

考虑海底地震动作用的跨海斜拉桥抗震韧性评估

韩志星¹, 叶 快¹, 熊世伟^{1,2}, 胡思聪³, 朱泽文^{1,2}

(1. 江西交通工程技术有限公司, 江西 南昌 330013; 2. 江西省交投养护科技集团有限公司, 江西 南昌 330013;
3. 南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 海床场地存在淤泥软土层和海水层, 导致海底地震作用不同于陆地地震作用。为研究海底地震作用下跨海斜拉桥抗震性能, 以一座典型的双塔斜拉桥为例, 对两类地震动作用下的桥梁抗震韧性进行分析。首先构建了桥梁抗震韧性分析方法。随后, 从 K-NET 台网的强震数据库分别选取了 83 条海底和陆地强震记录, 对比了两类地震动放大系数谱的特征及差异。然后, 通过非线性时程分析研究了斜拉桥各构件的地震响应特征, 确定了构件最不利位置。在此基础上, 结合各构件地震损伤指标, 对斜拉桥地震损伤概率及抗震韧性开展研究。结果表明: 受结构周期影响, 海底地震动放大系数谱值可能大于或小于陆地地震动。斜拉桥主塔的薄弱位置位于塔底, 最易损的拉索是连接辅助墩的拉索, 塔梁连接处的主梁是最危险截面; 较陆地地震动而言, 海底地震动下的斜拉桥地震损伤概率明显偏高、抗震韧性偏低, 最大差异为 40% 和 11%。跨海斜拉桥采用陆地地震动进行抗震分析可能存在低估地震损伤概率、高估抗震韧性的风险。

关键词: 抗震韧性; 跨海斜拉桥; 海底地震动; 陆地地震动; 地震易损性

中图分类号: U448.27; U442.5⁺5; TU997 文献标志码: A 文章编号: 1009-7716(2025)12-0059-06

Assessment on Seismic Toughness of Cross-sea Cable-stayed Bridges Considering Effect of Offshore Ground Motion

HAN Zhixin¹, YE Kuai¹, XIONG Shiwei^{1,2}, HU Sicong³, ZHU Zewen^{1,2}

(1. Jiangxi Jiaoke Transportation Engineering Co., Ltd., Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Jiaotou Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang 330013, China; 3. School of Engineering and Construction, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: There are silt-soft soil layers and seawater layers in the seabed, which cause the offshore seismic action to be different from that on land. To study the seismic performance of cross-sea cable-stayed bridges under the action of offshore earthquakes, taking a typical double-pylon cable-stayed bridge as an example, the seismic toughness of bridges under two types of ground motion is analyzed. Firstly, the seismic toughness analysis method of bridges is established. Secondly, 83 records of offshore and onshore strong earthquakes are selected respectively from the strong earthquake database of the K-NET network to compare the characteristics and differences of the two types of ground motion amplification coefficient spectra. And then, the seismic response characteristics of each component of the cable-stayed bridge are studied through nonlinear time-history analysis, and the most unfavorable positions of the components are determined. On this basis, the seismic damage probability and seismic toughness of the bridge are studied in combination with the seismic damage indicators of components. The results show that the spectral value of the amplification coefficient of offshore ground motion may be greater than or less than that of onshore ground motion due to the influence of the structural period. The vulnerable section of the main pylon of the cable-stayed bridge is located at the bottom of pylon, and the most vulnerable stayed cables are those connecting the auxiliary piers. The girder at the connection between the pylon and girder is the most dangerous section. Compared with onshore ground motion, the probability of seismic damage to cable-stayed bridges under offshore ground motion is significantly higher, while the seismic toughness is relatively lower, and the maximum differences is 40% and 11% respectively. The seismic analysis of cross-sea cable-stayed bridges using onshore ground motion may carry the risk of underestimating the probability of seismic damage and overestimating seismic toughness.

