



定位桩式游艇码头 在波浪及靠泊作用下的动力响应

沈 印

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 210096)

摘要: 游艇码头在国内是一种较新的结构形式, 为便于上下游艇, 游艇码头为浮动式结构, 定位桩是应用较多的一种锚固形式。由于全直桩情况下水平荷载引起的位移较大, 浮码头自身质量又较小, 在受到简谐波浪荷载或船舶靠泊撞击的冲击荷载时, 易引起码头结构的动力响应, 从而增加了定位桩的内力、降低了结构安全性。在强迫动力响应理论上, 结合有限元的方法分析定位桩式游艇码头在波浪荷载及靠泊撞击力下的动力响应, 并推导出适合游艇码头结构段使用的简化计算方法, 为设计工作提供了依据。

关键词: 游艇码头; 动力响应; 定位桩; 有限元

中图分类号: U 656.1+39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0084-06

Dynamic response of guiding pile wharf under action of wave and berthing

SHEN Yin

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group) Co., Ltd., Shanghai 210096, China)

Abstract: The yacht dock is a new structure form in China. In order to facilitate the getting on and off the yacht, the yacht docks are mostly floating structures and the guiding pile is widely used as a type of anchorage. The displacement caused under the horizontal load is large on the all-straight-pile yacht. Besides, the floating dock's mass itself is also small. So it is easy to cause the dynamic response of the wharf structure under the harmonic wave load or berthing impact. Thereby, it will increase the guiding pile's internal force and reduce the structure safety. The paper analyzes the dynamic response of the guiding-pile yacht under the berthing and wave load by the method of finite element and on the basic of the theory. The paper also derives the simple calculation method for the piece of yacht wharf structure, which lays a basis for the design work.

Keywords: marina; dynamic response; guild pile; FEM

如今国际上的游艇产业变得庞大、热门, 游艇产业被称为“漂浮在黄金水道上的商机”^[1], 中国的岸线可以轻易地容纳 32 万 ~ 130 万艘游艇。目前国内游艇码头尚以小规模居多, 定位桩是应用较多的一种锚固形式。码头结构段自质量较小, 加之定位桩为直桩、水平刚度较低, 从而决定了游艇码头具有较小的固有频率, 因此结构在受到

简谐荷载或冲击荷载时将产生较大的动力响应, 在设计时必须予以重视。游艇码头的设计在中国起步较晚, 对于波浪荷载及船舶撞击力的计算仍多采用港工规范; 国外相关的规范也并未考虑到码头的动力特性。本文在强迫动力响应理论上, 结合有限元的方法分析定位桩式游艇码头在波浪荷载及靠泊撞击力下的动力响应。

收稿日期: 2015-01-09

作者简介: 沈印 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事岸线、河道整治工程。

1 波浪荷载作用下的动力响应

《海港水文规范》^[8]第8章有关于波浪对建筑物的作用计算方法,显然并不适用于自身断面较小且结构平面形状复杂的浮式码头。英国游艇协会设计规范^[4]及澳大利亚游艇码头设计规范^[5]均采用2 kN/m²作为最小的水平波浪荷载,都未考虑游艇码头的动力响应。

动力响应分析的核心为确定结构的动力放大系数,即只需将计算得到的静力荷载乘以动力放大系数后作为设计荷载。在分析时可将波浪简化为规则波,波浪荷载可视为周期为 T 的简谐荷载。为便于研究,先不考虑抱桩器与定位桩的间隙,将定位桩式游艇码头等效为桩-平台结构;同时为便于计算,将桩周土体的作用简化为桩身的附加质量。桩底可近似取弹性嵌固点,且为固接,桩顶为铰接。浮码头结构段间的连接在水平方向上可近似为固接,因此整个码头结构段可当成整体计算。根据强迫动力响应原理,结构稳态强迫振动的动力放大系数用下式计算:

$$\alpha_d = \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\zeta\gamma)^2}} \quad (1)$$

式中: α_d 为动力放大系数; γ 为频率比 ω/λ , ω 为波浪荷载频率, λ 为结构的固有频率; ζ 为阻尼比。

根据瑞利能量原理计算结构的固有频率 ω 。定位桩的近似振型取为式(2),满足嵌固点完全固定的几何约束,也满足桩顶有限位移和斜率的几何约束。

$$\psi(x) = 1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2l}\right) \quad (2)$$

