

深埋隧道与浅埋隧道划分方法研究

张佩^{1,2}, 路德春^{1,2}, 杜修力^{1,2}, 马超^{1,2}

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 首都世界城市顺畅交通协同创新中心, 北京 100124)

摘要: 隧道开挖后, 围岩土体中的土压力拱效应显著地影响作用在隧道衬砌结构上的土压力。隧道结构设计时, 界限埋深是确定围岩压力的基本参数之一。基于隧道开挖时围岩土体中附加荷载的特点, 编制可以合理考虑土的应力路径相关性的弹塑性本构模型子程序, 利用二次开发后的有限元分析软件 ABAQUS 对隧道开挖过程进行了三维有限元模拟。从围岩土体的变形规律和应力重分布两个方面分析了隧道开挖过程中的土压力拱效应, 提出了深埋隧道与浅埋隧道的划分方法, 即洞顶土体竖向位移达到稳定值时对应的埋深为界限埋深, 当有支护结构与围岩土体相互作用时, 洞顶上方地表土体最大沉降对应的埋深作为界限埋深。通过与规范法确定的界限埋深比较, 表明提出方法可较好地反映隧道开挖时围岩土体变形的宏观规律, 并可考虑多种因素的定量影响。

关键词: 隧道开挖; 应力路径; 土压力拱效应; 界限埋深; 洞顶竖向位移

中图分类号: TU432; U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)S2 - 0422 - 06

作者简介: 张佩(1988 -), 女, 硕士研究生, 主要从事地下工程等方面的研究。E-mail: zhangwenpei@email.bjut.edu.cn。

Division method for deep and shallow tunnels

ZHANG Pei^{1,2}, LU De-chun^{1,2}, DU Xiu-li^{1,2}, MA Chao^{1,2}

(1. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100124, China)

Abstract: The earth pressure applied on the lining is affected significantly by the soil arching effect during tunnel excavation. The critical depth becomes one of basic parameters to determine the pressure of the surrounding rock when designing the tunnel structure. Based on the additional load characteristics of the surrounding rock, a user-defined elastic-plastic material subroutine (UMAT) of the constitutive model considering complex stress path of soils is compiled. Three-dimensional finite element analysis of tunnel excavation is carried out by means of the secondarily-developed ABAQUS with the UMAT. The soil arching effect is studied from two aspects: the deformation law of the surrounding rock and the stress path. According to the results, a new division method for deep and shallow tunnels is proposed, which can be illustrated by the critical depth. The critical depth is determined as the depth in accordance with the vertical displacement of ceiling becoming steady when there is no supporting structure, and the depth in accordance with the maximum settlement of the surface soil above the tunnel when supporting structures exist. Compared with the critical depth determined by the code, the proposed method can reflect the macroscopic deformation law of soils. Moreover, the quantitative impact of various factors is taken into account at the same time.

Key words: tunnel excavation; stress path; soil arching effect; critical depth; vertical displacement of ceiling

0 引言

土是由土颗粒、孔隙水和孔隙气体组成的摩擦材料, 当产生不均匀变形时, 土体中荷载的传递路径将会发生偏移和集中, 形成土压力拱。土压力拱效应在隧道工程中普遍存在, 它显著地影响作用在隧道衬砌结构上的土压力, Thomas 和 Gunther^[1]的隧道开挖过程三维有限元分析结果表明, 隧道埋深显著地影响围岩压力, 表现为深埋隧道与浅埋隧道围岩压力的作用机理及分析方法不同。围岩压力是隧道结构设计的作

用荷载, 国家现行《铁路隧道设计规范 (TB10003—2005)》^[2]和《公路隧道设计规范 (JTG D70—2004)》^[3]根据隧道的埋深不同, 分别给出了深埋隧道与浅埋隧道围岩压力的计算方法。深埋隧道与浅埋隧道的界限埋深是隧道结构设计的基本参数之一。

隧道的界限埋深受诸多因素影响, 包括围岩土体的力学特性、隧道的几何尺寸、施工方法等。隧道开

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278012); 教育部博士点基金项目 (20101103110011)

