

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210525001

文章编号:1674-599X(2023)02-0055-07

引用格式:梁建国,李壮,马帅,等.钢筋混凝土加固砖砌体拱涵承载力计算方法[J].交通科学与工程,2023,39(2):55-61.

Citation: LIANG Jianguo, LI Zhuang, MA Shuai, et al. Calculation method of bearing capacity of strengthening brick culvert masonry arch reinforced by reinforced concrete[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 55-61.

钢筋混凝土加固砖砌体拱涵承载力计算方法

梁建国¹,李壮¹,马帅²,姚明星³,王高峰⁴,李聪³

(1.长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410114;2.长沙水业集团有限公司,湖南长沙410015;
3.长沙市公共工程建设中心,湖南长沙410013;4.中国建筑第五工程局有限公司,湖南长沙410004)

摘要:针对采用高性能钢筋混凝土对排水主渠砌体拱涵结构进行非开挖加固时关于承载力的计算问题,提出了拱腹加固砌体的拱涵、拱顶和拱趾的正截面承载力计算公式。依据拱腹加固砌体的拱涵受力特点,提出了内力计算简图。研究表明:采用拱腹高性能钢筋混凝土进行非开挖加固修复,可有效阻止塑性铰的出现;当砌体拱涵拱腹采用增大截面法加固时,计算简图可采用无铰拱计算,并通过实例进行验证,发现本方法的计算结果与试验数据吻合良好,可为类似砖砌体排水拱涵加固设计提供借鉴。

关键词:增大截面法;高性能混凝土;排水拱涵;非开挖修复;正截面承载力

中图分类号:TU31

文献标志码:A

Calculation method of bearing capacity of strengthening brick culvert masonry arch reinforced by reinforced concrete

LIANG Jianguo¹, LI Zhuang¹, MA Shuai², YAO Mingxing³, WANG Gaofeng⁴, LI Cong³

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Changsha Water Group Co., Ltd., Changsha 410015, China;

3.Changsha Public Engineering Construction Center, Changsha 410013, China;

4.China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: By aiming at the lack of bearing capacity calculation method in the current standard for trenchless reinforcement and repair of existing drainage main channel masonry arch culvert with arch vamp high-performance reinforced concrete, the design calculation formula of bearing capacity of the normal section of the arch roof and arch toe of arch culvert reinforced with arch vamp was proposed. Based on the analysis of the stress characteristics of masonry arch culvert reinforced by the arch belly, the calculation diagram of internal force was put forward. Based on basic assumptions, the design formula of bearing capacity of the normal section of the arch and toe was obtained. The results showed that the trenchless reinforcement and restoration with arch high-performance reinforced concrete could effectively prevent the emergence of plastic hinges. When the arch belly of a masonry arch culvert was strengthened by the method of the increasing section, the calculation schematic diagram could be calculated by the hingeless arch. The experimental data were used to verify the theoretical formula, which was in good agreement with the experimental data, which could be used for reference for the design of drainage arch culverts reinforced with brick masonry.

Key words: enlarging section method; high performance concrete; drainage arch culvert; trenchless rehabilitation; normal section bearing capacity

收稿日期:2021-05-25

基金项目:2020年长沙市政府“红旗渠主渠结构加固试验段工法研究及实施”项目

作者简介:梁建国(1963—),男,长沙理工大学教授。

老旧排水干渠有砖砌体拱涵、预制混凝土圆拱涵、预制混凝土盖板涵、现浇箱涵及砌片石侧墙等不同型式,但大部分为砖砌体拱涵。对于这种截面异形、跨度较大的干渠进行修复加固时,通常采用模筑法、预制法、喷射法、螺旋缠绕法等施工工艺^[1-2]。在渠体内侧附加一层高性能钢筋混凝土,形成砖砌体与单侧钢筋混凝土的组合砌体,减小加固层厚度,提高渠道过水能力。关于增大截面法加固砌体结构的试验研究主要集中在两面加固^[3-4]。袁庆尧等^[5]采用压弯构件试验方法对单面喷射混凝土、现浇混凝土、抹水泥砂浆等组合砌体受压构件进行了试验研究。近年来,国内外学者对采用钢筋混凝土和高性能新型材料的加固砌体拱桥进行了许多试验研究^[6-8]。GARMENDIA等^[9-10]对采用纺织增强砂浆(textile reinforced mortar, TRM)、合成树脂(thin film composite, TFC)等进行砌体加固的研究中取得了许多成果。李传习等^[11-12]在钢-超高性能混凝土胶接组合板的研究中也验证了胶黏剂(环氧载体胶膜)的有效性。但在拱腹采用高性能钢筋混凝土加固砖砌拱涵的研究中,尤其是将偏心荷载作用在加固层一侧时,对组合砌体承载力的研究缺乏正截面承载力的计算方法。因此,本研究拟通过分析加固前后拱圈的受力特点,利用基本假定,推导单侧高性能混凝土组合砌体压弯构件的正截面承载力计算公式,并将计算结果与试验结果进行对比分析,以期对地下排水渠结构加固设计提供参考。

