

# 轨道约束对简支梁桥弹塑性地震反应的影响<sup>①</sup>

张永亮<sup>1,2</sup>, 陈兴冲<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**结合高速铁路多跨简支梁桥及轨道系统的特点,建立了考虑钢轨、轨道板、轨道扣件摩擦以及桥梁结构的线桥一体化模型,采用非线性时程反应分析研究了轨道约束系统所选桥跨桥墩的弹塑性地震反应影响。结果表明:对相邻墩高相差较大的多跨简支梁桥,轨道约束系统对桥墩的弹塑性地震反应影响较大。建议对此类桥梁应采用线桥一体化模型进行弹塑性地震反应分析。

**关键词:** 轨道约束; 简支梁桥; 弹塑性; 地震反应; 线桥一体化

**中图分类号:** U442.5+5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2012)02-0121-05

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0121

## Influence of Rail Restraint on Elasto-plastic Seismic Response of Simply Supported Girder Bridge

ZHANG Yong-liang<sup>1,2</sup>, CHEN Xing-chong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road & Bridge and Undergroud Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the properties of multi-span simply supported girder bridges and rail system restraints on the high-speed railway, the rail-bridge into an organic whole model is established by considering rail, track slab, friction between rail and fasteners, and bridge structure. The non-linear time history analysis method is adopted to research the influence of rail system restraint on elasto-plastic seismic response of piers for selected spans. The results show that the effect of rail system restraint on elasto-plastic seismic response of multi-span simply supported girder bridge with relatively great differences among the height of adjacent piers is significant, so it is advised for the case that the rail-bridge into an organic whole model should be adopted in elasto-plastic seismic response analysis.

**Key words:** Rail restraints; Simply supported bridge; Elasto-plastic; Seismic response; Rail-bridge into an organic whole model

## 0 引言

在5.12汶川地震中,我国宝成线、陇海线、宝中线及西康线等多座铁路桥梁发生支座破坏、墩身开裂、梁体移位以及轨道严重扭曲等震害,造成铁路交通瘫痪,给震后抗震救灾工作的开展增加了难度。随着我国铁路建设的跨越式发展,高速铁路和客运专线的建设如火如荼。由于高速铁路和客运专线具

有交通流量大、行车密度高、车速快、造价高等特点,一旦在地震中产生破坏,将产生不可估计的损失,因此与普通铁路相比应具有更高的抗震安全性<sup>[1]</sup>。

高速铁路桥梁一般长达几公里甚至几十公里,多采用连续的轨道板以及无缝钢轨,各桥跨间通过轨道板及长钢轨的联结使桥梁的振动具有较强的耦

① 收稿日期:2011-03-10

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1139);铁道部科技研究开发计划项目(2008G031-k)

作者简介:张永亮(1975-),男,副教授,博士生,从事桥梁抗震研究。

联性,对桥梁的地震反应也将产生较大的影响。目前轨道系统的纵向约束对有碴桥梁的动力特性及地震反应的影响已经取得了较多的研究成果:Maragakis 在 Strawberry Park 有碴桥上测定了该桥的频率及阻尼特性,并调查了轨道对该桥动力性能的影响,实验结果表明,当轨道存在时传递到相邻路基上的振动很明显;切断钢轨时,结构纵向、横向及竖向的基频均有所下降<sup>[2]</sup>。罗学海对铁路简支梁桥的实验结果表明轨道在纵桥向对桥梁有较大的约束,在横桥向对桥梁的约束较小<sup>[3]</sup>。文献[4]采用非线性弹簧单元模拟道床的纵向位移阻力关系,建立了地震时桥梁与轨道共同作用的线桥一体化模型,分析了普通铁路上的轨道约束对桥梁纵向抗震性能的影响。文献[5]研究了高架桥上长钢轨对桥梁的纵向约束作用及后继结构对桥梁抗震性能的影响。文献[6]针对高速铁路多跨简支梁桥及轨道系统的特点,建立了考虑钢轨、轨道板以及桥梁结构的线桥一体化模型,采用反应谱法研究了轨道约束系统以及相邻后继结构对所选桥跨弹性地震反应的影响。

由于高速铁路桥梁通常较长,在进行地震反应分析时,通常仅选取典型的一跨或几跨结构进行研究,而忽略轨道系统对结构的纵向约束作用。轨道约束系统在强震下对所选桥跨的桥墩弹塑性地震反应的影响有多大,轨道约束系统能否进入滑动屈服状态,传统的分析模型及分析方法能否保证高速铁路上桥梁的抗震安全性?目前国内外学者对此研究较少。本文依据高速铁路桥梁轨道系统的特点,以某高速铁路多跨简支梁桥为工程背景,通过建立考虑钢轨、轨道板、轨道扣件摩擦以及桥梁结构的线桥一体化模型,研究轨道约束系统对所选取桥跨的弹塑性地震反应的影响。

