

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.012

路基室内外动态模量换算关系研究

李雪连^{1a,1b}, 陈宇亮², 张起森^{1a}, 徐远明³, 王新武³

(1. 长沙理工大学 a. 交通运输工程学院; b. 道路结构与材料交通行业重点实验室, 长沙 410004;
2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015; 3. 江西省交通工程质量监督站, 南昌 330008)

摘要:对黏性土、砂性土和土石混填3种路基填料进行了现场落锤式弯沉仪测试、便携式落锤弯沉仪测试和动力锥贯入仪测试以及室内重复加载试验,建立了3种路基填料现场检测指标彼此之间的回归关系,分析了室内动态模量 M_R 随含水率变化的规律,并建立了二者之间的回归关系,最后通过现场测试的含水率,建立了室内外动态模量之间的经验关系。研究表明:黏性土、砂性土和土石混填路基填料现场动态模量 E_p 、 E_f 和平均贯入比率 DP 彼此之间存在着良好的双对数回归关系,3种路基填料的室内动态模量与含水率具有良好凸型抛物线回归关系,现场检测指标与室内动态模量也存在较好的回归关系。

关键词:道路工程; 动态模量; 重复加载试验; 相关性

中图分类号: TU411.3; TU413.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2014)06-0073-05

Conversion Relationship of Indoor and Field Dynamic Modulus of Subgrade

Li Xuelian^{1a,1b}, Chen Yuliang², Zhang Qisen^{1a}, Xu Yuanming³, Wang Xinwu³

(1a. School of Traffic and Transportation Engineering; 1b. Key Laboratory of Road Structure and Materials of Ministry of Transport, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, P. R. China; 2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, P. R. China; 3. Engineering Quality Supervising Station of Jiangxi Communication Bureau, Nanchang 330008, P. R. China)

Abstract: The Falling Weight Deflectometer(FWD) test, Portable Falling Weight Deflectometer(PFWD) test and Dynamic Cone Penetrometer(DCP) test in field as well as indoor repeated loading test were carried out with three types of subgrade, clay, sandy and earth-rock mixture. The regression relationship of the parameters observed of these three different types of subgrade in field was investigated respectively. The indoor dynamic modulus changed along with different water contents and the relationship was presented as well as the empirical relationship of the on-site and indoor dynamic. The results indicate that in the three different subgrade conditions, a double logarithmic regression relationship between dynamic modulus(E_p and E_f) and average penetration rate(DP) and a parabola regression relationship between indoor dynamic modulus and water content exist. The regression relationship between field index and indoor dynamic modulus was significant as well.

Key words: road engineering; dynamic modulus; repeated loading test; correlation

目前路面设计方法中把路基回弹模量作为路基的设计参数^[1],并在《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)和《公路路基路面现场测试规程》(JTGE60—2008)中给出了路基回弹模量的室内和现场测试方

收稿日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(51308075); 道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙理工大学)开放基金(kfj130201、kfj100203); 江西省交通运输厅科技项目(2012C0006); 海南省交通科技项目(JT20130898006)

作者简介: 李雪连(1978-),女,主要从事路基路面工程研究,(E-mail)14355101@qq.com。

法,这些测试有些是静态模量测试方法,如室内外承载板测试方法、室内外加州承载比(CBR)测试方法和弯沉测试方法,有些是动态模量测试,如现场落锤式弯沉仪(FWD)测试方法、动力锥贯入仪(DCP)测试方法。车辆荷载通过路面传递到路基上,具有典型的动态特性^[2],相比较于静态模量,动态模量能更好反映车辆荷载对路基路面的作用特性^[3],因此,采用动态模量测试方法是以后路基模量测试的发展趋势^[4]。

除规程中已有的 FWD 测试方法和 DCP 测试方法外,还有现场便携式落锤弯沉仪(PFWD)测试方法和室内重复加载试验(RTL)测试方法可以进行路基动态模量的测试^[5-8]。对这 4 种测试方法测定路基动态模量均有一定的研究,取得了很重要成果,对于推动路基动态模量在路面设计中的应用起到了非常重要的作用^[9-11]。但从已有的研究成果来看,不同测试方法所得动态模量彼此之间的换算关系还不明确,尤其是现场检测指标与室内试验指标之间的关系,如何实现现场检测指标与室内试验指标彼此之间的相互转换值得广泛关注。为此,对黏性土、砂性土和土石混填 3 种路基填料进行了 FWD 测

