

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240227003

排水刚性桩抗液化特性数值计算分析*

杨耀辉¹, 辛公锋¹, 陈育民^{2,3}, 张小宁⁴, 李文闻⁵

(1. 山东高速集团有限公司创新研究院, 山东 济南 250014; 2. 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; 3. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 4. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 5. 常熟理工学院商学院, 江苏 常熟 215500)

摘要: 为分析排水刚性桩的抗液化作用效果, 开展了排水刚性桩的数值计算模拟, 基于振动台试验实测结果验证了计算模型的可靠性, 针对设置不同排水通道数量的排水桩桩周超孔压比、超孔隙水渗流特性等进行了计算分析。结果表明: ①试验实测值与数值模拟结果吻合较好, 证明了计算模型的可靠性和合理性; ②桩身1倍桩径处超孔压比峰值为0.7, 1.5倍桩径处为1.0, 排水刚性桩的有效作用范围在桩周1倍桩径左右; ③单侧排水通道排水桩影响范围为以桩心为圆心、1倍桩径为半径的近似半圆, 双侧和四侧排水通道排水桩影响范围为与单侧排水通道圆心和半径相同的整圆, 排水体附近渗流矢量均指向排水通道, 表明了排水通道发挥了有效的排水作用。

关键词: 排水刚性桩; 数值计算分析; 超孔压比; 抗液化特性

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1177-07

Numerical Analysis of Liquefaction Resistance Characteristics of Rigid-drainage Piles

YANG Yaohui¹, XIN Gongfeng¹, CHEN Yumin^{2,3}, ZHANG Xiaoning⁴, LI Wenwen⁵

(1. Shandong Hi-Speed Group Innovation Research Institute, Jinan 250014, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 5. Business School, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract: To analyze the anti-liquefaction effect of rigid-drainage piles and provide support for practical engineering applications, a numerical simulation analysis of rigid-drainage piles was performed. The reliability of the model was validated based on the measured values from model tests. The analysis focused on excess pore pressure ratio and pore water seepage characteristics around rigid-drainage piles with varying numbers of drainage channels. The results showed that: (1) The measured values closely matched the numerical simulation results, confirming the reliability and accuracy of the calculation model. (2) The peak value of the excess pore pressure ratio was 0.7 at a distance of one pile diameter from the pile, and 1.0 at a distance of 1.5 times the pile diameter, indicating that the effective range of the rigid-drainage pile was approximately one pile diameter. (3) The influence range of drainage piles with a single drainage channel formed an approximate semi-circle with the pile center as the

* 收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52108298)资助

作者简介: 杨耀辉(1990—), 男, 高级工程师, 博士。主要从事地基加固处理方面的研究。E-mail: yangyaohui1905@163.com

origin and a radius of one pile diameter. For piles with double-sided and four-sided drainage channels, the influence range formed a full circle with the same center and radius. Additionally, the seepage vectors near the drainage channels all pointed toward the drainage channels, indicating the channels' effective role in drainage.

Keywords: rigid-drainage pile; numerical analysis; excess pore pressure ratio; anti-liquefaction characteristics

0 引言

砂土液化是地震灾害的重要形式之一。历次地震灾害调查中,均发现地震液化灾害及对建筑结构造成的破坏。1964年日本新泻地震^[1]、1995年日本阪神地震^[2]、2008年中国汶川地震^[3]、2011年日本东北大地震^[4]中均发现了严重的液化灾害现象,导致建筑物倒塌、桥梁破坏、公路滑坡等一系列工程灾害。因此亟需寻求一种有效的抗液化处理措施。

