

文章编号:1673-2049(2017)02-0041-07

# 冲击碾压法快速处置粉土路基的应用研究

宋修广<sup>1,2</sup>, 李进<sup>1,2</sup>, 于一凡<sup>1,2</sup>, 李新蔚<sup>3</sup>, 张宏博<sup>1,2</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 3. 齐鲁发展集团济南—东营高速公路建设指挥办公室, 山东 济南 250001)

**摘要:**针对黄河冲积平原区粉土路基填料受含水率影响较大、难以晾晒、普通碾压技术难以压实、生产效率低的特点,选择冲击碾压法对路基分层填筑施工。通过调整路基分层填筑厚度和压实遍数进行现场冲击碾压试验,检测路基表面沉降量、峰谷高差、压实度及路基承载力,并对比分析了3种不同虚铺厚度粉土路基的冲击压实效果。结果表明:表层土体压实度达到或超过93%后,压实度增长曲线出现拐点,继续碾压对提高土体压实效果影响越来越小,较难使层底土体压实度达到96%;路基填料允许的含水率 $\omega$ 范围为 $\omega_{\text{opt}} - 4\% \leq \omega \leq \omega_{\text{opt}} + 4\%$  ( $\omega_{\text{opt}}$ 为最佳含水率);推荐的最佳虚铺厚度为0.8 m,最适宜冲击碾压遍数为20,最佳碾压速度为10~12 km·h<sup>-1</sup>;建议把沉降量和峰谷高差作为检测压实效果的辅助指标。

**关键词:**冲击碾压;粉土路基;虚铺厚度;含水率;压实度

**中图分类号:** TU472 **文献标志码:** A

## Application Study of Impact Roller Compaction Method to Strengthen Silt Subgrade

SONG Xiu-guang<sup>1,2</sup>, LI Jin<sup>1,2</sup>, YU Yi-fan<sup>1,2</sup>, LI Xin-wei<sup>3</sup>, ZHANG Hong-bo<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Qilu Development Group Jinan-Dongying Highway Construction Command Office, Jinan 250001, Shandong, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the Yellow River alluvial plain silt subgrade filling including influence by moisture content, difficult to dry, difficult to compact with ordinary rolling technology, and low production efficiency, the impact roller compaction method was chosen in construction. Through adjusting the subgrade layer thickness and compaction pass number, the impact roller compaction test was conducted to detect the surface settlement, peak valley depth, compaction degree and bearing capacity of subgrade. The impact compression effects of three virtual thickness silt subgrades were compared and analyzed. The results show that compaction degree curve appears inflection point when compaction degree of surface soil reaches or exceeds 93%, and the effect of continue rolling on improving compression degree of soil is getting smaller, then it's difficult to improve compaction degree of bottom soil up to 96%. The allowed moisture content  $\omega$  of subgrade filling can be controlled within  $\omega_{\text{opt}} - 4\% \leq \omega \leq \omega_{\text{opt}} + 4\%$  ( $\omega_{\text{opt}}$  is optimum moisture content). The recommend silt virtual paving thickness is 0.8 m, the optimal rolling pass number is 20, the optimal rolling speeds are 10-12 km·h<sup>-1</sup>. The surface settlement

收稿日期:2016-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41372300)

作者简介:宋修广(1966-),男,山东威海人,教授,工学博士,博士后,E-mail:songxiuguang@sdu.edu.cn.

and peak valley depth should be taking as auxiliary indexes to evaluate the compaction effect.

**Key words:** impact roller compaction; silt subgrade; virtual paving thickness; water content; compaction degree

0 引言

冲击压实设备的研究最早可追溯到 19 世纪 80 年代,在美国、南非、瑞典等国专家几十年研究的基础上,1980 年南非学者 Jacobus 提出比较成熟的冲击压路机方案。冲击压实是以低频大振幅周期性地冲击地面,并辅以滚压、揉压以影响土层深处,使土体密度提高,孔隙减小,形成更加稳定的结构<sup>[1-4]</sup>。中国 1996 年开始试制第一台冲击压路机,目前已有十余家企业生产或试制成功<sup>[5]</sup>。在中国,公路施工中冲击压实法主要用于湿软性黄土地基的冲击碾压处理<sup>[6-8]</sup>、路基尤其是填石路堤等的分层填筑碾压<sup>[9]</sup>、旧沥青路及水泥路的冲击碾压<sup>[10-12]</sup>。徐超等<sup>[13]</sup>进行了冲击碾压消除浅层粉土地基液化的研究,得到了冲击碾压法消除浅层粉土地基液化的施工工艺。马万权等<sup>[14]</sup>进行了冲击碾压处理含砂低液限粉土路基的现场试验,确定采用沉降与面波法对冲压质量进行评价。宋荣方等<sup>[15]</sup>进行了冲击碾压法处理湿陷性黄土路基的现场试验,通过分层填筑填料压实度和沉降量分析压实效果。

