

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.06.087

# 城市水下浅埋暗挖隧道最小覆盖层厚度确定方法

豆世康

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 为了保证隧道的交通功能,实现城市水下隧道与近岸道路的连接,解决矿山法隧道水下段最小覆盖层厚度问题,通过对国内外水下隧道最小覆盖层厚度确定方法的讨论,针对江西赣州市蓉江四路章江隧道水下段最小覆盖层厚度,提出一种更为经济、合理的确定方法。该方法通过采用工程技术措施,以风险分析、数值计算、监控量测为手段,确定施工风险大小,结合交通功能、经济分析、社会效益,确定最小覆盖层的优选方案。最后,对提出的确定方法进行总结。

**关键词:** 水下隧道;最小覆盖层厚度;数值计算

**中图分类号:** U452

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)06-0340-07

## 0 引言

进入21世纪以来,我国水下隧道建设蓬勃发展。近年来,国内修建了一大批穿越江河湖海的水下隧道。在这些隧道的设计与施工过程中,如何确定水中段隧道的最小覆盖层厚度,确保隧道的功能实现、施工安全与运营稳定,一直是建设人员的困扰,也对矿山法修建水下隧道工程构成严峻挑战<sup>[1]</sup>。为此,国内众多专家、学者做了大量研究工作。王梦恕等<sup>[2]</sup>通过对水下隧道最小岩石覆盖层厚度的研究,提出了应从围岩稳定性和隧道涌水量的大小综合考虑的方法。李术才等<sup>[3]</sup>就厦门翔安隧道设计过程中应用工程类比和数值计算方法对其最小覆盖层厚度做了专项研究。王培勇等<sup>[4]</sup>就水下隧道合理覆盖层厚度进行了有限元模拟研究。陈海军<sup>[5]</sup>就基于工程技术措施下的水下隧道最小覆盖层厚度确定方法,以长沙市营盘路湘江隧道为例,提出了营盘路湘江隧道按10.5 m控制的原则。该隧道位于全分化和强风化岩石地层。中铁四院完成的长沙浏阳河湘江大道越江隧道设计,提出了越江隧道按14 m最小覆盖层厚度的原则,隧道拱部全部位于强风化砾岩中。中铁六院完成的浙江衢州市荷一路越江隧道工可报告,提出了越江隧道按8 m最小覆盖岩石厚度的原则。而本文结合赣州市蓉江四路越江隧道工程的交通功能需

求、陆域道路接线条件、建设风险与工程投资,提出基于注浆加固围岩下的水下隧道最小覆盖层厚度确定方法,供类似隧道工程借鉴。

## 1 工程简介

### 1.1 工程概况

江西省赣州市蓉江四路越江隧道穿越章江,为连接赣州市凤岗片区与蓉江新区之间的重要通道。虽然蓉江新区与经开区不断增加交通基础设施的投入,但两区之间通道缺失,越江交通需求难以得到满足,越江交通矛盾将越来越突出。蓉江四路越江隧道工程全长约2.5 km,隧道主线全长约为1.738 km,匝道长约1.3 km,时速50 km/h,双向六车道。主线隧道为双向六车道,采用浅埋暗挖法(俗称“矿山法”)施工,标准段断面净宽12.5 m,开挖面积平均137 m<sup>2</sup>;主线设计最大纵坡4.95%,匝道设计最大纵坡5.9%。隧道自东向西长距离穿越粉质黏土、粉砂、圆砾层、江中断裂带、强风化泥岩、中风化泥岩、杂填土,洞身所处地层透水性弱、自稳能力一般,开挖易坍塌,沿线各地层的物理力学指标见表1。章江江水深度随季节变化较大,最大水深约15 m(100 a一遇),平时水深3~5 m。

### 1.2 交通功能需求

结合城市既有路网与规划方案,本隧道“两主线、四匝道”的整体布局,可实现章江两岸各个方向的互通。通过匝道隧道与主线隧道的合理衔接,形成东西为主、南北为辅的交通格局,隧道的交通功能可得到极大拓展。隧道总体布置见图1。隧道纵断面与地质岩芯分别见图2、图3。

