

深水桥梁群桩-桁架组合基础抗震性能分析

魏凯¹, 袁万城¹, 伍勇吉², 游科华¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国水电顾问集团 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 研究了水下双桩系统按照同向、反向振型振动时的频率及动水压力变化规律, 通过分析发现, 水下相邻桩反向振动振型会增强作用于桩身的动水效应。据此提出群桩-桁架组合基础设计方案, 通过桩间桁架限制群桩间反向振动提高基础刚度。以四桩群桩基础模型为试验对象, 进行了普通群桩基础和3种组合基础方案在不同水深条件下的水池模态试验, 研究了群桩-桁架组合基础的动态性能。然后通过对四跨连续梁桥进行地震反应谱分析, 全面评估了该新型基础的抗震性能。研究表明, 经过合理设计的群桩-桁架组合基础可以改善并优化深水桥梁的地震响应。

关键词: 深水桥梁; 桥梁抗震; 群桩-桁架组合基础; 模态试验; 势流体单元

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Seismic Analysis of Pile Group-truss Foundation for Deep-water Bridges

WEI Kai¹, YUAN Wancheng¹, WU Yongji², YOU Kehua¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhongnan Engineering Corporation, Hydro China Corporation, Changsha 410014, China)

Abstract: The frequencies and the modal hydrodynamic pressure of the parallel and nonparallel vibration modes for a submerged two-pile system are investigated first. The results show that the nonparallel vibration of the two-pile system increases the hydrodynamic effect. The pile group-truss foundation is developed to control the nonparallel vibration of piles and increase the stiffness by installing the truss braces between piles. The modal tests for a typical group foundation and three developed pile group-truss foundation designs are carried out on a 4-pile foundation specimen to investigate the dynamic performances experimentally. The seismic performance of the pile group-truss foundation is then assessed through seismic response spectrum analyses of a four span deep water bridge. The study shows that the properly

designed pile group-truss foundation improves and optimizes the seismic responses of the deep water bridges.

Key words: deep-water bridge; earthquake resistant of bridge; pile group-truss foundation; modal testing; potential-based fluid element

近年来我国跨越江河、海峡和海湾的大跨深水桥梁不断规划与建设, 给桥梁工程界带来巨大的机遇和挑战。高桩承台群桩基础鉴于在建设条件、施工周期、施工难度及造价等方面的优势, 已成为在我国跨江海长大桥梁建设中被广泛采用的基础形式, 因其“头重脚轻”的结构形式, 亦成为桥梁抗震计算中需要重点验算的部分^[1]。对深水群桩基础来说, 问题更加复杂。大量试验^[2-3]表明, 水的存在会改变水下结构的动力特性, 如周期、振型、阻尼比等参数, 进而改变结构在地震作用下的受力情况, 因此, 如何确保深水群桩基础的抗震安全成为业界普遍关注的科学问题。

为解决上述问题, 文献[4]结合动水附加质量及结构有限元分析的特点, 提出了基于传统结构有限元分析的地震作用下水下桩基动力分析简化方法; 文献[5]采用 Morison 方程和辐射波浪理论建立了桥墩地震动水压力计算方法, 分析了动水压力作用对桥墩地震响应的影响, 并比较了2种方法计算结果对桥墩地震响应影响的差异; 文献[6]将承台假设为水中悬浮圆柱体, 建立了深水高桩基础承台的地震动水附加质量和附加阻尼矩阵的表达式, 通过经验公式进行形状修正实现了对矩形承台地震动水效应的解析求解。近年来, 基于势流体有限元、边界元的一系列结构-水相互作用的数值研究方法^[7]为复杂结构的流固耦合动力问题提供了更加精确有效

收稿日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(51278376, 90915011); 同济大学土木工程学院光华基金

第一作者: 魏凯(1984—), 男, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震与振动。E-mail: 10weikai@tongji.edu.cn

通讯作者: 袁万城(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震与振动。E-mail: yuan@tongji.edu.cn

的求解手段. 文献[8]基于试验和势流体理论讨论了不同水深及结构参数对水下群桩基础模态动力响应的影响.

然而,过去研究多针对深水基础的地震动水效应计算方法开展,少有针对深水群桩基础的合理抗震体系及构造措施的研究. 因此,本文从流固耦合影响机理入手,研究了具有不同间距水下相邻桩按照同向、反向振型振动时模态动水效应的变化;在流固耦合有限元分析的基础上,从降低水对结构动力特性影响和提高基础刚度 2 个角度入手,提出了深水桥梁群桩-桁架组合基础抗震体系;随后采用试验和数值方法相结合的方法对其动力及抗震效果进行了验证.

