

基于 FLAC3D 的某单线铁路隧道围岩压力数值模拟分析

高博 王永强 娄亚辉 冯铭川 吴盛

中国建筑第八工程局有限公司上海分公司, 上海市浦东区, 200120;

摘要: 在相同地质条件下, 为探究深埋与浅埋隧道围岩松动压力的差异, 本文开展了理论分析与数值模拟研究。首先依据《铁路隧道设计规范》中国岩松动压力的确定方法, 当隧道埋深超过特定临界值时, 围岩将形成“自然拱”, 松动压力主要由隧道周边自然拱范围内的岩体承担, 因此深埋隧道更容易形成稳定的成拱结构, 从而有效削减作用于衬砌的压力。随后, 利用 FLAC3D 建立三维计算模型, 通过数值模拟分析不同埋深条件下围岩受力与变形规律。模拟结果表明, 在相同地质条件下, 浅埋隧道难以形成完整的自然拱结构, 围岩松动压力显著高于深埋隧道。研究结论可为类似隧道工程的设计与受力判定提供参考。

关键词: 浅埋隧道; 深埋隧道; 围岩压力; 隧道工程; FLAC3D

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.018

引言

随着科技日新月异的发展, 人类社会经贸往来的频次与规模日益增大, 对交通方式的需求与依赖亦随之增长。鉴于地形地貌的多样性, 单纯的公路建设在某些地区已难以满足人们日益增长的交通出行需求。此时, 隧道的采用为选线提供了更为合理与高效的方案, 成为解决交通瓶颈的重要途径。

在隧道工程的建设中, 一个不可忽视的关键要素是围岩压力的确定。围岩压力是作为地下开挖空间周围岩体和支护结构变形或破坏的主要作用力, 其精确计算与合理评估对于确保隧道施工安全与稳定至关重要。这一作用力主要由两部分组成: 一是由地应力引起的围岩压力, 它反映了地质构造与岩石力学性质对隧道稳定性的影响; 二是围岩变形受阻而作用在支护结构上的作用力, 它体现了支护结构与围岩之间的相互作用。

从广义上来看, 围岩压力的概念不仅涵盖了有支护结构的情况, 也包括了无支护结构的情况。这意味着无论隧道是否采用支护措施, 都需要对围岩压力进行精确的计算和评估。提前确定围岩压力, 有助于制定更为科学合理的施工方案, 确保隧道建设过程中的安全, 并有助于缩短施工周期, 提高工程效率。

因此, 对于隧道工程而言, 准确确定围岩压力不仅是保障施工安全的关键环节, 也是优化施工方案、提高施工效率的重要手段。在未来的隧道建设中, 应进一步加强对围岩压力的研究与监测, 以推动隧道工程技术的不断进步与发展。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

拟建单线铁路隧道, 全长约 24m。围岩等级为IV级,

隧道顶的覆土埋深 $h=15m$, 隧道净跨 $B=6m$, 隧道高度 $H_t=5m$ 。围岩容重 $\gamma=21KN/m^3$, 计算时纵向取单位长度。拟建隧道周围岩体特征: 针对所描述的较软岩或软硬岩互层, 且以软岩为主的岩体特性, 其完整性或破碎程度对于隧道建设具有显著影响。这类岩体在力学性质上通常表现出较低的强度和较高的变形性, 因此在隧道掘进过程中易发生坍塌、变形等问题。

在拟建隧道周围的土体特征方面, 存在具有压密或成岩作用的粘性土、粉土及砂类土。这些土体往往经过钙质、铁质等物质的胶结作用, 形成粗角砾土、粗圆砾土、碎石土、卵石土及大块石土等。黄土作为一种特殊的土类, 在干燥状态下具有较高的强度, 但在湿润或饱和状态下其强度会显著下降, 因此对于隧道的稳定性和施工安全具有不可忽视的影响。

在围岩基本质量指标 (BQ) 方面, 根据提供的范围 (350~251), 可以看出隧道所处地段的围岩质量差异较大。较低的 BQ 值意味着围岩的稳定性较差, 需要采取相应的支护和加固措施以确保隧道施工和运营的安全。

