

高填方路堤强夯效果的现场检测及三维有限元模拟^{*}

徐平^① 乐金朝^① 刘忠玉^② 马清文^①

(^①郑州大学交通运输工程系 郑州 450002)

(^②郑州大学土木工程学院 郑州 450002)

摘要 针对河南某岩石碎渣高填方路堤,提出了夯击能 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、虚铺厚度 1.5m 的强夯施工工艺,对试验段进行了现场检测:地质雷达波形较好地反映强夯后虚铺层厚度的减小幅度,并可判断强夯水平有效加固范围为 4m ,瑞利波速沿深度变化比较均匀,平均值达到了 $310\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,重型动力触探结果表明试验段达到中密程度,灌水法测得的固体体积率都达到了 83% 以上,上述检测结果说明强夯的加固效果比较理想。采用 ABAQUS 有限元分析软件,将夯锤简化为刚性体,通过施加竖向初速度的方式模拟了强夯作用,结合雷达测试结果,认为夯沉量 20mm 可作为强夯的有效加固范围,最后模拟了存在涵洞结构物的路堤的强夯作用,指出涵洞上方路堤厚度必须达到 8m 以上,才能保证强夯安全作业。

关键词 强夯 高填方路堤 现场检测 有效加固范围 涵洞 有限元模拟

中图分类号: TU435 文献标识码: A

IN - SITU TEST AND THREE - DIMENSIONAL FEM ANALYSIS OF DYNAMIC COMPACTION EFFECT OF THICK FILL EMBANKMENT

XU Ping^① YUE Jinchao^① LIU Zhongyu^② MA Qingwen^①

(^①Department of Transportation Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002)

(^②School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002)

Abstract One Thick fill embankment was composed of broken rocks in Henan province. It was taken as an engineering example in this paper. A construction technology of dynamic compaction with energy of $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ and loose layer of 1.5m depth was put forward. In - situ tests were done at some segments. The loose layers turn dense after having been compacted and the horizontal efficient compaction range was 4m and was displayed from the ground radar wave shape. Rayleigh waves change little in the depth and the averaged value is $310\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. The segments have middle density judged with the heavy dynamic penetration tests results. The solid volume ratios tested with water replacement method were all above 83% . So, an important conclusion was obtained that the segments after having been dynamically compacted can have better compaction effect. The FEM software of ABAQUS was adopted. The dynamic compaction was simulated by taking the pounder as a rigid body and assigning the pounder with a vertical initial velocity. The efficient compaction range can be judged by the settlement of 20mm according to the conclusion from ground radar. Finally, dynamic compaction on the embankment with a buried culvert was simulated, which reveals that the depth of embankment upper culvert must be larger than 8m for safe dynamic compaction.

* 收稿日期: 2008 - 01 - 24;收到修改稿日期: 2008 - 05 - 13.

第一作者简介: 徐平, 主要从事岩土动力学方面研究. Email: plian127@163.com

Key words Dynamic compaction, Thick fill embankment, In-situ test, Culvert, FEM simulation, Radar wave, Rayleigh wave

1 引言

在山区修建高速公路,必须进行高填深挖,为了降低填料运输成本,通常以开挖路堑和隧道的废弃岩石碎渣作为填料来修筑路堤,该类路堤的施工工艺将直接影响高速公路的质量。目前国内一般采用强夯来加固高填方路堤,不少专家和学者已对强夯路堤或地基进行了理论分析和试验研究^[1-3]。

强夯法用于处理粗粒土或低饱和度的细粒土地基时,一般称为动力压密法,用于处理高饱和度的细粒土地基,特别是淤泥、淤泥质粘土和泥炭土等软土时,一般称为动力固结法。对于由废弃岩石碎渣填筑的高填方路堤,则属于动力压密法。当夯击反复进行时,固体颗粒相互靠拢,不断挤密,由紊乱状态进入稳定状态,孔隙大小变得比较均匀,压实度得到提高。强夯法是一种动力接触问题,而且属于大变形非线性,通常采用有限单元法进行数值模拟^[4-8]。

