

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.09.028

折板式竖井折板间隔对水流水力特性影响分析

孙迎霞¹, 薛英文^{2,3}, 梁舒豪⁴

[1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 湖北省城市综合防灾与消防救援工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072; 4. 湖南省建筑设计院有限公司, 湖南 长沙 410011]

摘 要: 为研究折板间隔对折板式竖井内水流的水力特性影响, 采用 Realizable k- ϵ 模型结合 VOF 模型对不同折板间隔的竖井进行数值计算。结果表明: 折板间隔是竖井较为关键的影响因素; 随着折板间隔的增大, 折板上水流流态会从往复跌水流逐渐过渡为 S 型贴壁流, 折板或壁面受到的冲击以及冲刷作用也会逐渐增大; 无论折板上水流流态为往复跌水流, 还是 S 型贴壁流, 竖井消能率基本都在 90% 以上, 受折板间隔影响较小。

关键词: 折板间隔; 折板式竖井; 水力特性; 数值模拟; 消能

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0114-05

0 引言

折板式竖井^[1], 一种常用于深隧^[2]工程的水工消能构筑物, 可以将市政排水系统中的雨、污水或合流污水转输到隧道中。这类竖井的主体结构^[1]通常分成两部分, 一部分设置纵横交错的折板, 使进入到竖井内的水流撞击在折板或边壁上, 随后经过往复跌落到竖井底部, 即“湿室”, 另一部分不通过水流, 即“干室”, 两部分设置通气孔连接。折板式竖井构造简单, 不易受到空化的影响, 不必设置特殊的进出口通道, 且消能效果也较好, 故在国内外排水深隧中得到较多的应用^[3]。

目前, 国内外对折板式竖井的相关研究还非常少。王志刚等^[4]对折板式竖井内水流流态以及折板功能进行研究分析, 发现折板式竖井的水流典型流态可分为往复跌水流和 S 型贴壁流, 且不同层折板的主要功能有所侧重, 首层折板能调节水流, 中间折板能消能, 水下折板则是消能和将气体从隧道内排出; ODGAARD A J 等^[1]、MARGEVICIUS A 等^[5]、STIRRUP M 等^[6]、王斌^[3]等对竖井稳定运行工况以及竖井能安全通过的最大流量进行研究, 得到了稳定过流和最大过流约束条件。ODGAARD A J 等^[1]对竖井内的烟雾流动情况进行研究, 发现竖井内空气流动缓慢, 且对外所需通气量较小。李璐等^[7]通过对折板式竖井进行数值仿真, 并通过模型试验验证, 发现模拟计算与模型试验结果吻合较好。

收稿日期: 2021-10-28

作者简介: 孙迎霞(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事给排水设计工作。

本文基于李璐等^[7]经过合理验证的数值模拟参数, 对 3 组折板式竖井进行数值计算, 得到竖井内流态、压强、流速以及消能率水力特性参数的分布情况, 并对折板间隔的影响进行分析。

1 竖井结构参数及物理模型

图 1 为某工程中方案设计图纸, 设计规模 4.07 m³/s。该竖井主要分为两个部分, “湿室”和“干室”; “湿室”每隔一段距离设置折板, 水流通过折板逐级跌路至底层, 最终进入到隧道; “干室”通过通气孔与“湿室”连通, 内部不通过水流, 顶板设有除臭间, 满足通风及除臭功能。

