

The Differences in the Design of isolated Foundation for Substation Equipment under Chinese and US Standards

Peng Yang

Concord New Energy Group, Beijing, 100048, China

Abstract

In overseas substation structural design, equipment foundations are typically constructed using RCC isolated foundations. Designers must thoroughly understand and apply relevant American standards during the design process. This paper provides a comprehensive analysis of the design codes from both countries, focusing on key aspects such as code adoption, load values, load combinations, shear calculations, and bending analysis. It highlights the design philosophies and methods within each regulatory framework. Chinese regulations place greater emphasis on balancing safety and economy under specific primary loads, and the consideration of load combinations may be relatively simplified; The American standards emphasize the diversity of load combinations and pay more attention to the verification of local failure modes such as shear capacity to ensure the safety of structures under various extreme conditions. These design differences are particularly evident in the foundation design for substation support structures and offer clear guidance and reference for designers working on overseas projects.

Keywords

independent foundation; load combination; American standard; substation equipment

中美规范下变电设备独立基础设计差异

杨鹏

协合新能源集团, 中国·北京 100048

摘要

海外变电结构设计中, 设备基础通常采用钢筋混凝土独立基础。在进行海外项目设计时, 设计人员需深入理解和运用美标的相关设计规范。论文通过对两国设计规范的全面分析, 特别是在规范采用、荷载取值、荷载组合、冲剪计算和受弯分析等关键环节的对比, 揭示了各自规范体系下的设计思路和方法。中国规范更注重在特定主要荷载下的安全性与经济性平衡, 荷载组合的考虑可能相对简化; 美国规范更强调荷载组合的多样性, 并对诸如冲剪能力等局部破坏模式的校核给予更多关注, 以确保结构在各种极端条件下的安全性。这些设计差异在变电站支架类设备基础设计中尤为突出, 为从事海外工程的设计人员提供了明确的指导和参考。

关键词

独立基础; 荷载组合; 美标; 变电设备

1 引言

在“一带一路”倡议和全球碳中和目标的催动下, 可再生发电项目与电力电网项目进入建设高峰期, 我国越来越多的电力企业“走出去”承接海外工程项目。海外项目一般执行严格的工程师审图制度, 其设计详图及计算书均要通过工程师批复, 使用的设计标准多为欧美标准。关于变电站支架类设备独立基础的设计, 中国规范主要在 DLT 5457—2012^[1]与 GB 50007—2011^[2]作了较详细的规定, 而美国规范在 *ASCE 113-Substation structure design guide* (《变电站结构设计导则》)^[3]与 *ACI 318-Building Code Requirements for*

Structural Concrete (《结构混凝土建筑规范要求》)^[4]中作了规定。针对独立基础设计, 论文主要对两种规范设计的异同进行对比和讨论。

2 基本风速

中美规范下基本风速的差异在海外工程设计中备受关注。在中国现行荷载规范为 GB50009—2012《建筑结构荷载规范》^[5]中, 基本风速为在空旷平坦地形, 距地面 10m 高度处, 以时距为 10min 平均年最大风速, 经统计分析确定重现期为 50 年的最大风速。而在美标 *ASCE7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (《最小荷载规范》)^[6]中, 基本风速为在地面粗糙度类别 C, 距地面 10m 高度处, 时距为 3s 的阵风速度, 其重现期按照建筑结构风险等级确定: I 级为 300 年, II

【作者简介】杨鹏 (1987—), 男, 中国江苏南京人, 本科, 从事国际电力及新能源项目全过程管理研究。

级为700年，Ⅲ级为1700年，Ⅳ级为3000。由此可见，中美规范中基本风速的确定均以空旷场地为基准，即美标以C类场地为基准，中标以B类场地为基准。不同距离的基本风速的换算关系见表1，中美两国的基本风速比基本为 $V_{10min} : V_{3s} = 1 : 1.42$ 。

表1 不同时距风速与10min时距风速比值

风速时距	1h	10min	5min	1min	10s	5s	3s
比值	0.94	1.0	1.07	1.20	1.35	1.39	1.42

3 荷载组合

《变电站建筑结构设计技术规程》中规定，设备支架及基础应以最大风工况与操作荷载工况作为承载能力极限状态的基本组合，其中最大风工况条件下的标准组合（其中风荷载乘以系数0.5）宜作为正常使用极限状态变形验算。

