

青藏铁路昆仑山隧道稳定性分析

王 薇 王连捷 王红才 乔子江

(中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081)

摘 要 在地质构造分析、地应力测量、地应力场的反演和岩石力学实验的基础上,对昆仑山隧道多种断面的应力分布进行了有限元计算,给出不同断面的应力分布图象,指出了不同断面应力分布的特点以及断面形状对应力分布的影响,同时计算了围岩的强度与应力比,对围岩稳定性进行了分析对比,优选了隧道断面形状。

关键词 隧道 青藏铁路 应力计算 工程稳定性

Stability Analysis of Kunlun Mountain Tunnel for Qinghai-Tibet Railway

WANG Wei WANG Lianjie WANG Hongcai QIAO Zijiang

(Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing, 100081)

Abstract The Qinghai-Tibet Railway is a great engineering project and also constitutes a major part in the development of western China, thus becoming one of the focuses of world attention. Construction of the railway is of great significance. The railway is planned to pass through an average height of 4 500~5 000 m above sea level and has a total length of 1 110 km, with several tunnels more than 11 km in total length to be excavated. One of them is the Kunlun Mountain tunnel over 1 600 m long surrounded by rocks of low quality. A study of the tunnel stability is very important to safety. On the basis of geological structural analysis, rock stress measurement, rock mechanical experimentation and inversion of tectonic stress field, this paper calculated stress distribution of tunnels in different sections by using finite element method. Stress pattern and ratio of rock strength to stress are given. Optimization of sections is made. It is shown that a tunnel which has curve sides and an arch bottom with ratio 1.08 of width to height is more stable than other types. Scientific basis is provided for reasonable designing, construction and long-term stability of the tunnel.

Key words tunnel Qinghai-Tibet railway stress calculation engineering stability

1 隧道概况和断面形状选择的原则

1.1 隧道概况

昆仑山铁路隧道位于昆仑山公路西侧高山中,大致呈 SN 走向,海拔高程 4 640 m,隧道长度约为 1 600 m,是青藏铁路较长的一条隧道。隧道穿越的山梁最高峰为 4 759 m,山梁一般高度为 4 700 m 左右,埋深大多为 50~60 m,最深可达 130 m。隧道附近岩体主要为三叠系板砂岩,包括浅灰色板岩、千枚状板岩夹页岩、砂质板岩和长石岩屑杂砂岩。这些岩石经地质时期多次变形,发生褶皱、断裂和顺层剪切滑动,岩体质量较差。

1.2 隧道断面形状选择的原则

隧道断面形状对围岩诱发应力和稳定性有着重要的影响。断面形状不同,隧道周边的诱发应力不同。在地应力较高,岩体条件较差的地区,隧道断面形状的选择尤为重要。隧道断面选择的目的一是

使之与地应力状态相适应,即在一定的地应力状态下,尽量使隧道围岩的诱发应力为相对均匀分布的压应力,减少应力集中程度,避免出现较大张应力(王连捷等,1994)。

在岩体开挖工程中,周边应力分布均匀的隧道称为“谐洞”。能获得均匀应力分布的“谐洞”通常是椭圆形隧道。其长轴和短轴之比等于原岩水平应力和铅直应力之比。在实际工程施行中,椭圆形隧道实际上是难于采纳的。在很多实际情况下,也是不需要的。在保证安全,降低费用,充分利用断面空间,满足“隧道界限”规定的前提下,选取适当的断面方案(钟桂彤,2000)。

2 不同断面应力计算与稳定性分析

2.1 原岩水平地应力和铅直应力

研究中在隧道附近专门进行了地应力测量。根据地应力测量和隧道附近地应力反演的结果,沿隧

道轴线地应力为 7~10 MPa,为了保证安全,在计算时取原岩水平应力为 10 MPa。

按隧道上复岩层的重量考虑铅直应力,即按隧道埋深 130 m,容重为 2.6 g/cm³ 计,计算的铅直应力为 3.5 MPa。水平应力与铅直应力之比为 2.86。

