

基于 PFWD 碎石土路基压实快速检测与均匀性评价方法

王 龙¹, 解晓光¹, 姜立东²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨;

2. 黑龙江省前嫩公路工程建设指挥部, 161400 黑龙江 嫩江)

摘 要: 为了研究碎石土路基压实的快速、无损检测及压实均匀性的评价方法, 提高碎石土路基的压实质量, 采用水准测量和 PFWD 对碎石土路基的沉降差和变形模量进行了定点采集, 建立了碎石土路基沉降差与变形模量 E_{vd} 的关系, 提出不同沉降差要求下的 E_{vd} 压实检测标准; 通过对典型路段压实跟踪检测, 对其压实质量进行了评价; 通过对碎石土路基变形模量的高密度检测, 建立了路基顶面的变形模量的三维模型, 定义了路基压实均匀的指标, 并对其压实的均匀性和压实的薄弱区域进行了评价. 研究结果表明, 根据沉降差与 E_{vd} 的关系, 采用 PFWD 无损检测可以快速、有效地评价碎石土路基的压实状态, 定义的均匀度指标可以用于评价路基压实的均匀性, 通过对薄弱区域的补充压实, 可以提高碎石土路基压实的均匀性.

关键词: 道路工程; 碎石土路基; 压实质量; PFWD; 无损检测; 评价方法; 均匀度

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0066-06

Compaction quality fast detection and compaction uniformity evaluation of gravel soils subgrade based on PFWD

WANG Long¹, XIE Xiaoguang¹, JIANG Lidong²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. Heilongjiang Qian-Nen Highway Project Construction Directorate, 161400 Nenjiang, Heilongjiang, China)

Abstract: To research a fast and nondestructive testing method of compaction quality of gravel soil subgrade, to evaluate the uniformity of compaction and to improve the gravel soils roadbed compacted quality, differential settlement and deformation modulus were measured by adopting level measurement and PFWD on designated points of gravel soils roadbed. The relationship of differential settlement between deformation modulus E_{vd} is established. The compaction test standards of E_{vd} base on different request of differential settlement are put forward. The compaction quality was evaluated by compaction tracking detection, the roadbed top 3D model of deformation modulus was established by the high density detection of gravel soil subgrade deformation modulus and the roadbed compaction uniform index defined. The compaction uniformity and the weak area of compaction were evaluated. The results of the study show that, according to the relationship between the differential settlement and E_{vd} , the PFWD nondestructive testing can quickly and effectively evaluate gravel soil subgrade compaction condition, the homogeneous degree index can be used to evaluate the roadbed compaction evenness, the gravel soil subgrade compaction uniformity can be improved by adding compaction to the weak area.

Key words: highway engineering; gravel soil subgrade; compaction quality; PFWD; nondestructive testing; evaluation method; evenness

收稿日期: 2012-07-06.

基金项目: 黑龙江省交通厅重点科技项目(2011-42).

作者简介: 王 龙(1968—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 王 龙, hitlongwang@sina.com.

碎石土材料具有良好的路用性能, 被广泛应用于山区路基的填筑, 但由于碎石土土石比例和粒径具有很大的变异性, 因此, 施工质量的控制一

直是道路工程界的难题^[1];根据相关的技术规范^[2],碎石土路基的施工质量控制分为3个阶段:第1阶段为表象法,当碎石土路基碾压完毕后,采用锹、镐进行挖掘试验,根据挖掘的难易程度评价碎石土路基的压实质量;第2阶段为定量实验法,采用压实后碎石土路基的固体体积率来评价压实质量,要求压实后碎石土路基固体体积率不小于83%;第3阶段则采用表象法和定量法结合的方式进行,在公路路基设计规范^[3]中,对石方和土石混合料路基的压实方法进行了具体的规定,同时建议采用沉降差指标,检测压实质量.以上的相关规定多为土石路基压实的过程控制,属定性评价,主观性大,虽然在规定吨位压路机碾压下的沉降差属定量指标,规范中也给出了土石路基沉降差的检测方法,但并没有给出沉降差的具体要求,只是规定用试验路段确定的沉降差指标检测压实质量,沉降差的检测采用水准仪法,每40 m检测1个断面,每个断面检测5~9点,实测沉降差不大于试验路确定的沉降差. PFWD法压实质量检测已应用于高铁道床的压实质量检测^[4-6],若能采用变形模量来评价公路碎石土路基的压实,不仅能评价指标从表象化向定量化过渡,还能利用PFWD高密度的检测数据,来评价碎石土路基压实的均匀性^[7]. 本文采用PFWD (Portable fallingweight deflectometer)检测碎石土路基的 E_{vd} 值,建立压实度与 E_{vd} (Dynamic modulus of deformation)值的关系,并提出满足压实要求的 E_{vd} 值标准,定义路基压实均匀性评价指标,并提出检测方法,实现碎石土路基压实的快速检测的压实均匀性评价.

