

# 地震作用下承台刚体假定的适用性分析\*

刘延芳

(中交路桥技术有限公司, 北京 100011)

**摘要:** 承台是桥梁结构中连接桥梁墩柱与桩基的主要受力与传力构件, 一般分析时均假定为刚体。为了研究地震作用下承台的受力性能, 首先阐述了在静力条件下承台刚体假定所需满足的条件; 通过改变承台的厚度, 即承台的自身刚度, 建立实体有限元模型与简化刚体假定有限元模型, 通过两者之间的比较, 分析在静力条件下得出的承台刚体假定条件在地震作用下是否仍具有一定的适用性。结果表明, 通过静力方法得出的承台刚体假定的条件在地震作用下具有一定的适用性, 但是仍存在一定修正的空间。

**关键词:** 桩基承台; 刚体假定; 静力条件; 有限元模型; 地震作用

**中图分类号:** TV223      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2014)01-0094-05

## 0 引言

桥梁桩基承台在桥梁结构抗震分析时常常被假定为刚性无穷大的刚体, 常用一根竖直的刚性梁来模拟承台(范立础等, 1997, 2001; 叶爱君, 管仲国, 2002)。陈振民等(2004)将承台模拟为一根竖直的刚性梁, 桩基模拟为线弹性梁体, 承台与桩基相连的刚性杆上的节点为主节点, 桩基与承台相连的桩基上的节点为从节点。通过与将承台模拟为带旋转自由度的三维实体非协调单元, 桩基模拟为三维梁单元的模型, 认为把刚性承台模拟为一根竖直的刚性梁, 计算所得的桩基内力是合理的、可靠的。

在一般情况下, 承台假定为刚体是可以满足工程精度要求的, 但是在有些情况下, 如在桩间距特别大时, 桩的根数较多的大型基础中且荷载集中的情况下, 就不能把承台视为刚体, 有必要对承台的刚度进行验算(横山幸满, 1984)。即便是按刚性设计的承台, 荷载的作用位置、桩的布置形式等诸多因素都会对桩—承台体系内力和变形产生一定的影响(刘云云, 1996; 刘利民, 1997)。本文以一桩基承台为例, 在其地震反应分析的基础上, 采用 ANSYS 有限元程序, 通过改变桩基承台的厚度, 比较承台的实体模型与刚体假定模型之间的差异, 研究承台通过静力条件得出的刚体假定条件在地震作用下的适用性。

## 1 静力作用下承台刚体假定条件

矢作枢和田克哉(1990)通过桩基与承台之间的相对刚度来确定刚性承台的前提条件, 认为承台的刚度大小与桩的荷载分配有关, 所以不能只从其截面的刚度(弯曲刚度、剪切刚度)来决定, 还要由桩的间距与桩的轴向弹性系数之间的相对关系来决定。林亚超(1981)认为承台能视作刚体的厚度是由地基相对刚度来确定的, 其条件可由公式(1)判断:

$$\mu = \frac{6EI}{K_v l^3} > \frac{n^4}{10} \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为承台的刚度系数;  $l$  为桩中至中的间距(单位: m);  $n$  为桩的列数。

实际工程中, 不存在完全刚性的承台, 但可将误差限制在一定的范围内, 以满足工程精度要求为准则, 区分是否可以按刚性承台计算。陈竹昌等(1999)在桩—承台体系中, 从非力矩作用平面内取一排桩, 把承台简化为支承在弹性支点上的连续梁, 弹性支点的弹性系数就是桩的轴向刚度。假设在梁上任意位置作用荷载, 比较刚性和非刚性状态下弹性支承的连续梁的受力状态, 受力状态的差别正是建立承台刚度判别标准的基础。当刚性和非刚性条件下梁体的支点反力的比值为1时将其视为刚体。并通过参数分析, 绘制了

\* 收稿日期: 2013-10-10.

