

考虑基质吸力的石灰改良土回弹模量 简化预测模型研究

梅杨

(河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450064)

摘要:针对两种路基石灰改良土,利用滤纸法获取了相应的土水特征曲线,并利用循环荷载三轴试验,测定了改良土在不同含水率、围压、动偏应力下的回弹模量,分析了基质吸力对回弹模量的影响规律,最终在土水特征曲线 SWCC、饱和含水率回弹模量 $M_{R\text{sat}}$ 、最优含水率回弹模量 $M_{R\text{opt}}$ 的基础上,建立了考虑基质吸力影响的回弹模量简化预测模型。研究表明:石灰改良土的回弹模量与含水率、基质吸力、外部应力状态存在明显的非线性关系,简化模型与其他预测模型相比,建模过程更加简化,可在试验数据较少条件下达到类似的预测精度,为定量预测湿度和基质吸力对石灰改良土路基回弹模量的影响提供了更便捷的工具。

关键词:路基;石灰改良土;回弹模量;循环荷载三轴试验;基质吸力;预测模型

1 引言

回弹模量被定义为路基土所受循环偏应力与回弹应变的比值,其不仅影响路面弯沉和疲劳寿命,还与由累积塑性变形引起的路面车辙破坏有关,因为较低的路基刚度造成应力扩散不足而导致更大的应力集中效应,从而产生过大的永久变形和不均匀沉降。因此,回弹模量是路基设计的重要控制参数。

掺石灰是中国软黏土地区常用来改良路基填料的

一种方法,可有效改善填料的工程性能指标,有利于节省土地资源,降低工程成本。建成后的石灰改良土路基处于车辆荷载反复作用下,不同层位路基的应力状况不同,路基土回弹模量表现出高度的应力依赖性;同时,路基在最优含水率条件下进行压实,随后含水率受到周围环境影响而逐渐达到平衡状态,并呈现季节性波动,回弹模量不仅受到应力状态的影响,还受到含水率和基质吸力的制约。目前,国内外学者已将基质吸力纳入回弹模量预测模型中,Khoury 和弋晓明等将基质吸力作为直接影响回弹模量的独立变量;Liang 和

- *****
- [9] 肖建庄,陈祥磊,李标,等. 纳米 SiO_2 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2020(1).
- [10] 徐晶,王先志. 纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型[J]. 硅酸盐学报, 2018(8).
- [11] 徐晶,王彬彬,赵思晨. 纳米改性混凝土界面过渡区的多尺度表征[J]. 建筑材料学报, 2017(1).
- [12] 李刊,魏智强,乔宏霞,等. 纳米 SiO_2 改性聚合物水泥基复合材料早期微观结构及性能[J/OL]. 复合材料学报: 1-11 [2020-03-15]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200218.002>.
- [13] 朱靖塞,许金余,白二雷,等. 复合纳米材料对混凝土动态力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016(3).
- [14] SUN J F, XU Z Q, LI W F, et al. Effect of Nano- SiO_2 on the Early Hydration of Alite-Ulphoaluminate Cement[J]. Nanomaterials, 2017, 7(5).
- [15] WANG L G, ZHENG D P, ZHANG S P, et al. Effect of Nano- SiO_2 on the Hydration and Microstructure of Portland Cement[J]. Nanomaterials 2016, 6(12).
- [16] ASTM C672-2003 Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals[S].
- [17] 申爱琴,喻沐阳,周笑寒,等. 橡胶沥青混合料疲劳损伤及全周期寿命预估[J]. 建筑材料学报, 2018(4).

收稿日期: 2019-12-15(修改稿)

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0804301)

作者简介: 梅杨,男,硕士,副教授. E-mail: 337418272@qq.com

Nokkaew 等则在预测模型中将基质吸力视为体应力或剪应力的一部分进行考虑。上述模型建模大多需要循环荷载试验数据进行回归分析以获取模型参数,为保证模型的精度,模型参数越多则对数据的需求量越大,试验周期长,难以适应大量工程建设的需求。此外,对于石灰改良土在含水率或基质吸力影响下的变形特性研究还不成熟,理论研究落后于实际工程应用。因此,建立一种便捷的预测模型来定量计算石灰改良土在动力和湿度作用下的回弹模量,具有重要的现实和理论意义。