收稿日期: 2013 - 06 - 18

挖时, 洞顶上方土体的重力荷载是通过土压力拱传递至拱脚及周围介质中去, 因此, 多数学者都从围岩松动压力的角度分析隧道的界限埋深。朱正国^[4]、宋玉香等^[5]建议将岩柱理论的极大值点作为隧道的界限埋深。太沙基^[6]基于松散体理论, 建立了太沙基围岩压力公式, 表明隧道埋深达到一定深度时, 围岩压力与上覆土层厚度无关。王明年等^[7]以太沙基公式围岩压力极限值的 0.8 倍对应的埋深作为界限埋深。杨建民等^[8]以谢家杰理论松动压力为 0 时的埋深作为界限埋深。在假定普氏理论破坏模式的基础上, 程小虎^[9]给出了土质隧道界限埋深的解析解。Yang 和 Huang^[10]、Fraldi 和 Guarracino^[11]基于 Hoek-Brown 准则, 采用极限分析上限定理, 分别得出了浅埋和深埋隧道围岩土体破坏曲线, 并给出了界限埋深的计算公式。针对不同的围岩压力计算公式及深浅埋划分方法, 曲星和李宁^[12]指出, 太沙基公式及谢家杰理论需在隧道洞跨及围岩级别满足一定条件时才能应用, 而普氏理论对围岩力学参数的考虑过于简化。

鉴于隧道力学问题的复杂性, 数值模拟方法已成为确定隧道界限埋深的有效手段。赵占厂和谢永利^[13]针对大跨径黄土隧道, 提出基于洞顶中心线上土体侧压力系数的变化规律确定隧道界限埋深的方法。毛峰^[14]利用相对内比表 $\lambda_i = \Delta y_i / \Delta y_1$ (Δy_i 为洞顶上方土体均分 n 等份后, 第 i 层土的竖向位移) 这一特征变量来确定隧道的深浅埋状态。喻波和王呼佳^[15]采用 Drucker-Prager 模型, 对隧道开挖进行了二维有限元模拟, 提出隧道深浅埋的划分应以围岩能否形成安全有效的压力拱作为基本原则, 并根据水平应力与竖向应力的关系来确定临界埋深。郑颖人等^[16]以等效塑性剪应变为破坏准则, 研究了隧道的破坏模式, 并得到可将破坏从拱顶转向侧壁时的深度作为界限埋深。在《公路隧道设计规范(JTG D70—2004)》中, 单洞隧道深埋与浅埋的判定, 是按荷载等效高度, 并结合地质条件、施工方法等因素以经验公式 $H_p = (2.0 \sim 2.5)h_q$ 来确定的(式中, h_q 按经验公式或普氏塌落拱高度确定)。《铁路隧道设计规范(TB10003—2005)》也采用了这一思想。规范中采用的经验划分方法比较简单, 但还不能反映界限埋深与围岩力学性质等影响因素的定量关系。基于土压力拱效应分析深埋隧道与浅埋隧道划分方法时, 多数研究者是从围岩应力的变化规律展开的。实际工程中, 围岩土体的初始应力及应力的重分布过程难以直接观察和测量, 不便于在工程应用中。

隧道开挖时, 围岩土体产生不均匀变形, 进而应力状态进行自我调整。隧道周围不同位置处的土体,

初始应力状态各异, 因开挖而作用的附加荷载也不同。利用数值方法模拟隧道的开挖过程, 核心的问题是所采用的本构模型能够考虑土的应力路径相关性, 尤其是可计算静水压力减小时土的塑性变形。本文基于土的应力路径本构模型^[17-18], 利用二次开发后的有限元分析软件 ABAQUS 对土质隧道的开挖过程进行了三维有限元模拟, 并从围岩土体的变形和应力重分布两个角度分析了土压力拱效应。基于数值模拟结果, 提出了利用洞顶处土体的竖向位移以及地表最大沉降曲线划分深埋隧道与浅埋隧道的新方法。

