

港珠澳大桥桥墩浮拖运输方案分析

秦 尧, 唐友刚, 刘成义, 刘浩宇, 别社安

(天津大学 建筑工程学院, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 根据港珠澳大桥桥墩结构质量和尺度巨大的特点, 提出了合理的装船运输方案. 采用水动力分析软件, 建立桥墩的三维质量模型、桥墩主体与半潜驳船的驳运联合体模型. 基于势流理论计算船体受到的波浪荷载, 分析联合体在海上拖航过程中的稳定性、运动响应, 检验桥墩浮拖过程的稳定性. 计算结果表明: 不采用加固措施, 横浪条件下桥墩的稳定性难以满足, 浪向角不大于 45° 时满足拖航要求; 采用侧向支墩及钢丝绳对桥墩局部加固, 桥墩在所有浪向条件下均满足稳定性要求.

关 键 词: 桥墩浮拖; 稳定性; 运动响应; 局部加固

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)06-0047-07

为满足港珠澳大桥的建设工程需要, 利用半潜驳船将已经预制好的桥墩通过浮拖方式从建造场地经装船运输至施工海域. 桥墩浮拖过程的跨距长, 遭遇海况复杂恶劣, 且桥墩属于高耸结构, 航行过程中驳运系统整体的重心较高, 半潜驳船和桥墩联合体的运动响应明显, 支撑桥墩的台车车轮承受巨大荷载. 若半潜驳船和桥墩之间的相对运动过大, 可能造成桥墩失稳, 从而导致重大事故发生. 为确保浮拖过程中半潜船及桥墩的安全, 需要对整个驳运系统进行水动力性能计算及桥墩的拖航稳定性分析^[1].

1 装船方案

1.1 半潜驳资料

海上运输采用 4 000 t 和 3 000 t 半潜驳各 1 艘, 每艘半潜驳配置 2 艘拖轮 (2 400 ~ 4 000 HP) 拖带到施工现场, 如图 1 所示. 本次桥墩拖运采用半潜驳 3 号及半潜驳 9 号 2 艘驳船进行, 分别根据桥墩的质量及驳船的举力来选取合适的驳船进行拖航运输^[2]. 3 号和 9 号驳船的主尺度如下: 举力分别为 3 000 和 4 000 t; 总长分别为 53 和 58 m; 总宽分别为 34.5 和 34.0 m; 主体型深分别为 4.5 和 4.6 m; 最大型深分别为 20.7 和 22.6 m; 空载排水量分别为 2 500 和 2 581.7 t; 满载排水量分别为 6 108 和 6 725.2 t.

1.2 桥墩装船布置

港珠澳大桥桥墩出运分为整体式、分段式墩台出

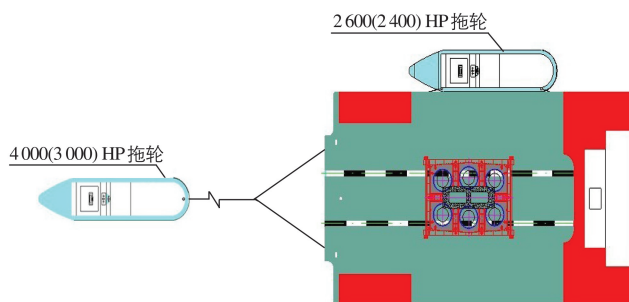


图1 拖航运输方案

Fig. 1 Offshore transportation program

收稿日期: 2013-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51079097); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (No. 51021004)

作者简介: 秦 尧 (1989-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事海洋工程结构动力学研究.

E-mail: qinyao2008abc@126.com 通信作者: 唐友刚 (E-mail: tangyougang_td@163.com)

运两种形式,本文选取质量最大的 16#整体式桥墩进行拖航运输分析.桥墩在驳船甲板上的布置如图 2 所示.墩台布置于纵移台车上,与半潜驳甲板通过纵移台车的车轮接触,甲板上的限位装置与纵移台车的连接固定形式如下:①纵向封车加固:利用半潜驳甲板上焊制的船艏两个端墩固定,通过横梁将纵移车两端顶紧加固;②横向封车加固:利用半潜驳甲板焊制支墩上的悬臂水平钢撑,通过钢制楔块顶紧纵移车车体加固.

