

混凝土碎石复合桩加固倾斜可液化场地的数值模拟研究

范晓雪, 贾科敏, 许成顺, 潘汝江

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:地震震害调查显示,缓倾场地的液化侧向扩展是常见的地基失效形式。由于混凝土桩具有较高的竖向承载能力和抗剪能力,而碎石桩具有较高的渗透性,可有效降低周围场地的液化程度,因此,混凝土碎石复合桩能否作为有效应对缓倾场地液化侧向大变形的工程措施,其可行性值得深入研究。基于 OpenSees 有限元平台建立了可液化土-桩基础的数值模型,并验证了模型的有效性。在此基础上,研究了混凝土碎石复合桩对倾斜液化场地的加固效果。此外,讨论了混凝土芯桩面积占比、碎石壳厚度对倾斜液化场地动力响应的影响。结果表明:混凝土碎石复合桩抗侧移效果明显,可有效降低周围场地侧向位移和混凝土桩身弯矩。当桩体的混凝土芯占比约为 20%、碎石面积占比 80% 时为最优设计方案。

关键词:倾斜液化场地;加固措施;混凝土碎石复合桩;数值模拟

中图分类号: TU472.99

文献标识码: A

Numerical simulation research of inclined liquefiable soil improved by concrete-stone composite pile

FAN Xiaoxue, JIA Kemin, XU Chengshun, PAN Rujiang

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The investigation of earthquake damage shows that the lateral spread of gently inclined soil is a common form of foundation failure. As the concrete pile has a high vertical bearing capacity and shear resistance, and the stone column has a high permeability, which can effectively reduce the degree of liquefaction of the surrounding soil, whether the concrete-stone composite pile can be used as an effective engineering measure to deal with the large lateral deformation of liquefaction in gently inclined soil, its feasibility is worthy of in-depth research. Therefore, the numerical model of liquefiable soil-pile foundation is established based on OpenSees finite element platform, then the reliability of the numerical model is verified. On this basis, the reinforcement effect of concrete-stone composite pile on inclined liquefaction soil is studied. In addition, the effects of area ratio of core pile and thickness of stone shell on dynamic response of inclined liquefaction soil are discussed. The results show that the concrete-stone composite pile has a significant anti lateral displacement effect, which can effectively reduce the lateral displacement of the surrounding soil and the bending moment of the concrete core pile. When the proportion of concrete core of pile body is about 20% and the proportion of stone shell area is 80%, it is the optimal design scheme.

Key words: inclined liquefiable soil; reinforcement measures; concrete-stone composite piles; numerical simulation

收稿日期:2023-01-13; 修回日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金项目(52225807)

作者简介:范晓雪(1997—),女,硕士研究生,主要从事饱和砂土液化及桩基础抗震领域的研究。E-mail:1103791727@qq.com

通讯作者:许成顺(1977—),女,教授,博士,主要从事土动力学与岩土工程领域的研究。E-mail:xuchengshun@bjut.edu.cn

0 引言

液化场地的加固措施有多种,包括桩基、挤密和换填等。其中较为常见的是碎石桩法,诸多学者通过实际工程项目、室内试验及数值模拟等方法进行研究,结果表明碎石桩在倾斜场地中对防治液化十分有利^[1-3]。但由于液化会降低土体抗剪强度,且碎石桩的刚度相对较低,该类型复合地基的承载力可能达不到设计要求。因此诸多学者开展了相关研究并提出改善方案,如包裹碎石桩^[4-5]、CFG 桩-碎石桩组合^[6-7]、水泥土桩-碎石桩组合复合地基等^[8-9]。

目前已有研究采用钢筋混凝土桩作为砂石桩内芯形成混凝土芯砂石桩,从而增强复合地基的竖向刚度,提高单桩承载力。由于江苏镇江一处高速公路以及深圳河口水利治理实际工程中应用了混凝土芯砂石桩复合地基,大量学者以此为基础进行相关研究,如唐彤芝等^[10]基于镇江高速公路桥头高填土路段工程,实测了不同数据并进行分析,揭示了混凝土芯砂石桩复合地基中孔压累积变化的影响因素等。各学者利用现场观测的数据,分析研究了混凝土芯砂石桩在软土地基中的各项性能,结果表明混凝土芯砂石桩能够综合砂石壳与混凝土桩两者的优点,加快孔隙水排出、提高复合地基承载力^[11-14]。

由于数值模拟方法具有许多优点,如能够在短时间内进行大量参数分析,较好地刻画饱和土体的剪缩、剪胀等液化特性,便于获取土和结构的动力响应等,大量学者采用此方法开展广泛研究^[15]。各学者主要针对混凝土芯砂石桩对高含水量软土地基的加固效果、桩体位移和固结特性等的影响进行分析研究,从而得到有价值的结论,加深对混凝土芯砂石桩性能的理解^[16-18]。如翁嘉蔚等^[19]通过数值模拟,对短混凝土芯砂石桩复合地基开展了固结特性的研究,并与碎石桩和混凝土桩加固模型进行了对比。

液化侧向扩展场地中桩基础的抗震性能始终是岩土地震工程的热点问题,尽管已有众多学者利用试验和数值模拟对其进行深入研究^[20-22],但目前针对混凝土碎石复合桩加固效果的研究还不多见。混凝土桩具有较高的竖向承载能力和抗剪能力,而碎石桩具有较高的渗透性,可有效降低周围场地的液化程度,因此混凝土碎石复合桩能否作为有效应对微倾场地液化侧向大变形的工程措施,其可行性值得深入研究。

本文通过 OpenSees 有限元平台建立液化场地数值模型,并与前人开展的离心机振动台试验结果进行对比验证。在此基础上,分别建立混凝土碎石复合桩、碎石桩和混凝土桩-倾斜液化场地数值分析模型,将 3 种桩型加固后的场地变形及桩身内力等动力响应结果进行对比分析,进而探讨混凝土碎石复合桩的优化设计方案。

1 数值模型建模方法

1.1 有限元数值模型的建立

基于 WILSON^[23]开展的离心机振动台试验中 Csp2 工况的情况,在 OpenSees 中建立相应的平面应变模型。模型模拟的原型场地尺寸为 51 m×20.5 m,上部是 9.1 m 的可液化松砂层,底部是 11.4 m 的密砂层,如图 1 所示。两层砂土均采用多屈服面塑性本构模型(PDMY02)来模拟^[24],该模型考虑了砂土先前剪胀对后续收缩阶段的影响,对永久剪切应变累计参数做了修正,可以更好地再现动力过程中剪切变形的累积和液化特性等。表 1 给出了模型中砂土的主要参数。

