



鱼山围垦对鱼山大桥桩基影响的 三维有限元分析

蒋腊梅¹, 郑 晨², 冯 浩¹, 沈良朵³

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 舟山绿色石化基地管理委员会, 浙江 舟山 316021; 3. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316022)

摘要: 为了研究陆域回填对近岸段桩基的影响, 结合鱼山大桥工程, 分析鱼山围垦对鱼山大桥桩基的影响, 利用ABAQUS软件采用三维固结有限元法进行固液耦合分析, 考虑土体渗流以及地基和桥梁桩基础与土之间的相互作用。就堤后回填加载过程对鱼山大桥工程、地基和桥梁桩基的影响进行模拟研究, 得出软基海堤与桥梁的相互作用情况下陆域回填对鱼山大桥的影响。结果表明, 陆域回填会增加鱼山大桥的沉降和位移。

关键词: 堤后回填; 固液耦合; 三维有限元分析; 海堤变形; 位移沉降

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0006-06

Three-dimensional finite element analysis of influence of Yushan reclamation on pile foundation of the Yushan Bridge

JIANG La-mei¹, ZHENG Chen², FENG Hao¹, SHEN Liang-duo³

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.Zhoushan Green Petrochemical Base Management Committee, Zhoushan 316021, China;

3.Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: To study the influence of backfilling to the pile of the bridge near the shore side, we analyze the interaction of the Yushan reclamation and the pile foundation of the Yushan Bridge combining with the actual project, use the three-dimensional consolidation finite element method by ABAQUS to carry out the solid-liquid coupling analysis considering the soil seepage and the interaction of foundation, bridge pier pile foundation, and soil, simulate the process of backfilling and its influence to the bridge approach, foundation and bridge pile of the Yushan Bridge, and obtain the influence of land backfill on the Yushan Bridge under the interaction of soft foundation seawall and bridge. The results show that land backfill can increase the settlement and displacement of the Yushan Bridge.

Keywords: backfilling; solid-liquid coupling; three-dimensional finite element analysis; seawall deformation; displacement and settlement

新建海堤及后方回填对附近大桥、高桩工程、地基和桥梁桩基位移应力等有较大影响^[1-3]。后方回填堆载过高容易导致相邻桥墩偏压超载, 造成桥墩下部的桩基倾斜偏移, 同时加上桩基自身的沉降将对大桥产生不利影响。有很多关于桩基位

移沉降的研究: 郑辉等^[4]采用Plaxis 3D软件建立三维有限元模型分析某斜坡式海堤工程对临近桥梁桩基位移的影响; 刘宜庆^[5]针对围垦区内土体流变特性及现实工程问题, 采用室内试验的方法对重塑土和水泥改良土进行流变试验, 对有围堤

和填土堆载时, 土体流变对桩基位移影响的时间相关性以及桩基抗偏对策进行数值模拟研究; 刘明艳^[6]综合桩基整体承载能力、负摩阻力、嵌岩深度、受力机理等多种因素对公路桥梁工程设计中桩基沉降问题进行研究; 郭静^[7]利用有限元软件ABAQUS建立双桩模型, 分析出桩的距径比、长径比、桩土弹性模量比等参数对桩-桩相互作用系数的影响, 并将其应用于群桩基础沉降计算中, 进而分析得出群桩基础沉降的计算公式; 李发达等^[8]基于OpenSees开源有限元数值计算平台建立相应的三维有限元模型研究新建桥梁桩基对既有桥梁桩基的影响。这些研究从各自关注的角度探讨桩基的位移和沉降, 对类似工程具有一定的指导意义。本文在这些研究的基础上, 采用三维固结有限元法进行固液耦合分析, 考虑土体渗流以及地基和桥墩桩基础与土之间的相互作用, 研究更为复杂的海上围垦后方回填加载过程中, 对鱼山大桥接线工程、地基和桥梁桩基的影响, 揭示软基海堤与桥梁相互作用的机理。