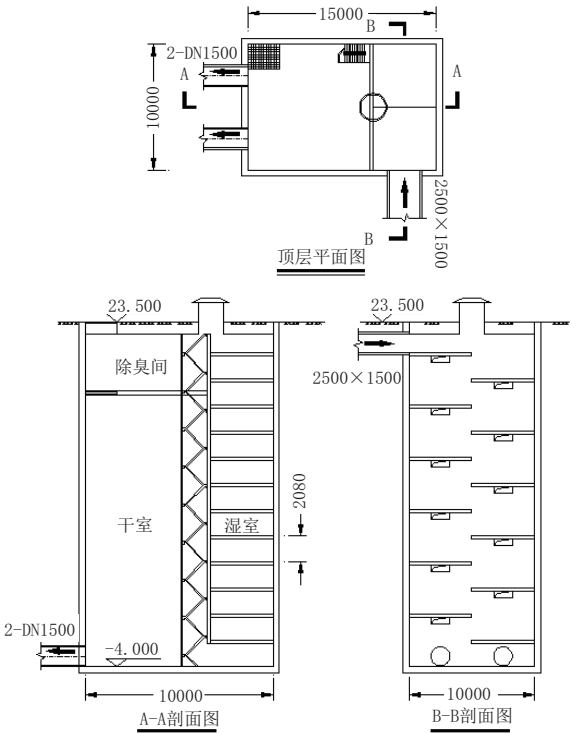


图 1 折板式竖井初始方案设计图(单位:mm)

考虑到折板式竖井内可以达到充分通气条件,以及本文主要研究点在于“湿室”内折板间隔对水流的影响,故在初始方案的基础上去掉“干室”部分,并对竖井内的折板间隔、折板长度、折板宽度等结构参数进行局部的优化设计,简化后的模型以及相应的结构参数分别见图 2 和表 1。

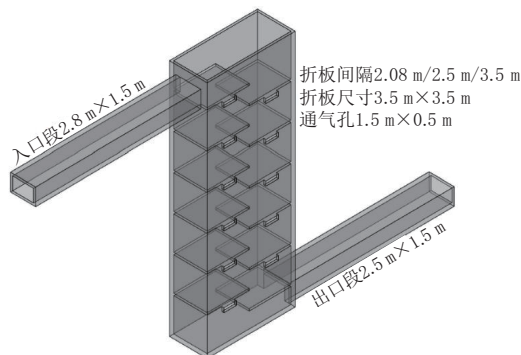


图 2 折板式竖井简化示意图

表 1 不同体型竖井参数表

体型	进出口尺寸/m	折板间隔 H/m	折板长度 L/m	折板宽度 B/m	通气孔尺寸/m	折板数
S1	2.5×1.5	2.08	3.5	3.5	1.5×0.5	12
S2	2.5×1.5	2.5	3.5	3.5	1.5×0.5	10
S3	2.5×1.5	3.125	3.5	3.5	1.5×0.5	8

2 数学模型建立

根据李璐等^[7]研究结果,相较于 RNG $k-\varepsilon$ 模型,紊流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型与实际模型更为贴合,本研究选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。相应的控制方程组如下:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (4)$$

式中: u_i, u_j 为速度分量; ρ 为流体密度; x_i, x_j 为轴坐标分量; $-\overline{\rho u_i u_j}$ 为紊流切应力; f_i 为质量力分量; μ 为动

力粘度系数; k 为紊动能; ε 为紊动耗散率; G_k 为紊动能产生项。

$$C_1 = \max(0.43, \frac{\eta}{\eta+5}), \eta = (2E_{ij} E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S U^* k / \varepsilon},$$

$$A_S = \sqrt{6} \cos \phi, \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{E_{ij} E_{ik} E_{kj}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}},$$

$$U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k,$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k; \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_2 = 1.9, A_0 = 4.$$

本次计算模型内的流场为瞬态流,同时选用 VOF 多相流模型结合 Realizable $k-\varepsilon$ 模型、PISO 算法进行计算。

对计算区域进行结构化网格划分,网格尺寸约 0.05~0.2 mm,总数约 115 万。对于求解参数设置,经过相应的调试,计算时间步长设置为 0.005~0.01 s,计算后的结果采用 TECPLOT 软件进行后处理。

