

文章编号: 1000-4750(2012)11-0175-08

桩-土复合地基抗液化数值试验分析

何剑平^{1,3}, 陈卫忠²

(1. 山东大学岩土中心, 济南 250061; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北, 武汉 430071;

3. 山东大学威海分校, 威海 264209)

摘 要: 在自由场中设置群桩基础, 改变桩基间距, 应用 FLAC3D 作系列三维桩基础非自由场液化数值模拟试验, 从桩对液化土的反作用这一方面, 研究群桩设置对场地液化分布的影响, 揭示群桩抗液化效应。试验结果显示, 群桩改变了自由场的特性, 群桩非自由液化场水平向不再同性。相对于自由液化场, 群桩约束了内部土体自由应变, 加大了桩-土结构复合地基的整体抗剪刚度, 适当间距的群桩抑制下部土液化的效应较明显, 超孔压比降低 20%, 群桩对上部土体的抗液化效应不大。桩基间距越小对近处场地液化的抑制作用越大, 对远处液化的强化作用也越大, 桩间距越大抑制作用越小, 对远处的强化作用也越小。桩间距相同, 桩径加大, 桩间场液化度降低。研究成果为桩-土结构复合地基抗液化设计提供理论及试验基础。

关键词: 群桩; 桩间距; 液化场; 液化度; 液化效应

中图分类号: TU435 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.03.0169

THE NUMERICAL EXPERIMENTS AND ANALYSIS ON ANTI-LIQUEFACTION EFFECT OF PILE-SOIL COMPOSITE FOUNDATION

HE Jian-ping^{1,3}, CHEN Wei-zhong²

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center of Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: By setting a group pile in a free field, changing the distance between piles, the series numerical simulation test was completed for the liquefaction in a pile-foundation non-free field by using FLAC3D. Studied the influence on liquefaction distribution features of the pile-foundation non-free field, and revealed the anti-liquefaction nature of a group-pile foundation. Experiment showed that: the non-free field liquefaction distribution approaches non-uniform in the horizontal direction, the pore-water pressure distribution shifted, the contour of pore pressure presents the fluctuation shape, nearby the structure forms the low pressure region, and forms the high pressure region several meters far to the structure. Contrast with the free liquefaction field, the excess pore pressure ratio in a low pressure region reduces obviously, approximately 20%, and the anti-liquefaction effect on top soil of a pile foundation was very limited. The excess pore pressure ratio in a high pressure region is higher than the free field. The group pile suppressed the vicinity soil liquefaction, and the piles strengthened the liquefaction in distant place soil. The bigger the pile rigidity is, the bigger the inhibition range is, and the bigger invigoration effect to the distant place liquefaction is also. The smaller the pile rigidity is, the smaller inhibition range is, and the smaller the invigoration effect to the distant place liquefaction is also. At same

收稿日期: 2011-03-25; 修改日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金项目(41072238, 51009133)

通讯作者: 何剑平(1960—), 男, 呼和浩特市人, 高工, 博士生, 主要从事结构抗震试验研究(E-mail: hejianping@sdu.edu.cn).

作者简介: 陈卫忠(1968—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士, 博导, 长江学者, 中国岩石力学与工程学会理事, 从事岩石工程研究(E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn).

distance between piles, when the pile diameter is bigger, the excess pore pressure ratio in the field between piles is lower. Researching results will provide a theoretical and experimental basis for the anti-liquefaction design of underground pipes through the liquefied soil layer.

Key words: pile group; distance between piles; liquefaction field; excess pore pressure ratio; liquefaction effects

随着技术的进步,砂土液化特性的明晰,砂土液化下地下结构设计将进入定量数值分析和模型试验阶段,由于地震模拟振动台液化试验模型尺度及边界处理的局限性,很难真实地模拟实际大场地的液化状态,振动台试验结果往往也有一定局限性,数值模拟试验基本不受模型尺度及模型边界条件处理的制约,可以较好的实现地下结构大型非自由场液化试验。

采取改良措施可有效降低土体液化的可能性,减小其破坏程度,其中设置良好的排水路径是其主要途径之一。张明作了碎石桩复合地基液化数值模拟试验及振动台试验^[1]。黄春霞作了碎石桩复合地基抗液化性能试验研究^[2]。河海大学刘汉龙教授开发了一种抗振动液化的刚性排水桩^[3]在刚性桩的侧面沿竖向设置凹槽,在凹槽中设置排水管,以形成竖向的排水通道。上述研究主要从排水降压这个途径研究抗液化问题,碎石排水桩、混凝土排水桩有两种功能,排水降压,改善土体强度。排水桩的抗液化效应实际是桩体减震及排水降压共同作用的结果。

刘光磊作了隔断墙地铁隧道数值及离心机模型试验^[4],设置截断墙的处理方法可限制两侧土体向隧道下方挤入的趋势,从而有效减小结构上浮。

群桩基础不仅可以分担上部垂直荷载,而且还能以分担振动剪应力的方式来防止砂土液化,即在地震动荷载作用下,剪应力集中于桩体,桩对桩间土起“减震”作用。因此,在同样地震烈度下桩间土所承受的剪应力由于桩的应力集中而得到衰减,从而提高了抗液化能力。

本文仅从群桩出发,探索群桩布置对液化场的影响。从桩体减震这个角度研究桩本身对液化场的反作用,研究桩-土复合地基非自由场液化分布的基本普遍规律,搞清楚群桩减震作用抗液化效应有多大。