最大风工况：取50年一遇的最大风速（无冰，相应气温）条件下的设备引线张力及自重、设备重、结构风压，风应取对结构最不利的方向。

操作荷载工况：取最大操作荷载、设备重及相应条件下的设备引线张力及自重。

导（地）线的基本组合的荷载分项系数，按表2的数值取用。当垂直荷载效应对结构抗力有利时，其荷载分项系数可取1.0。

表2 导（地）线荷载的荷载分项系数

项次	荷载名称	最大风工况	履冰工况	检修安装工况
1	水平张力	1.3	1.3	1.2
2	垂直荷重	1.3	1.3	1.2
3	侧向风压	1.4	1.4	1.4

偶然荷载的分项系数可取1.0，如短路电动力荷载。

DL/T 5551—2018在《架空输电线路荷载规范》^[7]中，对于荷载基本组合的效应设计值，永久荷载的分项系数，对结构有利时不大于1.0，不利时取1.2，验算结构抗倾覆或抗滑移时取0.9。

在美标ASCE 113-Substation structure design guide（《变电站结构设计导则》）中，采用USD设计的荷载组合。

美标中恒载组合系数为1.1，而中标为1.2；美标中导线荷载组合系数为1.1，而中标为1.3或1.4；对于硬连接的管母构、支架，应考虑短路电动力，美标中短路电动力组合系数为0.75，而中标中为1.0。可见中标比美标偏于保守。

在海外工程设计中，业主经常要求更严格的荷载分项系数，尤其是涉及高风险环境或重要基础设施项目时基于项目的地理位置、环境条件及设施的重要性综合决定。这样的规定可能使欧标和中标之间的差异更加明显。为了满足业主要求并确保经济合理性，设计师需要进行权衡取舍。

4 独立基础设计荷载

《建筑地基基础设计规范》对荷载取值的规定非常细致，旨在确保设计的科学性与可靠性。根据规范第3.0.5条的要求，设计人员在确定基础底部面积时，应依据地基承载力的特征值进行计算。所谓“特征值”是指在正常使用极限状态下，基于地基土压力变形曲线线性变形段所得出的值。这个特征值是在未超过比例界限点的情况下所能承受的最大地基压力，是通过实验数据和经验公式计算得出的。在规范中明确规定，进行截面设计时，应采用承载力极限状态下的基本组合荷载，并乘以相应的分项系数，以确保结构在极端条件下的安全性。例如，对于基础的配筋和材料强度校核，需使用考虑分项系数后的设计值进行计算。这样的设计理念与国际标准，如美国的ACI 318规范中的做法高度一致。ACI 318第15.2条强调，基础底部面积应根据传递到土体的力和弯矩来确定，并未将这些力和弯矩乘以安全系数，而是在截面设计时才考虑这些系数。

基础荷载的计算在设计过程中不仅仅是为了满足现在的使用需求，更重要的是为了应对未来各种极端情况的可能发生。规格通过分项系数的推出，保证了基础仍有足够的安全性。例如，在中国规范中，地基承载力特征值，本质上反映了地基在长期使用过程中所能保持的稳定性能，是根据大量的实验资料所得出的经验值。并且在实际操作中，为了保证设计的安全性，为了应对各种可能出现的不确定因素，设计者在进行截面设计时，都会在基础荷载上增加安全系数。GB/T50007—2011《建筑地基基础设计规范》规范有效地平衡了基础的经济性和安全性，通过采用特征值和设计值相结合的方法，为建筑的长期稳定性提供了可靠的保证。这一设计理念的合理性和科学性也得到了国际上的广泛认可，尤其是对比美国ACI318规范时，在荷载取值和设计方法等方面，可以发现两者的一致性非常高。这不仅对国内的基础设计提升了一个层次，而且在实际操作中，也给设计者一个明确的导向。