由于定位桩设计时需满足荷载作用下桩身变形位于弹性范围内,因此可根据弹性结构简单梁理论得出定位桩的变形势能:

$$V = N \int_0^l \frac{EI}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)^2 dx \quad (3)$$

$$y(x, t) = y_0 \psi(x) \sin(\lambda_1 t) \quad (4)$$

式中: y 为水平位移; y_0 为任意常数; λ_1 为一阶固有频率; N 为定位桩的数目; l 为弹性嵌固点至桩顶的距离。定位桩的动能为:

$$T_1 = \frac{N}{2} \int_0^d \bar{m} \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2 dx + \frac{N}{2} \int_d^l \bar{m}_0 \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2 dx \quad (5)$$

式中: d 为弹性嵌固点至水面的距离; \bar{m} 为考虑附加质量系数后定位桩的单位长度有效质量,为便于计算,将水面以下桩长作统一考虑; \bar{m}_0 为水面上定位桩单位长度实际质量。

浮码头平移运动产生的能量为:

$$T_d = \frac{1}{2} m_d \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2 \Big|_{x=d} \quad (6)$$

式中: m_d 为考虑流体附加质量系数后浮码头的质量。

由于浮码头不随定位桩的弯曲发生垂直位移,因此不计浮码头重力势能的变化。

令 $\max(V) = \max(T_1 + T_d)$,可求出固有频率 λ ,经过简化得出

$$\lambda = \sqrt{\frac{NEI\pi^4}{32l^3 \left[N(\bar{m}l_1 + \bar{m}_0 l_2) + m_d \left(1 - \cos \frac{\pi d}{2l}\right)^2 \right]}} \quad (7)$$

$$l_1 = \frac{3}{2}d + \frac{l}{2\pi} \sin \frac{\pi d}{l} - \frac{4l}{\pi} \sin \frac{\pi d}{2l} \quad (8)$$

$$l_2 = \frac{3}{2}(l-d) - \frac{4l}{\pi} \left(1 - \sin \frac{\pi d}{2l}\right) - \frac{l}{2\pi} \sin \frac{\pi d}{l} \quad (9)$$

将所求得的固有频率 λ 及波浪荷载频率 ω 代入式(1)即可求得动力放大系数 α_d ,将求得的波浪荷载乘以 α_d 后,便可作为等效静力来验算定位桩的强度及位移。由于定位桩数量较多,应考虑分配到每根桩的荷载的不均匀性,参照系船柱受力分布不均匀系数,最终的计算值应乘以不均匀系数1.3。

本文选取海南某游艇码头中的一个码头段来举例验证,码头段平面布置见图1。

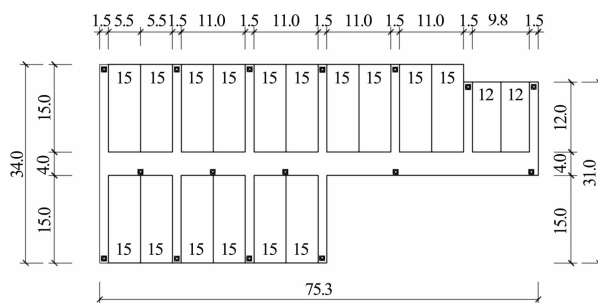


图1 计算码头段平面布置(单位:m)

码头泊位均为双船位泊位,有12、15 m两种长度的泊位,长12 m的泊位宽4.9 m,长15 m的泊位宽5.5 m,支走道宽1.5 m,该码头段总长75.3 m。取极端高水位为计算工况,定位桩采用 $\phi 529$ (厚度 $t = 10$ mm) 钢管桩,共16根,水面至嵌固点定位桩总长10.5 m,水面以上定位桩长1.5 m。浮码头采用混凝土结构,计算时假设为实心体,厚度取0.5 m。经计算,浮码头受到的波浪荷载为 $F = 268 \sin(\pi t)$,单位为kN,与码头轴线的夹角为 45° 。不考虑抱桩器与定位桩的间隙,考虑阻尼比为0.1,流体附加质量系数取1.0,则计算结果为: $\bar{m} = 551.25$ kg/m, $\bar{m}_0 = 127.99$ kg/m, $m_d = 266.5$ t, $l_1 = 1.4956$ m, $l_2 = 1.2255$ m, $\lambda = 4.057$ rad/s, $\gamma = 0.77$, $\alpha_d = 2.30$ 。

