

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.001

刘明维, 李鹏飞, 陈刚, 等. 内河框架码头构件重要性评价[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 1-7. (LIU Ming-wei, LI Peng-fei, CHEN Gang, et al. Importance evaluation and weak link analysis for members of overhead vertical wharfs located at inland rivers [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015 (1): 1-7.)

内河框架码头构件重要性评价

刘明维^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 翁珍燕³

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 福建省招标公司, 福建 福州 350002)

摘要:全直桩框架码头通过能力大,能适应内河大水位差条件要求,在我国西南山区河流码头建设中广泛应用。该结构由于构件数量多、受力条件复杂,构件传力途径和薄弱环节难以确定。运用基于结构广义刚度的重要性评价方法,分别计算船舶荷载作用下和荷载组合作用下框架码头构件重要性系数,对传力途径及薄弱环节进行分析。结果表明:桩柱的重要性普遍大于梁,桩柱的重要性呈现“上小下大”的趋势,梁的重要性则与船舶撞击位置有关;通过重要性系数分析可知,前排桩基、后排桩基、最高层前边梁、排架底层最后方节点和最前方节点等5处为内河框架码头的薄弱环节,在设计中应预留足够安全储备;框架码头的主要传力途径由结构最外层构件组成。研究结果可为码头结构优化提供参考依据。

关键词:全直桩框架码头;重要性评价;薄弱环节;传力途径

中图分类号: U656.1⁺24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)01-0001-07

山区河流渠化河段往往具有大水位差、大水深的复杂水文条件,以及陡岸坡、浅覆盖层甚至裸岩等特殊地质环境,建设高桩码头不能照搬沿海传统的高桩码头形式。在此背景下,内河框架码头结构应运而生,此类码头采用大直径全直桩,多层框架型式,能适应30 m以上水位差及浅覆盖层甚至裸岩地质条件^[1]。目前应用于三峡库区重庆寸滩港、果园港、涪陵黄旗港、万州江南沱口港及云南水富等港口中。内河框架码头由于构件数量多、受力条件复杂,因而构件传力途径和薄弱环节难以确定。在已建部分码头中已经出现个别构件发生开裂和变形等严重问题,如何评价此类复杂结构构件重要性并开展结构优化研究十分必要。

构件重要性是指构件对整体结构性能的影响程度^[2]。而整体结构的性能有多方面,包括整体结构的承载力、变形能力、刚度、稳定性、可靠度、使用空间等。如果某个构件在一个结构中过分重要,则该构件的破坏比较容易引起结构大范围的破坏。构件重要性评价可以通过计算构件重要性系数实现。构件的重要性系数越小,其对结构性能的影响越小,当重要性系数为0时,构件失效对结构体系没有影响;反之,构件的重要性系数越大,其对结构性能的影响越大,当重要性系数为1时,构件失效将导致结构局部或整体失效。重要性系数是对结构重要性的量化分析。

构件的重要性系数从本质上分主要有两类:反映构件对结构整体冗余度贡献的重要性系数^[3-4]和反映构件对结构应变能变化贡献的重要性系数^[5-6]。其中第一类重要性系数主要评价结构系统的自身属性,从结构系统的拓扑关系和刚度分布分析结构构件的重要性层次,获得结构安全性和易损性的信息。J. T. Pinto等^[7]和J. Agarwal等^[8]基于构件间的拓扑关系,通过一定的规则拆解结构,模拟各种失效过程,寻找最易失

收稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAB05B04);国家自然科学基金资助项目(51479014);交通运输部科技计划资助项目(2014329814070)

作者简介: 刘明维(1972-),男,贵州遵义人,教授,博士,主要从事港口工程设计计算理论方面的教学研究工作。

E-mail: mingwei_liu@126.com

效方案,找到了杆系结构潜在的最危险构件。第二类重要性系数从能量角度出发具体地考虑结构在某一常规荷载作用下应变能的分布和流向。两类重要性系数的区别主要体现在第二类重要性系数在第一类的基础上考虑了外荷载对结构重要性的影响^[9]。

