

长沙压实黏土剪切特性及应力-应变关系表征

张安顺^{1,2}, 付伟³, 张军辉^{1,2}, 高峰^{1,2}

(1. 长沙理工大学公路工程教育部重点实验室, 长沙 410114; 2. 湘江实验室, 长沙 410205; 3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘要:为研究路基压实黏土的剪切特性与应力-应变关系,以长沙黏土为例开展了不同压实度、含水率、加载速率、围压下的不固结不排水三轴试验。结果表明:弹性模量与极限强度均随压实度降低、含水率升高及围压减小呈衰减趋势,但与加载速率之间表现为无显著规律的小幅波动。建立了复杂条件下路基黏土的莫尔-库仑强度准则,以描述路基黏土强度随各个因素的变化规律。总黏聚力和总内摩擦角因压实度提高及含水率降低而大幅提高,且总黏聚力随加载速率的增加先减小后增大,总内摩擦角随加载速率的增加先增大后减小,但两者因加载速率改变导致的变化幅度较小。提出了长沙黏土应力-应变曲线的统一表征方法,可合理描述应变软化、稳定及硬化 3 种变形曲线。

关键词:道路工程;路基压实黏土;应力-应变关系;弹性模量;极限强度;抗剪强度指标

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)05-1604-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230873

Shear properties and stress-strain relationships characterization of Changsha compacted clay

ZHANG An-shun^{1,2}, FU Wei³, ZHANG Jun-hui^{1,2}, GAO Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory for Highway Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China; 3. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: To investigate the shear properties and stress-strain relationships of subgrade compacted clay, a series of unconsolidated and undrained triaxial tests were carried out on Changsha clay under different degrees of compaction, moisture contents, loading rates and confining pressures. The results show that the elastic modulus and ultimate strength decay with the decrease of degree of compaction, the increase of moisture content and the decrease of confining pressure, but there is a slight fluctuation with the loading rate. The Mohr-Coulomb strength criterion of subgrade clay under complex conditions is established to describe the variation law of the strength of subgrade clay with various factors. The total cohesion and total

收稿日期:2023-08-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(52025085, 52338009);湘江实验室重大项目(22XJ01009);中交第二公路勘察设计院科研项目(KJFZ-2019-041);湖南省研究生科研创新项目(CX20210748).

作者简介:张安顺(1994-),男,高级工程师,博士.研究方向:耐久性路基设计理论与方法.

E-mail: cr11zhanganshun@163.com

通信作者:张军辉(1978-),男,教授,博士.研究方向:耐久性路基设计理论与方法. E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

internal friction angle increase significantly with the increase of degree of compaction and the decrease of moisture content. With the increase of loading rate, the total cohesion decreases first and then increases, and the total internal friction angle increases first and then decrease. However, the fluctuation amplitude of these two indexes is weak due to the change of loading rate. The unified characterization method on stress-strain curves of Changsha clay is proposed, which can reasonably describe the three types deformation curves with strain softening, stability and hardening.

Key words: road engineering; subgrade compacted clay; stress-strain relationship; elastic modulus; ultimate strength; shear strength parameter

0 引言

截至2022年底,我国公路通车里程超过535万km,其中高速公路通车里程17.7万km,居世界首位。在复杂环境与外界荷载影响下,路基土的抗剪能力弱化导致路基永久应变非安定累积^[1]、边坡失稳滑塌^[2]与过大沉降变形^[3]等问题频发,致使作为路面基础的路基未能发挥应有的坚实耐久等功能,造成道路结构出现车辙与开裂等病害,严重影响道路运输的稳定性与安全性。从病害产生的本源看,准确了解复杂条件下路基土的剪切特性是道路结构工作性能分析时的必要条件。

在降雨、边坡植被及行车动荷载等作用下,以最大密实状态为目标设计的路基湿度随时空变化发生显著变化,并逐渐增加至与气候、土质等相适应的平衡状态^[4,5]。路基湿度增加导致路基土含水率升高,这一湿化作用将改变路基土的剪切特性。刘寒冰等^[6]在100~300 kPa围压下对黏质土进行了三轴试验,发现含水率增加使试件的应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型转变,且弹性模量、极限强度、黏聚力及内摩擦角急剧衰减。Xu等^[7]亦选取了100~300 kPa的围压范围测试了粉质黏土的力学指标,指出湿度变化并未改变试件应变硬化型的应力-应变曲线形态,而含水率升高则导致试件的弹性模量显著降低。与此同时,路基压实度伴随路基湿度增加有所衰减的事实使压实度对路基土剪切特性的影响不容忽视。龙万学等^[8]与周春梅等^[9]分别采用200 kPa与300 kPa最大围压水平针对红黏土与黄土开展的三轴试验结果显示,随着压实度增大两种土的黏聚力与内摩擦角均有不同程度提高,且应力-应变曲线逐渐由应变硬化型变为应变软化型,并借助Duncan-Chang双曲线模型对硬化型曲线予以拟合,

但未给出软化型曲线的描述方法。目前,围压对土体剪切特性的影响已得出较为普遍的结论,具体表现为更高的围压水平下土体的弹性模量与极限强度更大,应力-应变曲线的硬化程度也越明显^[10-12]。此外,水利、交通及地下空间等各类工程中不同施工速度对土体剪切特性的加载速率效应逐渐成为研究人员持续关注的热点问题。刘红玫等^[13]研究了不同含水率与围压下考虑加载速率变化的黄土剪切特性,认为黄土剪切特性受加载速率影响甚微。邓亚虹等^[14]选择了17%、20%及23.5% 3种含水率,在100~300 kPa的围压范围内考察了加载速率每分钟0.125%、0.25%、1.25%及2.5%条件下原状黄土的剪切特性,提出了加载速率临界值的概念,临界值内随加载速率的减缓极限强度、黏聚力及内摩擦角有所减小,且加载速率增高可使硬化型曲线过渡为软化型曲线。这些结论与Toyota等^[15]和林波等^[16]得到的不同加载速率下黏性土的试验规律相一致。

现有成果为深入了解复杂条件下路基土的剪切特性提供了有益参考,但存在三个方面的局限性:①围压水平,已有研究选取的围压水平通常可至数百千帕,与实际情况下道路路基围压较低的特点有所偏差,对试验围压的选择有待调整;②加载速率,已有研究设置的部分研究水平与现行《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中规定的不固结不排水三轴试验每分钟0.5%~1.0%的剪切速率范围出入较大,所得结论对路基工程的适用性值得商榷;③本构关系,双曲线模型可有效描述应变硬化曲线,但对于多个因素共同影响下不同类型应力-应变关系的统一描述目前还少见报道。

为解决上述问题,本文以长沙黏土为研究对象,开展道路路基场景下考虑压实度、含水率、加载速率及围压变化的三轴试验,分析各因素对其

剪切特性的影响特点,并针对应变软化、稳定及硬化型应力-应变关系提出统一表征方法。

1 试验概况

1.1 土样指标与试件制备

按现行《公路土工试验规程》,测定了表 1 所示试验黏土的界限含水率、最佳含水率、最大干密度、颗粒级配与比重等指标。

表 1 试验黏土基本工程参数

液限 /%	塑限 /%	塑性指数	最佳含水率 /%	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	0.075 mm 通过率 /%	比重
52.4	25.5	26.9	14.4	1.73	67.7	2.66

