

基于 D-P 准则的盾构隧道围岩与衬砌结构 相互作用分析¹⁾

何川^{*,2)} 齐春^{*} 封坤^{*,3)} 肖明清^{†,4)}

^{*}(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

[†](中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要 在进行盾构隧道管片衬砌结构荷载计算时, 常采用全土柱或压力拱理论计算围岩松动压力, 但当盾构隧道面临深埋条件且需计入形变压力时, 该方法难以适用. 鉴于此, 基于 Drucker-Prager 屈服准则, 推导了考虑渗流效应影响下围岩与衬砌结构相互作用的弹塑性解析解, 给出了围岩弹、塑性区应力与位移、塑性区半径等关键参数与支护阻力间关系的解析式. 阐述了上述解析结果在确定衬砌结构荷载中的应用, 即建立围岩与衬砌结构静力平衡状态并求二者对应曲线的交点. 进一步地, 考虑接头引起管片衬砌结构整体刚度降低对围岩与衬砌结构相互作用的影响, 引入刚度折减系数, 并在衬砌结构围岩压力确定中对施工期流固耦合效应的影响和渗流力对衬砌结构支护特性曲线的影响进行了简化处理. 最后, 通过算例将解析解与水下盾构隧道荷载实测值和数值计算值进行了比较. 结果表明: 用解析方法得到的施工期和稳定期的管片衬砌结构围岩压力比现场实测值分别大 28% 和 12%, 稳定期围岩压力比数值计算值大 5%, 可为类似工程的设计施工提供一定的参考价值.

关键词 盾构隧道, 围岩, 衬砌结构, 相互作用, 围岩压力, D-P 准则, 收敛约束法

中图分类号: U25, U451 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-16-344

THEORETICAL ANALYSIS OF INTERACTION BETWEEN SURROUNDING ROCKS AND LINING STRUCTURE OF SHIELD TUNNEL BASED ON DRUCKER-PRAGER YIELD CRITERIA¹⁾

He Chuan^{*,2)} Qi Chun^{*} Feng Kun^{*,3)} Xiao Mingqing^{†,4)}

^{*}(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[†](China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, China)

Abstract In calculating the load for segment lining structure of shield tunnel, the soil column or pressure arch theory are often used to describe surrounding rock loosening pressure. But when it comes to the deep-buried condition and the deformation pressure should be calculated, this method is considered as unreasonable and is difficult to apply. In view of

2016-11-25 收稿, 2016-12-04 录用, 2016-12-04 网络版发表.

1) 国家自然科学基金(U1361210, 51578462)、国家重点研发计划(2016YFC0802200)、中央高校基本科研业务费专项资金(2682015CX077)和中国铁路总公司科技研究开发计划(2014G004-0)资助项目.

2) 何川, 教授, 主要研究方向: 地铁及水下盾构隧道结构理论、大型及复杂交通隧道结构安全及长大交通隧道运营控制等.

E-mail: chuanhe21@163.com

3) 封坤, 副教授, 主要研究方向: 现代盾构隧道技术与结构设计理论. E-mail: windfeng813@163.com

4) 肖明清, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 水下隧道及高速铁路隧道设计. E-mail: tsyxmq@163.com

引用格式: 何川, 齐春, 封坤, 肖明清. 基于 D-P 准则的盾构隧道围岩与衬砌结构相互作用分析. 力学学报, 2017, 49(1): 31-40

He Chuan, Qi Chun, Feng Kun, Xiao Mingqing. Theoretical analysis of interaction between surrounding rocks and lining structure of shield tunnel based on Drucker-Prager yield criteria. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1): 31-40

this, based on the Drucker-Prager yield criterion, an analytical elasto plastic solution is derived for the interaction between surrounding rock and lining structure considering the influence of seepage effect, and the formula of the relationship between the support pressure and some key parameters such as the stress and displacement of surrounding rock elastic and plastic zone as well as the radius of the plastic zone is given. The analytical results can be applied in the determination of the load of the lining structure by establishing the static equilibrium state of the surrounding rock and the lining structure and finding the intersection point of the two curves. Further, rigidity reduction factor is induced to equivalent considering the influence of the overall rigidity decrease of assembled segment liner for the existence of joints to the interaction of surrounding rock and lining structure. In the load determination, the influence of the fluid-solid coupling effect during construction and seepage force on support characteristic curve of lining structure is also simplified considered. Finally, an engineering instance of underwater shield tunnel is introduced to compare the calculated load with the measured value and numerical simulated value. The results show that the caculated analytical load values of segment lining structure are greater by 28% and 12% comparing to measured values during the construction period and the stable period, and are greater by 5% comparing to numerical simulated value during the stable period, respectively. The research results of this paper can provide some reference for the design and construction of similar projects.

Key words shield tunnel, surrounding rock, lining structure, interaction, surrounding rock pressure, Drucker-Prager criterion, convergence-confinement method

引 言

管片衬砌作为盾构隧道的永久支护结构,在盾构机进行洞室开挖后通常作为主要承载单元承载.在进行盾构隧道管片衬砌结构载荷分析时,常采用全土柱法或压力拱法计算围岩松动压力^[1].但当盾构隧道面临深埋条件且需计入形变压力时,该方法难以适用,尤其是在当前盾构工法广泛应用于我国城市“排水深隧”、深埋交通隧道、深埋油气管道及煤矿深长井巷建设^[2-8]的前提下,深埋盾构隧道的载荷理论亟待深入探讨.

