

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.04.021

若干规范无腹筋梁受剪承载力公式比较

于磊,车轶,宋玉普

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要 根据收集到的集中荷载作用下无腹筋钢筋混凝土梁受剪试验数据,讨论了混凝土强度、剪跨比、截面高度和纵筋配筋率等因素对无腹筋梁计算结果的影响。通过对比分析,定量评价了我国 GB 50010—2002 和 SL191—2008、美国 ACI318—05,以及加拿大 CSA A23.3—04 等规范的受剪承载力计算公式。研究表明,与 CSA A23.3-04 相比,根据试验数据建立的 GB50010—2002,SL191—2008 和 ACI318—05 等规范中受剪承载力公式的计算结果离散程度较大,并且采用后面 3 种规范公式计算有效高度大于 600 mm、纵筋配筋率小于 1.0% 的梁时,计算结果偏于不安全。

关键词 钢筋混凝土梁 剪切强度 受剪承载力 规范比较

中图分类号 :TU375.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)04-0090-05

Comparison among shear design formulae in different codes for beams without web reinforcement/YU Lei, CHE Yi, SONG Yu-pu (State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract : According to the collected test data of reinforced concrete beams without web reinforcement under concentrated loads, the influences of concrete strength, shear-to-span ratio, sectional depth and longitudinal reinforcement ratio on the calculated results of the beams were discussed. The shear design formulae from Chinese codes GB 50010—2001 and SL 191—2008, American code ACI 318—05 and Canadian code CSA A23.3—2004 were quantitatively evaluated and compared. The studies show that the empirical data-based formulae in Chinese and American codes present larger scattering of results than the formula in Canadian code. The former three formulae may lead to unsafe results when applied to the beams with the effective sectional depth greater than 600 mm and the longitudinal reinforcement ratio less than 1.0% .

Key words : reinforced concrete beam ; shear strength ; shear bearing capacity ; code comparison

钢筋混凝土梁的剪切破坏机理及抗剪强度理论是混凝土领域的基本问题之一。在 20 世纪,钢筋混凝土梁的受剪机理和受剪承载力计算方法研究取得了很大的进展,但问题还远未解决^[1-3]。目前多数国家规范如美国 ACI 318—05、欧洲规范、我国的 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》和 SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》等,仍然采用传统的经验或半经验受剪承载力计算公式。各公式之间不仅存在较大的差异,而且计算结果与试验值之间的相关性较差。近年来,多伦多大学学者和其他学者完成了一系列大尺寸无腹筋梁和厚板的剪切试验,研究结果表明:ACI 318—05 的抗剪强度计算公式对低纵筋率和截面尺寸效应考虑不足,大尺寸梁

的受剪承载力计算偏于不安全^[4-7]。国内的研究表明,GB 50010—2002 抗剪强度计算公式也存在对截面尺寸效应考虑不足、纵筋率小于 1.0% 的情况下可能偏于不安全等问题^[8]。

Vecchio 等^[9]提出的修正压力场理论中的模型(MCFT)是目前公认的较好的混凝土受剪理论模型之一。Bentz 等^[6]在该理论的基础上进一步提出了用于计算钢筋混凝土梁受剪承载力的简化计算方法(SMCFT),并被加拿大的 CSA A23.3—04 规范采用。与传统的以试验数据统计为基础的经验公式相比,该方法具有明确的理论背景,可以全面地反映各因素对混凝土抗剪性能的影响^[5-6]。

我国设计规范中的钢筋混凝土梁受剪承载力计

算公式主要是根据 20 世纪 60—80 年代国内外抗剪试验数据的统计分析得来的,其中大尺寸梁的试验数据较少,并且为了保证试件在发生剪切破坏之前不产生弯曲破坏,通常试件的纵筋配筋率要高于实际工程中梁的配筋率(1.0% ~ 1.5%),纵筋率大于 2% 的数据占总数的 60% 以上。因此利用最新的试验成果对我国规范公式的有效性进行进一步的验证,并与国外规范公式进行对比分析是十分必要的。

笔者收集了 1953—2008 年完成的无腹筋钢筋混凝土梁受剪试验数据,对 GB 50010—2002 和 SL 191—2008、美国 ACI 318—05 和加拿大 CSA A23.3—04 的受剪承载力计算公式进行了比较研究,并讨论了混凝土强度、剪跨比、截面高度和纵筋配筋率等因素对各国规范公式计算结果的影响。

