DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.02.011

挤密桩桩间黄土挤密系数及其湿陷性分析

李希虎, 崔自治*, 郑凯旋
(宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:为研究挤密桩桩间黄土的湿陷性,考虑了挤密系数、饱和度对黄土湿陷性的影响,试验设置了挤密系数分别为0.84、0.87、0.90、0.93,饱和度分别为40%、50%、60%、70%,采用室内压缩试验测定了黄土湿陷系数、湿陷起始压力等指标,分析不同挤密系数和饱和度对黄土湿陷性的影响。结果表明,黄土挤密系数和饱和度对湿陷性的影响显著。随着挤密系数的增大,黄土湿陷系数呈减小趋势,湿陷起始压力呈增大趋势;随着饱和度的增大,黄土湿陷系数呈减小趋势,湿陷起始压力呈增大趋势。当黄土挤密系数增大到0.93、饱和度大于40%时,黄土几乎不表现湿陷性,判定消除湿陷性的临界挤密系数为0.93。

关键词:湿陷系数;饱和度;压实度;湿陷起始压力
中图分类号:TU475.3 **文献标志码:**A

黄土具有湿陷性,受水浸湿后土体结构迅速破坏,产生显著附加下沉,导致地基不均匀沉降,进而引发建筑物开裂、道路变形等工程病害,对人民生命财产安全造成严重威胁。工程中常采用垫层法、强夯法、挤密桩法、化学加固法及预浸水法等地基处理措施消除湿陷性,从而提高地基承载力。而在这些处理方法的作用机理与效果评价中,黄土的物理指标起着决定性的作用,其中挤密系数和饱和度对黄土的湿陷性影响极大。

《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2018)[1]规定,挤密填孔达到挤密填料孔直径后,3个孔之间土的平均挤密系数不宜小于0.93;3个孔之间土的最小挤密系数:甲、乙类建筑不宜小于0.88,丙类建筑不宜小于0.84。杜健等[2]对夯扩挤密法的加固机理和有效挤密范围做了相关研究,通过分析挤密系数、压实系数及孔隙比等参数可知,夯扩挤密法对桩间土的挤密效果随着桩间距的增大而减弱,合理的桩间距为2.53d(d为预钻孔直径),当夯击能提高后,桩间距可适当扩大。连杰明[3]对挤密法处理湿陷性黄土地基主要设计指标做了相关研究,认为桩间土挤密系数的确定应以桩间土湿陷性完全消除和复合地基承载力特征值达到设计要求为前提。不管是甲、乙类建筑还是丙类建筑,3个孔之间土的最小挤密系数都不应小于0.90。刘明军等[4]以冀北地区工程为例,采用素土挤密桩法处理湿陷性黄土,通过现场钻孔取样和室内试验测定了处理后土样的压缩系数、压缩模量、压实系数、挤密系数、湿陷系数等主要指标,验证了素土挤密桩法可有效提高湿陷性黄土的压缩模量,降低压缩性,对消除湿陷性具有显著效果。安利强等[5]针对宝鸡至兰州客运专线范家窝隧道洞口湿陷性黄土地基,采用水泥土挤密桩进行处理。现场试验表明,当桩间距≤65 cm时,桩间土体平均湿陷系数为0.002~0.007,挤密系数为0.89~0.98,平均挤密系数为0.93,湿陷系数和挤密系数均满足相关规范要求。秦建平[6]分析了西安市湿陷性黄土区域挤密法桩间土挤密系数分布规律,应用数理统计方法研究了桩间土挤密系数与桩距的相关性,提出了挤密系数(压实度)与中心距离之间的定量关系。梁金国等[7]研究了湿陷性黄土地区夯扩挤密桩对改善黄土地基湿陷性的效果,根据桩周土孔隙比、挤密系数和湿陷系数沿桩体径向的分布规律,将桩周土分为“充分挤密区”“有效挤密

收稿日期:2023-03-31
基金项目:国家青年科学基金(51808302);宁夏高等学校科学研 究项目(NGY2018027)
作者简介:李希虎(1998—),男,硕士研究生,主要从事地基基础研究(1312996069@qq.com)。
* **通信作者:**崔自治(1963—),男,教授,硕士,主要从事岩土工程相关研究(czz2062428@qq.com)。
引用格式:李希虎,崔自治,郑凯旋.挤密桩桩间黄土挤密系数及其湿陷性分析[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(2):188-192.

