



# 尖子山船闸上闸首软岩复合桩基受力特性\*

李俊龙<sup>1</sup>, 何良德<sup>1</sup>, 郝文字<sup>2</sup>, 胡定宽<sup>1</sup>, 王 航<sup>1</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 为研究船闸分离式闸首复合桩基的受力特性, 以尖子山船闸为依托, 建立软岩上边墩复合桩基有限元模型, 分析边墩位移、变形特征, 提出桩顶力简化算法, 研究软岩竖向力分担比  $\xi_v$  的影响因素。结果表明: 边墩以刚体位移为主, 检修期横向转动、竖轴扭转最大, 桩基布置宜外密内疏; 由于存在破碎带,  $\xi_v$  仅有 11.5%;  $\xi_v$  近似与置换率呈双曲线关系、与软岩模量呈幂函数关系, 桩间距越小, 置换率越大, 软岩模量越大, 桩岩系数比越小,  $\xi_v$  越大。破碎带固结灌浆处理后, 提高了桩基承载力, 还使  $\xi_v$  有效提高到 26.8%。

**关键词:** 分离式闸首; 软岩; 复合桩基; 置换率; 桩岩(土)系数比; 荷载分担比

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0124-07

## Mechanical characteristics of composite pile foundation in soft rock area at upper lock head of Jianzishan ship lock

LI Jun-long<sup>1</sup>, HE Liang-de<sup>1</sup>, HAO Wen-yu<sup>2</sup>, HU Ding-kuan<sup>1</sup>, WANG Hang<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Sichuan Transportation Survey and Design Institute, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** To study the mechanical characteristics of composite pile foundation at separated lock head, we establish a finite element model of composite pile foundation at separated lock head constructed on soft rock based on Jianzishan lock, analyze the deflections and deformations of the side piers, propose the simplification algorithm of pile top force, and research the influence factors of vertical load sharing ratio of soft rock  $\xi_v$ . The results show that the side pier is dominated by rigid body displacement, the lateral rotation and vertical axis torsion are the largest during the maintenance period, and the pile foundation layout should be dense outside and sparse inside. Because of the crushing zones,  $\xi_v$  is only 11.5%. The relation between  $\xi_v$  and replacement ratio may be approximated by a hyperbola, and the relation between  $\xi_v$  and the soft modulus by a power function. The smaller the pile spacing is, the higher the displacement rate, the higher the soft modulus, the smaller the pile-rock coefficient ratio, the higher  $\xi_v$  is. The consolidation grout treatment of the crushing zone can help increase the bearing capacity of the pile and improve  $\xi_v$  to 26.8% effectively.

**Keywords:** separated lock head; soft rock; composite pile foundation; replacement ratio; pile-rock (soil) coefficient ratio; load sharing ratio

船闸水工建筑物采用灌注桩、管桩等刚性桩时有两种处理方法: 1) 刚性桩与结构物之间设置碎石或素混凝土褥垫层<sup>[1-3]</sup>, 形成复合地基<sup>[4]</sup>, 利

用桩顶刺入垫层形成桩与桩间土沉降差, 充分发挥地基土承载力; 2) 刚性桩伸入底板与结构固接<sup>[5]</sup>, 形成复合桩基, 将结构荷载通过基桩穿过

收稿日期: 2020-07-13

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007); 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室开放基金资助项目(YT918001)

作者简介: 李俊龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口航道工程结构。

软弱层传递给力学性质较好的持力层, 充分发挥桩基的承载能力, 同时使桩间土分担一部分荷载。

赵朝志<sup>[6]</sup>、周俊波等<sup>[7]</sup>建立复合桩基上船闸闸首结构有限元模型, 研究闸首-桩-土共同作用机理, 分析施工宽缝期、完建期以及使用期桩土分担比的变化规律。李成强等<sup>[8]</sup>通过对比分析闸室结构刚性桩复合地基与复合桩基的承载特性差异, 得出 C10 素混凝土垫层可使桩间土分担比提高约 20%, 但闸室沉降有所增大。孙保虎等<sup>[9]</sup>给出复合桩基的地基沉陷系数计算方法, 能合理反映桩基布置、桩基参数以及地基土性质的影响, 较好解决了闸首底板内力简化计算问题。张守国<sup>[10]</sup>、伊西凯<sup>[11]</sup>针对闸首“预留宽缝、后期闭合”“分离施工、整体使用”的特点, 基于变刚度设计思想, 对闸首桩基布置进行优化布置研究。