1 砌体拱涵的受力特点与计算简图

片石侧墙和砖砌体平拱组成的排水主渠结构因跨径较大而采用分离式基础。由于排水主渠拱顶覆土厚度较小,土拱效应不明显,砖砌体拱圈承受上部土体和地面活载作用 q_1 ,侧墙承受由背面土体荷载产生土压力和地下水压力 q_2 ,其内力计算简图可将侧墙与拱券视为刚性连接,与地基连接为固定支座^[13],如图1所示。在圬工桥涵设计标准中,忽略了侧墙的位移,砖砌体拱按固定无铰拱计算(如图2所示),且其未考虑曲率、剪切变形、弹性压缩、温度作用效应和混凝土收缩效应^[14]。

由于重力式片石侧墙刚度很大,计算时将侧墙看作置于柔性土壤中的绝对刚体,侧墙本身不发生

变形,侧墙在拱的荷载作用下,只发生沉陷(水平方向与竖直方向的沉陷)和转动(转动角度),同时侧墙的转动位移引起土体产生弹性抗力作用,砖砌体拱圈可以简化为弹性无铰拱^[15],如图3所示。这种方法考虑了结构与地基土的共同作用,符合中国现行管道设计规范的要求^[16]。

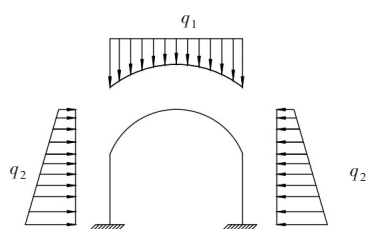


图1 刚架

Fig. 1 Stiff frame

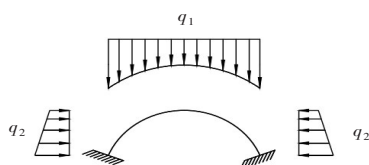


图2 固定无铰拱

Fig. 2 Fix the hingeless arch

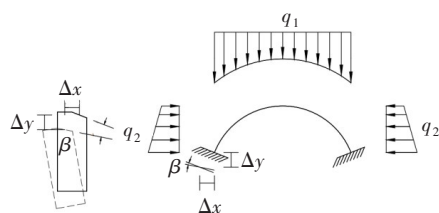


图3 弹性无铰拱

Fig. 3 Elastic hingeless arch

2 砌体拱涵的破坏特征与基本假设

2.1 拱腹加固砌体拱的破坏特征

未加固砌体拱在荷载 F 作用下,先在拱的受压区出现局部压坏,另一侧砌体由于抗拉强度较低产生开裂,从而形成铰,将拱结构分为几块独立旋转。如果铰的数量足够多,就有可能形成四铰机制导致坍塌,如图4(a)所示。砌体拱的坍塌与推力线的位置有关,只要推力线保持在拱的厚度范围内,拱会被压缩。在拱腹加固时,破坏机制发生变化,只要加固层与砌体保持黏接,且具有一定抗拉强度,加固层将阻止某些铰链的出现,推力线相对于拱厚向外延伸,如图4(b)所示^[17-20]。

