

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.09.013

高速液压夯加固台背碎石土现场试验研究

张思峰^{*1}, 牛立可¹, 李庆², 张集镇², 王长伟³

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省高速养护集团有限公司, 山东 济南 250032;
3. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 为探究高速液压夯加固碎石土的动力特性及影响规律, 依托潍坊至青岛高速公路某台背回填工程, 开展了高速液压夯加固箱涵背侧回填碎石土的现场试验研究。试验采用预埋土压力计、应变片等监测元件的方式, 监测夯击过程中碎石土及涵背的应力、应变发展规律。以动应力、残余应力、夯沉量、标准贯入击数及涵背应变作为评价指标, 探究了高速液压夯的动应力传播规律, 分析了夯击次数、夯击能、夯间距等因素对碎石土加固效果以及施工振动对桥涵台背的影响。结果表明: 高速液压夯所产生的动应力主要沿竖向传递, 有效加固深度可达2 m, 在水平向0.5 m范围内衰减速度快; 由于夯击对周围土体的加固作用, 对临近夯点夯击时, 其动应力明显增加; 增加夯击能可有效提高加固效果, 使用高档位夯击时加固效果更为显著; 加固效果随夯击次数的增加而增强, 但每一击所产生的密实效果逐渐降低, 对碎石土路基, 夯击次数以小于9次为宜; 适当减小夯间距可提高加固效果, 适宜夯间距为1.5倍夯锤直径; 夯击产生的涵背结构物应变远小于规范值, 对箱涵等构筑物的安全影响很小。研究成果可为类似桥涵台背路基填土夯实工程的设计及施工提供借鉴和参考。

关键词: 桥梁工程; 高速液压夯; 现场试验; 碎石土; 加固效果; 影响因素

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 09-0113-10

Experimental Study on Abutment Back Gravel Soil Reinforced with Rapid Hydraulic Impact Compaction

ZHANG Si-feng^{*1}, NIU Li-ke¹, LI Qing², ZHANG Jian-zhen², WANG Chang-wei³

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;
2. Shandong Hi-speed Maintenance Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250032, China;
3. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: To explore the dynamic characteristics and influencing rule of gravel soil reinforced with rapid hydraulic impact compaction, the field test of box culvert abutment backfill gravel soil reinforced with rapid hydraulic impact compaction was carried out based on the abutment backfill project on Weifang-Qingdao expressway. The test used embedded soil pressure gauges, strain gauges and other monitoring elements to monitor the stress and strain development rule of gravel soil and culvert back during the tamping process. Taking dynamic stress, residual stress, tamping settlement, standard penetration number and culvert back strain as evaluation indicators, the dynamic stress propagation rule of rapid hydraulic impact compaction was explored. The influence of tamping times, tamping energy, tamping spacing and other factors on the reinforcement effect of gravel soil was analyzed; meanwhile the influence of construction vibration on the bridge culvert abutment back was analyzed. The result indicates that the dynamic stress generated by rapid hydraulic impact compaction is mainly transmitted along the vertical direction. The effective reinforcement

收稿日期: 2023-05-23

基金项目: 山东高速集团有限公司科研项目 (2021-SCS-WQSB-QT-017)

作者简介 (* 通讯作者): 张思峰 (1976-), 男, 山东金乡人, 博士, 教授. (sddxzf@163.com)

depth can reach 2 m, and the attenuation speed is fast in the horizontal range of 0.5 m. Due to the reinforcement effect of tamping on surrounding soil, the dynamic stress increases obviously when the tamping point is close to the tamping point. Increasing tamping can effectively improve the reinforcement effect, and the reinforcement effect is more significant when using high-grade tamping. The reinforcement effect increases with the increase of number of tamping times, but the compaction effect produced by each blow gradually decreases. For the gravel soil subgrade, the number of tamping times should be less than 9. Appropriately reducing the tamping spacing can improve the reinforcement effect, and the appropriate tamping spacing is 1.5 times of the hammer diameter. The strain of culvert back structure caused by tamping, which has little effect on the safety of box culvert and other structures, is far less than the standard value. The study result can provide the design and construction references for similar bridge culvert abutment back subgrade filling compaction projects.

Key words: bridge engineering; rapid hydraulic impact compaction; field test; gravel soil; reinforcement effect; influencing factor

0 引言

“桥头跳车”是目前高等级公路建设中经常出现的工程问题之一,主要由桥涵过渡段的不均匀沉降所造成,因此加强台背填土处治,减小其工后沉降是消除或减轻桥头跳车病害的重要工程技术措施。但受桥涵台背工作面狭小,强夯及大型施工机械难以操作等因素影响,桥涵台背回填土压实一直是工程界面临的技术难题之一。作为近年发展起来的一种地基处理新方法,高速液压夯具有所需工作面小、施工操作灵活、夯击频率快等优势^[1],已成为桥涵台背段路基填土补强压实的有效手段。

目前,有关高速液压夯的相关研究成果主要集中于对其加固机理及加固效果的理论分析和数值模拟研究上。Adam等^[2]对高速液压夯实的加固机理进行了研究,认为夯击产生的冲击波是路基土体产生密实的主要原因;冯忠绪等^[3]建立了液压夯实过程的动力学模型,得到了有效加固深度的计算公式;冯雄辉等^[4]采用数值模拟方式分析了台背填土的液压夯实过程,认为其有效加固深度在1 m以上。目前依托工程实际开展的高速液压夯现场试验研究成果还较少见,苗学云等^[5]针对黄土沟壑区的涵背回填路段开展了液压夯的现场试验研究,提出停止夯实的路基表面沉降量标准为0.01~0.02 m;张焕新等^[6]对比了不同地基处治方法对于粉土质砂路基的加固效果,认为液压夯的处治效果优于振动压路机;潘发晶^[7]依托叶信高速开展了高速液压夯加固亚黏土及黏土路基的试验研究,认为夯击对于深度0.6 m以内的土体加固效果最好。

