

基于弹性模量缩减法的钢衬钢筋混凝土压力管道极限承载力计算

付传雄¹, 张伟², 张瑾²

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610
2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:针对钢衬钢筋混凝土压力管道(SLRCP)的体形和承载特性,在弹性模量缩减法基础上引入变截面拱和弹性中心法,建立了表征管道结构截面承载状态的单元承载比表达式,提出了 SLRCP 极限承载力分析的新方法。实例计算结果表明,该计算方法可通过弹性迭代模拟结构损伤演化过程,进而结合极限分析定理得出管道结构的极限承载力,具有原理简单和应用方便的特点,能够准确高效地求解 SLRCP 的极限承载力。

关键词:钢衬钢筋混凝土压力管道;极限承载力;弹性模量缩减法;弹性中心法

中图分类号:TV732.4⁺² **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)02-0026-05

Calculation of ultimate bearing capacity of steel lined reinforced concrete penstock based on the elastic modulus reduction method//FU Chuanxiong¹, ZHANG Wei², ZHANG Jin² (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: According to configuration and bearing mechanism of steel lined reinforced concrete penstocks (SLRCP), a new ultimate bearing capacity analysis method for SLRCP is proposed based on the elastic modulus reduction method. In this new method, the variable cross section arch model and elasticity centre method are employed in the internal force analysis of SLRCP, and an expression for element bearing ratio which characterizes the bearing condition of the corresponding section is given. Case study shows that the structural damage evolution process can be simulated by the elastic iteration process of the method, and then the ultimate bearing capacity of SLRCP can be obtained with combination of the limit analysis theorem. It also proves the simplicity and practicality of the new method, and the ultimate bearing capacity of SLRCP can be obtained by this method accurately and efficiently.

Key words: steel lined reinforced concrete penstocks; ultimate bearing capacity; elastic modulus reduction method; elasticity centre method

钢衬钢筋混凝土压力管道(steel lined reinforced concrete penstocks, SLRCP)在布置形式、结构形式和施工安装等方面具有诸多优点,已广泛应用于国内外重大水电站的输水系统中。另外,SLRCP 体型巨大,与坝体和厂房联结紧密,内有高速水流,一旦失事,将造成重大生命和财产损失,因而该类管道结构的安全性一直受到工程技术人员的关注。SLRCP 由内层钢衬和外包钢筋混凝土两部分构成,设计中考虑两者联合承载,常通过求解其极限承载力来评估结构的承载安全性,其中高效求解 SLRCP 极限承载力的计算方法是关键^[1-3]。

目前,SLRCP 极限承载力的计算方法主要有模型试验法和钢筋混凝土非线性有限元法。东江、李家峡、金安桥和三峡等水电站开展了模型试验,获得了管道结构典型断面的极限承载力,为工程设计提供了科学依据^[4-5]。模型试验法能直接获得管道结构的极限承载力,但存在成本高、影响因素多的不足。鉴于此,钢筋混凝土非线性有限元法已被引入一些重大工程的 SLRCP 极限承载力计算分析中,该法采用混凝土和钢材本构模型,模拟管道结构加载破坏全过程,但存在计算原理复杂、计算时间长和参数敏感性大的缺点^[6-8]。为此,有必要探讨更高效的

SLRCP 极限承载力计算方法。弹性模量调整法是一种高效求解压力管道极限承载力的塑性极限分析方法,近 20 年得到了不断发展^[9-13]。近年来提出的弹性模量缩减法 (elastic modulus reduction method, EMRM)^[14-15] 采用线弹性迭代分析方法,通过有策略地缩减高承载单元的弹性模量,使结构发生内力重分布,可以清晰模拟结构在外荷载作用下发生的损伤演化过程,进而得到结构的极限承载力。此前 EMRM 通过线弹性迭代为极限承载力的求解提供静力允许应力或内力场,本文将针对 SLRCP 的体形和承载特性,采用变截面拱模型和弹性中心法作为结构内力分析模型与方法,进而提出基于 EMRM 的 SLRCP 极限承载力的高效计算方法。

