

湿度循环下黏质路基土回弹模量演化规律

李冬雪, 凌建明, 钱劲松, 王海林

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 历经多次干湿循环的路基土, 其力学性能劣化现象非常突出, 路基的路用性能也随之衰减。基于室内试验研究含水率周期性变化对路基回弹模量的影响规律。遵循现场测试含水率变化态势, 利用“透水石渗水—静置—烘箱脱水—透水石渗水—静置—烘箱脱水……”一系列湿度循环来模拟现场路基土的含水率波动过程, 同时测试其回弹模量。结果表明: 黏质路基土回弹模量受含水率变化的影响非常明显, 回弹模量随湿度循环次数的增大而减小; 在相同的应力状态下, 黏质路基土的平衡含水率越高, 其回弹模量值对含水率的周期性变化越敏感, 且回弹模量值趋于不稳定状态。

关键词: 黏质路基土; 回弹模量; 含水率; 湿度循环

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Influence of Moisture Content Change Cyclicity on Modulus Evolution Law of Cohesive Subgrade Soil

LI Dongxue, LING Jianming, QIAN Jinsong, WANG Hailin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: After experiencing a repeated dry-wet cycle, the mechanical properties of the subgrade soil show irreversible changes. An indoor test was carried out to investigate the influence of the moisture content changes cyclicity on resilience modulus of the cohesive subgrade soil. And the extent of the resilience modulus attenuation of subgrade result in frequently dry-wet cycle was analyzed. A series of humidity cycle such as “water seepage under the permeable stone—standing—oven dehydration” were repeated to imitate the scene of the subgrade soil moisture content fluctuation process. The resilience of subgrade soil was tested by the system of UTM. The results show that the moisture content changes cyclicity influences the resilience modulus of cohesive subgrade soil. The resilience modulus decreases against the increase of cycle times. On the same stress state, the higher

the equilibrium moisture content is, the more sensitive the resilience modulus changes are. As a result, the resilience modulus tends to be unstable.

Key words: cohesive subgrade soil; resilience modulus; moisture content; moisture cyclicity

路基填土属于重塑土, 在道路的施工期与运营期间, 土体的物理力学性质并不一致, 路基的路用性能也有所不同。已有研究表明, 在道路运营初期(3~5年), 路基的含水率将由最佳含水率(optimal moisture content, OMC)逐渐增大至平衡含水量(equilibrium moisture content, EMC), 并随着运营期的增长, 路基内部含水率始终在EMC附近波动^[1-2]。与此同时, 路基的微观结构受水分迁移影响将发生改变, 进而影响路基的力学性能, 如表征路基刚度的重要指标回弹模量 M_R 。有学者提出, 以干湿循环(或冻融循环)强度折减系数来修正路基回弹模量受含水率波动变化带来的影响。受此启发, 拟采用室内模拟试验的方法对黏质土路基经历含水率周期波动后的回弹模量变化规律进行研究, 并借鉴强度折减的概念分析计算回弹模量湿度循环折减系数, 本文为进一步研究路基结构长期性能演化规律提供基础, 并对完善我国公路路基设计方法有借鉴意义。

1 试验方案设计

1.1 试验方法与装置

干湿循环试验方法的研究发展迅速, 特别是对于试件的吸水—失水过程的模拟思路比较清晰, 所采取的方法虽各有不同, 但均可得到较理想的结果^[2-9]。缺点在于对含水率的变化情况没有有效的控制措施, 而这一点对研究路基湿度循环对路基性能

收稿日期: 2012-08-01

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(2011318493720)

第一作者: 李冬雪(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为路基工程。E-mail: dongxuebest@163.com

通讯作者: 凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

的影响是至关重要的. 基于以上分析, 本文在制定湿度循环试验方案时, 通过研发吸水控制装置, 并借鉴静压成型与烘箱烘干方法达到试验目的, 实验装置示意图如图 1 所示. 试验采用上海黏土, 利用光电式液塑限联合测定仪测得其液限为 33.7%, 塑限为 21.6%, 根据土组分类标准可知, 土样为低液限黏土; 通过重型击实试验, 得到土样的最佳含水率为 13.6%, 最大干密度为 $1.82 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

