

高速铁路大跨连续梁桥地震反应分析及抗震校核

张永亮^{1,2}, 孙建飞², 徐家林²

(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:针对高速铁路大跨连续梁桥的结构特点,结合三水准的抗震设防目标,给出了各水准下桥梁的抗震验算指标。采用反应谱法及弹塑性时程反应分析法对一实桥进行了地震反应分析及抗震性能评价。结果表明固定墩控制该桥的抗震设计。在多遇地震作用下固定墩处于弹性状态;在罕遇地震作用下固定墩纵向进入塑性,但位移延性系数小于规范容许值,结构具有较高的延性储备。该桥的抗震能力满足三水准抗震设防目标。

关键词: 高速铁路; 连续梁桥; 地震反应; 延性; 时程反应分析

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0226-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0226

Analysis of Seismic Response and Seismic Checking in A Long-span Continuous Beam Bridge on a High-speed Railway

ZHANG Yong-liang^{1,2}, SUN Jian-fei², XU Jia-lin²

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

Abstract: Considering that earthquakes occur frequently in China, four vertical and four horizontal high-speed railway networks are planned, and 23 provincial capital cities and two-thirds of the cities with populations of more than a million are located in regions of high seismic intensity, seismic design is the controlling factor in the design of high-speed railway bridges. The differences between a high-speed railway bridge and a highway or common railway bridge lie in the following aspects: First, pier, bearing system, and displacement restrictions are required to strictly ensure that high-speed trains remain on the rails. Second, bridges make up a large proportion of the high-speed railway, and most of these bridges are viaducts and long. Third, the high-speed railway will have a major impact, being traffic intensive, high speed, high cost, and so on. Fourth, gravity piers (or hollow piers) are generally used in the substructures of such bridges, and these piers often have large section size and low reinforcement ratio. The long-span continuous bridge is the most widely used bridge type in Chinese high-speed railway construction, and the structural form of "multiple spans as one unit" is often used in this bridge type, with only one fixed pier per unit. Under earthquake force, the inertial force of the superstructure is mainly exerted on the fixed pier, so the fixed pier must meet the requirements of strength and ductility. For this reason, most fixed piers of long-span continuous bridges are reinforced concrete gravity piers. Under frequent earthquake action, piers are required to be elastic, and strength failure criterion can be

收稿日期:2013-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51108220);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1139)

作者简介:张永亮(1975-),男,副教授,博士生,从事桥梁抗震研究。Email: zhangyong_L@126.com

used to check piers. Under rare earthquake action, because a pier would be in a plastic state, the deformation failure criteria would be used. The seismic checking index for each level is combined with the three-level seismic fortification goal based on the structural characteristics of a long-span continuous beam high-speed rail bridge. A seismic response analysis was performed on an actual bridge by use of a response spectrum method, and elasto-plastic history response analysis and seismic performance evaluation were also conducted. The results showed that the seismic design of the bridge was controlled by the fixed pier. The fixed pier is in an elastic state under low-level earthquake conditions. Under high-level earthquake conditions, however, it enters a plastic state in the longitudinal direction, but the displacement ductility factor is less than the allowable value so it has sufficient ductility capability in reserve. Therefore, the seismic capacity of the bridge meets the three-level seismic fortification goal.

Key words: High-speed railway; Continuous beam bridge; Seismic response; Ductility; Time-history analysis

0 引言

我国是一个多地震的国家,规划中的四纵四横高速铁路网以及 23 个省会城市和 2/3 的百万人口以上的大城市均地处高烈度地震区,因而抗震设计往往成为高速铁路桥梁设计中的控制因素^[1-3]。如唐山地震(1976)、汶川地震(2008)及玉树地震(2010)都给我国人民的生命及财产带来了巨大损失,也造成了交通生命线工程的严重破坏,严重影响了震后的抢险救灾及恢复重建^[4-5]。

