

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.01.038

考虑隧道开挖时间影响的一种支护结构计算方法

白浪峰,曹校勇,徐平

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西西安710075)

摘要:基于硬化土模型,针对公路山岭隧道的初期支护结构,建立地层结构法数值模型,分析初期支护结构在施工过程中的安全性。由于隧道开挖的时空效应影响显著,采用二维平面应变模型的关键因素是如何确定围岩的应力释放系数,通过结合土体反力曲线(GRC)及纵面变形曲线(LDP),推导出支护结构不同施工阶段的应力释放系数,并采用内力包络图来分析每一施工步支护结构是否安全。所述方法在满足隧道精细化设计的同时,便捷有效,对隧道设计和施工有重要的指导意义。

关键词:隧道;时空效应;硬化土;应力释放;土体反力曲线;纵面变形曲线

中图分类号:U455.4

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2020)01-0222-06

A Support Structure Calculation Method Considering the Influence of Tunnel Excavation Duration

BAI Langfeng, CAO Xiaoyong, XU Ping

(CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: An embedded frame analysis with hardening soil constitutive model was established to analyze the safety of highway tunnel's initial support during construction. Due to the significant effect of the spatial and temporal effects during tunnel excavation, the key factor is how to determine the stress reduction coefficient if two-dimensional plane strain model was adopted. In this paper, stress reduction coefficient of each construction phase was deduced based on ground reaction curve and longitudinal deformation profile, and envelope diagrams of internal forces were adopted to verified structure safety in each construction phase. The results show that this method is convenient and effective to satisfy the detailed design of tunnels, and it is significant for tunnel design and construction.

Keywords: tunnel; spatial and temporal effect; hardening soil; stress reduction; GRC LDP

从十二五计划开始,我国设计行业获得了一个全新的发展契机,由于勘察设计企业众多,加之投资者对工程管理的信息化,为了能在诸多勘察设计企业中保持一定的优势,实施精细化设计是一种科学有效的措施。

近年来,数值分析已成为大型地下工程设计的一种重要手段,其关键是选择合适的土体本构模型和计算参数。隧道工程岩土体应力路径复杂,岩土体开挖属于卸载,研究表明^[1-4]卸载模量是加载模量的2倍~4倍,这在隧道工程数值分析中应引起充分注意。目前用于岩土工程分析的土体本构模型

主要有:邓肯-张(DC)模型、莫尔-库仑(MC)模型、修正剑桥(MCC)模型、硬化土(Hardening Soil, HS)模型及小应变硬化土(Hardening Soil Model with Small-strain, HSS)模型等^[5-6]。DC模型为非线性弹性模型,可以反映土体应力、应变的非线性特性,但却不能反映土体的塑性应变,也不能反映隧道工程不同的应力路径;MC模型会过高估计隧道仰拱或底板的隆起量;MCC模型和HSS模型模型参数较多且较难确定^[7-8]。HS模型适合软土及较硬岩土体的破坏和变形行为的描述^[9],其主应力空间的屈服面并不是不变的,而是随着塑性应变而扩张。HS模

型的岩土体刚度模量是与其应力水平相关的,不仅可以反映岩土体应力、应变的非线性特性,而且模型参数简单,可以从常规三轴试验和固结实验获得。

隧道初期支护结构精细化设计的关键点在于围岩应力释放系数的确定。Carranza 等^[10]用经典的收敛-约束法探讨了隧道纵面变形曲线(LDP)和土体反力曲线(GRC)的关系,Vlachopoulos 等^[11]考虑了围岩塑性区半径对变形的影响,提出了一种改进的隧道纵面变形曲线计算方法。本文基于前人的工作,提出关于应力释放系数和隧道径向变形的土体反力曲线,从而建立了应力释放系数与隧道掘进尺度的关系,精确定义隧道每一施工步的围岩应力释放系数。

