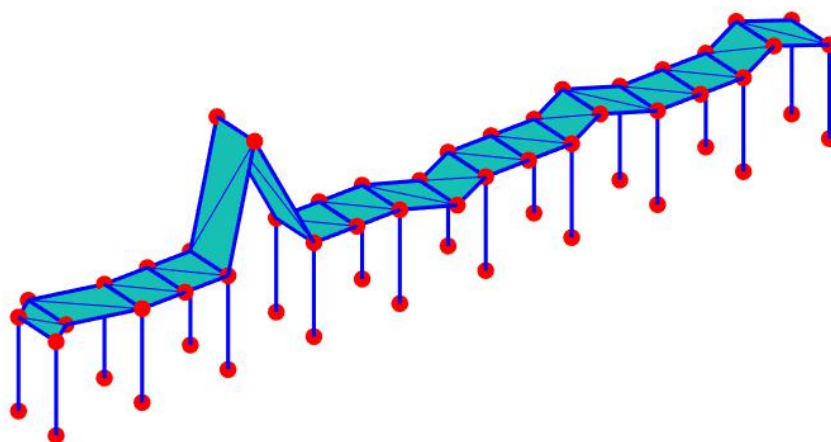


圖 1.1.3-20 連續梁第 4 階模態

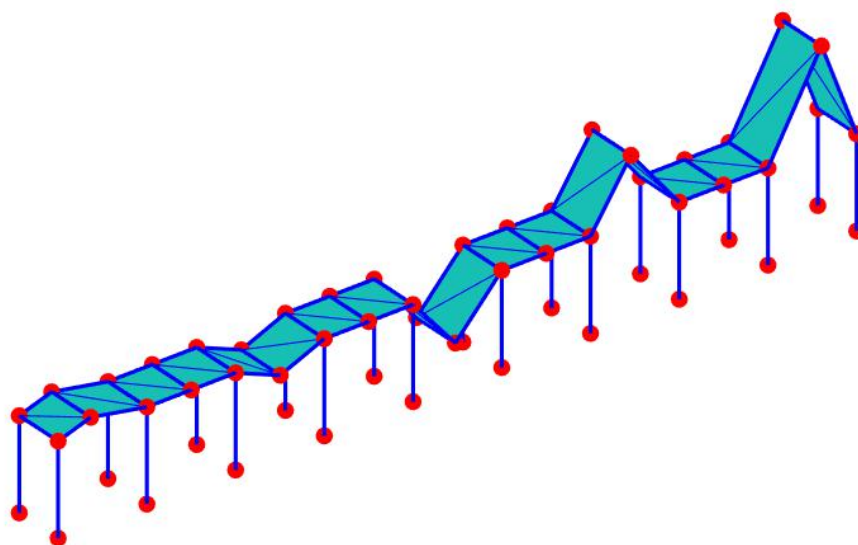


圖 1.1.3-21 連續梁第 6 階模態

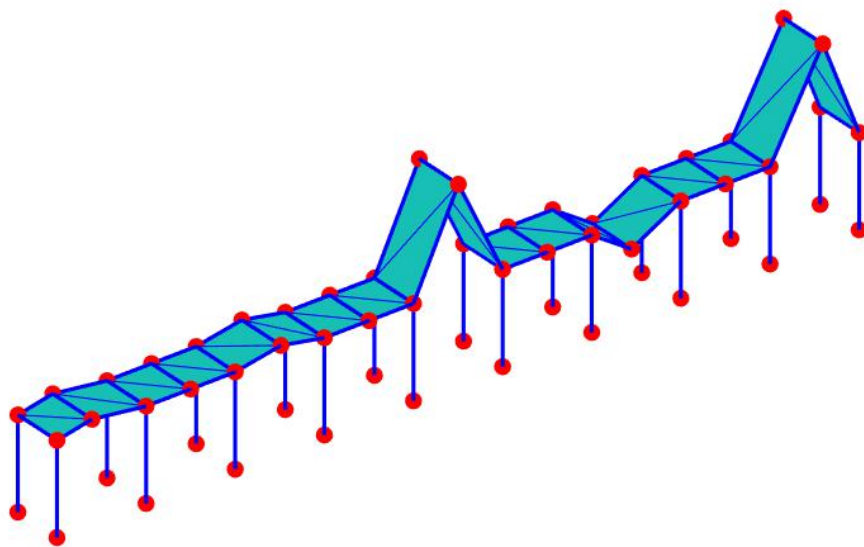


圖 1.1.3-22 連續梁第 7 階模態

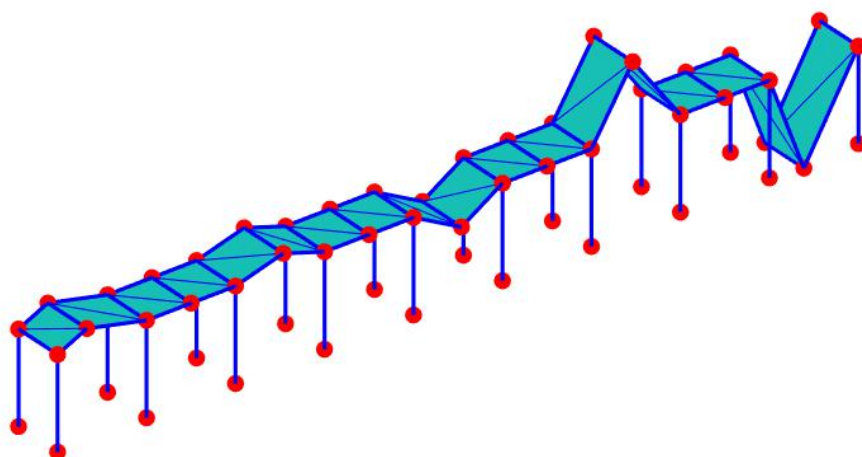


圖 1.1.3-23 連續梁第 8 階模態

