

黄土盾构隧道围岩强度指标结构性参数表征与荷载计算

韩兴博¹, 王培源¹, 陈子明¹, 王流宝², 雷平³, 高子明⁴, 叶飞¹

(1. 长安大学, 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁建西北投资建设有限公司, 北京 100855; 3. 西安市轨道交通集团有限公司, 陕西 西安 710018; 4. 中铁二十一局集团轨道交通工程有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 为了考虑黄土地层特征, 获取合理的围岩压力以指导黄土盾构隧道结构设计, 通过对比盾构隧道与新奥法隧道围岩压力现场测试数据, 结合黄土盾构施工实践, 验证形变围岩压力计算黄土盾构隧道围岩荷载的合理性; 考虑黄土地层的强度参数, 通过芬纳公式构建黄土盾构隧道形变围岩压力的计算方法; 采用三轴剪切实验, 探究原状黄土的应力应变关系以及应力结构性参数的变化规律, 构建应力结构性参数下黄土强度指标的计算方法; 结合盾构隧道开挖支护下围岩的应力应变变化规律, 建立深埋黄土盾构隧道围岩结构性参数场的计算框架, 结合结构性参数修正的黄土强度准则, 给出深埋黄土盾构隧道围岩压力的计算方法。研究发现, 使用形变压力理论计算黄土盾构隧道围岩荷载具有合理性; 原状黄土相比重塑黄土有明显的应力峰值及应变软化现象; 黄土应力结构性参数与粘聚力存在较好的拟合关系, 与内摩擦角相关性低; 当仅考虑地层浸水造成黄土结构性演变引起的围岩压力变化时, 当含水率由 1% 增加到 25%, 塑性圈半径由 4.6 m 增加为 5 m, 围岩压力由 587 kPa 增加到 622 kPa。

关键词: 黄土盾构隧道; 围岩压力; 三轴剪切实验; 芬纳公式; 结构性参数

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Structural Parameter Expression Method for Loess Strength Index and Soil Pressure Calculation for Loess Shield Tunnels

HAN Xingbo¹, WANG Peiyuan¹, CHEN Ziming¹, WANG Liubao², LEI Ping³, GAO Ziming⁴, YE Fei¹

(1. Chang'an University, School of Highway Engineering, Xi'an 710064, China; 2. China Railway Construction Investment Group Corporation Limited, Beijing 100855, China; 3. Xi'an Rail Transit

Group Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 4. China Railway 21st Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: In order to obtain the reasonable surrounding rock pressure with the consideration of the characteristics of loess strata to guide the tunnel structure design, by comparing the field test data of surrounding rock pressure of shield tunnel and the new Austrian tunneling method (NATM) tunnel, and in combination with the construction practice of loess shield tunnel, the rationality of calculating the surrounding rock load of loess shield tunnel by deformation surrounding rock pressure is verified. The calculation method of deformation surrounding rock pressure of deep-buried loess shield tunnel is constructed by introducing the strength parameters of loess stratum through Fenner formula. The stress-strain relationship and stress structural parameters of deep buried undisturbed loess are studied by triaxial shear tests, and the calculation method of loess strength index under stress structural parameters is then constructed. The calculation framework of structural parameter field of surrounding rock of deep-buried loess shield tunnel is established in combination with the stress-strain variation law of surrounding rock under the excavation and support. The calculation method of surrounding rock pressure for deep-buried loess shield tunnel is finally given based on the loess strength criterion modified by structural parameters. It is found that the undisturbed loess has an obvious stress peak and strain softening compared with the remolded loess. There is a good fitting relationship between loess stress structural

收稿日期: 2022-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(52378390, 52108360, 52378389)、长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102213206)、陕西省创新能力支撑计划资助(2023-CX-TD-35)

第一作者: 韩兴博, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为黄土盾构隧道结构施工及运营期力学响应。

E-mail: xingbo.han@chd.edu.cn

通信作者: 叶飞, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为盾构隧道结构施工及运营期安全相关问题。

E-mail: xianyefei@126.com



论文
拓展
介绍

parameters and cohesion, while the correlation with internal friction angle is low. Under the circumstances that only the change of surrounding rock pressure caused by the structural evolution from the loess stratum immersion is considered, when the water content increases from 1 % to 25 %, the radius of plastic circle increases from 4.6 m to 5 m, and the surrounding rock pressure increases from 587 kPa to 622 kPa.

Keywords: loess shield tunnel; surrounding rock pressure; triaxial shear test; Fenner formula; structural parameters

随着我国西部西安、太原、兰州等城市地铁工程的加速建设,黄土盾构隧道大量涌现。围岩压力的合理取值对隧道结构设计的安全性与经济性有重要影响。盾构隧道的围岩压力取值经历了从完全依靠工程经验到逐渐理论化、规范化的发展。19世纪中叶到20世纪初,盾构隧道结构主要以石块、砖块、铸铁等为主,结构厚度构造等也完全按照经验实施,还没有清晰的围岩压力的概念^[1]。随着盾构法在城市地铁的修建中发挥重要作用,英国、德国、日本等国家开始大量修建以钢筋混凝土衬砌为主要支护结构的盾构隧道,围岩压力的理念也逐渐清晰。由于地铁隧道一般埋深较浅,各个国家在设计时,围岩竖向压力基本采用全覆土重或者基于太沙基公式的松动土压力公式计算。2000年,国际隧道协会(ITA)发表了“Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining”^[2],较为规范地给出了盾构隧道围岩荷载的取值及结构设计方法,得到了不同国家学者及设计部门的广泛采纳。

