



斜撑钢管板桩直立式海堤结构受力分析

张博杰, 唐云, 刘堃

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 某填海工程的实施可能影响邻近桥梁的安全性, 拟采用斜撑钢管板桩直立式海堤结构, 通过Plaxis 3D岩土有限元分析软件模拟该海堤结构的受力特性及变位, 以及其对邻近桥梁桩基变位的影响。结果表明, 该直立式海堤结构受力特性较好、变位较小, 且对邻近桥梁桩基变位的影响较小。

关键词: 斜撑钢管板桩; 直立式海堤; 桥梁桩基变位

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0276-06

Force analysis of vertical seawall structure with inclined steel pipe and sheet pile

ZHANG Bojie, TANG Yun, LIU Kun

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The implementation of a reclamation project may affect the safety of the adjacent bridge, so it is proposed to adopt the vertical seawall structure with inclined steel pipe and sheet pile. The force characteristics and displacement of the vertical seawall structure, as well as its influence on the displacement of the pile foundation of the adjacent bridge, are simulated by Plaxis 3D geotechnical finite element analysis software. The results show that the vertical seawall structure has better force characteristics and less displacement, and has little influence on the displacement of adjacent bridge pile foundation.

Keywords: inclined steel pipe and sheet pile; vertical seawall; displacement of bridge pile foundation

近年来, 随着沿海城市的快速发展, 沿海地区的用地越来越紧张。通过填海方式快速形成陆域可一定程度地缓解沿海地区用地紧张的难题, 填海造地的工程案例也越来越多。海堤结构是填海工程的关键组成部分, 通过海堤结构形成外侧的防护和围蔽后方可对内部回填形成陆域。传统的海堤结构大多采用抛石斜坡堤结构, 其施工工艺简单、速度快且工程造价低, 在海堤建设过程中颇具优势, 但由于沿海地区工程建筑物众多且相互之间存在着许多交叉影响, 在填海工程陆域回填的过程中, 极有可能造成邻近建筑物的变位或失稳等安全问题, 因此存在此类问题的海堤结构相比于常规海堤结构, 对其结构形式和地基处理的要求更高、更严格。

近些年来, 国内不少工程的建设都面临对邻近桥梁安全影响的问题, 相关学者对此做了许多深入研究。郑安兴等^[1]采用有限元强度折减法, 模拟分析密排桩结构参数和桩基周围淘蚀对框架式海堤结构变形及稳定性的影响; 许健敏等^[2]提出一种低桩宽承台卸荷板式海堤结构, 采用有限元软件对该结构进行三维数值模拟分析, 并现场监测收集变形数据; 江泊洧等^[3]通过精细化三维有限差分数值模拟方式, 采用钻孔灌注桩+框架梁+高压旋喷的加固方案, 分析深厚软土区海堤填筑下穿含匝道高速公路桥对既有端承型桥梁桩基的影响程度及机理。但是目前针对本文提出的斜撑钢管板桩直立式海堤结构研究较少, 类似工程积累的经验也不多。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 张博杰(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程结构设计。

本文以某填海工程为例, 采用斜撑钢管板桩直立式海堤结构, 利用 Plaxis 3D 岩土有限元分析软件模拟该海堤结构的受力特性及变形, 以及对邻近桥梁桩基变位的影响, 为类似工程设计提供参考。

1 工程概况

1.1 设计方案

某填海工程陆域形成面积约 241.125 万 m², 外海堤总长约 7 437.7 m, 其中一段海堤与既有高速桥梁的最小距离仅为 72.5 m。此段海堤拟采用斜撑钢管板桩直立式海堤结构, 该结构段总长 641.5 m。

斜撑钢管板桩直立式海堤结构前排斜撑桩采用 $\phi 1\ 400$ mm 钢管桩, 纵向间距 3.3 m, 斜率 3:1, 桩端入强风化岩不小于 2 m; 后排直立板桩墙采用 $\phi 1\ 400$ mm 钢管桩+Z28-700 型钢板桩的组合结构, 组合结构中钢管桩为主桩, 纵向间距 2.86 m, 桩端入强风化岩不小于 2 m; 钢板桩为辅