该文针对两种典型石灰改良土,开展土水特性试验和循环荷载三轴试验,尝试利用土水特征曲线和较少的回弹模量试验数据,建立考虑基质吸力影响的回弹模量简化预测模型,探讨简化模型参数取值的合理范围,并通过与其他模型比较验证该简化模型的有效性。

2 试验过程

2.1 试验材料

试验用 I 号、II 号素土取自湖北省某湖区高速公路建设现场,根据界限含水率及塑性图,两种土分别为低液限黏土(CL)和高液限黏土(CH),天然含水率高,压缩性强,土体难压实,其级配曲线见图 1。为改善上述素土的工程性质,对其进行了掺石灰改良,掺入石灰中有效 CaO 和 MgO 总含量为 54.3%,超过 50%,属 III 级灰,根据当地施工经验,掺入量取 6%。素土和改良土的基本物性参数见表 1。

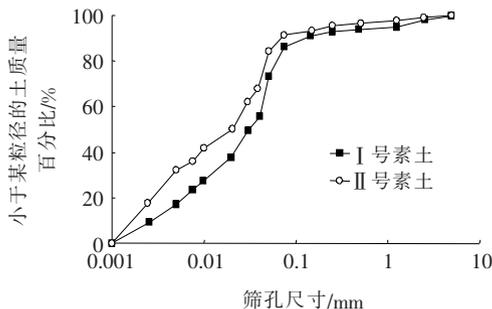


图 1 素土的级配曲线

2.2 试验过程

循环荷载三轴试验采用非饱和土三轴试验仪进行,改良土在分裂模中被压实制成高度 100 mm、直径 50 mm 的圆柱体试样,压实度参照 JTG D30—2015《公路路基设计规范》中对于路基各层压实度的要求, I 号和 II 号改良土试样的压实度选取了 96%(I 96 和

表 1 素土及改良土的基本物性参数

土种类	最大干密度/最优含水率/($g \cdot cm^{-3}$)/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
I 号素土	1.82 / 18.5	46.2	27.1	19.1
II 号素土	1.75 / 19.1	53.5	29.0	24.5
I 号改良土	1.70 / 20.1	38.1	25.2	12.9
II 号改良土	1.68 / 20.5	44.0	25.6	18.4

II 96)、94%(I 94 和 II 94)、93%(I 93 和 II 93)。其中每个压实度下配置了 7 组含水率试样(表 2),以 $K = 96\%$ 试样配置为例, I 96-7 和 II 96-7 处于压实时的最优含水率 w_{opt} , 试样 I 96-1 和 II 96-1 处于饱和含水率 w_{sat} , I 96-2~6 和 II 96-2~6 的含水率则分布于 w_{opt} 和 w_{sat} 之间。其中 I 96-7 和 II 96-7 试样的配置方法为:将试样包裹滤纸后,装入饱和器皿并浸泡在蒸馏水中进行饱和,每隔 8 h 将试样倒置,以确保试样两端含水率均匀; I 96-2~6 和 II 96-2~6 试样的配置方法为:将试样包裹滤纸后,用蒸馏水均匀喷洒在滤纸上,随后将试样和滤纸放入湿度平衡器皿中 12 h 使其含水率达到平衡,该流程被反复进行直到试样达到一定的含水率。该文含水率均默认为重力含水率。

将配置好的试样进行循环荷载试验,荷载形式为半正弦波,加载频率为 1 Hz,加载过程中不排水,从而试样可以保持恒定的含水率。 M_R 的确定按照 JTG D30—2015《公路路基设计规范》附录中的方法,而加载应力参考文献[9]的加载序列,选取了路基土具有代表性的受力状态,其中围压采用 15、30、45、60 kPa,动偏应力采用 30、55、75、105 kPa。

表 2 所配置试样的压实度与含水率

试样编号	压实度 $K/\%$	含水率 $w/\%$
I 96-1~7	96	26.8、25.6、24.4、23.3、22.7、20.8、20.1
I 94-1~7	94	26.8、25.6、24.4、23.3、22.7、20.8、20.1
I 93-1~7	93	26.8、25.6、24.4、23.3、22.7、20.8、20.1
II 96-1~7	96	27.0、25.8、25.0、24.1、23.3、21.7、20.5
II 94-1~7	94	27.0、25.8、25.0、24.1、23.3、21.7、20.5
II 93-1~7	93	27.0、25.8、25.0、24.1、23.3、21.7、20.5

