

文章编号:1672-3961(2026)01-0072-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.266

基于大三轴试验的高速液压夯处治粉土地基力学特性

江大海¹,刘亚珍²,齐迪¹,吕斌¹,宫海霞¹,王楚怡²,张宏博²

(1.齐鲁高速公路股份有限公司,山东 济南 250101; 2.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002)

摘要:为揭示高速液压夯处治粉土地基的力学特性,通过模拟不同夯击能作用,开展压实粉土室内大三轴试验,确定不同夯击能及围压条件下粉土应力-应变规律,并基于邓肯-张模型确定计算力学参数。结果表明,随着夯击能的增大,粉土试件峰值应力增大,其中经150 kJ能级处治后的粉土地基峰值应力最大可达396 kPa,为70 kJ能级处治地基的1.3~1.5倍,不同夯击能条件下,150 kJ能级处治后的地基剪缩现象最为明显;同夯击能级条件下,随着围压的增加,粉土试件的峰值应力增大,且峰值应力对应的应变增大,150 kJ夯击能级处治后的土体在200 kPa围压下的峰值应力可达530 kPa,为相同处治条件100 kPa围压下的2倍。参考邓肯-张计算模型,计算了不同夯击能处治后粉土地基的力学参数,研究成果为高速液压夯技术推广应用提供理论支撑。

关键词:高速液压夯;粉土地基;室内大三轴试验;剪切特性;邓肯-张模型

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

引用格式:江大海,刘亚珍,齐迪,等.基于大三轴试验的高速液压夯处治粉土地基力学特性[J].山东大学学报(工学版),2026,56(1):72-79.

JIANG Dahai, LIU Yazhen, QI Di, et al. Mechanical characteristics of rapid impact compaction technology treating pulverised soil foundations based on large triaxial tests[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):72-79.

Mechanical characteristics of rapid impact compaction technology treating pulverised soil foundations based on large triaxial tests

JIANG Dahai¹, LIU Yazhen², QI Di¹, LÜ Bin¹, GONG Haixia¹, WANG Chuyi², ZHANG Hongbo²

(1. Qilu Expressway Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: To reveal the mechanical characteristics of rapid impact compaction treatment on pulverized soil foundations, an indoor triaxial test was conducted on compacted pulverized soil. This test simulated the effects of different tamping energies, determined the stress-strain behavior of pulverized soil under varying tamping energies and confining pressures, and calculated the mechanical parameters based on the Duncan-Chang model. The results showed that as tamping energy increases, the peak stress of the pulverized soil specimens also increases. Specifically, the peak strain of the pulverized soil foundation treated with 150 kJ of tamping energy could reach up to 396 kPa, which was 1.3 to 1.5 times greater than that of the foundation treated with 70 kJ. The shrinkage of the foundation after treatment at 150 kJ of tamping energy level was most pronounced in the impact tamping. Moreover, under the same tamping energy level, the peak stress of the pulverized soil specimens increased with the rise in confining pressure, with the peak stress corresponding to the strain of the specimen. For instance, at a confining pressure of 200 kPa, the peak stress of the soil treated with 150 kJ of tamping energy could reach 530 kPa, which was double that observed under the same treatment conditions at a confining pressure of 100 kPa. Using the Duncan-Chang calculation model, the mechanical parameters of the pulverized soil foundation after treatment with different tamping energies were calculated. These research findings provided theoretical support for the promotion and application of RIC technology.

收稿日期:2024-10-11

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2024ME078)

第一作者简介:江大海(1978—),男,山东安丘人,工程师,主要研究方向为高速公路建设管理。E-mail:1015919373@qq.com

Keywords: rapid impact compaction; pulverized soil foundations; indoor large triaxial test; shear characteristics; Duncan-Chang model

0 引言

高速液压夯作为一种有效的地基处理技术,现已在建筑物基础、道路铺设、桥梁支撑及其他地基加固工程中广泛应用^[1-3];文献[4]中采用高速液压夯实机补强台背路基,结果表明,液压夯可显著提高回填土的压实度,加速消除一定范围内台背回填土的自然沉降,有效防止台背跳车早期病害的发生;文献[5]中针对 G20 青银高速山东济青段、山东滨莱高速莱芜段等高速公路改扩建工程的新旧路基进行高速液压夯加固,取得了提高结合部压实度及强度的良好效果;文献[6]通过临渭高速公路对高速液压夯实机施工过程的总结,认为高速液压夯可以有效消除黄土路基填筑的湿陷性,增强抗滑性及抗裂性,保证路基的填筑质量。

