

文章编号: 1002-0268 (2004) 12-0058-04

预应力钢拱加固双曲拱桥的设计分析

袁胜, 田安国, 刘 钊, 吕志涛
(东南大学土木工程学院 江苏 南京 210096)

摘要: 在我国, 由于许多混凝土双曲拱桥荷载设计标准偏低和长期超载, 导致其主拱应力水平过高, 威胁了行车安全, 急待加固。文中首次提出了预应力钢拱承托加固法, 该加固方法可以在不中断交通、不影响通航净空的情况下, 通过在加固钢拱内建立预压应力, 达到有效降低双曲拱桥混凝土主拱的应力水平并提高其承载能力的目的。结合工程实例, 文中分析预应力钢拱承托加固法的设计原理, 并介绍了加固设计方法。

关键词: 桥梁工程; 双曲拱桥; 预应力钢拱; 加固

中图分类号: U455.72 **文献标识码:** A

Analysis of the Method to Strengthen Double-arched Bridge with Prestressed Steel Arch

DING Wen-sheng, TIAN An-guo, LIU Zhao, LV Zhi-tao
(College of Civil Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096 China)

Abstract: Because of lower design load and overloaded traffic, the problem of overstress in main arch is popular for many concrete double-arched bridges. This problem threatens the safety of bridges and vehicle. Therefore, these bridges need urgently to be strengthened. A method of strengthening concrete double-arched bridge is presented to decrease the higher stress level in main arch with prestressed steel arch. At the same time, the traffic is not interrupted and the navigational capacity is not reduced. A successful case is also introduced with detailed analysis.

Key words: Bridge engineering; Prestressed steel arch; Double-arched bridge; Strengthen

在 20 世纪六、七十年代间, 双曲拱桥这种桥梁结构形式在我国被广泛采用。据有关资料统计^[1]: 仅江苏省双曲拱桥最多时占全省干线公路上桥梁总延长的 43%。由于当时双曲拱桥的设计荷载水平较低, 随着经济发展, 公路交通量和车辆荷载日益增大, 许多运营中的双曲拱桥都处于超载状态, 同时双曲拱桥的整体性较差, 在使用 20 多年后, 多数桥梁出现病害, 影响桥梁的安全使用和公路交通的发展, 迫切需要加固和提载。国内一些学者对双曲拱桥的加固方法进行了研究^[1~3], 提出了加大拱肋截面法、拱肋粘贴钢板法、改变结构形式法、加强上部结构减轻重量法等加固方法。

圈向墩台基础传递, 主拱圈的承载能力和应力水平体现了双曲拱桥的承载能力和应力水平; 拱肋除与拱波、拱板、横系梁组成主拱圈参与主拱圈共同工作外, 还起支撑拱波和拱板的作用, 其应力水平最大。本文首次提出采用预应力钢拱承托的加固方法, 在不中断上部交通、不改变桥梁结构的情况下, 通过预应力钢拱对主拱肋的承托, 降低主拱的应力水平, 并使加固结构与原结构共同承担恒载和活荷载, 从而达到有效提高双曲拱桥承载能力的目的。并且在加固后, 基本不增加拱桥结构高度, 不影响桥下通航能力。

1 加固设计原理

针对双曲拱桥的受力特点, 即全部荷载通过主拱

为了说明预应力钢拱承托加固双曲拱桥的机

理, 首先假设有一个不考虑自重影响的圆弧拱 A, 承受均布静水压力荷载 q_a 的作用。此时拱中内力只有轴力, 弯矩和剪力均为零, 处在理想轴压状态, 拱脚支座反力为 $F_R = q_a R$, 如图 1 (a)。现于 A 拱的拱腹设置另一完全相同圆弧拱 B, 两拱完全紧密贴合, 设其接触面为理想光滑状态。对圆弧拱 B 的拱脚沿拱轴线施加推力 F , 则两圆弧拱共同承担外荷载 q_a 和 F , 如图 1 (b)。由于两拱之间为理想光滑, 所以两者之间的相互作用力 q 为轴线径向力如图 1 (c) 所示。此时圆弧拱 A 的拱脚反力 F'_R 可用下式表示

