

# 高填方路堤压实补强现场试验与方案优化

刘泽<sup>1</sup>, 王禹横<sup>1</sup>, 李梦竹<sup>2</sup>, 屈畅姿<sup>2</sup>, 曹峥<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学土木工程学院; 2. 湘潭大学土木工程学院)

**摘要:**以济源—新安高速公路路基工程为依托,设计并开展了高填方黄土路堤压实补强现场试验,探讨了强夯和冲击碾压两种补强方案的加固效果和影响深度,并采用有限元法针对现场补强效果较优的冲击碾压方案开展了施工参数优化分析。结果表明:强夯补强的影响深度范围为4~6 m,冲击碾压补强的影响深度范围为2~4 m;影响深度范围内土体的加固效果会随夯击次数或碾压遍数的增加而增强,但增幅逐渐减小,存在一个最优的夯击次数或碾压遍数;在现场试验的施工参数条件下,填高2 m后冲击碾压补强比填高4 m后强夯补强更有利于提高路基的压实度及均匀性;冲击碾压补强的影响深度随碾压遍数的增加而增大,碾压遍数达到20遍时其影响深度可达3 m;压实效果和影响深度均随冲击轮质量的增加而增大,随冲击轮行驶速度的增大先增后减,冲击轮最佳行驶速度为3 m/s。

**关键词:**压实补强;高填方;黄土路堤;加固效果;影响深度

**Field test and scheme optimization of compaction and reinforcement effects of high fill embankment//Liu Ze<sup>1</sup>, Wang Yuheng<sup>1</sup>, Li Mengzhu<sup>2</sup>, Qu Changzi<sup>2</sup>, Cao Zheng<sup>2</sup>(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology; 2. School of Civil Engineering, Xiangtan University)**

**Abstract:** Based on the subgrade project of Jiyuan-Xin'an Expressway, a field test of compaction and reinforcement of high-fill loess embankment was designed and conducted, the reinforcement effects and influence depth of two reinforcement schemes, namely dynamic compaction and impact rolling, were discussed, and the finite element method was used to further optimize the construction parameters for the impact rolling scheme with better field reinforcement effect. The results show that the influence depth of dynamic compaction reinforcement ranges from 4 to 6 m, while that of impact rolling reinforcement ranges from 2 to 4 m. Within the influence depth range, the reinforcement effect of soil improves with an increase in dynamic compaction or rolling times, but the increase gradually decreases, indicating an optimal dynamic compaction or rolling time. According to the construction parameters of the in-situ test, impact rolling reinforcement after a 2-m fill height is more effective in improving the compaction degree and uniformity of the subgrade compared to dynamic compaction reinforcement after a 4-m fill height. The influence depth of impact rolling reinforcement increases with the rolling time, reaching up to 3 m after 20 times. Both the compaction effect and influence depth increase with the mass of the impact wheel but first increase and then decrease with an increase in the traveling speed of the impact wheel. The optimal traveling speed of the impact wheel is 3 m/s.

**Key words:** supplementary compaction; high fill; loess embankment; reinforcement effect; impact depth

在对高填方黄土路堤进行常规压实并达到目标压实度后,可进一步采用强夯或冲击碾压等方法进行补强。此举能显著提升土体压实度,从而增强土体抵抗变形的能力和路基整体强度,改善路基承载性能,消除黄土湿陷性,并减少路堤的不均匀沉降<sup>[1-3]</sup>。

强夯具有施工周期短、加固效果显著、适用范围广等特点,被广泛应用于路基压实和地基处理。例如:冯世进等<sup>[4]</sup>、曹利等<sup>[5]</sup>分别针对粉土地基和黄

土地基开展了强夯模型试验,分析了夯击次数、强夯能级、夯锤直径、夯锤落距、坡比等参数对地基振动衰减规律的影响,研究了参数变化对强夯加固效果的作用;Zhang等<sup>[6]</sup>通过数值计算分析了不同强夯能级加固填方路堤的应力场、位移场、塑性区变化规律,得出了强夯加固填方路堤的最优能级,并将该方案应用于现场,发现数值计算结果和现场实测结果相吻合;赵向阳等<sup>[7-8]</sup>采用有限元软件分析了夯锤重量、夯锤直径、落距等参数对强夯加固回填土地基的

加固效果和有效加固深度的影响。

冲击碾压是利用非圆形冲击轮行走时给土体施加冲击力,使土体产生应力和应变,从而达到压实土体的目的。例如:占鑫杰等<sup>[9]</sup>开展了冲击碾压加固堰塞坝料的模型试验,分析了行驶速度、冲击轮质量对动应力传播衰减规律、变形特性的影响,并结合冲击碾压过程中填料颗粒运动情况,探讨了冲击碾压加固机理;李文炜等<sup>[10]</sup>对冲击碾压过程中的填料压实机制进行了细观层面分析;陈忠清等<sup>[11-12]</sup>采用自制的冲击碾压模拟设备开展了不同工况下的冲击碾压加固砂土模型试验,分析了冲击轮行驶速度、质量、尺寸对冲击碾压加固效果的影响以及砂土应力应变分布及衰减规律;Rohleder 等<sup>[13]</sup>的现场试验结果表明,冲击碾压加固粉煤灰可显著降低土体孔隙率;Scott 等<sup>[14]</sup>、Nohani 等<sup>[15]</sup>分别研究了冲击轮轮重和土体含水率对冲击压实影响深度的影响,并对比分析了三边形冲击轮和四边形冲击轮的孔隙压力和土体应力大小;Ranasinghe 等<sup>[16]</sup>通过现场试验研究了四边形冲击压路机行驶速度对土体应力分布规律的影响;张星等<sup>[17]</sup>则对冲击压路机的行驶路径优化问题开展了研究。