四川岷江的尖子山、犍为、渠江风洞子等船闸覆盖层薄, 下卧软岩地基, 且层间破碎带较为发育, 闸首采用灌注桩处理的分离式结构。分离式边墩复合桩基在竖向偏心荷载作用下的压弯效应及在纵横向偏心荷载作用下的剪弯、扭剪效应明显。目前, 船闸复合桩基的研究多是针对软土地基, 对软岩地基开展的研究较少。《建筑桩基规范》<sup>[12]</sup>也只给出了土基承台效应系数经验值。本文依托尖子山船闸, 利用 Abaqus 软件建立有限元模型, 分析分离式边墩的变形特征、桩岩分担比, 提出一种估算桩顶力的简化方法, 探讨特征桩身内力的变化规律, 研究软岩分担比的影响因素, 为船闸复合桩基的设计和优化提供参考。

1 闸首边墩复合桩基模型

1.1 工程概况

尖子山Ⅳ级船闸, 设计船型 500 t 船舶(队), 闸室有效尺度为 120 m×16 m×3.5 m (长×宽×门槛水深), 设计水头 11.7 m, 采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统。

上闸首采用边墩、底板分离式结构, 边墩和底板间设有通缝, 通缝设置止水, 没有力和弯矩的传递, 选取上闸首靠岸侧边墩(内边墩)单独分

析。边墩总高度 23.5 m, 纵向长度 30.0 m, 横向宽度 17.2 m, 边墩内设置有空箱, 上下两排, 每排 4 个。边墩在高程 409.0 m 上、下分别采用 C25、C20 混凝土, 边墩结构见图 1。边墩底灌注桩采用 C30 钢筋混凝土, 桩径 1.4 m, 桩长 14.5 m, 基桩穿过层间挤压破碎带, 以中风化基岩为基础持力层, 桩基布置见图 2。

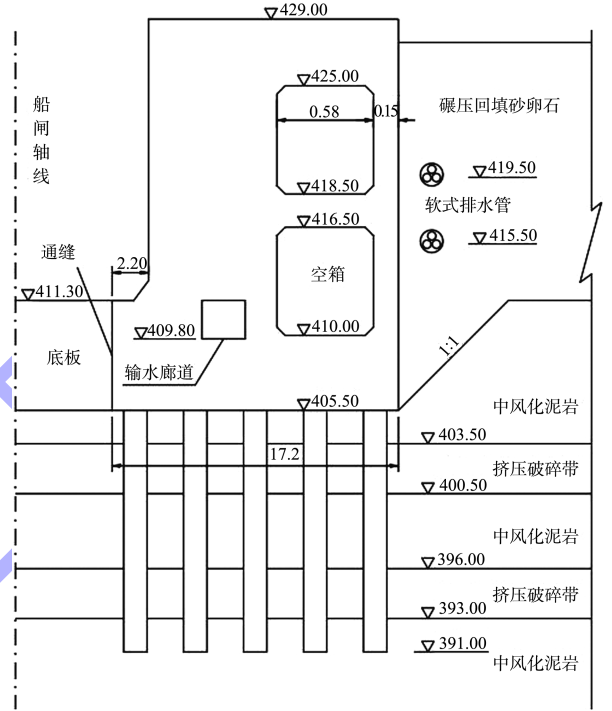


图 1 边墩结构断面 (单位: m)

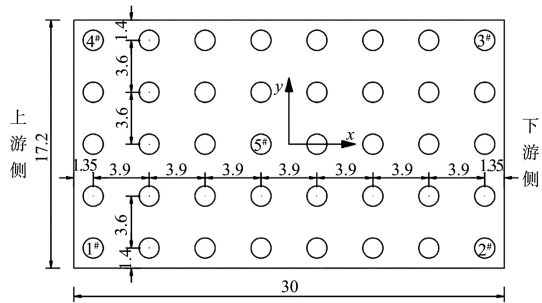


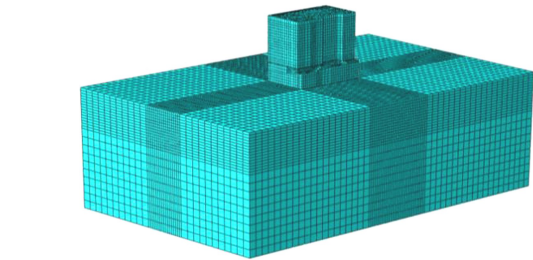
图 2 桩基布置 (单位: m)

