

· 工程与实践 ·

# 岩石地基承载力统计计算的若干问题

113 (17)  
-11P

江级辉  
(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

TU470.3

**摘要** 涉及岩石地基承载力统计计算的现行国家规范有 1989 年颁布的《建筑地基基础设计规范》和 94 年颁布的《岩土工程勘察规范》。两部规范对岩石单轴抗压强度的标准值,以及据此计算的岩石地基承载力设计值的计算方法显著不同。使工程地质勘察生产部门的技术人员无所适从,造成了不应有的混乱。本文就这一问题对两部规范的有关规定和计算公式结合工程实例进行分析。并提出解决办法和建议。

**关键词** 岩石地基, 单轴抗压强度, 标准值

**中图分类号** TU452 地基, 计算, 承载力

## 1 岩基承载力试验

我国现行有关规范中采用试验确定岩石地基承载力有两种基本方法:

### 1.1 岩基载荷试验

这种方法可以在原位直接确定地基岩体的承载力、变形模量、弹性模量等工程参数,能取得充分发挥岩石地基的承载能力,作出经济合理的地基基础设计的良好效果。但是这种试验方法设备要求高,试验周期长,费用比较大,动辄上万元。因此目前国内勘察市场上,除了少数单柱荷载以数十 MN 计的一级建筑外其它荷载不太大的一级建筑和二级建筑勘察时均很少采用这种昂贵的试验方法。

### 1.2 岩石单轴抗压强度试验

该方法将勘探工程中取得的岩石试件在室内压力机上作无侧限破坏试验,测试岩石的单轴极限抗压强度。通过对若干岩石样品试验指标的统计以确定地基岩石单轴极限抗压强度的标准值。按照岩石强度指标一般大于不连续结构岩体强度的理论和安全系数观点,将试验标准值进行适当折减求得岩石地基承载力设计值。由于这种方法取样简单,室内试验效率比较高,试验费用比较便宜,通过试验取得的承载力指标通常能满足所有二级建筑及部分荷载不大的一级建筑对地基承载力的要求。因此它是目前工业与民用建筑岩石地基工程勘察中应用最为广泛的试验方法。据重庆地区不完全统计,采用岩石单轴抗压强度确定承载力的工程勘察项目占 98% 以上。但是采用这种方法时对试验指标的统计却存在较大的分歧,并造成实际应用中技术混乱现状。分歧和混乱不仅使基层勘察技术人员在不同标准

收稿日期: 1997-01-20

江级辉, 男, 1943 年生, 副教授

面前无所适从,更使质量监督部门缺少统一的质量监控准则。本文拟对造成这种现象的原因进行剖析,并提出相应解决办法的建议。

## 2 两部规范的差异和问题

目前国内涉及岩石单轴抗压强度试验确定岩石地基承载力的国家规范有《建筑地基基础设计规范》GBJ 7-89(以下简称“89地基规范”)和《岩土工程勘察规范》GB 50021-94(以下简称“94勘察规范”)。两部规范对确定岩石地基承载力的计算公式及其理论依据都有显著差异。都不同程度的存在着缺陷。现分别介绍和分析如下:

### 2.1 89地基规范的有关规定及其存在的问题

该规范规定,对微风化及中等风化岩石地基承载力设计值,也可根据室内饱和单轴抗压强度按下式计算:

$$f = \varphi \cdot f_k \quad (1)$$

式中  $f$ —岩石地基承载力设计值(kPa)  
 $f_k$ —岩石饱和单轴抗压强度标准值(kPa);  
 $\varphi$ —折减系数。(具体折减方法参见原规范)。

该规范附录九还规定岩石饱和单轴抗压强度标准值  $f_k$  的计算公式为:

$$f_k = \mu_r - 1.645 \sigma_r \quad (2)$$

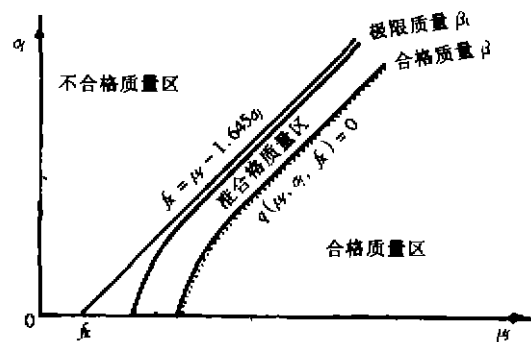
式中  $\mu_r$ —岩石单轴抗压强度的平均值;  
 $\sigma_r$ —岩石单轴抗压强度统计的标准差。

