

小型灌排 U 型槽施工期结构受力分析与优化研究

曹俊峰¹, 戴国强²

(1. 庐山市水务局, 江西 庐山 332800; 2. 江西省水利科学研究院, 江西省水工安全工程技术研究中心, 江西 南昌 330029)

摘 要:渠槽预制构件在施工期破损现象较为普遍,亟需提高构件的结构承载能力。本文以预制 U 型槽为研究对象,分析构件在实际施工中的受力特征,采用材料力学和有限元法分析构件应力状况;若构件最大拉应力超过混凝土极限弯拉强度,构件会发生脆性破坏,从混凝土材料角度阐释了构件破损机理,同时对构件结构提出了优化建议:增加构件槽底部局部厚度或提高混凝土强度等级,实现降低构件承受的最大拉应力、增大混凝土极限弯拉强度的效果,进一步增强构件结构实际的承载能力,有助于提升农田水利工程质量。

关键词:U 型槽;荷载分析;强度;破损机理

中图分类号:S277

文献标识码:B

文章编号:1004-4701(2019)04-0247-05

0 引 言

渠槽预制构件因具有施工进度快、工程造价低、通用性强、质量易保证等优点,成为小型渠道防渗衬砌的最主要形式,在我国小农水重点县和高标准农田建设工程中得到了大规模的推广应用。然而,与高标准农田建设发展要求不相符的是,渠槽预制构件破损问题频繁出现,甚至严重影响了小型农田水利工程质量。不同地区渠槽预制构件破损情况明显不同。在寒冷的西北地区,渠道衬砌冻胀破坏问题比较严重,受到专家学者的高度重视,目前已基本形成渠道衬砌抗冻胀理论体系^[1]。在气候较温暖湿润的江西地区,渠道衬砌虽不存在冻胀破坏,但渠槽预制构件破损现象却非常普遍。究其原因,通常认为是构件产品质量问题,然而在渠道衬砌结构受力优化方面却关注较少^[2,3]。

针对渠槽构件在制作、运输和使用过程中破损率偏高的现象,以预制 U 型槽为研究对象,对实际工程条件下的构件受力状况和破损机理进行分析,探讨常用构件的规格和尺寸的合理性,提出相应改进建议,进一

步提高构件的承载能力、安全系数及耐久性,进而充分发挥渠槽预制构件的性能优势,保障小型农田水利工程建设质量。

1 荷载类型与分析方法

在制作、安装和使用过程中,渠槽构件主要受内外侧压力和槽底部集中荷载作用。

1.1 极限弯拉应力分析方法

两侧荷载作用时的构件受力可简化为平面应变问题,认为截面受力为弯拉组合,截面受力示意图如图 1。

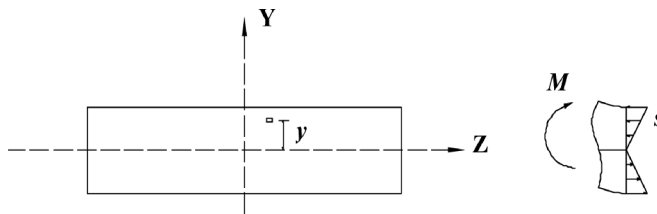


图 1 槽底截面受力示意图

收稿日期:2019-06-14

基金项目:江西省水利厅科技项目(KT201745、201820TG17、201820YBKT10)

作者简介:曹俊峰(1965-),男,大学专科,工程师。

截面最大弯曲应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y_{\max}}{I_z} \text{ 或 } \sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \quad (1)$$

