

波浪荷载作用下列车-大跨度桥梁 耦合系统动力响应研究

罗浩¹, 刘谋刚¹, 杨彤麟¹, 徐楚懿¹, 汪建群¹, 郭向荣²

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 411201 湘潭; 2. 中南大学土木工程学院, 410075 长沙)

摘 要: 针对波浪荷载作用下车桥系统的耦合作用问题, 以某公铁两用跨海斜拉桥为研究对象, 基于五阶 Stokes 波理论及 Jonswap 波浪谱, 利用 Fluent 软件建立深水环境下的数值波浪水槽模型, 计算了重现期分别为 5、20、50、100 年对应波高下的波浪荷载。采用 Ansys 与 Simpack 软件进行联合仿真, 对波浪荷载下车桥耦合系统动力响应进行分析。结果表明: 车桥耦合系统动力响应随着车速和波高参数的增加而逐步增大; 受到轮轨力的影响, 波浪-列车联合作用下桥梁横向位移曲线与单独波浪作用下位移曲线线型存在明显差异; 不同工况下, 桥梁跨中横向位移峰值未出现在列车抵达跨中位置时, 说明波浪荷载对桥梁横向位移的影响占主要地位; 随着波高的增加, 列车各动力指标逐渐增大; 当波高达 8.92 m 及以上, 车速达到 250 km/h 时, 列车动力响应更大, 此时更易发生事故。

关键词: 波浪荷载; 五阶 Stokes 波; 车桥耦合; 动力响应; 安全性与舒适性

中图分类号: U448 文献标志码: A

DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.008

文章编号: 1000-4939(2026)01-0093-09

CSTR: 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.008

Dynamic response of a coupled train-large span bridge system under wave loading

LUO Hao¹, LIU Mougang¹, YANG Tonglin¹, XU Chuyi¹, WANG Jianqun¹, GUO Xiangrong²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, 410075 Changsha, China)

Abstract: In response to the issue of coupled effects in the vehicular-bridge system under wave loading, a highway-railway sea-crossing cable-stayed bridge is taken as the research object. Based on the fifth-order Stokes wave theory and Jonswap wave spectrum, using Fluent software to establish a numerical wave flume model in deep-water environments. The wave loads corresponding to wave heights with recurrence periods of 5 years, 20 years, 50 years and 100 years are calculated. Ansys and Simpack software were used for combined simulation to analyze the dynamic response of vehicle-bridge coupling system under wave load. The results show that the dynamic response of the axle coupling system gradually increases with the in-

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51408217); 湖南省自然科学基金资助项目 (No. 2021JJ30258; 2015JJ3066)

通信作者: 罗浩。E-mail: 44428246@qq.com

引用格式: 罗浩, 刘谋刚, 杨彤麟, 等. 波浪荷载作用下列车-大跨度桥梁耦合系统动力响应研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 93-101.

LUO Hao, LIU Mougang, YANG Tonglin, et al. Dynamic response of a coupled train-large span bridge system under wave loading[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 93-101.

crease of vehicle speed and wave height parameters. Due to the influence of wheel-rail forces, there are significant differences in the lateral displacement curve of a bridge under the combined action of waves and trains compared to the displacement curve under wave action alone. The peak value of lateral displacement at the midspan of a bridge does not occur when the train reaches the midspan position under different operating conditions. It indicates that the influence of wave loads on the lateral displacement of the bridge is predominant; each dynamic indicator of the train gradually increases as the wave height increases. When the wave height reaches 8.92 m or above and the train speed reaches 250 km/h, the train exhibits a greater dynamic response, making it more susceptible to accidents.

Key words: wave loading; fifth-order Stokes wave; axle coupling; dynamic response; safety and comfort

随着我国铁路里程的快速发展,铁路桥梁的建设逐渐从内地向沿海地区拓展,其跨度也越来越大,面临的环境也越来越复杂,尤其是波浪荷载的冲击。大跨度桥梁在设计时往往呈现出较大的柔性,使得波浪荷载对桥梁的正常使用及行车安全构成一定的威胁。因此,对于车桥系统之间耦合作用的研究变得尤为重要。

刘斌^[1]通过 SAP2000 软件,分析了波浪作用下深水桥梁的动力响应。吴明军等^[2]研究了地震和波浪共同作用下桥墩的动力响应。李忠献等^[3-4]分别分析了波浪、地震、地震与波浪联合作用下深水桥梁和桥墩的动力响应。吴安杰等^[5]采用非线性 Morison 方程,分析波流与地震作用下深水桥墩的动力响应。王连宾^[6]基于 P-M 谱,分析了水深、车速和桥墩刚度对车桥系统动力响应的影响规律;罗浩等^[7-8]分析了波浪作用及波浪地震联合作用下跨海大桥的动力响应规律。雷虎军等^[9]采用刚性柱法,通过输入实测地震波研究了地震动水力对车桥系统动力影响。以上学者主要针桥梁下部结构在波浪、地震等荷载作用下的动力响应展开研究,忽视了上部结构的刚度与质量对桥梁动力响应的影响。并且,对于波浪荷载作用下车桥系统的动力响应分析较少,因