抗液化排水刚性桩是一种综合刚性桩承载力高和柔性桩能排水双重优点的新型桩基础^[5-6]。通过在刚性桩基础桩侧增加排水通道使刚性桩具备排水性能,可在地震作用发生时,迅速排出地基土体内部产生的超孔隙水,保证桩周土体的有效应力,从而保证桩身承载力不降低或虽然降低但仍能满足工作要求。已有研究中针对排水刚性桩开展了系列室内模型试验^[7-9]和现场试验^[10-11]研究。陈育民等^[12]开展了抗液化排水刚性桩小型振动台试验的数值模拟研究,采用动力计算与渗流计算耦合的计算模式,采用局部阻尼和自由场边界,计算得到的结果与振动台试验结果吻合较好。吴海清等^[13]对新型套管排水桩的承载性能和排水抗液化性能开展了数值计算研究,计算结果表明,桩侧排水盲沟的设置对桩身承载力不会产生不利影响。套管排水桩的超孔压消散作用对深部土体更明显,建议套管排水桩的沉桩深度达到液化层的埋深。R.P. Orense等^[14]开展了碎石排水桩处理地下结构的抗液化作用效果的模型试验和数值计算研究,提出了碎石排水桩的有效作用范围。Y.Sasaki等^[15]开展了碎石排水桩的大型振动台模型试验和数值计算研究,结果表明采用碎石排水桩的工况在振动结束后孔压消散速度更快,采用有限元数值分析的计算结果与试验结果吻合较好。

上述研究中针对排水桩的现场应用和室内模型试验开展了系列研究,分析了排水桩在沉桩过程

中和振动加载可液化地基中的土压力和孔压响应,也开展了一定的数值计算分析,但并未明确排水刚性桩对孔压消散作用的有效影响范围。因此,本文以排水刚性桩为研究对象,基于振动台模型试验的实测结果^[8],开展了抗液化排水刚性桩的数值计算分析,分析了排水刚性桩的有效作用范围,探讨了排水通道设置数量对排水刚性桩孔压消散作用效果的影响。研究结果为排水刚性桩的设计应用提供了理论和数据支撑。

1 计算模型建立

计算模型依据振动台模型试验的布置方案建立,采用单桩工况,模型地基为层状地基,设置3层土层,其中,表层土为黏土,渗透系数较小,目的是抑制振动作用下饱和松砂土中产生的超孔隙水压力的快速消散。中间土层为相对密实度为45%的松散砂土,为液化土层。底部土层为相对密实度为75%的密实砂土,作为桩端持力层。排水刚性桩位于模型箱中间位置,桩顶上部设置等效荷载,模拟桩身上部荷载。桩身与桩周土之间设置接触面模拟桩与砂土的相互作用。计算模型尺寸按照试验原型尺寸建立,采用FLAC^{3D}有限差分数值计算程序,模型如图1所示。

采用动力与流体耦合计算模式,自由场边界,局部阻尼,动孔压增长模型采用Finn模型^[12,16]。在

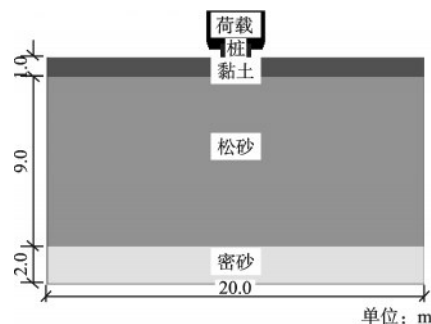


图1 数值计算模型

Fig.1 Numerical simulation model (m)

模型底部边界施加水平向正弦波振动,监测土体内部超孔压比响应变化,桩顶荷载及桩基础采用弹性模型,地基土体采用摩尔-库伦模型,桩身与地基土体参数见表1。桩体与地基土体接触面参数见表2。输入振动加速度时程如图2所示,振动持时为10 s,加载频率为5 Hz,峰值加速度为0.2g。

表1 数值模型材料参数

Table 1 Material parameters of numerical simulation model

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)
桩	2 400	1.6×10^4	7×10^3	-	-
荷载	7 800	-	-	-	-
黏土	1 550	15	5.5	11	22
松砂	1 350	30	11.5	0	30
密砂	1 650	33	12.5	0	30

表2 数值模型采用的接触面参数

Table 2 Interface parameters used in numerical simulation model

最大单元 尺寸/m	法向刚度/ ($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)
0.9	5×10^8	5×10^8	0	8

