李守巨,于申,刘军豪.轴力对混凝土管片极限承载力影响的计算模型[J].煤炭学报,2017,42(1):236-241.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0403
Li Shouju,Yu Shen,Liu Junhao.Computing model for influence of axial force on ultimate bearing performance of concrete segments[J].Journal of China Coal Society,2017,42(1):236-241.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0403

轴力对混凝土管片极限承载力影响的计算模型

李守巨,于 申,刘军豪

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对混凝土管片受压区高度小和受压区钢筋未达到屈服极限问题,提出了混凝土管片极限承载力计算模型。在轴力和弯矩共同作用下,将混凝土管片简化为偏心受压柱,建立了管片截面力平衡和弯矩平衡表达式。基于管片截面平面变形假定,建立了受压区钢筋应力与受压区高度和混凝土极限应变之间的关系。通过 2 个地铁隧道管片工程算例,分析讨论了轴力对受压区高度、受压区钢筋应力和管片极限承载力的影响。研究表明,混凝土管片的极限弯矩随着轴力的增加而增加;混凝土管片的最不利荷载组合为最大弯矩与最小轴力的组合。混凝土管片受压区的钢筋往往没有达到屈服极限,有时甚至处于受拉状态;现有模型假设受压区的钢筋屈服与钢筋的实际应力状态差异较大,新的计算模型能够准确计算受压区的钢筋的应力。

关键词: 偏心受压;混凝土管片;极限承载力;计算模型;受压区高度;钢筋应力

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2017)01-0236-06

Computing model for influence of axial force on ultimate bearing performance of concrete segments

LI Shou-ju,YU Shen,LIU Jun-hao

(*State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,Dalian University of Technology,Dalian* 116024,*China*)

Abstract: Taking into account the problems of small compressive depth and less than yielding strength for bars located in the compressive zone of concrete segments,a new computing model is proposed to evaluate the ultimate bearing performance of concrete segments.Under the actions of both axial force and bending moment,the concrete segment is simplified to column with eccentric compressive loading,and the expressions for force balance and bending moment balance are derived.Based on the plane deformation assumption,the relationships between the stress of reinforced bars in the compressive zone and compressive depth in the concrete segment are proposed.Through two practical examples of underground tunnels lined by concrete segments,the influences of the axial force on compressive depth,the stress of reinforced bars and ultimate bearing performances of concrete segments are investigated.The computing results show that the ultimate bending moment of concrete segment increases with the increase of axial force,and the worst loading combination is the maximum bending moment with minimum axial force.The stress of reinforced bars in compressive zone cannot reach the yielding limit of material and are even in tensile state in some loading cases.The difference between the assuming stress and practical stress for existing model is obvious.The proposed computing model can precisely calculate the stress of reinforced bars in the compressive zone.

Key words: eccentric compressive loading; concrete segment; ultimate bearing performance; computing model; com-

收稿日期: 2016-03-31 **修回日期:** 2016-07-15 **责任编辑:** 常 琛
基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB057804);国家自然科学基金资助项目(11572079);工业装备结构分析国家重点实验室开放基金资助项目(S14206)
作者简介: 李守巨(1960—),男,辽宁沈阳人,教授,博士。E-mail:lishouju@dlut.edu.cn

