

侧向受控条件与压实度对陕北地区压实黄土压缩特性的影响

常应红¹,赵金朋²,张晓轴¹,杨浩¹,李哲^{2*},邵登峰²,刘路路^{2,3}

(1.榆林市公路局,陕西 榆林 719199;2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;

3.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:近年来,随着道路工程建设的高速发展,压实黄土因竖向压缩引起的路基沉降问题日益严重。以往学者的研究主要集中在影响压实黄土变形的含水率、孔隙率、饱和度等因素方面,忽略了侧向约束条件以及不同压实度对压实黄土的影响。为解决以上问题,该文以陕北地区G307道路改扩建工程为依托,现场选取路基压实土样开展室内压缩试验。通过施加不同的侧向约束条件,分析竖向多级荷载作用下压实黄土在不同压实度和围压条件下的应力-应变曲线。结果表明:土样的竖向压缩量与施加的竖向荷载呈正相关,而与压实度呈负相关;围压与侧向约束均能降低土样的竖向压缩量。该结果反映了土样在实际工程中的工作状态,可为黄土区路基填筑提供借鉴和指导。

关键词:压实黄土;路基沉降;约束条件;压实度;围压

中图分类号:U419.4

文献标志码:A

Influence of Lateral Constraint Conditions and Compactness on Compression Characteristics of Compacted Loess in Northern Shaanxi

CHANG Yinghong¹, ZHAO Jinpeng², ZHANG Xiaozhou¹, YANG Hao¹,

LI Zhe^{2*}, SHAO Dengfeng², LIU Lulu^{2,3}

(1.Yulin Highway Bureau, Yulin, Shaanxi 719199, China; 2.Highway College, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of road engineering construction, subgrade settlement caused by vertical compression of compacted loess has become increasingly serious. The previous research on the deformation of compacted loess mostly focuses on moisture content, porosity, saturation, and other aspects, ignoring the influence of lateral constraint conditions and different compaction on compacted loess. To address these issues, based on the reconstruction and expansion project of G307 road in northern Shaanxi, this paper selected compacted soil samples of subgrade on site to carry out indoor compression tests. By applying different lateral constraint conditions, the stress-strain curves of compacted loess subjected to vertical multistage load under different compactness and confining pressures were analyzed. The results indicate that the vertical compression of soil samples is positively correlated with the applied vertical load and inversely correlated with compactness. Confining pressure and lateral constraint can reduce the vertical compression of soil samples. The results reflect the working state of the soil sample in the actual project, providing reference and guidance for the subgrade filling in the loess region.

Keywords: compacted loess; subgrade settlement; constraint condition; compactness; confining pressure

收稿日期:2024-05-30(修改稿)

基金项目:长沙理工大学公路养护技术国家工程研究中心开放基金资助项目(编号:kfj220104)

作者简介:常应红,男,高级工程师.E-mail:zhao19980522@126.com

*通信作者:李哲,男,博士,副教授.E-mail:764614114@qq.com

0 引言

黄土是一种具有较强结构性的非饱和特殊土,往往在干旱地区形成,在中国的西北、华北地带广泛分布,面积可达 $54\times 10^4\text{ km}^2$ ^[1]。由于中国西北地区填筑材料比较单一,为了降低施工成本,合理利用当地资源,在工程项目修建过程中秉持“就地取材,就地填筑”的原则,因此需要采用大量黄土作为建筑物、构筑物的地基填料^[2-3]。近年来,由于黄土的压缩性,地基沉降问题在工程建设中频繁发生,已成为建筑工程中不可忽视的重大隐患。因此,深入探讨黄土的压缩性逐渐成为岩土工程领域亟待解决的研究课题之一^[4-8]。

以往学者对土的压缩变形研究大多基于原状黄土,并取得一定成效,而对压实黄土的研究鲜见。据了解,压实黄土与原状黄土在压缩变形特性上具有较大区别^[9]。Covassi等^[10]通过对阿根廷的原状黄土和压实黄土进行真三轴试验,研究了压实黄土与原状黄土的结构各向异性;Zhang等^[11]通过对原状黄土与压实黄土进行固结排水三轴试验,对比了原状黄土与压实黄土的抗剪性能,发现压实黄土作为黄土区公路、铁路、机场、土坝中常用的填料,在承担荷载方面起着十分重要的作用。随着压实黄土普遍应用,深入研究压实黄土变形特性,对确定黄土区施工现场压实方式、施工后建筑物地基沉降预测、地基设计等方面具有重要意义。近年来,压实黄土的力学行为以及应力-应变关系越来越受学者关注。Kim等^[12]对4种黏粒含量(10%、20%、25%、30%)的黄土进行了标准压实试验、直剪试验、GDS固结试验等,评估了用于路基填筑的压实黄土的力学特性。当中国陕北地区修建公路时,往往会面临填方、挖方等地基处理措施的挑战。良好的黄土填料是保证地基安全稳定的前提,黄土的竖向压缩应变往往反映出黄土的稳定性。但是在实际工程中,随着施工方式和施工要求不同,导致压实黄土变形的因素也十分复杂。因此,明确压实黄土的竖向压缩应变,探讨出影响压实黄土竖向压缩应变的因素显得尤为重要^[13]。

