

文章编号:1673-2049(2018)05-0093-08

悬索桥易损性分析与简化模型

黄 勇,车泽鑫,谢光明

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:对中国当前已建和在建的车行悬索桥进行了统计分析,总结其分类特点,得到了统计意义上桥梁主要参数间的关系,并利用线性拟合得到趋势拟合公式。选取 3 座典型悬索桥(双塔地锚式平行双索面桥、双塔自锚式平行双索面桥、独塔自锚式空间索面桥)建立有限元模型,对影响悬索桥振动的主要参数进行了敏感度分析;利用塔底弯矩曲率曲线确定不同等级的损伤指标,采用增量动力分析(IDA)法得到地震反应需求值,通过计算不同损伤指标的能力需求比,对悬索桥的易损性进行分析。针对震后灾害快速评估的需求,建立单塔简化模型来计算易损性曲线。结果表明:对算例桥梁而言,主塔顺桥向弯曲振动,主塔刚度对自锚式平行索面悬索桥影响大,主缆刚度对地锚式平行索面悬索桥影响大;横桥向主塔刚度对 3 座桥影响均较大;地锚式悬索桥比自锚式悬索桥易损,而自锚式悬索桥中双塔平行索面桥抗震性能优于独塔空间索面桥;单塔简化模型在一定程度上能够满足震害后快速评估的需求,误差基本在工程上可以接受的范围。

关键词:悬索桥;地震易损性曲线;非线性分析;灵敏度分析;简化模型

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Suspension Bridge Vulnerability Analysis and Simplified Model

HUANG Yong, CHE Ze-xin, XIE Guang-ming

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration,
Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: The statistical analysis of suspension bridges of vehicles that had been built and under construction in China was carried out, and the classification characteristics were summarized. The relationship between the main parameters of the bridges in the statistical sense was obtained, and the trend fitting formula was obtained by linear fitting. Three typical suspension bridges (double tower anchored parallel double cable plane bridge, double tower self-anchored parallel double cable plane bridge, single tower self-anchored space cable bridge) were selected to establish the finite element model, and the main parameters affecting the suspension bridge vibration sensitivity analysis was carried out. The damage index of different grades was determined by the bending moment curve of the tower bottom. The seismic response demand value was obtained by incremental dynamic analysis (IDA) method. The vulnerability of the suspension bridge was analyzed by calculating the capacity demand ratio of different damage indicators. Aiming at the need for rapid assessment of post-earthquake disasters, a simplified model of single tower was established to calculate the vulnerability curve. The results show that, for the bridges in the example, the main tower stiffness has great influence on the self-anchored parallel cable-stayed

收稿日期:2018-07-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1500801);国家自然科学基金项目(51278471)

作者简介:黄 勇(1969-),男,黑龙江哈尔滨人,副研究员,工学博士,E-mail:huangyong@iem.ac.cn。

suspension bridge, and the main cable stiffness has great influence on the ground-anchored parallel cable-stayed suspension bridge. The stiffness of the main tower has great influence on the three types of bridges; the ground anchored suspension bridge is more vulnerable than the self-anchored suspension bridge, and the seismic performance of the double tower parallel cable bridge in the self-anchored suspension bridge is better than that of the single tower space cable bridge. The model can meet the needs of rapid assessment to a certain extent, and the error is basically acceptable in engineering.

Key words: suspension bridge; seismic fragility curve; nonlinear analysis; sensitivity analysis; simplified model

0 引言

随着中国经济的发展,大跨桥梁的设计建造技术逐步提高,悬索桥的建设数量正逐年增多。对现代意义的车行悬索桥而言,20 世纪 80 年代先后在西藏达孜、辽宁大连、福建泰宁建立起以钢桁架为加劲梁的地锚式悬索桥,90 年代逐渐出现了以钢筋混凝土门式框架为主塔,钢桁架、钢箱梁、混凝土桁架、混凝土肋板等为加劲梁的地锚式悬索桥。比较有代表性的大跨悬索桥有香港青马大桥、江苏江阴长江大桥,它们都是跨度超 1 000 m 的大跨悬索桥^[1]。进入 21 世纪,中国悬索桥建设进入了一个大发展的时期,其中 2009 年 12 月建成的西堠门大桥^[2],主跨长度为 1 650 m,设计使用年限为 100 年,主桥为两跨连续半漂浮钢箱梁结构的悬索桥,1 650 m 的跨度是目前中国悬索桥的最大主跨,也是世界第二长的跨度,其中钢箱梁全长位居世界第一。除了地锚式悬索桥继续向更大跨度发展之外,适用于 600 m 以下的自锚式悬索桥也如雨后春笋一般在各地出现。正在建设中的重庆鹅公岩轨道专用桥^[3],主跨达 600 m,塔高 164 m,主塔为钢筋混凝土两柱三横梁门式框架结构,加劲梁为五跨连续钢箱梁,是当今跨度最大的自锚式悬索桥。截至 2017 年底,据不完全统计,中国内地已建或在建的车行悬索桥达 160 多座,主要统计结果如图 1 所示。

