

文章编号:1671-6833(2010)06-0073-05

海底隧道穿越断层破碎带预注浆加固稳定性分析

汪磊¹, 李涛²

(1. 上海工程技术大学 城轨学院, 上海, 201620; 2. 北京交通大学 土建学院, 北京, 100044)

摘 要: 通过三维有限元方法研究当隧道穿越断层破碎带时, 采用不同注浆加固材料、不同注浆加固圈厚度对隧道围岩及初期支护受力和变形影响。得出: 围岩未采取注浆加固时, 塑性破坏主要集中在正常围岩与断层破碎带的过渡段; 采取注浆加固措施后, 破坏除发生在正常围岩与断层破碎带过渡段外还发生在各注浆加固段间的衔接处; 对围岩进行注浆加固后, 隧道拱顶最大沉降减小了一半多。同时, 随着注浆加固圈厚度或刚度的增大, 隧道拱顶位移、塑性变形的大小和分布区域、初期支护内的最大主应力都会相应的减小; 通过改变注浆加固范围和注浆加固参数都可以实现对隧道的变形和受力的有效控制, 两者在加固隧道围岩方面具有等效作用。

关键词: 倾斜断层破碎带; 注浆; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: U455.49 **文献标识码:** A

0 引言

穿越断层破碎带是海底隧道修建的关键问题, 对其准确地探测、预报并采取可靠的注浆加固方案及施工方法是海底隧道安全顺利施工的重要保证^[1]。然而对于海底隧道穿越断层破碎带时的预注浆加固往往是参考相关工程经验, 确定具体预注浆参数, 这样做的结果要么是注浆效果不良, 要么是造成资源浪费, 并且无法确定预注浆加固后隧道结构的稳定性特征。利用数值模拟方法, 分别考虑采用不同注浆加固圈厚度和不同注浆材料, 分析隧道围岩竖向位移、隧道围岩塑性区和隧道结构的受力特征, 并依此来研究海底隧道穿越断层破碎带预注浆加固的稳定性。

1 工程概况

青岛胶州湾海底隧道是我国大陆第二条海底隧道, 全长 6 170 m, 其中海域段长 3 950 m。隧道采用双向双洞 6 车道, 中间设服务隧道, 隧道主要采用钻爆法施工。根据前期工程地质勘探的结果, 隧道海域段基岩受构造运动影响较严重, 破碎岩体及抗风化能力较低的辉绿岩脉较发育, 对水敏感的 IV ~ V 级围岩所占比例较大, 其中, 隧道主洞

II ~ III 级围岩约占 55.7%, IV 级围岩约占 38.1%, V 级围岩约占 6.2%。隧道顶部 25 m 内岩体中的地下水活动痕迹普遍较明显, 隧道开挖时的爆破震动和围岩松弛都可能使其透水性加剧, 埋深不足 25 m 的海域段占了相当大的比例。

2 倾斜断层破碎带预注浆加固的稳定性分析

2.1 计算模型的建立

2.1.1 计算域的确定

青岛胶州湾海底隧道左线需穿越的 3 个主要断层破碎带, 具体情况如表 1 所示。

对胶州湾海底隧道不良地质地段中地质情况最差的 ZK4+955 ~ ZK5+019 进行模拟。

2.1.2 计算模型

为了准确计算出整个破碎带对隧道在穿越过程中的影响, 分别对隧道在进破碎带前和后的一定地段进行模拟, 取模型沿隧道轴向的长度为 80 m。另外, 已知该段隧道拱顶至海底面的距离平均约为 35 m, 考虑隧道的洞径, 模型下边界取至海底面以下 90 m, 水平方向取隧道中线两侧各 60 m。由此建立的包含断层破碎带的三维有限元网格模型如图 1 所示。整个计算模型共划分单元

收稿日期: 2010-06-12; 修订日期: 2010-08-03

基金项目: 上海市教育委员会学科建设资助项目(J51401)

作者简介: 汪磊(1985-), 男, 陕西人, 上海工程技术大学助教, 硕士, 主要从事隧道结构稳定性分析方面的工作, E-mail: 07121462@bjtu.edu.cn.

62 079个,节点 10 936 个.模型中隧道及注浆加固圈穿越断层破碎带的位置关系如图 1 所示,其中断层破碎带与平面 $y-z$ 的夹角为 45° 、与平面

$x-y$ 的夹角为 42° .从左向右的隧道拱顶连线上,断层破碎带位于 20~40 m 之间.

