

# 某混凝土空心板桥预应力筋断裂后 承载力分析及加固评定

王中强, 龚超超, 李昌霖

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 利用 Midas/Civil 有限元分析软件, 采用梁格法对预应力筋断裂后的混凝土空心板桥进行有限元建模, 建立桥梁上部结构的计算模型, 实现了混凝土空心板桥预应力筋断裂后静力学性能的仿真计算, 分析了预应力筋断裂对混凝土空心板桥的极限承载力的影响。拟采用纵向体外预应力加固形式对预应力筋断裂后混凝土空心板桥进行加固, 并对该桥加固前、后的极限承载力进行对比分析, 评价加固效果。

**关键词:** 混凝土空心板桥; 预应力筋断裂; 承载力; 纵向体外预应力; 加固

装配式预应力混凝土空心板桥与普通混凝土桥相比, 具有自重轻、桥下净空限制小、方便制作和架设, 且破坏后易修复等优点而被广泛使用。预应力筋作为预应力混凝土空心板桥重要受力材料, 一旦在外力作用下发生预应力筋断裂, 预应力混凝土空心板桥承载力易出现较大程度的降低, 极有可能引起整个桥梁上部结构出现脆性破坏, 给桥梁的使用安全带来隐患。因此, 对于这种因预应力筋断裂而导致桥梁承载力不足的加固研究非常重要。该文对某预应力筋断裂后的装配式混凝土空心板桥采用纵向张拉体外预应力进行加固, 并利用有限元分析软件 Midas/Civil, 采用梁格法对桥梁进行建模分析计算, 并对该桥加固前、后的承载力进行分析验算, 以评价加固效果。

预应力钢丝先后断裂。为了消除安全隐患, 确保该桥梁的运营安全, 必须对桥梁进行承载力分析, 并根据计算分析结果给出合理的处理建议。

空心板桥主要材料性能为: 空心板、桥面铺装采用 C40 混凝土, C40 强度标准值  $f_{ck} = 26.8$  MPa,  $f_{tk} = 2.39$  MPa; 普通钢筋采用 HRB400 钢筋, 抗拉强度标准值  $f_{sk} = 400$  MPa; HPB300 钢筋, 抗拉强度标准值  $f_{sk} = 300$  MPa; 纵向预应力筋 N1、N2 分别为  $4\phi^s 15.2$  及  $3\phi^s 15.2$  两种规格, 极限强度标准值  $f_{pTk} = 1\ 860$  MPa, 弹性模量为  $1.95 \times 10^5$  MPa; 混凝土重度为  $\gamma = 26$  kN/m<sup>3</sup>, 弹性模量为  $3.45 \times 10^4$  MPa; 沥青混凝土重度为  $\gamma = 24$  kN/m<sup>3</sup>。全桥横断面图、板的横断面配筋图分别如图 1~3 所示。

## 1 计算模型建立

### 1.1 工程概况

某装配式混凝土空心板桥上部结构为  $2 \times 13$  m 预应力混凝土空心板, 每跨共 5 块板, 左、右边板宽 1.87 m, 中板宽 1.24 m, 板与板之间为铰缝, 设计荷载为公路—II 级。在运营过程中, 由于架设自来水管工作人员钻孔疏忽, 使北侧一跨预应力空心边板预应力钢束 N1 中钢丝遭受较严重机械损伤, 钢丝损伤后截面减小, 应力急剧增长导致钢束 N1 中一根钢绞线的

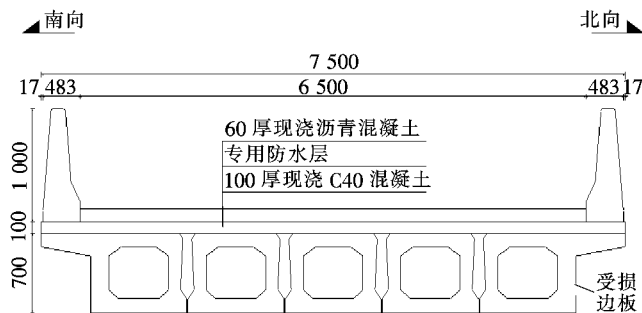


图1 全桥横断面图(单位:mm)

### 1.2 计算模型

运用 Midas/Civil 有限元程序, 采用梁格法对桥

收稿日期: 2018-08-26

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(编号: 18A128); 长沙理工大学土木工程湖南省重点学科创新型项目(编号: 13ZDXK08)

