

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.019

引用格式:吴双江,谢俊凌.沿海地区海堤提升对既有桥墩桩基的影响分析[J].公路与汽运,2025,41(1):97-101.

Citation: WU Shuangjiang, XIE Junling. Analysis of influence of seawall elevation on pile foundation of existing bridge piers in coastal areas[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(1): 97-101.

沿海地区海堤提升对既有桥墩桩基的影响分析

吴双江, 谢俊凌

(台州市交通勘察设计院有限公司, 浙江 台州 318000)

摘要: 沿海地区许多桥梁跨越海堤而建, 海岸带保护修复、生态海堤建设等重要工程须在桥下实施, 由此产生的附加土压力会使既有桥墩附近的软弱地基产生沉降, 导致桩身产生附加弯矩及剪力、桩顶产生水平位移。文中对比分析 3 种海堤提升方案对穿越处既有桥墩桩基承载力、位移及强度的影响。结果表明, 附加土压力会通过负摩阻力影响单桩轴向承载力; 单桩桩顶水平位移为最敏感因素; 墩顶位移变化幅度明显小于桩顶位移变化幅度, 从而产生支座摩阻力; 桩身强度随着外部荷载的变化而变化。

关键词: 桥梁; 桩基础; 桥下荷载; 单桩轴向承载力; 桩顶水平位移; 桩身强度; 海堤提升

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)01-0097-05

为贯彻落实相关文件精神^[1], 2019 年以来, 浙江省沿海 7 个设区市相继开展海塘提升工程、海岸带生态修复及海塘安澜工程, 多处海塘提升工程防潮标准提升至 100 年一遇设计标准, 宁波市镇海区、嘉兴市海盐县部分海塘甚至将防潮标准提升至 300 年一遇设计标准。

浙江省公路网发展迅速, 修建了许多跨越海湾海塘的桥梁。以 2019 年 1 月 16 日建成通车的甬台温(宁波—台州—温州)复线高速公路象山至乐清段、乐成至黄华段为例, 设置有象山港大桥、三门湾大桥、浦坝港特大桥、台州湾大桥、乐清湾大桥等多座跨越海湾海塘的桥梁。公路桥梁方案设计时, 会综合考虑区域地形、地貌、地质等特点及工程造价等因素, 选择结构合理、施工技术相对成熟、工程造价相对经济的结构形式及跨径。但海堤提升工程与公路建设并非同时研究、设计、施工, 且分属不同的行政管理部门, 桥梁设计时未必会给海堤提升工程预留充足空间及相应结构承载力, 海堤提升工程会给穿越处附近桥墩产生或多或少的影 响。席超波等以某高速公路下穿铁路桥为例, 分析了不均匀土压力作用下桥墩的倾覆稳定性, 提出了可能出现的不利情况^[2]。徐有为对下穿公路填方进行数值模拟, 分析了土体弹性模量、黏聚力和内摩擦角及填土高度等对既有铁路桥梁位移和内力的影响^[3]。文献[4-

5]对桥梁周边堆土对桩基的影响进行了研究, 认为桩周不均匀荷载将导致软弱地基土体发生不均匀变形, 变形差会使部分土体对桩身产生侧向作用力, 最终导致桩基、桥墩及上部结构发生侧向变形, 严重时 将引发桩身开裂。

海堤提升需要进行拓宽加高, 附加土压力会使影响范围内软弱地基产生沉降, 从而导致桩周土体沉降, 产生负摩阻力^[6]; 附加应力会使桩身产生附加弯矩及剪力, 须核算既有桥墩桩身强度; 附加应力还会使桩顶产生水平位移, 须核算既有桥墩桩基水平向承载力是否足够及产生的变形是否会影响桥梁上部结构的稳定性。为此, 本文以浙江某海堤提升加固工程为例, 分析沿海地区海堤提升对既有桥墩桩基的影响。

1 单桩承载力的确定

确定桩基础的承载力, 需要分析其基桩结构形式及单桩承载力。一般情况下, 桩会受到沿重力方向的轴向力、沿桩横截面的横轴向力及直接或间接产生的弯矩作用, 须分别分析单桩轴向承载力及横轴向承载力^[7]。

