

中小跨径实腹式石拱桥加固有限元分析研究

祁晓强

中冶建工集团有限公司 重庆 400084

摘要: 针对西部山区大量在役石拱桥承载力不足、加固效果评价缺乏统一标准的现状,本文以增大截面法为技术手段,建立10m、20m、30m跨径实腹式板拱桥有限元模型,提出基于截面应力、加固层利用率及自振频率的三维评价体系。通过对比不同加固厚度(15~40cm)及不同原拱圈强度(C20、C15)下的受力与动力特性,系统分析加固厚度对主拱圈应力分布、材料利用效率及整体刚度的影响规律。结果表明:增大截面法可有效降低主拱圈拉应力与压应力,加固层平均利用率随厚度增加呈先升后降趋势,L/4截面为加固控制敏感截面;原拱圈强度越低,加固效益越显著。综合静力与动力指标,给出Ⅲ类(C20)与Ⅳ类(C15)拱桥在不同跨径下的最优加固厚度范围,为石拱桥加固设计提供理论依据。

关键词: 石拱桥;增大截面法;加固厚度;有限元分析;加固层利用率;自振频率

1 引言

我国西部山区现存大量中小跨径实腹式石拱桥,受超载、材料老化及自然环境侵蚀影响,相当数量的拱桥被评为Ⅲ类或Ⅳ类桥,需进行加固改造。增大截面法(即外包混凝土层)是常用加固技术,但加固层厚度若选取不当,轻则导致材料浪费、加固效率低下,重则增加恒载而消耗原桥承载潜力。目前,石拱桥加固效果的评价多依赖荷载试验,既不经济也不便捷。因此,建立一套基于静力与动力特性的科学评价体系,并明确不同跨径、不同损伤程度下的最优加固厚度,具有重要的工程价值。

本文以重庆地区的典型实腹式板拱桥为研究对象,采用MIDAS/Civil建立10m、20m、30m跨径有限元模型,从原拱圈截面应力变化、加固层利用率及结构自振频率三个维度,系统分析加固厚度(15~40cm)及原拱圈强度(C20、C15)对加固效果的影响,得出经济合理的最优加固厚度范围^[1]。

2 加固效果评价指标与计算方法

2.1 基于组合截面内力的静力评价指标

采用增大截面法加固后,新旧拱圈形成组合截面,在荷载作用下满足平截面假定。原拱圈在加固前已存在较高的初始应力,加固层主要承担后续活载及温度荷载。定义两项核心静力指标:一是原拱圈截面总体应力变化,若加固后原拱圈在所有荷载作用下的最大压应力与拉应力相较于加固前有所降低,则表明加固有效;二是加固层利用率,定义为加固层控制截面的荷载效应最大值与极限承载力之比。该指标反映高强度加固材料的利用效率,若该值过低,则表明截面富余过大,不具经

济性;若该值过高,则意味着安全储备不足。计算公式依据JTGD61-2005《公路圬工桥涵设计规范》中偏心受压构件承载力公式。

2.2 基于自振频率的动力评价指标

加固后结构刚度的增加会直接引起自振频率的提高。频率具有易于测量、精度高(分辨率可达0.1%)的优点,可反映整体加固效果。采用瑞雷-李兹法推导的拱桥平面内振动频率近似公式,通过MIDAS/Civil提取前三阶竖向挠曲频率,以频率提高率作为整体刚度改善的定量指标^[2]。

3 有限元模型建立

3.1 模型参数

选取10m、20m、30m三种跨径的实腹式板拱桥,矢跨比均为1/3,原拱圈厚度0.7m,宽度9.5m,拱圈石料标号取C20(Ⅲ类桥)及C15(Ⅳ类桥)。加固层采用C40混凝土,厚度分别设为15、20、25、30、35、40cm。荷载标准为汽-20级、挂-100,人群荷载3.0kN/m²,考虑温升20℃与温降-10℃。拱上填料厚度大于50cm,不计冲击系数^[3]。

3.2 施工阶段模拟

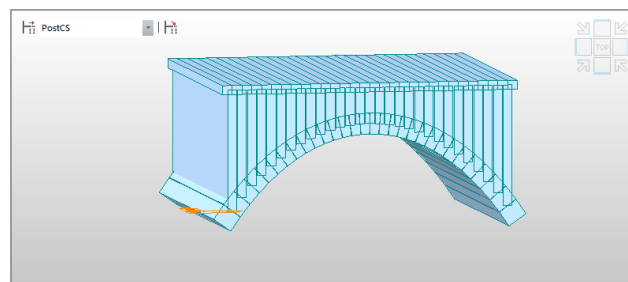


图3.1 实腹式20m跨径桥梁有限元模型

模型分三阶段:第1阶段施加加固层湿重作为均布荷

载；第2阶段激活加固层单元及弹性连接，钝化湿重；第3阶段考虑10年收缩徐变。采用空间梁单元，弹性连接模拟新旧拱圈黏结。典型有限元模型如图3.1所示。

4 加固厚度分析结果

4.1 实腹式10m跨径板拱桥

从应力分析角度看，加固前，主拱圈的最大拉应力为1.33 MPa（位于拱顶），最大压应力为-1.93 MPa（位于拱脚）。加固后，应力呈现显著下降趋势。当加固层厚度为15 cm时，最大拉应力降至0.80 MPa，压应力降至-1.46 MPa；当加固层厚度为40 cm时，拉应力仅为0.44 MPa。在加固层厚度处于20 - 40 cm的范围内，应力减小幅度趋于平缓，且当厚度为30 cm时，拱顶应力出现突变。加固后的应力均满足规范所规定的限值（拉应力限值为1.54 MPa，压应力限值为-13.4 MPa）。

