

嵌岩桩承载性状的有限元分析

Vertical bearing capacity of rock-socketed piles

陈 斌^{1,2}, 卓家寿², 吴天寿³

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 中港第二航务工程局, 湖北 武汉 430014)

摘 要: 在有限元分析的基础上, 采用 Duncan 非线性弹性 $E-B$ 模型对嵌岩桩垂直荷载作用下的承载性状作了较为全面的探讨。指出嵌岩桩确实存在着深度效应, 当嵌岩达到一定深度后, 继续增加嵌岩深度, 对桩的承载能力的提高已不明显, 甚至无助于承载能力的提高。并得出了嵌岩桩垂直承载力与基岩强度成指数关系的结论, 强调桩底沉渣不仅增加嵌岩桩的平均侧阻力和桩身沉降, 而且将显著提高桩侧岩层的局部应力。文中结论可为桩基工程的科研、设计和施工提供参考。

关键词: 嵌岩桩; 垂直承载力; 端阻力; 侧阻力; 嵌岩深度; 荷载分担比; 有限元

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)01-0051-05

作者简介: 陈 斌(1964-), 男, 四川安岳人, 工程力学专业博士后。

CHEN Bin^{1,2}, ZHOU Jia-shou², WU Tian-shou³

(1. Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. The Second Navigation Engineering Bureau, Wuhan 430014, China)

Abstract: Based on finite element analysis, this thesis makes a comprehensive study on the bearing capacity of rock-socketed piles under vertical load, as well as its three influencing factors: socketed depth, bedrock strength and thickness of sediments. It brings forward the finite element method of rock-socketed piles using the Duncan non-linear elastic $E-B$ model. The results of the analysis make sure that socketed depth has an effect on piles, and come to the conclusion that the vertical bearing capacity of rock-socketed piles is in power relation with the strength of the bedrock. The results emphasize that the sediment in the pile bed will increase not only the average shaft resistance and the settlement of rock-socketed piles, but also the stress in the surrounding rock significantly. These conclusions can be used as a reference in research, design and construction of pile foundation.

Key words: rock-socketed pile; vertical bearing capacity; base resistance; shaft resistance; socket length; share of load; finite element method

1 概 述^{*}

70年代以后, 国际工程界纷纷对嵌岩桩的承载力进行试验研究, 但因试验经费过于庞大, 原型桩的试验过于困难等, 所得成果多不理想。因而许多学者的研究工作主要转为依靠室内模型试验, 配合电算技术进行模拟与分析, 这样获得了不少科研成果。有限单元法的应用对研究嵌岩桩承载力起到了不可缺少的作用。在考虑土的非线性属性、层状体系及桩土间的非线性相互影响等因素时, 有限单元法可能是现阶段最通用的方法。本文采用有限单元法对嵌岩桩的承载性状进行计算分析。

就岩土材料本身的物理力学性态的可变性和不确定性而言, 对嵌岩桩承载力进行有限元定量计算, 显然不如现场原型试验直观和准确, 定性分析是嵌岩桩有限元计算的特征。但如果就结构某一介质的变化进行对比分析, 同样由于岩土材料性态的复杂和不确定性, 相对于现场原型试验, 利用有限元法进行计算分析, 除了具备经济快捷和预估分析的优点外, 还能显示出其定量对比分析的特长。正基于此, 下面将重点分析嵌岩桩基岩强度、嵌岩深度及孔底沉渣等地质和施工因

素变化对嵌岩桩承载能力的影响。

考虑到岩层弹性模量较大, 嵌岩桩的桩端接触应力分布比较均匀, 其边缘应力略大于中心应力, 因此, 假定桩端接触应力为均匀分布。根据实测资料, 嵌岩桩在破坏前, 桩身的压缩变形与桩顶荷载呈线性关系, 故桩身视为线弹性体; 由于嵌岩桩区域的岩土体多为风化岩, 因而地基部分按非线性弹性体计算, 采用 Duncan $E-B$ 双曲线模型; 考虑到嵌岩桩都为灌注桩, 桩身与土体之间接触较好, 能够实现变形协调, 故未按常规设置接触面单元。即程序中仅涉及桩身混凝土及地基岩土两类材料, 假设混凝土为线弹性材料, 岩土本构关系服从 Duncan 非线性弹性 $E-B$ 模型, 且服从 Mohr-Coulomb 破坏准则。

