

湿陷性黄土工程的地质特性及地基处理分析

戴存全

宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司

摘要：湿陷性黄土是一种特殊的土壤类型，具有独特的地质特性，如低含水量、大孔隙结构、不稳定结构和湿陷性等。这些特性使其在遇水时容易发生塌陷、变形，给工程建设带来严重威胁。针对湿陷性黄土地基的处理，常用方法包括换填垫层法、强夯法、挤密法、预浸水法和化学加固法等，选择适当的处理方法需要综合考虑工程特点、地质条件和经济因素等，并严格遵守相关原则和注意事项，以确保工程质量和安全。基于此，本文详细阐述了湿陷性黄土的地质特性，分析了不同地基处理方法的原理和适用范围，为湿陷性黄土地区的工程建设提供理论指导和技术支撑。

关键词：湿陷性黄土；地质特性；地基处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.21.023

引言：黄土是我国独有的一种特殊土壤类型，分布范围广泛，约占国土面积的10%左右。其中，湿陷性黄土是一种具有独特地质特征的黄土类型，主要分布于陕西、甘肃、宁夏等西北地区。湿陷性黄土在干燥状态下结构稳定，但一旦遇水或受潮，就会发生软化、塌陷、变形等现象，给工程建设带来严重威胁。因此，认识和掌握湿陷性黄土的地质特性，采取合理的地基处理方法，对于确保工程质量和安全具有重要意义。

一、湿陷性黄土的地质特性

1. 低含水量与大孔隙结构

湿陷性黄土含水量通常较低，一般在5%~15%之间，远低于其液限值。这主要是由于湿陷性黄土多分布于干旱少雨的气候环境下，在成土母质的风化作用和干燥气候条件的长期影响下，形成了独特的疏松、多孔、蜂窝状结构。这种大孔隙结构使得湿陷性黄土的孔隙率异常之高，通常在40%~55%之间，极个别甚至可达60%以上。正是由于这种超大的孔隙度和疏松多孔结构，湿陷性黄土往往表现出极低的密实度，自重固结程度很低，因此其承载力自然也相当有限。大量工程实践和室内测试都表明，湿陷性黄土在天然状态下的承载力一般很难满足正常建筑物的需求，这就需要通过人工措施对其进行加固处理。

2. 不稳定的结构与湿陷性

湿陷性黄土的颗粒主要由粉质黏土矿物和胶体颗粒组成，缺乏良好的黏聚力。在干燥状态下，这些颗粒之间仅靠毛细管张力和静止摩擦力维持结构的相对稳定，

一旦遇水或受潮，毛细管张力和静止摩擦力就会迅速消失，颗粒之间的联结力骤然减小，导致整体结构失稳，发生塌陷、变形和湿陷等现象。这就是湿陷性的本质特征。

3. 透水性与强度特性

湿陷性黄土在干燥状态下呈现疏松多孔的结构特征，孔隙率高达40%-60%，这使其具有较好的透水性能，垂直渗透系数一般在 10^{-4} ~ 10^{-5} cm/s的数量级。这种较高的渗透性意味着地下水和降雨能够较为顺畅地通过湿陷性黄土层，一旦湿陷性黄土受到水分的渗入或湿陷发生，其颗粒之间的毛细管承力和静摩擦力将迅速丧失，原本维系结构的微弱力量荡然无存。这会导致孔隙结构的严重破坏和变形，使原本较好的透水性也随之急剧下降，甚至出现完全失去渗透能力的情况。另一方面，虽然干燥的湿陷性黄土因疏松结构而孔隙度大，但依然能够维持一定的力学强度和承载能力。然而，这种强度和承载力只是一种暂时的、表面的现象，它完全源于颗粒之间微弱的摩擦力和毛细管承力。一旦受到水分的渗入，这些微弱的力量会迅速消失，湿陷性黄土的强度将骤然下降，造成严重的工程灾难。

