

湿化作用下路基高液限黏土永久变形研究

王曦辉,张来君,郑甲佳

(中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011)

摘要:为探究湿热地区高液限黏土在不同湿度及应力水平下的力学特性。该文以湿热地区高液限黏土为研究对象,开展不同湿度及应力水平条件下的动静三轴试验,测试其在不同含水率和围压条件下的应力-应变关系和永久变形特性。结果表明:路基低围压条件下,试样的应力-应变曲线表现为应变硬化型或应变稳定型,且试样的破坏强度随含水率的升高及围压的降低而减小。基于Konder双曲线模型,对静三轴试验得到的应力-应变关系予以归一化处理,建立能同时考虑含水率与围压影响的高液限黏土应力-应变方程。另一方面,试样的永久变形随偏应力升高而增大,与围压呈负相关,湿化作用会降低试样抵抗永久变形的能力。基于动静力测试结果,提出一种可合理反映剪切效应、约束作用及湿化损伤的路基土永久变形力学-经验预估模型,该模型预测精度较高。并通过其他学者的试验数据对模型进行验证,证明了其良好的适用性。

关键词:路基工程;高液限黏土;抗剪强度;永久变形

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Study on Permanent Deformation of Subgrade High Liquid Limit Clay under Wetting Effects

WANG Xihui, ZHANG Laijun, ZHENG Jiajia

(China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of high liquid limit clay under different humidity and stress levels in hot and humid regions, high liquid limit clay in hot and humid regions was studied. Dynamic and static triaxial tests were carried out under different humidity and stress levels to reveal the stress-strain relationship and permanent deformation properties across different water contents and confining pressures. The results show that under low confining pressures of the subgrade, the stress-strain curves of the specimens exhibit either strain hardening or strain stabilization, and the failure strength of the specimens decreases with increasing water content and decreasing confining pressure. Based on the Konder hyperbolic model, the stress-strain relationship obtained from the static triaxial test was normalized, and a stress-strain equation for high liquid limit clay was established that simultaneously considered the effects of both water content and confining pressure. The permanent deformation of the specimen increased with the increase in the deviatoric stress, which was inversely correlated with the confining pressure, and the ability of the specimens to resist permanent deformation decreased under wetting effects. Based on the dynamic and static test results, a mechanical-empirical prediction model was proposed to predict the permanent deformation of subgrade soil by taking into account the shear effect, restraint effect, and damage due to wetting effects. The model featured high prediction accuracy and had been validated using experimental data from other scholars, proving its good applicability.

Keywords: subgrade engineering; high liquid limit clay; shear strength; permanent deformation

0 引言

路基在柔性路面结构中最主要的作用是为路面结构提供支撑。一旦路基产生过大的塑性变形,上

部的路面结构将产生车辙、开裂等^[1-2]诸多病害。同时,复杂多变的气候环境对路基土的力学性能具有潜在威胁,现有研究表明:湿热地区路基在运营期间其含水率会逐渐增大并稳定在平衡含水率附近^[3-6],

收稿日期:2024-06-30(修改稿)

基金项目:中国路桥工程有限责任公司科研项目(编号:P2200001)

作者简介:王曦辉,男,工程师.E-mail:wangxihui2012@hotmail.com

湿度的升高使得路基土抵抗永久变形能力减弱。因此,深入了解湿化作用下路基土的永久变形特性对提升湿热地区道路服役水平具有重要意义。

目前,已有学者对路基土的永久变形演变规律开展研究。周文权等^[7]对不同围压下粗粒土进行了动三轴试验研究,结果表明:较低围压下,动应力幅值和加载次数对饱和粗粒土的动力变形有显著影响;丛林等^[8]开展了不同压实度及偏应力条件下的动三轴试验,发现压实度的升高会增强试样抵抗变形的能力,偏应力的增大加速了试样永久变形的发展;郑可扬等^[9]开展了不同应力条件下粗粒土的永久变形试验,数据显示围压恒定时粗粒土的轴向累积塑性应变值及其累积速率随偏应力的增大而增大。

明确永久变形演变规律后,学者们致力于建立有效的永久变形预估模型。其中,Monisimith等^[10]提出的指数模型,被学者们广泛应用并改进:

$$\epsilon_p = aN^b \quad (1)$$

式中: ϵ_p 为永久变形量; N 为循环次数; a 、 b 为回归系数。

Tseng等^[11]提出了式(2)所示的预估模型,将永久变形与弹性应变相互关联。

$$\epsilon_p = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N} \right)^\beta \epsilon_r} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 、 ρ 和 β 为材料参数; ϵ_r 为试验测得的弹性应变。

Ullidtz^[12]认为轴向应力是影响永久变形的重要因素。提出含轴向应力的永久变形预估模型:

$$\epsilon_p = \alpha_1 N^{\alpha_2} \left(\frac{\sigma_z}{p_a} \right)^{\alpha_3} \quad (3)$$

