

DOI: 10.11779/CJGE201901020

含水率变化下压实路基土动态回弹模量试验研究与 预估模型

刘维正¹, 曾奕珺¹, 姚永胜^{2*}, 张军辉²

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 路基土动态回弹模量 M_R 是路面设计和使用性能评价采用的关键参数, 运营期间受含水率变化影响显著。以压实红黏土为研究对象, 制备了 6 个不同含水率和 3 种不同压实度的试样, 采用滤纸法测试了不同状态下的基质吸力, 并通过动三轴试验研究了含水率、压实度、动偏应力和围压对动态回弹模量的影响。试验结果表明: M_R 随压实度、围压的增大而增大, 随动偏应力增大呈非线性减小; M_R 随含水率增大急剧降低, 从最佳含水率增加 4.5% 时, 不同压实度下 M_R 均降低约 50%, 动偏应力和压实度对 M_R 的影响随含水率增大逐渐减弱; M_R 随含水率和饱和度的变化规律与土性显著相关, 而不同土样的 M_R 随基质吸力变化趋势基本一致。进而引入基质吸力, 建立了综合考虑含水率和应力水平影响的压实路基土 M_R 预估模型, 通过本文和文献试验数据证实了该模型的适用性, 并基于 13 种土样的试验结果建立了模型参数与物性指标之间的经验关系。

关键词: 动态回弹模量; 路基土; 基质吸力; 预估模型; 回归分析

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)01-0175-09

作者简介: 刘维正(1982-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 从事特殊土路基稳定与加固方面的研究工作。E-mail: liuwz2011@csu.edu.cn。

Experimental study and prediction model of dynamic resilient modulus of compacted subgrade soils subjected to moisture variation

LIU Wei-zheng¹, ZENG Yi-jun¹, YAO Yong-sheng², ZHANG Jun-hui²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory of Highway

Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The dynamic resilient modulus (M_R) of subgrade soils is the key parameter used in pavement design and performance evaluation, and is significantly affected by variation of moisture content during operation. The compacted lateritic soil is used, and the test specimens are prepared using six different moisture contents and three degrees of compaction. The repeated loading triaxial tests are conducted to investigate the effects of moisture content, degree of compaction, dynamic deviator stress and confining pressure on dynamic resilient modulus, and the soil suctions of different specimens are measured using the contact filter paper method right after cyclic loading tests. The test results indicate that M_R increases with the increasing confining pressure and degree of compaction, and decreases nonlinearly with the increasing dynamic deviator stress. The values of M_R decrease greatly with the increasing moisture content, as moisture content increases by 4.5% from the optimum moisture content, they decrease to about 50% of the initial values, and the influences of dynamic deviator stress and compactness on M_R decrease with the increasing moisture content. In addition, the relationships for both M_R - moisture content and M_R - degree of saturation are highly soil type-dependent, while the variation of M_R with soil suction is similar for different soils. Thus by incorporating the soil suction into confining stress, a new prediction model for the resilient modulus taking into account both the stress state and the moisture content is proposed. The suitability of the proposed model is validated through the experimental data from this study and the existing literatures. Then the empirical relationships between model parameters and physical properties of soils are developed based on the statistical regression analysis performed on 13 different soils, and a good agreement between the measured and predicted values of M_R obtained using the regression model parameters is found.

This study may provide a simple and reliable method for

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478054; 512085172); 湖南省自然科学基金优秀青年基金项目(2018JJ1026)

收稿日期: 2018-01-21

*通讯作者(E-mail: yaoyongsheng23@163.com)

determining the reasonable resilient modulus of compacted subgrade soils in pavement structure design.

Key words: dynamic resilient modulus; subgrade soil; matric suction; prediction model; regression analysis

0 引言

动态回弹模量 (M_R) 最早由 Seed 等于 1962 年提出^[1], 定义为动态偏应力与回弹或可恢复应变之比。作为表征行车荷载作用下路基压实土抗变形能力的主要力学指标, 路基土动态回弹模量直接影响路面结构层疲劳开裂的预测及设计厚度的确定, 目前已成为国内外现行路面设计方法采用的关键参数^[2-3]。然而路基土通常处于地下水位以上且暴露于大气中, 运营期间受气候季节性变化影响, 路基内部含水率呈周期性变化^[4-5]。室内与现场试验均表明路基土 M_R 受含水率变化影响较大, 具有强烈的湿度依赖性^[6-9]。因此, 设计过程中路基土 M_R 的合理取值需考虑含水率变化效应, 以期路面结构分析与性能评价提供可靠参数。

路基土 M_R 受应力水平、湿度状态、压实度、土组类型和土体结构等因素影响, 最初主要以围压、动偏应力为变量建立预估模型^[10-11]。随着含水率对路基土 M_R 影响引起人们重视, 国内外不少学者对路基土 M_R 随含水率 w 的变化规律开展了试验研究, 并建立了路基土的 $M_R - w$ 经验关系^[12-13]。但 $M_R - w$ 的关系仅适用特定的试验用土, 受土组类型影响较大, 导致很难建立以 w 为变量的路基土 M_R 普适性模型^[14-15]。事实上, 路基土常处于非饱和状态, 不同于饱和土的特征在于存在基质吸力 ψ , 基质吸力对非饱和土的强度和变形有重要影响, 且与含水率的关系可通过土水特征曲线 (SWCC) 进行表示^[16]。因此, 基质吸力可作为表征含水率对路基土 M_R 影响的间接参数。基于此, 一些学者采用先进的动三轴试验通过控制基质吸力测试路基土 M_R 随 ψ 变化的规律, 并考虑到基质吸力对刚度的贡献, 分别以 ψ 为独立应力变量和围压的应力分量建立了不同的路基土 M_R 预估模型^[7, 14-15, 17-20]。这些模型对用于本身试验或与之性质相似的土样能提供可靠的预测结果, 但用于其他土样时, 需要大量的试验确定可靠的模型参数。此外, 控制基质吸力的 M_R 动三轴试验需要专业设备, 且对于细粒土达到某一设定含水率的平衡状态需要几天到几周时间, 耗时费力。因此对于工程设计与实践者, 建立常规试验可得土性参数与模型参数之间的关系, 从而构建 $M_R - \psi$ 实用模型, 用于预测不同含水率下不同路基土 M_R , 显得尤为必要。目前已有一些研究采用最大干密度、塑性指数、细颗粒含量等土的物性指标, 建立了与 M_R 预估模型参数的回归经验关系^[9, 21-23], 但这些 M_R 预估模型中很少含有基质吸力, 不能反映非饱和路基

