

软弱下卧层上持力岩层的端阻力特征值取值

罗照华^{1,2,3}

(1. 湖南省地质工程勘察院, 湖南株洲 412003; 2. 湖南省地质矿产勘查开发局 416 队, 湖南株洲 412003;
3. 湖南省地建集团基础工程公司, 湖南株洲 412003)

【摘要】 在分析岩体特征和岩体力学强度的基础上, 从基于岩石抗拉强度的冲切破坏模式出发, 建立起软弱下卧层上岩体的冲切安全指标和冲切端阻值系数数学模型, 再利用岩石的力学性质经验数据, 计算出沉积岩的拉压系数、冲切安全指标、端阻值系数, 并对各自的特征进行了分析, 认为以单轴饱和抗压强度为端阻力特征值取值指标, 对于软弱下卧层上抗压强度大、拉压系数小的桩端硬质岩体, 3d 厚度的规范规定是偏于不安全的, 因此应将抗拉强度纳入桩端岩体端阻力特征值的取值指标体系。利用端阻值系数数学模型和岩石的力学性质经验数据计算出不同岩性、不同完整性、不同安全等级的岩体冲切端阻值系数, 将计算结果与文献^[1]的抗压端阻值系数比较分析后提出了软弱下卧层上岩体的端阻值系数建议值。

【关键词】 软弱下卧层; 桩端岩体; 抗拉强度; 冲切破坏; 端阻值系数

【中图分类号】 TU 443

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2011.06.001

Characteristics Values of Tip Resistance on the Rock for the Weak Underlying Stratum

Luo Zhaohua^{1,2,3}

(1. Exploration Institute of Geological Engineering of Hunan Province; 2. The No. 416 Team of the Bureau of Exploration and Development of Geology and Mineral Resources of Hunan Province; 3. The Foundation engineering geological construction group company of Hunan Province Zhuzhou412003, Hunan China)

【Abstract】 From the point of punching damage mode of rock tensile strength, a mathematic model of punching safety indices and punching tip resistance value coefficient was established based on the analysis of rock characteristics and rock mechanical strength. Stretch and compression strength, punching safety indices and tip resistance coefficient of sedimentary rock were calculated by use of the empirical data of mechanical property of rock, and their characteristics were analyzed respectively. It is concluded that it tends to be unsafe that the relative standard provides 3d thickness of hard rock which has high compression strength and low stretch strength overlying weak subsoil bearing strata based on the use of uniaxial saturated compress strength as tip resistance value. The punching tip resistance coefficient of rock with different lithology, integrity and safety classes was calculated by tip resistance mathematic model and rock mechanical empirical data. The proposed value of tip resistance coefficient of the rock overlying weak bearing strata is given after comparing the calculation outcomes with resisting compression tip resistance values from references.

【Key words】 weak underlying strata; pile tip rock; tensile strength; punching failure; tip resistance coefficient.

0 引言

随着高大建筑物的迅速增加, 以岩石为持力层的大直径桩基础使用已非常广泛, 但对于岩石的桩的端阻力特征值取值问题, 现行规范^[1]规定按岩石的饱和单轴抗压强度标准值乘上折减系数确定(简称为抗压强度取值法), 也即只考虑岩石的抗压强度。这种取值方法在桩端岩层不存在软弱下卧层时

是可行的, 但对桩端岩层存在软弱下卧层时, 这种取值方法却存在问题。本文从岩体最弱强度——拉应力作用的冲切破坏出发, 以岩石的经验数据为依据, 结合抗压强度取值法, 按文献^[2]规定的桩端持力岩层 3d 厚度, 对软弱下卧层上岩层的端阻力特征值取值问题进行探讨。

1 桩端岩体的冲切安全指标和冲切端阻值系数数学模型

1.1 岩体的冲切安全指标及几个概念

为便于探讨,先定义几个与冲切破坏相关的安全指标和岩体力学性能概念:

1.1.1 岩体冲切强度(简称冲切强度), P_p :岩体抵抗冲切破坏的极限能力。

1.1.2 桩端岩体的厚径倍率(简称厚径倍率), n :桩端岩体厚度与桩端直径之比,表达式为:

$$n=h/d \quad (1)$$

式中: h 为桩端岩体的厚度,m; d 为桩端直径,m。

1.1.3 冲切安全系数(K):冲切强度与单桩竖向承载力设计值之比,表达式为:

$$K=P_p/R_a \quad (2)$$

式中: P_p 为岩体的冲切强度,kN; R_a 为单桩竖向承载力设计值,kN。

1.1.4 岩体的拉压系数(K_t):为岩体的抗拉强度与抗压强度之比,表达式为:

$$K_t=R_{mt}/R_{mc} \quad (3)$$

式中: R_{mt} 、 R_{mc} 为岩体的抗拉、抗压强度,kN。

1.1.5 岩体的桩的端阻力特征值系数(简称端阻值系数), K_r :岩体的桩的端阻力特征值与岩块的抗压强度之比,表达式为:

$$K_r=R_j/R_c \quad (4)$$

式中: R_j 为岩体的桩的端阻力特征值; R_c 为岩块的抗压强度,kN。

1.2 岩体的特征

岩体是由各种形状的岩块和结构面共同组成的地质体,在微观上具有不连续、各向异性、非均质、岩块可动及赋存地质因子的特性。但在宏观上,又是连续的、均匀的、各向同性的、稳定的地质体。因此岩体的强度同时受岩块强度、结构面强度及岩块与结构面的组合方式(岩体结构)控制。除完整结构岩体其强度接近岩块强度和岩体沿某一特定结构面滑动破坏的岩体(简称结构面岩体)其强度取决于结构面的强度这两种极端情况外,一般情况下,岩体的强度既不同于岩块的强度,也不同于结构面的强度,而是介于岩块与结构面强度之间,因此除完整岩体和结构面岩体两种特殊岩体外,其余岩体在宏观上可作为整体来研究。

1.3 桩端岩体破坏模式及冲切强度数学模型

岩基持力层在垂直荷载作用下,当不存在软弱下卧层时,桩端岩层一般出现压碎破坏,但存在软弱下卧层时,桩端岩层却可能出现剪应力作用

的剪切破坏、弯应力作用的弯拉破坏和拉应力作用的冲切破坏等三种破坏模式。由于岩体的抗剪强度>抗弯强度>抗拉强度,因此三种破坏模式中冲切破坏模式为多,已有研究也证明了这种规律^[3]。

赵明华等^[3]的研究表明:冲切锥台自重对桩端持力岩层的安全厚度影响极微(<1%),可以忽略不计。又根据向春尧^[4]研究的公式计算,软弱下卧层与桩端持力岩层的弹性模量比值为0.028时,3倍桩径下的软弱下卧层的顶托安全系数为1,也即当弹性模量比值小于0.028时,3倍桩径下软弱下卧层的顶托力可以忽略不计。实验资料表明:全风化岩与中风化岩的弹性模量比值多小于0.028,因此顶托力可以忽略不计;强风化岩与中风化岩、强风化岩与全风化岩的弹性模量比值一般为0.1左右,顶托力可作安全储备。

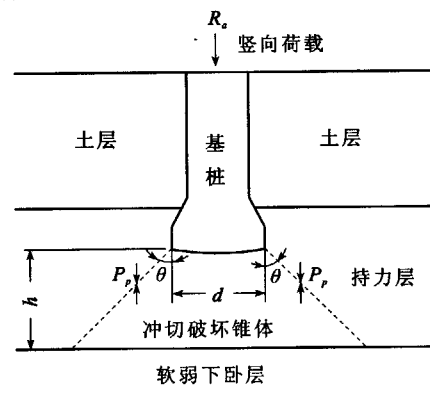


图1 桩端岩体冲切破坏示意图

综上所述,桩端持力岩层可视为整体,冲切锥台自重可忽略不计,将软弱下卧层的顶托力忽略或作安全储备而不计,而研究桩端持力岩层的承载力时,桩周土的摩擦力也是不计的。在上述条件下(见图1)罗照华^[5]建立了以岩基作持力层、且存在软弱下卧层的基桩的桩端岩体冲切强度简化计算公式,具体如下:

$$P_p=R_{mt}S \quad (5)$$

$$S=2\pi rh/\cos\theta \quad (6)$$

$$r=(h\tan\theta+d)/2 \quad (7)$$

根据文献^[5]: $R_{mt}=K_vR_t$, $R_{mc}=K_vR_c$, $K_v=(v_{mt}/v_{ct})$ ^[6]。将式(1)变换为 $d=h/n$,将式(3)变换为 $R_{mt}=K_tR_{mc}$ 。将 d 代入式(7)之后再再将 R_t 和式(6)、(7)代入式(5)整理得:

$$P_p=\pi K_t R_c h^2 (n\tan\theta+1)/n\cos\theta \quad (8)$$

式中: P_p 为桩端岩体的冲切强度,kN; S 为岩体冲切破坏锥体的侧表面积,m²; r 、 θ 分别为岩体冲切破

坏锥体的中径, m 、锥面与铅垂线的夹角, $(^\circ)$; R_t 、 R_c 为岩块的抗拉、抗压强度, kN ; K_v 为岩体的完整性系数; v_{ml} 、 v_{cl} 为岩体、岩块的压缩波速度。

1.4 单桩竖向承载力数学模型

基桩的单桩竖向承载力 R_a 一般以桩端岩体的端阻力特征值 (R_j) 设计, 则单桩竖向承载力计算公式为:

$$R_a = \pi d^2 R_j / 4 \quad (9)$$

将 $d=h/n$, $R_j=K_r R_c$

代入上式, 则有:

$$R_a = \pi K_r R_c h^2 / 4n^2 \quad (10)$$

1.5 桩端岩体的冲切安全指标和冲切端阻值系数数学模型

令 $P_p = KR_a$, 将式(8)、式(10)代入后得:

$$\pi K_r R_c h^2 (n \tan \theta + 1) / n \cos \theta = K \pi K_r R_c h^2 / 4n^2,$$

整理得一元二次方程式:

$$4K_t \tan^2 \theta n^2 + 4K_t n - KK_r \cos \theta = 0 \quad (11)$$

解(11)式可得岩体的厚径倍率 (n)、冲切安全系数 (K) 和端阻值系数 (K_r) 计算公式如下:

$$n = [-K_t \pm (K_t^2 + KK_r K_r \sin^2 \theta)^{1/2}] / 2K_t \tan \theta \quad (12)$$

因实际工程中 $n > 0$, 故式(12)为:

$$n = [-K_t + (K_t^2 + KK_r K_r \sin^2 \theta)^{1/2}] / 2K_t \tan \theta \quad (13)$$

$$K = 4K_t n (n \tan \theta + 1) / K_r \cos \theta \quad (14)$$

$$K_r = 4K_t n (n \tan \theta + 1) / K \cos \theta \quad (15)$$

通常可简单的取 $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ (φ 为岩体的内摩擦角, 可通过实验确定)。

2 沉积岩的拉压系数及特征

利用文献^[7]中的表 3-1-43 沉积岩力学性质指标经验数据中的抗压强度 (R_c) 和抗拉强度 (R_t) 计算

出沉积岩各种岩石的拉压系数 (K_t) (见表 1)。

从表 1 可以看出, 沉积岩的拉压系数 (K_t) 具有如下特征:

1) 沉积岩的拉压系数 (K_t) 与岩性密切相关, 岩性相同或相似, 尽管抗拉强度和抗压强度变化很大, 变异系数达 0.45~1.08, 但拉压系数的变化很小, 几乎相同, 变异系数仅为 0.0079~0.0596。反之, 岩性不同, 不但抗拉强度和抗压强度变化很大, 拉压系数也相差悬殊。

2) 沉积岩的拉压系数 (K_t) 高度集中在三个区间, 分别是: 0.0667~0.0857 (平均值为 0.0709)、0.0588~0.0614 (平均值为 0.0596) 和 0.0275~0.0444 (平均值为 0.0285), 对应的岩石分别是: 粘土岩、石灰岩和碎屑岩、白云岩三类。

3) 沉积岩的拉压系数 (K_t) 随抗压强度 (R_c) 的增大而减小 (见图 2), 且拉压系数与抗压强度 ($K_t \sim R_c$) 曲线呈抛物线型, 曲线斜率渐大, 也即拉压系数的减速随抗压强度的增大而加快。

