

DOI: 10.11779/CJGE202107012

深埋黄土盾构隧道围岩压力解析

韩兴博^{1,2}, 叶 飞^{*1,2}, 冯浩岚¹, 韩 鑫¹, 田崇明¹, 雷 平¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 公路大型结构安全教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

摘要: 随着盾构隧道工程的发展, 越来越多的深埋黄土盾构隧道逐步出现。对其围岩压力进行准确计算对衬砌设计及服役期的安全评价具有重要意义。围绕深埋黄土盾构隧道围岩压力的计算, 考虑盾构隧道衬砌与围岩的径向变形连续条件, 基于芬纳公式, 推导了盾构隧道衬砌内力、围岩应力及围岩变形的解析解; 引入黄土结构性参数, 给出了适用黄土盾构隧道的围岩压力解析解; 结合隧道开挖后围岩的广义剪应变, 构建了黄土隧道围岩结构性参数的求解方法; 结合黄土结构性参数, 讨论了围岩增湿对黄土结构性参数及围岩压力的影响。研究发现: 广义剪应变在塑性区内沿径向增大, 在弹性区内逐渐减小, 2倍塑性区半径外基本稳定; 围岩的黄土结构性参数在塑性区内可认为均匀分布; 围岩含水率由2%增加至20%时, 塑性区的扩大幅度约为33%, 围岩压力的增幅约为10%。研究成果以期对深埋黄土盾构隧道的围岩压力计算提供思路。

关键词: 盾构隧道; 黄土围岩; 围岩压力; 芬纳公式; 结构性参数

中图分类号: TU43; U451.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)07-1271-08

作者简介: 韩兴博(1991—), 男, 博士, 讲师, 从事隧道长期性能相关研究工作。Email: xingbo.han@chd.edu.cn。

Pressure of surrounding rock of deep-buried loess shield tunnel

HAN Xing-bo^{1,2}, YE Fei^{*1,2}, FENG Hao-lan¹, HAN Xin¹, TIAN Chong-ming¹, LEI Ping¹

(1. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Research Center of Highway Large Structure

Engineering on Safety, Ministry of Education, Xi'an 710064, China)

Abstract: With the development of shield tunnel engineering, more and more deep-buried loess shield projects have gradually appeared. The calculation of pressure of the surrounding rock is of great significance to the design of linings and safety evaluation during the service period. The aim of this study is to establish a theoretical solution for pressure of the surrounding rock of deep-buried loess shield tunnel. With the consideration of the continuous conditions of the radial deformation at the interface between the linings and the surrounding rock, the analytical solutions for forces and displacements of the linings and surrounding rock are derived based on the Fenner formula. Then, the analytical solution of pressure of the surrounding rock applicable to loess shield tunnel is given by introducing the structural parameters of loess. Considering the generalized shear strain of the surrounding rock after tunnel excavation, a solving method for the structural parameters of surrounding rock of loess tunnel is given. The influences of humidification on the structural parameters of loess and the pressure of surrounding rock are then discussed by introducing the surrounding rock structural parameters of loess. It is found that the generalized shear strain increases radially in the plastic zone and gradually decreases in the elastic zone. It is basically stable outside the twice the radius of the plastic zone. The structural parameters of loess of the surrounding rock can be recognized as evenly distributed in the plastic zone. When the water content of rock increases from 2% to 20%, the expansion of the plastic zone is about 33%, and the increase of the pressure of the surrounding rock is about 10%. The research results are expected to provide ideas for the calculation of pressure of the surrounding rock of deep-buried loess shield tunnels.

Key words: shield tunnel; loess; surrounding rock pressure; Fenner formula; structural parameter

0 引言

20世纪初, 隧道工程围岩稳定性分析主要以海姆、朗肯、金尼克等人为代表的古典压力理论为据。随着开挖深度的增加, 太沙基理论^[1]和普氏理论分别在欧美和前苏联地区逐渐流行。20世纪70年代新奥法的兴起, 催化形成了以岩石力学为基础, 考虑支护

与围岩共同承担荷载的隧道工程支护理论。与此同时,

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2020M683398); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102210124); 国家自然科学基金面上项目(51878060)

收稿日期: 2020-11-12

*通信作者(E-mail: xianyefei@126.com)

有限单元法的普及也推进了“连续体模型”^[2-3]在隧道设计中的应用。但是,由于构建岩体本构关系以及选取物理力学参数的困难,工程师们似乎仍然更愿意采用熟悉的“荷载-结构”模式^[4-7]。如此,在隧道围岩压力计算方面便基本形成了“离散压力”和“形变压力”两大类。通过大量的工程实践及现场测试分析^[8],对于深埋隧道采用“形变压力”分析围岩对衬砌的作用已基本形成共识^[9-12]。

