

# 基于性能的桩基设计概念探讨

张季超, 杨永康, 王可怡, 马旭

(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对相关规范在桩基设计中有关“上部结构、基础与地基的相互作用”不统一的问题, 提出了基于性能的桩基设计概念, 探讨了基于性能的桩基设计流程及桩基计算流程, 在考虑上部结构、基础与地基的相互作用的前提下, 建议将桩基抗震性能分为4个性能等级, 并将桩基的性能目标分为6个等级。

**关键词:** 基于性能的桩基设计; 桩土相互作用; 性能水准; 性能目标

**中图分类号:** TU473.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0054-04

**作者简介:** 张季超(1956- ), 男, 河南郑州人, 教授, 从事岩土工程及结构工程的研究。E-mail: zhangjichao1956@126.com。

## Conception of performance-based pile foundation design

ZHANG Ji-chao, YANG Yong-kang, WANG Ke-yi, MA Xu

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Based on the non-unification of superstructure-pile-soil interaction on pile foundation design in codes, the performance-based pile foundation design theory is put forward. According to the requirements of performance-based pile foundation design, design flow and calculation of the performance-based pile foundation design are discussed. Considering the superstructure-pile-soil interaction, 4 performance levels are suggested to divide respectively on earthquake, and 6 ranks of performance objectives are proposed.

**Key words:** performance-based pile foundation design; pile-soil interaction; performance level; performance objective

## 0 引言

基于性能化的设计理论于20世纪90年代由美国学者首次提出<sup>[1-3]</sup>, 并将其应用于结构抗震设计领域。性能化抗震设计思想自提出以来, 性能化抗风<sup>[4-6]</sup>和防火等设计理论也陆续提出。性能化抗震设计和性能化抗风设计也成为高层、大跨度结构设计的重要内容, 但基于性能的地基基础设计尚无人问津。对基于性能的桩基设计进行探讨, 有助于加快性能化在地基基础中的发展, 使地基设计与上部结构设计协调起来, 从而更好地指导工程建设。

## 1 问题的提出

随着新材料、新技术的推广, 土木工程建筑也往高层、大跨等方向发展, 结构基础变形也控制严格。桩基础作为一种承担上部结构荷载及控制变形的手段, 由于具有承载力高、应力传递途径简捷、变形小等优点得到了广泛应用。但在桩基础设计的早期, 由于其在设计时未能充分利用土对承台的抗力, 没充分考虑上部结构、基础与地基的相互作用, 使桩设计过

长, 从而导致资源浪费, 并不利于城市地下交通的发展<sup>[7]</sup>。

为使桩基设计更合理, 应考虑上部结构、基础与地基的相互作用。《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)<sup>[8]</sup> (简称GB50007) 中的5.3.10规定, 在同一整体大面积基础上建有多栋高层和低层建筑, 应考虑上部结构、基础与地基的共同作用进行变形计算。同时, 《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)<sup>[9]</sup> (简称JGJ94) 在考虑上部结构、基础与地基的相互作用的问题上提出了新的见解, 其3.1.8条提出以减小差异沉降和承台内力为目标的变刚度调平设计, 并建议对于主裙楼连体建筑、框架—核心筒结构高层建筑、大体量筒仓、储罐等桩基按变刚度调平设计, 进行上部结构—承台—桩—土共同工作分析。

但是, 自2010年12月1日起执行的《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[10]</sup> (简称GB50011), 在3.3.4款中针对地基基础抗震设计提出“同一结构单元的基

础不宜设置在性质截然不同的地基上”, “同一结构单元不宜部分采用天然地基部分采用桩基; 当采用不同基础类型或基础埋深显著不同时, 应根据地震时两部分地基基础的沉降差异, 在基础、上部结构的相关部位采取相应措施”。

综上所述, GB50007、JGJ94相对于GB50011有关上部结构、基础与地基的相互作用的规定没有得到统一, 特别是有关建筑物、地基和基础的变形协调设计, GB50007、JGJ94相对于GB50011截然不同。然而, 当结构的体型、荷载确定后, 上部结构的刚度难以再调整, 能调整刚度的只有桩基, 通过调整桩基的刚度, 能更好地使桩、地基变形协调, 有效减小差异沉降, 并能取得良好的经济效益。

因此, 在抗震设防区, 在考虑上部结构、基础与地基的相互作用的前提下, 要将结构设计得更安全, 使建筑物地基的变形更协调, 使经济效益更好, 建议采用基于性能的桩基设计。

