

文章编号:1671-1637(2026)07-0069-12

高速液压夯加固黄河冲积平原软土地基动力传播特性与计算方法

厉超¹, 张宇轩¹, 李文杰^{2,3}, 马龙^{2,3}, 刘乾^{2,3}, 周冲¹, 宋曙光^{*1}

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014;

3. 公路基础设施智慧建造与运维山东省重点实验室, 山东 济南 250014)

摘要:为探究高速液压夯加固黄河冲积平原软土地基的动力传播特性,依托实际工程,开展70、110、150 kJ三种能级现场夯击试验;通过监测夯击过程中土体超静孔隙水压力、地面振动速度等指标,阐明高速液压夯动应力沿竖向和径向的传播规律,建立了动力传播特性的理论计算方法,评价高速液压夯有效加固范围及振动影响范围。研究表明:高速液压夯动应力沿竖向传播符合指数衰减规律,表现出明显的二次衰减趋势,但传递指数小于弹性静力学理论值;动应力沿径向传播符合负幂函数衰减规律,且动应力值与夯板面积正相关;高速液压夯有效加固深度与锤重、夯锤落距正相关,与夯板面积、土体重度负相关,70、110、150 kJ三种能级有效加固深度分别为5.8、6.0、6.6 m;高速液压夯有效加固半径与夯板直径有关,约为夯板直径的1.1倍;高速液压夯地面振动主频为5~30 Hz,属于中低频振动,振动速度随夯击点到观测点距离(夯检距)按负幂函数规律衰减;对于一般工业建筑和公共建筑,70、110、150 kJ三种能级安全施工距离分别为7.2、7.8、8.4 m,居住建筑、振动敏感建筑等安全施工距离应参照该标准依次增大。研究结果可为高速液压夯设计与施工提供理论和实践参考。

关键词:路基工程;高速液压夯;现场试验;动力传播特性;计算方法;地基处理

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.050

Dynamic stress propagation characteristics and calculation methods for soft soil foundation reinforced by high-speed hydraulic compaction in Yellow River alluvial plain

LI Chao¹, ZHANG Yu-xuan¹, LI Wen-jie^{2,3}, MA Long^{2,3}, LIU Qian^{2,3}, ZHOU Chong¹, SONG Shu-guang^{*1}

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Intelligent Construction and Operation Maintenance of Highway Infrastructure, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: To investigate the dynamic stress propagation characteristics of soft soil foundation reinforced by high-speed hydraulic compaction in the Yellow River alluvial plain, field compaction tests at three energy

出版历程:2025-03-02 收稿,2025-07-29 修回,2025-09-26 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52408376);高速铁路建造技术国家工程研究中心开放基金项目(HSR202401);山东省路桥集团有限公司科研项目(2024-TLGS-QZXM-JSFW-014)

作者简介:厉超(1990-),男,山东日照人,副教授,工学博士,E-mail:lcseu@foxmail.com。

*通信作者:宋曙光(1985-),男,山东济宁人,教授,工学博士,E-mail:twilightsong@126.com。

引用格式:厉超,张宇轩,李文杰,等. 高速液压夯加固黄河冲积平原软土地基动力传播特性与计算方法[J]. 交通运输工程学报,2026,26(7):69-80.

Citation: LI Chao, ZHANG Yu-xuan, LI Wen-jie, et al. Dynamic stress propagation characteristics and calculation methods for soft soil foundation reinforced by high-speed hydraulic compaction in Yellow River alluvial plain[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(7): 69-80.

levels (70, 110, and 150 kJ) were conducted based on actual projects. The propagation laws of dynamic stress generated by high-speed hydraulic compaction in the vertical and radial directions were clarified by monitoring indicators such as excess pore water pressure in the soil and ground vibration velocity during the compaction process. On this basis, a theoretical calculation method for dynamic stress propagation characteristics was established, and the effective reinforcement range and the vibration influence range of high-speed hydraulic compaction were evaluated. The research results indicate that the vertical propagation of dynamic stress generated by high-speed hydraulic compaction follows an exponential decay pattern, which exhibits a distinct secondary decay trend. However, the transmission exponent is smaller than the theoretical value in elastic statics. The radial propagation of dynamic stress conforms to a negative power function decay pattern, and the dynamic stress value is positively correlated with the rammer area. The effective reinforcement depth of high-speed hydraulic compaction is positively correlated with the rammer weight and drop height, and negatively correlated with the rammer area and soil unit weight. The effective reinforcement depths for 70, 110, and 150 kJ energy levels are 5.8, 6.0, and 6.6 m, respectively. The effective reinforcement radius of high-speed hydraulic compaction is related to the rammer diameter, approximately 1.1 times the rammer diameter. The dominant frequency of ground vibrations induced by high-speed hydraulic compaction ranges from 5 to 30 Hz, which belong to medium-to-low-frequency vibrations. The vibration velocity decays according to the law of a negative power function with the distance from the tamping point to the observation point (tamping detection distance). For general industrial and public buildings, the safe construction distances for 70, 110, and 150 kJ energy levels are 7.2, 7.8, and 8.4 m, respectively. The safety construction distances for residential buildings, vibration-sensitive buildings, etc. should be increased successively with reference to this standard. The research findings can provide theoretical and practical references for the design and construction of high-speed hydraulic compaction.

Keywords: subgrade engineering; high-speed hydraulic compaction; field test; dynamic stress propagation characteristic; calculation method; foundation treatment

Publication history: Received 2025-03-02; Received in revised form 2025-07-29; Accepted 2025-09-26

Funding: National Natural Science Foundation of China (52408376); Open Foundation of National Engineering Research Center of High-speed Railway Construction Technology (HSR202401); Research Project of Shandong Luqiao Group Co., Ltd. (2024-TLGS-QZXJ-JSFW-014)

* **Corresponding author:** SONG Shu-guang, professor, PhD, E-mail: twilightsong@126.com.

0 引 言

高速液压夯动力加固技术引入中国后得到快速发展应用。该方法利用夯机液压缸将夯锤提升至一定高度后释放,夯锤在液压动力和重力的共同作用下高速落下,通过缓冲传力装置夯击压在地面的夯板来加固土体^[1]。与强夯、重夯等技术相比,高速液压夯具有机动灵活、施工高效等优点,主要体现为施工设备轻便和高频率夯击。夯板的存在还可避免表层土因振动或冲击而发生松散,使土体更为密实,加固效果更好,因而既可对一般土体进行夯实补强,也可对软弱地基进行深层加固^[2-4]。目前高速液压夯多为小能级(36 kJ能级居多),主要用于路基或土体

补强,有效影响深度较小。冯雄辉等^[5]研究表明,小能级液压夯处理台背路基影响深度在1 m以上;张焕新等^[6]得出快速液压夯影响深度为2.0~2.5 m,影响宽度在1.5 m左右。近年来,有学者尝试采用高能级液压夯加固地基,取得了良好的加固效果。赵国权等^[7]采用84 kJ能级处理吹填砂层地基,初步确定了工艺参数;胡建树等^[8]针对108 kJ能级液压夯地基处理工程,提出了具体的工艺参数;Tarawneh等^[9]采用9 t夯锤,夯击能为27~108 kJ能级进行地基加固,有效加固深度达到4~6 m;尼博^[10]采用150 kJ能级液压夯处治地基,提出了止夯控制指标。高速液压夯加固范围与夯击能紧密相关,目前正向更高能级、更深加固深度发展。