反力比值、桩的列数和承台刚度系数之间的关系曲线。如果以弹性计算结果与完全刚性的误差不大于10%作为可按刚性处理的标准,可以得到当承台为刚体时,  $\mu$  与  $n$  的关系为

$$\mu > \left(\frac{n}{1.4}\right)^4. \quad (2)$$

将  $\mu = \frac{6EI}{K_V l^3}$  代入式(2)可以得到按刚性处理的承台厚度的计算方法:

$$h > \left(\frac{0.521n^4 K_V l^3}{Eb}\right)^{1/3}. \quad (3)$$

至此,根据连续梁理论推导出了任意荷载作用位置、任意布桩形式下承台刚度的计算基本方法。并以虎门大桥辅航道通航孔为例,研究了在静力作用下式(3)的适用性,认为按照此公式得出的刚性处理承台厚度的计算方法,具有很高的精度和实用性。因此本文在此公式的基础上,通过分析,研究式(3)在地震荷载作用下的适用性。

## 2 计算模型及地震动输入

以图1所示的承台为例,采用反应谱分析方法,地震动输入见图2,峰值加速度为0.295 g,竖向加速度峰值为水平向加速度峰值的2/3,阻尼比取为5%。通过 ANSYS 有限元软件建立实体的承台有限元模型,其中桩基以及桥墩均采用梁 (beam4) 单元模拟,承台模型采用块体单元 (solid45) 模拟,并考虑两种单元之间的自由度耦合,桩基采用弹性嵌固模型。通过改变桩基承台的厚度,比较承台的实体模型(图3)与刚体假定模型(图4)之间的差异,进而研究承台通过静力条件得出的刚体假定条件在地震作用下的适用性。

