

# 既有双曲拱桥拱上填料更换方案设计与计算分析

戴恩彬<sup>1,2</sup>, 廖 婧<sup>2</sup>, 段登科<sup>2</sup>, 戴明晗<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙

<sup>2</sup>和天(湖南)国际工程管理有限公司, 湖南 长沙

<sup>3</sup>邵阳市交通规划勘察设计院, 湖南 邵阳

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年3月30日; 发布日期: 2026年4月13日

## 摘 要

桥面恒载是否均衡对双曲拱桥受力性能影响较大。为探究既有双曲拱桥拱上填料更换过程的安全性, 本文基于某三跨空腹式双曲拱桥, 首先具体分析了该桥梁病害情况以及主拱圈计算结果, 并提出相应的加固维修措施, 其次对由于长期过载而严重破损的拱上填料进行拆除换填。针对主拱圈段的拱上填料, 使用四组不同的加卸载方案, 采用有限元仿真软件Midas Civil 2021对各加卸载顺序方案进行模拟计算。通过对比加卸载时各方案 $M_{max}$ 和 $M_{min}$ 包络图, 选择对称、均衡拆除(换填)第1、8分块→第3、6分块→第2、7分块→第4、5分块填料作为最优设计加卸载方案。又通过与活载效应对比、施工时挠度值和上下缘应力的变化, 进一步验证了该方案的施工质量与安全性, 并为同类型桥梁拱上填料加固换填施工提供了理论与实际依据。

## 关键词

双曲拱桥, 病害, 换填加固, 有限元模型, 加卸载方案

# Design and Calculation Analysis of Arch Fill Replacement Scheme for Existing Double-Curved Arch Bridge

Enbin Dai<sup>1,2</sup>, Jing Liao<sup>2</sup>, Dengke Duan<sup>2</sup>, Minghan Dai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha Hunan

<sup>2</sup>Hetian (Hunan) International Engineering Management Co., Ltd., Changsha Hunan

<sup>3</sup>Shaoyang Transportation Planning, Surveying and Design Institute, Shaoyang Hunan

Received: March 10, 2026; accepted: March 30, 2026; published: April 13, 2026

## Abstract

The balance of deck dead load significantly influences the mechanical performance of two-way curved arch bridges. This study investigates the safety of spandrel fill replacement in existing two-way curved arch bridges, based on a three-span open-spandrel arch bridge. The bridge's disease conditions and the calculation results of the main arch ring are first analyzed in detail, and corresponding strengthening and maintenance measures are proposed. Subsequently, the spandrel fill, severely damaged due to long-term overloading, is removed and replaced. Four distinct loading-unloading schemes were employed, and finite element simulation software Midas Civil 2021 was used to simulate the construction process of the spandrel fill within the main arch ring segment under each scheme. The symmetrical and balanced removal (replacement) sequence of filler blocks—specifically, Block 1 and 8 → Block 3 and 6 → Block 2 and 7 → Block 4 and 5—was selected as the optimal design scheme by comparing the envelope diagrams of  $M_{\max}$  and  $M_{\min}$  during the loading and unloading processes across different schemes. Furthermore, by comparing with live load effects and analyzing variations in deflection values and stresses at the upper and lower edges during construction, the construction quality and safety of this scheme were further verified, providing both theoretical and practical foundations for the reinforcement and replacement of spandrel fill in similar bridge types.

## Keywords

Double-Curved Arch Bridge, Damage, Replacement and Reinforcement Filling, Finite Element Model, Loading and Unloading Scheme

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

双曲拱桥由板拱发展而来,适用于上承式桥梁,横截面型式为一个或多个小拱。相对于板拱而言,双曲拱桥结构新颖独特,凭借其强度高、承载能力大、桥梁受力明确、截面的抗弯惯性矩较大,能够节省材料及减轻自重等优点,曾在上世纪六七十年代得到了广泛应用[1]-[4]。由于双曲拱桥存在截面整体性较差、施工程序多、易开裂等问题。在交通经济的快速发展,特别是大型载重汽车数量急剧增加的情况下,大部分至今已建的双曲拱桥在长期交通荷载和恶劣环境共同作用下均出现不同程度的病害损伤。包括拱肋横向开裂、拱波纵向开裂、腹拱圈横向与环向裂缝、桥面铺装开裂与破损等,严重影响了桥梁质量安全与行车稳定[5]-[7]。为了满足交通经济发展、保证正常安全通行的需求、延长桥梁使用寿命、减少建设成本,对该类桥型的加固改造是一项重要工程。张杰等[8]通过检测与有限元模型,对南丰大桥承载能力进行评定,针对主拱圈偏心距不足提出拱脚堆载混凝土加固方案,使结构承载能力满足规范要求。王蔚等[9]提出在拱上增设框架式拱肋与横梁的复合套拱加固法,可在不影响桥下交通的前提下显著提升双曲拱桥承载力与整体性。秦向杰等[10]针对下穿铁路运营制约,创新采用拱背增大截面法加固双曲拱桥,在不中断铁路通行的前提下有效提升了结构承载能力。又对双曲拱桥铺装层墩顶横向裂缝问题,提出更换轻质填料、设置钢筋混凝土板及合理分联设缝的改造方案,经有限元验证可有效消除病害[11]。本项目为主跨为3孔空腹式等截面悬链线双曲拱,桥梁下部结构为小石子混凝土砌块片石重力式桥墩和U型桥台。综合考虑交通中断、承载力、耐久性以及建设成本要求,首先对旧桥进行病害分析和承载能力验算,

并针对桥梁病害提出加固设计处置。其次探究双曲拱桥在四组不同加卸载拱上填料顺序下的弯矩、内力、挠度、上下缘应力值变化。通过方案比选得出最安全可靠的加卸载拱上填料顺序，为后续双曲拱桥加固设计提供借鉴依据。

## 2. 工程概况

该桥始建于上世纪 70 年代，是一座 3 孔 40 m 跨空腹式双曲拱桥，全长 154 m (图 1)。结构上，主拱圈为 C25 钢筋混凝土薄壳，两侧镶砌砌块；墩台均为小石子混凝土砌体。本文通过换填拱上填料进行加固，并将原泥结碎石桥面改建为水泥混凝土。桥面宽 10.5 m，布置形式为：7 m 行车道 + 两侧各 1.75 m (含 1.5 m 人行道及 0.25 m 栏杆)。更多构造详见图 2、图 3。

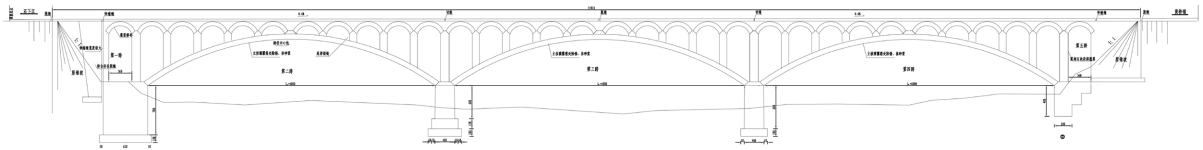


Figure 1. Bridge-type layout diagram (Unit: cm)

图 1. 桥型布置图(单位: cm)