1.2 模型建立

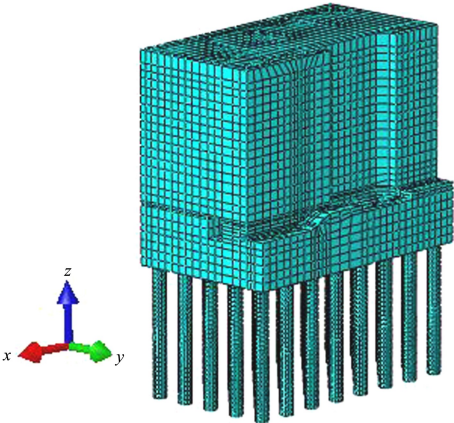
为减小地基边界对有限元分析带来的影响, 地基范围上下游侧各延伸 2 倍边墩长度 60.0 m, 左右横向各延伸 2 倍边墩宽度 34.4 m, 桩端向下延伸 2 倍桩长, 总深度 43.5 m, 约为边墩长度的 1.5 倍。地基地面采用固定约束, 四周侧面均采用

法向约束。在各计算工况下，地基侧面的竖向位移微小，附加竖向应力在深度内扩散充分，说明地基模型范围选取合理。软岩本构模型采用Mohr-Coulumb模型，结构与基桩采用线弹性模型，材料参数见表1。桩和岩基、边墩底面和岩基均设置接触，摩擦系数0.45。桩与边墩底面选择桩与边墩约束。模型网格采用C3D8单元划分，有限元模型见图3(纵向x轴向下游为正,横向y轴向内侧为正,竖向z轴向上为正)。

表 1 材料参数					
材料	天然密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	泊松 比	弹性模 量/MPa
中风化粉砂质泥岩	2.41	350	20	0.28	370
层间挤压破碎带	2.20	50	12	0.32	20
基桩	2.50	—	—	0.17	30×10 <sup>3</sup>
边墩 (C20 混凝土)	2.50	—	—	0.17	25×10 <sup>3</sup>
边墩 (C25 混凝土)	2.50	—	—	0.17	28×10 <sup>3</sup>



a) 整体模型



b) 边墩复合桩基

图 3 有限元模型

1.3 计算工况

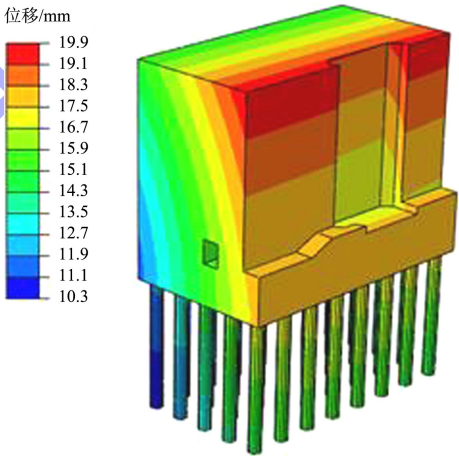
尖子山船闸上游最高、最低通航水位分别为426.00、425.50 m，下游最高、最低通航水位分

别为419.88、414.30 m。上游、下游检修水位分别为425.80、414.80 m。对完建期、高水位运行期及检修期3种工况进行计算分析，各个工况荷载包括横向荷载如回填土压力、边墩内侧水压力，纵向荷载如上下游水压力，竖向荷载如扬压力等参照《船闸水工建筑物设计规范》<sup>[13]</sup>计算，以面荷载的梯度形式施加在边墩相应位置上。