1 工程概况

本工程为舟山市岱山县鱼山大桥工程近岸段K8+175.75~K8+325.40范围的桥梁, 桥梁采用高桩板梁式结构, 桥墩中心距为27.9~30.9 m, 包含Y1~Y5排架, 其中Y1、Y2桩基采用钢管桩基础, 每榀墩台基桩采用双排共6根φ1800 mm钢管桩, 共计12根φ1800 mm钢管桩; 近大堤跨堤段Y3~Y5桩基采用灌注桩基础, 每榀横梁基桩采用3根φ2200 mm灌注桩, 共计9根φ2200 mm钻孔灌注桩。上部结构均采用现浇混凝土墩台(5榀)+预应力空心板结构(65块), 预制预应力空心板高1.6 m。桥宽为15.6 m, 其中桥面北端铺设220 kV桥缆, 水管及通信光缆布置于大桥南端, 行车道净宽11.25 m。平面布置如图1所示, 横断面、纵断面及桩位布置如图2所示。

本文通过对新建海堤在运行期的应力-应变分析结果, 计算新建海堤沉降变形及水平位移, 重

点分析鱼山石化围垦对鱼山大桥Y3~Y5桩基的影响, 找出新建海堤、桥墩荷载及相对位置和变形之间的关系, 为鱼山大桥的安全性评估提供依据。

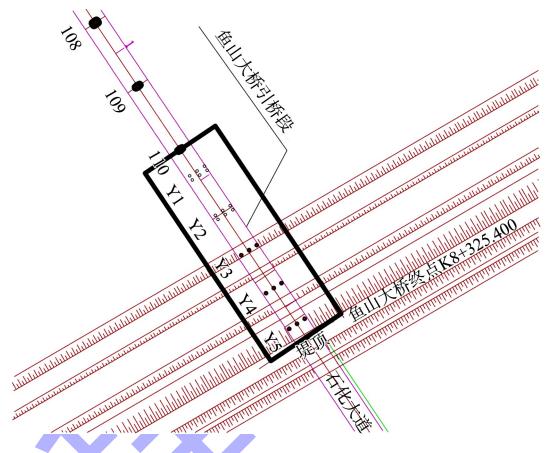
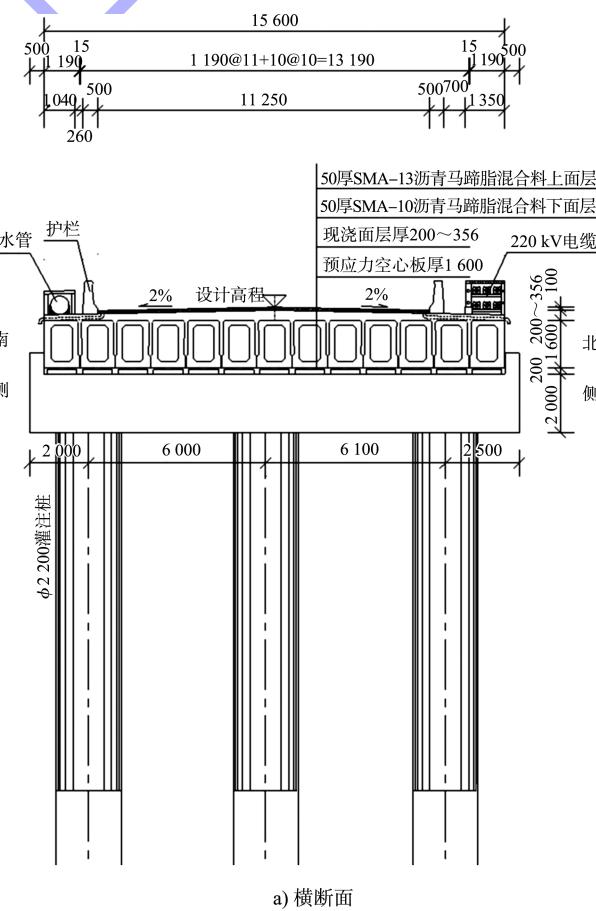