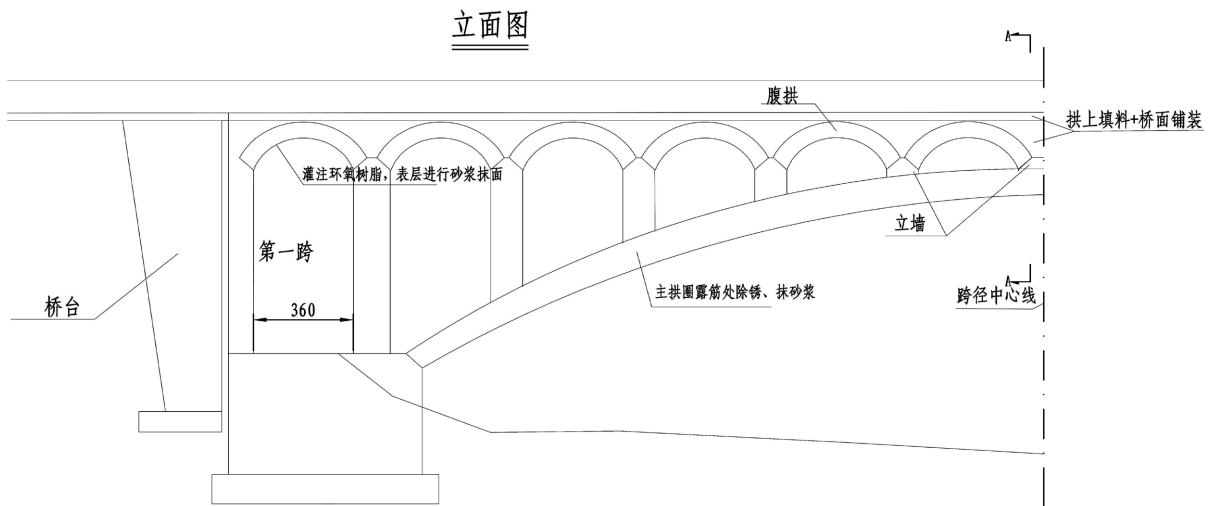


Figure 2. Construction drawing of the first span of the bridge

图 2. 桥梁第一跨构造图

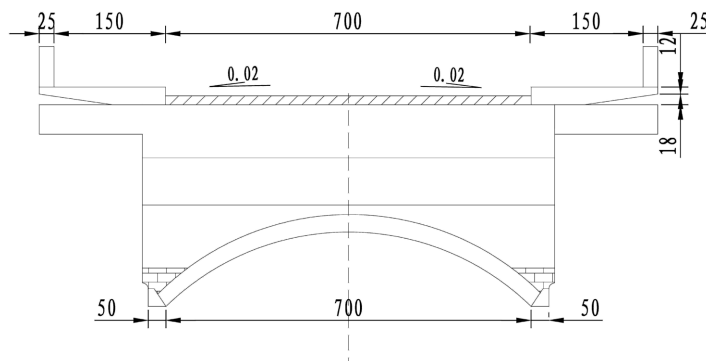


Figure 3. Cross-sectional diagram of the bridge (Unit: cm)

图 3. 桥梁横断面构造图(单位: cm)

主拱圈为3孔空腹式等截面悬链线无铰钢筋混凝土双曲单波拱。净跨径  $L_0=40.0\text{ m}$ ，净矢高  $f_0=6.175\text{ m}$ ，拱轴系数  $m=2.240$ 。拱顶填料与桥面铺装总厚  $55\text{ cm}$ ，拱圈横截面见图4。腹拱圈为浆砌块石等截面圆弧板拱，净跨径  $3.6\text{ m}$ ，净矢高  $0.60\text{ m}$ ，拱厚  $30\text{ cm}$ 。

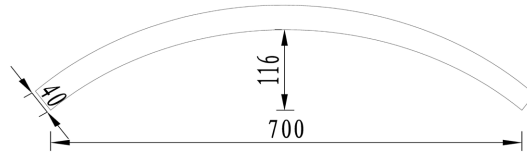


Figure 4. Cross-sectional view of the main arch ring (current state) (Unit: cm)  
图4. 主拱圈(现状)横断面图(单位: cm)

城镇化发展促使交通量持续增长，重载、环境与材料老化等因素加剧了该桥的性能退化，其安全与通行能力均不满足现状要求。本文结合检测数据与经济安全原则进行加固设计，着重探究拱上填料加卸载顺序调整对双曲拱桥受力与变形的影响，据此选定最稳妥的实施方案。

