

基于静载试验的土石混填路基压实度 检测新方法

罗 宏, 赵明华, 曹文贵, 胡天浩

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对现有路基压实度检测方法的局限性与不足, 首先, 利用土石混填路基在受载前后岩土颗粒体积不变的特性, 建立出土石混填路基孔隙率的变化模型, 导出土石混填路基变形模量的变化关系; 其次, 将土石混填路基视为半无限弹性空间, 并考虑路基在荷载作用下变形模量发生变化的特征, 引进分级加载的思想, 导出基于布辛奈斯克解的土石混填路基在竖向荷载作用下的变形或沉降计算方法; 然后, 将土石混填路基初始孔隙率与荷载-位移曲线建立关系, 从而提出基于静载试验的土石混填路基压实度检测新方法; 最后, 将现场试验数据与基于理论公式进行拟合分析, 其结果与传统方法较为接近, 新方法具有可行性与合理性。

关键词: 岩土力学; 土石混填路基; 孔隙率; 压实度; 静载试验; 变形模量

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4496 - 07

NEW METHOD FOR CHECKING COMPACTNESS OF SOIL-ROCK MIXTURE SUBGRADE BASED ON STATIC LOAD TEST

LUO Hong, ZHAO Minghua, CAO Wengui, HU Tianhao

(*Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China*)

Abstract: Some limitations and insufficiencies still could be found in the detection methods used to check compactness of filled subgrade, so a new method is put forward. Firstly, in view of the characteristic that the solid(soil and rock) volume will not change in the soil-rock mixture subgrade when it is loaded, a model which describes the change of porosity in the soil-rock mixture subgrade is established, moreover, the changing regularity of the deformation modulus of soil-rock mixture subgrade is also deduced. Then, the soil-rock mixture subgrade is regarded as a semi-infinite elastic space, and the changing regularity of its deformation modulus under the action of load is taken into account. A method for calculating the deformation or settlement of soil-rock mixture subgrade under the vertical surface load is brought forward based on Boussinesq's solution by adopting the idea of step loadings. Afterwards, the relationship between the initial porosity ratio of soil-rock mixture subgrade and load-displacement curves is established, and the new method for detecting the compactness of soil-rock mixture subgrade is set up based on static load test curves. Finally, the site test data are fitted based on the theory. The analysis shows that the results of the new method are close to those of the conventional indicating the feasibility and rationality of the new method.

Key words: rock and soil mechanics; soil-rock mixture subgrade; porosity ratio; compactness; static load test; deformation modulus

收稿日期: 2007 - 09 - 12; **修回日期:** 2007 - 11 - 17

作者简介: 罗 宏(1978 -), 男, 2002年毕业于湖南大学土木工程学院建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程试验方面的研究工作。
E-mail: chrisluohong@163.com

1 引 言

随着公路建设向山区延伸, 土石混填路基因具有能就地取材、工后沉降小、经济性好等优点已成为较普遍的公路路基型式^[1, 2]。为了确保土石混填路基填筑质量, 压实度的控制是关键之一^[3]。

目前, 公路路基压实度常用检测方法大体可分为灌水(砂)法、波法和静力贯入法 3 类, 尽管这些方法在一般路基压实度检测中得到了较广泛应用, 但将它们应用于土石混填路基会存在许多局限性和不足^[4]。首先, 用灌水(砂)法检测路基压实度, 必须开挖试坑, 路基有一定程度的破坏^[5, 6], 而对于土石混填路基而言, 开挖困难, 大面积应用该方法检测路基压实度, 效率较低, 无法满足工程机械化快速施工的要求^[3, 7]; 其次, 波法包括瑞雷波法^[8, 9]、瞬态冲击波法^[10, 11]、核子密度仪法^[12, 13]等, 由于人们对波在路基中传播规律与机制认识不足, 因而, 尽管这类方法检测效率高, 但其精度不够, 难以满足工程要求; 第三, 由于静力贯入法^[14]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, 但对于不同的土石混填路基, 这种关系极其复杂, 即便建立起这种关系往往也不具备普遍适应性, 因此, 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, 这是土石混填路基工程的迫切需求, 也是本文研究的核心内容。

