



钢护筒与混凝土桩水平受力机理 数值分析与模型验证*

李坚平^{1,2}, 王多银^{1,2}, 汪承志^{1,2}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究, 重庆 400074)

摘要: 大直径钢护筒与钢筋混凝土水平受力桩基由于桩身刚度不连续, 导致桩基与基岩结合部、钢护筒与基岩结构部出现较复杂的应力状态, 需要提出科学评判依据来确定这类桩基的有效嵌固深度。建立考虑钢护筒与混凝土桩水平受力的室内物理模型和数值模型, 通过大量变动参数的数值模拟和对比测试研究, 探讨研究影响钢护筒与混凝土桩水平承载性能的各种因素, 得到钢护筒与桩基共同作用下地基基础的力学性状规律。

关键词: 钢护筒; 桩基; 受力机理; 数值分析; 模型验证

中图分类号: U 655.54⁺4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0125-07

Numerical analysis and model validation of load-bearing mechanism between steel tube and concrete combined pile

LI Jian-ping^{1,2}, WANG Duo-yin^{1,2}, WANG Cheng-zhi^{1,2}

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing 400074, China)

Abstract: The discontinuous stiffness of large-diameter steel tube and concrete combined pile leads to the complicated stress state at the joint part of the pile foundation and the base rock, the steel casing and the bedrock structure. So, it is needed to put forward a scientific basis to determine the pile foundation's effective depth of embedment. Establishing the physical model and the numerical model of single pile with large-diameter steel tube and reinforced concrete combined force, we carry out numerical simulation and contrast test of a large number of variable parameters to probe into various factors affecting the lateral bearing capacity of the embedded piles and obtain the mechanical properties of the foundation under the action of the steel tube and the pile foundation.

Keywords: steel tube; pile foundation; load-bearing mechanism; numerical analysis; model validation

钢护筒与混凝土桩和钢管混凝土桩相比, 主要存在3点区别。1) 承受载荷的性质和桩径不同。钢管混凝土桩多用于海港和水位差较小的码头结构中, 承受的水平船舶撞击力作用于桩顶位置且变化不大, 钢管混凝土桩的桩径一般小于1.5 m, 现有研究通常集中在轴压短柱等方面; 钢护筒混

凝土桩多在内河大水位差的码头结构中采用, 承受的水平船舶撞击力作用位置变化较大, 且钢护筒混凝土桩基的桩基一般大于1.5 m。2) 两者的受力机理不同。钢管混凝土桩受力时主要利用竖向受压时圆形钢管对桩基内部的核心混凝土产生的紧箍效应, 使得钢管内的混凝土三向同时受压

收稿日期: 2016-01-10

*基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAB09B01); 国家自然科学基金 (51579021); 国家青年科学基金 (51209242)

作者简介: 李坚平 (1974—), 男, 博士研究生, 从事水工结构及岩土工程相关研究工作。

从而提高其自身抗压强度；钢护筒与混凝土桩进入基岩的深度不同，不能完全保证这两者之间能够完全协调发挥作用，且码头下层的纵向与横向的联系撑是焊接在钢护筒外部的，和内部的混凝土桩并没有联接形成一个整体，使其在船舶的循环低周期水平作用下易产生局部破坏。3) 两者传力途径有别。钢管混凝土桩通过钢管与桩芯混凝土将上部轴心力荷载传递到基础或地基中；钢护筒与混凝土桩轴向传力与钢管混凝土桩相似，但承受水平力则是通过靠船构件传递到钢护筒上，再通过钢和混凝土的界面传递到桩芯混凝土^[1-3]。

钢护筒与混凝土水平受力桩基的上述特性，在复杂工况耦合下会引起钢护筒混凝土桩承载能力降低甚至造成桩基破坏，最终导致码头的破坏。国内外学者^[4-6]对海港码头上采用较多的钢套筒摩擦桩和端承桩进行了研究，但这些研究很少考虑大直径钢护筒对桩基钢筋混凝土的约束效应，同时对钢护筒与基岩的相互作用及这些作用对桩基有效嵌固深度的影响分析也较少。