### 3. 桥梁病害情况与处治

#### 3.1. 技术状况评定

依据桥梁检测报告，该桥总体技术状况评分为  $53.6$  分，评定等级为 4 类(差)，已不满足正常使用要求，需进行大修或改造。具体评分分类容见表 1。

Table 1. Overall condition rating of bridges

表 1. 桥梁总体状况评分

部位	部位得分	权重	技术状况评分	技术状况等级
上部结构	52	0.40	53.6	4 类
下部结构	69.2	0.40		
桥面系	25.5	0.20		

为方便进行精确描述，该桥的主跨结构(第 2 跨~第 4 跨)的主拱圈(拱波和横向联系)、腹拱及立墙编号按如下原则进行，具体如图 5 所示。

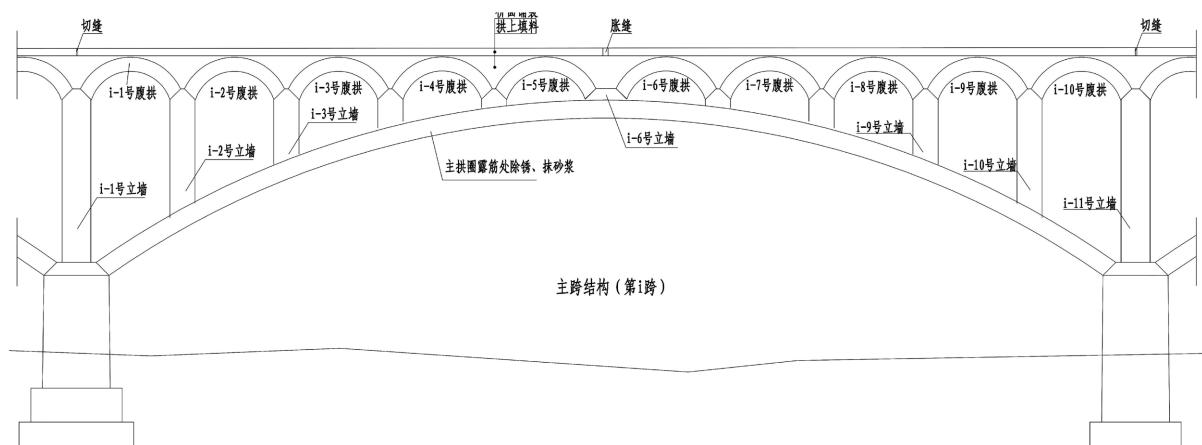


Figure 5. Numbering of abutments and vertical walls  
图 5. 腹拱及立墙编号

(1) 主拱圈拱波：采用两位数编码。首位表示桥跨序号，第二位表示自上游侧起的顺序号。如“2-1”指第二跨上游侧第一道拱波。

(2) 主拱圈横向联系：采用三位数编码。前两位定义同拱波，第三位表示桩号增长方向的顺序号。如“2-1-2”指第二跨上游侧第一道拱波处，桩号方向的第2个横向联系。

(3) 腹拱与立墙：均采用两位数编码。首位表示桥跨序号，第二位表示桩号增长方向的顺序号。如“2-1”指第二跨桩号方向第1个腹拱或立墙。

### 3.2. 上部结构病害

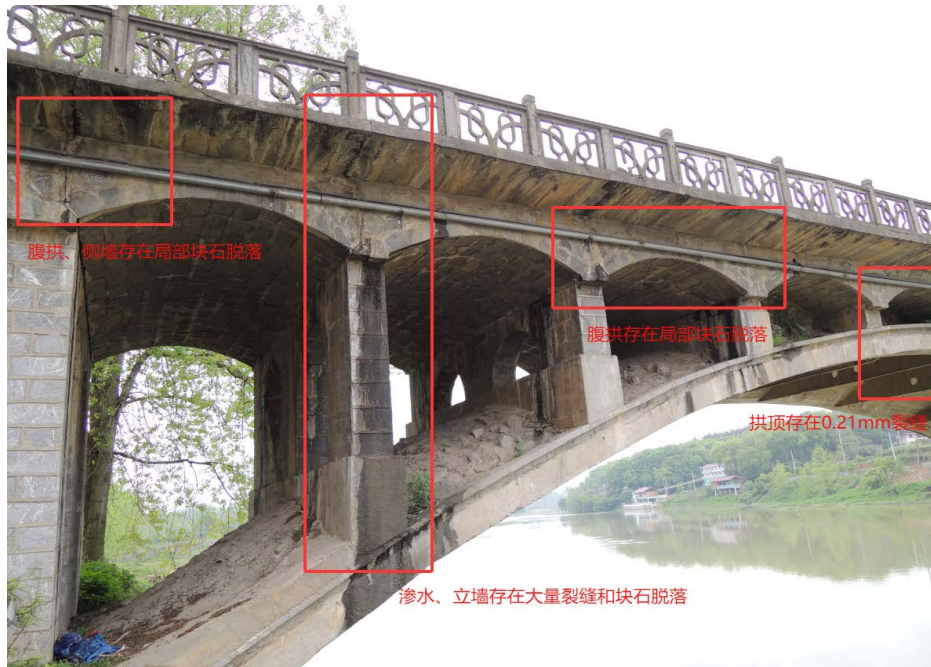


Figure 6. Water seepage at the main arch foot  
图 6. 主拱脚渗水



Figure 7. Wall cracking  
图 7. 立墙开裂

检测结果显示，该桥主要构件普遍存在缺陷。主拱圈方面，第2~4跨拱波出现大量露筋、蜂窝麻面、

剥落与渗水现象，一处横隔板(2-1-7)也发现露筋；第 1、5 跨拱脚渗水，且第 1 跨拱顶存在宽 0.21 毫米的横向贯穿裂缝。立墙构件中，2-7 号立墙(上游侧底梁)有宽 0.04 毫米的竖向裂缝，4-11 号立墙(上游侧)出现浆砌块石脱落(图 6~8)。侧墙病害表现为伸缩缝严重变形(最大缝宽 10.1 毫米)、渗水、长草以及因泄水管未外伸导致的水侵蚀问题。腹拱则同时存在渗水、杂物堆积、灰缝脱落及 4 条最大宽度达 4.30 毫米的纵向贯穿裂缝(图 9)。



Figure 8. Abdominal arch cracking, with some boulders falling off locally  
图 8. 腹拱开裂、局部块石脱落

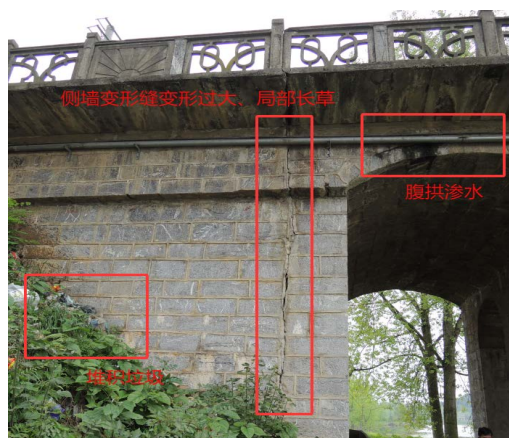


Figure 9. Water seepage on the side wall, excessive deformation of the deformation joint  
图 9. 侧墙渗水、变形缝变形过大

### 3.3. 下部结构病害

桥墩与桥台的砌体均存在局部灰缝脱落现象。其中，0 号与 3 号桥台两侧堆积大量居民生活垃圾。0 号桥台翼墙出现一道最大宽度 0.08 毫米的裂缝，其伸缩缝宽度亦偏大，最大达 5.30 厘米。基础整体无滑移、倾斜或下沉迹象，仅表面有轻微磨损。0 号、1 号桥墩及 3 号桥台基础无明显冲刷，但 1 号桥墩墩顶滋生青苔。此外，第 3 跨下游侧及 2 号桥墩基底存在局部冲刷，冲刷面积分别为 430 毫米 × 300 毫米与

120 毫米。

### 3.4. 桥面系病害

如图 10, 图 11 所示, 桥梁桥面及附属设施病害显著。桥面铺装破损严重, 出现磨光、脱皮、露骨, 且高低不平, 遍布坑洞、破碎及沉陷, 垃圾堆积; 因引水槽与泄水管堵塞, 桥面积水严重。人行道板表面不平整、局部破损坑槽、积水, 其悬挑板底缘渗水露筋且钢筋锈蚀。栏杆状况堪忧, 共计 132 处剥落露筋与 3 处局部断裂, 钢筋锈蚀严重。灯柱固定装置亦存在松动开裂问题。



Figure 10. Damaged bridge deck pavement and water accumulation

图 10. 桥面铺装破损、积水



Figure 11. Severe damage to the guardrail and corrosion of the reinforcement

图 11. 栏杆严重破损、钢筋锈蚀

### 3.5. 加固前主拱圈计算结果

选取一跨主跨结构开展验算。主拱圈为单孔空腹式等截面悬链线钢筋混凝土双曲拱, 主要参数: 净跨 40.0 m, 净矢高 6.175 m, 拱轴系数 2.240, 拱顶以上填料及铺装总厚 0.55 m, 截面见图 4。腹拱圈采用等截面浆砌块石圆弧板拱, 净跨 3.60m, 净矢高 0.60 m, 厚 30 cm。拱波混凝土强度为 28.4 MPa。由于交通量增大, 荷载等级由原汽-15、挂-80 提高至公路-II级和人群 3.5 kN/m<sup>2</sup>。为偏安全, 主拱圈材料视作素混凝土, 其承载力按规范[12]中式(1)计算。

$$\gamma_0 S \leq R(f_d, \xi_c a_d) Z_1 \quad (1)$$

式中  $\gamma_0$  ——结构的重要性系数;  $S$  ——荷载效应函数;  $R(\cdot)$  ——抗力效应函数;  $f_d$  ——材料强度设计值;  $a_d$  ——结构的几何尺寸;  $Z_1$  ——承载能力检算系数;  $\xi_c$  ——截面折减系数。

#### 1、检算系数 $Z_1$ 计算

(1) 根据总体状况评分表可知, 桥梁总体技术评分为 53.6, 对应的缺损状态评定标准值为 4。

(2) 推定强度匀质系数  $K_{br}$  如(2)所示:

$$K_{br} = \frac{R_{it}}{R} \quad (2)$$

式中  $R_{it}$  —— 砼实测强度推定值； $R$  —— 砼设计强度等级。

主跨结构的主拱圈混凝土设计强度等级  $R$  为 C25，主拱圈的拱波的混凝土实测强度推定值  $R_{it}$  最小为 28.4 MPa，可得  $K_{br} = 1.136$ ，则混凝土强度评定标度为 1。

(3) 根据桥梁检测报告可知：该桥的理论计算频率  $f_{di}$  为 6.8689，推出实测自振频率  $f_{mi}$  为 7.2223，则自振频率评定度为 2。

因此，该桥承载能力检算系数评定标度  $D = \sum \alpha_j D_j = 0.4 \times 4 + 0.3 \times 1 + 0.3 \times 2 = 2.5$ ，根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/TJ21-2011) [12]，取承载能力检算系数  $Z_1 = 1.10$ 。

### 2、截面折减系数 $\xi_c$ 计算

现场检测结果表明，主拱圈呈现微风化现象，其材料风化评定标度为 1；同时，其表面存在轻微混凝土剥落，物理与化学损伤评定标度为 2。截面损伤综合评定标度  $R = \sum \alpha_j R_j = 0.2 \times 1 + 0.8 \times 2 = 1.8$ ，根据规范[12]取截面折减系数  $\xi_c = 0.98$ 。

### 3、承载能力验算

承载力分析计算设定如下：主跨双曲拱的温度作用包括升温 25℃ 和降温 15℃，混凝土收缩按等效降温 6℃ 计入，其徐变效应通过系数折减(温度  $\times 0.7$ ，收缩  $\times 0.45$ )。模型不计桥面刚度而只考虑其质量，主拱圈两端固接，拱顶填料与桥面铺装总厚度为 55 cm，并忽略冲击作用。计算需考虑以下组合：

#### (1) 正截面受压强度验算

最大(小)弯矩组合：

组合 1 (3)： $1.0 \times (1.2 \times \text{恒载} + 1.2 \times \text{收缩} + 1.4 \times \text{车} + 0.7 \times (1.4 \times \text{人} + 1.4 \times \text{温升})) M_{\max(\min)}$ ；