深埋条件下盾构隧道的载荷,也即围岩与衬砌结构的相互作用,取决于施工开挖对围岩的扰动及其引起围岩中原始应力场的调整和重新分布,最终形成次生应力场的力学状态.然而,由于施工方式的特殊性,其力学过程极为复杂,施工期流固耦合效应对围岩应力场的影响不可忽略^[9-11].当盾构机通过时,刀盘掘削、开挖排土,扰动地层初始应力场,在此过程中施工引起围岩渗流场的变化,进一步影响围岩应力的变化;当盾构机通过后,管片衬砌脱环后支护围岩,围岩与管片衬砌结构相互作用、协调变形,形成围岩次生应力场.在此过程中围岩渗流场渐趋稳定,围岩的力学状态随之发生变化.可见,盾构隧道施工过程的特殊性决定了管片衬砌脱环后围岩与管片衬砌相互作用力学过程的复杂性,并决定了最终作用在管片衬砌结构上的围岩压力.而要探求

盾构隧道围岩与管片衬砌相互作用关系,必须合理考虑施工过程的特殊性,对其力学过程加以分析,主要包括:(1)开挖过程中围岩渗流场变化对应力场的影响;(2)施工过程中开挖与衬砌支护对于围岩应力场的影响.

目前,对于第1个问题的求解,蔡勇平等^[12]指出了用Mohr-Coulomb(M-C)破坏条件表达式计算水工压力隧洞弹塑性应力的载荷条件,并推导了含水围岩与衬砌应力的计算式.李宗利等^[13]以承受内水压的深埋圆形隧洞为对象,通过考虑和不考虑渗流场影响两种方法对隧洞开展了弹塑性解析,结果表明随着洞内外水头差的逐渐增大,渗流场对应力场的影响将显著增大.张常光^[14]基于平面应变状态下统一强度理论和弹脆塑性软化模型,推导了水工隧洞施工期和运行期不同载荷条件下围岩和衬砌应力、位移的统一解.从上述研究来看,围岩与衬砌结构间的相互作用受渗流场变化的影响有明显差异,可见施工方式、施工过程导致围岩渗流场变化对应力场的影响不可忽略.

在第2个问题的求解中,M-C和Hoek-Brown(H-B)准则被广泛采用.如吴顺川等^[15]对围岩和衬砌分别采用M-C屈服准则和双线性本构模型,推导了广义载荷作用下深埋圆形巷道中围岩和衬砌相互作用的弹塑性解析解.孙闯等^[16]基于M-C应变软化模型采用数值模拟手段将收敛约束法应用于高应力

软岩巷道围岩与支护结构的相互作用. 邹金锋等^[17]基于 M-C 屈服准则和应力应变软化模型并考虑轴向应力和渗透力的共同作用, 采用微小径向应力增量逐步求解法推导出软化围岩应力应变的解, 结果表明渗流对隧道围岩应力应变分布及塑性半径和围岩位移的影响不可忽略. Carranza-Torres 等^[18-19]基于 H-B 准则对收敛约束法 (convergence-confinement method, CCM) 的三大基本要素——围岩纵向变形曲线 (longitudinal deformation profile, LDP)、围岩收敛曲线 (ground reaction curve, GRC) 和支护特性曲线 (support characteristic curve, SCC) 进行理论解析, 并应用该方法进行了某圆形断面隧道的支护结构设计. 苏永华等^[20]基于 H-B 失效准则, 根据开挖空间围岩变形压力与收敛的关系导出了圆形隧道围岩载荷计算公式.

然而, M-C 准则和 H-B 准则均忽略了中间主应力的影响, 对围岩屈服或破坏的解释与实际情况难免存在较大偏差. Drucker-Prager (D-P) 准则引入了中间主应力的影响, 使得对此类问题的求解结果更符合实际. 侯公羽等^[21]基于 Levy-Mises 本构关系及 D-P 屈服准则对轴对称圆巷进行了理想弹塑性条件的求解. 张小波等^[22]考虑不同程度中间主应力的影响, 采用 D-P 屈服准则对圆形巷道围岩进行弹塑性区分析, 并与 M-C 准则解、统一强度准则解和 FLAC^{3D} 软件数值解的结果进行了对比, 认为适当的应用 D-P 屈服准则更能保证工程实践的安全性.

鉴于此, 本文基于 Drucker-Prager 准则, 推导了盾构隧道围岩的渗流力及渗流影响下围岩与衬砌结构相互作用的弹塑性解析解, 包括围岩弹、塑性区应力与位移、塑性区半径等. 在此基础上, 以收敛约束法为载体对大理深水下盾构隧道施工期和稳定期的载荷开展了分析, 并与现场实测和数值计算结果进行了对比验证.

1 围岩和衬砌结构的渗透水压力

运用渗流场基本理论推导隧道从衬砌拼装完成至水压稳定期间围岩和衬砌结构的渗透水压力, 作为等效考虑渗流效应影响下围岩与衬砌结构相互作用分析的边界条件.

对于深埋隧道, 为简化计算, 只考虑开挖面为圆形的情况. 假设围岩在半径 r_2 的范围内形成的稳定渗流场, 水头为 h_2 (相应水压为 p_{w0}), 衬砌的内径为 r_0 , 外径为 r_1 , 围岩和衬砌的渗透系数分别为 k_r 和

k_c . 分析模型如图 1 所示. 由于隧道的长度远大于断面尺寸, 可以认为是无限长的圆柱, 两端受约束, 按平面问题求解.