试、PFWD 测试和 DCP 测试以及室内 RLT,建立了 3 种路基填料现场检测指标彼此之间的回归关系,分析了室内动态模量随含水率变化的规律,并建立了二者之间的回归关系,最后通过现场测试的含水率,建立了室内外动态模量之间的经验关系。

1 现场动态模量检测与分析

1.1 现场试验方案

1) 路段选择

现场试验路段为江西省大广高速公路龙杨段 A1 标黏性土路基、A2 标土石混填路基和 B1 标砂性土路基,且应用都在路床部分,即 96 区上进行,在主车道上按 10 m 左右间距布点测试点。

2) 试验内容

考虑到 FWD 测试荷载较大,且承载板位置不易调整,因此首先进行 FWD 动态模量检测,再在测试点进行 PFWD 测试,最后进行 DCP 测试。每个点位测试完成后取样,采用酒精法测定该点含水率。测试路段全部完成后,把所有点位的土样标签编号,送到实验室进行相应室内试验。试验内容与顺序如图 1 所示。

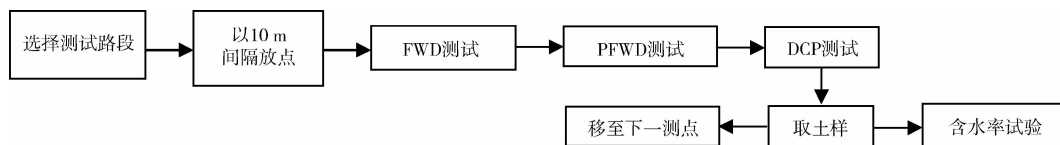


图 1 试验内容与顺序

1.2 检测结果分析

黏性土、砂性土和土石混填 3 种路基填料各测点的含水率如图 2 所示。

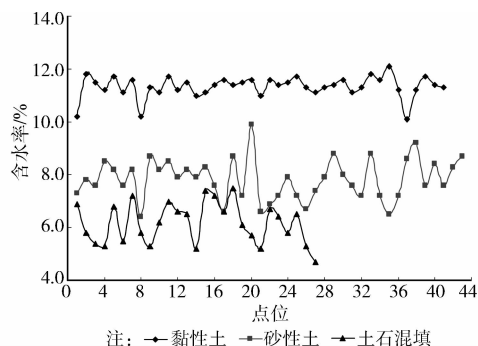


图 2 测试点位含水率情况

黏性土、砂性土和土石混填 3 种路基填料的 PFWD 所测模量 E_P 、FWD 所得反算模量 E_F 、DCP 所测平均贯入比率 DP 见图 3~图 5,考虑到回归关系须具有一定的物理意义,且形式简单,方便应用,

并能反映实测结果的非线性及动态模量与 DP 的反比关系,因此采用双对数关系 $y = ax^b$ 对 $E_P - E_F$ 、 $E_P - DP$ 和 $E_F - DP$ 进行回归,回归关系见表 1。