收稿日期: 2021-03-28

基金项目: 软弱互层超浅埋小净距大断面穿江隧道安全建造关键技术研究(编号 K2019K168)

作者简介: 豆世康(1978—),男,硕士,高级工程师,注册土木工程师、一级建造师,从事隧道与地下工程设计研究工作。

表 1 岩(土)体物理力学参数

| 岩土编号            | 名称       | 确定参数                | 承载力特征值/kPa  | 建议承载力特征值/kPa |
|-----------------|----------|---------------------|-------------|--------------|
| ① <sub>-1</sub> | 杂填土      | 地区经验                | 80~110      | 90           |
|                 |          | $e=0.678$ $IL=0.12$ | 266         |              |
| ②               | 粉质黏土     | $N=7$               | 257         | 240          |
|                 |          | 地区经验                | 240~300     |              |
| ③               | 粉砂       | $N=13$              | 164         |              |
|                 |          | 地区经验                | 160~200     | 170          |
|                 |          | 地区经验                | 360~400     |              |
| ⑤               | 圆砾       | $N_{63.5}=12$       | 450         |              |
|                 |          | 地区经验                | 380~400     | 380          |
| ⑥ <sub>-1</sub> | 强风化泥质粉砂质 | 地区经验                | 300~350     | 300          |
|                 |          | 单轴饱和抗压强度            | 6.0~12 MPa  | 1500         |
| ⑥ <sub>-2</sub> | 中风化泥质粉砂质 | 地区经验                | 1 000~1 500 | 1 300        |

注:岩石承载力特征值根据单轴饱和抗压强度乘以折减系数计算;折减系数中风化取0.25,微风化取0.30。建议值均参照地区经验取用。

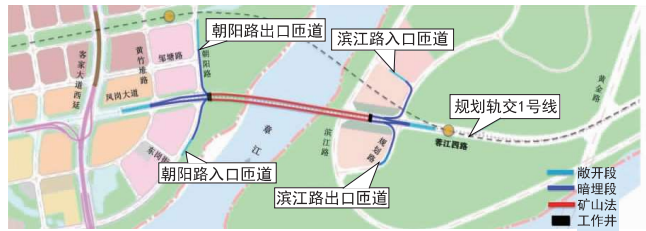


图 1 隧道总体布置

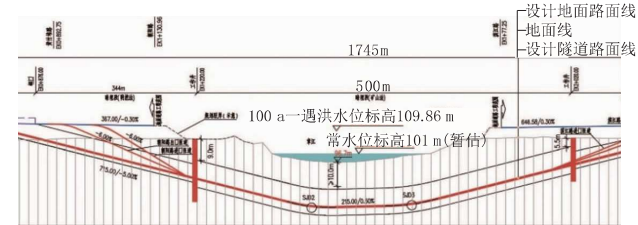


图 2 隧道纵断面



图 3 地质岩芯

2 研究最小覆盖层厚度的意义和影响最小覆盖层厚度的因素

2.1 研究最小覆盖层厚度的意义

隧道开挖后,其上覆围岩在达到和超过一定的厚度时,将可提供相当的自稳与自承载能力,岩体自

重荷载的绝大部分将不再下传由衬砌结构承受;反之,当其上覆围岩厚度不够时,则将不足以提供其自稳和自承载能力,岩体自重荷载将大部分或全部下传由衬砌结构承受。围岩体以能提供自承载与自稳能力的最小厚度称为最小覆盖层厚度<sup>[6]</sup>。

在海底和床底基岩裂隙水的作用下,对注浆密封岩体而言,将能形成强大的围岩承载圈。此时,外水压力和上覆岩体自重将由衬砌结构和围岩承载圈来共同承受,而不只是衬砌结构独自担当,这样设计计算出的衬砌厚度和配筋显然更加经济并符合工作实际。围岩能以形成承载圈的厚度称为围岩承载圈厚度<sup>[7]</sup>。

围岩最小覆盖层和最小承载圈厚度是跨海隧道工程设计施工的基础。通过对围岩最小覆盖层和最小承载圈厚度的研究,可以保证隧道设计的安全和经济,最大程度降低开挖施工中的风险和技术难度。

