

有关单桩竖向抗压承载力的几个概念辨析

付文光, 吴旭君, 卓志飞

(中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 分析总结了单桩承载力极限标准值、标准值、特征值、设计值及基本值等名词术语之间的复杂关系, 阐明了这些名词术语的概念及在相关规范中的取舍原因。得到的结论有: 可暂停使用“桩端阻力特征值”及“桩侧阻力特征值”; 以后时机成熟时, 可恢复使用承载力基本值及设计值名词、“承载力特征值”可修改为“承载力设计值”、“极限标准值”可去除“极限”两字; 基础规范及桩基规范用于计算单桩承载力的公式从概念角度理解都存在着不完善之处, 后者相对更直接、更可靠一些。

关键词: 单桩承载力; 桩侧阻力; 桩端阻力; 极限标准值; 特征值; 标准值; 设计值; 概念

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-1167-05

作者简介: 付文光 (1970-), 男, 北京人, 注册岩土工程师, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计咨询、工程实践、试验研究工作等。E-mail: zgjy1992@126.com。

Some concepts about vertical compressive bearing capacity of single pile

FU Wen-guang, WU Xu-jun, ZHUO Zhi-fei

(China Jingye Engineering Corporation Limited Company, Beijing 100088, China)

Abstract: The complex relations between some nouns and terms about the bearing capacity of single pile, such as the ultimate standard value, standard value, characteristic value, design value, basic value and so on, are systematically summarized, and the concepts, naming and abolishing reasons of these nouns and terms in codes are clarified. The conclusions are as follows: (1) the nouns of the characteristic values of pile shaft resistance and pile tip resistance can be abandoned temporarily; (2) when the time is right, the nouns of basic value and design value of bearing capacity can be used again, the characteristic value of the bearing capacity can be modified to the design value of the bearing capacity, and the word the ultimate can be wiped from the noun of the ultimate standard value; (3) there are some theoretical disadvantages of formulas for calculating the bearing capacity of single pile in the foundation code and pile code, and the latter is relatively more direct and more reliable.

Key words: bearing capacity of single pile; pile shaft resistance; pile tip resistance; ultimate standard value; characteristic value; standard value; design value; concept

0 概 述

《地基基础设计规范》^[1]用式 1、《建筑桩基技术规范》^[2]用式 2 估算单桩竖向抗压承载力:

$$R_a = q_{pa}A_p + u_p \sum q_{sia}l_i \quad (1)$$

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik}l_i + q_{pk}A_p \quad (2)$$

式中, R_a 为单桩承载力特征值, 式 2 中 Q_{uk} 为单桩极限承载力标准值, 其余符号意义见相关规范。桩基规范规定了特征值 R_a 为极限标准值 Q_{uk} 除以安全系数 2。

公式 (1)、(2) 主要区别是式 (1) 采用了特征值概念, 式 (2) 采用了极限标准值概念。两者都是“重量级”规范, 为什么计算公式采用了不同概念呢? 此外, 单桩承载力特征值、标准值、极限标准值、设计值及基本值等概念被混淆已是司空见惯之事。为了更好地理解、应用及改进相关技术标准, 有必要对这些

与单桩竖向抗压承载力相关的名词术语及概念进行梳理及辨析。

1 几个术语名词的概念

1.1 单桩承载力特征值、标准值与容许值

基础规范 1974 年版中, 采用了“单桩垂直容许承载力”一词, 但没有定义。该规范定义了地基土的容许承载力: “在保证地基稳定的条件下, 房屋和构筑物的沉降量不超过容许值的地基承载能力。”以此类推, 可以把单桩容许承载力理解为: 在保证地基稳定的条件下, 房屋和构筑物的沉降量不超过容许值的单桩承载能力。

基础规范 1989 年版中, 采用了“单桩承载力标准值”一词, 2002 年版及 2011 年版中, 采用了“单桩承载力特征值”一词, 均没有定义。单桩容许承载力、单桩承载力标准值及单桩承载力特征值的计算式均为式(1), 数值上均为通过载荷试验方法得到的单桩极限承载力除以安全系数 2, 三者名词不同但概念相同。