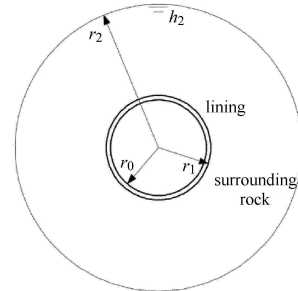


图 1 隧道-围岩渗流分析模型

Fig. 1 Model of tunnel-surrounding rock seepage analysis

衬砌内任一半径 r 处的渗流量为

$$Q_c = 2\pi r k_c \frac{dp_w}{dr} \quad (1)$$

式 (1) 的边界条件为

$$r = r_0, p = 0; r = r_1, p = p_{w1} \quad (2)$$

联立式 (1) 和式 (2) 可解得

$$Q_c = 2\pi k_c p_{w1} \ln \frac{r_1}{r_0}, r_0 \leq r \leq r_1 \quad (3)$$

同理可解得围岩内任一半径 r 处的渗流量为

$$Q_r = 2\pi k_r (p_{w0} - p_{w1}) \ln \frac{r_2}{r_1}, r_1 \leq r \leq r_2 \quad (4)$$

由于隧道衬砌和围岩处于稳定的渗流场内, 流过每一断面的渗流量都相等, 即 $Q_c = Q_r$, 联立式 (3) 和式 (4) 可解得衬砌、围岩任一半径处的渗透水压力

$$p_w = \begin{cases} p_{w0} \frac{k_r \ln \frac{r}{r_0}}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}, & r_0 \leq r \leq r_1 \\ p_{w0} \frac{k_c \ln \frac{r}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}, & r_1 \leq r \leq r_2 \end{cases} \quad (5)$$

上式为隧道开挖稳定后的渗流状态. 对于采用盾构法修建的水下隧道而言, 盾构施工过程中流固耦合效应引起的水压滞后导致施工期管片衬砌所受水压小于稳定期^[10-11, 23-25]. 该降低程度受地层条件和盾构施工参数等多种因素影响, 但具体降低多少, 目前的研究成果均未量化. 为简化起见, 本文采用将式 (5) 乘以折减系数的方法作近似处理, 折减系数取值见后文第 5 节.

代入边界条件

$$\sigma_r|_{r=r_1} = -p_a \quad (14)$$

求解可得

$$\sigma_r = (-p_a - A) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{-\frac{6\alpha}{3\alpha-1}} + \left(A - B \ln \frac{r}{r_1} \right) \quad (15)$$

式中

$$A = \frac{k}{3\alpha} - \frac{\beta p_{w0} k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{3\alpha - 1}{3\alpha} B$$

$$B = \frac{\beta p_{w0} k_c}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}$$

2.2 围岩弹性区应力

设围岩弹性区和塑性区交界处的半径为 R_0 , 界面上作用有径向应力 σ_{R_0} ; 围岩和衬砌的交界的半径为 r_1 , 在 r_1 处作用有支护阻力 p_a . 将围岩弹性区视为一厚壁圆筒, 其无穷远处作用有初始地应力 q_0 , 内半径 R_0 处承受径向应力 σ_{R_0} , 渗透水压 p_w 作用在整个区域内, 则由 Kirsch 公式可得围岩弹性区的总应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -q_0 \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \frac{R_0^2}{r^2} \sigma_{R_0} + \beta p_w \\ \sigma_\theta &= -q_0 \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) - \frac{R_0^2}{r^2} \sigma_{R_0} + \beta p_w \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

2.3 围岩塑性区半径与支护阻力的关系

围岩在弹、塑性区交界面处 ($r = R_0$) 的总应力连续, 即

$$\sigma_{rp} = \sigma_{re}, \quad \sigma_{\theta p} = \sigma_{\theta e} \quad (17)$$

上式左右两侧分别相加, 将式 (12) 和式 (16) 代入并化简, 可得

$$\frac{2k - 6\alpha\beta p_w}{3\alpha - 1} - \frac{2}{3\alpha - 1} \sigma_{rp} + 2\beta p_w = -2q_0 + 2\beta p_w \quad (18)$$

将式 (15) 代入式 (18) 并注意到 $r = R_0$, 可求得洞周径向支护阻力关于围岩塑性区半径的关系式

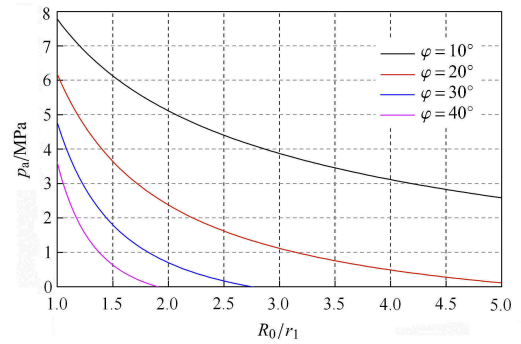
$$p_a = \left(-q_0 + \beta p_{w0} \frac{k_c \ln \frac{R_0}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}} - \frac{k}{3\alpha} + \frac{1}{3\alpha} \frac{\beta p_{w0} k_c}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}} \right) (3\alpha - 1) \left(\frac{R_0}{r_1} \right)^{\frac{6\alpha}{3\alpha-1}} - A \quad (19)$$

式 (19) 表达了在围岩岩性特征参数已知时, 径向支护阻力 p_a 与塑性区大小 R_0 之间的关系。

取 $q_0 = 10 \text{ MPa}$, $p_{w0} = 1 \text{ MPa}$, $c = 0.5 \text{ MPa}$, φ 分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$, 则 p_a 与 R_0/r_1 的关系如图 3(a) 所示. 可以看出, 在同样 R_0/r_1 的条件下, 所需支护阻力随着 φ 的减小而增大; 反之, 当 p_a 一定时, 随着 φ 的减小, 塑性区范围将逐渐增大。

