

非饱和粉土回弹模量的应力依赖性与水敏感性耦合分析

弋晓明^{1,2}, 李术才¹, 王松根², 刘振清²

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 公路养护技术国家工程研究中心, 北京 100029)

摘要:为了研究路基内部应力状态和含水率变化对回弹模量的影响,建立了路基土回弹模量的预估模型。根据室内三轴重复加载试验结果,研究了应力依赖性控制指标的选择,结果表明:体应力变化时,回弹模量不具有单调变化的规律,所以不宜作为应力依赖性的控制指标;而利用围压和偏应力作为控制指标时则能全面的反映回弹模量的变化规律。根据土水特征曲线,利用基质吸力表征含水率的影响,构建应力依赖性和水敏感性的耦合模型,并通过试验结果的拟合验证,发现该模型能够较好地反映回弹模量随应力水平和含水率变化的规律。

关键词:非饱和粉土;应力依赖性;水敏感性;耦合分析

中图分类号:U416.1⁺2

文献标志码:A

Coupling analysis of stress dependence and water sensitivity for the resilient modulus of unsaturated silt soil

YI Xiao-ming^{1,2}, LI Shu-cai¹, WANG Song-gen², LIU Zhen-qing²

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. National Engineering Research Center of Road Maintenance Technologies, Beijing 100029, China)

Abstract: The influences of stress and water content on the subgrade resilient modulus were studied by constructing the prediction model. According to the results of repeated loading tri-axial test, the control indicator was researched. The results showed that the resilient modulus presented different changes with the volume stress increasing, which was unsuitable to reflect the stress dependent of resilient modulus. The confining pressure and the deviatoric stress were more appropriate to be the control indicators. Based on the soil water characteristic curve, the relationship between matric suction and water content was analyzed, and the matric suction was used in the prediction model to express the influence of the water content on the resilient modulus. The model could couple the stress dependence and water sensitivity, and also could well reflect the effects of stress and water, which was verified by the experimental results fitting.

Key words: unsaturated silt soil; stress dependence; water sensitivity; coupling analysis

0 引言

回弹模量是表征土的力学性质的基本指标,也

是路基路面结构设计中的重要参数。在长期的运营过程中,受外界环境因素的影响,路基土的回弹模量将会发生变化。研究表明,路基土的回弹模量主要受3个因素的影响:应力水平、含水率以及压实度,

其中受应力水平和含水率的影响较大^[1]。将路基回弹模量易受应力和水分影响而发生变化的性质称为应力依赖性和水敏感性。

对于土体回弹模量的应力依赖性,国内外许多学者进行研究。凌建明和徐艳玲通过三轴试验研究了应力级位的影响^[1-2],Thompson M R、Yaw B P 和 Moosazadeh J 分析了偏应力的影响^[3-5];Dunlap W A 研究了围压的影响^[6];Seed H B 分析了体应力的影响^[7],Uzan J、Pezo R F 和 Witczak M W 分析了各种应力综合影响下回弹模量的变化规律^[8-10]。

土的结构及强度随着含水率的增加将会发生显著的变化。Allam M M 研究了含水率对土体内部结构的影响^[11];Koolen A J、Hawkins A B、Vasarhelyi B 分析了含水率对土体单轴抗压强度、切线模量和割线模量的影响^[12-15];国内许多学者也都分析了不同土质土体的内摩擦角、粘聚力及回弹模量随含水率的变化规律^[16-20]。

上述研究或从应力依赖性角度,或从水敏感性角度对土体的回弹模量进行了研究,但对于两者的耦合分析较少。本研究基于三轴重复加载试验,对非饱和粉土的应力依赖性和水敏感性进行了研究,建立了回弹模量的预估模型,对于分析和判断路基技术状况变化及对路面结构影响具有重要意义。

1 回弹模量的预估模型总结

1.1 应力依赖性模型

表征路基土应力依赖性的主要应力分量有偏应力 σ_d 、八面体剪应力 τ_{oct} 、围压 σ_3 、体应力 θ ,根据应力分量的不同,应力依赖性模型主要分为3类:剪切

