

## Statistics of bridge engineering parameters

Wei Quan you

Donghai Construction Group Co., Ltd., Dezhou

**Abstract:** the determination of geotechnical parameters and standard values of rock strength in the current geotechnical engineering investigation specifications (national standards) and highway specifications has basically absorbed the t-distribution statistical method applicable to small samples. Based on the statistical analysis of the standard values of pile sinking construction and static penetration test of each pier of Donghai Bridge on land, it is shown that in order to ensure the 95% confidence probability of the standard values of geotechnical parameters of each pier and abutment, the small sample statistics should be adopted according to the specifications in the detailed engineering exploration stage. Therefore, for long bridges, such as viaducts, large overpasses, long approach bridges, etc., it is necessary to reasonably divide the sections for statistics according to the change of soil layer and soil homogeneity, while for large bridges, it is necessary to make separate statistics.

**Key words:** bridge pile foundation; geotechnical uniformity; randomness of change; small sample statistics; division of sections; standard values of geotechnical parameters

Received: 2019-10-12; Accepted: 2019-11-30; Published: 2019-12-23

# 桥梁工程参数统计

魏全友

东海建设集团有限公司，德州

邮箱: weiquanyou23@163.com

**摘 要:** 现行岩土工程勘察规范（国标）及公路规范中岩土参数、岩石强度标准值的确定，基本上吸取了适用于小样本的  $t$  分布统计方法。通过对东海大桥陆上段桥梁各墩的沉桩施工及静力触探  $P_s$  标准值的统计分析表明，为保证各墩台岩土参数标准值 95% 的置信概率，在工程详勘阶段应按规范采用小样本统计。因此，对于长大桥梁，如高架道、大型立交、长大引桥等，应根据土层、土质均匀性变化情况合理划分区段进行统计，而对桥梁大型基础则应单独统计。

**关键词:** 桥梁桩基础；岩土均匀性；变化随机性；小样本统计；划分区段；岩土参数标准值

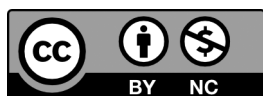
收稿日期：2019-10-12；录用日期：2019-11-30；发表日期：2019-12-23

---

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



# 1 岩土参数标准值 $\phi_k$ 统计计算

## 1.1 岩土参数标准值 $\phi_k$ 计算式

GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》指出，计算承载能力极限状态所需的岩土参数标准值  $\phi_k$  按式（1）计算。当设计规范另有专门规定的标准值取值方法时，可按有关规范执行。

岩土参数的标准值是岩土工程设计的基本代表值，是岩土参数的可靠性估值。采用统计学区间估计理论上得到的关于参数母体平均值置信区间的单侧置信界限值：

$$\phi_k = \phi_m \pm t_a \sigma_m = \phi_m \left( 1 \pm \frac{t_a}{\sqrt{n}} \delta \right) = \gamma_s \phi_m \quad (1)$$

$$\gamma_s = \left( 1 \pm \frac{t_a}{\sqrt{n}} \delta \right) \quad (2)$$

式中：准  $\phi_m$  为岩土参数平均值， $\phi_m = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{n}$ ； $t_a$  为统计学中的学生氏函数的界限值，一般取置信概率  $\alpha$  为 95%，相应的风险概率 5%； $\sigma_m$  为场地的空间均值标准差，按式（3）计算； $n$  为样本数； $\delta$  为岩土参数的变异系数，按式（4）计算； $\gamma_s$  为统计修正系数。

$$\sigma_m = \Gamma(L) \sigma_f \quad (3)$$

$$\delta = \sigma_f / \phi_m \quad (4)$$

式中： $\Gamma(L)$  为标准差折减系数。可用随机场理论方法求得，考虑到尚未完全实用化，按近似公式计算标准差折减系数  $\Gamma(L) = \frac{1}{\sqrt{n}}$ ； $\sigma_f$  为岩土参数的标准差，见式（5）。

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n \phi_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \phi_i \right)^2 / n \right]} = \delta \phi_m \quad (5)$$

由式（1）、式（2）可通过简化拟合成样本容量的显函数形式：

$$\frac{t_a}{\sqrt{n}} = \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\} \quad (6)$$

$$\text{由此得：} \gamma_s = \left( 1 \pm \frac{t_a}{\sqrt{n}} \delta \right) = 1 \pm \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\} \delta \quad (7)$$