1 动孔压模型与土体的液化

1.1 动孔压模型与土体的液化

振动孔隙水压力的发展变化是土体变形和其

强度变化的根本原因,也是用有效应力法分析土体动力稳定性的关键。国内外学者已经提出了考虑不同因数的多种振动孔隙水压力计算模型,如应力模型、应变模型、内时模型、能量模型、有效应力路径模型及瞬态模型等。FLAC3D采用的是应变模型。

FLAC3D 可以进行动力与渗流的耦合分析,能够模拟砂土在动力作用下的孔压积累直至土体的液化,FLAC3D 采用 Finn 模型来描述这种孔压积累的效应。Finn 模型的实质是在 Mohr-Coulomb 模型的基础上增加了动孔压的上升模式,并假定动孔压的上升与塑性体积应变增量有关。

设在有效应力为 σ'_0 时砂土的一维回弹模量为 \bar{E}_r , 则对于不排水条件下孔隙水压力的增量 Δu 与塑性体积应变增量 $\Delta \varepsilon_{vd}$ 的关系为:

$$\Delta u = \bar{E}_r \Delta \varepsilon_{vd} \quad (1)$$

FLAC3D 提供了两种不同的塑性模型体积应变增量公式,包括 Finn 模型和 Byrne 模型。

1) Finn 模型。

Martin 等(1975 年)的试验表明,塑性体积应变与循环剪应变幅值之间的关系与固结压力无关。为了实用目的,塑性体积应变增量 $\Delta \varepsilon_{vd}$ 仅是总的累积体积应变 ε_{vd} 和剪应变 γ 的函数^[5-6]:

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (2)$$

其中, C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 为模型常数。对于相对密度为 45% 的结晶二氧化硅砂: $C_1=0.80$ 、 $C_2=0.79$ 、 $C_3=0.45$ 、 $C_4=0.73$ 。

设体积应变增量与剪应变幅值的比值为 $y = \Delta \varepsilon_{vd} / \gamma$, 体积应变积累量与剪应变幅值的比值为 $x = \varepsilon_{vd} / \gamma$, 则有:

$$y = C_1(1 - C_2 x) + \frac{C_3 x^2}{1 + C_4 x} \quad (3)$$

图 1 Finn 模型说明液化过程就是一个体积压应变不断积累的过程,从图 1 可知,体积压应变较小时体积压应变增量曲线较陡,即振动开始时土样体积压缩较快,体积压缩积累到一定程度,达到液化状态,体积压缩就不增加了。砂土液化是饱和砂土在动力往复荷载作用下,体积压应变不断积累加

大,超静孔隙水压力不断升高,砂土有效应力不断降低,强度不断降低的过程。

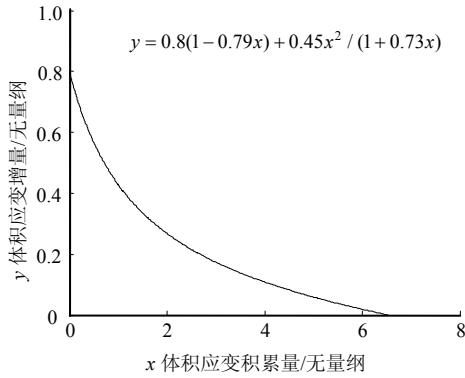


图1 Finn 模式体积应变积累量与体积应变增量的图形表示
Fig.1 Relationship between x and y on Finn model

1.2 一般应力条件下饱和砂土液化的判定准则

饱和砂土液化是从固态转变为液态,当不考虑液体的粘滞力时,其抗剪强度为 0。把液化定义为动荷载作用过程中广义剪应力 q 和有效球应力 p 为零,则有:

$$\begin{cases} q = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2} = 0 \\ p = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

满足式(4)的解只能是:

$$\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3 = 0 \quad (5)$$

式中, $\sigma'_i (i=1,2,3)$ 为液化时的 3 个有效主应力。这表明,当有效应力均为零时,饱和砂土发生液化。

根据有效应力原理,式(5)还可以改写为:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = u \quad (6)$$

式中, $\sigma_i (i=1,2,3)$ 为液化时的 3 个总应力; u 为液化时的孔隙水压力。这表明,当作用在土单元 3 个方向的总主应力相等(处于均压状态)且等于该时刻的孔压时,饱和砂土发生液化。

式(6)的液化准则既符合液化定义,又与试验方法和仪器无关,是一个客观的统一准则。

在数值分析中由于计算精度的影响,常用超孔压比的概念来描述液化,本文称超孔压比为液化度。在三维数值计算中超孔压比(ppr) r_u 的定义为^[3]:

$$r_u = 1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \quad (7)$$

式中: σ'_m 为动力计算过程中单元的平均有效应力; σ'_{m0} 为动力计算前单元的平均有效应力,定义为:

$$\sigma'_m = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad (8)$$

$$\sigma'_{m0} = \sigma'_{10} + \sigma'_{20} + \sigma'_{30} \quad (9)$$

式中: $\sigma'_{j0} (j=1,2,3)$ 为动力计算之前单元的有效应力张量的 3 个主应力; σ'_{m0} 是动力计算过程中单元的有效应力张量的 3 个主应力。本文用 fish 语言编写一个应用程序,记录土超静孔压比、体积应变增量、加速度、剪应力等变量的动力反应历程,分析问题。

2 数值计算模型

自由场中出现桩基础则成为非自由场,土-桩基础相互作用分析问题较复杂,液化土对桩基础内力有影响,桩基础对液化场有反影响,由土-桩基础弹性内力分析知,桩基础与土的相对刚度对桩内力影响很大,同理,群桩刚度对液化场分布特性也有直接影响,为了明晰群桩刚度对液化场分布的影响,在自由场中设置群桩,每个群桩基础有一个桩承台,桩关于 x 轴、 y 轴对称。桩净间距分别为 1m、2m、4m,试验分 4 个工况: 1m、2m、4m 净间距四桩基础工况、1m 净间距八桩基础工况。分别作 4 种工况非自由场液化试验,探索桩间距设置对桩间、桩外液化场的影响规律。

