

不同规范反应谱对桥梁减隔震设计的影响

李 闯* 倪晓博 叶爱君

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要 结合一座常规桥梁, 同时基于现行的两本桥梁抗震设计规范, 对其常规体系和减隔震体系分别进行动力时程分析, 来确定不同规范反应谱对桥梁减隔震设计的影响。研究表明, 桥梁采用减隔震设计大幅降低了关键截面的地震反应; 同时, 由于两本规范反应谱的差异, 基于这两本规范计算所得的结构地震反应也有较大悬殊, 其中位移反应的差异更大。

关键词 桥梁, 减隔震设计, 常规体系, 规范反应谱, 时程分析

Influence of Different Response Spectrum in Codes on Isolated Bridge Design

LI Chuang* NI Xiaobo YE Aijun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract With current codes, seismic design of bridges were conducted using the time-history analyses for a bridge with seismic isolation and a bridge using regular bearings, respectively. The influences of seismic isolation on bridge design were studied. The study indicates that seismic responses in key locations are substantially decreasing by using seismic isolation. Meanwhile, structural responses are much different due to the different response spectra in two codes. The difference of displacement responses is much greater than that of the force responses.

Keywords bridge, seismic isolation, a bridge using regular bearing, response spectrum in code, time-history analysis

1 引 言

最近几年, 我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01—2008)(以下简称《公规》)以及《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)(以下简称《城规》)先后编制出版, 并开始实施。这两本规范引入了新的桥梁抗震设计理念, 完善了相应的抗震设计方法, 所以随着这两本规范的实施, 我国的桥梁抗震设计水平将会上一个台阶。

对于常规桥梁的抗震设计, 两本规范均采用延性抗震设计和减隔震设计两种策略。对于采用减隔震设计的桥梁, 《公规》规定, 应针对 E1 地震作用和 E2 地震作用分别进行设计和验算^[1]; 而

《城规》规定, 可只进行 E2 地震作用下的抗震设计和验算^[2]。除此之外, 在减隔震设计的基本原则方面, 两本规范差别不大。

对于减隔震桥梁的地震反应分析方法, 两本规范均要求, 一般情况下采用非线性时程分析方法。两本规范均只给出了设计加速度反应谱作为地震动输入, 在地震加速度时程输入的选取, 以及时程反应分析方面, 均给出了一致的规定。未进行地震安全性评价的桥址, 可采用本规范设计加速度反应谱为目标拟合设计加速度时程, 也可选用与设定地震震级、距离、场地特性大体相近的实际地震动加速度记录, 通过时域方法调整, 使其加速度反应谱与本规范设计加速度反应谱匹配。而时程分析的最终结果, 当采用 3 组地震加速度时

收稿日期: 2013-01-12

* 联系作者, Email: 5577lichuang@tongji.edu.cn

程计算时,取各组计算结果的最大值;当采用7组及以上地震加速度时程计算时,可取结果的平均值。

然而,由于两本规范的主管部门不同,《公规》和《城规》分别采用的地震加速度峰值以及设计加速度反应谱差别较大,这一差别将会对桥梁的减隔震设计产生较大的影响。

为了定量分析不同规范反应谱对桥梁减隔震设计的影响,本文将针对一座常规桥梁,采用减隔震抗震设计策略,同时根据《城规》和《公规》两本规范进行抗震设计,并采用非线性动力时程方法进行E2地震下的地震反应分析,比较减隔震桥梁的地震反应以及对减隔震装置的性能要求。

2 桥梁结构及减隔震设计方案简介

某城市高架连续梁桥^[3],跨径组合为 4×31 m,一联总长116 m,立面布置见图1,属于规范规定的规则桥。桥墩为带系梁双柱墩,墩高为10 m,截面尺寸为1.3 m(横桥向) \times 1.8 m(纵桥向),墩柱轴线横向间距为5.7 m;矩形承台,尺寸为11.6 m(横桥向) \times 7.2 m(纵桥向) \times 2.5 m(高),重522 t;群桩基础,桩长40 m,桩数12根,桩径1 m,单桩配筋率1%,横断面布置如图2所示。

