

黄土地质条件下深基坑支护与地基处理技术研究

梁 超

中海大学设计研究院有限公司甘肃分公司 甘肃 兰州 730000

摘 要:黄土在西北和华北等地大量存在, 它所具有的水敏性、湿陷性和结构性对深基坑施工造成较大影响。根据黄土的工程性质, 总结适合黄土地层使用的深基坑支护方法(土钉墙、复合土钉墙、桩锚支护、内支撑以及地下连续墙)以及地基处理措施(挤密法、换填法、夯实法、深层搅拌桩和 CFG 桩等), 并对其支护结构受力变形情况、湿陷性黄土地基处理机理以及施工过程中需注意的问题进行了阐述。以某商业综合体一深基坑为例, 采用“预应力锚索+钻孔灌注桩+灰土挤密桩”的方案进行支护, 证明该方案有效可行。得出黄土地层中基坑支护要注重防水和排水; 地基处理既要考虑消除湿陷又要增强承载力; 并且提出了依据实时监测信息指导施工的方法。这些内容可供类似黄土地质情况下深基坑施工应用参考。

关键词:黄土; 深基坑; 支护结构; 地基处理; 湿陷性; 桩锚支护; 挤密桩

引言

伴随着城市化进程加快, 地下空间开发深度不断增加, 黄土地区深基坑工程越来越多。黄土具有大孔隙、弱胶结和强烈水敏性, 在遇到水时容易造成其结构迅速崩塌而降低强度, 从而导致较大的附加沉降甚至发生湿陷变形, 这对支护结构的安全以及周围环境都提出了很高的要求。近年来黄土地层基坑问题大多是因为对于黄土性质缺乏了解或者选择支护方式不合理或地基处理不当所引起。虽然目前有一些关于黄土地区建筑物基础的规定, 但是对于黄土地区深基坑(开挖深度大于等于 10 米)支护及地基联合设计的研究还不成熟, 施工参数主要靠经验。所以加强对黄土地区深基坑支护及地基处理技术的研究很有必要, 可以找出合适的方法并确定相应的标准, 这对今后工作有重要的指导作用。

1 黄土地层工程地质特性及其对基坑工程的影响

1.1 黄土的物理力学性质

黄土以粉粒(0.005~0.075mm)为主, 约占 60%~75%, 黏粒含量很少, 天然含水量 8%~15%, 孔隙比 0.8~1.2, 干密度 1.3~1.6g/cm³。由于其中含有大量的碳酸钙起着胶结作用而形成原状黄土具有较高的初始强度, 在遇水或受扰动时胶结被破坏, 颗粒之间摩擦力降低从而发生强烈的湿陷现象, 湿陷系数 δ_s 一般在 0.015~0.10 之间, 湿陷起始压力 50~150kPa。

1.2 对深基坑工程的主要不利影响

(1) 强度骤降: 基坑开挖卸载后, 坑壁应力释放, 若遇地表水或地下水入渗, 含水率增大造成黏聚力下

降 30%-50%, 内摩擦角减小 5°-10°, 从而降低边坡安全性; (2) 湿陷变形: 坑底或坑侧浸水情况下, 土体会发生进一步沉降, 一方面会使得支护结构产生更大的位移, 另一方面也会使坑内的工程桩产生负摩阻力; (3) 裂隙发育: 由于黄土具有较发育的垂直节理, 在开挖以后容易出现贯通裂隙, 为水的渗透提供路径, 加大局部不稳定程度; (4) 时空效应显著: 黄土地层基坑变形速度与暴露时间以及降雨密切相关, 施工干扰的影响较大^[1]。所以对于黄土地层深基坑工程应以支护结构刚性和防水性以及地基处理湿陷消除效果为重点进行控制并做到全方位全过程管理。

2 黄土地层深基坑支护技术

2.1 土钉墙与复合土钉墙

土钉墙借助土钉与土体间摩擦作用产生加筋土体, 增强边坡稳定性能, 在开挖深度不大于 12m 且地下水位较低条件下应用于黄土地层基坑开挖支护中, 具有施工简便以及成本低廉特点, 但是当遇到高含水量或者疏松黄土地质时, 仅依靠土钉无法有效抑制变形发展, 因此采用复合土钉墙, 在原有基础上增加预应力锚杆、微型桩或者止水帷幕, 从而形成“土钉+锚索+面板”组合形式, 可以使得适用范围扩大到 15m 以内。而主要的设计指标有土钉长度(一般取开挖深度的 0.8~1.2 倍)、布置距离(1.0~1.5m)以及注浆压力(0.3~0.6MPa), 同时在施工过程中必须保证成孔质量和注浆饱满程度。