内外侧压力作用时, 构件底部破坏截面上的总应力分别为弯拉组合应力 σ_{ti} 和弯压组合应力 σ_{to} , 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{ti} &= \sigma_{\max} + \sigma = \frac{M y_{\max}}{I_z} + \frac{f}{\delta} = \frac{\frac{\delta}{2} \times f \times H}{\delta^3/12} + \frac{f}{\delta} \\ &= f \times \left(\frac{6 \times H}{\delta^2} + \frac{1}{\delta} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{to} &= \sigma_{\max} - \sigma = \frac{M y_{\max}}{I_z} - \frac{f}{\delta} = \frac{\frac{\delta}{2} \times f \times H}{\delta^3/12} - \frac{f}{\delta} \\ &= f \times \left(\frac{6 \times H}{\delta^2} - \frac{1}{\delta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, M 为截面弯矩, $M = f \times l \times H$, $\text{kN} \cdot \text{m}$; W_z 为抗弯截面系数, $W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{l \delta^2}{6}$, m^3 ; I_z 为中性截面惯性矩, $I_z = \frac{l \delta^3}{12}$, m^4 ; y 为应力点距中性轴的距离, m ; l 为槽身实际受压长度, m ; H 为槽深, m ; δ 为槽壁厚度, m ; f 为单位长度荷载, kN/m 。

1.2 有限元法

预制构件受集中荷载作用时, 受力状态具有明显的三维效应, 无法简化为平面力学问题, 宜采用有限元方法进行应力计算。有限元计算网格如图 2 所示, 计算模型尺寸: 槽底直径为 200mm、槽净深为 300mm、槽壁厚为 35mm。

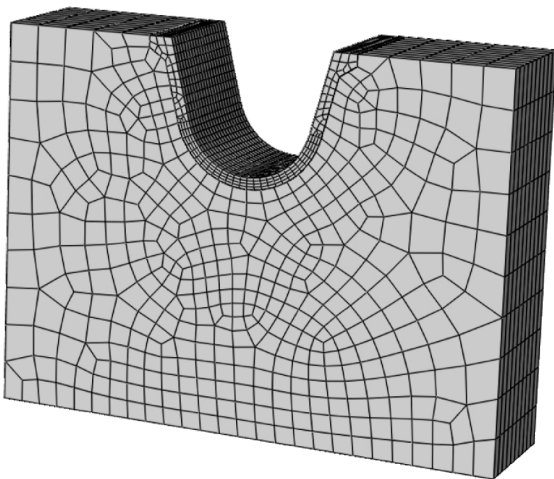


图 2 U 型槽有限元网格图

2 构件结构受力分析与破损机理

2.1 侧向荷载作用下的受力分析

侧向荷载主要包括自重力荷载、施工踩踏荷载和两侧土压力荷载。对于南方无冻胀地区, 正常使用工况下两侧土压力较小, 仅考虑运输和安装过程中的自重和施工踩踏荷载即可。

(1) 自重荷载作用。自重荷载形成的最不利受力状态如图 3 所示, 最大应力位置为 U 型槽一侧端部。

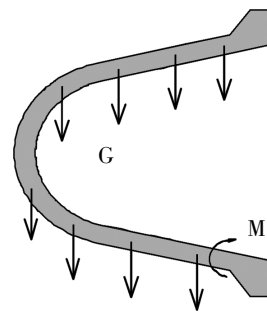


图 3 自重荷载作用下的最不利状态构件受力图

参照 SL191-2008 《水工混凝土结构设计规范》第 3.1.6 条规定^[4]: 预制构件应考虑制作运输吊装时相应荷载的作用, 进行预制构件施工吊装验算时构件自重应计入动力系数, 动力系数可取 1.5, 也可根据吊装时的实际受力情况适当增减。因此渠槽构件在搬运、堆放和安装过程中的自重荷载动力系数取值 1.5。

U 型槽的自重荷载由公式 (4) 计算可得:

$$G = \gamma_c \delta \left(\left(\pi - \frac{\alpha}{90} \right) r + 2 \frac{(H - r + r \sin \alpha)}{\cos \alpha} \right) \quad (4)$$

式中: G 为 U 型槽的自重荷载, kg/m ; γ_c 为混凝土密度, 取 2400 kg/m^3 ; δ 为衬砌厚度, mm ; r 为下圆弧半径, mm ; α 为直立段外倾角度, 取 $\alpha = 14^\circ$; H 为衬砌渠槽深度, mm 。