综上,目前国内外学者针对高速液压夯的现场

试验研究主要集中在素土路基上,对于碎石土路基的试验研究还鲜有报道,更缺少高速液压夯加固碎石土路基的动应力传播特性及影响范围的研究成果,加之碎石土填筑的路基具有均匀性不一的特点^[8],一定程度上影响了高速液压夯的应用范围和效果。基于此,本研究依托潍坊至青岛高速公路台背回填碎石土工程实际,开展了高速液压夯加固碎石土路基的应力传播规律、加固效果及夯击对涵背影响的现场试验研究,分析了高速液压夯加固碎石土路基的动力学特性,以期对桥涵台背侧回填碎石土路基工程的设计与施工提供借鉴和参考。

1 工程概况

潍坊至青岛高速公路工程是山东省高速公路网的重要组成部分。由于沿线土源紧张,为保护沿线土地资源及生态环境,部分路段路基填料选用开挖破碎后的碎石土进行填筑。

本次试验选取某箱涵侧回填碎石土路基作为试验场地,台背填土采用分层填筑,每层填筑厚度0.4 m,每层填筑后采用15 t压路机碾压5遍,另外,每填筑5层后采用HHT-3型高速液压夯对涵背侧4 m宽度范围内土体进行补强压实。该液压夯实机设有3个档位,最大夯击能为36 kJ,夯锤直径1 m。回填碎石土的物理力学性质和级配曲线如表1和图1所示。

2 试验方案

2.1 应力传播规律试验方案

为分析夯击作用下土体应力传播规律,试验中埋设了电阻式与振弦式土压力计,分别用于监测高速液压夯击实过程中产生的动应力及夯击后土体内

部的残余应力。每种土压力计均埋设5层, 间隔深度为0.4 m, 电阻式土压力计在第1层布设3组, 水平间隔距离为1 m, 具体监测仪器埋设及夯击试验方案如图2所示。

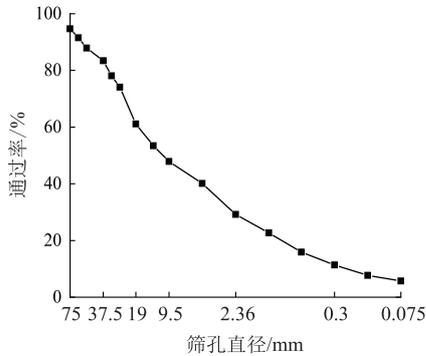


图1 级配曲线

Fig.1 Gradation curve

表1 碎石土物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of gravel soil

指标	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量/ MPa	压缩模量/ MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	泊松比
碎石土	2 360	21. 667	51. 326	30	0. 3

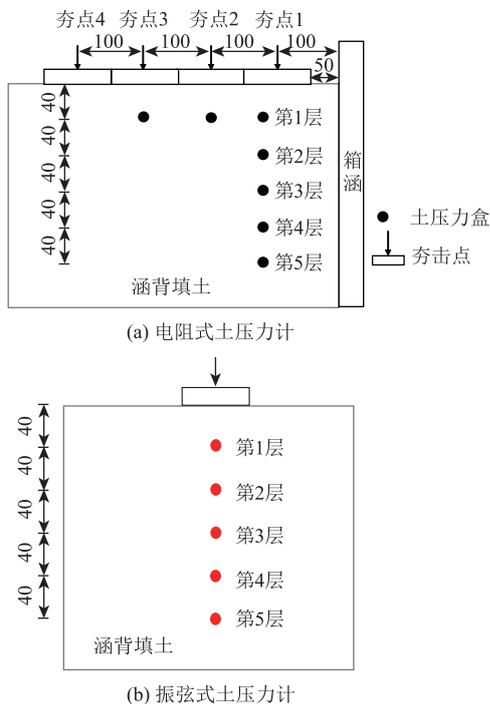


图2 试验布置 (单位: cm)

Fig.2 Test layout (unit: cm)

采用液压夯3档对各夯击点位进行压实, 每个夯点击实9次。使用动态应变仪(DH5922D动态信号测试分析系统)及频率计对高速液压夯击实过程中的动应力及夯后土体内部的残余应力进行监测。

2.2 加固效果分析试验方案

为分析高速液压夯击实效果并探究夯击能及夯间距等设计参数对土体加固效果的影响规律, 试验中开展了不同工况下(如表2所示)路基土体压实后的标准贯入击数及沉降量监测工作, 通过对比夯击前后标准贯入击数及夯坑沉降量的变化, 分析高速液压夯对碎石土路基的加固效果, 揭示液压夯加固土体的沉降变形规律。具体试验方案为: 夯前选取3处原状土体进行动力触探试验, 取其平均值作为初始标准贯入击数, 夯击9次后对夯坑(测量点a)及夯间土体(测量点b)进行触探试验(如图3所示), 得到夯后标准贯入击数。另外, 试验过程中还使用高精度水准仪监测每夯击3次后的夯坑土体(测量点a)沉降量(每点夯击15次)。

表2 高速液压夯试验工况

Tab.2 Rapid hydraulic impact compaction test conditions

工况	夯击能	夯间距/m
1	1档夯实	2
2	2档夯实	2
3	3档夯实	2
4	2档夯实	1.5
5	2档夯实	1

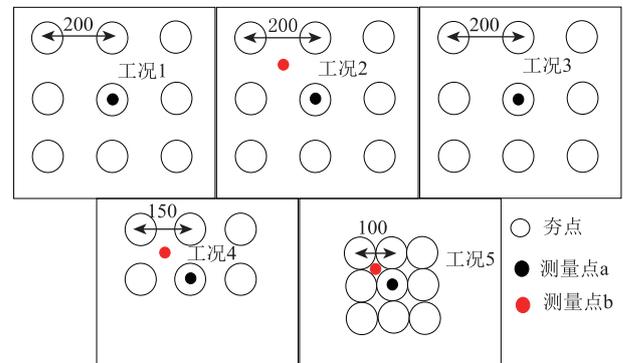


图3 加固效果监测试验布置 (单位: cm)

Fig.3 Reinforcement effect monitoring test layout (unit: cm)