此有必要开展进一步研究。

本研究以一座公铁两用跨海斜拉桥为研究对象,基于五阶 Stokes 波理论,以 Jonswap 谱为目标谱,通过 Fluent 流体分析软件建立数值波浪水槽对波浪荷载进行模拟。将波面函数的理论值与 CFD 模拟值进行对比,验证造波方法的准确性。采用子结构缩减法,对 Ansys 中建立的桥梁有限元模型的自由度进行缩减,再通过柔性体接口将桥梁模型导入 Simpack 进行车桥耦合联合仿真,分析不同车速与不同波浪荷载作用下的车桥系统动力响应。

1 工程概况

本研究以一座已建的公铁两用跨海斜拉桥为研究对象,该桥全长 1 188 m,桥跨布置为 132 m+196 m+532 m+196 m+132 m,如图 1 所示。主塔呈 H 型,塔高 221.5 m,采用 C50 混凝土;主梁为带副桁的板桁结合钢桁梁结构,总宽 36.8 m,如图 2 所示。上层为六车道公路,设计时速为 100 km/h;下层为双线铁路,总宽 15 m,设计时速为 200 km/h。桥址位于我国亚热带与热带季风区交界处,受风浪等气候影响严重,设计水深 40 m,百年一遇设计波高为 9.69 m。

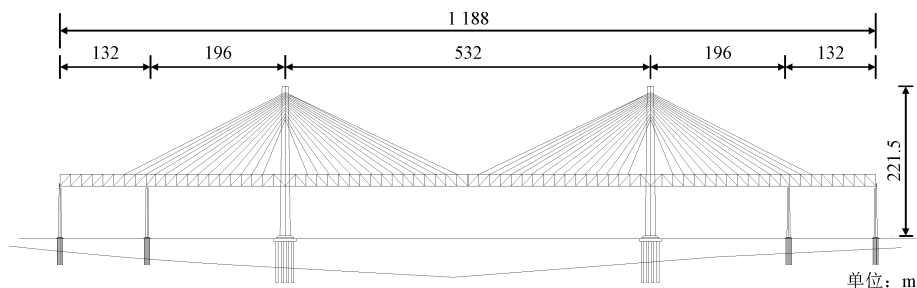


图 1 全桥桥跨布置图

Fig. 1 Layout of the whole bridge span

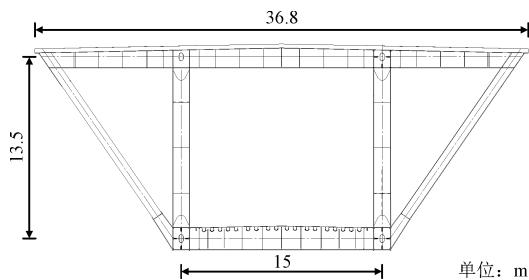


图 2 主梁横截面图

Fig. 2 Cross-section of main beam

2 波浪数值模拟

2.1 波浪工况拟定

根据《海浪理论与计算原理》^[10]可得累积波高与平均波高及周期的累积概率与平均周期的关系,分别见式(1)、式(2)

$$\frac{H_F}{\bar{H}} = \left(\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{F} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: F 为累积率; H_F 为累积率对应的波高; $\bar{H}$ 为平均波高。

$$F(T) = \exp \left(-0.675 \frac{T^4}{\bar{T}^4} \right) \quad (2)$$

式中: $F(T)$ 为累积概率; T 为累积概率所对应周期; $\bar{T}$ 为平均周期。

由式(1)和(2)可推出不同重现期对应波高及周期关系。根据五阶 Stokes 波方程中的弥散关系方程,设定桥梁所处水深环境 40 m,确定了 4 种不同重现期下的波浪要素,如表 1 所示。

表 1 不同重现期下波浪要素

Tab. 1 Wave elements at different recurrence periods

重现 期/年	波高/ m	波长/ m	周期/ s	水深/ m	累积波高 与平均 波高关系	累积概率 与平均 周期关系
5	5.72	97.86	7.96	40	$H_{20\%} = 1.43 \bar{H}$	$T_{20\%} = 1.24 \bar{T}$
20	7.80	129.70	9.31	40	$H_{5\%} = 1.95 \bar{H}$	$T_{5\%} = 1.45 \bar{T}$
50	8.92	145.06	9.95	40	$H_{2\%} = 2.23 \bar{H}$	$T_{2\%} = 1.55 \bar{T}$
100	9.69	155.81	10.40	40	$H_{1\%} = 2.42 \bar{H}$	$T_{1\%} = 1.62 \bar{T}$

2.2 海浪功率谱密度

Jonswap 谱是英、德、美等国于 1968 年至 1969 年间在北海通过不同的测量装置所测得的 2 500 个

波浪谱,并借鉴 P-M 谱进行分析所得到的表达式

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^\alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2} \right] \quad (4)$$

式中: ω_m 为谱峰频率; γ 为谱峰升高因子; α 为无因次风区的函数。

基于 Jonswap 谱,计算了在重现期分别为 5、20、50、100 年所对应波高的波浪功率谱密度,其结果如图 3 所示。功率谱密度曲线呈窄带分布,频率值集中于 0.3 ~ 2.0 rad/s 之间,且随着波高的增加而增加。

