

# 土石分层填方地基强夯加固效果研究

杨元富<sup>1</sup>, 眭素刚<sup>2</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 冉路蔓<sup>1</sup>, 梅倩玮<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 中国有色金属工业昆明勘察设计院, 昆明 650051)

**摘要:** 现有的高填方回填工艺多数为土石混合料回填, 土石分层回填的研究案例较少。为研究土石分层填方地基的强夯加固效果, 采用现场试验结合数值模拟的方法, 研究碎石层厚度为 1 m、2 m、4 m、4.5 m 的填方地基强夯加固效果。结果表明: 强夯加固后, 土石互层地基岩土体的干密度、含水率、孔隙比、压缩模量、地基承载力均得到了大幅度改善, 土石互层地基强夯加固效果可以满足工程设计要求; 随着碎石层厚度的增加, 土石分层回填地基的强夯加固深度降低; 在固定夯击能级、夯锤落距、夯击次数等因素的前提下, 碎石层厚度为 1 m、2 m、4 m、4.5 m 时的强夯加固效果均可以满足工程设计要求, 但满足要求的夯击数并无明显的变化规律。

**关键词:** 土石分层; 强夯加固; 夯沉量; 碎石层厚度

**中图分类号:** P642; TU753; TU472 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC CONSOLIDATION OF SOIL AND ROCK LAYERED FILL FOUNDATION

YANG Yuan-fu<sup>1</sup>, SUI Su-gang<sup>2</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, RAN Lu-man<sup>1</sup>, MEI Qian-wei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, KUST, Kunming 650093, China; 2. China Nonferrous Metal Industry Kunming Survey Design Institute Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** Most of the existing high fill backfill processes are earth-rock mixture backfill, and there are few research cases of earth-rock layered backfill. In order to study the dynamic consolidation effect of earth-rock layered fill foundation, field tests and numerical simulation are used to study the dynamic consolidation effect of fill foundation with the thickness of gravel layer of 1 m, 2 m, 4 m and 4.5 m. The results show that: After dynamic consolidation, the dry density, moisture content, pore ratio, compression modulus and foundation bearing capacity of soil-rock interlayer foundation have been greatly improved, and the effect of dynamic consolidation can meet the requirements of engineering design; With the increase of gravel layer thickness, the strengthening depth of dynamic consolidation decreases; Under the premise of fixed tamping energy level, tamping hammer drop distance, tamping times and other factors, the dynamic consolidation effect can meet the engineering design requirements when the gravel layer thickness is 1 m, 2 m, 4 m, 4.5 m, but the number of tamping that meets the requirements has no obvious change law.

**Key words:** stratification of stone and soil; dynamic compaction reinforcement; compaction settlement; gravel thickness

## 1 引言

随着我国现代化建设的飞速发展,我国建筑行业迎来了空前的发展,而与此同时,建筑场地用地问题也变得异常突出。尤其是大型工业建筑场地,采用大面积深挖高填的方法来解决项目用地问题已不可避免,对填筑地基常用的加固方式主要为动力固结法(或强夯法)。对大规模的地基加固,强夯法是一种经济、有效的解决方式。强夯法能够降低地基土壤的压缩性,提高地基土的强度,提升地基承载力,进而起到对地基夯实加固的效果;同时又具备适用范围广、作业简单、加固效果好的优势<sup>[1-7]</sup>。

最近几年来,许多国内外学者对强夯法加固地基进行了大量的研究。比如,MOON<sup>[8]</sup>等人通过现场测试和数值计算等方法,对萨布卡软弱路基的强夯法施工技术及其可行性进行了研究;贾剑青等<sup>[9]</sup>则采用了现场试验和数值模拟相结合的方法,研究了落距为15 m和20 m等两种情况下的路基承载力和变形的变化及特点;魏迎奇<sup>[10]</sup>等人探索了在1 000 kN·m夯击能作用下土石混合料填筑体内部质点的振动响应以及强夯加固的机理;李希等<sup>[11]</sup>利用离散元数值模拟的方法对夯锤位移时程特性、夯沉量发展规律及土体塑性区特征进行了研究;高政国等<sup>[12]</sup>用现场试验结合数值有限元计算的方法,对夯击能、夯击动量(夯锤落距)、夯锤尺寸等参数与夯沉量、有效加固范围的关系进行了研究;胡长明等<sup>[13]</sup>研究了不同强夯能级下,强夯加固的夯点中心距、最佳击数、停夯标准及有效加固深度等主要参数,并确定了强夯有效加固深度的估算方法;费香泽<sup>[14]</sup>等人进行了对强夯加固范围的影响因素,包括夯击能、锤重、落距、击数、夯锤直径、夯点间距的分析,研究结果得出了计算加固深度的公式。