2.3 高速液压夯振动影响试验方案

目前, 液压夯施工对临近构筑物安全性影响的相关文献还很少见。本现场试验中通过在临近箱涵结构物上(涵背后侧)黏贴动态应变计, 并将测量得到的应变与规范允许最大应变进行比较, 以分析不同夯击次数及夯点距结构物距离等因素对不同深度处结构物的振动影响, 并以此来评价夯击对临近结构物的安全性影响。具体试验方案为: 在箱涵后侧布置4组动态应变计, 布设深度距路基表面分别为0, 0.5, 1.0 m和1.5 m, 共设置4个夯点(涵背同一侧), 夯点边缘到箱涵距离分别为0.5, 1.5,

2.5 m 和 3.5 m (具体如图 4 所示)。同应力传播规律试验方案,本试验中也采用液压夯 3 档夯实、每点夯击 9 次。

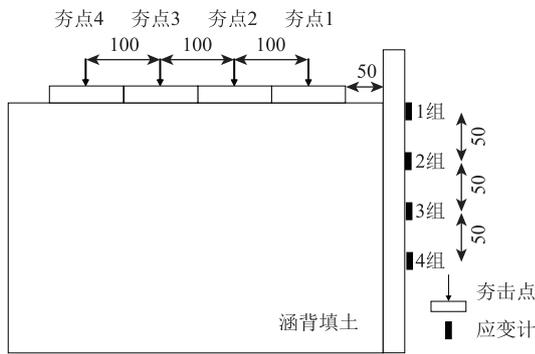


图 4 应变计及夯点布置 (单位: cm)

Fig. 4 Strain gauges and ramming points arrangement (unit: cm)

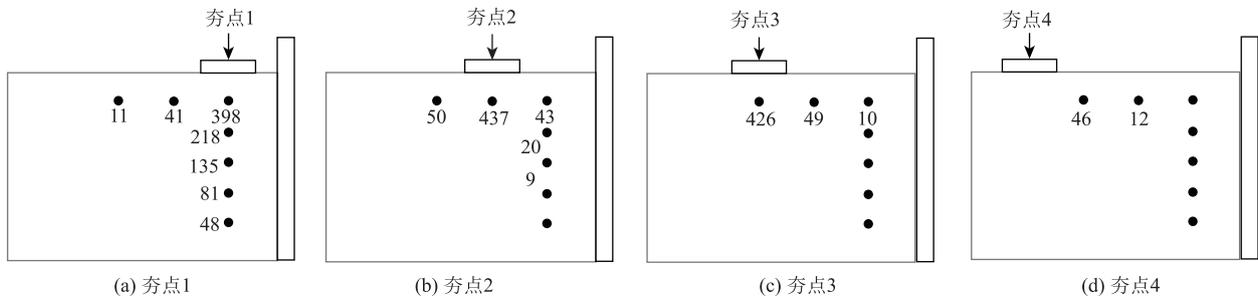


图 5 夯击 1 次时土体动应力分布 (单位: kPa)

Fig. 5 Distribution of soil dynamic stresses when ramming once (unit: kPa)

图 6 是对夯点 1 进行夯击时,其正下方土体动应力沿深度方向的变化曲线,其中图 6 (a) 为不同夯击次数时动应力与土体深度关系曲线,图 6 (b) 为图 6 (a) 图中夯击 5 次实测动应力沿深度方向的拟合曲线。由图可知,动应力沿深度方向基本呈指数形式衰减,0.8 m 以内衰减速度较快,夯击 9 次时 0.8 m 处的动应力仅为 0.4 m 处的 54%,而深度

3 试验结果分析

3.1 动应力传播规律

图 5 为夯击 1 次时各电阻式土压力计测得的动应力分布图 (部分土压力测值较小,图中未标注)。对比图 5 (a)~(c) 可知,在夯点 2、3 击实时,夯点下方动应力均大于夯点 1,这说明夯击对周围土体的加固起到促进作用,使得夯点周围土体承担上部荷载的能力也随之增强。另外,分析第 1 层压力计监测数据可知:距夯锤边缘 0.5 m 处的动应力平均值约为 45 kPa,与土体深度方向 2.0 m 处的动应力值相近,远小于夯点正下方深度 0.4 m 处 398~437 kPa 的动应力值。这表明夯击作用所产生的动应力主要沿竖向传递,这与强夯技术加固土体的影响规律相一致^[9]。

2.0 m 处的动应力平均值已衰减为 0.4 m 处动应力平均值的 12%左右。分析其原因认为:夯击产生的能量以波的形式在碎石土中进行传播,随着应力波的扩散传递,单位面积上所分得能量逐渐降低,并且应力波在传递过程中会受到碎石土颗粒间咬合力及摩阻力影响,存在能量损耗^[10-11],因此动应力沿深度方向逐渐衰减。另外,从图还可以看出,动应

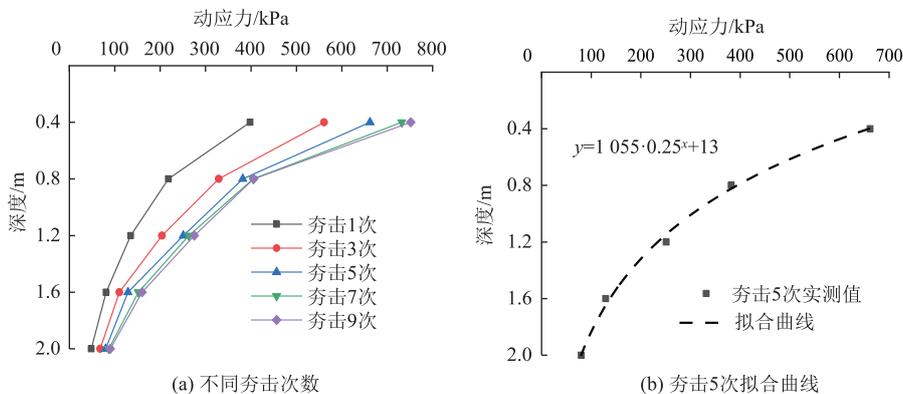


图 6 动应力沿深度方向变化曲线

Fig. 6 Variation curves of dynamic stress along depth direction

力沿深度方向的衰减规律与夯击次数基本无关, 这也提示我们高速液压夯对深层土体的加固效果有限, 工程中应合理设置夯击层厚。

图7为分别在夯点1, 3, 4夯击1次时, 0.4 m深度处土体动应力沿水平方向的变化曲线。可以看出, 动应力沿水平方向总体呈指数形式衰减, 土体受到的动应力随远离夯点急速降低, 距夯点0.5 m处其动应力值已降低为夯点处动应力值的9.2%, 这表明高速液压夯的水平影响范围主要在0.5 m以内; 距夯点2.5 m处, 已基本监测不到动应力, 说明液压夯补强加固碎石土路基的最大水平影响范围不超过2.5 m。