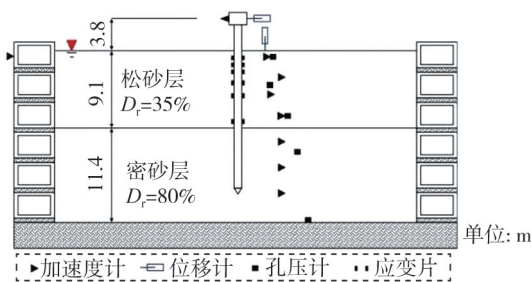


图 1 离心机振动台试验对应的原型场地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prototype soil corresponding to the centrifuge shaking table test

表 1 砂土层相关参数

Table 1 Soil material parameters

参数名称	可液化砂层	密砂层
材料号	1.00	2.00
密度 $\rho / (\text{t/m}^3)$	1.75	2.00
剪切模量 G_s / kPa	60 000	86 000
体积模量 B_s / kPa	94 000	105 000
摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	31.00	33.50
参考围压 p_0 / kPa	101.00	101.00
相位转换角 $\varphi_T / (^\circ)$	31.00	25.00
渗透系数 $(\times 10^{-5} \text{ m/s})$	3.00	0.60

钢管桩总长 20.6 m,其中露出地面 3.8 m,桩径 0.67 m,壁厚 19 mm。桩顶处有一重 50 t 的质量块来模拟上部结构的惯性作用。建模时桩体采用具有运动硬化和可选各向同性硬化的单轴双线性钢材料 Steel01^[25] 与弹性单轴材料 Elastic^[26] 来模拟,截面则通过 section Aggregator^[26] 命令聚合来模拟。桩的主要参数为^[23]: 弹性模量 70 GPa,截面惯性矩 $6.1 \times 10^{-3} \text{ m}^4$,屈服弯矩 $5.3 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

土体采用土-水完全耦合的四边形单元(quadUP),每个单元中有 3 个自由度。模型两侧通过 equalDOF 命令将深度相等的土节点在水平方向和竖直方向自由度进行捆绑,设定为捆绑边界,使土体的左右两边界保持位移同步,模拟简化的剪切边界条件,即认为该土体在地震作用下做简单剪切运动。底部固定位移自由度作为约束边界,地表固定孔隙水自由度来定义水位线。采用 Rayleigh 阻尼模拟能量的耗散效应。数值模型动力计算时选用与试验时相同的 Kobe 地震记录作为输入地震动,峰值强度为 0.22 g,地震动时程曲线如图 2 所示。

模型计算过程分为 3 步进行:①施加土层重力进行静力线弹性计算,用来模拟土体的初始应力状态;重力分析结束后,将土体由弹性变为塑性,执行非线性响应分析。②将桩体加入到模型中,再次进行重力塑性分析。③采用基底一致激励方式输入地震荷载进行动力分析。

1.2 模型可靠性验证

图 3~图 5 分别对比了典型测点的加速度、超孔隙水压力及桩弯矩的数值计算结果与试验结果,可看出两者总体的变化趋势、峰值等情况吻合程度较好,验证了该模型的可靠性,说明该模型可以较好地反映地震荷载下砂土地场的动力反应及液化场地中桩基响应情况等。

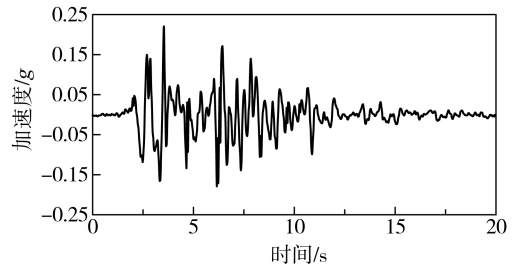


图 2 Kobe 地震动加速度时程

Fig. 2 Time histories of Kobe ground motion

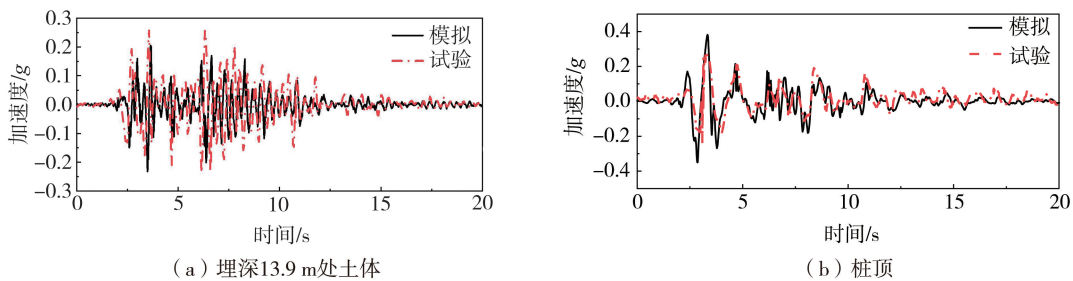


图 3 土体及桩基水平加速度时程对比

Fig. 3 Comparison of horizontal acceleration of soil and pile time history curves

