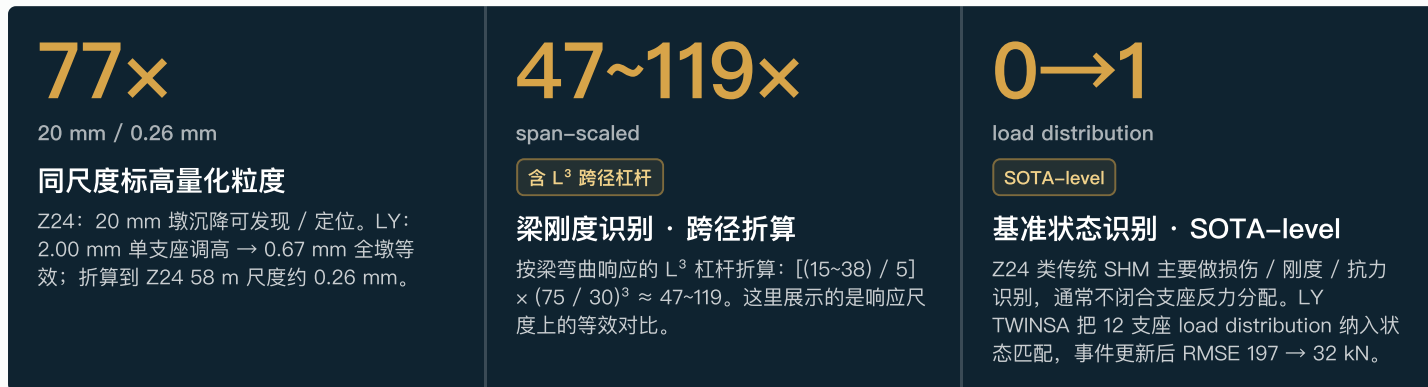


## LY TWINSA vs Z24 SHM 基准对比

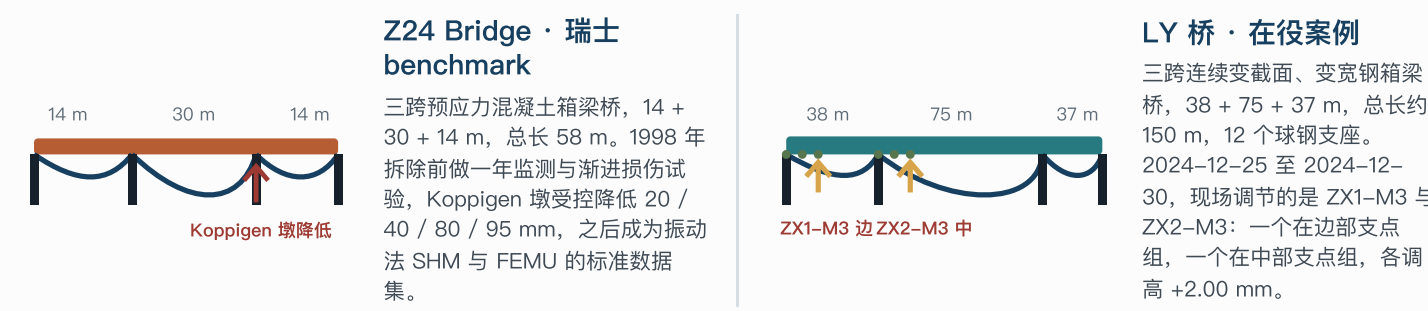
SOTA-LEVEL STATE MATCHING

Z24 是瑞士拆除前受控损伤试验形成的经典 SHM benchmark；LY 桥是在役桥 TWINSA 反力约束状态匹配案例。这里不乏比“算法先进性”，只比两个能落到工程量的状态识别粒度。

Z24 的公开 benchmark 证明：20 mm 墩沉降可被振动法发现 / 定位，15%~38% 量级的刚度变化也能通过 FEMU 更新。LY 的可验证输出进一步落到三类状态量：0.67 mm 全墩等效标高、跨径折算后的梁刚度识别量级，以及实测反力与预测反力的 load distribution 闭合。



## BACKGROUND 两座桥与试验背景



## SETTLEMENT BENCHMARK 沉降 / 等效标高的同尺度比较

## 20 mm 与 0.67 mm 不能直接比，需先折到同一桥长尺度

Z24 的 20 mm 是 58 m 桥上的墩沉降检测量级；LY 的 0.67 mm 是 150 m 桥上的全墩均匀标高分量。按总跨长度折算后，LY 对应到 Z24 尺度约 0.26 mm。