已有研究成果表明,结构构件的重要性评价不仅取决于结构系统自身的力学性能,也取决于作用荷载情况,还与所选取的结构性能的评价指标有关。本文以反应构件对结构应变能变化贡献的重要性系数为衡量指标,针对内河框架码头结构特点,借助数值模拟方法,分别计算仅有船舶荷载作用和荷载组合作用下码头各个构件的重要性系数,研究框架码头构件重要性的一般规律,并分析整个码头中结构的薄弱环节,为结构优化和加固提出建议。

1 基于结构广义刚度的重要性评价方法

1.1 构件重要性系数计算原理

反应构件对结构应变能变化贡献的重要性系数有多种计算方法,本文采用基于结构广义刚度的重要性评价方法^[10]对内河框架码头单个排架分别在仅有船舶荷载作用和荷载组合作用下的构件重要性进行分析。该方法采用线弹性分析,以拆除构件对广义结构刚度的影响程度作为构件重要性的评价指标,并进一步将该指标转化为结构变形能损失率,具体推导过程如下:

在一个保守系统中外力做功等于结构应变能的增加,在结构线弹性范围内,结构在外荷载下的应变能为:

$$U = 0.5 \mathbf{F}^T \mathbf{D} \quad (1)$$

在弹性范围内,结构的位移向量为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F} \quad (2)$$

其中荷载向量可以用荷载分布向量 \mathbf{V} 和最大荷载数值表示:

$$\mathbf{F} = F_{\max} \mathbf{V} \quad (3)$$

由式(1)~(3)得:

$$U = 0.5 F_{\max}^2 \mathbf{V}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V} \quad (4)$$

式中: \mathbf{K} 为结构的刚度矩阵。

定义 $K_{\text{stru}}^{-1} = \mathbf{V}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}$, K_{stru} 即为结构广义刚度,除考虑结构刚度属性外还考虑外荷载属性。

所以有:

$$U = 0.5 F_{\max}^2 K_{\text{stru}}^{-1} \quad (5)$$

重要性系数主要反应构件损伤对结构广义刚度的影响,其公式^[10]为:

$$I = 1 - K_{\text{stru},f} / K_{\text{stru},o} \quad (6)$$

式中: $K_{\text{stru},o}$ 和 $K_{\text{stru},f}$ 分别为结构完整和某构件失效后的结构广义刚度。

由式(5)可得:

$$K_{\text{stru}} = 0.5 F_{\max}^2 1/U \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得:

$$I = 1 - U_o / U_f \quad (8)$$

式中: U_o 和 U_f 分别为结构完整和某构件失效后的结构应变能。

除桩柱梁这三类普通构件外,节点作为一类特殊的构件,起到连接构件传递能量的重要作用,若节点损坏,将导致与其相连的所有构件失效。在计算得到各构件重要性系数的基础上有必要进一步确定节点的重要性系数。节点的重要性主要由与其相连接的构件决定,连接的构件数量越多,重要性越大,则节点越重要^[10],为量化该指标,现定义节点重要性系数的计算公式如下:

$$J_m = \sum_{n=1}^{a_m} I_{mn} \quad (9)$$

式中: J_m 为第 m 号节点的重要性系数; I_{mn} 为与第 m 号节点相连的第 n 号构件的重要性系数; a_m 为与第 m 号节点相连的构件总数。与构件重要性系数含义相似,节点的重要性系数越大,该节点就越重要。

1.2 构件重要性系数计算步骤

构件重要性系数的计算最主要是计算结构的应变能,为提高计算效率,本文选用大型通用有限元程序 ANSYS 进行建模计算。

(1)利用 ANSYS 建立架空直立式码头单个排架有限元模型^[11],并赋予其材料属性。由于该方法(基于结构广义刚度的重要性评价方法)只适用于线弹性分析,所以所有材料均采用线弹性本构。

