

国外未处治粒料与路基土回弹模量试验研究

——基本原理与试验方法

张世洲, 凌建明, 罗志刚

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092)

摘 要: 介绍了国外未处治粒料与路基土回弹特性室内试验研究中涉及的一些基本原理以及若干室内外试验方法, 并就试验方法的优缺点进行了简要评述。

关键词: 路基土; 粒料; 回弹模量; 重复加载试验; 三轴仪

回弹模量(M_R)的概念最初是 Seed 等(1962 年)^[1]在研究路基土回弹(弹性的、可逆的)特性与沥青混凝土路面疲劳损坏关系的过程中引入的。随后的大量研究表明: 与路面总变形相比, 路面回弹变形和路面性能之间具有更好的相关性。因而使得回弹模量的概念最终被道路界接受, 回弹模量亦成为沥青混凝土路面力学—经验设计方法中表征路基土和粒料力学特性的主要参数之一。在过去的 40 多年, 国外许多道路研究机构和科研人员都致力于路基土和粒料材料的动回弹响应试验研究, 并取得了大量成果。相比较而言, 国内道路界由于条件的限制, 在相关领域的研究还处于起步发展阶段。因此, 我们有必要对国外在该领域的研究工作及成果进行全面了解, 并在此基础上深化研究, 从而为构建一个合理、可行的常规路基土与粒料回弹模量测试方法提供基本的技术储备。

1 室内试验原理

1.1 回弹模量

回弹模量类似于弹性模量, 其按基本弹性理论定义为: 施加于试件的重复应力峰值与试件相应方向回弹应变峰值之比。由于重复应力峰值与回弹应变峰值并不同步, 所以回弹模量仅是个近似意义上的概念。对于常规重复加载三轴试验, 回弹模量按式(1)计算(如图 1 所示):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (1)$$

式中: M_R 为回弹模量; σ_d 为轴向重复应力峰值(偏应力), $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力; ϵ_R 为轴向回弹应变峰值。

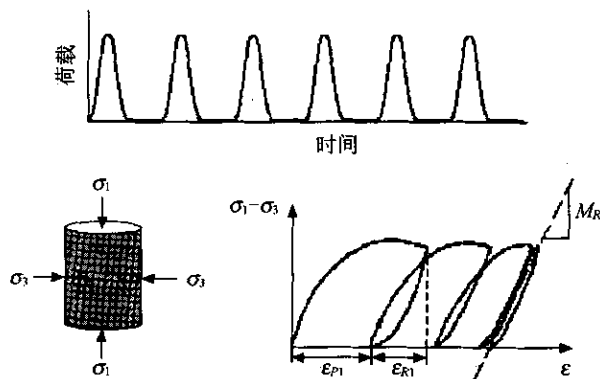


图 1 三轴试验与路基土或粒料回弹性质

1.2 荷载脉冲

当车辆在路表移动时, 轮迹处及其两侧一定范围内的路面将受到大量不同幅度的应力脉冲作用。应力脉冲持续时间随车速的降低和距路表深度的增加而增大。接近路表处的应力脉冲有显著的半正矢波形, 随着深度的增加, 应力脉冲尽管还保持着近似的半正矢波形, 但其间歇时间逐渐增大。此外, 路面的类型与几何形状对应力脉冲波形和间歇时间也有一定影响。

1.3 重复循环加载试验

为了在试验室近似模拟路面材料的实际受力状态,对试件施加一系列非连续(存在间歇)、具有一定波形的重复循环脉冲动应力,即进行所谓的重复循环加载试验。重复循环加载可应用于许多传统的静载试验,如静三轴试验、小梁弯拉试验、简单剪切试验等,然后由试验结果得到相应的回弹模量。

1.4 主应力轴旋转

在移动轮载作用下,路面结构中某点所受应力脉冲由竖向应力、水平应力和剪应力 3 个分量组成。当轮载通过该点正上方后,剪应力将反向作用,从而引起主应力轴旋转(如图 2 所示)。

