

贾鹏,王兰民,万征,等.某桥梁桩基础的抗震计算研究[J].地震工程学报,2018,40(2):258-264.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.258

JIA Peng, WANG Lanmin, WAN Zheng, et al. Seismic Calculation and Analysis of the Pile Foundation of a Certain Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 258-264. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.258

某桥梁桩基础的抗震计算研究^①

贾 鹏¹, 王兰民¹, 万 征², 秋仁东², 刘金波²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘要: 当前桩基础的抗震设计仅采取构造措施来保证其抗震性能,有可能会过高或过低地估计桩基础的抗震性能。针对某桥梁桩基础的抗震设计,建立全桥的三维有限元模型,计算在桩-土-结构共同工作情况下桩基础的地震响应,通过输入不同地震波来进行对比分析,并对结果进行复核,得出:(1)桩身内力响应与所输入地震动的频谱特性有关,桩身沿横桥方向的内力最大;(2)对于该场地的桥梁桩基础,桩-土-结构共同工作的有限元分析结果与 m 法结果差别不大;(3)当承台埋深为 0 时,桩身内力基本都偏大,要对承台侧土体做相应的加固处理。

关键词: 桩基础抗震; 有限元; 桩土相互作用; m 法; 承台埋深

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0258-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.258

Seismic Calculation and Analysis of the Pile Foundation of a Certain Bridge

JIA Peng¹, WANG Lanmin¹, WAN Zheng², QIU Rendong², LIU Jinbo²

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The seismic performance of the pile foundations of bridges is very important in earthquake and geotechnical engineering. At present, the seismic design of a pile foundation only considers structural measures to ensure its seismic performance, which can lead to overestimation or underestimation of the seismic performance. Therefore, this study investigates the seismic design of a bridge using a three-dimensional finite element model. Under different seismic waves, the seismic response of a pile foundation was calculated, considering the soil-pile structure interaction, and the results were compared and checked. The results show that: (1) The internal force response of the pile is related to the frequency spectrum characteristics of the input ground motion; (2) for the pile foundation in a site, the result of finite element analysis is similar to that of the m method; (3) when the depth of pile cap is zero, the internal force of the pile body is relatively large, so it is necessary to take corresponding measures to reinforce the soil around the pile cap.

Key words: seismic resistance of pile foundation; finite element method; pile-soil interaction; m method; depth of pile cap

① 收稿日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(51478444)

作者简介: 贾 鹏(1992—), 男, 研究生, 主要从事桩基础工程、岩土地震工程的研究。E-mail: pyybxgjip@126.com。

0 引言

随着设计与建造技术的不断发展,桥梁的设计与建造水平达到了新的高度。很多桥梁造价高、设计难度大,如果在地震中受到破坏,损失将无法估量,因此这类桥的抗震性能研究成为目前研究的热点。桥梁基础由于对沉降控制要求较高,因此桩基础一般都是桥梁基础的首选。在地震作用下,桥梁桩基往往承受较大的水平荷载。以往的震害调查表明桩基础常因抵抗弯矩不足而产生断裂破坏,或者产生大变形而影响上部结构,因此桩基础的抗震性能已经成为当今地震工程界和岩土工程界的一个研究热点^[1-2]。桩基础作为上部结构体系在地基中的延伸,其地震反应是地基场地本身与上部结构在地震中相互动力作用的具体反应,这种相互耦合作用使得桩基抗震量化分析变得复杂与困难。现有的桩基静力设计方法已很成熟,但桩基础的抗震设计还有很大的缺陷,仅限于要提高配筋率,增加相应的构造措施。如果按照现有规范对桩基采取构造措施或进行构造配筋,可能会低估或者高估地震时发生在桩身上的地震响应,由此造成安全隐患或经济上的浪费^[3-4]。现有国内外的研究成果中对桥梁上部结构的地震反应分析较多,而涉及桥梁桩基础与上部结构共同作用下的地震反应分析成果相对较少^[5-7],能够运用到设计中的成果则更少。对桩基础进行地震反应分析的结果正确与否缺乏直接判断。

鉴于此,本文针对某地一桥梁的桩基础设计,利用 Midas Civil 有限元软件,建立全桥有限元模型,分析桥梁上部结构与桩基础耦合作用条件下桩基础的地震响应,并将时程分析得到的墩柱内力作为桩顶惯性力荷载,用规范 m 法对桩身内力进行复核。