中国悬索桥中地锚式和自锚式几乎各占一半,这与近些年中国各地自锚式悬索桥的大发展分不开。地锚式一般对放置锚锭地质条件要求较高,而自锚式悬索桥则适用条件要宽松很多。从中国悬索桥建成年代也可以看出 2010 年后其大发展的趋势。从桥梁跨度来看,中国跨度 600 m 以上的悬索桥占 29%,全都是地锚式悬索桥;跨度 200 m 以下(一般 60 m 以上)悬索桥多为自锚式,只有少数地锚式;跨度 200~600 m 区间地锚、自锚各近一半。从桥塔

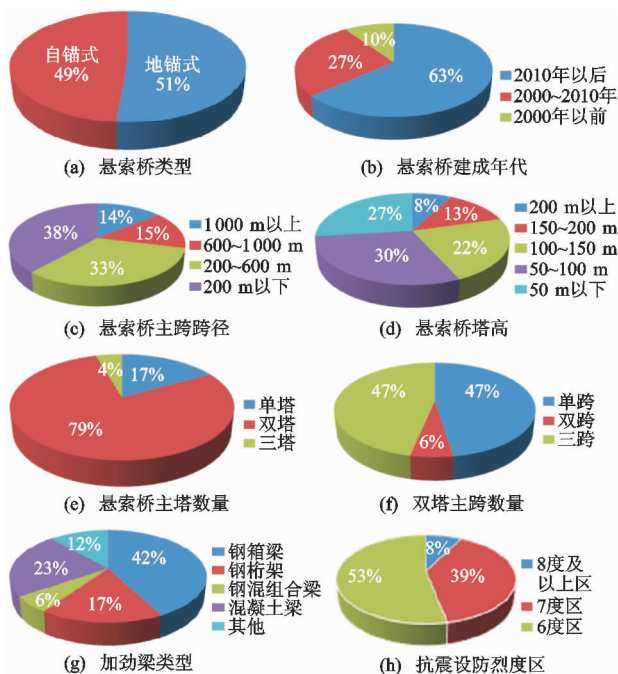


图 1 悬索桥基本信息统计结果

Fig. 1 Statistical Results of Suspension Bridge

高度来看,50~100 m 所占比重大一些,占 1/3,200 m 以上的高塔占了 8%。总的来说,中国悬索桥无论地锚式还是自锚式,双塔悬索桥所占比重最大,接近 80%。双塔悬索桥中主跨(悬吊跨)为三跨和单跨的各占 47%,不对称悬吊的占 6%。单塔多为双跨,单塔单跨相对较少。三塔悬索桥目前只有 7 座,占 4%。此外,中国悬索桥索塔几乎都采用钢筋混凝土,钢塔仅有 6 座,不到 4%;门式框架或 H 形框架占 94%;独柱塔往往采用空间索布置,仅限于自锚式悬索桥,仅有 9 座。加劲梁采用流线型扁平钢箱梁的比重相对要大些。另外,处于 7 度及以上烈度设防区^[4]的悬索桥占 47%,可见其地震安全性不容忽视。