由于桩基承载力分析多为单调加荷问题, 非线性弹性模型可能较适合于实际应用。虽然此模型可能会引入局部误差, 但从实用目的来看, 总的结论是合适的, 甚至也可近似地解决周期性加荷和卸荷的问题。长期以来, Duncan 模型作为土体非线性弹性模型的代表, 在土工计算中发挥了重要的作用。实际上土体要

发生屈服,产生不可恢复的塑性变形。所以,弹塑性模型更能反映土的实际变形特性。然而在实际土工问题中采用弹塑性模型进行数值分析的却很少,原因主要在于大多数模型参数测定困难,使用起来复杂,难以推广。此外,许多模型在工程计算中的应用效果也有待验证。如果采用复杂的弹塑性模型计算的结果与进行弹性非线性计算的结果相差无几,甚至有所不及,则不必采用复杂的弹塑性模型进行计算。所以一个模型的建立,既要尽可能反映材料的变形特性,又要兼顾到应用和参数测试的简单易行。Duncan 模型的一个显著优点就是参数测试简单,应用方便,因而被广泛应用于土工计算问题中^[1,2]。

2 嵌岩深度效应

嵌岩桩的概念一经提出,嵌岩深度的效应就成为这一课题的关键问题。表 1 及图 1~5 即展示了经有限元计算所得出完全嵌岩桩不同嵌岩深度下的结果,计算桩径取 $d = 1.0 \text{ m}$,取桩身混凝土为 C30 时的弹性模量 $E = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$,基岩的弹性模量为 $E = 6 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。基岩弹性模量的这一取值接近砂岩($E_i \approx 0.5 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4 \text{ MPa}$)、页岩($E_i \approx 1.0 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4 \text{ MPa}$)及石灰岩($E_i \approx 1.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4 \text{ MPa}$)的零荷载弹性常数变化范围的下限。

表 1、图 1~5 计算结果表明:

(1) 桩端荷载的传递率 Q_p/Q 随着嵌岩深度的增大而降低。在均质岩体中,当嵌岩深度比 $l/d = 1.0$ 时,桩端荷载传递率 $Q_p/Q = 40\% \sim 50\%$;当 $l/d = 2.0 \sim 3.0$ 时, $Q_p/Q = 10\% \sim 30\%$;当 $l/d \geq 5.0$ 时, $Q_p/Q \leq 10\%$ 。且由图 6 的荷载-沉降曲线上可以看出, $l/d = 5.0$ 与 $l/d = 10.0$ 的曲线非常接近。这也与嵌岩桩的试验研究结果^[3]是一致的。这些现象说明,嵌岩桩确实存在着深度效应,当嵌岩达到一定深度后,继续增加嵌岩深度,对桩的承载能力的提高已不明显,甚至无助于承载能力的提高。

(2) 对于嵌岩深度比 $l/d = 1.0 \sim 5.0$ 的一般情况,荷载传递率 Q_p/Q 随着桩顶荷载的增加而提高。这就意味着,嵌岩段桩侧阻力是先于桩端阻力而发挥作用,在荷载逐渐增大后,因桩侧岩层承受的应力逐步增加,桩岩之间的相对位移迅速增加,乃至传递到桩底,促使桩底基岩产生的反力增长较快。当嵌岩深度比过小或较大时,由于桩侧阻力或桩端阻力所占比例较大,荷载传递率的变化则不显著。

(3) 桩侧阻力的非线性分布现象突出,较多的情况下则为双峰曲线。就侧阻力曲线峰值的大小而言,一

般上部侧阻力峰值大于下端侧阻力峰值,但当桩顶荷载继续增大时,侧阻力的最大峰值有向下转移的趋势。上峰值多出现在 $0.15l$ (嵌岩深度) 附近,下部峰值多出现在 $0.75l$ 附近。在嵌岩深度 $10d$ 时,下部峰值逐渐退化。