若桥墩的整体稳定性难以满足,可在半潜驳甲板与桥墩底面之间加设侧向支墩,缝隙内采用钢制楔块支撑桥墩,增加桥墩支撑,减轻纵移车负荷;桥墩与半潜驳甲板之间采用吊点反压梁与半潜驳甲板通过钢丝绳连接,以提高桥墩拖航过程的稳定性^[3](图 3).

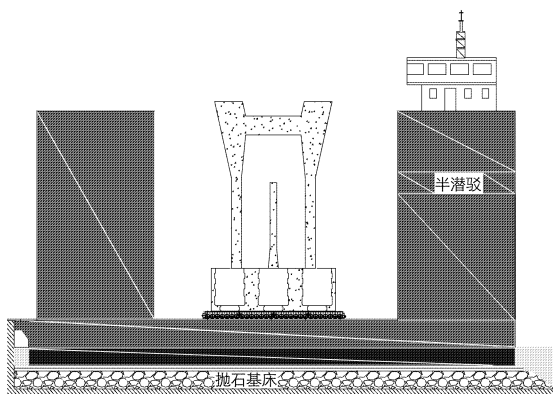


图 2 桥墩装船布置方案

Fig. 2 Shipment scheme of bridge pier

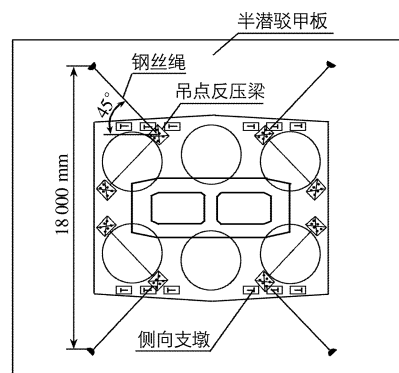


图 3 局部加固布置方案

Fig. 3 Partial reinforcement scheme

1.3 运输分析

桥墩海上拖航分析过程中,先将台车与桥墩当作整体进行整体稳定性分析,分析台车与驳船甲板接触面的稳定性;然后分析桥墩与台车之间接触面的局部稳定性.

1.3.1 整体稳定性分析 桥墩的整体稳定性分析过程中,1.2 节中所述的连接固定方式同时限制台车 3 个方向的平动:台车车轮与甲板的接触部位不可以发生水平方向的移动;台车车轮作为只能承受压力的单元,若车轮单元出现拉力,则认为车轮单元脱离甲板.桥墩与半潜船组成驳运联合体,对其进行稳定性及运动响应分析^[4].

对于半潜驳船,采用基于绕射-辐射原理的势流理论,在频域下对联合体进行水动力性能分析及线性波浪荷载求解,计算驳运系统 6 自由度运动的幅频运动响应曲线,预报航行状态下的运动响应^[5].

在双体模型中,根据联合体的运动响应(包括位移、速度及加速度)及波浪荷载计算结果,同时考虑惯性力、波激力及半潜驳与桥墩之间通过车轮单元的刚性耦合,同时求解桥墩模型和驳船模型的动力响应方程,计算拖航海况中车轮单元受力的幅值,通过波浪搜索,确定车轮单元最大幅值对应的波浪周期及浪向角^[6].

从保守角度考虑,桥墩的稳定性分析采用线性频域法计算.假设车轮单元荷载同时达到幅值,根据车轮单元的受力情况判断两体(桥墩与驳船)是否发生分离:若车轮单元的幅值超过静态平衡时车轮单元的平均值,则可能造成车轮单元受拉,判定车轮单元失效;整体稳定性分析时,若一侧台车的车轮单元基本失效,则判定桥墩失稳^[7].

1.3.2 整体稳定性局部加固分析 在桥墩与半潜驳甲板之间增设侧向支墩单元,与车轮单元相似,支墩单元仅承受压力,若支墩单元出现拉力,则认为桥墩与支墩之间发生分离;桥墩与半潜驳甲板之间采用缆索单元模拟钢丝绳,钢丝绳仅承受拉力,对桥墩有辅助定位的作用.