为了对比明晰起见,首先作典型自由场液化数值试验,以自由场作为参照,研究群桩非自由液化场分布特征。

2.1 自由场模型

自由场模型尺度: 60m(宽)×15m(厚)×15m(纵深),其中顶部 2m 厚粘土,下部 13m 厚松砂。

2.2 桩基础非自由场模型

在自由场模型中部设置群桩构建非自由场模型,四桩群桩基础桩净间距分别为 4m、2m、1m,代表不同密度桩分布工况,圆形桩断面简化为矩形断面 0.5m×0.5m,桩长 15m,桩承台厚 1m,承台埋深 0m。场地表层 2m 厚设置粘土,静水位在地表下 2m 处。混凝土体积模量 1.56×10^{10} Pa,剪切模量 1.27×10^{10} Pa,混凝土干密度 2500kg/m^3 ,弹性本构模型。

FLAC3D 动力数值分析边界条件: 模型外侧施加无限自由边界,局部阻尼系数 0.314。初始侧压力系数 1,流体模量 2×10^8 Pa,流体密度 1000kg/m^3 。动力渗流液化计算模型采用 Finn 模型,模型硅砂相对密度 45%。

左右两侧面及底面水平向加正弦速度波,速度时程考虑地震波的波形,从 0s~1s 速度逐渐增大达到最大值并稳定一定时间(1s~6s),随后速度逐渐减

小到 0(6s~7s), 速度幅值相当于加速度幅值 0.2g, 动力持续时间 7s, 频率 5Hz。

砂土试样渗透特性参数见表 1, 动力分析采用的流体参数及液化参数见表 2。

表 1 砂土试样渗透特性参数

Table 1 Parameters of seepage property for sandy soil

材料	本构模型	K/Pa	G/Pa	干密度/(kg/m ³)	内摩擦角/(°)
松砂	Finn	3×10 ⁷	1×10 ⁷	1500	35
粘土	Finn	3.33×10 ⁶	2.5×10 ⁶	1400	24

表 2 动力分析采用的流体参数及液化参数

Table 2 Fluid parameters and liquid parameters used in dynamic analysis

材料	流体模型	渗透系数/(m ² /Pa/s)	孔隙率	局部阻尼系数	液化模型
松砂	fl_iso	1×10 ⁻⁸	0.5	0.314	Finn
粘土	fl_iso	1.02×10 ⁻¹²	0.45	0.314	Finn

试验检测记录点分 5 列, 每列 6 个点, 坐标(x, y, z), 如图 2: 水平位置 x 分别为: 0、1.25m、1.75m、2.75m、8.0m; y 为 0; z 分别为: -4.5m、-7.2m、-9.5m、-11.5m、-13.5m、-14.5m。检测点记录加速度、超静水压力、超孔压比、剪应力等参数历程。

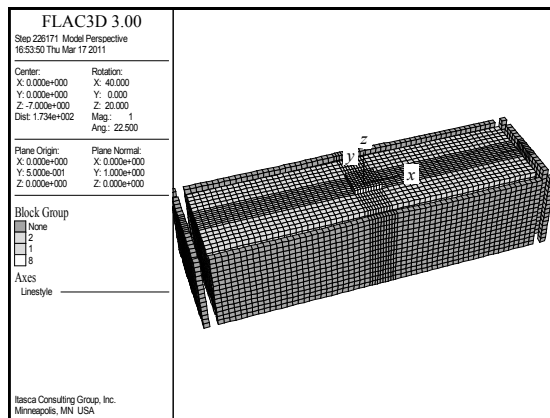


图 2 场地三维计算单元模型

Fig.2 The three-dimensional calculation unit model of field

图 2 为场地三维计算单元模型, 中间为桩承台及下部四桩, 以 4m 净间距 4 个单桩构成一个群桩工况为代表, 2m 间距工况、1m 间距工况类似, 1m 间距八桩工况为 x 轴向四对桩。场地四周设为无限自由边界。

图 3 为桩间净间距 4m 工况一个群桩基础平面布置图, 2m 工况、1m 工况类似, 1m 八桩工况为 x 轴向四对桩。坐标位于场地中心, 主要检测点设在 z 轴上。