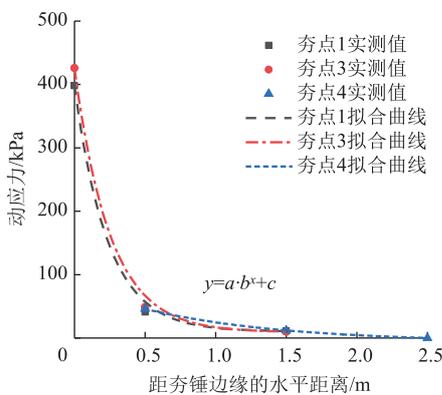


图7 动应力沿水平方向的变化曲线
Fig.7 Variation curves of dynamic stress along horizontal direction

图8为不同深度处土体所受动应力与夯击次数关系曲线。由图可以看出, 土体所受动应力随夯击次数增加总体呈上凸型的指数形式增长。以深度0.4 m处土体为例, 第1次夯击产生的动应力即达到400 kPa左右, 而后续夯击至第8和第9次时, 其动应力值基本稳定在750 kPa左右, 说明增加夯击次数对液压夯击实效果的提升是有限的, 当夯击次数达到一定值后, 再增加夯击次数无益于加固效果的明显提升, 这是由于夯后路基土颗粒间的摩阻力与咬合力增强, 应力传递过程中的能量损耗增大^[12], 因此动应力的增长幅度随夯击次数的增加而逐渐降低。当动应力趋于稳定时, 说明在当前夯击能下, 土颗粒已变得足够密实, 已达到停夯标准。

3.2 夯后残余应力变化规律

图9是土体残余应力(即由振弦式土压力计测得的夯后不同深度处土体所受到的土压力)与夯击次数的关系曲线。可以看出, 夯后土体残余应力也随夯击次数增加而增大, 但与动应力增长规律所不同的是, 除0.4 m深度外, 其余深度处的残余应力

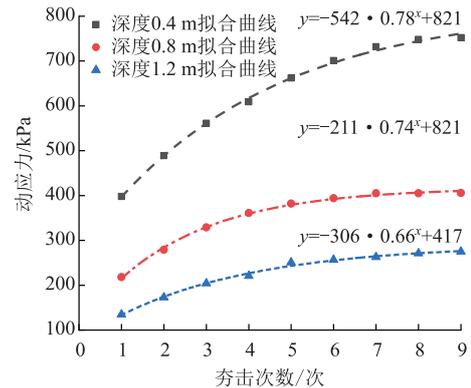


图8 不同深度土体动应力与夯击次数关系
Fig.8 Relation between dynamic stress and tamping times for soil of different depths

在夯击3次后已基本趋于稳定, 说明对于深部土体(0.4 m以下土体)来说, 夯击前3次已可达到较高的应力水平。

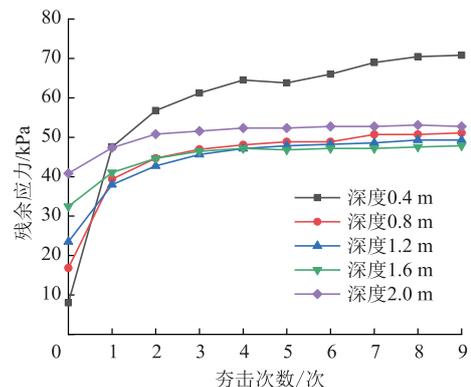


图9 残余应力与夯击次数关系
Fig.9 Relation between residual stress and tamping times

考虑到土体自重对残余应力的影响, 将残余应力中土体自重应力予以扣除, 得到夯击附加应力(即由夯击产生的土体竖向应力)与土体深度关系曲线如图10所示。可以看出, 夯后路基土体内部的附加应力随土体深度增加呈指数形式衰减, 深度0.8 m处测得的附加应力平均值相较0.4 m处普遍减少了50%左右, 该附加应力衰减规律与上述动应力沿深度方向变化规律基本一致。

3.3 夯击沉降量变化规律

图11为不同夯击能(以液压夯不同档位表征)及夯击次数下碎石土路基夯坑相对沉降量及累计沉降量演化曲线。可以看出, 累计沉降量随夯击次数增加呈上凸型指数形式增长, 而相对沉降量则呈下凹型指数形式衰减, 此规律与液压夯加固素土路基规律相似^[13], 但液压夯加固碎石土路基产生的沉降更小。分析原因认为, 无论是素土还是碎石土颗粒,

