

混凝土芯砂桩加固路基的沉降特性数值分析

管中林¹, 齐虎², 陈荣平², 钟志强², 陈盛原¹, 赵维炳¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

2. 中铁五局集团有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 混凝土芯砂桩(砼芯砂桩)是由混凝土芯桩和芯桩外部的砂石壳组成的复合桩,其芯桩能提高竖向承载力,而外部砂石壳作为竖向排水通道能加快桩间土孔隙水的排出,有效控制地基的工后沉降。对砼芯砂桩承式路堤进行了现场试验及有限元分析,现场主要进行了地基沉降和孔压的监测,将观测数据与有限元分析结果进行了对比研究,在此基础上进行桩体参数分析,以研究桩长、桩间距、砂桩直径对砼芯砂桩复合地基沉降特性的影响。结果表明:砼芯砂桩复合地基的沉降和超静孔隙水压力消散迅速主要是由于砂桩提供的快速排水通道;桩长、桩间距和砂墙宽度均对砼芯砂桩的沉降有一定影响,其中桩间距影响最大。

关键词: 地基处理;数值模拟;混凝土芯砂桩;沉降

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)03-0203-06

Numerical Analysis of Settlement Characteristics of Concrete-core Sand-gravel Piles

GUAN Zhonglin¹, QI Hu², CHEN Rongping², ZHONG Zhiqiang², CHEN Shengyuan¹, ZHAO Weibing¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. China Railway No. 5 Engineering Group Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract: Concrete core sand pile is a composite pile composed of concrete core pile and sand shell outside the core pile which can improve the vertical bearing capacity, while the external sand shell, as a vertical drainage channel, can accelerate the discharge of soil pore water between the piles and effectively control the post-construction settlement of the foundation. The field test and finite element analysis are carried out on the concrete core sand pile pile-borne embankment, and the monitoring of foundation settlement and pore pressure is mainly carried out on the site. The observation data and the finite element analysis results are compared. The pile parameters were adopted to analyze the influence of pile length, pile spacing and sand pile diameter on the settlement characteristics of concrete core sand pile composite foundation. The results show that the rapid settlement and excess pore water pressure dissipation of concrete core sand pile composite foundation are mainly due to the fast drainage channel provided by sand pile. Pile length, pile spacing and sand wall width all have certain influence on the settlement of concrete core sand pile, among which pile spacing has the greatest influence.

Keywords: foundation treatment; numerical simulation; concrete-core sand-gravel pile; settlement

软土地基具有含水率高、渗透性差等特征^[1],常采用预制混凝土管桩进行地基加固,然而预制管桩施工过程中的“成桩效应”,会导致土层产生超静孔隙水压力,使得地基固结慢,工后沉降大^[2]。针

对软土地基加固工后沉降这一难题,赵维炳等^[3]提出一种新型软土地基加固方式——混凝土芯砂桩复合地基。混凝土芯砂桩复合地基由芯桩和竖向排水体组成,芯桩采用预制钢筋混凝土管桩,竖向排

水体采用砂石壳。成桩后铺设一层碎石垫层加土工格栅作为褥垫层,利用建筑物或路堤本身重量分级逐渐加载,使正常使用状态下的地基变形在堆载和预压期间基本完成,把工后沉降和工后沉降差控制在规范允许的范围内。

混凝土芯砂石桩具有施工简便、承载能力高、成桩质量受周围软土影响小等优点,已广泛应用于软土地基的处理^[4-5]。近几年来,关于混凝土芯砂石桩复合地基的研究已经取得了一些成果。陈俊生等^[6]通过对镇溧高速公路混凝土芯砂石桩复合地基加固路段现场观测,发现混凝土芯砂石桩复合地基超静孔压消散快,地基沉降稳定较快,工后沉降小。唐彤芝等^[7]从理论计算和现场实测两个方面对混凝土芯砂石桩的排水固结性能进行研究,发现混凝土芯砂石桩的排水固结与塑料排水板或袋装砂井可以基本等效,相比刚性桩复合地基,大大缩短地基沉降稳定的时间,有利于控制工后沉降。叶观宝等^[8]通过数值模拟和理论计算相结合的方式,发现相对于传统无砂石壳桩的方案,混凝土芯砂石桩中包围在芯桩周围的砂石壳能够缩短排水路径,加快由沉桩或上部加载引起的超孔压的消散,加速桩周土的固结。俞缙等^[9]针对混凝土芯砂石桩的固结解析展开了一系列研究。以上研究主要集中在混凝土芯砂石桩复合地基的固结特性与芯桩的承载能力,对其沉降影响因素的研究有待深入。

