

拉压模量不同的剪胀土体中的球孔扩张问题

郑俊杰, 鲁燕儿, 陈保国

(华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 土体具有不同的拉压模量和剪胀特性。为使球形孔扩张问题的解答更符合实际情况, 根据不同模量弹性理论和非关联 Mohr-Coulomb 流动法则研究了球形孔扩张时弹性区和塑性区的应力和位移, 得到了弹性区和塑性区的径向应力和环向应力的解析解以及最大塑性区半径与扩张压力的计算表达式。探讨了不同拉压模量之比、拉压泊松比和剪胀角对球形孔扩张的扩张压力及塑性区半径的影响。结果表明: 拉压模量比、拉压泊松比和剪胀角对球形孔扩张时塑性区的开展和扩张后土体的应力有重要影响, 计算中忽略这些参数将带来较大的误差。

关键词: 拉压模量比; 球孔扩张; 剪胀角; 扩张压力

中图分类号: TU471.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)05-0675-06

作者简介: 郑俊杰(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与隧道工程的科研和教学工作。E-mail: zhengjj@hust.edu.cn。

Spherical cavity expansion in dilatant soils with different tension and compression moduli

ZHENG Jun-jie, LU Yan-er, CHEN Bao-guo

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Soil has different moduli in tension and compression. In order to obtain a more precise solution of spherical cavity expansion, an analysis of spherical cavity expansion in elasto-plastic soil is presented based on the elastic theory considering different moduli in tension and compression. The characteristics of dilation are taken into account by using the non-associated Mohr-Coulomb yield criterion. The analytical solutions for the stresses in elastic and plastic zones, maximum radius of the plastic zone and expansion pressure are obtained. The influences of different tension and compression modulus ratios, Poisson's ratios and dilation angles on the expansion pressure and radius of plastic zones are discussed. The results show that different tension and compression modulus ratios, Poisson's ratios and dilation angles have significant influences on the development of plastic zones and the stresses in the soil. Large errors will occur if these parameters are ignored.

Key words: ratio of tension and compression moduli; spherical cavity expansion; dilation angle; expansion pressure

0 引言

圆孔扩张理论已广泛用于分析岩土工程和机械工程中的挤压和扩张问题。随着岩土工程学科的发展, 许多研究领域需要应用圆孔扩张理论来研究土体的力学性状, 例如压力测试试验、静力触探试验和桩基工程等。土体是一种非常复杂的材料, 许多学者对土体的本构模型进行了大量的研究, 但是根据不同的本构模型求得的圆孔扩张解答也各不相同。Vesic^[1]应用理想弹塑性模型研究了圆孔扩张问题, Collins 和 Stimpson^[2]得到了排水及不排水条件下应变硬化土体或软化土体的圆孔扩张理论的近似解。Collins 和 Yu^[3]给出了不排水条件下, 极限状态时大应变圆孔扩张问题的理论解。Cao 等^[4]采用修正剑桥模型求解了不排

水条件下圆孔扩张问题的解答, Chang^[5]等将该解答应用于压力锥的贯入试验。

为考虑土体的剪胀特性, Yu 和 Houlsby^[6]采用 Mohr-Coulomb 屈服准则和非关联流动法则, 求解了剪胀土体中的圆孔扩张问题, Mantaras 等^[7]采用相同的土体模型以 Rower 的应力剪胀理论为基础分析了考虑剪胀特性土体中的圆孔扩张理论。王家来^[8]结合试验曲线推导了具有应变软化和剪胀特性土体中的柱形孔扩张的解析解。

上述研究均假设土体的拉压模量相同, 但根据三轴压缩试验和三轴拉伸试验^[9], 土体的拉压模量有较

基金项目: 湖北省科技攻关项目 (2002AA301C95)

