

基于围岩应力变化率确定盾构隧道竖向荷载的等效荷载高度取值方法

何林根¹ 黄钟晖² 康潇月¹ 刘 昊² 吕林海² 姚超凡¹ 王士民¹

(1. 西南交通大学交通隧道教育部重点实验室, 610031, 成都; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁)

摘 要 [目的] 现有复杂地质条件下, 盾构隧道荷载模式与计算方法的适用性和精确性存在不足, 有必要基于围岩应力变化率确定盾构隧道竖向荷载等效荷载高度的取值。[方法] 根据相似地层条件下已建盾构工程, 提出一种基于围岩荷载临界应力变化率确定竖向荷载的方法。结合南宁地铁 5 号线盾构隧道工程, 开展越江盾构隧道穿越土岩复合地层竖向荷载取值方法以及影响因素对竖向荷载变化规律的研究。[结果及结论] 基于相似地层条件的已建盾构工程, 以围岩荷载临界应力变化率参考值取 2% 为确定竖向荷载高度取值的依据。数值计算结果表明, 埋深对等效荷载高度的影响显著, 地下水赋存情况对于等效荷载高度的影响相对较小。

关键词 地铁; 盾构隧道; 应力变化率; 等效荷载高度

中图分类号 U451; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.034

Equivalent Load Height Determination Method for Shield Tunnel Vertical Load Based on Surrounding Rock Stress Change Rate

HE Lingen¹, HUANG Zhonghui², KANG Xiaoyue¹, LIU Hao², LYU Linhai², YAO Chaofan¹, WANG Shimin¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Nanning Rail Transit Co., Ltd., 530029, Nanning, China)

Abstract [Objective] The applicability and accuracy of the load modes and calculation methods of shield tunnels under existing complex geological conditions are insufficient. It is necessary to determine the equivalent load height value of the shield tunnel vertical load based on the surrounding rock stress change rate. [Method] Based on the built shield tunneling project under similar stratigraphic conditions, a method for determining vertical load based on the critical stress change rate of surrounding rock load is proposed. Combined with the shield tunnel project of Nanning Metro Line 5, the vertical load value method of the cross-river shield tunnel passing through

the earth-rock composite strata and the influencing factors on the vertical load change law are studied. [Result & Conclusion] Based on the built shield projects with similar stratigraphic conditions, a reference value of 2% is taken as the critical stress change rate of the surrounding rock load to determine the vertical load height value. The numerical calculation results show that the influence of burial depth on the equivalent load height is significant, while the influence of groundwater occurrence on the equivalent load height is relatively smaller.

Key words metro; shield tunnel; stress change rate; equivalent load height

目前,我国盾构隧道竖向荷载的计算方法大多是由《铁路隧道设计规范》《公路隧道设计规范》^[1-2]或工程经验而来,其中复杂地质环境下确定作用于盾构隧道衬砌外部的竖向荷载是衬砌管片设计的难点。隧道开挖带来的围岩扰动包括应力场及位移场变化——开挖使得初始平衡状态被破坏,衬砌结构和围岩相互作用后再恢复平衡状态^[3]。隧道开挖后由于洞室处于中空状态,洞周会产生径向内挤压力,使得围岩产生位移变化。针对隧道开挖扰动位移场的研究较多。文献[4]对于圆形隧道而言,由于隧道的洞室半径往往远远小于隧道长度,因此在理论计算中经常采用柯西课题解的方法,将隧道问题简化成两侧受均布压力的薄板中心小圆孔周边应力分布计算问题。文献[5]采用模型试验和数值模拟结合的方法,对岩体内部的应力演化规律展开研究。文献[6]通过数值模拟方法,分析多个因素对隧道开挖应力释放率的影响程度,揭示根据围岩等级来确定隧道开挖应力释放率的结论。

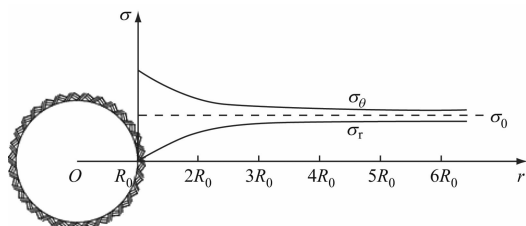
针对地下工程荷载反演分析,文献[7]以现场量测的数据为基础,通过反演模型推算出盾构隧道衬砌计算荷载取值;文献[8]采用正交试验设计分析方法,定义优化分析函数,反演分析黄土地层中盾构隧道管片衬砌结构设计荷载的合理计算参数。

结合神经网络算法学者们也做了大量研究:文献[9]针对盾构施工对土层扰动的影响,利用改进的遗传优化神经网络算法对其土体参数进行反演,得出较为准确的土体参数;文献[10]针对南京地区破碎软岩隧道围岩参数难测定问题,借助 Midas 数值模拟及 BP(反向传播)神经网络对区段穿越的破碎软弱围岩力学参数进行反演;文献[11]借助 LM 算法改进的 BP 神经网络与数值模拟技术相结合的方法构建智能隧道围岩参数反演模型。