表 1 嵌岩桩荷载分配计算结果表

Table 1 Calculated results of rock-socketed piles under loading

嵌岩深度 /m	荷载分配	桩顶荷载 Q/MN						
		2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
1.0	Q_s/MN	1.06	2.13	3.16	4.23			
	Q_p/MN	0.94	1.87	2.84	3.77			
	$\frac{Q_p}{Q}/\%$	47	47	47	47			
2.0	Q_s/MN	1.64	2.60	3.85	5.18	6.46		
	Q_p/MN	0.36	1.40	2.15	2.82	3.54		
	$\frac{Q_p}{Q}/\%$	18	35	36	35	35		
3.0	Q_s/MN	1.85	3.59	4.60	5.75	6.97		
	Q_p/MN	0.15	0.41	1.40	2.25	3.03		
	$\frac{Q_p}{Q}/\%$	8	10	23	28	30		
5.0	Q_s/MN		3.77	5.70	7.45	9.10	10.67	
	Q_p/MN		0.23	0.30	0.55	0.90	1.33	
	$\frac{Q_p}{Q}/\%$		6	5	7	9	11	
10.0	Q_s/MN			5.87	7.83	9.78	11.75	13.71
	Q_p/MN			0.13	0.17	0.22	0.25	0.29
	$\frac{Q_p}{Q}/\%$			2	2	2	2	2

注: Q_s 为桩侧阻力, Q_p 为桩端阻力

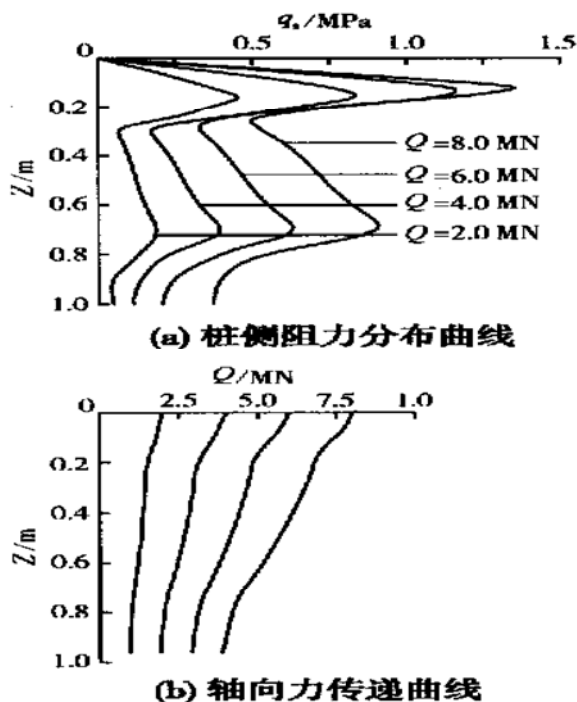


图 1 嵌岩 1 倍桩径时轴向力分布曲线

Fig. 1 Distribution of axial force in a pile with socketed depth equal to diameter of pile

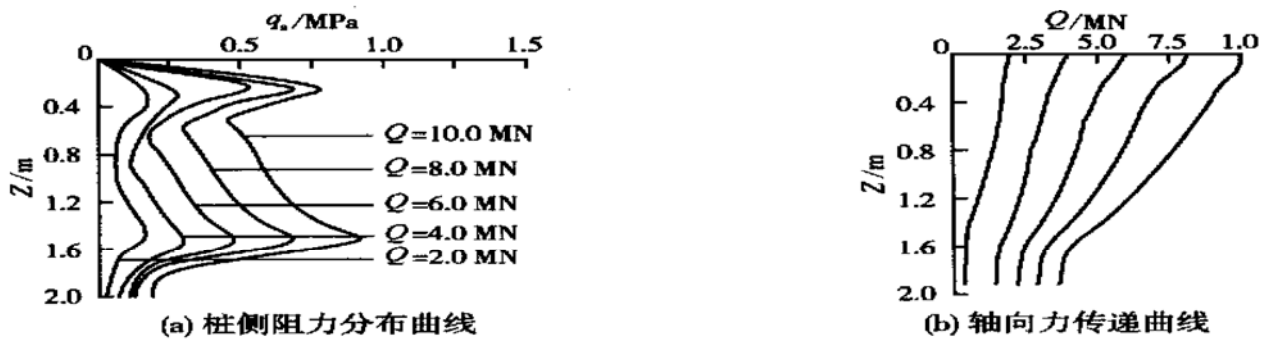


图2 嵌岩2倍桩径时轴向力分布曲线

Fig. 2 Distribution of axial force in a pile with socketed depth equal to two diameters of pile

