



波浪主控荷载下桩基箱梁式引桥设计

王安华, 陈志乐

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 为满足宁波梅山港区滚装码头90%船舶全天候作业要求, 码头引桥面较低。由于工程区波浪较大, 所以引桥设计的主控荷载由车辆荷载变为波浪荷载。为使引桥抵抗波浪的上托、下砸和侧推作用, 设计采用双向受力预应力箱梁、横向刚度前弱后强的桩基排架和波浪荷载传力装置, 实现了在低高程和大波浪条件下的桩基箱梁式引桥设计, 各项指标均满足规范要求。总结其设计方法及经验。

关键词: 滚装码头; 桩基箱梁式引桥; 波浪主控; 前弱后强的桩基排架; 双向受力预应力箱梁; 波浪荷载传力装置

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0123-05

Design of pile-girder type approach jetty under master control wave load

WANG An-hua, CHEN Zhi-le

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

Abstract: To meet the requirement of all-weather operation for 90% vessels in ro-ro wharf of Ningbo Meishan port, the elevation of wharf and approach jetty is low. Because of the large wave in the engineering area, the master load of the jetty turns to be the wave load instead of the vehicles load. To resist the uplifting, down-falling and horizontal thrusting forces from the wave, the design adopts the bi-directional-loaded prestressed girder, the front-weak & back-strong pile bents and wave load transmitting device to realize the design of pile-girder type approach jetty with low top-elevation and large wave. All indices meet the requirement of the standards. The design method and experience are summarized.

Keywords: ro-ro wharf; pile-girder type approach jetty; controlling wave load; front-weak & back-strong pile bent; bi-directional-loaded prestressed box girder; wave load transmitting device

1 工程概况

宁波梅山港区滚装码头位于宁波某保税港区, 属于外海开敞式码头, 新建1座引桥连接陆域和码头, 桥宽21 m, 桥长200 m, 引桥设计荷载为4车道40 ft (12.19 m) 集装箱拖挂车。为了满足90%船舶全天候作业要求, 桥面高程确定为5.82 m。考虑码头掩护后引桥设计波高为2.98 m, 浪向为横桥向。由于桥面高程较低和设计波浪较

大, 引桥设计的主控荷载由车辆荷载变为波浪荷载。

引桥采用桩基箱梁式排架结构, 排架间距20 m。桩基采用大管桩, 每个桩基排架布置6根桩基: 1对15:1斜桩+2对5:1斜桩。为降低桥梁整体的波浪侧向力和增加其抵抗波浪上托下砸时的整体受力性能, 引桥上部结构采用整体式双向受力后张预应力混凝土箱梁, 梁高1.1 m, 并采用C50高性能混凝土。预制箱梁间预留300 mm现浇缝, 现

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 王安华(1983—), 男, 高级工程师, 从事港口、桥梁工程结构设计和科研工作。

浇后形成一个整体结构以加强上部结构整体受力性能。排架横梁采用倒 T 型截面,下部高 1.7 m,宽 3 m,上部高 1.174 m,宽 1 m,上部为在箱梁安装就位后二次现浇。为降低抵抗波浪浮托力所