1 SLRCP 极限承载力计算方法

1.1 基于 EMRM 的极限承载力计算

在求解复杂结构的极限承载力时,EMRM 以线弹性有限元为基础,以广义屈服函数表达的单元承载比作为弹性模量调整的控制参数,根据单元承载比均匀度确定模量调整的动态阈值——基准承载比,利用变形能守恒原则建立模量调整策略,根据塑性极限分析界限定理,通过一系列缩减高承载单元弹性模量的高效弹性迭代过程,对承载结构进行内力重分布,形成逐渐逼近结构极限状态的允许内力场,从而获得结构的极限承载力^[14-17]。

a. 单元承载比。单元承载比是反应单元组合内力、材料强度和广义屈服条件的综合参数,该参数能体现单元的塑性屈服程度,是 EMRM 中进行单元弹性模量缩减的基本指标。在结构极限承载力计算分析中根据不同的单元类型和受力特性,采用相应的广义屈服函数来定义结构的单元承载比。管道结构的单元承载比 r 计算表达式为

$$r = \frac{S}{R} \tag{1}$$

式中: S 和 R 分别为考虑截面组合内力的某单元广义内力和抗力。

b. 承载比均匀度和基准承载比。为提高计算效率,EMRM 改变以往弹性模量调整策略中只考虑各单元自身应力状态影响,而考虑所有单元承载比分布状态的影响,定义单元承载比均匀度 d_k 为

$$d_k = \frac{\bar{r}_k + r_{kmin}}{\bar{r}_k + r_{kmax}} \tag{2}$$

其中

式中: $\bar{r}_k$ 、 r_{kmax} 和 r_{kmin} 分别为管道结构中所有单元承载比的平均值、最大值和最小值; N 为结构离散后总

的单元数。根据单元承载比均匀度,定义弹性模量缩减的动态阈值 (基准承载比) r'_k 为

$$r'_k = r_{kmax} - (r_{kmax} - r_{kmin}) d_k \tag{3}$$

c. 弹性模量缩减策略。通过上述定义,并结合单元变形能守恒原理及 Banach 不动点原理,建立弹性模量缩减策略:

$$E_{k+1} = \begin{cases} E_k \frac{2r_k'^2}{r_k^2 + r_k'^2} & r_k > r'_k \\ E_k & r_k \leq r'_k \end{cases} \tag{4}$$

式中: E_{k+1} 和 E_k 分别为某单元第 $k+1$ 和 k 次迭代分析的弹性模量。

d. 极限承载力求解。采用式 (4) 进行结构各单元的弹性模量缩减,可模拟结构损伤演化过程,进而得到初始荷载 P_0 作用下第 k 迭代步的结构极限承载力 P_{kL} :

$$P_{kL} = \frac{P_0}{r_{kmax}} \tag{5}$$

重复以上迭代计算,直到满足式 (6) 的收敛准则:

$$\left| \frac{(P_{kL} - P_{(k-1)L})}{P_{(k-1)L}} \right| \leq \varepsilon \tag{6}$$

式中: ε 为预设的收敛容差值,本文取 0.001。

结合极限分析下限定理,可获得结构的极限承载力:

$$P_L = P_{kL} \tag{7}$$

由式 (1) ~ (7) 可见,为采用 EMRM 进行 SLRCP 的极限承载力分析,需获得迭代分析过程中的单元承载比,因此需要得到结构内力分布和截面强度,根据 SLRCP 的体形和承载特性,本文采用变截面变截面拱结构及弹性中心法进行结构内力分析,同时考虑截面钢筋和钢衬的轴向承载能力作为拱结构的截面抗力。

1.2 管道内力计算

SLRCP 由钢衬和外包钢筋混凝土联合承载,其主要布置形式由图 1 所示。

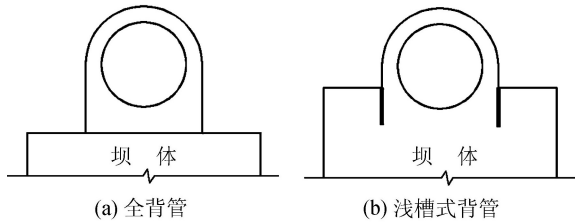


图 1 SLRCP 布置形式

蒋锁红等^[3-4]研究表明,由于浅槽式背管在坝体和管道两侧设置了垫层,防止了管道外包混凝土中的裂缝发展至坝体内部,同时静力作用下也使坝体对管道的约束作用较小,因而两种 SLRCP 都可以简化为图 2 所示的变截面拱结构,本文采用拱结构分

