

基于两水平设防的连续梁桥抗震性能分析

邓小伟

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海 200092)

摘要: 根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)中的抗震设防新理念和新方法,以Ⅶ度区某连续梁桥为工程背景,建立了弹塑性有限元模型,依次进行了动力特性分析、地震反应谱分析和非线性时程分析,揭示了两级地震作用下桥梁的受力及变形情况,并对桥梁的抗震性能进行了评价,可供桥梁抗震设计参考。

关键词: 两水平设防; 弹塑性有限元; 反应谱; 非线性时程; 延性抗震设计

中图分类号: U448.21 文献标识码: A 文章编号: 2095-0373(2012)04-0039-04

0 引言

我国是一个地震多发的国家。2008年5月12日的汶川地震给我国人民的生命财产造成了巨大的损失,同时造成了交通生命线工程的严重破坏,公路、桥梁、隧道各类交通基础设施损毁的直接经济损失达670亿元,其中桥梁损毁最为严重。同时,遭受破坏的大型桥梁修复起来比较困难,严重影响灾区生产生活和灾后的重建工作^[1]。

桥梁抗震设计规范是一个国家桥梁抗震设计的依据,对桥梁的抗震安全至关重要。因此,各个国家都会根据最新的抗震研究成果和震害经验,不断地对抗震设计规范进行修订^[2]。汶川地震后,交通部颁布实施了《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008),相对于原《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89)规范,细则在适用范围、设防目标和设防标准、设计和分析方法等方面均作了大量的修订和改进。特别是在设计理念和方法上有重大改进,采用了两水平设防、两阶段设计的抗震设计思想,引入了先进的延性抗震设计方法和能力保护设计原则,实现了和国际先进水平的接轨。

1 工程背景

航三公路S2跨线桥主桥采用预应力混凝土连续梁,跨径布置为35 m + 50 m + 35 m = 120 m,中墩采用双柱式框架墩,边墩采用三柱式框架墩,基础采用钻孔灌注桩,如图1。

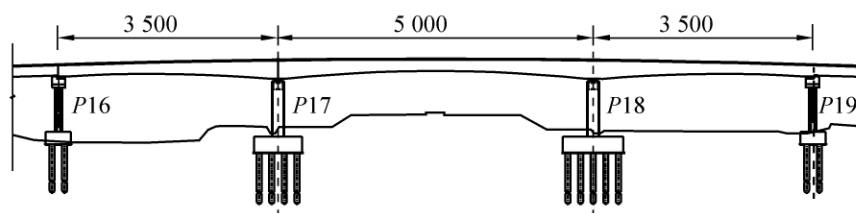


图1 主桥总体布置图(单位: cm)

主桥横断面分左、右两幅,由两个箱梁组成。单个箱梁断面采用单箱双室结构,中墩处梁高为2.9 m,跨中及边墩处梁高均为1.8 m,中间采用二次抛物线型渐变。单个箱梁顶板总宽16.15 m(防撞墙外包15 cm),底板总宽9.3 m,挑臂长度分别为3.5 m和3.35 m。

上部箱梁采用C50混凝土,中墩采用C40混凝土,边墩、所有承台及桩基础均采用C30混凝土。墩梁

收稿日期: 2012-09-17

作者简介: 邓小伟 男 1986年出生 工程师

间采用盆式支座: P17 墩处纵桥向与横桥向均限制; P16、P18 以及 P19 墩处纵桥向活动, 横桥向限制。

2 抗震设防标准与性能目标

本工程按地震烈度 7 度设防, 场地类型为 IV 类, 水平向设计基本地震动加速度峰值 $0.1g$ 。根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008), 主桥抗震设防类别为 B 类, 抗震重要性系数: E1 取 0.5, E2 取 1.7。本桥设计地震动加速度反应谱如图 2。

根据细则, 本桥抗震设防目标应为: 小震不坏, 大震不倒。对于基础、盖梁等重要或难以修复的构件, E1 地震下构件须保持在弹性范围工作, 基本不发生损伤; E2 地震下作为能力保护构件设计, 基本不发生损伤。对于桥墩等比较容易修复的构件, E1 地震下构件同样须保持在弹性范围工作, 基本不发生损伤; E2 地震下可发生一定的损伤, 但应具有足够的变形能力和抗剪能力, 保证结构不倒塌, 震后可以修复, 可供紧急救援车辆通过, 即桥墩可进行延性设计^[3]。

3 有限元模型及动力特性分析

进行桥梁地震反应分析, 首先要建立准确的动力有限元模型。本桥为连续梁桥, 上部结构的刚度模拟不需要太精细, 一般不需要采用三维实体单元或板单元, 而是采用能够反映上部质量分布和刚度特性的简化空间梁单元模拟^[4]。本桥采用有限元软件 MIDAS/Civil V2010, 建立三维有限元模型, 如图 3。边界条件为: 考虑基础对桥梁结构动力特性的影响, 利用“m”法计算基础刚度施加在承台底; 主梁与桥墩之间的盆式支座采用非线性弹簧连接模拟。坐标系取纵桥向为总体坐标系 x 轴, 横桥向为 y 轴, 竖向为 z 轴。

