

DOI: 10.11779/CJGE201704008

# 抗液化排水刚性桩沉桩过程中的孔压响应

王翔鹰<sup>1, 2</sup>, 刘汉龙<sup>1, 2, 3</sup>, 江 强<sup>1, 2, 4</sup>, 陈育民<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;  
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 江阴市人民政府重点工程建设办公室, 江苏 江阴 214400)

**摘要:** 抗液化排水刚性桩是一种将刚性桩与竖向排水体相结合的新桩型, 可用于提升饱和土地基在地震作用下的抗液化能力。基于某建筑桩基工程, 首次开展了抗液化排水刚性桩和不含排水体的普通刚性桩的沉桩对比现场试验, 分析了沉桩过程中桩周土体超孔隙水压力的增长及消散规律。试验结果表明: 沉桩过程中, 抗液化排水刚性桩对桩周超孔压的消散作用对于可液化土层所在的桩侧深部埋深处最明显(试验测点距桩心2倍桩径、埋深-15 m), 该处排水桩的超孔压峰值为普通桩的1/4到1/2, 排水桩消散70%峰值超孔压所需时间仅为普通桩的1/3; 在深部埋深(-15 m), 排水桩的最大影响半径为2~4倍桩径, 在上中部埋深(-5 m、-10 m), 排水桩的最大影响半径为4~8倍桩径; 在影响范围内, 同位置排水桩对深部可液化土层超孔压的消散作用要大于上中部埋深土层。现场试验数据为抗液化排水刚性桩的桩间距选择提供了有力的设计参考依据。

**关键词:** 抗液化; 排水刚性桩; 超孔压; 现场试验

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)04-0645-07

作者简介: 王翔鹰(1988-), 男, 安徽庐江人, 博士研究生, 从事抗液化排水刚性桩相关研究。E-mail: wxy5407@163.com。

## Field tests on response of excess pore water pressures of liquefaction resistant rigid-drainage pile

WANG Xiang-ying<sup>1, 2</sup>, LIU Han-long<sup>1, 2, 3</sup>, JIANG Qiang<sup>1, 2, 4</sup>, CHEN Yu-min<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing  
University, Chongqing 400045, China; 4. Jiangyin Construction Project Management Office, Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** The liquefaction resistant rigid-drainage pile is a new type of pile which can be used in geotechnical earthquake engineering. The pile combines the bearing capacity of rigid pile and the drain-ability of gravel pile. Based on the pile foundation engineering of Jiangyin No.1 High School's new campus, the pile-driving field tests on liquefaction resistant rigid-drainage pile are carried out for the first time. The excess pore water pressures around drainage piles and ordinary piles are recorded during field tests, depending on various data from different locations in depths and displacements. According to these test results, the maximum excess pore water pressure around the ordinary piles is larger than that around the drainage piles during the pile driving. When the pile driving is finished, the excess pore water pressures around the drainage piles dissipate faster than those around the ordinary piles. In the influence area, the excess pore water pressure dissipation of drainage piles at deep depths where a liquefiable soil layer is located is more obviously than that at shallow depths. The data of piles tests may provide other engineers with reliable evidences.

**Key words:** liquefaction resistance; rigid-drainage pile; excess pore water pressure; field test

## 0 引言

地震中饱和无粉性土的液化会对建筑物造成严重损害: 污水管道上浮、桩基础出现桩头倾斜甚至桩身被剪断、楼房因底部桩基被破坏而倾覆、液化中桥梁因桩基失效而出现倾斜甚至坍塌<sup>[1]</sup>。在对液化的处理与防治研究中, 桩基部分因其与建筑(结构)物安全

的紧密联系, 一直被众多工程、科研人员所重视, 例如: 研究特定荷载下桩响应<sup>[2]</sup>、特定场地上新的新工法<sup>[3]</sup>、特定结构在地震作用下的潜在危害<sup>[4]</sup>等。这其

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51379067); 重点国际合作研究项目(51420105013); 中央高校基本科研业务费项目(2015B17314)  
收稿日期: 2016-01-26

中, 碎石桩法<sup>[5-6]</sup>和挤密砂桩法<sup>[7-8]</sup>作为两种通用的土层抗液化处理桩法, 其性能受到了充分的肯定<sup>[9]</sup>。碎石桩和挤密砂桩能够有效消散桩周土体中因地震液化积累的超孔压, 但对于承载力要求较高的建(构)筑物, 往往无法提供足够的承载力。

Tanaka 等<sup>[10-11]</sup>针对既有路堤及其他地下结构, 在可液化土层中使用具有排水性能的特制钢制板桩进行围护处理。近年来, 科研工作者对特制板桩的抗液化性能陆续展开相关研究: 振动台试验<sup>[12-13]</sup>、离心机试验<sup>[14]</sup>、有限元数值模拟<sup>[15]</sup>等, 大部分研究结果表明: 特制板桩法能够阻止堤防底部土体因液化产生的侧向流动, 并减少围护板桩墙内地下结构的上浮位移, 降低结构因液化导致的沉降。但该方法所采用的板桩属于附加沉桩, 使用成本较高, 通常仅在针对既有建筑且其他液化处理方法施工受限时使用。