1 研究方法

修建碎石土路基试验路,定点采集碾压不同遍数路基沉降差和与其对应的PFWD变形模量,建立两者的关系,根据实体工程沉降差的要求,提出满足压实要求的 E_{vd} 值^[8];并对碾压完毕的路基进行密集的数据采集,对其压实质量和压实的均匀性进行评价.

1.1 PFWD工作原理

PFWD的工作原理为模拟汽车高速运行时对路基顶面产生的冲击效应,进行动力加载,试验时,落锤从设定的高度自由下落到有阻尼荷载板上,而产生符合测试条件的冲击荷载 σ ,通过传感器实测土体的沉陷值 S ,按下式计算土体动态变形模量为

$$E_{vd} = 1.5r\sigma/S. \quad (1)$$

式中: E_{vd} 为动态变形模量,MPa,计算至0.1 MPa; r 为荷载板半径,mm; σ 为荷载板下的动应力,MPa; S 为荷载板的沉陷值,mm.

1.2 沉降差与 E_{vd} 关系的建立方法

修建100 m碎石土路基试验路,每20 m选1个截面,每个截面3个点,用石灰进行标记并编号;碾压前后分别检测各点的高程和 E_{vd} 值,计算出每次压实的沉降差,通过回归的方法建立 E_{vd} 与沉降差的关系^[9];高程的测量采用四等水准进行,测点的布置如图1所示.

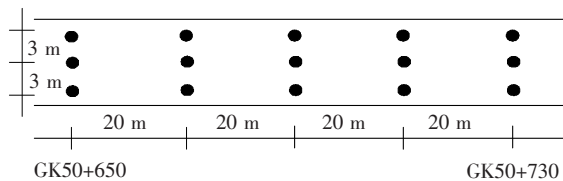


图1 碎石土路基变形模量标定路段点位布置方案

1.3 均匀性检测与评价

路基压实均匀性的评价需要密集采样,为此,选取100 m的实际施工路段,每20 m选取1个断面,每段断面布设5个测点,分别为左路肩、左行车道、路中线、右行车道、右路肩,共25个测点,测点示意图如图2所示.

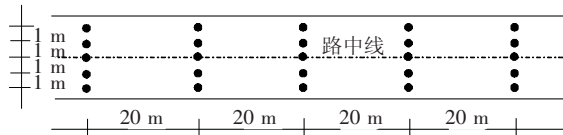


图2 路基压实均匀性检测测点布置示意图

路基设计规范中没有给出路基压实均匀性的要求和评价指标,文献[10]给出采用比对试验的评价方法,但只局限与横向或纵向的带状评价,路基压实的不均匀属于面状分布,因此,本文采用Matlab建立路基三维变形模量分布图,计算压实合格区域的投影面积,以其面积占压实路段面积的百分率来评价压实均匀性优劣,将其定义为均匀度 t ,则

$$t = \frac{S_h}{S_q} \times 100\%. \quad (2)$$

式中: t 为均匀度, S_h 为合格区域面积, S_q 为全部区域面积.

2 沉降差与 E_{vd} 关系的建立与压实标准的提出

对碎石土而言,压实度没有实际意义,实际施工中,常使用沉降值来控制施工过程.通过建立沉降值与 E_{vd} 之间的关系,然后根据施工中对沉

降差的要求,提出满足碎石土路基压实要求的 E_{vd} 标准值.

2.1 E_{vd} 与沉降差关系的建立

试验路位于龙嫩公路 A11 标段,桩号 GK50 + 620—GK50 + 720 的碎石土中碎石质量在 60% ~ 80% 之间,最大粒径约为 10 cm. 施工碾压采用 22 t 的振动压路机,碾压方法采用“三振一静”方法. 数据采集的过程如下:每遍压实后,先对每个测点进行水准测量,以确定每一点的沉降差;然后用 PFWD 测试该点的 E_{vd} . 表 1 中显示的是每个截面的沉降差和 E_{vd} 平均值,对碾压不同遍数下碎石土沉降差进行回归,得到 E_{vd} 与沉降差关系图如图 3 所示.