1 土压力拱效应分析

土体在不均匀变形或不均匀受力时, 将会形成土压力拱, 土压力拱是土体传递荷载或抵抗不均匀变形的物理机构。隧道开挖时, 隧洞上方的土体失去原有支撑, 自重荷载通过土压力拱传递至周围介质中, 隧道埋深增加的过程就是土压力拱逐渐发展和形成的过程。当隧道埋深较浅时, 如图 1 左图所示, 只有部分大主应力矢量封闭形成土压力拱, 围岩土体的自承载能力未充分发挥, 围岩压力近似等于隧洞上方土体的自重; 当隧道埋深较深时, 如图 1 右图所示, 围岩土体已充分发挥了其自承载能力, 隧道开挖只影响隧洞周围有限范围的土体, 对地表的影响随着埋深的增大而减小。

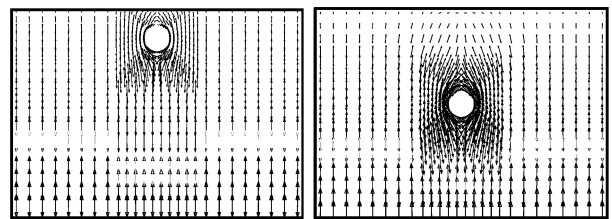


图 1 浅埋隧道与深埋隧道大主应力矢量图

Fig. 1 Vectorgraphs of maximum principal stress of shallow and deep tunnels

从应力的角度分析, 当隧道埋深较浅时, 随着隧道埋深 h 的增加, 围岩土体的自重应力 g 增大, 自承载能力 f 也增大, 即土压力拱效应增强; 自承载能力的增长速度 $\Delta f / \Delta h$ 增大, 且大于自重应力的增长速度 $\Delta g / \Delta h = \gamma'g$, 当 $\Delta f / \Delta h$ 趋于一稳定值时的最小埋深 h_c , 也可表示为 $\Delta f / \Delta g = K$ 时, K 为小于 1 的常数, 表明埋深大于 h_c 时不同埋深的隧道开挖对围岩土体的扰动作用相同, h_c 应为深埋隧道与浅埋隧道的界限埋深, 且 $g - f$ 为围岩压力。

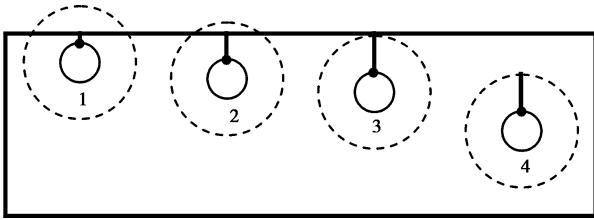


图2 不同埋深隧道示意图

Fig. 2 Tunnels at different buried depths

从变形的角度分析,当隧道埋深较浅时,施工扰动的范围已至地表,如图2中的1图和2图所示,洞顶处土体的竖向位移 y_B 为隧洞上方土体应变的累计值,随着隧道埋深的增加, y_B 增大;当隧道埋深较深时,不同埋深隧道的施工扰动范围基本相同,如图2中的3图和4图所示,洞顶处土体的竖向位移 y_B 与隧道埋深无关,取决于地层损失及土性参数。由上述分析可知,图2中3图所对应的埋深即为隧道开挖扰动的范围,也是深埋隧道与浅埋隧道的界限埋深。

2 界限埋深的确定方法

隧道开挖时形成的土压力拱是土体抵抗不均匀变形时荷载传递规律的表现,但目前尚无有效的观测手段测试到土压力拱,通过数值模拟方法再现隧道的开挖过程,获得围岩土体的应力和变形特征,分析土压力拱效应,研究围岩压力随埋深变化时作用机理的变化。利用数值方法模拟隧道的开挖过程,核心的问题是所采用的本构模型能反映不同附加荷载路径下土的塑性变形规律。本文采用可较好地反映土的应力路径相关性的弹塑性本构模型^[17-18],模型具有参数少,物理意义明确,适用于计算开挖荷载下的土体变形的特点。通过二次开发编制材料本构模型子程序UMAT^[19],将模型嵌入有限元分析软件ABAQUS,利用二次开发后的ABAQUS模拟隧道的开挖过程。