高速液压夯加固机理与强夯法类似,均属于动力加固,明确其动应力、应变等动力特性对于高速液压夯设计施工具有重要意义。李晋等^[2]通过现场实测,揭示了高速液压夯加固粉质黏土应力时空响应规律与加速度响应规律;张焕新等^[6]研究了高速液压夯实过程竖向动应力传递规律,结果表明竖向动应力随土体深度增加而迅速减小,土体加固效果变差;Jia等^[11]采用PFC软件模拟了高速液压夯加固碎石土路基的动力夯实过程,高速液压夯动力加固机理包括瞬态冲击压实和土粒振动压实;陈晓燕等^[12]探究了高速液压夯实法加固土石坝的压实性能,得到了不同夯击能的有效加固深度;Cheng等^[13]利用加速度传感器监测夯实过程中不同深度、不同传播距离土体的加速度特性,基于此提出了一种高速液压夯有效加固深度的评价方法;Vlček等^[14]通过现场试验,揭示了高速液压夯加固过程中地面振动加速度传播规律,明确了振动的幅频特性,给出了相应计算公式并进行了振动影响评价。从文献综述来看,高能级液压夯技术应用有了一定发展,但关于其动力传播特性研究较少,导致其加固效果及振动影响评价等方面研究缺乏理论基础。黄河冲积平原广泛分布于黄河中下游地区,区域内土体以低液限粉土和含砂粉土为主,地基土体进行动力加固时不易压实、孔隙率高、毛细作用显著、水稳定性差^[15]。目前该区域内高速液压夯动力传播特性、计算方法等研

究尚未开展,直接制约该技术的推广应用。

针对上述问题,本文设计高速液压夯地基加固现场试验,通过地基夯沉量、超静孔隙水压力、振动速度等监测指标,研究黄河冲积平原区高能级高速液压夯动力传播特性,建立动力传播特性的计算理论,并通过标准贯入试验检验加固效果,以为该技术的推广应用提供理论基础和技术参考。

1 试验场地概况

试验区域属于典型黄河冲积平原地貌单元,地形平坦开阔,地面标高最大为23.99 m,最小为20.05 m,地表相对高差3.94 m,地势整体平坦。区域内上部地层为黄河冲积漫滩相新近沉积土,以粉质黏土、粉土为主,下部地层为第四系全新统冲积土,以黏性土及粉砂为主,地表为人工填土。在勘察深度范围内(25.0 m),场地地层自上而下大致分为6个大层、4个亚层。试验场区地下水类型为第四系孔隙潜水及浅层微承压水,以大气降水及黄河水侧向渗漏补给为主,其次为引黄(黄河)、引清(小清河)及农田灌溉渗漏,试用期间地下水稳定埋深为3.5 m。试验区地质剖面如图1所示,不同土层的基本物理力学指标见表1。图1中:FX2 Q168中的FX2表示剖面线编号为2,Q是钻孔的通用代号,Q168即第168个钻孔;22.48表示钻孔海拔高度为22.48 m;阴影区域数字表示钻孔深度。

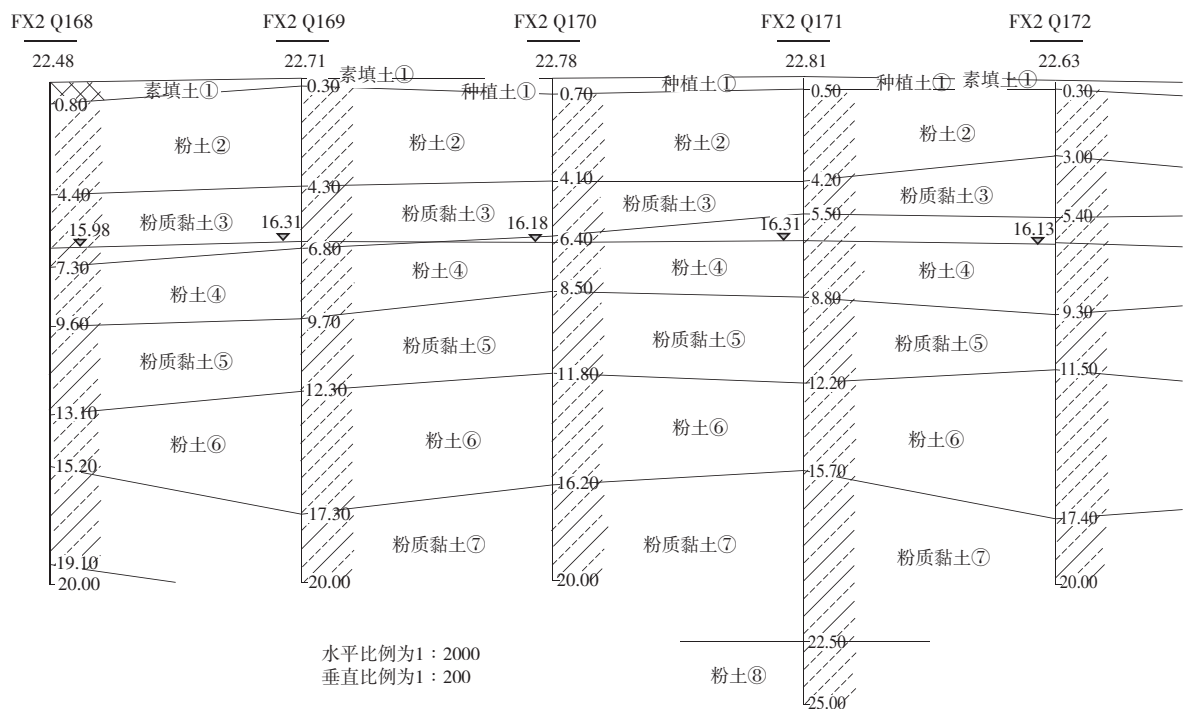


图1 试验区地质剖面(单位:m)

Fig. 1 Geological profile of the test area (unit: m)

表 1 试验区土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil layers in the test area

层号	地层名称	地层厚度 /m	土体重度 λ_d /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	固结快剪 c_q		固结不排水三轴剪切 c_u		不固结不排水三轴剪切 u_u		侧摩阻力标 准值 f_{ak} /kPa	压缩模量 E_{s1-2} /MPa
				黏聚力 c_{k1} /kPa	内摩擦角 $\varphi_{k1}/(^{\circ})$	黏聚力 c_{k2} /kPa	内摩擦角 $\varphi_{k2}/(^{\circ})$	黏聚力 c_{k3} /kPa	内摩擦角 $\varphi_{k3}/(^{\circ})$		
②	粉土	3.87	18.4	10	22.0	10	24.0	12	16.0	110	6.4
③	粉质黏土	1.59	19.3	30	12.0	35	14.0	33	8.0	110	4.5
④	粉土	1.29	19.1	11	23.0	11	24.0	12	18.0	120	7.0
⑤	粉质黏土	3.71	19.3	30	12.0	35	14.0	33	8.0	110	4.5
⑥	粉土	3.51	19.3	30	12.0	35	14.0	33	8.0	120	5.4
⑦	粉质黏土	3.38	19.4	12	26.0	11	27.0	14	19.0	130	8.9

2 试验方案及方法

现场划分为 3 个试验区,每个试验区面积为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$,分别进行 70、110、150 kJ 能级的夯击试验(图 2,其中 1#~9#为钻孔号)。高速液压夯锤重为 10 t,锤径为 1 m,夯板直径为 1.5 m。夯点采用正方形布置,夯点间距为 3.2 m。夯击时每个试验区点夯 2 遍,夯击次数为 42 击。由于试验现场地下水水位较低,点夯施工过程中无需回填其他材料。点夯完成间隔一定时间后进行场地平整和满夯,满夯能级为点夯能级的 1/2,满夯夯击次数为 6 击。为监测高速液压夯动应力,试验前分别在夯点下方、距夯点水平距离 2 m 及 4 m 处埋设振弦式孔隙水压力计。孔隙水压力计量程为 0.6、0.4 MPa(分辨率不大于 0.08% 满量程),配合 609A 测频仪(测频范围 500~6 000 Hz,测频精度为 0.1 Hz,采样频率为 1 Hz),实时监测夯击过程中孔隙水压力变化(图 3)。现场共埋设孔隙水压力计 30 个,其中浅层孔隙水压力计量程为 0.6 MPa,深层孔隙水压力计量程为 0.4 MPa。夯击过程中每 3 击记录 1 次地面夯击沉降量(夯沉量),并对高速液压夯施工前和施工后 28 d 的地基进行标准贯入试验检测,以评价地基的加固效果。