组合 2 (4)： $1.0 \times (1.2 \times \text{恒载} + 1.2 \times \text{收缩} + 1.4 \times \text{车} + 0.7 \times (1.4 \times \text{人} + 1.4 \times \text{温降})) M_{\max(\min)}$ ；

注：括号中取最小弯矩组合

#### (2) 截面受剪强度验算

最大(小)剪力组合：

组合 1 (3)： $1.0 \times (1.2 \times \text{恒载} + 1.2 \times \text{收缩} + 1.4 \times \text{车} + 0.7 \times (1.4 \times \text{人} + 1.4 \times \text{温升})) Q_{\max(\min)}$ ；

组合 2 (4)： $1.0 \times (1.2 \times \text{恒载} + 1.2 \times \text{收缩} + 1.4 \times \text{车} + 0.7 \times (1.4 \times \text{人} + 1.4 \times \text{温降})) Q_{\max(\min)}$ ；

注：括号中取最小剪力组合

**Table 2.** Analysis results of compressive bearing capacity of the main section (Unit: kN)

**表 2.** 正截面受压承载力分析结果(单位: kN)

截面位置	组合 1		组合 2		组合 3		组合 4	
	N	[N]	N	[N]	N	[N]	N	[N]
0	21520.4	41885.2	20453.8	42601.8	21001.7	43057.3	19935.2	29598.9
L/8	18795.2	44101.8	17539.1	42138.3	20807.5	42048.7	19551.4	39018.3
L/4	18826.8	44148.8	17167.2	42465.7	19398.9	43278.6	17739.3	44296.0
3L/8	18423.9	38636.8	16225.6	28374.2	18214.9	44318.7	16016.5	39336.1
L/2	18024.0	33169.3	15493.8	20235.1	17606.6	42073.7	15076.4	32505.1
5L/8	18423.9	38636.8	16225.6	28374.2	18214.9	44318.7	16016.5	39336.1
3L/4	18826.8	44148.8	17167.2	42465.7	19398.9	43278.6	17739.3	44296.0
7L/8	18795.2	44101.8	17539.1	42138.3	20807.5	42048.7	19551.4	39018.3
L	21520.4	41885.2	20453.8	42601.8	21001.7	43057.3	19935.2	29598.9

主跨结构主拱圈的正截面受压承载力以及抗剪承载力结果见表 2 和表 3 所示。

**Table 3.** Analysis results of shear resistance capacity (Unit: kN)

**表 3.** 抗剪承载力分析结果(单位: kN)

截面位置	组合 1		组合 2		组合 3		组合 4	
	Q	[Q]	Q	[Q]	Q	[Q]	Q	[Q]
0	364.0	17053.7	615.7	16833.7	1411.1	17881.0	739.7	17294.4
L/8	893.5	16390.5	1077.3	16128.4	318.9	16503.3	502.7	16241.2
L/4	1391.1	15965.4	1527.9	15621.0	825.4	15710.4	962.2	15366.0
3L/8	1596.1	15574.7	1678.7	15120.4	950.5	15240.5	1033.1	14786.2
L/2	511.2	15073.6	513.1	14551.7	1188.9	15226.0	1190.9	14704.1
5L/8	1596.1	15574.7	1678.7	15120.4	950.5	15240.5	1033.1	14786.2
3L/4	1391.1	15965.4	1527.9	15621.0	825.4	15710.4	962.2	15366.0
7L/8	893.5	16390.5	1077.3	16128.4	318.9	16503.3	502.7	16241.2
L	364.0	17053.7	615.7	16833.7	1411.1	17881.0	739.7	17294.4

由表 2、表 3 可知, 在所述荷载(公路-II级、人群 3.5 kN/m<sup>2</sup>)与温度(+25℃/-15℃)组合作用下, 主拱圈从拱脚至 3L/4 区间内各主要截面的抗压及抗剪承载力验算结果均满足安全要求。

### 3.6. 桥梁加固维修处理措施

#### (1) 主要材料

桥面铺装为 12 cm 厚 C40 防水混凝土, 下设均厚 12.5 cm 的 C15 素混凝土垫层, 桥头接线路面采用 C30 混凝土。钢筋选用 HRB335 与 HPB235 [13], 钢材为 Q235, 焊接材料与母材匹配并保证等强连接。其余材料均符合标准。

#### (2) 具体处理措施

① 对 0#桥台伸缩缝过宽处及桥台侧墙缝宽大于 0.1 cm 的裂缝埋压浆管压注 M40 微膨水泥浆封闭裂缝和空洞; ② 第一跨拱圈、第 2 跨及第 4 跨腹拱、立墙的裂缝  $\geq 0.1$  mm 的裂缝采用壁可法进行封闭; ③ 对蜂窝、麻面、露筋进行除锈处理并用复合砂浆修补; ④ 对 2 号桥墩进行 C25 素混凝土回填; ⑤ 拆除老桥桥面铺装、换填拱上填料; ⑥ 新建 12 cm 厚 C40 防水砼行车道板, 并埋设泄水管; ⑦ 桥跨处及桥台接线处设置胀缝; ⑧ 桥头接线为了平顺而破碎一部分水泥混凝土路面再重新铺筑; ⑨ 清除全桥局部杂草及堆积垃圾。

## 4. 拱上填料更换方案研究

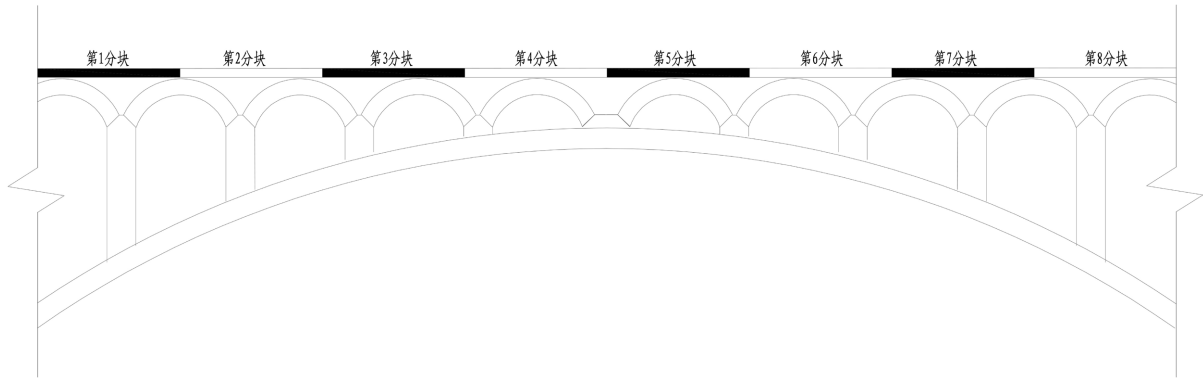
根据计算结果与检测报告, 旧桥在承载能力与正常使用极限状态下均满足规范。本研究基于加固前的验算组合, 通过分析不同拱上填料施工顺序下的结构弯矩、内力、挠度与应力变化, 评估施工安全, 旨在为同类桥梁的加卸载施工监控提供理论数据支持。

### 4.1. 施工段划分与计算模型

#### (1) 加卸载施工段划分

将加卸载荷载沿桥梁纵向每孔均分为 8 块, 如下图 12 编号, 拟采用以下四种加卸载顺序, 先卸载后加载, 加载顺序与卸载顺序保持一致:

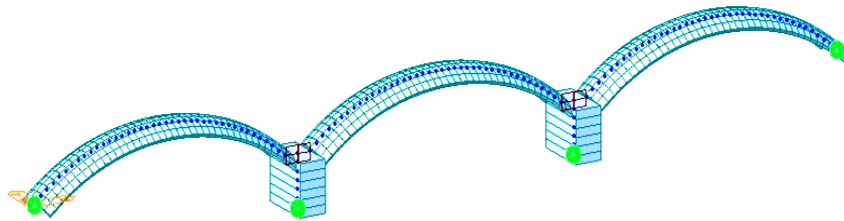
- 方案(1): 第 1、8 分块→第 2、7 分块→第 3、6 分块→第 4、5 分块。  
 方案(2): 第 4、5 分块→第 3、6 分块→第 2、7 分块→第 1、8 分块。  
 方案(3): 第 1、8 分块→第 3、6 分块→第 2、7 分块→第 4、5 分块。  
 方案(4): 第 4、5 分块→第 2、7 分块→第 3、6 分块→第 1、8 分块。



