

大体积混凝土结构构件最小配筋率

汪基伟, 陈思远, 冷 飞

(河海大学土木与交通学院, 江苏, 南京 210098)

摘要:通过回顾总结 SDJ20—78《水工混凝土结构设计规范》大体积混凝土结构构件配筋方法的演变过程,对比分析国内外各行业规范相关条文,研究条文依据的原理,提出新的大体积混凝土结构构件最小配筋率处理方法和相关条文建议。所提方法结合了现行 DL/T 5057—2009《水工混凝土结构设计规范》和 ACI 318—14《Building Code Requirements for Structural Concrete》的优点,使其既能保证 $\rho < \rho_{\min}$ 时所需钢筋用量为固定值,又能保证 $\gamma_d M$ 小于但靠近开裂弯矩 M_{cr} 时不会发生少筋破坏,且取消了 DL/T 5057—2009 规范大体积混凝土最小配筋率条文只适用于“卧置在地基上以承受竖向荷载为主、板厚大于 2.5 m 的底板”等限制。

关键词:水工结构;大体积混凝土结构构件;最小配筋率;设计规范

中图分类号:TV331 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)04-0069-06

Research on minimum reinforcement ratio of members in mass concrete structures//WANG Jiwei, CHEN Siyuan, LEN Fei (College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With reviewing and summarizing the evolution of the reinforcement methods for massive concrete structures in *Design Specification for Hydraulic Concrete Structures (SDJ 20-78)*, the regulations of the minimum reinforcement ratio of massive concrete in currently domestic and oversea codes of various industries are compared and analyzed, and the principles of relevant provisions are investigated. A new method to determine the minimum reinforcement ratio is presented and the recommendations on relevant provisions are made. The advantages of DL/T 5057-2009 and *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)* are combined skillfully in the suggested method, which guarantees that the amount of reinforcement is fixed when $\rho < \rho_{\min}$, ensures that the less reinforcement failure will not occur when $\gamma_d M$ is less than and close to the cracking moment M_{cr} . In addition, the limit that the minimum reinforcement ratio for massive concrete structures in DL/T 5057-2009 is only applicable to the bottom plate mounted on foundation and mainly subjected to vertical load with more than 2.5m thickness is eliminated.

Key words: hydraulic structure; members in mass concrete structures; minimum reinforcement ratio; design code

大体积钢筋混凝土结构构件(以下简称为大体积混凝土)的特点是尺寸大,而外力荷载却不大,按承载力计算所需的配筋率 ρ 常远小于最小配筋率 ρ_{\min} ,但按规定,钢筋面积应按最小配筋率 ρ_{\min} 乘以构件截面面积计算,这就造成了不必要的浪费。由于运用和稳定的要求,水工结构构件截面尺寸通常很大,厚度 1~2 m 的底板和墩墙十分常见,4~5 m 或以上的底板和墩墙也不少,因此水工大体积混凝土最小配筋率的正确制定是一个十分关键的问题,也是水工混凝土结构设计规范的特色。虽然每次规范修编都将此问题作为修编的重点,且每次都作了改进,但至今未能合理解决。本文对此进行研究,为正在进行的 DL/T 5057—2009《水工混凝土结构设

计规范》修编提供建议。

1 大体积混凝土定义

在水利工程中,有些结构构件称为大体积非杆系混凝土结构,其实大体积和非杆系是两个概念。前者是以尺寸大小作为标志,是指尺寸较大的混凝土结构构件,它的截面尺寸由运用和稳定要求控制,而不是由承载力要求决定;后者是以应力状态作为标志,与“杆系”相对应,截面应力呈非线性分布的为“非杆系”,反之为“杆系”。当然,在水利工程中常遇到尺寸大且截面应力为非线性分布的结构,所以我们常听到“大体积非杆系混凝土结构”这一名词。

非杆系结构的配筋设计方法可分为 2 类:①对

深受弯构件、牛腿、弧门支座等少数结构,已通过试验给出了极限承载力配筋公式,并规定了其最小配筋率。②对其他没有给出极限承载力配筋公式的非杆系结构,按弹性应力图面积计算钢筋用量,无最小配筋率要求;对重要结构还需采用钢筋混凝土有限元校核^[1]。

本文中的大体积混凝土是指尺寸大,但仍能简化为杆系,能按受弯、受压等构件进行配筋设计的结构构件;或已有极限承载力配筋公式的非杆系混凝土结构,即有最小配筋率要求的结构构件。

