

考虑不同地理条件下桥梁结构的地震响应研究

左志鹏¹, 童汉元²

(1. 南昌市昌城施工图设计审查有限公司, 江西 南昌 330038; 2. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330038)

摘要: 海床场地存在淤泥软土层和海水层, 导致海底地震作用方式不同于陆地地震。为研究海底地震作用下跨海混凝土斜拉桥的抗震性能, 以一座典型的双塔斜拉桥为例, 建立了非线性有限元动力分析模型。基于日本K-Net台网的强震数据库, 分别选取7条海底和陆地强震记录进行非线性时程分析; 结合结构的特点, 对跨海斜拉桥各类构件的地震响应情况展开研究, 并对对比分析不同类型地震作用下桥梁抗震性能的差异。分析结果表明: 多数情况下, 海底地震作用下的结构响应会大于陆地地震作用下的结构响应, 最大增幅可接近50%; 采用陆地地震进行跨海桥梁抗震分析计算, 可能存在低估地震响应的风险; 斜拉桥主梁的横向地震响应往往会大于纵向响应; 斜拉索短索地震响应往往会大于长索。在斜拉桥抗震设计时, 需要重点关注主梁的横向振动和短索的损伤状态。

关键词: 桥梁工程; 跨海斜拉桥; 海底地震; 地震响应

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0149-05

Study on Seismic Response of Bridge Structures under Different Geographical Conditions

ZUO Zhipeng¹, TONG Hanyuan²

(1. Nanchang Changcheng Construction Drawing Design Review Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 2. Nanchang Urban Planning and Design Research Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: There are silt-soft soil layers and seawater layers in the seabed site, which lead to a different mode of seismic action on the seabed from that on land. In order to study the seismic performance of sea-crossing concrete cable-stayed bridge under seabed seismic action, taking a typical double-pylon cable-stayed bridge as an example, the nonlinear finite element dynamic analysis model is established. Based on the strong earthquake database of the K-Net network in Japan, seven strong earthquake records on the seabed and on land are selected respectively for nonlinear time-history analysis. Combined with the characteristics of the structure, the seismic response of various components of sea-crossing cable-stayed bridge is studied, and the differences in seismic performance of the bridge under the different earthquake actions are compared and analyzed. The results show that in most cases, the structural response under seabed seismic action is greater than that under land seismic action. The maximum amplification can be close to 50%. There will be the risk of underestimating the seismic response if using the land earthquakes for seismic analysis and calculation of sea-crossing bridges. The lateral seismic response of the girder of a cable-stayed bridge is often greater than the longitudinal response. The seismic response of short cables of cable-stayed bridge is often greater than that of long cables. Therefore, it is necessary to focus on the lateral vibration of the girder and the damage status of the short cables in the seismic design of cable-stayed bridges.

Keywords: bridge engineering; sea-crossing cable-stayed bridge; seabed earthquake; seismic response

0 引言

随着沿海地区经济的快速发展, 跨海桥梁建设增多, 其中, 斜拉桥因跨越能力强而得到广泛应用。我国跨海桥梁常建在环太平洋地震带或欧亚地震带

范围内, 部分桥梁坐落于地震活跃的海域。相较于陆地桥梁, 这些跨海桥梁常会受到地震等灾害的影响。因此, 对跨海桥梁进行抗震研究, 确保其安全, 显得尤为重要。

近年来, 一些学者陆续开展了跨海桥梁的抗震研究。如胡思聪等^[1]以铅芯橡胶支座和阻尼器为研究对象, 分析了位移型及速度型2类方式的减震效果; 陈志强等^[2]研究近断层地震脉冲方向性效应对地