作者简介: 王中强, 男, 博士, 副教授. E-mail: 244949212@qq.com

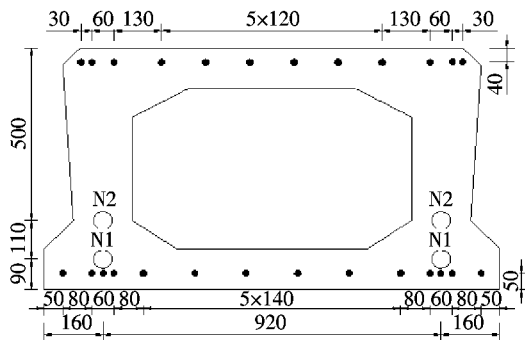


图 2 中板跨中横断面配筋图(单位:mm)

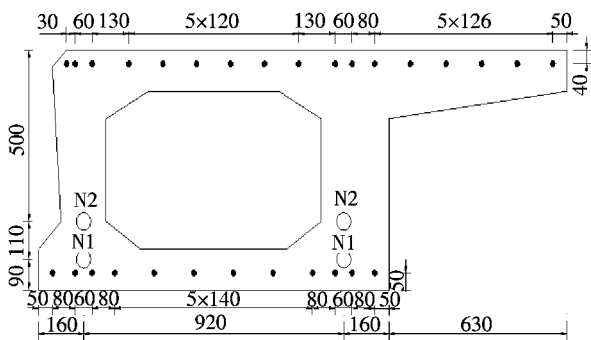


图 3 边板跨中横断面配筋图(单位:mm)

梁进行有限元建模。在进行有限元建模时,桥面铺装的 C40 混凝土、沥青混凝土及钢筋混凝土防撞护栏,均通过梁单元荷载定义为均布荷载,同时考虑结构自重、二期恒载、温度荷载及汽车荷载对结构的影响。将全桥划分为 200 个梁单元,其中虚拟横梁 120 个单元,节点 200 个,共设支座 20 个。为模拟主梁与支座整体受力的真实情况,将梁顶节点与支座顶节点之间采用刚性连接。为较真实地模拟出实际桥梁的支座约束,对支座顶节点与支座下端节点进行弹性连接,并以实际支座刚度定义一般弹性连接的刚度。桥墩部分由于刚度很大,不另外建立模型只输入边界条件,考虑墩顶处结构是全约束的,对所有的支座下端节点按固结约束。由于板与板之间采用铰缝连接,只考虑剪力的传递,故梁格法中对虚拟横梁铰接缝通过释放梁端约束来模拟。

在计算模型中,为了分析边板预应力筋断裂对该桥承载性能的影响,真实地反映桥梁在多种荷载组合作用下的力学行为,在 Midas/Civil 中建立了 5 种荷载工况:工况 1:自重;工况 2:二期恒载;工况 3:预应力荷载;工况 4:温度荷载;工况 5:汽车荷载。根据 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》对温度荷载和汽车荷载进行取值。针对上部结构空心板持久状态承载能力极限状态计算,得到中板、边板的正截面抗弯及斜截面抗剪承载力,对比分析该桥预应力筋断裂前后承载力的变化,并根据计算结果对该桥给出安全合理的处理建议。

1.3 计算理论

目前利用有限元分析桥梁结构内力的方法,主要包括空间梁单元法、板壳元法、三维实体元法和梁格法。其中,空间梁单元法虽然可以计算截面内力和变形,但是不能得到内力的横向分布;板壳元法和三维实体元法建立的模型比较复杂,计算工作量大且花费高昂;梁格法因理论清楚便于理解、计算速度快、精度较高的优点,在实际工程中作为桥梁上部结构空间分析的一种有效方法而被广泛使用。梁格法的基本原理是将桥梁上部结构用等效梁格来代替,将板、梁在每一区段内分散的弯曲刚度和抗扭刚度集中到最邻近的等效梁格内,纵向梁格构件内集中了实际结构的纵向刚度,横向梁格构件内集中了实际结构的横向刚度。基于梁格法原理,将原型板梁中心线作为纵梁,各片纵梁间的连接用虚拟的短横梁模拟,短横梁截面近似按工字形截面考虑,对空心板梁之间实际铰缝连接设为铰接,更真实地模拟出装配式空心板桥上部结构的受力特点。

2 计算结果及分析

2.1 加固前持久状况承载能力极限状态计算

在进行承载能力极限状态计算时,考虑普通钢筋影响,作用效应采用基本组合分析计算,该桥北侧边板预应力筋断裂后受损边板、相邻中板持久状况承载能力极限状态内力计算结果如表 1 所示。