土水特征曲线(SWCC)的测定采用滤纸法进行,试验所用的滤纸为 No. 203 型定量滤纸,率定方程如式(1)所示。根据以往经验,在压实度 $K = 93\% \sim 96\%$ 区间内,SWCC 的变化相对较小,因此为减少试验工作量,该文 SWCC 统一采用 $K = 93\%$ 试样的

SWCC,具体测定过程在此不详述。

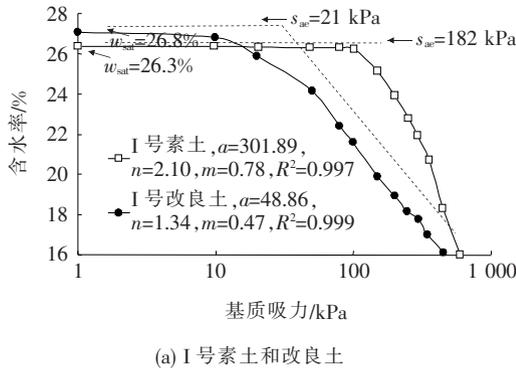
$$\begin{cases} \lg s_{fp} = -0.076\omega_{fp} + 5.493, \omega_{fp} \leq 47\% \\ \lg s_{fp} = -0.012\omega_{fp} + 2.470, \omega_{fp} > 47\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: s_{fp} 为滤纸的吸力(kPa); ω_{fp} 为滤纸的含水率(%)。

3 试验结果

3.1 土水特征曲线

图2为素土与改良土的SWCC对比,采用Fredlund和Xing提出的土水特征曲线方程[式(2)]对试验数据进行回归分析,回归参数 a 、 n 、 m 以及进气值



s_{ac} 见图2。

$$\frac{\omega}{\omega_{sat}} = \left\{ \ln \left[2.718 + \left(\frac{S}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m} \quad (2)$$

从图2可以看出:改良土的 ω_{sat} 比素土的 ω_{sat} 高,改良土的 s_{ac} 较低,即改良土先于素土排水。产生上述变化的主要原因为掺入石灰后,土颗粒会发生凝聚效应,产生聚集体,土中形成了较大的孔隙,使得气压力更容易进入土样中。在土水特征曲线的过渡段,素土的过渡段斜率要大于改良土过渡段斜率,说明相同的基质吸力变化下,改良土含水率变化更小,持水能力更强。随着基质吸力上升,素土和改良土的SWCC近似相交于某一点,即两者的含水率将趋于相同。

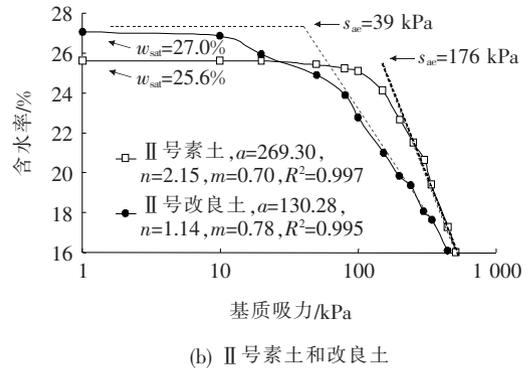


图2 改良前后的土水特征曲线

3.2 回弹模量的应力依赖性分析

已有研究表明,路基土的回弹模量同时受体力应力和偏应力的双重影响,考虑该现象的代表性模型如美国路面设计指南中的推荐模型:

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3)$$

式中: $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; $\tau_{oct} = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} / 3$; k_i 为模型参数; p_a 为参考大气压(100 kPa)。

表3为采用式(3)对该文部分试样回弹模量进行回归分析得出的模型参数值。图3为不同外部应力状态下的回弹模量试验值(符号)和采用式(3)模型的预测值(网格面)。由图3可以看出: M_R 值随着动偏应力的增加而降低,而随着围压的增加而上升,同时,外部应力状态对 M_R 的影响程度也与含水率和基质吸力有关,在同一外部应力状态下,在含水率从 ω_{opt} 增至 ω_{sat} 的过程中,两种改良土回弹模量平均降幅分别为37.2%和41.3%。