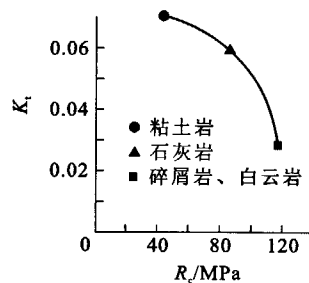


图 2 R_c - K_t 曲线图

上述特征表明: 沉积岩的抗拉强度虽然随抗压强度增加而增加, 但增幅远小于抗压强度, 且岩石越硬增幅越小, 即非线性相关。

表 1 沉积岩的拉压系数计算结果一览表

岩石名称	抗压强度 R_c /MPa			抗拉强度 R_t /MPa			拉压系数 $K_t = R_t/R_c$			
	最小	最大	中值	最小	最大	中值	最小	最大	中值	
粘 土 岩	碳质页岩	25.0	80.0	52.5	1.8	5.6	3.70	0.0720	0.0700	0.0705
	黑页岩	66.0	130.0	98.0	4.7	9.1	6.90	0.0712	0.0700	0.0704
	带状页岩	6.0	8.0	7.0	0.4	0.6	0.50	0.0667	0.0750	0.0714
	砂质页岩	60.0	120.0	90.0	4.3	8.6	6.45	0.0717	0.0717	0.0717
	软页岩	20.0	20.0	20.0	1.4	1.4	1.40	0.0700	0.0700	0.0700
	页岩	20.0	40.0	30.0	1.4	2.8	2.10	0.0700	0.0700	0.0700
	泥灰岩	3.5	20.0	11.5	0.3	1.4	0.85	0.0857	0.0700	0.0739
	泥灰岩	40.0	60.0	50.0	2.8	4.2	3.50	0.0700	0.0700	0.0700
	黑泥灰岩	25.0	30.0	27.5	1.8	2.1	1.95	0.0720	0.0700	0.0709
	最小值	3.5	8.0	7.0	0.3	0.6	0.50	0.0667	0.0700	0.0700
最大值	66.0	130.0	90.0	4.7	8.6	6.90	0.0857	0.0750	0.0739	
平均值	29.5	56.4	42.9	2.1	4.0	3.04	0.0712	0.0705	0.0709	
变异系数	0.74	0.79	0.76	0.74	0.79	0.77	0.0752	0.0240	0.0178	

续表

岩石名称	抗压强度 R_c /MPa			抗拉强度 R_t /MPa			拉压系数 $K_t=R_t/R_c$			
	最小	最大	中值	最小	最大	中值	最小	最大	中值	
石灰岩	石灰岩	10.0	17.0	13.5	0.6	1.0	0.80	0.0600	0.0588	0.0593
	石灰岩	25.0	55.0	40.0	1.5	3.3	2.40	0.0600	0.0600	0.0600
	石灰岩	70.0	128.0	99.0	4.3	7.6	5.95	0.0614	0.0594	0.0601
	石灰岩	180.0	200.0	190.0	10.7	11.8	11.25	0.0594	0.0590	0.0592
	最小值	10.0	17.0	13.5	0.6	1.0	0.80	0.0594	0.0588	0.0592
	最大值	180.0	200.0	190.0	10.7	11.8	11.25	0.0614	0.0600	0.0601
	平均值	71.3	100.0	85.6	4.3	5.9	5.10	0.0600	0.0593	0.0596
	变异系数	1.08	0.81	0.91	1.07	0.81	0.91	0.0141	0.0088	0.0079
碎屑岩、白云岩	砂岩	4.5	10.0	7.3	0.2	0.3	0.25	0.0444	0.0300	0.0345
	石英砂岩	68.0	102.5	85.0	1.9	3.0	2.45	0.0279	0.0293	0.0288
	碳质砂岩	50.0	140.0	95.0	1.5	4.1	2.80	0.0300	0.0293	0.0295
	片状砂岩	80.0	130.0	105.0	2.3	3.8	3.05	0.0288	0.0292	0.0290
	砂岩	47.0	180.0	113.5	1.4	5.2	3.30	0.0298	0.0289	0.0291
	砾岩	40.0	100.0	70.0	1.1	2.8	1.95	0.0275	0.0280	0.0279
	砾岩	120.0	160.0	140.0	3.4	4.5	3.95	0.0283	0.0281	0.0282
	砾岩	160.0	250.0	205.0	4.5	7.1	5.80	0.0281	0.0284	0.0283
	火山角砾岩	120.0	250.0	185.0	3.4	7.1	5.25	0.0283	0.0284	0.0284
	凝灰岩	120.0	250.0	185.0	3.4	7.1	5.25	0.0283	0.0284	0.0284
	白云岩	40.0	120.0	80.0	1.1	3.4	2.25	0.0275	0.0283	0.0281
	白云岩	120.0	140.0	130.0	3.4	4.0	3.70	0.0283	0.0286	0.0285
	最小值	4.5	10.0	7.3	0.2	0.3	0.25	0.0275	0.0280	0.0279
	最大值	160.0	250.0	205.0	4.5	7.1	5.80	0.0444	0.0293	0.0345
	平均值	80.8	152.7	116.7	2.3	4.4	3.33	0.0285	0.0286	0.0285
	变异系数	0.55	0.45	0.46	0.54	0.45	0.46	0.1580	0.0200	0.0596