本文通过有限元计算模拟混凝土芯砂石桩复合地基的固结沉降过程,分析桩长、桩间距、芯桩比对混凝土芯砂石桩复合地基的沉降特性的影响,研究加固区和下卧层的沉降及超静孔隙水压力的变化情况。

1 依托工程地基设计方案

南京市江宁区某滨江路工程场地地貌为长江

冲积漫滩,路面宽度 12 m,由于拟建路段软土深厚,具有含水量大、强度低、压缩性高等典型软土特性,采用混凝土芯砂石桩(简称砼芯砂桩)复合地基处理软土地基,路基断面图见图 1。地基土的物理力学性能指标见表 1。

砼芯砂桩芯桩采用外径 300 mm、内径 160 mm 的预制管桩,桩长 20 m,环形砂桩的外径 500 mm,砼芯砂桩整体采用梅花形布置,桩间距 3.2 m。砼芯砂桩沉桩完成后在桩顶铺设一层土工格栅和 50 cm 高的中粗砂褥垫层,目的是使堆载的荷载均匀传递到每根桩上^[10]。褥垫层施工完成后填筑 100 cm 高的堆载,19 d 后再填筑 50 cm 的堆载。

选取砼芯砂石桩施工段断面 K0+140 作为监测断面,分别埋设地表沉降标和孔压计进行现场监测,实时观测路堤填筑过程中复合地基高程、孔压的变化。现场监测的目的是控制施工速率,确保施工期安全,监测荷载施加过程中地基土内孔压的消长规律和地基的变形规律。

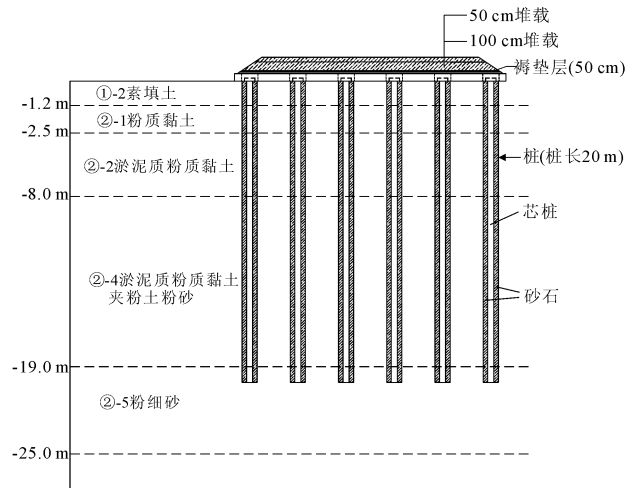


图 1 路基断面图

表 1 地基土物理力学性能指标

土层编号	土层名称	层厚 /m	含水率 ω /%	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	压缩模量 $E_{s(1-2)}$ /MPa	直剪(快剪)	
							C /kPa	φ /($^{\circ}$)
②-1	粉质黏土	0.5~3.9	31.1	18.56	0.883	4.44	19.2	11.6
②-2	淤泥质粉质黏土	0.5~13.5	38.4	17.63	1.100	3.10	11.9	8.9
②-3	淤泥质粉质黏土-粉土	1.2~27.1	37.1	17.56	1.091	3.32	11.8	10.3
②-4	淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂	0.7~17.0	37.0	17.71	1.068	3.44	11.5	9.6
②-5	粉细砂	1.2~13.5	22.8	18.99	0.715	12.14	3.0	30.5
②-6	粉质黏土夹粉细砂	1.8~17.8	35.7	17.65	1.053	3.51	11.5	10.6