为了把握中国已建、在建悬索桥的特点,能够在信息不完备情况下对此类桥梁进行易损性初估,对

收集到的 160 多座桥进行了统计分析,得到了统计意义上的桥梁主要参数间的关系,并利用线性拟合得到趋势拟合公式。塔高与主跨跨径的统计关系如图 2 所示。

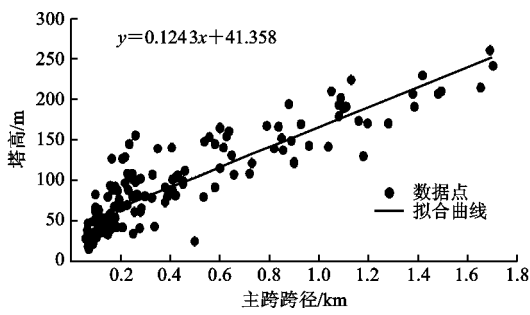


图 2 塔高与跨径的统计关系

Fig. 2 Statistic Relation for Pylon High and Span

车行悬索桥的历史震害并不多,主要有:1995 年日本阪神地震中在建的明石海峡大桥桥塔发生位移^[5];2008 年汶川地震中映秀、北川等地均有人行悬索桥震害的案例^[6-7],如图 3(a)所示的北川公园人行悬索桥;甘肃关头坝大桥^[8],为一座主跨 180 m 的公路悬索桥,兰州岸右侧索塔外侧面和重庆岸右侧索塔出现水平表面裂缝和混凝土碎落[图 3(b)]。此类桥梁往往是交通咽喉,且结构造价较高,一旦地震破坏,损失会较为严重。深入研究其动力特性、地震反应特点、各构件对整体结构反应的敏感性、地震作用下的可能破坏模式和震害机理是制定抗震对策方法的必要条件。特别是在此基础上,探究该类桥梁易损性的高效评估方法,对应应急救援及抗震规划都具有深远意义。同时,当前正在开展的“城市工程地震灾害模拟与评估系统”研究也需要建立此类桥梁的震害易损性评估模型。



图 3 汶川地震中悬索桥震害

Fig. 3 Earthquake Damages of Suspension Bridge in Wenchuan Earthquake

地震易损性可定义为在给定的地面运动强度下,结构构件或系统发生不同损伤状态的超越概率。地震易损性模型的建立通常采用 3 种方法:专家意见法^[9]、历史震害法^[10,11]、数值模拟法^[12-14]。因为悬索桥震害数据不多,地震易损性模型的建立多采

用数值模拟的方法来进行。余崇^[15]利用 Pan 等^[16]所提的桥梁地震易损性分析法对湘西矮寨大桥进行了地震易损性分析;张伟^[17]针对重庆青草背长江大桥进行了影响地震易损性参数的敏感度分析,认为桥面质量和矢跨比对该桥振动特性影响最大;Karmakar 等^[18]针对跨越美国 Palos Verdes 断层的悬索桥 Vincent Thomas 大桥进行了地震易损性分析,发现为抗震加固设置的阻尼器对中小地震有减震效果,而对大震却有加大震害的可能。巫生平^[19]以某自锚式悬索桥为工程背景,基于缆索整体性能退化和单根吊索断裂进行结构易损性分析,发现缆索整体性能退化时,性能退化程度与结构易损性呈非线性关系,且主缆易损性大于吊索易损性。目前国内外对悬索桥的易损性分析多针对某一具体桥梁,缺少对悬索桥分类分析及不同结构形式的比较。事实上,地锚与自锚、平行索面与空间索面、双柱框架塔与独柱塔的受力形式有所区别,相应的易损性特性会有所不同。本文在统计分析中国已建和在建悬索桥的基础上,分别选取一座地锚式平行双索面悬索桥(桥 A)、一座自锚式平行双索面悬索桥(桥 B)、一座自锚式独柱塔空间索面悬索桥(桥 C)进行地震易损性分析,并在此基础上探讨悬索桥可用于快速震害评估的简化模型。

1 典型案例桥梁及有限元模型

桥 A 主桥为 410.2 m+1 418 m+363.4 m 双塔三跨悬索桥,主梁采用加劲钢箱梁,主塔和过渡墩采用混凝土门式框架结构,主塔基础采用钻孔灌注桩基础。主塔采用 C55 混凝土,过渡墩采用 C30 混凝土,各承台和桩均采用 C35 混凝土。二期恒载包含 75 mm 厚沥青混凝土桥面铺装和其他二期恒载共计 63.527 kN·m⁻¹。利用 MIDAS/Civil 建立桥 A 的有限元模型,如图 4 所示。主梁、主塔及横梁、过渡墩及系梁均采用空间梁单元模拟;悬索采用桁架单元模拟,但要考虑垂度效应和恒载引起的几何刚度影响;支座用连接单元模拟;吊杆采用桁架单元模拟,考虑恒载引起的几何刚度影响;吊杆和主梁连接处采用主从节点方式约束;主梁顺桥向无约束;桩基础采用空间梁单元模拟,并在冲刷线下一定深度嵌固。

桥 B 结构形式为 46 m+108 m+248 m+108 m+46 m 双塔五跨钢-混凝土组合梁自锚式悬索桥,边主跨比为 1/2.3,主跨主缆垂跨比为 1/5。桥塔为钢筋混凝土 H 形结构,高 80.5 m;加劲梁下方设置