2.2 桩锚支护体系

钻孔灌注桩结合预应力锚索是黄土地层深基坑(深

度大于 12m) 常用的一种支护方式。一般灌注桩直径为 0.8~1.2m, 桩距为 1.5~2.5m, 嵌固深度至少要达到稳定的支撑层以下 3~5m。预应力锚索布置在灌注桩之间, 在锚固区内长度不得少于 6m, 施加预应力一般为设计轴力的 60%~70%。在黄土中, 锚索的最大抗拔力主要取决于注浆体与孔壁之间的摩擦力, 约为 50~80kPa, 在现场进行拉拔试验以确定。此方法的优点是可以主动调节变形, 通过张拉锁定值来限制桩顶水平位移在 20~30mm。但是要注意的是, 锚索成孔过程中泥浆护壁对黄土有软化作用, 应使用干钻或跟管钻进施工。

2.3 内支撑与地下连续墙

对于基坑深度大于 18 米并且周围环境要求较高的情况下, 采用内支撑(钢筋混凝土支撑或者钢支撑)与地下连续墙相结合的方法较为合适。地下连

续墙厚度一般为 0.8 至 1.0 米, 在基坑底部以下是 0.5 到 1.0 倍开挖深度, 起到挡土以及防水的作用。内支撑用来抵抗土压力, 使结构变形量控制在毫米级别以内^[2]。但是这种方法成本高, 施工工艺复杂, 而且在黄土地区容易出现槽壁坍塌的问题, 要控制泥浆比重(1.05~1.15)、槽内液位高度并采取一定措施防止槽壁坍塌。

2.4 排水与止水措施

黄土基坑事故中约 70% 是由于地表水或者地下水造成的。所以支护结构顶部要设截水沟, 坡面喷射混凝土封闭, 在坑底设排水盲沟、集水井。如果地下水位较高, 则要在支护桩外侧设水泥土搅拌桩或者高压旋喷桩作止水帷幕, 帷幕渗透系数应小于或等于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, 深度一般要穿过相对隔水层。

表 1 : 黄土地层常用深基坑支护方案对比

支护类型	适用深度/m	变形控制能力	主要优点	主要风险	黄土地层关键控制点
土钉墙	≤ 12	一般	造价低、工期短	抗水能力差, 变形较大	严格控水, 及时封闭坡面
复合土钉墙	≤ 15	较好	造价适中, 适应性较强	工序多, 锚杆易受拉拔蠕变	注浆饱满度, 微型桩垂直度
桩锚支护	12~25	良好(主动控制)	刚度大, 变形主动可控	锚索可能失效, 成孔护壁难	干钻成孔, 锚固段摩阻力验算
内支撑 + 地连墙	> 18	优异(刚性控制)	安全性高, 止水效果好	造价昂贵, 工期长, 换撑复杂	槽壁加固, 泥浆配比, 拆撑工况

3 黄土地基处理技术

3.1 灰土挤密桩与素土挤密桩

挤密桩是利用成孔过程中侧向挤密作用消除黄土地基湿陷性的, 在此基础上桩体材料(石灰和土以 2: 8 或 3: 7 的比例配制而成)以及桩间土构成联合地基从而大幅度提高地基承载力。一般情况下处理深度为 5~15m, 桩径 0.4~0.6m, 桩距 1.0~1.5m, 呈等边三角形或正方形布置。挤密程度由成孔方法决定(沉管、冲击或者螺旋钻孔), 其中采用沉管法挤密桩间土挤密系数可达到 0.93 以上, 湿陷性消除深度可至桩长范围内。设计上应使桩体压实度大于等于 0.97, 夯填含水量应在最优含水量 $\pm 2\%$ 左右。

3.2 换填垫层法

当软弱黄土层厚度小于 3m 时, 采用换填垫层法经济合理。一般用级配砂石、灰土或者水泥土代替原来的湿陷性黄土, 其压实度不应小于 0.95^[3]。垫层宽度要比基础每侧宽出至少一半垫层厚度, 以便分散基础荷载, 减少对下面尚未进行处理湿陷性土的压力增大作用。

3.3 强夯法与孔内深层强夯

强夯法适合于较厚非饱和黄土地基, 利用重锤(10~40t)、落距(10~25m)所产生冲击波及振动夯实土体, 对地基有良好效果, 其加固深度一般在 5~12m 以内。夯击能量一般取值为 $1000 \sim 4000 \text{kN} \cdot \text{m}$, 夯击次数为 2~3 次, 收锤标准以最后两次平均夯沉量小于或等于 50mm 为准。对于深层湿陷性黄土, 可用孔内深层强夯(DDC 工法), 就是先成孔到要求深度, 在分层铺设碎石并夯打, 形成高承载力密集柱状体, 处理深度可达 20m 以上, 而且能较好消除湿陷性。

3.4 水泥土搅拌桩与 CFG 桩

水泥土搅拌桩用于含水量较高软塑黄土, 利用机械搅拌使水泥浆与土混合, 生成一定强度柱状固结体, 其单轴抗压强度为 0.8~1.5MPa; 而 CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)是一种刚性桩复合地基, 桩径一般为 0.4~0.6m, 根据需要布置数量及长度, 通常与褥垫层(厚度为 200~300mm)一起应用, 可使地基承载力提高到原来的 1.5~3.0 倍并降低沉降量, 但是, 在湿陷性黄土中, CFG 桩并