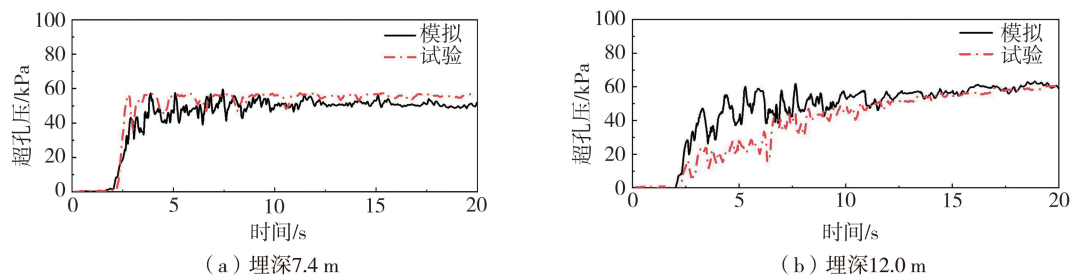


图 4 土体超孔压时程对比

Fig. 4 Comparison of excess pore pressure time history curves

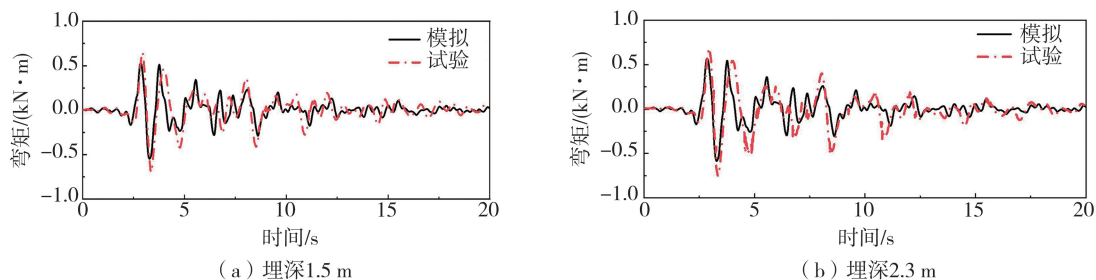


图 5 桩弯矩时程对比

Fig. 5 Comparison of pile bending moment time history curves

2 混凝土碎石复合桩加固效果

2.1 倾斜液化场地中 3 种桩型加固结果对比

将已验证的数值模型调整为倾角 2° 的倾斜液化场地模型,并分别建立混凝土碎石复合桩、碎石桩和混凝土桩-倾斜可液化场地数值分析模型。混凝土碎石复合桩的建立基于江苏镇江一处高速公路实际应用,桩径为 0.5 m,3 种桩型的桩长均为 20.5 m,桩截面如图 6 所示。其中碎石部分采用多屈服面塑性本构模型(PDMY02)^[24]来模拟,单元采用四边形平面应变单元 element quapUP 模拟。混凝土芯桩为边长 0.2 m 的预制方桩,模型中桩基单元采用基于位移的弹塑性梁柱单元 DispBeamColumn 模拟,截面采用 section fiber 纤维截面。纤维截面中采用无抗拉强度的单轴 Kent Scott Park 混凝土材料 Concrete01^[27]与具有各向同性应变硬化的单轴 Giuffre Menegotto Pinto 钢材料 Steel02^[25]来模拟。桩体各部分主要参数如表 2~表 4 所示。

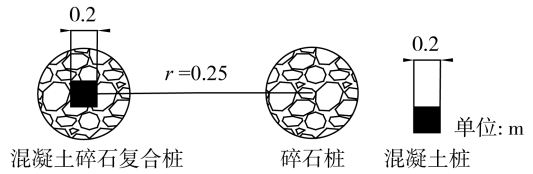


图 6 3 种桩型截面示意图

Fig. 6 Section diagram of three pile types

表 2 碎石材料参数

Table 2 Parameters of stone column materials

参数名称	数值	参数名称	数值
材料号	3.0	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	40.0
密度 $\rho/(t/m^3)$	2.4	参考围压 p/kPa	101.0
剪切模量 G_r/kPa	138000	相位转换角 $\varphi_T/(\circ)$	25.0
体积模量 B_r/kPa	400000	渗透系数 $(\times 10^{-2} m/s)$	1.5

表 3 混凝土材料参数

Table 3 Parameters of concrete materials

类别	抗压强度/kPa	峰值应变	屈服强度/kPa	屈服时应变
混凝土保护层	-8400	-0.002	0.0	-0.004
核心区混凝土	-12700	-0.005	-10200	-0.018

表 4 钢筋材料参数

Table 4 Parameters of reinforcement materials

类别	弹性模量 $(\times 10^8 kPa)$	屈服强度/kPa	应变硬化比
桩身钢筋	2.06	47000	0.001

2.1.1 土体孔压比发展规律分析对比

为了较好地保持计算结果的精度,网格划分时上部松砂层为 0.5 m×0.7 m,下部密砂层为 0.5 m×0.6 m(含碎石壳部分)。混凝土桩划分为 32 个桩单元,其中松砂层埋深中按 0.7 m 划分,松砂层埋深中按 0.6 m 划分,共 33 个桩节点,将桩的质量集中于各个桩节点上。在各数值模型的桩周土体处(距桩右侧 1 倍桩径),选择松砂层中距地表 2.8、4.9、7.0 m 的点 A、B、C,密砂层中距地表 10.9、13.9、16.9 m 的点 D、E、F 进行分析。网格划分及特征点选取如图 7 所示。

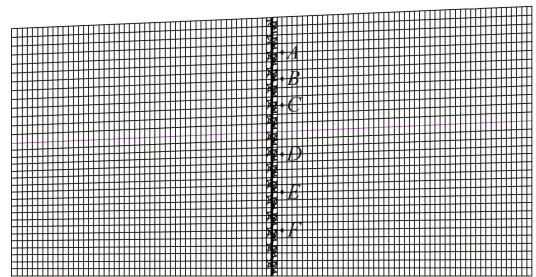


图 7 特征点选取示意图

Fig. 7 Schematics of feature points selection

桩周土体的超孔压比时程,如图 8 所示。由图可知,用混凝土碎石复合桩加固时,场地在振动开始后约 4 s,桩周土体孔隙水压力迅速上升,松砂层中不同深度土体孔压比变化趋势及幅值基本一致,孔压比峰值达到 0.7,土体基本未液化。超孔压累积至峰值后,孔隙水压力会在短时间内大幅消散,且不同埋深处几乎保持一致,孔压比下降至接近 0。5.5 s 时土体又受到了较大振动激励,孔隙水压力再次快速积累,孔压比基本重新达到峰值。振动 10 s 后由于场地中具有良好的排水通道并且振动逐渐减弱,松砂土体的超孔隙水压力总体呈持续波动消散趋势,在振动结束时孔压比保持较低水平,约为 0.2。

密砂层中不同深度土体,在整个振动过程中孔压比始终保持在较低水平,变化幅度较小。振动开始后约 3.5 s 时孔压比达到峰值,约为 0.4,埋深较深处孔隙水压力消散现象不显著。

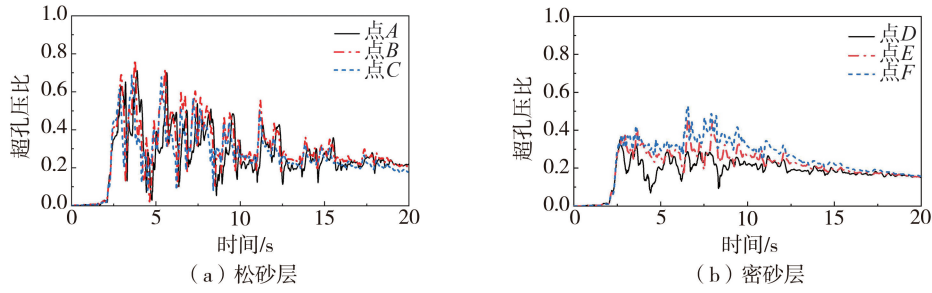


图8 混凝土碎石复合桩加固情况下桩周土体不同埋深处孔压比响应

Fig. 8 Pore pressure ratio response of soil around piles at different depths under the reinforcement of concrete-stone composite pile