1 群桩效应对群桩模态动水效应的影响

与传统的水下单桩振动不同,相邻桩的存在会改变作用于群桩各桩身上的动水压力分布,使结构-水动力耦合效应更加复杂. 为研究群桩耦合效应,以桩顶刚性连接的 2 根相邻圆柱桩为研究对象,研究了不同桩间距、不同振型对桩身动水压力分布及自振频率的影响规律.

以图 1 所示 2 根高 $h=10$ m、桩径 $d=1$ m 的相邻悬臂圆柱桩为研究对象,桩身材料为 C30 混凝土,为模拟承台约束下桩身模态,使用刚臂(rigid link)连接桩顶,忽略上部结构质量. 水深取 10 m,恰好没过桩顶. 采用有限元软件 ADINA^[9] 建立结构三维实体有限元模型. 无水模型的振动频率与桩间距无关,图 2 所示无水模型前 3 阶振型周期 T_n 分别为 2.25×10^{-1} , 3.69×10^{-2} , 3.66×10^{-2} s.

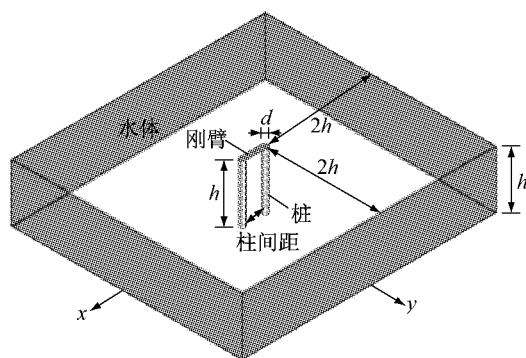


图 1 水下相邻圆柱桩分析模型

Fig.1 Analysis model of submerged cylinder piles

在结构模型基础上采用 20 节点势流体单元模拟水体,结构与水体单元之间设置流固耦合接触,根

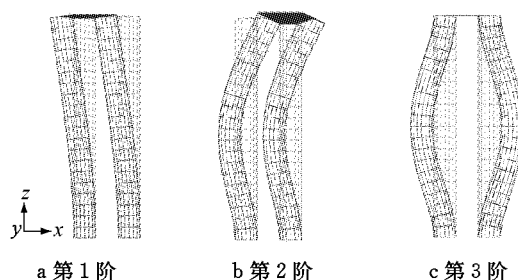


图 2 水下相邻圆柱桩前 3 阶振型

Fig.2 First three mode shapes of the submerged two-pile system

据文献[10],水体域边界与结构距离取水深的 2 倍,近似模拟无限水体. 通过对流固耦合有限元模型进行模态分析,计算得到模型考虑水体时按照上述振型振动时的周期 T_w . 为了说明水体对水下桩振动频率的影响,定义水体影响系数 β 计算公式如下:

$$\beta = (R_w - R_n) / R_n \quad (1)$$

式中: R_w 为水下双桩系统的响应; R_n 为相应工况下无水单桩的响应. 为研究水体对结构自振周期影响随桩间距的变化规律, R_w 和 R_n 分别取水下双桩系统和无水单桩的同阶振动周期 T_w 和 T_n , 根据式(1)计算 β 值,并绘制结果于图 3. 如果相邻桩的存在不会改变桩身动水压力分布,那么,在相同水深情况下,无论桩间距怎样变化,桩的振动周期都不会发生改变,即 β 不会发生变化. 但由图 3a 和 3b 知,随着桩间距减小,水体对反向振型的影响逐渐增大,而对同向振型的影响则逐渐减小;当桩间距缩小到 3 倍桩径以下时,这种群桩动水效应变得更加明显;此外,水体对同向振动周期的影响远小于其对反向振动的影响.