2 水工混凝土结构设计规范大体积混凝土配筋方法的演变

在我国最早的 SDJ 20—78《水工钢筋混凝土结构设计规范》^[2]中,大体积混凝土按少筋混凝土理论进行配筋设计。该理论认为,开裂弯矩 M_{cr} 作为少筋混凝土梁的第一道强度保证,即使存在偶然缺陷使混凝土提前开裂,它还可以由钢筋来承受破坏弯矩 M_u 形成第二道强度保证,这就是所谓的“双强度保证”。正是由于有“双强度保证”,少筋混凝土梁防止达到 M_{cr} 的安全系数 K_1 可小于素混凝土梁所要求的安全系数,防止达到 M_u 的安全系数 K_g 可小于钢筋混凝土梁的安全系数。 K_g 允许降低的程度与 K_1 有关, K_1 越小 K_g 就需越大,反之亦然。

少筋混凝土理论概念复杂,不易被工程师理解。特别是上世纪 80 年代后,我国规范普遍采用概率极限状态原则,而少筋混凝土理论的“双强度保证”的可靠度各是多少无法确定。因此,DL/T 5057—1996《水工混凝土结构设计规范》^[3]不再采用少筋混凝土理论,规范编制组转而研究其他方法来解决大体积混凝土采用固定最小配筋率时尺寸越大配筋越多的问题。

干城^[4]提出临界高度 h_{cr} 的概念,并以少筋混凝土配筋的上限 $K_1 = K_g$ 来确定 h_{cr} 。所谓临界高度就是承载力计算所需的配筋率 ρ 正好等于最小配筋率 ρ_{min} 时的截面高度 h 。对于受弯构件 $K_1 = \frac{\gamma f_1 b h^2}{(6M)}$,由 $K_1 = K_g$,并写成现行 L/T057—2009《水工混凝土结构设计规范》^[5]的形式:

$$h_{cr} = \sqrt{\frac{6K_g M}{\gamma f_1 b}} = \sqrt{\frac{6\gamma_d M}{\gamma f_1 b}} \quad (1)$$

式中: γ_d 为结构系数; M 为弯矩设计值; γ 为受拉区混凝土塑性影响系数; f_1 为混凝土抗拉强度设计值; b 为截面宽度。

取受拉钢筋面积 $A_s \geq \rho_{min} b h_{cr}$,这样在荷载和材料强度为一定的条件下, A_s 将保持为一常值,不再

随截面高度的增大而增大。

周氏等^[6]提出对于卧置地基上的厚板及墩墙,当 $\rho < \rho_{min}$ 时,其受拉钢筋实际采用最小配筋率可由 ρ_{min} 再乘以一个小于 1 的系数(荷载效应值与截面实际极限承载力的比值)得到。对于受弯和大偏压构件的受拉钢筋,该系数为 $\gamma_d M/M_u$;对于轴压和小偏压构件的受压钢筋,该系数为 $\gamma_d N/N_u$ 。其中, M_u 为受弯构件截面实际极限弯矩; N 和 N_u 分别为偏压构件轴力设计值和实际极限轴力。该方法被 L/T 57—1996 采用。

DL/T 5057—2009 仍采用周氏等^[6]提出的方法,但为了使用方便,直接给出了最小钢筋用量的计算公式;同时,由于不少工程设计人员反映 DL/T 5057—1996 中所谓的“大体积结构”和“截面厚度很大的构件”,其尺度很难掌握,希望能给出一个统一的标准,DL/T 5057—2009 规定板厚或墙厚超过 2.5 m 的构件属于“截面厚度很大的构件”。如此有以下规定:

a. 卧置在地基上以承受竖向荷载为主、板厚大于 2.5 m 的底板,当 $\rho < \rho_{min}$ 时,应配置的最小纵向受拉钢筋截面面积 A_s 可按照式(2)近似计算,但每米宽度内的钢筋面积不小于 2500 mm²。

$$A_s = \sqrt{\frac{\gamma_d M \rho_{min} b}{f_y}} \quad (2)$$

式中: f_y 为钢筋抗拉强度设计值。

b. 截面厚度大于 2.5 m 的大偏心受压墩墙,当 $\rho < \rho_{min}$ 时,应配置的最小竖向受拉钢筋截面面积 A_s 可按式(2)计算,但式中的 M 用 $N e_0$ 代替,其中 e_0 为轴压力至截面重心的距离。

c. 截面厚度大于 2.5 m 的轴心受压或小偏心受压墩墙,当 $\rho < \rho_{min}$ 时,全部竖向钢筋的最小截面面积 A'_s 可按式(3)计算,但沿周长每米钢筋面积不得少于 1000 mm²。

$$A'_s = \rho_{min} \frac{\gamma_d N}{f_c} \quad (3)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值。