但是,随着盾构工法机械化水平的极大提升,盾构隧道表现出整环拼装、快速支护的特点。Koyama等^[3]、Mashimo等^[4]、李雪等^[5]的现场测试也表明,盾构隧道实际受到的围岩压力显著小于使用太沙基公式计算的结果,似乎松动土压力理论对盾构工法快速支护下隧道的围岩压力计算的适用性变差。

聚焦到黄土盾构隧道,除了盾构工法对围岩压力产生的影响外,土的结构特性也是影响黄土地层盾构隧道围岩压力的重要方面。Shao等^[6]通过系列工程案例分析,发现黄土的特性将导致一些典型的隧道结构病害;Cheng等^[7]通过试验和数值模拟证明,降雨造成的土体性质演变对隧道结构受力有重要影响。Qiu等^[8]、Weng等^[9]的研究也证明地层浸水后隧道结构将会受到较大的扰动。因此,要实现

黄土盾构隧道的合理围岩压力计算必须考虑黄土的结构特性带来的影响。

目前,在世界范围内^[10],尤其是我国,对黄土的特殊性质及其定量化表征展开了大量的研究。Sun等^[11]依托27座黄土隧道实体工程的现场统计情况,研究了水对黄土隧道病害的影响。徐亚利^[12]、李玉波等^[13]考虑黄土的水敏性,直观建立了黄土强度参数随含水率衰减的函数。谢定义^[14]、邵生俊^[15]、邓国华^[16-17]等将黄土的结构性用应力比结构性参数来量化,这一参数能够考虑黄土结构性随含水率、围压、广义剪应变等的变化,为定量考虑地层浸水以及施工扰动对隧道围岩压力的影响提供了思路。但是如何考虑盾构隧道的工程特性,将这类定量的黄土的结构性参数应用到隧道工程中仍然值得深入研究。

因此,本研究聚焦黄土盾构围岩压力的计算方法,拟首先通过大量围岩压力测试现场数据验证形变压力计算黄土盾构围岩荷载的合理性。之后,在使用芬纳公式计算黄土盾构隧道围岩压力的基础上,引入黄土结构性参数。研究黄土结构性参数与强度指标的联系,从而得到能够定量化描述黄土特性的盾构隧道围岩压力计算公式,以期为黄土地区的隧道结构的合理设计提供参考。

1 盾构隧道围岩压力特性及计算

目前关于隧道的围岩压力计算,基本形成了浅埋采用松散荷载模式,深埋采用形变压力模式的共识。但这一共识是在围岩压力计算理论的基础上,依托大量的新奥法隧道实践完善得到的。受掌子面开挖扰动程度、衬砌支护时机、衬砌结构类型等差异,盾构隧道的围岩压力模式与新奥法隧道存在区别。

为了直观得到盾构隧道与新奥法隧道围岩压力的直观区别,对44处采用新奥法的山岭隧道断面以及23处盾构隧道断面的围岩压力测试结果进行了统计(图1)。通过统计图可以发现,山岭隧道围岩压力分布在0.01~0.28 kPa之间,平均值为0.13 kPa。统计的盾构隧道的埋深在9~28 m之间,基本属于浅埋隧道,盾构隧道围岩压力分布在0.04~0.48 kPa之间,平均值为0.21 kPa。

由此可见,盾构隧道的围岩压力显著大于新奥法隧道。从影响围岩压力的重要因素及一般规律可知:①当隧道埋深较大时,受地层自重的作用,施加在衬砌结构上的荷载将增大;②当隧道开挖洞径增

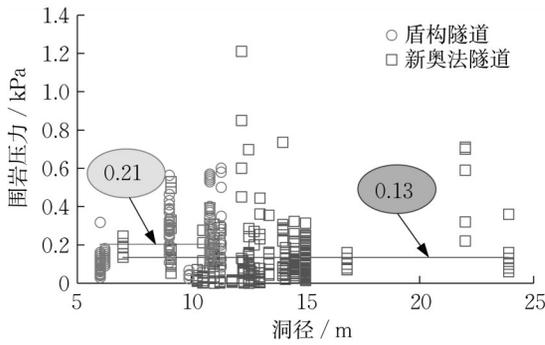


图1 盾构隧道与新奥法隧道围岩压力量值对比
Fig. 1 Comparison of surrounding rock pressure between shield tunnel and NATM tunnel

大时,由于扰动致使松散的岩土体范围更大,围岩荷载将更大;③支护时机较早时,导致围岩内部荷载释放不充分,自承能力发挥不足,将导致围岩荷载较大。但是,对比分析统计数据中盾构隧道及新奥法隧道的埋深及开挖洞径可以发现:①所统计的盾构隧道的埋深分布在9~30 m,新奥法隧道的埋深普遍接近或超过30 m,盾构法隧道的埋深小于新奥法。②盾构法的开挖跨径在6~12 m之间,新奥法跨径在9~22 m,盾构法隧道的开挖洞径小于新奥法。因此,可以分析得到,更早的支护时机是导致盾构法隧道围岩压力普遍大于新奥法隧道的重要原因。