1 工程概况

某桥梁桥长 405 m,单跨 30 m,桥上建筑整体 1 层,部分 2 层。交通层结构高度 5.7m,桥上建筑一层结构高度 5.1 m,二层结构高度 4.78 m,桥下墩高 11.5 m,结构总高 34.68 m。该桥是城市开发、改善区域交通瓶颈的关键性基础工程,因此具有重要的社会经济价值,有必要对其在地震作用下的状态进行分析与计算。

该桥中间部分靠近河床中心位置,承台上覆盖 1.5 m 左右的回填土,承台下分别为卵石夹土、卵石土、漂石夹土、漂石土层。局部地段还含有极薄层的

砂层透镜体,具体位置为地表面下约 11 m 的卵石层中间夹有厚度约 1.2 m 的砂层。总体来说该场地土层分布比较均匀,土层力学参数较高。场地土的物理力学参数如下表 1 所列。

表 1 土的物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soils used in tests

土 层	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
填筑土	17.5	-	-	-
含细粒土砂	18.5	14.0	-	20
卵石夹土	20.0	21.0	-	28
卵石	20.5	26.0	-	35
漂石夹土	21.0	34.0	-	40
漂石	22.5	45.0	-	45

该桥梁选用独立承台桩基础,桩长为 33 m,桩直径为 1.2 m,桩端持力层为漂石层,桩端入持力层深度平均约为 5 m。独立承台下布设四根灌注桩,承台与桩身所用材料的混凝土强度等级均为 C40,承台尺寸为 5.2 m $\times$ 5.2 m $\times$ 2.5 m。图 1 所示为该桥的立面图和桩基础平面布置图,对独立承台桩基础编号为 A1 $\sim$ A6、B1 $\sim$ B6、C1 $\sim$ C6。为加强横桥方向的整体刚度,在廊桥每一跨下横桥方向的三个并排的独立承台用系梁进行连接,这样三个独立承台在横桥方向形成了一个整体结构,有利于在该方向抵抗较大的变形。图 2 所示为桩位布置图。

2 有限元模型

考虑到地震力对桩基础的影响不仅与地震力有关,同时也与桩基础上部的结构整体刚度以及荷载分布有关,因此采用 Midas Civil 有限元软件建立了结构-基础-地基整体有限元模型(图 3)。模型中的梁体与墩柱采用空间杆系单元,桩基采用软件提供的梁单元来模拟。根据《公路桥梁抗震设计细则》JTG/TB02-01-2008^[8]的相关规定与计算方法,桩土相互作用采用等代土弹簧模拟,根据式(1)来确定桩土之间的弹簧抗力系数,得到不同土层所对应的地基刚度系数。由于在计算中需要考虑到桥墩下部承台、系梁以及桩与土层之间的相互作用,因此本次计算假定承台与灌注桩固定连接。

$$k_s = maBz \tag{1}$$

式中: m 为桩在地基中的水平抗力系数的比例系数(根据《铁路桥涵地基和基础设计规范》TB10002.5-2005^[9],该场地 m 值确定为 20 000 $\sim$ 120 000 kPa/ m^2); a 是土层的厚度; B 为桩的有效影响宽度; z 为土层的埋深深度。