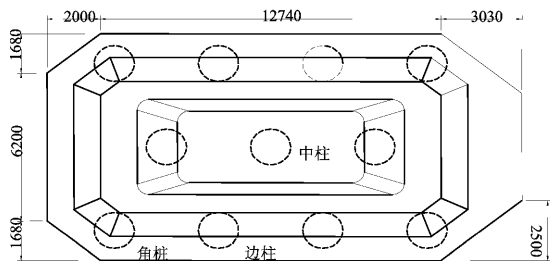


图1 桩基承台示意图  
Fig. 1 Layout of the pile cap

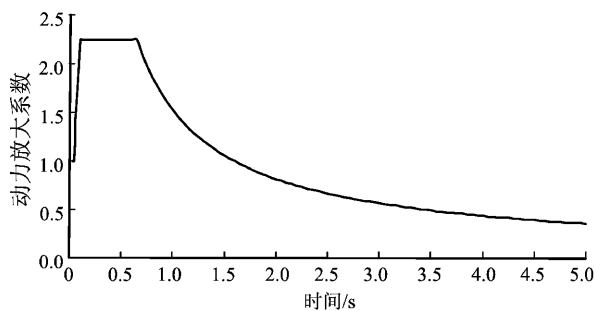


图2 地震加速度反应谱  
Fig. 2 Response spectrum of earthquake acceleration

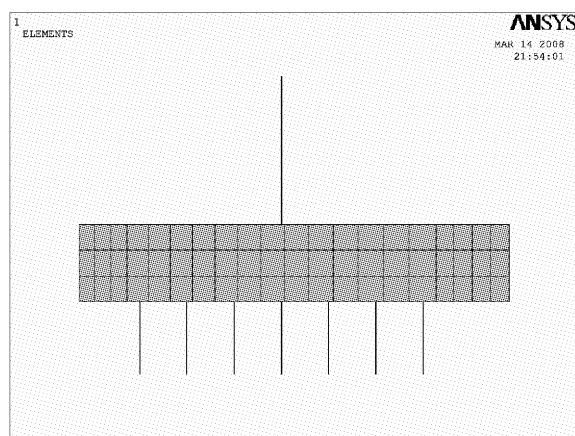


图3 承台实体模型  
Fig. 3 Solid model of the pile cap

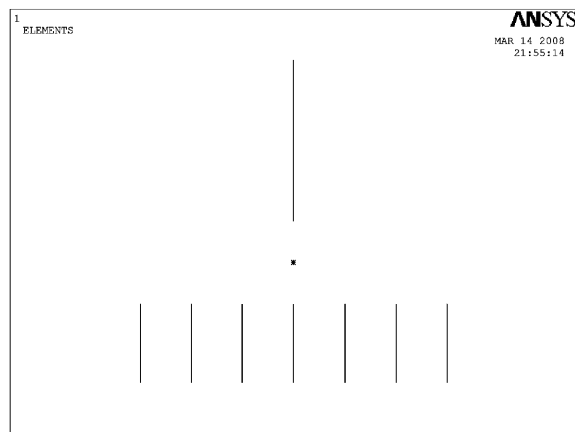


图4 承台刚体假定模型  
Fig. 4 Rigid body assumption model of the pile cap

## 3 计算结果分析

为了探讨静力作用下得出的承台刚体假定条件在地震荷载作用下的适用性,在其余参数保持不变的基础上,在 ANSYS 中通过改变承台的厚度,

与相应简化的刚体假定承台模型的计算结果进行比较分析。相应承台的厚度变化取值分别为 1.7 m、2.2 m、2.7 m、3.2 m、3.7 m、4.2 m，并根据式 (4)，将实际工程中承台厚度为 3.2 m 时的刚度假定为 1，其余厚度所对应的承台刚度的取值均为与之的相对比值。

$$R_p = \frac{E_p t^3}{12(1 - \nu_p^2)} \quad (4)$$

其中： $E_p$  为承台的弹性模量； $\nu_p$  为承台的泊松比。

经过计算，通过式 (3) 得出的承台满足刚性假定所需的最小厚度为 2.03 m，与实际采用的承台厚度的刚度相对比值为 0.255，其对数值为 -0.59。即当承台刚度相对比值的对数值小于 -0.59 时，承台并不满足刚性假定。

### 3.1 竖向地震作用

图 5 列出了仅在竖向地震输入下，实体有限元模型与简化刚体假定有限元模型的桩基顶部的计算结果之间的比较。当承台厚度不满足刚性假定条件时，ANSYS 实体与简化刚体假定有限元模型的计算结果最大误差达到 26% 左右；当承台厚度满足刚性假定条件时，ANSYS 实体与简化刚体假定有限元模型的计算结果最大误差不到 10%。因此，在计算桩基反应时，只有桩基承台的厚度满足一定要求时，承台的刚体假定才成立。

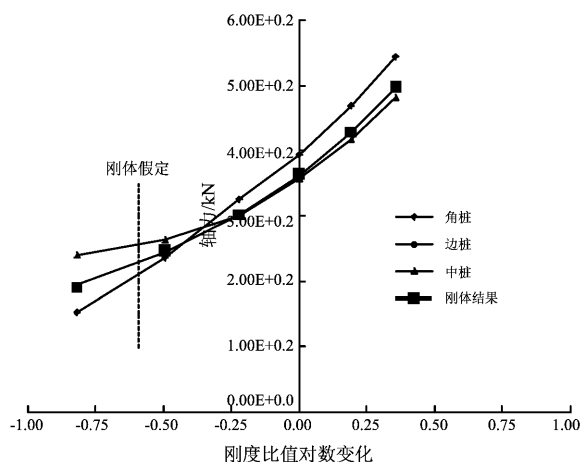


图 5 竖向地震作用下桩顶轴力随承台相对刚度的变化规律

Fig. 5 Rules of the axial force on the pile top various with the relative stiffness of the pile cap under the effect of the vertical seismic action