详细分析盾构法和新奥法隧道所处的支护时机阶段如图2所示。图中 P_0 为围岩的初始压力, P_s 为盾构法支护后的围岩压力, P_n 为新奥法支护后的围

岩压力, P_{min} 为最小支护压力, u_0 为支护开始施做时围岩发生的位移, u_{min} 为最小支护压力点对应的围岩位移。由于盾构管片在开挖掌子面后便立即施作,支护更加及时,大部分围岩更倾向处于弹塑性甚至弹性阶段,因此用形变压力描述更为合理。

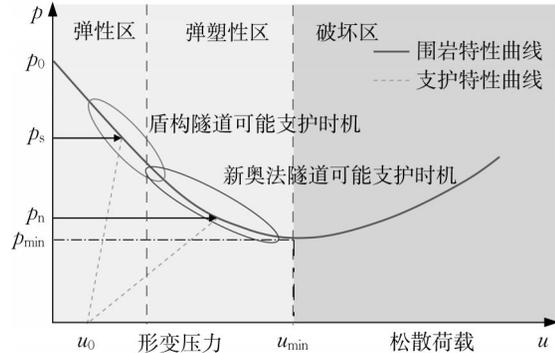


图2 岩石特性曲线与支护特性曲线相互作用图
Fig. 2 Interaction between rock characteristic and support characteristic

此外笔者通过对西安地铁盾构施工的难点的调研发现,黄土地层相较砂性土或其它易松散地层,施工中掌子面及开挖洞周的地层稳定性较好,施工中地层稳定性的保障并不是难点问题。反而,由于开挖洞周地层的稳定性,导致浆液下流,引发了较为严重的管片上浮问题。上述现象如图3所示。因此,从这一现象也可以印证,较低含水率工况下,黄土盾构隧道在施工后地层发生松散的范围并不会很大,围岩压力也应当更倾向为形变压力而非松散荷载。

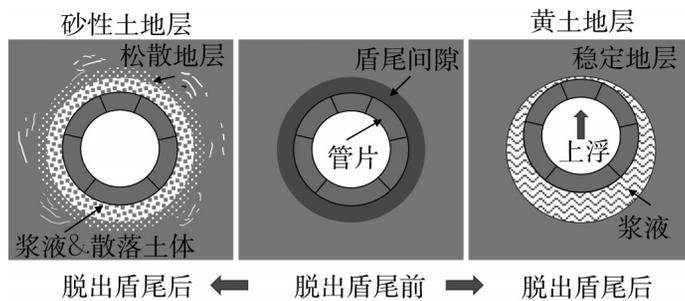


图3 不同地层盾构隧道掘进后管片移动
Fig. 3 Segments movement of different strata

盾构隧道断面形式一般为圆形,同时由于其盾构法施工的特点,开挖造成的扰动较山岭新奥法隧道小,因此不同于传统马蹄形断面的山岭隧道,盾构隧道围岩压力沿洞周分布较为均匀,同时为了便于解析,假定初始地应力为静水压力式、围岩为均匀、连续、各向同性的理想弹塑性介质,计算简图如图4所示,图中 p_i 为围岩压力, p_0 为初始地应力, p_b 为弹、

塑性区界面地应力, R_0 为隧道开挖半径, R_p 为塑性区半径, (r, θ) 为地层中某点对应的极坐标, E_1 为衬砌的弹性模量, μ_1 为衬砌的泊松比。

围岩压力可通过修正的芬纳公式计算:

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

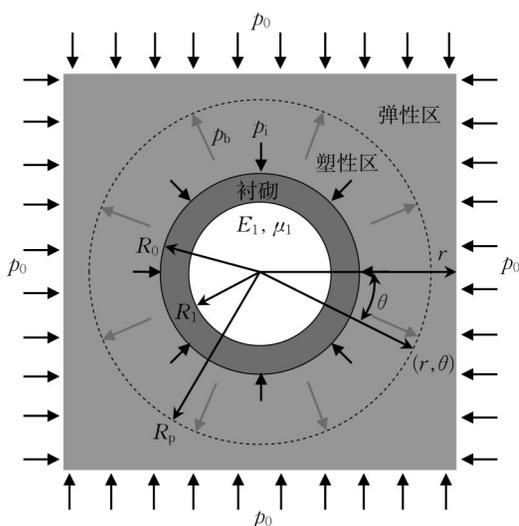


图4 计算简图

Fig. 4 Diagram of calculation

式中: c 为围岩粘聚力; φ 为内摩擦角。

塑性区半径可通过迭代法求解如下超越方程得到^[18]:

$$\left[(p_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \right] \cdot \left\{ \frac{1 - 2\mu}{E} - \frac{1 + \mu_1}{E_1} \left[\frac{R_1^2 + (1 - 2\mu_1)R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \right] \right\} + \frac{R_p^2}{R_0^2} \left\{ \frac{2\mu - 1}{E} p_0 + \frac{2 - \mu}{E} [(p_0 + c \cot \varphi) \sin \varphi] \right\} = 0 \quad (2)$$