图 4 为桩间净间距 4m 工况桩基础布置剖面图。中间数字为桩基础内部场检测点代号, 一侧的数字为桩基础外部场检测点代号。

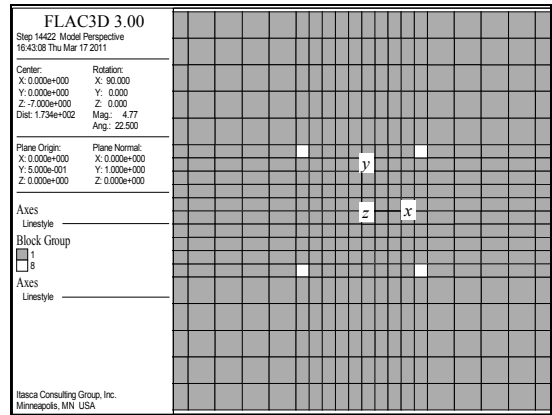


图 3 桩基础平面布置图

Fig.3 The pile foundation floor plan

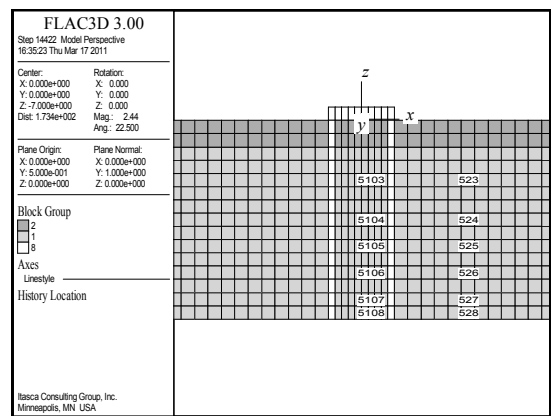


图 4 4m 间距桩基础竖向剖面图

Fig.4 The vertical plane map of pile foundation with 4m distance

图 5 为桩间净间距 2m 工况桩基础布置剖面图。

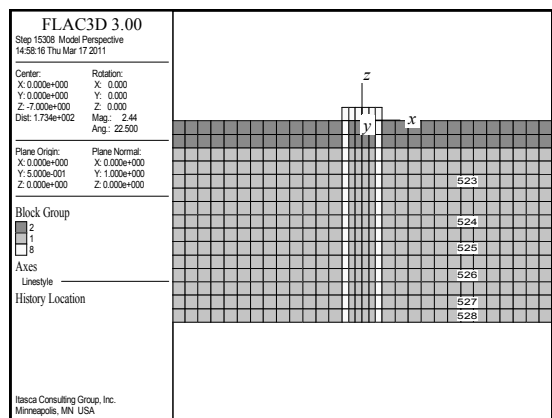


图 5 2m 间距桩基础布置剖面图

Fig.5 The vertical plane map of pile foundation with 2m distance

图 6 为桩间净间距 1m 工况桩基础布置剖面图。

3 典型自由场液化分布特征

自由场液化试验条件与桩基础非自由场相同, 典型自由场液化试验主要揭示场地超静水压力及

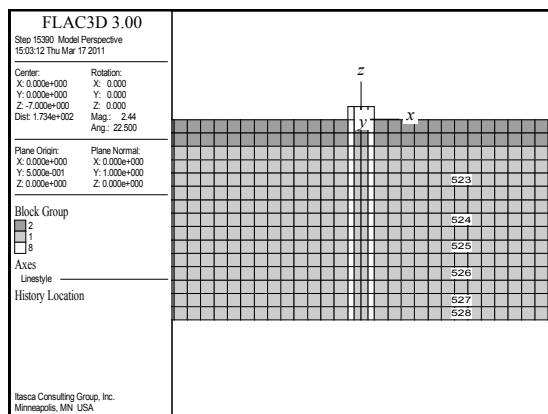


图 6 1m 间距桩基础布置剖面图

Fig.6 The vertical plane map of pile foundation with 1m distance

液化度分布状况。

图 7 为自由液化场动力结束时孔隙水压力云图, 云图显示自由场 x 轴水平向孔隙水压基本上均匀分布。

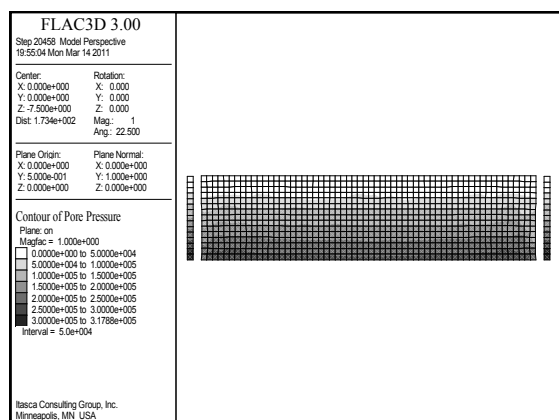


图 7 自由场孔隙水压云图

Fig.7 The contour of pore pressure in free-field

图 8 中三条线为场地砂土层中线上从上到下 3 个检测点的超静孔压比时间历程记录 ppr04、ppr06、ppr08。随着动水压力逐渐增大, 3 个点的 ppr 值逐渐升高, 趋于液化。砂土层 3 个点的超孔压比较

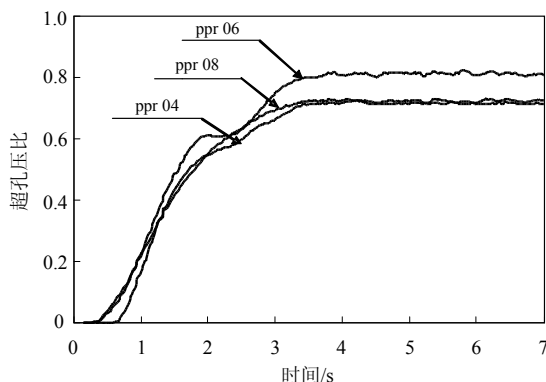


图 8 自由场松砂液化试验超静孔压比历程

Fig.8 The ppr history of liquefaction tests for free field

接近。

试验显示, 自由边界自由场中同一水平面上的水压力值基本相同, 超静水压力也相同, 孔压比值也基本相同, 体积压应变增量, 有效应力等参数值也都一样。也就是说: 1) 自由液化场水平向是同性的; 2) 自由液化场竖向不同性, 本试验中间液化度略高, 顶层及底层比中间层略低。

4 桩基复合场液化特征数值试验结果

4.1 桩基复合场孔隙水压分布

自由场中设置桩基础, 则场地的动力特性发生变化, 场地的液化特性也发生变化。桩基础的基本作用是减震, 对于液化场来说就是减小土剪应变, 降低超静水压力。桩基础复合场的液化特征观察其液化场的动水压力云图就能说明一些问题。下面给出四种工况中一种工况(1m 间距八桩基础非自由场)在动力结束时的动水压力云图, 以此说明问题。