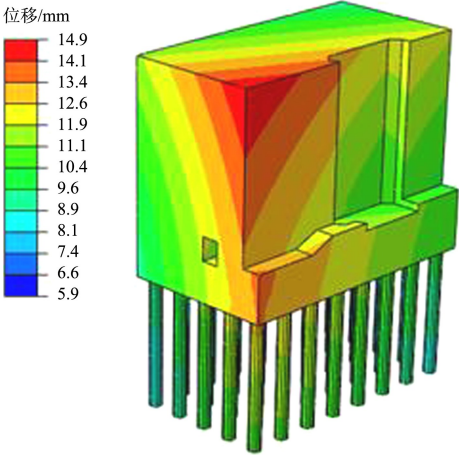
2 桩顶平面受力特性分析

2.1 边墩变形特征

3种工况下分离式边墩的位移云图见图4。可以看出，位移云图均为规则平直条带状分布，边墩的变形很小，可近似认为刚体运动。在压弯剪扭复杂荷载的作用下，边墩的平移和转动值见表2。



a) 完建期



b) 高水位运行期

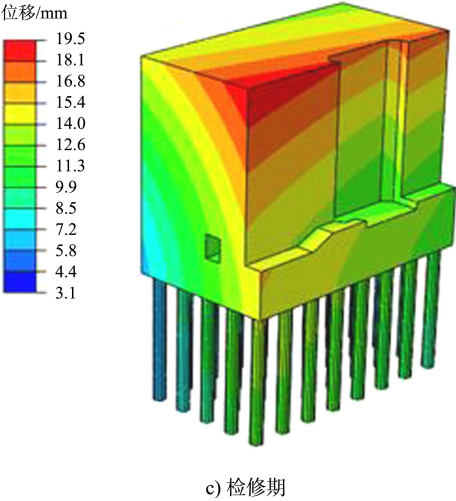


图 4 不同工况下边墩位移云图

在完建期竖向沉降最大, 由于没有上下游水压力等纵向荷载的作用, 纵向位移和纵向转动最小。横向位移和横向转动检修期最大, 完建期其次, 高水位运行期最小, 原因是在高水位运行期边墩内侧的水压力与外侧水土压力有所抵消。水平荷载在纵、横向分布不均匀是引起边墩扭转的原因, 高水位运行期边墩内侧水压力沿纵向变化较大, 检修期上游侧检修闸门的推力产生一定扭矩, 而完建期横向荷载沿纵向几乎没有变化, 产生的扭转较小。总体来看, 检修期边墩压弯剪扭的位移特征均较明显, 后文以此为代表工况进行分析。

表 2 边墩位移

工况	纵向位移/mm	横向位移/mm	竖向位移/mm	横向转动/(°)	纵向转动/(°)	扭转/(°)
完建期	0. 16	9. 38	-14. 54	-0. 041	$2. 8\times10^{-4}$	$3. 4\times10^{-5}$
高水位运行期	4. 41	7. 13	-9. 85	-0. 027	0. 009	0. 0025
检修期	4. 36	12. 70	-9. 07	-0. 054	0. 010	-0. 0031

2.2 桩岩分担比

对于船闸复合桩基, 上部荷载在边墩底面产生的纵向力、横向力、竖向力、横向弯矩、纵向弯矩和扭矩, 一部分由桩顶力以及桩顶力绕群桩形心轴的力矩来平衡, 剩下的部分由桩间软岩承担。检修期复合桩基的荷载分担比见表 3。可以看出, 桩基承担了绝大部分的上部荷载, 桩间软岩承担的荷载比例较小。从弯矩、扭矩的分担比来看, 桩顶力矩较小, 桩顶力形成的抵抗力矩较大, 说明上部荷载的弯矩、扭矩是引起桩顶力分布不均匀的主要原因。

表 3 检修工况荷载分担比

上部荷载	桩顶力矩 分担比/%	桩顶力形成的抵抗力矩 分担比/%	桩间软岩 分担比/%
纵向力	94. 5	-	5. 5
横向力	93. 4	-	6. 6
竖向力	88. 5	-	11. 5
横向弯矩	-7. 8	94. 5	13. 3
纵向弯矩	-5. 5	96. 4	9. 1
扭矩	0. 7	98. 0	1. 3

