



# 海上重力式基础结构 LNG 接收站 设计方法及应用

司家林, 朱峰, 陈良志, 钱原铭

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 根据国内外调研资料, 归纳整理海上 LNG(液化天然气)接收站重力式基础结构(GBS, gravity based structure) 概况、结构设计方法及难点解决方案, 并提出海上重力式基础结构 LNG 接收站在国内的应用展望和亟待解决的问题。亚得里亚海 LNG 接收站的结构设计为 GBS 的典型结构, 基于半概率极限状态设计法, 采用有限元方法分析获得从建造到应用的各阶段结构受力状态。结构设计的主要难点包括 LNG 储罐要求的混凝土温度梯度控制、绝缘材料湿度梯度控制, 以及结构整体的抗震可靠性。通过预埋发热电缆和安装柔性钢衬垫隔绝水汽, 可以解决温度和梯度的变化, 通过有限元分析地震作用下的地基-结构相互作用, 以论证结构抗震试验。由于资料有限, 需要对 GBS 的详细设计及施工等开展进一步研究, 其在我国未来的能源进口、海上天然气开采等方面具备应用潜力。

**关键词:** 重力式基础结构; LNG; 设计方法; 荷载组合

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0181-06

## Design method and application of LNG receiving station for offshore gravity based structure

SI Jialin, ZHU Feng, CHEN Liangzhi, QIAN Yuanming

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** Based on domestic and foreign research data, this paper summarizes and organizes the overview, structural design methods, and difficult solutions of gravity based structure (GBS) for offshore LNG (liquefied natural gas) receiving station. It also proposes the application prospects and unresolved problems of offshore GBS LNG receiving station in China. The structural design of the Adriatic Sea LNG receiving station is a typical structure of GBS, based on the semi-probabilistic limit state design approach. The finite element method is used to analyze and obtain the stress state of the structure at each stage from construction to application. The main difficulties in structural design include the temperature gradient control of concrete required for LNG tanks, the humidity gradient control of insulation materials, and the overall seismic reliability of the structure. The temperature and gradient changes are solved by embedding heating cables and installing flexible steel pads to isolate water moisture. The seismic resistance test of the structure is demonstrated through finite element analysis of the foundation structure interaction under seismic action. Due to limited information, further research is needed on the detailed design and construction of GBS, which has potential applications in future energy imports, and offshore natural gas extraction in China.

**Keywords:** gravity based structure; LNG; design method; load combination

为了避免 LNG(液化天然气)在储存和运输过程中的安全风险, LNG 码头一般通过填海或长距离

栈桥的方式使泊位远离人口密集区, 这两种布置方式投资成本较高、施工难度大、不利于环境保护。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 司家林 (1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为港口航道与海岸工程。

随着 LNG 需求增加、码头岸线资源趋于饱和以及环保要求使填海工程审批更加困难, 离岸式 LNG 进出口/接收站将在能源进出口中发挥更大作用。综合考虑, GBS 结构在耐火性、耐久性、可维护性、可拓展性和易施工性上优于其他 LNG 装卸结构。

重力式基础 (GBS) 是海上工程结构的重要基

础形式之一, 主要依靠基础自重力及压载物抵抗外部荷载和倾覆力矩, 保持结构稳定。目前 GBS 在国内外得到广泛应用, 典型的 GBS 结构案例见图 1。2008 年, 国外应用 GBS 结构作为海上 LNG 接收站的基础结构, 并具备靠泊 LNG 船、存储 LNG、提供 LNG 再气化平台等功能。