1.2 单桩极限承载力标准值

桩基规范采用了“单桩竖向极限承载力标准值”一词, 没有定义, 计算式即式(2)。该规范定义了单桩竖向极限承载力: “单桩在竖向荷载作用下到达破坏状态前或出现不适于继续承载的变形时所对应的最大荷载, 它取决于土对桩的支承阻力和桩身承载力。通过载荷试验方法直接得到单桩极限承载力。”该规范定义了“单桩竖向承载力特征值”: 单桩竖向极限承载力标准值除以安全系数后的承载力值, 规定安全系数为 2。

1.3 单桩承载力设计值

根据相关技术标准要求, 基础规范 1989 年版采用了概率极限状态设计法, 把 1974 年版中的总安全系数 2 分解为作用分项系数及抗力分项系数两项。该规范中采用了“单桩竖向承载力设计值”一词, 没有定义, 直接规定了其为 1.1~1.2 倍单桩承载力标准值。

类似的, 桩基规范 1994 年版把 1980 年版中的总安全系数 2 拆分为作用分项系数及抗力分项系数两项, 前者约为 1.2~1.4, 后者约为 1.6~1.75。该规范中采用了“基桩竖向承载力设计值”一词, 没有定义, 其值为单桩竖向极限承载力标准值除以抗力分项系数。仅从数值来看, 两本规范得到的设计值相差不大。

2 几个概念的讨论与辨析

2.1 单桩承载力基本值

基础规范 1974 年版及 1989 年版使用了“承载力基本值”这一名词, 没有定义, 可以理解为按标准方法试验、未经数理统计处理的承载力基本数据, 一般可由理论计算法、室内试验法及原位试验法等取得。原位测试法, 即通过静荷载试验、标贯试验、动力触探、静力触探、高应变等原位测试方法, 得到样本个体的承载力即承载力基本值, 对试验样本进行数理统计, 得到统计修正系数, 基本值的平均值与统计修正系数的乘积即为承载力标准值。基础规范 2002 年版用“特征值”代替了“标准值”; 同时取消了通过室内试验法及除静荷载试验以外其他原位测试法确定承载力特征值的方法; 且因与“基本代表值”等名词容易混淆等原因, 不再使用“承载力基本值”。为了准确地表达相应概念, 建议以后机会成熟时, “基本值”一词再

恢复使用。

2.2 单桩承载力标准值

地基土及桩的竖向抗压承载力即地基土及桩抵抗竖向荷载作用的能力, 是材料或构件的一种性能。

《建筑结构可靠度设计统一标准》^[3](以下简称统一标准)规定:“材料性能标准值为符合规定质量的材料性能概率分布的某一分位值”。《工程结构设计基本术语和通用符号》^[4]定义了材料性能标准值为:“结构或构件设计时, 采用的材料性能的基本代表值, 其值一般根据符合规定质量的材料性能概率分布的某一分位值确定, 亦称特征值。”《建筑结构设计术语和符号标准》^[5]进一步明确材料强度标准值为:“结构构件设计时, 表示材料强度的基本代表值, 由标准试件按标准试验方法经数理统计以概率分布规定的分位数确定, 分抗压、抗拉、抗剪、抗弯、抗疲劳和屈服强度标准值。”就钢材、混凝土及砌块等一般材料而言, 其抗压强度就是材料所能承受的最大应力。

但地基土的情况不同。与混凝土等小变形材料相比, 土属于大变形材料, 当荷载增加时, 随着地基土变形的增长, 其承载力也在逐渐加大, 很难界定出一个真正的极限值, 其承载力不仅体现了强度性能, 同时还体现了变形与稳定性能。因此, 土的承载力确定时, 没有按照小变形材料的原则及方法, 传统上一直采用直接确定允许使用值的作法, 如静荷载试验时的比例界限法、相对变形值法等。对静荷载试验结果进行数理统计, 得到允许使用值, 即基础规范 1974 年版的“容许值”、1989 年版的“标准值”、2002 年版及 2011 年版的“特征值”。这些均不是极限值, 相当于统一标准中的设计值概念, 已经包含了安全系数, 只是安全系数水准不确定。