析的弹性中心法求解截面内力,如图3所示。

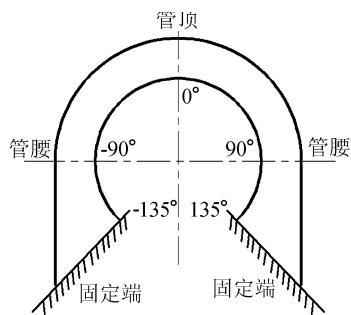


图2 变截面拱结构

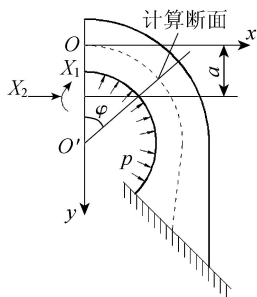


图3 SLRCP弹性中心法计算简图

变截面拱结构作为内力分析的基本体系,其第 k 迭代步附加刚臂长度 a_k 的计算方法为

$$a_k = \frac{\int \frac{y}{E_k I} dA}{\int \frac{1}{E_k I} dA} = \frac{\sum \frac{y}{E_k I} \Delta A}{\sum \frac{1}{E_k I} \Delta A} \quad (8)$$

式中: I 为计算断面的惯性矩; ΔA 为计算断面面积。进而可确定第 k 迭代步刚臂上的附加力:

$$X_{1k} = -\frac{\Delta_{1pk}}{\delta_{11k}} \quad X_{2k} = -\frac{\Delta_{2pk}}{\delta_{22k}} \quad (9)$$

其中

$$\delta_{11k} = \int \frac{\bar{M}_1^2}{E_k I} dA = \sum \frac{1}{E_k I} \Delta A$$

$$\delta_{22k} = \int \frac{\bar{M}_2^2}{E_k I} dA + \int \frac{\bar{N}_2^2}{E_k A} dA =$$

$$\sum \frac{(y - a_k)^2}{E_k I} \Delta A + \sum \frac{\cos^2 \varphi}{E_k A} \Delta A$$

$$\Delta_{1pk} = \int \frac{\bar{M}_1 M_p}{E_k I} dA = \sum \frac{pr R_i (1 - \cos \varphi)}{E_k I} \Delta A$$

$$\Delta_{2pk} = \int \frac{\bar{M}_2 M_p}{E_k I} dA + \int \frac{\bar{N}_2 N_p}{E_k A} dA =$$

$$\sum \frac{pr R_i (1 - \cos \varphi) (y - a_k)}{E_k I} \Delta A +$$

$$\sum \frac{pr (1 - \cos \varphi) (-\cos \varphi)}{E_k A} \Delta A$$

式中: δ_{11k} 、 δ_{22k} 分别为附加虚力作用下的位移; Δ_{1pk} 、 Δ_{2pk} 分别为内水压力作用下的位移; $\bar{M}_1$ 、 $\bar{M}_2$ 为附加力作用的弯矩; M_p 为内水压力作用的弯矩; φ 为计算断面单元与弹性中心面的夹角; y 为计算断面单

元到弹性中心的垂直距离; p 、 r 分别为管道内水压力和内半径; R_i 为弹性中心到圆心的距离; N_2 为附加力产生的轴力; N_p 为内水压力产生的轴力。

结合计算简图可求得第 k 迭代步中管道截面单元的内力:

$$\left. \begin{aligned} M_k &= X_{1k} + X_{2k} (y - a_k) + M_p \\ Q_k &= X_{2k} \sin \varphi + Q_p \\ N_k &= -X_{2k} \cos \varphi + N_p \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $M_p = \int_0^\varphi pr R_i \sin(\varphi - \varphi') d\varphi' = pr R_i (1 - \cos \varphi)$

$$Q_p = \int_0^\varphi pr \cos(\varphi - \varphi') d\varphi' = pr \sin \varphi$$

$$N_p = pr \int_0^\varphi \sin(\varphi - \varphi') d\varphi' = pr (1 - \cos \varphi)$$

