

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.093



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



渗透条件下重塑马兰黄土的压缩变形特性

雷伟^{1,2}, 郑建国³, 王小勇⁴, 于永堂⁴, 杨少飞⁴, 梁谊⁴, 马芳臣²

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710003; 2. 陕西建工集团股份有限公司, 西安 710003;
3. 机械工业勘察设计院有限公司, 西安 710021; 4. 中联西北工程设计研究院有限公司, 西安 710077)

摘要:地下水位抬升会导致黄土填方工程中填土饱和并发生渗流。为研究渗透作用对回填黄土沉降的不利影响,依托延安某填方工程,对马兰黄土取样,制备与填方黄土含水率相同、干密度不同的重塑黄土试样,并分别开展浸水饱和再压缩试验与饱和渗透再压缩试验,探究重塑马兰黄土在饱和状态及渗透状态下的压缩特性,通过对比不同状态差异,分析渗透作用对不同干密度压实填土沉降的影响。结果表明:重塑黄土经饱和、渗透不同工况后,其侧限压缩应力-应变关系高度符合 Gunary 模型;不同干密度重塑马兰黄土经过饱和渗透再压缩的侧限压缩应变均大于浸水饱和后再压缩的应变,且重塑黄土干密度越大,两种试验侧限压缩应变差值越小,但不会因干密度的增大而消除。在实际黄土填方工程中可采用 Gunary 模型计算重塑马兰黄土受地下水渗流影响引起的沉降增量。

关键词:马兰黄土;饱和土;渗透作用;压缩变形;试验研究

中图分类号:TU444 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Compression deformation characteristics of remolded Malan loess under seepage condition

LEI Wei^{1,2}, ZHENG Jianguo³, WANG Xiaoyong⁴, YU Yongtang⁴, YANG Shaofei⁴,
LIANG Yi⁴, MA Fangchen²

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710003, P. R. China;
2. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd, Xi'an 710003, P. R. China; 3. China Jikan Research Institute
of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd, Xi'an 710021, P. R. China; 4. China United Northwest Institute
for Engineering Design & Research Co., Ltd, Xi'an 710077, P. R. China)

Abstract: This study focuses on investigating the detrimental effects of the permeation phenomenon on the settlement of backfilled loess. The research is conducted under specific conditions, namely, in the context of a

收稿日期:2025-07-07

基金项目:陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-178);陕西省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(2023-013);陕西省交通运输厅2024年度交通科研项目(24-53K)

作者简介:雷伟(1994-),男,主要从事黄土的工程性质研究,E-mail:641270469@qq.com。

于永堂(通信作者),男,博士,正高级工程师,E-mail:yuyongtang@126.com。

Received: 2025-07-07

Foundation items: The “Scientists+Engineers” Team Construction Project of Qinchuangyuan in Shaanxi Province (No. 2023KXJ-178); Projects of the Provincial State-owned Capital Operation Budget for Science and Technology Innovation in Shaanxi Province (No. 2023-013); Transportation Research Project of Shaanxi Provincial Transportation Department for the Year 2024 (No. 24-53K)

Author brief: brief: LEI Wei (1994-), main research interest: engineering properties of loess, E-mail: 641270469@qq.com.

YU Yongtang (corresponding author), PhD, professor level senior engineer, E-mail: yuyongtang@126.com.

loess filling project where the groundwater level rises, causing the backfilled soil to reach saturation and experience seepage. Based on a fill project in Yan'an, Malan loess were collected and remolded specimens were prepared at the same water content as the fill material but with varying dry densities. Immersion-saturation recompression tests and saturated permeation recompression tests were conducted to investigate the compression characteristics under saturated and permeated conditions. By comparing differences between these states, the influence of permeability on the settlement of compacted fill soils with varying dry densities was analyzed. The results are as follow: After undergoing saturation and permeation processes, the remolded loess demonstrates remarkable consistency with the Gunary model in its confined compression stress-strain behavior. The lateral compression strains of samples with different dry densities after saturated permeation recompression are all greater than those after immersion-saturation recompression. Moreover, the greater the dry density of the sample, the smaller the difference in lateral compression strains between the two tests, but it will not be eliminated. The modified Gunary model proposed in this study can be employed to calculate the theoretical settlement increment of remolded Malan loess induced by groundwater seepage.

Keywords: Malan loess; saturation soil; permeation effect; compression deformation; experimental study

黄土丘陵沟壑区建设用地紧缺,近年来许多地区开展了“平山填沟、上山建城”工程,同时,在山区工业、机场等建设中也出现了大规模的“深挖高填”工程^[1-3]。平山造地、深挖高填重塑了场地的地貌形态,进而改变地下水径流、补给和排泄条件^[4-5],引起沟谷填方区地下水位升高并形成饱和渗流,导致重塑黄土增湿沉降变形加剧,从而对填方区新建工程安全稳定造成不利影响^[6-7]。因此,研究地下水位抬升过程中填方区重塑黄土在渗透作用下的压缩变形特性具有重要意义^[8-9]。

排水系统中,地下水通过填土逐步向盲沟排泄的过程,实质上是地下水在重塑黄土内部发生饱和和渗透的过程。部分学者^[10-14]分析了重塑黄土渗透系数与干密度、孔隙比、含水率等不同参数的关系,发现重塑马兰黄土的渗透系数与干密度、孔隙比之间呈幂函数关系,且在一定干密度范围内,渗透系数随初始含水率的增加线性减小。还有部分学者通过电镜扫描等方式从微观层面研究渗透条件的成因机制,其中,Xu等^[15-16]发现重塑黄土比原状黄土孔隙结构更加均匀,渗透中可溶盐与胶结物的溶解增加了孔隙尺寸,从而提升了重塑土的渗透性能。Duan等^[17]发现压实黄土的饱和渗透系数随应力水平的升高显著降低,且渗透率的变化与孔隙率呈正相关关系。在对渗透机理研究的基础上,研究人员分别通过理论研究、数值分析、室内试验及现场监测等方面,对填方工程在渗流作用下的变形特性进行研究。理论研究方面,早在1958年,钱家欢^[18]就研究了黄土在长期渗流作用下压缩变形与时间的关系。此后,刘保健等^[19]、陈开圣等^[20]、黄雪峰等^[21]等分别提出了重塑黄土侧限压缩条件下不同的应力-应变关系。数值研究方面,何俊飞^[22]通过Geo-

studio建立数值模型,分析了黄土填方地基在不同压实度、不同地下水位抬升高度下,场地的水分场变化规律以及工后增湿变形沉降规律。室内试验方面,周涛等^[23]采用1g模型试验,分析重塑黄土在不同地下水位抬升高度时的变形特性;Mei等^[1]通过大型离心试验,探究天然含水率与饱和状态下湿陷性黄土超高填方边坡的变形特征。现场监测方面,Zhu等^[24]、Yao等^[25]分析了润湿效应对填方工程的影响,发现与降雨渗透相比,饱和渗透引发的沉降变形占主导作用。