高速液压夯进行土体加固时,在地面会产生表面波(瑞利波、勒夫波等),对周围建(构)筑物产生不利影响。为避免高速液压夯表面波振动对周围环境

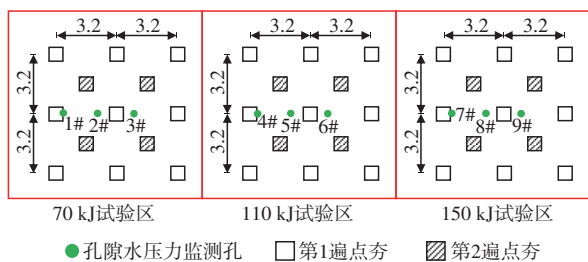


图 2 高速液压夯现场试验布置(单位:m)

Fig. 2 Field arrangement of high-speed hydraulic compaction test (unit: m)

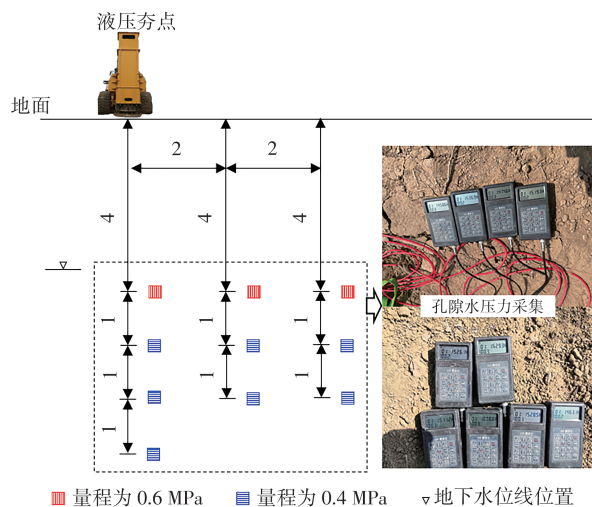


图 3 孔隙水压力计竖向布置及数据监测(单位:m)

Fig. 3 Vertical arrangement of pore water gauge and data monitoring (unit: m)

的影响,对不同能级液压夯的地面振动加速度和振动速度进行监测,明确高速液压夯地面振动的传播规律。距夯点不同距离共布置 9 个地面振动监测点,各监测点夯检距分别为 2、5、10、15、20、80、100、120 m。测振系统由 L20-S 型爆破测振仪、TT-3/5-500 Hz 三分量速度传感器及电缆组成,量程为 $0.001\sim 35\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,分辨率为 $0.000\text{ 1 cm}\cdot\text{s}^{-1}$,精度为 $\pm 5\%$,频响范围为 1~500 Hz,采样频率为 1 kHz。高速液压夯现场夯沉量、孔隙水压力及地面振动监测布置如图 4 所示。

3 试验结果

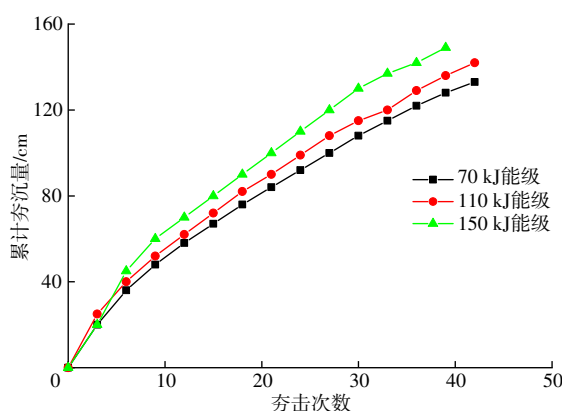
3.1 夯沉量

绘制不同工况地面夯沉量随夯击次数变化如图 5 所示,可以看出:随着夯击次数增大,累计夯沉量逐渐增大,但单击夯沉量逐渐减小并趋于平缓状态。类比强夯夯沉量变化规律可知,高能级液压夯施工存在饱和夯击能,达到饱和夯击能后继续增加夯击次数地基加固效果将不明显,此时地基土体趋

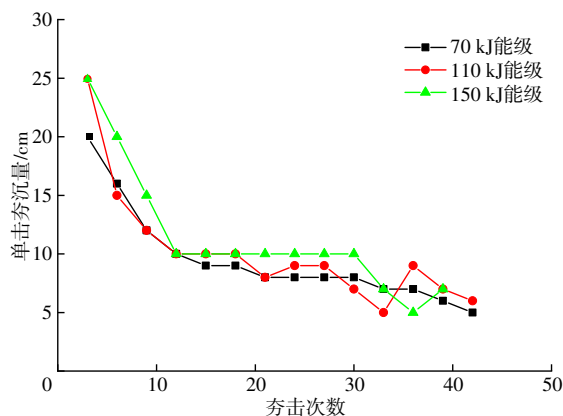


图4 夯沉量、孔隙水压力及地面振动监测

Fig. 4 Monitoring of tamping settlement, pore water pressure and ground vibration



(a) 累计夯沉量



(b) 单击夯沉量

图5 夯沉量随夯击次数变化

Fig. 5 Settlement variation with the tamping times

于密实状态。根据试验结果,夯击35次后单击夯沉量达到平缓状态。

3.2 超静孔隙水压力

不同工况超静孔隙水压力增长及消散结果如图6~8所示。结果表明,超静孔隙水压力随夯击次数增加而累计增大,且相同条件下夯击能越大,超静孔隙水压力越大。具体来说,当夯击能为70、110、

150 kJ时,夯点正下方4 m埋深超静孔隙水压力分别为52.75、69.49、82.32 kPa,超静孔隙水压力随夯击能的增长率为37%,但埋深7 m处增长率仅为16%。由此可知,超过一定埋深后,夯击能对超静孔隙水压力的影响将趋于稳定。由于夯击施工速度较快(约1 min),可不考虑夯击过程中孔压消散,因而采用累计超静孔隙水压力分析高速液压夯的动应力传播。止夯后,超静孔隙水压力迅速减小,夯后40~50 min消散完毕。

3.3 地面振动

高速液压夯施工过程中典型地面振动加速度时域、频域结果如图9所示。通过加速度时域结果可以看出,高速液压夯地面振动波形类似强夯振动衰减形态^[16],且振动持续时间较短(0.5 s以内)。通过加速度频域结果可以看出,高速液压夯地面振动主频为5~30 Hz,较强夯振动低^[17],但同属于中低频振动。因此,本文采用振动速度指标评价高速液压夯振动影响。

4 讨论与分析

4.1 竖向动应力传播特性

高速液压夯夯击地面时,夯锤重力势能转换为动能冲击夯板。与强夯相比,高速液压夯利用夯板缓冲效应将瞬态冲击荷载转换为周期面源荷载,激发产生中低频柱面波,降低峰值应力,延长动荷载作用时间,提升能量传递效率与加固深度。动应力在土体中由夯板处向四周传播,在地下水位以下将产生超静孔隙水压力。通过分析超静孔隙水压力沿竖向的分布规律,可以揭示高速液压夯竖向动应力传播特性。

根据理想弹性半空间静力学理论^[18-19],上述动应力可视为准静力,当确定夯锤-地面冲击接触应力后,即可计算高速液压夯板下不同深度土体的附加动应力值。高速液压夯板为圆形,因而地面冲击荷载的作用区域为圆形区域。为此,将圆形区域中心设为原点 O ,水平面设置为极坐标 r (夯点正下方 $r=r_0$),则地基内部任意深度 z 处的附加动应力 σ_z 满足柱坐标系下函数关系,如下所示

$$\sigma_z = n\sigma_0\alpha_r = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} \right)^3 \right] \quad (1)$$

