

杭州湾南岸海岸带工程地质条件及评价

李金铎^{1*}, 王日彪², 赖纪海¹, 贺智能¹, 余海俊²

¹自然资源部宁波海洋中心, 浙江 宁波

²宁波海工勘察研究院有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年9月30日; 录用日期: 2025年10月20日; 发布日期: 2025年10月31日

摘要

根据地形测量、工程地质钻探、水文泥沙测验以及区域和历史资料对杭州湾南岸海岸带工程地质条件和海岸工程的适宜性进行综合分析和评价。研究表明, 平坦开阔的地形地貌条件有利于海岸工程的建设, 近岸海域处于基本平衡或微淤状态, 岸滩稳定。地基土层主要为全新统至晚更新统冲海相和冲湖相成因, 水平空间上连续性较好, 垂向上表现为成层状变化, 粉砂和粉土层具中等压缩性, 总体上性质较好, 而淤泥质土体物理力学性质差, 中-高压缩性, 是工程建设的主要不良地质因素。海岸工程的建设需要对软土地基进行处理。研究区处于区域稳定型区域, 处于地震低烈度区, 适宜于工程建设。根据区内工程地基砂性土液化势判别结果表明, 经过地基处理后, 砂性土不发生液化而失稳破坏, 海岸工程可以安全运行。

关键词

工程地质条件, 评价, 海岸带, 杭州湾南岸

Engineering Geologic Conditions and Evaluation of Coastal Zone along the South Coast of Hangzhou Bay

Jinduo Li^{1*}, Ribiao Wang², Jihai Lai¹, Zhineng He¹, Haijun Yu²

¹Ningbo Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningbo Zhejiang

²Ningbo Ocean Engineering Surveying and Research Institute Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: September 30, 2025; accepted: October 20, 2025; published: October 31, 2025

Abstract

The engineering geological conditions and suitability of coastal engineering in the coastal zone

*通讯作者。

文章引用: 李金铎, 王日彪, 赖纪海, 贺智能, 余海俊. 杭州湾南岸海岸带工程地质条件及评价[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2551-2558. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410274

along the south coast of Hangzhou Bay are analyzed and evaluated based on topographic surveys, engineering geological drilling, and regional and historical data. The results show that the flat and open topographic and geomorphological conditions are favorable for the construction of coastal engineering, and the near-shore sea area is in the basic equilibrium or slight siltation state, and the shore beach is stable. The foundation soil layer is mainly of Holocene to Late Pleistocene alluvial and marine genesis, with good horizontal spatial continuity and laminar changes vertically, and the silt and silty soil layer has medium compressibility and good properties in general, while the muddy soil body has poor physical and mechanical properties and medium-high compressibility, which is the main adverse geological factor for the construction of the project. The construction of coastal projects requires the treatment of soft soil foundations. The study area is in the regional stabilization area, in the seismic low intensity zone, which is suitable for engineering construction. According to the results of discernment of liquefaction potential of sandy soil of engineering foundations in the area, after foundation treatment, the sandy soil is not destabilized and damaged by liquefaction, and the coastal project can be operated safely.

Keywords

Engineering Geological Conditions, Evaluation, Coastal Zone, South Coast of Hangzhou Bay

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着沿海地区社会经济的发展,大量的海岸工程如滩涂围垦、海底管线等开工建设,海岸带的工程地质条件及工程的适宜性评价是其进行前期技术可行性研究的重要内容,也是工程完工后安全稳定运行的重要保证[1]-[3]。前人在各个地区的研究已有大量成果[2]-[7]。如李伯安将浙江沿海地区第四系沉积物分为砂性土和淤泥质土,对海塘和水闸等水利工程建设的工程地质条件进行了研究[2]。杜星等对辽东半岛庄河海域海岸带工程地质特征进行了系统分析,认为研究区适宜开展海洋工程开发活动,但应重点考虑海底软弱土层等不良地质因素[4]。吴振等主要根据钻探资料,将莱州湾海岸带地表下 50 m 的土层分为 9 个工程地质层,并对各层工程地质特征、软土、盐渍土的分布范围、地基土液化等级、地下水和土的腐蚀性等进行了综合评价[5]。在南海,杨木壮等利用物探和海底取样资料,探讨了北部湾近岸海域海洋工程地质特征,指出研究区地形地貌复杂,存在浅层气、砂土液化等灾害地质因素,工程建设应当引起注意[7]。很多学者在总结相关研究成果和分析大量地质环境数据的基础上,尝试构建以自然灾害地质因素和人类活动影响等为基础的海岸带工程地质环境稳定性评价体系[3],对中国海岸带灾害地质特征进行总体评价[8],综合考虑研究区域工程地质、地形地貌、地质灾害等多种因素,采用专家打分法、模糊数学方法等,进行工程地质分区和稳定性的定量评价[3][9]。这些研究对海岸带工程建设和安全运行具有重大的指导意义,但在杭州湾南岸海岸带的工程地质评价和工程环境适宜性分析尚比较缺乏。