综上所述,现有研究多集中在非饱和重塑黄土的渗透性、应力-应变关系及压缩性等方面,虽然针对饱和和重塑黄土开展了部分研究工作,但尚未考虑重塑黄土在饱和渗流作用下对填方沉降的附加影响。基于此,笔者基于黄土填方工程中沟谷填方区地下水上升并通过盲沟渗排的实际工况,通过对重塑马兰黄土开展饱和和再压缩、饱和和渗透再压缩试验,分别研究其在饱和状态及渗透状态下的不同压缩特性,通过对比两种试验工况的压缩特性差异,分析渗透作用对压实填土沉降变形的不利影响。

1 试验概况

1.1 试验土样的物理性质及制备

试验用马兰黄土取自延安新区,基本物理性质指标见表1。取4组试样进行颗粒分析,粒径级配累积曲线如图1所示,土的不均匀系数 $C_u=6.40$,曲率系数 $C_c=1.23$ 。

经室内重型击实试验测得土样最优含水率为13.5%,最大干密度为 1.86 g/cm^3 。

将土样碾碎烘干后过2 mm孔径筛,去除杂质,加水制成与最优含水率接近的重塑土,待水分扩散

表 1 原状土样物理性质指标表

Table 1 The physical property indicators of undisturbed soil samples

类别	含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/$ (g/cm^3)	密度 $\rho/$ (g/cm^3)	相对密度 G_s	孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指 数 I_p	液性指数 I_L
原状土样	7.8	1.40	1.51	2.70	0.929	22.68	27.4	17.0	10.4	-0.88

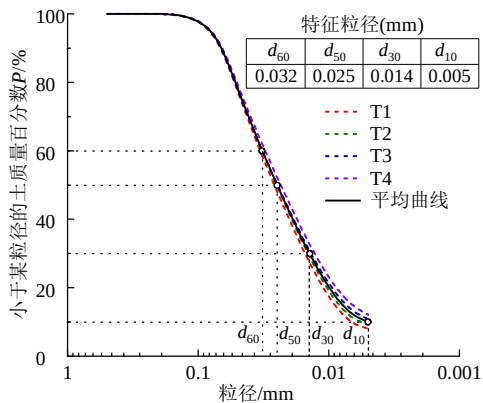


图 1 黄土粒径级配累积曲线

Fig.1 Cumulative curves of particle size distribution of undisturbed loess

均匀后,击实成干密度分别为 1.40、1.50、1.60、1.70、1.80 g/cm^3 的试样,可以完整地反映实际工程不同干密度的回填压实黄土,将重塑黄土每种干密度试样制备 6 个,试样基本性质指标见表 2。

表 2 重塑土样物理性质指标表

Table 2 Table of physical property indicators for reshaping soil samples

类别	干密度 $\rho_d/$ (g/cm^3)	含水率 $w/\%$	相对密 度 G_s	孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$
重塑土样	1.40	13.5	2.70	0.929	39.25
	1.50	13.5	2.70	0.800	45.56
	1.60	13.5	2.70	0.688	53.02
	1.70	13.5	2.70	0.588	61.97
	1.80	13.5	2.70	0.500	72.90

1.2 试验过程

由于黄土透水性良好,将上述试样平均分为两组,一组试样先浸水 3 d 进行饱和,然后将饱和试样放入高压固结仪进行固结压缩试验,模拟实际沟谷填方工程中沟底地下水位升高,填土发生饱和并承受上覆填土及地面荷载作用。另一组制样阶段采用两个 20 mm 环刀承压端对接并用密封胶带封缠,制备高度为 40 mm 的试样,将试样直接装入 TST-55 型土壤渗透仪,用变水头装置的水头进行试样饱和,试样饱和后向变水头管内注水至预定高度然后切断水源进行变水头渗透试验,渗透系数测试结束后,快速取出环刀试样并拆除密封胶带,平行推动两个 20 mm 环刀形成两个独立渗透试样,然后快速装入高压固结仪中进行侧限压缩试验,模拟实际沟

谷填方工程中沟底地下水位升高填土发生饱和,地下水在土体内发生渗流并通过地下盲沟缓慢排泄,同时饱和渗流区填土仍受上覆填土及地面荷载作用。试验过程均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[26]相关要求执行,压缩试验加压等级为 50、100、200、300、400、600、800、1 200、1 600 kPa,每级加压后,以试样竖向变形 $\leq 0.01 \text{ mm/h}$ 为稳定标准,试验过程照片如图 2~图 4 所示。

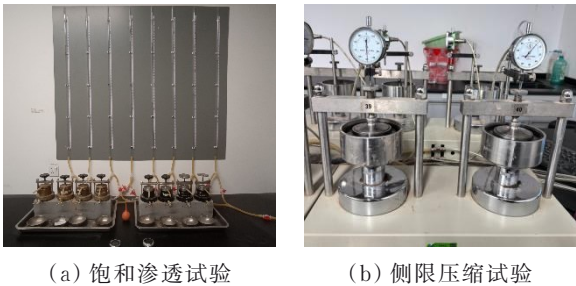


图 2 试验过程照片

Fig.2 Photos of test process

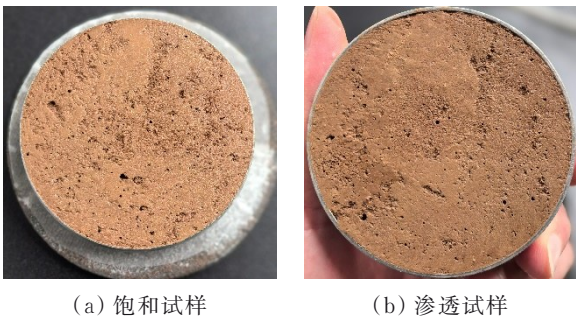


图 3 试样压缩前照片

Fig.3 Photos of samples before compression

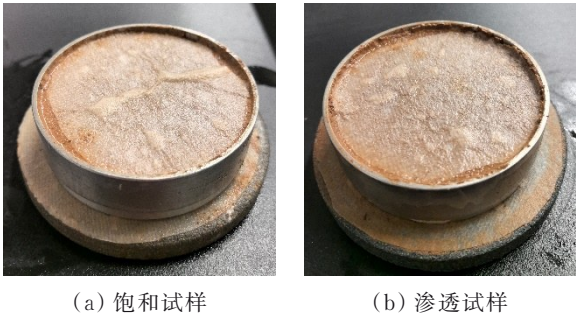


图 4 试样压缩后照片

Fig.4 Photos of compressed samples

2 试验结果分析

2.1 渗透系数与干密度相关性分析

相同含水率下,重塑黄土渗透系数与干密度和初始孔隙比的关系分别如图5、图6所示。由图5、图6可以看出:当含水率一定时,重塑黄土饱和渗透系数随着干密度的增加、孔隙比的减小急剧降低,其原因是重塑黄土干密度越大,土颗粒间孔隙就越小,相应的水在土颗粒间的渗透难度就越大;此外,通过拟合结果可以看出,重塑马兰黄土的渗透系数与干密度满足指数函数关系,与孔隙比满足幂函数关系。