按照 1.3.1 节的计算过程,分析局部加固后桥墩在拖航过程中的整体稳定性,从而评估局部加固措施对桥墩稳定性的改善情况.

1.3.3 局部稳定性分析 根据 1.3.1 节桥墩的运动响应计算结果,通过波浪搜索,统计桥墩各自由度加速

度幅值的最大值.考虑桥墩拖航过程中的风力(风倾力矩)、惯性力(惯性力矩)、桥墩与台车之间的摩擦力及重力等,根据力和力矩平衡的原则,分析桥墩与台车是否发生相对滑移或倾倒.

2 数值模拟

本次桥墩拖航运输计算采用美国 Ultramarine 公司开发的 Moses 软件实现. Moses 软件基于三维辐射-绕射理论编写船舶和浮体运动计算程序.该软件可以计算船舶和浮体的环境载荷、运动、锚泊、安装分析及多体之间的耦合运动分析^[8].

2.1 半潜驳船及桥墩模型

已知 16#桥墩采用半潜驳 9 号进行拖运,根据设计资料建立其水动力分析模型.采用 CAD 建立桥墩的三维模型,通过模拟质量分布计算桥墩的重心位置及转动惯量等参数,桥墩已知参数如下:桥墩类型为整体式,质量 3 205 t,纵向和横向受风面积分别为 364.44 和 109.25 m²,受风面积中心高度 10.00 m,重心高度 11.04 m,桥墩绕重心处 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的惯性半径分别为 9.09、7.68 和 5.71 m.

2.2 车轮/支墩单元模型及双体模型

16#墩台的稳定性分析过程中,桥墩与船体之间采用刚性约束连接,连接部件的位置选取为纵移台车的车轮.车轮的纵向间距取为 1 m,两车的横向间距为 8 m,纵轨之间的横向距离为 0.8 m,台车的高度为 1 m. 16#桥墩车轮单元的总数为 4×15,如图 4 所示.

若采用局部加固,根据 1.2 节所述的加固方式建立支墩单元,支墩单元的约束方式同车轮单元,钢丝绳加固采用缆索单元建模.

拖航分析过程中,考虑驳船和桥墩之间的刚性耦合,建立双体计算模型.若考虑局部加固,建立缆索单元及支墩单元,此时 16#桥墩的稳定性计算模型如图 5.

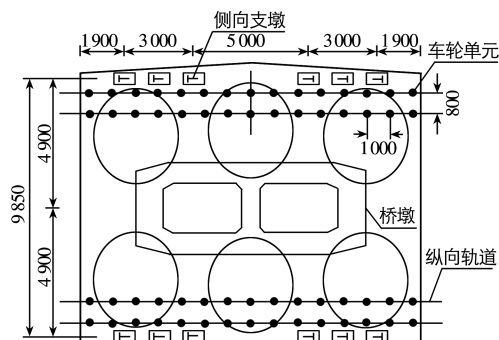


图4 车轮/支墩单元位置(单位: mm)

Fig.4 Schematic of wheel / buttress elements (unit: mm)

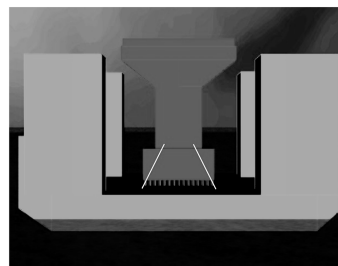


图5 16#桥墩整体稳定性计算模型

Fig.5 Stability model for 16# bridge pier

3 桥墩拖航稳定性分析

3.1 计算海况

根据拖运海域的海况条件及半潜驳船的正常作业海况要求,确定拖航计算海况如下:①波浪波高 1 m,波浪遭遇周期 4~12 s(间隔 0.5 s),规则波的方向为 0°,45°和 90°;②风速 13.8 m/s(6 级风上限),方向同波浪方向;③海水流速 1.0 m/s,方向同波浪方向,载荷方向如图 6 所示.

