

黄土地区小半径曲线梁桥地震响应规律研究

程麦理, 杨红霞

(延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要:为研究黄土地区桩基—黄土动力相互作用对小半径曲线桥梁结构地震响应的影响规律,根据桩基—黄土动力相互作用机理,结合黄土动力非线性本构关系,建立了桩基—黄土动力相互作用分析模型。针对小半径曲线桥梁结构的空间质量分布特点,推导建立了小半径曲线桥梁结构的动力运动方程。结合数值仿真分析,对考虑桩基—黄土动力相互作用的小半径曲线桥梁结构进行了地震响应分析。结果表明:考虑桩基—黄土动力相互作用时小半径曲线桥梁结构自振周期增大,结构加速度、位移响应增大;曲线桥梁桥墩内力减小,主梁弯矩和剪力减小,扭矩基本不变。

关键词:桩基—黄土;小半径曲线桥;SSI效应;地震响应

西北黄土高原地区的高速公路出入口匝道、城市立交等桥梁结构广泛采用小半径曲线桥梁,该类桥梁结构能够较好地满足地形对道路选线的要求,同时其空间构型优美。强震作用下,黄土易发生震陷、液化等地质灾害,同时也会诱使土体力学性能退化变异,给黄土场地的桩基抗震设计带来困难。小半径曲线桥梁结构在地震激励下表现为明显的空间行为,桩基—黄土会发生摩擦、滑移和分离等现象,桩基承载性能退化,因而对黄土地区的小半径曲线桥梁结构的地震响应规律研究意义深远。

2008年汶川地震中发生严重倒塌破坏的百花大桥引起了国内外学者的关注,蒋劲松等通过分析指出,百花大桥的倒塌破坏主要是由于桥墩高度差异大、主梁曲率半径小和桩土相互作用而导致;赵国辉等和孟杰等分别对汶川地震中西安大兴路立交桥和绵竹回澜桥的地震破坏原因进行了探讨,指出这两座曲线桥梁结构的破坏主要是由于固定支座设置不合理及场地土对结构周期延长造成结构吸收过多地震能量导致的灾害;姜秀娟等通过对某小半径曲线桥进行时程分析,指出恰当地考虑桩—土作用是正确分析曲线桥梁结构的关键;曾敏以新建武汉站西十联曲线匝道桥为背景,研究了小半径曲线桥在考虑相邻结构、桩—土—桥相互作用、地震输入方向、约束方式及支座偏心对桥梁地震

响应的影响,同时对小半径曲线梁桥的减隔震进行了深入探讨;闫磊等结合振动台试验对曲线梁桥结构进行了行波效应研究。

该文通过分析地震作用下桩基—黄土的动力相互作用行为,构造桩基—黄土动力相互作用分析模型,推导建立桩基—黄土动力相互作用的非线性理论。结合有限元数值仿真分析,建立考虑桩基—黄土相互作用(SSI效应)和不考虑桩基—黄土相互作用的两个曲线桥梁结构有限元模型,主要从结构动力特性、动力响应及频谱响应等角度进行深入分析,探究对比小半径曲线桥梁结构在考虑SSI效应和不考虑SSI效应下的地震响应规律。

1 桩基—黄土相互作用模型

为准确反映黄土—桩基的动力相互作用机制,通过分析黄土地区桩基的震害特征,采用能够考虑桩基—黄土界面脱离、摩擦、滑移及碰撞特性的桩—土动力相互作用分析模型。该模型主要包括桩体、桩—土界面、近场土体及远场土体,通过在桩基和黄土间设置间隙单元,用来模拟桩—土界面在地震作用下发生的碰撞效应,单位桩基段的桩—土动力相互作用分析模型如图1所示。

收稿日期:2018-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51808479,51408453);陕西省自然科学基金资助项目(编号:2018JQ5217);陕西省教育厅专项科学研究计划项目(编号:17JK0859);延安大学博士科研启动项目(编号:YDBK2016-08);延安大学科研计划项目(编号:YDY2017-11)

作者简介:程麦理,男,博士,副教授.E-mail:cml3635@163.com

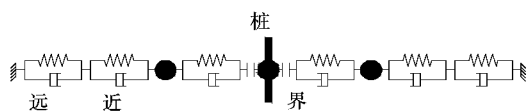


图 1 桩—土动力相互作用分析模型

地震作用下,由于桩基与黄土的动力相互作用,使得桩基的动力响应机制复杂,难以进行精细的定量分析。通过对黄土场地中桩基进行简化,桩基—黄土动力相互作用分析模型采用集中质量模型,桩段质量为 m_i 。由于地震作用使得桩基—黄土界面处发生强烈的非线性动力相互作用行为,近场土体在桩基的往复挤压作用下发生明显的弹塑性变形,从而导致桩基与土体在靠近地面部位出现脱离现象。桩基与基础土体界面在运动过程中的相对速度诱导二者产生碰撞行为,而桩—土界面的竖向相对运动则表现为摩擦滑移非线性运动趋势。