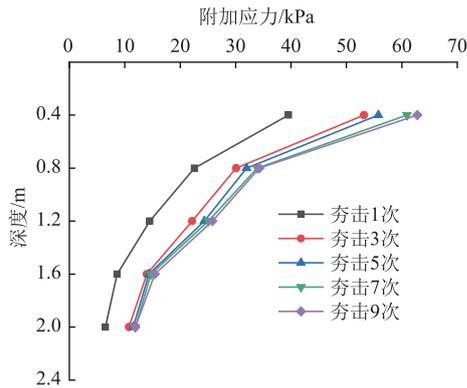


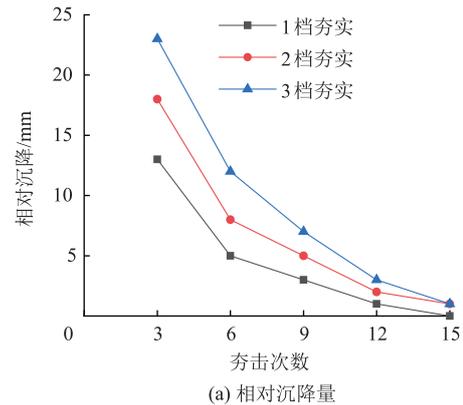
图10 附加应力与土体深度关系

Fig. 10 Relation between additional stress and soil depth

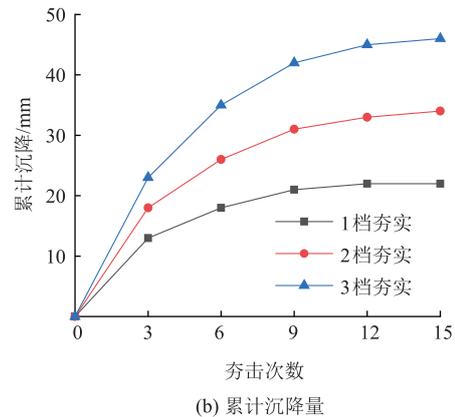
其在夯击作用下土颗粒将发生重新排列,使得土粒结构更加紧密,后续施加相同的夯击力造成的压实效果将逐渐降低。但不同于素土填料的是,碎石土路基是由较大的碎石颗粒构成土骨架,细小的土颗粒填充在孔隙中,路基土的整体刚度更大,因此夯击产生的沉降量更小。另外,从图中还可以看出,夯击9次后,3个档位的相对沉降量均小于10 mm,根据相关文献结论^[14]和工程经验,高速液压夯补强加固碎石土路基,以1档夯击9次即可满足实际工程对最后3击的相对沉降差要求(即相对沉降量小于10 mm)。但对比相同夯击次数、不同夯击能下的土体沉降量曲线可以看出,3档夯实造成的沉降量最大,1档最小,这表明提高夯击能可有效增强土体密实程度,这是因为夯击能的增加可提高应力波的总能量,从而克服土颗粒间更大的摩阻力,最终增强液压夯对碎石土路基的加固效果。从这点上来说,采用3档夯击碎石土路基效果更为有效。最后3击相对沉降量不超过10 mm可停止夯实。

另外,对比图6与图11可以发现,夯击产生的动应力与累计沉降量均随夯击次数呈上凸型指数增长形式,采用3档夯击3次及9次所测得的0.4 m深度处的动应力分别为561 kPa和752 kPa,动应力增加了约34%,而相应夯击次数下的累计沉降量分别为23 mm和42 mm,增加了约82%。可以看出,累计沉降量的增长幅度远大于动应力,这说明在最佳夯击次数范围内,沉降的响应效果相较于动应力更为明显。

图12为不同夯间距下夯坑土体沉降量随夯击次数的演化曲线。可以发现,1.0 m夯间距击实造成的相对及累计沉降量最大,2.0 m最小,这表明减小夯间距可以增强土体密实程度,这是因为夯击会对周围土体的加固起促进作用^[15],而液压夯实存在着最



(a) 相对沉降量



(b) 累计沉降量

图11 不同夯击能下土体沉降量

Fig. 11 Soil settlement under different tamping energies

大水平影响范围,夯击对周围土体的加固作用随夯间距的增加而逐渐减弱。对比图11与图12可以发现,不同夯间距所对应的夯坑相对及累计沉降量相差并不大,而不同的夯击能所对应的相对及累计沉降量曲线则相差较大,这表明相较于增大夯击能,减小夯间距对夯点下方土体加固效果的提升十分有限,夯间距并非影响夯坑土体加固效果的主要因素。

3.4 夯实前后承载力变化规律

本研究采用重型动力触探仪进行动力触探试验,试验过程中每贯入10 cm记录1次标准贯入击数,并将每3次记录的数据(即贯入30 cm)作为一组,取3次结果的平均值作为这一组的标准贯入击数^[16]。

图13为夯点下方土体在不同夯击能下的标准贯入击数与贯入深度关系曲线。可以发现,夯后标准贯入击数相较夯前明显增加,这表明高速液压夯的加固效果显著。贯入深度达到2.1 m时,夯击前后贯入击数相差不大,这表明液压夯对深度2.0 m以下的碎石土的承载力提高效果较差,基本起不到加固效果。

对比同一深度处的标准贯入击数可知,1档夯实后的标准贯入击数最小,3档夯实后的标准贯入

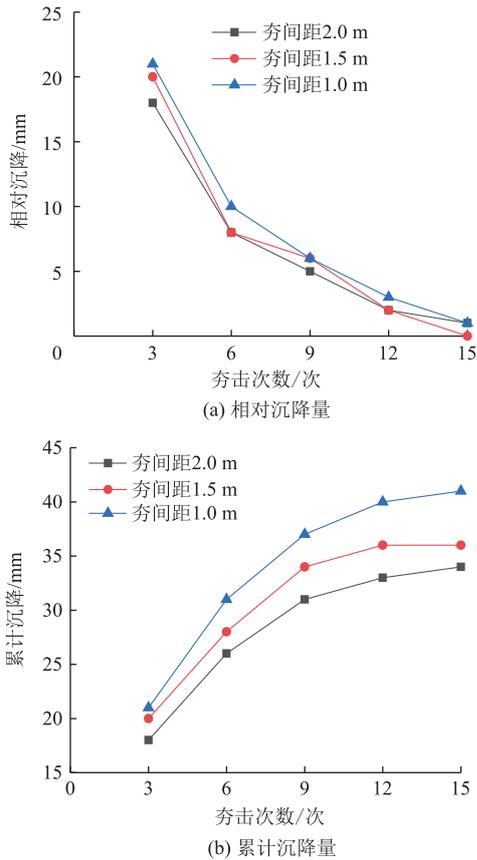


图 12 不同夯间距下路基土体沉降量
Fig. 12 Subgrade soil settlement with different ramming spacings