收稿日期: 2024-10-23

作者简介: 左志鹏(1991—), 男, 硕士, 从事桥梁设计与研究工作。

震的影响;曾聪等^[3]提出跨断层地震合成方法,分析了斜拉桥非线性动力响应。一些学者基于实测强震记录^[4],发现海底和陆地地震频谱特性存在较大差异。

本文以混凝土斜拉桥为工程背景,通过精细化的数值模拟方法,分别选取7条海底和陆地强震记录进行非线性时程分析,研究桥梁主塔、主梁、拉索等构件的地震响应。

1 工程背景

本桥为预应力混凝土双塔双索面斜拉桥,跨径布置为124 m+360 m+124 m=608 m。主梁为单箱四室,梁高3.2 m,梁顶宽27.5 m,梁底宽16.14 m;采用H形桥塔,上塔柱高98 m,下塔柱高82 m,斜拉索扇形布置,塔上索距3.5~2.5 m,每个索塔布置28对斜拉索。桥梁总体布置及构造形式如图1所示。

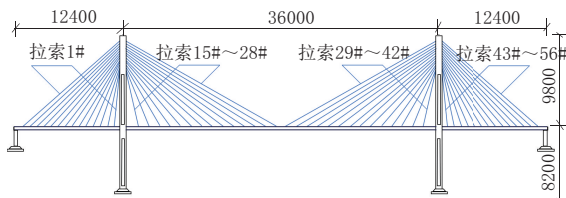


图1 桥梁总体布置及构造形式(单位:cm)

2 模型建立

采用OpenSees^[5]建立斜拉桥有限元分析模型,如图2至图5所示。考虑到构件的损伤,主梁及索塔均采用基于位移的非线性梁单元模拟,混凝土采用基于Mander本构^[6]的Concrete 04模拟。钢筋采用基于Giuffrè-Menegotto-Pinto^[7]模型的Steel 02材料模拟。拉索本构采用弹塑性模型,拉索弹模采用Ernst公式修正板式橡胶支座的水平受剪滞回曲线呈狭长形,可近似作线性处理^[8-9]。全桥采用瑞利阻尼,阻尼比取为3%。

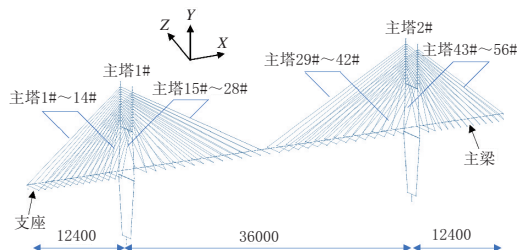


图2 有限元模型示意图(单位:cm)

3 地震波选择

Bommer和Acevedo等^[10]在2004年的研究中指出,分析结构反应时选择7条地震波较为合适。本文从日本K-Net台站挑选合适的强震记录。挑选

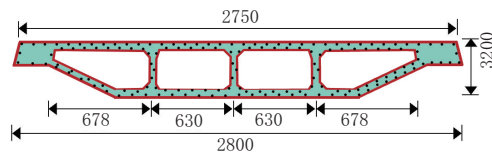


图3 主梁横断面示意图(单位:cm)

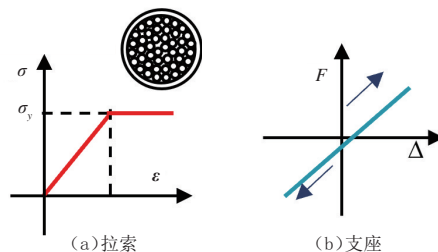


图4 拉索和支座材料本构图

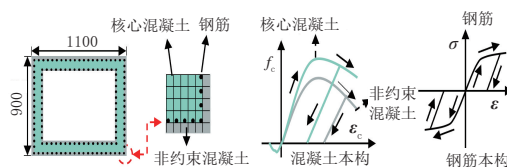


图5 主塔混凝土和钢筋本构图(单位:cm)

依据如下:(1)海底场地被近似认为是中硬土场地^[11],选取的海底和陆地场地平均剪切波速为150~380 m/s;(2)在不同组的地震事件中,应尽可能选择不同的海底和陆地台站。基于上述原则,表1列出了所选7次地震事件的详细信息。