公式(1)的立论依据源于国家标准《建筑结构设计统一标准》GBJ 68-84中对材料性能的标准值的有关解释和规定。即材料性能标准值是结构设计时采用的材料性能的基本代表值,是设计表达式中材料性能的设计取值,也是生产中控制材料性能质量的主要依据。材料性能标准值应根据符合规定质量的材料性能的概率分布的某一分位数确定。当材料性能服从正态分布时:

$$f_k = \mu_r - t_a \sigma_r \quad (3)$$

式中,  $t_a$  为与材料性能  $f$  低于  $f_k$  的概率有关的保证率系数,对于材料强度的标准值,该标准规定取概率分布的 0.05 分位数,此时  $t_a$  为 1.645 因此导出公式(2)。对现有大部分人工材料的强度统计资料的分析表明,按 0.05 分位数规定材料强度标准值是对应于材料的极限质量水平(见附图)。

公式(2)在使用时有一个很容易被忽略的前提条件,即必须是“符合规定质量的材料”。例如,用统计方法评定混凝土强度时,符合规定质量的混凝土,其强度标准差  $\sigma_{f_{cu}}$  和最小值  $f_{cu, min}$  都不能太大,就是说公式(2)的使用不是无条件的。如果要将它由人工材料移



附图 材料性能的质量分区

(据《建筑结构设计统一标准》GBJ68-84)

植到地基强度指标上使用,当然也应该符合这些前提条件才行。虽然从广义上看,地基岩土也可以被认为是一种结构材料(在荷载作用下产生内力),但它却是经过各种复杂的,长期的内外动力地质作用形成的天然材料,不存在象人工材料那样在生产中控制它的质量指标问题;一般来说对岩石地基也不存在用其它材料来替换它的问题。其物理性质和强度试验完全可能出现不符合上述前提条件的高变异特性。这在重庆地区侏罗系沙溪庙组的陆相地层中尤为明显。其中的中风化砂岩单轴抗压强度最高可达 70~80 MPa,最低也有小到 4~5 MPa 者。经常出现这样的情况,在不到一千平方米的场地,单轴抗压强度的变异系数却高达 0.5。这时将公式(2)用于根据岩石单轴抗压强度计算承载力设计值就会出现中风化岩层的设计值大大小于同类岩层的强风化层设计值这样显然不合理的结果。例如重庆李子坝嘉陵新苑工程,场地地基为侏罗系中统的中风化砂质泥岩,通过对六个钻孔中的 45 件岩芯样品作单轴抗压强度试验,统计结果见表 1。标准值按公式(2)计算,再取中风化岩石折减系数高限值 0.25,按公式(1)计算出该工程砂质泥岩地基承载力设计值为 396 kPa。而同一规

表 1 重庆李子坝嘉陵新苑单轴抗压强度成果统计

钻孔号	ZK1	ZK3	ZK7	ZK11	ZK13	样本数 $n$	平均值 $\mu$ (MPa)	标准差 $\sigma$ (MPa)	变异系数 $\delta$	标准值 $f_k$ (MPa)
天然样品	8.0	7.4	24.2	28.5	11.2	22	15.11	7.00	0.46	3.59
	9.5	5.9	19.3	24.1	11.1					
	9.7	8.4	19.9	21.1	11.5					
		7.1	22.3	21.5	12.7					
			24.4		11.5					
					13.3					
饱和样品	4.6	4.2	15.0	15.4	6.8	23	8.97	4.49	0.50	1.584
	5.1	4.4	15.9	13.2	7.5					
	5.5	4.7	13.7	12.1	6.8					
		5.0	14.0	13.5	6.9					
		4.3	15.7		6.1					
					6.1					

范附录五规定的中等风化石质岩承载力取值范围为 700~1200 kPa,取样试验得到的指标大大小于上述给定范围,只相当于强风化石质岩承载力指标的中值(强风化石质岩承载力为 200~500 kPa)。显然这样统计设计是不合理的,不能用于实践。以上实例表明用于合格人工材料的强度标准值计算公式(2)不适用于变异性很大的天然岩石地基。

## 2.2 94 勘察规范的有关规定及其存在的问题

该规范是最新颁布的勘察规范。其中规定:承载能力极限状态计算需要的岩土参数标准值应按下列式计算

$$f_k = \gamma_s \cdot f_m \quad (4)$$

式中  $f_m$ —岩土参数的平均值;

$\gamma_s$ —统计修正系数,可按式(5)估算。

$$\gamma_s = 1 \pm \left( \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta \quad (5)$$