Keywords: seismic toughness; cross-sea cable-stayed bridge; offshore ground motion; onshore ground motion; seismic fragility

收稿日期: 2025-06-04

基金项目: 江西省交通运输厅工程科技项目(2023C0008;
2024YB055)

作者简介: 韩志星(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事
桥梁设计工作。

0 引 言

随着沿海交通和经济的快速发展, 跨海桥梁建设

日益增多,斜拉桥因跨越能力强得到广泛应用。然而,我国沿海多处于地震带上,跨海桥梁较陆地桥梁更易受到地震威胁^[1-2]。斜拉桥因刚度小、阻尼低,地震中易产生大变形,导致结构损伤,急需开展抗震性能研究。

近年来,学者们围绕斜拉桥的动力特性和抗震性能开展了多项研究,如索力影响、地震动类型、桩土作用、材料随机性及减震控制等,丰富了相关方面的认知^[3-8]。然而,受限于海底地震动记录稀缺,现有研究多基于陆地地震动,针对海底地震动的研究相对较少。此外,传统抗震性能评估多依赖有限地震波,难以全面反映桥梁震后功能恢复能力^[3-5]。随着对震后运营需求的提升,抗震韧性作为综合反映结构安全性与恢复能力的评价指标,逐渐受到重视,并成为抗震工程发展的趋势^[9-12]。

基于此,本文结合抗震韧性与地震易损性理论,构建桥梁韧性评估方法,通过83组实测地震记录,分析海底与陆地地震动差异,并对一座跨海斜拉桥进行非线性时程分析,评估其地震响应、易损性和韧性表现,比较不同地震动条件下的结构损伤和功能恢复能力的差异。

1 桥梁抗震韧性评估原理简述

桥梁抗震韧性描述了其在地震冲击下功能的退化与恢复能力,通常通过功能-时间曲线下的归一化面积来表示^[13],如图1所示。地震发生后,桥梁功能迅速下降,随后在一定维修周期内逐步恢复至初始状态。

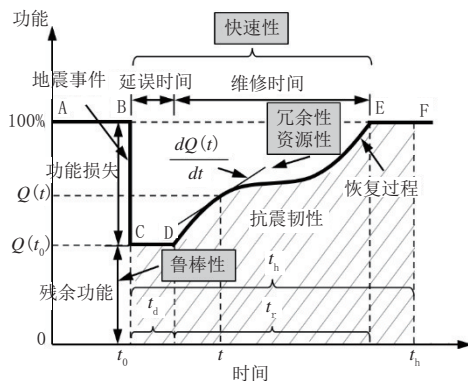


图1 抗震韧性示意图

为考虑地震的不确定性及损伤模糊性,残余功能 $Q(t)$ 可表示为损伤超越概率与模糊三角数的组合:

$$Q(t) = \sum P(D \geq di) \cdot \tilde{q}_i(t) \quad (1)$$

式中: $P(D \geq di)$ 为达到损伤等级 di 的概率; $\tilde{q}_i(t)$ 为

该等级下的模糊残余功能函数,其可由以下模型表示:

$$\tilde{q}_i(t) = H(t - t_0) \cdot [q_r + (q_m - q_r)f(t)] \quad (2)$$

式中: q_r 为震后初始残余功能, $q_m = 1$ 为完全恢复功能; $f(t)$ 为恢复函数,常见形式如指数型或逻辑斯谛型函数。

震后初始功能损失率可由损伤等级确定,常取值为:轻微、中等、严重、完全依次为0.03、0.08、0.25、0.67^[14]。损伤概率 $P(D \geq di)$ 来源于桥梁易损性曲线,按下式估算^[15]:

$$P(D \geq di) = \Phi \left[\frac{\ln(S_D) - \ln(S_C)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_D^2}} \right] \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; S_D 和 S_C 分别为地震需求和抗震能力的预测均值; β_C 和 β_D 分别为抗震能力及地震需求的对数标准差。结合概率需求分析可估算需求与地震烈度之间的关系,完整地刻画桥梁在地震作用下的性能演化过程。