本文以河南某段高速公路为工程实例,提出强夯施工工艺,并进行地质雷达、瑞利波、重型动力触探和固体体积率的现场测试,检测了强夯加固效果,最后采用 ABAQUS 有限元软件对强夯作用进行了模拟。

2 强夯施工工艺及检测与评价手段

2.1 强夯施工工艺

河南某段高速公路的路堤施工段距离最近的料场有几十公里,出于降低工程造价的考虑,选用填筑岩石碎渣、分层进行强夯的施工工艺。夯点按正三角形布置,间距为 3.0m,夯锤的底面半径为 1.0m,重量为 10t,落距为 10m,采用的夯击能为 1000 kN·m。

为了确保路堤的填筑质量,要求:(1)路床顶 2m 以下的填料的粒径不得大于 50cm,路床顶 0.5~2.0m 范围内的粒径不得大于 30cm,大颗粒要剔除或进行二次破碎;(2)每个夯点都根据最后两击的平均夯沉量不大于 3.5cm 及最后两击每击夯沉量不大于 5cm 的双重指标进行控制;(3)当一层全部夯完后,用推土机推平,并使用振动压路机强振

6 遍压实之后,才能铺下一层(厚为 0.5~1.5m),虚铺层的夯点与夯实层呈交错布置,夯点正好位于夯实层夯点正三角形的形心之上。

2.2 雷达测试

由于重锤的集中作用,强夯只能对一定范围内的路堤起到压实作用。因此,研究强夯的有效加固范围有利于对施工方案(特别是夯击点的布置)及时地进行调整,使其更加合理、完善。

虚铺层和夯实层之间存在明显的界面,利用地质雷达波在界面上的反射脉冲原理,可以真实、可靠地探测出一定深度内由于强夯而引起的土体结构的密实状况,并可进一步判断强夯的有效加固范围。

选用 100MHz 天线的地质雷达对强夯段同一夯坑进行了测试(图 1)。

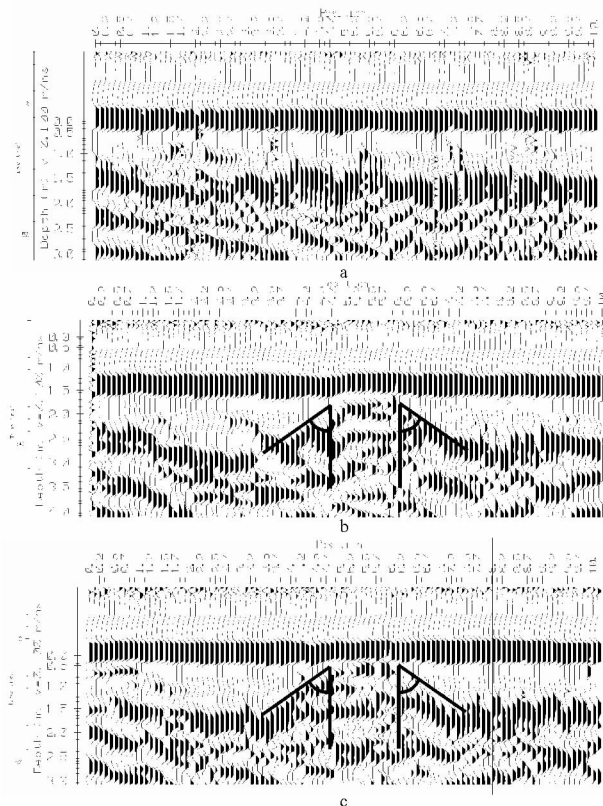


图 1 同一夯坑附近的雷达波形

Fig. 1 Radar wave shape around the same pit
a. 夯击前; b. 5 击后; c. 9 击后

从图 1a 可以看出,雷达波形的层状结构非常明

显,图中反映的虚铺层厚度(最上面两层脉冲波之间的距离)为1.5m,与实际情况完全相符;从图1b、1c可以明显地看出,夯坑范围内的虚铺层被击密,厚度减小,另外两侧出现明显的扩散角,约为 53° ,扩散区域的水平距离为4m,即水平有效加固范围为4m(夯击中心点离影响区域边界的距离为2m)。

