

文章编号:1673-2049(2019)02-0077-07

# 行波效应下高墩多塔斜拉桥地震易损性分析

李立峰<sup>1,2</sup>, 曹方亮<sup>1,2</sup>, 胡思聪<sup>1,2</sup>, 陈明玉<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为了研究行波效应对大跨高墩多塔斜拉桥抗震性能的影响,以一座超高墩四塔斜拉桥工程实例为分析对象,采用概率性的易损性分析方法,选用 OpenSees 抗震有限元分析软件,建立全桥非线性动力有限元模型。从 PEER 数据库中选取 80 条有代表性的地震波数据,采用位移输入法进行地震波的多点输入以计入行波效应的影响,考虑 7 种不同剪切波速和一致激励情况,完成全过程非线性分析。结合大桥特点,考虑 3 种纵向约束体系,选择支座、斜拉索、主梁和桥塔作为易损构件,并通过比较后选取 PGD(地震波峰值位移)作为地震动强度指标,建立结构地震概率需求模型,计算和绘制了易损构件的易损性曲线,选择 MPGD 值(损伤超越概率  $P_t=50\%$  对应构件的 PGD 值)作为构件损伤评价指标。结果表明:支座是最易损伤的构件,桥塔相对来说易损性最小;行波效应对支座的抗震有利,对纵向全约束和半约束体系的抗震也有利;随着波速的增加,各构件和体系的抗震水平基本趋于一致激励的结果。

**关键词:**斜拉桥;行波效应;地震易损性;一致激励

**中图分类号:**TU311 **文献标志码:**A

## Seismic Fragility Analysis of High-pier Multi-tower Cable-stayed Bridge Under Traveling Wave Effect

LI Li-feng<sup>1,2</sup>, CAO Fang-liang<sup>1,2</sup>, HU Si-cong<sup>1,2</sup>, CHEN Ming-yu<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the influence of traveling wave effect on seismic performance of long-span high-pier multi-tower cable-stayed bridge, a four-tower cable-stayed bridge with ultra high-pier was taken as the analysis object, and the fragility analysis method based on probability was used. The seismic finite element analysis software OpenSees was used to establish the nonlinear dynamic finite element model of whole bridge. A suite of 80 ground motions typically were selected from database PEER, and the displacement input method was used to carry out multi-point excitations to account for the influence of traveling wave effect. Considering seven different shear wave velocities and uniform excitation, the whole process of non-linear analysis was completed. According to the characteristics of bridge, considering three kinds of longitudinal restraint systems of whole bridge, the supports, cables, girders and pylons were selected as vulnerable members, and PGD (peak ground displacement) was selected as the index of earthquake ground motion intensity after comparison. The seismic probabilistic demand model of

收稿日期:2018-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51278183);交通运输部建设科技项目(2013 318 798 320);陕西省交通运输厅科技项目(17-19K)

作者简介:李立峰(1971-),男,湖南沅江人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lilifeng@hnu.edu.cn。

structures was established, the fragility curves of fragility members were calculated and drawn, and the MPGD (PGD value of component corresponding damage transcendence probability  $P_f = 50\%$ ) was selected as the damage evaluation index of components. The results show that the support is the most vulnerable component, and the tower is relatively minimal in vulnerability. The traveling wave effect is beneficial to the seismic resistance of the support, the longitudinal fully constraint and semi-constraint systems. With the increase of wave speed, the seismic resistance of various components and systems tends to be the result of uniform excitation.

**Key words:** cable-stayed bridge; traveling wave effect; seismic fragility; uniform excitation

## 0 引言

大跨度桥梁的地震反应分析一般要考虑地面空间变化效应<sup>[1]</sup>,对于地面支承距离大、延伸长、地形复杂的大跨度桥梁,国内外学者对其抗震性能的研究已较为成熟<sup>[2-3]</sup>,地震动空间变化的影响因素主要有行波效应、局部场地效应、部分相干效应和波的衰减效应。欧洲规范<sup>[4]</sup>是第 1 个考虑了非一致激励影响的规范,其中规定桥长大于 200 m 且存在地质不连续或明显不同地貌时,或桥梁总长大于 600 m 时,无论地质情况如何,均应考虑地震动空间变化对桥梁的影响,并给出了指导原则。中国目前最新的公路桥梁抗震规范对此也作了明文规定<sup>[5]</sup>。行波效应作为空间变化最主要的影响因素之一,必然成为大跨桥梁结构抗震性能评估的一个重要依据。

