

大颗粒红砂岩高填方路基强夯加固理论与试验研究

郭乃正, 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 赵炼恒, 但汉成

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 假设夯坑周边隆起量较小, 夯坑下土柱的侧向变形可忽略, 夯坑的体积等于土体夯后孔隙减小的体积, 强夯前后土柱质量不变, 按照体积相同的原则等效为一圆柱体, 推导出大颗粒土体在夯击时其压实度、孔隙比与有效影响深度的理论计算公式以及夯沉量、孔隙比、压实度与夯击能量之间的理论计算公式, 利用这一理论对常吉高速公路的路基加固进行施工设计。研究结果表明: 理论计算结果与实测结果较吻合, 证实了上述理论的有效性; 强夯后土体的压缩模量提高 15%, 夯沉量随夯击次数的增加而逐渐减小。

关键词: 红砂岩; 强夯; 夯沉量; 压实度; 孔隙比

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)01-0185-05

Dynamic compaction theory and experiments in high roadbed filled with red sandstone

GUO Nai-zheng, ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li, ZHAO Lian-heng, DAN Han-cheng

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the assumption that the upheaval around the tamper hole and the radial deformation was smaller, the tamper hole bulk equaled the reduction of small opening ratio after tamping, and the soil mass tamped was not changeable, the relationship between energy of tamper and settlement, compaction degree, small opening ratio was obtained. The formulation of the compaction degree and small opening ratio along the depth were given. The parameters of tamper construction design were confirmed. The reliability and validity of the tamper construction design was proved by a series of trail in local. The results show that compression modulus increases by 15%, and the tamping settlement decreases gradually with the increase of tamp times.

Key words: red sandstone; dynamic compaction; settlement; compaction degree; small opening ratio

强夯法自 1969 年由法国工程师 Menard 提出并应用于地基加固以来, 在公路路基的加固中也得到了广泛发展。强夯法就是利用起重设备将重锤提升到一定高度, 然后, 使重锤自由下落, 以巨大的冲击能量作用在地基上, 使土中产生极大的冲击波, 以克服土颗粒间的各种阻力, 使土体压密^[1-3]。国内外对强夯动应力的研究主要为试验和数值模拟研究^[4-6]。孔令伟等^[7-9]对强夯的边界接触应力进行了理论研究, 此外,

徐至钧等^[10-13]对强夯和强夯置换法加固地基进行了较系统的研究。然而, 人们对于山区高速公路的填石路基强夯加固的研究并不多。在此, 本文作者针对湖南省常(德)吉(首)高速公路中存在较多的大颗粒高填方路基强夯加固问题进行研究。该路段的路基回填高度一般为 4~20 m, 最高的可达 58 m。全线主要处在红砂岩地区, 少数路段为石灰岩, 且地表覆盖层较浅, 所以, 路基填料主要为红砂岩以及附近边坡开挖和隧

收稿日期: 2007-04-15; 修回日期: 2007-06-02

基金项目: 湖南省科学技术厅科技计划重点资助项目(04SK2009)

作者简介: 郭乃正(1961-), 男, 河南获嘉人, 研究员, 从事交通基础工程的应用研究

通信作者: 邹金锋, 男, 博士; 电话: 0731-2659893; Email: zoujinfeng_0@163.com

道出渣,以钙泥质和钙质红砂岩碎石为主,夹带少量亚黏土,碎石含量达 70%以上,虽然填筑时进行了大规模的改石工作并将粒径控制在 34 cm 左右,但路基填筑后孔隙率仍然较大,压实质量也难以控制,极易产生较大的工后沉降和不均匀沉降。新实施的《公路路基设计规范》对路堤压实度要求又有所提高,下路堤、上路堤压实度分别从原来的 90%和 93%提高到 93%和 94%,而该段路基的填筑在新规范实施以前均按旧规范要求填筑。为了提高路基的压实度,减少路基的工后沉降和不均匀沉降并考虑到该路基的特殊性,决定采用强夯法对路基进行强夯加固^[14-16]。为此,本文作者对常(德)吉(首)高速公路的强夯加固进行了研究并提出了切实可行的设计方案。

1 夯击前后孔隙比及压实度的估算

1.1 理论推导

在大颗粒填料路基中,迄今为止对如何有效地确定其压实度还没有一个行之有效的理论公式。其原因主要是大颗粒填料的干密度无法确定,而路基压实与沉降的控制标准又与压实度和孔隙比密切相关,因此,找出一个简单适用的理论公式来确定大颗粒填料的压实度与孔隙在强夯前后的提高幅度具有重要的理论意义和应用价值。考虑到大颗粒填料在强夯后其周边隆起范围比较小,在地表只有 1.5 m 左右,而随着深度的增加,其周围隆起的范围将更加小,为此,进行如下假设:

- a. 由于大颗粒土体在夯击时水平方向的影响有限,据此假设夯锤加固作用下的土体为一个土柱体;
- b. 由于假设路基在夯实过程中,夯坑周边土体的隆起量可以忽略不计,故可以认为夯坑的体积等于土体夯后孔隙减小的体积;
- c. 虽然土柱有侧向变形,但假设强夯前后土柱质量不变,故可以将变形后的圆柱体分成很多小段,对于每一小段按照体积相同的原则等效为 1 个圆柱体,如图 1 所示。

对于夯锤下的被夯土柱,设强夯前土柱高度为 h_1 ,底面半径为 R ,在强夯作用下土柱体的压缩量为 h_0 ,底面半径增加量为 R_0 ,夯坑上口直径为 D_0 ,夯锤的直径为 D ,夯击前土体的加权平均重度、干密度分别为 γ_0 和 ρ_0 ,夯后土体的加权平均重度、干密度分别为 γ_1

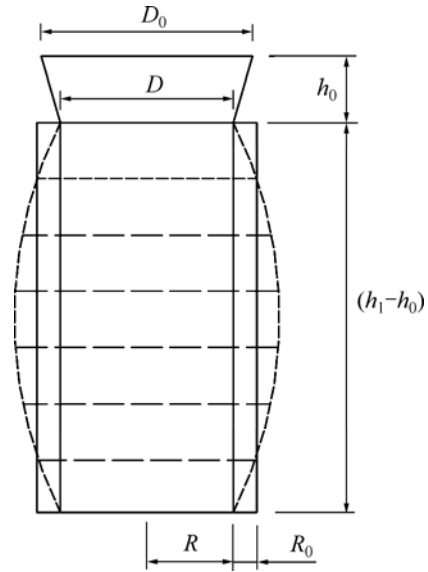


图 1 夯坑和土体的理论分析模型

Fig.1 Analyses theory model of soil deformation

和 ρ_1 。采用平均应变计算土体泊松比 ν :

$$\nu = (R_0/R)/(h_0/h_1),$$

则有 $R_0 = R h_0 \nu / h_1$ 。根据强夯前、后夯坑中土体的质量与有效加固深度内土体增加的质量相等的原则可得:

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{R^2 h_1 \rho_0}{\left(R + \nu R \frac{h_0}{h_1}\right)^2 (h_1 - h_0)}, \\ h_1 - h_0 = \frac{(D_0^2 + D^2 + D_0 D)}{12(R + R_0)^2 (\gamma_1 - \gamma_0)}. \end{cases} \quad (1)$$

由于密度可由压实度 K 和最大干密度 ρ_d 来表示,设 K_0 和 K_1 分别为夯实前、后的平均压实度,并令

$$\beta = \frac{R^2 h_1}{\left(R + \nu R \frac{h_0}{h_1}\right)^2 (h_1 - h_0)}, \quad D_0 = D = 2(R + R_0), \quad \text{则有:}$$

$$\begin{cases} K_1 = \beta K_0, \\ \rho_1 = \beta \rho_0. \end{cases} \quad (2)$$

同理,重度也可由压实度来表示,则有:

$$\begin{cases} h_0 = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0)}{\gamma_1} h_1, \\ K_1 = \frac{K_0 h_1}{h_1 - h_0}. \end{cases} \quad (3)$$

又因为 $\rho_d = \rho_s / (1 + e)$ (其中 ρ_s 为饱和重度),

$h_1 = \alpha \sqrt{W/10}$, 故将其代入式(2)和式(3)可得:

$$\begin{cases} W = 10 \times \left[\frac{(1 + e_0)h_1}{\alpha(e_0 - e_1)} \right]^2, \\ W = 10 \times \left[\frac{h_1 K_1}{\alpha(K_1 - K_0)} \right]^2. \end{cases} \quad (4)$$

其中: e_0 和 e_1 分别表示强夯前、后土体的孔隙比; W 为夯击的能量; h_1 为有效加固深度。

1.2 夯沉量计算分析

由于本路段中的强夯处理是属于路基的补强加固, 强夯只是用来提高路基的压实度, 又因强夯补强, 在加固前路基时压实度必须达到 90% 以上, 然后, 在此基础上才能用强夯法进行补强加固, 因此, 可取平均压实度 $K_0=90%$, 根据上述理论可以求出在有效影响深度(5.5 m)内不同的夯击能量作用下路基平均压实度分别为 $K_1=93%$ 和 $K_1=95%$ 时的单点夯沉量的预测值, 其计算结果如表 1 所示。