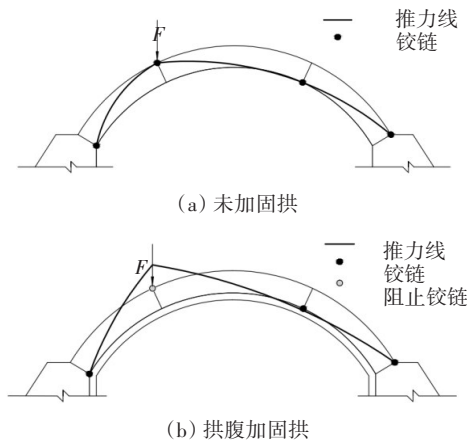


图4 拱的破坏机理

Fig. 4 Failure mechanism of arch

2.2 单侧加固砌体的破坏特征

为了阻止砌体拱出现铰,使其产生机动体系倒塌,在主渠内部单侧采用高性能钢筋混凝土加固,加固层和原结构形成组合砖砌体,共同承受轴向压力和弯矩作用。

分析双面加固砖砌体受压构件^[3-4]、单面加固(偏心荷载作用在加固层对边)砖砌体^[5]及混凝土实心砌块砌体^[6]受压构件的试验报告,发现单面加固组合砌体的破坏特征有:①根据偏心距的大小,将单面加固组合砖砌体的破坏分为大偏心受压破坏和小偏心受压破坏,破坏过程与钢筋混凝土压弯构件的正截面破坏类似;②混凝土和砌体界面未进行特殊加固下,荷载很大时会产生界面破坏;③界面破坏发生前,构件截面应变符合平截面假定。

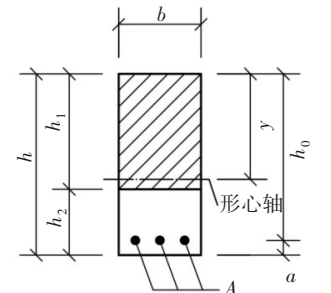
2.3 基本假设

根据单面组合砌体受压构件破坏特征,假设:①加固层和砖砌体黏结良好,组合砖砌体截面符合平截面假定;②受压区砖砌体和混凝土应力按矩形分布,考虑到组合结构二次受力,以及砌体应力超前的影响,将混凝土强度利用系数 α_c 取0.9,受压区钢筋强度利用系数 α_s 取1.0^[21];③不考虑砖砌体和混凝土的抗拉强度。

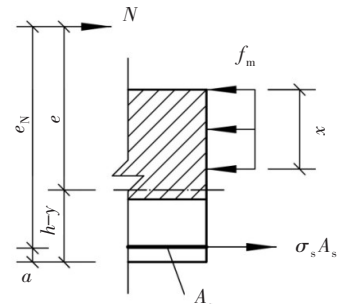
对于无铰拱,控制截面弯矩可能为正,也可能为负(以拱腹受拉为正)。因此,单面加固组合砖砌体分为偏心荷载作用在加固层对边(拱顶处)和偏心荷载作用在加固层一侧(拱趾处)这两种情况,其计算示意如图5所示。

在图5中, N 为加固后截面内力; h_1 为砌体截面高度; h_2 为加固层截面高度; h 为加固后的组合砌体截面高度; h_0 为加固后的组合砌体截面有效高度; a

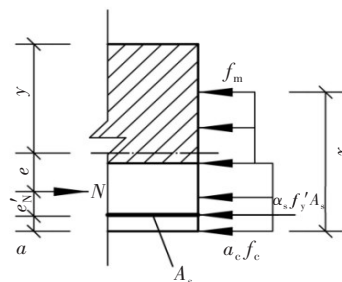
为加固层配筋的合力点至加固层外表面的距离; b 为计算宽度; x 为受压区高度; y 为组合截面中性轴距离砌体外表面的距离,按等效T形截面计算; e 为相对截面形心轴的荷载偏心距; e_N 为偏心荷载作用在加固层对边时,加固层配筋的合力点至加固后截面内力 N 作用点的距离, $e_N = h_0 + e - y$; e'_N 为偏心荷载作用在加固侧时加固层配筋的合力点至加固后截面内力 N 作用点的距离, $e'_N = h_0 - e - y$; A_s 为加固层配筋截面面积; f_m 为原构件砌体抗压强度设计值; f_c 混凝土轴心抗压强度设计值; f'_y 为加固层配筋抗压强度设计值; α_c 为混凝土强度利用系数; α_s 为受压区钢筋强度利用系数; σ_s 为加固层配筋的钢筋应力,钢筋应力按以下方式取值:当 $\xi \leq \xi_b$ 时,为大偏心受压, $\sigma_s = f_y$;当 $\xi > \xi_b$ 时,为小偏心受压, $\sigma_s = 650 - 800\xi$, $\xi = x/h_0$ 。 ξ_b 为相对界限受压区高度,对于HRB400级、HRB335级、HPB300级,分别取0.36、0.44、0.47^[22]。