3 国内外其他混凝土结构设计规范对大体积混凝土最小配筋率的规定

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 版)^[7]对大体积混凝土最小配筋率的规定有两条:

①卧置于地基上的混凝土板,板中受拉钢筋的最小配筋率可适当降低,但不应小于 0.15%;②结构中次要的钢筋混凝土受弯构件,当构造所需截面高度远大于承载的需求时,其纵向受拉钢筋的配筋率可按 $\rho \geq h_{cr}/h \rho_{min}$ 计算,其中 h_{cr} 为构件截面的临界高

度,采用式(4)计算,且取 $h_{cr} \geq 0.5h$; h 为截面高度。

$$h_{cr} = 1.05 \sqrt{\frac{M}{\rho_{\min} f_y b}} \quad (4)$$

JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[8]规定,对截面尺寸由抗倾、抗滑、抗浮或布置要求等条件确定的大体积混凝土受弯构件和刚性墩台的纵向受力钢筋最小配筋率可不受 ρ_{\min} 的限制,但其受拉钢筋配筋率不得小于 0.05%;厚度大于 4 m 的构件每米宽度内的钢筋面积不得少于 2500 mm²。

ACI 318—14《Building Code Requirements for Structural Concrete》^[9]给出了大尺寸梁和受压柱最小配筋率的处理方法:①若每个截面所配置的 A_s 均比分析所需的钢筋用量大 1/3,则不必满足 ρ_{\min} 要求;②当柱的截面尺寸大于承载力要求时,在非高地震风险区可以折减面积来确定最小配筋量,该折减面积应不小于总截面面积的一半。

EN 1992-1-1:200^[10]规定,对于允许发生脆性破坏的次要构件, ρ_{\min} 可取承载能力极限状态要求的 1.2 倍。

另外,JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[11]未给出大体积混凝土最小配筋率的处理方法。SL 191—2008《水工结构混凝土结构设计规范》^[12]对大体积混凝土最小配筋率的规定与 DL/T 5057—2009 相同,只是表达形式上有所差别,SL 191—2008 采用安全系数表达,DL/T 5057—2009 采用分项系数表达。

4 大体积混凝土最小配筋率处理方法的对比

4.1 受弯构件

对大体积混凝土受弯构件,最小配筋率要求可归纳为下列 4 种处理方法。

a. 临界高度法:包括 GB 50010—2010 的临界高度法和干城^[4]提出的临界高度法,其中 GB 50010—2010 取 $h_{cr} \geq 0.5h$ 作为临界高度的下

限,且只适用于次要建筑物。

b. 荷载效应与极限承载力比值法:DL/T 5057—2009 和 SL 191—2008 采用,只适用于卧置在地基上以承受竖向荷载为主、板厚大于 2.5 m 的底板。

c. 计算面积加大法:ACI 318—14 和 EN 1992-1-1:200 采用。其中,ACI 318—14 对计算钢筋面积加大 1/3;EN 1992-1-1:200 加大 20%,只适用于次要建筑物。

d. 固定最小配筋率:JTS 151—2011 采用。 $\rho \geq 0.05\%$ 和 $A_s \geq 2500 \text{ mm}^2/\text{m}$ (底板厚 > 4.0 m) 时作为钢筋用量的下限。

表 1 以 DL/T 5057—2009 的表达式形式列出各方法的计算公式,以便对各方法进行比较。表中各方法的公式均满足按承载力计算得到的钢筋用量 $A_{s, \text{计}} < \rho_{\min} b h_0$ 的条件,其中 h_0 为截面有效高度。

