

# 循环荷载下徐州饱和粉砂土孔隙水压力特征试验研究

曹国旭, 张璞, 蔺云宏

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 为研究徐州地区饱和粉砂土在地铁列车振动、地震等循环荷载作用下孔隙水压力的变化规律, 采用 GDS 空心圆柱扭剪仪对徐州地铁 3 号线区间隧道底部的饱和粉砂土进行了动三轴试验, 考虑了不同振动频率、有效围压、循环应力比和固结比对粉砂土孔隙水压力变化的影响。试验结果表明, 徐州地区饱和粉砂土的孔隙水压力变化规律主要表现为 S 型曲线和双曲线。在较低动荷载比、较低固结比、较低频率时, 孔隙水压力变化规律为 S 型曲线; 在较高动荷载比、较高固结比、较高频率时, 孔隙水压力变化规律为双曲线型。针对孔隙水压力变化规律, 修正了孔隙水压力增长模型, 对参数进行了拟合标定, 为徐州市域范围内的地铁隧道饱和粉砂土地基孔隙水压力变化预测提供参考依据。

**关键词:** 粉砂土; 动三轴试验; 循环荷载; 孔隙水压力; 孔压模型

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0564-08

## Experimental study on pore water pressure characteristics of saturated silty sand in Xuzhou under cyclic loading

CAO Guoxu, ZHANG Pu, LIN Yunhong

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to obtain the development of pore water pressure of saturated silty sand in Xuzhou area under cyclic loading such as subway train vibrations and earthquakes, a series of dynamic triaxial tests were conducted using the GDS hollow cylindrical torsion shear instrument. These tests focused on saturated silty sand from the bottom of the interval tunnel of Xuzhou Metro Line 3, considering the effects of different vibration frequencies, effective confining pressures, cyclic stress ratios and consolidation ratios on pore water pressure variations under dynamic loads. The experimental results indicate that the pore water pressure variation in Xuzhou's saturated silty sand primarily follows S-type curve and hyperbola. Under conditions of lower dynamic load ratios, lower consolidation ratios, and lower frequencies, the pore water pressure changes follow an S-type curve. In contrast, under higher dynamic load ratios, higher consolidation ratios, and higher frequencies, the changes follow a hyperbolic curve. Based on the observed pore water pressure variation patterns, the pore water pressure growth model was modified, and the model parameters were fitted and calibrated. This paper provides a valuable reference for predicting changes in pore water pressure in saturated silty sand foundations of subway tunnels in Xuzhou area.

**Key words:** silty sand; dynamic triaxial test; cyclic loading; pore water pressure; pore water pressure model

## 0 引言

徐州位于黄淮平原, 地区形成受黄河、淮河冲击影响明显, 饱和粉砂土层在市域范围内分布较

广, 深度从十多米至二十多米不等, 多条地铁线路穿越饱和粉砂土层。受列车振动、地震等动循环荷载作用, 地铁隧道周围饱和粉砂土层可能引发孔隙水压力增加和累积, 严重者甚至可能发生局部液