1.1 单桩轴向荷载传递机制和特点

桩的承载力是桩与土共同作用的结果^[7]。轴向荷载逐步施加于单桩桩顶时, 桩身上部受到压缩而

产生相对于土的向下位移,同时桩侧表面会受到周围土体的向上摩阻力。桩顶荷载通过桩侧摩阻力传递至桩周土体,使桩身轴力和桩身压缩变形随深度增加而减小;随着桩顶荷载的增加,桩底土层因受到压缩而产生桩端阻力。但当桩周土体因某种原因发生下沉,其沉降变形大于桩身沉降变形时,在桩侧表面将出现向下的负摩阻力。因此,土对桩的轴向支撑力由桩侧摩阻力(扣除负摩阻力)和桩端阻力两部分组成。

1.2 单桩横轴向承载力容许值的确定

桩的横轴向承载力是指桩在与桩轴线垂直方向受力时的承载力^[7]。在横向荷载作用下,桩身产生横向位移或挠曲,并与桩周土体协调变形,对土体产生侧向压力,同时桩侧土体反作用于桩身,产生侧向土抗力。对于刚性桩,因桩径较大或桩长较短,桩相对于桩周土体刚度较大,随着横向荷载的增大,可能由于桩侧土体强度不够使桩整体产生破坏。对于柔性桩,因桩径较小或桩长过长,桩相对于桩周土体刚度较小,随着横向荷载的增大,在桩身弯矩最大处可能发生断裂或桩身发生过大侧向变形而丧失承载力。因此,桩的横轴向承载力可能由桩侧土的强度及稳定性决定,也可能由桩身材料的抗剪强度及侧向变形条件决定。

2 工程概况

浙江某处海堤以斜交约 63° 角度穿越一高速公路桥梁。桥梁上部结构为 $75\text{ m}+2\times 120\text{ m}+75\text{ m}$ 预应力混凝土变截面连续箱梁,在内海侧桥墩顶设置固定支座,在外海侧桥墩顶设置可滑动支座;下部结构主墩采用墙式墩+承台+群桩基础,跨越海堤的 2 个桥墩承台下设置直径 2.0 m 的钻孔灌注桩,桩长约 82 m。场地内特殊岩土主要为海积平原上部软土,软土层厚度近 35 m,具有高含水量、高压缩性及高灵敏度的特点,工程地质性质差,承载力低。桥梁与海堤的平面关系见图 1。

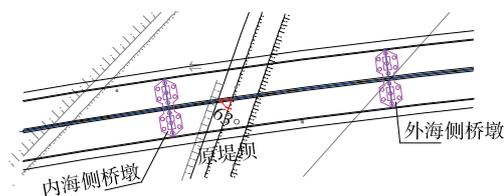


图 1 桥梁与海堤的平面关系示意图

该海堤提升项目将该标段海塘的防洪挡潮标准由原 50 年一遇设计标准提高至 100 年一遇设计标准,以增强海塘防灾减灾能力,保护当地人民生命财产安全,同时兼顾营造滨海城市文化特色,改善和美化集聚区投资环境和人居环境。在海堤原设计高程 6.8 m 的基础上,堤顶加高至 8.8 m,堤顶净宽由 5.0 m 加宽至 10.0 m。

目前该桥已建成通车,且桥梁建设时未考虑海堤提标加固对桥墩的影响,近 35 m 厚度的淤泥质土在海堤提标加固施工完成后很长时间内会产生固结变形,后期固结变形必然对跨越海堤的桥墩产生影响,如增加桥墩桩基的侧向位移、对桩身产生附加弯矩等。