表 1 沉降差和 E_{vd} 均值汇总

沉降差平均值/mm	E_{vd} 平均值/MPa
0	39.2
22.8	39.6
10.5	44.0
4.5	44.6
2.5	50.0

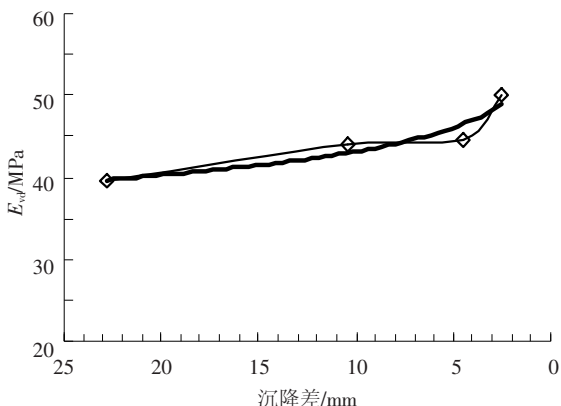


图 3 碎石土路基 E_{vd} 值与沉降差的关系

由图 3 可以看出,碎石土路基的沉降差与变形模量具有良好的对数关系,回归的关系为

$$E_{vd} = -4.18\ln(\Delta h) + 52.80, R^2 = 0.90. \tag{3}$$

式中: Δh 为沉降差, mm.

2.2 压实控制标准的建立

文献[3-4]对石方和土石混合料路基的施工进行了具体的规定,但以上的相关规定多为土石路基压实的过程控制,属定性评价,主观性大,其中在规定吨位压路机碾压下的沉降差属定量指标,规范中给出了土石路基沉降差的检测方法和对沉降差的模糊要求,即实测沉降差不大于试验路确定的沉降差^[11-12].

沉降差的确定与公路等级、交通量等因素有关,一般情况下,土石混合料路基压实沉降差控制在 2 ~ 6 mm 之间,工程中常常认为当沉降差小于 3 mm 时,即达到压实要求. 表 2 为根据式(3)计算出的不同沉降差下的 E_{vd} 计算值和提出的 E_{vd} 压实控制标准值,例如,当沉降差 $\Delta h = 3$ mm 时,计算可得 $E_{vd} = 48.2$ MPa. 但是,为了使标准值具有一定的安全性,在确定标准值时可取 $E_{vd0} = 49$ MPa.

表 2 不同沉降差要求下变形模量 E_{vd} 的控制标准

Δh /mm	E_{vd} /MPa	
	对数关系计算值	压实控制标准
8	44.1	45.0
6	45.3	46.0
5	46.1	47.0
4	47.0	48.0
3	48.2	49.0
2	49.9	50.0
1	52.8	53.0

3 碎石土路基压实状况评价

根据表 2 提出的碎石土路基压实 E_{vd} 的控制标准,对桩号在 K47 + 000—K48 + 400 路段的压实状态进行了跟踪检测,由于碎石土路基压实的最大沉降差的要求为 3 mm, E_{vd} 的控制量为 49 MPa;检测路段的最大变形模量为 94 MPa,最小变形模量为 30.4 MPa(翻浆后补,压实状况不良),检测结果如图 4 所示. 对于路段压实质量的评价采用变形模量 E_{vd} 算术平均值的下置信界限来评价,具体评价公式为

$$E_{vd,d} = \overline{E_{vd}} - \frac{t_a}{\sqrt{n}}s \geq E_{vd0}. \tag{4}$$

式中: $E_{vd,d}$ 为变形模量代表值, MPa; $\overline{E_{vd}}$ 为评定路段内测点变形模量平均值, MPa; t_a 为 t 分布随测点数和保证率而变化的系数,二级路路基保证率为 90%; s 为检测值的标准差; n 为测点数; E_{vd0} 为变形模量标准值, MPa.