上述研究工作在研究强夯加固深度领域奠定了基础。但大多数都是考虑夯击能、锤重、落距等对强夯加固深度的影响,碎石层厚度对高填方土石分层地基强夯法加固深度影响的研究较少。

本研究依托西南某产业园大型基础设施建设项目场平设计及地基处理,开展了系列现场试验研究及数值模拟研究。采用静力触探试验和室内试验相结合的方法测试地基承载力和压缩模量<sup>[15]</sup>,分析土石分层回填地基强夯前后回填料物理力学特性的变化规律及特点,从而研究其强夯加固效果。然后利用数值模拟的方法研究不同碎石层厚度土石分层回填地基的加固深度。研究成果可为同类工程的设计与施工提供参考。

## 2 试验方案

试验强夯单击夯击能5 000 kN·m,夯锤落距均为20 m,平整场地后,将试验设计2个试验区(试验区为H1、H2)4个试验方案(试验编号分别为H1-1、H1-2、H2-1、H2-2),为尽可能地确保研究不被其他因素干扰,各试验方案均采用土石分层比1:1的方式进行回填处理(碎石层厚度为1 m),回填高度达6 m后进行强夯施工。试验场地设计底面尺寸为58 m×48 m,顶面尺寸为40 m×30 m,边坡比为1:1.5,试验场地四周均为临空;回填料碎石层主要以白云岩为主,软土层以黏土为主。对碎石层回填料进行级配曲线测定,其结果如图1所示。

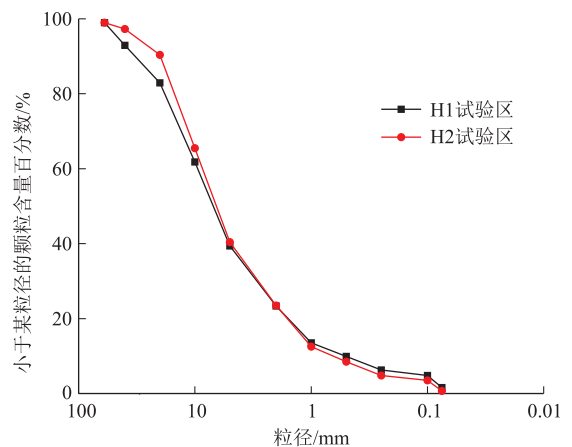


图1 碎石层级配曲线

不同夯点的夯击次数为11击,为满足地基设计加固质量的要求,如果最后两击的平均夯沉量小于10 cm,则停止夯击,否则,则增加夯击次数以满足地基加固质量要求。表1为强夯法施工参数,图2为强夯夯点布置图。

表1 点夯施工参数

夯能/kN·m	锤重/t	锤径/cm	落距/m	夯击数/击
5 000	25	260	20	11

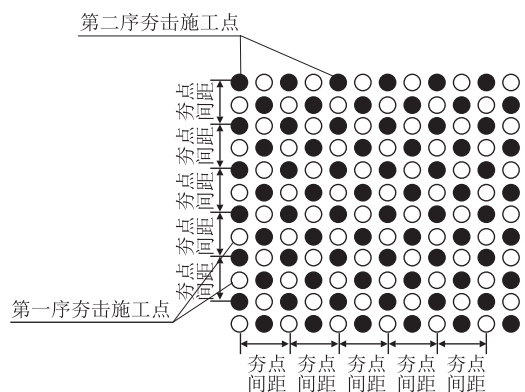


图2 强夯夯点布置

强夯作用完成后,我们对地面的平均夯沉量进行了测量,并对各个区域进行了取样进行了常规土工试验。通过对比强夯前后土体的主要物理指标以及各个试验区土体静力触探数据的变化来进行分析,研究其强夯加固效果。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 夯沉量分析

