李敏峰,徐永峰.强震区非对称连续梁桥地震响应及性能评价[J].地震工程学报,2020,42(5):1276-1282.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2020.05.1276

LI Minfeng, XU Yongfeng. Seismic Response and Performance Evaluation of Asymmetric Continuous Beam Bridges in Meizoseismal Areas[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5):1276-1282. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1276

强震区非对称连续梁桥地震响应及性能评价

李敏峰1,2,徐永峰1

(1. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000;

2. 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心,河北张家口 075000)

摘要:为研究高烈度地区不等跨连续梁桥的抗震性能,依托某高速公路上一座主跨为(40+60+ 35)m的典型不等跨连续梁桥,建立其动力分析有限元模型,获得该桥的模态特性。在 E1 概率和 E2 概率两种地震水平作用下,同时采用反应谱分析和时程分析法,对不等跨桥梁结构的地震响应 进行分析。最后根据桥墩验算截面的弯矩-曲率关系曲线,探讨该桥梁的抗震性能。研究结果表 明:动态时程反应分析与反应谱分析所得的结果基本吻合,由于反应谱分析假定结构线弹性状态而 时程反应分析考虑了材料的弹塑性,在 E2 概率水平下,两者个别响应值有较大差别;由于反应谱 法是对各阶模态下最大响应的组合,动态时程反应分析是同一时刻各地震波引起的结构响应的组 合,因而时域和频域计算结果会存在一些误差,频域结果偏于保守;E1、E2 概率地震作用下,主桥 桥墩检算截面仍然在弹性范围内工作,满足弹性设计要求。

关键词:连续梁桥;反应谱法;时程分析法;抗震分析;性能评价;有限元

中图分类号: U448.21; U442.5+5 **文献标志码:**A **文章编号:** 1000-0844(2020)05-1276-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1276

Seismic Response and Performance Evaluation of Asymmetric Continuous Beam Bridges in Meizoseismal Areas

LI Minfeng^{1, 2}, XU Yongfeng¹

(1.Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;
2.Hebei Innovation Center of Transportation Infrastructurein Cold Region, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: This study investigated the seismic performance of unequal-span continuous beam bridges in high-intensity regions. A finite-element model for dynamic analysis was established based on a typical unequal-span continuous girder bridge with a main span of (40+60+35) m on a highway, and the modal characteristics were obtained. Both the response spectrum analysis and time-history analysis methods were adopted to calculate the seismic response of the unequal-span

收稿日期:2020-07-10

基金项目:2018-2019 年度河北省高等教育教学改革研究与实践项目"以新工科为指导的桥梁工程课程群建设研究" (2018GJJG327);张家口市科学技术和地震局项目"钢筋混凝土箱形桥梁上部结构加固方法应用模拟研究"(1621006B) 第一作者简介:李敏峰(1985-),女,河北张家口人,硕士,讲师,主要研究方向:桥梁基本理论研究、桥梁检测与加固、钢结构等。

E-mail:Liminfeng11@163.com。

bridge under E1 and E2 probability earthquakes. Finally, the seismic performance of the bridge was evaluated according to the bending moment-curvature curve of the pier section. The analysis results showed that the results from the dynamic time-history analysis were basically consistent with that from the response spectrum analysis. Because we assumed linear elasticity in the latter analysis but elastoplastic properties of the material in the former, the individual response values of the two methods were different under the E2 probability level. The response spectrum method is the combination of the maximum responses at the respective modes, but the dynamic time-history analysis is the combination of the structural responses induced by seismic waves at a given time; therefore, there were some errors between the calculation results in the time domain and the frequency domain, and the the calculation results in the frequency domain were conservative. The bridge was found to still work within the elastic range under the E1 and E2 probability earthquakes, which can meet the elastic design requirements.

Keywords: continuous girder bridge; response spectrum method; time history analysis method; seismic analysis; performance evaluation; FEM

0 引言

在山区、丘陵及河流冲积平原等地区,为了既 能跨越山谷、道路或江河,又可以充分利用地形、地 质及水文条件降低成本,往往会修建不等跨连续梁 桥。该类桥梁适应性强、受力性能好、变形量小、行 车舒适等特点在偏远地区或引桥中修建得比较 多^[1-3]。然而,我国是一个地震多发的国家,地震作 用导致公路、铁路交通运输大动脉陷于瘫痪,不仅 造成财产的巨大损失,同时影响救灾及灾后的恢复 工作。地震造成的桥梁建筑物的损坏坍塌给了我 国桥梁抗震设计工作着惨痛的经验教训^[4-5]。因 此,桥梁结构的抗震分析和性能评价有重要的理论 和应用价值。

