

黄土地区超深方竖井结构设计研究

文 / 徐伟 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
 张亚鹏 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
 叶哲谦 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

摘要：随着地下空间开发利用向深部发展，传统浅埋竖井(≤30m)的设计与施工经验已难以满足超深竖井(≥50m)工程的需求。本文以合阳县城南排水口工程一深度达50m的施工竖井为工程背景，系统研究了其结构设计中的关键技术难题。首先，针对深部土压力计算问题，对比分析了不同土压力理论的适用性，提出了适用于黄土地区超深方竖井的土压力系数取值建议。其次，在支护型式上，通过经验类比和结构力学计算，最终选用了“格栅钢架+喷锚支护+钢围檩加强”的支护结构。本研究为黄土地区类似超深竖井工程提供了重要的理论依据和实践参考。

关键词：黄土；超深竖井；土压力系数；支护结构；钢围檩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.015

引言

竖井作为连接地表与地下空间的关键通道，广泛应用于交通隧道、水利工程、矿山开采等众多领域。在一般工程中，施工竖井的深度多在30m之内，其设计理论与施工技术相对成熟。然而，随着城市地下空间的立体化开发的增加，深度超过50m的超深竖井工程日益增多。

黄土是一种广泛分布于我国西北、华北地区的特殊第四纪沉积物，具有大孔隙、强湿陷性、垂直节理发育等典型工程特性。这些特性使得在黄土地区进行深基坑或竖井开挖时，面临着基坑稳定性差等严峻挑战。传统针对浅埋竖井的设计方法，如简单的横撑支护或厚度经验取值，在超深条件下不再安全经济。

本研究依托合阳县城南排水口工程，其施工竖井深度达到50m，远超常规深度，系统研究其土压力计算理论、支护结构选型等关键技术问题，以解决超深带来的“深部效应”难题，确保工程的安全、经济与高效。

一、工程概况

(一) 工程布置

合阳县城南排水口建设工程主要建筑物由排水隧洞、施工竖井与检查井、隧洞出口建筑物等组成。排水隧洞总长2257.34m，采用马蹄形断面，断面净尺寸为3.3m×3.3m(宽×高)。在桩号0+000.00、0+356.92及0+889.35三处各设置1座施工竖井(兼做检查井)，深度分别为22.70m、31.50m及50.46m，其中3#施工竖井净尺寸为9m×6m。

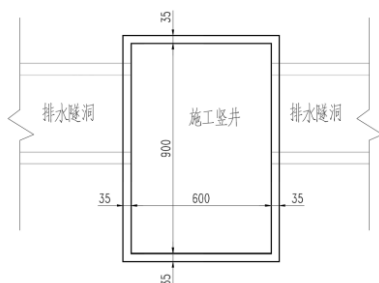


图1 3#施工竖井平面布置图(单位:cm)

(二) 地质条件

3#施工竖井地形平坦，位于合阳县城南道路一侧，竖井地层主要包括人工填土、新黄土、老黄土、古土壤、粉质黏土等，自上而下包括：

(1) 人工填积层(Q₄^{ml})：杂色，稍湿、稍密~中密，主要成分以粉质黏土为主，层厚0.60~2.20m。

(2) 第四系上更新统风积层(Q₃^{eo1})、残积层(Q₃^{el})：以黄褐色~褐色粉质黏土为主，黄土结构疏松，垂直节理发育，具湿陷性，厚约5~10m。

(3) 第四系中更新统风积层(Q₂^{eo1})、残积层(Q₂^{el})和冲洪积层(Q₂^{al+pl})：多层风积老黄土和残积古土壤交替分布于黄土台塬地层中上部，以黄褐色、棕褐色粉质黏土为主，垂直节理发育，顶部老黄土具湿陷性。路线范围广泛分布。

3#施工竖井处地下水位埋藏较深，埋深约60m。

二、超深方竖井土压力系数研究

(一) 经典土压力理论及系数计算方法

土压力是竖井支护结构设计的主要荷载，其取值的准确性直接关系到结构的安全性与经济性。目前，国内外尚无专门针对方形竖井的土压力计算规范。工程实践中多参考挡土墙、建筑边坡等相关规范，并结合经典土压力理论进行综合判断。

(1) 静土压力理论：认为挡土墙结构绝对刚性，不发生任何变形，土体处于弹性平衡状态。水平土压力系数 $K_0=1-\sin\phi'$ (ϕ' 为土的有效内摩擦角)。该理论未考虑支护结构与土体的相互作用，用于超深竖井结构设计偏于保守。

(2) 朗肯主动土压力理论：假设挡土墙允许向外发生足够位移，使土体达到极限平衡状态。其主动土压力系数 $K_a=\tan^2(45^\circ-\phi'/2)$ 。对于黄土，需要考虑粘聚力的影响，主动土压力强度计算公式为： $P_a=\gamma zK_a-2cK_a$ 。朗肯理论适用于墙背垂直、光滑且填土表面水平的情况，计算简便，但未考虑墙土之间的摩擦作用，结果偏于保守。