根据式 (1) 和式 (4), 可计算出常规 U 型槽构件在自重力荷载作用下的最大弯拉应力, 详见表 1。

(2) 施工踩踏荷载作用。施工踩踏荷载作用下构件的最不利受力状态如图 4 所示, 最大弯拉应力出现在槽底部。

以 100kg 标准荷载作用进行应力计算, 根据式 (3)

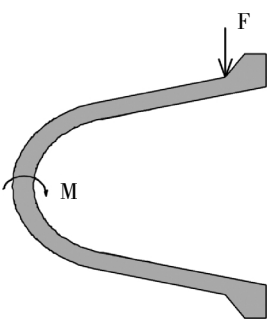


图 4 施工踩踏荷载作用下的最不利状态构件受力图

计算 U 型槽构件在施工踩踏荷载作用下的最大弯拉应力,如表 1 所示。表 1 所列构件均为工程常用规格,等厚度且最小厚度不小于 35mm,构件混凝土强度不低于 C20。

表 1 不同侧向荷载引起的 U 型槽底最大弯拉应力 MPa

规格 $D\times H\times\delta$	自重荷载引起的 槽底最大弯拉应力 σ_{ik}	施工踩踏荷载引起的 槽底最大弯拉应力 σ_{ik}
	σ_{ik}	σ_{ik}
200×300×35	1.0	3.05
300×300×35	1.2	3.05
300×300×40	1.1	2.35
300×350×35	1.6	3.54
300×400×35	2.0	4.03
300×400×40	1.7	3.10
400×350×35	1.8	3.54
400×350×40	1.6	2.73
400×400×40	1.9	3.10
400×450×40	2.3	3.48
400×500×40	2.7	3.85
500×500×45	2.7	3.05
600×500×45	2.9	3.05
600×600×45	3.9	3.64

注：200×300×35 表示 U 型槽下圆弧内壁直径为 200mm,槽深为 300mm,厚度为 35mm 规格构件,下同。

2.2 集中荷载作用下的受力分析

考虑有限元分析的关注重点为混凝土构件的应力大小及分布情况,为简化计算,混凝土和粘土材料均采用线弹性本构关系。以 400kg 荷载作用(相当于成年耕牛标准体重),动力系数取为 1.5(见图 5)。混凝土和粘

土的计算参数如表 2 所示。

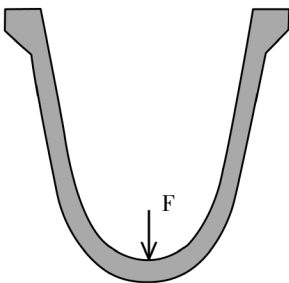


图 5 构件底部受力图

表 2 混凝土和粘土的主要计算参数

材料	密度 $\rho_d/(\text{kg/m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
混凝土	2 400	2.5×10^4	0.25
粘土	1 600	100	0.30

以 300×400×35、400×500×40、500×500×45 具有代表性规格的构件为研究对象,分析 U 型槽构件拉应力分布状况,如图 6~8。构件承受的最大拉应力位于槽底面(对应于荷载作用位置),构件侧面应力较小。