试验中,试验方案 H1-1 的总夯沉量为 180.3 cm,其中第 10 击和第 11 击的平均夯沉量为 6.65 cm;试验方案 H1-2 总夯沉量为 174.6 cm,其中第 9 击和第 10 击的平均夯沉量为 5.2 cm。试验方案 H2-1 总夯沉量为 178.5 cm,其中,第 10 击与第 11 击的平均夯沉深度达到 5 cm;试验方案 H2-2 的总夯沉量达到 166.4 cm,其中第 9 击和第 10 击的平均夯沉量是 7.7 cm。最终的两次沉降值都能达到实验设计的标准。图 3 展示了夯击次数与夯沉量之间的关系曲线。

试验数据显示,随着夯击次数的增多,各个夯点的土体逐步变得更加紧密,而每次夯击的沉降量的增长速度则逐步放缓。在强夯过程中,前几次的夯沉量相对较大,其曲线显示出急剧下降的趋势。但随着夯击次数的增加,每次夯击的沉降量迅速减少,最后的曲线逐渐变得平稳。值得注意的是,夯沉量

与夯击次数之间的关系曲线在 9~10 击后开始稳定,而实验中观察到的地面隆起量相对较少,根据夯沉量判断,夯实加固效果较好。

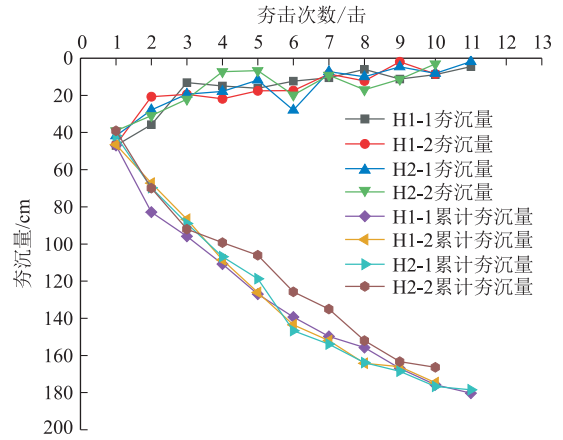


图 3 夯击次数与夯沉量关系曲线

#### 3.2 地基土主要物理力学指标的变化

为了确保试验结果能够准确反映土体被强夯后的真实状态,我们在完成强夯约 10 d 后,在每个试验区下方的夯点处进行土样采集,并将夯点之间的土样运送至试验室进行室内常规土工试验,然后与夯前采集的土样试验结果进行对比分析。土体的主要物理力学指标的统计结果和对比见于表 2~表 5。

表 2 各试验区强夯前后土体干密度统计

取样深度 /m	夯前平均密度 /g·cm <sup>-3</sup>	试验区土体强夯后平均干密度/g·cm <sup>-3</sup>							
		H1 区				H2 区			
		夯点	增幅/%	夯间	增幅/%	夯点	增幅/%	夯间	增幅/%
1~3	1.2	1.35	11.99	1.25	3.06	1.38	14.31	1.22	0.5
4~6	1.1	1.33	17.03	1.21	5.8	1.31	15.01	1.26	10.89
7~9	1.14	1.33	16.65	1.23	8.15	1.3	13.5	1.19	4.56
10~12	1.16	1.31	12.91	1.29	11.02	1.25	7.58	1.17	0.95

表 3 各试验区强夯前后土体含水率统计

取样深度 /m	夯前平均含水率/%	试验区土体强夯后平均含水率/%							
		H1 区				H2 区			
		夯点	增幅/%	夯间	增幅/%	夯点	增幅/%	夯间	增幅/%
1~3	43.5	35.5	-18.39	40.5	-6.9	36	-17.24	41	-5.75
4~6	48	35	-27.08	44	-8.33	37.5	-21.88	40.5	-15.61
7~9	47.3	36	-23.89	41	-13.32	39	-17.55	45	-4.86
10~12	43	38	-11.63	40	-6.98	42	-2.33	42	-2.33

