



应变能法在框架码头传力途径中的应用*

彭炳力^{1,2}, 刘明维^{1,2}, 陈 宇³, 陈 珏^{1,2}

(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. 重庆航天职业技术学院, 重庆 400074)

摘要: 基于应变能的基本原理, 建立框架码头三维有限元模型, 计算结构在弹性工作状态下对应 5 种撞击力工况的应变能。结果表明: 水平力沿码头横向的主要传力途径为直接受力构件→相邻横向构件→前排或后排桩基, 沿码头纵向的主要传力途径为直接受力构件→离作用位置最近的纵向构件; 撞击力作用在高水位时结构储存的应变能最大, 因此建议在高水位工况下进行结构稳定性验算; 码头结构外围的构件应变能较大, 特别是前、后排桩基、靠江侧横向构件以及与后排桩基相连纵向构件, 即力主要通过码头结构的外围构件进行传递, 设计中应将上述构件作为控制构件进行设计。

关键词: 框架码头; 传力途径; 应变能
中图分类号: TU 457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)12-0052-07

Application of strain energy method in framework wharf force transmission route

PENG Bing-li^{1,2}, LIU Ming-wei^{1,2}, CHEN Yu³, CHEN Jue^{1,2}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Chongqing Aerospace Polytechnic, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the basic principle of strain energy, we establish the framework wharf three-dimensional finite element model and calculate the structure strain energy in the condition of flexible work of five kinds of impact forces. The results show that the main force transmission route of horizontal force along the transverse of the wharf is from the direct stressed component to the adjacent transverse components, and then the front row or back row pile foundation. The main force transmission route of horizontal force along the longitudinal direction of the wharf is from the direct stressed component to the longitudinal components closest to the acting position. The structure stores the maximum strain energy when the impact force is applied to the high water level, therefore it is proposed to check the structural stability in high water conditions; The strain energy of the peripheral components are larger, especially the front row or back row pile foundation, river-side transverse members and longitudinal member connected with the back pile. In other words, the force mainly passes through the peripheral components of wharf structure, and these components should be designed as the control components.

Keywords: framework wharf; transmission route; strain energy

山区河流渠化河段往往具有大水位差、大水深、复杂的地质环境、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

收稿日期: 2015-05-08
*基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAB05B04)
作者简介: 彭炳力 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

头结构应运而生, 该类码头采用大直径全直桩, 多层框架形式, 能适应 30 m 以上水位差及浅覆盖层甚至裸岩地质条件^[1]。为便于施工, 现阶段内河框架码头上下层联系撑分别使用钢筋混凝土和钢壳结构, 桩基采用钢护筒和钢筋混凝土联合受力结构^[2], 形成钢护筒嵌岩桩框架码头这一新的结构形式。这使得该类结构在水平力作用下的受力特性与传统高桩码头有很大的区别, 同时也使码头的受力情况更为复杂。因此有必要弄清水平力在码头横向排架上的传递路径, 进而解决水平力在框架码头排架中的传递问题, 为框架码头的设计施工提供理论依据。

应变能是指物体变形过程中贮存在物体内部的势能。通过计算构件中贮存的能量反映出构件在承载时所发挥的作用大小, 进而得出构件在整个结构中的重要程度。已有研究表明构件的重要程度也可通过重要性系数^[3-4]来反映。在结构构件的重要性评价指标方面, 根据是否考虑荷载作用可将评价指标分为两类^[5]: 基于结构自身属性以及结构性能。基于结构自身属性的评价指标有结构拓扑关系^[6]和系统刚度^[7]; 基于结构性能的指标有系统承载能力、能量评估失效概率等。相对于上述两类指标来说, 应变能更能直观反映出构件对荷载传递的贡献度。任倩等^[7]的研究表明: 在线弹性、小变形等基本假设条件下, 尽管杆件应变能与外作用力不成线性关系, 但是杆件组合变形的应变能仍然可以表示为各相应基本变形的应变能之和。本文以重庆某码头工程为依托, 基于应变能的基本原理, 建立框架码头三维有限元模型, 计算结构在弹性工作状态下对应的 5 种撞击力工况的应变能。以能量的变化阐述水平力在框架码头排架中的传力途径, 得出水平力在框架码头中的传递规律。