斜拉桥拉索体系具有优越的跨越能力,是大跨度桥梁的最主要桥型,其中大跨度多点地面支承的高墩多塔斜拉桥近年来在中国山区公路中得到越来越广泛的应用。这类高墩多塔斜拉桥 1 阶频率低、周期长,整体结构刚度较柔,使得其动力特性及抗震性能均有别于传统的低墩双塔斜拉桥,地面运动的空间变化影响更加不容忽视<sup>[6]</sup>。

目前,基于性能的抗震设计思路已经得到广大工程师和学者的认可,并逐渐被各国抗震设计规范所采纳<sup>[7-8]</sup>。考虑到地震动的随机性,应当采用基于性能的方法对桥梁结构进行概率性抗震性能分析,地震易损性分析就是基于性能设计的重要一环,其描述的是结构在不同地震强度作用下超过某一性能目标状态的超越概率,是一种基于概率的结构性能分析方法,该法已经越来越多地运用于工程结构分析当中<sup>[1,9]</sup>。采用易损性分析方法研究空间变化特性对大跨桥梁结构抗震性能的影响尚不多见。

本文以一座超高墩四塔斜拉桥工程实例为研究对象<sup>[10]</sup>,考虑材料和几何非线性,采用 OpenSees 建立全桥动力有限元分析模型,选取 80 条地震波进行

动态时程分析,考虑行波效应对地震波进行处理分析,针对塔梁纵向半约束、纵向全约束和纵向全飘浮 3 种结构体系,建立斜拉桥系统易损性曲线评估桥梁易损构件的抗震水平,从不同体系和不同构件 2 个角度研究行波效应对高墩多塔斜拉桥地震反应的影响。

## 1 分析模型

### 1.1 工程概况

本文采用一座大跨径高墩四塔预应力混凝土双索面斜拉桥,跨径布置为 165 m+3×380 m+165 m,桥梁全长为 1 470 m。图 1 为大桥整体布置及构造形式,4 座索塔总高度均超过 250 m,墩高超过 150 m,其中 T7 索塔高 287 m,桥墩部分高 178 m。主桥选用单箱四室混凝土主梁,梁高 3.2 m,箱梁顶板宽 27.5 m,箱梁底板宽 16.14 m,底板及斜腹板厚 0.28 m,中间腹板厚 0.3 m。墩梁间安装有聚四氟乙烯滑板支座,梁端采用 960 型 RB 多向伸缩装置。

### 1.2 建立模型

本文研究分析采用 OpenSees 抗震有限元分析软件,建立全桥非线性动力有限元模型。为考虑构件损伤,主梁及索塔均采用非线性梁柱单元模拟;截面均采用纤维截面,混凝土材料采用基于 Mander 本构的单轴材料模型,纵向钢筋采用双折线本构模型。拉索采用桁架单元模拟,为考虑拉索松弛和屈服,拉索材料采用理想弹塑性材料模型,拉索的弹性模量根据 Ernst 公式进行等效折减,给结构施加初始索力。梁端支座为滑板支座,采用零长度单元模拟。拉索与主梁、索塔采用刚性连接,索塔底端采用直接嵌固法模拟。全桥采用瑞利阻尼,阻尼比取为 3%。同时为考虑结构自重对地震响应的影响,动力时程分析前先进行非线性自重荷载静力分析。