关于黄土隧道围岩压力的研究也伴随围岩压力的发展而发展。黄土隧道围岩压力的计算研究首先在铁路行业展开。最早在1962年铁道部第三、第四设计院对陇海线37座黄土围岩隧道调查后,建议按照普氏理论计算围岩压力。直到1995年颁布的《铁路工程设计技术手册(隧道)》明确了黄土隧道围岩压力的计算方法,即:浅埋隧道围岩压力采用谢家杰公式进行计算,深埋隧道采用修正卡柯公式进行计算。手册并指出,对黄土地区隧道不宜按计算摩擦角或围岩类别确定隧道围岩压力,应根据实测的黄土物理力学指标进行设计。该手册的总结基本体现了当时中国对黄土隧道的认识水平^[10]。黄土公路隧道的修建起步较晚,基本借鉴了铁路隧道在此方面的科研成果。由目前黄土隧道围岩压力的计算方法可以看出,其材料本构多用莫尔库仑或双线性准则。这些公式在不考虑黄土增湿结构性降低时,能够较为准确地对围岩压力进行计算^[13-14]。但是,黄土增湿导致的结构性降低是影响黄土围岩荷载的重要因素^[15-18]。为了便于在实际工程中考虑黄土的结构性,谢定义等^[19-20]、陈昌禄等^[21]、邵生俊^[22]、邓国华等^[23-26]对黄土结构性参数进行了大量的研究。这些研究将黄土的结构性用一特定参数来表示,实现了黄土结构性随含水率、围压、广义剪应变等变化的描述。这类结构性参数为黄土地层隧道围岩压力的求解提供了思路,但是如何将其应用到隧道工程中仍然有待进一步研究^[23]。

为了实现深埋黄土盾构隧道围岩压力的计算,本研究拟首先基于芬纳公式,考虑盾构隧道衬砌与围岩的变形连续等边界条件,给出深埋盾构隧道围岩应力与变形的解析过程。其次,在芬纳公式中引入黄土结构性参数,给出适用黄土盾构隧道的围岩压力解析。同时,给出隧道工程黄土围岩结构性参数的具体求解方法。研究成果以期对深埋黄土盾构隧道的围岩压力计算提供思路。

1 盾构隧道围岩压力计算

1.1 基于芬纳公式的围岩压力计算

假定深埋隧道的围岩为均匀、连续、各向同性的

理想弹塑性介质,初始地应力为静水压力式。由芬纳公式及修正的芬纳公式可知,深埋圆形洞室的围岩压力可以通过初始地应力、洞室半径、塑性区半径等计算,如图1,有

$$p_i = (p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - ccot\varphi \quad (1)$$

式中 p_i 为围岩压力; p_0 为初始地应力; c 为围岩黏聚力; φ 为内摩擦角; R_0 为隧道开挖半径; R_p 为塑性区半径,将式(1)移项,得

$$R_p = \left[\frac{(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi)}{p_i + ccot\varphi} \right]^{\frac{1-\sin\varphi}{2\sin\varphi}} R_0 \quad (2)$$

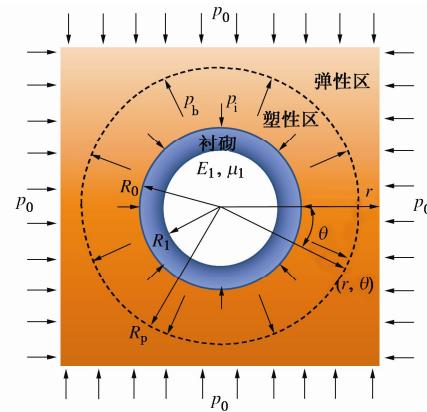


图1 计算简图

Fig. 1 Diagram of calculation

1.2 塑性区半径求解方程的建立

由式(1)可知,塑性区半径是求解围岩压力的重要参数。本节将通过衬砌与围岩塑性区在边界上的位移条件,建立塑性区半径的求解方程。

围岩弹性区的变形可以通过拉梅公式进行解答,荷载 p_0 引起的弹性区内一点的径向位移为

$$u' = \frac{1+\mu}{E} \frac{R_p^2}{r} p_0 \quad , \quad (3)$$

式中, u' 为弹性区一点由 p_0 引起的径向位移, E 为弹性模量, μ 为泊松比, r 为计算位置的半径。

同理,塑性区对弹性区的径向作用力引起弹性区内某点的位移为

$$u'' = -\frac{1+\mu}{E} \frac{R_p^2}{r} p_b \quad , \quad (4)$$

式中, u'' 为弹性区一点由 p_b 引起的径向位移, p_b 为塑性区对弹性区的径向作用力。

开挖引起弹性区内一点的径向位移为 p_0 与 p_b 作用的和:

$$u = u' + u'' = \frac{1+\mu}{E} (p_0 - p_b) \frac{R_p^2}{r} \quad . \quad (5)$$

围岩塑性区一点的径向变形为

$$\begin{aligned}
 u = & \frac{1-2\mu}{E} r \left[(p_i + ccot\varphi) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - ccot\varphi \right] + \\
 & \frac{2-\mu}{E} \frac{R_p^2}{r} \left[-(p_i + ccot\varphi) \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} + ccot\varphi \right] + \\
 & \frac{1+\mu}{E} \frac{R_p^2}{r} p_0 \quad . \tag{6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - ccot\varphi \right] \\
 & \left\{ \frac{1-2\mu}{E} - \frac{1+\mu_1}{E_1} \left[\frac{R_1^2 + (1-2\mu_1)R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \right] \right\} + \\
 & \frac{R_p^2}{R_0^2} \left\{ \frac{2\mu-1}{E} p_0 + \frac{2-\mu}{E} [(p_0 + ccot\varphi) \sin\varphi] \right\} = 0 \quad . \tag{12}
 \end{aligned}$$