基础规范 1989 年版把“承载力标准值”一词扩大应用到了桩。桩因设置于土体中, 静荷载试验结果与土具有类似的大变形材料的压力变形性状。但桩毕竟不是土, 不属于大变形材料或构件, 无法采取与土类似的直接确定设计使用值的作法, 规范于是规定了极限状态指标, 把单桩静荷载试验时达到了极限状态指标时的桩所承受的荷载确定为桩的极限承载力, 这与小变形材料作法类似。基础规范 1989 年版把桩的极限承载力除以安全系数 2, 得到所谓的单桩承载力标准值。与土类似, 该承载力标准值相当于统一标准中的设计值, 安全系数为 2。

可见, 承载力标准值不是极限值, 不符合相关技术标准对标准值的定义, 相关技术标准规定的标准值对应的是极限值。基础规范 2002 年版之后该名词被停用。

2.3 单桩极限承载力标准值

桩基规范可能并不认同基础规范中单桩承载力标准值的概念及名词, 一直没采用。但因“承载力标准值”名词已经被占用, 于是采用了“极限承载力标准值”一词且一直沿用至今。

2.4 单桩承载力设计值

如前所述, 基础规范 1989 年版把经过深宽修正的地基土承载力标准值规定为地基土承载力设计值, 把 1.1~1.2 倍的单桩承载力标准值规定为单桩承载力设计值。因此带来的问题是: 承载力设计值大于标准值, 不符合统一标准等规范。后者等相关技术标准规定, 抗力的设计值为抗力标准值除以抗力分项系数, 因分项系数均不小于 1.0, 故抗力的设计值均应不大于标准值。基础规范 1989 年版中设计值的概念及用法没有问题, 问题出在承载力标准值的概念上, 如前所述。

这个矛盾很难协调。地基土承载力没有极限值, 或者说传统上就没有测定过像小变形材料那种极限标准值, 也就无法通过标准值除以材料分项系数得到设计值; 按传统方法得到的承载力“标准值”实质上就是设计值, 已经包含了安全系数。但如果直接把“标准值”改为“设计值”, 也很为难, 必然会引起混乱。于是基础规范修订为 2002 年版时, 用“承载力特征值”替代了“承载力标准值”, 同时停用了“承载力设计值”。由于“基本值”经数理统计处理后得到的是“标准值”, “标准值”一词被停用, “基本值”一词也随之停用。

桩基规范 1994 年版把极限承载力标准值除以抗力分项系数 1.6~1.75 规定为单桩承载力设计值, 符合统一标准规定。修订为 2008 年版时, 与基础规范相似的原因, 也停用了“单桩承载力设计值”一词。

虽然“承载力设计值”名词被停用, 但其代表的设计理念并没有问题且仍然在使用。该词的停用, 给准确表达承载力的有关概念及计算公式带来了不便, 建议以后机会成熟时再恢复使用。

2.5 单桩承载力特征值

基础规范 2002 年版及 2011 年版采用了“单桩承载力特征值”一词。基础规范没有定义, 但条文说明解释了“特征值”一词: “用以表示正常使用极限状态计算时采用的地基承载力和单桩承载力的设计使用值, 其含义为发挥正常使用功能时所允许采用的抗力设计值。”

基础规范定义了地基承载力特征值: “由载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内规定的变形所对应的压力值, 其最大值为比例界限值。”对单桩承载力特征值的概念可以理解为: 正常使用极限状态下允许使用的单桩最大竖向抗压承载力。如果以之为定义, 那么, 这种定义模式是从荷载或者设计计算的角度出发的, 与对地基土的定义模式不同。对地基土直接规定了荷载试验时承载力特征值状态, 认为特征值是地基土的固有属性。对单桩承载力特征值如果采用同样定义模式, 因为不能通过试验直接确定, 就要先定义极限承载力标准值, 再描述其与特征值的关系—桩基规范就是这么定义的。目前, 技术标准能够规定静荷载试验时相对应某变形量的桩承载力为极限值, 但无法规定什么样的变形量相当于特征值。这也许是基础规范没有对其定义的原因。