由于盾构隧道修建条件复杂化的趋势盛行,衬砌结构与围岩的相互作用效应更为复杂^[12],但鲜有针对地铁盾构隧道等效荷载高度的研究,有必要提出一种确定作用在衬砌结构上竖向荷载高度的方法。有鉴于此,本文根据部分已建越江盾构隧道工程的荷载反演资料,通过利用 FLAC^{3D}有限差分软件进行数值分析,并最终提出基于围岩应力变化率确定竖向荷载等效荷载高度的方法。在相似地层条件下,盾构隧道开挖对围岩的扰动具有相似性^[13-14],故把上述方法在南宁地铁 5 号线的盾构隧道工程中加以印证。

1 围岩应力变化率

隧道开挖后围岩的变形具有时间相关性和空间相关性,不仅会导致位移场发生变化,也会导致原始应力场的扰动^[15],如图 1 所示。工程实践证明^[16-17],隧道开挖后围岩的固有结构被破坏,块体间阻力削弱而产生变形松弛,隧道围岩应力重分布,隧道周边径向应力被释放,围岩内通常形成塑性区,一方面使应力不断向围岩深部转移,另一方面又不断向隧道方向变形并逐渐解除塑性区的应力。基于实测的围岩应力沿隧道径向的分布特征,可以分析软岩隧道开挖期地应力场的变化调整规律。初始围岩应力场在结构完整时是稳定存在的,



注: σ_r 为径向应力; σ_θ 为环向应力; r 为距隧道中心 O 的水平距离; R_0 为隧道半径。

图 1 径向应力和环向应力随 r 的变化曲线

Fig. 1 Change curves of radial stress and circumferential stress with r

而隧道的开挖导致整体结构被破坏,必然会引起原始应力场发生变化。因此,应力变化可作为确定隧道开挖引起围岩扰动范围的依据。对此,本文提出基于围岩应力变化率确定等效荷载高度的方法。

隧道开挖引起围岩变形,选取围岩应力变化为研究切入点,探究土岩复合地层竖向荷载的确定方法。基于全国部分地区相似地层条件下的已建盾构隧道项目相关资料,选择工程中典型计算断面进行数值模拟,得到隧道开挖前和建成后的应力变化,将计算所得应力数据代入到应力处理公式,从而得到该断面的围岩应力变化率 δ 。结合这些工程的结构荷载反演分析所得等效荷载高度建议取值 H ,得到盾构隧道围岩荷载临界应力变化率 δ_H 。鉴于此,提出围岩应力处理公式:

$$\delta = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中:

σ_1 ——隧道开挖前围岩某点处的初始应力;

σ_2 ——隧道建成后该点处的平衡应力。

不同工程计算结果归纳总结之后,可推导出围岩荷载临界应力变化率参考值 δ_0 。以 δ_0 作为“量尺”来确定南宁地铁 5 号线越江盾构隧道的等效荷载高度取值,进而探讨隧道埋深以及地下水赋存情况对荷载的影响规律。本文提出荷载确定方法的流程如图 2 所示。

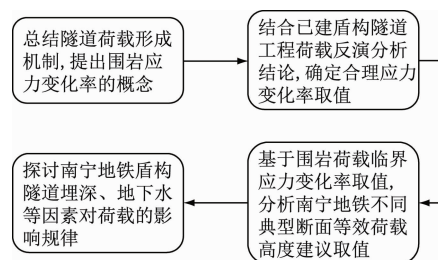


图 2 基于围岩应力变化率分析等效荷载高度的流程图

Fig. 2 Flow chart of equivalent load height analysis based on surrounding rock stress change rate

2 围岩荷载临界应力变化率的确定与验证

2.1 计算工况

选取福州及武汉部分已建的盾构地铁隧道工程,因其具有相似的复合地层条件,能够满足前述需求并开展后续研究。

工况一:在武汉地铁 2 号线越江隧道工程中,依照隧址区的隧道线形及水文地质条件,择取穿越土层的断面作为典型断面一。

工况二:在武汉地铁 2 号线越江隧道工程中,依据隧址区隧道线形与水文地质状况,选定穿越岩层的断面作为典型断面二。

工况三:在武汉地铁 8 号线一期工程越江标段项目中,依据隧址区的隧道线形和水文地质条件,将汉口岸隧道区间内最大覆土之处的断面作为典型断面三。

工况四:在福州地铁某线越江盾构隧道工程中,以隧址区隧道线形及水文地质条件为主要参考因素,选择穿江代表性断面作为典型断面四。

根据文献[18],当隧道直径为 D 时,工况一与工况二中 $H=2.5D$,工况三与工况四中 $H=2.0D$ 。

各工况 H 均以其所依托项目的盾构管片内力实测数据为反演目标。利用正交试验设计对影响管片衬砌结构内力的主要荷载参数进行调整,借助有限元正分析即可得到各参数组合下的结构内力分布,再通过误差比对分析即可得出荷载分布的最优解。

2.2 数值模型建立

隧道荷载实际研究一般通过典型断面分析来总结隧道纵向荷载演变规律,从而为荷载设计提供有力支撑。

本文采用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立二维地层-结构模型,进行结构分析。在典型地质水文条件处,本文以纵向单位长度隧道的力学特性代替该段的三维力学特性,将三维计算简化为二维的平面应变计算。