由厚壁圆筒理论, 衬砌的应力为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p_i}{\left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2}\right)r^2} - \frac{p_i}{\left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2}\right)R_1^2}, \\ \sigma_\theta = \frac{-p_i}{\left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2}\right)r^2} - \frac{p_i}{\left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2}\right)R_1^2} \quad . \end{cases} \tag{7}$$

式中 σ_r 为径向应力; σ_θ 为环向应力; R_1 为衬砌的内半径。

则衬砌外缘的径向位移为

$$u_{R_0}^c = \varepsilon_\theta R_0 = \frac{1+\mu_1}{E_1} p_i \left[\frac{R_1^2 + (1-2\mu_1)R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \right] R_0 \quad , \tag{8}$$

式中, ε_θ 为环向应变, E_1 为衬砌弹性模量, μ_1 衬砌为泊松比。

同时, 塑性区内缘的径向位移为

$$u_{R_0} = \frac{1-2\mu}{E} R_0 p_i - \frac{2-\mu}{E} \frac{R_p^2}{R_0} p_0 + \frac{1+\mu}{E} \frac{R_p^2}{R_0} p_0 \quad . \tag{9}$$

对于盾构隧道而言, 管片在盾构机掘进后便立即施做, 可以认为塑性区内缘的径向位移和管片外缘的径向位移一致, 即

$$u_{R_0}^c = u_{R_0} \quad . \tag{10}$$

将式(8), (9)代入式(10), 得

$$\begin{aligned}
 & \frac{1-2\mu}{E} R_0 \left[(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - ccot\varphi \right] - \frac{2-\mu}{E} \frac{R_p^2}{R_0} \\
 & \left[-ccot\varphi + \left[(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - ccot\varphi \right] + \right. \\
 & \left. ccot\varphi \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} \right] + \frac{1+\mu}{E} \frac{R_p^2}{R_0} p_0 \\
 & = \frac{1+\mu_1}{E_1} \left[(p_0 + ccot\varphi)(1 - \sin\varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - ccot\varphi \right] \\
 & \left[\frac{R_1^2 + (1-2\mu_1)R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \right] R_0 \quad . \tag{11}
 \end{aligned}$$

化简式(11), 有

1.3 塑性区半径的迭代求解

式(12)是关于 R_p 的超越方程, 可以通过牛顿迭代法进行求解。首先, 记方程(12)为 $f(R_p)=0$; 选取 R_{p0} 为 R_p 的初始近似值, 在 R_{p0} 处将 $f(R_p)$ 展开为泰勒级数:

$$\begin{aligned}
 f(R_p) = & f(R_{p0}) + f'(R_{p0})(R_p - R_{p0}) + \\
 & \frac{f''(R_{p0})(R_p - R_{p0})^2}{2!} + \cdots + \frac{f^{(n)}(R_{p0})(R_p - R_{p0})^n}{n!} + R_n(x), \tag{13}
 \end{aligned}$$

取其线性部分等于 0, 得

$$f(R_{p0}) + f'(R_{p0})(R_p - R_{p0}) = 0 \quad , \tag{14}$$

以式(14)作为 $f(R_p)=0$ 的近似方程, 当 $f'(R_{p0}) \neq 0$, 则其解为

$$R_{p1} = R_{p0} - \frac{f(R_{p0})}{f'(R_{p0})} \quad . \tag{15}$$

将式(15)转化为迭代关系:

$$R_{p(n+1)} = R_{pn} - \frac{f(R_{pn})}{f'(R_{pn})} \quad . \tag{16}$$

迭代计算的流程如图2所示。为了防止出现方程奇异, 设置阈值 e_1 对首次迭代的方程结果进行初判。

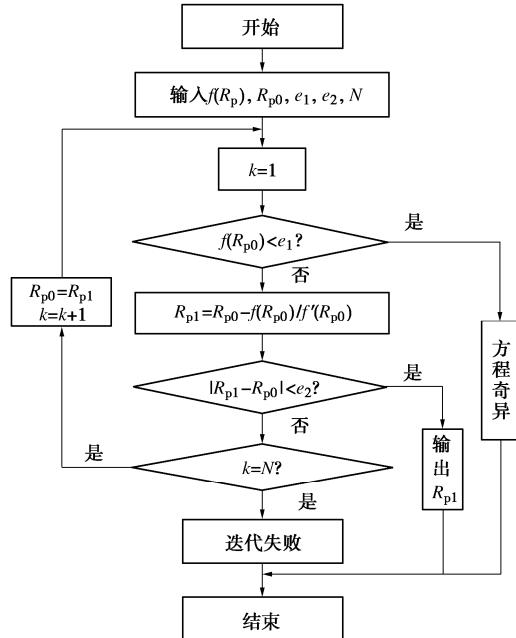


图2 超越方程的迭代求解流程

Fig. 2 Iterative algorithm of transcendental equation

符合要求后迭代计算 R_{pl} , 同时设置阈值 e_2 对迭代前后的塑性区半径差值进行比判。考虑到计算精度和计算效率, 建议 $e_2=10^{-4}$ 。为了防止迭代陷入死循环, 设置最大迭代次数为 N , 迭代超过 N 次后停止计算。

1.4 适用性验证

通过上述流程迭代求解出塑性区半径后代入式(1), 即可计算得到围岩压力。

文献[27]对一盾构隧道 4 个断面的围岩压力进行了现场测试。测试断面的埋深分别为 14.8, 19.5, 23.1, 24.8 m。管片直径为 8.7 m, 刀盘直径为 9 m, 衬砌厚度为 0.4 m。参照文献[27]的围岩及隧道参数(表 1), 按照上述流程, 计算得到的围岩压力与实测对比结果如图 3 所示。由图 3 可知, 计算得到的围岩压力均在现场试验得到的测试结果范围内。说明使用本文方法计算盾构隧道的围岩压力具有适用性。此外, 将使用牛顿迭代法计算得到的 R_p 代入式(12)左侧, 计算结果为 1.36×10^{-20} , 与右侧 0 值非常接近。因此, 使用牛顿迭代法求解超越方程(12)具有准确性。

表 1 计算参数取值表

Fig. 1 Values of calculation parameters

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
围岩	2	0.37	22	20	11.5
衬砌	17	0.20	25	—	—

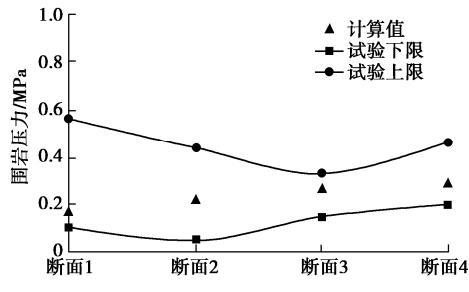


图 3 计算值与现场测试结果对比

Fig. 3 Comparison between calculated and field test results

2 考虑黄土结构性参数的隧道围岩压力计算

邵生俊等^[22]将结构性参数引入莫尔库仑强度理论用于表达黄土的强度特征, 考虑黄土结构性影响的 Mohr-Coulomb 强度理论如下:

$$\tau = c_{(m_\sigma)} + \sigma \tan \varphi_{(m_\sigma)}, \quad (17)$$

式中, τ 为结构性黄土的抗剪强度, σ 为结构性黄土的正应力, $c_{(m_\sigma)}$ 考虑黄土结构性的黏聚力, $\varphi_{(m_\sigma)}$ 为考虑黄土结构性的摩擦角。

邵生俊等^[22]通过大量试验发现, 考虑结构性的黄土摩擦角与黄土结构性参数的关系不大。考虑结构性

的黄土黏聚力可建立与结构性参数的关系, 因此式(17)可简化为

$$\tau = \frac{m_\sigma}{a + b m_\sigma} + \sigma \tan \varphi, \quad (18)$$

式中, $a=0.045$, $b=0.0022$, m_σ 为黄土的应力比结构性参数。

因此, 考虑黄土结构性参数后, 围岩压力为

$$p_i = (p_0 + c(m_\sigma) \cot \varphi)(1 - \sin \varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c(m_\sigma) \cot \varphi. \quad (19)$$

由式(19)可知, 结构性参数的求解成为了求解黄土隧道围岩压力的重要内容。邵生俊通过三轴试验发现 m_σ 与黄土的含水率, 固结压力, 广义剪应变存在联系, 结构性参数与广义剪应变之间的关系可以表达为

$$m_\sigma = A \varepsilon_s \exp[-(B \varepsilon_s + C)] + D \varepsilon_s + E, \quad (20)$$

式中, $A=1$, $B=0.85$, C , D , E 分别为

$$C = k_{c1} w \left(\frac{\sigma_{3c}}{p_a} \right)^{0.2} + k_{c2}, \quad (21)$$

$$D = -k_{d1} \exp(-k_{d2} w), \quad (22)$$

$$E = \frac{k_{e1} \exp(-k_{e2} w)}{\sqrt{\sigma_{3c}/p_a}} + 1. \quad (23)$$

式中 p_a 为标准大气压; w 为围岩含水率; $k_{c1}=26.51$; $k_{c2}=-5.52$; $k_{d1}=1.734$; $k_{d2}=15.39$; $k_{e1}=33.34$; $k_{e2}=11.43$ 。