桩, 仅穿透可压缩土层至残积土或风化岩顶面。斜撑钢管桩和钢管板桩墙顶部采用现浇钢筋混凝土墩台连为一体, 墩台后方约 12.14 m 范围回填中粗砂, 其后回填砂或土形成陆域。墩台上方回填 10~100 kg 块石, 上部设置净宽 7 m 防洪应急通道, 顶高程 6.66 m; 墩台海侧设置带挑檐的挡浪墙, 顶高程为 7.86 m。墩台下方铺设模袋混凝土护底, 海侧抛填 600~800 kg 块石护底。海堤基础采用水泥搅拌桩加固处理, 搅拌桩直径 0.7 m, 采用格栅形布置形式, 搅拌桩置换率为 0.58, 搅拌桩 28、90 d 设计强度为 0.6、0.8 MPa。

该高速桥梁全长 6 840 m, 共 114 跨, 单跨长度 60 m, 标准段为 5 跨一联。桥梁采用简支转连续箱梁结构, 预应力混凝土箱梁整体预制、吊装。桥梁标准宽度为 40.5 m, 采用分离式桥面, 半幅桥面宽度 19.85 m, 双向八车道, 为公路 I 级设计荷载。混凝土箱梁由 2 个花瓶式混凝土立柱支撑, 立柱下接承台(承台长 10.2 m、宽 7.0 m、厚 2.8 m), 承台下接 4 根桩径为 1.8 m 的钻孔灌注桩。

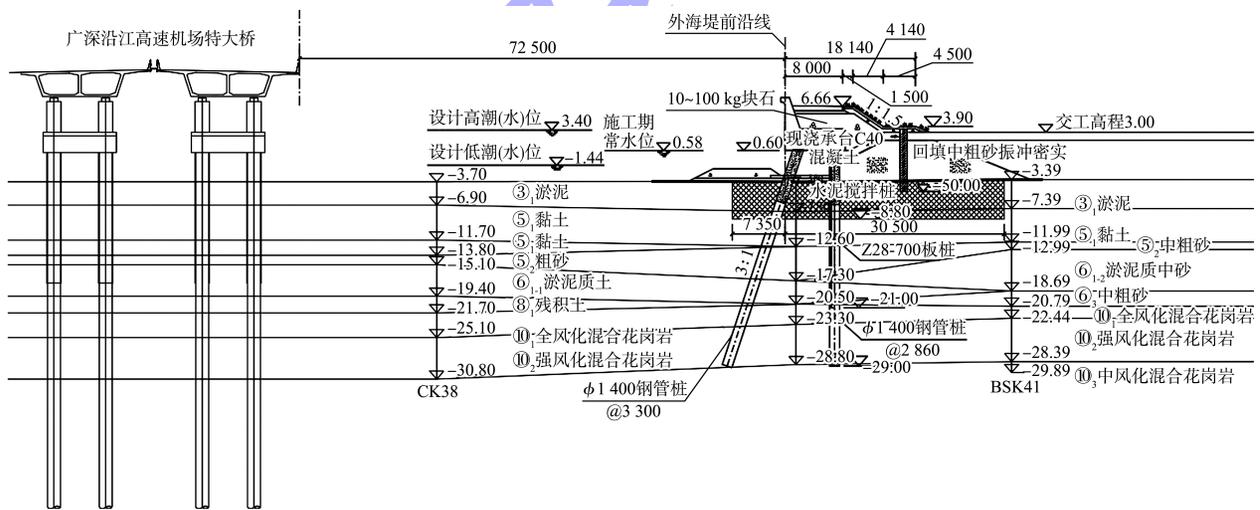


图 1 直立式海堤结构典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

1.2 地质参数

该工程直立式海堤结构段位置土层分布从上至下依次为淤泥、淤泥-淤泥质土、黏土、中粗砂、淤泥质土、粉质黏土、残积土、风化混合花岗岩等, 土体物理力学参数见表 1。直立式海堤结

构地基基础搅拌桩处理后的土体指标根据《地基处理手册》^[4]、《复合地基设计和施工指南》^[5]及 GB/T 50783—2012《复合地基技术规范》^[6]等计算, 并根据工程经验适当折减, 搅拌桩处理后 28、90 d 土体的物理力学指标见表 2。

