

电厂循环管淤泥质地基过大沉降加固效果研究*

商拥辉^{1,2}, 徐林荣^{2,3}, 王克宏⁴

(1. 黄淮学院 建筑工程学院, 河南 驻马店 463000; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075;
3. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075; 4. 湖南核工业地质局三〇三大队, 长沙 410075)

摘要:海相淤泥质土具有含水量高、压缩性强及承载力低等特性, 工程实践地基处治后服役期一旦出现沉降过大现象, 不仅治理费用昂贵且二次加固技术要求较高。依托印度尼西亚雅加达湾北部龙湾 3×315 MW 燃煤电厂循环管地基工程为背景, 在分析循环管地基原“真空预压+竹桩”处治措施的基础上, 借助实测数据从设计、施工及管理等方面阐述了地基过大沉降的原因; 考虑加固中循环管保持正常工作因素, 提出“循环管两侧高压双管旋喷桩+循环管道下部双液注浆”二次集成加固方案。综合测试和数值计算结果可知, 二次加固方案实施后循环管地基沉降得到控制, 测试 50 d(趋于稳定) 累计沉降约为 22 mm; 计算预测 30 年累计沉降约为 48 mm(5 cm 以内), 沉降速率小于 0.01 mm/d; 实测和计算均验证加固控制效果较好。研究成果能为类似工程实践提供理论参考。

关键词:海相淤泥质土; 循环管地基; 过大沉降; 二次加固; 控制效果

中图分类号: TU472.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0556-09

Study on Reinforcement Effect of Muddy Soil Foundation over Large Sedimentation in Power Plant

Shang Yonghui^{1, 2}, Xu Linrong^{2, 3}, Wang Kehong⁴

(1. Institute of Architecture and Engineering, Huanghuai University, Zhumadian, Henan 463000, P.R. China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P.R. China; 3. High Speed Railway Construction Technology National Engineering Laboratory, Changsha 410075, P.R. China; 4. Hunan Nuclear Industry Geological Bureau of the 303 Brigade, Changsha 410075, P.R. China)

Abstract: The marine muddy soil has the characteristics of high water content, strong compressibility and low bearing capacity. After the engineering practice and the service period, the sedimentation is too large, which is expensive and the secondary reinforcement technology is high. Based on the analysis of the “vacuum preloading and bamboo pile” treatment measures of circulating pipe foundation in the north of Jakarta Bay, Indonesia, the design of the measured data is from the aspects of design, construction and management. This paper expounds the reason of the large settlement of the foundation. Considering the normal working factors of the circulating pipe in the reinforcement, the author puts forward the second integrated reinforcement scheme of the double-liquid grouting pile on the two sides of the circulating pipe. According to the results of comprehensive test and numerical calculation, it can be seen that the settlement of the recirculating pipe is controlled after the second reinforcement scheme is carried out. The cumulative settlement is about 22 mm for 50 days (stable). The cumulative sedimentation is about 48mm (within 5 cm) and the settling rate is less than 0.01 mm / Day; measured value and calculated value to verify the reinforcement control effect are better. The research results can provide reference data for similar engineering practices.

Keywords: marine muddy soil; circulating pipe foundation; excessive settlement; secondary reinforcement; control effect

* 收稿日期: 2018-11-01(修改稿)

作者简介: 商拥辉(1985-), 男, 河南汝南人, 博士, 讲师, 主要从事轨道交通特殊土路基与隧道工程方面的教学和科研工作。E-mail: mlpeter@136.com

基金项目: 国家自然科学基金(51078358, 51778634)

0 引言

21世纪以来,随着经济全球化的不断发展以及科学技术的不断进步,人类建造活动由陆地逐渐延伸到沿海滩涂地区^[1]。沿海地区分布不同程度的海相淤泥质土,具有压缩性高、强度低、天然地基承载力低等显著特点^[2-3]。据不完全统计数据显示,全球海岸线长约为30万km^[4],我国大陆海岸线长约为1.8万km,后者约占前者6%^[5-6]。海相淤泥土广泛分布于世界范围内的沿海国家,如何有效处治海相淤泥质软土地基已成为全球工程界面临的重大课题之一。

目前,国内外工程界处治软土地基的常用方法包括:砂垫层法^[7]、强夯法^[8]、换填法^[9]、排水固结法^[10]及碎石桩法^[11]等。国内外学者结合理论分析、数值模拟、室内模型及现场测试等方法,对软土地基处治机理与关键技术进行探究,并获得了相对丰富的成果。例如:Terzaghi于1923年提出一维固结理论^[12],Rendulic于1953年将Terzaghi一维固结理论推广到二维、三维^[13],该理论成为软土地基应力变形分析的基础。国内李明飞^[14]、刘江波^[15]等学者在上述理论基础上,进一步探索了软土地基固结特性的时间与空间效应。数值模拟相比经典理论分析而言,可以结合实际工程进行多个工况下软土地基应力变形分析,具有一定进步性。例如:周洛汉等^[16]、陈宏伟等^[17]依托沪宁城际铁路,探索了桩-筏复合地基处置深厚软土的机理与控制效果。借助现场测试,刘吉福等^[18]、赵明华等^[19]分析了软土地基桩基处治后的荷载传递机理。

海相淤泥质地基与一般软土更为复杂,相应的处治技术也要求较高。高压喷射技术作为一种有效的软土地基加固方法,通过注浆切坡软土使其加固硬化,最早于20世纪60年代末期被日本中西涉博士发明出来,当时命名为CCP(Chemical Chaiming Pile)工法,即单管法^[20]。20世纪70年代中期,日本又研发出JPG(Jumbo Special Grout)工法(二重管法)和CJG(Column Jet Grout)工法(三重管法)^[21]。高压喷射技术具有固结形状可控、固结强度有保障、原料广泛低廉、浆液集中流失