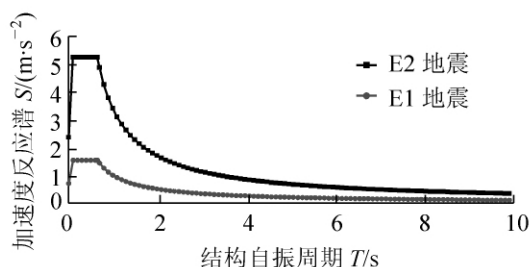


图 2 设计地震动加速度反应谱

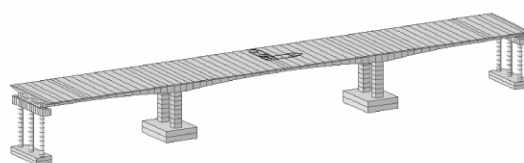


图 3 动力有限元模型

主桥中墩、边墩均选用抗震型盆式支座, 不仅在活动方向可以滑动, 在固定方向也可以发生滑动, 其发生滑动的临界力为竖向支反力的 26%, 以降低传递到下部结构的剪力, 从而起到保护桥梁下部结构的作用。为更真实的反映实际情况, 本桥在做非线性时程分析时考虑了支座摩擦力的影响, 将支座简化为摩擦单元, 支座的临界滑动摩擦力为 $F_{\max}$, x_y 为盆式支座的屈服位移, 支座的初始剪切刚度 $k = F_{\max}/x_y$, 在支座发生滑动后支座的剪切刚度为 0, 其恢复力如图 4 所示。

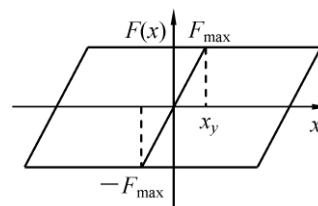


图 4 盆式支座恢复力模型

表 1 列出了主桥前 10 阶的自振周期及其主要振型特征。

表 1 主桥动力特性表

振型阶数	周期/s	振型特征
1	1.15	P17 墩纵弯、梁体纵飘
2	0.62	各墩横弯、梁体横飘
3	0.57	梁体随各墩扭摆
4	0.51	P16 墩纵飘
5	0.44	P19 墩纵飘
6	0.43	梁体 1 阶竖弯
7	0.27	梁体 1 阶横弯
8	0.25	梁体 2 阶竖弯
9	0.23	边墩扭摆
10	0.22	梁体 3 阶竖弯

4 反应谱分析

为考虑不同方向地震输入对结构的影响 ,计算中分别考虑了纵桥向和横桥向的输入地震动。表 2 为主桥各桥墩在两级地震作用下的地震响应和能力验算状况 ,可以看出各墩柱在 E1 地震作用下均处于弹性状态 ,但在 E2 地震作用下 ,P17 制动墩纵桥向以及所有桥墩横桥向均进入塑性工作状态。

表 2 各墩柱反应谱分析结果

地震输入	墩号	E1 地震作用				E2 地震作用			
		最小轴力 / kN	弯矩需求 / (kN · m)	初始屈服 弯矩 / (kN · m)	构件 状态	最小轴力 / (kN)	弯矩需求 / (kN · m)	初始屈服 弯矩 / (kN · m)	构件 状态
纵桥向	P16	2 540	605	3 679	弹性	2 426	2 059	3 644	弹性
	P17	10 881	13 849	16 028	弹性	10 768	47 078	15 963	塑性
	P18	11 379	832	16 315	弹性	11 157	2 830	16 187	弹性
	P19	2 695	538	3 729	弹性	2 667	1 828	3 718	弹性
横桥向	P16	1 646	1 541	3 417	弹性	349	4 936	2 964	塑性
	P17	8 885	8 132	15 318	弹性	3 980	27 464	11 927	塑性
	P18	9 618	6 805	15 869	弹性	5 168	23 067	12 772	塑性
	P19	2 005	1 119	3 524	弹性	322	3 637	2 955	塑性

5 非线性时程分析

E2 地震作用下 ,P17 制动墩纵桥向以及所有桥墩横桥向均进入塑性状态。根据本桥抗震设防原则 ,E2 地震作用下 ,允许结构出现塑性 ,发生损伤 ,即进行延性抗震设计。延性抗震的主要特点是利用结构在强震下进入塑性状态 ,降低结构刚度 ,延长结构周期 ,使之与地震的卓越能量周期区段相远离 ,进而达到减震的目的^[5]。此外 ,塑性部位的滞回机制有助于耗散传入结构的地震能量 ,进一步控制结构的位移响应。延性抗震体系中 ,结构的塑性行为一般是通过设置潜在的塑性铰来实现的 ,为了便于检查和修复 ,潜在的塑性铰通常选择在墩身或支柱上。根据本桥的结构形式和受力特点 ,在纵向地震作用下的塑性铰位置为墩底 ,在横向地震作用下的塑性铰位置为墩顶和墩底。为此 ,需将墩柱截面划分为纤维单元 ,采用弹塑性的钢筋和混凝土应力-应变关系分别模拟钢筋和混凝土单元 ,进行非线性时程分析 ,并由此计算 E2 地震作用下的地震响应。