注:式中正负号按不利组合考虑,则承载力计算为负号。

公式(4)实际形式上与 89 地基规范相似,都是平均值乘以统计修正系数,所不同的是统计修正系数  $\gamma_s$  的计算方法。89 地基规范的公式(2)也可以表示为平均值与修正系数的乘积,修正系数  $\gamma_s$  与变异系数  $\delta$  的关系为式(6),与试样本数  $n$  无关。

$$\gamma_s = 1 - 1.645 \delta \quad (6)$$

而 94 勘察规范的统计修正系数  $\gamma_s$  却是变异系数  $\delta$  和样本数  $n$  的函数,公式(5)是根据统计学区间估计理论得到的参数母体平均值  $\mu$  的可靠性估值,其单侧置信界限值计算公式,在采用风险率  $\alpha = 0.05$  的情况下,经简化拟合成本容量  $n$  的显函数形式。

94 勘察规范的公式正确地考虑到了作为地质体的岩石地基有别于人工材料的特点,将样本容量  $n$  纳入了标准值计算的变量。但在实际应用中仍然存在两个基本问题。

### 2.2.1 如何确定样本容量 $n$

关于样本容量  $n$  在勘察取样试验中的确切含义,89 地基规范与 94 勘察规范都没有专门说明,这个从统计学中沿用到勘察取样来的词汇似乎不应该存在什么歧义。实则不然,目前工程地质勘察行业对此存在两种完全不同的看法。

一部分人以单件试验样品的数量作为样本容量  $n$ ,而不管这些样品在母体上的空间分布如何。即使若干钻孔中只取一个钻孔的六件岩芯试样,形式上也符合 89 地基规范关于地基承载力统计数据的最低要求。如今工程地质勘察工作纳入市场机制已经多年,多数勘察单位为了降低成本,尽量少取试样,都采取了这种对  $n$  的理解方法。下面举一个具体工程实例来分析这里的弊病。

重庆某单位的集资建房工程为 12 层点式建筑,单位建筑荷载 360 kN/m,占地 450 m<sup>2</sup>。承接场地工程地质勘察任务的单位拟定的勘察纲要布置机械钻孔四个。只在一个钻孔的泥岩岩芯中连续

表 2 某集资建房工程岩石单轴抗压强度成果统计

地层代号	钻孔号	岩样号	天然样 (MPa)	饱和样 (MPa)
J <sub>2</sub>	ZK4	4-1	11.4	7.2
		4-2	12.7	7.5
		4-3	9.8	5.9
		4-4	13.2	8.3
		4-5	12.9	8.2
		4-6	13.6	7.4
样本容量( $n$ )			6	6
平均值 $\mu$ (MPa)			12.27	7.38
标准差 $\sigma$			1.29	0.76
变异系数 $\delta$			0.11	0.10
统计修正系数 $\gamma_s$			0.91	0.92
标准值 $f_d$			11.56	6.77

注:按 94 勘察规范公式统计

表 3 补充勘察取样单轴抗压强度试验成果

钻孔号	天然样 (MPa)		饱和样 (MPa)	
	单值	平均	单值	平均
ZK5	5.2	5.46	4.2	3.9
	4.7		3.7	
	6.5		3.9	
ZK6	5.2	5.7	3.9	4.1
	5.6		4.1	
	6.3		4.4	

取样 12 件分别作天然和饱和单轴抗压强度试验, 结果见表 3。勘察质量检查人员对该资料进行审查时对这种单孔取样能否保证勘察质量表示怀疑, 但又无充分的规范准则来证明这种做法欠妥。因为它显然符合 89 地基规范中的“参加统计的数据不宜少于六个”的规定。后来建设单位因某种原因将工程方案改为 18 层商住楼立项, 并得到有关政府机关的批准。工程改为高层建筑后要进行补充勘察。于是又打了 ZK5, ZK6 两个钻孔, 在原持力层中风化泥岩岩芯中又取了 12 件样品作单轴抗压强度试验, 结果如表 3。将表 3 的补充勘察试验数据与表 2 的原数据混合统计, 结果见表 4。对比表 2 和表 4 的统计结果, 发现这个工程在同一场

表 4 两次取样单轴抗压试验混合统计成果

	样本数 $n$	平均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	变异系数 $\delta$	统计修正系数 $\gamma_c$	标准值
天然样 (MPa)	12	8.93	3.49	0.39	0.795	7.1
饱和样 (MPa)	12	5.7	1.76	0.30	0.84	4.8