已有成果对冲击碾压法用于不同路基填料的压实效果进行了研究,得出了相应地区的施工工艺参数,而对于黄河冲积平原区粉土路基的施工工艺研究较少,需要进一步研究。山东省济东(济南—东营)高速公路经过济南、滨州等粉土地区,取土场含

水率高,晾晒时间长,有效施工期短,传统压实技术难以满足工程要求,本文结合济东高速路基施工,借鉴冲击碾压处置其他类路基的工程经验,对冲击碾压法处置粉土路基效果进行研究。本文研究成果对该地区粉土路基冲击碾压施工工艺参数的确定具有良好的参考价值。

1 工程概况

济东高速为双向四车道高速公路,设计车速为 120 km·h<sup>-1</sup>,地貌主要为黄河冲积平原,岩性以粉土、粉质黏土为主。粉土颗粒表面磨圆度高,粒径均匀,粒间孔隙率高,并缺乏黏土细颗粒的填充,使得该类土难以压实;由于粉粒含量较高,颗粒级配不良,会表现出较为显著的毛细现象、抗冲刷能力差等不良工程现象,因此粉土作为路基填料时使用传统压实方法较难压实。济东高速路基基本为填方路基,试验场地选在具有代表性的二标济阳某段,该段填土高度约为 4 m,路基顶宽为 28 m,边坡坡度为 1:1.5。

根据冲击碾压法的施工特点,试验区布置为长条形,长 100 m,宽 40 m。路基分层填筑时,试验段虚铺厚度  $H$  按 1,0.8,0.6 m 进行分层填筑。

试验区路基填料物理力学性质指标见表 1,颗粒大小分配曲线见图 1,最大干密度为 1.81 g·cm<sup>-3</sup>,最佳含水率为 14.5%。

表 1 路基填料物理力学指标

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters of Subgrade Filling

液限 $W_L$ /%	塑限 $W_P$ /%	塑性指数 $I_P$	颗粒所占比例/%			不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
			粒径为 0.25~0.075 mm 的砂粒	粒径为 0.075~0.005 mm 的粉粒	粒径小于 0.005 mm 的黏粒		
30.32	21.37	8.95	0.6	80.0	19.4	11	1.84

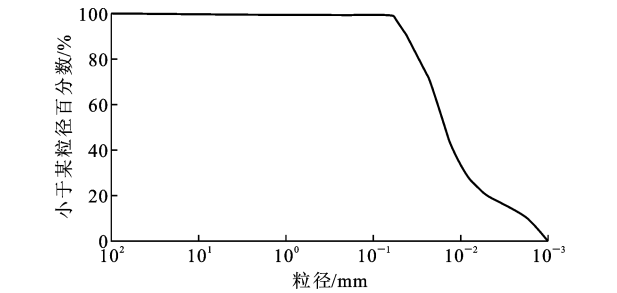


图 1 路基填料颗粒大小分配曲线

Fig. 1 Particle Size Distribution Curve of Subgrade Filling

2 现场试验方案

试验选定 YCT-25kJ 三角形压实机,两冲击轮之间外部宽度为 296 cm,轮宽 90 cm,轮隙宽度 116 cm。冲击压路机周期性地冲击地面,在凸行轮的作用下形成峰谷,峰谷影响冲击压路机行驶,每冲击碾压 5 遍后用刮平机刮平。冲击碾压采用来回错轮的方式,下一圈碾压时冲击压路机外侧轮从上一圈两轮之间通过,轮迹之间不重叠,为保证下一遍碾压时