杭州湾是典型喇叭状现代强潮河口湾,南岸从慈溪北侧向东南扩展至镇海东侧海域,潮流作用和长江入海泥沙的输入在南岸形成以泥质粉砂为主的宽缓的淤涨型潮滩,公元 1500 年至 2020 年间不断向海扩张,上部地层为厚层的第四系海相沉积[10][11],近年来海岸带区域内滩涂围垦、海底管线、生态修复、海上风电等项目建设日益增多,局部区域工程环境已发生变化,局部区域在某些年份出现侵蚀[11]-[13],对该区进行工程地质研究和分析十分必要。本文根据工程环境调查、地形测量、路由勘测等实测资料,并结合其他自然环境以及区域和历史资料,对研究区工程地质条件进行了综合分析和评价,为海岸工程

设计和维护等提供参考。

2. 资料与方法

研究区从海岸至 0 m 线(理论最低潮面, 下同)(见图 1)外侧 500 m 进行了地形测量, 海域地形测量采用 Trimble R10 RTK 定位, HY1601 测深仪测水深。滩涂和陆域地形使用大疆 M300 型无人机搭载激光雷达测量, RTK 和全站仪进行校准, 误差均在精度范围之内, 制作数字化地形图。

采用路由调查的 5 个工程地质钻孔资料和 3 个站位的水文泥沙资料, 分别位于研究区北部和南部(见图 1)。工程地质钻探使用海上钻探船和 XY-1 型工程钻机, 进行标准贯入试验和静力触探, 采用活阀式取土器采取粘性土, 砂、粉土采用专用环刀取砂器锤击法采取, 土样带回室内进行土工试验, 所有测试均使用数据自动采集系统。

