

电缆排管理论研究及其计算方法的深入探讨

张成芬¹ 郑众安² 王振阳¹ 董金朋¹

1. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司; 2. 丽水市正阳电力设计院有限公司

摘要: 本文主要围绕电缆排管理论及其计算方法进行探讨。现有的电缆排管理论在设计和操作过程中面临着诸多挑战和限制, 主要是因为电缆排管的衬砌混凝土与其周围土体的相互作用机制还无法完全解释。为了解决这些问题, 本文深入研究了国内外有关电缆排管理论的设计准则和相关文献, 并在此基础上归纳总结了电缆排管的理论计算方法。最后, 根据所得结果, 通过实例计算电缆排管的各个参数与matlab数值模拟结果相对应, 证实理论计算的可靠性。文章期望能够提供较为完整的电力排管理论参考, 为电力系统的可持续性发展提供实用而适宜的指导。

关键词: 电缆排管理论; 计算方法; 设计准则; 数值模拟

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.11.067

引言

随着社会经济的不断发展, 电力工程已经成为关系国计民生的基础设施建设项目。电缆排管作为电力输送、分配与使用过程中的关键组成部分, 其管理理念的合理性及科学性直接关联着整个电力系统的稳健运营。电缆排管的设计要严格遵守相关的设计规范, 包括国际电工委员会(IEC)及我国电力工业标准工业部的各项准则。但是, 现阶段仍存在一些亟待改善之处, 如封装技术的规范化程度较低, 并未进行充分的应用性研究。

封装技术是电缆排管内部结构的关键环节之一, 其科学原理和严格执行的重要性不言而喻。然而, 目前已经存在的混凝土封装技术在电缆排管管理过程中仍然存在不少问题, 例如理论作业流程欠缺系统化和规范化, 针对专门性适用性的研究也显得不足。这种情况导致要剖析封装混凝土与电缆管道之间的联合工作理论机理尚存在困难。

本研究旨在深入探讨电缆排管理的理论计算方法, 通过全面剖析并对比各类方法的优点与局限, 旨在为电缆排管的设计与管理提供更为科学且可靠的理论与实践依据。期望能进一步明晰电力排管理论的关键参数, 从而提升电力系统的整体性能。同时, 期望能弥补现有电力排管理论计算方法在规律性、规定性及适应性方面的研究空白, 为我国电力行业的可持续发展提供切实可行的理论支持与参考。

一、文献综述

电缆排管理论研究近年来取得了令人瞩目的进展, 吸引了国内外众多学者和产业界人士的关注。在理论和实践的双重推动下, 电缆排管的设计、施工、安全维护等方面的研究不断深入, 为电力系统的稳定运行提供了有力保障。

电缆排管作为电力系统的重要组成部分, 其设计涉及诸多因素, 如材料选择、排管布局、监测保护等。刘承斌等人提出了玻璃纤维增强聚合物复合材料(GFRP)钢筋混凝土电缆排管结构, 此设计有望提升混凝土电缆排管结构的耐久性, 并降低由钢筋混凝土电缆排管金属部件引发的能量损耗问题。这一研究成果为电力排管设计提供了宝贵的理论依据和实践指导。

同时, 周震海等人的电缆排管过路包封层弹性地基梁属性及优化设计也取得了突破性进展, 在分析典型排管结构的基础上, 针对不同的基床系数, 分析排管包封混凝土的弹性地基梁属性, 提出基于长梁、半长梁内力解, 并结合常见的工程实际条件, 提出过路段排管包封混凝土结构层的优化设计建议, 为相关工程的建设提供参考。

除了电力排管的设计和施工, 其监控和预警系统也是研究的重点之一。梁爱武等人的高压电缆排管变形控制标准破坏性试验研究也取得了突破性进展, 为高压电缆在周边建设活动影响下的保护标准制定和监测预警提供了理论参考。

