

文章编号: 1674—8247(2024)05—0024—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.004

成都平原典型土石混合填土地基的强夯试验

余志松¹ 冉逸涵² 肖世国^{2,3} 程晓斌¹

(1. 成都建工第八建筑工程有限公司, 成都 610081; 2. 西南交通大学, 成都 610031;
3. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要:为掌握在高能级夯击作用下成都平原地区的土石混合填土地基的力学行为特征,采用现场点夯与满夯试验方法,测试强夯作用过程中地基沉降量和土体动应力,确定夯沉量与夯击次数的关系。结果表明:(1)该土石混合填土地基沉降量的增长速率随夯击次数的增大逐步非线性减小,在 4 000 kN·m 夯击能作用下的最佳夯击次数为 10 次;(2)地基中动应力随竖向深度或距夯击点径向距离的增加呈非线性减小,动应力沿径向的平均衰减梯度大于沿深度的平均衰减梯度,锤径范围内的径向动应力衰减梯度大于锤径范围外的衰减梯度;(3)土体有效加固深度与夯击能显著相关;(4)等效拟静力法的强夯动应力估算值为实测值的 0.48 ~ 0.73 倍。研究成果可为类似混合填土地基的强夯技术提供参考。

关键词:强夯法;土石混合填土;现场试验;沉降量;动应力

中图分类号:TU472.3 **文献标志码:**A

24

Dynamic Compaction Test on Typical Soil-rock Mixture Filled Foundation in Chengdu Plain

YU Zhisong¹ RAN Yihan² XIAO Shiguo^{2,3} CHENG Xiaobin¹

(1. Chengdu Eighth Construction Engineering of CDCEG, Chengdu 610081, China;

(2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. MOE Key Laboratory

of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To understand the mechanical behavior characteristics of soil-rock mixture filled foundations in the Chengdu Plain under high-energy compaction, field tests including single-point compaction and full-area compaction were conducted. The settlement of the foundation and dynamic stress in the soil during the dynamic compaction process were measured to establish the relationship between the settlement and the number of blows. The test results indicate that: (1) The growth rate of settlement in the soil-rock mixture filled foundation gradually decreases nonlinearly with an increasing number of blows, and the optimal number of blows under a compaction energy of 4 000 kN·m is 10 times. (2) The dynamic stress in the foundation decreases nonlinearly with increasing vertical depth or radial distance from the compaction point, with the average attenuation gradient along the radial direction being greater than that along the depth. The attenuation gradient of radial dynamic stress within the hammer diameter is more significant than that outside the hammer diameter. (3) The effective reinforcement depth of the soil is significantly correlated with the compaction

收稿日期:2023-06-15

作者简介:余志松(1976-),男,工程师。

基金项目:四川省交通运输科技项目(2020-A-01);成都建工集团有限公司科技项目(TFSD-011)

引文格式:余志松,冉逸涵,肖世国,等.成都平原典型土石混合填土地基的强夯试验[J].高速铁路技术,2024,15(5):24-29.

YU Zhisong, RAN Yihan, XIAO Shiguo, et al. Dynamic Compaction Test on Typical Soil-rock Mixture Filled Foundation in Chengdu Plain[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):24-29.

energy. (4) The estimated dynamic stress values obtained using the equivalent quasi-static method are 0.48 to 0.73 times the measured values. The research findings provide a reference for dynamic compaction techniques applied to similar mixed-fill foundations.

Key words: dynamic compaction method; soil-rock mixture filling; field test; settlement; dynamic stress

成都平原地处四川盆地中心,地层从上而下主要由砂卵石、泥岩、粉砂质泥岩构成。以本地区的砂土与泥岩碎石所构成的土石混合填料是成都平原常见的填土类型,强夯技术是该地区加固此类土石混合填土地基或地基的常见方法^[1-2]。目前,对于土石混合填土的夯击动应力传递、夯击沉降变形等力学行为研究较为有限,尤其是针对成都平原地区的砂土-泥岩碎石类土石混合填土的研究鲜见报道,相关工程实践中亟需深入认识此类土石混合填土的强夯力学行为。