高速铁路桥梁与公路、普通铁路桥梁相比不同之处在于^[6]:(1)为保证列车高速平稳运行,桥墩、支座体系刚度要求高,位移限制严格,这也意味着其要承受更大的地震荷载;(2)桥梁比例大,高架桥、长桥多;(3)行车密集,车速快;(4)下部结构主要采用重力式桥墩(或空心墩),墩身截面尺寸大,配筋率相对较低。5·12 汶川地震后我国对《铁路工程抗震设计规范》(2006)进行了局部修订,为了体现高速铁路桥梁的重要性,规定了采用地震作用重要性系数 C_i 以提高其抗震设防标准。

本文针对高速铁路大跨连续梁桥的结构特点,结合三水准的抗震设防目标,讨论了各水准下桥梁的抗震验算指标。采用反应谱法及弹塑性时程反应分析方法对一桥梁实例进行地震反应分析,并根据 2009 年修订版《铁路工程抗震设计规范》对该桥的抗震性能进行评价。

1 抗震设防目标及验算方法

铁路工程抗震设计规范实行了“三水准设防”的多级抗震设防理念,即在多遇地震(50 年超越概率 63.2%)作用下桥梁的抗震性能应达到性能水准 I

(地震后不损坏或轻微损坏,能够保持其正常使用功能);在设计地震(50 年超越概率 10%)作用下桥梁的抗震性能应达到性能水准 II(地震后可能损坏,经修补,短期内能恢复其正常使用功能);在罕遇地震(50 年超越概率 2%~3%)作用下桥梁的抗震性能应达到性能水准 III(地震后可能产生较大破坏,但不出现整体倒塌,经抢修后可限速通车)。

在实际工程的具体抗震设计中,三水准设防目标主要通过两阶段的抗震设计实现,即在多遇地震作用下对桥梁进行强度验算;在罕遇地震作用下对桥梁进行变形能力验算,从而达到“小震不坏,大震不倒”的设防目标。

大跨度连续梁桥是我国高速铁路建设中广泛使用的桥型之一,这种桥型大多采用“多跨一联”的结构形式,在一联桥跨中通常仅设置一个固定墩。在地震荷载作用下,由于上部结构的惯性力主要由固定墩承担,因此固定墩必须满足强度及延性的要求,因此大跨连续梁桥固定墩大多采用钢筋混凝土重力式桥墩。对于钢筋混凝土重力式桥墩,结合两阶段的抗震设计,具体的验算指标如下:

(1) 应力验算

在多遇地震作用下,要求桥墩基本处于弹性状态,可采用强度破坏准则校核。采用容许应力法按偏心受压构件对墩底控制截面的钢筋拉应力及混凝土压应力进行验算,验算公式为

$$\sigma_g \leq \xi[\sigma_g]; \quad \sigma_c \leq \xi[\sigma_c] \quad (1)$$

式中, σ_c 、 σ_g 为地震作用下控制截面的混凝土最大压应力及钢筋最大拉应力; $[\sigma_c]$ 、 $[\sigma_g]$ 为混凝土及钢筋的容许应力; ξ 为地震时的容许应力修正系数, $\xi = 1.5$ 。

(2) 变形验算

在罕遇地震作用下,由于桥墩此时已处于塑性状态,此时强度破坏准则失效,应采用变形破坏准则进行校核。规范采用位移延性系数作为指标,验算公式为

$$\mu_{\mu} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \leq [\mu_{\mu}] \quad (2)$$

式中, μ_{μ} 为非线性位移延性比; $[\mu_{\mu}]$ 为允许位移延性比; Δ_{\max} 、 Δ_y 分别为桥墩的非线性响应最大位移及屈服位移。