土的变形性状的本质特征。

本文以南方地区广泛分布的红黏土为试验土样, 采用动三轴试验测试不同湿度和应力状态下的动态回弹模量变化规律, 并采用滤纸法测试动三轴试验后的基质吸力; 再结合已有文献中的相关试验数据, 分析不同类型路基土 M_R 与含水率、饱和度、基质吸力相互间的关系, 建立综合考虑湿度 (基质吸力) 和应力 (围压与偏应力) 影响的路基土 M_R 预估模型, 并采用 SPSS 软件统计回归分析模型参数与常规土性指标之间的关系, 为合理选取路基动态回弹模量设计参数提供可靠且简便实用的方法。

1 试验材料与方法

1.1 土样基本物性指标

试验土样取自长沙芙蓉北路提质改造工程南段工地, 为花岗岩风化形成的红黏土。依据现行的《公路土工试验规程》, 通过室内试验得到试验土样颗粒相对密度、界限含水率、击实特性、颗分等基本物理性质指标如表 1 所示。

表 1 试验土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of test soil

G_s	w_L /%	w_p /%	I_p	ρ_{dmax} /($g \cdot cm^{-3}$)	w_{opt} /%	粒径分布/%	
						<0.075 mm	<0.005 mm
2.72	70.8	35.2	35.6	1.72	18.5	76.1	42.6

注: G_s 为颗粒相对密度, w_L 为液限, w_p 为塑限, I_p 为塑性指数, ρ_{dmax} 为最大干密度, w_{opt} 为最佳含水率。

1.2 动态回弹模量试验

为分析含水率对压实红黏土动态回弹模量的影响, 考虑到红黏土作为特殊填料其压实标准可适当降低, 本文分别在压实度为 87%, 90% 和 93% 的条件下制备了不同含水率 w (w_{opt} , $w_{opt} \pm 1.5\%$, $w_{opt} \pm 3.0\%$, $w_{opt} + 4.5\%$) 的试样, 总计为 3 个不同压实度和 6 组不同含水率。试件直径为 100 mm, 高 200 mm, 使用对开模具, 分 3 层静压成型。试验过程中, 试样实际含水率和压实度分别与目标值误差不超过 1%。

此次动三轴试验采用深圳瑞格尔仪器有限公司生产的动三轴试验系统, 根据美国 AASHTO T307-99 规范给出的路基土回弹模量试验方法进行加载试验^[24]。加载波形为半正弦波, 频率为 1 Hz, 加载时间为 0.1 s, 间歇时间为 0.9 s。试件首先在围压 $\sigma_c = 41.4$ kPa、动偏应力 $\sigma_d = 24.8$ kPa 下预先加载 1000 次, 以消除加载帽

或底座与试件之间的接触变形, 然后分别在不同围压 (13.8, 27.6, 41.4 kPa) 和不同动偏应力 (12.4, 24.8, 37.2, 49.7, 62.0 kPa) 共 15 级荷载下加载 100 次, 再根据每级荷载作用下最后 5 次加载的回弹变形平均值 ε_R , 按下式计算不同压实度和含水率试样的动态回弹模量:

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_R \quad (1)$$

1.3 基质吸力测试

考虑到滤纸法可测得的基质吸力范围大, 且该方法操作简便、结果准确, 本文根据 ASTM D5298-10 试验规程^[25], 采用型号为 WhatmanNO.42 的滤纸测试动三轴试验后的试件基质吸力, 具体试验步骤如下:

(1) 不同湿度和压实度的试件经过动三轴试验后, 立即将试件均匀地切割成 4 块土样, 并用刮刀将每块土样两端处理平整。

(2) 将 3 张适合的滤纸放置于两块切割平整的土样间, 且与土样完全接触, 通过中间滤纸量测土样的基质吸力, 外面两张用来保护中间滤纸免于被土样吸附及污染, 保证量测的准确性。

(3) 将待测试样移入密封良好的储罐中, 恒温恒湿条件下进行至少 10 d 的吸力平衡过程, 待试块与滤纸之间的水汽交换趋于稳定后, 量测滤纸的含水率 w , 并由校正曲线^[26]计算相应的基质吸力 ψ :

$$\lg \psi = 4.945 - 0.0673w \quad (w < 47\%) \quad (2a)$$

$$\lg \psi = 2.909 - 0.0229w \quad (w \geq 47\%) \quad (2b)$$

(4) 每个三轴试件可测量 2 个基质吸力, 取其平均值, 然后结合三轴试件含水率的测试值, 确定对应状态下的土-水特征曲线。

2 试验结果及分析

2.1 土-水特征曲线模型及参数标定

土-水特征曲线为土的含水率与吸力之间的关系曲线, 表征了基质吸力变化时土体持水能力大小, 曲线形状主要受土粒的矿物成分、孔隙的大小及分布、孔隙的结构、土的应力历史和温度等因素的影响。目前已有不少描述土-水特征曲线的数学模型, 其中应用最为广泛的为 Van Genuchten 模型和 Fredlund-Xing 模型, 两者表达式分别如下:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\psi/a)^b]^c} \quad (3a)$$

$$S_r = \frac{\theta}{\theta_s} = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \frac{1}{[\ln(e + (\psi/a)^b)]^c} \quad (3b)$$

式中 S_r 为饱和度; θ 为体积含水率; θ_s 为饱和状态体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为基质吸力; ψ_r 为