相对而言, 通过基底摩擦力参与的纵向力、横向力、扭转的分担比较小, 通过基底反力参与的竖向力和纵、横向弯矩的反担比较大。假设软

岩符合温克尔地基模型, 地基反力-沉降关系可用基床系数表示, 单桩的荷载分担比可表示为:

$$\eta_i = \frac{K_i \Delta_i}{(K_i + k S_{bi}) \Delta_i} = \frac{K_i}{K_i + (1 - \rho_i) k S_i} \tag{1}$$

$$\rho_i = \frac{S_{ai}}{S_i} \tag{2}$$

$$S_i = S_{ai} + S_{bi} \tag{3}$$

式中:  $\eta_i$  为第  $i$  根桩的竖向力分担比;  $S_i$  为桩的影响面积;  $S_{ai}$  为桩的截面面积;  $S_{bi}$  为桩影响范围内基底净面积;  $K_i$  为桩顶竖向刚度;  $k$  为桩间软岩的基床系数;  $\Delta_i$  为桩顶沉降;  $\rho_i$  为桩的面积置换率。由式(1)可以进一步得到群桩竖向力分担比为:

$$\eta_v = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{\sum_{i=1}^n K_i + (1 - \rho) k S} \tag{4}$$

式中:  $\eta_v$  为群桩竖向力分担比;  $\rho$  为群桩的面积置换率;  $S$  为基底面积。

忽略桩顶弯矩的贡献时, 群桩弯矩分担比可由下式估算:

$$\eta_M = \frac{\sum_{i=1}^n K_i r_i^2}{\sum_{i=1}^n K_i r_i^2 + k I'_M} \tag{5}$$



式中： $\eta_M$ 为群桩弯矩分担比； $I_M'$ 为基底净面积的惯性矩； $r_i$ 为第*i*基桩与群桩形心轴的距离。

式(4)表明软岩基床系数越小，桩顶刚度、面积置换率越大，桩的竖向力分担比就越大。式(5)中 $r_i^2$ 项表明，采用基底周边桩间距小、内部桩间距大的“外密内疏”布置形式有利于提高群桩弯矩分担比。尖子山船闸纵横向桩间距分别为2.79*d*、2.57*d*(*d*为桩径)，桩间距较小，面积置换率为11.9%，桩的竖向力分担比高达88.5%，横向、纵向弯矩分担比分别为86.7%、90.9%，扭矩分担比为98.7%，其工作状态更接近常规桩基础。

2.3 桩顶力的简化计算

由前文所述可知，尖子山船闸复合桩基桩顶力矩分担较小，桩顶轴力可采用下列公式计算：

$$F_{zi} = -\frac{M_y}{\sum_{j=1}^n x_j^2} x_i + \frac{M_x}{\sum_{j=1}^n y_j^2} y_i \tag{6}$$

式中： $F_{zi}$ 为第*i*根桩的桩顶轴力； $x_i$ 、 $y_i$ 为第*i*根桩的坐标； $M_x$ 、 $M_y$ 分别为横向、纵向弯矩； $n$ 为桩的数量； $x_j$ 、 $y_j$ 为以群桩形心为原点的桩坐标。

由于船闸边墩扭转效应较明显，应考虑扭矩对纵、横向剪力的影响，扭矩的平衡方程为：

$$\sum_{j=1}^n N_{xj}^T y_j + \sum_{j=1}^n N_{yj}^T x_j = T \tag{7}$$

式中： $T$ 为群桩分担的扭矩； $N_{xj}^T$ 、 $N_{yj}^T$ 分别为扭矩*T*产生的桩顶纵向、横向剪力，分别与 $y_j$ 、 $x_j$ 成正比。

可得桩顶水平力计算式为：

$$F_{xi} = -\frac{T}{\sum_{j=1}^n x_j^2 + \sum_{j=1}^n y_j^2} y_i + \frac{H_x}{n} \tag{8}$$

$$F_{yi} = \frac{T}{\sum_{j=1}^n x_j^2 + \sum_{j=1}^n y_j^2} x_i + \frac{H_y}{n} \tag{9}$$