4 桥梁地震响应分析

4.1 主梁地震响应

图6所示为20060421事件地震作用下主梁位移时程曲线。可以看出,两类地震作用下主梁各项响应差异均较大,尤其是在地震发生的中后期,在海底地震作用下,主梁三向变形均大于陆地地震。对比图6(a)和图6(b)可以看出,主梁跨中横向变形明显大于纵向变形,这可能是由于主梁在纵桥向设置了限位装置和阻尼装置。此外,对比主梁水平和竖向位移响应可以看出,地震对主梁竖向位移时程的影响明显大于水平方向,表明该条地震波下主梁的竖向变形更加敏感。

由图7可得,海底地震作用下主梁纵向、横向和竖向平均峰值位移分别为28.42、39.36和48.39 mm,陆地地震作用下主梁纵向、横向和竖向平均峰值位移分别为18.99、29.64和39.67 mm。相较而言,海底地震主梁纵向、横向和竖向峰值位移增幅分别为49.66%、32.79%、21.98%。从统计上来看,相较于陆地地震,海底地震的主梁位移总体更大,这意味着传统的基于陆地地震分析的方法可能会低估海底地震的结果响应。

表 1 地震事件及海底和陆地地震信息

事件编号	组别	震级 M_w	震源深度/km	台站	震中距/km	峰值加速度 PGA (gal)		
						EW	NS	UD
20060421	A1	5.8	7	KNG203	44	84.96	38.87	7.05
				TKY008	25	80.52	92.36	35.43
20060502	A2	5.1	15	KNG205	9	418.70	252.10	96.22
				SZ0002	21	222.90	77.24	51.07
20120703	A3	5.2	88	KNG206	46	118.60	74.27	15.89
				TKY009	52	36.36	34.03	14.86
20140505	A4	6.0	156	KNG201	56	72.73	89.37	6.96
				TKY008	20	28.52	19.52	14.43
20150912	A5	5.2	57	KNG201	107	63.89	78.13	4.09
				KNG008	46	91.18	101.90	27.53
20180707	A6	6.0	57	KNG202	83	79.60	68.40	33.28
				KNG004	88	29.70	27.95	8.34
20211007	A7	5.9	75	KNG204	91	69.32	63.01	12.07
				CHB014	14	90.25	101.60	39.02

