

利用土钉墙支护技术对临近高速深基坑支护方案的设计优化及应用

文 / 王孟哲 中交三航局第九工程有限公司

摘要：随着城市基础设施的逐步完善，避免不了临近重要构筑物深基坑施工，本文通过临近高速深基坑施工案例，详细介绍利用土钉墙支护技术对原支护桩设计方案进行优化，并通过验算及实际施工验证，体现了技术具有施工周期短、成本低、施工方便、安全可控等优势，为类似工程设计施工提供借鉴。

关键词：土钉墙；深基坑；临近高速施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.06.062

前言

目前基坑支护技术种类繁多，如何选择合适的支护方式需要进行多方面进行考虑，一个合理支护方式既能保障基坑安全，更能降低成本、缩短工期。特别是在临近高速等重要构筑物施工时更需要对支护技术进行综合考虑，本文通过支护参数验算、工程实例来进行阐述，希望为同类项目实施提供参考。

一、工程概况及地质情况

(一) 工程概况

望城新区湿地公园排水箱涵工程是南昌新能源汽车产业园（一期）场平及市政道路工程EPC总承包项目中的一个重点单项工程，位于南昌市望城新区北侧，根据《南昌市望城新区水系规划》，是新区“三横八纵”骨干水系的重要组成部分，建成后将使新区内的行洪、排涝、灌溉功能大幅提升，也是湿地公园的排水通道。

箱涵起点为坚磨大道，自西北向东南延伸终于G320国道，全长3.3km。排水箱涵利用G6001高速现有排水涵洞横穿高速。在里程CPK2+840-CPK3+190段临近高速施

工，最大开挖深度13m，原高速侧支护设计方案为混凝土围护桩+旋喷桩。

(二) 工程水文及地质情况

地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水，下覆基岩为第三系新余群（Exn2）泥质砂岩，岩石致密本身不含水或弱含水。上层滞水容易受雨季影响，遇到连续较大降雨或暴雨可导致地表大量积水。孔隙水主要存于泥质砂岩层的裂隙中，受岩层的裂隙发育程度及裂隙性质等条件影响，总体富水性较差。

G6001高速公路周边地貌为剥蚀岗埠地貌，场地地层结构自上而下依次由素填土、粉质黏土、全风化泥质砂岩、强风化泥质砂岩四个地层构成。

二、设计优化

(一) 原设计方案

因该段箱涵临近现有运营高速，且基坑最深达13米，设计及高速运营单位对基坑支护方案均高度重视，为保障基坑安全，该段高速侧原设计采用混凝土围护桩+旋喷桩支护，另侧则采用土钉墙支护。该方案安全系