区”“挤密影响区”和“非挤密区”4 个区域。三桩桩间土试验结果显示,三桩形心处的孔隙比最大、挤密系数最小、湿陷系数最大。樊保平[8]认为灰土垫层法是一种合理、经济的方法,适合于低湿度具有湿陷性的黄土地基,当处理深度相对较大且环境影响要求较低时,也可选择强夯法。熊昌[9]认为在湿陷性黄土地区,利用灰土挤密桩对厚度较大的湿陷性黄土地基进行处理,可以完全消除湿陷性,并能较大幅度提高地基承载力、加快工期、降低造价。庞江波[10]认为采用换填并用机械压实的方法不仅使地基黄土密实度增大、强度提高、变形减小、透水性降低及承载力提高,而且还能消除黄土湿陷性。

挤密桩法处理湿陷性黄土已在多地应用,但对于宁夏地区利用挤密桩法消除黄土湿陷性的研究较少,有待进一步研究。本文针对宁夏同心地区黄土进行湿陷性试验,采用正交试验方法,以挤密系数、饱和度为因素,设计正交试验方案,研究湿陷系数、湿陷起始压力与挤密系数、饱和度之间的关系,为宁夏地区解决黄土湿陷性问题提供试验数据和理论指导。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验用黄土取自于宁夏同心县,为细粒粉质黄土。将土样充分拌匀,块状扰动土用木碾或粉碎机碾散。取代表性土样测定其天然含水率、最优含水率、最大干密度、液(塑)限及颗粒级配等基本物理性质。土样的物理力学指标如表 1 所示,颗粒级配结果如图 1 所示。

表 1　土样的物理力学指标

Tab. 1　Physical and mechanical properties of soil samples

塑限 w_P	液限 w_L	天然含水率 w_0	土粒相对密度 G_s	最大干密度 r_d	最优含水率 w_{opt}
17.5	26.9	0.94	2.71	1.85	16.2

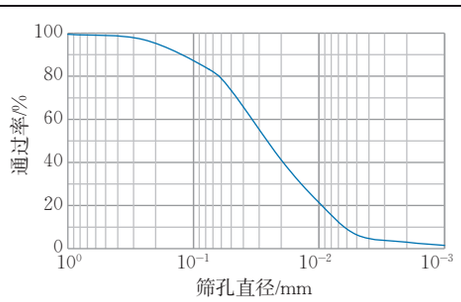


图 1　试验黄土颗粒级配

Fig. 1　Particle size distribution of test loess

1.2　试验方案

根据试验设计,按挤密系数 0.84、0.87、0.90、0.93 及饱和度 40%、50%、60%、70% 配制土样。因素水平如表 2 所示,采用 $L_{16}(4^5)$正交试验表。环刀规格为直径 79.8 mm、高度 20 mm。室内黄土湿陷试验参照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)进行。该标准中湿陷系数测定方法分为单线法和双线法,单线法的所需试样较多,但测定结果较为准确,双线法虽然制样量少、操作方便,但是没有单线法贴近工程实际。本试验采用单线法测定不同物理指标下黄土的湿陷系数,使用全自动气压固结仪进行测定。试验步骤如下:切取 5 个环刀试样,对各试样分级加压,按 50、100、150、200 kPa 逐级加载至沉降稳定;随后在各试样最后一级压力下浸水,直至湿陷变形稳定。湿陷系数 δ_s 的计算公式为

$$\delta_s=\frac{h_p-h'_p}{h_0}\times 100\%。\tag{1}$$

式中:h_p 为各级压力下变形稳定后高度(mm);h'_p 为各级压力下浸水稳定后高度(mm);h_0 为试样初始高度(mm)。

表 2　因素水平表

Tab. Factors and levels

试样编号	挤密系数 λ_c	饱和度 S_r/%	e_1	e_2	e_3
1	0.84	40	1	1	1
2	0.87	50	2	2	2
3	0.90	60	3	3	3
4	0.93	70	4	4	4

2　结果与分析

2.1　湿陷系数分析

正交试验结果如表 3 所示。挤密系数、饱和度对湿陷系数的影响趋势如图 2 所示。由图 2 可知,湿陷系数与挤密系数、饱和度均呈负相关关系:随着挤密系数的增大,湿陷系数呈减小趋势;随着饱和度的增大,湿陷系数亦呈减小趋势。湿陷系数与饱和度之间具有良好的相关性。饱和度为土孔隙中水体积与孔隙总体积之比,与天然含水率呈显著正相关。随着饱和度增加,湿陷系数逐渐减小,但其变化速率较为稳定,且减小幅度明显小于挤密系数的影响。当挤密系数为 0.87～0.90 时,湿陷系数变化速率较大;当挤密系数大于 0.90 时,变化速率明显减缓。当挤密系数为 0.93 时,湿陷系数降至 0.006 5,表明土体湿陷性显著降低。存在“湿陷最终挤密系数”这