$$F'_R = (q_a - q) R$$

其中, q 为两拱之间相互作用力, R 为圆弧拱的半径。当 $q = q_a$ 时,

$$F'_R = 0$$

此时作用在圆弧拱 B 上的拱轴推力 F 为

$$F = qR = q_a R = F_R$$

设外荷载增加了 Δq 时, 由于原圆弧拱 A 和承托圆弧 B 拱具有完全相同的几何和力学特性, 所以

$$\Delta F_R = \Delta F = \frac{1}{2} \Delta q R$$

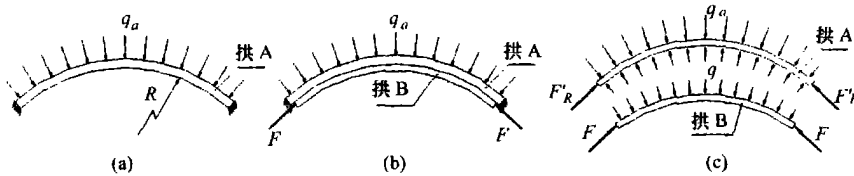


图 1 加固原理示意图

由以上分析可以看出, 在理想状态下, 通过对下部承托圆弧拱 B 施加轴向推力, 可以将原承载圆弧拱 A 的内力完全卸除。如加固结构 (承托圆弧拱 B) 支承在原拱结构 (圆弧拱 A) 的基础上时, 则基础承担的荷载仅与外荷载有关, 加固结构内的预应力不会增加基础荷载。当加固结构和原拱结构分别作用在各自独立的基础上时, 即使外荷载增加, 也可以通过调节加固结构的内部预应力来降低原结构的基础荷载, 使加固结构和原结构不但能够共同承担新增荷载, 而且加固结构及其基础的承载力能得到有效利用。

上述加固机理在实际运用时, 可以根据混凝土双曲拱桥主拱和基础的实际承载力, 合理选择加固钢拱的预应力大小和基础形式 (是否与原拱共用同一基础), 达到加固、提载的设计要求。

2 加固设计与有限元分析

预应力钢拱加固双曲拱桥的设计可按照以下步骤进行: 首先通过现场测试和分析计算对双曲拱桥的损伤状况和承载能力进行评定; 然后根据评定结果, 结合对加固、提载等级的要求, 分析计算确定加固钢拱内的预应力水平和加固后双曲拱桥各构件的应力水平; 进行加固钢拱的截面设计、构造设计, 原桥混凝土构件的加固补强设计, 加固施工设计; 最后进行承载力验算。

由于双曲拱桥的实际拱轴线是一条近似倒悬链线, 作用在主拱肋上的荷载较为复杂, 加固钢拱与原桥之间的相互作用也十分复杂, 所以可采用有限元分

析。空间有限元是进行原桥结构的受力状况模拟、加固钢拱与原结构之间的相互作用分析、确定加固钢拱内预应力的有效工具。针对本加固方法的特点, 结合大型有限元软件 SAP2000, 以下对加固设计和有限元分析中的一些主要问题加以讨论。

2.1 加固钢拱预应力的确定

加固钢拱内预应力的确定, 是本加固设计的关键。从原理上讲, 在保证加固钢拱的自身强度和稳定的条件下, 加大加固钢拱内的预应力水平可以将原双曲拱桥主拱的应力降到很低。但是, 施加过大的预应力不仅会增加加固结构的造价, 更主要的是, 由于双曲拱桥的整体性较差, 混凝土拱肋在长期压应力的作用下产生了不可恢复的徐变变形, 过大的钢拱顶推力会破坏原桥的整体性, 甚至会在拱肋中产生拉应力, 造成结构新的损伤。所以, 在设计加固钢拱的顶推力时应充分考虑原桥主拱肋的应力水平、原桥的损伤情况、加固提载的等级以及钢拱与原主拱肋之间摩擦力导致的预应力损失等因素, 同时要利用有限元计算分析手段, 确定加固钢拱对原桥主要构件应力变化的影响, 在确保安全的情况下, 充分利用原桥的承载力。