## 77x

状态量化粒度

对象	相对 Z24 20 mm 的比例	数值	口径
Z24 墩沉降	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #c00000;"></div>	20 mm	检测 / 定位
LY 全墩等效	<div style="width: 13.3%; height: 10px; background-color: #008000;"></div>	0.67 mm	状态量化
LY 折算到 Z24	<div style="width: 1.3%; height: 10px; background-color: #008000;"></div>	0.26 mm	同尺度量化

换算：单支座事件 2.00 mm → 三支座墩均匀分量  $2.00 / 3 \approx 0.67$  mm；Z24 / LY 总跨比例为 58 / 150，所以  $0.67 \times 58 / 150 \approx 0.26$  mm。20 / 0.26 ≈ 77。

## STIFFNESS BENCHMARK 刚度识别：跨径折算后对比

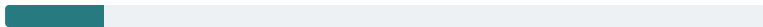

用 L<sup>3</sup> 杠杆把刚度识别折算到响应尺度

Teughels & De Roeck 的 JSV 2004 论文给出 Z24 的刚度参数更新：180 → 157、200 → 145，即 1.15x 到 1.38x。LY 梁刚度识别按 5% 粒度计；LY 主跨 75 m 大于 Z24 主跨 30 m，弯曲响应按 L<sup>3</sup> 量级放大。

## 47~119x

跨径折算后

折算项	相对 119x 的比例	数值	口径
刚度差异	<div style="width: 10%; height: 10px; background-color: #c00000;"></div>	(15~38) / 5	Z24 / LY

跨径响应		15.6x	L <sup>3</sup> 杠杆
折算后对比		47~119x	响应尺度

折算:  $[(15 \text{ 到 } 38) / 5] \times (75 / 30)^3 \approx 47 \text{ 到 } 119$ 。这个数不是单纯参数百分比, 而是把 LY 主跨更长造成的弯曲响应放大一并计入后的等效 benchmark 对比。

## INTERPRETATION 检测结论与量化结论的差别

比较项	Z24 振动法 benchmark	LY TWINSA 状态匹配
事件性质	退役桥受控损伤试验。Koppigen 墩降低 20 / 40 / 80 / 95 mm, 已知事件用于验证 SHM 算法。	在役桥现场支座调高。ZX1-M3、ZX2-M3 各 +2.00 mm, 用实际反力响应检验模型更新。
标高变化	20 mm 阶段可发现 / 定位; 常见输出为 damage index、异常分类或受损墩位置。	输出可回代到支座标高: 2.00 mm 单支座事件 → 0.67 mm 全墩等效 → 0.26 mm Z24 同尺度量。
刚度变化	参考态 FEMU 中, 刚度参数出现 1.15x 到 1.38x 的更新, 等价于 15% 到 38% 的变化。	梁刚度按 5% 识别粒度计, 并按 LY 主跨 75 m / Z24 主跨 30 m 的 L <sup>3</sup> 响应杠杆折算, 等效对比约 47~119x。
跨径影响	Z24 主跨 30 m, 总长 58 m, 刚度变化主要通过模态 FEMU 识别。	LY 主跨 75 m, 总长约 150 m; 按 L <sup>3</sup> 量级估算, 长跨对梁刚度变化的响应杠杆约为 15.6x, 已经计入首屏 47~119x。
荷载分布	传统 SHM 多停在 damage index、刚度更新或抗力状态识别, 通常不直接闭合同一时刻的支座反力分配。	LY TWINSA 把 load distribution、温度、支座标高事件放进同一个状态匹配, 事件更新后实测反力与预测反力重新闭合, 均值 RMSE 197 → 32 kN。

## EVIDENCE 论文证据

来源	本页采用的结论	用于哪一项对比
KU Leuven Z24 benchmark	Z24 几何与 SIMCES 背景: 三跨 14 + 30 + 14 m, 总长约 58 m。	Z24 桥型和尺度来源。
Maeck, Peeters, De Roeck, 2001	列出 20 / 40 / 80 / 95 mm 墩沉降序列; 20 mm 是可用于检测 / 定位的受控损伤量级。	沉降事件序列与 20 mm benchmark。
Teughels & De Roeck, JSV 2004	参考态更新中识别刚度参数: 180 → 157、200 → 145, 对应约 1.15x 到 1.38x, 即 15% 到 38% 的变化量级。	刚度识别 benchmark 与 47~119x 折算来源。
Sony, Sadhu, 2022	近期论文复用 Z24 20 / 40 / 95 mm 墩沉降, 20 mm 阶段可通过 damage index 区分受损墩。	“20 mm 可发现 / 定位” benchmark。
Nguyen-Tran et al., 2023; Abdrabo, 2024	近期研究继续把 Z24 用作分类、异常检测和在线识别 benchmark, 输出多为场景分类或异常判定。	说明近期 Z24 主流输出仍偏检测 / 分类, 而非现场状态量反演。