在最佳含水率(Optimum moisture content, OMC)情况下填筑压实的路基土,运营期受晴雨交替持续影响导致其含水率有所升高并最终稳定在平衡含水率附近。本团队^[17,18]通过大量现场开挖所得数据发现黏性土的平衡含水率约为塑限的 0.9 倍,为此结合表 1 中结果将试件的含水率设置为 1.0OMC、1.2OMC、1.4OMC、1.6OMC 以代表黏性土路基可能的湿度范围。姚占勇等^[19]对 12 条高速公路的压实度检测后指出运营多年的路基压实度相较于填筑初期的最大衰减量约为 10%,结合《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定的压实度要求,本文将试件的压实度设置为 96%、93%、90%、87%。试件制备时,采用自制的对开模分 5 层均匀静压成直径 100 mm、高度 200 mm 的圆柱型试件,前 4 层压实结束后使用刮刀将表面拉毛以保证层间紧密连接。脱模后用保鲜膜包裹试件并静置 1~3 d 使试件湿度均匀,随后进行三轴试验。

1.2 三轴试验方案

文献^[20—22]表明:30~120 kPa 能够基本代表我国常见路基填高对应的围压水平,故试验围压选定为 30、60、90、120 kPa。由于黏性土路基施工过程中因重型压实机具所致的快速超固结应力历史和黏性土的低渗透特性,以及所处环境与行车荷载特征,运营期黏性土路基的固结变形一般仅在动荷载施加瞬间有所增大,之后通常需要很长时间才能固结完成,因此,采用不固结不排水的加载方式考察黏性土在短时加载条件下的剪切特性。加载速率根据《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)的规定范围取每分钟 0.50%、

0.70%、0.85% 及 1.00%。试验方案设计如表 2 所示,试件总数共计 40 个。采用意大利 WF 公司生产的 Dynatriax-100/14 三轴测试系统,该设备提供的静荷载最大值为 100 kN,围压最大值为 1 000 kPa,应力误差控制达 0.01 kPa,控制加载速率精度至 0.01 μm/min。当轴向应变达到 15% 时加载停止,主要流程如图 1 所示。

表 2 三轴试验方案

Table 2 Scheme for triaxial test

组号	压实度 /%	含水率 / OMC	加载速率 / (%×min ⁻¹)	围压 / kPa
1	96	1.0(14.4%)	0.70	30、60、90、120
2	93	1.0(14.4%)	0.70	30、60、90、120
3	90	1.0(14.4%)	0.70	30、60、90、120
4	87	1.0(14.4%)	0.70	30、60、90、120
5	96	1.2(17.3%)	0.70	30、60、90、120
6	96	1.4(20.2%)	0.70	30、60、90、120
7	96	1.6(23.0%)	0.70	30、60、90、120
8	96	1.2(17.3%)	0.50	30、60、90、120
9	96	1.2(17.3%)	0.85	30、60、90、120
10	96	1.2(17.3%)	1.00	30、60、90、120

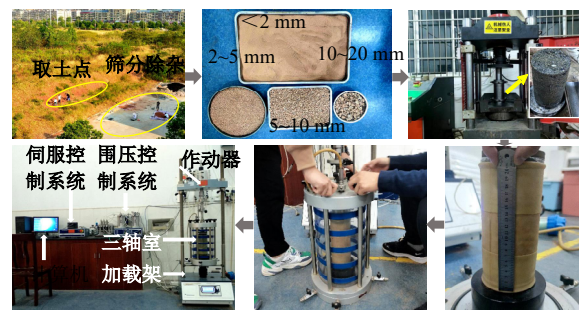


图 1 三轴试验流程

Fig. 1 Flow chart of triaxial test procedure

2 试验结果分析

2.1 应力-应变关系

图 2 与图 3 分别为不同压实度与围压下试件的应力-应变曲线和剪切破坏形态。由图可知,不同压实度的试件在各级围压下荷载响应类型均表现为应变软化。同时,加载结束后的试件均呈现脆性破坏,试件表面普遍观察到较为清晰的破裂面。因此,压实度变化并未改变试件的应力-应变曲线类型与破坏形态。此外,可以发现当压实度与围压增大时,应力-应变曲线上移,同一轴向应变对应的轴向应力升高,表明试件抵抗变形能力有所增强。

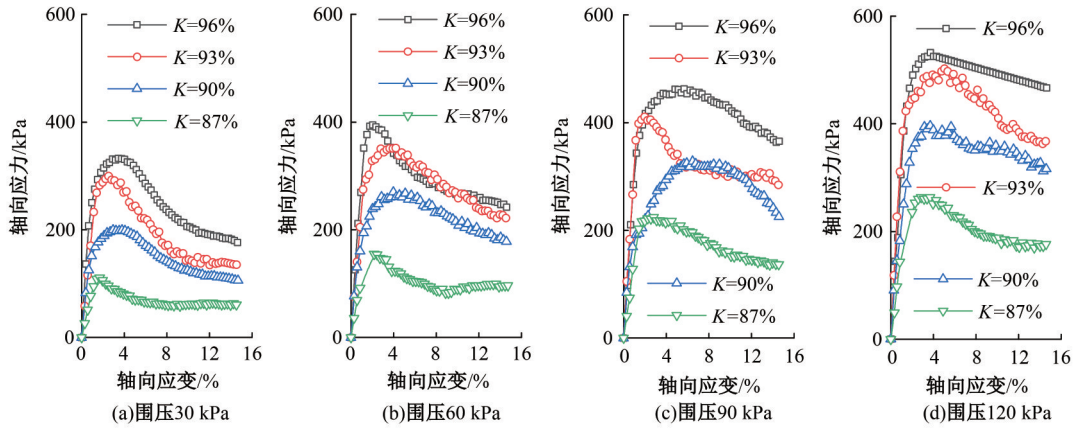


图 2 不同压实度下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves under different degrees of compaction

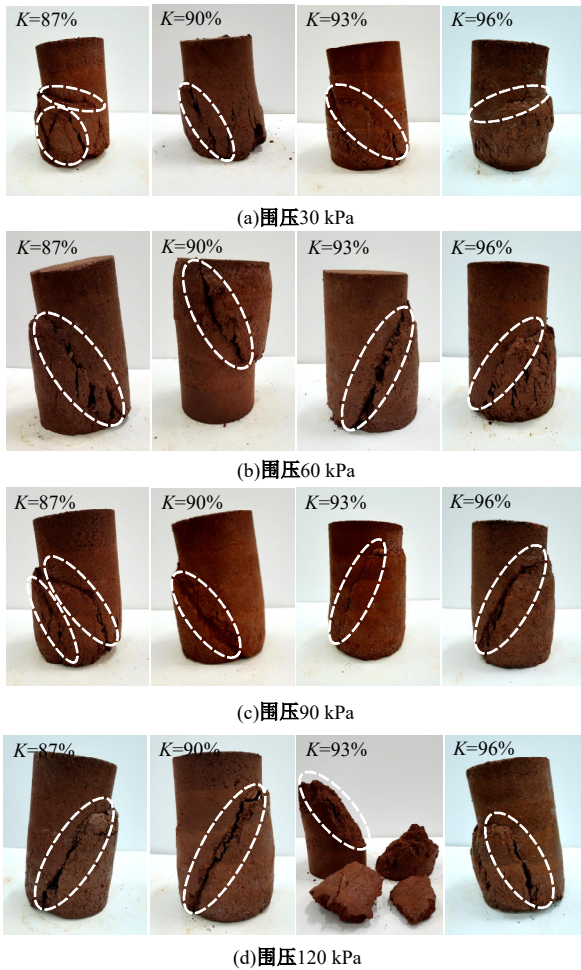


图 3 不同压实度下的破坏形态

Fig. 3 Failure modes under different degrees of compaction

图 4 与图 5 分别为不同含水率与围压下试件的应力-应变曲线和剪切破坏形态。由图可知,随着含水率的升高,试件的软化程度有所降低,应力-应变曲线由应变软化向应变稳定或应变硬化