pressive depth; bar stress

钢筋混凝土管片是地铁隧道、水工隧洞、矿山竖井和巷道等地下工程的常见衬砌结构。混凝土管片优化设计和准确极限承载力分析是保证地下结构安全性和经济性的重要研究内容之一。在混凝土管片的优化设计方面已有很多专家学者进行了多方位的研究。Moller 等分析了隧道施工过程中不同的安装步骤对地表沉降和衬砌力的影响[1]; Caratelli 等研究了在隧道建设中用纤维增强预制混凝土代替传统钢筋混凝土的可行性[2]; Jiang 等对预制混凝土桥梁尽心研究,得出混合筋段有良好的延性和抗弯性能[3]; Shalabi 等对隧道管片的防漏性能进行了研究[4]; Yan 等比较分析了多种防火隧道衬砌管片,得出抗弯加固和使用混合纤维的钢筋混凝土设计即有良好的抗剥落性,又有足够的结构强度[5]; Zhang 等通过一种简单实用的方法对液氮注入岩石的渗透性进行了数值模拟[6]; Sun 等对高应力软岩巷道的支护技术进行了研究[7]; Xue 等分析了巷道覆盖层位移场和应力场的演化规律,并分析了裂缝的动态发展过程和分布规律[8]。对于管片力学性能的研究,特别是随着盾构机等机械掘进设备的广范应用,已引起了国内外学者的普遍关注。Zhang 等和 Arnau 等分别研究了螺栓之间和管片相邻环之间的相互作用[9-10]; Do 等建立了二维有限差分模型,研究了侧向土压力系数和隧道周边土体的性质等因素对隧道衬砌管片的力学影响[11]; Ye 等对不同荷载不同螺栓预紧力和不同装配方式下的横向抗弯刚度进行了研究[12]; Nehdim 等对隧道衬砌管片中超高性能纤维增强混凝土的力学性能进行了试验研究[13]; 毕湘利等对通缝拼装和内张钢圈加固盾构隧道结构进行了极限承载力足尺试验研究[14-15]。目前对盾构隧道管片的极限承载能力以原型试验和理论分析相结合,因此,建立准确的理论模型对隧道管片的力学性能评估是至关重要。

本文通过研究混凝土管片的极限弯矩与轴力之间的关系,分析受压区钢筋真实的应力状态,探讨混凝土管片的最不利荷载组合,进一步完善混凝土管片极限承载力模型。

1　混凝土管片极限承载力现有计算模型

将对称配筋的混凝土管片简化为偏心受压模型,按照现行的钢筋混凝土设计规范,假设混凝土管片受拉区和受压区钢筋屈服,如图 1 所示。

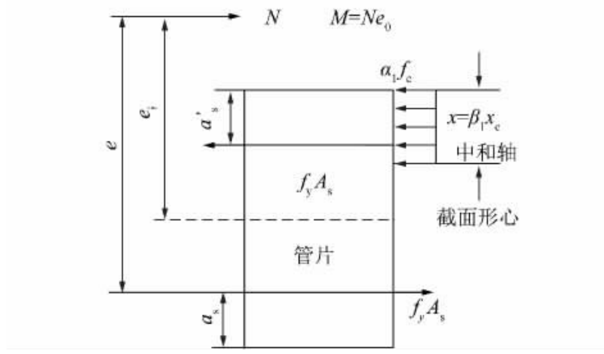

图 1　对称布筋混凝土管片受力分析简图

Fig. 1　Idealized computational models for concrete segments with symmetrical reinforcement bars

假设管片截面所受的轴力 N 的设计值已知,混凝土的标号已知,并且对称配筋的钢筋面积已知,根据力的平衡和弯矩平衡关系,计算管片的极限弯矩。由图 1 截面力的平衡条件得到

$$N = \alpha_1 f_c b x \tag{1}$$

式中,α_1 为系数,与混凝土的强度等级有关; f_c 为混凝土的轴心抗压强度设计值; b 为管片宽度; x 为受压区高度。式(1)可表示为

$$x = \frac{N}{\alpha_1 f_c b} \tag{2}$$

轴力作用点至受拉钢筋中心之间的距离为

$$e = \frac{\alpha_1 f_c x b(h_0 - 0.5x) + (h_0 - a_s) f_y A_s}{N} \tag{3}$$

式中,h_0 为截面的有效高度; a_s 为受拉钢筋中心到受拉边缘的距离; f_y 和 A_s 分别为为受拉钢筋的屈服强度和截面面积。截面的初始偏心距为

$$e_i = e - h/2 + a_s \tag{4}$$

式中,h 为管片高度。截面计算偏心距为

$$e_0 = e_i - e_a \tag{5}$$

式中,e_a 为截面附加偏心距。基于混凝土结构设计规范,混凝土管片的极限弯矩为

$$M_u = Ne_0 = \alpha_1 f_c \frac{N}{\alpha_1 f_c b} b\left(h_0 - 0.5\frac{N}{\alpha_1 f_c b}\right) + (h_0 - a_s) f_y A_s - N(h/2 - a_s + e_a) \tag{6}$$

