

重塑黄土动态回弹模量依赖性分析 及预估模型*

冉武平¹,李玲^{1†},张脩²,张祥¹

(1. 新疆大学 建筑工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047;2. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室
和黄土地区公路建设与养护技术山西省重点实验室,山西 太原 030006)

摘要:为明确重塑黄土动态回弹模量的应力依赖性,借助室内重复加载三轴试验,研究了在16种应力路径、3个压实度和4个含水量状态下黄土回弹特性。试验结果表明:含水量越高时偏应力和围压影响较体应力显著,含水量越低时偏应力和体应力影响较围压显著。低偏应力条件下,含水量对低压实度黄土的回弹模量影响显著,反之高偏应力条件下含水量则对高压实度黄土回弹模量影响显著;回弹模量在含水量大于等于最佳含水量时,受偏应力和体应力影响显著,而在含水量小于最佳含水量时受偏应力和围压影响显著。鉴于此,提出以Ni模型为基础,在不同湿度阶段采用不同的应力控制参数的两阶段动态回弹模量预估模型,从而精准表达黄土路基性能参数。

关键词:重塑黄土;动态回弹模量;重复加载三轴试验;依赖性分析;分阶段预估模型

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Dependence Analysis and Prediction Model of Dynamic Resilient Modulus of Remodeled-loess

RAN Wuping¹, LI Ling^{1†}, ZHANG Xiu², ZHANG Xiang¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi
Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To investigate the stress dependency of the dynamic resilient modulus (MR) of remodeled-loess, the dynamic triaxial tests were conducted under 16 stress paths, 3 degree of compactions and 4 water contents. The research results show that the effect of deviatoric stress and confining pressure are more significant than the bulk stress when the water content is higher, while the effect of deviatoric stress and bulk stress are more significant than confining pressure when the water content is lower. For the loess with low compaction degree, MR is significantly affected by the water content under low deviatoric stress conditions, while for loess with high compaction degree, MR is significantly affected by the water content under

* 收稿日期:2017-07-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51768070,51368058),National Natural Science Foundation of China(51768070,51368058);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室和山西省重点实验室开放课题资助项目(KLTLLR-Y14-10),the Open Project Funding of Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in the Loess Region and Shanxi Transportation Research Institute (KLTLLR-Y14-10)

作者简介:冉武平(1977-),男,甘肃镇原人,新疆大学副教授,工学博士

† 通讯联系人,E-mail:Lil@xju.edu.cn

high deviatoric stress conditions. MR is significantly affected by deviator stress and bulk stress when $\omega < \omega_{opt}$, while, it is significantly affected by deviator stress and confining pressure when $\omega \geq \omega_{opt}$. In view of this, a two-phase prediction model of MR is proposed based on the Ni mode which adopts different stress control parameters at different humidity stages, so as to express the performance parameters of loess sub-grade accurately.

Key words: remodeled-loess; dynamic resilient modulus; repeated loading triaxial test; dependence analysis; phased prediction model

路基动态回弹模量既是反映路基承载力的力学指标,亦是路面结构设计的重要参数.自1962年由Seed等^[1]在研究受路基应力应变特性影响的沥青路面疲劳损坏过程中,首次提出这一概念以来,国内外很多学者就路基土动态回弹模量展开全面深入研究.而在道路结构设计中采用路基土动态模量无论从体现荷载作用效应还是反映路基工作状态,都较静态模量更科学.目前,工程应用已逐渐实现了由静态模量向动态模量的转变,包括我国《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)也首次提出以动态回弹模量作为路基设计的设计指标.

路基动态回弹模量研究主要集中于影响因素、试验方法、预估模型等几方面.Li^[2]、杨树荣^[3]和陈声凯^[4]等学者认为仅在一定围压范围内,随偏应力提高路基土的动态回弹模量呈非线性的减小.Dae-hyeon等^[5]认为偏应力对回弹模量的影响存在一个临界点,偏应力小于该临界点回弹模量随偏应力的增大而急剧减小;反之,回弹模量则无明显变化.Muhanna等^[6]研究表明,围压较小时对回弹模量影响较小,但当围压超过100 kPa后,对回弹模量影响显著增大.凌建明等^[7]则认为路基动态回弹模量随压实度的提高而增大,但含水量越大,压实度对回弹模量的影响越小.李志勇等^[8]分析了红黏土动态模量,认为动态回弹模量在最佳含水量附近达到最大值.Allen等^[9]通过对静态三轴仪和动态三轴仪两种加载方式的对比,分析了常围压对脉冲荷载和静载试样条件下的回弹模量影响.Arthur等^[10]克服传统方向剪切仪中主应力轴仅能按固定角度旋转的不足,研制了考虑应力引起的各向异性的定向剪切仪.凌天清^[11]采用HX2100伺服三轴仪研究了路基细料土的回弹特性.陈乐求等^[12]通过大型动三轴压缩试验开展了受干湿循环影响的水泥改良粗粒土的动弹性模量等力学特征参数的研究;曹文贵等^[13]采用三轴剪切试验机研究了不同应力路径条件下土石

混填体剪切强度指标变化规律.回弹模量预估模型主要包括基于经验关系的回归模型(基于物性参数的经验模型和基于力学指标的经验模型)和基于应力状态的本构模型两大类.