1 各国规范受剪承载力计算公式

1.1 GB 50010—2002 和 SL 191—2008 公式

GB 50010—2002 规范考虑荷载形式的不同,分别给出无腹筋梁的受剪承载力计算公式^[10]:

集中荷载作用

$$V_c = \beta_h \frac{1.75}{\frac{a}{d} + 1} f_t b d \quad (1)$$

均布荷载作用

$$V_c = 0.7 \beta_h f_t b d \quad (2)$$

式中: V_c 为混凝土抗剪强度; a 为集中荷载到支座的剪跨长度; b 为截面宽度; d 为截面有效高度; a/d 为剪跨比; f_t 为混凝土抗拉强度设计值; β_h 为截面高度影响系数,反映了截面高度对受剪承载力的影响, $\beta_h = (800/d)^{1/4}$,当 $d < 800$ mm 时取 $d = 800$ mm,当 $d > 2\,000$ mm 时取 $d = 2\,000$ mm。

SL 191—2008 不考虑荷载形式对承载能力的影响,对集中荷载作用和均布荷载作用均采用式(2)进行计算,使得 V_c 计算公式得以简化^[11]。还规定,对于以承受集中力为主的重要独立梁,式(2)中的系数 0.7 改取为 0.5,即

$$V_c = 0.5 \beta_h f_t b d \quad (3)$$

需要指出的是,GB 50010—2002 和 SL 191—2008 均规定,按计算不需要配置抗剪钢筋的梁均应按构造配置箍筋,因此计算 V_c 时往往不考虑尺寸效应(取 $\beta_h = 1$),对厚板的计算则需考虑尺寸效应。

1.2 ACI 318—05 规范公式

ACI 318—05 沿用了 1962 年 ACI 委员会提出的公式,该公式是根据平均截面高度 340 mm 的钢筋混凝土梁的抗剪试验数据得出的,表达式如下^[12]:

$$V_c = \left(0.16 \sqrt{f_c'} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b d \leq 0.29 \sqrt{f_c'} b d \quad (4)$$

式中: f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度; ρ_w 为纵向受拉钢筋面积 A_s 与 bd 的比值(纵筋配筋率); M_u 和 V_u 分别为计算截面的弯矩和剪力。

1.3 CSA A23.3—04 公式

加拿大 CSA A23.3—04 的无腹筋梁的受剪承载力表示为^[13]

$$V_c = \beta \sqrt{f_c'} b d_v \quad (5)$$

$$\beta = \frac{0.4}{1 + 1\,500 \epsilon_x} \frac{1\,300}{1\,000 + s_{xe}} \quad (6)$$

$$\epsilon_x = \frac{\frac{M_u}{d_v} + V_u}{2 E_s A_s} \quad (7)$$

$$s_{xe} = \frac{35 s_x}{16 + a_g} \geq 0.85 s_x \quad (8)$$

式中: d_v 为截面内力臂; β 为反映开裂混凝土传递剪力能力的参数,由应变效应项和尺寸效应项两部分组成; ϵ_x 为截面 1/2 高度处的纵向应变,取纵向受拉钢筋应变的 1/2; s_{xe} 为等效裂缝间距系数; a_g 为骨料最大粒径,当 $f_c' \geq 70$ MPa 时, $a_g = 0$; s_x 为裂缝间距系数,取内力臂 d_v 和纵向受拉钢筋竖向间距的较小值。

GB 50010—2002,SL 191—2008 和 ACI 318—05 等规范公式均是根据对大量实验数据的统计分析得到的,具有计算公式直观、计算方便、易被工程师接受等优点;CSA A23.3—04 公式具有明确的理论背景,但计算比较复杂,需要进行迭代计算。

2 各国规范公式计算结果比较

笔者收集了 1953—2008 年完成的集中荷载下无腹筋梁的剪切破坏试验数据^[1,3-6],其中包括了多伦多大学近年来完成的一系列大尺寸无腹筋梁和厚板的受剪试验数据。收集数据中,梁高范围为 51 ~ 2100 mm,混凝土圆柱体抗压强度为 12.2 ~ 73.6 MPa,纵筋率为 0.14% ~ 6.64%,剪跨比为 2.41 ~ 8.03。

分别采用上述 4 种规范公式对所收集数据进行计算,其中 SL 191—2008 的公式采用式(3),受剪承载力计算值 V_{cal} 与试验值 V_{test} 比较见图 1。

