

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.017

挟沙水流速度与含沙量垂向分布关系探讨

董啸天^{1,2}, 李瑞杰^{1,2}, 付刚才^{1,3}, 张海春⁴

- (1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境海洋实验室, 江苏 南京 210098;
3. 珠海市海骏工程建筑处 92311 部队, 广东 珠海 519080;
4. 浙江省海洋开发研究院海洋环境与化工研究室, 浙江 舟山 316100)

摘要: 采用数据拟合构造的挟沙水流掺混长度, 结合 Prandtl 掺混长度理论, 得到新的挟沙水流流速分布。类比动量传递系数表达式与掺混长度的关系, 结合挟沙水流流速分布公式, 得到新的含沙量垂线分布公式。分别利用水槽及河道实测资料验证, 结果表明流速公式与含沙量公式可以客观准确地描述流速、含沙量垂向变化规律, 对含沙量有更高的精度。误差分析表明: 近底层流速误差较大, 说明底部边界层的选取与判别仍需深入探究; 近表层含沙量误差较大, 说明含沙量参考点的选取在理论上仍需研究, 以摆脱其随机影响。

关键词: 近岸海域泥沙运动; 挟沙水流掺混长度; 流速分布; 含沙量垂向分布

中图分类号: TV149 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)04-0371-06

Relationship between vertical distributions of velocity and sediment concentration of sediment-laden flow

DONG Xiaotian^{1,2}, LI Ruijie^{1,2}, FU Gangcai^{1,3}, ZHANG Haichun⁴

- (1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Laboratory of Ocean Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Haijun Construction Company of Zhuhai, Unit 92311, Zhuhai 519080, China;
4. Marine Environment and Chemical Laboratory, Zhejiang Marine Development Research Institute, Zhoushan 316100, China)

Abstract: Using the mixing length of sediment-laden flow constructed with data fitting and combining the Prandtl mixing length theory, a new equation describing the velocity distribution of sediment-laden flow was established. Based on this new equation and the analogy of the relationship between the momentum transfer coefficient and mixing length, a new equation describing the vertical distribution of sediment concentration was also established. Through verification with observed data from the flume experiment and field survey, it was found that these two equations can objectively describe the vertical variations of velocity and sediment concentration, showing a higher precision in describing the sediment concentration. The error analysis shows that the error of the near-bottom velocity is large, indicating that the selection and judgment of the bottom boundary layer need further investigation; the error of the sediment concentration close to the surface is large, indicating that the selection of the reference point for the sediment concentration requires further theoretical research, in order to discard the influence of random effects.

Key words: nearshore sediment movement; mixing length of sediment-laden flow; velocity distribution; vertical distribution of sediment concentration

挟沙水流是自然界中常见的水流运动现象, 精确求解挟沙水流流速垂线分布是研究含沙量分布、水质问

收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(41276017); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201205005)

作者简介: 董啸天(1990—), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 主要从事泥沙运动力学及海岸泥沙运动研究。E-mail: do.ng.xt@163.com

题、冲淤演变的首要要求,因此研究挟沙水流流速分布具有重要的理论意义和实用价值。王兴奎等^[1]通过试验发现挟沙水流流速分布仍符合对数律,但是随泥沙浓度增加,卡门常数 κ 值减小,且近底区偏离对数公式的规律。Coleman认为近底区挟沙水流流速分布符合对数律,从实测资料角度提出了不同的尾流函数项的表达式^[2]。为了尽可能真实地反映挟沙水流的紊动特性,许多学者通过实测数据与理论分析构造出不同掺混长度公式,应用并推导出挟沙水流流速分布,如张红武^[3]、严冰等^[4]从掺混长度理论出发,从不同角度研究掺混长度,并用不同的试验数据进行验证,得到相对合理的结果。笔者应用数据拟合构造得出的掺混长度表达式,推导出新的流速分布公式。此外,借助动量传递系数的概念,建立泥沙扩散系数与挟沙水流掺混长度的关系,得到新的含沙量垂线分布公式,在此基础上分析了不同流速分布对含沙量分布的影响。