表 4 各试验区强夯前后土体孔隙比统计

取样深度 /m	夯前平均孔隙比	试验区土体强夯后平均孔隙比							
		H1 区				H2 区			
		夯点	增幅/%	夯间	增幅/%	夯点	增幅/%	夯间	增幅/%
1~3	1.32	1.08	-18.18	1.25	-5.3	1.19	-9.85	1.29	-2.27
4~6	1.48	1.15	-22.42	1.33	-10.43	1.19	-19.87	1.21	-18.52
7~9	1.47	1.18	-19.52	1.25	-14.97	1.19	-19.05	1.32	-10.2
10~12	1.41	1.13	-19.57	1.18	-16.01	1.265	-9.96	1.35	-3.92

表5 各试验区强夯前后土体压缩模量统计

取样深度 /m	夯前平均压缩 模量/MPa	试验区土体强夯后平均压缩模量/MPa							
		H1区				H2区			
		夯点	增幅/%	夯间	增幅/%	夯点	增幅/%	夯间	增幅/%
1~3	4.05	7.1	75.31	5.9	45.68	10.7	164.2	7.1	75.31
4~6	6.4	11.3	76.56	8.3	29.69	12.15	89.84	7.5	17.19
7~9	5.6	10.05	79.46	6.8	21.43	10.7	91.07	7.7	37.5
10~12	7.9	10.2	29.11	8.8	11.39	11.35	43.67	8.5	7.6

从表2可以看出:强夯后取样试验深度范围内的夯点干密度一般在 $1.17\sim 1.3\text{ g/cm}^3$ 之间,最大增幅达约17%,各试验区3m内干密度平均提高约13.15%,4m以下提高约为7.6%~17%;夯间干密度一般在 $1.2\sim 1.39\text{ g/cm}^3$ 之间,最大增幅达约11%,各试验区3m内干密度平均提高约1.8%,4m以下提高约为0.94%~11%。在试验深度范围内,夯点的干密度改善效果相对于夯间显著。

从表3可以看出:强夯后取样试验深度范围内的夯点含水率一般在35%~38%之间,最小增幅达约-27.1%,各试验区3m内含水率平均降低约18%,4m以下降低约为2%~27%;夯间含水率一般在40%~45%之间,最小增幅达约-16%,各试验区3m内含水率平均降低约6%,4m以下提高约为2%~16%。在试验深度范围内,夯点的含水率改善效果相对于夯间显著。

从表4可以看出:强夯后各试验区夯点孔隙比一般在1~1.27之间,各试验区3m内孔隙比平均降低约14%,4m以下降低约10%~22.5%;夯间孔隙比一般在1.38~1.35之间,各试验区3m内孔隙比平均降低约3.8%,4m以下降低约3.9%~

19%。在试验深度范围内,夯点的孔隙比改善效果相对于夯间显著。

从表5可以看出:处理后地基土的压缩模量有较大幅度的提高,各试验区夯点压缩模量一般在7.1~12.15MPa之间,各试验区3m内压缩模量平均提高约120%,4m以下提高约29%~91.1%;夯间压缩模量一般在5.9~8.8MPa之间,各试验区3m内压缩模量平均提高约60.5%,4m以下提高约7.6%~38%。在试验深度范围内,夯点的压缩模量改善效果相对于夯间显著。

由此可见,强夯后与强夯前相比,土体干密度、含水率、孔隙比及压缩模量等指标变化情况大致为浅层变化较大、深层变化小。在有效加固区范围内,强夯法对改善土质特性有显著效果,且夯点的改善效果相对于夯间较为显著。