图1 鱼山大桥工程近岸段平面布置



a) 横断面

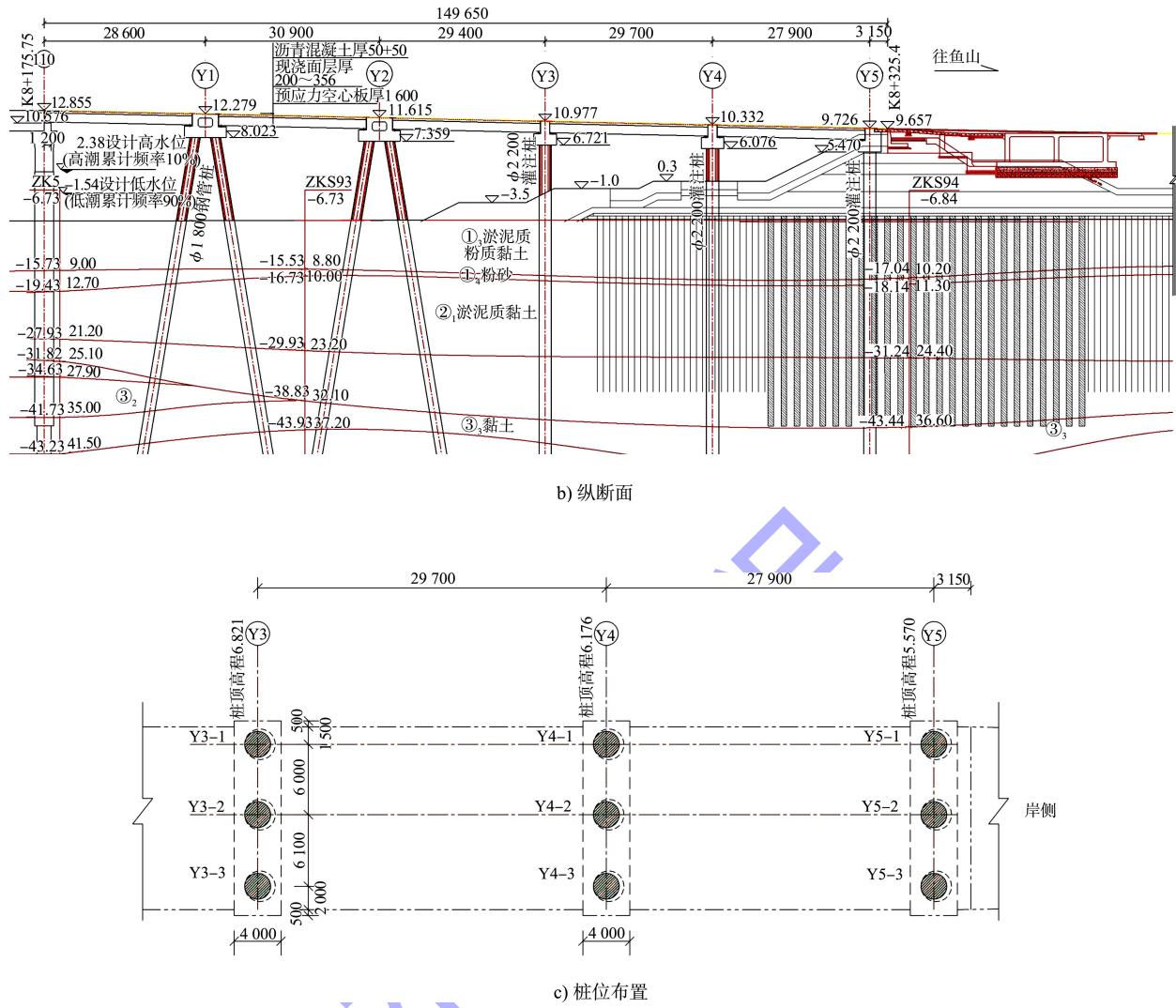
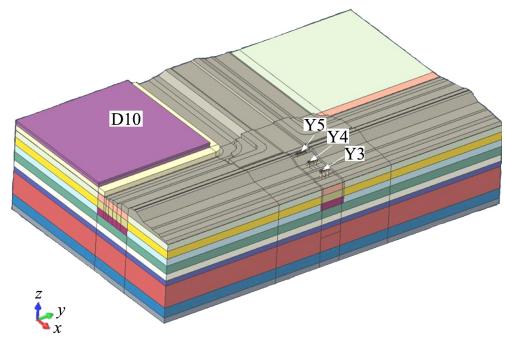