总体来看,基质吸力越高, M_R 对 σ_3 和 σ_d 的变化更加敏感。以I号改良土($K=0.93, \sigma_3=15$ kPa)为

例,当基质吸力为193 kPa时, σ_d 由30 kPa增至105 kPa过程中, M_R 减小了23%,而当基质吸力为0 kPa时, M_R 在上述过程中减小了约3%,表明 $M_R - \sigma_i$ 关系与 $M_R - s$ 关系相互影响而存在耦合特征。

4 简化预测模型

文献[13]提出了一种归一化模型以预测 $M_R - s$ 关系,该模型利用了饱和含水率回弹模量 M_{Rsat} 和最优含水率回弹模量 M_{Ropt} 以及相应的物性参数,同时仅含有一个模型参数 η :

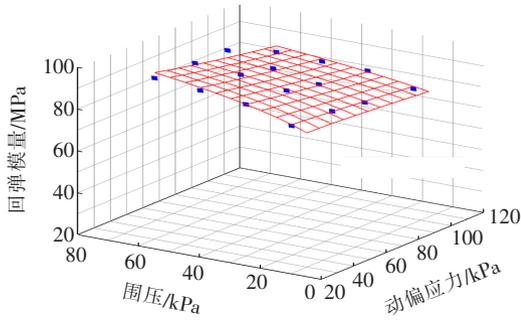
$$\frac{M_R - M_{Rsat}}{M_{Ropt} - M_{Rsat}} = \frac{s}{s_{Rsat}} \left(\frac{S_r}{S_{ropt}} \right)^\eta \quad (4)$$

路基土的压实度 K 通常处于90%~96%的范围,在该范围内孔隙比 e 的变化较小。将式(4)中的饱和度 S_r 、最优含水率饱和度 S_{ropt} 分别以 $S_r = \omega G_s / e$ 和 $S_{ropt} = \omega_{opt} G_s / e$ 进行替换(G_s 为重度),从而得到以含水率及基质吸力表征的回弹模量简化预测模型:

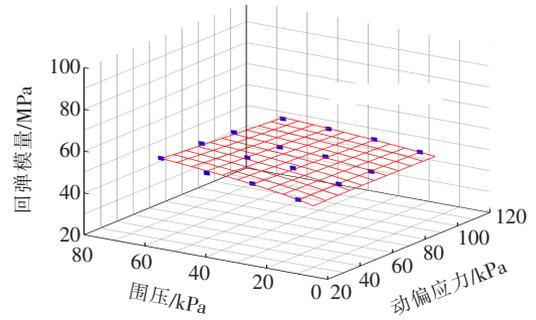
$$\frac{M_R - M_{Rsat}}{M_{Ropt} - M_{Rsat}} = \frac{s}{s_{Rsat}} \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right)^\eta \quad (5)$$

表 3 式(3)模型拟合参数

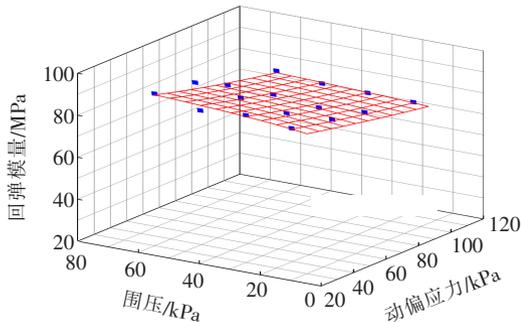
试样编号	压实度 $K/\%$	含水率 $w/\%$	基质吸力 s/kPa	模型拟合参数			R^2
				k_1	k_2	k_3	
I 96-7	96	20.1	193	1 317.2	0.130	-1.059	0.839
I 96-3	96	24.4	48	1 037.6	0.244	-0.969	0.813
I 96-1	96	26.8	0	974.9	0.135	-0.596	0.941
I 94-7	94	20.1	193	1 063.1	0.145	-1.132	0.819
I 96-3	94	24.4	48	994.1	0.117	-1.029	0.817
I 94-1	94	26.8	0	970.9	0.131	-1.071	0.910
I 93-7	93	20.1	193	627.7	0.202	-0.597	0.864
I 96-3	93	24.4	48	588.8	0.120	-0.519	0.933
I 93-1	93	26.8	0	561.1	0.139	-0.444	0.943
II 96-7	96	20.5	213	1 353.6	0.136	-0.982	0.912
II 96-5	96	23.3	78	1 014.5	0.084	-0.394	0.913
II 96-1	96	27.0	0	965.5	0.047	-0.642	0.841
II 94-7	94	20.5	213	1 088.4	0.154	-0.959	0.798
II 96-5	94	23.3	78	887.7	0.213	-0.949	0.856
II 94-1	94	27.0	0	800.9	0.193	-0.942	0.892
II 93-7	93	20.5	213	760.6	0.051	-1.185	0.884
II 93-5	93	23.3	78	554.0	0.075	-1.279	0.912
II 93-1	93	27.0	0	525.2	0.092	-1.272	0.903