以往有些学者通过室内试验、现场测试、理论分析和数值模拟等方法研究了地基土的夯击力学行为特征。孔令伟^[3]等通过积分变换技术和传递矩阵法获得了强夯作用下弹性地基中的应力分布;以上海浦东国际机场场道工程地基为原型,韩文喜^[4]等通过数值模拟获得了强夯加固砂土-软土地基的动应力、位移、孔隙水压力变化特征;钱家欢^[5]等采用理论分析与试验方法,研究了软黏土地基的强夯动力行为特征;张清峰^[6-7]等通过室内试验研究了不同夯击能、夯击数及测点位置的煤矸石地基中的动应力,并发现动应力在强夯作用下主要为单一波峰变化,且达到峰值所需的时间明显小于衰减时间;李准^[8]等通过现场测试与统计方法确定强夯能级与工艺流程,张健^[9]等通过FLAC3D数值模拟分析了强夯冲击能量作用下夯击土体的动应力、夯坑沉降量和夯锤周边地表变形;依托渝邻某高速公路工程,张栋梁^[10]等通过高填方路堤强夯加固现场测试及数值模拟得到了该区域地基最佳夯击次数为6~7次,有效加固深度约5 m;黄达^[11]等采用瑞利波检测方法,基于碎石土地基的力学行为分析了土石比对碎石土强夯地基的加固效果影响特征;以云南玉溪某工程为依托,张书铭^[12]等通过圆锥动力触探试验、标准贯入试验和静载试验测试了地基加固处理效果,并确定了适用于该类场地土体的强夯处理方案;有学者通过室内试验发现,强夯对松散宽级配堰塞填料的加固效果明显,不同能级强夯作用后锥尖阻力大幅提高,但夯击能超过某数值后增大夯击能对改善加固效果有限。陈星欣^[13]等和水伟厚^[14]等分别针对饱和粉土、湿陷性黄土的强夯动力行为特征进行了研究,得到了变形与应力规律。

以上研究成果表明,土体的强夯力学行为与土体物理属性密切相关。实际上,对于成都平原地区的砂

土-泥岩碎石类土石混合填土,其中的砂土与红层泥岩碎石均具有较强的地域性特征。鉴于以往针对此类填土强夯力学行为的具体研究较少及相关工程实践的需求,本文针对成都平原地区的典型土石混合填土,依托某路基工程,通过现场夯击试验方法,测试确定夯击动应力传递扩散、夯沉量及其与夯击次数的关系等主要夯击力学行为特征。

1 试验方案

1.1 试验工程概况

某工程位于新华夏系四川盆地沉降带川中褶皱带贾家场向斜构造带上,岩层较平缓,呈单斜产出,岩层倾向285°,倾角3°,岩体中主要发育两组裂隙,无断层通过,属稳定场地。场地地层自上而下依次为:第四系全新统人工杂填土、素填土(Q_4^{ml})、第四系全新统残坡积粉土和可塑粉质黏土(Q_4^{el+dl})、第四系全新统坡洪积淤泥质粉质黏土、软塑粉质黏土、可塑粉质黏土(Q_4^{dl+pl}),下伏侏罗系上统蓬莱镇组粉砂岩、长石砂岩、砂质泥岩和泥质砂岩(J_3p),基岩带可分为强、中风化层。路基填土取用砂土与就地开挖的红层泥岩碎石的混合土体,其颗粒级配曲线如图1所示,填料中粒径大于0.5 mm的颗粒占到总重量约88%。

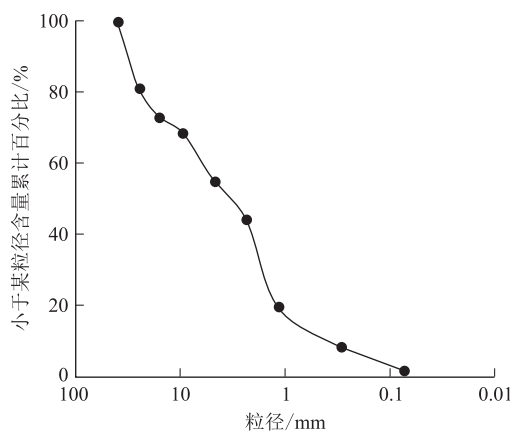


图1 现场填土试样颗粒级配曲线图

1.2 强夯试验设计

本试验强夯加固分两遍进行,第一遍为4 000 kN·m (圆形铸钢夯锤的锤底直径 $D=2$ m,夯锤落距约20 m)的主夯,夯点间距3.0 m,呈正方形布置。主夯夯点顺序如图2所示。夯点的收锤标准以最后两击的