已有研究结果表明,路基回弹模量的依赖参数较多,主要有荷载参数(应力路径)、物性参数(密度、含水量)和材料参数(土质状况、级配组成)影响显著.考虑到黄土一方面在我国分布区域广、厚度大,并已在公路路基建设中得到广泛应用;另一方面由于其特殊的物理、力学和工程性质,对荷载和湿度具有更显著的依赖性,因此,有必要针对黄土路基动态回弹模量开展系统研究,以期为我国广泛分布的黄土地区公路设计提供合理的设计参数.鉴于此,本文以山西太原黄土为研究对象,通过室内动态三轴试验,展开3种压实状态、4种湿度状态以及16种应力状态的黄土动态回弹模量试验研究,从而全面评价和分析黄土动态回弹模量特性,并在此基础上甄选和优化回弹模量预估模型,从而为黄土地区路基设计提供理论依据和经验参数.

1 试验方案

1.1 试样制备

试验所用黄土土样为重塑土,其基本物性参数如表1所示.为全面分析重塑黄土动态回弹模量的依赖性,试样选择不同压实度和含水量状况成型.考虑路基不同层位压实度要求标准,选择90%、93%和96%3个压实度,且每个压实度的试件按照8.5%、

表1 黄土基本物性参数

Tab. 1 Parameters of the basic physical properties of loess

γ_{dmax} /(g·cm ⁻³)	ω_{opt} /%	ω_L /%	ω_P /%	G_s	土粒分布/mm	
					<2	<0.074
1.94	13.5	20.36	33.85	2.71	99.1	59.3

注: γ_{dmax} 为最大干密度; ω_{opt} 为最佳含水量; ω_L 为塑限; ω_P 为液限; G_s 为比重.

11.5%、13.5%和16.5%的含水量配制,每组3个平行试样.试样尺寸按照径高比1:2制作成高度为100 mm的 $\phi 50$ mm圆柱体试件.

1.2 试验方法及参数

本文所用动三轴试验仪为意大利 Control 公司生产的 WF-7005 全自动三轴试验系统,采用气压进行围压加载.土和粒料材料的动态回弹模量试验方法应用较为广泛的是 T292-97^[14]、LTPP P46-96^[15]和 NCHRP 1-28^[16]等规程.罗志刚^[17]通过对路基应力路径和应力水平统计分析,得出在标准荷载条件下,路基内的应力范围: σ_1 为10~180 kPa, σ_3 为0~60 kPa,并借鉴上述成熟国外试验方法,提出了如表2所示的动态三轴试验加载序列;加载波形为半正弦波,加载频率为1 Hz;加载时间为0.2 s,荷载间歇时间为0.8 s.本文则采用罗志刚提出的试验方法.文中 σ_1 为轴向主应力; σ_2 、 σ_3 为围压应力,一般 $\sigma_2 = \sigma_3$; σ_d 为循环偏应力, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$; θ 为体应力, $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; τ_{oct} 为八面体剪应力,具体如式(1)所示.

$$\tau_{oct} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / 3 \quad (1)$$

表2 三轴试验加载序列

Tab.2 Triaxial loading sequence for subgrade soil

加载序列号	围压应力 σ_3 /kPa	接触应力 0.2 σ_3 /kPa	偏应力 σ_d /kPa	加载次数
预加载	30	6	55	1 000
1	60	12	30	100
2	45	9	30	100
3	30	6	30	100
4	15	3	30	100
5	60	12	55	100
6	45	9	55	100
7	30	6	55	100
8	15	3	55	100
9	60	12	75	100
10	45	9	75	100
11	30	6	75	100
12	15	3	75	100
13	60	12	105	100
14	45	9	105	100
15	30	6	105	100
16	15	3	105	100

