



基于欧洲标准板桩码头钢拉杆设计计算方法

郑帅恒^{1,2}, 孙英¹, 刘学¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东广州 510230;
2. 中交四航局第三工程有限公司, 广东湛江 524022)

摘要: 针对当前钢拉杆国内设计方法在海外应用认可度不高的现状, 详细介绍欧标中对于钢拉杆的杆体及组成构件(连接板、销轴)的计算理论、方法和过程, 并结合实例进行设计计算。结果表明: 钢拉杆的抗拉承载力受杆体光圆段和螺纹段抗拉承载力最小值控制; 设计时可以采取在杆体中加入单向铰等措施避免弯矩出现, 此时缺口系数可取0.9, 螺纹段抗拉承载力也可增加50%; 销轴尺寸确定时应同时满足其抗弯验算、抗压验算、抗剪验算和弯剪组合验算; 确定连接板尺寸时, 可以将销轴直径稍微增加, 作为板上开孔尺寸进行设计计算。

关键词: 板桩码头; 钢拉杆; 设计计算方法

中图分类号: U656.1+12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0082-06

Calculation method for design of steel tie rods of sheet pile wharf based on European codes

ZHENG Shuaiheng^{1,2}, SUN Ying¹, LIU Xue¹

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd.,

Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, Guangzhou 510230, China;

2. The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524022, China)

Abstract: Aiming at the current status quo that the domestic design method of steel tie rods is lack of recognition in overseas applications, we introduce in detail the calculation theory, method and process of steel tie rods body and components (connecting plates, pins) in European codes, meanwhile carry out design and calculation with examples. The results show that the tensile resistance of the steel tie rod body is controlled by the minimum value of tensile resistance between shaft and threads. In the design, some measures can be taken to avoid bending moments occurring in the rod such as one-way hinges, at which time the notch coefficient can be taken as the value of 0.9, and the threaded section's tensile resistance can increase by 50%. The diameter of pin should be determined to satisfy the requirements of the bending resistance, bearing resistance, shear resistance and combined shear and bending resistance. The diameter of pin can be slightly increased as the size of the plate openings when the size of connecting plate is designed.

Keywords: sheet pile wharf; steel tie rod; design and calculation method

板桩码头作为常见的码头结构形式, 其组成包含板桩墙、钢拉杆、锚碇墙、导梁等构件; 其受力特点表现为依靠板桩入土部分的横向土抗力和上部锚碇结构以维持结构的稳定性。钢拉杆由端部预埋件和中间杆体组成, 端部预埋件与杆体之间铰接, 各个杆体之间通过连接铰和张紧器连接^[1]。钢拉杆作为板桩墙和锚碇墙之间的传力构