1 流速分布与含沙量分布

紊流是自然界中常见的水流运动现象,紊流的动量传递依赖于脉动。搜集相对掺混长度实测值,采用数据拟合后经过构造的挟沙水流掺混长度表达式如下^[5]:

$$l = \kappa y \sqrt{\frac{h}{h+y}} \quad (1)$$

式中: l ——挟沙水流掺混长度; κ ——卡门常数; y ——垂线坐标; h ——水深。

将 Prandtl、Rouse 采用的挟沙水流掺混长度^[6],以及 van Rijn^[7]采用的挟沙水流掺混长度与式(1)进行比较(图1,横坐标为相对水深,纵坐标为掺混长度与水深的比值)。Prandtl 掺混长度采用线性结构,仅适用于近底层;Rouse 掺混长度采用根式结构,在水表处不符合实际情况;van Rijn 掺混长度存在间断点,不能合理地反映挟沙水流掺混长度。

在线性底层以外的流区,雷诺应力占主导作用,分子黏性很小,可忽略不计,根据 Prandtl 掺混长度理论^[6],雷诺应力可表示如下^[8]:

$$\tau = -\rho u'_x u'_z = \rho l^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \left| \frac{du}{dy} \right| = \rho \varepsilon_m \frac{du}{dy} \quad (2)$$

其中

$$\varepsilon_m = l^2 \frac{du}{dy}$$

式中: τ ——雷诺应力; ρ ——水流密度; u'_x 、 u'_z —— x 、 z 方向的脉动流速; u ——挟沙水流流速; ε_m ——动量传递系数。

二维均匀流中,切应力有如下规律:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right) = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (3)$$

式中: τ_0 ——水底切应力; u_* ——摩阻流速^[9]。

将式(1)代入式(2),并与式(3)联立,沿整个水深积分可得垂线流速分布表达式:

$$\frac{u_m - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left[\ln \frac{\frac{y}{h}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2}} - \sqrt{1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2} \right] \quad (4)$$

式中: u_m ——水表面流速。

式(4)描述的水表面流速梯度为零,水表面流速为最大流速。与对数流速公式相比,式(4)更合理。

考虑水流中悬沙的垂线分布达到平衡状态,泥沙的沉降通量与向上的紊动通量相等,泥沙扩散方程为

$$(1 - C) C \omega_s + \varepsilon_s \frac{dC}{dy} = 0 \quad (5)$$

式中: C ——含沙量; ω_s ——泥沙沉降速度; ε_s ——泥沙交换系数。

泥沙的沉降速度为含沙量的函数,目前已有多种形式各异的泥沙沉降速度表达式,Richardson-Zaki 给出

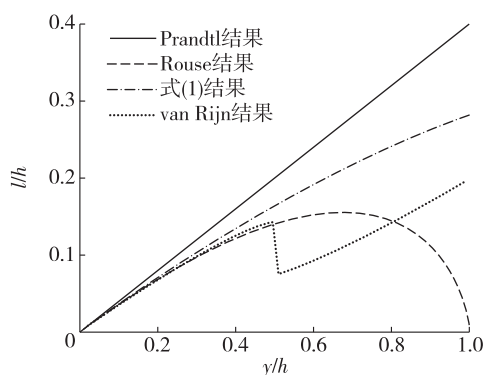


图1 Prandtl、Rouse、van Rijn 掺混长度与式(1)结果对比

Fig. 1 Comparison of mixing lengths from Prandtl, Rouse, and van Rijn equations with Eq. (1)

了得到普遍应用的泥沙沉降速度含沙量关系式^[10]:

$$\frac{\omega_s}{\omega_0} = (1 - C)^4 \quad (6)$$

式中: ω_0 ——单颗粒泥沙静水沉降速度。

类比动量传递系数的结构形式,建立泥沙扩散系数与挟沙水流掺混长度的关系,代入式(1)、式(4),得

$$\varepsilon_s = l^2 \frac{du}{dy} = u_* \kappa y \sqrt{\frac{h-y}{h+y}} \quad (7)$$

