

文章编号 :1000-2472(2008)02-0022-05

## 土石混填路基压实度检测新方法探讨<sup>\*</sup>

曹文贵<sup>†</sup>,胡天浩,罗 宏,赵明华

(湖南大学 岩土工程研究所,湖南 长沙 410082)

**摘 要:**土石混填路基变形模量和孔隙率随荷载增加而发生变化,土石颗粒受载前后体积不变,基于上述特点,建立了集中荷载作用下土石混填路基孔隙率和变形模量的变化模型,引进分级加载的思想和基于集中荷载作用于半无限空间的布辛奈斯克理论,建立了可考虑土石混填路基变形模量与孔隙率变化影响的路基表面竖向位移计算模型,利用土石混填路基表面静载试验曲线及曲线拟合方法确定了土石混填路基初始孔隙率,建立了土石混填路基压实度检测新方法.结合某工程实例进行测试结果对比分析,结果表明:新方法与传统方法测试结果吻合,能加快测试速度,降低对路基的破坏程度.

**关键词:**路基;土石混填;孔隙率;压实度;静载试验;变形模量

**中图分类号:**U213.1<sup>+</sup>57

**文献标识码:**A

## Discussion on a New Technique for Detecting Compactness of Soil-Rock Mixture roadbed

CAO Wen-gui<sup>†</sup>, HU Tian-hao, LUO Hong, ZHAO Ming-hua

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** The deformation modulus and the porosity ratio of soil-rock mixture roadbed change with the increase of load, and the total volume of the soil and the rock in soil-rock mixture roadbed before and after the action of concentrated load never changes under the action of load. In view of these characteristics, a model describing the porosity ratio and deformation modulus of soil-rock mixture roadbed was developed. An idea of step-by-step loading and the Boussinesq's theory about semi-infinite space under concentrated load were introduced, and then a calculating model of the vertical settlement was established, which could reflect the effect of the change of porosity ratio and deformation modulus. A method for determining the initial porosity ratio of soil-rock mixture roadbed was presented based on the static load test curves and their fitting method. Finally, a new technique detecting the compactness of soil-rock mixture roadbed was developed. Moreover, the measured results from an engineering case were used to make a comparative analysis, which showed that the results of the new method agreed with those of traditional methods. It could improve the testing speed and reduce the extent of the failure of the roadbed.

**Key words:** roadbeds; soil-rock mixture; porosity ratio; compactness; static load test; deformation modulus

随着公路建设向山区延伸,土石混填路基<sup>[1]</sup>已成为较普遍的公路路基型式之一,为了确保土石混填路基施工速度和填筑质量,必须严格控制其压实度,因此,必须开发适用于土石混填路基的压实度检测技术,这正是本文研究的出发点.

目前,公路路基压实度检测方法大体可分为灌水(砂)法、波法和静力贯入法三类.尽管这三类方法在一般路基压实度检测中得到了较广泛应用,但是,将它们应用于土石混填路基压实度检测会存在许多缺陷和不足.第一,应用灌水(砂)法<sup>[2]</sup>检测路基压

<sup>\*</sup> 收稿日期:2007-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578060);湖南省自然科学基金资助项目(03JJ Y5024)

作者简介:曹文贵(1963-),男,湖南南县人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup>通讯联系人, E-mail: cwglyp@public.cs.hn.cn

实度,由于必须开挖试坑,因而不但要破坏路基,而且,对于土石混填路基来说,开挖施工困难,大面积应用该方法检测土石混填路基压实度,其检测速度慢,无法满足土石混填路基建设的快速机械化施工要求;其次,波法主要包括瑞雷波法<sup>[3,4]</sup>,瞬态冲击波法<sup>[5]</sup>,核子密度仪法<sup>[6]</sup>等。由于人们对波在路基中传播规律与机理认识不足,因而,尽管这类方法检测效率高,但其检测精度较差,难以满足工程检测的精度要求;第三,由于静力贯入法<sup>[7]</sup>是基于静力触探原理检测路基压实度,即根据贯入深度与压实度的经验关系来间接确定路基压实度,而且,对于不同的土石混填路基,这种关系极其复杂,即使建立起这种关系也不具备普遍适应性,因而,利用该方法检测土石混填路基压实度的精度也难以满足工程要求。因此,有必要针对土石混填路基的工程特点,深入研究其压实度检测新方法,这正是本文研究的核心内容。

