



强震区高桩码头接岸结构设计

余神光¹, 蒋依坛², 路卫卫¹, 宋兰芳¹, 陈良志¹

(1. 中交第四航务工程勘测设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 针对强震区高桩码头的接岸结构设计, 依托某实际工程, 采用定性、定量分析方法, 对比研究工程中常用的斜坡式挡土墙、悬臂板桩、有锚板桩等接岸结构的适应性及特点, 提出一种新型沉降板式接岸结构, 并对该新型接岸结构的特征进行论述。研究表明, 相比于传统的接岸结构, 该新型接岸结构在强震区更为经济、合理, 对岸坡的沉降、变形具有更好的适应能力, 对保障码头运营以及震后快捷修复更为有利。

关键词: 强震区; 高桩码头; 接岸结构; 沉降板式接岸结构

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0096-05

Design of land-connecting structure for piled wharf in strong seismic area

YU Shen-guang¹, JIANG Yi-tan², LU Wei-wei¹, SONG Lan-fang¹, CHEN Liang-zhi¹

(1. CCCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: For the land-connecting structure design of piled wharf in strong seismic zone, based on a practical engineering case and using qualitative and quantitative analysis method, we compare and analyze the performance of frequently used land-connecting structure such as concrete retaining wall installed on slope, cantilever sheet pile wall and anchored sheet pile wall, and propose a new land-connecting structure of anchoring settlement slab, the characteristics of which are expounded. The research shows that, compared with the traditional land-connecting structure, the anchoring settlement slab is an economic and convenient option in strong seismic zone, which has better adaptability to slope settlement and deformation and is more advantageous to guarantee wharf operation and quick damage-repair after earthquake.

Keywords: strong seismic zone; piled wharf; land-connecting structure; anchoring settlement slab

高桩码头的接岸结构是衔接桩基平台与后方陆域的重要构筑物, 其结构的安全和性能对保障码头正常运营具有重要的影响。工程实践中, 传统接岸结构形式常采用直立式或斜坡式结构^[1], 其中直立式主要由板桩式、重力式等组成, 斜坡式由斜坡堤、护面和堤顶的挡土结构等组成。

在强震区, 高桩码头岸坡的土体将承受强烈的地震惯性力作用以及超孔隙水压力影响,

难免出现侧向沉降(沉陷)或位移, 可能对接岸结构的稳定产生不利影响; 接岸结构的失稳破坏是强震区高桩码头的主要震害现象之一。特别是随着抗震设计理念与方法的发展, 超强震区的高桩码头岸坡目前一般采用基于位移的设计方法, 即容许岸坡在偶遇地震水平下发生一定的位移, 这对接岸结构的设计提出更高的挑战。

此外, 在高桩码头抗震设计中, 各结构构件

的震后性能也是抗震设计应该考虑的内容之一。国外标准^[2-3]一般要求码头结构体系在运营水平地震发生后不影响运营; 在偶遇水平地震发生后, 所有的破坏能在短时间内修复, 且破坏应发生于可看到和易于修复的位置。高桩码头的接岸结构作为连接码头平台与陆域的关键通道, 其震后修复性也应是抗震设计时重点考虑的因素之一。

因此, 强震区高桩码头接岸结构的设计需进行特别的考虑, 如中国行业标准 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》^[4]建议接岸式高桩结构宜采取减少岸坡和接岸结构变形对高桩码头结构不利影响的措施, 可在码头结构和接岸结构之间设置允许相对滑动的连接结构等措施。然而, 目前行业内关于强震区高桩码头接岸结构设计的研究较少。

本文结合某强震区的高桩码头工程, 对比研究不同传统接岸结构形式的特点和适应性, 提出一种新型的沉降板式接岸结构, 并阐述该新型接岸结构的特点与设计理念, 可为类似项目设计提供参考。

1 工程概况

某工程地处东南亚环太平洋地震带, 码头岸线长 680 m, 含 2 个 7 万吨级的集装箱泊位, 码头结构设计使用年限为 60 a, 护岸结构设计年限为 100 a。码头采用高桩梁板结构, 码头面顶高程为 5.5 m, 港池底高程为 -16.0 m。

