

文章编号: 1674—8247(2024)02—0045—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.02.008

盐渍土既有高速铁路路基压实质量检测

胡 超 张 健 陈伟志 龙 军

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:高速铁路路基填料压实标准主要通过压实系数、地基系数、动态变形模量等指标进行控制。对于既有路基,在不破坏路基的条件下,路基内部的控制指标难以有效测试。为评价某海外项目既有路基内部填料压实情况,最大程度减少对既有路基工程的扰动破坏,通过试验段建立了动力触探试验(DPT)锤击数与实测压实系数、地基系数、动态变形模量的拟合关系式,并将其应用于该项目全线路基内部压实质量检测。结果表明:应用该拟合关系式能够避免对既有路基的破坏,节约工期,取得了较好的经济效益。

关键词:盐渍土;既有高速铁路;路基工程;压实质量;无损检测

中图分类号:U213.1 文献标志码:A

Quality Inspection of Compaction of Subgrade for Existing High-speed Railway in Saline Soil Environments

HU Chao ZHANG Jian CHEN Weizhi LONG Jun

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The compaction standards of high-speed railway subgrade filling materials is mainly controlled by indexes such as compaction coefficient, subgrade modulus, and dynamic deformation modulus. Testing the internal control indicators of existing subgrades effectively can be challenging without causing damage to the subgrade itself. To assess the compaction quality of fillers within the subgrade of an overseas project, while minimizing disruption and damage to the current subgrade, a fitting relation was established to relate the number of hammer blows from the Dynamic Penetration Test (DPT) to the directly measured compaction parameters compaction coefficient, subgrade modulus, and dynamic deformation modulus within a test section. This fitting relation was then used for a comprehensive evaluation of the internal compaction across the project's entire subgrade. The findings indicate that the use of this fitting relation prevents harm to the existing subgrade, reduces construction time, and delivers significant economic advantages.

Key words: saline soil; existing high-speed railway; subgrade engineering; compaction quality; non-destructive testing

高速铁路路基基床填料(化学改良土除外)压实标准通过压实系数 K 、地基系数 K_{30} 、动态变形模量 E_{vd} 指标进行控制。基床以下路堤填料(化学改良土除外)压实标准通过压实系数 K 、地基系数 K_{30} 两个指标进行控制。对于已修建的路基,在不破坏既有路基的条

件下,路基内部的 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 指标难以有效测试。

压实系数 K 为工地试样的干密度和由室内试验得到的试样最大干密度的比值。工地试样干密度需要在原位根据填料最大粒径开挖试坑,对于既有路基的不同深度位置,需要大面积开挖,对既有路基破坏

收稿日期:2023-12-05

作者简介:胡超(1986-),男,高级工程师。

引文格式:胡超,张健,陈伟志,等.盐渍土既有高速铁路路基压实质量检测[J].高速铁路技术,2024,15(2):45-49.

HU Chao, ZHANG Jian, CHEN Weizhi, et al. Quality Inspection of Compaction of Subgrade for Existing High-speed Railway in Saline Soil Environments [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2):45-49.

较大,且用时较长。地基系数 K_{30} 表示土体表面在平面压力作用下产生的可压缩性的大小,采用直径为300 mm的刚性承载板进行静压平板载荷试验测得,要求原位测试面平整水平,且要为承载板、反力装置留够空间。对于既有路基内部 K_{30} 的测试方法存在大面积开挖、破坏较大、用时长的缺点。动态变形模量 E_{vd} 采用动态变形模量测试仪进行原位测试,虽测试用时较短,但由于300 mm刚性承载板的存在,需对既有路基内部进行开挖。

