



# 双向 $\pi$ 形面板在高桩码头结构中的应用

刘 杰<sup>1</sup>, 翁 扬<sup>2</sup>, 章少兰<sup>1</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003)

**摘要:** 系统论述拉美地区高桩结构中常用的双向  $\pi$  形面板的结构特点和适用性, 对其施工期和使用期的结构受力开展有限元分析, 总结结构变形、受力分布特性和不同尺度参数对内力的影响规律, 并对局部薄弱点提出加强措施。结果表明, 与常规面板结构相比, 双向  $\pi$  形面板使上部结构更轻便、整体性更好, 在力学性能上也有进一步提升。研究成果验证了双向  $\pi$  形面板的技术可靠性和合理性。

**关键词:** 高桩码头; 双向  $\pi$  形面板; 结构特点; 有限元; 内力分析

**中图分类号:** U 656.1+13

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)10-0216-06

## Application of bidirectional $\pi$ -shape slab in piled wharf structure

LIU Jie<sup>1</sup>, WENG Yang<sup>2</sup>, ZHANG Shao-lan<sup>1</sup>

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2.Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200003, China)

**Abstract:** We systematically discuss the structural characteristics and applicability of the bidirectional  $\pi$ -shape slab commonly used in piled wharf structure in Latin America region, carry out the finite element analysis of the structural forces during the construction and the service periods, summarize the structural deformation, force distribution characteristics and influence law of different scale parameters, and propose the reinforcement measure for local weak point. The results show that compared with the conventional slab structures, the bidirectional  $\pi$ -shape slab makes the upper structure lighter and more integrated, and the mechanical properties are further improved. The results verify the technical reliability and rationality of the bidirectional  $\pi$ -shape slab.

**Keywords:** piled wharf structure; bidirectional  $\pi$ -shape slab; structural characteristic; finite-element method; internal force analysis

高桩码头结构可采用梁板式、无梁板式、墩式、多层式等结构形式<sup>[1]</sup>。梁板式结构工程建设经验丰富, 已成为各大型连片式码头的主要形式<sup>[2]</sup>, 而其中的预制面板发展有两种主流方向: 一种是叠合板, 其特点是下层面板体积小、质量轻, 对施工设备要求低; 另一种是空心大板, 相对叠合板的预制构件来说其质量和体积不具备优势, 但能在铺设完成后立刻成为新的施工平台, 有利于快速施工。

对面板的优化创新研究仍在不断的推进中。

河海大学在国家“七五”期间提出了折线拱结构, 借鉴的是微弯板<sup>[3]</sup>的拱形特性。陈达等<sup>[4]</sup>针对拱式结构受力特点, 结合码头工程荷载特点, 提出一种高桩码头双跨连续拱式纵梁结构形式, 并通过实例论证该新结构能充分利用混凝土的抗压能力, 不仅扩展了码头结构的跨越能力, 还能减小拱脚对桩基的水平推力。本文分析的双向  $\pi$  形面板本质上是属于折线板的变形, 在拉美地区(古巴、哥斯达黎加、巴西等国家)高桩码头工程中较为普遍, 是一种应用成熟的独特面板, 能进一步提

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 刘杰(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口、航道工程规划与设计。

高上部结构的整体性和力学性能, 但公开资料较少, 国内尚无在港航工程中的应用实例。本文从该面板的结构特点、施工期和应用期的结构受力规律, 以及不同尺度参数的影响等方面进行分析, 以期为其在国内外港口工程设计中的应用和推广提供参考。

1 双向  $\pi$  形面板结构特点分析

1.1 结构外形

双向  $\pi$  形面板核心构件是一种特殊的预制薄壳面板结构, 它的中心区域与常规的高桩码头面板一样是平面矩形, 但矩形四边都带有向下的折板部分, 与水平面呈一定角度(通常是  $60^\circ$ ), 两个方向的截面形状呈  $\pi$  形, 整体结构类似空心的梯形台, 构件横纵向断面见图 1, 构件的三维模型见图 2。它作为预制面板, 横向伸出部分搁置在下横梁上, 面板与面板之间的纵向伸出部分共同构成纵梁现浇模板, 现浇混凝土后形成完整的面板和横纵梁。