与对称式结构相比,不对称桥梁在地震作用下 会产生不平衡的扭转或弯矩,使结构受力更加复 杂^[6-9]。因此,不等跨桥梁的抗震分析更有必要性和 实用意义。目前,抗震分析多集中在对称桥梁。赵 永刚等^[10]根据超长联预应力混凝土连续梁桥的结 构特性,考虑了双曲面球减震装置减隔震机理,分析 了其抗震性能;贾毅^[11-12]系统的探讨了高墩大跨曲 线连续刚构桥在地震荷载下的响应特点;张永亮 等^[13]针对高速铁路大跨连续梁桥的受力特点,按照 三水准抗震设防,采用反应谱法和非线性时程分析 评价实桥的抗震性能。结果表明:该桥的抗震设计 由固定墩控制;赵旭峰等^[14]依托一座(48+80+48) m 的铁路连续梁桥,进行了多遇地震弹性、罕遇地 震弹塑性地震反应分析。综上所述,对不等跨连续 梁的抗震分析与性能评估的文献较少,有必要进一步研究高烈度地区不等跨连续梁桥的抗震性能与 评估。

本文针对不等跨连续梁桥的结构受力特点,根 据两水准的抗震设防目标,针对高速公路某一桥梁, 分别采用反应谱法和弹塑性时程反应分析法进行地 震反应分析,并对该桥的抗震性能进行评价。

1 桥梁概况和模型工况

韩江特大桥全长1276.4 m,分南北两幅桥,上 部结构为8联预应力混凝土连续梁,航道处主桥为 (40+60+35) m 预应力混凝土现浇连续箱梁。箱 梁采用C55 混凝土。梁高按照2次抛物线设计,跨 中以及边跨支点梁高2.0 m,主跨支点梁高3.6 m, 如图1所示。预应力束采用高强度低松弛钢绞线, 公称直径为15.2 mm。普通钢筋采用 HPB300 和 HRB400 钢筋两种,支座类型为摩擦摆式减隔震 支座。

采用有限元分析软件 Midas Civil 建立潮安韩 江特大桥主桥(40+60+35) m 及附属左右各1联 的有限元模型,如图2所示。其中,墩梁均采用空间 梁单元模拟,空间梁单元可以相对准确地模拟地震 作用下桥梁结构的多向受力状态。主梁单元偏心位 置设定为质心,并考虑桥面纵坡影响,确保各构件相 对位置与实桥精确匹配。主梁与支座顶部节点,支 座底部与盖梁顶部的支座垫石分别采用刚臂连接, 尽量正确模拟支座高度与重心位置。



韩江特大桥总体布置图 图 1





Fig.2 Finite element calculation model

根据施工设计图中所注明的材料等级,按规范 值取用。上部结构采用 C55 混凝土,弹模为 E_{c} = 3.55×10⁴ MPa。盖梁和墩身采用 C40 混凝土,弹 模 $E_c = 3.25 \times 10^4$ MPa,承台和基础采用 C35 混凝 土弹模 $E_c = 3.15 \times 10^4$ MPa。混凝土的泊松比均为 0.2,容重 γ 为 26 kN/m³。采用集中质量模型,结 构质量按照材料容重、重力加速度和截面特性由程 序自动计算。混凝土桥梁结构振型阻尼比为 0.05, 采用瑞利阻尼形成阻尼矩阵。11 cm 厚的沥青混凝 土铺装层以及防撞墩等二期恒载换算成 55.36 kN/m 连续梁均布荷载。考虑两种地震输入工况,工况 [: 顺桥向+竖向;工况Ⅱ:横桥向+竖向。

本桥中选用双曲面球型减隔震支座的设计方 案,当地震水平力超过双曲面支座上剪力键水平承 载力时,支座开始滑动,通过摩擦耗能,延长地震周 期,达到减、隔震效果,震后又可以在自重作用下形 成恢复力,使支座复位。由于状态非线性对动力分 析结果产生显著的影响,在进行结构非线性地震时 程反应分析时,采用图 3 所示的双线性滞回曲线模 拟双曲面支座的非线性滞回特性,通过 Midas Civil 中滞后系统连接单元来实现。