1 数值分析的理论基础

1.1 HS 本构模型介绍

土体硬化模型是以经典塑性理论为基础的屈服面模型。它的弹性部分采用了合理的双刚度,加卸载模量分别定义,考虑了岩土体压硬性^[12-13]。塑性部分采用非关联流动法则和各向同性的硬化准则,较好地描述了岩土体的双曲线形式的应力-应变关系,如图 1 所示。其中 q_a 为抗剪强度的渐进值, q_f 为极限偏应力, q_a 与 q_f 之间的比值由破坏比 R_f 给出, $R_f = q_f/q_a$ 。

当 $q < q_f$, 岩土体处于弹性阶段,竖向应变 ε_1 与偏应力 q 之间满足双曲线关系:

$$- \varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad (1)$$

式中: E_{50} 是主加载下与围压有关的刚度模量,它由下面方程式给出:

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cdot \cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c \cdot \cos\varphi + p^{\text{ref}} \sin\varphi} \right)^m \quad (2)$$

式中: p^{ref} 为相关应力,一般取 100 kPa; E_{50}^{ref} 为相关应力 p^{ref} 时的加载模量; σ_3 为小主应力,当土体压缩时此值为负; c 为土体黏聚力; φ 为土体内摩擦角; m 为与刚度应力水平相关的幂指数。

当 $q \geq q_f$ 时,岩土体处于塑性阶段,产生塑性变形,随着硬化参数的变化,岩土体同时发生剪切硬化和压缩硬化。

在使用 HS 模型时,还需要固结试验的参考切线刚度 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$,卸载重加载刚度 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$,卸荷重加载泊松比 ν_{ur} ,正常固结条件下的侧压力系数 K_0^{nc} 。缺省情况下,采用 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 3E_{50}^{\text{ref}} = 3E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 是合适的。

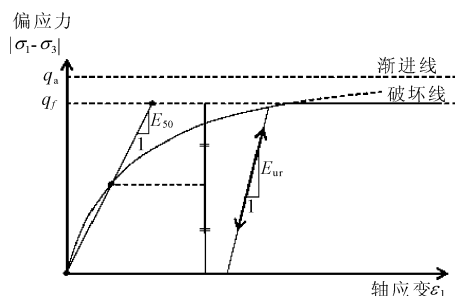


图 1 标准排水三轴试验的应力-应变关系

1.2 改进的 LDP 与 GRC 之间的关系

为了确定隧道初期支护的合理支护时机或者优化初支在隧道特定变形下的支护能力,研究隧道的纵面变形曲线是很有必要的。在隧道掌子面前方的围岩已经发生了一部分径向变形,随着掌子面掘进,径向位移逐渐增大,而且距掌子面后方足够远的隧道轮廓的径向变形将趋于收敛,这种把掌子面掘进距离和隧道径向变形关联起来的曲线称之为纵面变形曲线(LDP)。Vlachopoulos 等^[11]通过三维数值分析,考虑原岩应力、岩体质量、开挖步距、塑性区等因素,基于 Panet^[14]提出的解析解公式,拟合出改进的 LDP 曲线公式。

沿隧道轴向,掌子面前后断面的径向位移为:

$$\begin{cases} u^* = \frac{u}{u_{\max}} = u_0^* \cdot e^{x^*} & x^* \leq 0 \\ u^* = 1 - (1 - u_0^*) \cdot e^{-\frac{3x^*}{2R^*}} & x^* \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x^* = x/R_l$, x 为隧道断面距掌子面的距离, x 小于 0 表示断面在岩体内部,反之则在已开挖隧道内。

$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{\max}} = \frac{e^{-0.15R^*}}{3} \quad (4)$$

式中: $R^* = R_p/R_l$, R_p 为塑性区半径, R_l 为隧道半径, u_0 为掌子面处的隧道径向位移, u_{\max} 为隧道径向位移的最大收敛值。

经典的土体反力曲线(GRC)可由解析解导出,描述的是隧道内部压力 p_i 与隧道径向变形之间的关系,这种关系与岩土体的物理性质密切相关。隧道内部压力 p_i 是一个假想的力,模拟的是隧道内开挖岩土体在隧道轮廓线上的径向反力,这个力在初始开挖前等于原岩应力 p_0 ,随着隧道开挖逐渐释放直至为零。LDP 与 GRC 之间的关系如图 2 所示。SCC 曲线为支护特征曲线。