针对这类地质条件下的隧道建设, 需要充分考虑岩体的软硬互层特性、土体的压密与成岩作用以及黄土的特殊性质。在设计和施工过程中, 应采取合理的支护和加固措施, 确保隧道的稳定性和施工安全。同时, 对于不同地段的围岩质量差异, 应制定相应的施工方案和监测措施, 以应对可能出现的各种地质问题。

1.2 隧道围岩压力计算

确定围岩压力大致分为以下三个步骤:

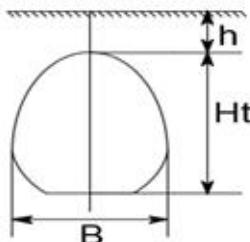
(1) 隧道深埋浅埋的判定。在隧道工程中, 存在一个特定的临界埋深值, 只有当隧道的实际埋深超过这一临界值时, 隧道顶部周围的岩石才可能因自身重力作

用而自然形成拱形结构，即所谓的自然拱。基于这一地质力学特性，工程实践中习惯上将超过该临界埋深的隧道定义为深埋隧道，反之则称之为浅埋隧道。

对于浅埋隧道而言，由于其埋深未达到形成自然拱所需的临界值，因此无法利用自然拱来分担围岩压力。在此情况下，浅埋隧道的围岩压力大小将直接受到其埋置深度的影响。随着埋深的增加，围岩对隧道结构的压力也会相应增大，反之则减小。因此，在浅埋隧道的设计与施工中，必须充分考虑埋深对围岩压力的影响，以确保隧道结构的安全与稳定。

(2) 选择公式。对于深埋隧道可以使用，《铁路隧道设计规范》推荐方法、普氏理论、泰沙基公式等。对于浅埋隧道可用，郎金公式、谢家休理论、比尔鲍曼公式、泰沙基公式。

(3) 计算垂直及侧向压力。



h: 隧道埋深, H_t: 隧道高度, B: 隧道宽度

图1 隧道截面图

根据隧道所处环境、工程地质、水文地质、隧道深度等综合分析考虑进行计算。

1.2.1 按照我国《铁路隧道设计规范》计算

$$H_t/B=5/6=0.833<1.7$$

则，该隧道适用于下述公式

式中：H_t—隧道高度（m）

B—隧道宽度（m）

单线、双线及多线铁路隧道按破坏阶段设计时垂直压力计算公式为：

$$q=\gamma \times h_q$$

$$h_q=0.41 \times 1.79^4=0.41 \times 1.79^4=4.21 \text{m}$$

h=15m>(2~2.5) h_q=10.525m, 属于深埋隧道

$$q=21 \times 4.21=88.41 \text{kN/m}$$

式中：q—围岩垂直均布压力（kPa）

γ—围岩重度（Kn/m³）

h_q—围岩压力计算高度（m）

S—围岩级别。

表1 水平均布松动压力

围岩级别	I ~ II	III	IV	V	VI
水平均布压力	0	<0.15q	(0.15~0.3)q	(0.3~0.5)q	(0.5~1.0)q

根据表1 水平均布松动压力可知：

$$e=(0.15~0.3) q=13.26~26.52 \text{kN/m}$$

如果 h=5m, h<2 h_a, 隧道应为浅埋，按浅埋公式：

$$q=\frac{Q}{B}=\gamma h \left(1-\frac{h \lambda \tan \theta}{B}\right)=\gamma h K \text{ 计算。}$$

表2 各级围岩的 θ 及 ϕ_0 值

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
θ	0.9	$0.9 \phi_0$	$0.9 \phi_0$	(0.7~0.9) ϕ_0	(0.5~0.7) ϕ_0	(0.3~0.5) ϕ_0
ϕ_0	$> 78^\circ$	$70^\circ \sim 78^\circ$	$60^\circ \sim 70^\circ$	$50^\circ \sim 60^\circ$	$40^\circ \sim 50^\circ$	$30^\circ \sim 40^\circ$