3 海塘提标方案

3.1 海塘提升方案一:堤顶采用空箱结构加高+缩短镇压平台

海堤堤顶采用 C35 钢筋混凝土空箱结构加高至 8.8 m,防浪墙拆除重建后设计堤顶高程为 9.6 m,堤顶加宽至 10.0 m;空箱底部设 1.0 m 深、0.5 m 宽钢筋混凝土防渗墙,堤顶加宽区域采用原位土方固化进行处理,堤后采用 1:2 草皮护坡,迎水侧镇压平台宽度为 5.0 m,护面贴坡 8.5 m。外坡消浪结构宽度为 12.6 m,采用单只质量为 1.5 t 的混凝土扭王块;镇压层外侧坡脚设抛石护底,长度为 5.0 m,块石单片质量 $\geq 200\text{ kg}$ 。为防止空箱结构与顺海塘轴线方向两侧土石结构之间形成跌坎,在空箱结构两侧设 C35 钢筋混凝土搭板,长 \times 宽 \times 厚为 $10.0\text{ m} \times 10.0\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 。该方案的断面布置见图 2。

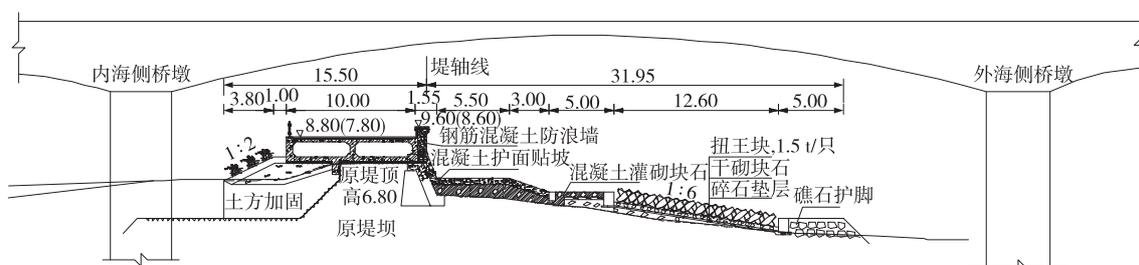


图 2 海塘提升方案一断面布置示意图(单位:m)

3.2 海塘提升方案二:堤顶填土+海堤内海侧设密排灌注桩支挡

在海堤堤顶原设计高程 6.8 m 的基础上,填土加高至 8.8 m,防浪墙拆除重建后设计堤顶高程为 9.6 m,堤顶加宽至 10.0 m;堤顶加宽区域采用原位土方固化进行处理,堤后采用 1:2 草皮护坡,迎水侧镇压平台宽度为 12.5 m,护面贴坡 8.4 m。外坡消浪结构宽度为 12.6 m,采用单只质量 1.5 t 的混凝土

扭王块;镇压层外侧坡脚设抛石护底,长度 5.0 m,块石单片质量 ≥ 200 kg。

内海侧坡脚设双排呈梅花形布置的 C30 钻孔灌注桩,桩径为 0.8 m,桩长为 43.0 m,桩底高程为 -38.0 m,桩间距为 1.5 m;桩顶设 1.0 m 高帽梁,帽梁宽度为 2.3 m,帽梁外侧设集水沟。该方案断面布置见图 3,海堤内海侧密排灌注桩支挡的平面布置见图 4。

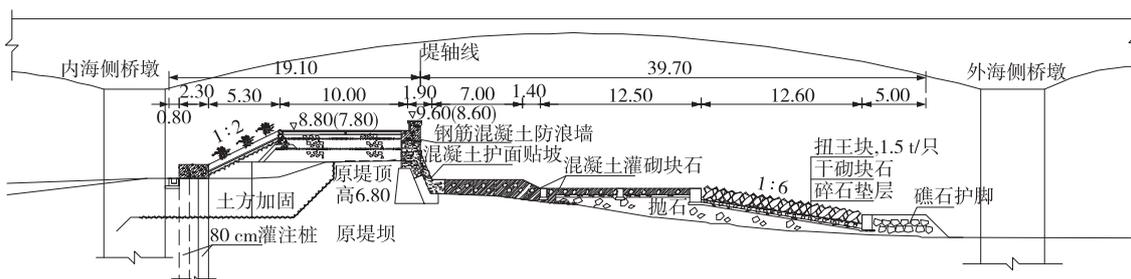


图 3 海塘提升方案二断面布置示意图(单位:m)