2 砼芯砂桩复合地基有限元计算模型

对砼芯砂桩复合地基建立二维有限元模型,由

于路基是对称的,因此取一半建立模型,采用平面应变模型^[11]。模型在路基横截面方向的宽度取复合地基宽度的两倍为 24 m,深度方向取桩长的两倍为

40 m^[12],模型两侧及底部边界均不透水,两侧边界约束水平位移,下边界约束水平和竖向位移,上边界无限制^[13],有限元模型网格见图2。单桩的砂石宽

度按照体积等效的原则换算为3 cm,地基土采用H-S本构模型,褥垫层、填土和砂石采用摩尔库伦本构模型,H-S模型参数见表2,M-C模型参数见表3。

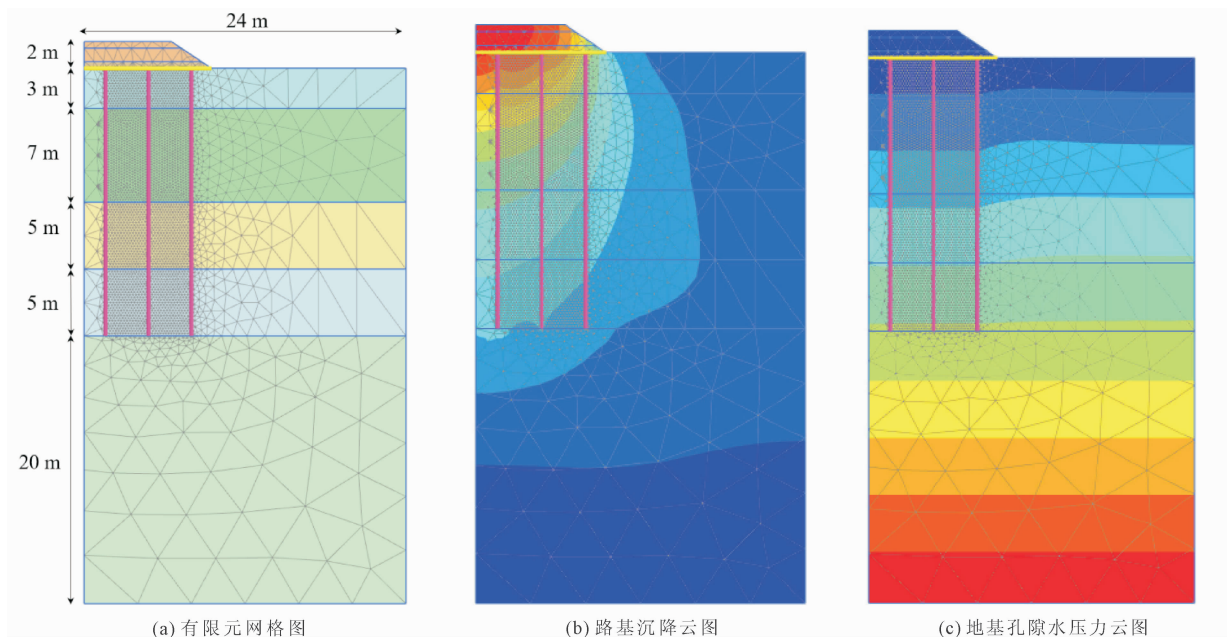


图2 有限元计算图

表2 地基土硬化模型计算参数

土层名称	层厚/m	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e_0	黏聚力 c' /kPa	内摩擦角 φ' /($^\circ$)	固结试验切线模量 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ /kPa	渗透系数 K_x /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
粉质黏土	0~3	18.56	0.883	19.2	11.6	6000	0.00010
淤泥质粉质黏土	3~10	17.63	1.100	11.9	8.9	4620	0.00008
淤泥质粉质黏土-粉质黏土	10~15	17.56	1.091	11.8	10.3	4455	0.00010
淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂	15~20	17.71	1.068	11.5	9.6	4200	0.00010
粉细砂	20~40	18.99	0.715	3.0	30.5	7810	1.00000