一临界值,当挤密系数达到该值时,黄土颗粒间连接方式由支架大孔隙结构转变为镶嵌微孔隙结构,土体趋于密实,湿陷性基本消失。

表 3 正交试验结果

Tab. 3 Results of orthogonal experiment

组别	λ_c	S_r	e_1	e_2	e_3	δ_s
G1	0.84	0.4	1	1	1	0.013 8
G2	0.84	0.5	2	2	2	0.013 1
G3	0.84	0.6	3	3	3	0.012 3
G4	0.84	0.7	4	4	4	0.011 2
G5	0.87	0.4	2	3	4	0.012 8
G6	0.87	0.5	1	4	3	0.011 0
G7	0.87	0.6	4	1	2	0.010 2
G8	0.87	0.7	3	2	1	0.009 0
G9	0.90	0.4	3	4	2	0.009 9
G10	0.90	0.5	4	3	1	0.008 7
G11	0.90	0.6	1	2	4	0.007 3
G12	0.90	0.7	2	1	3	0.006 9
G13	0.93	0.4	4	2	3	0.007 7
G14	0.93	0.5	3	1	4	0.006 9
G15	0.93	0.6	2	4	1	0.006 0
G16	0.93	0.7	1	3	2	0.005 5

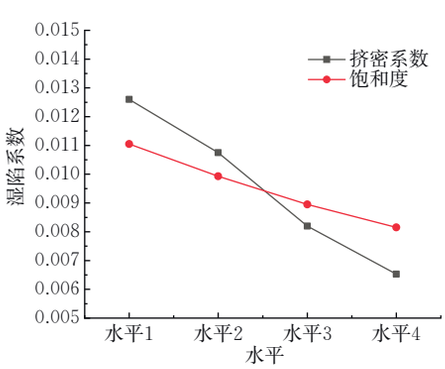


图 2 挤密系数、饱和度对湿陷系数的影响趋势

Fig. 2 Influence trends of compaction coefficient and saturation on collapsibility coefficient

图 3 为不同因素极差图。由图 3 可知:挤密系数的极差最大,其对湿陷系数的影响最大;饱和度次之;3 个误差列的极差最小,表明试验误差较小,结果可靠可信。表 4 为不同因素的方差分析结果。由表 4 可知,挤密系数对湿陷性的影响高度显著,饱和度影响显著,误差项作用最小,进一步验证了试验的可靠性。两个因素对湿陷系数的影响相互独立,不存在交互作用。

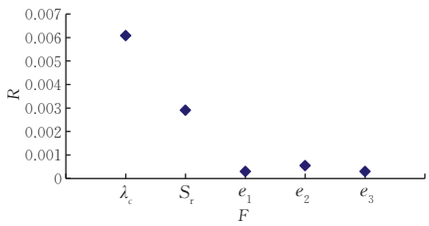


图 3 极差分析图

Fig. 3 Analysis of range

表 4 方差分析结果

Tab. 4 Results of variance analysis

因素	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
λ_c	0.000 087	3	0.000 029	91.062	高度显著
S_r	0.000 019	3	0.000 006	19.785	显著
e	0.000 002 6	9	0.000 000 9		

注:$F \geqslant F_{0.99}(f,f_e)$为影响高度显著;$F \geqslant F_{0.95}(f,f_e)$为影响显著。

2.2 湿陷起始压力分析

湿陷起始压力是评价黄土湿陷性的另一重要指标,指黄土受水浸湿后开始产生湿陷时的临界压力,通常定义为湿陷系数为 0.015 时所对应的压力值。根据试验结果,本文绘制了 16 组湿陷系数-压力关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可知:同一挤密系数下,湿陷系数随着压力的增大呈先增大后减小、最终趋于稳定的趋势,整体呈单峰形态,峰值对应的压力范围为 150~300 kPa;饱和度越大,湿陷系数峰值越小;不同挤密系数的黄土在同一压力下,湿陷系数随着挤密系数的增大而逐渐减小。不同挤密系数、饱和度下,黄土的湿陷程度存在差异,湿陷程度等级由高到低为挤密系数为 0.84 的黄土、挤密系数为 0.87 的黄土、挤密系数为 0.90 的黄土、挤密系数为 0.93 的黄土。总体上,黄土的湿陷系数与荷载存在密切相关。根据湿陷系数-压力曲线,可以确定相应条件下的湿陷起始压力。