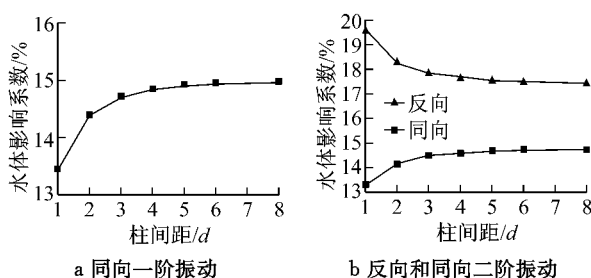


图 3 水体对结构不同的模态振动频率的影响

Fig.3 Hydrodynamic effect on different natural vibration frequencies of structure

为了解释上述结果,图 4 给出了基于三维势流体单元计算得到的两桩模型按照反向、同向二阶振动时的模态动水压力分布随桩间距增大的变化情况. 桩间距依次取 $1d$, $3d$, $5d$ 和 $8d$. 由图 4 知,两桩反向(非一致)振型都会明显增强桩间区域的动水压

力(见图 4a, 4c, 4e, 4g 桩间高亮区域), 增强作用于桩身的动水效应, 而同向振型因为结构运动的一致性, 对桩间水体扰动较小, 使中间部分具有刚体运动的状态, 从而削弱了动水影响(图 4b, 4d, 4f, 4g 桩间深色区域); 随桩间距增大, 相邻桩对桩间水体运动

的影响逐渐减小; 从动水压力数值上比较, 同向振动产生的动水压力明显小于反向振动的动水压力, 这也是水对同向振型的影响明显小于对反向振型的影响的主因. 上述现象对于高阶振型同样成立.

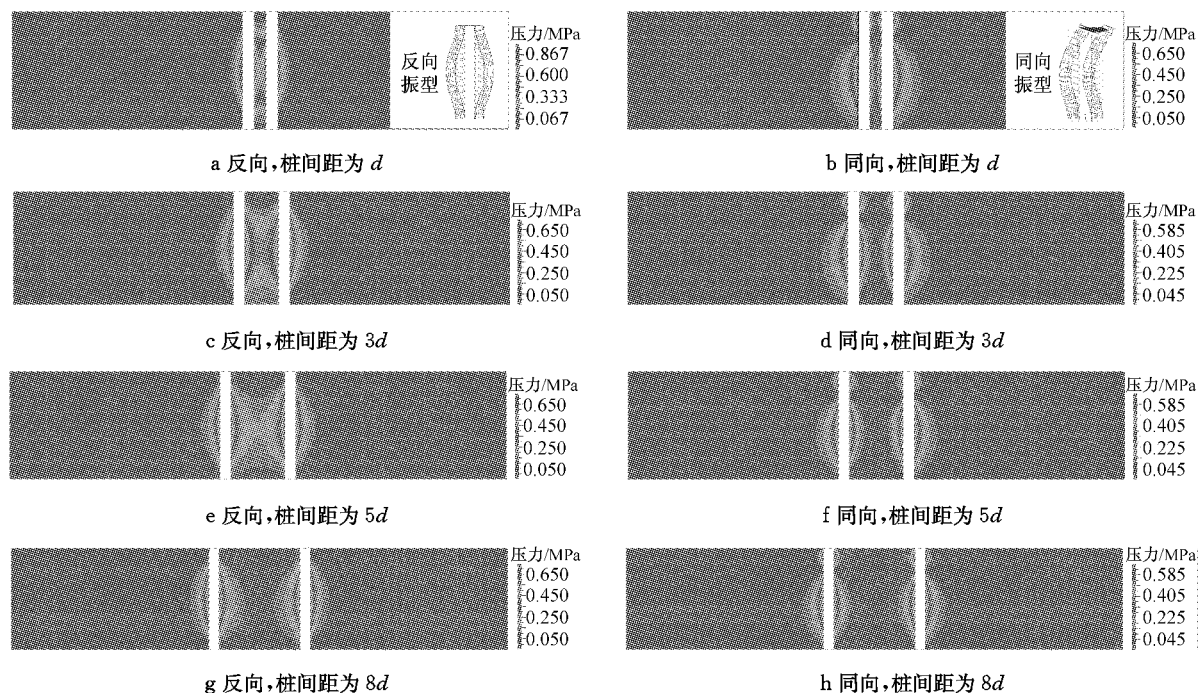


图 4 反向与同向模态动水压力分布剖面

Fig.4 Cutting view of hydrodynamic pressure distribution

2 深水群桩-桁架组合基础体系

根据上述发现, 当桩间距一定时, 若能通过采取一定构造措施增强群桩间联系, 降低反向(非一致)振型的贡献, 将能够减少深水对群桩基础结构动力特性的影响, 有利于结构抗震设计. 调研其他深水基础的动力特性发现: 桥梁工程中所用的斜桩基础相对普通基础具有较高基础刚度; 海洋工程中的重力式导管平台^[11]常用剪刀撑、贝雷架等桁架式构件来加强深水塔架的联系, 结构稳定性高, 基础刚度大. 因此, 从降低水对结构动力特性影响和提高基础刚度的角度出发, 提出了将桁架式连接构件与高桩承台基础相结合的群桩-桁架组合基础方案: 通过在桩基自由段内安装桁架结构连接有效限制相邻桩反向振型, 同时提高体系的整体刚度, 从而达到减小动水影响、增强深水基础抗震能力的效果.