取一厚板承受 $M = 300 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $\rho_{\min} = 0.15\%$ 。C25 混凝土, $f_c = 11.9 \text{ MPa}$; HRB400 钢筋, $f_y = 360 \text{ MPa}$; $h_0 = h - 50 \text{ mm}$, 截面宽度 $b = 1.0 \text{ m}$, 截面高度 h 从 0.5 m 以 0.5 m 的增幅增加到 6.0 m, 按表 1 所列各方法计算其受拉钢筋的面积 A_s 随截面高度 h 的变化如图 1 所示。其中, $h \leq 1.0 \text{ m}$ 时 $\rho \geq \rho_{\min}$, $h \geq 1.5 \text{ m}$ 时 $\rho < \rho_{\min}$ 。

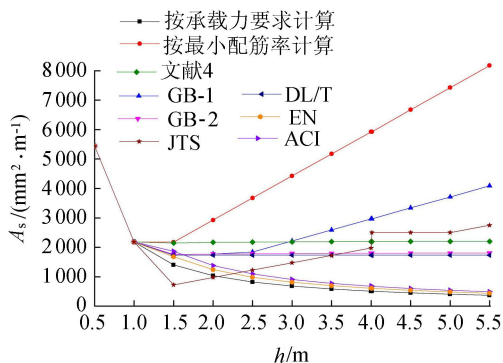


图 1 受弯构件各 ρ_{\min} 处理方法计算结果

表 1 大体积混凝土受弯构件最小配筋率 ρ_{\min} 处理方法公式汇总

方法	具体方法简称	计算公式	其他说明
临界高度法	GB-1	$h_{cr} = 1.05 \sqrt{\frac{\gamma_d M}{\rho_{\min} f_y b}} (h_{cr} \geq 0.5h), \rho_s \geq \frac{h_{cr}}{h} \rho_{\min}, A_s = \rho_s b h_0$	GB 50010—2010 采用。为方便与其他方法比较,取 $A_s = \rho_s b h_0$
	GB-2	$h_{cr} = 1.05 \sqrt{\frac{\gamma_d M}{\rho_{\min} f_y b}}, \rho_s \geq \frac{h_{cr}}{h} \rho_{\min}$	取消 $h_{cr} \geq 0.5h$ 的限制
	文献[4]	$h_{cr} = \sqrt{\frac{6\gamma_d M}{\gamma_m f_y b}}, \rho_s \geq \frac{h_{cr}}{h} \rho_{\min}, A_s = \rho_s b h_0$	取 $\gamma_m = 1.55$
荷载效应与极限承载力比值法	DL/T	$A_s = \sqrt{\frac{\gamma_d M \rho_{\min} b}{f_y}}$	DL/T 5057—2009 采用
	ACI	$A_s = 4/3 A_{s, \text{计}}$	ACI 318—14 采用
计算面积加大法	EN	$A_s = 1.2 A_{s, \text{计}}$	EN 1992-1-1:200 采用
	JTS	$\rho \geq 0.05\%$ 和 $A_s \geq 2500 \text{ mm}^2/\text{m}$ (底板厚 > 4.0 m)	JTS 151—2011 采用

从图 1 可以看到:

a. 当 $\rho \geq \rho_{\min}$ 时, 随截面高度 h 的增加, A_s 减小; 当 $\rho < \rho_{\min}$ 时, 若仍按 ρ_{\min} 配筋, 则 A_s 随 h 的增加不断增大。

b. 当 $\rho < \rho_{\min}$ 时, JTS (JTS151—2011 方法) 以 $\rho \geq 0.05\%$ 和 $A_s \geq 2500 \text{ mm}^2/\text{m}$ (底板厚 $> 4.0 \text{ m}$) 为 A_s 的下限, 使得 A_s 先随 h 的增加而增大, 在 $h=4 \text{ m}$ 处 A_s 有一个突然增加, 从 $2000 \text{ mm}^2/\text{m}$ 突增到 $2500 \text{ mm}^2/\text{m}$; 随后进入水平线, 再又随 h 的增加而增大。