将式(6)代入式(5),结合式(7),从参考点 a 到高度 y 垂向积分,假设所研究对象为低含沙水流,即 $1-C \approx 1, 1-C_a \approx 1$,整理化简可得

$$\frac{C}{C_a} = \left\{ \frac{1 - \sqrt{1 - \eta^2}}{1 - \sqrt{1 - \eta_a^2}} \frac{\eta_a}{\eta} \exp \left[2 \left(\arctan \sqrt{\frac{1 + \eta}{1 - \eta}} - \arctan \sqrt{\frac{1 + \eta_a}{1 - \eta_a}} \right) \right] \right\}^{-b} \quad (8)$$

式中: a ——参考高度; C_a ——参考高度 a 处的含沙量。

取相对水深 $\eta = y/h$,参考点相对水深 $\eta_a = a/h$,Rouse 数 $b = \omega_0 / (\kappa u_*)$, u_* 表达式为

$$u_* = \frac{\kappa \bar{u}}{\ln \frac{4h}{z_0} - \frac{8}{3}} \quad (9)$$

式中: $\bar{u}$ ——垂线平均流速; z_0 ——摩阻高度,一般取常数 0.0025。

将式(8)结果与 Rouse 公式结果^[6]、van Rijn 公式结果^[7]、丰青公式结果^[5]进行比较(图2,Rouse 数取 1, z_0 取 0.0025 m),表明同一相对水深处,式(8)结果与 Rouse 公式结果、van Rijn 公式结果相比为大,与丰青公式结果相比为小,与 van Rijn 公式结果较接近。

考虑泥沙加入清水水流中,随着不同粒径的泥沙在各高度重新分布并达到稳定,挟沙水流流速分布与含沙量分布同时调整并逐渐趋于稳定,而水流条件改变以后,自然会进一步影响泥沙运动。针对 Rouse 公式算得的浓度在表面为零、底部边壁为无穷大的问题,李瑞杰等^[11]、郑俊等^[12]、Brown^[13]、Zheng 等^[14]、Park 等^[15]从不同角度进行研究,得到形式各异的含沙量分布公式。显而易见,不同的流速分布对含沙量的影响是不同的,若能找出不同流速分布与含沙量之间的关系,则可以更清晰地描述含沙量的分布规律。

与清水水流相比,挟沙水流因泥沙颗粒的制紊作用消耗了水流的紊动能^[16],使挟沙水流紊动较弱,紊动切应力较清水切应力小,流速梯度较清水小。一方面,由 Prandtl 理论^[6]知,脉动流速是流速梯度与掺混长度的乘积,若掺混长度相同,挟沙水流的脉动流速较清水小,包含的紊动能较少,挟沙水流悬浮的泥沙也较少;除此,由

Prandtl 掺混长度理论^[6]知,水流紊动切应力与流速梯度的平方成正比关系,故挟沙水流流层之间的紊动切应力比清水小,对泥沙的悬浮扩散作用也较弱^[15]。由此可知,采用挟沙水流流速分布式(式(4))推导得到的含沙量垂向分布与采用对数流速公式推导得的丰青公式^[5]相比,在同一相对水深处为小。图2亦印证了上述特征。

2 流速和含沙量垂向分布公式验证

采用黄河水利委员会黄河水利科学研究院室内水槽试验资料^[5]与无定河南河川站实测水文资料验证,挟沙水流流速垂向分布的比较见图3(YS-22、YS-28、YS-34、YS-39、YS-42、NO6-15、NO2-5、NO1-1、NO3-8、NO13-34 代表试验组次)。由图3可知:从含沙量较小到较大的高含沙水流,式(4)与实测资料吻合较好;室

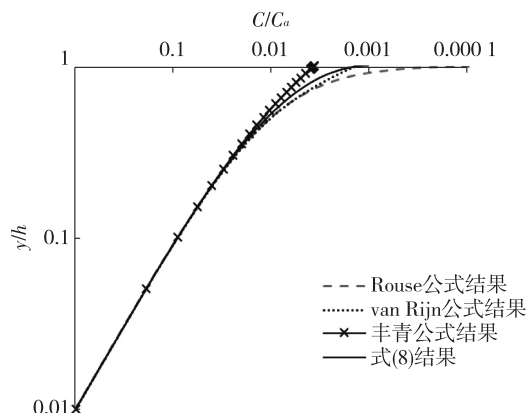


图2 Rouse 公式、van Rijn 公式、丰青公式及式(8)含沙量垂向分布比较

Fig. 2 Comparison of vertical distributions of sediment concentration obtained from Rouse, Van Rijn, and Fengqing equations with Eq. (8)

