

大直径嵌岩桩单桩承载性能的有限元分析

许锡宾¹, 周 亮¹, 刘 涛²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 长江航务管理局, 湖北 武汉 430014)

摘要: 分析了嵌岩桩承载力的组成, 考虑到桩身与周围土体之间存在着滑移的可能性, 对其设置接触单元, 利用三维有限元软件进行了桩侧阻力、桩端阻力及嵌岩深度的分析计算。讨论了嵌岩桩承载力与长径比、桩径、嵌岩深度及基岩强度的关系, 提出了长径比和桩径都是影响嵌岩桩承载力的重要因素, 过大的长径比对其承载力的提高并不明显以及存在着合理桩径; 验证了嵌岩桩确实存在着最佳嵌岩深度, 但不一定存在着最大嵌岩深度, 并且最佳嵌岩深度随着基岩强度的减弱而增大。

关键词: 嵌岩桩; 单桩; 承载性能; 有限元分析

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)06-0942-05

Finite Element Analysis of Load-bearing Properties of Large Diameter Rock-socketed Single Pile

XU Xi-bin¹, ZHOU Liang¹, LIU Tao²

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

2. The Yangtze River Administration of Navigational Affairs, Wuhan 430014, Hubei, China)

Abstract: Constitution of rock-socketed piles' load-bearing properties was analyzed; based on the possibility of slippage between the pile and surrounding soil, the pile side resistance, tip resistance and embedded rock depth were calculated through three-dimensional finite element software. The relationship between the load-bearing capacities and aspect ratio, pile diameters, rock-socketed depth and bedrock was discussed. The research result indicated that the aspect ratio and pile diameters played an important role in influencing bearing capacity; excessive aspect ratio exerted little influence on bearing capacity; the existence of the optimal depth embedded in the rock-socketed piles was verified, however, it was not certain whether there was the maximum depth of embedded rock or not; the weaker the rock strength, the deeper the optimal socketed rock.

Key word: rock-socketed pile; single pile; load bearing properties; finite element analysis

嵌岩桩作为一种特定的桩基类型, 具有承载力高、变形小及施工简单等特点, 自 20 世纪 90 年代以来得到了广泛的工程应用, 其承载性能也备受众多学者关注, 并对此做了大量的分析与研究工作。Rowe 和 Armitage^[1] 对嵌岩桩桩岩模量比、相对嵌入深度等进行了分析, 认为桩侧阻力随着嵌岩深度的增大而略有减小, 单位侧阻随着桩径的增大而有所减小以及岩性越好, 桩侧极限阻力越大; 黄求顺^[2] 通过实验认为嵌岩桩的嵌入深度为 3 倍桩径时, 桩侧阻与端阻都可以得到较充分的发挥, 嵌入深度为 5 倍桩径时, 桩端阻力接近为 0, 超过 5 倍桩径时桩端已无阻力存在; 刘利民^[3] 等通过对不同场地的 5 根嵌岩桩荷载试验结果的灰色关联分析, 认为嵌岩桩桩岩侧阻力对桩身承载力的影响最大以及上覆土

层的桩土侧阻力也对其有着显著的影响, 在设计时两者都不能忽略; 刘兴远^[4] 等提出了以 BP 网络模型来研究嵌岩桩嵌岩段极限承载力的影响因子的方法, 认为岩体的风化程度是主要因素并且存在着最优桩长; 陈斌^[5] 等则利用有限元方法得出了嵌岩桩确实存在着嵌岩深度效应, 其竖向承载力与基岩强度成指数关系; 王耀辉^[6] 等利用嵌岩桩模型试验及数值分析的方法得出了桩-岩界面上的摩阻力是非均匀分布的, 并指出在高强度岩体中嵌岩桩的承载力与桩-岩界面的摩阻力特性有极大关系; 赵世航^[7] 等针对嵌岩桩规范中计算竖向承载力的不足, 利用灰色预测系统理论对嵌岩桩单桩承载力进行预测, 并与实测的试桩成果相比较, 结果表明该理论模型可行且测量精度较高; 赵明华^[8] 等基于桩-岩结

