

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.004

# 考虑地震动水力的深水矮塔斜拉桥地震响应分析

陈智威

(福建省高速公路科技创新研究院有限公司, 福建 福州 350000)

**摘要:** 为探究地震动水力对桥梁地震响应的影响,以某深水矮塔斜拉桥为例,采用 ABAQUS 建立能精确模拟斜拉索在桥塔上空间分布的有限元模型,基于辐射波浪理论,以节点质量方法附加到高桩承台群桩基础上,以分析动水力对深水矮塔斜拉桥动力特性和地震响应的影响。结果表明:地震动水力会使深水矮塔斜拉桥自振周期有所增大,其中第十阶自振周期的增长率为 21.21%;地震动水力会显著增大结构动力响应,在 Imperial Valley 地震波下,桥塔纵向剪力增大 25.44%,纵向弯矩增大 25.54%,在 Borrego 地震波下,横向剪力增大 21.58%,横向弯矩增大 18.43%。在深水矮塔斜拉桥结构的抗震设计中,地震动水力的影响不容忽视。

**关键词:** 深水矮塔斜拉桥;地震动水力;ABAQUS;动力特性;地震响应

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0023-07

## Seismic Response Analysis of Cable-stayed Bridges with Low Towers Considering Ground Motion and Hydraulic Power

CHEN Zhiwei

(Fujian Provincial Highway Technology Innovation Research Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of ground motion hydraulics on the seismic response of bridges, taking a deep-water low-pylon cable-stayed bridge as an example, ABAQUS was adopted to establish a finite element model that can accurately simulate the spatial distribution of stay cables on the bridge tower. Based on the radiation wave theory, the analytical solution of ground motion hydraulics of components with different cross-section sizes was calculated, and it was attached to the pile group foundation of high pile caps through the joint mass. The influence of ground motion hydraulics on the dynamic characteristics and seismic response of deep-water low-pylon cable-stayed bridges was analyzed. The results show that the seismic hydraulic force will increase the natural vibration period of the deep-water extradosed cable-stayed bridge, and the growth rate of the tenth-order natural vibration period is 21.21%. The ground motion hydraulic will significantly increase the dynamic response of the structure. Under the Imperial Valley seismic wave, the longitudinal shear force of the bridge tower increases by 25.44%, and the longitudinal bending moment increases by 25.54%. Under the Borrego seismic wave, the transverse shear force increases by 21.58%, and the transverse bending moment increases by 18.43%. In the seismic design of deep-water extradosed cable-stayed bridge structure, the influence of ground motion hydraulic cannot be ignored.

**Keywords:** deep-water low-pylon cable-stayed bridge; ground motion water; ABAQUS; dynamic characteristics; seismic response

随着我国交通路网的不断优化与加密,深水大跨桥梁的建设日益成为交通基础设施的重要组成部分。然而,我国地震灾害频发,地震作用下的桥梁基础会与周围水体之间产生地震动水力效应,影响桥

梁地震响应,故充分研究地震荷载下动水对桥梁结构的影响具有重要意义。

张士博等<sup>[1]</sup>通过缩尺模型试验对斜拉桥桥塔在地震作用下的响应进行了研究,结果表明,现实海

域下,地震作用是动水力产生的主要因素。赵秋红等<sup>[2]</sup>分析了波浪与地震联合作用下深水桥梁的动力响应,结果表明,动水压力显著增大了桥梁结构的动力响应,而波浪对结构动力响应的影响较小。周枚等<sup>[3]</sup>以某大型圆形桥墩、矩形桥墩以及高桩承台群桩基础为例,采用基于势流体的有限元单元法建立了完全数值模型,研究了动水压力对不同类型桥墩地震响应的影响差异及其分布规律。Liaw 等<sup>[4]</sup>提出了一种针对圆形截面柱的动水解析解。赵金钢等<sup>[5]</sup>研究了深水高墩的地震损伤特性,并认为 45 m 水深为深水高墩的显著水深,会增加桥墩的地震损伤概率。Goyal 等<sup>[6]</sup>提出了考虑水、土等多个边界条件的斜拉桥桥塔在地震激励下的动水力模拟方法。苏京华等<sup>[7]</sup>对比了考虑与不考虑地震动水压力工况下某连续刚构桥的动力响应数值模拟结果,发现考虑水体与结构之间的相互作用会显著增加结构的动力响应。赖伟<sup>[8]</sup>推导并验证了棱柱承台在地震动作用下的水力学解析解的有效性。Li 等<sup>[9]</sup>给出了圆形墩和方形墩在水流作用下的附加质量表达式。可以看出,众多学者在采用有限元方法研究地震动水力对斜拉桥地震响应的影响时,都是采用桁架单元进行模拟,但实际上桁架单元并没有真实模拟出斜拉索在桥塔内的空间分布以及二者之间的接触情况。