CSA A23.3—04 公式 V_{cal}/V_{test} 的平均值为 0.90,变异系数为 0.19,计算值总体上略小于试验值,是几种方法中离散程度最小、计算精度最好的。GB 50010—2002 和 ACI 318—05 公式的 V_{cal}/V_{test} 平均值分别为 0.86 和 0.85,计算结果偏于保守,变异系数分别为 0.45 和 0.38,相比之下 GB 50010—2002 公式的计算离散程度较大。SL 191—2008 公式的 V_{cal}/V_{test} 平均值为 1.09,变异系数为 0.19,总体上略

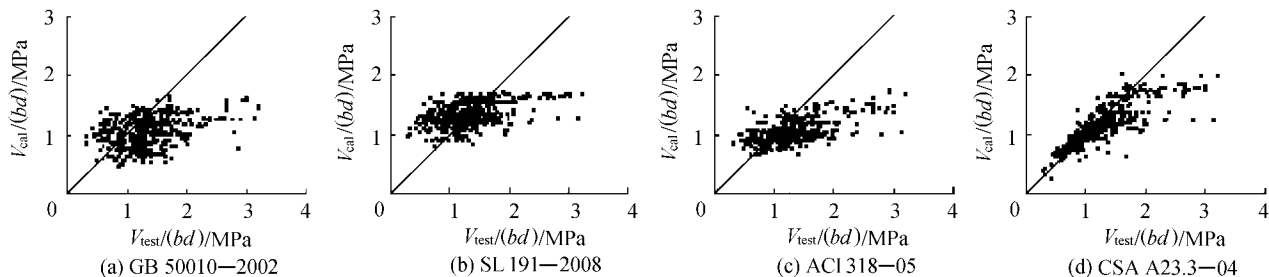


图1 各规范公式计算结果与试验值比较

高于试验值和 GB 50010—2002 公式的计算结果。SL 191—2008 对集中荷载作用和集中荷载作用采用统一的表达式,当剪跨比取 2.5 时,GB 50010—2002 集中荷载作用下的计算表达式(式(1))与 SL 191—2008 的(式(3))相同。而本文试验数据均为集中力作用,剪跨比为 2.41 ~ 8.03,相应地 GB 50010—2002 公式的系数 $1.75/(\lambda + 1) = 0.51 \sim 0.19$ 小于 SL 191—2008 公式的系数 0.5,因此 SL 191—2008 公式的计算结果总体大于 GB 50010—2002 公式的计算结果。

3 各因素对受剪承载力计算结果的影响

3.1 混凝土强度和剪跨比的影响

图 2 和图 3 分别给出了混凝土强度和剪跨比对受剪承载力计算结果的影响(图中 f_{cu} 表示混凝土立方体抗压强度, f_c 表示混凝土轴心抗压强度)。GB 50010—2002, SL 191—2008 和 ACI 318—05 公式

计算值虽然在某些区域离散性较大,但基本能够正确反映混凝土强度和剪跨比的影响。

3.2 截面高度的影响

修正压力场理论认为,无腹筋梁的受剪承载力尺寸效应主要是由于大尺寸梁在破坏时斜裂缝宽度变大,削弱了裂缝面上骨料咬合的作用,从而导致其破坏剪应力小于小尺寸梁。裂缝宽度的变化可以用纵向的钢筋应变和裂缝间距描述。此外,混凝土的骨料粒径也对斜裂缝面的剪力传递有影响。CSA A23.3—04公式通过式(6)中的尺寸效应项考虑了裂缝间距和骨料最大粒径的影响。GB 50010—2002 和 SL 191—2008 规定,当梁高大于 800 mm 时采用系数 β_h 考虑尺寸效应影响。

图 4 为截面有效高度对受剪承载力计算结果的影响。由图 4 可以看出,随着梁截面有效高度的增加,GB 50010—2002 公式和 SL 191—2008 公式的计算结果明显高于试验值,说明尽管引入了 β_h ,仍无