**Figure 12.** Load number for loading and unloading  
**图 12.** 加卸载荷载编号

### (2) 计算模型

本研究采用有限元分析方法, 借助 Midas Civil 软件建立计算模型, 并以平面杆系理论作为其核心求解。全桥模型划分为 132 个单元, 137 个节点, 有限元模型见图 13 所示:



**Figure 13.** Schematic diagram of the finite element model  
**图 13.** 有限元模型示意图

### (3) 评价标准

本文通过四种加-卸载方案下弯矩进行对比, 选取弯矩值最小方案, 并将此方案临时施工模拟与活载效应、各工况下挠度值参照规范要求进行比较, 进一步论证选取方案的安全可靠性, 评判标准如下:

- ① 弯矩: 通过各方案对比, 综合选取弯矩值最小为最优施工方案, 降低桥梁安全风险。
- ② 活载效应对比: 参照《公路桥涵施工技术规范》[14], “临时荷载引发的附加内力不应超过活载效应 15%”
- ③ 挠度值: 挠度绝对值小于规范允许限值, 取一跨按 40 m 计,  $L/600 \approx 66.7$  mm。

## 4.2. 结果对比分析

### (1) 弯矩

对上述四种方案在施工过程(先卸后加载)中产生的弯矩最大包络图  $M_{\max}$  与最小包络图  $M_{\min}$  如图 14~17 所示。

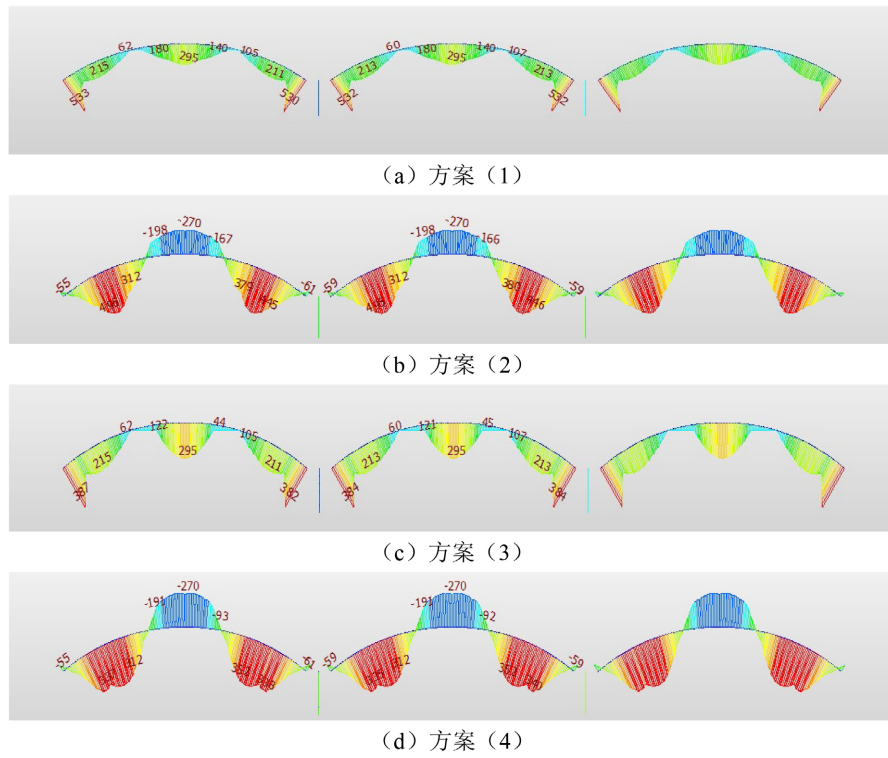


Figure 14. Uninstallation of  $M_{max}$  envelope graph  
图 14. 卸载  $M_{max}$  包络图

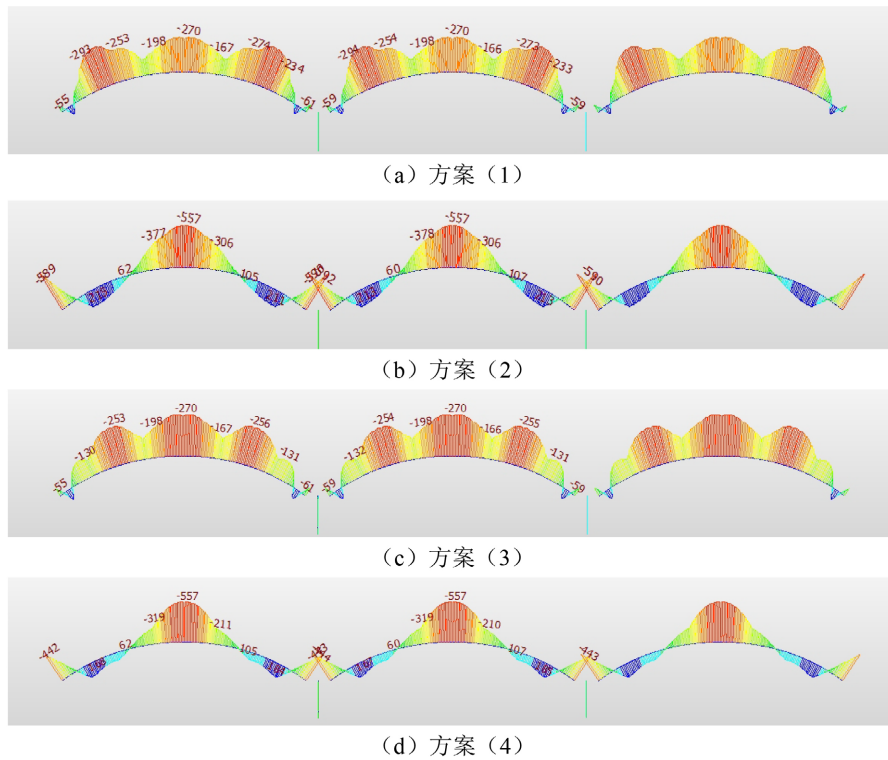
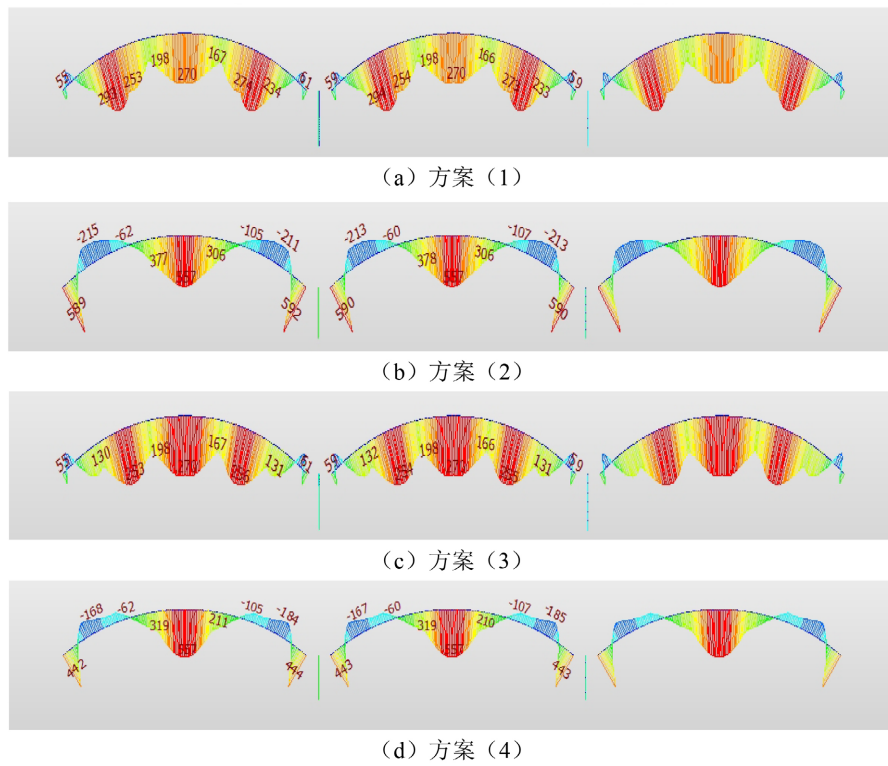
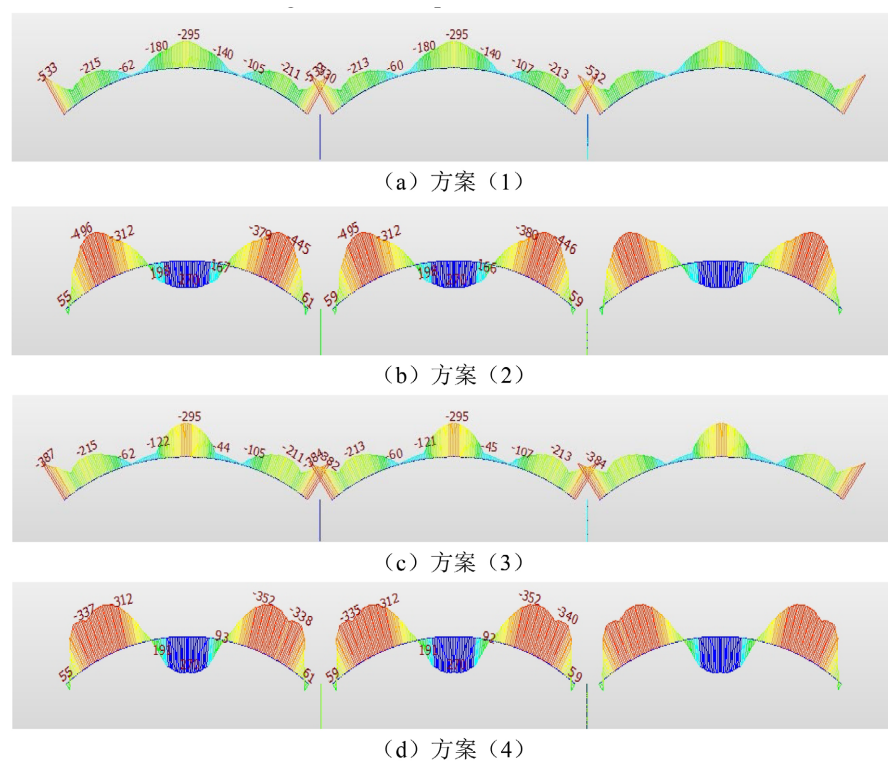