2.2 影响最小覆盖层厚度的因素

水下隧道的最小覆盖层厚度是影响施工安全和工程造价最重要的设计参数之一。在保证施工安全的前提下,隧道的覆盖层厚度越小,隧道埋深就越小,作用在隧道结构上静水压力就越小<sup>[8]</sup>,隧道结构尺寸也可以越小。同时,隧道埋深越小,在隧道坡度一定的前提下,隧道长度就越短,与两端的接线就越容易,因而隧道的工程造价也越低。另外,水下隧道覆盖层越薄,河(海)水与隧道之间的渗流通道就越短,隧道施工过程中发生突水、塌方的概率就越大<sup>[9]</sup>。因此,设计水下隧道,要综合考虑功能需求、工程造价和风险等因素来确定合理的最小覆盖层厚度。从国内外已建的各种类型水下隧道工程来看,影响其最小覆盖层厚度的主要因素有以下几点:

- (1)所确定的覆盖层厚度能否保证水下隧道的施工安全。
- (2)水下隧道的功能需求。
- (3)隧道两端陆域的接线条件。
- (4)隧址处水域段工程地质与水文地质条件。
- (5)满足隧道使用功能所确定的隧道断面尺寸。
- (6)水域基床控制条件,如规划航道标高、冲刷线等。

3 现有方法分析

国内外规范对水下隧道最小覆盖层厚度并没有明确限制,各国确定最小覆盖层厚度主要采用经验统计与工程类比方法。日本和挪威是世界上水下隧

道钻爆法实践最多的国家,通过对许多成功经验和失败教训的总结,各自归纳了一套经验公式。我国水下隧道的最小覆盖层厚度也基本是根据经验来确定的,同时参考类似工程和行业经验进行对比。

采用矿山法修建水下隧道,埋深不能过大,也不能过小,需要采用最小的安全埋深。埋深过大,既会带来隧道与两岸接线困难、纵坡增大、运营条件变差的问题,又会使隧道增长、造价提高。若埋深不足,会增加围岩加固的难度、堵水和排水的费用,甚至会导致河(海)水的灌入,危及隧道和人员安全。因此,应考虑经济、安全、运营条件等多方面因素,综合确定隧道的最小安全埋深(岩石覆盖厚度)。确定最小埋深控制值是隧道纵断面控制的重要因素。

### 3.1 挪威经验法

挪威海底隧道建设积累了大量经验,总结出海底隧道最小埋深经验参考图(见图4)。纵轴 $H$ 表示水深,横轴 $h$ 表示岩石覆盖厚度。图中按岩石的完整程度分别给出了良质岩石和弱质岩石两条经验曲线。良质岩石的纵坡波速平均值为 $5\,000\sim 6\,000\text{ m/s}$ ,弱质岩石的纵坡波速平均值为 $2\,000\sim 2\,900\text{ m/s}$ 。在已知岩石纵坡波速的情况下,可采用内插的方法,根据图4计算最小岩石覆盖厚度。

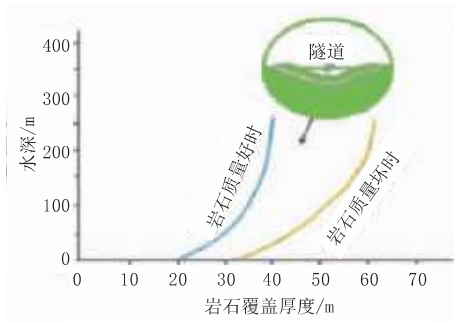


图4 挪威法经验法图示

### 3.2 日本最小涌水量法和经验法

#### 3.2.1 最小涌水量法

矿山法修建的隧道,涌水量是确定埋深的重要依据。随着埋深的增加,静水压力逐渐增大,但渗流通道也逐渐增长。根据不同的埋深得到相应的涌水量,埋深和涌水量曲线上最小涌水量对应的埋深即最小岩石覆盖层厚度。经验计算公式为:

$$h = \frac{re}{2} e^{\frac{H}{h}}$$

式中: $h$ 为水下隧道岩石覆盖厚度; $H$ 为水深; $r$ 为隧道半径。

#### 3.2.2 经验法

日本是修建海底隧道较成功的国家之一,在此

方面积累了很多经验。日本第一条钻爆法海底铁路隧道即青函隧道于1988年竣工,距今已有20多年历史。日本总结出的最小覆盖层厚度经验公式为:

$$H=1/3\sim 2/3h$$

式中: $H$ 为海底隧道埋深; $h$ 为最大海水深。

### 3.3 国内顶水采煤经验方法

水下隧道最小埋深的确定与煤矿安全开采上限的确定有相似之处。为了保证隧道施工安全,必须留设足够的防水岩柱。安全防水岩柱的最小高度应大于导水裂隙带的高度和保护层厚度之和(见图5)<sup>[10]</sup>。开采上限计算公式:

$$H=a+s+h$$

式中: $H$ 为开采上限高; $a$ 为表面裂隙深度,基岩经验值取 $2\sim 10\text{ m}$ ;  $s$ 为保护层厚度,一般取 $5\text{ m}$ ;  $h$ 为爆破引起的扰动高度(导水裂隙带高度),一般取 $2\text{ m}$ 。

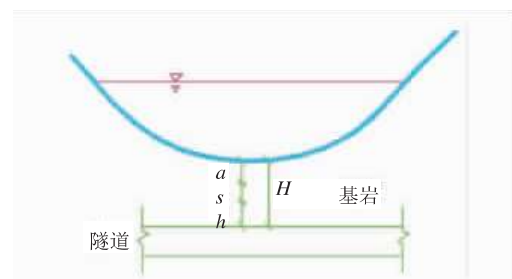


图5 水下隧道最小埋深的确定图示

#### (1) 保护层厚度 $s$ 的确定

根据多年来煤矿开采经验,推导出经验公式:

$$s = 1.5 \frac{\sqrt{h_1 \times h_2}}{f} + c$$

式中: $s$ 为保护层厚度, $m$ ;  $h_1$ 为水头高度, $m$ ;  $h_2$ 为坑道宽度, $m$ ;  $c$ 为岩层强风化带厚度,一般取 $2\sim 5\text{ m}$ ;  $f$ 为普氏强度,查表或取样试验求得。

$$f=R/10$$

式中: $R$ 为岩石标准试样单轴极限抗压强度; $c$ 为岩层风化带厚度。

#### (2) 导水裂隙带高度 $h$ 的确定

依岩石爆破力学:

$$h=k \cdot w \cdot \sqrt[3]{F(n)}$$

式中: $k$ 为地基系数; $w$ 为单个最危险药包的最小抵抗线; $F(n)$ 为相应药包爆破指数的函数。

### 3.4 权函数法

确定水下隧道最小岩石覆盖层厚度时,应从围岩稳定性和隧道涌水量两方面来考虑。首先,由于水下隧道的特殊性,围岩稳定性至关重要;其次,对于水下隧道施工安全来说,防突水也十分重要;最后,



隧道涌水量影响排水费用。综上分析,提出水下隧道最小岩石覆盖层厚度的确定原则:经验分析法依据围岩稳定性和实际案例分析确定;顶水采煤值根据预留安全煤柱、防止施工突水确定;最小涌水量依据排水成本较小来确定;依据其重要性,对不同方法选取不同的权重,最后加权确定最小岩石覆盖层厚度建议值。例如,可取建议值=经验分析值×0.5+顶水采煤值×0.3+最小涌水量值×0.2。

3.5 工程类比法

除按上述方法确定钻爆法水下隧道最小覆盖层厚度外,工程类比也是较常用的一种方法。采用工程类比法时一定要注意可比性,应主要从工程地质与水文地质情况、隧道断面尺寸及隧道的使用功能等条件进行确认<sup>[11]</sup>。国内外具有比较多的工程案例,已经施工完成的国内水下矿山法隧道,如长沙浏阳河隧道水下最小岩石覆盖层厚度为 14 m,长沙营盘路隧道水下岩石覆盖层厚度为 10.5 m。其余均为海底隧道,由于海水水深很深,参考性不强。