前人总结出压实黄土竖向压缩应变的诱因主要有压实度、含水率、初始孔隙率、侧向受控条件等,并在不同影响因素条件下展开相关研究。陈存礼等^[14]在考虑不同含水率及干密度的情况下,对具有不同

结构性(排列)的压实黄土开展侧限压缩试验,研究分析土样的竖向压缩应变以及不同制样含水率条件下引起的结构性变化,进而分析对压实黄土压缩的影响,探讨压缩性指标与初始结构性参数之间的关系,提出压实黄土压缩曲线的表达式。为理清黄土压缩性与物理指标(含水量、压实度)和变形指标(压缩变形系数、压缩系数)的关系,陈开圣等^[15]对压实黄土开展室内一维压缩试验,分析了土样的变形特点,提出并明确了压缩变形系数的概念,研究了含水率对压缩变形系数的影响,得到压实黄土的压缩变形系数随着含水率的增大而逐渐增大的特性。在分析影响黄土竖向压缩应变的因素上,杨晶等^[16]同样采取室内一维压缩试验方法,从压实能和初始含水率方面对压实黄土压缩变形特性开展研究,并进行了含水率、击实能以及竖向荷载对压实黄土竖向压缩应变的影响分析,明确了三者对黄土竖向压缩应变的影响程度;黄雪峰等^[17]选取了某黄土高填方工程,开展了大量的室内压缩固结试验和增湿变形试验,讨论了压实黄土在不同影响因素下的变形特性,同时构造了压实黄土应力-应变关系的最佳拟合模型,并利用试验数据对不同压实度条件下的压缩固结变形量及增湿变形量进行预测。以往的研究大多基于室内传统的压缩试验,所采用的侧限条件往往是土样处于无侧限或者完全侧限状态,对于选取不同侧面受控条件研究压实黄土的竖向压缩应变尚需持续深入。由于在实际工程中土颗粒接触条件不同,其受力状态也不尽相同,这种影响因素往往体现在侧面受控约束上。因此,对于利用不同侧面约束条件作为新的研究方向来深入研究压实黄土的实际竖向压缩变形具有重要意义。

1 试验材料与试验方法

1.1 土样

选取G307绥德至吴堡断面K24+923路基压实黄土开展室内试验,土样物理性质参数见表1。

表1 土样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水 率/%	孔隙 比	相对 密度	液限/ %	塑限/ %	最优含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1.784	12.89	0.527	2.71	28.7	18.9	11.77	1.950

1.2 试验方案

本次试验采用自制压缩设备,开展了压实黄土在不同侧向约束条件下的压缩试验。为了深入反映土样在工程中的实际情况,对土样进行了不同形式的约束,如图1所示。对于处于填方体内部的土样,选取四侧预留变形的约束形式;对于一侧靠近原状土或者挡土墙,另外三侧临近填土体的土样,采用一侧约束另外三侧预留变形的约束形式;对于三侧处在内部的土样,采用一侧无约束三侧预留变形的约束形式,其中, d 为预留距离。