2 地震动选取及特性分析

本文基于K-NET强震台网选取6个海底强震台站和相邻海底台站的数个陆地台站的强震记录^[16]。其中海底台站的水深范围为933~2339 m,相邻台站之间的距离小于25 km。从以上台站近20 a发生的21次地震事件中选取了83组海底和陆地强震记录。每组强震记录包含2个水平和1个竖向分量。图2所示为海底和陆地地震波的特征参数分布情况。

为对比海底与陆地地震动特性,图3展示了两类地震在三个方向的平均放大系数谱,其中阻尼比取0.03。从图3中可以看出:当周期较小时($T < 0.1 \sim 0.2$ s),陆地地震动的放大系数明显大于海底地震动;然而,当周期大于0.1~0.2 s后,海底地震动的放大系数反超陆地地震动。海底地震动水平方向放大系数峰值为3.0和3.17,均高于陆地地震动的2.77和3.11。这表明海底地震动水平放大系数谱峰值大于陆地地震动。但竖向方向上,海底地震动峰值(2.61)低于陆地地震动(3.06)。此外,海底地震动的特征周期明显大于陆地地震动。

综上所述,陆地地震动对中短周期结构影响更显著,而海底地震动则可能对斜拉桥等长周期结构带来更加显著的影响。

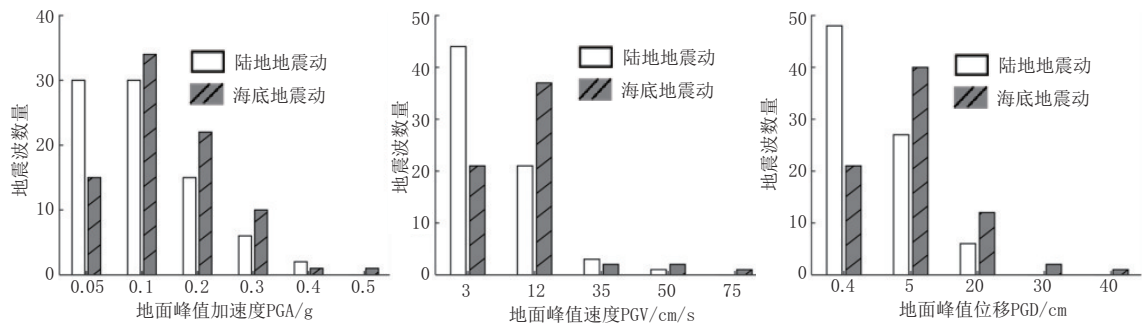


图2 83条地震动信息分布

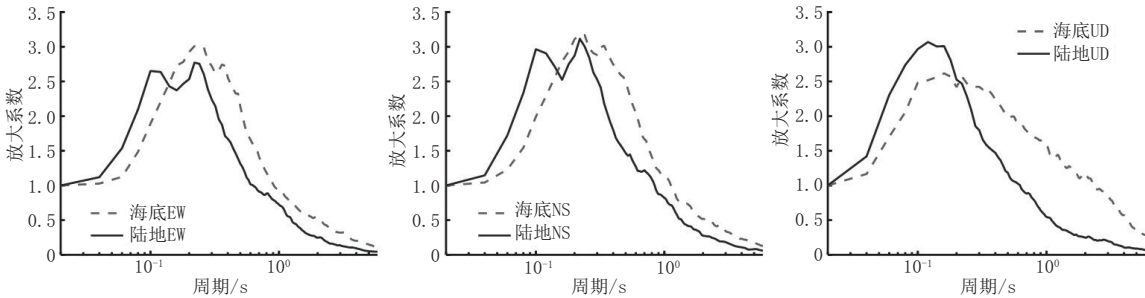


图3 海底和陆地地震动平均放大系数谱

3 工程算例

本文算例为一座典型的混凝土双塔斜拉桥。斜拉桥跨径布置 125 m+360 m+125 m,桥梁全长 617 m。主梁采用 C55 混凝土,截面为单箱四室截面,梁高 3.2 m,箱梁宽 28 m;主塔采用 H 型混凝土桥塔,混凝土强度为 C50。桥面以上的部分为上塔柱,高度为