残余含水率对应的基质吸力; a, b, c 为模型参数, 其中 a 与进气值 ψ_e 相关, ψ_e 是划分土体处于部分饱和 (饱和区) 与非饱和状态 (过渡区) 的重要参数, b 和 c 控制土水特征曲线过渡区的斜率。

可见两模型表达形式相似, 但当土体含水率低于残余含水率时, Van Genuchten 模型常高估实际含水率的数值, 而 Fredlund-Xing 模型符合土体完全干燥时含水率接近于零的理论情况, 与实际情况吻合^[27]。故本文采用 Fredlund-Xing 模型 (式 3 (b)) 对不同压实度和含水率下实测的基质吸力进行分析, 拟合曲线如图 1 所示, 拟合参数列于表 2, 可为下文动态回弹模量预测分析提供依据。

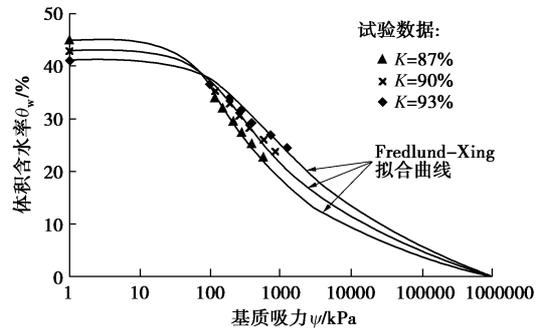


图 1 不同压实度红黏土试样的土水特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curves (SWCC) of lateritic soil specimens with different degrees of compaction

表 2 压实红黏土土-水特征曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of SWCC of compacted lateritic clay

压实度 $K/\%$	模型参数			进气值	
	a	b	c	ψ_r/kPa	ψ_e/kPa
87	80.0	1.522	0.582	1050.2	62.9
90	107.5	1.395	0.513	1271.7	72.8
93	154.9	1.286	0.460	1922.8	82.2

由图 1 可知压实度 (干密度) 越大, 土体含水率在吸力增大过程中变化相对较缓, 压实度小的试样在较小吸力作用下, 饱和度降低较快。这表现为压实度大的土-水特征曲线模型参数 b, c 值小于压实度小的试样 (如表 2 所示), 过渡区土-水特征曲线斜率较小。同一饱和度条件下, 干密度越大, 试样对应的吸力越大, 反之, 则吸力越小。表明了干密度大的试样持水能力强于干密度小的试样。

2.2 动态回弹模量影响规律分析

(1) 应力水平的影响

图 2 为试验土样在最佳含水率 (18.5%)、不同压实度下 M_R 随动偏应力和围压的变化曲线。由图 2 可知, M_R 随动偏应力为增加呈非线性减小, 在同一围压下, 减小幅度范围 2.4%~18.3%; M_R 随围压增加而增加, 在同一动偏应力下, 增加幅度范围为 5.6%~

15.3%，其中压实度 87%，90%和 93%的土样平均增加幅度值分别为 12.6%，9.6%和 8.4%。可见，动偏应力和围压对压实红黏土 M_R 均有较大影响，相对而言，动偏应力影响程度大一点；围压对 M_R 的影响程度随压实度的提高而减小。这是因为黏性土颗粒间的黏聚强度相对摩擦强度起主导作用，偏应力增加引起的剪切位移对细粒土结构的破化效应要大于围压增加对土体刚度的增强效应，从而导致动偏应力对 M_R 影响程度相对围压要大。此外，随着压实度的提高，土粒间排列更紧密，围压对土体摩擦强度的增强作用减弱。

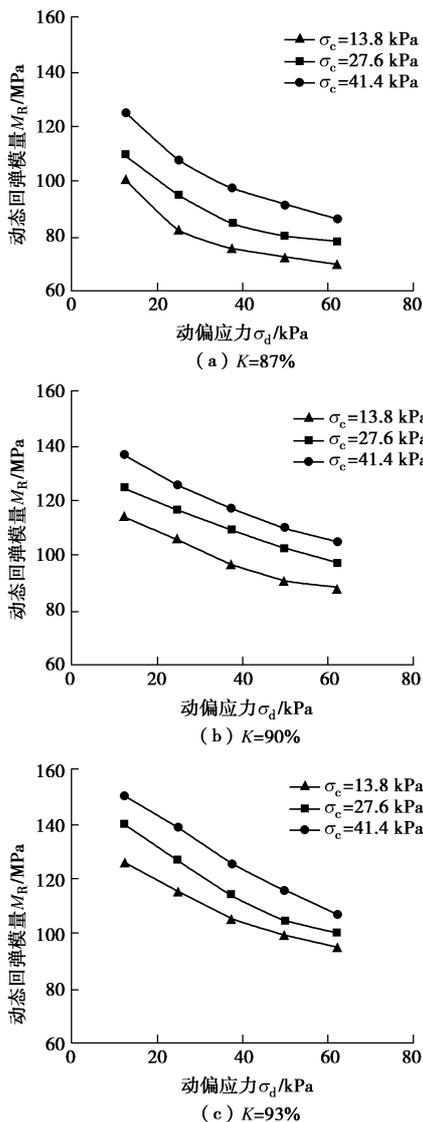


图2 应力水平对压实红黏土动态回弹模量的影响规律
Fig. 2 Influences of stress level on dynamic resilient modulus of compacted lateritic clay

(2) 含水率的影响

图3为试验土样在围压 $\sigma_c=27.6$ kPa、不同压实度下 M_R 随含水率和动偏应力的变化曲线。可以看出：随着含水率增大，动态回弹模量非线性减小；含水率从 15.5%增加至 23.0%，不同压实度和动偏应力下 M_R 均降低约 60%， M_R 绝对值的减小随动偏应力增大而