目前对于高填方黄土路堤压实补强施工方法没有统一的标准,现有研究大多集中在单一方法的施工效果与设计参数上,对于两种方法的差异及优化研究少见报道。为此,本文结合河南济源—新安高速公路高填方黄土路堤工程的施工,通过现场试验获取两种补强方法的加固效果和有效影响深度,再以补强效果较好的方案(冲击碾压)为研究对象,建立三维动力分析模型,分析了补强过程中土体动力响应特性,并探讨了冲击轮行驶速度、质量等参数对加固效果的影响,以期在实际工程冲击碾压补强的施工方案优化提供参考。

## 1 现场试验

### 1.1 压实补强方案

河南济源—新安高速公路位于洛阳北部,沿线地势起伏变化大,深挖高填路段多,路基填料多为黄土。为保证高填方黄土路基的稳定性、减少工后沉降,拟采用强夯或冲击碾压对高填方路段进行压实补强。

路堤填筑压实施工工艺一般包括施工准备、填前检测、上料、摊铺、整平、碾压、压实度检测、压实补强等工序。为了明确两种补强方法加固效果优劣,选择了工程两个路段分别进行强夯补强和冲击碾压补强。

强夯补强在 K25+740 至 K25+880 路段进行,其填筑压实方案为:①采用 RS196 型振动压路机(自

重 19.6 t)静力压实 4 遍,压路机的行驶速度控制为 4 km/h;②振动压实 2 遍,振动频率为 30 Hz,行驶速度为 4 km/h,激振力为 360 kN,振幅为 1.8 mm;③每填高 4 m 采用能量为 2 000 kN/m 强夯补强 3 遍,夯锤重 20 t,锤径  $d$  为 2 m,提升 10 m 对土体进行夯击,夯点间距为  $2d$ ,夯击遍数为 3 遍。夯点布置见图 1。

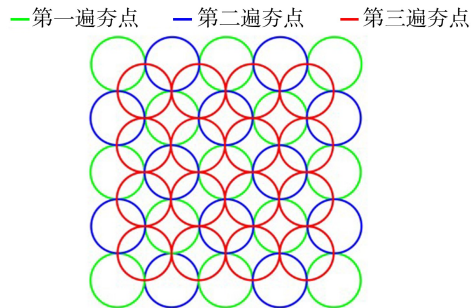


图 1 强夯补强方案

冲击碾压补强在 DK0+140 至 DK0+324 路段进行,其填筑压实方案为:①采用与 K25+740 至 K25+880 路段同样的设备和参数先静力压实 4 遍后振动压实 2 遍;②每填高 2 m 后采用 CYZ-25 三边形冲击压路机对土体进行冲击碾压补强,三边形冲击轮的宽度为 0.9 m,轮间距为 1.17 m,行驶速度为 11 km/h,往返一次冲击碾压宽度为 4 m,拟定碾压遍数为 20 遍。冲击碾压补强方案见图 2。

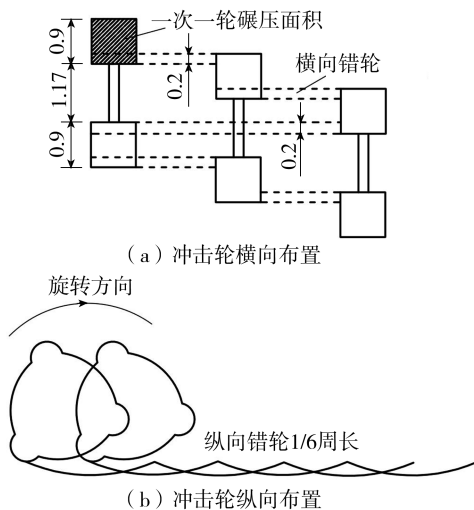


图 2 冲击碾压补强方案(单位:m)

### 1.2 监测方案

为评价两种方法的补强效果,结合 DK0+140 至 DK0+324 路段填筑进度,在路基内埋设了加速度计和动土压力盒两种元器件以测量补强施工时的动力响应。元器件布置方案如图 3 所示:强夯补强时,在距离坡肩 5 m 位置处从坡顶向下、在 0.3、2、4、6、8 m 深度处分别布设一个加速度计,用于测试不同深度处的加速度响应;在坡顶横向距坡肩 6.5 m(距离加速度计 1.5 m)处、距坡顶 0.3、2、4、6、8 m 深度处分

别埋设一个电阻应变式动土压力盒,用于测试不同深度处的动土压力响应。由于强夯断面和冲击碾压断面的施工进度不同,当强夯补强的二级边坡断面填筑完成时,冲击碾压补强二级边坡断面只填筑到4 m,故在冲击碾压补强的边坡高度4 m,距离坡面11 m和12.5 m处向下0.3、2、4 m深度处也埋设了加速度计和动土压力盒。