2.2 岩石力学参数的确定

隧道应力计算所使用的岩石力学参数系由岩石力学实验确定。隧道所经之处岩石主要为具有变质的砂岩和板岩。岩石样品在室内进行测试,每种岩石的样品数为 15 个,进行力学参数的测试。并将测试结果用于隧道应力计算。

2.3 隧道断面的数据

选择 3 种断面进行力学计算(表 1,图 1)。

表 1 隧道断面数据

Table 1 Datas of tunnel section

	高/cm	宽/cm	断面积/m ²	宽高比	备注
断面 1	1063	893	80	0.84	原设计
断面 2	1069	893	78	0.84	将原设计的直边改为曲边
断面 3	994	1078	88	1.08	加大宽高比

2.4 有限元网格

采用 Super SAP 有限元应力分析软件进行有关数据的分析。选取的隧道分析模型的边界数据大致为隧洞数据的 8 倍。即模型的边界数据为 80 m 高,80 m 宽的正方形边界。这样的数据可以保证克服边界的影响。

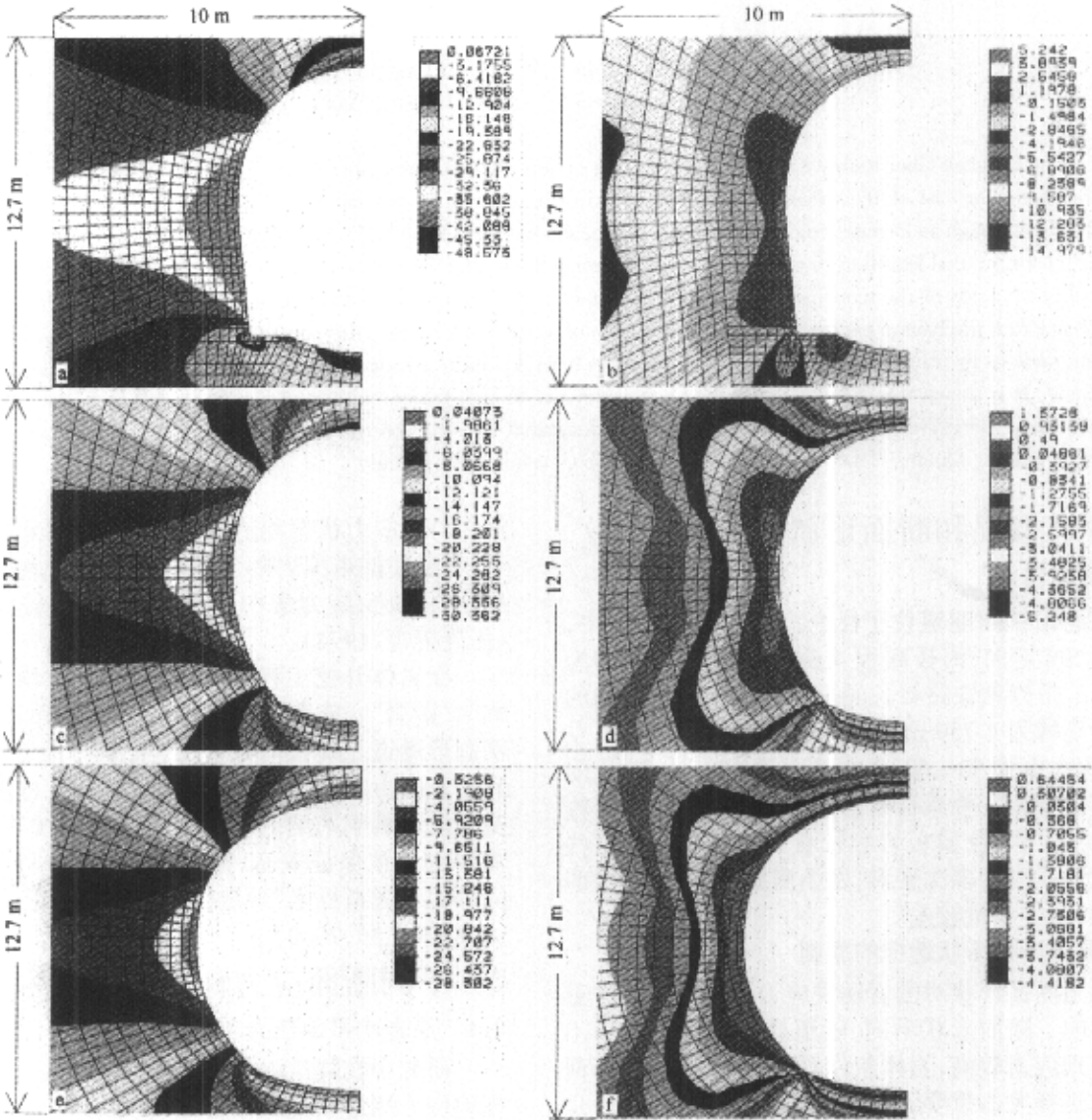


图 1 隧道周边应力分布/MPa

Fig. 1 Stress distribution of tunnel/MPa

a-断面 1 的最大主应力;b-断面 1 的最小主应力;c-断面 2 的最大主应力;d-断面 2 的最小主应力;e-断面 3 的最大主应力;f-断面 3 的最小主应力
maximum principal stress,a-for section 1;b-for section 1;c-for section 2;d-for section 2;e-for section 3;f-for section 3

隧道位于模型中心,由于隧道的对称性,所以取模型的一半进行计算。网格为四边形等参单元,单元数为 1 700~1 900 个。在隧道周边网格较密,以保证周边分析的足够精确。

2.5 计算结果

