



凹凸缝约束对横向分力在高桩码头排架中分配系数的影响

杜政¹, 杨蛟², 唐巾评¹, 潘新恩¹

(1. 广西交投集团有限公司, 广西南宁 530007; 2. 湖南省中州九翥工程咨询有限公司, 湖南长沙 410004)

摘要: 高桩码头横向分力在相邻结构段传递中忽略凹凸缝约束会导致排架分配系数偏大。将码头结构沿水平向简化为弹性支座刚性连续梁, 考虑转动刚度, 推导出在凹凸缝约束和不考虑约束条件下, 高桩码头排架横向分力分配系数计算公式。结合工程实例, 对比规范值、不考虑凹凸缝约束、考虑凹凸缝约束的公式计算值和三维有限元法计算值。结果表明, 不考虑凹凸缝约束, 公式计算和有限元计算结果吻合较好, 比规范值偏小; 考虑凹凸缝约束, 排架的横向分力分配系数整体减小, 尤其是在码头整体结构中部(凹凸缝附近)与规范值差异较大。

关键词: 凹凸缝约束; 高桩码头; 横向分力; 分配系数

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0047-07

Influence of concave-convex joint constraint on distribution coefficient of lateral force in bent of high-pile wharf

DU Zheng¹, YANG Jiao², TANG Jin-ping¹, PAN Xin-en¹

(1. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China;

2. Hunan Zhongzhou Jiuxi Engineering Consulting Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Ignoring the concave-convex joint constraint in the transfer of the adjacent structural sections of the high-piled wharf's lateral force can lead to a large bent distribution coefficient. We simplify the wharf structure as a rigid continuous beam with elastic support horizontally, consider the rotational stiffness, and derive the calculation formula for the distribution coefficient of the lateral force component of the high-piled wharf bent under the constraint of the concave-convex joint and without considering the constraint. Combining with the engineering example, we compare the results of the normative value, and the formula calculation value without considering the concave-convex joint constraint, and the formula calculation value and the three-dimensional finite element method calculation value considering the concave-convex joint constraint. The results show that the results of the formula calculation are in good agreement with the results of the finite element calculation without considering the concave-convex joint constraint, and the results of the formula calculation and the finite element calculation are smaller than the standard value. Considering the concave-convex joint restraint, the lateral force distribution coefficient of the bent frame reduces as a whole, especially in the middle part of the overall wharf structure(near the concave-convex joint) is quite different from the standard value.

Keywords: concave-convex joint constraint; high-pile wharf; lateral force; distribution coefficient

横向分力在高桩码头排架中传递规律的研究已经取得不少成果, 早期赵颖^[1]通过物理试验, 表明

水平荷载作用下, 码头排架位移由平动和转动组成, 水平位移呈线性分布; 张祖贤等^[2]通过模型试

验提出，不论采用哪种桩基布置形式，在水平荷载作用下，码头位移以平移和转动为主，呈刚性位移性质，水平力在各排架中的分配可按弹性支撑刚性梁计算；王多垠等^[3] 对大水头差全直桩框架码头进行三维数值模拟，框架码头排架横向分力分配系数与规范值存在差异；张志明等^[4] 建立全直桩码头在水平荷载作用下的整体三维简化方法的理论依据，并认为转动刚度对水平力分配系数影响较大。陶桂兰等^[5] 假定码头上部结构为刚体，考虑桩顶部纵向位移影响，推导出水平力分配计算公式。但对凹凸缝约束对水平力分配的影响研究不多，刘洋等^[6] 采用三维有限元模型模拟高中码头凹凸缝对水平力传递作用，提出简化模型，计算桩基内力均比不考虑凹凸缝传递水平情况下均有一定程度减低。随着理论研究和工程实践的深入，凹凸缝约束对横向分力

在排架中传递的影响程度尚不十分明确。

通常设计工作中往往不考虑凹凸缝的水平传力作用，将凹凸缝仅作为一种构造要求，计算中各个结构段相互独立。实际上这种简化处理较为粗糙，与实际受力情况不符，计算结果较为保守。本文采用《码头结构设计规范》^[7] (简称《规范》) 的基本假定，将码头上部结构视作一个刚性连续梁，排架位置按弹性支撑简化。在此基础上，提出水平刚度和转动刚度，将凹凸缝结构视作受力构件，简化为铰接，分别在不考虑和考虑凹凸缝约束作用下，推导公式，并将公式的计算值与规范值和三维有限元模型计算值进行对比。