綜上，與其它時段相比，模態頻率差異很小，可以認為是演算法誤差。因此，可以判定友誼橋動力特性、邊界條件未發生明顯改變。

1.2 環境溫濕度分析

1.2.1 環境溫度

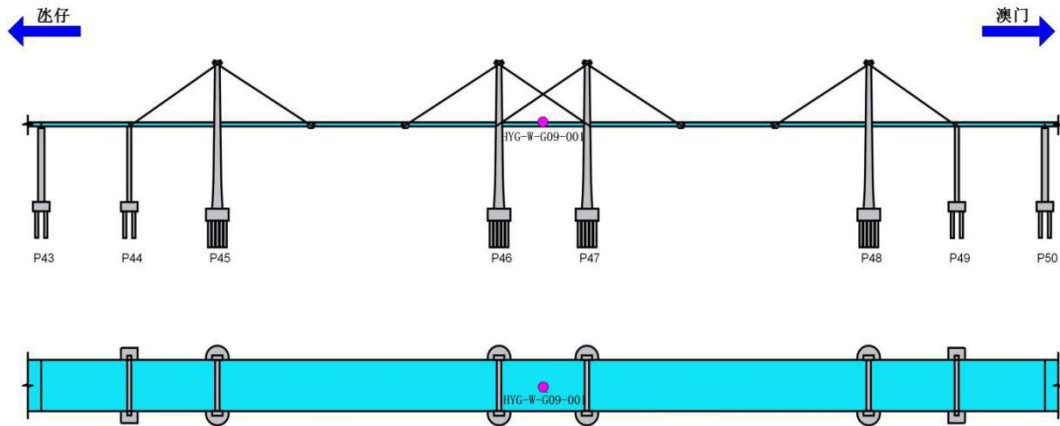


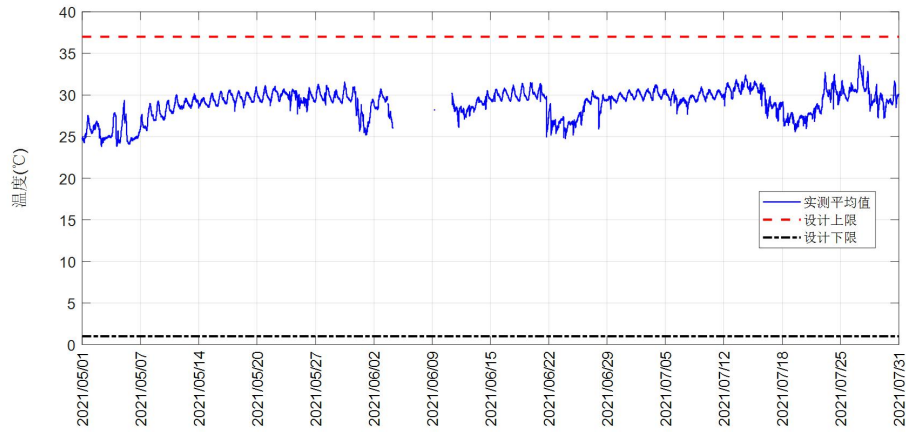
圖 1.2.1-1 外主橋橋面溫濕度佈置

表 1.2.1-1 環境溫濕度監測點資訊一覽表

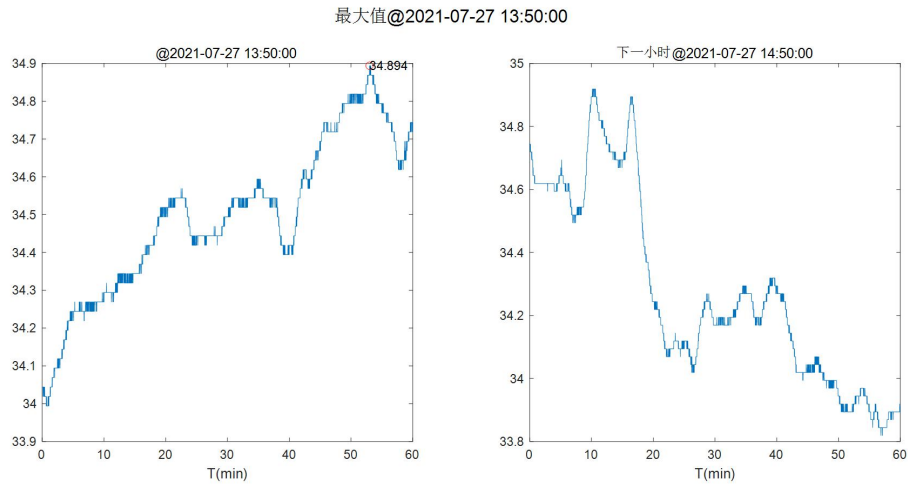
感測器編號	位置	監測項	數量
HYG-W-G09-001-濕度	P46、P47 墩間橋面跨中	濕度	1
HYG-W-G09-001-溫度	P46、P47 墩間橋面跨中	溫度	1

表 1.2.1-2 總體統計最值表 (°C)

各最值	編號	最大 值	時間	最小 值	時間	變化 量/°C	位置
最大值	HYG-W-G09-001-溫度	34.8	2021-07-27 13:50	23.8	2021-05-04 21:40	10.9	P46、P47 墩間橋面跨中
最小值	HYG-W-G09-001-溫度	34.8	2021-07-27 13:50	23.8	2021-05-04 21:40	10.9	P46、P47 墩間橋面跨中