基于混凝土结构设计规范,判断管片柱子模型是否大偏心受压判据为

$$N_{ub} = \alpha_1 f_c b x_b \tag{7}$$

式中,N_{ub}为界限情况下受压承载力设计值; x_b为混凝土的界限受压区高度。当 $N<N_{ub}$ 当时,为大偏心受压; 否则为小偏心受压。

$$x_b = \xi_b h_0 \tag{8}$$

式中,ξ_b 为混凝土的相对界限受压区高度

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \dfrac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}} \tag{9}$$

混凝土管片极限承载力的计算步骤为: ① 根据式(7)判断,管片是否为大偏心受压构件; ② 由式(2)计算管片受压区高度; ③ 根据式(5)计算轴力对截面重心的偏心距; ④ 根据式(6)计算混凝土管片的极限弯矩。

2 混凝土管片极限承载力新的计算模型

考虑到地铁隧道混凝土结构的特殊性,混凝土的标号较高,经常采用 C50 或者 C55,甚至 C60 混凝土,并且管片截面高度远小于截面宽度,使得混凝土管片受压区的高度较小,往往混凝土管片受压区的钢筋没有达到屈服(图 2),甚至所谓的受压区钢筋可能处于受拉状态。在此情况下,现有模型计算所得到的受压区钢筋应力与实际的受力状态差别较大,如果按照现有模型进行管片设计和承载力复核可能会带来一些问题。

根据图 3,由截面力的平衡条件得到

$$N = \alpha_1 f_c bx + \sigma_{sc} A_s - f_y A_s \tag{10}$$

式中,σ_{sc} 为受压钢筋的应力; 可得

$$x = \frac{N - \sigma_{sc} A_s + f_y A_s}{\alpha_1 f_c b} \tag{11}$$

假设受压钢筋没有达到屈服极限,钢筋应力与应变的关系为

$$\sigma_{sc} = \varepsilon_{sc} E_s \tag{12}$$

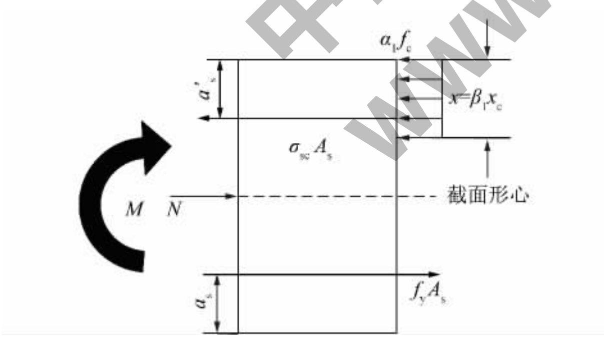

图 2 管片简化为偏心受压柱模型受力分析简图

Fig. 2 Force and bending moment balances for column with eccentric compressive loading

在偏心轴力 N 作用下,根据梁平截面变形假定和应变三角形相似关系(图 4),受压区钢筋应变与混凝土极限压应变的关系为

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{cu}} = \frac{x_c - a_s}{x_c} = 1 - \frac{\beta_1 a_s}{x} \tag{13}$$

式中,ε_{cu} 为混凝土的极限压应变,一般取 ε_{cu} = 0.003 3,对于 C50 以下的混凝土,β_1 = 0.8; a_s 为受拉钢筋的合力点至截面受拉边缘的竖向距离,一般取为 a_s = 40 mm。x_c 为中和轴高度,即受压区的理论高度; x 为矩形应力图受压区高度。ε_{sc} 为受压区钢筋的应变,当 ε_{sc}<0 时,表示受压区钢筋处于受拉状态,受压区的理论高度小于钢筋形心到混凝土管片表面的距离; 否则,当 ε_{sc}>0 时,表示受压区钢筋处于受压状态。