用混凝土碎石复合桩加固时,埋深 2.8 m、桩上游距桩不同距离处土体超孔压比响应,如图 9 所示。结果表明整个振动过程中距混凝土碎石复合桩不同距离(1 倍桩径、3 倍桩径、5 倍桩径)的土体孔压比变化趋势基本相同。当振动刚开始后约 4 s 时,孔压比均达到峰值,其中距离桩 1D 时孔压比峰值相对最小。而距桩 3D 及 5D 的两处孔压比峰值均超过 0.8,场地达到初始液化。在 4~6 s 时段内,同深度处距桩 1D 的土体孔压比始终略低于另外两处,6 s 后距桩 3D 及 5D 的土体处孔压比开始出现差距。表 5 中列出了点 A~点 C 的孔压比峰值,可明显看出相同埋深的土体距桩更远处的孔压比更大。3D 处孔压比峰值虽然较大,但后续孔隙水消散速度较快,振动后半程保持在 0.4 左右,综合图 10 场地整体孔压响应云图,可看出 3 倍桩径处基本达到混凝土碎石复合桩的最大影响范围。

表 5 距桩不同距离处土体孔压比峰值

Table 5 Peak values of pore pressure ratio at different distances from the pile

土体埋深位置	距桩距离		
	距桩 1D	距桩 3D	距桩 5D
点 A	0.71	0.86	0.90
点 B	0.77	0.92	0.94
点 C	0.69	0.86	0.89

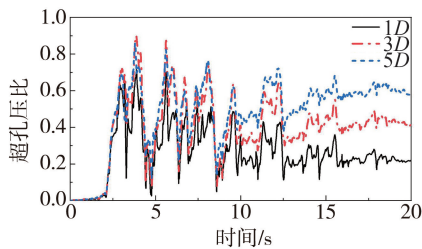


图 9 混凝土碎石复合桩加固情况下距桩不同距离处土体的孔压比响应

Fig. 9 Pore pressure ratio response of soil at different distances from concrete-stone composite pile under reinforcement

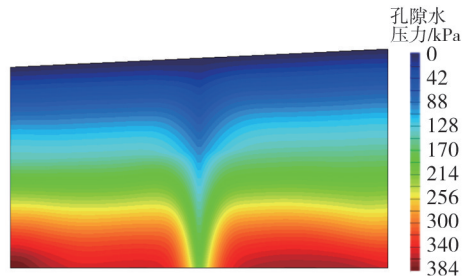


图 10 混凝土碎石复合桩加固场地中孔压云图

Fig. 10 Contour map of pore pressure under the reinforcement of concrete-stone composite pile

3 种加固方法下点 A、点 B、点 C 孔压比对比结果,如图 11 所示。由图所知,在整个振动过程中,用混凝土碎石复合桩加固与仅用碎石桩加固时,孔压比变化趋势及幅度基本相同,峰值达到 0.7。而用混凝土桩加固时,孔压比在振动初期略大于另 2 种加固情况,峰值达到了 0.8。在达到峰值过后孔隙水压力虽然也发生消散现象,但消散速度小于另 2 种情况,此时孔压比相对来说仍较大。10 s 左右超孔隙水压力重新大幅积累,孔压比增大,此时场地的软化程度相比其他 2 种情况更为显著。整体看来,用混凝土碎石复合桩与碎石桩加固场地,相较于用混凝土桩加固时,土体的软化程度较小,说明碎石的排水效应较明显。

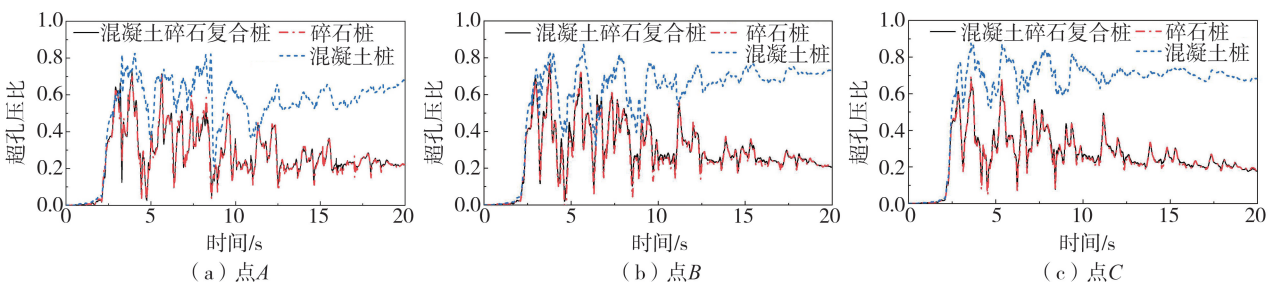


图 11 3 种加固情况下点 A、点 B、点 C 的孔压比响应

Fig. 11 Pore pressure ratio response of point A, B and C under three reinforcement conditions

2.1.2 土体侧移响应对比

混凝土碎石复合桩加固情况下桩周不同埋深处土体侧移响应,如图 12 所示。结果表明,用混凝土碎石复合桩加固倾斜场地时,振动开始后 3.5 s 桩周土体开始发生侧向位移且迅速增长,增长速度随土层深度增加而减缓,松砂层内土体侧移量较大。10 s 后由于振动减弱,各深度处土体侧向位移增长速度均有所减缓,在振动结束后产生不可恢复的残余变形。综合图 13 场地土侧移响应云图看出该模型土体侧向位移集中在松砂层,即可液化层内。密砂层内侧向位移较小,表现为一个刚性体,基本不能相对于基底滑动,这是因为密砂的软化程度较小。

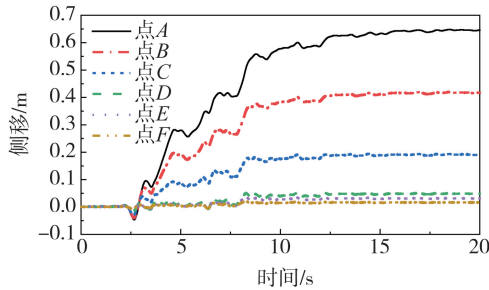


图 12 混凝土碎石复合桩加固情况下桩周土体不同埋深处侧移响应

Fig. 12 Lateral displacement response of soil around piles at different depths under the reinforcement of concrete-stone composite pile