结构的地震响应分析需先了解结构的动力特性,本文采用 3 种结构体系,如图 2 所示。体系 A 四个桥塔均为塔梁墩固接;体系 B 中塔 T6, T7 塔梁

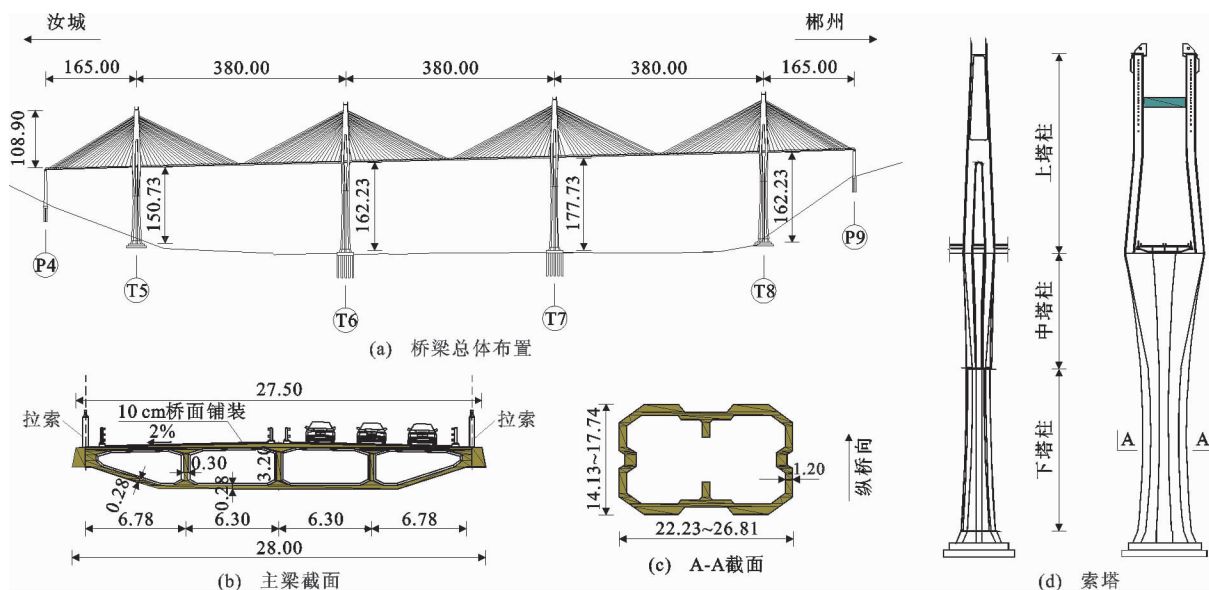


图 1 桥梁整体布置及构造形式(单位:m)

Fig. 1 Overall Arrangement and Structural Forms of Bridge (Unit:m)

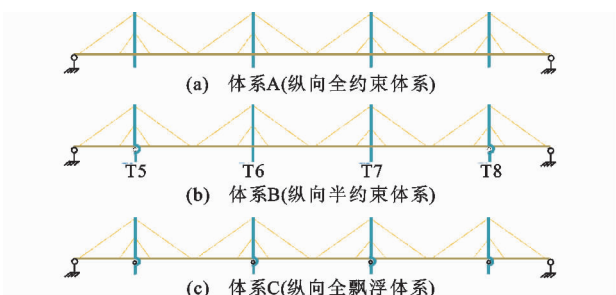


图 2 桥梁结构体系示意

Fig. 2 Schematic Diagram of Bridge Structural System

墩固接,边塔 T5, T8 设置无纵向约束的弹性支座;体系 C 四个桥塔均设置无纵向约束的弹性支座。在软件中以上支座各约束方向数值模拟刚度  $k_b$  取为  $1 \times 10^{15} \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

结构的动力特性(频率和振型)与其质量和刚度有关,3 种结构体系的纵向刚度明显不同,其动力特性也存在一定差异。考虑到振型参与量达到模型分析要求,本文计算了结构前 150 阶振型,其中 1 阶振型为纵向振动,3 种体系的自振周期分别为 5.2, 6.6, 10.8 s。模态分析结果显示,大跨度斜拉桥不能忽略高阶振型的影响。

## 2 地震波选取与输入

由于地震动的随机性,不同的地震波具有不同的峰值、频谱特性和持时,因此必须选择足够数量的地震波进行统计分析<sup>[11]</sup>,本文从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)强震数据库中选取了 80 条地震波(包含加速度波和位移波)。所选地震波特性参

数覆盖较广,包括长、短周期波,其中地震波峰值位移(PGD)取值范围为 7~324 cm,所选地震波信息如图 3 所示,其中  $g$  为重力加速度,  $\xi$  为阻尼比。

考虑到大跨桥梁具有很强的方向性,本文主要研究地震波沿纵桥向输入,已知地震波在基岩中的传播速度为  $2\,000 \sim 2\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在软土中的传播速度为  $50 \sim 250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文在考虑行波效应时将剪切波速分为 8 组工况,如表 1 所示。在 OpenSees 中,非一致激励采用位移波输入,一致激励采用加速度波输入。位移波输入方式和加速度波输入方式的行波效应分析原理参见文献[12]。

## 3 地震动强度与损伤指标的确定

### 3.1 地震动强度指标的确定

目前易损性分析方法在桥梁抗震上的应用已经较为成熟,易损性分析原理本文就不再赘述,具体参见文献[9]。

易损性分析首先需要通过概率地震需求分析建立概率地震需求模型,而建立地震概率需求模型需要首先确定符合结构特性的地震动强度指标,满足结构响应预测的可靠性。目前常用的强度指标主要有地震波的峰值加速度(PGA)、速度(PGV)、位移(PGD),其中 PGA 适用于短周期结构,PGV 适用于长周期结构,而 PGD 则适用于更长周期的结构。考虑到大跨斜拉桥的柔性较大,周期较长,且本文行波效应计算采用的是位移波,故采用 PGD 作为地震动强度指标。同时,本文参考文献[9]选取梁端位移  $d$ 、拉索应变  $\epsilon$ 、桥墩截面曲率  $\varphi$ 、主梁弯矩  $M$  四类能