式中： $F_{xi}$ 、 $F_{yi}$ 分别为计算的桩顶水平纵向反力和横向剪力； $H_x$ 、 $H_y$ 分别为群桩分担的纵向力、横向力。

根据有限元计算结果可得群桩分担的 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 、 $T$ 等合力(矩)，按式(6)、(8)、(9)可计算相关系数和桩顶力计算式。通过对比检修期40根桩顶力，得出简化算法的平均误差为11.1%，由于实际存在群桩效应，外周桩顶力简化算法偏小18.8%，内部桩顶力偏大13.1%。总体来看，简化算法较好反映了在压弯剪扭荷载作用下桩顶力分布特征，估算精度较高。

3 沿深度桩身内力分析

3.1 竖向承载特征

检修期5根特征桩的轴力沿深度的变化曲线见图5。可以看出，在纵、横向弯矩作用下，越靠近下游侧和边墩内侧的桩顶轴力越大，这与式(6)反映的变化趋势一致。中桩顶轴力3 506.0 kN，小于角桩平均轴力4 399.5 kN。在深度1.5~4.0 m和12.5~15.5 m两段位置轴力减小趋势明显放缓，其原因是这两段位置为层间挤压破碎带，提供的侧摩阻力大幅减小。

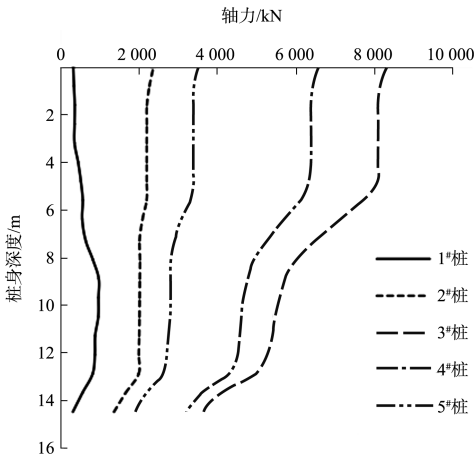


图5 轴力沿深度变化

桩侧摩阻力和桩端阻力对软岩产生的附加应力云图如图6所示，由于桩侧摩阻力产生的附加应力沿深度向外逐渐扩散，在云图中不明显，而由桩端阻力产生的附加应力在桩端有应力集中的现象，可以清楚地看出其呈应力泡的形状，在双向弯矩的作用下，应力泡的形状并非是沿群桩中