分析桩基—黄土在地震作用下的运动行为,采用碰撞单元模拟桩基与土体的近场运动,碰撞单元利用 Jan—Hertz—Damp 模型,其包含并联的弹簧和阻尼器并串联一个间隙单元。

根据远场土体的剪切变形特征,远场单元则采用并联的弹塑性弹簧和阻尼器模拟,将远场土体简化为 Kelvin—Voigt 体,采用 Winker 地基梁基本假定,根据 Mindlin 公式计算不同深度处的水平弹簧刚度。

远场土体连接人工边界单元,人工边界采用线弹性弹簧和黏弹性阻尼器并联而成,主要用于传递和耗散地震能量。

2 曲线桥桩—土—结构动力作用理论

地震作用下结构由于惯性力的存在而发生变形,根据 d'Albert 原理,通过考虑桩基与黄土及上部曲线桥梁结构的动力相互作用,结合结构地震动力分析模型可知,结构中各质点的惯性力、阻尼力及其弹性恢复力应满足动力平衡方程:

$$m_i''\ddot{u}_i(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij}\dot{u}_j(t) + \sum_{j=1}^n k_{ij}u_j(t) = -m_i''\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: m_i'' 为曲线梁桥上部结构质点质量; $\ddot{u}_i(t)$ 为曲线梁桥上部结构 i 质点的加速度; \dot{u}_j 、 u_j 分别为上部结构 j 质点的速度和位移; $\ddot{u}_g(t)$ 为地震加速度荷载。

地震激励作用下,桩基质点除受到桩端地震荷载 $\ddot{u}_g(t)$ 的作用,还受到桩侧土体的约束与动力作用,则

桩基质点动力平衡方程可表示为:

$$m_i\ddot{u}_i(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij}\dot{u}_j(t) + \sum_{j=1}^n k_{ij}u_j(t) = -m_i\ddot{u}_g(t) - m_i'[\ddot{u}_i(t) - \ddot{u}_i'(t)] - c_i^d(\dot{u}_i(t) - \dot{u}_i'(t)) - k_i^d[u_i(t) - u_i'(t)] \quad (2)$$

式中: m_i 为桩基质点质量; m_i' 为桩周土体质量; $\ddot{u}_i'(t)$ 、 $\dot{u}_i'(t)$ 、 $u_i'(t)$ 分别为桩周第 i 层土体质点加速度、速度和位移; c_i^d 、 k_i^d 分别为第 i 层土体对桩基相互作用的阻尼系数和弹簧刚度。

对式(2)进行整理,采用矩阵方式对曲线桥梁结构动力分析方程进行表述,其结构运动平衡方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{\ddot{u}_g\} + [M']\{\ddot{u}'\} + [C^d]\{\dot{u}'\} + [K^d]\{u'\} \quad (3)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为桩—结构动力体系的质量、阻尼、刚度矩阵; $[M']$ 、 $[C^d]$ 、 $[K^d]$ 分别为桩周土体的质量、阻尼和刚度矩阵。

3 有限元数值模型建立

陕北黄土高原地区某公路曲线匝道桥,其中某联为 3 跨跨径均为 30 m 的连续梁桥,曲率半径 50 m,采用独柱式桥墩。1[#]和 4[#]桥墩顶设有抗扭转支座及约束径向位移的单向支座,2[#]桥墩顶为点铰支承(约束主梁的径向及切向位移),3[#]桥墩顶为限制径向位移的单向支座。桥墩高度 10 m,主梁截面尺寸及桥墩截面尺寸如图 2 所示。

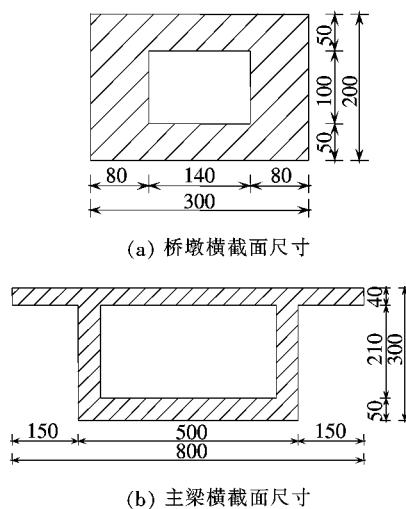


图 2 结构细部尺寸(单位:cm)