动力触探试验(DPT)在原位测试中,先采用钻具钻进至所需测试土层顶面,然后对该土层进行连续贯入,对既有路基不同深度进行连续测试。动力触探试验(DPT)有 N_{10} 轻型、 N_{28} 中型、 $N_{63.5}$ 重型、 N_{120} 超重型。路基压实质量检测中采用 N_{10} 轻型动力触探时设备简单、操作方便、勘探速度快,在路基基床质量评估中经常使用,但其分辨率不高,易受介质不均匀的影响^[1]。采用 N_{10} 轻型、 N_{28} 中型动力触探操作过程中难以贯入,效率较低,易受人为因素及设备自身影响,导致误差较大^[2]。 N_{120} 超重型动力触探试验虽然效率高,但试验结果精度相对较低,因而一般采用 $N_{63.5}$ 重型动力触探试验进行原位测试。 $N_{63.5}$ 重型动力触探设备最大直径74 mm,对既有路基的破坏很小,具备快速、无创的优点。

海外铁路建设项目经济选择性强,项目主体复杂^[3],原则上不宜产生废弃工程。为适应海外众多铁路提速提质改造工程中既有路基质量检测的需求,尽量减少对既有路基工程的扰动破坏,亟需建立动力触探试验(DPT)锤击数与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 指标相互关系,采用动力触探原位测试对路基内部压实质量进行检测,以期达到避免既有路基的破坏,节约工期,节约工程投资的目的。

1 原位检测概况

国外某高速铁路某期工程全长约241 km,其中216 km路基工程已按外方设计完成70%线下工程施工,且施工完成后已静置10余年。既有铁路工程设计速度250 km/h,现按照300 km/h有砟铁路进行整改设计。为验证既有路基工程能否满足线下工程300 km/h的设计要求,需对既有路基工程的填料和压实质量进行检测和评估。

1.1 填料概况

该铁路沿线普遍分布盐渍土(岩)地层,其中易溶盐含量大部分集中0.01%~5%,少部分在5.0%~9.0%范围内,最高15%。这些盐渍土主要

为氯盐渍土、亚氯盐渍土、硫酸盐渍土、亚硫酸盐渍土,盐渍化程度以弱~中盐渍土为主,局部为强盐渍土。沿线部分低山浅丘地貌多为沉积岩,含有易溶盐、中溶盐类矿物,如砂岩、泥岩、砾岩、泥灰岩及石膏岩,属于盐渍岩。

现场调查发现,既有铁路存在明显的由于毛细水上升,直接造成路堤填筑土吸水软化及次生盐渍的现象,路基本体毛细水强烈上升高度为0.4~2.0 m。根据收集的资料得知,既有路基填料易溶盐含量0.04%~1.99%,将近一半路基填料的易溶盐含量大于0.3%,部分既有路基填料易溶盐含量大于1%,绝大部分填料能达到B2组以上。整改设计过程中,在铲除含盐量超限的填料之后,需要对剩余既有路基进行进一步的压实质量检测,用以评估能否满足设计要求。

1.2 分析步骤

为建立DPT锤击数与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 的相互关系,具体实施步骤如下:

(1)进行填料试验,根据颗粒分析试验结果对填料级配、组别进行判定,并根据填料组别进行段落里程划分。

(2)根据划分的段落里程,每个段落中选取4个未施工过渡段的涵洞(尽可能包括已施工基床底层且填筑高度在4 m以上),在涵洞两侧背后路基表层先进行DPT及 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试,然后开挖涵洞两侧背后路基,依次在不同开挖深度进行DPT及 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试。

(3)整理DPT测试的锤击数与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试数据,进行相关性分析,建立DPT锤击数(10 cm)与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 之间拟合关系式。

2 检测情况及结果

2.1 断面选择

在GK 11+322、GK 13+300涵洞的两侧涵背分层挖出路基填料。现场原位测试的层面包括施工面、施工面以下0.9 m、1.5 m、2.4 m,共计4个层面,在每一个层面的不同位置分别开展DPT、 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试。

在GK 61+740涵洞两侧涵背分层挖出路基填料,现场原位测试的层面包括施工面、施工面以下0.3 m、1.3 m、2.1 m、3.1 m,共计5个层面,在每一个层面上不同位置分别开展DPT、 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试。