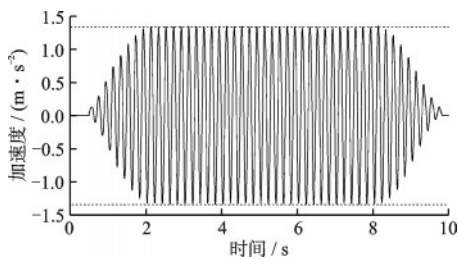


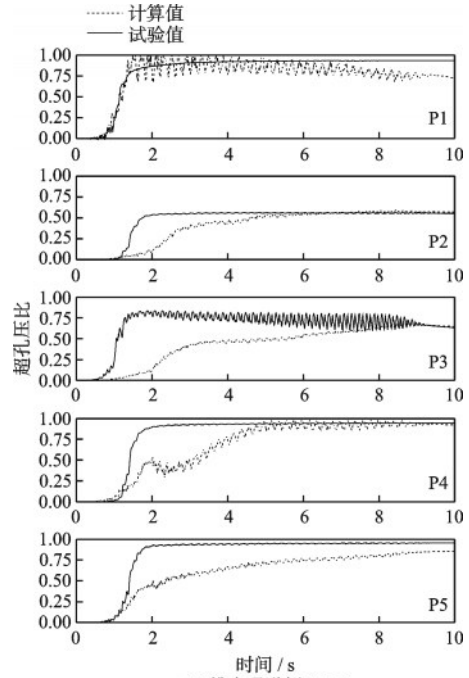
图2 模型计算输入地震波

Fig.2 Input seismic waves for numerical simulation model

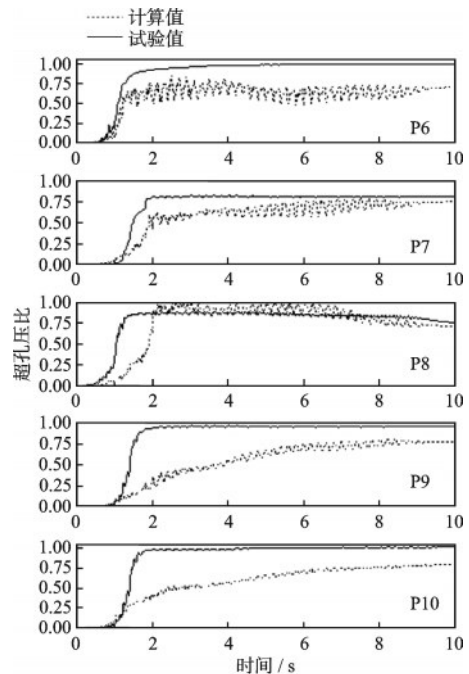
2 结果分析

2.1 超孔压比时程曲线对比分析

采用FLAC^{3D}中内置FISH语言命令,定义计算过程中需监测的超孔压比,将振动台试验结果与数值计算结果进行对比分析。振动台试验中的传感器布置如文献[8]所示,在数值计算中监测相同位置处的超孔压比变化。超孔压比时程曲线如图3所示。图3(a)所示为排水通道侧的超孔压比时程,布置了5个孔压传感器,沿深度方向从模型上部至下



(a) 排水通道侧P1-P5



(b) 非排水通道侧P6-P10

图3 超孔压比对比分析时程曲线

Fig.3 Time history comparison of excess pore pressure ratio

部(P1,P2,P3)呈现深小浅大的规律,排水通道对模型深部土体的孔压消散作用效果优于浅部土体,此现象与深部土体的超孔隙水不断由底部向顶部迁移有关。水平方向上距离排水通道由近及远(P2,P4,P5)超孔压比不断增大,表明排水通道能够有效加快桩周超孔隙水压力的消散。图3(b)所示为非排水通道侧的超孔压比结果。由结果可以看出,非

