

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.014



开放科学(资源服务)标识码OSID:



可液化土中劲芯复合桩的地震响应特征

刘涉川, 王安辉, 章定文, 林文丽

(东南大学交通学院, 南京 211189)

摘要:劲芯复合桩是将预制混凝土管桩插入水泥土桩中复合而成的新型桩基。通过振动台模型试验及有限差分程序FLAC3D数值模拟分析,研究可液化地基中劲芯复合桩的地震响应。利用模型试验结果验证数值模型的准确性和可靠性,进而通过参数分析讨论水泥土桩桩径、桩长、剪切模量等因素对可液化土-复合桩-上部结构地震响应的影响规律,定量评价水泥土桩加固对场地抗液化性能及桩基弯曲破坏的影响特征。结果表明:增大水泥土桩桩径和桩长可有效提高复合桩的抗震性能;增大水泥土剪切模量对复合桩抗震性能的提高有限;桩基在桩头附近或水泥土与可液化砂土交界处易产生较大的弯矩响应,该部位应采取必要的抗震构造措施。根据研究结果,提出了可液化地基中劲芯复合桩的抗震设计要点。

关键词:劲芯复合桩;可液化土;振动台试验;数值模拟;抗震性能

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)06-0042-10

Seismic response of strength composite piles in a liquefiable soil

LIU Shechuan, WANG Anhui, ZHANG Dingwen, LIN Wenli

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China)

Abstract: Strength composite pile is a new type of pile formed by inserting a precast concrete pipe pile into soil-cement column. A series of shaking table model tests and finite difference analysis using FLAC3D were carried out to examine the seismic response of strength composite pile in a liquefiable ground. The accuracy and reliability of the numerical model were verified by the model testing results, and the effect law of diameter, length and modulus of soil-cement columns on the seismic response of sand-composite pile-superstructure were clarified. In addition, the anti-liquefaction performance of liquefiable ground and the bending failure of composite piles were evaluated. Results show that increasing the diameter and length of soil-cement column can effectively improve the seismic performance of composite pile. Increasing the shear modulus of soil-cement column to improve the seismic performance of composite piles is limited. A large moment response may occur in the pile near pile head or at the interface of cement-improved soil and liquefiable sand, so necessary seismic structural measures should be considered at the part. Based on the evaluation results, the key points of seismic design for

收稿日期:2020-10-23

基金项目:国家自然科学基金(52078129)

作者简介:刘涉川(1997-),男,主要从事地基处理研究, E-mail: liushechuan@seu.edu.cn。

章定文(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: zhangdw@seu.edu.cn。

Received:2020-10-23

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 52078129)

Author brief:LIU Shechuan (1997-), main research interest: foundation treatment, E-mail: liushechuan@seu.edu.cn.

ZHANG Dingwen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangdw@seu.edu.cn.

composite piles in liquefiable soil were proposed.

Keywords: strength composite pile; liquefiable soil; shaking table test; numerical simulation; seismic performance

地震引起的场地液化极易造成桩基础的严重破坏,进而导致上部结构的倒塌破坏^[1-2]。为保证受震时可液化地层中桩基的结构安全,众多学者通过提高桩体截面抗弯刚度来改善桩基的承载力和抗震性能^[3-4]。劲芯复合桩是一种通过优化匹配将预制混凝土管桩插入水泥土桩中复合而成的新型桩基。这种新型复合桩利用直径较大、成本较低的水泥土桩加固预制混凝土管桩的桩周土体,在大大提高预制混凝土管桩的承载能力和抗震性能的同时,也具有一定的经济效益^[5-6]。

针对可液化砂土地基中桩-土-结构地震响应问题,学者们通过振动台试验和数值模拟方法开展了很多研究。Tokimatsu等^[7]通过大型振动台试验研究了液化砂土中桩基在惯性力和地面运动作用下的桩身应力响应;Cubrinovski等^[8]通过大型振动台试验对液化侧向扩展场地中桩-土动力相互作用进行了研究,分析了地震作用下桩周土孔压变化和桩身弯矩特性;Brandenberg等^[9]基于OpenSees有限元软件,采用非线性Winkler地基梁模型,对液化侧向扩展场地群桩基础的动力响应进行了数值分析;Choobasti等^[10]基于Finn本构模型和FLAC2D有限差分软件,通过数值分析研究了可液化土层中桩基的地震响应。苏栋等^[11]通过离心机动力模型试验,研究了可液化砂土中单桩的地震响应;戚春香^[12]基于振动台模型试验和ANSYS有限元分析相结合的方法,研究了饱和砂土液化过程中桩-土动力相互作用及其变化规律;童立元等^[13]采用有限差分程序FLAC3D,分别对液化侧扩场地中单桩和群桩基础的地震响应进行了数值模拟分析。

虽然众多学者已针对可液化土中常规桩的抗震性能做了很多工作,但对劲芯复合桩抗震性能方面的研究还很少,仅有极少数学者做了一些初步探索^[14]。对此,笔者通过振动台模型试验和FLAC3D数值模拟分析,对可液化地基中劲芯复合桩的地震响应影响因素及其变化规律进行研究,进而提出可液化地基中劲芯复合桩的抗震设计要点。