2.1 组合基础体系水下模型试验

为验证不同桁架体系与群桩基础组合后的性

能, 在一座尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 砖石水池中建立了一个由钢管桩、钢箱-混凝土承台以及钢筋混凝土桥墩三部分组成的四桩群桩试验模型(下文称无桁架模型).

桩底固结, 自由桩长 1.75 m , 采用 4 根壁厚 1 mm 、直径 6 cm 钢管; 承台高为 0.3 m , 边长 0.6 m ; 上部墩高 1.5 m , 长、宽分别为 $0.2, 0.1\text{ m}$. 加速度传感器分别布置在墩顶、墩中、承台中、承台侧边以及桩身 $1/2, 3/4$ 处的 x, y 向测点处, 并采取了专门的防水设计. 采用单点激励、多点拾振方法测试了无桁架模型在 4 种不同水深(无水、 0.75 m , 1.75 m 和 1.90 m)条件下的一阶、二阶 y 向侧弯振动频率. 试验装置、模型和试验水深位置如图 5 所示. 随后将横截面为 $3.0\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$ 桁架杆件依次按照横撑、剪刀撑及贝雷架形式安装在原四桩试验模型上组成图 6 所示 3 种不同的群桩-桁架组合基础体系, 采用相同手段重新测试各组合基础体系在不同水深条件下的动力特性. 桁架杆件采用圆形抱箍式节点与钢管桩连接.

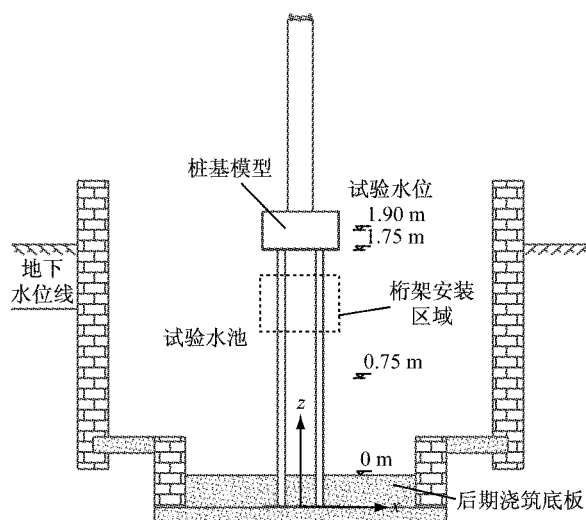


图 5 试验装置与模型示意

Fig.5 Sketch of testing setup and model

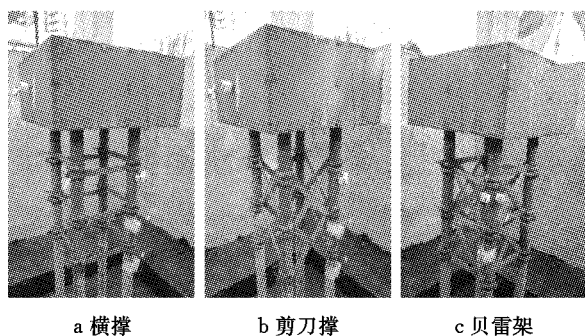


图 6 深水群桩-桁架组合基础

Fig.6 Three deep water pile group-truss foundation

表 1 给出了原四桩模型和各组合体系在不同试验水深环境下的一阶频率值。为评价采用不同组合基础形式时动水效应对结构动力特性的影响,根据式(1) R_w 取水深 h 时结构振动周期 T_h , R_n 取无水结构振动周期 T_0 , 计算各水深 h 时的水体影响系数 β 绘于图 7。