构面特性的嵌岩桩荷载传递分析,提出了考虑影响嵌岩桩荷载传递的综合影响系数 η ,同等条件下, η 值越大,嵌岩桩的承载性能越好;王红伟^[9]等通过对西埃门大桥 2.8 m 直径嵌岩桩静载试验和应力测试结果分析,得出在桩侧与桩端岩石强度较高时,桩侧摩阻力和端阻力在桩岩相对位移和桩端位移很小时就能够发挥出较高的水平;王勇刚^[10]通过对嵌岩桩的有限元分析,得出桩周土体内聚力增加时,桩侧土体所分担的荷载比将增大。

这些研究成果极大地丰富了嵌岩桩领域的内涵,对进一步认清嵌岩桩的工作机理、承载特性及失效模式等都具有很重要的意义。但由于工程地质条件的复杂性,经过一些简单假定后的模拟计算结果并不能很准确地反映嵌岩桩工作的实际状态,目前的研究或多或少存在着一些缺陷。笔者通过桩岩(土)间的滑移-剪胀理论^[11],运用三维有限元软件 ANSYS 在桩-土-岩边界处设置接触单元,对大直径嵌岩桩单桩进行数值模拟分析,提出其承载性能的一些看法,以期能更深入认识嵌岩桩的工作性态。

1 计算方法

在现行的规范中,认为嵌岩桩的竖向承载力主要由 3 部分组成:桩与土间的侧摩阻力、嵌岩段的侧摩阻力及桩端阻力。其承载力标准值可由式(1)表示,图 1 为嵌岩桩的受力分析。

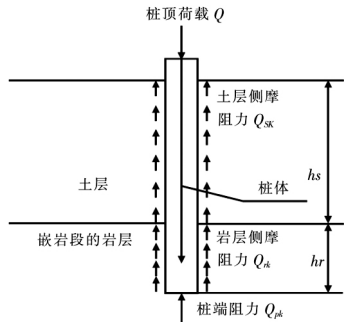


图 1 嵌岩桩受力分析
Fig.1 Force diagram of rock-socketed piles

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk} + Q_{pk} \tag{1}$$

式中: Q_{uk} 为桩的极限承载力; Q_{sk} 为桩土间侧阻力; Q_{rk} 为桩岩侧阻力; Q_{pk} 为桩端阻力。

1.1 基本假定

在对嵌岩桩进行有限元数值模拟分析时,做了以下基本假定:

- 1) 为了准确地模拟桩周土的工作状态,对土体及沉渣采用符合 Drucker - Prager 屈服准则的 D - P 材料模型;
- 2) 岩体是均质各向同性的地下空间半无限体,而且为小变形,按连续线弹性模型来考虑;
- 3) 地基土具有非线性性质,假定桩与桩周土之间是紧密接触,无法向渗透,但会产生切向相对滑移;
- 4) 混凝土、土为均匀且各向同性的;
- 5) 岩土体可以分层;
- 6) 不考虑时间效应,荷载为静力加载。

1.2 参数的选取

1.2.1 几何参数

分别给出桩径、桩长径比、嵌岩深度的变化范围及沉渣深度的取值。

- 桩径 D 变化范围: 0.8 ~ 2 m;
- 桩长径比 L/D 变化范围: 5 ~ 25;
- 嵌岩深度 h_r 变化范围: 1 D ~ 9 D ;
- 沉渣厚度 h_c 取为 5 cm。

1.2.2 材料物理力学参数

岩体材料参数一般根据试验数据确定,此处根据重庆地区试验资料取值^[12],详见表 1。但在进行数值模拟分析时根据需要适当地调整,以便分析影响嵌岩桩承载性能的各种因素。桩周土体及沉渣 D - P模型计算参数见表 2。

桩身混凝土材料参数: 混凝土强度等级 C20,弹性模量为 $E_p = 25\ 000\ \text{MPa}$,泊松比为 $\mu = 0.2$,轴心抗压强度设计值为 $\sigma_{cm} = 9.6\ \text{MPa}$,轴心抗拉强度设计值为 $\sigma_{tm} = 1.1\ \text{MPa}$,容重 $\gamma = 25\ \text{kN/m}^3$ 。

表 1 岩体材料参数

Tab.1 Rock mechanical parameters

岩体性质	岩体抗压强度 σ_{cm}/MPa	岩体抗拉强度 σ_{tm}/MPa	弹性模量 E_m/MPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
微风化	38.24	0.82	4.0×10^3	0.30	28
中风化	19.75	0.63	2.5×10^3	0.28	26
强风化	4.62	0.40	1.8×10^3	0.25	24
全风化	1.86	0.15	1.0×10^3	0.20	22

