

# 刚性桩复合地基地震反应的拟静力计算方法

宋二祥, 武思宇, 刘华北

(清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 针对竖向传播的SV波作用下刚性桩复合地基的动力反应, 在振型分解反应谱法的理论基础上, 提出一种基于有限元分析的拟静力方法。该方法通过等效线性方法考虑土体的非线性, 将上部结构惯性和自由场变形对桩身内力的影响分开来考虑, 其中前者采用类似振型叠加反应谱法的方法进行分析, 后者采用一种针对地下结构的改进的有限元反应位移法进行分析。与动力时程分析的结果对比表明, 所建议的计算方法能够较准确地求得水平地震作用下桩身内力峰值及其分布, 显著提高了分析的效率。

**关键词:** 刚性桩复合地基; 拟静力方法; 动力相互作用

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)11-1723-06

**作者简介:** 宋二祥(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地基基础及地下工程方面的教学及科研工作。E-mail: songex@tsinghua.edu.cn。

## Quasi-static calculation method for seismic response of rigid pile composite foundation

SONG Er-xiang, WU Si-yu, LIU Hua-bei

(Dept. of Civil Engineering, Key Laboratory of the Ministry of Education for Structural Engineering and Vibration, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the finite element method and the theory of mode superposition, a quasi-static calculation method for the seismic response of rigid pile composite foundation under SV wave is presented. The nonlinear behavior of the soil is considered by the equivalent linear method, and the influence of the inertia force of the super-structure and the deformation of the free field response on the internal force of the pile is considered separately. The former is analyzed by using the mode superposition method of response spectrum, and the latter is analyzed by using a modified FEM for seismic deformation of underground structures. It is found that both the peak values and the distribution of the force in the pile can be calculated satisfactorily by using the method proposed, and that the efficiency of calculation is greatly increased.

**Key words:** rigid pile composite foundation; quasi-static calculation method; dynamic interaction

## 0 引言

刚性桩复合地基是用刚度相对较大的桩(如混凝土桩或强度等级较高的CFG桩等)对强度或变形不能满足要求的地基进行加固而形成的一种非均质人工地基。在地基与基础之间一般铺设20~30cm的砂石垫层,用于调节桩与土之间的荷载分担,保证桩间土直接承受较大比例的荷载。这种复合地基的桩一般不配筋或者配较少的构造筋,因此用料较省。同时,同散体材料桩相比,刚性桩复合地基可以较大程度地提高地基的承载力,一般可提高到1.5~3.75倍<sup>[1]</sup>。凭借其在承载力和造价上的突出优势,这种复合地基在我国已被大量应用到20~30层的高层建筑当中。

目前,针对刚性桩复合地基在竖向静力荷载下的

承载力和变形等问题,工程界已提出了一些有实用价值的设计分析方法<sup>[1]</sup>,但对其在地震作用下的工作机理和抗震性能却研究很少,有限的研究成果主要集中在有限元数值模拟<sup>[2-3]</sup>和振动台模型试验<sup>[4-5]</sup>两方面,尚没有比较简便实用的设计分析方法。

对于刚性桩复合地基在震区的应用,人们担心的问题主要有以下两方面:一是由于这种复合地基的桩不与基础相连,在地震作用下建造于其上的高层建筑的抗倾覆与抗滑移性能如何?二是由于其桩体不配

基金项目:北京市自然科学基金项目(8042013);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0736)

收稿日期:2007-06-12

修改稿返回日期:2009-08-20

筋,在地震作用下会发生大面积桩的断裂破坏?对于上述第一点,本课题组的研究表明,只要对上部结构按天然地基的情况进行设计,则其稳定性是有保证的。当然,也可通过分析基础周围土体及垫层的变形大小来对此进行分析,但不是很必要。因此,问题的难点就集中于刚性桩复合地基的桩身强度验算问题。由于桩的设置大幅度提高了原地基的承载力,所以大量桩体的严重破坏,显然有使地基发生失稳的危险,所以这一验算很有必要。