本工程区域的水流、波浪条件良好, 地震是码头结构设计控制性因素, 地震设计参数见表 1。合同规定, 桩基平台、挡土结构应满足三级水准的地震设防要求; 结构在偶遇地震水平下只允许出现轻微损坏, 简单修理后继续使用。

表 1 地震设计参数

地震重现期/a	峰值地面加速度	地震设防要求
72	0.200g	运营水平地震
475	0.505g	偶遇水平地震
2 475	0.611g	设计水平地震

2 岸坡设计方案

按设计要求, 码头岸坡抗震设计考虑二级水准的地震设防要求(表 2), 即允许岸坡在偶遇地震水平下失稳, 发生一定的位移。

表 2 地震设计参数

地震重现期/a	岸坡设防标准
72	整体稳定安全系数 ≥ 1.1
475	整体稳定安全系数 ≥ 1.0 ; 若无法满足, 允许岸坡失稳, 应对位移进行评估, 最大总位移 $\leq 30 \text{ cm}$

本工程岸坡地基土为特殊的岸礁钙质土, 土颗粒以中砂、粗砂、砾石为主, 且含较大比例的细粒土。通过对冲密实法、挤密砂桩法、强夯法、基于挤密理论的碎石桩等方案, 岸坡土体采用基于排水法理论的碎石桩进行抗液化处理^[5]。

根据设计要求, 岸坡采用基于位移的方法进行抗震设计。经综合比选, 码头岸坡设计坡比为 1:3, 采用块石护面, 码头典型断面如图 1 所示。

经计算评估^[6], 在偶遇地震水平下, 岸坡的整体稳定安全系数为 0.885 (<1.0), 岸坡的最大总位移不超过 25 cm, 岸坡的主体水平位移约为 15 cm。

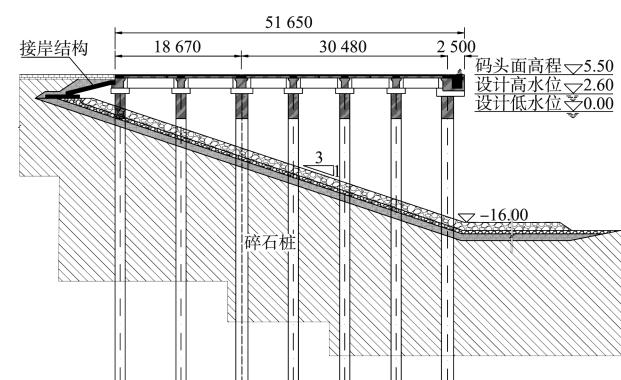


图 1 码头断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3 传统接岸结构形式评估

3.1 斜坡式挡土墙接岸结构

斜坡式挡土墙接岸结构一般是在码头岸坡坡顶设置重力式挡土墙结构, 挡土墙结构与桩基平

台之间采用简支板过渡连接。该接岸结构具有结构简单、施工方便等特点，在高桩码头中应用广泛。

挡土墙结构须满足偶遇地震水平下的抗滑、抗倾稳定要求，在地震动土压力和惯性力作用下，重力式挡土墙结构须采用较大的宽、高比才能满足自身稳定要求。

采用斜坡式挡土墙接岸结构的码头设计断面如图 2 所示。接岸结构的混凝土用量为 1.05 万 m^3 。在偶遇地震下，挡土墙结构自身稳定，接岸结构传递至桩基平台的附加侧向土压力作用可忽略。