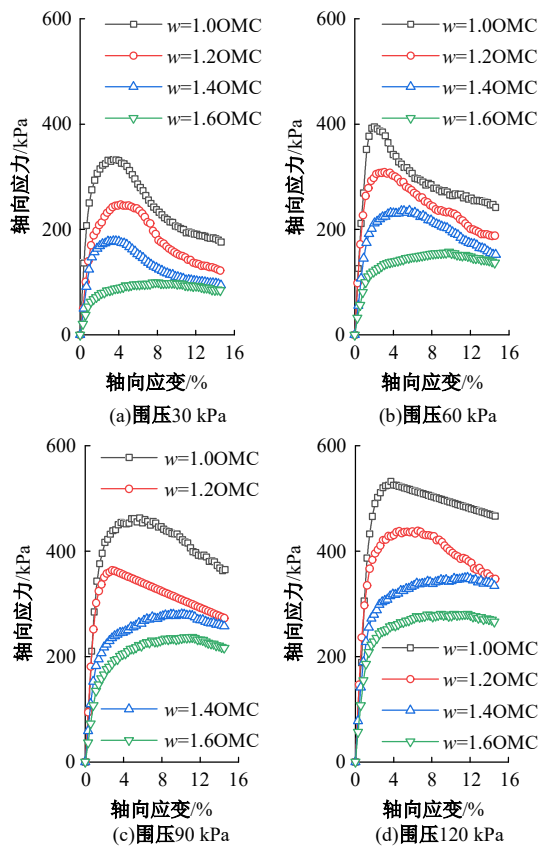


图 4 不同含水率下的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under different moisture contents

型过渡,且破坏形态由局部的脆性破坏转变为全面的鼓胀型塑性破坏。同时,含水率升高使相同状态下轴向应力减小,试件强度降低。此外,分析发现围压 30 kPa 与 60 kPa 时试件的应力-应变曲线出现转型的湿度范围为 1.4OMC~1.6OMC,而围压 90 kPa 与 120 kPa 时应力-应变曲线在 1.2OMC~1.4OMC 范围内已由应变软化转为应变稳定型,

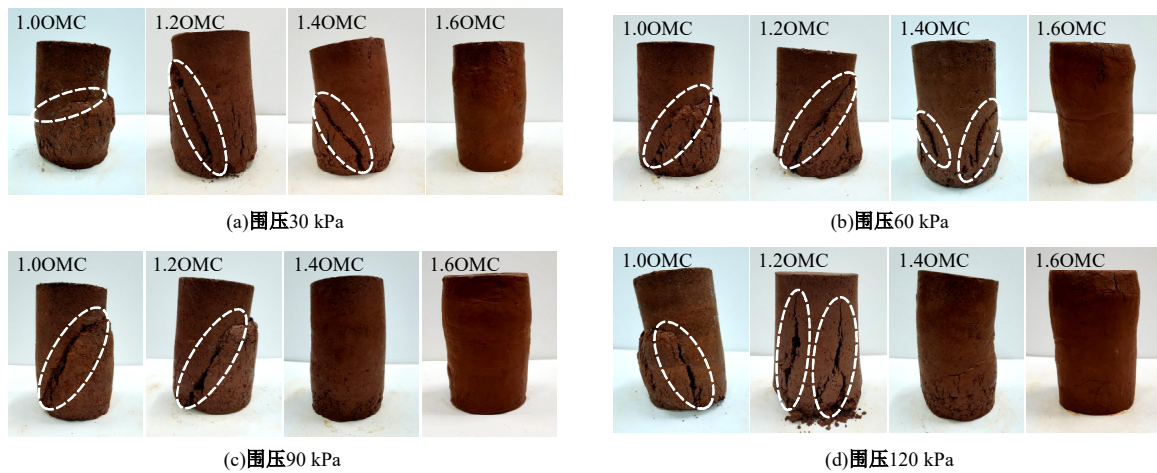


图 5 不同含水率下的破坏形态

Fig. 5 Failure modes under different moisture contents

说明湿化作用对应力-应变关系的影响受围压水平牵制,围压水平越高,湿化作用越明显。

图 6 与图 7 分别为不同加载速率与围压下试件的应力-应变曲线和剪切破坏形态。由图可知,相同围压下采用不同加载速率得到的应力-应变

曲线较为接近,试件均有明显的剪切破裂面。换言之,加载速率对试件的应力-应变曲线类型与破坏形态影响较小,这与文献[13]中土体剪切特性受加载速率影响微弱的结论相一致,但与文献[14-16]中的结果存在区别,可能是本研究根据公

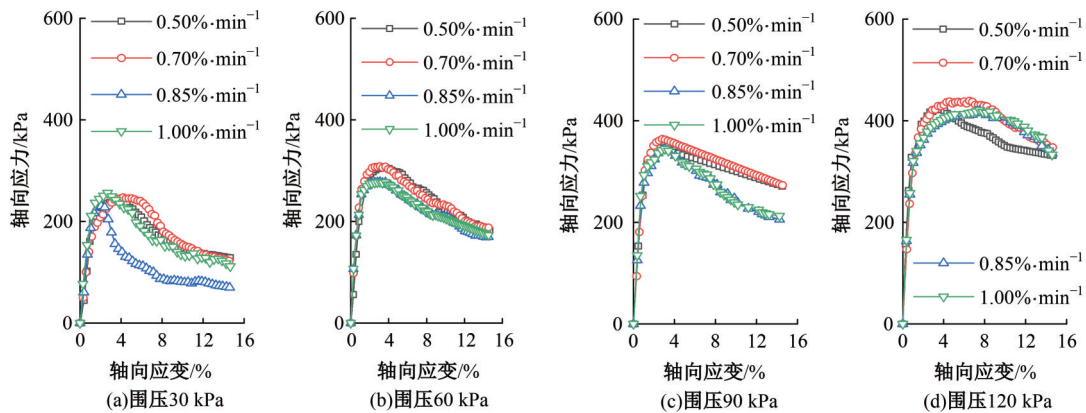


图 6 不同加载速率下的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves under different loading rates