文献[7]中设计大三轴试验,研究不同加筋情况下土工格栅加筋土的力学特征及加筋效果,并通过邓肯-张模型对加筋效果进行定量分析;文献[8]向素土中掺加碎石,制成不同颗粒级配的改良填料,对其进行大三轴试验研究力学特性;文献[9]通过现场试验对高速液压夯技术原位改良地基效果进行研究;文献[10]通过数值模拟等手段,分析土体位移场与局部孔隙度的演变,研究高速液压夯技术应用过程中土体变形规律;文献[11]对高速液压夯不同夯实次数处理过的路基开展瞬态面波无损检测,通过钻土取芯并开展土工试验得到含水率与压实度等相关土体参数随深度的变化情况;文献[12]提出通过液压夯实机的夯击补强作用检测路基分层压实度的思路。

然而目前国内外关于高速液压夯技术的研究主要侧重于工程应用,缺少相关理论计算与针对高速液压夯技术处治后地基的力学特性理论研究,根

本原因在于对高速液压夯处治后的土体力学行为研究较少,尤其缺乏不同夯击能条件下土体力学指标及模型研究。因此,为揭示高速液压夯处治粉土地基的力学特性,本研究设计不同夯击能和围压工况下的大三轴试验,分析试样应力-应变曲线、体应变-轴应变曲线,得出各因素影响规律与粉土地基的力学参数;参考邓肯-张模型,计算经高速液压夯技术处治后土体的力学参数,得到关键力学指标。研究成果为高速液压夯技术在更广泛领域的应用提供理论支撑,有助于实现复杂工程条件下对地基稳定性和安全性的更高要求。

1 试验方案

1.1 试验材料

为贴合工程实际,试验选用黄泛区粉土作为试验土体,根据文献[13]进行物理力学特性试验与粒径级配测定。粉土颗粒组成特征如表 1 所示,土体粒径分布曲线见图 1,其中 F1、F2 为土样编号。

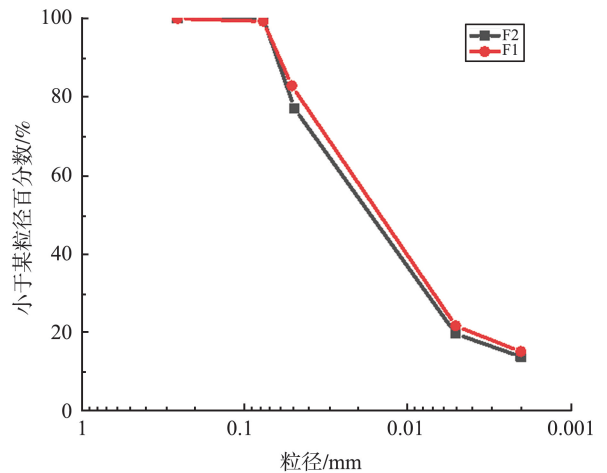


图 1 黄泛区粉土粒径分布曲线
Fig.1 Distribution curve of particle size of chalky soil in the yellow floodplain

表 1 粉土颗粒组成特征
Table 1 Characteristics of particle composition of chalky soil

土样 编号	不同粉土粒径占比/%					限制粒径 d_{60}/mm	有效粒径 d_{10}/mm	不均匀 系数 C_u	曲率 系数 C_c
	<0.002 mm	<0.005~ 0.002 mm	<0.050~ 0.005 mm	<0.074~ 0.050 mm	0.074~ <0.250mm				
F1	14.8	6.9	61.5	16.8	0	0.001 48	0.027	18.24	3.03
F2	13.8	5.9	57.7	22.6	0	0.001 47	0.031	21.09	3.71

为研究高速液压夯技术对土体处理前后的应用效果,对土体进行击实试验,击实曲线见图2。试验得到粉土的最优含水率为15%,最大干密度为 1.862 g/cm^3 。

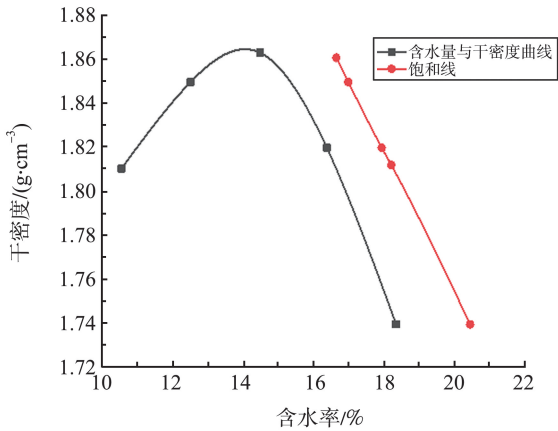


图2 粉土击实曲线

Fig.2 Compaction curve of pulverised soil

1.2 试验设备

为探究不同围压及夯击能条件下粉土介质的抗剪性能,对土体开展静态三轴不固结不排水(unconsolidated undrained, UU)试验。试验选用成都东华卓越科技公司生产的DJSZ-1000试验系统,该仪器包含加载、控制、油压、储水和冷却5个系统。仪器可施加的轴向荷载最大可达1 500 kN,试样尺寸选用 $\varphi 15\text{ cm}\times 30\text{ cm}$,可通过控制系统进行轴向荷载、轴向位移和围压等参数的调节控制。