化, 这将造成隧道结构开裂、沉降、地表坍塌等工程问题。因此, 研究动循环荷载作用下粉砂土孔隙水压力的变化规律是十分必要的。

粉砂土中含有较多的砂粒、粉粒, 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量占全重的 50%~85%。我国幅员辽阔, 各个地区的粉砂土成因不同, 颗粒级配也有很大差异, 粉砂土颗粒级配曲线如图 1 所示。孟凡丽等<sup>[1]</sup>、来淑娜<sup>[2]</sup>研究了在不同频率、固结比和围压条件下, 循环荷载对杭州粉砂土动强度、孔隙水压力和累积变形发展规律的影响, 提出了孔压发展和累积变形模型; 黄窈婷<sup>[3]</sup>通过动三轴试验研究了交通循环荷载作用下, 不同频率、固结比和围压条件下广西粉砂土的应力-应变特征、动弹性模量、阻尼比曲线特征、抗液化特性以及孔压发展规律; 赵丽敏等<sup>[4]</sup>研究了黄泛区粉砂土的静力特性, 并选取沙漠地区风积沙及豫东平原区和南京地区广泛分布的黏性土为代表, 与研究中的黄泛区粉砂土的静力特性做比较; 董正方等<sup>[5]</sup>通过动三轴试验得到黄泛区粉砂土的动强度曲线和抗液化强度曲线, 并分别分析了围压、干密度、细粒含量 3 种因素的影响; 董淑云<sup>[6]</sup>对黄河三角洲地基土的孔隙水压力上升规律与模型进行分析; 庄海洋等<sup>[7-8]</sup>、陈国兴等<sup>[9-10]</sup>分别研究了南京细砂的动力特性, 提出了橡皮膜效应等因素对南京细砂液化流动大变形特性的影响规律及其机理; 王炳辉等<sup>[11]</sup>定义了有效动剪应力比和有效应力对数衰减率, 研究饱和和南京细砂孔压比发展随循环周数比的发展规律; 孙静等<sup>[12]</sup>、范基春<sup>[13]</sup>研究了不同负温下经历多次冻融循环后黑龙江粉砂土的动应力、动模量、动模量比和阻尼比等动力参数的变化规律; 崔旋等<sup>[14]</sup>通过强度试验分析了围压、相对密实度及固结比对动荷载作用下尾粉砂中孔隙水压力发展的影响规律; 管明哲等<sup>[15]</sup>研究了粉砂土地区盾构隧道的风险及其原因, 在已有的盾构隧道安全风险评价方法的基础上, 建立粉砂土地区盾构隧道风险评价体系。

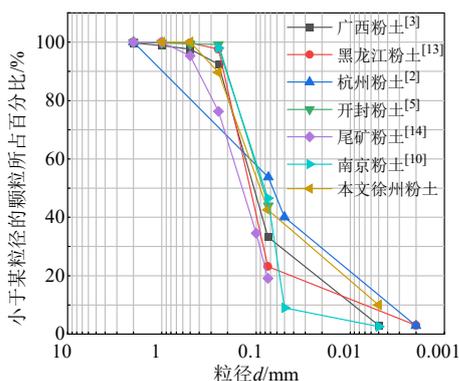


图 1 粉砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curves of the silty sand

也有许多学者对饱和粉砂土的孔隙水压力模型进行了研究, LIAM FINN 等<sup>[16]</sup>提出了考虑孔隙水压力累积增长引起土体软化的修正双曲线模型; 张建民等<sup>[17]</sup>提出饱和砂土与无黏性土的 A、B 及 C 型模型; 陈国兴等<sup>[10]</sup>、曹宇春等<sup>[18]</sup>、曾长女等<sup>[19]</sup>基于已有模型推导了新的双曲线孔压发展模型; 宫全美等<sup>[20]</sup>建立了地铁振动荷载下的对数动孔压强化型模型, 适用于动强度较高的土体; 叶俊能等<sup>[21]</sup>考虑循环动应力和最小动偏应力的影响, 提出海相沉积软土的幂函数型模型。这些模型可为不同地区的孔压发展提供数据拟合。

徐州市区广泛分布着粉土及粉砂层液化区, 故黄河漫滩部分厚度为 15~30 m, 数条地铁区间穿越饱和粉砂土层。徐州地区部分地铁工程建设在饱和粉砂土层中, 需要对当地的饱和粉砂土孔隙水压力变化规律进行针对性研究。本文就徐州地区饱和粉砂土在循环振动荷载作用下, 考虑振动频率、循环应力比、有效围压和固结比 4 种不同的影响因素, 深入研究饱和粉砂土孔隙水压力的变化规律, 基于已有的孔压模型, 对动孔压变化模型参数进行拟合分析, 以便为徐州地区饱和粉砂土层的地铁工程建设提供预测模型。

## 1 试验设备及方案

### 1.1 试验设备及试样

本文试验采用英国 GDS 的空心圆柱动三轴仪, 主要组成部分有: (1) 轴向、扭转驱动装置; (2) 压力室; (3) 内、外围压控制器及反压控制器; (4) 模拟信号调节装置; (5) GDSDCS 数字控制系统; (6) 应力及应变测量系统。试样高度为 200 mm, 内径为 60 mm, 外径为 100 mm, 如图 2 所示为空心圆柱试样图。