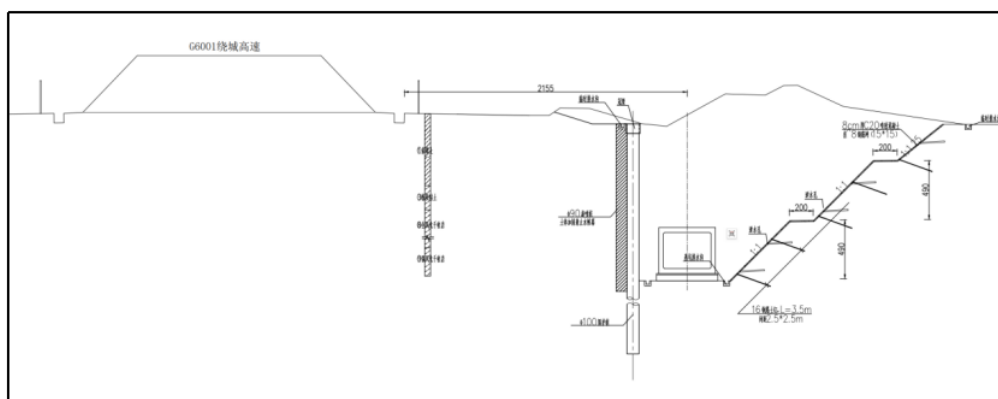


图1 原设计方案图

数高，但对工期及造价影响较大，存在超概风险。

(二) 优化思路

经现场调查，并查阅本项目及高速地勘资料，该段地质条件适合土钉墙防护，而且箱涵中心线距离高速排

水沟有21.5m，现场具备一定长度的放坡开挖条件，两侧能否均采用放坡开挖+土钉墙支护。在充分考虑高速荷载的情况下，利用土钉墙支护技术的灵活性，通过调整土钉的间距、长度等方式来提高基坑的稳定性。

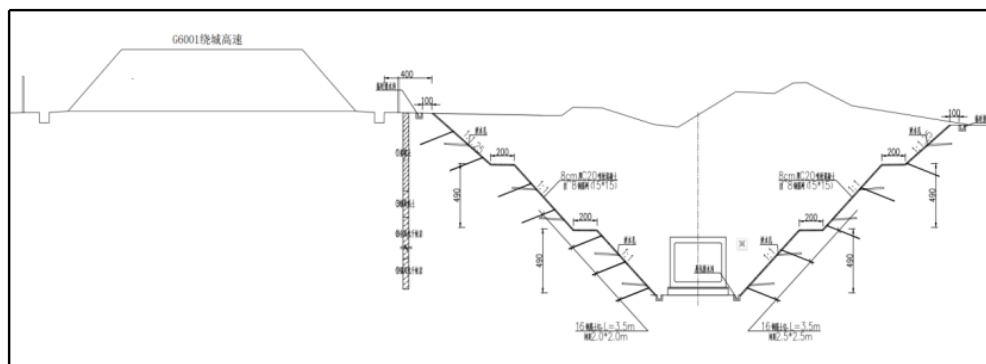


图 2 优化后设计方案图

三、临近高速侧土钉墙参数设计及验算

(一) 参数信息

1. 基本参数

侧壁安全级别	二级	基坑开挖深度 h (m)	13.2
土体的滑动摩擦系数	1.3	条分块数	10
土钉墙计算宽度 B' (m)	15		

2. 荷载参数

序号	类型	面荷载 q (kPa)	荷载宽度 b (m)	基坑边线距离 a (m)	平行基坑边的分布长度 l (m)	作用深度 d (m)
1	局布荷载	200	50	6	340	1

3. 土层参数

序号	土名称	土厚度 (m)	坑壁土的重度 γ (kN/m³)	土内摩擦角 φ (°)	粘聚力 C (kPa)	极限摩擦阻力 (kPa)	饱和重度 (kN/m³)
1	粉土	4.8	19.7	15.03	37.24	30	9.7
2	红黏土	3	19.1	22	35	50	9.1
3	风化岩	7.4	21	36	55	65	11

4. 土钉墙布置数据

土钉参数:

序号	孔径 d (mm)	长度 l (m)	入射角 α (°)	竖向间距 Sz (m)	土钉杆体材料	杆体截面积 As (mm²)	抗拉强度标准值 fyk (N/mm²)	抗拉强度设计值 fy (N/mm²)
1	160	3	20	0.8	钢筋	314	400	360
2	160	3	20	2	钢筋	314	400	360
3	160	3	20	2	钢筋	314	400	360
4	160	3	20	2	钢筋	314	400	360
5	160	3	20	2	钢筋	314	400	360
6	160	3	20	2	钢筋	314	400	360
7	160	3	20	2	钢筋	314	400	360

5. 计算系数

结构重要性系数 γ₀	1	综合分项系数 γ_F	1.25
土钉抗拔安全系数 K_t	1.6	圆弧滑动稳定安全系数 K_s	1.3
抗滑移安全系数 K_sl	1.2	抗倾覆安全系数 K_ov	1.3
经验系数 η_b	0.6		