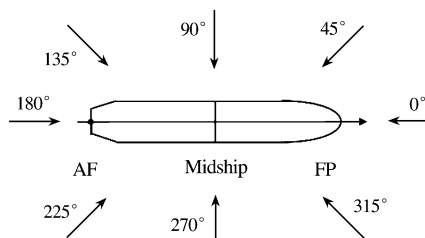


图6 波浪方向示意

Fig.6 Wave directions

3.2 拖航稳性计算

建立联合体模型,定义受风面积,风速取 36 m/s (70 节),半潜船拖航吃水为 3 m. 联合体的稳性计算结果如图 7 所示. 联合体的稳性计算参数为:排水量 5 885 t;重心距基线高度 12.53 m,纵向受风面积 660.25 m²,横向受风面积 1 572 m²,受风中心距基线高度 13.963 m. 可见,初稳性高为 22.18 m,回复力臂曲线与风倾力臂曲线的第一交角为 1.13°,甲板处进水角为 5.4°,平台回复力臂曲线进水角以下的面积为 5.75 m/rad,与风倾力臂曲线在同一限定角以下的面积比为 2.38,均满足 IMO 有关半潜船完整稳性规则中的规定^[9]:①回复力矩曲线与风倾力矩曲线的面积(第二交点或进水角处)之比应大于 1.4;②当横倾角达 40°或进水角小于 40°时,回复力臂曲线下的面积应不小于 5.16 m/rad;③初稳性高不小于 0.15 m;④最大回复力臂对应角应不小于 15°.

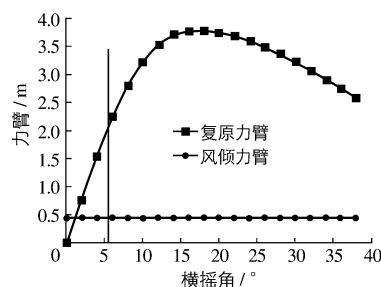


图 7 联合体稳性计算曲线

Fig. 7 Stability curve of barge-pier model

3.3 联合体运动响应计算

拖航过程中联合体的航速为 6 节. 由于航速较低,航速对联合体的水动力性能影响较小,可忽略不计,航速主要改变了联合体对波浪的遭遇周期. 波浪周期 T_e 和遭遇周期 T 之间的关系如下^[10]:

$$T_e = T / (1 + 2\pi v \cos \beta / (gT)) \quad (1)$$

式中: v 为航速(m/s); β 为航向角,迎浪方向取为 0°.

根据 3.1 节确定的拖航海洋环境条件,采用线性频域法统计不同波浪遭遇周期及浪向角条件下驳运联合体的运动响应幅值,从而进行波浪搜索,并将波浪遭遇周期转换为波浪周期,计算结果如图 8 所示. 联合体拖航过程中的干舷为 1.6 m,横摇进水角为 5.4°.