1 振动台模型试验

1.1 试验设备与相似比

为研究复合桩抗震性能并给数值模型提供实际依据,基于重庆大学土木工程实验中心的ANCO

振动台进行模型试验。振动台配有内部尺寸为950 mm×850 mm×600 mm(长×宽×高)的层状剪切模型箱。考虑到模型的尺寸、材料等因素,为真实反映原型结构的动力特性,对原型结构进行缩放和相似比设计。选定几何尺寸相似比1:20,弹性模量相似比1:20,密度相似比1:1,并由 Buckingham π 定理^[15]选取模型其余各物理量的相似比,结果如表1所示。

表1 振动台模型试验相似比

Table 1 Similitude laws of shaking table test

物理量	计算公式	相似比
几何尺寸 S_l	选定	1:20
质量密度 S_ρ	选定	1:1
弹性模量 S_E	选定	1:20
应力 S_σ	$S_\sigma = S_E$	1:20
线位移 S_s	$S_s = S_l$	1:20
时间 S_t	$S_t = S_l \cdot S_\rho^{0.5} \cdot S_E^{-0.5}$	0.224
加速度	$S_a = S_E / (S_\rho \cdot S_l)$	1
动孔压	$S_u = S_l$	1:20
上部自重 S_p	$S_p = S_E \cdot S_l^2$	1:8 000

1.2 模型地基和桩基的制备

参照实际工程场地的土层分布,模型地基土层自下而上由100 mm非液化中粗砂层、420 mm可液化土层和30 mm干砂覆盖层组成。可液化土层和干砂覆盖层采用福建标准砂,各土层基本物理参数见表2。中粗砂采用空中砂雨法制备,压实至相对密实度80%左右,缓慢注水至饱和。可液化层采用水沉法制备,控制水面高于土层约10 cm,控制落距约为60 cm,测得相对密实度约为40%。干砂覆盖层采用空中砂雨法制备。

由于原型PHC管桩弹性模量为38 GPa,直径为400 mm,通过相似比缩放后其直径过小,难以浇筑,所以模型管桩和筏板采用1.9 GPa有机玻璃进行制作,采用有机玻璃专用胶将6根管桩(复合桩)组成的2×3群桩基础嵌固于筏板上。管桩的桩长 l 为450 mm,桩径 d 为20 mm,壁厚为5 mm,桩间距为6.25 d ,筏板尺寸为310 mm×175 mm×30 mm(长×宽×厚)。在每根管桩空心部分灌入138 g细铁砂以确保与原型的密度相似比为1:1。在筏板上粘贴4块尺寸为100 mm×100 mm×200 mm(长×

宽×高),总质量 60 kg 的铁块模拟上部结构荷载。水泥土桩桩长 L 为 450 mm,与管桩等长,桩径 D (即复合桩桩径)为 50 mm,通过减小水泥掺量和缩短养护龄期的方法使弹性模量达到相似比要求。试验水泥土桩采用 10% 水泥掺量的水泥胶砂制作而

成,其质量配合比为水泥:福建标准砂:水=1:10:2。经测定,水泥土试样的 3 d 平均抗压强度为 0.28 MPa。在制作复合桩时,首先将管桩固定于牛皮纸筒中心位置,然后将拌和好的水泥土灌入纸筒,待水泥土固化后拆除纸筒,即可形成整体的复合桩。

表 2 砂土物理参数

Table 2 Physical parameters of sand

试验用砂	颗粒比重 G_s	曲率系数 C_c	不均匀系数 C_u	特征粒径 D_{50}/mm	最大干密度 $\rho_{d,\text{max}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho_{d,\text{min}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏粒含量 $F_c/\%$
标准砂	2.63	1.19	4.50	0.60	1.64	1.35	0
中粗砂	2.65	1.02	2.03	1.42	1.82	1.47	0

由于模型箱宽度方向(平行于振动方向)边界对结果影响较小,采用不透水泡沫板将模型沿该方向均分为两部分,以便在同一次振动中完成两次试验,试验结果取平均值,以减小误差。试验模型及传感器布置示意图见图 1。

1.3 地震波选取

沿模型箱长度方向输入 El Centro 波作为地震波,主震段持续时间 30 s,加速度幅值 0.4g(约为抗震设防烈度 9 度),主频率 5.17 Hz。输入地震波前后对模型地基输入幅值为 0.02g、持续时间为 20 s 的白噪声。

2 抗震性能变化规律数值模拟分析

2.1 数值模型及参数

为深入研究水泥土桩的设计参数(桩径、桩长和模量)对劲芯复合桩的影响规律,基于振动台模型试验,采用有限差分程序 FLAC3D 对原型条件下 2×3 复合桩桩筏基础在可液化土层中的地震响应进行数值模拟分析。计算模型取实际尺寸(试验模型的 20 倍),即长 19 m、宽 8.5 m、高 11 m,如图 2 所示。模型中,各土层、桩基、筏板及上部重物均采用三维实体单元模拟,桩与砂土、砂土与筏板之间均设置接触面单元以模拟相互作用,接触面法向刚度与切向刚度取 109 Pa/m,接触面间的摩擦角取 15° 。采用六面体单元对模型进行网格划分,整个模型共划分约 30 950 个单元,35 625 个节点。