从加固层利用率指标看，在各控制截面中，拱脚与L/8截面的利用率相对较高（约为14% - 16%），L/4截面的利用率趋近于零。结构的平均利用率处于7.67% - 8.22%的区间内，当加固层厚度为20 cm时，平均利用率达到最大值8.22%，这表明20 cm为最经济的加固层厚度^[4]。

从频率提高角度看，第一阶频率从192.00 rad/s最高提升至313.99 rad/s（对应加固层厚度为40 cm），平均提高量从14.51%（加固层厚度为15 cm时）增加至34.69%（加固层厚度为40 cm时），频率与加固层厚度呈正比例关系，比例系数约为4.03。

综合考量应力改善情况、加固层利用率以及经济性等因素，Ⅲ类（C20）10 m拱桥的最优加固厚度为15 - 20 cm。

4.2 实腹式20m跨径板拱桥

加固前最大拉应力1.53MPa（L/4截面），最大压应

力-2.83MPa（拱脚）。加固20cm后，L/4截面拉应力降至0.00MPa，拱脚压应力降至-1.75MPa，各截面应力减小约80%。加固层平均利用率在5.69%~7.58%之间，30cm厚度时利用率最高（7.58%）。频率平均提高量从17.35%（15cm）增至42.02%（40cm），比例系数4.92。

综合判定：Ⅲ类（C20）20m拱桥最优加固厚度为20~25cm。

4.3 实腹式30m跨径板拱桥

加固前拱脚压应力高达-7.27MPa，L/4截面拉应力3.53MPa，已接近甚至超过C20石材强度。加固25cm后，全截面转为受压状态（最大压应力-2.43MPa），拉应力消失；加固30cm后压应力进一步降至-1.96MPa。加固层平均利用率在13.76%~19.74%之间，25cm厚度时利用率最高（19.74%）。频率平均提高量从19.96%（15cm）增至44.21%（40cm），比例系数5.01。