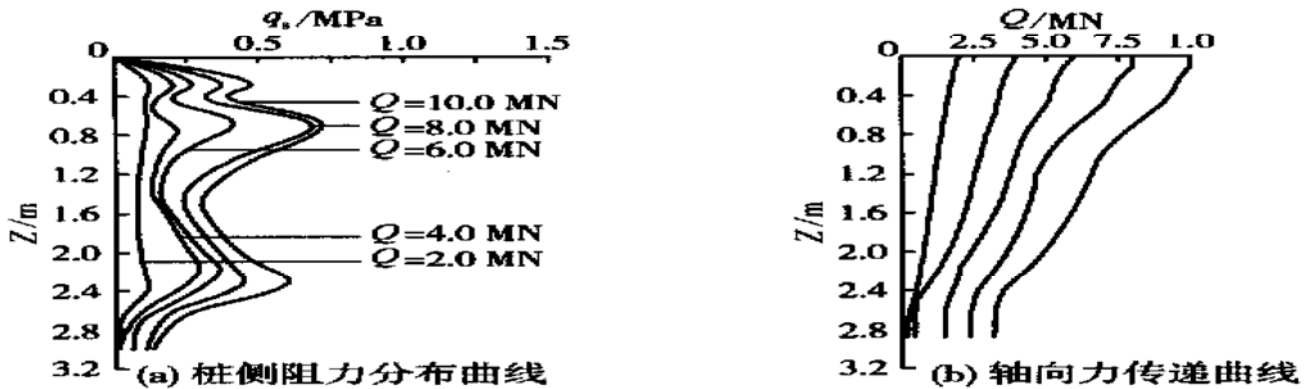


图3 嵌岩3倍桩径时轴向力分布曲线

Fig. 3 Distribution of axial force in a pile with socketed depth equal to three diameters of pile

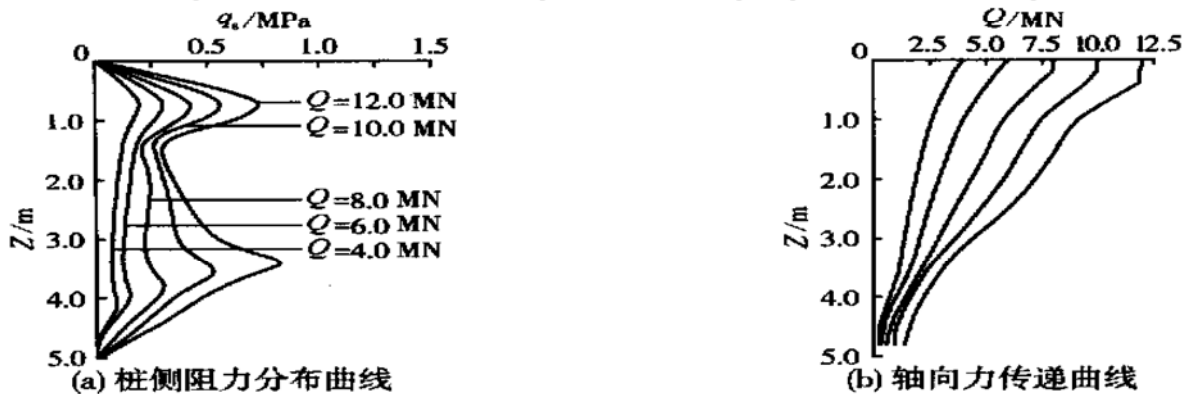


图4 嵌岩5倍桩径时轴向力分布曲线

Fig. 4 Distribution of axial force in a pile with socketed depth equal to five diameters of pile