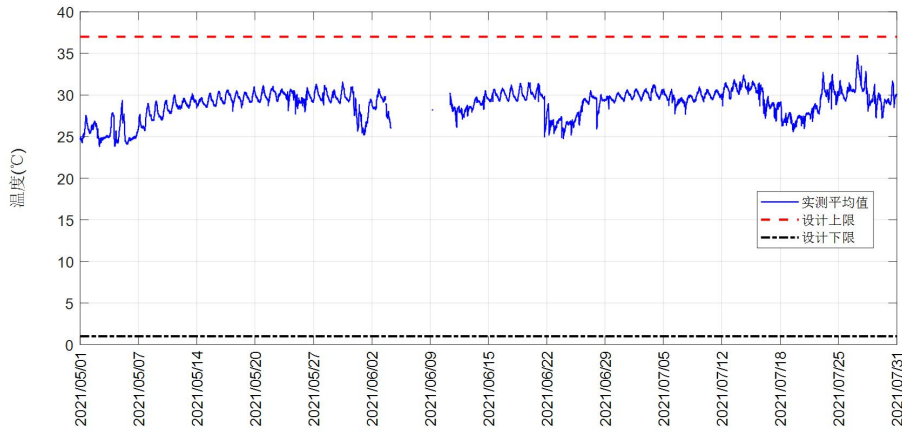
HYG-W-G09-001-溫度



最大值一小時原始時程圖

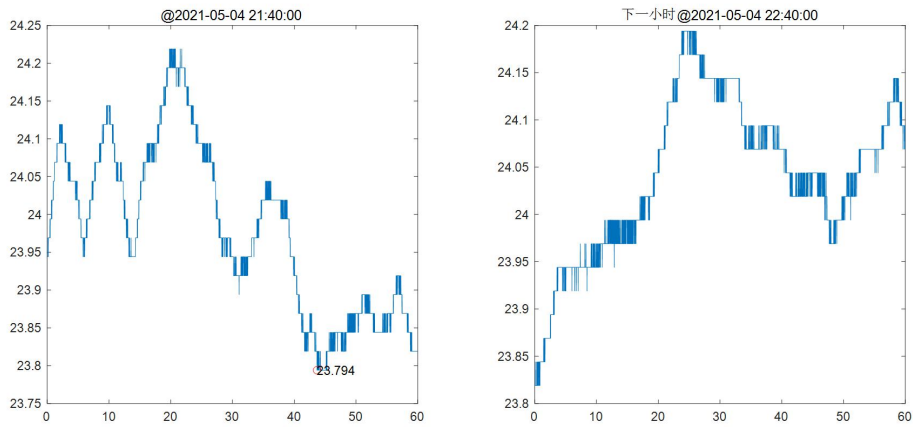
圖 1.2.2-2 溫度最大值時程圖

以上分析表明，全橋最大溫度為 34.76°C，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-溫度），時間為 2021-07-27 13:50；對應時刻原始數據分析表明，該時段溫度波動正常，最大暫態溫度為 34.89°C，溫度在 33.99~34.89°C 之間波動。



HYG-W-G09-001-溫度

最小值@2021-05-04 21:40:00



最小值一小時原始時程圖

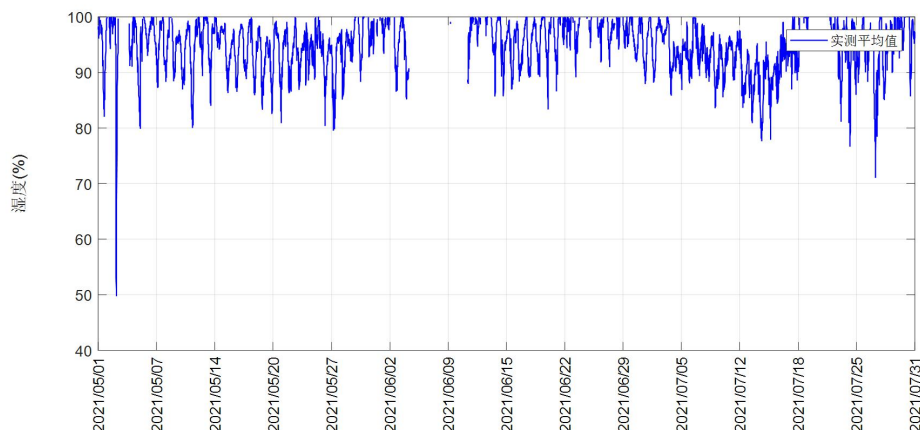
圖 1.2.2-3 溫度最小值時程圖

以上分析表明，全橋最小溫度為 23.84°C，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-溫度），時間為 2021-05-04 21:40；對應時刻原始數據分析表明，該時段溫度波動正常，最小暫態溫度為 23.79°C，溫度在 23.79~24.22°C 之間波動。因此，該位置處溫度變化無異常。