2 试验结果分析

2.1 应力状态对回弹模量影响

选用目标压实度分别为90%、93%和96%,湿度均为最佳含水量的试样,试验结果如图1和图2所示.为便于表达,文中 k 、 ω 、 M_R 分别为土样压实度、含水量和动态回弹模量.由图1可知,在各种围压条件下,随着偏应力增加,回弹模量减小,当围压从15 kPa增长至60 kPa, $k=90\%$ 时,其衰减量分别为23%、36%、39%和47%; $k=93\%$ 时,其衰减量分别为19%、25%、29%和43%;而 $k=96\%$ 时,其衰减量分别为18%、28%、30%和36%.由图2可知,在不同压实度条件下,黄土动态回弹模量随体应力增加而增加,当偏应力从30 kPa增长至105 kPa, $k=90\%$ 时,回弹模量增幅分别为45%、56%、79%和121%; $k=93\%$ 时,增幅分别为42%、51%、67%和100%; $k=96\%$ 时,增幅分别为41%、51%、65%和81%.偏应力越小增幅越大,这说明压实度越小,偏应力和体应力对回弹模量影响越显著.

由图3可知,围压为45 kPa时,在各湿度条件下,不同压实度黄土随偏应力增加回弹模量不断减小,当含水量从8.5%增长到16.5%时,随偏应力增加黄土动态回弹模量衰减幅度由15%增长到30%左右,这说明含水量越小偏应力影响越微弱,而随含水量不断增加,偏应力影响也逐渐显著,尤其是对高压实度土样的回弹模量影响更显著.由此可知偏应力对低含水量下低压实度和高含水量下高压实度的黄土回弹模量影响显著.

由图4可知,当偏应力为75 kPa时,随含水量变化,不同压实度土样回弹模量与体应力曲线簇在 ω_{opt} 附近逐渐由低压实度土样密集向高压实度土样密集转变,由此表明当含水量较小时,高压实度土样回弹模量对体应力更敏感;而当含水量越大时,低压实度土样回弹模量对体应力则更敏感.含水量为8.5%和11.5%时,随体应力增加各压实度条件下的黄土回弹模量增长幅度为20%~30%;而含水量为13.5%和16.5%时,各压实度下的黄土回弹模量增长幅度则为50%~60%.鉴于偏应力一定,土样湿度越大,体应力增加所引起的回弹模量增加幅度越显著,因此可认为高含水量条件下,随体应力增加引起的回弹模量增加主要是由于围压所致.故而再次验证围压变化对高含水量黄土试样较低含水量试样的回弹模量影响显著.

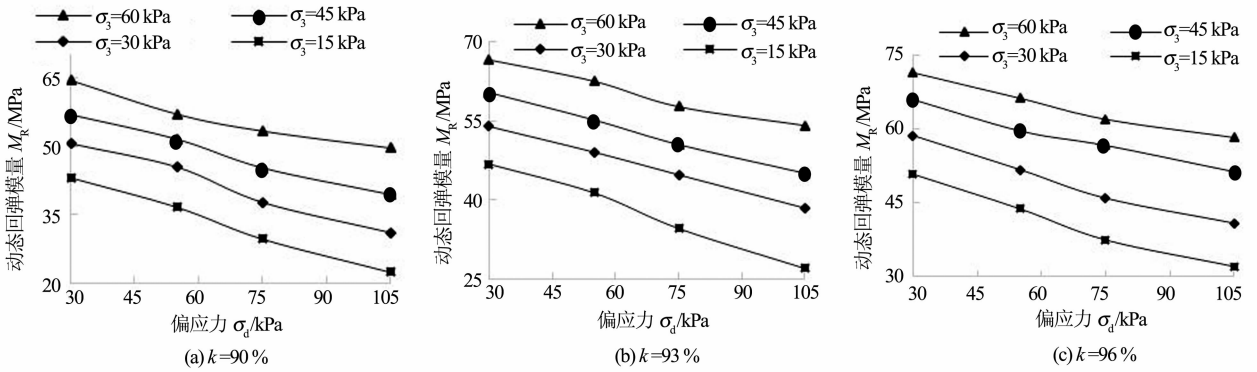


图 1 不同围压含水量为 13.5% 时的黄土动态回弹模量与偏应力关系
 Fig. 1 Relationship between M_R and σ_d for loess of 13.5% water content and different σ_3