1 应变能法

1.1 基本方法

对保守结构系统, 外荷载作功应完全贮存到结构内, 转化为结构的应变能, 其总应变能 V_ε 应

等于所有杆件应变能的和。如果结构受荷前的初始状态应变能为零, 那么结构受荷后的应变能也等于外荷载所作的功, 根据能量守恒, 积蓄在弹性体内的应变能在数值上等于外力所做作的功即:

$$V_\varepsilon = W \quad (1)$$

由于结构构件在拉伸、扭转、弯曲和剪切的情况下都能把内力转换为结构中的应变能, 所以本文通过分别计算出各种工况作用下各构件的应变能, 以应变能的方法得出结构的关键传力途径。

1.2 算例验证

本文通过某一基本算例进行理论方法和有限元方法的验证, 以论证有限元方法的正确性。

选取一杆件(图 1), 长度 L 为 1 m, 直径 $d = 0.1$ m, 弹模 E 为 26 GPa, 施加 10 kN 垂直力, 假定杆件始终处于弹性工作状态, 计算其应变能。

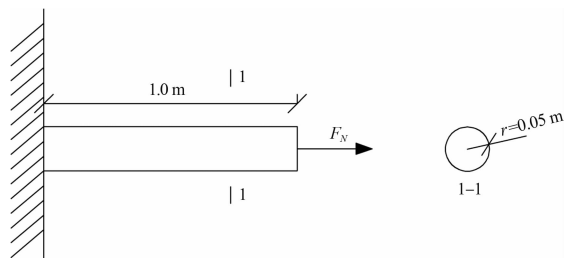


图 1 算例简图

1) 材料力学^[9]的计算公式。

$$V_\varepsilon = W = \frac{1}{2} F \Delta l = \frac{1}{2} F_N \Delta l \quad (2)$$

$$\Delta l = \frac{F_N l}{EA} = \frac{F l}{EA} \quad (3)$$

$$V_\varepsilon = \frac{F_N^2 l}{2EA} = \frac{F^2 l}{2EA} = \frac{EA}{2l} \Delta l^2 \quad (4)$$

经计算得: $\Delta l = 4.9 \times 10^{-5}$ m; $V_\varepsilon = 0.245$ J。

2) 通过有限元软件进行验证计算。

采用有限元软件 ANSYS 建立模型, 选用梁单元建模进行静力计算。

计算结果见图 2, 位移与应变能分别为 0.049 mm 和 0.245 044 J, 与理论计算符合。因此可以采用本方法进行钢护筒嵌岩桩框架码头在水平力作用下的应变能计算。

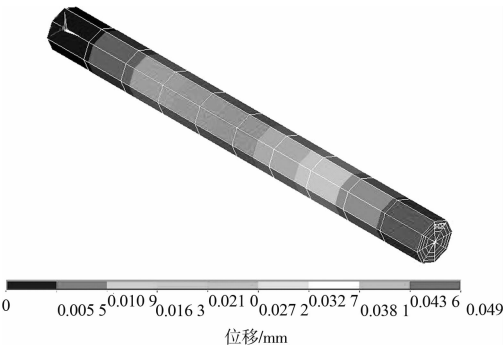


图 2 有限元模型结果

1.3 有限元法计算构件应变能

通过分别计算结构整体的应变能和缺失某一构件情况应变能，在仅有自重荷载作用的弹性工况下，利用 ANSYS 自带的生死单元技术逐个杀死单元，在水平荷载作用下，计算杀死单元后残余结构的总应变能^[10]。通过两种情况下的应变能之差，得出杀死构件的应变能。

$$U_f - U_0 = U_i \tag{5}$$

式中： U_0 为结构完整时的结构总应变能； U_f 为某构件失效后的结构总应变能； U_i 为缺失构件的理论应变能。 U_i 为 U_f 与 U_0 之差，是由于某构件失效后结构的整体性要大于构件失效前结构的整体性，因此相同外力作用下某构件失效后结构的整体变形要比结构完整时的变形大，所以外荷载所做的功也更多，结构内储存的应变能也越大，即 $U_f > U_0$ 。