3 沉积岩的厚径倍率、冲切安全指系数和端阻值系数及其特征

根据内部资料^①：粘土岩、石灰岩和碎屑岩、白云岩的内摩擦角 φ 分别取 40° 、 58° 和 58° ，则 θ 为 25° 、 16° 、 16° ，端阻值系数 (K_r) 按通常的 0.33 取值，

用式(13)计算不同安全等级的厚径倍率 (n)，用式(14)计算不同厚径倍率的冲切安全系数 (K)；按规范^{[1][2]}规定，厚径倍率 (n) 按 3 取值，用式(15)计算不同安全等级的端阻值系数 (K_r)。计算结果见表 2 并见图 3~图 5。

表 2 沉积岩的冲切安全指标计算结果一览表

岩性	项目	抗压强度 R_c /MPa	拉压系数 K_t	厚径倍率 $n(K_r=0.33)$				冲切安全系数 $K(K_r=0.33)$				端阻值系数 $K_r(n=3)$			
				$K=2$	$K=3$	$K=4$	$K=5$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$K=2$	$K=3$	$K=4$	$K=5$
粘土岩	数值	42.9	0.0709	1.31	1.74	2.12	2.46	3.01	5.61	8.93	12.97	0.925	0.617	0.462	0.370
	数值	85.6	0.0596	1.77	2.37	2.90	3.38	2.19	3.88	5.96	8.45	0.639	0.426	0.320	0.256
石灰岩	差值	42.7	0.0113	0.46	0.63	0.78	0.92	-0.83	-1.73	-2.96	-4.52	-0.285	-0.190	-0.143	-0.114
	差值%	99.5	15.9	34.9	36.1	36.9	37.5	-27.4	-30.9	33.2	-34.9	-30.9	-30.9	-30.9	-30.9
碎屑岩 白云岩	数值	116.7	0.0285	2.99	3.93	4.73	5.44	1.05	1.85	2.85	4.04	0.306	0.204	0.153	0.122
	差值	73.8	0.0424	1.68	2.18	2.61	2.98	-1.97	-3.75	-6.07	-8.93	-0.619	-0.413	-0.310	-0.248
	差值%	172.0	59.8	128.7	125.1	122.8	121.3	-65.3	-66.9	-68.1	-68.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9

① 湖南省水文地质工程地质一队。湖南省株洲市水文地质工程地质环境地质检查勘查报告,1987年12月。

从表 2 和图 3~图 5 可以看出,沉积岩的厚径倍率、冲切安全系数和端阻值系数具有如下特征:

1)厚径倍率(n)随抗压强度(R_c)的增大而增大,冲切安全系数(K)、端阻值系数(K_r)随抗压强度(R_c)的增大而减小。

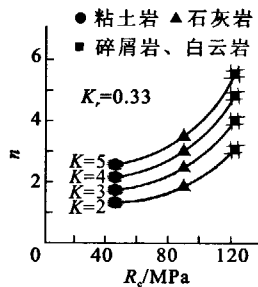


图 3 $n-R_c$ 曲线图

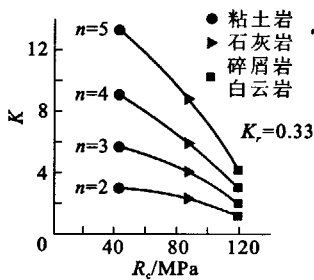


图 4 $K-R_c$ 曲线图

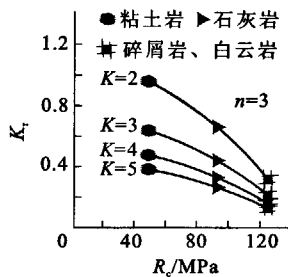


图 5 K_r-R_c 曲线图

2)厚径倍率与抗压强度($n-R_c$)曲线、冲切安全系数与抗压强度($K-R_c$)曲线、端阻值系数与抗压强度(K_r-R_c)曲线的斜率渐陡,但前者斜率为正,后两者斜率为负,即厚径倍率随抗压强度增大而增速加快,冲切安全系数、端阻值系数随抗压强度增大而减速加快。