表 1 加固前受损边板、相邻中板持久状况承载能力极限状态内力计算结果

部位	正截面最大正弯矩			斜截面最大剪力		
	效应值/ (kN·m)	抗力/ (kN·m)	富余量/ %	效应值/ kN	抗力/ kN	富余量/ %
受损边板	1 093.09	1 432.58	23.70	-411.42	1 733.86	76.27
相邻中板	857.75	1 322.32	35.13	-309.47	1 731.01	82.12

由表 1 可知:该桥在使用过程中由于边板预应力筋 N1 一根钢绞线断裂引起预应力损失,虽然相邻中板正截面抗弯承载力和斜截面抗剪承载力储备仍有较大富余,但受损边板正截面的抗弯承载力储备明显降低。考虑到桥梁运营后期交通量会增大,以及运营中可能出现的其他病害,为了提升该桥梁的承载能力,从安全性和经济性等其他方面综合考虑,选择对受损的边板采用体外预应力加固。

2.2 加固后持久状况承载能力极限状态计算

对受损边板采用斜撑式体外预应力筋加固方式,水平筋选用 $2\phi^{s}15.2$ 无黏结预应力钢绞线,斜撑选择

槽形钢,采取张拉水平筋的方式对边板施加预应力,设计锚下张拉控制应力 1 395 MPa,受损边板体外预应力加固示意图如图 4 所示。通过有限元分析程序 Midas/Civil 对加固后结构的受力情况进行计算,加固后受损边板、相邻中板持久状况承载能力极限状态内力计算结果见表 2。

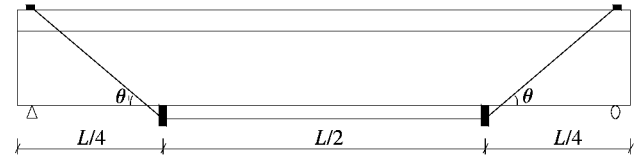


图 4 受损边板体外预应力加固示意图

表 2 加固后受损边板、相邻中板持久状况承载能力极限状态内力计算结果

部位	正截面最大正弯矩			斜截面最大剪力		
	效应值/ (kN·m)	抗力/ (kN·m)	富余量/ %	效应值/ kN	抗力/ kN	富余量/ %
受损边板	1 144.08	1 696.67	32.57	-419.80	1 799.90	76.68
相邻中板	843.78	1 322.32	36.19	-307.59	1 731.01	82.23

由表 1、2 计算结果对比可知:对该桥受损边板采用斜撑式体外预应力筋加固后,受损边板正截面抗弯承载力富余量提升 8.87%,而相邻中板的正截面抗弯承载力富余量提升 1.06%;受损边板的斜截面抗剪承载力富余量提升 0.41%,而相邻中板的斜截面抗剪承载力富余量提升 0.11%。结果表明:该桥加固后受损边板正截面抗弯承载力提高明显,而相邻中板的正截面抗弯承载力无明显提高;虽然受损边板和相邻中板斜截面抗剪承载力提升不明显,但仍能满足其斜截面抗剪承载力的要求。

3 加固效果评定

为评定该空心板桥加固后的承载性能能否满足有关规范要求,根据结构理论分析的 3 项承载性能指标对该加固桥梁进行计算,结果见表 3。

表 3 承载性能指标计算结果

承载能力 安全程度 $K_R$	承载能力 加固效率 $E_R/\%$	活载评定系数 $R_H$
1.48	18.43	1.35

由表 3 可得:

(1) 在承载能力极限状态的基本组合作用下,加

固后的结构有超过 40% 的承载能力富余量,说明该桥梁结构通过采用斜撑式体外预应力筋加固可以在持久状况下满足承载能力的要求。

(2) 由承载能力提高率  $K_R = 18.43\%$  可知:加固后的结构有接近 20% 的承载能力提高率,从桥梁承载能力角度来说加固后的结构比加固前有了较大幅度的提高,也从另一方面更直观地证明采用斜撑式体外预应力筋加固对提高原有结构承载力具有显著的效果。

(3) 由活载评定系数可知:加固后的桥梁结构能够较好地适应当前交通量下的荷载状况。

4 结论

(1) 装配式混凝土空心板边板预应力筋的断裂,虽然对相邻中板正截面抗弯承载力和斜截面抗剪承载力的影响并不明显,但是受损边板的正截面抗弯承载力明显降低,而斜截面抗剪承载力仍有较大富余。