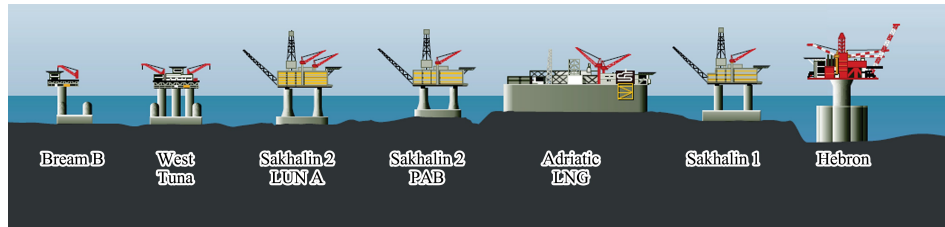


图 1 采用 GBS 为基础结构的项目

目前, 采用 GBS 结构作为 LNG 出口/接收站的项目包括意大利得里亚海液化天然气 (Adriatic LNG, 简称 ALNG) 接收站和俄罗斯北极液化天然气 2 号, 其中 ALNG 的 GBS 结构于 2008 年完工并投入使用, 成为世界上第 1 个采用 GBS 结构的 LNG 接收站。

## 1 GBS 设计研究进展

Haug 等<sup>[1]</sup>总结海上 LNG 设施混凝土结构的发展过程, 讨论 GBS 结构的发展背景, 提出环境条件、干舷高度、存储容量等 GBS 结构概念设计的控制参数; Oberlies 等<sup>[2]</sup>讨论使用模型测试 GBS 结构的有效性, 并使用长期分析方法定义波浪冲击荷载纳入, 其结果应用于 Hebron GBS 结构设计; Widiyanto 等<sup>[3]</sup>介绍 GBS 极端载荷, 提出使用线弹性有限元和非线性有限元分析技术计算结构内力, 使计算结果更加精确。

目前, 国内对于大型单体海上混凝土结构研究较少。基于长 324 m、宽 152 m、高 30 m 的俄罗斯北极 2 号 LNG 项目的 GBS 已取得一些研究成果。谢崇峰等<sup>[4]</sup>对北极 2 号 LNG 项目 GBS 的内部构造进行介绍, 参考国内外标准对 GBS 结构的冰荷载、风荷载进行计算, 建立有限元模型, 结合各工况荷载组合进行校核; 罗晓健等<sup>[5]</sup>对比国内外关于荷载及工况组合的规范, 建立有限元模

型。承载能力极限状态控制工况为拖航阶段, 通过增加预应力配筋解决可能出现的开裂风险; 正常使用极限状态控制工况为在位服役阶段, 另外还应对其他偶然荷载工况进行单独验算。

GBS 结构在我国的海上平台建设、能源进口等方面具有应用价值。目前, 我国对 GBS 应用的研究成果较少。

本文基于国外相关文献, 介绍意大利 ALNG 接收站的 GBS 结构主要概况, 总结设计方法及难点解决方案, 并展望国内的应用场景, 旨在为国内的研究和应用提供参考。

## 2 结构设计

### 2.1 结构基本概况

ALNG 接收站位于意大利 Porto Levante 以东约 17 km 的北亚得里亚海域, 通过一条直径 30 in (约 762 mm) 的管道向意大利天然气网输送天然气。作为 ALNG 基础结构的 GBS 安装于平均海平面 29 m 的海床上, GBS 内部有 2 个镍钢材质的 LNG 储罐, 各为长 155 m、宽 33 m、高 28 m、质量约 4 500 t。GBS 与其支撑的上层建筑物质量约 29 万 t<sup>[6]</sup>。

### 2.2 主要构件尺寸及用途

GBS 长 180 m、宽 88 m、高 47 m, 结构质量约 18 万 t, 外形为圆角矩形结构。GBS 内部结构见图 2。

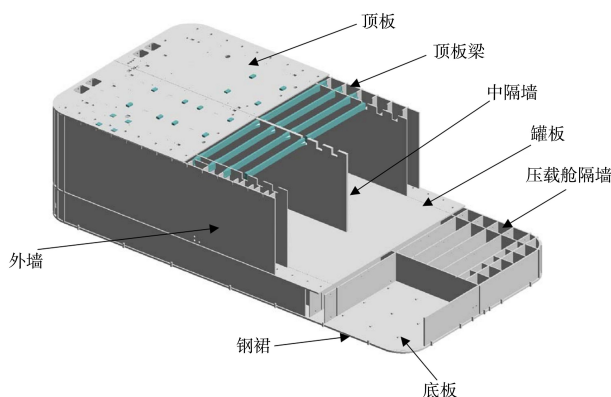


图 2 GBS 结构

1) 钢裙: GBS 设置沿底部轮廓和用于加强整体结构的波纹钢裙边, 高 1 m、厚 0.6 m, 将 GBS 底部划分为 12 部分。钢裙边在安装后嵌入地基, 增加结构的抗滑能力。底板钢裙布置见图 3。