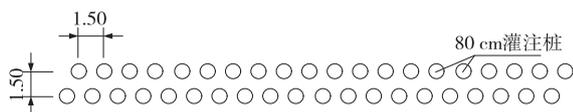


图 4 海塘提升方案二密排灌注桩支挡平面布置示意图(单位:m)

3.3 海塘提升方案三:堤顶填土

在海堤堤顶原设计高程 6.8 m 的基础上,填土

加高至 8.8 m,防浪墙拆除重建后设计堤顶高程为 9.6 m,堤顶加宽至 10.0 m;堤顶加宽区域采用原位土方固化进行处理,堤后采用 1:8 草皮护坡,迎水侧镇压平台宽度为 12.5 m,护面贴坡 8.4 m。外坡消浪结构宽度为 12.6 m,采用单只质量为 1.5 t 的混凝土扭王块;镇压层外侧坡脚设抛石护底,长度 5.0 m,块石单片质量 ≥ 200 kg。该方案断面布置见图 5。

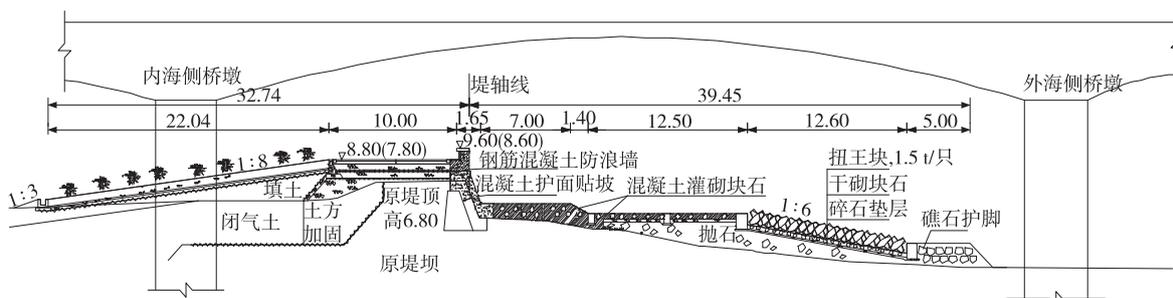


图 5 海塘提升方案三断面布置示意图(单位:m)

4 海塘提升对穿越处桥梁既有桥墩桩基的影响分析

不论采用何种方案进行海塘提标加固,均须提高堤顶及防浪墙高程,同时加固外海侧镇压平台,会在原地面产生荷载,这些荷载会使穿越处桥梁桩周土体产生沉降。因此,计算单桩承载力时应计入桩侧负摩阻力。如海塘提升方案三采用 1:8 草皮护坡,会直接增加桩基的轴向荷载。该高速公路桥梁所在地区的地基土性质较差,新建坝体填筑后,其下

方土体受附加应力影响产生一定位移,主动土压力在桥梁承台、桩基附近作用于桥梁结构,导致承台、桩基出现位移。

对桥梁上部结构建立总体计算模型,提取基本组合情况下支座反力,然后建立桥墩、承台实体模型,计算各桩的桩顶承载力和位移、墩顶位移及桩身强度^[8]。海塘提标加固对既有桥墩产生的负摩阻力及单桩轴向承载力计算结果见表 1,海塘提标加固对既有桥墩产生的桩顶位移及墩顶位移见表 2 和表 3。

表 1 3 种海堤提标方案下单桩轴向承载力

方案编号	负摩阻力/ kN	单桩桩顶 荷载/kN	单桩轴向承 载力/kN
方案一	1 378	16 152	18 651
方案二	1 483	16 152	18 546
方案三	1 520	16 531	18 509

注:单桩轴向承载力已扣除负摩阻力。

表 2 3 种海堤提标方案对外海侧桥墩产生的位移

方案编号	桩顶最大位移/mm		墩顶位移/mm	
	顺桥向	横桥向	顺桥向	横桥向
方案一	5.13	5.28	8.30	4.25
方案二	12.80	7.02	8.17	4.82
方案三	18.65	10.08	8.21	4.96