广义剪应变的表达式为

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} . \quad (24)$$

主应变和径向及环向应变的关系为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} \right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} = \varepsilon_\theta, \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_r, \\ \varepsilon_3 &= \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} \right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

径向应变和环向应变在弹性区及塑性区, 需分别求解。在弹性区域, 由弹性力学极坐标下平面应变问题的物理方程可知:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_r - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\varphi \right), \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_\varphi - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r \right). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

塑性区内, 由广义胡克定律有

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \left[\sigma_\theta - \frac{1}{\mu} (\sigma_r + \sigma_z) \right], \quad (27)$$

根据拉梅解答, 式(27)中,

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad . \quad (28)$$

塑性区在小变形情况下, 考虑到平面应变状态和材料的不可压缩性, 有

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0 \quad , \quad (29)$$

则塑性区的径向和环向应变为

$$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left[\sigma_\theta - \frac{1}{\mu} \left(\sigma_r + \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \right) \right] \quad . \quad (30)$$

将式(26), (30)分别代入式(25)和(24)便可求得弹性区和塑性区任意位置的广义剪应变, 从而可对围岩不同位置的黄土结构性参数进行求解。

3 工程案例及分析

由于目前关于深埋黄土盾构隧道围岩压力的现场测试数据较少, 本节将本文方法的计算结果与文献[28, 29]的浅埋黄土盾构隧道, 以及文献[9, 30]深埋黄土新奥法隧道的现场测试结果进行对比。每个对比断面的现场测试结果中包含了同一断面不同位置(拱顶、拱肩、拱腰等)的围岩压力测试数据。

如图4, 由10个对比断面的结果可以看出, 计算值在6个断面上均处于现场测试结果的上限和下限之间。在现场测试上下限外的4个断面也均与极限值非常接近。对于对比断面#1、#2的浅埋黄土盾构隧道, 计算值与现场测试断面的围岩压力最大值(拱顶断面)较为接近。这是由于本文方法将初始围岩压力场视为静水压力模式。但是对于浅埋隧道的围岩, 一般水平围岩荷载和竖向围岩荷载具有明显差异。因此, 计算值与现场测试断面水平位置的围岩压力存在差异。对比断面#3~#7均为黄土新奥法隧道。发现计算值与测试结果的最大值接近或略大于测试结果。这是由于按照本文计算假设, 管片衬砌在开挖后便与围岩共同变形, 承担的荷载比例将大于新奥法滞后的支护结构所承担的比例。此外, 对比断面#1、#2和断面#4~#10的现场测试结果, 发现同一断面不同位置, 浅埋隧道的围岩压力较为离散, 而深埋隧道较为接近。这说明, 将深埋隧道的围压压力假设为静水压力式具有合理性。因此, 可以预见, 本文方法在计算深埋黄土盾构隧道围岩压力时能够取得较为合理的计算结果。

为了进一步讨论黄土结构性参数对围岩压力的影响, 假定: 某一深埋黄土盾构隧道, 开挖直径为8 m, 围岩的弹性模量为0.2 GPa, 泊松比为0.37, 初始地应力为2 MPa, 围岩初始黏聚力为50 kPa, 内摩擦角为15°, 衬砌考虑管片接头的刚度折减取弹性模量为10 GPa, 泊松比为0.2, 衬砌厚度为30 cm。取含水率为

2%, 4%, …, 18%, 20%进行讨论。

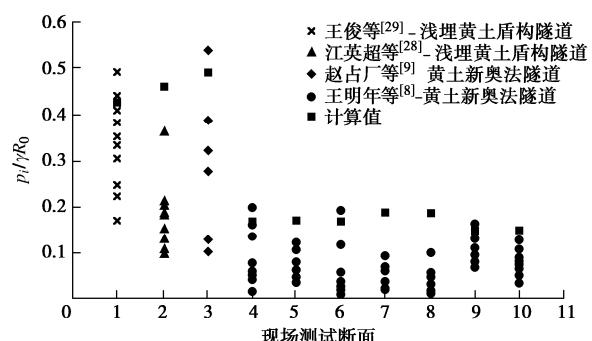


图4 计算值与现场测试结果对比

Fig. 4 Comparison between calculated and filed test results

按照本文计算方法, 分析黄土结构性参数对围岩压力的影响。如图5所示, 当黄土结构性参数在0~80范围内逐渐增大时, 围岩压力逐渐减小。当结构性参数在1~20内增加时, 围岩压力减小较为显著(降幅为79%)。

