

浅谈隧道软岩大变形的计算

周伟

(中国公路工程咨询集团有限公司路桥设计研究院分公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 文中介绍了云南某隧道穿越地应力较高且围岩为软岩的区域时, 分析了白云岩和白云质灰岩隧道衬砌的内力, 以计算控制截面安全系数, 判别高地应力下隧道衬砌安全。

关键词: 隧道; 软岩大变形; 安全系数

中图分类号: U456

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0120-03

一、引言

隧道工程施工中时刻伴随着各种地应力问题, 有关软岩大变形的处理, 是亟待解决的困境, 其实质是基于新奥法原理时, 围岩自承能力的部分消失, 衬砌变形无法有效的约束, 在一定的时效特征内易造成衬砌的变形, 给施工造成较大难度。

二、工程概况

该隧道位于云南省临沧市境内某高速, 为时速 80km/h 的双洞四车道隧道。隧道穿越构造、剥蚀切割低中山峡谷地貌, 最大埋深约 1,385m, 地应力较高, 属特长隧道。

在该隧道 ZK181+000-ZK181+080 段落内, 分布白云岩和白云质灰岩, 节理裂隙极发育, 岩体破碎, 为碎裂岩体, 厚 656-743m。此段隧道埋深 >800m, 属高应力区。

隧址区位于侵蚀溶蚀高中山地段, 地层以二叠系、三叠系碳酸可溶岩为主, 地下水类型为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶水、深层地下水(响水温泉), 其中以碳酸盐岩岩溶水为主。

隧址区及附近发育南梳坝断层(F3), 断层破碎带厚度 8~30m, 受断层错动、挤压、拖曳的影响, 断裂带附近岩体破碎, 裂隙发育, 可溶岩岩溶化程度相对较高, 断层破碎带围岩级别低、透水性中等。

根据收集的资料, 隧址区内地震活动频发且多为 6 级以上地震。该区域最近一次地震为 1976 年龙陵地区发生的 7.3 级、7.4 级地震。根据现场访问, 隧址区震感强烈。该隧道工程按Ⅷ度进行抗震设防。

本隧道详勘阶段在洞身实施了两个深孔钻探, 并进行孔内地应力测试, 分别为深 585m 的 SDZK02 孔和深为 685m 的 SDZK03 孔。该报告通过试验成果及理论计算, 做出了该隧道洞身部位应力值预测及评价结果。

对于隧道工程区 IV 级来说, 围岩相对位移值小于 1%, 为轻微变形, 几乎无支护问题; 当埋深超过 1,000m 时, V 级围岩可能出现轻微程度变形, 变形量在 1%~2.5%, 变形段主要在断层破碎带及其影响区域。

三、大变形的判定

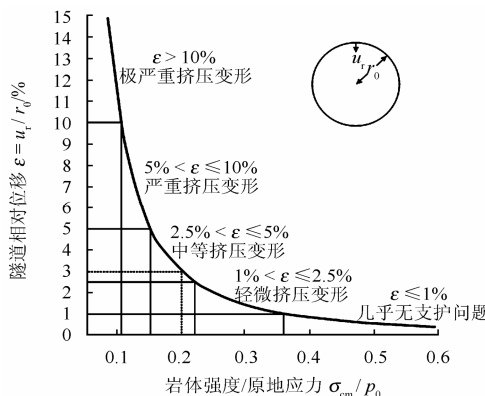
收稿日期: 2022-10-06

作者简介: 周伟, 中国公路工程咨询集团有限公司路桥设计研究院分公司。

隧道软岩大变形有以下几种判别方法:

(1) Hoek 评价方法

Hoek 评价法采用计算隧道挤压变形或围岩强度与应力状态比值关系, 提出当阈值小于 0.2 时, 严重的挤压变形容易出现, 此状态下隧道相对位移值为 3%。因此可以认为, 当相对变形值大于 3% 时, 即发生了软岩大变形。



在该隧道的地应力专题报告《隧道原地应力测量与地应力场综合分析》中, 关于挤压变形行为分类采用了上述 Hoek 方法。

(2) 应力强度比: 根据有关文献及实验研究资料, 采用应力强度比为指标对挤压性隧道大变形等级进行了划分。

表 1 变形等级

大变形等级	轻微大变形 (I)	中等大变形 (II)	强烈大变形 (III)
围岩应力强度比	3~5	5~8	>8

(3) 地质综合分析法: 参考既有设计的经验, 主要将地应力、岩体特征、地下水发育特征、围岩级别、有无膨胀性作为控制因素, 作为大变形判别分级的标准。

(4) 现场判定法:

表 2 变形分级

大变形分级	隧道相对位移	双车道 U _r / cm	初期支护破坏现象
轻度	3.0 < ε _r ≤ 5.0	16.5~27.5	喷射砼轻微开裂、掉块, 少量初支钢架局部脱离
中度	5.0 < ε _r ≤ 10	27.5~55	喷射砼严重开裂、掉块, 大量初支钢架局部变形
严重	ε _r > 10.0	> 55	喷射砼碎块大面积发生, 锚杆拉断, 钢架变形扭曲

三、大变形处治原则

根据基础资料的分析，本隧道围岩相对变形均小于 3%，所以本隧道基本无软岩大变形情况或在断层破碎带及其影响区域偶有轻微软岩大变形发生。

大变形的的设计遵循“超前注浆加固围岩、加大预留变形量、柔性 and 刚性钢架相结合、采用多次初期支护、采用信息化施工”的综合治理理念。其具体对策如下：

- (1) 加强信息化施工，建议根据施工情况对大变形的强度等级及段落范围进行动态调整。
- (2) 适当加大预留变形量。变形段应结合施工现场的变形量进行设计，变形量根据大变形的等级按 25~40cm 进行预留。
- (3) 加强隧道开挖前的超前支护，采用自进式注浆锚杆与超前支护加固岩体，锚杆长度可以根据围岩屈服范围确定。
- (4) 初期支护加强措施：加密钢拱架，设置可伸缩 U 型钢，设置双层初期支护，加强二衬配筋等。
- (5) 可以根据需要设置可缩式钢架支撑。
- (6) 隧道软岩大变形段落，二次衬砌应单独设计、现场核算、重点施工，施工中尽早形成封闭的受力环。
- (7) 隧道软岩大变形段落，加强监控量测工作，并设立警示牌与围栏等安全设施。

四、大变形衬砌结构计算

针对该隧道特定地质条件和工程设计要求，采用有限单元法的荷载结构模型，分别对白云岩和白云质灰岩下的衬砌结构受力进行数值模拟计算。

软岩大变形的产生主要受地应力的影响，隧道的开挖使地应力得到释放，变形越大，应力释放越多，围岩塑性区也就越大，围岩产生的形变压力也就越小，故软岩大变形段的隧道支护结构应提供较大的预留变形量，才能保证衬砌结构的安全使用。

文中采用 MIADS-GTS NX 大型通用有限元软件对衬砌结构进行受力分析。MIADS-GTS NX 隧道衬砌结构受力分析步骤：

1. 计算该段落支护结构的相应荷载；
2. 建立荷载-结构模型和划分网格；
3. 施加约束和荷载；
4. 求解；
5. 后处理（对结果进行分析）。

(1) 荷载确定

分别对该地段围岩压力、围岩形变压力、地层抗力和地层抗力进行计算，可根据所计算支护结构类型的预留变形量，确定支护结构所允许围岩产生的最大变形，从而可以得出当围岩产生最大变形时，围岩中塑性区的半径，最终算出围岩作用于衬砌上的相对荷载。

(2) 计算参数

分别计算白云岩和白云质灰岩中衬砌的受力情况，由于围岩的形变荷载与 $\sin\phi$ 成指数函数，所以内摩擦角对形变荷载的影响是很大的。故当围岩为白云岩时，采用 DBX-3 衬砌计算，即严重大变形衬砌， $U=0.3m$ ；当围岩为白云质灰

岩时，采用 DBX-1 衬砌计算， $U=0.2m$ 。

文中计算隧道所处围岩等级为 V 级，衬砌采用 C35 钢筋混凝土衬砌，钢筋采用 $\Phi 25mm@20cm$ ，箍筋采用 $\Phi 8$ ；钢筋混凝土的等效模量可由等效前后截面内刚度和弯曲刚度分别相等求得，即下式求得：