就本测段而言, $n = 55$, $\overline{E_{vd}} = 59.0$ MPa, $s = 13.1$ MPa, $E_{vd0} = 49$ MPa, 由于检测路段为二级路,保证率为 90%, 查表 $t_a = 0.1755$, 把以上数据代入式(4),得

$$E_{vd,d} = \overline{E_{vd}} - \frac{t_a}{\sqrt{n}}s = 58.9 \text{ MPa} \geq 49.0 \text{ MPa}.$$

排除翻浆的测点,检测路段的最小变形模量 $E_{vd,min}$ 为 40.91 MPa,由室内试验结果可知,对于碎石土路基,单位压实度变形模量的增加量为 8 MPa,

根据路基压实质量评定标准的规定, 当 $K > K_0$, 且单点压实度 K_i 全部大于等于规定值减 2 个百分点时, 评定路段压实度合格率为 100%, 标准 E_{vd0} 减 2 个百分点压实度所对应的 E_{vd} 为

$$E_{vd} = 49 \text{ MPa} - 2 \times 8 \text{ MPa} =$$

$33 \text{ MPa} < 42.03 \text{ MPa}$.

说明按 E_{vd} 的检测结果, 路段压实质量合格率为 100%; 就单点来说, 在 55 个检测点中, 有 10 个点的 $E_{vd} < 49 \text{ MPa}$, 排除翻浆点的影响, 压实合格率为 83%.

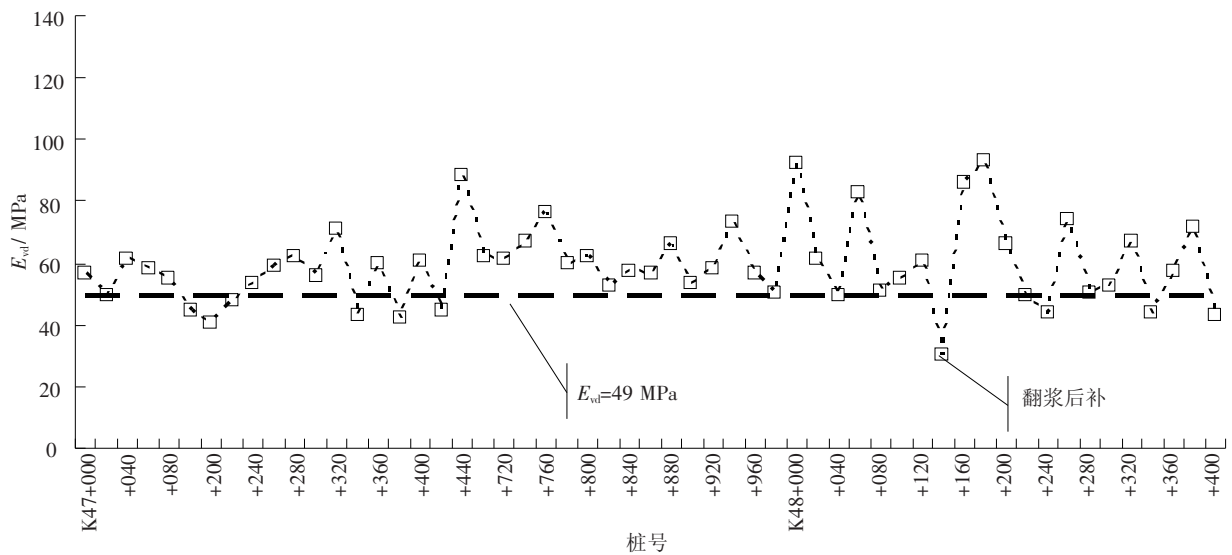


图4 碎石土路基压实 PFWD 跟踪压实检测结果

4 碎石土路基压实均匀性的评价

土石混合料路基填料由于土石比例和颗粒直径变化范围很大, 虽规范严格界定了土石混合料的材料要求和填筑方法, 但在实际施工中, 如何保证填筑质量和压实质量的均匀性一直是具有挑战性的课题^[13], 目前还没有开拓性的检测和评价方法, 基于采用 PFWD 检测土石混合料路基的研

究结果, 在施工现场, 对典型路段碎石土路基压实的均匀性进行检测和评价.

4.1 基于 Matlab 均匀性评价

在 240 m 的侧段上, 布设了 13 个断面, 采集了 65 个 E_{vd} 数据, 编制 Matlab 程序, 内插出各点间 E_{vd} 信息, 绘制测段上 E_{vd} 的三维分布图, 如图 5 所示.