式中: n 为夯击次数; σ_0 为均布荷载中心点的地面冲击接触动应力; α_r 为圆形均布荷载周边下方不同深度土中竖向附加应力系数,与土体深度和圆形荷载

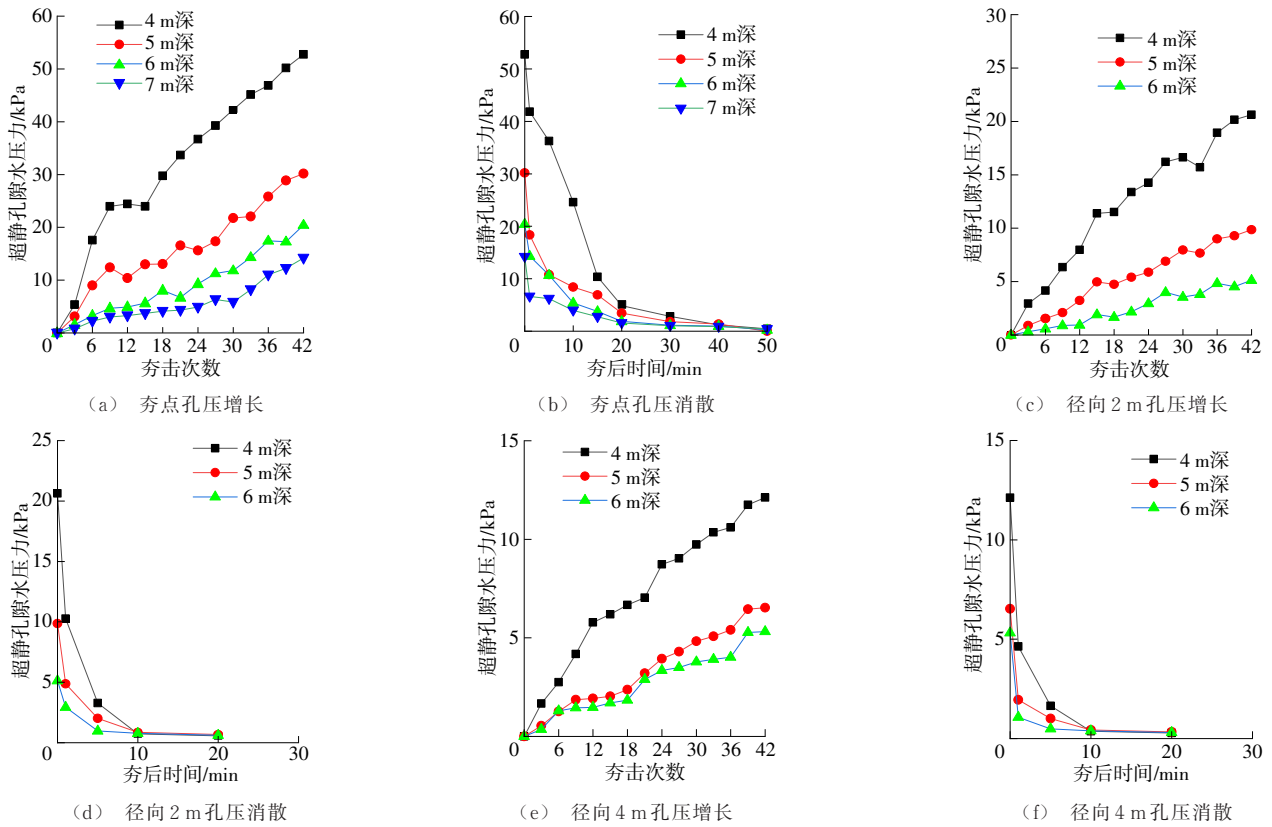


图6 70 kJ能级高速液压夯超静孔隙水压力变化

Fig. 6 Excess pore water pressure variation of high-speed hydraulic compaction with 70 kJ energy level

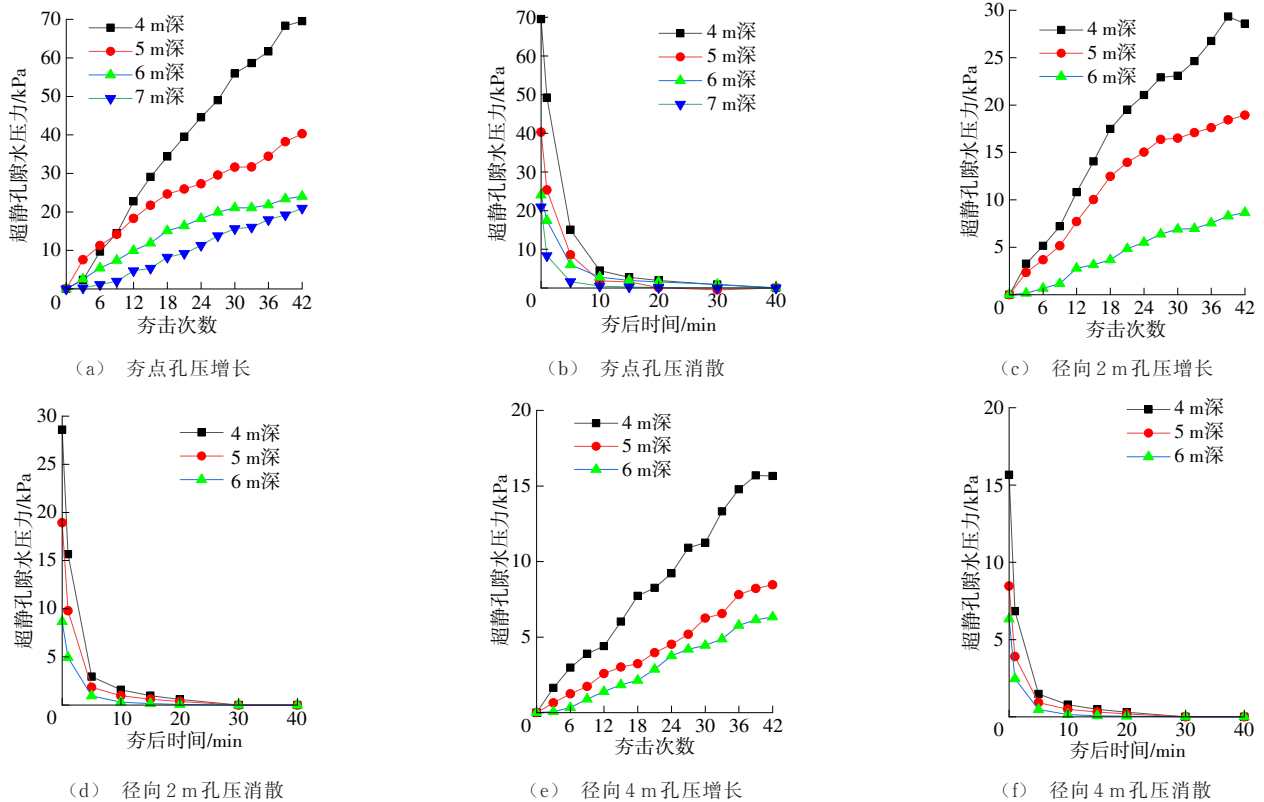


图7 110 kJ能级高速液压夯超静孔隙水压力变化

Fig. 7 Excess pore water pressure variation of high-speed hydraulic compaction with 110 kJ energy level