少、设备简单安全、无公害及施工简便等优点,处治海相淤泥质软土地基可以显著改善土的变形性质,达到提高地基的承载力的目的^[22]。20世纪70年代后期,高压喷射技术从日本引进国内,1988年国家科委将高压喷射技术列为重点研究。到目前为止,高压喷射注浆工法经不断完善和优化,已经形成了一个种类繁多的系列化施工方法,可依喷射流移动轨迹、注浆管类型、固结机理和土的置换程度分为十几个类别^[23]。如今,高压喷射注浆技术已广泛地应用在各个领域中。

印度尼西亚雅加达湾北部龙湾电厂工程,场地为深厚海相淤泥质土,电厂主体建设前采用“真空预压+堆载”加固处治方法。在投入使用后,循环管基础沉降达几十厘米,影响到其正常使用,需采取加固措施。然而,考虑电厂工作的特殊情况,要求二次加固过程中循环管保持正常工作,这就为二次加固方案选择提供了难题。基于此考虑,首先对原有加固方案沉降过大原因进行分析,然后对二次加固方案进行比选,并借助现场测试和数值模拟对处治效果进行了合理评估。研究成果能够为进一步完善海相淤泥质土软土地基处治技术,以及推广高压喷射技术在类似工程中的应用提供理论参考。

1 工程概括及地基沉降原因分析

1.1 地基原处置措施

印度尼西亚雅加达湾北部龙湾3×315 MW燃煤电厂工程位于西瓜哇岛的北海岸,距万丹省文登市27 km,在雅加达以西约80 km,位于万丹省文登市龙塔村,南纬06°02'30",东经106°27'30",海拔为平均海平面以上0~2 m,紧邻Cilontar河口,场地主要由河流冲积、海洋沉积形平原,地下水较浅(埋深约为0.2~1.5 m)。勘察结果表明,电厂场地范围淤泥质土平均分布厚度9 m,局部区域淤泥质土层厚度可达到25~28 m。结合原位测试与室内土工试验综合分析,汇总电厂区域各土层基本物理力学指标见表1。由表1可知:电厂区域淤泥质土具有含水量较高、抗剪强度较低、压缩性较高、以及天然地基承载力较低等特点。

表 1 土的物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical indices of soil

分层代号	天然含水量 ω /%	重力密度		比重 G_s	孔隙比 e	饱和度 S_r /%	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p /%	液性指数 I_L /%
		湿 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	干 γ_d / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)							
① ₁ 淤泥土	85	15	7.5	2.57	2.43	95	95	30	65	0.93
① ₂ 淤泥土	68	15	8.5	2.60	1.943	95	93	30	62	0.61
②可塑黏土	55	16	10	2.60	1.5	95	85	30	50	0.54
③硬朔黏土	47	17	12	2.62	1.2	95	90	29	60	0.23

分层代号	UU 抗剪强度		CU 抗剪强度		承载力特征值 /kPa	渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	固结系数 /($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	压缩模量	
	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)				标贯 /MPa	静探 /MPa
① ₁ 淤泥土	6	1.5	6	10	30	4.40×10^{-7}	1.8×10^{-3}	/	1.06
① ₂ 淤泥土	10	3	8	12	45	3.46×10^{-7}	2.0×10^{-3}	3.6	3.08
②可塑黏土	22	7	16	15	140	2.02×10^{-7}	2.2×10^{-3}	7	8.97
③硬朔黏土	35	10	40	18	/	3.74×10^{-8}	2.5×10^{-3}	11.53	/

考虑电厂区域海相淤泥质土层分布及基本物理力学特点,对电厂相关工程地基进行了处治,具体处治的方案包括:①考虑电厂主体工程建筑荷载相对较大,对应海相淤泥质地基处治方式为“真空预压+堆载”;②在循环水管道搭接部等重要区域,海相淤泥质地基处治方式为“PC 桩基础”;③其他部分区域综合考虑服役功能与处治造价,海相淤泥质土地基采用处治方式为“碎石垫层+竹桩”。其中,碎石层厚起到均匀传递上部荷载作用,厚度为 1~2 m;竹桩深 5~6 m,竹桩间距 0.5 m,竹桩采用“梅花”形状进行布置,整个设置如图 1 所示。图 1 中循环水管斜上方区域土质为回填土含砾黏土。