将夯坑、强夯的有效加固范围绘制于同一平面图上(图2,实线为夯坑,虚线为强夯有效加固范围)。

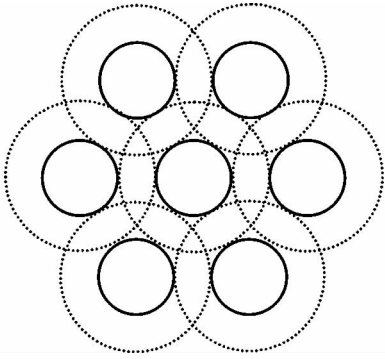


图2 夯坑及强夯有效加固范围平面图

Fig. 2 Plane distribution of pits and efficient compaction range

从图2可以看出,当夯点相距3m时,除了夯锤直接作用的2.0m外,中间孔隙也完全处于相邻强夯作用的水平有效加固范围的叠加区域内,这说明夯点按正三角形布置,间距为3.0m是合理的。

2.3 瑞利波测试

运用瞬态瑞利波技术测得强夯段的频谱曲线,并与碾压段进行了对比(图3)。

从图3可以看出,强夯段的瑞利波频散曲线沿深度的分布比较均匀,平均波速为 $310\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而碾压段的频散曲线则基本上随着深度的增大而增大,平均波速接近 $260\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,明显低于强夯段,这说明,强夯段的强度高于碾压段,即采用强夯加固路堤的效果好于碾压。

2.4 重型动力触探测试

对强夯段6个夯坑进行了重为63.5kg的动力触探测试(表1)。

从表1可以看出,圆锥动力触探每打入路堤10cm的锤击数都大于10,根据《岩土工程勘察规

范》(GB50021-2001)可知,强夯段路堤都达到了中密程度。

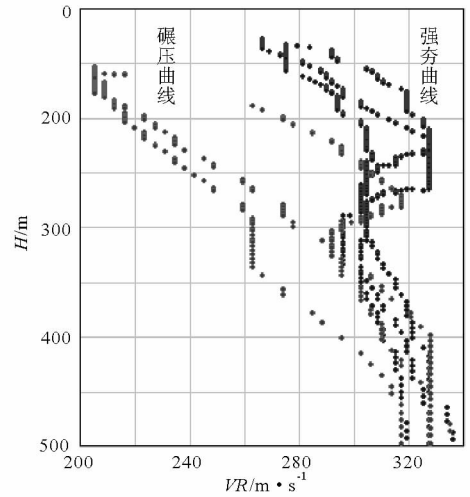


图3 强夯段和碾压段的瑞利波频散曲线

Fig. 3 Dispersion curves of rayleigh wave of the dynamic compacted and rolled segments

表1 动力触探现场检测结果

Table 1 Results of in-situ dynamic penetration test

夯坑	锤击次数			合计
	第1个10cm	第2个10cm	第3个10cm	
1	12	13	18	40
2	11	12	15	38
3	13	13	22	48
4	10	17	13	40
5	10	11	16	37
6	12	13	15	40

2.5 固体体积率

对于颗粒较大的碎石填筑的路堤,可参照《碾压土石坝施工技术规程》(SDJ213-83),采用灌水法测试固体体积率(固体颗粒体积与总体积之比)来对压实情况进行检测与评价。在强夯段进行了固体体积率测试(表2)。

从表2可以看出,由于上层受到夯锤的直接作用,所以固体体积率略大于中层或下层,但所有的测试结果都超过了83%,这说明强夯能够很好地减小路堤的孔隙率,提高路堤的强度,具有较理想的加固效果。