本文首先将根据土石混填路基的工程特点,基于土石混填路基表面因受荷载作用发生变形而导致路基孔隙率变化的特征,利用半无限空间受载的布辛奈斯克弹性理论解,建立荷载-变形与土石混填路基孔隙率的关系,其次,利用静载试验测得的土石混填路基表面荷载与位移的关系曲线,引进曲线拟合的方法确定土石混填路基孔隙率,进而确定其压实度,从而建立土石混填路基压实度检测的新方法,以期使土石混填路基压实度检测技术取得进步。

## 1 土石混填路基压实度检测新方法

土石混填路基表面受荷载作用会产生变形,此时,路基表面或体内孔隙率会不断发生变化,如果能建立起路基孔隙率与荷载或变形的关系,并且,利用静载试验测得路基表面位移曲线,则可确定路基初始孔隙率,于是,路基压实度即可测定。基于上述原理,测定路基压实度的关键之一就是测定土石混填路基表面荷载-位移曲线,其测定装置见图1。要利

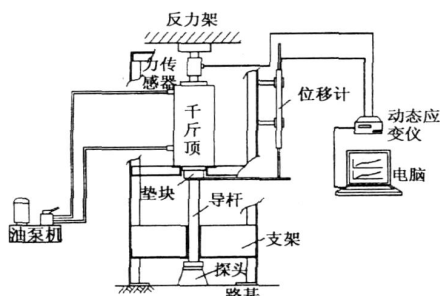


图1 静载实验装置

Fig. 1 Static load test device

用该曲线确定路基初始孔隙率,就必须建立起土石混填路基表面荷载或位移与初始孔隙率的关系模型,下面将介绍其确定方法。

## 2 土石混填路基压实度检测数学模型

### 2.1 土石混填体孔隙率变化模型

假定土石混填体为均质松散体,取一个半径为 $r$ ,高度为 $z$ 的柱状单元体,如图2所示,其初始孔隙率为 $n_0$ ,则此时土石颗粒的体积为:

$$V = r^2 z (1 - n_0). \quad (1)$$

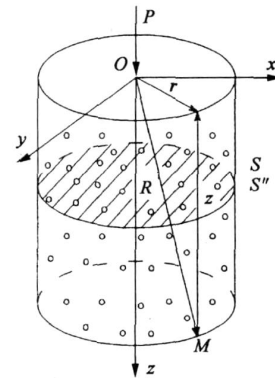


图2 单元体示意图

Fig. 2 Unit sketch

受荷载作用后单元体将产生变形,其孔隙率必定发生变化,设此时孔隙率为 $n$ ,径向应变为 $r$ ,竖向应变为 $z$ ,则单元体的半径变为 $r(1 + r)$ ,高度变为 $z(1 + z)$ ,变形后单元体中土石颗粒的体积为:

$$V = r^2 z (1 + r)^2 (1 + z) (1 - n). \quad (2)$$

由于土石颗粒体积不可压缩,即 $V = V$ ,因此

$$n = 1 - \frac{(1 - n_0)}{(1 + r)^2 (1 + z)}. \quad (3)$$

从式(3)可以看出,荷载作用下土石混填体的孔隙率是不断变化的,正因为如此,土石混填体在荷载作用下被不断压密,其变形模量也发生变化,因此有必要进一步探讨土石混填体变形模量的变化关系。

### 2.2 土石混填体变形模量的变化关系

设当孔隙率为 $n$ 时对应的土石混填体变形模量为 $E$ ,土石颗粒的变形模量(无孔隙)为 $E_0$ ,如图2所示,由于单元体内孔隙的存在,当单元体的截面积为 $S$ 时,有效承载截面面积为:

$$S = (1 - n) S_0. \quad (4)$$

如果设单元体在单轴荷载 $P$ 作用下产生的平均应

力为  $\sigma$ , 有效应力为  $\sigma'$ , 应变为  $\epsilon$ , 则有  $\sigma = E \epsilon$ , 而  $\sigma' = E' \epsilon$ . 由截面所受荷载大小相等可得:

$$\sigma = \sigma', \quad (5)$$

则可得  $E$  与  $E_0$  的关系为:

$$E = (1 - n) E_0. \quad (6)$$

将式(3)代入式(6)可得:

$$E = (1 - n_0) E_0 / [(1 + \nu)^2 (1 + \nu_z)]. \quad (7)$$

式(7)即为土石混填体变形模量的变化关系.

