

新型固化剂加固土动态力学特性试验研究

高莉莉¹, 张建文²

(1. 盐城工业职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 盐城 224000; 2. 东南大学 土木工程学院)

摘要:为解决水泥、石灰等传统固化材料在应用中存在的早期强度较低、水稳性差、容易开裂等问题,引入某新型固化剂对土壤进行加固以提高土体工程特性。对新型固化剂加固土开展了不同围压、不同固化剂掺量的动三轴试验,分别研究了固化剂掺量、动应力幅值和围压与疲劳破坏周次的关系。结果表明:相同固化剂掺量的固化土在相同动应力幅值作用下,固化土的疲劳破坏周次随着围压的增大而相应增大;相同固化剂掺量的固化土在固定围压条件下,动应力幅值与破坏疲劳周次有着很好的单调关系;在相同动应力幅值作用下,疲劳破坏周次与固化剂掺量的关系并不是单调的,而是有一个最佳掺量值(12%,干土重)。

关键词: 固化土; 新型固化剂; 动荷载; 力学特性; 动三轴试验

土壤固化剂作为一种可以将土壤快速固化,并且显著提高土壤工程特性的功能性材料在应急工程、低等级道路、铁路、水利和农业等工程中得到了广泛应用,其中水泥土的应用具有比较长的历史,对其研究也积累了很多成果,特别是针对一些特殊土质的处理,包括疏浚污泥、盐渍土、含有机质土、粉质土、湿陷性黄土等。在不断应用研究中人们逐渐认识到水泥、石灰等传统的固化材料在应用中存在着诸多不足,比如早期强度比较低、水稳性差、容易开裂等。

现代土壤固化技术针对传统材料的不足进行了诸多改进,同传统的材料相比有着很多优点,比如可以适用于更多的土体类型,施工更简便,工程特性更好等,因此不断获得工程人员的青睐,固化剂种类包括有机固化剂、有机无机复合固化剂、离子型固化剂和生物酶类固化剂。现有研究主要针对某一特殊土质提出改进办法,研究项目也主要是静态工程特性,针对固化土的动力学特性研究较少,而固化土在实际工程中多承受动态荷载,因此掌握固化土在动态荷载作用下的工程特性对于指导工程实践具有更大的参考价值。

针对以上不足,该文对某新型固液混合固化剂加固土开展不同围压、不同固化剂掺量的动三轴试验,并对动应力—应变关系曲线进行分析,可为固化土的工程应用提供理论借鉴。

1 试验概况

1.1 试验材料及试验仪器

土样为黄土质黏砂土,液限为30.5%,塑限为19.9%,最大干密度为 1.88 g/cm^3 ,最佳含水量为11.4%。所用固化剂为CAU-4型固液复合型固化剂,其固体组分为粉末状物质,颜色为黑灰色,密度约为 2.7 g/cm^3 ,易吸水,耐火性好。与土壤混合后会产生含32个结晶水的钙矾石针状结晶体,交错穿插于土团粒中,可将土壤中大量的自由水以结晶水的形式固定下来,有效地填充土团粒间的孔隙使土体变得致密,有效增强土体强度。液体组分为无色、无味状液体,偏黏稠,密度为 $1.4\sim 1.5\text{ g/cm}^3$,易溶于水。与水作用后可产生大量 Ca^{2+} 或者 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等,促使其与土胶粒吸附层进行离子交换作用,通过降低土壤胶粒电势、减薄土壤胶粒双电层的厚度,使土颗粒聚集成团,形成团粒化和砂质化结构,将土壤的亲水性转化为憎水性,可达到加强土体强度和稳定性的目的。

试验仪器为TDJSZ型土体动、静剪切流变仪。试验振动频率为2 Hz。在试验过程中,当试件的全幅应变增长速率突然加快时,试件表面出现明显裂缝,紧接着试件整体出现严重形变破坏,此时的全幅应变通常不超过4.5%。综合考虑静态试验过程中试件破坏时的全幅应变通常为3%左右,故可认为全幅值应变达