在对地震动水力的模拟以及地震动水力对矮塔斜拉桥结构响应的方面。樊冰等<sup>[10]</sup>建立了斜拉桥动力计算的三维有限元模型,分析了动水对斜拉桥地震响应的影响。殷旭东等<sup>[11]</sup>研究了动水对于墩-塔-梁固结体系斜拉桥抗震性能的影响。雷虎军等<sup>[12]</sup>采用 OpenSees 建立考虑地震动水力的有限元模型,斜拉索同样采用桁架单元模拟,对考虑地震动水力的跨海斜拉桥减震控制进行了研究。Jiang 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于横截面半径和浸没高度的圆柱体动水力简化公式。李彤<sup>[14]</sup>采用了 Morison 方程分析了土-群桩-结构-水的相互作用体系的地震响应。然而,针对高桩承台群桩基础在动水力作用下的地震响应研究仍然较为稀缺。

以某跨海深水矮塔斜拉桥为例进行研究,采用 ABAQUS 建立能精确模拟斜拉索在桥塔上的空间分布以及二者之间相互作用的有限元模型,并用桥塔采用实体单元,其它部分仍采用梁单元的部分实体有限元模型对其进行验证。再分别采用不同方法计算承台与群桩两部分的地震动水力附加质量,分析地震动水力对深水矮塔斜拉桥动力特性和地震响应的影响。

## 1 工程概况及有限元模型

### 1.1 工程概况

背景桥为某跨海大桥的主桥,其结构形式为四跨预应力混凝土矮塔斜拉桥,跨径布置为 100 m + 2 × 180 m + 100 m,主桥的总体布置如图 1 所示。该桥所处水域水深接近 45 m,桥墩高度也接近 45 m,是高墩高桩承台基础。主梁为单箱三室斜腹板变截面箱梁;主、边墩均采用空心矩形桥墩;塔、梁、墩固结,其中主塔采用矩形实心断面,从底部到顶部为变截面,桥面以上塔高 33.5 m;斜拉索为单索面、双排布置的斜拉索在中央分隔带上。

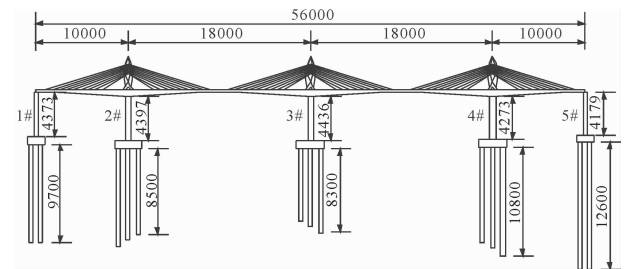


图 1 主桥总体布置图(单位:cm)

### 1.2 地震波的选择

桥梁类别为 A 类,桥址所属区域抗震设防烈度为 VI 度,场地类别为 II 类。根据《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[15]</sup>,采用加速度反应谱法,在 PEER 中选波,最终选取 Borrego 地震波、Imperial Valley 地震波以及 Borrego Mtn 地震波。加速度反应谱对比曲线如图 2 所示。根据规范计算出 E2 地震作用下的 PGA 为 0.085g,并对三条地震波进行调幅。