表2 强夯段的固体体积率

Table 2 Solid volume ratio of compacted segments

测点桩号	层厚/ cm	固体体 积/cm ³	试坑体 积/cm ³	固体体积 率/(%)
K34 + 570	上 40	83.1	97.3	85.4
	下 30	61.7	73.2	84.3
K34 + 600	上 30	42.0	49.0	85.7
	下 30	37.6	44.4	84.7
K34 + 610	上 30	39.1	45.4	86.1
	下 30	40.6	48.8	83.2
K34 + 613	上 30	48.7	56.6	86.0
	下 30	60.3	70.0	86.1
K34 + 588	中 20	44.7	52.7	84.8
	下 20	35.4	41.9	84.5
K34 + 572	上 30	40.9	47.7	85.7
	中 20	42.7	50.5	84.5

3 强夯的有限元模拟

参照 K16 + 225 ~ K22 + 200 的路堤结构,建立三维路基有限元模型如图 4 所示,顶面宽 28.3m,底面宽 84m,高 15m,长 80m,将夯锤作用面细划,共计 63986 个单元。

虚铺层(厚 1.5m)和夯实层的计算参数由室内试验得到(表 3,表 4)。

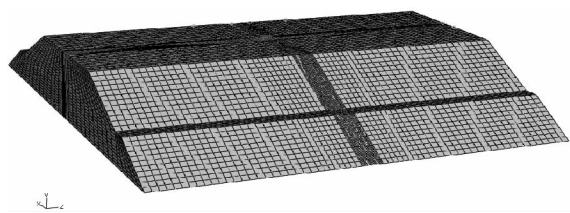


图4 三维路堤有限元模型

Fig. 4 Three - dimensional FEM model of embankment

表3 虚铺层的计算参数

Table 3 Computational index of upper loose layer

E / MPa	φ / (°)	ν	c / kPa	ρ / kg · m ⁻³
22.9	28.2	0.30	5.0	1800

表4 夯实层的计算参数

Table 4 Computational index of under compacted layers

E / MPa	φ / (°)	ν	c / kPa	ρ / kg · m ⁻³
39.34	38.1	0.33	10.0	2250

3.1 模拟夯沉量

将夯锤看作刚性体,通过赋予夯锤竖直向下 14.14m · s⁻¹的初速度来模拟强夯过程。根据有限元模拟结果,绘制了夯击中心点(特指夯锤中心点处的路堤表面)的实测和模拟夯沉量随击数的变化曲线(图 5)。

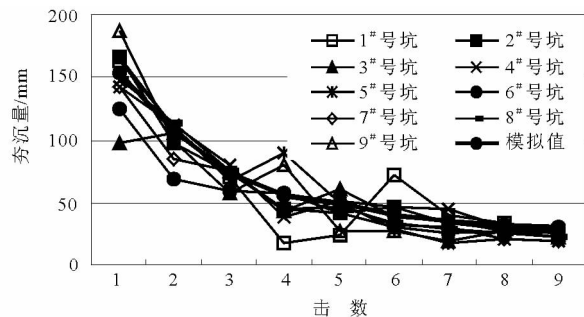


图5 夯击中心点的实测和模拟夯沉量随击数的变化曲线

Fig. 5 Curves of tested and simulated center settlements changing with the number of dynamic compactions

从图 5 可以看出,随着强夯击数的增大,每击产生的夯沉量基本上都呈减小的趋势,但也有特殊情况,例如 3[#]坑的第五击产生的沉降量是 61mm,反而大于第四击的沉降量(43mm),这主要是因为填方路堤中存在较大的岩块,在第五击时岩块突然破碎,从而产生较大的沉降量,不过从整体上看,对于开始的几击(一~四),随着击数的增大,每击产生的沉降量明显地减小,但超过五击后,沉降量减小的幅度明显地降低。由于室内试验制备试样时都事先经过了击实(现场虚铺层无法制备完整的三轴试样),因此试验得到的强度略高于实际情况,导致有限元模拟的夯沉量略低于实测值,不过从整体来看,有限元模拟结果与实测结果基本接近,本文采用的模型和计算方法可以认为是合理可行的。

根据有限元模拟结果,得到了夯击中心点的模拟夯沉量随时间(总时间为 0.30s)的变化曲线(图 6)。

从图 6 可以看出,夯击中心点的模拟夯沉量随时间的变化规律基本相同:先迅速增大到最大值,然后有所回弹并最终趋于稳定,以第一击为例,0.09s 左右达到最大值 162mm,0.25s 左右基本达到稳定,并基本保持在 150mm 左右,这比最大值回弹了 12mm,另外随着夯击次数的增大,夯击中心点的夯