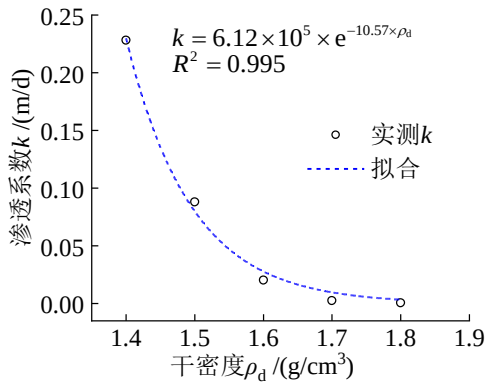


图5 渗透系数随干密度变化曲线

Fig.5 Curve of permeability coefficient with dry density

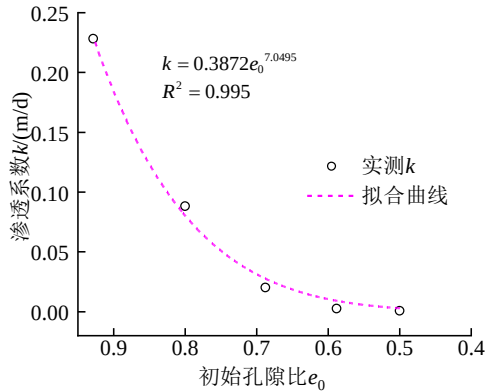


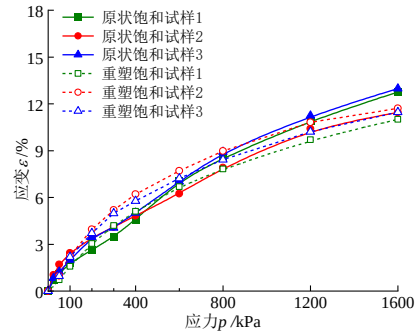
图6 渗透系数随初始孔隙比变化曲线

Fig.6 Curve of permeability coefficient with initial void ratio

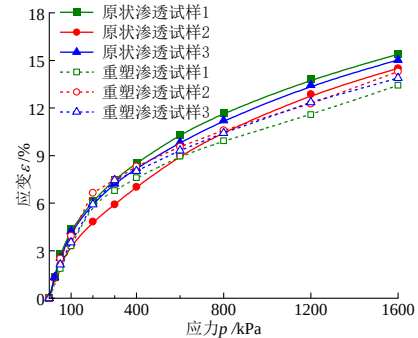
2.2 原状与重塑土样试验结果对比分析

因重塑土破坏了黄土原有内部结构,导致工程性质发生差异,为了对比重塑黄土和原状黄土在饱和及渗透工况下压缩特性的差异,开展了干密度为 1.40 g/cm^3 原状土样的饱和再压缩试验与渗透再压缩试验,并与干密度为 1.40 g/cm^3 重塑土样的试验结果进行对比,参照魏汝龙^[27]提出的直接绘制压缩应力与应变关系曲线的方法,采用连续介质力学中的应变度量来反映土样压缩变形程度和发展规律,

如图7、8所示。



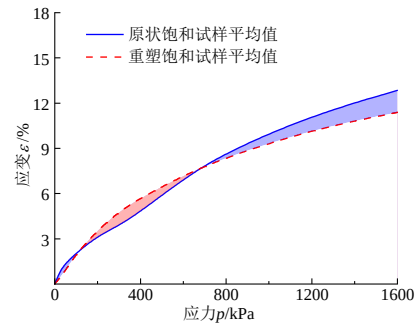
(a) 试样先饱和后压缩



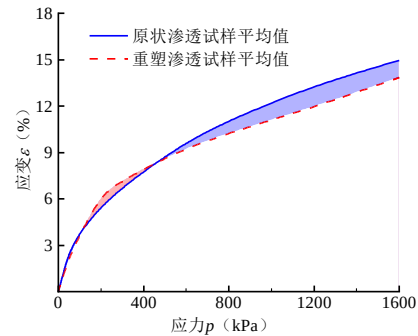
(b) 试样先渗透后压缩

图7 相同干密度原状土和重塑土不同试验工况下 ε - p 曲线

Fig.7 The ε - p curves of undisturbed soil and remolded soil with the same dry density under different test conditions



(a) 试样先饱和后压缩



(b) 试样先渗透后压缩

图8 不同试验工况下压缩应变差异图

Fig.8 The compressive strain difference chart under different test conditions

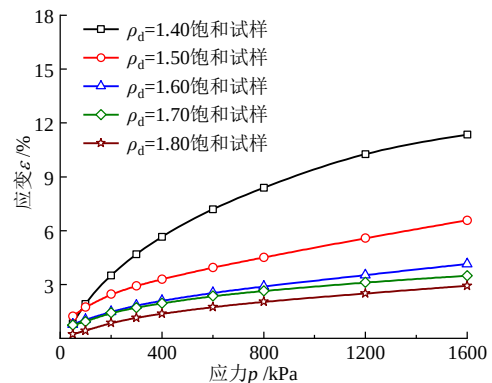
图7为相同干密度原状土样与重塑土样在不同试验条件下的侧限压缩应力 p 与应变 ϵ 关系曲线。由图7可以看出:两种试验条件下,随着应力的不断增加,原状土样与重塑土样的压缩应变发展趋势基本一致,即曲线斜率均由大变小。但无论是原状土还是重塑土,饱和和渗透压缩应变均大于饱和和压缩应变。图8进一步将原状土样与重塑土样分别在饱和及渗透两种不同试验条件下的压缩试验结果平均值进行对比。由图8(a)可知:试样在先饱和再固结压缩情况下,当垂直压力介于200~600 kPa时,同一应力对应的重塑土样压缩应变大于原状土样,而其他压力段下原状土样压缩应变大于重塑土样,最大应变差 $\Delta\epsilon$ 为应力1 600 kPa对应的1.43%,为本级压力下原状试样总应变的11.2%。由图8(b)可知:试样在先饱和渗透再固结压缩情况下,当垂直压力在200~400 kPa之间时,同一应力对应的重塑土样压缩应变稍大于原状土样,超过400 kPa后,原状土样压缩应变大于重塑土样,但其应变差随着应力的增加并非连续增大,而呈先增大后减小的趋势,最大应变差 $\Delta\epsilon$ 为应力1 200 kPa对应的1.42%,为本级压力下原状试样总应变的10.6%。工程中为了消除原状土和重塑土差异沉降带来的不利影响,在挖填交界区需根据地形坡度开挖台阶,并通过强夯或其他措施进行接坡补强处理。