减小， $\sigma_d=13.8$ kPa 和 $K=93\%$ 时 M_R 值减小最多，为 123.9 MPa；含水率从 w_{opt} 增大到 $w_{opt}+1.5\%$ 时，动态回弹模量变化相对较小，但随着含水率继续增大，从 w_{opt} 增大到 $w_{opt}+4.5\%$ 时，不同压实度下 M_R 均降低约 50%，最大减小约 70 MPa。此外，随着含水率的增大，动偏应力对动态回弹模量影响程度逐渐减弱。分析认为，黏性土的抗剪强度主要由黏聚力承担，而土体的黏聚力受颗粒间引力、基质吸力和胶结作用所控制。当含水率达到最优含水率后进一步增大，增加的水分主要以自由水的形式存在于孔隙，一方面导致弱结合水膜变厚，颗粒间距增大，相互引力减小；另一方面导致饱和度增大，液面张力作用显著降低，基质吸力急剧减小；同时红黏土中的游离氧化铁等矿物因自由水增加而溶解导致土颗粒及其颗粒间胶结物质软化溶蚀，胶结作用减弱。因此，非饱和和压实细粒土随含水率增加，抵抗变形能力减弱，动态回弹模量急剧下降。

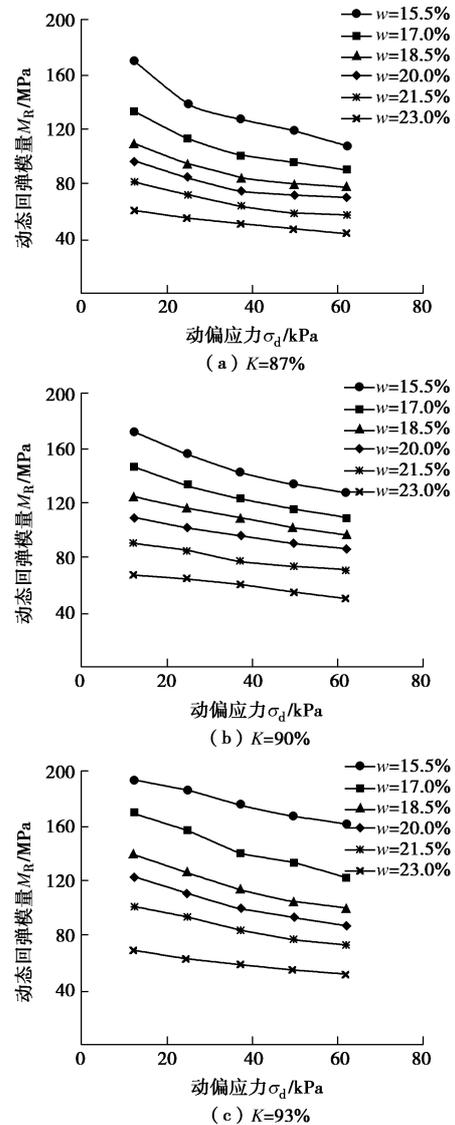


图3 含水率对压实红黏土动态回弹模量的影响规律
Fig. 3 Influences of moisture content on dynamic resilient modulus of compacted lateritic clay

针对应力水平 (σ_c 和 σ_d) 对 M_R 的影响, 现行《公路路基设计规范》^[28] 采用一个通用模型进行描述, 模型表达式如下:

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4)$$

式中 θ 为体应力, $\theta = 3\sigma_c + \sigma_d$; $\tau_{oct} = (\sqrt{2}/3)\sigma_d$; p_a 为大气压强, 取 100 kPa; k_1, k_2, k_3 为模型参数。

采用式 (4) 对本文 M_R 的试验结果进行拟合, 得到不同压实度和含水率下的 k_1, k_2, k_3 值如表 3 所示。再根据《公路路基设计规范》^[28] 推荐的当量应力水平 $\theta = 70$ kPa 和 $\tau_{oct} = 13$ kPa, 计算得到的代表性动回弹模量 M_{Rrep} 列于表 3, 其随含水率的变化规律如图 4 所示。可见 M_{Rrep} 随含水率增大急剧降低, 表现为显著的湿度敏感性; 且随含水率增大, 压实度对 M_{Rrep} 的影响程度不断降低。

表 3 不同压实度和含水率下代表性动态回弹模量

Table 3 Representative M_R with different degrees of compaction and moisture contents

压实度 $K/\%$	含水率 $w/\%$	k_1	k_2	k_3	R^2	M_{Rrep} /MPa
87	15.5	1878.4	0.17	-2.63	0.89	128.0
	17.0	1495.9	0.31	-2.56	0.94	97.8
	18.5	1221.7	0.29	-2.53	0.98	80.2
	20.0	1220.3	0.30	-2.59	0.99	72.9
	21.5	892.3	0.37	-2.36	0.99	58.9
	23.0	658.5	0.36	-2.25	0.99	43.3
90	15.5	1950.7	0.24	-1.60	0.89	147.9
	17.0	1648.5	0.29	-2.27	0.92	112.3
	18.5	1286.6	0.23	-1.84	0.85	94.2
	20.0	1118.9	0.22	-1.76	0.92	83.5
	21.5	1059.0	0.34	-2.08	0.89	72.4
	23.0	767.4	0.33	-2.16	0.99	52.4
93	15.5	2230.7	0.19	-1.35	0.97	178.6
	17.0	1949.8	0.19	-2.03	0.99	142.1
	18.5	1600.2	0.21	-2.14	0.99	114.2
	20.0	1368.2	0.20	-1.82	0.98	102.8
	21.5	1139.7	0.15	-1.83	0.99	86.7
23.0	854.2	0.27	-2.05	0.99	62.9	