基桩采用直径为 1 m 钢筋混凝土端承桩,桩长 15 m,场地土参数如表 1 所示。桩基与基础的混凝土强

度为 C30,主梁混凝土强度为 C50。当该小半径曲线梁桥在加速度峰值为 300 cm/s^2 的 El-Centro 地震波作用下,分析该曲线桥梁结构的地震响应规律。

表 1 场地土层参数

层号	土层厚度/ m	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比	剪切模量/ MPa	弹性模量/ MPa
1	3	1.2	150	0.32	35.1	148.2
2	8	1.5	180	0.29	41.2	174.5
3	4	1.9	300	0.23	60.7	203.3
4	10	2.1	1 150	0.21	91.3	351.8

为对比分析黄土场地对小半径曲线桥梁结构地震响应的影响,根据桩基—黄土动力相互作用的理论分析模型,分别建立考虑桩—土相互作用(考虑 SSI 效应)和不考虑桩—土作用(不考虑 SSI 效应)的有限元模型,分析探究考虑黄土—桩基效应对小半径曲线桥梁结构的地震响应规律。

建立有限元模型时采用柱坐标系,首尾桥墩连线方向为 Y 轴方向,Z 轴方向为由墩底指向墩顶,各坐标轴间满足右手定则。采用有限元分析程序 Ansys 及其 APDL 参数化语言建立该小半径曲线梁桥的仿真分析模型。主梁、桥墩和桩基均采用 Beam188 单元模拟,利用 Combin40 单元模拟桩基—黄土界面的非线性力学行为,Combin39 单元模拟近场黄土的弹塑性动力荷载变形关系,而通过定义 Combin14 单元模拟远场黄土及其人工边界。Mass21 单元用于模拟桩基各水平支承弹簧点处桩基与黄土的集中质量。

4 结果分析

4.1 曲线梁桥动力特性

由于黄土—桩基的动力相互作用,使得考虑 SSI 效应时小半径曲线梁桥的动力特性相较不考虑 SSI 效应在边界处理上有较大差异,图 3 为考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应时小半径曲线桥梁结构的自振频率,表 2 为该结构的各阶振型。

由图 3 可知:考虑黄土—桩基相互作用(SSI 效应)和不考虑黄土—桩基相互作用计算获得的小半径曲线桥梁结构自振频率差异较大。不考虑 SSI 效应时,小半径曲线桥梁结构前 6 阶自振频率随着阶数的增大基本呈线性变化,7~9 阶频率明显较接近。考虑 SSI 效应时,小半径曲线桥梁结构自振频率明显小于

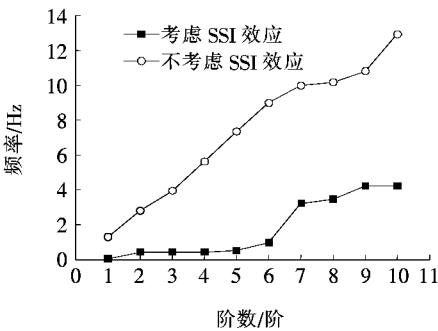


图 3 小半径曲线桥梁结构频率

表 2 小半径曲线桥梁振型

阶数/阶	考虑 SSI 效应	不考虑 SSI 效应
1	主梁切向	主梁切向
2	1 [#] 、4 [#] 墩切向反对称(1 阶)	径向(1 阶)
3	2 [#] 墩切向(1 阶)	径向反对称(2 阶)
4	1 [#] 和 4 [#] 墩切向对称(2 阶)	径向正对称(3 阶)
5	径向对称(1 阶)	竖向对称(1 阶)
6	径向反对称(2 阶)	竖向反对称(2 阶)
7	2 [#] 墩切向弯曲(2 阶)	径向对称(4 阶)
8	径向对称(3 阶)	径向反对称(5 阶)
9	2 [#] 和 3 [#] 墩径向	竖向对称(3 阶)
10	1 [#] 、2 [#] 和 3 [#] 墩扭转	1 [#] 、4 [#] 墩切向反对称

不考虑 SSI 效应,该结构 1~6 阶自振频率较接近,结构前 6 阶自振频率随阶数的增加变化不大。

由表 2 可知:考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应对小半径曲线桥梁结构振型的影响较大,二者差异显著。考虑 SSI 效应时,由于桥梁桩基刚度较小,因而在前 10 阶包含有一定数量的桥墩弯曲振动模态。不考虑 SSI 效应时,小半径曲线桥梁结构的振型主要表现为结构整体的径向、切向及竖向的对称和反对称振动。整体而言,考虑 SSI 效应相较不考虑 SSI 效应,小半径曲线桥梁结构的振型更复杂,因而在对黄土地区的小半径曲线桥梁结构进行模态分析时,应适当考虑黄土—桩基相互作用对结构动力特性的影响。