岩土体采用 Mohr-Coulomb plasticity 模型,假定地面平坦,且各地层土体为均匀水平层状分布、各向同性的弹塑性体。模型上边界为地面,下边界及左右边界为离隧道外轮廓 $5.0D$ 处,沿盾构前进

方向取单位长度。模型两侧及地面以各面法向的限制位移自由度为约束条件。

以工况四为例,管片采用 shell 单元进行模拟,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 、厚度为 0.3 m 、泊松比为 0.2 、弹性模量为 $3.45 \times 10^4\text{ MPa}$ 。盾构开挖采用 null 空模型来模拟,将开挖释放掉的应力作为释放节点荷载,按照一定比例分配后,重新加在开挖后隧道的周边上,使其转化为等效节点力,即为应力释放过程。在模拟中假定盾构开挖及应力释放后管片安装都是瞬时完成的。工况四的计算模型如图 3 所示。

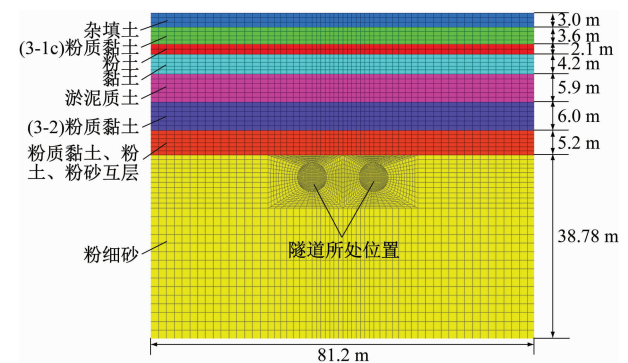


图3 工况四的计算模型

Fig. 3 Calculation model of working condition 4

2.3 工况一计算分析

工况一中,隧址区地层从上到下依次为:杂填土,粉土层,黏土层,淤泥质土层,粉质黏土层等。隧道主要穿越粉细砂层, $D=6.2\text{ m}$,埋深为 31.58 m (约为 $5.1D$)。各地层的物理力学参数如表 1 所示。

工况一下隧道开挖前及左线隧道建成后,围岩应力云图见图 4。提取应力并代入式(1),得到围岩应力变化率,见图 5。

表 1 工况一地层物理力学参数表

Tab. 1 Table of strata physical and mechanical parameters under working condition 1

土层	土层位置	覆土厚度/m	重度/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	渗透系数/(cm/s)	静止侧压力系数
杂填土	水位线上	0.67	18.5	12	12	9.3×10^{-3}	
杂填土	水位线下	2.44	18.5	12	12	9.3×10^{-3}	
粉质黏土	水位线下	3.41	19.4	14	11	1.2×10^{-5}	0.51
粉土	水位线下	1.98	20.8	19	26	1.0×10^{-3}	0.43
黏土	水位线下	3.95	19.4	19	9	3.5×10^{-6}	0.53
淤泥质土	水位线下	6.90	18.0	13	5	4.6×10^{-6}	0.73
粉质黏土	水位线下	5.75	19.1	16	11	8.1×10^{-6}	0.50
粉质黏土、粉土、粉砂互层	水位线下	5.08	19.5	17	12	1.2×10^{-5}	0.48
粉细砂	至隧道顶	1.40	19.2	0	33	1.9×10^{-2}	0.40

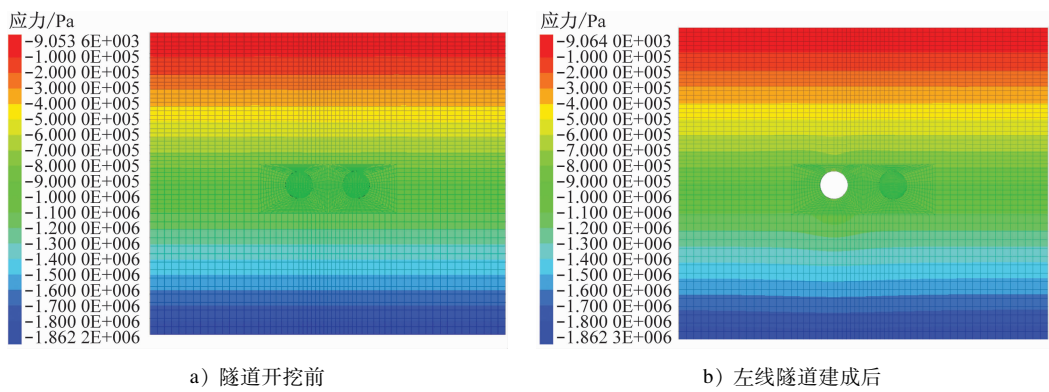


图 4 工况一围岩应力云图

Fig. 4 Surrounding rock stress nephogram under working condition 1

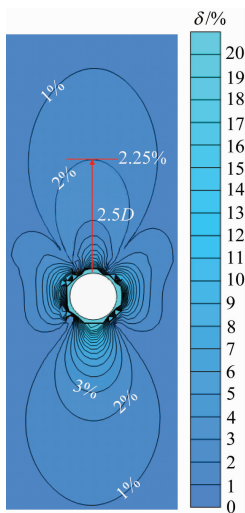


图 5 工况一围岩应力变化率云图

Fig. 5 Surrounding rock stress variation rate nephogram under working condition 1