刘汉龙<sup>[16-17]</sup>发明的抗液化排水刚性桩, 通过在刚性桩桩侧设置凹槽, 根据凹槽的类型放置不同的工程材料以形成排水通道<sup>[18]</sup> (图 1), 使其既有类似碎石桩的排水效果, 又具有刚性桩的承载性能, 从而能消散地震作用下地基中产生的超孔隙水压力达到抗液化的效果; 陈育民等<sup>[18]</sup>通过振动台试验与三维数值模拟, 对比分析了动力作用下普通桩与抗液化排水刚性桩周围土体中的孔压响应分布, 总结了排水刚性桩的排水规律特性。

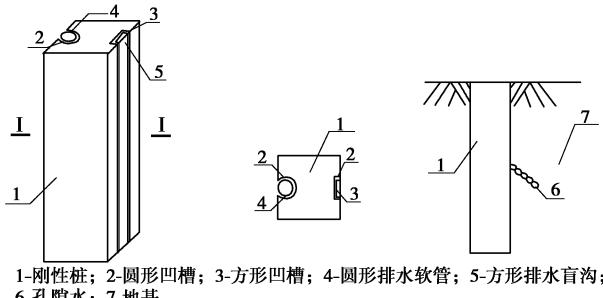


图 1 排水刚性桩技术示意图

Fig. 1 Sketch of rigid-drainage pile

本文结合江阴市第一初级中学新校区教学楼桩基

建设工程, 首次开展了抗液化排水刚性桩和不含排水体的普通刚性桩的沉桩对比现场试验: 分别在普通预制方桩(下文简称普通桩)和抗液化排水刚性桩(下文简称排水桩)周围埋设动态孔压计, 对沉桩过程中产生的超孔隙水压力进行现场试验检测, 监测并记录沉桩结束后超孔隙水压力的消散情况, 分析现场试验中普通预制方桩与抗液化排水刚性桩孔压响应的差异。

## 1 工程概况及桩型介绍

江阴市第一初级中学新校区位于江阴市徐霞客广场北侧, 场地地形较为平坦, 地貌上属于长江三角洲冲积平原, 地貌单一, 地势稍有起伏。根据现场勘探报告, 拟建场地在 50 m 深度范围内可划分为 9 个工程地质层, 其中 4, 7 层和 8 层各分出一个亚层。教学楼选用第⑦、⑦-1、⑧或⑧-1 层作为桩基持力层, 该部分土层分布较为均匀, 可视为均匀地基。其中, 第⑦、⑧层为粉质黏土, 而第⑦-1 层为饱和的粉砂夹粉土, 土层分布在 12.00~18.00 m 区间, 层厚 0.00~6.50 m, 该类土在中高强度地震发生时存在液化的可能(表 1)。图 2 为场地工程地质剖面图局部示例,  $p_s$  为比贯入阻力。

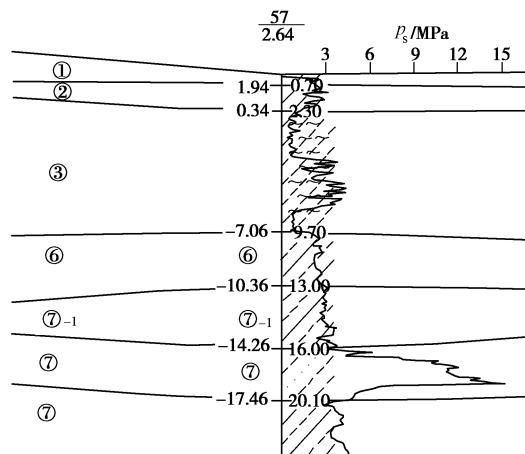


图 2 工程地质剖面图

Fig. 2 Geological profile

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

层号	土层名称	层厚 /m	天然含水率 /%	重度 /(kN·m <sup>-2</sup> )	孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(^)
1	素填土	0.40~2.80									
2	粉质黏土夹粉土	0.00~2.90	30.9	18.69	0.867	97	32.6	22.6	6.94	22.1	21.4
3	淤泥质粉土	0.70~21.80	35.6	17.90	1.015	95	32.6	23.8	6.71	18.4	24.0
4	淤泥质粉土	0.00~21.60	36.0	17.82	1.032	95	32.5	24.2	6.97	16.6	27.6
4-1	粉土	6.70~11.80	33.1	18.10	0.955	94	32.3	24.2	6.71	16.9	25.9
5	粉质黏土	0.00~19.30	32.7	18.15	0.946	93	34.5	22.1	4.92	22.6	13.1
6	粉质黏土	0.00~8.90	23.8	19.63	0.683	95	31.9	18.8	7.65	43.6	15.2
7	粉质黏土	0.00~8.80	22.9	19.98	0.646	96	35.0	20.5	10.96	79.4	18.3
7-1	粉砂夹粉土	0.00~6.50	26.5	18.99	0.764	93	30.7	22.0	9.27	2.6	28.8