此前的试验和数值计算研究表明,复合地基桩的变形和内力受土层的自由场变形和上部结构惯性力共同影响,并且通常情况下,两者的影响基本相当,均应予以考虑<sup>[4-5]</sup>。而桩基础的抗震设计中,除存在液化土层和模量相差较大的软硬分层外,则主要考虑上部结构对桩基础的惯性相互作用。所以刚性桩复合地基的抗震分析不能照搬桩基的分析方法。

采用动力时程有限元方法能够较准确地分析刚性桩复合地基的地震反应。但是,由于实际工程问题的复杂性,时程分析所耗费的计算时间往往是无法接受的。从上部结构和地铁等地下结构的抗震计算来看,拟静力计算方法<sup>[6-7]</sup>能够给出较为符合实际的计算结果,又相对简便,已广泛用于工程实际,得到工程界的认可。鉴于此,本文借鉴上部结构抗震分析的振型叠加反应谱法和地下结构抗震分析的拟静力方法,提出一种针对刚性桩复合地基抗震设计分析的简化分析方法。与时程分析的计算结果对比表明,所建议的方法能够较准确地分析复合地基桩在地震荷载作用下的桩身内力峰值和基础周围土体的峰值应变及应力,特别是对于桩长范围内存在软硬分层这种最可能导致复合地基桩断裂的情况,简化方法的计算精度较高。

## 1 基本原理

如上所述,刚性桩复合地基的桩身内力一般受上部结构惯性力和自由场变形的共同影响。为简化计算,这里分别计算这两种作用的效应,再将其组合来求出地震荷载的综合效应,见图1(其中箭头表示某时刻水平地震动的情况)。研究表明复合地基桩的破坏以桩身的弯曲破坏为主,故本文着重考察的荷载效应为桩身弯矩。

对于上部结构,采用带有桩加固区的模型按规范建议的振型分解反应谱法<sup>[8]</sup>求解结构惯性力的作用效应。但针对地震荷载下的地层运动尚没有类似于上部结构抗震设计的反应谱方法,所以这里对自由场变形为主的作用效应采用地下结构抗震分析中的一种拟静

力方法——改进的有限元反应位移法<sup>[5,7]</sup>。

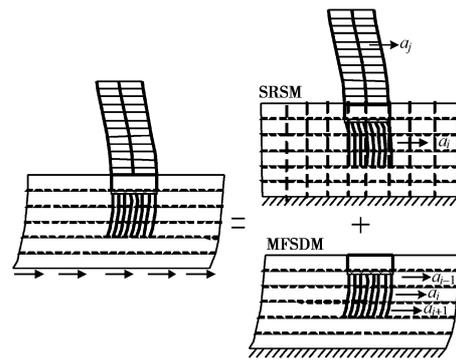


图1 简化计算方法原理简图

Fig.1 Schematic diagram of quasi-static calculation method

### 1.1 结构惯性力作用效应的求解

现行桩基础抗水平地震作用的设计计算方法,是在假定结构底部固支的情况下,利用底部剪力法、振型分解反应谱法或时程分析等方法确定结构对桩基的水平向地震作用,之后将此作用视作静力荷载验算桩基抗水平地震的承载力能否满足要求。研究表明,将惯性力视作静力无法真实反映桩在动力荷载下的反应特性,尤其在无量纲频率 $\alpha_0 = \omega d / V_s$ (式中, $\omega$ 为振动频率, $d$ 为桩径, $V_s$ 为土体剪切波速)较大时,可能会有较大误差。

这里对结构惯性作用的效应采用振型分解反应谱法来进行分析,但进行振型分解的模型包含基础及复合地基。分析中通过对每个有限单元(包括结构和地基基础)施加与振型成比例的惯性力来计算相应振型的作用效应。这样既合理考虑了上部结构的惯性荷载,又在一定程度上考虑了复合地基桩-土-结构的动力相互作用。计算中考虑以上部结构变形为主的前两、三阶振型,其中振型参与系数和地震影响系数按照规范<sup>[8]</sup>进行取值,其计算式如下:

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_{ss}} X_{ij} G_i}{\sum_{i=1}^{n_{ss}} X_{ij}^2 G_i}, \quad (1)$$