总体而言,相同干密度的原状土样与重塑土样在两种不同试验条件下 ϵ ~ p 关系曲线比较接近,重塑黄土在低应力时压缩性较强,高应力时表现出比原状黄土更小的侧限压缩应变。各压力段产生应变差异的原因是原状土保留了沉积过程中形成的粒间胶结和定向水膜,这些胶结物在颗粒接触点形成“桥键”,使得颗粒间存在初始抗剪刚度,在低应力下表现为结构屈服压力高于重塑土。重塑土因扰动破坏了胶结结构,水膜厚度趋于均匀,颗粒间以范德华力或毛细力为主,胶结强度几乎为零,导致其初始刚度低,压缩性高。在孔隙结构演化方面,初始状态时原状土存在虫孔、裂隙、絮凝结构等宏-微观孔隙,形成结构孔隙空间,在低应力下不易闭合,表现为剪胀性和低压缩性。随着应力增加,结构孔隙逐渐塌陷,胶结断裂,颗粒重新排列,结构强度逐步丧失,应变加速增长。对于重塑土,初始孔隙分布均匀,加载过程中颗粒通过滑移与旋转实现密实,孔隙率单调减小,压缩性逐渐降低,后期应变趋于平稳^[28-29]。

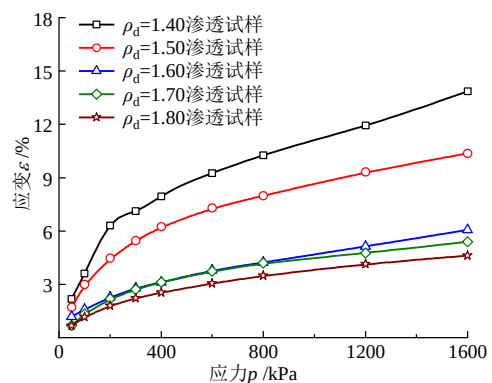
2.3 干密度对重塑黄土压缩性的影响

分别绘制不同干密度下饱和再压缩试样的 ϵ ~ p 曲线和渗透再压缩试样的 ϵ ~ p 曲线,见图9。由图9

可见,不同试验工况下,相同垂直压力时重塑黄土均表现出随着干密度增大,侧限压缩应变越来越小的规律。从表2知,在干密度 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_d=1.50 \text{ g/cm}^3$ 时,对应土样初始孔隙比 e_0 分别为0.929、0.800,土样介于稍密~中密状态,随着荷载增加,土样侧限压缩应变增长较快。在干密度 $\rho_d \geq 1.60 \text{ g/cm}^3$ 后,土样初始孔隙比 $e_0 < 0.75$,呈密实状态,随着竖向压力增大,侧限压缩应变增长较慢,且随着干密度增加,压缩应变差异总体较小。



(a) 试样先饱和和后压缩工况下 ϵ ~ p 曲线



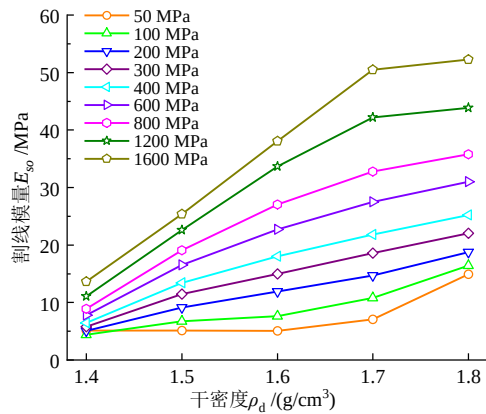
(b) 试样先渗透后压缩工况下 ϵ ~ p 曲线

图9 不同试验工况下 ϵ ~ p 曲线

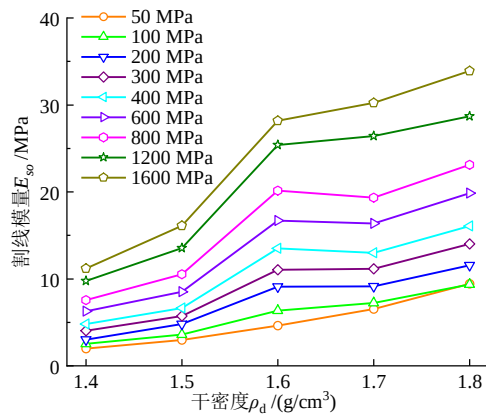
Fig.9 The ϵ ~ p curves under different test conditions

定义 $E_{so}=p/\epsilon$ 为一维压缩试验在侧限条件下的割线模量,绘制每级荷载下试样割线模量与干密度的关系曲线,见图10。由图10可以看出,在饱和和压缩工况下,重塑黄土的垂直压力 p 介于100~1200 kPa区间,随着干密度增大割线模量 E_{so} 近似呈线性增长。在垂直压力 $p < 100 \text{ kPa}$ 时线性规律不明显,可能与试验初始读数等试验误差有关,当垂直压力 $p > 1200 \text{ kPa}$ 时, $\rho_d \leq 1.70 \text{ g/cm}^3$ 时 E_{so} 依旧呈线性增长, $\rho_d > 1.70 \text{ g/cm}^3$ 后 E_{so} 增长速率减小主要系此时土样密实度较高,且垂直压力较大,土样压缩性增幅不再明显。在渗透压缩工况下,由于渗透作用的干预,土样割线模量 E_{so} 总体较饱和工况偏低,即压缩性变大。在较低压力段($p \leq 100 \text{ kPa}$) E_{so} 基本

表现为线性增长,其他压力段下当 $\rho_d \geq 1.60 \text{ g/cm}^3$ 时, E_{so} 增速明显减小,相比较饱和试样 $\rho_d \geq 1.70 \text{ g/cm}^3$ 时, E_{so} 增速才减小,说明渗透作用不仅增大了重塑黄土的压缩性,还劣化了同一压力段下重塑黄土割线模量 E_{so} 随干密度增大而线性增大的趋势。



(a) 先饱和后压缩工况



(b) 先渗透后压缩工况

图 10 不同试验工况下的 $E_{so}-\rho_d$ 曲线

Fig.10 The $E_{so}-\rho_d$ curves under different test conditions

2.4 重塑黄土侧限压缩应力-应变关系

结合已有研究^[20-21],可以采用不同函数拟合重塑黄土侧限压缩应力-应变关系。选取双曲函数、幂函数、Gunary模型分别对重塑黄土浸水饱和与饱和渗透后的侧限压缩应力与应变的关系进行分析。其中双曲线模型在初期时应变随应力迅速增加,随后逐渐变缓,适用于初始压实度较低或一般土样的侧限压缩;幂函数模型在初始压实度较高时拟合精度优于双曲线模型,但随着压实度降低,拟合精度逐渐减小;Gunary模型能够很好地表征压实马兰黄土垂直压应力-垂直压应变的非线性关系,适用于不同初始压实度的黄土侧限压缩。

