

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.013

## 基于压实稳定性的路基连续压实质量评价方法\*

朱波<sup>1</sup>, 张宗堂<sup>2</sup>, 杨子莹<sup>3</sup>

(1.中国铁建投资集团 中铁建湖南高速公路有限公司, 湖南 常德 415000; 2.湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 3.华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 连续压实控制技术主要通过振动压路机对路基土体进行振动压实的过程中不断采集压路机的振动响应信息,对振动轮下土体压实质量进行实时评价,实现对所有压路机全部碾压力压实质量的整体检测。文中针对地基层刚度变化较大时连续压实检测值不能有效评价填筑层压实质量的问题,采用压实单元的变化率作为压实稳定性指标评价填筑层土体的压实质量。

**关键词:** 公路;路基;压实质量评价;压实稳定性;连续压实控制技术

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)04-0066-05

高速铁路与高速公路对结构整体沉降有更高的要求,需要更加稳定的路基结构为其上部结构(如道床、铁轨、路面等)提供足够稳定的支撑<sup>[1-2]</sup>。压实质量是保证土工构造物长期稳定和有效运营的重要条件<sup>[2-4]</sup>,须采用完善的检测技术、严格的验收标准进行压实质量评价<sup>[5-7]</sup>。文献[8-9]指出,进行相关性检验试验是采用连续压实质量控制的前提。然而在某些工况下,由于连续压实指标的检测深度与常规压实指标的检测深度存在较大差异,相关性检验结果不合格。Adam D.认为 10 t 压路机的连续压实指标的检测深度为 0.6~1.0 m,12 t 压路机的检测深度为 0.8~1.5 m<sup>[10]</sup>。Anderegg R.等研究连续压实指标的检测深度与振幅之间的关系,提出每增大 0.1 mm 振动轮竖向振幅,检测深度增大 0.1 m<sup>[11]</sup>。Rinehart R.V.等进行土体刚度参数检测深度试验研究,结果表明刚度参数检测深度受压路机吨位与振幅的影响较大<sup>[12]</sup>。当填筑高度小于连续压实指标的检测深度时,若地基刚度变异较大,则连续压实检测值受地基刚度的影响会产生较大变异。常规压实质量控制方法为人工操作的点测试验,其检测深度多与填铺厚度相等,变异较大的地基刚度可能影响连续压实值与常规压实检测值的相关性。此外,在进行连续压实质量控制与验收时,变异较大的地基层刚度还可能影响压实程度和压实均匀性评价结果。为避免地基层刚度不均匀对连续压实检测的影响,本文在将点状分布的矢量连续压实值

进行栅格化处理的基础上,采用压实单元的变化率作为压实稳定性指标评价填筑层土体的压实质量,并根据连续压实目标值  $V_{CCV,Target}$  和块金常数目标值  $C_{0,Target}$  确定稳定性目标值  $\Delta V_{CCV,Target}$ ,实现特殊工况下连续压实质量控制。

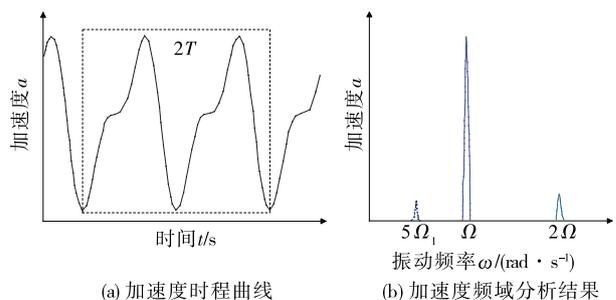
## 1 路基连续压实检测方法

1.1 振动加速度参数  $V_{CMV}$  和  $V_{CCV}$ 

相关研究表明,土体压实状态和振动轮加速度的幅值、谐波的幅值有关<sup>[13]</sup>。据此 Thurner H. F. 等提出振动加速度参数  $V_{CMV}$ <sup>[14]</sup>,其计算公式为:

$$V_{CMV} = C \cdot \frac{a_{2\Omega}}{a_{\Omega}} \quad (1)$$

式中: $C$  为常数; $a_{\Omega}$ 、 $a_{2\Omega}$  分别为振动压路机振动频率为  $\Omega$ 、 $2\Omega$  时振动轮垂直加速度幅值(见图 1)。