黄土湿陷起始压力与挤密系数、饱和度之间均存在较好的规律性。湿陷起始压力与挤密系数关系曲线如图 5 所示,湿陷起始压力与饱和度关系曲线如图 6 所示。由图 5 可知:随着挤密系数的增大,湿陷起始压力逐渐增大;同时,饱和度越大,湿陷起始压力就越大,最大可达 150 kPa。土体越密实,其表面黏结物与连接结构就越紧密,孔隙度越小,湿陷起始压力也就越大。分析表明:湿陷起始压力与湿陷系数是同一黄土结构在变形和强度方面对水敏感性的不同反映,总体上随着湿陷系数的增加,湿陷起始

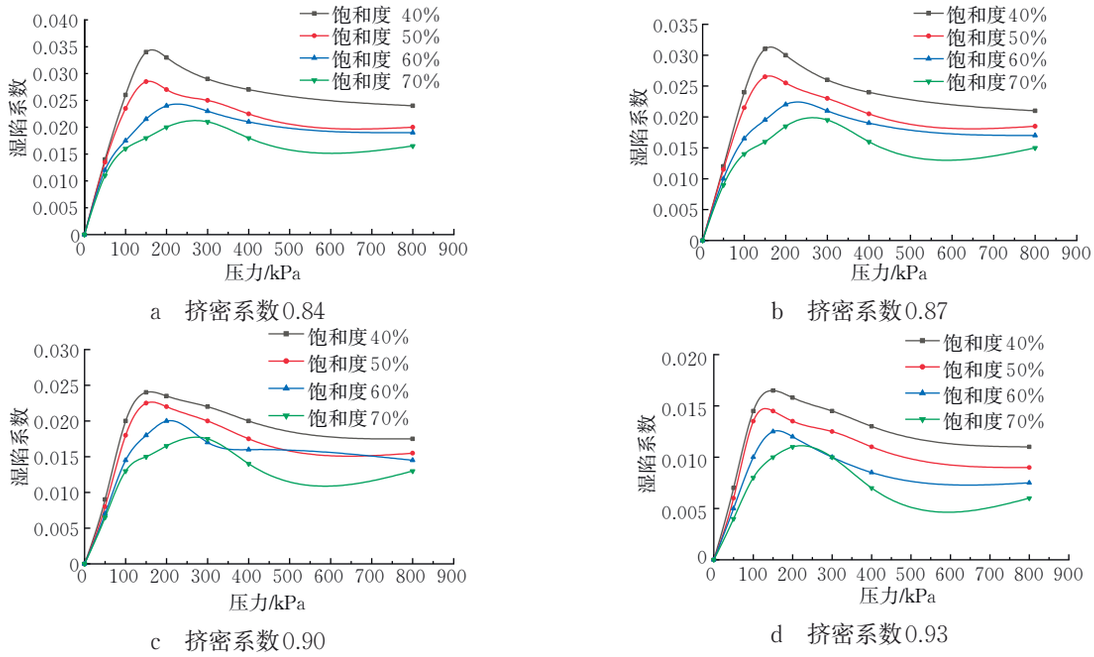


图4　不同挤密系数、饱和度下湿陷系数-压力关系曲线

Fig.4　Relationship curves between collapsibility coefficient and pressure under different compaction coefficients and saturations

压力减小。由图 4 可知,湿陷系数与压力、挤密系数、饱和度均存在明显关系。湿陷系数随着压力的增大先增大后减小,最终趋于平缓;在挤密系数一定时,同一压力下,饱和度越小,湿陷系数越大。

当黄土受水浸湿后,在较小压力下首先进入附加压密阶段,此时外界压力在土体中引起的剪应力小于土的残余结构强度,土体仅发生孔隙体积减小,并未引起结构破坏;随着压力增大,逐渐过渡到明显的湿陷阶段,此时外界压力超过土的残余结构强度,土颗粒连接受到破坏并发生重组,土体产生较大变形,直至重组稳定后,压缩量才逐渐减小。由图 6 可知,当挤密系数为 0.93、饱和度为 50% 时,湿陷系数小于 0.015,此时黄土湿陷性消除。