采用双曲函数拟合重塑黄土的应力 p 与应变 ϵ 之间的关系,其表达式为

$$\epsilon = \frac{p}{A + Bp} \quad (1)$$

式中: p 为压缩试验中各级垂直压力,即应力; ϵ 为各级荷载下侧限压缩总应变; A 、 B 为拟合参数。

采用式(1)对不同干密度下重塑黄土在饱和及渗透两种不同试验条件下的固结压缩结果进行拟合,结果如表3所示。

表 3 重塑黄土 $\epsilon-p$ 关系双曲线函数拟合结果
Table 3 Hyperbolic function fitting results of $\epsilon-p$ relationship for remolded loess

土样类别	干密度 ρ_d / (cm^3/g)	拟合系数		R^2
		A	B	
重塑饱和土样	1.40	47.214	0.058 7	0.999 4
	1.50	65.766	0.123	0.955 9
	1.60	107.200	0.190	0.966 8
	1.70	99.217	0.238	0.977 0
	1.80	205.126	0.220	0.997 6
重塑渗透土样	1.40	23.361	0.063	0.978 5
	1.50	29.899	0.082	0.989 8
	1.60	67.076	0.136	0.961 3
	1.70	83.775	0.172	0.990 4
	1.80	65.968	0.151	0.995 3

采用幂函数拟合重塑黄土应力 p 与侧限压缩应变 ϵ 之间的关系,其表达式为

$$\epsilon = kp^n \quad (2)$$

式中: k 、 n 均为拟合参数。

表4列出了各试验条件下,不同干密度重塑黄土用式(2)拟合的结果。

表 4 重塑黄土 $\epsilon-p$ 关系幂函数拟合结果
Table 4 Power function fitting results of $\epsilon-p$ relationship for remolded loess

土样类别	干密度 ρ_d / (cm^3/g)	拟合后系数		R^2
		k	n	
重塑饱和土样	1.40	0.171	0.575	0.984 4
	1.50	0.185	0.482	0.998 0
	1.60	0.110	0.491	0.999 4
	1.70	0.136	0.443	0.997 1
	1.80	0.036	0.602	0.989 7
重塑渗透土样	1.40	0.563	0.435	0.982 0
	1.50	0.453	0.428	0.985 7
	1.60	0.187	0.470	0.998 5
	1.70	0.141	0.476	0.992 1
	1.80	0.184	0.462	0.979 7

从表3和表4的结果可以看出,重塑黄土在浸水饱和与饱和渗透不同工况下的侧限压缩应力与应变关系用双曲函数或幂函数均可拟合,但拟合接近程度存在一定差异。具体来说,当重塑黄土进行先饱和和后压缩试验,干密度分别为1.40、1.80 g/cm^3

时,幂函数拟合 R^2 介于 0.98~0.99,其余干密度下拟合 R^2 均大于 0.99,此时幂函数相比较双曲函数具有更好的拟合度;当进行先饱和和渗透后压缩过程时,采用幂函数拟合 R^2 均大于等于 0.980,同样表现出较好的拟合度,表明与双曲函数相比,重塑马兰黄土采用幂函数能更好地反映其侧限压缩应力-应变关系。

进一步用 Gunary 模型表示重塑黄土应力-应变

关系,表达式为

$$\varepsilon = \frac{p}{E_{so}} \quad (3)$$

$$E_{so} = a + bp + c\sqrt{p} \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 为拟合参数。