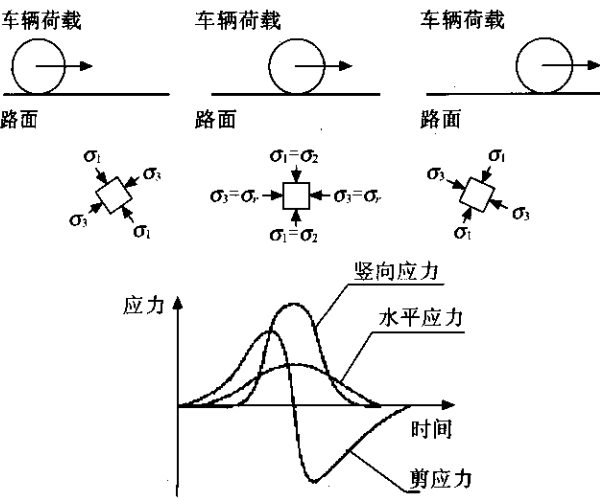


图 2 移动轮载作用下的主应力轴旋转

1.5 初始应力状态

路面结构中的应力状态由两部分组成:(1)初始残余应力;(2)交通荷载引起的动应力。对于稳定处治层还应包括温度和湿度变化引起的应力。

施工期间,重型压实设备按一定厚度压实路基、基层和路面。每压实完一层,该层即成为重型施工机械的下一临时工作面。因此,在路面施工完成前,某一特定层将承受机械压实与施工机械轮载共同产生的巨大垂直应力。该垂直应力会在结构层内引起侧向应力,并将其“锁存”于层内^[2~4]而形成所谓的“残余侧向应力”。

残余侧向应力是限制粒料基层底部永久变形的重要因素,也是确定合理围压的重要因素,可按式(2)计算^[5]:

$$\sigma_{Rd} = K_0 \sigma_0 \tag{2}$$

式中: σ_{Rd} 为残余侧向应力; σ_0 为上覆结构的垂

直压力; K_0 为考虑残余应力的侧向土压力系数。

2 室内试验测试法

按照重复循环加载设备的不同,室内动回弹模量测试方法可分为以下几种^[6]:(1)常规动三轴测试法(下文中简称为动三轴测试法);(2)方向剪切测试法;(3)扭剪测试法;(4)共振柱测试法;(5)空心圆柱扭剪测试法;(6)真三轴测试法。

2.1 动三轴测试法

动三轴仪是在常规静三轴仪的基础上,经增加轴向激振系统改造而成(如图 3 所示)。激振动力可采用电磁力、惯性力、气(液)压力等。后来发展成可在轴压和室压两向分别激振。