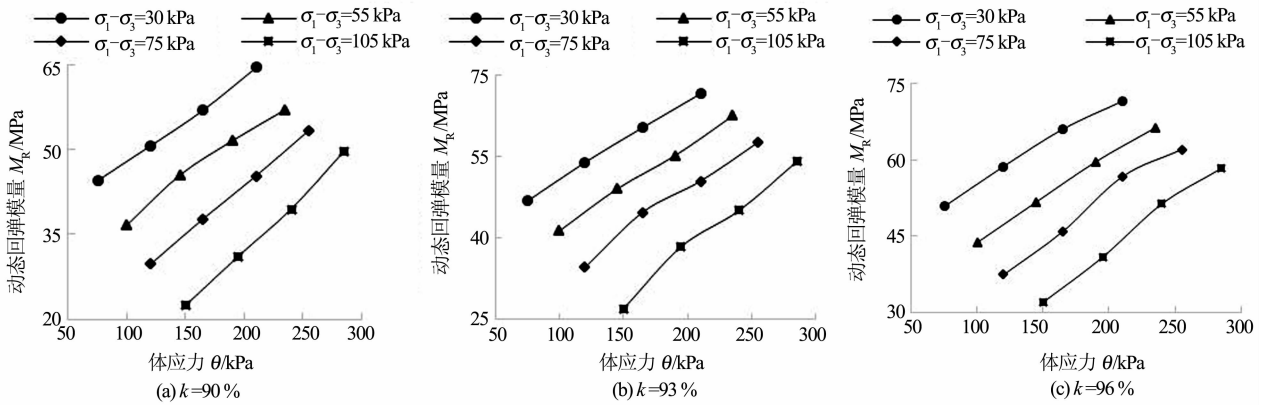


图 2 不同偏应力含水量为 13.5% 时的试样动态回弹模量与体应力关系
 Fig. 2 Relationship between M_R and θ for loess of 13.5% water content and different σ_d

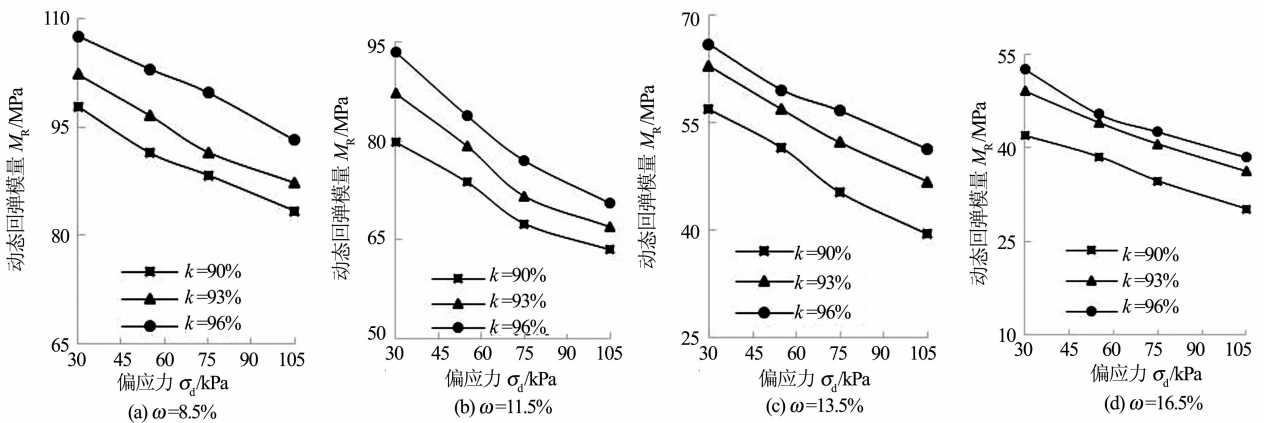


图 3 不同压实度条件下黄土动态回弹模量与偏应力关系
 Fig. 3 Relationship between M_R and σ_d for loess under different degree of compaction

