

湿陷性黄土地区基坑开挖与支护的特性分析

杨立业

宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司

摘要：湿陷性黄土地区基坑开挖与支护面临着独特的挑战。本文分析了湿陷性黄土的工程特性，阐述了开挖过程中土体强度、地下水位变化和黄土膨胀变形等因素对基坑稳定性的影响。针对湿陷性黄土地区的特点，文章探讨了基坑支护结构类型的选择、受力性能以及对稳定性的影响。同时，介绍了土钉墙、锚喷支护和Mixed地桩等支护措施在湿陷性黄土中的应用。最后，文章提出了开挖顺序与步距、支护结构刚度和监测反馈控制等设计考虑因素，为湿陷性黄土地区基坑工程提供参考。

关键词：湿陷性黄土；基坑开挖；支护结构；稳定性；监测反馈

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.22.015

引言

随着区域经济的快速发展，湿陷性黄土地区大量兴建地下空间和基础设施。由于湿陷性黄土的特殊工程性质，基坑开挖和支护面临着地质条件复杂多变的挑战。湿陷性黄土遇水易发生坍塌和沉陷，给基坑施工带来潜在风险。因此，深入研究湿陷性黄土地区基坑开挖与支护的特性，对于确保工程安全、提高施工质量具有重要意义。本文将系统分析湿陷性黄土的工程特性，揭示开挖过程中的独特现象，并探讨有针对性的支护措施和设计考虑因素，为湿陷性黄土地区基坑工程提供有益启示。

一、湿陷性黄土的工程特性

湿陷性黄土作为一种独特的土体，其工程特性备受关注。这种土体具有高孔隙比、低密度、高含水率敏感性等特点，使其在受到外力作用或水分变化时，易发生显著的物理力学性质变化。湿陷性黄土的抗剪强度较低，遇水软化明显，且随含水率增加，强度迅速降低，潜在的坍塌风险随之增大。同时，湿陷性黄土的压缩性较高，在上覆荷载或自重作用下容易产生大的变形。此外，湿陷性黄土的渗透性能也较为特殊，存在垂直节理和大孔隙，导致水分易于渗入，加剧土体的不稳定性。综合考虑湿陷性黄土的这些工程特性，在进行基坑开挖和支护设计时，需要采取针对性措施，确保工程安全和稳定。

二、湿陷性黄土地区基坑开挖特性分析

1. 土体强度随含水率变化显著

湿陷性黄土地区基坑开挖过程中，土体强度随含水率变化显著是一个关键特性（表1）。当含水率较低

时，湿陷性黄土表现出较高的强度和稳定性，然而，随着含水率的增加，土体颗粒间的胶结作用减弱，孔隙水压力上升，导致土体强度急剧下降。这种强度的显著变化对基坑稳定性构成严重威胁。在实际开挖过程中，受降雨、地下水位变化、施工扰动等因素影响，湿陷性黄土的含水率可能出现不同程度的增加，进而引发土体强度的急剧退化。为应对这一特性，基坑开挖需要严格控制水分的渗入，采取有效的排水措施，同时监测含水率的变化，及时调整开挖方案和支护措施，以确保土体强度维持在安全范围内。

表1 土体强度随含水率变化的关系图

含水率 (%)	土体强度 (kPa)
10	500
15	400
20	300
25	200
30	100

2. 地下水位变化引起潜在滑动面形成

在湿陷性黄土地区，地下水位的变化对基坑开挖稳定性有着重要影响。当地下水位上升时，土体中的水分含量增加，孔隙水压力上升，土体的有效应力降低，抗剪强度显著下降。这种强度的退化可能在土体内部形成潜在的滑动面。随着开挖深度的增加，滑动面的规模和范围也可能扩大，对基坑稳定性构成严重威胁。一旦触发滑动，大量土体可能沿着滑动面发生位移，导致基坑坍塌事故的发生。因此，在湿陷性黄土地区进行基坑开挖时，必须高度重视地下水位的变化及其引起的潜在滑动面问题。通过合理布设降水井点，实施有效的地下水控制措施，可以降低地下水位，减小孔隙水压力，提高土体的稳定性。同时，通过土工监测手段，及时掌握地下水位变化情况，对潜在滑动面的形成进行预警，从而为基坑开挖的安全提供有力保障。