本文结合常吉高速公路土石混填路基, 对压实度检测新方法进行探讨。首先, 根据土石混填路基的工程特点, 基于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, 利用布辛奈斯克半无限空间受载的弹性理论解, 建立荷载、变形与土石混填路基孔隙率的关系; 然后, 利用静载试验测得的土石混填路基表面荷载与沉降的关系曲线; 最后, 利用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。通过以上方法, 期望通过理论与试验结合, 建立土石混填路基压实度快速检测新方法, 以指导土石混填路基现场施工质量。

2 土石混填体压实数学模型

2.1 土石混填体孔隙率及变形模量变化模型

假定土石混填体为均质松散体, 受到荷载后,

土石颗粒体积不变, 仍为均质松散体, 只是孔隙率均匀减小。如图 1 所示, 取土石混填某一单元体, 该单元体的初始孔隙率为 n_0 , 半径为 r , 高度为 z 。则此时土石颗粒的体积为

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

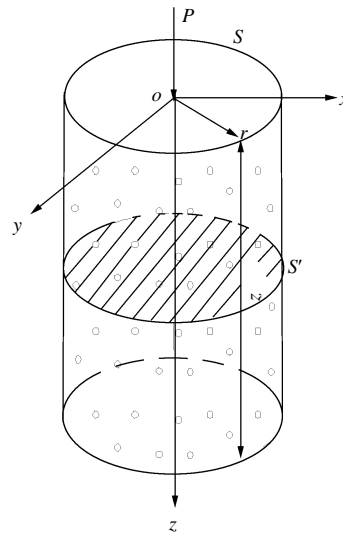


图 1 单元体示意图

Fig.1 Sketch of unit element

受荷载作用后单元体产生变形, 设此时孔隙率为 n , 径向应变为 ε_r , 竖向应变为 ε_z , 则其半径变为 $r(1 + \varepsilon_r)$, 高度变化为 $z(1 + \varepsilon_z)$, 那么变形后单元体中土石颗粒的体积为

$$V' = \pi r^2 z (1 + \varepsilon_r)^2 (1 + \varepsilon_z) (1 - n) \quad (2)$$

由土石颗粒体积不可压缩性, 单元体在受荷载作用前后土石颗粒的体积不变即 $V = V'$, 可得

$$n = 1 - \frac{(1 - n_0)}{(1 + \varepsilon_r)^2 (1 + \varepsilon_z)} \quad (3)$$

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 1 所示, 由于孔隙的存在, 当单元体的截面面积为 S , 则有效承载截面面积为

$$S' = (1 - n)S \quad (4)$$

单元体在单轴荷载 P 作用下产生的平均应力为 σ , 有效应力为 σ' , 应变为 ε , 则

$$P = \sigma S = \sigma' S' \quad (5)$$

$$\sigma = E \varepsilon \quad (6)$$

$$\sigma' = E_0 \varepsilon \quad (7)$$

由式(3)~(7)可得

$$E = \frac{(1 - n_0) E_0}{(1 + \varepsilon_r)^2 (1 + \varepsilon_z)} \quad (8)$$

式(8)即为土石混填体变形模量的变化关系。

2.2 集中荷载作用下路基表面竖向位移计算

将土石混填路基视为弹性半无限空间, 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, 假设土石混填路基荷载 P 按分级方式加载, 分级荷载为 $\Delta P_i (i=1, 2, \dots, n; n$ 为加载级数), 加载到荷载 P_i 时土石混填路基变形模量为 $E(P_i)$, 则在 ΔP_i 作用下路基内一点 $M(x, y, z)$ 的变形可分别由布辛奈斯克解^[15]得到(在圆柱坐标下):

$$\Delta u_{ri} = \frac{(1+\mu)\Delta P_i}{2\pi E(P_i)R} \left[\frac{rz}{R^2} - \frac{(1-2\mu)r}{R+z} \right] \quad (9)$$

$$\Delta w_i = \frac{(1+\mu)\Delta P_i}{2\pi E(P_i)R} \left[2(1-\mu) - \frac{z^2}{R^2} \right] \quad (10)$$