图 9 为 1m 间距八桩场地动力结束时 z 坐标间于 $-9m \sim -12m$ 切片孔隙水压力云图, 由图 9 看出桩间场地形成低压区, 群桩外四角远处形成高孔隙水压力区。

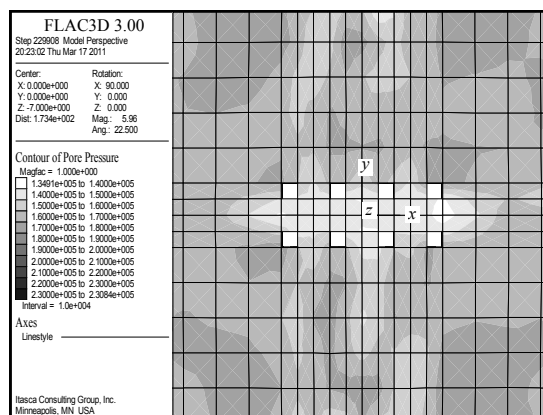


图 9 1m 间距八桩场水压平面云图

Fig.9 The level contour of pore pressure in non free field with eight pile distribution on 1m distance

图 10 为桩间距 1m 八桩场地动力结束时 y 坐标间于 $0m \sim 6m$ 切片孔隙水压力竖向云图, 由图 10 看出桩间场地下部动水压较外侧低, 桩间场地上部动水压与外侧水压差别不大。说明群桩基础减震降水压作用对桩基础下部有效, 对桩基础上部土体无效。

观察孔隙水压力场的变化历程, 开始, 水平平均布压力从结构边上开始发生变化, 紧贴结构处水压力相对外侧逐渐减小, 结构稍外侧压力逐渐增大,

水压云图隆起。场地最大空隙水压力不断积累增大，到动力结束时，形成 2 个对称的半液化场。与自由液化场相比，桩基础近处孔隙水压明显降低；离开桩数米孔隙水压明显升高，60m 场地左右两侧孔隙水压与自由场相近，非自由场水压发生转移重分布，非自由场液化参数水平向不再同性了。由水压云图看出近群桩下部区域形成低孔隙水压区^[7]，群桩下部区域外侧形成高空隙水压区，最大水压中心在离开群桩一段距离的场地底部形成，压力中心并不紧贴桩。

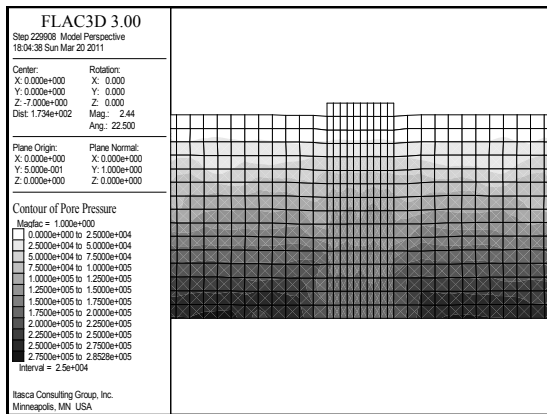


图 10 1m 间距 8 桩场水压竖向云图

Fig.10 The vertical contour of pore pressure in non free field with eight pile distribution on 1m distance

观察动力结束时液化场水压云图，考察云图中最大孔隙水压值及其位置，看出，复合土刚度越大场地最大孔隙水压值越大，桩基础附近水压降低区范围越宽，压力中心离结构越远，复合土刚度越小场地最大孔隙水压值越小，结构附近水压降低区范围越窄，压力中心离结构越近。

统计各工况非自由液化场单桩附近低压区域的范围，知单桩影响液化场的影响半径范围为桩直径尺度的 2 倍以内。如 0.5m 直径桩低压区域水平向半径约为 $2 \times 0.5m = 1m$ 。群桩效应是单桩效应的整合，桩间距是单桩影响半径的两倍则就整合利用了单桩效应，桩间距大于单桩影响半径的两倍则就不能全部整合抗液化场地。

4.2 桩基间场地液化分布主要参数统计对比

表 3 为桩间非自由场各工况中心竖轴上从上到下 6 个点液化度历程最大值， $\Sigma/6$ 为 6 个点平均液化度，检测点水平位置 $x = 0m$ 。

从表 3 中数据看出，桩间距设置对桩间场的液化度有影响，桩间距小于 2m 的三种工况平均超孔压比均比自由场低，说明适当的桩间距可降低场地

表 3 桩间场各工况液化度对照表

Table 3 The largest ppr of the field between pile

液化度	八桩 1m 间距	1m 间距	2m 间距	4m 间距	自由场
ppr03	0.962	1.008	0.790	1.085	0.517
ppr04	0.799	0.926	0.503	0.770	0.745
ppr05	0.666	0.817	0.513	0.914	0.730
ppr06	0.537	0.695	0.892	0.551	0.843
ppr07	0.327	0.410	0.535	0.903	0.816
ppr08	0.146	0.203	0.346	1.004	0.752
$\Sigma/6$	0.573	0.677	0.597	0.871	0.734

液化程度，在小桩间距下，场地下层液化度显著降低，即群桩对场地底部土体约束较大。4m 间距工况平均液化度比自由场略高，可能是由于桩基础本身给土体传递能量所致，也说明桩基础间距超过一定尺度就不能起到抗液化作用。适中桩间距场地液化度显著降低。桩间距太大，桩间场地液化度降低不大，接近自由场。桩间距 1m 八桩场比四桩场液化度降低，可见加大群桩整体刚度液化度有所降低。桩间距较小液化度较低，但不是桩间距越小液化度就越低。群桩基础的减震作用在液化场中的反应就是超静孔压比降低。