因此，本文结合重庆港某码头实际工程的钢护筒和混凝土水平受力结构，在实验室建立试验模型，通过大量的模型试验和数值分析对比，探讨这类桩基的水平承载机理，为复杂条件下深水码头建设提供技术保障。

1 工程概况与现场测试

重庆港某大型码头钢护筒与混凝土水平受力码头工程拟采用4排桩基，桩基直径依次是外侧1根2.0 m外包直径2.2 m $\delta 16$ 钢护筒，内侧3排1.8 m的钢筋混凝土外包直径2.0 m $\delta 16$ 钢护筒，水工平台4跨分段、每跨间距8.0 m，两端悬臂3.0 m。试验要求桩基嵌入中风化基岩至少4倍桩径，且钢护筒底部也要进入中风化基岩。

为研究钢护筒与混凝土桩水平受力的工作性状，开展单桩模型试验(图1)。单桩模型试验模拟实际地基，并设置有无钢护筒且不同嵌岩深度的桩基进行载荷试验。取原型桩径 $D = 2\ 000$ mm，

桩身混凝土采用的C30，弹性模量 $E_c = 30$ GPa。基岩的模拟选取砂:石膏:水 = 5.6:0.8:1(表1)，同时混凝土桩选取有机玻璃模拟，钢护筒选取铝皮模拟^[7-8]。

表1 原型岩体的物理力学参数

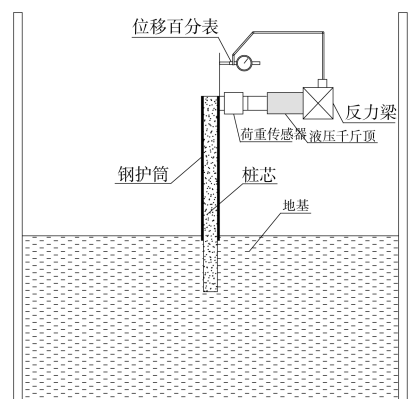
岩石类型	天然密度/ (t/m^3)	内聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	天然抗压 强度标准 值/MPa	饱和抗压 强度标准 值/MPa
中等风化泥岩	2.540	316	32	7.5	4.2
中等风化砂岩	2.450	690	34	23.6	16.9

整体模型试验材料采用原型相同的材料，即模型钢护筒、钢横纵联系撑及钢靠船构件采用与原型相同的Q235A钢板，厚度为1.6 mm和2.0 mm。混凝土采用原型相同的C30，受力钢筋采用直径为6 mm的二级钢筋，采用直径为2 mm的铁丝模拟构造钢筋。

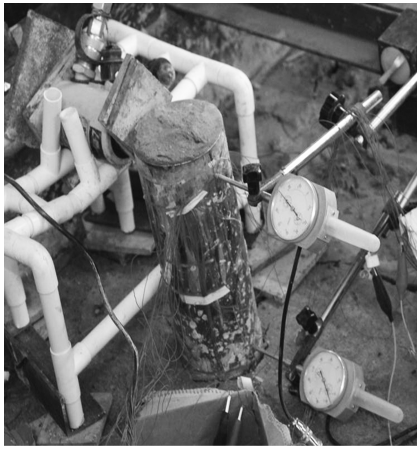
本试验拟分3组，桩基编号及基本尺寸参数见表2。试验在试验槽(2.4 m \times 1.3 m \times 1.4 m)中进行。对同组中2根桩基的试验结果进行比较分析。