(3) 库伦主动土压力理论：库伦理论基于滑动土楔体假设，考虑墙背与土体之间的摩擦作用，更适合实际工程条件。根据《水工挡土墙设计规范》(NB/T11089-2023) 附录 D^[1]，库伦主动土压力系数计算公式为：

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \epsilon)}{\cos^2 \epsilon \cos(\epsilon + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\epsilon + \delta) \cos(\epsilon - \beta)}} \right]^2}$$

其中 ϵ 为墙背与竖直面夹角， β 为填土表面与水平面的夹角， δ 为墙与土之间的摩擦角。库伦理论可以考虑墙背倾斜、填土面坡度和墙土摩擦等多种因素，对于无粘性填土的主动土压力计算较为准确，但在计算粘性土和被动土压力时仍有较大误差。

(4) 适用于粘性土的库伦理论公式：《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013) 第 6.2.3 条提出的主动土压力计算公式^[2]，基于库伦土压力理论，并对

其进行了扩展，使其能够适用于粘性土和更复杂的边界条件。

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta - \varphi - \delta)} \{ K_q [\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)] + 2\eta \sin \alpha \cos \varphi \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta) - 2\sqrt{K_q \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \times \sqrt{K_q \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \}$$

$$K_q = 1 + \frac{2g \sin \alpha \cos \beta}{\gamma H \sin(\alpha + \beta)}$$

$$\eta = \frac{2c}{\gamma H}$$

(5) 各土压力理论计算值

根据上述各土压力理论及计算公式，结合地层情况，计算得到不同土压力理论下的土压力系数。

表 1 各土压力理论下的土压力系数计算值

土压力理论	土压力系数	备注
静土压力理论	0.62	未考虑支护结构与土体的相互作用
朗肯主动土压力理论	0.45	适用于墙背垂直、光滑且填土表面水平的情况
库伦主动土压力理论	0.39	考虑墙背与土体间的摩擦作用，未考虑凝聚力 c 的作用
适用于粘性土的库伦理论公式	0.23 ~ 0.30	对应 10m ~ 50m，墙背很粗糙，排水良好，摩擦角 $\delta = 0.6 \psi$
	0.18 ~ 0.22	对应 10m ~ 50m，墙背与填土间不可能滑动，摩擦角 $\delta = 0.9 \psi$

(二) 深竖井土压力系数的特殊性与系数取值

超深方竖井中的土压力分布与常规挡土结构存在显著差异，主要表现为空间效应、环形土拱效应。这些效应导致深竖井土压力计算不能简单套用传统土压力理论。

曹周阳等人^[3]基于 Mogi-Coulomb 强度准则的研究表明，竖井井壁的空间主动土压力较平面应变条件下的朗肯土压力显著减小，不同工况下减小幅度可达 33%-86%。这一现象主要是由于竖井的轴对称特性导致土体中产生环形土拱效应，使部分土重通过剪切阻力转移至井壁周围土体，从而减小了作用在井壁上的水平土压力。

朱正国等人^[4]比较了竖井不同深度位置的土压力实测值和朗肯理论值，竖井深度 8m 处比值为 59% ~ 78%，竖井深度 16m 处比值为 48% ~ 63%，竖井深度 24m 处比值为 46% ~ 60%，竖井深度 32m 处比值 43% ~ 53%。

综合以上分析，考虑本工程竖井利用超前小导管对井壁外侧土层进行预加固，使竖井井壁与地层形成可靠连接，参考表 1 的适用于粘性土的库伦理论公式，主动土压力系数取 0.18 ~ 0.22。

三、超深方竖井支护型式选择及设计

(一) 超深方竖井支护型式初选

黄土因其独特的工程地质特性，如垂直节理发育、高孔隙比、遇水易软化崩解等，对开挖过程中的井壁稳

定性和施工安全构成了严峻考验。在工程实践中，针对此类深竖井，常见的支护方法主要包括倒挂壁逆作法混凝土衬砌、沉井法及喷锚支护等多种技术路径。

倒挂壁逆作法混凝土衬砌则是自上而下分段开挖、逐段浇筑混凝土衬砌的工艺。该方案安全性较好，然而其施工工序繁琐，各环节相互制约，导致作业循环时间长，对于工期要求紧迫的项目，其适用性会受到限制。

沉井法是借助井筒自重或附加荷载，通过内部挖土使其克服外围摩阻力而下沉至设计标高。该方法在稳定地层中具有一定优势，但其在黄土地层中应用时，沉井过程中极易发生“突沉”、“倾斜”等风险，且下沉速度和姿态难以精准把握，施工周期和不确定性较大。

相比之下，喷锚支护在分层开挖后立即在开挖面上喷射一层混凝土（含钢筋网及格栅钢架）封闭土体，防止其松弛，并随即安装超前小导管深入土体内部，将潜在滑移体的荷载传递至稳定地层中，形成复合承载体系。近年在黄土地层地铁施工深竖井开挖支护中喷锚支护应用广泛，成为黄土地层深竖井工程的更优选择。

