



隔震设计在高桩 LNG 码头中的应用

曹凯平¹, 王曙光², 程培军¹

(1. 中交第三航务勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

摘要: 隔震设计近年发展较快, 在房建、路桥领域已取得较多应用且效果较好, 但隔震设计对于常规码头效果不明显。高桩 LNG 码头抗震设计要求高, 尤其在强震地区, 地震荷载通常起控制作用, 因此较适宜采用隔震设计。参考其他行业的做法, 推荐可用于高桩 LNG 码头的隔震设计方法, 在结构设计上提出一种与装配式结构相结合的方案, 具有可快速施工、可及时更换的优点, 并给出高桩 LNG 码头隔震设计的算例。研究成果可为强震地区高桩 LNG 码头设计提供参考。

关键词: 隔震设计; 高桩 LNG 码头; 装配式结构; 强震地区

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0057-04

Application of seismic isolation design in pile supported LNG pier

CAO Kaiping¹, WANG Shuguang², CHENG Peijun¹

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Seismic isolation design has developed rapidly in recent year, and has been widely used in the field of civil buildings, roads and bridges with good effect, but the seismic isolation design has no obvious effect on conventional docks. For pile supported LNG pier, due to their high requirements for seismic design, the seismic load usually serve as the control function of the structure, especially in high seismic regions, so it is more suitable to adopt seismic isolation design. Referring to the practice of other industries, this paper recommends the isolation design method suitable for pile supported LNG pier. In structural design, a scheme combining with prefabricated structure is proposed, which has the advantages of rapid construction and timely replacement. The research results can provide reference for the design of pile supported LNG pier in strong earthquake area.

Keywords: seismic isolation design; pile supported LNG pier; prefabricated structure; high seismic region

近年来, 隔震技术在抗震设计中发展较快, 在房建、公路桥梁领域均已获得广泛的应用。实践证明, 采用隔震技术的建筑结构表现出良好的抗震性能。如土耳其的马拉蒂亚医院因采用隔震技术, 在大地震中受损较小, 震后及时恢复了正常使用。可见, 隔震技术在地震中能较好地发挥保护建筑结构的作用。

目前, 我国房建领域的 GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》^[1]对建筑隔震设计方法进行了规定, 公路领域的 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁

抗震设计规范》^[2]有独立章节明确桥梁的隔震设计方法, 而水运工程领域对于隔震研究较少。国内现行 JTS 14—2012《水工工程抗震设计规范》^[3]无相关内容, 美国土木工程学会编制的 ASCE 61-14-2024 *Seismic Design of Piers and Wharves*^[4]对隔震设计仅有简单介绍。部分国内外学者开展了相关研究, 宋波等^[5]针对常规高桩码头结构形式, 在理论计算模型中加入橡胶支座, 可以有效减小地震力; Jeffrey 等^[6]研究布置斜桩的不同长宽比的码头采用隔震设施后的抗震性能, 发现长宽比越大, 隔震

收稿日期: 2023-11-30

作者简介: 曹凯平 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程水工结构设计。

效果更好；李俊威等^[7]对隔震与非隔震的高桩码头进行 Pushover 比较分析，发现隔震设施可以减小叉桩上的内力，塑性铰发展较慢，提高了结构的延性；高树飞等^[8]介绍了隔震在码头中的实际应用，世界范围内仅洛杉矶港 136# 泊位采用了隔震技术，尚未大规模使用。

隔震技术对于常规码头的必要性不大。一是我国沿海地区大部分处于低烈度区，地震荷载较小；二是常规码头结构在使用过程中需要承受较大的水平荷载，如船舶撞击力、系缆力等，除少数处于强震地区的码头，地震力一般不起控制作用，采用常规抗震方法能够满足需要。

高桩 LNG 码头抗震要求高，需要承受 50 a 2% 超越概率的地震，地震荷载通常为结构设计控制荷载，采用常规抗震设计方法会较大地增加桩基规格和数量以抵抗地震荷载。隔震技术能够有效降低结构所受的地震影响，提高结构在地震中的安全性。同时，采用隔震技术能够将地震力集中，发生破坏后可通过更换隔震设施恢复功能。因此，对于高桩 LNG 码头，隔震技术是一种值得研究的抗震设计方法。