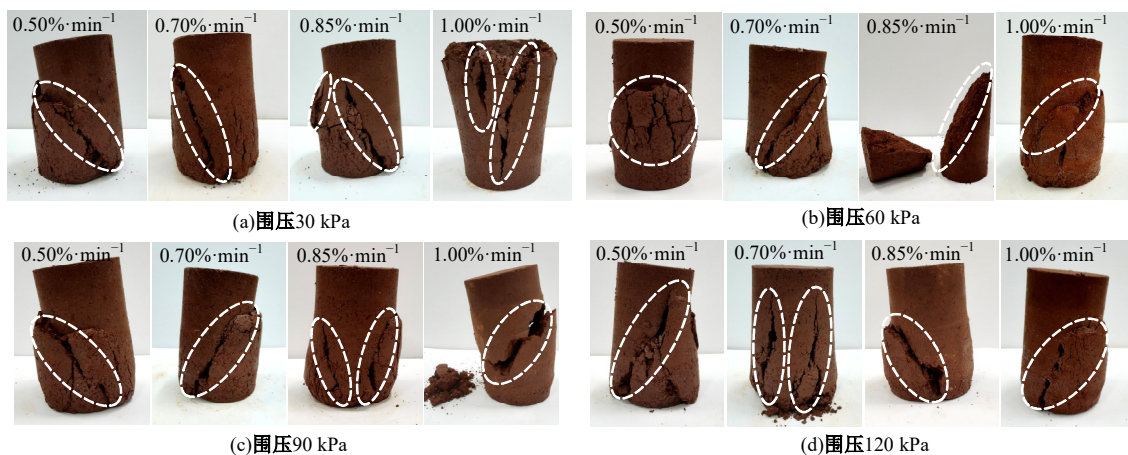


图 7 不同加载速率下的破坏形态

Fig. 7 Failure modes under different loading rates

路路基实际特点采用的围压和加载速率水平与已有文献的试验条件差异较大所致。

2.2 弹性模量

弹性模量定义为土体弹性变形阶段的轴向应力增量与轴向应变增量的比值,广泛应用于岩土体的弹塑性计算分析。不同影响因素下的弹性模量测试结果如图 8 所示。以图 8(a)中围压 60 kPa 为例,当压实度由 87% 增大至 90%、93% 与 96% 时,弹性模量分别增大 28.9%、108.6%、119.5%。由图 8(b)可以看出,含水率升高导致弹性模量急剧减小,伴随着含水率由 OMC 逐渐升高至 1.6OMC,不同围压对应的弹性模量衰减幅度达 46.5%~77.7%,鉴于此,可考虑在湿热地区路基工程中采取垫层或包边等措施^[23]控制路基湿度。而图 8(c)中并未观察到弹性模量与加载速率之间显著的变化规律,不同围压下的弹性模量随加载速率增加出现较小幅度的上下波动。此外,图 8(a)~(c)均表明围压越大,弹性模量越大,说明围压升高有助于提升土体刚度。

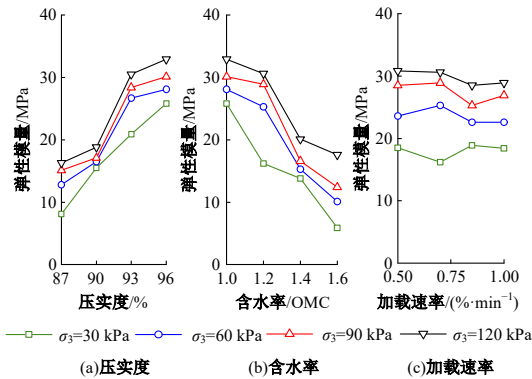


图 8 不同影响因素下的弹性模量

Fig. 8 Elastic modulus under different influence factors

2.3 极限强度

对应变软化曲线,取峰值点对应的轴向应力为极限强度;对应变稳定或硬化曲线,以轴向应变达到 15% 时的轴向应力为极限强度。据此,得到了图 9 所示不同因素影响下的极限强度。由图 9(a)可知,极限强度随压实度的增大而增大,但增大速率逐渐减缓。由图 9(b)可知,除围压 90 kPa、含水率 1.4OMC 时的极限强度因试件离散性原因导致规律有轻微偏差,其余工况对应的极限强度与含水率基本呈线性负相关变化关系。图 9(c)表明加载速率对极限强度影响较小,同一围压下可取均值。除此之外,围压增大使试件的极限强度持续提高。

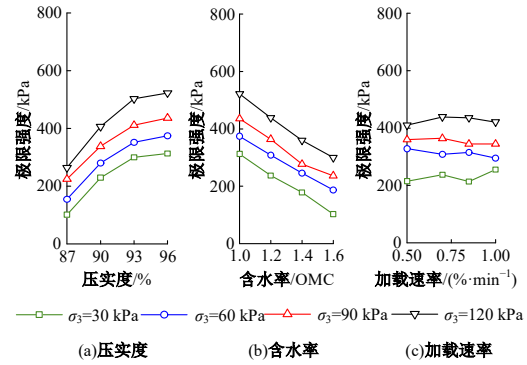


图 9 不同影响因素下的极限强度

Fig. 9 Ultimate strengths under different influence factors

根据图 9 所示的试验规律,采用对数函数描述极限强度与压实度之间增大速率逐渐减缓的非线性变化规律,采用直线函数描述极限强度与含水率和围压之间的线性变化规律,提出了式(1)所示的预估模型。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = a \ln(bK + c) \left(d \frac{w}{OMC} + e \right) (f\sigma_3 + g) \quad (1)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为极限强度; K 为压实度; w 为实际含水率; OMC 为最佳含水率; σ_3 为围压; 参数 $a \sim g$ 均可由极限强度试验结果对影响因素回归确定。

需要说明的是,因加载速率对极限强度影响较小,这里不将加载速率作为模型变量。为考察式(1)的合理性,还提取了文献[8-10, 24, 25]中其他学者的极限强度试验结果对式(1)予以验证,回归结果见表 3。可以看出,式(1)对 5 种不同黏土的极限强度的描述精度均超 90%,且模型中反映各因素影响情况的关键参数 b, d, f 的正负也符合图 9 所示的试验规律,因此,提出的预估模型对黏土极限强度具有较广泛的适用性。值得指出的是,由于砂土与黏土的强度成因存在差异,导致式(1)对文献[25]中砂土结果的预估精度偏低,需谨慎使用。

莫尔-库仑强度理论在土体强度理论中使用最为广泛,但传统莫尔-库仑强度准则未能直接将压实度、含水率及围压的影响全面体现。由莫尔-库仑强度理论,莫尔应力圆方程如式(2)所示:

$$f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3) = \left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 = 0 \quad (2)$$

表 3 提出的极限强度预估模型验证结果

Table 3 Verification results of the proposed ultimate strength prediction model

数据来源	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>R</i> ²
本研究(黏土)	4.97	456.75	-391.51	-1.32	2.81	0.09	7.41	0.97
文献[8](黏土)	4.88	0.19	0.85	-91.99	185.09	0.22	24.39	0.93
文献[9](黏土)	1.92	1.61	0.03	-20.04	46.72	0.09	4.94	0.99
文献[10](黏土)	2.36	2.14	-0.14	-5.49	13.02	0.32	6.71	0.98
文献[24](黏土)	0.01	3.52	-1.44	-767.09	1386.48	0.29	58.94	0.96
文献[25](砂土)	8.66	1.47	-0.29	-72.61	102.14	0.05	26.06	0.85