地相同岩层的强度标准值前后竟差 60% 之多。这表明单孔取样试验统计是不可靠的。即使是占地面积小的场地, 尽管试件也有 6 个, 其可靠性依然很差。虽然 94 勘察规范规定了详细勘察中取样钻孔的比例, 但仍然没有对样本容量  $n$  作出规范和解释。以致不合格的勘察取样有隙可乘, 顺利通过质量检查关。

另一种观点认为: 样本容量不应该是样品的件数, 而应该是样品的组数。每个勘探点同一层位只能有一组, 每组三件样品, 取其试验的算术平均值为该组参加统计的样本。照此办法, 上面举的勘察取样实例中, 样本数  $n$  应为 3, 平均值  $\mu$ : 7.81; 标准差  $\delta$ : 3.15; 变异系数  $\delta$ : 0.40; 统计修正系数  $\gamma_c$ : 0.39; 标准值  $f_k$ : 3.11。

同一个工程场地, 因为对  $n$  的理解和取值方法不同, 涉及承载力这样重要指标的计算结果竟造成如此大的差异。看来这个问题的解决无论是理论上还是实践上都到了刻不容缓的时候了。

笔者基本主张后一种统计观点。因为建立在抽样理论基础上的勘察取样、试验、统计工作要取得有意义的成果同样须满足两个主要条件: 1 代表性; 2 样本数量必须充分。对于地基, 当持力层已经确定后, 设计人员关心的是持力层物理力学性质在平面上的变化。从统计学观点看, 整个建设场地范围内持力层的强度是有无穷多元素的集合。因为即使在有限的场地范围内也可以采集到几乎是无限多个试件进行试验, 其结果是在一个区间内变化并按正态分布的随机变量。但实际上却无必要大量取样, 而认为每个勘探点的试样性质可以外推一定范围。规范中关于勘探点密度的规定也是基于这种观点制定的。就是说一个勘探点的试样只在以该点为中心的某个有限范围内具有代表性, 它仅仅是场地范围内地基持力层的一个样本。即使该点取了若干件样品, 也只不过是地层深度变化范围增加了权重, 并没有增加代表平面范围变化的样本。但必须有一个数据来代表这个样本的值。因此, 将该勘探点取的某层岩石若干件试样作为一组, 组内各试样试验的平均值为该点的代表值即一个样本。这样才是合理的。

此外如果按前者观点, 地层深度内的每一件样品均认为是地基平面范围的一个样本,

那么对一些诸如重庆地区侏罗系砂岩和泥岩那样的巨厚层岩石,厚可达 5~6 m,一个钻孔的岩芯可以取数十件样品,岂不是可以按数十个样本统计!“一孔之见”即出现数十个样本,这显然有问题。前面所举的单孔取样导致错误统计结果的实例也证明这种观点是不可取的。

### 2.2.2 承载力设计值取值问题

94 勘察规范定岩土参数(包括承载力)的设计值  $f_d$  按下式计算:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma} \quad (7)$$

式中  $\gamma$ —岩土参数的分项系数,按有关设计规范取值。

尽管有以上计算公式和规定,但其中的分项系数  $\gamma$  怎样取值,即无处查询。勘察技术人员只得沿用 89 地基规范中的折减系数对标准值折减以求得承载力设计值。即用 94 勘察规范公式(4)、(5)求单轴抗压强度标准值,然后再按 89 地基规范求设计值。像这样用不同规范计算同一设计值指标是没有先例的,但在重庆地区的勘察单位和质量监督部门已经约定俗成,普遍采用了。笔者认为这个问题如果不以某种法令性的形式使其明确起来,则直接影响到勘察质量的提高和规范标准化应用。

## 3 几点结论和建议

1) 《建筑地基基础设计规范》GBJ 7-89 中计算岩石单轴抗压强度标准值的公式(2)是源于人工材料的公式,不适用于作为地质体的天然岩石地基。

2) 不能在单孔取样试验的基础上进行岩土参数的统计计算。有关地基承载力计算的数据统计,每个勘探点每一层位只能有一个样本,用该点的若干件试样试验的平均值表示。

3) 94 勘察规范与 89 地基规范关于承载力的统计计算公式和规定是否可以混用,对此,规范制定部门应以某种权威的方式予以明确,以利于勘察设计单位和质量监控部门的正常运作。

### 参 考 文 献

- 1 建筑结构设计统一标准 GBJ 68-84
- 2 建筑地基基础设计规范 GBJ 7-89
- 3 岩土工程勘察规范 GB 50021-94
- 4 混凝土强度检验评定标准 GB 107087