表2 模型桩参数

组别	桩号	桩径 D/mm	嵌岩长度 h/mm	嵌岩比 (h/D)	有无 钢护筒	荷载类型
1	1-1	100	300	3	有	水平荷载
	1-2	100	300	3	无	
2	2-1	100	400	4	有	
	2-2	100	400	4	无	
3	3-1	100	500	5	有	
	3-2	100	500	5	无	



a) 布置方案



b) 模型

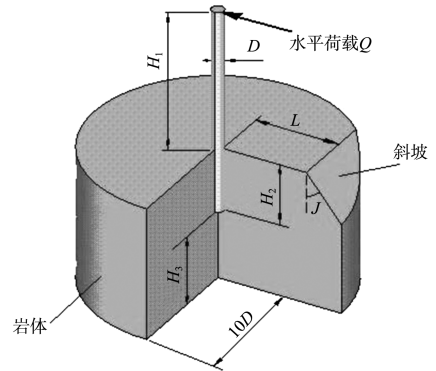
图 1 单桩模型试验布置方案与模型

2 有限元分析计算、参数选择与模型验证

有限元分析时桩体取直径 $D = 0.1 \text{ m}$ 的圆柱体。其中 $z = 0 \sim H_2$ 为桩的嵌岩段; $z = H_2 \sim (H_1 + H_2)$ 为桩的自由段, 自由段桩长 $H_1 = 1.0 \text{ m}$ 。岩体为直径为 $5D$ 的圆柱体被一斜平面切割而成, 岩体在桩底以下的厚度 $H_3 = 0.5 \text{ m}$ 。上述数值分析模型的几何尺度见图 2^[9]。在分析时, 对桩岩体采用三维单元, 钢护筒采用三维壳单元进行单元划分。混凝土桩的弹性模量 $E_1 = 3.12 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu_1 = 0.36$; 模型岩体弹性模量 $E_2 = 38 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu_2 = 0.18$; 钢护筒采用铝片弹性模量取为 70 GPa , 泊松比取 0.25 ; 岩体采用 Von Mises 屈服准则。通过反复试算发现, 桩岩的单元总数达到 22 000 以上时分析结果基本保持稳定。图 3 是网格划分以后的桩岩结构。

有限元模拟将钢护筒与混凝土桩基之间设置为刚性连接; 钢护筒底部岩层上表面设置只考虑

法向接触的摩擦; 桩基与基岩侧面之间设置摩擦系数为 0.45 的接触; 桩底部与基岩同样设置只考虑法向接触的摩擦。



注: H_2 为桩的嵌岩深度; L 为襟边宽度, 即岩体斜坡边距离桩身的最小净距; J 为斜坡倾角。

图 2 有限元分析模型几何尺度

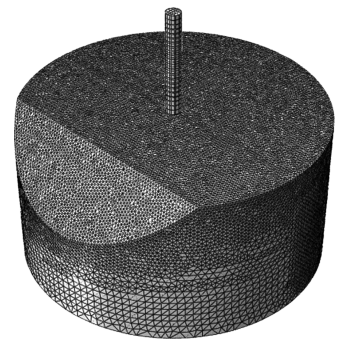


图 3 有限元网格划分

图 4 是第 1 组试验测试桩基位移与数值模型位移的对比结果。数值计算结果与模型测试基本吻合, 验证了数值模型的可靠性。从图 4 还可以看出, 单桩和群桩具有相似的位移变化趋势, 均为缓变型曲线, 且在相同外力作用下, 单桩位移较群桩位移大。

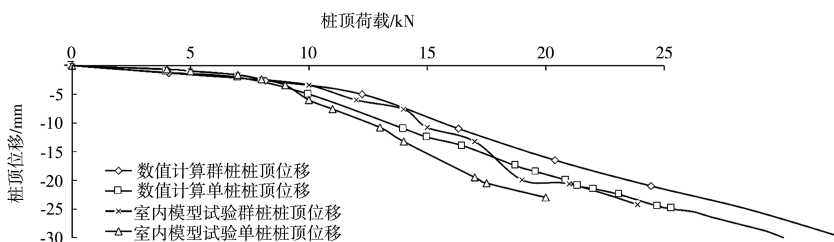


图 4 单桩与整体模型分析结果对比

参照文献[10]确定桩基水平承载力设计值的有关规定, 并借鉴国内外已有的经验^[11], 在横向

荷载作用下桩的力学特性分析时, 结合模型试验的几何比尺、模量比尺, 模型桩桩身应力标准可

以表达为;

$$\sigma_{z,M} \leq \sigma_0 / \lambda_E \lambda_\varepsilon \quad (1)$$

式中： $\sigma_{z,M}$ 为模型桩桩身应力标准； σ_0 为在横向荷载、竖向荷载和预应力的综合作用下，原型桩桩身容许出现的最大应力； λ_E 、 λ_ε 分别为模型试验的模量比尺、应变比尺。