c. GB-2 (GB 50010—2010) 方法取消 $h_{cr} \geq 0.5h$ 的限制后、文献 [4] 和 DL/T (DL/T 5057—2009 方法) 3 种方法, 当 $\rho < \rho_{\min}$ 时, A_s 和 h 关系为水平线, 即 A_s 保持常量, 不随 h 增大而增大。当 $\rho < \rho_{\min}$ 时, GB-2 和文献 [4] 认为 A_s 可由 ρ_{\min} 乘以承载力所需的混凝土截面面积 bh_{cr} (而不是构件原有的全截面面积 bh) 确定, 是对截面面积打了折扣而保持最小配筋率不变; 而 DL/T 认为 A_s 可由折减后配筋率 ρ_{\min} 乘以全截面面积 bh 确定, 是对配筋率打了折扣而保持截面面积不变。两种方法形式不同, 但实质是相同的, 都认为当 $\rho < \rho_{\min}$ 时多余的截面面积是无用的, 不参与抵抗荷载效应, 而只产生自重荷载效应。GB-2 和 DL/T 计算结果十分接近, GB-2 略大于 DL/T, 且截面高度 h 越大两者 A_s 相差越多一些。这是因为 GB-2 求 h_{cr} 时假定 $h_0 = 0.95h_0$, 当 $h > 1000 \text{ mm}$ 后 $h_0 = 0.95h_0$ 就小于 $h_0 = h - 50 (\text{mm})$, 且 h 越大 $h_0 = 0.95h_0$ 小于 $h_0 = h - 50$ 越多。文献 [4] 得到的 A_s 大于 GB-2 和 DL/T, 这可能是由于前者采用的混凝土抗拉强度 f_t , 后者采用的抗压强度 f_c 引起的。

d. ACI (ACI318—14 方法) 和 EN (EN1992-1-1: 200 方法) 方法, 当 $\rho < \rho_{\min}$ 后, 随 h 的增加 A_s 减小, 只不过 ACI 的 A_s 大于 EN 的。这 2 种方法出发点是相同的, 它认为当 $\rho < \rho_{\min}$ 时多余的截面面积是有用的, 能参与抵抗荷载效应, 这与 GB-2 和 DL/T 等方法完全不同。由于当 $\rho < \rho_{\min}$ 后, 截面受压区高度 x 很小, 承载力计算公式可写为

$$\gamma_d M \leq M_u = A_s f_y (h_0 - 0.5x) \approx A_s f_y h_0 \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, ACI318—14、EN 1992-11: 200 将承载力计算得到 $A_{s, \text{计}}$ 加大 1/3 和 20%, 其实就是加大弯矩设计值以保证承载力安全。

e. 由于 GB-1 (GB 50010—2010 方法) 采用了 $h_{cr} \geq 0.5h$ 的限制条件, 使得 $\rho < \rho_{\min}$ 后 A_s 和 h 关系先为水平线, 然后 A_s 又随 h 增大而增大, 和该方法最初的出发点不符。

4.2 受压构件

对于受压构件, 只有 DL/T 5057—2009 和 SL 191—2008、ACI318—14 给出了处理方法, 其中 DL/

T5057—2009 和 SL 191—2008 给出了具体公式, 其原理仍是和受弯构件一样, 采用折算最小配筋率, 它等于 ρ_{\min} 乘以一个小于 1.0 系数 (设计轴压力和极限轴压力的比值); ACI 318—14 规定则比较笼统, 规定可采用不小于总截面面积的一半的折减面积来确定最小配筋量。

5 本文大体积混凝土最小配筋方法

对于受弯构件, 设置最小配筋率最主要的原因是要保证构件不发生少筋破坏。从上面的比较可知, 在现行规范中对大体积混凝土结构构件最小配筋率比较可行的处理方法是 DL/T 5057—2009 (SL 191—2008) 和 ACI 318—14 采用的方法。

ACI318—14 的优点是: 将设计弯矩 $\gamma_d M$ 加大 1/3 后, 能保证原设计弯矩 $\gamma_d M$ 小于但大于 2/3 开裂弯矩 M_{cr} ($2/3 M_{cr} \leq \gamma_d M < M_{cr}$) 的结构构件, 若发生小于 1/3 的超载 (这里的超载是指荷载超过其设计值), 仍能保证 $\gamma_d M \leq M_{cr}$, 构件不发生少筋破坏。缺点是: 随截面尺寸的增加, 所需钢筋用量越来越少。由于人们一般认为“钢筋混凝土结构的配筋量应有一个起码的要求, 不然其性能与无筋的素混凝土结构相差无几”, 因此过少的钢筋用量会给人不安全的感。另外, 当 $\gamma_d M$ 靠近 M_{cr} 时, 以及 $\gamma_d M < 2/3 M_{cr}$ 后仍将 $\gamma_d M$ 加大 1/3, 显然是没有必要的。