3 结果与分析

3.1 流态

图 3 为 S1、S2、S3 折板式竖井内水流流态图。从图 3 中可知,随着折板间隔的增加,从折板边缘射流而出的水舌水平跌距会逐渐增大,水舌撞击点也会从折板表面转移至边壁上,这样竖井内水流流态就会转变成 S 型贴壁流。其中,图 3(a)为典型的往复跌水流流态,竖井内折板共 12 层,每一层折板间的水流均撞击在折板上且由于边壁限制而形成水垫层,随着水流跌落至竖井底层折板,水流紊动越剧烈,水舌水平跌距略有增大;图 3(c)为 S 型贴壁流流态,在竖井内除第二层折板外,其余折板间射流出的水舌均撞击在竖井边壁上,且越到竖井底部,撞击的位置会越高;图 3(b)为上述两种流态的过渡状态,即过渡流,理论上竖井内水舌应一直撞击在折板与边壁的交汇处,但实际并非如此,竖井上部折板间流态更接近贴壁流,而底部折板间水舌却是有些撞击在折板上,有些撞击在边壁上。

3.2 压强

图 4~图 9 为 S1、S2、S3 竖井内某些折板上表面或边壁纵向中心压强分布图。从图 4~图 9 以及上文流态分析情况可知,随着折板间隔的增大,流态从跌水流转变成贴壁流,竖井内压强分布规律也发生较大变化。对于 S1 竖井,5#、8#、11# 折板及边壁上时均压强曲线较为相似,呈“山峰”型和“边坡”型曲线

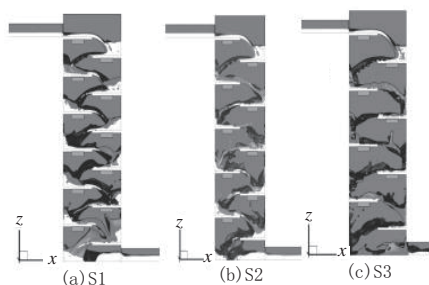


图3 折板式竖井初始方案设计图

分布;从图中可以发现,时均压强曲线存在两个峰值和一个极小值点,峰值在折板与边壁交叉点及折板上靠近交叉点1 m左右,极小值在两者中间。峰值可能是因为水流先后与折板及边壁撞击,从后文流速图可以发现,与边壁撞击的仅是部分水流,且在两个峰值中间折板上形成水垫层。对于极小值点,可能是折板上水垫层内存在漩涡且漩涡转向是沿壁面向上,使得折板上时均压强呈下凹趋势。对于S3竖井,与S1刚好相反,折板和边壁上时均压强分别呈“边坡”型和“山峰”型曲线分布。边壁上2 m左右的压强峰值同样是由于水舌撞击的结果,而随后压强陡然降低和升高,这可能是因为边壁对水流产生一个反向的作用力,致使水流有水平反向的运动趋势,但由于下跌的流程较短,使得水流并不能脱离壁面,故压强会陡然降低,甚至会出现负压,之后水流向下撞击在折板上,使得边壁凹角附近的压强陡然增大,其数值甚至超过水舌与壁面撞击处产生的最大压强。对于S2竖井,折板和边壁上时均压强均呈“边坡”型曲线分布,时均压强从折板与边壁交汇处开始沿两侧分别逐渐减小。对比三组竖井时均压强最大峰值,发现S3竖井接近30 kPa,大于S1竖井,S2竖井最小。至于三组竖井内的脉动压强分布情况,应与折板或边壁的时均压强分布基本相对应,在水舌撞击处以及折板与边壁交汇处的脉动压强较大,S3竖井边壁上局部位置脉动压强可能大于时均压强,产生负压。

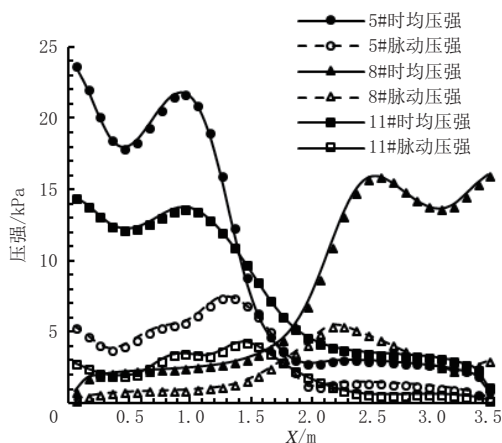


图4 S1竖井折板上表面压强分布图(单位:kPa)