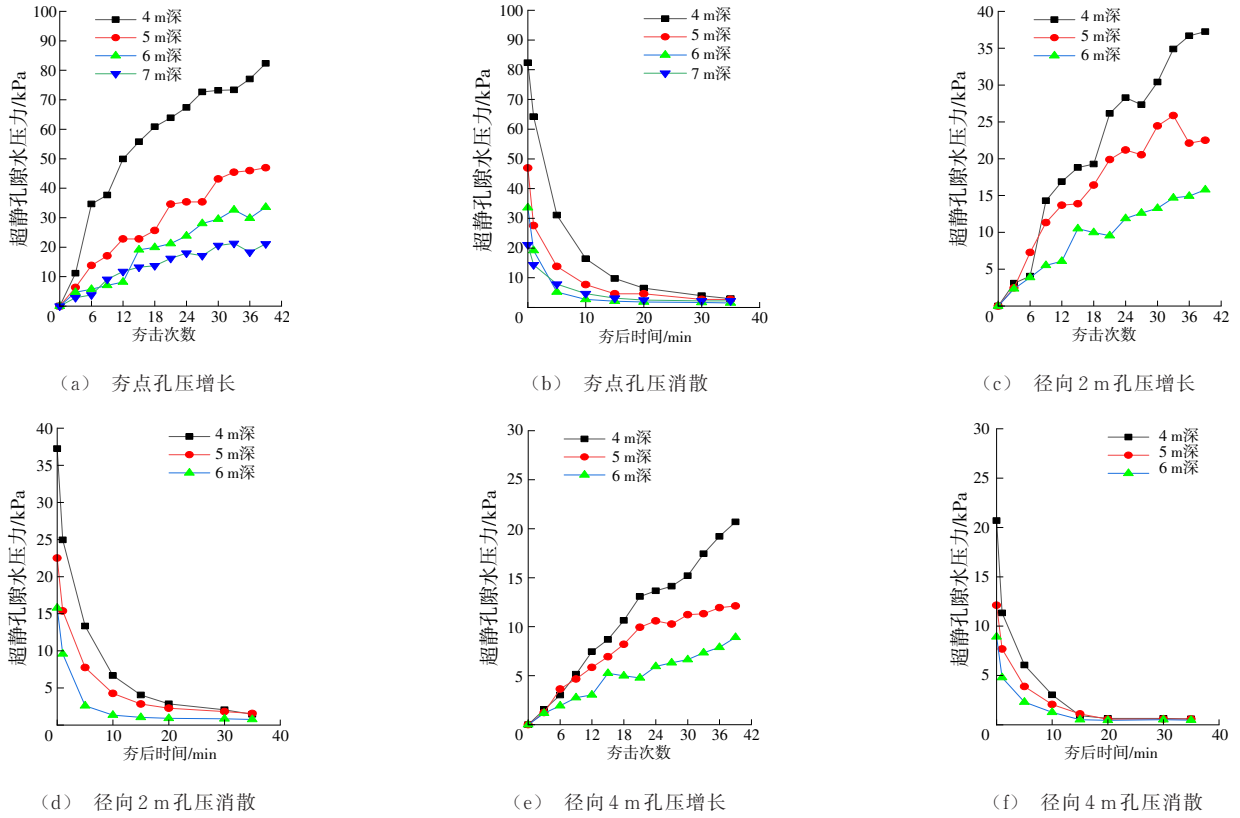


图8 150 kJ能级高速液压夯超静孔隙水压力变化

Fig. 8 Excess pore water pressure variation of high-speed hydraulic compaction with 150 kJ energy level

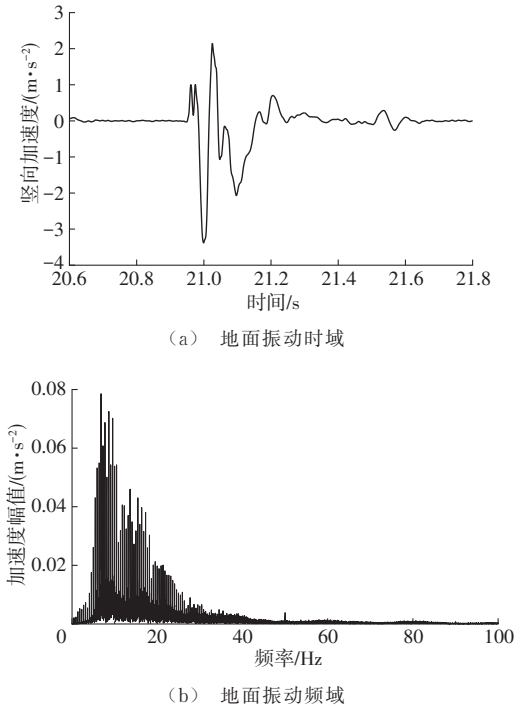


图9 高速液压夯地面振动结果(150 kJ能级、夯检距5 m测点)

Fig. 9 Ground vibration results of high-speed hydraulic compaction (150 kJ energy level, measurement point of 5 m tamping detection distance)

半径的比值有关; r_0 为圆形荷载半径,理论上等于高速液压夯夯板半径 r_b 。

相比强夯^[20-22],夯板的存在使得地面冲击过程分为夯锤-夯板典型刚体碰撞和夯板-土体碰撞2个过程,其中夯板-土体碰撞视为拟静力加载,夯锤-夯板碰撞视为动力加载,该系统总动量保持不变,即

$$F_0 t_0 = M v_0 \quad (2)$$

式中: F_0 为夯锤-夯板冲击接触动荷载, $F_0 = \sigma_0 \pi r^2$; t_0 为夯锤-夯板接触时间; M 为夯锤质量; v_0 为夯锤自由下落至夯板时初速度。

根据式(2)可计算地面冲击接触动应力 σ_0 ,将式(2)代入式(1),即可得到地基内部任意深度 z 处的附加动应力 σ_z 为

$$\sigma_z = n \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{M v_0}{t_0 \pi r_b^2}$$

以夯击能150 kJ工况为例,计算夯锤自由下落至地面初速度 $v_0 = 5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (夯锤落距 $h_0 = 1.5 \text{ m}$),夯锤-夯板接触时间(振动持时) $t_0 = 0.31 \text{ s}$ (图9),计算夯锤产生的冲击接触动荷载 $F_0 = 174.9 \text{ kN}$,则夯

锤地面冲击接触动应力 $\sigma_0=98.9$ kPa。根据式(3)计算 4 m 深度土体动应力为 4.99 kPa, 夯击 40 次后 ($n=40$), 土体竖向动应力累计值为 199.9 kPa, 同理可计算其他深度土体的动应力。

许多学者曾基于达朗贝尔原理确定了强夯冲击地基的动力学方程, 建立了不同地面冲击接触动应力的计算方法, 如冉逸涵等^[19]、刘汉龙等^[20]、钱家欢等^[21]、Scott 等^[22]等均提出过类似方法。参考上述方法, 可计算高速液压夯地面冲击接触动应力 σ_0 , 进而利用式(3)计算不同深度土体附加动应力 σ_z 。相关计算参数: 土体重度 $\lambda_d=20$ kN·m⁻³, 加荷弹性模量 $E=6$ MPa, 卸荷弹性模量 $E_{sul}=24$ MPa, 动剪切模量 $G_d=2.1$ MPa, 土体阻尼比 $\delta=0.15$, 土体泊松比 $\nu=0.40$, 夯锤质量 $M=10$ t, 夯锤落距 $h_0=1.5$ m, 夯板半径 $r_b=0.75$ m, 夯锤入土速度损失率 $\eta=30\%$ 。不同理论方法计算得到的土体动应力沿深度分布与现场实测值对比如图 10 所示。

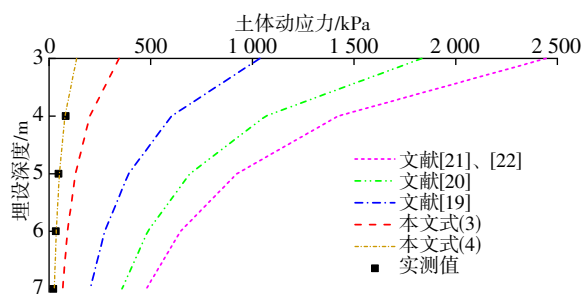


图 10 土体动应力理论计算值与实测值对比 (150 kJ)