式中: Δu_{ri} , Δw_i 分别为在 ΔP_i 作用下沿 r 及 z 方向的位移; μ 为土石混填体的泊松比; R 为点 $M(x, y, z)$ 与路基荷载在路基表面作用点之间的距离; r 为点 $M(x, y, z)$ 在路基表面投影点与荷载 P_i 作用点之间的距离, 分别表示为

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (11)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (12)$$

令

$$m = \int_0^P \frac{1}{E(t)} dt \quad (13)$$

对式(9)及(10)积分, 可得路基内点 $M(x, y, z)$ 在荷载 P 作用下的总位移:

$$u_r = m \frac{(1+\mu)}{2\pi R} \left[\frac{rz}{R^2} - \frac{(1-2\mu)r}{R+z} \right] \quad (14)$$

$$w = m \frac{(1+\mu)}{2\pi R} \left[2(1-\mu) - \frac{z^2}{R^2} \right] \quad (15)$$

于是, 可得土石混填体应变为

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{m(1+\mu)}{2\pi} \left\{ z \frac{R^2 - 3r^2}{R^5} - (1-2\mu) \left[\frac{R^2(R+z) - r^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\} \quad (16)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{m(1+\mu)z}{\pi} \left(\frac{2R^2 - 3z^2}{2R^5} - \frac{1-\mu}{R^3} \right) \quad (17)$$

在路基表面 ($z=0$) 的应变可表示为

$$\varepsilon_r = -Am = -A \int_0^P \frac{1}{E(t)} dt \quad (18)$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (19)$$

其中,

$$A = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi r^2} \quad (20)$$

由式(8), (18)代入式(19)可得

$$E(P) = \frac{(1-n_0)E_0}{(1-Am)^2} \quad (21)$$

令 $B = E(1-n_0)$, 由式(13), (21)可得

$$A \int_0^P \frac{1}{E(t)} dt = 1 - \left[\frac{B}{E(P)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

对式(22)两边求微分:

$$[E(P)]^{\frac{1}{2}} d[E(P)] = \frac{2A}{B^{\frac{1}{2}}} dP \quad (23)$$

$$E(P) = \left(\frac{A}{B^{1/2}} P + B^{1/2} \right)^2 \quad (24)$$

由式(13), (15), (24)变换, 令 $z=0$, 可得

$$w = \frac{P}{aP+b} \quad (25)$$

$$a = \frac{1-2\mu}{2r(1-\mu)} \quad (26)$$

$$b = \frac{(1-n_0)E_0\pi r}{1-\mu^2} \quad (27)$$

2.3 土石混填路基压实度确定方法

利用式(25)结合土石混填路基表面静载试验曲线进行拟合可望确定参数 a 与 b , 并确定路基初始孔隙率。将式(25)进行变换, 可得

$$\frac{1}{w} = a + \frac{b}{P} \quad (28)$$

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, 半径为 r_0 , 由式(26)可得土石混填体的泊松比 μ , 由式(27)可确定参数 $(1-n_0)E_0$ 。因此, 要确定孔隙率 n_0 必须先确定土石(无孔隙)的平均变形模量 E_0 。 E_0 通过试验难以确定, 可通过选取土石混填路基具有代表性的试验点, 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, 反演得到土石平均变形模量 E_0 。