2 工程概况及动力分析模型

2.1 工程概况

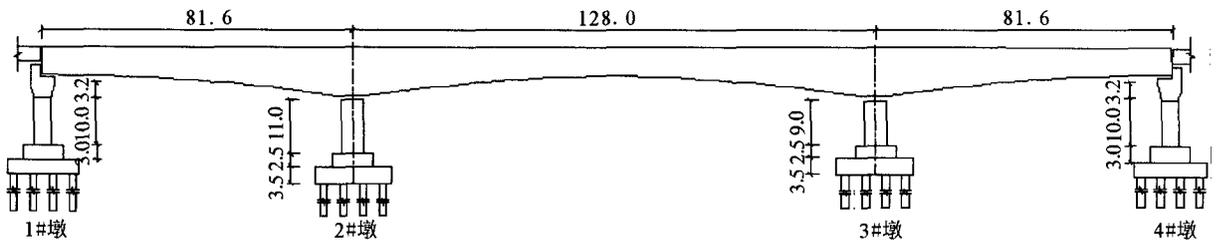


图1 全桥总体布置(单位:m)

Fig.1 General sketch of the bridge (unit:m).

2.2 动力分析模型

采用有限元软件建立全桥三维有限元模型。梁、墩及承台均采用空间梁单元模拟,考虑邻跨简支梁质量的影响,利用集中质量单元实现。顺桥向施加在边墩墩顶,质量大小为邻跨简支梁的质量和二期恒载质量之和;横桥向施加在边墩主梁横截面中心处,质量大小为邻跨简支梁的质量和二期恒载质量之和的一半。二期恒载按照 210 kN/m 考虑,桥面铺装按照集中质量的形式均匀分配在结点上。将

本文以京沪高速铁路一座大跨度连续梁桥为工程实例。该桥主桥为(80+128+80) m 双线连续箱梁桥,引桥为 32 m 预应力混凝土简支梁桥。下部结构为圆端形实体桥墩,基础为钻孔灌注桩,地基土以粉砂及粉质粘土为主,地震基本烈度Ⅶ度。主梁断面采用单箱单室结构,中墩处梁高为 9.6 m,跨中及边墩处梁高均为 5.6 m,中间采用二次抛物线型渐变。箱梁顶板总宽 13.4 m,底板总宽 7.0 m。上部箱梁采用 C50 混凝土,桥墩及桩基础均采用 C30 混凝土。采用盆式橡胶支座,3#墩为固定墩。全桥总体布置图见图 1。

地基土对结构的约束作用简化成线性弹簧施加在承台底,考虑平动、转动及耦联弹簧刚度的影响,采用 m 法计算,地基系数的比例系数取 20 000 kPa/m²。支座采用主从自由度模拟,固定墩约束纵桥向、横桥向及竖向 3 个平动自由度及绕纵桥向的转动自由度,活动墩约束横桥向及竖向 3 个平动自由度及绕纵桥向的转动自由度。全桥空间动力分析模型见图 2。



图2 动力分析模型

Fig.2 Dynamic analysis model of the bridge.

3 多遇地震作用下地震反应分析及强度验算

多遇地震作用下,结构地震反应分析采用振型分解反应谱分析,地震动输入为安评报告提供的反应谱,设计加速度反应谱 $\beta(T)$ 形式如下:

$$\beta = \begin{cases} 1 + 10(\beta_{\max} - 1)T & 0 < T \leq 0.1 \\ \beta_{\max} & 0.1 < T \leq T_g \\ \beta_{\max} \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma & T_g < T \leq 5T_g \\ 0.45 & T > 5T_g \end{cases} \quad (3)$$

式中:系数 $\gamma=1.07$; T 为反应谱周期; β_{\max} 为反应谱最大值, $\beta_{\max}=2.50$; T_g 为反应谱特征周期, $T_g=0.5$ s。地面峰值加速度 $PGA=0.038$ g,地震影响

系数的最大值 $\alpha_{max} = 0.095$ 。

由于该桥主跨跨度为 128 m 大于 40 m, 根据震规, 多遇地震下重要性系数 C_i 应取 1.5。将反应谱分别沿纵、横桥向输入, 取前 100 阶振型, 组合方法采用 SRSS^[7], 得到的桥梁面内、面外弯矩分布规律见图 3。从图中可以看出, 3# 固定墩的地震反应最