然而, 我们也必须认识到现有研究的局限性。虽然理论层面的研究已经取得了一定的成果, 但在电缆排管的具体计算方法方面还有待进一步深入探讨。为了更好地指导实际工程应用, 需要加强这方面的研究, 对各种计算方法进行详细分类和评估。

二、电力排管理论的计算方法

(一) 电缆排管过路段内力理论计算

根据公路行业规范, 排管包封层内力计算时, 可将地面行车车轮位置的荷载, 假定为集中荷载作用在包封层顶部。图1即为垂直横穿道路排管受地面行车荷载作用的示意图, 在多车道荷载作用下, 车辆的重量通过轮压作用在排管上方, 集中荷载的标准值可按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)的建议取值, 即单处轮压为70kN, 着地作用面积为0.6m×0.2m。

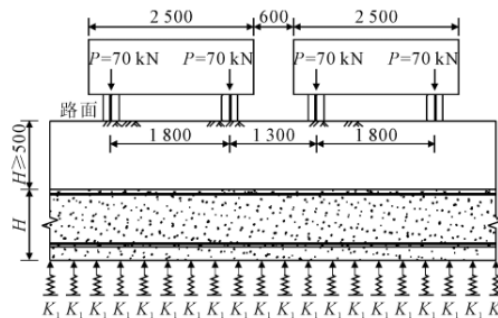


图1 下穿道路排管受行车荷载作用下的受力简图

在城市输变电工程中, 排管过路段的包封结构层一般都要延长至道路两侧的绿化带外, 即使是双向双车道的道路也超过10m, 故都需要考虑按半长梁或长梁来分析排管包封结构层的纵向内力。根据长梁的内力解析解, 各变形和内力参数的计算公式如下:

$$\omega = \frac{P_0 \lambda}{2bk} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (1)$$

$$\theta = -\frac{P_0 \lambda^2}{2bk} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (2)$$

$$M = \frac{P_0}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (3)$$

$$V = -\frac{P_0}{2} e^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad (4)$$

式中： ω 为排管垂直方向上的位移； θ 为排管包封层的转角变形值； M 为排管包封层的弯矩； Q 为排管包封层的剪力； P_0 为竖向集中荷载； λ 为梁的柔度系数， $\lambda = \sqrt[4]{(kb)/(4EI)}$ ； B 为梁的宽度； k 为基床柔度系数； x 为距离集中荷载（车轮）位置距离。

基床系数 k 的确定方法主要有载荷试验法和理论与经验公式方法。基床系数 k 也可以根据地基、基础及荷载的实际情况适当选用表1中的数值。

表1 基床柔度系数表

土类	基床系数 $k \times 10^4 / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
淤泥质土、有机质土或新填土	0.1~0.5
软弱粘土与粉土	0.5~1.0
粘土与粉质粘土：软塑	1.0~2.0
可塑	2.0~4.0
硬塑	4.0~10.0
松散砂土	1.0~5.0
中密砂土与松散砾石	1.5~2.5
紧密砂土与中密砾石	2.5~4.0
黄土与黄土类粉质粘土	4.0~5.0
紧密砾石	5.0~10.0
硬粘土	10~20
风化岩石、石灰岩及砂岩	20~100
完好的坚硬岩石	100~1500

注：对软弱土地基及基础宽度较大时宜选用表中的低值，对瞬时荷载情况可按正常数值提高一倍采用。

(二) 电缆排管截面换算

根据我国标准（GB50608-2010），仅针对实心矩形截面梁的抗剪承载力设计公式进行了规定。在电缆排管横截面中，多排孔的处理方式遵循面积和惯性矩相等的原则，将圆孔转换为矩形孔。关于这一处理过程，可参考刘承斌等人提出的等效方法（如图1所示）。此方法亦为内含孔洞构件承载力计算的通用做法，此处不再详述。