### 2.3 集中荷载作用下路基表面竖向位移计算模型

将土石混填路基视为半无限空间, 在荷载作用下路基发生变形的过程中, 由于路基孔隙率不断发生变化, 不能直接采用布辛奈斯克弹性理论解计算路基变形. 为此, 假设施于土石混填路基表面的荷载  $P$  按分级方式加载, 每级荷载大小为  $P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为加载级数), 令荷载加至  $P_i$  时对应的土石混填体变形模量为  $E(P_i)$ , 则在  $P_i$  作用下路基内一点  $M(r, z)$  的变形可分别由布辛奈斯克解<sup>[8]</sup>得到(在圆柱坐标下, 见图2):

$$u_{ri} = \frac{(1 + \mu)}{2} \frac{P_i}{E(P_i) R} \left[ \frac{rz}{R^2} - \frac{(1 - 2\mu)r}{R + z} \right], \quad (8)$$

$$w_i = \frac{(1 + \mu)}{2} \frac{P_i}{E(P_i) R} [2(1 - \mu) + z^2/R^2]. \quad (9)$$

式中:  $u_{ri}$  及  $w_i$  分别为在  $P_i$  作用下土石混填体沿  $r$  和  $z$  方向的位移;  $\mu$  为土石混填体的泊松比;  $R$  为点  $M(r, z)$  与路基荷载在路基表面作用点之间的距离,  $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ ;  $r$  为点  $M(r, z)$  在路基表面投影点与荷载  $P_i$  作用点之间的距离,  $r^2 = x^2 + y^2$ . 对式(8)及式(9)积分可得路基内点  $M(r, z)$  在荷载  $P$  作用下的总位移:

$$u_r = m \frac{(1 + \mu)}{2 R} \left[ \frac{rz}{R^2} - \frac{(1 - 2\mu)r}{R + z} \right], \quad (10)$$

$$w = m \frac{(1 + \mu)}{2 R} [2(1 - \mu) + \frac{z^2}{R^2}]. \quad (11)$$

其中

$$m = \int_0^P \frac{1}{E(t)} dt. \quad (12)$$

于是, 利用式(10)及式(11)分别对  $r$  和  $z$  求偏导, 并取  $z = 0$  可得土石混填路基表面径向和竖向应变为:

$$\epsilon_r = A m, \quad (13)$$

$$\epsilon_z = 0. \quad (14)$$

其中

$$A = (1 + \mu)(1 - 2\mu)/(2r^2). \quad (15)$$

从式(11)可以看出, 要确定荷载  $P$  作用下路基表面位移, 必须建立路基变形模量  $E(P)$  的关系式, 为此, 将式(13)及式(14)代入式(7)可得:

$$E(P) = E_0(1 - n_0)/(1 + A m)^2. \quad (16)$$

令  $B = E_0(1 - n_0)$ , 将式(12)代入式(16)可得:

$$A \int_0^P \frac{1}{E(t)} dt = [B/E(P)]^{1/2} - 1. \quad (17)$$

再对式(17)两边求微分可得:

$$[E(P)]^{-1/2} d[E(P)] = -\frac{2A}{B^{1/2}} dP. \quad (18)$$

于是, 可得:

$$E(P) = (B^{1/2} - \frac{AP}{B^{1/2}})^2. \quad (19)$$

至此, 即建立起土石混填路基变形模量计算式. 将式(19)代入式(12), 再将式(12)代入式(11), 并令  $z = 0$ , 即可得在荷载  $P$  作用下路基表面的竖向位移为:

$$w = \frac{P}{aP + b}. \quad (20)$$

其中

$$a = -\frac{1 - 2\mu}{2r(1 - \mu)}, \quad (21)$$

$$b = \frac{(1 - n_0) E_0 r}{1 - \mu^2}. \quad (22)$$

### 2.4 土石混填路基压实度确定方法

利用式(20), 并根据土石混填路基表面静载试验曲线进行曲线拟合可望确定参数  $a$  与  $b$ , 进而确定路基初始孔隙率, 从而可确定路基压实度. 为此, 将式(20)进行变换, 可得:

$$\frac{1}{w} = a + \frac{b}{P}. \quad (23)$$

将  $1/w$  视为纵坐标,  $1/P$  视为横坐标, 进行线性拟合, 可得参数  $a$  与  $b$ . 如果静载试验探头为平底圆形探头, 其半径为  $r_0$ , 则由式(21)及式(22)可得:

$$a = -\frac{1 - 2\mu}{2r_0(1 - \mu)}, \quad (24)$$

$$b = \frac{(1 - n_0) E_0 r_0}{1 - \mu^2}. \quad (25)$$

由式(24)可得土石混填体的泊松比  $\mu$ , 而由式(25)可确定参数  $E_0(1 - n_0)$ , 据此确定初始孔隙率  $n_0$  必须先确定土石(无孔隙)的平均变形模量, 它可通过选取土石混填路基代表试验点, 首先利用灌水法测定其压实度, 然后利用试验结果对土石平均变形模量进行标定, 进而得到土石平均变形模量  $E_0$ ,