式中: σ_z 为有效轴向应力; p_a 为大气压强, $p_a=101.3$ kPa; α_1 、 α_2 、 α_3 为回归系数。

考虑到应力状态对路基土永久变形的显著影响,Puppala等^[13]提出了预估模型:

$$\epsilon_p = \alpha_1 N^{\alpha_2} \left(\frac{\sigma_{oct}}{p_a} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{\alpha_4} \quad (4)$$

式中: σ_{oct} 为体应力, $\sigma_{oct}=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$,其中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为大主应力、中主应力、小主应力(围压); τ_{oct} 为八面体剪应力, $\tau_{oct}=(\sqrt{2}/3)\sigma_d$, $\sigma_d=\sigma_1-\sigma_3$,即大主应力与小主应力之差; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为模型参数。

已有研究为合理解释路基土的永久变形提供了有益参考,但由于取土地域的差异,以上的研究成果在湿热地区并不一定适用。同时,已有模型多是对试验结果的数学拟合,缺乏塑性理论支撑,且部分模

型是基于无黏结颗粒材料提出的,对路基土的适用性尚需验证。而在湿热地区路基土永久变形受湿度变化影响显著,上述模型亦缺乏对湿度变化的考虑。为此,本文选取湿热地区常见的高液限黏土作为研究对象,开展静三轴试验以合理认识不同应力与湿度条件下土样的强度特性。然后,开展动三轴试验考察围压、偏应力和含水率对土样永久变形的影响规律,建立了综合考虑应力变量、湿度变量及加载次数的力学-经验预估模型,以期对路基在湿-力综合作用下的变形稳定分析提供有效参考。

1 试验内容和方法

1.1 试验材料

根据现行《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[14],通过室内试验得到试验所用高液限黏土的基本物理参数,如表1所示。

表1 试验用高液限黏土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of high liquid limit clay for test

最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/ %	塑限/ %	液限/ %	塑性指数 I_p
1.562	23.5	29.1	57.4	28.3

1.2 试验方案

基于已有学者对实际路基的现场实测湿度结果^[15],本研究设置最佳含水率 w_{OMC} 、 $1.1w_{OMC}$ 、 $1.2w_{OMC}$ 及 $1.3w_{OMC}$ 为试件的湿度水平。试件压实度统一设置为96%。试样直径为100 mm、高度为200 mm,分5层静压成型。静三轴试验围压的选取参考文献^[16]。静三轴试验工况如表2所示,采用不固结不排水UU三轴剪切试验,加载速率为0.6%/min,并在试样轴向应变达到20%时停止试验。

表2 静、动三轴试验方案

Table 2 Static and dynamic triaxial test schemes

试验方案	围压/kPa	偏应力/kPa	压实度/%	含水率
静三轴 试验	12,28,42	—	96	w_{OMC}
	12,28,42	—		$1.1w_{OMC}$
	12,28,42	—		$1.2w_{OMC}$
动三轴 试验	12,28,42	28,48,69	96	$1.3w_{OMC}$
	12,28,42	28,48,69		w_{OMC}
	12,28,42	28,48,69		$1.1w_{OMC}$
	12,28,42	28,48,69		$1.2w_{OMC}$
	12,28,42	28,48,69		$1.3w_{OMC}$

永久变形试验的围压与静三轴试验相同,偏应力水平设置为28 kPa、48 kPa和69 kPa(表2)。加载时采用应力控制的半正弦形荷载施加形式,荷载频率为1 Hz,其中,加载时间0.1 s,间歇时间0.9 s,加载次数为10 000次。