(a) 加固后截面尺寸



(b) 偏心荷载作用在加固层对边



(c) 偏心荷载作用在加固层一侧

图5 计算示意图

Fig. 5 Structure calculation diagram

3 单面组合砖砌体拱涵正截面承载力

3.1 设计计算公式

在计算拱腹加固砌体拱涵正截面承载力时,根据《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)^[14]不进行拱的弯曲平面外和弯曲平面内的整体“强度-稳定”验算,按短柱正截面承载力计算。

考虑加固后截面内力 N 、相对截面形心轴的荷载偏心距 e 、检测评价得到的原结构砌体强度和初步选定的加固层厚度及材料强度,并考虑加固后截面的中和轴位置(在砌体内或混凝土内),根据计算简图建立平衡方程组,解该方程组得到加固层配筋截面面积 A_s 。

1) 偏心荷载作用在加固层对边,如图5(b)所示。中和轴位置判别方法为:当 $Ne_N \leq f_m bh_1 \left(h_0 - \frac{h_1}{2} \right)$ 时,中和轴在砌体内,否则中和轴在混凝土内。

当中和轴在砌体内时,正截面承载力为:

$$f_m bx \left(e - y + \frac{x}{2} \right) = \sigma_s A_s e_N \quad (1)$$

$$N \leq f_m bx - \sigma_s A_s \quad (2)$$

其中, $e_N = h_0 + e - y_0$ 。

当中和轴在混凝土内时,正截面承载力计算公式为:

$$f_m bh_1 \left(e - y + \frac{h_1}{2} \right) + \alpha_c f_c b \left(x - h_1 \right) \left(e - y + \frac{x + h_1}{2} \right) = \sigma_s A_s e_N \quad (3)$$

$$N \geq f_m bh_1 + \alpha_c f_c b \left(x - h_1 \right) - \sigma_s A_s \quad (4)$$

钢筋应力取值方法为:当截面受压区相对高度 $\xi \leq \xi_b$ 时,为大偏心受压, $\sigma_s = f_y$;当 $\xi > \xi_b$ 时,为小偏心受压, $\sigma_s = 650 - 800\xi$, $\xi = x/h_0$ 。关于界限受压区高度 ξ_b ,若为HRB400级钢筋,取0.36;若为HRB335级钢筋,取0.44;若为HPB300级钢筋,取0.47^[22]。

2) 偏心荷载作用在加固侧。

由于加固层混凝土在受压区,距离偏心荷载较远侧为原结构砌体,没有纵向钢筋,不存在距离偏心荷载较远侧钢筋是否受拉屈服的问题,所以无须讨论大小偏压的情况。

中和轴位置的判别:当 $Ne'_N \geq \alpha_c f_c bh_2 \left(\frac{h_2}{2} - a \right)$

时,中和轴在砌体内;否则,中和轴在混凝土内。

当中和轴在砌体内时,正截面承载力计算公式为:

$$\alpha_c f_c bh_2 \left(\frac{h_2}{2} - e'_N - a \right) + f_m b \left(x - h_2 \right) \left(\frac{h_2}{2} - e'_N - a + \frac{x}{2} \right) = \alpha_s f'_y A_s e'_N \quad (5)$$

$$N \geq f_m b \left(x - h_2 \right) + \alpha_c f_c bh_2 + \alpha_s f'_y A_s \quad (6)$$

其中, $e'_N = h_0 - e - y_0$ 。

当中和轴在混凝土内时,砌体退出工作,可按钢筋混凝土压弯构件计算。

3.2 试验验证

根据文献[5],对不同加固方法和截面尺寸的9组32个砖砌体试件进行压弯试验,竖向压力和水平荷载同步等比例加载,保证柱中部最大弯矩处偏心距相同。极限荷载时,柱中部最不利截面偏心距 e 等于 M/N 加上压弯构件中部最大挠度试验值。文献[6]对不同加固截面尺寸的5个实心混凝土砌块试件进行了偏心加载试验。

构件的承载力按本研究提出的方法进行计算,各种材料强度值取材料强度平均值进行计算,并考虑到试验是一次加载,强度利用系数 $\alpha_c=1.0$ 、 $\alpha_s=1.0$ 。构件极限承载力的试验值与计算值对比结果见表1。