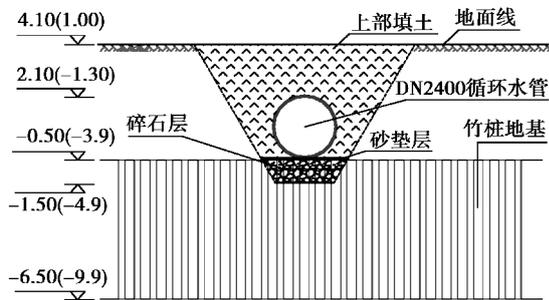


图 1 竹桩加固方案

Fig. 1 Reinforcement program of the bamboo pile

1.2 沉降测试与事故原因分析

为了保值循环水管正常服役,自施工结束后对电厂整个区域内循环水管进行沉降测试,测点动态

沉降曲线如图 2 所示。图 2 中两个测点分别选用循环水管“PC 桩”和“碎石垫层+竹桩”处治区(选取测点为该处处治监测沉降最大曲线)。

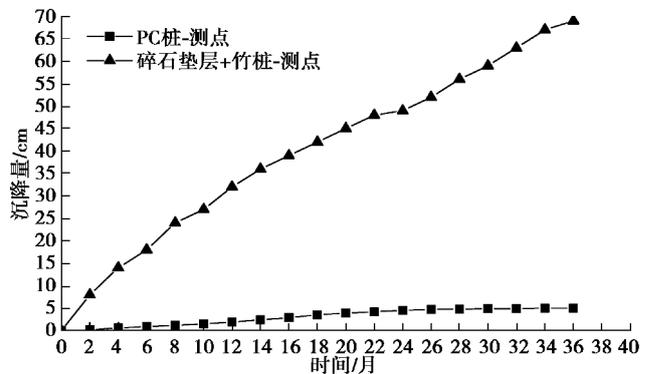


图 2 沉降测试曲线

Fig. 2 The curves of settlement test

由测试结果图 2 可知:在循环水管道搭接部等重要区域,海相淤泥质地基采用“PC 桩基础”方案处治后,地基承重能力提高,循环水管在工程状态中受到地基沉降干扰教小,测试沉降整体呈类直线发展趋势,自观测起 12 个月、24 个月和 36 个月累积沉降值分别为 1.7 cm、5 cm 和 5.1 cm,相应沉降增加值依次为 4.3 cm 和 4.4 cm,对应沉降增加的幅度依次为 252.94%和 258.82%。测试数据表明,自观测累积 20 个月后沉降曲线处于稳定状态。部分循环水管软土地基采用“碎石垫层+竹桩”处治后,沉降曲线随时间增幅较快,观测 12 个月、24 个月和 36 个月

沉降值分别为 32.24 cm、48.62 cm 和 68.43 cm,相应沉降增加值依次为 16.38 cm 和 36.19 cm,对应沉降增加的幅度依次为 50.81% 和 112.25%。测试数据表明,部分循环水管采用“碎石垫层+竹桩”处治,处治效果并不理想,沉降呈逐渐增大趋势。

循环管地基沉降过大并持续发展的原因归结于以下几种主要因素:①海相淤泥质软土层较厚,原处治方式兼顾考虑工程造价因素,采用“碎石垫层+竹桩”处治方案本身存在一定缺陷,具体表现为:竹桩长度(5~6 m)仅为地基海相淤泥质土层平均厚度(9 m)的 55.56%~66.67%,未插入持力层,对于整个加固区难以形成有效荷载传递,地基因附加应力固结效果相对较弱;碎石垫层易于受上部循环水管自重荷载作用,易于嵌入压缩性较高的淤泥质土内,难以有效分担上部荷载,易于造成应力集中,进一步加剧循环水管的下沉。②施工存在瑕疵。电厂循环水管沉降过大事出现后,现场勘验发现,该区域循环水管中心线与地基处治中心存在偏差,且碎石垫层的厚度及压实度抽检合格率不足 30%。③循环水管服役期管理措施不完善。根据现场调研循环水管维修工作人员记录可知,部分地段循环水管服役过程中存在超负荷运行情况,先后出现两次水管开裂渗透事故,维修存在不及时、不

保质情况。上述等三大因素,造成了“碎石垫层+竹桩”处治区沉降累积较大,且仍在持续发展。因此,需要采取相应的加固措施,在不影响电站正常运行条件下消除淤泥质土层地基沉降对循环管产生的不利影响,保证上部循环管处于正常工作状态。

2 二次加固方案及关键参数确定

2.1 二次加固方案选择

目前,普遍认为桩基是软土地基加固最有效的方法。考虑工程中淤泥地基初步处治过,且二次加固施工要求保持循环管正常工作,而灌注桩、静压桩及搅拌桩均不具备施工条件,施工过程中可能造成循环管的破坏,同时因大面积开挖,既不安全也不经济。因此,结合多个专家指导意见及工程实际情况,提出循环管道两侧采用高压双管旋喷桩和循环管道下部采用双液注浆加固的方案。具体加固措施包括:①高压双管旋喷桩在加固段的循环管两侧各按梅花形间距 1.8 m 布置一排,桩径按照处治深度进行分段设计,上部 5 m 范围桩径 ≥ 1.2 m,以下部分桩径 ≥ 1.0 m,桩长约 30 m。②双液注浆管在加固段的循环管两侧各布置一排,底部交叉,间距 1.5 m,注浆部位为旋喷桩之间、循环管以下 2 m 范围。具体二次加固方案设计如图 3 所示。

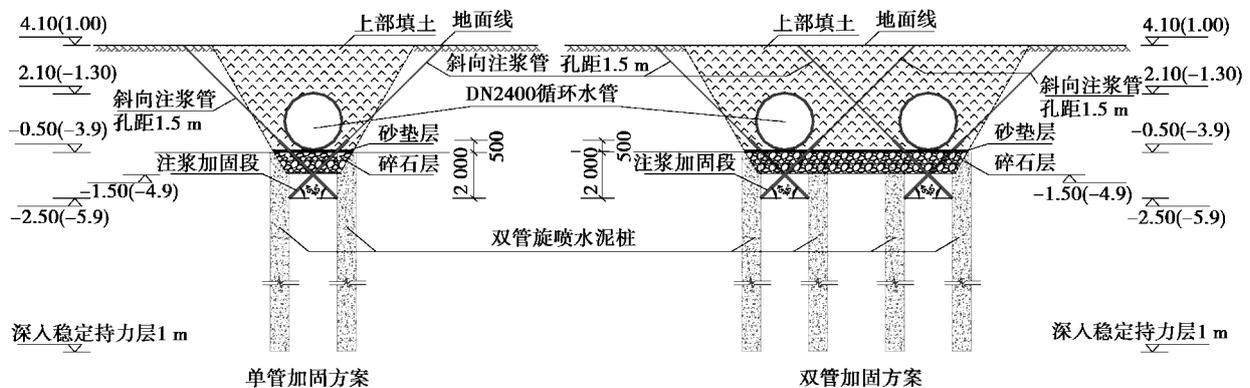


图 3 加固方案二设计剖面图

Fig. 3 Design section of the reinforcement plan II

2.2 旋喷桩的固化特性试验分析

借助室内试验,分布不同海相淤泥质土掺入水泥后固化特性,为高压喷射旋喷桩水泥掺量选择提供参考数据。试验选用 P.042.5 水泥,掺量主要考虑 0%~15% 之间。图 4 为水泥固化土(海相淤泥质)无侧限抗压强度、不排水抗剪强度、代表抗变形能力指标的杨氏模量随水泥掺入量的变化曲线。