表 1 胶州湾海底隧道左线主要不良地质地段

Tab. 1 The main bad geological section at Jiaozhou Bay Left Tunnel

里程	ZK2+755~ZK2+951	ZK3+407~ZK3+519	ZK4+955~ZK5+019
地质条件	受断层及风化的影响岩石内裂隙极发育且呈压碎~破碎状;岩体大部分呈碎石角砾状,结构松散,含少量地下水.	东北向断层与西北向断层交汇处,受构造影响岩体破碎呈角砾状散状结构,无自稳能力;地下径流和海水入渗条件良好.	受构造影响严重,岩体极破碎,呈碎裂散状结构,与绿泥石的蚀变带裂隙密集,部分裂隙为张性裂隙,地下水量较大(可达 $5.31\text{ m}^3/\text{m}$)

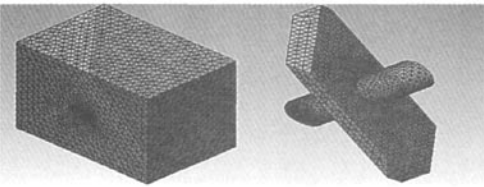


图 1 有限元计算模型及隧道注浆加固圈与断层破碎带的相对位置

Fig. 1 The finite element model and the relative position of fault zone and tunnel grouting circle

为了模拟隧道开挖施工的过程,建立了模拟双侧壁导洞法施工时初期支护和临时支护的单元,其中部分单元位于断层破碎带内,如图 2 所示.

2.1.3 参数选择

计算中采用的围岩参数根据工程现场 V 级围岩的实测资料选取.隧道开挖时的初期支护主要为格栅钢拱架和喷射混凝土,采用弹性板壳单元模拟^[2-4].格栅间距为 0.6 m,格栅钢拱架及喷射混凝土厚为 0.3 m.隧道围岩材料采用 Mohr-Coulomb 屈服准则模拟.围岩注浆和初期支护的材料参数见表 2.

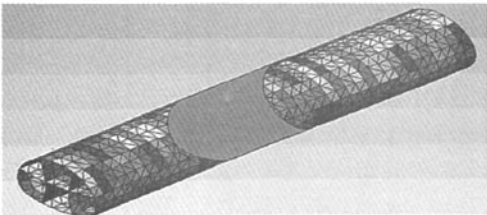


图 2 隧道初期支护中位于断层破碎带的部分

Fig. 2 The part of tunnel lining in fault zone

2.1.4 计算荷载与边界条件

各个部分的计算方法如下.

①结构自重按隧道结构设计尺寸及材料标准重度计算确定;②地层垂直压力为岩层自重应力,水平地应力的计算不考虑构造应力的影响,假设

为垂直地应力乘以侧压力系数 $K_0 = \nu/(1-\nu)$; ν 为材料的泊松比;③隧道所在海底上方海水深约为 42 m,将其简化为均布面荷载作用在海底面上.计算模型的位移边界条件为:顶面为自由边界,侧面法线方向固定,底面垂直方向固定.

2.2 模拟方法

2.2.1 隧道开挖施工工序及方法

为了控制开挖过程中的围岩变形,将采用全断面预注浆加固后以双侧壁导洞法开挖^[5].围岩加固和掌子面开挖时的具体实施步骤见图 3,各个导洞掌子面之间的错距为 10 m,全断面注浆加固每次加固进尺为 20 m.

表 2 V 级围岩注浆区和初期支护材料参数

Tab. 2 The material parameters of V-grade surrounding rock, grouting zone and initial support

材料类型	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	抗拉强度/ kPa
V 级围岩	18	1200	0.40	150	25	100
注浆加固圈	20	3 000	0.35	200	30	200
初期支护	25	10 000	0.20	—	—	—

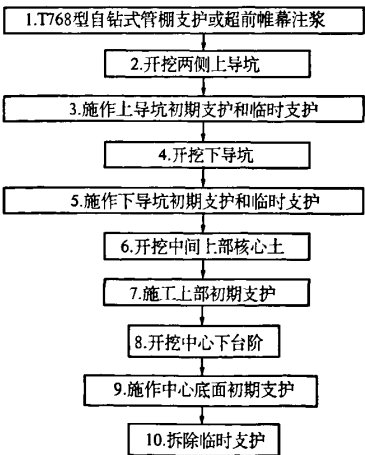


图 3 隧道双侧壁导洞法施工工序流程图

Fig. 3 The flow chart of tunnel construction process with the both side heading method