2.6 桩端阻力特征值及桩侧阻力特征值

基础规范没有明确这两个名词的概念。笔者理解为: 桩端阻力特征值及桩侧阻力特征值为单桩正常使用极限状态下允许使用的最大桩端阻力及桩侧阻力, 即单桩承载力为特征值时的桩端阻力及桩侧阻力。

这两个特征值如何确定呢? 基础规范 1974 年版及 1989 年版提供了相关经验值, 但没有说明经验值的来源及确定方法, 2002 年版及 2011 年版则笼统地说“由当地静载荷试验结果统计分析算得”。事实上, 工程实践中特征值确定方法就是取得极限标准值后除以安全系数 2。技术标准也是这么做的, 只是没有明说。目前还没有见到确定这两个特征值的其他方法。

但这种作法与前述对这两个特征值的概念理解之间有矛盾了。单桩竖向受压时荷载传递机理有几个特点^[6]: ①桩侧摩阻力是自上而下逐渐发挥的, 不同深度的摩阻力是异步发挥的; ②桩土间产生一定的相对位移后, 桩侧摩阻力从峰值跌落为残余值; ③桩端阻⼒与侧阻⼒是异步发挥的, 只有当桩身应力传递到桩端后桩端土才产生端阻⼒; ④桩端土较坚硬时, 桩端阻⼒随着桩端沉降增大而增大。这样, 单桩受到与承载力特征值等值荷载时, 桩身上部的桩侧阻⼒的发挥值可能已经接近极限, 而桩身下部的侧阻⼒和端阻⼒发挥值仍然很小, 远未达到特征值水平^[7], 即当单桩受荷达到承载力特征值状态时, 桩侧阻⼒及桩端阻⼒并非极限值的一半, 即并非特征值。或许是前述笔者理解的两个特征值的概念不准确? 倘若如此, 准确的概念又应该是什么呢。从力学机理上分析, 例如桩侧土的摩阻⼒, 本质是剪切强度, 和锚杆、土钉等构件与土体的黏结强度本质相同, 只是名词不同而已。既然是强度, 就应只有极限值, 应视极限值为特征值, 而不应是极限值的一半, 基础规范把极限值的一半作为特征值, 很难理解有什么物理意义, 用途也只是以经验方法计算承载力特征值。

那么, 这两个特征值又是如何验证的呢? 通常采用间接方法: 按该两个特征值, 计算出单桩承载力特征值, 进行静荷载试验, 最大试验荷载不小于 2 倍承载力特征值的计算值, 得到试验结果, 进行数理统计

得到极限承载力标准值，除以 2 后，如果不小于单桩承载力特征值的计算值，则验证合格。

为了解国外对这两个特征值的概念，笔者在互联网上用多种引擎搜索了含有“桩侧阻力特征值”英文名词的文献，数百篇，都是国人文献的英译版，没有一篇是外国人原著的，因此推测英文中没有相应的原创术语，从而推测这个概念是国内首创、国外没有的。当然，或许只是笔者孤陋寡闻。

这两个特征值的概念很难说得清楚，很难认为有确切的物理意义，其来源是间接的，验证方法也是间接的，可能也无法与国际接轨，用途也只是为了计算单桩承载力特征值。那么，这两个名词在技术发展的现阶段，是不是必须要采用呢？

3 承载力计算公式比较

创建这些概念的目的是为了应用，主要用于计算单桩承载力。基础规范用式(1)计算单桩承载力特征值，如前所述，桩端阻力与桩侧阻力不能同步达到特征值水平，故两者不能直接相加，式(1)在技术上很难成立。

式(2)采用了桩端阻力极限标准值及桩侧阻力极限标准值两个参数。桩端阻力，即桩端土为桩提供的承载力，土是大变形材料，如前所述，很难界定出真正的承载力极限值，这里为什么出现极限值了呢？桩基规范 2008 年版定义了极限端阻力、极限侧阻力：相应于桩顶作用极限荷载时，桩端、桩身侧表面所发生的岩土阻力。从定义可看出，桩基规范把单桩承载力达到极限值水准时的桩端土的承载力视为极限值，并非物理意义上的极限值。