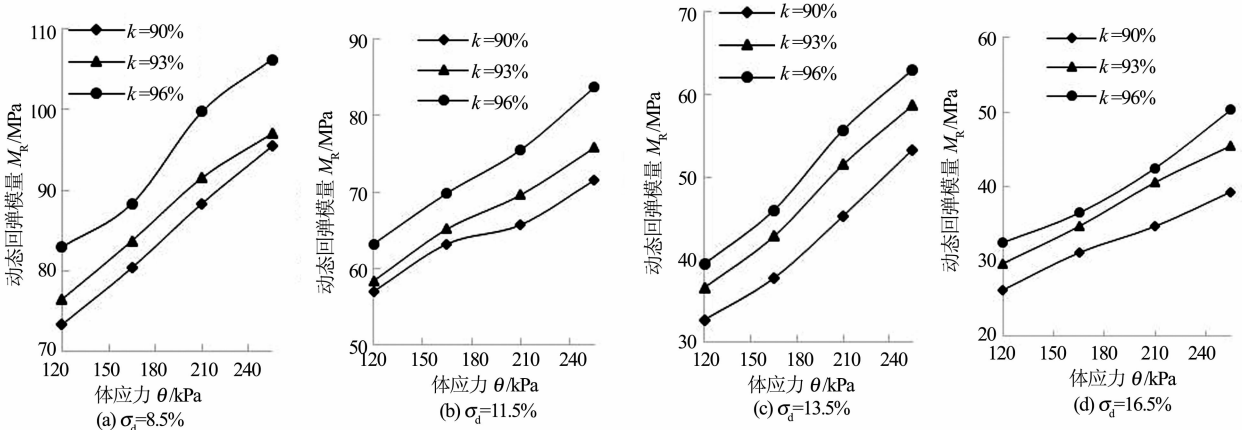


图4 不同压实度条件下动态回弹模量与体应力关系

Fig. 4 Relationship between M_R and θ for loess under different degree of compaction

2.2 压实度和含水量对动态回弹模量影响

由图3可知,在不同湿度和应力条件下,随压实度增加黄土动态回弹模量持续增加;而曲线斜率则反映影响程度,当含水量在 ω_{opt} 附近时,曲线斜率相对较大,由此可知湿度在 ω_{opt} 附近波动,压实度对回弹模量的影响最显著,而含水量较 ω_{opt} 大或是小时,曲线斜率有所减小,说明压实度对回弹模量影响有所减弱。

而由图5可知,围压为45 kPa时,在不同偏应力条件下,黄土动态回弹模量随含水量增加和压实度减小则不断衰减;在不同偏应力和压实度条件下,随含水量变化的回弹模量曲线分布疏密不同,疏密变化最显著则在 ω_{opt} 附近.当偏应力较小时,压实度

越大回弹模量曲线越密;而当偏应力较大时,压实度愈小回弹模量曲线越密.这也再次表明低偏应力条件下,含水量对低压实度黄土的回弹模量影响显著;而在高偏应力条件下含水量则对高压实度黄土回弹模量影响显著.在低偏应力条件下,各压实度的黄土动态回弹模量随含水量变化曲线,随偏应力不同而不同,但曲线反弯点出现在 ω_{opt} 附近.这说明含水量大于或小于 ω_{opt} ,黄土回弹模量对各应力的敏感性不同;低偏应力条件下,在 ω_{opt} 附近的湿度变化对回弹模量影响显著.但当偏应力很大时,较大的含水量对回弹模量的影响逐渐减弱。

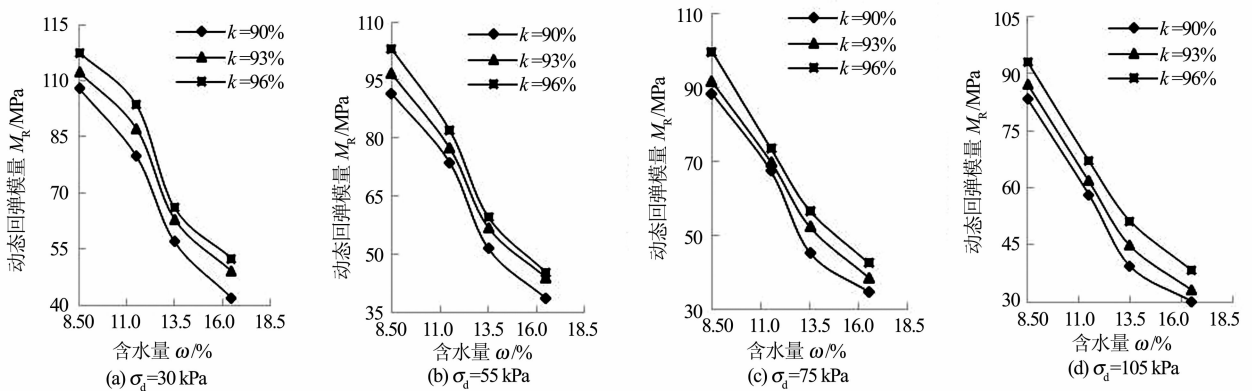


图5 $\sigma_3 = 45$ kPa 不同偏应力条件下压实度、含水量和动态回弹模量关系

Fig. 5 Relationship between ω , k and M_R for loess under different deviatoric stress as $\sigma_3 = 45$ kPa

3 回弹模量预估分析

3.1 回弹模量预估模型

路基回弹模量主要与材料状态参数(材料的性

质、密实度和含水量)以及工作状态参数(主要是应力状态)密切相关.因此构建路基土动态回弹模量预估模型,基于对影响回弹模量的应力条件相关性分析研究.根据国内外学者的研究成果可知,回弹模量预估模型已从初始的经验回归公式逐步发展为具有

本构意义的力学模型, 这些预估模型主要包含仅考虑剪切影响的模型、仅考虑侧限影响的模型、综合考虑剪切与侧限影响的复合模型以及将应力和应变分

解为体积与剪切两部分的预估模型. 具有代表性的典型回弹模量预估模型如表 3 所示.