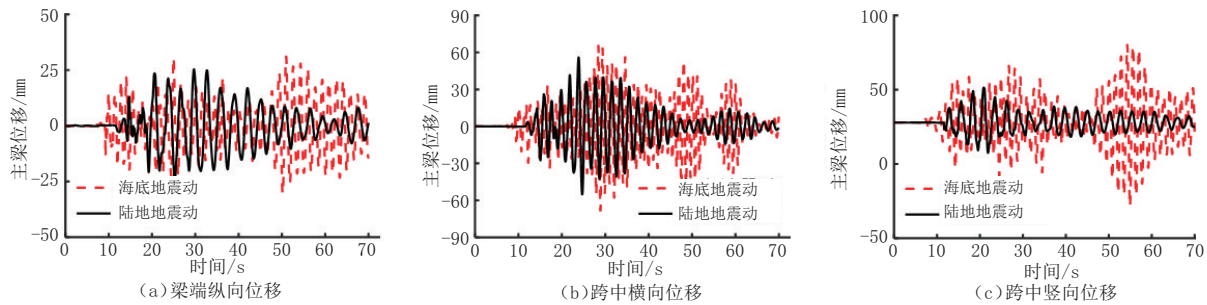


图 6 20060421 事件海底和陆地地震作用下主梁的时程曲线

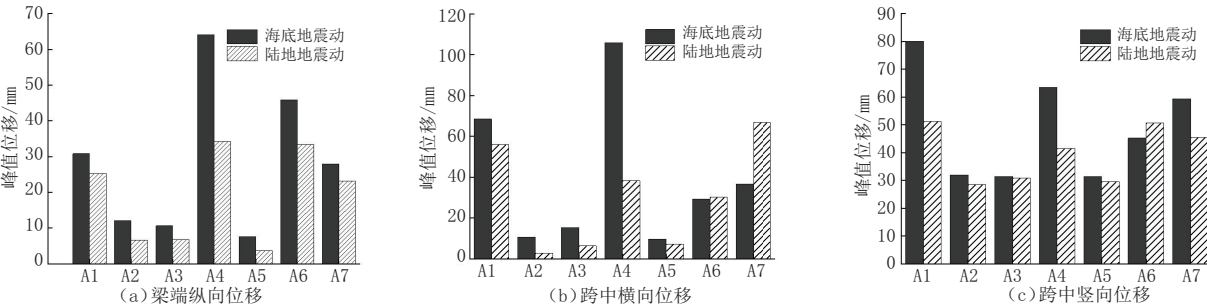


图 7 海底和陆地地震作用下主梁的峰值位移图 (PGA=0.2 g)

4.2 主塔地震响应

由图 8 可得,主塔在海底地震作用下的主梁三向变形均大于陆地地震。对比主塔三向变形时程结果可知,主塔纵桥向和横桥向的地震响应比较接近,竖向地震响应较小。

由图 9 可得,海底地震作用下主塔塔顶最大纵向、横向和竖向峰值位移分别为 82.93、108.04、13.14 mm;陆地地震作用下主塔塔顶最大纵向、横向和竖向峰值位移分别为 62.70、13.53、35.38 mm。从统计上来看,相较于陆地地震,海底地震造成的主塔位移总体更大。同样的,有少数地震波呈现相反规律。从主塔和主梁的位移响应可以看出,两者的规

律基本一致,主塔和主梁响应基本同步。这可能是受到拉索和塔梁约束的结果。

4.3 拉索地震响应

如图 10 所示,对比两根拉索可以看出,15#短索的拉索应变要大于 28#长索的拉索应变。此外,相较于陆地地震,海底地震作用下的拉索应变更大。

如图 11 所示,可以看出,7 次事件下,15#短索的拉索应变均要大于 28#长索的拉索应变。这表明短索在地震作用下可能相较于长索更易受损。此外,在 7 次事件中,海底地震作用下 15#和 18#拉索的平均索力分别为 189.71 kN 和 147.02 kN,而在 7 次事件