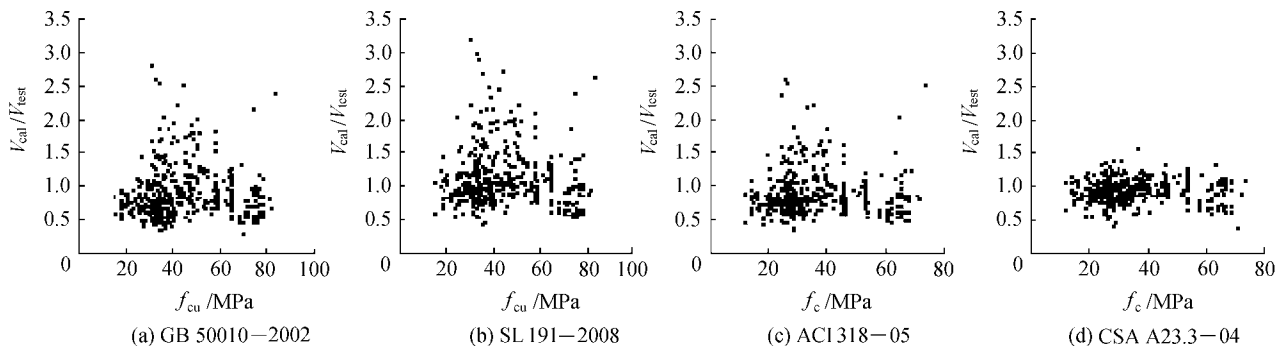


图2 混凝土强度对计算结果的影响

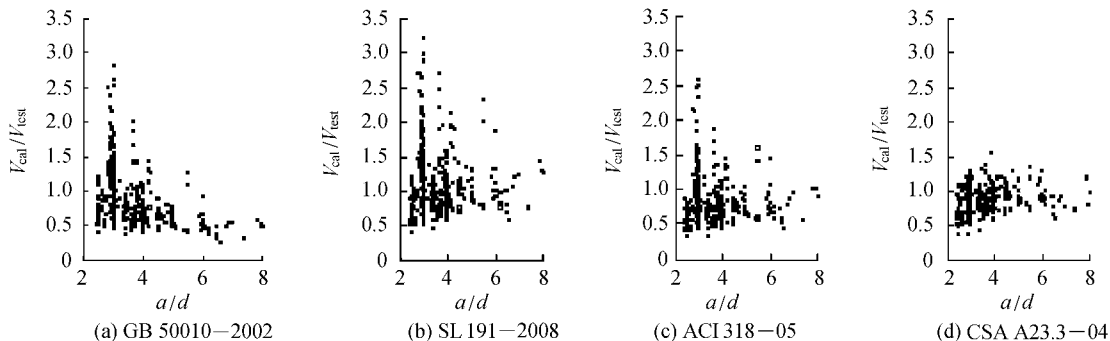


图3 剪跨比对计算结果的影响

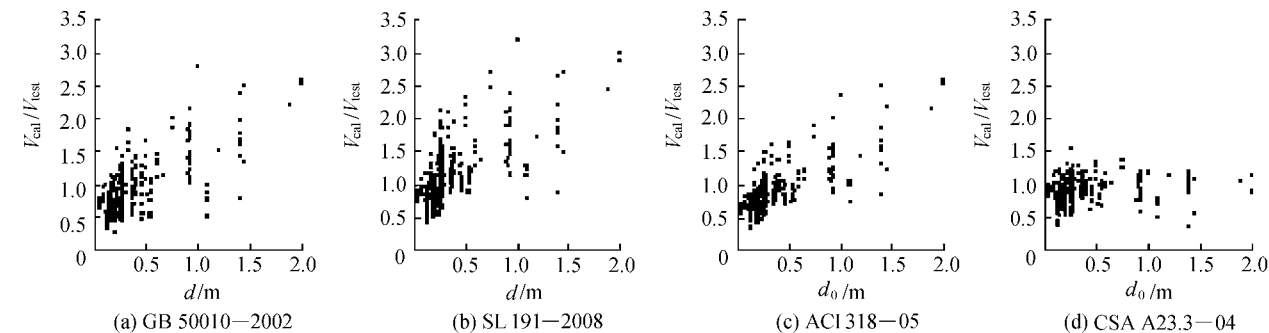


图 4 截面有效高度对受剪承载力计算结果的影响

法真实地反映大尺寸无腹筋梁的受剪承载力尺寸效应。ACI 318—05 公式同样没有很好地反映尺寸效应,而 CSA A23.3—04 公式能够较好地体现尺寸效应。

表 1 给出了采用各规范公式对不同梁高试件的分析结果。 $d \leq 600 \text{ mm}$ 时,GB 50010—2002 公式和 ACI 318—05 公式较保守; $d > 600 \text{ mm}$ 时,GB 50010—2002 公式、SL 191—2008 公式和 ACI 318—05 公式的计算结果均高于试验值,偏于不安全。