2.2 加固钢拱与原结构间粘结

由前面加固原理的分析知道, 加固钢拱对原主拱结构的卸荷加固作用主要是通过接触面的径向相互作用实现的, 但由于双曲拱桥的拱轴线不是恒载下的理想拱轴线, 原主拱肋内同时存在轴力、弯矩和剪力, 所以它与加固钢拱接触面之间的同时存在有径向力和切向力, 保证剪切力有效传递有利于两者在活荷载下

的共同工作。

在加固钢拱与原主拱肋接触面间使用粘结剂有利于两者的共同工作，但在对钢拱施加预应力阶段，粘结剂产生的剪切力会增加钢拱内的预应力损失，不利于钢拱内预应力的均匀分布，所以应选择早期流动性好、初凝时间长、后期强度高的粘结剂。由于混凝土主拱肋内存在弯矩，所以在加固钢拱和混凝土拱肋的粘结面间还会产生拉应力，为防止粘结面抗拉强度不足，应在加固钢拱上设置吊耳板，在顶推结束后与主拱肋两侧可靠连接。

2 3 有限元建模

双曲拱桥属于空间结构，拱上建筑和主拱圈共同工作具有明显的空间效应，所以在有限元的建模中应准确反映结构的空

间特点，同时采用恰当的单元来模拟结构中各个构件的工作性能。在双曲拱桥中，拱肋、立柱、卧梁、盖梁等采用梁单元模拟，拱波、拱板、路面刚性层应采用厚板单元模拟。

双曲拱桥中常见的病害，裂缝截面处拱波和拱板的抗弯能力大大减弱，仅能承担很小的弯矩，利用 SAP2000 提供的节点约束释放的办法^[4]，释放该处单元的转动约束，可以较好地模拟这类结构损伤。同时，拱波和拱板是装配整体式构件。如果整体性较差，在建模时可根据裂缝开展情况对其有效结构厚度进行折减。

双曲拱桥拱肋与拱脚的连接有预制和现浇整体两种方式。对于现浇整体式的拱脚构造，如果在使用中没有出现大的拱脚裂缝的情况，可以采用固接方式。如果采用的是将预制拱肋插入拱脚预留浅槽的构造，同时出现较大的拱脚裂缝则应释放拱脚转动约束。