在南部 3 个钻孔点位进行了定点水文泥沙测验, 测验项目有大小潮流速、流向、气象、波浪、悬沙含沙量、悬沙颗粒分析、底质颗粒分析(见图 1)。

所有现场调查和室内试验都按照有关规范进行, 结果准确可靠。

收集使用研究区自然条件、区域地质、地形地貌以及滩涂围垦、海上风电等工程建设的资料。使用 Surfer15.0 和 AutoCAD2014 软件制图。

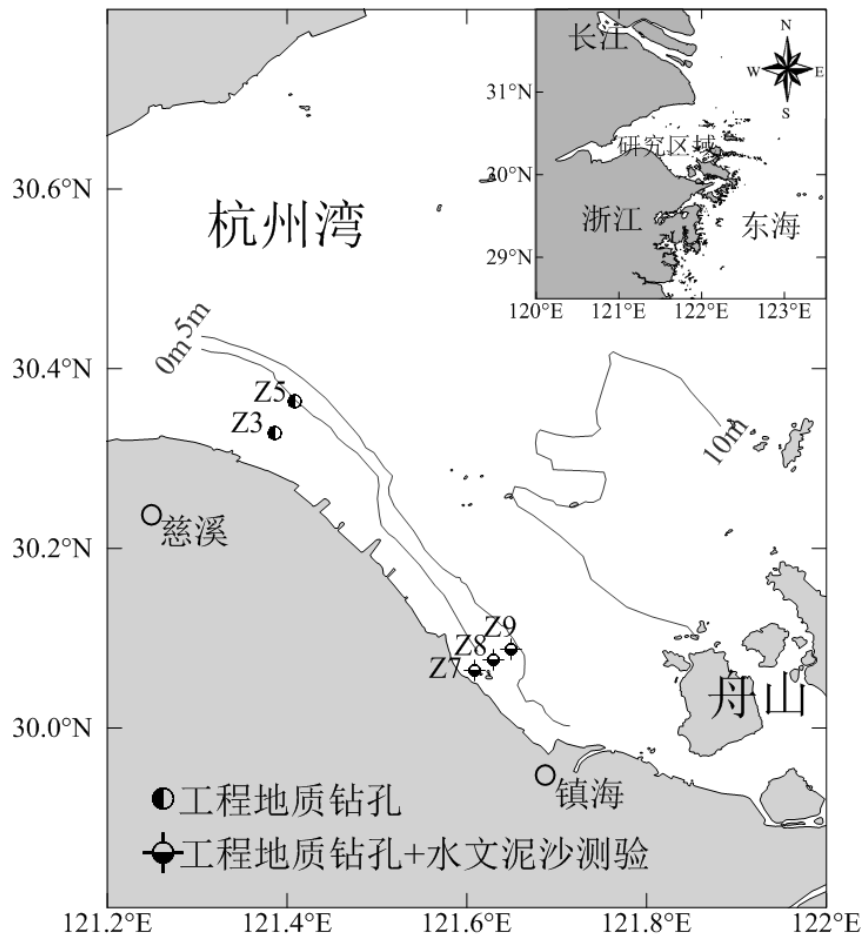


Figure 1. Investigated area and engineering geological drilling position (modified from nautical chart 13310)

图 1. 研究区域和工程地质钻孔位置(底图参考海图 13310)

3. 结果与讨论

3.1. 地形地貌和岸滩冲淤稳定性

研究区海域面向东北(见图 1), 由滨海平原、滩涂逐渐过渡为海域, 海面开阔, 海岸多为围垦海堤, 岸线至 0 m 线之间滩面平坦宽阔, 0~5 m 等深线为水下岸坡, 5 m 等深线以下为平坦的水下平原, 平坦开阔的地形地貌条件有利于海岸工程的建设。

实测资料表明, 近岸海域潮流性质以往复流为特征, 涨潮流向西北, 落潮流向东南, 总体平行等深线和岸线方向, 流向集中, 说明处于动态平衡状态。潮流流速较大, 大、小潮垂线平均最大流速分别在 130~200 m/s 和 60~110 m/s, 海水含沙量相对较大, 颗粒较细, 多为细粉砂或极细粉砂, 在较强的潮流作用下往复运动, 不易落淤。根据计算, 涨潮流和落潮流挟沙能力大致相当, 总体上涨潮单宽输沙量略大于落潮单宽输沙量, 表层沉积物为粘土质粉砂等细颗粒沉积类型, 这些现代沉积类型在长江口至杭州湾以至浙江近海都是最常见的, 这些都反映了杭州湾南岸近岸海域处于基本平衡或微淤状态。

文献也指出, 长江入海泥沙在杭州湾地形约束和潮流作用下在南岸形成泥质砂为主的淤涨型岸滩, 但随着近几十年来的围垦, 岸线已外推至水深较大潮流较强的区域, 海岸该区处于泥沙冲淤平衡或微淤状态[11]-[14]。

历史资料对比分析表明, 杭州湾南岸边滩在历史时期虽有涨、坍交替变化, 但总趋势是滩面淤涨, 岸线向外推出。14 世纪后, 滩涂淤涨加快, 筑塘围涂工作基本未间断。近年来边滩高程相对稳定。从大的区域来看, 全新世中期以来, 海面长期相对稳定, 泥沙逐渐淤积, 岸线外推, 海湾发育成海岸平原, 第四系松散沉积物主要为海相沉积, 浅部地层连续, 没有地层错断、缺失以及沉积相沉积厚度的大变化, 表明近代以来并未发生严重、突然的冲淤变化[10] [15]。

可以看出, 研究区地形地貌、泥沙运动和岸滩稳定性适宜工程的建设, 但应注意大潮时潮流速度较大, 工程的设计施工和安全运行应加以考虑。

3.2. 工程地质条件及不良地质因素

本区早、中更新世上升剥蚀, 晚更新世海陆交替频繁, 全新世大规模海侵。下部地层为上更新统河湖相与海相交互沉积, 与下伏基岩直接接触, 上部为全新统海相沉积, 厚度 20~45 m [10] [15]。