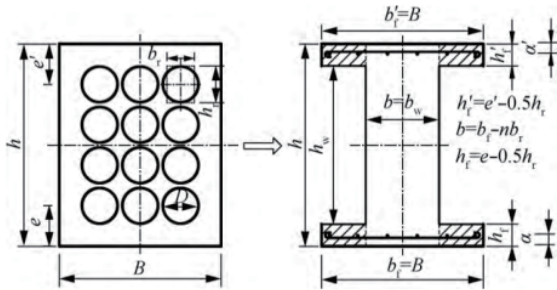


图2 电缆排管的换算工字型截面图

如图2所示，具有 m 排 n 列孔道的电缆排管，其截面宽度为 B ，高度为 h ，可将其等效为工字型截面。首先，根据截面面积和惯性矩相等的原则，将圆孔折算成矩形孔，此时，矩形孔的高 h_r 及宽 b_r 为：

$$h_r = \frac{\sqrt{3}}{2}D, b_r = \frac{\sqrt{3}\pi}{6}D \quad (5)$$

式中， D 为圆孔直径。上翼缘高度 h'_f 为第一排孔中心离上边缘的距离 e' 扣除 $0.5h_r$ ，下翼缘高度 h_f 可利用第 m 排孔中心离下边缘的距离 e 扣除 $0.5h_r$ 求得。工字型截面的腹板宽度 b 为折算前截面宽度 b_f 扣除 n 个矩形孔宽度 b_r 获得。即：

$$b_f = B, h_f = e - 0.5h_r \quad (6)$$

$$b = b_f - nb_r, h_w = h - 2h_f \quad (7)$$

式中， h_w 为腹板高度。这种处理忽略了相邻排的孔洞部分混凝土面积，获得的工字型截面略偏于保守。

(三) 极限承载力理论计算

按照工字形截面承载力公式进行计算，先判定中性轴是否在翼缘内，由于 $f_y A_s < \alpha_1 f_c b'_f h'_f$ ，故按式(8)、(9)计算其承载力：

$$h_0 = h - a_s, x = \frac{f_y A_s}{\alpha_1 f_c b'_f} \quad (8)$$

$$M_u = f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right), p = \frac{4M_u}{0.65 \times 2 \times 1.7} \quad (9)$$

依据混凝土结构设计规范（GB50608—2010）中关于工字形截面钢筋混凝土构件抗剪承载力计算方法的规定，矩形、T形和I形截面受弯构件的受剪截面应满足以下条件：

$$V_u \leq \min(V_{max}, V_H) \quad (10)$$

式中： V_u 为构件斜截面上的最大剪力设计值； V_{max} 为规范规定的最高抗剪承载力限制； V_H 为截面实际抗剪承载力。 V_{max} 的计算方法为：

$$V_{max} = \begin{cases} 0.25\beta_c f_c b h_0, & h_w/b \leq 4 \\ [0.25 - 0.025(h_w/b - 4)]\beta_c f_c b h_0 & 4 \leq h_w/b \leq 6 \\ 0.2\beta_c f_c b h_0 & 6 \leq h_w/b \end{cases} \quad (11)$$

式中： β_c 为混凝土抗压强度影响系数：当混凝土强度等级不超过C80时取1.0，当混凝土强度等级为C80时取0.8，其间按线性内插法确定； b 为矩形截面的宽度；T形截面或工字形截面的腹板宽度； h_w 为截面的腹板高度；矩形截面取有效高度，T形截面取有效高度减去翼缘高度，工字形截面取腹板净高； h_0 为截面的有效高度。

V_H 的计算方法为：

$$V_H = V_C + V_f = 0.86k f_t b_w h_{of} + A_{fv} f_{fv} h_{of} \sin \alpha / s \quad (12)$$

式中： α_f 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值； f_t 为混凝土抗拉强度； b_w 为腹板宽度。 k 的计算方法为：

$$k = \sqrt{2\rho_f \alpha_f + (\rho_f \alpha_f)^2} - \rho_f \alpha_f \quad (13)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w h_{of}} \quad (14)$$

