

文章编号: 0451-0712(2005)09-0006-05

中图分类号: TU311.3

文献标识码: B

# 水对深水结构动力效应的影响

张海龙<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 李健刚<sup>1</sup>, 郭怀明<sup>2</sup>, 王吉仁<sup>2</sup>, 白思华<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 武汉市 430074; 2. 丹江口二桥建设指挥部 丹江口市 442700)

**摘 要:** 以丹江口二桥深水基础为例, 从理论和实际上探讨了水对深水结构物的动力影响, 推导了相关的计算公式, 为进一步精确计算这类结构的动力稳定性, 提供了理论依据。

**关键词:** 深水结构; 水效应; 动力反应; 抗力矩阵

置于深水之中的结构大多承受动力荷载。如海上钻井平台要承受钻机的周期转动动力, 深水基础桥梁要承受车辆荷载的冲击力。因此, 研究水对这类结构的动力稳定性的影响就显得十分重要。目前, 各国学者都对此问题做了不懈的努力。结构在液体中的耦联振动问题最早是由 H·M·Westergaard 于 1933 年在他的一篇论文《地震引起作用在坝体上的水动压力》中提出来的, 到现在已有近 70 年的时间, 但是直到近年来各种海洋工程和深水结构的大量建造, 才引起人们的兴趣与重视。早在 20 世纪 80 年代, 我国著名力学专家黄玉盈教授就从 Reissner 板的理论出发, 提出并论证了变水深环境中中厚度浮板耦振问题的一个局部变分原理, 它是建立中厚度浮板各种近似分析方法的一个有力工具。借助这个变分原理, 黄教授还导得了一个计算中厚度浮板固有频率的一个变分式。还值得指出的是, 利用这种变分原理, 在能量泛函式中加上外激发幅值的势, 就可以

容易地把它推导到浮板谐振受迫的动力分析中去。

本文结合南水北调源头工程丹江口二桥的深水基础, 从另一个角度探讨了水对深水结构动力特性的影响问题。

## 1 丹江口二桥概况

丹江口二桥跨越丹江口水库, 是南水北调工程的重要项目之一。它是一座桥跨布置为 88 m+150 m+150 m+88 m 的连续梁桥, 单箱单室箱梁, 桥宽 12 m, 翼缘板挑出 2.5 m, 全桥布置见图 1 所示。该桥位于大坝上游 7.3 km 处, 桥位处上下游约长 3.5 km 区段为肖河谷地段, 距丹江口市城区约 6 km 多。桥址处气候特征为夏季酷热, 冬季严寒, 春秋气候温和, 极端最高气温为 42.7℃, 极端最低气温为 -13.5℃。对长年观测数据统计分析, 每年 2 月~4 月水库水位逐渐下降到死水位 137.23 m, 6 月~8 月蓄至限制水位 147.23 m。

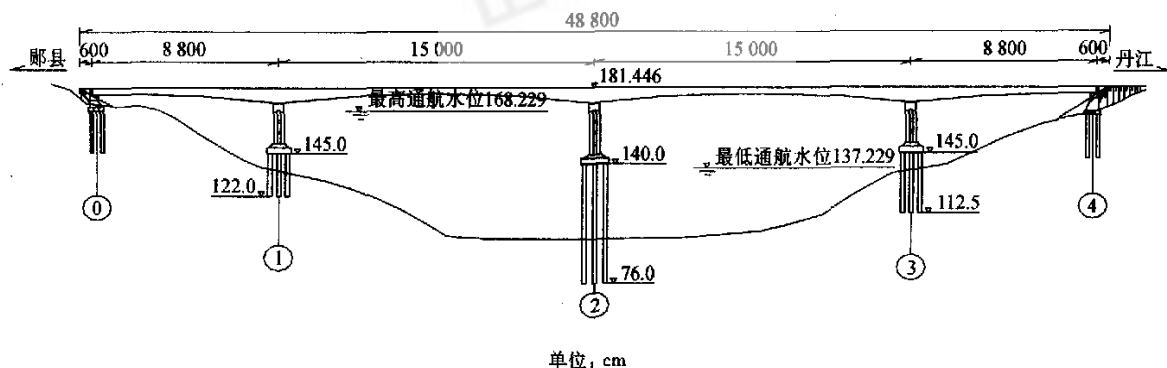


图 1 全桥布置

2004 年,由于水库水源分配的需要,该桥 2 号墩施工期水深接近 50 m,是长江大桥桥墩水深的 2 倍左右,成为整座桥的施工难点。由于置于深水中的 2 号墩,两侧都是长达 75 m 的悬臂,要放置半年多才能与两侧边跨合拢,为防止在此期间结构遭受风或地震荷载而引起破坏,我们对结构进行了动力分析,并考虑了深水对其动力特性的影响。