### 3.3 地基承载力的变化

为考察土石分层地基的强夯加固效果,用静力触探试验分别对试验区夯前和夯后的地基土进行连续触探试验。夯前和夯后静力触探数据对比如表6所示。

表6 夯前和夯后静力触探数据对比

试验深度 /m	强夯前		H1		H2	
	平均锥尖阻力 /MPa	平均侧壁阻力 /kPa	强夯后平均 锥尖阻力/MPa	强夯后平均 侧壁阻力/kPa	强夯后平均 锥尖阻力/MPa	强夯后平均 侧壁阻力/kPa
0~1	1.44	49.60	6.22	95.90	4.75	71.08
1~2	5.71	57.30	8.30	141.92	6.72	106.23
2~3	7.46	189.90	7.65	127.75	8.02	117.69
3~4	1.26	78.10	6.20	97.50	6.61	96.73
4~5	1.82	60.85	4.46	77.43	7.28	111.12
5~6	2.39	106.15	4.10	72.87	6.06	91.28
6~7	1.31	241.85	7.71	132.93	10.25	153.55
7~8	1.68	79.35	8.24	128.28	6.13	91.84
8~9	1.71	79.35	5.88	95.73	4.53	72.25
9~10	—	—	9.50	152.65	5.59	96.80

从表6可以看出,回填土在强夯前均处于松散状态,强夯后均得到了有效加固,静力触探锥尖阻力有大幅提高,回填土由松散状态达到了中密-密实状态。随着深度的增加,静力触探锥尖阻力有波动趋势,但仍然有明显的加固效果。

承载力特征值计算见表7,夯前、夯后地基承载力随深度的变化情况见图4。

由表7和图4可知,强夯处理后,各试验区的地基承载力估算值均大于300kPa,可见强夯加固地基效果明显。相对于夯前承载力,加固后的地基承

表 7 估算承载力

试验深度 /m	强夯前估算承载力 /kPa	H1		H2	
		强夯后估算承载力 /kPa	承载力提高倍数	强夯后估算承载力 /kPa	承载力提高倍数
0~1	207.54	567.62	2.74	437.56	2.11
1~2	356.51	750.49	2.11	611.27	1.71
2~3	385.42	693.29	1.80	725.58	1.88
3~4	193.10	565.78	2.93	602.03	3.12
4~5	232.57	412.04	1.77	660.20	2.84
5~6	262.33	380.98	1.45	553.19	2.11
6~7	197.31	698.22	3.54	921.65	4.67
7~8	224.21	744.68	3.32	559.09	2.49
8~9	225.81	537.44	2.38	418.20	1.85
9~10	—	855.91	—	511.92	—

表 8 数值模拟试验方案

模拟方案	土石比	碎石层厚度/m
S1	1:1	1
S2	1:2	2
S3	1:2	4
S4	1:3	4.5

数值模拟采用 ABAQUS 软件,建立长为 16 m、宽为 16 m、高为 10 m 的地基有限元模型;半径 2 m、高 0.5 m、质量约为 30 t 的夯锤有限元模型。

在地基模型中,四周和底面都被设定为约束边界,其中模型的四周限制水平方向上的位移,而模型的底面则同时限制垂直和水平方向上的位移;夯锤模型是在水平方向上进行约束的,而在竖直方向上则是自由移动的<sup>[9]</sup>,土体则使用了 D-P 模型进行模拟。在模拟的过程中,我们假定<sup>[16-18]</sup>:①地基土体是一种均质且各向同性的弹塑性介质;②未将地下水对地基的影响纳入考虑;③夯锤与碎石层的接触面上,切向力是可以忽略不计的;④夯锤仅进行垂直方向的移动,不进行轴向的旋转;⑤夯击的过程中,不会有任何能量损耗。表 9 为地基土体和夯锤的物理力学特性。如图 5 所示为数值模型图。

表 9 模型计算参数

名称	弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg·m <sup>-3</sup>	摩擦角/°
黏土	4.1	0.3	1 730	12
碎石	6.1	0.35	2 230	43
夯锤	3×10 <sup>5</sup>	0.3	7 800	—