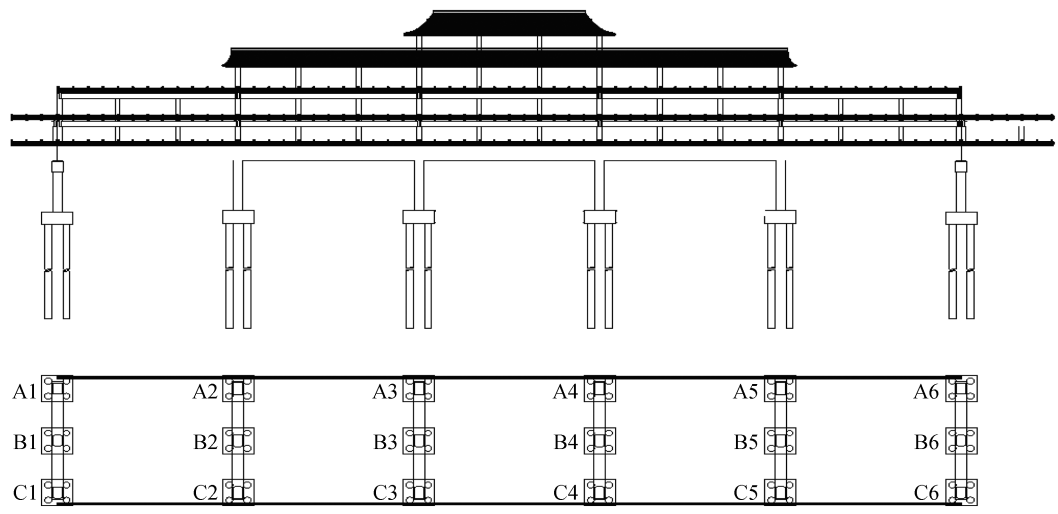


图 1 桥梁立面及桩基础平面图

Fig.1 The elevation drawing of bridge and plan of pile foundation

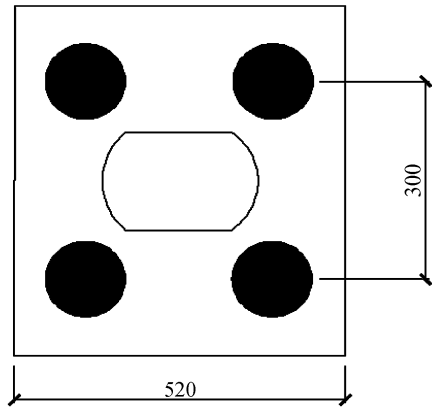


图 2 桩基础布置图(单位:mm)

Fig.2 The layout plan of pile foundation (Unit:mm)

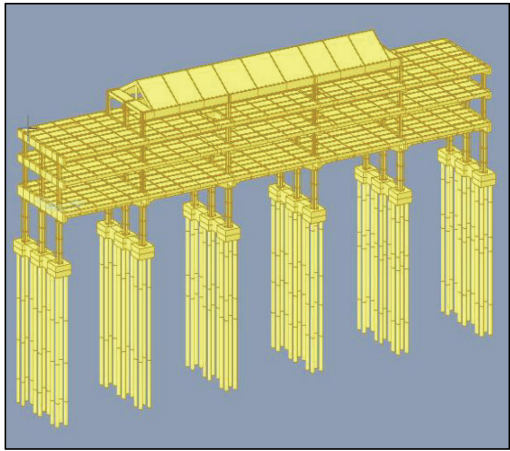


图 3 桥梁有限元模型

Fig.3 The finite element model of bridge

3 地震响应分析

由于该桥处于Ⅷ度抗震设防区,根据文献[8]的

相关规定确定场地罕遇地震加速度峰值为 4 m/s^2 。本次计算采用三条实测地震加速度时程曲线(都江堰崇义镇走石山波、安龙波和 El Centro 波)分别进行计算,图 4 为三条地震波的时程曲线。按照《建筑抗震设计规范 GB50011-2010》中 5.1.2^[4] 的说明,将三条地震波进行基线校正, x 、 y 、 z 三方向峰值加速度值比例为 $1:0.85:0.65$ (x 正方向为顺桥梁纵向方向, y 正方向为垂直桥梁行车道的横向方向, z 正方向为垂直桥面竖直向上方向)。

分别在基底输入这三条地震波,计算得到桩顶最大水平位移如表 2 所列,最大水平位移为 5.37 mm ,桩顶位移值都在 6 mm 以内。计算发现模型中 $A3\sim A4$ 、 $B3\sim B4$ 、 $C3\sim C4$ 独立承台桩基础的内力最大,这主要是因为这一部分上部结构质量更大,在地震中会产生更大的惯性力。模型中桩基础的最大内力情况如表 3 所列。在本次计算中,由于考虑到了承台周围土层的荷载分担作用,模型中桩身最大水平剪力计算值为 755.15 kN ,桩身最大弯矩为 $2\,769.06\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。最大剪力和弯矩值均产生在横桥向 y 方向,说明横桥向抗震性能较为薄弱。另外发现输入三条地震波后桩身的内力最大值有所不同,可见桩身内力响应与所输入地震动的频谱特性有关。