2.2.2 数值模拟实施方法

①根据青岛胶州湾海底隧道的岩土工程勘察报告确定要模拟的断层破碎带,收集相关的工程地质、水文地质资料;②按照隧道的设计数据、断层参数、断层所在地层的物理力学性质指标建立三维有限元模型;③确定围岩和隧道支护结构的荷载条件、材料的性质及其相关物理力学参数;④在数值模拟隧道施工过程中,按照双侧壁导洞法进行模拟;⑤针对围岩注浆加固圈的不同厚度,计算隧道穿过断层破碎带时注浆加固对隧道初期支护结构变形和受力的影响;⑥考虑不同性质的注浆加固材料,计算隧道穿过断层破碎带时注浆加固对隧道初期支护结构变形和受力的影响;⑦在上述计算的基础上,综合分析隧道穿过断层破碎带时不同注浆加固方式对隧道初期支护结构变形和受力的影响,对注浆加固的效果进行评估。

2.3 计算结果分析

2.3.1 不同注浆加固圈厚度的影响分析

考虑了6种不同的隧道围岩注浆加固工况,注浆加固圈厚度分别为0,3,4,5,6,7 m,其中5 m为初步设计建议值。

图4为某工况下隧道穿过断层破碎带时隧道纵剖面的竖向位移等值线图。图5为某工况下隧道及围岩的塑性变形区分布图。从图4可知,隧道(拱顶和拱底)及围岩在断层破碎带内及邻近范围产生的竖向变形要明显大于断层以外的变形;从图5可知,对于工况1塑性破坏最先出现在正常围岩与断层破碎带的过渡段。对比工况2到工

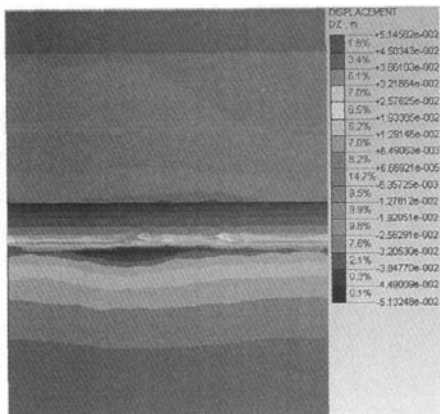


图4 某工况下隧道穿过断层破碎带时隧道纵剖面竖向位移等值线图

Fig.4 The vertical displacement contours of longitudinal section when tunnel crossing the fault zone though a operating condition

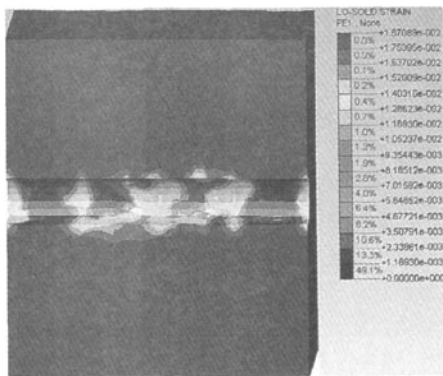


图5 某工况下隧道及围岩的塑性变形区分布图

Fig.5 The plastic deformation distribution of the tunnel and surrounding rock though a operating condition

况6,塑性破坏除发生在正常围岩与断层破碎带的过渡段外,还出现在隧道各个全断面注浆加固段间的衔接处;在隧道横断面上,围岩发生塑性破坏的区域主要在隧道底部、顶部及两侧壁中部。

比较未注浆的工况1和其它5种注浆加固的工况,可以发现塑性变形区的集中程度发生了变化。对于隧道围岩不进行注浆加固时,围岩的塑性变形区在正常围岩与断层破碎带过渡段处高度集中,导致在工况1的塑性区剖面图中,只显示出在正常围岩与断层破碎带过渡段有塑性区。在工况1的塑性区分布图中,还可以看出在断层破碎带的塑性变形要大于正常围岩区的塑性变形,并且在断层破碎带的两侧,塑性区有一定的延伸。此外,与未注浆加固的塑性区相比,围岩经注浆加固后塑性区开始在全断面注浆加固交接处出现,这是由于在模拟中很难实现与实际工程相符的每一个注浆加固段之间所必须的至少1 m的搭接段,模拟时将一个注浆加固段开挖完后,隧道前方掌子面尚未有任何支护,所以在注浆加固交接处出现了一定的塑性变形区。因此,图中各注浆加固圈之间交接处塑性区的产生机理和正常围岩与断层破碎带过渡区的塑性区不同。比较工况2至工况6,由于隧道围岩注浆加固圈厚度的不同,可以看出塑性变形的大小和区域的大小都发生了变化。一方面,随着注浆加固圈厚度的增加,围岩的强度和刚度得到提高,塑性变形的值越来越小;另一方面,随着注浆加固圈厚度的增加,塑性变形区也越来越均匀,其塑性变形区分布规律逐渐变得与围岩中无断层破碎带的情况相同。