(二) 主要性能验算

因验算项目较多, 仅提供土钉墙整体稳定性、抗滑动及抗倾覆稳定性验算过程及结果。

1. 土钉墙稳定性验算

土钉墙整体稳定性验算采用圆弧滑动简单条分法进

行验算, 针对不同开挖深度及基坑底面以下可能滑动面情况进行逐一分析。

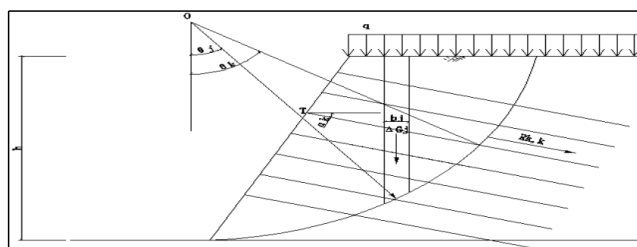


图 3 弧滑动法示意图

$$K_{s,i} = (\sum (c_j l_j + (q_j b_j + \Delta G_j) \cos \theta_j \tan \phi_j) + \sum R_{k,k} (\cos(\theta_k$$

$$+ \alpha_k) + \psi_v) / S_{x,k}) / (\sum (q_j b_j + \Delta G_j) \sin \theta_j)$$

公式中:

c_j 、 ϕ_j 为第 j 土条滑弧面处土的黏聚力 (kPa)、内摩擦角 (°); b_j 为第 j 土条的宽度 (m); θ_j 为第 j 土条滑弧面中点处的法线与垂直面的夹角 (°); l_j 为第 j 土条的滑弧段长度 (m), 取 $l_j = b_j / \cos \theta_j$; q_j 为作用在第 j 土条上的附加分布荷载标准值 (kPa); ΔG_j 为第 j 土条的自重 (kN), 按天然重度计算; $R'_{k,k}$ 为第 k 根土钉在圆弧滑动面以外的锚固段的极限抗拔承载力标准值与杆体受拉承载力标准值的较小值; α_k 为第 k 层土钉的倾角; θ_k 为圆弧面在第 k 层土钉处的法线与垂直面的夹角; ψ_v 为系数, 取 $\psi_v = 0.5 \sin(\alpha_k + \theta_k) \tan \phi$, ϕ 表示第 k 层土钉与滑弧交点处土的内摩擦角。

将第 10 步各参数代入上面的公式中, 进行计算得到第 10 步结果 (计算步数有 10 步, 如果全提供数据较多, 本文仅提供最后关键一步结果):

计算步数	安全系数	滑裂角 (度)	圆心 X (m)	圆心 Y (m)	半径 R (m)
10	1.457	28.502	9.304	19.664	21.754

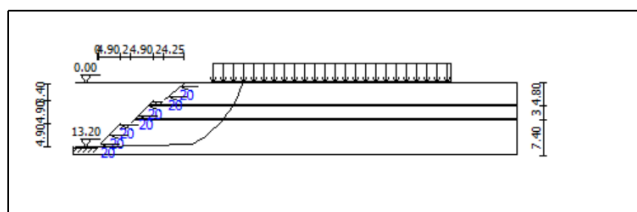


图 4 第 10 步稳定性示意图

经过验算，第10步开挖内部整体稳定性安全系数 $\gamma k=1.457>1.3$ ，验算满足要求[标高-13.2 m（最深处基坑底标高）]