表 1 不同梁高的计算结果比较

规范名称	$V_{\text{cal}}/V_{\text{test}}$			
	$d \leq 600 \text{ mm}$		$d > 600 \text{ mm}$	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数
GB 50010—2002	0.77	0.33	1.55	0.39
SL 191—2008	1.00	0.31	1.80	0.31
ACI 318—05	0.78	0.27	1.44	0.31
CSA A23.3—04	0.87	0.19	0.97	0.21

3.3 纵筋配筋率的影响

纵筋配筋率是影响无腹筋梁抗剪性能的重要因素之一。我国规范公式虽然在形式上未包括纵筋配筋率项,但在建立公式时为了方便实际工程应用,采用剪力强度控制区及其下包线理论将纵筋配筋率项略去^[10]。CSA A23.3—04 计算公式中纵筋配筋率的影响体现在式(6)的应变项中。

图 5 为纵筋配筋率对受剪承载力计算结果的影响。由图 5 可以看出,随着配筋率的降低,GB 50010—2002,SL 191—2008 和 ACI 318—05 等规

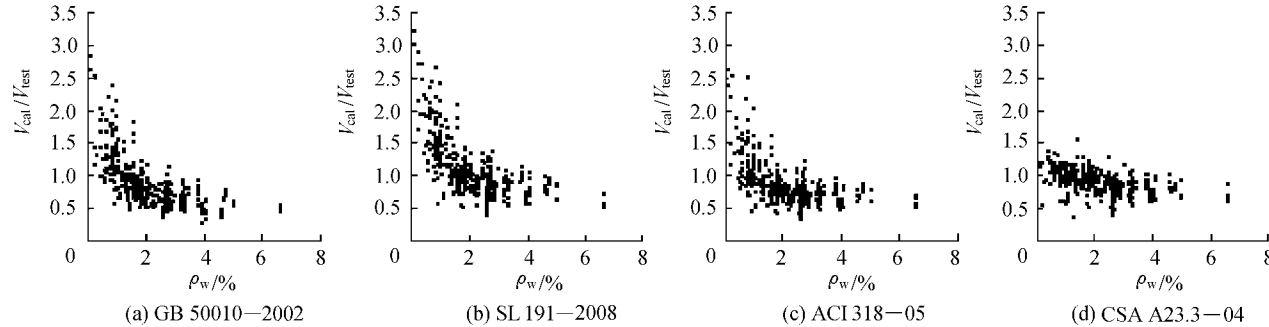


图 5 纵筋配筋率对受剪承载力计算结果的影响

范公式的计算结果偏于不安全,CSA A23.3—04 能较好地反映不同纵筋配筋率的影响。

表 2 为不同纵筋配筋率的计算结果。 $\rho_w \leq 1.0\%$ 时,GB 50010—2002,SL 191—2008 和 ACI 318—05 等规范公式的计算结果大于试验值,偏于不安全; $\rho_w > 1.0\%$ 时,GB 50010—2002 和 ACI 318—05 等规范公式又过于保守。

表 2 不同纵筋配筋率的计算结果比较

规范名称	$V_{\text{cal}}/V_{\text{test}}$			
	$\rho_w \leq 1.0\%$		$\rho_w > 1.0\%$	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数
GB 50010—2002	1.37	0.33	0.75	0.36
SL 191—2008	1.69	0.30	0.97	0.29
ACI 318—05	1.27	0.35	0.77	0.28
CSA A23.3—04	1.05	0.15	0.87	0.19

4 结 论

a. 采用 GB 50010—2002,SL 191—2008 和 CSA A23.3—04 规范公式对收集的纵筋配筋率为 $0.14\% \sim 6.64\%$ 、剪跨比为 $2.41 \sim 8.03$ 的集中荷载作用无腹筋梁试验数据进行分析,结果表明,CSA A23.3—04 规范公式 $V_{\text{cal}}/V_{\text{test}}$ 的平均值为 0.90,变异系数为 0.19,计算值总体略小于试验值,计算精度高、离散程度小,能取得较满意的计算结果;GB 50010—2002 和 ACI 318—05 规范公式的 $V_{\text{cal}}/V_{\text{test}}$ 平均值分别为 0.86 和 0.85,计算结果偏于保守,相比之下 GB 50010—2002 规范公式的计算离散程度

较大,SL191—2008 公式的 V_{cal}/V_{test} 平均值为 1.09,总体上计算值略高于试验值和 GB50010—2002 公式的计算结果。

b. GB50010—2002 和 SL191—2008 规范公式简单,便于工程应用,但对于 $d > 600\text{ mm}$ 和 $\rho_w \leq 1.0\%$ 的无腹筋梁,计算结果偏于不安全,对于无抗剪钢筋的厚板可能带来安全隐患。

参考文献：

[1] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土结构设计构造 35 年设计规范背景资料汇编[R]. 北京: 中国建筑科学研究院,1985.