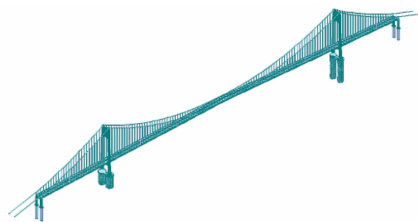


图 4 桥 A 有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Bridge A

1 道预应力混凝土下横梁,为空心矩形截面;塔顶处为钢桁架上横梁;主梁梁高 3.2 m,桥面板全宽 40 m。主塔与主梁均采用 C50 混凝土,桥面板采用 C55 混凝土,主塔上横梁为 Q235E 钢,组合钢梁为 Q370qE 钢,主缆吊杆均采用高强钢丝。与桥 A 建模方法相似,桥 B 的有限元模型如图 5 所示。主塔采用底部空间固接处理,对于主缆锚固点连接,主缆在主索鞍部连接,吊杆与加劲梁连接均采用刚性主从约束实现。

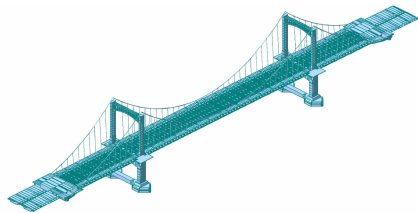


图 5 桥 B 有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model of Bridge B

桥 C 主桥采用 80 m+190 m+260 m+80 m 四跨连续半漂浮体系,主梁采用分离式双箱断面,两封闭钢箱梁之间用横向连接箱进行连接,钢箱梁梁高 3.2 m。全桥 2 根主缆呈空间缆形,索塔塔柱总高 150 m,采用 C50 混凝土,截面为哑铃形,根部尺寸为 10 m×10 m,向上截面尺寸逐渐缩减为 10 m×10 m。基础为群桩基础。采用与桥 A 相同方法建立桥 C 的有限元模型,如图 6 所示,塔底墩底均采用固接形式。

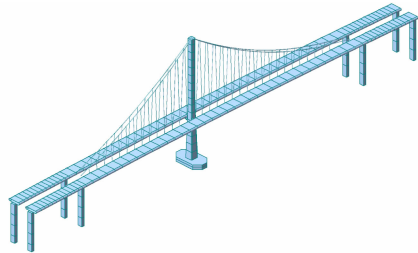


图 6 桥 C 有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model of Bridge C

2 典型案例桥梁参数敏感性分析

对上述 3 座典型案例桥梁进行动力特性分析,

并在此基础上通过改变桥梁结构设计参数,包括桥面系质量、主梁刚度、主缆刚度和主塔刚度等,得到悬索桥结构设计参数变化对桥梁自振特性的影响,以了解各案例桥梁结构的特点。这里定义相对参数比 $p=I/I_0$, I_0 为原悬索桥模型主梁、主缆及主塔的刚度或桥面质量, I 为改变后的各构件参数。

对于悬索桥的抗震设计而言,主塔作为重要构件影响着整桥的易损性。用主塔顺桥向和横桥向弯曲一阶频率变化来分析各参数的敏感度,结果如图 7 所示。

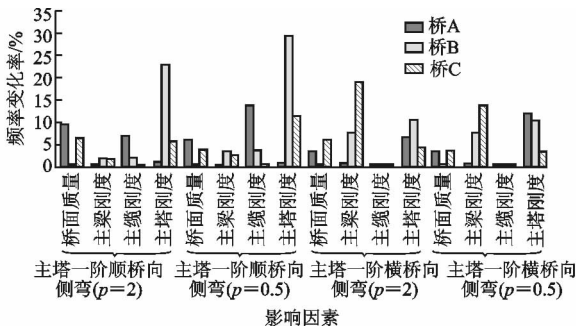


图 7 自振特性的影响因素分析结果

Fig. 7 Analysis Results of Influence Factors of Self-vibration Characteristics

由图 7 可以看出:对于顺桥向弯曲振动,主塔刚度对自锚式平行索面悬索桥影响最大,频率变化率可高达 30%,桥面质量对其影响最小;主缆刚度对地锚式平行索面悬索桥影响最大,频率变化率在 10%左右,主梁刚度对其影响最小;桥面质量和主塔刚度对自锚式空间索面悬索桥均有一定影响。对于横桥向弯曲振动,主塔和主梁刚度对其影响较大,因为塔梁连接形式可能不同,相对来说,主塔刚度影响更为明确。主缆刚度对 3 座桥梁的影响均很小,桥面质量有一定影响。