其中 $\gamma_j$ 为 $j$ 振型的参与系数; $X_{ij}$ 为 $j$ 振型 $i$ 结点的水平相对位移; $n_{ss}$ 为上部结构的质点数,对应于有限元分析中上部结构的结点数; $G_i$ 为质点 $i$ 的质量,对应于有限元模型中采用集中质量矩阵时的结点质量。而水平地震作用则采用在有限元模型中施加惯性力的方式来实现,所施加惯性力的相应加速度按下式计算:

$$A_i = \alpha_j \gamma_j X_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n), \quad (2)$$

其中 $A_i$ 为质点 $i$ 的加速度,对应于有限元模型中结点的加速度矢量(一般含3个分量); $\alpha_j$ 为对应于 $j$ 振型自振周期的地震影响系数,按规范方法取值; $n$ 为有限元模型的总结点数,包括上部结构和地基基础。

### 1.2 自由场变形作用效应的求解

自由场变形的作用效应即桩和土之间的运动相互

作用, 即土体的变形带动桩发生变形。参考地下结构抗震计算中所采用的一种拟静力方法——改进的有限元反应位移法 MFSDM (Modified FEM seismic deformation method) [6-7, 9], 可以通过施加惯性力的方式使每层土单元发生自由场运动时的最大剪切变形, 每层土施加的惯性加速度由下式给出:

$$a_{pi} = \frac{\tau_{i,\max} - \tau_{i-1,\max}}{\rho_i h_i}, \quad (3)$$

其中,  $\tau_{i,\max}$  和  $\tau_{i-1,\max}$  分别为自由场分析中第  $i$  层土单元上下表面的最大剪应力,  $\rho_i$  为第  $i$  层土单元的质量密度,  $h_i$  为该层土单元的厚度。当抗震分析采用多组地震波时, 为简化计算,  $a_{pi}$  可取多组地震波的均值。

显然, 当桩存在时, 如上计算近似按静力方法考虑了桩-土相互作用。计算表明这一方法能够较准确地分析地基变形作用下的桩身内力峰值, 尤其是当桩身峰值内力受局部土层的剪切变形控制时 (通常为软硬分层情况), 其分析精度更高。

### 1.3 效应组合

参照振型叠加反应谱法和不同方向地震输入下结构的抗震验算方法, 考虑上部结构惯性力产生的桩身内力与自由场变形产生的桩身内力未必同时达到峰值, 拟静力方法的计算结果取为

$$S = \sqrt{\sum_{j=1}^m S_j^2 + S_f^2}, \quad (4)$$

其中,  $S_j$  为以结构惯性作用第  $j$  振型效应,  $S_f$  为自由场变形的作用效应。

由于自由场变形的作用效应分析并未采用与上部结构惯性作用相同的模态分析, 故计算中与结构惯性作用对应的振型和土层自由场变形有可能发生偶联, 这在计算中应予避免, 以免重复考虑两种相互作用。这里建议: 地基模型的水平尺寸要保证地基的剪切刚度远大于楼层的剪切刚度, 而竖向尺寸要使上部结构前两、三阶自振频率与土层的自振频率不要太接近。

### 1.4 土体非线性的考虑

实际工程中, 土体在强震荷载作用下呈现出明显的非线性行为, 突出表现为土体在循环剪切荷载作用下模量随应变幅值增大而减小, 阻尼则相应增大。按笔者的研究, 这对复合地基的地震反应有显著影响。为使计算结果能较好反映实际, 采用等效线性方法考虑土体的非线性。Idriss 和 Seed 针对场地地震反应分析首先提出等效线性方法, 随后得到广泛应用 [6], 还扩展到土与结构动力相互作用的分析中 [11-12]。

参照利用等效线性模型进行动力时程分析的方法, 外区土体采用 SHAKE91 自由场分析中的等效模量来进行拟静力计算, 对内区土体按等效线性方法进

行静力的迭代计算, 第一次迭代计算土体模量采用其初始模量。考虑到许多本构关系由二维到三维的扩展均采用应力不变量的形式, 参照文献 [13] 的做法, 本文采用等效剪应变  $\varepsilon^e$  确定土体的剪切模量和阻尼比。参照振型分解反应谱法对作用效应的组合, 内区土的等效剪应变由下式给出:

$$\varepsilon^e = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\varepsilon_j^e)^2 + (\varepsilon_f^e)^2}, \quad (5)$$