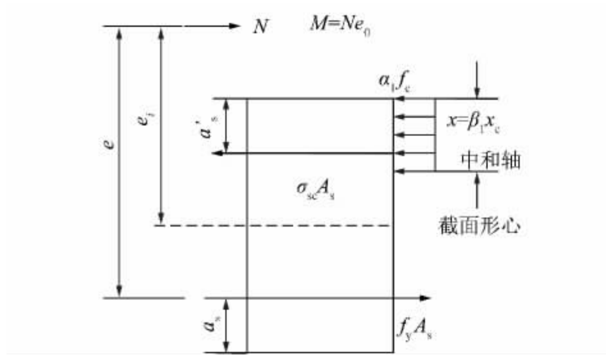

图 3 对称布筋大偏心管片承载力计算简图

Fig. 3 Idealized computational models for concrete segments with symmetrical reinforcement bars and eccentric compressive loading

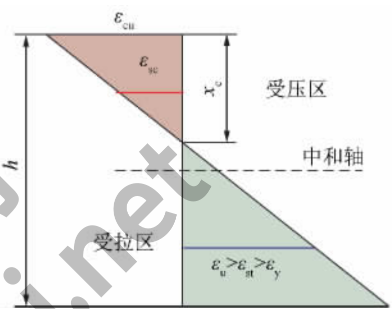

图 4 简化混凝土管片应变分布

Fig. 4 Simplified strain distributions on concrete segment

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{cu}\left(1 - \frac{\beta_1 a_s}{x}\right) \tag{14}$$

将式(14)代入式(12),得

$$\sigma_{sc} = E_s \varepsilon_{cu}\left(\frac{x - \beta_1 a_s}{x}\right) \tag{15}$$

将式(15)代入式(11),得

$$x = \frac{N - E_s \varepsilon_{cu}\left(\dfrac{x - \beta_1 a_s}{x}\right) A_s + f_y A_s}{\alpha_1 f_c b} \tag{16}$$

$$\alpha_1 f_c b x^2 - (N + f_y A_s + E_s \varepsilon_{cu} A_s) x - E_s \varepsilon_{cu} A_s \beta_1 a_s = 0 \tag{17}$$

由式(17)求出受压区高度 x,然后代入到式(15),求出受压钢筋的应力。根据图 3 力矩平衡关系,得

$$Ne = \alpha_1 f_c xb(h_0 - 0.5x) + (h_0 - a_s)\sigma_{sc} A_s \tag{18}$$

$$e = \frac{\alpha_1 f_c xb(h_0 - 0.5x) + (h_0 - a_s)\sigma_{sc} A_s}{N} \tag{19}$$

$$e_0 = e - h/2 + a_s - e_a = \frac{\alpha_1 f_c x b(h_0 - 0.5x) + (h_0 - a_s)\sigma_{sc} A_s}{N} - (h/2 - a_s + e_a) \tag{20}$$

在式(17)求出出受压区高度 x，式(15)受压钢筋的应力和式(20)求出 e_0 基础上，基于混凝土结构设计规范，混凝土管片的极限弯矩为

$$M_u = Ne_0 = \alpha_1 f_c x b(h_0 - 0.5x) + (h_0 - a_s)\sigma_{sc} A_s - N(h/2 - a_s) \tag{21}$$

混凝土管片极限承载力新模型的计算步骤为：① 根据式(7)判断，管片是否为大偏心受压构件；② 由式(17)计算管片受压区高度；③ 由式(15)计算受压区钢筋的应力；④ 根据式(20)计算轴力对截面重心的偏心距；⑤ 根据式(21)计算混凝土管片的极限弯矩。

3 数值算例

为了研究新的计算模型与现有计算模型的差异，通过两个盾构施工的地铁隧道实例，研究盾构隧道管片的极限承载力和受压区钢筋受力特性，讨论现有计算模型所存在的缺陷。

算例 1 为北京地铁 10 号线盾构隧道某断面[16]，隧道管片外径 6.0 m，管片衬砌中心半径 2.85 m，管片厚度 0.3 m，管片宽度为 1.2 m，覆土厚度 10.31 m，覆土容重 18.82 kN/m^3。混凝土管片强度等级为 C50，采用对称配筋，管片主筋采用 HRB335 钢筋，a_s = 40 mm，单侧主筋面积 A_s = 2 514 mm^2 (8ϕ20)。

采用有限元方法得到混凝土管片内力分布如图 5 和 6 所示。其中，最大正弯矩 160 kN · m，最大负弯矩 170 kN · m，轴力处于受压状态，其数值在 400～1 010 kN 之间变化。采用现有方法和改进模型计算管片极限弯矩随轴力的变化见表 1 和 2。