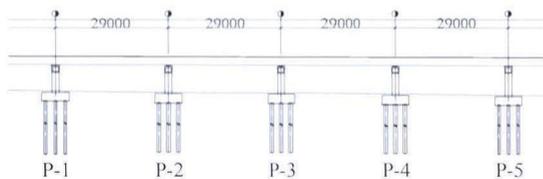


图1 桥梁立面图

Fig.1 Vertical section of the bridge



图2 桥梁横断面

Fig.2 Cross section of the bridge

上部结构、立柱、基础分别采用C50、C40、C35混凝土。上部结构和二期恒载总质量为6 375 t,中墩、次边墩以及边墩上每个支座的支座反力分别为7 693 kN、8 842 kN和3 248 kN。桥梁的常规体系为:每个墩上均采用盆式支座,纵桥向中间桥墩支座为固定型,其余均为滑动型;横桥向一侧为固定型,另一侧为滑动型。此时桥梁的纵向基本周期为1.747 s,横向基本周期为0.907 s。

桥梁的减隔震设计方案为每个墩上均采用摩擦摆式支座。

3 桥梁动力分析模型及地震动输入

3.1 桥梁动力分析模型

该桥的空间有限元动力分析模型如图3所示,其中,主梁和桥墩用梁单元模拟,摩擦摆式减隔震支座采用非线性连接单元模拟^[4],支座单元上节点与主梁六个自由度主从连接,桩基础采用等效的土弹簧单元模拟桩—土的相互作用,墩底与承台中心六个自由度主从。

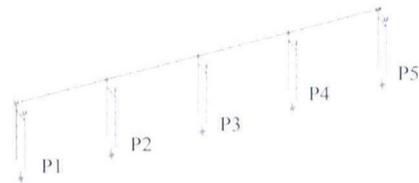


图3 连续梁桥计算模型

Fig.3 Computational model of the continuous bridge

常规体系中活动支座采用双线性分析模拟,考虑支座的摩擦作用效应,其恢复力模型见图4,活动支座的临界滑动摩擦力 $F_{\max} = \mu_d W$,初始刚度 $k = F_{\max} / x_y$,其中滑动摩擦系数 μ_d 取0.02,活动支座屈服位移 x_y 取0.003 m, W 为支座所承受的上部结构重力。

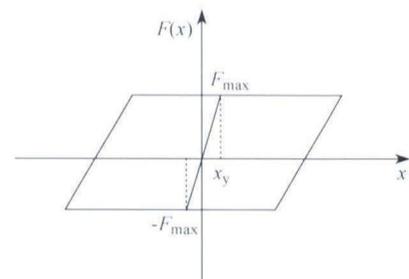


图4 活动盆式支座的恢复力模型

Fig.4 Restoring force model of movable GPZ

该桥所用的摩擦摆式支座的参数为:半径 5 m,动摩擦系数取 0.02,其恢复力模型如图 5 所示。支座屈服后刚度 $K_d = W/R$,等效刚度 $K_{eff} = W/R + \mu_d W/D_d$,等效阻尼比 $\xi_{eff} = (2/\pi) \cdot [\mu_d / (D_d/R + \mu_d)]$,其中, W 为恒载作用下支座竖向反力, R 为滑动面的曲率半径, D_d 为支座设计水平位移, μ_d 为滑动摩擦系数。^[2]

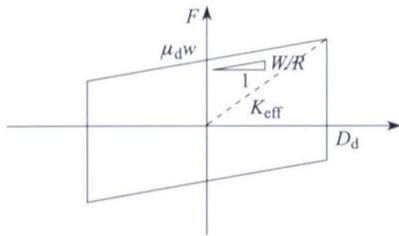


图 5 摆式支座的恢复力模型

Fig. 5 Restoring force model of friction pendulum bearing

3.2 地震动输入

通过《中国地震动参数区划图》查得,桥梁所在场地的设计基本地震加速度峰值为 0.1 g,抗震设防烈度 7 度,地震分区第 2 区,场地类型为 III 类场地,反应谱特征周期为 0.55 s。

