

考虑桩-土-结构相互作用的桥梁桩基 地震反应有限元分析

张彬,董齐蕾,尹丹

(辽宁工程技术大学土木与交通学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:地震荷载作用下桩-土-结构相互作用问题在桥梁抗震研究中越来越受到重视。本文结合工程实例,利用有限元仿真软件 ADINA,建立桩-土-结构相互作用的有限元实体分析模型。选取三种时程波作为地震荷载,对在地震作用下桩-土-结构相互作用对桩的沉降位移,桩侧摩阻力和有效应力的影响进行了分析研究,对桩基设计提出了较为合理的建议。

关键词:地震荷载作用;桩-土-结构;相互作用;软件模拟

文章编号:1003-8035(2014)04-0072-04

中图分类号:P642

文献标识码:A

0 引言

近几年来,全世界范围内的地震频繁发生,不仅给社会造成极其严重的经济损失,而且还会造成人员伤亡。桩基灾害已经成为桥梁震害主要形式之一,因此,在桥梁设计中更应加强对桩基的考虑。本文以实际工程为例,借助有限元软件分析计算,分析了在地震荷载作用下的桩-土-结构相互作用的桥梁桩基的反应,根据模拟结果分析,对桩基设计提出更为合理的建议。

1 桩-土-结构模型与分析方法

1.1 土体的本构模型

基于 Drucker-Prager 屈服准则的弹塑性本构模型对于土体弹塑性动力分析效果好,因此,本文采用 DP 模型作为土体模拟的本构模型。在实际工程中桩体承受的荷载以竖向荷载为主,所以将桩体等效为单一材料。

1.2 动力方程

在地震动输入的桩-土-结构体系任意时刻 t 的运动方程为:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + K(u) = F(t) \quad (1)$$

式中, M 为系统的质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $F(t)$ 为结点荷载向量; $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $u(t)$ 分别表示系统的结点加速度、结点速度向量和结点位移向量。

本文采用 New-mark 法进行分析。假设时间间隔 Δt 内加速度呈现线性变化,在此基础上进行积分,得

到 $t + \Delta t$ 时刻的位移和速度向量,用位移函数描述位移和速度向量,代入方程,得出时程的反应方程,即:

$$[F]^e = \{u(t + \Delta t)\} = \{F(t)\}^e \quad (2)$$

只要知道 t 时刻的 $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 和 $t + \Delta t$ 时刻的 $\{F(t + \Delta t)\}$ 即可计算出下一时刻各状态的向量。由大量的研究表明:当 $\gamma \geq 0.5$, $\beta \geq 0.25$ ($\gamma + 0.5$)² 时,New-mark 法是无条件稳定的。在结构动力分析中,通常取 $\gamma = 0.5$, $\beta = 0.25$ 即可取得很好的计算结果^[1]。

1.3 地震反应分析方法

动态时程分析法充分考虑了结构的材料属性、几何形状、边界连接条件等非线性因素,还考虑了桩-土-结构相互作用以及地震时程相位差等问题,并且可以直观地反映出地震动的振幅、频谱特性和持续时间,因此,本文采用动态时程分析法^[2]。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

位于赤峰市内某桥全长 632m,宽 28m,上部结构为变截面预应力混凝土连续箱梁,下部结构主墩采用 11.65m × 2m 钢筋混凝土八边形桥墩(单幅),承台厚度 2m,主墩桩基采用 12 根直径为 1.2m 的钻孔灌注桩,按嵌岩桩进行设计^[3]。该区地震烈度为 VII 度,地

收稿日期:2013-10-29;修订日期:2014-02-07

作者简介:张彬(1960—),男,辽宁丹东人,博士生导师,教授,研究方向为桥梁与隧道工程、岩土工程。

E-mail:zhangbin3351888@163.com

震动峰值加速度 0.15g,地震分组为第一组。土层参数见表 1。

表 1 1 土层参数
Table 1 1 Soil parameters

土层参数	人工填土	圆砾	全风化玄武岩	强风化玄武岩	中风化玄武岩
层数	1	2	3	4	5
厚度(m)	2	6	8	3	21
密度(m^3)	1.85	2.6	2.65	2.65	2.8
粘聚力(KPa)	8	5	19	21	300
摩擦角($^{\circ}$)	15	35	32	32	32
泊松比	0.35	0.3	0.3	0.3	0.25
弹性模量(MPa)	13.6	20	250	250	4500
膨胀角($^{\circ}$)	10	20	30	30	30