收稿日期: 2008-04-22

大差异。针对土体的这一特性,王启铜、龚晓南等^[10-11]考虑材料拉压模量不同的性质,推导了 Tresca 材料和 Mohr-Coulomb 材料中圆孔扩张时应力及位移的计算公式,罗战友等^[12-13]采用双剪强度理论推导了不同拉压模量土体中圆孔扩张问题的应力及位移的统一解。

本文在总结前人对圆孔扩张理论研究的基础上,考虑土体具有不同拉压模量的特性和剪胀特性,根据不同模量弹性理论分析了球形孔扩张的弹性区域和塑性区域的应力、塑性区半径和扩张压力。通过对各参数的分析,探讨不同拉压弹性模量之比、拉压泊松比和剪胀角对球形孔扩张的扩张压力及塑性区半径的影响。

1 计算模型及基本方程

假设土体服从 Mohr-Coulomb 屈服准则;扩张前,土体的初始应力为 σ_0 ;压应力为正,拉应力为负。图 1 为球形孔扩张示意图,图中, r_p 为塑性区半径, u_p 为弹塑性交界面上的位移, a_0 为初始半径, a 为扩张后的球形孔半径, p_a 为半径 a 处的扩张压力。

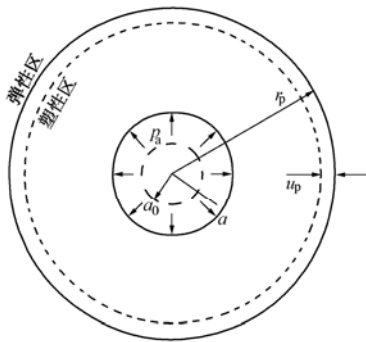


图 1 球形孔扩张示意图

Fig. 1 Schematic of spherical cavity expansion

涉及到的基本方程如下:

(1) 球形孔扩张时的平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

(2) 几何方程

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (2)$$

(3) 弹性阶段, 拉压模量不同时的本构方程

根据不同模量的弹性理论^[14], 考虑不同拉压模量的弹性阶段本构方程为:

$$\Delta\varepsilon_r = \frac{1}{E^+} \Delta\sigma_r - 2\frac{\nu^-}{E^-} \Delta\sigma_\theta \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon_\theta = \frac{1}{E^-} (1 - \nu^-) \Delta\sigma_\theta - \frac{\nu^+}{E^+} \Delta\sigma_r \quad (4)$$

式中, E^+ , E^- 分别为压缩模量和拉伸模量。

(4) 边界条件

$$\begin{cases} \sigma_r = p_a & (r = a) \\ \sigma_r = \sigma_0 & (r \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (5)$$

(5) Mohr-Coulomb 材料的屈服准则

$$(1 - \sin \varphi) \sigma_r - (1 + \sin \varphi) \sigma_\theta = 2c \cos \varphi \quad (6)$$

令 $\alpha = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$, $Y = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$, 则式 (6) 变为

$$\alpha \sigma_r - \sigma_\theta = Y \quad (7)$$

2 弹性阶段应力和位移的解答

球形孔扩张的初期, 由于土体变形较小, 土体处于弹性状态, 因此可按弹性理论求解。根据前述假设, 土体中的初始应力为 σ_0 , 因此径向应力增量 $\Delta\sigma_r = \sigma_r - \sigma_0$, 环向应力增量 $\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta - \sigma_0$, 由于初始应变和位移均为零, 因此 $\Delta\varepsilon_r = \varepsilon_r$, $\Delta\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta$, $\Delta u_r = u_r$ 。

在弹性变形阶段, 根据平衡方程、几何方程以及本构方程可得

$$(1 - \nu^-) \frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{2}{r} (1 - \chi \nu^+) \frac{du_r}{dr} + \frac{2}{r^2} (\nu^- - \chi) u_r = 0 \quad (8)$$

根据文献[10]的推导, 上式的解答为

$$u_r = \frac{(p_a - \sigma_0)}{\eta_1} r \left(\frac{a}{r} \right)^{1+n} \quad (9)$$