表1 土体物理力学指标

土层	湿密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	直剪快剪		直剪固快		三轴不固结不排水剪	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
③ ₁ 淤泥	1.48	2.536	3.7	1.0	3.8	14.7	7.5	1.7
③ ₂ 淤泥-淤泥质土	1.61	1.842	4.4	0.7	-	-	-	-
⑤ ₁ 黏土	1.95	0.806	37.1	8.6	31.4	14.8	50.3	1.3
⑥ ₁ 淤泥质土	1.75	1.312	7.7	1.7	12.8	15.2	8.1	0.9
⑥ ₂ 粉质黏土	1.96	0.801	25.1	8.7	19.6	17.1	-	-
⑧ ₁ 残积土	1.92	0.847	21.2	22.3	19.7	26.2	-	-
⑩ ₁ 全风化混合花岗岩	1.96	0.743	27.1	24.7	22.5	27.9	61.9	1.3
⑩ ₂ 强风化混合花岗岩	1.98	0.699	30.6	23.9	20.7	29.1	-	-

土层	三轴固结不排水剪				无侧限抗压 强度/kPa	压缩模量/ MPa
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)		
③ ₁ 淤泥	6.5	14.4	5.1	26.2	-	1.381
③ ₂ 淤泥-淤泥质土	-	-	-	-	7.7	2.050
⑤ ₁ 黏土	28.1	16.1	16.2	25.2	79.3	6.316
⑥ ₁ 淤泥质土	-	-	-	-	13.5	2.914
⑥ ₂ 粉质黏土	-	-	-	-	-	6.186
⑧ ₁ 残积土	29.0	26.0	23.2	29.4	45.8	5.358
⑩ ₁ 全风化混合花岗岩	45.2	22.0	35.3	28.1	60.7	-
⑩ ₂ 强风化混合花岗岩	-	-	-	-	-	-

表2 水泥搅拌桩复合地基物理力学指标 (置换率 58%)

土层	28 d			90 d		
	密度/(g·cm ⁻³)	复合压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	密度/(g·cm ⁻³)	复合压缩模量/MPa	黏聚力/kPa
③ ₁ 淤泥	1.635	11.40	61.4	1.635	15.11	80.8
③ ₂ 淤泥-淤泥质土	1.778	14.34	65.7	1.778	18.98	85.1
⑤ ₁ 黏土-粉质黏土	2.165	18.29	79.2	2.165	23.86	98.5
⑥ ₁ 淤泥质土	1.955	14.57	68.9	1.955	19.21	88.3

1.3 设计水位、波浪

位见表3(采用1985国家高程基准),海堤外侧设计

该工程海堤外侧设计潮(水)位及海堤内侧水

计波浪要素见表4。

表3 设计潮(水)位

位置	水位类型	采用标准	潮(水)位/m
海堤 外侧	设计高潮(水)位	200 a 一遇	3.40
	设计低潮(水)位		-1.44
	施工期高水位	10 a 一遇	2.79
	施工期低水位		-1.32
	施工期常水位		平均海平面
海堤 内侧	正常水位	调蓄池正常蓄水位	0.66
	最高水位	调蓄池最高设计涝水位	2.16

表4 设计波浪要素

水位类型	H _{1%} /m	H _{4%} /m	H _{5%} /m	H _{13%} /m	波高 H/m	周期 T/s	波长 L/m
200 a 一遇高水位	4.41	3.89	3.79	3.31	2.28	6.9	53
200 a 一遇低水位	1.80	1.60	1.60	1.40	1.00	4.5	21

2 有限元模拟

2.1 模型建立

斜撑钢管板桩直立式结构采用 Plaxis 3D 有限元分析软件建立三维分析模型。三维有限元分析模型原理为^[7]: 对于土体本构模型的选择, 软土层采用考虑加/卸载模量分别定义的 HS 弹塑性本构模型; 砂层、全风化及强风化岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型; 变形小、刚度大的中风化及微风化岩采用线弹性模型。桩基结构采用嵌入式桩单元模拟, 嵌入式桩单元由梁单元和特殊界面单元构成, 在梁单元的节点位置的土体单元中根据单元形函数建立虚拟节点, 该特殊界面单元会在梁单元节点和这些虚拟节点之间建立相互联系, 进而与土体单元中所有节点建立联系。结构与土体之间的相互作用通过 Goodman 接触界面单元模拟结构与土体之间的摩擦、滑动及缝隙。模型边界条件: 模型侧面为法向约束边界条件, 底面为固定边界条件, 顶面为自由边界条件。斜撑钢管板桩直立式海堤结构三维有限元计算模型见图 2。