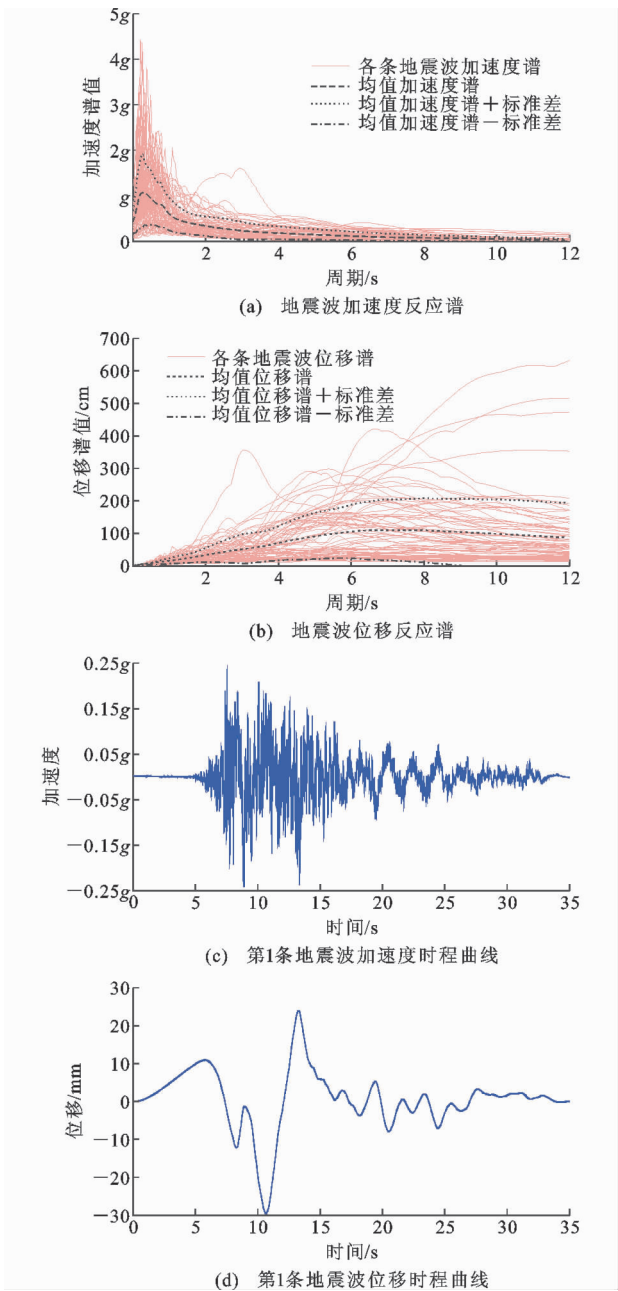


图3 地震波反应谱和时程曲线( $\xi=0.03$ )

Fig. 3 Seismic Wave Response Spectrum and Time History Curves ( $\xi=0.03$ )

表1 工况与对应波速

Tab. 1 Working Condition and Corresponding Wave Speed

工况编号	1	2	3	4	5	6	7	8
波速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	50	100	200	380	760	1 520	2 500	$\infty$

注:波速 $\infty$ 表示一致激励情况。

够反映斜拉桥损伤特性的工程需求参数,采用一次拟合得到相应的地震概率需求模型。由于篇幅所限,仅列出了纵向半约束体系一致激励下的地震概率需求模型,如图4所示,其中 $P$ 为PGD值。