排水通道侧的超孔压比峰值均达到或接近 1.0,说明在振动荷载作用下,土体已完全液化,有效应力减小,接近“零有效应力”状态,这是由于设置单侧排水通道的排水桩无法对非排水通道侧的超孔压消散起到有效作用。不同位置处的数值计算结果与试验结果呈现一致的变化规律,从单个位置的超孔压比变化时程进行分析,超孔压比峰值和超孔压比的增长消散规律也保持了较好的一致性。在浅部地基土体位置的数值计算结果较试验结果孔压增长积累趋势较慢,但在主要变化规律和峰值方面表现一致,验证了数值计算模型的可靠性和合理性。

2.2 加速度时程曲线对比分析

加速度时程曲线对比如图 4 所示(试验过程中,由于传感器原因,A3、A4、A5 位置处加速度数据未采集到)。从结果来看,计算结果与试验实测数值基本吻合一致,计算结果能较好的反映试验过程中

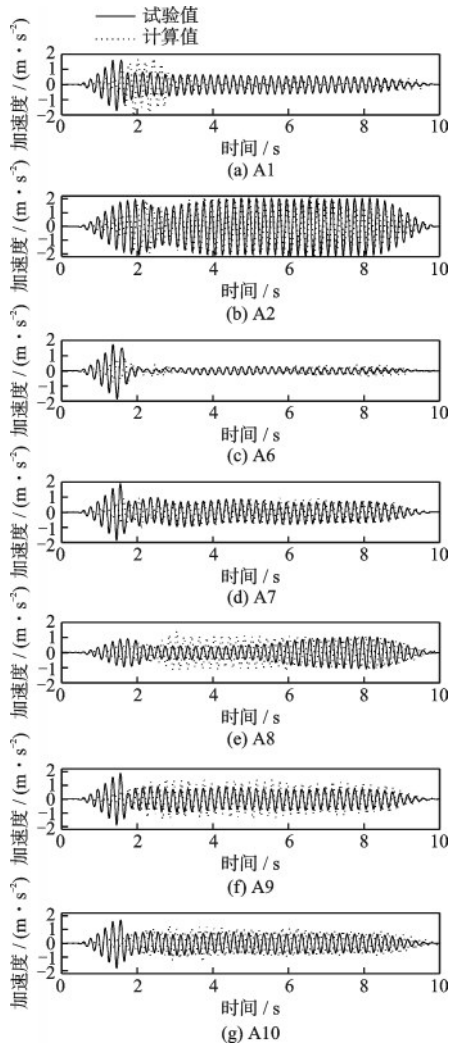


图 4 加速度对比分析时程曲线

Fig.4 Time history comparison of acceleration

的土体加速度响应。土体内部出现了较为明显的“液化减震”效应,加速度响应较输入地震加速度时程有明显的弱化。在较远位置监测点(P9、P10)处,计算加速度响应幅值略高于试验加速度幅值,这也与孔压结果一致。

2.3 不同排水通道数量抗液化作用效果分析

为进一步分析排水刚性桩抗液化作用的效果,在桩身单侧、对向两侧和四侧分别设置排水通道,各工况下的桩周超孔压比云图如图 5 所示。单侧排水通道条件下,排水通道的作用范围为排水通道侧和相邻两侧,无法影响到对向非排水侧,其有效作用范围近似以桩心为圆心,以 1 倍桩径距离为半径的半圆。双侧和四侧排水通道条件下,其有效作用