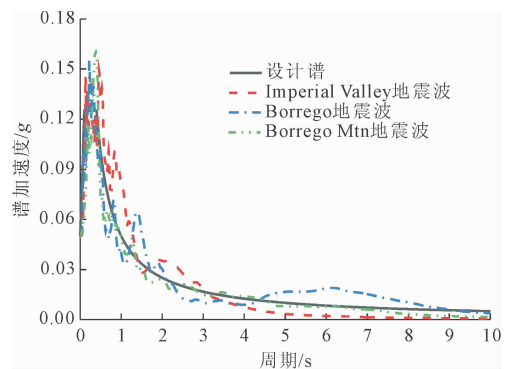


图 2 规范反应谱和目标反应谱

### 1.3 有限元模型建立

#### 1.3.1 有限元模型

采用 ABAQUS 建立该桥有限元模型,如图 3 所示。在模型中,主梁、桥墩、桥塔、承台以及桩基均采用梁单元模拟。斜拉索通过内力传递来平衡桥面所

受的力,是矮塔斜拉桥的主要受力构件,因此,斜拉索的处理对于有限元结果影响较大。采用三维梁单元去模拟斜拉索,这样不仅可以将斜拉索在桥塔内的实际空间位置模拟出来,还可以精确模拟斜拉索的受力情况。对于斜拉索和桥塔之间的相互作用,可以采用连接器单元去模拟,连接截面本构采用衬套。因为斜拉索在桥塔内线形是直线+圆弧+直线的形式,所以需要每根斜拉索指定坐标系,这里采用柱坐标系,这样就可以使得每根斜拉索都沿各自切向具有滑移趋势。采用连接器单元模拟斜拉索与桥塔之间相互作用的局部区域模型如图 4 所示。所涉及的支座也采用连接器单元模拟。另外,考虑到桥位的冲刷情况及桩的嵌固深度,不考虑地震动桩土相互作用,仅将各桩基础在冲刷线处固结。

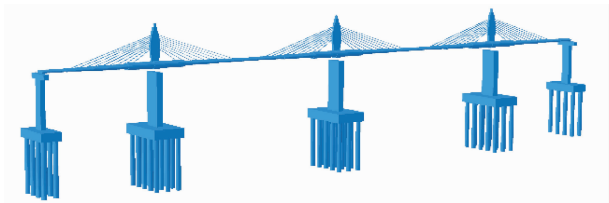


图 3 矮塔斜拉桥有限元模型

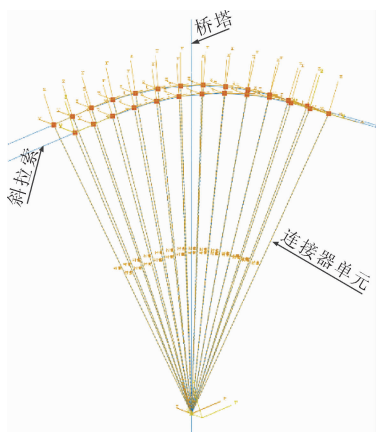


图 4 连接器单元模拟斜拉索与桥塔相互作用

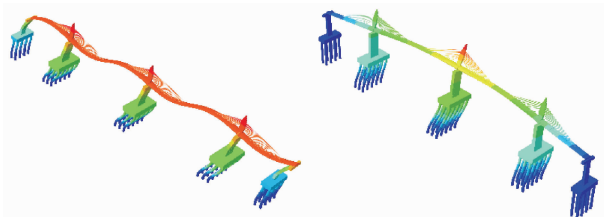
### 1.3.2 有限元模型比较

为了验证上述模型的正确性,另建立桥塔采用实体单元建模,斜拉索采用梁单元建模的部分实体有限元模型作为对比。为方便后文叙述,把桥塔采用实体单元,斜拉索采用梁单元建模的有限元模型记为模型 A,全桥都采用三维梁单元建模的有限元模型记为模型 B。采用子空间迭代法对模型 A 和模型 B 进行动力特性分析,前十阶周期及对比情况见表 1,前 2 阶振型如图 5 所示。从表 1 及图 5 中可知,模型 A 和模型 B 的计算结果表明两者前 10 阶周期相对误差率较小,最大不超过 0.2%,初步证明

了有限元模型的正确性。

表 1 矮塔斜拉桥自振周期及振型描述

序号	模型 A 周期/s	模型 B 周期/s	相对误差 r/%	振型描述
1	2.08618	2.08400	-0.104	一阶纵飘
2	1.78347	1.78187	-0.090	一阶正对称侧弯 + 桥塔同向侧弯
3	1.77967	1.77944	-0.013	一阶反对称侧弯
4	1.77284	1.77145	-0.078	一阶正对称侧弯 + 边塔和中塔反向侧弯
5	1.68606	1.68505	-0.060	一阶反对称竖弯
6	1.41631	1.41630	-0.001	一阶反对称扭转
7	1.40763	1.40750	-0.009	1#边墩纵飘
8	1.36654	1.36653	-0.001	二阶正对称侧弯
9	1.33682	1.33922	0.180	5#边墩纵飘
10	1.12952	1.12907	-0.040	一阶正对称竖弯



(a) 一阶纵飘

(b) 一阶正对称侧弯+桥塔同向侧弯

图 5 前 2 阶振型图

采用非线性时程分析法对模型 A 和模型 B 进行地震响应分析,地震动采取三向输入,分析两个模型计算结果是否具有 consistency,验证模型 B 的正确性。限于篇幅原因,仅给出该桥在 Imperial Valley 地震波作用下的部分地震响应时程曲线,如图 6 所示。由计算结果可知,模型 A 和模型 B 计算出的结构地震响应具有较好的一致性,地震波作用下塔底纵横向剪力和弯矩、墩底纵横向剪力和弯矩、主梁梁端和塔顶纵横向位移动力响应几乎完全一致。因此,采用模型 B 进行有限元分析是可行的,其计算结果具有较好的可靠性。