可见，这两个经验公式理论上都存在着待商榷之处：式(1)假定了桩侧阻力存在着特征值状态，而式(2)假定了桩端阻力存在着极限值状态。笔者以为，问题产生的根本原因，是桩端土的承载力与桩侧土的摩阻力的力学性质不同：桩端土的承载力的本质是大变形材料的抗压强度，数值大小与变形量密切相关；桩侧土的摩阻力的本质是剪切强度，与变形量基本无关。两种对变形要求不同的强度对桩产生的阻力直接相加，必然存在矛盾，不管是特征值+特征值=特征值，还是极限标准值+极限标准值=极限标准值，理论上都很难成立。

但目前也没有更好的理论及方法。在两个公式之间做选择，笔者更倾向于式(2)，原因如前所述：①桩特征值状态很难确定，尤其是桩侧阻力特征值，很难描述其物理意义，其概念非常不明确。②特征值的经验值来源是间接的，验证方法也是间接的，相对于

极限标准值而言，可靠性更差一些。③特征值是通过极限值取得的，既然极限值解决承载力计算问题更直接、更方便，为什么还要舍近求远换算成特征值呢？④承载力检测以极限值为直接目标，设计计算也应该以极限值为直接目标。式(2)的计算目标就是桩极限承载力，不像特征值那样去细分桩达到极限承载力状态时桩侧阻力及桩端阻力的状态，很难分清楚，也没有必要去分。

4 结 论

(1) 本文总结分析了单桩承载力极限标准值、标准值、特征值、设计值及基本值等多个与单桩竖向抗压承载力相关的名词术语之间的复杂关系，阐明了这些名词术语的概念及在相关规范中的取舍原因。

(2) 承载力基本值及设计值的名词及概念，对准确描述承载力的工作状态，及对设计计算与检测工作大有裨益，建议以后机会成熟时恢复使用。

(3) 可暂停使用桩端阻力特征值及桩侧阻力特征值名词，待有更成熟的研究成果后再考虑使用。单桩承载力特征值名词继续使用，以后机会成熟时可修改为“单桩承载力设计值”。地基土承载力特征值名词及概念则作为特例，可继续保留使用。

(4) 单桩极限承载力标准值、桩极限端阻力标准值、桩极限侧阻力标准值等名词目前可推广使用，建议以后时机成熟时去除其中的“极限”两个字。

(5) 基础规范用于计算单桩承载力特征值的公式及桩基规范用于计算单桩承载力极限标准值的公式，均采用了桩侧阻力与桩端阻力直接相加方法，从概念角度理解都存在着不完善之处，主要是桩侧阻力与桩端阻力的力学特性及对变形的要求不同所致。两者殊路同归，相对来说，桩基规范中的公式更直接、更可靠一些。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban and Rural Development of P. R. China. GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Housing and urban-Rural Development of P. R. China. JGJ94—2008. Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,

2008. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984. (Ministry of Construction of P. R. China. GB 50068—2001 Unified standard for reliability design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GBJ 132—90 工程结构设计基本术语和通用符号[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. (Ministry of Housing and Urban and Rural Construction and Environmental Protection of P. R. China. GBJ 132—90 . Basic terms and general symbols for engineering structure design[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991. (in Chinese))
- [5] 中华人民共和国建设部. GB/T 50083—97 建筑结构设计术语和符号标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (Ministry of Construction of P. R. China. GB/T 50083—97. Standard for terminology and symbols used in design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [6] 张 雁, 刘金池. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 16 – 17. (ZHANG Yan, LIU Jin-chi. Pile foundation manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 16 – 17. (in Chinese))
- [7] 刘金砾, 高文生, 邱明兵. 建筑桩基技术规范应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 388. (LIU Jin-li, GAO Wen-sheng, QIU Ming-bing. Handbook of technical code for building pile foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 388. (in Chinese))