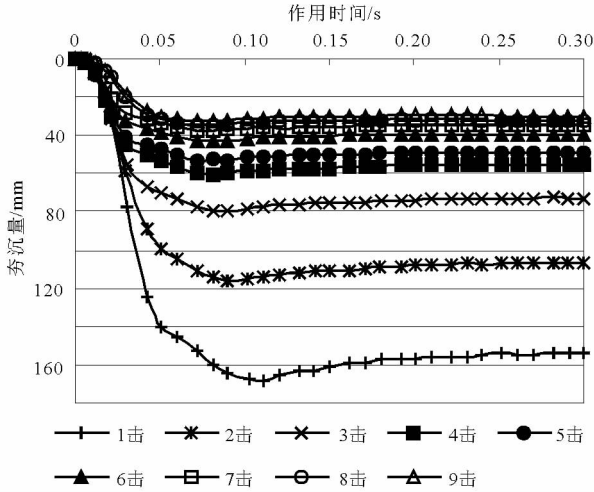


图6 夯击中心点的模拟夯沉量随时间的变化曲线

Fig. 6 Curves of simulated center settlements changing with compaction times

沉量的变化越来越小,例如第九击和第八击仅相差4mm左右,远远小于第一击与第二击的差值47mm。

3.2 强夯有效加固范围的探讨

岩石碎渣在强夯动力作用下,会产生脆性破坏、颗粒被挤密,并表现为大变形等特性。本文的工程实例取自河南济源,施工期为春季,雨水少,不涉及孔隙水压力消散的固结问题,因此路堤的固体体积率随着夯沉量的增大而提高,于是,可用夯沉量来判断强夯的有效加固范围。

取第一击的有限元模拟结果,绘制了水平和垂直距离都为6m范围内的稳定夯沉量等值线(图7)。

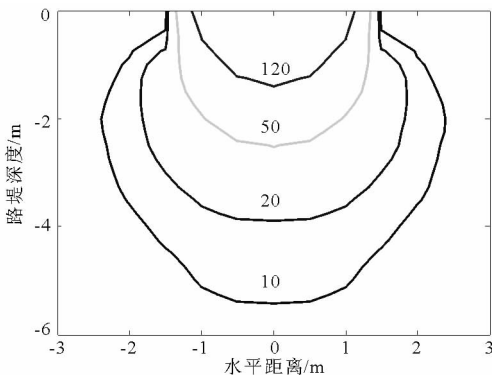


图7 稳定夯沉量的等值曲线(mm)

Fig. 7 Contours of stabilized settlements(mm)

由前面的地质雷达测试结果得知,强夯的水平有效加固范围为4m,结合图7,水平有效加固范围对应的夯沉量等值线为20mm,由此可判断,强夯的竖直竖向影响深度为3.8m,于是在1.5m厚的虚铺层上进行强夯时,也能对下层进行加固,这说明虚铺层和下层交错布置能够做到上下层的兼顾,虚铺厚度为1.5m完全合理。

3.3 强夯对涵洞的影响

在存在涵洞等结构物的路堤上进行强夯时,会对涵洞产生很大的振动,严重时会导致结构物产生裂缝,甚至破坏,某标段就发生过涵洞被夯塌的事故,当时涵洞上方的路堤厚度为4m。

涵洞的实照物取自K18+694,由片石砌成,取 $E = 80\text{MPa}$, $\nu = 0.3$,虚铺层和强夯层的参数见表3和表4。涵洞顶点的最大竖向位移随上部路堤厚度变化曲线见图8。