3 地震易损性分析

3.1 主桥塔底断面的能力计算

以桥 B 为例,计算得到恒载作用下主桥塔底验算断面单元划分及顺桥向弯矩-曲率图,见图 8。通过弯矩-曲率图可以划分性能指标,见图 9。

以往的研究^[15,17]及震害经验表明悬索桥在地震中易损构件是主塔,而主塔的易损部位是塔底断面。本文利用上述性能指标,通过增量动力分析(IDA)法计算地震需求,采用二次多项式曲线来拟合得到标准差^[16],进而计算这 3 座悬索桥桥塔不同损伤状态超越概率的易损性曲线。

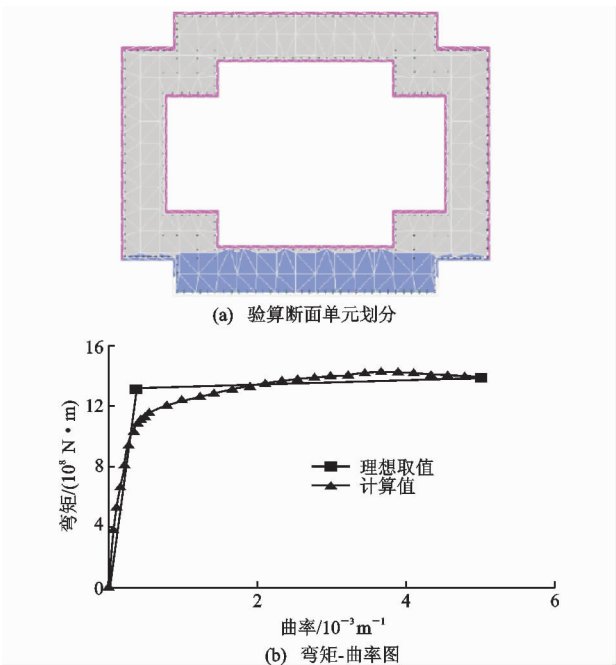


图 8 桥 B 塔底验算断面单元划分及顺桥向弯矩-曲率图
Fig. 8 Unit Division and Moment-curvature Graph Along Longitudinal of Key Section at Pylon of Bridge B

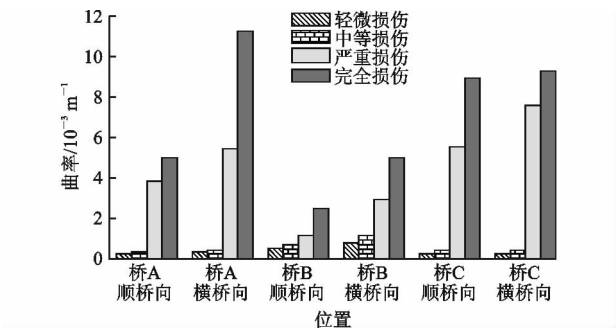


图 9 各桥水平两方向性能等级划分
Fig. 9 Division of Two Horizontal Direction Performance Grades for Each Bridge

3.2 地震动选择

本文选取了 PEER 推荐的 22 条远场地震动,进行归一化,每条地震动按 0.1g (g 为重力加速度),0.2g,0.4g,0.8g,1.0g 设 5 个强度等级,分顺桥向和横桥向 2 个方向进行 IDA 计算,所选地震动如表 1 所示。

3.3 易损性曲线

在建立的有限元模型中,于塔底处顺桥向和横桥向设置塑性铰单元。用调整得到的一系列地震波对建立的有限元模型进行非线性时程分析,得到桥梁的地震响应即地震需求 S_d ,本文中 S_d 为塔底的截面曲率。

确定各构件在不同损伤状态下的损伤指标 S_c ,

表 1 IDA 计算所选 22 条地震动
Tab. 1 22 Ground Motion Records for IDA

编号	地震动	编号	地震动
1	CAPEMEND_RIO360	12	KOCAELI_DZC270
2	CHICHI_CHY101-N	13	LANDERS_CLW_TR
3	CHICHI_TCU045-N	14	LANDERS_YER270
4	DUZCE_BOL090	15	LOMAP_CAP000
5	FRIULI_A-TMZ000	16	LOMAP_GO3000
6	HECTOR_HEC090	17	MANJIL_ABBAR-L
7	IMPVALL_H-DLT352	18	NORTHR_LOS270
8	IMPVALL_H-E11230	19	NORTHR_MUL279
9	KOBE_NIS000	20	SFERN_PEL090
10	KOBE_SHI000	21	SUPERST_B-ICC000
11	KOCAELI_ARC000	22	SUPERST_B-POE270