T 为周期

图 1 确定  $V_{CMV}$  值的方法

在线性振动轮-土系统中,当振动轮的激振力为 30 kN 时,振动轮的频率为 30 Hz, $a_{2\Omega}/a_{\Omega}$  的值恒

\* 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4019);湖南省教育厅科学研究项目(21C0360)

为零。实际上,由于振动轮-土系统为非线性(如土具有非线性的弹塑性特性、振动轮发生部分脱离、振动轮-土接触表面在每个加载周期中的非线性变化),振动轮的加速度响应会失真,导致加速度曲线不是纯粹的正弦曲线。傅里叶分析可以通过总结激励的倍数重现波形失真频率。因此, $a_{2\Omega}/a_{\Omega}$ 可用来衡量失真度或非线性。

$V_{CMV}$ 和土体密度、刚度和模量的关系依据经验确定,且受振动轮尺寸、振幅及振动频率、前进速度、土壤类型和下层已压实土的影响。Sakai 公司在  $V_{CMV}$ 的基础上,提出连续压实指标  $V_{CCV}$ ,该指标在考虑基波和一次谐波的基础上考虑了更高阶谐波,计算公式如下:

$$V_{CCV} = \left( \frac{a_{0.5\Omega} + a_{1.5\Omega} + a_{2.5\Omega} + a_{3\Omega}}{a_{2.5\Omega} + a_{3\Omega}} \right) \times 100 \quad (2)$$

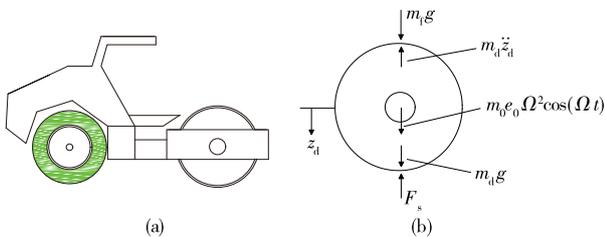
尽管与  $V_{CMV}$ 相比  $V_{CCV}$ 考虑了更多谐波对压实质量评价结果的影响,但其本质上依旧是基于对振动加速度信号的处理进行压实质量预测,并未从物理、力学角度进行压实质量评价。

### 1.2 路基能量参数 $O_{mega}$

基于路基能量的概念,Bomag 公司提出采用  $O_{mega}$ 作为路基压实度的连续检测指标,该指标按式(3)计算<sup>[15]</sup>,计算原理见图 2。

$$O_{mega} = \oint_{2T} (-m_d)\ddot{z}_d + (m_d + m_f)g + m_0 e_0 \Omega^2 \dot{z}_d dt \quad (3)$$

式中: $m_d$ 、 $m_f$ 、 $m_0$ 分别为上车机架、振动轮和偏心轮的等效质量; $z_d$ 、 $\ddot{z}_d$ 分别为振动轮的位移和加速度; $g$ 为重力加速度; $e_0$ 为偏心轮加速度。



$F_s$ 为振动轮-土接触力  
图 2 振动轮-自由度集总参数模型

$F_s$ 由振动轮静载、惯性力和偏心力确定,忽略机架的惯性力。振动轮的加速度由固定在振动轮上的加速度计测试。 $\omega$ 值通过对  $F_s$ 和  $z_d$ 在两个周期内积分得到<sup>[16]</sup>。