3 种断面数据的隧道周边应力分布如图 1,图中给出了最大主应力和最小主应力。为更清楚地分析隧道附近应力状况,研究中只取隧道模型的中心部分。

断面 1 该断面为原设计,断面积为 80 m²,宽高比为 0.84,侧边和底角处出现张应力,大小为 1~3 MPa。张应力波及的深度为 0.5 m(图 1b)。顶板区域最大压应力为 32 MPa,底角处出现局部压应力集中,底板最大压应力为 26 MPa(图 1a)。

断面 2 断面 2 是在断面 1 的基础上进行改进的,将侧帮直线段和底角的直线段改为曲线,宽高比(宽/高)为 0.84,断面积为 78 m²。隧道侧边张应力数值为 1~1.5 MPa,深度小于 0.5 m(图 1d)。拱顶和底板压应力相对减小,顶板区域最大压应力为 30 MPa,底板最大压应力为 26 MPa(图 1c)。与断面 1 相比,底角处应力集中消失,侧帮张应力减小,拱顶与底板处压应力降低。

断面 3 该断面是在断面 2 基础上改进的,主要是增加了跨度,宽高比(宽/高)为 1.08,断面积有所加大,为 88 m²。由图 1 可以看出,隧道侧边张应力消失(图 1f)。拱顶和底板压应力进一步减小,顶板区域最大压应力为 24 MPa(图 1e),底板最大压应力为 22 MPa。

为了便于比较,将 3 个断面的应力状态列于表 2。由图 1 及表 2 可以看出,断面 3 应力分布相对较均匀,断面 1 的应力均匀性相对较差,断面 2 介于二者之间。

由图 2 可看出断面 3 应力分布较均匀,主应力方向平行于隧道周边,断面 1 有应力集中现象,底角处主应力方向与周边边界夹角较大,对稳定性不利。

表 2 隧道断面应力状态

断面	侧边张应力		拱顶压应力	底板压应力
	应力强度/MPa	深度/m	/MPa	/MPa
断面 1	1~3	0.5	32	26
断面 2	1~1.5	<0.5	29	26
断面 3	万方数据	—	24	22

