

## 考虑桩—土相互作用的高架桥抗震性能研究\*

姚庆<sup>1</sup>, 苗通<sup>2</sup>, 武隽<sup>3</sup>, 刘冉冉<sup>3</sup>

(1.陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 700075; 2.广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010; 3.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 以一座主跨跨径 50 m 的典型三跨高架桥为例建立有限元模型, 利用 ANSYS 的二次开发平台 APDL 进行时程分析, 研究墩底固结与桩—土相互作用下桥梁的地震响应。结果表明, 考虑桩—土相互作用后, 结构的自振频率明显降低, 基频降低 50%, 关键截面的位移和内力变化显著, 位移最大变化量接近 500%, 梁的内力最大相对增幅约 45%, 在高架桥抗震设计时需考虑桩—土相互作用。

**关键词:** 桥梁; 高架桥; 抗震性能; 桩—土相互作用

**中图分类号:** U446.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)03-0127-05

高架桥现已成为中国各大城市解决交通拥堵问题的主要方式之一。地震作用对于高架桥的破坏后果非常严重, 确定合理的高架桥抗震性能计算模型对于评估高架桥的抗震风险性具有重要作用<sup>[1]</sup>。以往的桥梁设计多采用墩底固结模型, 忽略了桩—土相互作用对桥梁抗震性能的影响。总结历次的桥梁地震灾害, 发现相当一部分桥梁的破坏是由于桩基失效引起的, 如 1976 年的唐山地震<sup>[2]</sup>、1995 年的日本阪神地震<sup>[3]</sup>, 也有相当一部分桥梁破坏的主要原因是基础的破坏。相关研究表明, 考虑桩—土相互作用, 桥梁结构的关键截面响应一般会增大<sup>[4-5]</sup>。本文以一座典型的连续梁高架桥为例进行抗震分析, 对比考虑桩—土相互作用和不考虑桩—土相互作用时高架桥的抗震性能, 为地震作用下高架桥选取合理的分析模型和抗震分析提供参考。

## 1 桩—土—桥有限元地震分析模型

JTG D63—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》规定, 桩—土相互作用可采用 m 法进行模拟<sup>[6]</sup>。本文将 m 法应用于有限元软件 ANSYS 建模中。

### 1.1 桩—土相互作用模型

m 法假定桩基础周围土体对桩基础的影响是线性的, 该影响可通过土弹簧模拟<sup>[7-9]</sup>。采用有限元软件 ANSYS 建模时, 桩基础和土弹簧分别采用空间梁单元 Beam4 和 Combin14 单元模拟 (见

图 1)。x、y、z 方向土弹簧刚度的计算见式(1)<sup>[6]</sup>。

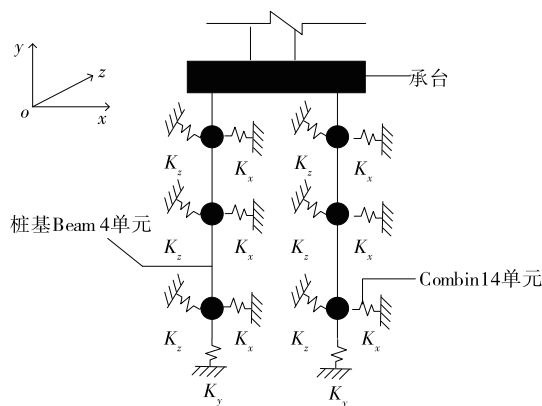


图 1 桩—土—桥相互作用模型

$$\begin{cases} K = ab_p m Z & (x, z \text{ 方向}) \\ K_y = C_0 A_0 & (y \text{ 方向}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a$  为土层厚度;  $b_p$  为桩的计算宽度;  $m$  为地基土的比例系数;  $Z$  为各土层中点距地面的距离;  $C_0$  为桩底土竖向地基系数;  $A_0$  为桩底土受压面积。

### 1.2 考虑桩—土作用的桥梁地震动力分析模型

参考文献[10], 桩—土—桥体系在地震作用下的动力方程为:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -MIa_g \quad (2)$$

式中:  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为桥梁的总体质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $u(t)$  分别为桥梁有限元模型的节点加速度、速度和位移向量;  $I$  为单位矩阵;  $a_g$  为地震加速度。

\* 基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2020JM-230)

式(2)的求解采用 ANSYS 有限元软件完全瞬态分析中的 HHT 时间积分法,它是一种改进的 Newmark-Beta 法<sup>[11-12]</sup>。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