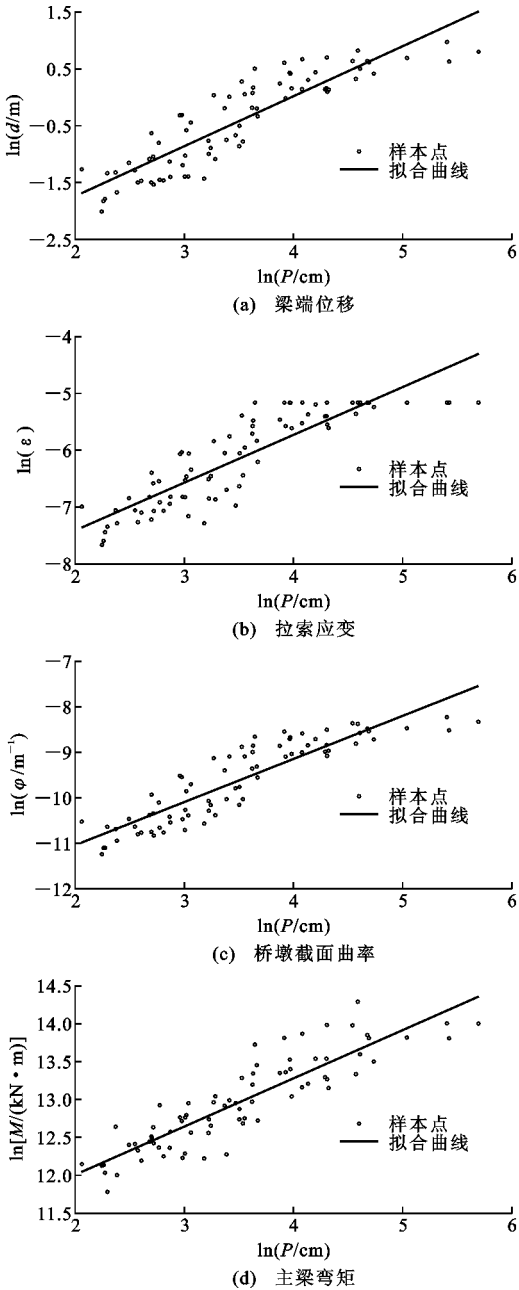


图4 纵向半约束体系一致激励下地震概率需求模型

Fig. 4 Seismic Probabilistic Demand Model in Longitudinal Semi-constraint System Under Uniform Excitation

3.2 损伤指标的确定

研究表明<sup>[9]</sup>,对于斜拉桥结构,其支座、斜拉索、主梁、桥塔和边墩发生破坏的概率较大,但考虑到分析桥梁边墩采用的是滑板支座,边墩不易发生损伤,故仅分析支座、斜拉索、主梁、桥塔这4类构件的破坏形式。要评价桥梁结构的易损性,首先要根据性能水准来确定结构的破坏状态并量化其损伤指标。本文针对大跨斜拉桥进行研究时仅考虑轻微损伤、中等损伤和严重损伤3种状态。

计算模型采用的支座类型是滑板支座,其在大

震作用下的破坏状态与很多因素有关,要确定其损伤状态比较复杂。本文参考文献[9]直接用梁端位移量来定义其损伤状态。轻微损伤对应梁端位移达到伸缩缝容许位移,中等损伤对应梁端位移超过支座尺寸,严重损伤对应梁端位移超过盖梁尺寸,引起落梁。

斜拉索作为斜拉桥最主要的传力构件,在强震作用下可能会出现应力超限,本文采用应变比  $\alpha_c = \epsilon_1 / \epsilon_2$  来定义其损伤状态,其中  $\epsilon_1, \epsilon_2$  分别为地震作用下和结构自重作用下拉索轴向应变。轻微损伤对应拉索在地震作用下索力增大 1 倍,即  $\alpha_c = 2.00$ ; 严重损伤对应拉索达到极限承载力,即  $\alpha_c = 2.50$ ;  $\alpha_c = 2.25$  指定为中等损伤。

斜拉桥的桥塔、主梁主要承担轴力和弯矩,故采用曲率延性系数  $\mu$  来定义其损伤状态,  $\mu = \varphi_1 / \varphi_2$ , 其中  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为地震作用下结构的最大曲率和首次屈服曲率。轻微损伤对应截面最外侧钢筋屈服点; 中等损伤对应双折线的弯折点,此时结构出现塑性铰; 严重损伤对应弯矩最大点。构件截面特征点通过弯矩-曲率关系得到。

根据以上4类构件损伤指标的确定方法,可以

得到各构件的损伤状态,如表 2 所示。

表 2 构件损伤指标与损伤状态

Tab. 2 Damage Indexes and Damage States of Component

构件名称	损伤指标	损伤状态		
		轻微损伤	中等损伤	严重损伤
支座	$d/m$	0.96	1.35	1.69
斜拉索	$\alpha_c$	2.00	2.25	2.50
桥塔	$\mu_T$	1.00	1.29	4.94
主梁	$\mu_G$	1.00	1.30	4.27

注:  $\mu_T, \mu_G$  分别为桥塔、主梁曲率延性系数。

4 地震易损性分析

4.1 一致激励下构件易损性分析

对于构件易损性分析,本文取地震波峰值位移 (PGD) 作为易损性曲线的自变量,根据最不利原则,取梁端位移、92# 斜拉索和 6# 桥塔下塔柱收腰处截面曲率、主梁跨中偏左 14 m 处截面曲率为分析对象,以构件超越概率为因变量,建立一致激励下构件易损性曲线。图 5 为 3 种体系在一致激励下构件易损性曲线。