$$E^*A=E1^*A1+E2^*A2; E^*I=E1^*I1+E2^*I2$$

其中：E、E1、E2—等效、混凝土、钢筋的弹性模量；A、A1、A2—等效、混凝土、钢筋的截面积；I、I1、I2—等效、混凝土、钢筋的惯性矩。

(3) 计算模型

二次衬砌采用荷载-结构法进行计算，以 DBX-1 衬砌为例。

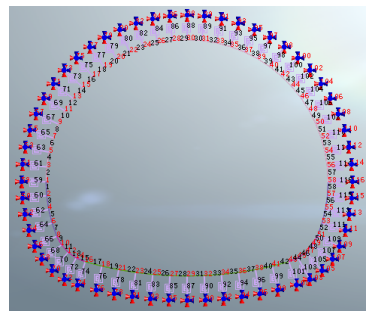


图 1 DBX-1 衬砌计算模型单元编号图

(4) 计算工况

文中包括 2 个计算工况，分别为白云岩和白云质灰岩中的 DBX-1、DBX-3 型衬砌，DBX-1 衬砌承担 70%荷载，DBX-3 衬砌承担 60%的荷载。

表 3 计算工况

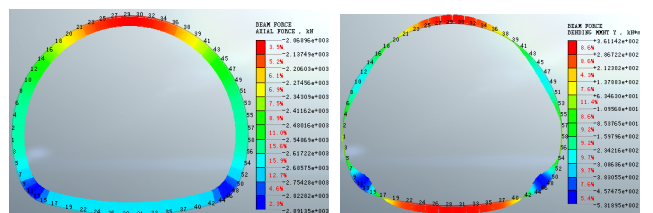
工况	衬砌类型	围岩类型	围岩竖向压力 q	顶部围岩水平压力		形变压力 P _i
				e ₁	水平压力 e ₂	
1	DBX-3	白云岩	356.14	139.06	242.09	353.90
2	DBX-1	白云质灰岩	346.14	82.34	140.95	83.5

五、大变形衬砌结构分析

分别对两种工况进行衬砌受力计算。

(1) 工况 1。

围岩为白云岩，采用 DBX-3 衬砌。从图中可以看出轴力值沿全环相差不大，而弯矩分布相差较大；其中，内侧受拉部分为拱顶、边墙、仰拱中心位置，外侧受拉部分为拱肩、边墙与仰拱交接处，仰拱与边墙交接处为最大弯矩值为 531.9 KN·m。因此，该位置断面受力特性最差。



工况 1 轴力图

工况 1 弯矩图

图 2

(2) 工况 2。

围岩为白云质灰岩，采用 DBX-1 衬砌。从图 3-3 可以

看出轴力值沿全环相差不大，而弯矩分布相差较大；其中，内侧受拉部分为拱顶、边墙、仰拱中心位置，外侧受拉部分为拱肩、边墙与仰拱交接处外侧受拉，仰拱与边墙交接处为最大弯矩值为 376.80 KN·m-357.88 KN·m。因此，该位置断面受力特性最差。

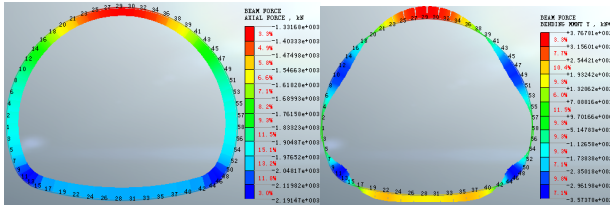


图 3 工况 2 轴力图 工况 2 弯矩图

(3) 安全系数计算

两种工况下，各个 i 截面（单元编号上图可见）安全系数见表 4。

表 4 安全系数

单元号	工况 1				工况 2			
	轴力 kN	弯矩 kN·m	安全系数	是否满足要求	轴力 kN	弯矩 kN·m	安全系数	是否满足要求
1	2610.72	29.6436	5.81	是	1946.44	22.3559	7.79	是
2	2604.45	33.7703	5.80	是	1940.08	39.0986	7.62	是
3	2624.56	43.7155	5.69	是	1958.39	42.9641	7.51	是
4	2597.44	124.1452	5.22	是	1930.56	124.8188	6.64	是
5	2656.12	5.9887	5.87	是	1986.08	13.5106	7.74	是
6	2585.46	216.8722	4.63	是	1914.88	216.6957	5.58	是
7	2708.15	137.3640	4.96	是	2031.37	78.3274	6.88	是
8	2564.55	283.5878	4.21	是	1890.30	292.8995	4.69	是
9	2796.72	365.2200	3.55	是	2104.88	242.4209	5.04	是
10	2531.46	303.4813	4.11	是	1853.63	324.9498	4.31	是
11	2866.31	506.3830	2.77	是	2162.98	343.1473	4.03	是
12	2486.27	282.6950	4.29	是	1803.67	309.6288	4.52	是
13	2873.88	531.8949	2.63	是	2176.08	357.3780	3.89	是
14	2431.82	228.8347	4.74	是	1742.80	255.5572	5.30	是
15	2791.51	439.0413	3.14	是	2112.23	282.4846	4.64	是
16	2371.38	150.5850	5.43	是	1674.80	172.6272	6.65	是
17	2723.23	225.0961	4.42	是	2061.41	116.8168	6.39	是
18	2308.51	57.2606	6.32	是	1603.76	71.4833	8.55	是
19	2709.97	113.3907	5.10	是	2052.22	140.6715	6.16	是
20	2246.88	41.6844	6.61	是	1533.92	37.0454	9.53	是
21	2190.07	137.1602	5.90	是	1469.41	142.5309	7.76	是
22	2705.81	258.5924	4.24	是	2050.57	242.5667	5.10	是
23	2141.37	220.9331	5.20	是	1414.04	235.5155	5.92	是
24	2705.08	305.1835	3.96	是	2052.59	255.5548	4.97	是
25	2103.61	286.0743	4.61	是	1371.07	308.0341	4.43	是
26	2704.91	330.8581	3.80	是	2055.48	230.8185	5.22	是
27	2078.99	327.3409	4.22	是	1343.06	354.0561	3.68	是
28	2704.95	346.2541	3.71	是	2057.47	202.9805	5.51	是
29	2068.96	341.4663	4.08	是	1331.68	369.8224	3.44	是
30	2074.15	327.3409	4.22	是	1337.66	354.0561	3.67	是
31	2705.18	351.3847	3.68	是	2057.71	191.6080	5.62	是
32	2094.32	286.0743	4.62	是	1360.72	308.0341	4.43	是
33	2705.62	346.2541	3.71	是	2056.19	202.9805	5.51	是
34	2128.36	220.9331	5.22	是	1399.58	235.5155	5.93	是
35	2706.25	330.8581	3.80	是	2053.76	230.8185	5.22	是
36	2174.41	137.1602	5.93	是	1452.06	142.5309	7.82	是
37	2707.44	305.1835	3.96	是	2052.21	255.5548	4.97	是