1 研究思路

研究思路如图 1 所示。

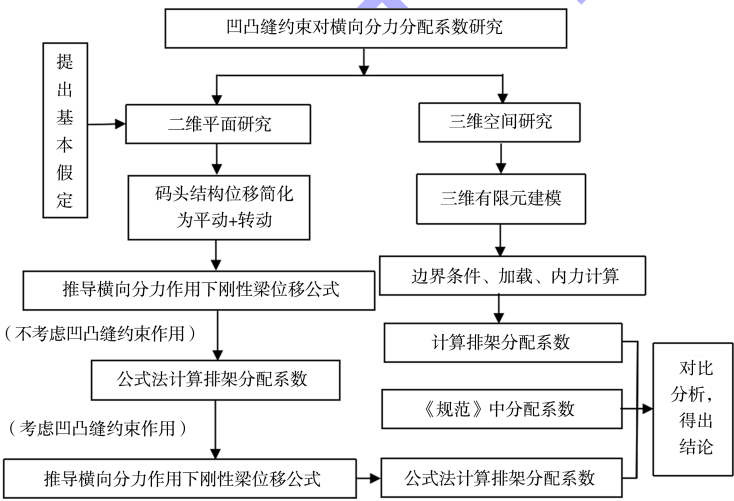


图 1 研究思路

2 高桩码头横向分力分配系数公式

2.1 基本假定

- 1) 码头结构在横向分力作用下，水平方向按弹性支座刚性连续梁计算，排架桩基视为侧向弹性支撑。
- 2) 码头结构在横向分力作用下，发生平动和绕刚度中心的转动，不考虑自身微小变形，即在使用方向发生直线位移。
- 3) 忽略码头桩基轴向变形，将桩基视作两端固接的杆系结构。
- 4) 码头横向分力在水平向传递仅考虑相邻两

- 个结构段作用，不考虑第 3 个结构段。
- 5) 将凹凸缝简化为铰支座，只传递水平力，不传递弯矩。
- 6) 桩基水平向和纵向刚度相同。

2.2 排架水平刚度 k

针对全直桩码头，忽略轴向变形，仅考虑发生横向变形，将桩基视作两端固定梁，采用结构力学中的形常数公式，单樁排架刚度 k 为排架各桩基刚度之和，即：

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \sum_{i=1}^n \frac{12E_i I_i}{l_i^3} \tag{1}$$

式中: k_i 为节点(桩基) i 的刚度; E_i 为桩基弹性模量; I_i 为截面惯性矩; l_i 为桩基长度。

2.3 排架转动刚度 k_φ

在横向分力作用下, 码头整体结构发生转动角度 φ , 对于单根桩, 由于上部结构对桩基约束, 也发生转动角度 φ (较小), 即产生扭矩 T ; 同时沿水平向发生位移 Δ 产生剪力, 即产生弯矩 M 。 Δ 和排架转动刚度 k_φ 可表示为:

$$\Delta = \tan\varphi \cdot y_i \approx \varphi \cdot y_i \quad (2)$$

$$k_\varphi = \frac{M_\varphi}{\varphi} = \frac{T+M}{\varphi} \quad (3)$$

代入相关参数, 可得:

$$k_\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{G_i I_{pi}}{l_i} + k \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (4)$$

式中: G_i 为剪切模量; I_{pi} 为桩基截面惯性矩; l_i 为桩基长度; M_φ 为单榭排架发生转角 φ 产生的力偶矩; k 为排架水平刚度; y_i 为桩基到转动原点距离。

