



浮式再气化平台 锚定嵌岩桩内力分析

曾冬, 丁建军, 卢生军, 李少斌

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 基于国外某浮式再气化平台锚定嵌岩桩设计, 介绍水平分层钢管混凝土复合截面参数和刚度计算, 描述往复荷载及岩质条件下的 P - Y 曲线绘制方法并采用 ANSYS 软件编制通用程序实现桩土相互作用的 P - Y 曲线仿真模拟。讨论不同地质模型、往复荷载和非往复荷载作用下桩的 P - Y 曲线、嵌岩深度、荷载作用高程以及岩石单轴抗压强度对锚桩内力的影响。研究成果可为浮式再气化平台锚定嵌岩桩设计与施工提供参考。

关键词: 浮式再气化平台; 锚定嵌岩桩; 钢管混凝土; P - Y 曲线; 地质模型; 嵌岩深度; 作用高程

中图分类号: TU 473; U 655.54*4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0224-09

Internal force of restraining rock socketed pile of floating regasification unit

ZENG Dong, DING Jian-jun, LU Sheng-jun, LI Shao-bin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on the design of the restraining rock socketed pile of floating regasification unit, we provide an insight into various horizontal layered concrete-filled steel tube composite section parameters and stiffness calculation, introduce the recognized P - Y curves for the cyclic load type and rock, and establish simulation models for the P - Y curve using software ANSYS. Furthermore, we probe into the effects of the ground model, P - Y curves for the static and cyclic load type, rock socketed depth, lateral force application level, and uniaxial compressive strength of rock on the internal force of restraining rock socketed pile. The research results may serve as a reference basis for the design and execution of the restraining rock socketed pile of floating regasification unit.

Keywords: floating regasification unit; restraining rock socketed pile; concrete-filled steel tube; P - Y curve; ground model; rock socketed length; action elevation

近年来,随着人们对清洁能源的需求逐渐增加,天然气的需求量呈大幅增长趋势。液化天然气浮式再气化平台由于具有节约成本、远离工业区和人口密集区停泊等优点受到越来越多的关注。浮式再气化平台系泊方式之一是通过桩箍连接至大直径锚定嵌岩桩(以下简称锚桩)上,从而限制其运动量。

浮式再气化平台锚桩内力分析时存在以下难

点: 1) 锚桩承受很大的水平荷载且荷载作用高程随平台升沉而改变; 2) 锚桩为水平分层钢管混凝土复合截面,如何准确模拟水平分层钢管混凝土复合截面是锚桩内力分析时需要解决的难题; 3) 锚桩嵌入基岩一定深度,现有文献对黏土和砂土中横向受荷桩的 P - Y 曲线研究较多^[1-5],而对软岩和硬岩中横向受荷桩的 P - Y 曲线研究较少^[6-7],如何实现软岩和硬岩中桩土相互作用的仿真模拟

收稿日期: 2020-09-07

作者简介: 曾冬(1991—),男,硕士,工程师,从事码头和防波堤设计研究工作。

是锚桩内力分析时需要解决的难题; 4) 实际地质分布具有不均匀性和不确定性, 当工程中锚桩数量较少时, 可以通过逐桩钻孔及分别计算来得出锚桩的最大内力。但在缺少逐桩钻孔资料的情况下, 如何根据现有钻孔资料来确定锚桩的最大内力是设计需要解决的问题。综上, 现有文献对浮式再气化平台锚桩内力的研究较少, 有必要做进一步研究。

1 工程概况

国外某新建大型液化天然气码头, 满足液化天然气船舶靠泊、储存和再气化外输功能。主要设施包括防波堤、2 个靠船墩和 5 个系缆墩、储气船、浮式再气化平台和 6 根大直径锚定嵌岩桩。浮式再气化平台总长 94.9 m, 型宽 38.4 m, 型深 19.8 m, 设计吃水 6.7 m, 舱容量为 2.8 万 m³, 船舶总吨 1.29 万 t。平台通过桩箍连接至锚桩上系泊, 如图 1 所示。

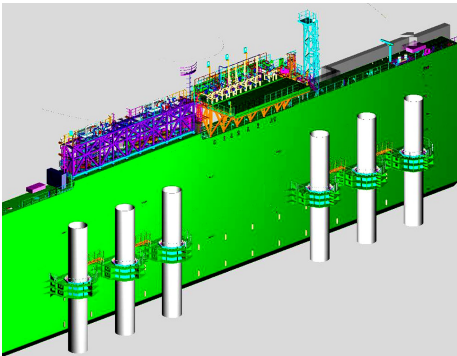


图 1 浮式再气化平台锚桩系泊

2 基础数据

2.1 锚桩主要参数

如图 2 所示, 锚桩桩顶高程 10.95 m, 桩底高程-30.0 m, 锚桩桩长 40.95 m。锚桩由大直径钢管桩和钢筋混凝土两部分组成。其中钢管桩材质为 S355 DH36, 顶高程 10.95 m, 底高程-27.0 m, 钢管桩长 37.95 m。在高程-12.0 m 以上, 钢管桩直径 2.48 m, 壁厚 50 mm; 在高程-12.0 m 以下, 钢管桩直径 2.50 m, 壁厚 60 mm。混凝土等级为 C35/45, 钢筋等级为 B500B, 钢筋混凝土顶高程-5.0 m, 底高程-30.0 m, 钢筋混凝土长 25.0 m。每个截面上共设 36 组钢筋, 每组 2 根直径 50 mm 的钢筋, 如图 3 所示。