表 3 3 种海堤提标方案对内海侧桥墩产生的位移

方案编号	桩顶最大位移/mm		墩顶位移/mm	
	顺桥向	横桥向	顺桥向	横桥向
方案一	3.64	1.18	14.13	2.72
方案二	22.40	4.60	13.30	1.84
方案三	58.42	12.77	15.12	3.82

从表 1 可以看出:相同地质条件下,方案一产生的负摩阻力最小,其单桩承载力最大;方案一和方案二均无直接填土作用于桥墩承台,2 种方案下单桩桩顶荷载一致,其单桩轴向承载力大小取决于桥墩附近荷载产生的附加土压力。以单桩轴向承载力作为控制指标,3 种方案均可行。

从表 2、表 3 可以看出:既有桥墩桩顶位移随桥下附加荷载的增大而增大;墩顶位移与墩身高度、支座形式及桥下荷载分布位置有关,受桥梁上部结构位移限制,墩顶位移变化幅度明显小于桩顶位移变化幅度。对比方案一和方案二,由于桥下荷载分布位置不同,桩顶最大位移出现的位置不同,说明不能单从桥墩与海堤边缘的距离判断最大桩顶位移所在的桥墩位置。

不同类型支座在不同方向会有一定位移容许值。理论设计时,外海侧桥墩单向滑动支座处横桥向、顺桥向容许位移分别为 3 mm、150 mm,双向滑动支座处横桥向、顺桥向容许位移分别为 50 mm、150 mm;内海侧桥墩固定支座处横桥向、顺桥向容许位移均为 3mm,单向滑动支座处横桥向、顺桥向

容许位移分别为 100 mm、3 mm。对比表 2 和表 3 中各方案对既有桥墩产生的墩顶位移,外海侧及内海侧桥墩支座均可能产生支座摩阻力,依据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》关于支座摩阻力的计算方法^[9]及有限元模型中提取的上部结构重力产生的效应,得到外海侧、内海侧桥墩的支座摩阻力标准值分别为 985.51 kN、996.13 kN。

JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》中按 m 法计算弹性桩水平位移的方法适用于基础在地面处位移最大值不超过 6 mm 的情况^[10]。JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》规定采用试验法确定和公式法计算单桩水平承载力特征值时,对于水平位移敏感的建筑物,取水平位移 6 mm 对应荷载的 75%作为单桩水平承载力特征值(即单桩横轴向承载力容许值)^[11]。除方案一桩顶最大水平位移小于 6 mm 外,方案二和方案三桩顶最大水平位移均大于 6 mm,以桩顶水平位移作为控制指标时,推荐采用方案一。

桥梁属于对水平位移敏感的建筑物,根据桩基材料及截面特征,水平位移为 6 mm 时,计算得单桩水平承载力特征值为 2 744.43 kN。

根据 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[12]及 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版)^[13]计算沿周边均匀配置纵向钢筋的圆形截面钢筋混凝土偏心受压构件正截面抗压承载力,即桩身轴向承载力和桩身抗弯承载力。3 种海堤提升方案对既有桥墩桩身强度的影响见表 4~6。

从表 4~6 可看出:虽然方案二和方案三对既有桥墩桩基产生的桩顶水平位移最大值均超过 6 mm,但桩身及桩顶最大剪力均未超过单桩水平承载力特征值;虽然 3 种方案对既有桥墩产生的墩顶位移均超过支座理论容许位移,导致产生支座摩阻力,但 3 种方案的桩顶剪力均小于各支座摩阻力标准值。

表 4 3 种海堤提升方案对内海侧桥墩剪力及轴向力的影响

方案 编号	桩身最大 剪力/kN		桩顶最大 剪力/kN		桩身最大 轴向力/ kN	桩身轴向 承载力/ kN
	横桥向	轴向	横桥向	轴向		
方案一	727.14	563.21	656.66	86.87	17890.30	42333.33
方案二	878.23	502.15	752.16	228.26	18861.98	40622.26
方案三	889.12	508.98	761.64	225.41	20815.48	41514.47

