

填方材料变形模量与压实度的关系

袁爱忠¹, 张远军²

(1. 山西晋城公路规划勘察设计院, 山西 晋城 048000; 2. 四川升拓检测技术有限公司, 成都 610045)

摘 要: 简便快捷、准确客观检测和监控填土压实度质量是工程施工与监理、工程建设与管理等追求的目标, 变形模量作为一种路基强度指标, 可以反映路基特性。采用落球式测试技术为手段, 在相同碾压条件下, 测试同类填方材料路基的变形模量与压实度, 并对其进行函数拟合分析, 研究填方材料的变形模量和压实度的内在关联, 建立变形模量与压实度的关系模型, 最后应用所得模型对填方工程质量进行监控、检测, 并与传统的挖坑灌砂法对比验证, 以明确变形模量与压实度的关系模型的可行性。

关键词: 变形模量; 压实度; 挖坑灌砂法; 落球测试技术

中图分类号: TU4

文献标志码: A

引 言

填方工程压实度是道路、桥梁、铁路、水利、机场、市政等施工质量监控、检测的重要参数指标。对于公路路基, 只有对填方材料分层充分压实, 才能真正确保填方结构的强度、刚度、变形等工程性质指标达到设计要求, 如果路基压实度没能达到设计要求, 将严重影响工程的进度和质量。

随着我国道路、桥梁、铁路、水利、机场、市政等涉及填方工程的基础建设迅猛发展, 对填方工程质量要求日益严格, 对现场测试、施工过程监控等的需求也日益广泛。目前, 较为常用的现场压实度的检测方法有挖坑灌砂法、核子密度仪法、环刀法等, 这些方法往往存在样点少、代表性差、费工费时、复现性差、监控不及时等问题, 落后于工程质量监控、检测要求。开发新的工程质量(尤其是压实度检测)检测技术, 以达到简便快捷、准确客观检测和监控填方压实度质量目标, 已成为国内外土工检测的重要课题之一^[1], 随之各种新的检测技术也应运而生, 如瑞利波法、振动法、动态模量法等。

本文通过压实度质量检测新技术现状分析, 笔者提

出通过变形模量与压实度的关系模型, 建立了有效的落球式填方压实度质量检测技术的方法。

1 压实度质量检测新技术研究现状

1.1 振动检测技术

道路中振动检测技术^[2]是用向地面瞬态锤击来测定它的强度与压实度(或密实度)的一种方法。路基路面在受到锤击后即刻就得到凹陷变形, 或者产生一种传递振动波。这种凹陷或传递振动波即为检测所需要的主要参数, 由于这种参数是依靠锤击后道路产生振动获得, 因而, 简称为振动检测技术。在国内外利用锤击的方法来得到路基路面检测数据, 主要集中在路基路面的强度与压实度方面。从理论上讲, 无论是路基、路面均可用锤击的方法测定它们的强度和压实度(或密实度)。尽管振动的理论研究已经发展到相当的水平, 但是所遇到的振动问题非常复杂, 结构中许多参数, 如阻尼系数、边界条件等还需要确定。

1.2 瑞利波检测技术

瑞利波测试技术是利用瑞利波的频散特性来进行地下介质特性的测试分析^[3]。同一波长的瑞利波的传

收稿日期:2012-07-23

基金项目:山西省交通厅科技项目(2011)

作者简介:袁爱忠(1968-), 男, 山西高坪人, 工程师, 主要从事公路勘察设计 & 施工方面的研究, (E-mail) zhangyj@scentralit.com

播特性反映了水平方向的地质条件变化情况,路基的压实度也是一定压实厚度内土体的一种介质特性,介质弹性参数的大小直接反映了其压实度特性,通过试验回归分析,可以得到瑞利波传播速度 V_R 与压实度 K 的关系模型,因此瑞利波传播速度是瑞利波测试技术检测压实度的重要参数^[4]。然而瑞利波波速测试受到结构边界条件、路基层状态等的影响,只适合半无限体、下层较软等场合。