122.4 m,桥面以下的部分为下塔柱,高度为 84 m,其中塔底截面为空心四边形截面。截面长和宽分别为 11 m 和 9 m。斜拉索采用扇形布置形式,每个主塔一共布置 28 对斜拉索,边跨索距和中跨索距分别为 8 m 和 12 m,塔上索距为 2.5 ~ 3.5 m。斜拉桥塔梁之间采用弹性约束连接。

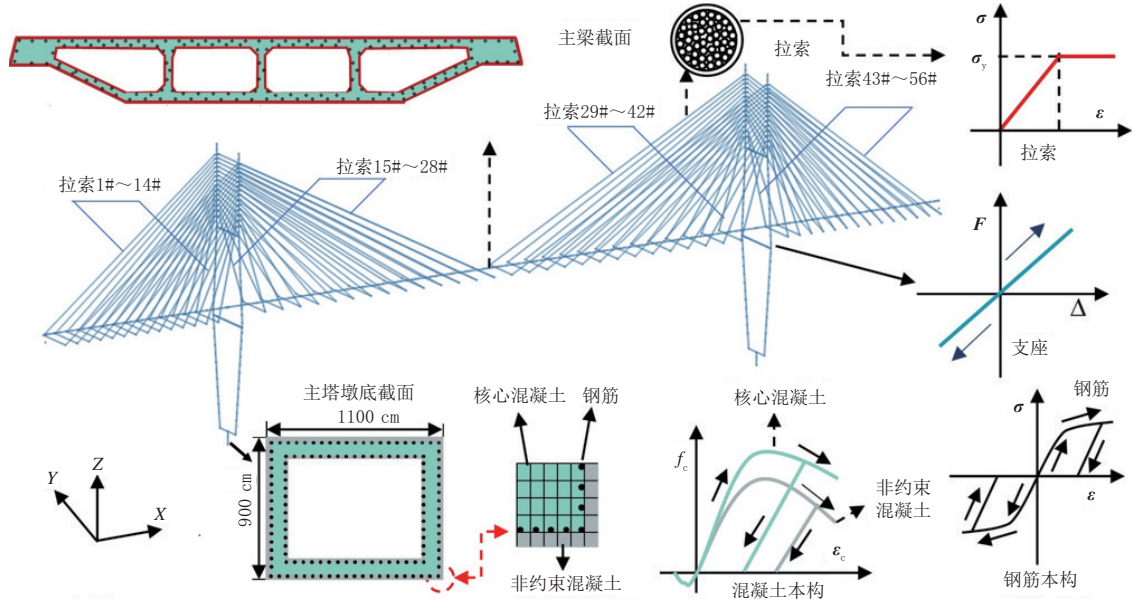


图4 有限元模型示意图

采用 OpenSees^[17] 建立斜拉桥有限元动力分析模型(见图4)。为模拟构件损伤,主梁与主塔采用基于位移的非线性梁单元,截面为纤维截面;混凝土材料采用 Mander 模型的 Concrete04,钢筋材料采用 Giuffr -Menegotto-Pinto 模型的 Steel02。斜拉索采用桁架单

元,材料为理想弹塑性模型,弹性模量由 Ernst 公式等效,初始索力通过初应力施加,索与主梁、主塔刚性连接。梁端碰撞采用带 gap 的线弹性单元模型,碰撞刚度参考以往研究^[18],近似取为主梁的轴向刚度 ($K = 1.2 \times 10^6$ kN/m);塔底采用弹性嵌固,通过 6 个