由表1可知,试件极限承载力的试验值与计算值比值的平均值为1.036,变异系数为0.295,本方法计算值与试验结果吻合良好。

4 实例

以位于长沙市晓园公园内红旗渠排水主渠试验段为例,其原结构为砌体拱涵,拱顶覆土厚度为3.95 m,地下水水位线至拱顶的高度为2.25 m。拱涵侧墙采用重力式片石砌体,拱圈采用厚度为385 mm的烧结砖砌体,其基础为分离式片石砌体,渠底反拱为素混凝土,拱涵实测截面尺寸如图6所示。经现场检测,砖抗压强度的平均值为6.30 MPa,砂浆抗压强度的平均值为23.09 MPa,为安全起见,砖的强度等级取MU5.0,砂浆强度等级取M7.5,砌体抗压强度设计值取1.34 MPa。根据《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332—2002)^[16],考虑地面车辆荷载,按3种最不利活荷载布置:①全跨垂直荷载+两侧水平荷载;②全跨垂直荷载+左侧水平荷载;③左半跨垂直荷载+左侧水平荷载。采用Abaqus软件进行内力计算,按无铰拱设置边界条件,得到各种荷载情况

下拱顶和拱趾截面内力和最不利内力组合,见表2。

根据无筋砌体承载力计算公式进行验算,原结构拱顶和拱趾均不满足承载力要求。红旗渠挡土墙转角处可用圆弧形挡土墙的土压力进行计算^[22]。

采用增大截面法对拱涵的拱圈进行加固。加固施工工艺包括模筑法、喷射法、螺旋缠绕法等,加固层采用 C60 UHPC 材料,厚度为 120 mm,钢筋选

用 HRB400 级,钢筋保护层厚度为 50 mm。拱顶按偏心荷载作用在加固层对侧,拱趾按偏心荷载作用在加固层一侧进行计算,根据本研究提出的计算公式,确定截面配筋量,计算结果见表3。

加固层钢筋截面面积计算值为负值,按构造配筋,选用 $\phi 14@150\text{mm}$ ($A_s = 1\,026\text{ mm}^2$)。

表 1 极限荷载试验值与计算值对比表

Table 1 Comparison table of ultimate load test value and calculation value

试件编号	试件数量/件	原截面尺寸/mm	加固层尺寸/mm	$f_{m,m}/\text{MPa}$	$f_{c,m}/\text{MPa}$	$f_{y,m}/\text{MPa}$	e/m	A_s/mm^2	N_u^c/kN	N_u^t/kN	N_u^t/N_u^c
Ty81-3(1)	2	620×370	620×60	3.3	7.71	235.0	0.306	150.8	338.9	320.0	0.9
Ty81-4(1)	2	620×370	620×100	3.3	24.30	235.0	0.353	150.8	336.5	462.5	1.4
Ty81-5(1)	2	620×370	620×100	3.3	24.30	235.0	0.353	235.6	337.6	372.5	1.1
Ty82-9(1)	2	620×370	620×60	3.8	12.00	235.0	0.311	150.8	387.2	275.0	0.7
Ty81-3(2)	2	620×370	620×60	3.3	7.71	235.0	0.357	150.8	220.1	140.0	0.6
Ty81-4(2)	2	620×370	620×100	3.3	24.30	235.0	0.409	150.8	230.1	336.0	1.5
Ty81-5(2)	2	620×370	620×100	3.3	24.30	235.0	0.410	150.8	229.2	290.0	1.3
Ty81-6(2)	1	620×370	620×45	3.3	14.00	235.0	0.366	150.8	210.7	140.0	0.7
Ty81-7(2)	2	620×370	620×140	3.3	25.80	235.0	0.419	150.8	291.9	320.0	1.1
Ty81-8(2)	2	620×370	620×140	3.3	23.10	235.0	0.420	150.8	284.0	163.0	0.6
Ty82-9(2)	1	620×370	620×60	3.8	12.00	235.0	0.365	235.6	283.0	140.0	0.5
Ty81-6(3)	1	620×370	620×45	3.3	14.00	235.0	0.646	150.8	44.1	40.0	0.9
Ty81-7(3)	1	620×370	620×140	3.3	25.80	235.0	0.697	150.8	80.1	90.0	1.1
Ty81-8(3)	1	620×370	620×140	3.3	23.10	235.0	0.699	150.8	78.3	118.0	1.5
B-1	1	380×260	200×96	9.8	35.50	339.5	0.152	339.3	382.7	582.0	1.5
B-2	1	380×260	200×140	9.8	35.50	339.5	0.100	339.3	641.6	903.0	1.4
B-3	1	380×260	200×140	9.8	35.50	339.5	0.060	339.3	1 472.3	1 398.0	0.9
C-1	1	380×260	200×140	9.8	35.50	339.5	0.100	339.3	641.6	772.0	1.2
C-2	1	380×260	200×140	9.8	35.50	339.5	0.100	339.3	641.6	566.0	0.9
D-1	1	380×260	290×140	9.8	35.50	339.5	0.101	339.3	947.8	1 076.0	1.1
D-2	1	380×260	380×140	9.8	35.50	339.5	0.100	339.3	1 357.1	1 333.0	1.0