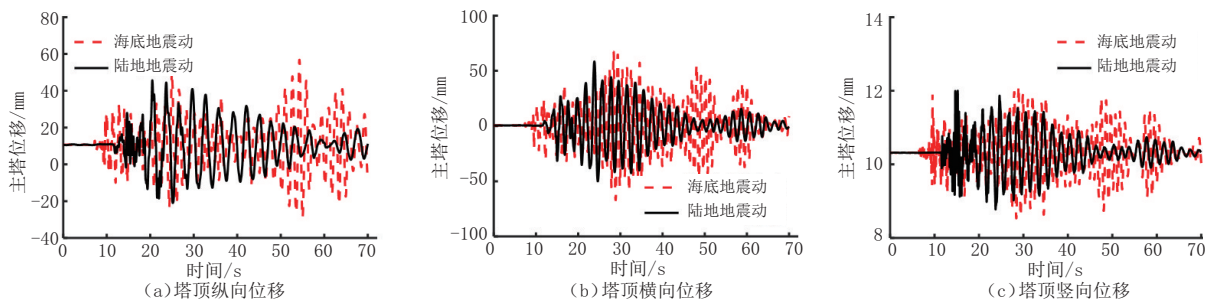


图8 20060421海底和陆地地震作用下主塔的时程曲线

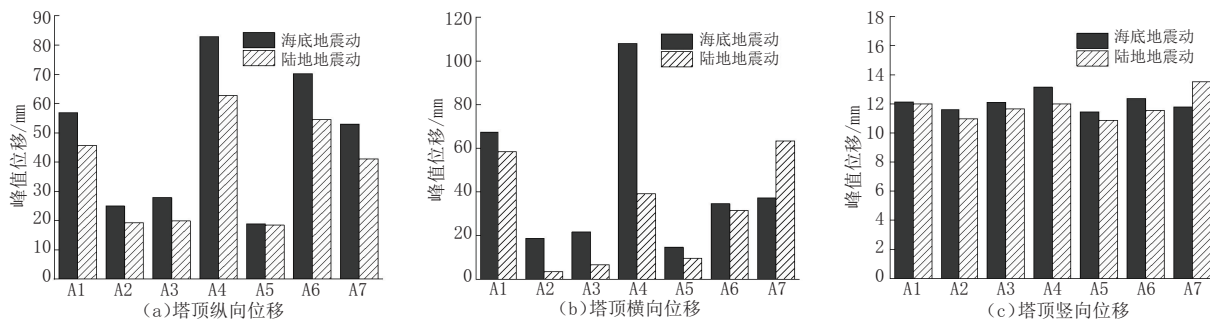


图9 海底和陆地地震作用下主塔塔顶峰值的位移对比图

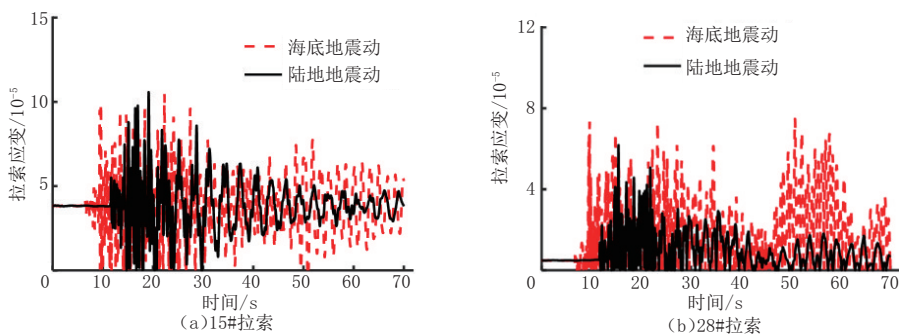


图10 海底和陆地地震作用下15#和28#拉索应变时程曲线图

中,陆地地震作用下15#和18#拉索的平均索力分别为144.95 kN和115.43 kN。相较于陆地地震,海底地

震作用下的15#和18#平均索力增幅分别为30.87%和27.37%。

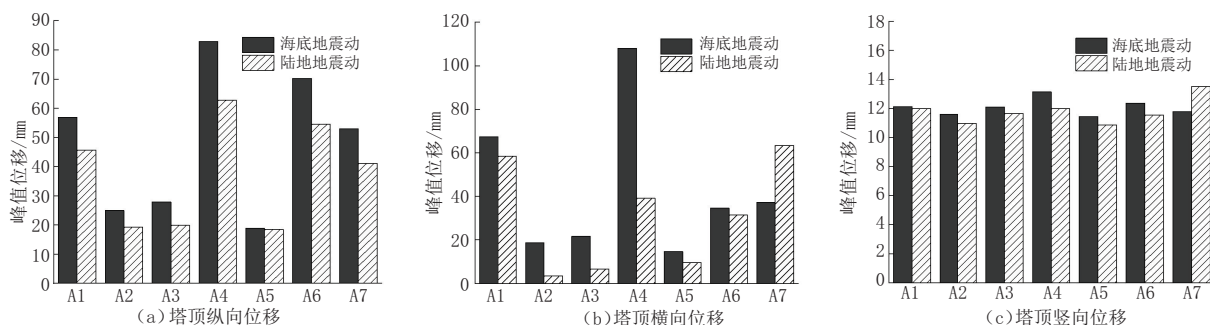


图11 海底和陆地地震作用下15#和28#拉索索力对比图

5 结 论

本文以一座跨海混凝土斜拉桥为例,选取了海底地震波和陆地地震波各7条,通过非线性时程分析,对比研究了海底地震作用下和陆地地震作用下斜拉桥各构件的地震响应差异。得到以下结论。