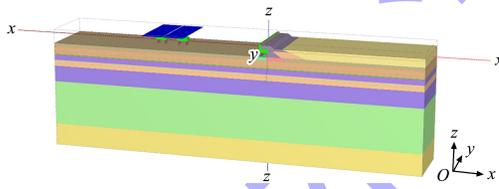


图 2 斜撑钢管板桩直立式海堤结构三维有限元计算模型

2.2 模拟工况

根据该工程的施工工序, 通过 5 种工况模拟各个阶段海堤结构的受力及其对桥梁桩基的影响, 分别为施工期 2 种工况(工况 1、2)及运营期 3 种工况(工况 3-1~3-3), 具体工况描述如下。

工况 1 为短暂工况, 水泥土搅拌桩地基处理施工完成, 斜撑钢管板桩及墩台施工完成, 后方陆域回填至 2.0 m。荷载条件: 海堤结构自身重力+墙后回填土压力+水压力(海侧水位采用施工期常水位 0.58 m、陆侧采用 2.0 m)。

工况 2 为短暂工况, 在工况 1 的基础上, 后方陆域回填堆载至 4.0 m 进行堆载预压地基处理。荷载条件: 海堤结构自身重力+墙后回填土压力+堆载土压力+水压力(海侧水位采用施工期低水位 -1.32 m、陆侧采用 0.58 m)。

工况 3-1 为持久工况, 海堤建设完成, 陆域卸载至交工高程, 场地投入运营。荷载条件为: 海堤结构自身重力+墙后回填土压力+使用荷载产生的土压力+水压力(海侧水位取 200 a 一遇低水位 -1.44 m、陆侧取 2.16 m)+波吸力。

工况 3-2 为持久工况, 其荷载条件为: 海堤结构自身重力+堤后填土压力+使用荷载产生的土压力+水压力(陆侧取调蓄池水位 2.16 m、海侧取设计高水位 3.4 m)+波吸力。

工况 3-3 为持久工况, 其荷载条件为: 海堤结构自身重力+堤后填土压力+使用荷载产生的土压力+水压力(陆侧取调蓄池水位 0.66 m、海侧取设计常水位 0.58 m)+波吸力。

2.3 模拟结果

斜撑钢管板桩直立式海堤结构运营期工况下最大整体水平变位分布见图 3a)。可以看出, 直立板桩墙位置处土体的水平变位最大, 负向最大水平变位为 114.10 mm。斜撑钢管板桩直立式海堤结构局部水平变位分布见图 3b)。可以看出, 该结构负向最大水平变位为 88.46 mm, 可满足海堤的安全性和使用要求。斜撑钢管板桩直立式海堤结构斜桩和直立式排桩弯矩标准值分布见图 4。可以看出, 弯矩分布符合桩基及直立式板桩墙的受力特性, 斜桩最大弯矩为 5 267 kN·m, 直立式排桩最大弯矩为 1 807 kN·m。斜撑钢管板桩直立式海堤结构钢管桩内力计算结果见表 5, 其中斜桩最大应力为 271 MPa, 直桩最大应力为 285 MPa, 均小于钢材允许应力 330 MPa, 可满足安全性要求。