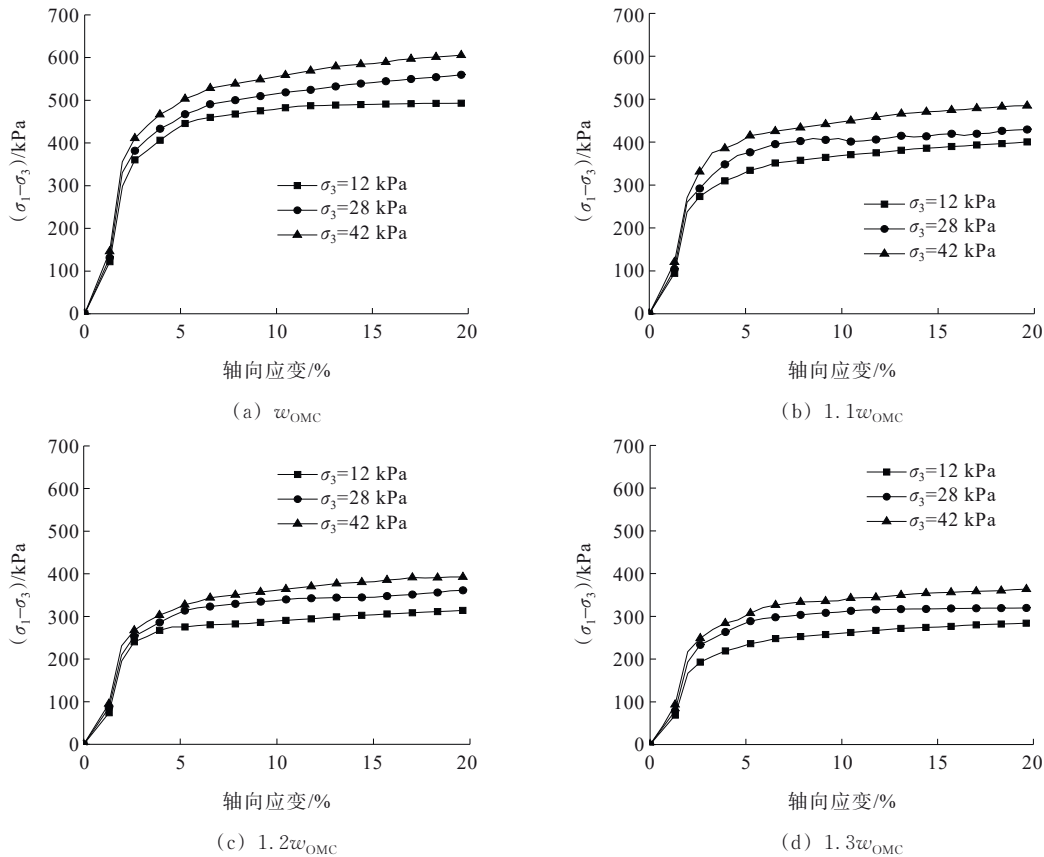


图1 不同含水率与围压下的高液限黏土应力-应变曲线

Figure 1 Stress-strain curve of high liquid limit clay under different water contents and confining pressures

由图1可知:含水率与围压水平的改变并未引发高液限黏土应力-应变曲线的形态发生改变,均表现为应变硬化型或应变稳定型。与此同时,含水率的升高或围压的降低均导致应力-应变曲线的空间位置有所下降,土体的抗变形能力发生衰减,这与以往学者们的试验规律相一致^[17-19]。

对于应变硬化型或应变稳定型应力-应变曲线,取轴向应变为15%时对应的偏应力作为破坏强度^[20],结果如图2所示。

由图2可知:高液限黏土的破坏强度均随含水率的升高而降低,以围压28 kPa为例,当含水率由 w_{OMC} 增长至 $1.3w_{OMC}$ 时,试样的破坏强度分别下降43.9%、41.2%、39.3%。此外,围压的增大有助于提高试样的破坏强度。

2 静三轴试验结果与分析

2.1 静三轴试验结果

不同工况下的高液限黏土应力-应变关系曲线如图1所示。

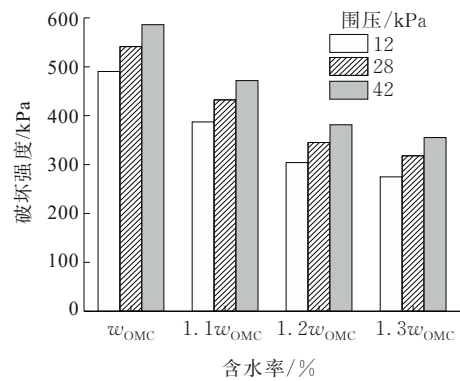


图2 不同含水率与围压下的高液限黏土静三轴破坏强度
Figure 2 Static triaxial failure strength of high liquid limit clay under different water contents and confining pressures

2.2 应力-应变归一化分析

Konder双曲线模型可用于描述应变硬化型或应

变稳定型应力-应变关系,但由于双曲线模型的限制,在围压和含水率作为试验变量时,需要对各工况分开拟合,显著增加了试验结果分析时的工作量,因此本文采用归一化方法将围压与含水率作为变量对双曲线模型予以改进。

Konder 双曲线方程如下:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a\epsilon_1 + b} \quad (5)$$

式中: a 为主应力差的极限值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数; b 为初始切线模量 E_0 的倒数; ϵ_1 为竖向应变。

式(5)可变形为:

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a\epsilon_1 + b \quad (6)$$

式(6)两边同时乘归一化因子 N 可得:

$$\frac{N\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = aN\epsilon_1 + bN \quad (7)$$

归一化因子 N 应满足以下条件:

$$aN = \frac{N}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = C_1 \quad (8)$$

$$bN = \frac{N}{E_0} = C_2 \quad (9)$$

式中: C_1 、 C_2 均为常数。

进一步将式(7)转化为:

$$\frac{N\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = C_1\epsilon_1 + C_2 \quad (10)$$