类模型^[3-5]、侧限类模型^[6-7]和复合类模型^[8-10]。

剪切类模型和侧限类模型均反映了回弹模量与单一应力指标之间的关系,而复合类模型则反映了回弹模量与各个指标之间的关系,应用范围较广。复合类模型中最基础的是 Uzan 模型,许多复合模型都是在其基础上建立的,如式(1)所示^[8]:

$$E = k_1 (\theta)^{k_2} (\sigma_d)^{k_3} \quad (1)$$

考虑到量纲问题,Witczak M W 在模型中引入了大气压强,建立了 Witczak-Uzan 模型^[10],如式(2)所示:

$$E = k_1 \sigma_{atm} \left(\frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{atm}} \right)^{k_3} \quad (2)$$

其中 σ_{atm} 为大气压强,通过引入大气压强解决了模型的量纲不一致问题。

1.2 水敏感性模型

表征水分对非饱和路基土回弹模量影响,主要是用含水率 ω 、饱和度 S 、基质吸力 φ 等指标^[21-23],如下所示:

$$E = k_1 e^{k_2 \omega} \quad (3)$$

$$\log \frac{E}{E_{opt}} = k_1 (S - S_{opt}) \quad (4)$$

式中 E_{opt} 、 S_{opt} 分别为最优含水率时对应的回弹模量和饱和度。

$$E = k_1 \varphi^{k_2} \quad (5)$$

2 回弹模量试验

2.1 粉土的基本物理性质

通过室内试验测得粉土的基本物理性质指标,如表1所示。

表1 粉土的物理性质参数
Table 1 The physical parameters for silt

粉土的颗粒组成						$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	I_p	G_s	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$\omega_{opt}/\%$
粒径/mm	0.25 ~ 0.074	0.074 ~ 0.05	0.05 ~ 0.005	0.005 ~ 0.002	< 0.002	33.6	24.8	8.8	2.7	1.69	15.4
质量分数/%	26.5	34.2	34.9	4.3	0.1						

2.2 试验方案设计

利用静压成型的方法制备含水率分别为 11.4%、13.4%、15.4%、17.4%、19.4% 的 5 组试件,试件为圆柱形,直径 10 cm,高度 20 cm。采用 UTM-100 进行三轴重复加载试验,测量每个试件的回弹模量。加载波形为半正弦波,频率 10 Hz,加载时间 0.2 s,间歇时间 0.8 s,接触应力为竖直应力的 0.1 倍。试验加载序列如表 2 所示。

表2 三轴试验加载序列^[24]
Table 2 Loading for tri-axial tests^[24]

加载序号	围压应力 σ_3/kPa	循环偏应力 σ_d/kPa	竖直应力 σ_1/kPa	加载次数
预载	30	55	85	1 000
1	15	30	45	100
2	30	30	60	100
3	45	30	75	100
4	60	30	90	100
5	15	55	70	100

续表2

加载序号	围压应力 σ_3 /kPa	循环偏应力 σ_d /kPa	竖直应力 σ_1 /kPa	加载次数
6	30	55	85	100
7	45	55	100	100
8	60	55	115	100
9	15	75	90	100
10	30	75	105	100
11	45	75	120	100
12	60	75	135	100
13	15	105	120	100
14	30	105	135	100
15	45	105	145	100
16	60	105	165	100

2.3 试验结果

各加载序列在不同含水率条件下的回弹模量测试结果如图1所示。

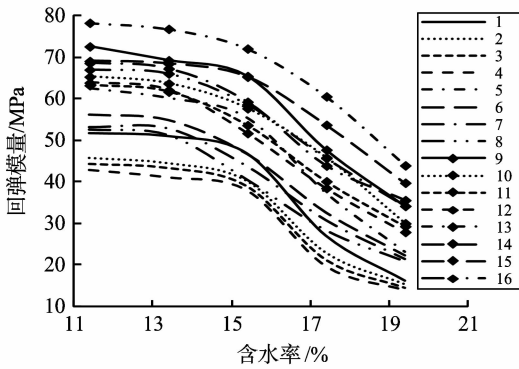


图1 试验结果
Fig.1 Experimental results

从图1中可以看出,粉土的回弹模量随着含水率的增加而逐渐降低,并且在含水率超过最优含水率后,下降趋势明显增大;在不同的应力加载条件下,粉土的回弹模量也各不相同。下面分别从应力依赖性和水敏感性两方面进行分析,确定非饱和粉土的回弹模量预估模型的影响指标。