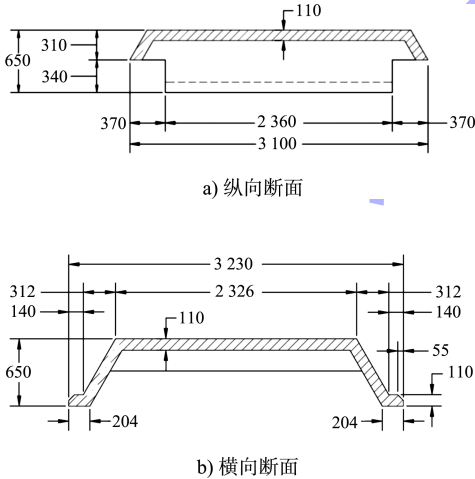


图 1 双向  $\pi$  形面板构件断面 (单位: mm)

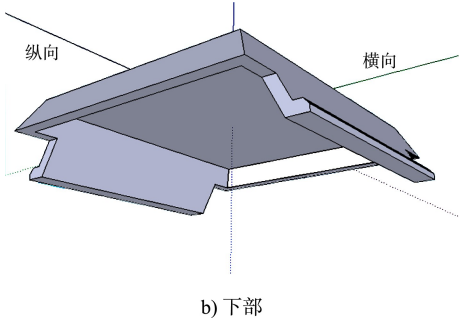
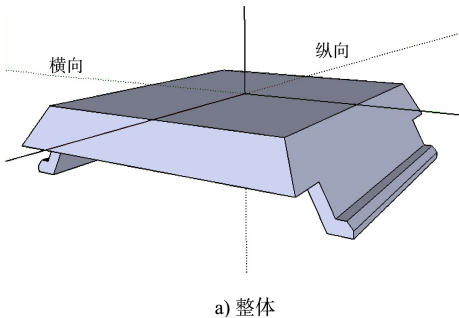


图 2 双向  $\pi$  形面板构件三维模型

1.2 结构及受力特点

无梁板码头没有吊装梁系的复杂工序, 上部结构现浇成一个整体, 提高了结构稳定性, 但是没有梁系的结构属于系点支撑, 仅适用于没有集中荷载的中小码头工程<sup>[5]</sup>。对荷载较大或条件复杂的大型港口工程结构, 应首选梁板式, 如天津港、上海港等大型港口, 都选用了梁板式结构。本文分析的双向  $\pi$  形面板与常规梁板式码头有一定相似性, 但施工工艺更像无梁板式码头, 它的出现为港口设计行业提供了一种新的思路。其优点为:

- 1) 发挥现浇模板作用。预制面板结构边缘处下折, 吊装完成后搁置在下横梁上, 面板与面板、面板与下横梁之间的围限形成上部结构的现浇底模, 可一次性完成上横梁、纵梁和面板的现浇施工, 大大节约了上部结构的施工时间。
- 2) 提高上部结构整体性。蒋利学等<sup>[6]</sup>对整体现浇梁板进行竖向荷载的加载试验, 研究竖向荷载作用下空间效应对结构内力的影响, 确认整浇梁板空间效应可大幅提高梁的刚度和承载能力。双向  $\pi$  形面板保证了横纵梁和面板一体化施工, 也进一步提高了上部结构的整体性和结构受力性能。

3) 充分发挥结构性能, 保证上部结构更加轻巧, 降低结构整体重心, 更有利于结构抗震设计。

1.3 结构适用性分析

双向  $\pi$  形面板及其配套结构主要应用于拉美的高震区, 其特点是桩距小、上部结构轻, 符合抗震设计原理<sup>[7]</sup>。而我国沿海地区多处于低震区, 码头设计中抗震并不是主要的技术问题, 传统结构因具有跨径大、梁板分离装配等特点得到更多

应用,可满足我国的码头大吨位、长泊位的停靠需求,因此这种面板结构在国内受到的关注很少。随着“一带一路”倡议不断延伸,对这种面板及其整体结构的研究有着重要的现实意义。

结合某工程实例,重点分析该面板结构在施工期、使用期的结构受力以及不同尺寸参数的影

响等。该码头结构的典型断面见图 3,从陆侧到码头前沿线共设 9 排桩,全长为 25.2 m;上部是预制薄壳面板,尺寸见图 1,其上部结构轻巧,可降低整体重心,上表面为整体现浇结构,整体性强;下部采用全直钢管桩,桩距较小。桩基及接岸结构不在本文中讨论,仅作为分析的边界条件输入。