以某高架桥为例进行抗震性能研究。该桥上部结构采用(30+50+30) m 变截面连续梁,主线采用单箱双室截面,支线采用单箱单室截面,梁高由 3.2 m(支点处)变化到 1.8 m(跨中);下部结构采用柱式墩,墩高 8.8~10.5 m,采用摩擦桩基础;箱梁采用 C50 混凝土,桥墩、桥台及桩基均采用 C40 混凝土(见图 2)。

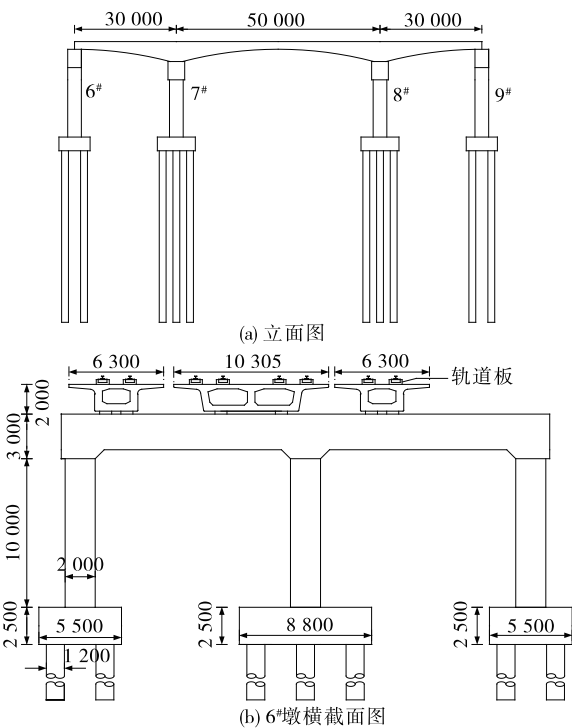


图 2 三跨连续梁桥示意图(单位:mm)

2.2 空间有限元模型

分别建立墩底固结和考虑桩-土相互作用的桥

梁模型(见图 3),箱梁、盖梁、桥墩及桩基采用 Beam4 单元模拟,主梁与盖梁、盖梁与桥墩的连接采用耦合(CP)进行模拟,主节点分别为盖梁节点、墩节点。桩-土相互作用采用弹簧单元 Combin14 模拟,采用 m 法确定弹簧参数。

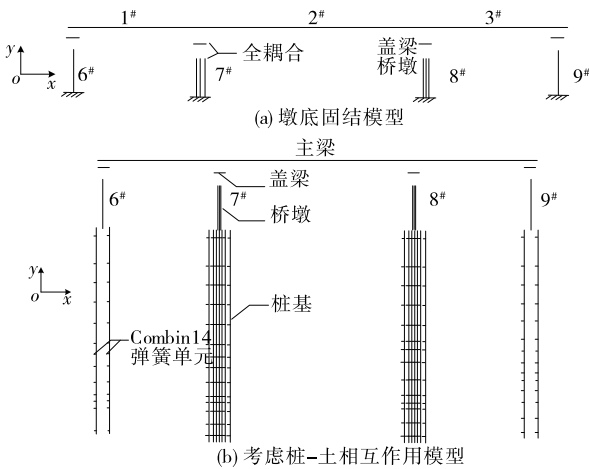


图 3 桥梁有限元模型

以 6# 墩的中桩基为例说明土弹簧刚度的计算步骤。该桩基长 52 m,图 4 为其平面图。根据土层地质参数,桩底竖向土弹簧刚度如下:

$$K_y=C_0A_0=10\,000\times52\times3.14\times(0.5\times1.2+52\times\tan6)^2=59\,962\,294\text{ kN/m}$$

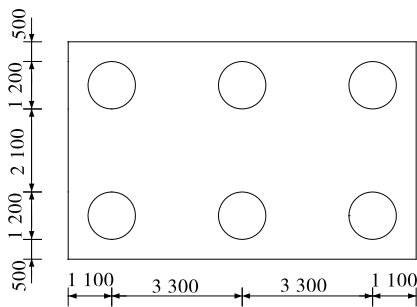


图 4 6# 墩的中桩基平面图(单位:mm)

按式(1)计算 x、z 方向土弹簧刚度,计算结果

见表 1。

表 1 土弹簧刚度  $K_x$  和  $K_z$  计算结果

土层	土层深度/ m	土弹簧位置 Z/m	土层厚度 a/m	m 值/ (kN·m <sup>-4</sup> )	x 方向桩的计 算宽度 $b_p$ /m	z 方向桩的计 算宽度 $b_p$ /m	$K_x$ / (kN·m <sup>-1</sup> )	$K_z$ / (kN·m <sup>-1</sup> )
水上新黄土	12.3	6.15	12.3	8 000	1.61	1.52	974 308	919 843
古土壤	14.3	13.30	2.0	5 000	1.61	1.52	214 130	202 160
饱和软黄土	22.0	18.15	7.7	4 000	1.61	1.52	900 022	849 710
古土壤	24.4	23.20	2.4	5 000	1.61	1.52	448 224	423 168
软塑老黄土	32.8	28.60	8.4	8 000	1.61	1.52	3 094 291	2 921 318