其中,  $\varepsilon_j^e$  为上部结构惯性作用下第  $j$  振型的土体等效剪应变,  $\varepsilon_f^e$  为自由场变形作用下的土体等效剪应变。

通常, 当前后两次计算得到的等效剪应变的相对差异小于 1% 时即可为迭代完成, 一般迭代 4~5 次。

虽然严格来说, 利用模态叠加法进行动力分析仅适用于封闭线弹性系统 [14], 但从工程角度来说, 用此方法求解复合地基桩身内力和土体变形应是可行的。

### 1.5 拟静力方法的主要步骤

(1) 进行自由场分析, 确定每层土的等效模量以及自由场反应过程中每层土的峰值剪力  $\tau_{i,\max}$ 。

(2) 建立复合地基-结构体系的有限元模型, 进行自重作用下的静力分析, 对加固区土体的初始模量据应力水平进行修正。

(3) 利用 (2) 建立的模型及 (1)、(2) 两步得到的外区土的变形模量和加固区土体的初始模量, 进行模态分析, 选取以结构变形为主的前 2 或 3 阶振型, 进行结构惯性力作用效应的求解, 得到每个振型下内区土体的等效剪应变。

(4) 利用 (1) 得到的每层土的峰值剪应力, 对复合地基进行自由场变形作用效应的求解, 得到内区土体的等效剪应变。

(5) 利用 (3)、(4) 得到的等效剪应变进行组合, 得到总的等效剪应变, 按收敛条件进行判断, 不满足时则重复第 (3)~(5), 直至收敛条件满足。

(6) 利用 (3)、(4) 的计算结果对需要考察的效应进行组合, 得到最终计算结果。

## 2 算例验证

有限元计算分析表明, 当地震烈度为 8 度时, 复合地基的可能破坏形式主要为: ①在地基明显软硬分层情况下, 复合地基桩可能发生断裂; ②当基础埋深较浅、结构高宽比较大且埋深范围内土体较软的情况下, 结构可能发生倾覆。针对此两种破坏形式, 分别取匀质和分层两类地基情况验证上述简化方法的适用性, 前者主要考察基础周围土体是否破坏较严重, 以验算复合地基上结构的抗倾稳定性, 后者主要考察桩身弯矩, 以验算复合地基桩是否会发生断裂。

在以下的讨论中，与简化方法对比的动力时程分析同样采用等效线性方法来考虑土体的非线性。

### 2.1 计算模型简述

考虑上部结构长宽比较大的情况，取一榀结构来进行计算，注意到水平地震作用为反对称荷载，由对称性取半结构进行分析。上部结构为层高 3 m、宽 16 m 的 20 层剪力墙结构，层质量取为 1250 kg/m<sup>2</sup>，自振周期 T<sub>1</sub> 可据结构高度 H 和宽度 B 近似按下式估算<sup>[15]</sup>：

$$T_1 = 0.03 + 0.03 \frac{H}{\sqrt[3]{B}}, \quad (6)$$

其中，T<sub>1</sub> 的单位为 s，H，B 的单位为 m。

地下室埋深 6 m。桩、垫层尺寸见表 1，材料参数见表 2。地基的模拟范围取 100 m×2.4 m×50 m，其中进行等效线性迭代的内区尺寸为 30 m×2.4 m×40 m，如图 2 所示。

表 1 桩和垫层的部分参数

Table 1 Parameters of pile and cushion

桩径/m	桩距/m	桩长/m	垫层厚/m
0.4	1.6	10	0.2

表 2 材料力学性质参数

Table 2 Material parameters

材料	质量密度 (kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	变形模量 (GPa)	阻尼比 (%)
桩	2200	0.20	22.5	5
混凝土	2500	0.20	34.5	5
碎石	2200	0.20	—	—
地基土	1800	0.33	—	—