2.2 地震荷载下桩-土-结构体系影响分析

2.2.1 模型建立

结合上表中的参数,采用 3D 实体单元进行建模。分别在模型的顶面(上表面)设置应力边界条件;将 X,Y 方向约束施加在模型的前后和左右四个侧表面上;在底面施加 Z 方向约束。模型划分为 4371 个节点,7 个单元组,20174 个 3D 实体单元,如图 1 所示^[4]。

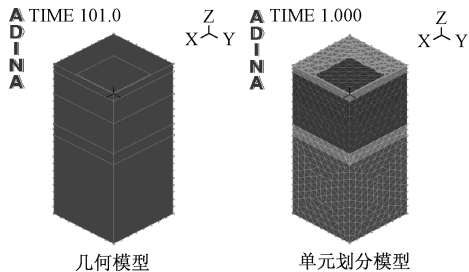


图 1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

2.2.2 地震波的选取

本文选取 El Centro 波,宁河地震天津波和 taft 波作为地震波的研究波形。

根据国家地震局批准的烈度表,当基本烈度为 7 度时,地面运动的最大水平加速度 a 为 0.15g,为了简化计算,只截取了部分时段的地震波:取 taft 波 15~25s 加速度波(以下简称时程波 1);天津波 20~30s 加速度波(以下简称时程波 2);El Centro 波 10~20s 加速度波(以下简称时程波 3)。本文中每隔 0.2s 取一值,共 50 个。

2.2.3 地震荷载作用下桩-土-结构沉降位移分析

由于在 t=13 时间步各时程波效果比较好,规律

相对比较明显,将此时间步的时程波输入到 ADINA 软件中可以得到较为规律的点,因此选择 t=13 时间步进行分析。

将各时程波作用下 t=13 时间步桩体沉降位移,桩顶各时间步沉降位移总结成图,如图 2、图 3 所示。

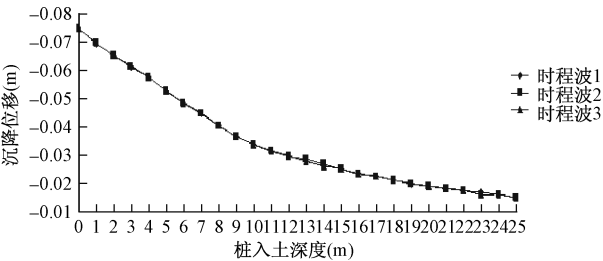


图 2 各时程波桩体沉降位移
Fig.2 Each history wave pile top Settlement displacement dynamic state time dependent

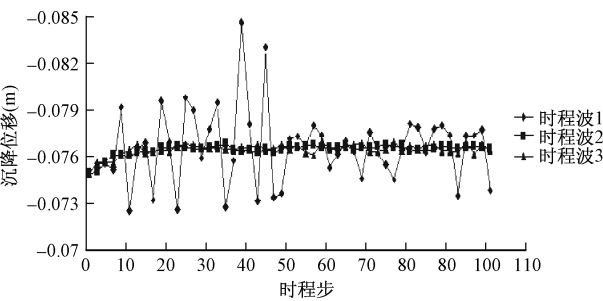


图 3 各时程波桩顶沉降位移动态时程
Fig.3 Each history wave settlement of pile top displacement dynamic state time dependent

由图 2 所示,桩体的沉降位移随着桩体的入土深度的变化而变化,桩顶处的沉降位移比桩身其他位置要大,受 Z 方向约束影响,在土层底部的持力层沉降位移减小趋于零。由图 3 所示,各时程波作用均会产生不同的沉降位移,具体的位移值由时程波震动的大小的不同而不同,产生的浮动基本与所输入体系地震波震动相关。时程波 1 作用下沉降位移值在 0.07254~0.08476m 区间浮动;时程波 2 作用下沉降位移值在 0.07496~0.07685m 区间浮动;时程波 3 作用下沉降位移值在 0.07496~0.07701m 区间浮动。

2.2.4 桩侧摩阻力

将各时程波作用下 t=13 时间步桩侧摩阻力,桩顶各时间步桩侧摩阻力总结成图,如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知,由于受承台影响,桩顶附近的侧摩阻力相对较小,随着桩体入土深度的增加,侧摩阻力先在 Z 轴负向增加,在 14m 处附近的中硬岩层