隧道开挖的有限元模型,如图3所示,计算区域断面长为60 m,高40 m,开挖方向纵深18 m,有限元网格在开挖断面细化。侧面边界设置为水平向约束,竖向向自由;底面边界设置为竖向约束,水平向自由;地表面为自由边界。设置的监测路径位于地表,与开挖方向正交,如图3所示;监测点A为监测路径的中点,位于隧洞正上方的地表处,监测点B位于监测点A的正下方洞顶处。开挖断面为圆形,隧道半径 $R=2$ m,采用全断面一步开挖方法,不加衬砌支护。计算工况的隧道埋深分别为2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17和18 m,共17种工况。

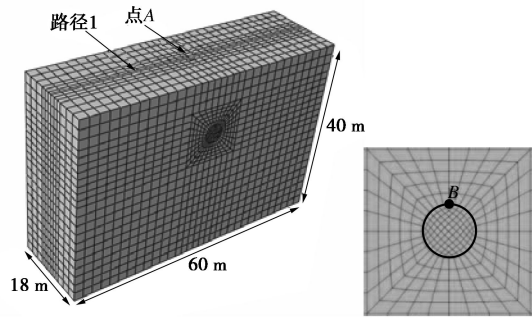


图3 隧道开挖的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of tunnel

计算区域内为均一土层,土性条件取为藤森黏土,土性参数如表1所示。初始状态的孔隙比 $e_0=0.68$,有效重度(浮重度) $\gamma'=16$ kN/m³。土的黏聚力 c (kPa)与前期固结压力相关,本文采用下式描述

$$c = 10 + 0.45 p_{\max} \quad (1)$$

式中, p_{\max} 为历史上最大的静水压力,对于超固结土, p_{\max} 为前期固结压力,对于正常固结土, p_{\max} 为当前静水压力。式(1)右端第一项常数10,它反映了地表土的超固结特性。因此,土体能够承受一定的拉应力。

表1 土性参数

Table 1 Parameters of soils

M_f	M	ν	λ	κ
1.66	1.42	0.3	0.085	0.019

2.1 洞顶处监测点B的竖向位移

隧道开挖前,围岩土体质点均受到重力作用,并处于平衡状态。隧道开挖后,断面周围土体失去了原有土体的支撑,破坏了初始的平衡状态,而向临空面松弛变形,其结果又改变了相邻质点的相对平衡关系,引起应变的调整,以达到新的平衡,产生地层损失,从而引起地表沉降。

图4为图3中监测点B竖向位移随埋深的变化规律。从图4可以看出,对于无衬砌隧道,随着隧道埋深的增加,点B的竖向位移呈现为先逐渐增大,当隧道埋深达到某一深度后达到最大值并保持稳定,即随着埋深的增加不再变化,此埋深对应于图2中的3图状态。在本文给定的土性条件、隧道断面及施工方法等条件下,B点竖向位移达到最大值并趋于稳定时的埋深为7 m左右,即界限埋深 h_c 为7 m。

2.2 地表土监测点A的沉降规律

隧道开挖时,围岩土体受到扰动,造成开挖面周围土体的变形,引起地表沉降,甚至造成临近建(构)筑物的开裂和破坏。地表沉降是多种因素综合引起的,如地层条件、隧道埋深、隧道半径以及开挖方法等。

图 3 中路径 1 在不同埋深下的地表沉降曲线如图 5 所示, 从曲线形式可以看出, 任一埋深时, 土体沉降规律与著名的 Peck 曲线是一致的; 对于不同埋深时的地表沉降曲线, 随着隧道埋深的增大, 地表沉降槽的宽度增大, 沉降曲线趋于平缓, 且地表沉降的最大值均位于隧道中线正上方, 即监测点 A 处。