具体方法如下。

利用土石混填路基压实度概念,结合土石颗粒(无孔隙)的密度,可得路基压实度为:

$$K = \frac{d}{d_{\max}} \times 100\% = \frac{m(1 - n_0)}{d_{\max}} \times 100\%, \quad (26)$$

$$m = \frac{r_s}{sG + r(1 - G)} \quad (27)$$

式中:  $m$  为土石颗粒的混合密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $r$  为岩石颗粒的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $s$  为土颗粒的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $G$  为土石混合料中岩石颗粒的含量;  $d_{\max}$  为代表性试验点土石混合料室内振动击实试验最大干密度<sup>[9]</sup>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),则由式(26)可得代表性测点初始孔隙率  $n_0$ ,再由式(25)可得:

$$E_0 = \frac{b(1 - \mu^2)}{r_0(1 - n_0)} \quad (28)$$

以式(28)确定的  $E_0$  与  $d_{\max}$  以及代表性试验点的室内密度试验参数  $m$  作为该测区标定试验参数,并结合静载试验曲线拟合参数,即可利用式(26)确定其他点的压实度。

### 3 实例与验证

为了验证本文方法的合理性和可行性,采用湖南常吉高速公路某合同段试验资料进行分析,共选用4个测点,分别进行静载试验(探头半径  $r_0 = 50$  mm)和灌水法试验,各测点的静载试验拟合曲线如图3所示。其中1#测点作为标定点,利用本文方法进行标定,可得土石混合料平均变形模量  $E_0 = 21.193$  MPa,含石量  $G = 65.8\%$ ,最大干密度  $d_{\max} = 2.325$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ,岩石颗粒密度  $r = 2.78$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ,土颗粒密度  $s = 2.26$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ,则由式(27)可得  $m = 2.578$   $\text{g}/\text{cm}^3$ 。利用其标定参数,结合其他测点(2#,3#与4#)静载试验曲线可确定其压实度,并与灌水法检测结果进行比较,见表1。由此可以看出,4个测点静载试验数据采用本文变形或沉降计算模型进行拟合,拟合效果良好,所得参数  $a$  与  $b$  稳定可靠,而且由此得到的各测点压实度分析结果与灌水法检测结果吻合良好,可以满足工程要求,说明本文方法具有可行性和合理性。

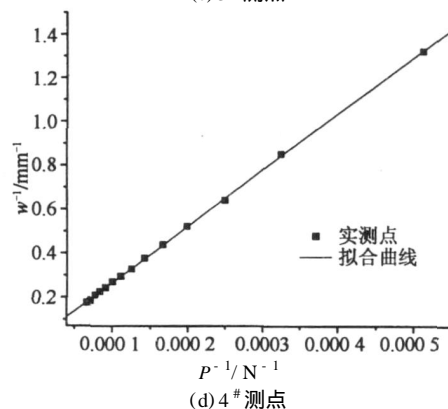
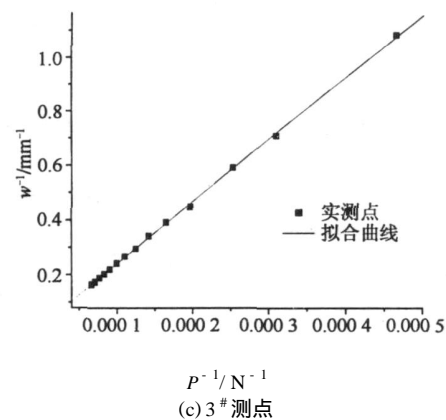
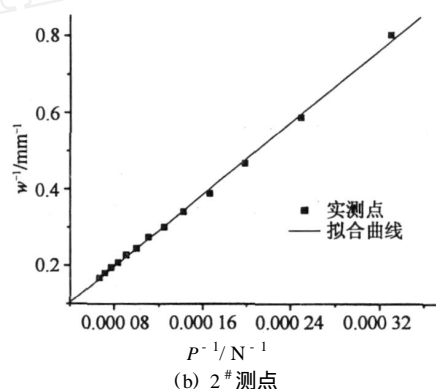
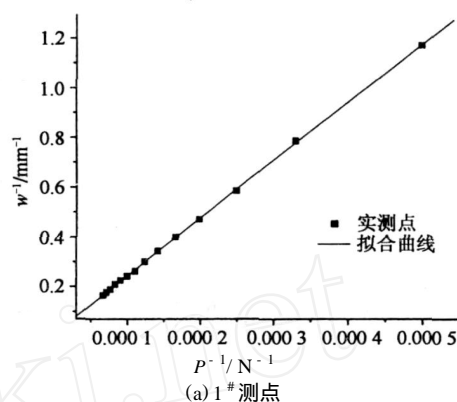