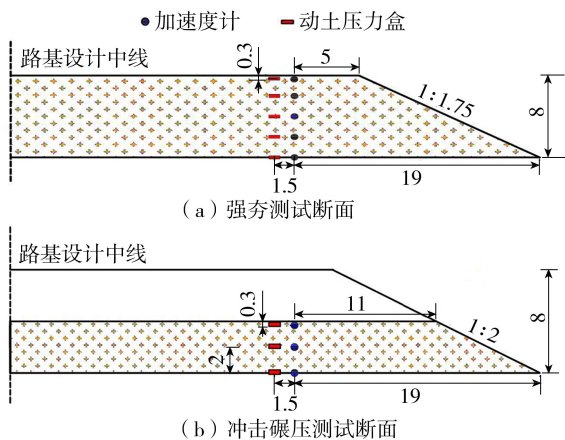


图3 测试元器件布设(单位:m)

### 1.3 补强效果与影响深度对比

#### 1.3.1 压实效果对比

由于压实补强针对的路基厚度较大,很难采用灌砂法进行压实度检测。为解决这一问题,综合比较后拟采用压缩法测定土层平均压实度。为此,需要先测定不同压实度黄土的压缩波速并建立压缩波速与压实度的关系。土层压缩波速的测定以 GB/T 50269—2015《地基动力特性测试规范》中的单孔法为依据。具体方法为:先在试验段合适位置开挖出一个土坑(长70 cm、宽50 cm、深80 cm),再采用质量密度控制法进行目标压实度的土坑回填,回填过程中在距离土坑底部10、70 cm处各埋设一个加速度计,然后在压实后的土层顶面进行振激并采集加速度计的数据,根据式(1)计算压缩波速,并建立土层压缩波速与压实度的关系。

$$v_s = L/\Delta T \quad (1)$$

式中: $v_s$ 为填料的压缩波速,m/s; $L$ 为两个测试元器件的垂直距离, $L=0.6$  m; $\Delta T$ 为两个测试元器件采集到的加速度时程曲线中加速度峰值点出现的时间间隔,s。

为此,先后按目标压实度92%、94%、96%、98%进行了压实黄土压缩波速的测定,获得了压实黄土压缩波速与压实度的关系,如图4所示。

在两种补强方法施工时进行了不同深度处的加速度响应测量,按式(1)得到两种补强方法施工后一定深度范围内的压缩波速,结合图4所示压实黄土压缩波速与压实度关系,可获得该深度范围内的

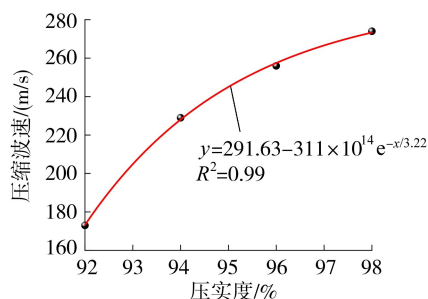


图4 压实黄土压缩波速与压实度关系标定曲线

平均压实度。实测结果见表1。由表1可知,相同深度范围内冲击碾压达到的压实度大于强夯。在深度0~0.3 m和>0.3~2.0 m范围内,冲击碾压和强夯压实度之间的差值分别为1.1%、0.7%,这表明在0~2.0 m深度范围内,冲击碾压比强夯具有更好的补强效果。

表1 各深度范围内两种补强方法的压实度

| 深度/m     | 压实度/% |      |
|----------|-------|------|
|          | 强夯    | 冲击碾压 |
| 0~0.3    | 96.2  | 97.3 |
| >0.3~2.0 | 96.0  | 96.7 |
| >2.0~4.0 | 95.1  | 95.6 |

#### 1.3.2 影响深度对比

图5为强夯补强作用下动力响应峰值沿深度的分布曲线。由图5可知,强夯作用下路基内的加速度和动应力均随深度增加而非线性减小,具有明显的衰减特征。第1次夯击时,与深度0.3 m处的动力响应峰值相比,强夯引起的振动加速度峰值在深度为2、4、6、8 m处分别衰减了56.2%、84.0%、97.0%、99.7%,动应力峰值分别衰减了46.9%、73.0%、93.9%、99.0%;深度6 m处加速度峰值和动应力峰值均已衰减超过90%,故可认为强夯补强影

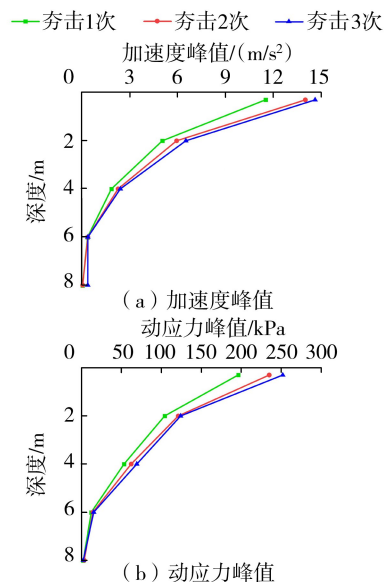


图5 强夯补强作用下动力响应峰值沿深度的分布曲线

响深度范围为 4~6 m。随着夯击次数的增加,曲线形态基本不变,深度 6 m 以上土体的动力响应峰值会增大,但增幅随夯击次数的增加而减小,第 3 次夯击时的加速度峰值、动应力峰值曲线都非常接近第 2 次强夯时的曲线,表明强夯效果并不会随夯击次数的增加而持续增大。