表 1 各组合基础体系一阶频率

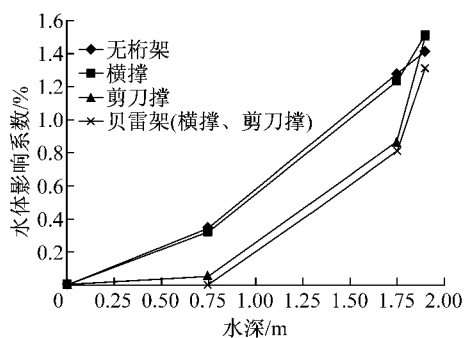
Tab.1 1st frequency of the combined

foundation systems				Hz
水深/m	无桁架	横撑	剪刀撑	贝雷架
0	3.105	3.106	3.721	3.720
0.75	3.095	3.096	3.719	3.720
1.75	3.066	3.068	3.689	3.690
1.90	3.062	3.060	3.666	3.672

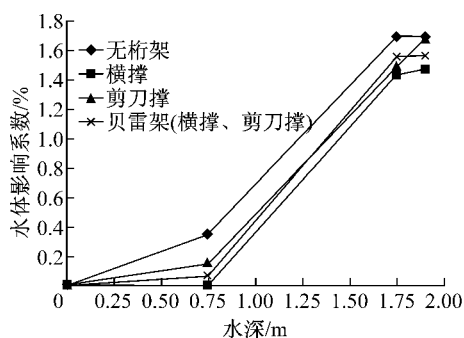
2.2 试验结果分析

分析表 1 结果,对应于各阶模态来说,采取无桁架及采用横撑、剪刀撑、贝雷架的四桩模型其一阶频率值逐渐增加,说明采用桁架构件后结构整体刚度有所提高。对比图 7 的试验结果可以发现:动水效应

对采用群桩-桁架组合基础的影响大多小于对无桁架基础的影响,这说明桁架构件减小了水体对基础动力特性的影响;采用剪刀撑比采用横撑式桁架对减弱及改善水体对结构一阶振型影响更加有效,同时,相比贝雷架,采用剪刀撑式桁架在性能接近的情况下具有更优越的工程经济性。



a 一阶振型



b 二阶振型

图 7 水体影响系数与水深的关系

Fig.7 Hydrodynamic effect as a function of water depth

3 组合基础抗震性能分析

3.1 工程背景

以某跨越钱塘江的大桥为背景研究群桩-桁架组合基础体系对深水桥梁地震响应的影响。跨径布置及水文情况如图 8 所示,上部结构采用钢-混凝土组合箱梁(截面积为 2.054 m^2 , 抗弯惯矩为 120.7 m^4), 3 号和 4 号承台混凝土为 C30, 截面见图 9, 箱形空心桥墩, 采用 C40 混凝土, 截面积为 15.91 m^2 , 横桥向抗弯惯矩为 179.428 m^4 , 纵桥向抗弯惯矩为 16.35 m^4 。不考虑桩土相互作用, 桩底在冲刷线处固结。

3.2 基础结构方案

采用以下 3 种方案建立 SAP2000 梁单元分析模型: 方案 1 采用普通高桩承台基础; 方案 2 采用图 10 所示高桩承台-桁架组合基础; 方案 3 采用高桩承

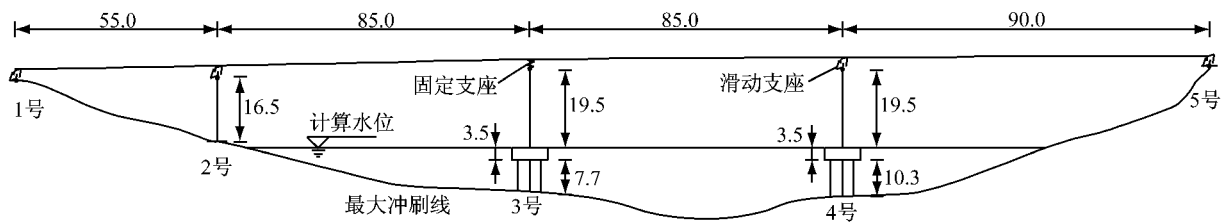


图 8 全桥计算模型(单位:m)

Fig.8 Model of the bridge case (Unit: m)

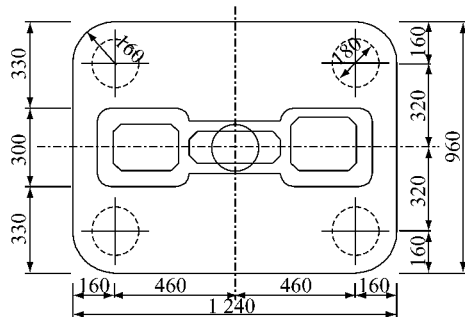


图 9 3 号和 4 号墩承台平面(单位:cm)