图 2 空心圆柱试样

Fig. 2 Hollow cylindrical specimen

试验用土来自徐州轨道交通3号线的粉砂土。粉砂土的基本物理性质指标如表1所示,试样采用振捣法分10层逐层装土,试样初始密实度控制为50%。试样采用二氧化碳法、水头饱和法、反压法3种方法

保证土样达到饱和状态,待试样饱和度不小于0.98时,认为反压饱和完成。然后对试样施加不同的围压、固结比进行固结,待反压体积稳定,即1h内固结排水量变化不大于0.1 cm<sup>3</sup>时,认为固结完成。

表1 粉砂土基本物理性质指标  
Table 1 Physical property indexes of the silty sand

土样编号	比重 $G_s$	颗粒百分比/%				干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	最大孔隙比 $e_{max}$	最小孔隙比 $e_{min}$
		<0.005 mm	0.005~0.075 mm	0.075~0.250 mm	0.250~0.500 mm			
1	2.63	9.66	32.88	47.09	10.37	1.64	0.93	0.51
2	2.66	6.60	36.25	45.83	11.32	1.65	0.92	0.52
3	2.65	7.87	39.63	42.67	9.83	1.64	0.87	0.57

1.2 试验方案

为了模拟现场土样的应力条件,考虑不同振动频率、有效围压、固结比下循环应力比对粉砂土动孔压发展的影响。依据徐州地铁一、二期建设中穿越粉砂土区间埋深一般在10~26 m,为模拟不同埋深的隧道下土体,有效围压采用100 kPa、200 kPa和300 kPa。依据徐州地铁1—3号线运营速度及轮轨间距的统计分析,地铁行驶过程中的振动频率主要分布在0.4~0.6 Hz的低频区段和2.4~2.6 Hz的高频区段,同时参照工程场地地震安全性评价中土的动力特性试验常用频率(1 Hz),故本试验选用频率为0.5 Hz、1.0 Hz和2.5 Hz。为模拟实际场地土固结条件,选取1.0、1.2和1.4这3种固结比,研究不同固结比对孔压发展的影响。根据列车荷载选取动应力幅值,通过控制动加载过程中的轴向循环应力比(Cyclic Stress Ratio)来控制动应力幅值,循环应力比  $CSR = \sigma_{dc} / 2p'$ ,其中  $\sigma_{dc}$  为动应力幅值,  $p'$  为有效围压。图3展示了加

载过程中的轴向动应力时程曲线( $\sigma_{dc}=40$  kPa),考虑地铁荷载大小,本文针对不同影响因素及CSR的多种工况进行试验,选取的CSR最大值为0.25。具体试验方案如表2所示。

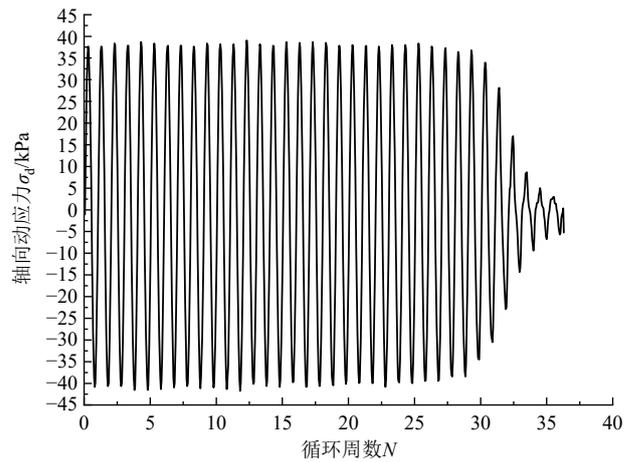


图3 加载过程中的轴向动应力时程曲线( $\sigma_{dc}=40$  kPa)  
Fig. 3 Time-history curve of axial dynamic stress during loading ( $\sigma_{dc}=40$  kPa)

表2 试验方案  
Table 2 Test schemes

组号	试样编号	频率 $f$ /Hz	有效围压 $p'$ /kPa	固结比 $K_c$	CSR
A组	A1	0.5	200	1.0	0.100
	A2	1.0			
	A3	2.5			
B组	B1—B4	0.5	100	1.0	0.075、0.100、0.125、0.150
	B5—B8		200		
	B9—B12		300		
C组	C1—C2	0.5	200	1.0	0.125、0.150
	C3—C5			1.2	
	C6—C8			1.4	