## 2 地震动水力计算方法

### 2.1 承台地震动水力计算方法

对于承台、墩柱这类大尺寸构件,采用辐射波浪理论计算其动水力附加质量。地震动水力作用下的结构运动方程:

$$(M_s + M_w)\ddot{u}_s + C_s\dot{u}_s + K_s u_s = -(M_s + M_w)\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中: $M_s$  为结构的质量; $M_w$  为水体附加质量的精确解; $\ddot{u}_s$  表示结构的加速度; $C_s$  为阻尼; $\dot{u}_s$  表示速度; $K_s$  为刚度; $u_s$  表示位移; $\ddot{u}_g$  表示地面加速度。

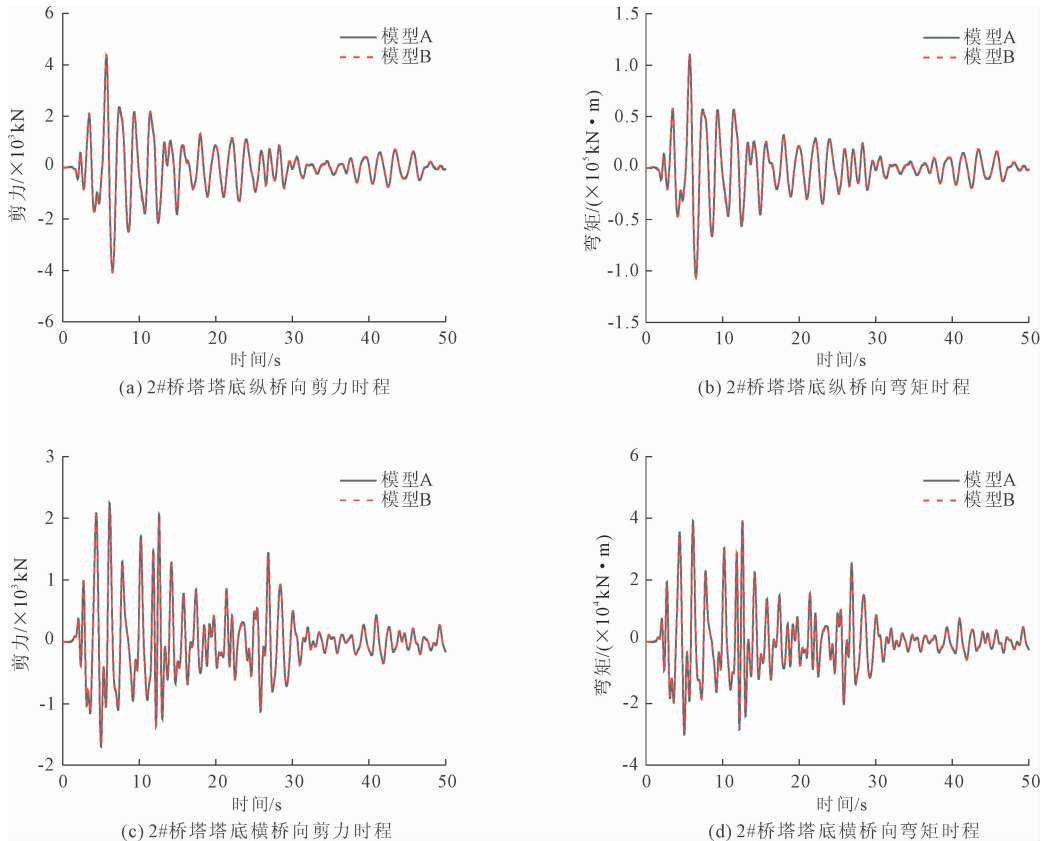


图 6 Imperial Valley 地震波作用下 2# 塔底内力响应时程

单位高度矩形截面的动水力附加质量与圆形截面动水力附加质量的等效换算系数:

$$K = 0.94732 + \frac{2.59648}{1 + \left(\frac{D/B}{0.09516}\right)^{0.54638}} \quad (2)$$