中粗砂和干砂采用 Mohr-Coulomb(MC)模型,可液化砂土采用 Finn 模型^[16]。Finn 模型是一种用来描述饱和砂土中孔压积累效应的动孔压计算模型,其本质是在 Mohr-Coulomb 本构模型的基础上增加了动孔压的上升模式,且假定动孔压增量与塑性体积应变增量相关。塑性体积应变增量可按照 Byrne^[17]的方法计算。

$$\frac{\Delta \epsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 \frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}) \quad (1)$$

式中: ϵ_{vd} 为砂土塑性体积应变; γ 为砂土剪应变; C_1

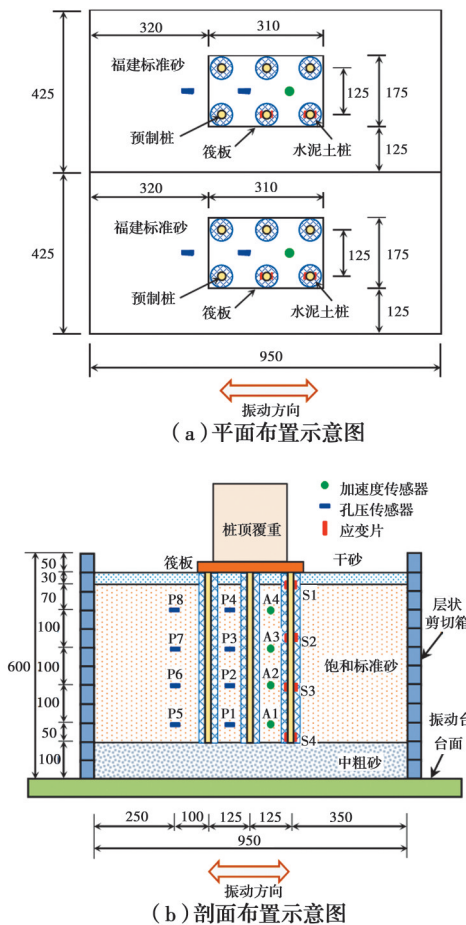


图 1 试验模型和传感器布置图(单位:mm)

Fig. 1 Layout of test model and sensor (Unit: mm)

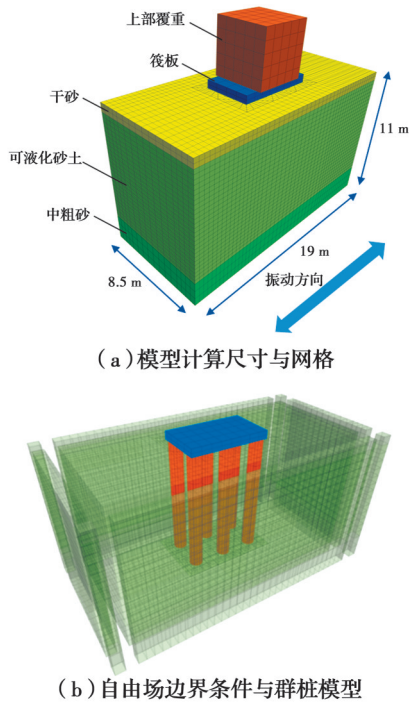


图 2 数值分析模型

Fig. 2 Numerical analysis model

和 C_2 为两个参数,可通过式(2)、式(3)确定。

$$C_1 = 7\ 600D_r^{-2.5} \quad (2)$$

$$C_2 = 0.4/C_1 \quad (3)$$

式中: D_r 为砂土相对密实度。水泥土桩采用MC模型,其变形模量取 $150q_u$ (q_u 为无侧限抗压强度),黏聚力取 $30\%q_u$,砂土和水泥土的参数如表 3 所示,其中,可液化砂土的部分计算参数依据文献[18]中福建标准砂的剪切试验结果确定。管桩、筏板、上部重物采用弹性模型,弹性模量分别为 38、32.5、120 GPa,泊松比均取 0.2。

数值模型采用瑞利阻尼进行动力分析,假定阻尼矩阵与质量矩阵和刚度矩阵相关。在FLAC3D中设置瑞利阻尼时,需要最小临界阻尼比和中心频率两个参数,根据FLAC3D用户手册中瑞利阻尼参数的确定方法^[19],本模型中临界阻尼比设为 5%,中

心频率设为 5 Hz。

动力计算时,采用自由场边界条件以减少边界效应的影响,如图 2(b)所示,模型底部和四周均设为不排水边界,地基表面设为自由排水边界。在设置静力场的情况下完成初始应力场和孔压场的计算后,删除静力边界条件,施加自由场边界,并从模型底面沿水平方向输入非压缩 El Centro 波,开展三维弹塑性流固耦合动力响应分析。需要注意的是,在动力与渗流的耦合分析时,需将渗流计算模式打开,以模拟饱和和土体的动孔压在振动过程中的累积和消散效应。

2.2 数值模型可靠性验证

为了验证计算模型参数选取的合理性与可靠性,将数值计算结果与模型试验结果进行对比。由于振动台试验采用的是缩尺模型,而数值模拟采用的是复合桩基础原型,为便于比较和分析,将振动台试验的监测结果按表 1 所示的相似比关系进行换算。