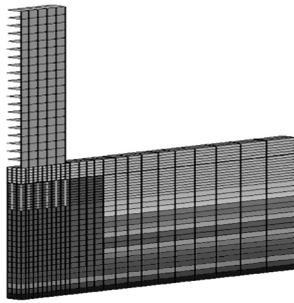


图 2 有限元模型图

Fig. 2 The finite element model

场地为二类场地，特征周期 0.4 s，考虑 8 度抗震烈度罕遇地震作用。按规范要求<sup>[8]</sup>，取与场地类型对应的峰值 0.4g 的 El Centro 波、兰州波和北京人工波等 3 组地震波进行计算，有限元模型的地震输入采用 SHAKE91 进行反演，保证实际地面运动与所用地震波一致。时程分析中网格边界采用黏弹性人工边界。

土的等效线性模量和阻尼比随剪应变的变化参照文献[16]并按北京地区常见中密粉土选用，垫层碎石的等效线性模型曲线采用文献[17]推荐的曲线，初始模量采用文献[18]的研究成果。

### 2.2 匀质地基情况

土的初始剪切波速为 250 m/s。图 3 是动力时程分析与拟静力方法得到桩身弯矩峰值和基础周围土体等效剪应变的对比。其中“avg.”是三个不同地震输入下动力时程方法计算结果的均值，“push”则是简化方法的相应结果。由图可见，不同地震作用下的时程分析结果还是有些差异的，单个地震波时程分析的结果与拟静力方法的结果有些情况下差异也较大，但按规范规定取不少于 3 个地震输入下的平均值，则简化方法与时程分析方法的结果一般吻合更好。

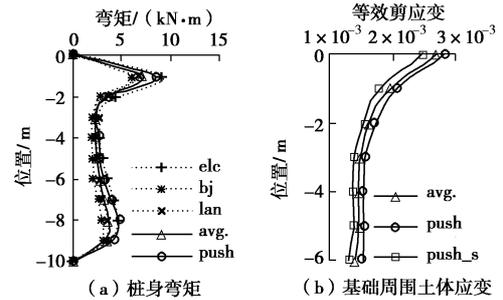


图 3 均质地基情况下计算结果对比

Fig. 3 Comparison of calculated results for uniform soil

研究表明，8 度地震作用下较软但非液化匀质地层中，复合地基桩一般不会发生破坏。所以尽管此种情况下拟静力方法对桩身内力的计算精度尚可，但在工程中其应用可能不多。由于采用刚性桩复合地基的结构一般都较高，当结构高宽比较大时，强震下上部结构的抗倾稳定性需要考虑。此时，可通过考察基础周围土体的变形来对此进行分析。由图 3 中基础周围土体平均等效剪应变的对比（图中“push\_s”是仅考虑上部结构惯性作用的计算结果）拟静力方法给出的基础周围土体的等效剪应变与动力时程分析的结果吻合较好；并且，如果考察基础周围土体的应力和变形，仅考虑结构惯性力作用的计算结果也能够满足工程精度要求。实际上，基础周围土体主要受结构惯性力的影响，所以在进行结构的抗倾覆分析时可以仅考虑上部结构惯性力的影响。

### 2.3 分层地基情况

由于地基软硬分层是引起复合地基桩可能断裂的最主要原因，故本节主要考察复合地基桩的弯矩与时程分析结果的吻合程度，以检验简化方法的适用性。

这里标准层土体初始剪切波速取北京地铁五号线典型站点土层平均初始剪切波速 250 m/s。桩中软弱层工况为桩顶以下 4~6 m 初始剪切波速分别为 150 和 200 m/s 的软层。桩底硬层工况为桩底进入初始剪切波速分别为 400 和 500 m/s 的硬层 2 m。

图 4 和 5 是计算给出的桩身弯矩包络图。总的来看，简化方法的计算结果与多组动力时程分析结果的平均值吻合较好，尤其是软硬土层界面处的桩身弯矩吻合更

好, 无论是软硬分层位于桩中还是桩底部, 计算相对误差均不超过 30%。计算结果表明, 简化方法能够较准确地计算地震作用下复合地基桩的峰值内力。

软硬分层条件下, 简化计算方法计算的界面附近桩身内力与动力时程方法的计算结果吻合较好, 其主要原因可有以下几点: ①简化方法能较准确地反映上部结构惯性力的影响。这一点在 2.2 节匀质土层桩身弯矩和基础周围土体剪应变的计算结果已经给出了较好的例证; ②简化方法能够较准确地反映自由场变形的影响, 因为这种方法能够较准确地计算出自由场变形情况下每层土体的最大剪切变形, 界面处软层的变形情况能够得到比较好的模拟, 而界面处的桩身内力又主要受软层界面附近局部的剪切变形所控制。所以在土体软硬分层的情况下, 这种方法对桩身内力的求解精度较高; ③简化方法能够较好反映土体的非线性。表 3 是简化方法与时程分析方法在最终迭代完成后所给出分层界面处软土层模量对比的相对误差, 其值均小于 15%。