式中: $D$ 为矩形截面正面迎击水体的宽度; $B$ 即为 $D$ 邻边的宽度。

根据上述公式,背景桥承台单位高度的动水力附加质量计算结果见表 2。

表 2 承台单位高度动水力附加质量 单位: $10^5$  kg

构件	纵向	横向
主墩承台	24.066	9.469
边墩承台	14.454	3.900

## 2.2 群桩地震动水力计算方法

对于小尺寸圆柱体,采用经典 Morison 方程计

算其动水力附加质量,线性化后的 Morison 方程为:

$$F_w = -M_w(\ddot{x} + \ddot{x}_g) - C_w(\dot{x} + \dot{x}_g) \quad (3)$$

式中: $F_w$ 为单位长度柱体上的动水压力; $M_w$ 为水中结构的附加动水质量; $C_w$ 为动水附加阻尼系数,圆柱体结构 $C_w$ 为 2.0; $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 分别为桥墩的相对加速度和相对速度; $\ddot{x}_g$ 、 $\dot{x}_g$ 分别为地震动加速度和速度。

在计算群桩基础的地震动水压力时应考虑群桩效应。群桩系数 $K_g$ 可根据《港口与航道水文规范》<sup>[16]</sup>计算, $K_g$ 值可按表 3 采用。

表 3 群桩系数 $K_g$

桩列方向 $l/D$	2	3	4
垂直于波向	1.5	1.2	1.1
平行于波向	—	1.0	—

根据上述公式,背景桥群桩的动水力附加质量计算结果见表 4。

表 4 群桩动水力附加质量

单位: $10^5$  kg

构件	1#边墩		2#边墩		3#边墩		4#边墩		5#边墩	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
群桩	60.69	44.95	109.26	80.94	109.90	81.41	110.26	81.67	59.28	43.91

注:群桩指群桩基础中所有桩柱单元节点上附加质量总和。

### 3 地震动水力对深水矮塔斜拉桥的影响分析

#### 3.1 地震动水力对深水矮塔斜拉桥动力特性的影响

采用子空间迭代法对模型进行动力特性分析,不考虑地震动水力模型和考虑地震动水力模型前10阶周期及对比情况见表5。

表5 矮塔斜拉桥自振周期及振型描述

序号	无水周期/s	有水周期/s	增长率/%	考虑地震动水力模型振型描述
1	2.08400	2.15140	3.234	一阶纵飘
2	1.78187	1.85249	3.963	一阶正对称侧弯
3	1.77944	1.83729	3.251	一阶反对称扭转
4	1.77145	1.82762	3.171	一阶反对称竖弯
5	1.68505	1.74382	3.488	一阶正对称扭转
6	1.41630	1.58801	12.124	1#边墩纵飘
7	1.40750	1.53116	8.786	5#边墩纵飘
8	1.36653	1.47920	8.245	一阶正对称竖弯
9	1.33922	1.44250	7.712	二阶正对称竖弯 + 二阶反对称扭转
10	1.12907	1.36853	21.209	二阶正对称竖弯 + 二阶正对称扭转

注:无水:不考虑地震动水力;有水:考虑地震动水力;增长率 =

$\frac{T_{有水} - T_{无水}}{T_{无水}}$ ,  $T_{无水}$ 、 $T_{有水}$  分别表示不考虑地震动水力和考虑地震动水力下背景桥自振周期。

从表5中可以得到,考虑地震动水力情况下,背景桥自振周期均有一定的增大,其中第十阶自振周

期最大增长率为21.21%,这主要是因为背景桥在考虑动水力附加质量后,整体结构质量有所增加,自振频率有一定的减小,导致自振周期均有所增大。

#### 3.2 地震动水力对深水矮塔斜拉桥地震响应影响

为了便于比较考虑地震动水力和不考虑地震动水力状态下桥梁响应的差别,此处引入地震动水力效应影响率,用于衡量地震动水力对深水桥梁地震响应影响程度的大小,其定义为:

$$K = \frac{\mu_m - \mu_0}{\mu_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\mu_m$  为有水时地震响应峰值; $\mu_0$  为无水时地震响应峰值。

文中的  $K_Q$  为地震动水力对剪力的效应影响率,  $K_M$  为地震动水力对弯矩的效应影响率,  $K_D$  为地震动水力对位移的效应影响率。

##### 3.2.1 地震动水力对桥塔地震响应的影响

不考虑地震动水力(无水)和考虑地震动水力(有水)的桥塔塔底纵横向内力响应对比见表6和表7,从表中可以看出,地震动水力对桥塔内力峰值的影响显著。考虑地震动水力后,在 Imperial Valley 地震波下,桥塔纵向剪力增大25.44%,纵向弯矩增大25.54%,在 Borrego 地震波下,横向剪力增大21.58%,横向弯矩增大18.43%。另外,从表6和表7中可知,不同地震波作用下动水力效应影响率不同,随着输入地震波的变化,结构响应的峰值增长率有一定的差异,可见地震动水力的影响大小与输入的地震波有关。