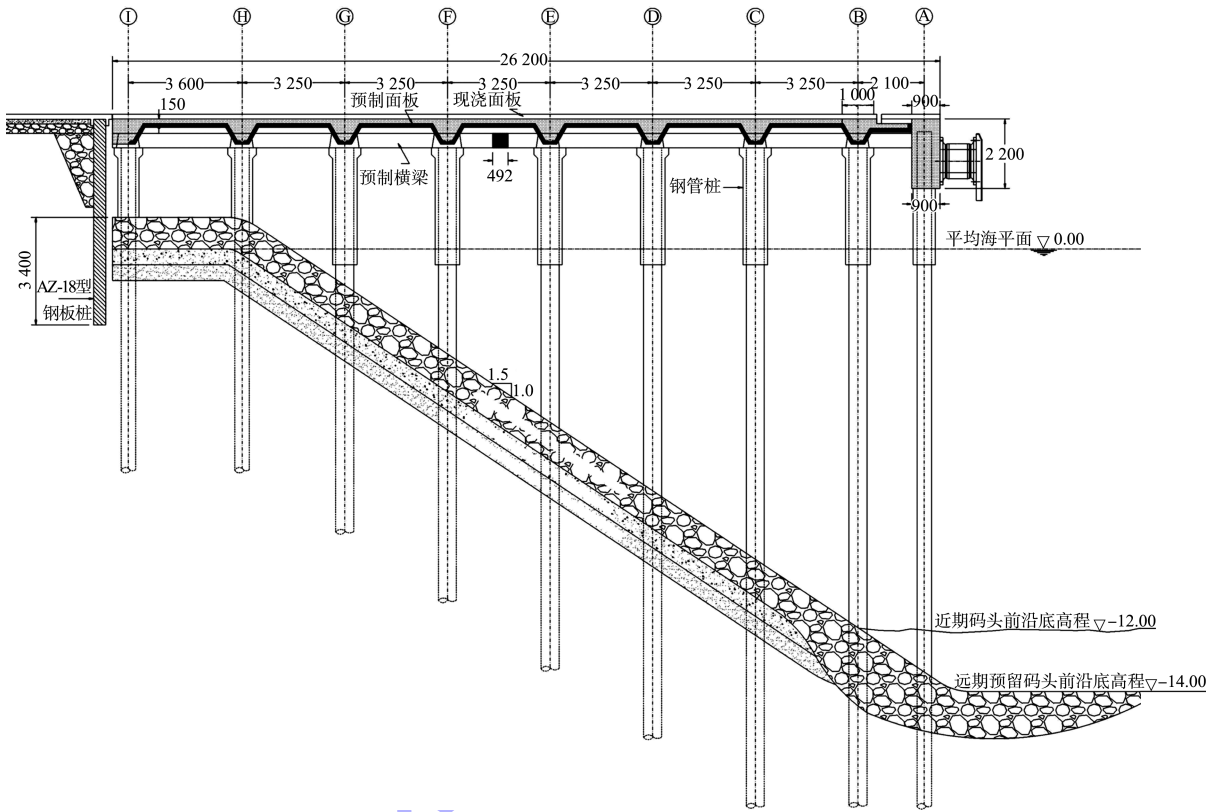


图 3 某工程高桩码头结构典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

2 施工期结构分析

施工期先进行钢管桩沉桩和下横梁的施工,形成上部结构的工作面后,再吊装双向  $\pi$  形面板。面板吊装后的效果见图 4,通过三维模型可直观地理解面板与面板、面板与下横梁之间的搭接关系,未浇筑现浇混凝土层,效果图边界部分未做处理。

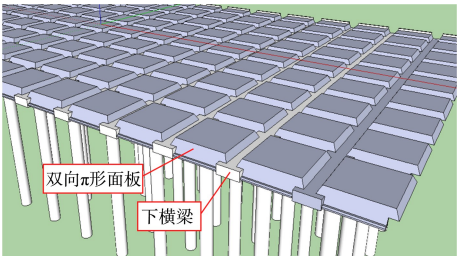


图 4 施工期面板安装后的整体效果

本面板具有空间特性,规范要求的常规平面板的简化计算方法不适用。为保证对面板边角区域的模拟更接近实际情况,本文采用三维有限元方法计算面板结构的应力与变形,推算构件承载力设计值,而非宏观的剪力、弯矩。