表 2 桩周土体及沉渣 D - P 模型计算参数

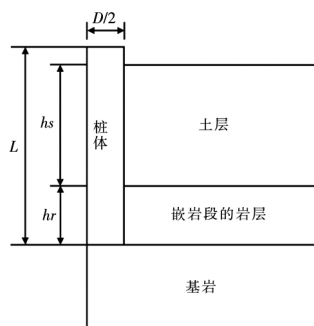
Tab.2 D - P model parameters of soil and sediments around pile

材料	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	膨胀角 $\psi/(\text{^\circ})$	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E_m/MPa	泊松比 μ
土体	18	30	21	20	2.5×10^2	0.35
沉渣	10	25	17	20	2.5×10^2	0.32

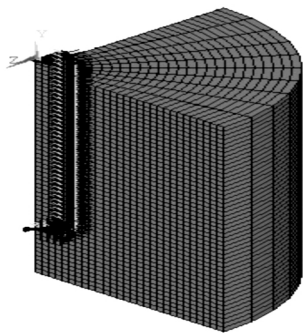
1.3 有限元模型的建立

1.3.1 模型的建立及网格划分

嵌岩桩的数值模型包括5个部分,即嵌岩段岩体、上覆土层、桩身混凝土、桩底沉渣和桩岩(土)界面。由于单桩的几何形状和变形对称于桩的垂直轴线,分析时将它简化为桩截面的1/4模型,建立的桩-岩-土模型,如图2(a)。采用三维空间8节点等3单元 solid45 对桩土岩结构进行离散,桩土(岩)之间设置接触面薄层单元,把桩单元定义为刚性面,而周围的岩(土)体为柔性面。为保证计算的速度和精度,一方面尽量地减少单元的数目,另一方面在桩与岩(土)的接触面附近和桩端持力层尽量加密网格,在高应力梯度区,单元尽量划分得较为密集,在边界处适当地加大,网格划分后的有限元模型如图2(b)。



(a) 桩-岩-土平面模型



(b) 桩-岩-土划分网格的三维模型

图2 嵌岩桩数值模拟模型

Fig.2 Numerical simulation model of rock-socketed piles

1.3.2 边界条件和约束问题

对于嵌岩桩模型边界条件,上边界为自由边界,在对称面边界($X=0, Z=0$)承受对称位移约束,下边界承受固定位移约束。

1.3.3 作用荷载

在进行数值模拟时,结构上作用的荷载主要考虑上覆土层的自重应力和桩顶所施加的荷载。由于土体中应力应变是非线性的,如果不考虑时间效应,而仅仅根据当前较小的自重应力来计算土体弹性模量,会使计算结果偏小,从而使地面位移偏大,实际

上土体的初始应力状态是无法准确计算的,一般应由实验来确定。作为近似估计,可以采用土体的自重应力,由桩所引起土体的初始应力场的变化不予考虑。

2 数值模拟结果分析

通过对数值模拟得到的结果进行分析,认为长径比、桩径、嵌岩深度以及基岩强度等因素影响着嵌岩桩的承载能力,下面分别就这些因素进行分析。

2.1 嵌岩桩长径比的影响

为考虑长径比对嵌岩桩承载性能的影响,假定桩周土体为均质的单一土体,岩体也为均质的且分层。

数值模拟过程中,桩径 $D=2\text{ m}$,嵌岩深度为 $h_r=6\text{ m}$,覆盖土层为 3 m ,沉渣厚度为 5 cm ,持力层为中风化岩(岩体参数取值见表1),长径比考虑5, 9, 15, 20 及 25 五种情况。在嵌岩桩顶部施加表面力 $318\ 471\text{ Pa}$,即相当于整根桩在桩顶施加 $1\ 000\text{ kN}$ 的荷载; $636\ 942\text{ Pa}$ 相当于施加 $2\ 000\text{ kN}$ 的荷载。不同长径比下各参数随桩顶荷载变化如图3。

图3(a)为在相同荷载水平下,长径比 L/D 为5~25时桩顶沉降随桩顶荷载的变化曲线图。由图可知:当长径比 L/D 在5~15之间时,其桩顶沉降变化较缓慢,在终极荷载 $9\ 000\text{ kN}$ 下均不超过 13.0 mm ;而对于 $L/D > 20$ 的嵌岩桩,其桩顶沉降变化较快,在终极荷载作用下均大于 15.5 mm 。由于嵌岩桩嵌岩段的侧阻力较大,其位移几乎为0,因而桩顶的沉降主要是桩端沉降和非嵌岩段的桩身与土体之间的侧摩阻力所构成;数值模拟中还发现当桩顶施加荷载极小时,桩顶的位移甚至小于最上端土层的位移。