2 框架码头传力途径分析

2.1 工程概况

本文以重庆某码头工程为依托，码头采用框架直立式结构形式，码头共设置两层纵横撑，上层为钢筋混凝土纵撑（高 1.6 m × 宽 1.6 m）、横撑（高 2 m × 宽 1.6 m）；下层为直径 1.5 m 钢纵横撑；码头排架采用 4 排大直径钢护筒嵌岩灌注桩基，第 1 排桩直径 2.2 m，后 3 排桩直径 2.0 m，均外设钢护筒；钢筋混凝土联系撑以上采用直径 1.4 m 的立柱支撑横梁及纵梁；横梁截面形式为倒 T 型，边梁、轨道梁和一般纵梁截面均采用矩形，面板为整体现浇厚度 0.5 m 的钢筋混凝土面板；系靠船构件由 1.3 m × 1.3 m 的钢筋混凝土立柱和直径 1.0 m 的钢管纵横联系梁系组成；码头平台每段共 4 跨，排架间距 8 m，码头断面见图 3。

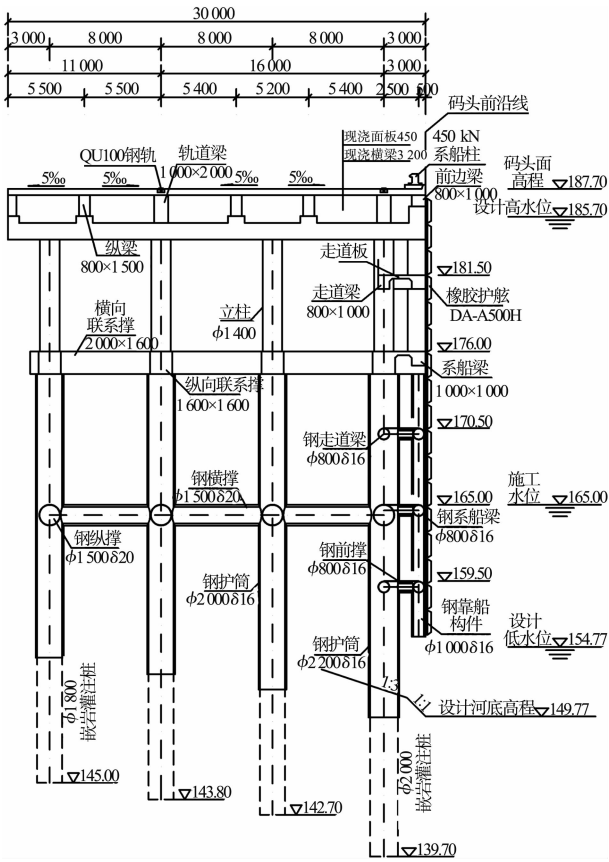


图 3 码头断面（高程：m，尺寸：mm）

2.2 计算模型

本文选取中间排架各构件按从左往右、从上往下的顺序进行编号；并考虑与排架相连纵向的联系撑，也按顺序进行编号（因结构完全对称，所以对于对称构件只对一侧进行编号），见图 4。

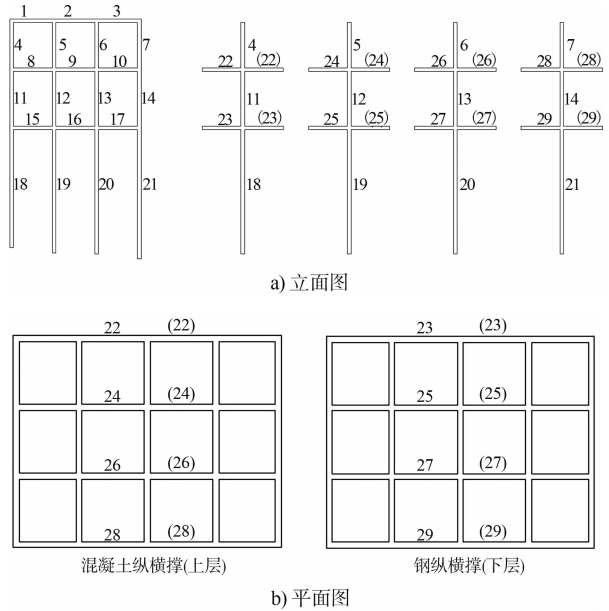


图 4 计算模型纵横撑杆件编号

由于本文中码头结构为全直桩码头, 其承受水平荷载的能力远小于承受竖向荷载的能力, 且船舶撞击力是码头结构主要承受的水平荷载, 所以本文选择撞击力作用在中间排架时不同水位对应的 5 种撞击力工况作为数值模型的计算工况 (表 1), 撞击力作用位置见图 5。