需的桥梁自重和桩基轴力,在箱梁和排架横梁间设置传力键将波浪浮托力和上部结构的波浪侧向力传递给桩基排架,并实现温度自由伸缩。引桥断面如图 1 所示。

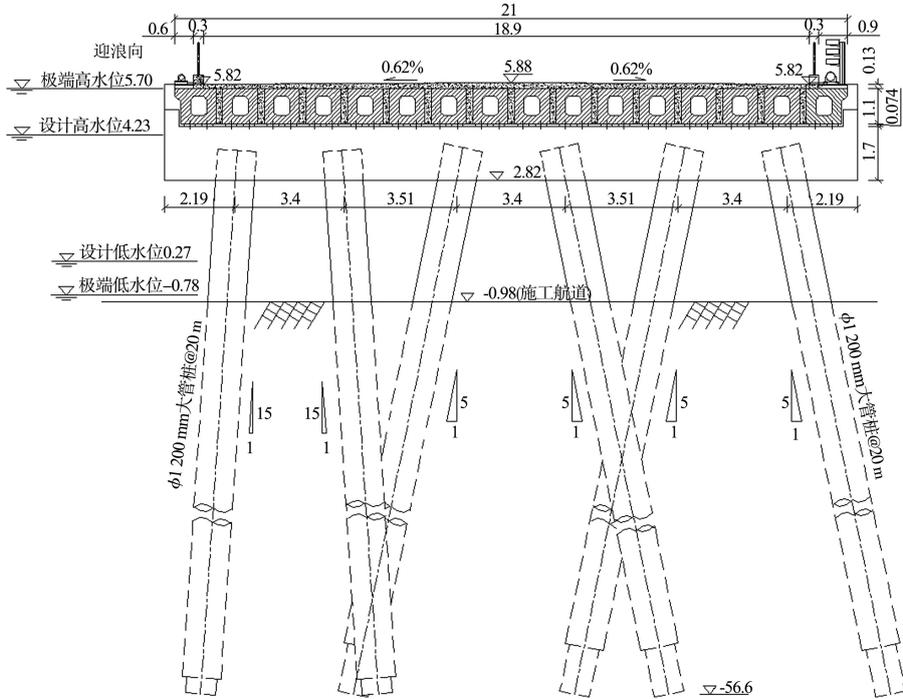


图 1 引桥断面 (单位: m)

2 引桥波浪荷载

考虑到波浪对结构影响较大,为保证结构的安全,既根据规范^[1]和手册^[2]的理论公式计算波浪荷载,同时做了断面波浪物理模型试验^[3]。在

理论公式计算中,波浪荷载浮托力和冲击压强采用 JTS 145-2—2013《海港水文规范》计算,波浪荷载的侧向力和越浪下砸力采用《海港设计手册》(中册)计算。波浪荷载的计算值和试验值见表 1。

表 1 引桥波浪荷载的计算值和物模试验值

方法	面板的最大水平力/(kN/延米)	面板的越浪下砸力/(kN/延米)	面板底部最大浮托力/(kN/延米)	横梁底部最大浮托力/kN	面板底部最大冲击压强/kPa
物模试验	30.00	156.58	476.93	974.4	49.07(分布宽度 2.10 m)
规范计算	43.15	237.50	287.32	853.0	106.00(分布宽度 1.64 m)

由表 1 可知:手册计算的波浪侧向力比物模试验结果稍大;手册计算的越浪下砸力比物模试验结果稍大;物模试验的整体浮托力比规范计算结果大约 65%,物模试验的横梁浮托力和规范计算结果较为接近;规范计算的面板底部冲击压强相对物模试验值较大。由于波浪荷载的不确定性和物模断面试验的不完整性,为保证结构安全,引桥结构按照既满足波浪荷载物模试验值又满足计算值考虑。

3 波浪主控下引桥的计算分析和设计

3.1 上部结构

引桥上部结构计算时,考虑到波浪荷载作用时各箱梁的上托力、下砸力和冲击压强值均不同,同时为了更好地反映和发挥其抵抗波浪的整体受力性能,上部结构采用梁格法模型,各纵梁间采用虚拟横梁连接,虚拟横梁在固结现浇缝处采用刚性连接。在计算模型中,波浪上托力和冲击压强按照波峰在引桥全断面的移动过程进行加载,

以寻找各梁最不利的波峰相位; 波浪侧向力加载在迎浪向的边梁上; 越浪冲击力按照三角形分布加载在越浪作用宽度内的箱梁上。波浪上托力、下砸力和越浪冲击不同时出现, 车辆荷载按车道位置加载。上部预应力箱梁按照浪溅区的一级裂缝验算^[4]。上部结构的梁格模型见图 2。

