

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.035

装配式空心板体外横向预应力加固力学性能研究

韩智强¹, 郭茂泉², 晋民杰¹, 王俊霞³

(1. 太原科技大学 交通与物流学院, 山西 太原 030024; 2. 山西交通科学研究院; 3. 山西通畅工程勘察设计咨询有限公司)

摘要:为研究装配式空心板桥在施加体外横向预应力后的力学变化,以某4×25 m空心板桥为依托工程,基于刚接板法的相关原理,构造铰缝处赘余力典型方程组,计算系数矩阵及荷载项矩阵,并采用通用软件 Ansys 建立仿真模型,分析相关数据。结果表明:空心板桥在施加体外预应力加固后,铰缝受力明显改善,验证了理论正确性,研究结果可为空心板桥加固分析提供参考。

关键词:横向预应力加固; 横向分布系数; 剪力; 横向弯矩

装配式预应力混凝土空心板桥采用企口缝进行横向连接,由于20世纪90年代,中国大部分空心板均采用小铰缝设计,在桥梁运营多年后,结构出现诸多病害,铰缝脱落开裂、空心板单板受力等,已经引起桥梁设计与养护人员高度重视。针对此类桥梁病害,通常采用施加横向预应力进行加固,但对于加固理论分析还不太成熟。传统体外预应力加固分析主要基于铰接板法,即假设结构受力后,结构铰接处只传递剪力,未考虑横向弯矩对其影响,与实际工程较为不符。因此,该文基于传统刚接板法理论,分析空心板桥施加横向预应力后,结构铰缝处的受力机理,构造空心板刚接板法在接缝处赘余力的典型方程组,计算系数矩阵及荷载项矩阵,通过理论分析和模型试验验证方法的合理性和可行性,以便为空心板加固设计分析提供参考。

1 刚接板法计算原理

空心板桥在竖向荷载作用下,在铰缝处产生4个力分量:竖向剪力、横向弯矩、纵向剪力和法向力;通过分析得知:纵向剪力和法向力同另外两个分量相比,对于横向传力贡献较小,为提高计算精度,建议忽略不计,在空心板横向预应力加固受力分析时,主要考虑铰缝处竖向剪力和弯矩传递影响。

假设桥梁横向有 m 块空心板,即有 $m-1$ 条铰缝,通过工程力学相关原理可知,桥梁结构共有 $2(m-1)$ 未知铰接力超静定方程:

$$\{\delta_{ij}\}X_i + \{\delta_{ip}\} = 0 \quad (1)$$

式中: $\delta_{ij}[i, j=1, 2, \dots, 2(m-1)]$ 为铰缝 j 处施加单位正弦铰接力,铰缝 i 处的竖向位移; $X_i (i=1, 2, \dots, m-1)$ 为单位正弦铰接力作用下,铰缝 i 处竖向剪力值; δ_{ip} 为外荷载 P 在铰缝 i 处的竖向位移。

对于系数矩阵 $[\delta_{ij}]$,其表达式如下所示:

$$[\delta_{ij}] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} s & \gamma-1 & & & 0 \\ \gamma-1 & s & \gamma-1 & & \\ & \gamma-1 & s & \gamma-1 & \\ & & \gamma-1 & s & \gamma-1 \\ & & & \gamma-1 & s & \gamma-1 \\ [0 & & & & \gamma-1 & s] \end{bmatrix},$$

$$A_{12} = A_{21}^T = \begin{bmatrix} 0 & \gamma & & & 0 \\ -\gamma & 0 & \gamma & & \\ & -\gamma & 0 & \gamma & \\ & & -\gamma & 0 & \gamma \\ [0 & & & & -\gamma & 0] \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} c & -\gamma & & & 0 \\ -\gamma & c & -\gamma & & \\ & -\gamma & c & -\gamma & \\ & & -\gamma & c & -\gamma \\ [0 & & & & -\gamma & c] \end{bmatrix}.$$

收稿日期:2020-03-12

基金项目:山西省重点研发项目(编号:201803D31076);太原科技大学教学改革项目(编号:201917)