在GK 56+700涵洞两侧涵背分层挖出路基填料,现场原位测试路基的层面包括施工面、施工面以下0.5 m、1.2 m、2.1 m、3.1 m,共计5个层面,在每一个层面上不同位置分别开展DPT、 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试。

2.2 填料分析

在 GK 11 + 322、GK 13 + 300、GK 56 + 700、GK 61 + 740 位置分别各取 5 组土样进行颗粒分析试验,级配曲线如图 1 所示。

根据 TB 10102 – 2023《铁路工程土工试验规程》^[4]进行土类定名。根据图 1 试验数据分别计算出不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 。结合 C_u 、 C_c 及 TB 10001 – 2016《铁路路基设计规范》^[5]进行填料级配、组别判定,如表 1 所示。由表 1 可知,大部分填料组别为 A 组。

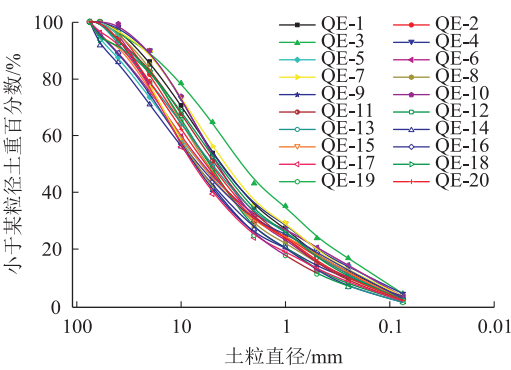


图1 土样级配曲线图

表1 土类定名及组别判定表

段落	GK 11 + 322					GK 13 + 300				
编号	QE-1	QE-2	QE-3	QE-4	QE-5	QE-6	QE-7	QE-8	QE-9	QE-10
C_u	34.74	39.33	31.15	43.30	68.94	63.75	34.00	32.56	48.82	26.57
C_c	1.26	2.16	1.01	1.30	1.65	1.74	1.16	2.20	2.97	2.63
级配	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
组别判定	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
段落	GK 56 + 700					GK 61 + 740				
编号	QE-11	QE-12	QE-13	QE-14	QE-15	QE-16	QE-17	QE-18	QE-19	QE-20
C_u	25.20	22.70	38.40	30.73	53.26	59.89	36.67	28.10	25.85	33.69
C_c	1.33	1.90	1.21	1.24	2.02	1.85	2.27	1.26	1.50	1.65
级配	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
组别判定	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3 结果分析

现场对 GK 11 + 322 位置涵洞两侧、GK 13 + 300 位置涵洞两侧(雨天)、GK 13 + 300 位置涵洞两侧(晴天)、GK 56 + 700 位置涵洞两侧、GK 61 + 740 位置涵洞两侧土样进行 DPT、 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 测试。由于雨天对填料压实测试结果质量产生较大干扰,故排除 GK 13 + 300 涵洞两侧(雨天)的测试数据。

3.1 相关性分析

根据以往的研究^[6-8],动力触探和压实指标具有正相关性,本次试验图 2~图 4 中散点的位置散布在从左下角到右上角的区域,两个变量之间具备明显正相关性。

相关分析中最简单的就是两个变量间的线性相关,一变量数值发生变动,另一变量数值会随之发生大致均等的变动,各点的分布在平面图上大概表现为一条直线,该直线称之为线性回归方程,采用最小二乘法求解。研究对动力触探和压实系数 K 、动态变形模量 E_{vd} 、地基系数 K_{30} 建立了线性回归方程。然而,随着路基填料压实度不断增大,土体压密程度变大,

孔隙率降低,压密难度增大,从而导致填料压实指标的增长率变慢,且当填料逐渐趋于完全压密状态时,填料压实指标也将趋于某一定值,因而并非明确的线性关系。

综上所述,动力触探和压实指标之间具备如下关系特点:

(1)路基填料压实指标 f 随动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 的增大而增长,即 f 对 $N_{63.5}$ 的增长率大于或等于 0,可表示为:

$$\frac{df}{dN_{63.5}} \geq 0$$

(1)