由图 4 知:水泥掺量和龄期均对水泥固化土的无侧限抗压强度、不排水抗剪强度和杨氏模量均存

在影响;随着养护龄期增加,海相淤泥质土与水泥因发生物理化学反应的团聚程度更显著,相应而言强度与抵抗变形能力提高更为明显,从试验数据变化曲线来看,在龄期 14 d 时团聚作用基本完成了一大部分(强度约占 80%);不同水泥掺量下的固化土的无侧限抗压强度、土体抗剪强度和杨氏模量 E 增长情况也不一致,掺量为 2.5% 时几乎无增长,水泥掺量达到 15% 时,强度(无侧限抗压强度/抗剪强度)与刚度(杨氏模量)分别增长了 40 和 250 多倍。

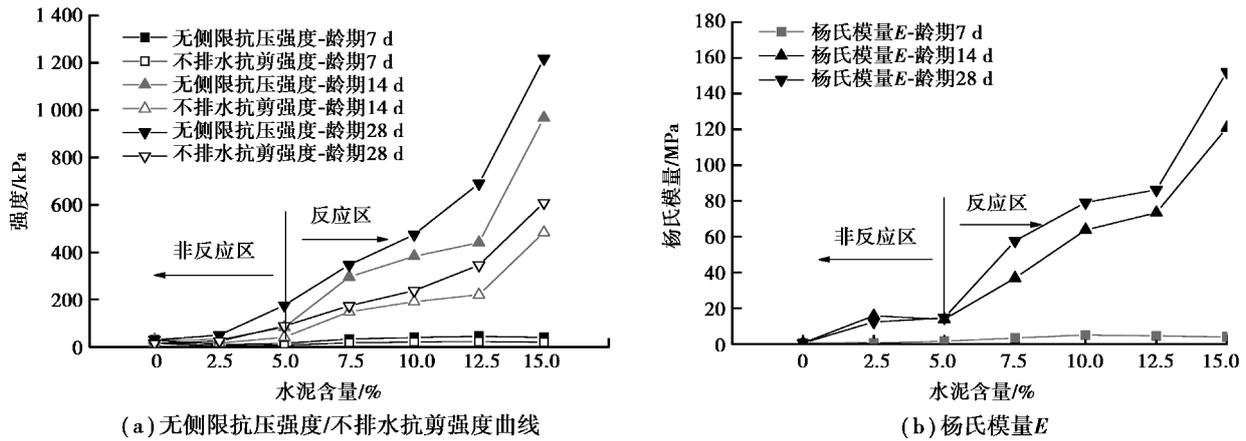


图 4 海相淤泥质土水泥固化试验数据曲线

Fig. 4 Curves of solidification test of marine solidified soil cement

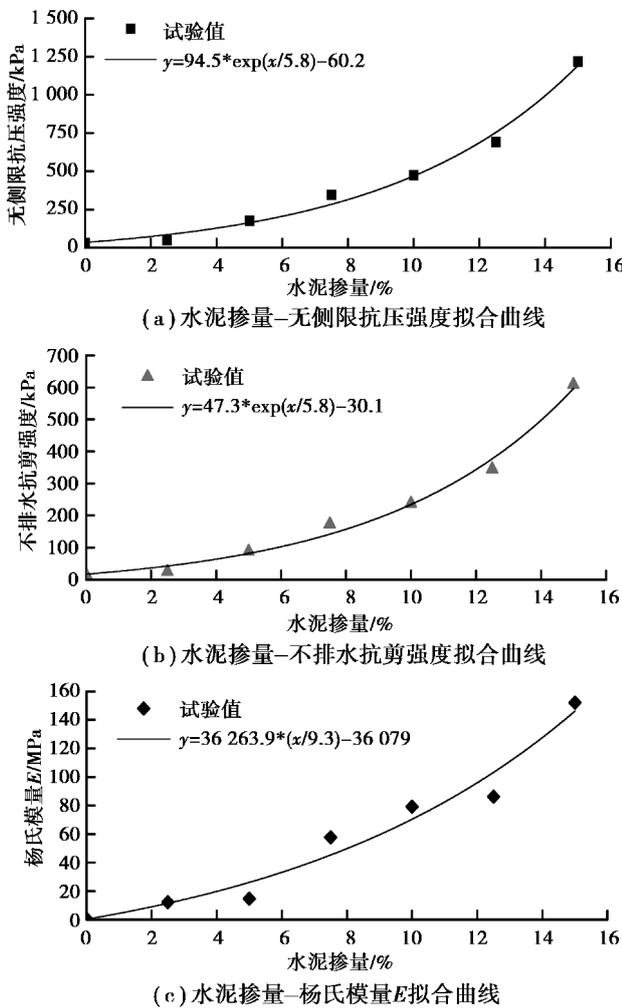


图 5 拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve

为进一步探索固化土强度与刚度参数,对其试验各项指标进行相关性拟合。由图 5 可知:水泥掺量与强度(无侧限抗压强度/抗剪强度)与刚度(杨氏模量)呈指数增长关系。大量工程实践表明,旋