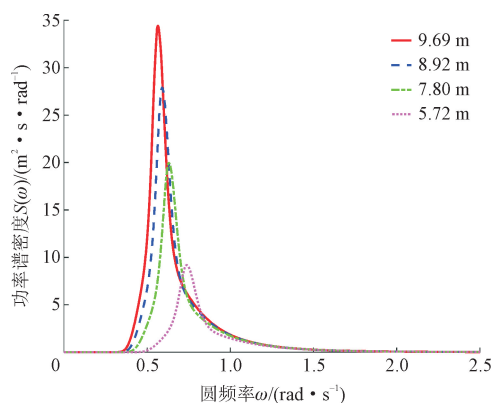


图 3 4 种波高下的功率谱密度

Fig. 3 Power spectral density at four wave heights

2.3 数值波浪水槽

对于数值波浪水槽的建立,需要根据波浪要素及工况来实现。本研究以 9.69 m 高波浪荷载为最不利工况设计数值波浪水槽^[11-12]。为确保数值波浪水槽尺寸满足所有工况,桥塔几何模型采用 Ansys workbench 建立,数值波浪水槽则依据造波区与消波区长度设定,其长为 560 m,宽为 125 m,高为 250 m,设计水深为 40 m,其中将造波区设为 1 倍最大波长,消波区设为 2 倍最大波长,并在 ICEM CFD 中划分网格。为保证数据计算精准,同时兼顾计算收敛难度,在对数值波浪水槽进行网格划分时,沿波浪传播方向上从起点至桥塔处采用 1 m 渐变至 0.15 m 作网格加密处理,在水槽竖向以自由水面为界向两端采用 0.25 m 渐变至 1 m 作网格加密处理;为更加精准反映桥塔壁面上所受波浪力的大小,对桥塔流域处的纵向网格设置边界层加密到 0.1 m,然后将网格转化为六面体结构化网格,总共划分出 2 613 020 个网格单元,分布规律如图 4(a) 所示,数值波浪水槽的边界条件如图 4(b) 所示。

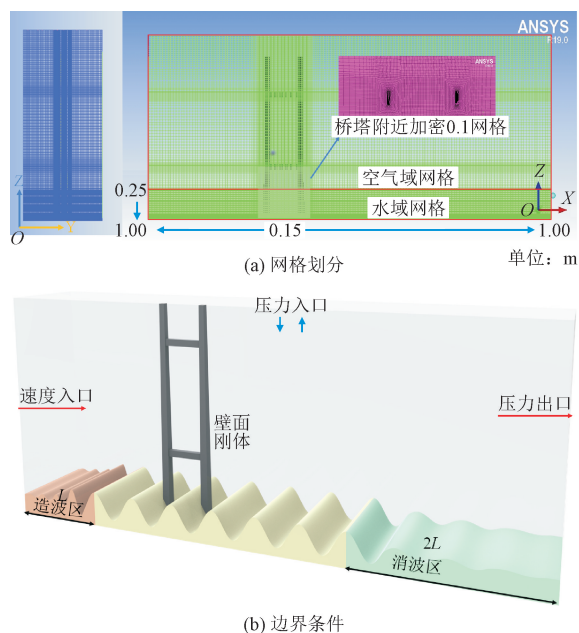


图4 数值波浪水槽网格划分及边界条件

Fig. 4 Numerical wave flume meshing and boundary conditions

2.4 造波与消波原理

本研究采用速度入口造波法进行造波。基于 Fluent 软件,通过给入口边界处的水质点提供一个水平和垂向运动速度以及波面升高来促使其作周期性运动,从而生成波浪。与二阶 Stokes 波相比,高阶 Stokes 波考虑了高阶非线性效应,可以更准确地描述水波现象^[13]。故本研究采用五阶 Stokes 波浪模拟,其速度和波面方程如下所示。

波面升高方程为

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 \lambda_n \cos n(kx - \omega t) \quad (5)$$

其中各项系数为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda \\ \lambda_2 = \lambda^2 B_{22} + \lambda^4 B_{24} \\ \lambda_3 = \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 B_{35} \\ \lambda_4 = \lambda^4 B_{44} \\ \lambda_5 = \lambda^5 B_{55} \end{cases}$$

水平方向速度为

$$u_x = c \sum_{n=1}^5 n \lambda_n \sinh nk(z+d) \sin n(kx - \omega t) \quad (6)$$

垂向速度为

$$u_z = c \sum_{n=1}^5 n \lambda_n \sinh nk(z+d) \sin n(kx - \omega t) \quad (7)$$

式中: ω 为圆频率; k 为波数; d 为水深;其他各项系数参见文献[14]。

消波采用动量阻尼消波法^[15-16],该方法通过在数值波浪水槽末端的消波区域设定一个与波浪传播方向相反的动量源来消除或抵消波浪力。阻尼消波动量方程表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \mu u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \mu v \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ 为流体相对密度; t 为波浪传播时间; u 、 v 分别为波浪传播的水平方向、竖向方向的速度分量; p 为划分流体网格单元上的压力; g 为重力加速度; μ 为消波动力系数。