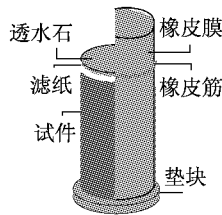


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Experimental apparatus schematic diagram

1.2 试验控制条件

受季节性变化等因素的影响, 路基频繁失水—吸水, 在交通荷载的共同作用下, 结构发生不可逆变化, 进而导致路基性能逐渐降低. 为研究频繁失水—吸水循环对路基性能的影响, 采用“透水石渗水→静置→烘箱脱水→透水石渗水→静置→烘箱脱水……”一系列湿度循环来模拟现场路基含水率波动状态, 进而分析含水率周期波动次数对回弹模量的影响.

圆柱体测试试件的尺寸为: 高度 $h=20 \text{ cm}$, 直径 $d=10 \text{ cm}$, 为了保证试件达到最大密实程度, 采用万能液压试验机静压成型, 压实条件采用最佳含水率及目标压实度. 由于大部分路基处于非饱和状态, 含水率处于 $\omega_{\text{omc}} \sim \omega_{\text{omc}} + 7\%$ 之间^[1], 因此本试验设置 EMC 为 18%, 22%, 波动幅度 (transition moisture content, TMC) 为 $\pm 2\%$, 试件分别经历循环次数 $N=1, 2, 3, 4$ 次波动后, 测试其回弹模量值. 试验过程中, $\omega_{\text{emc}} + 2\% \rightarrow \omega_{\text{emc}} - 2\% \rightarrow \omega_{\text{emc}}$ 为一个湿度循环, $\omega_{\text{emc}} + 2\% \rightarrow \omega_{\text{emc}} - 2\% \rightarrow \omega_{\text{emc}} + 2\% \rightarrow \omega_{\text{emc}} - 2\% \rightarrow \omega_{\text{emc}}$ 为两个循环, 依次类推. 参考罗志刚^[10]等的研究成果, 土体动回弹模量采用 UTM (universal testing machine) 动力加载系统进行测试, 围压为气压加载. 动回弹模量测试的偏应力选定为 30, 55, 75 和 105 kPa, 围压取 15, 30, 45 和 60 kPa; 共 32 个工况, 64 个试件. 加载波形采用半正弦波, 加载频率取 1 Hz, 其中持载时间为 0.1 s, 间歇时间为 0.9 s. 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%. 每一加载级组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, 按下式计算试件的回弹模量:

$$M_R = \sigma_d / \epsilon_R$$

式中: M_R 为动回弹模量, MPa; σ_d 为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 为轴向回弹应变均值.

2 试验参数

2.1 静置时间(曲线)

试件渗水初期, 含水率沿高度方向分布并不均匀, 为了确保试件在测试动回弹模量时其内部含水率达到设计平衡含水率且均匀一致, 需要确定合理的静置平衡时间. 为此, 测试了试件静置时间为 1~10 d 时, 高度 H 方向(6 层)的含水率, 结果如图 2 所示. 目标含水率为 23%, 每 24 h 取 1 个试件剖开.

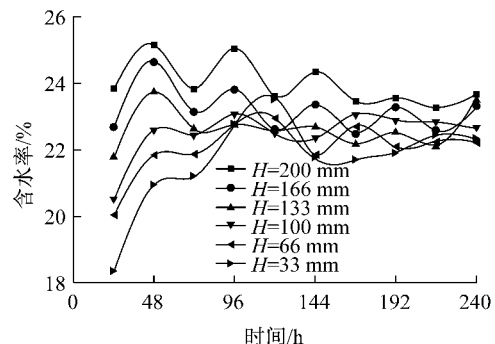


图 2 含水率沿高度分布与时间关系图

Fig.2 The relationship between the moisture content and the time

加水初期, 试件最大、最小含水率差值为 5.5%, 静置时间满 7 d 后, 试件最大、最小含水率差值稳定在 1.5% 附近. 当继续增加静置时间至 8~10 d 时, 含水率差值变化不明显, 若继续增加平衡时间则水分持续向下迁移, 导致试件含水率上小下大. 鉴于试件内部含水率由 OMC 增大至 EMC 的变化规律, 吸水静置时间控制在 7 d.