本文建立数值分析模型,以隧道拱顶中心点为监控点,得出围岩应力释放系数与拱顶沉降相关的 GRC 曲线。假定支护结构承担的压力为 $(1 - \beta)p_0$,

则隧道开挖后围岩应力释放了 $\beta p_0, \beta$ 称之为应力释放系数。运用数值模拟来推导 GRC 曲线有传统方法不能比拟的优势,数值模拟方法能够考虑围岩水平侧应力系数对隧道径向位移的影响。结合 LDP 曲线,从而把掌子面掘进距离和围岩应力释放系数联合起来,便于隧道工程结构设计的实际应用。以断面距掌子面距离 a 为例, ab 虚线与 LDP 曲线交于 b 点,确定此时对应的径向位移,然后过 b 点做垂直于 x 轴的直线 bc 并与 GRC 曲线交于 c 点,过 c 点做平行于 x 轴的直线 cd 并与 y 轴交于 d 点,由此可以确定特定断面处对应的围岩应力释放系数。如图 3 所示。

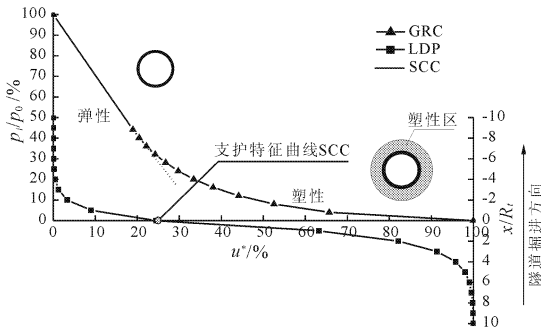


图 2 LDP 曲线与 GRC 曲线之间关系

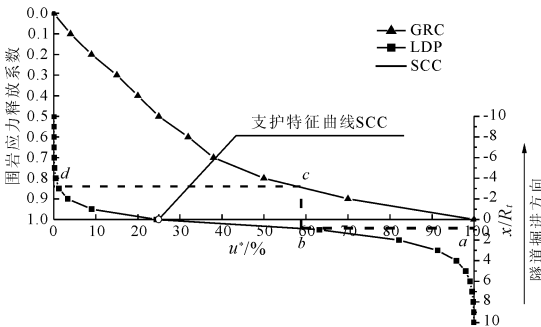


图 3 改进的 LDP 曲线与 GRC 曲线之间的关系

1.3 初期支护结构的安全评价方法

隧道的初期支护结构主要有喷射混凝土、锚杆以及型钢或格栅。其中,喷射混凝土和型钢/格栅组合使用,可以看作组合梁结构。组合梁的弹性模量和厚度由混凝土和钢材的刚度决定。由于软弱围岩在隧道开挖时破碎膨胀,塑性区也比较大,锚杆的作用受限,因此本文不考虑锚杆的受力,锚杆仅作为支护体系的安全储备,这样结果是偏于保守的。

二维平面应变模型里喷射混凝土、型钢/格栅的轴向刚度和抗弯刚度可按下式计算:

对喷射混凝土:

$$D_s = \frac{E_s A_s}{1 - \nu_s^2} \quad K_s = \frac{E_s I_s}{1 - \nu_s^2} \quad (5)$$

对钢材:

$$D_r = \frac{E_r A_r}{1 - \nu_r^2} \quad K_r = \frac{E_r I_r}{1 - \nu_r^2} \quad (6)$$