3 计算结果分析

3.1 嵌固深度对钢护筒与钢筋混凝土水平受力嵌岩桩横向承载性状的影响

对襟边宽度为 0.1 m 的钢护筒与钢筋混凝土水平受力单桩模型进行系统的数值分析和模型试验，分别探讨不同嵌岩深度 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 m 5 种情况下桩体位移、桩体(混凝土)应力以及桩周围岩体塑性区情况，最大水平荷载为 25 kN。

分析表明，在襟边宽度=0.1 m 的情况下，随着嵌岩深度从 0.5~0.1 m 不断减小，桩体逐渐趋于不稳定状态(图 5)，主要表现在桩基绕着位移零点发生转动，无钢护筒桩基在嵌固深度达到 3D~4D 之后逐步稳定，而钢护筒桩基直至 5D 之后才逐步稳定，这种稳定主要表现在桩底端的位移随着深度增加逐步趋于零。

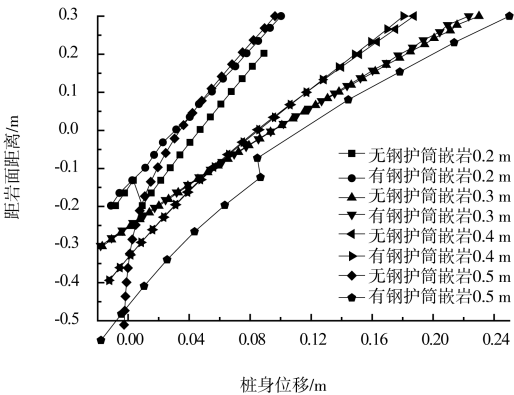


图 5 有钢护筒情况下嵌岩深度对桩身的位移曲线

进一步分析桩基基础的塑像带分布情况，可知有钢护筒桩基的塑性区通常分布在钢护筒与基岩接触段岩体顶部 1D 范围内，这与无钢护筒的嵌岩灌注桩完全不同，主要表现在：

1) 桩周无钢护筒的桩侧周围岩体的塑性区发展深度随桩体嵌岩深度的增加出现较显著的退化，并且随岩体模量增加，退化比例也出现明显增加。

钢护筒嵌岩桩无明显退化，随着岩土模量增加，顶部塑性区范围减小。

2) 从不同基岩弹性模量下不同嵌岩深度的基岩塑性区分布曲线(图 6)可知：无钢护筒的桩基分布曲线均呈反 S 形，有钢护筒的嵌岩桩只有 L 形分布，没有上段的变化段，即钢护筒嵌岩桩在嵌岩深度达到一定范围后，岩体的塑性区基本不变。

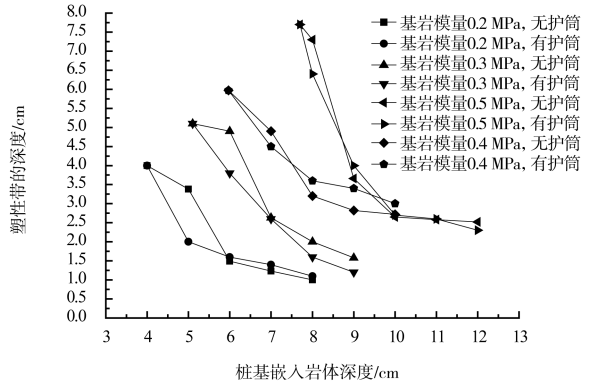


图 6 塑性带退化发展曲线

在水平荷载作用下，桩体嵌固深度的变化对岩体塑性区深度的发展趋势有明显影响；当钢护筒嵌岩桩基嵌固深度到达一定后，岩体的塑性区变化很小，这个深度基本是桩基直径的 4.5 倍。