表 5 3 种海堤提升方案对外海侧桥墩剪力及轴向力的影响

方案 编号	桩身最大 剪力/kN		桩顶最大 剪力/kN		桩身最大 轴向力/ kN	桩身轴向 承载力/ kN
	横桥向	轴向	横桥向	轴向		
方案一	949.16	627.19	772.97	497.62	24 719.10	48 093.24
方案二	748.57	688.91	624.81	539.70	20 158.94	43 195.46
方案三	757.63	698.00	632.50	522.16	20 920.81	43 232.28

表 6 3 种海堤提升方案对桥墩弯矩的影响

方案 编号	桩身最大弯矩/ (kN·m)		桩身抗弯承载力/ (kN·m)	
	外海侧	内海侧	外海侧	内海侧
方案一	4 270.22	3 906.09	11 496.60	8 879.12
方案二	4 997.08	4 542.68	12 231.75	11 100.96
方案三	5 231.32	4 702.44	11 856.79	11 083.70

方案一对既有桥墩桩基产生的附加内力最小。材料及配筋设计相同的情况下,施加不同外部荷载,会产生不同的结构抗力。单以桩身强度作为控制指标时,3 种方案的桩身轴向承载力及桩身抗弯承载力均满足要求。

5 结论

(1) 海堤提升工程中新增荷载越小,且荷载分布位置越靠近桥梁跨中处,其对穿越点附近既有桥墩桩基的影响越小。

(2) 由海堤提升工程联想到桥下道路等级提升改造工程,以轻质材料对既有道路路基进行换填处理来提高设计高程或拓宽路基是对既有桥墩桩基影响最小的方案,同时对轻质材料路段进行防渗处理,保证不增加桥下荷载。

(3) 相同地质条件下,附加土压力并不会直接增大单桩桩顶荷载,但附加土压力越大,桩周土体产生的负摩阻力越大,单桩轴向承载力越小。通过反压削减既有桥墩桩顶水平位移的方式会增加桩基负摩阻力、减小其轴向承载力,还会对相邻桥跨桩基产生类似影响,从而扩大影响范围。

(4) 既有桥墩桩顶位移随桥下附加荷载的增大而增大;墩顶位移与墩身高度、支座形式及桥下荷载分布位置有关,受桥梁上部结构位移限制,墩顶位移变化幅度明显小于桩顶位移变化幅度,由此可能产

生支座摩阻力。

(5) 桥梁属于对水平位移敏感的建筑物,单桩桩顶水平位移容许值应取 6 mm。

(6) 所用材料及配筋设计相同的情况下,桩基础结构抗力会随外部荷载的变化而变化。

参考文献:

- [1] 浙江省发展和改革委员会,浙江省财政厅,浙江省自然资源厅,等.关于加强要素保障加快海塘安澜千亿工程建设的实施意见[EB/OL].(2023-03-21)[2023-09-21]. http://slt.zj.gov.cn/art/2023/3/21/art_1228975812_59035543.html.
- [2] 席超波,杨冰清,赵一博,等.高速公路下穿既有铁路桥墩基底承载力验算[J].公路与汽运,2024,40(1):95-101.
- [3] 徐有为.下穿公路对既有铁路桥梁位移与内力的参数敏感性分析[J].公路与汽运,2023(4):125-129.
- [4] 冯印.深厚软土区城市道桥近距下穿京沪高铁桥梁影响及处置研究[J].中外公路,2020,40(2):157-162.
- [5] 李忠诚,朱小军.地面超载条件下土体侧移模式及对邻近桩基影响分析[J].岩土力学,2007,28(增刊1):809-814.
- [6] 陈林,谢发祥,吉伯海.负摩阻力作用下高速铁路桩基基础承载特性研究[J].交通科学与工程,2015,31(3):43-48.
- [7] 王晓谋.基础工程[M].4版.北京:人民交通出版社,2010.
- [8] 王思伟,林立科.盾构隧道下穿铁路刚架桥安全影响分析[J].中外公路,2021,41(3):251-256.
- [9] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [10] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [11] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [12] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [13] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范(2015年版):GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

收稿日期:2023-09-21