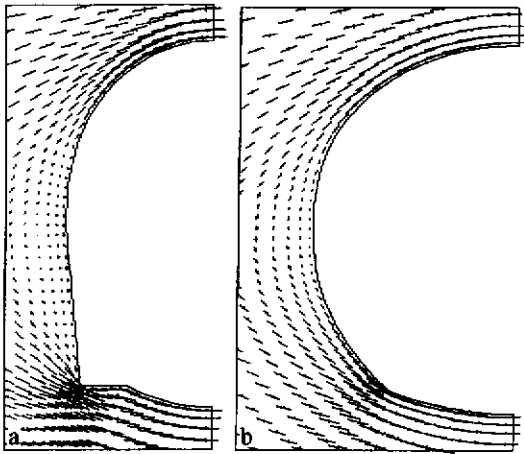


图 2 主应力矢量
Fig. 2 Vector Diagram of Principal stress
a-断面 1 b-断面 3
a-for section 1 b-for section 3

3 隧道围岩的强度应力比值

3.1 强度准则

在进行了隧道应力分析以后,还需分析隧道围岩的可能破坏情况。进行破坏分析的准则有多种,这里采用 Hoek-Brown 准则。该准则表达式如下:

$$\sigma_{1c} = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{ic}\sigma_3 + s\sigma_{ic}^2}$$

式中, σ_{1c} 为破坏时的最大主应力; σ_3 为最小主应力; σ_{ic} 为完整岩石的单轴抗压强度; m,s 为常数,取决于岩石的性质和岩石的完整性。

上述关系式可用图解表示(图 3)。曲线表示岩石或岩体破坏时最大主应力与最小主应力的关系,称为强度曲线。从图中可以看出,岩石的强度与应力状态有关,围压越大,强度越大。

如果隧道某一点的应力状态在强度曲线的右侧,则不发生破坏。只有最大主应力等于或大于强

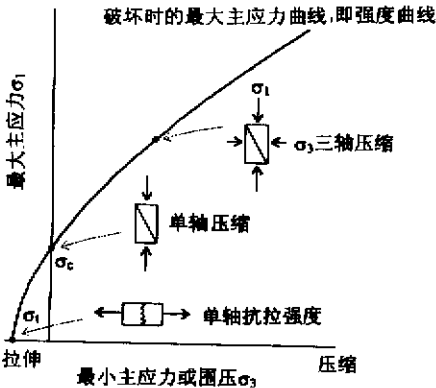


图 3 岩石破坏时最大主应力和最小主应力关系曲线
Fig. 3 Curve of relation between maximum principal stress and minimum principal stress as fracture

度的地方,才有可能发生破坏,根据强度与应力比(强度/应力)画出曲线,根据曲线判断破坏程度。

如果发生破坏的范围达到一定程度,则将引起隧道的整体失稳,若破坏范围较小,只形成局部破坏,总体仍是稳定的。

3.2 m,s 值的确定

根据岩石三轴实验结果,利用 E. Hoek 公式(E. Hoek 等,1986),可以计算出 m,s 值及完整岩石的强度 σ_{ic} ,使用了 6 组三轴实验数据进行计算。其结果的平均值为 $\sigma_{ic} = 67.2, m = 24.3, s = 1$ 。如前所述,需要根据岩石的质量对 m,s 值进行折减,才能用于现场。E. Hoek 给出了岩石质量指标评分与折减系数的关系曲线。有了岩石质量指标就可以由这条曲线查出折减系数。

该区目前尚未进行岩石质量评价和质量评分。计算中根据野外采回的岩石标本和实测数据,按一般稍差的岩石质量,对照 E. Hoek 曲线初步进行了折减,折减后为 $m = 3.5, s = 0.2$ 。