由荷载反演资料所得,该断面地层条件下 $H = 2.5D$ 。对比分析图 5 可见,当 $H = 2.5D$ 时, $\delta_H \approx 2.25\%$ 。鉴于此,当 $\delta = 2.00\%$ 时,对应的 H 略大于 $2.5D$,能够保证设计荷载足够安全。

2.4 工况二计算分析

工况二中,隧址区地层从上到下地层组成依次为:杂填土,粉质黏土,黏土,粉质黏土,强风化粉砂岩。隧道主要穿越强风化粉砂岩层, $D = 6.2\text{ m}$,埋深为 23.4 m (约为 $3.8D$)。各地层的物理力学参数如表 2 所示。

依据围岩应力处理公式的定义,得到围岩应力变化率见图 6。由荷载反演资料所得,该断面地层条件下 $H = 2.5D$ 。分析图 6 可见,当 $H = 2.5D$ 时, $\delta_H = 2.13\%$ 。因此,当 $\delta = 2.00\%$ 时,对应的 H 略大于 $2.5D$,能够保证设计荷载足够安全。

表 2 工况二地层物理力学参数表

Tab. 2 Table of strata physical and mechanical parameters under working condition 2

土层	土层位置	厚度/m	重度/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	渗透系数/(cm/s)	静止侧压力系数
杂填土	水位线上	1.76	18.5	12	12	9.3×10^{-3}	
杂填土	水位线下	0.61	18.5	12	12	9.3×10^{-3}	
粉质黏土	水位线下	5.52	19.4	14	10	4.6×10^{-6}	0.50
黏土	水位线下	7.03	19.2	20	9	3.5×10^{-6}	0.53
粉质黏土	水位线下	5.55	19.9	18	10	9.3×10^{-6}	0.50
强风化粉砂岩	至隧道顶	2.93	24.8				

2.5 工况三计算分析

工况三中,隧址区地层从上到下依次为:素填土、粉质黏土层、粉砂层、粉细砂层。隧道主要穿越粉细砂层,属于透水性地层。 $D = 12.1\text{ m}$,其埋深为 31.25 m (约为 $2.6D$)。各地层的物理力学参数如表 3 所示。

依据围岩应力处理公式的定义,得到围岩应力变化率如图 7。由荷载反演资料所得,对于隧道外径达到 12 m ,埋深达到 $2.0D$ 的盾构隧道,建议隧道拱顶垂直土压力按等效于拱顶之上 $2.0D$ 的土柱压力进行计算。而对于埋深小于 $2.0D$ 的盾构隧道,上覆土压力按照全土柱法进行考虑。对比图 7 分

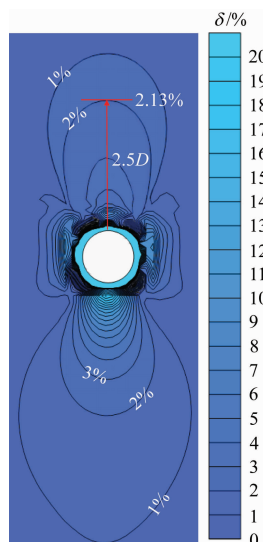


图6 工况二围岩应力变化率云图

Fig. 6 Surrounding rock stress variation rate nephogram under working condition 2

析可知,当埋深大于 $2.0D$,取 $H = 2.0D$ 时, $\delta_H \approx 2.37\%$,因此,当 $\delta = 2.00\%$ 时,对应的 H 略大于 $2.0D$,能够保证设计荷载足够安全。

2.6 工况四计算分析

工况四中,隧址区地层从上到下依次为:杂填土,填砂层,中砂、淤泥层,淤泥质土夹薄层粉砂层,中砂层等。隧道主要穿越中砂、淤泥质土夹薄层粉砂的复合地层。 $D = 6.2\text{ m}$,其埋深为 31.35 m (约 $5.1D$)。各地层物理力学参数如表4所示。

根据围岩应力处理公式的定义,得到围岩应力变化率如图8。由荷载反演资料所得,当断面埋深较大时,盾构隧道管片衬砌结构设计荷载取等效荷载高度为 $2.0D$ 较符合衬砌结构的实际受力。对比分析图8,可见,当 $H = 2.0D$ 时, $\delta_H \approx 2.01\%$ 。由此确定, $\delta = 2.00\%$ 时,对应的 H 略大于 $2.0D$,能够保证设计荷载足够安全。

表3 工况三地层物理力学参数表

Tab.3 Table of strata physical and mechanical parameters under working condition 3

土层	土层位置	厚度/m	重度/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	泊松比	渗透系数/(cm/s)	静止侧压力系数
素填土	水位线上	2.51	18.6	15.0	10.0	0.48	2.1×10^{-5}	0.35
素填土	水位线下	2.85	18.6	15.0	10.0	0.48	2.1×10^{-5}	0.35
粉质黏土	水位线下	9.06	18.6	16.5	9.9	0.49	1.5×10^{-5}	0.55
粉砂	水位线下	7.03	19.4	0	30.0	0.49	2.0×10^{-3}	0.33
粉细砂	至隧道顶	9.80	19.4	0	32.0	0.49	5.0×10^{-3}	0.35