件, 是板桩码头抵抗水平力的关键构件^[2]。其承载能力的发挥关系到整个板桩码头系统的安全, 不少工程案例已经证明, 板桩码头系统的失效与钢拉杆的断裂有关。

常见的钢拉杆主要由杆体、“O”形头、张紧器等构件组成, 见图1。其中杆体与张紧器通过螺纹咬合连接, “O”形头之间通过连接板并配合

收稿日期: 2024-03-18

作者简介: 郑帅恒(1993—), 男, 工程师, 从事市政、边坡、港口及航道工程设计。

销轴进行连接, 杆体与板桩墙及锚碇墙通过垫板与螺母连接。钢拉杆设计时, 各构件自身强度以

及连接部位强度均不应小于钢拉杆所受拉力设计值。

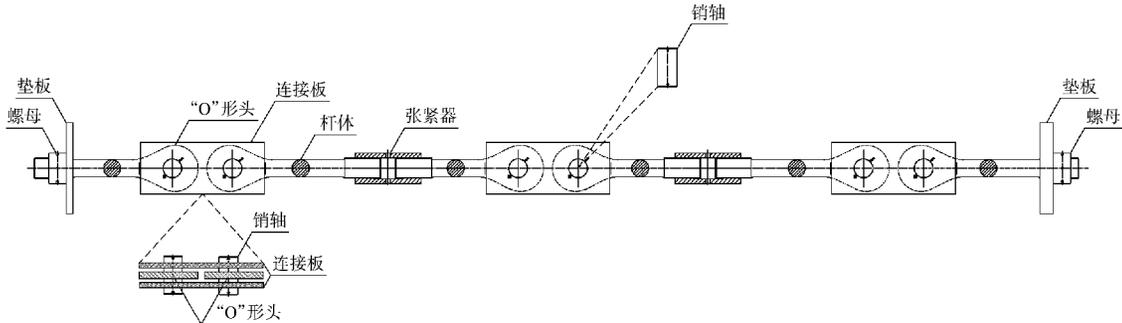


图 1 钢拉杆构件

当前, 国内钢拉杆设计、生产、施工以 GB/T 20934—2016《钢拉杆》^[3]、JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[4] 等为依据, 前者偏向于生产工艺、试验等方面, 缺少理论计算方法; 而后者给出杆体直径推荐公式, 并在工程实践中应用广泛^[5], 但对于连接部位和连接件未给出具体计算方法; 现行规范及其计算方法在国际上影响力不足, 在海外工程应用上受到一定限制。国内学者对拉杆计算尤其是按照欧洲标准计算的研究较少, 仅符成等^[6]介绍欧标中钢板桩、拉杆和导梁的计算理论和方法, 并结合算例与国标进行对比, 但未涉及拉杆各个组成构件和连接部位的计算。拉杆作为中心受拉构件, 杆体以外构件的合理设计也是影响拉杆整体性能发挥的关键。

鉴于此, 本文详细介绍欧洲标准中对钢拉杆的杆体承载力计算方法和各构件的设计方法, 并结合海外工程算例, 以期海外工程板桩码头的钢拉杆设计提供一定参考。

1 杆体承载力计算

钢拉杆杆体按照有无螺纹分为螺纹段和光圆段, 如图 2 所示。根据欧洲标准 EN 1993-5:2007(E)^[7] 第 7.2.3 条, 对钢拉杆的抗拉极限承载力 $F_{t,Rd}$ 有以下规定:

$$F_{t,Rd} = \min(F_{t,Rd}, F_{lg,Rd}) \quad (1)$$

式中: $F_{t,Rd}$ 为螺纹段抗拉承载力, $F_{lg,Rd}$ 为光圆段抗拉承载力。

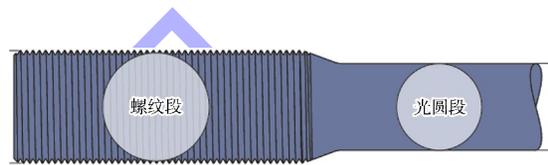


图 2 钢拉杆螺纹段和光圆段

欧标采用以下公式对螺纹段的抗拉承载力进行计算:

$$F_{t,Rd} = k_l f_{up} A_s / \gamma_{M2} \quad (2)$$

式中: k_l 为缺口系数, 该系数可以看作是对螺纹抗拉性能发挥程度的折减, EN 1993-5:2007(E) 推荐取 0.9, 而随后的 EN 1993-5:2007/AC:2009(E)^[8] 推荐取 0.6, 同时指出当能通过合理设计, 使得连接铰处不受弯曲或组合应力作用时, 可取 0.9; f_{up} 为材料极限抗拉强度; γ_{M2} 为分项系数, 取 1.25^[9]; A_s 为螺纹段受拉截面积, EN 1993-5:2007(E) 指出, 保守起见, 可以使用螺纹部分的净面积代替受拉截面积, 计算公式为:

$$A_s = \pi d_e^2 / 4 \quad (3)$$

式中: d_e 为螺纹段有效直径, 对于普通螺纹 $d_e = D_0 - 0.938 2P$, 对于梯形螺纹 $d_e = D_0 - P$, 其中 D_0 、 P 分别为螺纹大径、螺距。

EN 1993-5:2007(E) 采用以下公式对光圆段抗拉承载力进行计算:

$$F_{lg,Rd} = f_{yp} A_g / \gamma_{M0} \quad (4)$$

式中: f_{yp} 为材料屈服强度; γ_{M0} 为分项系数, 取 1.0; A_g 为光圆段截面积, 其值为 $\pi D_1^2 / 4$, 其中 D_1 为杆体直径。

2 连接板尺寸设计计算

相邻杆体之间通过铰连接时,需要通过板上开孔与销轴相连,而连接板厚度、板上开孔尺寸和位置对该处连接的安全性至关重要。根据欧洲标准 EN 1993-1-8:2005 (E)^[10]表 3.9 对板上开孔尺寸和位置以及板的厚度做出以下规定。