3.2 钢护筒嵌岩桩桩身力学特性

从桩身弯矩分布曲线(图 7)可以看出，不论有、无钢护筒的嵌岩桩，在每级荷载下的弯矩基本保持随入岩深度的增加先增大到一个峰值然后迅速减小，此后会有一个略微增大的过程，最后基本减小为 0；最大弯矩主要存在入岩深度 1D 附近。只是在峰值以后钢护筒嵌岩桩的弯矩急剧减小，最后基本趋于 0。

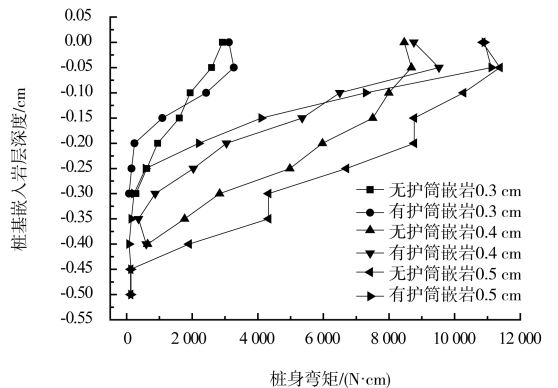
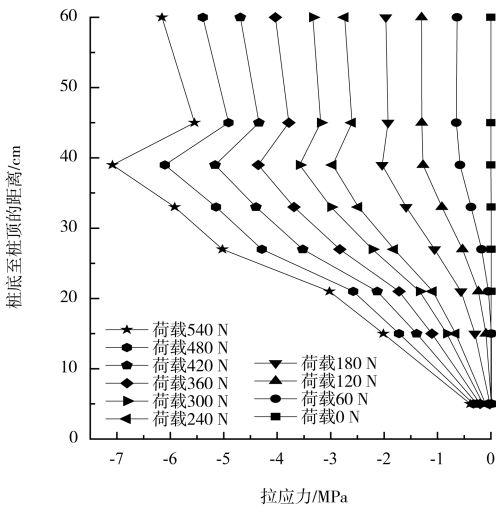
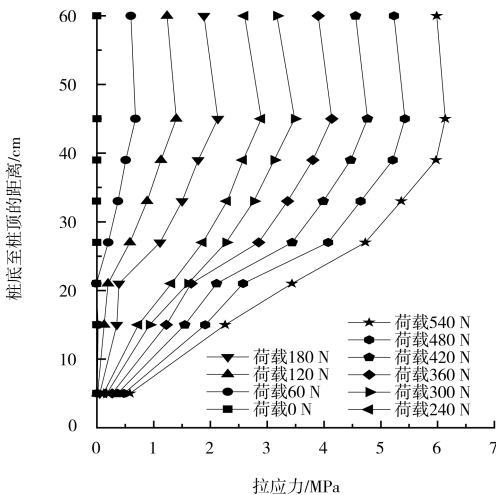


图 7 桩身弯矩分布曲线

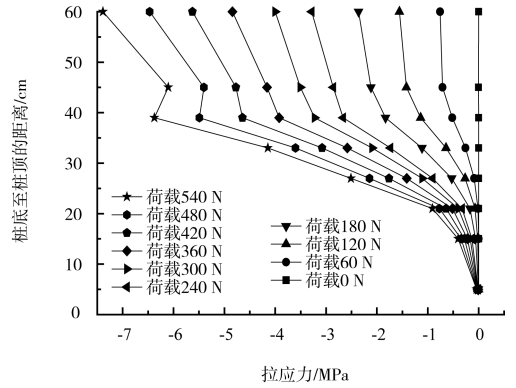
从桩基在不同荷载工况下的桩身应力分布曲线(图8)可以看出: 无钢护筒桩基在水平荷载 $\leq 180\text{ N}$ 时, 桩体在桩底向上 24 cm 的嵌固深度内弯拉应力较小; 而钢护筒桩基在水平荷载 $\leq 180\text{ N}$ 时, 桩基底部应力明显变化的趋势不明显, 在中部(桩底向上 24 cm)可以发现应力增加趋势明显, 上部应变突变趋势也不明显, 只是其数值明显大于无钢护筒桩基的应变。结合 $p-s$ 曲线, $z=24\text{ cm}$ 处可作为水平荷载不大于 180 N 时的嵌固点; 当水平荷载超过 240 N 时, 桩体会出现一定的整体位移趋势。桩基在不同荷载工况下的桩身应力分布曲线还可得到岩体渐进性破坏的特征: 当水平荷载等于 180 N 时, 岩体的塑性发展区距离嵌固深度 $z=24\text{ cm}$ 处还有一定距离, 正是这段