大, 控制该桥的抗震设计。

在墩高相对较矮的条件下, 通常墩底截面为抗震设计的控制截面。将多遇地震作用下分析得到的结构地震反应量值与恒载作用下的反应进行组合, 得到墩底截面的组合内力及验算结果见表 1。可以看出:

表 1 桥墩地震反应及验算

Table 1 Seismic response of pier and checking

计算方向	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/kN·m	配筋率	σ_c /MPa	σ_g /MPa
纵向	107 060	22 944	216 130	0.3%	13.8	226
横向	107 060	12 017	166 566	/	4.3/-0.1*	/

(注: * 表示假设墩身为素混凝土时, 截面的最大拉应力)

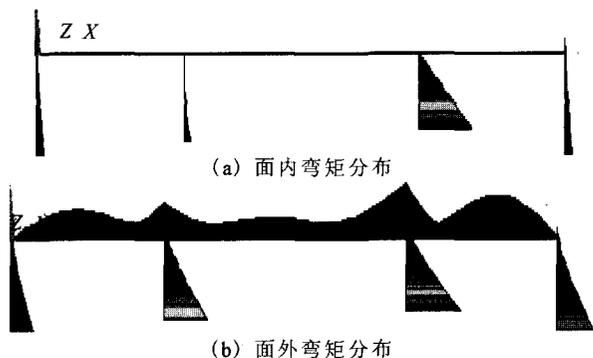


图 3 桥梁面内和面外弯矩分布图

Fig. 3 Distribution of moment on both in-plane and out-plane of bridge.

(1) 对于大跨度连续梁桥而言, 由于支座纵、横向约束方式的不同, 导致固定墩纵桥向的抗震性能控制桥梁的抗震设计;

(2) 在多遇地震作用下, 3# 固定墩的配筋率为 0.3% 时, $\sigma_c = 13.8$ MPa, 小于 15.0 MPa; $\sigma_g = 226$ MPa, 小于 270 MPa。表明墩身弹性工作状态能满足“小震不坏”的抗震设防目标。

4 罕遇地震作用下地震反应分析及变形能力验算

4.1 桥墩位移延性能力计算

在桥梁延性抗震设计中, 延性桥墩的位移延性主要来自塑性铰区截面的塑性转动能力。数量足够、配置合理的横向箍筋和纵向钢筋一起, 对核心混凝土起到约束, 并能够有效地限值混凝土的横向膨胀, 维持核心混凝土的完整, 提高核心混凝土的极限压应变, 阻止纵向受压钢筋可能出现的屈曲。

在墩底截面刚刚屈服时, 可认为曲率沿墩高成线性分布, 则墩顶屈服位移为

$$\Delta_y = \frac{1}{3} \varphi_y H^2 \quad (4)$$

在墩底截面达到极限状态时, 按照 Park 等人提出的“等效塑性铰长度”概念计算^[8]。即假设在墩底附近存在一个长度为 L_p 等塑性曲率段, 在该段长度范围内截面的塑性曲率恒等于墩底截面的最大塑性曲率 φ_p , 桥墩以等效塑性铰区的中点为塑性转动中心。

按照等效塑性铰长度的概念, 在墩底截面达到极限状态时, 墩顶的极限位移为

$$\Delta_p = \frac{1}{3} \varphi_y H^2 + L_p (\varphi_u - \varphi_y) (H - 0.5 L_p) / K \quad (5)$$