图 6 为冲击碾压补强作用下动力响应峰值沿深度的分布曲线。由图 6 可知,第 1 遍冲击碾压时,与深度 0.3 m 处的动力响应峰值相比,振动引起的加速度峰值在深度 2、4 m 处分别衰减了 20.6%、93.1%,动应力峰值则分别衰减了 48.5%、93.2%。深度 4 m 处的加速度峰值和动应力峰值衰减量已超过 90%,可认为冲击碾压的影响深度范围为 2~4 m。从图 6(b) 可以看到,随着碾压遍数的增加,动应力峰值会增加,但第 20 遍冲击碾压时的动应力峰值曲线与第 10 遍的曲线比较接近,表明随着碾压遍数的增加,其补强效果逐渐趋于饱和,存在一个最优的碾压遍数。而对比图 5(a) 和图 6(a) 可知,冲击碾压的加速度峰值分布曲线的规律性并没有强夯明显,主要原因在于冲击碾压施工时,冲击轮有两个,且同时对土层施加冲击作用,引起的振动具有明显的叠加、干扰效应。

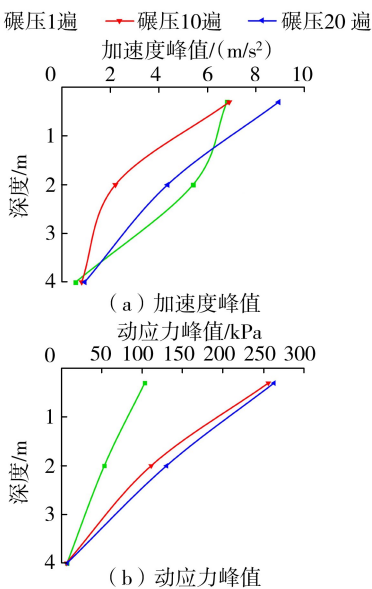


图 6 冲击碾压补强作用下动力响应峰值沿深度的分布曲线

由此可见,在上述施工参数条件下,填高 2 m 后冲击碾压补强要比填高 4 m 后强夯补强更有利于提高路基的压实度及均匀性。

## 2 基于有限元分析的补强方案优化分析

### 2.1 模型建立

为进一步发挥冲击碾压补强的作用,采用 ABAQUS 建立有限元模型开展模拟分析。以 DK0+

140 至 DK0+324 路段为原型,建立顶面长 43.5 m、高 8 m、底长 61.1 m、厚 9 m 的三维路堤模型;再以现场冲击压实机为模拟对象,建立宽度为 0.9 m、质量为 6 t 的单轮三边形冲击轮三维分析模型,如图 7 所示。

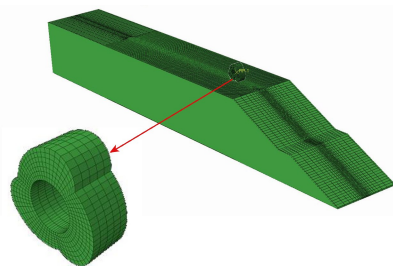


图 7 模型建立

模型中的土体包括两部分:顶部 0~2 m 部分为未补强土层,下方 2~8 m 部分为已补强土层。土层采用莫尔库仑模型,冲击轮选用线弹性本构模型。模型各部分的参数见表 2。在土体表面和冲击轮外表面设置接触单元,接触单元的参数为:法向行为设为“硬”接触,切向行为采用“罚”函数,摩擦系数为 0.3。模型共设置两种边界:①静态边界,对模型底面限制  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移, $yOz$  平面限制  $x$  方向的位移;②无限元边界,考虑模型厚度较小,冲击碾压补强产生的振动波传递,将需要设置无限元边界的两个  $xOz$  平面向内部平移 0.1 m 作为基准平面,并使用 ABAQUS 自带的“拆分几何元素”工具将路基沿基准平面进行拆分;网格类型设置为 DC3D8E,然后在 inp 文件中将其改为 CIN3D8。坡面和顶面为自由面。

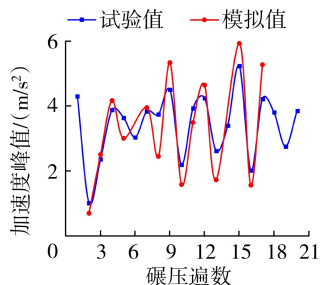
表 2 土体及冲击轮材料参数

| 材料    | 密度/<br>( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 模量/<br>MPa | 泊松比  | 内摩擦<br>角/ $(^\circ)$ | 黏聚力/<br>kPa |
|-------|-----------------------------------|------------|------|----------------------|-------------|
| 未补强土层 | 1497                              | 1.61       | 0.33 | 25.3                 | 21.6        |
| 已补强土层 | 1546                              | 2.25       | 0.33 | 27.0                 | 24.5        |
| 冲击轮   | 7850                              | 210000     | 0.28 |                      |             |

