

基于基质吸力的粘性路基土动回弹模量预估模型研究

邱 欣¹, 钱劲松², 张世洲³

(1. 浙江师范大学工学院, 金华 321004; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
3. 辽宁省交通规划设计院, 沈阳 110015)

摘要:为解决非饱和粘性路基土动回弹模量参数取值问题,采用滤纸法测定土样基质吸力,获取其土水特征曲线,并利用室内重复动三轴测试方法,进行了动态回弹模量测试,并探讨了动回弹模量的影响因素及其规律,进而在考虑含水量与基质吸力之间对应关系的基础上,集成创建了综合反映湿度状况(基质吸力)与应力状况(围压和循环偏应力)影响的粘性路基土新型动态回弹模量预估模型。研究表明,土水特征曲线 Fredlund & Xing 模型能够较好地关联非饱和粘性路基土基质吸力与湿度之间的相关关系;回弹模量测试值随围压、基质吸力和压实度的提高而增大,随循环偏应力和含水量的增大而减小。

关键词:回弹模量; 预估模型; 基质吸力; 土水特征曲线

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)03-0049-05

路基土动回弹模量 (Resilience Modulus, M_R) 这一概念最初是 Seed 等^[1]在研究路基土回弹特性与沥青路面疲劳损坏关系的过程中引入的, Dragos 等^[2]将其定义为瞬时动态脉冲荷载下, 动态偏应力与回弹或可恢复应变的比值。目前, 各国现行沥青路面设计方法大都采用 M_R 来表征路基的力学特性, 并已成为沥青路面结构厚度设计的重要参数之一^[3~4]。长期以来, 国内外许多学者在深入分析粘性路基土 M_R 主要影响因素(土组类型、含水量、压实度和应力状况等)的基础上, 建立了相应的 M_R 预估模型^[5~6]。但分析认为现有 M_R 预估模型主要以不同形式反映了应力状况对 M_R 的影响, 而对路基内湿度因素的考虑则有所不同。Naji 利用 18 个现场土样进行了含水量与 M_R 关系的研究, 结果表明含水量与 M_R 之间不具有——对应关系, 即在同一含水量下, 可能对应于多个 M_R , 因而不能以含水量为变量来建立 M_R 的预估模型^[7]。事实上, 路基土通常位于地下水位以上, 呈非饱和状态, 其不同于饱和土的本质原因在于基质吸力的存在, 而土水特性曲线是联系湿度和吸力关系的纽带, 反映了土中含水量与基质吸力的单值函数关系^[8], 故基质吸力可间

接地反映路基土湿度状况对 M_R 的影响。但研究表明现有 M_R 研究成果很少对此问题进行系统地考虑与分析。基于此, 本文一方面采用滤纸法测定粘性土样在不同含水量下的基质吸力, 并建立土水特征曲线模型; 另一方面采用室内反复动三轴试验, 测定典型粘性路基土在不同条件下的 M_R 值; 进而在全面分析 M_R 影响因素的基础上, 建立综合反映路基湿度(基质吸力)及应力状态(围压和偏应力)的粘性路基土 M_R 预估模型。研究结果以期路面结构设计合理地确定路基模量参数提供全新的视角。

1 试验材料与方法

1.1 土样基本物性指标

根据我国现行《公路土工试验规程》中路基土的分类标准, 代表性粘性路基土(取土地点位于京珠高速公路广州—韶关段 k162 处)的筛分曲线如图 1 所示, 其基本物理性质指标如表 1 所示。

1.2 基质吸力测试

鉴于滤纸法具有经济、准确、操作方便及测量范围大等优点^[8], 研究中采用该法间接测量土中基质吸力, 其基本原理是在封闭的恒温环境下, 使滤纸的含水量与土样中的基质吸力保持平衡, 再由滤纸校正曲线, 得到土样基质吸力。测试时定量分析滤纸型号为 Whatman NO. 42 ($\Phi = 5.5\text{cm}$), 校正曲线(基质吸力 ψ 与滤纸含水率 w_f 之间的关系曲线)如式(1)^[9]:

$$\log \psi = 4.945 - 0.0673w_f \quad w_f < 47 \quad (1a)$$

$$\log \psi = 2.909 - 0.0229w_f \quad w_f \geq 47 \quad (1b)$$

收稿日期: 2010-10-18; 修订日期: 2011-03-14

基金项目: 国家青年科学基金项目(50908176); 浙江省教育厅
基金项目(Y200909200)