2.4 独立结构段不考虑凹凸缝约束

假设在横向分力 F 作用下, 码头结构简化为弹性支座刚性连续梁, 发生的直线位移公式为:

$$Y_i = \alpha X_i + \beta \quad (5)$$

式中: Y_i 为节点 i 发生的竖向合位移; X_i 为节点 i 横坐标; α 为刚性梁发生的转角; β 为刚性梁竖向位移。

由平衡条件 $\sum_{i=1}^m k Y_i = F$ 、 $\sum_{i=1}^m M_i = 0$ (M_i 为第 i 个节点的弯矩) 整理得:

$$\alpha = \frac{Fe - \sum_{i=1}^m k \beta x_i}{k_\varphi + \sum_{i=1}^m k x_i^2} = \frac{Fe}{k_\varphi + \sum_{i=1}^m k x_i^2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{F}{\sum_{i=1}^m k} = \frac{F}{mk} \quad (7)$$

$$R_i = k Y_i = k \left(\frac{Fe}{k_\varphi + \sum_{i=1}^m k x_i^2} X_i + \frac{F}{mk} \right) = \frac{FekX_i}{k_\varphi + \sum_{i=1}^m k x_i^2} + \frac{F}{m} \quad (8)$$

式中: R_i 为第 i 排架横向分力分配系数; F 为横向

分力; e 为横向分力 F 到转动原点的距离; k 为排架水平刚度; x_i 为弹性支座横坐标; X_i 为节点 i 横坐标; k_φ 为排架转动刚度; m 为弹性支座个数。

2.5 相邻结构段考虑凹凸缝约束

假设在横向分力 F 作用下, 码头结构简化为弹性支座刚性连续梁, 发生的直线位移公式为:

$$Y'_i = \alpha' X'_i + \beta' \quad (9)$$

式中: Y'_i 为节点 i 发生的竖向合位移; X'_i 为节点 i 横坐标; α' 为刚性梁发生的转角; β' 为刚性梁竖向位移。

由平衡条件 $\sum_{i=1}^m R'_i + Q = F$ (R'_i 为考虑凹凸缝约束第 i 排架横向分力分配系数)、 $\sum_{i=1}^m M_i = 0$ 整理得:

$$\alpha' = \frac{Fe - Qd}{k_\varphi + \sum_{i=1}^m k x_i^2} \quad (10)$$

$$\beta' = \frac{F - Q}{\sum_{i=1}^m k} = \frac{F - Q}{mk} \quad (11)$$

式中: e 为横向分力 F 作用点到转动原点的距离; Q 为凹凸缝处约束反力; d 为凹凸缝到转动原点的距离; k 为排架刚度; x_i 为弹性支座横坐标; k_φ 为排架转动刚度; m 为弹性支座个数。

由变形协调原理, 即由于铰处(凹凸缝位置)左侧和右侧位移相等, 可得铰处(凹凸缝)约束反力:

$$Q = \frac{Femd + F \sum_{i=1}^m x_i^2}{2(md^2 + \sum_{i=1}^m x_i^2 + \frac{k_\varphi}{k})} \quad (12)$$

则排架横向分力分配系数公式为:

$$R'_i = k Y'_i = \frac{Fe - Qd}{\frac{k_\varphi}{k} + \sum_{i=1}^m x_i^2} \cdot X_i + \frac{F - Q}{m} \quad (13)$$

3 实例分析

3.1 工程概况

码头采用高桩梁板式结构, 见图 2。选取其中一个结构段长 38 m, 共 7 榭排架, 排架间距为

表 1 基本参数

混凝土强度等级	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量 G/GPa	极惯性矩 I_p/m^4	桩径 D/m
C30	32.0	0.2	2.50	13.3	0.098 125	1.0

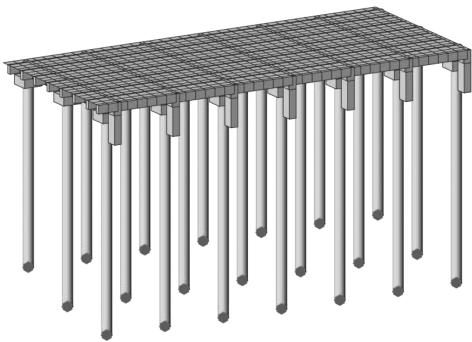


图 3 有限元计算模型

3.3 计算结果分析

横向分力作用对结构的不利位置通常在结构自由端部,分析横向水平力作用在第 1 樁,计算结果见表 2。可以看出,在不同工况下,采用公式法计算各排架分配系数与有限元计算结果吻合较好,误差控制在 5%以内,说明实际情况下,码头结构本身并非完全刚体,会发生一定变形,误差在可接受范围内。可见本文提供的公式可较准确地表达码头受横向分力作用的剪力分配规律。与规范值相比,采用公式法计算各排架分配系数均偏小,误差在 10%以内,主要是公式中考虑了排架转动刚度影响所致。