1.3 动态模量检测技术

动态模量检测技术^[5-7]是一种快速、方便检测路基动荷载特性的承载力指标的新试验方法,该方法可以真实地反映路基等的动态力学特性。动态模量已成为现行路基压实质量监控的一项重要指标。通过测试相同条件(同种填土材料、相同碾压等)下的动态模量与压实度,并进行回归分析,建立动态模量与压实度的关系模型。因此动态模量检测技术检测压实质量的关键参数就是动态模量,然而 E_{vd} 、 $PFWD$ 等动态模量测试均受到填方材料黏性、应变水平、惯性力等的影响。

通过压实度质量检测新技术现状分析可见,新技术都是力求建立某一易测参数与压实度 K 的关系模型,用以简便快捷地现场检测压实度质量。鉴于此,我们较全面地结合了当前填方工程的检测规程和检测指标要求,以 Hertz 碰撞理论为基础,通过探求变形模量与压实度的关系,建立了有效的落球式填方材料压实度质量测试技术,下称“落球测试技术”。

2 试验方法

2.1 挖坑灌砂法

挖坑灌砂法是目前较为常用的现场压实度的检测方法之一,是规范的试验方法,也是我国公路建设中路基压实度质量检测最常采用的直接密度法,其精度比较高,但其检测效率低(在操作人员熟悉的情况下,一个测试点要半个小时左右时间),对路基有一定程度的损伤,不能进行大规模测试。

在本试验中挖坑灌砂法用以采集压实度数据。

2.2 落球测试技术

落球测试技术是一种新型技术,该技术基于 Hertz 冲击理论,将一个刚性球体从一定高度落到测试对象材料上,通过测试球体与地基材料的碰撞过程来推算材料的变形特性。其中,最主要的测试参数为接触时间,测试对象越硬,接触时间越短。根据测试的接触时间,利用 Hertz 冲击理论公式^[8],通过数值计算,可以直接计算材料的变形特性。Hertz 冲击理论公式为:

$$T_c = 4.53 \left[\frac{(\delta_1 + \delta_2)M}{\pi \sqrt{Rv_0}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

其中, T_c 为接触时间(s); E_1 为模量, μ_1 为泊松比; $\delta_1 = \frac{1 - \mu_1}{E_1}$ 为球体参数(已知); E_2 为模量(测试指标); μ_2 为泊松比(影响小,可预设); $\delta_2 = \frac{1 - \mu_2}{E_2}$ 为测试材料参数; M 为落球质量(kg); R 为落球半径(m); v_0 为落球与测试材料碰撞时的速度, $v_0 = \sqrt{2gH}$, 其中, $g = 9.80 \text{ m/s}^2$, H 为球体的下落高度(m)。

式(1)是基于完全弹性体对象而提出的,而填方材料多是弹塑性材料,但可以通过积分速度的方法,把实际的接触时间分离成压缩过程的接触时间及回弹过程的接触时间,通过压缩过程的接触时间即可求出变形模量。

2.3 试验设计及原材料

对分类填方材料,在相同碾压条件下,利用挖坑灌砂法测试压实度和落球测试技术测试变形模量,并对压实度和变形模量进行函数拟合分析,沟通填方材料的变形模量和压实度的内在关联,建立变形模量与压实度的关系模型。

原材料选择来源有两类(图 1),一类为山西大同、忻州地区路基铺装用标准砂石土,另一类为山西忻州境内 208 国道改建工程用的标准水稳砂砾,测试时龄期为 5 天。

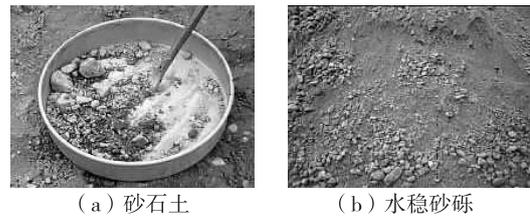


图 1 原材料(左:砂石土,右:水稳砂砾)