Fig. 10 Comparison of theoretically calculated and measured values of soil dynamic stresses (150 kJ)

由图 10 可以看出, 不同理论计算结果均与实测值有一定差异, 其中本文式(3)计算结果与现场实测值最为接近, 但差异性仍较大。尽管如此, 不同理论计算值呈现出的变化趋势与实测值基本吻合, 即高能级液压夯动应力沿竖向传播符合圆形均布荷载下附加应力分布规律。分析原因可知, 动应力沿竖向衰减的直接原因是波动能量的几何扩散(应力波向四周传播, 波阵面面积扩大, 单位面积上的能量密度减小), 间接原因包括土体阻尼、散射效应等。黄河冲积平原地基地下水位高、孔隙率大, 土体阻尼特性较大, 采用准静力假定后忽略了土体阻尼的影响, 导致实际情况偏小于理论计算结果。因此, 可以认为高速液压夯动力作用下地基动应力随深度变化仍符合式(3), 但其指数项有所不同。同样以夯击能 150 kJ 工况为例, 对现场土体竖向动应力监测结果进行回归拟合, 得到修正后的公式如下

$$\sigma_z = n \frac{Mv_0}{t_0 \pi r_0^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} \right)^{1.1493} \right] \quad (4)$$

采用式(4)计算不同工况土体动应力沿深度的分布与现场实测值对比如图 11 所示。

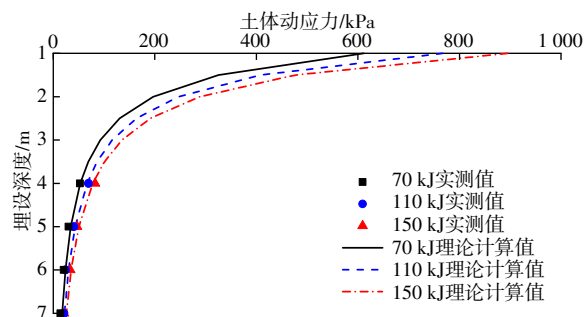


图 11 不同工况土体动应力沿深度分布

Fig. 11 Distribution of soil dynamic stresses along the depth of different conditions

由图 11 可以看出, 采用式(4)计算土体竖向动应力与现场实测值基本吻合, 其中 70、110、150 kJ 工况拟合决定系数 R^2 分别为 0.95、0.97 和 0.99, 计算精度较现有方法显著提升, 验证了本文修正公式的准确性。与现有理论模型相比(图 10), 本文计算公式能够准确计算高速液压夯竖向动应力传递特性。由图 11 可知, 夯点下土体竖向动应力沿深度具有以下变化规律: 竖向动应力沿深度迅速衰减, 呈现明显的二次衰减趋势, 其中 0~4 m 埋深动应力值沿深度衰减较快, 在 4 m 埋深位置, 曲线出现明显拐点, 即曲率最大点; 4 m 埋深以下区域动应力值沿深度缓慢衰减。以 150 kJ 工况为例, 1 m 深度土体动应力值为 895.63 kPa; 埋深为 4 m 时动应力快速减小至 82.33 kPa; 4~8 m 埋深动应力衰减较慢, 埋深为 6 m 时减小至 33.58 kPa, 埋深为 7 m 时减小至 21.12 kPa。随着深度增加, 拐点以下各工况动应力值逐渐接近, 至埋深 7 m 时, 各工况动应力值近似相等(图 11), 表明高速液压夯竖向动应力的传播具有一定影响深度, 超过该深度后夯击作用效果将减弱。根据式(4), 通过测试现场振动加速度或振动速度(图 9), 获得夯锤-夯板接触时间参数 t_0 , 即可计算不同深度土体动应力。

4.2 径向动应力传播特性

为分析不同埋深高速液压夯动应力沿径向传播特性, 以 150 kJ 工况为例, 选取夯击 40 次后 4、5、6 m 埋深超静孔隙水压力的监测数据, 绘制不同埋深土体动应力随夯检距的变化规律, 结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出, 不同埋深土体动应力均沿径向衰减, 并且埋深越浅衰减速率越快。超静孔隙水

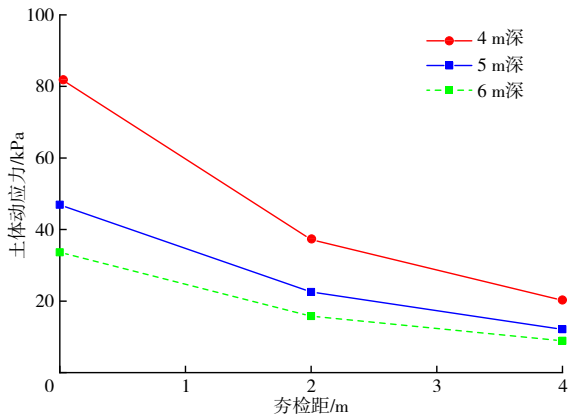


图12 土体动应力随夯检距变化规律(150 kJ)

Fig. 12 Variation rule of soil dynamic stress with tamping detection distance (150 kJ)

压力的这种衰减规律,反映了土体状态对高速液压夯动应力径向传播特性的影响,即上层土体自重应力较小、压实度较低,土体动应力沿径向衰减速率较快;下层土体自重应力大、压实度较高,土体应力沿径向衰减速率较慢。

上述动应力传播过程主要受高速液压夯点振级、场地介质条件和夯检距3个因素控制。已有资料表明,涉及该动力夯实过程的主要物理量有夯板面积 A 、夯检距 r_s 等物理量^[23-24]。根据 π 定理,选取夯板面积 A 为基本变量^[25],参考动力夯实法振动传播规律,考虑动应力随夯检距 r_s 具有负幂函数衰减关系^[26],得到高速液压夯动应力 σ_r 随夯检距具有如下衰减形式

$$\sigma_r = K\sigma_z \left(A/r_s^2 \right)^\beta \quad (5)$$

式中: K 为场地系数; β 为衰减系数。

为推求式(5)中 β ,首先对不同工况土体动应力进行归一化,得到归一化动应力与夯板面积 A 及夯检距 r_s 的函数关系,然后进行回归分析,并将回归分析结果与式(5)对照,即可求得 K 和 β 。归一化回归分析结果如图13所示。

由图13可以看出,土体动应力沿径向分布的计

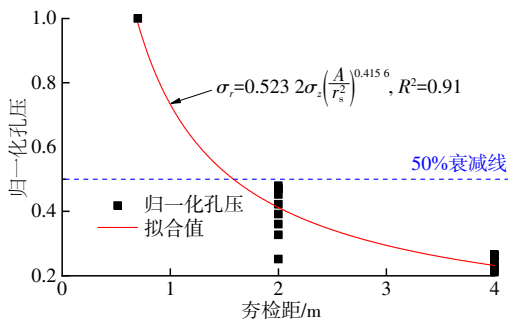


图13 土体动应力沿径向分布

Fig. 13 Distribution of soil dynamic stress in radial direction

算结果与现场实测值基本吻合,拟合决定系数 R^2 为0.91,验证了理论公式的准确性。根据回归分析结果,得到高速液压夯土体径向动应力传播计算公式为

$$\sigma_r = 0.523 \cdot 2\sigma_z \left(A/r_s^2 \right)^{0.4156} \quad (6)$$

4.3 有效加固范围计算

基于上述动应力传播特性,能够确定高速液压夯的有效加固范围(深度和半径)。参考强夯加固深度判别方法,将超静孔隙水压力 σ_c 与土体自重应力 σ_s 比值不大于0.2作为有效加固深度的判别标准,即取超静孔隙水压力为土体自重应力20%对应的深度作为有效加固深度^[27]。不同夯击能有效加固深度判别如图14所示。