## 2 基本理论

众所周知,结构在阻尼情况下的自由振动方程为:

$$M\ddot{V} + C\dot{V} + KV = 0 \quad (1)$$

式中:  $M$  为结构的质量矩阵;  $C$  为结构的阻尼矩阵;  $K$  为结构的刚度矩阵;  $V$  为结构的自由度列阵。

显然,水的问题在本方程中的反映主要是对第 1 项和第 2 项的理解和修改问题。对于第 1 项,根据修改的 Morison 公式,作用在结构总位移向量上的波浪力为:

$$F_i(t) = -\frac{\pi}{4}\rho \sum_j (C_m - 1) D_{ij}^2 L_{ij} \ddot{V} - 0.5\rho \sum_j C_d D_{ij} L_{ij} a_{ij} \dot{V} + \left( \frac{\pi}{4}\rho \sum_j C_m D_{ij}^2 L_{ij} \dot{u} + 0.5\rho \sum_j C_d D_{ij} L_{ij} a_{ij} u \right) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为水的密度;  $C_m$  为等效惯性力系数;  $L_{ij}$  为交汇于  $j$  节点的单元长;  $D_{ij}$  为交汇于  $j$  节点的圆构件的直径;  $C_d$  为等效阻尼系数;  $u$  为水的速度;

$a_{ij} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{ij} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \left( \int_0^\infty S_{ij} d\omega \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $S_{ij}$  是速度的谱函数,  $\sigma_{ij}$  是速度的方差。

考虑到丹江口水库一般为静水,故式(2)中的后一项应为 0。第 1 项的值可加入式(1)中的第 1 项,以附加质量的机理出现在式(1)中。

若结构物完全浸入水中,我们称它为结构物的环境问题。若结构物的基础部分浸泡在水中,我们称它为结构物的边界问题。对环境问题,结构完全在水中振动,它在振动过程中所遇到的阻尼包含上式第 2 项的阻尼,它假定和速度成正比,即:粘滞阻尼(速度阻尼)理论。式(1)所使用的就是这种阻尼。对结构物的基础部分浸泡在水中,我们认为,这不仅是阻尼问题,从另一个角度说,应当是结构约束条件,即边界条件变化的问题。可以设想:直立于海洋中的一根悬臂梁,根部固结于海底的岩层中。它的相当一部分

位于海水中,其余部分在海水以上。若我们换个角度去考虑,把这根悬臂梁置于与水面同样高度的油中、同样高度的淤泥中、同样高度的砂中、同样高度的岩石中。这样一来,问题就变得十分明显,位于水中的悬臂梁,其理论自由长度将变短。若这样考虑,它的结构刚度将加大,自振频率将会提高。其动力特性将位于固结于海底的悬臂梁和固结于水面的悬臂梁之间。现在的问题是如何考虑水的效应,并建立相应的计算公式来分析、计算它。

近年来,大量地基工作者研究了桩基的受载与变形机理。关于桩在横向荷载作用下桩身内力和位移计算,国内外学者曾提出了许多方法。现在普遍采用的是将桩作为弹性地基上的梁,按文克儿假定(梁身任一点的土抗力和该点的位移成正比)的解法。目前,大家公认并被交通部列入《公路桥梁地基与基础设计规范》的是“ $m$ ”法。该法假定,地基系数  $B$  随深度成正比例增长,即  $B = mZ$ ,  $Z$  为桩的入土深度,  $m$  为地基土比例系数( $\text{kN/m}^4$ )。同时,大量的分析研究表明,自地面到 10 m 深度处,土的竖向抗力几乎没有什么变化,但到 10 m 以下时,它的竖向抗力几乎和水平抗力相当。