击数最大, 这表明增加夯击能可提高液压夯对碎石土路基的加固效果, 这与由夯击能与沉降量间的相关分析所得结论相同。从图 13 还可以看出, 夯后测得的标准贯入击数沿深度方向出现了中间“鼓肚子”的现象, 最大值位于 0.9 m 处, 该“鼓肚子”区域土体承载力提高最为显著, 这表明高速液压夯的主要加固区域出现在夯点下方一定深度处 (“鼓肚子”区域), 而非位于土体表层。分析原因认为: 虽然液压夯产生的冲击波在路表处的能量最大, 但冲击波中的瑞利波会对路基表层土体造成一定扰动^[17], 因此液压夯对路表土体的承载力提高效果有限, 而冲击波所携带的能量及瑞利波对土体的扰动作用均随土体深度增加而逐渐减弱, 在本试验中的 0.9 m 左右综合效果最优, 也造成此处承载力出现“鼓肚子”现象。另外, 对比 1 档和 3 档的贯入击数可以发现, 3 档夯实时在路基深度 1.8 m 处的贯入击数仍有较大提升幅度, 而 1 档夯实前后贯入击数基本没有变化, 这表明增加夯击能可以增大高速液压夯的有效加固深度。

另外, 对比图 11 (b) 与图 13 可知, 夯击 9 次时, 3 档夯实所对应的路基累计沉降量及承载力相较

1 档夯实分别增加了 98%, 9.8%, 可以看出, 在最佳夯击次数范围内, 增加同样的夯击能, 路基沉降量的变化幅度远大于承载力, 这与沉降量与动应力的关系相一致。

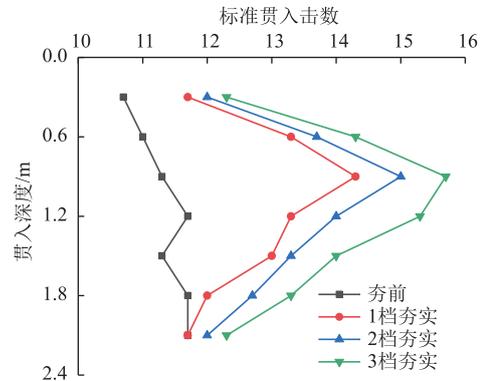


图 13 不同夯击能下标准贯入击数与深度关系
Fig. 13 Relation between standard penetration times and penetration depth under different tamping energies

图 14 为夯点下方土体在不同夯间距下的标准贯入击数与贯入深度关系曲线。由图可知, 采用 1.0 m 夯间距进行夯击后测得的标准贯入击数最大, 碎石土路基的承载力提升最为显著, 夯间距 1.5 m 测得的贯入击数次之, 2.0 m 时最小, 这表明减小夯间距可以提高夯击对碎石土路基的加固效果, 这与不同夯间距下沉降量的监测结果相一致。但将该结论与前述不同夯击能下标准贯入击数与深度关系曲线相对比可知, 夯间距对不同深度处土体承载力的影响远没有后者更为显著。

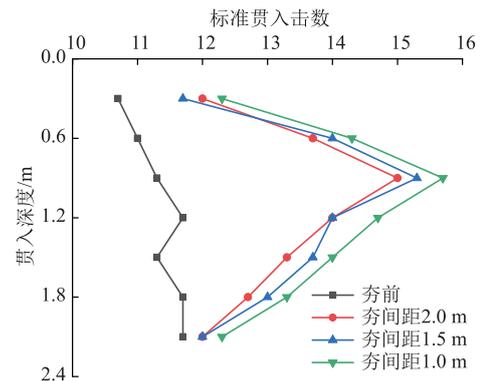


图 14 不同夯间距下标准贯入击数与贯入深度关系
Fig. 14 Relation between standard penetration times and penetration depth with different ramming spacings

图 15 是夯间土体在不同夯间距下的标准贯入击数与贯入深度关系曲线。从图中可以看出, 采用 1.0 m 夯间距时, 夯间土体所测得的标准贯入击数最大, 2.0 m 夯间距时贯入击数最小, 且在 0.9 m 深度

处, 1.0 m 夯间距下的标准贯入击数相较于夯前的增大值比 2.0 m 夯间距下提高了 2.6 倍, 这表明减小夯间距可以提高夯间土体的土颗粒密实程度。另外还可以看出, 采用 2.0 m 夯间距击实后, 路基土体 0.3 m 深度处的贯入击数相较夯前还有所降低, 这表明采用 2.0 m 夯间距不利于夯间土体的加固。这是因为液压夯对土体的加固效果随远离夯点而逐渐减弱, 加之夯击产生的瑞利波对表层土体的扰动作用(对土体起主要加固作用的压缩波主要沿竖向传递, 而瑞利波主要沿土体表层传播^[18]), 最终导致夯点间表层土体承载力降低。综合考虑夯点下方及夯间土体的加固效果与施工效率, 碎石土路基夯间距以采用 1.5 倍夯锤直径为宜。

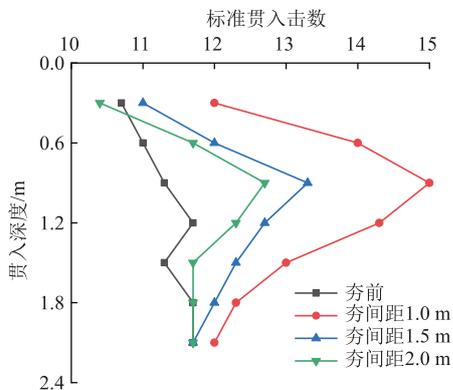


图 15 夯间土体标准贯入击数与贯入深度关系

Fig. 15 Relation between standard penetration times and penetration depth of rammed soil

3.5 结构物安全性分析

图 16 为分别在夯点 1~4 夯击 1 次时, 在涵背不同位置处测得的应变值。可以发现, 夯击产生的涵背应变随距离增加(夯点逐渐远离箱涵)而逐渐减小, 距夯点 2.5 m 外, 箱涵等结构物产生的应变可基本忽略。另外, 表层土体的夯击对箱涵不同深度处产生的应变也基本相同, 说明液压夯击实对箱涵的影响基本不随箱涵高度的变化而变化。