进而得弹性阶段的应力

$$\sigma_r = \sigma_0 + (p_a - \sigma_0) \left(\frac{a}{r} \right)^{1+n} \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 + (p_a - \sigma_0) \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \left(\frac{a}{r} \right)^{1+n} \quad (11)$$

式中, χ 为拉压模量比, $\chi = E^- / E^+$,

$$n = \frac{1}{2(1 - \nu^-)} \left[(1 + \nu^- - 2\chi \nu^+) + \sqrt{(1 + \nu^- - 2\chi \nu^+)^2 - 8(1 - \nu^-)(\nu^- - \chi)} \right],$$

$$\eta_1 = \frac{n(\nu^- - 1) + 2\nu^-}{1 - \nu^- - 2\nu^+ \nu^-} E^+,$$

$$\eta_2 = \frac{1 - m\nu^+}{1 - \nu^- - 2\nu^+ \nu^-} E^-.$$

当扩张压力 p 继续增大, 直至 p 达到某一值时, 孔壁处土体开始屈服。根据式 (7) 和 (11), 得该临界扩张压力

$$p_c = \frac{Y - (\alpha - 1)\sigma_0}{\alpha - \eta_2 / \eta_1} + \sigma_0 \quad (12)$$

当考虑 $E^+ = E^-$, $\nu^+ = \nu^-$ 时, 上述应力和位移的解答与传统的拉压模量相同材料中球形孔扩张解答

一致。

3 弹塑性阶段应力和位移的解答

3.1 弹塑性阶段的应力

(1) 弹性区 ($r \geq r_p$) 的应力

根据式 (1) ~ (5) 可得弹性区的应力为

$$\sigma_r = \sigma_0 + Ar^{-(1+n)}, \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 + \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right) Ar^{-(1+n)}. \quad (14)$$

(2) 塑性区 ($a \leq r \leq r_p$) 的应力

塑性区的应力同时满足平衡方程 (1) 和屈服准则 (7), 可得塑性区的径向应力和环向应力

$$\sigma_r = \frac{Y}{\alpha - 1} + Br^{-2(1-\alpha)}, \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Y}{\alpha - 1} + \alpha Br^{-2(1-\alpha)}. \quad (16)$$

根据弹塑性边界上的连续性, 可求得积分常数 A , B 的表达式为

$$A = \frac{[Y - (\alpha - 1)\sigma_0]\eta_1}{\alpha\eta_1 - \eta_2} r_p^{1+n}, \quad (17)$$

$$B = \frac{[Y - (\alpha - 1)\sigma_0](\eta_2 - \eta_1)}{(\alpha - 1)(\alpha\eta_1 - \eta_2)} r_p^{2(1-\alpha)}. \quad (18)$$

由式 (13) 和 (14) 可得弹塑性边界 ($r = r_p$) 上的应力

$$\sigma_{r_p} = \sigma_0 + \frac{[Y - (\alpha - 1)\sigma_0]\eta_1}{\alpha\eta_1 - \eta_2}, \quad (19)$$

$$\sigma_{\theta_p} = \sigma_0 + \frac{[Y - (\alpha - 1)\sigma_0]\eta_2}{\alpha\eta_1 - \eta_2}. \quad (20)$$

根据塑性区径向应力解答式 (15) 和式 (18), 以及边界条件式 (5), 可得最终扩张压力

$$p_a = \frac{Y}{\alpha - 1} + \frac{[Y - (\alpha - 1)\sigma_0](\eta_2 - \eta_1)}{(\alpha - 1)(\alpha\eta_1 - \eta_2)} \left(\frac{r_p}{a} \right)^{2(1-\alpha)}. \quad (21)$$