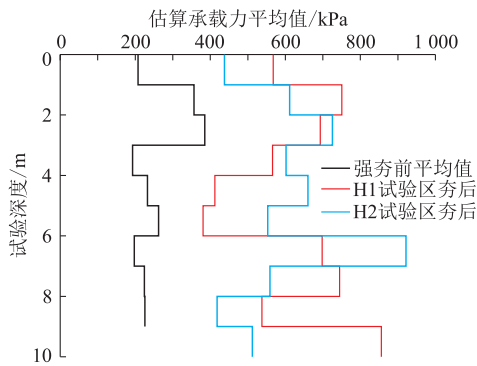


图 4 夯前及夯后地基承载力变化曲线

承载力均有较大幅度提高,稳定性好。

#### 4 地基加固效果数值模拟分析

由图 3 可知,在 11 击强夯作用下,H1-1 方案的强夯加固深度达 180.3 cm,H2-1 方案的强夯加固深度达 178.5 cm;在 10 击强夯作用下,H1-2 方案的强夯加固深度达 174.6 cm,H2-2 方案的强夯加固深度达 166.4 cm。碎石层厚度为 1 m 时,10 击强夯作用下强夯加固深度达 165 cm 以上;11 击强夯作用下强夯加固深度达 175 cm 以上。根据以往经验,猜测在固定夯击能级、夯锤落距、夯击次数等因素的前提下,随碎石层厚度的增加,强夯加固深度减小。

为研究不同碎石层厚度下强夯加固效果,验证猜测,利用 ABAQUS 数值模拟软件模拟研究强夯作用下不同碎石层厚度的土石分层地基强夯加固深度。

##### 4.1 数值模拟试验方案

现场试验均采用土石分层比 1:1 的方式进行回填处理(碎石层厚度为 1 m),为研究不同碎石层厚度的强夯加固深度,建立了 4 个不同碎石层厚度的模拟试验方案,各试验方案土石比参数见表 8。

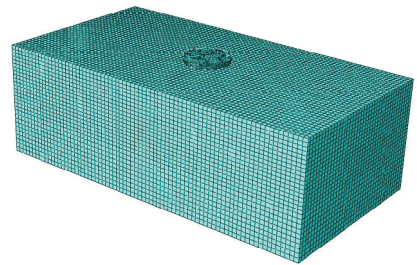


图 5 数值模型

加固范围内土体弹性模量  $E$ 、冲击荷载  $P_{max}$  和强夯瞬态作用时间  $t_N$  分别按式(1)~式(3)确定<sup>[16,19]</sup>。

$$E = E_0 \times N^{0.516} \quad (1)$$

$$P_{max} = \frac{u \times \sqrt{ms}}{\pi r^2} \quad (2)$$

$$t_N = \pi \sqrt{\frac{m}{s}} \quad (3)$$

其中, $u = \sqrt{2gh}$ ;  $s = \frac{2rE}{1-\nu^2}$ 。

式中,  $E_0$  为土体初始弹性模量, MPa;  $E$  为土的弹性模量, MPa;  $N$  为夯击次数;  $u$  为夯锤与土体接触时的速度, m/s;  $m$  为夯锤质量, t;  $r$  为夯锤半径, m;  $s$  为弹性常数;  $t_N = 0.1$  s。  $\nu$  为土的泊松比;  $h$  为落距, m。

#### 4.2 计算结果分析

模拟方案 S1(碎石层厚度为 1 m)的地基夯沉量现场实测值与模拟试验 S1 对比图如图 6 所示。

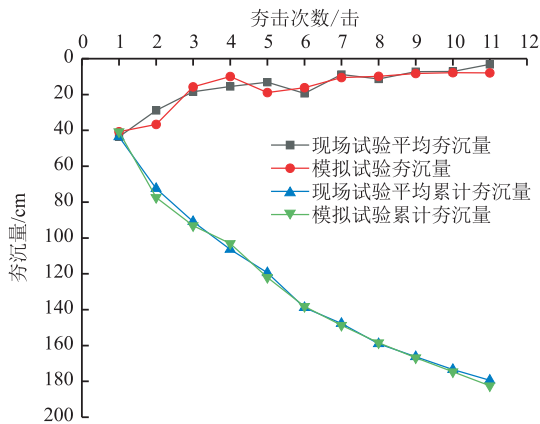


图 6 地基夯沉量现场实测值与模拟试验 S1 对比

由图 6 可知,数值模拟强夯过程所得的累计夯沉量约为 180 cm,与现场试验实测的平均夯沉量相差值小于 1 cm,差值较小;且最后两击的夯沉量平均值约为 7.85 cm,满足设计要求中的最后两击的平均夯沉量不大于 100 mm;模拟结果与现场试验结果较为吻合。