LY 刚度比较采用梁刚度 5% 识别粒度, 并按主跨 L<sup>3</sup> 响应杠杆折算; 支座刚度自回归不参与本页 benchmark。load distribution 指 12 支座实测反力与模型预测反力在同一状态变量下重新闭合。

LY 数据口径: 桥跨 38 + 75 + 37 m; 2024-12-25 至 2024-12-30 现场支座调高事件为 ZX1-M3、ZX2-M3 各 +2.00 mm; 事件拟合改善来自 /Users/darcy/antigravity/xuyunnew/web/twinsa/77d\_update\_event\_corrected\_reg.json。

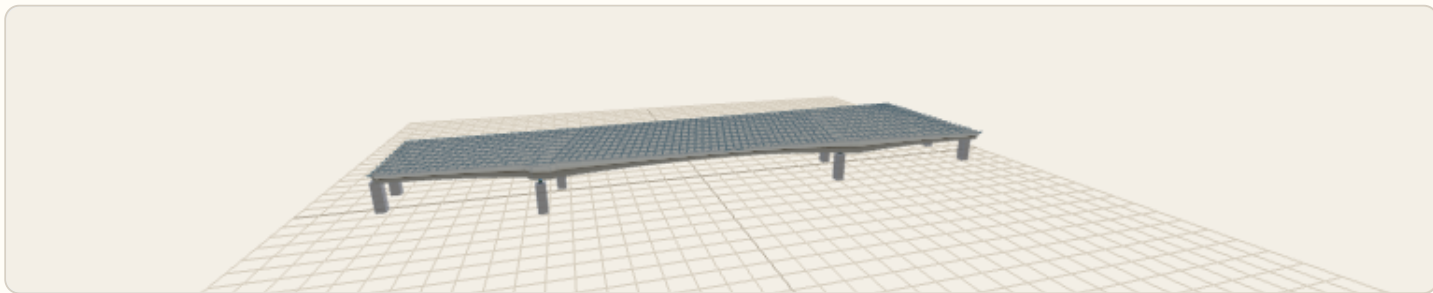
# LY 路高架结构状态盲源 PINN反演及状态评价

## 01 · 结构与测量

### 结构与测量 桥梁构造、支座测点与实测反力

#### 结构背景

三跨连续变截面、变宽钢箱梁 3D 模型 · 38 + 75 + 37 m · 12 球钢支座

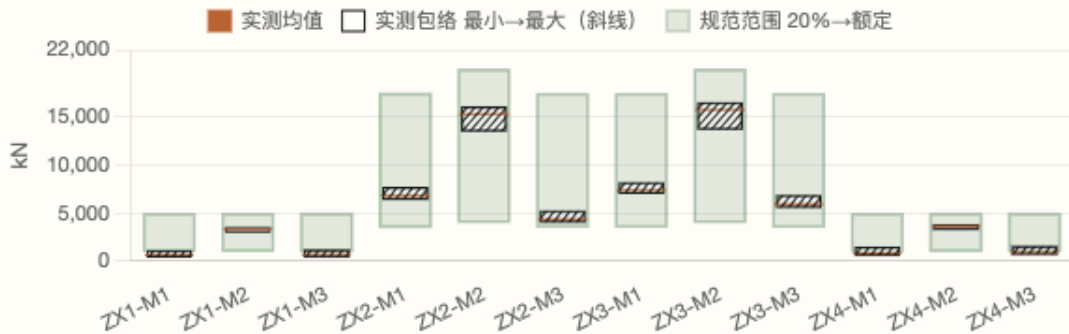


— 变截面钢箱梁   ● 支座测点   ■ 反力均值柱

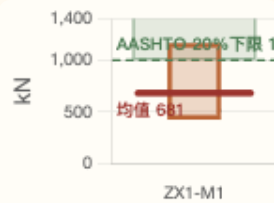
#### 实测反力

12 支座实测包络 · 范围 / 均值 / 额定

每柱: 实测最小→最大包络 (斜线条带) | 美标/AASHTO 20%→额定 (绿底)