## 2 基于性能的桩基设计框架

### 2.1 基于性能的桩基设计流程

基于性能的桩基设计的目的, 是在不同性能目标的基础上, 针对上部结构、基础与地基的相互作用以及桩的耐久性问题, 使桩基满足正常使用的承载能力、稳定性、变形及耐久性等技术要求, 满足地震力等偶然荷载作用要求, 满足使用功能、美观及经济效益等的要求。

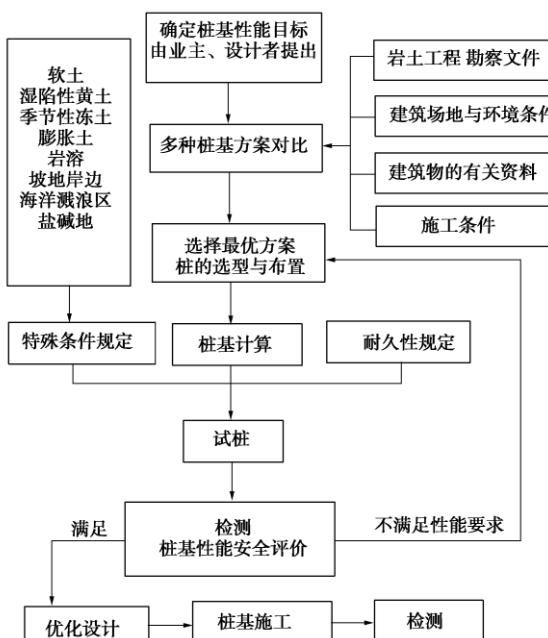


图 1 基于性能的桩基设计流程

Fig. 1 Flowchart of performance-based pile foundation design

基于性能的桩基设计与传统的桩设计过程相比,

主要差别在于, 在桩基设计之前, 由业主、设计者或专家讨论, 给出他们所期望的桩基的性能水准, 根据性能水准来完成设计。同时, 通过试桩的检测数据, 反馈到桩基计算进行优化设计, 也是基于性能的桩基设计与传统的桩设计的重要区别。

通过综合考虑传统的桩设计流程及基于性能的桩基设计思想, 给出基于性能的桩基设计流程, 如图1所示。

### 2.2 桩基计算流程

桩基计算是桩基性能化设计的重要内容, 其包括了JGJ94中规定的一般计算、验算内容及桩土协调的计算内容。图2为基于性能的桩基设计的计算流程。

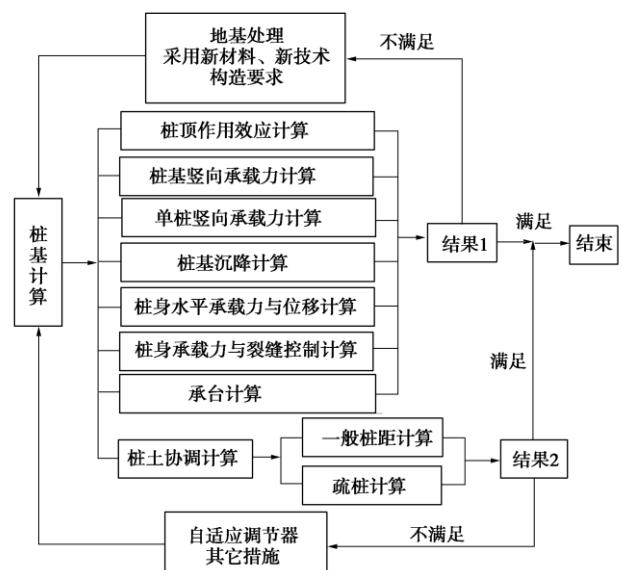


图 2 基于性能的桩基计算流程

Fig. 2 Flowchart of performance-based pile foundation calculation

针对JGJ94中桩基计算、验算的内容, 若计算不通过, 要重新选择桩型或方案, 这不仅造成工期的浪费, 并且重新选择的方案也不一定是最佳的。基于性能的桩基设计的计算, 当计算不满足时, 可采用一定的措施, 来优化设计, 例如采用地基处理的方法来消除桩的负摩阻力, 或采用新材料、新技术等。