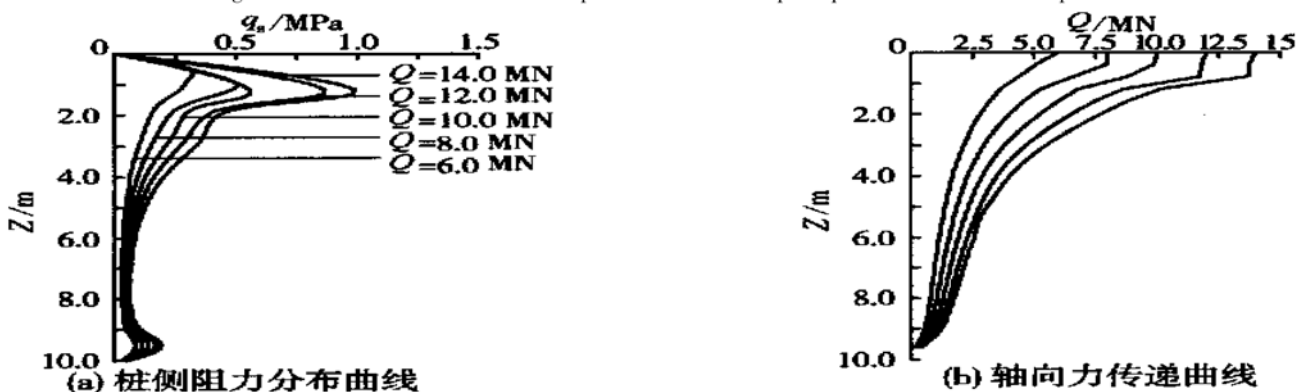


图5 嵌岩10倍桩径时轴向力分布曲线

Fig. 5 Distribution of axial force in a pile with socketed depth equal to ten diameters of pile

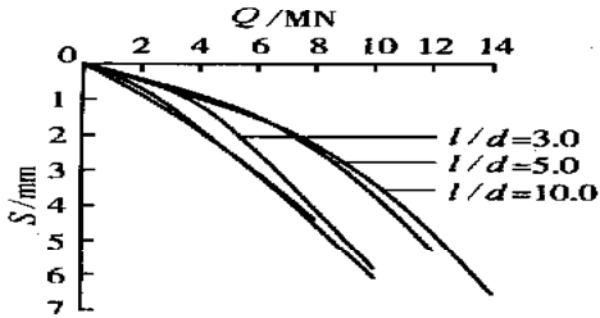


图6 嵌岩桩荷载 Q - 沉降 S 计算曲线

Fig. 6 Calculated curves of load vs. settlement for rock-socketed pile

3 基岩强度的影响

图7绘出了经有限元计算得出的 $d = 1.0\text{ m}$ 直径嵌岩桩在桩顶沉降为 5 mm 时的弹性模量与承载能力关系曲线,该曲线在对数坐标纸上可近似为一直线,如图7(b)所示。表2列出了按桩身材料弹性模量 $E_p = 3 \times 10^4\text{ MPa}$,桩底岩层弹性模量 $E_b = 6 \times 10^3\text{ MPa}$,而桩侧岩层弹性模量 E_s 变化时的荷载传递率值。从表中可以看出,当 $E_p/E_s > 2$ 时,桩端阻力所分担的荷载比例有较大的增加;当 $E_p/E_s > 8$ 时,桩的承载特性已由端承摩擦桩转变为摩擦端承桩,桩端阻力已分担大部分的荷载。

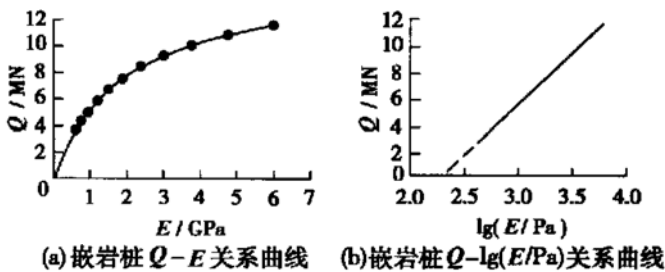


图7 嵌岩桩弹性模量和承载能力关系曲线

Fig. 7 Relationship between elastic modulus and bearing capacity of rock-socketed piles

表2 岩层强度对荷载传递率的影响计算值

Table 2 Effect of rock strength on calculated rate of load transfer

E_b/E_s	1	2	4	8	16	32
Q_s/MN	5.70	5.46	7.02	3.19	2.36	1.59
Q_p/MN	0.30	0.54	1.98	2.81	3.64	4.41
$\frac{Q_p}{Q}/\%$	5.0	9.0	33.0	46.8	60.6	73.45
S/mm	1.44	1.95	2.44	3.15	3.97	4.73

注: S 为桩顶沉降

综上所述,嵌岩桩的承载能力与基岩的弹性模量成指数关系,对于较软的岩层,寻求强度高一点的基岩作为嵌岩桩的持力层,将能够有效的提高嵌岩桩的承载力,而对于岩性较硬的岩层,过于追求更硬的岩层作

为嵌岩桩持力层,其承载能力可能难以达到理想的效果,亦不经济。同时应该注意,在桩侧岩层和桩底基岩的强度相差较大时,可能会使嵌岩桩的承载特征产生质的变化,即当桩侧岩层的强度相对于桩底岩层过低时,嵌岩桩会呈现出摩擦端承桩,甚至端承桩的承载性状。