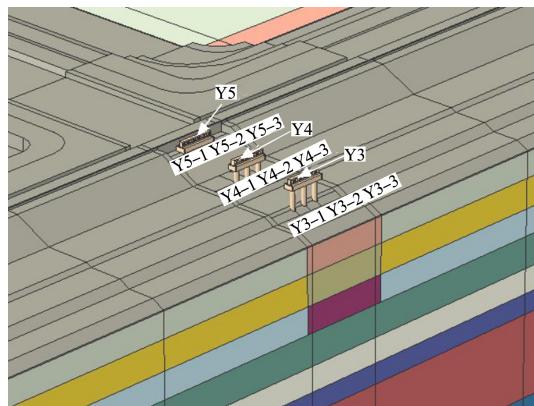
图 2 鱼山大桥工程近岸段纵断面和桩位布置 (高程: m; 尺寸: mm)

2 三维有限元模型

模型以中隔堤与东隔堤交叉段中心位置为中
心, 取沿中隔堤方向 370 m 和东隔堤方向 600 m
范围为计算区域, 高度方向约 150 m, 如图 3 所示。
鱼山大桥及其成陆的接线中隔堤与设计的围
垦海堤线路呈正交叉。为分析 D10 区加载对近陆
地高架桥桩的影响, 划分有限元网格时, 有限元
计算模型中高架桥桥墩取 Y3~Y5 共 2 跨 3 个桥
墩, 桥墩中心距为 27.9~29.7 m。



a) 鱼山大桥与东堤交叉段



b) Y3~Y5桩与地基

注: 沿桥梁向中隔堤为负 x 向, 垂直桥梁向 D10 区为负 y 向, 竖直向上为正 z 向。

图 3 三维有限元模型

最终的有限元网格划分见图 4。9 根 $\phi 200$ mm 的 Y3~Y5 灌注桩采用实体单元进行模拟, 桩基均按正八面体近似模拟圆截面。边界条件设置为: 地基四周侧面采用法向位移约束, 底部采用三向位移约束, 上表面设置孔隙水排水边界条件。桩

与地基之间的相互作用设置为: 对于桩底部与土体接触部分, 设置为面面接触方式, 法向设置为硬接触, 切向摩擦系数设置为 0.3。模型的坐标系以 x 轴沿桥方向, y 轴垂直于桥方向, z 轴为竖直方向。