为验证水槽造波与消波的正确性,并分析波浪的传播情况,在桥塔前端处设定检测点,将波面函数的理论计算值与 CFD 模拟值进行了对比,如图 5 所示。由于采用速度入口造波法,在桥塔前端处的前 27 s,波浪尚在传递,此时水面呈发展状态,在第 27 s 时达到波面峰值。由图 5 可知,波高衰弱较小,波浪分布均匀,理论计算与数值计算所得的波形拟合较好。

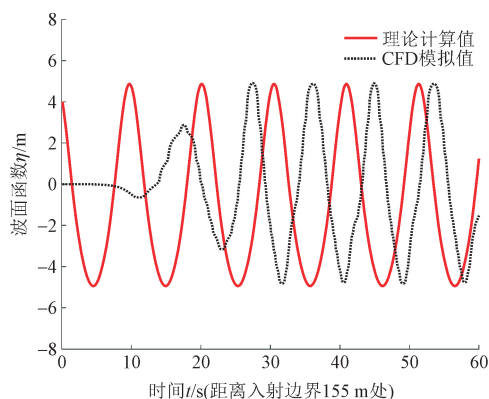


图5 波面函数理论计算值与 CFD 模拟值对比

Fig. 5 Comparison between of theoretical calculated values and CFD simulated values of wave surface function

图 6 为不同时刻的波浪传递情况,波浪经过桥塔进入到消波区后波面逐渐平缓,在消波区末端经过动量源消波法已达到和水平面一致,表明消波区域具有良好消波效果。

通过在数值波浪水槽中实现波浪的传递及对桥塔的作用后,分别模拟上文 4 种工况下波浪荷载,最终求解出桥塔与波浪交界处的总波浪力,如图 7 所示。桥塔所受波浪力随着波高的增大而逐渐增加,并随时间呈周期性变化。在波高增加的同时,波浪周期明显变大,波浪力达到峰值的时间也越来越长,

其中 5.72、9.69 m 波高的波浪荷载的波浪力分别最早于 23、39 s 达到峰值。4 种波高波浪荷载作用下的波浪力峰值分别为 3 290、9 890、12 600、18 300 kN。

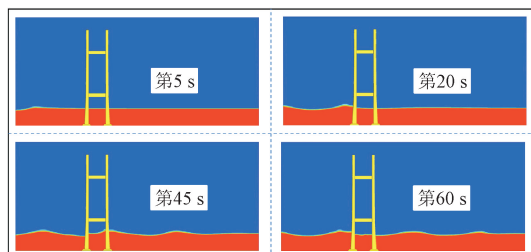


图6 不同时刻波浪传递图

Fig. 6 Wave transmission diagram at different moments

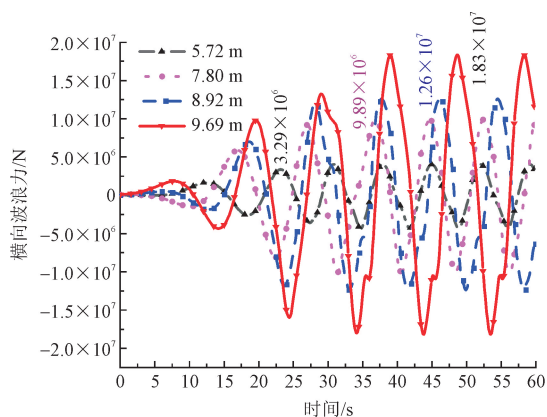


图7 不同波高下横向波浪力时程

Fig. 7 Timehistory of lateral wave forces at different wave heights

3 波浪作用下车-轨-桥耦合模型

3.1 车-轨-桥耦合模型

车-轨-桥耦合模型是一种刚体与柔体结合相互作用的模型^[17-18],为提高耦合计算精度与效率,本研究采用柔性轨道法,列车-桥梁系统刚柔耦合仿真具体步骤如下:首先利用 Ansys 建立斜拉桥及钢轨有限元模型,桥梁单元类型(表 2);然后对桥梁进行子结构分析缩减桥梁自由度;通过 Simpack 中的有限元接口程序生成桥梁柔性体文件(*.fbi);柔性轨道通过编写轨道配置文件*.fir 读取轨道参数并生成轨道柔性体,再将这两种柔性体通过力元连接,列车与柔性体轨道通过轮轨关系耦合。车-轨-桥系统耦合模型如图 8 所示,单节列车模型采用 CRH2,共 42 自由度,编组形式为 8 编组,图中红色为动车,蓝色为拖车。波浪力作为一种时变荷载,在 Simpack 软件中采用输入函数的方法,将其以外部激励的形式加载至桥塔与桥墩;轨道不平顺采用德国低干扰普模拟。