喷桩浆液不是水泥越多越好,而是与地质条件及浆液流速等因素相关。水灰比太大时高压喷射有困难,而太小时固化特性又难以满足加固目标。高压旋喷桩水泥掺量选取除结合水泥固化试验外,还要在施工中进行试桩试验综合选取,故实践中水灰比通常取 8.0%~15%。结合固化试验及高压旋喷桩施工前期试桩数据,最后选取施工中旋喷桩最佳水泥掺量约为 13%~15%。

3 二次加固处治效果分析

3.1 现场测试

为了对二次加固方案处治效果进行评估,采用现场测试与数值模拟相结合的方式对循环水管地基二次加固后沉降状态进行分析。

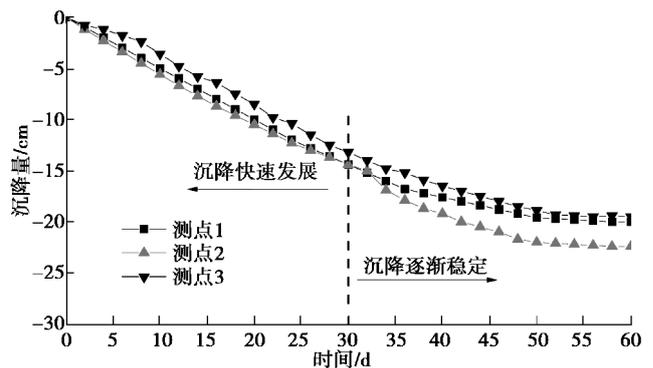


图 6 实测沉降曲线(二次加固处治后)

Fig. 6 Curves of the measured settlement (after secondary reinforcement treatment)

由图 6 实测沉降曲线可知:地基二次加固施工结束初期,循环水管地基沉降随时间仍成逐渐增大的趋势。这说明初期二次加固效果未充分发挥,随着这一功效发挥作用,地基沉降逐呈收敛趋势,在沉降观测 45~60 d 内沉降速率为 0.067 mm/d,相

对较小,稳定时累积变形控制在 22 mm 以内,说明循环水管采用二次加固处治后,整体控制效果较好。

3.2 数值模拟

数值模型所选截面为图 7 中粗线 1-1 断面所示范围,宽为 68 m,因平面图中 68 m 宽度内标高基本无变化,故模型表面取平。同时,分析时仅取图 7 中 1#循环管道进行分析。模型计算中土的本

构模型采用软件自带软土模型,旋喷桩本构模型采用线弹性模型;模型中桩采用板单元模拟,其他采用实体单元进行模拟;模型两侧限制法向位移,模型底部采用采用固定约;整个模型仅考虑重力场作用,且假设同一类型材料为各项同性均质;计算涉及参数详见表 1,其中旋喷桩的压缩模量和泊松比分别近似取 250 MPa 和 0.23。