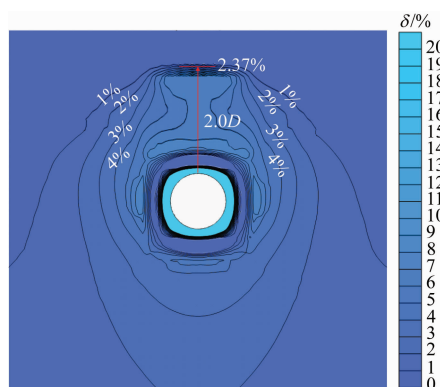


图7 工况三围岩应力变化率云图

Fig. 7 Surrounding rock stress variation rate nephogram under working condition 3

m ,区间下穿邕江,越江段长度为 405.64 m , $D = 6.0\text{ m}$ 。区间场地范围内的地层属于上软下硬土岩复合地层,其中土层主要包括填土层、黏性土层、粉土层、粉细砂层、圆砾层,而岩层主要有古近系半成岩的泥岩层、粉砂岩层及炭质泥岩层。鉴于隧址区的隧道线形、水文地质条件,以及能清楚反映不同地层条件下衬砌结构内力变化规律的原则,选取2个最具代表性断面作为计算断面。计算断面1选取隧道穿越圆砾-泥岩复合地层的江岸断面,隧道上部为圆砾土,下部为粉砂质泥岩,其下卧层为粉砂质泥岩,隧道顶部的覆土厚度约为 29.6 m ;计算断面2选取邕江中最高水头的断面,隧道顶部的覆土厚度约为 10.8 m ,且隧道上方邕江多年平均水位的水头为 21.5 m 。计算断面的地质剖面简图如图9所示。两个计算断面隧道所处区域地层条件差距不大,相应地层物理参数见表5。

3 南宁地铁5号线越江隧道竖向荷载分析

3.1 计算断面选择

五一立交站至新秀公园站区间总长为 $2\,367.0$

表 4 工况四地层物理力学参数表

Tab.4 Table of strata physical and mechanical parameters under working condition 4

土层	土层位置	厚度/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(cm/s)	静止侧压力系数
杂填土	水位线上	2.16	18.00	5.00	15.00		
填砂	水位线上	1.54	17.80	18.40	10.20		
填砂	水位线上	4.25	17.80	18.40	10.20		
中砂、淤泥	水位线上	10.79	18.98	22.67	22.27	5.5×10^{-6}	
淤泥质土夹薄层粉砂	水位线下	5.04	16.68	11.80	2.87		0.46
中砂	水位线下	4.44	18.35	16.10	26.60		
淤泥质土	水位线下	3.13	17.10	16.78	4.61	2.7×10^{-6}	0.39
中砂	隧道穿越处	7.70	18.73	6.65	20.20	1.9×10^{-6}	0.33
淤泥质土夹薄层粉砂	隧道穿越处	5.17	17.20	19.30	10.60		0.30

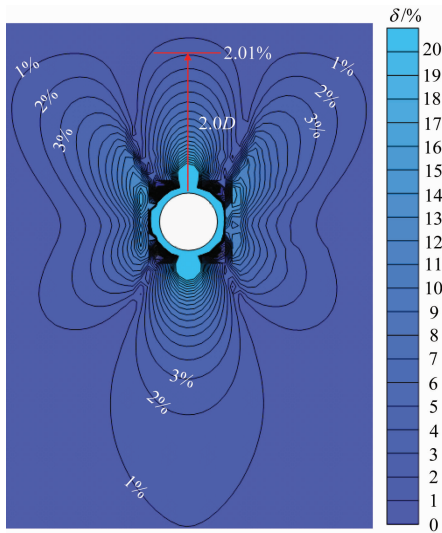


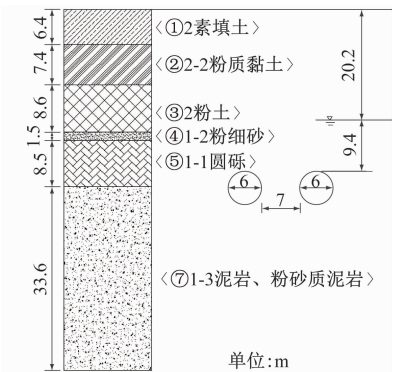
图 8 工况四围岩应力变化率云图

Fig. 8 Surrounding rock stress variation rate nephogram under working condition 4