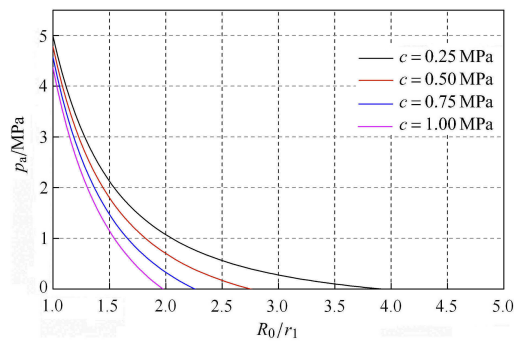
取 $q_0 = 10 \text{ MPa}$, $p_{w0} = 1 \text{ MPa}$, $\varphi = 30^\circ$, c 分别为 $0.25 \text{ MPa}, 0.505 \text{ MPa}, 0.75 \text{ MPa}, 1.00 \text{ MPa}$, p_a 与 R_0/r_1 的关系如图 3(b) 所示. 可以看出, R_0/r_1 一定时, 所需支护阻力随着 c 的减小而增大; 反之, 当 p_a 一定时, 随着 c 的减小, 塑性区范围将逐渐增大。

图 3 说明, 径向支护阻力限制了塑性区域的发展, 这是支护阻力一个很重要的作用。



(a) φ 与 R_0/r_1 的关系

(a) Relationship between φ and R_0/r_1



(b) c 与 R_0/r_1 的关系

(b) Relationship between c and R_0/r_1

图 3 径向支护阻力与围岩塑性区大小的关系

Fig. 3 Relationship between radical support pressure and radius of plastic zone of surrounding rock

2.4 围岩的位移分析

弹性区内的围岩位移可采用弹性力学中厚壁圆

筒的公式确定, 即

$$u_r^e = \frac{1 + \mu_r}{E_r} (q_0 - p_a) \frac{r_1^2}{r} \quad (20)$$

式中, μ_r 为围岩泊松比, E_r 为围岩弹性模量. 将围岩视为在弹、塑性边界上承受内压力 σ_{R_0} 的厚壁圆筒, 则弹性区的位移为

$$u_r^e = \frac{1 + \mu_r}{E_r} (q_0 - \sigma_{R_0}) \frac{R_0^2}{r} \quad (21)$$

由围岩弹、塑性边界上的位移协调条件可知

$$u_{R_0}^p = u_{R_0}^e \quad (22)$$

假定围岩在塑性区内产生变形的过程中体积不变, 则围岩周边产生的位移 u_r^p 近似等于

$$u_r^p = u_{R_0}^p \frac{R_0}{r} = u_{R_0}^e \frac{R_0}{r} = \frac{1 + \mu_r}{E_r} (q_0 - \sigma_{R_0}) \frac{R_0^2}{R_0} \frac{R_0}{r} = \frac{R_0^2 (1 + \mu_r)}{E_r r} (q_0 - \sigma_{R_0}) \quad (23)$$

联立式 (15)、式 (19) 和式 (23), 可得隧道周边位移关于支护阻力 p_a 的关系式

$$u_{r_1}^p = \frac{R_0^2 (1 + \mu_r)}{E_r r_1} \left[(3\alpha - 2) q_0 + 3\alpha\beta p_{w0} \frac{k_c \ln \frac{R_0}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}} - k \right] \quad (24)$$

由于式 (19) 为关于 R_0 的超越方程, 无法写出 R_0 关于 p_a 的显式表达式, 故式 (24) 也无法写出 $u_{r_1}^p$ 与 p_a 的显式表达式. 对于此类问题, 一般可由式 (19) 采用迭代法或试算法先求得某一 p_a 作用时的 R_0 , 再代入式 (15) 求得 σ_{R_0} , 最后代入式 (23) 求得此 p_a 作用时的 $u_{r_1}^p$. 由于采用迭代法或试算法求解较为繁琐, 因此本文拟采用更简捷的方法进行求解, 即将 R_0 作为沟通 p_a 和 $u_{r_1}^p$ 的“桥梁”, 先对 R_0 赋某一值, 通过式 (19)、式 (15) 求得相应的 p_a 和 σ_{R_0} , 再通过式 (23) 求得 $u_{r_1}^p$. 当 R_0 取值的增量足够小时, 对应的数值解趋近于精确解, 从而使计算过程得到简化.

3 围岩和衬砌结构之间平衡的建立

3.1 围岩弹塑性收敛曲线

围岩收敛曲线 (GRC) 是对不同支护阻力作用下洞周围岩变形的描述, 反映了洞周围岩位移随支护力减小而增大的关系, 其典型形态如图 4 所示^[27-28].

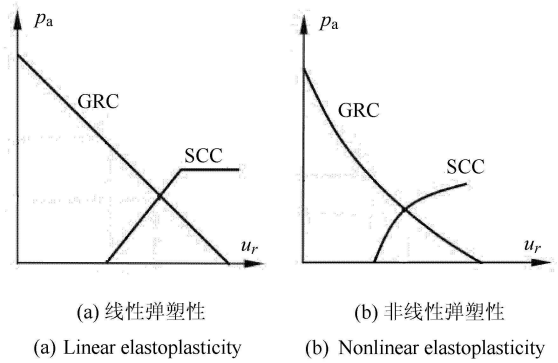


图 4 围岩收敛曲线和衬砌支护特性曲线

Fig. 4 Ground reaction curve (GRC) and support characteristic curve (SCC)

若定义隧道开挖后围岩周边不出现塑性破裂的最低支护阻力为临界阻力, 则当支护结构能够提供的支护阻力不小于临界阻力时, 开挖后围岩仍处于弹性状态, 洞周位移与支护阻力的关系曲线可用式 (21) 描述. 当支护结构能够提供的支护阻力小于临界阻力时, 开挖后围岩出现塑性区, 若考虑渗流效应并基于 D-P 屈服准则, 此时洞周位移与支护阻力的关系可用式 (24) 描述, 其对应的曲线可通过 2.4 节介绍的简化方法处理.