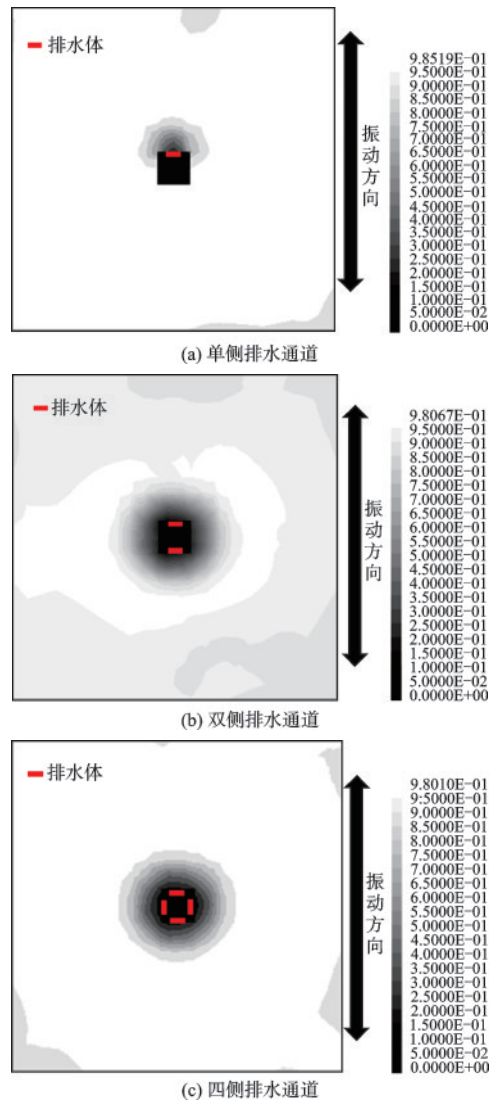


图 5 不同排水通道超孔压比分布云图

Fig.5 Contour map of excess pore pressure ratio with different drainage channels

范围可以覆盖桩周土体,形成一个以桩心为圆心,以1倍桩径为半径的圆。而且,设置对向双侧排水通道和四侧均设置排水通道工况下,其有效加固范围和作用效果基本一致,表明对向双侧排水通道即可满足抗液化作用效果,无需在桩身四侧均设置排水通道。

为进一步表明排水通道对超孔隙水压力的有效消散作用,分析了单侧排水通道、双侧排水通道和四侧排水通道工况下地基模型内部的矢量分布,如图6所示。单侧排水通道工况下(图6(a)),当振

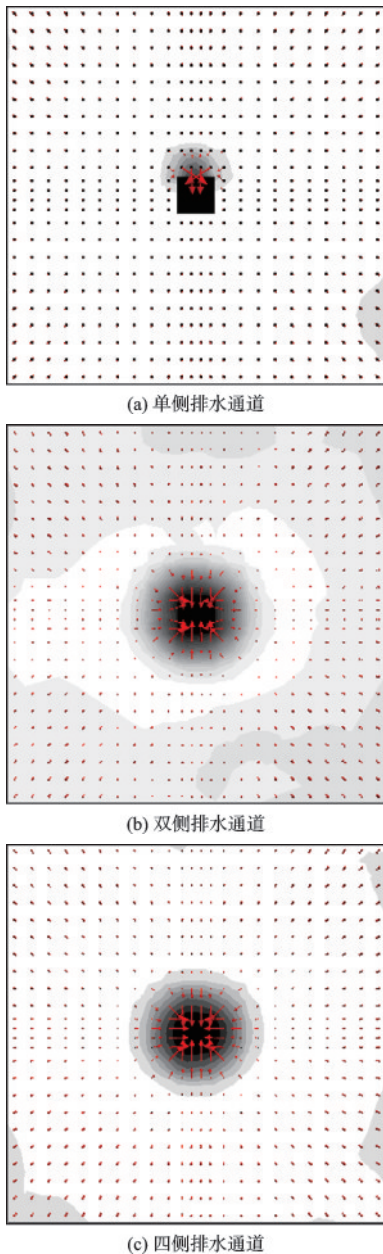


图6 不同排水通道渗流矢量分布图

Fig.6 Flow vector distribution with different drainage channels

动荷载产生时,可以看出排水通道影响范围内土体内部产生的超孔隙水均流向排水体,这是因为排水体内的孔隙水压力小于周围土体内部的超孔隙水压力,产生了水压力差,使得排水通道周围土体的水流向排水体。对向双侧排水通道(图6(b))和四侧排水通道(图6(c))的渗流矢量分布也由桩周土体指向排水体。而且,渗流矢量的分布特征与超孔压比分布规律一致,即随着土体距离排水通道越远,土体孔隙水流向排水体的趋势越弱,超出排水通道有效作用范围的超孔隙水仍然向上部渗流迁移。