## 1.2 学生氏 t 分布适用于小样本推断

英国统计学家哥塞特（Gosset）于 1908 年以“Student”的笔名发表了 t 变

量的分布规律,故名为学生氏t分布。哥塞特在1899年担任一家酿酒厂化学技师,从事试验和数据分析工作,接触的样本量较小(4、5个),通过大量实验数据积累,发现了t分布规律,其价值特别适用于随机变量的小样本推断。当 $n \geq 30$ 时,可证实t分布与常态分布几乎没有差别。反之,对式(7)使用时,要避免工程上误用统计学上的过小样本用量,如 $n = 2、3、4$ 等[2]。

式(1)、(7)表明,岩土参数标准值 $\phi_k$ 与 $\phi_m$ 、 $\gamma_s$ 有关。 $\gamma_s$ 决定于统计对象的样本数 $n$ 及其变异系数 $\delta$ 。

1)当 $n < 6$ 时, $\gamma_s$ 随 $n$ 的增减有很大变化,随着 $\delta$ 的增大其变化越显著。 $n < 5$ 的曲线段,是 $\gamma_s$ 对平均值 $\phi_m$ 折减最大的区段。由于桥梁工程的特点,每个墩台基础的安全应具有相同的保证率,JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》对岩石极限强度标准值统计计算,要求 $n \geq 6$ 是合理的。对一个大型墩、台基础现实的规模,样本数将需要6~9个,随变异系数 $\delta$ 增大而取高值。

2)随着 $n$ 的增大,不同 $\delta$ 的曲线相互靠拢, $\delta$ 的影响相应减弱, $\gamma_s$ 的增大削弱了对平均值的折减[2,3]。在实际工程中,样本数量在一定程度上反映工程场地的规模,如东海大桥陆上段长达2.4 km的实例看,应根据场地范围土层、土质的变化情况,进行合理划分区段、分别按区段进行统计,可较好地保证各区段墩台的设计参数标准值的保证率(95%置信概率)。

## 2 东海大桥陆上段静力触探Ps标准值统计分析实例

### 2.1 工程概况[4]

东海大桥陆上段全长约2.4 km,位于长江三角洲入海口东南前缘,地貌属潮坪类型。在距原大堤330 m范围内为古河道区,其余场地土层分布均属正常沉积区。

东海大桥为上、下行分离的独立桥梁,上部结构为4~6跨一联的预应力混凝土连续梁,跨径30 m。标准桥宽15.25 m + 1.00 m + 15.25 m,匝道标准宽单车道为7.75 m、双车道为9.5 m。因此两侧设有匝道处的桥面总宽达50 m左右

。下部结构为准 600 mm PHC 管桩基础、Y 型钢筋混凝土桥墩。

设计荷载：汽车—超 20 级、挂车—120，并以集装箱拖挂车按前、后车轴距为 10 m 排列布置进行校验。

正常沉积区墩基础持力层选用⑦ 1-2 层灰黄色粉砂，埋藏深度 30.0 ~ 34.3 m，层厚 6.5 ~ 14.1 m，密实、土质不均，属中—低压缩性土；上覆⑦ 1-1 层草黄色砂质粉土，厚 3.5 ~ 8.3 m，中密、土质均匀，属中压缩性土；下卧为⑦ 2-1、⑦ 2-2 层粉细砂，密实，属中—低压缩性土，2 层厚度 > 29 m。

墩基础准 600  $\phi$  mm PHC 管桩进入持力层⑦ 1-2 层一般为 4 m 左右，采用 6 ~ 8 t 3 种型号的柴油锤进行沉桩施工。

## 2.2 墩基础持力层均匀性的沉桩反应

由位于正常沉积区的 64 个墩（11 号 ~ 74 号）的沉桩施工情况表明，有 48 个墩基础的桩 100% 达到设计标高，占总数的 75%，16 个墩基础的桩存在沉桩未能达到设计标高的情况，约占总数的 25%。将沉桩情况分 2 个类型。