通过对湿陷性黄土地质特性的深入分析，可以发现它与普通黄土和其他土壤有着明显的区别。低含水量、大孔隙结构、不稳定结构、湿陷性以及透水性和强度的特殊表现（如表1），都是湿陷性黄土区别于其他土壤的关键所在。正是由于这些独特的地质特征，湿陷性黄土地基受到水的影响时，往往会发生严重的工程地质问题，因此需要采取针对性的地基处理措施。

表1 湿陷性黄土地质特性示意表

干燥状态	潮湿状态
低含水量 5%-15%	结构失稳塌陷
大孔隙率 40%-60%	强度降低，承载力丧失
结构疏松，多孔蜂窝状	透水性差

二、湿陷性黄土地基的处理方法

1. 换填垫层法

换填垫层法是处理湿陷性黄土地基最直接有效的方法，它的原理是将原有的湿陷性黄土开挖清除，用其他稳定的土或石料进行回填，从而彻底消除湿陷性黄土对工程的不利影响。该方法操作简单，适用范围广泛，可以应用于各种类型的建筑物和构筑物的地基处理，尤其适合处理重要工程或较小范围的湿陷性黄土地基。但

它也存在一些明显的缺陷，如开挖量大、占地面积广、造价昂贵等，因此一般只适用于小范围或重要工程的处理。

在换填垫层施工过程中，需要合理划分开挖范围，控制边坡坡度，防止发生塌方。同时，开挖时要注意防止残留湿陷性黄土受潮引起膨胀变形。回填过程中，填料的选择非常关键，宜选用渗透系数小、压缩性小、强度高的土、灰土、水泥石。当仅要求消除基底以下1m-3m的湿陷性土层的湿陷量时，采用土垫层，要求提高垫层的承载力及增强水稳定时，可采用灰土或水泥石垫层；换填深度以下土层为非湿陷性土时，填料也可选用天然砂砾料或人工碎石。回填过程需分层摊铺夯实，确保整个回填体的均匀性和密实度，杜绝出现分层、空洞或密实度不均的缺陷。通过每层控制合理的摊铺厚度并严格压实，最终形成一个质量可靠、强度高、变形小的回填基础。为避免回填土与原地基发生相对位移，还需在两者之间设置过渡层。开挖和回填过程中还要注意控制扬尘、噪声等环境影响。此外，换填垫层法还需要对多余的湿陷性黄土进行妥善处置，需要集中堆放或外运至指定地点，妥善处置，避免造成水土流失等次生环境问题。

2. 强夯法

强夯法是一种深层压实加固湿陷性黄土地基的方法，它利用重型夯锤对地基进行连续强力冲击，通过传递的振动能使湿陷性黄土颗粒充分密实，从而提高地基的承载力和抗湿陷能力。强夯法施工便捷，费用较低，适用于平整的广阔区域，是处理湿陷性黄土地基最常见、最经济的方法之一。

施工时，施工人员需要精心设计夯锤重量、落距和夯击点布置，以确保能量传递的均匀性和加固深度。通常情况下，地表以下3~12米范围内的湿陷性黄土能够得到较好的压实加固。为提高压实效果，还可先在地基表面铺设薄层中粗砂或碎石过渡层，使能量传递更加顺畅。强夯作业过程中，地面会产生一定沉降，需要及时检测并控制在允许范围内，必要时可进行分层夯击。此外，强夯还会引起一定噪声、振动和扬尘，对周边环境有所影响，因此在人口密集区或对振动敏感的建筑物附近慎用该方法，可采取减振等防护措施。

3. 挤密法

挤密法是通过在地基中插入一系列夯钻、棒或桩体，利用桩体在插入过程中对周围土体产生的挤密作用，使湿陷性黄土发生压密和固化而达到加固目的。相比于换填土法和强夯法，挤密法对场地占用面积的要求较小，无需大量开挖和开阔作业场地，施工便捷灵活，对环境的影响较小。同时，由于采用分布式加固，能够避