式中: M_k 、 Q_k 和 N_k 分别为管道截面单元的弯矩、剪力、轴力; Q_p 为内水压力单独作用下结构的剪力。

1.3 管道截面的单元承载比计算

通过上述结构内力分析,并结合SLRCP在内水压力作用下以轴力为主的受力特点,可以得到拱结构第 k 迭代步的单元承载比:

$$r_k = \frac{S_k}{R_k} = \frac{N_k}{f_{sk} A_{sk} + f_{yk} A_{yk}} = \frac{-X_{2k} \cos \varphi + N_p}{f_{sk} A_{sk} + f_{yk} A_{yk}} \quad (11)$$

式中: f_{sk} 和 f_{yk} 分别为钢衬和钢筋的屈服强度; A_{sk} 和 A_{yk} 分别为钢衬和钢筋的截面积。

1.4 管道极限承载力计算步骤

a. 建立SLRCP的拱结构分析模型,管道截面各单元采用初始或缩减后的弹性模量,利用式(8)(9)(10)求得结构各单元的内力值。

b. 采用式(11)确定各迭代步的单元承载比。

c. 根据式(4)缩减高承载单元的弹性模量,进行截面内力的弹性迭代分析。

d. 采用式(5)求解各迭代步的结构极限荷载。

e. 根据式(6)进行迭代收敛判定:如未收敛,重复步骤a至步骤e;如满足收敛条件,根据式(7)求得SLRCP的极限承载力。

2 算例分析

东江、金安桥和三峡水电站SLRCP模型试验的几何尺寸如图4所示,材料参数见表1,均考虑承受内水压力作用,设计内水压力分别为1.27 MPa、1.23 MPa和1.21 MPa。根据前述方法建立相应的变截面拱结构模型,采用本文提出的基于弹性中心法内力分析的弹性模量缩减法,得到结构极限承载力,并与模型试验法和钢筋混凝土非线性有限元法^[1, 5-6]的计算结果对比,见表2。

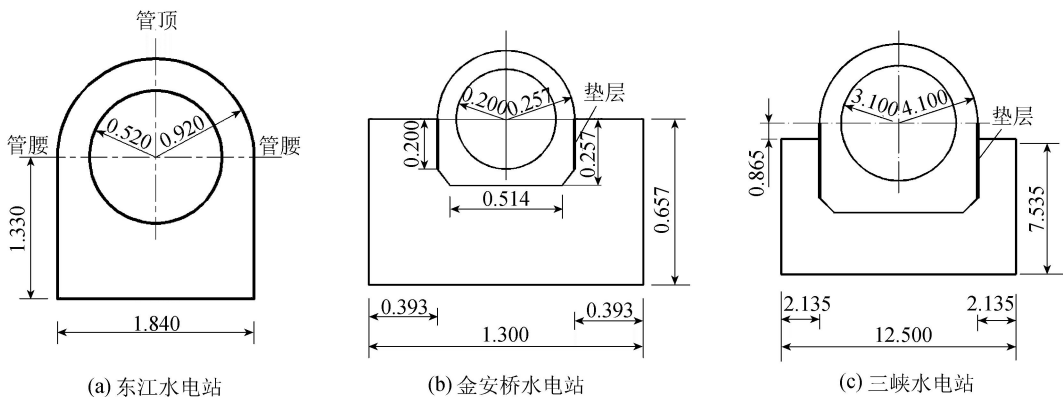


图4 SLRCP 模型试验的几何尺寸(单位:m)

表1 模型试验的材料参数

工程	材料	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
东江 水电站	混凝土	400.00	29.000	0.167	40.00	3.00
	钢衬	4.00	210.000	0.300	240.00	240.00
	钢筋	4.26	210.000	0.300	240.00	240.00
	垫层	1.00	0.003	0.300		
金安桥 水电站	混凝土	57.00	28.000	0.167	44.46	2.94
	钢衬	1.00	206.000	0.300	310.00	310.00
	钢筋	0.57	205.000	0.300	310.00	310.00
	垫层	15.00	0.002	0.300		
三峡 水电站	混凝土	1000.00	19.800	0.167	29.20	2.14
	钢衬	16.00	205.000	0.300	350.00	350.00
	钢筋	12.20	205.000	0.300	375.00	375.00
	垫层					