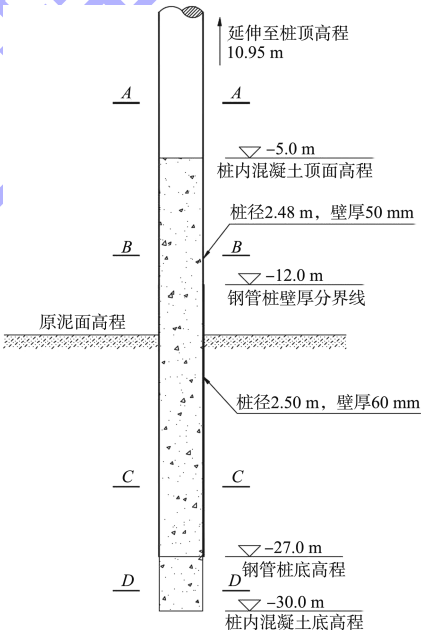
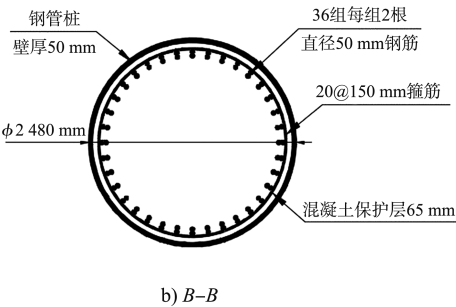
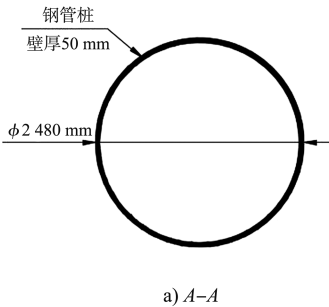


图 2 锚桩立面



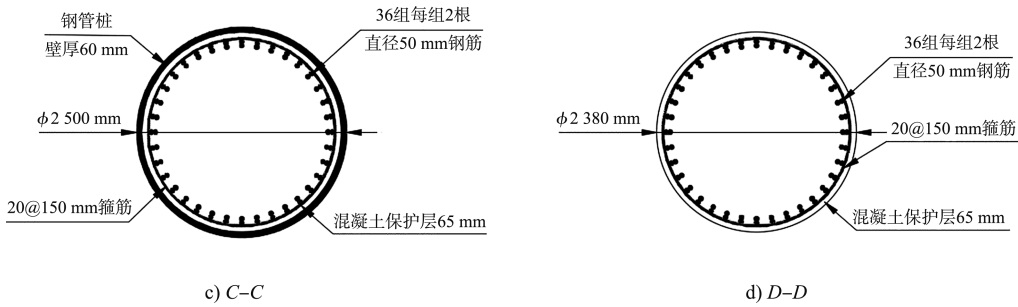


图 3 锚桩断面

2.2 钢管混凝土复合截面刚度计算

由图 3 可知，锚桩共有 4 个典型断面 A-A ~ D-D，其中断面 A-A 为钢管桩，高程范围-5.0 ~ 10.95 m，钢管桩外径 2.48 m，壁厚 50 mm，计算出钢管桩截面惯性矩为 0.282 m⁴。

锚桩断面 B-B 为钢管桩、钢筋和混凝土组成的复合截面，高程范围-12.0 ~ -5.0 m。钢管桩外径 2.48 m，壁厚 50 mm，钢管桩截面惯性矩为 0.282 m⁴。截面共设 36 组每组 2 根直径 50 mm 的钢筋，通过平行移轴和刚度换算，计算出钢筋等效截面惯性矩为 0.150 m⁴。对于混凝土刚度计算，假定设计使用寿命内混凝土将开裂，根据 BS EN 1992: 2004 第 5.8.7.2(3) 条，开裂混凝土截面刚度取为未开裂的 0.3，再通过刚度换算，计算出混凝土等效截面惯性矩为 0.076 m⁴。因此，复合截面 B-B 惯性矩为 0.508 m⁴。

锚桩断面 C-C 为钢管桩、钢筋和混凝土组成的复合截面，高程范围-27.0 ~ -12.0 m，钢管桩外径 2.50 m，壁厚 60 mm。锚桩断面 D-D 为钢