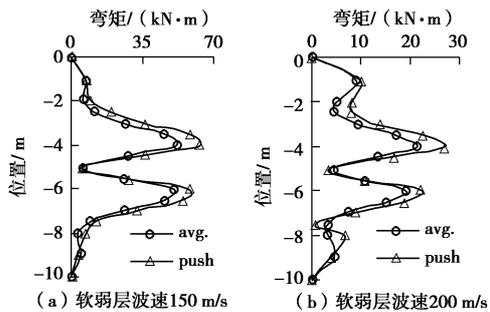


图 4 桩中软弱层情况下桩身弯矩对比

Fig. 4 Comparison of pile bending moment when soft soil embedded at the middle depth of the pile

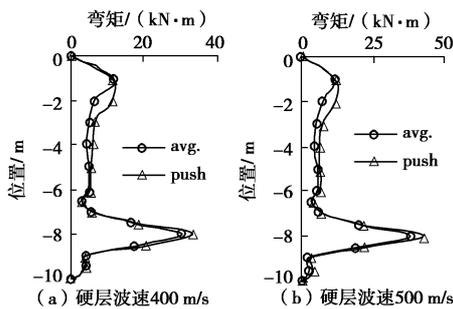


图 5 桩底硬层情况下桩身弯矩对比

Fig. 5 Comparison of pile bending moment when hard soil located at the pile bottom

表 3 界面处软层平均剪切模量相对误差

Table 3 Relative errors of mean shear moduli in soft layer

工况	相对误差/%
桩中软弱层 $V_s=150$ m/s	6.8
桩中软弱层 $V_s=200$ m/s	14.8
桩底硬层 $V_s=400$ m/s	14.1
桩底硬层 $V_s=500$ m/s	12.4

### 2.4 计算效率比较

由上可知, 本文所建议简化方法能够较准确地计算水平地震作用下复合地基桩的内力和基础周围土体的变形。同时, 相对时程分析来说, 简化方法的计算效率较高。等效线性的动力时程分析相对于一般的弹塑性时程分析来说已明显减少了计算耗时, 但由于单元数目较大、地震持时较长等原因, 计算耗时仍然较多。以上述算例为例, 时程分析的有限元结点数约为 10000 个, 取地震波中峰值较大的前 10 s 来进行计算, 每个算例的计算耗时在 20 h 左右。而采用简化方法计算, 每个算例的计算耗时在 1 h 左右, 其中大部分为迭代步之间的数据处理工作。计算所用 PC 的基本配置为: CPU 为主频 2.04G 的 AMD3200+, 内存为 2 G 的 DDR 内存。对于工程实际问题, 其有限元模型的规模可能还会远大于上述算例, 如采用时程分析的方法, 对于 PC 来说, 其计算耗时将大大增加, 甚至无法接受。而简化方法的计算耗时受有限元模型规模的影响要远小于时程分析。并且计算表明, 当软硬分层界面与结构的距离较远 (大于 1/2 倍的基础宽度) 时, 仅考虑上部结构的一阶振型与自由场变形作用效应的组合即可满足工程要求的分析精度。所以还可以根据情况适当简化计算。

由于简化方法为静力分析, 计算耗时基本不受地震波持时长短的影响, 所以从扩大分析规模和提高分析效率两方面来说, 简化方法都具有较明显的优势。

## 3 结 论

针对带垫层刚性桩复合地基的抗震验算提出一种简化计算方法, 着重计算复合地基桩的内力和基础周围土体的变形, 以分别验算桩的强度、分析结构的抗倾稳定性。该简化方法充分考虑刚性桩复合地基中桩的受力特性与桩基中桩的差异, 计算中同时考虑上部结构的惯性作用和地基自由场变形的作用。对这两种作用采用不尽相同的拟静力方法分别计算, 然后再予以组合。计算中还采用等效线性方法考虑土体模量随应变水平的变化。数值算例表明, 所建议简化计算方法能够较准确地计算桩身内力最大值和基础周围土体的变形, 且与动力时程分析方法比较, 简化方法大大节省了计算时间, 提高了分析的效率。特别桩身范围存在明显的软硬分层情况 (模量比大于 1.5), 简化方法的分析精度更高。