1.3 试验工况

为探明不同埋深处土体经夯实处治后的效果,试验选取100、150、200 kPa 3种围压;设置不夯击、70、110、150 kJ不同夯击能量夯击等4种工况;含水率的变化对非饱和土抗剪强度有显著影响,尤其对黏聚力 c 的影响更为明显^[14]。分析土体击实曲线可知,黄泛区粉土的最优含水率为13%~16%,故试件含水率设置为15%,各工况设置见表2。

表2 三轴试验工况设置

Table 2 Three-axis test condition setting

序号	含水率/%	初始压实度/%	夯击能/kJ	夯击次数	处治压实度/%	围压/kPa
1			70	40	93	
2			110	40	95	100
3			150	40	97	
4			70	40	93	
5	15	85	110	40	95	150
6			150	40	97	
7			70	40	93	
8			110	40	95	200
9			150	40	97	

1.4 试验步骤

试验采用分层填筑的方法控制填料的相对实度,试验填料分3层填筑,每层高度为10 cm。三轴试验采用不固结不排水的剪切试验方法,具体步骤如下。

(1)计算试样所需粉土及水的质量,将其均匀拌合,焖料24 h后使用。

(2)将乳胶橡皮膜底部固定在底座上,各层粉土依次倒入乳胶膜中,通过控制夯锤下落高度模拟不同夯击能下的夯击压实。

(3)使用钢尺测量砂顶面距套筒顶端的距离,保证填料压实到指定高度。填筑完成后,打开抽真空阀,利用真空泵对试样进行抽真空处理,至试样孔隙压力达到60 kPa,关闭抽真空阀和真空泵,保证填料在施加围压前不会坍塌。

试验夯击时所采用的夯板为直径10 cm、厚1 cm的铁板;夯锤为质量10 kg的铁锤。根据II定理及缩放比例关系,将夯击能缩小比例设为1:18 000、夯锤夯板直径缩小比例设为1:12、锤重缩小比例设为1:900,如表3所示。

表3 模拟夯击表

Table 3 Simulated tamping table

组号	夯击能(锤重 $W\times$ 落距 h)/(N·cm)		夯板直径/cm	
	原型	模型	原型	模型
1	90 000 \times 78	100 \times 3.9	120	10
2	90 000 \times 110	100 \times 5.5	120	10
3	90 000 \times 170	100 \times 8.5	120	10

试验过程通过注水施加围压,当围压达到目标值并稳定后开始施加轴向荷载。试验轴向压力采用应变控制,轴向加载速率设为1.5~3.0 mm/min,剪切速率为2 mm/min,试件破坏标准为出现峰值偏应力或试件轴向应变达到20%,试验过程中填料夯实与成型过程如图3所示。

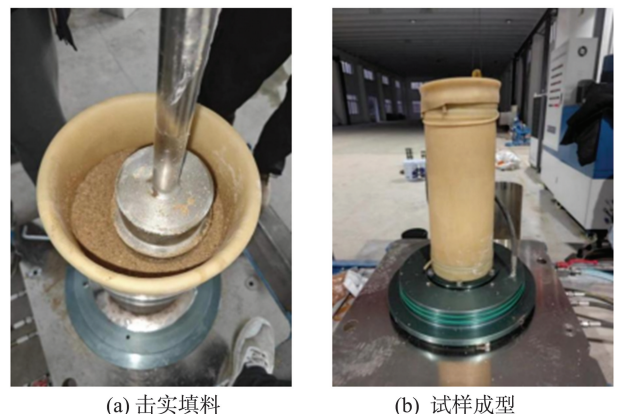


图3 三轴试验过程

Fig.3 Triaxial test process

2 试验结果分析

2.1 夯击能变化对土体特性影响

不同工况条件下试样的典型破坏形态如图 4 所示。试验结果表明:夯击能变化导致试样破坏形式随之变化,随着夯击能的增大,试样整体变形增大且剪切面更为明显和连续。分析原因为:随着夯击能的增大,土体颗粒之间的接触更紧密,摩擦增加使得试样具有更高的抗剪能力。