表6 三条地震波作用下塔底纵桥向内力峰值

地震波	截面位置	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
		无水	有水	$K_Q/\%$	无水	有水	$K_M/\%$
Imperial Valley	2#桥塔塔底	4386	4984	13.63	110400	130400	18.12
	3#桥塔塔底	4839	6070	25.44	120600	151400	25.54
	4#桥塔塔底	4232	5072	19.85	108000	131100	21.39
Borrego	2#桥塔塔底	2960	2992	1.08	74390	76860	3.32
	3#桥塔塔底	3205	3587	11.92	79210	88920	12.26
	4#桥塔塔底	2662	2917	9.58	67890	76170	12.20
Borrego Mtn	2#桥塔塔底	2693	3095	14.93	65300	74990	14.84
	3#桥塔塔底	2970	3406	14.68	73170	84570	15.58
	4#桥塔塔底	2817	3518	24.88	70620	87270	23.58

##### 3.2.2 地震动水力对桥墩地震响应的影响

地震动水力对桥墩地震响应峰值见表8和表9,从表中可以看出,地震动水力显著增大桥墩的动力响应。在 Imperial Valley 地震波下,桥墩纵向剪

力增大20.57%,纵向弯矩增大24.63%。在 Borrego 地震波下,桥墩横向剪力增大30.10%,横向弯矩增大29.69%。从表8中可知,不同地震波作用下,动水力效应影响率存在差异。随着输入地震波

的变化,结构响应的峰值增大率也有所不同。在 Imperial Valley 地震波作用下,墩底内力的动水力效应影响率可达到 24.63%;而在 Borrego 地震波作用下,动水力效应影响率的最大值仅为 12.84%。可

见地震动水力的影响大小与输入的地震波有关。此外,从表中还可以得到边墩的动水力效应影响率小于主墩的动水力效应影响率,即地震动水力对主墩的影响大于对边墩的影响。

表 7 三条地震波作用下塔底横桥向内力峰值

地震波	截面位置	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
		无水	有水	$K_Q/\%$	无水	有水	$K_M/\%$
Imperial Valley	2#桥塔塔底	2151	2356	9.53	37490	40670	8.48
	3#桥塔塔底	2972	3085	3.80	55990	56840	1.52
	4#桥塔塔底	2029	2226	9.71	36580	40290	10.14
Borrego	2#桥塔塔底	2092	2534	21.13	36350	42990	18.27
	3#桥塔塔底	2380	2826	18.74	41120	48130	17.05
	4#桥塔塔底	2076	2524	21.58	36130	42790	18.43
Borrego Mtn	2#桥塔塔底	1558	1648	5.78	28220	29700	5.24
	3#桥塔塔底	1889	1969	4.24	34800	36020	3.51
	4#桥塔塔底	1534	1617	5.41	27850	29170	4.74

表 8 三条地震波作用下墩底纵桥向内力峰值

地震波	截面位置	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
		无水	有水	$K_Q/\%$	无水	有水	$K_M/\%$
Imperial Valley	1#边墩墩底	3012	3038	0.86	124400	127600	2.57
	2#主墩墩底	19030	20600	8.25	570700	665400	16.59
	3#主墩墩底	19590	23620	20.57	570100	710500	24.63
	4#主墩墩底	19180	22000	14.70	577600	687700	19.06
	5#边墩墩底	3329	3305	-0.72	133700	133600	-0.07
Borrego	1#边墩墩底	2506	2190	-12.61	80640	80630	-0.01
	2#主墩墩底	12150	12260	0.91	367400	389100	5.91
	3#主墩墩底	12570	13860	10.26	359800	405500	12.70
	4#主墩墩底	11890	12680	6.64	360600	406900	12.84
	5#边墩墩底	2383	2647	11.08	78110	87660	12.23
Borrego Mtn	1#边墩墩底	2138	2325	8.75	79930	83770	4.80
	2#主墩墩底	11180	12640	13.06	339100	373900	10.26
	3#主墩墩底	11570	12770	10.37	331000	382900	15.68
	4#主墩墩底	12020	14440	20.13	357800	423800	18.45
	5#边墩墩底	2419	2432	0.54	86090	85960	-0.15