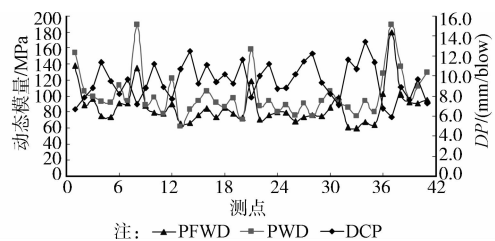


图 3 黏性土路基现场检测结果

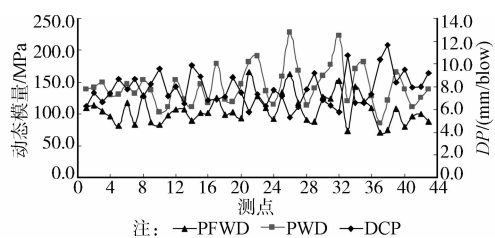


图 4 砂性土路基现场检测结果

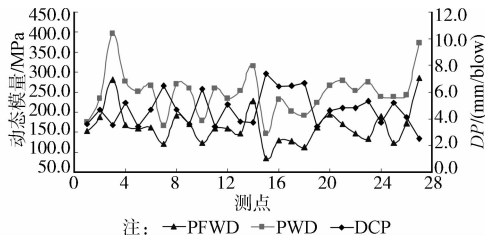


图 5 土石混填路基现场检测结果

表 1 现场检测指标的回归关系

回归关系	土质类型	点位	回归系数		R
			a	b	
E_P-E_F	黏性土	41	2.205 9	0.792 3	0.876 2
	砂性土	43	1.823	0.818 2	0.808 3
	土石混填	27	0.654 6	1.000 5	0.848 4
E_P-DP	黏性土	41	703.2	-0.952 4	0.816 3
	砂性土	43	760.0	-0.975 7	0.840 1
	土石混填	27	510.5	-0.768 9	0.777 8
E_F-DP	黏性土	41	739.3	-0.901 9	0.688 9
	砂性土	43	619.88	-0.728 6	0.635 1
	土石混填	27	547.9	-0.538 2	0.642 0

表 2 主要物理指标

路段	土质名称	土质代号	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P/\%$	最佳含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\gamma_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$
A1 标	低液限黏土	CL	48.7	24.7	24.1	12.6	1.885
B1 标	高液限粘土质砂	SHC	51.8	26.1	25.7	9.5	2.032
A2 标	土石混填	CLG	37.2	24.6	12.6	8.9	2.153

2) 试验方法与内容

采用重复加载三轴试验进行室内动态模量试验^[12-13],试验仪器为英国 Cooper 公司液压伺服通用材料试验机 CRT-UTM-HYD 25 kN。根据路基填料的现场位置,按照按 96% 的压实度制备试件,考虑到不同含水率状态下,应力级位对路基填料的影响^[14],选取每种土质的最佳含水率 OMC、OMC±1%、OMC±2% 和 OMC±3% 共 7 个目标含水率,测试完成后测定的试件实际含水率作为最终含水率,如表 3 所示。每种含水率状态下制作 3 个平行试件^[15]。

已有研究或有限元分析表明^[16],中国高速公路路面结构下路基的体应力一般在 75 kPa 以下,故试验只进行围压 σ_3 为 15 kPa,偏应力 σ_d 为 30 kPa 这一组合方式来进行室内动态模量试验,具体加载方式如表 4 所示。

由图 3~图 5 和表 1 可知,黏性土、砂性土和土石混填路基的 E_P-E_F 、 E_P-DP 和 E_F-DP 之间均具有较好的回归关系,其中, E_P-E_F 的回归系数最高,其值均大于 0.8, E_P-DP 的回归系数次之,其值在 0.77~0.85 之间,而 E_F-DP 的回归系数最小,其值在 0.63~0.69 之间。

此外,由于路基强度和刚度越高, E_F 越大, E_P 就越大,二者成正比关系,回归系数 a 和 b 均为正值;而路基强度和刚度越高, DP 就越小,而动态模量 E_P 、 E_F 就越大,即动态模量与 DP 成反比关系,回归系数中 a 为正值而 b 为负值,表明实测结果与反比例规律一致。从黏性土与土石混填、砂性土与土石混填的回归系数对比分析还可以发现,随土体强度增大, E_P-E_F 、 E_P-DP 和 E_F-DP 回归系数中的 a 值减少, b 值增大。

2 室内动态模量试验与分析

2.1 室内试验方案

1) 主要物性指标

把 3 种土质现场检测过程中收集的土样汇集一起,充分拌匀后进行各自的物性指标试验,试验结果见表 2。

表 3 试件的含水率

试件编号	含水率/%		
	黏性土	砂性土	土石混填
1	9.4	6.5	5.8
2	10.2	7.3	6.8
3	11.4	8.1	7.7
4	12.3	9.4	8.6
5	13.5	10.0	9.7
6	14.3	11.2	10.5
7	15.5	12.4	11.3

表 4 试验加载方式

加载序列号	围压应力 σ_3/kPa	接触应力 $0.2\sigma_3/kPa$	循环偏应力 σ_d/kPa	最大轴向应力 σ_{max}/kPa	荷载作用次数
0(预载)	30	6	55	61	1 000
1	15	3	30	33	100