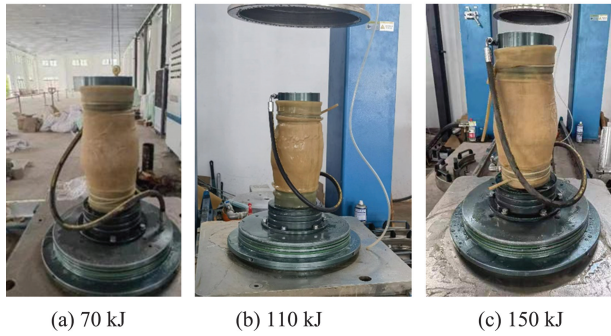
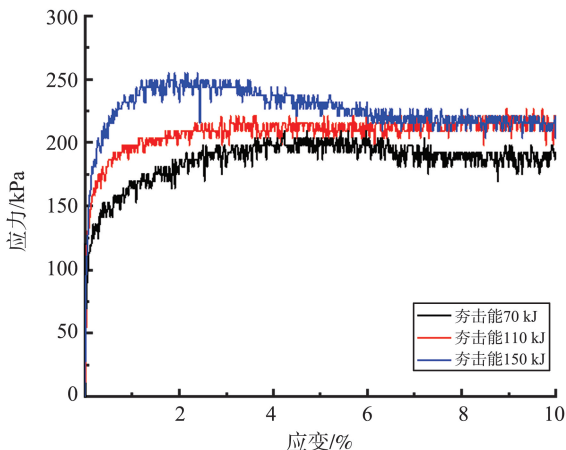


图 4 不同夯击能条件下试样破坏形态

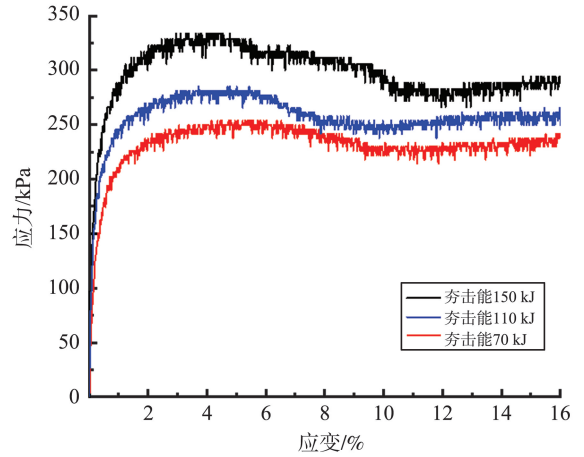
Fig.4 Damage morphology of specimens under different tamping energy conditions

不同夯击能条件下,试样应力-应变曲线如图 5 所示。

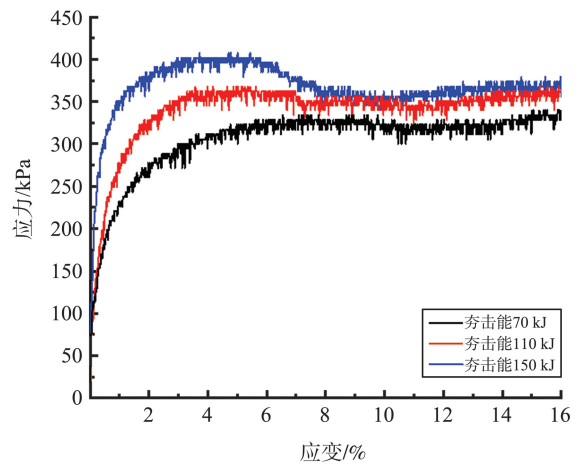
由图 5 可知,在试件初始加载阶段,应变随应力的增加而增加,试件显示出剪缩特征;随着荷载持续施加,应变逐渐减小,表现出剪胀特征。在围压相同的条件下,试件的峰值应力随处治夯击能增大而增加,其中 150 kJ 能级处治土体的峰值应力约为 70 kJ 能级处治土体的 1.3~1.5 倍;峰值应力出现时机为应变达到 2%~5%。分析原因为:夯击能级增加使得土颗粒之间排布更为密集,在剪应力作用下引起土颗粒间相互位置的变化,使颗粒间的孔隙减少,对剪切应力的抵抗作用更强。



(a) 围压 100 kPa



(b) 围压 150 kPa



(c) 围压 200 kPa

图 5 不同夯击能下的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves at different tamping energies