表 3 路基回弹模量典型预估模型
Tab. 3 Typical prediction model of dynamic resilient modulus for subgrade soil

名称	预估模型	基本理念及特点
$k-\theta$ 模型 ^[18]	$M_R = k_2 \theta^{k_2}$	考虑了体应力, 但未考虑剪切应力影响
双线性模型 ^[19]	$M_R = \begin{cases} k_1 + k_3(k_2 - \sigma_d)(k_2 \geq \sigma_d) \\ k_1 - k_4(\sigma_d - k_2)(k_2 < \sigma_d) \end{cases}$	考虑剪切荷载影响, 但仅考虑单一围压
幂指数模型 ^[20]	$M_R = k_1 (\sigma_d)^{k_2}$	考虑了偏应力, 但未考虑围压, 且存在量纲问题
双曲线模型 ^[21]	$M_R = (a + b\sigma_d) / \sigma_d$	考虑了偏应力, 但未考虑围压, 且存在量纲问题
Uzan 模型 ^[22]	$M_R = k_1 \theta^{k_2} \sigma_3^{k_3}$	最基本的复合类模型, 考虑体内应力和剪应力的影响
八面体剪应力模型 ^[23]	$M_R = k_1 p_a (\theta/p_a)^{k_2} (\tau_{oct}/p_a)^{k_3}$	较 Uzan 模型消除了量纲问题, 但仍存在模量不定值问题
NCHRP 1-28A 模型 ^[16]	$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$	考虑体应力和剪切应力, 消除了量纲和模量不定值问题
Ni 模型 ^[24]	$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} + 1\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$	考虑围压和剪切应力, 消除了量纲和模量不定值问题

3.2 重塑黄土回弹模量预估模型建立

3.2.1 预估模型指标分析

由前述分析可知, 尽管重塑黄土动态回弹对应力条件有显著的依赖性, 但在不同的湿度条件下对不同应力状态的敏感程度不同. 当含水量大于最佳含水量时, 由于湿化作用, 其整体强度和刚度较小, 对围压和偏应力敏感程度较体应力显著; 而当含水量较小时, 则因其较高的粘聚性使其具有较大的抗变形能力, 对围压影响的敏感性则较体应力和偏应力要小. 同时黄土路基的实际工作状态一方面受环境影响较大, 在干旱地区路基内部尤其是路基工作区范围内湿度较小, 路基的平衡湿度小于最佳含水量, 在潮湿多雨地区, 路基平衡湿度则会大于最佳含水量; 另一方面在同一地区沿路基深度湿度分布不均衡. 鉴于上述分析, 黄土路基动态回弹模量的预估模型控制参数建议分阶段考虑: 当 $\omega < \omega_{opt}$ 时, 采用体应力和剪应力作为控制变量; 而当 $\omega \geq \omega_{opt}$ 时, 则选择围压和体应力作为控制变量, 这样既可体现出应力依赖性, 同时也体现出湿度变化的影响.

3.2.2 预估模型构建

由上述分析可知, 黄土路基回弹模量对多种应力条件都有较高的敏感性. 而由表 3 可知, 前 4 种仅考虑单应力条件的预估模型显然不能真实反映黄土回弹模量的多应力依赖性; Uzan 模型尽管克服了前 4 种预估模型仅考虑单一应力的缺陷, 但仍存在量纲问题和模量不定值问题, 与 Uzan 模型相比较, 八

面体剪应力模型具有相同的拟合精度(σ_d 与 τ_{oct} 成比例), 消除了量纲问题, 但仍存在模量不定值问题. NCHRP 1-28A 模型和 Ni 模型与之前的模型相比较, 不仅精度大大提高, 而且还解决了量纲和模量不定值的问题. 但对比两个预估模型, 不难发现 Ni 模型在第一项中多了一个常数项, 同时选用了围压作为控制变量, 这就说明在应力级位较低时, Ni 模型有更高的模量定值性, 故而也可提高其在低应力级位下的数值的稳定性. 考虑到黄土自身强度较低, 且受湿度影响, 强度衰变更快, 故为提高在低应力条件下的回弹模量预估精度, 本文选择 Ni 模型作为黄土路基回弹模量预估模型. 但考虑到不同湿度状态下, 黄土动态回弹模量对应力路径的依赖性和应力状态敏感程度不同, 故在基于 Ni 预估模型的基础上, 将应力参数按照湿度条件做出调整, 当 $\omega < \omega_{opt}$ 时, 采用体应力和偏应力作为控制变量; 而当 $\omega \geq \omega_{opt}$ 时, 则选择围压和体应力作为控制变量, 构建重塑黄土回弹模量的预估模型如式(2)和式(3)所示:

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\sigma_d}{p_a} + 1\right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (\omega < \omega_{opt}) \tag{2}$$

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} + 1\right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (\omega \geq \omega_{opt}) \tag{3}$$

3.3 参数拟合及分析

根据上述预估模型, 分别对含水量为 8.5%、11.5%、13.5% 和 16.5% 的试验数据进行拟合分

析.其中含水量为8.5%和11.5%的试验数据用式(2)拟合,结果如表4和图6所示;而含水量为13.5%和16.5%的试验数据用式(3)拟合,结果如表4和图7所示.由结果可知,式(2)拟合结果最大偏差为7.3%,式(3)拟合结果最大偏差则为8.7%,且二者具有较高的相关系数,由此表明针对压实黄土依据湿度状态采用两阶段预估模型,具有较高的精度.

表4 数据拟合结果
Tab. 4 Data fitting results

阶段	k_1	k_2	k_3	R	R^2	最大偏差/%
$\omega < \omega_{opt}$	0.772	-0.777	0.474	0.953	0.909	7.3
$\omega \geq \omega_{opt}$	415.556	1.29	-0.752	0.966	0.933	8.7

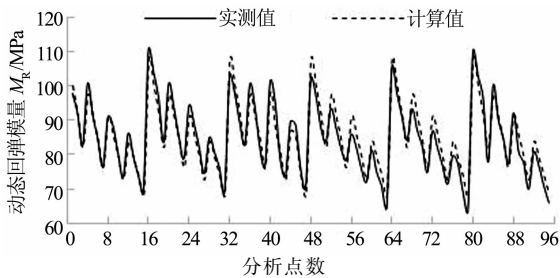


图6 $\omega < \omega_{opt}$ 模型数据拟合图

Fig. 6 Sketch for data fitting of prediction model as $\omega < \omega_{opt}$

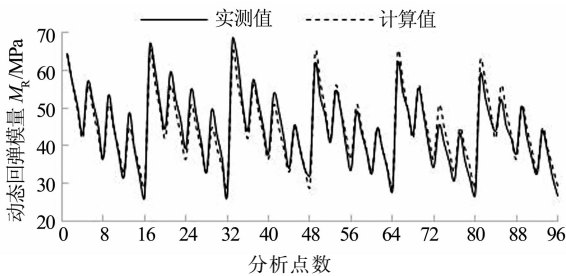


图7 $\omega \geq \omega_{opt}$ 模型数据拟合图

Fig. 7 Sketch for data fitting of prediction model as $\omega \geq \omega_{opt}$

4 结 语

1) 重塑黄土动态回弹模量显著依赖于偏应力、围压和体应力,且随偏应力的增大而减小,随围压和体应力增大而增加.压实度越小,围压、偏应力和体应力影响越显著.含水量越小,体应力和偏应力较围压对回弹模量影响显著,而含水量越大围压和偏应力较体应力影响显著.

2) 在围压一定时,低含水量低压实度重塑黄土

和高含水量高压实度黄土动态回弹模量对偏应力敏感性较强;而在偏应力一定时,低含水量高压实度和高含水量低压实度黄土动态回弹模量对体应力较敏感.

3) 在不同偏应力条件下,黄土动态回弹模量随含水量增加和压实度减小则不断衰减.低偏应力条件下,含水量对低压实度黄土的回弹模量影响显著;而高偏应力条件下含水量则对高压实度黄土回弹模量影响显著.但从影响程度来看,当在最佳含水量附近时,压实度对回弹模量的影响最显著;当含水量较大或含水量较小时则压实度对回弹模量影响最小.

4) 针对黄土在不同湿度条件下对不同应力条件的依赖性不同,以 Ni 模型为基础,当黄土路基 $\omega < \omega_{opt}$ 时采用偏应力和体应力为预估模型的控制变量;当黄土路基 $\omega \geq \omega_{opt}$ 时采用偏应力和围压为预估模型的控制变量.

5) 研究结果充分反映了重塑黄土动态回弹特性,从而可为黄土地区路基结构设计提供理论依据和设计参数.鉴于本文仅对正常状态下重塑黄土动态回弹模量对含水量、压实度以及应力路径的依赖性展开研究,后续有必要针对冻融循环和干湿循环情况下重塑黄土动态回弹特性展开进一步研究.