3. 开挖卸荷导致黄土体积膨胀变形

湿陷性黄土在开挖卸荷过程中，由于上覆土体的移除，土体应力状态发生显著改变。卸荷效应导致土体中的水平应力减小，垂直应力相对增大，土体应力路径发生偏转。在这种应力状态改变的影响下，湿陷性黄土体积出现膨胀变形。土体孔隙比增大，结构趋于疏松，强度和稳定性降低。开挖卸荷引起的黄土体积膨胀变形，不仅影响基坑周边土体的稳定性，还可能对邻近建筑物和地下管线造成不利影响。为控制开挖卸荷引起的

黄土体积膨胀变形，需要合理设计开挖顺序和分段开挖高度，避免过大的卸荷幅度。同时，采用适当的支护结构，如土钉墙、地下连续墙等，提供侧向约束，限制土体的水平位移。在开挖过程中，加强变形监测，根据监测数据及时调整开挖和支护方案，确保黄土体积膨胀变形得到有效控制。

三、开挖深度和开挖坡比的关系

为确保基坑安全，需要采用更加缓和的开挖坡比。合理的开挖坡比不仅能够减小土体的失稳风险，还能降低土方开挖量和支护工程量，从而节约工程成本。然而，过于缓和的坡比也可能占用更多的土地资源，影响周边环境。因此，确定最优的开挖深度和开挖坡比组合（表2），需要综合考虑工程安全、经济效益和环境影响等因素。通过工程地质勘察和室内土工试验，获取湿陷性黄土的物理力学参数，结合数值模拟和稳定性分析，选择合理的开挖深度和坡比。在实际开挖过程中，通过监测变形、位移等指标，动态评估基坑稳定性，必要时采取坡比调整或支护加固等措施，确保基坑开挖的安全与效率。

表2 土质基坑放坡坡度允许值（高宽比）

土体性质	深度在5m之内	深度在5~10m
黄土状土 (Q ₄)	1: 0.50 ~ 1: 0.75	1: 0.75 ~ 1: 1.00
马兰黄土 (Q ₃)	1: 0.30 ~ 1: 0.50	1: 0.50 ~ 1: 0.75
离石黄土 (Q ₂)	1: 0.20 ~ 1: 0.30	1: 0.30 ~ 1: 0.50
午城黄土 (Q ₁)	1: 0.10 ~ 1: 0.20	1: 0.20 ~ 1: 0.30

四、湿陷性黄土地区基坑支护特性分析

1. 支护结构类型的选择

湿陷性黄土地区基坑支护结构类型的选择需要综合权衡诸多因素，包括基坑深度、土层特性、周边环境、施工工期和经济成本等。常见的支护结构类型有排桩支护、土钉墙支护、地下连续墙支护和锚喷支护等。排桩支护适用于较深基坑和湿陷性较强的土层，通过桩体的刚度和内支撑控制变形。土钉墙支护则利用土钉与土体的锚固作用，配合喷射混凝土面层，提高土体整体稳定性，适合深度不大、土质较均匀的基坑（图1）。地下连续墙兼具挡土和止水功能，适用于深基坑和地下水丰富的场地，但造价较高。锚喷支护通过预应力锚杆和喷射混凝土的组合，增强土体强度，约束变形。支护类型的选择需要通过现场勘察、试验和数值模拟等手段，在满足安全和环保要求的前提下，兼顾技术可行性和经济合理性，并针对湿陷性黄土采取专门防护措施。

2. 支护结构在湿陷性黄土中的受力性能分析

与一般土层相比，湿陷性黄土具有更高的压缩性、更强的湿陷性和更显著的强度损失，导致支护结构在外荷载作用下产生更大的变形和更复杂的内力分布。基坑开挖卸荷过程中，土体回弹和结构变形相互影响，在支护结构的关键部位引起显著的附加弯矩和剪力。同时，