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

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100\% = \frac{\rho_m(1-n_0)}{\rho_{dmax}} \times 100\% = \frac{\rho_m b(3-4ar)}{4\rho_{dmax} E_0 \pi r(ar-1)^2} \times 100\% \quad (29)$$

$$\rho_m = \frac{\rho_r \rho_s}{\rho_s \eta + \rho_r (1 - \eta)} \quad (30)$$

式中: ρ_m 为土石颗粒的平均密度(g/cm^3), ρ_r 为岩石颗粒的密度(g/cm^3), ρ_s 为土颗粒的密度(g/cm^3), η 为土石混合物中岩石颗粒的含量; ρ_{dmax} 为代表性试验点土石混合物室内振动击实试验最大干密度^[16] (g/cm^3)。则由式(29)可得代表性测点初始孔隙率 n_0 , 由式(27)可得 E_0 为

$$E_0 = \frac{b(1 - \mu^2)}{\pi r_0 (1 - n_0)} \quad (31)$$

以式(31)确定的 E_0 与 ρ_{dmax} 以及代表性试验点的室内密度试验参数 ρ_m 作为该测区标定试验参数, 并结合试验曲线拟合得到参数, 即可利用式(29)确定其他点的压实度, 至此, 即建立了基于快速静载试验的土石混填路基压实度确定方法。

3 土石混填路基室内外试验

以上通过理论建模, 建立了土石混填路基荷载和竖向位移的关系, 可间接得到压实度。为了验证该方法的可行性, 进行了大量室内外试验。

室内模型试验的意义在于通过对现场路基的初步模拟, 利用快速静载试验来探讨不同含石量、不同压实度下, 探头形状、大小、加载速度等因素中的敏感者, 以确定合适的探头形状、尺寸及加载方式, 揭示快速静载试验中 w - P 曲线形式与压实度之间的关系, 为现场实验做准备, 为理论研究提供依据。基于该目的, 首先在室内利用 3 种含石量分别填筑了 3 种不同压实度的模型路堤, 在这 9 种不同组合下利用不同大小及形状的探头分别进行了快速静载试验, 如图 2, 3 所示。理论推导中的无限分级加载概念可理解为缓慢的连续加载。试验采用可控制速度的电动油泵加载, 利用动态应变仪实时记录压力传感器和位移传感器的数值, 直到路堤试验点破坏为止, 整个过程持续 3~5 min。相同条件下重复多次试验得到了大量数据。

通过室内试验数据分析得到如下规律:

(1) 锥形探头试验曲线多呈直线形, 缺乏变化, 且离散性较大, 表现内在规律的能力较差, 不适合作为现场试验用的探头。

(2) 半圆形探头试验曲线形式略好, 但离散性也较大, 随着含石量的增加, 其表现内在规律的能



图 2 室内模型试验
Fig.2 Laboratory model test



图 3 各种探头
Fig.3 Various detectors

力也逐渐下降, 也不适合作为现场试验用的探头。

(3) 平探头的试验曲线形式较好, 离散性不大, 曲线形式基本一致, 且光滑, 故平探头比较适合作为现场试验用。

(4) 由于尺寸效应及土石混填料的不均匀性, 尺寸过小的探头相对来说表现内在规律的能力差一些, 尺寸越大的探头表现内在规律越明显, 但尺寸越大, 所需要的反力也越大, 在现场试验时不适用。

据上述规律, 建议现场试验时采用 50~100 mm 直径的圆形平底探头。现场试验地点选择在常吉高速公路项目第 4 合同段白石桥—常德方向, 起止桩号为 K52+600~K52+700, 进行现场试验的目的主要有:

(1) 使用室内模型的试验装置进行现场试验, 对试验装置在试验过程出现的问题进行论证和反馈, 为下一步完善测试技术与设备提供参考;

(2) 验证室内模型试验确定的探头形状的适用性, 以确定探头的最终形式及尺寸大小;