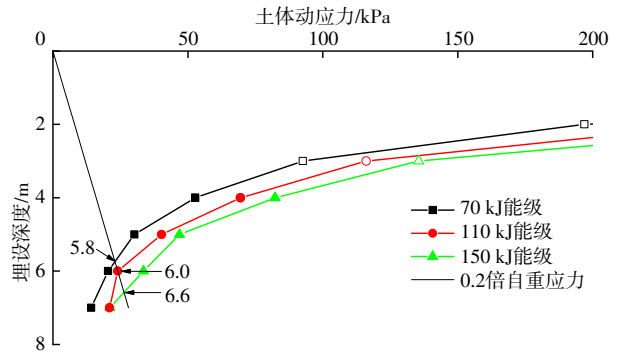


图14 不同夯击能有效加固深度判定曲线

Fig. 14 Determination curves of effective reinforcement depth for different tamping energies

由图14可知,判定夯击能70、110、150 kJ工况有效加固深度分别为5.8、6.0、6.6 m。基于上述试验结果,进一步建立高速液压夯有效加固深度的理论计算公式。分析可知,影响高速液压夯有效加固深度的主要参数包括夯锤锤重 W 、落距 h_0 、夯板面积 A 、土体重度 λ_d 、含水率 ω 和夯击次数 n 等物理量,以此作为影响有效加固深度 H 的基本因素。高速液压夯夯击过程涉及3个基本量纲,长度 L 、时间 T 和夯锤质量 M 。根据 π 定理,选取夯锤锤重 W 和落距 h_0 为基本变量,即 $x_1=W, x_2=h_0$,满足量纲分析对基本物理量的要求。令 $x_3=H, x_4=A, x_5=\lambda_d, x_6=\omega, x_7=n$,可得到5个量纲为1数: $\Pi_1=H/h_0, \Pi_2=A/h_0^2, \Pi_3=\lambda_d h_0^3/W, \Pi_4=1, \Pi_5=1$ 。对不同量纲为1的 Π 数进行组合仍为量纲为1数,取 Π_2, Π_3 和 Π_4 进行如下组合,得到量纲为1数 Π_6 为

$$\Pi_6 = \frac{W}{A\lambda_d h_0} \quad (7)$$

考虑梅纳有效加固深度的基本形式,将式(7)改写为

$$\Pi_1 = \alpha \sqrt{\Pi_6} \quad (8)$$

将 Π_1 、 Π_6 代入式(8),建立如下公式

$$H = \alpha \sqrt{\frac{Wh_0}{A\lambda_d}} \quad (9)$$

式中: α 为因素系数,与土体含水率 ω 和夯击次数 n 有关。

将试验结果代入上述公式后,得到因素系数 $\alpha = 0.9268 (R^2 = 0.99)$ 。由此得到高速液压夯有效加固深度计算公式为

$$H = 0.9268 \sqrt{\frac{Wh_0}{A\lambda_d}} \quad (10)$$

通过式(10)可以看出,高速液压夯有效加固深度与夯锤锤重、落距正相关,与夯板面积、土体重度负相关。参考强夯加固效果影响敏感性可知^[28],夯锤锤重、落距(夯击数)、夯板面积、土体重度和含水率对其有效加固深度的影响程度逐渐减弱。

同理,根据不同工况超静孔隙水压力沿径向衰减情况,可以分析高速液压夯的有效加固半径。由于目前关于动力夯实地基径向加固范围未形成统一判定标准,本文根据高速液压夯现场试验夯点布置形式(图2),取动应力衰减率50%对应的水平距离作为有效加固半径。根据图13径向动应力传播规律,得到不同夯击能施工的有效加固半径约为1.64 m,即1.1D(D为夯板直径)。因而夯击施工时可按照3.2 m间距布置夯点,即高速液压夯布点间距可按2D取值。

为验证有效加固范围的正确性,将不同工况夯

前夯后标贯试验结果汇总于图15中。

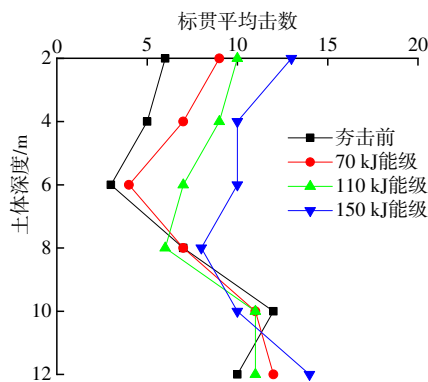


图15 高速液压夯加固前后标贯结果

Fig. 15 Standard penetration test results before and after high-speed hydraulic compaction

由图15可知:经过夯击后,6 m深度范围内土体标贯击数显著增大,表明地基土体承载力得到提高,土体得到加固密实,由此验证了式(10)的准确性;并且相同地质条件下,高速液压夯能级越高,有效加固深度越大;各试验区7 m深度以下标贯平均击数增幅不明显,表明3种能级高速液压夯有效加固深度均未超过7 m。此外,70、110、150 kJ工况满夯后地面平均沉降量分别为32.5、33.4、35.4 cm,有效消除了软土地基的工后固结沉降,达到了预期加固效果。

4.4 振动影响范围分析

高速液压夯地面振动属于中低频振动,因而采用振动速度进一步评价高速液压夯振动影响范围^[17]。不同工况地面振动速度随夯检距的变化情况如表2和图16所示。

表2 地面振动速度随夯检距变化

Table 2 Ground vibration velocity variation with tamping detection distance

夯击能/kJ	不同夯检距(m)对应的振动速度/(cm·s ⁻¹)							
	2	5	10	15	20	80	100	120
70	9.973	4.286	1.483	0.727	0.623	0.235	0.226	0.112
110	10.440	4.730	1.794	0.803	0.646	0.155	0.117	0.113
150	12.302	5.324	1.945	0.817	0.713	0.122	0.121	0.100

由表2和图16可以看出,夯检距20 m以内,地面振动速度随夯检距增大迅速减小,而夯检距20 m以外地面振动速度衰减缓慢。参考《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[17],对于一般工业建筑、公共建筑,70、110、150 kJ能级安全施工距离分别为7.2、7.8、8.4 m。不同类型建筑安全施工距离可根据图16确定,居住建筑、振动敏感建筑等安全施工距离应参照该标准依次增大。

研究表明,冲击类荷载产生的地面振动速度随

夯检距按负幂函数规律衰减^[26],本文采用负幂函数公式对图16结果进行回归分析,得到高速液压夯地面振动计算公式如下

$$v = 7.183 \left[r_s / (W_h A) \right]^{-1.1} \quad (11)$$

式中: W_h 为夯击能; v 为振动速度; $r_s \leq r_b$ 时,取 $r_s = r_b$ 。

由图16可以看出,采用拟合公式计算地面振动速度与现场实测值基本吻合,70、110、150 kJ能级拟合决定系数 R^2 分别为0.989 8、0.989 9和0.991 8,

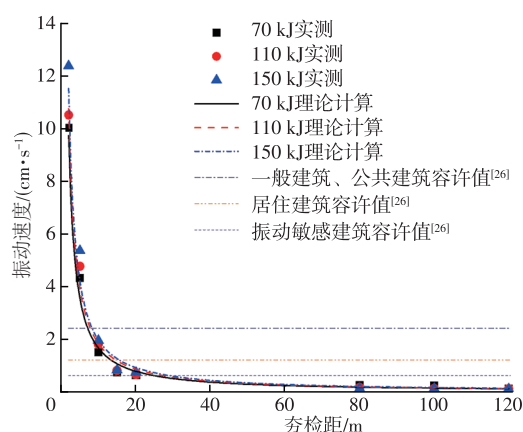


图16 高速液压夯地面振动速度随夯检距变化

Fig. 16 Ground vibration speed variation of high-speed hydraulic compaction with tamping detection distance