2.2 烘干曲线

试件脱水普遍采用自然风干、烘箱烘干以及电风扇吹干等方法, 烘箱烘干脱水法的温度条件一般控制在 40~70 °C 之间, 本文采用烘箱烘干方法使试件脱水, 烘箱设置为 50 °C、无鼓风状态. 为确定烘干时间, 取 2 个试件进行干燥试验, 并将两试件试验结果用于对比与分析. 试件于最佳含水率成型, 压实度为 96%, 成型后加水至含水率为 23%; 静置 7 d 后进

行脱水试验,连续测试 1 440 min,其中 0~450 min 内,每 30 min 称重并计算含水率.将含水率与脱水时间关系绘制曲线如图 3a 所示.

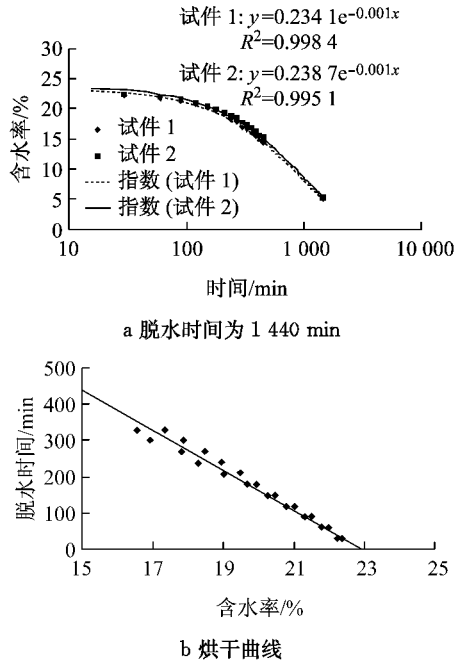


图 3 含水率与脱水时间关系图
 Fig. 3 The relationship between the moisture content and the drying time

结果表明:烘干时间达到 450 min 时,试件脱水总质量约为 210 g,试件含水率降低至 15%左右;烘干时间达到 1 440 min 时(即 1 d),试件脱水总质量为 490 g 左右,含水率降低至 5%.试件脱水前期速度慢,后期脱水速度快,产生这种现象的原因可能是:试件放入烘箱的初期,试件体内外层温度差异较大,所失水分主要来源于试件表层,而后期试件体内外层温度逐步趋平,并达到试验温度 50 °C,水分在高温条件下的迁移速度快,且试件内部气相体积增加,加速了水分迁移,因此产生了后期失水速度较快的现象.

在湿度循环试验过程中,试件的含水率主要集中在 16%~24%范围内,为方便后续试验中对干燥时间的控制,特将试验结果中相关部分试验数据单独取出进行拟合,如图 3b 所示,以线性趋势线拟合效果较好,公式为: $y=1 150-50x$, $R^2=0.98$.其中 x 为目标烘干含水率,%; y 为烘干所需时间,min.

3 试验结果与分析

3.1 回弹模量与应力状态关系

表 1、图 4 给出了黏质土试件在压实度 $K =$

96%,含水率 $\omega=13.6\%$,18.0%和 22.0%时,不同应力状态下回弹模量的试验结果.依据这些试验结果,可以得出以下结论:在相同的循环偏应力水平时,黏质土 M_R 随围压的增大而增大;在相同的围压水平时, M_R 随偏应力增大而减小.将 M_R 随围压(偏应力)增大(减小)的程度定义为变化率,平均变化率 k 为变化率的平均值.则 M_R 随围压、偏应力的平均变化率分别为 11.24%与 8.78%.

表 1 回弹模量与应力状态关系($N=1$)
 Tab. 1 The relationship between the modulus of resilience and the stress state($N=1$)

偏应力 σ_d / kPa	围压 σ_3 / kPa	回弹模量/MPa		
		$\omega=13.6\%$	$\omega=18.0\%$	$\omega=22.0\%$
75	15	50.80	24.34	17.08
75	30	53.07	28.33	22.66
75	45	55.37	30.64	25.60
75	60	57.12	33.66	27.98
30	60	71.48	43.68	33.01
55	60	60.47	34.62	29.86
75	60	57.12	33.66	27.98
105	60	53.62	33.39	24.68