参 考 文 献

- [1] SEED H B, CHAN C K, LEE C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relations to fatigue failures in asphalt pavements[C]//Proceedings International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement. Michigan: University of Michigan, 1962:611-636.
- [2] LI D, SELIG E T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(6): 939-957.
- [3] 杨树荣, 拱祥生, 黄伟庆. 非饱和粘性路基土回弹模量之研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 225-229.
YANG S R, GONG X S, HUANG W Q. Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 225-229. (In Chinese)
- [4] 陈声凯, 凌建明, 罗志刚. 路基土回弹模量应力依赖性分析及预估模型[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 95-97.
CHEN S K, LING J M, LUO Z G. Stress-dependent characteristics and prediction model of the resilient modulus of subgrade soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 95-97. (In Chinese)
- [5] KIM D, KIM J R. Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test[J]. Construction and Building Materials-Elsevier, 2007, 21: 1470-1479.
- [6] MUHANNA A, RAHMAN M, LAMBE P. Resilient modu-

- lus measurement of fine-grained subgrade soils[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1687(1):3-12.
- [7] 凌建明, 苏华才, 谢华昌, 等. 路基土动态回弹模量的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5):919-925.
LING J M, SU H C, XIE H C, *et al.* Laboratory research on dynamic resilient modulus of subgrade soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 919-925. (In Chinese)
- [8] 李志勇, 董城, 邹静蓉, 等. 湘南地区红黏土动态回弹模量试验与预估模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1840-1846.
LI Z Y, DONG C, ZOU J R, *et al.* Research on experiment and prediction model of dynamic resilient modulus of laterite soil in Southern Hunan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7):1840-1846. (In Chinese)
- [9] ALLEN J J, THOMPSON M R. Resilient response of granular materials subjected to time-dependent lateral stresses[J]. Transportation Research Record, 1974, 510(1):1-13
- [10] ARTHUR J, BEKENSTEIN S, GERMAINE J T, *et al.* Stress path tests with controlled rotation of principal stress directions[J]. Astm Special Technical Publication, 1981, 21: 516-540.
- [11] 凌天清. 柔性路面结构非线性分析研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 1995:20-40.
LING T Q. Study on nonlinear analysis of flexible pavement structure [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 1995:20-40. (In Chinese)
- [12] 陈乐求, 陈俊桦, 张家生. 干湿循环作用下水泥改良泥质板岩粗粒土动力特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9):107-113.
CHEN L Q, CHEN J H, ZHANG J S. Dynamic properties of cement improved argillite-slate coarse-grained soil under drying-wetting cycles [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(9):107-113. (In Chinese)
- [13] 曹文贵, 黄文健, 王江营, 等. 土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3):142-148.
CAO W G, HUANG W J, WANG J Y, *et al.* Large-scale tri-axial test study on deformation and intensity characteristics of soil-rock aggregate mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3):142-148. (In Chinese)
- [14] AASHTO T292-97(R2000) Standard method of test for resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials[S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2000:156-183.
- [15] LTPP Protocol P46 Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soil[S]. Washington DC: Strategic Highway Research Program, Federal Highway Administration, 1996:54-84.
- [16] NCHRP Project 1-28 Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design-final report[R]. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 1997:34-56.
- [17] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2007:60-72.
LUO Z G. Research on dynamic modulus parameters of subgrade and granular layers [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 2007:60-72. (In Chinese)
- [18] SEED H B, MITRY F G, MONOSMITH C L, *et al.* Prediction of pavement deflection from laboratory repeated load tests (NCHRP report 35) [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1967:22-43.
- [19] THOMPSON M R, ELLIOTT R P. ILLI-PAVE-based response algorithms for design of conventional flexible pavements [R]. Washington DC: Transportation Research Record, 1985: 31-42.
- [20] MOOSSAZADEH J, WITCZAK M W. Prediction of subgrade moduli for soil that exhibits nonlinear behavior[R]. Washington DC: Transportation Research Record, 1981:23-35.
- [21] DRUMM E C, BOATENG-POKU Y, JOHNSON P T. Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(5): 774-789.
- [22] RAHIM A M. Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(3): 163-169.
- [23] WITCZAK M W, UZAN J. The universal airport pavement design system, Report I of V: Granular material characterization[R]. Washington DC: Department of Civil Engineering, University of Maryland, 1988:67-85.
- [24] NI B, HOPKINS T C, SUN L, *et al.* Modeling the resilient modulus of soils [C]//Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, railways and airfields. Lisbon, Portugal: A A Balkema Publishers, 2002: 1131-1142.