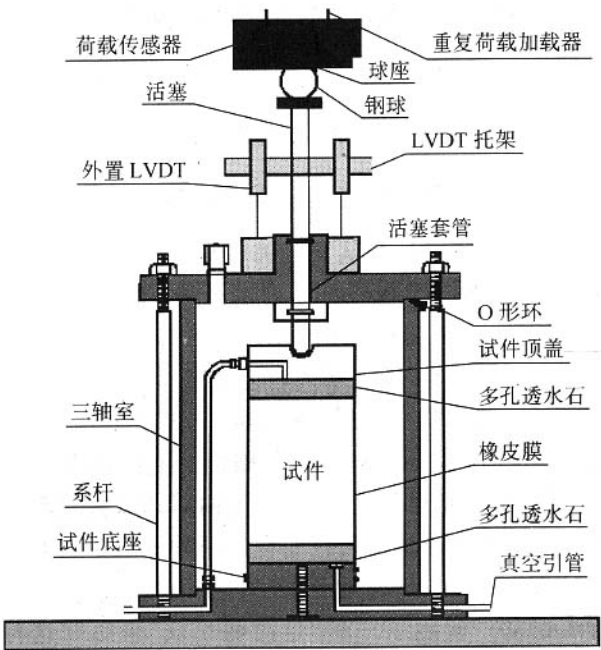


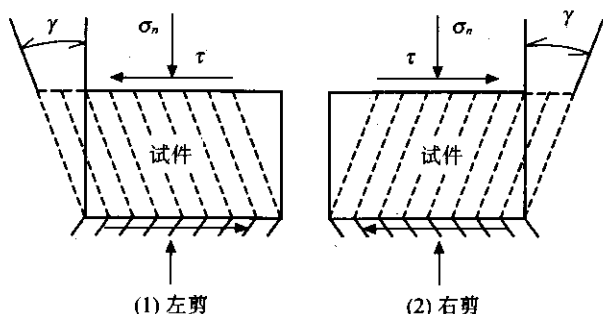
图 3 动三轴仪

用于测试回弹模量,动三轴仪有 3 个非常重要的优点:(1)在整个测试期间,施加于试件的应力条件非常明确;(2)允许相对简单地控制试件轴向和径向排水,试件端部的孔隙水压力也较易测量;(3)能较容易地测量轴向、径向及体积应变。除上述优点外,动三轴仪也便于进行未扰动试管取样试件测试,或用于静载试验。

动三轴仪的显著不足则在于不能模拟移动轮载条件下主应力轴的旋转和剪切应力反向,且在测试中无法控制中间主应力。此外,当使用外置传感器测量轴向应变时,必须反复仔细地进行校核,否则无法满足试验要求。

2.2 方向剪切测试法

在方向剪切试验中,某一方向保持平面应变状态,另外两个方向同时施加正应力和剪应力(如图4所示)。重复加载时,通过改变剪应力方向来实现主应力轴按固定角度($0^\circ \sim 90^\circ$)旋转。虽然试验中未真实再现现场移动轮载作用下的应力路径,但该试验能够模拟剪应力反向,故可用于研究剪应力反向和主应力轴旋转的大致影响^[7,8]。



注: σ_n 为正应力; τ 为剪应力; γ 为剪应变; 剪模量 $G = \tau / \gamma$ 。

图4 方向剪切试验加载模式

采用方向剪切测试方法确定的砂的剪切回弹模量,与动三轴试验在同等应力水平条件下获得的结果类似^[8]。但在永久应变测试方面,方向剪切试验重复加载100 000次后,永久应变继续呈对数累积增长。而动三轴试验重复加载10 000~20 000次后,永久应变仅有很小的改变,这与路面的实际情况不相符。因而在研究永久变形方面,方向剪切试验较动三轴试验更为合理。永久应变在这两种试验中的差异可以理解为主应力轴旋转引起的“各向异性”。Arthur等^[9]研制了一种“定向剪切仪”来研究这种应力引起的各向异性。该仪器克服了传统方向剪切仪中主应力轴仅能按固定角度旋转的不足。

从概念上讲,进行方向剪切试验应当非常简易。但试件顶面均布剪应力的施加及其引起的均匀变形通常会成为问题。再者,施加于试件的复杂应力状态也不易评定。虽然方向剪切测试法已长时间用于试验研究,但上述问题的存在致使该方法无法很好地被接受。尽管在研究永久变形方面,方向剪切测试法较动三轴测试法更为合理,但毕竟不适合于作常规试验方法来考虑。

2.3 扭剪测试法

在扭剪试验中,试件底部被固定,顶部施加扭矩(如图5所示),加载频率通常小于10 Hz,回弹模量根据剪应力—剪应变滞后环线确定。扭剪测试法的

优点在于:仪器便于校核,试验直观易操作。但在定义试件排水条件方面不如动三轴试验方便。此外,扭剪仪的测试能力有限(小于一般厚度路面或弱材料在典型轮载作用下的应变值)。鉴于路基的应变较基层小,因而其更适合于路基土的测试。该方法进行改进后,可以将其作为路基土回弹特性研究的一种基本试验手段。