### 1.3 动态割线刚度参数 $E_{vib}$

振动模量  $E_{vib}$ 通过基于集总参数振动和柱体弹

性半空间理论得到<sup>[17]</sup>。Bomag 公司采用恒定压实频率  $\Omega=32\text{ Hz}$ ,采用两个加速度计采集振动轮的垂直加速度。相位滞后计算,使接触力  $F_s$ 与图 2 所示的力达到平衡。振动轮的位移由振动轮的加速度计算得出。图 3 为  $F_s-z_d$ 关系曲线,通过该曲线可得到土壤刚度。Bomag 公司的  $E_{vib}$ 测量值采用动态割线刚度  $k$ 。

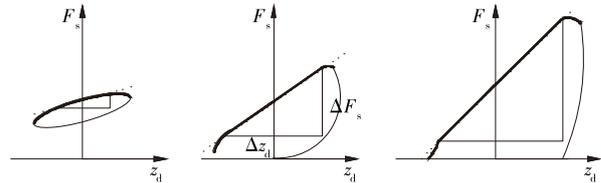


图 3 接触力  $F_s$ -振动轮位移关系曲线

为了将  $F_s-z_d$ 特性、刚度  $k$ 与振动模量  $E_{vib}$ 联系起来,引入一个刚性柱体(见图 4)。卢德伯格理论的表达式如下:

$$z_d = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \cdot \frac{F_s}{L} \cdot (1.8864 + \ln \frac{L}{b}) \quad (4)$$

式中: $\nu$ 为泊松比; $E$ 为杨氏模量; $L$ 为长度; $b$ 为接触宽度,按式(5)计算。

$$b = \sqrt{\frac{16R(1-\nu^2)}{\pi E L} F_s} \quad (5)$$

式中: $R$ 为半径。

$k$ 和  $E$ 的关系见图 4。 $E_{vib}$ 通过拟合方法确定。

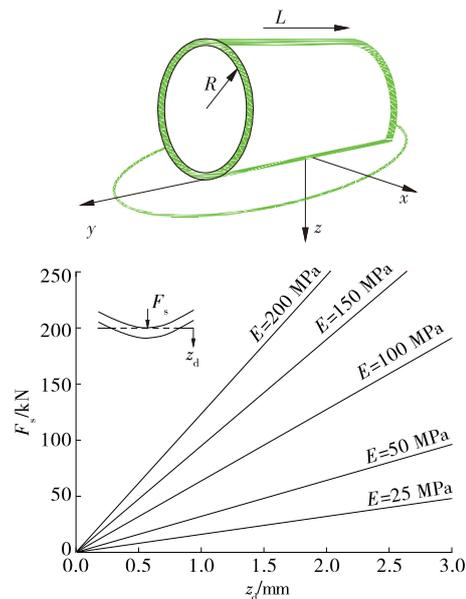


图 4 基于弹性半空间理论的接触力和振动轮位移的关系

### 1.4 土体刚度参数 $k_s$

20 世纪 90 年代,Ammann 提出基于压路机振

动轮的土体刚度参数  $k_s$ 。通过考虑图 2 中集总参数模型来代表土体—振动轮—机架系统的垂直运动,其中土体用开尔文—沃伊特弹簧黏性阻尼模型代替。通过频谱分析和对振动轮加速度峰值进行积分,可以求得振动轮的位移幅值  $z_d$ 。连续接触和局部脱离状态所得  $F_s-z_d$  响应见图 5。振动轮速度为零时,  $k_s$  按式(6)计算<sup>[18]</sup>。

$$k_s = \omega^2 \left( m_d + \frac{m_0 e_0 \cos \phi}{z_d} \right) \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为角速度;  $\phi$  为转速。

$k_s$  为  $F_s$  和  $z_d$  的比值,是当振动轮处于轨迹线的最底端且  $z_d$  为最大时计算得出的(见图 5)。 $k_s$  代表土体静态刚度(弹簧常数),由于开尔文—沃伊特弹簧黏性阻尼模型可以很好地模拟土体,所以是有效的。弹簧—阻尼可以很好地表征地基土及振动轮—土系统的行为。