地基工作者对桩基的研究给我们带来了启发。我们知道,深水结构的自振周期往往较长。对于这些长周期的振动结构,入水部分所受到的水的作用和桩基受到的土的作用是相当一致的,且水是标准的均质材料,内聚力差,比起土来,更符合“ $m$ ”法的基本假定。这样,式(1)就可写成:

$$(M + M_0)\ddot{V} + CV + KV = 0 \quad (3)$$

由式(3)得:

$$(M + M_0)\ddot{V} + (C + K)V = 0 \quad (4)$$

在此,式(4)具有重要的力学意义。它表明:部分浸泡在水中的结构在振动过程中,不单有附加质量,而且广义刚度——即它的约束条件也有变化。若把水看成一种介质,随着这种介质内聚力的增大,它对结构的约束也会变大。由此看来,桥墩部分位于深水中的桥梁振动过程要复杂得多。

利用式(3)进行计算时,关键是对等效惯性力系数的取用,美国在近海移动式钻井站的规范建议的数值如表 1,日本《港口建筑物设计标准》建议的数值如表 2,前苏联 CH92-60 规范规定:对圆柱  $C_m$  取 1.7。

我国 1982 年颁布的《海水固定平台建造规范》里,  $C_m$  取 2.0,本文计算以此为依据。

表1 美国规范建议值

形状	条件	$C_M$
圆形	淹没	2.0(大直径)
	淹没	1.5(小直径)
椭圆形	淹没	$1.0+b/B$
平面	淹没	1.0(具有圆筒面积 $\pi b^2/4$ )
四边形	淹没	$1.0+b/B$

表2 日本《港口建筑物设计标准》建议值

物体形状	标准体积	$C_M$
圆柱	$\pi D^2 L/4$	2.0( $L \gg D$ )
正方体	$D^2 L$	2.19( $L > D$ )
正方体	$D^3$	1.67

### 3 实例计算

2003 年夏天,丹江口水库水位上升到近年来的最高水位,而且居高不下。严重影响了位于深水中的 2 号墩的施工。也就是说,2 号墩将以一个独立的大 T 的形式在深水中悬浇施工相当一段时间。为了保

证 2 号墩在施工期间不因特殊情况(大风、波浪冲击、地震等)的发生而出现意外,为了考虑方方面面的因素,鉴于大型通用程序的不便,笔者根据实际情况自编程序对其按施工期间的结构图示,进行了动力分析。其结构图和结构离散图如图 2、图 3 所示。

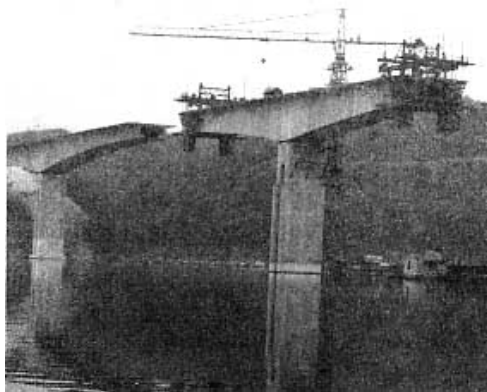


图2 施工期间的 2 号墩

61 59 57 55 53 51 49 47 45 43 41 39 37 35 33 31 29 27 25 23 21 19 17 15 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50 52 54 56 58 60 62

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

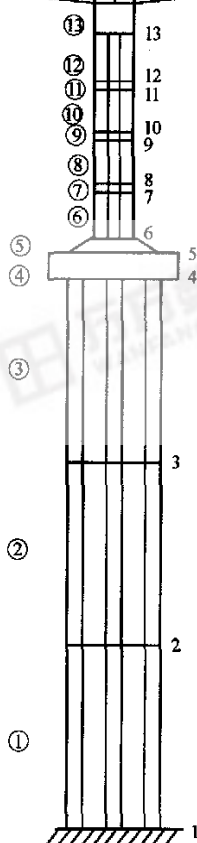


图3 2号墩结构单元

因位于深水中的 9 根直径为 2.0 m 的大型基桩长达 64 m,故把它分为 3 个单元,从下向上,依次是下承台单元、中承台单元、上承台单元。上承台以上的双薄壁墩和闭合横撑,分别按开口断面单元和闭口断面单元处理。主梁则按施工过程的悬浇段进行单元划分。这些空间单元的截面特性,包括质量矩阵中的极惯性矩均按有关力学公式尽量准确地计算。首先完成无水作用的结构动力特性的分析计算,以利程序的调通。单元的截面特性确定以后,采用幂法和子空间叠代法同时进行计算。得到的结果一致,即确认程序已被调通后,再考虑水的作用。