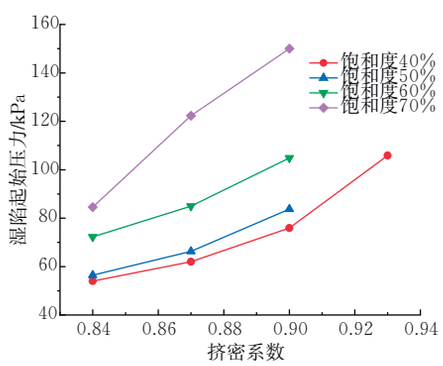


图5　湿陷起始压力与挤密系数关系曲线

Fig. 5　Relationship curve between initial collapse pressure and compaction coefficient

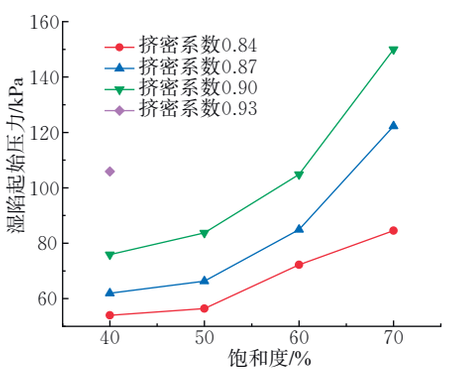


图6　湿陷起始压力与饱和度关系曲线

Fig. 6　Relationship curve between initial collapse pressure and saturation

3　结论

(1)挤密系数和饱和度对黄土湿陷性均有显著影响。随着饱和度的增大,湿陷系数呈逐渐减小趋势;随着挤密系数的增大,湿陷系数亦呈逐渐减小趋势。

(2)湿陷系数随着荷载的增大呈先增大后减小、最终趋于平缓的变化规律,峰值对应的荷载压力范围为 150～300 kPa。

(3)随着挤密系数的增大,湿陷起始压力呈增大趋势,且饱和度越大,增大趋势越明显。当挤密系数增加到 0.93 且饱和度大于 40% 时,黄土湿陷性基本消除,故判定消除黄土湿陷性的临界挤密系数为 0.93。

参考文献:

[1] GB 50025—2018 湿陷性黄土地区建筑规范[S].
[2] 杜健, 刘红玫, 张豫川. 夯扩挤密法室内模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 81-86.
[3] 连杰明. 挤密法处理湿陷性黄土地基主要设计指标探讨[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 87-92.
[4] 刘明军, 许东宇, 张伟, 等. 素土挤密桩消除湿陷性黄土湿陷性研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1640-1644.
[5] 安利强, 马周全, 张世径. 湿陷性黄土隧道洞口地基处理方法[J]. 铁道建筑, 2016(2): 73-75.
[6] 秦建平. 西安黄土挤密桩间地基土挤密系数的试验研究[J]. 路基工程, 2009(2): 98-100.
[7] 梁金国, 韩立君, 李华伟. 湿陷性黄土地基夯扩挤密桩挤密效应试验研究[J]. 工程勘察, 2008, 36(10): 15-18.
[8] 樊保平. 龙城高速公路湿陷性黄土地基处理技术应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
[9] 熊昌. 西安某超高层深基坑支护工程设计方案探讨[J]. 山西建筑, 2016, 42(23): 80-82.
[10] 庞江波. 禹阎高速公路湿陷性黄土地基处理技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.

Investigation of the Compactness Coefficient and Collapsibility of Loess Between Compacted Piles

LI Xihu, *CUI Zizhi**, *ZHENG Kaixuan*
(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This study investigates the collapsibility of loess situated between compacted piles, focusing on the effects of the compactness coefficient and saturation levels on the loess's behavior. The compactness coefficients were set at 0.84, 0.87, 0.90 and 0.93, respectively, while the saturation levels were established at 40%, 50%, 60% and 70%. Using indoor compression tests, it measured the collapsibility coefficient and the initial collapse pressure of the loess. The analysis reveals that both the compactness coefficient and saturation significantly influence the collapsibility of loess. As the compactness coefficient increases, the collapsibility coefficient decreases, whereas the initial collapse pressure increases. Similarly, an increase in saturation leads to a decrease in the collapsibility coefficient and an increase in the initial collapse pressure. Notably, when the compactness coefficient reaches 0.93 and the saturation exceeds 40%, the loess exhibits negligible collapsibility. Therefore, the critical compactness coefficient for eliminating collapsibility is determined to be 0.93. These findings provide a valuable reference for employing compacted piles to mitigate the collapsibility of loess.

Keywords: collapsibility coefficient; saturation; density coefficient; initial collapse pressure

(责任编辑 王德平)