式中: $N_{63.5}$ ——动力触探锤击数(次);
 f ——路基填料压实指标,包括压实系数 K 、动态变形模量 E_{vd} (MPa)、地基系数 K_{30} (MPa/m)。

(2)路基填料压实度不断增大,土体压密程度变大,压密难度增大,从而导致填料压实指标 f 的增长率变慢,可表达为:

$$\frac{d^2f}{dN_{63.5}^2} \leq 0$$

(2)

(3)当填料逐渐趋于完全压密状态时,填料压实

指标 f 也将趋于某一定值。

根据以上特点,建立以下填料压实指标与动力触探锤击数模型关系(以下简称“负指数模型”):

$$f = F - Ae^{-RN_{63.5}} \tag{3}$$

式中: F 为路基填土趋于完全密实状态(即 $RN_{63.5} \rightarrow \infty$)对应的压实指标; $A = F - f_0$,其中 f_0 为路基填土趋于松散堆积状态(即 $RN_{63.5} \rightarrow 0$)对应的压实指标,可见 $A \geq 0$; R 为定值,反映了压实指标 f 随动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 值的变化率,即 f 与 $N_{63.5}$ 曲线的曲率。

对式(3)求一阶导数得:

$$\frac{df}{dN_{63.5}} = AR e^{-RN_{63.5}} \tag{4}$$

对式(3)求二阶导数得:

$$\frac{d^2f}{dN_{63.5}^2} = -AR^2 e^{-RN_{63.5}} \tag{5}$$

由上述分析可知, $A \geq 0$,若欲使 $df/dN_{63.5}$ 恒大于或等于0且 $d^2f/dN_{63.5}^2$ 恒小于或等于0,则参数 R 必须满足 $R \geq 0$ 。

3.2 关系建立

(1) $N_{63.5}$ 与 K 关系建立

$N_{63.5}$ 与 K 关系如图2所示,采用式(3)对图2数据进行拟合,可得 $N_{63.5}$ 与 K 的拟合关系式为:

$$K = 0.984 - 0.17e^{-0.1N_{63.5}} \tag{6}$$

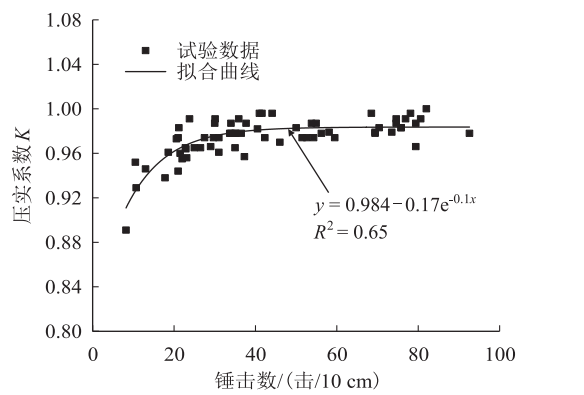


图2 $N_{63.5}$ 与 K 关系图

(2) $N_{63.5}$ 与 E_{vd} 关系建立

$N_{63.5}$ 与 E_{vd} 关系如图3所示,采用式(3)对图3中数据进行拟合,可得 $N_{63.5}$ 与 E_{vd} 的拟合关系式:

$$E_{vd} = 208 - 140e^{-0.026N_{63.5}} \tag{7}$$

(3) $N_{63.5}$ 与 K_{30} 关系建立

$N_{63.5}$ 与 K_{30} 关系如图4所示,采用式(3)对图4中数据进行拟合,可得 $N_{63.5}$ 与 K_{30} 的拟合关系式为:

$$K_{30} = 1\,270 - 1\,226e^{-0.015N_{63.5}} \tag{8}$$

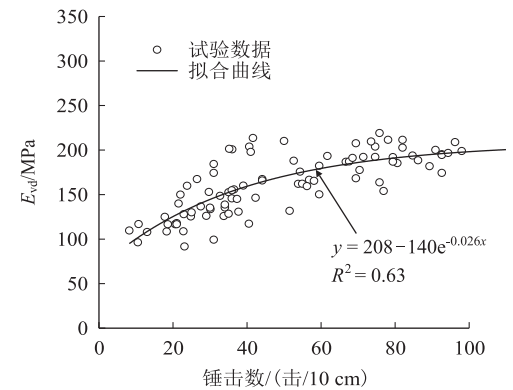


图3 $N_{63.5}$ 与 E_{vd} 关系图

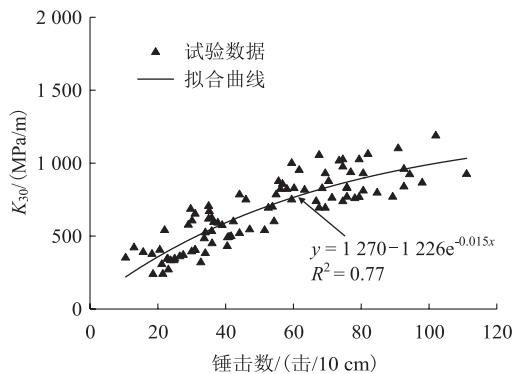


图4 $N_{63.5}$ 与 K_{30} 关系图

3.3 关系验证

采用动力触探试验(DPT)锤击数和拟合关系式(6)~式(8)分别估算 K 、 K_{30} 、 E_{vd} ,并在图5~图7中分别给出估算值与实测值的关系,其中 K^e 、 E_{vd}^e 和 K_{30}^e 分别为 K 、 E_{vd} 和 K_{30} 的估算值, K^m 、 E_{vd}^m 和 K_{30}^m 分别为 K 、 E_{vd} 和 K_{30} 的现场实测值。

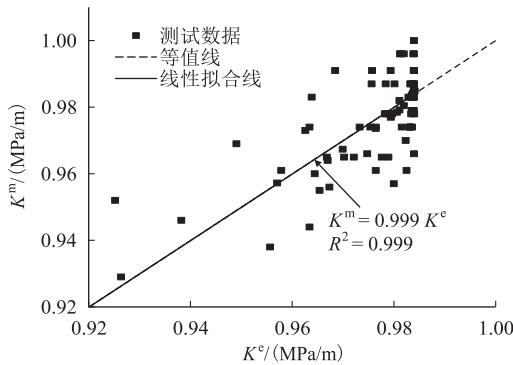
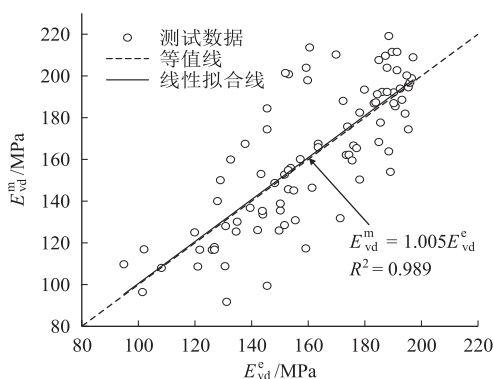
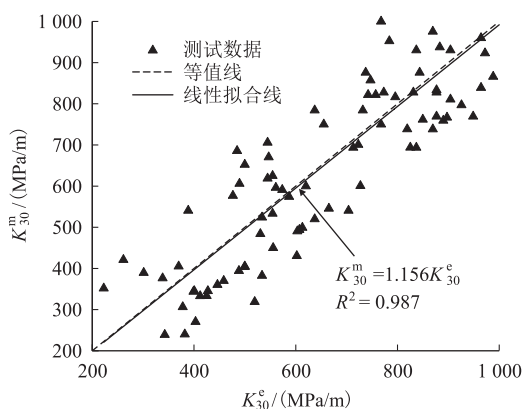


图5 K^e 与 K^m 关系图

由图5~图7可知,数据点较为均匀的分布在等值线两侧,且等值线和线性拟合线基本重合,说明拟合关系式(6)~式(8)具有较好的估算能力和应用效果。此外,利用动力触探试验(DPT)锤击数估算 K 、