式 (21) 中, 只有当 r_p 已知时才能求得 p_a , 所以下节主要求解 r_p 的值。

3.2 塑性区半径

将式 (13), (14) 和式 (17) 代入式 (3) 和 (4), 得弹性区的位移 ($r \geq r_p$)

$$u = \delta \left(\frac{r_p}{r} \right)^{1+n} r, \quad (22)$$

$$\text{式中, } \delta = \left[\frac{1-\nu^-}{E^-} \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right) - \frac{\nu^+}{E^+} \right] \frac{[Y - (\alpha - 1)\sigma_0]\eta_1}{\alpha\eta_1 - \eta_2}.$$

将 $r = r_p$ 代入式 (22), 求得弹塑性边界上的位移

$$u_p = \delta r_p, \quad (23)$$

u_p 为负值, 这与塑性区向外扩张的情况一致。

在应用圆孔扩张理论分析工程实际问题时注意到, 多数情况下圆孔周边介质将发生较大的变形, 例如桩打入土体时桩周土体应考虑土体的大应变。为考虑塑性区大应变的影响, 采用对数应变表达形式:

$$\varepsilon_r = \ln \left(\frac{dr}{dr_0} \right), \quad (24)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (25)$$

本文采用 Mohr-Coulomb 非关联流动法则, 引入剪胀角 ψ 来考虑土体的剪胀性, 此流动法则表达为

$$\frac{\dot{\varepsilon}_r^p}{\dot{\varepsilon}_\theta^p} = - \left(\frac{2}{\beta} \right), \quad (26)$$

式中, $\beta = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$, ψ 为土体的剪胀角。

取塑性区的弹性变形为弹塑性区边界上的弹性变形, 可得

$$\frac{\dot{\varepsilon}_r}{\dot{\varepsilon}_\theta} = - \left(\frac{2}{\beta} \right), \quad (27)$$

对式 (27) 进行积分可得

$$\beta \varepsilon_r + 2 \varepsilon_\theta = 0. \quad (28)$$

将式 (24) 和 (25) 代入式 (28) 得

$$r^{(2+\beta)/\beta} - a^{(2+\beta)/\beta} = r_0^{(2+\beta)/\beta} - a_0^{(2+\beta)/\beta}. \quad (29)$$

在弹塑性边界上, 即 $r = r_p$, $r_0 = r_p + u_p$, 代入式

(29) 得

$$r_p^{(2+\beta)/\beta} - a^{(2+\beta)/\beta} = (r_p + u_p)^{(2+\beta)/\beta} - a_0^{(2+\beta)/\beta}. \quad (30)$$

将式 (23) 代入式 (30) 得

$$r_p^{(2+\beta)/\beta} - a^{(2+\beta)/\beta} = (r_p + \delta \cdot r_p)^{(2+\beta)/\beta} - a_0^{(2+\beta)/\beta}, \quad (31)$$

简化式 (31) 得

$$\left(\frac{a_0}{a} \right)^{(2+\beta)/\beta} + \left[1 - (1 + \delta)^{(2+\beta)/\beta} \right] \left(\frac{r_p}{a} \right)^{(2+\beta)/\beta} = 1. \quad (32)$$

在应用球形孔扩张理论分析岩土工程中的某些问题 (例如静力触探问题) 时, 考虑的初始半径 a_0 极小, 即 $a_0 \rightarrow 0$, 则可得 $a_0/a \rightarrow 0$, 则有

$$r_p/a = \left[1 - (1 + \delta)^{(2+\beta)/\beta} \right]^{-\beta/(2+\beta)}. \quad (33)$$

由式 (33) 可求得塑性区半径 r_p/a 的值, 再根据式 (21) 可求得圆孔半径为 a 时的扩张压力 p_a 。

4 参数分析

由上述分析可知, 球形孔扩张问题的塑性区半径、临界扩张压力和最终扩张压力与材料的拉压模量比、拉压泊松比和剪胀角有关。为分析这些参数对球形孔扩张问题的影响, 取压缩模量 $E^+ = 6.4 \times 10^3$ kPa, 黏