#### ZX1-M1 特写 低反力区放大



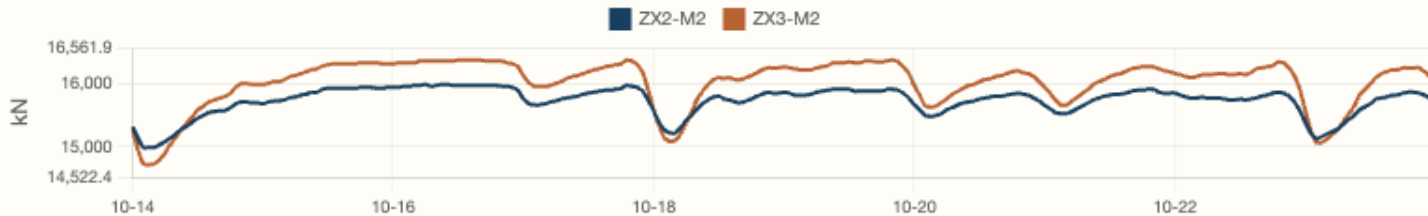
均值 681 kN, 低于美标/AASHTO 20%下限 319 kN; 实测包络 429→1,160 kN。

#### 反力时程

2024-10-14 12:00 → 2024-10-24 11:00 · 240 h · ZX2-M2 / ZX3-M2

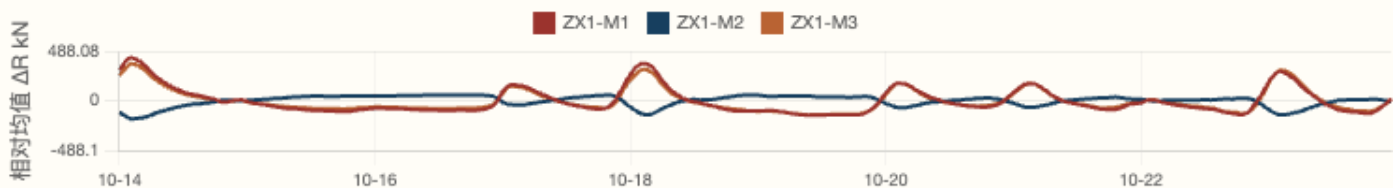
12 支座反力时程 · 可按区间查看

打印页固定截取局部窗口; 上图只显示 ZX2-M2 与 ZX3-M2 的实际反力时序, 下图显示 ZX1 三支座相对各自均值的同步升降。



#### ZX1 支座线 · M1 / M2 / M3

相对均值变化



## 模型修正结果 · 初始相对标高 + 结构参数修正

平均 NSE

**96.3%**

时程拟合优度，越接近 100% 越贴近实测。

支座	初始相对标高
ZX1-M1	-1.89 mm
ZX1-M2	+4.22 mm
ZX1-M3	-2.40 mm
ZX2-M1	-1.64 mm
ZX2-M2	+2.87 mm
ZX2-M3	-1.45 mm
ZX3-M1	-3.24 mm
ZX3-M2	+7.72 mm
ZX3-M3	-3.50 mm
ZX4-M1	-3.53 mm
ZX4-M2	+6.21 mm
ZX4-M3	-3.37 mm

参数位置 / 类型	原值	修正结果	系数调整
边跨1主梁 EIY	18.17M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	14.28M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	-21.5%
主跨主梁 EIY	31.04M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	38.72M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	+24.7%
边跨2主梁 EIY	24.30M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	20.13M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	-17.2%
ZX1 墩盖梁 EIXX	29.03M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	26.41M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	-9.0%
ZX2 墩盖梁 EIXX	186.02M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	221.70M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	+19.2%
ZX3 墩盖梁 EIXX	186.02M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	182.26M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	-2.0%
ZX4 墩盖梁 EIXX	29.03M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	33.66M $\text{kN}\cdot\text{m}^2$	+16.0%
12 个支座弹簧 $K_{eq}$	11,250 $\text{kN}/\text{mm}$	11,195 $\text{kN}/\text{mm}$	-0.5%
自重 + 铺装 + 护栏 荷载	65,868 $\text{kN}$	67,418 $\text{kN}$	+2.4%