## 2 试样孔压发展试验结果分析

本文试验中, 等向固结采用孔压达到围压为标准判断初始液化。非等向固结孔压难以达到围压, 故采用双幅轴向应变达到 5%作为初始液化破坏判别标准。

### 2.1 振动频率的影响

图 4 为  $p'=200$  kPa、 $CSR=0.1$  条件下, 振动频率为 0.5 Hz、1.0 Hz 和 2.5 Hz 时粉砂土动孔压发展规律。由图 4 可见, 随着频率增加, 动孔压曲线从 S 型逐渐向抛物线型转变, 频率越大, 动孔压发展速率越慢, 最终稳定值也更小。本文试验中 CSR 为 0.1 时, 粉砂土在 0.5 Hz 频率下, 动荷载施加 35 圈试样发生初始液化, 动孔压曲线为 S 型; 随着振动频率增加到 1.0 Hz, 动孔压曲线发展为抛物线型, 且初始液化圈数较 0.5 Hz 时上升较大, 达到 276 圈; 当频率为 2.5 Hz 时, 试样振动 500 圈后依然没有发生初始液化, 孔压值逐渐趋于低于围压的某一稳定值。考虑到地铁运行荷载、地震荷载的主要作用在低频区, 而粉砂土在低频区时孔压发展迅速, 其影响不容忽视, 故本文后续的试验将选择频率 0.5 Hz 进行试验。

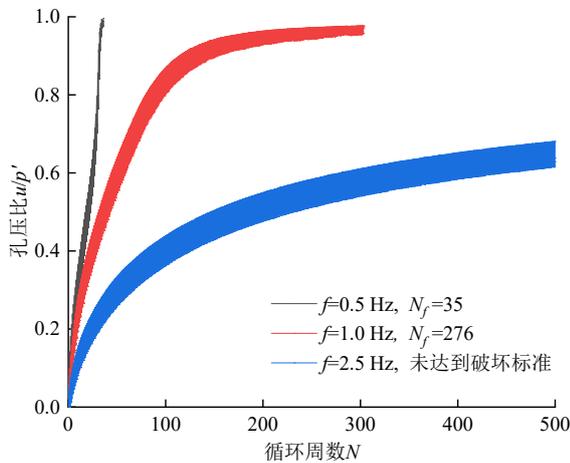


图 4 振动频率对孔压发展的影响

Fig. 4 Effect of vibration frequency on pore water pressure development

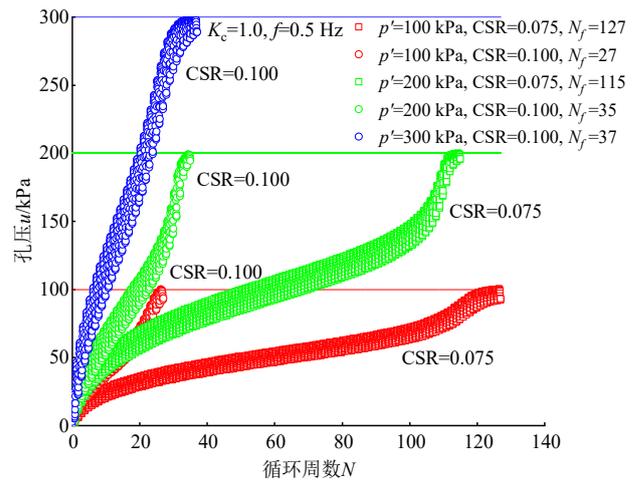
### 2.2 有效围压的影响

试样等向固结时, 有效围压对孔压发展的影响随着施加的动荷载 CSR 值的不同而不同。图 5 (a) 中的 CSR 值较低, 此时动孔压发展曲线呈现 S 型, 孔压发展速率持续增加, 到快破坏时增长率逐渐变大直至发生初始液化。