由式(2)可以看出,如果能将黄土的结构性引入 Mohr—Coulomb 强度准则,从而对式(2)中的粘聚力和内摩擦角进行修正,那么能够便捷的构建出考虑黄土结构性的围岩压力计算方法。

2 黄土强度指标的结构性参数表征

黄土结构性参数能够较为合理的反映黄土受应力、水等扰动后的结构特性变化。而土的强度指标在隧道等岩土工程领域的结构受力分析中的重要指标。因此,如果可以建立黄土结构性参数与强度指标的联系,便可在隧道受力等分析中定量考虑黄土结构特性的影响。

文献[19]提出的应力结构性参数能够明确、可靠的反映黄土的结构性变化,其计算为

$$m_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_y (\sigma_1 - \sigma_3)_y}{(\sigma_1 - \sigma_3)_r (\sigma_1 - \sigma_3)_s} \quad (3)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 为天然黄土剪切过程结构性变化条件下的主应力差值; $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 为重塑土剪切过程结构性变化条件下的主应力差值; $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 为饱和土剪切过程结构性变化条件下的主应力差值。

为了研究黄土的结构性,依托西安地铁9号线,在芷阳广场站附近,采用探井法,在隧道设计标高处钻取了大量原状土样,通过三轴剪切实验(图5),研究黄土的结构性参数变化规律并实现其计算。



图5 黄土三轴剪切实验

Fig. 5 Triaxial shear test of loess

试验得到的原状黄土、重塑黄土、饱和黄土的应力应变曲线分别如图6—12所示。由图6—8可知,原状黄土的应力应变曲线表现出较为明显的两段线性的特征。原状黄土在较低含水率下具有明显的峰值应变,应变峰值基本出现在2%。当含水率较高时,试样未显示出较为明显的峰值。黄土的应力应

变曲线受围压、含水率的影响很大,但是在小应变阶段(2%以内),黄土表现出线弹性的应力应变关系特性,且受围压及含水率的影响很小。

由图9—11可知,重塑黄土没有明显的应力峰值,其应力应变曲线显著区别于原状黄土,表明原状黄土具有较强的结构性。

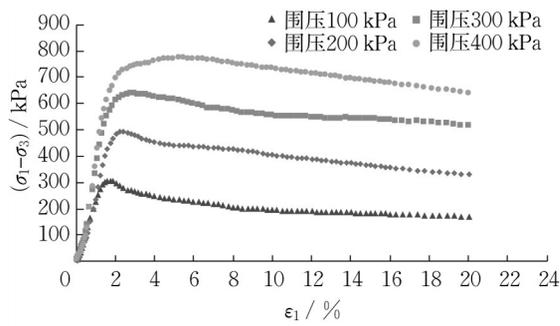


图 6 含水率 8 % 原状土应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain of undisturbed soil with an 8 % moisture content

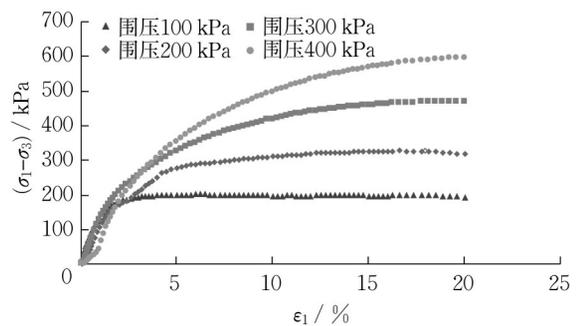


图 9 含水率 8 % 重塑土应力应变曲线

Fig. 9 Stress-strain of remolded soil with an 8 % moisture content

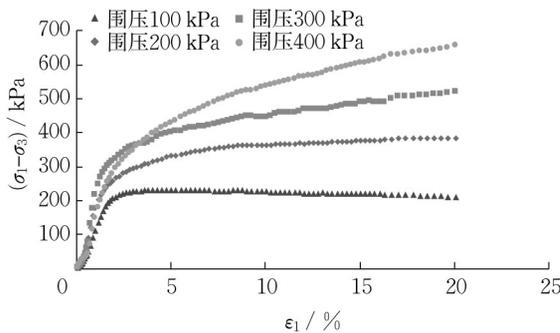


图 7 含水率 15 % 原状土应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain of undisturbed soil with a 15 % moisture content