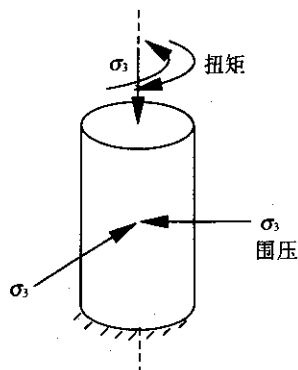


图5 扭剪试验加载模式

2.4 共振柱测试法

共振柱试验的原理是通过激振系统(轴向激振或扭剪激振)使试件产生共振,然后确定弹性波在试件中的传播速度,以计算试件的模量。试件可以是圆柱形的,也可以是空心圆柱形的。试件可以一端固定、一端自由,也可以一端固定、一端用弹簧和阻尼器支承。试件在压力室中可以是各向等压应力状态,也可以是轴向与侧向压力不等的应力状态。图6为轴向与侧向压力不等的共振柱试验装置。

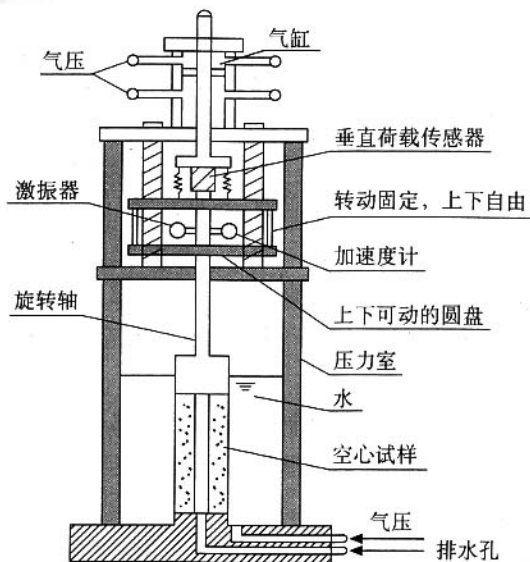


图6 共振柱试验装置

由于试验中试件所经受的轴向循环应变远小于重轮载作用下路面中的应变,故该方法不适合用于路面材料测试,除非能够建立测试模量与应变水平的经验相关关系。

2.5 空心圆柱扭剪测试法

空心圆柱扭剪仪(如图 7 所示)在独立施加内压、外压、轴向荷载和扭矩时,可以独立变化,亦即 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{z\theta}$ 等 4 个应力变量,可以独立变化 3 个主应力的方向和在某一个方向上变化主应力方向,从而实现主应力轴旋转。因而,相较于三轴测试法和方向剪切测试法而言,空心圆柱扭剪测试法能模拟更为复杂的应力状态和应力路径^[10],是研究路面材料属性的先进手段。该方法特别适合研究移动轮载作用下路面材料的永久变形,以及材料的各向异性、主应力轴旋转对应力—应变关系的影响。此外,当主应力轴不旋转时,空心圆柱扭剪仪可以像真三轴仪一样进行不同应力路径的真三轴试验。