不能消除湿陷性,必须与其他方法如挤密或者预浸水相结合才能起到作用。

4 支护与地基处理的协同设计思路

在黄土地层深基坑工程中,支护结构控制坑壁稳定,地基处理保证坑底以及建筑地基的安全,二者不是各自为政,而是通过基坑开挖卸荷、地下水渗流以及施工顺序相互联系在一起。协同设计应遵循的原则包括:(1)支护和地基处理同时进行,在条件允许的情况下尽量采用“支护桩+锚索”和“挤密桩”的方式布置,使支护桩底部不受地基处理施工的影响;(2)先进行地基处理后开挖基坑,防止长时间暴露使坑底产生湿陷;(3)地基处理范围要超过支护桩外侧2~3m,起到一个“围箍”的作用,降低基坑底部隆起和侧向挤出现象的发生;(4)根据实际情况及时调整有关参数,结合现场监测结果进行反算,优化后续施工参数^[4]。

5 工程实例分析

5.1 工程概况

该商业综合体基坑开挖深度为14.5米,地层为马兰黄土,厚度约为22米,湿陷系数为0.028~0.052,含水量为11.3%,天然重度为16.8kN/m³,粘聚力为28kPa,内摩擦角为22°。地下水位在地下18米,距离其周围8米的位置有一栋旧住宅楼,环境比较敏感。

5.2 支护与地基处理方案

采用“钻孔灌注桩+预应力锚索”:桩径1.0m,桩距1.8m,桩长22m(嵌固7.5m),C30混凝土;设三根锚索,竖向间距2.5m,锚固段8m,锁定拉力分别为150kN、200kN、180kN。坡顶截水,在桩之间挂网喷混封闭。地基用灰土挤密桩,桩径0.45m,桩距1.2m,正三角布置,延伸至基坑外侧3m,深度为12m,灰土比3:7,压实度达到0.96以上,满足设计要求。

5.3 监测结果与效果评价

施工过程中布置了桩顶水平位移、深层侧向位移、锚索轴力以及地面沉降观测点。由监测数据显示:桩顶最大水平位移为22mm,小于报警值30mm;深层侧向位移最大值出现在坑底部,为18mm;锚索轴力衰减值为12%,处于可接受范围内;地面最大沉降为15mm,临近建筑物沉降为5.6mm,满足相关标准的规定。对地基进行检查发现,桩间土挤密系数平均为0.94,湿陷系数小于等于0.004,复合地基承载力为220kPa,所有指标均达

到设计的要求。由此可见该组合方案适合用于黄土地质条件。

6 施工质量控制与监测预警要点

6.1 关键施工环节控制

(1)灌注桩用旋挖干钻施工,控制泥浆比重,沉渣不大于100mm;(2)锚索两次注浆(常压+高压1.0~1.5MPa),保证饱满;(3)挤密桩按“由外到内”进行成孔,防止侧挤;(4)基坑分层分段开挖,每层不宜大于锚索以下0.5m,及时支护。

6.2 动态监测与信息化施工

建立支护变形、土体位移、水位以及锚索应力等全方位监控体系,每天1~2次观测,在有变化情况下每2小时进行一次观测,达到一定警戒线后立即采取措施。信息化施工需将监测信息与数值计算结果对比,及时修正设计。

7 结语

黄土地层深基坑主要问题是土体水敏性和湿陷性问题。经过研究得出以下几点结论:(1)支护要重视止排水,宜采用主动支护方式(如桩锚),刚性支护和柔性支护结合使用既可行又经济;(2)地基处理以“消除湿陷性+提高承载力”为目标,挤密桩、强夯以及CFG桩均有各自优缺点,在实际工程中可综合利用,但应注意其与支护结构之间相互位置关系以及先后顺序;(3)基于实时监测信息指导施工有利于减少事故发生率;(4)今后需要进一步完善黄土结构性损伤机理以及湿陷变形与支护内力相互作用理论,研发智能化监测预警设备。

参考文献

- [1] 王铁行,张鹏,李宁.黄土湿陷性对深基坑桩锚支护体系受力变形影响的数值分析[J].岩土工程学报,2022,44(3):512-520.
- [2] 陈正汉,刘祖典,杨正.黄土地基处理技术规范应用研究及工程实践[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):2087-2096.
- [3] 赵明华,张玲,陈昌富.挤密桩处理湿陷性黄土地基的试验研究及优化设计[J].岩土力学,2020,41(8):2745-2754.
- [4] 刘松玉,杜延军,陈志龙.深基坑支护结构变形预测与预警技术研究进展[J].地下空间与工程学报,2023,19(1):1-12.