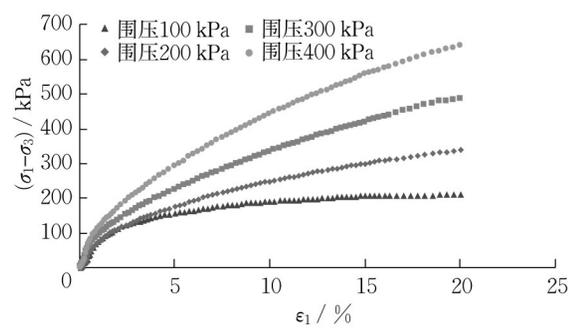


图 10 含水率 15 % 重塑土应力应变曲线

Fig. 10 Stress-strain of remolded soil with a 15 % moisture content

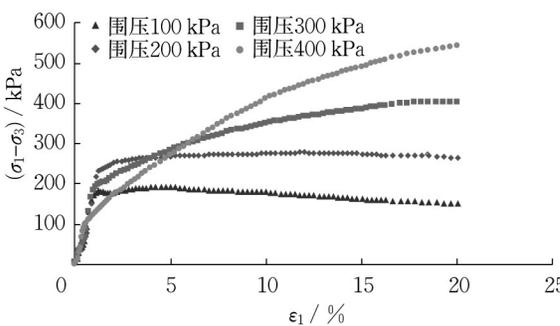


图 8 含水率 20 % 原状土应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain of undisturbed soil with a 20 % moisture content

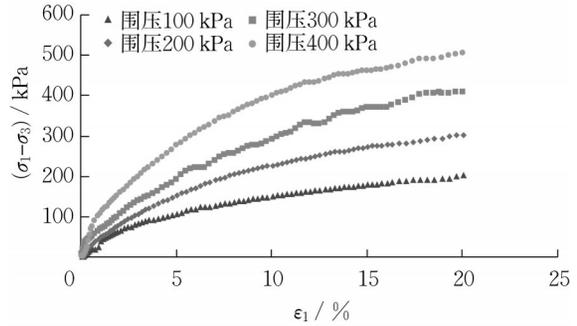


图 11 含水率 20 % 重塑土应力应变曲线

Fig. 11 Stress-strain of remolded soil with a 20 % moisture content

通过三轴剪切实验得到原状黄土、重塑黄土以及饱和原状黄土的应力应变关系后,参照式(3),计算得到的黄土结构性参数如图 13—15 所示。由图 13—15 可知,在小应变阶段,不同含水率及围压下黄土的结构性参数随应变呈现出线性增长的趋势,与小应变阶段应力应变曲线规律一致。在 2%~5% 应变阶段,黄土的结构性参数随应变增加显著降低。5% 应变后,黄土的结构性已经得到较为充分的释放。同时可以发现,黄土的结构性参数在 2% 应变

之后,随围压、含水率、应变的变化较为规律,因此是一种能够较为稳定反映黄土结构特性参数。

虽然黄土结构性参数能够较好的定量化反映黄土的结构特性,但是将其直接应用到围岩压力的计算中较为困难。Mohr—Coulomb 准则在岩土工程领域具有广泛的应用,其强度指标也是众多围岩压力计算公式的重要参数。并且,文献[20]指出,黄土结构性参数与强度指标具有良好的线性关系。因此,可以进一步探讨黄土的结构性对强度指标的影响,