方法 1: 已知连接板厚度 T , 计算开孔尺寸和位置的公式为:

$$a \geq F_{Ed} \gamma_{M0} / (2Tf_{yp}) + 2d_0/3 \quad (5)$$

$$c \geq F_{Ed} \gamma_{M0} / (2Tf_{yp}) + d_0/3 \quad (6)$$

方法 2: 已知开孔尺寸和位置, 计算连接板厚度 T 的公式为:

$$T \geq 0.7 \sqrt{F_{Ed} \gamma_{M0} f_{yp}} \quad (7)$$

$$d_0 \leq 2.5T \quad (8)$$

式中: F_{Ed} 为连接板上作用力; γ_{M0} 为分项系数, 取 1.0; d_0 为螺栓、铆钉或销轴孔直径; a 、 c 分别为在平行和垂直受力方向上螺栓、铆钉或销轴孔到连接板边缘尺寸。

两种方法设计计算见图 3。

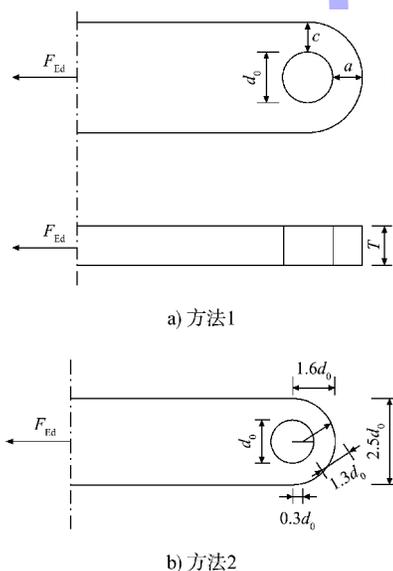


图 3 连接板尺寸设计计算

3 销轴设计计算

3.1 销轴抗剪承载力验算

根据欧洲标准 EN 1993-1-8:2005 (E) 表 3.10 对销轴计算的规定, 销轴设计时应验算销轴抗剪

承载力、销轴与连接板之间的抗压承载力、销轴抗弯承载力、销轴弯剪组合。

销轴抗剪承载力验算的公式为:

$$F_{v,Rd} \geq F_{v,Ed} \quad (9)$$

$$F_{v,Rd} = 0.6Af_{up}/\gamma_{M2} \quad (10)$$

式中: $F_{v,Rd}$ 为设计抗剪承载力; $F_{v,Ed}$ 为承载能力极限状态下的设计剪力作用值; A 为销轴截面积, 其值为 $\pi d_1^2/4$, 其中 d_1 为销轴直径; γ_{M2} 为分项系数, 取 1.25。

3.2 销轴与连接板之间的抗压承载力验算

销轴与连接板之间的抗压承载力验算公式为:

$$F_{b,Rd} \geq F_{b,Ed} \quad (11)$$

$$F_{b,Rd} = 1.5Td_1f_y/\gamma_{M0} \quad (12)$$

式中: $F_{b,Rd}$ 为设计承压抗力; $F_{b,Ed}$ 为承载能力极限状态下的设计压力作用值; f_y 为销轴和连接板的设计强度中的较小值, 即 $f_y = \min\{f_{yp,连接板}, f_{yp,销轴}\}$; γ_{M0} 为分项系数, 取 1.0; T 为连接板厚度。

3.3 销轴抗弯承载力验算

销轴抗弯承载力验算公式为:

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad (13)$$

$$M_{Rd} = 1.5W_{ee}f_{yp}/\gamma_{M0} \quad (14)$$

式中: M_{Rd} 为设计抗弯承载力; M_{Ed} 为销轴承受的弯矩作用, 公式见式 (15); W_{ee} 为弹性截面模量, 公式见式 (16)。

$$M_{Ed} = F_{Ed}(b+4c'+2T)/8 \quad (15)$$

$$W_{ee} = \pi d_1^3/3 \quad (16)$$

式中: b 、 c' 为钢拉杆厚度、连接板与钢拉杆间距, 见图 4。

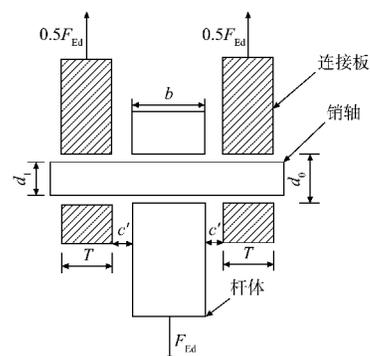


图 4 销轴承受的弯矩 M_{Ed} 计算

3.4 销轴弯剪组合验算

销轴弯剪组合验算公式为:

$$(M_{Ed}/M_{Rd})^2 + (F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2 \leq 1 \quad (17)$$