平均夯沉量小于5 cm 控制^[17];第二遍为1 500 kN·m能级的满夯。每夯点夯击2次,要求夯锤的底面积彼此搭接1/3。满夯夯点顺序如图3所示。

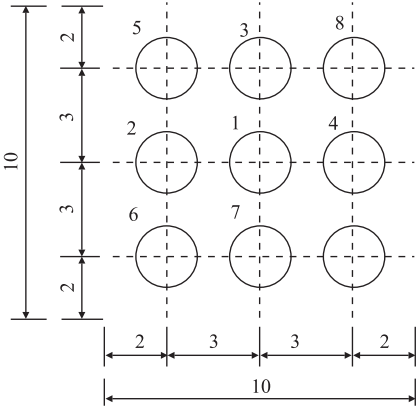


图2 主夯夯点顺序图(m)

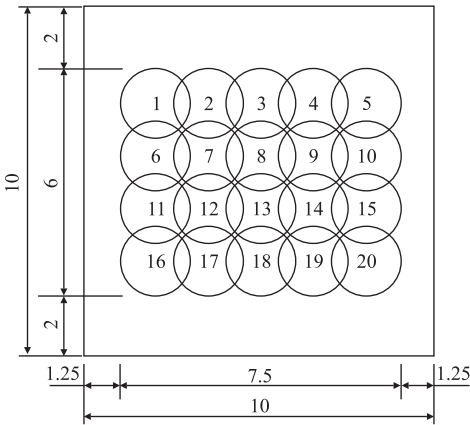


图3 满夯夯点顺序图(m)

主夯布置8个夯点,按数字编号由小到大进行夯击。图2中的右下角为动土压力盒线缆导出点,为保护线缆不受破坏,故不布置夯点。主夯完成后,用填料对夯坑进行回填、整平后,再进行满夯,其夯击按图3中所示的数字编号由小到大顺序进行。调整夯锤起吊高度至7.5 m,每点夯击2遍,一点夯击完成后移动夯锤位置至下一夯点,控制两夯点间距满足1/3 锤径搭接,在主夯区域6 m×7.5 m 范围内按编号顺序进行满夯施工。

1.3 强夯测点布置

为测试填土在强夯冲击荷载作用下的动应力,分别在距离虚铺土体顶面2 m、2.5 m、3 m、3.5 m、4 m、4.5 m处布设动土压力盒,在2 m、2.5 m深土层上横向布置3~4个动土压力盒,间隔0.5 m,具体位置和编号如图4所示。为测量填土在每一次夯击后的夯沉量,在试验段外布设基准观测点,采用水准仪测量夯沉量。

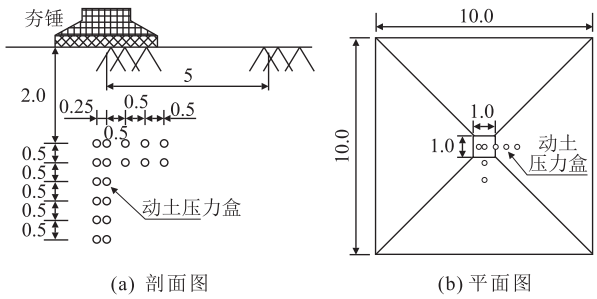


图4 动土压力盒布置图(m)

1.4 主要试验仪器

试验所用设备主要包括强夯机械和动态应变测试分析系统,采用的传感器为动土压力盒。采用的动态应变测试系统单台可同时采集20个通道数据,并可进行多台级连,采集动土压力盒数据;动土压力盒采用应变全桥电路,可准确消除温度变化对仪器的影响;强夯机械由带龙门架型履带式起重机和圆形铸钢锤组成。

1.5 强夯试验流程

选取沿线某处作为试验段,测量原地面高程,然后放坡开挖形成深5 m的拟强夯场地基坑。在虚铺填土过程中,从下至上分层埋设动土压力盒,每层虚铺土厚0.5 m。填土完成后,夯击试验主要操作步骤如下:

- (1) 清理并平整填土表面。
- (2) 标出主夯夯点位置,并测量场地高程。
- (3) 起重机就位,使夯锤对准夯点位置。
- (4) 测量夯前锤顶高程。
- (5) 将夯锤起吊至预定高度,待夯锤脱钩自由下落后,放下吊钩,测量锤顶高程,若出现因夯坑底部倾斜而造成夯锤歪斜的情况需及时整平坑底。
- (6) 按前述相关规范控制标准,完成一个夯点的夯击;重复步骤(3)~步骤(6),完成主夯全部夯点的夯击。
- (7) 用推土机将夯坑填平,并测量其场地高程。
- (8) 在间隔6 h^[15]后,采用低能量满夯,将场地表层松土夯实,并测量夯后场地高程。