4 桩身内力复核

为了验证上述时程分析结果的正确性,采用《建筑桩基技术规范 JGJ 94-2008》^[3] 中关于承台-桩-土层共同工作原理计算桩身内力值。该方法基于 m 法原理,其基本假定为将土体视为弹性变形介质,其

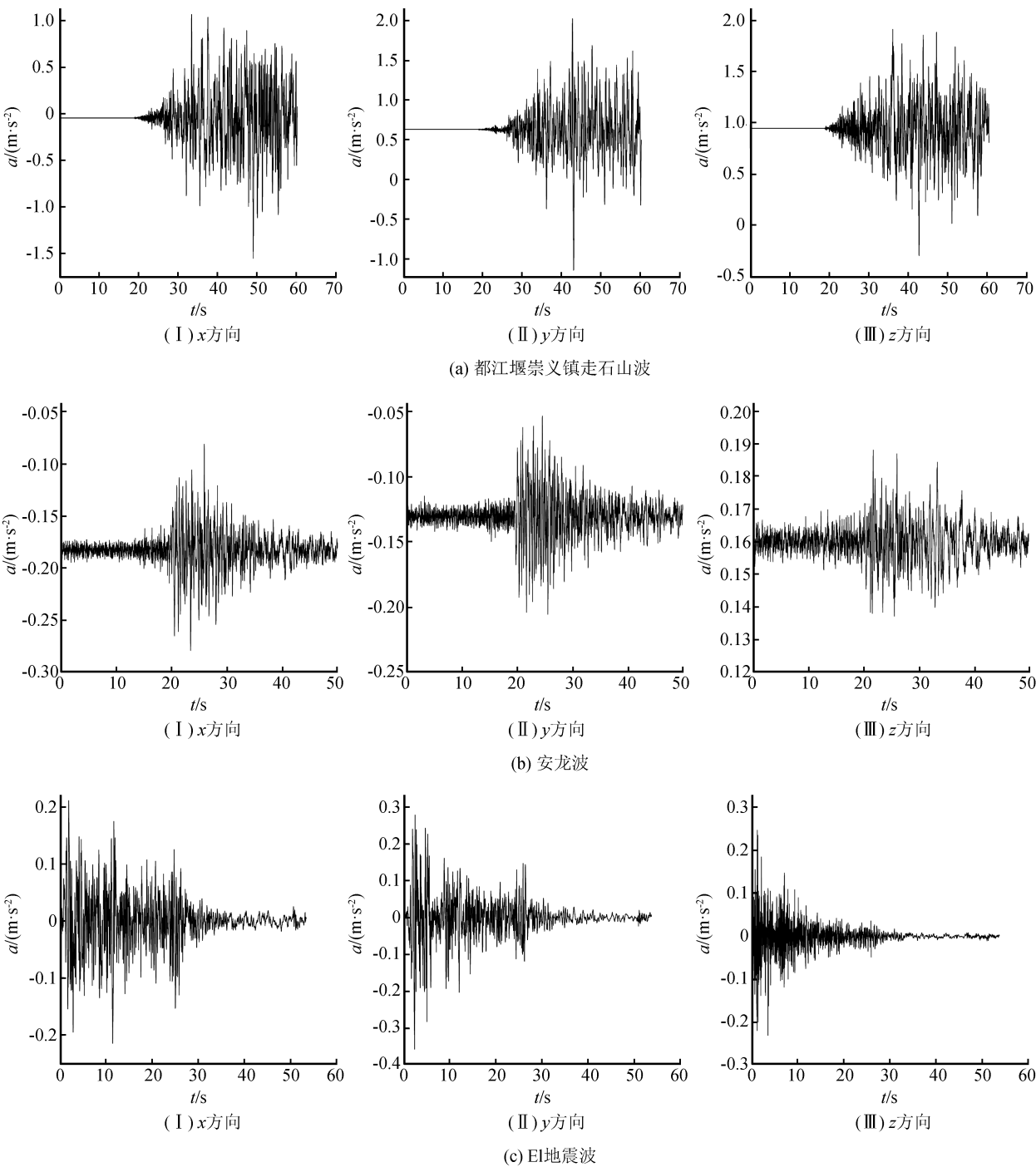


图 4 地震加速度时程曲线

Fig.4 Seismic acceleration time-histories curves

表 2 罕遇地震下模型中桩顶最大位移
Table 2 The maximum displacement of pile top in the model under rare earthquake