弹簧模拟桩-土相互作用。支座使用理想弹塑性零长度单元建模,板式橡胶支座的水平剪切滞回可简化为线性。全桥阻尼采用瑞利阻尼,阻尼比取3%。为考虑恒载影响,时程分析前进行非线性静力分析,分析中考虑梁柱效应。动力特性分析结果显示:结构一阶振型为纵向振动,周期为4.28 s;二阶振型为横向振动,周期为3.44 s。

4 地震损伤及抗震韧性分析

基于一些学者已有的研究成果^[19-23],将斜拉桥及各构件划分为轻微、中等、严重和完全四个损伤状态。借鉴常规桥梁损伤指标的选取原则,并结合斜拉桥自身特点,定义主梁、主塔、斜拉索、支座四类构件的损伤指标^[24]。其中,主塔和主梁都为压弯构件,故采用曲率延性比 $\mu_\theta = \varphi/\varphi_y$ 作为损伤指标。拉索采用应变比 $\alpha_c = \varepsilon/\varepsilon_g$ 来描述其损伤状态,其中 ε 和 ε_g 分别为地震荷载作用下和恒载作用下拉索轴向应变。支座采用主梁梁端位移 d_c 作为损伤指标。各构件损伤指标见表1。

利用非线性时程分析结果,结合损伤指标构建概率地震需求模型,进而得到各构件及系统的易损性曲线,如图5所示。从图5中可以看出,在四种损伤状态下,支座系统均是最易损伤构件。在低水平

表1 各类构件损伤指标

构件	EDP	LS ₁	LS ₂	LS ₃	LS ₄
斜拉索	α_c	2.00	2.17	2.34	2.50
主梁	μ_θ	1.00	1.33	1.96	2.56
下塔柱柱底截面	μ_θ	1.00	1.40	10.67	20.00
支座系统	d_c	30 cm	45 cm	90 cm	110 cm

损伤(即轻微和中度损伤)下,主塔和主梁次之,其次是拉索;在高水平损伤(即严重和完全损伤)下,仅次于支座系统的是拉索和主梁,其次是主塔。拉索损伤主要是由主塔和主梁之间的较大变形导致的。值得注意的是,主梁在地震中表现出较大的损伤概率,这与已有的研究^[8]规律相吻合。这表明对于高墩、大跨的斜拉桥而言,主梁地震下的损伤不可忽略。主塔低水平损伤概率与高水平损伤概率存在巨大差异,这表明所设计的主塔具有非常好的延性,一般不会发生高水平损伤,这与集鹿地震观察到的主塔损伤程度相似^[25]。观察桥梁系统易损性可以发现,其形状与支座易损性曲线接近,表明斜拉桥整体损伤由支座损伤控制,这与串联体系的损伤假定一致。此外,海底、陆地地震作用下斜拉桥各构件和桥梁系统的易损性曲线形状类似,但相较于陆地地震动,海底地震动作用下各构件的损伤概率明显增大,尤其是对于高水平损伤。