(3) 利用现场试验所得到的数据, 检验本文节 2 压实度理论计算模型在实际情况下的正确性和合理性。

现场试验对研究开发适用于土石混填路基的快

速、简便、可操作性强且准确的压实度检测新方法及其相应的检测设备,对检验理论研究成果具有重要意义。

现场测定装置连接方式及现场试验如图 4 所示,数据采集方式与室内试验相同。现场试验曲线如图 5 所示。

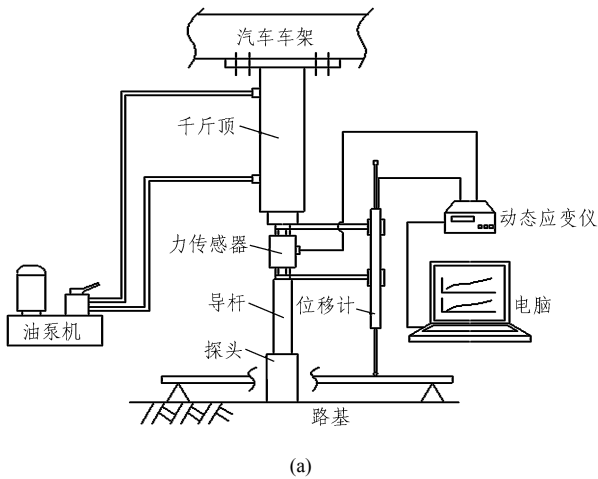


图 4 路基表面静载试验

Fig.4 Surface static load test of subgrade

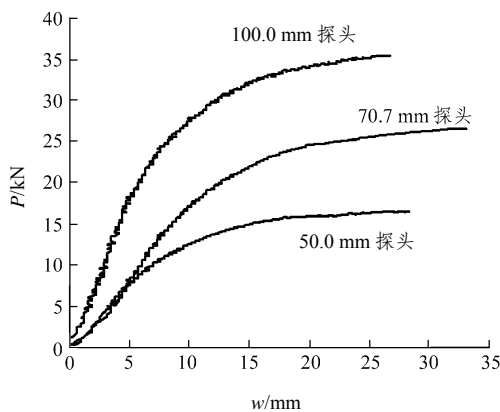


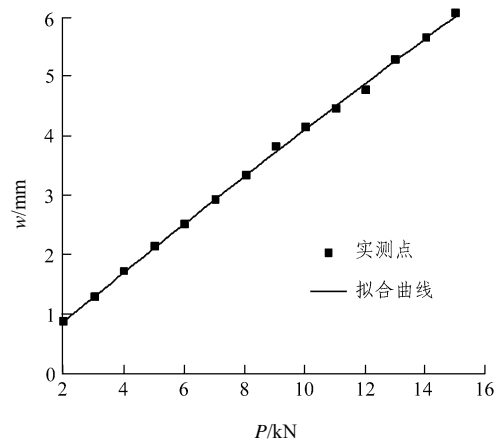
图 5 现场试验曲线

Fig.5 Curves of field test

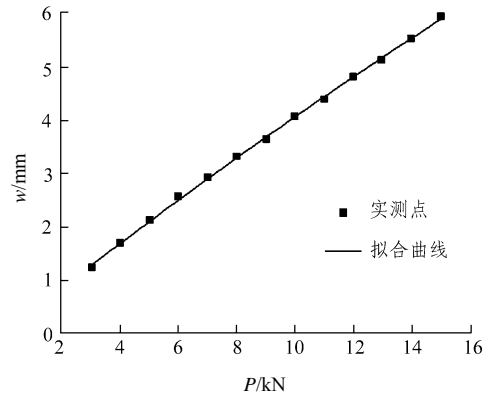
4 数据拟合及分析

选用现场试验 4 个测点,分别进行了灌水法试验和静载试验得到 $w-P$ 曲线,因曲线的后半段路基已经变形太大,与假定不符,故只取前半段进行拟合,该阶段土石颗粒处于弹性状态,只是孔隙被压密。各测点的静载试验拟合曲线如图 6 所示。