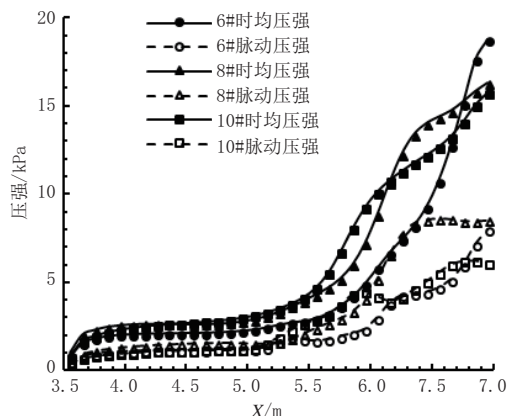


图5 S2竖井折板上表面压强分布图(单位:kPa)

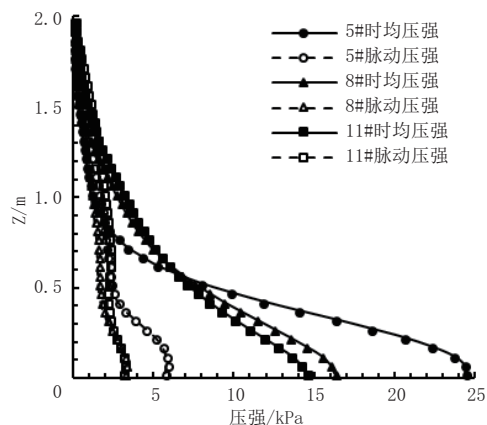


图6 S3竖井折板上表面压强分布图

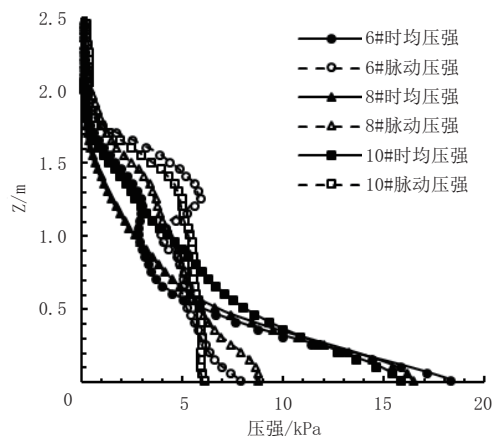


图7 S1竖井边壁压强分布图

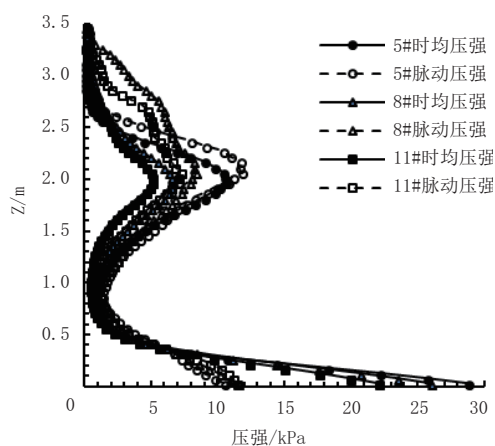


图8 S2竖井边壁压强分布图

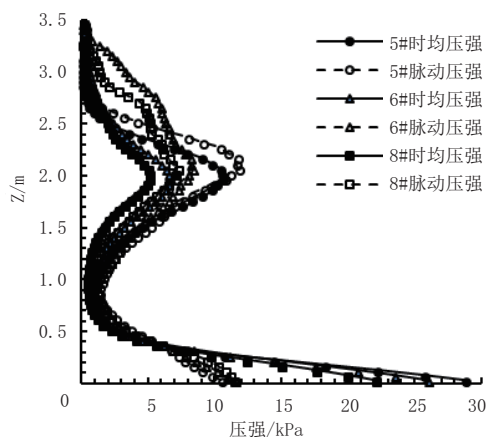


图9 S3竖井边壁压强分布图

对三组竖井内不同折板或边壁上时均压强和脉动压强计算结果进行对比,可以发现水流大约经过6次跌落后,折板或边壁上的时均压强及脉动压强曲线越来越接近,且峰值越来越小。这可能是因为经过约6次跌落后,水流与折板或边壁反复撞击,能量得到很好的消散。