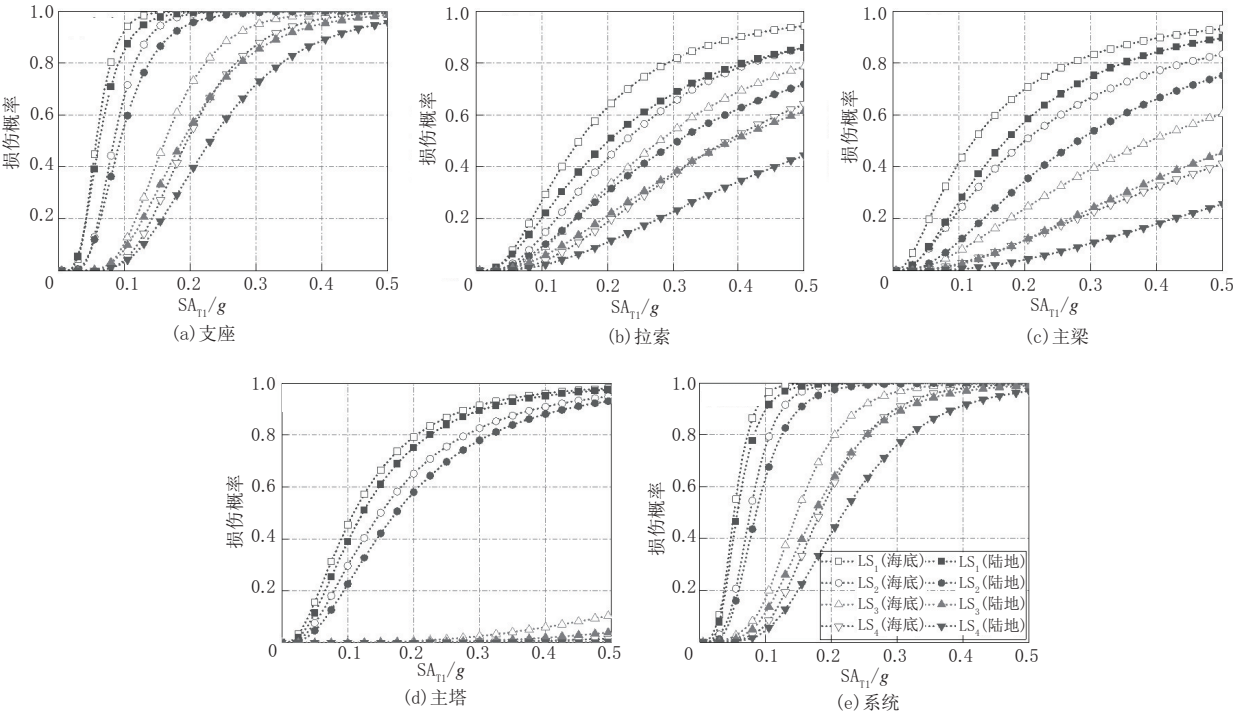


图5 桥梁构件及系统地震易损性曲线

根据桥梁系统的地震易损性曲线,可最终确定桥梁功能恢复过程及抗震韧性。表2列出了分析中

各参数的随机模型。通过蒙特卡洛随机对每个参数进行抽样,样本数量取为10 000。对于每个样本进

表 2 抗震韧性分析中随机变量的概率分布				
参数	分布形式	上限	下限	均值
δ_d/d	均匀分布 ^[14]	60	30	45
$\delta_{r,IS_1}/d$	三角分布 ^[26]	1	0.2	0.6
$\delta_{r,IS_2}/d$	三角分布 ^[26]	5	1	2.5
$\delta_{r,IS_3}/d$	三角分布 ^[26]	120	30	75
$\delta_{r,IS_4}/d$	三角分布 ^[26]	360	120	230
ω	均匀分布 ^[14]	10	8	9

行抗震韧性分析。图 6 显示了在 $SA_{T1}=0.2g$ 的地震作用下桥梁震后功能变化情况。从图 6 中可以看出,桥梁在遭遇地震事件后,功能迅速降低,然后逐步恢复。桥梁功能的恢复过程呈现出非线性增长,早期的功能恢复率相对低于后期.这是因为早期功能恢复取决于低水平损伤的修复,而后期功能恢复取决于高水平损伤的修复。高水平损伤对功能的削弱明显高于低水平损伤。此外,功能恢复过程呈现出显著的离散性,尤其是在恢复的中后期。海底地震动下的桥梁震后剩余功能较陆地地震动下降低了 15.6%。假定参考时间为 400 d,可以得到两种地震动下桥梁抗震韧性分别为 0.732 和 0.803。