试验现场使用的桩型为刘汉龙<sup>[16]</sup>所开发的抗液化排水刚性桩。排水刚性桩为钢筋混凝土预制桩, 在预制时, 通过模具在桩身侧面设置排水凹槽。排水凹槽内放置形状互相匹配的塑料排水盲沟, 塑料盲沟预先用无纺土工布通长包裹, 盲沟的大小、尺寸以不超过排水刚性桩桩身侧面为准。在实施过程中, 通过现场的打桩设备将抗液化排水刚性桩打入到地基的预定深度, 地震时产生的超静孔隙水可以通过排水凹槽中的塑料排水盲沟进行消散, 而盲沟周围包裹的土工布可以防止排水通道被泥沙阻塞, 从而保证排水通道畅通达到消除液化的目的。

如图3所示, 现场桩型截面为300 mm×300 mm的方形截面, 桩身侧面排水凹槽尺寸为120 mm×20 mm, 排水盲沟截面尺寸为100 mm×10 mm。盲沟置于排水凹槽后, 沿桩身通长用冲击钻钻钉锚固, 以防止沉桩过程中排水体因桩周土体摩擦力被挤出。

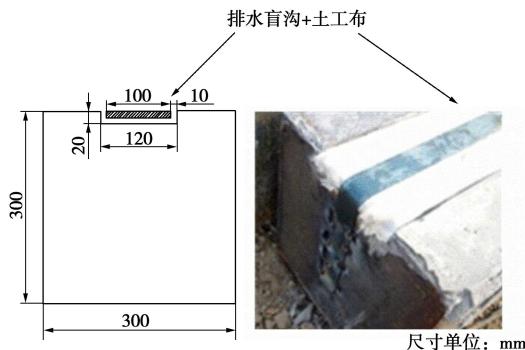


图3 排水桩横截面

Fig. 3 Cross section of rigid-drainage pile

## 2 现场条件及测点布置

教学楼桩基工程选用的桩型为预制方桩, 桩身设计总长22 m, 分为上下两截, 上节桩长10 m, 下节桩长12 m, 采用静压沉桩法施工。其中, 上节桩排水体通长布置, 下节桩在桩底部留有1 m长的桩靴, 确保沉桩时排水体能够随桩身沉入土中。工程拟建的3栋教学楼中, 北侧及中间的教学楼桩基使用普通桩, 南侧教学楼桩基使用排水刚性桩。根据现场的施工进度及工程场地情况, 选取三桩、四桩两种承台形式作为试验工况。

如图4(a)所示, 三桩承台试验仪器的埋设位置: ①垂直排水体所在面距离桩心0.6 m处钻孔, 分别在-5, -10, -12, -15 m埋深位置布设动态孔隙水压力计; ②垂直排水体所在面距离桩心1.2, 1.8, 2.4 m处分别钻孔, 分别在-5, -10, -15 m埋深位置布设动态孔隙水压力计。如图4(b)所示, 四桩承台试验仪器的埋设位置: 垂直排水体所在面距离桩心0.6, 1.2,