桩土协调计算是反映上部结构、基础与地基相互作用的桩基计算的重要内容, 它是复合桩基计算不可缺少的步骤。其计算将上部结构—基础—复合桩基作为一个整体, 分析其沉降、桩土应力分布、桩土荷载分担比例、基础总沉降、差异沉降及沉降影响范围, 通过考虑上部结构、基础和复合桩基三者接触部位的位移协调, 对其进行分析和求解<sup>[11]</sup>。计算既要满足承载力的要求, 又要满足建筑物对沉降变形的要求。计算方法主要有按一般的桩距（桩间距<6倍桩径）计算和按疏桩（桩间距≥6倍桩径）计算, 当计算不满足要求时, 可采用自适应调节器或其它措施进行承载力及

变形协调。

### 3 桩基性能水准

GB50007、JGJ94 建议考虑上部结构、基础与地基的相互作用,使桩基充分发挥桩、土的作用,进而达到变形协调及良好经济效益方面的性能要求。而 GB50011 基于建筑结构的抗震性能,不建议考虑上部结构、基础与地基的相互作用。针对这两个不同角度,根据考虑上部结构、基础与地基的相互作用性能,以及不同建筑物的重要性及对桩基的要求,特别是变形、稳定性、承载力、耐久性的要求,初步建立了桩基在多遇地震、设防地震、罕遇地震下的抗震性能水准,并建议将其划分为 4 个等级,各性能水准的描述见表 1。

表 1 桩基抗震性能水准描述

Table 1 Description of pile foundation performance level on anti-earthquake

性能水准	多遇地震	设防地震	罕遇地震
第一水准	完好, 承载力、变形远小于规定范围, 功能不受影响	完好, 承载力、变形在规定范围内, 功能不受影响	基本完好, 承载力、变形在规定范围内, 功能不受影响
第二水准	完好, 承载力、变形明显小于规定范围, 功能不受影响	基本完好, 承载力、变形在规定范围内, 功能不受影响	轻一中等破坏, 承载力、变形超出规定范围, 没达到正常使用极限状态的限值, 局部功能受影响
第三水准	完好, 承载力、变形在规定范围内, 功能不受影响	轻一中等破坏, 承载力、变形超出规定范围, 没达到正常使用极限状态的限值, 局部功能受影响	中等破坏, 承载力、变形超出规定范围, 没达到承载力极限状态的限值, 大部分功能受到较大影响
第四水准	完好, 承载力、变形在规定范围内, 功能不受影响	中等破坏, 承载力、变形超出规定范围, 没达到承载力极限状态的限值, 大部分功能受到较大影响	不严重破坏, 承载力、变形达到承载力极限状态的限值, 功能丧失, 但还能支承上部结构而未倒塌

### 4 性能目标

桩基性能目标是指考虑上部结构、基础与地基的相互作用的前提下,在建筑结构抗震性能所要求达到桩基性能水准的总和。性能目标的确定是根据建筑桩基的设计等级、桩基的功能要求、耐久性要求、建筑物的重要性、建筑物体型的复杂性以及由于桩基问题

可能造成建筑破坏或影响正常使用程度、经济效益等因素,由业主、设计者讨论并提出,或由专家讨论、修改得出。表 2 给出了桩基抗震性能目标。

表 2 桩基抗震的性能目标

Table 2 Performance objectives of pile foundation on anti-earthquake

性能水准状态	第一水准	第二水准	第三水准	第四水准
多遇地震	A、B	C	D、E	F
设防地震	A、B	C	D、E	F
罕遇地震	A	B	C、D	E、F

性能目标 A: 桩基在多遇地震、设防地震、罕遇地震均满足第一水准性能要求,反映桩基的最高性能需求,在多遇地震、设防地震、罕遇地震作用下要求功能均不受影响的桩基,可以采用此性能目标。此性能目标适用于极其重要的建筑物。

性能目标 B: 桩基在多遇地震及设防地震满足第一水准性能要求,在罕遇地震满足第二水准性能要求,反映了桩基较高性能需求。在多遇地震及设防地震作用下要求功能不受影响、在罕遇地震作用下要求大部分功能不受影响的桩基,可以采用此性能目标。

性能目标 C: 桩基在多遇地震及设防地震满足第二水准性能要求,在罕遇地震满足第三水准性能要求,反映了桩基较高性能需求。在多遇地震及设防地震作用下要求功能不受影响、在罕遇地震作用下要求局部功能不受影响的桩基,可以采用此性能目标。