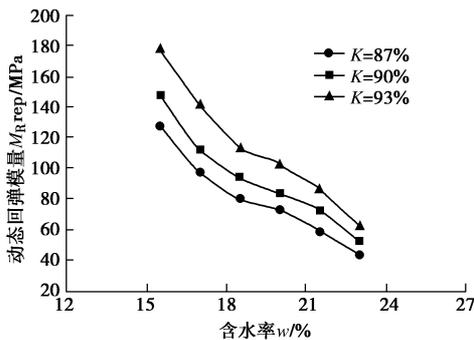
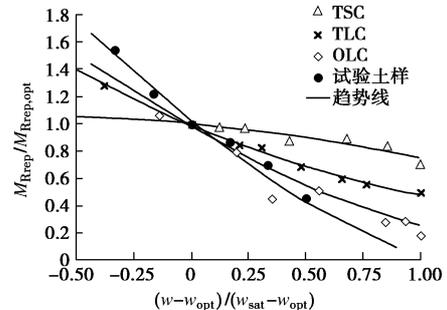
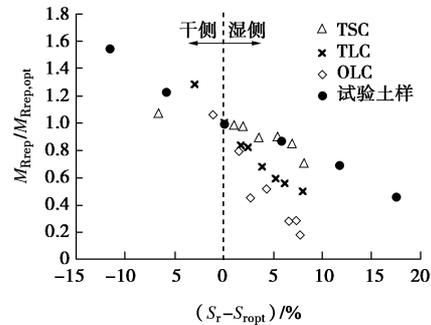


图 4 代表性动态回弹模量随含水率的变化规律
Fig. 4 Variation of M_{Rrep} with moisture content

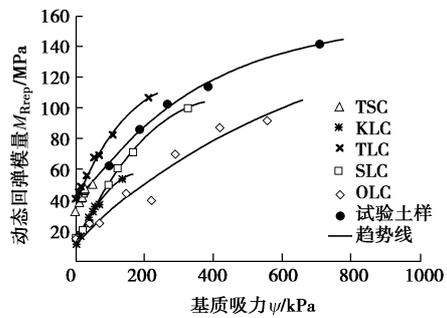
虽然表 3 中采用应力相关模型的拟合系数较高, 范围为 0.85~0.99, 但该模型不能显式地考虑含水率的影响。为探索建立显式包含湿度变化影响变量的动态回弹模量预估模型, 结合本文试验数据和已有文献中的数据进一步分析 M_R 随含水率的变化规律。图 5 为不同土样的代表性动态回弹模量与含水率、饱和度和基质吸力的关系曲线, 其中 TSC, KLC, TLC, SLC, OLC 的 M_{Rrep} 数据均来自于文献[29], 其塑性指数 I_p 分别为 6, 10, 12, 14 和 26, 其余物性指标见表 4。由图 5 (a) 可见, 不同土样 M_{Rrep} 随含水率 w 的变化规律不一致, 表现为与土性显著相关, 随着塑性指标的增大, M_{Rrep} 随 w 的变化程度越大; 图 5 (b) 中 M_{Rrep} 随饱和度 S_r 的变化规律在最佳含水率湿侧表现为较大的离散性; 图 5 (c) 为不同土样的 M_{Rrep} 随基质吸力 ψ 的变化规律, 虽然吸力为 0 (完全饱和状态) 时 M_{Rrep} 大小不同, 但随 ψ 的增大, 不同土样的 M_{Rrep} 随 ψ 变化



(a) $M_{Rrep}/M_{Rrep,opt} - (w-w_{opt})/(w_{sat}-w_{opt})$



(b) $M_{Rrep}/M_{Rrep,opt} - (S_r - S_{r,opt})/\%$



(c) $M_{Rrep} - \psi$

图 5 不同土样的代表性动态回弹模量与含水率、饱和度和基质吸力的关系曲线

Fig. 5 Relationships among M_{Rrep} , moisture content, saturation and martic suction of different soils

趋势基本一致。由此可见, 基质吸力 ψ 可作为表征含水率对动态回弹模量影响的间接指标, 可用于建立 M_R 预估模型的一个应力状态变量。

3 动态回弹模量预估模型

3.1 模型构建

如前文所述, 式(4)所述模型可以较好地刻画 M_R 的应力依赖性, 而基质吸力作为非饱和土的一个应力状态特征变量, 与湿度变化下土体 M_R 值有显著相关性, 因此本文将基质吸力 ψ 引入到式(4)中以考虑含水率变化对 M_R 的影响。目前有将 ψ 作为独立应力变量和围压的应力分量考虑的两种方法, 其中作为应力分量考虑的方法应用较广泛, 通常是基于非饱和土有效应力的概念, 采用 Bishop 有效应力系数 χ_w 考虑基质吸力对有效应力的贡献, 得到模型的表达式如下:

$$M_R = k_4 p_a \left(\frac{\theta + \chi_w \psi}{p_a} \right)^{k_5} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a} + 1 \right)^{k_6}, \quad (5)$$

式中, k_4 , k_5 , k_6 为模型参数, 其余符号意义同前。

已有以 ψ 作为应力分量的 M_R 预估模型的不同之处在于有效应力系数 χ_w 表达式的不同。其中, Khalili 等^[30]提出 χ_w 与大于进气值 ψ_e 的基质吸力的经验关系为

$$\chi_w = (\psi_e / \psi)^{0.55}. \quad (6)$$

表4 用于本文模型分析的不同土样的物性指标

Table 4 Physical properties of different soil samples used in model regression analysis