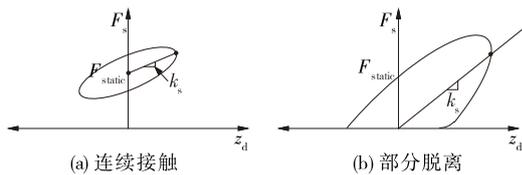


图 5 连续接触和部分脱离时的  $k_s$

以上这些连续压实检测方法受到多种因素的限制,目前中国连续压实检测技术还处于初期发展阶段,还没有统一的标准来指导连续压实质量检测。此外,基于连续压实检测指标的压实质量评价体系还不完善。下面从压实稳定性的角度对已有连续压实质量评价方法进行改进。

## 2 连续压实检测参数的栅格化处理

### 2.1 栅格结构的概念

压路机压实是人工操作的,受人为因素影响,前后两遍的碾压轮迹在空间上无法重合,若要计算同一坐标处前后两次压实值的变化率,须对整个碾压面的检测数据进行栅格化处理,使不同遍数、相同碾压面的数据一一对应。将原本为点分布的连续压实检测数据(矢量数据)进行栅格化处理,将离散分布的点以规则的阵列的栅格单元表示。在进行连续压实检测数据栅格化处理前,须确定栅格单元大小。

### 2.2 栅格单元的划分

连续压实质量控制的检测单元是振动压路机有效碾压宽度与其采样间隔的乘积。一个连续压实检测值代表一个检测单元面积范围内土体压实状态的

平均值。以 BW219 DH-3 振动压路机(轮宽 2 m)为例,该压路机装载美国天宝公司(Trimble)生产的 CCS900 连续压实检测系统,连续压实检测指标  $V_{CCV}$  的检测单元面积为  $0.4 \text{ m}^2$ (见图 6)。

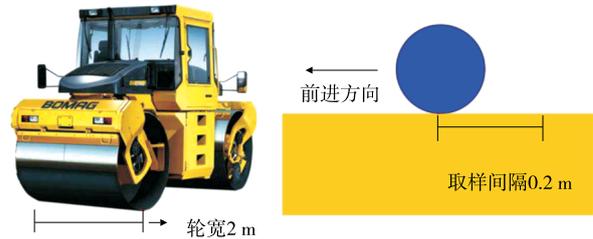


图 6 检测单元示意图

在进行连续压实检测数据栅格化处理时,先根据碾压面的施工参数划分相应网格。如图 7(a)所示,假设某一碾压面长为  $L \text{ m}$ 、宽为  $B \text{ m}$ ,则通过计算机生成一个  $5L \times 0.5B$  的网格(矩阵)。若某一连续压实检测点  $P$  的坐标为  $(x, y)$ ,其栅格化后所在网格的单元位置为第  $i$  行、第  $j$  列,则  $i, j$  满足下式:

$$\begin{cases} 2(i-1) \leq x \leq 2i; i=1, 2, \dots, 0.5B \\ 2(j-1) \leq x \leq 2j; j=1, 2, \dots, 5L \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7)可以将点分布的连续压实数据  $V_{CCV}(x, y)$  转化为矩阵  $Z(i, j)$ [见图 7(b)]。