4 桩底沉渣厚度的影响

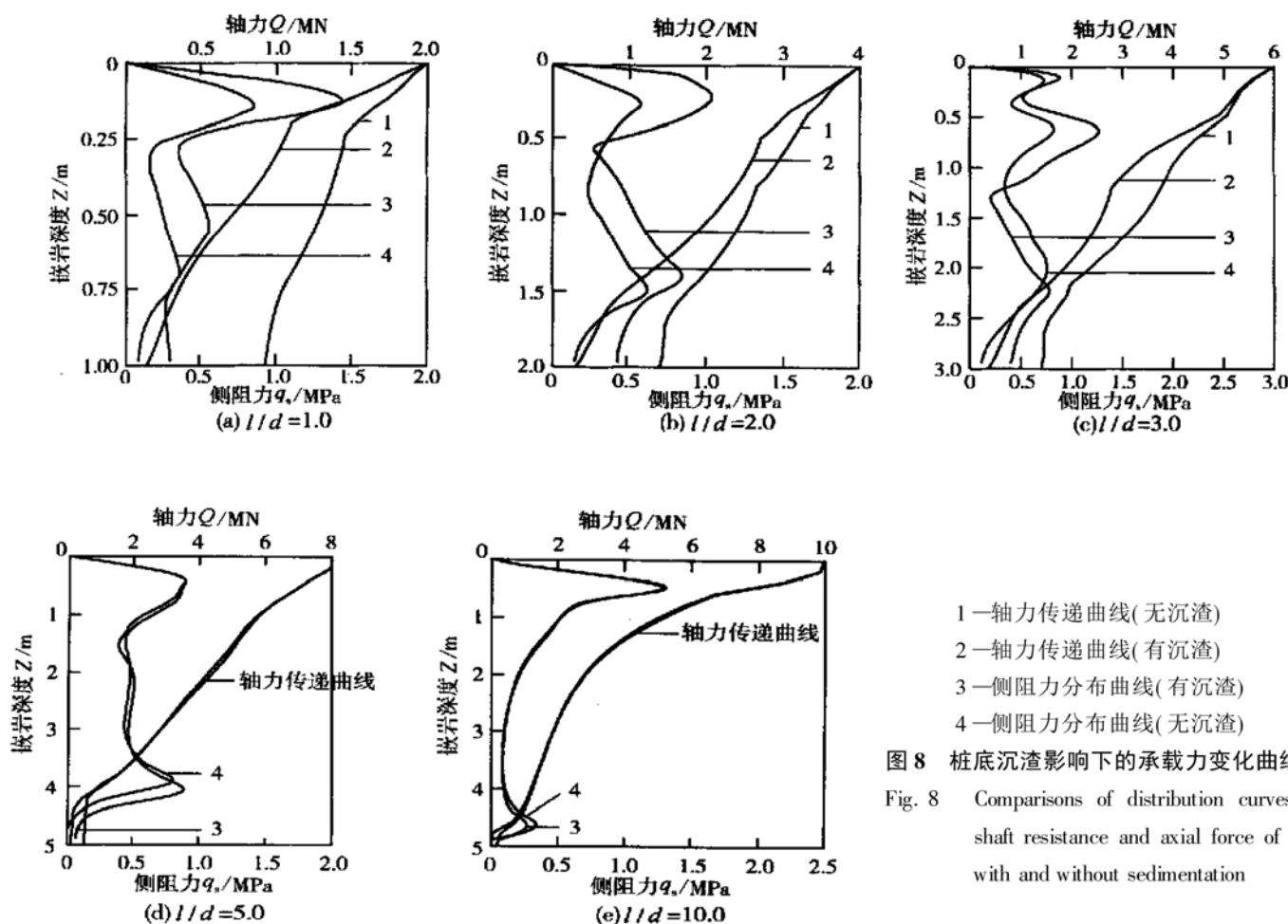
从传统观念出发,嵌岩桩的桩底是不允许留有虚土和沉渣的。随着对嵌岩桩认识的深化,人们已经发现,在很多情况下,嵌岩桩的承载力并不是以桩端阻力为主。因而,桩底残留沉渣和虚土问题也就不再那么敏感,更何况当采用泥浆护壁成孔,入土深度又较深的嵌岩桩,要想完全清除孔底沉渣几乎是不可能的。不过,在绝大多数条件下,是需要对沉渣数量作出控制的。图8即展示了经有限元计算得出的沉渣情况对嵌岩桩承载力的影响曲线,相应的计算值列于表3中。