1.8, 3.0 m处分别钻孔, 分别在-5, -10, -15 m埋深位置布设动态孔隙水压力计。

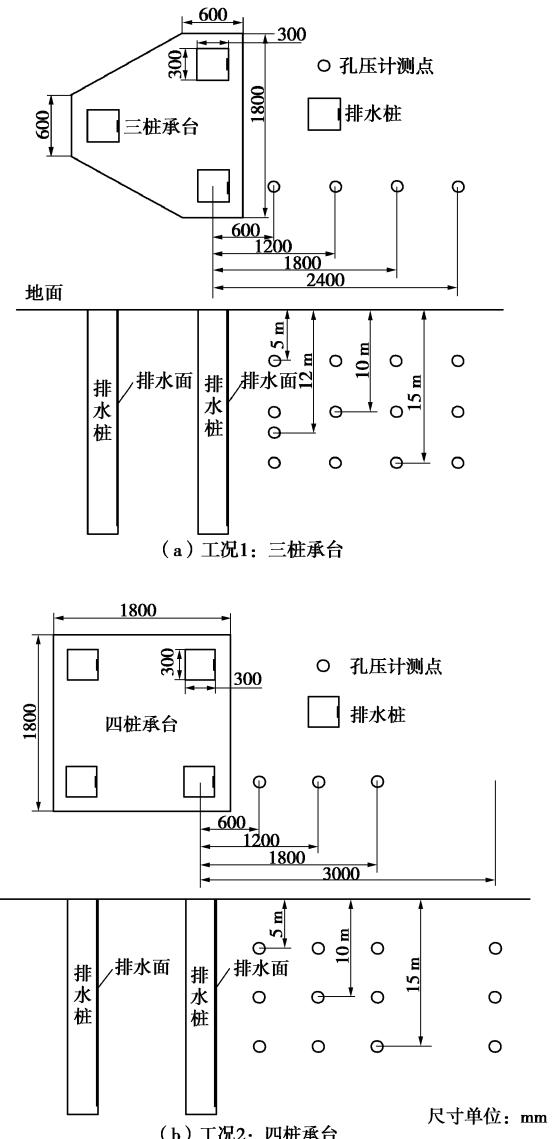


图4 现场试验仪器布置

Fig. 4 Arrangement of sensors

## 3 试验结果与分析

### 3.1 沉桩过程中桩侧超孔压时程分析

图5为0.6 m测点-15 m埋深处普通桩与排水桩单次沉桩过程的超孔压时程曲线。现场沉桩施工分为两步: 首先进行下节桩的沉桩作业, 进尺达到要求后, 进行上、下节桩的焊接施工; 焊接完毕后, 在接桩处补钉短条排水体, 确保排水通道上下畅通, 随后进行整桩的沉桩作业。(普通桩现场试验时, 因仪器所接线路意外断电造成约10 min的试验数据未予记录。)

第一阶段下节桩的最大沉桩进尺为12 m, 第二阶段整桩的最大沉桩进尺为10 m, 累积进尺为22 m。由图5可知, 测点处排水桩与普通桩在第一阶段中产

生的超孔压峰值要远小于第二阶段, 普通桩第一阶段的超孔压峰值为第二阶段超孔压峰值的 17.9%, 排水桩第一阶段的超孔压峰值为第二阶段超孔压峰值的 18.1%。

在整个沉桩过程中, 排水桩产生的超孔压幅值要小于普通桩。第一阶段, 测点处排水桩沉桩产生的超孔压峰值为普通桩超孔压峰值的 51.5%, 第二阶段, 测点处排水桩沉桩产生的超孔压峰值为普通桩超孔压峰值的 51%。图 5 中排水桩两阶段超孔压峰值的时间间隔要比普通桩略长, 是因为现场试验过程中, 该次排水桩接桩焊接的实际作业时间要略长于普通桩。

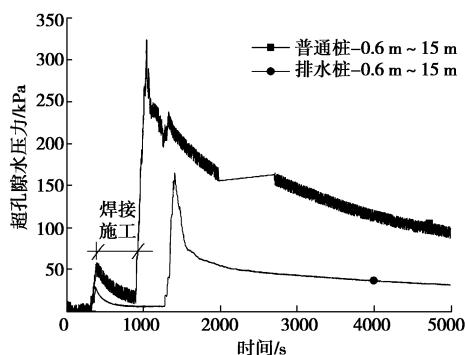


图 5 沉桩过程超孔压时程曲线

Fig. 5 History of excess pore pressure during pile-driving

从时程曲线可以看出, 在相同位置的测点处, 排水桩桩周积累的超孔压消散速度要快于普通桩。图 6 是沉桩过程中超孔压峰值消散情况的归一化曲线,  $u$  为实时超孔压与峰值超孔压之比。本试验工况中, 测点处峰值孔压消散 30% ( $u=0.7$ ), 50% ( $u=0.5$ ), 70% ( $u=0.3$ ) 的时间分别为: 排水桩 74, 132, 826 s, 普通桩 156, 880, 3474 s。数据表明, 相对于普通桩, 排水桩桩周由沉桩积累的超孔压在迅速消散。

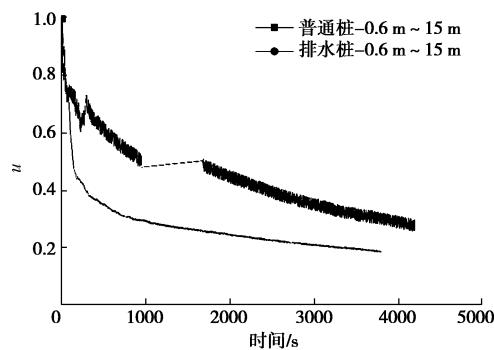


图 6 峰值孔压消散 (第二阶段)

Fig. 6 Dissipation curves of maximum excess pore pressure (2nd stage)

相同程度的峰值孔压消散, 排水桩与普通桩的消散时间之比分别为 0.47 (0~30%,  $u$ : 1~0.7), 0.08 (30%~50%,  $u$ : 0.7~0.5), 0.27 (50%~70%,  $u$ :

0.5~0.3)。在超孔压达到峰值后消散的起始阶段 (0~30%,  $u$ : 1~0.7), 相比普通桩, 排水桩对孔压消散的加速作用已较为明显, 排水桩的消散耗时为普通桩的 47%; 在超孔压消散的中间阶段 (30%~50%,  $u$ : 0.7~0.5), 排水桩对孔压消散的加速作用极为显著, 排水桩的消散耗时仅为普通桩的 8%; 在超孔压消散的后期阶段 (50%~70%,  $u$ : 0.5~0.3), 排水桩对超孔压的消散仍有较大的加速作用, 排水桩的消散耗时为普通桩的 27%。