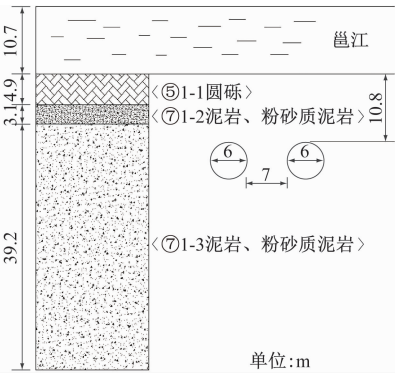
3.2 计算结果分析

通过数值计算及围岩应力公式处理后,得到计算断面 1、2 的围岩应力变化率云图,如图 10 所示。由图 10 可见,计算断面 1 的隧道穿越圆砾-泥岩复合地层,埋深甚至超过 5.0D。当取 $\delta_0 = 2.00\%$ 时,其对应的 $H = 14.9\text{ m}$,出现该结果的原因可能是圆砾-泥岩复合地层的 δ 比土质围岩的 δ 更大。基于安全角度考虑,竖向荷载计算可采用 $H = 2.5D$ 作为设计竖向荷载高度。同理,计算断面 2 位于邕江河床之下,其 $H = 10.7\text{ m}$,非常接近隧道顶部的覆土厚度,鉴于此,考虑竖向荷载高度为全土柱高度。

鉴于 $\delta_0 = 2.00\%$,结合两个典型计算断面的围岩应力变化率云图,可得相应的等效荷载高度如表 6 所示。



a) 计算断面 1 地质剖面图



b) 计算断面 2 地质剖面图

图 9 南宁地铁越江盾构隧道计算断面地质剖面简图
Fig. 9 Simplified geological profile diagram of Nanning Metro cross-river shield tunnel calculation sections

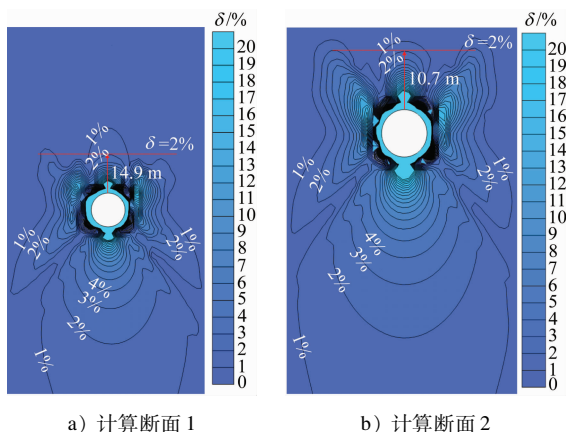
3.3 隧道埋深、地下水赋存情况对竖向荷载的影响规律

以南宁地铁 5 号线的计算断面 1 作为研究对象,分别对隧道埋深 h_1 、地下水位到隧道顶部距离 h_2 及隧道顶部处 H 进行数值计算,并绘制 h_1 、 h_2 同 H 的关系如图 11 及图 12 所示。其中 h_2 为负表示地下水位线高度低于隧道顶部。

表 5 南宁地铁计算断面地层物理力学参数

Tab.5 Physical and mechanical parameters of Nanning Metro calculation sections

土层	密度/(g/cm^3)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^\circ$)	泊松比	渗透系数/(cm/s)	静止侧压力系数
① ₂ 素填土	1.97	11.0	8	0.25	3.5×10^{-4}	0.60
② _{1,2} 淤泥质土	1.81	8.0	6	0.38	1.2×10^{-6}	0.61
② _{2,2} 粉质黏土	1.97	40.0	12	0.26	1.2×10^{-6}	0.35
② _{3,2} 粉质黏土	1.94	25.0	11	0.28	1.2×10^{-6}	0.39
③ ₂ 粉土	1.96	10.5	15	0.30	3.5×10^{-4}	0.43
④ _{1,2} 粉细砂	2.03		27	0.28	3.5×10^{-3}	0.39
⑤ _{1,1} 圆砾	2.00		35	0.25	8.1×10^{-2}	0.33
⑦ _{1,2} 泥岩、粉砂质泥岩	2.05	60.0	15	0.24	2.3×10^{-5}	0.32
⑦ _{1,3} 泥岩、粉砂质泥岩	2.11	80.0	20	0.23	2.3×10^{-5}	0.30
⑦ _{2,3} 粉砂岩、泥质粉砂岩	2.13	45.0	30	0.23	9.3×10^{-4}	0.30
⑦ ₄ 炭质泥岩	2.09	35.0	20	0.30	5.8×10^{-4}	0.43



a) 计算断面1 b) 计算断面2

图 10 南宁地铁典型计算断面围岩应力变化率云图

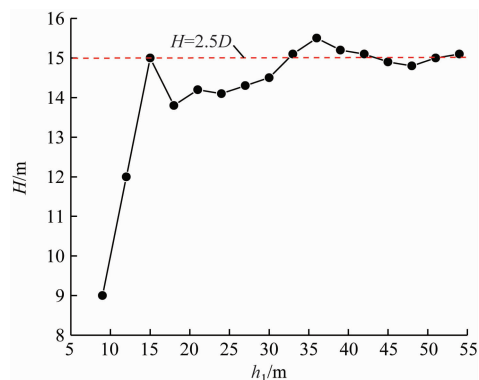
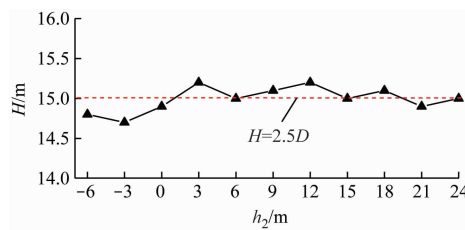
Fig. 10 Surrounding rock stress variation rate nephogram of typical Nanning Metro calculation sections