作者简介: 邱欣(1978-), 男, 讲师, 工学博士, 从事路基路面结
构力学行为及材料性能研究。

E-mail: xqiu@zjnu.cn

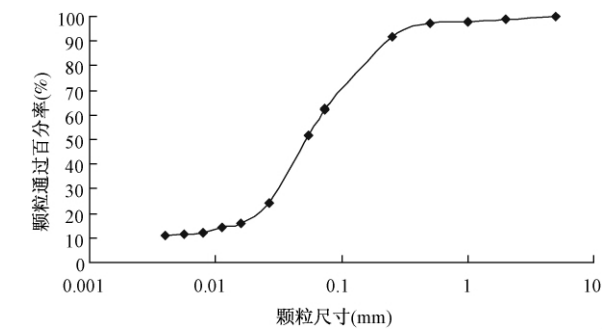


图 1 土粒径分布曲线
Fig. 1 Particle-size distribution curve

表 1 土样基本物理性质指标

Table 1 Basic properties of test specimens						
土样	γ_{dmax} ($g \cdot cm^{-3}$)	w_{opt} (%)	G_s	w_L (%)	w_p (%)	I_p
京珠 K162	1.95	13.20	2.737	34.40	21.40	13.0

用滤纸法测量基质吸力和土水特性曲线测量的具体操作步骤如下:

(1) 将土样进行饱和处理,通过风干获得不同湿度状态,按压实度 95% 成型试件,并在最佳含水量 (Optimum Moisture Content, OMC) 两侧 $\pm 4\%$ 范围内,准备 7 个圆柱形土样试件 ($h = 12.7\text{cm}$, $\Phi = 10\text{cm}$);

(2) 采用线锯把圆柱形在中间锯开,并用刮刀把试样锯开部分削平,以便于滤纸埋入,并保证滤纸与试样之间良好接触;

(3) 将三张干燥滤纸 (Whatman No. 42) 放置于两块土样之间,中间那张滤纸用来量测土中的基质吸力,而外面两张用来保护中间滤纸免于被土样污染。

(4) 将待测试样放置于密封良好的储罐中,大约经过 14d 后,罐内的土与滤纸之间的水汽交换趋于稳定,量测滤纸的含水量,并由校正曲线计算基质吸力;

(5) 测量土样含水量,绘制土样的土水特征曲线,并进行模型参数标定。

1.3 动回弹模量试验

三轴重复加载试验是测试 M_R 的首选方法,在国际上被广泛接纳和应用。本文参照美国 AASHTO 路基土与未处治粒料回弹模量试验规程 (T292 - 91) [10],制定了三轴重复加载测试方法。试验仪器为澳大利亚 UTM - 100 测试仪,围压为气压加载。圆柱体测试试件的尺寸为 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$,采用万能液压试验机静压压实成型。根据击实试验结果,将所取土样在不同含水量 (OMC 和 $OMC \pm 3\%$) 和不同压实度 (90% 和 98%) 条件下分别制备 3 个平行试件,并利用试验

前后两次量测到的试件高度平均值作为试件高度,来计算实际的压实度,同时三轴加载测试后用整个试件测定实际含水量。应力状态的影响在应力加载序列中体现,试验中加载序列参照 AASHTOT292 - 91 [10]、NCHRP1 - 28A [11] 等试验方法,并根据我国实际路面结构的受力特点而确定 (表 2)。

表 2 路基细粒土典型应力加载序列
Table 2 Test sequence for fine-grained subgrades

加载序列	围压应力 σ_3 (kPa)	循环偏应力 σ_d (kPa)	竖向应力 σ_1 (kPa)	加载次数 (次)
0 - 预载	30	50	80	1 000
1	60	30	90	100
2	45	30	75	100
3	30	30	60	100
4	15	30	45	100
5	60	55	115	100
6	45	55	100	100
7	30	55	85	100
8	15	55	70	100
9	60	75	135	100
10	45	75	120	100
11	30	75	105	100
12	15	75	90	100
13	60	105	165	100
14	45	105	150	100
15	30	105	135	100
16	15	105	120	100