分析时 ,同时考虑纵桥向和横桥向的地震波 ,如图 5。

通过 E2 地震作用下的弹塑性时程分析 ,可以得到各墩底截面的最大塑性转角及相应的轴力水平。采用数值积分法可以计算得到截面在该轴力水平作用下的弯矩曲率关系 ,从而可以确定截面的极限曲率 φ_u 和屈服曲率 φ_y ,则截面的容许塑性转角为 $\theta_u = L_p(\varphi_u - \varphi_y) / 2$,其中 L_p 为等效塑性铰长度。各墩底截面的最大塑性转角及相应的容许塑性转角如表 3 所示。

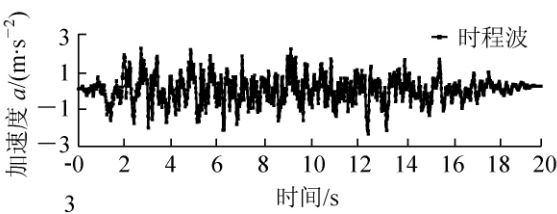


图 5 设计地震波

表 3 E2 地震下墩柱截面最大塑性转角与容许转角

效应 方向	塑性 铰	最大塑性 转角 / rad	墩柱轴力 / kN	屈服曲率 $\varphi_y / (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	极限曲率 $\varphi_u / (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	L_p / m	容许转角 θ_u / rad
纵桥向	P17	0.005 42	10 370	0.002 6	0.034 9	0.9	0.014 5
横桥向	P16	0.001 25	1 245	0.004 8	0.048 2	0.67	0.014 5
	P17	0.001 6	7 178	0.002 8	0.037 2	0.9	0.015 5
	P18	0.001 67	5 997	0.002 9	0.038	0.9	0.015 8
	P19	0.001 31	3 668	0.004 3	0.044 3	0.67	0.013 4

由表 3 可见 ,本桥在 E2 地震作用下各墩柱截面具有一定的转动能力 ,最大塑性转角都在容许范围内 ,且有较高的延性储备 ,满足延性抗震设计的要求。下一步 ,可根据墩柱的时程分析结果对基础、盖梁

以及桥墩(抗剪)等能力保护构件进行抗震设计。对于未进入塑性状态的墩柱,该墩柱的剪力设计值、基础和盖梁的内力设计值可直接采用 E2 地震作用的计算结果;对于已进入塑性状态的墩柱,墩柱的剪力设计值、基础和盖梁的内力设计值按能力保护原则确定。

6 结语

根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)的桥梁抗震设防新理念,利用 MIDAS/Civil V2010,考虑盆式支座摩擦和钢筋混凝土墩柱弹塑性的影响,对航三公路 S2 跨线桥主桥进行 E1、E2 两级地震作用的分析。E1 地震作用下,桥梁结构处于弹性状态;E2 地震作用下,制动墩纵桥向和各墩横桥向进入塑性状态,最大塑性转角都在容许范围内,且有较高的延性储备,较好地满足了两水平设防的抗震设计要求。

参 考 文 献

- [1]杜修力,韩强,李忠献,等. 5.12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1270-1279.
- [2]殷鹏程,叶爱君. 从中美规范比较探讨桥梁结构抗震体系[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(3): 1-8.
- [3]中华人民共和国行业标准. JTG/T B02—01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [4]张斌. 考虑竖向地震作用时连续梁桥地震反应分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(3): 20-23.
- [5]管仲国,李建中. 城市快速路高架桥抗震体系选择与经济对比——上海浦东内环线改扩建工程[C]//第 19 届全国桥梁学术会议论文集(下册). 北京: 人民交通出版社, 2010.

Seismic Performance Analysis of Continuous Girder Bridge Based on Two-level Design Approach

Deng Xiaowei

(Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd. (TJAD), Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the new ideas and new methods by guidelines for seismic design of highway bridges (JTG / T B02—01—2008), with the background of a continuous girder bridge in the area of 7 degree earthquake intensity, an elastic-plastic finite element model is established for dynamic characteristics analysis, seismic response spectrum analysis and nonlinear time history analysis, to reveal the force and deformation under earthquake action of two levels. Furthermore, the seismic performance is evaluated to provide a reference for seismic design of bridges.

Key words: two-level fortification; elastic-plastic finite element; response spectrum; nonlinear time history; seismic ductility design

(责任编辑 车轩玉)