表 1 有效影响深度为 5.5 m 时单点夯击下沉量

Table 1 Settlements in different tamper energies when effective depth is 5.5 m

参数	平均压实度/%						
	95						
h_0/m	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3
$W/(kN \cdot m)$	403.6	498.3	602.9	717.5	842.1	976.6	1121.1
参数	平均压实度/%						
	93						
h_0/m	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3
$W/(kN \cdot m)$	1121	1384	1675	1993	2339	2713	3114

从表 1 可以看出, 在有效深度范围(5.5 m)内, 要使土体的平均压实度提高 5%, 则其夯击能量要达到 1.121 MN·m 以上且其平均夯沉量应该控制在 30 cm 以上; 要使土体的平均压实度提高 3%, 则其夯击能量应在 1.121 MN·m 以上且其平均夯沉量应该控制在 18 cm 以上。

1.3 强夯法补强加固施工设计方案

根据本工程的具体特点和工程地质条件并结合强夯的初步实验和理论分析结果, 制定以下强夯加固实施方案。其强夯设计参数如下:

a. 采用点夯法进行夯击, 强夯采用隔点不隔行进行施工, 对路基边角处进行适当调整, 夯点距路边线为 1 m 左右。

b. 其有效加固深度为 5.5 m。对填土厚度超过 10 m 的高填方路基段均进行强夯加固, 对于填土厚度超过

10 m 的填土路基, 填土厚度再每递增 5.5 m 进行 1 次强夯, 当达到 -0.8 m 的填土层面时进行最后 1 次强夯。

c. 点夯的夯击能为 1.2 MN·m, 夯锤落距 $H=10.0$ m, 夯锤直径 $D=2.0$ m。

d. 夯击间距取 3.5 m, 点位布置采用 3.5 m×3.5 m 的方格网, 如图 2 所示。

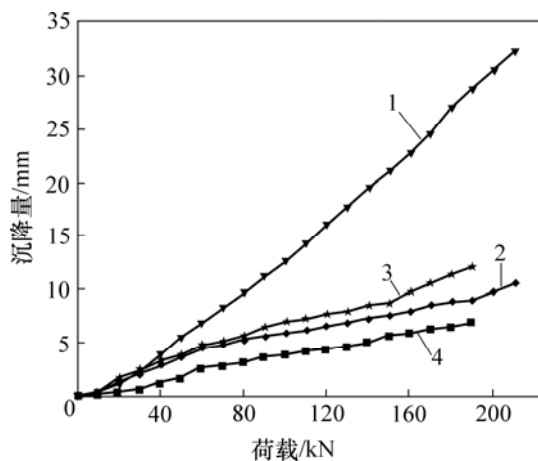
e. 夯击次数是单点夯击 3 锤(注: 当该点的夯沉量小于 25 cm 时, 该点的夯击完成; 当该点夯沉量大于或等于 25 cm 时, 该点再补夯 1 锤)。

2 强夯效果试验

为了检验强夯前、后路基的承载力, 特在该试验段进行 8 个点(共 16 个试验)的荷载板试验, 荷载板直径为 30 cm, 反力装置采用挖土机, 采用量程为 300 kN, 行程为 15 cm 的穿心顶, 用 2 个百分表对称地安装在荷载板的对称部位, 以便测出不同荷载作用下发生的位移, 其分级加荷以 10 kN 为一级。为了说明问题, 只给出 2 个点的试验数据。

2.1 承载力试验成果分析

承载力试验的试验结果如图 2 所示。



1—2 点夯前; 2—2 点夯后; 3—3 点夯前; 4—3 点夯后

图 2 2 点和 3 点强夯前后路基承载力试验曲线

Fig.2 Bearing capacity curves of roadbed before and after dynamic compaction

从图 2 可以看出:

a. 强夯后, 第 3 点在强夯后的位移不超过 6 mm;

b. 对于第 2 点, 强夯后的位移达到 10 mm 以上, 强夯前的位移将达到 35 mm, 这可能是其填土中存在冲积土或者坡积土的缘故, 但是, 它们基本上在强夯过后不影响路基的正常使用。