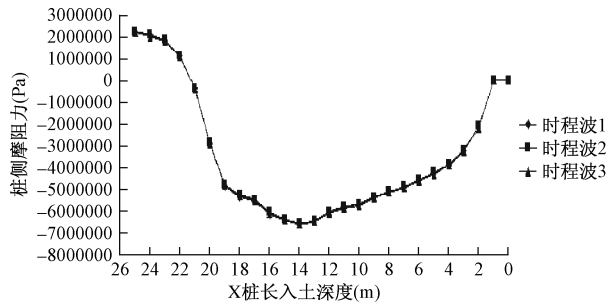


图4 各时程波桩侧摩阻力

Fig. 4 Each history wave pile side of drag

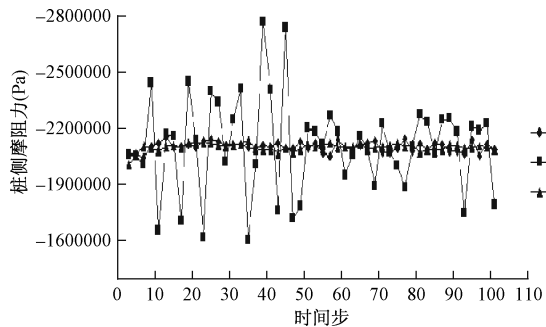


图5 各时程波桩侧摩阻力动态时程

Fig. 5 Each history wave pile side of drag
dynamic state time dependent

底部达到最大值,随后侧摩阻力向 Z 轴正方向增加,负侧摩阻力减小,在 20m 附近达到中性点,随后增加为正向侧摩阻力,侧摩阻力值的变化基本符合侧摩阻力曲线。不同时程波对桩侧摩阻力均产生影响,不同的时程波引起同一深度处的侧摩阻力值在不同时间步产生浮动,浮动值与时程波的震动规律基本相符。

2.2.5 有效应力

将各时程波作用下 $t = 13$ 时间步桩侧摩阻力,桩顶各时间步桩周有效应力总结成图,如图 6、图 7 所示。

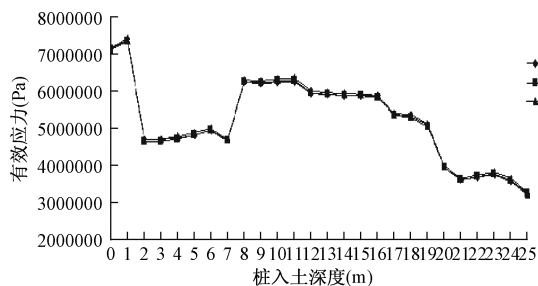


图6 各时程波桩周有效应力

Fig. 6 The history wave piles week effective stress

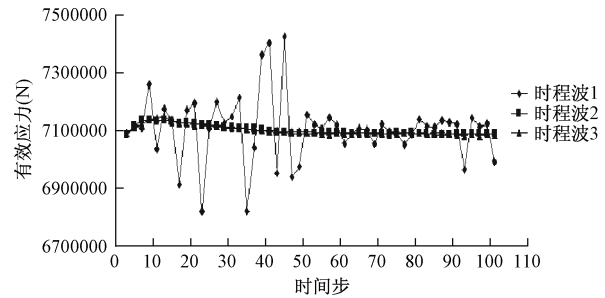


图7 各时程波桩周有效应力动态时程

Fig. 7 Each the history wave piles week effective
stress dynamic state time dependent

基本按照土层变化及入土深度递减,在桩顶附近的有效应力值比较大,随着各土层中的入土深度的增加,有效应力略有减小,呈曲线变化;在各土层相接处,有效应力会有突变的现象,这是由于各土层的弹性模量、粘聚力、密度等性质的变化,有效应力的变化因此受到影响。在桩顶面的有效应力浮动值基本符合时程波震动规律,但是不同的地震时程波作用的有效应力值不同。

3 结论

本文以位于赤峰市内的某桥梁工程为例,建立了符合工程实际的近似简化模型,通过对模拟结果的分析,在地震荷载作用下桥梁桩体设计时,需考虑桩-土-结构相互作用的影响,应注重以下方面:

- (1) 桩顶面与承台相接处及其附近的应力及沉降位移的验算;
- (2) 各土层有明显分层改变处的应力值及沉降位移等参数验算;
- (3) 应力突变处及有转折处的除应力值外的其他参数验算。

参考文献:

- [1] 肖晓春,迟世春. 水平地震下土-桩-结构相互作用简化分析方法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 35(5): 561-564.
XIAO Xiaochun, CHI Shichun. Horizontal seismic Soil-pile-structure interaction analysis method to simplify[J]. Dalian University of Technology, 2003, 35(5): 561-564.
- [2] 吴正平. 引入摩擦元模拟桩土共同作用[J]. 南昌航空工业学院学报, 2000(4): 63-68.
WU Zhengping, Introducing friction element modeling of pile-soil interaction [J]. Nanchang Institute of

从图 6、图 7 可以看出,桩体受土体的有效应力

- Aeronautical Technology, 2000(4): 63-68.
- [3] 赤峰市新华步行街桥梁设计说明书[R]. 辽宁北四达交通技术发展有限公司, 2011.
Chifeng City, Xinhua Street Bridge Design Manual[R]. Liaoning North Fourth of Transportation Technology Development Co., Ltd, 2011.
- [4] 张向东, 代丹, 许红飞. 基于 ADINA 模拟的桩土相互作用有限元分析[J]. 山西建筑, 2008, 34(36): 19-20.
ZHANG Xiangdong, DAI Dan, XU Hongfei. ADINA simulation based on finite element analysis of pile-soil interaction[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(36): 19-20.
- [5] 郑海荣. 桩-土-结构相互作用体系的地震响应[J]. 地震学刊, 1992(2): 65-69.
ZHENG Hairong. Pile-soil-structure interaction system seismic response[J]. Seismology Journal, 1992(2): 65-69.
- [6] 李旭. 地震荷载作用下桩-土-上部结构作用机理及数值模拟[D]. 西安: 华西大学, 2010.
LI Xu. Pile under earthquake load-soil-Superstructure mechanism and numerical simulation[D]. Xi'an: West University, 2010.
- [7] W. H. Wu, H. A. Smith. Efficient Modal Analysis for structures with soil-structure interaction Earthquake Engineering and Structure Dynamic, 1995, 24(3): 283-299.
- [8] 李洞明. 地震作用下桩土相互作用的研究与分析[D]. 上海: 同济大学, 2005.
LI Dongming. Pile interaction under seismic research and analysis[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [9] 毕志成, 吴碧中, 陈雪丹. 桩-土-桩相互作用分析[J]. 低温建筑技术, 2008(1): 107-109.
BI Zhicheng, WU Bizhong, CHEN Xuedan. Pile-soil-pile interaction analysis[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(1): 107-109.
- [10] 刘勇生. 桥梁结构抗震研究的文献综述[J]. 世界地震工程, 1992, 10(1): 48-55.
LIU Yongsheng. Bridge seismic research literature review[J]. World Earthquake Engineering, 1992, 10(1): 48-55.
- [11] 刘立平. 水平地震作用下桩-土-上部结构弹塑性动力相互作用分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
LIU Liping. Pile under horizontal seismic-soil-plastic superstructure dynamic interaction analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [12] 马建. 地震作用下桩-土-结构相互作用的分析[J]. 科技信息, 2011, (8): 788-789.
MA Jian. Earthquake a pile under a soil-structure interaction analysis[J]. Science and Technology Information, 2011, (8): 788-789.
- [13] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
FAN Lichu. Bridge seismic[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.

Seismic response analysis of bridge pile foundation considering pile-soil-structure interaction

ZHANG Bin, DONG Qi-lei, YIN Dan

(School of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The problem of pile-soil-structure interaction under earthquake has been paid more and more attention to the study of bridge seismic. With an example, this paper uses finite element analysis software, ADINA, using the finite element simulation analysis software to establish the pile-soil-structure interaction finite element entities analysis model. The articles selectes three waves as earthquake load, By analysis of the model simulation results, earthquake under the pile-soil-structure interaction of soil and pile settlement displacement pile shaft resistance and effective stress analysis, pile foundation traits response results validate analysis proposed pile-based design rationalization.

Key words: seismic effects; pile-soil-structure; interactions; software simulation