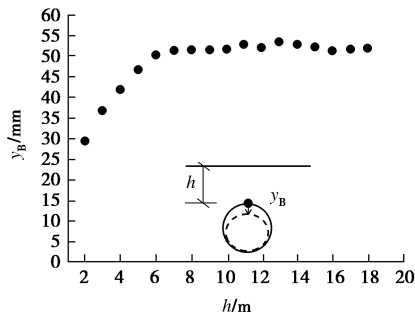


图 4 点 B 竖向位移随埋深的变化规律

Fig. 4 Variation of vertical displacement at point B with depth

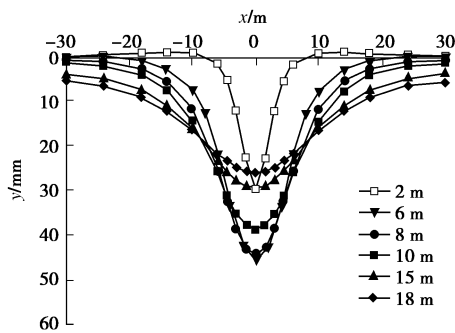


图 5 路径 1 随埋深的沉降规律

Fig. 5 Variation of vertical displacement of path 1 with depth

图 6 为 A 点沉降随埋深的变化规律。从图 6 可以看出, 随着埋深的增加, A 点的沉降呈现为先增大后减小的规律。当埋深在 7 m 左右时, A 点沉降达到最大值。土压力拱效应分析及数值模拟结果均表明, 洞顶处点 B 的竖向位移 y_B 达到最大值且稳定时的埋深与隧洞中线上方地表土体沉降 y_A 达到最大值的埋深是一致的, 如图 4 和图 6 所示。当隧道有衬砌结构时, 洞顶处点 B 的位移受到限制, 此条件下的界限埋深主要受地层损失影响, 可将由洞顶处点 B 的竖向位移规律图 4 得到的界限埋深, 等价地转化为由地表沉降随埋深规律图 6 确定。

2.3 围岩土体的应力释放规律

隧道开挖前, 围岩土体处于自重应力状态, 随着埋深的增大, 自重应力线性增加。隧道开挖后, 围岩土体的应力状态随着开挖过程动态变化, 埋深 15 m 和 18 m 的隧道中线正上方土体中的静水压力, 数值模拟结果如图 7 和图 8 所示, 从曲线形式可知, 开挖作用只影响了断面一定范围内的土体, 使其静水压力

减小。隧道埋深为 15 m 时, 地表至 8 m 深度处土体的静水压力未受到影响, 与开挖前大小相同; 隧道开挖使得距离洞顶 7 m 范围内的土体静水压力减小, 表明隧道开挖的影响范围为 7 m。隧道埋深为 18 m 时, 围岩土体的扰动规律与埋深 15 m 时相同, 隧道开挖的影响范围为 7 m。数值模拟结果表明, 在算例条件下深埋隧道开挖的影响范围为 7 m, 即界限埋深为 7 m。从围岩土体应力释放的角度分析获得的界限埋深, 与前文从变形的角度分析结果是一致的。

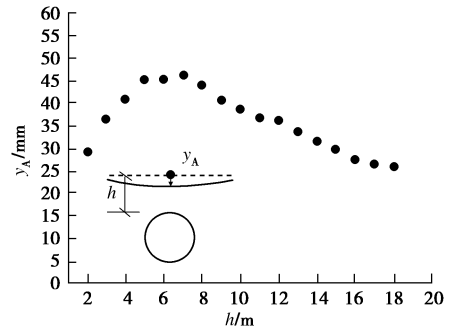


图 6 A 点沉降随埋深的变化规律

Fig. 6 Variation of vertical displacement at point A with depth

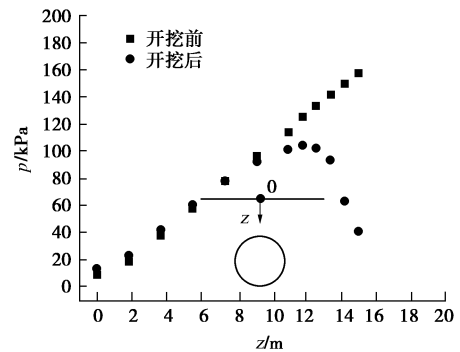


图 7 隧道埋深 15 m 的静水压力变化

Fig. 7 Variation of hydrostatic pressure at depth of 15 meters during tunnel excavation