计算得动力放大系数为2.30,计算得到的桩内力再乘以1.3的不均匀系数,每根桩受到的最大等效静力为50.08 kN。

为验证结果的可靠性,本文采用大型通用有限元软件 Ansys Workbench 对上述码头结构模型进行了计算。计算选用软件中的隐式动力学模块,通过限制码头结构的竖向位移来模拟浮力,为与理论计算结果比较分析,定位桩与码头间留有2 cm空隙,但先假定为粘结,桩底采用固定约束模拟嵌固,桩身截面根据等质量、等刚度的原则简化为圆形截面。对结构施加一个水平的简谐荷载,为避免非稳态振动对计算的影响,取计算时长为24 s,充分发挥阻尼的衰减作用。模型见图2,有限元计算模型各参数的取值见表1。

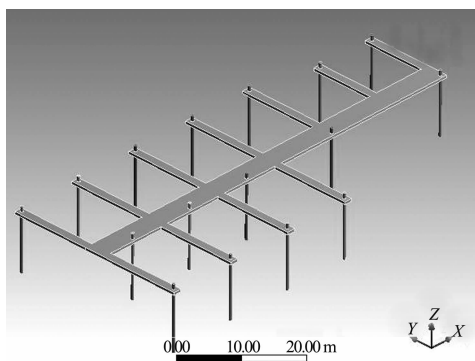


图2 浮码头结构段有限元模型

表1 有限元计算模型参数取值

结构	材料参数	计算参数
定位桩	杨氏模量 $E = 35.77$ GPa	
	等效密度: $\rho_{\text{水下}} = 3045.6$ kg/m ³ (考虑流体附加质量并根据等质量原则计算结果)	最小荷载步: 1×10^{-4} s 最大荷载步: 1×10^{-2} s
	$\rho_{\text{水上}} = 707.13$ kg/m ³ (根据等质量原则计算结果)	考虑材料的大应变效应 阻尼比: 0.1
	泊松比 $\xi = 0.23$	通过后处理中输入 apdl 命令获得桩身内力
浮码头	杨氏模量 $E = 3e^{10}$ Pa	
	密度 $\rho = 1000$ kg/m ³ 泊松比 $\xi = 0.18$	

运用 ANSYS 强大的 APDL 功能,在后处理中加入适当的命令流即可得到各桩的水平力,图3为其中1根桩身水平力随时间的变化。

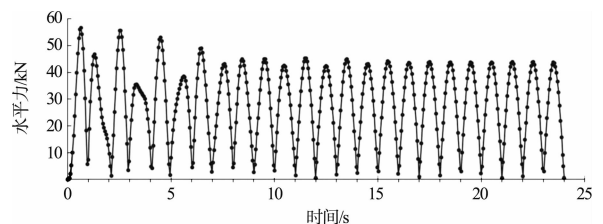


图3 不考虑空隙定位桩水平力随时间的变化

根据强迫振动理论,结构的动力响应方程解应包括3项,即自由振动项、伴生自由振动项及稳态振动项。稳态振动项与干扰力有关,以干扰力的频率振动,并且不随时间衰减。第1、2项由于阻尼的衰减作用,经过一段时间的运动后逐渐消失。由于波浪荷载作用时间长,且前两项存在时间较短,因此本文只研究稳态振动阶段定位桩的内力变化。从图3可以看出,内力值的变化明显分为前后两个区间,前8 s为自由振动及伴生自由振动随着阻尼的作用而逐渐衰减过程引起的内力变化,8 s之后进入稳态振动阶段,也就是本文研究的阶段。该桩水平力在稳态阶段最大值约为45 kN,其余各桩最大水平力为38~48 kN, $F_{\max}/F_{\min} = 1.26$,内力分布较均匀,与理论计算结果吻合良好。