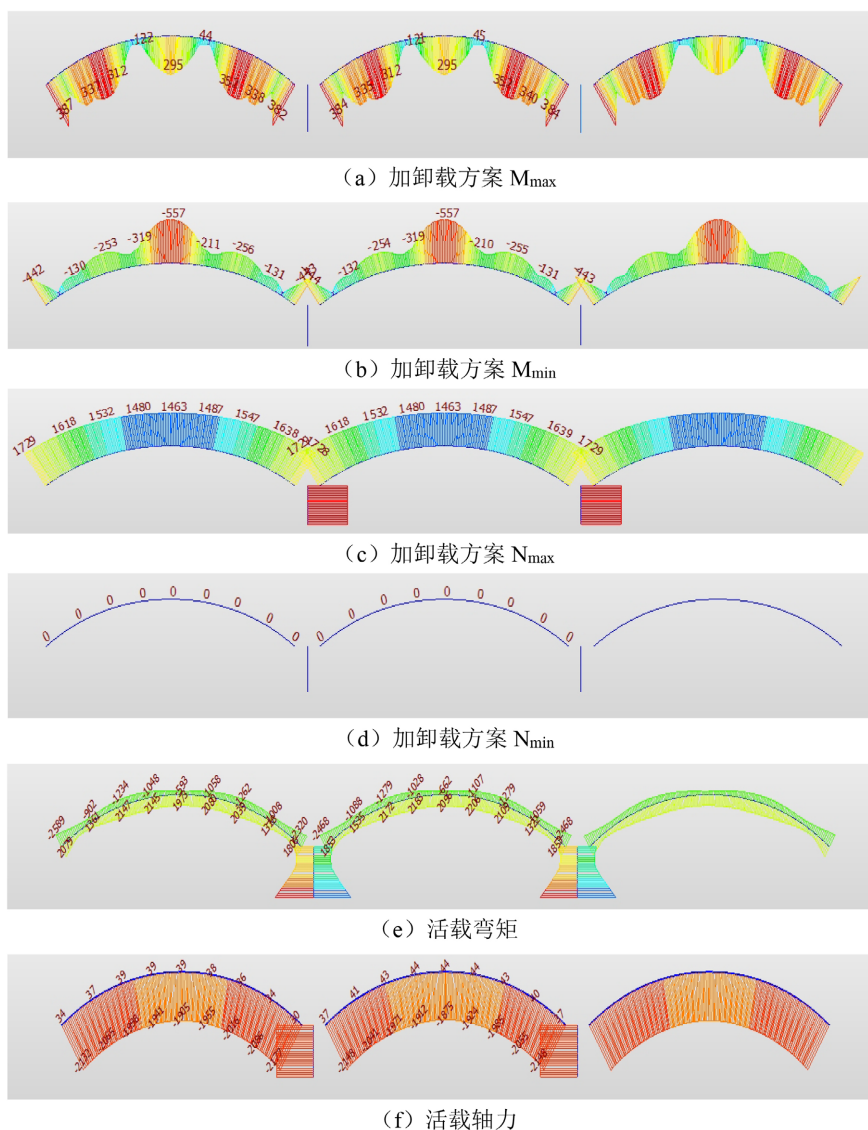
Figure 15. Uninstallation of  $M_{min}$  envelope graph  
图 15. 卸载  $M_{min}$  包络图

Figure 16. Envelope plot of  $M_{\max}$  load图 16. 加载  $M_{\max}$  包络图Figure 17. Envelope plot of the  $M_{\min}$  package图 17. 加载  $M_{\min}$  包络图

分析图 14~17 可知, 各方案弯矩包络图呈近似对称, 边跨与中跨规律一致, 故后续聚焦中跨。数据对比如下: 方案(3)在支座、3L/8、5L/8 的  $M_{\max}$  及 L/8 的  $M_{\min}$  均低于方案(1); 而方案(2)和(4)在 L/8、4/L 的  $M_{\max}$ , 以及在支座、L/2 的  $M_{\min}$ , 均显著高于方案(3)。加载工况下, 除 L/8 截面(方案(3)  $M_{\max} = 132 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 方案(1)为  $294 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )外, 两者其余截面  $M_{\max}$  相近; 方案(2)和(4)在支座、L/2 的  $M_{\max}$  值则出现不利的急剧增大。卸载工况下, 方案(3)在支座、3L/8、5L/8 的  $M_{\min}$  值也小于方案(1); 方案(2)和(4)在 L/8、4/L 的  $M_{\min}$  值远超方案(3)。整体上, 方案(3)包络图形态与方案(1)类似, 但关键截面弯矩值更小, 安全性更好; 方案(2)和(4)存在多处弯矩陡增, 风险较高。基于此, 推荐方案(3)为最佳施工顺序, 其卸载流程为“第 1、8 分块→第 3、6 分块→第 2、7 分块→第 4、5 分块”, 加载填筑按相同顺序执行。