按照《公规》,该桥梁类别为 B 类, E2 地震下抗震重要性系数 C_i 为 1.3,场地系数 C_s 为 1.3,阻尼调整系数 C_d 为 1.0。而按照《城规》,桥梁类别为乙类, E2 地震下地震调整系数 C_i 为 2.2。

依据上述参数,得到了两规范在 E2 地震下的反应谱,如图 6 所示。结果表明《城规》得到的反应谱始终比《公规》的大,两者在平台段、周期 4 s 及 6 s 处的比值分别为 1.30、1.99 和 2.41。可见,两本规范的反应谱在长周期部分差别很大,《城规》的要大得多。

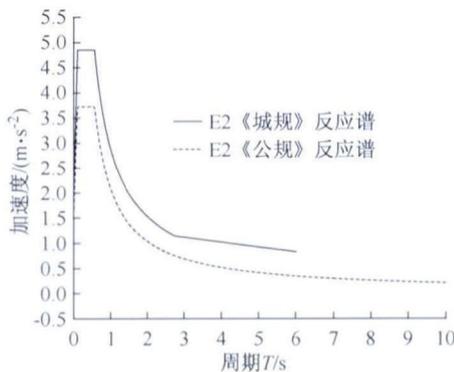


图 6 阻尼比为 5% 的加速度反应谱

Fig. 6 Acceleration response spectrum with a 5% damping ratio

分别以上述两条设计加速度反应谱为目标,拟合两组人工地震加速度时程作为地震动输入,每组 7 条,图 7 为其中的一条。图 8 和图 9 分别对每组加速度时程对应的反应谱与目标反应谱做了比较,可见,人工波的加速度反应谱与规范加速度反应谱有较好的吻合,作为时程反应分析的地震动输入是合适的。

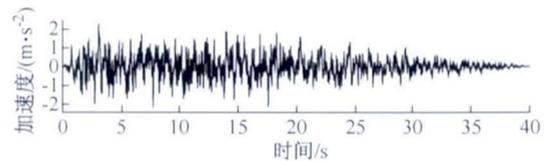


图 7 人工地震加速度时程

Fig. 7 Artificial earthquake acceleration time history

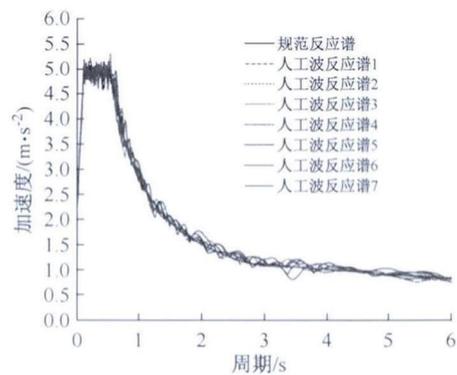


图 8 《城规》规范反应谱与人工加速度时程反应谱

Fig. 8 Acceleration response spectra in the code CJJ 166—2011 and acceleration response spectrum obtained by artificial earthquake acceleration time history

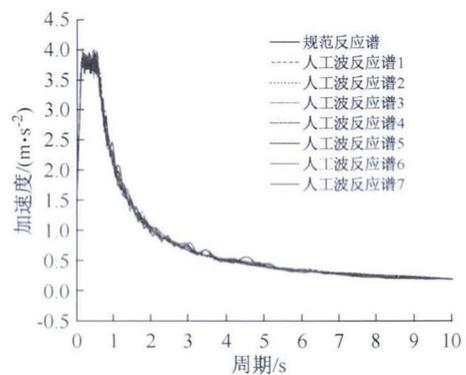


图 9 《公规》规范反应谱与人工加速度时程反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectra in guidelines TG/TB02—01—2008 and acceleration response spectrum obtained by artificial earthquake acceleration time history

4 地震反应比较分析

分别采用前述两组由规范反应谱为目标拟合的人工地震加速度时程作为地震动输入,采取相同的减隔震方案,对减隔震桥梁进行地震反应分析。对每组7条时程均进行了纵向和横向地震反应计算,分析结果取平均值。