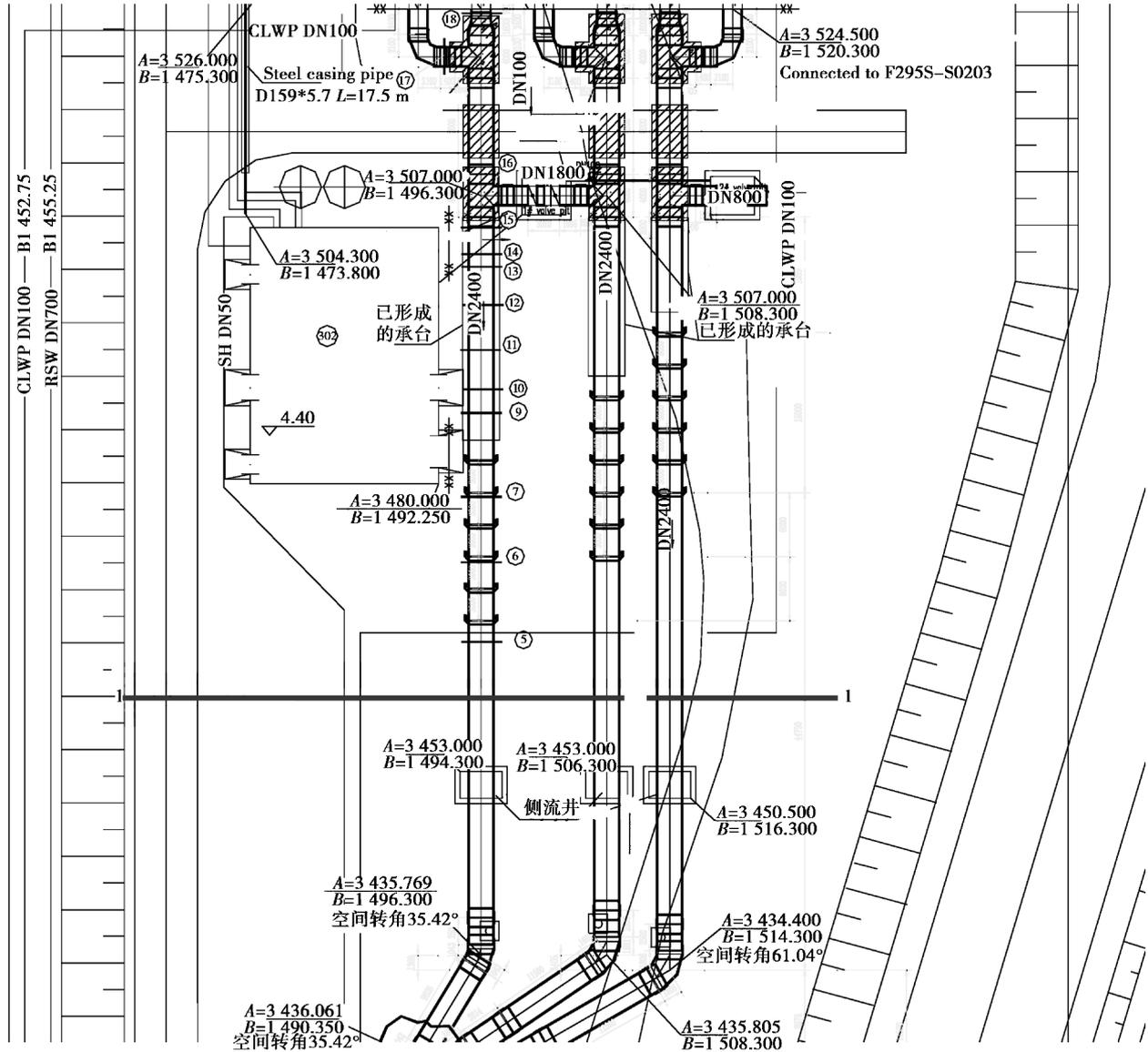
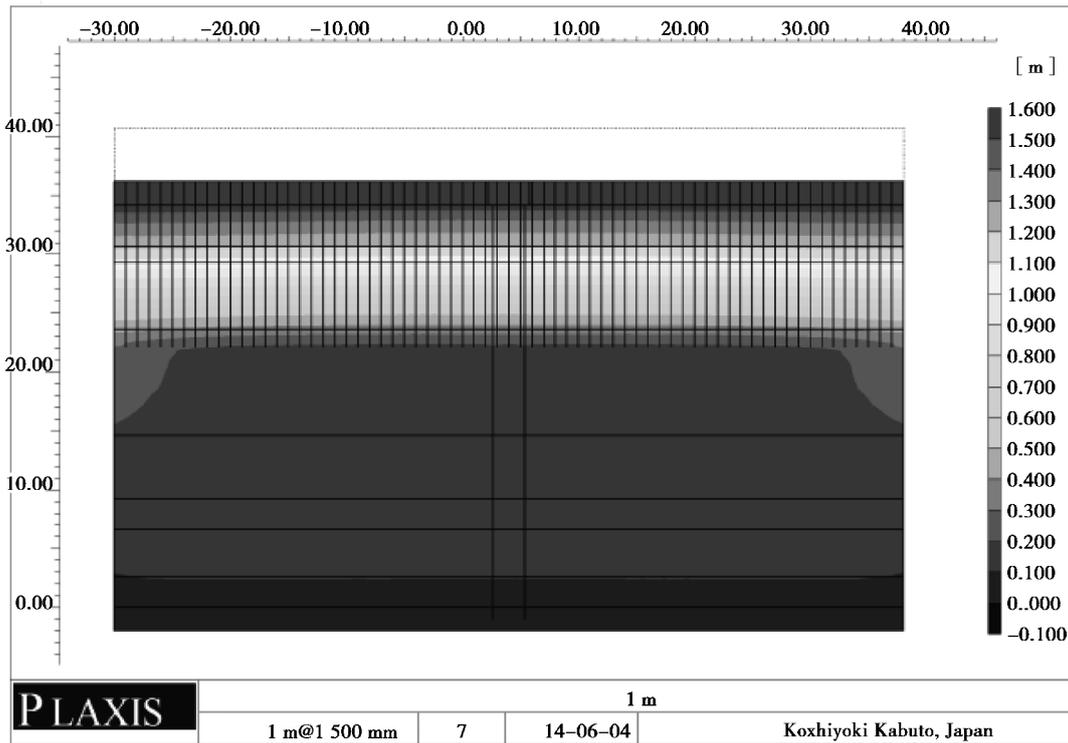


图 7 二次加固平面位置图

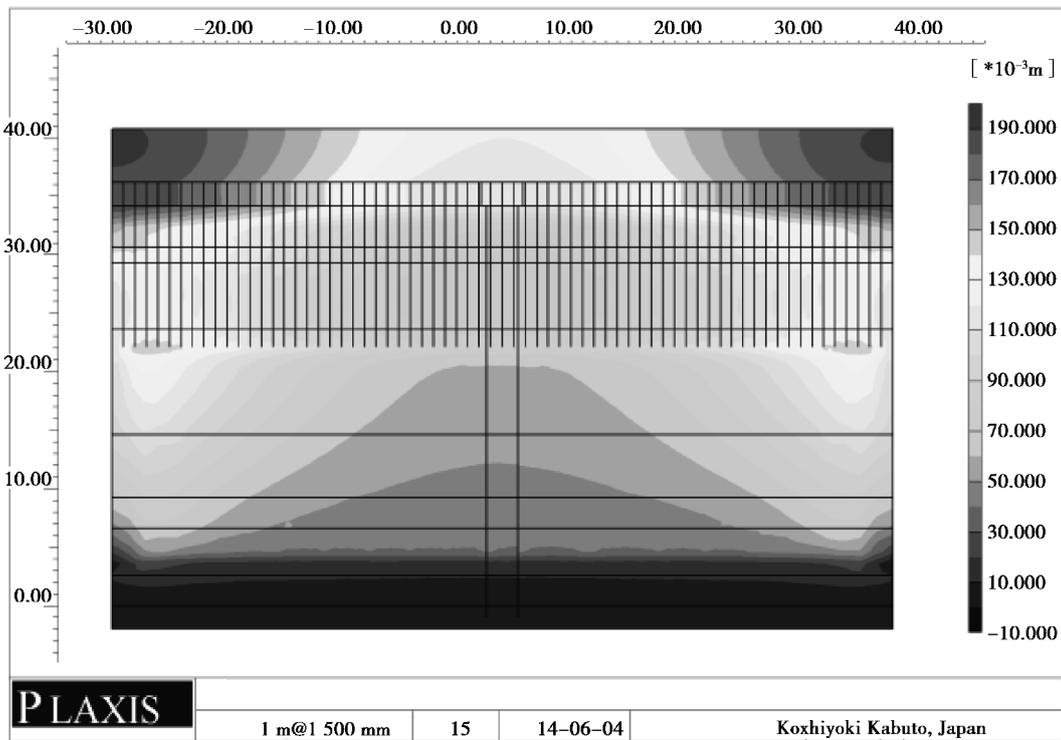
Fig. 7 Plane position map of secondary reinforcement