到 5% 为动态试验试件的破坏标准。

1.2 试验方案

试验方案如表 1 所示(其中动应力幅值级别上栏表示拟定应力值,下栏表示仪器设置加载重量,其换算后就等于上栏应力值),分为 3 个固化剂掺量水平和 3

个围压水平。试验中测定动模量的方法为:作用于试件的轴向动应力从一个小的幅值开始振动加载,后逐级增大幅值继续振动试验,直至达到试验破坏标准时,试验终止。记录试验过程中每级荷载的动应力和动应变,确定各动应变幅值时的动强度和动模量。

表 1 动三轴试验方案

组号	固化剂掺量/%	围压/ kPa	不同动应力幅值级别(kPa)时仪器加载重量/kg				
			677.5	816.3	955.1	1 085.7	1 224.5
1	10	100,200,300	83.0	100.0	117.0	133.0	150.0
2	12	100,200,300	83.0	100.0	117.0	133.0	150.0
3	14	100,200,300	83.0	100.0	117.0	133.0	150.0

注:① 试件尺寸为:φ39.1 mm×80 mm;② 动应力幅值级别表示拟定应力值,加载重量换算后就等于应力幅值。

2 动三轴试验数据分析

动三轴试验是运用与静三轴试验相似的轴向加载应力条件,对一定密度和含水率的试件通过固结稳定后在不排水条件下施加设置好的一定水平的主动应力,并在这一水平的动应力幅值作用下持续振动加载,加载至试件振动破坏为止,试验过程中记录动态的应力、应变和孔压变化及循环周次。整理动三轴试验数据,分别对不同围压以及不同固化剂掺量条件下,动应力幅值和分别达到预设破坏要求时的循环作用次数的关系进行分析研究。

图 1 为 10% 固化剂掺量下,动应力幅值与疲劳破坏周次的关系。图 2 为 100 kPa 围压下,动应力幅值与疲劳破坏周次的关系。

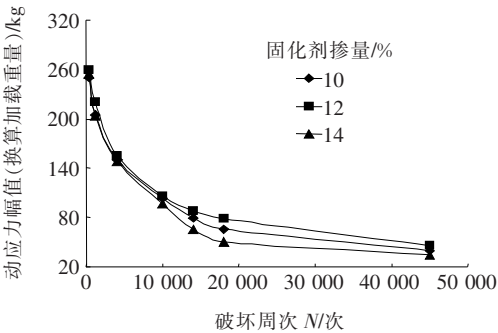


图 2 100 kPa 围压条件下动应力幅值与疲劳破坏周次的关系

比较“光滑的过渡”后,逐渐在低应力幅值趋于相对稳定。在掺量相同时,不同围压条件下二者关系的区别显著表现为“光滑过渡段”;而在围压相同时,不同掺量条件下二者关系的区别同样显著表现为“光滑过渡段”。因此,对不同条件下动应力幅值与疲劳周次的关系讨论主要集中在比较明显的“光滑过渡段”中。

2.1 围压对动应力幅值与疲劳破坏周次关系的影响

图 3 为不浸水状态下,不同固化剂掺量的土样在不同动应力幅值作用下达达到全幅应变 5% 时的疲劳周次与对应动应力幅值的关系,其中固化剂掺量分别为 10%、12% 和 14%。

由图 3 可知:在某一固定的固化剂掺量条件下,动应力幅值与疲劳破坏周次存在着很好的单调递减关系,除了图 3(b)中 12% 掺量、300 kPa 条件以外。而这一例外现象产生的原因可能是试验过程中,该条件下某次试验中原有压力室突然发生漏水现象,更换到一个新压力室后其传力装置摩阻力太大,使得实际作用于试件的动应力幅值未达到理论设置的标准,从而使得在该条件下该次试验的数据有所偏差。分析正常的一般情况,随着动应力幅值的增大,在相同固化剂掺