整个试验场地不漏压,下一遍碾压时采用错轮碾压,纵向错轮碾压时下一遍碾压时的波谷为上一遍的波峰位置,横向错轮碾压时下一遍碾压时外侧冲击轮向内错轮约 20 cm,横向错轮不重叠碾压,直至到达路基另一边,完成路基的横向碾压。通过纵向、横向分别错轮,保证路基受到均匀冲击压实,不出现漏冲或过冲现象,错轮碾压见图 2。冲压时,借鉴已有工程经验,共冲击碾压 20 遍,若碾压质量不满足设计要求,再适当增加碾压遍数;初期试验时控制路基填料含水率  $\omega$  的范围为  $\omega_{\text{opt}} - 4\% \leq \omega \leq \omega_{\text{opt}} + 2\%$  ( $\omega_{\text{opt}}$  为最佳含水率),由于路基填方量较大,含水率以碾压后实测值为准;碾压速度控制在  $10 \sim 12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间。冲击碾压过程中,对每层冲压前和冲压第 5, 10, 15, 20 遍后路基表面沉降量、峰谷高差、压实度等进行检测,试验中还进行轻型圆锥动力触探、静力触探试验。

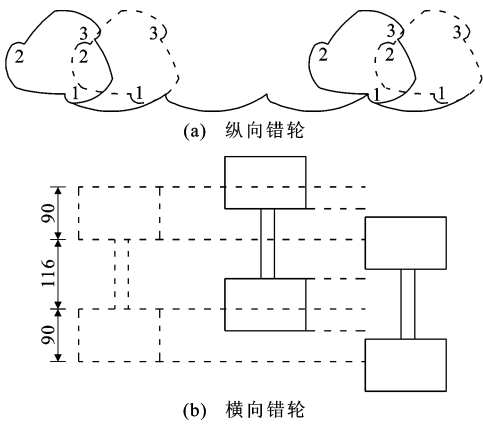


图 2 冲击压实错轮碾压方案(单位:cm)  
Fig. 2 Impact Compaction Wheel Rolling Solutions (Unit:cm)

在试验区路基表面按照  $25 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  的网格布置沉降观测点,观测点数量为 20 个。峰谷高差为冲击轮相邻波峰与波谷差值,随机选取 40 个测点。轻型圆锥动力触探试验随机选取 20 个测点;在试验区静力触探试验选 2 个测点进行,2 个测点距离约为 10 cm。分层填筑路基进行压实度检测时,每层选取 3 个测点,每个测点的竖向检测位置在层顶、中间、层底。

3 试验结果与分析

3.1 压实度试验结果分析

冲击碾压过程中,每层的中间、层底深度是变化的,为便于统计,分别用 0,  $H/2$ ,  $H$  表示测点层顶、中间和层底的深度。

3.1.1 含水率检测结果分析

不同碾压遍数和不同深度处土体的含水率如表 2~4 所示。

表 2 不同碾压遍数后的含水率(虚铺厚度 1 m)

Tab. 2 Water Contents After Different Rolling Pass Number (Virtual Paving Thickness Is 1 m)

深度/m	不同碾压遍数后的含水率/%					
	0	5	10	15	20	25
0.0	16.64	15.32	15.24	16.15	14.63	13.07
0.5	14.44	13.01	14.08	15.21	10.91	11.21
1.0	11.83	15.26	12.30	13.11	10.50	10.56
平均值	14.31	14.53	13.87	14.82	12.01	11.61

表 3 不同碾压遍数后的含水率(虚铺厚度 0.8 m)

Tab. 3 Water Contents After Different Rolling Pass Number (Virtual Paving Thickness Is 0.8 m)

深度/m	不同碾压遍数后的含水率/%				
	0	5	10	15	20
0.0	14.72	17.16	16.34	16.56	18.89
0.4	18.01	16.39	13.94	17.84	19.03
0.8	18.90	19.35	16.70	16.91	19.06
平均值	17.21	17.64	15.66	17.11	19.00

表 4 不同碾压遍数后的含水率(虚铺厚度 0.6 m)

Tab. 4 Water Contents After Different Rolling Pass Number (Virtual Paving Thickness Is 0.6 m)

深度/m	不同碾压遍数后的含水率/%				
	0	5	10	15	20
0.0	12.31	18.02	16.41	16.67	19.73
0.3	14.01	18.68	14.72	13.74	18.51
0.6	19.61	18.87	17.85	17.44	18.69
平均值	15.31	18.52	16.33	15.95	18.98