表 1 计算工况		
工况	荷载	水位/m
1	ZJ-1	181.5
2	ZJ-2	176.0
3	ZJ-3	170.5
4	ZJ-4	165.0
5	ZJ-5	159.5

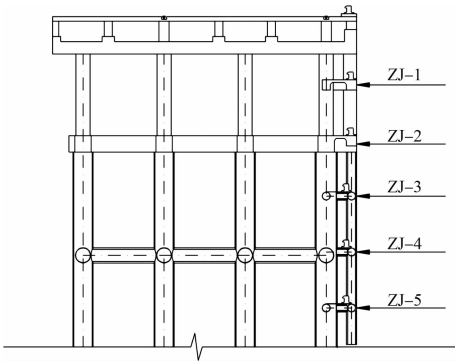


图 5 撞击力作用位置

ANSYS 单元生死功能并不是将“杀死”的单元从模型中删除, 而是将其刚度矩阵乘以一个很小的因子, 因子缺省值为 10^{-6} 。杀死单元的单元载荷将为 0, 从而不对载荷向量生效。在单元建立方面, 必须在 PREP7 中生成所有单元, 包括后面要被激活的单元。在加载及求解方面, 在第 1 个载荷步中, 选择分析类型和所有的分析选项。对于所有单元生死应用, 在第一个载荷步中应设置

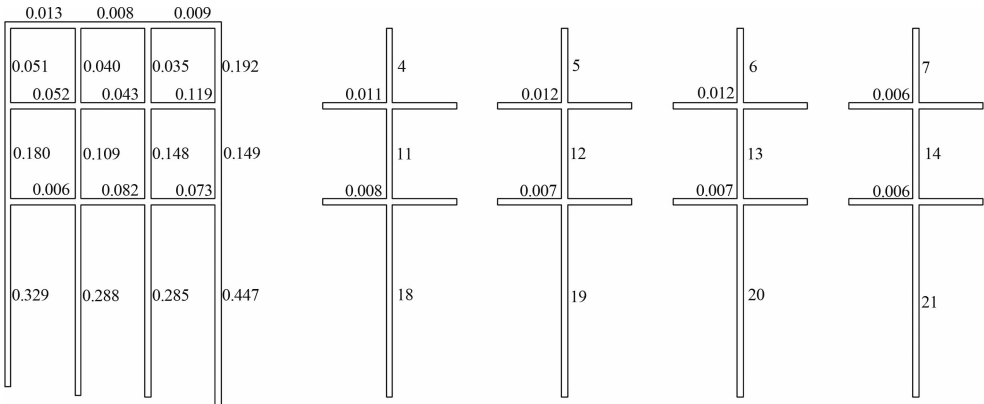


图 7 工况 1 结果 (单位: J)

牛顿-拉夫森选项。单元在载荷步的第 1 个子步被杀死 (或激活), 然后在整个载荷步中保持该状态。

考虑码头正常工作状态, 选取一个码头分段 (5 榭 4 跨排架) 建立三维模型 (图 6)。桩基采用桩芯混凝土及钢护筒联合受力复合截面, 桩、纵横梁、联系撑等构件均采用弹性梁单元 (Beam188); 码头面板采用壳单元 (shell63), 各节点的连接形式均设置为刚性连接。在材料参数设置方面, 钢筋混凝土弹性模量 $E = 3.0 \times 10^7$ kPa, 泊松比 $\nu = 0.17$, 密度 $\rho = 2.45$ t/m³; 钢弹性模量 $E = 2.1 \times 10^8$ kPa, 泊松比 $\nu = 0.3$, 密度 $\rho = 7.8$ t/m³。在边界条件方面, 桩基嵌岩段设置为固结。