Fig.9 Cap section of Pier 3 and 4 (Unit: cm)

台-桁架组合基础及柔性桥墩。其中,方案 2 中采用群桩与剪刀撑桁架组合基础,桁架杆件采用尺寸为 400 mm×300 mm×50 mm 工字钢,截面积 0.04 m²。方案 3 在其他参数与方案 2 一致的情况下减小桥墩刚度为原桥墩刚度的 80%,以适应基础刚度增加的特点。

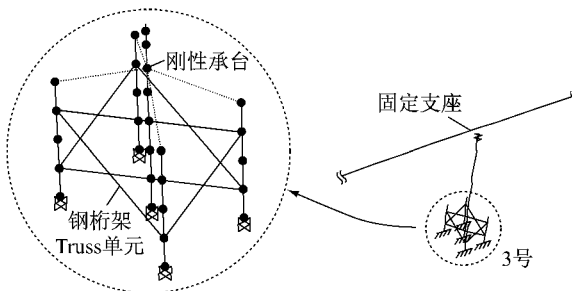


图 10 群桩-桁架组合基础 SAP2000 建模

Fig.10 Modeling of the pile group-truss combined foundation in SAP2000

3.3 地震响应计算

选取 C 类场地规范反应谱,考虑前 200 阶模态,基于反应谱方法计算了各方案在不考虑水和考虑水(图 8 计算水位)时的纵桥向地震响应,计入 5% 的模态阻尼。有水时偏于安全地忽略动水阻尼的影响,仅以动水附加质量的方式考虑桩身和承台的地震动水作用,按照如下方法求解:

(1)对水下实心混凝土桩进行动力分析时,结构单位长度上的质量应为结构质量和动水附加质量的

和,可参考文献[12]计算。

(2)对于承台部分,基于势流体有限元模型采用如下步骤进行简化计算。承台依照真实尺寸进行三维建模;承台下设 1 根与桩同长的“虚拟梁”,通过调整梁刚度使简化模型与原模型无水状态下的一阶振动周期 $T_{n,1}$ 相同;然后,基于简化模型,利用势流体流固耦合求解技术计算水中简化模型的一阶振动周期 $T_{w,1}$,然后根据式(2)求解承台附加质量 M_a 。考虑到承台高阶振型在反应谱分析中贡献较小,故此近似认为承台一阶振型得到的动水附加质量即为反应谱分析时承台的动水附加质量。

$$M_a = M_c \left(\frac{T_{w,1}}{T_{n,1}} \right)^2 - M_c \quad (2)$$

式中: M_c 为承台质量。根据上述方法得到各方案在计算水位下桩身、承台动水附加质量如表 2。

表 2 桩身、承台动水附加质量

Tab.2 Hydrodynamic added mass of piles and cap		
方案	每延米桩身动水质量/kg	承台动水质量/kg
1	2.543×10^3	1.102×10^5
2	2.543×10^3	1.099×10^5
3	2.543×10^3	1.114×10^5

3.4 计算结果与讨论

取 3 号固定墩、4 号滑动墩位置的地震响应作为研究对象,表 3 列出了各方案在有、无水工况下计算得到的该墩墩顶、承台位移及桩身、墩身关键位置的地震响应结果。为研究不同基础方案对动水效应的改善效果,分别取 R_w 和 R_n 为考虑和不考虑动水影响时的结构地震响应计算 β ,比较了按照式(1)计算的水体对各方案桩基内力的影响,见图 11。根据图 11 可知,采用群桩-桁架组合基础的方案 2 和方案 3 相比采用传统群桩基础的方案 1 明显减少了地震动水效应对桩身内力的影响,说明采用桁架构造来改善群桩地震动水效应的做法是有效的。

根据表 3 知,考虑水体后,无论哪种方案,地震动水效应都不同程度地放大了结构的地震响应。考虑水体后,因为附加质量的原因,结构自振周期延长。控制桥墩地震响应的低阶模态反应谱值变化不