### 参考文献:

[1] 池跃君. 刚性桩复合地基工作性能及沉降计算方法的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002. (CHI Yue-jun. Study on the

- work mechanism and settlement calculation method for rigid pile composite foundation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese))
- [2] 刘光磊, 宋二祥. 群桩刚性桩复合地基地震反应三维有限元分析[J]. 建筑结构, 2006, **36**(7): 85 - 90. (LIU Guang-lei, SONG Er-xiang. Three-dimensional FE analysis of rigid pile composite foundation with group of piles[J]. Building Structures, 2006, **36**(7): 85 - 90. (in Chinese))
- [3] 徐自国. 刚性桩复合地基抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2003. (XU Zi-guo. Study on the anti-seismic behavior of rigid pile composite foundation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese))
- [4] 武思宇, 宋二祥, 等. 刚性桩复合地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **20**(4): 1 - 10. (WU Si-yu, SONG Er-xiang, et al. Shaking table tests on rigid pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **20**(4): 1 - 10. (in Chinese))
- [5] 武思宇, 宋二祥, 等. 刚性桩复合地基抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(1): 77 - 82. (WU Si-yu, SONG Er-xiang, et al. Shaking table tests on the anti-seismic behavior of rigid pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 77 - 82. (in Chinese))
- [6] 林 皋. 地下结构抗震分析综述[J]. 世界地震工程, 1990(3): 1 - 10 (LIN Gao, State of the art of anti-seismic analysis of underground structures[J]. World Earthquake Engineering, 1990(3): 1 - 10 (in Chinese))
- [7] 李 彬. 地铁地下结构地震反应计算理论及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (LI Bin. Study on the calculation theory and its application for the earthquake response of underground subway structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese))
- [8] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2001. (GB50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. 2001. (in Chinese))
- [9] 刘如山, 石宏彬. 地下结构横切面抗震计算中拟静力计算方法的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, **27**(增): 148 - 154. (LIU Ru-shan, SHI Hong-bin. Quasi-static calculation method for anti-seismic analysis of cross section of underground structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, **27**(S): 148 - 154. (in Chinese))
- [10] TATEISHI A. A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2005, **22**: 41 - 53.
- [11] WU Guo-xi. Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain[J]. Can Geotech J, 1997, **34**: 44 - 52.
- [12] ANANDARAJAHA A, ZHANGA J, EALY C. Calibration of dynamic analysis methods from field test data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, **25**: 763 - 772.
- [13] 陈 波. 桩 - 土 - 结构动力相互作用系统的模拟与分析[D]. 上海: 同济大学, 2002. (CHEN Bo. Modeling and analysis of dynamic pile-soil-structure interaction[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [14] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (LIAO Zhen-peng. Introduction on wave theory in engineering[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [15] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 2001. (GB50009—2001 Code for load of design of building structures[S]. 2001. (in Chinese))
- [16] 袁晓铭, 孙 锐, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(4): 133 - 138. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, et al. Experimental study on shear modulus ratio and damping ratio of ordinary soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 133 - 138. (in Chinese))
- [17] 朱国祥. 土层地震反应分析中不同参数的敏感性分析[J]. 工程抗震, 2004(3): 28 - 32. (ZHU Guo-xiang. Sensitivity study on various parameters in seismic analysis of soil layers[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2004(3): 28 - 32. (in Chinese))
- [18] 何兆益, 黄 卫, 等. 级配碎石弹性模量的动三轴试验研究[J]. 东南大学学报, 1997, **27**(13): 36 - 39. (HE Zhao-yi, HUANG Wei, et al. Experimental study on elastic modulus of gravel by triaxial tests[J]. Journal of Southeast University, 1997, **27**(13): 36 - 39. (in Chinese))