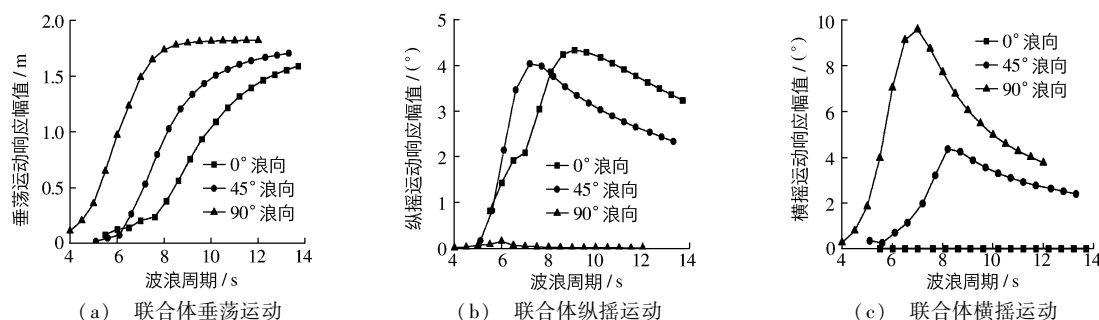


图 8 联合体运动响应幅值曲线

Fig. 8 Response amplitude curves of heave motion, pitch motion and roll motion

根据运动响应计算结果可知:①联合体的垂荡运动响应幅值随波浪周期的增大而增大,在长周期范围内趋于平缓;②纵摇运动响应幅值的极值出现在波浪周期为 7~9 s 之间,横摇运动响应幅值的极值出现在波浪周期为 7~8 s 附近,两者较为接近,这是由于半潜驳船近似方形的特殊船型造成的;③由于航速影响,联合体不同浪向下运动响应的波浪敏感周期不同;④横浪条件下,联合体的横摇和垂荡运动响应较大,易发生甲板入水,不建议半潜船在横浪条件下进行拖航运输.

3.4 无局部加固桥墩整体稳定性计算

根据 3.1 节确定的拖航海洋环境条件,计算不同波浪周期及浪向条件下车轮单元受力的最大幅值,从而进行波浪的敏感性搜索,确定车轮单元最大幅值对应的波浪周期. 16#桥墩车轮单元的波浪敏感性分析结果如图 9 所示,根据计算结果可知:①车轮单元的受力幅值对短周期波浪较为敏感,接近联合体的横摇运动敏感周期;②车轮单元的敏感性曲线与横摇运动响应曲线形状接近,表明车轮单元受力幅值的变化主要受联合

体横摇运动响应的影响;③横浪条件下,车轮单元的最大幅值显著增加。

通过波浪敏感性搜索,在不同浪向条件下,统计车轮单元的最大幅值及失效数目,从而进行桥墩的整体稳定性分析,如表1所示。桥墩发生失稳时失效车轮单元(空心圆标注)的位置如图10所示:横浪条件下,75%的车轮单元失效,桥墩发生失稳。

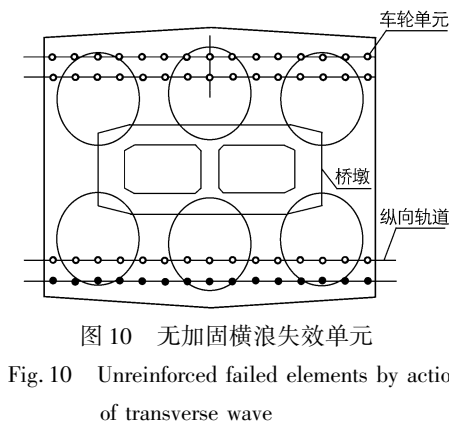
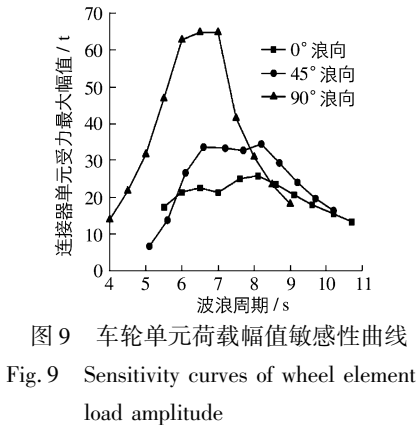


表1 未加固桥墩的稳定性分析

Tab.1 Stability analysis of bridge pier without reinforcement

桥墩编号	波浪方向	车轮单元 最大幅值/ t	平均值/ t	敏感波浪 周期/ s	失效车轮 单元数目	是否保持 稳定	车轮单元 总数
16#	0°	25.90	52	8.1	0	是	60
	45°	34.51		8.2	0	是	
	90°	64.87		6.5	45	否	

3.5 局部加固桥墩稳定性计算

采用1.3.2节所述的加固措施,按照3.3节的波浪搜索方法对桥墩在海上的拖运过程进行稳定性分析,统计结果如表2所示。

桥墩发生失稳时失效单元(空心圆标注)的位置如图11所示:横浪条件下,侧向支墩单元发生失效,25%的车轮单元发生失效,75%的车轮单元未与驳船甲板发生分离,桥墩的整体稳定性能够保持;钢丝绳拉力的预张力为5 t,拖航过程中张力幅度变化较小,对改善桥墩的稳定性作用较小。