2 试验结果及分析

2.1 主夯点沉降量

主夯点的沉降量与夯击次数密切相关,用4 000 kN·m夯击能连续夯击12次后的沉降曲线如图5所示(以主夯点1为例)。

由图5可知,随夯击次数的增加,累积夯沉量不断增大,但其增长速率逐步减小,沉降曲线逐渐趋于平缓。连续夯击12次后累计夯沉量达到了84 cm左右,这意味着强夯对填土的加固作用较为显著。同时,随

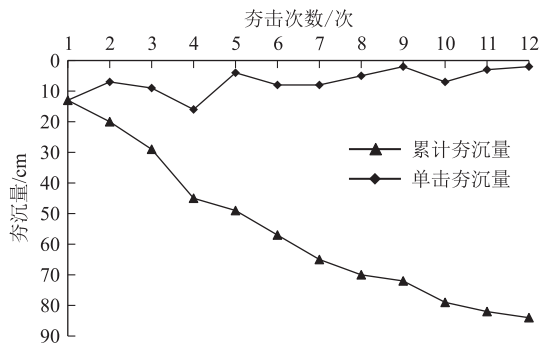


图5 主夯点1的夯沉量与夯击次数关系图

随着夯击次数的增加,单击夯沉量逐渐减小,在第10次夯击后,单击夯沉量均小于5 cm。由此说明,第10次之前的夯击对填土加固作用影响较大,当土体达到一定密实度后(第10次夯击后),增加夯击次数对加固效果影响不明显。对于成都平原土石混合填土-块石质土地基,4 000 kN·m夯击能作用下的最佳夯击次数为10次。

2.2 主夯动应力沿深度变化

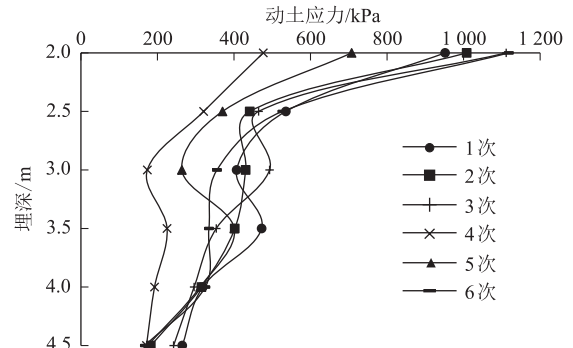
在4 000 kN·m夯击能作用下,不同深度填土的竖向动土应力的分布如图6所示。由图6可知,土体中动应力随深度的增加呈非线性减小。埋深2.5 m、3 m、4 m处动应力分别比埋深2 m、2.5 m、3.5 m处动应力减小了约41%、33.4%、18.5%。这表明,在较浅范围内(3 m以内),动应力随深度衰减显著,但随着深度增加,动应力衰减速率减慢。埋深4.5 m处仍有100 kPa以上的动应力,该动应力值超过了土体的自重压应力,说明对此填土4 000 kN·m能级的影响深度足以超过4.5 m。

2.3 主夯动应力沿径向变化

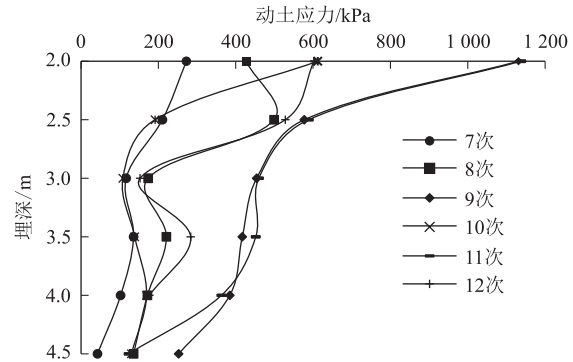
埋深2 m、2.5 m处的填土中动应力沿径向变化曲线分别如图7、图8所示。由图7、图8可知,动应力随距夯锤中心径向距离的增大呈非线性减小。在埋深2 m处,随距夯锤中心径向距离的增加,动应力平均衰减率依次为46.1% (0.5 m)、48.3% (1 m)、73.4% (1.5 m);在埋深2.5 m处,相应的衰减率依次为54.8%、55.5%、66.5%。对比图7和图8可知,动应力沿径向的平均衰减梯度(511.4 kPa/m)大于沿深度方向的平均衰减梯度(250.5 kPa/m),且锤径范围内的径向动土应力衰减梯度大于锤径范围外的衰减梯度。