查表2可知： $\phi_0=55^\circ$, $\theta=44^\circ$ (取 0.8 ϕ_0), 则 $\tan \phi_0=1.428$, $\tan \theta=0.966$ 。

$$\tan \beta = \tan \phi_0 + \sqrt{\frac{\tan \phi_0 (\tan^2 \phi_0 + 1)}{\tan \phi_0 - \tan \theta}}$$

$$=1.428 + \sqrt{\frac{1.428(1.428^2 + 1)}{1.428 - 0.966}} = 4.493$$

$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \phi_0}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \phi_0 - \tan \theta) + \tan \phi_0 \tan \theta]} = 0.153$$

围岩垂直均布松动压力为：

$$q=\gamma h \left(1-\frac{h \lambda \tan \theta}{B}\right)=92.07 \text{kN/m}$$

围岩水平均布松动压力为：

$$e_1=\gamma h \lambda=16.07 \text{kN/m}$$

$$e_2=\gamma (h+H_t) \lambda=32.13 \text{kN/m}$$

可知浅埋隧道所受围岩松动压力比深埋隧道大，因而靠近洞口段的洞身衬砌需要加强。

2 有限元模拟分析

2.1 隧道模型基本假定

由于隧道开挖面积较大，施工复杂，为简化分析过程需对模型进行以下几个基本假定。

(1) 土体为各项同性的弹塑性材料，服从 Mohr-Coulomb 强度准则；

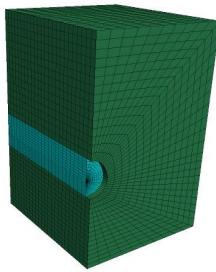
(2) 开挖过程中，土层与结构单元的性质和参数不发生变化；

(3) 不考虑隧道外降水或回灌；

为确保模拟结果的准确性并兼顾计算效率，模型范围须充分覆盖隧道开挖潜在影响区。通常，根据实践经验，竖向计算深度取隧道开挖深度的 3 倍，水平方向计算宽度则为开挖深度的 4 倍。模型应涵盖开挖土体及计算范围内的岩土体，并采用 brick 单元网格作为土体的

计算模型,以确保模拟的精确性与效率性。数值分析模型见图2。

FLAC3D 6.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.
Zone Group
Cut Plane: on front
Default-soil
Default-tunnel



FLAC3D 6.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Z Displacement
4.3910E-04
4.0000E-04
3.5000E-04
3.0000E-04
2.5000E-04
2.0000E-04
1.5000E-04
1.0000E-04
5.0000E-05
0.0000E+00
-5.0000E-05
-1.0000E-04
-1.5000E-04
-2.0000E-04
-2.5000E-04
-3.0000E-04
-3.2690E-04

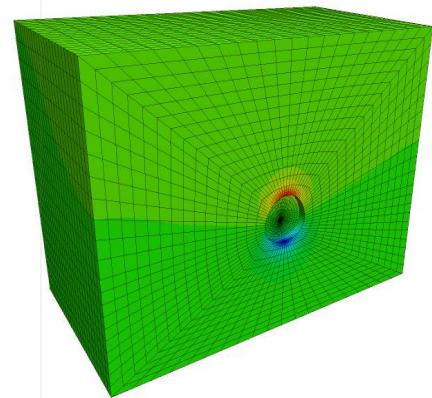


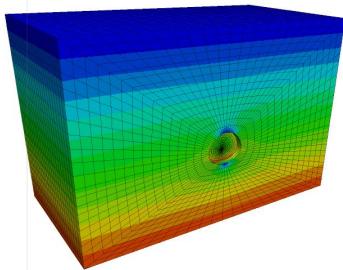
图2 隧道模型断面示意图

在模型底面处施加竖向约束,在模型侧面施加水平约束,模型顶面自由无约束。

土体参数选取弹性模量 1.3×10^9 Pa, 泊松比 0.3, 黏聚力 3×10^5 Pa, 内摩擦角 44, 密度 21KN/m^3 。土体开挖时采用 null 命令模拟土体开挖,然后求解至稳定状态。