3 非饱和粉土回弹模量预估模型

3.1 应力指标的选择

在三轴试验中,由于围压相等,即 $\sigma_2 = \sigma_3$,所以八面体剪应力 $\tau_{oct} = \sqrt{2}\sigma_d/3$,即 τ_{oct} 和 σ_d 具有相同的效应,因此,表征应力依赖性的主要应力分量有 σ_d 、 σ_3 和 θ ,由于 $\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$,所以表征应力依赖性的基本应力分量应该是偏应力 σ_d 和围压 σ_3 。

以最优含水率时的试验结果为例进行分析。图2表明了回弹模量同偏应力和围压的关系,可以看出,当围压相同时,回弹模量随偏应力的增大而减小;当偏应力相同时,回弹模量随围压的增大而增大。回

弹模量随偏应力或围压的变化而单调变化,因此,利用偏应力和围压作为应力指标来构建模型是合适的。

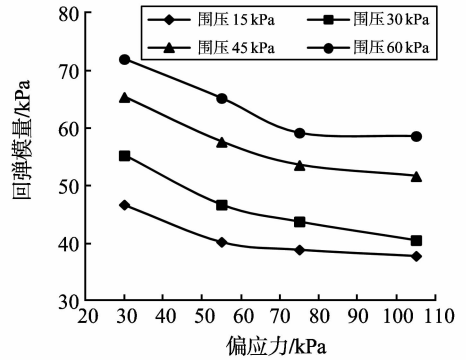


图2 偏应力和围压对回弹模量的影响
Fig.2 The influences of σ_d and σ_3 on the resilient modulus

现有计算模型中也有部分模型采用体应力 θ 作为应力指标,如式(1)、式(2)、所示。由于当围压和偏应力变化时,回弹模量的变化规律不一致,所以体应力变化时,回弹模量会产生不同的变化规律。当偏应力相等、围压增加时,体应力增加,回弹模量增大;当围压相等、偏应力增加时,体应力增加,而回弹模量减小。不同情况下回弹模量随体应力变化的结果如图3和图4所示。

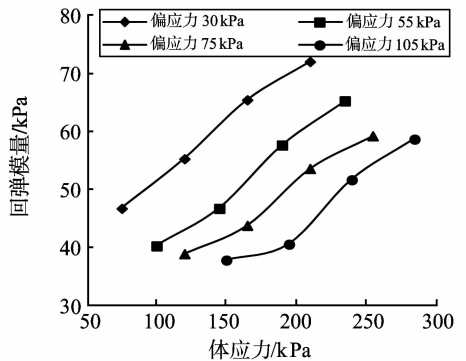


图3 不同偏应力时体应力对回弹模量的影响
Fig.3 The influence of θ on the resilient modulus M_R under different σ_d

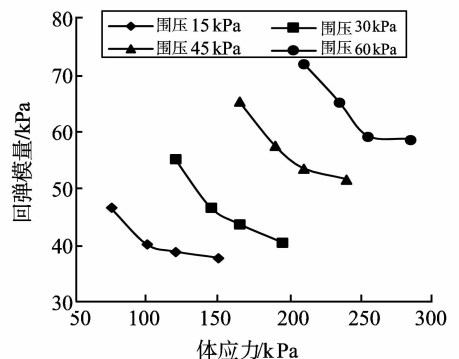


图4 不同围压时体应力对回弹模量的影响
Fig.4 The influences of θ on the resilient modulus under different σ_3

回弹模量随体应力的变化不具有单调变化的规

律,所以采用体应力作为应力控制指标时不能全面的反映回弹模量的变化规律,具有一定的局限性。

3.2 水敏感性指标的选择

土的基质吸力与含水率、饱和度之间存在一定的关系,考虑到模型量纲的问题,可以在应力依赖性模型中引入基质吸力,以此来反映水分变化对于回弹模量的影响。土水特征曲线表示土的含水率(含水率、体积含水率或饱和度 S)与土中吸力(基质吸力或总吸力)的关系曲线,典型的是 Fredlund 模型,如图 5 所示。