表 2 桥梁单元类型

Tab. 2 Bridge unit types

单元类型	桥梁部位
Beam188	主梁、主塔和桥墩
Shell181	桥面板
Link180	斜拉索

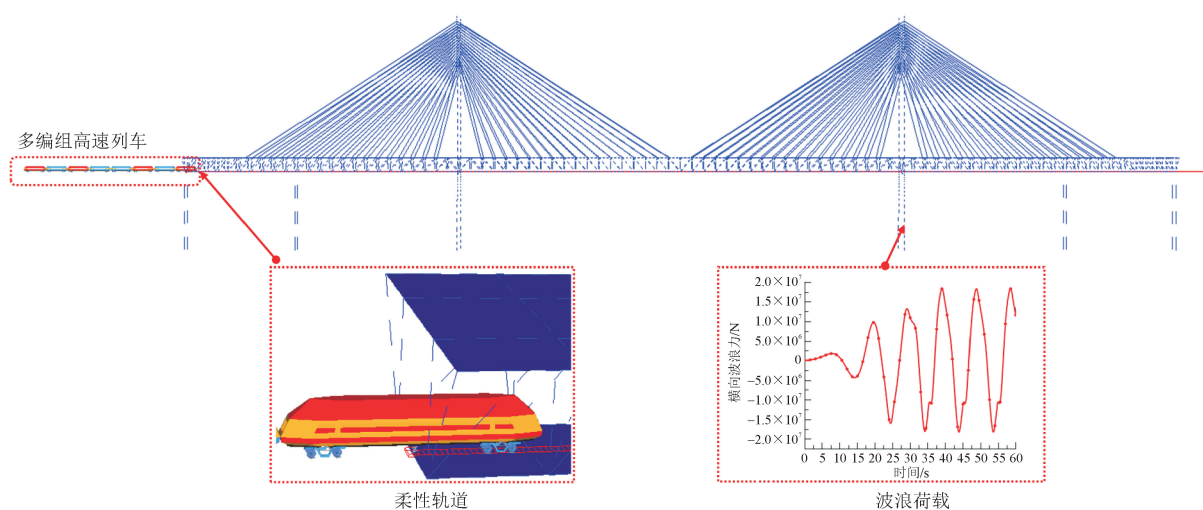


图8 波浪荷载下列车-轨道-桥梁动力学耦合模型

Fig. 8 Coupled train-track-bridge dynamics model under wave loading

3.2 波浪力加载验证

为验证波浪力加载至耦合模型中的正确性,通过有限元软件 Ansys 和多体动力学软件 Simpack 分别计算了桥梁在 9.69 m 高的波浪荷载作用下的桥梁主跨跨中的横向位移响应,如图 9 所示。

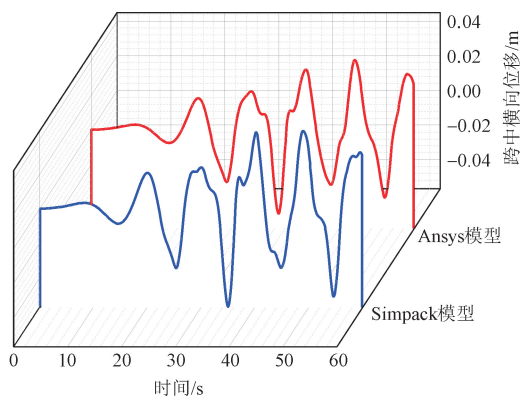
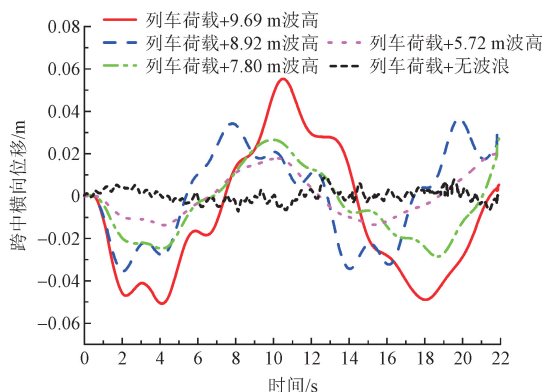