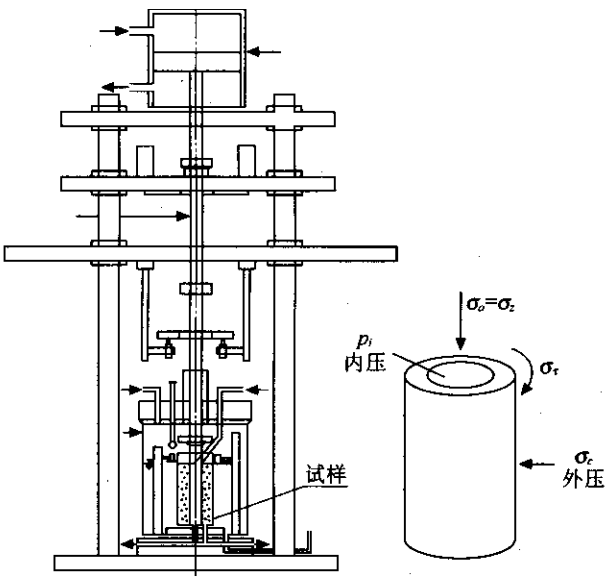


图 7 空心圆柱扭剪仪及试件应力状态

这种仪器存在以下缺点:(1)受试件壁厚的限制,材料粒径限制在粗砂的级别;(2)空心圆柱试件沿径向上的应力分布是不均匀的,只有当试件厚度与直径相比很薄时,这种不均匀性才可以忽略;(3)在试件两端施加扭矩时,为了不使试件帽滑动,常将一些齿嵌入试件而致使剪应力 $\tau_{z\theta}$ 沿长度方向也不易均匀分布,因而试件长度应适中;(4)由于试件内外表面都覆有橡皮膜,膜的嵌入对试件体变测量有很大影响。

在空心圆柱扭剪试验中,由于仪器使用和试件制备工序复杂,故不适合于作常规试验方法来考虑。

2.6 真三轴测试法

常规三轴试验的根本不足在于其中的两个主应力总是相等的。针对常规三轴仪的这一缺陷,科研人员研制了可以“真正”实现独立变化 3 个主应力的试验设备——真三轴仪。目前的真三轴仪可分为两大类:改造式真三轴仪和盒式真三轴仪^[11]。改造式真三轴仪是在原三轴压力室中将试件改成立方形,并安装一对侧向压力板,以施加 σ_2 。其优点是试件有一对面暴露在压力室中,能减少该方向与其他两个方向边界间的干扰,同时也较容易观察到试件的破坏形式。不足之处在于 3 个方向并不能完全独立地施加大、中、小主应力。美国加州理工大学伯克利分校的 Lade 和 Duncan 所研制的真三轴仪就属于该系列,如图 8。盒式真三轴仪是在立方体试件的 3 个方向设置 3 个独立的加载系统,从而形成一个立方“盒”。其加载系统的边界可以是刚性的,也可以是柔性的,或混合式的。该系列中最具代表性的真三轴仪是英国剑桥大学 Hambly 和 Pearce 设计与发展的剑桥盒式真三轴仪,其工作原理如图 9 所示。这种仪器可以在 3 个方向独立施加主应力,并且大、中、小主应力可在 3 个方向自由转换,可做到约 30% 的均匀应变而不会使边界互相干扰,且基本实现控制和数据采集自动化。但其刚性边界易造成应力分布不均,刚性加压板对于试件破坏时剪切带的形成与观察都有干扰和影响。