2.4 主夯动应力与夯击次数的关系

在4 000 kN·m能级作用下,埋深2 m处土体竖向动应力随夯击次数变化曲线如图9所示。由图9可知,动应力值随着夯击次数的增加变化明显。第1次

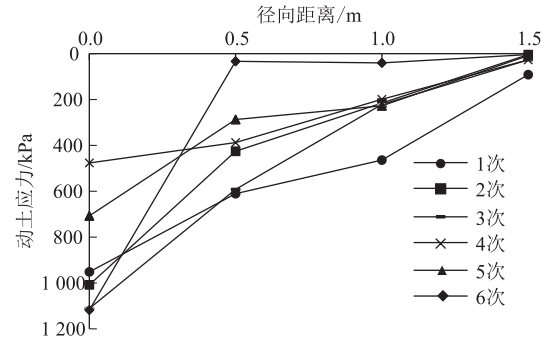


(a) 夯击1~6次

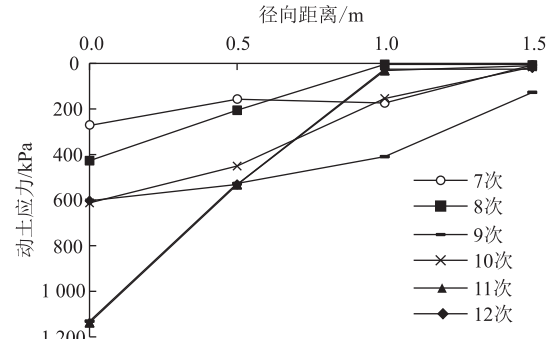


(b) 夯击7~12次

图6 不同夯击次数下动应力沿深度变化曲线图



(a) 夯击1~6次



(b) 夯击7~12次

图7 埋深2 m处动应力沿径向变化曲线图

夯击后,土体处于松散状态,动应力为951.7 kPa;第2次夯击后,土体逐渐密实,动应力值为1 008.1 kPa,增加5.92%;第3次夯击后,动应力值为1 111.4 kPa,增

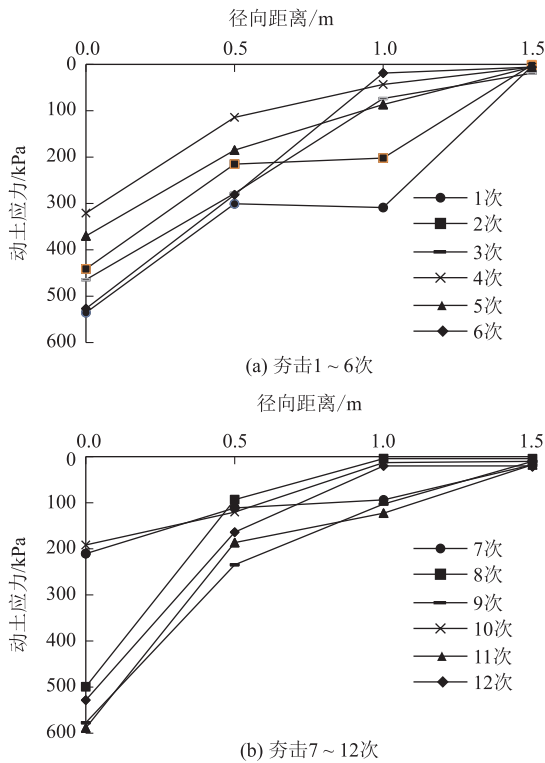


图8 埋深2.5 m处动应力沿径向变化曲线图

加了10.25%;其后,随着夯击次数的增加,动应力增幅显著减小;第6、9、11次夯击后,填土动应力分别为1 118.1 kPa、1 131.1 kPa、1 137.7 kPa,变化很小。这表明,在前3次夯击的作用下土体由疏松到密实,强夯加固效果显著,其后强夯加固作用逐渐减弱。

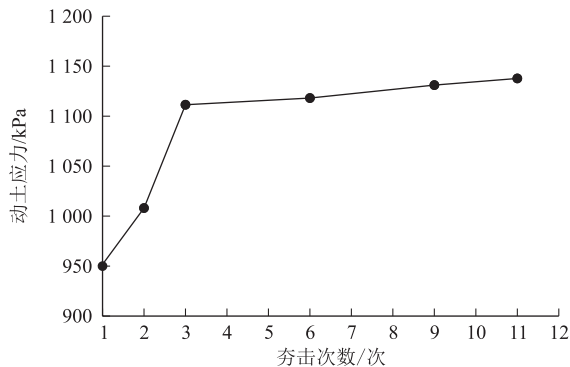


图9 埋深2 m处动应力随夯击次数变化曲线图

2.5 动应力与夯击能级的关系

在主夯(4 000 kN·m)和满夯(1 500 kN·m)两种夯击能级下,填土中竖向动应力沿深度分布曲线如图10所示。由图10可知,夯击能对土体的动应力影响显著,是影响土体加固深度的主要因素。在本次试验中,随深度以0.5 m间隔增加(2.0~4.5 m),二者产生的动应力差值依次为560.6 kPa、295.0 kPa、186.4 kPa、215.5 kPa、247.0 kPa、147.2 kPa,且满夯的