(二) 超深方竖井受力分析

1. 计算模型

竖井结构计算时将其简化为平面问题处理，在结构纵向截取一基本计算单元，将三维空间结构简化成二维平面框架结构，进行内力计算，并进行配筋计算。

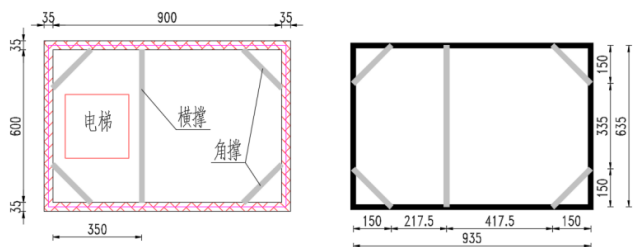


图2 3#施工竖井平面布置尺寸图(单位: cm)

2. 荷载计算

地面超载按照 20kPa 考虑。

土压力选取计算剖面位于地面以下 10m、20m、30m、40m 及 50m 处, 结合施工竖井所处的地层参数, 采用适用于粘性土的库伦理论公式计算得到施工竖井不同深度的主动土压力。

3. 内力计算

采用结构大师计算软件, 计算不同深度竖井结构的内力。以深度 50m 处为例, 展示相应内力分析计算结果。

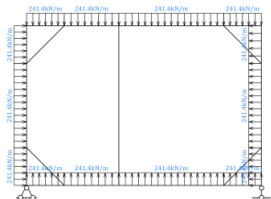


图3 荷载分布图

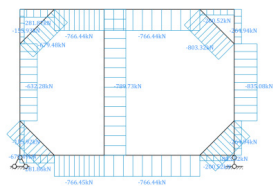


图4 轴力分布图

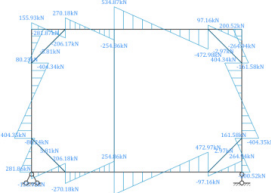


图5 剪力分布图

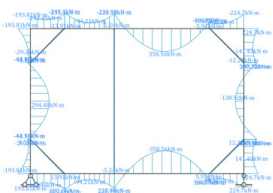


图6 弯矩分布图

4. 配筋计算

抗剪计算取最大剪力复核支护的混凝土厚度是否满足要求, 抗弯计算取弯矩较大、轴力较小的部位计算配筋。综合考虑施工便利性、经济性以及工期要求等多方面因素, 若结构抗剪力不足, 则采用加装钢围檩的支护措施使其达到抗剪要求。

通过对竖井结构内力计算结果的研究分析, 不同深度断面选取的内力计算成果如下表所示。

表2 选取的内力成果表

深度 H(m)	结构外侧		结构内侧		剪力 V (kN)
	弯矩 M (kN·m)	轴力 N (kN)	弯矩 M (kN·m)	轴力 N (kN)	
10	104	85	80	85	116
20	83.8	102	129.8	277.4	193.6
30	132.8	161.7	205.7	439.7	306.8
40	182.1	221.7	282	602	420.6
50	231.5	281.9	358.6	766.4	534.9

表3 构件截面尺寸验算及配筋成果表

深度 H(m)	最大剪力 (kN)	支护措施		计算配筋面积 (mm ²)	设计配筋
		一般措施	补强措施		
10	128	横撑及两角斜撑		1315	4C25
20	213	横撑及四角斜撑		1379	4C25
30	337	横撑及四角斜撑	I20a@3m	2185	4C28
40	463	横撑及四角斜撑	I20a@2m	2997	6C28
50	588	横撑及四角斜撑	I20a@1m	3810	6C32

结语

本文以陕西省合阳县黄土地区 50m 超深竖井为背景, 研究主动土压力系数和支护形式, 得出以下结论:

(1) 对于黄土地区超深竖井, 土压力计算不能简单套用朗肯理论, 应考虑深度效应和空间拱效应, 采用适用于粘性土的库伦理论公式较为合适。

(2) 通过经验类比和结构力学计算, 对于超深竖井在设置一定的内支撑(包括横撑及斜撑)基础上, 采用格栅钢架护壁+喷 C30 混凝土厚 350mm+ 钢围檩的加强支护形式具有安全经济、节约工期的优势, 是优选的施工方方案。

(3) 目前施工竖井已完建, 根据现场监测数据, 竖井施工期间变形很小, 该项目的成功实施为黄土地区类似超深竖井工程提供了重要的理论依据和实践参考。

参考文献

[1] 国家能源局. 水工挡土墙设计规范 (GB 11089-2023) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范 (GB 50330-2013) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[3] 曹周阳, 关晓迪, 朱勇锋等. 基于 Mogi-Coulomb 强度准则的竖井井壁土压力广义解 [J]. 地基处理, 2022, 4(5): 387-393.

[4] 朱正国, 安辰亮, 朱永全. 地铁深竖井土压力理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3776-3783.

作者简介: 徐伟, 1984 年 11 月 15 日, 男, 汉, 江苏姜堰, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水利水电工程设计。