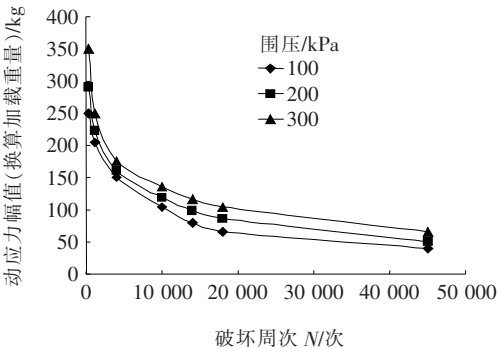


图 1 10% 固化剂掺量条件下动应力幅值与疲劳破坏周次的关系

从图 1、2 不难发现:在不同围压、相同固化剂掺量和不同固化剂掺量、相同围压下,动应力幅值和疲劳破坏周次的关系曲线很近似,都表现为:随着破坏周次的增大,相应的动应力幅值先是迅速降低,在经历一个

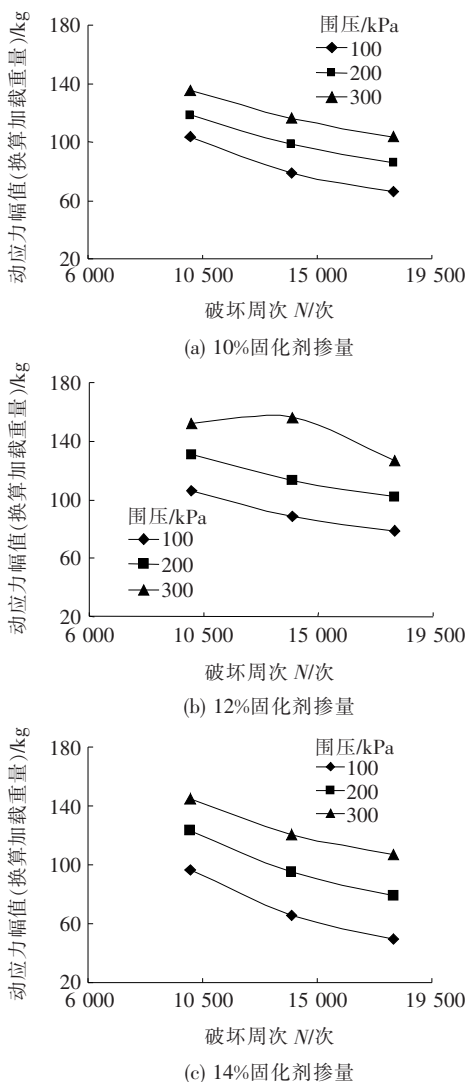


图 3 不同固化剂掺量下动应力幅值与疲劳破坏周次的关系

量条件下,疲劳破坏周次有很明显的减小趋势,而且该趋势随着动应力幅值的增大越来越明显:即在相同固化剂掺量条件下,单位动应力幅值增量对应的疲劳破坏周次的减小值越来越小。说明随着动应力幅值的增大,应变量增大,而且应变的增大速率逐渐加快,从而使得破坏速率加快,在单位周次作用下的应变量增大。

相同固化剂掺量的固化土在固定动应力幅值作用下,由于围压的增大,固化土在单位周次作用后的应变量减小,即围压的增加使得试件侧方向有了束缚力,而侧向束缚力加大了发生相同应变的困难程度,并且侧向束缚力越大,发生应变的困难程度越大,达到疲劳破坏时要求的作用次数越多。因此固化土的疲劳破坏周次会随着围压的增大而相应增大。