筋混凝土截面，高程范围由桩底至-27.0 m。钢管混凝土复合截面刚度计算结果如表 1 所示。

表 1 钢管混凝土复合截面刚度计算结果

截面	惯性矩/m ⁴			
	钢管桩	钢筋	混凝土	复合截面
A-A	0.282	0	0	0.282
B-B	0.282	0.150	0.076	0.508
C-C	0.342	0.150	0.076	0.568
D-D	0	0.150	0.076	0.226

2.3 工程地质

如图 4 所示，锚桩位于钻孔 BH-D1、BH-D2、BH-D3 和 BH-D4 组成的区域内。对 4 个钻孔进行统计分析，得出可能的最不利地质情况(简称下限地质模型 LB)和可能的最有利地质情况(简称上限地质模型 UB)，见表 2。

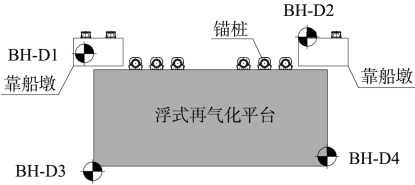


图 4 钻孔布置

表 2 可能的最不利和最有利地质情况土参数

地质情况	土层	表面高程/m	$\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	C_u/kPa	ε_{50}	q_{ur}/MPa
下限地质模型 LB	软黏土	-15.70	1.9	12	0.020	—
	硬黏土	-16.27	1.9	50	0.007	—
	硬黏土	-18.42	1.9	250	0.004	—
	软岩	-20.78	2.6	—	—	5
	硬岩	-30.96	2.6	—	—	17
上限地质模型 UB	硬黏土	-14.78	1.9	100	0.005	—
	硬黏土	-15.48	1.9	300	0.004	—
	硬黏土	-17.01	1.9	300	0.004	—
	硬岩	-17.89	2.8	—	—	177

注： ρ 为密度， C_u 为不排水抗剪强度， ε_{50} 为三轴试验中最大主应力差一半时的应变值， q_{ur} 为岩石单轴抗压强度。

3 锚桩内力分析

3.1 *P*-*Y* 曲线法分类

P-*Y* 曲线法是计算横向受荷桩的重要方法之一。大水平力作用下锚桩将产生较大水平变位, 不再符合弹性变形条件, 而 *P*-*Y* 曲线法可以考虑土体的非线性, 与传统的假想嵌固点法和 *m* 法相比, *P*-*Y* 曲线法能更好地反映桩土相互作用的非线性关系。

国内水运工程桩基规范^[8] 将非往复荷载作用

下桩的 *P*-*Y* 曲线分为 3 类: 软黏土、硬黏土和砂土。其中软黏土 *P*-*Y* 曲线与 Matlock 法完全相同, 砂土 *P*-*Y* 曲线与 API RP 2A 法^[9] 完全相同, 但国内水运工程桩基规范缺少对往复荷载及岩质条件下桩的 *P*-*Y* 曲线绘制方法相关描述。Reese 和 Turner 依次提出软岩和硬岩中横向受荷桩的 *P*-*Y* 曲线。因此, 水平力作用下单桩的 *P*-*Y* 曲线发展为 5 类: 软黏土、硬黏土、砂土、软岩和硬岩, 如表 3 所示。

表 3 *P*-*Y* 曲线按土质分类

土类	软黏土	硬黏土	砂土	软岩	硬岩
<i>P</i> - <i>Y</i> 曲线	Matlock 法	Matlock 法和 Reese 法	API RP 2A 法	Reese 法	Turner 法

3.2 *P*-*Y* 曲线分析

3.2.1 软黏土在往复荷载作用下桩的 *P*-*Y* 曲线

软黏土在往复荷载作用下桩的 *P*-*Y* 曲线可按 Matlock 法确定, 公式如下:

当 $Y/Y_{50} < 3$ 时,

$$\frac{P}{P_u} = 0.5 \left(\frac{Y}{Y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

$$Y_{50} = \rho \varepsilon_{50} D \tag{2}$$

当 $Y/Y_{50} \geq 3$ 时, 进一步分为以下 3 种情况:

- 1) 当 $X \geq X_R$ 时, $P = 0.72 P_u$;
- 2) 当 $X < X_R$ 且 $Y/Y_{50} \geq 15$ 时, $P = 0.72 P_u (X/X_R)$;
- 3) 当 $X < X_R$ 且 $3 < Y/Y_{50} < 15$ 时, 为一直线过渡。

$$\frac{P}{P_u} = 0.75 \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{X}{X_R} - 1 \right) \left(\frac{Y}{Y_{50}} - 3 \right) \right] \tag{3}$$