式中:σ为剪切面上的正应力;τ为剪切面上的剪应力;σ₁为大主应力。

当土体达到极限强度时,式(1)可改写为:

$$g(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_3 - a \ln(bK + c) \left(d \frac{w}{OMC} + e \right) (f\sigma_3 + g) = 0 \quad (3)$$

由包络线定理^[26],有:

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 - \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_3 + af\sigma_3 \ln(bK + c) \left(d \frac{w}{OMC} + e \right)}{2 + af \ln(bK + c) \left(d \frac{w}{OMC} + e \right)} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right]^2} \quad (6)$$

式(5)(6)为直接反映压实度、含水率及围压影响的路基黏土莫尔-库仑强度准则,结合表3中

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \frac{\partial g}{\partial \sigma_3} - \frac{\partial f}{\partial \sigma_3} \frac{\partial g}{\partial \sigma_1} = 0 \quad (4)$$

联立式(2)~(4),则有:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 + af\sigma_3 \ln(bK + c) \left(d \frac{w}{OMC} + e \right)}{2 + af \ln(bK + c) \left(d \frac{w}{OMC} + e \right)} \quad (5)$$

本研究的模型参数,计算得到图10~图12所示不同影响因素下的抗剪强度包络线,发现与莫尔应

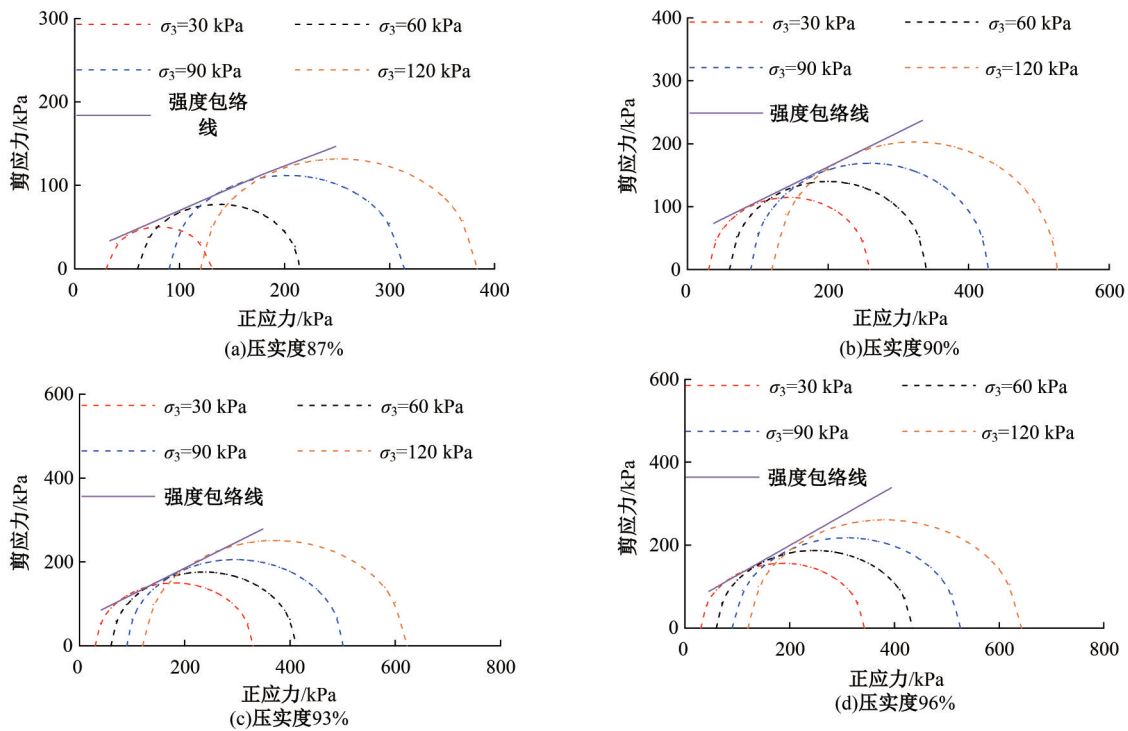
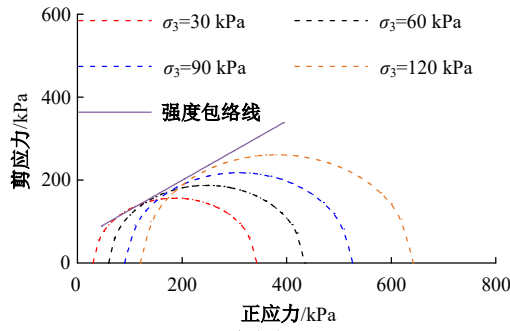
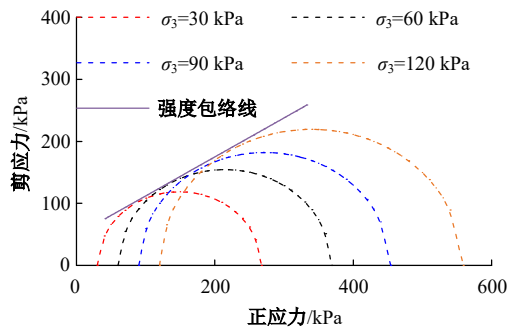


图 10 不同压实度下的莫尔半圆及抗剪强度包络线

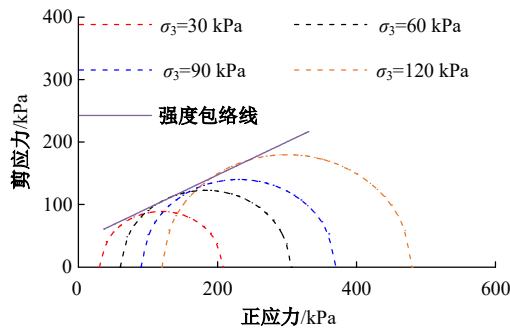
Fig. 10 Mohr's semicircles and shear strength envelopes under different degrees of compaction



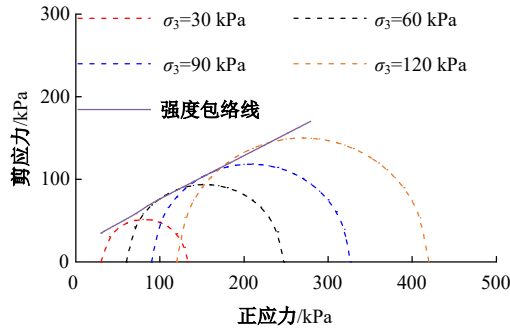
(a)含水率1.0OMC



(b)含水率1.2OMC



(c)含水率1.4OMC



(d)含水率1.6OMC

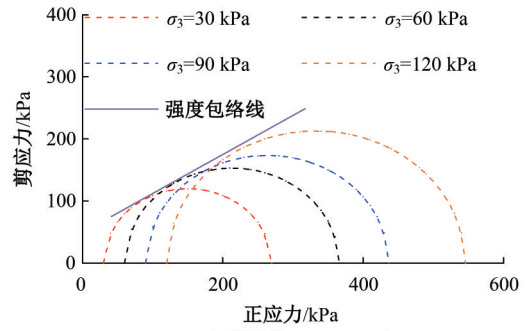
图 11 不同含水率下的莫尔半圆及抗剪强度包络线

Fig. 11 Mohr's semicircles and shear strength envelopes under different moisture contents