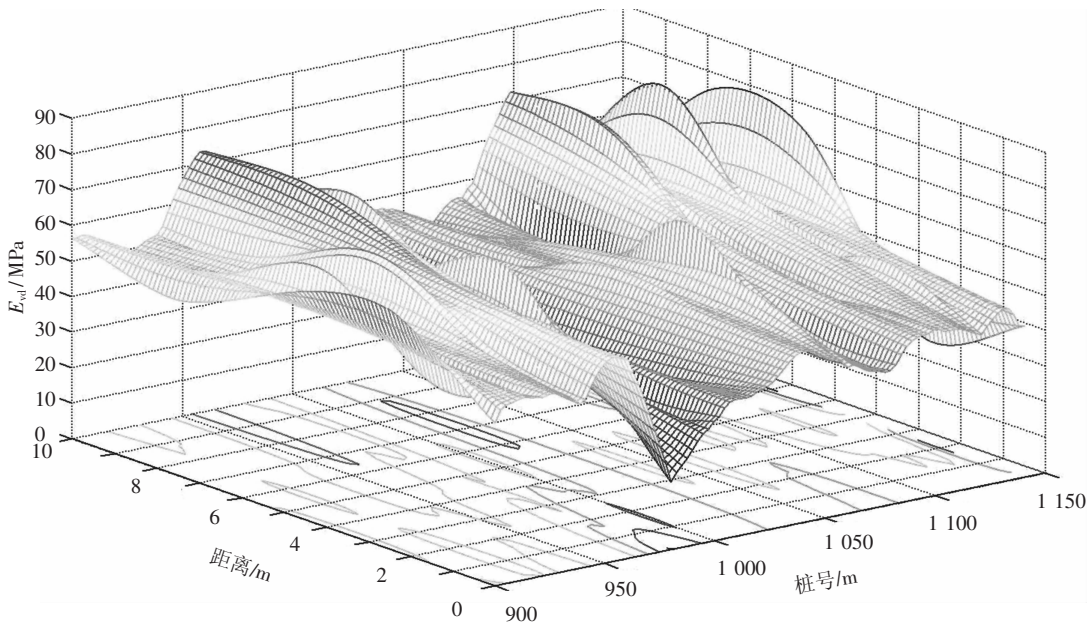


图5 基于 Matlab 仿真 E_{vd} 分布图

路基压实的程度过高或过低均会产生不均匀沉降,因此压实的不均匀区间既包括压实不足区间,也包括超压区间,因此,对于压实均匀性是否合格的评价,不能采用置信区间的方法进行压实度的评价,而是要采用双置信区间控制,测点 $n = 65$,实测数据均值为 50 MPa ,标准差为 13.88 MPa ,置信度为 0.95 ,则依据压实度评定方法有

$$\begin{aligned} \bar{x} \pm t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} &= \\ 50 \pm t_{0.05}(64) \times \frac{13.88}{\sqrt{65}} &= \\ 50 \pm 1.998 \times \frac{13.88}{\sqrt{65}} &= 50 \pm 4.11. \end{aligned}$$

即当采集的变形模量 E_{vd} 处于 $[45.89, 50.11]$,则认为路基压实处于均匀状态,当检测结果超出 $[45.89, 50.11]$ 区间,则认为路基压实具有不均匀性,压实方法或压实工艺存在系统问题,需改进;图 6 阴影部分为检测路段压实不均匀的区间,压实均匀度 t 为

$$\begin{aligned} t &= \frac{s_h}{s_q} \times 100\% = \\ \frac{1\,515.6}{2\,400} \times 100\% &= 63.15\%. \end{aligned}$$

计算结果表明,该路段的均匀度为 63.2% ,即有接近 40% 的面积压实不均匀,而该路段的压实度合格率为 95% ,因此用压实度来评价不能充分地反映压实质量,使路基存在不均匀沉降的隐患,在路基压实质量评定中,应增加压实均匀性评价指标^[14-15].

4.2 路基压实薄弱区间确定

图 6 阴影部分为压实不合格区域,包括 E_{vd} 相对过高和 E_{vd} 相对过低的区域;就路基压实质量控制而言, E_{vd} 相对过高区域不能被进行有效的施工改造,而只能对 E_{vd} 相对过低的区域进行补压,以提高压实的均匀性水平.