式中: *X* 为泥面以下桩的任一深度 (m); *X_R* 为极限水平土抗力转折点深度 (m); *D* 为 桩径或桩宽 (m); *Y* 为 泥面以下 *X* 深度处桩侧水平变形 (mm); *Y₅₀* 为 桩周土达到极限水平土抗力一半时, 桩的侧向水平变形 (mm); *P* 为 单位桩长上水平土抗力标准值 (kN/m); *P_u* 为 单位桩长上极限水平土抗力标准值 (kN/m); ρ 为 相关系数, 取 2.5; ε_{50} 为 三轴试验中最大主应力差一半时的应变值。

图 5 中实心圆和三角形分别代表非往复荷载和往复荷载作用下、下限地质模型中、高程 -16.0 m 位置处、软黏土中桩的 *P*-*Y* 曲线。由图 5

可知, 单位桩长上的水平土抗力小。

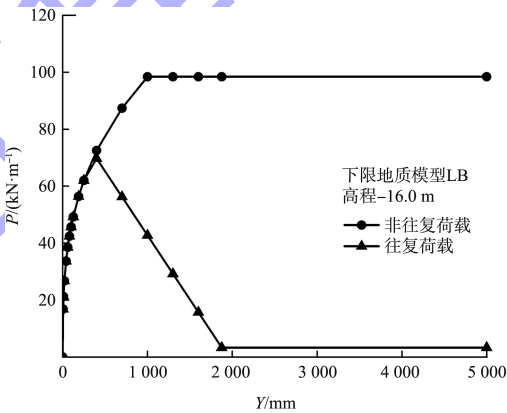


图 5 软黏土中桩的 *P*-*Y* 曲线

3.2.2 硬黏土中桩的 *P*-*Y* 曲线

在缺少试桩资料的情况下, 硬黏土在非往复荷载和往复荷载作用下桩的 *P*-*Y* 曲线可按 Matlock 法确定, 但有以下几点不同:

- 1) 无量纲参数 *J* 值宜取为 0.25;
- 2) ε_{50} 对较硬黏土取 0.005, 硬黏土取 0.004;
- 3) 相关系数 ρ , 硬黏土可取 0.5~1.0。

3.2.3 软岩中桩的 *P*-*Y* 曲线

软岩中桩的 *P*-*Y* 曲线可按 Reese 法确定。软岩中单位桩长的极限水平土抗力按以下公式确定。

当 $0 \leq X_r < 3D$ 时:

$$P_{ur} = \alpha_r q_{ur} D \left(1 + 1.4 \frac{X_r}{D} \right) \tag{4}$$

当 $X_r \geq 3D$ 时:

$$P_{ur} = 5.2 \alpha_r q_{ur} D \tag{5}$$

式中： P_{ur} 为单位桩长上极限水平土抗力标准值(kN/m)； α_r 为强度折减系数； q_{ur} 为岩石单轴抗压强度(MPa)； X_r 为岩面以下深度(m)；

软岩中横向受荷桩的 P - Y 曲线由 3 段组成，如图 6 所示。

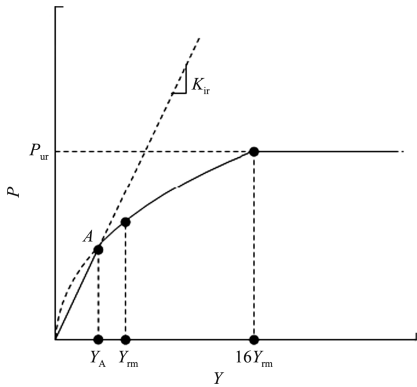


图 6 软岩 P - Y 曲线

第 1 段为直线段，当 $Y \leq Y_A$ 时：

$$P = K_{ir} Y \tag{6}$$

第 2 段为曲线段，当 $Y_A < Y < 16Y_m$ 且 $P \leq P_{ur}$ 时：

$$P = \frac{P_{ur}}{2} \left(\frac{Y}{Y_m} \right)^{0.25} \tag{7}$$

第 3 段为平直线段，当 $Y \geq 16Y_m$ 时：

$$P = P_{ur} \tag{8}$$

式中： $K_{ir} = k_{ir} E_{ir}$ 。

当 $0 \leq X_r < 3D$ 时：

$$k_{ir} = \left(100 + 400 \frac{X_r}{3D} \right) \tag{9}$$

当 $X_r \geq 3D$ 时：

$$k_{ir} = 500 \tag{10}$$

$$Y_m = k_{rm} D \tag{11}$$

$$Y_A = \left(\frac{P_{ur}}{2 Y_m^{0.25} K_{ir}} \right)^{1.333} \tag{12}$$

式中： Y_A 为 A 点位置处桩的侧向水平变形(mm)； k_{rm} 为无量纲常数，取值范围为 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ ； E_{ir} 为岩石初始模量。

图 7 代表下限地质模型中、高程-23.8 m 位置处、软岩中桩的 P - Y 曲线，软岩中桩的 P - Y 曲线无往复荷载和非往复荷载区分。由图 7 可知，软岩中桩侧水平变形值小，但单位桩长上的水平土抗力值大。