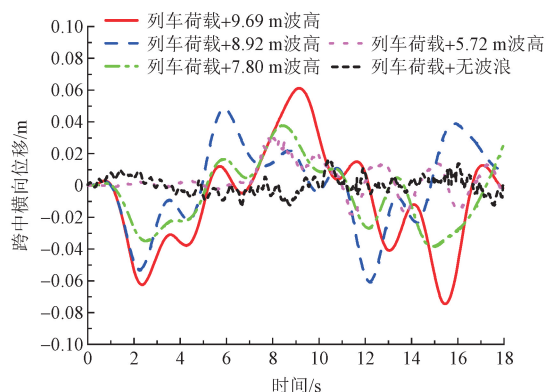
图 9 两种桥梁模型位移响应时程对比

Fig. 9 Comparison of displacement response time history of two bridge models

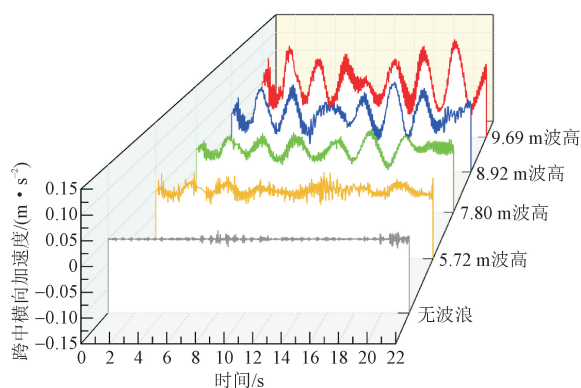
在 2 种软件中,桥梁跨中横向位移时程曲线基



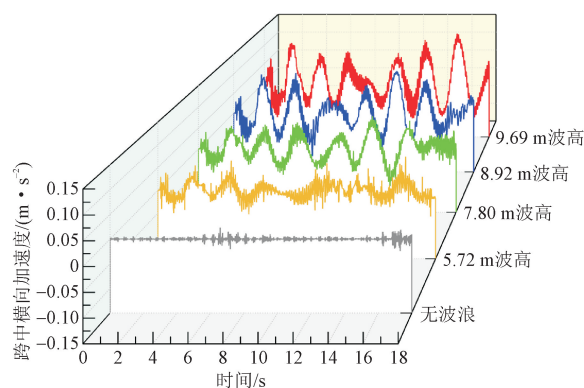
(a) 200 km/h 车速下跨中位移响应时程



(b) 250 km/h 车速下跨中位移响应时程



(c) 200 km/h 车速下跨中加速度响应时程



(d) 250 km/h 车速下跨中加速度响应时程

图 10 波浪与列车荷载联合作用下跨中横向动力响应时程

Fig. 10 Lateral dynamic response of mid-span under combined action of wave and train load

当 4 种波高的波浪荷载与 200 km/h 的列车荷载联合作用时,跨中横向位移峰值分别为 0.021、

本一致,验证了在 Simpack 中桥梁波浪力加载的正确性,该方法可用于后续车桥耦合动力响应分析。

4 车桥系统动力响应

4.1 联合作用下桥梁动力响应

为探讨列车荷载与波浪荷载联合作用对桥梁所产生的影响,分别计算 4 种不同波高的波浪荷载及无波浪荷载作用与车速分别为 200、250 km/h 的列车荷载联合作用下桥梁的动力响应。桥梁主跨跨中的横向动力响应结果如图 10 所示。

由图 10 可知,车桥耦合系统动力响应随着车速和波高参数的增加而逐步增大。受到列车轮轨力的影响,联合作用下桥梁横向位移曲线与单独波浪下位移曲线线形存在明显差异。2 种车速及 4 种波高作用下,桥梁跨中横向位移峰值并未出现在列车抵达跨中位置时,说明波浪荷载对桥梁横向位移的影响占主要地位。

0.029、0.036、0.055 m,跨中横向位移峰值分别增大了 38.1%、24.1%、52.8%,说明在设计车速下,随着

波高的增加,桥梁跨中横向位移的增幅逐渐增大。其中 250 km/h 车速与 8.92 m 波高的波浪荷载联合作用时增幅最为明显,而与 9.69 m 波高的波浪荷载联合作用时横向位移响应最大,其挠跨比为 1/7 093,小于规范限值 1/4 000^[19]。

当 4 种波高的波浪荷载与 200 km/h 的列车荷载联合作用时,跨中横向加速度峰值分别为 0.039、0.050、0.080、0.117 m/s²,分别增大了 28.2%、37.5%、46.25%,说明在设计车速下,随着波高的增加,桥梁跨中横向加速度峰值基本呈线性增加。其中 250 km/h 车速与 5.72 m 波高波浪荷载作用时,跨中横向加速度增幅最大,与 9.69 m 波高的波浪荷载作用时,跨中横向加速度峰值达到 0.130 m/s²。

4.2 联合作用下列车动力响应

为探讨在波浪与列车荷载联合作用下列车所受到的影响,计算了在不同波高工况下,列车分别以 200、250 km/h 行驶时车体所产生的动力响应。列车子系统的各动力响应见表 3、表 4 及图 11、图 12。

表 3 不同波高工况下列车动力响应(200 km/h)

Tab. 3 Dynamic response of train under different wave height conditions (200 km/h)

波高/m	列车	轮对横向力/kN	脱轨系数	轮重减载率
0	动车	18.34	0.4	0.36
	拖车	17.16	0.35	0.32
5.72	动车	20.55	0.48	0.4
	拖车	18.56	0.41	0.36
7.80	动车	23.67	0.5	0.42
	拖车	22.44	0.43	0.39
8.92	动车	28.94	0.55	0.46
	拖车	27.54	0.48	0.43
9.69	动车	34.75	0.62	0.52
	拖车	31.35	0.54	0.48

由表 3、表 4 可知:在同一车速下,列车的各项动力指标均随波高的增加而增大。在各波高工况下,车速为 200 km/h 时,动车脱轨系数从 0.40 增加到了 0.62,拖车脱轨系数从 0.35 增加到了 0.54;车速为 250 km/h 时,动车脱轨系数从 0.48 增加到了 0.72。《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)^[20]规定脱轨系数和轮重减载率应分别小于 0.8、0.6。显然在各工况下列车脱轨系数满足要求。在波高为 9.69 m,车速为 250 km/h 时,动车的轮重减载率超出规范限值,这将影响行车安全。

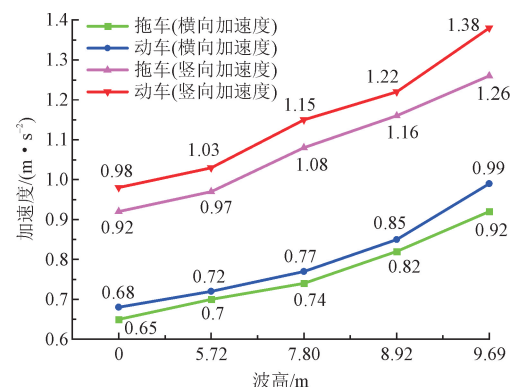
表 4 不同波高工况下列车动力响应(250 km/h)