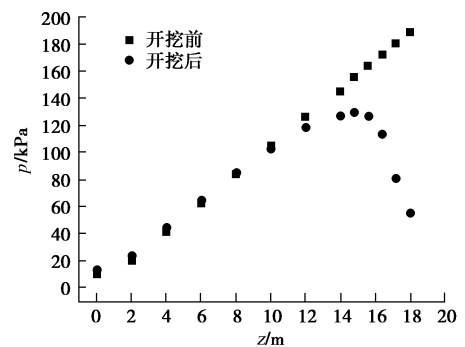


图 8 隧道埋深 18 m 的静水压力变化

Fig. 8 Variation of hydrostatic pressure at depth of 18 meters during tunnel excavation

2.4 本文方法与规范方法比较

《公路隧道设计细则(JTG/T D70—2010)》中隧道的界限埋深是以 2.0~2.5 倍荷载等效高度来确定。对单洞隧道, 界限埋深的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} H_p &= (2.0 \sim 2.5)h_q, \\ h_q &= 0.5 \times B_m / f_{kp}, \\ B_m &= B_t + 2 \times B_p, \\ B_p &= (H_t - H_0) \times \tan(45^\circ - \varphi_c / 2), \\ f_{kp} &= c / R_b + \tan \varphi. \end{aligned} \right\} (2)$$

式中 H_p 为深埋、浅埋隧道的界限埋深; h_q 为荷载等效高度; B_m 为隧道平衡拱跨度; B_t 为隧道开挖跨度; B_p 为隧道两侧破裂面在水平面上的投影宽度; H_t 为隧道开挖高度, 本文为 4 m; H_0 为破裂面到边墙基础的距离, 本文为 2 m; φ_c 为围岩计算摩擦角, 本文为 φ 值相同, φ 为围岩内摩擦角, 本文为 40.55° ; f_{kp} 为普氏围岩坚固系数; c 为围岩黏聚力, 本文为 55 kPa, R_b 为岩体的饱和单轴抗压强度, 对于土体, 为土体无侧限抗压强度, 本文计算得 $R_b = 764$ kPa。

与前文有限元算例的参数一致时, 规范法计算的荷载等效高度 h_q 为 3.15 m, 进而界限埋深 H_p 为 (6.3~7.8) m。本文利用洞顶处土体的位移规律图 4 或地表最大沉降曲线图 6 得到的界限埋深为 7 m, 与规范结果一致, 表明本文方法可较好地反映隧道开挖时围岩扰动的宏观规律。

3 结 论

围岩压力显著地受隧道埋深的影响, 在进行隧道结构设计时, 通常按深埋隧道与浅埋隧道分别确定围岩压力, 界限埋深是合理分析围岩压力的基本参数之一。本文基于隧道开挖时围岩土体的附加荷载特点, 编制了可以较好考虑土的应力路径相关性的弹塑性本构模型子程序, 利用二次开发后的 ABAQUS 对隧道的开挖过程进行了三维有限元模拟, 分析了围岩土体中土压力拱效应, 提出了深埋隧道与浅埋隧道的划分方法, 并给出了界限埋深的确定方法。

(1) 洞顶处土体点 B 的竖向位移 y_B , 随着隧道埋深的增加而增大, 当达到某一埋深后, 洞顶竖向位移趋于一个常数, 达到最大值, 不再随着埋深的增加而变化。洞顶上方地表处土体点 A 的沉降 y_A , 随着隧道埋深的增大, 先增大后减小。 y_B 趋于稳定值时的埋深与 y_A 达到最大值时的埋深相同, 并且该埋深与围岩土体静水压力的扰动范围一致。

(2) 建议利用洞顶处土体位移 y_B 趋于稳定值时的埋深作为划分深埋隧道与浅埋隧道的界限埋深, 对于有支护结构与围岩土体共同作用时, 界限埋深主要

受地层损失的影响, 为地表处土体的沉降 y_A 达最大值时对应的埋深。在简单条件下, 本文方法与规范法给出的界限埋深一致, 本文方法的优点在于可以考虑多种因素的定量影响。