图 7 为峰值孔压消散情况的半对数曲线。相较图 6, 图 7 更为直观地描述了排水桩对桩周近侧深部埋深处超孔隙水压力的消散作用: 与普通桩较为平稳的超孔压消散过程不同, 排水桩在 70 s 至 110~120 s 对峰值孔压存在显著的加速消散阶段; 该测点处, 排水桩在 1000 s 内消散了 70% 的峰值超孔压, 而普通桩消散同样幅度的峰值超孔压, 需要 3000~4000 s。

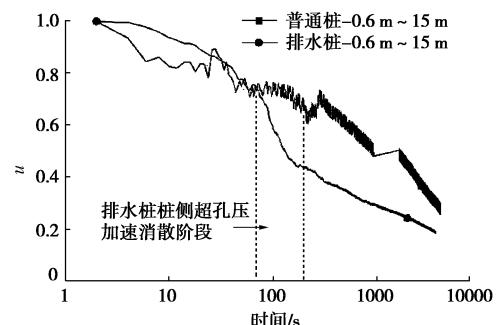


图 7 峰值孔压消散对数曲线 (第二阶段)

Fig. 7 Logarithmic dissipation curves of maximum excess pore pressure (2nd stage)

### 3.2 间距对深部超孔压时程的影响

图 8 为普通桩与排水桩桩周 15 m 埋深各测点在沉桩过程中的超孔压时程曲线, 因普通桩的原始试验数据毛刺较多, 对其使用均值函数进行光滑处理。对比普通桩与排水桩在各测点的超孔压时程曲线, 不难发现, 在距离桩心较远的 1.8 和 2.4 m 测点处, 普通桩与排水桩的时程曲线较为相似, 无较大差异; 在距离桩心较近的 0.6 m 测点处, 排水桩的时程曲线与普通桩存在显著差异, 从峰值上看, 排水桩仅为普通桩的二分之一, 从消散速度上看, 排水桩消散掉 70% 峰值超孔压所需的时间仅为普通桩的三分之一。对比排水桩各测点的时程曲线, 排水桩在 0.6 m 测点处峰值超孔压的消散要快于其他较远测点处。这说明, 抗液化排水刚性桩对可液化土层所在深部位置超孔压的消散作用, 主要体现在桩周近点处。

图 9 是沉桩过程中各测点超孔压峰值消散情况的归一化曲线 (半对数化处理)。由图 9 可以看出, 排水桩对峰值超孔压的加速消散作用在距离桩心 0.6 m 测

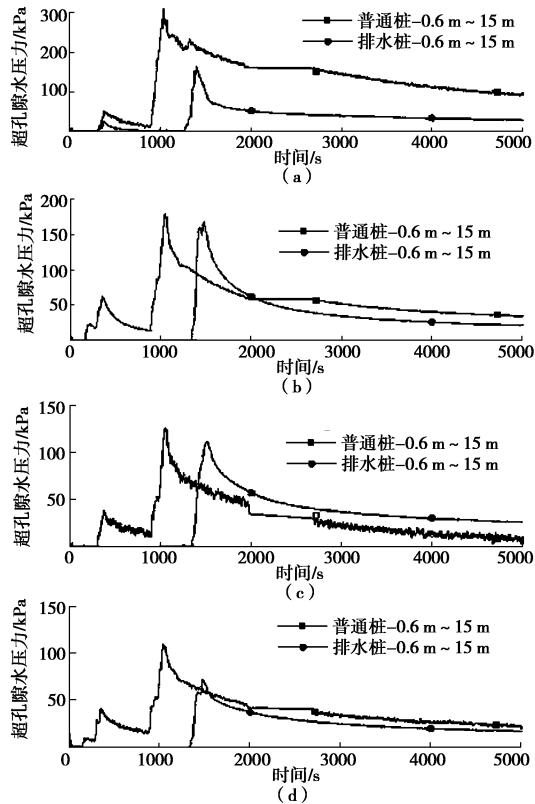


图 8 各测点超孔压时程曲线 (平滑)

Fig. 8 Curves of excess pore history at depth of -15 m (Smoothed)