3) 在夯击前后路基土的荷载-沉降关系曲线均没有明显的转折点, 呈近似直线关系。虽然没有得出路基的极限承载力, 但夯后路基土的沉降量明显小于夯前沉降量, 说明路基土的压缩模量有了较大提高, 土体的压缩性明显提高, 从而减少了路基的工后沉降。

采用式(5)计算路基土的压缩模量, 其提高量值的显著变化如表 2 所示。

$$E_0 = 0.79(1 - \nu^2)d \frac{p}{s} \quad (5)$$

式中: E_0 为试验土层的变形模量, kPa; p 为施加的荷载, kPa; s 为对应于施加荷载的沉降量, cm; d 为承压板直径, cm; ν 为路基土的泊松比。

从表 2 可以看出, 压缩模量在路基强夯前、后提高情况比较显著, 其最小倍数达到 1.49 倍, 最大倍数达到 3.85 倍, 平均值为 2.49 倍。

表 2 强夯前后土体压缩模量对比表

Table 2 Comparison between compression module before and after dynamic compaction 压缩模量/MPa

条件	实验点								平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	
夯前	14.2	5.3	12.7	7.6	29.1	17.4	14.4	14.2	14.4
夯后	54.7	16	21.8	15.3	47.4	36	21.4	29.2	30.2

2.2 密度的探坑试验

采用探坑试验来评估强夯前后密实度的变化情况。为了减小误差, 探坑的体积不小于 80 cm×80 cm×80 cm, 探坑的体积采用灌水法进行测量, 土体及水的质量采用实验室的标准磅来测量。其试验结果如表 3 所示。

表 3 土体含水量、干密度和密度在强夯前后的变化表

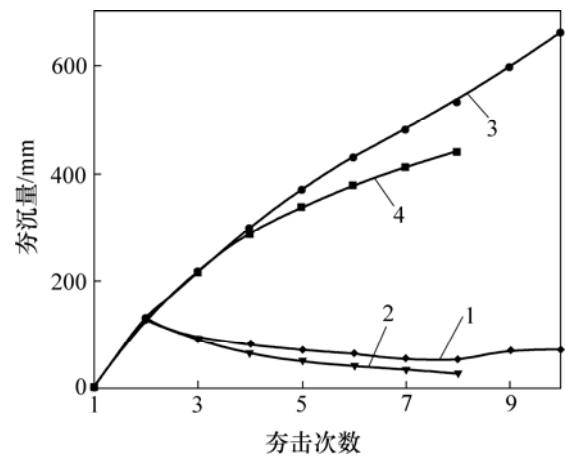
Table 3 Change of ratio of contained water and density before and after tampering

实验点	含水量/%		土体密度/(g·m ⁻³)		干密度/(g·m ⁻³)	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
1	0.163	0.081	2.04	2.18	1.952	2.015
2	0.153	0.055	2.32	2.41	2.008	2.086
3	0.148	0.076	2.35	2.60	2.045	2.128
4	0.132	0.119	2.08	2.25	2.022	2.010
5	0.141	0.088	2.18	2.36	1.910	2.171
6	0.146	0.068	2.16	2.66	1.880	2.496
7	0.122	0.066	2.13	2.44	1.896	2.289
平均值	0.144	0.079	2.18	2.42	1.959	2.171

从表 3 可以看出, 路基填料的密度显著提高, 其密度的提高率最高达 23.6%, 最少也达 4%, 其密度平均提高 10.91%, 根据密实度的定义可知, 其密实度的提高率也在该值左右; 含水量在强夯前、后发生显著的变化, 其减小率最高可达 64%, 最小可达 9.8%, 其平均值达 45%; 干密度最高可提高 32.7%, 但其平均值的变化略比密度平均值的变化高, 可达 11.1%。

2.3 单点夯击试验方案

为了更好地了解大颗粒填料在强夯时的夯沉量变化特性, 特在施工现场选择一个场地进行不同能量下的试夯试验。试验点分别为 A, B, C 和 D 4 点, 相应的夯击能量分别为 1.20, 1.08, 0.96 和 0.84 MN·m。夯点的夯击顺序为 A→C→B→D, 相应的夯击次数分别为 9, 7, 7 和 5 次; 在夯击过程中, 要记录各个点每次夯击后的夯沉量。A 点和 C 点的夯沉量与夯击次数的关系如图 3 所示。



1—A 点单击夯沉量; 2—C 点单击夯沉量; 3—A 点累计夯沉量; 4—C 点累计夯沉量

图 3 A 和 C 点的单击和累计夯沉量与夯击次数的关系图 Fig.3 Relationship between tamper times and settlements with different tamper energies