图 11 列出了试验土样采用 Gunary 模型拟合曲线。

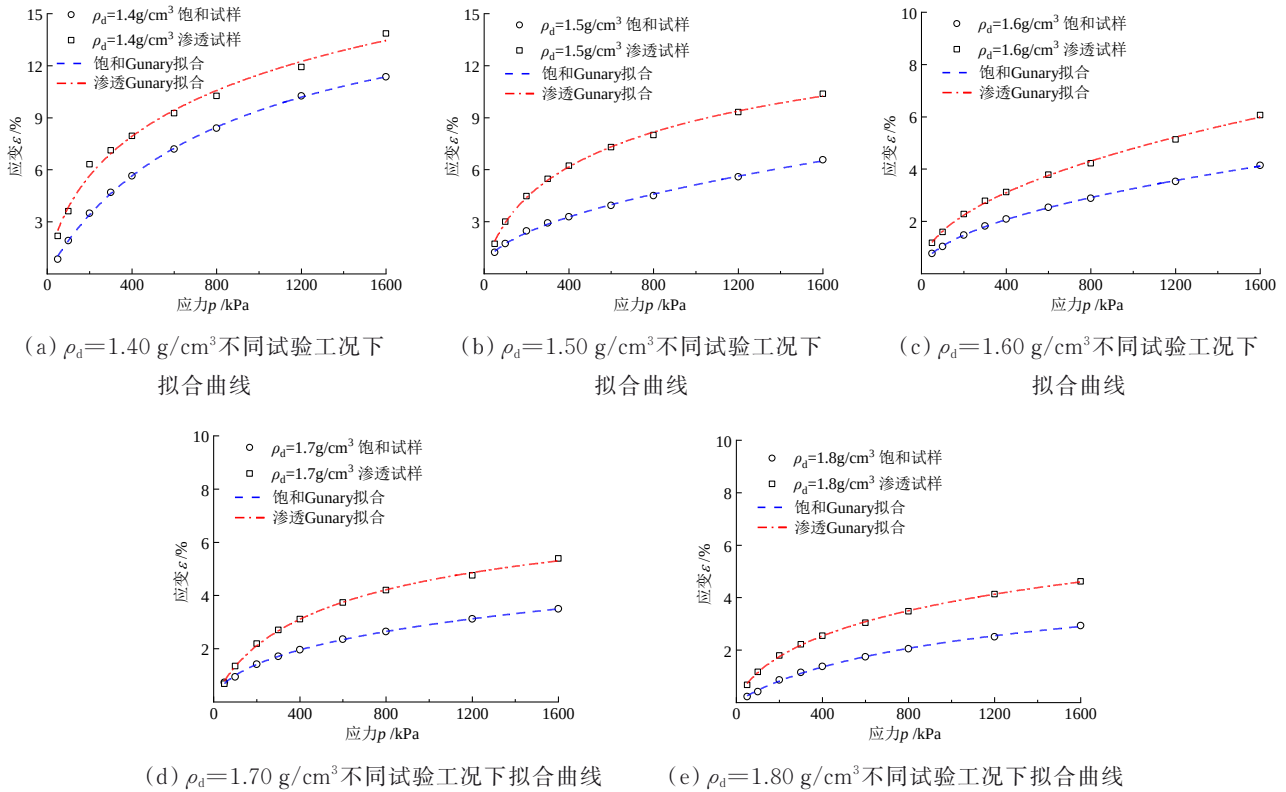


图 11 用 Gunary 模型拟合重塑黄土的 ε - p 关系

Fig.11 Fitted results of remolded loess ε - p relationship with Gunary model

将图 11 所示试验数据用式(4)进行拟合,拟合结果见表 5。

综合图 11 和表 5 可知:Gunary 模型更加契合重塑黄土侧限压缩时的应力-应变关系,所有拟合 R^2 均大于 0.99。结合表 3~表 5 拟合结果,由于幂函数属于数学模型,拟合参数并不能赋予物理意义,无法表示当应力趋向于 0 时的初始割线模量,而双曲函数中的参数 A 、Gunary 模型中参数 a 即代表了当应力趋近于 0 时的初始割线模量,将表 3、表 5 中的参数进一步经单位换算,整理了以双曲函数和 Gunary 模型反映的初始割线模量随干密度的变化曲线,如图 12 所示。由图 12 可见,由双曲函数参数 A 反映的初始割线模量随干密度呈现增大趋势的规律较好,与图 10 试验数据规律较为一致,且表现出饱和土样初始割线模量大于渗透土样初始割线模量的规律,而 Gunary 模型由于增加了应力平方根

表 5 用 Gunary 模型拟合重塑黄土的 E_{so} - p 关系

Table 5 Gunary model fitting results for E_{so} - p relationship of remolded loess

土样类别	干密度 ρ_d / (cm ³ /g)	拟合式	R^2
重塑饱和土样	1.40	$E_{so} = 44.544 + 0.055p + 0.219\sqrt{p}$	0.999 5
	1.50	$E_{so} = -8.336 - 0.009p + 6.692\sqrt{p}$	0.998 5
	1.60	$E_{so} = -5.895 - 0.005p + 10.055\sqrt{p}$	0.999 5
	1.70	$E_{so} = 10.682 + 0.075p + 8.187\sqrt{p}$	0.999 3
	1.80	$E_{so} = 158.070 + 0.150p + 3.823\sqrt{p}$	0.998 4
重塑渗透土样	1.40	$E_{so}' = 8.031 + 0.033p + 1.470\sqrt{p}$	0.990 9
	1.50	$E_{so}' = 12.670 + 0.049p + 1.630\sqrt{p}$	0.998 6
	1.60	$E_{so}' = -5.266 + 0.005p + 6.601\sqrt{p}$	0.998 4
	1.70	$E_{so}' = 32.002 + 0.081p + 4.645\sqrt{p}$	0.999 5
	1.80	$E_{so}' = 42.837 + 0.109p + 2.108\sqrt{p}$	0.998 0

项,反映的初始割线模量随干密度增大并无明显规律,说明双曲函数中参数 A 在物理意义上能更准确反映土体初始割线模量。

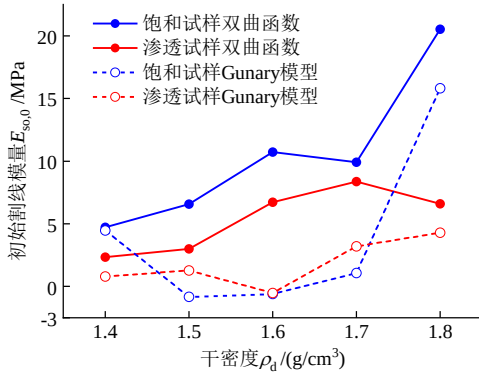


图 12 初始割线模量 $E_{s0,0}$ 随 ρ_d 变化曲线

Fig.12 The curves of the initial secant modulus $E_{s0,0}$ of the secant varying with ρ_d

与双曲函数相比较, Gunary 模型虽不能准确反映土体初始割线模量,但模型中增加了参数 c ,使得割线模量 E_{s0} 与垂直压力 p 不再是简单的线性函数,而进化成了“线性-平方根混合函数”,在拟合度上更加符合图 9 中各个试验工况下 ϵ - p 曲线在低应力时的非线性和高应力时的近线性关系,同时,当式(4)中拟合参数 c 无限趋近于 0 时,式(3)就退化为双曲函数,说明 Gunary 模型涵盖了双曲线模型的情况。王飞等^[30]的结果及本文试验结果均表明,重塑黄土在各种工况条件下(接近最优含水率情况、多次干湿循环条件、浸水饱和工况、饱和渗透工况)的侧限压缩应力-应变关系均高度符合 Gunary 模型, Gunary 模型可更好地分析计算工程中土样承受上覆荷载时的应变。

将不同干密度下土样渗透后再压缩应变与饱和后再压缩应变作差($\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{渗透压缩}} - \epsilon_{\text{饱和压缩}}$),绘制应力与应变差关系曲线如图 13 所示,并给出不同土样压缩系数 $a_{1,2}$ 随干密度变化规律曲线,如图 14 所示。由图 13 可知:除 $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 试样外,其他试样均表现出应变差 $\Delta\epsilon$ 随 p 增加而增加的规律,且随 p 的增加, $\Delta\epsilon$ 增幅越来越小。在 $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ 时,重塑黄土压缩系数分别为 $a_{1,2} = 0.27 \text{ MPa}^{-1}$ (渗透)、 $a_{1,2} = 0.13 \text{ MPa}^{-1}$ (饱和),压缩系数为两倍关系,均处于中压缩状态,且对应干密度下土样渗透系数较大,此时土样受渗透作用影响较大, $\Delta\epsilon$ 随 p 增幅较为明显, $p > 400 \text{ kPa}$ 后,土样逐渐趋于密实,此时 $\Delta\epsilon$ 增幅明显降低,但应变差值 $\Delta\epsilon$ 明显大于 $\rho_d \geq 1.60 \text{ g/cm}^3$ 干密度下的土样。当干密度 $\rho_d \geq 1.60 \text{ g/cm}^3$ 时,从图 13 也可明显看出,土样压缩系数趋于稳定且基本维持在 $a_{1,2} = 0.1 \text{ MPa}^{-1}$ 附近,土颗粒间内部孔隙本身

较小,土样渗透系数也显著降低,渗透水体流经土颗粒间难度增加,相应的渗透作用对土样的压缩性影响较小,不同干密度下 $\Delta\epsilon$ - p 曲线基本重合,且随着 p 增加,压缩应变差值 $\Delta\epsilon$ 增幅较小,但 $\Delta\epsilon$ 不会因干密度的增大而消除。