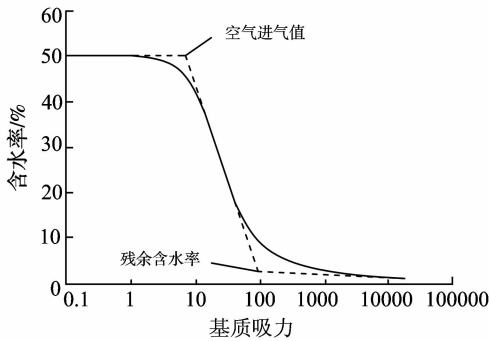


图 5 土水特征曲线图

Fig. 5 The soil water characteristic curve

White N F 提出以空气进气值和残余含水量为分界点,可以把土水特征曲线分为三个区^[25]:边界效应区、过渡区、非饱和残余区。其中在空气进气值与残余含水率之间的过渡区在实际中应用较多,此区间内含水率与基质吸力之间的关系可表示为^[26]

$$\omega = a + b \ln \varphi, \quad (6)$$

式中 ω 为含水率,%; φ 为基质吸力, kPa。

将上式转换成用 ω 表示 φ 的形式,可得:

$$\varphi = e^{k_1\omega} + k_2. \quad (7)$$

3.3 预估模型构建

根据试验结果可知,回弹模量随含水率的增大而减小,而基质吸力也随含水率的增大而减小,所以回弹模量随基质吸力的增大而增大,与偏应力对回弹模量的影响相似,因此可在应力依赖性模型中的偏应力指标中加入基质吸力项,可表示为

$$E = k_1 \sigma_{atm} \left(\frac{\sigma_d + \varphi}{\sigma_{atm}} \right)^{k_3} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{atm}} \right)^{k_4}. \quad (8)$$

式中回弹模量及各应力指标的单位均为 kPa; $\sigma_{atm} = 10^2$ kPa; k_1, k_3, k_4 为与土质有关的常数。

将式(7)代入式(8)可得

$$E = k_1 \sigma_{atm} \left(\frac{\sigma_d + e^{k_2\omega}}{\sigma_{atm}} \right)^{k_3} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{atm}} \right)^{k_4}. \quad (9)$$

根据试验结果,对上式中的参数进行回归,结果见表 3。

表 3 模型拟合参数

Table 3 The fitting parameters of prediction model				
k_1	k_2	k_3	k_4	R^2
1 144. 8	0. 199	-0. 561	0. 385	0. 884

计算值与试验值之间的对比结果如图 6 所示,可以看出两者的相对误差在 $\pm 10\%$ 左右,相关性良好,因此上述模型能够较好地反映出不同的应力水平和含水率情况下非饱和粉土的回弹模量值。

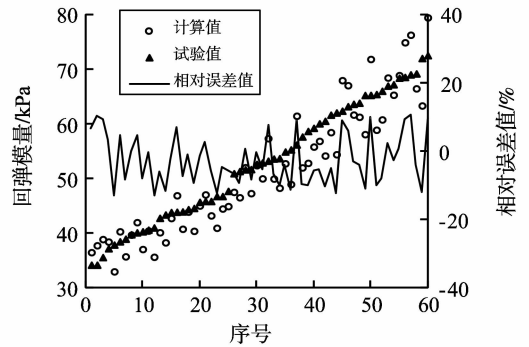


图 6 计算值与试验值结果对比

Fig. 6 The comparison of the calculated value to the experimental value

4 结论

(1) 粉土的回弹模量具有应力依赖性和水敏感性,回弹模量随含水率的增大而减小,且当含水率超过最优含水率后,下降幅度明显增大;在不同的应力加载条件下,粉土的回弹模量值也表现出较大的差异性。

(2) 围压和偏应力是反映应力依赖性的基本应力指标,而且回弹模量随围压或偏应力的变化具有单调变化的规律:当围压相同时,回弹模量随偏应力的增大而减小;当偏应力相同时,回弹模量随围压的增大而增大。用围压和偏应力作为应力依赖性的控制指标能全面的体现回弹模量的变化规律。