2.1 边界条件及荷载工况

考虑到面板此时的搁置状态,依据《码头结构设计规范》可简化为两边支承两边自由的单向板,所不同的是在有限元分析中需要设置其边界条件。面板与横梁竖向方向接触面均设置为 displacement 位移限制,即限制与接触面垂直方向位移,但不限制水平方向的位移。

面板承受的作用有面板自身重力、厚度为

0.30~0.84 m 的现浇混凝土层以及表面的施工荷载。根据施工期不同阶段, 分为两种荷载组合工况:

1) 工况 1 为面板构件吊装至预定位置, 通过两侧横梁简支支撑, 面板承受自身重力作用和施工荷载。

2) 工况 2 为面板吊装完毕后浇筑上部混凝土, 且现浇混凝土还未达到设计强度, 此时预制面板承受自身重力、现浇混凝土和施工荷载。由于面板的空间特性, 现浇混凝土层折算的竖向荷载分布也随位置变化, 最大为  $21\text{ kN/m}^2$ , 位于纵向折板边缘, 最小为  $7.5\text{ kN/m}^2$ , 作用于矩形平台面。

2.2 施工期建模与分析

采用 ANSYS 有限元分析软件建立钢筋混凝土整体式模型, 将模型支座简化为向上的简支支承、附加一个必要的水平约束, 通过定义并添加材料、设置荷载、设置边界条件、划分网格、数值计算, 对面板构件的变形、正应力及剪应力等模拟分析, 考察施工期面板的安全性 with 合理性。

位移较大的两个部位分别是纵向板翼底部凸出部分和上部板中心区域, 在工况 2 分别为 0.19 与 0.16 mm, 位置与受弯最大的区域基本一致, 见图 5; 上部板块符合一般矩形平板的变形规律, 折板连接区域未出现较大变形, 横向板翼区域由于有下横梁支撑, 几乎不发生变形。

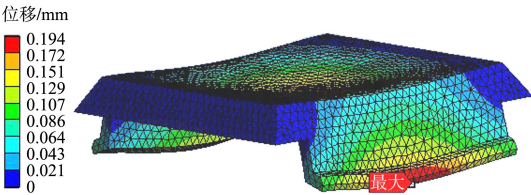


图 5 工况 2 施工期面板构件位移云图

面板大部分区域的应力均在安全范围内, 在纵梁板翼伸出部分的凹直角转角局部区域出现应力集中, 最大拉应力高达  $5.07\text{ MPa}$  (图 6), 超出抗拉极限有局部破坏风险, 因此需要以加强构件局部抗拉承载力为原则, 加强沿着拉应力方向的钢筋, 且应尽量靠近应力较大的外表面, 以提供足够的承载力, 保证预制面板在施工期的可靠性。

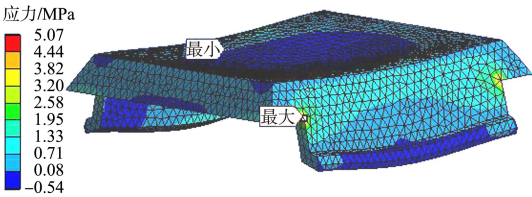


图 6 工况 2 施工期面板构件最大主应力云图

当面板上部现浇完成、混凝土强度还没达到设计要求时, 预制面板构件处于最不利状态, 剪应力最大值出现在上部板与纵向板翼交界线处以及纵向板翼中部, 剪应力最大值为  $1.027\text{ MPa}$ ; 但剪应力远低于材料抗剪极限, 因此施工期剪应力风险远小于拉应力风险。

3 使用期结构分析

3.1 整体模型与荷载

使用期码头结构分成若干结构段, 每个结构段由桩基和浇筑后形成整体的面板、纵横梁的结构体系构成。双向  $\pi$  形面板与厚 0.3 m 的上部现浇层结合成一体, 形成的上部结构面板厚度为 0.41 m, 因此受弯能力也大幅提高。考虑到主要分析的是面板, 桩土作用采用假想嵌固点法模拟满足建模分析的要求, 嵌固点深度约为 8.5 倍桩径, 整体模型见图 7。上部作用考虑结构自身重力、堆货、流动机械、移动岸桥等竖向为主的荷载, 并按照《码头结构设计规范》的要求乘以分项系数进行组合分析, 以检验双向  $\pi$  形面板及形成一体化的面板在使用期的可靠性及配筋要求。