作者简介:韩智强,男,博士研究生,讲师, E-mail:hzqj11987@163.com

式中: A_{11} 为单位剪力 $g_i = 1$ 在铰缝处产生的相对竖向位移; A_{12} 为单位横向弯矩 $m_i = 1$ 在铰缝处产生的相对竖向位移; A_{21} 为单位剪力 $m_i = 1$ 在铰缝处产生的相对转角; A_{22} 为单位横向弯矩 $m_i = 1$ 在铰缝处产生的相对竖向转角。

通过对上述方程求解, 可得出铰接缝处弯矩及剪力值。

2 空心板横向加固仿真分析研究

2.1 工程背景

以某 4×25 m 空心板桥为依托工程, 结构体系为先简支后连续的结构, A 类预应力混凝土构件, 板高 1.15 m, 板宽 1.51 m。空心板采用 C50 混凝土, 铰缝 C40 混凝土, 桥梁上部结构横向共由 8 片空心板组成, 分别为 N1~N8, 墩身为 C40 混凝土, 承台、桩基为 C25 混凝土, 如图 1 所示。

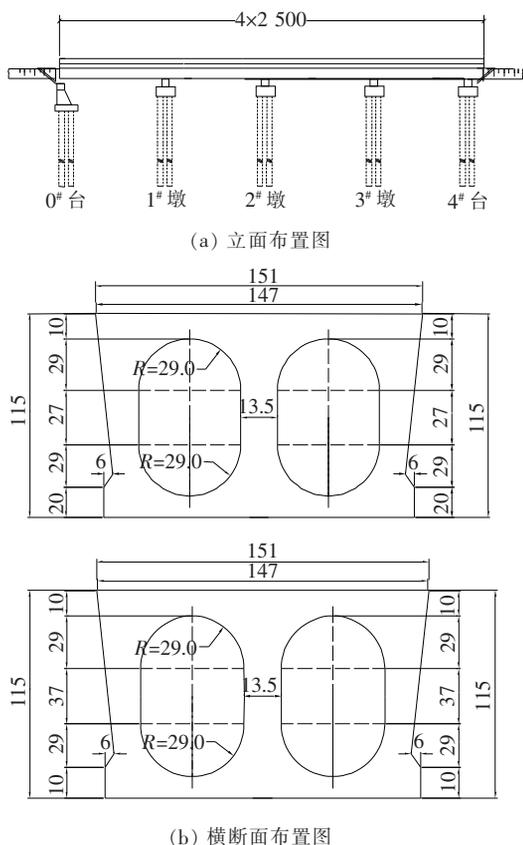


图 1 空心板桥总体布置(单位: cm)

2.2 仿真模型分析

(1) 单元选取。采用通用软件 Ansys 对依托工程进行分析, 其中桥梁混凝土采用 Solid45 单元模拟, 预应力筋采用 Link8 模拟, 建模时主梁与预应力筋通过节点耦合联系, 预应力值通过降温法实现, 其模型示意图见

图 2、3。

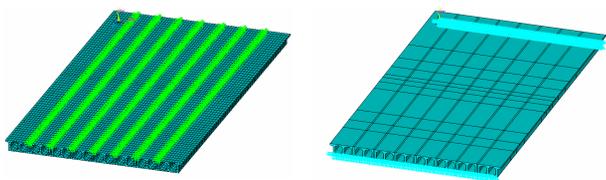


图 2 空心板单元划分模型 图 3 实体模型及约束情况

(2) 横向预应力张拉。在横向预应力布设时, 考虑跨中截面受力较大, 因此, 横向预应力主要考虑跨中附近布设, 并且预应力筋与边板采用刚接, 分别采用单根 173.3 kN 进行张拉。为得出各片主梁的荷载横向分布影响线, 模型采用在各块梁板跨中中心处施加单位竖向荷载。

(3) 加载工况。由于桥梁设计荷载为公路 I 级, 因此, 该文分析单位移动荷载作用桥梁不同位置时, 结构时程位移曲线变化规律, 并在其最不利位置进行工况布载, 通过计算分析, 建立偏载和中载两个工况, 其布载方式如图 4、5 所示。