由图 5 可知:不同构件在地震作用下对应各损伤状态的损伤超越概率都随 PGD 的增大而增大;通

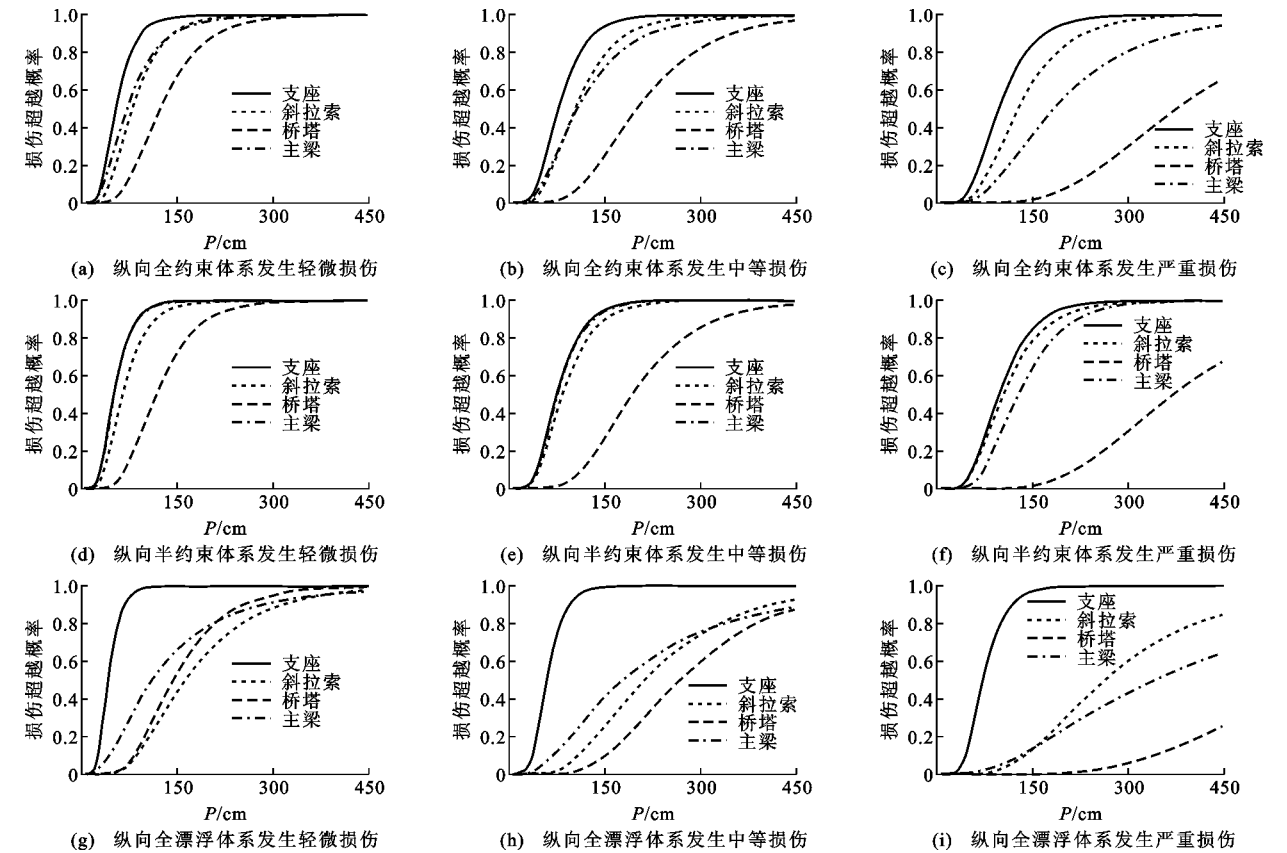


图 5 一致激励下构件易损性曲线

Fig. 5 Component Fragility Curves Under Uniform Excitation

过损伤超越概率  $P_f=50\%$  时,各构件对应的 PGD 值表示各构件在地震作用下失效概率的大小,为表示方便,以下均称其为 MPGD(记为  $P_M$ )。MPGD 值越大,则表明结构构件失效概率越小,构件的抗震能力越强。不难看出,支座是最易损伤的构件,桥塔相对来说易损性最小,因为本桥桥塔实际建造时配筋较多,并且高墩桥塔的延性也相对较好。主梁损伤是由于地震作用下墩顶产生的较大变形对受约束的纤细主梁造成的,而斜拉索的损坏是由于强震作用下桥塔与主梁之间产生较大的变形,从而使拉索

承受巨大的轴向力。另外,考虑到 3 种体系下桥塔几乎都具有较小的失效概率,以下将仅分析支座、斜拉索和主梁在行波效应下的构件易损性。

4.2 3 种结构体系易损性分析比较

为了更加直观地分析行波效应下 3 种结构体系的抗震性能及其差异,本文将 3 种体系下易损构件在不同剪切波速下的 MPGD 值绘制成图,并就每个易损构件对应 3 种体系的抗震能力进行比较。考虑篇幅,仅列出了具有代表性的轻微损伤状态下 3 种构件的计算结果,如图 6 所示。