图 3 GBS 底板钢裙布置

2) 底板: 底板混凝土厚 0.7 m, 设置横向和纵向的后张法钢筋。底板承受上方压力, 并在浮运阶段承受外部水压。

3) 压载舱隔墙: 底板的上方是压载舱, 在横向有 25 个隔墙, 纵向有 5 个隔墙, 所有外墙、纵隔墙和横隔墙混凝土在水平和垂直方向上均设置后张法钢筋。隔墙厚度为 0.4 m, 将压载舱划分为多个隔间。这种类似于“华夫饼”的隔舱加强了 GBS 压载舱结构和罐板的结构强度, 并能在接收站安装后填充压载物。

4) 罐板: 罐板厚 0.6 m, 混凝土在水平和垂直方向上都设置了后张法钢筋。罐板构成 GBS 整体箱体的一部分, 但主要用途是支撑 LNG 储罐。储罐正下方的罐板区域用低温钢筋加固, 并设有加热管道, 以保护混凝土罐板免受 LNG 储罐低温的影响。

5) 外墙: 外墙厚 0.6 m, 混凝土在水平和垂直方向上都设置了后张法钢筋。GBS 的设计要求在外围采用双层墙, 在两端采用 3 层墙。这种分隔结构使得一部分区域能够承受船舶撞击等损坏。储罐隔间周围的内墙也有一个加热系统, 将混凝土温度梯度保持在允许的范围内。

6) 中隔墙: 中心墙厚 1.2 m、长 155 m、高 32 m。中隔墙为 GBS 顶板混凝土梁提供垂直支撑, 并在形成的舱室中分别安装 LNG 储罐。

7) 顶板梁: 顶板梁高 2.5 m、宽 0.8 m、长 35.4 m。顶板与梁共同为上层模块提供支撑。

8) 顶板: 顶板厚 0.5 m、宽 88 m、长 180 m, 混凝土在水平和垂直方向上都设置了后张法钢筋。

## 2.3 设计方法

### 2.3.1 设计准则

设计标准基于半概率极限状态设计法, 使用与荷载和材料强度相关的安全系数。这些标准考虑了结构所处的环境、可靠性要求和维护方面等因素<sup>[7]</sup>。

为了保证结构具备足够的耐腐蚀性, 应特别注意使用极限状态(SLS)下的混凝土裂缝宽度。在浪溅区及其上方的混凝土和使用后张法钢筋的混凝土, 裂缝限制最为严格, 允许的裂缝宽度  $\omega < 0.25 \text{ mm}$ 。水下部分和使用普通钢筋的混凝土裂缝宽度极限  $\omega < 0.45 \text{ mm}$ 。

承载力极限状态(ULS)的基本标准是将钢筋的拉伸应变限制在 2.5‰, 混凝土的压缩应变限制在 3.5‰。根据 DNV (Det Norske Veritas, 挪威标准协会) 规则, 在承载力极限状态时验证了两种荷载组合, 其中永久荷载或主要可变荷载作为主导力。

### 2.3.2 有限元设计

在对 GBS 概念进行长期计算后, ALNG 设计人员利用 ANSYS 软件建立约 1 500 万个自由度的 GBS 有限元模型(图 4), 对运行工况和临时荷载工况进行分析, 并将计算结果作为设计规范校核的依据。建模精度包含所有混凝土实体、后张钢