DL/T 5057—2009 的优点是: 能保证 $\rho < \rho_{\min}$ 时所需钢筋用量不再变化, 为固定值, 构件有一个起码的钢筋用量, 给人以安全的感。但实际上, 按此方法设计, 当原设计弯矩 $\gamma_d M$ 小于但靠近 M_{cr} 时, 若发生少许超载就会使 $\gamma_d M > M_{cr}$ 引起构件开裂, 而这时构件的配筋率 $\rho < \rho_{\min}$ 从而发生少筋破坏。所以在 DL/T 5057—2009 中, 该方法只适用于卧置在地基上以承受竖向荷载为主的底板, 因为地基板即使发生少筋开裂也不会发生突然的失效。

本文方法结合 DL/T 5057—2009 和 ACI 318—14 两者的优点, 既能保证 $\rho < \rho_{\min}$ 时所需钢筋用量为固定值, 又能保证 $\gamma_d M$ 小于但靠近 M_{cr} 时不会发生少筋破坏。如此, 可将“卧置在地基上以承受竖向荷载为主、板厚大于 2.5 m 的底板”扩展到所有的受弯构件。在讨论具体方法前, 先来讨论 $\gamma_d M$ 、 M_{cr} 、 ρ 和 ρ_{\min} 之间的关系。

当 $\gamma_d M = M_{cr}$ 时, 按承载力要求计算得到配筋率 ρ 就为最小配筋率 ρ_{\min} , 有 $M_{cr} = \rho_{\min} b h_0 f_y (h_0 - 0.5x_{cr})$; 因而, 当 $\gamma_d M = \zeta_s M_{cr}$ ($\zeta_s \leq 1$) 时, 有

$$\gamma_d M = \rho b h_0 f_y (h_0 - 0.5x) = \zeta_s M_{cr} = \zeta_s \rho_{\min} b h_0 f_y (h_0 - 0.5x_{cr}) \quad (6)$$

当 $\rho < \rho_{\min}$ 时, 受压区高度 x 很小, 近似认为 ($h_0 -$

$0.5x) = (h_0 - 0.5x_{cr})$, 由上式得

$$\rho = \zeta_s \rho_{\min} \quad (7)$$

式(7)说明, $\gamma_d M = \zeta_s M_{cr} (\zeta_s \leq 1)$ 时, 按承载力要求计算得到配筋率 ρ 和设计弯矩 $\gamma_d M$ 近似按相同的比例变化, 即可近似用 ρ 和 ρ_{\min} 的比值表示 $\gamma_d M$ 和 M_{cr} 的比值。

为实现“既能保证 $\rho < \rho_{\min}$ 时所需钢筋用量为固定值, 又能保证 $\gamma_d M$ 小于但靠近开裂弯矩 M_{cr} 时不会发生少筋破坏”的目的, 对发生 $\zeta_s \rho_{\min} < \rho < \rho_{\min}$, 也就是 $\zeta_s M_{cr} < \gamma_d M < M_{cr}$ 的情况, 将设计弯矩 $\gamma_d M$ 乘一加大系数 γ_s , 参考 ACI 318—14 的规定, 取 $\gamma_s = 1.35$, 相当将设计弯矩 $\gamma_d M$ 加大 1/3, 即: 当 $\zeta_s \rho_{\min} < \rho < \rho_{\min}$, 应配置的最小纵向受拉钢筋截面面积 A_s 为:

$$A_s = \sqrt{\frac{\gamma_s \gamma_d M \rho_{\min} b}{f_y}} \leq \rho_{\min} b h_0 \quad (8)$$

通过反复试算发现 $\zeta_s = 0.65$ 较为合适, 图 2 给出了本文方法和 ACI 方法对梁、板的计算结果。其中, 弯矩设计值 $M = 300 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 钢筋采用 HRB400, 混凝土强度等级取 C20、C25、C30、C35 4 种水工结构常用的等级, 截面高度 h 从 1.0 m 以 0.50 m 的增幅增加到 3.0 m, 板、梁 ρ_{\min} 分别为 0.15% 和 0.20%。在计算时, 对 ACI 318—14 方法也采用 $A_s \leq \rho_{\min} b h_0$ 的规定。从图 2 知: ①由于混凝土强度对承载力影响小, C20、C25、C30 和 C35 的计算曲线十分接近。②对于板, 当承载力要求的配筋率与最小配筋率的比值 ρ/ρ_{\min} 大于 0.75 左右时, 本文方法和 ACI 318—14 钢筋用量完全相同; 当 ρ/ρ_{\min} 在 0.65 ~ 0.75 左右范围时, 两者钢筋用量相差不多, 本文方法比 ACI 318—14 最多小 7% 左右; ρ/ρ_{\min} 小于 0.65 时, 本