表 2 横向分力作用于第 1 樁排架时的分配系数

分配系数	规范值	公式法	有限元法	公式法与有限元计算误差百分比/%	规范与公式计算误差百分比/%
R_1	0.465	0.429	0.426	0.70	7.74
R_2	0.357	0.334	0.327	2.14	6.44
R_3	0.250	0.238	0.236	0.85	4.80
R_4	0.143	0.143	0.141	1.42	0.00
R_5	0.034	0.047	0.047	-	-
R_6	-0.071	-0.048	-0.046	-	-
R_7	-0.178	-0.143	-0.145	-	-

注:仅统计排架横向分力分配系数在 0.1 以上的误差百分比,下同。

凹凸缝处约束反力 Q (占单位力的比例) 见表 3。可以看出,随着横向分力作用位置逐渐靠近凹凸缝,约束反力(绝对值)由大变小再大,说明码头结构段绕刚度中心发生转动,凹凸缝对结构段发生相对受拉约束,呈现负值;随着横向分力不断向凹凸缝靠近,凹凸缝对结构段受压约束,变化为正值。横向分力作用在码头结构端部时,码头发生转动变形较大,凹凸缝限制码头结构变形作用明显,横向分力作用在码头结构中间排架时,码头发生平动位移为主,凹凸缝约束变形能力减弱。

表 3 凹凸缝处约束反力 Q

工况	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Q	-0.188	-0.077	0.033	0.143	0.253	0.363	0.473

限于篇幅,只罗列受凹凸缝约束影响较大的 P1、P2、P6 和 P7 工况各排架横向分力分配系数,见表 4。可以看出,与规范取值相比,考虑凹凸缝约束公式法计算分配系数普遍较小,最危险排架分配系数在 P1 工况(外力作用自由端部)、P2、P6 和 P7 工况(外力作用在凹凸缝位置)分别减小 13.76%、9.8%、50.98% 和 52.26%。由此可知,凹凸缝约束作用能减小各排架承担的横向剪力影响,对于码头整体结构中间段削减作用更加明显。如果中间段采用自由端计算取值,规范值明显偏大,导致结构设计过于保守,造价偏高。与公式法计算比较,有限元计算的分配系数普遍偏小,P1、P2、P6 和 P7 工况,最危险排架分配系数分别减少 10.77%、3.88%、4.79% 和 12.12%。由此可知,考虑凹凸缝约束作用对码头横向分力分配系数影响较大,建议高桩码头结构设计应考虑凹凸缝水平力传递,优化结构方案,提高方案竞争力。

表 4 横向分力作用于第 1、2、6、7 榀排架的分配系数

工况	分配系数	规范值	公式法	有限元法	规范与公式法计算误差/%	有限元与公式法计算误差/%
P1	R_1	0.465	0.401	0.362	13.76	-10.77
	R_2	0.357	0.324	0.294	9.24	-10.20
	R_3	0.250	0.247	0.220	1.20	-12.27
	R_4	0.143	0.170	0.140	-18.88	-21.43
	R_5	0.034	0.093	0.084	-	-
	R_6	-0.071	0.016	-0.017	-	-
	R_7	-0.178	-0.061	-0.049	65.73	-24.49
P2	R_1	0.357	0.322	0.310	9.80	-3.88
	R_2	0.286	0.266	0.267	7.00	0.38
	R_3	0.214	0.210	0.204	1.89	-2.92
	R_4	0.143	0.154	0.144	-7.63	-6.88
	R_5	0.071	0.098	0.089	-	-
	R_6	0	0.042	0.037	-	-
	R_7	-0.071	-0.014	-0.012	-	-
P6	R_1	-0.071	0.007	0.017	-	-
	R_2	0	0.035	0.037	-	-
	R_3	0.071	0.063	0.060	-	-
	R_4	0.143	0.091	0.083	36.36	-9.64
	R_5	0.214	0.119	0.109	44.39	-9.17
	R_6	0.286	0.147	0.138	48.60	-6.52
	R_7	0.357	0.175	0.167	50.98	-4.79
P7	R_1	-0.178	-0.072	-0.049	59.55	-46.94
	R_2	-0.071	-0.023	-0.012	-	-
	R_3	0.034	0.026	0.023	-	-
	R_4	0.143	0.075	0.06	47.55	-25.00
	R_5	0.250	0.124	0.104	50.40	-19.23
	R_6	0.357	0.173	0.148	51.54	-16.89
	R_7	0.465	0.222	0.198	52.26	-12.12