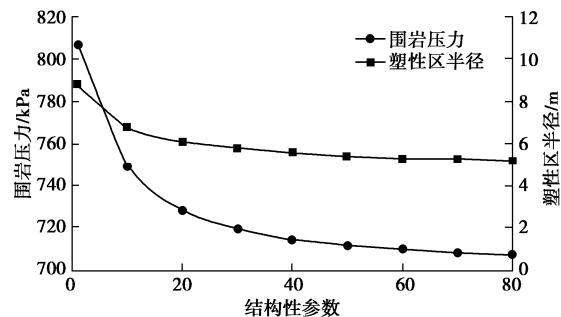


图5 黄土结构性参数对围岩压力的影响

Fig. 5 Influences of structural parameters on soil pressure of loess

黄土结构性参数受含水率, 固结压力以及广义剪应变等的影响。为了进一步讨论上述参数对黄土结构性参数的影响, 取含水率为0~20%, 固结围压为0~500 kPa, 广义剪应变为0~1, 对结构性参数进行计算。计算结果如图6所示。

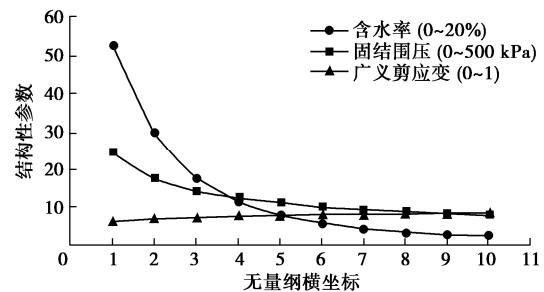


图6 黄土结构性参数各因素影响分析

Fig. 6 Influence analysis of various factors on structural parameters of loess

由图6可知, 黄土结构性参数随含水率和固结围压的增大而减小, 随广义剪应变的增大而增大。但是

广义剪应变的变化对黄土结构性参数的影响非常有限。含水率与固结围压的影响较为显著，尤其是含水率。随含水率的增加，黄土结构性参数迅速降低，黄土结构性遭到破坏，自承能力大幅减弱。

上述参数分析在理想模型中具有意义。但是在实际工程中，盾构隧道开挖支护后便会展开一特定应变场，从而其黄土结构性参数仅随含水率发生变化。因此，针对假定的盾构隧道开挖工程，首先计算其广义剪应变场，继而讨论含水率对黄土盾构隧道围岩压力的影响。

按照式(24)~(30)计算得到的围岩广义剪应变的分布如图7所示。在仅考虑静水初始地应力的作用下，围岩的广义剪应变呈径向放射性分布。同一半径处的广义剪应变相等。在塑性区内，广义剪应变由衬砌接触面到塑性圈半径逐步增大，在弹性区，随逐步远离塑性圈半径而减小，在2倍塑性区范围外基本趋于稳定。

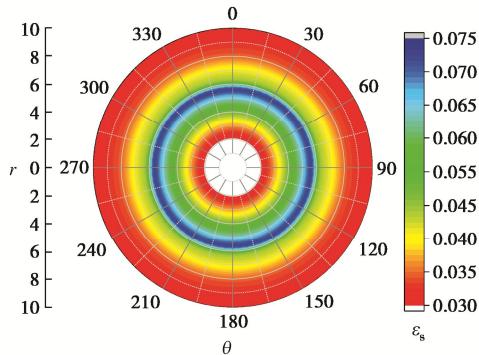


图 7 广义剪应变分布

Fig. 7 Distribution of generalized shear strain

在图7计算得到的广义剪应变的基础上，按照式(20)~(23)计算得到黄土围岩中结构性参数的分布如图8所示。图8曲面在 xoz 平面的投影可以反映结构性参数在塑性圈内随围岩含水率的变化趋势。由图8可知，含水率对结构性参数有较大影响，并且结构性参数随含水率增大而减小。图8曲面在 yoz 平面的投影可以反映结构性参数在塑性圈内随所处位置半径的变化趋势，从半径4~6 m，结构性参数线性增长，但是增长的程度非常有限。因此在计算围岩压力时，可认为塑性圈中的黄土结构性参数为一均值，从而简化计算。

求得黄土结构性参数后，引入莫尔库伦强度准则，求得围岩塑性圈和围岩压力随含水率的变化，如图9所示。其中，塑性区半径随含水率增大(2%~20%)由6 m增加至8 m，增幅为33%。围岩压力从710 kPa增加至770 kPa，增幅约为10%。由此可见，黄土在增湿后围岩压力增大。因此，本文计算方法在一定程