4 工程案例及设计计算

西非某码头工程采用板桩结构进行设计建设, 包含有管板桩组合墙(前墙)、钢板桩锚碇墙(后墙)、钢拉杆等构件, 其中钢拉杆采用 S650 级钢材, 规格为 $\phi 115 \text{ mm}$ 、 $\phi 120 \text{ mm}$ 和 $\phi 125 \text{ mm}$, 长度

47~51 m。钢拉杆的杆体及构件设计参数见表 1~3。在不考虑腐蚀影响下, 复核钢拉杆杆体和构件的极限承载能力是否满足要求。

表 1 钢拉杆设计参数

规格	光圆段		螺纹段		f_{yp}/MPa	f_{up}/MPa	设计荷载/kN
	D_1/mm	D_0/mm	P/mm				
$\phi 115 \text{ mm}$	115	136	10	650	850	6 267	
$\phi 120 \text{ mm}$	120	145	12	650	850	6 846	
$\phi 125 \text{ mm}$	125	150	12	650	850	7 450	

表 2 连接板设计参数

规格	长度/mm	宽度/mm	T/mm	开孔大小 d_0/mm	相邻孔间距/mm	f_{yp}/MPa	f_{up}/MPa	设计荷载/kN
$\phi 115 \text{ mm}$	825	340	55	129	400	650	850	6 267
$\phi 120 \text{ mm}$	855	355	60	137	410	650	850	6 846
$\phi 125 \text{ mm}$	895	370	60	141	430	650	850	7 450

表 3 销轴设计参数

规格	T/mm	b/mm	c'/mm	d_t/mm	f_{yp}/MPa	f_{up}/MPa	设计荷载/kN
$\phi 115 \text{ mm}$	55	95	2	127	650	850	6 267
$\phi 120 \text{ mm}$	60	100	2	135	650	850	6 846
$\phi 125 \text{ mm}$	60	105	2	139	650	850	7 450

4.1 杆体承载力验算

钢拉杆承载力验算过程可以分为以下步骤:

1) 步骤 1, 根据式(2)、(3)计算螺纹段抗拉承载力 $F_{t,Rd}$, 考虑到项目使用的钢拉杆有 3 个单向铰接(图 1, 连接板与销轴组成单向铰), 单向铰可以防止因地基沉降、砂石回填等因素使钢拉杆承受

侧向弯矩, 确保只承受拉力, 因此, 缺口系数 k_t 可取值 0.9; 再根据式(4)光圆段抗拉承载力 $F_{lg,Rd}$; 2) 步骤 2, 按式(1)计算得到拉杆抗拉极限承载力 $F_{t,Rd}$, 并与设计值进行对比。

计算数据及结果见表 4。结果显示, 各尺寸杆体的设计均满足承载力要求, 且承载力有一定富余。

表 4 杆体承载力验算结果

规格	螺纹段			光圆段			$F_{t,Rd}/\text{kN}$	设计荷载/kN	是否满足要求
	d_c/mm	A_s/mm^2	$F_{t,Rd}/\text{kN}$	D_1/mm	A_g/mm^2	$F_{lg,Rd}/\text{kN}$			
$\phi 115 \text{ mm}$	126	12 462.7	7 627	115	10 381.6	6 748	6 748	6 267	满足
$\phi 120 \text{ mm}$	133	13 885.9	8 498	120	11 304.0	7 348	7 348	6 846	满足
$\phi 125 \text{ mm}$	138	14 949.5	9 149	125	12 265.6	7 973	7 973	7 450	满足

4.2 销轴设计验算

销轴设计验算按以下步骤进行: 1) 步骤 1, 销轴抗剪验算, 根据式(10)计算出销轴抗剪承载力 $F_{v,Rd}$, 并按式(9)与承载能力极限状态下的设计剪力作用值 $F_{v,Ed}$ 进行对比; 2) 步骤 2, 销轴抗压验算, 根据式(12)计算出设计承压抗力 $F_{b,Rd}$, 并按照式(11)与承载能力极限状态下的设计压力