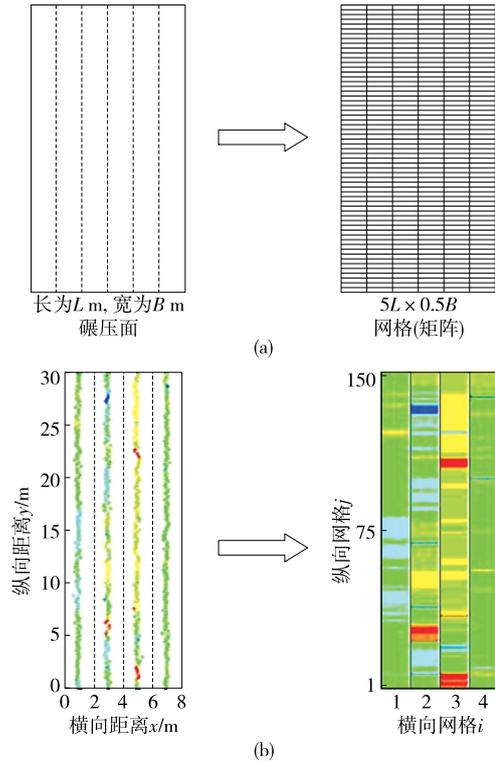


图 7 连续压实检测数据的栅格化处理

### 2.3 空白网格的插值

在实际工程中,由于连续压实检测值是等时间

间隔输出的,检测点空间分布的疏密程度受到压路机行驶速度的影响。当行驶速度大于额定行驶速度时,检测点的输出间距小于网格间距,可能导致同一个网格中出现 2 个连续压实检测值;当行驶速度小于额定行驶速度时,检测点的输出间距大于网格间距,可能导致某些网格为空白网格。对于出现 2 个或 2 个以上连续压实检测值的网格,取落在网格内所有检测点的平均值作为该网格的值。对于空白网格,则采用线性插值法进行空间局部插值,通过线性插值建立从变量与基本变量之间的线性关系,从而导出以基本变量作为未知量的总体线性方程组,并转换为压实单元的变化率与稳定性指标的目标值。

### 3 稳定性指标及其目标值

#### 3.1 压实单元的变化率

设某一碾压面长为  $L$  m、宽为  $B$  m,网格尺寸为  $5L \times 0.5B$ ,定义  $V_{CCVi,j}^k$  为第  $k$  遍第  $(i,j)$  网格单元(压实单元)的连续压实检测值,第  $k$  遍与第  $k-1$  遍第  $(i,j)$  压实单元的变化率为  $\Delta V_{CCVi,j}^k$ ,计算公式如下:

$$\Delta V_{CCVi,j}^k = \frac{V_{CCVi,j}^k - V_{CCVi,j}^{k-1}}{V_{CCVi,j}^{k-1}} \quad (8)$$

在确保所选择的压路机能够将所填筑的土体压实至规定密实度的前提下,从压实稳定性的角度,以变化率  $\Delta V_{CCVi,j}^k$  作为压实稳定性指标并代替压实值  $V_{CCVi,j}^k$  来评价压实单元  $(i,j)$  的土体压实度是否达到要求。图 8 为将某刚度不均匀基层的最后一遍碾压面的压实值  $V_{CCVi,j}^k$  转化为变化率  $\Delta V_{CCVi,j}^k$  的效果图。

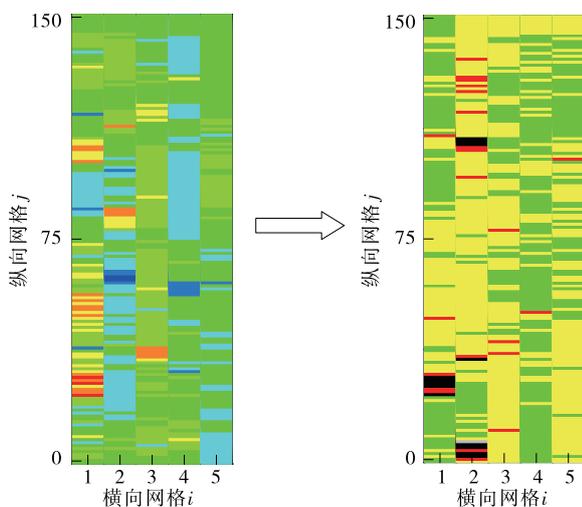


图 8 某碾压面的压实值与压实变化率对比

根据图 8,转化为变化率后碾压面更均匀,压实薄弱区域为其变化率大于某一目标值(暂定为 5%)的区域。在地基层刚度不均匀情况下,若直接采用连续压实值对碾压面压实质量进行评价,会将某些区域误判为薄弱区域(如第一条碾压轮迹中间部分),也可能无法判别某些真实的薄弱区域(如第二条碾压轮迹的起始部分)。