## (2) 活载效应对比

选定方案(3)加卸载顺序与活载(公路二级 + 人群荷载, 未考虑偏载和超载)的标准值弯矩和轴力效应包络图对比结果如图 18 所示。



**Figure 18.** Comparison of load application and unloading and live load envelope diagram  
**图 18.** 加卸载与活载对比包络图

从图 18 中对比结果可知, 方案(3)加卸载过程产生的  $M_{\max}$ 、 $M_{\min}$  和  $N_{\max}$ 、 $N_{\min}$  效应均比活载效应小。通过对多方案的内力时程曲线与峰值响应对比可见: 方案(3)加卸载过程中, 结构跨中弯矩极值( $M_{\max} = 295 \text{ KN}\cdot\text{m}$ ,  $M_{\min} = -557 \text{ KN}\cdot\text{m}$ )与支座轴力极值( $N_{\max} = 1729 \text{ kN}$ ,  $N_{\min} = 0 \text{ kN}$ )均小于活载作用下的对应内力( $M_{\text{活载}} = 2096 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 、 $N_{\text{活载}} = 2148 \text{ kN}$ )。符合规范[14]中“临时荷载引发的附加内力不应超过活载效应 15%”的规定, 从规范合规性与力学响应双维度验证了施工过程的安全可行性。

### (3) 选定方案各工况挠度与应力

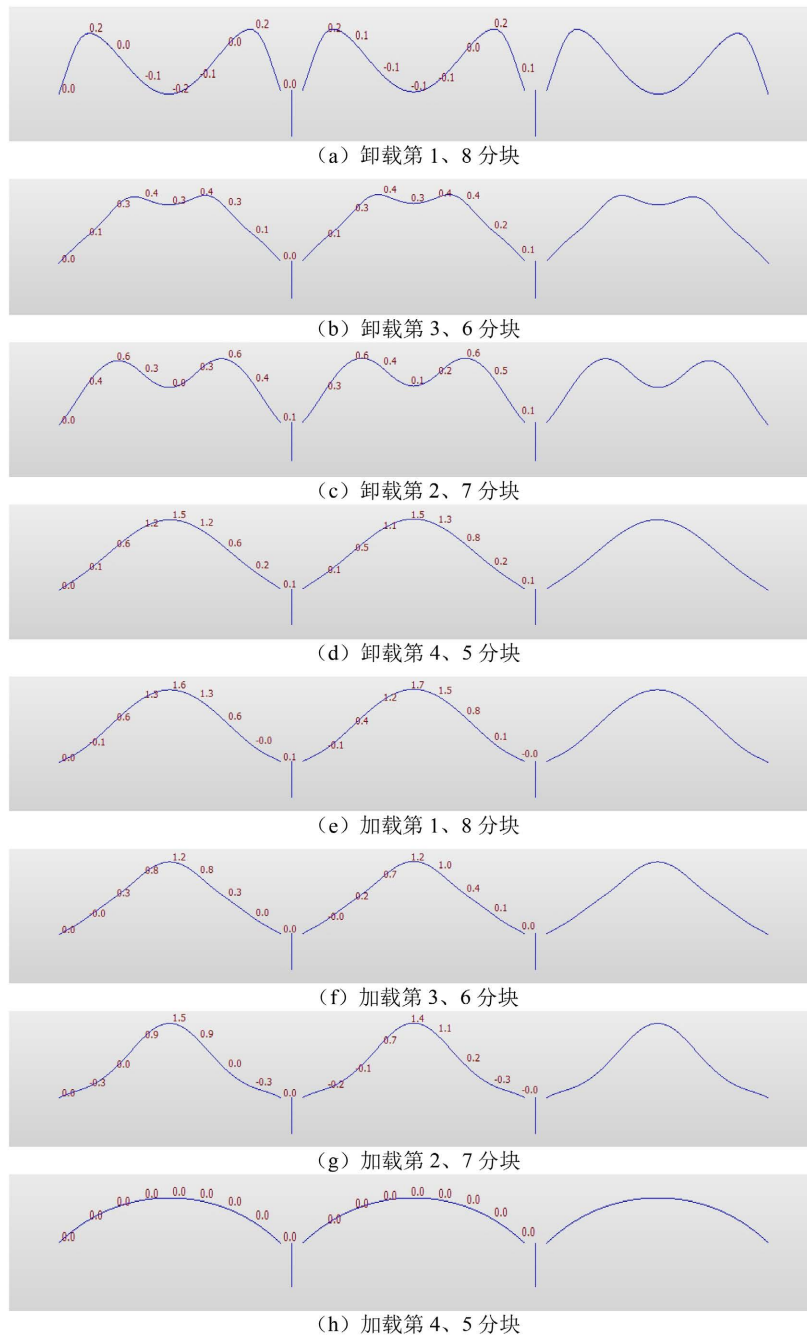
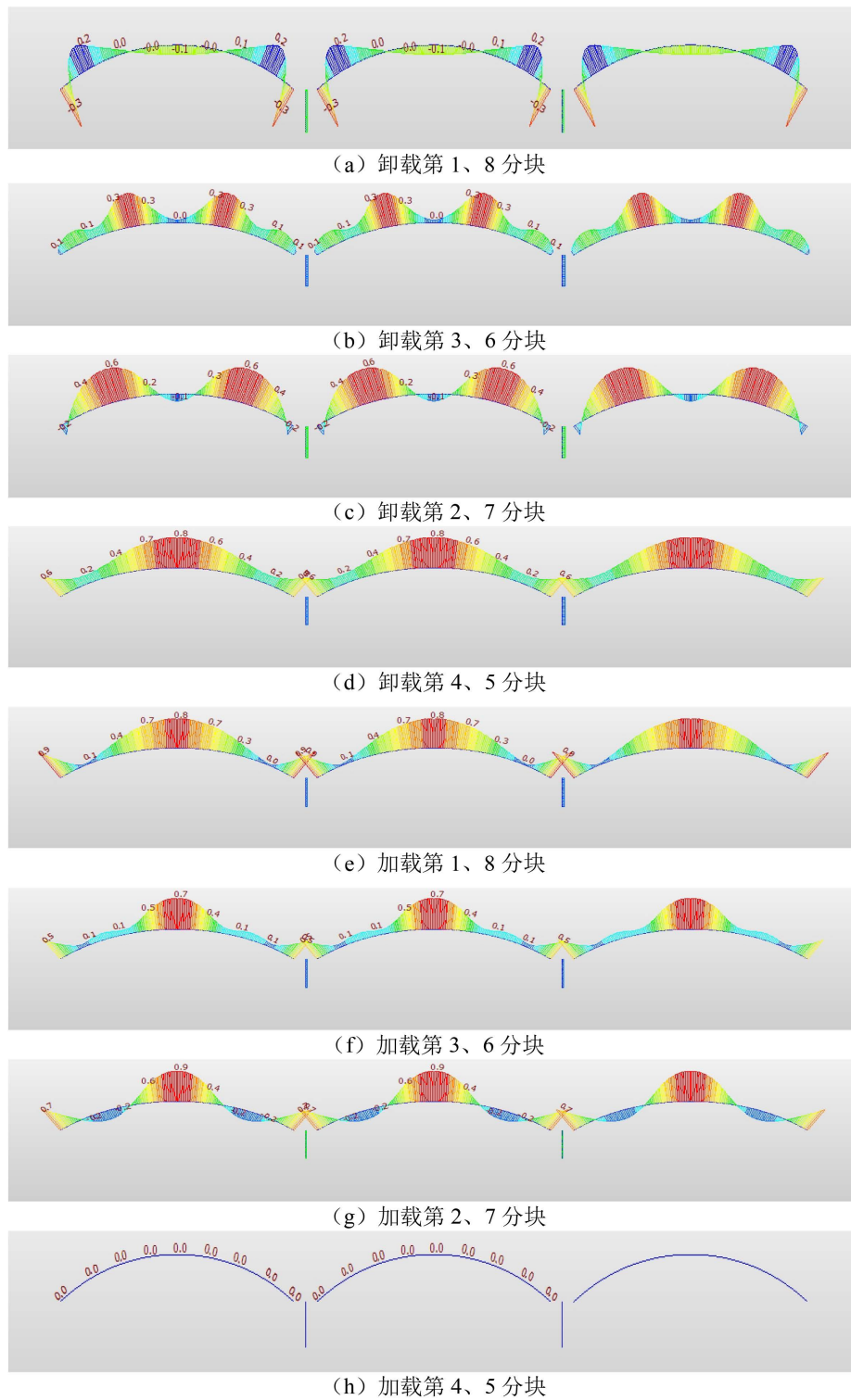