### 1 分析模型及计算参数

#### 1.1 分析模型

以某高速铁路多跨简支梁桥为工程背景,选取该桥 D399 墩至 D411 墩之间的 13 孔 32 m 简支梁为计算桥跨。桥梁全长 416 m。部分结构立面布置示意图 1。

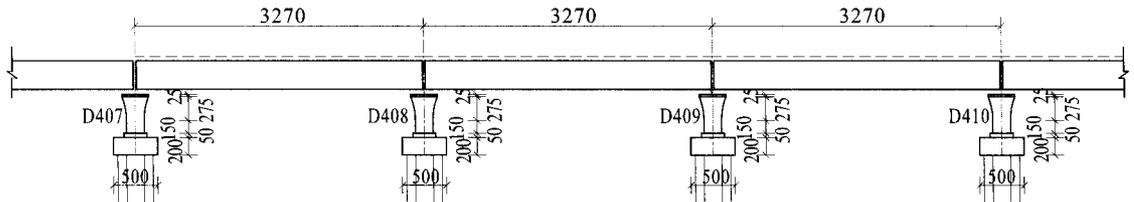


图 1 所选桥梁结构的立面布置(单位:cm)

Fig. 1 Overall arrangement for the selected bridge structure(unit:cm).

桥上 CRTS II 型板式无砟轨道由钢轨,弹性扣件,轨道板、砂浆调整层、连续底座板、滑动层、侧向挡块等部分组成,见图 2。台后路基上设置摩擦板、端刺及过渡板,梁缝处设置硬泡沫塑料板。在距梁体纵向固定支座 1.39 m 处,底座混凝土板与梁体采用齿板连接。

板刚度的全桥简支梁模型,见图 3(a);模型 2—考虑轨道板刚度的全桥简支梁模型,见图 3(b);模型 3—同时考虑轨道板刚度和底座板与主梁、轨道扣件摩擦影响的全桥简支梁模型,见图 3(c)。三种模型中轨道板端的边界条件均为自由边界,在墩底均设置了塑性铰。

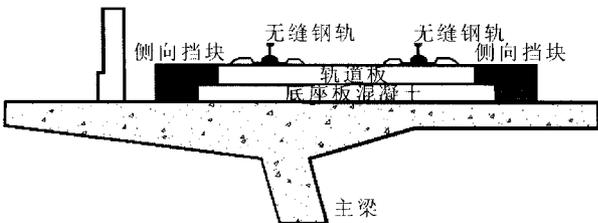


图 2 CRTS II 型板式无砟轨道横截面

Fig. 2 Cross section of CRTS II slab rail without ballast.

为了研究强震下轨道系统对高速铁路多跨简支梁桥弹塑性地震反应的影响,本文建立了三个计算模型进行对比研究。分别为:模型 1—未考虑轨道

#### 1.2 计算参数

模型 1 未考虑钢轨、轨道板与底座混凝土板的刚度贡献,仅考虑其质量影响。模型 2 将钢轨、轨道板与底座混凝土板等效成一个整体截面。模型 3 将钢轨、轨道板与底座混凝土板分别按实际截面分开建模。3 个模型中,钢轨、轨道板与底座混凝土板(或等效成整体截面)、主梁及桥墩均采用三维梁单元模拟。在承台底施加六个线性弹簧模拟地基刚度,其中弹簧参数采用 m 法计算。固定及活动支座采用主从自由度模拟。在距梁体纵向固定支座 1.39 m 处,底座混凝土板与梁体水平向刚性连接,其余

部位只考虑两者间的竖向连接。结构分析模型采用通用有限元 MIDAS 建模。

计算模型中,主要构件的几何及物理参数见表 1。表 1 中,对于主梁,  $I_{yy}$  为主梁截面竖向抗弯惯

性矩,  $I_{zz}$  为主梁截面横桥向抗弯惯性矩。对于桥墩,  $I_{yy}$  为墩身截面横桥向抗弯惯性矩,  $I_{zz}$  为墩身截面纵桥向抗弯惯性矩。