聚力 $c=10.9$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=15^\circ$, 初始应力 $\sigma_0=78$ kPa, 最终圆孔半径 $a=0.5$ m (如将球形孔扩张理论应用于分析打桩问题时, a 即为桩的半径)。

4.1 拉压模量比的影响

保持 $E^+=6.4\times 10^3$ kPa 不变, 改变 E^- 的值, 由此得到不同的拉压模量比 χ , 并假设 $\nu=\nu^+=\nu^-$, $\psi=0$ 。得到不同拉压模量比及不同泊松比情况下的塑性区半径、临界扩张压力和最终扩张压力的变化规律如图 2~4 所示。

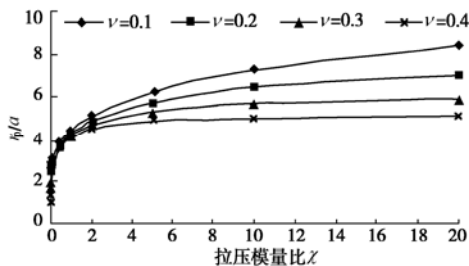


图 2 塑性区半径随拉压模量比的变化规律

Fig. 2 Variation laws of the plastic zone radius with various ratios of tension and compression moduli

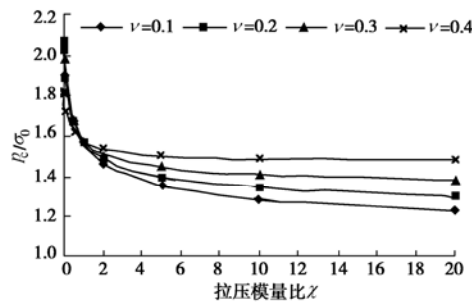


图 3 临界扩张压力随拉压模量比的变化规律

Fig. 3 Variation laws of the critical expansion pressure with various ratios of tension and compression moduli

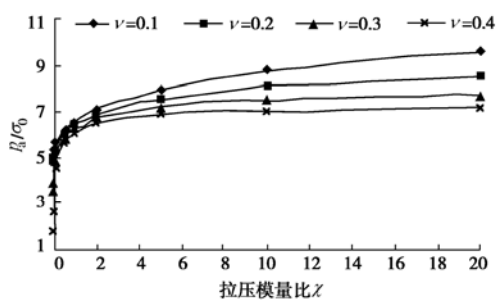


图 4 最终扩张压力随拉压模量比的变化规律

Fig. 4 Variation laws of the ultimate expansion pressure with various ratios of tension and compression moduli

由图 2~4 可知, 当其他参数不变时, 随着拉压模量比 χ 的增大, 塑性区半径逐渐增大 (图 2), 这说明拉伸模量 E^- 小的材料, 塑性区不易开展; 另外随着 χ

的增大, 临界扩张压力减小 (图 3), 表明拉伸模量 E^- 小的材料不易发生屈服。而最终扩张压力随 χ 的增大而增大 (图 4), 由此可见最终扩张压力和临界扩张压力的差值随 χ 的增大而增大, 也证明了拉伸模量 E^- 小的材料中塑性区不易开展的结论。对于不同的泊松比, 拉压模量比对塑性区半径、临界扩张压力和最终扩张压力的影响也不同。泊松比较大的材料中, 塑性区半径和最终扩张压力较小, 而临界扩张压力较大, 且相对于泊松比小的材料, 这些参数随拉压模量比的变化不显著。对土体而言, 拉伸模量 E^- 比压缩模量小得多, 从图 2~4 中可以看出, 拉压模量比较小时, 各参数随拉压模量比的变化趋势明显, 而不同的泊松比对各参数的变化影响很小。

4.2 拉伸泊松比的影响

取 $E^+=E^-=6.4\times 10^3$ kPa, $\psi=0$, 则拉压模量比 $\chi=1$ 。塑性区半径、临界扩张压力和最终扩张压力随拉伸泊松比的变化规律如图 5~7 所示。