### 3.2.3 地震动水力对主梁梁端和桥塔塔顶位移的影响

地震动水力对主梁和桥塔的地震响应峰值见表 10,由表 10 可知,地震动水力会显著增大主梁和桥塔的位移响应。在 Imperial Valley 地震波下,主梁梁端纵向位移增大 18.86%,桥塔塔顶纵向位移增大 20.59%。在 Borrego 地震波下主梁梁端横向位移增大 18.08%,桥塔塔顶横向位移增大 29.76%。

另外,不同地震波作用下,动水力效应影响率不同,结构响应的峰值增长率有较大差异。值得关注的是,纵向位移的动水力效应影响率在 Imperial Valley 地震波作用下达到最大,而横向位移的动水力效应影响率在 Borrego 地震波作用下达到最大,可见地震动水力的影响大小不仅与输入的地震波有关,还与地震波输入方向有关。

表 9 三条地震波作用下墩底横桥向内力峰值

地震波	截面位置	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
		无水	有水	$K_Q/\%$	无水	有水	$K_M/\%$
Imperial Valley	1#边墩墩底	3607	3880	7.57	146100	152500	4.38
	2#主墩墩底	22030	23640	7.31	1036000	1126000	8.69
	3#主墩墩底	20860	22930	9.92	1009000	1119000	10.90
	4#主墩墩底	21470	22510	4.84	986100	1042000	5.67
	5#边墩墩底	3751	3609	-3.79	129300	137300	6.19
Borrego	1#边墩墩底	3901	4288	9.92	164900	178500	8.25
	2#主墩墩底	22340	27070	21.17	1065000	1292000	21.31
	3#主墩墩底	21930	28530	30.10	1061000	1376000	29.69
	4#主墩墩底	22040	26540	20.42	1025000	1234000	20.39
	5#边墩墩底	3922	4108	4.74	159800	163400	2.25
Borrego Mtn	1#边墩墩底	3038	2986	-1.71	120400	119100	-1.08
	2#主墩墩底	14310	15010	4.89	696600	738100	5.96
	3#主墩墩底	13200	14790	12.05	668300	731400	9.44
	4#主墩墩底	14270	15060	5.54	680100	719200	5.75
	5#边墩墩底	2774	3313	19.43	107800	121500	12.71

表 10 三条地震波作用下主梁梁端和桥塔塔顶位移峰值

地震波	关键位置	纵向位移/mm			横向位移/mm		
		无水	有水	$K_D/\%$	无水	有水	$K_D/\%$
Imperial Valley	主梁梁端	86.66	103.0	18.86	89.26	98.42	10.26
	2#桥塔塔顶	130.20	156.80	20.43	130.30	143.50	10.13
	3#桥塔塔顶	122.90	148.20	20.59	129.60	149.80	15.59
	4#桥塔塔顶	129.80	155.60	19.88	127.70	137.20	7.44
Borrego	主梁梁端	60.28	63.66	5.61	89.43	105.60	18.08
	2#桥塔塔顶	86.16	92.10	6.89	127.60	164.00	28.53
	3#桥塔塔顶	80.34	88.05	9.60	136.10	176.60	29.76
	4#桥塔塔顶	90.10	96.18	6.75	126.30	162.30	28.50
Borrego Mtn	主梁梁端	52.78	55.59	5.32	52.35	57.49	9.82
	2#桥塔塔顶	77.98	86.26	10.62	79.13	81.05	2.43
	3#桥塔塔顶	69.56	76.10	9.40	84.20	87.42	3.82
	4#桥塔塔顶	76.35	80.59	5.55	79.68	79.72	0.05

## 4 结 论

采用 ABAQUS 建立了某深水矮塔斜拉桥有限元模型,基于辐射波浪理论研究了地震作用下动水对桥梁的影响,主要得到以下结论:

(1) 提出了一种适合工程应用的矮塔斜拉桥简化有限元模型,并与桥塔采用实体单元建模的有限元模型进行对比验证。

(2) 地震动水力对深水中的矮塔斜拉桥的主要振型影响较为显著,其中第十阶自振周期的增长率为 21.21%,其他各阶自振周期也有不同程度的增大,地震动水力对矮塔斜拉桥动力特性的影响不容

忽略。

(3) 地震动水力会显著增大结构的动力响应,在 Imperial Valley 地震波下,桥塔纵向剪力增大 25.44%,纵向弯矩增大 25.54%,在 Borrego 地震波下,横向剪力增大 21.58%,横向弯矩增大 18.43%,因此对于深水矮塔斜拉桥抗震设计,考虑地震动水力的影响是十分有必要的。

### 参考文献:

- [1] 张士博,柳春光.复杂环境荷载下斜拉桥单塔结构动力响应试验[J].中国公路学报,2017,30(12):250-257.