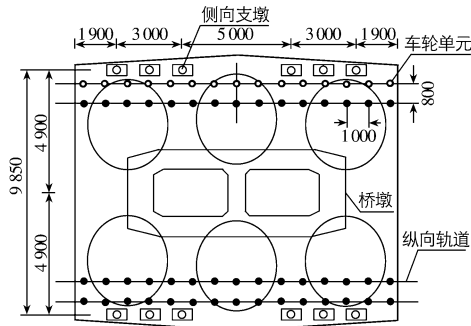


表2 加固后桥墩的稳定性分析

Tab.2 Stability analysis of bridge pier with reinforcement

桥墩 编号	波浪 方向	车轮单 元最大 幅值/ t	支墩单 元最大 幅值/ t	均值/ t	车轮 单元 极值/ t	支墩 单元 极值/ t	钢丝绳 张力 极值/ t	失效支 墩单元 数目	失效车 轮单元 数目	是否 保持 稳定	连接器 单元 总数
16#	0°	21.71	16.67	43	64.71	60.67	5.33	0	0	是	60
	45°	27.92	26.58		70.92	69.58	5.55	0	0	是	
	90°	50.21	55.62		93.21	98.62	5.74	8	15	是	

3.6 桥墩与台车相对稳定性分析

根据 3.1 节中确定的环境工况,扩大波浪遭遇周期范围至 1~18 s,计算桥墩拖航过程的运动响应. 通过波浪搜索,统计桥墩拖航过程中的加速度极值如表 3 所示. 根据加速度统计结果,进行桥墩与台车的稳定性分析如表 4 所示.

通过分析可知,16#桥墩在拖航过程中不会与台车发生局部失稳;横浪条件下,桥墩的最大水平荷载达到最小抗滑摩擦力的 32%,最大倾斜力矩达到最小抗倾力矩的 62%,最接近失稳状态.

表 3 桥墩加速度极值统计

Tab. 3 Statistics of maximum acceleration of bridge pier

桥墩编号	波浪方向	线加速度/(m·s ⁻²)			角加速度/(°·s ⁻²)		
		纵荡	横荡	垂荡	横摇	纵摇	首摇
16#	0°	0.443	0.003	0.590	0.023	3.416	0.011
	45°	0.349	0.317	0.817	3.597	4.401	2.869
	90°	0.011	1.353	1.193	7.817	0.167	2.869

表 4 桥墩与台车局部稳定性分析

Tab. 4 Partial stability analysis of piers and trolley

桥墩编号	波浪方向	相对滑移稳定性分析		倾倒稳定性分析		是否 稳定
		最小抗滑摩擦力/ kN	最大水平荷载/ kN	最小抗倾力矩/ (kN·m)	最大倾斜力矩/ (kN·m)	
16#	0°	14 775.05	1 435.82	221 625.75	27 276.25	是
	45°	14 411.28	1 570.66	101 918.55	40 029.61	是
	90°	13 808.74	4 417.37	138 087.43	85 789.84	是

4 结 语

本文针对珠港澳大桥桥墩海上运输过程,在桥墩和驳船之间选取合理的约束形式,分析了浮拖过程中联合体的稳性、运动响应及桥墩的稳定性,提出了一种分析浮拖稳定性的方法,通过分析结果,得出以下结论:

- (1)拖航过程中,驳运联合体在横浪条件下垂荡及横摇运动响应较大,易发生甲板上浪.
- (2)整体稳定性分析过程中:不考虑局部加固,仅横浪条件下,车轮单元的受力幅值显著增大,多数车轮单元失效,易发生桥墩与甲板的分离,造成桥墩失稳;考虑局部加固,横浪条件下,仅支墩单元和部分车轮单元失效,桥墩能够保持稳定.
- (3)所有浪向条件下,桥墩与台车之间的局部稳定性均满足要求.
- (4)联合体的横/纵摇运动响应、车轮单元受力幅值均对短周期波浪较为敏感;车轮单元受力幅值的变化主要受联合体横摇运动响应的影响.
- (5)根据对比结果,采用侧向支墩进行桥墩局部加固可以有效改善桥墩的稳定性,而钢丝绳加固方式作用较小,主要起辅助定位的作用. 此外,还可以进一步分析其他改善桥墩稳定性的措施:调整桥墩宽度方向平行于船宽;增加桥墩和甲板之间支墩数量;采用钢围堰对桥墩上部加固.