(1)多数情况下,海底地震作用下的结构响应会

大于陆地地震作用下的结构响应,最大增幅可接近50%。采用陆地地震进行跨海桥梁抗震分析计算,可能存在低估地震响应的风险。

(2)斜拉桥主梁的横向地震响应往往会大于纵向响应;斜拉索短索地震响应往往会大于长索。在斜拉桥抗震设计时,需要重点关注主梁的横向振动和短索的损伤状态。

(3)少数情况下,海底地震作用下的结构响应会小于陆地地震作用下的结构响应。这表明海底地震的频谱特性复杂,需要进一步探究海底地震对结构的影响机制。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 陈志强,郑史雄,陈志伟,等.近断层脉冲方向性对大跨斜拉桥地震响应的影响[J].铁道科学与工程学报,2018,15(12):3127-3134.
 [3] 曾聪,江辉,黄磊,等.跨断层独塔斜拉桥的非线性地震响应特性研究[J].中国公路学报,2021,34(2):230-245.
 [4] 陈宝魁.海底地震动特性及跨海桥梁地震反应分析[D].大连:大连理工大学,2016.
 [5] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, *et al.* OpenSees Command Language Manual[R]. Berkley: Pacific Earthquake Engineering Research

Center, 2006.
 [6] MANDER J B, PRIESTLEY M J, PARK R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
 [7] MENEGOTTO M, PINTO P. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behavior of Elements under Combined Normal Forces and Bending Moment[J]. In: IASBE Proceedings. Lisbon, 1973: 1-14.
 [8] 邢来成.墩台协同抗震体系桥梁地震响应和参数优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
 [9] 易凌志.近断层地震下大跨混合梁斜拉桥易损性研究[D].长沙:湖南大学,2020.
 [10] BOMMER J J, ACEVEDO A. The Use of Real Earthquake Accelerograms as Input to Dynamic Analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(1): 43-91.
 [11] 陈宝魁,卢宏飞,宋固全,等.海底地震动作用下隔震桥地震反应[J].南昌大学学报(工科版),2020,42(3):233-241.

(上接第110页)

桥体系后,再经体系转换最终形成自锚式悬索桥体系。该桥于2023年04月开工建设,计划于2026年底建成通车。

计算分析结果表明,在施工阶段和成桥阶段,主桥各个构件的强度、刚度、稳定性均满足规范要求。通过详细介绍该桥的设计与计算分析,旨在为类似工程的设计与施工提供参考借鉴。

参考文献:

[1] 臧瑜,戴建国,邵长宇.重庆鹅公岩轨道大桥设计关键技术[J].桥梁建设,2020,50(4):82-87.
 [2] 黄铁生,万田保.自锚式悬索桥关键技术的设计构思[J].桥梁建设,2005(3):25-28.
 [3] 刘少华.自锚式悬索桥体系转换吊索张拉设计[J].山东交通科技,

2021(1):74-76.
 [4] 符佳.上海市嘉松公路越江工程设计综述[J].城市道桥与防洪,2021(7):28-32.
 [5] 许骏.自锚式悬索桥锚固段合理总体布置研究[J].城市道桥与防洪,2023(5):172-175.
 [6] 龚子松.自锚式悬索桥合理成桥状态及受力特性研究[J].上海公路,2018(3):34-38.
 [7] JTG/T D65-05—2015,公路悬索桥设计规范[S].
 [8] 西南交通大学.重庆市轨道环线鹅公岩轨道专用桥工程自锚式悬索桥施工方案研究报告[R].成都:西南交通大学,2018.
 [9] 陈逸群,许骏.先斜拉后悬索组合梁自锚式悬索桥桥面板浇筑方案研究[J].城市道桥与防洪,2023(4):172-175.
 [10] 陈逸群.大跨度自锚式悬索桥半封闭箱型加劲梁抗风性能试验研究[J].工程技术研究,2024(6):1-4.