注: $f_{m,m}$ 为原构件砌体抗压强度平均值; $f_{c,m}$ 为加固层混凝土抗压强度平均值; $f_{y,m}$ 为加固层钢筋强度平均值; N_u^c 为极限荷载计算值; N_u^t 为极限荷载试验值。

表 2 控制截面内力及最不利内力组合

Table 2 Control section internal force and the most unfavorable combination of internal forces

控制截面		恒载	活载 a	活载 b	活载 c	M_{\max} 对应 N	N_{\max} 对应 M
拱顶	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	5.2	1.2	1.5	0.8	6.7	6.4
	N/kN	-565.4	-47.0	-37.8	-23.5	-603.2	-612.4
拱趾	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	-35.1	-1.6	-5.3	-10.3	-45.4	-36.7
	N/kN	-567.7	-45.6	-37.8	-25.0	-592.7	-613.3

注: M 代表拱圈控制截面弯矩; N 代表拱圈控制截面轴力。

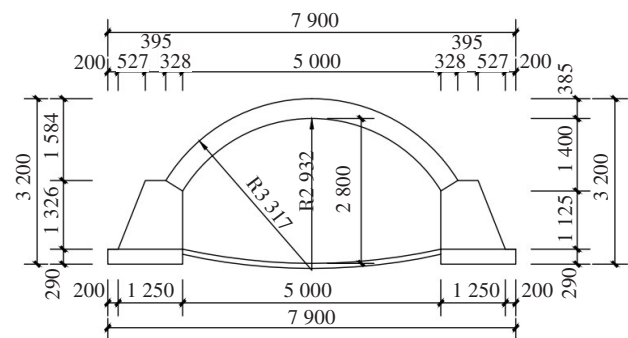


图 6 红旗渠试验段拱涵实测截面尺寸(单位:mm)

Fig. 6 Measured section size of arch culvert in Hongqi Canal test section(unit:mm)

表3 加固砌体承载力计算

Table 3 Calculation of bearing capacity of reinforced masonry

控制截面	$M/(kN\cdot m)$	N/kN	e/mm	ξ	A_s/mm^2
拱顶	6.7	-603.2	-11.1	1.000	-9 318
	6.4	-612.4	-10.5	1.000	-9 256
拱趾	-45.4	-592.7	76.6	0.871	-7 599
	-36.7	-613.3	59.8	0.829	-7 473

5 结论

采用高性能混凝土进行加固,更便于模筑法、喷射法、螺旋缠绕法的非开挖施工,且加固截面厚度薄,可尽量减小对涵洞断面流量的不利影响。得到结论为:

1) 砌体拱涵拱腹采用增大截面法加固时,计算简图可采用无铰拱计算,可有效阻止塑性铰的出现,提高拱圈承载力;

2) 增大截面法,加固砌体拱涵的正截面承载力。可根据偏心荷载在加固层对边或加固侧时,分别按式(1)~(4)和式(5)~(6)计算。

参考文献(References):