筋、预埋板、穿孔和预应力孔道,在钢筋和各类构件拥挤的区域,对每个钢筋进行建模,以避免冲突,并验证可施工性。

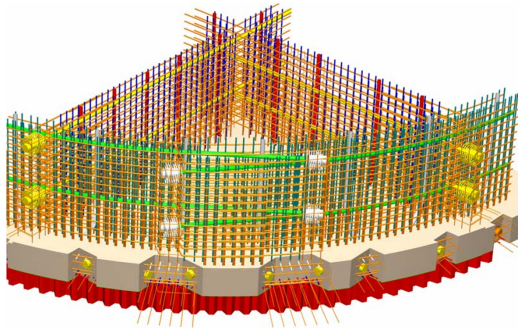


图4 GBS结构钢筋模型

结构分析建立各种用于静态和动态计算的有限元模型。混凝土设计方法基于对整个GBS的有限元分析,其中每个有限元由八节点一阶六边形实体单元组成,典型的单元边长约为1 m,因此通常每个板或墙跨有9个单元,足以在计算中对大多数混凝土板的线性分布压力提供良好的结果。模型还用于对其他局部区域进行有限元分析,以确定由于集中荷载(如船舶挤靠力或拖曳力)引起弯矩和横向剪切的局部最大应力。

模型采用假定弹性模量 $E$ 为30 GPa、泊松比 $\nu$ 为0.2和密度 $\rho$ 为 $2\,400\text{ kg/m}^3$ 的线性各向同性材料进行有限元分析,为分析收缩和徐变的影响,根据混凝土在后张处理时的龄期,通过将弹性模量降低40%~65%进行模拟收缩和徐变的影响。

### 2.3.3 设计状态

接收站GBS复杂的施工、运输、安装和运行环境需考虑大量的荷载条件。对每个阶段的荷载进行近似分析,以确定详细的荷载建模。根据DNV的规定,GBS分为5个设计状态:

1) 建设和整合状态:在GBS建设和整合阶段,主要的荷载是各种结构构件的后张力。在组合成整体之前,各个构件在预制过程中就已经存在后张力。由于预应力随着时间损失并造成构件的变形,因此在设计中必须规定构件混凝土的浇

筑顺序。

2) 舾装状态:舾装状态包括LNG储罐的水力验算,验算方法为用水代替LNG模拟储罐的受力状态。由于LNG的密度约为水的1/2,因此验算方法是在储罐内加入储罐体积60%的水,并将液化天然气加压至储罐设计压力水平的125%,以此工况作为储罐及储罐底板的控制荷载。为了验算储罐周围舱壁的密封性,考虑储罐相邻舱室注水至一定高度的工况。另外,舾装状态还验算了GBS出运时在预制坞内上浮的工况。

3) 拖曳状态:为了确保在所有天气情况下均可进行拖曳作业,拖曳状态验算了100 a重现期的波浪荷载,波压力通过专门的静水和水动力学分析确定。拖曳状态还验算在任意1个隔舱被意外淹没状态下的结构完整性,当隔舱间存在巨大的水压差时,这种荷载条件用于模拟其安全性。

4) 安装状态:安装阶段包括向GBS结构各压载舱注满水,在安装地点完成沉降安装过程,验算侧面隔舱被水充分填满的状态。

5) 运行状态:运行状态工况荷载包括有效波高 $H_s=5.9\text{ m}$ ,周期 $T_p=10.9\text{ s}$ 的波浪荷载、船舶冲击荷载和重现期为475 a地震作用下的承载力极限状态。

除了上述5种状态外,设计组还考虑了几种对结构有重大影响的状态,如爆炸、船舶撞击和意外断电。为了承受LNG船的冲击,该接收站设计水平承载力为60 MN,作用在靠近水位高度的外墙上。意外断电将导致混凝土内的加热电缆失效,LNG储罐的 $-162\text{ }^\circ\text{C}$ 低温将传导至混凝土,产生温度应力。

### 2.3.4 荷载组合

有限元模型模拟重力、压载力、波浪力、土压力等恒载,对于波浪、船舶冲击、爆炸或地震等可变荷载,需要进行单独的动态分析,并将可变荷载转换为等效的静态荷载进行分析。为了模拟荷载条件,模型单元的荷载被分解并构成基本