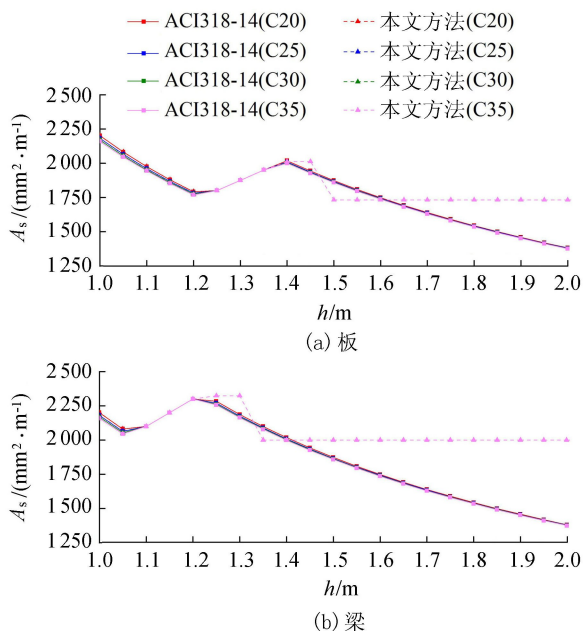


图 2 本文方法和 ACI 方法计算结果对比

文方法钢筋用量保持不变, 而 ACI 318—14 则随截面高度 h 的增加而减小。对于梁也有类似的规律。

6 新编规范大体积混凝土结构最小配筋率的建议

根据前面的讨论, 建议新编规范大体积混凝土结构最小配筋率可按下列方法处理:

a. 截面高度大于 1.5 m 的受弯构件, 当按受弯承载力计算得出的纵向受拉钢筋配筋率 ρ 小于最小配筋率 ρ_{\min} 时, 其最小配筋率 ρ_{dmin} 可由式(9)求得, 也可直接按式(9)近似求得其最小纵向受拉钢筋截面面积 A_s 。

$$\rho_{\text{dmin}} = \frac{\gamma_s \gamma_d M}{M_u} \leq \rho_{\min} \quad (9)$$

$$A_s = \sqrt{\frac{\gamma_s \gamma_d M \rho_{\min} b}{f_y}} \leq b h_0 \rho_{\min} \quad (10)$$

式中: γ_s 为弯矩加大系数, 对于卧置地基上或按受弯承载力计算得出的纵向受拉钢筋配筋率 $\rho < 0.65 \rho_{\min}$ 的受弯构件取 $\gamma_s = 1.0$, 其余取 $\gamma_s = 1.35$ 。

b. 截面高度大于 1.5 m 的受压构件, 当按承载力计算得出的竖向钢筋的配筋率 ρ 小于规定的最小配筋率 ρ_{\min} 时, 其最小配筋率 ρ_{dmin} 可由式(11)求得, 也可按式(12)或式(13)近似求得其最小竖向钢筋截面面积。

$$\rho_{\text{dmin}} = \frac{\gamma_d N}{N_u} \leq \rho_{\min} \quad (11)$$

大偏心受压构件:

$$A_s = \sqrt{\frac{\gamma_d N e' \rho_{\min} b}{f_y}} \quad (12)$$

小偏心受压和轴心受压构件:

$$A'_s = \frac{\gamma_d N \rho_{\min}}{f_c} \quad (13)$$

式中: e' 为轴压力至混凝土受压合力作用点的距离。

c. 截面高度大于 1.5 m 的受弯构件, 每米宽度内的纵向受拉钢筋截面面积不宜小于 1500 mm^2 ; 截面厚度大于 1.5 m 的受压构件, 沿周长每米钢筋面积不宜少于 1500 mm^2 。

d. 和 DL/T 5057—2009 相比, 有以下几点变化: ①同时列出 ρ_{dmin} 计算公式和钢筋面积近似计算公式, 以方便规范使用者更好地理解条文的实质。②不再限制于卧置在地基上以承受竖向荷载为主的底板, 而扩大到所有受弯构件和偏压构件。③对受弯构件引入了弯矩加大系数 γ_s , 以保证 $\gamma_d M$ 小于但靠近 M_{cr} 时不会发生少筋破坏。④将大体积混凝土构件 2.5 m 厚的划分减小到 1.5 m。从理论上讲, 本文方法对构件的尺寸大小是没有要求的, 只要按承