加载波形采用半正矢波;加载频率为 10 Hz;加载时间为 0.2 s;加载间歇时间为 0.8 s。

2.2 试验结果分析

黏性土、砂性土和土石混填 3 种路基填料的室内动态模量如图 6 所示。

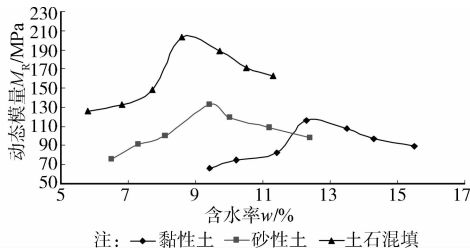


图 6 动态模量 M_R 与含水率 w 的关系

由图 6 可知,7 个试件中,黏性土、砂性土和土石混填的动态模量均是在最佳含水率最大,且当含水率小于最佳含水率时,动态模量的下降幅度较大,而当含水率大于最佳含水率时,动态模量的下降幅度相对较小。因此,含水率对路基填料的动态模量影响十分显著,3 种路基填料的动态模量 M_R 均随含水率 w 先增后减,具有典型的凸型抛物线特征。为此,采用二阶多项式方程 $y = ax^2 + bx + c$ 对 3 种路基填料的动态模量 M_R 与含水率 w 的关系进行回归,回归系数如表 5 所示。

表 5 动态模量与含水率的回归系数

土质类型	试件数量	回归参数			R
		a	b	c	
黏性土	7	-3.026 2	79.9	-422.2	0.886 5
砂性土	7	-4.057 8	80.6	-278.7	0.932 2
土石混填	7	-5.196 6	98.1	279.8	0.851 9

从表 5 可以看出,3 种路基填料的动态模量 M_R 与含水率 w 的回归系数 R 均大于 0.85,表明二者具有良好的回归关系。

3 室内外动态模量关系的建立

室内外动态模量关系的建立可以考虑以含水率作为中间桥梁,即根据室内动态模量 M_R 与含水率 w 的回归关系,把现场检测点位的含水率代入该回归关系,可以得出现场点位含水率状态下的室内动态模量 M_R ,依次求出所有点位的 M_R 后,再采用直线方程 $y = ax + b$ 建立现场检测动态模量与室内动态模量之间的回归关系(见表 6)。

表 6 室内外动态模量的回归关系

回归关系	土质类型	点位	回归参数		R
			a	b	
M_R-E_P	黏性土	41	-0.208 2	11.8	0.815 1
	砂性土	43	-0.455 4	149.9	0.784 6
	土石混填	27	-0.458 1	199.89	0.778 5
M_R-E_F	黏性土	41	-0.157 9	109.9	0.782 5
	砂性土	43	-0.270 7	140.2	0.695 4
	土石混填	27	-0.345 5	210.3	0.719 6
M_R-DP	黏性土	41	1.393 5	80.6	0.646 7
	砂性土	43	5.709 3	56.9	0.613 9
	土石混填	27	11.802 0	68.9	0.637 3

由表 6 可知,室内动态模量 M_R 与 E_P 、 E_F 和 DP 均具有较好的回归关系,其中, M_R-E_P 的回归系数最高,其值均大于 0.75, M_R-E_F 的回归系数次之,其值在 0.69~0.79 之间,而 E_P-DP 的回归系数最小,其值在 0.61~0.65 之间。

M_R-E_P 与 M_R-E_F 的回归参数 a 均为负值,而 E_P-DP 回归参数 a 均为正值,这似乎与动态模量的概念存在一定偏差,造成这种情况的主要原因在于,现场动态模量 E_P 、 E_F 与含水率负相关, DP 与含水率正相关,而当含水率低于最佳含水率时,室内动态模量 M_R 与含水率正相关。而室内动态模量与含水率的回归关系为凸型抛物线,当含水率低于最佳含水率(现场含水率情况一般符合这一情况), M_R 与含水率正相关。因此,采用本方法建立室内外动态模量换算关系时,一定要明确现场含水率状况。

4 结语

1)黏性土、砂性土和土石混填 3 种路基填料采用 PFWD、FWD 和 DCP 测试方法所得的模量指标彼此之间存在良好的双对数回归关系,其中, E_P-E_F 的回归系数最高, E_P-DP 的回归系数次之,而 E_P-DP 的回归系数最小。