由式(8)及式(9)可知,归一化因子既要与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 呈线性关系,也要与 E_0 呈线性关系。由 Konder 模型分析结果(图 3)发现, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 与 E_0 呈显著的线性关系,与此同时,若选用 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 作为归一化因子,则必然满足式(8),基于此,本文选取 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为归一化因子。

$$E_0 = 0.0254(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (11)$$

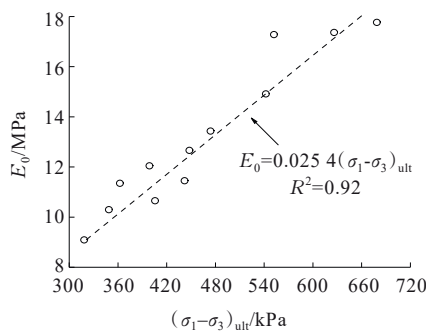


图 3 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 与 E_0 的关系

Figure 3 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ and E_0

由 Konder 模型对试验数据的拟合分析见表 3。由表 3 可知:主应力差极限值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 受到含水率及

围压的影响,因此,采用双乘幂模型进行拟合,如式(12)所示:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 350.007 \left(\frac{w}{w_{OMC}} \right)^{-2.042} \sigma_3^{0.166} \quad (12)$$

联立式(10)、(11)及式(12)可得归一化方程为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1 \left[350.007 \left(\frac{w}{w_{OMC}} \right)^{-2.042} \sigma_3^{0.166} \right]}{0.0254 + \epsilon_1} \quad (13)$$

用式(13)预测不同围压及含水率下的应力-应变关系曲线,预测结果见图 4。

表 3 Konder 双曲线对应力-应变曲线拟合关系

Table 3 Fitting relationship of Konder hyperbolic stress and strain curves

$\sigma_3 /$ kPa	w/w_{OMC}	$a/10^{-5}$	$b/10^{-3}$	$E_0 /$ kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} /$ kPa	R^2
12	1.0	7.003	1.812	14 280	552	0.996
28	1.0	6.111	1.597	16 366	626	0.996
42	1.0	5.627	1.473	17 770	678	0.997
12	1.1	7.897	2.233	12 663	448	0.975
28	1.1	7.445	2.109	13 431	473	0.986
42	1.1	6.703	1.845	14 918	542	0.977
12	1.2	9.712	2.867	10 296	348	0.995
28	1.2	8.301	2.507	12 046	398	0.991
42	1.2	8.731	2.263	11 453	441	0.998
12	1.3	9.879	3.141	9 093	318	0.993
28	1.3	9.384	2.761	10 657	362	0.987
42	1.3	8.811	2.465	11 349	406	0.998

注: w 为含水率; w_{OMC} 为最佳含水率。

由图 4 可知:用主应力差极限值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 作为归一化因子,对高液限黏土的应力-应变曲线进行归一化处理,效果较好。式(13)所示归一化模型能对不同围压及含水率下的应力-应变关系进行合理描述。

3 动三轴试验结果及分析

3.1 永久变形试验分析

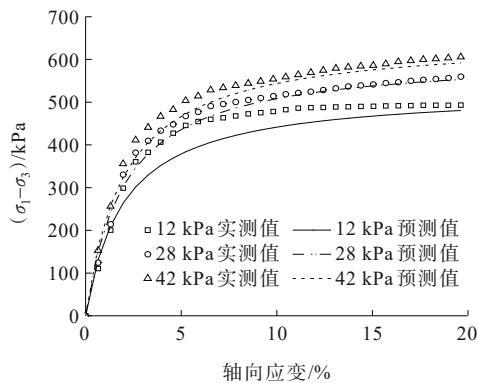
在不同的应力状态及含水率下测得 10 000 次循环荷载作用后的永久变形,其结果如图 5 所示。

由图 5 可知:含水率对黏土的永久变形有显著影响。永久变形随含水率的升高而增加,在高含水率时表现得更加明显,即含水率较低时,试样处于长期稳定状态,没有进一步的塑性应变累积。试样经过小的塑性变形后,处于完全弹性阶段。而在含水率较高情况下,土样在 10 000 次循环荷载作用后可能达到破坏状态。因此,在路基服役期间,控制其含水

率为 $w_{OMC} \pm 2\%$, 可有效提高其抗变形能力, 从而改善路基质量。

此外, 由图 5(a)可知: 在低围压(12 kPa)、含水率较高情况下, 即使偏应力较小, 路基土也会产生较大的永久变形。而图 5(c)中, 在高围压(42 kPa)和低偏应力(28 kPa)条件下, 即使含水率较高, 路基土的永久变形也相对较小。因此, 在考虑含水率对路基的影响时亦应考虑路基所处的应力状态。