5 独立基础冲剪计算对比

中美规范中钢筋混凝土扩展基础的计算方法存在显著差异。

中标计算方法如下：

①柱下独立基础的受冲切承载力应按下列公式验算：

$$F_l \leq 0.7\beta_{hp}f_t a_m h_0$$

$$a_m = (a_l + a_b) / 2$$

$$F_l = p_j A_j$$

②当基础底面短边尺寸小于或等于柱宽加两倍基础有效高度时，应按下列公式验算柱与基础交接处截面受剪承载力：

$$V_s \leq 0.7\beta_{hs}f_tA_0$$

$$\beta_{hs} = (800/h_0)^{1/4}$$

美标计算方法如下：

①抗冲切承载力计算如下：

$$V_c = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.17(1+2/\beta)f'_c(b_0h_0) \\ 0.083[2+(\alpha_s h_0/b_0)]f'_c{}^{1/2}(b_0h_0) \\ 0.33f'_c{}^{1/2}(b_0h_0) \end{array} \right\}$$

②抗剪切承载力计算如下：

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$V_n = V_c + V_s$$

通过算例，计算结果如下所示。

从表3可以看出，在相同的混凝土等级和荷载条件下，对于基础厚度的计算值，中标规范比美标规范更为保守，势必导致更大的工程量。

表3 中美规范基础厚度计算值 (mm)

序号	混凝土等级	上柱尺寸/m	基础尺寸/m	永久荷载/kN	可变荷载/kN	中标		美标	
						剪切	冲切	剪切	冲切
1	C30	0.4x0.4	1.0x1.2	360	90	—	180	186	168
2	C30	0.4x0.4	0.8x1.2	500	200	362	—	273	305

6 受弯计算

计算矩形独立基础的底板弯矩时，有零应力和无零应力两种情况。在轴向或单向偏心荷载作用下，当台阶宽度不大于2.5且挠度不大于基础宽度的1/6时，认为基础上不存在零应力区地面。根据《建筑地基基础设计规范》，任意截面的底板弯矩可按下式计算：

$$M_l = \frac{1}{12}a^2 \left[(2l+a) \left(p_{\max} + p - \frac{2G}{A} \right) + (p_{\max} - p)l \right]$$

得到截面的弯矩设计值后，按下式计算底板配筋：

$$A_s = \frac{M}{0.9f_y h_0}$$

其中， h_0 为基础有效高度。

正如ACI 318规范中所述，第一步涉及确定基础底板的反作用力。随后，利用悬臂板计算模型，考虑上部荷载反力影响下基板两侧的B、L方向，计算出基板的实际最大弯矩。最后，计算沿基础每条边缘的钢筋。

轴心荷载作用时，基础底板弯矩按下式计算：

$$M_u = \frac{1}{2}q_u l^2$$

其中， q_u 为基础底面地基净反力； l 为弯矩计算截面处至相应基础边的距离。

配筋计算公式与中标相同。

7 结论

①中标基本风速时距为10min，重现期为50年；美标风速的时距为3s，重现期按照不同建筑结构的风险等级包括I级为300年，II级为700年，III级为1700年，IV级为3000年。中美两国的基本风速比基本为 $V_{10min} : V_{3s} = 1 : 1.42$ 。

②对于基础上部荷载的组合系数，中标较美标保守。在海外项目技术标书中，业主往往会制定比美标更保守的荷载组合系数。

③对于基础荷载而言，中标与美标取值方法基本一致，均采用荷载组合系数法。

④中国和美国规范在扩展基础的抗剪力和抗冲切力计算上存在显著差异。中国规范通常使用统一的抗剪和抗冲切计算方法，并依据标准规定的系数进行计算。而美国规范则更加注重实际受力情况，采用不同的计算方法和区域划分，例如在冲切力计算时更关注荷载分布的位置和方向，并引入更复杂的系数调整。这些差异导致了两国在扩展基础设计中对安全性和经济性的不同权衡。

⑤在基础底板弯矩的计算上，中、美规范采用的方法有所不同，但在配筋计算方面最终结果基本一致。中国规范倾向于使用简化公式来直接计算弯矩，并基于此确定配筋要求，而美国规范则采用倒悬臂板模型来模拟实际受力情况，通过反力计算得出更为精确的弯矩分布，并根据此分布进行配筋设计。这种模型考虑了底板各个区域的受力特点，从而使得计算结果更贴合实际情况。

参考文献

- [1] DLT 5457—2012 变电站建筑结构设计技术规程[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [2] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 美国土木工程师协会.ASCE 113-Substation structure design guide[Z].
- [4] 美国混凝土协会.ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete[Z].
- [5] GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] 美国土木工程师协会.ASCE 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures[Z].
- [7] DL/T 5551—2018 架空输电线路荷载规范[S].北京:中国计划出版社,2018.