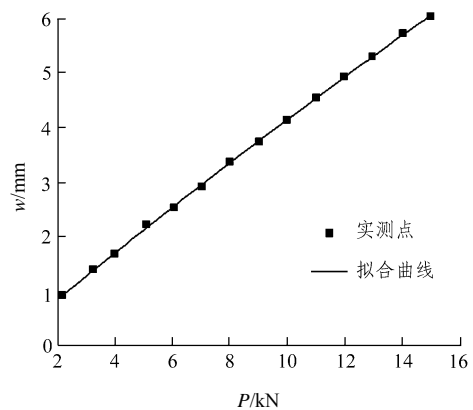
以 1# 测点作为标定点,可反演得土石混合料平



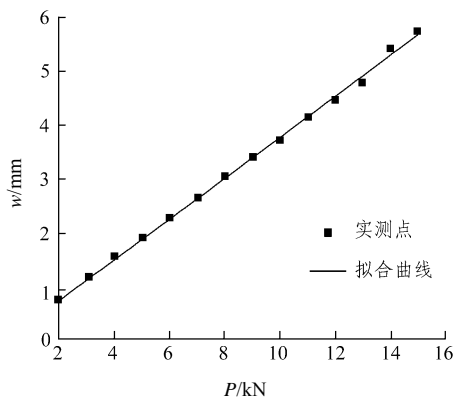
(a) 1# 测点



(b) 2# 测点



(c) 3# 测点



(d) 4# 测点

图 6 实测与拟合曲线的比较

Fig.6 Comparison between practical and theoretical curves

均变形模量 $E_0 = 30.2153 \text{ MPa}$, 含石量 $\eta = 65.8\%$, 最大干密度 $\rho_{dmax} = 2.235 \text{ g/cm}^3$, 岩石颗粒密度 $\rho_r = 2.78 \text{ g/cm}^3$, 土颗粒密度 $\rho_s = 2.26 \text{ g/cm}^3$, 则由式(30)可得 $\rho_m = 2.275 \text{ g/cm}^3$ 。利用这些参数, 可确定 2#, 3#, 4# 测点的压实度, 与灌水法检测结果进行比较分析, 结果见表 1。

表 1 分析结果比较

Table 1 Comparison of analysis results

测点	参数 a /mm ⁻¹	参数 b /(N·mm ⁻¹)	R	泊松比 μ	初始 孔隙率 /%	压实度/%	
						新方法	灌水法
1#	0.010 91	2 323.64	0.999 91	0.312	11.645	97.97	97.97
2#	0.009 39	2 352.46	0.999 18	0.347	12.779	96.71	96.30
3#	0.011 98	2 285.24	0.999 76	0.286	11.592	98.03	96.93
4#	0.008 07	2 576.48	0.999 88	0.374	11.874	97.72	97.71

因 1#测点是用已知的压实度来反演参数 E_0 的, 故压实度结果完全相同的。除 3#测点偏差稍大, 2#, 4#测点得到的压实度结果与灌水法结果吻合良好, 曲线拟合效果良好, 所得参数 a, b 稳定可靠。

基于本文提出的理论和现场静载试验, 结合室内击实试验, 可以对现场土石混填路基压实度进行检测。该方法的优势在于快速便捷, 对路基破坏极小, 且结果稳定可靠。

5 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, 基于变化的变形模量利用布辛奈斯克解得到土石混填路基在集中力作用下竖向位移计算公式。

(2) 利用室内模型试验及常吉高速公路现场试验, 得到了检测用探头的合理形状、尺寸以及现场试验方法及注意事项。

(3) 基于本文理论和室内外现场试验, 结合数据拟合手段, 提出了基于快速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对路基破坏极微, 检测结果满足工程要求。

参考文献(References):