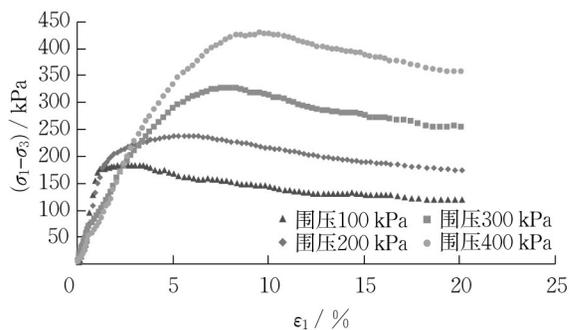


图 12 饱和原状土应力应变曲线

Fig. 12 Stress-strain of saturated undisturbed soil

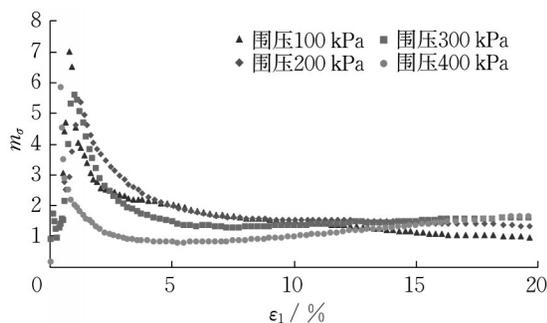


图 15 含水率 20%黄土结构性参数

Fig. 15 Structural parameters of loess with a 20% moisture content

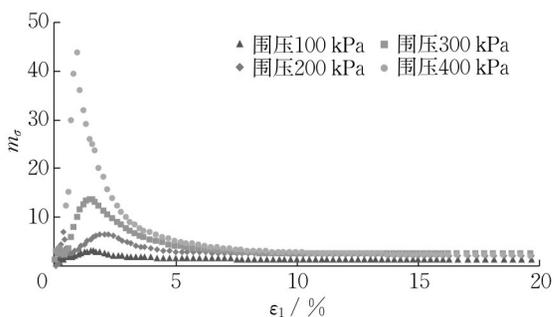


图 13 含水率 8%黄土结构性参数

Fig. 13 Structural parameters of loess with an 8% moisture content

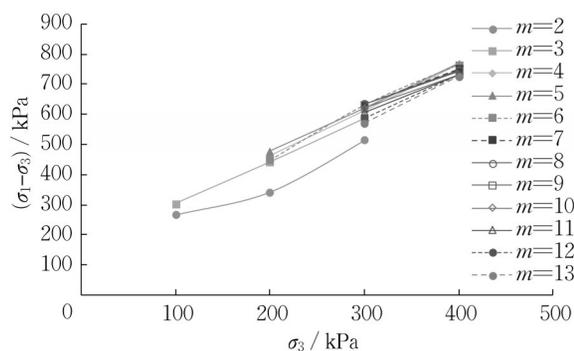


图 16 结构性参数与主应力差值关系

Fig. 16 Structural parameters versus principal stress difference

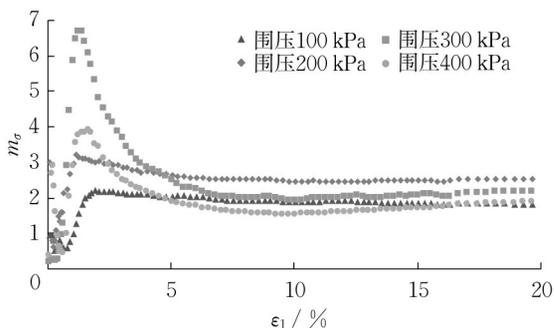


图 14 含水率 15%黄土结构性参数

Fig. 14 Structural parameters of loess with a 15% moisture content

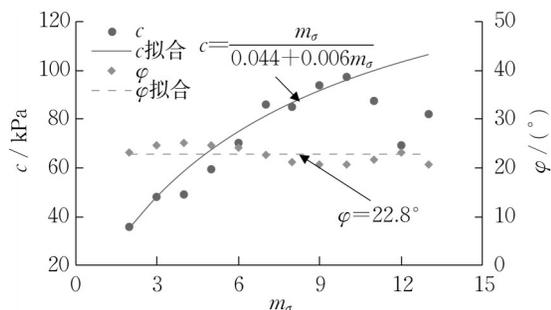


图 17 结构性参数与黄土强度指标关系

Fig. 17 Structural parameters versus loess strength index

以 Mohr—Coulomb 准则为媒介,构建考虑黄土地层特性的围岩压力计算方法。在图 13—15 计算得到的黄土结构性参数结果上,可以得到特定黄土结构性参数下土体的抗剪强度,分析得到不同围压等级下的,结构性参数取 2~13 时分别对应的主应力差值如图 16 所示。从而可以建立黄土的强度指标:粘聚力和内摩擦角与结构性参数的关系(图 17)。

根据文献[20]研究,粘聚力与结构性参数之间符合双曲线关系,同时参考文献[21],广义剪应力 q 与广义剪应变 ϵ_s 双曲线关系表达式为 $q = \epsilon_s / (a + b$

$\epsilon_s)$,因此,可假定粘聚力与结构性参数的关系式为

$$c = \frac{m_\sigma}{a + bm_\sigma} \quad (4)$$

式中: a 、 b 为拟合参数,通过图 14 拟合结果可知,本工程 $a=0.044$, $b=0.006$ 。

由图 17 可知,黄土的粘聚力随黄土结构性参数增长而变大。黄土的内摩擦角始终维持在 22.8° ,不随结构性参数变化而发生明显改变,因此可以认为结构性黄土的内摩擦角不随结构性参数变化而变

化。这与文献[20, 22]等的研究结果一致。

3 结构性参数下的黄土盾构隧道围岩压力计算

通过第2节的研究,考虑黄土结构性参数后,式(1)可转化为

$$p_i = (p_0 + c(m_\sigma) \cot \varphi) (1 - \sin \varphi) \left(\frac{R_0}{R_p} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c(m_\sigma) \cot \varphi \quad (5)$$

$$m_\sigma = A \epsilon_s \exp[-(B \epsilon_s + C)] + D \epsilon_s + E \quad (6)$$

式中: ϵ_s 为广义剪应变; $A=1$; $B=0.85$; C, D, E 可通过式(7)–(9)计算

$$C = k_{c1} \omega \left(\frac{\sigma_{3c}}{p_a} \right)^{0.2} + k_{c2} \quad (7)$$

$$D = -k_{d1} \exp(-k_{d2} \omega) \quad (8)$$

$$E = \frac{k_{e1} \exp(-k_{e2} \omega)}{\sqrt{\sigma_{3c}/p_a}} + 1 \quad (9)$$

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

广义剪应变可通过主应力进行计算

$$\epsilon_s = \sqrt{\frac{2}{9} [(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (10)$$

围岩的主应力可参照文献[18],通过弹塑性理论求得。得到隧道围岩的应力状态后,通过式(10)可对围岩的广义剪应变进行求解。同时结合式(6)–(9)可完成围岩的结构性参数求解,之后代入式(5)便可以得到考虑黄土结构特性的围岩压力。

4 算例与讨论

以西安地铁9号线芷阳广场—大学城站区间盾构隧道工程为例,隧道内轮廓半径 $R_0=2.7$ m,外轮廓半径 $R_1=3$,注浆层厚0.1 m。围岩弹性模量取切变模量,参照图4取 $E_1=55$ MPa,管片以及注浆组成的支护层的弹性模量取 $E_2=100$ MPa,围岩泊松比 $\mu_1=0.37$,支护层泊松比 $\mu_2=0.2$ 。初始地应力2 MPa。原状黄土凝聚力36 kPa,内摩擦角22.8°。