0.4g El Centro 波作用下土体超孔压比时程计算值与振动台试验记录值的对比如图 3 所示。由图 3 可知,数值计算与模型试验的结果趋势相同、数值相近,且均能反映土体液化由浅层向深层发展的趋势。因此,建立的数值计算模型可以较好地模拟地震过程中土体超孔压的发展和液化现象,保证后续参数分析计算结果的可靠性。需要指出的是,数值计算得到的浅层土体超孔压峰值的持续时间长于模型试验实测结果,这可能是由于数值模型与实际情况中砂土的渗透系数存在一定的差异。

图 4 为 0.4g El Centro 波作用下模拟计算的加速度时程及桩身弯矩与试验记录值的对比。由图 4(a)可以看出,数值计算得到的加速度响应在时域和频域上均与试验结果趋势相近,且加速度幅值基本一致。数值计算不仅能够反映振动台试验中饱和砂土因液化而产生的加速度衰减现象,而且可以模拟浅层土体加速度衰减较深层土体更为明显的现

表 3 砂土和水泥土桩计算参数

Table 3 Calculation parameters of sand and soil-cement columns

类别	厚度 (长度)/m	本构 模型	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙率	剪切模 量/MPa	体积模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	渗透系数/ ($cm \cdot s^{-1}$)	液化 参数
干砂	0.6	MC	1.45	0.45	3.85	8.33	0	30	6×10^{-3}	
可液化砂土	8.4	Finn	1.45	0.45	3.85	8.33	0	30	6×10^{-3}	$C_1=0.76,$
中粗砂	2.0	MC	1.74	0.34	15.4	33.3	0	32	1×10^{-2}	$C_2=0.53$
水泥土桩	9.0	MC	1.80	0.30	323	700	1 680	35	6×10^{-7}	

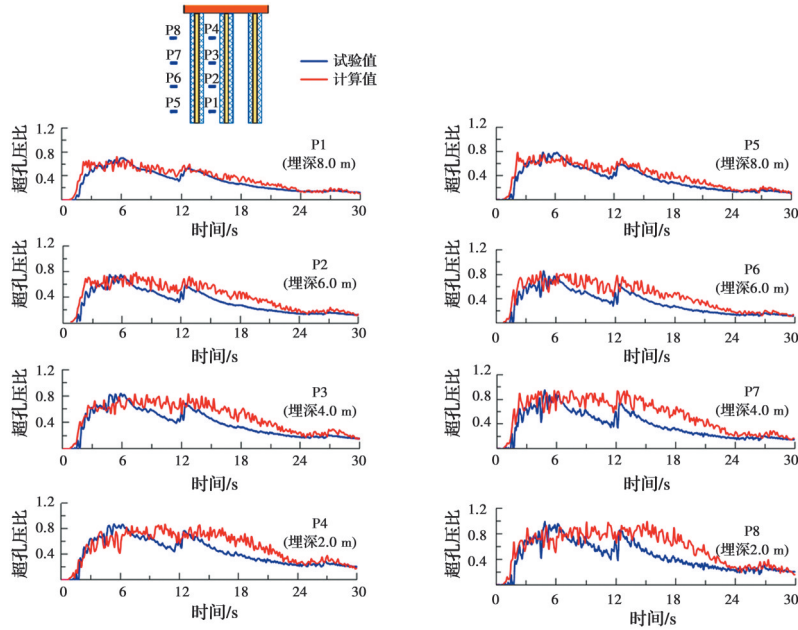


图 3 超孔压比响应计算值与试验值的对比

Fig. 3 Comparison between calculated and test results of excess pore pressure ratio

象。图 4(b)显示了桩基础的弯矩响应数值计算值与模型试验值的对比。两者的总体特征和变化趋势基本一致。

综上所述,建立的数值模型能够很好地反映结构的真实情况,保证参数分析计算的合理性和可靠性。

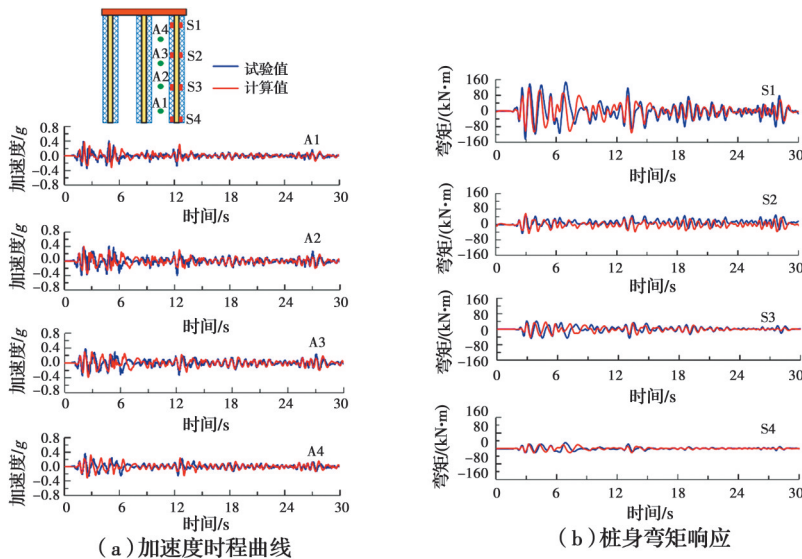


图 4 加速度和弯矩计算值与试验值的对比

Fig. 4 Comparison between calculated and test results of acceleration and bending moment