- [1] 柴贺军, 陈谦应, 孔祥臣, 等. 土石混填路基修筑技术研究综述[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 1 005 - 1 010.(CHAI Hejun, CHEN Qianying, KONG Xiangchen, et al. Overview of soil-stone high embankment construction study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 1 005 - 1 010.(in Chinese))
- [2] 闫秀萍. 关于土石混填料填筑路基压实检测方法的探讨[J]. 公路交通科技, 2001, 18(4): 40 - 42.(YAN Xiuping. Study on earth stone mixture filled subgrade compactness test method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(4): 40 - 42.(in Chinese))
- [3] 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.(FAN Yun. Advance and evaluation of checking technique on the quality of filled soil evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 524 - 529.(in Chinese))
- [4] 黄卫东, 赵明阶, 韦 刚. 高速公路土石混填路基压实质量控制与评价[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(4): 49 - 54.(HUANG Weidong, ZHAO Mingjie, WEI Gang. Control and evaluating of the compact quality of soil-stone embankment in highway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(4): 49 - 54.(in Chinese))
- [5] 沙庆林. 公路压实与压实标准[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.(SHA Qinglin. Road compaction and compaction standard[M]. Beijing: China Communications Press, 1980.(in Chinese))
- [6] 何兆益, 吴国雄, 朱洪洲. 山区高填方土石混填路堤压实质量控制研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 28 - 31.(HE Zhaoyi, WU Gouxiong, ZHU Hongzhou. Study on compaction effect control of high embankment in mountain area highway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(3): 28 - 31.(in Chinese))
- [7] 陈进杰, 王祥琴, 张晓东, 等. 路基压实质量快速监测仪器研制[J]. 岩土力学, 2003, 24(增): 340 - 344.(CHEN Jinjie, WANG Xiangqin, ZHANG Xiaodong, et al. Study on the rapid inspection instruction for

- subgrade of compaction quality[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.): 340 - 344.(in Chinese)
- [8] 柴华友, 汪江波, 周一勤, 等. 瑞雷波分析方法及应用进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 119 - 125.(CHAI Huayou, WANG Jiangbo, ZHOU Yiqin, 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))
- [9] 李青山, 张献民, 李红英. 路基压实度的瞬态瑞雷波检测法[J]. 河北工业大学学报, 2003, 32(5): 27 - 30.(LI Qingshan, ZHANG Xianmin, LI Hongying. The method of transient Rayleigh wave applied in roadbed compaction degree test[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(5): 27 - 30.(in Chinese))
- [10] 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 Xianmin, WANG Jianhua. Nondestructive detection technique for transient vibration used to highway engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 105 - 110.(in Chinese))
- [11] 盛安连, 顾炳其. 路基压实度快速测定瞬态冲击法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(1): 67 - 71.(SHENG Anlian, GU Bingqi. Instantaneous impulsion method for rapid measurement of subgrade compactness[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(1): 67 - 71.(in Chinese))
- [12] 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, 20(增 1): 1 900 - 1 902.(WANG Chaodong, XU Xichang, GU Jianyang. Application of nuclear measuring technique in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 1 900 - 1 902.(in Chinese))
- [13] 王北水. MC - 3 型核子仪在公路检测中的若干影响因素及对应措施[J]. 中南公路工程, 2002, 27(2): 90 - 92.(WANG Beishui. Influencing factors and countermeasures of MC - 3 nuclear detector in road detection[J]. Central South Highway Engineering, 2002, 27(2): 90 - 92.(in Chinese))
- [14] 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 Liping, SHE Xuesen. Compaction standard and application of earth-rock mixtures in mountain area[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 122 - 125.(in Chinese))
- [15] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1990.(XU Zhilun. Elastic mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1990.(in Chinese))
- [16] 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 Songlin, WANG Long, WANG Zheren. Study on compacting properties of soil-aggregate mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 5 - 8.(in Chinese))