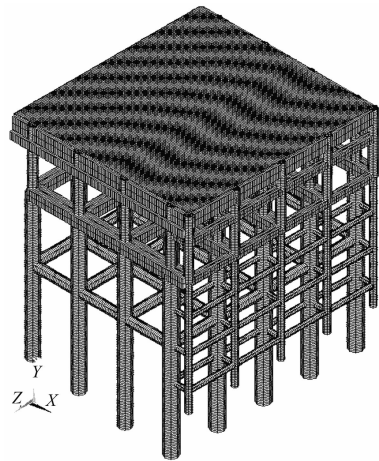


图 6 有限元计算模型

2.3 传力途径分析

计算单位水平力在各工况作用下各构件的应变能 (表 2) 与结构总的应变能 (表 3), 这里以工况 1 的计算结果为例 (图 7)。由于撞击力作用在结构中间排架且码头结构是完全对称的, 因此纵向构件仅标出一侧的应变能, 另一侧与之相同。

表 2 工况 1 下各构件应变能 J

构件编号	U_o	U_f	构件应变能
1	4.495	4.508 25	0.013 25
2	4.495	4.502 58	0.007 58
3	4.495	4.504 25	0.009 25
4	4.495	4.546 16	0.051 16
5	4.495	4.535 23	0.040 23
6	4.495	4.530 53	0.035 53
7	4.495	4.687 23	0.192 23
8	4.495	4.547 36	0.052 36
9	4.495	4.538 60	0.043 60
10	4.495	4.614 20	0.119 20
11	4.495	4.674 98	0.179 98
12	4.495	4.604 77	0.109 77
13	4.495	4.643 34	0.148 34
14	4.495	4.644 19	0.149 19
15	4.495	4.501 49	0.006 49
16	4.495	4.577 40	0.082 40
17	4.495	4.568 19	0.073 19
18	4.495	4.824 76	0.329 76
19	4.495	4.783 08	0.288 08
20	4.495	4.780 45	0.285 45
21	4.495	4.941 76	0.446 76
22	4.495	4.506 61	0.011 61
23	4.495	4.503 72	0.008 72
24	4.495	4.506 94	0.011 94
25	4.495	4.502 44	0.007 44
26	4.495	4.507 12	0.012 12
27	4.495	4.502 11	0.007 11
28	4.495	4.501 73	0.006 73
29	4.495	4.501 96	0.006 96

表 3 工况 1 下结构总应变能

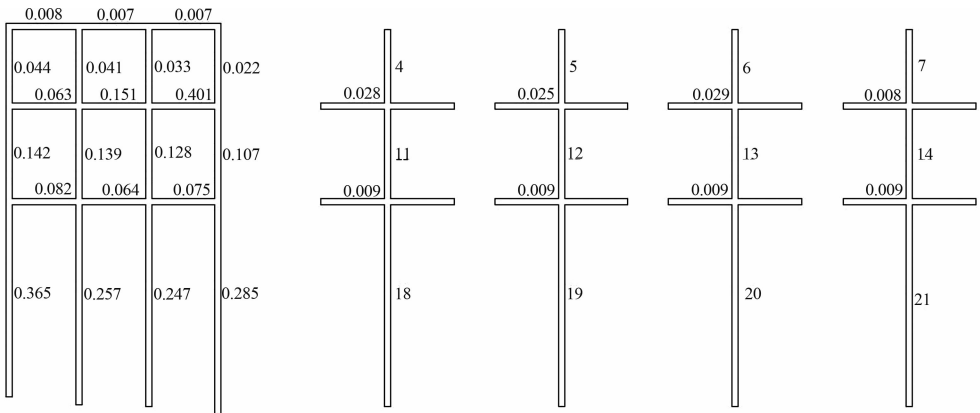
工况	1	2	3	4	5
应变能/J	4.50	3.75	3.82	3.42	3.56

结合表 3 及图 7 看来, 工况 1 结构系统总的应变能为 4.495 J。当构件处于同一层面时, 位于两侧的构件应变能要大于内侧构件, 以构件 18、19、20、21 为例, 其对应的应变能分别为 0.33、0.29、0.29、0.45 J, 18[#]、21[#]构件为码头结构的最后排和最前排桩基。在其他层面同样也存在这个规律, 这说明码头结构的主要受力构件分布于该码头结构的外侧。构件 7 的应变能要明显大于同层面其他构件, 这是由于构件 7 是直接承受撞击力的构件。对于不同层面的竖向构件来说, 位置越低对应的应变能越大, 这是由于高水位撞击时, 水平力通过直接作用的构件传到相邻的联系撑, 再通过竖向构件传到地基, 因此离地基越近的构件其应变能就越大。