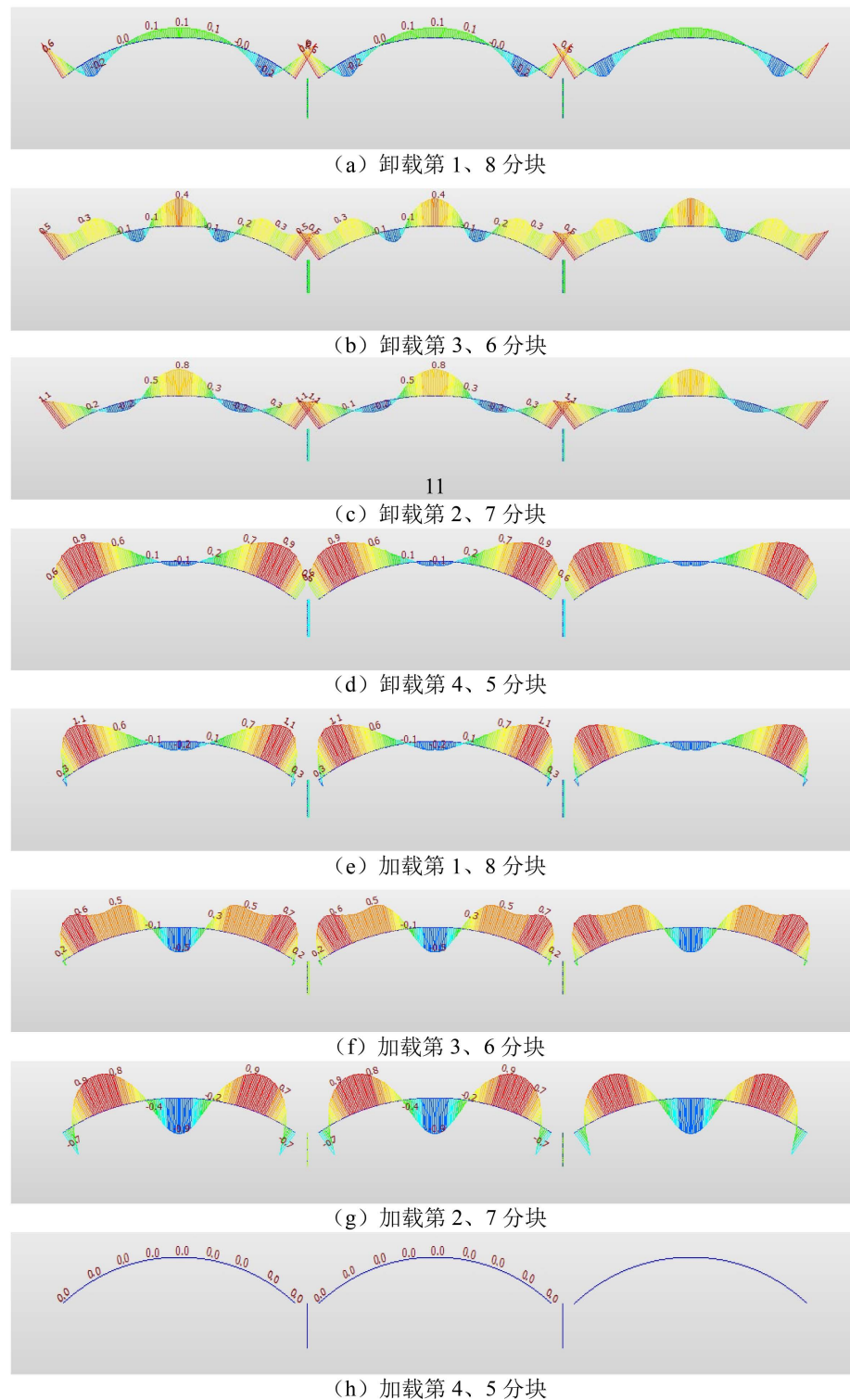
Figure 19. Unloading-loading deflection analysis diagram

图 19. 卸载 - 加载挠度分析图

按照方案(3), 提取其各工况下边、中跨各八分点位置处的挠度(mm)和上下缘应力(MPa), 其结果如图 19~21 所示。



**Figure 20.** Stress analysis of unloading-loading upper edge  
**图 20.** 卸载 - 加载上缘应力分析图



**Figure 21.** Stress analysis diagram of lower edge during unloading and loading  
**图 21.** 卸载 - 加载下缘应力分析图

图 19~21 的施工过程分析表明, 采用方案(3)时, 结构挠度与应力增量均处于安全范围。具体而言: 最大挠度出现于跨中, 边跨与中跨极值(分别为+1.6 mm/-0.2 mm、+1.7 mm/-0.1 mm)均低于规范允许值;

上下缘最大压应力(跨中及支座上缘 0.9 MPa, 支座及 L/8 截面下缘 1.2 MPa)远小于混凝土材料强度(C25 标准值及实测 28.4 MPa)。

上述结果验证了方案(3)在施工中能将变形约束在弹性范围内, 且附加应力水平合理, 符合相关规范对施工阶段应力的控制要求。该分析为实际加卸载施工的监控提供了可靠的理论与数据基准。

## 5. 结论

本研究针对一座上世纪 70 年代修建的 3 孔空腹式等截面悬链线双曲拱桥, 通过病害分析与承载力验算, 并重点研究了四种拱上填料更换顺序对安全性的影响, 结论如下:

(1) 该桥技术状况属 4 类(差), 综合评分 53.6, 结构性能退化严重, 急需大修改造。

(2) 采用新荷载组合(公路-II级、人群 3.5 kN/m<sup>2</sup> 及升降温 25°C/15°C)验算表明, 主拱圈各截面抗压与抗剪承载力均满足要求。

(3) 有限元分析得出, 最优卸加载顺序为“第 1、8 分块→第 3、6 分块→第 2、7 分块→第 4、5 分块”, 该对称方案下弯矩最小。

(4) 实施该方案时, 结构弯矩与轴力小于活载标准值。施工过程中挠度与应力响应均受控(边跨挠度 ±1.6 mm/-0.2 mm, 中跨±1.7 mm/-0.1 mm; 上下缘应力峰值 0.9 MPa、1.2 MPa), 验证了施工过程安全可行。

## 参考文献

- [1] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [2] 孙文杰. 双曲拱桥加固技术研究现状[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(6): 155-157.
- [3] 陈博文. 某双曲拱桥的承载能力评估及加固方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [4] 王文武. 双曲拱桥拆除施工关键技术及施工全过程研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2024.
- [5] 庞培培. 双曲拱桥的病害分析及加固拓宽改造研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2016.
- [6] 顾云佳. 危旧双曲拱桥的病害及加固方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2013.
- [7] 欧亚斌. 双曲拱桥加固技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [8] 张杰, 徐德志. 大跨径多跨连续双曲拱桥承载能力评定及加固方案设计[J]. 公路, 2022, 67(9): 236-240.
- [9] 王蔚, 陈进, 李毅谦, 等. 双曲拱桥复合套拱加固方法及应用[J]. 世界桥梁, 2020, 48(1): 82-86.
- [10] 秦向杰, 何初生, 陈翠丽, 等. 下穿铁路运行条件下双曲拱桥加固优化设计[J]. 公路, 2020, 65(3): 106-110.
- [11] 秦向杰, 何初生, 王雁楠, 等. 南京长江大桥双曲拱桥铺装改造设缝的研究[J]. 公路, 2021, 66(1): 137-141.
- [12] 交通运输部公路科学研究院, 长安大学, 江西省交通运输厅, 东南大学, 北京公科固桥技术有限公司, 江西中煤建设集团有限公司. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/TJ21-2011 [S]. 2011.
- [13] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC183). 钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB/T1499.2-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [14] 中交第一公路工程局有限公司, 四川公路桥梁建设集团有限公司, 湖南路桥建设集团公司, 广东省长大公路工程有限公司, 重庆高速公路集团有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T3650-2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.