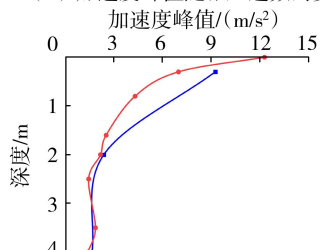
### 2.2 模型验证

数值模型建立后进行冲击碾压动力计算。图 8 为路基内加速度峰值的数值计算结果与实测结果对比。对比可知,数值计算结果与实测结果随碾压遍数增加的变化基本规律一致;由于土体本构模型简化、边界条件设定等因素的影响,两者间的量值存在一定的误差,但最大误差不超过 30%,可以认为该数值模型较为合理,可用于进一步分析。

路堤经过多遍碾压后土体沉降沿深度的分布曲线如图 9 所示。由图 9 可知,土体表面沉降最大,沿深度方向逐渐减弱。深度 2 m 以上的土体沉降随着碾压遍数的增加而增大,可见增加碾压遍数对表层土体加固效果会优于 2 m 以下的土体。



(a) 加速度峰值随碾压遍数的变化



(b) 加速度峰值沿深度的分布

图8 模型验证

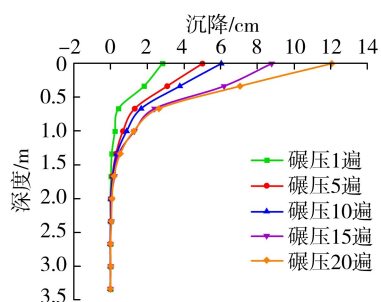


图9 不同碾压遍数下土体沉降沿深度的分布曲线

图10为竖向动应力峰值沿深度的分布曲线。由图10可知,深度1.3m以上土体的竖向动应力峰值沿深度呈增减交替的波动性变化;深度1.3m以下土体的竖向动应力峰值随深度的增加逐渐减小并趋于零;随着碾压遍数的增加,归零处的深度在增加。文献[18]将0.2倍的土体自重应力等于冲击碾压引起竖向动应力峰值时的深度值作为影响深度。可见,冲击碾压的影响深度会随着碾压遍数的增加而增大,碾压20遍时其影响深度可达3m。

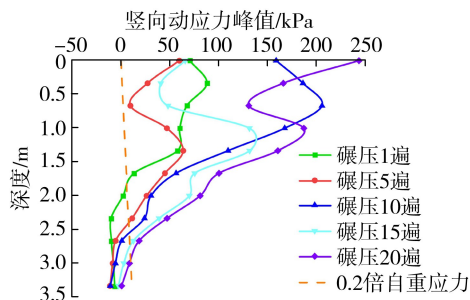


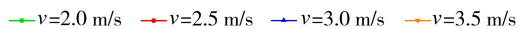
图10 不同碾压遍数下竖向动应力峰值沿深度的分布曲线

## 2.3 冲击碾压参数分析

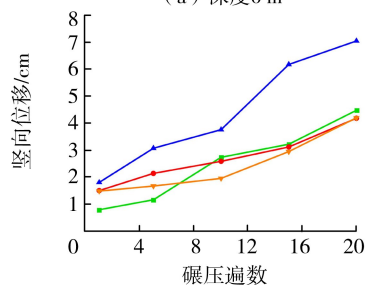
### 2.3.1 冲击轮行驶速度的影响

图11为不同冲击轮行驶速度下土体竖向位移随碾压遍数的变化,图中 $v$ 为冲击轮行驶速度。深

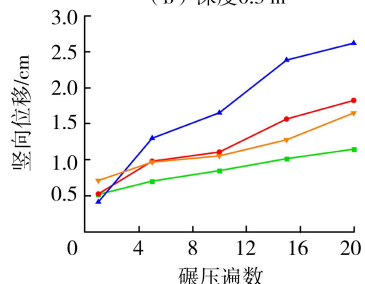
度超过1m土体竖向位移量值较小,限于篇幅未列出。整体而言,各工况下土体竖向位移均随着碾压遍数的增加而增大、随着深度的增加而减小。另外,冲击轮行驶速度从2m/s上升到3m/s时,土体竖向位移逐渐增加,当冲击轮行驶速度进一步增加时,土体竖向位移则有一定程度的减小。



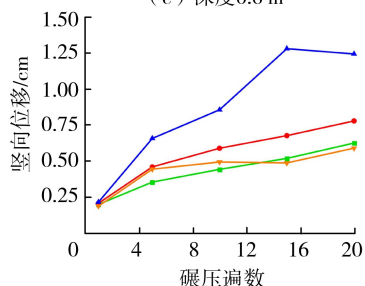
(a) 深度0m



(b) 深度0.3m



(c) 深度0.6m



(d) 深度1.0m

图11 不同冲击轮行驶速度下土体竖向位移随碾压遍数的变化

图12为不同冲击轮行驶速度下土体竖向动应力峰值沿深度的分布曲线。由图12可知,冲击碾压作用下土体竖向动应力峰值沿深度呈非线性分布;随着冲击轮行驶速度的增加,土体竖向动应力峰值呈先增加后减小的趋势,冲击轮行驶速度为3m/s时竖向动应力峰值较大。由图12(d)可知,碾压20遍时影响深度分别为2.78、2.83、2.96、2.79m,