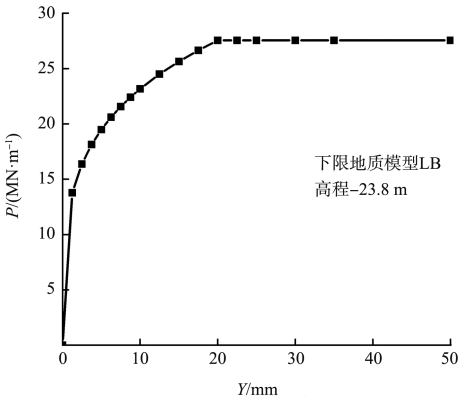


图 7 软岩中桩的 P - Y 曲线

3.2.4 硬岩中桩的 P - Y 曲线

硬岩中桩的 P - Y 曲线可按 Turner 法确定。硬岩中桩的 P - Y 曲线由 2 段组成，如图 8 所示。

当 $Y < 0.0004D$ 时：

$$P = E_s Y = 2000 S_u Y \tag{13}$$

当 $0.0004D \leq Y \leq 0.0024D$ 时：

$$P = 100 S_u Y + 0.76 S_u D \tag{14}$$

$$P \leq P_{ult} = S_u D \tag{15}$$

当 $Y > 0.0024D$ 时：

$$P = 0 \tag{16}$$

式中： P 为单位桩长上水平土抗力标准值(kN/m)； Y 为桩的侧向水平变形(mm)； E_s 为硬岩初始弹性模量； S_u 为岩石单轴抗压强度之半(MPa)； P_{ult} 为单位桩长上极限水平土抗力(kN/m)。

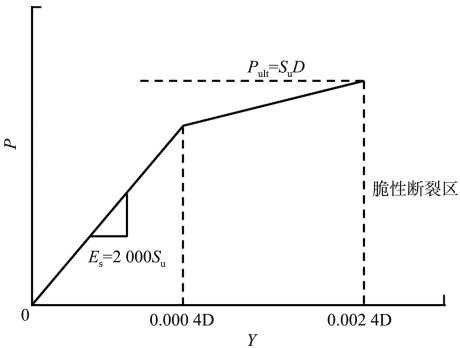


图 8 硬岩 P - Y 曲线

图 9 代表上限地质模型中、高程-22.0 m 位置处、硬岩中桩的 P - Y 曲线，硬岩中桩的 P - Y 曲线无往复荷载和非往复荷载区分。由图 9 可知，硬岩中桩侧水平变形极小，但单位桩长上水平土抗力很大。

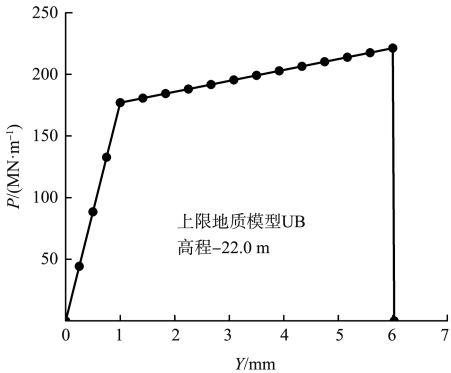


图 9 硬岩中桩的 P - Y 曲线

3.3 有限元模型

采用 ANSYS 软件进行锚桩内力分析, 锚桩采用 3D 弹性梁单元 BEAM188 进行模拟, 通过 P - Y 曲线法模拟桩-土之间的相互作用。 P - Y 曲线为桩周土对桩身抗力 P 与桩侧水平变形 Y 之间的关系, 而 ANSYS 软件中 COMBIN39 非线性弹簧单元有 F-D 常数对能够表示力与位移之间的关系。因此, 可以采用 COMBIN39 单元模拟桩土相互作用。锚桩泥面以下每个节点通过 2 个相互垂直的 COMBIN39 单元进行限制, 如图 10 所示。



图 10 锚桩有限元模型

3.4 分析工况

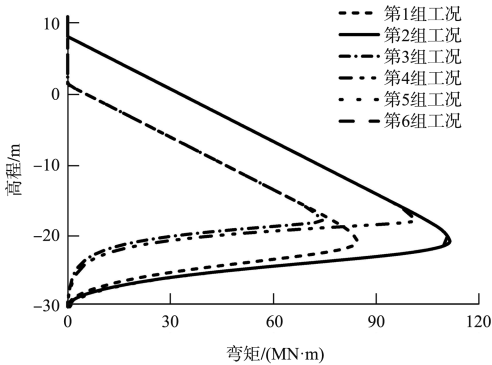
波浪荷载作用下, 浮式再气化平台对锚桩产生的水平力设计值为 4 008 kN。水平力作用高程随浮式再气化平台升沉而变化, 其中最大作用高程为 7.95 m, 最小作用高程为 1.15 m。表 4 为 6 组锚桩内力分析工况, 用于研究不同地质模型、不同荷载类型的 P - Y 曲线、嵌岩深度、荷载作用高程以及岩石单轴抗压强度对锚桩内力的影响。