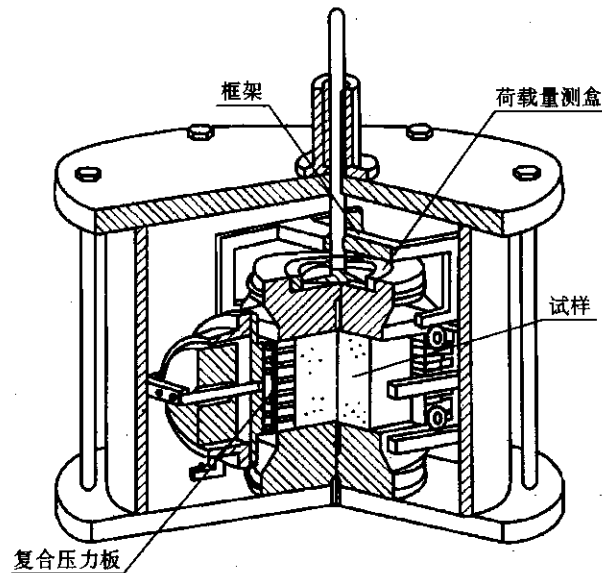


图 8 Lade-Duncan 真三轴仪

真三轴测试法可以用于研究中间主应力、初始应力各向异性、强度各向异性以及应力不变量的影

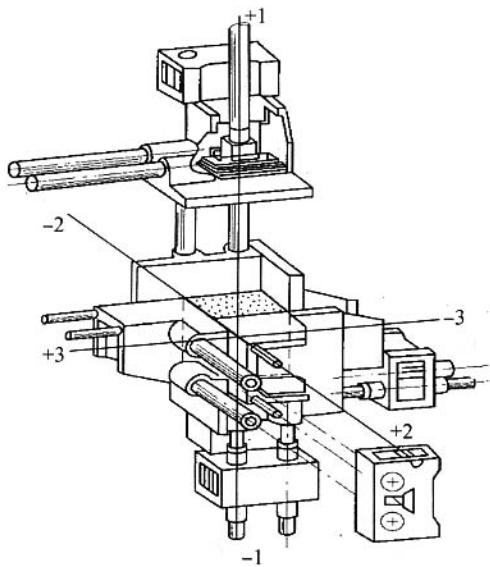


图9 剑桥真三轴仪加载导向系统

响^[12],较仅能控制两个方向正应力的动三轴测试法和方向剪切测试法,其能模拟更为复杂的应力状态和应力路径。但由于真三轴仪自身的复杂性,且存在许多尚待解决的技术问题,故不适合用于常规试验方法。

3 现场试验测试法

3.1 FWD 测试法^[13]

FWD 是一种脉冲式弯沉检测设备,于 20 世纪 70 年代开始用于路基路面评价,由法国及瑞典最先研制成功。随后,美国、丹麦、英国和日本等国先后引进仿制了这种弯沉仪。FWD 通过计算机控制下的液压系统提升并释放一重锤来施加脉冲荷载(通过调整锤重和提升高度改变荷载大小,缓冲器用于调整荷载波形与作用时间),荷载经刚性圆盘传递给路面,并由按一定规律布置的 5~9 个速度型传感器测定冲击荷载作用下的弯沉盆,工作原理如图 10 所示。该仪器可以较好地模拟行车荷载对路面的动力作用,测速快、精度高(弯沉分辨率达 $1\mu\text{m}$),能为路面结构层模量反算提供较完整、准确的弯沉盆信息,因此成为国外当前检验评定路基路面模量及刚度的主要测试设备。FWD 工程应用技术研究主要包括检测方法和反算方法两大方面。检测方法重点研究不同材料和不同路面结构形式条件下的传感器布置方案、加载大小和次数,以确保模量反算结果的可靠性。反算方法重点研究弯沉盆反算算法和力学分析模型,分为经验方法和理论方法两类。经验方法以

MODULUS 程序为代表。理论方法根据力学模型的不同可分为以下几类:静态线性、静态非线性、动态线性、动态非线性。反算算法有迭代法、数据库搜索法、遗传算法、人工神经网络算法等,当前主要采用的是迭代法。