并分别计算地震需求 S_d 与各级损伤指标 S_c 的比值 S_d/S_c ,来界定地震需求与损伤指标的关系。利用二次曲线拟合 $\ln(S_d/S_c)$ 与 $\ln(G)$ (G 为地震波峰值加速度)相应的散点后可得到均值 μ 和标准差 σ ,进而求得超越概率,理论公式如下

$$\mu=a[\ln(G)]^2+b\ln(G)+c$$
 (1)

$$\sigma=\sqrt{S_r(n-2)}$$
 (2)

式中: S_r 为样本点残差平方和; n 为样本点数量; a, b, c 为拟合参数。

地震需求 S_d 与某一损伤指标 S_{cl} 的比值 S_d/S_{cl} 大于 1 的概率为超越概率 P_f ,用公式表达如下

$$P_f=P(\frac{S_d}{S_c}>1)=1-\Phi(\frac{\ln1-\mu}{\sigma})=\Phi(\frac{\mu}{\sigma})$$
 (3)

由此可以得到 3 座悬索桥主塔塔底验算断面在不同损伤状态下的易损性曲线,如图 10 所示。比较这 3 座桥的易损性曲线可以看出:桥 A 横桥向相对容易受到震害;桥 C 在 0.3g 之后顺桥向易损概率超过桥 A;桥 B 无论顺桥向还是横桥向在轻微和中等破坏中都要轻于其他两桥。超过 50% 损伤超越概率对应的 G 值如表 2 所示,能够在一定程度看出各类桥的鲁棒性^[8]。图 11 将 3 座桥中等概率时的 G 值进行了比较,桥 B 相对抗震能力较好,特别是在轻微和中等损伤程度中优势比较突出。

4 悬索桥易损性分析简化模型

为了满足在震后快速评估的需求,需要建立相对悬索桥精细有限元模型更为简化的地震反应计算模型。通过参数敏感度分析和实际桥梁振动试验研究^[7],悬索桥主塔与缆索桥面系振动相对独立,主要体现在横桥向基本可以不考虑缆索桥面体系的影响。以桥 A 为例,分别建立整桥和单塔的有限元模

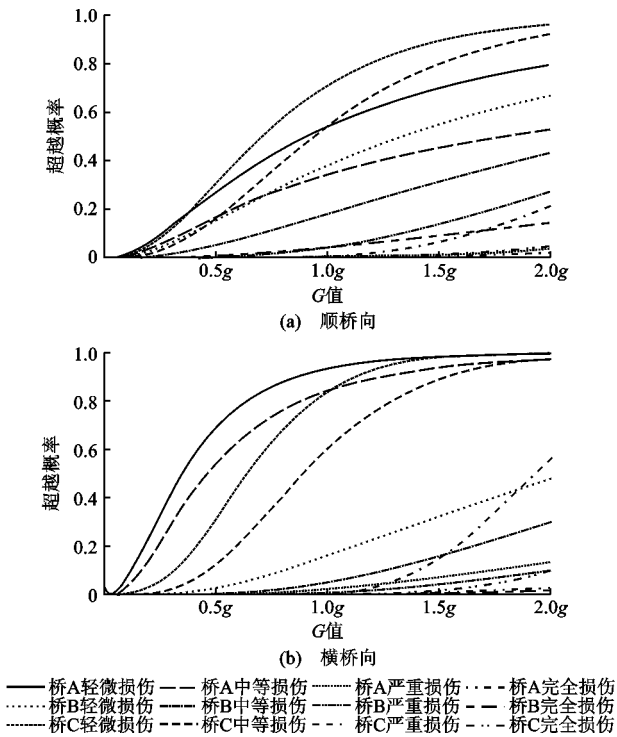


图 10 3 座桥易损性曲线

Fig. 10 Fragility Curve of Three Bridge Classes

表 2 中等概率对应的 G 值

Tab. 2 G Value Corresponding to Medium Probability

位置	G 值			
	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	完全损伤
桥 A 顺桥向	0.91g	1.77g	9.15g	10.90g
桥 A 横桥向	0.35g	0.46g	4.59g	7.89g
桥 B 顺桥向	1.33g	2.34g	3.46g	6.43g
桥 B 横桥向	2.08g	2.76g	4.13g	7.91g
桥 C 顺桥向	0.71g	0.94g	2.68g	3.92g
桥 C 横桥向	0.64g	0.90g	1.93g	2.94g