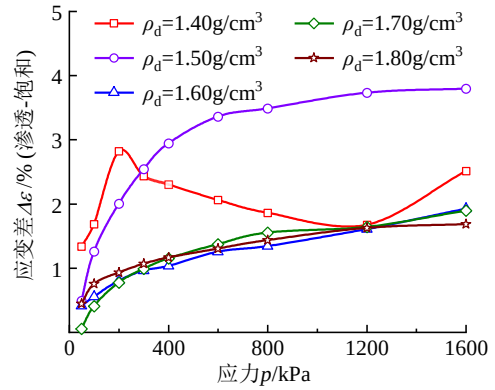


图 13 不同干密度下 $\Delta\epsilon$ - p 曲线

Fig.13 $\Delta\epsilon$ - p curves under different dry densities

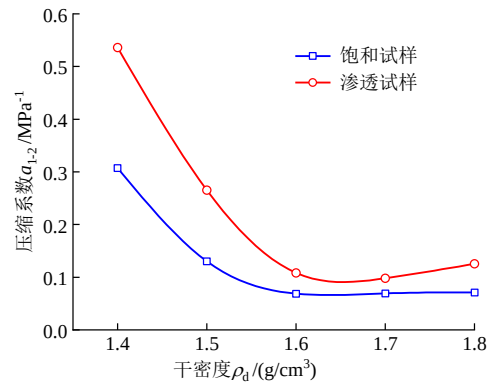


图 14 压缩系数随干密度变化曲线

Fig.14 The curves of compression coefficients with dry densities

从图 14 可以看出, $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 试样压缩系数 $a_{1,2}$ 从饱和压缩时的 0.31 MPa^{-1} 增加到渗透压缩时的 0.54 MPa^{-1} ,增幅达到饱和压缩的 74.2%,结合洪勃等^[10]、张亚国等^[13]的电镜结果,在干密度较低状态下,重塑马兰土颗粒间以大孔隙为主,在加载初期 ($p \leq 200 \text{ kPa}$),内部大孔隙迅速向中小孔隙转化,加之本身渗透作用对土粒间孔隙的冲蚀,试验表现出加载初期 $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 试样应变差 $\Delta\epsilon$ 随 p 的增加快速增长;当 $p > 200 \text{ kPa}$ 后,土样内部原有大孔隙基本被压缩为中小孔隙,且压缩过程中较为松散的土颗粒结构可能发生了二次重新排列,进而弱化了渗透作用对土样压缩变形的加剧作用,表现出图 13 中 $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 试样超过 200kPa 后,应变差 $\Delta\epsilon$ 仍大于 1,但随加载压力 p 的增加 $\Delta\epsilon$ 增幅出现回落,在 $p = 1200 \text{ kPa}$ 时达到最低的现象。最后一级荷载 $p = 1600 \text{ kPa}$ 时 $\Delta\epsilon$ 又稍有增加,可能与试验操作、

人为读数误差等有关。

通过已有 SEM 观测发现,未浸水黄土颗粒表面存在清晰的盐晶体胶结桥,而浸水后胶结物溶解,颗粒间接触由“点-面”变为“点-点”,胶结强度下降约 30%^[31]。Zhang 等^[32]对重塑黄土的压汞(MIP)试验表明,浸水饱和后,大孔隙(>10 μm)体积占比从 35% 增至 52%,而微孔(<0.1 μm)减少 18%,总孔隙率增加 12.7%,反映了结构的松散化。离子迁移分析中,通过离子色谱(ICP-OES)和电导率测试发现,重塑黄土在渗透饱和过程中,Na⁺、SO₄²⁻、Ca²⁺等可溶盐浓度显著下降,即渗流作用劣化了重塑黄土结构性能,进而加剧了其在土覆荷载作用下的压缩变形。

3 渗透作用对压实填土沉降的影响

在黄土填方工程中,尤其针对山区“U”型或“V”型沟谷填土属于有侧限填方,当沟谷谷底区重塑黄土处于地下以下,土体呈饱和状态,同时土体内地下水通过附近的主、次盲沟进行排泄,等同于试验中重塑黄土经历的饱和渗透的过程,此时在上覆填土及地面建(构)筑物等荷载长期作用下,其压缩变形明显大于非渗透作用时饱和状态重塑黄土变形。

依据固结理论,当土层厚度为 H 时,按照分层总和法,该土层的理论沉降可以由式(5)计算。

$$\Delta S = \Delta \epsilon \times H \quad (5)$$

假定某黄土填方工程中,沟谷区地下水位抬升 5 m,且地下水持续通过填土渗入盲沟排泄,受地下水上升影响的填土所受垂直压力为 400 kPa,回填黄土干密度 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$,此时可采用 Gunary 模型拟合公式进行分析,将式(3)转化为标准 Gunary 模型式,用式(6)表示。

$$\epsilon = \frac{p}{E_{so}} = \frac{p}{a + bp + c\sqrt{p}} \quad (6)$$

取 $p = 400 \text{ kPa}$,将表 5 中 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 的拟合参数代入式(6),并采用渗透土样拟合式减去饱和土样拟合式,计算得到由于渗透作用引起此部分填土的应变差 $\Delta \epsilon = 1.0364\%$,带入式(5)可计算受影响填土的理论沉降增加量 $\Delta S = 51 \text{ mm}$,此部分变形增加量对黄土填方工程沉降预测、工程稳定性评价将产生较大影响,工程中应予以重视。

4 结论

对不同干密度重塑马兰黄土分别开展了饱和再压缩、渗透再压缩试验,获得了重塑黄土渗透性、固结压缩应力-应变关系,并进行了不同工况的

差异性比较,主要结论如下:

1)通过对不同干密度重塑马兰黄土开展饱和渗透试验发现,重塑黄土渗透系数随干密度的增大快速减小,渗透系数与干密度呈指数函数关系,与重塑黄土初始孔隙比满足幂函数关系。

2)对不同干密度重塑马兰黄土饱和再压缩、渗透再压缩的试验结果分别采用双曲函数、幂函数和 Gunary 模型进行拟合,发现 Gunary 模型对不同工况下不同干密度重塑黄土的侧限压缩应力-应变关系均保持较好的拟合度。

3)对比两种试验结果发现,不同干密度重塑马兰黄土经渗透再压缩的侧限压缩应变均大于浸水饱和再压缩的应变,且重塑黄土干密度越大,两种试验侧限压缩应变差值越小,但不会因干密度的增大而消除。

4)在沟谷区黄土填方工程中,应充分考虑地下水位上升后经填筑体向盲沟渗流过程中,渗透作用对压实黄土压缩性的不利影响,在类似工程的设计、施工及沉降预测中,应充分考虑重塑马兰黄土受地下水渗流影响引起的理论沉降增量。