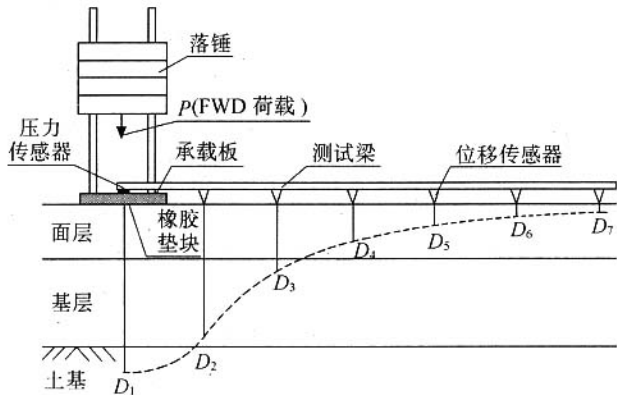


图10 FWD 工作原理

3.2 LFWD 测试法^[14]

LFWD(轻型或便携落锤弯沉仪)是继 FWD 之后一种新型的路基/地基动力性能检测设备,由加载装置(产生额定的荷载脉冲)、加载板(按路基/地基强度的不同可选用直径 10 cm、20 cm、30 cm 板)与中心地震检波传感器组成。LFWD 将 10 kg 的落锤提升至一定高度,然后自由下落,落锤冲击承载板产生脉冲荷载并传递给路基/地基而产生竖向位移。荷载与位移被数据采集系统记录,并根据布辛尼斯克(J. Boussinesq)解按测试所得的压力与位移峰值计算路基/地基模量。LFWD 测试法最初是在德国现场承载板试验中发展起来的,一般可用于评价最大粒径小于 6 cm 的路基土强度,动模量的测试范围为 15~80 MPa,也可用于路基的压实度的间接评价。与 FWD 相比,LFWD 具有小型、轻便、测试简便、价格便宜等优点,具有广阔的应用前景。

3.3 DCP 测试法^[15]

DCP(动力锥贯入仪)最初是南非研制的现场路面体系性能检测设备。其后,英国、美国、澳大利亚、新西兰等国也将其用于道路检测。DCP 由上杆与下杆两部分组成:上杆由手柄和 8 kg 落锤(落距一般为 575 mm,可变)组成,并通过铁砧与下杆相连;下杆由杆尺(一般为 1 000 mm,可变)与钢化贯入锥头组成。与一般的锥贯入试验(如 CPT)不同,DCP 试验不是将锥头以一常速率压入土中,而是通过落锤施加动力荷载将锥头贯入,到达指定位置后,记录贯

入深度与加载次数,以计算动力锥贯入指数 $DCPI$ (或称贯入率,为贯入深度与加载次数之比)。DCP 法简便、经济、易于维修,能连续测量不同深度的贯入率,以评价路面层或路基的强度或刚度。贯入率低,表示材料刚度大,反之表示材料刚度小。此外,DCP 还可用于结构层压实度检测、厚度测量等方面。目前,关于 DCP 测试值与回弹模量相关关系的研究正在逐步深入。

3.4 Geogague 测试法^[14,16]

Geogague(土刚度仪)是美国 FHWA(联邦公路管理局)和 APPA(国防部高级研究管理局)共同开发研制的。Geogague 可用于浅层土刚度与模量的直接、快速测量。其配有振动器,可通过仪器底部的圆环对土体施加很小的垂直荷载(频率的范围为 100~196 Hz,垂直荷载约 9 N),从而引起小的弯沉。力与弯沉之比即为 Geogague 测定的模量。根据 Egorov 公式可将 Geogague 测定的模量转化为路基的弹性模量。

4 结语

通过对各种测试方法及仪器的简要评述可知,室内试验应以动三轴仪为依托以研制常规路基土与粒料回弹模量测试方法。纵观国外过去几十年的研究历程,动三轴测试法也一直是路面设计中评价粘性土和粒料回弹属性的主流方法。与其他室内测试方法相比,动三轴压缩试验比较直观,也能近似合理地模拟现场条件,是可以满足当前路面设计要求的。至于现场测试,国内在 FWD 测试研究方面虽有一定积累,但应继续深入,尤其对现场反算模量与室内测试模量相关关系的研究有待进一步加强。

参考文献:

- [1] Seed H B, Chan C K, Lee C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relations to fatigue failures in asphalt pavements[M]. Proceedings International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, 1962.
- [2] Allen J J, Thompson M R. Resilient response of granular materials subjected to time dependent lateral stresses[M]. Transp. Res. Rec. 510, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1974.
- [3] Uzan J. Characterization of Granular Materials[Z]. TRB, 1985, No. 1 022, Symposium on Mechanics of Granular Materials.
- [4] Duncan J M, Seed H B. Compaction-Induced Earth Pressure Under K_0 Conditions [J]. ASCE, 1986, 112 (1).
- [5] Selig E T. Tensile Zone Effects on Performance of Layered Systems [J]. Geotechnique, 1987, 37(3).
- [6] NCHRP Project 1-38. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design-Final Report [Z]. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, June, 1997.
- [7] Ansell P, Brown S F. The Effect of Cyclic Shear Stresses on Granular Materials [M]. Research Report Submitted to British Rail and Transportation Research and Road Laboratory (TRRL), University of Nottingham, 1975.
- [8] McDonald L M, Raymond G P. Repetitive Load Testing: Reversal or Rotation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21.
- [9] Arthur J R F, Bekenstein S, Germaine J T, Ladd C C. Stress Path Tests with Controlled Rotation of Principal Stress Directions [J]. Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP740, 1981, 21.
- [10] Thom N H, Dawson A R. The Permanent Deformation of a Granular Material Modelled Using Hollow Cylinder Testing [M]. Transportation Research Board, Paper presented at the 68th Annual Meeting, Washington, D. C., 1989.
- [11] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] Jamiolkowski M, Ladd C C, Germaine J T, Lancellotta R. New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils [J]. Proceedings, 11th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985, 1.
- [13] 查旭东. 基于同伦方法的路面模量反算的研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [14] Ravindra Gudishala. Development of Resilient Modulus Predictive Models for Base and Subgrade Pavement Layers from in situ Devices Test Results [Z]. M. S. Thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Department of Civil and Environmental Engineering, December, 2004.
- [15] Murad Y Abu-Farsakh, Munir D Nazzal, Khalid Alshibli. Application of DCP in Pavement Construction Control [Z]. 84th Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM), 2005.

文章编号: 0451-0712(2006)11-0016-07

中图分类号: U416.2

文献标识码: B

复合式路面温度场分布与温度应力分析

李国胜

(河南省交通规划勘察设计院 郑州市 450052)

摘 要: PCC+AC 复合式路面是一种“刚柔相济”的路面结构形式。沥青混凝土上面层的存在,使得 PCC+AC 复合式路面水泥混凝土板的温度应力与普通水泥混凝土路面的温度应力有较大的不同,并且沥青混凝土层厚度的大小直接影响水泥混凝土板的温度应力的分布。结合耐氏~许昌高速公路项目的实施,重点分析了 PCC+AC 复合式路面的温度场分布与温度应力。

关键词: 复合式路面; 温度场; 温度应力; 温度梯度

1 温度调查

根据对项目区附近的郑洛高速公路沥青混凝土路面和许昌 311 国道水泥混凝土路面 7 月份夏季高温期、12 月份冬季低温期及 4 月份春季升温期温度场进行的 3 次实测,可以得到一些规律性认识:

- (1) 昼夜平均气温以及气温的变化幅度随太阳总辐射量的增加而增加;
- (2) 凌晨 5:30~6:30 之间路表温度最低,而后

路表温度快速升高,于午后 14:00 左右达到最高,至次日凌晨 5:30~6:30 再次达到最低;

- (3) 随着深度的增加,温度波动的幅度逐渐减小;
- (4) 不论是沥青混凝土路面,还是水泥混凝土路面,最低温度都出现在路表面;
- (5) 路面南北半幅的温度略有差异,南半幅结构温度稍高于北半幅。

收稿日期: 2006-08-30

[16] Auckpath Sawangsuriya, Tuncer B Edil, Peter J Bosscher. Comparison of Moduli Obtained from the Soil Stiffness Gauge with Moduli from Other Tests

[Z]. 81st Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM), 2002.

Overseas Test Study on Resilient Modulus of Unbound Granular Material and Subgrade Soil ——Basic Fundamental and Test Method

ZHANG Shi-zhou, LING Jian-ming, LUO Zhi-gang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, overseas some basic fundamentals of laboratory tests and testing methods in field or laboratory about trial research on resilient property of unbound granular material and subgrade soil are presented. Then, the advantages and disadvantages of every trial method are evaluated briefly.

Key words: subgrade soil; granular material; resilient modulus; repeated loading test; triaxial apparatus