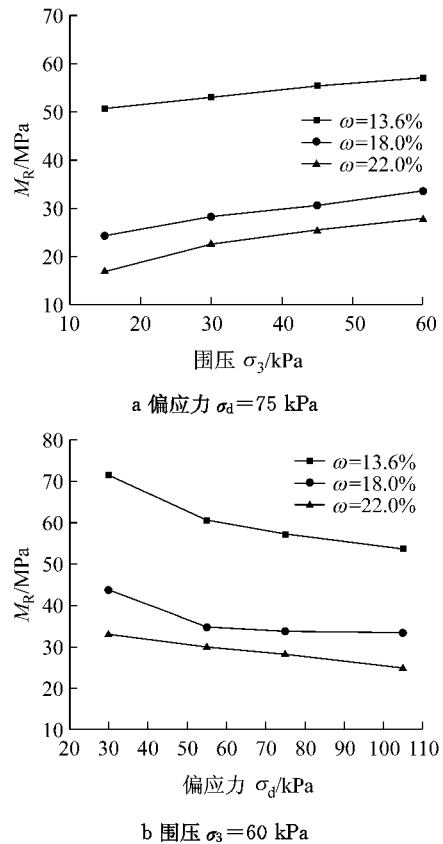


图 4 回弹模量与应力状态的关系(循环次数 $N=1$)
 Fig. 4 The relationship between the modulus of resilience and the stress state(cycle times $N=1$)

围压、偏应力均不是影响回弹模量的惟一应力因素,就应力状况而言,围压应力对路基细粒土模量

的影响要显著大于偏应力. 此外, 路基细粒土模量随含水量的减小、压实度和围压应力的增大而增大, 随偏应力的增大而略有减小.

3.2 回弹模量随循环次数、含水率变化规律

图 5 绘制了黏质路基土在围压 $\sigma_3 = 15 \text{ kPa}$, $\sigma_d = 30 \text{ kPa}$ 的应力状态下, 经试验测得的回弹模量与循环次数及含水率之间的关系图. 由试验结果可以得到, 当试件含水率由 OMC 增大到 EMC 时, M_R 有显著降低; 含水率每增大 1%, M_R 值分别降低 7.7% ($\omega_{\text{emc}} = 22\%$), 7.5% ($\omega_{\text{emc}} = 18\%$); 当含水率在 EMC 附近周期性波动变化时, M_R 值亦有所变化, 随着 N 的逐渐增大, M_R 有明显减小趋势, N 增大至 4 次时, M_R 值分别降低了 23.5% ($\omega_{\text{emc}} = 22\%$), 20.2% ($\omega_{\text{emc}} = 18\%$). 其他应力状态时也可得到相似的结果.

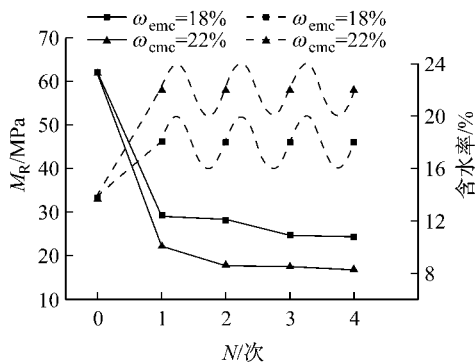


图 5 回弹模量与循环次数、含水率的关系

Fig.5 The relationship between the modulus of resilience M_R , cycle times N and moisture content

由于试件每经历一次湿度循环, M_R 值均有所下降, 因此, 可定义 $N=1, 4$ 时的 M_R 值为黏质路基土经历湿度循环后 M_R 的上、下限, 即试件分别经历 1, 2, 3, 4 次湿度循环后的 M_R 值均在此区域内. 图 6 是当 $N=1, 4$ 时, 试件的 M_R 分布区域图, 当 $\omega_{\text{emc}} = 18\%$, $\omega_{\text{tmc}} = \pm 2\%$ 时, 试件经历 4 次湿度循环后, M_R 值降低, 但基本大于 20 MPa, M_R 值分布区域集中在 20~45 MPa 之间; 当 $\omega_{\text{emc}} = 22\%$, $\omega_{\text{tmc}} = \pm 2\%$ 时, M_R 值降低明显, 且分布范围较大, M_R 值分布区域集中在 0~35 MPa 之间, 特别是当偏应力增大到一定值 ($\sigma_d = 105 \text{ kPa}$) 时, 试件破坏, 无法测得有效 M_R 值, 此时认为 $M_R = 0$. 据此可以得到以下结论, 黏质路基土回弹模量受湿度循环的影响程度随 EMC 值的增大而增加, EMC 值小, M_R 受影响程度小. EMC 值大时, M_R 值变化明显, 趋于不稳定状态.