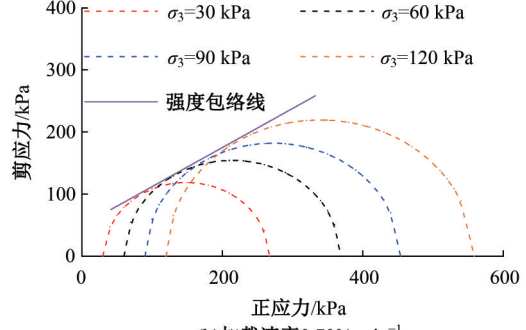
力半圆可基本吻合,表明式(5)(6)可以合理描述路基黏土强度随各因素的变化关系。

2.4 抗剪强度指标

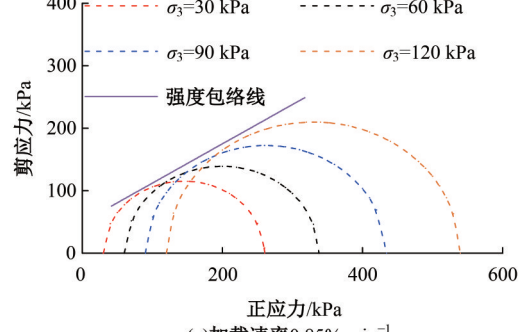
路基土的抗剪强度取决于诸多因素,为使工



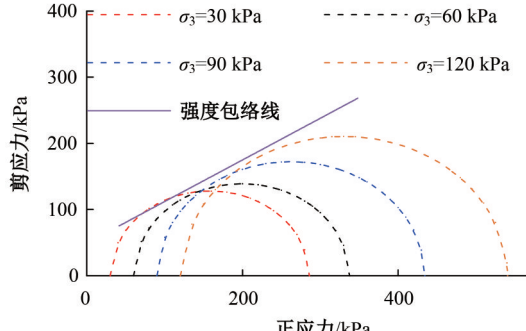
(a)加载速率0.50%·min⁻¹



(b)加载速率0.70%·min⁻¹



(c)加载速率0.85%·min⁻¹



(d)加载速率1.00%·min⁻¹

图 12 不同加载速率下的莫尔半圆及抗剪强度包络线

Fig. 12 Mohr's semicircles and shear strength envelopes under different loading rates

程应用简便,以总黏聚力和总内摩擦角作为抗剪强度指标的应用最多。图 13 为各因素下试件的抗剪强度指标,由图 13(a)可知,试件的总黏聚力与总内摩擦角随压实度增大而增大,当压实度由 87% 增大至 96% 时,两者分别增大 313.6% 与

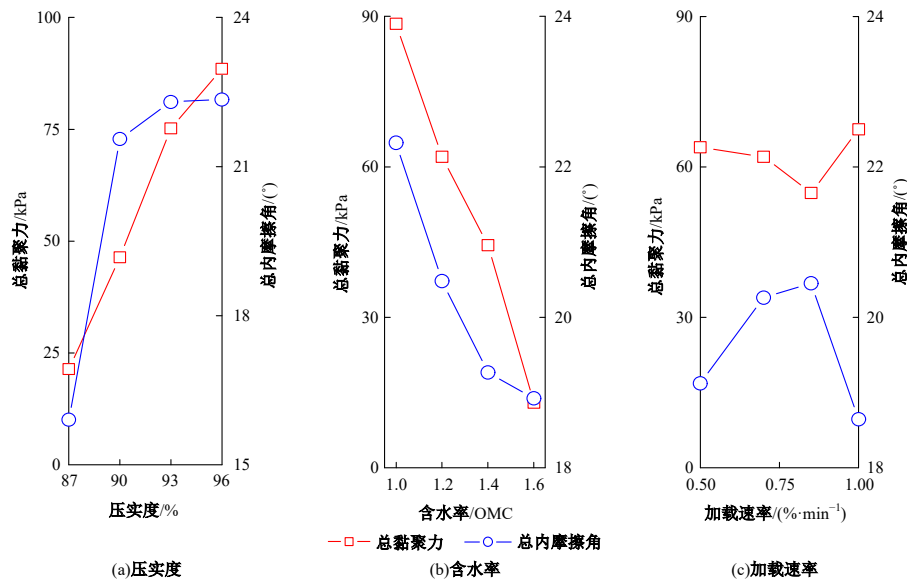


图 13 不同影响因素下的抗剪强度指标

Fig. 13 Shear strength parameters under different factors

40.6%，究其原因在于压实度增加使土颗粒之间的距离减小，颗粒间咬合摩擦等相互作用增强，且土体空隙间的水分减少，导致土颗粒间获得了更紧密的联结程度，因此，试件的总黏聚力与总内摩擦角随之增大，这一规律与文献[8,9,24]所得结论相一致。由图 13(b)可知，湿化作用下试件的抗剪强度指标显著降低，当含水率由 OMC 升高至 1.6OMC 时，总黏聚力与总内摩擦角分别减小 85.3% 与 15.2%，原因在于随含水率升高土颗粒表面的结合水膜厚度增加，导致颗粒间的联结作用弱化，同时，水膜的润滑作用有所增强，减小了荷载作用下土颗粒间的滑动阻力，相应的抗剪能力也随之下降，在刘寒冰等^[6]对长春黏土、李晶晶等^[27]对哈尔滨黏土及周葆春等^[28]对荆门黏土的试验结果中均发现了相同规律。由图 13(c)可知，抗剪强度指标随加载速率并非单调变化，而是以 0.85%·min⁻¹为节点：当加载速率小于 0.85%·min⁻¹时，总黏聚力随加载速率的增大而减小，总内摩擦角随加载速率的增大而增大；当加载速率大于 0.85%·min⁻¹时，总黏聚力随加载速率的增大而增大，总内摩擦角随加载速率的增大而减小，但需明确本研究中加载速率对抗剪强度指标的影响不大，当加载速率由 0.50%·min⁻¹提升至 1.00%·min⁻¹，总黏聚力与总内摩擦角的最大变化为量仅 12.4 kPa 与 1.8°。

3 应力-应变关系表征

除试验研究以外，建立数学模型有助于更清

晰地认识土体的应力-应变关系。由图 2、图 4 及图 6 可知，不同工况下的应力-应变曲线具有应变软化、稳定及硬化 3 种形态，仅使用经典的本构关系（如 Duncan-Chang 硬化曲线模型以及 Prevost^[29]软化曲线模型等）均无法对其全面描述。而文献[30]提出的修正双曲线模型虽然被证明能够描述土体不同类型的变形曲线，其表达式如下：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{l\varepsilon^2 + m\varepsilon + n} \quad (7)$$