(下转第 82 页)

参数测定方法和技术,可以为动态勘察、动态设计、动态评估提供参数支持,也可以为动态施工、规划堆积、施工优化、施工风险管控提供技术支持,符合该领域发展趋势。

上述工作有助于工程大数据的形成,工程大数据有利于科学研究和技术更新,也有利地区经验和行业标准的形成,对同类工程具有借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林.土石混合体概念、分类及意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):50-56,70.
- [2] 尹小涛,杨华,但路昭,等.西南山区交通工程弃渣的工程特性评价及其分类[J].地球科学与环境学报,2021,43(2):389-397.
- [3] 刘建彪,杨俊毅,杨培,等.山区高速公路弃渣场渣体敏感性及其分类堆置[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(10):128-131.
- [4] 谷东京,黄宜胜.基于室内原状样试验的土石混合体强度特性研究[J].水电能源科学,2021,39(7):150-153.
- [5] 杨忠平,李进,蒋源文,等.含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响[J].岩土工程学报,2021,43(8):1443-1452.
- [6] 罗亚琼,张超,马婷婷.基于大型直剪试验的土石混

合体剪切强度特性及剪切变形模拟方法研究[J].中外公路,2020,40(5):295-301.

- [7] 胡世兴,靳晓光,孙国栋,等.土石混合体材料大型三轴试验及PFC-FLAC耦合仿真研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3344-3356.
- [8] 张振平,盛谦,付晓东,等.基于颗粒离散元的土石混合体直剪试验模拟研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(1):135-146.
- [9] 江泊洧,潘家军,程展林,等.考虑垂直分布因素的松散弃渣土力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(3):631-639.
- [10] 王家辉,江泊洧,饶锡保,等.渣场松散碎石土应力-应变特性研究[J].长江科学院院报,2021,38(5):88-93,102.
- [11] 袁斌.颗粒群体形态特征量化及对弃渣堆积体剪切特性的影响[D].成都:成都理工大学,2020.
- [12] 张家铭,刘浩,胡恒,等.咸池沟弃渣场渣体大型三轴试验研究[J].工程勘察,2012,40(12):4-7.
- [13] 李薇,杨华,尹小涛,等.山区高速公路典型弃渣场稳定性综合评估[J].公路交通科技,2021,38(7):38-44.
- [14] 张朔.山区高速公路弃渣场稳定性评估和综合安全控制技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.

(上接第 29 页)

- [2] 赵秋红,许梦凡,董硕.地震-波浪耦合作用下考虑相位影响的深水桥墩动力响应分析[J].中国公路学报,2021,34(5):86-98.
- [3] 周救,江坤,李久龙.地震作用下不同形式深水桥墩流固耦合效应研究[J].振动与冲击,2022,41(21):7-18.
- [4] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974,3(1):33-49.
- [5] 赵金钢,杜斌,孔德文,等.近场地震作用下库区深水钢筋混凝土高墩地震易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2021,41(1):55-66.
- [6] Goyal A, Chopra A K. Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989,18(3):325-344.
- [7] 苏京华,柳春光.地震、波浪联合作用下深水大跨桥梁响应分析[J].水利与建筑工程学报,2022,20(3):140-146.
- [8] 赖伟.地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D].上海:同济大学,2004.
- [9] Li Qiao, Yang Wanli. An improved method of hydrody-

amic pressure calculation for circular hollow piers in deep water under earthquake[J]. Ocean Engineering, 2013,72:241-256.

- [10] 樊冰,李永庆,宋松林,等.高烈度区深水斜拉桥动水效应及抗震体系研究[J].地震工程学报,2022,44(5):1024-1033.
- [11] 殷旭东,陈维田.库区大跨度墩-塔-梁固结体系斜拉桥抗震性能研究[J].公路,2021,66(3):140-144.
- [12] 雷虎军,孙昱坤.考虑地震动水力的跨海斜拉桥减震控制研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(7):1936-1944.
- [13] Jiang Hui, Wang Baoxi, Bai Xiaoyu, et al. Simplified expression of hydrodynamic pressure on deepwater cylindrical bridge piers during earthquakes[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017,22(6):04017014.
- [14] 李彤.地震作用下土-群桩-结构-水相互作用体系的动力反应分析[D].上海:同济大学,1999.
- [15] 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01-2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [16] 港口与航道水文规范:JTS 145-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.