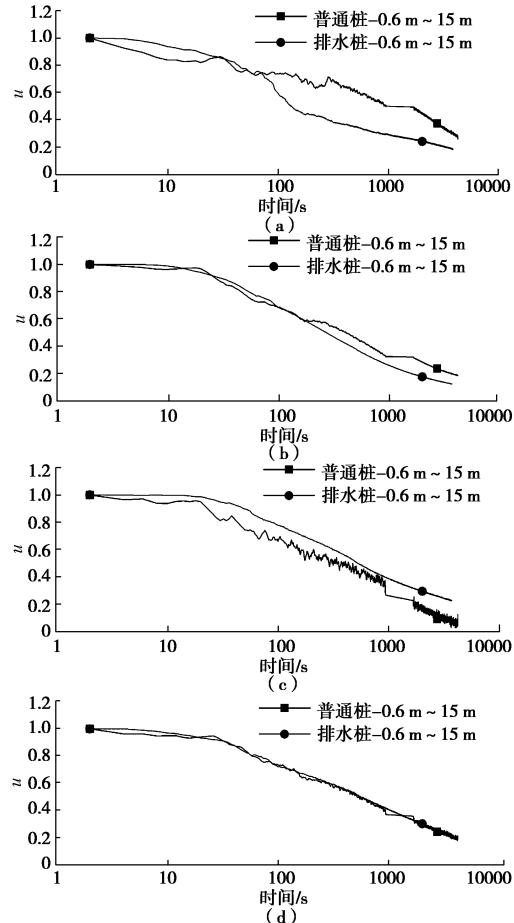


图 9 各测点峰值超孔压消散对数曲线 (第二阶段)

Fig. 9 Logarithmic dissipation curves of maximum excess pore pressure at depth of -15 m (2nd stage)

点处最为明显, 其在 70 至 120 s 存在显著的加速阶段, 在距离桩心 1.2 m 测点处仍有加速消散作用 (1000 s 内), 在距离桩心 1.8, 2.4 m 两测点处, 排水桩的峰值超孔压消散曲线已基本重合, 且与普通桩的消散曲线已无较大差异。

### 3.3 超孔压峰值沿深度分布规律

图 10 为三桩承台\四桩承台两组试验工况下, 普通桩与排水桩在单次沉桩过程中不同深度各测点处的超孔压峰值对比 (其中三桩承台试验工况中, 排水桩 1.2 m 测点处-5 m 埋深、普通桩 2.4 m 测点处-10 m 埋深两个位置的孔压计损坏)。下面的分析中, 三桩承台试验工况记为 1 号工况, 四桩承台试验工况记为 2 号工况。

图 10 中的数据表明, 在相同水平间距的测点处, 桩体在沉桩过程中产生的超孔压峰值随着深度的增加逐渐增大, 但排水桩桩与普通桩有所区别: 在各测点 -5, -10, -15 m 不同埋深位置, 排水桩桩周的超孔压峰值普遍小于普通桩, 1 号工况中各个位置排水桩与普通桩超孔压峰值之比的平均值为 56%, 2 号工况中各个位置排水桩与普通桩超孔压峰值之比的平均值为 88%。1 号工况中, 所有测点位置的排水桩峰值皆小于普通桩。2 号工况中, 在上中部位置排水桩与普通桩的超孔压峰值较为接近: 如-10 m 埋深 0.6 m 测点, 排水桩与普通桩超孔压峰值比 84%, -10 m 埋深 1.2 m 测点, 排水桩与普通桩超孔压峰值比 96%; 但在深部位置排水桩的超孔压峰值明显小于普通桩: -15 m 埋深 0.6 m 测点, 排水桩与普通桩超孔压峰值比 26%, -15 m 埋深 1.2 m 测点, 排水桩与普通桩超孔压峰值比 75%。两组工况的 0.6 m 测点处-15 m 埋深位置, 排水桩与普通桩的超孔压峰值之比最小: 1 号工况中排水桩峰值为普通桩峰值的 51%, 2 号工况中排水桩峰值为普通桩峰值的 26%。

上述结果表明, 对比普通桩, 排水桩对桩周距离较近 (0.6 m) 的深部土体 (-15 m) 中的超孔压消散现象最为显著, 即能有效阻止深部可液化土层中的超孔压积累, 从而达到土层抗液化的处理效果。

### 3.4 超孔压峰值沿离桩心距离的分布规律

图 11 为两组工况各自在单次沉桩过程中-5, -10, -15 m 埋深处普通桩与排水桩的超孔压峰值沿测点到桩心距离的分布图。(因受到场地限制, 1 号试验工况距离桩心最远端观测点布置距离为 2.4 m, 即 8 倍桩径, 2 号试验工况距离桩心最远端观测点布置距离为 3.0 m, 即 10 倍桩径。)