由于实际定位桩与抱桩器间会有空隙,为研究空隙对定位桩内力的影响,将模型中桩与码头间的接触改为无摩擦接触,图4为考虑了空隙后桩身水平力随时间的变化。

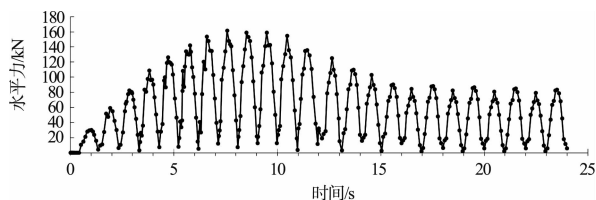


图4 考虑了空隙后定位桩水平力随时间的变化

从计算结果可知, 定位桩的内力变化与无间隙时有一定区别, 主要是因为考虑间隙后的码头结构段不是简单的单自由度线性结构, 相当于研究一个由两个受到简谐荷载的物体组成的系统。同样只需要研究系统进入稳态振动后的情况, 因此可不考虑前 15 s 桩身内力变化情况的差异, 由图 4 可知进入了稳态振动阶段后, 定位桩内力瞬时最大值约 80 kN, 是未考虑间隙的 1.78 倍, 因此为保证结构在实际情况下的安全度, 应在上述理论计算值的基础上再乘 2.0 的安全系数。

2 游艇靠泊撞击力的动力响应

关于船舶靠泊撞击力的计算公式, 公路、桥梁及港工规范中均有涉及, 在《港口工程荷载规范》中可先计算有效撞击能量, 并根据浮码头与橡胶护舷的结构刚度进行分配, 而游艇码头护舷刚度一般均较小, 远小于浮码头, 吸收的能量也远不及码头自身及定位桩的变形所吸收的能量, 因此无法根据橡胶护舷的吸能-反力曲线确定对结构的反力。在 TB 10002.1—2005《铁路桥涵设计基本规范》中假定船舶作用于墩台的有效动能全部转化为碰撞力所做的静力功, 其公式为

$$F = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (10)$$

式(10)考虑了船只和墩台的弹性变形系数 C_1 、 C_2 , 但在实际情况下该参数难以准确获得, 规范亦提供了缺乏资料时的假定值, 但对公式结果的准确性影响较大。

JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》则直接根据船舶吨级给出了撞击力的取值表格, 由于未考虑船舶撞击速度使得结果与实际值差距较大, 且表格中仅有 3 000 t 及以上船舶吨级, 而游

艇一般远小于此吨级, 因此更无法准确计算。

由于靠泊前浮码头基本处于静止状态且撞击力持续时间短暂, 因此游艇靠泊时的撞击力可视为作用时间短暂的冲击荷载。冲击荷载可表达为作用时间短暂的脉冲, 由于作用时间短, 因此不考虑阻尼的影响, 根据理论上的计算结果^[2], 当频率比 $\gamma < 1$ 时结构最大动力响应出现在强迫振动阶段, 动力放大系数为

$$\alpha_d = \frac{1}{1 - \gamma^2} \left(\sin \frac{2\pi}{1 + \frac{1}{\gamma}} - \gamma \sin \frac{2\pi}{1 + \gamma} \right) \quad (11)$$

当 $\gamma > 1$ 时结构最大动力响应出现在自由振动阶段, 动力放大系数为

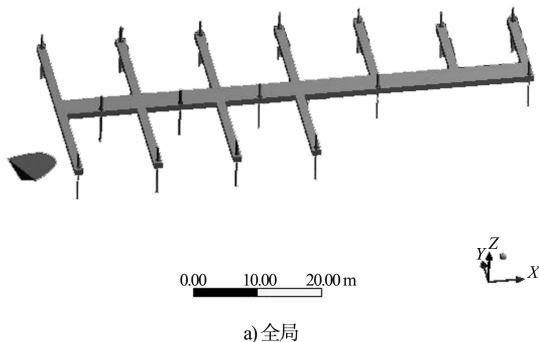
$$\alpha_d = \frac{2\gamma}{1 - \gamma^2} \cos \frac{\pi}{2\gamma} \quad (12)$$

根据动量守恒定律 $mv = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} F \sin(\omega t) dt$ (13)

化简为 $F = \frac{mv\omega}{2}$ (14)

式中: F 为冲击荷载静力幅值; m 为游艇质量; v 为游艇撞击速度; ω 为冲击荷载角速度。因此受冲击荷载的动力响应只需将静力幅值 F 乘以动力放大系数 α_d 即可。

为了验算理论计算的可靠性, 以上一节游艇码头结构段为例, 用有限元方法对游艇靠泊撞击力进行了计算。计算取 15 t 游艇以 1.0 m/s 的速度成 45°角撞向最外侧支走道。为简化模型, 采用质量相同的类似船头的刚体模型代替撞击游艇, 不计阻尼比, 模型见图 5。同样为避免桩与抱桩器间隙对计算结果的影响, 先将接触改为粘结。撞击过程中距撞击点最近的定位桩内力随时间的变化见图 6。