式中: E 是弹性模量; A 是截面积; I 是惯性矩; ν 是泊松比。

组合梁的等效轴向刚度和等效抗弯刚度可由下式表示:

$$D_{eq} = n(D_r + D_s) \quad (7)$$

$$K_{eq} = n(K_r + K_s)$$

式中: $n = 1/b$, b 为型钢/格栅沿隧道纵向的间距。

求得组合梁内力后,喷射混凝土和钢材各自承担的内力可按刚度分配:

$$N_i = \frac{ND_i}{n(D_r + D_s)}$$

$$Q_i = \frac{QK_i}{n(K_r + K_s)} \quad (8)$$

$$M_i = \frac{MK_i}{n(K_r + K_s)}$$

式中:下标 i 代表喷射混凝土或者钢材。

求得每种结构承担的内力后,就可以对结构进行安全性评价。由于喷射混凝土物理性质的复杂性,为了消除地下工程不可预知的因素和未知荷载,本文采用一种简便方法,仅使用构材的极限单轴抗压和抗拉强度^[15],并采用全局安全系数 F_s ,来分析构材的承载能力。

(1) $N - M$ 承载能力。最大的拉压应力由下式导出:

$$\frac{\sigma_{max}}{F_s} = \frac{N}{A} + \frac{Mt}{2I} \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_{min}}{F_s} = \frac{N}{A} - \frac{Mt}{2I}$$

当 $M = 0$ 时可求得最大和最小轴力:

$$N_{max} = \frac{A\sigma_{max}}{F_s} \quad (10)$$

$$N_{min} = \frac{A\sigma_{min}}{F_s}$$

当最大的拉压应力同时发生时 M 最大:

$$M_{max} = \pm \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{F_s} \right) \frac{I}{t} \quad (11)$$

(2) $N - Q$ 承载能力。矩形梁截面的最大和最小主应力由下式表示:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{max}}{2} \right)^2 + \tau_{max}^2} \quad (12)$$

式中: $\sigma_{max} = \frac{N}{A}, \tau_{max} = \frac{3Q}{2A}$

当最大最小主应力同时发生时 Q 最大:

$$Q_{\max} = \pm \frac{A}{F_s} \sqrt{-\frac{4\sigma_c\sigma_t}{9}} \quad (13)$$

把式(13) 带入式(12) 可求得:

$$N_{\max} = \frac{\sigma_c A}{F_s} - \frac{9Q^2 F_s}{4\sigma_c A} \quad (14)$$

$$N_{\min} = \frac{\sigma_t A}{F_s} - \frac{9Q^2 F_s}{4\sigma_t A}$$

2 工程分析实例

以某隧道工程为例,复理石发育,围岩软弱破碎,埋深较深,采用五级围岩支护。支护参数为:C30 喷射混凝土 28 cm;型钢 I20b,纵向间距 60 cm;双层 $\Phi 8$ 钢筋网 20 cm \times 20 cm。

2.1 数值模型的建立

为了保证本工程施工质量,实验室做了大量关于喷射混凝土强度的试验。试验参数见表 1、表 2。

表 1 喷射混凝土力学性能指标

龄期 /d	抗压强度 f_{ck} /MPa	抗拉强度 f_{tk} /MPa	弹性模量 E_c /GPa	泊松比 ν_s
1	12.2	1.46	20.5	0.15
3	17.3	1.85	27.1	0.15
28	20.1	2.30	30.0	0.15

表 2 型钢材料指标

型号	截面积 /cm ²	惯性矩 /cm ⁴	弹性模量 E_s /GPa	泊松比 ν_r	标号
I20b	39.5	2500	210	0.15	Q235

根据表 1、表 2 的材料参数,结合式(5)一式(7),可以算出由钢拱架和喷射混凝土组合成的复合梁的等效刚度,如表 3 所示。

表 3 复合梁刚度

龄期/d	轴向刚度 /($kN \cdot m^{-1}$)	抗弯刚度 /($kN \cdot m^2 \cdot m^{-1}$)
1	7391354	47980
3	9281891	60331
28	10112581	65759

数值分析模型及地质参数如图 4 所示。

2.2 应力释放系数的确定

(1) 确定 GRC 曲线和 LDP 曲线。为了确定 GRC 曲线,运用有限元数值方法研究围岩应力释放系数与拱顶沉降的关系。设定围岩应力释放系数 β 从 0.0 ~ 1.0 按 0.1 的等差数列增长,共有 10 个计