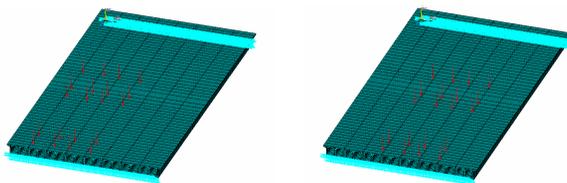


图 4 偏载荷载布置图

图 5 中载荷载布置图

3 结果分析

3.1 荷载横向分布系数分析

通过施加横向体外预应力, 计算分析荷载横向分布影响线变化规律, 并基于各板挠度横向分布影响线竖标值的最大值 Δ_{\max} 、最小值 Δ_{\min} , 提出加固效率 $\eta(\Delta z)$, 即: $\eta(\Delta z) = (\eta\Delta z_{\text{加固前}} - \eta\Delta z_{\text{加固后}}) / \eta\Delta z_{\text{加固前}}$ 作为评价加固效果的指标, 由于上部结构横向对称性, 为简化计算, 该文采用其中一半加以说明, 即 N1~N4, 其结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 桥梁结构施加体外横向预应力后, 8 片板受力较为均匀, 且呈对称分布, 由此可知, 桥梁横向刚度逐渐增大, 荷载协同作用逐渐增强, 横向分布情况较为均匀, 结构体系也由单板受力逐步过渡到多板共同受力, 同时验证模型的正确性。

3.2 横向预应力加固前后力学性能分析

(1) 竖向位移分析: 计算各荷载工况下结构加固前后竖向位移变化, 结果如图 7 和表 1 所示。

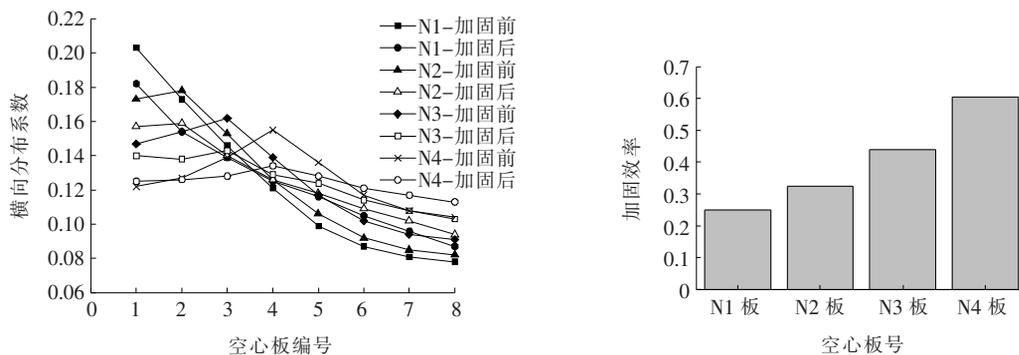
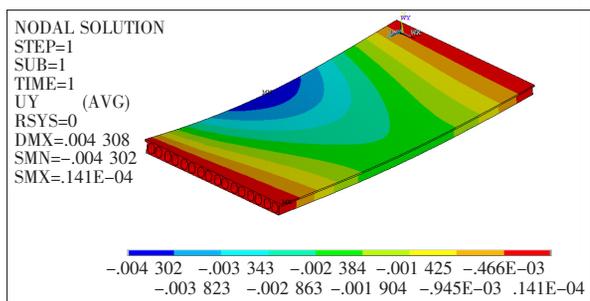
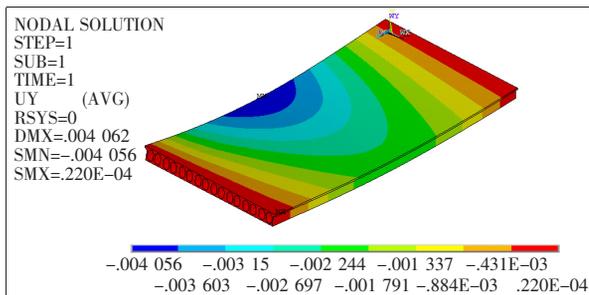