可见冲击碾压补强的影响深度随冲击轮行驶速度的增加呈先增加后减小的趋势,行驶速度为 3 m/s 时影响深度最大。

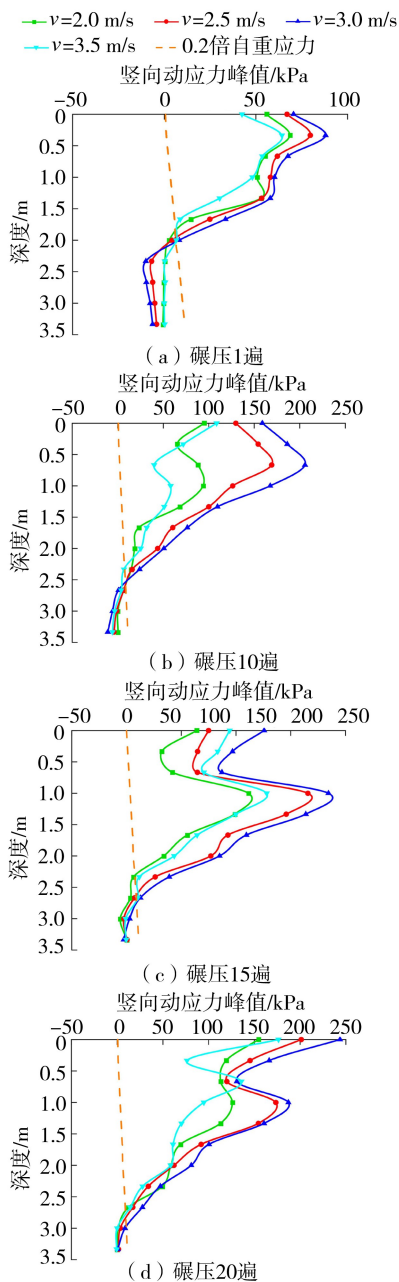


图 12 不同冲击轮行驶速度下土体竖向动应力峰值沿深度的分布曲线

### 2.3.2 冲击轮质量的影响

图 13 为不同冲击轮质量下土体沉降随碾压遍数的变化,图中  $m$  为冲击轮质量。由图 13 可知,土体沉降均随着碾压遍数的增加而增大,但随着深度的增加而减小;不同深度处的土体沉降均随着冲击轮质量的提高而增大。在深度 0、0.3、0.6、1.0 m 处采用质量为 7 t 的冲击轮分别碾压 16、13、10、8 遍时的土体沉降可达到现场冲击碾压补强(质量为 6 t)碾压 20 遍时的土体沉降(即图中虚线与曲线的交点)。

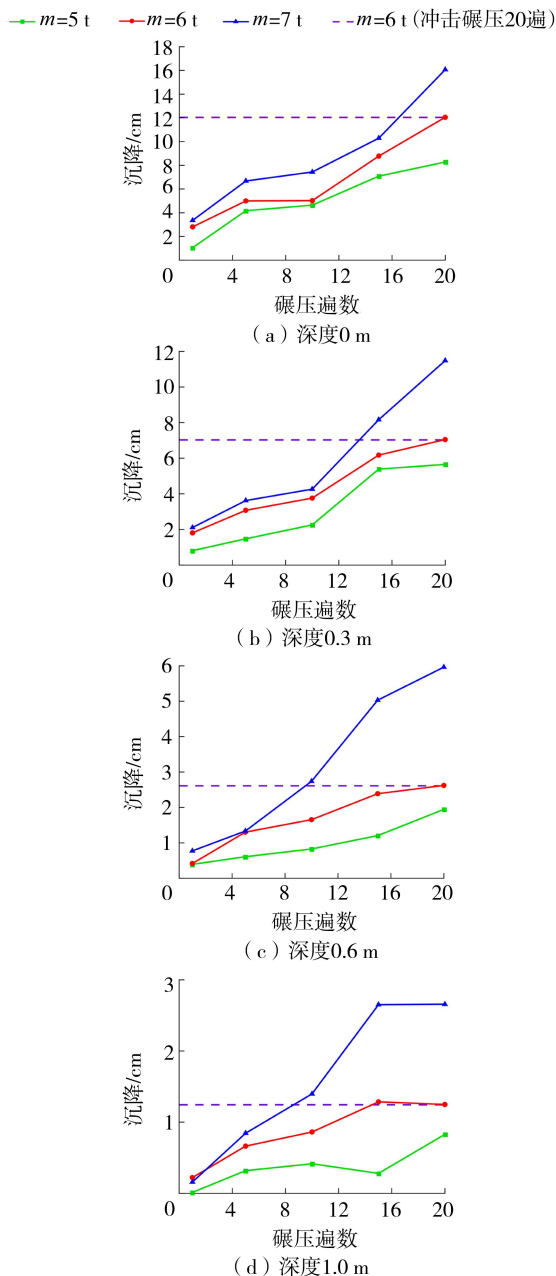


图 13 不同冲击轮质量下土体沉降随碾压遍数的变化

图 14 为不同冲击轮质量下土体竖向动应力峰值沿深度的分布曲线。由图 14 可知,竖向动应力峰值沿深度方向呈非线性分布;竖向动应力峰值随着冲击轮质量的增加而增加。采用质量为 5、6、7 t 的冲击轮碾压 20 遍时影响深度分别为 2.89、2.96、3.03 m,可见冲击碾压补强影响深度随着冲击轮质量的增加而提高。