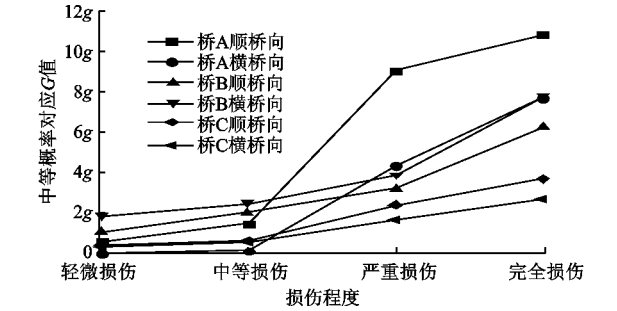


图 11 3 座桥中等概率 G 值比较

Fig. 11 Comparison of G Values with Median Probability for Three Bridge Classes

型进行模态分析,有限元模型如图 12 所示,结果如表 3 所示。可知横桥向相对误差较小,顺桥向相差较大。

进一步通过与前述易损性分析时相同的 IDA

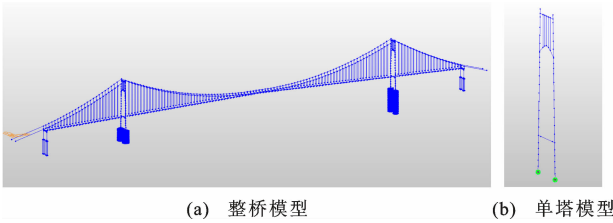


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite Element Models

表 3 单塔模型与整桥模型比较

Tab. 3 Comparison of Single Tower Model and Whole Bridge Model

主要振型	单塔模型		整桥模型		相对误差/%
	周期/s	质量贡献率	周期/s	质量贡献率	
顺桥向振动	9.462 7	0.573 1	4.656 2	0.043 6	-103.23
横桥向振动	4.730 2	0.604 3	4.649 2	0.268 6	-1.74

计算,可得塔底内力的地震反应结果:地震动输入情况下,塔底弯矩、剪力单塔模型与整桥模型相对误差不超过 11%,完全可以满足工程上的简化要求。顺桥向相对误差最高时可达 63%,需要进行一定的模型修正,才能满足工程简化条件。

根据悬索桥的受力特点,主塔顺桥向主要承受缆索体系传递来的荷载和约束刚度,主塔顺桥向振动往往与桥面缆索体系顺桥向振动耦合在一起。因此考虑将桥面缆索体系顺桥向振动等效为一个单质点体系串联在塔顶,单质点质量为主塔承担的主梁质量 M_b ,刚度为与整桥顺桥向振动周期 T 相一致的等效刚度。经过大量试算,发现仅考虑等效刚度能更好地模拟顺桥向的动力反应,故简化模型最终采用主塔顺桥向塔顶施加等效刚度弹簧约束,刚度 K_b 取与整桥顺桥向振动周期 T 相一致的刚度,即 $K_b = (2\pi/T)^2 M_b$ 。利用精细化整桥模型和简化单塔模型计算得到的轻微损伤和中等损伤易损性曲线如图 13 所示,可以看出结果比较接近,简化模型是可靠的。

5 结 语

(1)对于算例桥梁而言,主塔顺桥向弯曲振动,主塔刚度对自锚式平行索面悬索桥影响大,主缆刚度对地锚式平行索面悬索桥影响大;主塔横桥向弯曲振动,主塔刚度对 3 座桥梁影响均较大,主缆刚度的影响均很小。