参照文献[18]求解得到开挖及支护后围岩的广义剪应变以及小主应力 σ_3 如图18、图19所示。由图18可知,盾构隧道开挖支护后的围岩广义剪应变沿径向先增大后减小,在 $R=4.5$ m处,广义剪应变达

到峰值,随后逐渐减小,在 $R=7$ m后基本趋于稳定。由图19可知,隧道围岩的小主应力沿径向亦先增大后减小,在 $R=4.5$ m处达到峰值,在 $R=7$ m后基本趋于初始地应力。

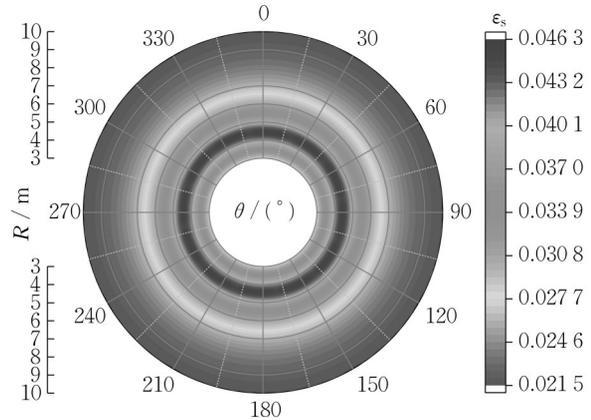


图18 广义剪应变分布

Fig. 18 Distribution of generalized shear strain

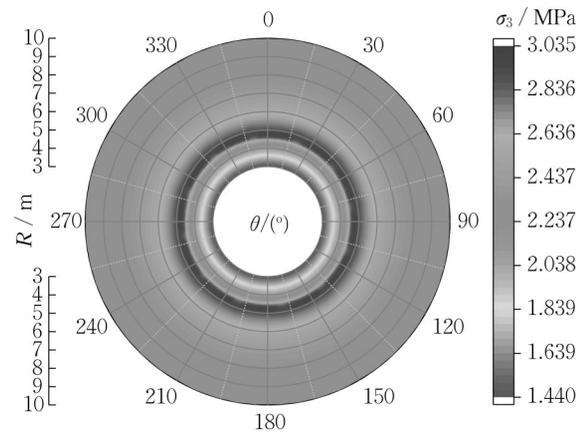


图19 小主应力分布

Fig. 19 Distribution of minor principal stress

将广义剪应变及小主应力计算结果代入式(6)–(9),得到不同含水率 ω 下的围岩结构性参数如图20所示。由图20可知,含水率对围岩的结构性具有重要影响。随含水率增加围岩的结构性快速降低,当含水率大于15%后,降幅不再明显。沿隧道径向,随半径增大,受开挖支护影响,黄土的结构性先增大后减小。但是这种趋势在较大含水率地层中不显著。

将围岩结构性参数的计算结果代入式(2)以及式(5),分别求得不同含水率地层的塑性圈半径及围岩压力如图21所示。当含水率由1%增加到25%,塑性圈半径由4.6 m增加为5 m,围岩压力由587 kPa增加到622 kPa。

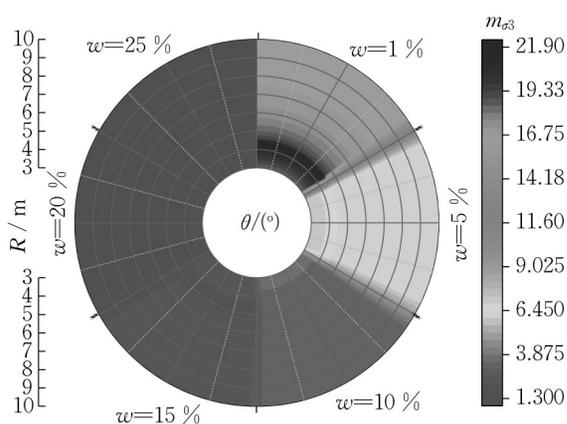


图20 不同含水率地层的结构性参数分布

Fig. 20 Distribution of structural parameters of strata with different water content

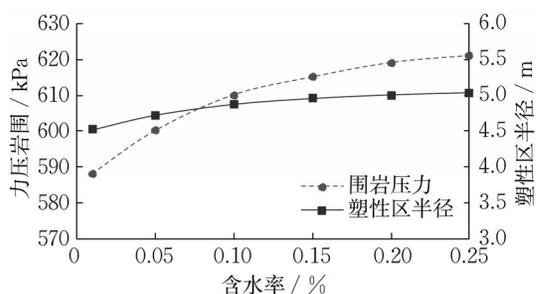


图21 不同含水率地层塑性区半径及围岩压力

Fig. 21 Radius of plastic zone and soil pressure in strata with different water contents

5 结论

(1)黄土的应力结构性参数与土体抗剪强度指标具有较好的拟合关系,依托工程土样黏聚力与结构性参数满足 $c=m_s/(0.044+0.006 m_s)$,内摩擦角随结构性参数变化不显著。因此,可在隧道受力分析中定量考虑黄土结构特性的影响。