表2 SLRCP 极限承载力计算结果对比 MPa

工程	本文计算方法	非线性有限元法	模型试验法
东江水电站	3.81	3.25	4.00
金安桥水电站	2.43	2.70	2.60
三峡水电站	3.28	2.70	3.40

由表2 计算结果可见,采用本文计算方法求得的结构极限承载力与模型试验法的误差分别为4.75%、6.54%和3.53%,误差较小,表明该算法具有良好的计算精度。由SLRCP 极限承载力迭代过程(图5)可知,本文计算方法不必经过多次弹性迭代分析即能准确得到管道结构的极限承载力,具有较高的计算效率。

3 结 语

本文针对钢衬钢筋混凝土压力管道的体形和承载特性,在弹性模量缩减法的基础上,提出了采用变截面拱和弹性中心法作为结构内力分析模型与方法,确定了表征该类管道结构截面承载状态的单元承载比表达式,进而给出了管道结构极限承载力分析的新方法。实例计算结果表明,该方法能够准确高效地得到SLRCP 的极限荷载,可为该类管道结构的整体安全评估提供理论依据,同时也可为其他拱式结构的极限承载力分析和安全评估提供新思路。

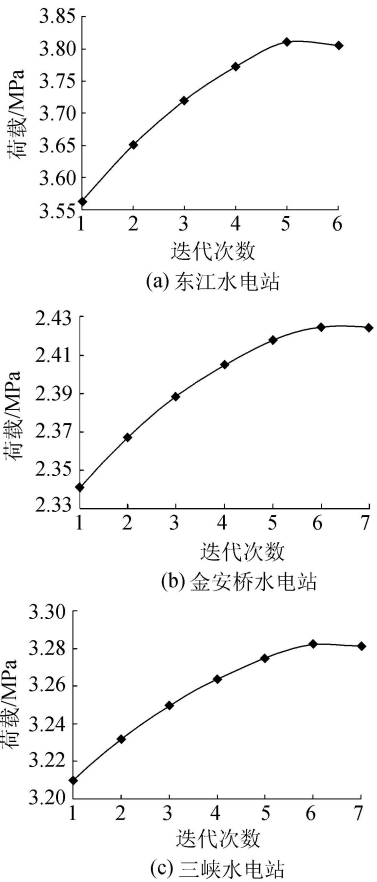


图5 SLRCP 极限承载力迭代过程

参考文献:

[1] DON Z R,ZHAO Q F,SONG C C,et al. Nonlinear analysis of steel liner-reinforced concrete penstocks[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,1990,112(1):57-64.

[2] 杨绿峰,张伟,韩晓凤. 水电站压力钢管整体安全评估方法研究[J]. 水力发电学报,2011,30(5):149-156. (YANG Lufeng,ZHANG Wei,HAN Xiaofeng. Integral safety evaluation method for steel penstocks of hydroelectric station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(5):149-156. (in Chinese))