表 3 全桥地震响应

Tab.3 Earthquake response of all bridge cases

桥墩	方案	墩顶位移/m		承台位移/m		墩底剪力/kN		墩底弯矩/(kN·m)		桩顶剪力/kN		桩顶弯矩/(kN·m)	
		无水	有水	无水	有水	无水	有水	无水	有水	无水	有水	无水	有水
3 号	1	0.071 6	0.071 7	0.012 2	0.012 2	10 753	10 766	207 790	208 102	2 265	2 284	8 470	8 571
	2	0.069 4	0.069 4	0.008 9	0.008 9	10 932	10 942	211 220	200 540	2 563	2 584	5 649	5 719
	3	0.075 4	0.075 5	0.008 3	0.008 3	10 215	10 220	197 320	197 458	2 415	2 432	5 345	5 399
4 号	1	0.020 6	0.021 5	0.007 6	0.008 2	2 932	3 001	40 251	41 111	1 050	1 121	5 100	5 482
	2	0.016 6	0.017 3	0.004 0	0.004 3	2 794	2 879	40 374	41 610	1 055	1 122	2 841	3 038
	3	0.017 7	0.018 2	0.003 9	0.004	2 707	2 760	39 667	40 466	1 024	1 071	2 706	2 900

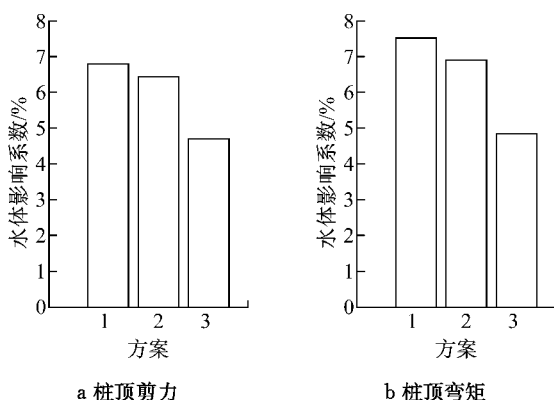


图 11 水体对 4 号墩桩顶剪力和弯矩的影响

Fig.11 Hydrodynamic effect on the shear force and moment on the top of Pier 4

大,但是结构质量的增加增大了地震响应;而对桩基弯矩贡献较大的高阶振型多处于反应谱上升段,地震动反应谱值增加,地震需求亦增大。

表 3 中方案 1 和方案 2 结果表明:无论有水、无水,相比方案 1,方案 2 桥墩以及成桥体系的整体刚度提高,墩顶及承台位移减小;方案 2 的 3 号固定墩墩底内力及桩顶剪力相比方案 1 有所增加,而桩顶弯矩明显减小 33%;对于 4 号滑动墩,方案 2 相比方案 1,除墩底弯矩略有增加之外,其他地震力需求都有所降低,其中桩顶弯矩需求减小约 45%。采用群桩-桁架组合基础后,结构刚度增加,结构位移明显减小,但是结构的刚度调整造成了结构内力重分配,改善了桩基受力,但对桥墩受力不利。

采用柔性桥墩的方案 3 比方案 2 桥墩刚度减小,虽然位移略有增加,但是内力有了大幅减小;与方案 1 相比,方案 3 桥墩虽然刚度减小,但结构变形因为基础的作用得到了有效控制;且无论固定墩还是滑动墩,方案 3 的桥墩及桩基内力都小于原方案的结果,结构地震需求有了明显改善,实现了位移控制与内力控制的双赢。

通过对上部结构的合理设计,群桩-桁架组合基础的抗震性能得到了更有利的发挥。

4 结论

通过对水中相邻圆柱体进行数值模拟,首先探讨了相邻圆桩体的振型对动水效应的影响,从限制反向振型和增大基础整体刚度的角度出发提出了群桩-桁架组合基础结构体系。利用群桩模型水池模态试验和全桥地震响应数值模拟对群桩-桁架组合基础的动力和抗震性能进行了全面评估,主要结论如下:

(1)当两桩间距小于 10 倍的桩径时,水中相邻两桩的反向(非一致)振型会明显增强桩间区域的动水压力,从而增大作用于桩身的动水效应。

(2)采取桩间带有横撑、剪刀撑、贝雷架等横向连接构件的群桩-桁架组合基础体系能提高结构整体刚度与自振频率,并可以降低地震作用下水对结构动力特性和地震响应的影响,有利于结构的抗震设计,其中,以剪刀撑式构件性价比最高。

(3)对处于强震区的深水桥梁而言,群桩-桁架组合基础作为一种新颖、可行的深水抗震基础形式不仅有效减小了结构的地震动水效应,也具有改善、优化桥梁地震响应的能力。从抗震优化设计的角度,如果能对采用此类基础的桥梁进行合理设计,比如使用柔性桥墩,即能很好地消除组合基础对结构动力特性的影响,并达到位移和内力需求控制的双赢。