本文参考公路规范，提出适用于高桩 LNG 码头的隔震设计方法。同时，在结构设计上提出一种与装配式结构相结合的隔震方案，具有可快速施工、可及时更换的优点，并给出高桩 LNG 码头隔震设计的算例，以期为强震地区高桩 LNG 码头设计提供参考。

1 隔震原理及方法

1.1 隔震原理

隔震的原理一是延长结构周期，避免自振周期与地震周期相近，导致共振；二是增加结构阻尼，使得地震产生的能量能够更快地消散，从而减小对结构的破坏。结构采用隔震技术一般需要满足：1) 结构的基本周期比较短；2) 结构高度相差较大；3) 工程场地的预期地面运动特性比较明确，主要能量集中在高频段。如果存在下列情况之一时，则不宜采用隔震：1) 地震作用下，场地可能失效；2) 下部结构刚度小，结构的基本周

期比较长；3) 位于软弱场地，延长周期也不能避开地震波能量集中频段；4) 支座中可能出现负反力。

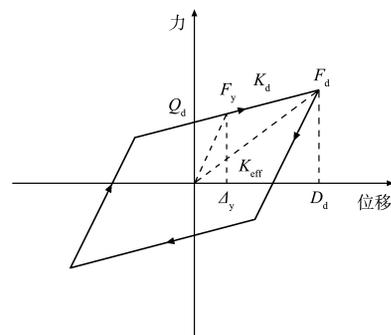
1.2 码头隔震的设计方法

码头隔震的设计方法可参照现行桥梁抗震设计规范进行，一般可在同一高程设置隔震装置以形成隔震层。较为常用的隔震装置包括铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座等，其恢复力模型如图 1 所示，其等效刚度和等效阻尼比可分别按式(1)、(2)确定：

$$K_{\text{eff}} = \frac{Q_d}{D_d} + K_d \quad (1)$$

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{2Q_d(D_d - \Delta_y)}{\pi D_d^2 K_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中： K_{eff} 为隔震支座的等效刚度，kN/m； D_d 为隔震支座的水平设计位移，m； Q_d 为隔震支座的特征强度，即滞回曲线与剪力轴交叉值，kN； K_d 为隔震支座的屈后刚度，kN/m； ξ_{eff} 为隔震支座的等效阻尼比； Δ_y 为隔震支座的屈服位移，m。



注： F_y 为屈服强度， F_d 为设计强度。

图 1 铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座的恢复力模型

1.3 隔震结构的分析方法

隔震结构的分析方法主要有反应谱法、非线性时程法和非线性静力法等。高桩 LNG 码头结构较为简单且质量主要集中在上部，可简化为单质点结构，初步设计阶段适宜采用单振型反应谱法。由于隔震装置具有非线性，开始时隔震装置的位移响应未知，因而其等效刚度、等效阻尼比也未知，所以反应谱法分析过程是一个迭代过程。设计过程如下：

- 1) 将结构简化为等效单自由度系统。

2) 横向和纵向的水平位移可按式(3)计算:

$$d = \frac{T_{eq}^2}{4\pi^2} S \quad (3)$$

式中: d 为结构横向、纵向的水平位移, m; T_{eq} 为考虑隔震装置后的等效周期, s; S 为相应于横向或纵向 T_{eq} , 采用等效阻尼比修正后的设计加速度反应谱值。

3) 梁体水平位移为 d 时, 隔震结构的 T_{eq} 可按式(4)~(8)计算; 支座的水平位移 d_i 可按式(9)计算; 顶部水平位移 d_p 可按式(10)计算。