研究区北部慈溪近岸, 表层为厚度 1~2 m 左右的不稳定松软浮泥层, 之下由钻孔揭露的 50 m 深度内地基土可以划分为 4 个工程地质层(见图 2), 场地土层主要受流水作用形成, 主要为海相成因, 水平空间上连续性较好, 垂向上表现为成层状变化, 上部两层厚约 15 m, 为砂质粉土或粉土夹粉砂, 粉土含量较大, 中压缩性, 强度较高, 性质较好。下部两层为淤泥质粉质粘土或淤泥质粘土, 高压缩性, 强度低, 性质较差, 钻孔底部为晚更新世老粘土层, 强度较高。

在研究区南部的镇海近岸, 勘探揭露的地基土可以划分为 5 个工程地质层(见图 2), 勘察资料表明: 场地土层主要受流水作用形成, 主要为冲海相和冲湖相成因, 结构总体上呈“上软下硬”的格局, 水平空间上连续性较好, 垂向上表现为成层状变化, 局部地段受古地貌变迁影响, 地层沉积为过度性质呈交互状变化。上部 1 层为近期形成淤泥质土, 性质差; 2 层为全新世形成的巨厚层粘性土, 该层土体总体性质差, 以高或中偏高压缩性土为主, 是本场地浅部主要的软弱层, 其下 3 层、4 层为全新世早期冲海积形成, 前者为粉砂, 物理力学性质好, 具中等压缩性, 后者为高压缩性的淤泥质土, 物理力学性质差, 5 层为晚更新世形成的冲湖积粘性土和粉砂层, 该工程地质层具中等压缩性, 总体上性质较好。

研究区浅表层一般为厚度 0.5~1.5 m 淤泥或者淤泥质土层, 其下部一般为粉土层(见图 2), 与北侧杭州湾主流通道内的表层沉积一致。在杭州湾主流通道和长江口等粉细砂沉积区, 有沙波活动性的报道[14]

[16]。但本区粉土沉积之上有约 1 m 厚的泥质沉积, 因此, 可以认为该区这种沉积不具活动性。

依据工程地质层分布和室内土工实验土体物理力学性质指标统计结果(见表 1), 结合有关规范和本地地区的建筑经验, 综合确定地基土承载力特征值和海岸工程的持力层, 研究区进行海岸工程的建设是可行的。涉海工程的桩基持力层可选择埋深较浅, 强度较高的粉土层, 按端承摩擦桩考虑, 由于粉砂土埋深较浅, 设计时应予以考虑抗拔作用; 如果桩基埋深较深, 选择厚度较大的淤泥质土层, 按纯摩擦桩考虑, 采用预制桩或钢管桩形式。海底管道可以选择埋深较浅的粘质粉土层作为持力层。

研究区岸滩浅部地层含水介质为粉质粘土、粘质粉土、砂质粉土, 主要接受大气降水及地表水入渗补给, 由于入渗微弱, 浅层地下水水量相对较贫乏, 滩涂部分则明显受到潮汐活动的影响。海域部分地下水主要为潜水, 受大气降水及地表径流补给, 赋存于浅部粉土粉砂层中, 透水性较好。根据水样分析报告, 研究区域地下水对钢筋混凝土有弱侵蚀性, 涉海工程需要采取一定的防护措施。

研究区平坦宽阔, 无滑坡、潮流冲刷槽、埋藏古河道等不良地质现象, 对工程建设影响较大的主要不良地质因素是广泛分布的巨厚软土层, 具有含水量高、孔隙比大、抗剪强度低等特点, 若采用天然地基, 会产生较大的不均匀沉降和过量沉降, 使建筑物产生开裂等不良现象, 但经过对软土地基的处理或采用桩基础, 对于海岸工程而言是适宜建筑的。另一个不良地质因素是砂土的液化性, 在下一节讨论。

Table 1. Physical and mechanic indices statistics of main foundation soils in the study area