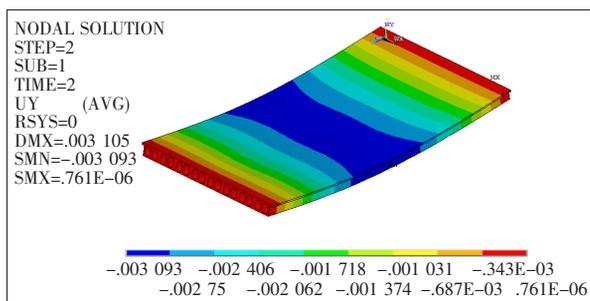
图6 N1~N4板荷载横向分布影响线



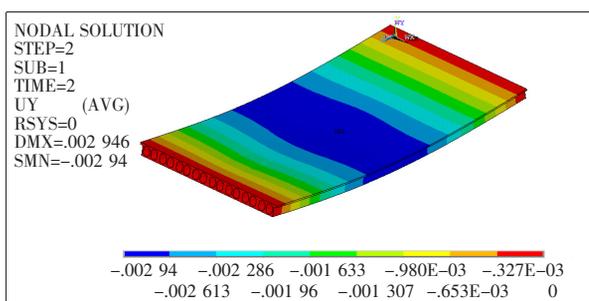
(a) 偏载加固前



(b) 偏载加固后



(c) 中载加固前



(d) 中载加固后

图7 荷载作用下加固前后竖向位移(单位:m)

表1 预应力加固前后竖向位移

位移	加固前最大 竖向位移/mm	加固后最大 竖向位移/mm	增长系数/ %
偏载	4.31	4.06	5.8
中载	3.11	2.95	5.2

比较加固前后的位移云图及其计算结果可知:位移云图逐渐向带状发展,铰接缝处逐渐由铰接向刚接过渡,表明结构在进行横向预应力加固后,桥梁整体横向刚度逐步增强,单板效应逐步改善,同时也验证该类方法的实用性。

(2) 应力分析:计算各荷载工况下结构加固前后应力变化,结果如图8、9所示。

从上述结果可知:

(1) 在中载作用下,结构内力成对称分布,但偏载

作用下,由于外部竖向荷载通过相邻铰缝传递荷载,对直接承受偏载作用的梁板,受力较大,且在跨中位置为结构的最不利位置。同时,各梁板铰缝处受力均以顶板受压、底板受拉为主,并存在拉力和剪力的复合作用。

(2) 加固前应力分布不连续,横向应力分布各梁呈独立受力特点。加固后横向刚度增强,板间由铰接渐变为刚接;底板压应力大幅提高,顶板拉应力有少部分增长,空心板桥由单板受力变为多板共同承载,加固取得了较好效果。