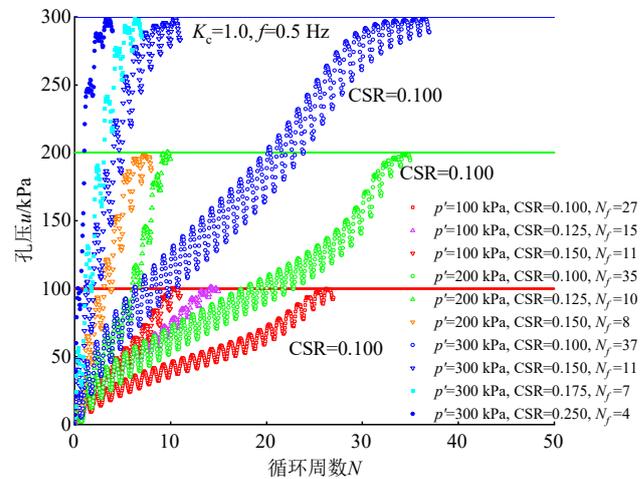
图 5 (b) 中试样动孔压发展均呈现双曲线型,

孔压持续增加, 孔压增长率从大到小, 直至达到初始液化标准。

由图 5 可知,  $CSR \leq 0.100$  时, 动荷载还未达到临界动应力值, 所以孔压初始发展较慢, 而一旦接近破坏状态时, 孔压激增, 动应变也快速增加, 导致孔压增长率快速增加。 $CSR > 0.100$  时, 动荷载接近临界动应力值, 孔压初始发展较快, 持续加载, 孔压增长率从大到小, 直至达到初始液化标准, 孔压发展曲线呈现双曲线型式。



(a) S 型孔压发展曲线



(b) 双曲线型孔压发展曲线

图 5 有效围压对孔压发展的影响

Fig. 5 Effect of effective confining pressure on pore water pressure development

### 2.3 固结比的影响

图 6 为试样在  $p'=200$  kPa、不同固结比影响下的粉砂土孔压强度发展曲线。在相同的有效围压下, 不同固结比对粉砂土试样孔压的影响规律不同。固结比越大, 粉砂土循环荷载下动孔压强度越不容易达到临界动应力幅值。

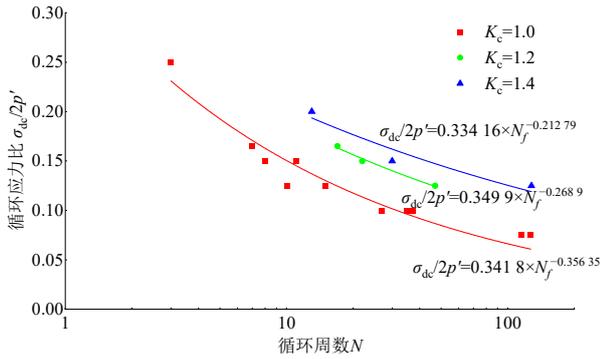


图6 不同固结比下的动强度曲线

Fig. 6 Dynamic strength curves at different consolidation ratios

本文试验中，固结比大于 1.0 的粉砂试样均呈现双曲线型式，固结比对孔压发展的影响如图 7 所示。试验中， $K_c$  为 1.0 的等向固结时，施加的动荷载 CSR 值越大，饱和粉砂土的孔压增加速率明显更大，越容易产生双曲线型的孔压发展曲线，孔压发展呈现逐步增长态势，增长率逐步降低并趋于不变；而 CSR 值较低时（小于 0.1），孔压发展曲线逐渐向 S 型转变，初始时孔压发展缓慢，并逐步增加，快达到破坏时，孔压快速增加。