1 类：48 个墩，每墩 22 ~ 29 根桩，平均 26 根 / 墩，基础桩 100% 达到设计标高。

2 类：4 个墩，每墩 26 ~ 36 根桩，平均 31 根 / 墩，基础桩达到设计标高的为 82.8% ~ 93.5%，平均 87.5%。

3 类：12 个墩，每墩 28 ~ 36 根桩，平均 31 根 / 墩，基础桩达到设计标高的为 3.6% ~ 74.2%，平均 36.7%。

根据单桩承载力及强度、沉降要求，本工程桥墩桩基持力层取用⑦ 1-2 层是合理的；按本地区地基基础设计规范及沉桩经验，用 D62、MH72B 柴油锤通常也是适用的。但上述沉桩施工发生约 25% 的桩未达设计标高的情况，主要是沉桩的最后贯入度过小，如 3 类基础沉桩的最后贯入度平均值仅为 2.77 ~ 1.20 mm / 击，超过了沉桩设备正常使用的控制范围。

打入桩的沉桩施工、设计时一般应了解工程地质勘察对场地进行的原位测试成果，如静力触探的比贯入阻力  $P_s$  值、标准贯入击数  $N$  等。沉桩难易程度往往是原位测试结果的实际反映。本工程的工程地质勘察报告提供了较全面的原位测试成果，实际沉桩施工时出现持力层端阻力超过了预期的情况，因此对

Ps、N 值作进一步分析、评价。

## 2.3 墩基础 Ps 标准值的统计分析比较

1) 地质剖面的持力层⑦ 1-2 在 2 km 范围的层面、层厚变化平缓, 但沉桩施工反映了⑦ 1-2 层的均匀性变化, 并呈随机变化的特点。

2) 根据 11 号 ~ 74 号墩场地的 Ps 及 N 变化情况划分为 5 个区段, 对 Ps 值进行分段统计。将相应属于 2 类、3 类的墩号列入所在区段, 表明区段划分与沉桩反应基本相符。

3) 反映统计范围 Ps 值离散状况的变异系数  $\delta$ , 不划分区段的  $\delta = 0.226$ , 比划分区段的  $\delta$  值都大, 划区段的  $\delta$  值在 0.151 ~ 0.078; 不分区段统计的 Ps 平均值为 17.66 MPa, 修正系数较大, 即对平均值的修正折减较小。与图 1 揭示规律基本一致。

4) 当不划分区段时, Ps 标准值为 16.44 MPa, 与划分的各区段 Ps 标准值比较如下: ① 35 号 ~ 45 号墩区段 Ps 标准值为 16.28 MPa, 两者基本相同; ② 11 号 ~ 24 号墩、63 号 ~ 74 号墩的 Ps 标准值分别为 11.40 MPa 和 12.51 MPa, 均低于 16.44 MPa, 如这 2 个区段采用不分区段统计的标准值, 则将降低置信概率; ③ 24 号 ~ 35 号墩、45 号 ~ 63 号墩 2 区段的 Ps 标准值 18.58 MPa 和 20.46 MPa 则均高于 16.44 MPa, 如这 2 个区段采用不分区段统计的标准值, 则偏于保守。

## 2.4 岩土参数标准值的小样本统计对桥梁工程设计的实用意义

1) 桥梁工程在平面上是条线, 墩、台则是线上的点, 而桥梁工程场地土层、土质随机变化是自然形成的特征。

东海大桥陆上段 2.4 km 范围内采用同一持力层 ⑦ 1-2 层, 沉桩施工时反映了土层的不均匀性, 此例较为典型。此外, 在闵浦大桥浦东、浦西 2 个主墩墩位处, 土层分布基本相同, 均取用⑦ 2 层为持力层, 但是两岸主墩基础单桩承载力却有差别; 位于宝山区纵一路的庵木港桥工程 [5], 跨越河口宽仅为 20 m, 地质勘察表明仅南岸为古河道切割区, 使⑥层、⑦层缺失, 其余均为正常沉积区。

以上 2 例均反映土层、土质变化的随机性。

在桥梁工程施工图设计阶段,应保持每个墩台基础具有相同的安全保证率,即对岩土参数标准值应取用合理的统计范围进行计算统计。其样本数不能过小,也不能过大。因此,合理确定区段十分重要。