编号	土样名称	G_s	$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p	$w_{opt}/\%$	$\rho_{\text{dmax}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Sand/%	Silt/%	Clay/%	数据来源
#1	IHT	2.72	35.5	16.5	19.0	15.5	1.884	28.0	42.0	30.0	文献[20]
#2	TSC	2.68	19.6	13.6	6.0	13.5	1.954	3.0	81.0	16.0	文献[29]
#3	OLC	2.75	48.0	22.0	26.0	23.0	1.649	20.0	48.0	32.0	
#4	KLC	2.71	31.0	21.0	10.0	20.3	1.664	15.0	60.0	25.0	
#5	SLC	2.74	32.5	18.5	14.0	18.2	2.002	10.0	70.0	20.0	
#6	TLC	2.69	25.0	13.0	12.0	12.2	1.806	31.0	50.0	19.0	
#7	P-7	2.67	31.0	24.0	7.0	17.0	1.735	35.0	52.0	13.0	
#8	P-17	2.65	38.0	21.0	17.0	16.0	1.765	19.0	63.0	18.0	
#9	P-26	2.71	44.0	18.0	26.0	22.0	1.612	4.0	61.0	35.0	
#10	P-53	2.66	88.0	35.0	53.0	35.0	1.255	2.0	13.0	84.0	
#11	A-4	—	27.8	19.8	8.0	14.2	1.847	43.7	40.0	16.3	文献[7]
#12	A-6	—	30.8	18.4	12.3	16.5	1.842	31.2	55.0	13.8	
#13	RLF-103%	2.69	42.0	18.0	24.0	22.0	1.612	8.9	63.8	27.3	文献[33]
#14	MnRd-103%	2.66	26.0	17.0	9.0	16.0	1.806	36.2	45.3	14.5	
#15	MnRd-98%	2.66	26.0	17.0	9.0	16.0	1.806	36.2	45.3	14.5	
#16	RW-98%	2.69	28.0	17.0	11.0	13.5	1.827	11.9	82.4	5.7	
#17	TH23-98%	2.75	85.0	33.0	52.0	27.5	1.469	3.6	21.2	75.2	
#18	低液限黏土-96%	2.64	27.5	16.5	11.0	13.6	1.980	14.0	76.0	10.0	
#19	低液限黏土-91%	2.64	27.5	16.5	11.0	13.6	1.980	14.0	76.0	10.0	
#20	红黏土-87%	2.72	70.8	35.2	35.6	18.5	1.720	23.9	33.5	42.6	本文试验
#21	红黏土-90%	2.72	70.8	35.2	35.6	18.5	1.720	23.9	33.5	42.6	
#22	红黏土-93%	2.72	70.8	35.2	35.6	18.5	1.720	23.9	33.5	42.6	

注: Sand/%、Silt/%和Clay/%分别表示粒径大于0.075 mm, 0.005~0.075 mm和小于0.005 mm的颗粒含量。

该经验关系应用于 Liang 等^[7]建立的 M_R 预估模型, 但式(6)右边基质吸力的指数项采用常数0.55对于不同类型土的适用性存在欠缺。本文采用 Vanapalli 等^[31]基于土水特征曲线建立普适的抗剪强度公式时提出的 χ_w 表达式:

$$\chi_w = \Theta^\kappa, \quad (7)$$

式中, Θ 为相对体积含水率, $\Theta = \theta / \theta_s$, θ_s 为饱和体积含水率, κ 为拟合参数。为考虑不同类型土样的参数 κ 的变化, 本文采用 Garven 等^[32]建立的以塑性指数 I_p 为变量的经验关系式:

$$\kappa = -0.0016I_p^2 + 0.0975I_p + 1. \quad (8)$$

结合式(5)、(7)和(8), 得到本文建立的综合考虑应力水平和含水率影响的 M_R 预估模型:

$$M_R = k_4 p_a \left(\frac{\theta + \Theta^\kappa \psi}{p_a} \right)^{k_5} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a} + 1 \right)^{k_6}. \quad (9)$$

3.2 模型适用性分析

为验证本文显式考虑含水率影响的预估模型的合理性和适用性, 收集已有文献中同时测试了不同含水率下土体的基质吸力和动态回弹模量的试验数据, 包括本文试验在内共22种试样, 物性指标如表4所示, 液限 w_L 范围为19.6%~85.0%, I_p 范围为6.0~53.0。其中#1、#7和#8土样有3个不同含水率, #2~#6土样各有8个不同含水率, #9, #10分别有4个和5个不同

含水率, 含水率变化幅度相对较大, 加上本文试样共 13 种试样用来建立模型参数与物性指标的关系, #11~#19 试样用来验证所建模型及模型参数的准确性。

对于相同试样在不同含水率和应力水平下采用一套参数进行拟合, 表 5 为 13 种试样分别采用 Liang 等模型^[7]和本文模型进行预估的拟合参数对比情况, 2 个模型的 3 个回归参数 k_4, k_5, k_6 变化趋势基本一致, 其中 k_4 均大于 0, 与土体结构和物理状态相关; k_5 均为正值, 路基土 M_R 随体应力和基质吸力增大而增大, 表现为硬化特性; k_6 均为负值, 路基土随动偏应力增大而减小, 表现为软化特性。此外针对 13 种试样, 本文模型的拟合系数 R^2 变化范围为 0.61~0.96, 平均为 0.86 (如图 6 所示), 高于 Liang 等模型的拟合系数均值 0.69, 变化幅度要低于 Liang 等模型, 表明本文建立的 M_R 预估模型对于不同土样具有较好的适用性。

表 5 不同模型的拟合参数对比

Table 5 Comparison of fitting parameters from different prediction models

土样 编号	文献[7]				本文模型			
	k_4	k_5	k_6	R^2	k_4	k_5	k_6	R^2
#1	146.5	4.489	-7.324	0.97	191.5	2.498	-4.082	0.96
#2	387.8	0.513	-0.373	0.62	380.1	0.550	-0.409	0.71
#3	181.1	1.856	-2.742	0.71	192.0	1.128	-1.704	0.92
#4	224.0	0.984	-0.503	0.29	175.8	1.330	-0.735	0.61
#5	302.3	1.372	-1.249	0.26	178.5	1.430	-0.731	0.84
#6	702.9	0.891	-2.403	0.43	578.4	0.912	-2.228	0.89
#7	155.2	1.384	-1.186	0.71	165.4	1.027	-0.679	0.88
#8	19.9	2.166	-1.624	0.92	38.6	1.705	-1.386	0.94
#9	158.2	1.185	-1.422	0.80	172.5	0.891	-1.044	0.86
#10	317.9	0.736	-1.455	0.83	381.8	0.357	-1.023	0.81
#20	455.7	1.374	-3.314	0.75	442.9	1.181	-2.986	0.93
#21	428.0	1.290	-2.477	0.84	470.8	1.114	-2.271	0.91
#22	445.5	1.249	-2.351	0.89	534.9	0.987	-2.083	0.94