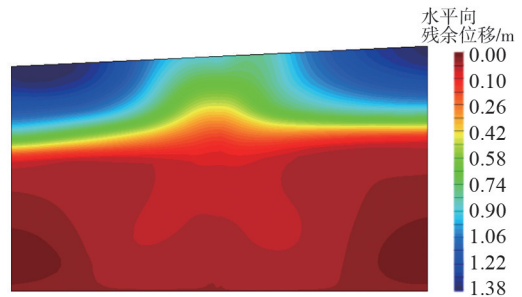


图 13 混凝土碎石复合桩加固场地中残余位移云图

Fig. 13 Contour map of horizontal residual displacement of soil under the reinforcement of concrete-stone composite pile

3 种加固情况下松砂层中点 A、点 B、点 C 处土体侧移的对比结果如图 14 所示。由图可知,用混凝土碎石复合桩加固时土体最大侧移量分别为 0.646、0.417、0.191 m,用碎石桩加固时最大侧移量比前者约大了 7.9%、8.2%、3.7%,用混凝土桩加固时比用混凝土碎石复合桩时大了 107.1%、136.2%、87.4%。说明混凝土碎石复合桩与碎石桩加固时土体侧移量相对较小,用混凝土桩加固时侧移量较大,与前者呈现出较大的差距。这是因为用混凝土碎石复合桩与碎石桩加固时,土体孔隙水能及时排出,导致桩周土体强度未明显降低。

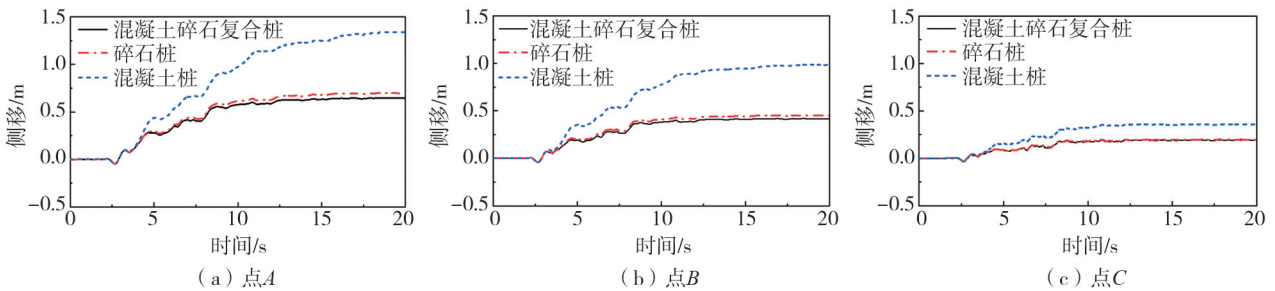


图 14 3 种加固情况下点 A、点 B、点 C 的侧移响应

Fig. 14 Lateral displacement of soil response of point A, B and C under three reinforcement conditions

2.2 两种桩型加固场地时桩身响应对比

2 种加固情况下沿深度方向桩身侧向位移包络图,如图 15(a) 所示。由图可知,随桩基埋深增大,2 种桩的桩身位移呈现逐渐减小的趋势,在密砂层处均保持很小的侧移量。这与土体沿深度方向侧移响应规律一致,可见桩基的位移响应与土体的侧向位移响应联系密切。混凝土碎石复合桩与混凝土桩桩身的最大侧移均出现在桩顶处,2 种加固情况下桩身最大侧移量分别为 0.92、1.54 m,差距为 0.62 m,此时钢筋混凝土桩的桩身侧移量约比混凝土碎石复合桩的侧移量大 67.4%。

混凝土碎石复合桩与混凝土桩加固情况下的桩身弯矩包络图,如图 15(b) 所示,2 种情况下桩弯矩幅值随桩基埋深的变化规律基本一致,在松砂层中桩基弯矩值相对较大。同埋深处,用混凝土桩加固时的桩弯矩高于混凝土碎石复合桩的弯矩值,在可液化土层中更为明显。混凝土碎石复合桩与混凝土桩的最大弯矩均出现在松砂层和密砂层的土层分界面处,此时混凝土桩的桩身最大弯矩约比混凝土碎石复合桩的大 36.7%。

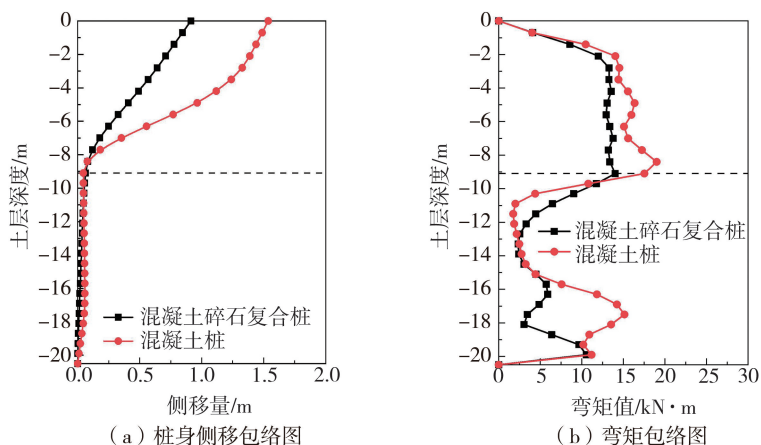


图 15 2种加固情况下桩身侧移及弯矩包络图

Fig. 15 Envelope diagram of pile lateral displacement and bending moment under two kinds of reinforcement

以上讨论表明,混凝土碎石复合桩相比于混凝土桩拥有较好的抗液化能力,略优于碎石桩。混凝土碎石复合桩中碎石壳的排水效应大幅提升了其抗液化性能,而混凝土芯桩的存在对于混凝土碎石复合桩抗土体侧移效果影响不大。

3 芯桩面积比及碎石壳厚度的影响

3.1 混凝土芯桩面积比影响

本小节针对混凝土芯桩在混凝土碎石复合桩中面积比的影响进行研究。在数值模型中,保持混凝土碎石复合桩直径不变仍为 0.5 m,更改芯桩的边长,选取芯桩的边长分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 m,保持其余参数均相同。此时混凝土芯桩与混凝土碎石复合桩面积比,即芯桩占比分别为 5.1%、20.4%、45.9%、81.5%,桩截面如图 16 所示。