2.3 水泥土桩设计参数对抗震性能的影响

为深入研究可液化土中劲芯复合桩的抗震性能,通过数值模型进行参数分析,重点分析水泥土桩设计参数(桩径 D 、桩长 L 和剪切模量 G_c)对砂土-复合桩-上部结构地震响应的影响。

2.3.1 水泥土桩桩径 基于构建的三维数值计算

模型,保持砂土剪切模量 $G_s=3.85\text{ MPa}$,水泥土桩剪切模量 $G_c=323\text{ MPa}$,水泥土桩桩长 $L=9\text{ m}$,管桩桩长 $l=9\text{ m}$,管桩桩径 $d=400\text{ mm}$ 不变,分别选取水泥土桩桩径 D 为 $1.0d$ (即单独管桩)、 $1.5d$ 、 $2.0d$ 、 $2.5d$ 和 $3.0d$,以此来探讨水泥土桩桩径对砂土-复合桩-上部结构地震响应的影响。

在 0.4g El Centro 波作用下,不同桩径比 D/d 对应的土体各深度处超孔压比峰值曲线如图 5 所示。为方便比较,纵坐标是将深度 z 除以管桩桩长 l ,并归一化处理后来表示的。结果表明,随着 D/d 的增大,土中各深度位置超孔压比峰值不断减小。 D/d 从 1.0 增大至 3.0 时,埋深 8 m 位置 ($z/l=0.89$) 的超孔压比峰值从 0.85 降低至 0.69,减少 18.8%;埋深 2 m 位置 ($z/l=0.22$) 的超孔压比峰值从 1.09 降至 0.82,减少 24.8%,表明水泥土桩对场地的超孔压反应有明显的削弱作用,且增大水泥土桩桩径可有效降低桩周土体的液化风险。上述计算规律与 Hasheminezhad 等^[20]通过数值计算得到的规律一致。

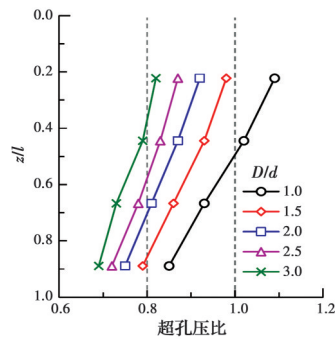


图 5 不同桩径比下各深度处超孔压比峰值对比
Fig. 5 Comparison of peak values of excess pore pressure ratio under different depths and diameter ratios

为了定量分析复合桩基础对土体抗液化性能提高的程度,基于能够反映土体液化程度的超孔压比,定义复合桩场地抗液化性能提升比 η 为^[21]

$$\eta = \frac{r_u - r_u'}{r_u} \quad (4)$$

式中: r_u 和 r_u' 分别表示预制桩场地和复合桩场地群桩内部土体某深度处的超孔压比。

η 与桩径比的关系曲线如图 6 所示。随着桩径比 D/d 的增大,砂土地基各深度处的抗液化性能提升比均明显增大,水泥土桩桩径是影响复合桩基础提升地基抗液化特性的关键因素。当 D/d 由 0 增大至 3.0 时, η 由 0 增大至 21.9%。对于同一复合桩场地,其抗液化性能提升比随土层埋深的减小而增大。

在强震作用下,液化场地桩基最常发生弯曲失效。为直观地分析水泥土桩桩径对复合桩弯曲失效的影响,将不同振动强度 a_{max} 下预制管桩桩身最大弯矩与极限弯矩的比值 M_{max}/M_u 随桩径比 D/d 的变化曲线绘制于图 7。当 M_{max}/M_u 小于 1 时,表明桩

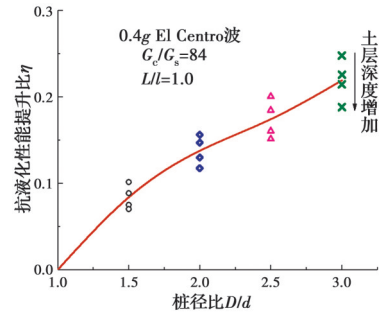


图 6 抗液化性能提升比与桩径比的关系
Fig. 6 Relationship between D/d and η

基未发生弯曲失效,当 M_{max}/M_u 大于或等于 1 时,表明桩基发生弯曲失效;其中,劲芯复合桩的芯桩为预应力混凝土管桩 PHC400C(95),其桩身受弯承载力极限值 M_u 为 194 kN·m。

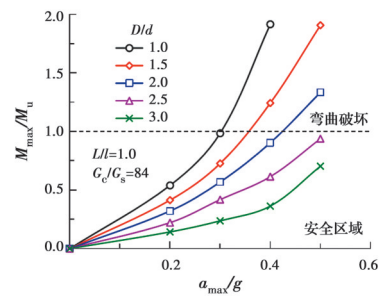


图 7 桩径比对复合桩弯曲失效的影响

Fig. 7 Effect of D/d on bending failure of composite piles

由图 7 可以看出,随着 D/d 的增大,相同震动强度下的 M_{max}/M_u 逐渐减小,且震动强度越大,减小幅度越明显。这表明增大震动强度可大幅增加桩基发生弯曲失效的风险,而增大水泥土桩桩径可显著降低复合桩发生弯曲破坏的风险。需要说明的是,在所有的工况中 ($L/l=1.0$),桩基发生弯曲破坏的位置均处于桩头附近。