续表 1

土层	土层深度/ m	土弹簧位置 Z/m	土层厚度 a/m	m 值/ (kN · m <sup>-4</sup> )	x 方向桩的计 算宽度 b <sub>p</sub> /m	z 方向桩的计 算宽度 b <sub>p</sub> /m	K <sub>x</sub> / (kN · m <sup>-1</sup> )	K <sub>z</sub> / (kN · m <sup>-1</sup> )
古土壤	34.9	33.85	2.1	8 000	1.61	1.52	915 575	864 394
软塑老黄土	38.1	36.50	3.2	8 000	1.61	1.52	1 504 384	1 420 288
古土壤	41.3	39.70	3.2	8 000	1.61	1.52	1 636 275	1 544 806
水下老黄土	46.0	43.65	4.7	8 000	1.61	1.52	2 642 396	2 494 685
古土壤	48.0	47.00	2.0	8 000	1.61	1.52	1 210 720	1 143 040
老黄土	49.3	48.65	1.3	10 000	1.61	1.52	814 596	769 059
古土壤	51.7	50.50	2.4	10 000	1.61	1.52	1 951 320	1 842 240

2.3 桥梁自振特性

桥梁结构的自振特性是结构动力性能的综合反

映<sup>[13-15]</sup>,不考虑和考虑桩—土相互作用时桥梁前 5 阶自振频率、振型特征对比见表 2。

表 2 三跨连续梁桥自振特性对比

阶次	频率/Hz		频率增幅/%	振型特征	
	不考虑桩—土作用	考虑桩—土作用		不考虑桩—土作用	考虑桩—土作用
1	1.8	1.2	-33.3	主梁一阶竖弯+纵飘	主梁一阶竖弯
2	2.9	1.6	-44.8	主梁一阶对称竖弯	主梁一阶对称竖弯+纵飘
3	2.9	1.7	-41.4	主梁一阶对称竖弯+纵飘	主梁一阶对称竖弯+纵飘
4	3.1	2.1	-32.3	主梁一阶对称竖弯	主梁纵飘
5	3.8	2.4	-36.8	主梁纵飘	主梁一阶对称横弯+纵飘

注:频率增幅=(考虑桩—土相互作用时桥梁结构频率-不考虑桩—土相互作用时桥梁结构频率)/不考虑桩—土相互作用时桥梁结构频率×100。

由表 2 可知:考虑桩—土相互作用时,桥梁结构的频率比不考虑桩—土相互作用时减小 32.3%~44.8%,会对地震下动力响应计算产生较大影响。

3 基于 APDL 命令流的高架桥抗震性能分析

以桩—土相互作用的桥梁有限元模型为例,基于 ANSYS 的二次开发平台 APDL 编写命令流。采用两种地震组合作用,分别为横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震、纵桥向  $E_x$  + 竖向  $E_y$  地震。两个水平向( $E_x$ 和 $E_z$ )输入的地震动时程曲线见图 5,加速度最大值为 0.22 m/s<sup>2</sup>,积分步长取 0.01 s,总时长为 10 s,竖向地震作用按横向作用的 65% 计算<sup>[16]</sup>。图 6~10 为横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下桥梁关键截面的位移和内力。

由图 6~10 可知:横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下,考虑桩—土相互作用时,主梁跨中横桥向最大位移中 2<sup>#</sup> 梁的增幅最大,由 0.6 mm 增加到