荷载测试波形采用半正弦波加载,频率为 1Hz,其中持载时间为 0.1s,间歇时间为 0.9s。3 个平行试件的高度和含水量与平行试件均值误差不超过 1%。试件加载预压 1 000 次时,如果垂直永久应变达到 5%,预压停止。每个平行试件回弹模量值与平均值之间误差不超过 5%。每一加载级位组合的加载循环次数一般取 100,待应变水平稳定后取最后 5 次回弹变形的平均值,按式 (2) 计算试件的回弹模量。

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R}$$

(2)

式中: M_R ——动回弹模量;

σ_d ——轴向重复偏应力峰值,大小等于 $\sigma_1 - \sigma_3$;
其中 σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力,分别对应于试验中的竖向应力和围压应力;

ε_R ——轴向回弹应变均值。

2 试验结果与分析

2.1 土水特征曲线模型及参数标定

当前,大部分用于描述土水特征曲线的数学模型

都是根据经验、土体结构特征和曲线形状而建立的,其表达式在形式上具有幂函数、对数函数的特征^[12]。本文借助土样基质吸力的量测结果,分别采用式(3)和式(4)所对应的 Fredlund & Xing 模型^[13]、Van Genuchten & Burdine 模型^[14],对实测粘性土样在不同含水量条件下的基质吸力进行了拟合分析,拟合曲线如图 2 所示。

$$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h_s}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln\left[\exp(1) + \left(\frac{h_s}{a}\right)^b\right] \right\}^c}$$

(3)

式中: θ_w ——体积含水量;
 h_s ——基质吸力;
 θ_s ——饱和体积含水量;
 h_r ——与剩余体积含水量对应的基质吸力;
 a b c ——待定参数。

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h_s}{a}\right)^b \right]^c}$$

(4)

式中: θ_r ——剩余体积含水量,其它参数同上式。

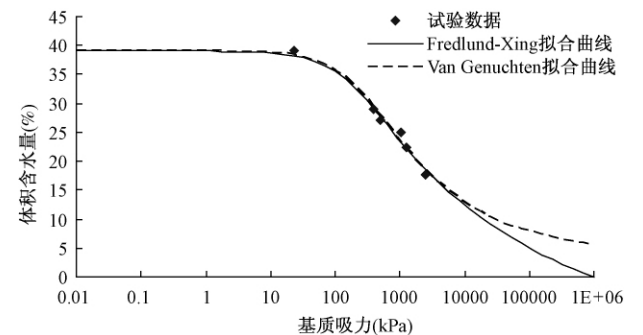


图 2 京珠 K162 土样的 SWCC 拟合曲线
Fig.2 SWCC fitted curve of Jing-Zhu K162

从拟合曲线可知,Fredlund & Xing 模型和 Van Genuchten & Burdine 模型在大部分含水量范围内与试验数据吻合较好,但在接近于完全干燥状况时,Fredlund & Xing 模型计算含水量接近于 0,更符合理论情况,而此时 Van Genuchten & Burdine 模型的误差较大。鉴于 Fredlund & Xing 模型能够在较大含水量范围条件下保持连续的特点,分析中以此模型作为关联非饱和和粘性路基土基质吸力与湿度的关系纽带,其对应的模型参数标定结果如表 3 所示。

2.2 动回弹模量影响因素分析

粘性路基土 M_R 主要受其应力状况、含水量、压实

度与基质吸力等因素的影响。

表 3 土 - 水特征曲线参数拟合
Table 3 Fitting parameters of soil-water
characteristic curve

土样	模型参数				R^2	进气值 ψ_c (kPa)
	a	b	c	h_r (kPa)		
京珠 K162	219.00	1.07	0.66	6 786.96	0.99	78.08

(1) 应力状态的影响

图 3 为粘性土样在 OMC、90% 压实度下 M_R 与应力状况(循环偏应力 σ_d 和围压应力 σ_3) 之间的关系。由图可知, M_R 随围压的增大而提高,在相同的循环偏应力下, M_R 随围压变化的增长幅度在 11.88% ~ 17.04% 之间; M_R 随循环偏应力的增大而减小,在相同的围压下, M_R 随偏应力增大而下降的幅度为 8.35% ~ 13.77%。分析结果在一定程度上反映了围压及偏应力对粘性路基土 M_R 的影响规律。