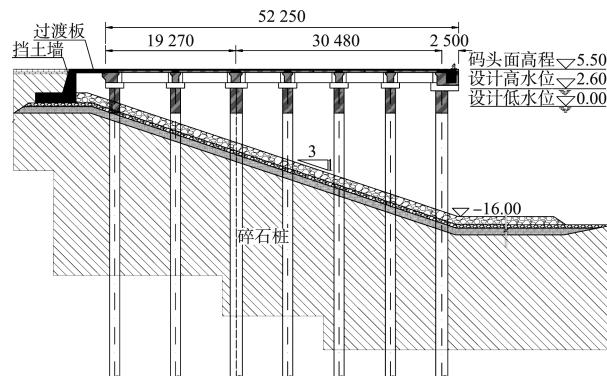


图 2 斜坡式挡土墙接岸结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

斜坡式挡土墙接岸结构的主要缺点是挡土墙对岸坡土体的沉降、变形适应性较差。在偶遇地震水平下，挡土墙结构虽然能保持自身稳定，但当岸坡顶部出现沉降或者位移时，挡土墙存在较大的倾斜或倒塌风险；而过渡板仅靠两端搁置支撑，一旦挡土墙倾斜，过渡板极易掉落海中，震后修复困难。

3.2 悬臂板桩接岸结构

悬臂板桩接岸结构可依托桩基平台，采用钢管板桩组合结构替代靠岸侧桩基，组合桩兼顾竖向支撑和挡土功能，桩基平台作为悬臂板桩接岸结构的水平支撑系统^[7]。相比于斜坡式挡土墙接岸结构，悬臂板桩接岸结构在一定程度上克服了对岸坡土体变形、沉降适应性差的缺点。

在强震区，悬臂板桩将承受显著的地震动土压力、超静水压力作用^[8]。因悬臂板桩墙与桩基平台连为整体，墙后侧向力也将传递至桩基平台上，导致桩基平台承受显著的水平推覆力。因结

构体系受力复杂，宜建立桩-土整体模型进行抗震分析。

采用悬臂板桩接岸结构的码头设计断面如图 3 所示。悬臂板桩墙采用 “ $\phi 2000 @ 22$ 钢管桩 + AZ20-700 钢板桩” 组合桩结构。在原桩基平台基础上，该接岸结构新增钢材用量为 4 162 t，新增混凝土量为 1 733 m^3 。在偶遇地震下，接岸结构传递至桩基平台的附加侧向土压力作用为 685 kN/m。

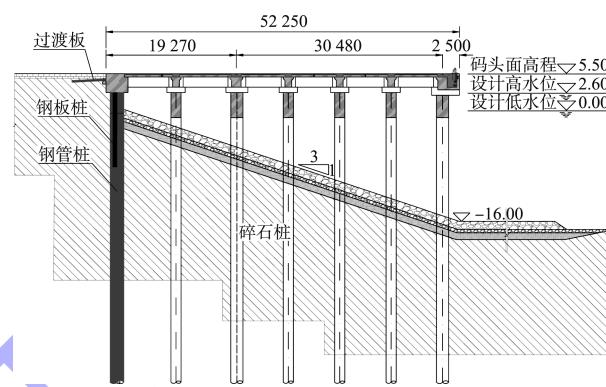


图 3 悬臂板桩接岸结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

悬臂板桩接岸结构的主要缺点是接岸板桩墙既作为桩基平台的抗震桩^[9]，又兼做挡土结构，承受了主要的地震荷载，也是塑性铰潜在发生的区域，结构体系的抗震性能较差。悬臂板桩墙在地震作用下的变形难以控制，特别是塑性铰形成后桩基易发生损坏，一旦损坏难以修复。

3.3 有锚板桩接岸结构

有锚板桩接岸结构是在悬臂板桩接岸结构的基础上，通过增加单独的锚定结构形成的接岸结构体系。相比于悬臂板桩接岸结构，有锚板桩既提高了接岸板桩墙的受荷能力，也保证了接岸结构与桩基平台的独立性，进而减少岸坡土压力对桩基平台的影响。工程中也可通过加大有锚板桩墙的结构尺寸来增大岸坡截止高度，进而缩减桩基平台的宽度。