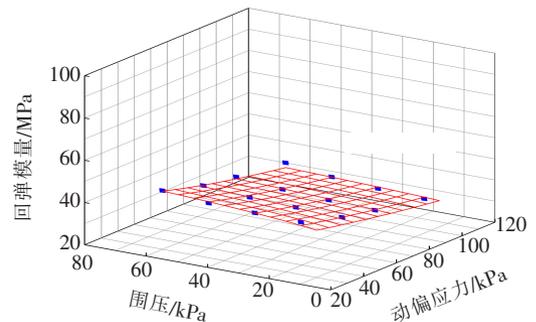
(a) I 93-7



(b) I 93-1



(c) II 93-7



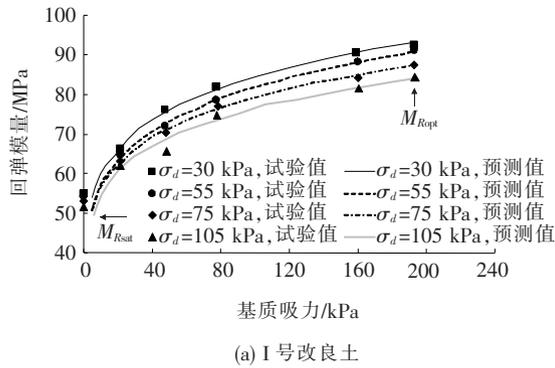
(d) II 93-1

图 3 改良土的 $M_R - \sigma_d - \sigma_3$ 关系

上述模型中的 ω 可以直接采用 SWCC 来估算, 根据已有研究, η 通常为 1.0~3.0 的较小范围内, 通常取 2.0 即可以产生较好的预测效果。因此, 该模型需要的参数仅为 SWCC、 s_{opt} (最优含水率下的基质吸力)、 M_{Rsat} 、 M_{Ropt} , 其中 s_{opt} 可以从 SWCC 中获取, M_{Rsat} 、 M_{Ropt} 两个参数可以采用普通循环应力试验进行测试, 从而大大简化了预测模型建模过程。

4.1 预测效果

该文模型对于回弹模量的预测效果如图 4 所示,



其中 $\sigma_3 = 30$ kPa, $\eta = 2.0$, 由图 4 可以看出该模型可较好地预测 $M_R - s$ 的关系。

将式(3)代入式(5)中可得到如图 5 所示的 $M_R - \sigma_d - s$ 关系的三维图 (符号为试验值, 网格面为预测值, $\sigma_3 = 30$ kPa, $\eta = 2.0$), 其中用于计算 M_{Ropt} 和 M_{Rsat} 的 k_1, k_2, k_3 见表 3。由图 5 可以看出在不同 σ_d 水平下 $M_R - s$ 关系是非线性的, M_R 与 s, σ_d 的关系得到较好预测。