2. 抗滑动、抗倾覆稳定性验算

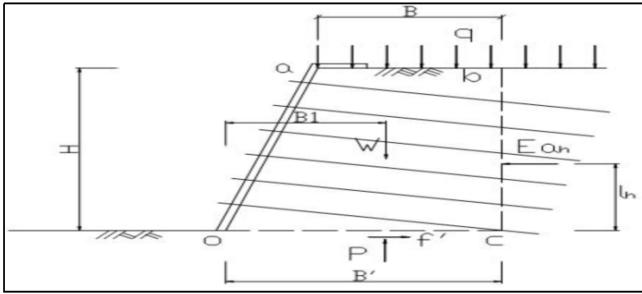


图5 抗滑动、抗倾覆稳定性验算示意图

①抗滑动稳定性验算

抗滑动安全系数计算： $f' / E_{ah} \geq 1.2$

其中， E_{ah} 为主动土压力的水平分量（KN）； f' 为墙底的抗滑阻力（KN）； $f' = \mu (W + qB_a S_v)$ ； μ 为土体的滑动摩擦系数； W 为所计算土体自重（KN）； q 为坡顶面荷载（KN/m²）； B_a 为荷载长度； S_v 为墙体厚度，本次计算取值为土钉墙的一个水平间距。

1级坡： $f' / E_{ah} = 489.447 > 1.200$ ，满足要求！

2级坡： $f' / E_{ah} = 435.741 > 1.200$ ，满足要求！

3级坡：主动土压力的水平分量 E_{ah} 为0，第3级坡满足要求！

②抗倾覆稳定性验算

抗倾覆安全系数计算： M_c / M_q

M_c 为墙体的自重和地面荷载所产生的抗倾覆力矩， $M_c = W \times B_c + qB_a \times (B - B + b \times B_a / 2)$

其中， W 为所计算土体自重（KN）； q 为坡顶面荷载（KN/m²）； B_c 为土体重心至o点的水平距离； B_a 为荷载在B范围内长度； b 为荷载距基坑边线长度； B' 为土钉墙计算宽度； M_k 为主动土压力产生的倾覆力矩： $M_k = E_{ah} \times l_h$ ； E_{ah} 为主动土压力的水平分量（KN）； l_h 为主动土压力水平分量的合力点至通过墙趾O水平面的垂直距离。

1级坡： $M_c / M_q = 961.737 > 1.300$ ，满足要求！

2级坡： $M_c / M_q = 4325.933 > 1.300$ ，满足要求！

3级坡：主动土压力产生的倾覆力矩 M_k 为0，第3级坡满足要求！

四、施工工序控制

(一)土方开挖

基坑开挖采用分段跳槽开挖，每段开挖长度约50m~60m，CPK2+840-CPK3+190段分为7段，跳槽隔段施工，待先开挖段达到回填要求后开挖相邻段基坑，尽量

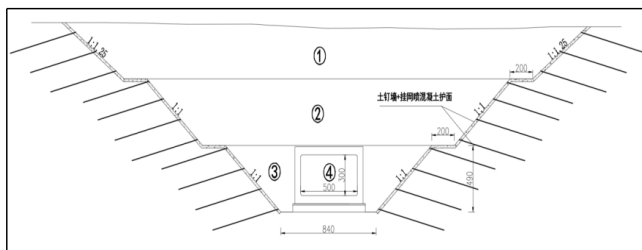


图6 放坡开挖步顺图

减少基坑外露时间。放坡分层开放施工顺序：①开挖第三级边坡土体，施工该级边坡土钉及挂网喷混凝土支护→②开挖第二级边坡土体，该级土钉及挂网喷混凝土施工→③开挖第一级边坡土体，该级土钉及挂网喷混凝土施工→④排水箱涵主体施工→⑤台背及基坑回填。

根据该处基坑情况，基坑开挖按6个步骤进行：①施工准备，包含线路调查、图纸复核、便道及弃土场选择、放样；②修建截水沟；③土方开挖，包含土石方挖运、边坡及平台修整；④边坡支护，包含土钉墙、挂网、喷混凝土；⑤基坑排水及临边防护，包含基坑排水沟、集水井开挖、基坑临空防护。⑥边坡及基坑监测，包括埋设沉降位移桩和沉降位移检测。