由于墩身承受较大的轴向压力,在形成这些单元的刚度矩阵时,必须引入几何刚度矩阵。即:

$[K]=[K]_e+f[K]_g$  (5)

式中:[K]为墩身单元的刚度矩阵;[K]<sub>e</sub>为墩身单元的弹性刚度矩阵;[K]<sub>g</sub>为墩身单元考虑轴向压力效应的几何刚度矩阵;f为该墩身单元的轴向压力。

考虑 f 时,因当前计算单元的位置不同,其轴向压力亦不相同。在自编的程序中,要充分考虑这点并对 f 进行准确地计算。

考虑水的作用时,核心是 m 值的确定。根据我国相关规范,对土、砂、淤泥等的 m 值的规定,经过反复的分析、比较,并参考一些真桥的设计实例,最后才确定了 m 值的大体范围。有了 m 值就可根据入水单

元入水深度计算水的抗力系数。然后形成水的抗力矩阵。应用式(4)就可完成考虑水的效应后结构的自振特性的计算了。值得注意的是:形成水的抗力矩阵时,要注意水对哪个方向的自由度才会产生抗力。具体计算结果见表3、表4,表3、表4的相应振型如图4、图5所示。水深10~50 m 结构频率变化见表5。

表3 不考虑水效应结构的前6阶自振特性

振型序号	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	0.333	3.003	墩的扭转,主梁前后摆动
2	0.364	2.747	桩的横向摆动
3	0.427	2.342	桩的纵向摆动
4	0.834	1.199	桩的纵向摆动和墩的纵向摆动
5	1.57	0.637	梁的竖向振动
6	1.96	0.510	梁的横向摆动

表4 考虑水效应后结构的前6阶自振特性

振型序号	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	0.343	2.15	墩的扭转,主梁前后摆动
2	0.537	1.862	墩的纵向摆动
3	0.942	1.062	墩的横向摆动
4	1.58	0.633	主梁的竖向振动
5	2.08	0.481	梁的竖向振动
6	2.18	0.459	桩的横向摆动