图 3 摩擦摆支座双线性滞回曲线



地震动是通过桩土相互传递到结构上的,桩土 相互的正确模拟是结构动力分析的关键一环。本文 按照土弹簧方法进行模拟,弹簧刚度值计算方法与 静力法相同,土的抗力取值根据场地情况而定,取 *m*_{ah}=2.5*m*_#。每层土对桩的约束弹簧刚度值:

$$K = m \bullet c \bullet a \bullet z$$

式中:K 为土弹簧计算刚度;m 为土层系数;a 为桩 基的有效宽度,根据地基规范计算得到:c为土层 厚度。

主桥动力特性分析 2

桥梁的动力特性是指该桥的自振频率和主振型。 它是桥梁结构抗震设计的基础,也是衡量结构质量和 刚度是否匹配的关键指标。从各阶主振型的形式,可 以判断结构的刚度分配情况。由该结构的力学模型, 利用结构动力分析中的多重 Ritz 向量法,获得了成桥 状态动力特性。表1给出了结构前6阶动力模态。 图 4 给出结构前 6 阶的主要振型。

表1 结构前6阶动力特性

Table 1	The first	six-order	dynamic	characteristics	of	structure
---------	-----------	-----------	---------	-----------------	----	-----------

振型阶数	周期/sec	频率/Hz	振型描述
1	4.45	0.225	局部纵弯
2	3.99	0.251	引桥纵弯
3	3.92	0.233	主桥纵弯
4	3.62	0.276	局部纵弯
5	3.07	0.326	主桥正对称横弯
6	2.95	0.340	主桥反对称横弯

由表1可知,结构的基本周期为4.45 s,相应的 基频为0.225 Hz,第1阶振型为引桥桥墩局部纵向 弯曲振动,第3阶振型才出现主桥的纵向弯曲模态。 由于采用了箱形薄壁墩,桥墩的纵向弯曲刚度较小, 符合设计的初衷。该桥第5、6阶振型均为主跨横桥 向振动。因此,在抗震分析中,应考虑纵、横桥向地 震动输入。

3 抗震设防烈度及设防水准

桥梁抗震设防的合理安全原则要求结构在经济 与安全之间达到合理平衡。该桥按8度采用抗震设 防措施;抗震设防类别为B类;并采用了100年 63%(地震水准I,简称E1)和50年2.5%(地震水 准II,简称E2)两种超越概率地震动进行抗震设防。 本桥抗震方案为上部结构采用减隔震支座,下部结 构在E2地震作用下采用弹性设计,使得墩柱及桩 基满足弹性强度要求,支座满足位移需求。

3.1 反应谱分析的地震动参数

对结构抗震设计有实际意义的是结构响应的最 大值,它主要取决于场地条件、结构的自振周期和阻 尼系数。设计加速度反应谱β(T)形式如下:

	$S_{\max}(0.435 + 5.65T)$	$0 < T \leqslant T_{\scriptscriptstyle 0}$
$\beta(T) = c$	$S_{ m max}$	$T_{\rm 0}\leqslant T\leqslant T_{\rm g}$
	$S_{\max}(T_g/T)^{\gamma}$	$T_t \leqslant T \leqslant 10.0S$

最大地震影响系数为 $S_{max} = A \cdot \beta_{max}$,与概率水 准和阻尼有关,相应的设计地震反应谱的谱形参数 值见表 2。竖向地震动反应谱取对应的水平地震动 峰值的 2/3 作为其加速度峰值,其谱形参数与水平 向的谱形参数相同。图 5 是 100 年超越概率 63% 和 50 年超越概率 2.5%的水平及竖向设计地震动反 应谱曲线。



表 2 地震反应谱参数 2 Dependence of conthegrate response specific

Table 2 Tatalacters of caltiquake response spectrum												
177 14: HW 고고				水平向						竖向		
起越戰举 水准	T_0 /S	${ m T_g}/{ m S}$	β_{max}	$A_{max} / (cm \cdot s^{-2})$	γ	S _{max} / g	T ₀ /S	T_g /S	$eta_{ ext{max}}$	$A_{\rm max}$ /(cm • s ⁻²)	γ	$S_{ m max} \ /g$
100年63%	0.10	0.50	2.30	87.15	1.0	0.205	0.10	0.50	2.30	58.10	1.0	0.136
50年2.5%	0.10	0.85	2.30	276.97	1.0	0.650	0.10	0.85	2.30	184.65	1.0	0.433

3.2 时程分析的地震动参数

本文以《地震安评报告》提供的设计加速度反应 谱为目标拟合人工地震波。选取 E1 概率和 E2 概 率下,相关系数低于 10%的水平地震加速度时程曲 线各3条。桥址处的特征周期与人工地震波的特征 周期相吻合,以满足频谱特性的要求。由模态分析 结果可知:该桥的基本周期为4.45 s,震波的有效持 续时间在结构基本周期的5~10倍之间,满足地震 波有效持时要求。由于地震波有效峰值 EPA 值略 低于设计加速度 EPA 值,应通过适当调整,本文中 确立的调整系数为1.07。选取的加速度时程曲线及 基于时程曲线的反应谱与设计规准加速度反应谱对 比如图 6 和图 7 所示。