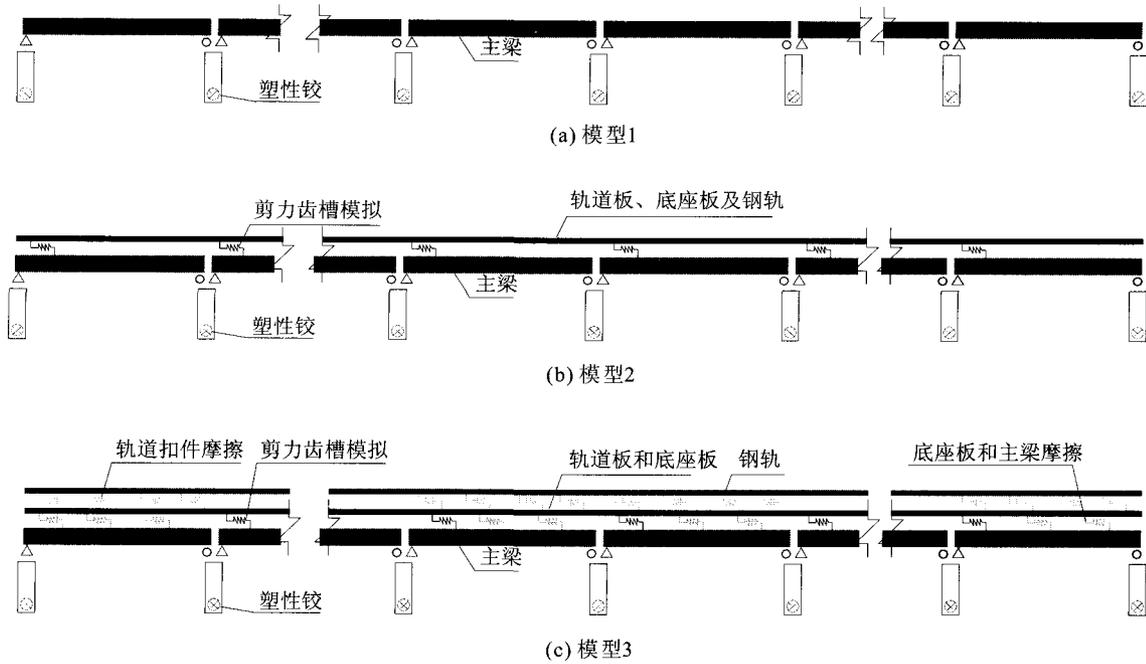


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation models.

表 1 桥梁几何及物理参数

主要构件	材料特性	面积/m <sup>2</sup>	$I_{yy}/m^4$	$I_{zz}/m^4$
主梁	C50 混凝土	8.99	11.50	84.96
桥墩	C35 混凝土	11.14	29.35	3.45
钢轨	钢材	0.007 736	/	/
轨道板	C60 混凝土	0.51	/	/
底座板	C30 混凝土	0.649	/	/
底座板与桥梁固结刚度 / [kN · m <sup>-1</sup> ]	1 × 10 <sup>9</sup>	/	/	/
端刺纵向刚度 / [kN · m <sup>-1</sup> ]	1 × 10 <sup>8</sup>	/	/	/

根据文献[7、8]提供的设计资料:模型 3 中钢轨扣件之间以及底座板和桥梁之间的摩擦采用理想弹塑性力学模型模拟,其力学参数的计算方法如下:

(1) 钢轨与轨道板—钢轨扣件之间的力学参数  
 无载时:纵向摩阻  $F=30 \text{ kN/m}$ , 极限位移为  $u_x=0.000 5 \text{ m}$ 。

(2) 底座板和桥梁之间的力学参数  
 无载时:极限位移  $0.000 5 \text{ m}$ , 极限阻力  $F=\mu N=\mu(\gamma(A_1+A_2)+8.24) \text{ kN/m}$ 。式中,  $A_1$  为轨道板截面积;  $A_2$  为底座板截面积;  $\gamma$  为钢筋混凝土容重, 取  $25 \text{ kN/m}^3$ ;  $\mu$  为摩擦系数。

以上弹簧参数在 MIDAS 中输入时, 极限阻力为  $F \times L$ ,  $L$  为模型中的弹簧间距。采用滑动摩擦单

元模拟。本文仅考虑无载时钢轨扣件之间的摩擦影响及底座板和桥梁之间的摩擦影响。模型 3 中每跨设置 4 个非线性弹簧, 弹簧间间隔  $L=8 \text{ m}$ 。

弹塑性分析时, 滞回模型采用 Takeda 模型, 该模型骨架曲线包含开裂、屈服与极限三点。假定墩底截面的配筋率为  $0.5\%$ , 配箍率为  $0.3\%$ 。骨架曲线各控制点坐标采用截面分析程序 Ucfyber 计算。塑性铰长度参考文献[6]计算。地震反应分析中, 地震波从承台底沿顺桥向输入。时程分析中选用 El-centro 和 Taft 强震记录, 将幅值调整为  $0.2 \text{ g}$ 。