由表 2~4 可以看出,路基不同深度处土体含水率随碾压遍数的增加无明显变化规律,不同碾压遍数下含水率沿深度方向无明显变化规律。结合施工现场分析原因,虚铺厚度 1 m 施工正值 5 月份,蒸发作用显著,碾压第 10 遍后遭遇降雨,土体含水率增大,继续碾压,含水率降低明显,故高温季节施工时,应及时洒水,使土体含水率保持在合理的范围内;虚铺厚度 0.8 m 施工正值 12 月份,含水率整体较大,经试压未发现翻浆现象,碾压第 10 遍后遭遇降雪,土体含水率增大,碾压 20 遍后,经检测压实度符合设计要求;虚铺厚度 0.6 m 施工正值 12 月份,局部土体含水率比最佳含水率高 5.1%,碾压最后 5 遍时局部出现了翻浆现象,对翻浆区域换填,采用振动压路机分层压实。同时为保证压实效果,每次在不同位置检测含水率,导致土体含水率在碾压遍数增

加时变化较大,离散性明显。

用平均值表示每碾压 5 遍后土体的整体含水率,平均含水率与碾压遍数关系曲线见图 3。

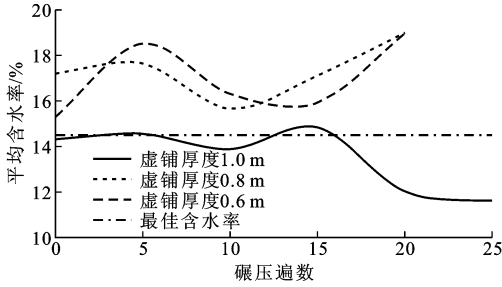


图 3 平均含水率与碾压遍数关系曲线

Fig. 3 Relation Curves of Average Water Content and Rolling Pass Number

由图 3 可知,土体含水率随着碾压遍数的增加呈显不同的变化趋势,这主要是因为受天气因素和冲击碾压作用的影响。两冲击点间土体由于冲剪作用发生剪切破坏,形成破坏面。冲击碾压产生的冲击能远远大于普通振动压路机压实功,冲击作用下含水率较大的土体孔隙水被排除,孔隙水受挤压后沿破坏面移动,使土体上下层含水率趋于均匀。由图 3 还可知,土体含水率变化范围上限约为  $\omega_{opt} + 4\%$ ,经试验验证,路基冲击碾压后,压实质量满足设计要求。

3.1.2 压实度检测结果分析

根据试验方案设计,取每层 6 个监测点压实度的平均值表示该层压实度,碾压遍数与压实度的关系曲线如图 4~6 所示。

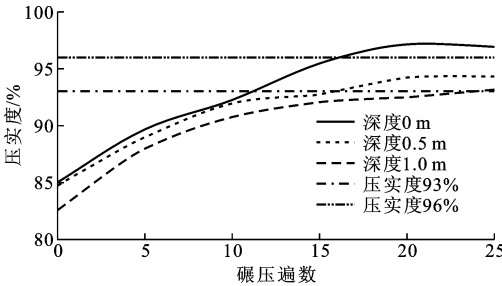


图 4 压实度与碾压遍数关系曲线(虚铺厚度 1 m)

Fig. 4 Relation Curves of Compaction Degree and Rolling Pass Number (Virtual Paving Thickness Is 1 m)

由图 4~6 可知,不同深度处土体压实度随着碾压遍数的增加逐渐增大,前 10 遍碾压土体压实度提高显著,最后 5 遍碾压土体压实度增加不明显,表层局部土体出现压实度降低现象。分析原因可知,表层土体压实度达到或超过 93%后,不同深度处土体压实度曲线出现拐点,继续碾压对提高土体压实度

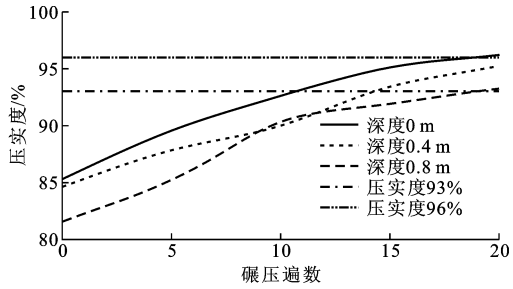


图 5 压实度与碾压遍数关系曲线(虚铺厚度 0.8 m)

Fig. 5 Relation Curves of Compaction Degree and Rolling Pass Number (Virtual Paving Thickness Is 0.8 m)