作用值 $F_{b,Ed}$ 进行对比; 3) 步骤 3, 销轴抗弯验算, 根据式(14)~(16)计算出设计弯矩抗力 M_{Rd} , 并按照式(13)与销轴承受的弯矩作用 M_{Ed} 进行对比; 4) 步骤 4, 根据式(17)进行销轴弯剪组合验算。

计算数据见表 5~8。结果显示, 各尺寸销轴的设计均满足要求。

表5 销轴抗剪承载力验算

规格	d_1/mm	f_{up}/MPa	γ_{M2}	$F_{v,Rd}/\text{kN}$	$F_{v,Ed}/\text{kN}$	是否满足要求
$\phi 115\text{ mm}$	127	1 100	1.25	6 685.1	3 133.5	满足
$\phi 120\text{ mm}$	135	1 100	1.25	7 553.9	3 423.0	满足
$\phi 125\text{ mm}$	139	1 100	1.25	8 008.2	3 725.0	满足

表6 销轴抗压承载力验算

规格	d_1/mm	f_y/MPa	γ_{M0}	T/mm	$F_{b,Rd}/\text{kN}$	$F_{b,Ed}/\text{kN}$	是否满足要求
$\phi 115\text{ mm}$	127	650	1.0	55	6 810.4	3 133.5	满足
$\phi 120\text{ mm}$	135	650	1.0	60	7 897.5	3 423.0	满足
$\phi 125\text{ mm}$	139	650	1.0	60	8 131.5	3 725.0	满足

表7 销轴抗弯承载力验算

规格	F_{Ed}/kN	d_1/mm	T/mm	b/mm	c'/mm	W_{eg}/mm^3	f_{yp}/MPa	$M_{Rd}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{Ed}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	是否满足要求
$\phi 115\text{ mm}$	6 267	127	55	95	2	200 997.6	800	193.0	166.9	满足
$\phi 120\text{ mm}$	6 846	135	60	100	2	241 424.3	800	231.8	195.1	满足
$\phi 125\text{ mm}$	7 450	139	60	105	2	263 526.4	800	253.0	217.0	满足

表8 弯剪组合验算

规格	$M_{Rd}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{Ed}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$F_{v,Rd}/\text{kN}$	$F_{v,Ed}/\text{kN}$	$(M_{Ed}/M_{Rd})^2$	$(F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2$	$(M_{Ed}/M_{Rd})^2 + (F_{v,Ed}/F_{v,Rd})^2$	是否满足要求
$\phi 115\text{ mm}$	193.0	166.9	6 685.1	3 133.5	0.75	0.22	0.97	满足
$\phi 120\text{ mm}$	231.8	195.1	7 553.9	3 423.0	0.71	0.21	0.92	满足
$\phi 125\text{ mm}$	253.0	217.0	8 008.2	3 725.0	0.74	0.22	0.96	满足

4.3 连接板设计尺寸验算

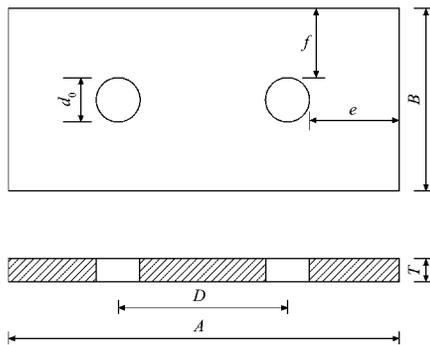
连接板设计见图6。按照式(5)、(6)计算连接板

需要的最小尺寸，并与实际设计尺寸进行对比，见表9。结果显示，当前连接板的设计尺寸均满足要求。

表9 连接板设计计算结果

规格	F'_{Ed}/kN	d_0/mm	T/mm	f_{yp}/MPa	γ_{M0}	D/mm	e/mm	f/mm	计算长度[A]/mm	计算宽度[B]/mm	设计长度 A/mm	设计宽度 B/mm
$\phi 115\text{ mm}$	3 133.5	129	55	650	1.0	400	129.8	86.8	788.7	302.7	825	340
$\phi 120\text{ mm}$	3 423	137	60	650	1.0	410	135.2	89.6	817.4	316.1	855	355
$\phi 125\text{ mm}$	3 725	141	60	650	1.0	430	141.8	94.8	854.5	330.5	895	370