## 支座位置

ZX1-M1



初始相对标高 -1.89 mm

## 参数位置

边跨1主梁 EIY

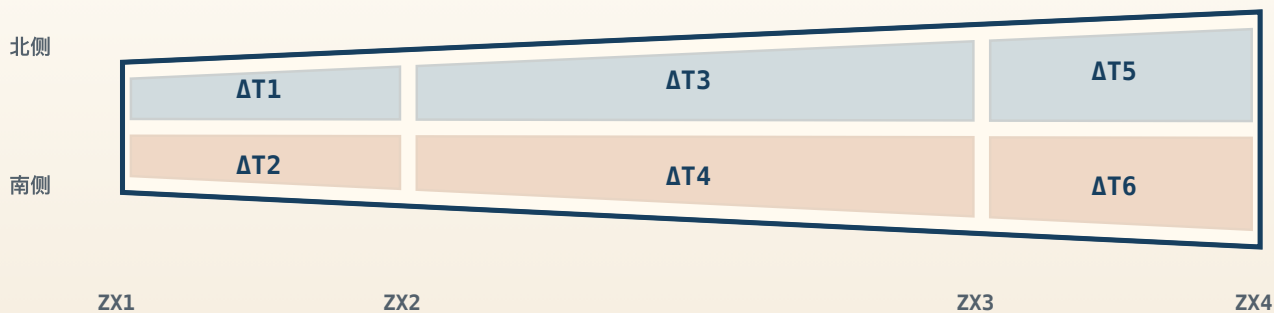


修正系数 -21.5% · 边跨1主梁 EIY

## 6个温度反演模式 · 逐时刻解释

### 6个温度梯度模式对应位置

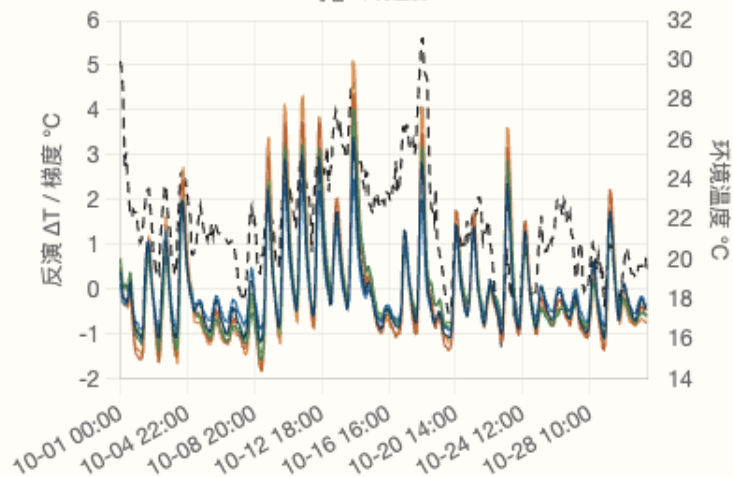
同一张桥梁俯视图，北/南两侧分区显示。



$\Delta T_{1/2}$  为边跨1,  $\Delta T_{3/4}$  为主跨,  $\Delta T_{5/6}$  为边跨2; 上排为北侧, 下排为南侧。