#### 3.2 稳定性指标的目标值

采用连续压实值  $V_{CCV}$  作为压实质量控制指标时,须通过相关性检验试验确定目标值  $V_{CCV,Target}$  来判断某一点的土体压实度是否达到要求。同样,采用稳定性指标  $\Delta V_{CCV}$  时,也需要确定稳定性目标值  $\Delta V_{CCV,Target}$ 。奥地利/国际土力学与岩土工程学会(ISSMGE)颁布的规程规定采用 5% 作为碾压轮迹前后两遍的限定值,中国《铁路路基填筑工程连续压实控制技术应用规程》<sup>[19]</sup> 采用 2% 作为  $\Delta V_{CCV}$  的限定值。然而,在不同工况下,压路机型号、吨位、碾压工艺参数、填土种类都不尽相同,检测结果的精度不同,若采用上述两种规程的方法,以某一固定值作为稳定性指标的目标值,会在某些工况下导致控制标准过于严格或过于宽松。

在理想状态下,随着碾压遍数的增加,路基填筑层由松散向密实状态变化,理论上,在确保压路机能够将所填筑土体压实到规定密实度的前提下,当相邻两遍振动压实值差值为零时,路基结构的反力、压实状态和塑性变形都不再变化。然而,由于量测误差等不确定性因素的影响,即使填土的压实状态达到最大密实度,压路机前后两遍的压实值差值也无法为零。Facas N. W. 等对连续压实值的不确定性进行研究,认为不同填土性质、不同压路机、不同压实工艺参数都会对连续压实值的不确定性产生影响<sup>[20]</sup>。本文基于连续压实检测数据空间随机性变异程度的统计指标块金常数  $C_0$  (见图 9),提出适用于不同工况的稳定性目标值  $\Delta V_{CCV,Target}$ 。

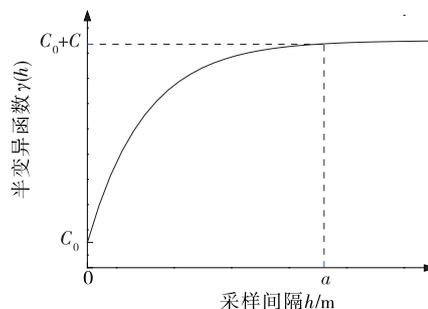


图 9 半变异函数模型

为了推导随机变异性指标块金常数  $C_0$  与稳定性目标值  $\Delta V_{CCV, Target}$  的数理关系,对块金常数  $C_0$  的数理意义进行分析。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [V_{CCV}(x_i) - V_{CCV}(x_i + h)]^2 \quad (9)$$

$$\gamma^*(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)] \quad (10)$$

式中: $N(h)$ 为采样间隔为  $h$  的点对数; $V_{CCV}(x_i)$ 为样本点  $x_i$  的属性值; $C$ 为偏基台值; $a$ 为变程。

当  $h$  趋近于零时, $N(h)$ 趋近于 1, $\gamma(h)$ 趋近于  $0.5[V_{CCV}(x) - V_{CCV}(x+h)]^2$ , $\exp(-h/a)$ 趋近于 1, $\gamma^*(h)$ 趋近于  $C_0$ 。令  $\gamma(h) = \gamma^*(h)$ ,则有  $C_0 = 0.5[V_{CCV}(x) - V_{CCV}(x+h)]^2$ 。定义  $\Delta V_{CCV}$  为同一位置检测值的差值, $\Delta V_{CCV} = V_{CCV}^k(x) - V_{CCV}^{k-1}(x)$ ,则有:

$$\Delta V_{CCV} = \sqrt{2C_0} \quad (11)$$

进一步推导  $\Delta V_{CCV, Target}$  与  $\Delta V_{CCV}$  和目标压实值  $V_{CCV, Target}$  间的数学关系,得:

$$\Delta V_{CCV, Target} = \frac{V_{CCV, Target}^k - V_{CCV, Target}^{k-1}}{V_{CCV, Target}^{k-1}} = \frac{\sqrt{2C_{0, Target}}}{V_{CCV, Target}} \quad (12)$$