3.2 支护特性曲线

支护特性曲线 (SCC) 是指作用在支护结构上的载荷与支护结构变形的关系曲线, 当不考虑支护结构与围岩的接触状态对支护结构刚度的影响时, 可认为作用在支护结构上的径向压力和它的径向位移成正比. 通常支护结构都是在隧道围岩已经发生一定量值的收敛变形后才施设的, 并一直作用到支护结构强度为止, 如上图 4 所示. 支护特性曲线可用下式表示

$$u_{r_0} = u_0 + \frac{p_a r_1}{K_c} \quad (25)$$

式中, u_{r_0} 为支护结构的径向位移, u_0 为支护结构的初始径向位移, p_a 为作用在支护结构上的径向压力, K_c 为支护结构刚度.

当混凝土支护结构厚度 d_s 较小时 ($d_s \leq 0.04r_1$), 可采用薄壁圆筒公式计算, 其支护刚度和可提供的最大支护阻力 $p_{a\max}$ 分别为

$$K_c = \frac{E_c d_s}{r_1 (1 - \mu_c^2)} \quad (26)$$

$$p_{a\max} = \frac{d_s f_c}{r_1} \quad (27)$$

式中, $p_{a\max}$ 为支护结构的最大支护阻力; E_c 为混凝土弹性模量; μ_c 为混凝土泊松比; f_c 为混凝土抗压强度. 当混凝土支护结构厚度 d_s ($d_s \geq 0.04r_1$) 较大时, 可采用厚壁圆筒公式计算, 其支护刚度和可提供的最大支护阻力 $p_{a\max}$ 分别为^[5]

$$K_c = \frac{E_c(r_1^2 - r_0^2)}{r_1(1 + \mu_c)[(1 - 2\mu_c)r_1^2 + r_0^2]} \quad (28)$$

$$p_{a\max} = \frac{1}{2}f_c\left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2}\right) \quad (29)$$

对于装配式管片衬砌结构, 其厚度约为外径的 4%~6%^[29-30], 属厚壁圆筒问题. 由于接头的存在, 管片衬砌结构整体抗弯性能有所降低, 可通过引入结构横向刚度有效率 η (刚度折减系数)^[31] 来表征这一特性, 于是式 (28) 可修正为下式

$$K_c = \frac{\eta E_c(r_1^2 - r_0^2)}{r_1(1 + \mu_c)[(1 - 2\mu_c)r_1^2 + r_0^2]} \quad (30)$$

需要指出, 前文对围岩进行弹塑性分析时, 考虑了渗流作用, 得到的围岩收敛曲线方程中含有渗透水压力项. 然而在得出管片衬砌支护特性曲线时采用的是传统的分析方法, 尚未考虑渗透水压力的影响, 这显然不尽合理. 因此此处采用简化方法考虑这一作用, 认为渗透水压力使管片结构产生初始位移, 即其扩大了围岩与管片结构相互作用前二者的“间隙”.

文献 [32] 指出, 由于衬砌厚度相对较小, 可以把以体积力形式作用在衬砌范围内的渗流力以合力的形式表达为作用在衬砌背后的表面力. 对于本文, 其值可通过对式 (5) 第 2 式积分得到

$$F_w = \frac{p_{w0}k_r \ln \frac{r_1}{r_0}}{k_c \ln \frac{r_2}{r_1} + k_r \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (31)$$

由厚壁圆筒仅受外压作用时的位移公式可得, 渗透水压作用下管片衬砌的附加径向位移为

$$u_0^{p_w} = \frac{F_w r_1^2}{\eta E_c (r_1^2 - r_0^2)} \left[\frac{(1 + \mu_r) r_0^2}{r_1} + (1 - \mu_r) r_1 \right] \quad (32)$$

将上式计算结果叠加到式 (25) 的 u_0 中, 即可在管片衬砌支护特性曲线中考虑渗流作用的影响.

3.3 围岩与衬砌结构静力平衡状态的建立

围岩开挖刚完成时, 若要保持围岩稳定, 需要很大的支护阻力才能够实现, 往往远大于支护结构所

能提供的最大支护力, 因此, 围岩会继续发生收敛变形. 与此同时, 由于支护结构径向变形逐渐增大, 所能提供的支护阻力也随之增大. 最终, 围岩收敛曲线将与管片衬砌的支护特性曲线相交于一点, 达到平衡状态. 交点横坐标对应平衡体系形成时的协调位移, 也即洞周发生的位移; 交点纵坐标为管片衬砌结构承担的载荷, 其以上部分为围岩自身需要承担的载荷.

4 工程实例分析

狮子洋隧道位于广深港客运专线东涌站至虎门站之间, 穿越珠江入海口的狮子洋. 隧道工程范围全长 10 800 m, 其中盾构段 9 340 m. 隧道主体结构采用单层装配式管片衬砌结构, 内径 9.8 m, 外径 10.8 m, 管片厚度 50 cm, 平均幅宽为 2 m, 采用“7+1”分块方式的通用楔形环钢筋混凝土管片错缝衬砌, 混凝土强度等级为 C50, 抗渗等级为 P12^[33].

在右线基岩浅埋段设置试验断面测试衬砌承受的水土压力. 试验断面隧道大范围通过弱风化泥质粉砂岩, 隧道埋深约为 38 m (超过 2 倍隧道外直径), 水头约为 38 m. 实测施工期和稳定后作用在管片衬砌上的水压力分别为 0.33 MPa, 0.39 MPa, 围岩压力分别为 0.10 MPa, 0.16 MPa^[25]. 因此, 施工期流固耦合效应引起的水压折减系数可暂取 0.85.