由前述沉降分析可知,采用质量为 7 t 的冲击轮将碾压遍数由拟定的 20 遍减少为 16 遍时各深度处的土体沉降可达到甚至超过现场冲击碾压补强(质量为 6 t)碾压 20 遍时的土体沉降,若以土体沉降为判定指标,增加冲击轮质量的同时,可适当减少碾压遍数,进而提高施工效率,缩短工期。

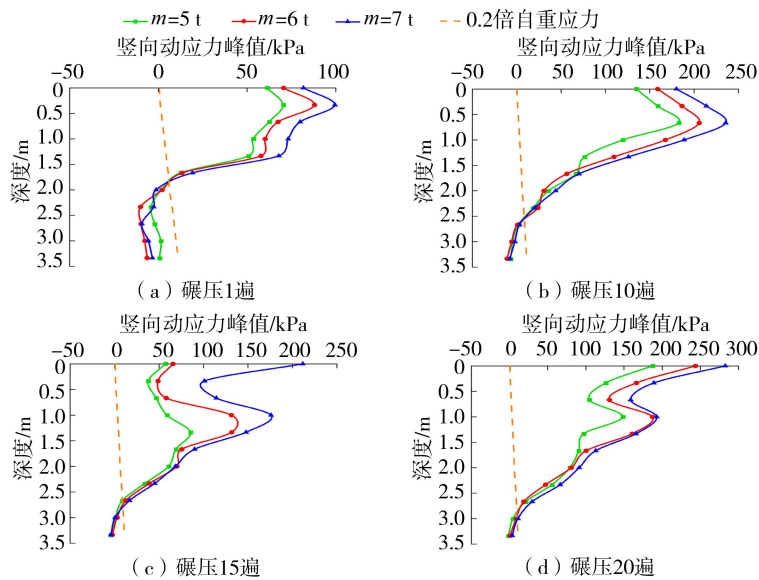


图 14 不同冲击轮质量下土体竖向动应力峰值沿深度的分布曲线

### 3 结 论

a. 现场试验强夯补强的影响深度范围为 4~6 m, 冲击碾压补强的影响深度范围为 2~4 m; 影响深度范围内土体的加固效果随着夯击次数或碾压遍数的增加而增强, 但增幅会逐渐减小, 存在一个最优的夯击次数或碾压遍数。

b. 在现场试验施工参数条件下, 填高 2 m 后冲击碾压补强比填高 4 m 后强夯补强更有利于提高路基的压实度及均匀性。

c. 冲击碾压补强的影响深度随着碾压遍数的增加而增大, 碾压 20 遍时其影响深度可以达到 3 m。

d. 冲击轮最佳行驶速度为 3 m/s, 在拖行设备能力条件范围内, 增加冲击轮质量有利于提高补强效果和施工效率。

#### 参考文献:

[ 1 ] Li Qian, Tang Chuan, Fu Le, et al. Practice research on wet-collapsible loess foundation treatment by high energy dynamic compaction [ J ]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204-208 : 635-639.

[ 2 ] Zhao Zhenrong, Yang Hongxia. Construction quality control of dynamic compaction method treatment collapsible loess foundation [ J ]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597 : 1149-1152.

[ 3 ] 温会芳. 高速公路高填方路基强夯补强施工及现场试验研究 [ J ]. 江西建材, 2024 ( 3 ) : 55-57. ( Wen Huifang. Study on dynamic consolidation construction and field test of high fill subgrade of expressway [ J ]. Jiangxi Building Materials, 2024 ( 3 ) : 55-57. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 冯世进, 胡斌, 张旭, 等. 强夯参数对夯击效果影响的室

内模型试验 [ J ]. 同济大学学报 ( 自然科学版 ), 2012, 40 ( 8 ) : 1147-1153. ( Feng Shijin, Hu Bin, Zhang Xu, et al. Model test study on impact parameters' influence on tamping effect [ J ]. Journal of Tongji University ( Natural Science ), 2012, 40 ( 8 ) : 1147-1153. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 曹利, 卞海丁, 张哲, 等. 高能级强夯黄土地基振动衰减规律模型试验研究 [ J ]. 科学技术与工程, 2023, 23 ( 15 ) : 6581-6590. ( Cao Li, Bian Haiding, Zhang Zhe, et al. Model test study on vibration attenuation law of high energy dynamic compaction loess foundation [ J ]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 ( 15 ) : 6581-6590. ( in Chinese ) )

[ 6 ] Zhang Lu, Yang Guangqing, Zhang Dongliang, et al. Field test and numerical simulation of dynamic compaction of high embankment filled with soil-rock [ J ]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019 ( 1 ) : 6040793.