试样体应变与轴向应变之间的相关关系如图 6 所示。其中体应变为正值,试件发生剪缩;体应变为负值,试件发生剪胀^[15]。

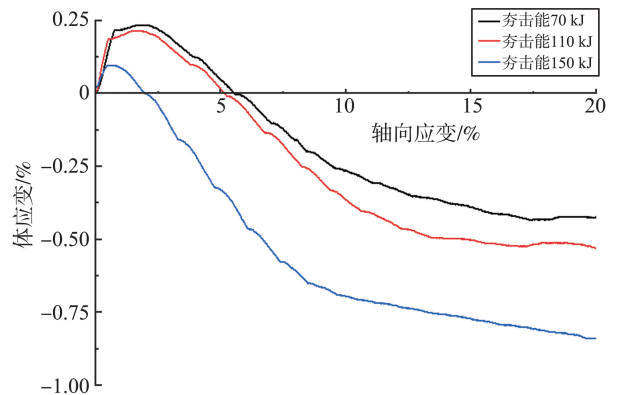


图 6 不同夯击能下的体应变-轴向应变曲线

Fig.6 Body strain-axial strain curves at different tamping energies

由图 6 可知,粉土试件随剪切过程产生剪缩-剪胀变化,体应变随轴向应变的增大而减小,达到峰值强度后土体由剪缩性转为剪胀性,直至试

验结束;夯击能越大,试件达到峰值强度时产生的轴向应变越小,经 70 kJ 能级夯击能处治后的地基在轴向应变为 6% 时达到峰值强度,而 150 kJ 能级处治后的地基在轴向应变为 2% 左右即达到峰值强度。分析原因为:初始阶段试件内部存在一定的孔隙,受轴向力作用,粉土颗粒被压缩密实,加上围压的限制作用,由此产生体积收缩现象,待土体内部孔隙完全填充,剪应力超

出围压的限制作用时,试件出现体积膨胀现象;夯击能级越大,处治后土体越密实,剪胀现象出现越早。

2.2 不同围压条件下压实粉土三轴剪切特性

不同围压条件下试样破坏形式如图 7 所示。由图 7 可知,随着围压的增大,试样整体变形明显变小。分析原因为:试样表面受到的压力增大,阻碍了试样表面的粉土颗粒之间发生相对位移。

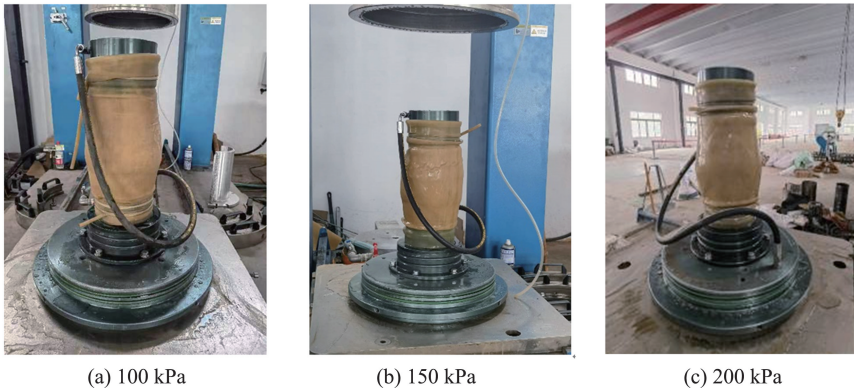
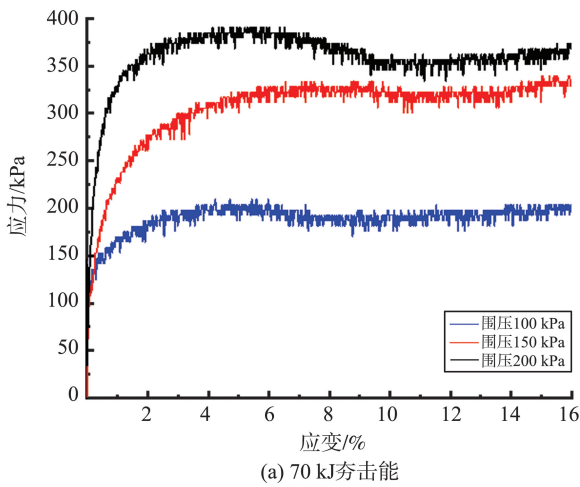