强夯 11 击后,模拟方案 S2、S3、S4 的夯击次数与夯沉量关系曲线如图 7 所示。最后两次夯平均夯沉量小于 10 cm 的夯击数和强夯 11 击的累计位移随碎石层厚度变化的曲线如图 8 所示。

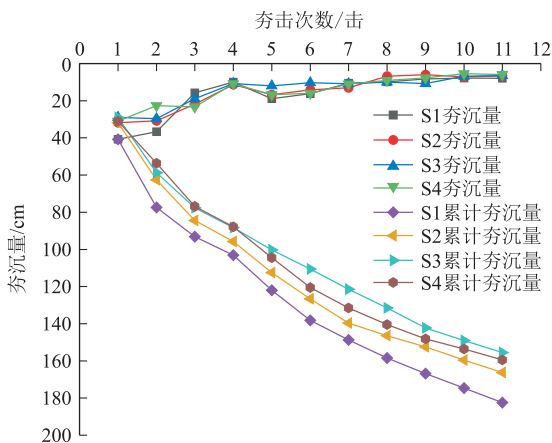


图 7 模拟试验夯击次数与夯沉量关系曲线

由图 7 和图 8 可知:(1)夯击初期,在 4 个不同的试验方案中,地基的夯沉量呈现出快速增长的趋

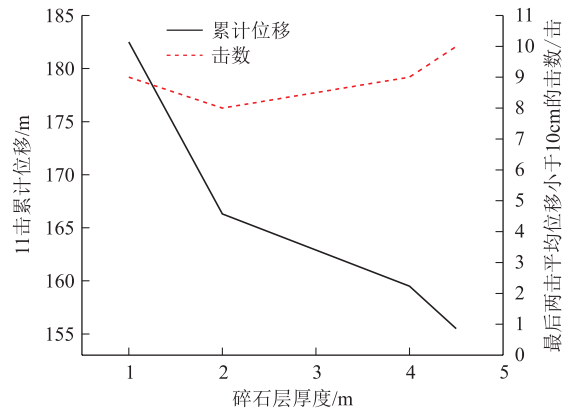


图 8 夯击数和累计位移随碎石层厚度变化曲线

势。然而,随着夯击次数的逐渐增多,土体的密度和弹性模量也在持续上升,导致单次下沉量逐步下降并最终趋于稳定。(2)在固定夯击能级、夯锤落距、夯击次数等因素的前提下,随着碎石层厚度的增加,由于碎石土的回填料密度和弹性模量比软土层大,强夯加固深度随碎石层厚度的增加呈现减小的规律。(3)碎石层厚度为 1 m 时,强夯击数为 9 击即可达到后两击平均夯沉量小于 10 cm 的设计要求;碎石层厚度为 2 m 时,强夯击数为 8 击即可达到后两击平均夯沉量小于 10 cm 的设计要求;碎石层厚度为 4 m 时,强夯击数为 9 击即可达到后两击平均夯沉量小于 10 cm 的设计要求;碎石层厚度为 4.5 m 时,强夯击数为 9 击即可达到后两击平均夯沉量小于 10 cm 的设计要求。(4)在固定夯击能级、夯锤落距、夯击次数等因素的前提下,随着碎石层厚度的变化,最后两次夯平均夯沉量小于 10 cm 的夯击数并无明显的变化规律。