模型建立诸多假设基础上,借助该模型对地基沉降预测分析前,需要对其合理性进行验证。考虑二次加固前已有测试数据,可以此模型模拟二次加固前地基沉降状态,并与测试数据对比,达到合理评估模型精度目的。由图 8 可知:原海相淤泥质软

土地基采用“碎石垫层+竹桩”处治后,循环水管运行周期 3 年对应固结沉降计算值约 70 cm 左右,与现场沉降实测(图 2)较吻合,说明本文建立的数值模型具有较高可信度。



(a) 真空预压(模拟荷载100 kPa)地基沉降位移云图



(b) 地循环管运行地基沉降位移云图

图 8 沉降计算结果云图

Fig. 8 Cloud map of the settlement calculation results

由上述计算结果可知,本文所建数值模型具有较高可信度,可以借助该模型对循环水管地基二次加固效果进行分析。过程分为两部分:①管道下部双液注浆加固;②高压双管旋喷桩加固复合地基。结合数值模型预测30年内循环水管二次加固后沉降变化状态,具体计算结果如图9所示。

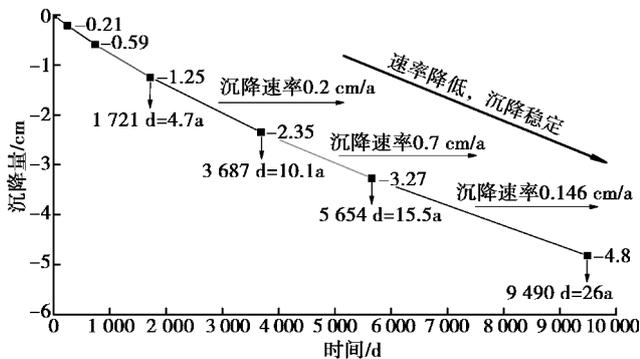


图9 时间-总位移图

Fig. 9 The total displacement with time

由图9可知:循环水管二次加固后,沉降随时间逐渐趋于缓慢,最终处于稳定状态,与加固后实测数据图7相吻合,再次验证文中所建数值模型的合理性;预测5a、10a、15a和26a累积沉降依次为1.26 cm、2.35 cm、3.25 cm和4.82 cm,其中预测5~10a、10~15a和15~26a时间区间地基沉降速率分别为率0.056 mm/d、0.047 mm/d和0.041 mm/d(小于0.01 mm/d),沉降随年限增加逐渐呈收敛趋势,说明“碎石垫层+竹桩”地基二次加固沉降控制效果较好。

4 结论

借助现场调研、测试数据、室内试验与数值模拟等方法,分析了印度尼西亚雅加达湾北部龙湾3×315 MW燃煤电厂循环水管沉降事故原因,并对二次加固方法与处治效果进行分析,研究获取主要结论如下:

(1)结合测试数据与现场勘验,从设计、施工与管理等三大角度,对印度尼西亚雅加达湾北部龙湾3×315 MW燃煤电厂部分循环水管采用“碎石垫层+竹桩”处治后沉降过大原因进行了归纳总结;原设计竹桩未深入稳定持力层,对下部地基快速固结作用有限是沉降过大的主要影响因素。

(2)加固方案与关键参数选取。选取方案中采用高压双管旋喷桩、以及前期对原有碎石垫层进行注浆加固硬化,整个加固施工扰动较小,满足二次加固不影响循环水管正常工作高要求。同时,借助室内海相淤泥质土固化试验,明确了注浆水泥掺

量优化范围为13%~15%。

(3)测试加固后50 d沉降基本趋于稳定,累积沉降控制在22 mm以内;借助数值模型预测30a后循环管道总位移值约为48.2 mm,且沉降速率小于0.01 mm/d。现场测试和实测数据均验证了二次加固控制效果较好。

参考文献(References)