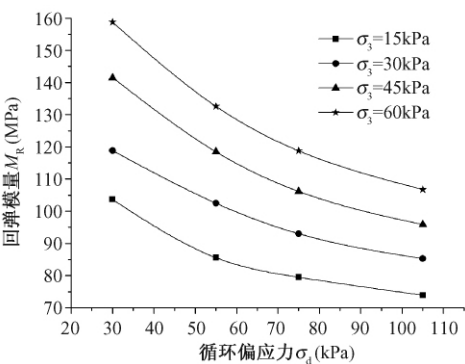


图 3 京珠 K162 土样回弹模量与应力状况关系
Fig.3 M_R versus stress state
of Jing-Zhu K162 soil specimen

(2) 含水量与压实度的影响

图 4 为粘性土样在不同压实度下 M_R 与含水量之间的关系。由图可知,粘性路基土 M_R 随含水量的增加而下降,随压实度的提高而增大。在相同的压实度下,当含水量由 OMC 变化为 OMC $\pm$ 3% 时,其 M_R 变化幅度高达 49.77% ~ 90.28%;在 OMC 下,压实度由 90% 提高到 98% 时,其 M_R 增幅为 18.22%,且随着含水量的增大,压实度对 M_R 的影响将不断降低。

(3) 基质吸力的影响

由于基质吸力与含水量之间具有特定的函数关系,因此, M_R 与基质吸力之间的关系也间接反映湿度状况对 M_R 的影响。分析时,与每个湿度状态对应的基质吸力由已标定的 Fredlund & Xing 土水特性曲线模型获取。图 5 为粘性土样在不同压实度下, M_R 与基

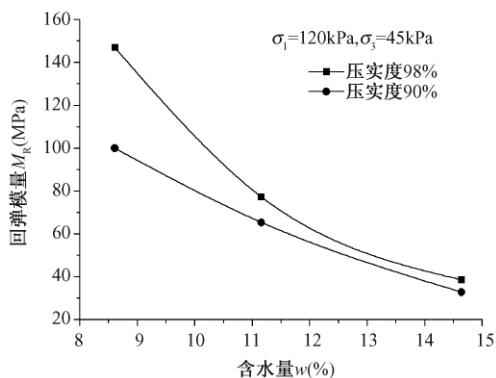


图4 京珠 K162 土样回弹模量与含水量关系

Fig. 4 M_R versus moisture content
of Jing-Zhu K162 soil specimen

质吸力之间的关系。可见, M_R 随基质吸力增加而增大;随着压实度的提高,基质吸力对 M_R 的影响也愈加显著,分析认为这主要是由于随着压实度的提高,土颗粒之间的联结得到了加强,从而引起 M_R 的增大。

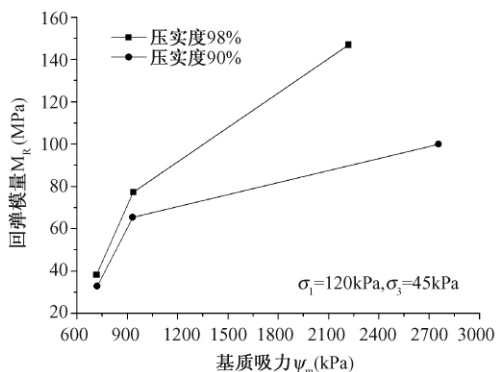


图5 京珠 K162 土样回弹模量与基质吸力关系

Fig. 5 M_R versus matric suction
of Jing-Zhu K162 soil specimen

3 回弹模量预估模型

3.1 模型构建

由上述分析可知,粘性路基土 M_R 受湿度、压实度、应力状态等诸多因素的影响,其预估模型亦可表达成诸多变量的函数。应用 Bishop (1959) 提出的非饱和土有效应力概念,考虑到基质吸力与含水量之间的一一对应关系,研究中在原有以应力形式为主的本构预估模型中(以 Uzan 模型为基础)引入基质吸力项,以此综合反映应力及湿度状态对 M_R 的影响。借助非线性回归分析工具 Datafit 8.0,建立的粘性路基土 M_R 预估模型:

$$M_R = k_1 (\sigma_d + \chi \psi_m)^{k_2} \sigma_3^{k_3} \quad (5)$$

式中: σ_d ——偏应力;