随着固结比增加，在相同有效围压和 CSR 条件下，固结比越大，孔压的发展速率就越缓慢，偏压固结时孔压发展速率要远远小于等压固结时的孔压发展速率。

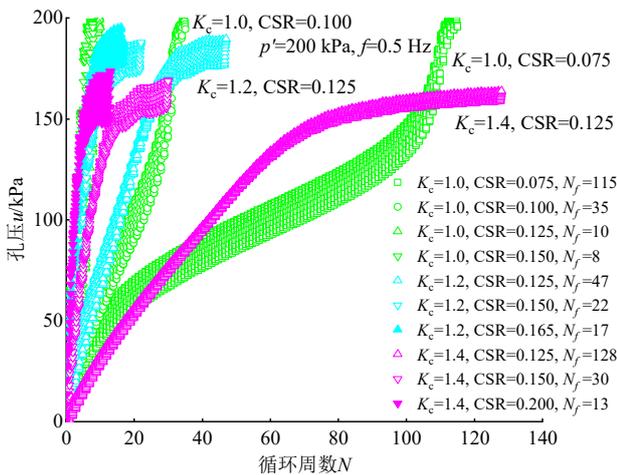


图7 固结比对孔压发展的影响

Fig. 7 Effect of consolidation ratio on pore water pressure development

### 3 粉砂土动孔压发展模型

为了建立粉砂土动孔压发展模型，纵坐标选取动孔压发展峰值，并与有效围压进行数学归一，横

坐标对振动周数与破坏周数进行数学归一。试验曲线如图 8、图 9 所示，参考相关文献选取改进的张建民 A 型模型和张建民 B 型模型<sup>[17]</sup>，对不同情况下的粉砂土孔压发展曲线进行拟合。图 8 为  $CSR \geq 0.100$  时不同围压和固结比下的孔压发展曲线，图 9 为  $CSR \leq 0.100$  时等向固结下不同围压的孔压发展曲线。

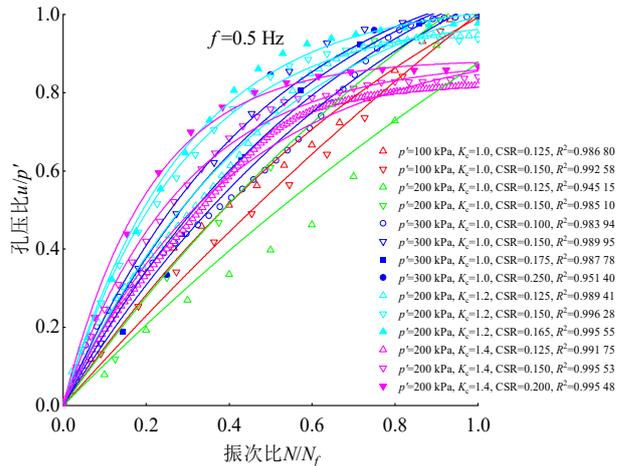


图8 改进的 A 型曲线拟合结果（双曲线型）

Fig. 8 Improved A-type curves fitting results (hyperbolic type)

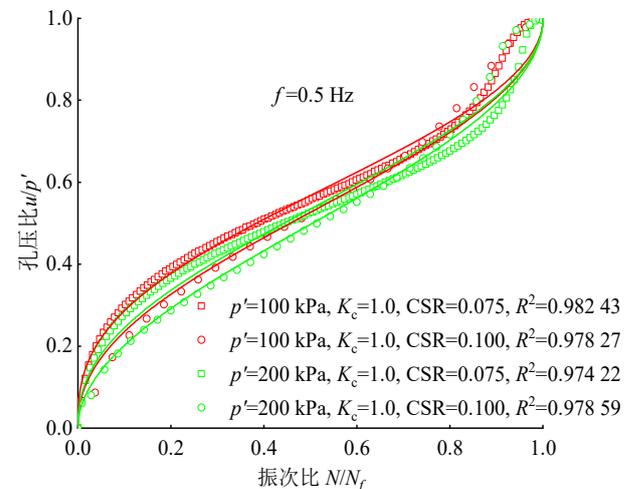


图9 改进的 B 型曲线拟合结果（S 型曲线）

Fig. 9 Improved B-type curves fitting results (S-type)

分析孔压发展规律可发现，当 CSR 低于动强度曲线的临界值时，孔压发展较缓慢，表现为 S 型，可采用张建民 B 型曲线<sup>[17]</sup> 进行拟合，表达式由式

(1) 所示，本试验中的其余孔压曲线均可采用改进的张建民 A 型曲线<sup>[17]</sup> 进行拟合，表达式由式 (2) 所示，参数拟合结果如表 3 所示，各拟合曲线具有较好的相关性。

$$\frac{u}{p'} = a \left( 1 - e^{-b \frac{N}{N_f}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{u}{p'} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2a}} \quad (2)$$