2.3.2 水泥土桩桩长 保持砂土剪切模量 $G_s=3.85$ MPa,水泥土桩剪切模量 $G_c=323$ MPa,水泥土桩桩径 $D=1000$ mm,管桩桩径 $d=400$ mm,管桩桩长 $l=9.0$ m 不变,分别选取水泥土桩桩长 L 为 $0.25l, 0.5l, 0.75l$ 和 $1.0l$,以此来探讨水泥土桩桩长对砂土-复合桩-上部结构地震响应的影响。

在 0.4g El Centro 波作用下,不同桩长比 L/l 对应的土体各深度处超孔压比峰值曲线如图 8 所示。随着 L/l 的增大,土中各深度位置超孔压比峰值不断减小,且在水泥土桩加固范围内,超孔压比减小得更为明显。这表明水泥土桩能有效抑制场地的超孔压反应,且增加桩长能有效降低桩周土的液化程度。

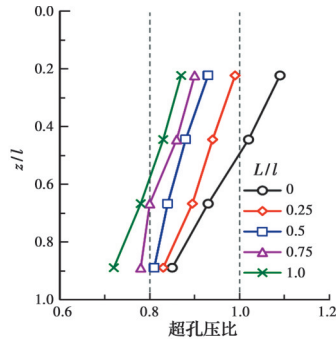


图8 不同桩长比下各深度处超孔压比峰值对比

Fig. 8 Comparison of peak values of excess pore pressure ratio under different depths and length ratios

不同震动强度下预制混凝土管桩的 M_{max}/M_u 随桩长比 L/l 的变化规律如图9所示。由图9可知,随着 L/l 的增大,相同震动强度下的 M_{max}/M_u 明显减小。在 $a_{max}=0.3g$ 的工况下,当 L/l 由0增大至1.0时,管桩的 M_{max}/M_u 由0.98降低至0.42,增加水泥土桩桩长可明显降低复合桩弯曲失效的风险。值得注意的是,对于 L/l 为0.25和0.5的工况,桩基发生弯曲失效的位置处于水泥土与砂土交界处附近;而其他工况中,桩基发生弯曲破坏的位置均处于桩头附近。可能的原因是,正常的等截面桩($L/l=0, L/l=1$)由于桩头嵌固,最大弯矩发生在桩头处;而当水泥土桩与管桩不等长时,由于水泥土桩使得周围土层的侧向约束发生明显变化,水泥土与砂土交界处将发生明显的刚度突变和动应力集中现象,因此,在此处产生较大弯矩。这一弯矩值的大小会随着 L/l 的增大而减小,当 $L/l=0.25$ 和 $L/l=0.5$ 时,交界面弯矩大于桩头弯矩,而 $L/l=0.75$ 时,交界面弯矩已小于桩头弯矩。

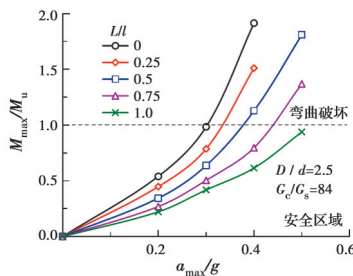


图9 桩长比对复合桩弯曲失效的影响

Fig. 9 Effect of L/l on bending failure of composite piles

2.3.3 水泥土桩剪切模量 保持水泥土桩桩长 $L=9$ m, 桩径 $D=1000$ mm, 管桩桩长 $l=9$ m, 桩径 $d=400$ mm, 可液化砂土层剪切模量 $G_s=3.85$ MPa 不变, 分别选取水泥土桩剪切模量 G_c 为 $15G_s$ 、 $30G_s$ 、

$45G_s$ 和 $60G_s$ 的工况来探讨水泥土桩模量对砂土-复合桩-上部结构地震响应的影响。

在 $0.4g$ El Centro 波作用下, 不同桩土剪切模量比 G_c/G_s 对应的土体各深度处超孔压比峰值曲线如图10所示。由图10可知, 随着桩土模量比的增大, 土体各深度处超孔压比均减小, 但减小幅度随模量比的增加呈降低趋势, 表明在一定范围内增加水泥土剪切模量可有效提高桩周土体的抗液化性能。

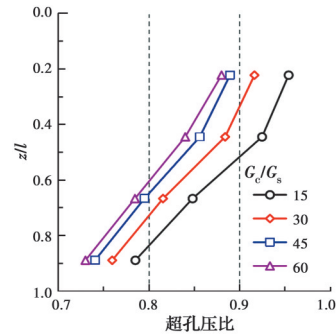


图10 不同模量比下各深度处超孔压比峰值对比

Fig. 10 Comparison of peak values of excess pore pressure ratio under different depths and modulus ratios