在施工过程中,需根据揭露的岩石情况对 m,s 值进行修正,以便对稳定性进一步评价。

3.3 强度与应力比

将折减后的 m,s 值($m = 3.5, s = 0.2$)代入强度准则公式,可得各单元的强度值。将此强度值与单元的最大主应力相比,可得强度/应力比值,并得出等值线,由图 4 可以看出隧道周边的强度/应力比值皆大于 1,即没有超应力区出现。最接近于破裂的部分是拱顶和底板处。距拱顶越远,比值越大,越不易破坏。各个断面拱顶处的强度/应力比如表 3。可以看出,断面 3 的强度/应力比最高为 1.33~1.34,断面 1 的强度/应力比为 1.13~1.15。显然,比值都大于 1,处于安全状态。但断面 3 更趋于安全。

表 3 拱顶单元的强度/应力比

Table 3 Ratio of strength with stress of vault elemet

断面	断面 1	断面 2	断面 3
强度/应力	1.13~1.15	1.15~1.17	1.33~1.34

4 结论与建议

(1)由 3 种断面隧道应力分析可见,在原岩水平应力为 10 MPa,铅直应力为 3.5 MPa 情况下,断面 1 的侧帮出现张应力,张应力区的深度约 1 m,同时在隧道底角处出现局部应力集中情况。断面 2 是将断面 1 的侧帮直线段和底板的直线段改为曲线,使断面应力条件有明显改善,张应力深度减小。断面 3 侧边张应力消失,周边应力分布趋向于均匀。

(2)从压应力分布特点来看,断面 1 拱顶压应力为 32 MPa 断面 2 拱顶压应力为 30 MPa 断面 3 拱顶压应力为 28 MPa,其压应力数值最小。

(3)从强度应力比(强度/应力)来看。断面 3 比值最大,断面 1 比值较小,断面 2 为中间状况。通过比较,可见断面 3 稳定性最好,应为首选。断面 1 和断面 2 的应力分布显然较差,但通过锚杆支护等措施,应力和强度情况也能得到改善。

(4)断面形状对围岩分布具明显影响,将形状稍做改变,应力状况就有明显改善。如将断面 1 的直边改为曲边,应力分布就有明显改善。

(5)建议在施工过程中掌握工程地质条件和岩层情况的变化,并进行隧道位移收敛监测,及时调整工程设计以保证工程施工的顺利进行和长期稳定。

参 考 文 献

E. Hoek, E. T. Brown. 1986. 岩石地下工程. 北京 冶金工业出版社, 107~108.
钟桂彤. 2000. 铁路隧道. 北京 中国铁道出版社, 27~28.
王连捷, 任希飞, 丁原辰等. 1994. 地应力测量在采矿工程中的应用. 北京 地震出版社, 50~51.

References

E. Hoek, E. T. Brown. 1986. Underground excavation in rock. Beijing : Metallurgy Industry Publishing House, 107~108(in Chinese).
Zhong Guitong. 2000. Railway tunnel. Beijing : Railway of China, 27~28(in Chinese with English abstract).
Wang Lianjie, Ren Xifei, Ding Yuanchen et al.. 1994. Application of rock stress measurement in mining engineering. Beijing : Seismological Press, 50~51(in Chinese).

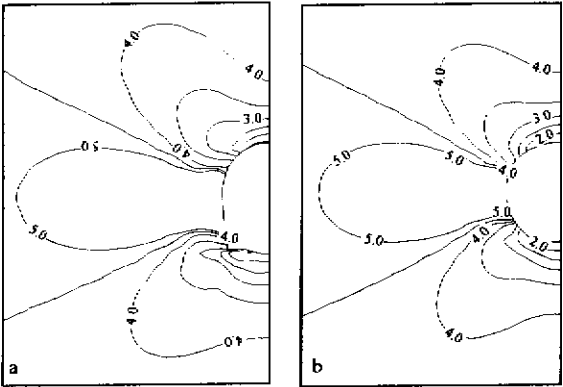


图 4 隧道围岩强度/应力等值线

Fig. 4 counter of ratio of strength with stress
a-断面 1 b-断面 3

a-for section 1 b-for section 3