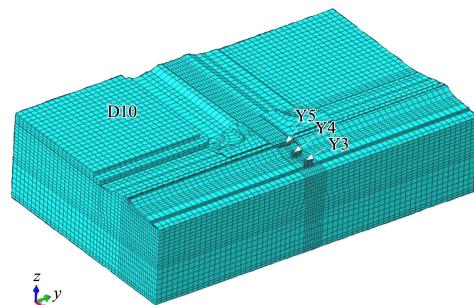


图 4 鱼山大桥与东堤交叉段三维有限元网格划分

地基土层的应力-应变关系采用邓肯-张非线性模型^[9]模拟, 其模型参数通过开展三轴固结排水剪试验确定, 见表 1。过程中的弹性材料模型参数见表 2。

表 1 三维有限元计算材料邓肯-张模型参数

材料	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	R_f	K	n	G	F	D	K_{ur}
D10 区地基 1	2.00	6.00	25.0	0.613	215.50	0.92	0.200	0.090 0	6.21	431.0
D10 区地基 2	2.10	0	35.0	0.765	966.50	0.46	0.388	0.209 0	12.77	1 933.0
抛石	2.10	0	35.0	0.765	966.50	0.46	0.388	0.209 0	12.77	1 933.0
① ₃ 淤泥质粉质黏土	1.33	7.15	22.3	0.727	52.65	0.90	0.161	0.071 5	5.05	105.3
② ₁ 淤泥质黏土	1.26	34.35	25.5	0.587	38.85	0.75	0.162	0.060 0	4.05	77.7
② ₂ 淤泥质粉质黏土	1.24	31.90	22.7	0.590	32.75	0.74	0.157	0.040 0	3.30	65.5
③ ₃ 黏土	1.40	32.00	22.6	0.551	48.05	0.84	0.116	0.035 5	5.60	96.1
③ ₄ 粉质黏土	1.36	28.05	28.6	0.609	48.15	0.78	0.162	0.053 5	4.55	96.3
④ ₂ 粉质黏土	1.27	47.75	19.9	0.645	40.95	0.69	0.203	0.036 5	2.75	81.9
① ₃ 碎石桩复合地基	1.44	6.10	35.6	0.730	189.73	0.83	0.190	0.090 0	6.21	379.5
② ₁ 碎石桩复合地基	1.38	29.20	29.9	0.610	178.00	0.71	0.200	0.080 0	5.36	356.0
② ₂ 碎石桩复合地基	1.36	27.10	27.5	0.620	172.81	0.70	0.190	0.070 0	4.72	345.6

注: ρ 、 c 、 φ 分别为密度、黏聚力、内摩擦角; R_f 为最大剪切强度与双曲线的渐近线的比; K 为围压取一个大气压时的初始弹性模量; n 为无因次指数项, 一般在 0.2~1.0 之间; G 、 F 、 D 为与切线泊松比有关的无量纲试验参数; K_{ur} 为卸载-重加载系数。

表 2 弹性材料模型参数

材料及土层	密度/ $(t \cdot m^{-3})$	弹性模量/ MPa	泊松比
桥桩、承台及桥墩混凝土	2.50	31 500	0.17
④ ₃ 细砂	1.99	8.75	0.33
⑤ ₃ 粉砂	2.00	11.40	0.33
⑥ ₁ 粉质黏土	2.03	14.56	0.33
⑩ 岩石层	2.62	15 000	0.25

3 模型验证

本文主要验证数值模型的有效性, 仅考虑卸载后进行固结分析, 不施加载荷, 即考虑如图 5 所示的过程。将数值结果与实测数据进行对比, 进而验证模型的有效性。

D10 地块于 2018-04-16 开始加载, 根据实测数据推算出, D10 号地块吹填土地基各监测点对

应的最终沉降量、工后沉降量。受地基淤泥质土厚度和堆载方式等影响, 各监测点地基已完成固结沉降很不均匀, 呈现出显著差异。实测数据表明(截至 2019-09-26), 经推算所得顶层最终沉降量位于 1 363.2~2 983.0 mm, 卸载 1 a 后的工后沉降分布在 110.0~531.7 mm。

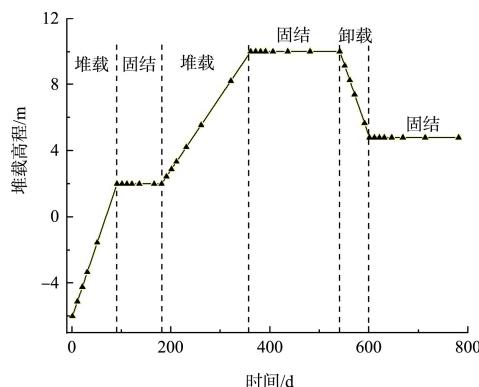


图 5 验证数值模型所设置的计算过程

3 个参考点的沉降位移时程曲线见图 6, 其中 A、B 和 C 点位于 D10 区地表, D 点位于 D10 区 -6 m 深度处。由于实测数据为地表数据, 将进一步比较 A、B 和 C 点的总沉降位移与工后沉降。A、B 和 C 点的总沉降位移在卸载一年后的总沉降量分别达到 2 200、1 850 和 2 060 mm, 工后沉降分别为 157、144 和 135 mm, 与实测数据地表最终沉降量(1 363.2~2 983.0 mm)、工后沉降(110.0~531.7 mm)相比较吻合较好。另一方面, 模型上 D 点的超孔隙水压力时程曲线见图 7。