1.2.2 環境濕度

表 1.2.2-3 總體統計最值表 (%)

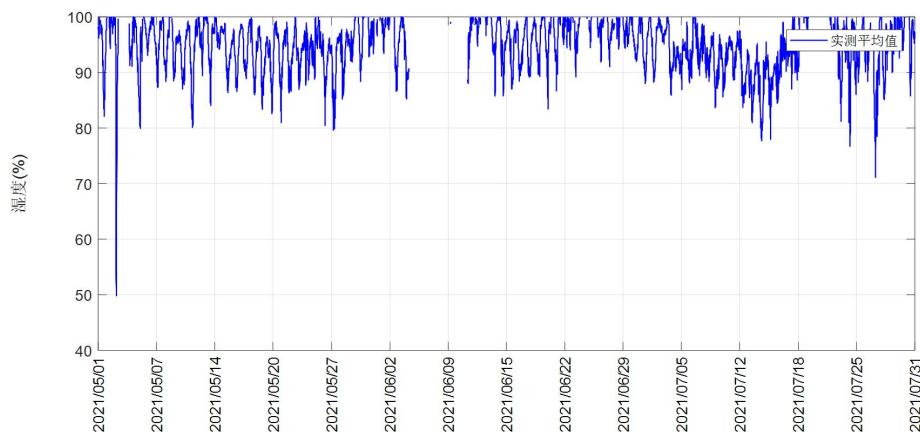
各最值	編號	最大值	時間	最小值	時間	變化量 /%	位置
最大值	HYG-W-G09-001-濕度	100.0	2021-05-08 06:30	49.9	2021-05-03 01:10	50.1	P46、P47 墩間橋面跨中
最小值	HYG-W-G09-001-濕度	100.0	2021-05-08 06:30	49.9	2021-05-03 01:10	50.1	P46、P47 墩間橋面跨中



HYG-W-G09-001-濕度

圖 1.2.2- 1 濕度最大值時程圖

以上分析表明，全橋最大濕度為 99.99%，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-濕度），時間為 2021-05-08 06:30。



HYG-W-G09-001-濕度

圖 1.2.2- 4 濕度最小值時程圖

以上分析表明，全橋最小濕度為 49.89%，發生在 P46、P47 墩間橋面跨中（感測器編號：HYG-W-G09-001-濕度），時間為 2021-05-03 01:10。

2 結論與建議

(1) 梁端縱向位移對稱性分析

大橋同一截面的上下游感測器的位移變化趨勢、大小保持一致，具有較好的對稱性。

(2) 主梁振動

內主橋最大加速度為4.88mg，外主橋最大加速度為5.41mg，連續梁最大加速度為5.80mg，振動幅度較低，未對結構產生影響。

(3) 主橋應變（剔除溫度效應）：

外主橋最大應變為 34.02 $\mu\epsilon$ ，最小應變為-21.47 $\mu\epsilon$ ，最大應變變化為 44.92 $\mu\epsilon$ ；連續梁最大應變為 29.11 $\mu\epsilon$ ，最小應變為-14.75 $\mu\epsilon$ ，最大應變變化為 38.44 $\mu\epsilon$ 。

(4) 模態分析：

模態分析表明，主橋2021年第二季度與之前時段分析結果相比頻率變化較小，結構實際剛度和實際約束條件滿足有關設計要求，結構整體性能狀況良好。

(5) 大橋環境溫濕度

環境最大溫度為 34.76 $^{\circ}\text{C}$ ，最小溫度為 23.84 $^{\circ}\text{C}$ ；全橋最大濕度為 99.99%，最小濕度為 49.89%。

綜上所述，澳門友誼大橋2021年度第二季度各項監測資料基本正常，從監測數據角度分析大橋結構整體基本無異常狀況。