承载力计算得出的配筋率 ρ 小于最小配筋率 ρ_{\min} 就能适用,但考虑到若截面尺寸太小,采用该条文进行计算没有太大的经济效益;以及用于确定最小配筋用量,条文第 3 款的规定就是按 0.10% 的配筋率和 1.5 m 厚的构件得出的。

参考文献:

[1] 汪基伟,张雄文. 水工钢筋混凝土结构有限元设计计算原则[J]. 水利水电科技进展,2005,25(5):44-47. (WANG Jiwei, ZHANG Xiongwen. Calculation principle for finite element design of hydraulic reinforced concrete structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(5): 44-47 (in Chinese))

[2] 中华人民共和国水利电力部. 水工钢筋混凝土结构设计规范:SDJ20—78 [S]. 北京:中国标准出版社,1978.

[3] 中华人民共和国电力工业部. 水工结构混凝土设计规范:DL/T 5057—1996 [S]. 北京:中国标准出版社,1996.

[4] 干城. 水工大体积矩形截面纯弯构件的配筋计算[J]. 西北水电,1991(2):18-20. (GAN Cheng. Reinforcement calculation of large rectangular section pure bending members of hydraulic engineering [J]. Northwest Hydropower, 1991 (2): 18-20. (in Chinese))

[5] 中华人民共和国国家能源局. 水工结构混凝土设计规范:DL/T 5057—2009 [S]. 北京:中国标准出版社,

2009.

[6] 周氏,陈礼和. 水工钢筋混凝土构件最小配筋率的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),1992,20(1):44-51. (ZHOU Di, CHEN Lihe. Study on the Minimum Reinforcement Ratio of Hydraulic Reinforced Concrete Members [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1992, 20 (1): 44-51. (in Chinese))

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范(2015年版):GB 50010—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[8] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011 [S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[9] American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete: ACI 318-14 [S]. Farmington Hills; American Concrete Institute, 2014.

[10] European Committee for Standardization. 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for buildings: BS-EN-1992-1-1 [S]. London: European Committee for Standardization, 2004.

[11] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTGD62—2004 [S]. 北京:人民交通出版社,2004.

[12] 中华人民共和国水利部. 水工结构混凝土设计规范:SL 191—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.

(收稿日期:2019-03-18 编辑:郑孝宇)

(上接第 55 页)

[17] 曹卫东,张晓娣,施卫东. 采用径向回流平衡孔的低比转速离心泵压力脉动特性[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5):23-26. (CAO Weidong, ZHANG Xiaoti, SHI Weidong. Pressure fluctuation performance of low specific-speed centrifugal pump with radial reflux balance hole [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 23-26. (in Chinese))

[18] SMIRNOV P E, MENTER F R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term [J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(4): 1-8.

[19] SPALART P R, SHUR M. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature[J]. Aerospace Science and Technology, 1997, 1(5): 297-302.

[20] 张强,杨永. Spalart 的曲率修正方法在 SST $k-\omega$ 模型中的应用[J]. 西北工业大学学报,2013,31(3):392-396. (ZHANG Qiang, YANG Yong. Implementation and verification of spalart's rotation/curvature correction method for SST $k-\omega$ turbulence model [J]. Journal of

Northwestern Polytechnical University, 2013, 31 (3): 392-396. (in Chinese))

[21] 郭婧. 叶顶间隙泄漏涡流及空化流场特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.

[22] 郑源,陈宇杰,张睿,等. 轴流泵失速工况下非定常流动特性研究[J]. 农业机械学报,2017,48(7):127-135. (ZHENG Yuan, CHEN Yujie, ZHANG Rui, et al. Analysis on unsteady stall flow characteristics of axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (7): 127-135. (in Chinese))

[23] 杨帆,汤方平,刘超,等. 大型立式蜗壳混流泵装置非定常湍流特性分析[J]. 水力发电学报,2014,33(5):204-210. (YANG Fan, TANG Fangping, LIU Chao, et al. Analysis on unsteady turbulence characteristics of large-scale volute mixed-flow pump system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33 (5): 204-210. (in Chinese))

(收稿日期:2018-05-20 编辑:郑孝宇)