- [1] 吴宁. 深层水泥土搅拌桩在深厚海相淤泥质软土中的应用研究[J]. 中国港湾建设, 2014(9): 29-31. (Wu Ning. Application of deep cement-soil mixing pile in deep marine muddy soft soil [J]. China Harbor Construction, 2014(9): 29-31. (in Chinese))
- [2] 王晓峰. 基于天然含水率海相淤泥质土的统计与分析—以大连长兴岛葫芦山湾海域为例[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 97-103. (Wang Xiaofeng. Statistics and analysis of marine silty soil based on natural water content—a case study of Hulu mountain bay in Changxing Island, Dalian [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 97-103. (in Chinese))
- [3] 管健, 张晶, 上官子昌. 海相淤泥质土力学参数的实验研究[J]. 价值工程, 2013, 32(24): 86-88. (Guan Jian, Zhang Jing, Shang Guan Zichang. Experimental study of the mechanical parameter of marine ooze soil [J]. Value Engineering, 2013, 32(24): 86-88. (in Chinese))
- [4] 柏叶辉, 李向新, 钟舒怡. 深圳市1988-2018年海岸线时空演变分析[J]. 软件, 2018, 39(10): 133-138. (Bai Yehui, Li Xiangxin, Zhong Shuyi. Dynamic change of the coastline in Shenzhen during 1988-2018 [J]. Computer Engineering & Software, 2018, 39(10): 133-138. (in Chinese))
- [5] 徐日庆, 李雪刚. 杭州海相软土的固化及其理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (Xu Riqing, Li Xuegang. Curing of marine soft soil in Hangzhou and its theoretical research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [6] 王文军, 刘用海, 朱向荣. 宁波海相软土工程特性研究[J]. 工程勘察, 2008(10): 19-24. (Wang Wunjun, Liu Yonghai, Zhu Xiangrong. Study on engineering characteristics of marine soft soil in [J]. Engineering Investigation, 2008(10): 19-24. (in Chinese))
- [7] 王明明, 李忠雨, 翟树起, 等. 天津滨海地区海相淤泥质软土基坑开挖及坑底加固技术[J]. 施工技术, 2008, 37(9): 14-15. (Wang Mingming, Li Zhongyu, Zai Shuqi, et al. Excavation and pit bottom reinforcement technology of marine silt soft soil foundation in Tianjin Binhai Area [J]. Construction

- Technology, 2008, 37(9):14-15. (in Chinese))
- [8] 朱福, 战高峰, 佴磊. 天然软土地基路堤临界高度一种计算方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1738-1744. (Zhu Fu, Zhan Gaofeng, Yi Lei. A calculation method for critical height of embankment on natural soft soil foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1738-1744. (in Chinese))
- [9] 杨逾, 郑志明. 基于范例推理的软基处理评价方案研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 93-97. (Yang Yu, Zheng Zhiming. Research on evaluation scheme of soft foundation processing based on case-based reasoning [J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2015, 32(12): 93-97. (in Chinese))
- [10] 朱建才, 朱亦弘, 王旭, 等. 杭州某软土超深基坑变形性状研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增1): 335-341. (Zhu Jiancai, Zhu Yihong, Wang Xu, et al. Study on deformation behavior of a deep soft clay excavation in Hangzhou [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Supp. 1): 335-341. (in Chinese))
- [11] 左人宇, 罗锦华, 陆钊. 深圳海积软土基于 CU 试验的修正剑桥模型[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 646-655. (Zuo Renyu, Luo Jinhua, Chen Zhao. Modified Cam-Clay Model based on the cu test about marine soft soil in Shenzhen [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 646-655. (in Chinese))
- [12] Tang X W, Onitsuka K. Consolidation by vertical drains under time-dependent loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(9): 739-751.
- [13] 牛犇, 唐晓武, 张超杰, 等. 竖井正方形地基固结度解答及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1283-1292. (Niu Ben, Tang Xiaowu, Zhang Chaojie. Solution and application of vertical drain consolidation theory considering a square influence area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1283-1292. (in Chinese))
- [14] 李明飞. 高速公路软土路基变形规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2006. (Li Mingfei. Study on the deformation laws of soft soil roadbed of highway [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006. (in Chinese))
- [15] 刘江波. 海南滨海滨塘区软土固结特性分析[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 26-29. (Liu Jiangbo. Analysis of consolidation characteristics of soft soil in Qiangtang District, Hainan [J]. Chinese and foreign highways, 2018, 38(1): 26-29. (in Chinese))
- [16] 周洺汉, 商拥辉, 徐林荣, 等. 高速铁路基运营期沉降超限治理措施及效果评估[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(12): 28-34. (Zhou Minghan, Shang Yonghui, Xu Linrong. Control measures for settlement overrun of high-speed railway subgrade during operation period and effect evaluation [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(12): 28-34. (in Chinese))
- [17] 陈宏伟, 徐林荣. 高铁波浪状地形路基间过渡段沉降特性与控制效果[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 7-13. (Chen Hongwei, Xu Linrong. Study on settlement characteristics and control effect of high-speed railway transition section in wavy terrain subgrade [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(1): 7-13. (in Chinese))
- [18] 刘吉福, 郑刚, 龚晓南, 等. 柔性荷载刚性桩复合地基修正密度法稳定分析改进[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 33-36. (Liu Jifu, Zheng Gang, Gong Xiaonan, et al. Improvement of revised density method for stability analysis of rigid-pile composite foundation under flexible loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Supp.2): 33-36. (in Chinese))
- [19] 赵明华, 牛浩懿, 刘猛, 等. 柔性基础下碎石桩复合地基桩土应力比及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1549-1556. (Zhao Minghua, Niu Haoyi, Liu Meng. Pile-soil stress ratio and settlement of composite ground with gravel piles in flexible foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1549-1556. (in Chinese))
- [20] 华永平. 高压旋喷注浆工艺在桩基加固中的应用[J]. 公路交通技术, 2009(1): 87-89. (Hua Yongping. Application of high pressure jet grouting technology in pile foundation reinforcement [J]. Road Traffic Technology, 2009(1): 87-89. (in Chinese))
- [21] 彭正勇. 三重管旋喷注浆技术在隧道围岩加固中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1216-1255. (Peng Zhengyong. Application of triplex pipe jet grouting in tunnel wall rock reinforcement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1216-1255. (in Chinese))
- [22] Teoh Y P, Ing H W. A field trial of jet-grouting in marine clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 38(2): 338-348.
- [23] 白中坤, 杨朝帅, 于少辉. 正交试验法在旋喷桩参数试验中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 624-629. (Bai Zhongkun, Yang Chaoshuai, Yu Shaohui. Application of orthogonal experiment to examination of rotation jet grouting pile parameters [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 624-629. (in Chinese))