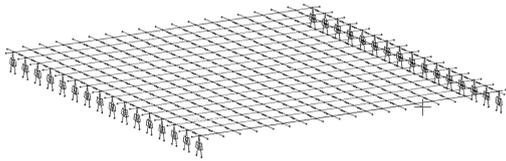


图 2 上部结构梁格模型

上部预应力箱梁的受力状态为双向受力状态下, 其组合工况如下:

- 1) 正弯梁底受拉状态: ①自重力+车辆荷载; ②自重力+越浪下砸力。
- 2) 负弯梁顶受拉状态: ①自重力+波浪浮托力; ②自重力+波浪冲击压强。

各荷载下箱梁的最大弯矩值如表 2 所示, 为简化仅列出横向 8 片箱梁, 另外 8 片与之对称。

表 2 各荷载下箱梁的最大弯矩 kN·m

部位	自重力	集装箱 车辆荷载	越浪 下砸力	波浪 浮托力	波浪冲 击压强
边梁	1 689	785	1 348	-1 801	-1 557
中梁 1	1 486	703	1 135	-1 557	-1 197
中梁 2	1 486	708	1 075	-1 539	-1 028
中梁 3	1 486	709	1 005	-1 518	-862
中梁 4	1 486	710	924	-1 494	-708
中梁 5	1 486	673	802	-1 409	-609
中梁 6	1 486	667	708	-1 376	-576
中梁 7	1 486	634	612	-1 339	-565

根据表 2 可知, 正弯矩中越浪下砸力为主控荷载, 负弯矩中的主控荷载为波浪浮托力, 同时浮托力的弯矩效应已经大于自重荷载, 因此本桥的主控荷载为波浪荷载。荷载作用下各箱梁的弯矩从桥中心向边缘逐渐增大, 边梁最大。自重力和车辆荷载作用下中梁的弯矩基本相同, 边梁弯矩大于中梁; 越浪下砸力主要作用在桥梁边缘, 其弯矩效应从桥梁中部向边缘增大幅度较大, 变化幅度约 120%; 波浪浮托力从中部到边缘增大幅

度为 35%; 波浪冲击压强从中部到边缘的增大幅度为 175%。为了便于施工和安装, 引桥构件设计为边梁和中梁两种构件。

由于本桥箱梁为双向受力预应力构件, 在配置底部钢束的情况下还需在顶部配置负弯矩钢束, 但配置顶部负弯矩钢束后在正弯状态下会导致箱梁顶部压应力和底部拉应力增大, 同样在负弯状态下底部预应力钢束会导致箱梁底部压应力和顶部拉应力增大, 顶底部钢束相互影响, 因此钢束配置过程较为复杂。在调束过程中通过逐步增加钢束反复调整, 使箱梁顶底部均满足一级裂缝不出现拉应力和压应力小于 16.2 MPa 的要求验算, 最终箱梁配置钢束确定为: 底部双孔 $\phi S15.2-10+$ 双孔 $\phi S15.2-9$ 钢筋线, 顶部为双孔 $\phi S15.2-6$ 钢筋线。在 1.1 m 梁高的前提下, 增加或减小钢束都会导致顶部或底部某指标不满足要求。最终箱梁的顶底应力验算结果如表 3 所示。

表 3 箱梁应力的验算结果

部位	车辆 工况	越浪下 砸力工况	浮托力 工况	波浪冲 击压强	MPa
边梁顶部	-13.2	-14.4	-1.7	-2.8	
边梁底部	-1.7	-0.4	-13.5	-12.4	
中梁顶部	-14.9	-15.7	-3.2	-5.1	
中梁底部	-2.5	-1.6	-14.1	-12.3	

由验算结果可知, 箱梁顶部和底部最大值拉压应力分别在越浪下砸力工况和浮托力工况。

3.2 下部桩基排架

桩基排架计算采用排架加载车辆和波浪荷载计算分析, 桩基采用 m 法施加水平向土弹簧, 桩底施加竖向土弹簧。计算模型如图 3 所示。

根据桩基排架的所受波浪荷载, 计算工况主要考虑如下几种:

- 1) 自重力+车辆荷载;
- 2) 自重力+车辆荷载+2 m 工作波浪荷载(侧向力+浮托力)+水流量;
- 3) 自重力+极端高水位时极端波浪侧向力+极端越浪下砸力+水流量;
- 4) 自重力+极端高水位时极端波浪侧向力+浮托力+水流量;



图 3 桩基排架计算模型

计算分析发现横梁弯矩的控制工况为工况 2，桩基最大压桩力和弯矩的控制工况为工况 3，最大拉桩力控制工况为工况 5。控制桩基选型的为在工况 3 情况下的桩基压桩力和弯矩。因此对于桩基排架，波浪荷载也是主控制荷载。

关于桩基轴力，在计算分析中发现，当桩基均采用 5:1 的斜率时，各桩基轴力差距较大，顶浪向 2# 桩基轴力远远大于其他桩基(表 4)。其主要原因是可同时出现的越浪下砸力和波浪侧向力的共同作用所致。越浪下砸力按“Δ”分布作用于迎浪侧上部结构，然后经上部结构二次分配于排架横梁和桩基上，主要偏心于 1# 和 2# 桩基侧。在越浪下砸力作用下桩轴压力排序为 1# > 2# > 3# > 4# > 5# > 6#。在波浪侧向力作用下，顶浪向 2#、4# 和 6# 桩基将产生轴压力，背浪向 1#、3# 和 5# 桩基将产生拉桩力。因此两者共同作用最终导致 2# 桩基轴压力最大并远远大于其他桩基。

- 5) 自重力+最大波浪浮托力+对应水位(4.23 m)时波浪侧向力+水流利；
- 6) 自重力+最大波浪冲击压强+对应水位(3.70 m)时波浪侧向力+水流利。

表 4 桩基内力计算值(桩基斜率均为 5:1)

桩号	桩基偏角/(°)	越浪下砸力下桩轴力/kN	波浪侧向力下桩轴力/kN	桩轴压力/kN	桩轴拉力/kN	桩基最大弯矩/(kN·m)
1#	20	1 544	-453	4 964	-666	1 445
2#	25	1 297	583	6 272	-301	1 137
3#	25	878	-508	4 300	-712	1 291
4#	25	631	508	5 161	300	1 114
5#	25	238	-582	4 682	-796	1 219
6#	20	19	450	5 258	-836	1 164

排架结构横向是一个各桩基共同构成的具有一定横向刚度的结构，桩基的横向刚度越大，其由侧向力转换的轴力就越大。为降低 2# 桩基轴力，可降低迎浪向桩基的横向刚度，形成横向刚度前弱后强的桩基排架结构以减小迎浪向桩基在侧向力作用下的轴力并将主要侧向力传递给后方桩基，留出富余

来承受越浪冲击力。降低桩基的横向刚度有 2 个途径：降低迎浪向一对叉桩(1# 和 2# 桩)的斜率；增大 2# 桩的偏角。根据计算分析最终将迎浪向 1# 和 2# 桩斜率调整为 15:1，2# 桩的偏角调整为 3°，为对称将 5# 桩的偏角也调整为 35°。调整后的桩基的内力的计算结果见表 5，桩力计算结果较为均匀。

表 5 引桥桩基内力计算结果

桩号	桩基偏角/(°)	越浪下砸力下桩轴力/kN	波浪侧向力下桩轴力/kN	桩轴压力/kN	桩轴拉力/kN	桩基最大弯矩/(kN·m)
1#	20	1 560	-190	5 401	-452	1 476
2#	35	1 253	238	5 616	-300	1 337
3#	25	878	-628	4 299	-812	1 397
4#	25	602	643	5 251	-297	1 239
5#	35	263	-640	4 696	-830	1 356
6#	20	9	581	5 343	-853	1 296

3.3 波浪荷载传力装置的设计

为将作用在上部结构的波浪荷载传递到桩基排架, 需要在箱梁和排架横梁结合处设置既能传递侧向力又可传递浮托力的装置, 并应具有伸缩功能。单梁梁端在波浪荷载作用下的反力如表 6 所示, 在波浪冲击荷载作用下梁端反力最大。