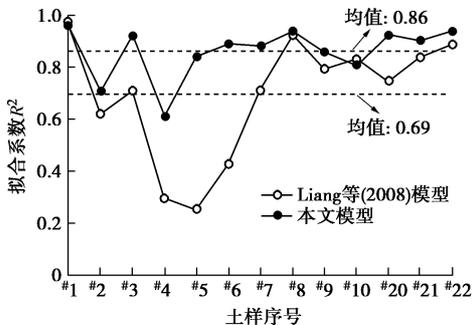


图 6 不同模型拟合系数对比

Fig. 6 Comparison of fitting parameters from different prediction models

3.3 模型参数回归分析

然而不同土样的模型参数需要通过试验获得, 考

虑到测试 M_R 和 ψ 需要专门的设备和人员, 且耗时长, 为了能在没有试验条件下合理确定 M_R , 本文拟构建模型参数与物性指标的关系。基于表 5 中本文模型回归得到的 13 种试样的模型参数, 以塑性指数 I_p 、液限 w_L (%)、黏粒含量 Clay% (<0.005 mm, %)、细颗粒含量 $P_{0.075}$ (<0.075 mm, %)、干密度 ρ_d (g/cm³)、活性指数 AI ($I_p/P_{0.075}$) 和 wPI ($I_p \cdot P_{0.075}$) 为变量, 采用 SPSS 软件, 通过逐步线性回归方法建立本文模型参数 (k_4, k_5 和 k_6) 与所选变量的经验关系。通过每一个变量 t 检验的 P 值来表征变量在方程中的显著程度, P 值越小表明与之相对应的预估值显著性越高, 即表明变量与 $k_4 \sim k_6$ 之间具有明显的线性关系。然后从所有变量的组合中选取决定系数 R^2 最大的一组作为建立回归方程的变量。本文模型参数多元逐步线性回归分析结果见表 6, 得到 $k_4 \sim k_6$ 与物性参数之间的经验关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \ln k_4 &= 2.531 + 0.108I_p - 0.039w_L - \\ &\quad 0.016\text{Clay}\% + 2.008\rho_d, \\ k_5 &= 0.653 - 0.017P_{0.075} + 1.054\rho_d, \\ k_6 &= -3.838 + 0.04P_{0.075} - 17.662\text{AI} + \\ &\quad 0.112w_L - 0.786\rho_d. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

可见, 模型参数 k_5 回归系数稍微偏低外, k_4 和 k_6 拟合系数均较高, 表明模型参数与物性指标之间存在较好的线性关系。

表 6 本文模型参数多元逐步线性回归分析结果

Table 6 Results of stepwise and multiple regression analyses for proposed model parameters

因变量	自变量	预估值	标准差	t 值	P 值	R^2
$\ln k_4$	截距	2.531	2.207	1.147	0.289	0.78
	I_p	0.108	0.027	3.961	0.005	
	w_L	-0.039	0.016	-2.520	0.040	
	Clay %	-0.016	0.008	-2.024	0.083	
	ρ_d	2.008	1.130	1.778	0.119	
k_5	截距	0.653	0.551	0.421	0.183	0.58
	$P_{0.075}$	-0.017	0.009	-1.830	0.097	
	ρ_d	1.054	0.717	1.471	0.172	
k_6	截距	-3.838	3.119	-1.231	0.253	0.83
	$P_{0.075}$	0.040	0.017	2.410	0.043	
	AI	-17.662	4.583	-3.854	0.005	
	w_L	0.112	0.037	2.992	0.017	
	ρ_d	-0.786	0.369	-0.620	0.155	

3.4 模型可靠性验证

采用表 4 中其余 9 种土样 (#11~#19 土样) 对本文模型及其参数经验关系式 (10) 进行验证, #11~#19 土样的 I_p 范围为 8.0~52.0, 含水率在最佳含水率上下变化, 且考虑了不同压实度影响。图 7 为基于式 (9)、(10) 的预测值与实测值的对比, 结果显示数据点分布在均值线上下一定范围内, 表征预测精度的系数 R^2 达到 0.79, 验证了经验关系式 (10) 的可靠性。表明

了根据以物性指标为变量的经验关系式计算得到的模型参数可以较好地用于预估路基压实土的动态回弹模量,且可结合式(9),预测不同压实细颗粒土动态回弹模量随含水率和应力水平的变化规律。

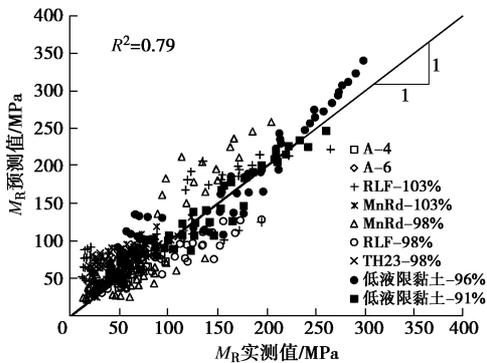


图7 本文模型预测值与实测值对比

Fig. 7 Comparison between measured and predicted values of M_R using proposed model

4 结 论

(1) 压实度越大,非饱和路基土持水能力越强;同一含水率下,动态回弹模量随压实度、围压的增大而增大,随动偏应力增大呈非线性减小;动偏应力对 M_R 影响程度相对围压要大,围压对 M_R 的影响程度随压实度的提高而减小。

(2) 同一应力水平下,非饱和路基土 M_R 随含水率增大急剧降低,本文的红黏土试样含水率从 w_{opt} 增加 4.5% 时,不同压实度下 M_R 均降低约 50%,最大减小约 70 MPa,表现为显著的湿度敏感性;且随含水率增大,动偏应力和压实度对 M_R 的影响程度逐渐减弱。

(3) M_R 随含水率 w 、饱和度 S_r 的变化规律与土性显著相关,土体的塑性指标的增大, M_R 随 w 的变化程度越大;而不同土样的 M_R 随基质吸力 ψ 变化趋势基本一致, ψ 可作为表征含水率对 M_R 影响的相关指标。