填土动应力约为主夯的0.50倍、0.49倍、0.59倍、0.48倍、0.36倍、0.42倍,即,高能级主夯产生的动应力约为低能级满夯的2倍,二者的动应力差值随深度总体呈非线性缓慢减小的变化特点。

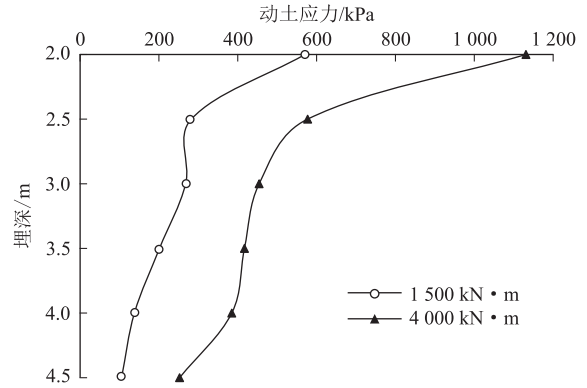


图10 主夯和满夯时动应力沿深度变化曲线比较图

2.6 与理论估算方法对比

土体的强夯动力作用行为复杂,实际中可近似采用等效拟静力法将动力问题等效为静力问题进行简化分析。根据弹性半无限体理论,可得到土体表面夯击等效拟静力 p_e 计算式^[16]:

$$p_e = \frac{SkE_0}{\omega D(1 - \mu^2)} \quad (1)$$

式中: S ——土体的夯沉量(m);

E_0 ——土体变形模量(MPa);

μ ——土体泊松比;

D ——夯锤直径或边长(m);

ω ——夯锤沉降系数,圆锤与方锤分别取0.79、0.89;

k ——模量系数,一般取值1/7~1,对于高夯击能量取大值。

根据本试验场地土体的物理力学性质试验,相关参数分别为:土体变形模量为22.5 MPa、泊松比为0.35;夯沉量为0.13 m(取第1次夯击);本夯击试验的4 000 kN·m能级属于高能级,取 $k=1$ 。将相关参数代入式(1)得到: $p_e=2\ 109.7$ kPa。从而按照式(2)基于 Boussinesq 理论得到的土体内部沿深度应力表达式^[17],可计算出强夯土体的动应力 σ_z 随距夯击土面深度 z 的变化曲线,如图11所示。

$$\sigma_z = \left\{ 1 - \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2}} \right)^3 \right\} p_e \quad (2)$$

式中: σ_z ——强夯土体的动应力(kPa);

z ——距夯击土面深度(m)。

由图11可知,等效拟静力法估算值与实测值相对

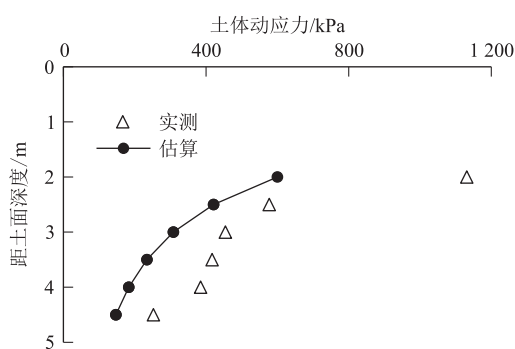


图11 土体中夯击动应力的理论估算与实测值对比图

误差为 27% ~ 52%, 估算值是实测值的 0.48 ~ 0.73 倍。这表明,对于本试验对象的土石混合土体,理论估算值显著小于实测值,理论估算值偏于不安全,也意味着经典的弹性理论近似算法不适于此类具有明显塑性性质的非均匀土体。

3 结论

(1)对于成都平原地区的典型土石混合填土,随夯击次数的增加,累积沉降量呈非线性增大,但其增长速率逐步减小,即强夯加固作用随着夯击次数的增加而逐渐减弱。在 4 000 kN · m 夯击能作用下,最佳夯击次数为 10 次,其影响深度足以超过 4.5 m。