(2) 分别在船舶荷载作用下和荷载组合作用下的不同弹性工况, 计算完整结构的总应变能。

(3) 分别在对应工况下, 利用 ANSYS 自带的生死单元技术逐个杀死单元, 计算杀死单元后残余结构的总应变能。

(4) 将第(2), (3)步中计算得到的各个构件的总应变能和杀死单元后残余结构的总应变能代入式(1)计算, 求得对应构件的重要性系数。

(5) 将所求得各个构件的重要性系数代入式(9)求得对应节点的重要性系数。

通过对构件和节点的重要性系数进行比较分析就可以评判构件和节点的受力安全余量大小的相对程度, 以及它对整个结构体系的受力可靠性是否有较大影响, 以此来判断构件和节点在整个结构中的重要性。

2 结构重要性评价

2.1 船舶荷载作用下构件重要性计算

以重庆港果园二期集装箱码头工程为例, 码头断面如图 1 所示, 除考虑结构自重外, 仅考虑船舶撞击力一种水平荷载作用, 根据不同水位情况, 从下至上分 6 层系缆, 对应撞击位置用第 1 层、第 2 层、...、第 6 层表示。有限元计算模型如图 2 所示, 模型中桩基底部固结, 其他边界均自由。构件编号如图 3 所示。

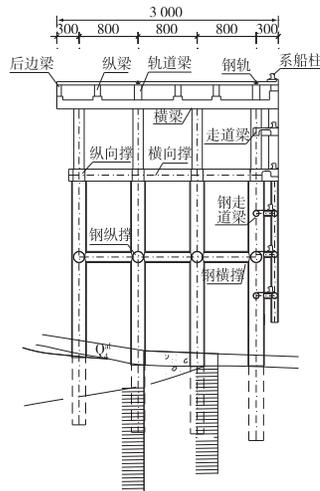


图 1 码头断面(单位: cm)

Fig. 1 Sectional drawing of wharf (unit: cm)

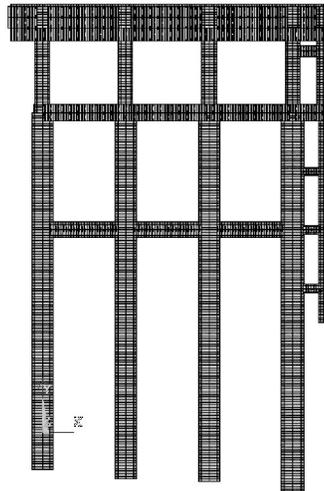


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 A FEM model

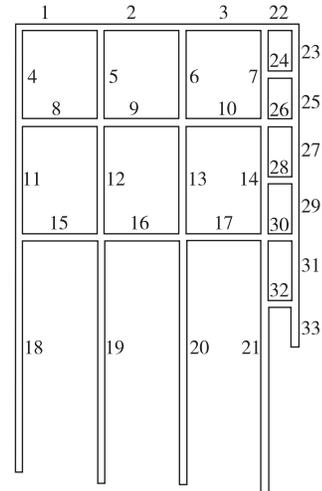


图 3 构件编号

Fig. 3 Series number of members

采用基于广义刚度的构件重要性评价方法, 计算撞击在 6 个不同系缆层下各构件的重要性系数, 撞击位置为第 6 层(码头面)的计算结果见表 1。限于篇幅, 省略撞击第 1~5 层计算结果表, 通过图构件重要性计算结果图表达(见图 4)。节点重要性系数由计算结果图中的重要性系数相加得到, 此处不再赘述。

表 1 各个构件重要性系数计算结果 (水平荷载+自重, 撞击位置为第 6 层)

Tab.1 Calculated importance factors of each member (under horizontal load and dead load, impact at the sixth layer)

构件编号	U_f	重要性系数	构件编号	U_f	重要性系数
1	7 609. 56	0. 099	12	10 949. 00	0. 374
2	7 749. 21	0. 115	13	11 049. 90	0. 380
3	10 923. 70	0. 372	14	13 204. 60	0. 481
4	10 755. 40	0. 363	15	7 109. 57	0. 036
5	8 072. 32	0. 151	16	7 055. 29	0. 028
6	8 087. 72	0. 152	17	7 057. 50	0. 029
7	7 280. 23	0. 058	18	29 530. 00	0. 768

(续表)