表3 桩底沉渣对承载能力的影响计算

Table 3 Effect of thickness of sedimentation on bearing capacity of rock-socketed pile

序号	嵌岩深度比 $\frac{l}{d}$	桩顶荷载 Q/MN	桩底沉渣 /mm	桩顶沉降 /mm	桩端阻力 Q_p/MN	荷载传递率 $\frac{Q_p}{Q}/\%$
1	1.0	2.0	0	0.84	0.939	47.0
2	1.0	2.0	50	1.42	0.148	7.4
3	2.0	4.0	0	1.86	1.397	34.9
4	2.0	4.0	50	2.56	0.312	7.8
5	3.0	6.0	0	2.46	1.403	23.4
6	3.0	6.0	50	3.14	0.363	6.1
7	5.0	8.0	0	2.37	0.548	6.9
8	5.0	8.0	50	2.46	0.104	1.3
9	10.0	10.0	0	3.25	0.216	2.2
10	10.0	10.0	50	3.28	0.044	0.4

从计算结果中可知,当嵌岩深度比 $\frac{l}{d} \leq 3.0$ 时,桩底沉渣对嵌岩桩的承载能力影响较为显著。特别是对嵌岩段桩侧阻力的峰值影响较大,岩层所承受的剪应力峰值增长 50% 以上;当 $\frac{l}{d} \geq 5.0$ 时,桩底沉渣引起的承载力的变化甚微。因此,当桩的嵌岩深度比 $\frac{l}{d} > 5.0$ 时,桩端反力已基本不发挥作用,这也是与前面的分析与试验研究结果^[3]相符的。同时,也进一步说明当嵌岩深度较大时,对桩底沉渣的限制可适当放宽,以方便施工,但对于嵌岩深度较浅的情况(如嵌岩深度比 $\frac{l}{d} \leq 3.0$),则应注意桩底沉渣对嵌岩桩承载力的削弱影响。



5 结 论

从嵌岩桩有限元计算分析中,可以得到如下几个方面的认识:

(1) 嵌岩桩的桩端阻力对荷载的分担比例随着嵌岩深度的增加而逐渐减少。嵌岩深度效应显然是存在的,即当嵌岩达到一定临界深度后,再继续加大嵌岩深度对桩垂直承载能力的提高已无积极的作用。相反,由于桩长的增加,结构自重、建设成本以及施工难度都将增大。这都是应避免的不利的因素。但值得注意的是,当基岩强度不均匀时,嵌岩的临界深度不仅与桩径有关,而且与基岩强度有直接关系。随着桩侧基岩强度的减小,桩端阻力的荷载分担比将显著提高,因而当桩侧岩层强度相对于桩底基岩的强度较低时,嵌岩的临界深度会相应增大。

(2) 高强度的硬岩,其强度指标的波动,对于嵌岩桩承载力的影响相对于软岩要小,基岩强度与承载力之间有近似指数函数的关系。所以,在具体实践中,对软质基岩上的桩基,其岩石强度指标的取值应充分考虑其波动范围的下限值的不利影响,同时设计勘察中

应对岩石强度离散较大的区域,增加取样密度。

(3) 嵌岩桩有限元计算所显示的嵌岩段桩侧阻力的非线性分布现象突出,呈现为双峰曲线,这在嵌岩深度较小时,尤为明显,当嵌岩深度较大时,则下部峰值逐渐退化。但目前暂未见到这类情况的正式报道,因而有待于今后的工作中继续加以研究。

(4) 桩底沉渣在嵌岩较浅的桩基中应尽量减少,并需在设计和监理过程中引起重视。因为沉渣不仅仅是影响桩端阻力的发挥和平均桩侧阻力的增加,更重要的是较厚的沉渣会大大增加桩侧阻力的峰值,即加大局部应力。但对于嵌岩较深的桩基,由于沉渣对嵌岩桩的承载能力影响较小,沉渣量不必加以严格限制。

参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,1996. 44-106.
- [2] 孙 钧,汪炳枢. 地下结构有限元法解析[M]. 上海:同济大学出版社,1988. 192-197.
- [3] 重庆大学嵌岩桩课题组. 大直径嵌岩桩承载能力及施工工艺[R]. 重庆:重庆大学,1996.