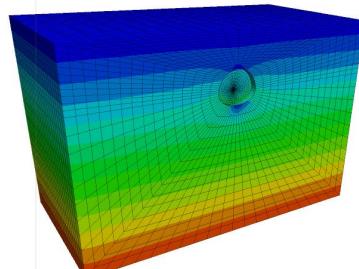
2.2 云图分析

FLAC3D 6.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.
Zone ZZ Stress
Calculated by Polynomial Extrapolation
Tolerances in SVD algorithm: 1e-07
1.8661E+03
0.0000E+00
-1.0000E-04
-1.0000E+05
-2.0000E+05
-3.0000E+05
-3.5000E+05
-4.0000E+05
-5.0000E+05
-5.5000E+05
-6.0000E+05
-6.0720E+05



(a) 深埋隧道垂直压力

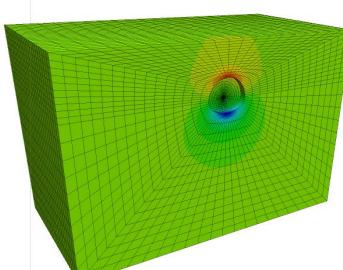
FLAC3D 6.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.
Zone ZZ Stress
Calculated by Polynomial Extrapolation
Tolerances in SVD algorithm: 1e-07
7.3940E+03
0.0000E+00
-5.0000E-04
-1.0000E-05
-1.5000E+05
-2.0000E+05
-2.5000E+05
-3.0000E+05
-3.5000E+05
-4.0000E+05
-4.5000E+05
-5.0000E+05
-5.5000E+05
-6.0327E+05



(b) 浅埋隧道垂直压力

FLAC3D 6.00
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Z Displacement
2.7000E-03
2.5000E-03
2.2500E-03
2.0000E-03
1.7500E-03
1.5000E-03
1.2500E-03
1.0000E-03
7.5000E-04
5.0000E-04
2.5000E-04
0.0000E+00
-2.5000E-04
-5.0000E-04
-7.5000E-04
-1.0000E-03
-1.2500E-03
-1.4712E-03



(c) 深埋隧道位移云图

(d) 浅埋隧道位移云图

图3 隧道围岩应力位移云图

根据图3数值模拟隧道围岩压力计算结果可以看出:

①隧道在开挖后其围岩位移在隧道顶部最大,而后逐渐减小,这与隧道开挖后围岩变形规律相吻合。

②隧道开挖后在洞身衬砌处其应力最大,在衬砌上部围岩处应力也较大,这是由于隧道开挖后产生应力重分布,导致隧道上部土体产生扰动,支撑的土体被移除,导致其产生向下滑动的趋势。

③由应力云图显示浅埋隧道的垂直压力在衬砌处最大为 3.1×10^4 N/m,而深埋隧道为 2.5×10^4 N/m。显然浅埋隧道所受围岩松动压力比深埋隧道大。

3 结论

(1) 在隧道开挖过程中掌子面处压力很大,在衬砌连接部分其应力及位移都比较大,这是由于原先的初始地应力被破坏,导致其应力变化过程中产生的应力集中现象,这与实际工程经验相符。

(2) 衬砌对围岩稳定具有非常重要的作用,在云图中发现,良好的衬砌结构可以让围岩变形控制在合理的范围之内,保证施工及运行安全。

(3) 在相同地质条件下,由应力云图可知其浅埋隧道所受围岩松动压力要高于深埋隧道。因此,浅埋隧道在靠近洞口段的洞身衬砌需要加强。

参考文献

- [1] 朱永全. 隧道工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018: 88-97.
- [2] 谢光莹. 王毅. 基于 FLAC3D 流固耦合的某公路下穿隧道开挖数值模拟研究 [J]. 广州: 隧道建设, 2019.
- [3] 彭文斌. FLAC3D 实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.