

· 港 口 ·



隔震与非隔震高桩码头结构的 Pushover 对比分析*

李俊威^{1,2}, 马玉宏^{1,2}, 赵桂峰^{2,3}, 郭隆洽⁴

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510006; 2. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;
3. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广东 广州 510006;
4. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 高桩码头叉桩刚度大, 在地震作用下极易发生脆性破坏而引起码头结构的破坏, 隔震技术作为提高结构抗震安全性的成熟技术, 已经广泛应用于建筑、桥梁等结构中。为此, 在叉桩桩顶处增加橡胶隔震支座提高码头结构的抗震安全性。以顺岸无梁板式码头为研究对象, 通过 SAP2000 软件建立全直桩码头结构、非隔震叉桩码头结构、隔震叉桩码头结构 3 种有限元分析模型, 进而对 3 种结构进行二维 Pushover 对比分析, 对比结构的自振周期、静力 Pushover 曲线、塑性铰、桩身弯矩以及位移能力 5 个方面。结果表明, 隔震叉桩码头结构具有较大的水平承载能力和位移变形能力, 可以有效解决叉桩脆性破坏的问题。

关键词: 高桩码头; 隔震; 叉桩; 脆性破坏; Pushover

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0045-07

Pushover comparative analysis of isolated and non-isolated pile-supported wharf structure

LI Jun-wei^{1,2}, MA Yu-hong^{1,2}, ZHAO Gui-feng^{2,3}, GUO Long-qia⁴

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510006, China;

4. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The batter pile of pile-supported wharf has large stiffness and is prone to brittle failure under earthquake to cause the damage of wharf structure. As a mature technology to improve the seismic safety of the structure, seismic isolation technology has been widely used in buildings, bridges and other structures. Therefore, we add rubber isolation bearing at the top of batter pile to improve the seismic safety of wharf structure. Taking the coastal beamless slab wharf as the research object, we build the finite element analysis models of all-plumb-pile wharf structure, non-isolated batter pile wharf structure and isolated batter pile wharf structure by SAP2000 software, carry out the two-dimensional Pushover comparative analysis of the three structures, and compare and analyze the five aspects of natural vibration period, static Pushover curve, plastic hinge, pile bending moment and displacement capacity. The results show that the isolated batter pile wharf structure has large horizontal bearing capacity and displacement capacity, which can effectively solve the problem of brittle failure of batter pile.

Keywords: pile-supported wharf; isolation; batter pile; brittle failure; Pushover

收稿日期: 2022-01-02

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0112500); 国家自然科学基金项目(52078150)

作者简介: 李俊威(1998—), 男, 硕士研究生, 从事港工结构隔震减震研究。

通讯作者: 马玉宏(1972—), 女, 博士, 研究员, 从事工程隔震减震研究。E-mail: myhzhth@gzhu.edu.cn

高桩码头作为重要的码头结构形式之一，其凭借着结构简单、能承受较大荷载、砂石料用量少以及对挖泥超深的适应性强等优点，在港口工程中得到广泛的应用。高桩码头上部结构需要承受起重机等荷载，其刚度和强度比桩基大得多，因此，震害主要发生在桩基上，其中叉桩的震害尤为严重。1976 年唐山地震使天津新港高桩码头大量叉桩断裂，桩帽出现不同程度的裂缝^[1]；1989 年美国洛马·普雷塔地震中，几乎 50% 的码头损坏发生在叉桩上^[2]；1994 年美国洛杉矶地震下的 APL 公司高桩码头中，设置了叉桩的 127# 泊位较无叉桩的 126# 泊位破坏严重^[3]；2010 年海地地震中的太子港南码头，斜桩比直桩受损情况更为严重^[4]。由前述震害不难看出，高桩码头叉桩在地震中表现出较差的抗震性能。为此，引入隔震的概念，在叉桩桩顶处设置橡胶隔震支座，研究其抗震性能。目前很少有码头结构采用隔震技术，已知的仅有美国洛杉矶港 136# 泊位和科罗内尔港 2# 码头^[5]，相关理论和技术有待进一步深化，因此对隔震高桩码头结构进行研究分析具有重大意义。