横向分力作用下，码头齿缝受拉、压剪作用明显，对水平力的传递效率影响因素也较多，如结构缝布置形式(悬臂式或者简支式)、结构缝宽、齿缝构造、凹凸缝填料特性以及实际施工质量等。本文的推导公式简化凹凸缝接触为铰支，公式暂未考虑齿缝细部构造、填料摩擦系数、结构相对变形等影响，但其模型简单，受力明确，计算快捷，计算结果较为可信，可为横力作用下的高桩码头排架分配系数研究提供一定的参考价值。

通过式(12)、(13)可知，高桩码头排架横向分力分配系数与桩基长度 l 、排架横坐标平方和、结构段跨数、桩纵向坐标平方和密切相关，实际工程设计中，可考虑增加排架横坐标平方和即减

小排架间距，增加结构段跨数；增加桩纵坐标平方和，即减小桩间距，增加纵向桩数，减小排架剪力，同时对比造价投资，选择最佳方案。

排架横向分力分配系数对比见图 4。可以看出，受到凹凸缝约束作用，码头结构转动中心均向凹凸缝一边移动，采用有限元法和公式法，码头结构转动中心基本在第 4 榀和第 5 榀排架之间，位置基本重合，由于有限元计算考虑了非线性变形，导致有限元法计算结果偏小，但总体变形趋势基本一致。规范法和公式法将码头结构简化为刚性梁，码头各排架变形均呈现一条直线，忽略凹凸缝约束作用，按规范取值码头转动中心在对称中心第 4 榀排架位置，P1~P7 工况，各排架分配系数明显大于公式法计算，发生转动变形也存在较大差异。

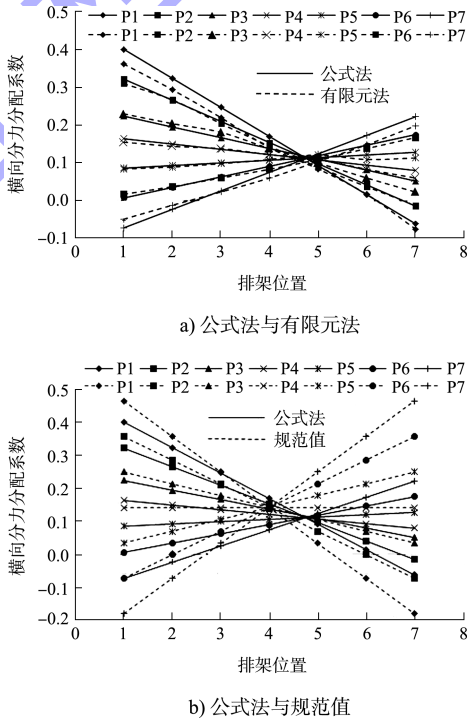


图 4 排架横向分力分配系数对比

4 结论

1) 本文推导的不考虑凹凸缝约束反力的横向分力在高桩码头各排架的分配系数计算公式与三维有限元计算结果比较吻合，排架主要控制性分配系数值较规范值偏小。

2) 凹凸缝约束导致码头结构转动中心向凹凸缝一边移动，各排架横向分力分配系数与规范值差异较大。考虑凹凸缝约束作用，高桩码头排架横向分

力分配系数普遍减小, 在码头整体结构中部(凹凸缝附近), 横向分力分配系数削减作用明显。

3) 高桩码头排架横向分力分配系数受码头凹凸缝约束以外, 可考虑增加排架横坐标平方和, 即减小排架间距、增加结构段跨数; 增加桩纵坐标平方和, 即减小桩间距, 增加纵向桩数, 综合考虑后选择最佳方案。

4) 考虑凹凸缝约束作用对码头横向分力分配系数影响较大, 建议高桩码头结构设计应考虑凹凸缝水平力传递, 优化结构方案。本文推导的计算公式可为码头排架横向分力分配系数研究提供一定的参考价值。

参考文献:

[1] 赵颖.高桩码头整体模型试验研究[J].人民长江, 1980(S1): 74-80, 34.