### 3.2 顺桥向地震作用

图 6~8 描述了桩基承台在纵向地震作用下各桩基顶部的受力变化规律。当承台厚度不满足刚性假定的条件时，桩基结构的反应与按刚性条件假定的计算结果相差较大，轴力最大误差为 12% 左右，剪力最大误差为 20% 左右，弯矩最大误差为 69% 左右；当承台厚度满足刚性假定的条件时，在纵向输入情况下，角桩基顶的剪力、弯矩的受力与刚性假定的结果误差较大，其原因是刚性

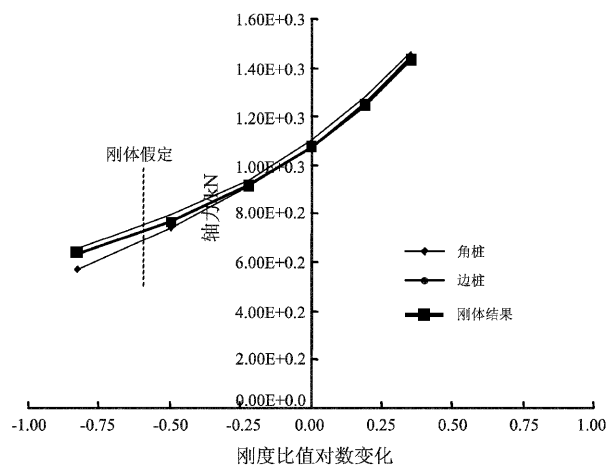


图 6 纵向地震作用下桩顶轴力随承台相对刚度的变化规律

Fig. 6 Rules of the axial force on the pile top various with the relative stiffness of the pile top under the effect of the longitudinal seismic action

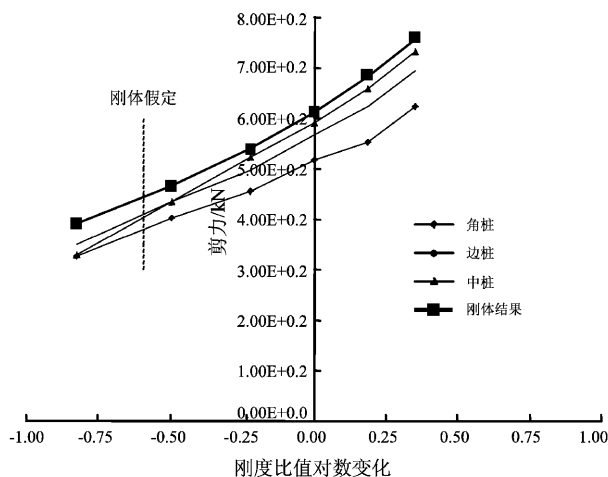


图 7 纵向地震作用下桩顶剪力随承台相对刚度的变化规律

Fig. 7 Rules of the shear on the pile top various with the relative stiffness of the pile top under the effect of the longitudinal seismic action

假定模型中没有考虑承台自身扭转质量的作用,考虑后计算结果与实体模型的计算结果吻合的较好。其余桩基结构的反应在承台满足刚性假定条件后结果误差较小,轴力最大误差均在5%以下。

### 3.3 横桥向地震作用

图9~11描述了桩基承台在横向地震作用下各桩基顶部的受力变化规律。在横向输入下,当承

台厚度不满足刚性假定的条件时,桩基结构的反应与按刚性条件假定的计算结果相差较大,轴力最大误差达到30%左右,剪力最大误差达到10%左右,弯矩最大误差达到40%左右;但当桩基结构的反应在承台满足刚性假定条件后,其计算结果与刚性假定的计算结果误差较小,轴力最大误差均在10%以下,剪力最大误差均在4%以下,弯