式中, L_p 为等效塑性铰长度^[8]; 取 $K = 2.0$; φ_y, φ_u 分别为墩底截面屈服曲率及极限曲率。

桥墩的位移延性能力可表示为

$$[\mu_\mu] = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (6)$$

钢筋的应力—应变关系采用曲线强化模型, 可以比较准确地描述钢筋的大变形特性, 约束混凝土应力—应变关系曲线采用 Mander 模型。尽管在多遇地震作用下, 3# 墩配筋率为 0.3% 时即可满足“小震不坏”, 但在罕遇地震下为保证桥墩的延性能力现行震规要求墩身钢筋混凝土桥墩的最小配筋率不低于 0.5%, 因此本桥的纵筋 (HRB335) 配筋率取为 0.57%。采用条带法对墩底截面的纵向进行了全过程分析, 根据等能量法确定了骨架曲线上的控制点, 分析结果见表 2。

表 2 3# 墩底截面弯矩—一曲率

Table 2 M— φ of the bottom section of 3# pier

屈服弯矩	屈服曲率	极限弯矩	极限曲率
/[kN·m]	/[rad·m ⁻¹]	/[kN·m]	/[rad·m ⁻¹]
3.89E+05	6.67E-04	4.01E+05	12.3E-03

由式(4)~式(6), 可计算得 $\Delta_y = 0.0291$ m, $\Delta_u = 0.195$ m, 桥墩的位移延性能力 $[\mu_\mu] = \Delta_u / \Delta_y =$

6.70 > 4.8 (规范给出的允许位移延性比)。

4.2 桥墩位移延性验算

输入桥址场地安评报告提供的50年超越概率为2%的3条地震波,峰值加速度 $PGA=0.2g$ 。其中一条典型的加速度时程曲线见图4。在3#固定墩墩底沿纵桥向设置塑性铰,塑性铰的滞回规则采用Clough模型,结构的阻尼采用Rayleigh阻尼矩阵,应用Newmark- β 法逐步积分求解,分析时间步长为0.01s。罕遇地震第一条安评地震波作用下墩顶位移的时程反应曲线见图5,墩底剪力-墩顶位移的滞回曲线见图6,桥墩的延性能力验算结果见表3。

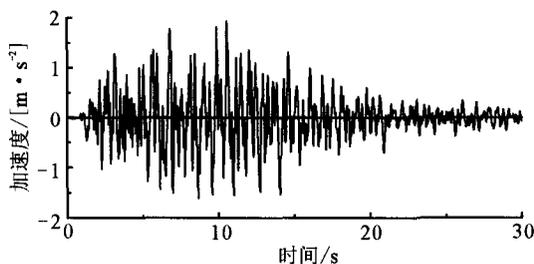


图4 典型的加速度时程曲线

Fig. 4 A high-level earthquake acceleration wave.

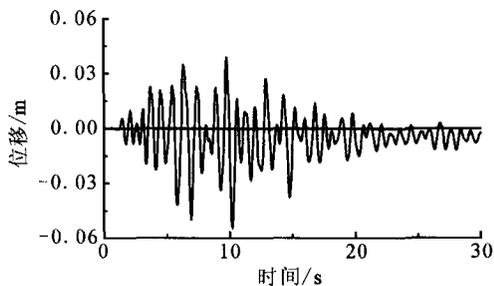


图5 墩顶位移时程曲线

Fig. 5 Displacement-time history curve of the pier top.

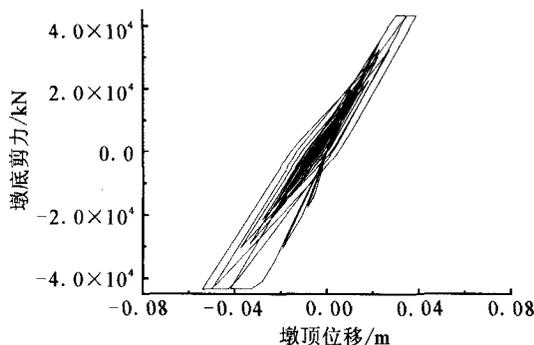


图6 墩底剪力-墩顶位移滞回曲线

Fig. 6 Force-displacement hysteresis curve of the pier top.