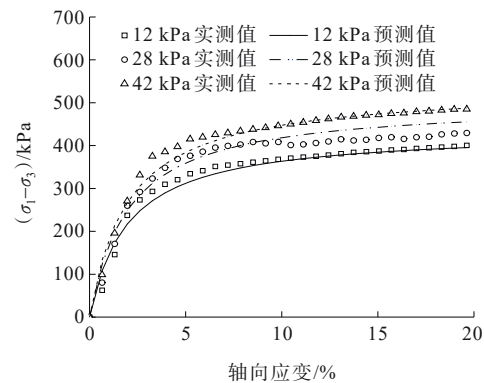
围压 28 kPa 时不同偏应力水平下试样的永久变形



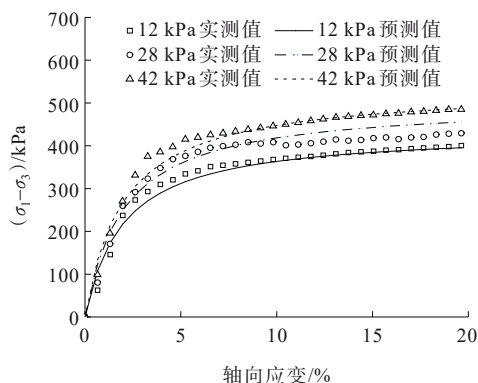
(a) w_{OMC}

与荷载循环次数之间的关系如图 6 所示。由图 6 可知: ① 随着循环次数的增加, 永久变形量在初始阶段逐渐增加, 然后逐渐趋于稳定值, 且永久变形量应变速率逐渐降低; ② 永久变形量与循环次数呈指数关系。多数学者认为永久变形在前 2 000 次循环荷载作用下便接近终值的 70%。在较低偏应力水平和较低含水率下, 即使荷载循环次数较高, 试样也会趋于稳定。

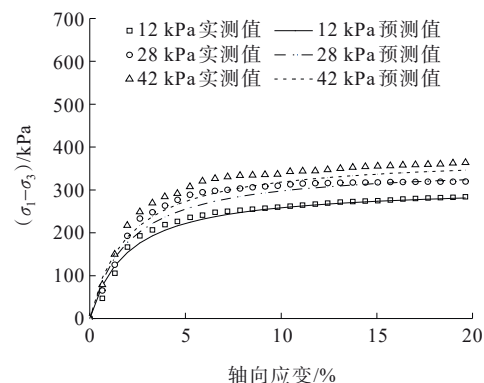
图 7 为不同含水率和围压下, 循环荷载作用 10 000 次后, 永久变形随偏应力变化的情况。



(b) $1.1w_{OMC}$



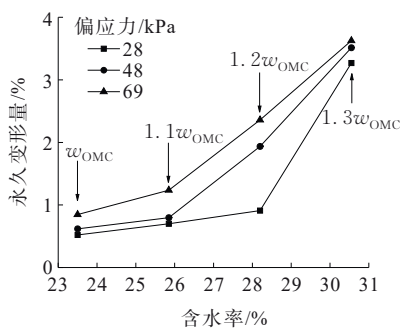
(c) $1.2w_{OMC}$



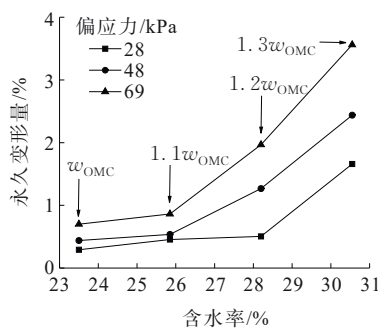
(d) $1.3w_{OMC}$

图 4 归一化模型对各工况下的应力-应变关系预测效果

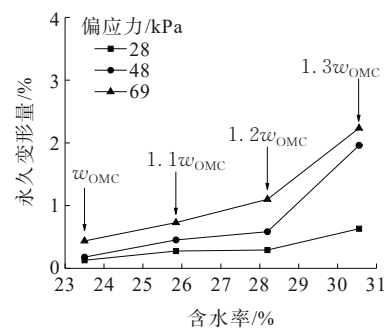
Figure 4 Prediction of normalized model for stress-strain relationship under various working conditions



(a) 围压为 12 kPa



(b) 围压为 28 kPa



(c) 围压为 42 kPa

图 5 不同工况下 10 000 次荷载循环后永久变形

Figure 5 Permanent deformation after 10 000 load cycles under different working conditions