性能目标 D: 桩基在多遇地震、设防地震、罕遇地震均满足第三水准性能要求,反映了桩基一般性能需求。在多遇地震及作用下要求功能不受影响、在设防地震作用下要求大部分功能不受影响、在罕遇地震作用下要求局部功能不受影响的桩基,可以采用此性能目标。

性能目标 E: 桩基在多遇地震及设防地震满足第三水准性能要求,在罕遇地震满足第四水准性能要求,反映了桩基一般性能需求。在多遇地震作用下要求功能不受影响、在设防地震作用下要求大部分功能不受影响、在罕遇地震作用下功能丧失但还能支承上部结构而不倒的桩基,可以采用此性能目标。

性能目标 F: 桩基在多遇地震、设防地震、罕遇地震均满足第四水准性能要求,反映了桩基最低性能需求。在多遇地震作用下要求功能不受影响、在设防地震作用下要求局部功能不受影响、在罕遇地震作用下功能丧失但还能支承上部结构而不倒的桩基,可以采用此性能目标。

综上所述,性能目标 A 反映了桩基设计最高性能需求,性能目标 B、C 反映了桩基设计较高性能需求,

性能目标 D、E 反映了桩基设计一般性能需求, 性能目标 F 反映了桩基设计最低性能需求。

## 5 结 论

(1) 针对 GB50007、JGJ94 与 GB50011 有关上部结构、基础与地基的相互作用规定的不统一, 提出了基于性能的桩基设计概念。

(2) 通过综合考虑传统的桩设计流程及基于性能的桩基设计思想, 给出基于性能的桩基设计流程及桩基计算流程。

(3) 在考虑上部结构、基础与地基的相互作用的基础上, 把桩基在多遇地震、设防地震、罕遇地震下的抗震性能水准分为 4 个性能等级。在此基础上, 把桩基的性能目标分为 A、B、C、D、E、F 等 6 个等级。

## 参考文献:

- [1] 门进杰, 史庆轩, 周 琦. 框架结构基于性能的抗震设防目标和性能指标的量化[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(9): 76 - 82. (MEN Jin-jie, SHI Qing-xuan, ZHOU Qi. Performance-based seismic fortification criterion and quantified performance index for reinforced concrete frame structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(9): 76 - 82. (in Chinese))
- [2] 陈 麟, 郭永兴, 周 云. 巨型钢框架节点基于性能的研究[J]. 广州大学学报 (自然学科版), 2010, **9**(6): 38 - 42. (CHEN Lin, GUO Yong-xing, ZHOU Yun. Research on performance-based design of steel mega-frame joints[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2010, **9**(6): 38 - 42. (in Chinese))
- [3] 岳茂光. 场地 - 结构体系基于性能抗震设计分析方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (YUE Mao-guang. Studies on analysis method of performance-based seismic design of site-structure system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [4] 周 云, 汪大洋, 陈小兵. 基于性能的结构抗风设计理论框架[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, **29**(3): 244 - 251. (ZHOU Yun, WANG Da-yang, CHEN Xiao-bing. Framework on performance-based wind-resistant design theory[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, **29**(3): 244 - 251. (in Chinese))
- [5] 周 云, 张春梅, 阴 肖. 超高层建筑结构风致振动的动力参数敏感性研究[J]. 广州大学学报 (自然学科版), 2009, **8**(4): 65 - 69. (ZHOU Yun, ZHANG Chun-mei, YIN Yi. Experimental study of seismic behaviors of double high strength concrete filled steel tube columns[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2009, **8**(4): 65 - 69. (in Chinese))
- [6] 徐 安, 石碧青, 等. 超高层建筑结构风致振动的动力参数敏感性研究[J]. 广州大学学报 (自然学科版), 2011, **10**(1): 54 - 59. (XU An, SHI Bi-qing, et al. Sensitivity of dynamic parameters according to wind-induced vibrations of super tall buildings[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2011, **10**(1): 54 - 59. (in Chinese))
- [7] 郑俊杰, 彭小荣. 桩土共同作用设计理论研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 242 - 245. (ZHENG Jun-jie, PENG Xiao-rong. Study on design theory of pile-soil cooperative work[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(2): 242 - 245. (in Chinese))
- [8] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [9] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [10] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB50011—2010 Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 徐美娟, 宰金珉, 梅国雄. 有关上部结构—桩—土相互作用研究问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(增刊 1): 4361 - 4365. (XU Mei-juan, ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Research review on superstructure-pile-soil interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(S1): 4361 - 4365. (in Chinese))

(本文责编 明经平)