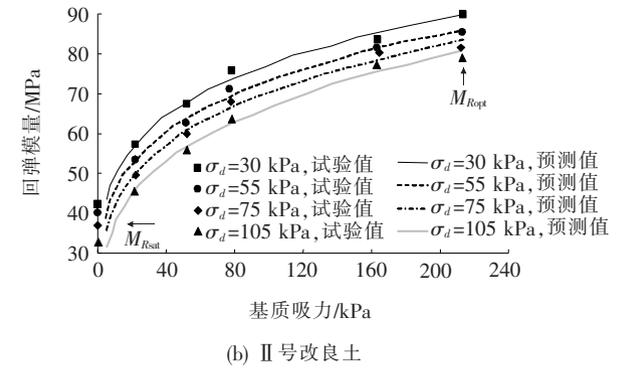


图 4 改良土 $M_R - s$ 关系的试验值和预测值 ($\sigma_3 = 30$ kPa, $\eta = 2.0$)

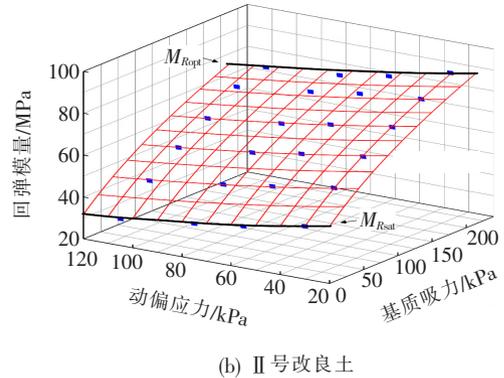
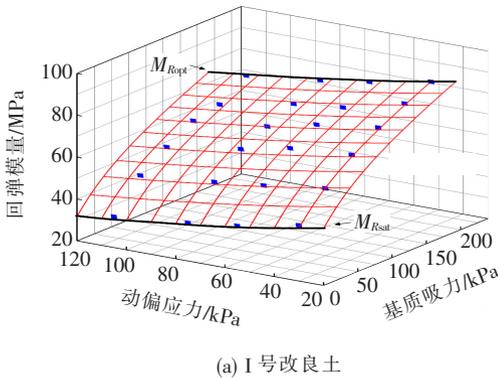


图 5 改良土的 $M_R - \sigma_d - s$ 关系的试验值和预测值 ($\sigma_3 = 30$ kPa, $\eta = 2.0$)

总体来看, 对于 I 号改良土和 II 号改良土分别开展了 21(3×7)组试验, 当 η 取 2.0 时, 预测的平均 R^2 值分别为 0.90 和 0.91, 说明简化预测模型的预测精度较好。此外, 对式(5)中的 η 还选取了其他值进行预测, 当 η 取 1.8 时, R^2 值分别为 0.89 和 0.92; 当 η 取 2.2 时, R^2 分别为 0.88 和 0.86。可以看出, 当 η 超过 2.0 时, 预测效果有所下降, 而 η 取 2.0 已经能够提供较为理想的预测效果。

4.2 模型对比

两种更加复杂的预测模型被用来与该文简化模型对比。Liang 等提出了如式(6)的模型, 该模型具有 k_{1L}, k_{2L}, k_{3L} 共 3 个模型参数, 基质吸力被视为体应力

的一部分出现, 同时还引入了 Bishop 有效应力参数 χ , 可按式(7)进行计算。

$$M_R = k_{1L} p_a \left(\frac{\theta + \chi s}{p_a} \right)^{k_{2L}} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_{3L}} \quad (6)$$

$$\chi = \begin{cases} (s/s_{ae}) - 0.55 & (s > s_{ae}) \\ 1 & (s \leq s_{ae}) \end{cases} \quad (7)$$

Ng 等提出了如式(8)的模型, 在该模型中基质吸力 s 被视为与外部应力参数类似的独立参数, 其中 p 为平均体应力, q_{cyc} 为循环偏应力, p_r 为参考应力, 取 1 kPa, $k_{1N}, k_{2N}, k_{3N}, k_{4N}$ 均为模型参数。

$$M_R = k_{1N} (p/p_r)^{k_{2N}} \left(1 + \frac{q_{cyc}}{p_r} \right)^{k_{3N}} \left(1 + \frac{s}{p} \right)^{k_{4N}} \quad (8)$$