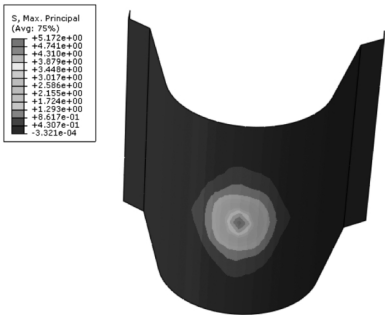


图 6 300×400×35 槽底拉应力分布图

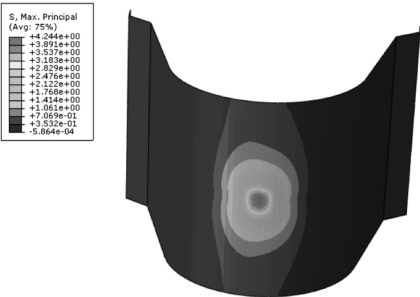


图 7 400×500×40 槽底拉应力分布

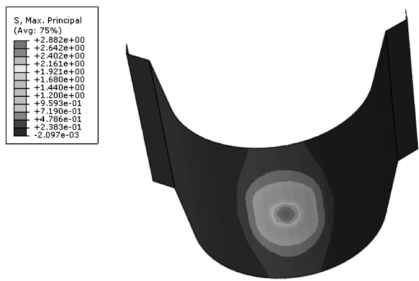


图 8 500×500×45 槽底拉应力分布

U 型槽底面最大拉应力计算结果见表 3。U 型槽底面最大拉应力主要与构件厚度有关,构件厚度越小,槽底拉应力越大。为进一步分析构件厚度对槽底面最大拉应力的影响,以 300×400×35 槽底加厚 10mm 为例,构件槽底面最大拉应力由 5.17MPa 减至 2.91MPa。说明增加构件厚度,会显著降低槽底面最大拉应力,有利于提高构件结构的承载能力。

表 3 U 型槽构件底面最大拉应力有限元计算结果

规格 $D\times H\times\delta$	槽壁最小厚度 δ/mm	槽底面最大拉应力 σ/MPa
300×400×35	35	5.17
300×400×45	45	2.91
400×500×40	40	4.24
500×500×45	45	2.88

3.3 U 型槽构件破损机理

由于 U 型槽素混凝土抗压强度远大于其抗拉强度,决定了构件破坏模式为混凝土弯拉破坏。换言之,如果侧向荷载或集中荷载作用引起的混凝土弯拉应力一旦超过混凝土极限弯拉强度,则 U 型槽构件发生脆性破坏。

混凝土的弯拉强度与抗压强度存在一定的相关性,专家学者针对不同类型混凝土的弯拉强度和抗压强度的相关关系进行了研究,并采用幂函数关系式进行表述^[5-9],但由于所依据的试验对象不同,各成果所提出换算关系差异较大。

为合理确定渠槽预制构件混凝土抗压强度与极限弯拉强度的换算关系,通过大量现场试验,采用回弹法测试构件混凝土抗压强度,现场测试构件内外压荷载及构件尺寸,再由公式(2)和式(3)计算出相应的混凝土

土极限弯拉强度值,对这些试验数据采用幂函数关系式进行拟合,得出渠槽构件混凝土抗压强度与弯拉强度的关系式为:

$$f_n=0.38f_c^{0.75} \tag{5}$$

式中: f_n 为弯拉强度,MPa; f_c 为抗压强度,MPa。

由式(5)可计算出 C20 混凝土极限弯拉强度为 3.6MPa,C25 混凝土极限弯拉强度为 4.2MPa。

(1) 侧向荷载作用。对比 U 型槽底最大弯拉应力(见表 1)与混凝土极限弯拉强度(C20 混凝土 3.6MPa,C25 混凝土 4.2MPa)可知:除个别大规格构件外,自重荷载作用引起的最大弯拉应力均小于 C20 混凝土极限弯拉强度,说明现行规格构件基本能够满足在搬运、安装过程中的自重冲击荷载作用;部分厚度小、槽深大的构件在施工踩踏荷载作用下的最大弯拉应力超出 C20 混凝土极限弯拉强度,但均小于 C25 混凝土极限弯拉强度。

(2) 集中荷载作用。当槽底厚度较小时(如 300×400×35),槽底最大弯拉应力超出 C25 混凝土的极限弯拉强度,构件发生破坏;而当槽底厚度较大时(如 500×500×45),槽底最大弯拉应力小于 C20 混凝土极限弯拉强度。可见,现行部分厚度较小($\leq 40\text{mm}$)的 U 型槽构件不能满足实际使用过程中的集中荷载($\geq 400\text{kg}$)作用工况。