4 桥梁结构抗震分析

4.1 反应谱分析

根据《公路桥梁抗震设计细则》[15],桥梁抗震分

析中各个方向上振型参与系数的总和应大于 90%。 对于潮安韩江大桥,参与计算的振型不应低于 150 阶。按反应谱理论计算各质点的地震力,用 CQC 方法对前 150 阶振型的计算结果进行组合叠加得总 响应,竖向反应谱值取水平向的 2/3。

4.2 时程分析

计算时偏于安全地假定地震动沿桥纵向、横向 或竖向传播,由于地震动沿桥纵向和横向同时作用 的可能性很小,因而在计算时地震动沿纵、横向分别



图 5 地震动反应谱曲线





图6 水平向人工地震波时程曲线







Fig.7 Comparison between the response spectrum based on time-history curve of artificial seismic wave and the response spectrum of design earthquake

- 飒萍,寸:」虽辰凶-1

输入,不考虑行波效应。

由于时程分析结果较多,限于篇幅,本文给出了 结构在 E1、E2 概率下地震动时程分析所得韩江桥 主桥桥墩的墩底截面的内力最大响应值。

4.3 验算截面能力计算

根据恒载和地震作用对各控制截面进行最不利 轴力作用下的 M-φ 分析,获得特征曲率与特征弯矩 关系。桥墩的初始屈服弯矩为截面最外层钢筋首次 屈服时对应的弯矩,等效屈服是把截面的 M-φ 曲线 等效为双线性所得到的等效屈服弯矩,由此根据预 期的性能目标进行抗震性能验算。根据《公路桥梁 抗震设计细则》^[15],验算桥墩各控制截面顺桥向及 横桥向的等效屈服弯矩及结构在抗震计算 E2 概率 下各桥墩验算截面纤维模型弯矩屈服破坏及验算截 面 M-φ 曲线。图 8 和图 9 所示为 20 ♯ 主墩墩底截 面屈服破坏及弯矩-曲率曲线。

4.4 地震作用下截面验算

截面验算时首先计算结构在 E1 概率地震作用 下的工况 1、工况 2 的地震响应,如果验算截面都满







Fig.9 The transverse yield failure and moment-curvature curve of the No.20 pier bottom section

足弹性设计要求,则继续进行结构在 E2 概率地震 作用下的截面验算。验算结果汇总于表 3 和表 4。

从表3和表4可以看出,韩江特大桥在E1概率 地震作用下,时程分析法结果与反应谱法分析结果 基本吻合,E2概率地震作用下,反应谱结果值偏大, 主要是结构进入塑性工作阶段,而反应谱法假定材 料在弹性范围内。时程分析能更加真实反映结构受 力情况,因此,以本文以时程分析结果作为结构抗震 性能评估的主要依据。在E1、E2两种概率地震作 用下,根据主桥桥墩地震响应结果及验算截面弯矩-曲率关系曲线,主桥19 # 至 22 # 桥墩控制截面的地 震弯矩小于等效屈服弯矩,说明桥梁满足下部结构 弹性设计的设防目标。

5 结语

(1)由动态时程反应分析与反应谱分析所得的 结果基本吻合,计算结论是可靠的。在 E2 概率水 平下,两者个别响应值有较大差别,是由于反应谱分 析假定结构线弹性状态而时程反应分析考虑了材料

表 3 E1 概率地震作用下各桥墩验算截面计算结果(单位:kN・m)

Table 3 Calculation results of the checking section of each bridge pier under E1 probability earthquake (Uuit:kN • m)

桥墩号	恒载弯矩+地震	弯矩(反应谱法)	恒载弯矩+地震弯矩(时程分析法)		截面等效屈服弯矩	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
19	7 371	10 963	6 382	12 700	42 500	83 250
20	17 067	25 101	19 469	32 196	70 570	240 100
21	16 783	19 566	21 628	23 454	63 770	227 300
22	4 484	6 271	3 255	5 846	29 060	62 990

表 4 E2 概率地震作用下各桥墩验算截面计算结果(单位:kN・m)

Table 4	Calculation results of the	checking section of eac	h bridge pier under E2	2 probability earthquake	(Unit: kN • m)
		0			