Pushover 分析方法是对目标结构在施加竖向荷载的同时施加某种分布形式的单调递增的水平力，直至结构达到目标控制点，从而获取结构的荷载-位移曲线^[6]，其分析结果可用于进行抗震性能评估。有学者已经利用 Pushover 方法对高桩码头进行可行性分析^[7]，且美国规范 ASCE61-14^[8]也使用此方法进行高桩码头抗震性能评估。本文以顺岸无梁板式码头为研究对象，利用 SAP2000 建立全直桩码头结构 (all-plumb-pile wharf structure, 简称 APP)、非隔震叉桩码头结构 (non-isolated batter pile wharf structure, 简称 BP-NIS)、隔震叉桩码头结构 (isolated batter pile wharf structure, 简称 BP-IS) 3 种模型，并进行二维 Pushover 对比分析，进而研究隔震叉桩码头方案对于提高码头结构抗震安全的有效性。

1 工程概况

以某顺岸无梁板式码头为研究对象，全直桩和叉桩码头结构断面见图 1。码头宽 35 m，通过引桥与陆岸相连。桩基采用钢管桩，直径 1 200 mm，壁

厚 36 mm，桩身长 30.45 m，从海侧到陆侧依次命名为 1#~6# 桩。混凝土强度等级为 C35，选用 B500BWR 等级钢筋，屈服强度标准值为 500 MPa，钢管选用 S420MH 圆钢，屈服强度标准值为 400 MPa。各土层特性参数见表 1。地震基本烈度为 8 度，Ⅱ类场地。

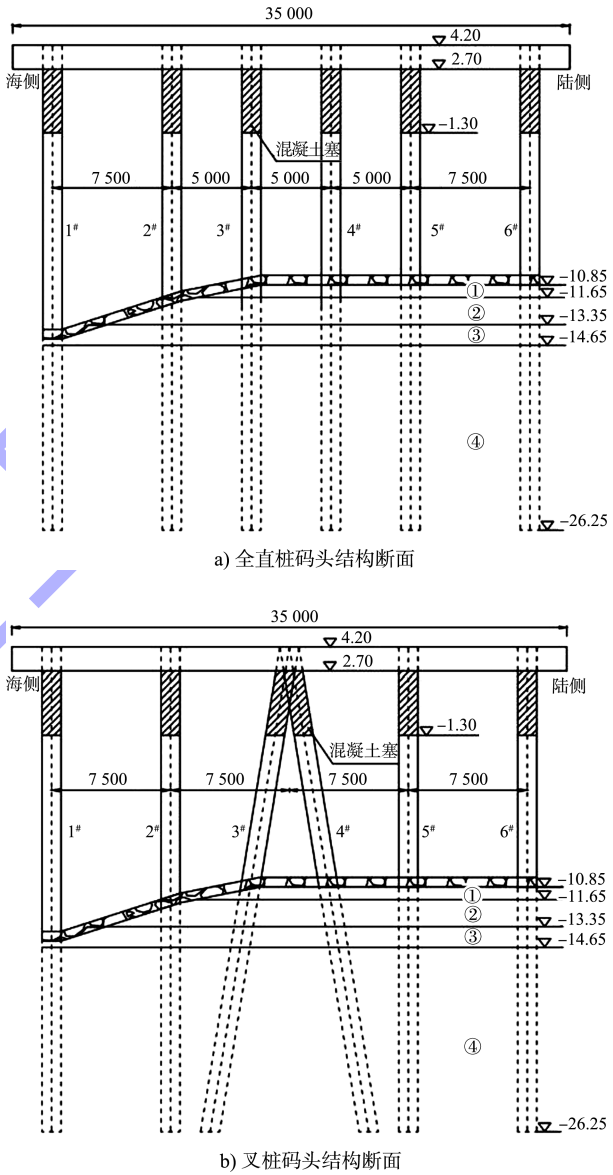


图 1 全直桩码头和叉桩码头结构断面
(尺寸: mm; 高程: m)