3.6 极限覆盖层厚度及其确定方法

在注浆或冻结等辅助措施下,极限覆盖层厚度的主要影响因素包括不良地质体情况(如风化槽、风化囊、断层破碎带等)、与海(江河)水联通状况、注浆效果、水深、隧道开挖尺寸、支护参数选取及开挖方法等。

对于某断面而言,在注浆条件下极限顶板的确定更多是从技术层面出发,寻求一个临界的覆盖层厚度安全值。然而,对于覆盖层厚度过薄引起的围岩失稳尚无很好的判断依据,目前比较常用的方法是利用塑性区或位移扰动区来判断围岩的稳定性范围。参考已有研究成果,基于 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 强度准则,引入最小安全系数来确定最小安全覆盖层厚度。其中,安全系数  $F_s$  可表示为:

$$F_s=H(x)/f(\sigma)$$

式中: $f(\sigma)$ 为总应力的函数; $H(x)$ 为标量的内变量  $x$  的函数。

对于岩石介质,Drucker-Prager 屈服条件是工程界应用最为广泛的屈服条件之一,其主应力表示形式为:

$$F(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)=aI_1+J_2/2-K=0$$

式中: $a$ 、 $K$  为材料参数; $I_1$ 、 $J_2$  为应力第一不变量和应力偏量第二不变量,可分别表示为:

$$I_1=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$$

$$J_2=[(\sigma_1-\sigma_2)+(\sigma_2-\sigma_3)+(\sigma_3-\sigma_1)]/6$$

当与库伦六边形的外顶点重合时, $a$ 、 $K$  与  $c$ 、 $\phi$  的关系为:

$$a=2 \sin\phi^3-1/2/(3-\sin\phi)$$

$$K=6 \cos\phi^3-1/2/(3-\sin\phi)$$

根据上式可得,满足 Drucker-Prager 屈服条件的岩体破坏安全系数:

$$F_s=(K-aI_1)/J_2/2$$

当  $F_s>1$  时,表示未破坏(屈服面内部);当  $F_s<1$  时,表示已破坏(屈服面外部);当  $F_s=1$  时的覆盖层厚度为该断面的极限覆盖层厚度。

3.7 根据《公路隧道设计规范》中深浅埋界限来确定

隧道最小覆盖层厚度在概念上在公路隧道设计规范中为深浅埋隧道分界深度  $H_p$  值。根据规范, $H_p$  按荷载等效高度来判定<sup>[12]</sup>。《公路隧道设计规范》方法借用的是《铁路隧道设计规范》中的方法。铁路隧道经验公式是通过 127 座单线铁路隧道的 417 个塌方资料的统计分析,以 5 m 为基本跨度整理而成的<sup>[13]</sup>。公路隧道与铁路隧道相比,在限界、跨度、高跨比等方面有其自身的特点,引用铁路隧道经验公式必然存在较大的误差。在定性分析的基础上,定量分析不可缺失,目前隧道设计规范均引入了定量分析  $BQ$  值的设计理念<sup>[14]</sup>。

$BQ$  值通过岩体分析计算得出,岩体完整程度的定量指标用岩体完整性系数  $K_v$  表达。 $K_v$  一般用弹性波探测值,《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)计算公式采用了 157 组数据回归。若无探测值,可用岩体体积节理数  $J_v$  确定,见表 2。

表 2 岩体体积节理数

| $J_v$ (条/m <sup>3</sup> ) | <3    | 3~10      | 10~20     | 20~35     | >35   |
|---------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| $K_v$                     | >0.75 | 0.75~0.55 | 0.55~0.35 | 0.35~0.15 | <0.15 |

$$K_v=(V_{pm}/V_{pr})^2$$

式中: $V_{pm}$  为评价区域岩体的弹性纵波速度; $V_{pr}$  为评价区域岩石的弹性纵波速度。

$$BQ=100+3R_c+250K_v$$

当  $R_c>90K_v+30$ ,应以  $R_c=90K_v+30$  和  $K_v$  代入计算  $BQ$  值;当  $K_v>0.04R_c+0.4$ ,应以  $K_v=0.04R_c+0.4$  和  $R_c$  代入计算  $BQ$  值。