表 4 锚桩内力分析工况

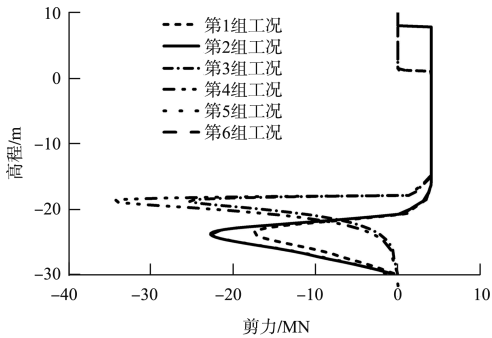
分析工况	地质模型	荷载类型 P - Y 曲线	桩底 高程/m	作用 高程/m
1	LB	往复荷载	-30	1.15
2	LB	往复荷载	-30	7.95
3	UB	往复荷载	-30	1.15
4	UB	往复荷载	-30	7.95
5	LB	往复荷载	-32	7.95
6	LB	非往复荷载	-30	7.95

3.5 锚桩内力结果与分析

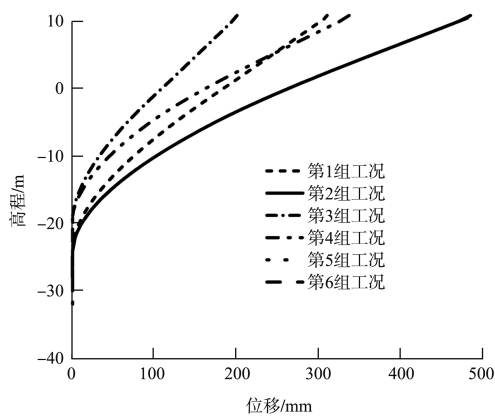
图 11 为 6 组工况中锚桩弯矩、剪力和桩侧水平位移随高程变化曲线。由图 11a) 和 b) 可知, 实线和虚线重叠, 即第 2 组和第 6 组工况内力结果相同。第 2 组与第 6 组工况区别在于不同荷载类型作用下桩的 P - Y 曲线不同。结果显示, 上述 2 组工况中, 不同荷载类型作用下桩的 P - Y 曲线对锚桩内力无影响。原因为泥面以下锚桩桩侧水平变形小, 见图 11c), 浅层软黏土和硬黏土中往复荷载作用下桩的 P - Y 曲线与非往复荷载作用下桩的 P - Y 曲线均一致。此外, 软岩和硬岩水平抗力比上覆软黏土和硬黏土抗力大得多, 起主导作用, 再加上软岩和硬岩中桩的 P - Y 曲线均无区分往复荷载和非往复荷载作用, 因此锚桩内力结果相同。



a) 弯矩-高程关系曲线



b) 剪力-高程关系曲线



c) 桩侧水平位移-高程关系曲线

图 11 锚桩内力及水平位移随高程变化曲线

通过对比第 1 组与第 2 组以及第 3 组与第 4 组工况内力结果曲线可知，横向荷载作用高程越高，锚桩弯矩越大；泥面以上，锚桩剪力不变，而泥面以下，锚桩剪力也越大；锚桩最大弯矩和最大剪力深度均保持不变。因为第 1 组与第 2 组以及第 3 组与第 4 组工况地质模型相同，相比于上覆软黏土和硬黏土，软岩和硬岩水平抗力陡然增大，锚桩最大弯矩均位于岩层表面位置处。因此，横向荷载作用高程越大，产生的锚桩弯矩越大。泥面以上，锚桩最大剪力值与荷载作用高程无关；泥面以下，由于水平土抗力的存在，横向荷载作用高程越大，桩侧水平变形越大，水平土抗力也越大，泥面以下锚桩弯矩随高程变化曲线越陡，且剪力为弯矩的一阶导数，因此，泥面以下，锚桩剪力也越大。

通过对比第 1 组和第 3 组工况内力结果曲线可知，下限地质模型 LB 对应的锚桩最大弯矩比上限地质模型 UB 对应的锚桩最大弯矩要大，但最大剪力要小，最大弯矩和最大剪力深度更大。原因在于锚桩桩底高程相同的条件下，下限地质模型 LB 代表可能的最不利地质情况，对应的岩层表面位置更深，因此锚桩最大弯矩和最大剪力深度更大。在横向荷载相同的情况下，下限地质模型 LB 对应的锚桩最大弯矩更大。由于下限地质模型 LB 地质情况更不利，水平土抗力更小，因此，锚桩弯矩随高程变化曲线更缓，锚桩最大剪力更小。由于项目现场并未补充逐桩钻孔，在缺少逐桩钻