2.2 固化剂掺量对动应力幅值与疲劳破坏周次关系的影响

图 4 为在不同围压水平时,不浸水状态的固化土

土样在不同动应力幅值作用下达达到全幅应变 5% 时的疲劳周次与对应的动应力幅值的关系,其中固化剂掺量分别为 10%、12% 和 14%。

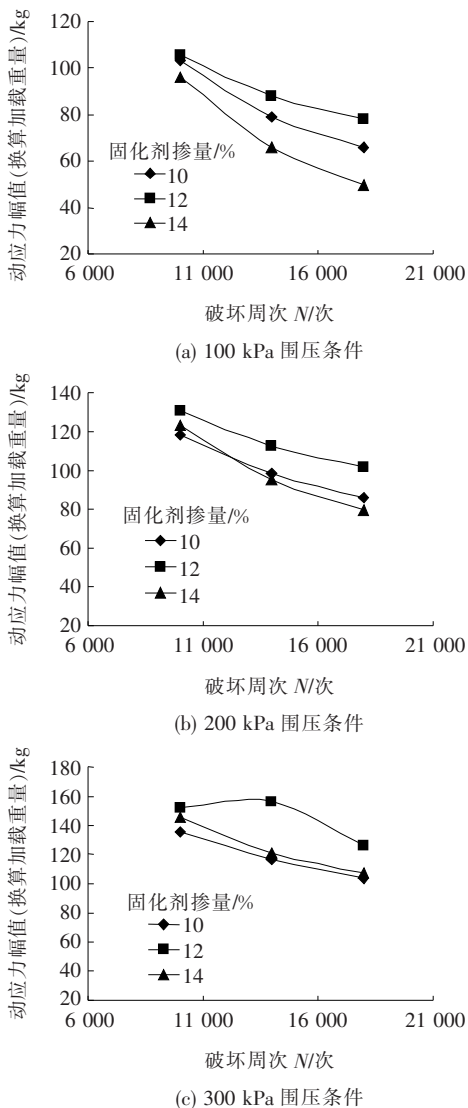


图 4 不同围压条件下动应力幅值与疲劳破坏周次的关系

由图 4 可知:相同固化剂掺量固化土在相同围压条件下,动应力幅值与破坏疲劳周次仍然有着很好的单调关系。相同固化剂掺量固化土的疲劳破坏周次随着动应力幅值的增大而相应地减小,并且随着动应力幅值的增大,动应力幅值单位增量对应的疲劳破坏周次的降幅也逐渐减小。这也说明在低动应力幅值水平时,疲劳破坏周次随着动应力幅值增大而减小的趋势很明显;而随着动应力幅值的进一步增大,在高动应力幅值水平中,疲劳破坏周次随着动应力幅值增大而减小的趋势逐渐趋于稳定,直至动应力幅值增大到一定水平后,在很小的周次后试件即达到破坏标准,此时称为相对的“稳定趋势”。

在相同动应力幅值作用下,疲劳破坏周次与固化剂掺量的关系并不是单调的,而是有着一个最佳掺量值,该值使得在相同动应力幅值作用下的疲劳破坏周次达到最大。由图 4(a)可看出:在 100 kPa 围压条件下,按照疲劳性能的优良程度,12%掺量固化土的疲劳性能优于 10%掺量固化土,14%掺量固化土的疲劳性能最差;由 4(b)可看出:在 200 kPa 围压条件下,高动应力幅值水平时,12%掺量固化土的疲劳性能优于 14%掺量固化土,10%掺量固化土的疲劳性能最差,低动应力幅值水平时,12%掺量固化土的疲劳性能优于 10%掺量固化土,14%掺量固化土的疲劳性能最差;由图 4(c)可看出:在 300 kPa 围压条件下,12%掺量固化土的疲劳性能优于 14%掺量固化土,10%掺量固化土的疲劳性能最差。这也就说明在实际工程运用中需要调整固化剂掺量以使得材料的疲劳度最佳。通过不同围压水平下的试验数据分析可知,在相同动应力幅值条件下,12%的固化剂掺量对应的疲劳破坏周次最大,说明此时材料的疲劳性能最佳,即 12%为该固化土材料的最佳掺量。

3 动应力—应变关系曲线分析

3.1 动强度计算

对固化土循环加载指定幅值大小的动应力,并使土体在指定的循环加载作用次数下达到破坏标准,此时作用的动应力幅值称为动强度。试验中主要是采用通过控制动应力幅值而得到与其对应的破坏周次,去除明显异常数据,对得到的试验结果进行归纳计算,得到动应力幅值作用下的破坏周次与其对应动应力幅值关系近似线性,破坏振动周次为 10 000、14 000、18 000 次时的动应力幅值如表 2 所示,其中 $\sigma_{5\%}$ 指应变幅值达到 5%时所对应的轴向动应力幅值。

表 2 不同破坏周次动应力幅值计算汇总

固化剂 掺量/%	围压/ kPa	不同破坏周次(次)时 $\sigma_{5\%}$ 对应的 动应力幅值/kN		
		10 000	14 000	18 000
10	100	103.5	78.9	65.9
	200	118.3	98.3	85.8
	300	135.2	116.3	103.6
12	100	105.8	88.2	78.3
	200	131	112.7	101.5
	300	151.7	156	126.3