表3 摩尔库伦模型下的土体参数

土层名称	排水类型	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e_0	黏聚力 c' /kPa	内摩擦角 φ' /($^\circ$)	弹性模量 E /kPa	渗透系数 K_x /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
褥垫层	排水	22	0.5	1	40	25000	10.00000
填土层	排水	21	0.7	20	25	8000	0.00001
砂墙	排水	20	0.5	1	30	4000	5.00000

有限元计算得出的路基中心沉降结果见图3,路基中心表面在堆载初期沉降速率较大,45 d后趋于稳定,堆载70 d后沉降量即趋于稳定。可以看出数值计算结果和现场实测结果拟合程度良好,现场实测的最大沉降为12.0 cm,数值计算结果的最大沉降为11.2 cm,现场实测沉降较数值计算结果偏大,约大0.8 cm。

砂桩周围的孔压结果见图4,可以发现现场实测孔压与数值计算得出的孔压值结果拟合程度较

好。

3 砼芯砂桩参数敏感性研究

砼芯砂桩复合地基沉降由加固区土体竖向压缩和下卧层土体压缩两部分组成^[14]。为充分认识砼芯砂桩复合地基位移特点,进行合理设计和优化,进行有限元分析,揭示桩长、桩间距、芯桩比等不同设计参数下,砼芯砂桩复合地基的沉降变形规律和超静孔隙水压力消散规律。