3 试验结果分析

3.1 试验数据筛选

在试验过程中难免会出现个别数据偏离较大,影响到试验结果的准确性,但如果任意舍弃测试所得结果又必将影响到试验的客观性,人为因素增加。为此,笔者将测试砂石土压实度分为: < 94% , 94% ~ 95.5% , 95.5% ~ 96% , 96% ~ 97% , 97% ~ 97.5% , > 97.5% 等 6 个范围组,将水稳砂砾压实度分为: < 93% , 93% ~ 95% , 95% ~ 96% , > 96% 等 4 个范围组,以便统计分析。

对于偏离较大的可疑值,选择 4d 检验法进行进步判别,以确定可疑数据的舍弃或保留。

4d 检验法先在试验数据中假设某个数据可疑,去除

可疑数据后,将其余数据视为新的一组数据,求出算术平均值 \bar{X} 和算术平均偏差值 \bar{d} , 如果可疑数据与 \bar{X} 之差大于 $4\bar{d}$, 即 $|\text{可疑值} - \bar{X}| > 4|\bar{d}|$, 则舍弃可疑值, 否则保留。利用4d检验法处理后的试验数据见表1。

表1 4d检验法处理数据

原材料	变形模量(MPa)	压实度(%)	总数/舍弃数
砂石土	36.80	93.15	5/1
	53.48	94.98	5/1
	111.68	95.72	6/1
	178.44	96.69	13/4
	224.39	97.20	6/2
	348.37	98.00	4/1
水稳砂砾	185.92	92.65	3/1
	237.99	93.75	3/1
	256.06	95.13	4/0
	312.17	97.45	3/1

3.2 变形模量与压实度关系拟合

为了明确变形模量与压实度的具体关系,笔者对试验数据进行了拟合分析。根据瑞利波法、振动法、动态模量法,以及模量与弯沉关系等的分析思路和拟合模型,笔者选用线性拟合模型、对数拟合模型、指数拟合模型、乘幂拟合模型4种常见模型进行拟合分析,以选择更好的变形模量与压实度关系模型。具体拟合分析结果见表2。

由表2可见,无论是砂石土还是水稳砂砾,变形模量与压实度均具有较好的相关关系,且相关系数均达到90%以上。因此选用合适的拟合模型,可以较准确地反映变形模量与压实度的关系。根据大量的实践经验及试验总结,对数拟合模型可作为我们首选模型。即压实系数 K 可用下式表示:

表2 拟合分析结果

拟合模型	砂石土	水稳砂砾
线性模型	$y = 0.0137x + 93.7853$	$y = 0.0389x + 85.0911$
相关性	$R^2 = 0.8477$	$R^2 = 0.9597$
对数模型	$y = 1.9715\ln(x) + 86.5085$	$y = 9.2991\ln(x) + 43.6300$
相关性	$R^2 = 0.9594$	$R^2 = 0.9264$
指数模型	$y = 93.7945e^{0.0001x}$	$y = 85.5768e^{0.0004x}$
相关性	$R^2 = 0.8420$	$R^2 = 0.9613$
乘幂模型	$y = 86.9178x^{0.0206}$	$y = 55.2975x^{0.0979}$
相关性	$R^2 = 0.9574$	$R^2 = 0.9291$

注:表中R为相关系数。

$$K = a\ln(E) + b \quad (2)$$

其中, E 为落球测试技术测得的变形模量, a 、 b 可以根据不同材料类别通过标定得到。一般变形模量与压实度对数拟合模型相关系数达到95%以上。

4 实例验证

为了验证变形模量与压实度对数拟合模型的有效性和适用性,将落球测试技术($E \sim K$ 对数拟合模型应用技术)应用到208国道改建工程中,并与挖坑灌砂法做了对比。具体对比验证结果如图2所示。