(2)受隧道开挖及支护效应的影响,围岩的广义剪应变及小主应力沿径向先增大后减小,最后趋于稳定。地层的结构性受含水率影响显著,随含水率增加,结构性快速降低,当含水率大于15%后,降幅不再明显。

(3)黄土盾构隧道围岩压力倾向属于形变压力,当含水率由1%增加到25%,塑性圈半径由4.6 m增加为5 m,围岩压力由587 kPa增加到622 kPa。

作者贡献声明:

韩兴博:理论框架构建,理论推导计算,初稿撰写。

王培源:试验数据分析,数据作图,初稿撰写,论文修改。

陈子明:初稿撰写,围岩压力数据统计与分析。

王流宝:三轴剪切试验及结果分析。

雷平:三轴剪切试验及结果分析。

高子明:现场黄土取样及参数测试。

叶飞:理论指导,研究方案把控。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
- [3] KOYAMA Y, OKANO N, SHIMIZU M, *et al.* In-situ measurement and consideration on shield tunnel in diluvium deposit [J]. Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE, 1995, 11(7):385.
- [4] MASHIMO H, ISHIMURA T. Evaluation of the load on a shield tunnel lining in gravel [M]// International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology. Kyoto, JAPAN; A A Balkema Publishers, 2001.
- [5] 李雪,周顺华,宫全美,等.大断面深埋高水压地铁盾构隧道周边土压力作用模式评价[J].岩土力学,2015,36(5):1415.
LI Xue, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, *et al.* Evaluation of earth pressure around a deeply buried metro shield tunnel with a large cross-section under high water pressure conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1415.
- [6] SHAO S, SHAO S J, LI J, *et al.* An analysis of loess tunnel failure and its mechanism [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 1.
- [7] CHENG X S, ZHOU X H, LIU H B, *et al.* Numerical analysis and shaking table test of seismic response of tunnel in a loess soil considering rainfall and traffic load [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(3): 1005.
- [8] QIU J L, LU Y Q, LAI J X, *et al.* Experimental study on the effect of water gushing on loess metro tunnel [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(11): 1.
- [9] WENG X, SUN Y, ZHANG Y, *et al.* Physical modeling of wetting-induced collapse of shield tunneling in loess strata [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90(8): 208.
- [10] YATES K, FENTON C H, BELL D H. A review of the geotechnical characteristics of loess and loess-derived soils from Canterbury, South Island, New Zealand [J]. Engineering Geology, 2018, 236(3): 11.
- [11] SUN W, LIANG Q G, QIN S H, *et al.* Evaluation of groundwater effects on tunnel engineering in loess [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 1947.
- [12] 徐亚利.结构性黄土的扰动状态本构模型研究及应用[D].西

- 安:西安建筑科技大学,2011.
- XU Yali. Research on the disturbed state constitutive model of the structural loess and application [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [13] 李玉波,贺豪楠,朱才辉.不同含水率状态黄土隧道修正围岩压力算法[J].现代隧道技术,2020,57(S1):306.
- LI Yubo, HE Haonan, ZHU Caihui. Modified calculation method for surrounding rock pressure of loess tunnel under different water contents [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 306.
- [14] 谢定义,齐吉琳.土结构性及其量化参数研究的新途径[J].岩土工程学报,1999,21(6):651.
- XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651.
- [15] 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.
- SHAO Shengjun, LONG Jiyong, Yu Qinggao, *et al.* A constitutive model of collapsible loess with structural parameter [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1315.
- [16] 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.
- DENG Guohua, SHAO Shengjun, CHEN Changlu, *et al.* A structural parameter reflecting coupling action between shear stress and spherical stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2310.
- [17] 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.
- DENG Guohua, SHAO Shengjun. Variation characteristic analysis of a structural parameter for surrounding soils in loess tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 219.
- [18] 韩兴博,叶飞,冯浩岚,等.深埋黄土盾构隧道围岩压力解析[J].岩土工程学报,2021,43(7):1271.
- HAN Xingbo, YE Fei, FENG Haolan, *et al.* Analysis of surrounding rock pressure of deep-buried loess shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1271.
- [19] 邵生俊,周飞飞,龙吉勇.原状黄土结构性及其量化参数研究[J].岩土工程学报,2004(4):531.
- SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(4): 531.
- [20] 邵生俊,邓国华.原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J].土木工程学报,2008,41(11):93.
- SHAO Shengjun, DENG Guohua. The strength characteristics of loess with different structures its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 93.
- [21] 邵生俊,谢定义.土的变形非线性与剪缩剪胀性新认识[J].岩土工程学报,2000(1):75.
- SHAO Shengjun, XIE Dingyi. New understanding of deformation nonlinearity and shear contraction dilatancy of soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000(1): 75.
- [22] 邵生俊,龙吉勇,杨生,等.湿陷性黄土结构性变形特性分析[J].岩土力学,2006,27(10):1668.
- SHAO Shengjun, LONG Jiyong, YANG Sheng, *et al.* Analysis of structural deformation properties of collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1668.