## 2 轨道系统对桥梁弹塑性地震反应的影响

为了系统研究轨道系统对高速铁路多跨简支梁桥弹塑性地震反应的影响,本文分两种情形进行了讨论。工况1为各墩墩高相近,分别为5.5 m,4.5

m和5 m不等;工况2将D404、D405、D406的各墩墩高在原墩高的基础上分别增大2倍、4倍、2倍,其它墩高保持不变,见图4。

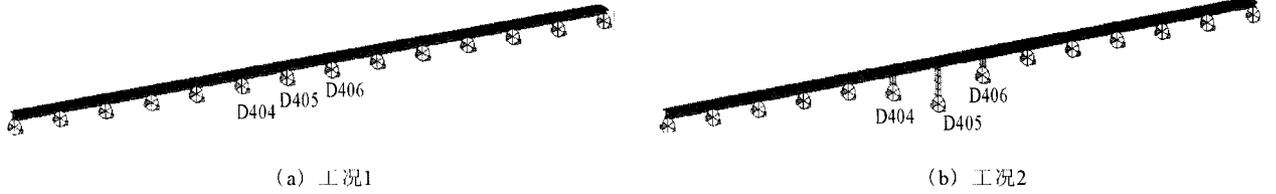


图4 不同工况的计算模型

Fig. 4 Calculation models for different cases.

在各墩墩底截面均设置了塑性铰,设各墩底截面的塑性铰实际曲率为 $D$ ,截面的开裂曲率为 $D_1$ , $D/D_1$ 的计算结果见表2及表3。

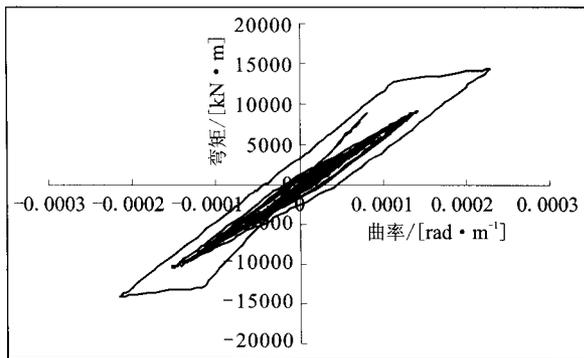
表2 输入 Elcentro 波  $D/D_1$  计算结果

墩号	工况1			工况2		
	模型1	模型2	模型3	模型1	模型2	模型3
D399	10.99	10.33	9.93	11.1	10.5	10.31
D400	11.17	10.33	10.02	11.1	10.5	10.40
D401	10.04	9.53	9.26	10.1	9.9	9.94
D402	10.04	9.69	9.48	10.1	10.3	10.40
D403	10.08	9.82	9.67	10.1	11.0	11.10
D404	10.04	9.90	9.83	8.6	5.8	5.66
D405	10.07	9.96	9.96	6.9	2.0	1.95
D406	10.07	10.02	10.08	8.6	5.8	5.78
D407	10.05	10.09	10.21	10.2	11.3	11.57
D408	10.06	10.15	10.33	10.1	10.8	11.01
D409	10.08	10.18	10.43	10.1	10.4	10.55
D410	10.03	10.22	10.54	10.1	10.4	10.50
D411	10.04	10.23	10.62	10.1	10.3	10.58

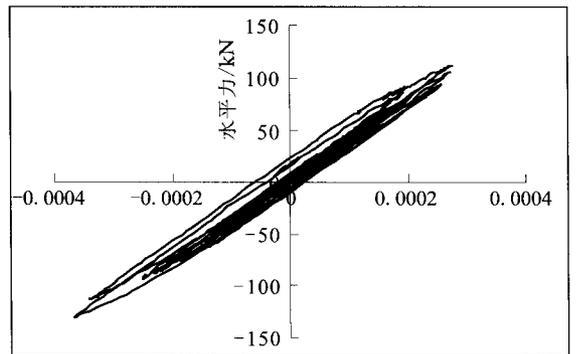
表3 输入 Taft 波  $D/D_1$  计算结果

墩号	工况1			工况2		
	模型1	模型2	模型3	模型1	模型2	模型3
D399	5.33	4.36	3.99	5.3	6.7	6.30
D400	5.31	4.22	3.96	5.3	6.7	6.38
D401	4.42	4.17	3.88	4.4	6.2	6.18
D402	4.45	4.20	4.00	4.5	6.6	6.68
D403	4.45	4.33	4.18	4.4	7.0	7.02
D404	4.44	4.49	4.35	6.2	4.5	4.40
D405	4.45	4.61	4.52	5.6	1.0	0.98
D406	4.45	4.69	4.66	6.2	4.5	4.50
D407	4.44	4.74	4.78	4.5	7.1	7.22
D408	4.45	4.77	4.88	4.5	6.6	6.98
D409	4.45	4.80	4.98	4.5	6.3	6.73
D410	4.44	4.85	5.11	4.5	6.2	6.43
D411	4.42	4.86	5.14	4.4	6.2	6.33