算步,随着围岩应力释放,隧道轮廓位移逐渐向隧道内方向收敛,进而获得与特定释放系数对应的拱顶沉降值。图 5 的横坐标荷载乘子表示计算过程,当荷载乘子等于 1.0 时表示计算完成。图 5 的每条曲线表示特定应力释放系数区间内的拱顶沉降值变化情况。由计算可得拱顶最大位移值 $u_{\max} = 49.28$ mm, $R^* = R_p/R_l = 2.9$ 。

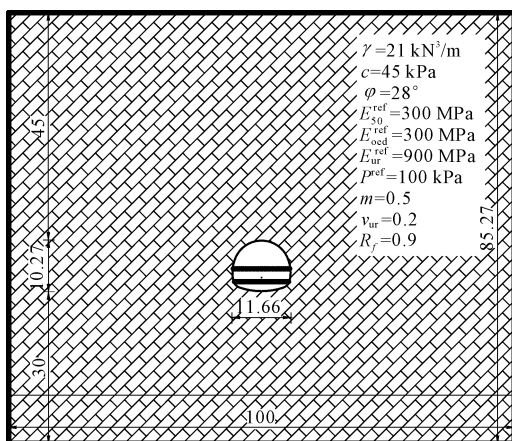


图 4 数值模型草图(单位:m)

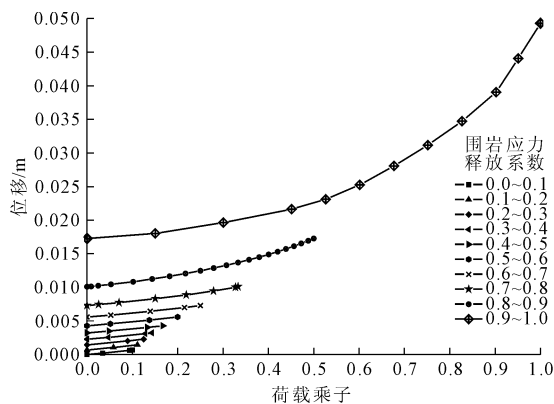


图 5 拱顶位移与释放系数的关系曲线

把 u_{\max} 和 R^* 代入式(3)一式(4),可以得出本隧道对应的 LDP 曲线,如图 6 所示。

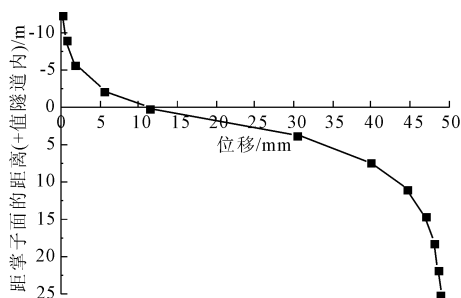


图 6 拱顶位移与掘进尺度的关系

(2) 确定围岩应力释放系数。五级围岩段设计掘进尺度 0.6 m,平均每天 1.5 个循环。根据掘进

速度可求得特定施工步距掌子面的距离,根据图 6 可求得与掌子面距离对应的拱顶沉降,然后根据图 5 曲线,由拱顶沉降值反求应力释放系数。当沉降值为图 5 中数据的中间值时,释放系数可按内插法确定。详细结果如表 4 所示。由表 4 可知,隧道开挖后围岩应力释放系数为 0.73,安装钢拱架后应力释放系数为 0.86,实际操作时,本计算步的释放系数增量为 0.13。后续施工步的释放系数以此类推。

表 4 施工步与释放系数的关系

施工步	距掌子面 距离/m	位移值 /mm	应力释放 系数
开挖无支护	0.0	10.63	0.73
架立钢拱架	0.9	15.98	0.86
喷射混凝土 1 d	1.8	20.60	0.91
喷射混凝土 3 d	3.6	27.98	0.94
喷射混凝土 28 d	26.1	49.28	1.00