3.3 路基土回弹模量湿度循环折减系数

鉴于潮湿多雨地区路基力学性能受湿度变化影

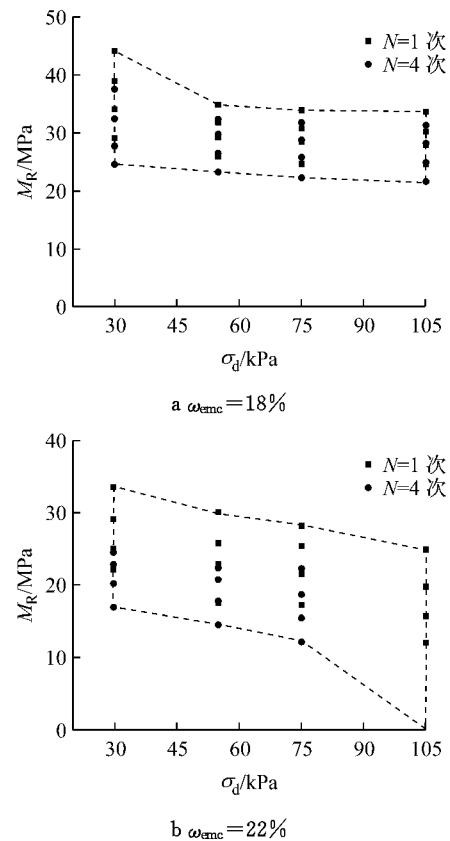


图 6 不同应力状态时回弹模量的分布区域

Fig.6 Different state modulus of resilience distribution area

响较大, 随季节变化波动较大, 目前多采用回弹模量湿度调整系数, (回弹模量湿度调整系数为 EMC 状态的路基回弹模量值与 OMC 状态的路基回弹模量值之比), 忽略了湿度循环变化对回弹模量的影响, 因此提出路基回弹模量湿度循环折减系数作为对此种情况的修正. 路基回弹模量湿度循环折减系数 η 的定义为: 经历湿度循环次数 N 后的路基 M_R (此时湿度为 EMC) 与初次达到 EMC 状态的路基回弹模量值 $M_{R, \text{emc}}$ 之比, 即

$$\eta = M_R / M_{R, \text{emc}} \quad (1)$$

此处湿度循环折减系数 η 仅反映湿度循环次数对模量取值的影响. 折减系数越小, 则路基回弹模量受湿度循环的影响越严重. 在确定经历多个湿度周期循环的路基回弹模量时, 首先需要确定相应周期的折减系数 η , 然后乘以初次达到 EMC 状态的 $M_{R, \text{emc}}$, 便可得到受湿度周期性波动影响的 M_R .

对室内回弹模量试验结果进行分析, 以幂函数对试验结果进行拟合效果较好, R^2 均大于 0.95, 可以接受, 回归结果如表 2 所示. 因此, 可通过回归分析得到不同应力状态下回弹模量的相对稳定值, 并以此计算路基回弹模量湿度循环折减系数 η .