## 5 结论

(1) 经强夯加固后,土石互层地基岩土体的干密度、含水率、孔隙比、压缩模量均得到了大幅度改善,加固后的地基承载力有较大幅度提高,土石互层地基强夯加固效果好。

(2) 在强夯 11 击内,碎石层厚度为 1 m、2 m、4 m 和 4.5 m 的强夯加固深度均能满足最后两击平均夯沉量小于 10 cm 的设计要求,且强夯加固深度随着碎石层厚度的增加而降低。

(3) 现场试验结果及数值模拟结果显示:碎石层厚度为 1 m 时,强夯击数 9 击可满足设计要求;碎石层厚度为 2 m 时,强夯击数 8 击可满足设计要求;碎石层厚度为 4 m 时,强夯击数 9 击可满足设计要求;碎石层厚度为 4.5 m 时,强夯击数 9 击可满足设计要求。强夯施工时,可根据经济、地基加固效果等

因素选择合适的土石比及夯击次数,以提高施工效率,加快施工进度。

### 参考文献

- [1] 王保田,张福海,祝子泓.强夯法加固岷江防洪堤粉土地基的效果检验[J].岩土力学,2004,25(7):1159-1162.
- [2] ZEKOS D, TSITSAS G, DIMITRIADI V, et al. Dynamic compaction of collapsible soils-case study from a motorway project in Romania[C]. XVI Ecsmge Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015.
- [3] 李增华.强夯技术在湿陷性黄土路基中的应用[J].铁道建筑,2010,50(2):82-84.
- [4] WU Shuai-feng, WEI Ying-qi, ZHANG Yin-qiu, et al. Dynamic compaction of a thick soil-stone fill: dynamic response and strengthening mechanisms[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: 105944.
- [5] ROLLINS K M, KIM J. Dynamic compaction of collapsible soils based on U. S. case histories[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(9): 1178-1186.
- [6] DU J F, WU S F, HOU S, et al. Deformation analysis of granular soils under dynamic compaction based on stochastic medium theory [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, (1): 1-10.
- [7] 宋修广,刘相宜,庄培艺,等.湿陷性黄土地基强夯加固控制指标的研究[J].铁道建筑,2011,51(4):101-103.
- [8] MOON J S, JUNG H S, LEE S J, et al. Ground improvement using dynamic compaction in Sabkha deposit [J]. Applied Science, 2019, 9(12): 2506-2522.
- [9] 贾剑青,贾超,赖远明,等.高速铁路路基加固效果及稳定性分析[J].中国安全科学学报,2020,30(6):50-56.
- [10] 魏迎奇,蔡红,吴帅峰,等.高填方土石混合料强夯振动响应及加固机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):237-240.
- [11] 李希,张勋,马新岩,张升.土石混合填料强夯过程三维离散元模拟[J].北京交通大学学报,2020,44(3):88-92+108.
- [12] 高政国,杜雨龙,黄晓波,等.碎石填筑场强夯加固机制及施工工艺[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):377-384.
- [13] 胡长明,梅源,王雪艳.离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J].岩土力学,2012,33(10):2903-2909.
- [14] 费香泽,王钊,周正兵.强夯加固深度的试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(4):56-59.
- [15] 栾帅,王凤来,水伟厚.残积土回填地极高能级强夯有效加固深度试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(10):151-158.
- [16] 贾剑青,刘杰,赖远明,等.高压旋喷桩复合地基承载力研究[J].中国铁道科学,2018,39(6):1-7.
- [17] 赵永船,张宁.软土地基框构桥顶进施工方法和控制措施研究[J].中国安全科学学报,2019,29(增2):77-81.
- [18] 范文超,蔡新,徐宝明,等.强夯荷载作用下地基竖向位移数值分析[J].水利水电科技进展,2018,38(4):75-79.
- [19] 詹金林,水伟厚,何立军.高能级强夯加固机理的数值模拟[J].水利水电科技进展,2008,28(06):15-19+27.

**作者简介:** 杨元富(2000—),男,昆明理工大学国土资源工程学院硕士研究生,主要研究方向:工程地质。E-mail:1757663697@qq.com

**通讯作者:** 陈刚(1981—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向:地质灾害调查、评价及数值模拟;复杂裂隙岩体渗流机理。

E-mail:chen\_kust@qq.com