(2) 采用纵向体外预应力加固装配式混凝土空心板桥对因外力造成空心板桥局部某一板梁承载能力不足的加固效果比较明显,对提高桥梁上部结构整体的承载能力有一定的局限性。

(3) 依据综合评定法及结构理论分析计算,将承载能力安全程度、承载能力加固效率以及活载评定系数 3 项指标作为评价桥梁结构承载性能的方法,并通

# 钢筋混凝土圆管涵管壁混凝土强度的试验研究

马运朝<sup>1</sup>, 李修坤<sup>2</sup>, 王双喜<sup>2</sup>

(1.湖北交通职业技术学院, 湖北 武汉 430079; 2.湖北省交通投资集团有限公司)

**摘要:**为探究不同制作工艺对钢筋混凝土圆管涵管壁混凝土强度的影响,对混凝土管涵切割弧形板式构件进行了弯曲抗拉试验、回弹试验和柱体抗压试验,分析了人工浇捣管涵、一次投料离心管涵和两次投料离心管涵的内外壁混凝土强度差异。试验结果表明:离心管涵的混凝土强度与人工浇捣管涵有较大的差异;离心法制管的投料方式对管涵内壁的混凝土强度有明显的影响;管涵内外壁混凝土强度的差异随着管涵内径和壁厚的增加而显著增大。基于试验数据分析与理论计算验证,对内外壁混凝土强度差异产生的原因进行了机理分析,并提出了钢筋混凝土管涵内外壁混凝土抗压强度和抗拉强度的调整系数。该系数考虑了不同制作工艺对管涵混凝土强度的影响,可应用于此类混凝土管涵的结构设计分析中。

**关键词:**钢筋混凝土;圆管涵;抗拉强度;抗压强度

钢筋混凝土圆管涵一般采用离心悬辊工艺或人工浇捣法制作成型,其中离心悬辊工艺因具有设备简单、生产便利、预制周期短等特点而得到了更为广泛的应用。采用离心悬辊工艺生产时,混凝土可采用一次成型或两次成型的方法进行浇注。一次成型法即为一次性连续投料直至管涵成型;两次成型法需在投料至2/3壁厚时暂停浇筑并采取排水措施,在积水排尽后再继续浇筑。采用离心法制管时,混凝土平均强度相比于人工浇捣管涵会有所提高,但离心作用使混凝土混合物产生离析,导致管涵混凝土强度沿壁厚方向的分布极不均匀,外壁的混凝土强度显著高于内壁,内壁混凝土强度有可能低于人工浇捣的管涵。然而,现行的钢筋混凝土圆管涵计算公式均未考虑离心管涵内外壁混凝土强度的差异,其内外壁混凝土设计强度取为一致,

这样便高估了离心管涵内壁的混凝土强度,并且未充分利用离心管涵外壁的混凝土强度。

在中国高等级公路中广为应用的、按现行规范设计的钢筋混凝土圆管涵中,在施工和运营阶段,离心管涵的开裂现象比较普遍。而管涵壁混凝土强度是影响管涵抗裂能力和极限承载能力计算的主要因素,因此合理确定离心管涵管壁混凝土强度显得极为重要。此外,离心管涵可沿壁厚方向将混凝土分为多层,每层混凝土强度均不相同,而现行的诸多混凝土测试方法,如回弹法、超声波法、拔出法和钻芯法等,或测试精度有限、或只能评定离心管涵混凝土的平均强度,均无法准确测量混凝土强度沿管涵壁厚方向的变化。因此,为合理确定离心管涵内外壁混凝土强度的真实取值,该文对不同工艺制作的管涵和管涵切割试块进行试验测

过对混凝土空心板预应力筋断裂加固前、后的极限承载力的计算分析,验证了这3项指标对于桥梁结构承载性能评估的合理性。

## 参考文献:

- [1] 陈淮,张云娜.施加横向预应力加固装配式空心板桥研究[J].公路交通科技,2008(10).
- [2] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 葛俊颖.桥梁工程软件 Midas Civil 使用指南[M].北京:人

民交通出版社,2013.

- [4] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].
- [5] 戴公连,李建桥.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 江林祥,易汉斌,俞博.体外预应力加固桥梁技术与工程实例[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [7] JTG/T J21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [8] 交通部第二公路勘察设计院.公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)[M].北京:人民交通出版社,1991.

收稿日期:2018-09-17

作者简介:马运朝,男,高级工程师,E-mail:117236439@qq.com