心对称, 而是发生了偏移, 由于横向转动大于纵向转动, 横向不均匀沉降更大, 图 6 中横向应力泡较纵向更偏离中心。

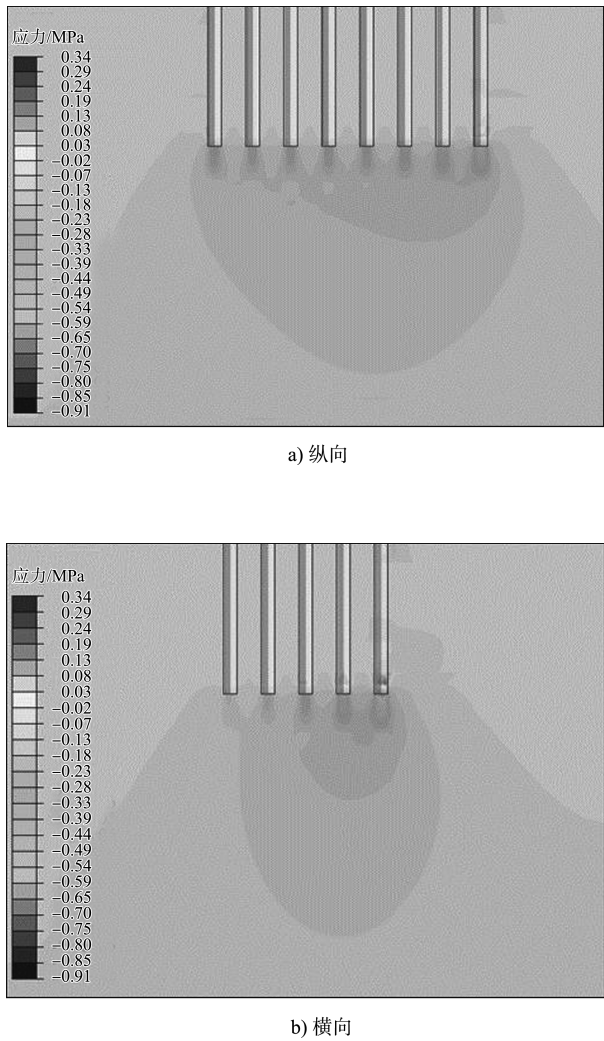


图 6 软岩附加应力云图

3.2 侧向承载特征

特征桩在横向的弯矩和剪力沿深度的变化曲线见图 7。可以看出, 各桩最大剪力均发生在桩顶, 上游侧的桩顶剪力大于下游侧, 与式(9)中桩顶横向剪力考虑扭矩的影响相符。角桩顶横向剪力均大于中桩顶剪力, 其中 4#角点桩最大, 角桩平均剪力为 2 087.2 kN, 中桩剪力为 1 439.2 kN。

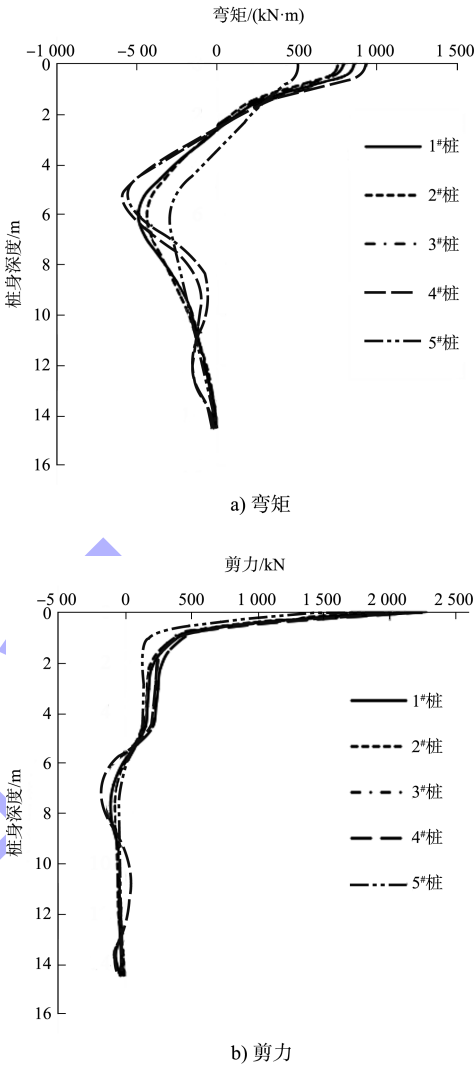


图 7 弯矩和剪力沿深度变化

桩顶均为正弯矩, 在深度 2~4 m 范围内出现反弯点, 深度 5~7 m 范围内出现最大负弯矩, 其下弯矩逐渐减小为 0。角桩顶横向弯矩均大于中桩顶弯矩, 其中 4#角点桩最大, 角桩平均弯矩 840.9 kN·m, 中桩弯矩 514.9 kN·m。沿着横向位移方向, 内侧角点 3#、4#桩为首排桩, 在深度 6 m 以下桩身弯矩的变化规律, 与其他桩有明显的差异。首排桩的桩前土体没有前排桩的扰动, 相对其他桩而言, 首排桩的土体抗力作用更大, 所以桩身弯矩有所差异。

4 软岩分担比影响因素

4.1 置换率

对等直径群桩，定义桩顶刚度系数  $k_a = K_a/S_a$  ( $S_a$  每根桩截面积;  $K_a$  为桩顶竖向刚度)，基底软岩竖向力分担比  $\xi_v = 1 - \eta_v$ ，由式(4)可得：

$$\xi_v = \frac{(1-\rho)kS}{nK_a + (1-\rho)kS} = \frac{(1-\rho)}{\rho\alpha_k + (1-\rho)} \tag{10}$$

式中： $n$  为群桩根数， $n = \rho S/S_a$ ； $\alpha_k$  为桩顶刚度系数与基床系数比，其值为  $k_a/k$ ，简称桩岩(土)系数比。