表 6 各典型断面的等效荷载高度取值

Tab.6 Equivalent load height values for each typical section

计算断面	隧道埋深/m	地下水位埋深/m	H/m	对应竖向荷载计算设计高度
计算断面 1	29.6	22.2	14.9	$2.5D$
计算断面 2	10.8	21.5	10.7	全土柱

由图 11 可见:埋深对 H 影响显著,在埋深较浅(h_1 为 9~15 m)时,上覆土体均受明显扰动,采用全土柱理论更为合理;当 $h_1 > 2.5D$ (即 $h_1 > 15$ m) 时,上覆土体荷载不再全部作用于管片上。这表明:随着埋深的增加,等效荷载高度接近于 $2.5D$,反映了土体(岩体)受到扰动后具有成拱效应;当埋深到达一定程度,成拱效应会趋于稳定,上覆土体荷

图 11 h_1 同等效荷载高度的关系Fig. 11 Relationship between h_1 and the equivalent load height图 12 h_2 同等效荷载高度的关系Fig. 12 Relationship between h_2 and the equivalent load height

载只有成拱效应范围内的才是作用于隧道结构上的真实荷载,此时再选择全土柱理论会在施工中导致严重经济浪费。

由图 12 可见,不同 h_2 对应的 H 均大致为 $2.5D$,可见,地下水赋存情况对 H 的影响较小。经分析,这可能是隧道埋深足够大时,水压力被逐层分散在上覆土层中。与地下水赋存情况相比,地层自稳性及衬砌结构与围岩适应性才是决定等效荷载高度的主要因素。

4 结语

本文以已建盾构隧道工程为依据,提出围岩应力变化率作为隧道竖向荷载高度的确定方法,结合南宁轨道交通5号线工程,印证了方法的合理性。并对穿越圆砾-泥岩复合地层典型断面的竖向荷载影响因素进行了探讨,得出以下结论:

1) 依据相似地层条件的已建盾构工程,确定了其等效荷载高度 H 对应的围岩荷载临界应力变化率 δ_H ,总结归纳得出围岩荷载临界应力变化率参考值 $\delta_0 = 2\%$ 为竖向荷载高度取值的依据。

2) 选取南宁地铁5号线盾构隧道工程的典型计算断面,验证了 $\delta_0 = 2.00\%$ 作为确定竖向荷载高度方法的可行性,并在南宁地铁施工设计中得到有效运用。

3) 以南宁地铁5号线穿越圆砾-泥岩复合地层的断面作为研究对象,进行大量的数值计算,发现埋深对等效荷载高度的影响显著,地下水赋存情况对于等效荷载高度的影响相对较小。

参考文献

- [1] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway tunnels Section 1 Civil engineering: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [3] 蒋哲宇. 土岩复合地层中无既有地下结构边界情况下隧道开挖引起的位移场、应力场参数化分析[J]. 福建质量管理, 2020(10): 183.
JIANG Zheyu. Parametric analysis of displacement field and stress field caused by tunnel excavation in soil-rock composite stratum without existing underground structure boundary[J]. Fujian Quality Management, 2020(10): 183.
- [4] 秦雨樵, 汤华, 吴振君. 地质钻孔不规则程度的定量描述及其对柯西课题解的影响[J]. 能源与环保, 2020, 42(5): 44.
QIN Yuqiao, TANG Hua, WU Zhenjun. Quantitative description of geological boreholes irregular degree and its influence on Kirsch's solution[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(5): 44.
- [5] 徐前卫, 程盼盼, 朱合华, 等. 软弱围岩隧道开挖应力扰动特征试验及数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 154.
XU Qianwei, CHENG Panpan, ZHU Hehua, et al. Model experiment and numerical simulation of characteristics of stress disturbance induced by tunnel excavation in a soft rock mass[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(6): 154.
- [6] 孙亚奇, 杜守继. 山岭隧道开挖应力释放率研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(3): 153.
SUN Yaqi, DU Shouji. Study of stress release ratio of mountain tunnel excavation[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(3): 153.
- [7] 王晓强, 屈兴兵. 盾构隧道衬砌荷载取值反演分析[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(2): 176.
WANG Xiaoliang, QU Xingbing. Inversion analysis of shield tunnel lining load[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(2): 176.
- [8] 周济民, 何川, 方勇, 等. 黄土地层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 165.
ZHOU Jimin, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 165.
- [9] 李振涛, 姜磊, 刘宇, 等. 砂土区间地铁盾构施工土体参数反演及其验证[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 630.
LI Zhenhao, JIANG Lei, LIU Yu, et al. Inverse analysis and verification of soil parameters for metro shield construction in sand layer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 630.
- [10] 张秋彬, 李俊才, 徐建鹏. 破碎软岩隧道围岩参数反演分析[J]. 公路, 2019, 64(12): 293.
ZHANG Qiubin, LI Juncan, XU Jianpeng. Back analysis of surrounding rock parameters of fractured soft rock tunnel[J]. Highway, 2019, 64(12): 293.
- [11] 周义舒, 刘春, 黄富禹. 基于BP神经网络的隧道参数反演模型研究[J]. 交通建设与管理, 2021(1): 90.
ZHOU Yishu, LIU Chun, HUANG Fuyu. Study on tunnel parameter inversion model based on BP neural network[J]. Transport Construction & Management, 2021(1): 90.
- [12] 路开道. 水下圆砾地层盾构隧道施工荷载实测及其力学响应研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1): 44.
LU Kaidao. In situ tests on construction load and mechanical response of shield tunnel in underwater gravel stratum[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 44.
- [13] 赵翔, 魏玉峰, 郝腾飞, 等. 圆形地下洞室开挖围岩扰动区及塑性区范围的确定及讨论[J]. 公路, 2018, 63(4): 264.
ZHAO Xiang, WEI Yufeng, HAO Tengfei, et al. Determination and discussion on the scale of surrounding rock's disturbed zone and plastic zone when excavating circular underground cavern[J]. Highway, 2018, 63(4): 264.
- [14] SHARAN S K. Analytical solutions for stresses and displacements