(3) 体应力变化时,回弹模量不具有单调变化的规律:当偏应力相等时,粉土的回弹模量随体应力的增加而增加;而当围压相等时,粉土的回弹模量随体应力的增大而减小。因此,体应力不适宜作为应力依赖性的控制指标。

(4) 由于基质吸力与含水率之间存在一定的对应关系,在应力依赖性模型中引入基质吸力,以此来表示含水率变化对回弹模量的影响,从而建立了粉土回弹模量应力依赖性和水敏感性的耦合模型。对试验数据的拟合表明,此模型能够较好的反映不同的应力水平和含水率条件下回弹模量的变化规律。

(5) 通过建立的预估模型,预测实际运营状态

下的路基回弹模量,从而为研究路面结构的受力特征,分析路面结构破坏的原因提供更加科学的依据。

参考文献:

- [1] 凌建明,陈声凯,曹长伟. 路基土回弹模量影响因素分析[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(4):446-451.
LING Jianming, CHEN Shengkai, CAO Changwei. Analysis of influence factors on resilient modulus of subgrade soils [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4):446-451.
- [2] 徐艳玲,唐伯明,谢国栋,等. 不同含水率下应力级位对粘性土回弹模量的影响[J]. 中外公路, 2011, 31(6):68-72.
XU Yanling, TANG Boming, XIE Guodong, et al. The influence of stress on the resilient modulus of clay under different water content [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(6):68-72.
- [3] THOMPSON M R, ROBNER Q L. Resilient properties of subgrade soils [J]. Transportation Engineering Journal, ASCE, 1979, 105:71-89.
- [4] YAW B P, DRUMM E C. Hyperbolic model for the resilient modulus response of fine-grained subgrade soil [J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1989, 24:1-14.
- [5] MOOSAZADEH J, WITCZAK M W. Prediction of subgrade modulus for soil that exhibits nonlinear behavior [M]. Washington D C: TRB, National Research Council, 1981:9-17.
- [6] DUNLAP W A. A report on a mathematical model describing the deformation characteristics of granular materials [R]. Texas: Texas Transp Inst, Texas A & M University, 1963.
- [7] SEED H B, MITRY E G, MONOSMITH C L, et al. Prediction of pavement deflection from laboratory repeated load tests [R]. Washington D C: TRB, National Research Council, 1967.
- [8] UZAN J. Characterization of granular materials [M]. Washington D C: TRB, National Research Council, 1985:52-59.
- [9] PEZO R F. A general method of reporting resilient modulus tests of soils—a pavement engineer's point of view [R]. Washington D C: TRB, National Research Council, 1993.
- [10] WITCZAK M W, UZAN J. The universal airport pavement design system: report of IV: granular material characterization [R]. College Park: College of Engineering, University of Maryland, 1988:9.
- [11] ALLAM M M. Effect of wetting and drying in shear strength [J]. Geotechnical Engineering ASCE, 1981, 107(4):681-687.
- [12] KOOLEN A J, KUIPER H. Agricultural soil mechanics [M]. Berlin, Germany: Springer, 1983.
- [13] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content [J]. Engineering Geology, 1992(25):115-130.
- [14] VASARHELYI B, VAN P. Influence of water content on the strength of rock [J]. Engineering Geology, 2006(84):70-74.
- [15] VASARHELYI B. Statical analysis of the influence of water content on the strength of the miocene limestone [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2005(38):69-76.
- [16] 唐芬,叶四桥,陈洪凯. 新疆翻浆路基土吸水抗剪强度衰减非线性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006(2):335-339.
TANG Fen, YE Siqiao, CHEN Hongkai. The study about nonlinear decline of shear strength of water sucked frost boil soil in roadbase in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006(2):335-339.
- [17] 熊承仁,刘宝琛,张家生,等. 重塑非饱和粘土抗剪强度参数与饱和度的关系研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2):195-198.
XIONG Chengren, LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, et al. Study on relation of shear strength parameters with saturation of remolded unsaturated cohesive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2):195-198.
- [18] 彭丽云,刘建坤,肖军华,等. 京九线路基击实粉土力学特性的试验[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4):56-60.
PENG Liyun, LIU Jiankun, XIAO Junhua, et al. Mechanics of properties of compacted silt on Beijing-Kowloon railway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4):56-60.
- [19] 姚占勇,李运恒,商庆森,等. 平原水网区等级公路若干问题的研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2008, 38(1):70-74.
YAO Zhanyong, LI Yunheng, SHANG Qingsen, et al. Research on some problems about a classified highway in a water net plain district [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(1):70-74.
- [20] 朱登元,管延华. 毛细水作用对粉土路基稳定性的影响[J]. 山东大学学报:工学版, 2012, 42(1):93-98.
ZHU Dengyuan, GUAN Yanhua. The influence of capillary water action on the embankment stability of a silt embankment [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(1):93-98.