当地基、基桩参数不变时，可近似认为系数比  $\alpha_k$  基本不变， $\xi_v$  仅与  $\rho$  有关。基底布置 4、9、15、24、28、40 根基桩时， $\rho$ - $\xi_v$  关系如图 8 中标记点(从左至右)。如仅布置角点、边中、中心 9 根桩时， $\rho = 2.7\%$ 、 $\xi_v = 29.0\%$ ；仅布置 4 根角点桩时， $\rho = 1.2\%$ 、 $\xi_v = 55.6\%$ 。经拟合得，尖子山船闸的桩岩系数比  $\alpha_k = 58.52$ ，由拟合曲线可见，桩间距越大，置换率越小，软岩的分担比越大。

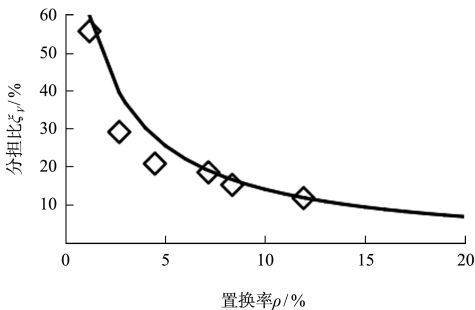


图 8 软岩竖向力分担比与置换率关系

4.2 桩顶与基床系数比

当桩基布置、桩基参数不变时，置换率  $\rho$  不变，桩周、桩下软岩分布及其性质影响桩顶刚度系数为  $k_a$ 、基床系数  $k$  以及系数比  $\alpha_k$ ，从而影响软岩竖向力分担比  $\xi_v$ 。

假设地基无破碎带，不同部位不同模量放大倍数时，软岩竖向力分担比变化规律如图 9 所示。分担比随着桩周软岩模量增大而增大、桩下软岩模量增大而减小，桩周模量对分担比的影响大于桩下模量，桩周、桩下模量同倍数增大时，分担比也随之增大。

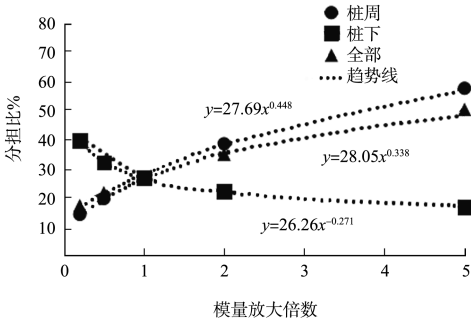


图 9 软岩竖向力分担比与软岩模量关系

分析桩周软岩压缩量组成可知，两层挤压破碎带的压缩量占 88.4%。桩周软岩应力竖向近似均匀分布时，等效换算模量 44.9 MPa，软岩竖向力分担比仅 11.5%。在灌注桩施工完毕、闸墙和底板浇筑一定厚度之后，对挤压破碎带进行固结灌浆处理，取中风化泥岩模量时，桩岩系数比降低到  $\alpha_k = 26.79$ ，分担比可提高到 26.8%。

5 结语

1) 尖子山船闸分离式边墩变形很小，刚体运动为主。完建期最大沉降为 14.5 mm，高水期最大纵向位移为 4.4 mm，检修期最大横向位移为 12.7 mm，横向转动和竖向扭转检修期最大。由于两层挤压破碎带的影响，边墩荷载大部分基桩承担，软岩竖向力分担比仅 11.5%。

2) 桩顶力分布特征与群桩效应以及偏心荷载的弯扭作用有关。简化算法的外周桩顶力偏小、内部桩顶力偏大，总体精度较高。外周桩抗压、抗推刚度大于内部桩，弯扭作用下外周桩顶力也较大，桩基可采用外密内疏布置，提高群桩抗弯、抗扭能力。

3) 软岩分担比近似与置换率呈双曲线关系、与软岩模量呈幂函数关系，桩间距越小，置换率越大，软岩模量越大，桩岩系数比越小，分担比越大。桩周模量对软岩分担比影响大于桩下模量，挤压破碎带固结灌浆处理后，可提高桩基竖向、水平承载力，还可使软岩竖向力分担比提高到 26.8%。

4) 闸首桩间距增大会减少桩的数量，基桩顶、软岩承受的荷载增加，结构沉降也会增加，如何确定最优桩间距，在满足基桩承载能力和结构沉降的前提下，充分发挥桩间软岩承载能力的问题，须做进一步研究。