[ 7 ] 赵向阳. 强夯法地基加固的数值模拟 [ D ]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.

[ 8 ] 张丽娟. 强夯法地基加固数值模拟及工程案例 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2020.

[ 9 ] 占鑫杰, 李文伟, 杨守华, 等. 冲击碾压法加固堰塞坝料的室内模型试验研究 [ J ]. 水利水运工程学报, 2023 ( 4 ) : 138-146. ( Zhan Xinjie, Li Wenwei, Yang Shouhua, et al. Model test study on landslide dam material improvement by rolling dynamic compaction [ J ]. Hydro-Science and Engineering, 2023 ( 4 ) : 138-146. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 李文伟, 占鑫杰, 王保田, 等. 冲击碾压加固松散堰塞坝料的细观机制研究 [ J ]. 岩土力学, 2023, 44 ( 8 ) : 2297-2307. ( Li Wenwei, Zhan Xinjie, Wang Baotian, et al. Meso-mechanism of rolling dynamic compaction to reinforce loose landslide dam material [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44 ( 8 ) : 2297-2307. ( in Chinese ) )

( 下转第 82 页 )

- Engineering, 2017, 143(9):03117006.
- [23] 何梦星,林颖典,黄天炜,等. 弯道对植被群河道水流结构影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 11-20. (He Mengxing, Lin Yingdian, Huang Tianwei, et al. Effect of curved channel on flow structure with vegetation patch [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 11-20. (in Chinese))
- [24] Valela C, Sirianni D A B, Nistor I, et al. Bridge pier scour under ice cover[J]. Water, 2021, 13(4):536.
- [25] Rodi W. Turbulence modeling and simulation in hydraulics; a historical review [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(5):03117001.
- [26] 刘洋,徐毅,王茂枚,等. 方形桥墩紊动特性及尾涡区尺寸 PIV 试验[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4):55-60. (Liu Yang, Xu Yi, Wang Maomei, et al. PIV experiments on turbulence characteristics and tail vortex zone scale of a square pier[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4):55-60. (in Chinese))
- [27] Jia Yafei, Altinakar M, Guney M S. Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3):351-366.
- [28] Wu Peng, Balachandar R, Sui Jueyi. Local scour around bridge piers under ice-covered conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(1):04015038.
- [29] 潘志刚,林祥峰,张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6):78-81. (Pan Zhigang, Lin Xiangfeng, Zhang Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):78-81. (in Chinese))
- [30] 黄君宝,肖厅厅,孙志林,等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5):441-446. (Huang Junbao, Xiao Tingting, Sun Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5):441-446. (in Chinese))
- [31] 王飞,姚磊华,张彬,等. 桥墩局部冲刷动态模拟及不同截面的冲刷特性[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3):81-87. (Wang Fei, Yao Leihua, Zhang Bin, et al. Dynamic simulation of local scour around bridge piers and scouring characteristics of piers with different cross sections [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):81-87. (in Chinese))
- [32] 邓斌,唐瑶,蒋昌波,等. 开孔桥墩墩后水动力特性 PIV 试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3):8-14. (Deng Bin, Tang Yao, Jiang Changbo, et al. PIV experimental study on hydrodynamic characteristics of flow past a hollow pier [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):8-14. (in Chinese))
- [33] 潘光辉. 冰盖作用下桥墩的局部冲刷与防护[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.  
(收稿日期:2024-08-15 编辑:俞云利)

(上接第 66 页)

- [11] 陈忠清,徐超,吕越. 冲击碾压加固砂土模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2):525-531. (Chen Zhongqing, Xu Chao, Lyu Yue. Model test of impact roller compaction for dry sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2):525-531. (in Chinese))
- [12] 陈忠清,吕越,徐超. 冲击碾压荷载下砂土位移特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1):241-245. (Chen Zhongqing, Lyu Yue, Xu Chao. Experimental tests on displacement characteristics of sand subjected to impact roller compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1):241-245. (in Chinese))
- [13] Rohleder R, Stallard H. Case study: compaction of coal ash fill by impact rolling as a method of subgrade improvement beneath a heavy duty pavement [J]. Australian Geomechanics Journal, 2014, 49(1):55-66.
- [14] Scott B T, Jaksa M B, Mitchell P W. Influence of towing speed on effectiveness of rolling dynamic compaction [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(1):126-134.
- [15] Nohani E, Mirzaei H. Distribution of effective stress in compaction of earth dams due to the three-sided impact roller and comparing with four-sided roller field data [J]. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2014, 21(3):114-124.
- [16] Ranasinghe R A T M, Jaksa M B, Nejad F P, et al. Genetic programming for predictions of effectiveness of rolling dynamic compaction with dynamic cone penetrometer test results [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(4):815-823.
- [17] 张星,姚仰平. 冲击压路机路径优化与控制方法 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(11):311-322. (Zhang Xing, Yao Yangping. Compaction-path optimization and path control for an impact roller [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(11):311-322. (in Chinese))
- [18] 于一凡. 黄泛区粉土路基冲击压实动力特性研究与机理分析[D]. 济南:山东大学, 2016.  
(收稿日期:2024-08-20 编辑:俞云利)