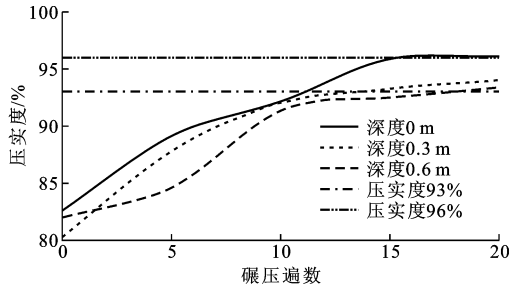


图 6 压实度与碾压遍数关系曲线(虚铺厚度 0.6 m)

Fig. 6 Relation Curves of Compaction Degree and Rolling Pass Number (Virtual Paving Thickness Is 0.6 m)

效果越来越小,在层底土体压实度达到 93%后,层底土体压实度曲线接近水平,上层土体压实度增加较小甚至出现下降趋势。因此,层底土体压实度达到 93%后,增加碾压遍数对提高层底土体压实效果的影响有限,施工效率降低,经济性下降。根据规范要求,路床区压实度要在 96%以上,路堤区要在 93%以上,考虑经济性和施工效率,冲击碾压法处置粉土填土路基时不适宜路床区施工,宜用于路堤区施工。

根据层底填料压实度要求,采用线性插值法可粗略得出满足压实要求的碾压遍数。由图 4~6 还可知,虚铺厚度 1,0.8,0.6 m 对应的碾压遍数分别为 24,19,17 遍。

为提高施工效率和经济性,有必要确定最佳虚铺厚度。对于不同虚铺厚度,作用在单位面积上的压实功不同,单位面积压实功小,表明虚铺厚度较好,可从功的角度确定最佳虚铺厚度。假定冲击能量只作用在新填筑土体上,冲击轮冲击路面简化为冲击轮宽,可按下式计算不同虚铺厚度时单位面积压实功  $W_a$ 。

$$W_a = \frac{NE}{HL} \tag{1}$$

式中: $N$  为冲击碾压遍数; $E$  为单次冲击能量,YCT-

25 kJ 三边形压实机以正常的工作速度  $10 \sim 12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  工作时,取值为 25 kJ;  $L$  为冲击轮的宽度, YCT-25 kJ 三边形压实机以正常工作速度工作时,取值为 1.8 m。

根据公式(1)计算单位面积压实功,绘制单位面积压实功和虚铺厚度的关系曲线,见图 7。

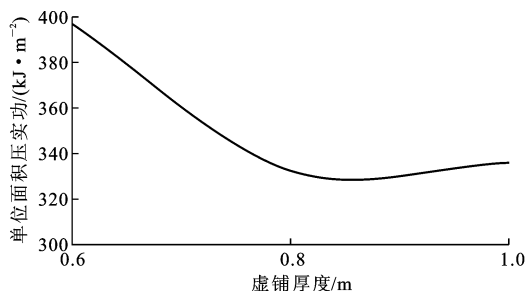


图7 单位面积压实功与虚铺厚度关系曲线

Fig. 7 Relation Curve of Compaction Energy Per Unit Area and Virtual Paving Thickness

由图 7 可知,单位面积压实功与虚铺厚度之间呈抛物线关系。虚铺厚度小于 0.8 m 时,单位面积压实功随虚铺厚度的增加而减小,虚铺厚度大于 0.8 m 时,单位面积压实功随虚铺厚度的增加而增大,这说明虚铺厚度为 0.8 m 时,压实效率高且经济,最适宜的虚铺厚度应为 0.8 m。

### 3.2 沉降量检测结果分析

每碾压 5 遍后对沉降量观测点的标高进行测量,将每碾压 5 遍沉降量和总沉降量取算数平均值。绘制累计沉降量与碾压遍数关系曲线,见图 8,相对沉降量与碾压遍数关系曲线见图 9。

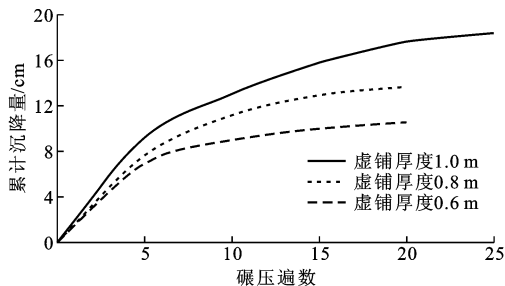


图8 累计沉降量与碾压遍数关系曲线

Fig. 8 Relation Curves of Cumulative Settlement and Rolling Pass Number

由图 8 可知:累计沉降量随着碾压遍数的增加逐渐增大,且增长速度逐渐变缓;前 5 遍内曲线较陡,沉降量增长较快,可以看做快速沉降期,增加碾压遍数时,曲线变得平缓,此时土体变形处于过渡期,碾压最后 5 遍时曲线逐渐接近水平,沉降量变化较小,说明土体趋向密实,土体处于稳定阶段。分析