工况 2~5 的结果见图 8。

从计算结果可以看出:

- 1) 码头结构系统总的应变能随着水平力作用位置的上升基本上呈增大的趋势, 即: 当船舶作用力处于高水位时, 系统存储的能量最大 (4.495 J), 结构的势能最大。
- 2) 随着水平力作用位置的下移, 桩基的最大应变能从后排桩基转移到了前排桩基, 当水平力作用在高水位时, 水平力在结构横向方向的主要路径是: 受力构件→相邻的横向构件→后排桩基, 这是因为高水位时水平力作用形成了倾覆力矩, 而钢纵横撑及以上部分由于钢纵横撑以及混凝土纵横撑的设置, 其整体刚度很大, 因此可将包括钢纵横撑及以上部分的变形视为刚体绕后排桩支承点的转动, 所以后排桩的受力较大; 当水平力



a) 工况2

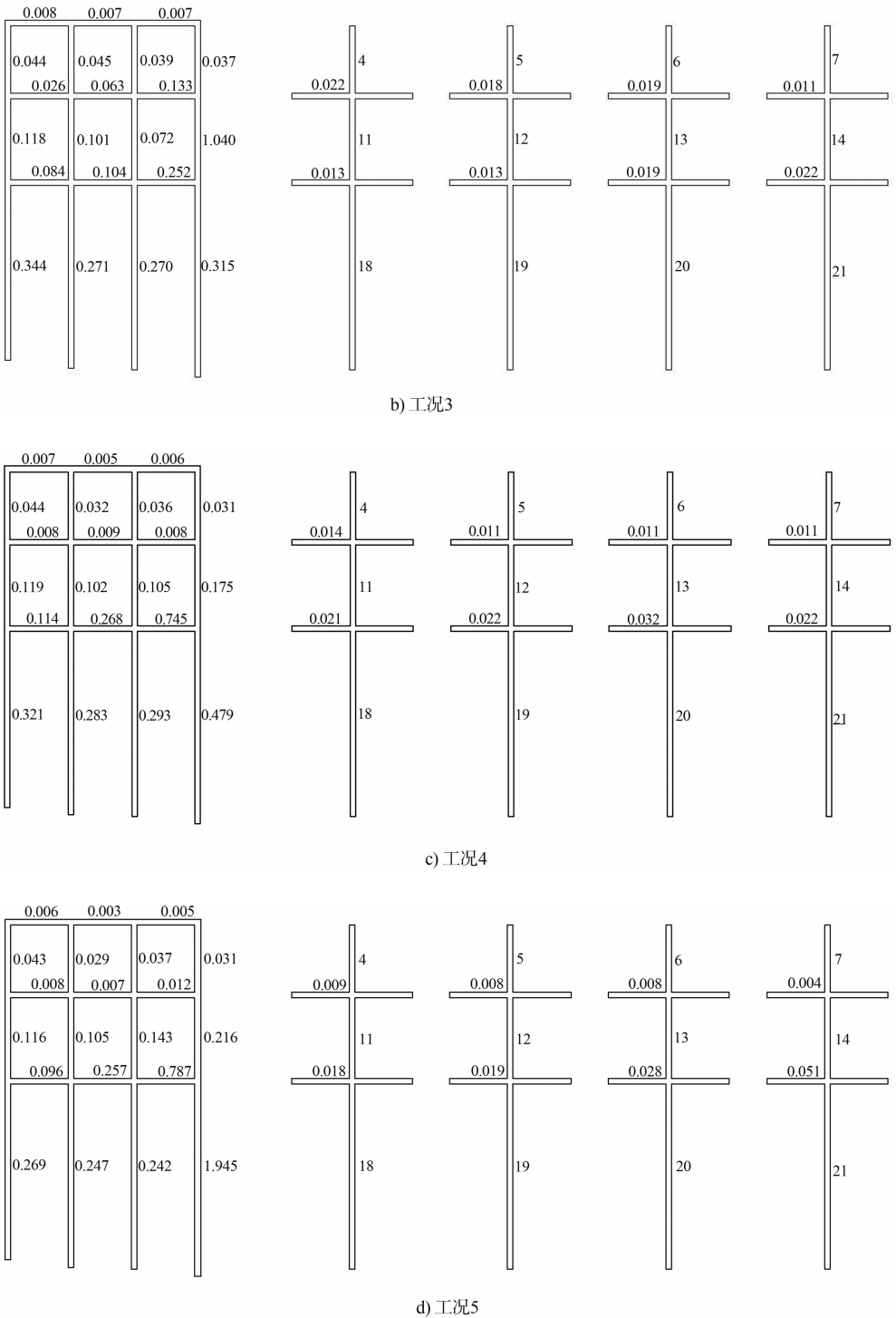


图 8 构件应变能（单位：J）

作用在低水位时，主要路径是：受力构件→相邻的横向构件→前排桩基，是因为钢纵横撑及其以上部分的整体刚度大，其刚度相对于前排桩基来说要大得多，因此在水平力作用下前排桩基的变形要远大于钢纵横撑及其以上部分的变形，所以力的传递除了直接受力构件及相邻横向构件外，

大部分直接由前排桩承担。无论撞击位置在哪一层，构件储存能量的大小都是：桩 > 第 2 层柱 > 最高层柱。且同一排架相邻的竖向、横向及纵向构件之间，竖向构件的应变能均大于横向和纵向构件。

3) 水平力在纵向方向的传递主要是通过离作

用位置最近的纵向构件进行传递。应变能的变化趋势跟桩基的趋势相同，即纵撑的最大应变能随着水平力作用位置的下移，从后排截面转移到了前截面。

4) 撞击位置越低，横梁构件及上层柱构件中的能量越少，当撞击位置为最底层情况时，上部横梁基本为零，说明当撞击位置在最底层时，对上部结构影响较小，但前排桩基中存贮了较大的能量。分析原因主要是此位置为撞击直接受力部位，该构件承受的剪力较大造成此构件应变能偏大。

3 结 论

1) 随着撞击位置的降低，结构的总应变能逐渐减小。即结构的变形随撞击位置的降低而减小。所以在考虑码头结构整体的稳定性计算时，建议取高水位工况进行复核算。

2) 随着撞击位置的变化，水平力沿结构横向的主要传力途径为：直接受力构件→相邻横向构件→前排或后排桩基；水平力沿结构纵向的主要传力途径为：直接受力构件→离作用位置最近纵向构件。并且相对整个码头结构来说，竖向构件的重要性要大于横向和纵向构件，这与土木工程中的“强柱弱梁”思想相符。