(2)填土中竖向动应力随深度或距夯锤中心径向距离的增加呈非线性减小,且动应力沿径向的平均衰减梯度大于沿深度的平均衰减梯度,在锤径范围内的径向动土应力衰减梯度大于锤径范围外的衰减梯度。

(3)夯击能显著影响土体的动应力和土体加固深度。高能级主夯(4 000 kN · m)产生的动应力约为低能级满夯(1 500 kN · m)的 2 倍,且二者差值随深度增加总体呈非线性缓慢减小趋势。对于本试验的土石混合填土,等效拟静力法估算的强夯动应力值偏小,为实测值的 0.48 ~ 0.73 倍。

参考文献:

- [1] 黄锐. 四川盆地软基特性及处治方案决策模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
HUANG Rui. Research on Engineering Properties and Decision Model of Treatment Scheme of Soft Soil of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [2] 吕孟懿. 成渝经济区地质灾害发育特征及典型地质灾害分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
LV Mengyi. Chengdu-Chongqing Economic Zone Development Features of Geological Disasters and the Analysis of Typical Geological Disaster [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [3] 孔令伟, 袁建新. 强夯时地基土的应力场分布特征及应用[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 13-19, 23.
KONG Lingwei, YUAN Jianxin. Stress Field Distribution Characteristics of Foundation during Dynamic Consolidation and Its

- Application[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 13-19, 23.
- [4] 韩文喜, 张倬元, 李强. 强夯加固砂土软土地基的数值模拟[J]. 山地学报, 2000, 18(S1): 88-93.
HAN Wenxi, ZHANG Zhuoyuan, LI Qiang. Numerical Simulation of Dynamic Consolidation of Sandy Soft Soil Foundation[J]. Mountain Research, 2000, 18(S1): 88-93.
- [5] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 1-17.
QIAN Jiahuan, QIAN Xuede, ZHAO Weibing, et al. Theory and Practice of Dynamic Consolidation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 1-17.
- [6] 张清峰, 王东权. 煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 1049-1056.
ZHANG Qingfeng, WANG Dongquan. Physical Model Tests of Coal Gangue Foundation under Dynamic Compaction Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 1049-1056.
- [7] 张清峰, 王东权. 强夯法加固煤矸石地基动应力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1142-1147.
ZHANG Qingfeng, WANG Dongquan. Model Tests on Dynamic Stress in Colliery Wastes Improved by Dynamic Compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1142-1147.
- [8] 李准, 徐涛, 颜欢. 软土地基强夯碎石墩施工方案及定额测定[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 79-83.
LI Zhun, XU Tao, YAN Huan. Construction Scheme and Quota Determination of Dynamic Compaction Gravel Pier on Soft Soil Foundation[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 79-83.
- [9] 张健, 刘俊. 填石路堤强夯加固施工参数及路基动应力响应规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 95-101.
ZHANG Jian, LIU Jun. Dynamic Stress Response Law and Construction Parameters Study of Rockfill Embankment under Dynamic Compaction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 95-101.
- [10] 张栋梁, 靳静, 张璐, 等. 高填方路堤强夯加固现场试验及数值模拟研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(8): 54-57.
ZHANG Dongliang, JIN Jing, ZHANG Lu, et al. Field Test and Numerical Simulation Study on Dynamic Compaction Reinforcement of High Fill Subgrade[J]. Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2020, 16(8): 54-57.
- [11] 黄达, 金华辉. 土石比对照碎石土强夯地基加固效果影响规律瑞利波检测分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3067-3072.
HUANG Da, JIN Huahui. Influences of Soil-rock Ratio on Foundation with Detritus Soil under Dynamic Compaction Based on Rayleigh Wave Detection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3067-3072.
- [12] 张书铭, 燕永锋, 郑晓军. 抚仙湖东岸建设厂区碎石杂填土强夯方案比选研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(3): 85-89.
ZHANG Shuming, YAN Yongfeng, ZHENG Xiaojun. Comparison and Selection of Reinforcement Scheme of Dynamic Compaction of Miscellaneous Mountain Gravel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2022, 33(3): 85-89.