图6 E_{vd}^c 与 E_{vd}^m 关系图图7 K_{30}^c 与 K_{30}^m 关系图

K_{30} 、 E_{vd} 指标具有一定的离散型,建议采用一小段路基范围的压实指标估算均值来判断该段路基的压实质量。

4 结论

为适应海外铁路提速提质改造工程中既有路基压实质量检测的需求,最大强度减少对既有路基工程的扰动破坏,本文结合国外某高速铁路项目的原位检测试验,通过对该项目盐渍土路基大量的动力触探试验(DPT)锤击数与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 指标检测数据进行分析,得到主要结论如下:

(1) 填料压实指标与动力触探锤击数之间并非明确的线性关系,路基填料压实度不断增大,土体压密程度变大,压密难度增大,从而导致填料压实指标的增长率变慢,且当填料逐渐趋于完全压密状态时,填料压实指标也将趋于某一定值。

(2) 建立了适用于该项目同填料组别的动力触探试验(DPT)锤击数与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 指标的拟合关系式,应用后能够避免对既有路基产生破坏,节约工期,取得了较好的经济效益。

由于动力触探试验精度易受土质影响,本研究对盐渍土路基地段具有参考意义,建议具体项目实施中按照填料组别进行段落划分,选取代表性试验段进行实测分析,在获得足够数量的数据基础上,对同组别的填料建立动力触探试验(DPT)锤击数与 K 、 K_{30} 、 E_{vd} 指标的拟合关系式,在应用过程中不断修正完善,以便更好地控制路基压实质量。此外,利用动力触探试验锤击数估算的压实指标具有一定的离散型,建议采用一小段路基的压实指标估算均值来判断该段路基的压实质量。

参考文献:

- [1] 程远水,朱忠林,张千里,等. 提速线路路基检测评估方法及适用条件分析[J]. 铁道建筑, 2007, 47(1): 74-76.
CHENG Yuanshui, ZHU Zhonglin, ZHANG Qianli, et al. Detection and Evaluation Method and Application Condition Analysis of Subgrade of Speed-increasing Line [J]. Railway Engineering, 2007, 47(1): 74-76.
- [2] 覃俊壹,王霜,刁心宏. 轻型动力触探在既有铁路提速中的应用[J]. 土工基础, 2010, 24(3): 27-29.
QIN Junyi, WANG Shuang, DIAO Xinhong. Application of Light Dynamic Penetration Test in Existing Railway Speed-raising Engineering [J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(3): 27-29.
- [3] 杨昉,肖朝乾. 浅谈铁路路基工程海外项目技术管理[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(2): 87-90, 94.
YANG Fang, XIAO Chaoqian. Preliminary Discussion on the Overseas Project Technical Management of Subgrade Engineering [J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(2): 87-90, 94.
- [4] TB 10102-2023 铁路工程土工试验规程[S].
TB 10102-2023 Code for Soil Test of Railway Engineering [S].
- [5] TB 10001-2016 铁路路基设计规范[S].
TB 10001-2016 Code for Design of Railway Subgrade [S].
- [6] 张涛,左德元. 动力触探在路基压实度检测中的应用[J]. 路基工程, 2006(6): 140-141.
ZHANG Tao, ZUO Deyuan. Application of Dynamic Penetration Test in Subgrade Compaction Detection [J]. Subgrade Engineering, 2006(6): 140-141.
- [7] 肖尊群,李志平. 含水率与轻型动力触探 N10 对既有重载铁路路基压实度指标变化关系研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(9): 164-168.
XIAO Zunqun, LI Zhiping. Research on Existing Overloaded Railway Subgrade Compaction Index Changing in Relation to N10 and Moisture Content Separately [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(9): 164-168.
- [8] 芦巍. 基于动力触探的高速铁路路基压实状态分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(9): 97-100.
LU Wei. Analysis of Compaction State of High Speed Railway Subgrade Based on DPT [J]. Railway Engineering, 2020, 60(9): 97-100.