方向	走石山波	安龙波	El 波
x 向/mm	-3.43	2.91	3.75
y 向/mm	-3.42	3.69	-5.77

水平抗力系数随深度线性增加,地面处为零。对于低承台桩基,在计算桩基时,假定桩顶标高处的水平

抗力系数为零,并随深度增长。 m 法将桩基视为一根竖直的弹性地基梁,其基本微分方程为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Bmzy = 0$$

(2)

式中: E 、 I 分别为桩的弹性模量和截面惯性矩; z 、 y 分别为桩基某处的深度和水平位移; B 为桩基的计算宽度。

将桩顶的位移和弯矩、水平与竖向作用力作为

表 3 罕遇地震下模型中桩的最大内力

方向	走石山波		安龙波		EI 波	
	剪力/kN	弯矩/(kN·m ⁻¹)	剪力/kN	弯矩/(kN·m ⁻¹)	剪力/kN	弯矩/(kN·m ⁻¹)
x 向	142.62	675.55	158.77	-728.37	-215.23	-870.84
y 向	755.15	1 740.98	-672.01	-1 689.33	-651.54	2 769.06

边界条件输入,代入式(1),求解该高次幂级数方程即可求得相应的桩身内力与位移。该方法的求解图式如图 5 所示。

为了简化计算,编制了受水平荷载的桩身内力计算软件。软件界面如图 6 所示。

取罕遇地震作用下时程分析的墩底最大剪力值时刻的内力组合值进行内力分析,将墩底内力施加到桩身,计算桩身内力。表 4 列出了采用走石山、安龙、EI 地震时程分析结果复核的内力与位移情况。