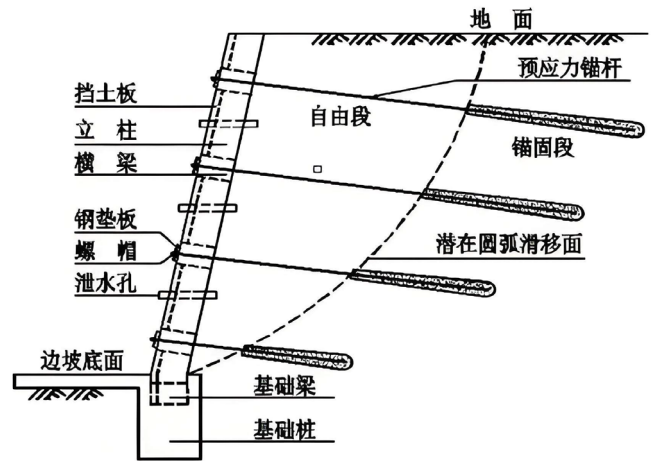


图1 土钉墙支护结构示意图

随着含水量变化，湿陷性黄土的强度和变形参数呈现动态演化，引起支护结构内力二次分配。暴雨入渗、管线渗漏等因素还会引入突发的附加荷载和变形。因此，支护结构的受力分析必须采用复杂的本构模型，综合考虑土体和结构的非线性，通过迭代方法，逐步模拟开挖卸载和湿陷软化过程。在获取内力包络的基础上，还需进行整体和局部稳定性校核，构件抗裂抗压性能验算，并评估防排水措施效果。

3. 支护结构对基坑稳定性的影响及其监测

合理的支护结构布置和参数选择，可有效约束湿陷性黄土的侧向变形，抑制潜在滑裂面的扩展，提高基坑抗失稳能力。支护结构的刚度和强度需满足土体开挖卸荷和湿陷胀缩引起的附加应力要求。支护结构施工的每个环节，从成孔成槽到钢筋混凝土浇筑，再到支撑体系架设，任何缺陷都可能引发连锁反应，导致局部或整体破坏，引发基坑失稳。必须严格支护结构的全过程质量管控，重视湿陷性黄土施工的特殊风险，做好排水防护和应急准备。完善的监测体系是保障基坑稳定的重要手段。监测项目应涵盖支护结构的应力应变、位移和倾斜等指标，并布设必要的土体位移监测点。监测数据异常时，必须快速分析原因，及时采取卸载、加固、止水等措施，降低失稳风险。监测数据还可指导开挖进度控制和支护方案优化。

五、湿陷性黄土地区基坑支护措施

1. 土钉墙支护

土钉墙支护是湿陷性黄土地区基坑工程常用的一种支护形式，其基本原理是通过在土体中安装倾角和长度合适的钢筋或型钢土钉，并在洞口注浆形成土钉体，利用土钉与土体间的相互作用，提高土体抗剪强度和稳定性。在湿陷性黄土中应用土钉墙支护时，需要重点关注以下几点：首先是合理确定土钉的埋深、间距和直径参数，以发挥最佳锚固作用；其次是注浆材料的选择和注浆工艺的控制，采用渗透性和耐久性好的水泥基材料，优化注浆配比和压力；再者是土钉头部的连接方式和面

层保护措施,采用喷射混凝土或预制板封闭,防止土钉锈蚀;最后是加强施工过程控制,确保土钉安装精度和注浆质量。土钉墙支护可有效提升湿陷性黄土地区基坑工程的安全性和经济性。

2. 锚喷支护

锚喷支护是湿陷性黄土地区基坑工程中一种新型的支护技术,由预应力锚杆和喷射混凝土面层两部分组成。锚杆沿基坑内坡按设计角度和间距布置,内端锚固于稳定土层,外端通过锚头与喷射混凝土面层连接,形成整体支护体系。锚杆施加预应力对土体产生压应力,喷射混凝土面层提供侧向约束力,两者协同作用,显著提高土体抗剪强度和自稳能力。与土钉墙相比,锚喷支护的锚杆直径更大、长度更长、预应力更高,喷射混凝土面层也更厚更强,因而整体刚度和承载力更大,适用于湿陷性较高、基坑较深的工程。在锚喷支护设计和施工中,要重点把握锚杆防腐处理、锚杆安装工艺控制、喷射混凝土配合比和施工工艺控制,以及成品保护养护措施等关键环节,并开展必要的变形监测分析,优化施工方案,确保支护效果。