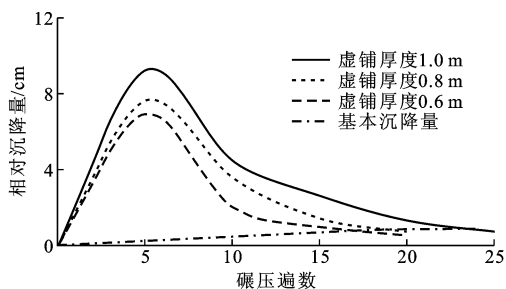


图9 相对沉降量与碾压遍数关系曲线

Fig. 9 Relation Curves of Relative Settlement and Rolling Pass Number

原因可知,路基填筑后即进行冲击碾压试验,虚铺路基填土空隙较大,因而累计沉降量增长速度较快;碾压中期路基填土逐渐密实,空隙减小,累计沉降量增速变缓;碾压后期土体趋向密实,累计沉降量基本不再增加。冲击碾压处置分层填筑路基时,土体变形可分为 3 个阶段,即快速沉降期、过渡期、稳定期。

由图 9 可知,每碾压 5 遍相对沉降量曲线的变化趋势较好地对应了土体变形的 3 个阶段。填料虚铺厚度 1.0、0.8、0.6 m 时,碾压前 5 遍、最后 5 遍时,相对沉降量占总沉降量分别为 51.2%、4.2%、55.9%、5.4%、65.8%、5.2%。前 5 遍相对沉降量占总沉降量的一半左右,此时土体处于快速沉降期,最后 5 遍的相对沉降量占总沉降量的 5% 左右,表明填料处于稳定期。基本沉降量是满足压实效果的最少碾压遍数与相对沉降量曲线交点间的连线。基本沉降量曲线基本为直线,说明满足压实效果时最少碾压遍数最后几遍的相对沉降量与不同虚铺厚度呈正相关,即不同虚铺厚度下支撑层土体的变化是一致的。

填土路基虚铺厚度为 0.6~1 m,通过沉降量控制压实效果时,支撑层土体变化不予考虑,认为沉降量主要发生在压实层。建立累计沉降量与碾压遍数和虚铺厚度之间的数学关系来分析土体压实效果(沉降量)。由 MATLAB 插值法得

$$S = NH(15N^2 - 980N + 22\ 200) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: $S$  为累计沉降量。

碾压最后 10 遍时计算得累计沉降量与实测沉降量的相对误差最大为 4.03%,可满足工程计算需要。压实效果满足规范要求的土体处于稳定期且最后 5 遍的沉降量增量不超过总沉降量的 5%,此时所对应的碾压遍数即为有效压实遍数。

### 3.3 峰谷高差检测结果分析

每碾压 5 遍的峰谷高差取碾压完后的算数平均值。峰谷高差和碾压遍数变化曲线见图 10。由图

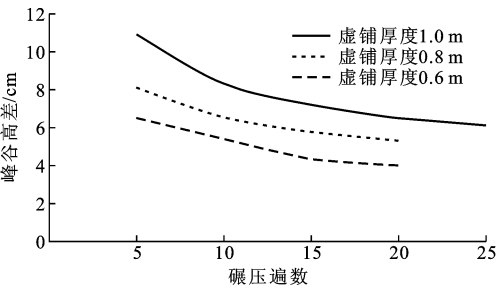


图 10 峰谷高差与碾压遍数关系曲线

Fig. 10 Relation Curves of Peak Valley Depth and Rolling Pass Number

10 可知,同一虚铺厚度时,峰谷高差随着碾压遍数的增加而减小,速率逐渐减小至曲线接近水平。填料虚铺厚度 1,0.8,0.6 m 时,最后 5 遍碾压完后的峰谷高差分别为 6.1,5.3,4 cm,相对峰谷高差为 0.4,0.48,0.35 cm,均小于最后 5 遍碾压完后峰谷高差的 10%。这说明随着碾压遍数的增加,土体压实度逐渐增大,抵抗变形的能力增强。碾压遍数相同时,峰谷高差与虚铺厚度呈正相关。峰谷高差反映了填料的压实效果。峰谷高差曲线最终接近水平,相对峰谷高差可作为控制压实效果的辅助指标。由 MATLAB 插值法得

$$D=H(1.37N^2-64N+1\ 350)\times 10^{-4} \quad (3)$$

式中: $D$  为峰谷高差。

计算得路基虚铺厚度 1,0.8,0.6 m 时,最后 5 遍碾压完后的相对峰谷高差分别为 0.12,0.64,0.48 cm。可以最后 5 遍碾压完后相对峰谷高差  $\Delta L_5=L_n-L_{n-5}$  不超过  $L_{n-5}$  的 10% 作为检测土体压实效果的辅助指标。