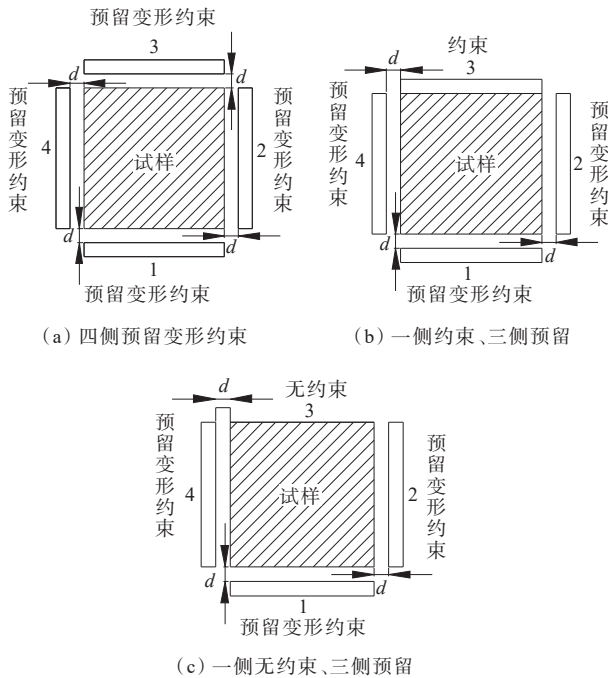


图1 土样采取的预留变形约束平面图

Figure 1 Plan view of soil samples under reserved deformation constraints

同时,为了更好地描述实际工程中土体试样在不同围压状态下的压缩性,试验在受力方式上分别设置了以下约束形式,如图2所示。

1.3 试验设备

此次试验摆脱了室内传统压缩试验的不便,设计了能够对土样单元施加约束条件以及围压条件的试验装置。

(1) 反力系统、量测系统。土样的竖向荷载通过千斤顶施加,为保证土样不发生偏移,自主研发了反力装置,该反力装置由工字型钢焊接而成,内部设置斜撑以保证结构的稳定性,反力装置如图3所示。采用百分表测量试验土样的变化,百分表通过磁力表座固定在基准梁上,基准梁与反力装置脱离放置。

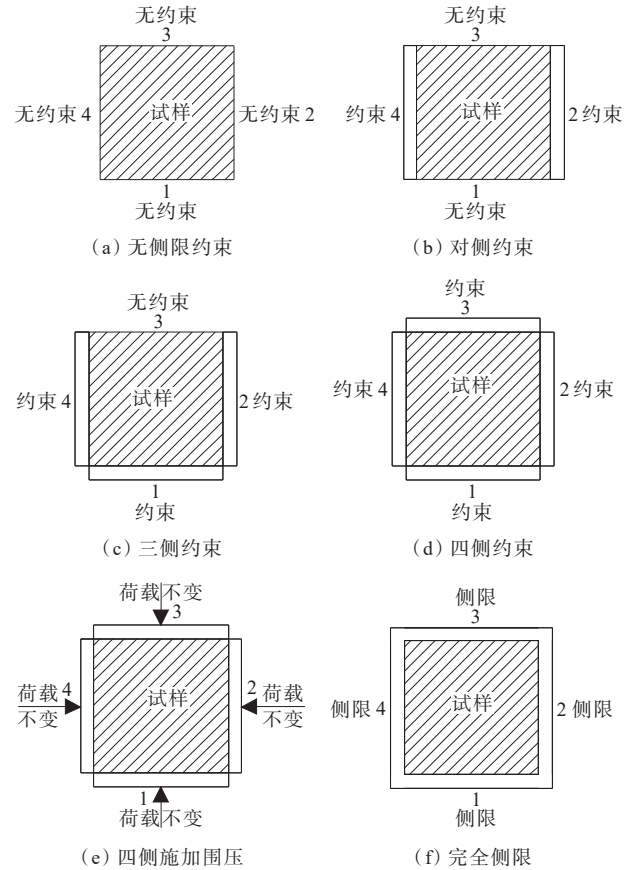


图2 试样采取不同受力方式约束时平面图

Figure 2 Plan view of soil samples with constraints under different stress modes

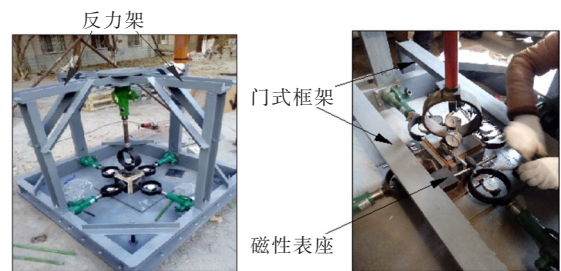


图3 反力与量测装置

Figure 3 Reaction device and measuring device

(2) 加载系统。土样的侧向约束力同样利用千斤顶施压,为使土样的侧向约束力大小得到控制,千斤顶部位配有测力环,如图4所示。

1.4 土样试块、围压、加载、压实度的选取

分别将不同压实度的土样按试验要求置于不同侧向预留变形的试样模具中,利用千斤顶对土样施加围压以及竖向压力,通过百分表测量压力值。为保证土样围压稳定,尽可能减少在试验中发生侧向变形,围压分别设置 25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa。试验过程中,荷载分别为 25 kPa、50 kPa、100 kPa、

150 kPa、500 kPa,土样的最优含水率为11.77%,最大干密度为1.95 g/cm³,将土样的最优含水率视为土样的含水率,土样的压实度和干密度关系见表2。