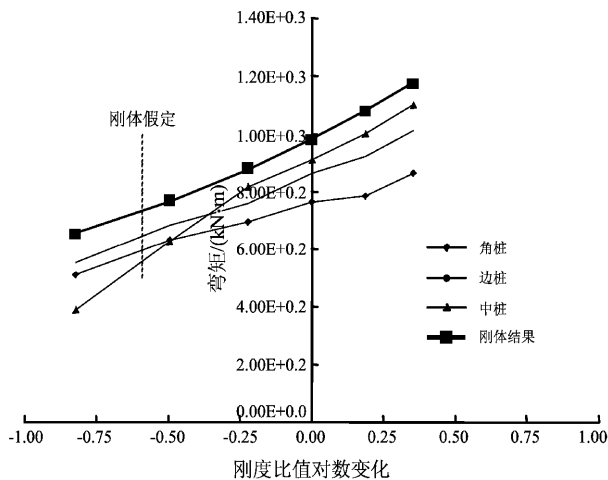


图8 纵向地震作用下桩顶弯矩随承台相对刚度的变化规律

Fig. 8 Rules of the moment on the pile top various with the relative stiffness of the pile top under the effect of the longitudinal seismic action

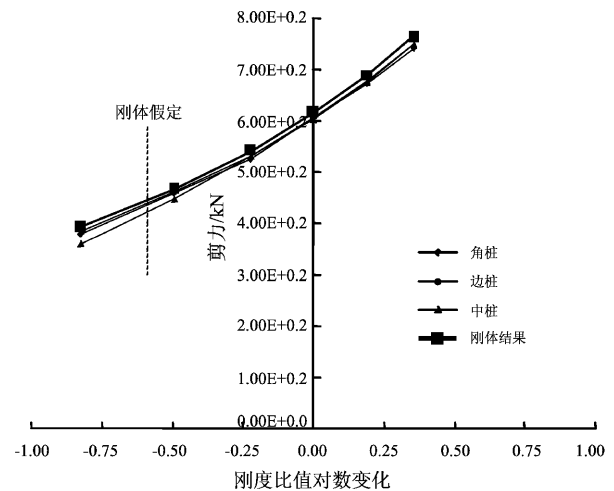


图10 横向地震作用下桩顶剪力随承台相对刚度的变化规律

Fig. 10 Rules of the shear on the pile top various with the relative stiffness of the pile top under the effect of the transverse seismic action

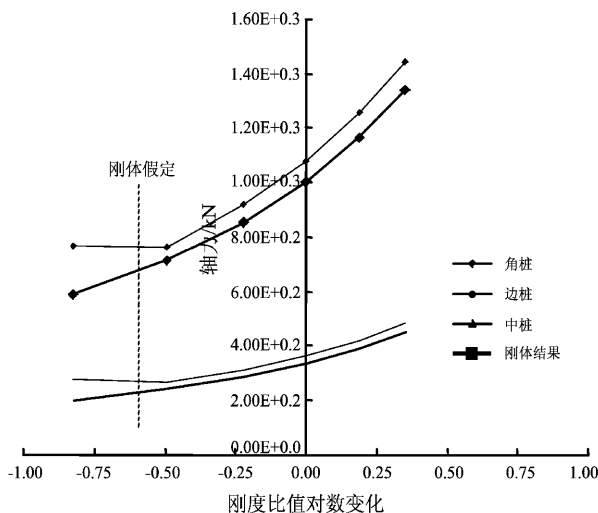


图9 横向地震作用下桩顶轴力随承台相对刚度的变化规律

Fig. 9 Rules of the axial force on the pile top various with the relative stiffness of the pile top under the effect of the transverse seismic action