桥墩号 -	恒载弯矩+地震	弯矩(反应谱法)	恒载弯矩+地震	载弯矩+地震弯矩(时程分析法) 截面等效屈服			
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	
19	38 271	52 179	31 786	52 524	42 500	83 250	
20	89 064	118 580	56 533	75 090	70 570	240 100	
21	80 487	94 728	49 542	68 845	63 770	227 300	
22	23 895	27 333	17 788	23 861	29 060	62 990	

的弹塑性。

(2)反应谱法是对各阶模态下最大响应的组合,动态时程反应分析是同一时刻各地震波引起的结构响应的叠加组合,频域分析并未考虑相位的影响,偏于保守。

(3) E1 概率地震作用下,主桥桥墩检算截面仍 为弹性工作状态,满足弹性设计要求。E2 概率地震 作用下,采用时程分析法时,主桥各桥墩墩底截面均 在弹性范围内,而反应谱法分析时,20 #、21 # 墩墩 底截面超出了弹性工作状态,但满足延性抗震设计 要求。

参考文献(References)

[1] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震(第二版)[M].北京:人民交通出版 社,2011.

YE Aijun, GUAN Zhongguo.Seismic Design of Bridge[M].Beijing:China Communications Press, 2011.

- [2] WILLIAMS D.,GODDEN W.Seismic Response of Long Curved Bridge Structures: Experimental Model Studies[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1979, 7(2): 107-128.
- [3] LOU L,ZERVA A.Effects of Spatially Variable Ground Motions on the Seismic Response of a Skewed, Multi-span, RC Highway Bridge[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7-10):729-740.
- [4] BECK J L, SKINNER R I. The Seismic Response of a Reinforced Concrete Bridge Pier Designed to Step[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1973, 2(4): 343-358.
- [5] IEMURA H, PRADONO M H. Passive and Semi-active Seismic Response Control of a Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Structural Control, 2002, 9(3):189-204.
- [6] CALVI G M, PAVESE A, RASULO A, et al. Experimental and Numerical Studies on the Seismic Response of R. C. Hollow Bridge Piers [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2005, 3 (3):267-297.
- [7] LING X Z,GUO M Z, WANG D S, et al. Large-scale Shaking Table Model Test of Seismic Response of Bridge of Pile Foundation in Ground of Liquefaction [J]. Yantu Lixue/Rock and

Soil Mechanics, 2006, 27(1):7-10, 22.

- [8] ERÖZ M, DESROCHES R.Bridge Seismic Response as a Function of the Friction Pendulum System (FPS) Modeling Assumptions[J]. Engineering Structures, 2008, 30 (11): 3204-3212.
- [9] WILSON J C.Analysis of the Observed Seismic Response of a Highway Bridge[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1986, 14(3):339-354.
- [10] 赵永刚,韩文涛,史贵君.临河黄河特大桥抗震设计与研究
 [J].公路工程,2013,38(6):189-193,223.
 ZHAO Yonggang,HAN Wentao,SHI Guijun.Seismic Design and Research of the Linhe Yellow River Bridge[J].Central South Highway Engineering,2013,38(6):189-193,223.
- [11] 贾毅.高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[D].昆明:云南 大学,2014.
 JIA Yi. Seismic Response Analysis of High Pier and Longspan Curve Continuous Rigid Frame Bridge[D].Kunming: Yunnan University.2014.
- [12] 贾毅,赵人达,廖平,等.高烈度地震区大跨长联连续梁桥抗震 分析及性能评价[J].防灾减灾工程学报,2017,37(4):681-688.

JIA Yi, ZHAO Renda, LIAO Ping, et al. Seismic Resistance Analysis and Performance Evaluation of Large Span Continuous Beam Bridge in High Intensity Seismic Region[J].Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng, 2017, 37(4):681-688.

- [13] 张永亮,孙建飞,徐家林.高速铁路大跨连续梁桥地震反应分析及抗震校核[J].地震工程学报,2013,35(2):226-231. ZHANG Yongliang,SUN Jianfei,XU Jialin.Analysis of Seismic Response and Seismic Checking in a Long-span Continuous Beam Bridge on a High-speed Railway[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(2):226-231.
- [14] 赵旭峰,王春苗.连续梁桥抗震性能分析与评价[J].铁道工程 学报,2009,26(5):36-39.
 ZHAO Xu feng, WANG Chun miao. Analysis and Evaluation of Seismic Behavior of Continuous Girder Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society,2009,26(5):36-39.
- [15] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计细则 JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
 Guidelines for Seismic Design of HighwayBridges JTG/T B02-01-2008[S].Beijing:China Communications Press,2008.