2)上述 3 种路基填料的室内动态模量与含水率具有良好凸型抛物线的回归关系,且当含水率小于最佳含水率时,动态模量的下降幅度较大,而当含水率大于最佳含水率时,动态模量的下降幅度相对较小。

3)上述 3 种路基填料的 M_R 与 E_P 、 E_F 和 DP 均具有较好的回归关系,其中, M_R-E_P 的回归系数最高, M_R-E_F 的回归系数次之,而 E_P-DP 的回归系数最小。

参考文献:

- [1] 黄晓明,汪双杰. 现代沥青路面结构分析理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [2] Mazari M, Navarro E, Abdallah I, et al. Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(1):36-44.
- [3] Alvian, John, Lim Meng Siang, et al. Innovative laboratory assessment of the resilient behaviour of materials rigid, elastic and particulates [J]. Procedia Engineering, 2013, 53:156-166.
- [4] 查旭东. PFWD 快速检测路基模量研究[J]. 公路交通科技, 2009, 25(1):26-30.
Zha X D. Study of rapid test of subgrade modulus with PFWD [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 25(1):26-30.
- [5] 董城,岳志平,李志勇,等. 基于路基路面协调变形的路基回弹模量设计[J]. 公路交通科技, 2012, 29(1):38-42.
Dong C, Yue Z P, Li Z Y, et al. Design of subgrade resilient modulus based on coordinate deformation of subgrade and pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(1):38-42.
- [6] Mishra D, Tutumluer E, Moaveni M, et al. Laboratory and field measured moduli of unsurfaced pavements on weak subgrade [C]//GeoCongress, 2012:1381-1390.
- [7] 陈宇亮,徐远明,王新武. 基于动弹性模量的土石混填路基压实质量控制技术[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(1):20-23.
Chen Y L, Xu Y M, Wang X W. Controlling methods of compaction quality of subgrade filled with earth-rock mixtures based on dynamic modulus [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(1):20-23.
- [8] Wang J, Guo L, Cai Y Q, et al. Strain and pore pressure development on soft marine clay in triaxial tests with a large number of cycles [J]. Ocean Engineering, 2013, 74(1):125-132.
- [9] 唐伯明,邓学钧,李一鸣. 落锤式弯沉仪(FWD)与贝克曼梁式弯沉仪(BB)的对比试验研究[J]. 中国公路学报, 1990, 3(3):37-43.
Tang B M, Deng X J, Li Y M. Comparative study of FWD and BB [J]. China Journal of Highway and Transport, 1990, 3(3):37-43.
- [10] 查旭东,肖秋明. PFWD 实测压力与弯沉之间的关系[J]. 公路交通科技, 2011, 28(10):24-29.
Zha X D, Xiao Q M. Relation between pressure and deflection measured with portable falling weight deflectometer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(10):24-29.
- [11] 黄大维,杨有海,赖国泉,等. 高速铁路路基动态变形模量分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(5):1402-1408.
Huang D W, Yang Y H, Lai G Q, et al. Analysis of dynamic deformation modulus for high-speed railway subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5):1402-1409.
- [12] 陈声凯,凌建明,罗志刚. 路基土回弹模量应力依赖性分析及预估模型[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6):95-99.
Chen S K, Ling J M, Luo Z G. Stress-dependent characteristics and prediction model of the resilient modulus of subgrade soils [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6):95-99.
- [13] 邱欣,钱劲松,张世洲. 基于基质吸力的粘性路基土动回弹模量预估模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3):49-54.
Qiu X, Qian J S, Zhang S Z. Research on prediction model of dynamic resilient modulus of subgrade soil based on matric suction [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3):49-54.
- [14] 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 J M, Chen S K, Cao C W. Analysis of influence factors on resilient modulus of subgrade soil [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4):446-451.
- [15] 徐艳玲,唐伯明,谢国栋,等. 不同含水率下应力级位对粘性土动回弹模量的影响[J]. 中外公路, 2011(6):68-72.
Xu Y L, Tang B M, Xie G D, et al. The influence stress level for dynamic resilient modulus of clay under different water content [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011(6):68-72.
- [16] 凌建明,姚祖康,罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究[R]. 2007.

(编辑 胡英奎)