2.3 结果分析

根据 1.3 节的计算方法,可以绘制出钢拱架和喷射混凝土对应的 $M-N$ 、 $Q-N$ 包络图。通常有限元模型的网格节点较多,利用传统方法逐个断面进行安全判断较为麻烦,结合内力包络图,直接与衬砌每个节点的内力进行对比,能够方便快速的判定初支结构是否安全。本文采用的安全系数 $F_s = 1.60$ 。 $M-N$ 、 $Q-N$ 包络图见图 7、图 8。

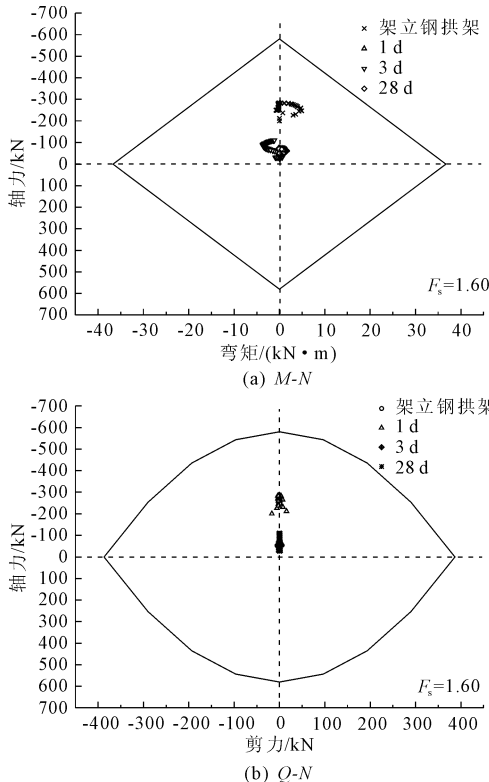


图 7 钢拱架内力与包络图

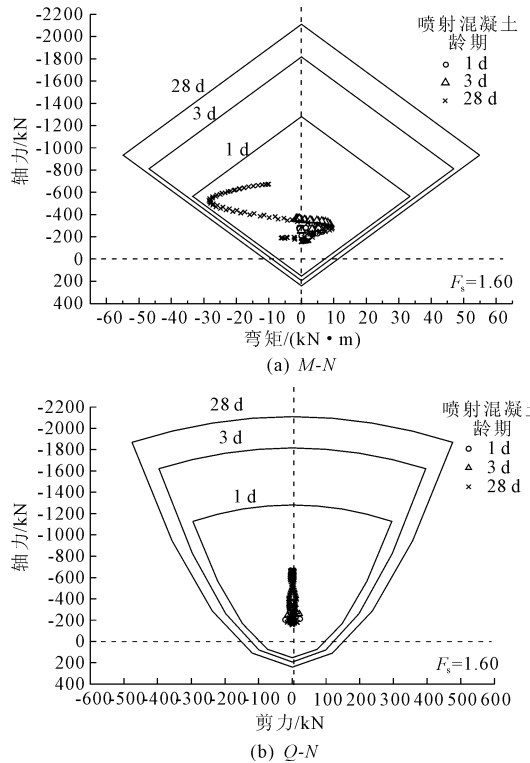


图 8 喷射混凝土内力与包络图

从图 7、图 8 可以一目了然的看出设计的支护参数是在每个施工阶段都是安全有效的。可以发现,钢拱架暂时独立承担围岩荷载时受力最大,随着喷射混凝土的施作和硬化,喷射混凝土承担了越来越多的围岩荷载,喷射混凝土成为承担围岩荷载的主要支护结构。

3 结论

隧道开挖是一个四维问题,时空效应一直是隧道工程学术研究的一个难点。本文结合经验公式和数值模拟,有效的把时间因素和空间因素联系起来,运用二维平面应变模型简捷快速的计算隧道初期支护结构的安全性,得出以下结论:

- (1) 硬化土(HS)本构模型比经典的摩尔-库仑(MC)模型更适宜模拟隧道开挖。
- (2) 隧道工程支护参数的确定,不仅要保证施工完成后的安全性,而且要满足各施工阶段的安全。
- (3) 用内力包络图可以快速评判支护结构的安全性,极大的提高了工作效率。

参考文献:

[1] 刘国彬,侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996,18(6):18-23.
 [2] 宋二祥,邱 玥. 基坑复合土钉支护的有限元分析[J]. 岩土力学,2001,22(3):241-244,253.