式中:  $u/p'$  为孔压比;  $N/N_f$  为振次比;  $a, b, \alpha$  均为孔压增长模型的相关计算参数。

表 3 参数拟合结果  
Table 3 Parameter fitting results

$K_c$	$p'/kPa$	CSR	模型	参数			$R^2$	
				$a$	$b$	$\alpha$		
1.0	100	0.125	改进的 A 型曲线	1.582 22	0.986 02	—	0.986 80	
		0.150		3.383 74	0.351 26	—	0.992 58	
	200	0.125		2.513 70	0.428 16	—	0.945 15	
		0.150		2.019 37	0.738 22	—	0.985 10	
	300	0.100		1.524 08	1.292 50	—	0.983 94	
		0.150		1.186 17	2.117 84	—	0.989 95	
		0.175		1.369 75	1.442 51	—	0.987 78	
		0.250		1.258 00	1.784 61	—	0.951 40	
	1.2	200		0.125	1.147 92	2.023 14	—	0.989 41
				0.150	0.994 08	3.421 12	—	0.996 28
0.165			1.035 28	3.438 28	—	0.995 55		
1.4	200	0.125	0.936 46	2.444 92	—	0.991 75		
		0.150	0.885 29	3.486 63	—	0.995 53		
		0.200	0.885 03	4.755 64	—	0.995 48		
1.0	100	0.075	—	—	1.381 33	0.982 43		
		0.100	改进的	—	—	1.130 90	0.978 27	
	200	0.075	B 型曲线	—	—	1.175 03	0.974 22	
		0.100	—	—	0.987 27	0.978 59		

### 4 结 论

本文采用 GDS 空心圆柱扭剪仪开展了一系列徐州地区饱和粉砂土的动三轴试验, 着重研究振动频率、循环应力比、有效围压、固结比对饱和粉砂土孔隙水压力变化特性的影响, 并对试验结果进行了数学拟合, 得到的主要结论如下:

(1) 通过试验研究发现, 振动频率、循环应力比、有效围压和固结比对于饱和粉砂土的孔压发展特性均有影响。试验对 0.5 Hz、1.0 Hz 和 2.5 Hz 这 3 种振动频率加载的分析结果显示, 0.5 Hz 频率下饱和粉砂土的孔压发展增速较快, 振动频率越小, 粉砂土的孔压增长速率越快, 且孔压在低频区的增速较大。

(2) 循环应力比 CSR 越大, 动荷载越接近临界动应力值, 孔压初始发展较快, 持续加载后孔压增长率从大到小趋于平稳, 孔压发展曲线呈现双曲线型; 循环应力比 CSR 越小, 动荷载还未达到临界

动应力值, 孔压初始发展较慢, 持续加载孔压激增, 动应变也快速增加, 孔压发展曲线呈现 S 型。分别采用改进的 A 型和 B 型曲线拟合, 预测徐州地区饱和粉砂土的动孔压变化数值, 拟合度较好。

(3) 固结比越大, 饱和粉砂土的动孔压增长速率越慢; 有效围压对孔压发展的影响随着施加的动荷载 CSR 值的不同而不同。

(4) 徐州地区饱和粉砂土层的地铁建设需要注意提高土层固结比, 通过轮轨间距设计调整降低振动循环荷载频率, 可以采用改进的 A 型和 B 型曲线预测饱和粉砂土的动孔压变化数值。

### 参考文献

[1] 孟凡丽, 吕筱, 来淑娜. 循环荷载下杭州粉砂土动孔压模型研究[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(1): 67-71.  
MENG Fanli, LÜ Xiao, LAI Shuna. Study on the model of dynamic pore water pressure in silt soil in Hangzhou under