限于篇幅,模型3仅给出在 Elcentro 波作用下,典型的墩底弯矩一曲率滞回曲线及底座板与主梁的摩擦单元的滞回曲线,见图5。



(a) 墩底弯矩一曲率



(b) 底座板与主梁的摩擦单元

图5 部分滞回曲线

Fig. 5 Some hysteretic curves.

在 Elcentro 及 Taft 地震波作用下,从表2、表3及图5中可以看出:(1)对工况1,各墩身均已开裂但未进入屈服(屈服状态为  $DY/D1 \geq 1.32E-3/1.05E-4 = 12.57$ ),且三种模型的计算结果较为接

近。说明对于墩高接近的多跨简支梁进行强震下的墩身弹塑性地震反应分析时,可以不考虑轨道板的纵向约束,而将其简化为单墩模型进行分析。(2)对工况2,各墩身均已开裂但未进入屈服,三种模型的

计算结果相差较大。考虑轨道板的纵向约束作用后,在墩高变化的D404~D406墩身的延性系数明显降低,而其临近的矮墩的延性系数明显增大。说明对于墩高相差较大的多跨简支梁,进行墩身弹塑性地震反应分析时,应建立全桥有限元模型,以便充分考虑轨道板的纵向约束影响。(3)底座板与主梁的摩擦单元还未完全进入屈服,底座板与主梁之间的相对滑动位移较小( $<0.5\text{ mm}$ ),耗能能力还不明显,轨道扣件的摩擦单元仍处在弹性状态,因此轨道扣件及底座板与主梁的摩擦对结构的地震反应影响较小。

### 3 结论

本文采用线桥一体化模型,针对轨道系统对高速铁路多跨简支梁桥弹塑性地震反应的影响进行了数值分析,可得出如下结论:

(1)对于墩高接近的多跨简支梁,轨道板的纵向约束作用对墩身的弹塑性地震反应影响较小。进行墩身弹塑性地震反应分析时可以不考虑轨道板的纵向约束,而将其简化为单墩模型进行分析。

(2)对于墩高相差较大的多跨简支梁,轨道板的纵向约束作用对墩身的弹塑性地震反应影响较大。高墩墩身的延性系数明显降低,而其临近矮墩的延性系数明显增大,但随着桥墩延性的增大,轨道

板的约束作用对桥墩的弹塑性反应影响呈减小的趋势。因此对于墩高相差较大的多跨简支梁进行强震下的墩身弹塑性地震反应分析时,应建立线桥一体化模型,以充分考虑轨道板的纵向约束影响。

(3)在强震下,底座板与主梁的摩擦单元、轨道扣件的摩擦单元基本处在弹性状态,耗能能力有限。因此进行强震下的墩身弹塑性地震反应分析时,可以忽略底座板与主梁及轨道扣件的摩擦影响。

### 【参考文献】

- [1] 张永亮,陈兴冲,夏修身.行波效应对铁路大跨连续刚构桥地震反应的影响[J].西北地震学报,2010,32(3):268-272.
- [2] Maragakis E. Full-Resonance Tests of a Railway Bridge[A]//Structures Congress—Proceedings 1[C].ASCE,1996:183-190.
- [3] 罗学海,朱葳,谢逢萱.铁路实体桥墩动力分析的简化方法[J].地震工程与工程振动,1982,2(3):87-95.
- [4] 黄艳,阎贵平,刘林.轨道约束对铁路桥梁纵向地震反应特性的影响[J].铁道学报,2002,24(5):124-128.
- [5] 马坤全,陈文艳.轨道交通高架桥合理抗震设计参数及抗震措施研究[J].中国铁道科学,2001,22(4):63-68.
- [6] 张永亮,陈兴冲,李子奇.轨道约束系统对高速铁路多跨简支梁桥地震反应的影响[J].世界地震工程,2010,26(4):6-12.
- [7] 铁路工程抗震设计规范(GB50111-2006)[C].北京:中国计划出版社,2006.
- [8] 郑健.中国高速铁路桥梁[M]北京:高等教育出版社,2008.