由图 11 可知, 单次沉桩过程中, 无论是排水桩还是普通桩, 在相同埋深位置, 桩周土体内产生的超孔压峰值随着测点到桩心距离的增大而减小, 以 1 号试

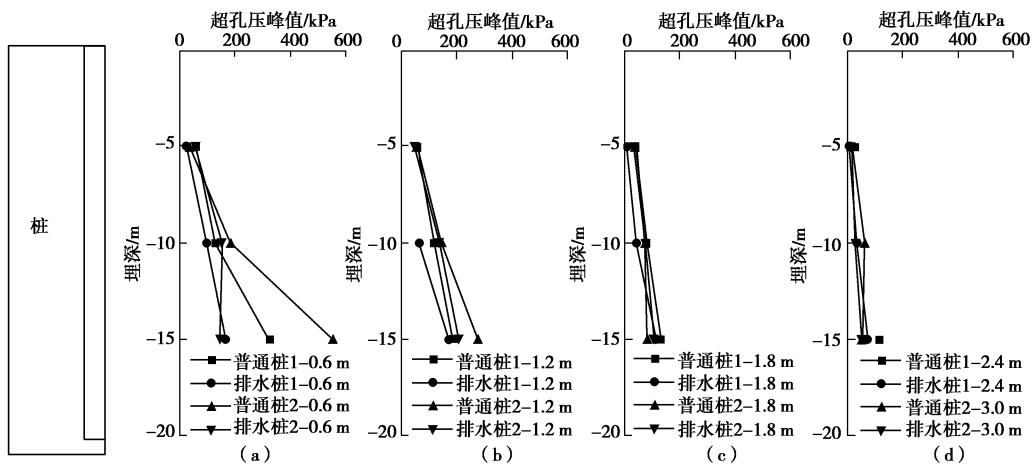


图 10 超孔压峰值竖向分布

Fig. 10 Comparison of peak excess pore pressures in vertical direction

验工况为例: 排水桩桩周-5 m 埋深, 8 倍桩径距离 (2.4 m) 处的超孔压峰值为 2 倍桩径距离 (0.6 m) 处的超孔压峰值的 17%; 普通桩桩周-5 m 埋深, 8 倍桩径距离 (2.4 m) 处的超孔压峰值为 2 倍桩径距离 (0.6 m) 处的超孔压峰值的 44%。

值比为 43%, 6 倍桩径距离 (1.8 m) 处排水桩与普通桩的超孔压峰值比为 52%; 而对于桩周-15 m 埋深, 2 倍桩径距离 (0.6 m) 处排水桩与普通桩的超孔压峰值比为 51%, 6 倍桩径距离 (1.8 m) 处排水桩与普通桩的超孔压峰值比为 86%。

上述结果表明: 对于-5 和-10 m 的埋深, 排水桩的影响半径可达 4 到 8 倍桩径, 对于-15 m 的埋深, 排水桩的影响半径可达 2 到 4 倍桩径。

## 4 结 论

本文介绍了抗液化排水刚性桩的工作机理, 基于一中新校区的桩基工程, 首次开展了抗液化排水刚性桩和不含排水体的普通刚性桩的沉桩对比现场试验, 分析了沉桩过程中桩周土体超孔隙水压力的增长及消散规律, 试验结果表明:

(1) 相比普通桩, 抗液化排水刚性桩由于桩身存在排水通道, 能够迅速消散桩周因沉桩作用产生的超孔隙水压力。排水桩对超孔压的消散主要体现在两个方面: 沉桩过程中排水桩桩周的超孔压峰值小于普通桩; 沉桩结束后排水桩桩周超孔压的消散速度大于普通桩。在现场试验中, 抗液化排水刚性桩对可液化土层所在的桩身近侧深部位置 (距桩心 2 倍桩径、-15 m 埋深) 的消散作用最明显, 单次成桩过程中排水桩积累的超孔压峰值仅为普通桩积累的超孔压峰值的四分之一到二分之一; 排水桩消散 70% 的超孔压峰值所需的时间仅为普通桩的三分之一。

(2) 排水桩对桩周超孔压的消散影响范围随着土体深度的增加而减小: 当土体深度在 10 m 以内, 排水桩的影响半径可达 4 到 8 倍桩径; 当土体深度达到 15 m 左右, 排水桩的影响半径可达 2 到 4 倍桩径。

(3) 在影响半径以内, 排水桩对超孔压的消散作用在可液化土层中最为显著。现场可液化土层所在深

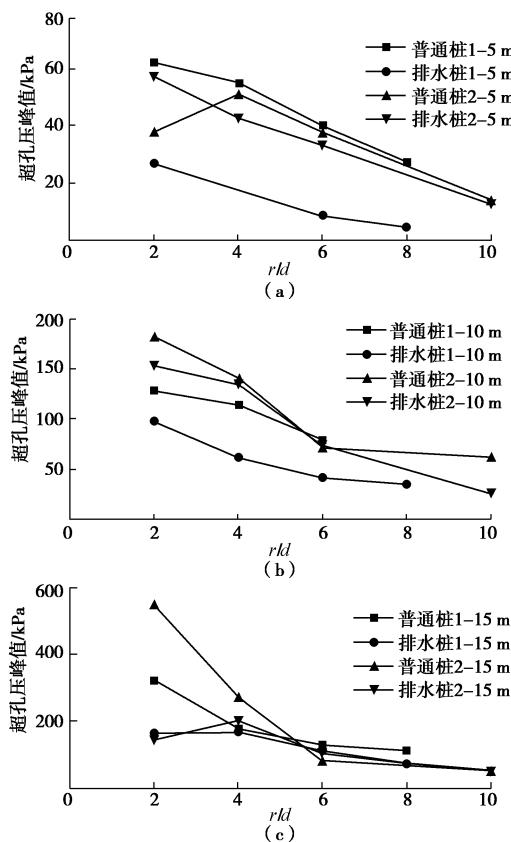


图 11 桩周超孔压峰值规律

Fig. 11 Comparison of peak excess pore pressures in horizontal direction

排水桩桩周的超孔压峰值普遍小于普通桩。同时, 排水桩对超孔压峰值的影响范围随着埋深的增加而减小, 同样以 1 号试验工况为例: 对于桩周-5 m 埋深, 2 倍桩径距离 (0.6 m) 处排水桩与普通桩的超孔压峰