3) 直接受撞击力作用的位置构件应变能较大，因此对于直接受力的构件应适当加强。此外，能量聚集主要出现在桩基以及结构直接受力位置。前后排桩基、靠江侧横向构件以及与后排桩基相连的纵向构件的应变能较大，即主要传力构件均

分布于框架码头结构的外围。工程中应将上述构件作为控制构件进行设计。

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[J].水运工程,2011(3):54-58.

[2] 汪承志,刘建国,石兴勇.钢护筒与钢筋混凝土联合受力的内河大水差架空直立式码头力学特性分析[J].水运工程,2012(6):115-120.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 杨想红.基于结构应变能的组合空腹板架结构构件重要性评估方法研究[J].科学技术与工程,2014,14(16):1 671-1 815.

[6] Agarwal J, Blockley D, Woodman N. Vulnerability of structural systems [J]. Structural Safety, 2003, 25 (3): 263-286.

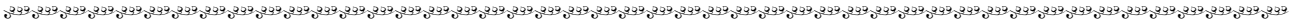
[7] Starossek U, Haberland M. Approaches to measures of structural robustness [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 7(7-8): 625-631.

[8] 任倩,应祖光.关于杆件组合变形的应变能[J].浙江科技学院学报,2004,16(2):98-100.

[9] 孙训芳.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2009:19-21.

[10] 刘明维,李鹏飞,陈刚,等.内河框架码头构件重要性评价[J].水利水电工程学报,2015(1):1-6.

(本文编辑 武亚庆)



著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。