[2] ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion. Recent approaches to shear design of structural concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1998,124:1375-1417.

[3] REINECK K H, KUCHMA D A, KIM K S, et al. Shear database for reinforced concrete members without shear reinforcement[J]. ACI Structural Journal,2003,100(2):240-249.

[4] COLLINS M P, KUCHMA D. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings [J]. ACI

Structural Journal,1999,96(4):482-490.

[5] SHERWOOD E G. One-way shear behavior of large, lightly reinforced concrete beams and slabs [D]. Toronto, Canada: University of Toronto,2008.

[6] BENITZ E C, VECCHIO F J, COLLINS M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements [J]. ACI Structural Journal, 2006,103(4):614-624.

[7] ZARAI S P D, PAPADAKIS G C. Diagonal shear failure and size effect in RC beams without web reinforcement [J]. Journal of Structural Engineering,2001,127:733-742.

[8] 张川,张百胜,黄建锋. 钢筋混凝土无腹筋简支梁的抗剪承载力研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(1):48-52.

[9] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. ACI Structural Journal,1986,83(2):219-231.

[10] GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S].

[11] SL191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].

[12] ACI318—05 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary [S].

[13] CSA A23.3—04 Design of Concrete Structures[S].

(收稿日期:2009-09-26 编辑:方宇彤)

(上接第 89 页)

[22] 尚松浩,毛晓敏,雷志栋,等. 计算潜水蒸发系数的反 Logistic 公式[J]. 灌溉排水,1999,18(2):18-21.

[23] 沈立昌. 关于潜水蒸发经验公式的探讨[J]. 水利学报,1985(7):34-40.

[24] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,等. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):49-53.

[25] 唐海行,苏逸深,张和平. 潜水蒸发的实验研究及其经验公式的改进[J]. 水利学报,1989(10):37-44.

[26] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 潜水稳定蒸发的分析与经验公式[J]. 水利学报,1984(8):60-64.

[27] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型[J]. 科学通报,2006,50(S1):36-41.

[28] TANJI K K, KIELEN N C. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas [M]. Rome:FAO, 2002.

[29] 孔凡哲,王晓赞. 利用土壤水吸力计算潜水蒸发初探

[J]. 水文,1997(3):44-47.

[30] 王振龙,刘森,李瑞. 淮北平原有无作物生长条件下潜水蒸发规律试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):26-32.

[31] 张书函,康绍忠,刘晓明,等. 农田潜水蒸发的饱和规律及其计算方法研究[J]. 西北水资源与水工程,1995,6(1):9-15.

[32] 孔凡哲,王晓赞. 有作物条件下潜水蒸发计算方法的实验研究[J]. 中国农村水利水电,2002(3):3-5.

[33] EAGLESON P S. Climate, soil and vegetation 3: a simplified model of soil moisture movement in the liquid phase [J]. Water Resources Research,1978,14(5):722-730.

[34] EAGLESON P S. Ecohydrology: darwinian expression of vegetation form and function [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2002.

[35] 周金龙,刘丰,侯江涛,等. 新疆平原非灌区自然植被生态耗水量的计算[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(4):162-165.

(收稿日期:2009-09-03 编辑:方宇彤)

·简讯·

2010 流域水安全与重大工程安全高层论坛将在南京举行

为了有效地预防或解决我国当前面临的日益突出的流域水安全和重大工程安全问题,中国工程院院士论坛——2010 流域水安全与重大工程安全高层论坛将于 2010 年 10 月 29—31 日在南京举行。本次论坛的主题是“流域水安全与重大工程安全”。主要议题有 ①流域旱涝灾变机理及水资源安全保障;②流域水生态环境演变与水质安全保障;③泥沙运动及河口海岸动力学;④河湖调水引流效应;⑤地震、地质灾害与重大工程安全;⑥重大工程安全检测、监测与监控;⑦重大工程安全与风险管理;⑧地下工程与基础设施安全。本次论坛由中国工程院土木、水利与建筑工程学部,国家自然科学基金委员会材料与工程科学部主办,河海大学、南京水利科学研究院、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心承办。

(本刊编辑部供稿)