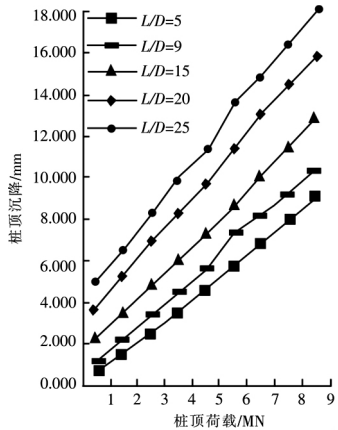
图3(b)为不同长径比下桩侧阻力随桩顶荷载的变化曲线图。图中反映出来的规律与图3(a)相同,当 $L/D < 10$ 时,桩侧阻力所占桩顶荷载的比例较小;当 $L/D > 15$ 时,桩侧阻力随着桩顶荷载的增加而逐渐增大,但 $L/D = 20$ 与 25 时,两者所占的比例差值较小。

同时,桩土侧摩阻力与桩身承载力之比也随着长径比的增大而增加图3(c)。但非嵌岩段的桩土侧阻力发挥到一定程度后,其所占桩顶荷载的比例几乎保持不变。

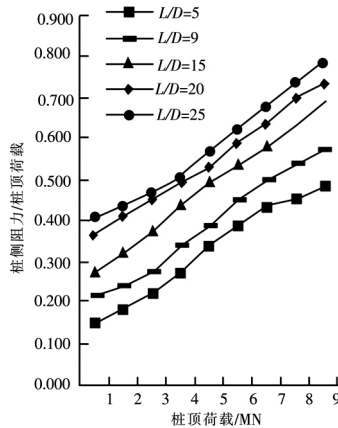
综上,由数值模拟结果可得出:

1) 覆盖土层具有分担荷载的作用,在多数情况下,不能把嵌岩桩简单地简化为端承桩来计算,应充分考虑非嵌岩段的桩土侧阻力,覆盖土层强度较高且厚时能有效地降低桩端与桩顶的沉降,提高嵌岩桩的承载能力。

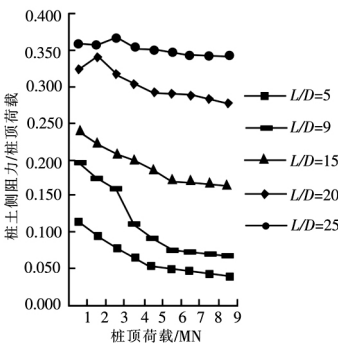
2) 大长径比的桩其桩顶沉降变化较快,一味地增加长径比,桩顶的位移过大,可能影响桩的屈曲稳定和结构的强度,对提高嵌岩桩的承载能力并无积极的作用。



(a) 不同长径比下桩顶沉降随荷载变化



(b) 不同长径比桩侧阻力随桩顶荷载变化



(c) 不同长径比桩土侧阻力随桩顶荷载变化

图3 不同长径比下各参数随桩顶荷载变化

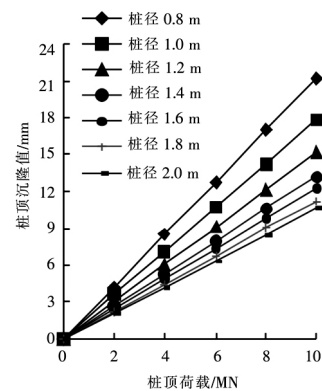
Fig.3 Variation of parameters with change of pile top load under different aspect ratios

2.2 嵌岩桩桩径的影响

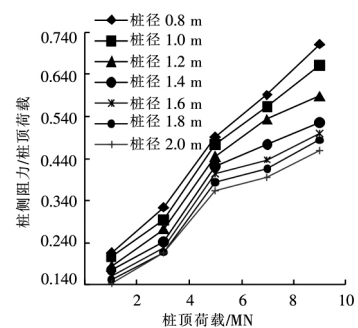
图4为嵌岩桩在桩长 $L=20$ m,嵌岩深度为 $h_r=3D$,覆盖土层为5 m,沉渣厚度为5 cm,持力层为中风化岩(岩体参数取值见表1),桩径分别为0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8及2.0 m等7种情况下,桩顶沉降与桩顶荷载及桩侧阻力与桩顶荷载的变化