构件编号	U_f	重要性系数	构件编号	U_f	重要性系数
8	7 784. 07	0. 119	19	14 277. 90	0. 520
9	7 638. 41	0. 102	20	14 549. 80	0. 529
10	7 747. 60	0. 115	21	31 936. 50	0. 785
11	19 059. 00	0. 640			

注:各构件的 U_0 均为 6 856. 03。

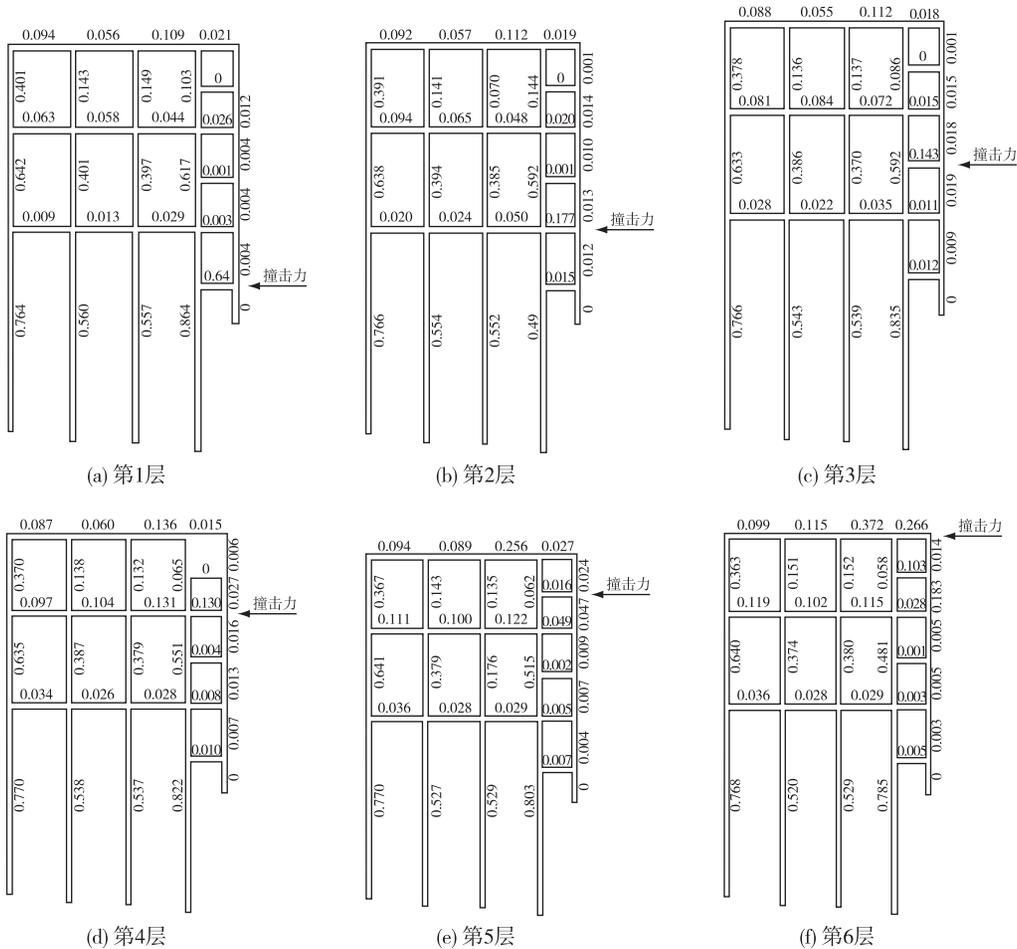


图 4 构件重要性计算结果

Fig. 4 Calculated results of members

由图 4 可见:

(1) 船舶荷载撞击位置从第 1 层至第 6 层,桩、柱的重要性系数都是底层桩>第 2 层柱>最高层柱,最高层柱的重要性系数从前往后整体呈现增大趋势,而第 2 层柱以及最底层桩的重要性系数中间小两边大。梁的重要性系数与船舶撞击位置有关,总体而言呈现“下小上大”的趋势,且最高层前边梁(3 号构件)的重要性系数始终最大。除此,桩柱的重要性一般大于梁。通过重要性系数可知,最前排桩基(21 号构件)、最后排桩基(18 号构件)以及最高层前边梁(3 号构件)是整个码头结构中的薄弱环节,设计时需提高安全储备。