4 分析与讨论

由于沉积岩的抗拉强度与岩性密切相关,尽管抗拉强度随抗压强度的增大而增大,但并非线性相关,因此按文献^[1]的取值法,即端阻值系数(K_r) (文献^[1]中的折减系数)只考虑岩体的完整性和岩石的

抗压强度,而不考虑岩石抗拉强度与抗压强度的关系提供桩的端阻力特征值,会出现两个互相矛盾的问题:

1)安全等级相同,岩性不同,满足安全等级的桩端岩体的厚径倍率不同。岩石越硬,拉压系数越小,要求的厚径倍率越大(见表 2),当安全系数取值为 2,3,4,5 时,要求的厚径倍率粘土岩为:1.31,1.74,2.12,2.46,石灰岩为:1.77,2.37,2.90,3.38,碎屑岩、白云岩为:2.99,3.93,4.73,5.44。石灰岩和碎屑岩、白云岩的厚径倍率比粘土岩增加 0.46~0.92 和 1.68~2.98,增加率为 34.9%~37.5% 和 128.7%~121.3%。

2)厚径倍率相同,岩性不同,桩端岩体的安全等级不同。岩石越硬,拉压系数越小,冲切安全系数越小,安全性也越差(见表 2),当桩端岩体厚径倍率取值为 2,3,4,5 时,桩端岩体的冲切安全系数粘土岩为:3.01,5.61,8.93,12.97,石灰岩为:2.19,3.88,5.96,8.45,碎屑岩、白云岩为:1.05,1.85,2.85,4.04。石灰岩和碎屑岩、白云岩的冲切安全系数比粘土岩小 0.83~4.52 和 1.97~8.93,减小率为 27.4%~34.9%和 65.3%~68.9%。

上述分析表明:对于存在软弱下卧层的桩端岩体的端阻力特征值,以岩石的单轴抗压强度为取值指标,对于硬质岩石,由于其拉压系数小,3 d 桩端硬持力层厚度的规定是偏于不安全的,也是欠妥当的。为了确保安全,要么调整 3 d 桩端硬持力层厚度的规定,要么将岩石的抗拉强度纳入桩端岩体端阻力特征值的取值指标体系中。工程实践表明:为确保安全而加大桩端岩体的厚度,对于拉压系数小的硬质岩石来说难度非常大,不但工期长、成本高,且对于人工挖孔灌注桩还将增加施工的安全威胁。因此建议调整桩的端阻力特征值取值指标体系,将采用抗压强度的单一指标体系调整为抗压强度与抗拉强度相结合的双指标体系,即以抗压强度和拉压系数为指标的取值体系。

5 端阻力特征值的取值问题

5.1 端阻值系数体系

由于岩体的破坏模式有:压碎破坏、剪切破坏、弯拉破坏、冲切破坏,因此岩体的端阻力特征值的取值也应该考虑岩体的抗压强度、抗剪强度、抗弯强度和抗拉强度,端阻值系数也就有抗压、剪切、弯拉和

冲切等端阻值系数,这些共同组成桩端岩体的端阻值系数体系。但因抗压强度最高,抗拉强度最低,故一般而言只考虑抗压端阻值系数和冲切端阻值系数即可。

5.2 端阻值系数的经验值

确定岩体的桩的端阻力特征值的关键在于确定岩体的端阻值系数,根据岩石经验数据的统计计算结果和相关规定,对岩体(岩石)的冲切端阻值系数和抗压端阻值系数的数值及端阻值系数选取分述如下:

5.2.1 抗压端阻值系数

文献^[1]中的折减系数经多年的工程实践证明是安全的、可行的,因此可按文献^[1]中的岩石地基承载力特征值的折减系数取值,即完整岩体取 0.5;较完整岩体取 0.2~0.5;较破碎岩体取 0.1~0.2;对破碎、极破碎岩体可根据地区经验确定,无地区经验时,可根据平板载荷试验确定。