加固钢拱与原拱肋之间的粘结根据等效剪切刚度的原则，通过在两者节点间设置剪切单元来模拟。加固钢拱内的预应力可以通过温度应力的方式模拟。

3 工程实例

利用预应力钢拱加固双曲拱桥的方法，对扬州市内某钢筋混凝土双曲拱桥进行了加固，使该桥的承载能力由原先的汽-13 提高到汽-20。图 2 为该桥主拱加固示意图。

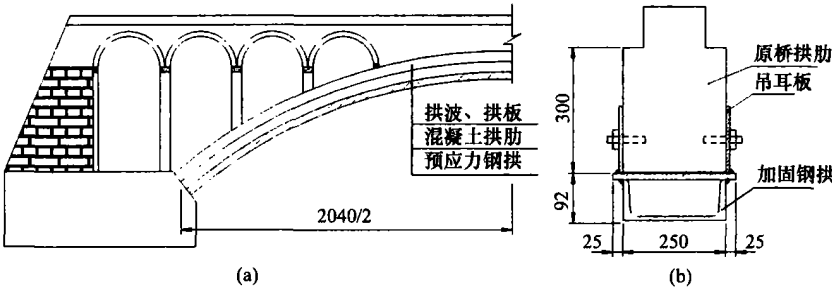


图 2 扬州桥主拱加固示意图

该桥建于 1976 年，跨径为 20.4m，矢高 3.9m，桥面宽 10.65m，5 肋 4 波。通过对该桥的现场检测，发现该桥的主体构件施工质量较好，主拱肋上除局部因保护层破坏而导致钢筋锈蚀外无横向裂缝，根据现场回弹检测混凝土强度达到 25 号；微弯板基本完好，局部有宽 1~2mm 的顺桥向裂缝；病害主要表现在：横系梁与主拱肋之间的连接处混凝土脱落，钢筋锈蚀普遍存在；部分腹拱拱顶有横桥向的裂缝，裂缝宽度为 2~3mm；尤其是两侧引桥腹拱，拱顶裂缝宽达近 10mm，而且基本都是贯穿裂缝，严重威胁了桥梁行车的安全。

为了进一步评估该桥的结构状况，一方面，我们对该桥进行了加载试验，采用 2 辆 15t 加载车辆沿桥面中线并行，试验表明：在试验荷载的作用下，主拱肋没有出现

的横向裂缝，沿竖向变形小于 $L/1000$ ，拱脚处的水平位移很小（现场测试值为零）。另一方面，我们根据现场测绘的数据建立了空间有限元模型，如图 3，并根据试验情况进行了有限元分析计算，主拱应力的有限元计算结果见表 1。

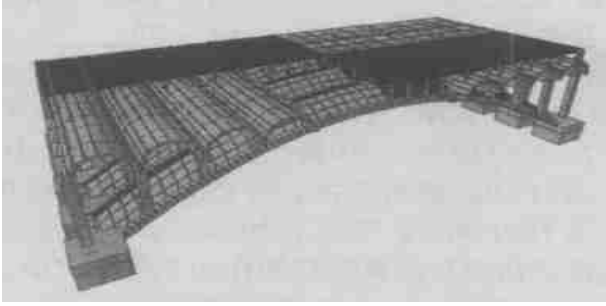


图 3 双曲拱桥的空间有限元模型（去除 1/4 桥面板）

由表 1 可见，原双曲拱桥拱肋在横载和试验车载的组合作用下，应力水平较高，拱肋中最大压应力达

表 1 原桥主拱内力值

荷载组合	N_{max}/kN				M_{max}/MPa	σ_{max}/MPa		
	拱脚	1L/8	1L/4	3L/8	拱顶	拱肋	拱肋	拱板
恒载	714	523	471	451	472	-18.4	8.10	3.3
恒载+试验车载	840	640	590	531	526	-37.1	9.43	4.1

到 9.43MPa 超过了 25 号混凝土的 $[\sigma]$ 。结合现场试验和有限元应力分析可以看出，原双曲拱桥主体质量较好，有一定的超载能力，但达不到汽-20 的要求，

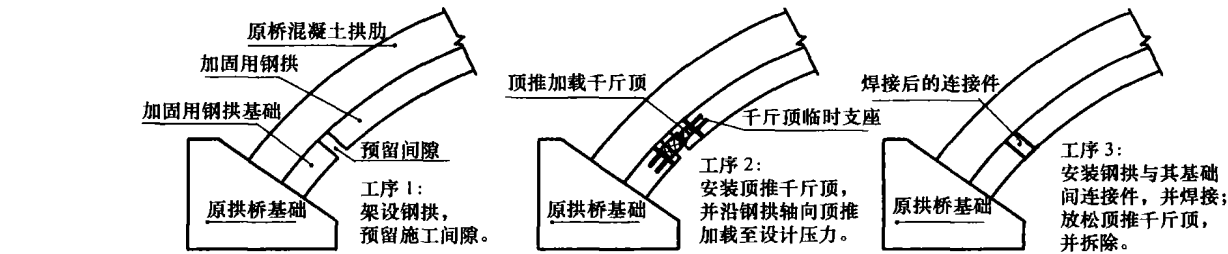


图 4 加固钢拱中预压应力建立过程示意图

根据规范^[9]，本文采用汽-20，挂-100 的荷载标准对加固后的双曲拱桥进行有限元分析计算，计算中忽略温度内力。表 2、表 3 分别给出了加固后的双曲拱桥在不同荷载组合下主拱截面和加固钢拱截面的内力，其中，横载中包括自重和加固钢拱的预应力。