图。

从图4(a)中可以看出,桩径愈大,同一水平荷载下的桩顶沉降就愈小,特别是在桩径小于1.4 m时变化较明显;当桩径大于1.4 m时,其变化逐渐趋缓。在以沉降来控制嵌岩桩的承载性能时,可以看出桩径在0.8~1.4 m区间变化时,桩径愈大,其承载能力有很大的提高。比较直径为1.6 m与2.0 m的荷载沉降曲线可知,在同一荷载作用下,两者的沉降值相差甚微,分析其原因在于桩径增大的同时结构的自重也迅速增加。承载能力得不到有效的增加,因而过分追求桩径来提高嵌岩桩的承载力是不经济的。



(a) 桩顶沉降随桩顶荷载的变化



(b) 桩侧阻力比随桩顶荷载的变化

图4 不同桩径下各参数随桩顶荷载变化

Fig.4 Variation of parameters with change of pile top load under different pile diameters

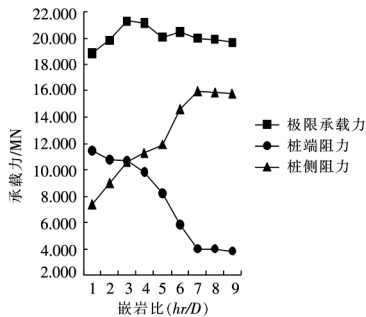
同时,由图4(b)可以看出,随着桩径的增大,桩侧阻力所占桩顶荷载的比例呈减小趋势,当桩径小于1.4 m时,其值变化较大;当桩径大于1.4 m时,其变化逐渐趋缓。这是因为桩径增大的同时,桩顶沉降变小,桩侧土层阻力得不到发挥所致。

2.3 嵌岩桩的嵌岩深度效应

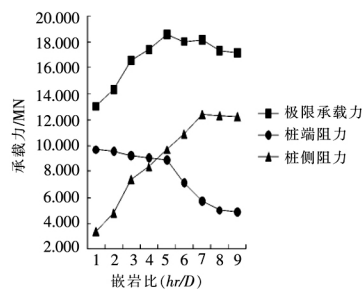
为考虑嵌岩深度对嵌岩桩的承载性能的影响,仍假定桩周土体为均质单一的土体,在数值模拟过程中计算了硬岩与软岩2种情况,假设硬岩的强度为软岩的5倍。计算时取桩长 $L=30$ m,桩径 $D=2$ m,覆盖土层厚度为5 m,沉渣厚度为5 cm,硬岩的

抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比及容重分别取为 32.35 MPa、0.75 MPa、3.7 GPa、0.3、27.5 kN/m³; 软岩的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比及容重分别取为 6.47 MPa、0.57 MPa、2 GPa、0.26、25 kN/m³, 其承载力随嵌岩深度的变化情况如图 5。

从图 5 可知: 在嵌岩深度不大时, 嵌岩桩单桩的承载力随着嵌岩深度的增加而有所提高, 且在软岩中增长速度较硬岩中快。



(a) 硬岩下承载力随嵌岩深度变化图



(b) 软岩下承载力随嵌岩深度变化图

图 5 不同基岩承载力随嵌岩深度的变化图

Fig. 5 Variation of bearing capacity with change of rock-socketed depth under different rocks

由图 5(a) 可知: 硬质基岩中, 在 3 倍嵌岩桩径时, 承载力达到最大值; 而在 5 倍嵌岩桩径时, 承载力并未有所提高, 甚至有所下降; 到达 9 倍桩径时, 端阻比为 19.7%。

由图 5(b) 可知: 软质基岩中, 最佳嵌岩深度并不是 3 D , 而是 5 D , 此时端阻比为 47.8%, 当嵌岩深度增加到 9 D 时, 桩端阻力仍不为 0, 逐渐趋于一定值, 端阻比为 28.5%, 因而不存在理论上的最大嵌岩深度, 这与宋仁乾^[13] 等对浙江地区软土地基嵌岩桩的分析结论较为一致。