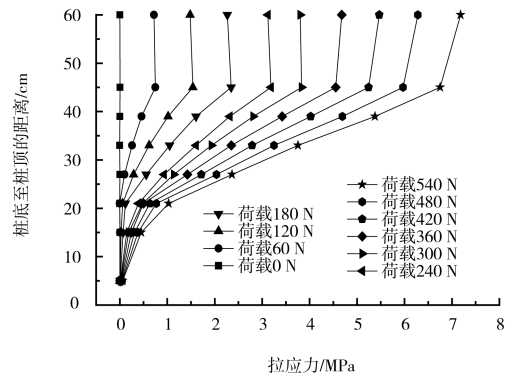
a) 无钢护筒桩身B侧拉应力



b) 无钢护筒桩身A侧拉应力



c) 有钢护筒桩身B侧拉应力



d) 有钢护筒桩身A侧拉应力

图8 有无钢护筒作用时桩基 A、B 侧拉应力分布

距离保证了桩体的整体稳定。嵌固于软岩中的桩基的水平临界荷载与极限荷载的界限并不明显, 因此桩的水平承载力宜从桩体应力、结构位移两方面来综合考虑。

进一步分析桩基的破坏模式, 发现水平荷载作用下嵌岩桩的破坏原因通常为两类: 1) 桩径较大、入岩深度较小且岩质较差时, 桩的抗弯刚度相对岩(土)体的刚度大, 在水平荷载作用下, 桩身主要表现为刚体转动, 其水平承载力主要依靠岩(土)体的强度控制; 2) 桩径较小、入岩深度较大且岩质较好时, 桩的抗弯刚度相对岩(土)体的刚度小, 在水平荷载作用下, 桩身主要表现为弹性桩的特性, 水平承载力主要受桩侧岩(土)体的抗力和桩身材料的抗弯刚度来控制。这类破坏从岩层面上观察, 靠近加载点的侧面均表现为桩身与桩周岩(土)体接触面发生轻微的脱开现象, 而远离加载点的另一侧面挤压地基岩(土)体出现层面轻微隆起现象。

3.3 最优嵌固深度

1) 当襟边宽度 s 不大于 15 cm 时(对应原型桩 3 m), 嵌岩桩的位移特性出现较大的变化, 岩体襟边的宽度影响已不能忽略。这一点在基桩的平面布置时应充分重视。

2) 当岩体的襟边宽度不断减小、约在地面线以下 5 cm 处(对应原型桩 1 m) 时, 各根桩的弯矩均达到最大值, 将导致桩体失稳或者岩土体的渐进破坏, 这对承受横向载荷的大直径嵌岩桩明显是不利的。

3) 当水平荷载不大于 180 N 时, 桩体在嵌固深度 $z=24$ cm 以下区域, 桩身段的弯拉应力较小, 与 $z=24$ cm 以上桩段的弯拉应力分布有较大区别; 当水平荷载等于 240 N 时, 桩体嵌固进入岩体部分的弯拉应力陡增, 其应力分布呈现为一条倾斜直线。结合荷载-位移曲线可见: $z=24$ cm 处可以作为对应水平荷载 180 N 以下时的嵌固点; 水平作用达到 240 N 以后, 桩体出现整体位移的变形趋势。