- around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(1): 78.
- [15] 杨会军, 王梦恕. 隧道围岩变形影响因素分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 92.
- YANG Huijun, WANG Mengshu. Analysis on construction factors of surrounding rock deformation in tunneling works[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(3): 92.
- [16] 张朝强, 田乐, 刘博. 深埋软岩隧道开挖地应力场与围岩破坏机制分析[J]. 公路, 2016, 61(1): 228.
- ZHANG Chaoqiang, TIAN Le, LIU Bo. Analysis of deformation and failure mechanism of the high geotectonic stress soft rock tunnel during construction[J]. Highway, 2016, 61(1): 228.
- [17] 黄才华. 山区地铁隧道围岩开挖应力场及开挖方法研究[J]. 施工技术, 2014, 43(10): 131.
- HUANG Caihua. Research on excavation stress field and excavation method of subway tunnel surrounding rock in mountain area[J]. Construction Technology, 2014, 43(10): 131.
- [18] 李策, 王士民, 王承震, 等. 基于实测内力的大直径水下盾构隧道荷载反演分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 103.
- LI Ce, WANG Shimin, WANG Chengzhen, et al. Back analysis of load of large underwater shield tunnel based on measured internal force[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 103.
- 收稿日期:2023-02-06 修回日期:2023-10-03 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-06 Revised:2023-10-03 Published:2025-04-10
• 第一作者:何林根,无, helingen1997@163.com
通信作者:王士民,教授, wangshimin@swjtu.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 176 页)

- [7] 黄海林, 吴方伯, 祝明桥, 等. 板肋形式对预制带肋底板混凝土叠合板受弯性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 66.
- HUANG Hailin, WU Fangbo, ZHU Mingqiao, et al. Influence of rib details on flexural behavior of concrete composite slab with precast prestressed ribbed panel[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 66.
- [8] 金凌志, 廉德铭, 李丽, 等. 钢筋桁架超高性能混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 69.
- JIN Lingzhi, LIAN Deming, LI Li, et al. Experimental research on flexural behavior of UHPC composite slabs with steel truss[J]. Industrial Construction, 2020, 50(3): 69.
- [9] 赵广军, 赵雷, 李文杰, 等. 预应力混凝土带肋叠合板受弯性能试验与设计关键问题研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 171.
- ZHAO Guangjun, ZHAO Lei, LI Wenjie, et al. Experimental and design key problems study on bending behavior of prestressed concrete composite slab with concrete rib[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 171.
- [10] 曹任辉, 彭波, 任靖, 等. 双面叠合剪力墙水平接缝传力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 19.
- CAO Renhui, PENG Bo, REN Jing, et al. Experimental study on force transmission performance of double-sided superposed shear walls with horizontal joints[J]. Building Structure, 2023, 53(14): 19.
- 收稿日期:2024-06-21 修回日期:2024-11-06 出版日期:2025-04-10
Received:2024-06-21 Revised:2024-11-06 Published:2025-04-10
• 通信作者:颜慧, 硕士研究生, 2233413@tongji.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 181 页)

- GONG Dao, ZHOU Jinsong, DU Shuaimi, et al. Study on the effect of the underframe equipment on vibration transmissibility and modal frequency of the car body for high-speed emu trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 126.
- [5] 周立群. 基于 OSPA 方法的客室地板振动传递路径分析及控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHOU Liqun. Transfer path analysis and control of floor vibration based on OSPA method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 姜旭东, 刘金龙, 史史, 等. 基于传递路径分析方法的动车组异常振动研究[J]. 铁道车辆, 2020, 58(5): 39.
- JIANG Xudong, LIU Jinlong, SHI Li, et al. Research on abnormal vibration of multiple units based upon the transfer path analysis method[J]. Rolling Stock, 2020, 58(5): 39.
- [7] 杨旭, 李冰, 陈少江. 传递路径分析方法用于农用车振动控制的研究[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 33.
- YANG Xu, LI Bing, CHEN Shaojiang. Research on transfer path analysis method on vibration control of agricultural vehicles[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 33.
- 收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-04-21 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-01 Revised:2023-04-21 Published:2025-04-10
• 通信作者:巩延庆, 高级工程师, 13814162048@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license