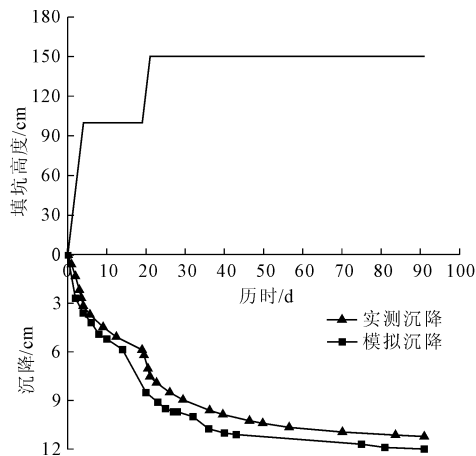


图 3 沉降结果与现场实测结果对比

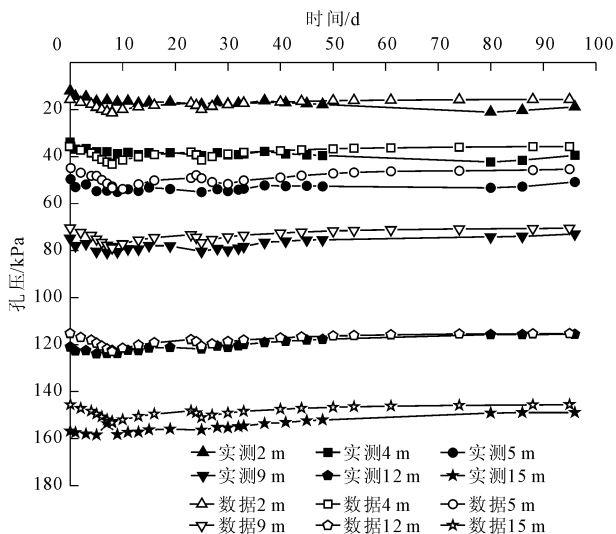


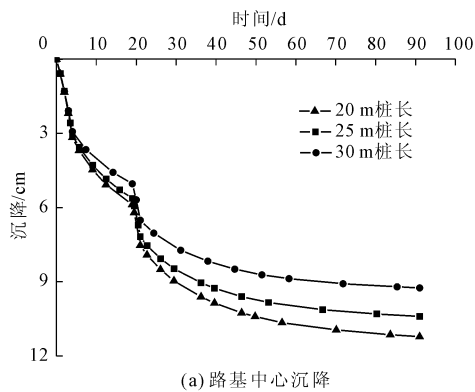
图 4 孔压结果与现场实测结果对比

3.1 桩长的影响

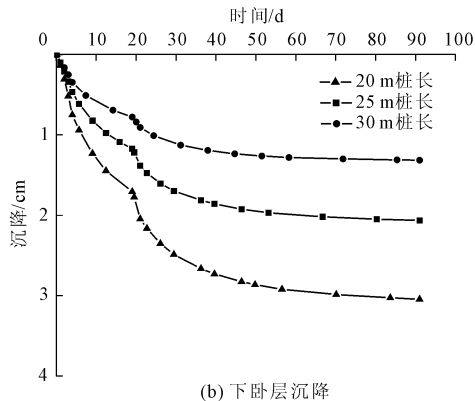
图 5 为不同桩长情况下,路基中心表面和下卧层顶面沉降发展曲线。如图 5 所示,路基表面和下卧层顶的沉降都随荷载增加而增大,当桩长从 20 m 增大至 30 m 时,下卧层顶面沉降因桩的加固作用而显著降低一倍多。因此,对存在较好持力层的软弱地基,应尽可能打穿软土层;对于深厚软土地基,如无法打穿软土层,也应尽量增加桩的打设深度,减小下卧层厚度,以尽可能减小地基沉降,特别是工后沉降。通过有限元计算发现不同桩长下超静孔隙水压力的消散速度并无明显差异,因此认为桩长对超静孔隙水压力的消散几乎没有影响。

3.2 桩间距的影响

图 6 为不同桩间距时,路基中心点和下卧层沉降随时间变化曲线。改变桩间距等同于改变桩的置换率:桩间距减少相当于桩加密,桩的置换率提高,

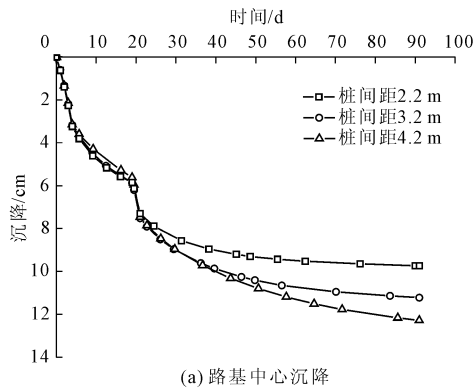


(a) 路基中心沉降

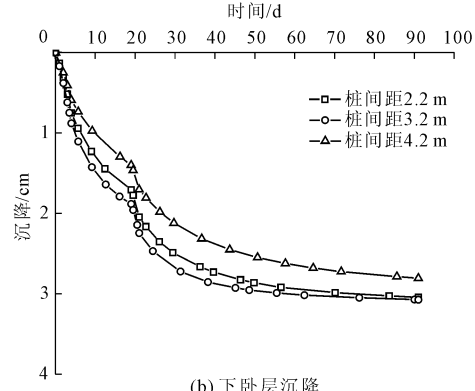


(b) 下卧层沉降

图 5 不同桩长下路基中心和下卧层的沉降



(a) 路基中心沉降



(b) 下卧层沉降

图 6 不同桩间距下路基中心和下卧层的沉降

反之桩的置换率降低^[15]。在下卧层厚度一定的情

况下,路堤填筑初期,荷载较小,置换率对路基中心沉降影响较小。随着路堤荷载的第二次堆载,路基中心沉降随置换率的减小而增大。从图中可以看到,在下卧层厚度一定的情况下,置换率的减小对下卧层顶面沉降影响较小,而加固区压缩量随置换率的减小而增加,即加固区压缩量占路基中心总沉降的比例随置换率的减小而增大。