(2) 船舶撞击位置对构件重要性也有较大影响。撞击位置越低,上层横梁重要性系数越小,桩的重要性系数越大;相反,撞击位置越高,上层横梁重要性系数增大,桩的重要性系数减小。因此,码头设计中,低水位时应更加重视桩基受力验算,高水位时应更加重视上层横梁受力验算。

(3)排架底层最后方节点(连接构件 11,15 和 18 号)和最前方节点(连接构件 14,17,21,30 号)重要性系数相当且均大于其他节点,这说明框架码头排架结构最危险的节点在排架底层最后方和排架底层最前方,若这 2 个节点发生破坏将对结构造成巨大损害。所以在设计时应采取相应的措施对这两个节点进行加固处理。

(4)结构的主要传力途径可以根据各构件的重要性系数而定,从上述计算结果可以看出,框架码头结构主要传力途径有两条,一条从受荷位置沿最前排桩基传至地基,另一条从受荷位置沿前排柱传至顶层横梁,再沿顶层横梁传至后排桩基,最后传至地基。上述所求得最重要构件以及最重要节点均在主要传力途径上。

2.2 荷载组合作用下构件重要性计算

内河框架码头结构计算中的荷载组合情况较为复杂,舒丹等^[12-13]采用单位力法对可能出现的荷载工况进行有限元计算,并采用 MATLAB 软件编程对计算结果进行组合,得到了结构最不利荷载组合工况。本文研究 2 种工况:撞击力+自重作用+满布堆货+门机荷载,其中撞击力位置考虑 2 种工况,撞击第 1 层(工况 1)和撞击第 6 层(工况 2)。撞击第 6 层的计算结果见表 2,2 种荷载组合工况下,码头构件重要性系数计算结果见图 5。

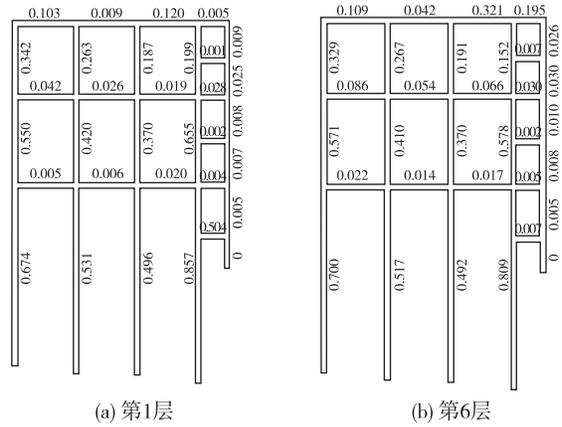


图 5 组合荷载下结构重要性系数计算结果
Fig. 5 Calculated results of importance factors under combined load

表 2 各个构件重要性系数计算结果 (工况 2)

Tab.2 Calculated importance factors of each member (working condition 2)

构件编号	U_f	重要性系数	构件编号	U_f	重要性系数
1	12 268.9	0.109	12	18 536.9	0.410
2	11 408.1	0.042	13	17 359.5	0.370
3	16 102.9	0.321	14	25 876.5	0.578
4	16 294.5	0.329	15	11 179.0	0.022
5	14 908.4	0.267	16	11 087.1	0.014
6	13 512.7	0.191	17	11 113.5	0.017
7	12 889.5	0.152	18	36 425.8	0.700
8	11 952.5	0.086	19	22 605.6	0.517
9	11 556.1	0.054	20	21 495.0	0.492
10	11 700.6	0.066	21	57 086.5	0.809
11	25 483.9	0.571			

注:各构件的 U_0 均为 10 928.1。

分析组合荷载作用下的构件重要性参数可见:

(1)组合荷载作用下,桩与柱的构件重要性系数依然呈现“上小下大”的趋势,且普遍大于梁,这与土木工程领域中“强柱弱梁”的设计思想相吻合。最高层柱的重要性系数从前往后依然呈现增大趋势,第 2 层柱以及最底层桩的重要性系数依然呈现“中间小两边大”的趋势。但是与仅有船舶撞击力相比,荷载组合作用下,每一层桩柱构件重要性系数的离差变小,这说明框架结构单纯承受横向力时受力集中,容易发生构件破坏,而承受竖向和横向耦合作用时结构的受力更为均匀,其整体性能更强。所以,框架码头结构受力验算及使用,不能忽视码头面无堆货时的运营安全。

(2)组合荷载作用下船舶撞击位置对构件重要性的影响规律与仅有船舶撞击力作用下的规律相似:低水位时桩的重要性系数较大,高水位时上层横梁的重要性系数较大。但在组合荷载作用下,船舶撞击位置改

变引起的桩和横梁的重要性系数的改变量减小,这说明竖向力作用使船舶撞击位置对框架码头构件重要性系数的影响减弱。

(3) 无论船舶撞击力作用在最底层还是最高层,组合荷载作用下排架底层最前方节点(连接构件 14, 17, 21, 30 号)重要性系数始终最大,而排架底层最后方节点(连接构件 11, 15 和 28 号)重要性系数较仅受船舶撞击力作用时有所减小,与中间节点重要性系数相当。这进一步说明了组合荷载使结构中间构件受力更为充分。不过由于组合荷载作用下排架底层最前方节点(连接构件 14, 17, 21, 30 号)受力更为集中,所以设计施工中应采取相应措施,提高其安全度。

(4) 组合荷载作用下主要的传力途径是从船舶撞击处沿前排桩基传至地基,其次是沿顶层横梁传至后排桩基最后传到地基,中间桩的重要性相对较弱,这与仅受船舶荷载作用时的规律相近。

3 结 语

(1) 运用基于结构广义刚度的重要性评价方法,分别计算结构受水平荷载和组合荷载时框架码头构件的重要性系数。结果表明,桩与柱的构件重要性系数普遍比梁大,且桩的重要性系数>第2层柱>最高层柱,梁的重要性系数与船舶撞击位置相关,计算结果与土木工程领域中“强柱弱梁”的设计思想相吻合。

(2) 通过重要性系数可以判断内河框架码头的薄弱环节主要有5处:前排桩基、后排桩基、最高层前边梁、排架底层最后方节点和最前方节点。对于以上薄弱环节设计时应加强安全储备,施工中则应加强监管和检查确保薄弱环节的施工质量。

(3) 框架码头的主要传力途径由整个框架结构的最外围构件组成,共有2条,一条从船舶撞击处通过最前排桩基直接传至地基,另一条通过顶层横梁和最后排桩基传至地基。文中判断的薄弱环节均处在这两条主要传力途径上。

(4) 船舶撞击位置的改变对构件的重要性会产生一定影响,撞击位置越低,桩的重要性系数越大,撞击位置越低,横梁的重要性系数越大。在结构承载能力验算时要对上述2种情况加以重视。

(5) 单纯横向力作用下构件重要性系数离差较大,结构受力较为集中,竖向和横向耦合作用下构件重要性系数离差减小,结构受力更为均匀,承载能力发挥更加充分。因此码头面堆货对结构受力有一定积极影响,相反,设计中不应忽视码头面无堆货时的结构承载力验算。

参 考 文 献:

- [1] 王多垠, 宋成涛, 温焰清, 等. 三峡库区变动回水区架空直立式码头结构形式研究, 水运工程, 2011(3): 54-58. (WANG Duo-yin, SONG Cheng-tao, WEN Yan-qing, et al. On overhead wharf structural pattern in fluctuating backwater area of Three Gorges reservoir area[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(3): 54-58. (in Chinese))
- [2] 高扬. 结构鲁棒性定量计算中的构件重要性系数[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (GAO Yang. Importance coefficients of components in quantitative evaluation of structural robustness[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [3] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 746-750. (LIU Cheng-mao, LIU Xi-la. Stiffness-based evaluation of component importance and its relationship with redundancy [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 746-750. (in Chinese))
- [4] NAFDAY A M. System safety performance metrics for skeletal structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(3): 499-504.
- [5] 张雷明, 刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 45-49. (ZHANG Lei-ming, LIU Xi-la. Network of energy transfer in frame structures and its preliminary application[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 45-49. (in Chinese))
- [6] GHARAIBEH E S, FRANGOPOL D M, ONOUFRIOU T. Reliability-based importance assessment of structural members with applications to complex structures[J]. Computers & Structures, 2002, 80(12): 1113-1131.
- [7] PINTO J T, BLOCKLEY D I, WOODMAN N J. The risk of vulnerable failure[J]. Structural Safety, 2002, 24(2): 107-122.

- [8] AGARWAL J, BLOCKLEY D I, WOODMAN N J. Vulnerability of structural systems[J]. *Structural Safety*, 2003, 25(3): 263-286.
- [9] 高扬, 刘西拉. 结构鲁棒性评价中的构件重要性系数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2575-2584. (GAO Yang, LIU Xi-la. Importance coefficients of components in evaluation of structure robustness[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2575-2584. (in Chinese))
- [10] 叶列平, 林旭川, 曲哲, 等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. *建筑科学与工程学报*, 2010, 27(1): 1-6. (YE Lie-ping, LIN Xu-chuan, QU Zhe, et al. Evaluating method of element importance of structural system based on generalized structural stiffness[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2010, 27(1): 1-6. (in Chinese))
- [11] 刘明维, 翁珍燕, 杨洋, 等. 架空直立式码头船舶撞击力横向分配系数数值模拟[J]. *水运工程*, 2013(5): 63-67. (LIU Ming-wei, WENG Zhen-yan, YANG Yang, et al. Numerical simulation of lateral distribution coefficients of ship impact force on overhead vertical wharfs[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2013(5): 63-67. (in Chinese))
- [12] 舒丹, 刘明维, 吴林键, 等. 内河架空直立式码头三维空间结构构件最不利荷载工况组合算法[J]. *中国港湾建设*, 2014(2): 37-44. (SHU Dan, LIU Ming-wei, WU Lin-jian, et al. Algorithm for all components worst load case combinations in 3D structure of vertical-faced wharfs in inland rivers[J]. *China Harbour Engineering*, 2014(2): 37-44. (in Chinese))
- [13] 王多垠, 石兴勇, 丁德斌, 等. 内河架空直立式集装箱码头结构计算中的作用效应组合探讨[J]. *中国港湾建设*, 2005(4): 33-35. (WANG Duo-yin, SHI Xing-yong, DING De-bin, et al. Study on loading combinations in structural calculation of high-pile container wharfs in inland rivers [J]. *China Harbour Engineering*, 2005(4): 33-35. (in Chinese))

Importance evaluation and weak link analysis for members of overhead vertical wharfs located at inland rivers

LIU Ming-wei^{1,2}, LI Peng-fei^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, WENG Zhen-yan³

(1. *National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 3. *Fujian Tendering Corporation, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: As all-vertical-piled frame wharfs not only have large capacity but also are able to adapt to the conditions of large water level difference. Such wharfs are widely used in construction of ports located at southwest mountain rivers. However, this kind of structure has so many members and the force condition is so complicated that it is hard to determine the force transmission route and weak links of the members. A method for evaluating importance, which is based on generalized stiffness, is applied in calculating importance factors of wharf members, under the situation of only ship load and combined load, separately, and analyzing force transmission route and weak links. The analysis results indicate that piles are more important than beams. Generally, the upper members of the piles are less important than the lower members, and the importance of beams is related to the impact location of ships. According to importance factors, there are five weak links in the inland river wharfs: the front piles, piles located in back row, the front beam of the top layer, and the rear and front nodes of the bottom bent frame. So, enough safety stock for the above weak links should be reserved in design. The force transmission route of the frame wharf is mainly constituted by the outmost members. The research results will provide a reference basis for structure optimization of the frame wharfs.

Key words: all-vertical-piled frame wharf; importance evaluation; weak link; force transmission route