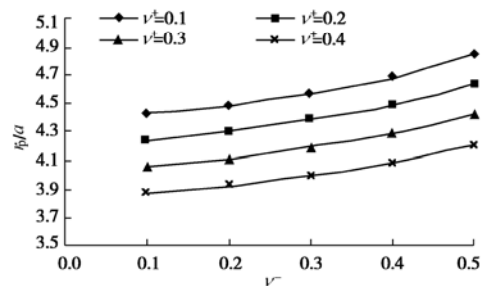


图 5 塑性区半径随拉伸泊松比的变化规律

Fig. 5 Variation laws of the plastic zone radius with various tensile Poisson's ratios

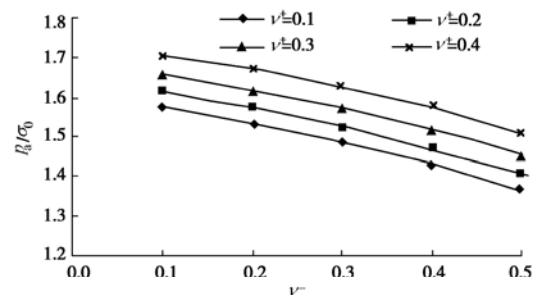


图 6 临界扩张压力随拉伸泊松比的变化规律

Fig. 6 Variation laws of the critical expansion pressure with various tensile Poisson's ratios

由图 5~7 可知, 塑性区半径随拉伸泊松比的增大而增大, 而临界扩张压力和最终扩张压力随拉伸泊松比的增大而减小。由此可知, 拉伸泊松比较小时, 塑性区不易扩展, 且不易发生屈服。另外, 塑性区半径和最终扩张压力随压缩泊松比的增大而减小, 而临

界扩张压力随压缩泊松比的增大而增大, 但这些变化很小。

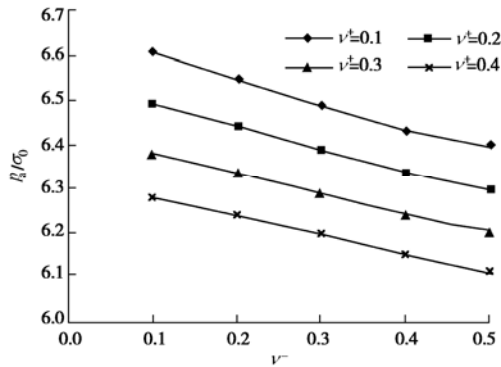


图7 最终扩张压力随拉伸泊松比的变化规律

Fig. 7 Variation laws of the ultimate expansion pressure with various tensile Poisson's ratios

4.3 剪胀角的影响

考虑土体的剪胀特性, 取拉压模量比 $\chi = 1, 0.5, 0.1, 0.01, 0.001$ 。得到塑性区半径和最终扩张压力随剪胀角的变化规律如图8和图9所示。

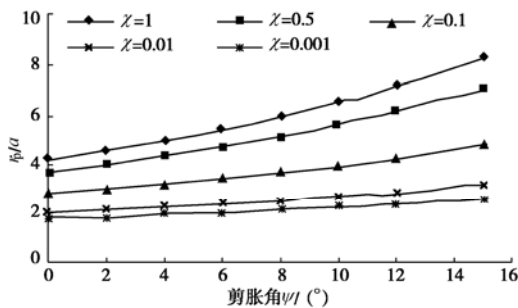


图8 塑性区半径随剪胀角的变化规律

Fig. 8 Variation laws of the plastic zone radius with various dilation angles

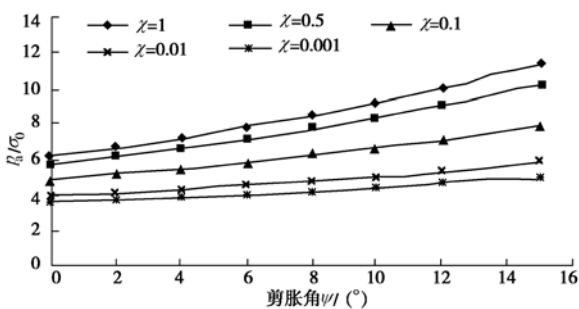


图9 最终扩张压力随剪胀角的变化规律

Fig. 9 Variation laws of the ultimate expansion pressure with various dilation angles