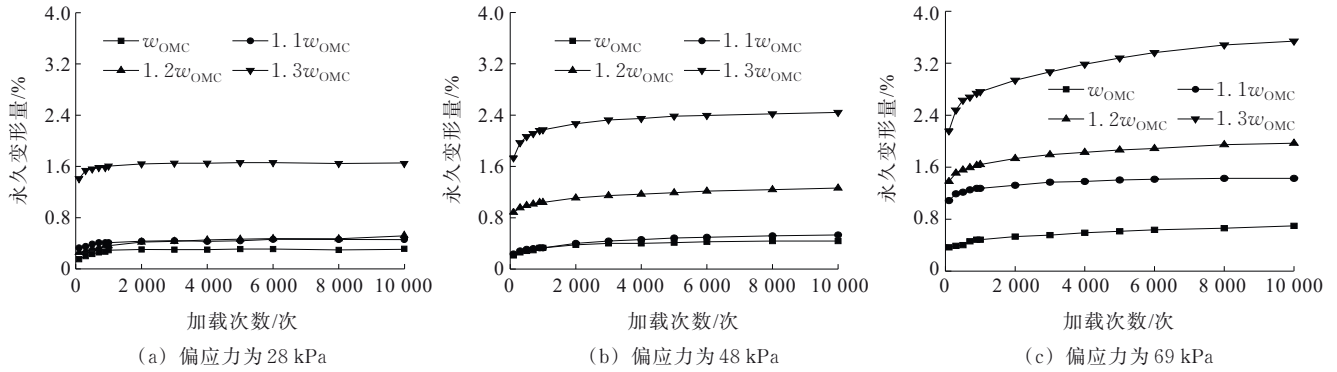


图6 围压为 28 kPa 时不同工况永久变形

Figure 6 Permanent deformation under different working conditions (confining pressure = 28 kPa)

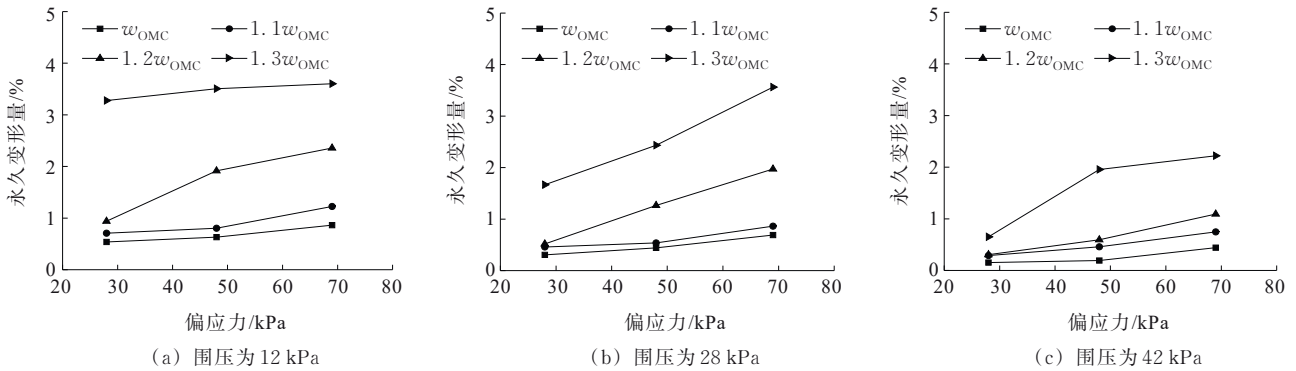


图7 不同含水率下 10 000 次荷载循环后永久变形

Figure 7 Permanent deformation after 10 000 load cycles under different water contents

由图 7 可知:在相同围压下,永久变形量随偏应力的升高而增加。在 4 种不同含水率情况下,其变化趋势相似。这是由于偏应力的增加,发生了剪切软化,从而降低了试样的强度,减小了对塑性应变积累的阻力。随着围压的减小,偏应力的影响越来越明显,尤其围压为 12 kPa 时。这说明偏应力对路基土的影响在一定程度上与围压有关。还有研究表明,除偏应力外,围压也是影响路基土累积塑性应变的重要因素^[21-22]。图 8 为 10 000 次加载循环后围压对

永久变形量的影响。由图 8 可知:在高围压下试样永久变形较小。这是由于围压的升高增强了试样的侧向约束,从而限制了永久变形的增加。此外,随着偏应力和含水率的增加,围压对永久变形的影响越来越小。

3.2 永久变形预估模型建立

基于图 5~8 中试验结果可知,路基土的永久变形量受应力变量、湿度状态及加载次数影响显著。本文以文献[23]的预估模型[式(14)]为基础,建立考虑应力相关性、湿度依赖性的力学-经验模型(图 9)。

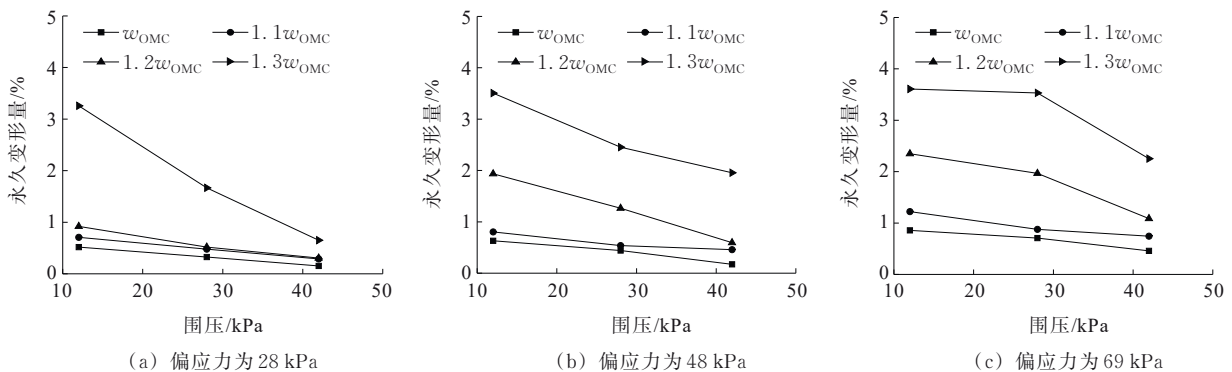


图8 不同围压下 10 000 次荷载循环后永久变形

Figure 8 Permanent deformation after 10 000 load cycles under different confining pressures