目前对于这种新型基础结构的研究仍处理论研究阶段,未来有待对其实际推广和应用进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 叶爱君,刘伟岸,王斌斌. 高桩承台基础与桥梁结构的动力相互作用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 1163.
YE Aijun, LIU Weian, WANG Binbin. Dynamic interaction between high-rise pile cap foundation and bridge structure [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(9):

- 1163.
- [2] 赖伟,王君杰,韦晓,等. 桥墩地震动水效应的水下振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 164.
LAI Wei, WANG Junjie, WEI Xiao, et al. The shaking table test for submerged bridge pier [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 164.
- [3] ZHANG G, SONG B, LIU H. Study of hydrodynamic pressure on the cylindrical pile-cap pier in deep water subjected to seismic action [M]. [S.l.]: ICCTP, 2009.
- [4] WU J S, CHEN K W. An alternative approach to the structural motion analysis of wedge-beam offshore structures supporting a load [J]. Ocean Engineering, 2003, 30(14): 1791.
- [5] 黄信,李忠献. 动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 65.
HUANG Xin, LI Zhongxian. Influence of hydrodynamic pressure on seismic response of bridge piers in deep water [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 65.
- [6] 王君杰,赖伟,胡世德. 深水高桩基础桥梁地震水动力效应分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 650.
WANG Junjie, LAI Wei, HU Shide. Seismic hydrodynamic effects on group-pile foundations with caps merged in water [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(5): 650.
- [7] Bouaanani N, Lu F Y. Assessment of potential-based fluid finite elements for seismic analysis of dam-reservoir systems [J]. Computers & Structures, 2009, 87(3/4): 206.
- [8] Wei K, Yuan W, Bouaanani N. Experimental and numerical assessment of the three-dimensional modal dynamic response of bridge pile foundations submerged in water [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012.
- [9] Adina R D. ADINA theory and modeling guide [R]. Watertown: ADINA R&D, 2010.
- [10] Miquel B, Bouaanani N. Practical dynamic analysis of structures laterally vibrating in contact with water [J]. Computers & Structures, 2011, 89(23/24): 2195.
- [11] 杨飏,欧进萍. 导管架式海洋平台磁流变阻尼隔震结构的模型试验[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 1.
YANG Yang, OU Jinping. Experimental research on isolation structure model of jacket offshore platform with MR damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 1.
- [12] 魏凯,袁万城. 深水高桩承台基础地震动水效应数值解析混合算法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 336.
WEI Kai, YUAN Wancheng. A numerical-analytical mixed method of hydrodynamic effect for deep-water elevated pile cap foundation under earthquake [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(3): 336.

(上接第 1462 页)

- [3] Lin B Z, Chuang M C, Tsai K C. Object-oriented development and application of a nonlinear structural analysis framework [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40: 66.
- [4] 蔡克铨,翁崇兴,黄彦智. 双钢管型屈曲约束耗能支撑的接合行为研究[J]. 台湾结构工程学会结构工程季刊, 2008, 18(3): 15.
 TSAI K C, WENG C H, HUANG I C. Experimental study of brace-to-gusset connections of double-tube buckling restrained brace [J]. Journal of Taiwan Society of Structural Engineering, 2003, 18(3): 15.
- [5] 黄彦智. 含屈曲约束耗能支撑框架抗震性能的试验与分析研究[D]. 台北: 台湾大学土木工程研究所, 2002.
HUANG I C. Experimental research of large scale buckling restrained brace frames [D]. Taipei: Institute of Civil Engineering of Taiwan University, 2002.
- [6] 台湾内政部建筑研究所. 建筑物抗震规范条文与解说[S]. 台北: 营建杂志社, 2005.
Institute of Civil Engineering of Taiwan "Ministry of the Interior". Recommended provisions for building seismic regulations[S]. Taipei: ABRI, 2005.
- [7] CHAI J F, LOH C H, SATO H. Modeling of phase spectrum to simulate design ground motions [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2002, 25(4): 447.
- [8] 台湾地震工程研究中心, 台湾灾害防救科技中心. 2006 恒春 12·26 地震事件勘灾报告 [R]. 台北: 台湾地震工程研究中心, 2007.
NCREC, NCDR. Preliminary reconnaissance report of 2006 Hengtsun Earthquake[R]. Taipei: NCREC, 2007.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P R China. GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [10] Vamvatsikos D, Cornell C A. Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 120(35): 1097.
- [11] AISC. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago: AISC, 2005.