参 考 文 献:

[1] 王阔. 半潜船运输与浮卸 Spar 平台性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. (WANG Kuo. Research on transportation and offloading performance of spar platform by semi-submersible vessel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))

[2] 马芳廷, 谷克超, 王立峰, 等. 坐底式半潜驳的开发和应用[J]. 中国港湾建设, 2006(1): 62-65. (MA Fang-ting, GU Ke-chao, WANG Li-feng, et al. Development and application of bottom resting semi-submersible barge[J]. China Harbor

- Engineering, 2006(1): 62-65. (in Chinese))
- [3] 杨玥. Truss Spar 平台在装船-运输-浮卸过程中的水动力性能及结构强度研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. (YANG Yue. Research on the hydrodynamic performance and structural strength of truss spar during the load-out, transportation and float-off process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese))
- [4] 陈柏乔. 半潜船运载装卸海洋结构物的可行性分析及压载方案优化[D]. 天津: 天津大学, 2009. (CHEN Bai-qiao. Feasibility analysis of ocean structures transportation by semi-submersibles and ballasting optimization[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [5] 彭翼. Spar 平台湿拖过程运动响应分析及湿拖方案选择[D]. 天津: 天津大学, 2010. (PENG Yi. Motion response analysis of truss spar in the process of wet-towing and options for wet-towing plan[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [6] 唐友刚. 高等结构动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002. (TANG You-gang. Advanced structural dynamics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. (in Chinese))
- [7] 陆丛红, 林焰, 纪卓尚, 等. 驳船载导管架拖航及下水工况中的结构强度分析[J]. 中国造船, 2005, 46(3): 24-33. (LU Cong-hong, LIN Yan, JI Zhuo-shang, et al. Structure strength analysis of the barge during jacket transporting and launching[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(3): 24-33. (in Chinese))
- [8] 王榕. 船舶靠泊过程与系泊状态动力响应分析[D]. 天津: 天津大学, 2009. (WANG Rong. The dynamic response analysis of the ship docking and mooring to the platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [9] 国际海事组织. 关于 IMO 文件包括的所有船舶的完整稳性规则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (International Maritime Organization. Code on intact stability for all types of ships covered by IMO instruments[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [10] 刘波, 梁瑜. 深水桁架式 Spar 平台干式拖航强度分析[J]. 中国造船, 2012, 53(增2): 227-232. (LIU Bo, LIANG Yu. Dry towing strength analysis of deep-water truss spar and transportation vessel[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(Suppl2): 227-232. ((in Chinese))

Analysis of floating transportation program of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge piers

QIN Yao, TANG You-gang, LIU Cheng-yi, LIU Hao-yu, BIE She-an

(School of Civil Engineering, State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An analysis method on shipment and offshore transportation of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge piers is studied and the reasonable transportation program is designed in this paper. According to the huge structure's weight and scale, the shipment scheme is developed. A 3D mass model of bridge pier and transportation system model including bridge pier and barge is established with hydrodynamic software. By calculating wave loads on the barge based on potential flow theory, the stability and motion response analysis of the barge-pier model is carried out, and the stability of bridge pier during offshore transportation is examined. The calculated results show that without partial reinforcement the stability requirement of bridge pier is difficult to meet under the action of transverse wave, and that transportation requirements are satisfied in the wave angle less than 45 degrees. The stability of the bridge pier during offshore transportation under all wave directions is satisfied through partial reinforcement with lateral buttress and wire rope.

Key words: floating transportation of bridge pier; stability; motion response; partial reinforcement