从表 4 可见,将时程分析计算得到的桥墩结构上最大内力作为已知条件,按照《建筑桩基技术规范

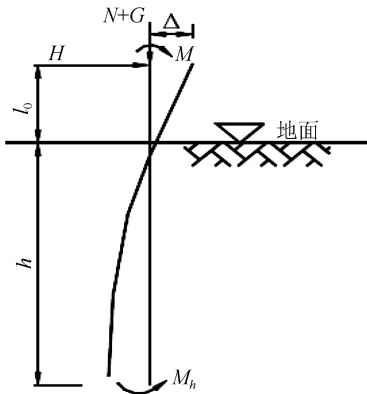


图 5 m 法计算图式

Fig.5 Calculation pattern of m method

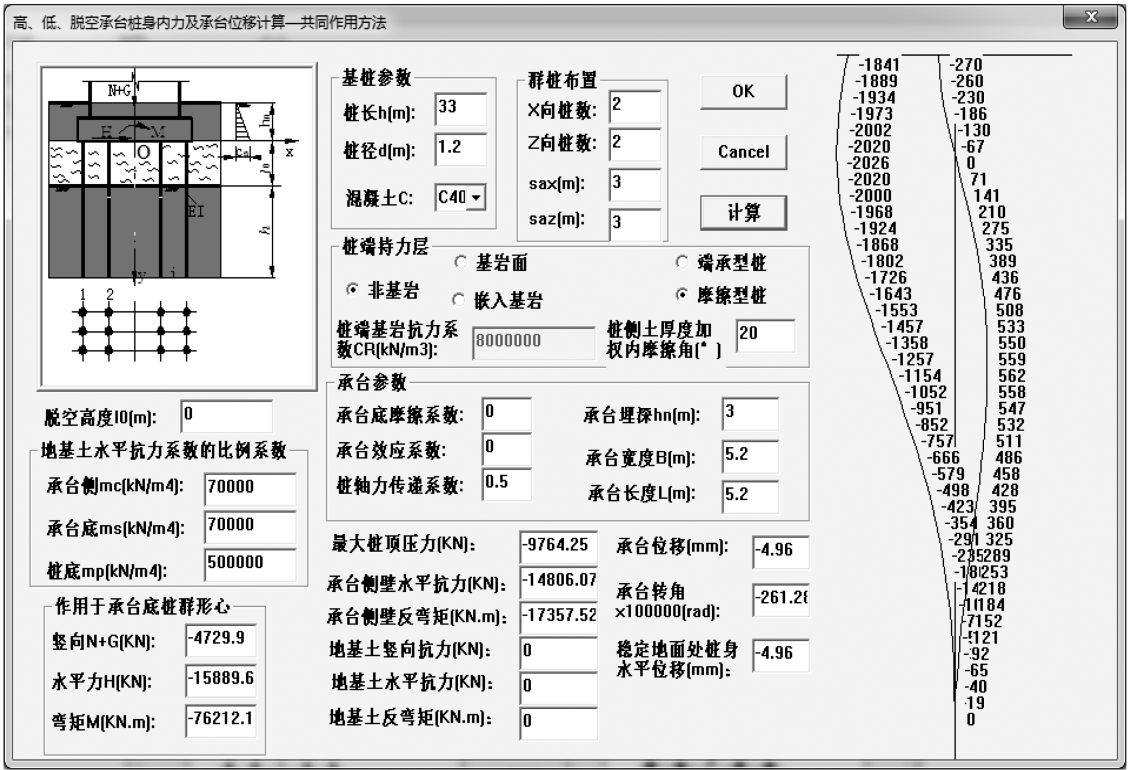


图 6 桩基础内力计算软件

Fig.6 Internal force calculation program of pile foundation

JGJ04-2008》中考虑承台-土-桩相互作用的计算方法进行计算校核,在罕遇地震作用下,计算得到桩身最大剪力值分别为-528 kN、572 kN、-868 kN,而弯矩值分别为 1 918 kN·m、-2 077 kN·m、

3 137 kN·m。将该结果与时程分析结果进行对比(表 5),发现除走石山波作用下剪力数值差别较大(30%)外,数值分析内力结果与 m 法结果差别基本都在 25%左右,这验证了有限元计算的正确性。这

是因为该场地土质较为均一且土性偏硬,在地震作用下桩基水平位移不大,基于弹性理论的 m 法与时

程分析法区别不大,因此在这种情况下可采用传统的惯性力作用相关方法进行设计。

表 4 采用不同地震波模拟下桩身最大内力与位移结果

Table 4 The maximum internal force and displacement of pile under the input of different seismic waves

地震波	输入方向	结构	剪力/kN	弯矩/(kN·m ⁻¹)	轴力/kN	位移/mm
走石山波	x	输入(墩)	-10 900	-53 183.7	1 666.4	-
		输出(桩)	393	-1 427	-	-3.41
	y	输入(墩)	14 620	71 449.9	522.4	-
		输出(桩)	-528	1 918	-	4.58
安龙波	x	输入(墩)	7 622	35 386.3	-1 327.1	-
		输出(桩)	-259	925	-	2.37
	y	输入(墩)	-15 870	-77 420.9	-4 729.9	-
		输出(桩)	572	-2 077	-	-4.97
El-Centro 波	x	输入(墩)	8 393	39 807.3	-1 993	-
		输出(桩)	-293	1 052	-	2.61
	y	输入(墩)	24 350	117 574.7	-1 058.8	-
		输出(桩)	-868	3 137	-	7.62

表 5 时程分析结果与 m 法最大内力结果对比(绝对值)

Table 5 Comparison between the results of time history analysis and m method (Absolute value)

地震波	剪力/kN			弯矩/(kN·m ⁻¹)			位移/mm		
	时程分析法	m 法	误差/%	时程分析法	m 法	误差/%	时程分析法	m 法	误差/%
走石山波	755.15	528	30%	1 740.98	1918	9%	3.42	4.58	25.3%
安龙波	672.01	572	14.9%	1 689.33	2077	18.6%	3.69	4.97	25.8%
El-Centro 波	651.54	868	25%	2 769.06	3137	11.7%	5.77	7.62	24.3%

考虑到该桥梁河道水流的冲刷作用,有可能在使用过程中将承台侧填土冲刷掉,因此对承台埋深为 0 的情况进行验算,得到的桩身内力情况(表 6)。表中结果显示当承台埋深为 0 时(承台侧向无填土时),桩身剪力普遍偏大,其中在 El 地震波作用下桩

身最大剪力达到了 6 170 kN,弯矩达到了 5 695 kN·m,横桥向最大位移达到了 24.15 mm,在这种情况下将会产生由桩基础破坏所导致的结构破坏。因此在实际施工过程中要对承台侧土体做相应的加固处理,确保承台不外露。