5.2.2 冲切端阻值系数

工程勘察或施工中若进行了岩石的抗压强度和抗拉强度试验,可用式(15)直接求取岩石的冲切端阻值系数后,再用岩体完整性系数修正即可得到岩体的冲切端阻值系数。但实际工程中一般只作岩石的抗压强度试验,因此根据经验数据提供经验值是必要的。

按规范^[1,2]的规定,桩端持力岩层的厚径倍率(n)为 3 时,冲切安全系数(K)分别为 2,3,4,5,用式(15)计算的桩的冲切端阻值系数(K_c)结果见表 2。粘土岩岩块为 0.925,0.617,0.462,0.370;石灰岩岩块的冲切端阻值系数是粘土岩的 2/3 左右,为 0.639,0.426,0.320,0.256;碎屑岩和白云岩岩块的冲切端阻值系数是粘土岩的 1/3 左右,为 0.306,0.204,0.153,0.122。

岩体的冲切端阻值系数采用岩块冲切端阻值系数乘以岩体完整性系数即可,计算结果见表 3。

从表 3 可以看出:对于软弱下卧层上的岩体,只有安全系数为 2 时,完整、较完整、较破碎粘土岩、较破碎石灰岩,安全系数为 3 时较破碎粘土岩、石灰岩,安全系数为 4、5 时较破碎粘土岩等的冲切端阻值系数大于抗压端阻值系数,其余均小于抗压端阻值系数。

5.2.3 建议端阻值系数

为确保桩基础的安全与稳定,桩的端阻值系数原则上应取冲切端阻值系数和抗压端阻值系数中的小值。计算结果表明:软弱下卧层上的岩体冲切端阻值系数一般小于抗压端阻值系数,因此端阻值系数的取值应以冲切端阻值系数为主、兼顾抗压端阻值系数。据此对软弱下卧层上满足规范^[2]规定 3d 厚度的桩端岩体的端阻值系数的取值建议为:安全系数为 2~5 时,完整、较完整、较破碎、破碎、极破碎岩体的端阻值系数,粘土岩为 0.60~0.25,0.50~0.20,0.30~0.10,0.20~0.05,<0.12~<0.05;石灰岩为 0.50~0.15,0.45~0.10,0.30~0.07,0.20~0.03,<0.10~<0.03;碎屑岩、白云岩为 0.30~0.07,0.20~0.05,0.15~0.03,0.10~0.01,<0.05~<0.01。安全系数小取上限,安全系数大取下限。不同岩性、不同完整性、不同安全系数的端阻值系数建议值详见表 3。

5.3 岩体的桩的端阻力特征值

岩体的桩的端阻力特征值可用岩体的端阻值系数乘以岩块的饱和单轴抗压强度求取。

岩体的端阻值系数,在有完整的试验资料时,用式(15)计算出冲切端阻值系数后乘以岩体的完整性系数,再与文献^[1]的折减系数(抗压端阻值系数)比较确定;在没有完整的试验资料时,则根据岩性及其完整性和建筑物的安全等级按表 3 中的建议值确定。

6 结论和建议

1)软弱下卧层上的桩端岩体,其破坏形式多不是压碎破坏,而是冲切破坏(沿某一特定结构面破坏的岩体除外)。本文在分析岩体特征和桩端岩体承载机理的基础上建立起了冲切安全指标和冲切端阻值系数数学模型。

2)用文献^[7]中的岩石力学性质经验数据对沉积岩的抗拉强度及其与抗压强度之间的关系进行了统计分析,分析结果表明:沉积岩的抗拉强度与岩性密切相关,拉压系数高度集中在三个区间,对应的岩性分别是:粘土岩、石灰岩和碎屑岩、白云岩。岩石的抗拉强度随抗压强度的增大而增大,但增幅减小,且抗压强度越大增幅越小,即岩石的抗拉强度与抗压强度呈抛物线型相关,而非线性相关。