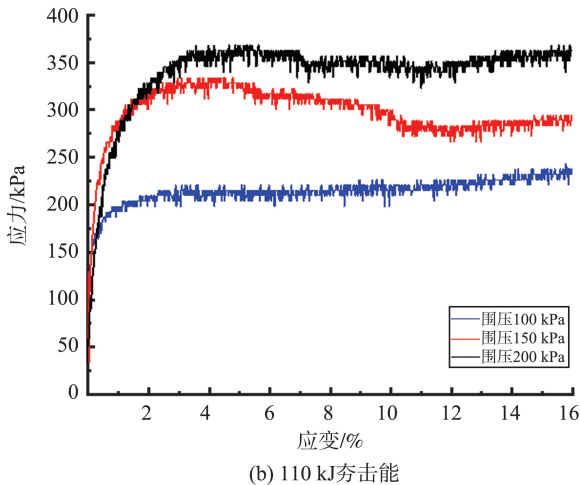
图 7 不同围压条件下试样破坏形态

Fig.7 Damage morphology of specimens under different circumferential pressure conditions

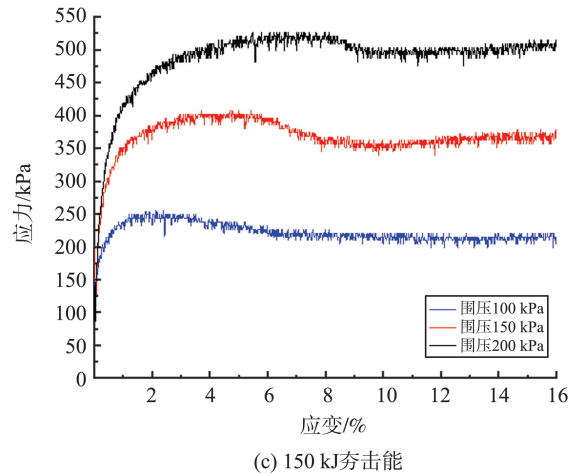
不同围压条件下试样应力-应变曲线如图 8 所示。



(a) 70 kJ 夯击能



(b) 110 kJ 夯击能



(c) 150 kJ 夯击能

图 8 不同围压下的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves under different enclosure pressures

由图 8 可知,在夯击能相同的条件下,随着围压的增加,出现试件峰值应力时试件的应变越大,围压越大试件峰值应力随之增大,其中 150 kJ 夯击能处治后的土体在 200 kPa 围压下的峰值应力可以达到 530 kPa,峰值应力出现时应变约为 6%; 200 kPa 围压下的峰值应力为相同处治条件 100 kPa 围压时的 2 倍,对应应变为相同处治条件 100 kPa 围压时的 3 倍。分析原因为:围压增加,试件环向受限越大,试样体积膨胀受到限制,试件产生相同应变所需应力越大。同时,应力-应变曲线还表现出明显的应变软化特性,即应力先随着轴向应变的增加而增加,到达峰值后随轴向应变的

增加而减小。

试样体应变与轴向应变之间的关系如图9所示。

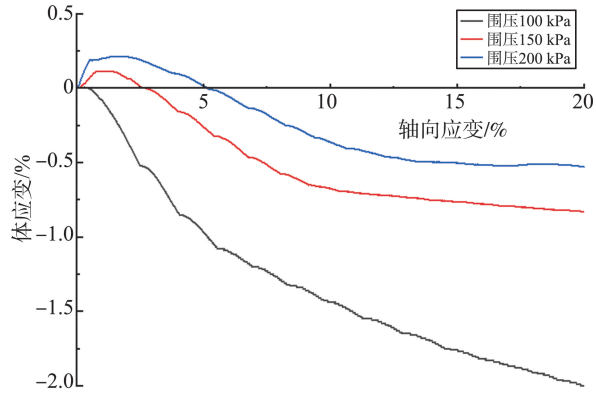


图9 不同围压条件下试件体应变-轴向应变曲线
Fig.9 Body strain-axial strain curve of specimen under different circumferential pressure conditions

由图9可知,在相同夯击能条件下,随着围压的提高,试样的剪缩性持续时间增长且体应变峰值不断增大,达到试件峰值强度所产生的轴向应变增大。围压为200 kPa时,试件达到峰值强度产生的轴向应变为5%,约为150 kPa围压条件的2倍。围压为100 kPa工况下试件几乎无剪缩过程。分析原因为:试件表面受到的压力过大,无法限制试件体积变化。

3 不同夯击能条件下压实粉土力学指标计算

为对土体力学特性进行定量描述,文献[16]基于应力-应变双曲线模型提出一种增量弹性模型,并广泛应用于岩土领域,模型公式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (1)$$

式中, a 为初始变形模量的倒数, b 为涉及围压与变形模量的关系参数, ε_a 为应变, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力。

总结经验公式得到参数 a 、 b 计算公式分别为

$$a = \frac{\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{95\%} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{70\%} - \frac{(\varepsilon_1)_{95\%} - (\varepsilon_1)_{70\%}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}}{2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{95\%} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{70\%}}{(\varepsilon_1)_{95\%} - (\varepsilon_1)_{70\%}} \quad (3)$$