4.2 曲线梁桥墩顶加速度及位移响应

由于曲线桥梁相较直线桥梁在横桥向(径向)的地震响应差异较大,图 4 为 1[#]桥墩径向位移响应时程曲线。

为对比考虑与不考虑 SSI 效应对小半径曲线桥梁结构的地震响应规律,表 3、4 分别为 1[#]、2[#]、3[#]及 4[#]桥墩顶位移和加速度响应峰值。

分析图 4 和表 3、4 可知:考虑 SSI 效应计算得到

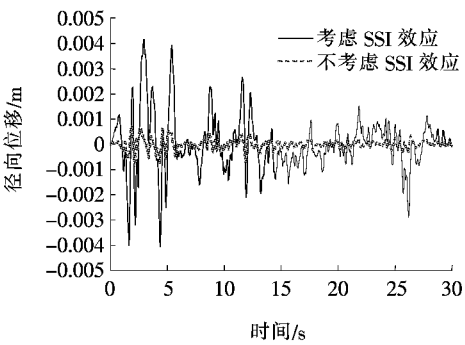


图 4 1# 桥墩径向位移响应时程

各桥墩顶的位移及加速度响应均明显大于不考虑 SSI 效应的计算结果,主要是由于考虑 SSI 效应时小半径曲线桥梁结构的桩基边界刚度相对较小,因而在同等强度地震荷载激励下易发生更大的地震位移响应。

4.3 结构内力响应

由于 2# 桥墩与主梁采用固定点铰支承,在地震作用下该桥墩分配更多地震力。桥墩的扭转刚度通常较大,地震荷载激励下不易发生扭转振动,因而其扭矩通常较小,表 5 为 2# 墩底截面在考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应情况下的内力峰值响应。

表 3 桥墩顶位移响应峰值 cm

墩号	径向位移				切向位移			
	不考虑 SSI 效应		考虑 SSI 效应		不考虑 SSI 效应		考虑 SSI 效应	
	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}
1#	0.073	-0.083	0.414	-0.405	0.007	-0.008	2.299	-1.990
2#	0.084	-0.079	0.197	-0.177	1.430	-1.220	13.870	-13.705
3#	0.082	-0.087	0.258	-0.198	0.022	-0.029	3.531	-3.070
4#	0.092	-0.066	0.492	-0.429	0.020	-0.023	2.296	-1.990

表 4 桥墩顶加速度响应峰值 cm/s²

墩号	径向加速度				切向加速度			
	不考虑 SSI 效应		考虑 SSI 效应		不考虑 SSI 效应		考虑 SSI 效应	
	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}
1#	111.7	-59.7	205.4	-84.3	29.3	-12.6	268.5	-153.6
2#	73.7	-33.6	91.1	-37.9	357.1	-191.6	231.1	-236.4
3#	44.1	-69.7	37.3	-93.2	59.5	-25.4	412.3	-236.2
4#	64.0	-113.1	83.7	-206.6	43.2	-19.1	267.7	-153.3

表 5 2# 桥墩墩底内力峰值响应

项目	F_x/kN		F_y/kN		F_z/kN		$M_y/(\text{kN} \cdot \text{m})$		$M_x/(\text{kN} \cdot \text{m})$	
	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}
考虑 SSI 效应	36.42	-27.38	92.51	-100.92	108.93	-142.13	133.46	-90.73	918.21	-898.22
不考虑 SSI 效应	777.64	-606.64	994.94	-992.27	54.25	-42.75	999.35	-998.95	7 525.33	-2 758.91

注: F_x 为径向剪力; F_y 为切向剪力; F_z 为轴力; M_y 为径向弯矩; M_x 为切向弯矩。

由表 5 可知:考虑 SSI 效应后曲线桥梁 2# 桥墩剪力及弯矩均明显减小,而由地震引起的轴向力略微增大。这主要是由于考虑 SSI 效应后结构基频减小,结构的自振周期与场地地震波的低频分量差异较大,因而在相同地震激励下考虑 SSI 效应分析获得的桥梁结构桥墩内力结果偏小。

曲线桥主梁由于其主梁曲率的存在,使得在地震作用下内力表现为弯扭耦合效应,内力分析复杂,给该类桥梁结构的抗震设计带来困难。表 6 为主梁中跨跨中截面在考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应情况下的内力峰值响应。