表 1 土层特性参数

| 土层 | 深度/m | 天然密度/(t·m ⁻³) | 摩擦角/(°) |
|-------|---------|---------------------------|---------|
| ①松散砂 | 0~0.8 | 1.85 | 32.0 |
| ②中密砂 | 0.8~2.5 | 1.90 | 38.8 |
| ③致密砾石 | 2.5~3.8 | 2.10 | 48.0 |
| ④致密砂 | >3.8 | 2.08 | 45.0 |

2 计算模型

按照 ASCE61-14 的规定, 对于高桩码头的抗震设计, 一般建立横向排架进行二维 Pushover 分析, 采用 SAP2000 建立高桩码头分析模型, 须考虑桩变形在上部结构面板内存在一定的扩散深度 l_{sp} , 计算公式为:

$$l_{sp}=0.1f_{ye}d_{bl} \tag{1}$$

式中: f_{ye} 、 d_{bl} 分别为连接钢筋的屈服强度平均值 (ksi)、直径 (in)。计算得 $l_{sp}=0.36\text{ m}$ 。扩散段 l_{sp} 按照桩顶截面特性进行模拟, 如图 2 所示。

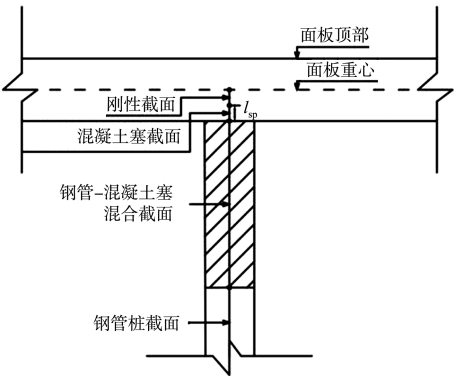


图 2 桩-板连接模型

采用框架 (frame) 单元模拟桩, 壳 (shell) 单元模拟码头面板。混凝土采用 Mander 本构模型, 钢管桩和钢筋采用 Simple 模型。结构质量包括码头

上部结构质量、10% 的活荷载、面板下表面至泥面以下 5 倍桩径范围内桩质量的 1/3^[9]。在桩顶和桩入土部分设置一定数量的塑性铰, 塑性铰用 fiber P-M2-M3 模拟, 其长度按下式计算:

$$L_{P\text{桩顶}}=0.3f_{ye}d_{bl}+d_{gap} \tag{2}$$

$$L_{P\pm下}=2D_p \tag{3}$$

式中: d_{gap} 、 D_p 分别为钢管桩顶部与码头面板拱底之间的距离、桩的直径。通过公式求得 $L_{P\text{桩顶}}=1.08\text{ m}$ 、 $L_{P\pm下}=2.4\text{ m}$ 。

使用土弹簧考虑桩-土相互作用, 用多段线性连接单元 (multi liner plastic) 模拟侧向土弹簧, 其非线性特性用 p - y (反力-位移) 曲线描述^[10-11]。在泥面以下 3 m 范围内以 0.5 m 的间距设置土弹簧, 3 m 以下范围以 1 m 的间距设置土弹簧。

在叉桩桩顶处设置高阻尼橡胶隔震支座, 形成隔震叉桩码头结构。支座的选型原则为高桩码头水平刚度满足规范要求, 即在静力作用下 (系缆力、船舶撞击力等), 水平位移不超过 100 mm^[12]。本工程选用 HDR1000 型支座, 使用其水平剪切应变变为 250% 时的性能参数进行分析计算, 支座参数见表 2, 在 SAP2000 中用 rubber isolator 单元模拟 HDR 支座。

表 2 高阻尼橡胶支座水平剪切应变为 250% 时的参数

| 橡胶总厚度/mm | 竖向刚度/(kN·mm ⁻¹) | 屈服力/kN | 屈服前刚度/(kN·mm ⁻¹) | 屈服后刚度/(kN·mm ⁻¹) | 水平等效刚度/(kN·mm ⁻¹) | 等效阻尼比 |
|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------|
| 161 | 5 350 | 244 | 12.6 | 2.29 | 3.21 | 0.1 |