经过修正后的  $BQ$  值,查询得到围岩级别,按规范公式计算最小覆盖层厚度和重度。

根据《公路隧道设计规范》计算最小覆盖层厚度与围岩级别息息相关。公路隧道规范考虑了洞跨、洞高、围岩级别对最小覆盖层厚度的影响,但没有考虑洞室形状、岩体结构、地下水、施工方法、支护形式等

因素的作用。从计算结果(见表3)可知,规范方法的计算结果均呈现出以下规律:围岩级别越高(即越破碎),相应最小覆盖层厚度越大;洞室跨度越大,最小覆盖层厚度越大;基岩层面上的外荷载越大,最小覆盖层厚度也越大。

表3 围岩级别

| 围岩级别 | 最小覆盖层厚度 $H_{\min}/\text{m}$ | 重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ |
|------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| V    | 38.48                       | 19.0                                      |
| IV   | 19.24                       | 25.0                                      |
| III  | 7.70                        | 26.0                                      |
| II   | 3.85                        | 26.5                                      |
| I    | 1.92                        | 26.5                                      |

### 3.8 按普式压力拱理论计算最小覆盖层厚度

由图6可知,取  $OFGB$  为脱离体进行分析,在  $OF$  和  $GB$  的切面上,岩体不能承受拉应力而只能承受压应力。同时假设  $O$  处拱顶和  $G$  处岩表的拉应力部分岩石已经完全崩落,所以  $O$  点和  $G$  点为拉应力、压应力的交界点,其应力为零。在弹性介质假设下,再假定压应力从  $O$  点从下向上和  $G$  点自上而下均呈线性增大,分别在  $F$  点、 $B$  点达到最大值  $\sigma_{\max}$ 。 $OF$  面上的总压力为  $S=1/2 \times \sigma_{\max}h$ ,其作用点位于距  $O$  点  $2/3 h$  处。作用于  $OFGB$  上的垂直力有这部分岩体自重和基岩层面上的残积土荷载及水压力,这些竖向力的合力用  $P$  表示, $P$  的作用点也不难求。

$$S=P\tan(45^\circ-\phi/2)$$

$$\sigma_{\max}=2S/h=2P\tan(45^\circ-\phi/2)/h$$

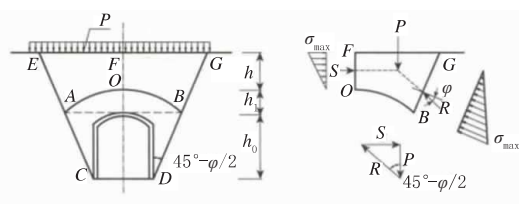


图6 普式压力拱计算图

如果  $\sigma_{\max}$  达到岩石的允许抗压强度  $[R_c]$ ,则认为压力拱将处于临界破坏的允许极限。允许抗压强度按下式计算:

$$[R_c]=R_c/F_s$$

式中: $R_c$  为岩石的单轴极限抗压强度; $F_s$  为安全系数,其值根据岩石的物理力学性质、岩体的工程地质与水文地质条件决定。由于岩体的离散型和随机性很大,工程中一般应采用  $F_s=8$ 。

若  $\sigma_{\max} \leq [R_c]$ ,则  $h \geq 2P\tan(45^\circ-\phi/2)F_s/[R_c]$ ,即可得到上覆岩体可形成承载拱。根据隧道所处地层参数,计算得出不同围岩级别的最小覆盖层厚度。

表4 不同围岩级别的最小覆盖层厚度

| 围岩级别 | 最小覆盖层厚度 $H_{\min}/\text{m}$ | 备注 |
|------|-----------------------------|----|
| V    | 21.66~35.3                  |    |
| IV   | 8.68~9.30                   |    |
| III  | 4.05~4.39                   |    |

压力拱理论方法是基于极限平衡条件推导最小覆盖层厚度公式。需要指出的是,推导过程中假设图6中  $B$ 、 $F$  两点应力同时达到最大,这适用于金属类塑性材料,应用于岩石类脆性材料则显得勉强。因为对岩石来说,当  $B$  点的应力达到最大值后,它并非保持不变只发生塑性流动,而是出现脆性开裂发生破坏,此时  $F$  点的应力往往并没有达到最大值。另外,假定压应力呈线性分布也与实际不符。因此,据以推出的公式必然有很大的局限性。压力拱理论均考虑了洞跨、洞高、围岩级别对最小覆盖层厚度的影响,同时还考虑到基岩层面上的外载影响,但没有考虑洞室形状、岩体结构、地下水、施工方法、支护形式等因素的作用。