注： F'_{Ed} 为作用于板上的作用力，考虑到相邻杆体通过由两块并行的连接板并行连接，此处取杆体上设计荷载的一半；[A]、[B]为连接板所需尺寸最小值， $[A] = d_0 + 2e + D$ ， $[B] = d_0 + 2f$ 。



注： D 为两个销轴孔中心距， e 为销轴孔在平行于受力方向上到连接板边缘距离， f 为销轴孔在垂直于受力方向上到连接板边缘距离。

图5 连接板设计

5 结语

1) 拉杆的杆体抗拉承载力由杆体光圆段和螺纹段两者抗拉承载力最小值控制，设计时应保证两部分的抗拉承载力均大于设计荷载值；钢拉杆出现的弯矩作用对拉杆螺纹段抗拉承载力发挥影响很大，体现在缺口系数 k_t 的取值上。设计时可以采取增加单向铰等措施避免弯矩出现，这样缺口系数就可以取 0.9，承载力也可以增加 50%。

2) 销轴尺寸确定时应同时满足其抗弯验算、抗压验算、抗剪验算和弯剪组合验算；确定连接

板尺寸时, 可以将销轴直径稍微增加作为板上开孔尺寸进行设计计算。

参考文献:

- [1] 郭昆峰. 锚粗钢拉杆在板桩码头的应用[J]. 港工技术, 2018, 55(S1): 70-72.
- [2] 李平杰, 戴宇文, 应宗权. 钢板桩码头钢拉杆动力检测技术应用[J]. 水运工程, 2015(3): 150-152, 177.
- [3] 巨力索具股份有限公司, 冶金工业信息标准研究院, 广东坚宜佳五金制品有限公司. 钢拉杆: GB/T 20934—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [4] 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.
- [5] 李芸, 袁海东. 双排钢管桩围堰施工设计: 以太湖西山岛出入通道 1 号桥为例[J]. 工程建设与设计, 2017(3): 151-154.

- [6] 符成, 张志鹏. 基于欧标的板桩码头钢构件承载能力计算方法[J]. 水运工程, 2023(4): 51-55.
- [7] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures-part 5: piling: EN 1993-5: 2007 (E) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures-part 5: piling: EN 1993-5: 2007/AC: 2009 (E) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2009.
- [9] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures- part 1-1: general rules and rules for buildings: EN 1993-1-1: 2005 (E) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [10] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-8: design of joints: EN 1993-1-8: 2005 (E) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

(本文编辑 王璁)

(上接第 81 页)

3) 影响本工程旧码头混凝土质量的根本原因包括混凝土技术发展水平、原材料选择和浇筑质量。这种“先天不足”的混凝土在高酸、高盐的海水环境中受到长期溶蚀, 导致混凝土出现密度小、孔隙率大、强度低、局部碎裂甚至淘空等现象, 这是影响混凝土性能的主要原因。

4) 随着港口行业的发展、岸线资源的紧张, 码头的修复、改造项目越来越多, 探明码头现有混凝土的情况以及原因分析对码头修复至关重要, 研究过程和结论可为类似码头改造项目提供参考借鉴。

参考文献:

- [1] 王雪峰. 混凝土的发展历程和趋势[J]. 河南建材, 2009(6): 48-49.
- [2] 李开, 李厚祥. 浅论混凝土的历史及其发展[J]. 四川水泥, 2015(5): 330-330.

- [3] 罗洪波. 混凝土的发展史[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015, 5(14): 5858-5859.
- [4] 国外混凝土减水剂的发展[J]. 水运工程, 1977(10): 26-28.
- [5] 冯乃谦. 日本混凝土耐久性问题的历史发展及其对策[J]. 混凝土, 2003(7): 14-17, 9.
- [6] 王薇薇. 腐蚀条件下混凝土疲劳剩余强度的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
- [7] 覃丽坤, 宋玉普, 赵东拂. 处于海洋环境的钢筋混凝土耐久性研究[J]. 混凝土, 2002(12): 3-5.
- [8] 王胜年. 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状[J]. 水运工程, 2010(10): 1-7, 118.
- [9] 梁程瑶. 海洋环境下混凝土强度演变的数据挖掘和数据库建立[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [10] 王少鹏. 公路桥梁混凝土材料的工程使用年限研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究所, 2019.

(本文编辑 赵娟)