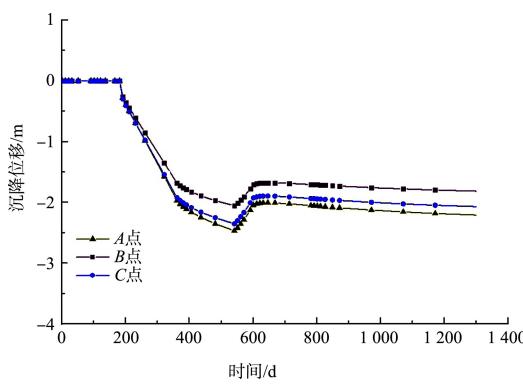


图 6 A、B 和 C 点的沉降位移时程曲线

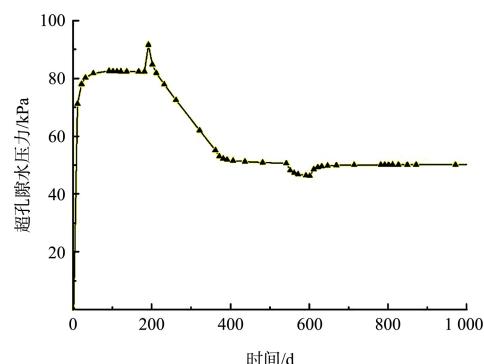


图 7 D 点的超孔隙水压力时程曲线

通过对比数值分析结果与实测的沉降位移, 可以验证本文所建立的有限元模型具有较好的精度, 能够反映整体模型在堆载、卸载过程中的土体沉降变形, 为进一步模拟施工加载过程的土体沉降和桩受力变形提供基础。

4 结果分析

4.1 海堤变形分析

进一步对 D10 区上方施加建筑物均布载荷的整个过程进行数值模拟。地基变形随着固结时间增加而逐步增加, 桥面施工完成 5 a 后, 地基变形基本已经达到稳定; 土体沉降在桥面完工 20 a 后土体变形趋于稳定, 见表 3。地基沉降主要发生在 D10 区, Y3~Y5 桩基附近土体沉降相对 D10 区较小, 桩基的总位移最大沉降约为 230 mm。最大地基沉降发生在 20 a 后, 地基最大沉降 4 305 mm, 顺桥向水平位移最大 616 mm, 横桥向水平位移最大 644 mm。最大的地基工后沉降位移为 514 mm。

表 3 海堤各阶段的位移极值

时间/a	水平位移极值/mm				地基最大沉降/mm
	最小顺桥向	最大顺桥向	最小横桥向	最大横桥向	
建筑完工	-396	641	-374	687	3 791
5	-471	612	-441	645	4 158
10	-475	610	-444	644	4 223
20	-477	616	-447	644	4 305

4.2 桩顶位移

Y3~Y5 桩基的竖向位移在建筑施工完成时的沉降位移为 88.7 mm, 发生在 Y5-1 桩顶。随着 D10 区建筑施工完成, 土体开始固结至 20 a 后,

最大竖向位移为 236 mm。D10 区加载后的地基固结作用对 Y5、Y4、Y3 桩基变形的影响依次减弱, 远离 D10 区的桩基沉降位移明显小于近加载区段桩基。