内水槽及天然河道实测资料与式(4)计算值在较大含沙量范围内都很吻合。

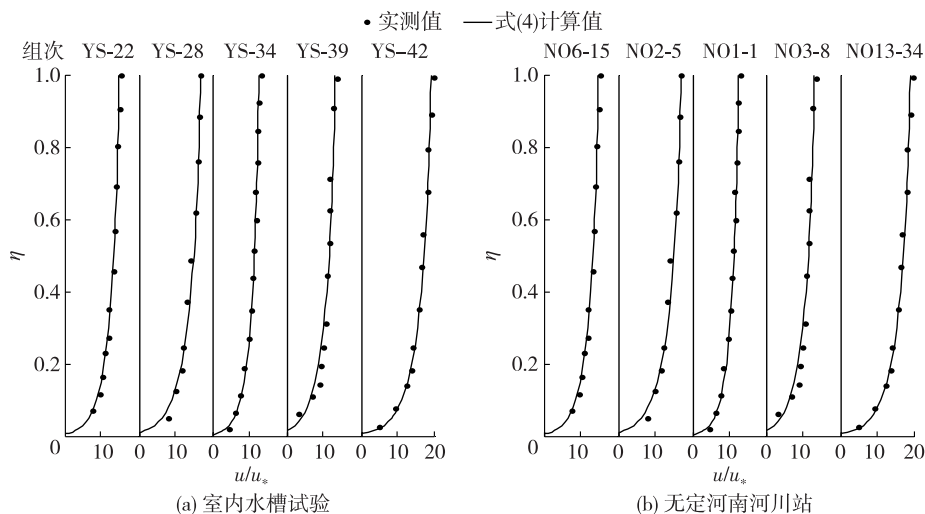


图3 挟沙水流流速垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of velocity of sediment-laden flow

选取2010年瓯江口海域的中潮实测资料、2008年台州海域大潮实测资料对式(8)进行分析验证,并与Rouse公式进行对比(参考层取为底层)。如图4所示,瓯江口海域输沙量大,但含沙量比较低,悬沙分布特征不明显,下层含沙量与上层差异不大;台州海域含沙量比较低,悬沙分布特征较显著。式(8)的计算结果与Rouse公式计算结果整体一致,但表层计算结果较Rouse公式为优,整体上较Rouse公式能更好地反映悬沙实测分布特征,更客观地反映含沙量垂线分布规律。挟沙水流流速和含沙量相对误差分析结果见表1、表2。误差分析结果表明,挟沙水流流速公式及含沙量公式与实测数据较吻合。

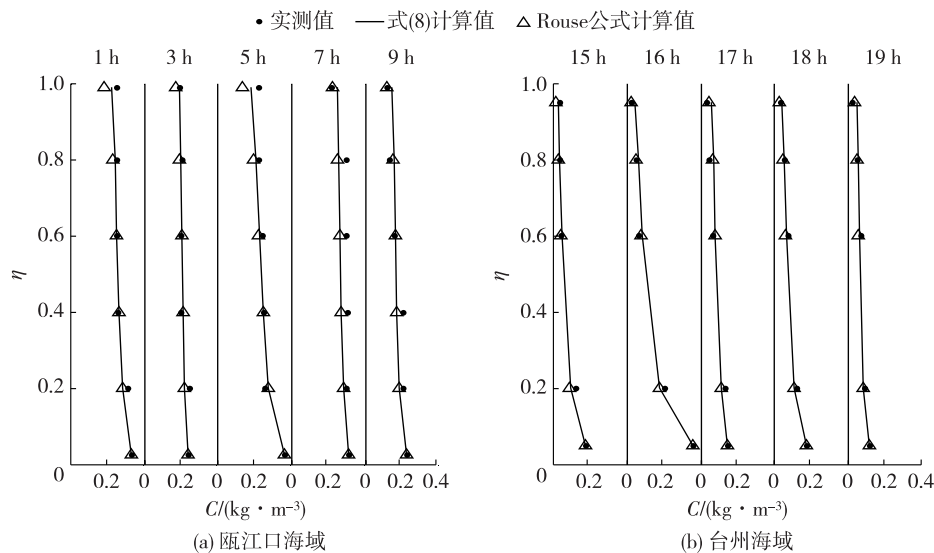


图4 式(8)计算值及Rouse公式计算值与近岸海域实测值比较

Fig. 4 Comparison of calculated results from Eq. (8) and Rouse equation with observed data from near shore