3.4 承载力检测结果分析

由于试验仪器到场时间的原因,虚铺厚度 1 m 进行轻型圆锥动力触探试验,虚铺厚度 0.8 m 和 0.6 m 进行静力触探试验。

3.4.1 轻型圆锥动力触探试验

虚铺厚度 1 m 时的碾压遍数和锤击平均次数关系曲线见图 11。

由图 11 可知,锤击平均次数随碾压遍数的增加逐渐增大,碾压 25 遍后的锤击平均次数比未碾压前提高 2.2 倍。碾压 15 遍后锤击平均次数的增速随着碾压遍数的增加逐渐减小,可见前 15 遍碾压冲击压实对提高锤击平均次数已有显著效果。

3.4.2 静力触探试验

采用手摇式静力触探仪,触探深度以触探仪受反力松动为止。不同虚铺厚度时土体静力触探比贯入阻力曲线见图 12。

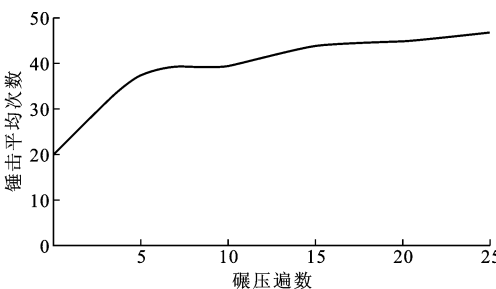


图 11 锤击平均次数与碾压遍数关系曲线

Fig. 11 Relation Curve of Hammer Average Number and Rolling Pass Number

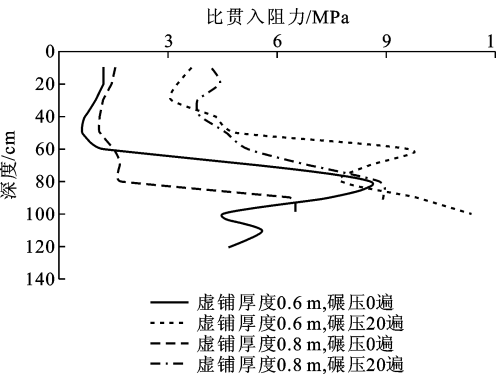


图 12 不同虚铺厚度时的比贯入阻力曲线

Fig. 12 Specific Penetration Resistance Curves with Different Virtual Paving Thicknesses

由图 12 可知,碾压 20 遍后,比贯入阻力比碾压前明显增加,增幅达到 300%。随着碾压遍数的增加,虚铺土体间孔隙率减小,综合考虑冲击碾压 20 遍时的沉降量,可以看出虚铺厚度以下土体压实度有所增加,但增幅不大。

4 结 语

(1)针对黄河冲积平原区粉土路基,冲击碾压能显著提高路基的承载力和压实度,填料充分压缩,且使用填料的含水率范围较大,与普通压路机相比有明显优势。

(2)表层土体压实度达到或超过 93% 后,不同深度处土体压实度曲线出现拐点,继续碾压对提高土体压实效果越来越小,较难使下层土体压实度达到 96%。考虑经济性和施工效率,冲击碾压法处置粉土路基时不适宜用于路床区,宜用于路堤区。

(3)推荐适用于黄河冲积平原区冲击碾压法处置粉土路基的工艺参数为:最佳虚铺厚度 0.8 m,最适宜冲击碾压遍数为 20 遍,填料允许的含水率范围可扩大为  $\omega_{opt}-4\%\leq\omega\leq\omega_{opt}+4\%$ ,最佳碾压速度为  $10\sim 12\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