表 6 桩身最大内力与位移结果

Table 6 The maximum internal force and displacement of pile

地震波	输入方向	结构	剪力/kN	弯矩/(kN·m ⁻¹)	轴力/kN	位移/mm
走石山波	x	输入(墩)	-10 052.44	-47 437.6	858.6	-
		输出(桩)	-2 513	-2 312	-	-9.8
	y	输入(墩)	15 570.2	74 492	135.1	-
		输出(桩)	3 890	3 604	-	15.26
安龙波	x	输入(墩)	7 113.2	32 110.6	-24 171.8	-
		输出(桩)	1 770	1 603	-	6.83
	y	输入(墩)	-15 889.6	-76 212.1	-4 729.9	-
		输出(桩)	-3 972	-3 682	-	-15.59
El-Centro 波	x	输入(墩)	7 609.9	35 192	-26 091.7	-
		输出(桩)	1 900	1 734	-	7.37
	y	输入(墩)	24 694.4	117 419.5	-1 264.1	-
		输出(桩)	6 170	5 695	-	24.15

5 结论

本文对某地桥梁进行了全桥有限元地震反应分析,并用有限元地震反应分析结果得到的墩柱内力

值对桩基础进行验算,得出了一些有意义的结论:
(1) 通过比较输入走石山地震波、安龙地震波、El-Centro 波桩身内力响应的规律发现,同一幅值的不同地震波作用下桩身最大内力有所不同,可见桩

身内力响应与所输入地震动的频谱特性有关。桩身内力均为横桥向 y 方向最大。

(2) 通过将有限元计算的墩柱内力结果作为桩顶所受的作用力用 m 法进行验算,发现时程分析结果与 m 法的结果误差不大,在可接受的范围内,验证了有限元分析结果的正确性,说明在土性均一的场地中,传统的惯性力设计是可以满足桩基础的抗震设计的。

(3) 对承台埋深为 0(承台侧向无填土时)的情况进行了验算,结果显示当承台埋深为 0 时,桩身内力基本都偏大。在这种情况下将会产生由桩基础破坏所导致的结构破坏。因此在实际施工过程中要对承台侧土体做相应的加固处理,发现承台侧向土流失要及时回填夯实。

参考文献(References)

[1] 黄雨,舒翔,叶为民,等.桩基础抗震研究的现状[J].工业建筑,2002,32(7):50-53.
HUANG Yu,SHU Xiang,YE Weimin,et al.Recent Studies on Seismic Resistance of Pile Foundation[J].Industrial Construction,2002,32(7):50-53.

[2] 刘惠珊.桩基震害及原因分析-日本阪神大地震的启示[J].工程抗震,1999(1):37-43.
LIU Huishan.Pile Foundations Damage and Cause Analysis [J].Earthquake Resistant Engineering,1999(1):37-43.

[3] 建筑桩基技术规范:JGJ94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Technical Code for Building Pile Foundation:JGJ94-2008[S].

Beijing:China Architecture & Building Press,2008.

[4] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for Seismic Design of Buildings:GB50011-2010[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.

[5] 陈思奇,梁发云,陈海兵,等.地震作用下预应力混凝土管桩运动响应三维数值分析[J].地震工程学报,2015,37(1):55-60.
CHEN Siqi,LIANG Fayun,CHEN Haibin,et al.Characteristics of Bending Moment Distribution Prestressed Concreted Highpilings During Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(1):55-60.

[6] 王立忠,管仲国,李建中.桥梁桩基础地震作用下不同桩土模型比较研究[J].结构工程师,2011,27(6):89-94.
WANG Lizhong,GUAN Zhongguo,LI Jianzhong.Comparison Study on Different Models of Bridge Pile-Foundation Subjected to Earthquakes[J].Structural Engineers,2011,27(6):89-94.

[7] 王君杰,赖伟,胡世德.深水高桩基础桥梁地震水动力效应分析[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(5):650-655.
WANG Junjie,LAI Wei,HU Shide.Seismic Hydrodynamic Effects on Group-pile Foundation with Gaps Merged in Water [J].Journal of Tongji University (Natural Science),2011,39(5):650-655.

[8] 公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges:JTG/T B02-01-2008[S].Beijing:China Communications Press,2008.

[9] 铁路桥涵地基和基础设计规范:TB10002.5-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.
Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert: TB10002.5-2005 [S]. Beijing: China Railway Press,2005.