验证了本文公式的准确性。

5 结 语

(1)高速液压夯动应力沿竖向传播符合指数型衰减规律,表现出明显的二次衰减趋势,传递指数为1.1493,较现有弹性静力学理论值要小;动应力沿径向传播符合负幂函数衰减规律,动应力值与夯板面积正相关。

(2)高速液压夯有效加固深度与夯锤锤重、落距正相关,与夯板面积、土体重度负相关,70、110、150 kJ能级有效加固深度分别为5.8、6.0、6.6 m;有效加固半径与夯板直径有关,约为1.1倍夯板直径,夯击施工布点间距可按2倍夯板直径取值。

(3)高速液压夯地面振动主频为5~30 Hz,振动速度随夯检距按负幂函数衰减。对于一般工业建筑、公共建筑,70、110、150 kJ能级安全施工距离分别为7.2、7.8、8.4 m,居住建筑、振动敏感建筑等安全施工距离应参照该标准依次增大。

(4)本文研究基于黄河冲积平原软土地基,其他地质条件(如黏土、砂土)有待进一步开展。

参考文献:

Reference:

- [1] 曹 斌,李生汀,吴立坚,等. 高速公路新旧路基结合部高速液压夯补强技术探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(10):58-59.
CAO Bin, LI Sheng-ting, WU Li-jian, et al. Discussion on strengthening technology of high-speed hydraulic ram at the junction of new and old subgrade of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2017, 13(10): 58-59.
- [2] 李 晋,姜 鹏,李天宇,等. 液夯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 hydraulic impactor[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(9): 67-74.

- [3] 杨涵晞,王梦洁,夏梦灿,等. 交通荷载下漫灌区水泥土桩复合地基的动力特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2025,45(5):117-128.
YANG Han-xi, WANG Meng-jie, XIA Meng-can, et al. Dynamic characteristics of cement soil pile composite foundation in flood irrigation area under traffic load[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(5): 117-128.
- [4] 高 盟,于金平,隋浩唐,等. 高能强夯动力置换深层淤泥软土加固机理[J/OL]. 交通运输工程学报,2025-12-19. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.108>.
GAO Meng, YU Jin-ping, Sui Hao-tang, et al. Mechanism of reinforcement for deep silt soil through high-energy dynamic replacement [J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025-12-19. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.108>.
- [5] 冯雄辉,万 智. 台背液夯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 backwall by hydraulic compaction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(1): 49-54.
- [6] 张焕新,方建勤,黄水泉. 液夯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,2010,55(6):140-143.
ZHANG Huan-xin, FANG Jian-qin, HUANG Shui-quan. Experimental study on construction technology of hydraulic tamping technology to strengthen subgrade at abutment back of expressway[J]. Highway, 2010, 55(6): 140-143.
- [7] 赵国权,孙文博,陈少军,等. 普通强夯与高速液压夯工艺用于吹填砂层地基处理对比分析[J]. 水运工程,2021(2):155-159.
ZHAO Guo-quan, SUN Wen-bo, CHEN Shao-jun, et al. Comparative analysis of common dynamic tamping and high-speed hydraulic tamping process used in foundation treatment of reclaimed sand layer[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(2): 155-159.
- [8] 胡建树,房启林,蒋诗艺,等. 高速液压夯技术在湿陷性黄土场地中的应用及分析[C]//王新杰. 第十一届深基础工程发展论坛论文集. 北京:中国建筑工业出版社,2021:342-344.
HU Jian-shu, FANG Qi-lin, JIANG Shi-yi, et al. Application and analysis of high-speed hydraulic ramming technology in wet loess sites[C]// WANG Xin-jie. 11th Deep Foundation Engineering Development Forum. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 342-344.
- [9] TARAWNEH B, MATRAJI M. Ground improvement using rapid impact compaction: Case study in Dubai, UAE [J]. Geotechnique, 2014, 66(11): 1007-1014.
- [10] 尼 博. 高速液压夯实机在机场不停航施工中的应用与研究

- [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(3): 6-8.
- NI Bo. Application and research of high-speed hydraulic rammachine in airport non-stop construction [J]. Building Technology Development, 2024, 51(3): 6-8.
- [11] JIA M C, YANG Y, LIU B, et al. PFC/FLAC coupled simulation of dynamic compaction in granular soils [J]. Granular Matter, 2018, 20(4): 76.
- [12] 陈晓燕, 厉超, 齐明杰, 等. 土石坝分层液压夯实填筑压实特性研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 98-101, 31.
- CHEN Xiao-yan, LI Chao, QI Ming-jie, et al. Study on compaction characteristics of layered hydraulic compaction filling for earth-rockfill dam [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 98-101, 31.
- [13] CHENG S H, CHEN S S, GE L. Method of estimating the effective zone induced by rapid impact compaction [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 18336.
- [14] VLČEK J, GAGO F, MIHÁLIK J, et al. Investigation of dynamic effect of rapid impact compaction [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 21364.
- [15] 邓友生, 李龙, 孙雅妮, 等. 水泥粉煤灰处理湿陷性黄土路基承载性能[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(4): 92-103.
- DENG You-sheng, LI Long, SUN Ya-ni, et al. Bearing capability of collapsible loess subgrade through cement-fly ash treatment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(4): 92-103.
- [16] 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.
- [17] 尹坚, 张良涛. 地基强夯振动测试分析及防振动措施[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(4): 17-20.
- YIN Jian, ZHANG Liang-tao. Test and measurement of the vibration induced by heavy ramming foundation and anti-vibration measure [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(4): 17-20.
- [18] XU P, ZHAO W, QIAO S F, et al. Comprehensive investigation on the reinforcement effect of the dynamic compaction of high stone-filled embankments [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 49: 101439.
- [19] 冉逸涵, 肖世国, 廖家前, 等. 土-石混合填土强夯动应力的简化与修正算法[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 1121-1128.
- RAN Yi-han, XIAO Shi-guo, LIAO Jia-qian, et al. Simplified and modified algorithms for dynamic compressive stress in mixed soil-rock fills under dynamic compaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(4): 1121-1128.
- [20] 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 Han-long, GAO You-bin, CAO Jian-jian, et al. Calculation of contact stress and soil vertical displacement under dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1493-1497.
- [21] 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 Jia-huan, QIAN Xue-de, ZHAO Wei-bing, et al. Theory and practice of dynamic consolidation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 1-17.
- [22] SCOTT R A, PEARCE R W. Soil compaction by impact [J]. Géotechnique, 1975, 25(1): 19-30.
- [23] 姚仰平, 张北战. 基于体应变的强夯加固范围研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2663-2671.
- YAO Yang-ping, ZHANG Bei-zhan. Reinforcement range of dynamic compaction based on volumetric strain [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2663-2671.
- [24] WU B Q, NI W K, SHI B L, et al. Study on elevation effect of vibration velocity by dynamic compaction on loess high slope based on dimensional analysis method [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(6): 04024107.
- [25] 邵友元. 对量纲分析法与 π 定理的理解与应用[J]. 东莞理工学院学报, 2010, 17(3): 106-109.
- SHAO You-yuan. Comprehension and application for dimensional analysis and rule π [J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2010, 17(3): 106-109.
- [26] 张宏博, 厉超, 宋修广, 等. 强夯加固粉土地基地面振动衰减规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1289-1295.
- ZHANG Hong-bo, LI Chao, SONG Xiu-guang, et al. Study on ground vibration attenuation law of silt foundation treated with dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1289-1295.
- [27] 宋修广, 周志东, 张崇高, 等. 强夯联合井点降水加固粉土地基现场试验[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 51-56, 134.
- SONG Xiu-guang, ZHOU Zhi-dong, ZHANG Chong-gao, et al. Field test on silt foundation treatment with dynamic consolidation method combining with well-point dewatering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 51-56, 134.
- [28] 厉超. 粉土地基强夯动力特性及有效加固范围研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 37-40.
- LI Chao. Study on dynamic compaction characteristics and the effective reinforcement scope of silt foundation [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 37-40.