综上所述, 嵌岩桩确实存在着嵌岩深度效应, 当嵌岩到达一定的深度后, 继续增加嵌岩深度, 对桩承载能力的提高已不明显, 甚至无助于承载能力的提高。这是因为嵌岩桩桩侧阻力总是先于桩端而发挥作用的, 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大, 乃至传递到桩底部, 促使桩底基岩产生的反力较快增长。当嵌岩深度比较小(或较大)时, 由于桩端(或桩侧)阻

力所占桩顶荷载的比例较大, 荷载传递的变化则不显著。

3 结 语

通过桩岩(土)间的滑移-剪胀理论, 运用三维有限元软件 ANSYS 在桩-土-岩边界处设置接触单元, 对大直径嵌岩桩单桩进行数值模拟分析, 得到了以下结论:

1) 嵌岩桩的桩侧阻力对桩顶荷载的分担比随着长径比的增加而提高, 当桩顶位移达到 10 mm 时, 上覆土层的侧阻力就可以得到充分的发挥。因而, 不能简单地把嵌岩桩作为端承桩来考虑。

2) 桩径较小时, 适当增加桩径有利于提高嵌岩桩的承载力, 但是桩侧阻力的发挥又要求较小的桩径, 所以应该寻求两者较为吻合的桩径; 以桩顶沉降量来控制嵌岩桩的承载性能时, 笔者认为合理的桩径应为 1.4 ~ 1.6 m。

3) 嵌岩桩的桩端阻力对桩顶荷载的分担比随着嵌岩深度的增加呈减小的趋势。嵌岩深度效应显然是存在的, 当嵌入深度不大时, 承载力随着嵌岩深度的增加而提高; 当嵌入达到一定深度时, 其承载力并不能得到显著提高。笔者认为硬质基岩的最佳嵌岩深度为 3 D , 软质基岩为 5 D , 但是并不存在最大嵌岩深度。

4) 如按 GB 5007—2002《建筑地基基础设计规范》, 嵌岩桩的嵌岩深度应为 (1 ~ 3) D , 但这只适应于硬岩, 对于嵌入较软的岩层并不是如此, 到达 3 D 后, 其承载力还有较大的提高, 笔者认为应该是 (3 ~ 5) D 。

参考文献:

- [1] Rowe R K, Armitage H H. Theoretical solutions for axial deformation of drilled in rock [J]. Can. Geotech. J., 1987(24): 114 ~ 125.
- [2] 黄求顺. 嵌岩桩承载力的研究 [C] // 中国建筑学会地基基础学术委员会论文集. 西安: 陕西高校联合出版社, 1992: 47 ~ 52.
- [3] 刘利民, 张洪文, 张建新, 等. 嵌岩桩承载特性的灰色关联分析 [J]. 西部探矿工程, 1996, 8(3): 6 ~ 7.
- [4] 刘兴远, 郑颖人. 影响嵌岩桩嵌岩段特性的特征参数分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 383 ~ 386.
- [5] 陈斌, 桌家寿, 吴天寿, 等. 嵌岩桩承载性能的有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 51 ~ 55.
- [6] 王耀辉, 谭国焕, 李启光, 等. 模型嵌岩桩试验及数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1691 ~ 1697.
- [7] 赵世航, 许锡宾. 嵌岩桩竖向承载力的探讨 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(2): 255 ~ 258.
- [8] 赵明华, 雷勇, 刘晓明, 等. 基于桩-岩结构面特性的嵌岩桩荷载传递分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 103 ~ 110.
- [9] 王红伟, 戴国亮, 龚维明, 等. 大直径深长嵌岩桩承载特性的试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(4): 7 ~ 10.

(下转第 977 页)

(续表 5)

序号	权重	纱帽	沌口	杨泗	汉口	谌家矶	阳逻	金口	涂家巷	余家头	红钢城	武石化	武钢工业	白浒山
C19	0.025 5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C20	0.050 5	0.3	0.9	0.9	0.7	0.5	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9
C21	0.041 4	0.3	0.7	0.9	0.9	0.3	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.9
C22	0.013 7	0.5	0.7	0.9	0.7	0.5	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9
C23	0.023 3	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C24	0.033 6	0.5	0.7	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.7
C25	0.013 9	0.9	0.7	0.5	0.3	0.7	0.9	0.9	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.9
C26	0.005 5	0.5	0.7	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C27	0.012 0	0.3	0.9	0.9	0.9	0.5	0.9	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.9
C28	0.004 2	0.3	0.5	0.9	0.9	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7
汇总得分		0.643 9	0.803 4	0.810 8	0.785 7	0.618 9	0.887 5	0.777 6	0.749 9	0.730 7	0.777 3	0.862 3	0.857 3	0.897 6