图11显示了复合桩地基抗液化性能提升比 η 与桩土剪切模量比 G_c/G_s 的关系。由图11可知, 地基各深度位置的 η 均随着 G_c/G_s 的增大而增大。当 G_c/G_s 由15增大至60时, 其平均抗液化性能提升比由10.2%提高至16.7%。因此, 水泥土剪切模量也是影响复合桩地基抗液化性能的主要影响因素, 但模量的影响具有一定的局限性, 当 G_c/G_s 大于45后, 继续增加剪切模量对复合桩地基抗液化性能的提升作用并不明显。

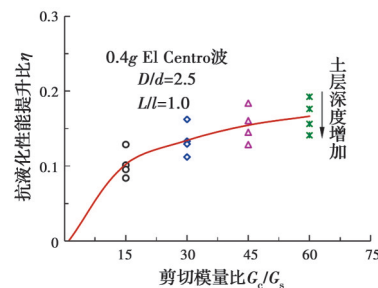


图11 抗液化性能提升比与剪切模量比的关系

Fig. 11 Relationship between of G_c/G_s and η

不同震动强度下预制管桩的 M_{max}/M_u 随 G_c/G_s 的变化如图12所示。由图12可知, 相同震动强度下的 M_{max}/M_u 随 G_c/G_s 的增大而减小。对于 $a_{max}=0.4g$ 的工况, 当 G_c/G_s 由15增大至60时, 其 M_{max}/M_u

由1.14减小至0.66。因此,增加水泥土剪切模量在一定程度上可降低复合桩发生弯曲破坏的风险,当 G_c/G_s 大于45后,持续增加水泥土剪切模量对 M_{max}/M_u 的影响不再显著。此外,所有工况中桩基发生弯曲失效的位置均位于桩头附近。

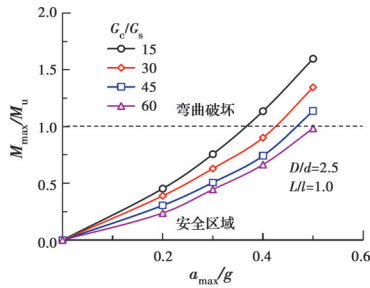


图12 剪切模量比对复合桩弯曲失效的影响

Fig.12 Effect of G_c/G_s on bending failure of composite piles

3 讨论

水泥土桩参数对可液化土中复合桩地基抗震性能影响显著,增大水泥土桩桩径是提高桩基抗震性最直接有效的措施。由于浅层液化土对桩基的破坏风险较深层液化土更大,故当可液化土层较薄时(小于10 m)^[22],水泥土桩贯穿可液化土层;若液化土层较深厚不宜贯穿,则水泥土桩长度应不小于

10 m。由于持续提高水泥土强度(模量)会大幅增加成本,且超过一定范围后对地基抗震性能的提升效果并不明显,因此,水泥土强度存在一个最佳范围。结合《劲芯复合桩技术规程》(JGJ/T 327—2014)^[23]、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[24]、《预应力混凝土管桩技术标准》(JGJ/T 406—2017)^[25]和本文成果,确定可液化土层中劲芯复合桩的桩身参数推荐值,可供实际工程参考,如表4所示。

在进行可液化土中劲芯复合桩抗震验算时,应当着重考虑水泥土桩加固对预制管桩水平抗震起到的有利作用。一方面,水泥土在一定程度上可视为强度模量更高的土壤,采用水泥土处理土壤能够提高地基的水平抗力系数;另一方面,水泥土加固能有效降低可液化土层的液化趋势,在对液化砂土水平抗力折减时可适当增大液化折减系数。为保证工程安全,不考虑桩径比 D/d 低于2.0时水泥土桩对土层液化的抑制作用,仅将其视为抗震性能的安全储备。另外,对于本文中桩头与筏板固接的复合桩,桩基在桩头附近或水泥土与可液化砂土交界处容易产生弯曲破坏,应在这些位置采取必要的构造措施,如增配螺旋箍筋、填芯等,以提高其抗震承载力和延性。

表4 可液化土层中劲芯复合桩桩身参数推荐值

Table 4 Design parameters recommended values of composite pile in liquefiable soil

桩	桩型	桩径/mm	桩身强度	桩长
预制混凝土管桩(芯桩)	混合配筋管桩或AB型、B型、C型的PHC管桩	300~800	C60~C80	深入液化层下持力层
水泥土桩	搅拌桩或高压旋喷桩	800~1 200	1.0~3.0 MPa	液化土层较薄时应贯穿,较深厚时不应小于10 m

4 结论

1)水泥土桩加固管桩地基形成的劲芯复合桩较普通管桩具有更好的抗震性能,能够在一定程度上抑制液化土超孔压的发展。增大水泥土桩桩径是提高桩基抗震性能最直接有效的措施。

2)增加水泥土桩桩长可以有效减小土体各深度处超孔压比,降低桩身弯曲破坏的风险。当可液化土层厚度较小时(小于10 m),水泥土桩应贯穿可液化土层;若液化土层较深厚不宜贯穿,则水泥土桩长度应不小于10 m。

3)增加水泥土剪切模量对复合桩地基抗震性能的提升是有限的,在实际工程中,可通过适当增加水泥土剪切模量来提高可液化地基中复合桩的抗震能力,但当桩土模量比大于45后,继续增加水