在强震区，与悬臂板桩接岸结构类似，有锚板桩墙也将承受显著的地震动土压力和超静水压力作用。有锚板桩接岸结构一般可建立单独的模型进行抗震分析。

采用有锚定板桩接岸结构的码头设计断面如图 4 所示。前墙钢板桩型号为 AZ50-700，钢拉杆

直径 70 mm、间距 2.1 m, 锚定板桩型号为 AZ24-700。接岸结构的钢材用量为 4 829 t, 混凝土用量为 2 678 m³。在偶遇地震下, 有锚板桩墙结构自身稳定, 接岸结构传递至桩基平台的附加侧向土压力作用可忽略。

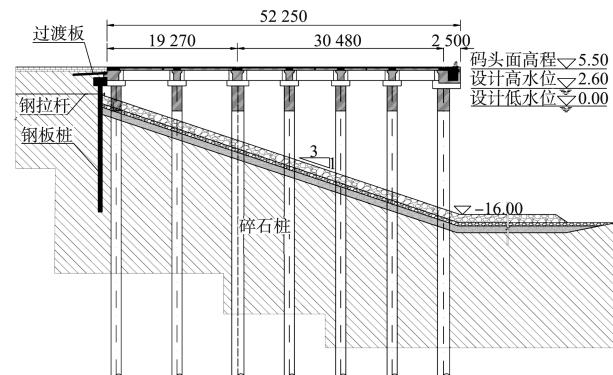


图 4 有锚板桩接岸结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

有锚板桩接岸结构的主要缺点是在桩基平台之外新增了一套板桩结构体系, 总体用钢量较大、施工工艺多, 方案经济性一般较差; 此外, 一旦拉杆、板桩墙发生损坏, 震后难以修复。

4 沉降板式接岸结构设计

沉降板式接岸结构主要由沉降板和用于支撑沉降板的底板组成, 主要构造特征:

1) 沉降板、底板均为预制钢筋混凝土板式构件, 沉降板为倾斜结构; 底板水平放置在岸坡坡顶。

2) 沉降板一端搁置于码头桩基平台的岸侧边梁上, 水平搁置端预留孔洞, 插入边梁预埋的竖向锚筋进行限位。

3) 沉降板另一端与底板卡式连接, 沉降板与底板相连的一端具有卡式接头, 卡式接头为与水平底板凹槽相适应的竖直结构, 沉降板通过其卡式接头卡入底板凹槽中形成约束。

4) 沉降板两端的接触面上设置橡胶垫缓冲。

沉降板主要承受后方填土的竖向荷载以及水平土压力作用, 可按两端铰接的悬臂梁结构进行计算; 底板主要承受上覆土体的自重以及沉降板接头处传递的压力, 可按弹性地基板进行计算。

新型沉降板式接岸结构如图 5 所示, 沉降板厚度为 550 mm, 底板厚度为 500 mm, 总混凝土用

量为 4 126 m³。在偶遇工况下, 接岸结构传递至桩基平台的附加侧向土压力作用为 38 kN/m, 其对桩基平台结构的影响较小。

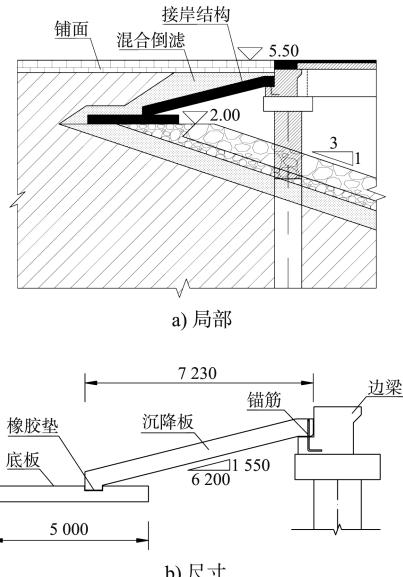


图 5 沉降板式接岸结构 (高程: m; 尺寸: mm)

为防止沉降板错位导致上方填料从安装缝隙中漏出, 沉降板之间可设置凹凸齿缝咬合连接 (图 6); 沉降板上方也可回填混合倒滤层以进一步提高该接岸结构在地震震动下的防漏性能。