(4) 引入基质吸力和非饱和有效应力系数,建立了综合显式考虑含水率和应力(围压与偏应力)影响的压实路基土 M_R 预测模型,并证实了该模型对于不同类型土体均有较好的适用性。

(5) 分别建立了本文模型 3 个参数与物性指标 (I_p , w_L , Clay %, $P_{0.075}$, ρ_d , AI) 之间的线性经验关系,并对其可靠性进行了验证,可用来预测运营期压实路基土动态回弹模量受含水率和应力水平变化影响的规律。

本文所建立的 M_R 预估模型综合考虑了湿度变化和应力水平的影响,并可通过常规物性指标确定模型参数,为设计过程中合理选取计算参数提供了简便实

用的方法。由于目前同时测试土体基质吸力和动态回弹模量的试验尚较少,本文模型参数的经验关系仅是在几种土样试验数据基础建立而来,今后需更多不同类型土样试验结果对本文经验关系进行修正以提高其可靠性。

参考文献:

- [1] SEED H B, CHAN C K, LEE C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements[C]// Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Michigan, 1962: 611 - 636.
- [2] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Development of the 2002 guide for the design of new and rehabilitated pavement structures[R]. Washington, D C: NCHRP Transportation Research Board, 2004.
- [3] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S]. 2017. (JTG D50—2017 Specification for design of highway asphalt pavement[S]. 2017. (in Chinese))
- [4] NGUYEN Q, FREDLUND D G, SAMARASEKERA L, et al. Seasonal pattern of matric suctions in highway subgrades[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(3): 267 - 280.
- [5] 钱劲松, 王 朋, 凌建明, 等. 潮湿多雨地区高速公路路基湿度的实测特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1812 - 1817. (QIAN Jin-song, WANG Peng, LING Jian-ming, et al. In-situ investigation of subgrade moisture of expressway in humid zone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(12): 1812 - 1817. (in Chinese))
- [6] DRUMM E C, REEVES J S, MADGETT M R, et al. Subgrade resilient modulus correction for saturation effects[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(7): 663 - 670.
- [7] LIANG R Y, RABAB'AH S, KHASAWNEH M. Predicting moisture-dependent resilient modulus of cohesive soils using soil suction concept[J]. Journal Transportation Engineering, 2008, 134(1): 34 - 40.
- [8] SALOUR F. Moisture influence on structural behaviour of pavements: field and laboratory investigations[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [9] MEHROTRA A, ABU-FARSAKH M, GASPARD K. Development of subgrade M_r constitutive models based on physical soil properties[J]. Road Materials and Pavement, 2018, 19(1): 56 - 70.
- [10] WITCZAK M W, UZAN J. The universal airport pavement design system. Report I of V: granular material characterization[R]. Maryland: University of Maryland, 1988.

- [11] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art I: resilient response of unbound aggregates[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2000, **126**(1): 66 - 75.
- [12] LI D, SELIG E T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **120**(6): 939 - 957.
- [13] KHOURY N, BROOKS R, BOENI S Y, et al. Variation of resilient modulus, strength, and modulus of elasticity of stabilized soils with postcompaction moisture contents[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, **25**(2): 160 - 166.
- [14] HEATH A C, PESTANA J M, HARVEY J T, et al. Normalizing behavior of unsaturated granular pavement materials[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(9): 896 - 904.
- [15] NG C W W, ZHOU C, YUAN Q, et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(2): 223 - 232.
- [16] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1993.
- [17] YANG S R, LIN H D, KUNG J H, et al. Suction-controlled laboratory test on resilient modulus of unsaturated compacted subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(9): 1375 - 1384.
- [18] KHOURY N, BROOKS R, KHOURY C, et al. Modeling resilient modulus hysteretic behavior with moisture variation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2012, **12**(5): 519 - 527.
- [19] SALOUR F, ERLINGSSON S, ZAPATA C E. Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(12): 1413 - 1422.
- [20] HAN Z, VANAPALLI S K. Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils[J]. *Engineering Geology*, 2016, **211**: 85 - 97.
- [21] ZAMAN M, SOLANKI P, EBRAHIMI A, et al. Neural network modeling of resilient modulus using routine subgrade soil properties[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2010, **10**(1): 1 - 12.
- [22] YAN K Z, XU H B, SHEN G H. Novel approach to resilient modulus using routine subgrade soil properties[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, **14**(6): 04014025.
- [23] ZHOU C J, HUANG B S, DRUMM E, et al. Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2015, **141**(1): 04014069.
- [24] AASHTO. Designation T307-99: determining the resilient modulus of soils and aggregate materials[S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2003.
- [25] ASTM Designation: D5298-10. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper[S]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [26] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements [J]. *Geotechnical Testing*, 2002, **25**(3): 322 - 333.
- [27] FREDLUND D G, XING A. Equation for the soil - water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**: 521 - 532.
- [28] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 2015. (JTG D30—2015 Specification for design of highway subgrades[S]. 2015. (in Chinese))
- [29] HAN Z, VANAPALLI S K, ZOU W L. Integrated approaches for predicting soil-water characteristic curve and resilient modulus of compacted fine-grained subgrade soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, **54**(5): 646 - 63.
- [30] KHALILI N, KHABBAZ M H. A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 1998, **48**(2): 1 - 7.
- [31] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear Strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, **33**(3): 379 - 392.
- [32] GARVEN E A, VANAPALLI S K. Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils[C]// ASCE. Proceedings of the 4th International Conference on unsaturated Soils. Carefree, 2006: 2570 - 2581.
- [33] GUPTA S C, RANAIVOSON A, EDIL T B, et al. Pavement design using unsaturated soil technology[R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation, St. Paul, 2007.
- [34] 兰 伟. 路基土非饱和特性及回弹模量预估模型[D]. 上海: 同济大学, 2009. (LAN Wei. Unsaturated characteristics and prediction model of and resilient modulus of subgrade soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))