3 结果分析

3.1 自振周期

3 种码头模型沿着推覆方向的自振周期见表 3。可见, APP 结构自振周期比 BP-NIS 结构大, 说明叉桩的横向刚度要大于直桩; BP-IS 结构自振周期大于 BP-NIS 结构, 这是因为橡胶支座具有较小的侧移刚度, 从而延长了码头结构的周期, 隔震周期是非隔震的 1.69 倍。

表 3 3 种码头结构的自振周期

| 码头结构类型 | APP | BP-NIS | BP-IS |
|--------|------|--------|-------|
| 自振周期/s | 1.93 | 1.20 | 2.03 |

3.2 静力 Pushover 曲线

3 种码头结构的静力 Pushover 曲线如图 3 所示。比较 APP 与 BP-NIS 的曲线可知, 叉桩比直桩具有更大的水平承载能力, 但是当 BP-NIS 推覆至 0.74 m 时, 曲线出现明显的垂直下滑段, 说明

叉桩发生了脆性破坏。而增加隔震装置的 BP-IS 结合了前两种结构的优点,在能够承受较大水平力的同时,结构又有较大的变形能力。

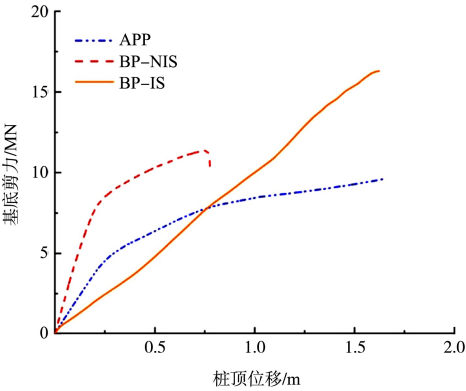
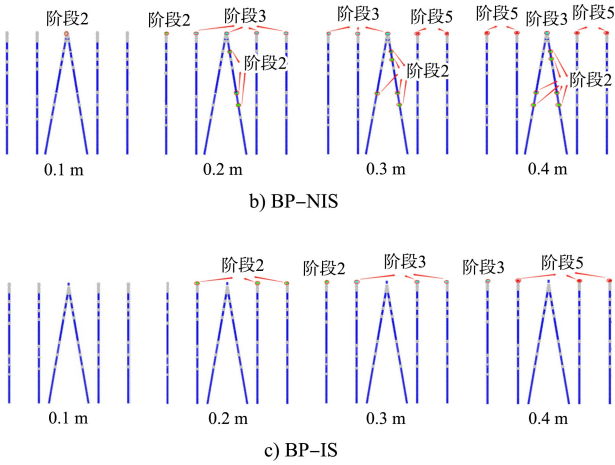
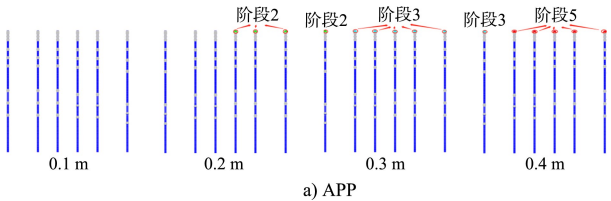