图 11 为 4 种工况下同一点超静孔压比历程图，4 种工况为自由场、4m 桩间场、2m 桩间场、八桩 1m 桩间场，检测点位置在场地中轴线下部，检测点坐标(x, y, z)为(0m, 0m, -13.5m)。

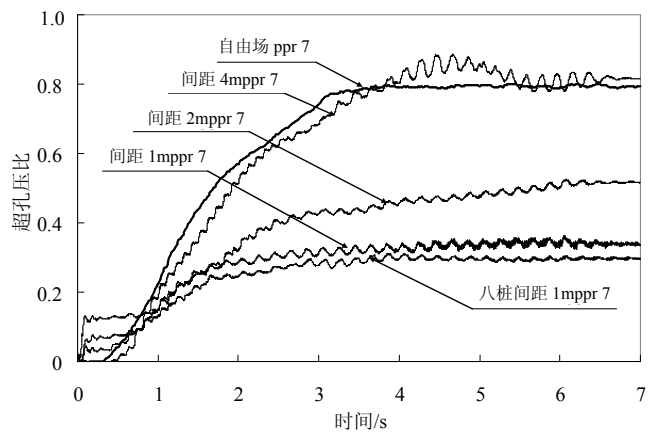


图 11 不同桩间距工况液化度历程对比图

Fig.11 The ppr history contrast chart at different working conditions

由超孔压比历程对比图知，4m 桩间场超孔压比与自由场接近，可见，桩间距较大时桩对场地的约束减小，等同于没有约束。最大超静孔压比依次减小，4m 桩间场最大，2m 桩间场次之，1m 桩间场较小，八桩 1m 桩间场最小，八桩 1m 桩间场该点最大超孔压比只有 0.33，远没有液化。

表 4 为五种工况下桩间场中轴从上到下 6 个检

测点超静孔隙水压力历程最大值对照表, 数据显示, 桩间距缩小桩间场超静水压力减小, 4m 桩间场超静水压力接近自由场, 比自由场略大。1m 间距八桩场超静水压比 1m 间距四桩场小, 缩小桩间距比外围增加桩数量降低超静水压力更有效。

在桩净间距 2m 条件下, 另作 1m 桩径四桩场地液化试验, 结果显示, 相对于 0.5m 桩工况, 桩间场平均超静孔压比降低, 平均超静水压降低。可见桩刚度越大对近场的抗液化效应也越大。

表 4 桩间场各工况超静水压分布对照表

Table 4 The excess pore pressure of the field between pile

超静水压	八桩 1m 间距	1m 间距	2m 间距	4m 间距	自由场
cjpp03($\times 10^4$ Pa)	5.793	5.980	5.451	5.825	4.422
cjpp04($\times 10^4$ Pa)	7.402	7.931	6.451	8.338	7.495
cjpp05($\times 10^4$ Pa)	7.537	8.815	7.432	10.03	8.640
cjpp06($\times 10^4$ Pa)	8.151	9.103	9.997	8.492	10.70
cjpp07($\times 10^4$ Pa)	7.243	7.061	10.19	13.39	12.38
cjpp08($\times 10^4$ Pa)	6.611	5.732	8.663	15.04	13.01
$\Sigma/6(\times 10^4$ Pa)	7.122	7.437	8.031	10.18	9.441

表 5 为桩间非自由场各工况中心竖轴线上从上到下 5 个点剪应力历程最大值, $\Sigma/5$ 为 5 个点的平均剪应力。数据显示, 2m 间距场地剪应力最小, 自由场平均剪应力最大, 4m 间距场接近自由场。可见适当间距的桩基能降低场地的剪应力, 从而降低场地的液化度。但不是桩间距越小桩间土剪应力越低。桩数量越多整体刚度越大, 反射传递地震波的能力越大, 此时桩间土剪应力不是最小。桩基础的减震作用通过桩间场土剪应力减小现象得到验证。

表 5 桩间场最大剪应力分布对照表

Table 5 The largest shear stress of the field between pile

剪应力	八桩 1m 间距	1m 间距	2m 间距	4m 间距	自由场
$\tau_{zc}84(\times 10^3$ Pa)	3.27	2.69	2.76	4.14	6.76
$\tau_{zc}86(\times 10^3$ Pa)	4.75	2.82	2.69	5.08	6.37
$\tau_{zc}88(\times 10^3$ Pa)	7.49	4.25	3.78	7.09	7.35
$\tau_{zc}810(\times 10^3$ Pa)	6.44	7.96	5.65	7.95	7.64
$\tau_{zc}812(\times 10^3$ Pa)	8.72	9.38	7.45	8.11	8.09
$\Sigma/5(\times 10^3$ Pa)	6.13	5.42	4.47	6.47	7.24

群桩近处液化场受桩刚度及桩间距影响较大, 桩间场下部相对于群桩外部形成低压区, 桩上部相对于下部液化度较高。桩阻碍了附近土体体积应变积累, 阻碍了动水压力升高, 抑制近处土液化; 桩又强化了群桩外部远处土液化, 可谓“抑此扬彼”。

4.3 桩间场内外液化分布对比

群桩的减震效应是针对桩间内部场来说的, 对于群桩基础外部场来说, 桩基反而起了加震作用。

以 1m 间距工况为例考察桩间内场、外场液化度分布状况便能说明问题。

图 12 为 1m 间距工况桩间场中轴($x=0m$)上 5 个点液化度时间历程。从动力结束时的动水压力云图清楚地看出, 群桩间液化场呈现低水压状态, 桩间区域以外出现高压区。桩间低压区的液化度明显降低, 下部 3 个点液化度很小, 5 个点的平均液化度为 0.61, 低于自由场平均液化度。桩间场受桩体影响地震波传递很快, 桩间场超空压比开始时刻突增, 比自由场增加快的多。