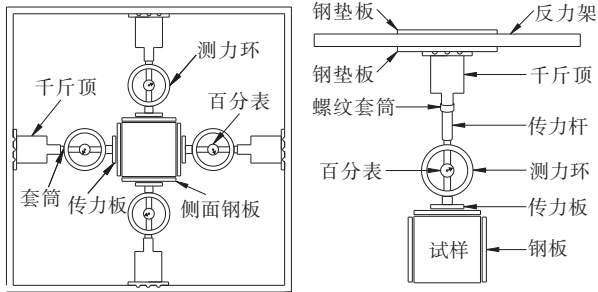


图4 加载装置

Figure 4 Loading device

表2 土样参数

Table 2 Soil samples parameters

压实度/ %	土样干密度/ (g·cm ⁻³)	土样湿密度/ (g·cm ⁻³)	湿土质量/ g	层数
84	1.62	1.81	7 383.6	3
88	1.69	1.89	7 733.1	3
93	1.78	1.98	8 086.9	3
96	1.84	2.06	8 436.1	3
100	1.92	2.15	8 787.6	3

根据表1,结合试验要求,制备了不同参数的土样试块,具体见表2。

2 试验结果与分析

本文通过对压实黄土施加竖向压应力,采取不同的压实度、侧向约束、侧向预留变形条件以及围压,分析压实黄土的应力-应变关系。

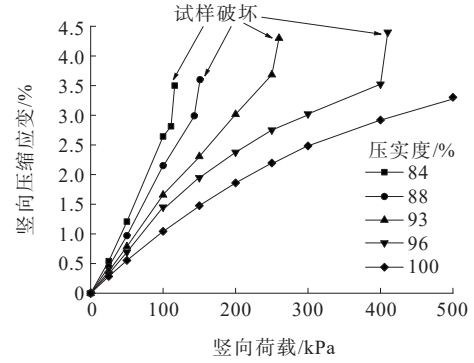
2.1 控制压实度

竖向压缩应变在传统意义上指土样在应力作用下土体竖向压缩量的变化,在压缩过程中土样的横截面面积是恒定的。考虑到传统竖向压缩应变的缺陷,采取适用于本文的新压缩方式。在压缩过程中,土样的横截面面积发生变化,其计算公式如式(1)所示:

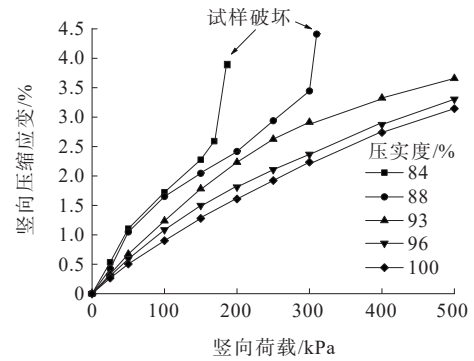
$$\epsilon = \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ϵ 为土样的竖向压缩应变; $\sum \Delta h_i$ 为土样的累计变形量; h_0 为土样初始高度。

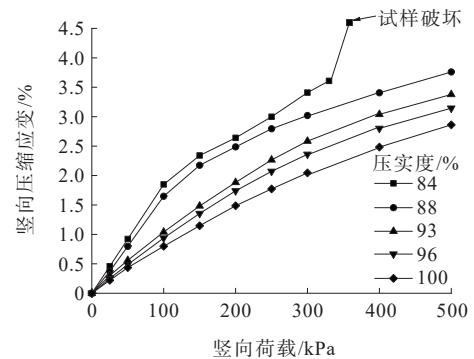
压实度作为影响土样竖向压缩应变的关键因素,引起了学者们的广泛关注,土样竖向压缩应变与竖向荷载之间的关系见图5。



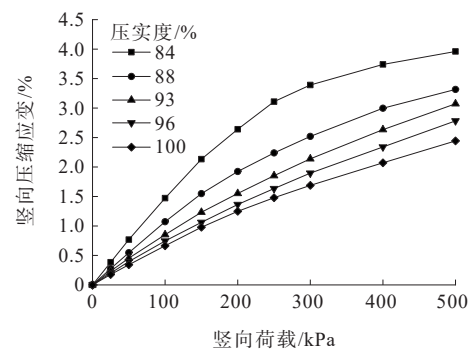
(a) 无侧限条件



(b) 对侧约束条件



(c) 三侧约束条件



(d) 四侧完全约束条件

图5 不同压实度的土样竖向压缩应变与竖向荷载之间的关系

Figure 5 Relationship between vertical compressive strain and vertical load of soil samples with different compactness

由图5可知:土样的竖向压缩量与施加的竖向荷载呈正相关,与压实度呈反相关;土样的初始压实度越大,土样越不容易发生竖向变形。其原因是土样的压实度越大,土样的孔隙比越小,孔隙体积越小,在外荷载作用下产生压缩的能力就越弱。压实度能有效提升土体强度参数,在一定程度上能够防止边坡的变形破坏。从微观角度来看,随着压实度的增加,大中孔隙体积减小,微小孔隙数量增加。