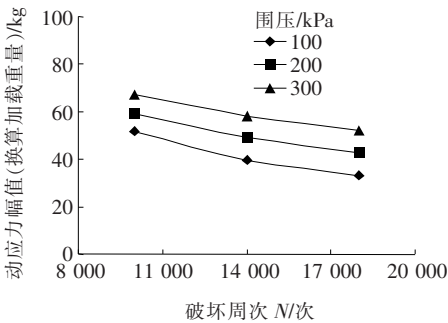
续表 2

固化剂 掺量/%	围压/ kPa	不同破坏周次(次)时 $\sigma_{5\%}$ 对应的 动应力幅值/kN		
		10 000	14 000	18 000
14	100	96.2	65.9	49.7
	200	123	95.2	79.2
	300	145.2	120.7	106.9

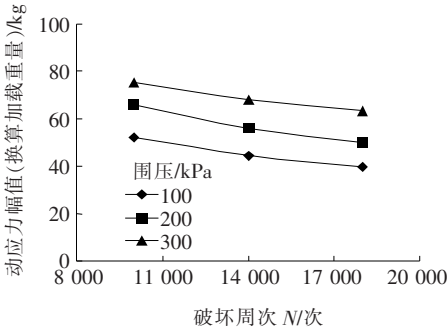
定义动剪应力幅值计算公式为:

$$\tau_{5\%} = \frac{1}{2} \sigma_{5\%}$$
 (1)

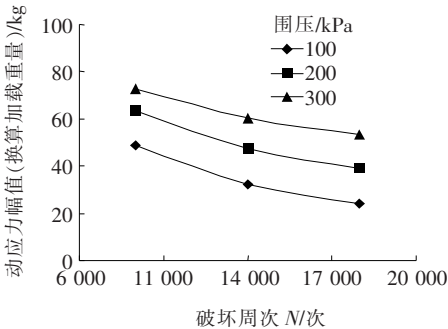
依据不同掺量固化土的不同破坏次数的动应力幅值数据,计算动剪应力幅值与破坏作用周次的关系,动剪应力曲线如图 5 所示。



(a) 固化剂掺量为 10%



(b) 固化剂掺量为 12%



(c) 固化剂掺量为 14%

图 5 动剪应力—破坏周次曲线

由图 5 可知:在某一固化剂掺量条件下,动剪应力

幅值与疲劳破坏周次存在着很好的单调关系。在相同固化剂掺量条件下,随着动剪应力幅值的增大,疲劳破坏周次有很明显的减小趋势,而且该趋势随着动应力幅值的增大越来越明显:即在相同固化剂掺量条件下,单位动应力幅值增量对应的疲劳破坏周次的减小值越来越小。说明随着动应力幅值的增大,应变量增大,而且应变的增大速率逐渐加快,从而使得破坏速率加快,在单位周次作用下的应变量增大。

运用摩尔—库仑抗剪强度理论求解动抗剪强度参数,即动黏聚力 $c_{\text{动}}$ 和动内摩擦角 $\varphi_{\text{动}}$,它们之间的关系表达为:

$$\tau_{\text{动}} = \sigma \tan \varphi_{\text{动}} + c_{\text{动}} \quad (2)$$

针对不同固化剂掺量固化土,分别选取上述 3 个不同围压作用下破坏振次为 10 000、14 000 和 18 000 次时相对应的动剪应力 $\tau_{5\%}$,并以总剪应力 $\tau_{z\text{动}} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c} + \sigma_{5\%}}{2}$ 为纵坐标,以主应力 $\sigma_{z\text{动}}$ 为横坐标,以 $\left(\frac{\sigma_{1c} + \sigma_{3c}}{2} + \tau_{5\%}, 0 \right)$ 为圆心,以 $\left(\frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{2} + \tau_{5\%} \right)$ 为半径,绘制总应力剪切强度包络线,求得不同破坏周次下的动内摩擦角 $\varphi_{\text{动}}$ 和动黏聚力 $c_{\text{动}}$ 。计算所得的动内摩擦角和动黏聚力如表 3 所示。