图 3 静力 Pushover 曲线

3.3 塑性铰

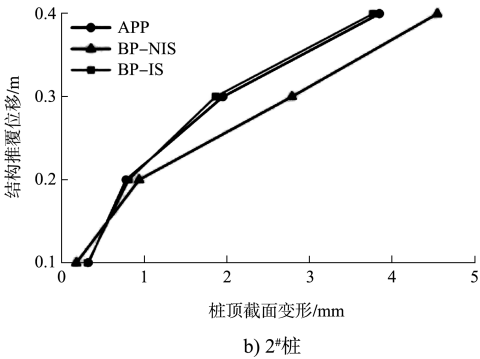
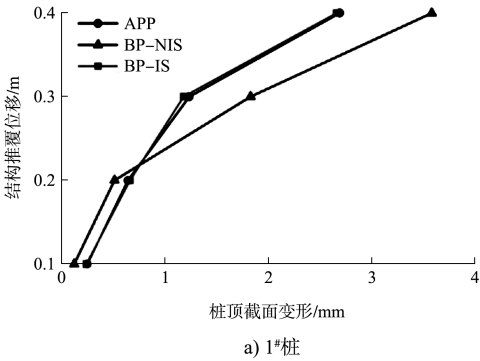
3种结构分别推覆至0.1~0.4 m时,塑性铰出现的情况见图4,其中塑性铰的发展由低到高分5个阶段:阶段1(弹性阶段)、阶段2(直接使用状态)、阶段3(生命安全状态)、阶段4(防止倒塌状态)、阶段5(极限承载力状态)。可以看出,隔震结构推覆至0.4 m时,HDR支座的水平横向变形为0.12 m,满足设计变形不超过支座有效直径的0.55倍(0.55 m)和橡胶层总厚度3倍(0.483 m)二者的较小值的规定^[13]。BP-NIS的塑性铰首先出现在叉桩桩顶处,随着结构推覆位移的增大,叉桩上的塑性铰也越来越多,而其直桩上的塑性铰与APP上的类似,都主要发生在桩顶,说明无隔震叉桩码头的震害主要集中在叉桩顶,其次是其直桩顶。BP-IS的叉桩并未出现塑性铰,且其直桩上塑性铰的发展速度慢于前面两种结构,说明隔震技术很好地保护了叉桩的安全性,也延缓了其他直桩的破坏。



注:未注明的点均为阶段1。

图 4 结构推覆至 0.1~0.4 m 时塑性铰出现的情况

结构推覆位移与桩顶截面变形的关系见图5。对于直桩(1[#]、2[#]、5[#]、6[#])而言,3种码头方案的桩顶截面变形差异不大,叉桩方案桩顶截面变形最大。而对于叉桩(3[#]、4[#])而言,BP-IS的桩顶截面变形明显小于BP-NIS和APP,这说明设置隔震支座后,叉桩桩顶截面的变形大幅减小。隔震叉桩码头方案可同时减小叉桩自身和相应直桩的桩顶截面变形。