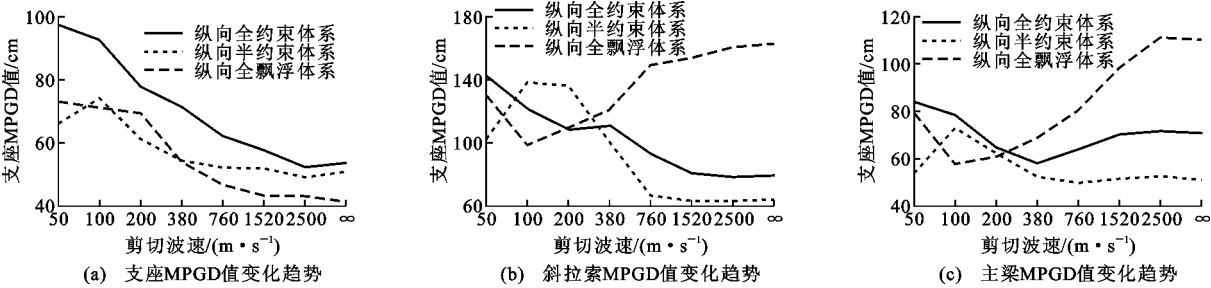


图 6 轻微损伤状态下构件 MPGD 值变化趋势

Fig. 6 Variation Trends of MPGD Value of Component Under Slight Damage State

由图 6 可知,支座在纵向全约束体系下抗震能力最佳,该体系下桥塔对主梁的约束作用限制了主梁纵桥向位移,使支座不易发生损坏。当波速较小时,漂浮体系下支座抗震能力高于半约束体系,这应该是较小波速下塔墩运动的不同步性更显著,支座的变形在漂浮体系下得到较大削减。斜拉索和主梁的抗震能力曲线较为相似,当波速较大时,其在纵向全漂浮体系下的抗震能力最佳,原因在于该体系下桥梁纵向刚度较小,斜拉索与主梁、桥塔之间的耦合效应更明显。当波速较小时,斜拉索随波速波动较大,说明波速越小,行波效应对结构的影响越大。

为了进一步比较各体系抗震性能的优劣,本文设定体系 MPGD 值来评价各体系的抗震性能。体系 MPGD 值是在考虑各构件的重要性基础上,由各构件的 MPGD 值组合而成,具体为  $P_M(\text{体系})=$

$0.2P_M(\text{支座})+0.4P_M(\text{斜拉索})+0.4P_M(\text{主梁})$ 。得到体系 MPGD 值变化趋势,如图 7 所示。

由图 7 可知,各损伤状态下体系 MPGD 值变化趋势极为相似,可以根据体系 MPGD 值变化趋势得出较统一的结论。根据地震波在土层的传播特性,将波速分为 3 段,即较慢、中速和较快,分别对应土质类型为软土、中硬和坚硬。

可以看出,当场地为软土地质时,纵向全约束体系抗震性能最佳;当场地为中硬地质时,纵向半约束体系抗震性能最佳;当场地为坚硬地质时,纵向全漂浮体系抗震性能最佳。

4.3 行波效应对结构抗震影响

根据图 6,7 可得出以下结论:

(1)行波效应对支座抗震能力有利,且其抗震能力随波速增加而不断降低,直至趋于一致激励结果。

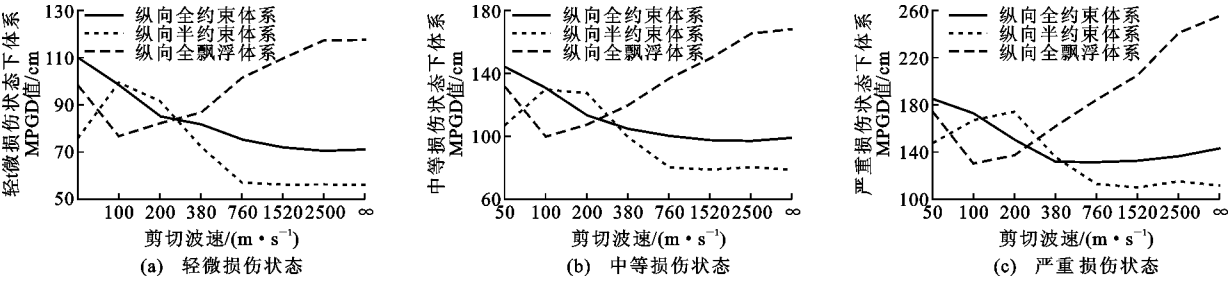


图 7 各损伤状态下体系 MPGD 值变化趋势

Fig. 7 Variation Trends of MPGD Value of System Under Each Damage State

(2)行波效应对纵向全约束和半约束体系的抗震有利,且半约束体系下各易损构件的抗震能力均大于一致激励的结果。

(3)纵向全约束体系中,行波效应对斜拉索和支座的抗震有利,对主梁的抗震不利。原因在于波速较小时,桥塔运动的不同步性更加显著,斜拉索和支座的内力和变形得到削减;受到桥塔约束的主梁承受桥塔对它所施加的约束作用,随着波速的提高,这种约束作用先增大后减小,在某特定波速下,约束作用最强,主梁最易发生损坏。