由图5(a)、(b)可知:当土样在无侧限约束和对侧约束条件下进行压缩试验时,在初始荷载施加阶段,土样的荷载-应变近似呈线性关系,说明荷载在100 kPa以内时,不同压实度的土样呈现相同的压缩趋势。随着荷载的增加,当土样的压实度为96%、100%时,土样的荷载-应变曲线逐渐偏向应力轴,说明土样的压实度较高时,土样的竖向压缩变化率较小,且随着压实度增大,其变化率逐渐减小;当土样的压实度为84%、88%时,土样的荷载-应变曲线逐渐偏向应变轴,说明土样的压实度较低时,土样的竖向压缩变化率较大,且随着压实度的减小,其变化率逐渐增大。由此可见,压实度与土样的竖向压缩应变呈反相关,进一步验证了压实度越大,土样越不容易发生变形。从约束条件来看,荷载-应变关系随着约束条件的增多,逐渐呈现弯曲状,即荷载-应变关系曲线更易趋向于应力轴。这说明,当土样采取的约束条件越多时,其荷载-应变曲线越容易向荷载轴偏移。由此可以推断,位于土体内部的土颗粒不容易变形,而表面土颗粒则容易变形。

2.2 控制侧向约束

以往关于压实黄土室内侧限压缩试验的研究,大多基于含水率的变化,并引入Gunary拟合形式进行分析^[17],即:

$$\epsilon_{si} = p_i / (a + bp_i + c\sqrt{p_i}) \quad (2)$$

陈开圣等^[15]认为压实黄土在侧限条件下,竖向压应力-竖向压应变曲线呈幂函数关系;胡长明等^[18]基于陈开圣的结果研究了吕梁地区马兰压实黄土,再一次验证了压实黄土的竖向压应力-应变曲线呈幂函数关系。为深入认识侧面约束对土样竖向压缩应变的影响,分析土样在相同压实度下,竖向荷载 p 与竖向压缩 ϵ 之间的变化规律,结果如图6所示。

由图6可知:① 随着约束条件增加,土样的应变

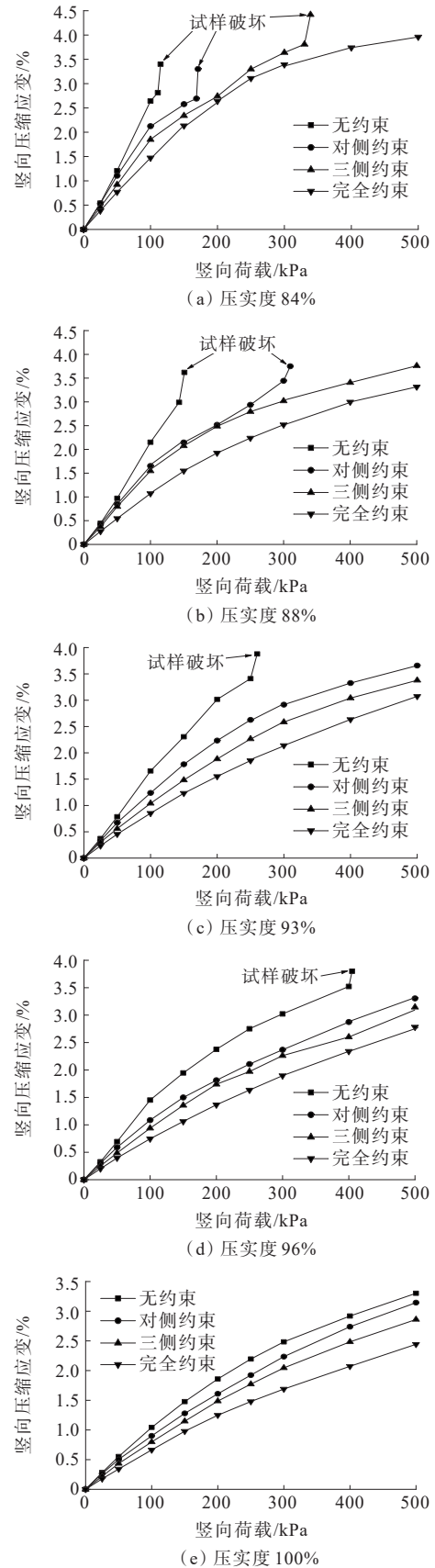


图6 土样在不同约束条件下的 ϵ - p 曲线
Figure 6 ϵ - p curves of soil samples under different constraint conditions