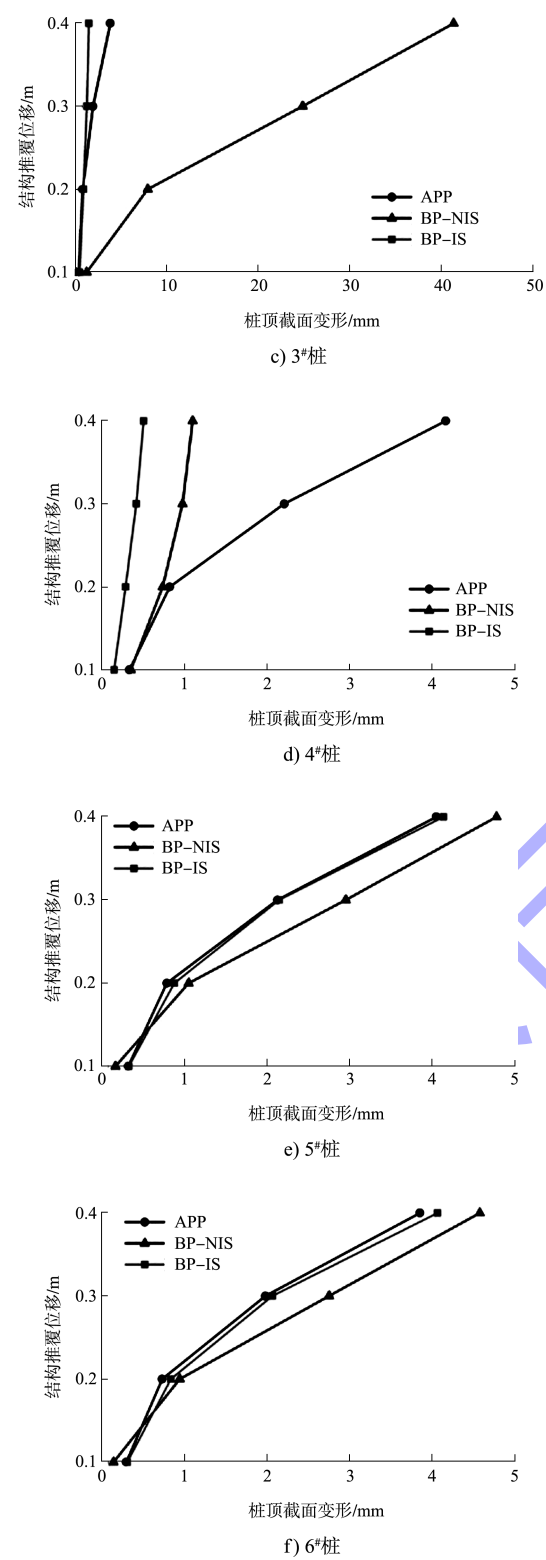
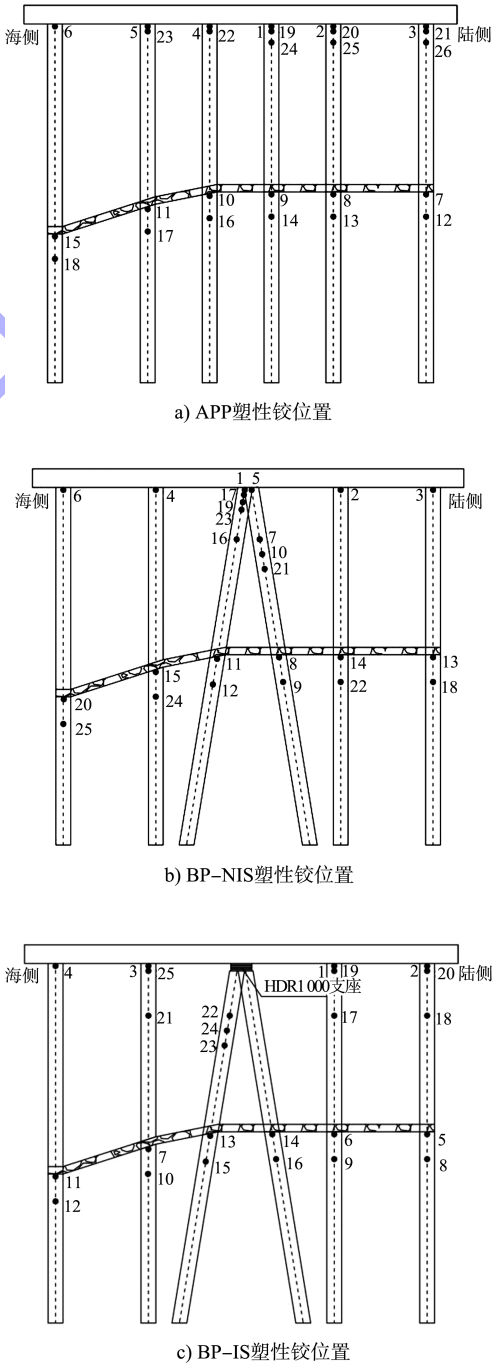
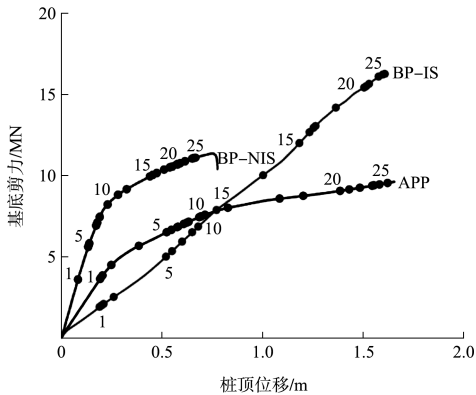