式中， f_{fv} 为箍筋的抗拉强度设计值，即：

$$f_{fv} = \min(0.004E_f, \varphi_{bend} f_{td}) \quad (15)$$

$$\varphi_{bend} = 0.3 + 0.05 \frac{r_v}{d_v} \quad (16)$$

式中： A_{fv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积； r_v 为箍筋的弯折半径； d_v 为箍筋的直径； s 为箍筋间距； α 为倾斜箍筋或螺旋筋与构件纵向轴线的夹角。

三、实例计算分析

丽水经济技术开发区余庄110kV输变电工程的某段电缆排管敷设截面如图3所示，具体数据参数如下：

- 1) 混凝土为C30，弹性模量 $E=3.0 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ；
- 2) 外包混凝土为860mm宽×600mm高；
- 3) 钢筋采用HRB400，Q235级：纵筋为 8@200，箍筋为 12@150；
- 4) 混凝土保护层厚度为50mm；

5) 排管的长度按一个标准断计算, $L \geq 40\text{m}$ 。

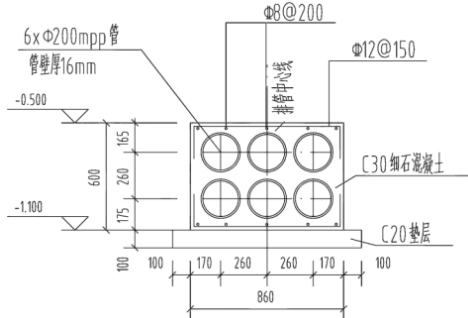


图3 电缆排管敷设断面图

(一) 理论计算分析

(1) 排管内力计算:

按式(1)、(2)、(3)、(4)计算出排管内力, 得: $M=9.3\text{KN}\cdot\text{m}$, $V=11.38\text{KN}$, 正应力 $\sigma=0.236\text{MPa}$, 剪应力 $\tau=0.578\text{MPa}$

(2) 截面等效换算:

如图3所示的具有2排3列孔道的电缆排管, 其截面宽度为B, 高度为h, 可将其等效为工字形截面, 如图4所示。

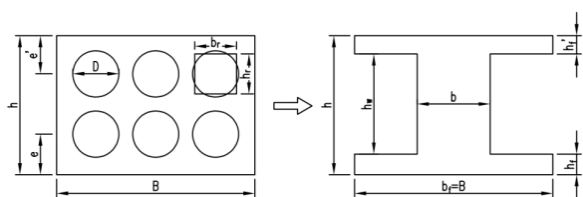


图4 工字形截面换算简图

按照截面面积和惯性矩相等的原则将圆孔折算成矩形孔, 将本试验中的尺寸代入(5) — (7)式, 可知: $h_f=173\text{mm}$, $b_f=181\text{mm}$, $e=175\text{mm}$, $e'=165\text{mm}$, $h_f=88.5\text{mm}$, $h_f'=78.5\text{mm}$, $h_w=433\text{mm}$, $b=317\text{mm}$, $b_f=860\text{mm}$, $h=600\text{mm}$ 。

(3) 抗弯承载力计算:

按照工字形截面承载力公式进行计算, 先判定中性轴是否在翼缘内, 由于 $f_y A_s < \alpha f_c b_f h_f'$, 故按式(8)、(9)计算其承载力为: $M_u=41.54\text{KN}\cdot\text{m} > M=9.3\text{KN}\cdot\text{m}$ (满足要求)

(4) 抗剪承载力计算:

按式(11)计算, 由于 $h_w/b \leq 4$, 故 $V_{max}=566.64\text{KN}$, 按式(12) — (16)计算, 得: $V_{H}=115.44\text{KN}$ 由于 $V_u \leq \min(V_{max}, V_H)$, 抗剪承载力 $V_u=115.44\text{KN} > V=11.38\text{KN}$ (满足要求)

(二) Matlab 数值模拟

建模时, 参考规范及经验值, 各类尺寸和参数按照如下情况直接或近视取值:

(1) 几何模型构建: 建立计算幅度为宽5m、高3m模型界面范围, 其中宽设置为5m主要考虑已有相关研究显示, 在电缆排管数值模拟时计算幅度宜取排管包封宽度的5倍以上(此时, 5m外土对排管的影响已很小可忽略, 即边界条件对孔周应力状态的扰动影响可忽略, 近似处于实际土壤环境中); 电缆排管、包封混凝土及其他结构尺寸参考设计图纸对应设置; 范围内其他区域为土(详见图5)。

(2) 边界定义: 共有电缆排管内壁和土的上下及

两侧5个边界: 排管内壁定义为自由边界、土的底边及左右两侧定义为位移受限的固定边界、土的顶部均布上方传递的土压力(具体数值由覆土深度决定)。

(3) 材料属性定义: 覆土 $E=50\text{MPa}$, C30细石混凝土 $E=3000\text{MPa}$, C20垫层 $E=2550\text{MPa}$, 底层土 $E=100\text{MPa}$; 土泊松比0.3, 砼泊松比0.2。

(4) 网格划分: 考虑模型截面形式相对简单, 采用软件自带的自动划分功能进行自动划分。

(5) 另外, 覆土容重取 20kN/m^3 , 考虑管涵上方为回填土, 参考相关规范, 荷载按照下式取值:

$$q_v = \gamma H$$

式中 q_v 为垂直均布土压力 (kPa); γ 为回填土容重 (kN/m^3); H 为埋深 (m)。

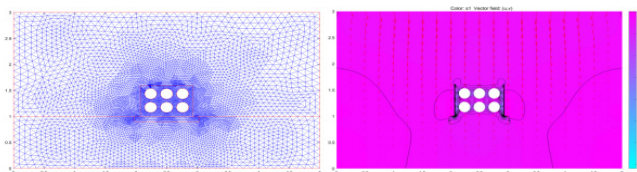


图5 模型建立和加载示意图

通过数据模拟得到电缆排管最大拉应力 $\sigma_t=0.23\text{MPa}$, 最大压应力 $\sigma_c=1.1\text{MPa}$ 与理论计算的正应力和剪应力相似, 证明理论计算可靠。

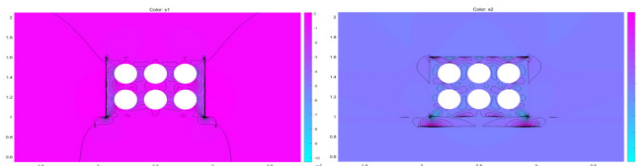


图5 电缆排管应力图

四、结论

电力排管理论的研究及其计算方法的探讨是当前电力工程技术领域中的核心议题。本文首先阐述了电力排管理论研究的现状, 以及所面临的困局, 其次通过扎实的理论研究工作, 充分展现电力排管理论以及相关计算方法的精髓所在, 通过对电力排管理论、设计规范以及其他相关研究成果的综合分析, 希望能够为电力行业的设计工作提供宝贵的参考, 且通过这篇论文, 填补电力排管理论计算方法在系统性、规范性和适用性等方面的空白, 以此能为电力系统的可持续化发展提供实质有效的指引和支援。

参考文献

[1] 刘承斌, 王激扬, 陈勇等. 全GFRP筋混凝土电缆排管的抗剪承载力[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3331-3341.
 [2] 刘承斌, 应健, 陈勇等. 全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(01): 70-80.
 [3] 梁爱武, 刘庭金, 王彦峰等. 高压电缆排管变形控制标准破坏性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(03): 712-719+758.
 [4] 杜凤强. 压杆—拉杆模型中混凝土强度有效系数研究[D]. 大连理工大学, 2011.
 [5] 邹建文. 混凝土构件受剪计算理论及有限元分析[D]. 武汉理工大学, 2007.
 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司群创项目(5211LS230008)