边跨1-北 边跨1-南 主跨-北 主跨-南 边跨2-北 边跨2-南

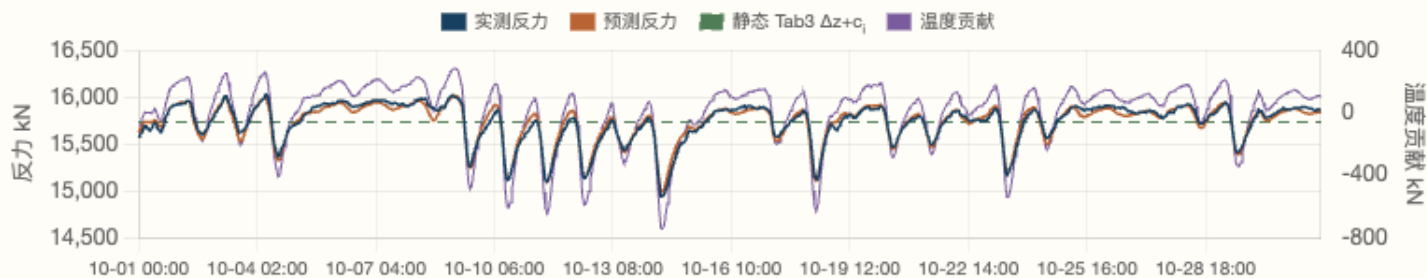
环境温度



### 实测与预测

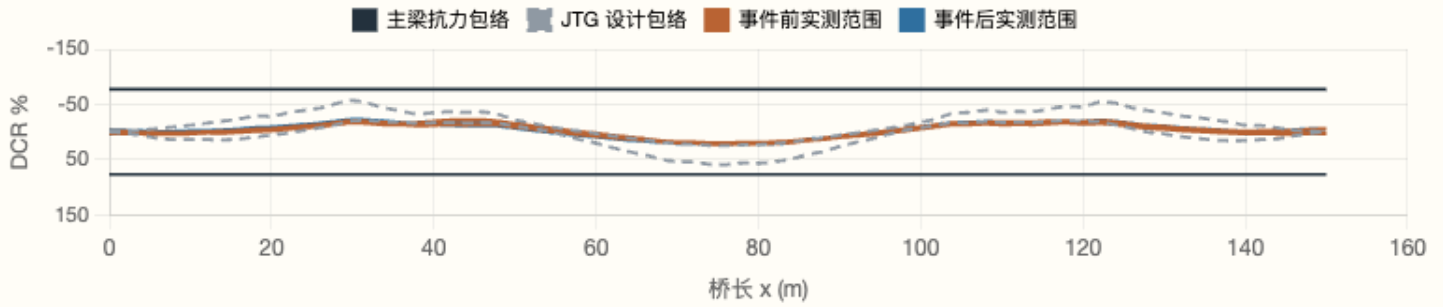
#### 实测反力时程 vs 温度梯度驱动预测

通道 ZX2-M2



纵向主梁

纵向主梁抗弯 DCR / LRFR 对比



纵向主梁 · 更新抗力 DCR max

**37.2%**

同一实测效应：模型初始抗力 29.6% → EIY 更新抗力 37.2%

横向支座线 · 更新抗力 DCR max

**45.1%**

同一墩三支座反力换算横向弯矩；用于判断支座线横向效应。

全桥纵向 · 实测效应

**29.6%**

整根主梁弯矩 / 整体抗力；低于 100% 表示仍有富余。

全桥纵向 · 规范设计

**77.1%**

按 JTG 设计组合复核整体主梁抗弯；低于 100% 表示满足。

横向支座线 · 实测控制

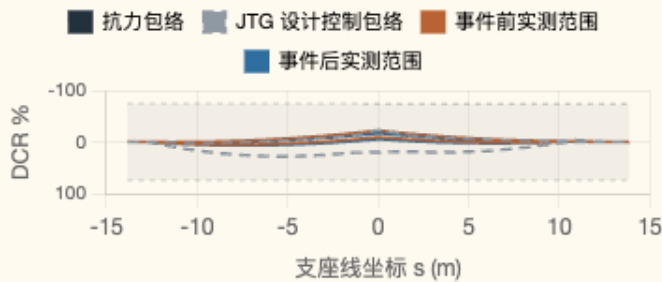
**52.3%**

同一墩三支座反力换算横向弯矩；用于判断支座线横向效应。

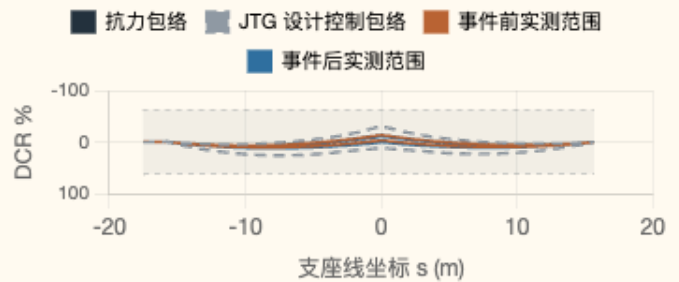
横向简化模型

横向简化模型 4 个支座线抗弯 DCR 曲线

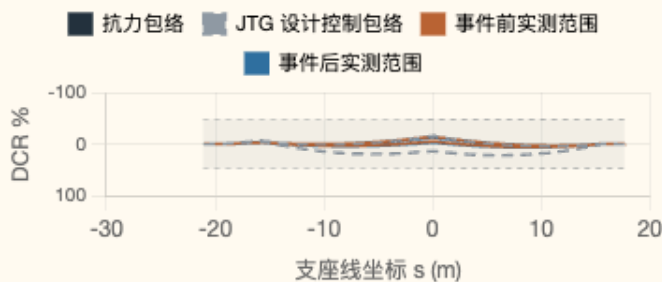
**ZX1** s=-13.9-13.9m · 实测 |M| 10,485 · 设计 |M| 12,944 kN·m · local My 复核