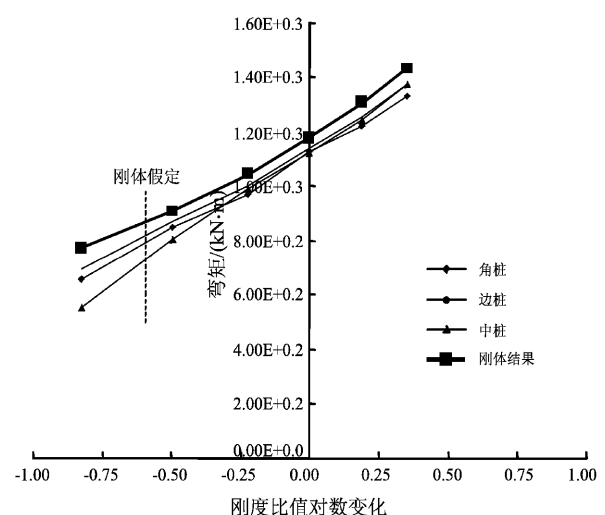


图11 横向地震作用下桩顶弯矩随承台相对刚度的变化规律

Fig. 11 Rules of the moment on the pile top various with the relative stiffness of the pile top under the effect of the transverse seismic action

矩最大误差均在 10% 以下。

## 4 结论

经过本文的分析可以得出以下结论：(1) 绝对刚性的承台是不存在的，在静力条件下得出的承台刚体假定的厚度条件在地震这种动力循环荷载作用下仍具有一定的适用性，其结果误差均在工程可以接受的范围内，但是承台的厚度在地震作用下仍具有 5% ~ 10% 左右的可修正空间；(2) 实际工程中所采用的承台厚度已远远大于承台刚体假定所需的厚度，这往往会导致承台附加质量加大，因此会导致桩基等下部结构在地震作用下需要额外承担来自承台部分的惯性作用，使得下部桩基的设计甚至承台自身的设计成为困扰设计人员的难题。

本文仅对承台在静力条件得出的刚体假定的限制条件在地震作用下的适用性问题作了初步的探讨，对于承台在地震作用下的响应特性，以及

对下部基础结构的影响方面并未做深入的探讨，仍需今后完善承台在地震作用下的性能研究。

## 参考文献：

- 陈振民, 温少荣, 刘祚秋. 2004. 刚性承台桩基内力计算方法[J]. 水运工程, (3): 71 - 75.
- 陈竹昌, 刘利民, 王建华. 1999. 承台刚度的研究[J]. 同济大学学报, 27(1): 29 - 33.
- 范立础, 胡世德, 叶爱君. 2001. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 26 - 29.
- 范立础. 1997. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 91 - 94.
- 横山幸满. 1984. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清译. 北京: 中国铁道出版社.
- 林亚超. 1981. 承台的应力分析与设计[J]. 国外桥梁, (3): 29 - 42.
- 刘利民. 1997. 桩基础内力分析方法的研究[D]. 上海: 同济大学.
- 刘延芳. 2008. 桥梁桩基承台抗震设计[D]. 上海: 同济大学.
- 刘云云. 1996. 抗拔单桩及嵌岩桩承台模型试验研究[D]. 上海: 同济大学.
- 矢作枢, 和田克哉. 1990. 桩的抗震设计[M]. 万世昌, 译. 北京: 人民交通出版社.
- 叶爱君, 管仲国. 2002. 桥梁抗震(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社.

# Applicability Analysis of Rigid Body Assumptions of Pile Caps under Earthquake

LIU Yan-fang

(Road and Bridge Technology Co. LTD, Beijing 100011, China)

## Abstract

As the main force and the force transmission member, the pile caps connect the bridge pier columns and piles foundation in the bridge structure, and is generally assumes to be the rigid body for analyzing. In order to researching the mechanical behavior of pile caps under earthquake, firstly, we introduce the meeting condition when the pile cap assumed as rigid body in static condition. By changing the thickness of the cap, which is also the pile caps under different stiffness, we build solid finite element model and simplified rigid assumption finite element model. Based on the comparison of these two models, we analyze the pile cap in rigid body assumptions condition obtained in static condition whether still has certain applicability under the earthquake. The results show that the assumption condition has certain applicability, however, it is still need to correction.

**Key words:** pile-caps; rigid body assumptions; static condition; finite element model; earthquake action