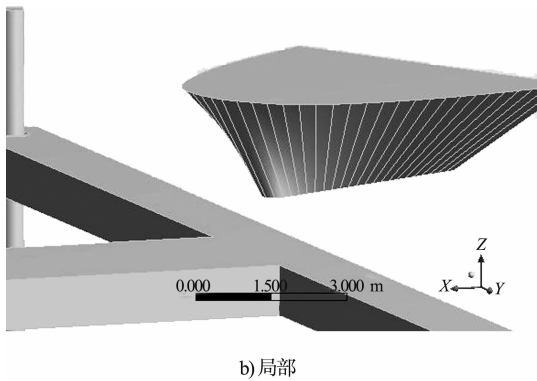


图5 游艇撞击码头模型

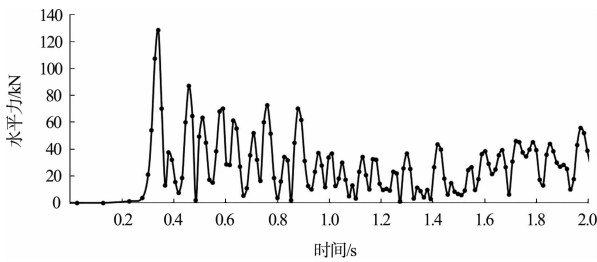


图6 定位桩内力随时间的变化

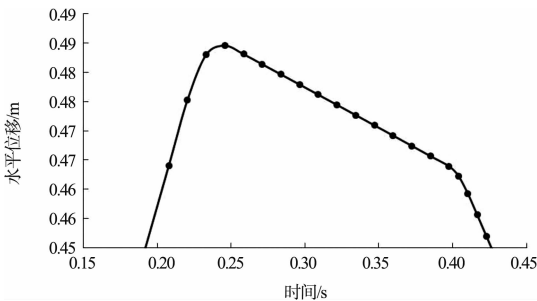


图7 游艇水平位移随时间的变化

从有限元的计算结果可知，定位桩内力最大值发生在游艇撞击力作用时间内，即发生在强迫振动阶段，此时定位桩内力最大值为 129 kN，再根据游艇模型水平位移随时间的变化（图 7）可知，游艇撞击力作用时间约为 0.2 s，即从 0.2 ~ 0.4 s，角速度为 15.7 rad/s。

撞击时刻游艇码头的位移见图 8，从图 8 可知由于撞击力作用时间短，因此仅引起撞击点附近定位桩及一段支走道的变形，因此在用式(7)计算码头固有频率时， N 值应取 1， m_d 值可取考虑流体附加质量系数后单根支走道的质量，浮码头的速度取支走道质心处的速度，近似为支走道端部速度的 1/2。根据本文计算方法得到考虑动力响应后

的等效静力见表 3。

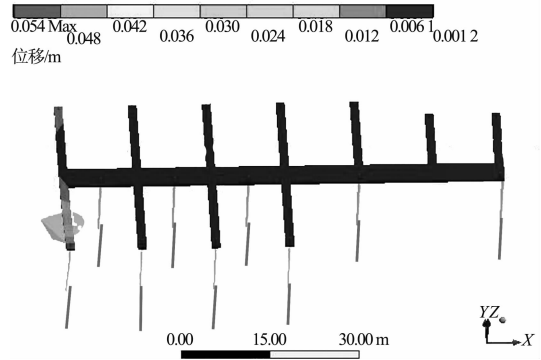


图8 撞击时刻游艇码头的位移

表3 靠泊撞击力等效静力

$\lambda / (\text{rad} \cdot \text{s})$	$\gamma > 1$	α_d	$F_{\text{等}} / \text{kN}$
8.63	1.818	1.024	120.6

从计算结果可知，有限元计算结果与本文计算方法所得结果相近，为研究定位桩与抱桩器间空隙对定位桩内力的影响，将模型中桩与码头间的接触改为无摩擦接触，图 9 为考虑了空隙后桩身水平力随时间的变化。