度上能够反映黄土的结构性随围岩增湿而受到破坏，从而导致围岩塑性区半径和围岩压力增大。

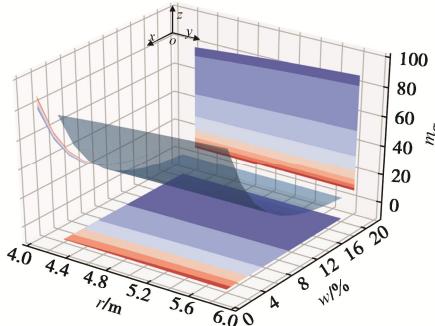


图 8 黄土结构性参数随半径及含水率变化规律

Fig. 8 Variation of structural parameters of loess with radius and water content

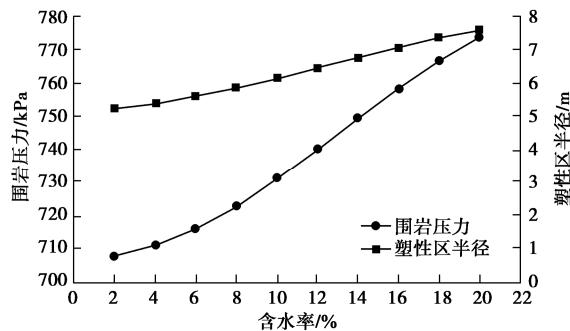


图 9 围岩压力及塑性区半径随黄土增湿变化规律

Fig. 9 Variation of pressure of surrounding rock and plastic zone radius with water content

4 结 论

本文通过考虑盾构隧道管片与围岩塑性区接触的边界条件建立了塑性区半径求解的超越方程，引入牛顿迭代法构建了塑性圈半径的求解方法，从而通过修正芬纳公式给出了深埋隧道的围岩形变压力计算方法。结合黄土的结构性参数，通过求解广义剪应变给出了隧道围岩黄土结构性参数的实用求解方法，代入莫尔库伦准则，实现了深埋黄土盾构的围岩压力求解。主要得到以下6点结论。

(1) 围岩塑性区半径的求解可通过管片与塑性区内径的边界条件构建超越方程，采用牛顿迭代法求解超越方程获得。

(2) 通过引入黄土结构性参数，可以考虑黄土结构性对围岩压力的影响。

(3) 对于深埋圆形盾构隧道，在静水初始地应力作用下广义剪应变沿径向放射性分布，在塑性区内随距衬砌接触面的半径而增大，在弹性区内随距塑性区半径的距离的增大而减小，2倍塑性区半径外基本趋于稳定。

(4) 围岩的黄土结构性参数随距接触面的半径增大而线形增大, 但是增加幅度非常有限, 可认为黄土结构性参数在塑性区内是均匀分布的。结构性参数随含水率增加有较为明显的降低, 不可忽略。

(5) 黄土围岩增湿会导致塑性区半径扩大与围压压力增加, 含水率由 2% 增加至 20% 时, 塑性区的扩大幅度约为 33%, 围岩压力的增幅约为 10%。

(6) 后续需开展深埋黄土盾构隧道围岩压力的现场测试工作, 验证所提计算方法的准确性。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 1943.
- [2] LI S, JIANIE Y C, HO I H, et al. Experimental and numerical analyses for earth pressure distribution on high-filled cut-and-cover tunnels[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, **24**(6): 1903 – 1913.
- [3] HAN L, YE G L, CHEN J J, et al. Pressures on the lining of a large shield tunnel with a small overburden: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, **64**(8): 1 – 9.
- [4] 何川, 张景, 封坤. 盾构隧道结构计算分析方法研究[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(8): 1 – 14. (HE Chuan, ZHANG Jing, FENG Kun. Research on structural analysis method of shield tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(8): 1 – 14. (in Chinese))
- [5] TAKANO Y H, WORKING GRP NO.2 I T A. Guidelines for the design of shield tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, **15**(3): 303 – 331.
- [6] CHEN K H, PENG F L. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **75**(5): 43 – 66.
- [7] 卢钦武, 邓涛, 关振长. 水平地震作用下浅埋隧道围岩压力的计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(6): 1093 – 1100. (LU Qin-wu, DENG Tao, GUAN Zhen-chang. Ground loading of shallow tunnels under seismic scenario[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(6): 1093 – 1100. (in Chinese))
- [8] 王明年, 王志龙, 桂登斌, 等. 考虑开挖方法影响的深埋隧道围岩形变压力计算方法研究[J/OL]. 西南交通大学学报, 1 – 10. (WANG Ming-nian, WANG Zhi-long, GUI Deng-bin, et al. Study on deformation load calculation method of surrounding rock in deep-buried tunnel considering the influence of excavation method[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1 – 10. (in Chinese))
- [9] 赵占厂, 谢永利, 杨晓华, 等. 黄土公路隧道围岩压力测试分析[J]. 现代隧道技术, 2003, **40**(2): 58 – 61. (ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Ground pressure measurement and analysis for highway tunnels located in loess[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, **40**(2): 58 – 61. (in Chinese))
- [10] 赵占厂, 谢永利. 黄土公路隧道结构设计与施工中的若干问题[J]. 现代隧道技术, 2008, **45**(6): 56 – 60, 81. (ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li. Some problems about structural design and construction for highway loess tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, **45**(6): 56 – 60, 81. (in Chinese))
- [11] 王建宇. 对形变压力的认识——隧道围岩挤压性变形问题探讨[J]. 现代隧道技术, 2020, **57**(4): 1 – 11. (WANG Jian-yu. The key way is to release the genuine rock pressure—discussion on problems of tunnelling in squeezing ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, **57**(4): 1 – 11. (in Chinese))
- [12] 王明年, 王志龙, 张霄, 等. 深埋隧道围岩形变压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 81 – 90. (WANG Ming-nian, WANG Zhi-long, ZHANG Xiao, et al. Method for calculating deformation pressure of surrounding rock of deep-buried tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 81 – 90. (in Chinese))
- [13] WANG M N, DONG Y C, YU L. Analytical solution for a loess tunnel based on a bilinear strength criterion[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, **57**(4): 296 – 304.
- [14] 王明年, 董宇苍, 于丽. 基于双线性强度准则的黄土隧道围岩弹塑性解析解[J]. 中国铁道科学, 2019, **40**(6): 68 – 77. (WANG Ming-nian, DONG Yu-cang, YU Li. Elastoplastic analytical solution to surrounding rock of loess tunnel based on bilinear strength criterion[J]. China Railway Science, 2019, **40**(6): 68 – 77. (in Chinese))
- [15] LUO Y B, CHEN J X, GAO S T, et al. Stability analysis of super-large-section tunnel in loess ground considering water infiltration caused by irrigation[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(22).
- [16] 李国良, 邵生俊, 靳宝成, 等. 黄土隧道地基的湿陷性问题研究[J]. 铁道工程学报, 2015, **32**(12): 12 – 16, 50. (LI Guo-liang, SHAO Sheng-jun, JIN Bao-cheng, et al. Research on the problems of collapsibility of loess tunnel foundation[J].