- cyclic loading[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2016, 44(1): 67-71.
- [2] 来淑娜. 地铁荷载下杭州饱和粉砂土动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.  
LAI Shuna. Research on dynamic properties of Hangzhou's saturated silty sands under metro vibration loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [3] 黄窈婷. 高水位低路堤饱和粉砂土路基动三轴试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.  
HUANG Yaoting. Dynamic triaxial test research of saturated silty soil subgrade under the structure of low embankment with high water level[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [4] 赵丽敏, 袁玉卿, 李伟, 等. 黄泛区粉砂土静力特性的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(15): 254-258.  
ZHAO Limin, YUAN Yuqing, LI Wei, et al. Experimental study on static character of the silty soil in the Yellow River Flooded Area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(15): 254-258.
- [5] 董正方, 王仁辉, 曹献伟, 等. 黄泛区粉砂土动强度与抗液化强度试验研究[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(1): 162-168, 186.  
DONG Zhengfang, WANG Renhui, CAO Xianwei, et al. Experimental study of dynamic and anti-liquefaction strengths of silty sand in Yellow River flood area[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43(1): 162-168, 186.
- [6] 董淑云. 黄河三角洲地基土地震液化的试验研究和数值模拟[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2004.  
DONG Shuyun. Testing research and numerical analysis for earthquake liquefaction of foundation soil in the Yellow River Delta[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2004.
- [7] 庄海洋, 陈磊, 沈礼伟, 等. 列车振动荷载作用下南京细砂振动累积变形特性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(6): 1294-1300.  
ZHUANG Haiyang, CHEN Lei, SHEN Liwei, et al. Experimental analysis on dynamic cumulative deformation of Nanjing fine sand under train-induced vibration loading[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1294-1300.
- [8] 庄海洋, 胡中华, 王瑞, 等. 饱和南京细砂初始液化后特大流动变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(12): 2164-2174.  
ZHUANG Haiyang, HU Zhonghua, WANG Rui, et al. Cyclic torsional shear loading tests on the extremely large post-liquefaction flow deformation of saturated Nanjing sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(12): 2164-2174.
- [9] 陈国兴, 刘雪珠. 循环荷载作用下南京片状细砂的不排水动力性态[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(10): 1498-1504.  
CHEN Guoxing, LIU Xuezh. Undrained cyclic behaviors of Nanjing flake-shaped fine sand under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1498-1504.
- [10] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 79-82.  
CHEN Guoxing, LIU Xuezh. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand of Nanjing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 79-82.
- [11] 王炳辉, 陈国兴. 循环荷载下饱和南京细砂的孔压增量模型[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(2): 188-194.  
WANG Binghui, CHEN Guoxing. Pore water pressure increment model for saturated Nanjing fine sand subjected to cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2): 188-194.
- [12] 孙静, 公茂盛, 熊宏强, 等. 冻融循环对粉砂土动力特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 747-754.  
SUN Jing, GONG Maosheng, XIONG Hongqiang, et al. Experimental study of the effect of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of silty sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 747-754.
- [13] 范基春. 粉砂土液化特性试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.  
FAN Jichun. Experimental study on liquefaction characteristics of silty sand[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [14] 崔旋, 季晓檬, 张宇, 等. 饱和尾粉砂动孔隙水压力发展特性试验研究[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(11): 101-107.

- CUI Xuan, JI Xiaomeng, ZHANG Yu, et al. Experimental study on dynamic pore water pressure development characteristics of saturated silty tailings[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(11): 101-107.
- [15] 管明哲, 吴叶遥, 董梅, 等. 基于监测数据的杭州粉砂土地层盾构隧道开发风险研究[J]. *地基处理*, 2023, 5(5): 398-407.
- GUAN Mingzhe, WU Yeyao, DONG Mei, et al. Research on the development risk of silty sand shield tunnel based on monitoring data[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2023, 5(5): 398-407.
- [16] LIAM FINN W D, LEE K W, MARTIN G R. An effective stress model for liquefaction[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(6): 517-533.
- [17] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. *水利学报*, 1991(8): 45-51.
- ZHANG Jianmin, XIE Dingyi. Practical algorithm for the increase of pore water pressure in saturated sand vibration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991(8): 45-51.
- [18] 曹宇春, 王天龙. 上海粉土液化特性及孔压模型的试验研究[J]. *上海地质*, 1998(3): 60-64.
- CAO Yuchun, WANG Tianlong. Experimental study on liquefaction behavior and pore pressure model of silt in Shanghai[J]. *Shanghai Geology*, 1998(3): 60-64.
- [19] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1963-1966.
- ZENG Changnü, LIU Hanlong, FENG Tugen, et al. Test study on pore water pressure mode of saturated silt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1963-1966.
- [20] 宫全美, 廖彩凤, 周顺华, 等. 地铁行车荷载作用下地基土动孔隙水压力实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增刊 1): 1154-1157.
- GONG Quanmei, LIAO Caifeng, ZHOU Shunhua, et al. Testing study of dynamic pore water pressure under train loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(S1): 1154-1157.
- [21] 叶俊能, 陈斌. 海相沉积软土动强度与孔压特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊 1): 55-60.
- YE Junneng, CHEN Bin. Dynamic strength and pore pressure property of marine deposit soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 55-60.