表 2 回弹模量曲线拟合数据

Tab.2 Modulus of resilience curve fitting data

围压 σ_3 / kPa	循环偏 应力 σ_d / kPa	拟合曲线					
		$y=Ax^B$					
		$\omega_{emc}=18\%$			$\omega_{emc}=22\%$		
		A	B	R^2	A	B	R^2
60	30	42.86	-0.08	0.993	32.67	-0.12	0.959
45		38.09	-0.09	0.992	28.77	-0.13	0.993
30		33.45	-0.10	0.991	24.64	-0.15	0.999
15		28.95	-0.11	0.993	20.89	-0.16	0.996
60	55	35.40	-0.08	0.997	28.71	-0.11	0.974
45		32.57	-0.08	0.996	25.69	-0.12	0.992
30		29.60	-0.09	0.998	22.41	-0.13	0.994
15		26.62	-0.10	0.996	18.32	-0.15	0.996
60	75	34.43	-0.07	0.997	27.44	-0.11	0.988
45		31.54	-0.08	0.993	24.30	-0.12	0.978
30		28.75	-0.09	0.999	20.91	-0.14	0.975
15		25.15	-0.10	0.997	17.01	-0.16	0.978
60	105	34.04	-0.07	0.997			
45		30.99	-0.08	0.995			
30		28.09	-0.08	0.998			
15		24.56	-0.10	0.999			

黏质路基回弹模量湿度循环折减系数计算结果如表 3 所示。其中, M_R 取 $N=20$ 对应值, $M_{R,emc}$ 取 $N=1$ 对应值。

表 3 回弹模量湿度循环折减系数

Tab.3 Modulus of resilience humidity cycle reduction coefficients

围压 σ_3 / kPa	循环偏应力 σ_d /kPa						
	$\omega_{emc}=18\%$				$\omega_{emc}=22\%$		
	30	55	75	105	30	55	75
60	0.78	0.81	0.82	0.84	0.70	0.69	0.71
45	0.76	0.80	0.81	0.82	0.68	0.70	0.67
30	0.73	0.78	0.78	0.79	0.64	0.66	0.65
15	0.72	0.77	0.76	0.75	0.59	0.66	0.62
取值范围	0.72~0.84				0.59~0.71		

计算结果表明,一般情况下, η 随围压增大而增大,说明增大围压,可降低湿度循环对路基土回弹模量的影响;但是对于较大的 EMC,在低偏应力时出现 η 随围压增大而减小的现象,即仅增加围压会产生负效果,此时,应该同时增大偏应力与围压才能有降低湿度循环对路基土回弹模量的影响。

4 结论

(1) 提出了黏质路基土湿度循环试验方法,并确定了浸湿平衡时间和干燥曲线。

(2) 含水率周期波动对黏质路基土回弹模量有影响, M_R 随着 N 的增大而减小;在相同的应力状态

时,黏质路基土的 EMC 越高,其 M_R 对含水率的周期性变化越敏感,且 M_R 值趋于不稳定状态。

(3) 基于黏质路基土回弹模量受含水率变化的影响规律,提出路基土回弹模量干湿循环折减系数,用以综合考虑潮湿多雨地区黏质路基土湿度周期性波动对回弹模量的影响。

参考文献:

- [1] 李聪. 基于非饱和土理论的路基回弹模量研究[D]. 重庆: 重庆交通大学土木建筑学院, 2007.
LI Cong. The study on resilient modulus taking into account theoretic of unsaturated soils[D]. Chongqing: School of Civil Engineering of Chongqing Jiaotong University, 2007.
- [2] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936.
YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936.
- [3] Zemenu G, Martine A, Koger C, et al. Analysis of the behavior of a natural expansive soil under cyclic drying and wetting [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(3): 421.
- [4] Alhomoud A S, Basma A A, Malkawi A I H, et al. Cyclic swelling behavior of clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering—ASCE, 1995, 121(7): 562.
- [5] Dif A E. Expansive soil under cyclic drying and wetting[J]. Journal of Geotechnical Testing, 1991, 14(1): 96.
- [6] Day R W. Swell-well-shrink behavior of compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering—ASCE, 1994, 120 (3): 618.
- [7] Basma A A, AlHomoud A S, Malkawi A I H, et al. Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays[J]. Applied Clay Science, 1996, 11(2/4): 211.
- [8] Rao S M, Reddy B V V, Muttharam M, et al. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils [J]. Engineering Geology, 2001, 60 (1/4): 223.
- [9] 凌建明, 谢华昌, 庄少勤, 等. 水泥-石灰土水稳性的实验研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 733.
LING Jianming, XIE Huachang, ZHUANG Shaoqin, et al. Experimental study on water stability of cement-lime stabilized soil [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(6): 733.
- [10] 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.
LUO Zhigang. Research on dynamic modulus parameters of subgrade and aggregates layer [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2007.