表 4 为各个模型对于 $K=93\%$ 试样回弹模量进行预测的模型参数、试验数和 R^2 值。由表 4 可以看出:3 种模型对于灰土改良土回弹模量的预测效果都较为理想, R^2 均大于 0.85。由于式(6)和式(8)的模型需要利用不同外部应力和吸力下的 M_R 数据进行模型参数回归,因此均采用了 24 组循环应力试验数据以保障精度。相比之下,该文简化模型只需进行测定 $M_{R_{opt}}$ 和 $M_{R_{sat}}$ 的试验,在各设置 3 组平行试验的情况下共需 6 组试验,在此前提下也取得了类似的预测效果。可见将 η 值固定在 2.0 的条件下,该文回弹模量模型的建模过程更加简单,降低了试验工作量和成本,同时可以保证预测精度。

表 4 3 种模型的预测对比情况

模型	参数	I 号改良土	II 号改良土
Ng 模型 (文献[5])	循环应力试验数	24	24
	平均 R^2	0.91	0.90
	k_{1N}	1078	1123
	k_{2N}	0.783	0.678
	k_{3N}	-0.201	-0.134
	k_{4N}	0.987	0.698
Liang 模型 (文献[6])	循环应力试验数	24	24
	平均 R^2	0.85	0.88
	k_{1L}	143.2	175.2
	k_{2L}	3.897	1.621
	k_{3L}	-6.116	-2.183
该文简化模型 ($\eta=2.0$)	循环应力试验数	6	6
	平均 R^2	0.89	0.91

5 结论

(1) 两种石灰改良土 M_R 值随着动偏应力 σ_d 的增加而降低,而随着围压 σ_3 和基质吸力 s 的增加而上升。总体来看,基质吸力越高, M_R 对 σ_3 和 σ_d 的变化更加敏感, $M_R - \sigma_i$ 关系与 $M_R - s$ 关系相互影响而存在耦合特征。

(2) 建立了以含水率及基质吸力表征的回弹模量简化预测模型,该模型建立所需的参数为 SWCC、 $M_{R_{sat}}$ 、 $M_{R_{opt}}$,相对容易获取,且将 η 固定取 2.0 时已能提供较为理想的预测效果。

(3) 相比现有其他模型,简化模型在试验数据较少的情况下可以取得类似的预测精度,从而为石灰改良土路基在湿度和基质吸力影响下的变形行为定量研究提供了更便捷的工具。

参考文献:

- [1] 王珣,张家生,杨果岳,等.重载作用下公路路基及基层动应力测试研究[J].振动与冲击,2007(6).
- [2] 贺建清.石灰改良土路基填料的动力特性及应用研究[D].中南大学博士学位论文,2005.
- [3] 钱劲松,李嘉洋,周定,等.考虑吸力效应的非饱和黏土回弹模量模型[J].岩土力学,2018(1).
- [4] 弋晓明,李术才,王松根,等.非饱和粉土回弹模量的应力依赖性与水敏感性耦合分析[J].山东大学学报(工学版),2013(2).
- [5] Ng CWW, Zhou C, Yuan Q, et al.. Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soil: Experimental and Theoretical Investigations[J]. Can. Geotech. J., 2013, 50(2): 223-232.
- [6] Liang RY, Rababah S, Khasawneh M. Predicting Moisture-Dependent Resilient Modulus of Cohesive Soils Using Soil Suction Concept[J]. J. Transp. Eng., 2008, 134(1): 34-40.
- [7] Nokkaew K, Tinjum JM, Likos WJ, et al.. Effect of Matric Suction on Resilient Modulus for Compacted Recycled Base Course in Post Compaction State[C]. Transportation Research Board, Washington, D. C., 2014:68-78.
- [8] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].
- [9] 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(5).
- [10] 卢宁,William JL.非饱和土力学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [11] ARA, Inc., ERES Consultants Division. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structure[S]. Transportation Research Board, Washington, D. C., 2004.
- [12] Chiu CF, Yan WM, Yuen KV. Reliability Analysis of Soil-Water Characteristics Curve and its Application to Slope Stability Analysis[J]. Eng. Geol., 2014, 135:83-91.
- [13] Han Z, Vanapalli SK. Model for Predicting the Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soil Using the Soil-Water Characteristic Curve[J]. Can. Geotech. J., 2015, 52(10):1 605-1 619.