综合判定：Ⅲ类（C20）30m拱桥最优加固厚度为25~30cm。

上述应力变化典型曲线如图4.1-4.3所示。

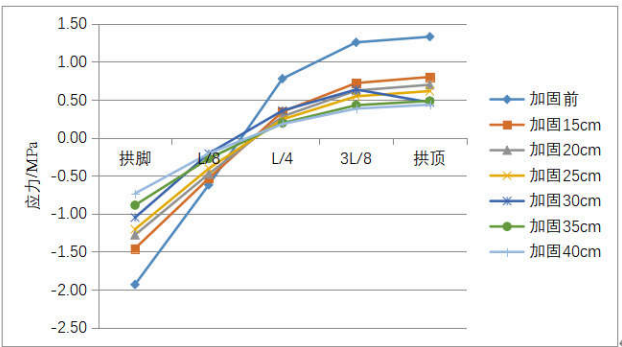


图4.1 10米跨径极限荷载下加固前后主拱圈的应力变化情况

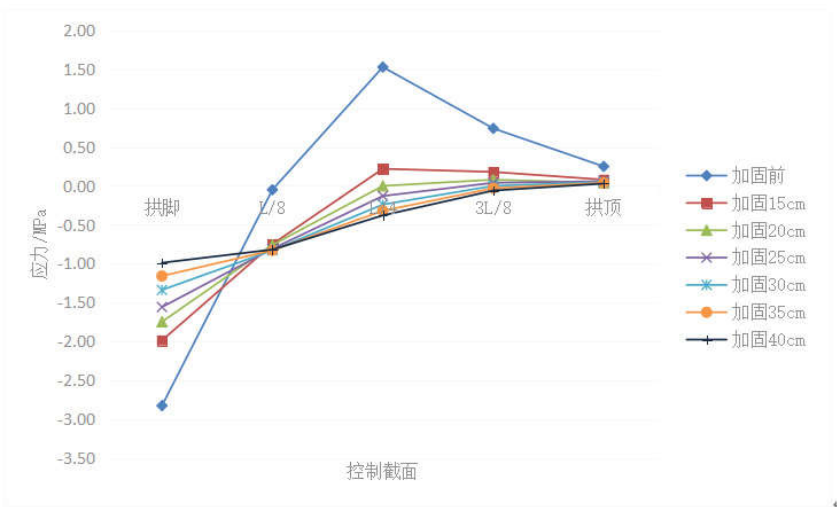


图4.2 20米跨径极限荷载下加固前后主拱圈的应力变化情况

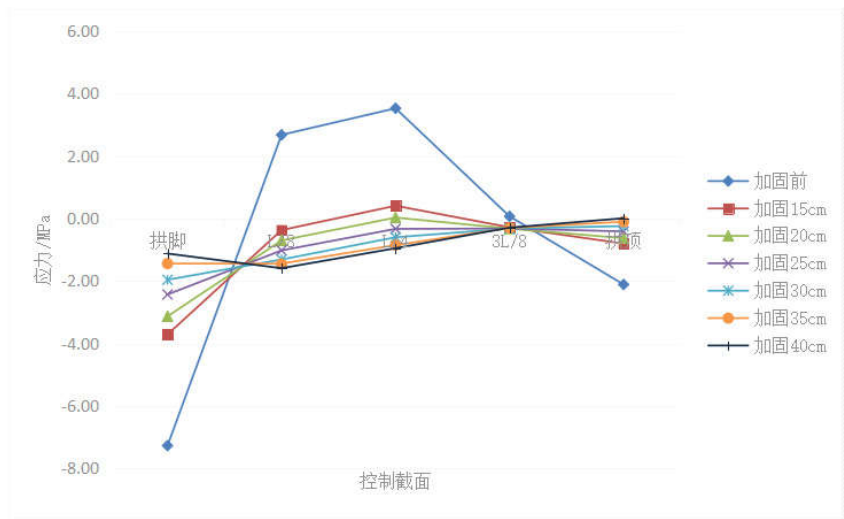


图4.3 30米跨径极限荷载下加固前后主拱圈的应力变化情况

5 原拱圈强度对加固效果的影响

针对Ⅳ类桥（原拱圈强度C15）建立对比模型，并与C20模型比较。结果如下：C15拱桥加固后应力降幅更大。例如30m跨径C15拱桥加固35cm后，拱脚压应力从-7.19MPa降至-1.20MPa，降幅83%，优于C20的80%。C15拱桥的平均利用率峰值（10m：13.59%；20m：12.40%；30m：20.64%）均高于同跨径C20拱桥，表明低强度原结构能更充分发挥加固层高强度材料的潜力。C15拱桥的频率提高比例系数（10m：4.13；20m：5.27；30m：5.34）均大于C20，说明加固对刚度改善更显著。

因此，原拱圈强度越低，增大截面法的加固效益越高。针对Ⅳ类桥，推荐加固厚度相应增加：10m取20~25cm，20m取25~30cm，30m取30~35cm。

6 关键控制截面分析

所有模型均显示：L/4截面的加固层利用率远低于拱脚和拱顶，但该截面的应力降幅却十分显著。以20m跨径C20拱桥加固20cm为例，L/4截面利用率仅0.06%，但拉应力从1.53MPa降至0.00MPa。这说明L/4截面是增大截面法最敏感的控制截面，其受力状态的改善是加固有效性的重要标志。工程中应重点监测L/4截面的应力与变形^[5]。

7 结论

增大截面法可显著降低中小跨径实腹式石拱桥主拱圈拉应力和压应力，加固后应力均匀，满足规范要求。加固效果随厚度增加而增强，但超过一定范围后应力降幅趋缓。加固层平均利用率随厚度增加先升后降，存在最优厚度区间。综合应力、利用率和频率指标，得到不

同跨径及原桥评级下的推荐加固厚度如下表。

表1 不同跨径实腹式石拱桥推荐加固厚度（cm）

计算跨径	主拱圈C20（Ⅲ类桥）	主拱圈C15（Ⅳ类桥）
L = 10m	15~20	20~25
L = 20m	20~25	25~30
L = 30m	25~30	30~35

原拱圈强度越低，增大截面法的加固效益越显著，加固层平均利用率和频率提高率均高于高强原结构。L/4截面是增大截面法加固的最敏感控制截面，尽管其加固层利用率很低，但应力降幅最大，应作为加固设计与监测的重点位置。基于频率的动力特性评价指标与加固厚度呈良好线性关系，可用于快速评估加固后整体刚度提升效果。

参考文献

[1]刘凯涛.有限元快速建模在石拱桥加固设计中的应用[D].长安大学,2023.

[2]郑其华,薛齐.老旧石拱桥加固结构损伤检测方法[J].结构工程师,2026,42(1):32-39.

[3]唐杨,陈大汉,孙庚英,等.增大截面法加固实腹式石拱桥有限元分析[J].喀什大学学报,2025,46(6):53-57. DOI:10.13933/j.cnki.2096-2134.2025.06.009.

[4]马开雄,刘志军,唐建梅.山区重载交通石拱桥维修加固施工技术[J].交通世界,2025,(24):115-117.

[5]李铁盔.套拱法在加固大跨径空腹式石拱桥中的应用[J].工程技术研究,2024,9(7):24-26.