式中： ε 为轴向应变； l, m, n 为模型参数。

仅含有应力变量的模型无法满足对考虑压实度及含水率等影响的应力-应变曲线统一描述。为使不同条件下长沙黏土的应力-应变关系能被统一表达，先使用式(7)对本研究的应力-应变曲线测试结果予以辨识，得到多种工况下不同的模型参数 l, m, n ，再建立模型参数与各个影响因素之间的函数关系。

将表 2 中 40 种工况对应的应力-应变试验结果分两部分独立使用，其中 32 种用于模型优化，另外 8 种用于模型验证。其中，所选取的 8 种验证工况包含了不同影响因素的各个水平和不同类型的剪切曲线，可全面验证模型的准确性与适用范围。用式(7)对 32 种工况的应力-应变试验结果拟合，限于篇幅拟合结果并未罗列。因前述分析得出加载速率对试件剪切特性的影响较小，这里未将加载速率作为影响模型参数的变量之一。由于量级，在模型参数之前设置了适当的系数，建立

了式(8)~(10)所示修正双曲线模型的参数 l 、 m 、 n 与压实度、含水率及围压的回归关系,预测精度示于图 14。

$$10^2 \times l = 57.84 \exp(-15.18K + 1.78) \times \left[3.95 \ln\left(\frac{w}{\text{OMC}}\right) + 0.75 \right] \exp(-0.02\sigma_3 + 10.46) \quad (8)$$

$$10^3 \times m = 0.24 \exp(-11.88K + 5.71) \times \exp\left(2.17 \frac{w}{\text{OMC}} + 5.74\right) (8.52\sigma_3^{-0.62} - 0.06) \quad (9)$$

$$10^5 \times n = 0.55(-3.41K + 3.78) \times \exp 1.8 \left(9 \frac{w}{\text{OMC}} + 0.37 \right) (-0.54 \ln \sigma_3 + 2.99) \quad (10)$$

式(7)~(10)为长沙黏土应力-应变关系的统一表征模型。为验证模型的合理性,选取了另外 8 种工况,具体罗列于图 15。将压实度、含水率与围压代入式(7)~(10)得到应力-应变曲线的计算值(虚线),发现与实测值(空心点)较为接近,说明式(7)~(10)能够对长沙黏土不固结不排水三轴试验结果统一描述。

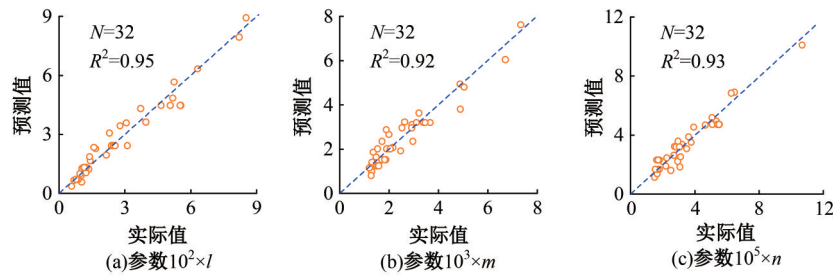


图 14 修正双曲线模型参数的预测效果

Fig. 14 Prediction effect of parameters of the modified hyperbolic model

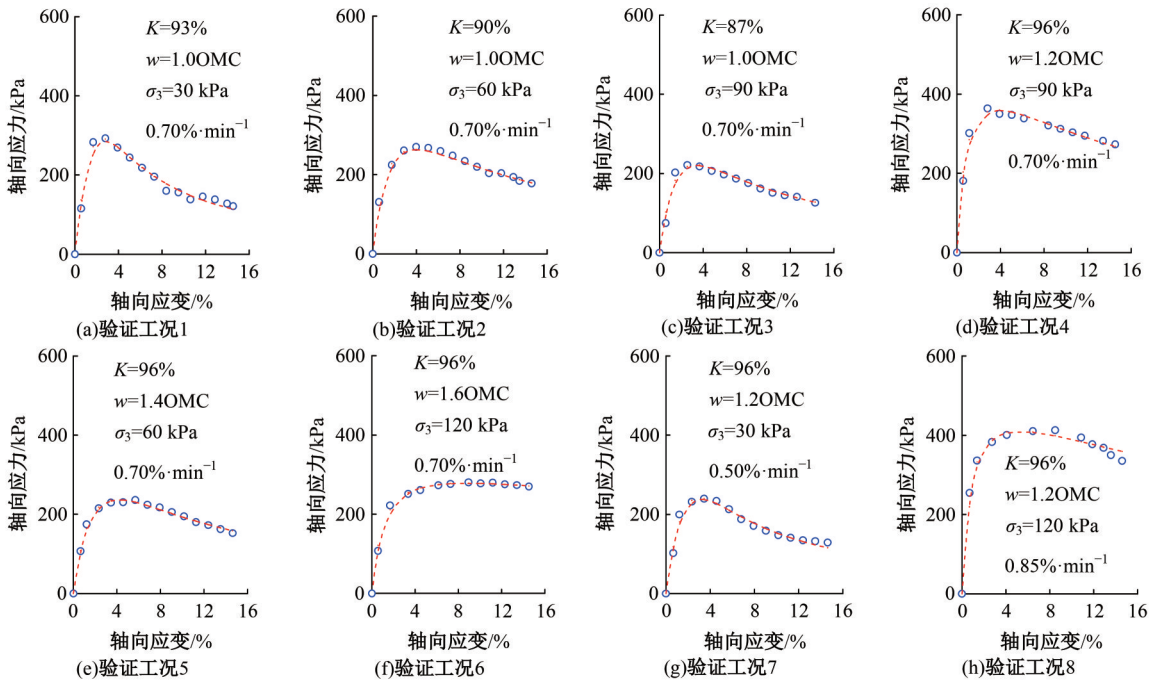


图 15 长沙黏土应力-应变统一表征模型的验证结果

Fig. 15 Verification results of unified stress-strain characterization model of Changsha clay

4 结 论

(1)不同压实度下长沙黏土的应力-应变曲线均为应变软化型。湿化作用使应力-应变曲线由

应变软化向应变稳定或应变硬化型过渡,土样由脆性破坏转变为塑性破坏。《公路土工试验规程》规定范围内,不同加载速率下的应力-应变曲线较

接近。

(2)弹性模量与极限强度随压实度增大、含水率降低及围压升高有所提高,但随加载速率表现为无明显规律的小幅波动。建立了考虑压实度、含水率与围压影响的路基黏土莫尔-库仑强度准则,可以描述路基黏土剪切强度随不同因素的变化规律。

(3)压实度提高与含水率降低均导致总黏聚力与总内摩擦角增大。加载速率对抗剪强度指标的影响存在临界值,低于该临界值时总黏聚力随加载速率的增大而减小、总内摩擦角随加载速率的增大而增大,高于该临界值时则有相反规律,但总体而言因加载速率变化所致两个指标的变化范围较小。

(4)综合分析加载速率对剪切特性的影响程度,可在每分钟 0.5%~1.0% 的范围内选取任一加载速率测试路基黏土的力学指标用于工程设计。此外,建立的长沙黏土应力-应变关系表征模型,可对不同压实度、含水率与围压下的应变软化、稳定及硬化曲线统一描述,所得计算值与实测值较为接近。