- [3] 刘书斌,王春波,周立波,等. 硬化土模型在无锡地区深基坑工程中的应用与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3022-3028.
- [4] Möller S C, Vermeer P A. On design analyses of NATM-tunnels [C]//Tunnelling and Underground Space Technology – Proceedings of the ITAAITES 2005 World Tunnel Congress and 31st ITA General Assembly Istanbul, 2005:233-238.
- [5] 王春波,丁文其,乔亚飞. 硬化土本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):199-208.
- [6] 唐利民,郑健龙. 邓肯-张模型参数反演的两种不适宜问题[J]. 地震工程学报,2015,37(S1):1-6.
- [7] 沈玉涛. 软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):23-27.
- [8] 邵羽,江杰,陈俊羽,等. 基于 HSS 模型与 MCC 模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. 水利学报,2015,46(S1):231-235.
- [9] 黄鑫,樊秀峰,安亚洲. HS 模型在基坑工程数值模拟中的适用性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):115-120.
- [10] Carranza C, Fairhurst C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the hoek-brown failure criterion [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(2):187-213.
- [11] Vlachopoulos N, Diederichs M S. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(2):131-146.
- [12] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. The hardening soil model: formulation and verification [C]//Beyond 2000 in Computation Geotechnics-10 Years of PLAXIS. 1999:281-296.
- [13] Surarak C, Likitlersuang S, Wanatowski D, et al. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays [J]. Soils & Foundations, 2012, 52(4):682-697.
- [14] Panet M. Understanding deformations in tunnels [J]. Comprehensive Rock Engineering, 1993, 1:663-690.
- [15] Carranza-Torres, Diederichs M S. Mechanical analysis of a circular liner with particular reference to composite supports for example, liners consisting of shotcrete and steel sets [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2009, 24(5):506-532.

(上接第 215 页)

参考文献:

- [1] 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范:GB 50652—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 宫本福,杨志勇. 北京地铁盾构施工风险控制技术研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(6):110-114.
- [3] 杨振伟,赵勇,王敏. 盾构在富水粉细砂地层施工洞内涌砂风险分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018,14(4):280-282.
- [4] 朱海军,周明洋. 富水砂层地铁施工中的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J]. 建筑施工,2018,40(1):100-102.
- [5] 白云飞. 富水粉细砂地层大开口率刀盘的施工技术研究与应用[J]. 铁道建筑技术,2016(3):57-60.
- [6] 周江,蒲文海. 浅谈土压平衡盾构下穿密集建筑群施工技术[J]. 中国工程咨询,2017(7):47-49.
- [7] 乔秀兵,李猛,周平. 济南地铁富水地层盾构下穿建筑物风险分析与控制[J]. 现代制造技术与装备, 2018(9):10-11.
- [8] 秦学波. 郑州地铁盾构下穿建筑物风险控制措施研究 [D]. 郑州:郑州大学,2018:18-22.
- [9] 杨喜,朱颖. 盾构隧道下穿高铁桥梁安全影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):212-218.
- [10] 吴文斌. 盾构隧道下穿既有砖混结构的变形影响及其破损评估[D]. 长沙:湖南大学,2018:34-43.
- [11] 金建申. 富水砂层区地铁车站基坑变形过大原因分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):191-196.
- [12] 太原地铁 2 号线一期施工图设计阶段风险评估报告 [R]. 北京:北京安捷工程咨询有限公司,2016.
- [13] 公交公司宿舍结构安全性鉴定报告[R]. 北京:中冶建筑研究总院有限公司,2018.
- [14] 迎泽苑 7 号楼结构安全性鉴定报告[R]. 北京:中冶建筑研究总院有限公司,2018.
- [15] 太原市轨道交通 2 号线双塔西街站—大南门站区间隧道施工对邻近公交公司家属楼、迎泽苑 7 号楼影响的安全影响性评估[R]. 北京:北京市勘察设计院有限公司,2018.