[3] 张伟,付传雄,杨绿峰,等. 钢衬钢筋混凝土压力管道极限承载力分析的弹性迭代法[J]. 水力发电,2012,38

- (4): 17-20. (ZHANG Wei, FU Chuanxiong, YANG Lufeng, et al. Elastic iterative method for limit analysis of steel lining reinforced concrete penstocks [J]. Water Power, 2012, 38(4): 17-20. (in Chinese))
- [4] 蒋锁红, 夏忠, 谢小平. 水电站坝后背管工程技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 龚国芝, 张伟, 伍鹤皋, 等. 钢衬钢筋混凝土压力管道外包混凝土的裂缝控制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 51-56. (GONG Guozhi, ZHANG Wei, WU Hegao, et al. Study on crack control of concrete wall of steel lined reinforced concrete penstocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 51-56. (in Chinese))
- [6] 张伟, 伍鹤皋, 苏凯. ABAQUS 在大体积钢筋混凝土非线性有限元分析中的应用评述[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 70-74. (ZHANG Wei, WU Hegao, SU Kai. Review for application of ABAQUS in nonlinear FEM analysis of mass reinforced concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 70-74. (in Chinese))
- [7] 伍鹤皋, 黄小艳, 张启灵, 等. 水电站直埋蜗壳结构受力特性与承载力[J]. 天津大学学报, 2008, 41(7): 777-782. (WU Hegao, HUANG Xiaoyan, ZHANG Qiling, et al. Mechanical characteristics and bearing capacity of complete bearing spiral case in hydropower station [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(7): 777-782. (in Chinese))
- [8] 张运良, 张存慧, 马震岳. 三峡水电站直埋式蜗壳结构的非线性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 220-225. (ZHANG Yunliang, ZHANG Cunhui, MA Zhenyue. Nonlinear FEM analysis on stress and strain of directly-embedded large-scale spirals [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 220-225. (in Chinese))
- [9] MACKENZIE D, BOYLE J T, HAMILTON R. The elastic compensation method for limit and shakedown analysis: a review[J]. Journal of Strain Analysis, 2000, 35(3): 171-188.
- [10] CHEN L, LIU Y, YANG P, et al. Limit analysis of structures containing flaws based on a modified elastic compensation method[J]. European Journal of Mechanics A-Solids, 2008, 27(2): 195-209.
- [11] SESHADRI R, HOSSAIN M M. Simplified limit load determination using the m_α -tangent method[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(6): 443-451.
- [12] 张伟, 杨绿峰, 韩晓凤. 基于弹性补偿有限元法的无梁岔管安全评价[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1175-1183. (ZHANG Wei, YANG Lufeng, HAN Xiaofeng. Safety evaluation of shell type bifurcated pipes using elastic compensation finite element method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1175-1183. (in Chinese))
- [13] MAHMOOD S L, HADDARA M R, SESHADRI R. Limit loads of ship structure components using the elastic modulus adjustment procedure (EMAP) [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(16): 1452-1463.
- [14] YANG L F, YU B, QIAO Y P. Elastic modulus reduction method for limit load evaluation of frame structures[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, 22(2): 109-115.
- [15] 杨绿峰, 余波, 张伟. 弹性模量缩减法分析杆系和板壳结构的极限承载力[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 64-70. (YANG Lufeng, YU Bo, ZHANG Wei. The elastic modulus reduction method for load carrying capacity evaluation of frame plate and shell structures [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 64-70. (in Chinese))
- [16] 张伟, 杨绿峰, 卢文胜. 工程结构极限承载力上限分析的弹性模量缩减法[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 30-38. (ZHANG Wei, YANG Lufeng, LU Wensheng. Elastic modulus reduction method for the upper bound of ultimate bearing capacity of structures [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 30-38. (in Chinese))
- [17] YANG L F, ZHANG W, YU B, et al. Safety evaluation of branch pipe in hydropower station using elastic modulus reduction method[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(6): 1-7.

(收稿日期: 2013-04-27 编辑: 周红梅)

· 简讯 ·

第6届国际洪水管理大会将于2014年9月16—18日在巴西圣保罗召开

国际洪水管理大会(International Conference on Flood Management)原名为“国际防洪大会”(International Symposium on Flood Defense), 是具有国际影响力的防洪减灾研讨会, 至今已经连续举办了5届。第6届国际洪水管理大会(ICFM6)将于2014年9月16—18日在巴西圣保罗举行, 由巴西水资源协会(Brazilian Water Resource Association)承办。会议主题为“变化环境中的洪水”, 共设有7个议题: ①城市洪水; ②气候变化中的洪水; ③特大城市中的洪水风险管理; ④气候变化对洪水风险的影响; ⑤土地利用、洪水、泥石流与水土流失; ⑥洪水预报与早期预警系统; ⑦通过社区防灾预备建设防洪社会。有关会议详情可登录 <http://icfm6.com/> 查询。

(本刊编辑部供稿)