通过在下卧层刚度均匀的试验段进行标定试验,得到连续压实目标值和块金常数目标值,代入式(12),即可求得稳定性目标值  $\Delta V_{CCV, Target}$ 。

## 4 结语

针对规范中路基压实质量评价方法的不足,从压实稳定性角度提出改进方法与新指标,主要工作与创新点如下:

(1) 针对地基层刚度变化较大时连续压实检测值不能有效评价填筑层压实质量的问题,在将点状分布的矢量连续压实值进行栅格化处理的基础上,采用压实单元的变化率作为压实稳定性指标评价填筑层土体的压实质量。

(2) 国内外相关规范都采用某一固定的百分比来限制前后两遍连续压实值的相对差值,未能根据不同工况下压实度检测结果的不确定性来控制压实标准。本文根据半变异函数模型中能够表征连续压实检测数据空间随机性变异程度的地统计指标块金常数  $C_0$  与连续压实变化率  $\Delta V_{CCV}$  的数学关系,提出在试验段进行标定试验得到连续压实目标值  $V_{CCV, Target}$  和块金常数目标值  $C_{0, Target}$  并据此反算稳定性目标值  $\Delta V_{CCV, Target}$  的方法,实现对路基连续

压实质量的评价。

## 参考文献:

- [1] 林彰银.雪峰山高速公路路基沉降施工技术及其质量控制研究[J].公路工程,2017,42(1):156-159+232.
- [2] 张洪亮,王秉纲.黄土路基压实标准研究[J].公路工程,2008,33(5):19-23.
- [3] 何漓江,刘祖德.室内击实试验与路基施工压实度控制问题探讨[J].中南公路工程,2001,26(3):80-82.
- [4] 孙青峰,黄雄立,郭听,等.路基压实度不足对路基路面结构性能影响试验研究[J].公路与汽运,2019(1):96-99+107.
- [5] 田利民.客运专线铁路路基压实标准与验收标准的探讨[J].铁道标准设计,2007,51(11):1-4.
- [6] 贾想,陆阳,刘小燕.路面结构动态模量反演[J].公路工程,2010,35(1):23-27.
- [7] 周进华,黄金荣,徐永福.宕渣路基压实质量检测方法研究[J].公路与汽运,2008(6):88-92.
- [8] VENNAPUSA P K R, WHITE D J, MORRIS M D. Geostatistical analysis for spatially referenced roller-integrated compaction measurements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 813-822.
- [9] WHITE D J, VENNAPUSA P K R, GIESELMAN H H. Field assessment and specification review for roller-integrated compaction monitoring technologies[J]. Advances in Civil Engineering, 2011, 2011: 1-15.
- [10] ADAM D. Roller-integrated continuous compaction control (CCC) technical contractual provisions & recommendations[C]//Design and Construction of Pavements and Rail Tracks: Geotechnical Aspects and Processed Materials, 2007: 120-148.
- [11] ANDEREGG R, KAUFMANN K. Intelligent compaction with vibratory rollers: Feedback control systems in automatic compaction and compaction control[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1868(1): 124-134.
- [12] RINEHART R V, MOONEY M A. Measurement depth of vibratory roller-measured soil stiffness[J]. Géotechnique, 2009, 59(7): 609-619.
- [13] 徐光辉.路基系统形成过程动态监控技术[D].成都:西南交通大学,2005.
- [14] THURNER H F, SANDSTRÖM A. Continuous compaction control, CCC[C]//European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, 2000: 237-246.