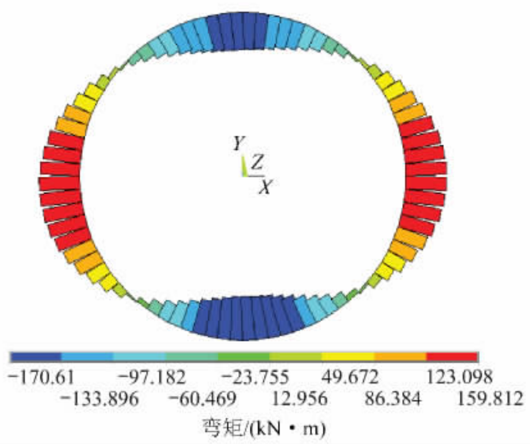

图 5　北京地铁混凝土管片弯矩分布

Fig. 5　Bending moment distributions on concrete segments of Beijing Metro

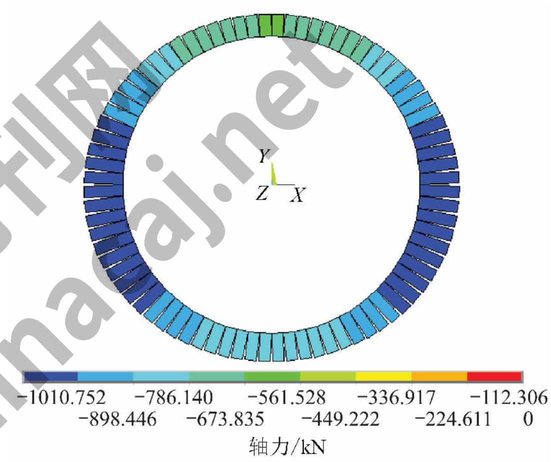

图 6　北京地铁混凝土管片轴力分布

Fig. 6　Axial force distributions on concrete segments Beijing Metro

表 1　管片极限弯矩随轴力的变化(现有方法，北京地铁)

Table 1　Variation of bending moment of segments versus axial force (Current model, Beijing Metro)

轴力/kN	400	500	600	700	800	900	1 000
x/mm	14.4	18.1	21.6	25.25	28.8	32.5	36.1
M_u/(kN · m)	215	226	237	248	258	268	278
σ_{sc}/MPa	300	300	300	300	300	300	300

表 2　管片极限弯矩随轴力的变化(修改模型，北京地铁)

Table 2　Variation of bending moment of segments versus axial force (New model, Beijing Metro)

轴力/kN	400	500	600	700	800	900	1 000
x/mm	35.6	37.0	38.6	40.2	41.9	43.6	45.5
M_u/(kN · m)	224	233	242	251	260	269	278
σ_{sc}/MPa	66	90	113	134	156	176	196

从图 7 中可以看出，混凝土管片的受压区高度随轴力的增加而增加，修改后模型的受压区高度大于现有模型计算结果。其原因在于，现有模型假设受压区钢筋达到屈服强度，导致与轴力相平衡的受压区高度减少。

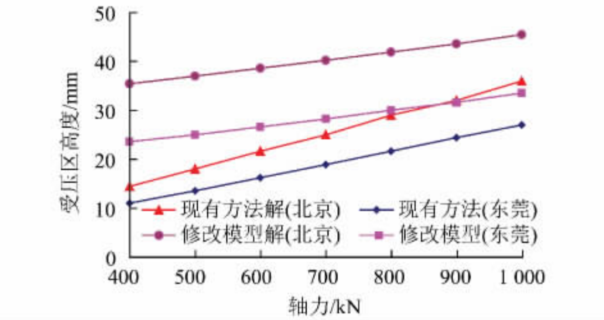

图 7　受压区高度随轴力的变化

Fig. 7　Variation of compressive depth versus axial forces

从图 8 中可以看出，混凝土管片的受压区钢筋应力随轴力的增加而增加。现有模型假设受压区钢筋应力达到屈服，而准确的计算发现，受压区钢筋远远没有达到受压屈服强度，对于东莞隧道，受压区钢筋却基本处于受拉状态。