3 结 语

采用数据拟合后经过构造的经验掺混长度表达式,推导得到新的挟沙水流流速分布公式;结合泥沙扩散方程与挟沙水流流速分布,推导得到相应的含沙量垂线分布公式,验证结果表明流速分布与含沙量垂线分布能够较客观地反映实际规律。由误差分析可知:近底层流速误差较大,表明底部边界层的选取与判别仍需深入探究;近表层含沙量误差较大,表明含沙量参考点的选取在理论上仍需研究,以摆脱其随机性影响。此外,水流因泥沙的存在而改变后,会进一步对泥沙运动产生影响,这种影响反映在含沙量分布中,相关问题的深

入探讨或是泥沙研究的一个突破口。

表 1 挟沙水流流速误差分析结果
Table 1 Error analysis of velocity of sediment-laden flow

测点编号	相对误差									
	YS-22	YS-28	YS-34	YS-39	YS-42	NO6-15	NO2-5	NO1-1	NO3-8	NO13-34
1	-0.033	-0.129	-0.007	0.026	-0.017	-0.024	0.004	0.002	-0.049	-0.020
2	0.009	-0.119	-0.009	0.040	-0.003	0.093	0.026	0.026	-0.032	-0.006
3	-0.018	-0.062	-0.009	-0.055	0.043	-0.006	-0.004	0.019	0.007	-0.034
4	-0.030	-0.073	0.031	-0.099	0.009	0.009	0.058	0.011	0.082	-0.006
5	-0.029	-0.119	0.015	-0.049	-0.027	0.015	-0.059	-0.006	-0.043	0.021
6	-0.016	-0.148	0.026	0.199	0.079	-0.027	0.034	-0.145	0.014	0.062

表 2 挟沙水流含沙量误差分析结果
Table 2 Error analysis of sediment concentration of sediment-laden turbulent flow

测点编号	相对误差									
	瓯江口海域					台州海域				
	1 h	3 h	5 h	7 h	9 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h
1	0.043	-0.035	-0.071	0.008	-0.111	-0.010	-0.175	0.142	0.196	0.033
2	0.047	-0.038	-0.029	0.237	-0.037	-0.023	-0.066	-0.125	0.166	0.035
3	0.025	-0.020	0.029	0.186	0.011	0.026	-0.063	-0.096	0.042	-0.173
4	-0.020	-0.015	0.019	-0.136	0.040	0.053	-0.005	-0.096	-0.150	-0.126
5	-0.039	0.034	0.049	-0.130	-0.080	-0.105	0.100	-0.056	-0.072	-0.109
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

参考文献:

[1] WANG Xingkui, QIAN Ning. Turbulence characteristics of sediment-laden flow[J]. Journal of hydraulic Engineering, 1989, 115 (6): 781-800.

[2] 黄才安,梅小文.关于挟沙水流流速分布问题[J]. 长江科学院院报,2000,17(4):15-17.(HUANG Caian,MEI Xiaowen.On the velocity distribution of sediment-laden flow problem[J]. Yangtze River Scientific Reaearch Institute,2000,17(4):15-17.(in Chinese))

[3] 张红武.挟沙水流流速的垂线分布公式[J]. 泥沙研究,1995(2):1-10.(ZHANG Hongwu.Vertical distribution of velocity in sediment-laden flow[J]. Journal of Sediment Research,1995(2):1-10.(in Chinese))

[4] 严冰,张庆河.基于有限掺混长度概念的悬沙浓度垂线分布研究[J]. 泥沙研究,2008(1):9-16.(YAN Bing, ZHANG Qinghe.Vertical distribution of suspended sediment concentration based on the concept of finite mixing length[J]. Journal of Sediment Research,2008(1):9-16.(in Chinese))

[5] 丰青,李瑞杰,江森汇,等.基于含沙紊动水流掺混长度的含沙量垂线分布[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(5):549-554.(FENG Qing, LI Ruijie, JIANG Senhui,et al.Vertical distribution of suspended sediment concentration based on mixing length of sediment-laden turbulent flow[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2012,40(5):549-554. (in Chinese))

[6] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998.