3.3 流速

图10为S1、S2、S3竖井中心截面上的流速等值线分布图,图中数值单位均为m/s。对于S1竖井,上层折板上水流流速大约3.5 m/s,经过几次跌落后,流速略有些增大,但基本稳定在2~4 m/s之间。对于S3竖井,折板上水流从折板边缘射流并撞击在边壁上,随后与折板凹角冲击并沿折板滑略而出,整个过程中,水流流速先增大后略有减小,对边壁以及折板有较大的冲刷作用,且折板边缘的水流流速往底层跌落有较大幅度的增长,从3.5 m/s快速增大至7 m/s,但之后由于紊动以及高速水流与壁面的撞击使得水股分散从而流速增大减缓;对于S2竖井,竖井内最上面几层折板水流速度逐渐增大,呈现贴壁流速度分布规律,而后由于水流剧烈紊动,使得折板间呈现类似跌水流速度分布规律,且水流流速有一定程度的减小,但由于折板上水流流量波动,有些折板间的流速还是较大。

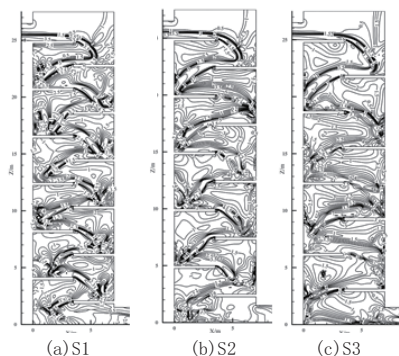


图10 S1、S2、S3竖井内流速等值线分布图

3.4 消能率

图11为S1、S2、S3竖井消能率图。单一折板间的消能率计算采取相邻折板边缘的出流断面,多层折板间的消能率计算采取首层折板与底层折板边缘的出流断面。

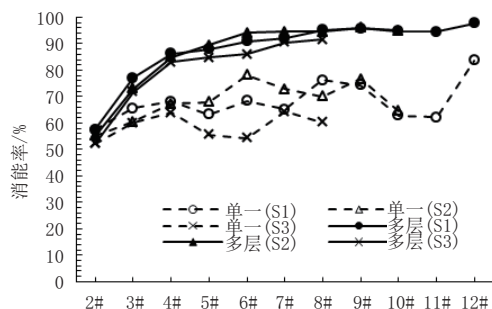


图11 S1、S2、S3竖井单一以及多层折板间消能率(单位:%)

由图11可知,无论水流流态为往复跌水流,还是S型贴壁流,经过3次跌落后,消能率均在80%以上,6次跌落后,达到了91%以上,最后S1竖井消能率达到了95%,比S2及S1略高,由此说明折板式竖井的消能效果较好。从单一折板间消能率变化情况来看,三组竖井的消能率均从55%左右整体增大10~25%,其中S1增长幅度最大,S2次之,而后折线均处于波动状态。对于S1竖井,能量的消耗主要是因为水流对水垫层和折板的冲击,对于S3竖井,主要是水流对边壁和折板的冲击,从压强及流速的角度来看,两种竖井还存在紊动消能,其所在比例较小。

4 结论与展望

通过对三组不同折板间隔的竖井进行数值计算,得到竖井内水力特性参数的分布情况,研究表明:

(1)随着折板间隔的增加,竖井内水流流态可从往复跌水流逐渐转变为S型贴壁流。间距最大的S3为贴壁流流态。

(2)随着流态转变成贴壁流,时均压强峰值会有所增大,但无论哪种流态,经过几次跌落后,折板或边壁上的时均压强及脉动压强曲线越来越接近,且峰值越来越小。对于S型贴壁流,边壁上局部位置可能产生负压。

(3)三种流态中,S型贴壁流流速增长幅度最大,对边壁及折板的冲击以及冲刷作用最强,不利于竖井结构安全稳定。三种模型相比较S1流态优于另外两种。

(4)根据李璐等^[7]研究结果,Realizable $k-\varepsilon$ 模型

与实际模型更为贴合,所以本模型能够基本反应实际情况,由于本工程还未实施,但是通过数学模型模拟,得出方案设计图纸中折板间距合理,能够起到预期的消能作用。

(5)无论哪种流态,折板式竖井消能效果均较好。折板间隔对折板式竖井的消能效果影响较小。对于往复跌水流,折板间能量的消耗主要靠水垫层消能和紊动消能;对于S型贴壁流,水流主要依靠水舌与边壁及折板撞击消能和紊动消能。

文中数值计算得到在水舌与竖井边壁撞击点的下部和折板射流下边缘可能会出现负压,这对竖井安全不利,在之后需要进一步研究分析;本次研究的竖井条件特殊,有着专门用于通气的通道,以此能保证良好通气的假设条件,但在实际工程中,通气与很多因素有关,对竖井也会有一定的影响,故需要在往后的研究中考考虑通气问题。

参考文献:

- [1] ODGAARD A J, LYONS T C, CRAIG A J. Baffle Drop Structure Design Relationships[J]. Journal of Hydraulic Engineering Asce, 2013, 139(9): 995-1002.
- [2] 鲁朝阳, 车伍, 唐磊, 等. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(24): 35-40.
- [3] 王斌, 邓家泉, 何贞俊, 等. 折板跌落式竖井设计约束条件研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(5): 363-367.
- [4] 王志刚, 张东, 张宏伟, 等. 折板消能竖井中的折板功能分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(4): 270-276.
- [5] MARGEVICIUS A, SCHREIBER A, SWITALSKI R, et al. A Baffling Solution to a Complex Problem Involving Sewage Drop Structures[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2010, 2010(6): 1-9.
- [6] STIRRUP M, MARGEVICIUS T, HRKAC T, et al. A Baffling Solution to Sewage Conveyance In York Region, Ontario[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2012, 15(1): 29-37.
- [7] 李璐, 梁舒豪, 杨墨, 等. 用于深隧工程的折板式竖井湿室部分数值模拟研究[J]. 中国给水排水, 2019, 489(13): 137-142.

(上接第 110 页)

参考文献:

- [1] 娄有原. 刚架拱桥的发展与推广[J]. 公路交通科技, 1989, 6(4): 33-38.
- [2] 刘洪瑞, 周俊峰. 超载作用下刚架拱桥的病害分析与防治[J]. 广东工业大学学报, 2003(2): 46-49.
- [3] 陈宇新, 王玉泉, 徐天予, 等. 浅析钢筋混凝土刚架拱桥病害分析及加固设计[J]. 东北公路, 2003(3): 90-93.
- [4] 刘云川, 刘建民, 王志辉. 刚架拱桥病害特点与防治对策[J]. 山东交通学院学报, 2006, 14(2): 26-28.
- [5] 钟军. 刚架拱桥的检测和试验[J]. 山东交通科技, 2008(2): 16-17.
- [6] 史强, 宋运来. 刚架拱桥病害分析及设计施工改进措施[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008(6): 141-146.
- [7] 李漪. 刚架拱桥裂缝成因分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(17): 288-289.
- [8] 闵凡华. 刚架拱加固施工中拱顶受力分析[J]. 北方交通, 2010(10): 46-48.
- [9] 黄育江. 刚架拱桥拱架片的加固[J]. 公路与汽运, 2006(5): 94-96.