孔资料的前提下，如何根据现有钻孔资料来确定锚桩的最大内力是设计需要考虑的问题。出于保守考虑，建议在确定锚桩最大弯矩设计值时，采用下限地质模型 LB；在确定锚桩最大剪力设计值时，采用上限地质模型 UB。

冲孔过程中，施工单位计划将锚桩桩底高程由 -30.0 m 增加至 -32.0 m，因此有必要从设计角度考虑增加冲孔深度对锚桩内力的影响。通常，锚桩水平承载力与入土深度有关，入土深度越深水平承载力越大。但在设计荷载作用下，增加冲孔深度对锚桩内力的影响不好判断，因此开展第 2 组和第 5 组工况进行对比。图 11a) 和 b) 中的黑实线和浅灰实线分别对应第 2 组和第 5 组工况中锚桩弯矩和剪力随高程变化曲线。其中第 2 组和第 5 组工况锚桩桩底高程分别为 -30.0 m 和 -32.0 m。由图 11a) 和 b) 可知，第 2 组和第 5 组锚桩弯矩和剪力曲线均基本重合。原因为地质模型相同且桩底进入基岩深度足够深的前提下，锚桩桩底高程由 -30.0 m 增加至 -32.0 m，锚桩最大弯矩和最大剪力深度均保持不变。因此，两组工况中锚桩内力基本重合。由此可见，在锚桩桩底入岩深度足够深的前提下，再增加锚桩冲孔深度，对锚桩内力几乎无影响。

岩石单轴抗压强度是决定软岩和硬岩中单位桩长水平土抗力的重要参数，因此有必要研究不同岩石单轴抗压强度值对锚桩内力及变形的影响。以第 4 组工况为基础，通过将硬岩单轴抗压强度值分别取为 10、30、50、100 MPa，其余参数保持不变来进行研究。图 12 为锚桩弯矩、剪力和桩侧水平变形随高程变化曲线，表 5 为对应的锚桩最大内力结果。由表 5 可知，随着岩石单轴抗压强度值逐渐增大，锚桩最大弯矩和最大弯矩深度变化很小(约 1%)，而最大剪力深度逐渐减小，最大剪力值逐渐增加。原因在于硬岩的水平土抗力陡然增大，因此，锚桩最大弯矩均位于硬岩表面位置，且最大弯矩值变化很小。岩面以下，随着岩石单轴抗压强度值逐渐增大，单位桩长上的水平土抗力增大，锚桩弯矩随高程变化曲线逐渐变陡，

最大剪力深度减小, 从而导致锚桩最大剪力值增加。

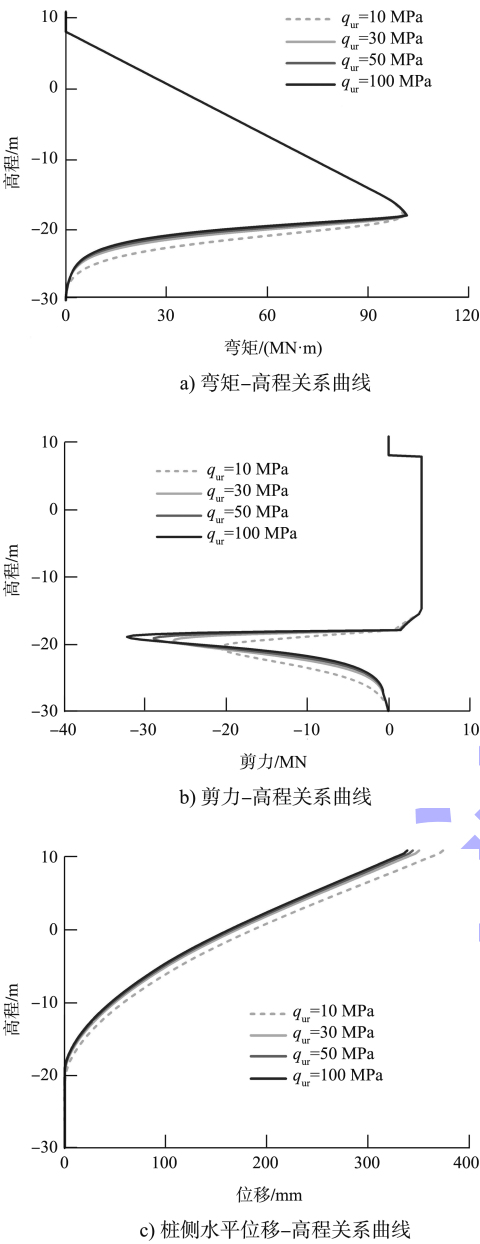


图 12 不同桩压强度下锚桩内力及水平位移随高程变化曲线

表 5 不同岩石单轴抗压强度对应的最大内力				
单轴抗压 强度/ MPa	最大弯矩/ (MN·m)	最大弯矩 深度/m	最大剪力/ MN	最大剪力 深度/m
10	100. 29	-17. 9	-20. 72	-20. 5
30	101. 00	-17. 9	-26. 47	-19. 5
50	101. 20	-17. 9	-28. 91	-19. 1
100	101. 36	-17. 9	-32. 18	-18. 9