(2)对于算例桥梁而言,地锚式悬索桥比自锚式悬索桥易损,而自锚式悬索桥中双塔平行索面桥抗

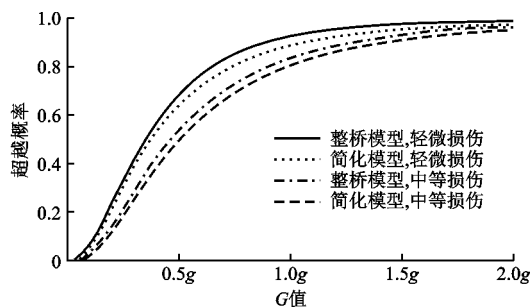


图 13 桥 A 两类模型得到的易损性曲线比较

Fig. 13 Comparison of Fragility Curves by Two Kind of Models of Bridge A

震性能优于独塔空间索面桥。

(3)单塔简化模型能够在一定程度上满足快速评估的需求,误差基本在工程上可以接受的范围。

(4)为了把握 3 座典型悬索桥的易损特点且便于简化模型的提出,本文仅列出了构件的易损性情况,对于系统的易损性需进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 中国公路学会桥梁和结构工程分会. 面向创新的现代桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
Bridge and Structural Engineering Branch of China Highway & Transportation Society. Innovation-oriented Contemporary Chinese Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,2009.
- [2] 宋 晖,沈 旺,王昌将,等. 西堠门大桥建设关键技术[M]. 北京:人民交通出版社,2015.
SONG Hui, SHEN Wang, WANG Chang-jiang, et al. The Key Engineering Technology of Xihoumen Bridge Construction [M]. Beijing: China Communications Press,2015.
- [3] 耿 波,李伟然. 重庆鹅公岩轨道专用悬索桥船撞作用下车安全性与舒适性研究[J]. 公路交通技术, 2017,33(6):55-59,65.
GENG Bo, LI Wei-ran. Study on the Driving Safety & Comfort on Chongqing Egongyan Monorail Suspension Bridge with the Effect of Vessel Collision[J]. Technology of Highway and Transport, 2017,33(6): 55-59,65.
- [4] GB 18306—2015,中国地震动参数区划图[S].
GB 18306—2015, Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China[S].
- [5] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1996.
FAN Li-chu. Aseismic of Bridges [M]. Shanghai: Tongji University Press,1996.
- [6] 李 乔,赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.
- [7] LI Qiao, ZHAO Shi-chun. Analysis of Seismic Damage of Engineering Structures in Wenchuan Earthquake[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2008.
- [8] 《地震工程与工程振动》编辑委员会. 汶川 8.0 级地震工程震害概览[M]. 北京:科学出版社,2008.
Editorial Committee of *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*. General Introduction of Engineering Damage of Wenchuan Ms8.0 Earthquake [M]. Beijing: Science Press,2008.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 汶川地震公路震害图集 [M]. 北京:人民交通出版社,2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wenchuan Highway Earthquake Damage Atlas [M]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [10] SCAWTHORN C, KHATER M, ROJAHN C, et al. ATC-25 Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifeline in the Conterminous United States [R]. Redwood City: Applied Technology Council, 1991.
- [11] BASOZ N I, KIREMIDJIAN A S, KING S A, et al. Statistical Analysis of Bridge Damage Data from the 1994 Northridge, CA, Earthquake [J]. Earthquake Spectra, 1999,15(1):25-54.
- [12] CHOI E, DESROCHES R, NIELSON B. Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zones [J]. Engineering Structures, 2003,7(1):41-51.
- [13] NIELSON B G, DESROCHES R. Analytical Seismic Fragility Curves for Typical Bridges in the Central and Southeastern United States[J]. Earthquake Spectra, 2007,23(3):615-633.
- [14] ZHANG J, HUO Y L, BRANDENBERG S J, et al. Effects of Structural Characterizations on Fragility Functions of Bridges Subject to Seismic Shaking and Lateral Spreading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008,7(4):369-382.
- [15] RAMANATHAN K, DESROCHES R, PADGETT J E. A Comparison of Pre- and Post-seismic Design Considerations in Moderate Seismic Zones Through the Fragility Assessment of Multispan Bridge Classes [J]. Engineering Structures, 2012,45:559-573.
- [16] 余 崇. 矮寨大桥基于性能的地震易损性分析[D]. 长沙:湖南大学,2013.
YU Chong. Performance-based Seismic Fragility Analysis of Aizhai Bridge[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [17] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSN M. Seismic Fra-

gility of Continuous Steel Highway Bridges in New York State[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6):689-699.

[17] 张 伟. 大跨度悬索桥地震动响应影响因子及易损性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.

ZHANG Wei. A Long-span Suspension Bridge Seismic Response Factors and Vulnerability Research [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.

[18] KARMAKAR D, RAY-CHAUDHURI S, SHINOZU-KA M. Finite Element Model Development, Validation and Probabilistic Seismic Performance Evaluation of Vincent Thomas Suspension Bridge[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11(2):223-237.

[19] 巫生平. 基于缆索体系性能退化的悬索桥易损性分析[J]. 福建建筑, 2017(4):70-73.

WU Sheng-ping. Vulnerability Analysis of Suspension Bridges Based on the Degradation of Cable System Performance[J]. Fujian Architecture & Construction, 2017(4):70-73.