Tab. 3 Dynamic response of train under different wave height conditions (250 km/h)

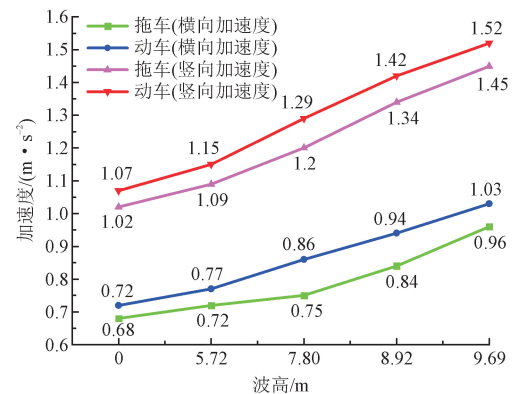
波高/m	列车	轮对横向力/kN	脱轨系数	轮重减载率
0	动车	20.70	0.48	0.40
	拖车	18.68	0.42	0.39
5.72	动车	24.12	0.52	0.43
	拖车	21.35	0.45	0.4
7.80	动车	30.55	0.57	0.48
	拖车	26.34	0.50	0.45
8.92	动车	34.87	0.64	0.54
	拖车	31.27	0.58	0.52
9.69	动车	40.44	0.72	0.62
	拖车	38.95	0.64	0.58

根据铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范(GB 5599—2019)^[19],列车车体横向与竖向加速度的限值分别为 1.0、1.3 m/s²,舒适度评判指标为 2.5(优秀)、2.75(良好)、3.0(合格)。

由图 11 可知,列车车体加速度随着波高的增加而逐步增大。在相同工况下,动车加速度均大于拖车。由图 12 可知,在无波浪作用时,列车舒适性受车速影响极小,均在良好以上。



(a) 200 km/h 车速下车体加速度



(b) 250 km/h 车速下车体加速度

图 11 波浪荷载作用下列车车体振动加速度

Fig. 11 Vibration acceleration of train body under wave load

在同一车速下,随着波高的增加,列车舒适性降低。当波高增加到 7.8 m 及以上时,车速的增加对列车舒适度的影响较大,特别是在波高为 9.69 m,车速为 250 km/h 时,动车与拖车的竖向舒适性指标均未达到合格标准。

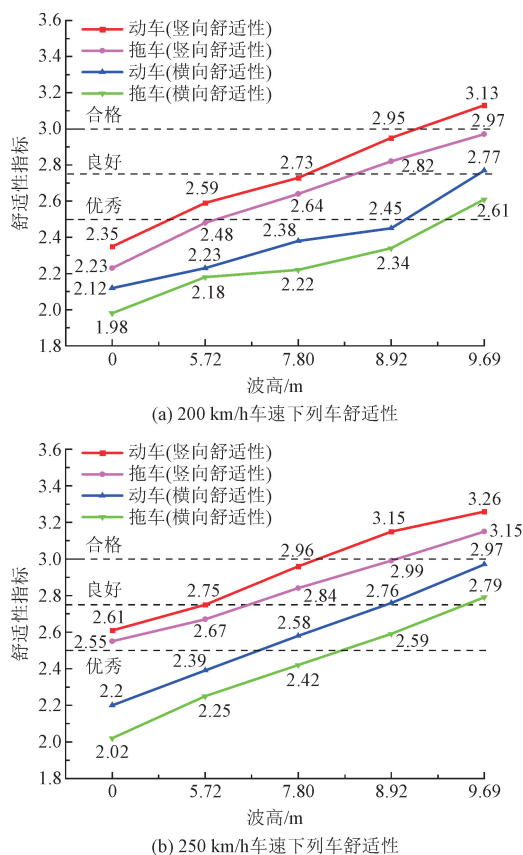


图 12 波浪荷载作用下列车舒适性

Fig. 12 Train comfort under wave load

5 结 论

本研究以一座公铁两用跨海斜拉桥为研究对象,基于五阶 Stokes 波理论,以 Jonswap 谱为目标谱,采用 Fluent 软件建立数值水槽对波浪荷载进行模拟。采用 Ansys 与 Simpack 软件进行联合仿真,建立车桥耦合模型,计算了在不同车速与不同波浪工况下车桥系统的动力响应,得到以下结论。

1) 基于数值波浪水槽模拟波浪,计算出桥塔与波浪交界处的总波浪力,发现桥塔所受波浪力随着波高的增大而逐渐增加,并随时间呈周期性变化;在波高增加的同时,波浪周期明显变大。

2) 随着车速和波高的增加,车桥耦合系统动力响应逐步增大;波浪-列车联合作用下桥梁横向位移曲线与单独波浪下位移曲线线形存在明显差异;且

位移峰值未出现在列车抵达跨中位置时,说明波浪荷载对桥梁横向位移的影响占主要地位。

3) 随着波高的增长,列车各项动力指标逐渐增大,其安全性和舒适性降低,其中动车的各项动力指标增长较拖车更为明显。特别是当车速超过设计时速,波高为 8.92 m 及以上时,列车的动力响应更大,此时更易发生事故。