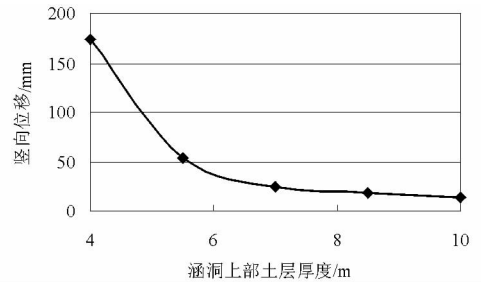


图8 涵洞顶部的最大竖向位移随上方路堤厚度的变化曲线

Fig. 8 Curves of maximum vertical displacements of culvert top changing with the depths of upper embankment

从图8可以看出,上方路堤厚度对涵洞顶部竖向位移的影响很大,当上方路堤厚4.0m时,顶点的竖向位移分别达到了173.9mm,随着路堤厚度的增大,涵洞顶点的竖向位移迅速减小,并在路堤厚度为8.0m时,顶点的竖向位移变得平缓,基本稳定在20mm,此时正处于前面定义的强夯有效加固范围的边缘,已经比较安全,也就是说,当路堤下有涵洞时,若采用强夯作为加固手段,则必须保证上方路堤厚度在8.0m以上。

4 结 论

(1)地质雷达、瑞利波、重型动力触探和固体体积率测试结果表明,强夯加固碎石填筑路堤的效果较理想;

(2)对于碎石填筑路堤,可结合雷达测试结果或其他手段由夯沉量来判断强夯的有效加固范围,对于本文算例以夯沉量为 20mm 作为强夯的有效加固范围(水平 4m,竖向 3.8m);

(3)采用 1000kN·m 的强夯作业时,必须保证涵洞上方路堤厚度为 8m 以上。

参 考 文 献

- [1] 郭乃正,邹金锋,杨小礼,等.高填方路堤强夯试验与数值模拟研究[J].铁道科学与工程学报,2007,4(3):53~57.
Guo Naizheng, Zou Jinfeng, Yang Xiaoli, et al. . Research of test and simulation on dynamic compaction in high roadbed. Journal of Railway Science and Engineering, 2007,4(3):53~57.
- [2] 周世良,王多垠,吴友仁.强夯处理高填方的现场试验与数值分析[J].重庆交通大学学报,2007,26(5):87~91.
Zhou Shiliang, Wang Duoyin, Wu Youren. Site test and numerical analysis of dynamic consolidation method for high earth fill. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 26(5): 87~91.
- [3] 周立新,黄晓波,邓长平.强夯密实处理块碎石填料试验研究[J].工程地质学报,2007,15(6):812~816.
Zhou Lixin, Hiamg Xiaobo, Deng Changping. Experimental tests

for broken stone fills treated with dynamic compaction. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6): 812~816.

- [4] 涂齐亮,王清,李振,等.夯击能应用于高填土地基的一些探讨[J].工程地质学报,2002,10(4):395~399.
Tu Qiliang, Wang Qing, Xia Yubin, et al. . Discusstion on some problems of application of amping energy to foundation with large fill thickness. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 395~399.
- [5] 蒋鹏,李荣强,孔德坊.强夯接触力和接触位移的碰撞分析求解[J].工程地质学报,2002,10(1):108~112.
Jiang Peng, Li Rongqiang, Kong Defang. Aculation of contact force and contact displacement during dynamic compaction by collision analysis. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 395~399.
- [6] 田水,王钊.强夯加固机理的非线性动态冲击显式有限元数值分析[J].工程地质学报,2006,14(5):694~698.
Tian Shui, Wang Zhao. Numerical analysis of the impact dynamical performance of dynamic compaction with non-linear explicit dynamic fem. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 694~698.
- [7] 蒋鹏,李荣强,孔德坊.强夯大变形冲击碰撞数值分析[J].岩土工程学报,2000,22(2):222~226.
Joang Peng, Li Rongqiang, Kong Defang. Numerical analysis of large deformation impact and collision properties during dynamic compaction. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 222~226.
- [8] 蔡袁强,陈超,徐长节.强夯加固回填土地基的三维数值模拟[J].岩土力学,2007,28(6):1108~1112.
Cai Yuanqiang, Chen Chao, Xu Changjie. Three-dimensional numerical simulation of dynamic compaction of backfilled soil. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1108~1112.