表1 分别对两组地震动输入下常规体系和减

隔震体系的地震反应进行了比较,重点比较了中间桥墩支座、墩底以及承台底的反应。从表中结果可以看出,E2地震作用下,与常规体系相比,减隔震体系中间桥墩的地震内力反应大幅降低,同时支座位移反应也比较小,在可以接受的范围之内。究其原因,主要是减隔震体系在延长结构周期、降低加速度反应谱谱值的同时,也改变了上部结构地震力在每个桥墩上的分配比例。

表1 中间桥墩地震反应比较
Table 1 Comparison of seismic responses of the middle pier

地震输入方向	计算项目	常规体系《城规》			减隔震体系		
		《城规》	《公规》	比值	《城规》	《公规》	比值
纵向	支座位移/m	0	0	-	0.135	0.07	1.94
	支座剪力/kN	4 556	3 321	1.37	354	253	1.4
	墩底剪力/kN	4 590	3 351	1.37	507	382	1.33
	墩底弯矩/(kN·m)	47 245	34 461	1.37	4 473	3 226	1.39
	承台底剪力/kN	9 622	7 188	1.34	2 059	1 549	1.33
	承台底弯矩/(kN·m)	117 124	85 548	1.37	12 301	8 915	1.38
横向	支座位移/m	0	0	-	0.119	0.064	1.85
	支座剪力/kN	5 368	3 777	1.42	328	249	1.32
	墩底剪力/kN	3 133	2 214	1.42	481	361	1.33
	墩底弯矩/(kN·m)	14 417	10 163	1.42	2 169	1 578	1.37
	承台底剪力/kN	6 033	4 491	1.34	2 103	1 469	1.43
	承台底弯矩/(kN·m)	78 068	55 280	1.41	12 823	9 234	1.39

从表中还可以看出,对于这两种体系,分别基于《城规》和《公规》得到的对应结构地震内力之比为1.32~1.43;而在对减隔震体系进行抗震分析时,基于前面两种规范,纵桥向和横桥向输入所得支座位移之比分别为1.94和1.85。这主要是由于这两种规范反应谱的差异引起的。

为了更清楚地分析不同规范反应谱对桥梁减隔震设计的影响,表2列出了E2地震纵向输入时,常规体系和减隔震体系的周期和对应的反应谱值,其中减隔震体系的反应谱值为每组人工时程经真实阻尼修正后所得反应谱对应结构等效周期的平均值。图10给出了两规范在E2地震下对应减隔震桥梁等效阻尼比的加速度反应谱和位移反应谱。由表2的结果可知,与常规体系相比,减隔震体系延长了结构的周期,降低了加速度反应谱的谱值;与按《公规》计算结果相比,基于《城规》计算的结构等效周期较长,而等效阻尼比较小;基于《城规》和《公规》计算所得的加速度反应谱值之比为1.42,位移反应谱值之比为2.31,这与表1中减隔震体系基于两种规范所得结构地震反应的规律基本上是一致的。

表2 地震反应谱值比较(纵桥向)
Table 2 Comparison of earthquake response spectra (in longitudinal direction)

变量		《城规》	《公规》	《城规》/《公规》
常规体系	基本周期/s	1.813	1.813	1
	加速度反应谱值	1.661	1.132	1.46
减隔震体系	等效周期/s	3.437	2.933	1.17
	等效阻尼比	0.271	0.374	0.72
	加速度反应谱值	0.601	0.424	1.42
	位移反应谱值	0.148	0.064	2.31

特别需要指出的是,相对位移谱统计特征^[5]表明,结构周期达到某一值时,相对位移并不随周期增大而线性增长,当结构自振周期达到位移特征周期时,相对位移谱等于地面运动的位移峰值PGD。图11绘出了我国两规范设计加速度反应谱对应的拟位移反应谱,并和日本、美国及欧洲规范给出的位移反应谱进行了比较,阻尼比5%。可见,我国及日本规范反应谱随着周期的增大,位移谱值是不断增大的,长周期部分是线性增加的,特别是《城规》,3s之后增大得很快,这是不合理的,会导致减隔震结构偏大的位移反应。而欧洲