临近高速处基坑边坡按三级开挖，每级边坡高为4.9m，平台设置为2m宽。基坑开挖坡率为：第一、二级1：1、第三级1：1.25，开挖过程中实时对高程进行测量，避免出现超挖或欠挖，当开挖标高距基坑底30cm时采用人工开挖，及时修整基坑面。基坑开挖到位后，在基槽两侧开挖排水沟，尺寸为30cm×30cm，每隔30米开挖集水坑，用水泵及时将积水排出。基坑开挖成型后，对开挖边坡按照拟定的开挖坡率进行修整，修整过程中预留好足够宽度的台阶便于上下，靠近高速侧严禁堆土 and 重型机械行走。

(二)土钉墙施工

1. 工艺流程

基坑开挖→边坡修整→土钉定位→钻孔→放置土钉→注浆→挂钢筋网→安装泄水孔→喷射混凝土→养护

2. 修整边坡

边坡修整采用小型机械辅以人工进行，严格按照设计坡度进行修整，严禁欠挖，修整后的坡面平整度偏差宜在±20mm范围内。当机械开挖扰动导致部分坡面出现松动土体时应及时清理。基坑边坡修整验收合格后，立即喷射第一层混凝土（厚度不小于2cm，强度等级C20）。喷射混凝土时喷嘴应与边坡垂直，距离边坡应在0.8-1.2m范围内，可有效减少回弹并增加混凝土的密实度。混凝土喷射由下向上进行，不得长时间停留在同一区域内。

3. 土钉定位

土钉墙采用梅花形布置，高速侧间距采用2m×2m，对侧间距采用2.5m×2.5m，具体间距也可在土方开挖后根据土质情况进行验算确定，对部分关键部位或土质软弱部位进行加密布置，点位均采用涂刷红油漆的短木桩进行标定。

4. 放置土钉

钻机就位后对标定好的孔位进行开孔钻进，开孔时应缓慢钻入，避免因钻速太快而导致土层扰动或孔位偏位，同时需达到相应深度且土层较稳定时方可提升至正常速度钻进。钻孔施工时应减少对周边土层的扰动，钻孔完成后采用高压风枪清除孔壁岩屑，确保土钉锚固深度。土钉可采用人工放入或机械打入，土钉末部通过焊接与加强筋及钢筋网连接成整体，提高土钉墙防护整体性。

5. 注浆

注浆采用M20水泥砂浆，孔底注浆时金属注浆管管口离孔底5-10cm，另一侧用密封袋封严，注浆压力为

0.2-0.5Mp。注浆时边注浆边向外拔管，拔管过程中不得将注浆管拔出浆面，直至注满。在水泥砂浆凝结硬化后应进行二次补注浆。

6. 钢筋网片安装

钢筋网片按开挖截面尺寸进行加工下料，网片由 $\Phi 8$ 钢筋、间距 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 采用铁丝绑扎而成，土钉末端与钢筋网片焊成整体。

7. 安装泄水孔

泄水孔在每一级边坡坡顶及底部设置，原则上间距为5m，采用梅花型布置，局部段落可加密布设。排水管采用直径7.5cm的PVC管，沿排水管周四排均匀排列10mm的圆孔（两孔间距为10cm），四排圆孔同位置应交错排列。排水管采用土工布包裹并绑紧，出水口侧边坡1-3m范围内排水管不设进水圆孔，在距出水管口边坡85cm范围内钻孔与排水管之间的间隙用黏土封堵。喷射混凝土时对管口进行临时封堵，防止混凝土进入堵塞管口。

8. 喷射混凝土（第二次）

采用湿喷法进行混凝土喷射，终喷厚度不少于8cm，在喷射过程中采用喷红漆的钢筋进行厚度控制。混凝土喷射机的喷射压力应适中，不得过高，压力过高易导致混凝土喷射速度快、动能大，回弹多；压力较低则易导致喷射速度慢、密实度不足，混凝土强度无法满足要求。控制喷嘴与边坡尽量垂直，边坡距离适中，喷射混凝土时因自下而上，有节奏、系统的移动，保证混凝土厚度均匀。在喷射完成后2-4h应进行洒水养护，养护时间不少于7d，上级边坡土钉墙支护达到设计强度后方可进行下级边坡开挖。