式中, $\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{95\%}$ 、 $\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{70\%}$ 分别为应力水平为

95%、70%时应变与应力的比值, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为破坏应力。

初始切线模量可表示为

$$E_i = kp \left(\frac{\sigma_3}{p}\right)^n \quad (4)$$

式中: E_i 为土样初始切线模量,随围压变化而变化; p 为大气压强,取101.3 kPa; k 、 n 为拟合参数。

选取试样加载过程中应力水平为75%~90%对应的应力-应变变化曲线,对其取对数得到以

$\lg\left(\frac{\sigma_3}{p}\right)$ 为横坐标、 $\lg\left(\frac{E_i}{p}\right)$ 为纵坐标的关系式,即

$$\lg\left(\frac{E_i}{p}\right) = n \lg\left(\frac{\sigma_3}{p}\right) + \lg k \quad (5)$$

根据式(5)计算可得各工况条件下 k 、 n ,70 kJ能量处理后粉土试件的拟合结果如图10所示。

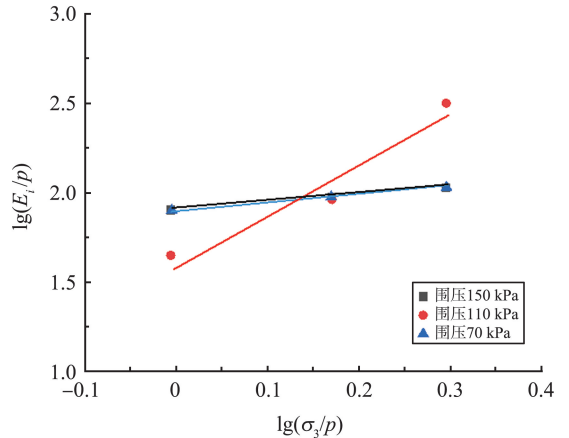


图10 不同夯击能处治土体拟合结果
Fig.10 Fitting results of soils treated with different tamping energies

工程实践中为便于判断试样应力是否超过抗剪强度进入塑流状态,引入破坏比 R_f 的概念,其中

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (6)$$

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (7)$$

各工况下邓肯-张模型参数如表4所示。

夯击能/kJ	k	n	c /kPa	$\Psi/(\circ)$
70	63.53	0.358	25.23	18.16
110	68.08	0.406	34.99	21.18
150	80.14	0.415	53.29	26.01

不同围压条件下粉土破坏比参数如表5所示。

表5 不同围压条件下粉土破坏比
Table 5 R_f of pulverised soil under different confining pressure conditions

夯击能/kJ	围压/kPa	R_f
70	100	0.531
	150	0.880
	200	0.715
110	100	0.723
	150	0.829
	200	0.875
150	100	0.905
	150	0.919
	200	0.997

试验结果表明:夯击能和围压均会显著影响地基的稳定性和承载力,且夯击能越大,土体颗粒之间越紧密,土体抗剪强度提高,破坏比越大;围压增大,土体内部颗粒之间的接触压力和相互作用力增加,同时土体的抗剪强度和破坏比提高。分析原因为:试件压缩后粉土颗粒之间的接触面积增加,粉土颗粒之间的摩擦作用加强,内摩擦角随土体压实度的增大逐渐增大,土体抗剪强度变大。

4 结论

本研究针对高速液压夯技术处治黄泛区粉土的处治效果进行室内大三轴试验,试验通过设置不同夯击能与试件围压等工况,分析经高速液压夯技术处治后粉土地基的力学行为,并通过邓肯-张模型计算得出粉土地基的力学参数,试验得到以下结论。

(1)在不同夯击能级处治条件下,粉土地基达到峰值应力时的轴向应变随应力的增加而增加,试件显示出剪缩的特征;随荷载持续施加,逐渐出现剪胀现象;在围压相同的条件下,试件的峰值应力随处治夯击能增大而增加,其中150 kJ能级处治土体的峰值应力约为70 kJ能级处治土体的1.3~1.5倍;峰值应力出现时机为应变达到2%~5%;150 kJ能级处治后的土体剪缩现象最明显。

(2)在相同夯击能条件下,随着围压的提高,试样的剪缩性持续时间越长,体应变峰值不断增大;达到试件峰值强度所产生的轴向应变越大,围压为200 kPa时试件达到峰值强度产生的轴向应变为

5%,约为150 kPa围压时的2倍;且围压为100 kPa工况下试件几乎无剪缩过程。分析原因为试件表面受到的压力过大,围压低于100 kPa时无法限制试件体积变化。