监测断面处围岩及管片衬砌结构的几何和力学参数根据文献 [33-35] 取值. 管片结构横向刚度有效率 η 根据文献 [31] 取 0.70; 管片衬砌混凝土抗渗等级为 P12, 可认为管片不透水; 支护设施时围岩径向收敛值 u_0 未知, 暂由刀盘开挖直径和管片外径确定, 取 $u_0 = 191 \text{ mm}$ ^[36].

综上, 计算所取参数分别为

$$r_0 = 4.9 \text{ m}; \quad r_1 = 5.4 \text{ m}; \quad r_2 = 38 \text{ m}; \quad d_s = 0.5 \text{ m}$$

$$E_r = 160 \text{ MPa}; \quad \gamma = 26 \text{ kN/m}^3; \quad c = 180 \text{ kPa}; \quad \varphi = 42^\circ$$

$$E_c = 34.5 \text{ GPa}; \quad \mu_c = 0.2; \quad f_c = 23.1 \text{ MPa}$$

$$u_0 = 0.191 \text{ m}$$

$$q_0 = \gamma H = 0.988 \text{ MPa}; \quad p_{w0} = \gamma_w H_w = 0.38 \text{ MPa}$$

$$k_r = 0.304 \text{ m/d}; \quad k_c = 0; \quad \beta = (2/3 + 1)/2$$

根据式 (21)、式 (24)、式 (29) 和式 (30) 求解并在同一坐标系中绘制围岩弹塑性收敛曲线和支护特性曲线, 如图 5 所示. 从图中可以看出, 对于本例, 由

于管片衬砌刚度大, 而渗透水压相对较小, 产生的管片衬砌附加变形很小. 分别求出施工期和稳定期围岩收敛曲线与支护特性曲线的交点, 其横坐标即为管片结构所承担的围岩载荷. 本算例中, 计算结果分别为 0.128 MPa, 0.179 MPa.

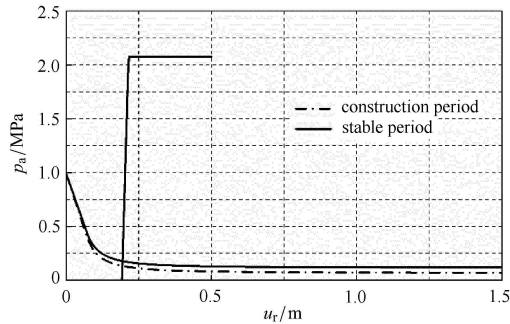


图 5 围岩与衬砌结构的相互作用

Fig. 5 Interaction between surrounding rock and lining structure

为进一步验证本文方法的有效性, 采用 FLAC^{3D} 建立数值分析模型, 计算隧道开挖后作用在管片衬砌上的围岩压力. 计算所取几何参数及材料物理学参数均与理论分析取值相同. 对于理论解析中未考虑的管片壁后注浆材料, 数值分析模型中也采用“弹性等代层”, 等代层参数见表 1.

计算按平面应变问题考虑, 模型中地层、管片衬砌和注浆材料均采用实体单元模拟, 地层材料采用 D-P 模型, 其他材料采用弹性模型. 模型上表面为自由边界, 取实际埋深 38 m, 其他边界取 4D (D 为管片外径), 并施加法向约束. 初始地应力取自重力应力, 初始水压取静水压力, 水位与地表平齐.

表 1 等代层参数

Table 1 Parameters of equivalent layer

Unit weight/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	Elasticity modulus/ GPa	Poisson's ratio	Porosity	Permeability coefficient/ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
23.0	25.5	0.20	0.10	$k_r/100$

由于施工过程中浆液逐渐硬化, 其材料参数会产生较大变化, 加之浆液在周围地层中流动、扩散, 施工中某一时刻的浆液参数很难确定, 因此仅列出稳定后作用在管片衬砌的围岩压力, 计算结果为 0.170 MPa.

采用本文方法计算得到的结果与现场实测值相比, 施工期和稳定期分别偏大 28% 和 12%; 与数值计算结果相比, 稳定期偏大 5%. 初步分析导致差异

的因素有 4 点: (1) 本文推导时假定围岩与衬砌结构紧密接触, 而现场实际并不能保证二者完全密贴, 因此测得的接触压力偏小; (2) 现场测试时管片壁后注浆浆液容易包裹在土压力盒周围, 使围岩压力不能完全传递至传感器受力面, 造成实测压力值小于实际值; (3) 推导时假定围岩初始应力场均匀分布, 且围岩为各项同性的理想弹塑性材料, 而实际很难保证; (4) 数值分析模型所取等代层参数为经验值, 条件所限而未能根据实测结果进行参数反演, 与实际情况可能存在偏差. 因此, 可认为本文解析方法得到的结果可信, 并具有较高的精度. 但由于施工期流固耦合效应造成的水压降低程度不易量化, 采用本文方法计算施工期管片衬砌承担的围岩压力有一定偏差, 尚需作进一步研究.

5 结论

本文基于 Drucker-Prager 准则, 针对盾构隧道施工的力学过程, 等效考虑渗流效应影响推导了围岩与衬砌结构相互作用的弹塑性解析解, 包括围岩弹、塑性区应力与位移、塑性区半径等, 并通过建立围岩与衬砌结构静力平衡状态得到管片衬砌结构承担的围岩压力, 最后通过算例与典型大埋深水下盾构隧道荷载实测及数值计算值进行比较分析, 得到以下结论:

(1) 等效考虑渗流效应影响并基于 Drucker-Prager 屈服准则, 推导了无限均质各项同性围岩受等压作用平面应变问题的解析解, 得到了围岩弹、塑性区应力与位移、塑性区半径等与支护压力间的关系式, 弥补了以往研究成果未能反映渗流力影响的缺憾.