表 6 单梁梁端在波浪荷载下的反力 kN

单梁	梁端浮托力反力	梁端冲击压强反力	梁端侧向力反力
边梁	390	600	60
中梁	350	435	60

上部结构两跨为一个桥面连续段, 在桥面连续段间设置伸缩缝, 为此在桥面连续段中部梁端预埋抗拉钢筋, 在伸缩缝处梁端预埋传力键。边梁在连续端设置 8 根 $\phi 36$ mm 的抗拉钢筋, 在伸缩缝端设置 8 根 $\phi 50$ mm 的传力键; 中梁在连续端设置 6 根 $\phi 36$ mm 的抗拉钢筋, 在伸缩缝端设置 6 根 $\phi 50$ mm 的传力键。传力键先预埋入箱梁内, 外露部分用套筒套住, 套筒和传力杆间填满沥青和木屑以实现其伸缩功能, 套筒和传力杆直径方向设有间隙以实现箱梁的挠度旋转(图 4)。

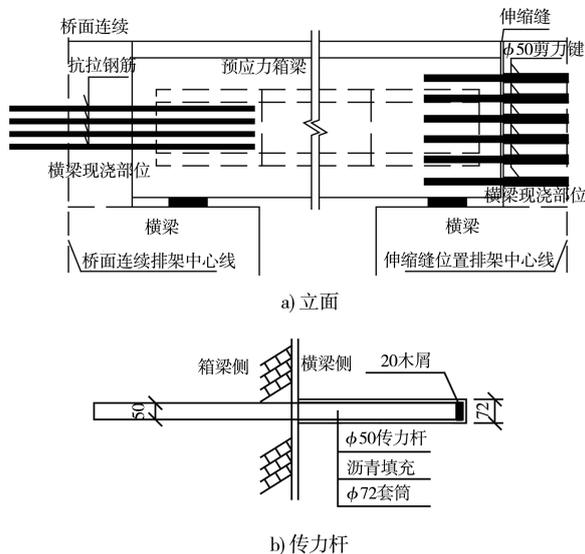


图 4 波浪荷载传力装置 (单位: mm)

4 结论

宁波梅山港区滚装码头引桥采用桩基箱梁式结构, 该引桥具有桥面高程低和所受波浪大的特点, 波浪荷载为本桥的主控制荷载。为了实现该引桥的车辆行使的正常使用功能和抵抗波浪的上托、下砸和侧推作用, 引桥采用双向受力预应力箱梁、横向刚度前弱后强的桩基排架和波浪荷载传力装置, 实现了在大波浪、低高程情况下的桩基箱梁式引桥设计, 各项指标均满足规范要求。设计方法和经验如下:

1) 上部双向受力预应力箱梁结构整体分析采用传力较好的梁格法分析, 分析得出越浪下砸力为下弯主控荷载, 波浪浮托力为上弯矩主控荷载, 双向受力预应力箱梁的调束采用逐步增加钢束来实现其在上弯下弯作用下顶底缘的拉压应力满足规范要求。

2) 下部桩基排架分析中发现越浪下砸力+波浪侧向力工况为桩基的控制工况, 通过改变桩基斜率和偏角以形成横向刚度前弱后强的桩基排架来优化桩基受力。

3) 单梁梁端反力的控制工况为波浪冲击荷载工况, 为实现波浪荷载在上部结构和桩基排架间的传递和箱梁的自由收缩, 在箱梁两端分别设置了抗拉钢筋和传力杆。

参考文献:

- [1] JTS 145-2—2013 海港水文规范 [S].
- [2] 交通部一航院. 海港工程设计手册(中册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [3] 交通运输部天津水运工程科学研究所海洋工程中心. 宁波-舟山港梅山港区多用途码头工程水工结构断面波浪物理模型试验报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所海洋工程中心, 2013.
- [4] JTS 202—2011 水运工程混凝土施工规范 [S].

(本文编辑 郭雪珍)