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{sp}}{\sum K_{eq}}} \quad (4)$$

$$\sum K_{eq} = \sum \frac{K_{eff} K_p}{K_{eff} + K_p} = \sum \frac{\alpha K_p}{1 + \alpha} \quad (5)$$

$$K_{eq} = \frac{\alpha K_p}{1 + \alpha} \quad (6)$$

$$K_{eff} = \frac{\alpha K_p}{1 + \alpha} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{K_d d + Q_d}{K_p d - Q_d} \quad (8)$$

$$d_i = \frac{d}{1 + \alpha} \quad (9)$$

$$d_p = d - d_i \quad (10)$$

式中: M_{sp} 为等效单自由度系统模型的质量, 可取上部结构质量, t; K_{eq} 为结构与其上隔震支座等效弹簧串联后的组合刚度值, kN/m; K_p 为抗推刚度, kN/m; α 为计算系数; d_i 为隔震支座的水平位移, m; d_p 为顶部水平位移, m。

4) 隔震结构的等效阻尼比 ξ_{eq} 可按式(11)计算:

$$\xi_{eq} = \frac{2 \sum [Q_d (d_i - \Delta_y)]}{\pi \sum [K_{eq} (d_i + d_p)^2]} \quad (11)$$

5) 采用迭代方法, 分别计算地震位移响应。

6) 一阶振型作用下, 结构顶的水平地震力 E_d 可按式(12)计算:

$$E_d = K_{eff} d_i \quad (12)$$

2 设计方案

国内外规范均要求 LNG 码头需要满足 50 a

10% 超越概率的操作基准地震 (operating-basis earthquake, OBE) 及 50 a 2% 超越概率的安全停堆地震 (safety shutdown earthquake, SSE) 的地震荷载, 隔震设计可针对 SSE 地震进行考虑。

常规高桩 LNG 码头一般由工作平台、靠船墩、系缆墩、引桥、补偿平台及其他辅助平台组成。靠船墩、系缆墩需要承受船舶的靠泊撞击力及系缆力等水平力, 且结构平面尺寸较小, 桩基数量较多, 地震力一般不起控制作用, 同时隔震支座也较难满足使用工况下的水平力承载力要求。因此, 靠船墩、系缆墩不进行隔震设计。

工作平台、补偿平台、引桥等结构平面尺寸较大, 正常工作条件下所受水平力较小。在强震地区其安全性通常由地震力控制, 适宜采用隔震设计。以工作平台为例, 隔震支座可布置在工作平台与桩基结构连接处, 从而形成隔震层。在常规工作平台施工中, 隔震层会增加施工工序及工期。本文考虑利用装配式码头技术提高施工效率。林学良等^[9]介绍了一种一体式预制桩帽, 将桩芯与桩帽结合一次性预制完成, 与下部桩基采用承插灌浆的方式连接。可在一体式预制桩帽的顶部增加隔震支座, 利用螺栓与桩帽连接, 将支座与桩帽一同插入桩内, 随后在支座顶部进行上部结构施工以形成隔震层, 见图 2。该隔震结构的优点在于当结构遭遇地震时可将破坏集中在隔震层, 保证桩基及上部工艺设备的安全。在隔震支座受到破坏后, 可依托桩帽在支座周围设置顶升支撑, 而后对破坏的支座进行更换, 以确保在大震后能够迅速恢复使用, 见图 3。