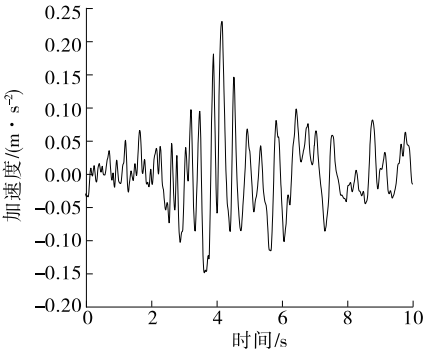


图 5 输入的水平向地震动时程曲线

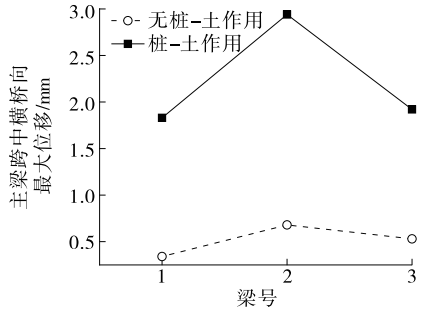


图 6 主梁各跨跨中横桥向最大位移对比

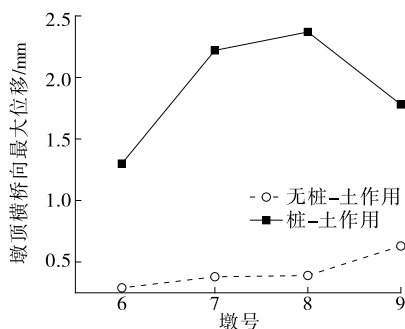


图7 墩顶横桥向最大位移对比

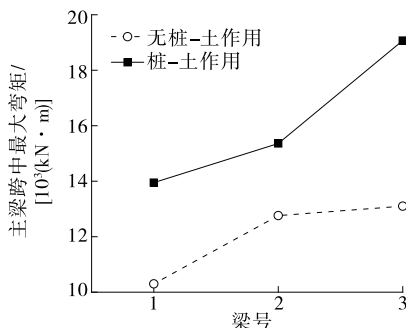


图8 主梁各跨跨中最大弯矩对比

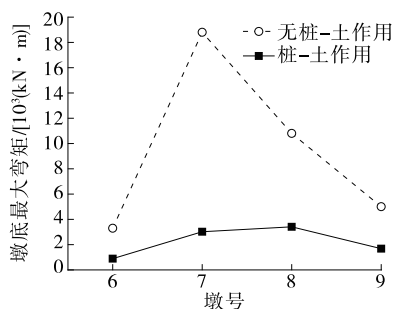


图9 墩底最大弯矩对比

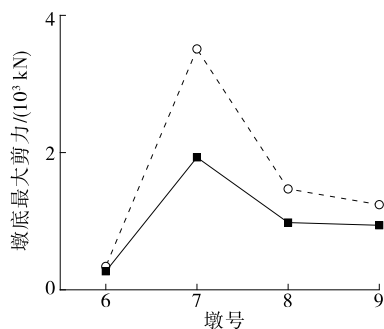


图10 墩底最大剪力对比

2.8 mm,以不考虑桩—土相互作用的模型结果为基准,相对增幅达到 367%。墩顶横桥向最大位移增幅最大的是 8<sup>#</sup>墩,由 0.4 mm 增加到 2.3 mm,相对增幅达到 475%。主梁跨中最大弯矩中 3<sup>#</sup>梁的增幅最大,由  $13.1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$  增加到  $19.1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,相对增幅达到 46%。墩底最大弯矩和最大剪力均

减小,相对减小幅度分别为 68%~84%、21%~45%。

纵桥向  $E_x$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下,两个模型响应差异的变化趋势与横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下变化趋势相似,主梁跨中纵桥向最大位移相对增幅为 43%~55%,墩顶纵桥向最大位移相对增幅为 65%~223%,主梁跨中最大弯矩相对增幅为 4%~35%,墩底最大弯矩相对减小幅度为 21%~84%,墩底最大剪力相对减小幅度为 11%~60%。比较两种地震组合作用,考虑桩—土相互作用时,横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下桥梁地震响应的变化幅值更大,8<sup>#</sup>墩墩顶位移在纵桥向  $E_x$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下的相对增幅为 223%,而在横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下的相对增幅为 475%,相对增幅增大大约 2 倍。

#### 4 结论

针对一座典型的主跨为三跨的高架桥,基于 ANSYS 有限元软件的二次开发平台 APDL,建立考虑和不考虑桩—土相互作用的高架桥分析模型,通过 m 法计算等代土弹簧刚度模拟桩—土相互作用,分析桩—土相互作用对高架桥抗震性能的影响,得出以下结论:

(1) 考虑桩—土相互作用时,高架桥结构基频降低 33.3%,结构刚度大幅下降。

(2) 在地震波的激励下,考虑桩—土相互作用时,桥梁结构关键截面包括主梁跨中和墩顶的位移增大。在横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下,主梁跨中横桥向位移中 2<sup>#</sup>梁的增幅最大,由 0.6 mm 增加到 2.8 mm,相对增幅达 367%;墩顶横桥向位移中 8<sup>#</sup>墩的增幅最大,由 0.4 mm 增加到 2.3 mm,相对增幅达 475%。桩—土相互作用影响桥梁结构的整体稳定性。