(4)纵向全飘浮体系中,考虑行波效应对斜拉索和主梁抗震不利,其原因在于纵向全飘浮体系解除了桥塔对主梁的纵向约束作用,整体结构刚度下降,由波速引起桥塔运动的不同步对结构影响更显著,导致主梁和斜拉索抗震能力相比一致激励明显下降。

## 5 结 语

(1)支座是最易损伤的构件,桥塔相对来说易损性最小,主要在于桥塔实际建造时配筋较多,并且高墩桥塔的延性也相对较好。

(2)软土地质场地条件下,纵向全约束体系抗震性能最佳;中硬地质场地条件下,纵向半约束体系抗震性能最佳;坚硬地质场地条件下,纵向全飘浮体系抗震性能最佳。

(3)行波效应对支座的抗震有利,对纵向全约束和半约束体系的抗震也有利,且随着波速的增加,各构件和体系的抗震水平基本趋于一致激励的结果。

(4)本文仅分析了地震波沿纵桥向输入,分析结果也只针对该种类型多塔斜拉桥,对于多点激励和三向正交地震动输入下结构的地震响应还有待于进一步研究分析。

## 参考文献:

## References:

- [1] ZHONG J, JEON J S, YUAN W, et al. Impact of Spatial Variability Parameters on Seismic Fragilities of a Cable-stayed Bridge Subjected to Differential Support Motions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6):04017013.
- [2] ALLAM S M, DATTA T K. Seismic Behaviour of Cable-stayed Bridges Under Multi-component Random Ground Motion [J]. Engineering Structures, 1999, 21(1):62-74.
- [3] 方 圆,李建中,彭天波,等.行波效应对大跨度多塔斜拉桥地震反应影响[J].振动与冲击,2010,29(10):148-152,235.  
FANG Yuan, LI Jian-zhong, PENG Tian-bo, et al. Influence of Travelling-wave Effect on Seismic Re-

- sponse of a Long-span Multi-tower Cable Stayed Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10):148-152,235.
- [4] EN 1998-2:2005, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 2: Bridges[S].
- [5] JTG/T B02-01—2008,公路桥梁抗震设计细则[S].  
JTG/T B02-01—2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S].
- [6] 耿方方,丁幼亮,谢洪恩,等.结构体系对多塔斜拉桥抗震性能的影响分析[J].公路交通科技,2014,31(7):65-71.  
GENG Fang-fang, DING You-liang, XIE Hong-en, et al. Influences of Structural System on Seismic Performance of Multi-pylon Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7):65-71.
- [7] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings[S].
- [8] FEMA-273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S].
- [9] 胡思聪,李立峰,王连华.高墩多塔斜拉桥地震动强度指标选择及易损性评估[J].中国公路学报,2017,30(12):50-59.  
HU Si-cong, LI Li-feng, WANG Lian-hua. Selection of Optimal Intensity Measures of Ground Motions and Seismic Fragility Assessment for Multi-span Cable-stayed Bridge with Tall Piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12):50-59.
- [10] 李立峰,胡思聪,王连华,等.超高墩多塔混凝土斜拉桥纵向约束体系研究[J].地震工程与工程振动,2015,35(1):85-93.  
LI Li-feng, HU Si-cong, WANG Lian-hua, et al. Longitudinal Constraint Systems for Super High-pier Multi-span Concrete Cable-stayed Bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1):85-93.
- [11] 周国良,鲍叶欣,李小军,等.结构动力分析中多点激励问题的研究综述[J].世界地震工程,2009,25(4):25-32.  
ZHOU Guo-liang, BAO Ye-xin, LI Xiao-jun, et al. Review on Dynamic Analyses of Structures Under Multi-support Excitation[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4):25-32.
- [12] 张 凡,颜晓伟,李 帅,等.考虑波速影响的斜拉桥非一致激励地震响应研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(4):60-68.  
ZHANG Fan, YAN Xiao-wei, LI Shuai, et al. Effects of Wave Velocities on Seismic Response of Cable-stayed Bridge Under Asynchronous Excitation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4):60-68.