基于以上分析发现: 在嵌岩深度与桩周岩体塑性区深度的关系曲线里有 2 个特征点, 其中一个特征点对应嵌岩深度与岩体的塑性区深度相同, 一个特征点对应曲线的反弯点。随着嵌岩深度的不断增加, 岩体塑性区的深度退化速率不断减小。这说明, 对于嵌岩桩, 存在着 2 个典型的嵌固深度值。

为了方便分析, 约定图 7 的第 1 个特征点为桩体的最小嵌固深度, 最小嵌固深度为在预先指定的桩岩体几何和力学参数与水平荷载作用下, 桩周岩体全部进入塑性区时的嵌固深度; 图 7 的第 2 个特征点为桩体的临界嵌固深度, 大于该临界嵌固深度后, 随着嵌固深度的增加, 桩周岩体塑性区的退化速率几乎为零。

随着桩体嵌固深度的增加, 岩体塑性区深度的退化趋势见图 8。结合图 7 和图 8 可以知道, 从桩体嵌固深度的经济性和确保岩体对桩体的嵌固作用来看, 实际工程中桩体嵌固深度应大于桩体的最小嵌固深度且宜接近临界嵌固深度。通过数

值分析统计可知, 临界嵌固深度和最小嵌固深度的比值在 1.3~1.6 之间。

3.4 最小嵌固深度的影响因素

结合桩及岩体参数: 桩体直径 $D=0.09$ m; 悬臂段桩长 $H_1=1$ m; 桩体的弹性模量 $E_1=3.12$ GPa; 泊松比 $\mu_1=0.36$; 岩体的模量系数 $k=0.4$; 泊松比为 0.18; 斜坡坡角 $J=0$; 襟边宽度 L , 分别取 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30(与之对应的实际襟边宽度为 1、2、3、4、5、6 m), 开展了弹塑性有限元模拟分析。针对不同水平荷载和襟边宽度对应的最小嵌岩深度开展分析研究。通过计算发现:

1) 岩体襟边宽度对水平承载嵌岩桩的岩体塑性区影响较小。

2) 水平荷载等级对桩体最小嵌固深度的影响较大。分析表明当水平荷载增加 30 N, 桩体最小嵌固深度增加的最大值达到近 2 cm(对应于原型桩岩结构的 0.4 m)。

3) 襟边宽度对桩体最小嵌固深度的影响非常小。

4) 岩体模量对桩体的最小嵌固深度有显著的影响, 随着岩体模量的增大, 桩体最小的嵌固深度不断地减小。分别将水平荷载等于 60、90、120 N 时的桩体最小嵌固深度, 与此时的岩体模量可以绘制成图 9。

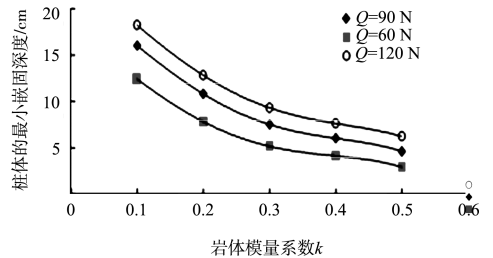


图 9 岩体模量对桩嵌岩深度的影响曲线

5) 水平荷载作用在不同位置, 将明显地影响桩体的桩身应力和位移。桩体位移曲线中, “反弯点”的位置低于桩体的临界嵌固深度。结合图 7 可以说明: 桩体嵌固深度应在图 10 所示的阴影范围内合理选择。