续表 4

单元号	工况 1				工况 2			
	轴力 kN	弯矩 kN·m	安全系数	是否满足要求	轴力 kN	弯矩 kN·m	安全系数	是否满足要求
38	2229.88	41.6844	6.66	是	1515.19	37.0454	9.63	是
39	2291.67	57.2606	6.36	是	1585.39	71.4833	8.63	是
40	2712.07	258.5924	4.23	是	2054.32	242.5667	5.10	是
41	2356.32	150.5850	5.46	是	1658.63	172.6272	6.69	是
42	2725.78	113.3907	5.08	是	2063.97	140.6715	6.14	是
43	2420.18	228.8347	4.75	是	1730.70	255.5572	5.31	是
44	2793.72	225.0961	4.34	是	2114.44	116.8168	6.26	是
45	2479.61	282.6950	4.30	是	1797.43	309.6288	4.52	是
46	2877.23	439.0413	3.12	是	2179.44	282.4846	4.58	是
47	2531.19	303.4813	4.11	是	1854.85	324.9498	4.31	是
48	2891.35	531.8949	2.64	是	2191.47	357.3780	3.89	是
49	2571.86	283.5878	4.21	是	1899.47	292.8995	4.69	是

为改善隧道大变形情况下衬砌结构的受力条件，大变形衬砌内轮廓对仰拱进行了加深，提高隧道内轮廓的扁平率，并增大了受力集中区域小仰拱的弧线半径。

经过各工况之间的对比，可以得出的结论是：

1) 仰拱与边墙交接处，由于几何形状的变化较快，使得此处容易发生应力集中，轴力、弯矩较大，因此安全系数较低，设计与施工时应注意此处的加固，另外，拱顶的位移也应加强监测；

2) 通过各个工况的安全性验算，可知在断层破碎带与地应力高地段，使用 DBX-3 型衬砌可保证钢筋混凝土结构的安全，在地应力较低地段，使用 DBX-1 型衬砌可保证钢筋混凝土结构的安全。

六、结语

针对隧道大变形段落的预案，是隧道施工准备的一环，文中模拟采用相应的大变形衬砌，通过计算确定方案的有效性和可靠性，可为类似隧道大变形衬砌的选择与处理提供参考。在实施过程中，处理隧道大变形仍需遵守以下原则。

(1) 应熟悉计文件，采用超前地质预报结合现场施工，核查大变形区段。施工时应根据实际地质条件，选择适宜的施工方法及现场监控量测资料，分析和预测围岩变形程度和对二衬稳定性的影响，及时修正支护结构形式和参数，避免盲目施工。

(2) 选择合适的开挖方式，减少爆破震动对围岩的扰动。严格控制各工序的施作时间与空间效应。

(3) 建立日常量测管理机制，加强各类监控量测工作，并综合分析量测数据，确定围岩变化趋势和支护结构的工作状态，并调整支护参数，通过逐步调整与完善，建立软岩大变形管理办法，进行最终位移的预测工作。

参考文献

[1] JTG 3370.1-2018, 公路隧道设计规范[S]. 第一册 土建工程.
 [2] JTG/T D70-2010, 公路工程地质勘察规范[S]. 北京: 人民交通出版社出版.
 [3] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
 [4] 关宝树. 隧道力学概论[M]. 成都: 西南交通大学, 1993.