免整体性沉降，是处理建筑物周边湿陷性黄土地基的理想选择。

挤密法施工时，首先需要合理布置夯钻或桩体的位置和间距，通常为1~2米，然后逐一施工，将夯钻或预制桩体垂直插入地基至设计深度，借助桩体的耙扫作用和周围土体的侧向挤密，达到加固目的。插入过程中，工作人员需控制好夯钻或桩体的垂直度，避免倾斜。当桩体接近拔出时，可适当振捣以优化加固效果。在具体操作中，挤密法对施工人员的经验要求较高，需严格按照规范执行。该方法加固深度一般不超过20米，适用于处理较浅层湿陷性黄土地基。

4. 预浸水法

预浸水法是利用黄土浸水产生湿陷的特点，在施工前对场地土层进行大面积浸水，使土体产生自重湿陷，达到消除深层黄土湿陷的目的。宜用于处理自重湿陷性黄土厚度大于10m、自重湿陷量的计算值不小于500mm的场地。该方法优点是施工条件简单，处理效果好，缺点是工期长、耗水量大。浸水坑边缘与已有建筑物之间的距离不宜小于50m，并评估浸水对已有建筑物、市政设施及场地边坡稳定性的影响，防止浸水对附近建筑物和场地边坡的稳定性所造成的不良影响。该方法处理结束后，采取垫层法或其他处理方法处理上部未消除湿陷性的土层，来达到消除全部土层湿陷性的一种处理方法。

5. 化学加固法

化学加固法是利用化学药剂渗入到湿陷性黄土中，使其发生化学反应或离子交换，从而达到固结和加固目的的一种地基处理方法。这种方法无须开挖或大型机械设备，操作相对简单，对环境的影响也较小，是处理湿陷性黄土地基的有效途径之一。

常用的化学加固剂包括水泥浆液、石灰浆液、硅酸盐玻璃、树脂等。施工时，先通过注浆或喷射的方式，将加固剂均匀渗入需处理的湿陷性黄土层中。加固剂在湿陷性黄土中发生水化反应、离子交换或聚合等化学作用，使黄土颗粒团聚成团，从而提高了抗剪强度、抗渗性和抗湿陷性。不同类型的化学加固剂，其加固原理、适用范围和效果存在差异。水泥浆液主要通过水化形成胶凝体，对砂土效果较好；石灰浆液则利用钙离子与黄土中的矿物质发生离子交换反应形成胶结物；硅酸盐可在黄土中凝聚出硅胶体，起到黏结作用；而树脂则主要靠聚合反应固化黄土。施工人员需根据具体情况，选择合适的加固剂类型和配合比。

化学加固法的加固深度和范围，主要取决于加固剂的渗透能力，一般适用于处理较浅层（10米以内）的湿陷性黄土地基。在施工过程中，还需控制好注浆压力、流量等参数，确保加固剂在土层中的均匀分布。该方法

的主要缺点是加固效果的持久性较差，加固体会随时间的推移而逐渐老化降解，因此需定期复检和补强加固。

表 2 处理方法适用范围

名称	适用范围	可处理的湿陷性黄土层厚度 (m)
换填垫层法	地下水位以上，局部处理	1-3
强夯法	地下水位以上， $St \leq 60\%$ 局部湿陷性黄土	3-12
挤密法	地下水以上， $St \leq 65\%$ 局部湿陷性黄土	5-25
预浸水法	湿陷性黄土层厚度大于 10m，自重湿陷量的计算不小于 500mm 的场地	大于 10
化学加固法	地下水位以上	1-10