参考文献:

- [1] 张哲,付伟,张军辉,等. 循环荷载下冻融路基黏土长期塑性行为[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(6): 1790-1798.
Zhang Zhe, Fu Wei, Zhang Jun-hui, et al. Long-term characterising plastic behavior of thawed subgrade clay under cyclic loads[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1790-1798.
- [2] Yang K H, Uzuoka R, Thuo J, et al. Coupled hydro-mechanical analysis of two unstable unsaturated slopes subject to rainfall infiltration[J]. Engineering Geology, 2017, 216: 13-30.
- [3] Nhan T T, Matsuda H, Sato H, et al. Pore water pressure and settlement of clays under cyclic shear: effects of soil plasticity and cyclic shear direction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(2): No. 04021185.
- [4] Zhang J H, Li F, Zeng L, et al. Numerical simulation of the moisture migration of unsaturated clay embankments in southern China considering stress state [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 11-24.
- [5] 李岫,张安顺,张军辉,等. 级配碎石基层结构动力响应模型测试及数值分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(6): 1782-1789.
Li Jue, Zhang An-shun, Zhang Jun-hui, et al. Model testing and numerical analysis of dynamic response of graded crushed rock base structure[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1782-1789.
- [6] 刘寒冰,张互助,王静. 冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 158-164.
Liu Han-bing, Zhang Hu-zhu, Wang Jing. Effect of freeze-thaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 158-164.
- [7] Xu W B, Wang X C. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical strength and microstructure of silty clay in the Qinghai-Tibet plateau[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2022, 36(1):No. 04021018.
- [8] 龙万学,陈开圣,肖涛,等. 非饱和红黏土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 28-33.
Long Wan-xue, Chen Kai-sheng, Xiao Tao, et al. Research of general triaxial test for unsaturated red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup. 2): 28-33.
- [9] 周春梅,程月,王勇,等. 压实黄土抗剪强度参数影响因素研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 258-264.
Zhou Chun-mei, Cheng Yue, Wang Yong, et al. Study on influencing factors of shear strength parameters of compacted loess[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 258-264.
- [10] Wei C B, Apel D, Zhang Y H. Shear behavior of ultrafine magnetite tailings subjected to freeze-thaw cycles[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29: 609-616.
- [11] 詹良通,孙倩倩,郭晓刚,等. 花岗岩风化料弃土快速堆填过程中不排水抗剪强度评估[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 50-58.
Zhan Liang-tong, Sun Qian-qian, Guo Xiao-gang, et al. Estimation of undrained shear strength of completely decomposed granite waste during rapid landfilling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 50-58.

- [12] Zhang A S, Zhang J H, Peng J H, et al. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of an embankment clay: laboratory tests and model evaluations [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 865348.
- [13] 刘红玫, 钟秀梅. 黄土抗剪强度的三轴试验[J]. *地震工程学报*, 2011, 33(增刊1): 243-245.
Liu Hong-mei, Zhong Xiu-mei. Triaxial test on the shearing strength of loess[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2011, 33(Sup. 1): 243-245.
- [14] 邓亚虹, 魏宝华, 王晗, 等. 原状黄土变形与强度特性的加载速率效应[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(7): 22-29.
Deng Ya-hong, Wei Bao-hua, Wang Han, et al. Loading rate effect on deformation and strength characteristics of undisturbed loess[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(7): 22-29.
- [15] Toyota H, Takada S, Susami A. Rate dependence on mechanical properties of unsaturated cohesive soil with stress-induced anisotropy[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59: 1013-1023.
- [16] 林波, 张锋, 冯德成, 等. 冻融循环作用后饱和黏土的应变速率效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(7): 2007-2014.
Lin Bo, Zhang Feng, Feng De-cheng, et al. Experimental investigation on strain rate effects of saturated clay subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 2007-2014.
- [17] Zhang J H, Ding L, Zheng J L, et al. Deterioration mechanism and rapid detection of performances of an existing subgrade in southern China[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(7): 2134-2147.
- [18] 郑健龙, 张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(3): 1-10.
Zheng Jian-long, Zhang Rui. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(3): 1-10.
- [19] 姚占勇, 蒋红光, 孙梦林, 等. 细粒土路基平衡密度状态分析[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 94-103.
Yao Zhan-yong, Jiang Hong-guang, Sun Meng-lin, et al. Analysis of equilibrium density state of highway subgrade with fine soils[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 94-103.
- [20] Liu B H, Kong L W, Xu G F, et al. Effects of three-dimensional cyclic stresses on permanent deformation of natural undisturbed clay[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(12):04022220.
- [21] 臧濛, 孔令伟, 郭爱国. 静偏应力下湛江结构性黏土的动力特性[J]. *岩土力学*, 2017, 38(1): 33-40.
Zang Meng, Kong Ling-wei, Guo Ai-guo. Effects of static deviatoric stress on dynamic characteristics of Zhanjiang structured clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 33-40.
- [22] 王家全, 畅振超, 唐毅, 等. 循环荷载下加筋砾性土填料的动三轴试验分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2851-2860.
Wang Jia-quan, Chang Zhen-chao, Tang Yi, et al. Dynamic triaxial test analysis of reinforced gravel soil under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 2851-2860.
- [23] Zhang J H, Li F, Zeng L, et al. Effect of cushion and cover on moisture distribution in clay embankments in Southern China[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(7): 1893-1906.
- [24] 胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下压实度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1495-1503.
Hu Tian-fei, Liu Jian-kun, Fang Jian-hong, et al. Experimental study on the effect of cyclic freezing-thawing on mechanical properties of silty clay with different degrees of compaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1495-1503.
- [25] 严晗, 刘建坤, 王天亮. 冻融对粉砂土力学性能影响的试验研究[J]. *北京交通大学学报*, 2013, 37(4): 73-77.
Yan Han, Liu Jian-kun, Wang Tian-liang. Experimental research of influences of freeze-thaw on the mechanical properties of silty soil[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, 37(4): 73-77.
- [26] Yang Y G, Gao F, Lai Y M. Modified Hoek-Brown criterion for nonlinear strength of frozen soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 86: 98-103.
- [27] 李晶晶, 孔令伟, 凌贤长. 高铁堑坡粉质黏土原位强度特性与应力历史效应[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2019, 46(3): 99-105.
Li Jing-jing, Kong Ling-wei, Ling Xian-zhang. In-situ strength characteristics and stress history effect of silty soil on high-speed railway cut slope[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(3): 99-105.
- [28] 周葆春, 孔令伟, 马全国, 等. 压实膨胀土非饱和抗

- 剪强度的湿度与密度效应[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 240-246.
- Zhou Bao-chun, Kong Ling-wei, Ma Quan-guo, et al. Effects of moisture and density states on unsaturated shear strength of compacted expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup. 1): 240-246.
- [29] Prevost J, Hoeg K. Soil mechanics and plasticity analysis of strain softening[J]. Géotechnique, 1975, 25(2): 279-297.
- [30] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 187(8): 1612-1617.
- Lai Yuan-ming, Cheng Hong-bin, Gao Zhi-hua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 187(8): 1612-1617.