图6为某工况下隧道拱顶下沉分布图,未注

浆前隧道拱顶最大下沉发生在正常围岩与断层破碎带的衔接处,其值为 51.3 mm,且断层破碎带范围内隧道整体有下沉的趋势.在围岩注浆加固后,沿隧道轴向拱顶的沉降变化呈不规则锯齿状曲线,较大的沉降值主要出现在正常围岩与断层破碎带的过渡段以及各个全断面注浆加固段之间的衔接处.因此,围岩未注浆加固前隧道拱顶的沉降较大,但随着注浆加固圈厚度的增加,沉降逐渐减小且趋于均匀.

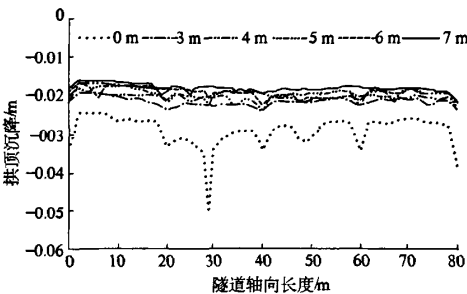


图 6 6 种工况下隧道拱顶沉降的变化
Fig. 6 The change of tunnel crown settlement with different grouting materials through six operating conditions

2.3.2 不同注浆材料加固的影响分析

采用大管棚注浆加固围岩能有效地控制地应力释放和减少拱部围岩的松动变形.当隧道沿线地质情况和注浆加固范围一定时,一般通过控制注浆材料的性质来优化注浆效果,使隧道开挖安全可靠.为了考察使用不同注浆材料时隧道围岩及初期支护的变形与受力情况,取注浆加固厚度不变但改变注浆圈力学参数的方法.注浆加固厚度为 5 m,其他参数如前文,所考虑工况如表 3 所示.

表 3 使用不同注浆加固材料的工况

Tab. 3 The conditions of with different grouting materials

加固工况	密度/ ($g \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
工况 1 (未注浆加固)	—	—	—
工况 2	1.6	1.8	0.24
工况 3	1.8	2.4	0.26
工况 4	2.0	3.0	0.30

由于在计算过程中除注浆加固材料不同外,其它参数都相同,所以地应力和隧道结构上的荷载也基本相同.围岩和隧道初期支护的竖向位移变化主要是由于注浆加固圈弹性模量的变化引起的.

图 7 所示为采用不同的注浆材料加固围岩时

得到的沿隧道拱顶纵剖面上的竖向位移等值线图.从中可知,在注浆加固圈厚度不变的情况下,隧道在穿越断层破碎带时隧道围岩变形规律相同,但竖向位移沿隧道轴向不断变化,在断层破碎

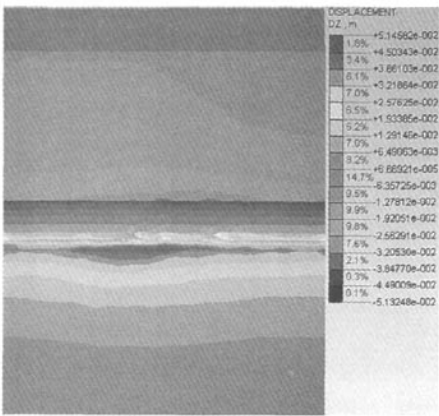


图 7 使用不同注浆加固材料时沿隧道纵剖面的竖向位移等值线图(工况 1)

Fig. 7 The vertical displacement contours of the tunnel profile with different grouting materials (condition 1)

带内及邻近区域竖向变形有明显增大的趋势.但随注浆加固圈强度和刚度的增大,隧道拱顶的沉降逐渐减小.