(4)根据现场试验,建议以最后5遍碾压的沉降量增量不超过总沉降量的5%和相对峰谷高差不超过峰谷高差的5%作为检测压实效果的辅助指标。

(5)黄河冲积平原区冲击碾压法处置粉土路基时最佳虚铺厚度和碾压速度远超普通压路机,施工效率高,对于指导黄河冲积平原区粉土路基施工有实际意义。

## 参考文献:

## References:

- [1] 贺杰. 夯的发展——冲击压路机[J]. 交通世界, 2002(7):46-49.  
HE Jie. The Development of the Ram — Impact Roller[J]. Transpworld, 2002(7):46-49.
- [2] 杨世基. 冲击压实技术在路基工程中的应用[J]. 公路, 1999(7):1-5.  
YANG Shi-ji. The Application of Impact Compaction Technology in Subgrade Engineering[J]. Highway, 1999(7):1-5.
- [3] 高瑞芳. 冲击压路机对路基进行压实[J]. 中国新技术新产品, 2011(20):43.  
GAO Rui-fang. To Use the Impact Roller to Compact on Embankment[J]. China Technologies and New Products, 2011(20):43.
- [4] 娄国充. 冲击压实技术处理高速公路湿陷性地基的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7):1207-1210.  
LOU Guo-chong. Application of Impact Compaction Technology in Highway Embankment of Collapsible Loess Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7):1207-1210.
- [5] 贺杰, 张润利, 逢宏波, 等. 冲击压路机的发展趋势[J]. 工程机械, 2002(2):35-37.  
HE Jie, ZHANG Run-li, PANG Hong-bo, et al. Developing Trend of Impact Compactors[J]. Construction Machinery and Equipment, 2002(2):35-37.
- [6] 王吉利, 刘怡林, 沈兴付, 等. 冲击碾压法处理黄土地基的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5):755-758.  
WANG Ji-li, LIU Yi-lin, SHEN Xing-fu, et al. Experimental Investigation on Treatment of Loess Subgrade with Impaction and Grind Method (IGM) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5):755-758.
- [7] 刘晓峰, 白亮. 山西省运城地区湿陷性黄土地基处理[J]. 公路, 2012(5):73-78.  
LIU Xiao-feng, BAI Liang. The Foundation Treatment of Collapsible Loess in Shanxi Yuncheng Areas [J]. Highway, 2012(5):73-78.

- [8] CLIFFORD J M. Impact Rolling and Construction Techniques[C]//ARRB. Proceedings of ARRB Conference. Melbourne:ARRB, 1976:21-29.
- [9] 路立龙. 关于山区高速公路填石路路施工技术的探讨[J]. 公路, 2013(4):129-130.  
LU Li-long. The Discussion About Mountain Area Highway Construction Technique of the Rock Fill Embankment[J]. Highway, 2013(4):129-130.
- [10] 胡昌斌, 阙云. 冲击碾压改建旧水泥混凝土路面施工时的地基振动特性[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11):124-130.  
HU Chang-bin, QUE Yun. Subgrade Vibration Characteristics During PCC Pavement Rehabilitation with Impact Roller[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11):124-130.
- [11] 胡昌斌, 袁燕. 冲击碾压改建路面施工对路基动力作用的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):745-752.  
HU Chang-bin, YUAN Yan. Dynamic Soil Pressure Characteristics of Embankment Under Impact Rolling Load During Rehabilitation of PCCP [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):745-752.
- [12] MAHBOUB K C, LIU Y H, ALLEN D L. Asphalt Overlay and Subsurface Drainage of Broken and Sealed Concrete Pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(8):617-622.
- [13] 徐超, 陈忠清, 叶观宝, 等. 冲击碾压法处理粉土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2):389-392, 400.  
XU Chao, CHEN Zhong-qing, YE Guan-bao, et al. Experimental Research on Ground Improvement of Silt Using Impact Roller Compaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2):389-392, 400.
- [14] 马万权, 沈康鉴, 李海平, 等. 含砂低液限粉土路基冲击压实技术研究[J]. 公路, 2008(2):130-132.  
MA Wan-quan, SHEN Kang-jian, LI Hai-ping, et al. Study on Impact Compaction Technique for Subgrade with Sand Silt of Low Liquid Limit[J]. Highway, 2008(2):130-132.
- [15] 宋荣方, 张东岭. 冲击碾压技术在湿软性黄土路基处理中的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(12):284-287.  
SONG Rong-fang, ZHANG Dong-ling. Experiment Study on Impact Roller Compaction Technology Treatment in Subgrade of Wetness and Softness Loess[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(12):284-287.