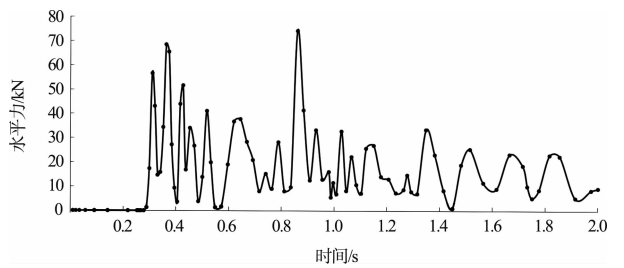


图9 考虑了空隙后定位桩内力随时间的变化

从计算结果可知，考虑了定位桩与码头间隙后的内力最大值发生在游艇撞击力作用之间之后，即在自由振动阶段，且最大值仅有 75 kN，可见在该种情况下，延缓了定位桩内力最大值出现的时间，同时定位桩与码头的间隙可减少靠泊撞击力引起的定位桩内力最大值。

3 结论

1) 计算波浪荷载下定位桩内力时，可将游艇码头等效为桩-平台结构，计算桩底可近似取弹性嵌固点，且为固接，桩顶为铰接。波浪荷载等效为简谐荷载，通过式(1)~(9)计算得到波浪荷载

等效静力的动力放大系数 α_d , 将波浪荷载静力幅值乘以 α_d , 再乘以定位桩内力分配不均匀系数 1.3 以及考虑定位桩与抱桩器间隙后的安全系数 2.0, 即为定位桩的设计荷载。

2) 计算船舶靠泊冲击力下定位桩内力时, 同样可先利用式(7)计算出码头结构的固有频率, 但定位桩数 N 取 1, m_d 值取考虑流体附加质量系数后单根支走道的质量, 速度取支走道端部的 1/2, 并利用式(14)计算出冲击力的静力幅值, 然后根据撞击作用时间取式(11)或式(12)计算得到动力放大系数 α_d , 将撞击力静力幅值乘以 α_d 即为定位桩的设计荷载。同时可以考虑由于定位桩与抱桩器间隙而引起的定位桩内力减小。

3) 从本文所得结论可以看出, 定位桩式游艇码头自身固有频率较低, 又受到波浪荷载等动力荷载作用, 定位桩的内力远大于按照静力方法计算的结果。因此, 简单地按照已有的港工规范来设计游艇码头具有较大安全隐患。

参考文献:

- [1] 邝向荣. 游艇港: 选址、规划、设计与开发 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2012.
- [2] 唐友刚. 海洋工程结构动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2008.
- [3] Layout and Design Guidelines for Marina Berthing Facilities. USA, 2005[S].
- [4] A Code of Practice for the Design, Construction and Operation of Coastal and Inland Marinas and Yacht Harbours. British, 2007[S].
- [5] AS 3962, Australian Standard Guidelines for Design of Marinas. Australia, 2001[S].
- [6] UFC 4-152-07N Small Craft Berthing Facilities [S].
- [7] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [8] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [9] Ohio Boating Facilities Standards and Guidelines[S].
- [10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [11] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中国交建中西非区域中心揭牌仪式在刚果（布）举行

8月25日, 中国交建中西非区域中心成立暨揭牌仪式在刚果（布）举行。中国交建副总裁孙子宇和中国驻刚果（布）大使馆临时代办刘存孝为中西非区域中心揭牌并讲话。

孙子宇指出, 中国交建在区域内各机构应积极响应国家“走出去”战略, 认清中西非国家形势, 全面推动“三网一化”等在非洲地区的发展。他要求, 各机构要统一思想、相互配合、共同发展, 积极推动“五商中交”在中西非区域的落地, 努力实现中国交建“率先建成具有国际竞争力的世界一流企业”的目标。

刘存孝指出, 中非之间的政治经贸关系相辅相成、相互促进, 希望中国交建能够发挥独特优势, 充分运用国内取得的经验和成果, 为促进非洲建设发展做出新的贡献。

海外事业部负责人宣读了中国交建中西非区域中心领导班子的任命, 介绍了区域中心的定位, 并对下一步工作提出要求。中西非区域中心负责人做了表态发言。

揭牌仪式结束后, 孙子宇与区域内各机构代表召开了市场开发工作交流会, 就区域市场开发思路等议题进行研讨。8月26日, 中西非区域中心召开第一次领导班子会议, 研讨区域中心工作机制和发展思路。

中国交建海外事业部、中西非区域中心负责人, 中国港湾、二公局相关负责人及区域内各机构代表参加活动。

(摘编自《中国交通建设网》)