参考文献:

- [1] THOMAS K, GUNTHER M. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunneling[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33: 234 - 247.
- [2] 铁道第二勘察设计院. TB 10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. (The Second Railway Survey and Design Institute. TB 10003—2005 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Press, 2005. (in Chinese))
- [3] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 朱正国. 连拱隧道围岩压力计算方法与动态施工力学行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007. (ZHU Zheng-guo. Research on surrounding rock pressure calculating method and dynamic construction mechanical behavior of multi-arch tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [5] 宋玉香, 贾晓云, 朱永全. 地铁隧道竖向土压力荷载的计算研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2240 - 2244. (SONG Yu-xiang, JIA Xiao-yun, ZHU Yong-quan. Study on vertical earth pressure calculation of metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2240 - 2244. (in Chinese))
- [6] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [7] 王明年, 郭 军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面黄土隧道深浅埋分界深度研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1157 - 1162. (WANG Ming-nian, GUO Jun, LUO Lu-sen, et al. Study of critical buried depth of large cross-section loess tunnel for high speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1157 - 1162. (in Chinese))
- [8] 杨建民, 喻 渝, 谭忠盛, 等. 大断面深浅埋黄土隧道围岩压力试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 125(2): 76 - 79. (YANG Jian-min, YU Yu, TAN Zhong-sheng, et al. Experimental research on the surrounding rock pressure of large sectional loess tunnel under deep and shallow submersion[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 125(2): 76 - 79. (in Chinese))

- [9] 程小虎. 土质隧道深浅埋分界的理论解析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 37 - 42. (CHENG Xiao-hu. Theoretical solution for the dividing depth of deep tunnel and shallow tunnel in earth[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 37 - 42. (in Chinese))
- [10] YANG X L, HUANG F. Collapse mechanism of shallow tunnel based on nonlinear Hoek-Brown failure criterion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26: 686 - 691.
- [11] FRALDI M, GUARRACINO F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 665 - 673.
- [12] 曲 星, 李 宁. 松散岩体竖向压力计算方法剖析及隧洞深浅埋划分方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2749 - 2757. (QU Xing, LI Ning. Analysis of calculation method of vertical pressure in loose rock mass and research on dividing line standard for deep and shallow-buried tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2749 - 2757. (in Chinese))
- [13] 赵占厂, 谢永利. 土质隧道深浅埋界定方法研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(10): 84 - 86. (ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li. Research on demarcating method for deep tunnel and shallow tunnel in soil[J]. Engineering Science, 2005, 7(10): 84 - 86. (in Chinese))
- [14] 毛 峰. 黄土隧道深浅埋分界方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (MAO Feng. The dividing line standard research of deep submersed tunnel and shallow submersed tunnel of loess tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [15] 喻 波, 王呼佳. 压力拱理论及隧道埋深划分方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008. (YU Bo, WANG Hu-jia. Study on pressure arch theory and demarcating method for deep tunnel and shallow tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. (in Chinese))
- [16] 郑颖人, 徐 浩, 王 成, 等. 隧洞破坏机理及深浅埋分界标准[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1851 - 1856. (ZHENG Ying-ren, XU Hao, WANG Cheng, et al. Failure mechanism of tunnel and dividing line standard between shallow and deep bury[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1851 - 1856. (in Chinese))
- [17] 路德春, 姚仰平. 砂土的应力路径本构模型[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 451 - 459. (LU De-chun, YAO Yang-ping. Constitutive model of sand considering complex stress paths[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(4): 451 - 459. (in Chinese))
- [18] 路德春. 基于广义非线性强度理论的土的应力路径本构模型[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006. (LU De-chun. A constitutive model for soils considering complex stress paths based on the generalized nonlinear strength theory[D]. Beijing: Beihang University, 2006. (in Chinese))
- [19] 路德春, 曹胜涛, 杜修力, 等. 平面应变条件下的土拱效应[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 454 - 458. (LU De-chun, CAO Sheng-tao, DU Xiu-li, et al. Soil arching effect under plane strain condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 454 - 458. (in Chinese))

(本文责编 明经平)