组合, 如重力、后张力或压载, 最终成为包括适当荷载因素的设计组合。

为了涵盖所有因素的最不利情况, 对每个不利工况进行建模, 如将 100 a 波浪的 8 个方向与 4 种满载或空载储罐的组合和 6 种不同的土壤反应模式相结合。根据表 1 的荷载组合形式, 分别生成 2 个系列的使用极限状态组合, 每个状态都考虑了后张力的上界和下界。GBS 设计过程中, 累计考虑了数千个荷载组合。

表 1 荷载模型组合原理

状态	永久荷载系数	活载系数	后张力系数	环境荷载系数
使用极限状态 a	1.3(1.2)	1.3	1.1/0.9	0.7
使用极限状态 b	1.0	1.0	1.0/0.9	1.3

## 2.4 设计难点和解决方案

### 2.4.1 温度和湿度梯度

根据热传导分析, 即使 LNG 储罐与混凝土充分隔离, 容纳 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 LNG 的储罐也会使一些混凝土构件的温度降到 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更低。温度分布引起的差异变形将导致混凝土开裂, 这是混凝土设计的难点。

通过在浇筑储罐底板和隔仓内混凝土之前, 预埋加热电缆并安装温度控制系统解决混凝土温度梯度的问题。通过系统控制加热电缆, 使混凝土温度保持在 $2\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围, 并使 GBS 结构内部的温差保持在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右<sup>[8]</sup>。

由于任何扩散到罐体隔间的水汽都可能降低 LNG 储罐周边绝缘材料的有效性, 甚至在低温环境下产生结冰状况, 因此还需要控制储罐旁混凝土相对湿度的梯度。为了防止混凝土蒸发的水分对 LNG 储罐的绝缘材料产生不利影响, 在储罐舱周边的混凝土内安装 3 mm 厚的柔性钢衬垫, 防止水汽侵入绝缘材料。

### 2.4.2 抗震设计

该接收站虽然所处位置的地震活跃度不高, 但仍进行了综合抗震设计(图 5)。目的是在重现期为 475 a 的地震中保持结构完整性, 计算在此地

震作用下的承载力极限状态, 并将当地重现期为 5 000 a 的罕见地震的破坏限制在一定范围内, 确保地震发生时 LNG 接收站能够安全关闭。

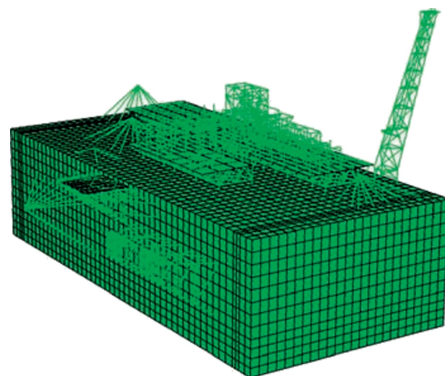


图 5 地震和爆炸分析模型

采用地震有限元方法分析接收站在地震状态下的反应。初步分析显示, 对于埋入相对柔性土壤中的刚性结构, 必须考虑地基-结构相互作用, 并建立集成的耦合动态模型, 包括地基系统、GBS、液体/气体在内的储罐、顶部模块和附属结构。

地震模拟分为 3 个步骤, 以解决地基-结构相互作用的问题。步骤 1: 假设 1 个无质量、坚硬的基础, 以模拟海床的自由运动; 步骤 2: 以土壤弹簧、土壤阻尼器和虚拟土体的形式产生与频率相关的基础阻抗, 分析基于地基-结构相互作用的简化模型, 其中接收站由集中荷载表示; 步骤 3: 使用更详细的有限元模型, 以确定选定点的截面应力。有限元模型中假设 GBS 具备线弹性, 并定义为非线性、非连续的土壤特性。为了模拟将底板作为刚体或随土体变化的情况, GBS 基础分别按整体或非整体建模计算。地震有限元分析的结果用于验证考虑晃动的 LNG 储罐的响应, 并作为顶部建筑和 GBS 设计的输入条件。在模态分析的基础上, 进一步通过地震有限元分析确定单元的荷载情况, 并通过比较之前选择点上的截面应力来校准等效静荷载。