4 结语

1) 锚桩为水平分层钢管混凝土复合截面, 有

限元建模时, 可以通过平行移轴和刚度换算, 将水平分层钢管混凝土复合截面换算为外径和刚度相同的钢管桩截面。

2) 浮式再气化平台锚桩承受很大的水平荷载且荷载作用高程随平台升沉而改变, 横向荷载作用高程越大, 锚桩弯矩越大, 泥面以上锚桩剪力不变, 而泥面以下锚桩剪力也越大, 锚桩最大高程位置起决定作用。

3) 由于地质分布具有不均匀性和不确定性, 锚桩内力分析时, 当工程中锚桩数量较少时, 宜通过逐桩钻孔及分别计算得出锚桩最大内力。在缺少逐桩钻孔资料的前提下, 出于保守考虑, 建议在确定锚桩最大弯矩设计值时, 采用下限地质模型 LB; 在确定锚桩最大剪力设计值时, 采用上限地质模型 UB。

4) 往复荷载和非往复荷载作用下桩的 P - Y 曲线不同, 但泥面以下桩侧水平变形较小或岩质条件下, 不同荷载类型桩的 P - Y 曲线对锚桩内力影响不大。

5) 锚桩施工过程中, 施工单位有时出于保守考虑, 将锚桩桩底高程在设计底高程基础上进一步加深 2 m, 从设计角度考虑, 在锚桩桩底入岩深度足够的情况下, 进一步增加冲孔深度, 对锚桩内力几乎无影响。

6) 岩石单轴抗压强度对锚桩最大弯矩和最大弯矩深度只有些许影响, 对最大剪力和最大剪力深度有一定影响。随着岩石单轴抗压强度值逐渐增大, 最大剪力深度逐渐减小, 最大剪力值逐渐增加。

参考文献:

[1] 杨国平, 张志明. 对大变位条件下横向受力桩 P - Y 曲线的研究[J]. 水运工程, 2002(7): 40-45, 71.

[2] 王成华, 孙冬梅. 横向受荷桩的 P - Y 曲线研究与应用述评[J]. 中国港湾建设, 2005(2): 1-4.

[3] 李芬花, 邓丹平, 周子楠. 基于 ANSYS 的近海工程桩基础 P - Y 曲线研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 60-65.

[4] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C] // Proceedings Offshore Technology

Conference. Houston: [s.n.], 1970: 1204.

[5] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles on stiff clay[C] //Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1975: 2312.

[6] REESE L C. Analysis of laterally loaded piles in weak rock [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1997, 123(11): 1010-1017.

[7] TURNER J. Rock-socketed shafts for highway structure foundations[C] //Transportation Research Board of the National Academies. NCHRP Synthesis of Highway Practice. Washington D. C.: Transportation Research Board of the National Academies, 2006.

[8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京: 人民交通出版社, 2018.

[9] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design-API RP 2A 21st Edition[S]. Washington: American Petroleum Institute, 2000.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

肯尼亚拉姆港项目 1 号泊位试运营

近日，中国交建承建的肯尼亚拉姆港 1 至 3 号泊位工程 1 号泊位开始试运营。肯尼亚拉姆港 1 至 3 号泊位工程位于肯尼亚海岸线北端拉姆郡的曼达湾，属于肯尼亚拉穆港-南苏丹-埃塞俄比亚交通走廊的一部分。项目主要建设内容包括修建集装箱泊位 3 个，港池及航道疏浚约 1 460 万 m³、后方集装箱堆场面积约 115 万 m² 及相关附属设施。项目的建成，为南苏丹、埃塞俄比亚、乌干达以及刚果东部提供了新的出海通道，促进拉姆地区经济发展。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202106/t20210602_131274.html (2021-06-02)

· 消 息 ·

喀麦隆克里比深水港二期航道正式投入使用

近日，由中国港湾承建，四航局施工的喀麦隆克里比深水港二期航道正式投入使用。喀麦隆克里比深水港二期工程于 2019 年 12 月 25 日正式开工，合同工期 42 个月，主要建设内容包括新建集装箱泊位、进港航道疏浚、防波堤延伸、新建堆场等。此次投入使用的航道全长 1 015 m，宽 200 m，设计水深 15 m。工程建成后，克里比深水港将成为喀麦隆乃至中西非地区大型集装箱中转港及综合枢纽港，极大推动喀麦隆物流和商贸发展，为区域经济发展注入新活力。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202105/t20210514_131077.html (2021-05-14)