图3 实测与理论曲线的比较

Fig. 3 Comparison between practical and theoretical curves

表 1 分析结果比较  
Tab. 1 Comparison for consequences

测点	参数 $a/\text{mm}^{-1}$	参数 $b/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	泊松比 $\mu$	初始孔隙率 $n_0/\%$	现场干密度 $d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	压实度 $K/\%$	
						新方法	灌水法
1	0.010 91	2 323.643 33	0.607 15	11.860 5	2.272	97.73	97.73
2	0.009 39	2 352.460 21	0.595 06	12.826 5	2.247	96.66	96.93
3	0.011 01	2 435.243 28	0.607 92	11.920 4	2.271	97.66	96.30
4	0.009 07	2 376.480 11	0.592 42	11.508 9	2.281	98.12	97.71

4 结 论

本文根据土石混填路基的工程特点,深入探讨了利用静载试验测定土石混填路基压实度的新方法.由此可得如下结论:

- 1) 建立了土石混填路基在荷载作用下孔隙率和变形模量的变化模型,为利用静载试验确定路基压实度奠定了基础.
- 2) 提出了基于静载试验的土石混填路基压实度检测新方法,利用该方法检测路基压实度无需破坏路基,检测结果可满足工程要求.

参考文献

[1] 柴贺军,陈谦应,孔祥云.土石混填路基修筑技术研究综述[J]. 岩土力学,2004,25(6):1005-1010.  
CHAI H J, CHEN Q Y, KONG X Y. Overview of soil-stone high embankment construction study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 1005-1010. (In Chinese)

[2] 沙庆林.公路压实与压实标准[M].北京:人民交通出版社,1980.  
SHA Q L. Compaction and compaction standard of road[M]. Beijing: China Communications Press, 1980. (In Chinese)

[3] 柴华友,汪江波,周一勤,等.瑞雷波分析方法及其应用进展[J].岩石力学与工程学报,2002,21(1):119-125.  
CHAI H Y, WANG J B, ZHOU Y Q, et al. Progress of rayleigh wave analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 119-125. (In Chinese)

[4] 赵建三,李亭.瑞雷波法应用于高速公路路基工程质量无损检测试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2003,30(1):107-112.  
ZHAO J S, LI T. Application study of rayleigh wave to subgrade quality's inspection on freeway with no-damage [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(1): 107-112. (In Chinese)

[5] 张献民,王建华.公路工程瞬态激振无损检测技术[J].土木工程学报,2003,36(10):105-110.  
ZHANG X M, WANG J H. Nondestructive detection technique for transient vibration used to highway engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 105-110. (In Chinese)

[6] 王朝东,许锡昌,郭见扬.核子测试技术在岩土工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2001,21(2):1900-1902.  
WANG C D, XU X C, GUO J Y. Application of nuclear measuring technique in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 21(2): 1900-1902. (In Chinese)

[7] 刘丽萍,折学森.山区土石料压实标准及其应用[J].土木工程学报,2006,39(2):122-125.  
LIU L P, ZHE X S. Compaction standard and application of earth-rock mixtures in mountain area [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 122-125. (In Chinese)

[8] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,2003.  
XU Z L. Elastic mechanics[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2003. (In Chinese)

[9] 马松林,王龙,王哲人.土石混合料室内振动压实研究[J].中国公路学报,2001,14(1):5-8.  
MA S L, WANG L, WANG Z R. Study of compacting properties of soil-aggregate mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 5-8. (In Chinese)