表 1. 研究海区主要地基土物理力学指标统计表

地层名称	统计指标	含水率	孔隙比	饱和度	塑性指数	压缩系数	粘聚力	内摩擦角	标准贯入
		(%)		(%)	(%)	(MPa ⁻¹)	(kPa)	(°)	(击/30 cm)
淤泥质粉质粘土	最大值	33.7	0.946	100.0		0.30	12.0	25.8	17.0
	最小值	23.0	0.744	82.3		0.11	8.5	20.0	5.5
	平均值	28.0	0.834	92.6		0.20	10.5	22.3	13.5
	标准差	2.3	0.054	4.7		0.05			3.1
	变异系数	0.084	0.065	0.051		0.237			
砂质粉土	最大值	32.7	0.887	98.0	9.4	0.29	13.4	21.3	37.0
	最小值	22.2	0.686	82.7	7.8	0.12	7.9	18.5	12.0
	平均值	26.6	0.773	91.3	8.6	0.21	10.6	19.9	21.3
	标准差	2.6	0.067	5.0		0.06			7.2
	变异系数	0.097	0.087	0.055		0.290			
淤泥质粘土	最大值	48.1	1.416	99.7	21.9	1.12	16.9	11.6	
	最小值	39.4	1.135	89.8	15.3	0.65	15.3	8.2	
	平均值	42.8	1.239	94.8	18.2	0.89	16.1	9.9	
	标准差	2.6	0.075	3.0	1.7	0.13			
	变异系数	0.060	0.061	0.031	0.095	0.145			
粉质粘土	最大值	39.0	1.128	98.9	16.2	0.92	13.7	10.9	
	最小值	27.3	0.865	85.6	7.0	0.41	13.7	10.9	
	平均值	34.6	1.027	91.7	12.8	0.66	13.7	10.9	
	标准差	3.0	0.078	2.7	2.6	0.14			
	变异系数	0.088	0.076	0.029	0.200	0.217			

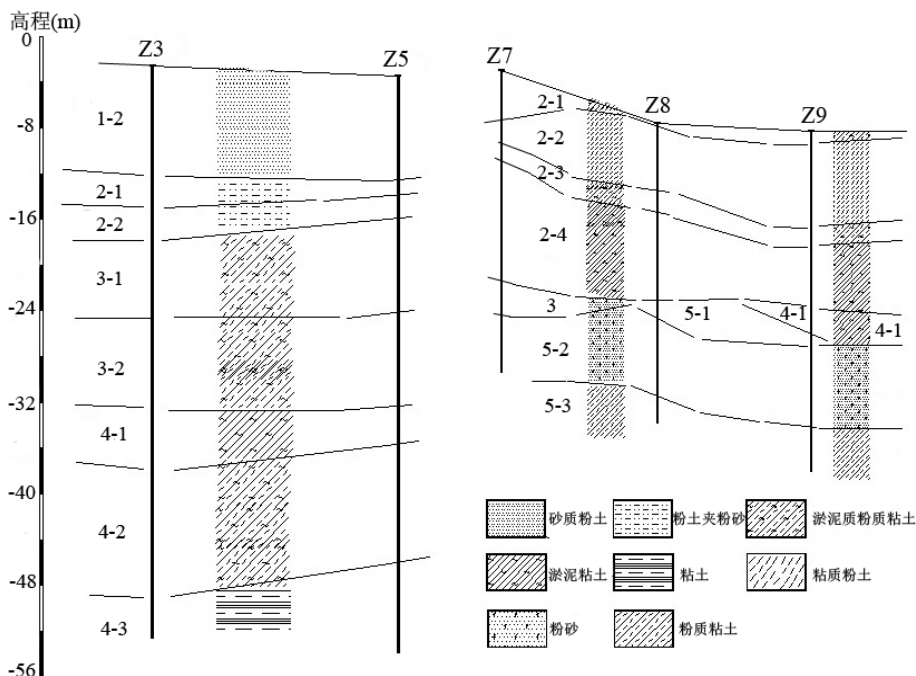


Figure 2. Engineering geological profile of the study area (core position see Figure 1)

图 2. 研究区工程地质剖面图(钻孔位置见图 1)

3.3. 区域稳定性和砂土的液化判别

研究区位于北北东向的闽浙 - 岭南隆起带的中部、华南低烈度区东北部, 燕山运动形成的一系列 X 共轭断裂构成了本区的主要构造骨架(见图 3), 在陆地主要呈 NE 走向, 其次为 NNE、NNW 和近 E-W 向, 具断块性质, 在海域及岛屿仍以 NE 向为主, 其它产状欠发育。研究区位于华南低烈度区之东北部, 新生代以来, 研究区断裂及相应的地震活动非常弱小。研究区 200 km 范围内, 1800 年以来无 6 级以上地震, 对研究区没有明显影响[10] [17]。