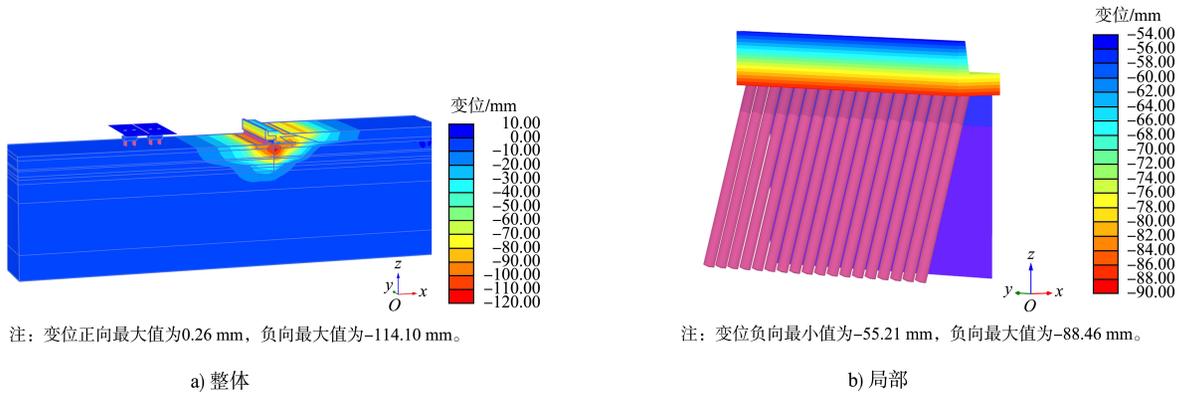


图3 斜撑钢管板桩海堤结构水平变位分布云图

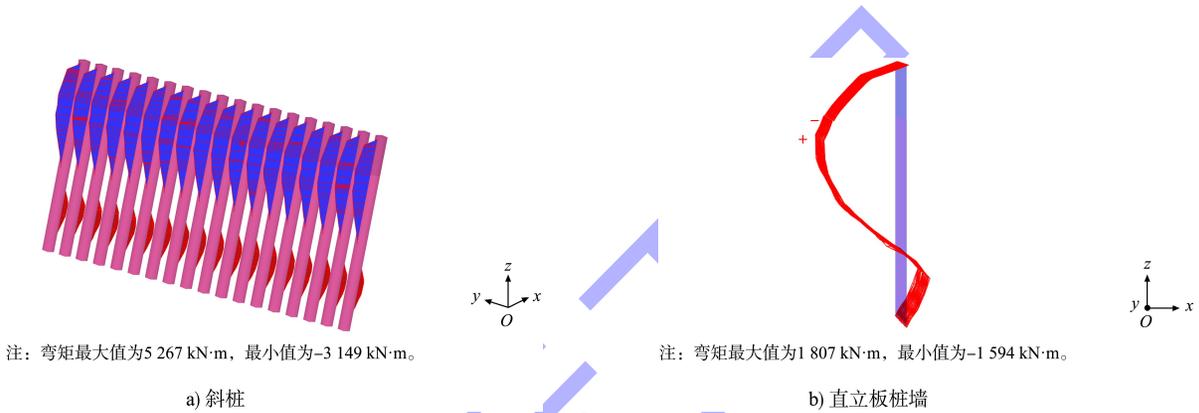
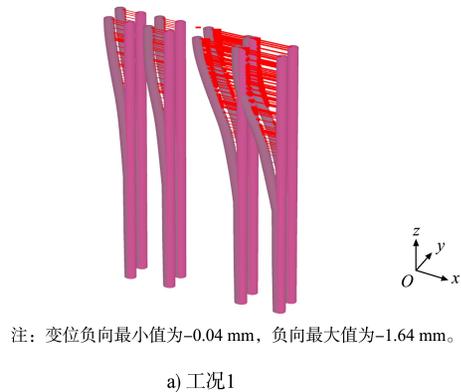


图4 斜撑钢管板桩海堤结构斜桩和直立板桩墙弯矩分布

表5 斜撑钢管板桩海堤结构钢管桩内力计算结果

构件	弯矩设计值/ (kN·m)	压桩力 设计值/kN	剪力设计值/ kN	压弯 应力/MPa	整体稳定性 应力/MPa	桩身容许 应力/MPa
前墙直桩	6 977	1 752	2 671	270	271	330
斜桩	7 110	5 517	1 523	280	285	330

施工期及运营期各工况下桥梁桩基的水平变位见图5。可以看出，施工期及运营期累计最大水平变位均为3.6 mm，满足本工程桥墩水平变位控制在5 mm内以保证桥墩安全的要求，可见采用斜撑钢管板桩直立式海堤结构，该填海工程对桥梁桩基的影响很小。斜撑钢管板桩直立式海堤结构在各施工阶段(目前实际已施工完成)及运营阶段均满足保障桥梁安全运营的需求，该结构形式合理可行。