(2) 阐述了围岩与支护结构静力平衡状态的建立方法, 并作为特例, 介绍了盾构隧道管片衬砌支护特性曲线的处理方法, 即采用结构横向刚度有效率 η 对整环刚度进行折减, 以反映接头对结构整体刚度的影响.

(3) 选取广深港客运专线狮子洋穿越基岩段水下盾构隧道为对象, 采用本文解析方法计算了施工期和稳定期作用在管片衬砌上的围岩水土压力. 与现场实测结果相比, 施工期和稳定期的计算值分别大 28% 和 12%.

(4) 本文解析方法与现场实测及数值计算结果存在差异的原因为: 现场围岩与衬砌间并不能完全满足计算假定的紧密接触条件; 现场测试时管片壁后

注浆的包裹作用使测试结果只能反映实际围岩压力的一部分; 实际情况很难保证围岩为无限均质各项同性介质, 并受等压作用; 数值计算模型采用的等代层参数与实际情况可能存在偏差。

参 考 文 献

- Ita WG. Guidelines for the design of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(3): 303-331
- 2020 年前广州将新建多条排水防涝深隧支隧. <http://www.zgsz.org.cn/2014/0612/11205.html>. 2014-6-12 (Guangzhou will build a number of deep buried drainage tunnels and anti-waterlogging branch tunnels until 2020. http://news.xinhuanet.com/energy/2016-01/18/c_1117801885.htm. 2014-6-12 (in Chinese))
- 黄鹏程. 武汉地下将建首条污水深隧. http://news.xinhuanet.com/energy/2016-01/18/c_1117801885.htm. 2016-1-8 (Huang Pengcheng. Wuhan will build its first deep buried sewage tunnel. http://news.xinhuanet.com/energy/2016-01/18/c_1117801885.htm. 2016-1-8 (in Chinese))
- 赖芳杰. 掘地 30 米成都将建 78.8 公里污水深隧防内涝. <http://www.sc.gov.cn/10462/12771/2016/4/3/10374826.shtml>. 2016-4-3 (Lai Fangjie. Digging 30 m, Chengdu will build 78.8 km of deep buried sewage tunnel to prevent urban waterlogging. <http://www.sc.gov.cn/10462/12771/2016/4/3/10374826.shtml>. 2016-4-3 (in Chinese))
- 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109 (He Chuan, Feng Kun, Fang Yong. Review and prospect on the constructing technologies of metro tunnel using shield tunneling method. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(1): 97-109 (in Chinese))
- 何川. 盾构/TBM 施工煤矿长距离斜井的技术挑战与展望. 隧道建设, 2014, 34(4): 287-297 (He Chuan. Challenges and prospectives of construction of long distance inclined shafts of coal mines by shield/TBM. *Tunnel Construction*, 2014, 34(4): 287-297 (in Chinese))
- 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65 (Editorial Office of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(5): 1-65 (in Chinese))
- 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望. 隧道建设, 2015, 35(2): 95-107 (Hong Kairong. State-of-art and prospect of tunnels and underground works in China. *Tunnel Construction*, 2015, 35(2): 95-107 (in Chinese))
- 何川, 封坤. 大型水下盾构隧道结构研究现状与展望. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 1-11 (He Chuan, Feng Kun. Review and prospect of structure research of underwater shield tunnel with large cross-section. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(1): 1-11 (in Chinese))
- 齐春, 何川, 封坤. 考虑流固耦合效应的水下盾构隧道受力特性. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 306-311, 330 (Qi Chun, He Chuan, Feng Kun. Fluid-solid interaction-based mechanical characteristics of underwater shield tunnel. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(2): 306-311, 330 (in Chinese))
- 夏炜洋. 盾构法隧道施工期流固耦合问题研究. [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012 (Xia Weiyang. Study on coupled solid-fluid problem of shield tunnel during construction period. [PhD Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012 (in Chinese))
- 蔡勇平, 蔡晓鸿. 水工压力隧洞结构应力计算. 北京: 中国水利水电出版社, 2004 (Cai Yongping, Cai Xiaohong. Stress Calculation of Hydraulic Pressure Tunnel Structure. Beijing: China Water & Power Press, 2004 (in Chinese))
- 李宗利, 任青文, 王亚红. 考虑渗流场影响深埋圆形隧洞的弹塑性解. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1291-1295 (Li Zongli, Ren Qingwen, Wang Yahong. Elasto-plastic analytical solution of deep-buried circle tunnel considering fluid flow field. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1291-1295 (in Chinese))
- 张常光. 圆形压力隧洞弹性应力和位移分析. [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008. (Zhang Changguang. Analysis of elastic-plastic stress and displacement for circular pressure tunnel. [Master Thesis]. Xi'an: Chang'an University, 2008 (in Chinese))
- 吴顺川, 潘旦光, 高永涛. 深埋圆形巷道围岩和衬砌相互作用解析解. 工程力学, 2011, 28(3): 136-142 (Wu Shunchuan, Pan Danguang, Gao Yongtao. Analytic solution for rock-liner interaction of deep circular tunnel. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 136-142 (in Chinese))
- 孙闯, 张向东, 李永靖. 高应力软岩巷道围岩与支护结构相互作用分析. 岩土力学, 2013, 34(9): 2601-2607 (Sun Chuang, Zhang Xiangdong, Li Yongjing. Analysis of interaction between surrounding rock and support structure in high stressed soft rock roadway. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2601-2607 (in Chinese))
- 邹金锋, 李帅帅, 张勇等. 考虑轴向力和渗透力时软化围岩隧道解析解. 力学学报, 2014, 46(5): 747-755 (Zou Jinfeng, Li Shuaishuai, Zhang Yong, et al. Solution and analysis of circular tunnel for the strain-softening rock masses considering the axial in situ stress and seepage force. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(5): 747-755 (in Chinese))
- Carranza-Torres C, Fairhurst C. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(6): 777-809
- Carranza-Torres C, Fairhurst C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the hoek-brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(2): 187-213
- 苏永华, 刘少峰, 王凯旋等. 基于收敛-约束原理的地下结构稳定性分析. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2002-2009 (Su Yonghua, Liu Shaofeng, Wang Kaixuan, et al. Stability analysis of underground structures based on convergence-confinement method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2002-2009 (in Chinese))
- 侯公羽, 牛晓松. 基于 Levy-Mises 本构关系及 D-P 屈服准则的轴对称圆巷理想弹塑性解. 岩土力学, 2009, 30(6): 1555-1562 (Hou Gongyu, Niu Xiaosong. Perfect elastoplastic solution of axisymmetric circular openings in rock mass based on Levy-Mises constitutive relation and D-P yield criterion. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1555-1562 (in Chinese))