率逐渐减小,说明压实度相同的土样在施加竖向荷载时,土样所受侧面约束越多,土样越不容易发生竖向压缩,侧面约束对土样的竖向压缩有较大影响。其主要原因是在竖向荷载作用下,侧面约束限制了土体向四周扩散的能力,土骨架能够保持较好的结构完整性,增加了抵抗外荷载变形的能力;②由图6(a)可以看出:侧面约束的数目对土样抵抗破坏的能力具有显著影响,随着荷载的增加,无约束、对侧约束、三侧约束的土样分别在荷载值为100 kPa、150 kPa、350 kPa时发生破坏,而在完全约束下,土样未发生破坏;③由图6(e)可知:当压实度达到100%时,4种约束条件下的土样均不会被破坏,此时土样的 $\epsilon-p$ 曲线符合Gunary拟合形式;④随着压实度增加,土样的应变率逐渐减小。当压实度达到100%时,无论土样是否约束,均不会发生破坏,说明压实度和侧面约束对土样压缩变形均有很大影响。

2.3 不同侧面约束下土样的破坏特征

土样的破坏过程本质上是一个渐进的压密过程。随着荷载的增加,土样侧面先出现裂缝,再随着压力逐渐增加裂缝开始扩展最终形成裂隙网。当裂隙交会时,会导致土样开裂。然而,在实际状态下,由于土样受到的约束条件不同,其变形特征是不同的。土样在不同约束状态下的初始形状与荷载施加后形状的对比见图7。

由图7可知:3种约束条件下,土样的破坏过程呈相似性质。在破坏初期,土样表面开始出现裂纹,随后裂纹逐渐扩展,最终形成明显的纵向裂纹,呈现出较为明显的撕裂破坏特征。3种约束条件下土样的破坏过程如下:①土样在无约束条件下,土样4个表面都形成了宏观的纵向裂缝。随着裂缝的扩展,土样破裂现象逐渐明显。由于土样四周没有约束力,四周的土样发生破坏并逐渐脱落,直到土样完全破坏。土样破坏后,裂纹呈倒锥形,其完整性最差;②土样在对侧约束条件下,由于约束面的限制,土样的裂缝出现在无约束面。裂缝的扩展形式与无约束条件相似,但破坏后土样的完整性相对较好;③土样在三侧约束条件下,由于约束面的限制,土样破坏仅出现在无约束面,裂缝从无约束面中间开始扩散,然后逐渐蔓延至整个无约束面,最终土样达到破坏状态。从土样形变来看,3种约束条件下,土样在无约束条件下的变化最为明显,约束面越多,土样的形变越

小。因此,在实际工程中,应考虑对黄土路基坡体施加约束装置增强其稳定性。



(a) 无侧限状态初始与破坏土样形态图



(b) 对面约束状态初始与破坏土样形态图



(c) 三面约束状态初始与破坏土样形态图

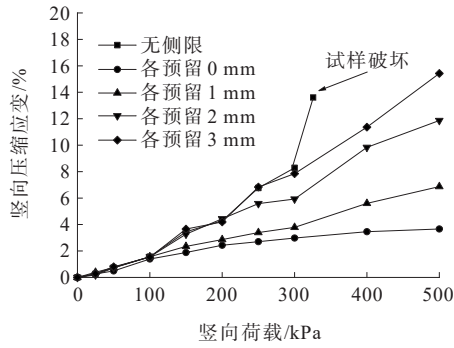
图7 不同侧面约束产生的土样变形破坏

Figure 7 Deformation and failure of soil samples caused by different lateral constraints

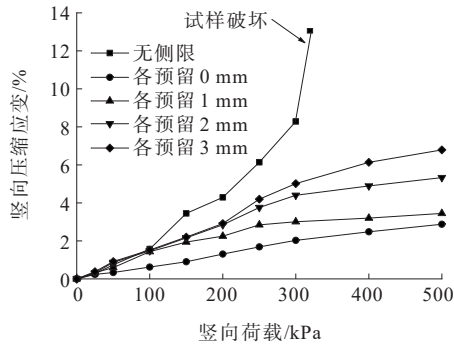
2.4 控制侧向预留变形约束条件

土样的压缩,不仅会发生竖向压缩,而且还会发生侧向变形,为理清压实黄土在不同竖向荷载作用下的侧向变形情况,本节选取固定压实度的土样开展土样在不同预留约束距离条件下的 $\epsilon-p$ 分析。图8分别展示了压实度为93%的土样在侧面预留变形约束条件下的 $\epsilon-p$ 关系,预留距离分别取0 mm、1 mm、2 mm、3 mm。