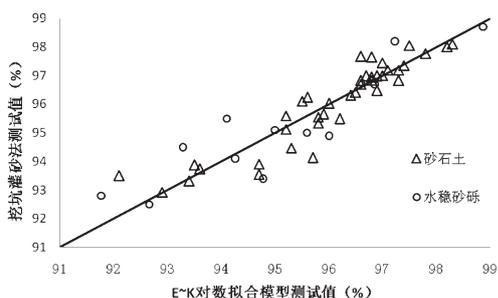


图2 实例验证结果

由图2可见,落球测试技术与挖坑灌砂法测试结果

较均匀地分布于等值轴线两侧,对砂石土、水稳砂砾两种方法测试结果的相关系数分别达到92.74%和92.91%,即两种方法测试结果相关性好,吻合度高。

实践应用表明,挖坑灌砂法测试一个点位需要耗时30分钟甚至更多,而落球测试技术测试一个点位只需要不到1分钟,即测试效率明显提高数十倍。另外,落球测试技术对测试对象完全是无损测试,可以做大规模测试,使对工程进行科学全面的监控成为可行。

5 结论

(1) 变形模量与压实度具有良好的相关关系,该相关性可应用于填方工程质量监控、检测,使现场及时监控,检测科学全面成为可行。

(2) 实践表明变形模量与压实度的关系可表示为对数拟合模型公式(2),其相关系数一般达到95%以上。但对于细粒土,超孔隙压力会对变形模量与干密度的相关关系产生不小影响,一般本技术不用于测试软弱粘土等材料。

(3) 应用实践表明,变形模量与压实度关系用于测试填方材料压实度快速可靠。

(4) 变形模量与压实度关系用于无损检测填方材料质量,省力省时,克服了传统测试代表样点少等缺陷。

致谢:感谢吴佳晔教授的技术指导,感谢山西省交通厅落球式填土材料力学特性测试技术研究项目(2011年科技项目)组相关兄弟单位的大力支持。

参 考 文 献:

- [1] 吴佳晔,杨露,胡庸.填土材料现场检测技术的现状和进展[J].四川理工学院学报:自然科学版,2009,22(6):1-4.
- [2] 范云.填土压实质量检测技术的发展与评析[J].岩土力学,2002,23(4):524-529.
- [3] 刘江波,韦世卓.瑞雷波法检测路堤压实度方法研究[J].科技信息,2011(20):690.
- [4] 堤知明,吴佳晔,江川颯一郎.表面波を用いたコンクリート強度の新しい測定技術[C].シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集,2003.
- [5] 郝孟辉,郝培文.土石混填路基动态回弹模量与压实度的关系[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(1):87-90.
- [6] 王振兴,韩亚强.基于迭代法的柔性路面模量动态反分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2009,26(2):19-21.
- [7] 杨成学,杨文礼,杨露.现场测试混凝土弹性模量的方法研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2010,23(5):504-507.
- [8] 田北平,吴佳晔,蒋世龙,等.基于落球检测技术原理的测试系统在填土路基碾压质量管理中的应用[J].公路交通科技:应用技术版,2009(12):70-72.

Relationship Between Deformation Modulus and Compaction Degree of Fill Materials

YUAN Ai-zhong¹, ZHANG Yuan-jun²

(1. Shanxi Jincheng Highway Planning Survey and Design Institute, Jincheng 048000, China;

2. Sichuan Central Inspection Technology Co., Ltd., Chengdu 610045, China)

Abstract: Engineering construction, supervision and management require a fast accurate way to detect or monitor the degree of compaction of filling. As a strength indicator, deformation modulus can reflect the characteristics of subgrade. By the falling-ball technology, the deformation modulus and degree of compaction are tested in the case of the similar material filled subgrade and analysed by function fitting. A relationship model of the deformation modulus and the degree of compaction is found out. Also the model is applied to detecting or monitoring the quality of filling engineering by the researchers. By comparing the results of this new model and the sand trenching and filling method, the feasibility of this relationship mode can be confirmed.

Key words: deformation modulus; compaction degree; trench excavation; FBT(falling ball technology)