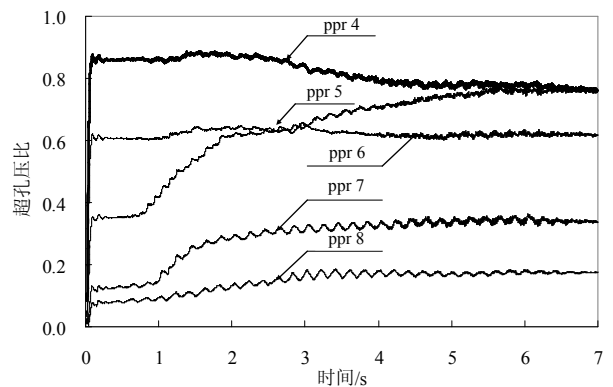


图 12 1m 距工况桩间内部场液化度历程图

Fig.12 The ppr history of internal field at 1m work conditions

图 13 为 1m 间距工况桩间区域以外远处($x=8m$)竖线上 4 个点液化度时间历程。统计竖线上 5 个点的最大平均液化度为 0.891。桩间区域以外高压区超孔压比高于自由场超孔压比, 高压区从上到下超孔压比值接近, 底部最低值也达到 0.819, 可见高压区域场地从上到下均液化。

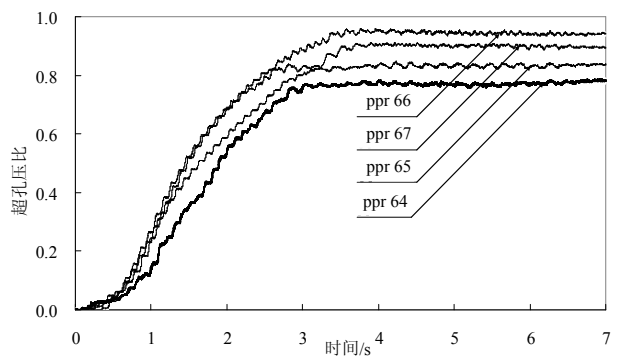


图 13 1m 距工况桩间外部场液化度历程图

Fig.13 The ppr history of external field at 1m work conditions

4.4 振动台试验结果佐证

为了验证数值模拟结果是否正确, 选择水泥桩复合地基抗液化震动台试验结果相对照。振动台试验结果取自文献[9]。牛琪瑛教授试验模型箱采用有

机玻璃制作, 箱长 250mm、宽 200mm、高 400mm。水泥桩先预制后与砂土一起置入模型箱, 布置采用正方形, 桩长 300mm, 桩径 $D=25\text{mm}$, 桩间距取 $2.5D$ 。

振动台加固地基模型试验显示, 加固后地基中部埋深处超静孔隙水压力最大峰值约为 3.56kPa 。而未加固模型地基相应测点处的超静孔隙水压力最大峰值约为 5.61kPa 。加固后的模型地基的超静孔隙水压力的最大峰值明显小于未加固模型地基的峰值, 降低了 36%。

振动台模型较深处和深处土层的孔压比也小于未加固模型地基相应处的孔压比。加固后的模型地基的超静孔压比最大峰值 0.825, 而未加固模型地基超静孔压比最大峰值 1.2, 超孔压比降低约 31%。

本文数值试验最小桩间距为 $3D$ 比振动台试验桩间距略大, 数值试验四桩场内下中部超静水压力 ($cjpp06$) 比自由场降低 24%。四桩场内下中部超静孔压比 ($ppr06$) 比自由场降低约 36%。

本文数值模型试验结果与牛琪瑛教授振动台试验结果相近。两种试验都表明群桩复合地基有抑制超静孔隙水压力上升的能力, 具有一定的抗液化性能。

群桩非自由场液化分布相对于自由场来说, 发生了重分布, 群桩内形成低孔隙水压区域, 底部超孔压比显著降低, 群桩以外形成高压区域, 高压区域超孔压比比低压区高的多, 高压区域超孔压比也比自由场高。可见桩基础的出现改变了自由场液化度水平向均匀分布的状态, 桩基非自由场液化分布特征是“抑近扬远”^[8], 即桩基础抑制近处土液化, 桩基础又强化了远处土液化。

群桩的抗液化效果较单桩更好, 群桩整合了单桩抑制液化的范围, 把单桩的抑制范围联成一体, 群桩抗液化的基本原理与单桩一样, 都是由于在饱和砂土中插入不同介质, 破坏了原有自由液化场, 阻碍了介质周围饱和砂土的自由体积压应变积累, 也就是阻碍了介质周围砂土的液化。

5 结论

本文一系列试验结果揭示了群桩对液化场影响的一些基本特征。

(1) 自由边界自由液化场中同一水平面上的体积压应变增量、超静水压力、孔压比、有效应力基

本相同, 自由液化场水平向是同性的。

(2) 群桩对液化场的影响可谓“抑近扬远”, 群桩场内液化度比自由场大约低 20%, 群桩的抗液化效应很有限。群桩阻碍了附近土体积压应变自由积累, 阻碍了附近孔隙水压力升高, 抑制了近处土液化, 桩又强化了远处土液化^[8]。桩刚度越大抑制范围越大, 刚度越小抑制范围越小。

(3) 群桩近处液化场形成低压区, 桩数米外远处液化场形成高压区。近处低压区液化度小、液化度上升速度快、水压振幅大, 远处高压区液化度大、液化度上升速度慢、水压振幅小。