参考文献

- [1] MEI Y, ZHOU D B, HU C M, et al. Study on deformation characteristics of loess ultrahigh-fill slope based on large-scale undisturbed soil centrifugal model tests [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 848542.
- [2] ZHANG H X, ZENG R Q, ZHANG Y, et al. Subsidence monitoring and influencing factor analysis of mountain excavation and valley infilling on the Chinese Loess Plateau: A case study of Yan'an New District [J]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106482.
- [3] WU Y M, LAN H X. Study on the deformation of filling bodies in a loess mountainous area based on InSAR and monitoring equipment [J]. *Land*, 2022, 11 (8): 1263.
- [4] 段旭,董琪,门玉明,等.黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40 (9): 1753-1758.
- DUAN X, DONG Q, MEN Y M, et al. Change of groundwater and water content of loess high fill in Gully Regions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(9): 1753-1758. (in Chinese)
- [5] BAO H, JI C L, LAN H X, et al. Slope effects on soil moisture migration and evolution in shallow layers of loess high-fill slopes in the Gully Land Consolidation [J]. *Catena*, 2025, 258: 109206.
- [6] 朱才辉,彭森,刘争宏,等.地下水位抬升对黄土高填方地基增湿影响研究[J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(2):

- 61-70.
ZHU C H, PENG S, LIU Z H, et al. Wetting effects of loess high-fill embankment due to groundwater uplift [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(2): 61-70. (in Chinese)
- [7] 祁生文, 侯晓坤, 于永堂, 等. 压实黄土场地湿陷沉降机理与黄土高原平山造城适宜性[J]. *科学通报*, 2023, 68(14): 1844-1860.
QI S W, HOU X K, YU Y T, et al. Collapse and subsidence mechanism of compacted loess and suitability of mountain bulldozing and city creation projects in the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(14): 1844-1860. (in Chinese)
- [8] LIANG Y H, SHUI W H, LU S F. Field practice and ground settlement behaviors of a land creation case in loess area of China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(11): 462.
- [9] WANG T S, LIU F, YU Y T, et al. Numerical analysis of hydrological response in loess excavation and filling area under multi-year precipitation infiltration [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(10): 372.
- [10] 洪勃, 李喜安, 陈广东, 等. 重塑马兰黄土渗透性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(2): 276-283.
HONG B, LI X A, CHEN G D, et al. Experimental study of permeability of remolded Malan loess [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(2): 276-283. (in Chinese)
- [11] 马亚维, 湛文武, 毕骏, 等. 干密度对黄土渗透系数的影响[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增刊 1): 165-170.
MA Y W, CHEN W W, BI J, et al. Influence of dry density on coefficient of permeability of unsaturated loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup 1): 165-170. (in Chinese)
- [12] RAN G L, ZHU Y P, YANG X H, et al. Permeability characteristics of improved loess and prediction method for permeability coefficient [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(17): 8072.
- [13] 张亚国, 梁伟, 郭松峰, 等. 黄土孔隙结构演化对其土-水特性影响分析[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(6): 1998-2005.
ZHANG Y G, LIANG W, GUO S F, et al. Analysis for effects of loess pore structure evolution on soil-water characteristics [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(6): 1998-2005. (in Chinese)
- [14] WANG H M, ZOU J Q, WU W, et al. Assessing unsaturated permeability of loess under multiple rainfalls [J]. *Engineering Geology*, 2023, 324: 107280.
- [15] XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. An investigation into the relationship between saturated permeability and microstructure of remolded loess: A case study from Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2021, 382: 114774.
- [16] XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. Exploring the geochemical mechanism for the saturated permeability change of remolded loess [J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 105927.
- [17] DUAN X, XIAO D, WANG B, et al. Stress-dependent permeability of loess fill: Evaluating hydrological impacts of land creation engineering in the Loess Plateau of China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2025, 33(1): 293-308.
- [18] 钱家欢. 在渗透水流长时期作用下黄土的压缩流变特性[J]. *水文地质工程地质*, 1958(10): 12-15.
QIAN J H. Compressive rheological properties of loess under the long-term action of seepage flow [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1958(10): 12-15. (in Chinese)
- [19] 刘保健, 谢定义, 郭增玉. 黄土地基增湿变形的实用算法[J]. *岩土力学*, 2004, 25(2): 270-274.
LIU B J, XIE D Y, GUO Z Y. A practical method for moistening deformation of loess foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 270-274. (in Chinese)
- [20] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土变形特性[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1023-1029.
CHEN K S, SHA A M. Study of deformation characteristic of compacted loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1023-1029. (in Chinese)
- [21] 黄雪峰, 孔洋, 李旭东, 等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊 2): 37-44.
HUANG X F, KONG Y, LI X D, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup 2): 37-44.
- [22] 何俊飞. 降雨及地下水位抬升对高填方地基增湿变形沉降规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
HE J F. Study on wetting deformation law of high fill foundation caused by rainfall and groundwater level rise [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [23] 周涛, 木林隆, 王乐, 等. 水位抬升下黄土高填方地基增湿变形试验研究[J]. *地基处理*, 2022, 4(增刊 1): 128-133.
ZHOU T, MU L L, WANG L, et al. Experimental study on humidification deformation of loess high fill foundation under water level rise [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(Sup 1): 128-133.
- [24] ZHU C H, PENG S, LI Z Q, et al. Evaluation on wetting effect of loess high-fill embankment under rainfall and groundwater uplift [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 38: 100916.
- [25] YAO Y G, ZHANG Y C, GAO X L, et al. Study on

permeability and collapsibility characteristics of sandy loess in northern Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126883.

[26] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)

[27] 魏汝龙. 整理压缩试验资料的一种新方法[J]. 水利水运科学研究, 1980(3): 90-93.

WEI R L. A new method of collating compression test data [J]. Hydro-Science and Engineering, 1980(3): 90-93. (in Chinese)

[28] 赵金均, 高宇甲, 霍继伟, 等. 结构性对黄土抗剪强度的影响研究: 以国道 G310 三门峡段为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 6-11.

ZHAO J D, GAO Y J, HUO J W, et al. Influence of structure on shear strength of loess in Sanmenxia [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 6-11. (in Chinese)

[29] 李广信. 高等土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016.

LI G X. Advanced soil mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)

[30] 王飞, 李国玉, 穆彦虎, 等. 干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2306-2312, 2320.

WANG F, LI G Y, MU Y H, et al. Experimental study of deformation characteristics of compacted loess subjected to drying-wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2306-2312, 2320. (in Chinese)

[31] 葛苗苗, 何璇, 谷川, 等. 压缩及增减湿作用下非饱和黄土细观结构演化规律研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(2): 397-409.

GE M M, HE X, GU C, et al. Study on the microstructure evolution of a compacted loess along compression, wetting and drying [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(2): 397-409. (in Chinese)

[32] ZHANG X W, KONG L W, GUO A G, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2).

(编辑 XXX)