(下转第 80 页)

7 结论

(1) 天然气管道下穿高速公路时,路基沉降计算中,顶管施工时采用以空隙量为土体损失量的方法;定向钻施工时采用土体损失率法,土体损失率取3%~6%。

(2) 天然气管道下穿高速公路应设置地下通道(涵)或套管,如未设置保护套管,应对管道受力进行验算。

(3) 管道下穿高速公路应考虑高速公路远期扩建中堆载对管道振动、次生应力与位移的影响,埋深4 m内应考虑压路机压力与振动的影响。

(4) 为保障管道安全,建议管道下穿高速公路路基段采取水平线形穿越的方式,管道两端采用柔性接头。

(5) 采用水泥砂浆对管道与孔壁环空间隙内的泥浆进行置换,尽量减小土体损失率。

(6) 加强管道沿线标志与警示牌设置,防止道路施工时在管道浅埋段上方堆载。

参考文献:

[1] 广东省交通运输厅.广东省交通运输厅关于公路路政许可涉路施工质量和安全技术评价的管理办法:粤交[2020]1号[A].广州:广东省交通运输厅,2020.

[2] 安徽省公路管理局,安徽省公路路政总队,交通运输部公路科学研究所.涉路工程安全评价规范:DB 34/T 2395—2015[S].合肥:安徽省交通运输厅,2015.

[3] 云南省公路路政管理总队,云南省公路工程咨询有限公司,重庆蒙韬交通工程设计咨询有限公司.涉路项目工程技术评价规范:DB 53/T 2020—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[4] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG D20—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[5] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[6] 魏纲.盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J].岩土工程学报,2010,32(9):1354—1361.

[7] 周正峰,凌建明,梁斌,等.机坪输油管道荷载附加应力分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1219—1224+1262.

[8] 支喜兰,江晓霞,沙爱民.路面基层振动压实作用下的底基层应力[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(3):33—36.

[9] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学[M].北京:清华大学出版社,2022.

[10] 中华人民共和国机械工业部.动力机器基础设计规范:GB 50040—1996[S].北京:中国标准出版社,1996.

[11] 中国石油天然气股份有限公司管道分公司,中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司,中国石油天然气股份有限公司西部管道分公司,等.油气管道地质灾害风险管理技术规范:SY/T 6828—2011[S].北京:石油工业出版社,2011.

[12] 中国石油天然气集团公司.油气输送管道穿越工程设计规范:GB 50423—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[13] 中国石油天然气管道工程有限公司,中国石油天然气管道局穿越分公司,中国石油天然气管道科学研究院.油气输送管道工程水平定向钻穿越设计规范:SY/T 6968—2013[S].北京:石油工业出版社,2013.

[14] 中国石油天然气集团公司.输气管道工程设计规范:GB 50251—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.

收稿日期:2022-05-24

(上接第70页)

[15] 张青哲.土基振动压实系统模型与参数研究[D].西安:长安大学,2010.

[16] MOONEY M A, RINEHART R V, FACAS N W, et al. Intelligent soil compaction systems[R]. NCHRP Report 676, 2010.

[17] KRÖBER W, FLOSS R, WALLRATH W. Dynamic soil stiffness as quality criterion for soil compaction[C]//Geotechnics for Roads, Rail Tracks, and Earth Structures, 2001:188—199.

[18] MOONEY M A, ADAM D. Vibratory roller integrated

measurement of earthwork compaction: An overview[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2007.

[19] 西南交通大学.铁路路基填筑工程连续压实控制技术规程:TB 10108—2011[S].北京:中国铁道出版社,2011.

[20] FACAS N W, MOONEY M A. Characterizing the precision uncertainty in vibratory roller measurement values[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(1):43—51.

收稿日期:2022-05-20