表3 3#墩纵向位移延性验算

Table 3 Checking on longitudinal displacement ductility of 3# pier

输入地震动	Δ_{max}/m	μ_{μ}	$[\mu_{\mu}]$
第一条	0.058	1.99	4.8
第二条	0.064	2.20	4.8
第三条	0.065	2.23	4.8

从表3可知,在罕遇地震作用下,墩身纵桥向已进入屈服状态,但墩顶的最大位移延性比均小于规范允许的位移延性比,说明该桥能够满足规范“大震不倒”的抗震设防目标。

本文还对3#固定墩横桥向进行了罕遇地震下的弹性地震反应分析,并采用允许应力法进行了校核。分析得到钢筋的最大拉应力为256.1MPa,混凝土的最大压应力为14.2MPa,均小于材料对应的允许应力值,表明3#固定墩横桥向基本处于弹性状态。

5 结语

本文以京沪高速铁路一座大跨度连续梁桥为实际工程背景,针对重力式钢筋混凝土桥墩的结构特点,采用反应谱法及弹塑性时程反应分析方进行了弹性及弹塑性地震反应分析,并根据《铁路工程抗震设计规范》对连续梁固定墩的抗震性能进行了评估。分析结果表明,固定墩控制该桥的抗震设计。在多遇地震作用下桥梁结构处于弹性状态;在罕遇地震作用下固定墩纵向进入塑性状态,但墩顶最大位移量值均在能力容许范围内,具有较高的延性储备。该桥能够满足三水准抗震设防目标。研究方法可供同类结构的抗震设计参考。

【参考文献】

- [1] 苗林,陈兴冲. 西小坪预应力连续箱梁桥抗震分析[J]. 兰州交通大学学报,2007,26(1):52-55.
MIAO Lin, CHEN Xing-chong. Seismic Analysis of Xixiaoping Pre-stress Concrete Continuous Box Girder Bridge[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2007,26(1):52-55.
- [2] 戴晓春,袁明,何庭国. 高速铁路长联大跨连续梁桥地震响应分析[J]. 桥梁建设,2006,(2):144-146.
DAI Xiao-chun, YUAN Ming, HE Ting-guo. Seismic Response Analysis of Long Span and Long Unit Continuous Girder Bridges on High Speed Railways[J]. Bridge Construction, 2006,(2):144-146.
- [3] 嵇一,王菲. 罕遇地震城际铁路连续梁桥延性抗震设计[J]. 铁道工程学报,2012,(4):66-72.
ZHUO Yi, WANG Fei. Seismic Ductility Design for Intercity Railway Continuous Bridge Under Rare Earthquake[J]. Jour-

- nal of Railway Engineering Society, 2012, (4): 66-72.
- [4] 邓小伟. 基于两水平设防的连续梁桥抗震性能分析[J]. 石家庄铁道大学学报, 2012, 25(4): 39-42.
DENG Xiao-wei. Seismic Performance Analysis of Continuous Girder Bridge Based on Two-level Design Approach[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 2012, 25(4): 39-42.
- [5] 苏虹, 胡世德. 连续梁桥的抗震性能分析[J]. 结构工程师, 2002, (2): 36-40.
SU Hong, HU Shi-de. Seismic Analysis of the Continuous Beam Bridge[J]. Structural Engineers, 2002, (2): 36-40.
- [6] 张永亮, 陈兴冲. 轨道约束对简支梁桥弹塑性地震反应的影响[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 121-125.
ZHANG Yong-liang, CHEN Xing-chong. Influence of Rail Restraints on Elasto-plastic Seismic Response of Simply Supported Girder Bridge[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 121-125.
- [7] 吴小峰, 孙启国, 狄杰建, 等. 抗震分析反应谱法和时程分析法数值仿真比较[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 275-278.
WU Xiao-feng, Sun Qi-guo, Di Jie-jian, et al. A Numerical Simulation Comparison between Response Spectrum Analysis and Time History Analysis[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 275-278.
- [8] R Park, et al. Bridge Manual of Transit New Zealand (second edition 2003)[S]. 2005.