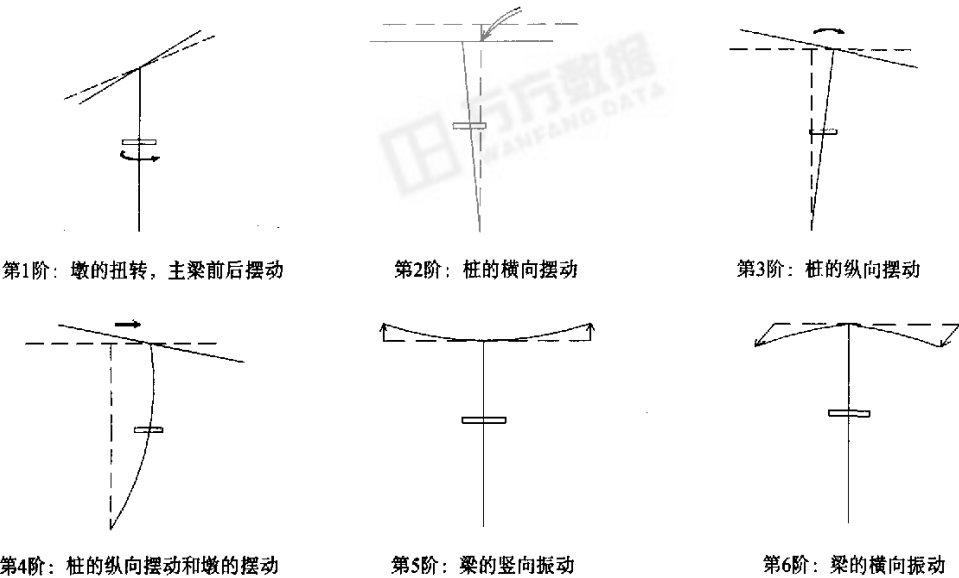


图4 不考虑水的前6阶振型

表5 水深从10~50 m 结构频率变化 Hz

水深/m	第1频率	第2频率	第3频率	第4频率	第5频率	第6频率
10	0.331	0.363	0.420	0.839	1.57	1.96
20	0.332	0.401	0.433	0.893	1.57	1.97
30	0.343	0.424	0.456	0.989	1.57	1.99
40	0.341	0.485	0.599	1.32	1.57	2.02
50	0.332	0.505	0.759	1.58	1.88	2.06

从表3、表4、图4及图5可以看出,水对以桥墩扭转为主的振型影响不大,这也是符合实际情况的。而从表5可以看出,结构基频变化随着水深的加深,振动频率逐渐增高,由计算得出:当水深为10 m、20 m、30 m时,前6阶振型如图4,只是频率不同;而水深为40 m时,前3阶振型如图5中的前3阶振型;水深为50 m时,图5中第4阶振型出现在该情况时的第4阶振型中。可见,随着水深的增加,第1阶振型保

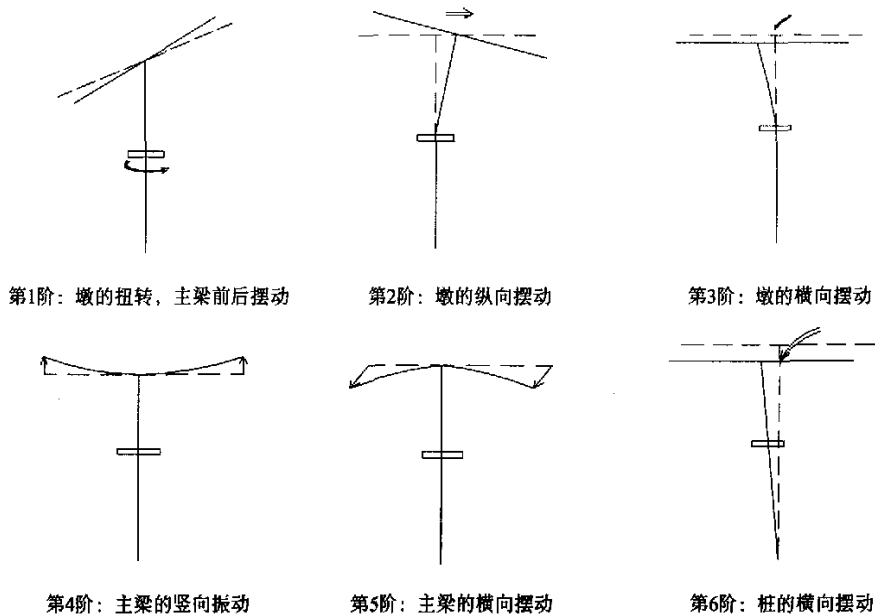


图5 考虑水的前6阶振型

持不变,而桩的振型阶数逐渐升高,墩的振型的阶数逐渐降低,表明水对结构有一定的约束作用。

为了验证自编程序计算结果的正确性,笔者又利用大型有限元计算软件ANSYS进行了计算。在建模过程中,采用BEAM189变截面梁单元来模拟实桥,其模型见图6所示。共生成259个单元和90个节点。通过计算,其结果与自编程序计算结果基本吻合。

## 5 结语

本实例中,中墩大T的前6阶振动频率因水的存在而有所提高,振型也有较大改变。不考虑水的影响时,桩的振型在第2阶中即出现,而用本文章的方法考虑水的影响时,桩的振型在第6阶中才出现。在动力分析中,这样的变化,将导致问题性质的改变。可见,水对深水中结构动力特性的影响不可忽略。本文探及耦联振动问题之内核,创造性地改进了振动