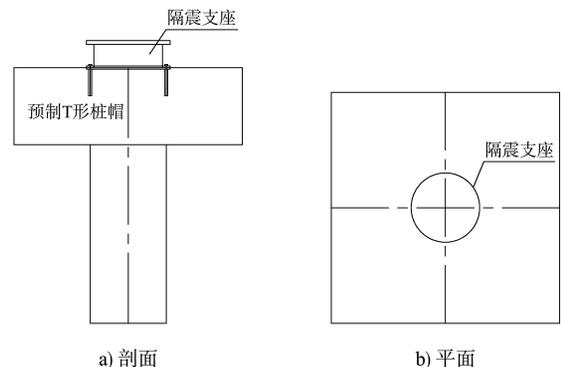


图 2 预制 T 形桩帽及隔震支座

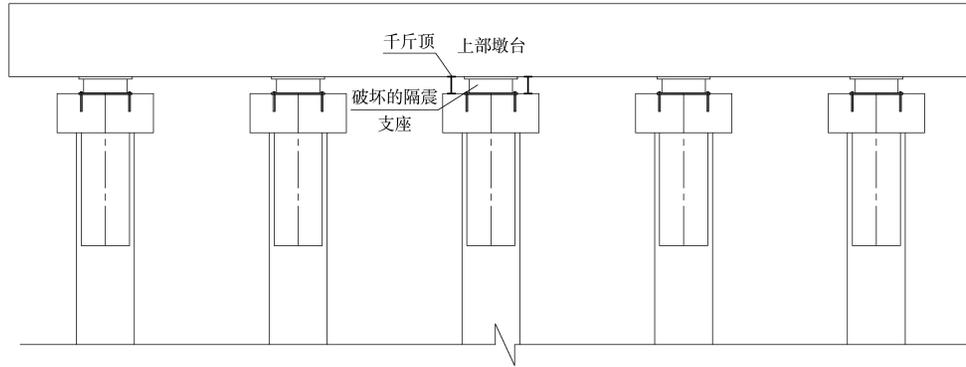


图3 震后受损支座更换

3 算例

国外某强震地区高桩 LNG 码头 SSE 条件下地震峰值地面加速度达 0.4g。工作平台平面尺寸为 22 m×35 m，布置 30 根桩。方案 1 采用常规抗震设计，桩基采用 30 根 $\phi 1\ 300$ mm 的钢管桩；方案 2 采用隔震设计，布置 30 根 $\phi 1\ 300$ mm 的钢管桩，桩顶布置一体式预制桩帽及高阻尼支座，支座参数为 $\phi 820$ mm、剪切弹性模量 0.8 MPa、支座屈服力 225 kN、初始水平刚度 7.7 kN/mm、屈服后水平刚度 1.7 kN/mm、水平等效刚度 2.7 kN/mm。采用 Autodesk robot 有限元模型计算，见图 4。方案 1 的结构阻尼比按常规取 5%；方案 2 的结构阻尼比根据上文迭代方法计算，为 8.02%。2 个方案的反应谱如图 5 所示。

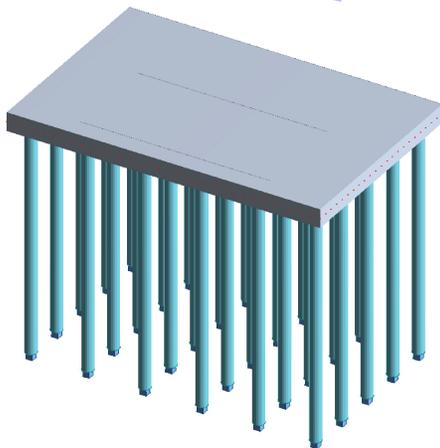


图4 有限元模型

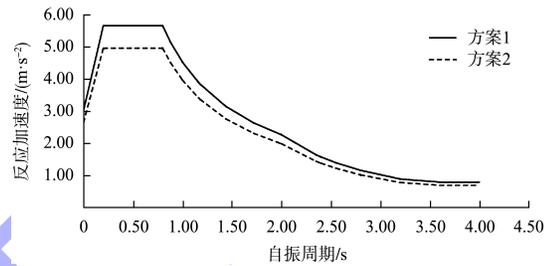


图5 SSE 设计反应谱

经计算，方案 1 自振周期为 1.18 s，在地震作用下的桩基应力达到 272 MPa，临近屈服。方案 2 采用隔震技术后，自振周期增加至 2.35 s，约为方案 1 的 2 倍，对应的地震加速度降低为方案 1 的 1/2；地震作用下的桩基最大应力为 203 MPa，约为方案 1 的 75%。对桩基结构进行优化，将桩基直径减小为 1 200 mm，计算得最大应力为 211 MPa，结构安全，各方案计算结果见表 1。因此，使用隔震技术能够减小地震荷载，优化结构，减小工程量。

表 1 各方案计算结果

方案	自振周期/s	反应加速度/($m \cdot s^{-2}$)	桩基最大应力/MPa
方案 1	1.18	3.82	272
方案 2	2.35	1.43	203
优化方案	2.56	1.39	211

4 结论

1) 强震地区的高桩 LNG 码头的抗震设防要求高，可在工作平台、引桥、补偿平台等结构应用隔震技术，提高结构抗震能力。

(下转第 78 页)