图 7 为碎石土路基变形模量 E_{vd} 低于下置信区间(即 $E_{vd} \leq 45.9 \text{ MPa}$)的区域,通过计算得薄弱区间占总面积的百分比 $k = 6.8\%$;可以看出,检测路段路基压实薄弱区间的面积为 6.8% ,通过补压,路基压实的最终均匀度可提高 6.8% ,即可以达到 70% .因此,通过 PFWD 快速检测,可以及时发现路基压实的薄弱区间,通过适当补压,可以提高碎石土路基压实的均匀性.

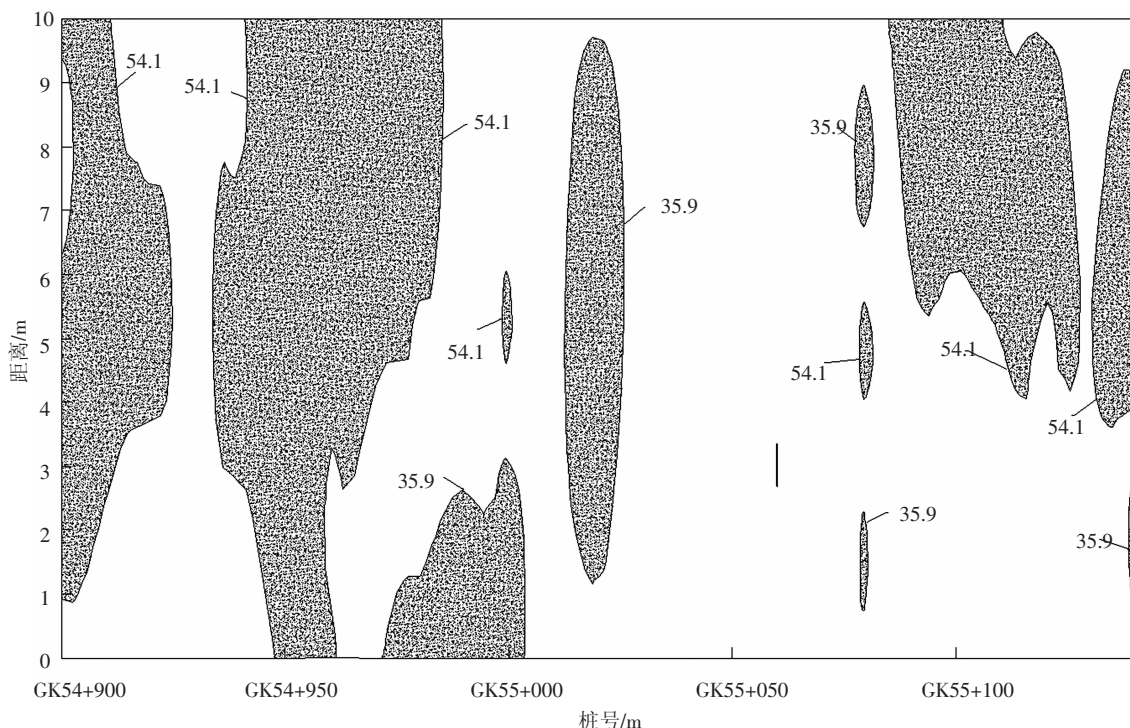


图 6 基于 Matlab 仿真的 E_{vd} 临界等值线及不合格区域

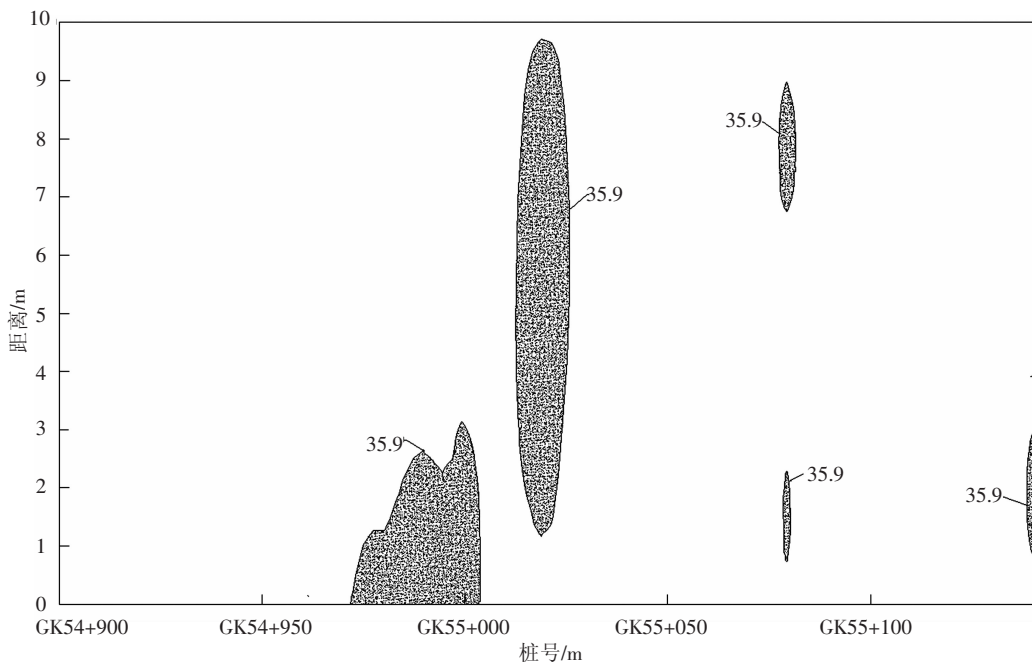


图7 碎石土路基压实薄弱区间

5 结 论

1)采用PFWD无损检测的方法,对碎石土路基的压实质量和压实的均匀性进行了检测和评价,定义了路基压实均匀程度的评价指标。

2)通过碎石土路基压实沉降差和变形模量的定点比对检测,建立了碎石土路基压实沉降差与 E_{vd} 的关系,提出了不同沉降差要求下的 E_{vd} 检测标准。

3)根据提出的PFWD快速无损检测标准,对实体工程进行了检测评价,说明采用PFWD对碎石土路基压实具有可行性,且具有快速、方便的优点。

4)采用均匀度对碎石压实的均匀性进行了评价,碎石土路基的均匀度远远小于其压实度的合格率,压实度的评价体系存在虚假提高路基压实质量的现象。

5)提出了路基压实薄弱区间的概念,通过PFWD快速检测,可以及时发现路基压实的薄弱区间,通过适当补压,可以提高碎石土路基压实的均匀性。

参考文献

[1] 时卫民,郑颖人. 碎石土压实性能试验研究[J]. 岩土工程技术,2005,19(6):299-306.
[2] JTG F80/1—2004. 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