4 构件尺寸的合理性分析与建议

构件槽底最大弯拉应力与构件厚度 δ 的平方成反比,与槽深 H 成正比。为减小构件受力,可增加厚度或减小槽深。考虑调整槽深会改变渠道断面过流能力,且减小槽深不符合渠道断面选型的优选原则(优先选用深窄式断面),故不宜通过减小槽深来减小构件应力。因此,建议通过提高构件混凝土强度等级或增加构件厚度,提高构件结构的承载能力。

考虑施工踩踏荷载和集中荷载作用下的构件最大拉应力均出现在槽底部,为减小槽底最大拉应力,同时考虑经济性,建议对槽底进行局部加厚。综合施工踩踏荷载和集中荷载作用工况的应力结果,为提高构件质量安全系数和耐久性,提出建议如下:渠槽构件混凝土强度等级不宜小于 C25,构件厚度不小于 35mm,槽底厚度不应小于 40mm;对于槽深大于 400 的构件,其混凝土强度等级不应小于 C25。常规 U 型槽构件的优化

建议如表 4 所示。

表 4 常规 U 型槽构件的优化建议

目前常用规格		改进后的规格		调整内容
尺寸	混凝土强度等级	尺寸	混凝土强度等级	
200×300×35	C20	200×300×40	C25	强度、厚度
300×300×35		300×300×40		强度、厚度
300×300×40		300×300×40		强度
300×350×35		300×350×40		强度、厚度
300×400×35		300×400×40		强度、厚度
300×400×40		300×400×40		强度
400×350×35		400×350×40		强度、厚度
400×350×40		400×350×40		强度
400×400×40		400×400×40		强度
400×450×40		400×450×40		强度
400×500×40		400×500×40		强度
500×500×45		500×500×45		强度
600×500×45		600×500×45		强度
600×600×45		600×600×45		强度

5 结 论

(1) 在制作、安装和使用过程中,渠槽构件主要承受的荷载为自重和施工踩踏荷载形成的侧向荷载和动物踩踏和耕作机械等形成的集中荷载。

(2) 侧向荷载作用时,构件最大弯拉应力出现在槽底部,且最大弯拉应力值与厚度 δ 的平方成反比、与槽深 H 成正比;集中荷载作用时,构件最大弯拉应力出现在槽底部荷载作用点位置,主要与厚度 δ 有关。考虑减

小槽深不符合渠道断面选型的优选原则,同时兼顾构件产品的经济性,建议仅增加构件局部厚度(底部),来降低构件最大弯拉应力。

(3) 厚度 $\leq 40\text{mm}$ 的部分构件最大弯拉应力值偏大,超过了 C20 混凝土极限弯拉强度,构件容易发生脆性破坏。为进一步提高构件质量安全系数和耐久性,建议提高混凝土强度等级(不宜低于 C25)、增加槽底局部厚度(不宜小于 40mm)。

参考文献:

- [1] 王斌. U 形渠道衬砌防冻机理与数值模拟研究 [D]. 宁夏大学, 2017.
- [2] 戴素娟. U 型断面薄壳渡槽应力分析的简化计算方法[J]. 山东矿业学院学报, 1994, 13 (03): 258~263.
- [3] 祝小靓,徐镇凯,傅琼华. U 型槽有限元分析[J]. 江西水利科技, 2011, 37 (04): 257~260.
- [4] SL191-2008, 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [5] J. M. Raphael. Tensile-strength of concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1984, 81 (02): 158~165.
- [6] S. Popovics. Strength and related properties of concrete: a quantitative approach [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998.
- [7] M. A. Rashid, M. A. Mansur, P. Paramasivam. Correlations between mechanical properties of high-strength concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE, 2002, 14 (03): 230~238.
- [8] American Concrete Institute. ACI 318-11 building code requirements for structural concrete and commentary [S]. 2011.
- [9] 武明鑫,张楚汉,陈振富. 混凝土直拉、劈拉、弯拉强度关系的试验与仿真研究[J]. 水利学报, 2015, 46 (8): 981~988.

编辑: 张绍付

(下转第 279 页)