6 结 语

笔者在全面梳理影响港口岸线等级优劣因素的基础上,确定了评价指标体系。在计算指标权重时,引入了不确定性 AHP 法和群决策理论,使评价计算结果更具可信性。实证表明,该方法克服了原有评价方法的弊端,提高了评价结果的准确性和科学性,具有较好的实践运用价值。

参考文献:

[1] 杨大鸣,王呈芳,张培林. 港口岸线评价模型及其应用[J]. 水运工程,2003,351(4): 38-42.

[2] 马荣华,杨桂山,陈雯. 长江江苏段岸线资源评价因子的定量分析与综合评价[J]. 自然资源学报,2004,19(2): 176-182.

[3] 许光委. 港口岸线的资源性分析和等级评价研究[D]. 天津:

天津大学,2005.

[4] 邱彬皇. 港口岸线资源评价与适应性研究[D]. 上海: 上海海事大学,2007.

[5] 王莲芬. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社,1990.

[6] 唐秋生,张洋,李萍. 基于层次分析与灰关联分析的公路货运市场细分方法[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版,2008,27(2): 313-316.

[7] 刘进生,魏毅强,王绪柱. 区间数判断矩阵的建立及其评分权重计算[J]. 系统工程,1993,11(3): 43-45.

[8] 董元帅,唐伯明. 基于区间数法的水泥路面使用性能评价[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版,2009,28(5): 870-872.

[9] 许先云,杨永清. 不确定 AHP 判断矩阵的一致性逼近与排序方法[J]. 系统工程理论与实践,1998(2): 19-22.

[10] 秦学志,王雪华,杨德礼. AHP 中群组判断的可信度法[J]. 系统工程理论与实践,2000,19(5): 76-78.

(上接第 946 页)

[10] 王勇刚. 嵌岩桩承载性状有限元分析[J]. 长江科学院院报,2010,27(4): 44-48.

[11] 周韬. 无覆盖土层嵌岩桩的受力机理及承载性能的研究[D]. 长沙: 中南大学,2007.

[12] 陈洪凯,唐红梅,陈野鹰,等. 三峡库区港口地质灾害防治关键技术研究[R]. 重庆: 重庆交通大学岩土工程研究所,2004.

[13] 宋仁乾,张忠苗. 软土地基中嵌岩桩嵌岩深度的研究[J]. 岩土力学,2003,24(6): 1053-1056.

(上接第 957 页)

结果有重要影响。在进行风险管理决策时,需要分析其风险管理成本和风险管理效益,判断风险管理措施经济上是否可行,考虑到备选方案客观上的风险水平。同时应充分地考虑到决策者的风险态度问题,如果风险出现,决策者应对该风险造成的整体或部分损害承担财物责任,应该建立风险管理决策激励约束机制,风险管理决策者应当承担相应的决策责任,分享科学决策的效益,以减少项目风险管理中盲目决策的风险损失。

参考文献:

[1] 陆际恩,谭宇胜,彭波,等. 效用理论与期望损益值理论在项目风险决策中的比较[J]. 施工技术,2006(4): 25-27.

[2] 蒋学炼,李炎保. 联合效用理论与风险量化的防波堤决策模型研究[J]. 海洋通报,2009(1): 12-15.

[3] 邓铁军,仇一颗. 工程风险管理[M]. 北京: 人民交通出版社,2004.

[4] 陈伟珂,黄艳敏,何伟怡. 工程项目风险管理[M]. 北京: 人民交通出版社,2007.

[5] 陈艳春. 决策支持系统设计与开发[M]. 北京: 中国铁道出版社,2007.

[6] 杜波,林利宇. 浅谈集团项目管理中质量风险的控制与防范[J]. 土木工程学报,2003(3): 90-94.

[7] 郭长有,陈军. 基于信息化建设的项目群管理模式[J]. 管理工程学报,2005(增刊): 18-21.

[8] 韩玉琴. 某施工企业建筑工程质量现状与治理[J]. 山西建筑,2002(5): 132-133.

[9] 杨少华. 浅谈建筑工程施工的质量控制[J]. 工程质量,2002(8): 22-25.