表3 软弱下卧层上桩端岩体的端阻值系数计算结果及建议值一览表

项目名称	岩性	冲切安全系数	岩块端阻值系数	岩体端阻值系数					
				完整岩体	较完整岩体	较破碎岩体	破碎岩体	极破碎岩体	
冲切端阻值系数计算值	粘土岩	K=2	0.925	>0.69	0.69~0.51	0.51~0.32	0.32~0.14	<0.14	
		K=3	0.617	>0.46	0.46~0.34	0.34~0.22	0.22~0.09	<0.09	
		K=4	0.462	>0.35	0.35~0.25	0.25~0.16	0.16~0.07	<0.07	
		K=5	0.370	>0.28	0.28~0.20	0.20~0.13	0.13~0.06	<0.06	
		K=2	0.639	>0.48	0.48~0.35	0.35~0.22	0.22~0.10	<0.10	
	石灰岩	K=3	0.426	>0.32	0.32~0.23	0.23~0.15	0.15~0.06	<0.06	
		K=4	0.320	>0.24	0.24~0.18	0.18~0.11	0.11~0.05	<0.05	
		K=5	0.256	>0.19	0.19~0.14	0.14~0.09	0.09~0.04	<0.04	
		K=2	0.306	>0.23	0.23~0.17	0.17~0.11	0.11~0.05	<0.05	
	碎屑岩、白云岩	K=3	0.204	>0.15	0.15~0.11	0.11~0.07	0.07~0.03	<0.03	
		K=4	0.153	>0.11	0.11~0.08	0.08~0.05	0.05~0.02	<0.02	
		K=5	0.122	>0.09	0.09~0.07	0.07~0.04	0.04~0.01	<0.01	
		抗压端阻值系数值 ^[1]				0.50	0.20~0.50	0.10~0.20	经验或载荷试验
	建议端阻值系数	粘土岩	K=2	0.80	0.60~0.50	0.50~0.30	0.30~0.20	0.20~0.12	<0.12
			K=3	0.60	0.50~0.45	0.45~0.30	0.30~0.20	0.20~0.10	<0.09
K=4			0.45	0.45~0.33	0.33~0.25	0.25~0.15	0.15~0.07	<0.07	
K=5			0.36	0.33~0.25	0.25~0.20	0.20~0.10	0.10~0.05	<0.05	
K=2			0.60	0.50~0.45	0.45~0.30	0.30~0.20	0.20~0.10	<0.10	
石灰岩		K=3	0.40	0.45~0.30	0.30~0.20	0.20~0.15	0.15~0.06	<0.06	
		K=4	0.30	0.30~0.20	0.20~0.15	0.15~0.10	0.10~0.05	<0.05	
		K=5	0.20	0.20~0.15	0.15~0.10	0.10~0.07	0.07~0.03	<0.03	
		K=2	0.30	0.30~0.20	0.20~0.15	0.15~0.10	0.10~0.05	<0.05	
碎屑岩、白云岩		K=3	0.20	0.20~0.15	0.15~0.10	0.10~0.07	0.07~0.03	<0.03	
		K=4	0.15	0.15~0.10	0.10~0.08	0.08~0.05	0.05~0.02	<0.02	
		K=5	0.10	0.10~0.07	0.07~0.05	0.05~0.03	0.03~0.01	<0.01	

注:由于破碎和极破碎岩体在特征上类似于碎石土,计算和建议的端阻值系数有待进一步验证,仅供参考。

3)在分析沉积岩厚径倍率、冲切安全系数和冲切端阻值系数特征的基础上,对以岩石的饱和单轴抗压强度作为端阻力特征值取值指标、端阻值系数按统一数值取值时的安全系数和厚径倍率进行了分析,分析结果表明:对于拉压系数小的硬质岩石,3d 桩端硬持力层厚度的规定是偏于不安全的,因此需将岩体的抗拉强度纳入岩体的端阻力特征值取值指标体系。

4)用文献^[7]中的岩石力学性质经验数据对沉积岩不同岩性、不同完整性、不同安全等级的岩体冲切端阻值系数进行了计算,并将计算结果与文献^[1]的抗压端阻值系数比较分析,在比较分析的基础上提出了软弱下卧层上岩体的端阻值系数建议值,以供工程勘察设计参考。

参 考 文 献

[1] GB 5007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:

中国建筑工业出版社,2002.

[2] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[3] 赵明华,陈昌富,曹文贵,等. 嵌岩桩桩端岩层抗冲切安全厚度研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2003,18(4): 41-45.

[4] 向春尧. 岩石桩基硬持力层的冲切安全厚度验算[J]. 岩土工程学报,1990,12(2):57-63.

[5] 罗照华,姜中笑. 桩端硬持力层冲切安全性评价及在红层中的运用[J]. 岩土工程技术,2009,23(6): 301-303.

[6] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

[7] 常士骧,张苏民主编 工程地质手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007

收稿日期:2011-09-27