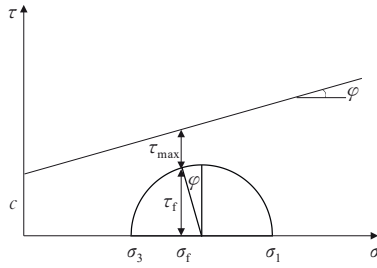


图9 剪应力比(SSR)示意图

Figure 9 Shear stress ratio (SSR)

$$\epsilon_p = \alpha_1 N^{\alpha_2} \sigma_d^{\alpha_3} \left(\frac{\tau_f}{\tau_{max}} \right)^{\alpha_4} \quad (14)$$

式中: ϵ_p 为永久变形量; N 为循环次数; τ_f 为剪应力, $\tau_f = \sigma_d \cos \varphi/2$, φ 为内摩擦角; τ_{max} 为试样的静三轴破坏强度; $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 为模型参数。

由于式(14)中 τ_f/τ_{max} 项并未将剪切作用与保护作用分离,且模型中并未考虑湿度影响,因此建立新的力学-经验预估模型如式(15)所示:

$$\epsilon_p = \alpha_1 N^{\alpha_2} \tau_f^{\alpha_3} \tau_{max}^{\alpha_4} \left(\frac{w}{w_{OMC}} \right)^{\alpha_5} \quad (15)$$

式中: w 为含水率; w_{OMC} 为最佳含水率; $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 为模型参数(表4)。

表4 式(15)模型拟合参数

Table 4 Model fitting parameters for Eq. (15)

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	R^2
2.54×10^{-6}	0.08	0.91	1.36	9.27	0.93

对本文的永久变形数据运用式(15)拟合, R^2 值为0.93,精度较高。为了进一步验证永久变形预估模型的有效性,选择了聂如松等^[24]的细粒土试验数据进行验证(图10), R^2 值为0.92(表5),说明本模型对黏土较为适用。

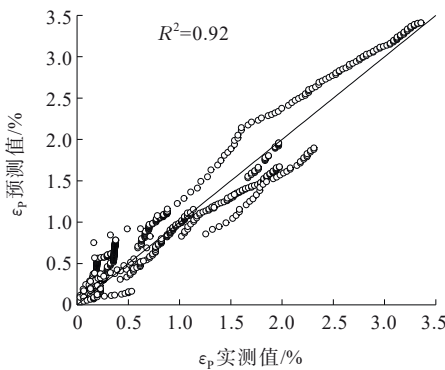


图10 模型预测值与实测值对比

Figure10 Comparison between predicted and measured values of model

表5 聂如松等^[24]试验数据拟合参数

Table 5 Fitting parameters of Nie, et al. ^[24] test data

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	R^2
2.89×10^{-8}	0.28	2.72	-1.28	5.06	0.92

4 结论

(1) 试样的破坏强度受围压及含水率影响较大,在不同围压下,随着含水率的升高破坏强度下降,围压升高,破坏强度则会上升。

(2) 基于Konder双曲线模型,以主应力差极限值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 作为归一化因子,建立了试样应力-应变关系的归一化方程。结果表明:预测曲线与试验结果吻合良好,模型预测效果较好。

(3) 根据永久变形试验结果,分析了永久变形影响因素,结果表明:随着偏应力减小,围压增大,永久变形减小。含水率上升会使试样抵抗永久变形能力下降。

(4) 针对湿热地区黏土提出了考虑多因素的永久变形预估模型,并利用其他学者数据进行验证。结果表明:该模型拟合精度较高,可用于计算湿热地区路基土在长期循环荷载作用下的永久变形。

参考文献:

References:

[1] DA SILVA M F, RIBEIRO M M P, FURLAN A P, et al. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 26: 100443.

[2] 张宜洛, 邓展伟, 郭创. 基于动载作用的组合式柔性基层路面典型结构优化设计研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 16-23.

ZHANG Yiluo, DENG Zhanwei, GUO Chuang. Research on optimal design of typical structure of composite flexible base pavement based on dynamic loading[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3): 16-23.

[3] 过震文, 钱劲松. 高含水率条件下压实黏性土路基永久变形[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 1058-1064.

GUO Zhenwen, QIAN Jinsong. Permanent deformation of compacted clay with high moisture content[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 1058-1064.