图 17 是对 4 个夯点分别进行夯击时, 在涵背不同位置处测得的应变与夯击次数的关系曲线。由图可知, 夯击前 3 次所测得的涵背应变与夯击次数基本呈正相关关系, 夯击 4~9 次测得的涵背应变值在一定范围内波动(在夯点 1, 2, 3, 4 进行夯击时产生的应变波动范围分别为 8~14, 4~8, 2~4, 1~2 $\mu\epsilon$), 且 4 组应变计测量得到的应变大小与监测位置无明显关系, 分析原因认为, 这是由于箱涵为“回型”结构的刚性体, 夯击产生的冲击波作用在箱涵侧壁上时, 会受到箱涵顶板及底板的影响,

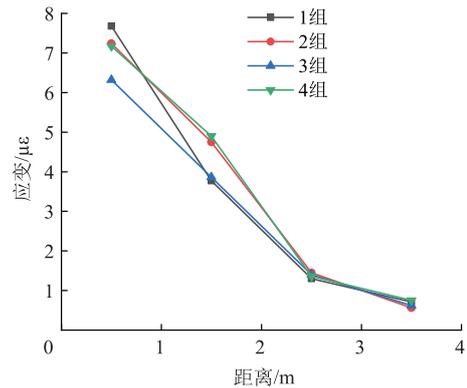


图 16 夯击距离与涵背应变关系

Fig. 16 Relation between tamping distance and culvert back strain

导致规律性较差。

整个夯击过程中所监测到的最大应变为 13.23 $\mu\epsilon$, 远小于箱涵结构物的最大允许应变(混凝土结构物的开裂允许应变为 150 $\mu\epsilon$), 这表明高速液压夯不会对桥涵构筑物的安全性造成影响。

4 结论

(1) 高速液压夯击实碎石土路基产生的动应力主要沿竖向传播, 其传递深度可达 2.0 m, 水平影响范围主要在 0.5 m 以内。动应力沿深度及水平方向均呈指数形式衰减, 其衰减规律与夯击次数无关。动应力随夯击次数增加呈上凸型的指数形式增长, 夯击 8 次之后动应力基本不再变化。

(2) 夯后土体残余应力随夯击次数的增加而增大, 但对于深度 0.4 m 及以下的土体来说, 夯击前 3 次已可达到较高的应力水平。夯击产生的附加应力沿深度方向的衰减规律与动应力变化规律相一致。

(3) 相较于素土路基, 液压夯加固碎石土路基产生的沉降更小, 增加夯击能及夯击次数均可提高液压夯对碎石土路基的夯实质量。综合考虑压实效果(最后 3 击相对沉降量不超过 10 mm 可停止夯实)与施工效率, 推荐使用 3 档夯击 9 次作为补强碎石土路基的最优施工参数。

(4) 减小夯间距可提高碎石土路基的加固效果, 但土体承载力的提升远不如增加夯击能带来的效果显著, 考虑到夯间土体的加固效果与经济效益, 实际工程中采用 1.5 倍夯板直径作为夯间距加固碎石土路基为宜。

(5) 液压夯击产生的涵背最大应变远小于结构物的最大允许应变, 高速液压夯施工不会对桥涵构筑物安全性造成影响。

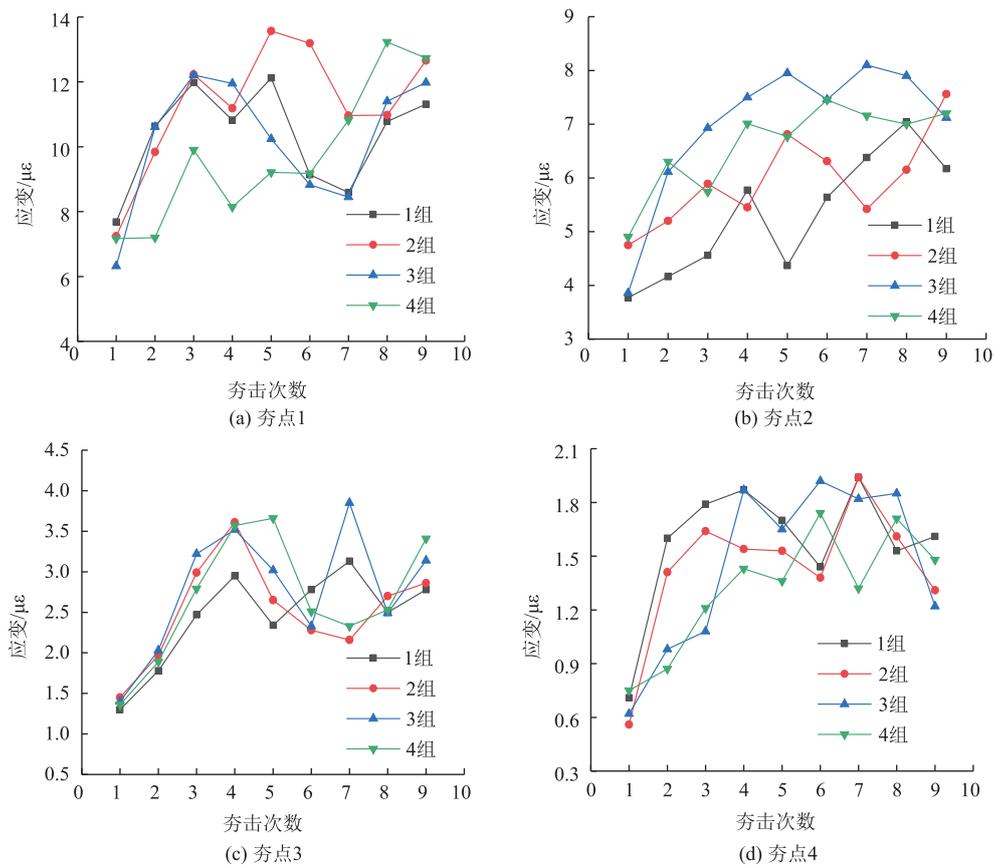


图 17 夯击次数与涵背应变关系

Fig. 17 Relation between tamping times and culvert back strain

参考文献:

References:

[1] 孙文怀. 高速公路桥台背填土压实的 RIC 工法实验研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (5): 702-705.
 SUN Wen-huai. Study on RIC Construction Method for Tamping of Abutment Back in Express Highway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (5): 702-705.