表 3 动强度参数

固化 剂掺 量/%	10 000 周次		14 000 周次		18 000 周次	
	$c_{\text{动}} /$ kPa	$\varphi /$ (°)	$c_{\text{动}} /$ kPa	$\varphi /$ (°)	$c_{\text{动}} /$ kPa	$\varphi /$ (°)
10	32	8.1	23	8.0	19	7.9
12	23	9.1	17	8.7	15	8.8
14	16	15.3	9	15.6	6	14.9

3.2 动弹性模量计算

固化土的动弹性模量是进行固化土动力分析的一个重要参数,表征的是固化土材料在弹性变形阶段的动应力—应变的关系。由于固化土的应力—应变关系具有明显的非线性特征,在循环荷载作用下,在某一周次加载过程中,该周次内变化的动应变幅值与应力的关系可近似拟合为双曲线:

$$\sigma_{\text{动}} = \frac{\xi_{\text{动}}}{a + b\xi_{\text{动}}} \quad (3)$$

式中: $\xi_{\text{动}}$ 为轴向动应变幅值; $\sigma_{\text{动}}$ 为相应 $\xi_{\text{动}}$ 时的动应力; a 、 b 为试验参数。

动弹性模量可定义为:

$$E_{\text{动}} = \frac{\sigma_{\text{动}}}{\xi_{\text{动}}} = \frac{1}{a + b \cdot \xi_{\text{动}}} \quad (4)$$

将式(3)做极限求解分析,可得:

$$\sigma_{\text{动max}} = \lim_{\xi_{\text{动}} \rightarrow \infty} \sigma_{\text{动}} = \lim_{\xi_{\text{动}} \rightarrow \infty} \frac{1}{a/\xi_{\text{动}} + b} = \frac{1}{b} \quad (5)$$

由式(4)可知:当 $\xi_{\text{动}}$ 趋于 0 时, $E_{\text{动}} \rightarrow E_{\text{动max}}$, 则:

$$E_{\text{动max}} = \lim_{\xi_{\text{动}} \rightarrow 0} \frac{1}{a + b \cdot \xi_{\text{动}}} = \frac{1}{a} \quad (6)$$

由以上分析可知:参数 a 、 b 的倒数分别为最大动弹性模量和最大动应力幅值。

基于以上理论,如果试验过程中能够绘出指定固化剂掺量、围压和加载频率条件下的单次加载过程的动弹性应变和动应力幅值的关系图,就可以绘出不同循环加载周次下,当前单一周次加载过程中的动弹性模量—动弹性应变的关系图。最后再依据此关系图按照式(4)进行参数拟合,即可得出不同预设条件下拟合参数 a 和 b 值。

4 结论

(1) 固化土在固定的固化剂掺量条件下,随着动应力幅值的增大,应变量增大,而且应变的增大速率逐渐加快,从而使得破坏速率加快,在单一周次作用下的应变量增大;相同固化剂掺量的固化土在相同动应力幅值作用下,固化土的疲劳破坏周次随着围压的增大而相应增大。

(2) 相同固化剂掺量的固化土在固定围压条件下,动应力幅值与破坏疲劳周次有着很好的单调关系。在低动应力幅值水平时,疲劳破坏周次随着动应力幅值增大而减小的趋势很明显;而随着动应力幅值的进一步增大,在高动应力幅值水平中,疲劳破坏周次随着动应力幅值增大而减小的趋势逐渐趋于稳定,直至动应力幅值增大到一定水平后,在很小的周次后试件即达到破坏标准。

(3) 在相同动应力幅值作用下,疲劳破坏周次与固化剂掺量的关系并不是单调的,而是有着一个最佳掺量值,使得相同动应力幅值作用下的疲劳破坏周次达到最大,对于此固化剂最佳掺量为 12%(干土重)。

参考文献:

- [1] 杨林,刘雨彤,宋玉鑫. 外加剂改性水泥石灰土力学及收缩特性试验研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [2] 夏永杰,王丽艳,刘瀚森. 掺废弃钢渣的水泥土强度特性试验研究[J]. 中外公路,2016(5).