采用国内外应用最广泛的平稳泊松模型对研究区未来 4 级以上地震发生的概率进行描述[18]。在 t 时间内发生 n 次地震的概率为:

$$p(n|t, v) = \frac{e^{-vt} (vt)^n}{n!}, \quad v \text{ 表示地震年平均发生率。}$$

采用此模型对研究区未来 10 年、20 年和 30 年的地震强度进行预测, 未来 30 年研究区 200 km 范围发生一次 $M_s > 4$ 地震的概率为 0.33 (见表 2)。

可见, 研究区地震活动具有震级小, 强度弱, 频率低的特征, 且有一个比较稳定的趋势, 近代地震均以弱震、微震为主。只要采取合理的抗震设防措施, 是适宜于工程建设的。

研究区 20 m 以内地基土主要为淤泥质土、粉土、粉砂、粉质粘土, 属于软弱场地土[16]。根据区域地质资料, 研究区覆盖层厚度大于 80 m [10] [16], 根据规范, 涉海工程场地类别为 IV 类, 设计地震分组为第一组, 设计特征周期值为 0.65 S [19]。

根据工程地质钻探资料, 研究区地层普遍存在饱和砂土或粉土, 标准贯入试验结果表明, 浅部地基土层在地震烈度为 VII 度设防时, 将会发生轻微 - 中等液化。在研究区海底管道工程实践中, 对管道地基土进行了抗液化处理后其下部砂性土进行了液化势判别。结果表明, 在管道基础采用 50 cm 黄砂垫层处理后, 管道下部 6 m 内每间隔 1 m 土层中, 即使在地震烈度为 VII 度的地震作用下, 地震剪应力均小于其

相应土层的抗液化剪应力, 砂性土不发生液化而失稳破坏, 海岸工程可以安全运行(见表 3) [16]。

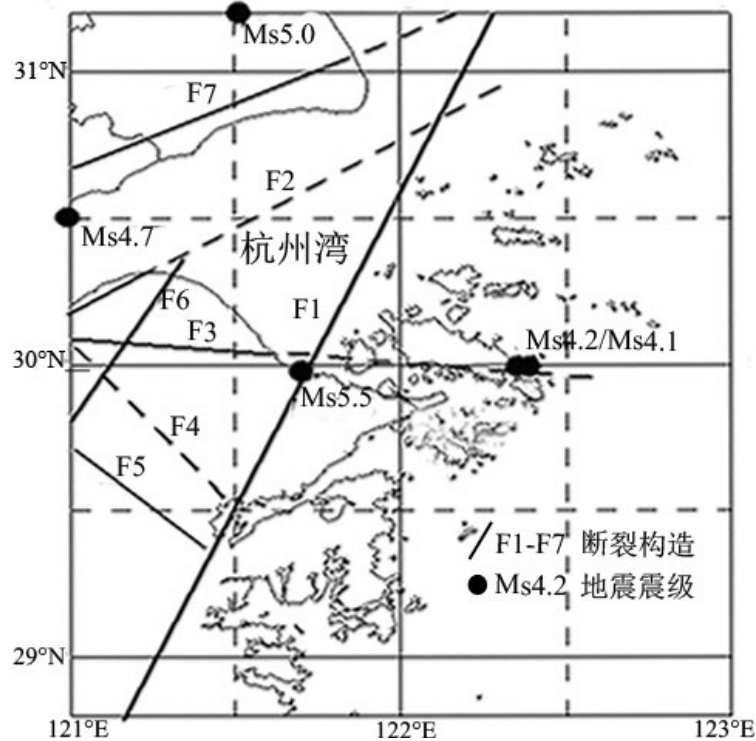


Figure 3. Faults and earthquakes $M_s > 4$ since 1800 A.D. within 200 km of the study area

图 3. 研究区 200 km 范围断裂及 1800 年以来 $M_s > 4$ 地震分布

Table 2. Probability of earthquakes $M_s > 4$ within 200 km in the study area

表 2. 研究海区 200 km 范围发生 $M_s > 4$ 地震的概率

概率	0 次	1 次	2 次	3 次
$p(n 10)$	0.82	0.16	0.02	0
$p(n 20)$	0.67	0.27	0.05	0.01
$p(n 30)$	0.55	0.33	0.1	0.02