(4) 群桩近处低压区域液化度层次紊乱, 不再是从上到下逐层减小, 桩腰部液化度大于上部位、下部位。这是受桩振动振型影响的结果, 桩腰部位移振幅较大, 动水压振幅也较大。大间距群桩场水压分布较扁平, 接近自由场。

(5) 桩净间距在 3 倍桩直径左右, 抑制桩间土液化的作用最大, 相对于自由液化场来说, 桩体改变了动荷载条件下地基中的应力-应变条件, 提高了地基土体的抗剪强度^[9]。群桩抑制桩下部土层液化的作用显著。本试验群桩对于上层土液化没有抑制作用, 可能与桩基础直接传递基岩地震荷载在顶部产生鞭梢效应有关。

(6) 群桩对深部土层的减震作用显著, 混凝土桩基础本身没有排水功能, 混凝土桩基础是通过减震途径降低水压起到一定的抗液化效果, 碎石桩复合地基则兼备了减震与排水两个功能^[10], 抗液化效果更好。

研究结果为进一步研究液化场地下结构的动力特性打下了试验基础。

参考文献:

- [1] 张明. 碎石桩复合地基抗液化性能数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
Zhang Ming. Numerical simulation of anti-liquefaction characteristics of gravel pile composite foundation [J]. Taiyuan: Taiyuan University Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] 黄春霞. 碎石桩复合地基抗液化性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
Huang Chunxia. The study of anti-liquefaction characteristics of gravel pile composite foundation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005. (in Chinese)

(参考文献[3]—[10]转第 190 页)

- load response of bridge column-foundation-soil systems in freezing conditions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(11): 1745—1754.
- [6] 吴志坚, 王平, 霍元坤, 等. 多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型振动试验研究[J]. *西北地震学报*, 2009, 31(4): 319—326.
Wu Zhijian, Wang Ping, Huo Yuankun, et al. Study on shaking table test for seismic response of pile foundation of bridges at the permafrost regions [J]. *Northwest Seismological Journal*, 2009, 31(4): 319—326. (in Chinese)
- [7] Feng Xiong, Yang Zhaohui. Effects of seasonally frozen soil on the seismic behavior of bridges [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(1): 44—53.
- [8] 陈兴冲, 高峰, 吴少海. 冻土层对桥梁地震反应的影响[J]. *工程力学*, 2007, 24(3): 120—125.
Chen Xingchong, Gao Feng, Wu Shaohai. Effect of frozen soil layer on seismic response of bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(3): 120—125. (in Chinese)
- [9] 陆鸣, 李小军. 青藏铁路四座主要桥梁工程场地地震安全性评价报告[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程地震研究中心, 2001.
- Lu Ming, Li Xiaojun. Report of seismic security estimation on engineering site of four bridges in Qinghai-Tibet Railway [R]. Harbin: Research Center of Seismic Engineering, China Earthquake Administration. 2001. (in Chinese)
- [10] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. *力学学报*, 2006, 38(1): 49—56.
Du Xiuli, Zhao Mi, Wang Jinting. A stress artificial boundary in FEA for near-field wave problem [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1): 49—56. (in Chinese)
- [11] Lysmer J, Udaka T, Tsai C F. FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure systems [R]. Report No. EERC75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
- [12] Baltay P, Gjelsvik A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1990, 2(1): 46—49.
- [13] Kim S H, Mha H S, Lee S W. Effects of bearing damage upon seismic behaviors of a multi-span girder bridge [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(7): 1071—1080.

(上接第 182 页)

- [3] 陈育民, 徐鼎平. *FLAC/FLAC3D 基础与工程实例*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 313—333.
Chen Yumin, Xu Dingping. *FLAC/FLAC3D foundation and project example* [M]. Beijing: China Hydraulic Press, 2009: 313—333. (in Chinese)
- [4] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北. 可液化地层中地铁隧道地震响应数值模拟及其试验验证[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1815—1822.
Liu Guanglei, Song Erxiang, Liu Huabei. Numerical modeling of subway tunnels in liquefiable soil under earthquakes and verification by centrifuge tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1815—1822. (in Chinese)
- [5] Martin R Geoffrey, W D Liam Finn, H Bolton Seed. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, May 1975: 423—438.
- [6] Byrne M Peter. A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand [C]. *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. March 11-15, 1991, St. Louis, Missouri, Paper No. 1.24, 47—55.
- [7] 张艳美, 张鸿儒. 碎石桩设计参数对复合地基抗液化性能的影响[J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 1320—1325.
Zhang Yanmei, Zhang Hongru. Influence of stone columns design parameters on anti-liquefaction nature of composite foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 1320—1325. (in Chinese)
- [8] 陈国兴. *岩土地震工程学*[C]. 北京: 科学出版社, 2007: 296—324.
Chen Guoxing. *Geotechnical earthquake engineering* [C]. Beijing: Science Press, 2007: 296—324. (in Chinese)
- [9] 牛琪璞, 徐增杰. 水泥土桩复合地基的抗液化研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(增刊 I): 67—71.
Niu Qiyong, Xu Zengjie. Research on liquefaction resistance of composite subgrade for soil-cement columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(Suppl I): 67—71. (in Chinese)
- [10] 李立军, 牛琪璞, 梁仁旺, 杨庆陶. 碎石排水桩抗地震液化的试验研究与理论分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(增刊 II): 226—230.
Li Lijun, Niu Qiyong, Liang Renwang, Yang Qingtao. Experimental study and theoretical analysis on drainage gravel pile resistance of earthquake liquefaction [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 26(Suppl II): 226—230. (in Chinese)