[7] van RIJN L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas[M].Den Haag: Aqua Publications,1993.

[8] 卢金友,徐海涛,姚仕明.天然感潮河道水流紊动特性分析[J]. 海洋工程,2005,23(3):70-77.(LU Jinyou, XU Haitao, YAO Shiming. Analysis of flow turbulence characteristics in the natural tidal reach[J]. The Ocean Engineering, 2005,23(3): 70-77. (in Chinese))

[9] FANG Guohong, ICHIYE T. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,1983,73(1):65-82.

[10] RICHARDSON J F, ZAKI W N. Sedimentation and fluidisation: Part I[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1997, 75: S82-S100.

[11] 李瑞杰,丰青,郑俊,等.近岸海域流速与含沙量垂线分布分析[J]. 海洋通报,2012(6):607-612.(LI Ruijie, FENG Qing, ZHENG Jun, et al. Analysis on vertical distribution of nearshore fluid velocity and sediment concentration[J]. Marine Science

- Bulletin, 2012(6):607-612. (in Chinese))
- [12] 郑俊,李瑞杰,丰青,等.近岸悬沙质量浓度垂向分布公式[J].河海大学学报:自然科学版,2013,41(5):452-455.
(ZHENG Jun, LI Ruijie, FENG Qing, et al. Formula of vertical distribution of nearshore suspended sediment concentration[J].
Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2013,41(5):452-455. (in Chinese))
- [13] BROWN G L.Approximate profile for nonequilibrium suspended sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(7):
1010-1014.
- [14] ZHENG Jun, LI Ruijie, FENG Qing, et al. Vertical profiles of fluid velocity and suspended sediment concentration in nearshore
[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(3):406-412.
- [15] PARK E, LATRU B E M.Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data[J]. Remote
Sensing of Environment, 2014, 147:232-242.
- [16] LI Anlong, LI Guangxue, CAO Lihua. The coastal erosion and evolution of the Yellow River Delta abandoned lobe[J]. Journal of
Geographical Sciences, 2004, 14(4):465-472.
- +++++

· 简讯 ·

第五届全国水工抗震防灾学术交流会将在宜昌市举行

第五届全国水工抗震防灾学术会议将于2015年11月6—8日在湖北省宜昌市举行。本次会议由中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会主办,三峡大学、水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心、湖北省水力发电工程学会承办,河海大学、清华大学、大连理工大学、武汉大学、四川大学等20多个单位协办。

本次水工抗震防灾学术会议将就下列议题进行交流探讨:水工建筑物抗震设计、分析理论;地震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估及修复加固;水工结构现场检测与监测、健康诊断与鉴定;水库引发地震、地震预测和预警;水电工程抗震措施、抗震安全评价体系;水工结构工程振动、爆炸与冲击等关键科学技术问题。

会议内容:(a)邀请著名的水工抗震与地震工程领域院士、专家就本学科的研究与发展作特邀报告。(b)对以下专题进行交流和研讨:(1)水工(港工)建筑物抗震设计标准;(2)水工(港工)建筑物抗震分析理论与方法;(3)水工(港工)建筑物抗震试验研究方法和技术;(4)水工(港工)建筑物场地地震动输入;(5)水工(港工)建筑物与地基材料动态特性;(6)水工(港工)建筑物现场测试与动力性态检测、健康诊断与鉴定;(7)水工(港工)结构、金属结构振动、爆炸与冲击;(8)水工(港工)结构减震、隔震和控震技术;(9)强震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估以及次生灾害影响;(10)震损水工结构的安全度及修复加固技术;(11)水库地震的预测、监测及其影响研究;(12)边坡与地下结构动力分析理论、方法、抗震设计及地质灾害防治;(13)水利水电工程安全评价方法、防灾减灾措施及应急预案。

会议详情见 <http://www.hydropower.org.cn/showNewsDetail.asp?nsId=16303>

(本刊编辑部供稿)