a) 工况1

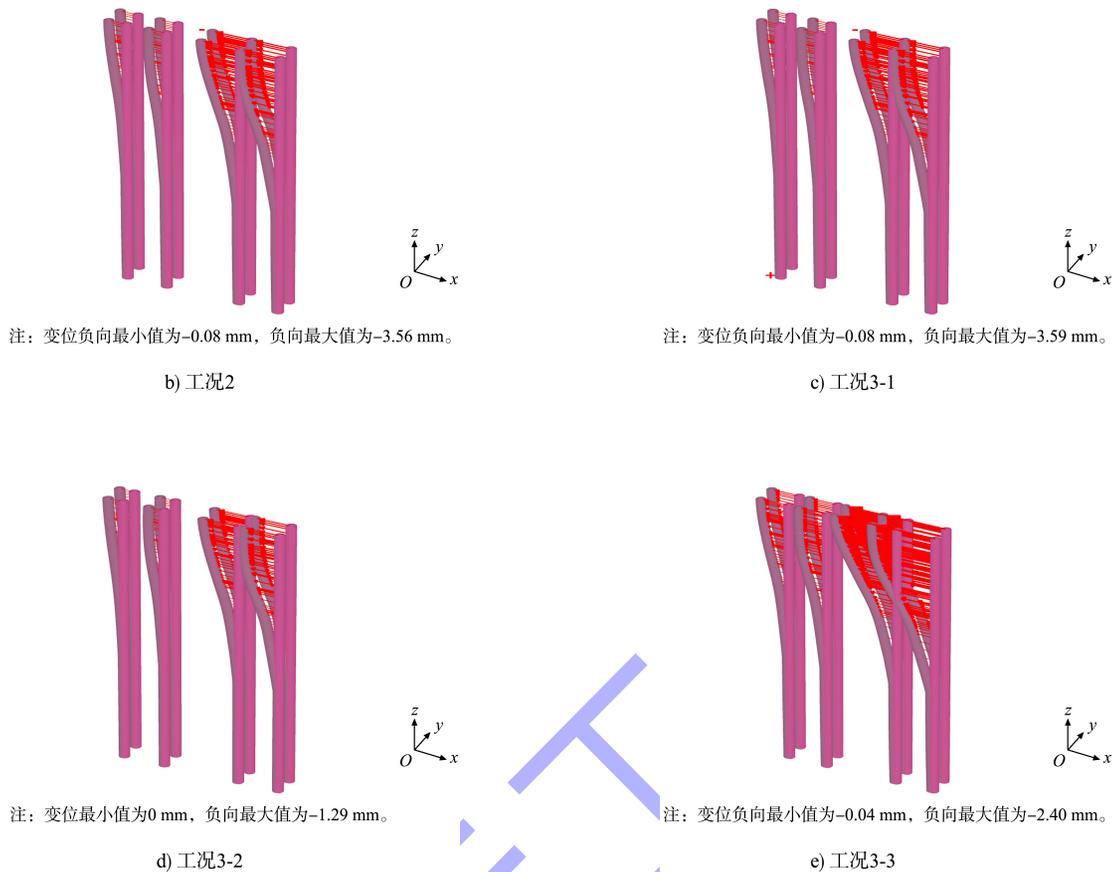


图 5 施工期及运营期各工况下桥梁桩基的水平变位分布

3 结论

1) 斜撑钢管板桩直立式海堤结构, 能够较好地控制自身水平变位, 钢管桩内力均能够满足规范要求, 该结构整体受力特性较好, 可满足海堤安全性和使用要求。

2) 斜撑钢管板桩直立式海堤结构可有效地减小填海工程对邻近桥梁桩基的变位影响, 满足保障桥梁安全运营的需求。

参考文献:

- [1] 郑安兴, 毛前, 臧振涛, 等. 框架式海堤变形模拟与稳定性影响因素分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(5): 57-62.
- [2] 许健敏, 谢兰芳, 董华钢. 一种低桩宽承台卸荷板式海

堤在限制环境下的应用[J]. 水运工程, 2019(1): 101-106.

- [3] 江泊洧, 俞演名, 宁顺理, 等. 深厚软基区海堤填筑下穿对既有桥梁桩基的影响[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 108-116.
- [4] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [6] 浙江大学, 浙江中南建设集团有限公司. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [7] BRINKGREVE R B J., KUMARSWAMY S, SWOLFS W M, et al. Plaxis 3D manuals[M]. Delft: Plaxis, 2017.

(本文编辑 王璁)