[3] JTG F10—2006. 公路路基施工技术规范[S]. 北京:

人民交通出版社,2006.

[4] 赵文,谢强. 路基压实质量 E_{vd} 评价建议标准试验研究[J]. 铁道工程学报,2009(9):10-13.
[5] 郭传臣. E_{vd} 在新建地方铁路路基工程中的应用[J]. 铁道标准设计,2008(2):17-19.
[6] 肖金凤,康琳. DBM型动态变形模量测试仪检测客运专线路基填筑质量方法研究[J]. 铁道工程学报,2004(1):31-33.
[7] 王复明,渠建伟,王运生. 便携式落锤弯沉仪PFWD在土石填料压实质量控制中的应用[J]. 铁道建筑,2008(9):67-70.
[8] 董秀文,谢强,郭永春. E_{vd} 与动态模量 E_d 相关关系的试验研究[J]. 路基工程,2006(6):43-45.
[9] 薄会申,李铂. 地基系数K30与变形模量 E_v 及动态变形模量 E_{vd} 的对比试验研究[J]. 铁道勘察,2007(3):59-61.
[10] 李芦林. E_{vd} , K30平板载荷对比试验探讨[J]. 铁道工程学报,2007(1):34-37.
[11] 吕宾林,张千里. 地基系数变形模量及动态变形模量的测试与对比[J]. 铁道建筑,2006(2):55-57.
[12] 段丹军,查旭东,张起森. 应用便携式落锤弯沉仪测定路基回弹模量[J]. 交通运输工程学报,2004,4(4):10-13.
[13] 李跃军,吴亚中,李亮. 路基施工质量均匀性综合评价法[J]. 公路交通科技,2010,27(2):42-47.
[14] 刘俊锋,徐科,李智,等. 利用PFWD评价路基施工质量均匀性[J]. 湖南交通科技,2006,132(3):48-65.
[15] 徐科. 使用落锤式弯沉仪评价基层施工质量均匀性[J]. 山东建筑工程学院学报,2006(2):112-115.

(编辑 魏希柱)