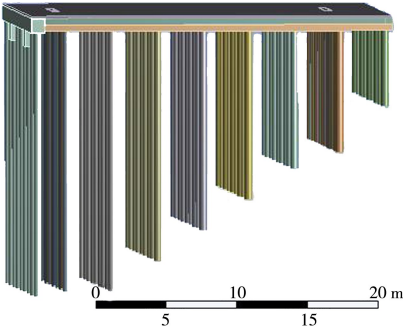


图 7 使用期高桩码头结构段整体模型

3.2 使用期建模与分析

由于面板构件的外形特性, 浇筑后在两个面



板之间形成的纵梁呈倒梯形，其承受正弯矩的能力比一般的矩形梁要大得多，在同等荷载的情况下，通过缩小截面面积以减轻结构质量；另一方面也减小了双向板的自由长度和宽度，以提高板体的承载力。对整体模型的有限元计算和分析如下：

1) 由于集装箱岸桥为移动荷载，轮压大，整个纵向轨道梁底部区域承受了沿纵向的较大拉应力，这部分是预制板板翼伸出部分，需要重点加强，板块间应伸出钢筋绑扎，以加强板块间底部的强度。由于为连续梁，仅次于底部的风险部位是纵梁区域顶表面，也承受了一定的拉应力，但是尚在承受极限之内，应增添钢筋以防冲击荷载等意外的影响对顶部梁区域造成破坏。在对面板区域的应力考察后发现其主应力值相对梁系区域

较小，因此除纵梁外的其他区域安全系数相对较高。

2) 一般平面板的抗剪分析条件同样适用于双向  $\pi$  形面板，双向  $\pi$  形面板在使用期的剪应力相对正应力属于次要风险。其使用期跨厚比也较小，采用一般混凝土面板结构构造配筋满足配筋率即可。

3) 作为叠合板，双向  $\pi$  形面板四边的翼缘部分起到了加强肋的作用，相比于一般平板，其叠加的施工期荷载很少，降低了施工期内矩形部分钢筋的应力。

综合施工期和使用期有限元分析结果，双向  $\pi$  形面板主要受弯矩影响，面板平板部分比板翼部分配筋率需要适当提高(图 8)，现浇层根据计算结果配筋。

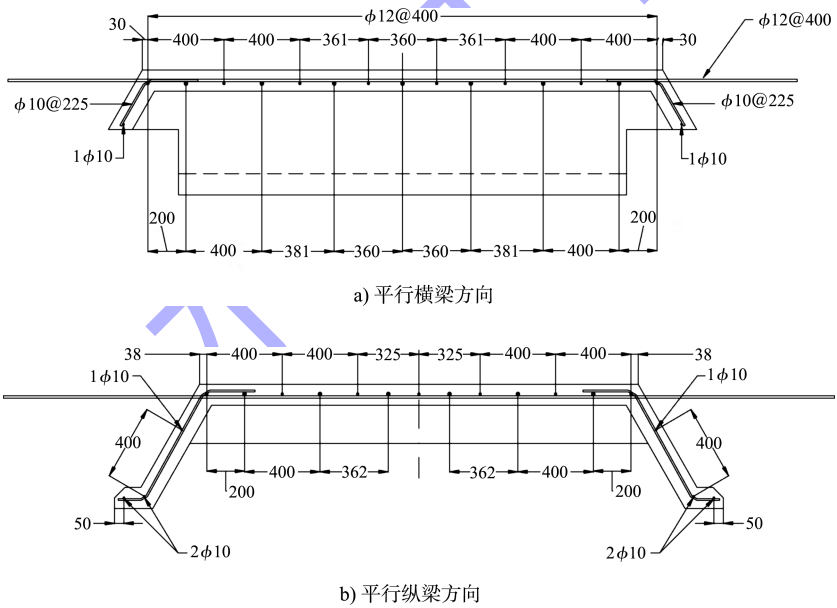


图 8 双向  $\pi$  形面板截面配筋 (单位: mm)

4 面板尺度参数的影响分析

该面板的优点主要体现在轻便的上部结构及高效的施工程序，对面板核心构件施工期和使用期的分析后，基本验证了其技术可靠性和合理性，并识别不同阶段需要重点加强的部位。

根据梁板空间效应理论，连接处的微调可能会对整体性能带来很大的差异，特别是梁板结合处与梁底部区域。通过对梁内侧与上部板连接处

夹角和梁长度两个主要的参数进行调整，以分析其对结构受力的影响。

1) 梁内侧斜面与水平夹角的变化，比较了 50°、60°、75° 和 90° 这 4 种情况。各个模型的最大正应力、剪应力出现的点均在纵梁侧面与横梁连接处，正应力方向接近垂直于梁截面方向；在梁高和截面面积不变的情况下，50°、60° 两种模型的正应力均明显小于另外两种夹角接近垂直的