(3) 考虑桩—土相互作用时,桥梁结构关键截面的内力变化显著。在横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下,主梁跨中最大弯矩中 3<sup>#</sup>梁的增幅最大,由  $13.1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$  增加到  $19.1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,相对增幅达 46%;墩底最大弯矩和最大剪力均减小,相对减小幅度分别为 68%~84%、21%~45%。桩—土相互作用对桥梁地震响应的影响显著。

(4) 比较两种地震组合作用,两个模型地震响应变化趋势相似,但横桥向  $E_z$  + 竖向  $E_y$  地震组合作用下桥梁地震响应变化幅值更大。

## 参考文献:

- [1] 刘冉冉.地震作用下列车-地铁高架桥耦合振动分析[D].西安:长安大学,2020.
- [2] 王青桥,韦晓,王君杰.桥梁桩基震害特点及其破坏机理[J].震灾防御技术,2009,4(2):167-173.
- [3] BASOZ N, KIREMIDJIAN A S. Damage to bridges from the Northridge earthquake and its consequences on highway system performance[C]//Proceedings of the 7th Proceedings of US/Japan Work on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems. Seattle: EQE International Inc,1998:23-38.
- [4] GAZETAS G, MYLONAKIS G. Seismic soil-structure interaction: New evidence and emerging issues[C]//Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III,1998:1119-1174.
- [5] 江博君,冼巧玲,周福霖.桩土效应对高铁桥梁地震反应的影响分析[J].广州大学学报(自然科学版),2016,15(1):57-63.
- [6] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [7] 燕斌.桥梁桩基础抗震简化模型比较研究[D].上海:同

济大学,2007.

- [8] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.
- [9] 肖晓春,迟世春,林皋.水平地震下土-桩-结构相互作用简化分析方法[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(5):561-564.
- [10] 李强.地震作用下土-桩-桥梁结构动力相互作用研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2018.
- [11] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [12] 王新敏.ANSYS结构动力分析与应用[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [13] 陈令坤,蒋丽忠,陶磊,等.考虑土-桩作用的高速列车-桥梁地震响应分析[J].岩土力学,2012,33(10):3162-3170.
- [14] 刘贝.土-桩-结构相互作用对砼自锚式悬索桥地震响应的影响研究[J].公路与汽运,2020(4):129-134.
- [15] 葛雄,魏征,邓育林.地震作用下多跨简支梁桥挡块优化设计研究[J].交通科学与工程,2021,37(2):47-54.
- [16] 中华人民共和国铁道部.铁路工程抗震设计规范:GB 50111—2006[S].北京:中国计划出版社,2006.

收稿日期:2023-01-04

\*\*\*\*\*  
(上接第121页)

耐磨等优点,在桥梁加固维修、路面改造等项目中具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 程鹏.预应力现浇箱梁裂缝原因分析及预防处理措施[J].北方交通,2017(7):68-70.
- [2] 杨牧盘.支架现浇箱梁顶板开裂原因分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(4):242-244.
- [3] 杨昊,陈干,曾国良.高原高寒地区叠合梁斜拉桥砼桥面板接缝冬季施工温度控制[J].公路与汽运,2018(3):164-165+168.
- [4] 刘伟权.严寒地区铁路箱梁冬期施工温控实例分析[J].低温建筑技术,2020,42(5):147-149.
- [5] 罗阳青,杜召华,蒋鑫,等.连续箱梁顶板裂缝成因分析研究[J].湖南交通科技,2012,38(1):63-66+141.
- [6] 陈兴达.车辆荷载作用下开裂钢筋混凝土梁的动力特性研究[D].天津:天津大学,2017.
- [7] 李子豪.列车荷载作用下铁路混凝土简支梁桥裂缝扩

展性能及规律研究[D].成都:西南交通大学,2021.

- [8] 殷新锋,方志.车辆作用下开裂混凝土连续梁桥的动力响应分析[J].工程力学,2009,26(4):174-180.
- [9] 毛旺涛.大件运输车辆过桥实体车桥耦合振动分析与性能评价研究[D].西安:长安大学,2020.
- [10] 段艳菊.混凝土桥梁水害原因分析与处理[J].特种结构,2020,37(2):118-122.
- [11] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路桥梁加固设计规范:JTG/T J22—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [12] 陈兆军.桥面环氧覆层路用性能及加铺技术研究[J].公路工程,2014,39(4):145-148.
- [13] 李寻,王兴昌,方星,等.薄层环氧桥面铺装材料低温性能研究[J].公路,2011(5):178-181.
- [14] 王兴昌,王凯,范瑛,等.环氧薄层铺装材料耐候性试验研究[J].建材世界,2015(3):68-71.

收稿日期:2022-10-17