部埋深(-15 m)排水桩与普通桩的超孔压峰值比要小于上中部埋深(-5, -10 m)排水桩与普通桩的超孔压峰值比。抗液化排水刚性桩能够有效消散桩周土体中因沉桩作用产生的超孔隙水压力, 相较中上部土层, 其对深部可液化土层超孔压的消散效果更为明显; 在相同深度, 距离排水桩桩身越近, 超孔压消散作用越强。

(4) 地震作用下的超孔压消散与沉桩过程中的超孔压消散情况在机理上是有所差异的, 抗液化排水刚性桩在地震荷载下对桩周土体中超孔压的消散作用待后续展开研究。

## 参考文献:

- [1] YASUDA S, HARADA K. Measures developed in Japan after the 1964 Niigata earthquake to counter the liquefaction of soil[C]//10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Anchorage, 2014.
- [2] ASHOUR M, NORRIS G. Lateral loaded pile response in liquefiable soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(6): 404 – 414.
- [3] CHEN Y, LIU H, CHEN Z. Working mechanism and numerical simulation of assembly coastal building techniques[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, **15**(S2): 180 – 185.
- [4] MOAYEDI H, HUAT B B K, MOKHBERI M, et al. Using stone column as a suitable liquefaction remediation in Persian Gulf coast[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 15P: 1757 – 1767.
- [5] PARK Y H, KIM S R, KIM S H, et al. Liquefaction of embankments on sandy soils and the optimum countermeasure against the liquefaction[C]// 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000(1): 1 – 5.
- [6] ADALIER K, ELGAMAL A. Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns[J]. Engineering Geology, 2004, **72**(3/4): 275 – 291.
- [7] TSUKAMOTO Y, ISHIHARA K, YAMAMOTO M, et al. Soil densification due to static sand pile installation for liquefaction remediation[J]. Soils and Foundations, 2000, **40**(2): 9 – 20.
- [8] KRISHNA a. M, MADHAV M R, LATHA G M. Liquefaction mitigation of ground treated with granular piles: densification effect[J]. ISET Journal of Earthquake, 2006, **43**(473): 105 – 120.
- [9] SADREKARIMI A, GHALANDARZADEH A. Evaluation of gravel drains and compacted sand piles in mitigating liquefaction[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2005, **9**(3): 91 – 104.
- [10] TANAKA H, KITA H, IIDA T, SAIMURA Y, TAKANO Y. Liquefaction countermeasure using steel sheet pile with drain capability[J]. The Sumitomo Search, 1996(58): 72 – 81.
- [11] TANAKA H, KITA H, IIDA T, et al. Countermeasure using steel sheet pile with drain capability[C]// Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, 1996.
- [12] OTSUSHI K, KATO T, HARA T, et al. Study on a liquefaction countermeasure for flume structure by sheet-pile with drain[J]. Ground Improvement Technologies and Case Histories, 2009: 437 – 443.
- [13] KITA H, IIDA T, NISHITANI M, et al. Experimental study on countermeasures for liquefaction by steel piles with drain[J]. Earthquake Engineering, Tenth World Conference, 1992: 1701 – 1706.
- [14] ADALIER K, PAMUK A, ZIMMIE T F. Earthquake retrofit of highway/railway embankments by sheet-pile walls[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, **22**(1): 73 – 88.
- [15] OTSUSHI K, KATO T, HARA T, et al. Analytical study on mitigation of liquefaction-related damage to flume channel using sheet-pile with drain[J]. GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design, 2010(GSP 199): 3062 – 3071.
- [16] 刘汉龙. 岩土工程技术创新方法与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 34 – 58. (LIU Han-long. Technological innovation methods and practices in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 34 – 58. (in Chinese))
- [17] 刘汉龙. 一种抗液化排水刚性桩: 中国, CN 2873886Y[P]. 中国: 2007: 0 – 5. (LIU Han-long. Liquefaction resistant rigid-drainage pile: China, CN 2873886Y[P]. China: 2007: 0 – 5. (in Chinese))
- [18] 陈育民, 刘汉龙, 赵楠. 抗液化刚性排水桩振动台试验的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(12): 114 – 119. (CHEN Yu-min, LIU Han-long, ZHAO Nan. Laboratory test on anti-liquefaction characteristics of rigidity-drain pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(12): 114 – 119. (in Chinese))