由图8和图9可知, 其他参数不变时, 塑性区半径和最终扩张压力随着剪胀角的增大而增大, 由此表明剪胀角小的土体中塑性区不易开展。而对于不同的拉压模量比 χ , χ 小的土体中塑性区半径和最终扩张

压力较小, 且 χ 越大, 土体中塑性区半径和最终扩张压力随剪胀角的变化越显著。

5 结 论

求解了不同拉压模量土体中考虑剪胀特性的球形孔扩张问题的解答, 并根据推导得到的解析解分析了拉压模量、泊松比和剪胀角对塑性区半径、临界扩张压力和最终扩张压力的影响, 得到如下结论:

(1) 当压缩模量不变时, 拉伸模量小的材料不易屈服, 且塑性区不易开展。相对于泊松比大的材料, 泊松比小的材料中塑性区半径、临界扩张压力和最终扩张压力随拉压模量比的变化不显著。

(2) 拉伸泊松比较小时, 塑性区不易扩展, 且不易发生屈服。另外, 塑性区半径和最终扩张压力随压缩泊松比的增大而减小, 临界扩张压力随压缩泊松比的增大而增大。

(3) 塑性区半径和最终扩张压力随着剪胀角的增大而增大, 剪胀角小的土体中塑性区不易开展。拉压模量比越大, 土体中塑性区半径和最终扩张压力随剪胀角的变化越显著。

因此, 拉压模量和剪胀角对球形孔扩张问题有重要的影响, 分析球孔扩张问题时不考虑这些因素将会带来较大的误差。

参考文献:

- [1] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1972, **98**(SM3): 265 - 290.
- [2] COLLINS I F, STIMPSON J R. Similarity solutions for drained and undrained cavity expansions in soils[J]. Geotechnique, 1994, **38**(4): 575 - 587.
- [3] COLLINS I F, YU H S. Undrained cavity expansion in critical-state soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, **20**(7): 489 - 516.
- [4] CAO L F, TEH C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay I: theoretical analysis[J]. Geotechnique, 2001, **51**(4): 323 - 334.
- [5] CHANG M F, TEH C I, CAO L F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay II: application to the interpretation of the piezocone test[J]. Geotechnique, 2001, **51**(4): 335 - 350.
- [6] YU H S, HOULSBY G T. Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis[J]. Geotechnique, 1991, **41**(2): 173 -