图7为不同桩间距下最大超静孔隙水压力的变化情况,由图可以发现随着桩间距的减小,超静孔隙水压力的最大值变小,超静孔隙水压力消散的也更快,桩间距4.2 m时超静孔隙水压力的消散速度明显慢于其他两种情况,桩间距3.2 m和2.2 m的最大超静孔隙水压力有所不同但70 d固结后超静孔隙水压力都基本消散完成。桩间距降低导致置换率提高,排水通道数量增加,排水效率提高,因此桩间距小的情况下超静孔隙水压力消散的更快。

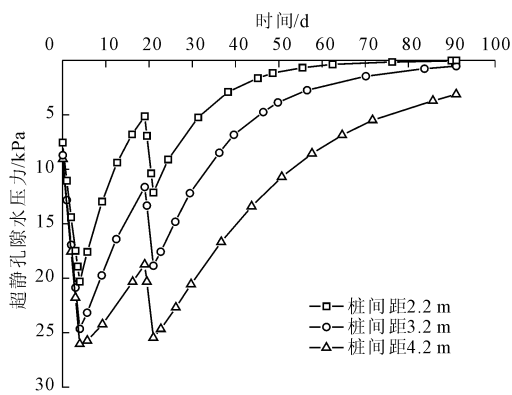


图7 不同桩间距下超静孔隙水压力消散情况

3.3 砂桩直径的影响

图8和图9分别为环形砂桩不同直径,即有限元模型中砵芯砂桩不同砂墙宽度情况下,路基中心和下卧层顶面沉降发展曲线和超静孔隙水压力的变化情况。图中可以看出,砂墙宽度为零,即仅采用预制混凝土管桩加固软土地基的方案,此时路基的沉降很小,超静孔隙水压力最大且消散很慢,与砵芯砂桩相比固结速度缓慢,将产生较大的工后沉降。随着砂墙宽度的增加,超静孔隙水压力的消散基本一致,但路基表面和下卧层的沉降速率明显加快且沉降总量有所降低,这是由于砂墙的弹性模量较大,对地基有一定的加固作用,砂墙的宽度越大,其对地基的加固作用越明显。