σ_3 ——围压应力;

ψ_m ——基质吸力;

χ ——饱和度参数,对于干燥土取 0,而饱和土则取 1;

k_1, k_2, k_3 ——模型参数。

对于 χ 的取值, Loret 和 Khalili^[15] 认为当土基质吸力 (ψ_m) 小于进气值 (ψ_e) 时,土可视为饱和状态,满足 Terzaghi 有效应力公式,因此 $\chi = 1$ 。对于非饱和土, Loret 和 Khalili 针对 14 种土(包括粉土、砂质粘土及粘土)进行剪切强度试验,试验结果发现 χ 与 (ψ_e / ψ_m) 具有高度的相关性:

$$\chi = \left(\frac{\psi_e}{\psi_m} \right)^{0.55} \quad (6)$$

进气值 ψ_e 可由土水特征曲线来确定,京珠 K162 粘性土样的 ψ_e 值如表 3 所示。

模型参数回归分析结果如表 4 所示。由此可知,所建立的 M_R 预估模型具有较高的相关性 ($R^2 > 0.9$)。回归模型参数中 k_2 在一定程度上反映了基质吸力与偏应力对 M_R 的控制程度。当 k_2 为正值时,基质吸力对 M_R 起控制作用,即 M_R 随基质吸力的增加而增大;反之,当 k_2 为负值时, M_R 则主要取决于偏应力的大小,它随偏应力的增加而呈下降趋势。 k_3 的大小反映了围压对 M_R 的影响。

表4 回弹模量预估模型参数回归结果

Table 4 Fitting parameters of resilient
modulus predictive model

土样	k_1	k_2	k_3	R^2
京珠 K162	2.89×10^3	-0.75	0.36	0.93

3.2 预估模型可靠性验证

为验证模型的正确性,分析中将试验测试结果与模型预估结果进行了对比分析,如图 6 所示。由此可见,两者之间具有较高的相关性,模型合理可靠。由于基质吸力与含水量之间具有一一对应的函数关系,因而在 M_R 预估模型中通过引入基质吸力项,可以较好地预估不同湿度状况下粘性路基土 M_R ,以反映季节性湿度变化对其的影响规律,从而为路面结构设计提供更准确的 M_R 参数取值。

4 结论

(1) Fredlund & Xing 模型可较好地表征非饱和粘性路基土湿度和基质吸力的相关关系,模型参数拟合结

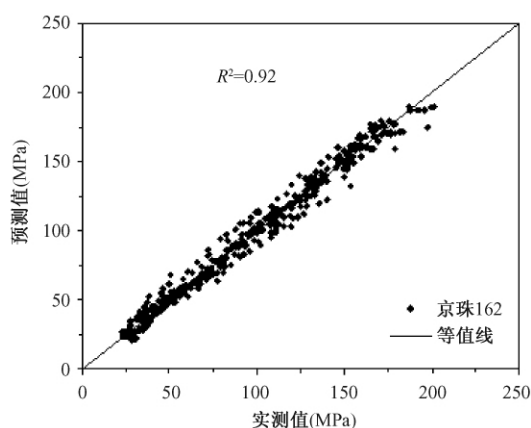


图6 粘土回弹模量预测与试验结果对比

Fig.6 Predicted versus measured resilient modulus for clay soil

果具有较高的可靠性。

(2) 粘土路基土回弹模量随围压、基质吸力和压实度的提高而增大, 随循环偏应力和含水量的增大而减小; 随着含水量的增大, 压实度对回弹模量的影响不断降低; 而提高压实度, 可显著增强基质吸力对回弹模量的影响。

(3) 在考虑含水量与基质吸力之间特定关系的基础上, 通过引入基质吸力变量, 建立了粘性路基土动态回弹模量预估模型。该模型同时考虑了围压、循环偏应力及基质吸力的影响, 因而能较好地反映路基土实际的受力状况与湿度状况, 从而获得了较精确的预估结果。