- 22 张小波, 赵光明, 孟祥瑞. 基于 Drucker-Prager 屈服准则的圆形巷道围岩弹塑性分析. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 30-37 (Zhang Xiaobo, Zhao Guangming, Meng Xiangrui. Elastoplastic analysis of surrounding rock on circular roadway based on Drucker-Prager yield criterion. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S1): 30-37 (in Chinese))
- 23 谢红强. 隧道工程热液固多场耦合效应研究. [博士论文]. 成都: 西南交通大学, 2006 (Xie Hongqiang. Study on multi-field coupled effects of heat, liquid and solid in tunnel works. [PhD Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006 (in Chinese))
- 24 何川, 谢红强. 多场耦合分析在隧道工程中的应用. 成都: 西南交通大学出版社, 2007 (He Chuan, Xie Hongqiang. Application of Analysis of Multi-field Coupled Effects in Tunnel Works. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007 (in Chinese))
- 25 肖明清. 大型水下盾构隧道结构设计关键问题研究. [博士论文]. 成都: 西南交通大学, 2014 (Xiao Mingqing. Research on key issues of segmental lining structure design for underwater shield tunnel with large cross-section. [PhD Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014 (in Chinese))
- 26 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理——广义塑性力学. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002 (Zheng Yingren, Shen Zhujiang, Gong Xiaonan. Principle of Plastic Mechanics of Rock and Soil—Generalized Plastic Mechanics. Beijing: China Building Industry Press, 2002 (in Chinese))
- 27 Alejano LR, Alonso E, Rodríguez-Dono A, et al. Application of the convergence-confinement method to tunnels in rock masses exhibiting Hoek-Brown strain-softening behaviour. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(1): 150-160
- 28 González-Nicieza C, Álvarez-Vigil AE, Menéndez-Díaz A, et al. Influence of the depth and shape of a tunnel in the application of the convergence-confinement method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(1): 25-37
- 29 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道. 北京: 中国铁道出版社, 1991 (Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Shield Tunnel. Beijing: China Railway Publishing House, 1991 (in Chinese))
- 30 日本土木学会. 盾构隧道管片设计——从允许应力法到极限状态法. 官林星译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012 (JSCE. Design of Shield Tunnel Segment—From Allowable Stresses Method to Limit State Method. Guan LX transl. Beijing: China Building Industry Press, 2012 (in Chinese))
- 31 封坤, 何川, 夏松林. 大断面盾构隧道结构横向刚度有效率的原型试验研究. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1750-1758 (Feng Kun, He Chuan, Xia Songlin. Prototype tests on effective bending rigidity ratios of segmental lining structure for shield tunnel with large cross-section. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1750-1758 (in Chinese))
- 32 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力载荷. 铁道建筑技术, 2008, (2): 1-6 (Wang Jianyu. Problems on external water pressure on tunnel lining. *Railway Construction Technology*, 2008, (2): 1-6 (in Chinese))
- 33 铁道第四勘察设计院. 广深港客运专线广州至深圳段狮子洋隧道盾构隧道结构设计. 武汉: 铁道第四勘察设计院, 2006 (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd. Structure design of Shiziyang shield tunnel of Guangzhou-Shenzhen section of Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong PDL. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd, 2006 (in Chinese))
- 34 铁道第四勘察设计院. 广深港客运专线广州至深圳段狮子洋隧道工程地质勘察报告. 武汉: 铁道第四勘察设计院, 2006 (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd. Geological survey report of Shiziyang shield tunnel of Guangzhou-Shenzhen section of Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong PDL. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd, 2006 (in Chinese))
- 35 中华人民共和国铁道部. TB10003-2005, J449-2005 铁路隧道设计规范. 北京: 中国铁道出版社, 2005 (Ministry of Railways of the PRC. TB10003-2005, J449-2005 Code for design of Railway Tunnels. Beijing: China Railway Publishing House, 2005 (in Chinese))
- 36 洪开荣. 高速铁路特长水下盾构隧道施工技术. 北京: 中国铁道出版社, 2013 (Hong Kairong. Construction Technologies of Extra Long Underwater Shield-Bored High Speed Railway Tunnels. Beijing: China Railway Publishing House, 2013 (in Chinese))