[2] ADAM D, ADAM C, FALKNER F J, et al. Vibration Emission Induced by Rapid Impact Compaction [C] // Eurodyn 2011: European Association for Structural Dynamics 2011. Leuven: International Conference on Structural Dynamics; 2011, 914-921.

[3] 冯忠绪, 刘本学, 赵侃, 等. 高速液压夯实机 (RHIC) 夯实效果的试验研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2007, 97 (1): 56-59.
 FENG Zhong-xu, LIU Ben-xue, ZHAO Kan, et al. Experimental Study on Rapid Hydraulic Impact Compaction (RHIC) [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2007, 97 (1): 56-59.

[4] 冯雄辉, 万智. 台背液压夯实处理现场试验与数值模

拟研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10 (1): 49-54.
 FENG Xiong-hui, WAN Zhi. Field Test and Numerical Simulation Study on Treatment of Expressway Retaining Hydraulic Abutment Back by Rapid Hydraulic Impact Compaction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10 (1): 49-54.

[5] 苗学云, 刘贺业, 屈耀辉, 等. 沟壑路段涵洞台背高频液压夯实工艺试验研究 [J]. 铁道建筑, 2017, 57 (10): 92-95.
 MIAO Xue-yun, LIU He-ye, QU Yao-hui, et al. Experimental Study on Rapid Hydraulic Impact Compaction Process of Culvert Abutment in Gully Section [J]. Railway Engineering, 2017, 57 (10): 92-95.

[6] 张焕新, 方建勤, 黄水泉. 液压夯实技术补强高速公路台背路基施工工艺试验研究 [J]. 公路, 2010 (6): 140-143.
 ZHANG Huan-xin, FANG Jian-qin, HUANG Shui-quan. Experimental Study on Construction Technology of Reinforcing Expressway Abutment Back Subgrade by Rapid Hydraulic Impact Compaction [J]. Highway, 2010 (6): 140-143.

- [7] 潘发晶. 高速夯实机在叶信高速公路加宽工程应用研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
PAN Fa-jing. Research on the Application of Rapid Hydraulic Impact Compaction in Yexin Expressway Widening Project [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [8] 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 (增1): 237-240.
WEI Ying-qi, CAI Hong, WU Shuai-feng, et al. Vibration Response and Reinforcement Mechanism of High-fill Soil-stone Mixtures by Dynamic Compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (S1): 237-240.
- [9] 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, 173 (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, 173 (4): 628-632.
- [10] 刘文俊, 李岳, 蔡靖, 等. 基于强夯应力波传播模型的夯击参数研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (增1): 427-435.
LIU Wen-jun, LI Yue, CAI Jing, et al. Selection of Tamping Parameters Based on Propagation Model of Dynamic Compaction-induced Stress Wave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44 (S1): 427-435.
- [11] 李晋, 姜鹏, 李天宇, 等. 液压夯补强路基动力响应现场试验研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (9): 67-74.
LI Jin, JIANG Peng, LI Tian-yu, et al. In-situ Experimental Study on Dynamic Response of Subgrade Reinforced by Rapid Hydraulic Impact Compaction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (9): 67-74.
- [12] 姬猛, 徐天宇, 陈策策, 等. 液压夯实机补强台背路基影响因素分析 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (5): 41-51.
JI Meng, XU Tian-yu, CHEN Ce-ce, et al. Analysis on Influencing Factors of Reinforcing Subgrade on Abutment Back Using Rapid Hydraulic Impact Compaction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (5): 41-51.
- [13] 朱家剑, 高文泽, 王选仓, 等. 台背回填高速液压夯实机补强路基质量控制标准研究 [J]. 内蒙古公路与运输, 2019, 172 (4): 18-23.
ZHU Jia-jian, GAO Wen-ze, WANG Xuan-cang, et al. Study on Quality Control Standard of Rapid Hydraulic Impact Compaction Reinforced Subgrade for Abutment Back [J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2019, 172 (4): 18-23.
- [14] 魏晓培. 高速夯实机桥台背路基施工的应用技术研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
WEI Xiao-pei. Research on the Application Technology of Rapid Hydraulic Impact Compaction Abutment Back Subgrade Construction [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [15] 窦锦钟, 邵雪莹, 廖晨聪, 等. 不同夯点布置形式下群夯加固效果研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (增1): 527-534.
DOU Jin-zhong, SHAO Xue-ying, LIAO Chen-cong, et al. Study on Multi-tamping Effects Under Different Arrangement Forms of Tamping Location [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (S1): 527-534.
- [16] 石磊, 傅少君, 袁稳沉, 等. 重型动力触探轴向冲击力与锤击能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (1): 201-208.
SHI Lei, FU Shao-jun, YUAN Wen-chen, et al. Experimental Study on Axial Impacting Force and Hammer Impacting Energy in Rod of Heavy Dynamic Penetration Test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (1): 201-208.
- [17] 常家乐. 快速液压夯实机夯实效果的颗粒离散元分析及试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
CHANG Jia-le. Particle Discrete Element Analysis and Experimental Study on the Tamping Effect of Fast Rapid Hydraulic Impact Compaction [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [18] 黄涛, 贺玉龙, 刘辉. 强夯控制高填方沉降量的机理研究 [J]. 路基工程, 2007, 133 (4): 43-45.
HUANG Tao, HE Yu-long, LIU Hui. Study on the Mechanism of Controlling the Settlement of High Fill by Dynamic Compaction [J]. Subgrade Engineering, 2007, 133 (4): 43-45.