泥土的剪切模量对复合桩抗震性能的提升效果并不明显。

4)桩头与筏板固接的复合桩地基在桩头附近或水泥土与可液化砂土交界处容易产生弯曲破坏,工程中应在这些位置采取必要的构造措施。

参考文献

- [1] TOKIMATSU K, OH-OKA H, SATAKE K, et al. Effects of lateral ground movements on failure patterns of piles in the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake [C]// Proceedings of a Speciality Conference, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE Geotechnical Special Publication, 1998: 1175-1186.
- [2] BERRILL J B, CHRISTENSEN S, KEENAN R P, et al. Case study of lateral spreading forces on a piled

- foundation [J]. *Geotechnique*, 2001, 51(6): 501-517.
- [3] 徐宁, 张建伟, 李荣翔. 玻璃纤维增强复合桩水平承载特性试验与数值模拟[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(5): 9-15.
- XU N, ZHANG J W, LI R X. Test and numerical study on the bearing capacity of GFRP composite pile under lateral loadings [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(5): 9-15. (in Chinese)
- [4] 李炜, 胡波, 李波, 等. 大直径加翼单桩水平承载性能离心模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 821-827.
- LI W, HU B, LI B, et al. Centrifuge model tests on horizontal bearing capacity of a large diameter pile with wings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 821-827. (in Chinese)
- [5] DONG P, QIN R, CHEN Z Z. Bearing capacity and settlement of concrete-cored DCM pile in soft ground [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2004, 22(1): 105-119.
- [6] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(Sup2): 998-1001.
- QIAN Y J, XU Z W, DENG Y G, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup2): 998-1001. (in Chinese)
- [7] TOKIMATSU K, SUZUKI H, SATO M. Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25: 753-762.
- [8] CUBRINOVSKI M, KOKUSHO T, ISHIHARA K. Interpretation from large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(2/3/4): 275-286.
- [9] BRANDENBERG S J, BOULANGER R W, KUTTER B L, et al. Static pushover analyses of pile groups in liquefied and laterally spreading ground in centrifuge tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(9): 1055-1066.
- [10] CHALOULOS Y K, BOUCKOVALAS G D, KARAMITROS D K. Pile response in submerged lateral spreads: Common pitfalls of numerical and physical modeling techniques [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 55: 275-287.
- [11] 苏栋, 李相菘. 可液化土中单桩地震响应的离心机试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(4): 423-427.
- SU D, LI X S. Centrifuge investigation on seismic response of single pile in liquefiable soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(4): 423-427. (in Chinese)
- [12] 戚春香. 饱和砂土液化过程中桩土相互作用 p - y 曲线研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- QI C X. Research on p - y curves of pile-soil interaction during liquefaction of saturated sands [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [13] 童立元, 王斌, 刘义怀. 地震地基液化大变形对桥梁桩基危害性三维数值分析[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(3): 91-94.
- TONG L Y, WANG B, LIU Y H. 3-D numerical analysis of large subsoil liquefaction distortion influence resulted from earthquake on bridge pile foundation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(3): 91-94. (in Chinese)
- [14] 鲍鹏, 姜析良, 盛桂琳. 劲性搅拌桩复合地基承载性能静动力分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 63-68, 82.
- BAO P, JIANG X L, SHENG G L. Static and dynamic analysis of bearing capacity of composite foundation of concrete core mixing piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 63-68, 82. (in Chinese)
- [15] IAI S. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field [J]. *Soils and Foundations*, 1989, 29(1): 105-118.
- [16] FINN W D L, MARTIN G R, LEE K W. An effective stress model for liquefaction [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1975, 103(6): 517-533.
- [17] BYRNE P M. A cyclic shear-volume coupling and pore-pressure model for sand [C]//Proceedings of the second international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, St. Louis, Missouri, 1991: 11-15.
- [18] 许成顺, 李艳梅, 潘霞, 等. 初始静孔隙水压力对砂土静动力剪切特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 1050-1057.
- XU C S, LI Y M, PAN X, et al. Experimental study on effect of initial static pore water pressure on static and dynamic shear properties of sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6): 1050-1057. (in Chinese)
- [19] 陈育民, 徐鼎平. *FLAC/FLAC3D 基础与工程实例* [M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- CHEN Y M, XU D P. *Foundation of FLAC/FLAC3D and engineering cases* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese)
- [20] HASHEMINEZHAD A, BAHADORI H. Seismic

- response of shallow foundations over liquefiable soils improved by deep soil mixing columns [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 110: 251-273.
- [21] 刘润, 李成凤, 练继建, 等. 筒型基础-砂土地基动力响应的离心振动台试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 817-826.
- LIU R, LI C F, LIAN J J, et al. Centrifugal shaking table tests on dynamic response of bucket foundation-sandy soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 817-826. (in Chinese)
- [22] 王康达. 江苏典型液化地基桩基地震响应特性及抗震设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- WANG K D. Research on the dynamic seismic response and practical design method of piles in typical liquefiable soil of Jiangsu Province [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [23] 劲性复合桩技术规程: JGJ/T 327—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Technical specification for strength composite piles: JGJ/T 327-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [24] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [25] 预应力混凝土管桩技术标准: JGJ/T 406—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Technical standard for prestressed concrete pipe pile: JGJ/T 406-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)

(编辑 黄廷)