3. Mixed地桩支护

Mixed地桩支护是湿陷性黄土地区基坑工程的一项新技术,其特点是钢筋混凝土桩和原位土体桩复合布置,发挥两种材料的协同作用,优化支护效果。具体做法是,先在基坑周边钻孔灌注混凝土形成钢筋混凝土桩,再在相邻混凝土桩间采用深层搅拌法制作原位土体桩,两种桩交错布置,通过连梁可靠连接,共同承担土压力和控制变形。Mixed地桩支护的优势在于,利用混凝土材料的高强度和原位土体材料的柔韧性,通过复合增强,提高支护体系刚度和韧性,较传统单一材料支护方式具有更好的抗变形能力和整体稳定性。同时,原位土体桩的应用,减少了混凝土用量,降低了造价,具有经济环保效益。在Mixed地桩支护设计中,混凝土桩和土体桩的配比和搭接长度的确定至关重要。而在施工中,混凝土灌注桩的质量控制和土体桩的湿陷消除效果评估,则是确保支护效果的重点。

六、基坑开挖与支护设计考虑因素

1. 开挖顺序及步距

合理的开挖顺序可避免应力集中和变形失控,而恰当的步距则兼顾了支护结构的受力和施工进度。通常采用分区分层、对称平衡的开挖原则,每层开挖高度控制在1.0~1.5m,并及时跟进支护措施。开挖步距需要通过计算分析和工程类比确定,一般水平方向步距为支护桩直径的1.0~1.5倍,而垂直方向步距为1.2~1.5m。在实际施工中,还应严格控制每步开挖后的暴露时间不超过24~36h,并加强变形监测,根据监测数据动态优化开挖进度。当采用土钉墙等支护形式时,开挖后及时施作支护尤为重要;而采用地下连续墙时,则要合理把

控开挖和支撑的时间间隔,避免土体强度退化。

2. 支护结构刚度

支护结构刚度直接影响湿陷性黄土基坑的变形控制和稳定性。刚度过小,易导致过大位移和安全隐患;而刚度过大,又可能造成材料浪费和成本升高。支护结构刚度的选择需综合考虑基坑深度、土体特性、环境条件和变形控制要求等因素。一般而言,对于开挖深度小于10m的基坑,可采用土钉墙等柔性支护,等效刚度模量控制在800~1200MPa;而对于开挖深度大于10m的基坑,宜采用地下连续墙等刚性支护,等效刚度模量控制在2000~3000MPa。在支护结构设计时,可通过改变支护间距、断面尺寸、混凝土强度等参数实现刚度调控,并辅以支撑体系进一步提高整体刚度。值得注意的是,刚度设计还应满足抗震要求,当地震烈度超过7度时,支护结构的延性和韧性也需重点考虑。

3. 监测与反馈控制

监测项目一般包括支护结构的水平位移、竖向位移、倾斜度、应力应变等指标,以及土体的孔隙水压力、位移、土压力等参数。常用的监测仪器有测斜仪、深层位移计、应变计、土压力盒等。监测频率应根据施工进度和风险程度确定,一般开挖初期每天1次,待基坑开挖至设计标高后可适当减少频率。当监测数据出现异常或超出预警值时,必须及时分析原因,采取卸荷、支撑加固、止水降水等措施,并调整开挖进度和支护方案。监测数据的及时反馈和科学利用,可在确保安全的前提下,不断优化设计方案,最大限度地发挥支护结构的作用,从而在保证工程质量和安全的同时,提高施工效率,节约工程成本。

结束语

湿陷性黄土地区基坑开挖与支护是一项复杂的系统工程,需要全面考虑湿陷性黄土的特殊性质及其对基坑稳定性的影响。合理选择支护结构类型,开挖坡比,优化开挖顺序与步距,并重视监测反馈控制,是确保基坑安全施工的关键。未来,随着对湿陷性黄土工程特性认识的深入和新技术、新材料的应用,湿陷性黄土地区基坑工程必将迎来更加科学、安全、经济的发展新局面。同时,加强理论与工程实践的结合,建立完善的设计规范和施工指南,对于推动湿陷性黄土地区基坑开挖与支护技术的进步具有重要意义。

参考文献

- [1]唐迪,李因旭.黄河邻岸异形超深基坑支护结构变形研究[J].建筑技术,2024,55(10):1185-1189.
- [2]丁邺,沙丽荣.基坑开挖支护力学性能分析[J].北方建筑,2024,9(02):17-21.
- [3]张婷.深基坑开挖支护和降水方案应用分析[J].工程技术研究,2024,9(08):197-199.