表 2 加固后混凝土主拱内力值

荷载组合	N_{max}/kN				M_{max}/MPa	σ_{max}/MPa		
	拱脚	1L/8	1L/4	3L/8	拱顶	拱肋内	拱肋	拱板
恒载	577	379	323	301	322	-4.40	6.41	2.1
恒载+人群+汽-20	755	569	512	481	469	-27.6	8.39	3.7
恒载+挂-100	821	635	572	538	529	-28.4	8.97	4.3

表 3 加固钢拱内力值

荷载组合	$N_{\max } / \mathrm{kN}$					强度利用率
	拱脚	1L/8	1L/4	3L/8	拱顶	$\sigma_{\max } / [\sigma]$
恒载	150	150	148	144	134	9.2%
恒载+人群+汽-20	340	297	279	274	219	20.8%
恒载+挂-100	355	348	343	318	201	21.8%

由表 1、表 2 可见：经加固后，混凝土双曲拱桥在汽-20 设计荷载下，拱肋内的最大压力值为 755kN，相当于加固前拱桥在恒载作用下拱肋最大压力的 106%，小于加固前拱桥在 2 辆 15t 加载车辆作用下拱肋最大压力的 90%。而且，加固后，混凝土拱肋和拱板在设计荷载和验算荷载的作用下的最大应力均小于材料的许用应力，满足了规范的要求。由表 3 可见，加固钢拱的内力在验算荷载下最大达到 355kN，

且在试验荷载下，拱肋的压应力超过了许用应力，安全储备不足。因此，拟采用预应力钢拱承托法降低主拱肋的应力水平，达到加固和提载的目的。

由于箱形截面具有截面稳定性好，结构自重小，能够承受较大的截面内力，因此选择了由 25b 槽钢和 12mm 厚钢板围焊组成的箱形截面作为加固钢拱截面，如图 2 (b)。加固钢拱内有效预压力设计值为 150kN。加固钢拱内预压应力的建立过程如图 4。

其强度得到了有效的发挥。

4 结论

(1) 采用预加应力钢拱承托法加固双曲拱桥，可以有效地减小原桥结构中混凝土的应力水平，较大地提高原桥的承载能力，避免了常规加固方法中的自重增加较大，新、老混凝土之间粘结不好、加固结构在使用中应力水平低不能发挥自身强度的问题。

(2) 合理选择预应力钢拱中的预加应力，可以有效地发挥加固材料的高强特性，在减少加固结构的应力滞后的同时充分利用原结构的强度，使加固方案更加经济可靠。

(3) 本加固方法不需中断原桥交通，几乎不影响桥下通航能力，对原桥的基础影响较小，具有比较广泛的适用性。

参考文献:

[1] 李仁志, 赵焕春, 等. 双曲拱桥的加固与技术改造 [J]. 东北公路, 1996 (3): 78—83.

[2] 胡钊芳, 谌润水. 公路旧桥加固与提载技术研究及实例 [J]. 公路, 2002 (2): 14—16.

[3] 吴国雄, 王东, 等. 锚喷与碳纤维在双曲拱桥加固中的应用研究 [J]. 公路, 2001 (8): 59—62.

[4] Computers and Structures, Inc. SAP2000 Analysis Reference [Z]. Berkeley, California, USA: 1999.

[5] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTJ023-85) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.