五、效果及优点分析

（一）本项目效果分析

①节约工期，土钉墙支护可以和基坑开挖同时进行，养护期短，若采用原设计方案，需先完成围护桩及旋喷桩，且需等桩身强度达到设计强度后方可进行土方开挖，经测算，工期缩短近2个月。

②成本降低明显，土钉墙支护较原围护桩+旋喷桩支护节省了大量混凝土和钢筋，放坡增加的土方开挖成本及土钉墙成本远远低于围护桩结构，节约成本近150万元。

③基坑安全稳定性良好，完全满足基坑安全要求及高速安全运营要求，在通过严密的验算和有序施工把控下，边坡监控量测位移数据均在可控稳定范围内。



图7 现在支护情况

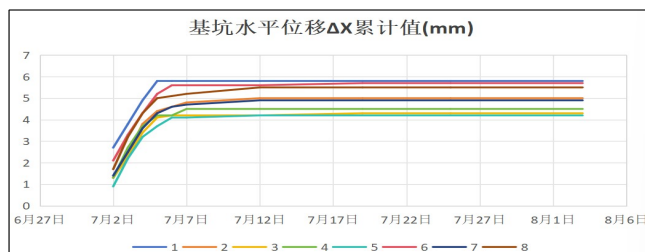


图8 基坑监控数据统计（一）

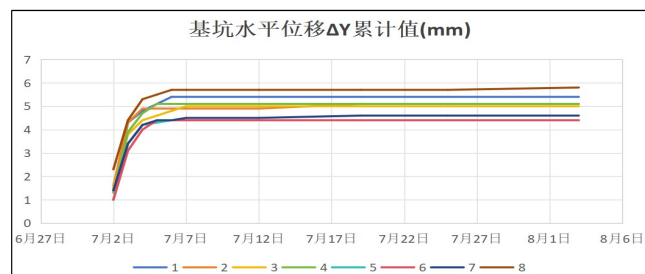


图9 基坑监控数据统计（二）

（二）土钉墙支护优点分析

①土钉墙支护安全性可控，类型范围适用广。土钉墙支护是由众多土钉共同受力，即便个别土钉失效，同排及周边的土钉会分担其荷载，对整体影响不大。土钉钻孔小，与桩相比更容易穿透各种地层，对周边地层和构筑物扰动小，对于坡面倾斜、形状不规则等情况亦可及时支护。可根据边坡监测数据及开挖后的地质土质条件，经验算后实时调整土钉相关参数，做到动态支护。

②设备、工艺及质量控制简单，对施工场地要求低。施工设备、工艺简单，无须复杂的技术和大型机具，无大量隐蔽工程，质量方便简单。可以在距离构筑物近、场地狭小，特别是大型护坡施工设备没有足够工作面的情况下施工。

③施工速度快。土钉墙可以和土石方开挖时同步进行，养护等待时间短。而且该防护形式无横撑，土钉墙支护未占用基坑空间，不影响土方外运及主体施工，施工速度较其他支护结构快。

④工程造价相对于其他防护形式较低。土钉墙工程造价及成本比其他支护结构一般低 $1/3 \sim 1/6$ ，可以有效控制施工成本。

结语

土钉墙支护技术具有较大的灵活性和实用性，适合在临近构筑物或者施工工作面较小的基坑，同时可根据已开挖的土质情况调整防护参数，做到动态调整，可用于复杂基坑防护，具有可操作性和经济适用性，适合在类似工程中予以推广运用。

参考文献

[1] 中国建筑科学研究院. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
 [2] 江正荣. 建筑施工计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
 [3] 谢建民、肖备. 施工现场设施安全设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
 [4] 李立峰. 潍坊文化艺术中心基坑工程坑中坑关键施工技术分析与应用[D]. 济南, 山东大学, 2014.