- sing molten nitrates as heat transfer fluid [J]. *Energy*, 2011, 36(2):1048-1056.
- [9] PANNA L S, SARVIYA R M, BHAGORIA J L. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers [J]. *Applied Energy*, 2010, 87:541-550.
- [10] ABBAS R, MONTES M J, PIERA M, et al. Solar radiation concentration features in linear Fresnel reflector arrays [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 54(1):133-144.
- [11] FLORES L S, ALTAMIRANO M, HERNANDEZ A. Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator [J]. *Renewable Energy*, 2012, 39(1):198-206.
- [12] PINO F J, CARO R, ROSA F, et al. Experimental validation of an optical and thermal model of a linear Fresnel collector system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 12(20):1-9.
- [13] SAHOO S S, SINGH S, BANERJEE R. Analysis of heat losses from a trapezoidal cavity used for Linear Fresnel reflector system [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(5):1313-1322.
- [14] WATMUFF J H, CHARTERS W W S, PROCTOR D. Solar and wind induced external coefficients Solar collectors [J]. *Cooperation Mediterranee Pour Energie Solaire, Revue Internationale Heliotechnique*, 1977, 3(2):56-62.
- [15] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2004.
- [16] IENHARD I J, LIENHARD V J. A heat transfer textbook [M]. Cambridge: Phlogiston Press, 2002.
- [17] 宋固. 线性菲涅尔反射式太阳能集热系统研究[D]. 济南:山东大学, 2011.
- SONG Gu. Research on linear Fresnel reflector solar collector system[D]. Jinan: Shandong University, 2011.

(编辑:陈燕)

(上接第88页)

- [21] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46:355-370.
- [22] WITCZAK M W. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures final report [M]. Washington D C: TRB, National Research Council, 2004.
- [23] 李聪, 邓卫东, 张盛. 考虑非饱和土基质吸力影响的路基回弹模量研究 [J]. *公路交通技术*, 2008, 8(4):5-8.
- LI Cong, DENG Weidong, ZHANG Sheng. Research on subgrade rebounding modulus allowing for influence on unsaturated soil base suction [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2008, 8(4):5-8.
- [24] 陈声凯, 凌建明, 张世洲. 路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定 [J]. *公路*, 2006, 11(11):148-152.
- CHEN Shengkai, LING Jianming, ZHANG Shizhou. Fixing loading sequence for resilient modulus test of subgrade soil [J]. *Highway*, 2006, 11(11):148-152.
- [25] WHITE N F, DUKE H R, SUNADA D K. Physics of desaturation in porous materials [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 1970, 96:165-191.
- [26] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(11):3302-3306.
- LIU Xiaowen, CHANG Lijun, HU Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11):3302-3306.

(编辑:胡春霞)

(上接第104页)

- WANG Guojun, LI Bijing. Theory of truth degrees of formulas in Łukasiewicz n-valued propositional logic and a limit theorem [J]. *Science in China: Ser E*, 2005, 35(6):561-569.
- [27] 王国俊, 宋建社. 命题逻辑中的程度化方法 [J]. *电子学报*, 2006, 34(2):252-257.
- WANG Guojun, SONG Jianshe. Graded method in propositional logic [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(2):252-257.
- [28] 王国俊. 数理逻辑引论与归结原理 [M]. 2版. 北京:科学出版社, 2006:17-40.

(编辑:胡春霞)