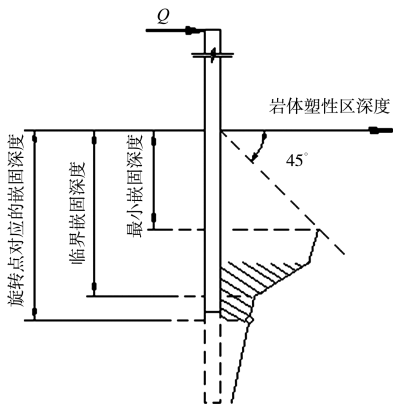


图10 岩体合理嵌岩深度关系

3.5 桩体直径与弹模对承载性状的影响

桩体直径增加有利于减小桩体位移, 同时可以更好地发挥岩体的抗力作用; 桩体直径对桩身应力的影响较大, 改变桩体直径可以作为调整桩身应力的方法之一。

在分析桩体弹模对嵌岩桩承载性状的影响时, 分别取桩体材料模量 $E_{pile} = 3.12$ 、 1.1×3.12 、 1.2×3.12 GPa, 获取桩身应力和桩体位移, 可以发现: 桩体材料的模量对嵌岩桩的桩体位移影响很微弱 (图11); 对桩身应力有一定的影响, 但是, 影响量不大

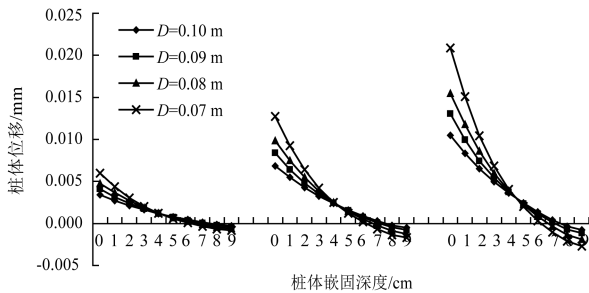


图11 岩体模量对桩嵌岩深度的影响曲线

4 结论

1) 钢护筒与混凝土嵌岩桩的水平承载力主要受桩径、桩体嵌固深度、岩体模量、作用点位置、襟边宽度等的影响。

2) 岩体模量和水平荷载对桩体的最小嵌固深度影响较大; 桩体的最小嵌固深度受岩体的襟边宽度影响不大, 其对应的原型岩体襟边宽度为 3 m。

3) 在水平荷载以及桩岩体结构预先指定的条件下, 岩体塑性区深度随着桩体嵌固深度的变化

而变化; 桩体的嵌固深度描述了岩体塑性区随着嵌固深度的变化趋势。

4) 岩体模量和水平荷载对桩体位移和桩身应力的影响较大; 水平荷载作用点也会明显地影响桩体的桩身应力和位移。

5) 随着桩体直径的增加, 桩的位移和桩身应力逐渐减小, 同时岩体的抗力作用不断增加, 因此改变桩体直径可作为调整桩身应力的方法之一。另一方面, 当采用较小的桩径时, 需要取用的嵌固深度较大。

参考文献:

- [1] 杨照兵, 陆周, 宋双. 牺牲阳极阴极保护技术在码头桩基工程中的应用[J]. 水运工程, 2011(7): 95-99.
- [2] 黄俊, 李浙江, 詹明旭. 宁波港鑫东方燃供仓储有限公司白峰码头设计综述[J]. 水运工程, 2009(9): 79-85.
- [3] 方育平, 何文钦. 大中型高桩码头不同类型桩基结构的应用与分析[J]. 水运工程, 2009(7): 87-92.
- [4] Moon K S, Connor J J, Fernandez J E. Diagrid structural system for tall building: Characteristics and methodology for preliminary design[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2007, 16(2): 205-230.
- [5] Han Lin-hai, Liu Wei, Yang You-fu. Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression[J]. Journal of Concrestructional Steel Research, 2008, 64(3): 377-387.
- [6] Prichard S J, Perry S H. Impact behaviour of sleeved concrete cylinders [J]. Structural Engineering, 2000, 78A(17): 23.
- [7] 陈肇元. 钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [8] 张望喜, 单建华. 冲击荷载下钢管混凝土柱模型力学性能试验[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 96.
- [9] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [10] GE H B. Strength of concrete-filled thin-walled steel box column: experiment[J]. Journal of Structural Engineering: ASCE, 1992, 118(11): 3 036.
- [11] 蔡健, 谢晓锋, 杨春, 等. 核心高强钢管混凝土柱轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 81-85. (本文编辑 郭雪珍)