4 结论

(1) 根据刚接板法相关原理,构造空心板铰缝处赘余力的典型方程组,计算系数矩阵及荷载项矩阵。

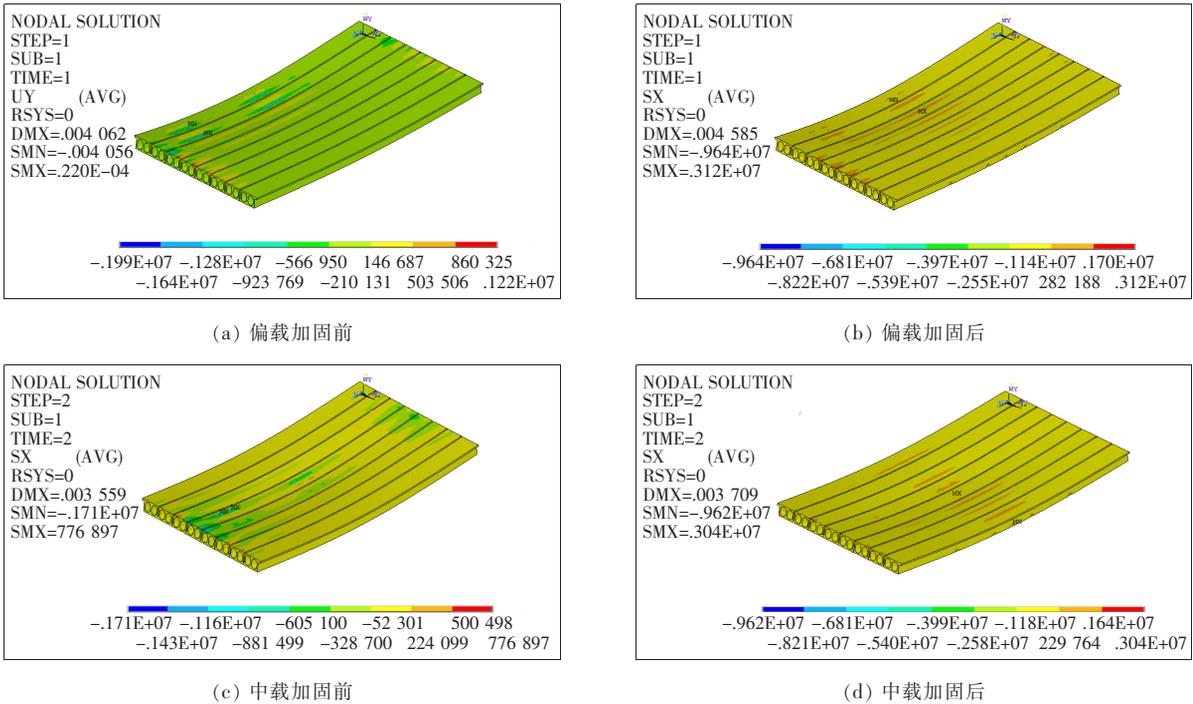


图 8 荷载作用下加固前后应力变化(单位:Pa)

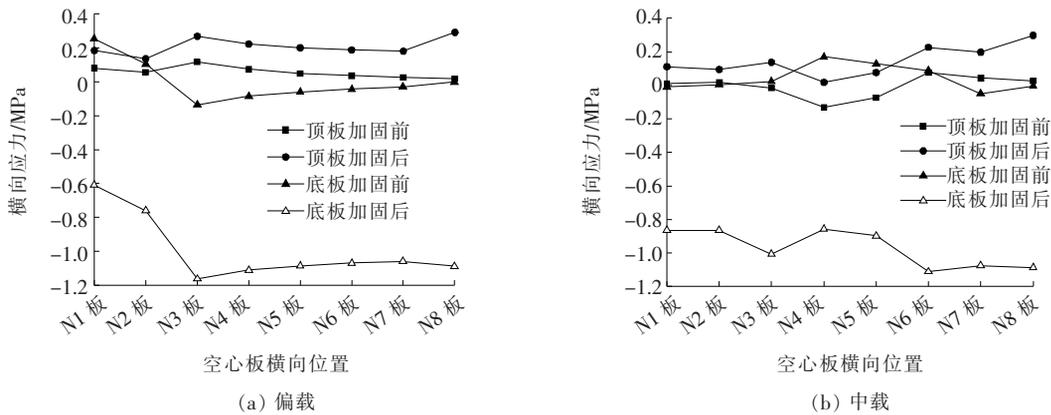


图 9 预应力加固前后跨中截面顶底板横向应力对比

(2) 采用通用软件 Ansys 建立桥梁加固前后仿真模型,并计算得出结构在中载和偏载下,铰缝呈顶面受压、底面受拉状态,并伴有拉剪复合应力出现,其结构弯曲性能显著。

(3) 通过对比分析施加横向预应力加固前、后的各类应力云图,得知加固后底板压应力大幅提高,增强了梁板横向受力,研究方法可为该类桥梁加固设计提供参考。

参考文献:

[1] 张云娜. 施加横向体外预应力加固装配式空心板桥的研究[D] 郑州大学硕士学位论文,2007.
 [2] CHEN Jianbing, AI Jun. Deformation Analysis of In-

service Simple Beam Bridge with External Prestressed Reinforcement [J]. Journal of China & Foreign Highway,2004,24(3):53-56.

[3] 刘小强. 新预应力混凝土板式桥梁设计研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2007.
 [4] 刘平,李鹏飞,李莎. 空心板桥横向预应力加固分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2014(4).
 [5] 乔学礼. 空心板铰缝破坏机理及防治措施研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2008.
 [6] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
 [7] 杨雪峰. 预应力混凝土空心板桥梁加固方法对比分析[J]. 中外公路,2019(3).
 [8] 贾艳敏,郭凯强,赵学,等. 既有预应力混凝土空心板梁设计参数的识别及应用[J]. 中外公路,2017(4).