图 5 桩顶截面变形

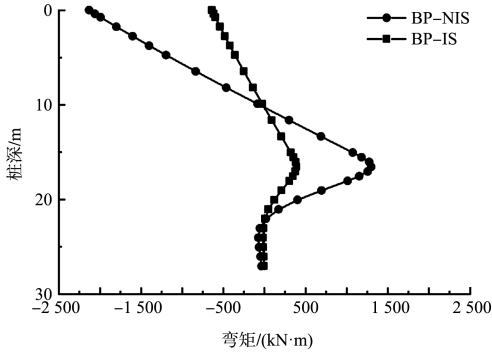
3 种码头结构塑性铰出现的位置和顺序见图 6, 基本都是由陆侧向海侧方向发展, 先从桩顶开始, 再出现在泥面处。不同之处在于, BP-NIS 首个塑性铰出现在叉桩桩顶处, 而 BP-IS 结构叉桩顶部

并未出现塑性铰, 说明隔震装置极大程度地减小了叉桩桩顶处的变形, 从而避免了叉桩顶部的脆性破坏。此外, APP、BP-NIS 和 BP-IS 3 种结构首次塑性铰出现时对应的桩顶位移分别为 0.19、0.08 和 0.19 m, APP 首次出现塑性铰的桩顶位移尽管较大, 但塑性铰发展迅速, 很快产生脆性破坏, BP-IS 首次屈服位移是 BP-NIS 结构的 2.3 倍, 且塑性铰发展缓慢, 说明隔震装置大幅增加了码头结构的延性。





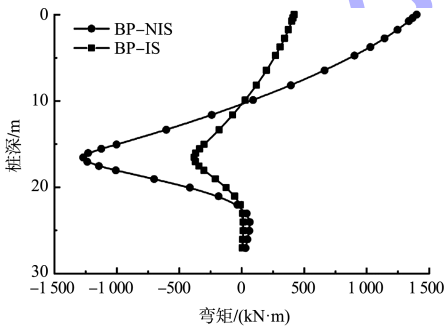
d) 3种结构塑性铰出现的顺序
图 6 塑性铰出现的位置和顺序



b) 4#桩
图 7 DE地震作用下叉桩弯矩

3.4 桩身弯矩

ASCE 61-14 考虑运营水准地震(OLE, 50 a 内超越概率为 50%)、偶遇水准地震(CLE, 50 a 内超越概率为 10%)和设计水准地震(DE, 50 a 内超越概率 2%的 2/3)3 个地震动水准。性能点反映了结构在某一地震动水准下所能达到的最大位移, 根据 ASCE 61-14 求得 3 种码头结构在 DE 地震动水准下的性能点为: APP、BP-NIS、BP-IS 结构的基底剪力分别为 1 797.4、2 698.6、1 120.1 kN, 桩顶位移分别为 0.099、0.068、0.113 m。BP-NIS 结构和 BP-IS 结构在 DE 地震作用下叉桩的弯矩见图 7。可以看出, BP-IS 的叉桩弯矩比 BP-NIS 明显减小, 说明隔震的效果显著。



a) 3#桩

3.5 结构的位移能力

ASCE 61-14 给出的各个地震动水准下对应的材料应变限值见表 4。

表 4 各地震动水准下的材料应变限值

| 地震水准 | 应变限值 | | |
|------|-------|-------|---------|
| | 混凝土 | 钢筋 | 钢管(入土段) |
| OLE | 0.010 | 0.015 | 0.010 |
| CLE | 0.025 | 0.054 | 0.025 |
| DE | — | 0.072 | 0.035 |

利用首次出现塑性铰时的变形结果可以衡量不同地震动水准下码头的变形能力。以最先到达应变限值的材料作为桩达到要求变形能力的标准^[14], 结果见表 5。

性能点对应的桩顶位移即为结构的位移需求。3 种码头结构的位移能力均大于位移需求, 都符合结构的抗震性能要求^[15]。表 5 的数据显示, BP-IS 的位移能力与 APP 几乎相等, 相比 BP-NIS 提高 29%~123%, 而且随着地震等级的增大, 隔震的效果越好。