2) 不同的设计阶段对工程地质勘察有不同的要求。工程可行性研究阶段、初步设计阶段,一般着重对整个工程场地的地质条件作出评价,以满足相应阶段要求。施工图设计阶段应对各墩台基础进行承载能力极限状态计算,其所需的岩土参数标准值则由相应阶段的勘察报告提供,统计的置信概率为 95%。因此,当勘察报告对同一土层、不同区段提供岩土参数标准值时,可以有合理的差异。

综合土层、土质随机变化的特性和保证每个墩台岩土参数标准值满足 95% 置信概率的要求,吸取  $t$  分布小样本推断的统计方法确定岩土参数标准值是合理的,表 1 的比较结果是一个实例说明。

3) 小样本统计区段(域)的划分按桥梁工程规模、结构特点及对岩土参数的设计要求,可以下列方式进行:

(1) 中小桥梁工程场地不大,且按规定每座桥梁均应有地质勘察报告。

(2) 长大桥梁,如高架道、大型立交、长大引桥等工程场地范围大,考虑土层、土质随机变化特性及基础结构特点等要求,应对场地土层、土质条件划分区段进行评价。

(3) 大型基础及有特殊要求的基础应作为一个区段提出报告。

## 2.5 东海大桥陆上段 $P_s$ 标准值的统计 [4]

按上述分析,东海大桥陆上段针对各墩位的静力触探标准值统计,按下述区段划分进行统计。

1) 根据持力层原位测试  $P_s$  值分布变化,选择  $P_s$  值差异较小者划分区段。

2) 桥墩 11 号 ~ 74 号墩共有 32 个静力触探孔,大致是每隔一个墩设一个触探孔,孔距约 60 m。其分布密度基本满足区段划分进行标准值统计要求。

3) 共划分为 5 隔区段,每段长 300 ~ 540 m。



### 3 静载试验与勘察报告参数的关系

单桩轴向受压承载力静载试验成果能直接反映

临近钻孔显示的地质条件下的单桩轴心受压极限承

载力。该成果的比对依据是设计提供的单桩受压承载力计算结果。该计算则源自工程地质勘察报告提供的岩土参数。

如果以岩土参数具有 95% 保证率观察, 在正常情况下静载试验值应大于计算值, 如果参数的变异系数  $\delta$  较大时, 两者间将存在明显差异。当工程场地范围较大时, 可由静载试验结果验证单桩承载力计算值。如需由静载试验成果作为单桩承载力的设计依据, 则应在确定工程范围内进行足够的静载试验, 以确保取得的单桩承载力结果具有 95% 的保证率。此法仅在大型基础中静载试验值未达到计算值, 要求重新确定单桩承载力设计值的情况下才会选用。在客观上以静载试验取代地质勘察报告的做法, 将耗费大量的工时、人力和财力。

### 4 结语

桥梁工程场地土层、土质的变化是随机发生的。中、小桥梁工程场地不大, 土性一般不会有较大的变化, 因此工程地质勘察报告提供的岩土参数能反映场地特征, 可作为设计依据; 对于大型工程, 如高架道、大型立交、长大引桥等, 工程场地范围大, 应划分区段进行统计, 并提供各区段的有关参数; 对桥梁大型基础则应独墩进行统计, 保证每个墩、台岩土参数具有相同的保证率。

现行的 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》、JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》和 JTJ 064—1998《公路工程地质勘察规范》中对岩土参数、岩石强度标准值, 吸取了适用于小样本的  $t$  分布统计方法。对大范围场地和以点分布的墩、台, 划区段进行统计可较好地反映土层、土质变化的实际情况, 并使每个墩、台取得相同的安全保证率。单桩承载力静载试验, 一般应视为验证性成果, 如要求作为指导设计的成果, 则同样应考虑试验成果在适当的场地范围内具有的一定的保证率(或置信概率)。



## 参考文献

- [1] 张秀梅, 邱华, 耿福强, 等. 基于桥梁桩基础抗震性能分析及其在设计阶段中的应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2017 (15): 113-114.
- [2] 林少宫. 基础概率与数理统计 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [3] 夏宁茂. 新编概率论与数理统计 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2008.
- [4] 骆飞. 小样本岩土参数统计特征估计及边坡稳定可靠性分析 [D]. 西南交通大学, 2017.
- [5] 李理. 一座小型桥梁特殊设计条件的处理 [C] // 第四次全国城市桥梁学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2003.