4) 对于跨海大桥,在进行桥梁设计时,必须充分考虑桥址处波浪荷载的大小,在极端条件下应当合理控制车速以确保行车安全。

参考文献:

- [1] 刘斌. 波浪荷载作用下深水桥梁的振动控制[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [2] 吴明军,陈文元,肖盛莲. 地震和波浪力共同作用下桥墩的动力响应研究[J]. 四川建筑科学研究,2010,36(6):157-159.
WU Mingjun, CHEN Wenyuan, XIAO Shenglian. A study on the dynamic response of bridge piers under the combined effect of earthquake and wave force[J]. Sichuan building science, 2010, 36(6):157-159 (in Chinese).
- [3] 李忠献,黄信. 地震和波浪联合作用下深水桥梁的动力响应[J]. 土木工程学报,2012,45(11):134-140.
LI Zhongxian, HUANG Xin. Dynamic responses of bridges in deep water under combined earthquake and wave actions[J]. China civil engineering journal, 2012, 45(11):134-140 (in Chinese).
- [4] 林曾,袁万城. 考虑波浪作用下的深水桥墩地震响应分析[J]. 土木工程与管理学报,2015,32(2):37-41.
LIN Zeng, YUAN Wancheng. Seismic response of bridge pier in deep water considering wave action[J]. Journal of civil engineering and management, 2015, 32(2):37-41 (in Chinese).
- [5] 吴安杰,杨万理,赵雷. 波流与地震共同作用下深水桥墩动力响应分析[J]. 西南交通大学学报,2018,53(1):79-87.
WU Anjie, YANG Wanli, ZHAO Lei. Dynamic response analysis of bridge pier in deep water under combined loads of wave, current and earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1):79-87 (in Chinese).
- [6] 王连宾. 波浪荷载作用下车桥系统动力响应及行车安全性分析[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [7] 罗浩,徐楚懿,杨彤麟,等. 基于 P-M 谱的波浪荷载数值模拟及其对跨海斜拉桥的冲击响应规律研究[J]. 计算力学学报,2023,40(4):552-558.
LUO Hao, XU Chuyi, YANG Tonglin, et al. Based on P-M spectrum numerical simulation of wave load and dynamic responses of a cross-sea cable-stayed bridge[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2023, 40(4):552-558 (in Chinese).
- [8] 罗浩,甘贤备,晏亮,等. 地震和波浪联合作用下大跨度斜拉桥的动力响应研究[J]. 桥梁建设,2022,52(5):93-99.
LUO Hao, GAN Xianbei, YAN Liang, et al. Research on dynamic responses of long-span cable-stayed bridge under combined earth-

- quake and wave action[J]. Bridge construction, 2022, 52(5): 93-99(in Chinese).
- [9] 雷虎军,刘伟,孙昱坤. 考虑地震动水力的高速铁路跨海斜拉桥行车安全性研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(12): 113-120.
LEI Hujun, LIU Wei, SUN Yukun. Running safety of sea-crossing cable-stayed bridge of high-speed railway considering seismic hydrodynamic pressure[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(12): 113-120(in Chinese).
- [10] 文圣常,余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社, 1984.
- [11] 王永学. 无反射造波数值波浪水槽[J]. 水动力学研究与进展, 1994, 9(2): 205-214.
WANG Yongxue. Numerical wave channel with Absorbing Wave-maker[J]. Journal of hydrodynamics, 1994, 9(2): 205-214(in Chinese).
- [12] FRANTZIS C, GRIGORIADIS D G E, DIMAS A A. An efficient navier-stokes based numerical wave tank using fast Poisson solvers and the immersed boundary method[J]. Ocean engineering, 2020, 196: 106832.
- [13] 陈圣涛,钟兢军,孙鹏. 高阶 Stokes 波浪理论耦合 VOF 两相流模型的数值模拟研究[C]//第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会. 北京:中国力学学会, 2014: 2-7.
- [14] SKJELBREIA L, HENDRICKSON J. Fifth order gravity wave theory [C]//Proceedings 7th Conference of Coastal Engineer. [S. l.]: [s. n.], 1961: 184-196.
- [15] 李宏伟. 造波理论与方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
- [16] 童朝锋,魏芷阳,孟艳秋. 基于 FLUENT 的垂向二维数值波浪水槽的造波效果[J]. 水运工程, 2020(3): 13-20.
TONG Zhaofeng, WEI Zhiyang, MENG Yanqiu. Wave making effect of vertical two-dimension numerical wave tank based on FLUENT [J]. Port & waterway engineering, 2020(3): 13-20(in Chinese).
- [17] 李文杰. 基于 SIMPACK 的列车-轨道-桥梁耦合振动分析[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
- [18] MAZILU T, RĂCĂNEL I R, GHINDEA C L, et al. Rail joint model based on the Euler-Bernoulli beam theory[J]. Romanian journal of transport infrastructure, 2019, 8(2): 16-29.
- [19] 国家标准局. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB 5599—2019 [S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
- [20] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014 [S]. 北京:中国铁道出版社, 2015.
- (编辑 张璐)