(3)相同围压条件下,高速液压夯处治能级越高,粉土地基的破坏比越大,抗剪强度越高,地基处治效果越好,相同夯击能条件下,围压越大,地基的破坏比越大,抗剪强度越高,处治效果越好。

参考文献:

- [1] 窦启文. 快速液压夯实技术在不良地基中的应用分析[J]. 建材技术与应用, 2022(2): 15-17.
DOU Qiwen. Application analysis of rapid hydraulic tamping technology in bad foundation [J]. Research & Application of Building Materials, 2022(2): 15-17.
- [2] 庄仲欣. 高速液压夯实技术在高速铁路路基工程中的应用研究[J]. 路基工程, 2018(3): 153-156.
ZHUANG Zhongxin. Application research of rapid hydraulic compaction techniques in high-speed railway subgrade engineering [J]. Subgrade Engineering, 2018(3): 153-156.
- [3] 董金玉, 李日运, 孙文怀, 等. 快速夯实法(RIC)在高速公路高填方及台背填土施工中的技术研究[J]. 工程地质学报, 2008(3): 135-139.
DONG Jinyu, LI Riyun, SUN Wenhui, et al. Study of RIC construction technology for dynamic consolidation of high embankment and abutment backside fill soil in highway [J]. Journal of Engineering Geology, 2008(3): 135-139.
- [4] 刘明华, 王吉庆. 高速液压夯实机补强台背路基的施工工艺及工程应用[J]. 公路与汽运, 2016(4): 217-219.
LIU Minghua, WANG Jiqing. Construction process and engineering application of high-speed hydraulic compaction machines for reinforcing backfill subgrades [J]. Highways & Automotive Applications, 2016(4): 217-219.
- [5] 曹斌, 刘岩. 高速液压夯实机在高速公路路基填筑中的应用[J]. 公路, 2016, 61(11): 71-75.
CAO Bin, LIU Yan. Application of high-speed hydraulic compactors in highway subgrade filling [J]. Highway, 2016, 61(11): 71-75.
- [6] 李玉华. 浅谈高速液压夯实机在路基施工中的补强夯实作用[J]. 现代工业经济和信息化, 2015, 5(7): 47-48.
LI Yuhua. Introduction to high speed hydraulic rammer

- ramming role in construction of the roadbed[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2015, 5(7): 47-48.
- [7] 贺志军, 阿斯嘎, 邹金锋. 加筋含细粒土砂的大型三轴试验分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(10): 2451-2458.
- HE Zhijun, A Siga, ZOU Jinfeng. Research for reinforced fine-grained sand based on large-scale triaxial tests[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(10): 2451-2458.
- [8] 石熊, 张家生, 孟飞, 等. 改良粗粒土填料大型三轴试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(2): 645-652.
- SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Large-scale triaxial test on modified coarse-grained fillers[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(2): 645-652.
- [9] VUKADIN V. The improvement of the loosely deposited sand silts with the rapid impact compacton technique on Breice test sites [J]. *Engineering Geology*, 2013(160): 69-80.
- [10] JIA M, YANG Y, LIU B, et al. PFC/FLAC coupled simulation of dynamic compaction in granular soils[J]. *Granular Matter*, 2018, 20(4): 76.
- [11] 李晋, 崔言晨, 姜鹏, 等. 快速液压夯动力补强效果无损评价试验[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(9): 3744-3751.
- LI Jin, CUI Yanchen, JIANG Peng, et al. Test on nondestructive evaluation of dynamic reinforcing effect of rapid hydraulic impactor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(9): 3744-3751.
- [12] 周志军, 张志鹏, 郭涛, 等. 黄土路基补强分层压实度检测方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(12): 3052-3062.
- ZHOU Zhijun, ZHANG Zhipeng, GUO Tao, et al. Layered compactness detection method of reinforcement the of loess subgrade[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(12): 3052-3062.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] 宋修广, 张宏博, 王松根, 等. 黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(10): 1594-1602.
- SONG Xiuguang, ZHANG Hongbo, WANG Songgen, et al. Hydrophilic characteristics and strength decay of silt roadbed in Yellow River alluvial plain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(10): 1594-1602.
- [15] ANDERSEN K H, SCHJETNE K. Database of friction angles of sand and consolidation characteristics of sand, silt, and clay[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2012, 139(7): 1140-1155.
- [16] 殷德顺, 王保田, 王云涛. 不同应力路径下的邓肯-张模型模量公式[J]. *岩土工程学报*, 2007(9): 1380-1385.
- YIN Deshun, WANG Baotian, WANG Yuntao. Tangent elastic modulus of Duncan-Chang model for different stress paths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007(9): 1380-1385.

(编辑:郭少华)