图 8 为表 3 中某工况下隧道和围岩的塑性变形区分布图.从图中可以看出,塑性区主要集中在断层破碎带与正常围岩的过渡段以及各个全断面注浆加固段的连接处.与未进行注浆加固相比,加固后塑性变形大幅减少,随着注浆加固圈强度和刚度的增大,沿隧道轴向的塑性区和塑性变形也逐渐减小.另外,比较方案 1 的工况 3 和方案 2 的工况 3 的塑性区分布情况,可以发现两个图中的塑性变形大小和塑性变形区域非常相近,这说明

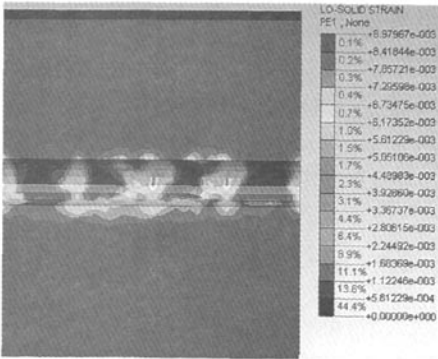


图 8 使用不同注浆材料时隧道和围岩的塑性变形区分布图
Fig. 8 The plastic deformation distribution of the tunnel and surrounding rock with different grouting materials

对围岩进行注浆加固时,在增大加固的范围和提高注浆加固圈的强度之间存在着一个作用等效关系,利用这个等效关系,可以设计出最为合理的注浆加固范围和注浆加固参数,使隧道的修建在施工上和经济上得到优化。

图9所示为使用不同注浆加固材料时沿隧道轴向隧道拱顶沉降的变化情况。从图中可知,未注浆之前隧道拱顶下沉的最大值发生在正常围岩与断层破碎带连接处,并且在断层破碎带内及邻近区域有整体下沉的趋势。而在围岩注浆加固后,隧道拱顶沉降沿轴向的变化不一,呈参差不齐的锯齿状曲线,较大的沉降主要发生在正常围岩与断层破碎带衔接处以及各个全断面注浆加固段之间。随着注浆加固材料强度和刚度的提高,拱顶沉降逐渐减少,并慢慢趋向一条相对平滑的曲线。

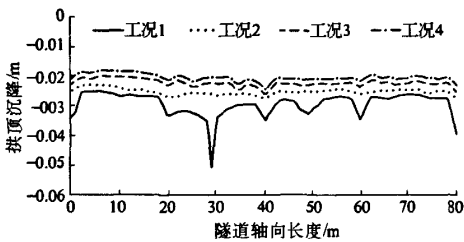


图9 使用不同注浆加固材料时隧道拱顶沉降的变化
Fig.9 The change of Tunnel Crown Settlement with different grouting materials

3 结论

(1)隧道穿越断层破碎带时,沿隧道轴向的竖向位移变化并不是很有规律,但隧道(拱顶和

拱底)及围岩在断层破碎带内及邻近范围产生的竖向变形要明显大于断层以外的变形;(2)围岩未采取注浆加固的情况下,塑性破坏集中发生在正常围岩与断层破碎带的过渡段;采取了注浆加固措施后,破坏会发生正常围岩与断层破碎带过渡段以及各个全断面注浆加固段间的衔接处;(3)随着注浆加固圈厚度的增加,围岩和初期支护的塑性变形越来越小,塑性变形区域越来越均匀,其分布规律逐渐趋于隧道穿过无断层破碎带时围岩的塑性变形区规律;(4)通过改变注浆加固范围和改变注浆加固参数都可以实现对隧道的变形和受力的有效控制,两者在加固隧道围岩方面具有等效作用。

参考文献:

- [1] 张顶立.海底隧道不良地质体及结构界面的变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11):2161-2169.
- [2] 杜永彬.破碎带隧道开挖支护效果的模拟[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(1):33-36.
- [3] 张顶立,黄俊.地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1703-1707.
- [4] WANG C, TANNANT D D, LILLY P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003(40):415-424.
- [5] 吕明,GRØVE, NILSEN B.挪威海底隧道经验[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4219-4225.

Stability Analysis of the Fault Fracture Zone with Pre-grouting Reinforcement in Subsea Tunnel

WANG Lei¹, LI Tao²

(1. College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Science and Engineering, Shanghai 201620, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper studies the influence on the force and deformation of surrounding rock and primary support by changing the grouting material or the grouting range with the three-dimensional finite element simulation. It can be proved: if surrounding rock was not reinforced by grouting, plastic deformation take place in the transition sections of normal surrounding rock and fault fracture zone; or it will take place at the interface of every grouting section with the exception of the transition sections; if surrounding rock was reinforced by grouting, the maximum settlement of the tunnel vault decreased by more than half, simultaneously as the thickness or stiffness of the grouting reinforcement range increases, the displacement of tunnel vault, the size and distribution area of plastic deformation, the maximum principal stress of primary support all decreased correspondingly; changing the grouting range or the parameters of the grouting can all control the force and deformation of tunnel effectively, and they have the same effect on the reinforcement of surrounding rock.

Key words: inclined fault fracture; grouting; the stability; numerical simulation