- 183.
- [7] MANTARAS F M, SCHNAID F. Cylindrical cavity expansion in dilatant cohesive-frictional materials[J]. *Geotechnique*, 2002, **52**(5): 337 - 348.
- [8] 王家来, 熊巨华. 应变软化土体中柱形扩孔解析[J]. *应用力学学报*, 1999, **16**(4): 58 - 62. (WANG Jia-lai, XIONG Ju-hua. An analytical solution to cylindrical cavity expansion in softening soil mass[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1999, **16**(4): 58 - 62. (in Chinese))
- [9] 龚晓南. 油罐软黏土地基性状[D]. 杭州: 浙江大学, 1984. (GONG Xiao-nan. Oil tank foundation property of soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1984. (in Chinese))
- [10] 王启铜, 龚晓南, 曾国熙. 拉压模量不同材料的球孔扩张问题[J]. *上海力学*, 1993, **14**(2): 55 - 63. (WANG Qi-tong, GONG Xiao-nan, ZENG Guo-xi. Expansion of a granular cavity in an infinite medium with different moduli in tension and compression[J]. *Shanghai Journal of Mechanics*, 1993, **14**(2): 55 - 63. (in Chinese))
- [11] 龚晓南, 王启铜, 罗 晓. 拉压模量不同材料的圆孔扩张问题[J]. *应用力学学报*, 1994, **11**(4): 127 - 132. (GONG Xiao-nan, WANG Qi-tong, LUO Xiao. Expansion of a circular hole in an infinite medium with different moduli in tension and compression[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1994, **11**(4): 127 - 132. (in Chinese))
- [12] 罗战友, 杨晓军, 龚晓南. 考虑材料的拉压模量不同及应变软化特性的柱形孔扩张问题[J]. *工程力学*, 2004, **21**(2): 40 - 45. (LUO Zhan-you, YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan. Expansion of cylindrical cavities in strain-softening material with different elastic moduli in tension and compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, **21**(2): 40 - 45. (in Chinese))
- [13] 罗战友, 夏建中, 龚晓南. 不同拉压模量及软化特性材料的球形孔扩张问题的统一解[J]. *工程力学*, 2006, **23**(4): 22 - 27. (LUO Zhan-you, XIA Jian-zhong, GONG Xiao-nan. Unified solution for the expansion of spherical cavity in strain-softening materials with different elastic moduli in tension and compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, **23**(4): 22 - 27. (in Chinese))
- [14] 阿姆巴尔楚米扬. 不同模量弹性理论[M]. 郭瑞锋, 张允真, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1986. (АМБІЦУЯН С А. Elastic theory with different moduli in tension and compression[M]. WU Rui-feng, ZHANG Yun-zhen, trans. Beijing: China Railway Press, 1986. (in Chinese))

2009年度全国数采与信号测试分析应用技术研讨培训会邀请函

近年来,我国数采与信号分析技术发展很快,以“INV”和“DASP”为代表的数采与信号分析仪器(虚拟仪器)在精度、速度、性能和实用性等方面取得了新的重大突破,进入了高智能、高自动、高精度、高速度、高技术、高集成的“六高”新时代,标志着我国在数采与信号测试分析、模态分析、声学测量、旋转机械分析、高精度计量校准等领域的技术推进和创新达到国际先进水平。随着仪器的发展升级和使用范围的扩大,各界用户迫切希望进一步了解有关仪器的功能、原理和使用方法,掌握仪器的使用技术,尤其是现场工程测试的经验和技巧,以提高科学试验和工程检测的精度、效率和水平。为此,中国振动工程学会振动与噪声控制分会将于2009年8月5~8日在辽宁省大连市大连理工大学国际会议中心举办全国数采与信号测试分析应用技术研讨培训会,热忱邀请科研院所、高等院校、军工和民用企业等各界代表参加。

培训内容: 振动理论基本概念; 数采与信号分析仪器的选

择、配套组成及对测试结果的影响; 冲击和连续振动中仪器的频响误差分析与探讨; 数采与信号分析中常见问题及测试技巧; 模态试验技术入门; 声压、声强及声功率的测量; AVD 全息测量技术及其他创新技术应用。

具体开会时间和会址将提前告知报名参会人员。详情将在北京东方所网站 <http://www.coinv.com.cn> 发布。会议期间有关仪器设备厂家将前来展示介绍产品, 开展业务洽谈和优惠活动。

报名和联系方式(任选一种):

中国振动工程学会振动与噪声控制分会咨询部, 电子邮件: inv@coinv.com.cn, 电话: 010-62976698, 62988558, 传真: 010-62970728, 地址: 北京市海淀区上地科贸大厦 516 号东方所, 邮编: 100085, 联系人: 雷速华, 聂恒仁。

大连理工大学土木水利学院抗震所, 电子邮件: lixin@dlut.edu.cn, 电话: 0411-84708512-8219 / 13840885582, 传真: 0411-84708501, 联系人: 李昕所长。

(研讨培训会组委会 供稿)