表 5 结构的位移能力和位移需求

| 地震水准 | 位移能力/m | | | 提高率/% | 位移需求/m | | |
|------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | APP | BP-NIS | BP-IS | | APP | BP-NIS | BP-IS |
| OLE | 0.36 | 0.28 | 0.36 | 29 | 0.031 | 0.023 | 0.032 |
| CLE | 0.64 | 0.39 | 0.66 | 69 | 0.069 | 0.045 | 0.070 |
| DE | 1.62 | 0.74 | 1.65 | 123 | 0.099 | 0.068 | 0.113 |

注: 提高率为 BP-IS 与 BP-NIS 相比较的结果。

4 结论

- 1) 叉桩横向刚度大, 比直桩能够承受更大的水平力, 但是容易发生脆性破坏, 设置隔震装置后可以有效解决叉桩脆性破坏的问题, 同时又有较大的水平承载能力和位移变形能力。
- 2) 3 种高桩码头结构塑性铰出现的顺序都是由陆侧向海侧方向发展, 先从桩顶开始, 再出现在泥面处。隔震叉桩码头结构的塑性铰发展速度慢, 并且叉桩桩顶变形小, 没有出现塑性铰。
- 3) 隔震码头结构在 DE 地震动水准下, 其叉桩内力得到明显减小。
- 4) 与非隔震叉桩码头结构相比, 隔震叉桩码头结构的位移能力提高 29%~123%。
- 5) 建议对有叉桩的高桩码头结构在叉桩桩顶处设置橡胶隔震支座, 以提高延性和耗能能力, 从而提高码头结构的抗震性能。

参考文献:

[1] 叶柏荣. 天津新港高桩码头地震危害的调查和分析[J]. 水运工程, 1981(12): 30-34.

[2] FENDY J, RASTANDI J I, PRAKOSO W A, et al. Study of dimension variation effect on a batter piled wharf structure with seismic isolation systems[J]. Materials science forum, 2020, 987: 10-14.

[3] Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of ASCE. Seismic guidelines for ports: experience from past earthquakes[M]. Reston: ASCE, 1998.

[4] WERNER S, MCCULLOUGH N, BRUIN W, et al. Seismic performance of Port de Port-au Prince during the Haiti earthquake and post-earthquake and post-earthquake

restoration of cargo throughput [J]. Earthquake spectra, 2011, 27(S1): 387-410.

[5] Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of ASCE. Chile earthquake of 2010: lifeline performance[M]. Reston: ASCE, 2013.

[6] 汪大绥, 贺军利, 张凤新. 静力弹塑性分析 (Pushover Analysis) 的基本原理和计算实例[J]. 世界地震工程, 2004(1): 45-53.

[7] 李颖, 贡金鑫, 吴澎. 高桩码头抗震性能的 pushover 分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 73-80.

[8] ASCE. Seismic design of piers and wharves: ASCE 61-14 [S]. Reston: ASCE, 2014.

[9] Port of Long Beach. Wharf design criteria (version 3.0) [S]. Long Beach: Port of Long Beach, 2012.

[10] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API RP 2A-WSD-2005[S]. Washington: American Petroleum Institute, 2005.

[11] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[12] BSI. Maritime works-part 2: code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins: BS 6349-2: 2010[S]. London: BSI, 2010.

[13] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[14] 李梦玥. 中美高桩码头抗震设计方法对比分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

[15] 高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 国内外高桩码头抗震性能和设计方法研究进展 I: 震害和抗震设计方法[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 1-8.

(本文编辑 王璁)

~~~~~

· 消 息 ·

宁波舟山港油品公共码头工程通过验收

近日, 三航局承建的浙江宁波舟山港外钓 30 万吨级油品公共码头工程通过竣工验收。该码头是舟山绿色石化基地(鱼山)的原油接卸配套码头, 是浙江自贸区油品全产业链中重要的基础设施, 施工内容包括新建 1 个 30 万吨级泊位及引桥, 其中码头长 440 m, 年设计油品通过能力为 1 385 万 t。项目的竣工将有效服务原油接卸需求, 优化宁波舟山港原油码头结构, 促进舟山群岛新区江海联运服务中心发展。