- Journal of Railway Engineering Society, 2015, **32**(12): 12 - 16, 50. (in Chinese))
- [17] WENG X L, SUN Y F, YAN B H, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of tunnel face stability considering longitudinal slope angle and steady state seepage in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **101**(7): 1 - 14.
- [18] WENG X L, SUN Y F, ZHANG Y W, et al. Physical modeling of wetting-induced collapse of shield tunneling in loess strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **90**(8): 208 - 219.
- [19] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 651 - 656. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 651 - 656. (in Chinese))
- [20] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(4): 35 - 41. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(4): 35 - 41. (in Chinese))
- [21] 陈昌禄, 邵生俊, 邓国华. 土的结构性参数与强度的关系及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(1): 328 - 334. (CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, DENG Guo-hua. Relationship between soil structural parameters and strength and its application in slope stability analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(1): 328 - 334. (in Chinese))
- [22] 邵生俊, 龙吉勇, 于清高, 等. 湿陷性黄土的结构性参数本构模型[J]. 水利学报, 2006, **37**(11): 1315 - 1322. (SHAO Sheng-jun, LONG Ji-yong, YU Qing-gao, et al. A constitutive model of collapsible loess with structural parameter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(11): 1315 - 1322. (in Chinese))
- [23] 邓国华, 邵生俊. 黄土隧道围岩的结构性变化特征分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 219 - 224. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun. Variation characteristic analysis of a structural parameter for surrounding soils in loess tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 219 - 224. (in Chinese))
- [24] 邓国华, 邵生俊, 陈昌禄, 等. 一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构性参数[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2310 - 2314. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, CHEN Chang-lu, et al. A structural parameter reflecting coupling action between shear stress and spherical stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2310 - 2314. (in Chinese))
- [25] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009. (DENG Guo-hua. Research on Structure Parameter of Loess and Structure Constitutive Relations under True Tri-Axial Condition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [26] 邓国华, 邵生俊, 余芳涛. 结构性黄土的修正剑桥模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 834 - 841. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, SHE Fang-tao. Modified Cam-clay model of structured loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 834 - 841. (in Chinese))
- [27] 邹志林. 海底取水盾构隧道双层衬砌结构受力特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (ZOU Zhi-lin. Study of Mechanical Characters of Subsea Water-Intaken Shield Tunnel with Double Lining[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [28] 江英超, 何川, 方勇, 等. 盾构施工对黄土地层的扰动及管片衬砌受荷特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, **44**(7): 2934 - 2941. (JIANG Ying-chao, HE Chuan, FANG Yong, et al. Soil disturbance caused by shield tunneling and segment lining loading characteristics in loess strata[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, **44**(7): 2934 - 2941. (in Chinese))
- [29] 王俊, 方勇, 何川, 等. 盾构隧道施工对砂性地层的扰动及管片受荷特征[J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(1): 156 - 162, 170. (WANG Jun, FANG Yong, HE Chuan, et al. Disturbance of shield tunnel construction to sandy stratum and load bearing characteristics of segment lining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(1): 156 - 162, 170. (in Chinese))
- [30] 王明年, 郭军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2009, **30**(5): 53 - 58. (WANG Ming-nian, GUO Jun, LUO Lu-sen, et al. Calculation method for the surrounding rock pressure of deep buried large sectional loess tunnel of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2009, **30**(5): 53 - 58. (in Chinese))