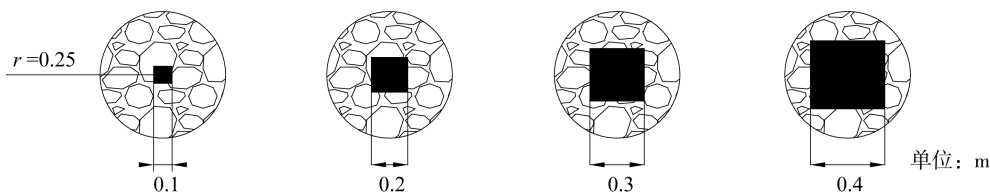


图 16 不同混凝土芯桩面积比示意图

Fig. 16 Schematic diagram of different area ratio of concrete core pile

混凝土碎石复合桩不同芯桩面积比情况下埋深 2.8 m 点 A 处土体侧移及孔压比时程,如图 17 所示,可观察到面积比不同时土体动力响应区别较大。由图 17(a)可知,当芯桩边长小于 0.2 m,即芯桩占比小于 20%时,土体孔压比幅值基本一致。之后随芯桩占比增大,孔压比明显增大,当占比达 80%以上时,孔隙水压力快速积累,并且消散较慢,孔压比峰值达到了 0.9,土的软化程度增大。

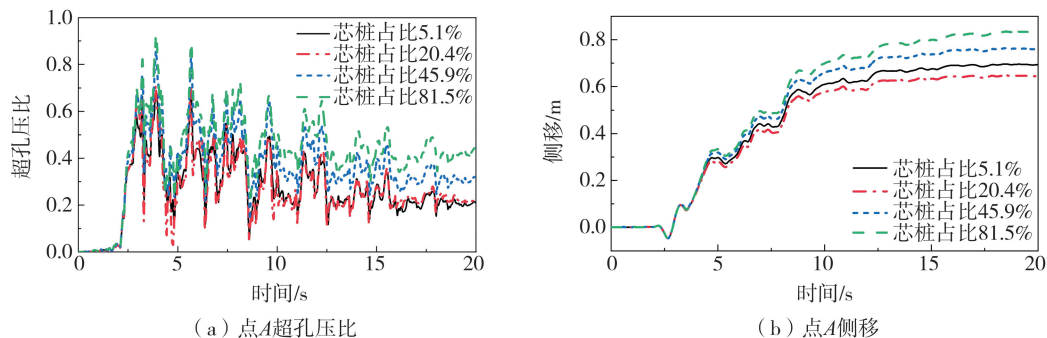


图 17 不同芯桩占比时埋深 2.8 m 处土体侧移及孔压比对比

Fig. 17 Comparison of soil lateral displacement and pore pressure ratio at 2.8 m buried depth under different area ratio of concrete core pile

由图 17(b)可知,在振动 0~5 s 阶段,不同芯桩面积比时的土体水平位移发展趋势基本相同。5 s 后土体侧移开始出现差距,当芯桩面积比大于 20%时,随面积比增大,土体侧移发展速度也逐渐增加。这是因为芯桩面积比增大即碎石壳厚度减小,缩小了混凝土碎石复合桩的排水面积,不利于孔隙水的消散,从而使土体抗剪强度下降,侧移量增大。芯桩面积占比 80%相较于占比 20%时,点 A 处土体残余位移增大了 29%。

图 18(a)显示了不同芯桩面积比时桩身沿深度最大侧移的变化,当面积比小于 20%时,桩身最大侧移变化不大,占比超过 20%,桩身最大侧移随面积比增加而增大,在松砂层中更为明显。芯桩边长每增加 0.1 m,桩顶处侧移约增大 0.1 m。

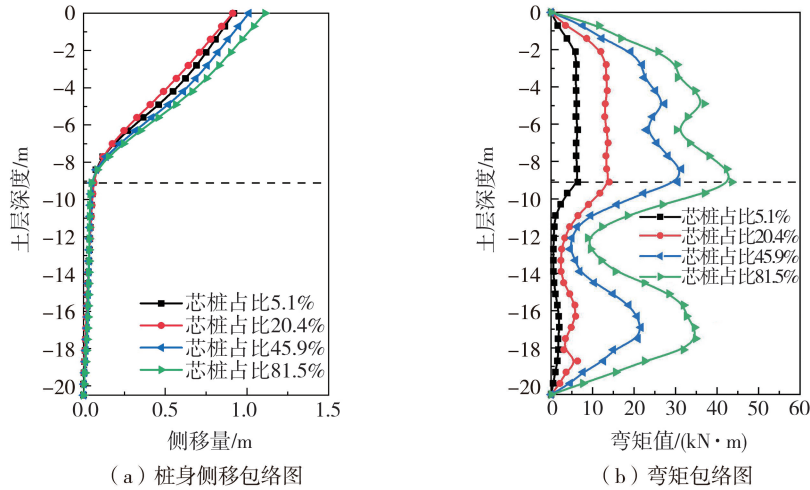


图 18 不同芯桩占比时桩身侧移及弯矩包络图

Fig. 18 Envelope diagram of pile lateral displacement and bending moment at different area ratio of concrete core pile

由图 17(b)和图 18(a)可知,当芯桩占比较小时,桩周土体侧移及桩身侧移反而会有所增大。这是由于碎石土占比较大,混凝土碎石复合桩会呈现普通碎石桩的特性,在地震荷载作用下抗土体及桩身侧移效果减弱。

混凝土碎石复合桩不同芯桩面积比时的桩身弯矩包络图,如图 18(b)所示。结果表明不同面积比情况下,桩身弯矩差异显著。芯桩占比越多,桩身各深度处弯矩值越大,这主要归因于芯桩占比增大导致混凝土碎石复合桩的抗弯刚度增大。在松砂层中,桩身弯矩差异同时受到芯桩占比减小时,孔隙水可较为快速排出的影响,导致桩周土体侧移较小,从而影响桩身弯矩。

3.2 碎石壳厚度影响

本节针对混凝土碎石复合桩中不同碎石壳厚度的影响进行研究。在数值模型中,保持混凝土芯桩边长不变仍为 0.2 m,更改混凝土碎石复合桩的直径,选取直径分别为 0.4、0.5、0.6、0.7 m,保持其余参数均相同。此时碎石面积比随之增大,碎石壳与混凝土碎石复合桩面积比分别为 68.2%、79.6%、85.9%、89.6%,桩截面如图 19 所示。