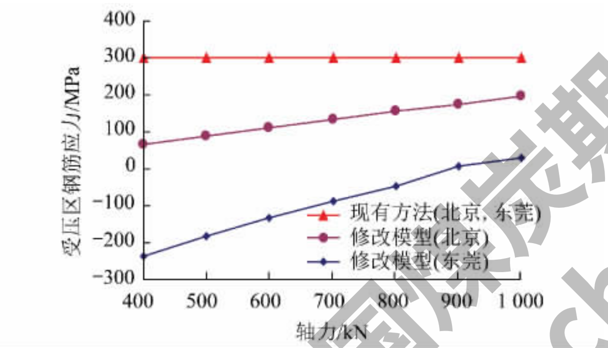

图 8　受压区钢筋应力随轴力的变化

Fig. 8　Variation of stress of reinforced bars in compressive zone versus axial forces

从图 9 中可以看出，尽管 2 种计算模型所得到的受压区高度和受压区钢筋应力差异较大，但是管片的极限承载力却基本相同，这也可能是按照现有方法设计管片未出现大的工程事故的原因之一。

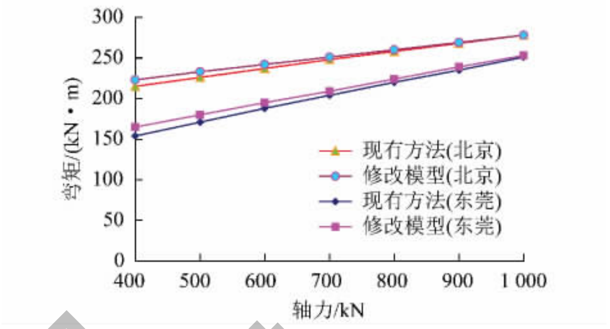

图 9　管片极限承载力随轴力的变化

Fig. 9　Variation of bending moment of segments versus axial force

算例 2 为东莞至惠州城际轨道交通工程某穿越东江水下隧道[17]，全长为 2 998.276 m，过江段设计最高水位 16.2 m，最低水位 9.74 m，最大埋深 16.2 m，最小埋深 14.11 m。区间隧道衬砌管片外径 8.5 m，内径 7.7 m，管片环宽度 1.6 m，厚度 400 mm。管片采用 C50 混凝土，采用对称配筋，管片主筋采用 HRB335 钢筋，a_s = 40 mm，单侧主筋面积 A_s = 882 mm^2。文献[1]计算得到的最大弯矩 90 kN·m 左右，最大轴力 1 000 kN 左右。东莞隧道管片极限弯矩随轴力的变化见表 3 和 4 所示。

表 3　管片极限弯矩随轴力的变化(现有模型，东莞隧道)

Table 3　Variation of bending moment of segments versus axial force (Current model，Dongguan tunnel)

轴力/kN	400	500	600	700	800	900	1 000
x/mm	10.8	13.5	16.2	18.9	21.6	24.4	27.0
M_u/(kN·m)	154	171	188	204	220	235	253
σ_{sc}/MPa	300	300	300	300	300	300	300

表 4　管片极限弯矩随轴力的变化(修改模型，东莞隧道)

Table 4　Variation of bending moment of segments versus axial force (New model，Dongguan tunnel)

轴力/kN	400	500	600	700	800	900	1 000
x/mm	23.6	25.0	26.6	28.2	30.0	31.6	33.5
M_u/(kN·m)	165	180	195	209	224	239	251
σ_{sc}/MPa	-235	-182	-134	-88	-46	7	30

注：钢筋应力负数表示受压区钢筋应力为受拉状态。

4 结 论

(1)混凝土管片受压区钢筋往往没有达到屈服强度,有时甚至处于受拉状态,按照现有模型假设受压区钢筋达到屈服应力进行管片设计,与钢筋实际受力状态差异较大,尽管两种模型得到的管片极限弯矩差别不大。

(2)从两个工程实例的计算结果可以看出,混凝土管片的极限承载力随着轴力的增加而增加。采用最大弯矩与最大轴力组合设计管片是存在某些问题的,实际管片最不利荷载组合应该是最大弯矩与最小轴力组合。