(下转第47页)

钻进过程中不可避免存在钻头掉落和套管理管现象,无法继续施钻,产生废孔情况而必须在相邻设计允许范围内重钻。鉴于应适当考虑废孔造成的合理范围内费用,故建议在设计阶段,袖阀管的钻孔长度可额外考虑一定比例的废孔钻孔长度。根据德庆隧道 90 根隧底袖阀管复合的数据,90 根桩共成孔 4 301.4 m,废孔 234 m,废孔率 5.44%,如表 14 所示。

表 14 隧底袖阀管跟管钻孔废孔率分析表

钻孔深度范围	根数 /根	钻孔长度 /m	废孔长度 /m	废孔率 /%
20 m < h ≤ 30 m	10	251	20	7.98
30 m < h ≤ 40 m	1	30	0	0.00
40 m < h ≤ 50 m	44	2 026	94	4.64
50 m < h ≤ 60 m	21	1 100	106	9.64
60 m < h ≤ 70 m	13	814	14	1.72
h > 80 m	1	82	0	0.00
合计	90	4 301	234	5.44%

4 结束语

本文依托贵南高速铁路德庆隧道,收集了详细的袖阀管注浆数据,搭建了相应的施工组织设模型,最终完成了隧道袖阀管施工的单价分析。研究成果填补了目前铁路工程造价标准关于隧道内袖阀管注浆的计价依据的空白,也为后续袖阀管注浆费用提供了参考。研究发现套壳料的强度、粘度和比重与其配合比有密切关系,同时套壳料的材料费用又是套壳料注浆费用中占比最大的部分,下一步计划对套壳料注浆的单价进行进一步的分析研究。

参考文献:

[1] 汪勇. 巨型溶洞松散回填体内超大断面隧道修建技术[J]. 高速

铁路技术, 2023, 14(2): 43-47.
WANG Yong. Construction Technology of Super-large Section Tunnel in Loose Backfill of Giant Karst Cave [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 43-47.
[2] 何省, 余大龙, 康芮. 隧道施工大型岩溶整治探讨[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 10-15.
HE Xing, YU Dalong, KANG Rui. Discussion on Large-scale Karst Treatment in Tunnel Construction [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 10-15.
[3] 李开兰, 王明慧, 王秋, 等. 羊角一号隧道大型半充填溶洞处理措施研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(6): 91-95.
LI Kailan, WANG Minghui, WANG Qiu, et al. Discussion on the Treatment Measures of Large-scale Half Filled Karst Cave in Yangjiao No. 1 Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 91-95.
[4] 应金星. 袖阀管注浆加固设计与施工工艺研究[J]. 吉林水利, 2009(7): 22-25.
YING Jinxing. The Design of Sleeve Valve Pipe Grouting Reinforced and Research of Construction Technique[J]. Jilin Water Resources, 2009(7): 22-25.
[5] 张民庆, 张文强, 姜才荣. 袖阀管注浆工法的改进与应用[J]. 施工技术, 2003, 32(9): 4-6.
ZHANG Mingqing, ZHANG Wenqiang, JIANG Cairong. Improvement and Application of the Sleeve-valve-pipe Grouting Construction Method[J]. Construction Technology, 2003, 32(9): 4-6.
[6] TZJ 3004-2017 铁路工程施工机具台班费用定额[S].
TZJ 3004-2017 Cost Quota of Machine Shift for Railway Engineering [S].
[7] JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S].
JGJ 79-2012 Technical Code for Ground Treatment of Buildings [S].
[8] 邝健政. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 科学出版社, 2001.
KUANG Jianzheng. Ground Treatment by Grouting: Theory and Engineering Cases [M]. Science Press, 2001.

(上接第 29 页)

[13] 陈星欣, 白冰, 席连海. 冲击荷载作用下饱和粉土变形和强度试验[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(4): 73-77.
CHEN Xingxin, BAI Bing, XI Lianhai. Experimental Research on the Deformation and Strength of Saturated Silt Soil under Impact Load [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4): 73-77.
[14] 水伟厚, 高广运, 吴延炜, 等. 湿陷性黄土在强夯作用下的非完全弹性碰撞与冲击应力解析[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 92-97.
SHUI Weihou, GAO Guangyun, WU Yanwei, et al. Non-perfect Elastic Collision and Impact Stress Analysis during Dynamic Compaction on Collapsible Loess [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 92-97.
[15] JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范 [S].

JGJ 79-2012 Technical Code for Ground Treatment of Buildings [S].
[16] 王成华, 李腾. 等效拟静力法的发展与工程实践[J]. 建筑科学, 2015, 31(3): 131-134.
WANG Chenghua, LI Teng. Development and Engineering Practice of the Equivalent Pseudo-static Method [J]. Building Science, 2015, 31(3): 131-134.
[17] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与土体竖向位移计算[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1493-1497.
LIU Hanlong, GAO Youbin, CAO Jianjian, et al. Calculation of Contact Stress and Soil Vertical Displacement under Dynamic Compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1493-1497.