Table 3. Equivalent average shear stresses and liquefaction-resistant shear stresses at different core depths of foundation soils under seismic action

表 3. 地震作用下地基土不同深度处等效平均剪应力和砂土抗液化剪应力

深度	天然容重	峰值加速度	等效平均剪应力	砂土抗液化剪应力
m	KN/m^3	g	Kpa	Kpa
1	18.95	0.075	0.91	1.59
2	18.95	0.075	1.81	3.18
3	18.95	0.075	2.7	4.77
4	18.95	0.075	3.58	6.36
5	19.16	0.075	4.51	7.95
6	19.16	0.075	5.38	9.54

4. 结论

1) 杭州湾南岸近年来海岸带区域内工程项目建设日益增多。根据实测地形、工程地质钻探以及水文泥沙测验等资料对研究区海岸带工程地质条件进行分析评价。平坦开阔的地形地貌条件有利于海岸工程的建设, 悬沙在较强的潮流作用下往复运动, 近岸海域处于基本平衡或微淤状态, 岸滩稳定。

2) 研究区勘探揭露的地基土层主要为全新统至晚更新统冲海相和冲湖相成因, 水平空间上连续性较好, 垂向上表现为成层状变化, 粉砂和粉土层具中等压缩性, 总体上性质较好, 而淤泥质土体物理力学性质差, 中-高压缩性, 是工程建设的主要不良地质因素。海岸工程的建设需要对软土地基进行处理。

3) 研究区处于区域稳定型号, 处于地震低烈度区, 适宜于工程建设。根据区内工程地基砂性土液化势判别结果表明, 经过地基处理后, 砂性土不发生液化而失稳破坏, 海岸工程可以安全运行。

参考文献

- [1] 顾小芸. 海洋工程地质的回顾与展望[J]. 工程地质学报, 2008, 8(1): 40-45.
- [2] 李伯安. 浙江省沿海滩涂工程地质条件初探[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2006, 18(2): 44-47.
- [3] 杜东, 柳富田, 刘宏伟. 河北曹妃甸岛区工程地质环境稳定性评价研究[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(4): 299-304.
- [4] 杜星, 孙树珩, 宋玉鹏, 等. 辽东半岛庄河海域海岸带工程地质特征及开发适宜性分析[J]. 海岸工程, 2022, 41(3): 242-249.
- [5] 吴振, 王松涛, 祝子惠. 莱州湾海岸带工程地质特征及特殊问题分析[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(9): 1-9.
- [6] 李涛, 赵庆英, 陈荣华, 等. 宁波洋沙山近岸海域浅部地层特征与不良工程地质现象[J]. 东海海洋, 2004, 22(3): 18-27.
- [7] 杨木状, 梁修权, 王宏斌, 等. 南海北部湾海洋工程地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 47-52.
- [8] 李培英, 杜军, 刘乐军, 等. 中国海岸带灾害地质特征及评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
- [9] 姜波, 冯秀丽, 田动会, 等. 埕北海域工程地质分区及模糊数学稳定性评价[J]. 海洋科学, 2018, 42(4): 18-26.
- [10] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志, 第五分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 1-86.
- [11] 姚培灵. 杭州湾南岸海岸带格局演变研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- [12] 胡成飞, 潘存鸿, 吴修广, 等. 1959-2019年杭州湾南岸滩涂演变规律及机制[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 230-241.
- [13] 方强, 黄赛花, 许雪峰, 等. 围垦工程群对杭州湾南岸累积水动力影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5338-5344.
- [14] 章伟艳, 张霄宇, 金海燕, 等. 长江口-杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及物源分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 640-650.
- [15] 林清龙, 林楠, 马宏杰. 杭州湾南岸慈溪地区晚第四纪沉积与古环境演化[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(9): 1-8.
- [16] 宁波海工勘察研究院. 慈溪污水处理厂海底管道路由勘察报告[R]. 宁波: 宁波海工勘察研究院, 2007.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB18306-2015, 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 刘杰. 地震活动的泊松模型和应力释放模型在地震预测和地震危险性评估中的一些应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 国家地震局地球物理研究所, 1998.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.