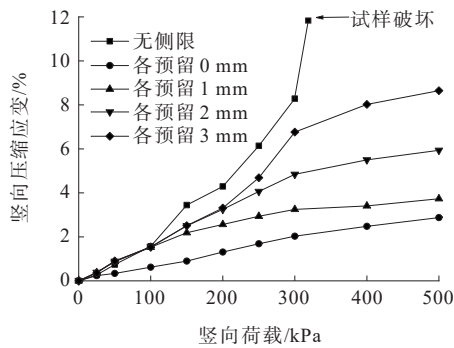
由图8(a)可知:土样在荷载刚施加阶段,土样的 $\epsilon-p$ 曲线几乎重合,说明100 kPa以内的荷载不足以使土样产生较大的变形,此时土样还没有与侧板接触。随着荷载的增大,土样在各种预留变形约束下的 $\epsilon-p$ 变化关系呈现不同增长趋势,说明在荷载达到一定值时,侧面预留距离对土样压缩变形影响很大;随着荷载的增大,土样在预留变形约束条件下的 $\epsilon-p$ 曲线逐渐偏向荷载轴,预留距离越小,偏向幅度越大,说明土样约束越紧密,土样越不容易被压缩;与一侧无



(a) 一侧无约束三侧预留变形



(b) 一侧约束三侧预留变形



(c) 四侧各预留变形约束

图 8 土样在不同预留变形约束条件下的 ϵ - p 曲线Figure 8 ϵ - p curves of soil samples under different reserved deformation constraints

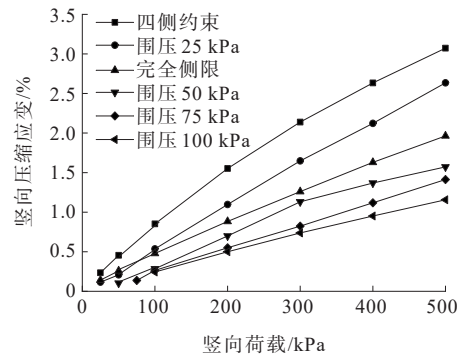
约束三侧预留变形相比,一侧约束三侧预留变形的压缩-荷载变化趋势相同,但其土样压缩量更小;由图 8(b)、(c)可知:在荷载刚施加阶段,土样在 4 个侧面都预留变形约束和一侧约束三侧预留变形约束条件下,土样的 ϵ - p 与无约束条件下的变形一致,说明无论采取哪种约束,土样在竖向荷载为 100 kPa 以内引起的侧面变形小于 1 mm。当荷载为 0~200 kPa,侧面预留为 2 mm、3 mm 的土样时,土样的 ϵ - p 曲线几乎重合,说明此时土样在竖向荷载作用下采用这两种

约束形式引起的侧面变形小于 2 mm。从土样的 ϵ - p 曲线可以看出:土样的最终竖向压缩应变大小关系随着约束条件的增多而逐渐降低,再一次验证了约束条件越多,土样越不容易发生竖向压缩变形。

2.5 控制围压

实际工程中,土体易受周围压力的影响,而围压的变化会影响土样的竖向压缩应变。针对该现象,以往学者进行了相关研究。张玉等^[19]利用 TSZ-3 型应变控制式三轴剪切仪,在不同固结围压条件下,对不同压实度的二灰改良黄土和压实黄土进行了常规三轴加载试验,研究了在竖向加载作用下改良黄土与压实黄土的应力-应变演化关系、强度特性及其破坏方式的差异,探讨了改良黄土与压实黄土压实性能的差异;刘冬^[20]利用固定压实度的土样,分别设置了不同等级的围压,探讨了压实黄土在不同围压状况下应力-应变关系。本节借鉴该研究思路,围压分别设置为 25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa,开展土样在低围压下的压缩变形试验,同时本次试验把预留变形约束同完全侧限与四侧约束时土样的 ϵ - p 关系进行对比。

图 9 为土样在 4 种围压条件下的 ϵ - p 曲线。

图 9 土样在不同围压条件下的 ϵ - p 曲线Figure 9 ϵ - p curves of soil samples under different confining pressures

从图 9 可以看出:随着荷载的增大,围压由 25 kPa 增加到 100 kPa 时,压缩应变率越来越小,这与张玉等^[19]的结论一致,围压越大,能提供的侧向约束越大,土的强度增长就越快。当荷载增加至 500 kPa 时,土样的竖向压缩应变由 2.63% 减小到 1.16%,降幅为 55.9%;随着围压的增大,土样应变率逐渐减小。由此可见,土样所受围压的大小对土样的竖向变形

影响较大,主要原因是围压在一定程度上等同于侧向约束,在围压作用下,能够有效地防止土样的侧向变形,进而使土样不容易发生竖向压缩。

3 结论

本文对陕北地区某道路改扩建工程的路基压实黄土现场取样,考虑土体在实际工程中的受力状态,通过室内模型试验,研究了不同围压、不同侧面约束、不同压实度下,土样的竖向应变与竖向荷载的变化关系。得到主要结论如下:

(1) 土样的竖向压缩量与施加的竖向荷载呈正相关,与压实度呈反相关;土样的初始压实度越大,土样越不容易发生竖向变形。

(2) 当土样压实度相同时,随着竖向荷载的增加,土样所受侧面约束越多,土样越不容易发生竖向压缩变形。

(3) 当荷载增加时,侧面预留距离对土样压缩变形影响很大,侧面预留距离越小,土样越不容易发生压缩变形。

(4) 在土样的压缩过程中,围压能够有效防止土样的侧向变形。围压越大,土样越不容易发生压缩变形,因此可认为围压在一定程度上等同于对土样施加侧向约束。

参考文献:

References:

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] 吴文彪, 郑俊杰, 曹文昭. 考虑含水率影响的压实黄土路堤稳定性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 542-546.
WU Wenbiao, ZHENG Junjie, CAO Wenzhao. Study on stability of compacted loess embankment considering the influence of moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(sup 1): 542-546.
- [3] 巨玉文, 胡颖, 王文正. 黄土填料高填方路堤工后沉降变形规律的试验研究[J]. 公路, 2017, 62(8): 21-27.
JU Yuwen, HU Ying, WANG Wenzheng. Experimental study on post-construction settlement and deformation law of loess filled high embankment[J]. Highway, 2017, 62(8): 21-27.
- [4] 雷明轩, 刘国田, 苏卫卫, 等. 砂黄土区路基下采空区地表移动变形规律研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 8-13.
LEI Mingxuan, LIU Guotian, SU Weiwei, et al. Study on laws of surface movement and deformation of goaf under subgrade in sand-loess area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 8-13.
- [5] 李丽. 关中地区压实黄土固结变形特性试验研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2021.
LI Li. Experimental study on consolidation deformation characteristics of compacted loess in Guanzhong area[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2021.
- [6] 李明. 铝粉水泥浆在黄土路基沉陷注浆处治工程中的应用[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 26-29.
LI Ming. Research on the application of cement slurry with aluminum powder to the grouting disposal due to the collapse of loess roadbed[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 26-29.
- [7] 葛苗苗, 李宁, 盛岱超, 等. 水力耦合作用下非饱和压实黄土细观变形机制试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2437-2448.
GE Miaomiao, LI Ning, SHENG Daichao, et al. Experimental investigation of microscopic deformation mechanism of unsaturated compacted loess under hydraulic coupling conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2437-2448.
- [8] 赵丹妮, 曹宝花, 许江波, 等. 不同纳米黏土改良黄土试验结果对比分析[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 55-65.
ZHAO Danni, CAO Baohua, XU Jiangbo, et al. Comparative analysis of test results of different nano-clay improved loess[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 55-65.
- [9] 景宏君, 张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 14-18.
JING Hongjun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14-18.
- [10] COVASSI P A, RINALDI V A. Inherent anisotropy of an undisturbed and compacted loess soil[J]. Deformation Characteristics of Geomaterials, 2015, 6: 850-857.
- [11] ZHANG J W, MU Q Y, GARG A, et al. Shear behavior of

- unsaturated intact and compacted loess: A comparison study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(3): 79.
- [12] KIM D, KANG S S. Engineering properties of compacted loesses as construction materials[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013, 17(2): 335-341.
- [13] 李金华, 陈籽涵, 岳鹏举, 等. 压实黄土强度特性影响因素的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4): 219-223.
LI Jinhua, CHEN Zihan, YUE Pengju, et al. Experimental study on the influencing factors of compacted loess strength characteristics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(4): 219-223.
- [14] 陈存礼, 蒋雪, 杨炯, 等. 结构性对压实黄土侧限压缩特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1939-1944.
CHEN Cunli, JIANG Xue, YANG Jiong, et al. Influence of soil structure on confined compression behaviour of compacted loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1939-1944.
- [15] 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 Kaisheng, SHA Aimin. Study of deformation characteristic of compacted loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1023-1029.
- [16] 杨晶, 白晓红. 压实黄土非线性压缩应力-应变关系在地基沉降计算中的应用[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 1002-1008.
YANG Jing, BAI Xiaohong. Nonlinear compression stress-strain relationship of compacted loess and its application to calculation of foundation settlement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 1002-1008.
- [17] 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 Xuefeng, KONG Yang, LI Xudong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(sup 2): 37-44.
- [18] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J]. *工程力学*, 2013, 30(10): 108-114.
HU Changming, MEI Yuan, WANG Xueyan. Deformation and shearing strength characteristic of compacted Malan loess in Luliang region[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 108-114.
- [19] 张玉, 何晖, 曾志英, 等. 粉煤灰-石灰改良黄土与压实黄土强度特性对比分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(8): 3265-3273.
ZHANG Yu, HE Hui, ZENG Zhiying, et al. Comparison of strength characteristics of fly ash-lime improved loess and compacted loess[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(8): 3265-3273.
- [20] 刘冬. 膨润土改性黄土的动力特性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
LIU Dong. Study on dynamic characteristics of bentonite modified loess[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.