图 7 给出了两类地震动在不同地震强度下的桥梁抗震韧性均值及标准差的变化情况。总体而言,不同地震动下由于四种损伤状态的比例不同,桥梁的抗震韧性随地震动强度增大而呈现出非线性的降低。当 SA_{T1} 小于 $0.05g$ 时,桥梁主要发生低水平损伤。因此,在这个范围内,抗震韧性降低很小。然而,随着地震动强度的增加,抗震韧性迅速降低。当 SA_{T1} 大于 $0.3g\sim0.4g$ 以后,桥梁抗震韧性缓慢降低。随着地震强度的上升,桥梁抗震韧性的不确定性也显著增加。对比两类地震动下的桥梁抗震韧性可以看出,海底地震动下桥梁抗震韧性总体低于陆地地震动,最大差异为 11%,但在地震动较低和较高的情况下,两者差异不显著。

5 结 论

本文基于 K-NET 强震台网选取 83 组海底与陆地地震动记录,分析其特性差异,并以一座典型跨海斜拉桥为对象,采用非线性时程分析方法,研究主梁、拉索和主塔的地震响应,建立构件及系统易损性模型,确定功能恢复过程并评估抗震韧性。主要结论如下:

(1)在短周期范围(小于 $0.1\sim0.2\text{ s}$),海底地震动放大系数谱值小于陆地地震动;在长周期范围(大于

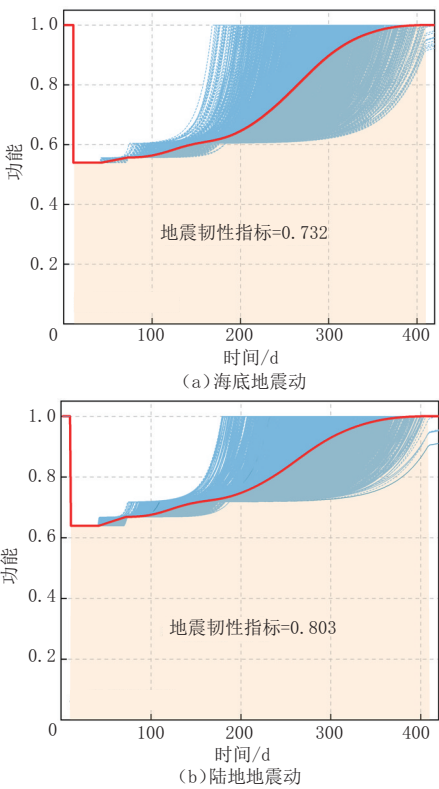


图 6 桥梁震后功能恢复过程图

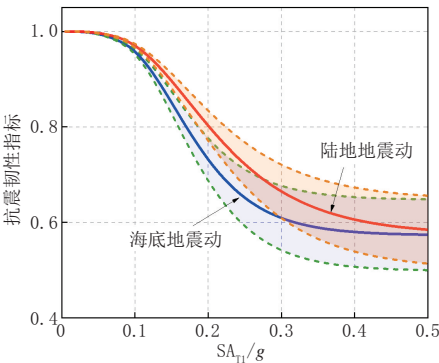


图 7 不同地震动强度下桥梁抗震韧性

0.2 s)则相反;且海底地震动具有更大的特征周期。

(2)斜拉桥主塔的薄弱位置位于塔底,最易损的拉索是连接辅助墩的拉索,塔梁连接处的主梁是最危险截面;海底地震动下的斜拉桥地震响应明显高于陆地地震动,但响应特征变化不明显。

(3)地震作用下,支座是最易受损构件,其次是主梁、拉索和主塔等构件。由于主塔具有较好的延性,主要呈现的是低水平损伤,不易出现高水平损伤。

(4)海底地震动下的斜拉桥抗震韧性总体低于陆地地震动,最大差异为 11%;但在地震动强度较低($SA_{T1}<0.1g$)和地震动强度较高($SA_{T1}>0.5g$)的情况下差异不显著。总体而言,跨海桥梁采用陆地地震动进行抗震分析可能存在低估地震损伤概率、高估抗

震韧性的风险。

参考文献:

- [1] GANEV T, YAMAZAKI F, ISHIZAKI H, *et al.* Response analysis of the Higashi-Kobe Bridge and surrounding soil in the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1998, 27(6): 557-576.
- [2] HOSHIKUMA J. I. Damage of highway bridges due to the great east Japan earthquake[C]. *Proceedings of the 27th US-Japan Bridge Engineering Workshop*, 2011.
- [3] 焦驰宇, 李建中, 彭天波, 等. 塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响[J]. *振动与冲击*, 2009(10): 179-184.
- [4] 李帅, 张凡, 颜晓伟, 等. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2): 86-97; 106.
- [5] XIE Wen, SUN Limin. Experimental and numerical investigations on transverse seismic responses of soil-cable-stayed-bridge system subjected to transverse near-fault ground motions[J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111361.
- [6] 谷音, 钟华, 卓卫东, 等. 基于性能的矮塔斜拉桥结构地震易损性分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(增刊1): 218-222.
- [7] ZHONG Jian, WEI Xu, XIN Zhidang, *et al.* Effect of near-fault vertical ground motions on failure mode of long-span sea-crossing cable-stayed bridges[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113005.
- [8] LI Lifeng, HU Sicong, WANG Lianhua, *et al.* Seismic fragility assessment of a multi-span cable-stayed bridge with tall piers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15(9): 3727-3745.
- [9] DONG You, Frangopol D M. Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties[J]. *Engineering Structures*, 2015, 83: 198-208.
- [10] PANG Yutao, WEI Kai, WAN Chengyuan, *et al.* Life-cycle seismic resilience assessment of highway bridges with fiber-reinforced concrete piers in the corrosive environment[J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111120.
- [11] FU Zijun, RUI Gao, LI Yiming, *et al.* Probabilistic seismic resilience-based cost - benefit analysis for bridge retrofit assessment[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45: 8457-8474.
- [12] ANWAR G A, DONG You, CHANG Haizhai, *et al.* Performance-based probabilistic framework for seismic risk, resilience, and sustainability assessment of reinforced concrete structures[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(7): 1454-1472.
- [13] Cimellaro G P, Fumo C, Reinhorn A M, *et al.* Quantification of seismic resilience of health care facilities[J]. *MCEER Technical Rep.-MCEER-09*, 2009, 9.
- [14] CHANG K C, Mo Y L, CHEN C C, *et al.* Lessons learned from the damaged Chi-Lu cable-stayed bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(4): 343-352.
- [15] Choi E, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones[J]. *Engineering structures*, 2004, 26(2): 187-199.
- [16] K-NET 和 KiK-net 强震台网[OL]. <http://www.kyoshin.bosai.go.jp>.
- [17] 胡思聪, 王连华, 李立峰, 等. 非一致氯离子侵蚀下近海桥梁时变地震易损性研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(4): 62-71; 97.
- [18] Maison B F, Kasai K. Analysis for a type of structural pounding[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(4): 957-977.
- [19] 王德斌, 夏青, 孙治国, 等. 冲刷环境下跨海桥梁海陆地震动作用易损性对比研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(5): 127-137.
- [20] 胡思聪, 李立峰, 王连华. 基于易损性的高墩多塔斜拉桥纵向减震控制研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(22): 149-157.
- [21] 李立峰, 曹方亮, 胡思聪, 等. 行波效应下高墩多塔斜拉桥地震易损性分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(2): 77-83.
- [22] 孙治国, 郭迅, 周英武, 等. 钢筋混凝土桥墩地震损伤破坏分析方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(1): 131-143.
- [23] 孙治国, 李翔平, 李宏男, 等. 长历时地震动下 RC 桥墩地震反应分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(1): 154-169.
- [24] 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.
- [25] 张国镇, 陈建州, 李政宽, 等. 集鹿斜张桥 921 地震损害与修方式简介[J]. *结构工程*, 2006, 21(4): 3-13.
- [26] 胡思聪, 龚俊宇, 殷梦辉, 等. 跨海斜拉桥海底地震动强度指标选择及易损性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2025, 33(5): 1442-1456.