模型; 60°方案在各方面性能更为均衡, 而 50°方案承受稍多的剪应力前提下, 承受更少的拉应力, 见图 9。因此在选择方案时, 50°和 60°方案均具有可选择性。

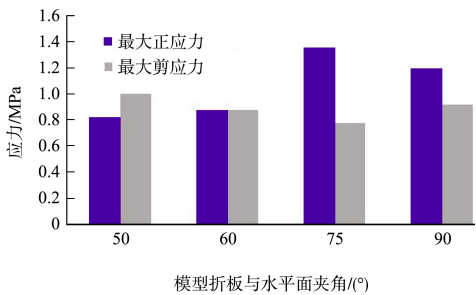
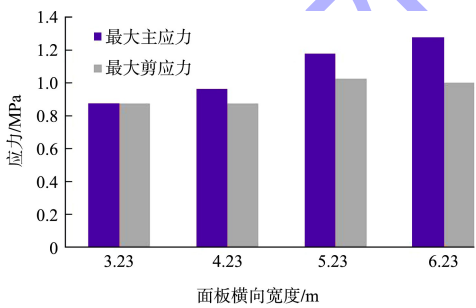
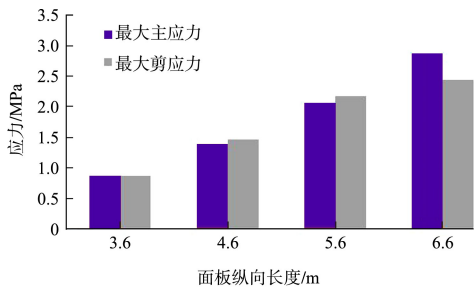


图 9 各模型最大正应力与剪应力对比

2) 加长横梁和纵梁, 加长量分别为 1、2、3 m, 通过线性增长的模型对比应力的增长趋势。加长纵梁(即增加面板长度)对面板造成的影响显著大于加长横梁(即增加面板宽度)的影响, 因此对于增加面板长度的设计需要谨慎; 增加面板宽度对于结构的拉应力影响比较有限, 随着宽度增加, 应力增长幅度在不断减小, 见图 10。因此在整体设计时可以适度增加横梁的长度, 尽量利用预制横梁。



a) 横向宽度变化



b) 纵向长度变化

图 10 面板宽度、长度变化对最大应力的影响

5 结论

1) 双向  $\pi$  形面板核心构件在施工期基本安全可靠, 纵向折板伸出部分凹角转角局部区域出现应力集中现象, 拉应力超过极限, 需要通过局部添加钢筋防止施工期荷载对这一区域的破坏。

2) 在使用期荷载作用下, 整体结构大部分区域安全可靠, 拉应力最大值出现在集装箱岸桥下方的纵梁与横梁连接拐角处, 可以通过添加局部钢筋解决; 使用期的剪应力最大值出现在梁截面的形心附近, 但在剪力极限内, 而上部面板区域剪应力普遍较小, 验证了一般矩形平板抗剪分析条件在本结构中的适用性。

3) 双向  $\pi$  形面板在抗弯、抗剪能力上强于同样用料的传统梁板结构, 纵梁板与水平面夹角为 50°或 60°的方案优于其他角度方案; 整体设计时可以适当增加横向排架桩基间距, 通过增加面板在横梁方向的长度尽可能地利用下方预制的横梁结构。

4) 该面板为预制板结构具有工程实用意义, 省去了复杂的支模工序以及纵梁架设, 大幅缩短工期且整体性好; 同样条件下使用该面板所建造的高桩码头在力学性能上更优。

5) 该预制面板存在应力集中导致局部损坏的风险。一般在局部添加沿应力方向的钢筋降低风险, 但实际工程中情况较为复杂, 建议通过物理模型试验验证其损坏机理。

6) 本面板构件及配套结构组成的高桩码头在抗震性上也有出色表现, 在自身重力分布、桩距设计上须考虑抗震因素。关于不同设计参数对抗震性能的影响有待做进一步的研究。

参考文献:

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] 邱喜, 尹崇清. 高桩梁板式码头整体优化设计[J]. 水运工程, 2008(8): 71-74.