三、地基处理方法的选用原则与注意事项

1. 选用原则

选择合适的湿陷性黄土地基处理方法，需要综合考虑多方面因素，必须遵循以下原则：

首先，根据工程性质、重要程度和建筑物类型，合理确定地基处理的目标和要求，对于重要的大型建筑或关键设施，需要追求更高的处理标准，可选择换填垫层法或化学加固法等彻底改善地基的方式；而对于一般的民用建筑，则可采用经济实用的强夯法或挤密法等方法。其次，要充分考虑现场的具体地质条件，包括湿陷性黄土的分布范围、深度、湿陷程度等，并结合场地的地形地貌和环境条件，选择适合的处理方式。如果湿陷性黄土层较浅，可考虑化学加固法；如果分布范围广阔，则强夯法可能更加经济合理；如果需要处理的湿陷性黄土层较深，可考虑挤密法和预浸水法。再次，要权衡各种方法的经济性，在确保工程质量安全的前提下，尽量选择经济实用的处理方案。一般来说，换填垫层法和化学加固法造价较高，而强夯法和挤密法相对经济，但后两者的适用范围也较为局限，预浸水法需要具备充足水源，又需要较长施工准备时间及施工周期。此外，还需要考虑施工的便利性和可操作性。换填垫层法对场地开阔程度要求较高，施工工期也比较长；而化学加固法、强夯法和挤密法则对场地要求较低，施工周期相对较短。因此，对于部分狭小场地，后三种方法可能更加便利实用。综合以上各方面因素，科学权衡利弊，方可确定最佳的湿陷性黄土地基处理方案。在某些特殊情况下，还可采用两种或多种方法的组合，发挥各自优势，达到事半功倍的效果。

2. 注意事项

首先，要严格执行现行的各项规范标准，遵守施工工艺流程，确保操作规范。具体来说，要按照相关的工

程建设施工规范、质量验收标准等，编制施工方案和作业指导书，落实到每一个操作环节；其次，要采取有效措施，避免加固过程中发生次生环境问题。比如换填垫层法时，应当采取遮挡、喷洒等措施防止扬尘；强夯法作业时，要设置隔声屏障，并选择低噪声设备，尽量避免对周边环境造成噪声污染；再次，要注意地基处理与主体工程的协调配合。地基处理作业应提前于主体工程实施，完成后需要预留足够时间，让地基充分固化、稳定。主体工程开工前，要对已处理的地基承载能力进行检测，确保符合设计要求。

此外，处理后的地基还需要持续监测，防止发生后期变形。同时，也要注意保护已处理的地基，在雨季到来前做好排水防淹防渗措施，避免受到雨淋或渗水侵蚀而失去加固效果。

湿陷性黄土地基的处理是一项系统工程，需要全面考虑各种影响因素，选择恰当方法，并严格按照规范要求实施，还要加强全过程的监控和维护，才能真正达到预期的处理效果，为工程质量和安全提供可靠保障。

结束语

综上所述，湿陷性黄土具有低含水量、大孔隙结构、不稳定结构和湿陷性等独特的地质特征，必须采取有效的地基处理措施，才能确保工程建设的质量和安全。常见的处理方法包括换填垫层法、强夯法、挤密法、预浸水法和化学加固法等，每种方法都有其适用范围和注意事项。在实际工程中，应根据具体情况选择合理的处理方案，并严格执行相关规范和标准，以充分发挥地基处理的作用，不断完善和优化湿陷性黄土地基处理理论与实践，为我国工程建设的可持续发展提供坚实的地质基础。

参考文献

[1] 梁周. 湿陷性黄土路基浅埋式桩板结构施工技术[J]. 四川水泥, 2024, (05): 216-218.

[2] 李腾龙. 太原地区湿陷性黄土工程特性与地基处理方法研究[D]. 导师: 陈文化. 北京交通大学, 2022.

[3] 姜鸿辉. 湿陷性黄土工程地质分区研究[D]. 导师: 阿肯江·托呼提. 新疆大学, 2021.

[4] 贾林, 康富, 梁瑞, 李付定. 湿陷性黄土地基主要特征及工程地质问题[J]. 散装水泥, 2020, (03): 50-51.

[5] 李方根. 浅谈湿陷性黄土路基设计与处理措施[J]. 科技风, 2019, (10): 116.

[6] 李国宝. 结合白龙江引水工程浅析陇东地区湿陷性黄土工程地质特性[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(10): 90-93.