此外, 有限元模型还对结构进行了局部分析, 以研究地震作用下压载砂液化的潜在可能性, 分

析对隔墙设计有较大影响的因素。在极端地震时,底板下面的钢裙边允许发生屈服,但在实际设计过程中,为了避免钢裙边锚固失效,需在设计过程中限制裙板的塑性变形。

### 3 结论

1) 国内现有的研究成果范围不足以全面支持对 GBS 结构的完整设计,还需要对包括但不限于 GBS 结构的储罐设计、内外部设施接口、施工期荷载等多方面内容进行研究。对于超大型 GBS 结构的施工,包括基础设施建设、施工组织设计、施工具体实施等大量课题,还需要进一步的研究,以支持 GBS 结构的应用。

2) 重力式基础结构的设计经验主要适用于离岸大型 LNG 码头。根据 2022 年数据,海运进口 LNG 超过 6300 万 t, 远超进口管道气比重<sup>[9]</sup>。预计在 2022—2026 年,国内 LNG 需求增长将保持强劲,平均每年增长 8%<sup>[10]</sup>,建设 LNG 接收站仍有较大前景。由于 GBS 结构 LNG 接收站大型化、预制生产和离岸作业的特点,可应用于岸线资源紧张、且具有一定能源供应要求的区域。未来 GBS 结构可在服务能源进口、海上天然气开采等方面具备应用潜力。

### 参考文献:

- [1] HAUG A K, EIE R, SANDVIK K, et al. Offshore Concrete Structures for LNG facilities - New developments [C]// Offshore Technology Conference, Houston: [s: n], 2003.
- [2] OBERLIES R, KHALIFA J, HUANG J, et al. Determination of Wave Impact Loads for the Hebron Gravity Based Structure (GBS) [C]//ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.
- [3] WIDIANTO, KHALIFA J, HASREID K O, et al. Hebron Offshore Concrete Gravity-Based-Structure: Novel Design and Construction Techniques [C]//Concrete Convention and Exposition. Conference on Offshore and Marine Concrete Structures: Past, Present, and Future, Michigan: American Concrete Institute. 2019: 21-39.
- [4] 谢崇峰,王宁辉,冯鹏,等.超大型极地海上重力式混凝土平台结构分析及全过程模拟[J].工业建筑,2024,54(1):46-55.
- [5] 罗晓健,谢崇峰,冯鹏,等.极地海洋重力式混凝土平台结构研究[C]//陕西省石油学会,西安石油大学,北京振威展览有限公司.2022国际石油石化技术会议暨新能源及节能技术国际会议论文集.西安:陕西省石油学会,2022:1-10.
- [6] WATERS L B, MUELLER C V, HELLEN P C, et al. Design and Construction of Gravity Based Structure and Modularized LNG Tanks for The Adriatic LNG Terminal [C]//Proceedings of the 15th International Conference and Exhibition of Liquefied Natural Gas, Paris: International Institute of Refrigeration. 2007.
- [7] LUDESCHER H, NAESS J, BJERKELI L. Detailed design of a gravity-based structure for adriatic liquefied natural gas terminal [J]. Structural engineering international, 2011, 21(1): 99-106.
- [8] NAESS J, GISKE S I, BJERKELI L. Concrete gravity-based structures used for offshore LNG storage and regasification in the Adriatic Sea[J]. Structural concrete, 2010, 11(2): 73-81.
- [9] 杨斌,朱善庆,李冰绯,等.2022年沿海 LNG 港口基本建设回顾与展望[J].中国港口,2023(7):1-3.
- [10] 周游,张佳佳,张良恺,等.2024年国际天然气市场分析与趋势预测[J].北京理工大学学报(社会科学版),2024,26(2):76-83.

(本文编辑 赵娟)