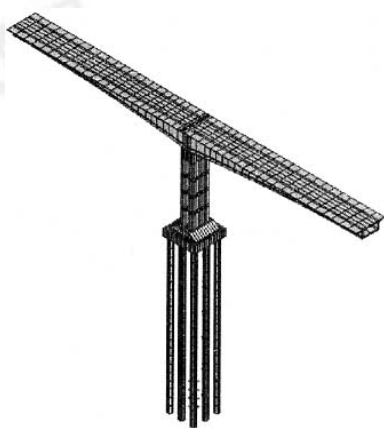


图6 ANSYS模型

基本方程,并通过计算对比,验证了设想的正确性,对实际工程计算具有较高的应用价值。当然,本文的分析前提是结构处于静水之中,动水之中结构的动力性态还有待进一步研究。

文章编号: 0451-0712(2005)09-0011-05

中图分类号: U448.221

文献标识码: B

# 双曲拱桥性能的综合评定及加固方法

施 洲, 赵人达

(西南交通大学 成都市 610031)

**摘 要:** 分析双曲拱桥性能的综合评定方法, 以大清流双曲拱桥为工程背景, 详细介绍其检测、实桥荷载试验, 以及计算分析综合评定的全过程。评定结果表明该桥拱圈上纵向裂缝明显, 耐久性差, 桥跨结构横向受力不均, 但承载能力满足原荷载等级要求, 若要长期使用或提高荷载等级必须进行加固。并对该桥的加固提出建议。

**关键词:** 双曲拱桥; 检测; 荷载试验; 评定; 加固

双曲拱桥是我国于 20 世纪 60 年代初在江苏省无锡市首创的一种新桥型, 该桥型具有用料省, 造价低, 结构轻巧美观, 特别是其施工简便, 不需要大吨位的吊装设备, 因此在当时的施工条件下得以广泛推广。双曲拱桥的承载结构主拱圈由拱肋、拱波、拱板以及横梁等构件组成。双曲拱桥的结构特征使得该类型的桥存在因拱圈各构件之间连接薄弱, 而直接导致的桥跨结构整体性差的缺点。双曲拱桥普遍存在承载能力低, 开裂严重等问题。随着经济的日益发展, 道路上的行车密度以及车辆的轴重不断加大, 这些双曲拱桥已经不能满足当前的交通运输要求。既有的双曲拱桥, 应对其现状以及承载能力做详细的评定, 为双曲拱桥的加固改造提供技术资料, 做到物尽其用, 避免拆除重建的巨额

花费。

## 1 双曲拱桥的性能评定方法

为评定双曲拱桥的性能, 科学合理的方法是首先全面检测桥跨结构的现状, 并实施实桥的荷载试验; 同时对桥跨结构进行承载能力验算, 综合分析双曲拱桥的当前性能。

### 1.1 双曲拱桥的检测

检测的内容有: 主拱圈现有拱轴线形的检测, 以及其他构件几何线形的检测; 结构材料强度检测, 即主拱拱肋、拱波及填平层、拱板以及墩台混凝土或石料的强度检测; 裂缝检测, 检测主拱拱圈混凝土裂缝分布, 典型裂缝深度、宽度等; 严重开裂或渗水区域的钢筋锈蚀情况调查; 其他检测如墩台风化状况、桥

收稿日期: 2005-03-29

## 参考文献:

- [1] 黄玉盈. 结构振动分析基础[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1988.
- [2] 张海龙. 桥梁的结构分析·程序设计·施工监控[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2003.
- [3] 张立翔, 杨柯. 流体结构互动理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 唐友刚. 高等结构动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [5] 张文首. 波浪荷载作用下海洋平台的阻尼减振分析[A]. 固体力学会议论文集[C]. 2002.
- [6] 张宁勇. 深水桥梁地震反应特性分析[D]. 同济大学硕士学位论文, 2002.
- [7] M G 哈勒姆, N J 黑弗, 等. 海洋建筑物动力学[M]. 1981.
- [8] J F 威尔逊. 海洋结构动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [9] Mahmoodi P. Structural Dampers. ASCE J. of Structural Division, 1969, 95(8).
- [10] 莫海红, 杨小平. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑业出版社, 2003.
- [11] 邱大洪. 波浪理论及其在工程中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [12] 吴鸿庆, 任侠. 结构有限元分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.