[4] 王江滔, 包特门白乙拉, 杨伟光, 等. 含水率-温度双因素影响的红黏土力学特性分析[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 253-258.

WANG Jiangtao, BAO Temenbaiyila, YANG Weiguang, et al. Analysis of influence of moisture content-temperature dual factor on mechanical properties of red clay[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 253-258.

- [5] 郑健龙,刘绍平,胡惠仁.公路路基湿度计算理论研究进展[J].中外公路,2023,43(1):1-10.
ZHENG Jianlong,LIU Shaoping,HU Huiren.The calculation theory of humidity for subgrade: A perspective review[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):1-10.
- [6] 陈彬,黄启刚,蒋宗岑,等.高速公路路基的湿度特性及变化规律研究[J].公路,2022,67(5):90-96.
CHEN Bin, HUANG Qigang, JIANG Zongcen, et al. Research on humidity characteristics and variation law of expressway subgrade[J].Highway,2022,67(5):90-96.
- [7] 周文权,冷伍明,刘文劼,等.低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J].岩土力学,2016,37(2):415-423.
ZHOU Wenquan, LENG Wuming, LIU Wenjie, et al. Dynamic behavior and backbone curve model of saturated coarse-grained soil under cyclic loading and low confining pressure[J].Rock and Soil Mechanics,2016,37(2):415-423.
- [8] 丛林,郭忠印,高启聚,等.重复荷载下粉性路基土永久变形特性和预估模型[J].公路交通科技,2010,27(4):12-15.
CONG Lin, GUO Zhongyin, GAO Qiju, et al. Permanent deformation characteristics and prediction model of silty subgrade soil under repeated loading[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(4):12-15.
- [9] 郑可扬,肖源杰,王萌,等.循环移动轮载下粗粒土路基填料永久变形特性及安定分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(9):1930-1943.
ZHENG Keyang, XIAO Yuanjie, WANG Meng, et al. Permanent deformation characteristics and shakedown analysis of coarse-grained embankment materials under moving wheel loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(9):1930-1943.
- [10] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975 (537):1-17.
- [11] TSENG K H, LYTTON R L. Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials[M]. Philadelphia:ASTM, 1989.
- [12] ULLIDTZ P. Mathematical model of pavement performance under moving wheel load[J]. Transportation Research Record,1993,1384:94-99.
- [13] PUPPALA A J, SARIDE S, CHOMTID S. Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2009,135(10):1379-1389.
- [14] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTJ 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering:JTJ 3430—2020 [S].Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2020.
- [15] ZHANG J H, ZHANG A S, LI J, et al. Gray correlation analysis and prediction on permanent deformation of subgrade filled with construction and demolition materials [J].Materials,2019,12(18):3035.
- [16] ZHANG J H, PENG J H, ZHANG A S, et al. Prediction of permanent deformation for subgrade soils under traffic loading in Southern China[J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(3):673-682.
- [17] 胡田飞,刘建坤,房建宏,等.冻融循环下含水率对粉质黏土力学性质影响试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):123-130.
HU Tianfei, LIU Jiankun, FANG Jianhong, et al. Experimental study on the effect of moisture content on mechanical properties of silty clay subjected to freeze-thaw cycling[J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2017,49(12):123-130.
- [18] 胡华,吴轩.围压和渗透压对花岗岩残积土抗剪强度影响的三轴试验研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2021,60(4):762-766.
HU Hua, WU Xuan. Triaxial test study on influence of confining pressure and osmotic pressure on shear strength of granite residual soil[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science),2021,60(4):762-766.
- [19] 徐淑亮.贵州高含水率高液限黏土压实控制方法研究[J].中外公路,2023,43(2):31-35.
XU Shuliang. Research on compaction control method of high water content and high liquid limit clay in Guizhou Province[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):31-35.
- [20] 申春妮,方祥位,王和文,等.吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2009,30(5):1347-1351.
SHEN Chunni, FANG Xiangwei, WANG Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(5):1347-1351.
- [21] ZHANG J H, PENG J H, LIU W Z, et al. Predicting resilient modulus of fine-grained subgrade soils considering relative compaction and matric suction[J]. Road Materials and Pavement Design,2021,22(3):703-715.
- [22] 刘朝晖,杨鑫,黄优,等.基于沥青混合料动态模量主曲线参数的沥青路面结构分析[J].中外公路,2024,44(3):35-45.
LIU Zhaohui, YANG Xin, HUANG You, et al. Analysis of asphalt pavement structure based on master curve parameters of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(3):35-45.
- [23] CHOW L C, MISHRA D, TUTUMLUER E. Framework for development of an improved unbound aggregate base rutting model for mechanistic-empirical pavement design [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2014,2401(1):11-21.
- [24] 聂如松,李亚峰,冷伍明,等.列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(4):828-841.
NIE Rusong, LI Yafeng, LENG Wuming, et al. Plastic deformation and critical dynamic stress of fine-grained soils under intermittent loading of trains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(4):828-841.