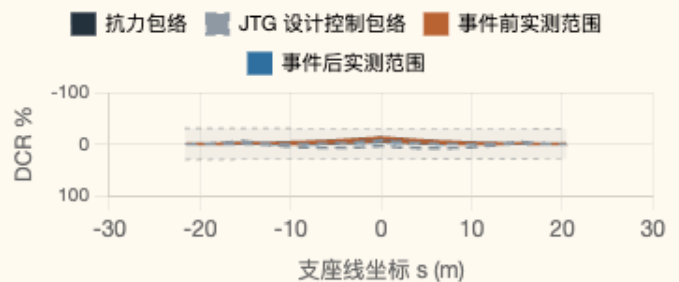
**ZX2** s=-17.5-15.7m · 实测 |M| 28,452 · 设计 |M| 62,065 kN·m · local My 对照 ×1.31



**ZX3** s=-21.1-17.7m · 实测 |M| 41,555 · 设计 |M| 59,706 kN·m · local My 对照 ×1.94



**ZX4** s=-21.7-20.5m · 实测 |M| 17,853 · 设计 |M| 10,598 kN·m · local My 对照 ×2.89



## 工程判断

## 结构承载指标满足；ZX4 横向支承线与边支座低压触发黄色预警。

评价口径：实测效应与更新抗力对比；另列横向实测弯矩包络超设计，以及 ZX1/ZX4 边角支座低于美标/AASHTO 20% 额定承压下限。

纵向主梁实测 DCR max

**37.2%**

x=30m · LRFR≈2.69

横向支承线实测 DCR max

**45.1%**

ZX4 控制 · LRFR≈2.22

ZX4 横向弯矩超设计

**+68.5%**实测  $17.9 / \text{设计 } 10.6 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 

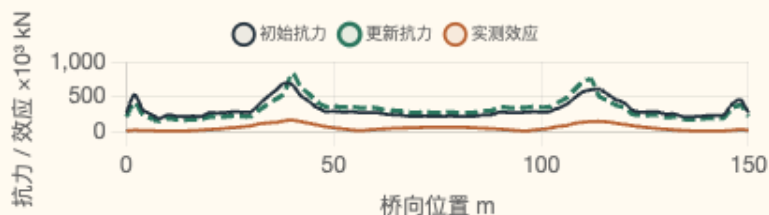
边支座低压预警

**4 个支座**

ZX1/ZX4 M1、M3 均值 13.6%-18.8% &lt; 20% 下限

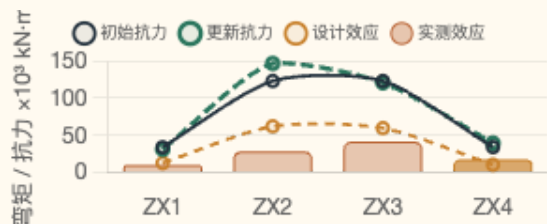
## 纵向主梁抗力线 · 初始 vs 更新

实际抗力按 EIY 修正后更新



## 横向支承线抗力 · 初始 vs 更新

实际抗力按 EIXX 修正后更新



## 1. 承载指标

纵向主梁实测 DCR 37.2%；横向支承线实测 DCR 45.1%；均未达到抗力控制状态。

## 2. 黄色预警

ZX4 横向实测弯矩包络约  $17.9 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，设计效应包络约  $10.6 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，超出约 68.5%。

## 3. 边支座低压预警

ZX1/ZX4 的 M1、M3 四个边角支座均值 681-938 kN，仅为额定 13.6%-18.8%，低于美标/AASHTO 20% 额定承压下限 1,000 kN。

## 4. 调平建议

现场复核后，优先试算并实施 ZX4-M1 或 ZX4-M3 顶升 +3~4 mm；以横向弯矩回落和四个边角支座恢复到 20% 下限以上作为验收指标。

## 5. 加固判断

当前抗力评价为 OK；上述问题优先按支座贴合、反力平衡和局部调平处理，不建议进入结构加固。

# 12月等效沉降 / 支座调高事件闭环

v20260514.10-print-event

从“10月模型外推后不对齐”，到“引入事件后边界状态更新后重新对齐”。本页是 77d 打印版的中文版追加页。

纸面结论：12月前后反力时程出现了基线模型解释不了的系统性偏离；把现场支座调高事件作为边界状态变化回代后，独立验证段预测明显重新贴合。这里说的“沉降”更准确是等效标高变化：负  $\Delta z$  表示相对降低，正  $\Delta z$  表示相对抬高，不能把每个反演  $\Delta z$  直接当作施工量。