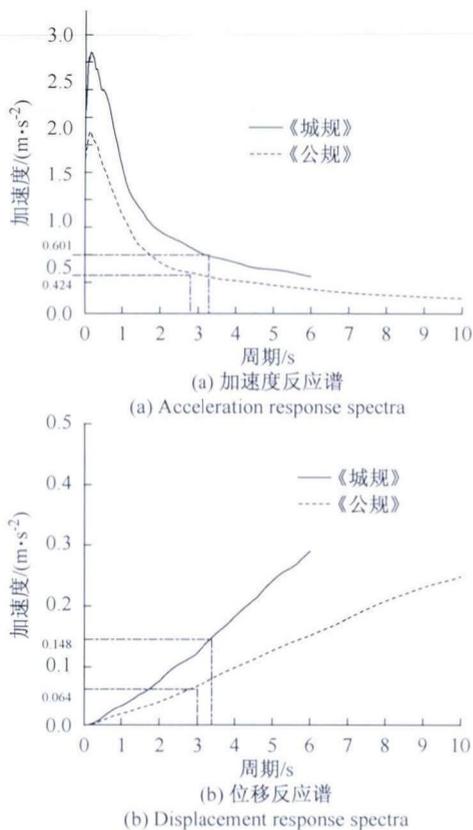


图 10 对应等效阻尼比的规范反应谱比较
Fig. 10 Comparison of response spectra in codes corresponding to equivalent damping ratio

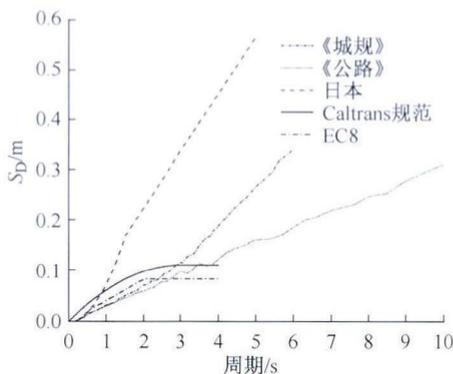


图 11 中、外规范位移反应谱图
Fig. 11 Comparison of displacement response spectra between Chinese and foreign specifications

规范^[6]位移反应谱在 2 s 之后就变成平台段; Caltrans 规范^[7]位移反应谱在 3 s 之后也变成平台段了。

5 结论

结合一座常规桥梁,同时基于《城规》和《公规》,对其常规体系和减隔震体系分别进行动力时程分析,并对结果进行了比较,得到如下结论:

(1) 与常规体系相比,减隔震体系在延长结

构周期、降低加速度反应谱谱值的同时,也改变了上部结构地震力在每个桥墩上的分配比例,从而大幅降低结构关键部位的地震内力。

(2) 无论在常规体系,还是在减隔震体系中,基于《城规》计算的结构地震反应要比基于《公规》计算的相应结果大。

(3) 在减隔震体系中,基于《城规》和《公规》算得的支座剪力、墩底剪力、墩底弯矩、承台底剪力以及承台底弯矩对应比值为 1.32 ~ 1.43,支座位移的比值为 1.85 ~ 1.94。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 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,2008.
Ministry of Transport of P. R. China. JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridge [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京:中国工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
Ye Aijun, Guan Zhongguo. Seismic design for highway bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [4] 王江波,贺金海,袁万城. 近场地震作用下采用拉索减震支座桥梁纵向地震响应特性[J]. 结构工程师,2012,28(5):82-88.
Wang Jiangbo, He Jinhai, Yuan Wangcheng. Influence of near-fault ground motion characteristics on seismic response of continuous beam bridges using cable-sliding friction aseismic bearing (CSFAB) [J]. Structural Engineers, 2012,28(5):82-88. (in Chinese)
- [5] 曹加良,施卫星,刘文光,等. 长周期结构相对位移反应谱研究[J]. 振动与冲击,2011,30(7):63-70.
Cao Jialiang, Shi Weixing, Liu Wenguang, et al. Relation displacement response spectrum of a long-period structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 63-70. (in Chinese)
- [6] European Committee for Standardization. BS EN 1998-2:2005 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges[S]. London: British Standard Institute, 2005.
- [7] California Department of Transportation. Caltrans Seismic Design Criteria. Version 1.3[S]. 2004,2.