(3)计算结果表明,混凝土管片受压区高度随着管片轴力的增加而增加,受压区高度最大值远远没有达到 $2a_s$;也就是说,无法保证受压区钢筋达到屈服极限。

(4)在大埋深和高水压条件下,例如琼州海峡海底隧道,埋深 50~80 m,水深 70~100 m,管片的轴力将显著增加,管片可能处于小偏心受压状态,如何针对此类问题提出计算模型需要进一步研究。

参考文献(References):

[1] Moller S C,Vermeer P A.On numerical simulation of tunnel installation [J].Tunnelling & Underground Space Technology,2008,23(4):461-475.

[2] Caratelli A,Meda A,Rinaldi Z,et al.Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete [J].Tunnelling & Underground Space Technology,2011,26(2):284-291.

[3] Jiang H,Cao Q,Liu A,et al.Flexural behavior of precast concrete segmental beams with hybrid tendons and dry joints [J].Construction & Building Materials,2016,110:1-7.

[4] Shalabi F I,Cording E J,Paul S L.Concrete segment tunnel lining sealant performance under earthquake loading [J].Tunnelling & Underground Space Technology,2012,31(5):51-60.

[5] Yan Z G,Shen Y,Zhu H H,et al.Experimental investigation of reinforced concrete and hybrid fibre reinforced concrete shield tunnel segments subjected to elevated temperature [J].Fire Safety Journal,2015,71(3):86-99.

[6] Zhang C H,Wang L G,Du J H,et al.Numerical modelling rock deformation subject to nitrogen cooling to study permeability evolution [J].International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(4):1-6.

[7] Sun L H,Wu H Y,Yang B S,et al.Support failure of a high-stress soft-rock roadway in deep coal mine and the equalized yielding support technology: a case study [J].International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(4):279-286.

[8] Xue J H,Wang H P,Zhou W,et al.Experimental research on overlying strata movement and fracture evolution in pillarless stress-relief mining [J].International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(1):38-45.

[9] Zhang W,Koizumi A.A study of the localized bearing capacity of reinforced concrete K-segment [J].Tunnelling & Underground Space Technology,2007,22(4):467-473.

[10] Arnau O,Molins C.Three dimensional structural response of segmental tunnel linings [J].Engineering Structures,2012,44(6):210-221.

[11] Do N A,Dias D,Oreste P,et al.2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior [J].Tunnelling & Underground Space Technology,2013,37(6):115-127.

[12] Ye F,Gou C F,Sun H D,et al.Model test study on effective ratio of segment transverse bending rigidity of shield tunnel [J].Tunnelling & Underground Space Technology,2014,41(1):193-205.

[13] Nehdi M L,Abbas S,Soliman A M.Exploratory study of ultra-high performance fiber reinforced concrete tunnel lining segments with varying steel fiber lengths and dosages [J].Engineering Structures,2015,101:733-742.

[14] 毕湘利,柳献,王秀志,等.通缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究 [J].土木工程学报,2014,47(10):117-127.
Bi Xiangli,Liu Xian,Wang Xiuzhi,et al.Experimental investigation on the ultimate bearing capacity of continuous-jointed segmental tunnel linings [J].China Civil Engineering Journal,2014,47(10):117-127.

[15] 毕湘利,柳献,王秀志,等.内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究 [J].土木工程学报,2014,47(11):128-137.
Bi Xiangli,Liu Xian,Wang Xiuzhi,et al.Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates [J].China Civil Engineering Journal,2014,47(11):128-137.

[16] 陈丹.北京地铁盾构隧道管片设计方法比较 [J].铁道标准设计,2009(10):60-64.
Chen Dan.Comparative analysis of designing methods of tunnel segments for Beijing Metro [J].Railway Standard Design,2009(10):60-64.

[17] 胡辉,张列,仇文革.三种盾构管片配筋设计方法对比及现场实测分析,2012,39(6):72-76.
Hu Hui,Zhang Lie,Qiu Wenge.Comparative analysis of three kinds of designing methods of tunnel segments and field experiment investigation [J].Hydrogeology and Engineering Geology,2012,39(6):72-76.