排水桩的有效加固作用范围直接影响其在实际工程中的设计和使用,因此,为明确排水刚性桩的有效加固作用范围,选取距离桩身排水通道0.5倍、1.0倍和1.5倍桩径3个位置处的超孔压比时程曲线,计算结果如图7所示。随着距离不断增大,超孔压比峰值也在不断增大,说明距离排水通道越远,其有效作用效果越弱。距离排水通道由近及远超孔压比峰值分别为0.4、0.7和1.0,且在0.5倍和1.0倍桩径位置处时,在振动加载过程中,超孔压比从加载2s左右开始逐渐减小,排水通道的作用减小了土体内部的超孔隙水压力,而距离排水通道1.5倍桩径位置处的超孔压比在持续加载过程中,超孔压比峰值基本保持在1.0左右,没有减小趋势。可以预见的是,在桩身1倍桩径内,超孔压比在0.7以下,处于临界孔压比数值以下^[17],证明排水刚性桩的有效作用范围在1.0倍桩径左右。

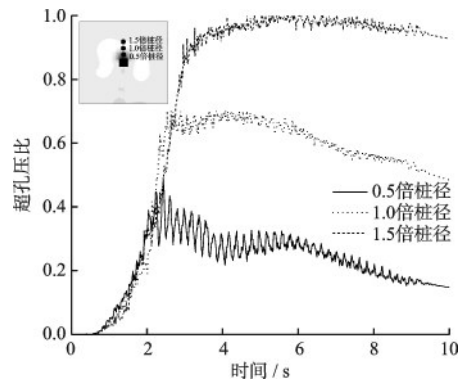


图7 不同桩径距离处超孔压比时程曲线

Fig.7 Time history of excess pore pressure ratio at different distances from the pile

3 结论

基于FLAC^{3D}有限差分数值计算程序,建立了

排水刚性桩处置可液化地基的三维数值计算模型。依据振动台试验实测结果对数值计算结果进行验证。基于已建立的三维数值分析模型对不同排水通道布置形式下桩周超孔压比的分布进行了计算分析。所得结论如下:

(1)建立了竖向荷载作用下,排水刚性桩处置可液化地基的三维数值计算模型,将计算结果与振动台试验实测结果进行了对比分析,验证了计算模型的可靠性和合理性。

(2)对设置不同排水通道的排水刚性桩桩周超孔压比分布和距离桩身不同位置处的超孔压比时程进行分析。排水刚性桩桩身设置单侧排水通道时,其有效作用范围为以桩心为圆心,以1倍桩径为半径的近似半圆。排水刚性桩桩身设置对向双侧排水通道和四侧排水通道时,其有效作用范围为以桩心为圆心,以1倍桩径为半径的完整圆。在距排水通道0.5倍桩径、1.0倍桩径和1.5倍桩径位置处的超孔压比峰值分别为0.4、0.7和1.0。以上结果均表明排水刚性桩的有效抗液化作用范围大约在桩身1倍桩径位置。

(3)分析了土体内部孔隙水渗流矢量的分布。位于排水通道周围处的土体渗流矢量均指向桩身排水体,随着距离增大,渗流矢量方向指向排水体的趋势减弱,渗流矢量分布形式也与超孔压比结果表现出较好的吻合。排水刚性桩桩身设置的排水通道有效的排出了桩周土体内部的超孔隙水,形成了有效的排水通道。

参考文献:

- [1] Ishihara K, Kuroda H. Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata earthquake[J]. Soil and Foundations, 1981, 21(3): 33-52.
- [2] 刘惠珊. 1995年阪神大地震的液化特点[J]. 工程抗震与加固改造, 2001(1): 22-26.
Liu H S. Liquefaction characteristics of the Hanshin earthquake in 1995[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2001(1): 22-26. (in Chinese)
- [3] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川8.0级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288-1296.
Yuan X M, Cao Z Z, Sun R. et al. Preliminary research on the liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296. (in Chinese)
- [4] 黄雨, 于淼, Subhamoy B. 2011年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 834-840.
Huang Y, Yu M, Subhamoy B. Review on liquefaction-induced damages of soils and foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834-840. (in Chinese)
- [5] 刘汉龙. 一种抗液化排水刚性桩: 中国, ZL200520076660.4[P]. 2007-02-28.
Liu H L. A kind of rigid drainage pile of mitigation of liquefaction: China, ZL200520076660.4 [P]. 2007-02-28. (in Chinese)
- [6] 刘汉龙, 陈育民, 赵楠. 刚性排水桩的技术开发与抗液化特性试验研究[C]//第一届全国工程安全与防护学术会议. 南京: 中国岩石力学与工程学会, 2008: 531-535.
Liu H L, Chen Y M, Zhao N. Development technical of Rigidity drain pile and laboratory test of its anti-liquefaction characteristics[C]// The first National Conference on Engineering Safety and protection. Nanjing: Chinese society for Rock Mechanics & Engineering, 2008:531-535. (in Chinese)
- [7] 陈志雄, 潘小东, 陈育民, 等. 排水刚性桩处置可液化倾斜场地的振动台试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 12-20.
Chen Z X, Pan X D, Chen Y M, et al. Research on efficacy of rigid-drainage pile improvement on liquefiable sloping ground by shaking table tests[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 12-20. (in Chinese)
- [8] 杨耀辉, 陈育民, 刘汉龙, 等. 排水刚性桩单桩抗液化性能的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 287-295.
Yang Y H, Chen Y M, Liu H L, et al. Shaking table tests on liquefaction resistance performance of single rigid-drainage pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 287-295. (in Chinese)
- [9] 杨耀辉, 陈育民, 刘汉龙, 等. 排水刚性桩群桩抗液化性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4025-4032.
Yang Y H, Chen Y M, Liu H L, et al. Investigation on liquefaction resistance performance of rigid-drainage pile groups by shaking table [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4025-4032. (in Chinese)
- [10] 王翔鹰, 陈育民, 江强, 等. 抗液化排水刚性桩沉桩过程的土压力响应[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2184-2192.

- Wang X Y, Chen Y M, Jiang Q, et al. Soil pressures of the anti-liquefaction rigid-drainage pile during pile driving[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2184-2192. (in Chinese)
- [11] 王翔鹰, 刘汉龙, 江强, 等. 抗液化排水刚性桩沉桩过程中的孔压响应[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 645-651.
- Wang X Y, Liu H L, Jiang Q, et al. Field tests on the response of excess pore water pressures of the liquefaction resistance rigid-drainage pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 645-651. (in Chinese)
- [12] 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 Y M, Liu H L, Zhao N. Laboratory test on anti-liquefaction characteristics of rigidity-drain pile [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 114-119. (in Chinese)
- [13] 吴海清, 陈育民. 套管排水桩处理可液化地基的数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(增1): 117-122.
- Wu H Q, Chen Y M. Numerical study on anti-liquefaction characteristics of drainage casing pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(Sup1): 117-122. (in Chinese)
- [14] Orense R P, Morimoto I, Yamamoto Y, et al. Study on wall-type gravel drains as liquefaction countermeasure for underground structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(1): 19-39.
- [15] Sasaki Y, Taniguchi E. Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits [J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 1-14.
- [16] 苏雷, 赵卓, 毕建巍, 等. 基于FLAC^{3D}液化场地桩基动力反应振动台试验数值分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 454-463.
- Su L, Zhao Z, Bi J W, et al. Numerical simulation of shake table test on dynamic response of pile foundation in liquefiable ground using FLAC^{3D} [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 454-463. (in Chinese)
- [17] 张荣祥, 石兆吉, 顾宝和. 地基液化失效和隔震的临界孔隙水压力研究[J]. 工程勘察, 1997(2): 5-7.
- Zhang R X, Shi Z J, Gu B H. Study on critical pore water pressure of foundation liquefaction failure and isolation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1997(2): 5-7. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)