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 International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement. University of Michigan, 1962.
- [2] Dragos A, Matthew W W, Charles W S, et al. Harmonized resilient modulus test method for unbound pavement materials [C]//82th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, 2003.
- [3] AASHTO. Guide for mechanistic - empirical design of new and rehabilitated pavement structures [S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [4] 戴裕聪. 土壤吸力对路基土壤之力学特性影响探讨 [D]. 台湾: 国立中央大学, 2004. [DAI Y C. Research on the effect of soil suction to the mechanical characteristic of subgrade soils [D]. Taiwan: National Central University, 2004. (in Chinese)]
- [5] 张世洲. 基于非饱和土力学的路基土回弹模量预估模型 [D]. 上海: 同济大学, 2007. [ZHANG S Z. A new model to predict resilient modulus of subgrade soils based on unsaturated soils mechanics [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)]
- [6] Yuh P H. Resilient modulus estimation system [D]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 2005.
- [7] Naji K N, Zaman M M, Nevels J B, et al. Effect of soil suction on resilient modulus of subgrade soil using the filter paper technique [C]//82th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, 2003.
- [8] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学 [M]. 陈仲颐, 张在明, 等 (译). 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. [Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soil [M]. Chinese edition. CHEN Z Y, ZHANG Z M, translators, Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 1997. (in Chinese)]
- [9] 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.
- [10] AASHTO. Resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials, T292 - 91 [S]. USA: AASHTO Publications Department, 1993.
- [11] NCHRP. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design, Project 1 - 28 [R]. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, 1997.
- [12] 文宝萍, 胡艳青. 颗粒级配对非饱和粘性土基质吸力的影响规律 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35 (6): 50 - 55. [WEN B P, HU Y Q. Effect of particle size distribution on the matric suction of unsaturated clayey soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35 (6): 50 - 55. (in Chinese)]
- [13] Fredlund D G, Xing A. Equation for the soil - water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 521 - 532.
- [14] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. Model for the prediction of shear strength with respect of soil suction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33: 347 - 392.
- [15] Loret B, Khalili N. An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media [J]. Mechanics of Materials, 2002, 34: 97 - 116.

(下转第 58 页)

Experiment research about mechanical characteristic of gneissic granite while confining pressure is unloaded

FAN Yong-bo¹, WU Fa-quan², HE Hai-fang³, REN Ai-wu⁴

(1. Key Laboratory of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100150, China; 2. Key laboratory of Engineering Geo-mechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100038, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Unloading confining pressure tests are conducted before different pre-peak confining pressure of gneissic granite obtained at the foundation of Xiaowan hydrodynamic station, the results show that the deformation modulus changes little, but poisson's ratio increases greatly compared with the loading conditions under the same confining pressure. Samples with different sizes will show different behaviors under the same unloading confining pressure, and the sample with a larger size will show tensile failure; The peak-stress of the sample will increase linearly with the confining pressure increasing, and size effect is obvious, namely, the larger the size of sample, the less the influence of the confining pressure change.

Key words: gneissic granite; pre-peak unloading confining pressure; mechanical parameter

责任编辑:张明霞

(上接第 53 页)

Research on prediction model of dynamic resilient modulus of subgrade soil based on matric suction

QIU Xin¹, QIAN Jin-song², ZHANG Shi-zhou³

(1. Engineering College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Key Lab. of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 2018042, China; 3. Liaoning Transportation Planning Design Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Matric suctions of test specimens were surveyed by using the filter paper method, and parameters of soil-water characteristic curve (SWCC) equations were obtained by using regression analysis. For the sake of investigating factors which affect subgrade dynamic resilient modulus (M_R) and their laws, a series of resilient modulus tests were carried out with repeated load triaxial tests on reconstituted cylindrical specimens. Based on the corresponding relationship between moisture content and matric suction, an innovative model to predict dynamic resilient modulus of subgrade based on matric suction was established, which integrate the influence of stress state (confining pressure and circular deviator stress) and moisture condition (matric suction). The experimental results indicate that values parameters of SWCC are distinct for each specimens, M_R values increases with the increasing confining pressure, matric suction and compaction degree, and the circular deviator stress and moisture content decrease. Comparing to silty soil, the dynamic resilient modulus of clay is more sensitive to stress state and moisture content.

Key words: resilient modulus; prediction model; matric suction; soil-water characteristic curve

责任编辑:张明霞