(上接第 28 页)

3) 人工保护后, 横沙浅滩滩面总体由冲刷转为淤积态势, 南侧串沟整体淤积, 但保滩工程自然促淤效果较差, 须结合航道疏浚土资源利用改善浅滩结构及质量, 进一步稳定北港口门河势, 保障深水航道安全运行。

参考文献:

[1] 赵德招, 刘杰, 张俊勇, 等.长江口河势近 15 年变化特征及其对河口治理的启示[J].长江科学院院报, 2014, 31(7): 1-6, 20.

[2] 王俊, 田淳, 张志林.长江口河道演变规律与治理研究[M].北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[3] 吴焱, 闫红飞, 戴文鸿.长江口北港分流通道近期演变及治理措施[J].人民长江, 2016, 47(24): 12-16, 31.

[4] 张俊勇, 陈立, 吴华林, 等.长江口近期河道演变特征[J].泥沙研究, 2015(2): 74-80.

[5] 李琦, 徐贵泉.长江口滩涂资源变化分析[J].中国水利, 2016(5): 19-21, 24.

[6] 陈海英, 孙鹏, 楼飞, 等.长江口横沙东滩滩涂整治利用和展望[J].水运工程, 2017(11): 152-155, 160.

[7] 刘杰, 吴华林, 程海峰, 等.长江口横沙东滩中长期开发利用研究[J].水运工程, 2012(7): 111-116.

[8] 路川藤, 罗小峰, 徐群, 等.基于非结构网格的长江口横

[2] 张祖贤, 朱秀峰, 王炳煌.水平力在码头排架中的分配试验研究[J].水运工程, 1991(12): 13-19.

[3] 王多垠, 张华平, 史青芬, 等.大水位差全直桩框架码头排架中的水平撞击力分配系数研究[J].中国港湾建设, 2009, 28(3): 23-25, 40.

[4] 张志明, 何良德, 李新国, 等.在水平静力作用下全直桩码头结构整体简化计算方法[J].中国港湾建设, 2011(5): 1-6.

[5] 陶桂兰, 董思远.全直桩码头横向水平力分配计算方法探讨[J].工程力学, 2014, 31(6): 245-249.

[6] 刘洋, 吴遵奇, 刘阳阳.高桩码头凹凸缝结构水平力传递的有限元计算[J].水运工程, 2014(10): 53-57.

[7] 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.

(本文编辑 王璁)

沙东滩新陆域数值模拟[J].水利水电技术, 2017, 48(9): 72-76, 125.

[9] 曹慧江, 王大伟, 袁文昊.长江口横沙东滩建港水动力泥沙环境三维数值模拟[J].水运工程, 2015(12): 74-79.

[10] 包起帆, 楼飞, 孟舒.长江口航道疏浚土综合利用及新横沙生态成陆探索[J].水运工程, 2018(11): 80-84, 125.

[11] 水利部.长江口综合整治开发规划[R].北京: 水利部, 2008.

[12] 缴健, 高祥宇, 丁磊, 等.分汊河口地貌演变对整治工程的响应[J].海洋工程, 2019, 37(3): 143-150.

[13] 栾华龙, 刘同宦, 丁平兴.长江口河段近期冲淤演变过程及未来趋势预测[J].工程科学与技术, 2019, 51(2): 21-27.

[14] ROELVINK J A.Coastal morphodynamic evolution techniques[J].Coastal engineering, 2005, 53(2/3): 277-287.

[15] 张长宽, 龚政, 陈永平, 等.潮滩演变研究进展及前沿问题[C]//中国海洋工程学会.第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下).北京: 海洋出版社, 2017: 7-14.

[16] 陈语, 何青, 张雨宁, 等.长江口浑浊带洪季悬沙粒度分布特征[J].泥沙研究, 2019, 44(5): 48-55.

[17] 付桂.长江口近期来水来沙量及输沙粒径的变化[J].水运工程, 2018(2): 105-110.

(本文编辑 王璁)