- [1] KOERNER G R, KOERNER R M. Geosynthetic use in trenchless pipe remediation and rehabilitation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(3-4): 223-237.
- [2] ABRAHAM D M, ALI GILLANI S. Innovations in materials for sewer system rehabilitation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14: 43-56.
- [3] 柏傲冬,王世雄.砂浆抹面纵配筋砖柱承载能力的试验及计算[J].建筑结构学报,1982(1):59-68.
BAI Aodong, WANG Shixiong. Experimental test and analysis of the bearing capacity of longitudinal reinforced brick column with cement mortar facing layer [J]. Journal of Building Structures, 1982(1): 59-68.
- [4] 柏傲冬,颜茂兰.组合砖砌体构件极限承压能力的计算[J].建筑结构,1984(4):36-40.
BAI Aodong, YAN Maolan. Calculation of ultimate bearing capacity of composite brick masonry members [J]. Building Structure, 1984(4): 36-40.
- [5] 袁庆尧,刘永武,石振华等.单面组合砌体的试验研究[J].建筑结构,1985(2):37-43.
YUAN Qingyao, LIU Yongwu, SHI Zhenghua, et al. Experimental study on single face composite masonry [J]. Building Structure, 1985(2): 37-43.
- [6] 乔文靖.复合拱圈加固圬工拱桥模型试验及工程应用研究[D].西安:长安大学,2014.
QIAO Wenjing. Study on model test and engineering application of masonry arch bridge strengthened by composite arch ring [D]. Xi'an: Chan'gan University, 2014.
- [7] 尚守平,狄国伟,刘君,等.喷射高性能水泥复合混凝土加固石拱桥试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(9):1-7.
SHANG Shouping, DI Guowei, LIU Jun, et al. Experimental investigation on stone-arch bridge strengthened with injecting high performance cement composite concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(9): 1-7.
- [8] 庞国栋,周建廷,李跃军.复合主拱圈加固石拱桥的承载力计算模式研究[J].重庆交通学院学报,2006,25(S1):16-18,27.
PANG Guodong, ZHOU Jianting, LI Yuejun. Study on computing model for the bearing capacity of the stone arch bridge strengthened by composite main arch circle method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25(S1): 16-18, 27.
- [9] GARMENDIA L, SAN-JOSÉ J T, GARCÍA D, et al. Innovative strengthening solution based on textile reinforced mortar for stone masonry Arches [J]. Advanced Materials Research, 2010, 988 (133-134): 849-854.
- [10] KESTELOOT S, DJELAL C, BENSLIMANE I, et al. Strengthening of masonry Arches using carbon plates [J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 216-223.
- [11] 李传习,胡正,李游,等.钢-超高性能混凝土胶接组合板受弯的界面性能[J].交通科学与工程,2020,36(4):28-35.
LI Chuanxi, HU Zheng, LI You, et al. Interfacial bonding performance of steel-ultra-high performance concrete adhesively bonded composite slabs [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 28-35.
- [12] 李传习,罗南海.高温对CFRP板/钢界面力学性能的影响[J].交通科学与工程,2019,35(4):34-39.

- LI Chuanxi, LUO Nanhai. Effect of high temperature on mechanical properties of the interface between CFRP laminate and steel [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2019, 35(4):34-39.
- [13] 《给水排水工程结构设计手册》编委会. 给水排水工程结构设计手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- Editorial Board of Water Supply and Drainage Engineering Structural Design Manual. Manual for structural design of water supply and drainage engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 1984.
- [14] 中交公路规划设计院. 公路圬工桥涵设计规范: JTG D 61—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- CCCC Highway Consultants. Code for design of highway masonry bridges and culverts: JTG D 61—2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [15] 汪胡桢. 水工隧洞的设计理论和计算[M]. 第2版. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- WANG Huzhen. Design theory and calculation of hydraulic tunnel [M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1990.
- [16] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水工程管道结构设计规范: GB 50332—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute. Structural design code for pipelines of water supply and waste water engineering: GB 50332—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [17] ALECCI V, MISSERI G, ROVERO L, et al. Experimental investigation on masonry Arches strengthened with PBO-FRCM composite [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 100: 228-239.
- [18] BORRI A, CASADEI P, CASTORI G, et al. Strengthening of brick masonry Arches with externally bonded steel reinforced composites [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(6): 468-475.
- [19] ZAMPIERI P, SIMONCELLO N, TETOUGUENI C D, et al. A review of methods for strengthening of masonry Arches with composite materials [J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 154-169.
- [20] 方鹏, 陈文胜, 蒋茂林, 等. 圆弧形挡土墙整体土压力计算[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(1):69-74.
- FANG Peng, CHEN Wensheng, JIANG Maolin, et al. Calculation of integral earth pressure of circular retaining wall [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(1):69-74.
- [21] 四川省建筑科学研究院. 砌体结构加固设计规范: GB 50702—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Sichuan Institute of Building Research. Code for design of strengthening masonry structures: GB 50702—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [22] 中国建筑东北设计研究院有限公司. 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- China Northeast Architectural Design & Research Institute Co., Ltd. Code for design of masonry structures: GB 50003—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

(责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)