由表 6 可知:考虑 SSI 效应相较不考虑 SSI 效应

表 6 中跨跨中截面内力峰值响应

项目	F_z/kN		F_x/kN		$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	
	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}
考虑 SSI 效应	271.67	-206.10	818.53	-621.30	180.15	-170.86	995.62	-998.14
不考虑 SSI 效应	123.69	-116.33	883.79	-94.88	909.51	-780.13	962.61	-995.75

注: F_z 为竖向剪力; F_x 为径向剪力; M_x 为弯矩; M_y 为扭矩。

的桥梁结构主梁剪力响应增大显著,而弯矩明显减小,主梁扭矩基本无变化。对比桥墩地震内力响应结果,主梁与桥墩的地震内力响应规律不一致。

4.4 结构频谱响应分析

图 5 为考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应下曲线桥梁 2# 桥墩顶切向加速度和径向位移的频谱分析对比。

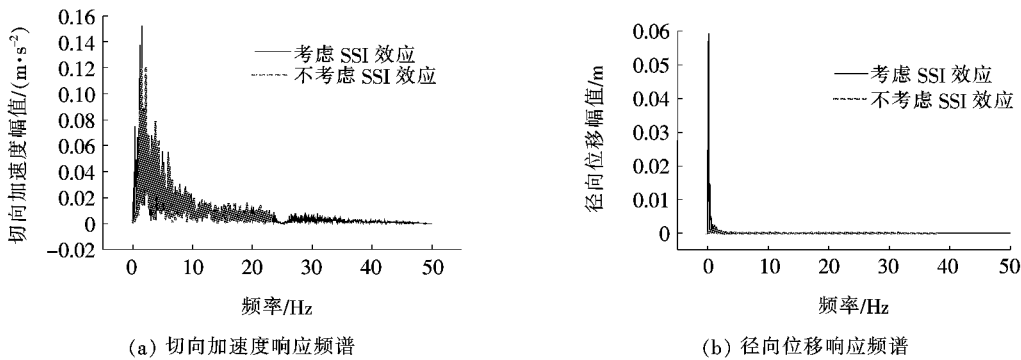


图 5 2# 桥墩顶地震响应频谱分析

由图 5 可知:考虑 SSI 效应时小半径曲线桥梁结构 2# 桥墩顶的地震加速度和位移响应有增大趋势,其中位移响应增大趋势明显,这与结构地震运动响应结论基本一致。因而在进行黄土场地的小半径曲线桥梁结构抗震分析时,应着重关注结构的运动行为指标超限问题。

5 结论

通过探究强震作用下黄土地区桩基地震动力响应规律,得到以下结论:

- (1) 桩基—黄土动力相互作用对小半径曲线桥梁结构的动力特性影响显著。考虑桩基黄土动力相互作用后,曲线桥梁结构的自振周期增大(自振频率降低)。
- (2) 黄土场地中考虑 SSI 效应相比未考虑 SSI 效应的小半径曲线桥梁结构的加速度及位移地震响应均增大,其中位移增大较明显。
- (3) 桩基—黄土的 SSI 效应对桥墩和主梁内力的地震响应规律不一致,使得桥墩内力降低,而主梁的剪力和弯矩增大,扭矩基本不变。

参考文献:

[1] 程麦理,李青宁,闫磊,等.多点激励下非规则高墩曲线桥梁地震响应试验研究[J].振动工程学报,2016(5).

[2] 程麦理,李青宁,尹俊红,等.非规则高墩曲线桥梁振动台试验研究[J].振动与冲击,2016(2).

[3] 蒋劲松,庄卫林,刘振宇.汶川地震百花大桥震害调查分析[J].桥梁建设,2008(6).

[4] 赵国辉,刘健新.大兴路立交匝道桥震害原因分析及修复方案[J].桥梁建设,2011.

[5] 孟杰,刘钊,张建东.汶川地震回澜立交桥震害成因分析[J].振动与冲击,2014(12).

[6] 姜秀娟,赵国辉,刘健新.桩—土相互作用对弯桥的地震响应影响分析[J].中外公路,2007(6).

[7] 曾敏.小半径曲线梁桥地震响应分析及减隔震研究[D].中南大学硕士学位论文,2009.

[8] 闫磊,李青宁,赵花静,等.行波激励下考虑结构碰撞的非规则桥梁抗震性能研究[J].地震工程学报,2018(6).

[9] 秦昌,徐略勤,刘津成,等.高墩大跨连续刚构桥长周期地震响应对比研究[J].中外公路,2017(1).

[10] 何贝贝,冯仲仁,陈百奔.参数变化对高墩弯桥地震响应特性的影响[J].中外公路,2017(3).