## 01 现象

### 12月外推后不再对齐

10月训练得到的基线模型外推到12月，部分支座反力与预测持续偏离。这个偏离不像单点噪声，更像边界状态发生了变化。

## 02 现场动作

### 支座调高窗口

现场记录口径：2024年12月25日至12月30日进行支座调高实验，其中ZX1-M3、ZX2-M3各调高+2.00 mm。

## 03 验证

### 事件后预测重新贴合

用事件后数据更新边界状态，再拿独立验证段检验。若更新后曲线能贴回实测，说明这不是事后讲故事，而是可复核的事件闭环。

## 验证段均值 RMSE

197 → 32 kN

改善 83.9%

## 验证段时程 RMSE

204 → 59 kN

改善 71.0%

## 更新段时程 RMSE

175 → 40 kN

改善 77.2%

## 事件缺口

7.8 天

12-24 14:00 至 25-01-01 09:00

## 事件前外推检验

12-01 00:00 → 12-24 14:00

322 h · 10月基线状态外推到12月，检查是否仍能解释实测反力。

## 支座调高窗口

12-24 14:00 → 25-01-01 09:00

现场动作发生在这个窗口内，反力状态跨窗变化。

## 事件后更新段

25-01-01 09:00 → 25-01-08 09:00

169 h · 用事件后短窗口识别新的边界状态。

## 独立验证段

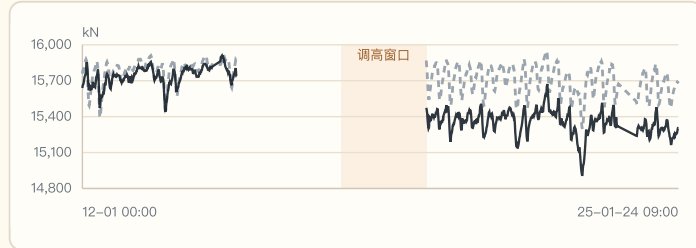
25-01-08 10:00 → 25-01-24 09:00

346 h · 不参与更新，用来检验预测是否真正对齐。

## ① 未更新：只看基准预测

12-01 00:00 → 25-01-24 09:00 · 838 h · ZX2-M2

— 实测 — 基准预测

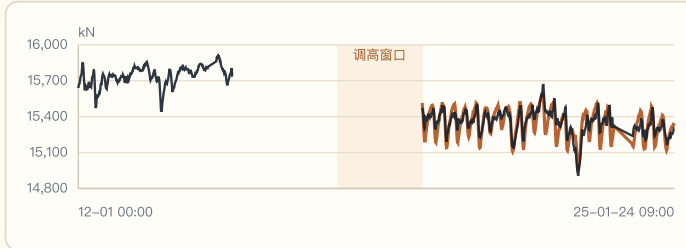


先不给“更新后预测”。只看10月基线外推，12月支座调高窗口之后，基准预测和实测明显错开。

## ② 事件捕捉：才出现更新后预测

12-01 00:00 → 25-01-24 09:00 · 838 h · ZX2-M2

— 实测 — 更新后预测



事件后再引入新的边界状态。更新后预测只在调高窗口之后出现，用来说明“后面又对齐了”。

## 标高事件对照 · 模型预测变化 vs 现场实际变化

实际变化来自现场 fact；模型变化来自反力回代

支座	事件前标高	模型预测变化	现场实际变化	力均值变化
ZX1-M1	-1.89 mm	+1.24 mm	0	+69 kN
ZX1-M2	+4.22 mm	+0.00 mm	0	-154 kN
ZX1-M3	-2.40 mm	+1.31 mm	+2.00 mm	+86 kN
ZX2-M1	-1.64 mm	+0.77 mm	0	+153 kN
ZX2-M2	+2.87 mm	+0.12 mm	0	-304 kN
ZX2-M3	-1.45 mm	+0.74 mm	+2.00 mm	+148 kN
ZX3-M1	-3.24 mm	+0.20 mm	0	+95 kN
ZX3-M2	+7.72 mm	-0.23 mm	0	-192 kN
ZX3-M3	-3.50 mm	+0.24 mm	0	+99 kN
ZX4-M1	-3.53 mm	-0.04 mm	0	+12 kN
ZX4-M2	+6.21 mm	-0.43 mm	0	-25 kN
ZX4-M3	-3.37 mm	-0.11 mm	0	+12 kN

这张表的作用是把“模型认为边界状态需要怎么变”和“现场实际调了哪几个支座”放到同一证据链里。二者不是逐项等同，但若方向和反力改善能闭合，就构成事件验证。