从图 3 可以看出: 当夯击能量分别为 1.2 MN·m 和 1.08 kN·m, 且夯击次数分别为 9 次和 7 次时, 它们相应的最终夯沉量达到 66.7 cm 和 40.7 cm 左右; 相应的单击平均夯沉量分别为 7.4 cm 和 7.0 cm 左右; 最后 1 击的夯沉量分别为 3.1 cm 和 4.1 cm 左右。

需要说明的是, 图 3 中的个别点沉降出现波动可能是夯锤的偏心夯击所致, 而有的点出现夯沉量过大可能是填土中的大颗粒被冲碎造成压实所致, 但是, 总体曲线都呈现出随着夯击次数的增加, 夯沉量逐渐减小的趋势。

3 结 论

a. 提出了大颗粒红砂岩高填方路基强夯加固有效影响深度的理论公式并应用于现场施工设, 取得了良好的效果。

b. 得出了夯沉量与夯击能量、夯沉量与有效加固深度、孔隙比与有效影响深度、有效影响深度和压实度之间的理论计算公式, 理论计算结果与实测较吻合。

c. 强夯后土体的压缩模量提高 15%, 夯沉量随夯击次数的增加而逐渐减小。

参考文献:

- [1] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
Editorial Board of Ground Treatment Handbook. Ground treatment handbook[M]. Beijing: China Construction & Building Press, 1994.
- [2] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
WANG Tie-hong. Case histories in ground treatment of great engineering of China[M]. Beijing: China Construction & Building Press, 2005.
- [3] 冶金工业部建筑研究总院. 地基处理技术①: 强力夯实法与振动水冲法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
Design Institute of Central Research Institute of Building & Construction of MMI. Technology of Ground Treatment ①: Dynamic consolidation & vibro-compaction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.
- [4] Poran C J, Rodriguez J A. Design of dynamic compaction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(5): 796-802.
- [5] White W, Valliappan S, Lee K. Unified boundary for finite dynamic models[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1977, 103(EM5): 949-964.
- [6] Ddgrande D, de Roeck G. An absorbing boundary condition for wave propagation in saturated pore elastic media part I: Formulation and efficiency evaluation[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 1993, 12: 411-421.
- [7] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 86-92.
KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 86-92.
- [8] 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.
JIANG Peng, LI Rong-qiang, KONG De-fang. Numerical analysis of large deformation impact and collision properties during dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 222-226.
- [9] 童小东, 蒋永生, 龚维明, 等. 解决动力接触问题的一种新方法[J]. 工程力学, 2000, 17(6): 82-86.
TONG Xiao-dong, JIANG Yong-sheng, GONG Wei-ming, et al. A new method for dynamic contact analysis[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(6): 82-86.
- [10] 徐至钧. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
XU Zhi-jun. Dynamic compaction & dynamic replacement for reinforcing ground[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [11] 张洪亮, 胡长顺, 刘保健, 等. 压实石灰黄土力学特性试验[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 13-16.
ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun, LIU Bao-jian, et al. Mechanical properties experiment of compacted loess-lime[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 13-16.
- [12] 王吉利, 刘怡林, 栾茂田. 强夯法处理黄土路基检测方法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(Suppl): 4562-4567.
WANG Ji-li, LIU Yi-lin, LUAN Mao-tian. Subsidence of bucket foundation under horizontal dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Suppl): 4562-4567.
- [13] 周德泉, 张可能, 刘宏利, 等. 强夯加固填土的效果与机理分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(2): 322-327.
ZHOU De-quan, ZHANG Ke-neng, LIU Hong-li, et al. Analyses on the result sand mechanism of dynamic compactness to fill foundation[J]. Journal Central South University: Science and Technology, 2004, 35(2): 322-327.
- [14] 罗 恒, 邹金锋, 李 亮, 等. 红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(Suppl.1): 2701-2706.
LUO Heng, ZOU Jin-feng, LI Liang, et al. Test study on soil dynamic stress diffusion and deformation during dynamic compaction in roadbed primed with large granule red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl.1): 2701-2706.
- [15] 何长明, 邹金锋, 李 亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 27(4): 628-632.
HE Chang-ming, ZOU Jin-feng, LI Liang. Field tests on measurement of dynamic stress of dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 27(4): 628-632.
- [16] 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, 6(3): 53-57.
GUO Nai-zheng, ZOU Jin-feng, YANG Xiao-Li, et al. Research of test and simulation on dynamic compaction in high roadbed[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 6(3): 53-57.