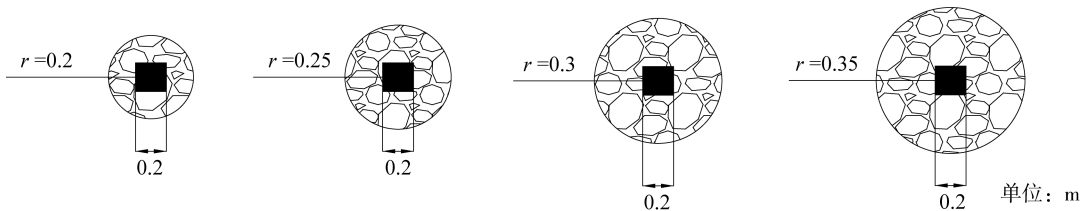


图 19 不同碎石壳厚度示意图

Fig. 19 Schematic diagram of different thickness of stone shell

混凝土碎石复合桩不同碎石壳厚度情况下埋深 2.8 m 点 A 处土体侧移及孔压比时程,如图 20 所示。由图 20(a)可知,随混凝土碎石复合桩直径的增加,碎石壳的厚度随之增大,增加了场地排水面积,有利于孔隙水的排出,使得孔压比随碎石占比增大而减小,但总体差别不大。说明当碎石面积到达一定程度后(碎石占比超过 80%),桩体排水能力不再发生大幅变化,孔压比峰值约为 0.7,振动结束时仍有孔隙水无法及时排出。

土体侧移量随碎石壳面积比增加而减小,如图 20(b)所示。这是由于孔隙水的及时排除、混凝土碎石复合桩直径的增大,导致土体抗剪强度降低幅度不大、桩体承担更多振动带来的能量,从而减小了土体侧移量。沿土体埋深方向,不同碎石占比时土体侧移差值不断缩小,在松砂浅层差异较大。埋深 2.8、4.9、7.0 m(点 A~点 C)处,桩直径 0.4 m 与 0.7 m 时的差值分别为 0.169、0.121、0.04 m。

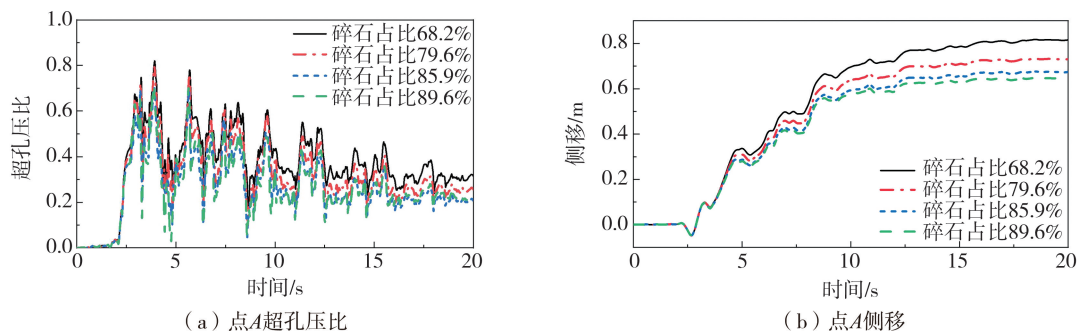


图 20 不同碎石壳厚度时埋深 2.8 m 处土体侧移及孔压比对比

Fig. 20 Comparison of soil lateral displacement and pore pressure ratio at 2.8 m buried depth under different thickness of stone shell

不同碎石壳厚度时桩身沿深度最大侧移的变化,如图 21(a)所示。结果表明混凝土碎石复合桩的直径分别为 0.4、0.5、0.6、0.7 m 时,在密砂层中桩身最大侧移差异不显著。松砂层中差距变大,桩顶的侧移分别为 1.043、0.965、0.917、0.915 m,随碎石厚度增加而减小。图 21(b)为混凝土碎石复合桩不同碎石壳厚度时的桩身弯矩包络图。由图可知,随着碎石壳厚度增大,松砂层中桩身各处最大弯矩值减小,但当芯桩面积比较小时,不同碎石壳厚度对桩身弯矩的影响不显著。

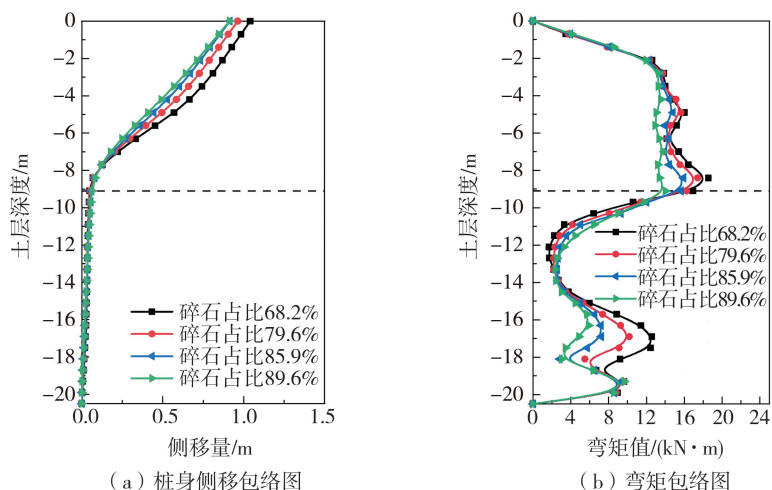


图 21 不同碎石壳厚度时桩身侧移及弯矩包络图

Fig. 21 Envelope diagram of pile lateral displacement and bending moment at different thickness of stone shell

由以上分析看出,混凝土碎石复合桩中碎石壳的存在,能有效抑制场地的超孔压反应,适当增大碎石壳占比能有效降低场地土体的液化潜力,但当碎石面积增大到一定比例时,碎石面积的变化对桩基地震响应的影 响不显著。

4 结论

本文通过数值模拟方法,对比研究了混凝土碎石复合桩加固倾斜液化场地的效果,并探讨了混凝土芯桩面积占比、碎石壳厚度的影响,主要结论如下:

1) 混凝土碎石复合桩整体看来具有较好的抗液化性能,抗侧移效果明显,可有效降低周围场地侧向位移、桩身弯矩及侧移。

2) 混凝土碎石复合桩中碎石壳的排水效应显著,因此其抗液化性能略优于碎石桩,显著优于混凝土桩,距桩 3 倍桩径时基本达到混凝土碎石复合桩的最大影响范围。

3) 混凝土芯桩的占比影响着混凝土碎石复合桩的地震响应。当混凝土碎石复合桩中芯桩占比持续缩小时,桩体会呈现普通碎石桩性能。因此混凝土碎石复合桩中芯桩占比约为 20% 时为最优选。

4) 当碎石壳厚度增大到一定程度后对混凝土碎石复合桩排水效应的影响程度减弱,因此混凝土碎石复合桩中碎石面积占比约 80% 时为最优选。

参考文献:

- [1] ELGAMAL A, LU J C, FORCELLINI D. Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(11): 1672-1682.
- [2] BADANAGKI M, DASHTI S, KIRKWOOD P. Influence of dense granular columns on the performance of level and gently sloping liquefiable sites [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(9): 0001937.
- [3] 周春澍. 基于 OpenSees 的碎石桩减轻液化触发微倾场地侧向位移研究[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2019.
ZHOU Chunshu. Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a slightly sloping stratum by gravel pile in OpenSees[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2019. (in Chinese)
- [4] TANG L, CONG S Y, LING X Z, et al. Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(2): 190-195.
- [5] 邱梦瑶, 陈树培, 唐亮, 等. 加筋碎石桩复合饱和砂土地基抗液化性能评价方法[J]. *地震研究*, 2020, 43(3): 554-562, 603.
QIU Mengyao, CHEN Shupe, TANG Liang, et al. A simplified evaluation method of liquefaction resistance for composite foundation reinforced by geosynthetic-reinforced gravel pile[J]. *Journal of Seismological Research*, 2020, 43(3): 554-562, 603. (in Chinese)
- [6] 张作鹏. CFG 桩与碎石桩双重复合地基的应用[C]//《建筑科技与管理》组委会. 2014 年 5 月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京: 《建筑科技与管理》组委会, 2014: 208-209.
ZHANG Zuopeng. CFG pile and gravel pile composite foundation dual application [C] // Organizing Committee of Building Technology and Management. Proceedings of the Academic Exchange Conference on Building Science, Technology and Management in May 2014. Beijing: Organizing Committee of Building Technology and Management. 2014: 208-209. (in Chinese)
- [7] 苟波. CFG 桩—碎石桩组复合地基工程特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
GOU Bo. Study on the engineering characteristics of composite foundation with CFG piles-gravel piles [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [8] 龚小陶, 张智浩, 马凇, 等. 振冲碎石桩与素混凝土桩复合地基在填海岩溶地基处理中的应用[J]. *工业建筑*, 2012, 42(10): 166-170.
GONG Xiaotao, ZHANG Zhihao, MA Lin, et al. Application of vibro replacement stone column-plain concrete pile composite foundation in treatment of the newly reclaimed Karst area[J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(10): 166-170. (in Chinese)
- [9] 崔志平. 基于振动台试验对不同桩体加固液化土变形特性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
CUI Zhiping. Study on the deformation characteristics of liquefied sands reinforced by different piles based on the shaking table test[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] 唐彤芝, 赵维炳, 陈俊生, 等. 高填土路堤荷载下混凝土芯砂石桩复合地基变形与承载力试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(12): 1829-1836.
TANG Tongzhi, ZHAO Weibing, CHEN Junsheng, et al. Experimental study on deformation and bearing capacity of composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles under high embankment load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(12): 1829-1836. (in Chinese)
- [11] 吴兴政. 混凝土芯砂石桩处理软土地基承载特性试验研究[J]. *山西建筑*, 2018, 44(7): 72-74.
WU Xingzheng. Test study on bearing characteristics of concrete-cored sand-gravel pile in soft soil foundation treatment[J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(7): 72-74. (in Chinese)
- [12] YU J, CAI Y Y, QI Z B, et al. Analytical analysis and field test investigation of consolidation for CCSG pile composite foundation in soft clay[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 2013: 1-14.
- [13] 程万钊, 乐茂华, 王富永, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基加固堤防软基试验研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(增刊 1): 675-681.
CHENG Wanzhao, YUE Maohua, WANG Fuyong, et al. Field tests study of concrete-cored sand-gravel piles applied to strengthen embankment engineering[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(S1): 675-681. (in Chinese)
- [14] 孙毅, 赵斌, 孙晖. 混凝土芯砂石桩复合地基在深圳河治理中的运用[J]. *人民珠江*, 2009, 30(5): 60-63.
SUN Yi, ZHAO Bin, SUN Hui. Application of concrete-core sand-gravel pile composite foundation in shenzhen river treatment[J]. *Pearl River*, 2009, 30(5): 60-63. (in Chinese)
- [15] 许成顺, 贾科敏, 杜修力, 等. 液化侧向扩展场地—桩基础抗震研究综述[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(4): 768-791.
XU Chengshun, JIA Kemin, DU Xiuli, et al. Review on seismic behavior of pile foundation subjected to liquefaction induced lateral spreading [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(4): 768-791. (in Chinese)

- [16] 谭桂华. 混凝土芯砂石桩复合地基的沉降及受力分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
TAN Guihua. The settlement and mechanical analysis of concrete-core sand-gravel pile composite foundation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 王青云. 混凝土芯砂石桩竖向承载特性研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
WANG Qingyun. Study on characteristics of concrete-cored sand-gravel pile vertical bearing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 叶观宝, 张晴雯, 张振. 真空联合堆载预压下混凝土芯砂石桩复合地基固结特性理论分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3356-3364.
YE Guanbao, ZHANG Qingwen, ZHANG Zhen. Consolidation analysis of concrete-cored sand-gravel piles improved composite foundation under combined vacuum and surcharge preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3356-3364. (in Chinese)
- [19] 翁嘉蔚, 杨涛. 路堤荷载下短混凝土芯碎石桩复合地基的固结特性[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 111-116.
WENG Jiawei, YANG Tao. Consolidation behavior of composite ground with short concrete-core stone columns under embankment loading[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(4): 111-116. (in Chinese)
- [20] JIA K M, XU C S, DU X L, et al. Seismic response comparison and sensitivity analysis of pile foundation in liquefiable and non-liquefiable soils [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 22(1): 87-104.
- [21] TANG L, LIU S X, LING X Z, et al. Seismic soil liquefaction mitigation using stone columns for pile-supported wharves [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(16): 8229-8256.
- [22] 贾科敏, 许成顺, 杜修力, 等. 液化侧向扩展场地-群桩基础-结构体系地震破坏反应大型振动台试验方案设计[J]. 工程力学, 2023, 40(7): 121-136.
JIA Kemin, XU Chengshun, DU Xiuli, et al. Experimental design of shaking table tests for seismic failure response of pile-group-superstructure subjected to liquefaction-induced lateral spreading[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(7): 121-136. (in Chinese)
- [23] WILSON D W. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay[D]. California: University of California, Davis, 1998.
- [24] YANG Z H, ELGAMAL A, PARRA E. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1119-1127.
- [25] FILIPPOU F C, POPOV E P, BERTERO V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1983.
- [26] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2006.
- [27] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.