4 结论

(1) 砵芯砂桩的环形砂壳可以近似看作砂井,

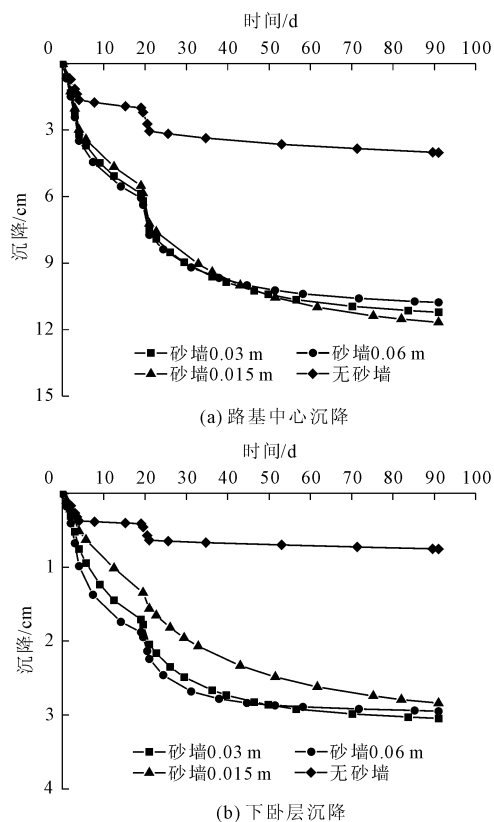


图8 不同砂墙宽度下路基中心和下卧层的沉降

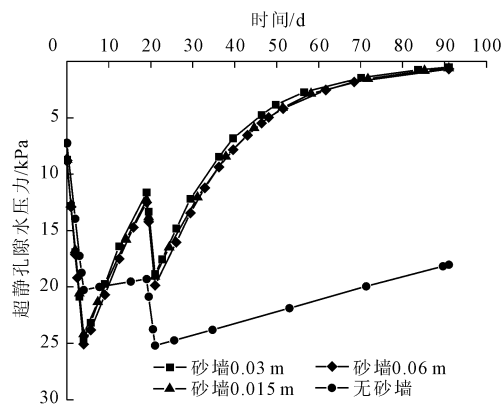


图9 不同砂墙宽度下超静孔隙水压力消散情况

其主要作用是提供排水通道,使堆载产生的超静孔隙水压力迅速消散,加速地基固结,促进下卧层沉降发展,减少工后沉降。

(2) 桩长的增加可有效降低路基加固区和下卧层的沉降,桩间距和砂桩直径均对路基加固区和下卧层的沉降有一定影响;砂桩直径的增加可以极大的缩短路基加固区的沉降固结时间;桩间距的选择对超静孔隙水压力消散的快慢有较大影响。

(3) 工程实践中,应合理设计砵芯砂桩的桩长、桩间距和砂桩直径,对有较好持力层的软土地基,应尽可能打穿软土层;对于深厚软土地基,如不可能打

穿软土层,也应尽量增加桩的打设深度,以尽可能减小地基沉降,特别是工后沉降。

参考文献:

- [1] 牛顺,肖涛,冯健雪,等.考虑扰动效应的透水管桩地基土固结效果有限元分析[J].长江科学院院报,2021,38(12):130-136,145.
- [2] 李国维,边圣川,陆晓岑,等.软基路堤拓宽静压PHC管桩挤土效应现场试验[J].岩土力学,2013,34(4):1089-1096.
- [3] 赵维炳,唐彤芝,蔡新,等.加固深厚软基的新方法——砾芯砂石桩复合地基法:CN1793525A[P].2006-06-28.
- [4] 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.
- [5] 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(S1):675-681.
- [6] 陈俊生,唐彤芝,赵维炳,等.混凝土芯砂石桩复合地基现场试验研究[J].岩土工程学报,2007(7):957-962.
- [7] 唐彤芝,王芮文,尹建斌,等.混凝土芯砂石桩复合地基排水固结特性及试验研究[J].公路,2007(12):4-8.
- [8] 叶观宝,张晴雯,赵维炳.混凝土芯砂石桩荷载试验及沉桩数值分析[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(1):41-48.
- [9] 俞缙,戚志博,蔡燕燕,等.低标号混凝土芯砂石桩复合地基固结计算方法[J].工程力学,2012,29(6):218-223,240.
- [10] 唐彤芝,姚雪军,黄康理.CFG桩复合地基现场荷载试验研究[J].工业建筑,2009,39(S1):741-744.
- [11] 李琳,马荣,李敬梅,等.土体侧移作用下桩基侧向土压力的群桩效应[J].防灾减灾工程学报,2022,42(3):561-570.
- [12] 吴九江,程谦恭,王寒冰,等.超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状分析[J].工业建筑,2012,42(5):106-114.
- [13] 李廷春,吕连勋,段会玲,等.深埋隧道穿越富水破碎带围岩突水机理[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(10):3469-3476.
- [14] 王驰,徐永福,叶冠林.砾芯水泥土搅拌桩复合地基工作特性分析[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(9):1610-1617.
- [15] 何宁,娄炎,娄斌.CFG桩复合地基加固桥头深厚软基[J].水利水运工程学报,2010(4):89-94.

(上接第 193 页)

- [17] Liu Xuechun, Cui Fuyuan, Jiang Ziqin, et al. Tension-bend-shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column[J]. Engineering Structures, 2019,201:109798.
- [18] Liu Xuechun, He X N, Wang H X, et al. Bending-shear performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018,145:28-48.
- [19] Hobbs D W. Strength of concrete under combined stress[J]. Cement and Concrete Research, 1971,1(1):41-56.
- [20] Chen W F. Plasticity in Reinforced Concrete[M]. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [21] 建筑构件耐火试验方法 第4部分:承重垂直分隔构件的特殊要求:GB/T 9978.4—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.