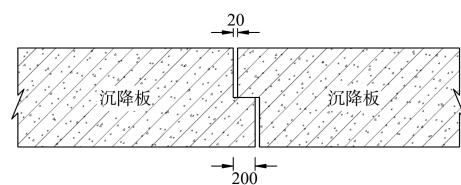


图 6 沉降板式凹凸齿缝构造 (单位: mm)

相比于传统接岸结构, 沉降板式接岸结构主要具有如下优点:

1) 沉降板和底板均为预制型构件, 安装快速、便捷; 震后也能较为方便地吊装修复;

2) 混凝土用量少, 具有较好的经济性;

3) 沉降板为倾斜结构, 具有一定的卸荷作用, 能减少传递至桩基平台上的土压力, 改善桩基平台受力;

4) 对岸坡沉降、变形的适应能力较强, 当岸坡坡顶出现 20 cm 沉降时, 沉降板的转角仅增加 1.5°(图 7), 依旧能保证陆域铺面与桩基平台的平顺过渡, 保证运营通道的畅通。

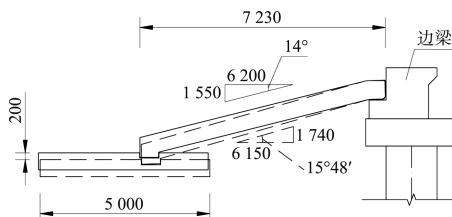


图 7 沉降 20 cm 后的沉降板变形情况 (单位: mm)

表 3 各接岸结构特点比较

结构特点	地震稳定性	造价	施工便利性	变形适应性	桩基平台影响	震后修复性
挡土墙	弱	低	易	弱	小	难
悬臂板桩	强	中等	中等	强	大	难
有锚板桩	强	高	复杂	强	小	难
沉降板	中等	低	易	中等	小	中等

5 结语

1) 在强震区, 高桩码头的接岸结构设计有特殊性: 在保证接岸结构自身稳定的基础上, 还应考虑接岸结构对岸坡沉降、变形的适应性以及震后修复的便捷性。

2) 在强震区, 传统的接岸结构(如斜坡式挡土墙、悬臂板桩以及有锚板桩)在自身稳定性、造价、施工便利性、岸坡变形适应性、对桩基平台影响或震后修复性等方面都存在一定的缺陷。

3) 本工程所采用的强震区高桩码头沉降板式接岸结构更为经济、合理; 其对岸坡的沉降、变形具有更好的适应能力, 对保障码头运营以及震后快捷修复更为有利。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京: 人民交通出版社, 2018.
- [2] Permanent International Association for Navigation Congresses.

5) 具有较大的变形冗余度, 即使震后出现局部移位, 也不影响使用。

综合传统各接岸结构形式的特点, 根据强震区高桩码头接岸结构设计所需考虑的主要因素, 沉降板式接岸结构与传统接岸结构的特点对比如表 3 所示。

Seismic design guidelines for port structures [S]. Amsterdam: Balkema Publishers, 2001.

- [3] American Society of Civil Engineers. Seismic design of piers and wharves: ASCE/COPR 61-14 [S]. New York: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S].北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] 王四根, 廖名亮, 伍琪琳.碎石桩排水抗液化的一种实用化解析解[J].水运工程, 2019(9): 282-288.
- [6] 余神光, 陈墨翟.高桩码头岸坡地震位移计算方法比较[J].水运工程, 2019(9): 160-163, 190.
- [7] 骆俊彬, 邹建强, 赵凯, 等.某海外工程新型板桩接岸结构分析[J].港工技术, 2020, 57(S1): 55-57.
- [8] U.S. Army Corps of Engineers. Retaining and flood walls [S]. Kansas: U.S. Army Corps of Engineers, 1989.
- [9] Port of Long Beach. Port of long beach wharf design criteria[R]. Long Beach: Port of Long Beach, 2015.

(本文编辑 郭雪珍)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。