表 4 Y3~Y5 桩基桩顶中心点位移

桩基 墩台	建筑完工			5 a			10 a			20 a		
	U_x /mm	U_y /mm	U_z /mm	U_x /mm	U_y /mm	U_z /mm	U_x /mm	U_y /mm	U_z /mm	U_x /mm	U_y /mm	U_z /mm
Y5-1	11.7	118	-88.7	0.5	93.9	-141	0.2	93.4	-188	0.8	93.4	-236
Y5-2	13.3	118	-87.2	2.5	93.8	-139	2.2	93.3	-186	2.8	93.4	-234
Y5-3	15.0	117	-86.1	4.3	93.7	-137	4.0	93.2	-184	4.6	93.2	-232
Y4-1	16.6	115	-87.1	8.9	91.6	-133	10.5	91.1	-177	12.2	91.8	-204
Y4-2	17.7	115	-86.0	10.2	91.5	-131	11.8	91.0	-176	13.5	91.7	-203
Y4-3	18.8	115	-85.2	11.5	91.5	-130	13.1	90.9	-174	14.8	91.7	-202
Y3-1	16.2	115	-83.4	11.1	91.6	-124	12.3	91.4	-146	13.2	91.4	-159
Y3-2	16.9	115	-82.8	11.9	91.5	-122	13.2	91.3	-145	14.1	91.3	-158
Y3-3	17.6	114	-82.4	12.7	91.4	-122	14.1	91.2	-144	14.9	91.3	-157

注: U_x 为顺桥向位移, 指向 D10 区为负; U_y 为横桥向位移, 指向 D10 区为负; U_z 方向为竖直方向, 向上为正。

5 结语

1) 采用三维固结有限单元法模拟 D10 区加载后桩基和地基变形情况, 考虑软土流变变形和桩基础与土之间的相互作用。本文所建立的有限元模型具有较好的精度, 能够反映整体模型在堆载、卸载过程中的土体沉降变形。

2) D10 区加载考虑建筑标准和规范, 按每层每平方米 11 kN 计算, 考虑 2 层高度建筑结构等效为均布荷载, 地基顺桥向水平位移、横桥向水平位移在桥面完工 5 a 后土体变形趋于稳定, 土体沉降在桥面完工 20 a 后土体变形趋于稳定。地基最大沉降 4 305 mm, 顺桥向水平位移最大 616 mm, 横桥向水平位移最大 644 mm。最大的地基工后沉降位移为 514 mm。

3) Y3~Y5 桩基的竖向位移在建筑施工完成时的沉降位移为 88.7 mm, 发生在 Y5-1 桩顶。随着 D10 区建筑施工完成, 土体开始固结至 20 a 后, 最大竖向位移为 236 mm。D10 区加载后的地基固结作用对 Y5、Y4、Y3 桩基变形的影响依次减弱, 远离 D10 区的桩基沉降位移明显小于近

加载区段桩基。

参考文献:

- [1] 孙剑平, 唐超, 王军, 等. 堆载致桥梁桩基偏移机理分析与纠偏技术研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 61-67, 33.
- [2] 闫澍旺, 刘子初, 于森, 等. 堆载对邻近桥梁结构影响的有限元分析[J]. 勘察科学技术, 2013(3): 1-4.
- [3] 裴广超, 李金洋, 李艳龙. 海堤与桥梁交叉段复合桩基安全性分析[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(11): 103-104.
- [4] 郑辉, 李春阳. 某斜坡式海堤工程对临近桥梁桩基位移的影响[J]. 水运工程, 2018(4): 63-68.
- [5] 刘宜庆. 滩涂围垦土基对桩基影响的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [6] 刘明艳. 公路桥梁工程设计中桩基沉降问题研究[J]. 工程建设与设计, 2019(19): 58-59, 62.
- [7] 郭静. 基于有限元模拟的群桩相互作用系数及沉降计算方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [8] 李发达, 凌贤长, 苏雷, 等. 新建桥梁桩基对既有桥梁桩基影响的数值分析[J]. 土工基础, 2020, 34(2): 171-175.
- [9] 王志亮, 宋茂天, 殷宗泽. 路堤沉降计算中邓肯-张模型参数灵敏度分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1135-1138.

(本文编辑 王璁)