压力拱理论的计算结果均呈现出以下规律:围岩级别越高(即越破碎),相应最小覆盖层厚度越大;洞室跨度越大,最小覆盖层厚度越大;基岩层面上的外荷载越大,最小覆盖层厚度也越大。

### 3.9 流固耦合理论数值模拟确定

经典渗流力学一般假定流体流动的岩土体为刚性的多孔介质,即在孔隙流体压力变化后,固体骨架不产生任何弹塑性变形,即渗流的非耦合情况。在实际岩土工程中,岩土体和人造多孔固体如混凝土等大多为可变形体,随着渗流过程中孔隙流体压力的变化,将会出现两个方面的影响。(1)随着孔压的变化将引起多孔介质骨架有效应力的变化,由此导致土体特性,如渗透率、孔隙度等的变化。(2)土体特性的变化又反过来影响孔隙流体的流动和压力的分布。

可见,工程实际中有许多情况必须考虑孔隙流体在多孔介质中的流动规律及其对多孔介质本身的变形或者强度造成的影响,即考虑多孔介质内应力场与渗流场之间的相互耦合作用流。流固耦合理论的研究一般都是基于比奥 Biot 的三维固结理论开展的,只是选取了不同的多孔介质的应力应变本构关系。比如弹塑性多孔介质模型、黏弹性多孔介质模型等;或者孔隙流体假设为多相流体或单相流体的差别(有的称为非饱和多孔介质或

者饱和和多孔介质)。

对于流固耦合问题的数值求解,通常有两种方法:有限差分法和有限单元法。

FLAC<sup>3D</sup> 可以模拟流体通过可渗透固体的渗流,例如模拟地下水在土体中的渗流,而这一过程可以与力学计算无关,即单相渗流,也可以与力学建模并行完成,由此获得流固耦合作用的效果。在数值方法中,流体范围是被离散的节点六面体区域。力学区域的划分同样如此。在内部,每一个区域被划分为四面体,孔隙压力和饱和度都被假设为是时变线性的节点变量。

4 蓉江四路章江隧道最小覆盖层厚度的确定

4.1 前述各种方法确定

按经验曲线、公式和工程类比确定的最小覆盖层厚度,根据挪威经验曲线,该隧道最小覆盖层厚度应为 42 m 左右。按日本最小涌水量法计算,本隧道最小覆盖层厚度应为 18.7~31.5 m (从正常段到大跨段)。按简易公式计算,应为 6.67~13.33 m (该法应用较少,计算结果不作为参考)。按国内顶水采煤的经验公式计算,最小覆盖层厚度应为 20.7~27.5 m (从正常段到大跨段)。公路隧道规范方法计算为 38.48 m。普式压力拱公式计算得出 21.66~35.3 m。类比国内同类型隧道,最小覆盖层厚度为 10.5~33 m。基本为隧道开挖宽度的 1.0~2.0 倍。

4.2 基于交通功能的需求最小厚度

根据章江两岸接线道路的技术标准,章江隧道主线纵坡不应大于 5%,匝道纵坡不应大于 6%。根据交通功能需求,经拟合隧道纵剖面,满足隧道交通功能后所确定的隧道与水下最小覆盖层厚度为 10.0 m,拱顶覆岩为中风化泥岩,隧道覆跨比仅为 0.67,建设风险与难度较大。

4.3 基于注浆加固围岩的流固耦合模拟计算

各种方法计算和功能需求确定的隧道最小覆盖层厚度来看,两者相差较大。因此,首先对满足功能需求的覆盖层厚度条件下采用注浆加固围岩,重新进行流固耦合模拟分析,判定注浆加固围岩后的风险。最后在对采取工程措施所增加的费用、隧道埋深减小导致隧道长度缩短所减少的费用,以及由于隧道埋深改变引起的隧道两端接线位置变化所造成的交通功能影响进行综合比较的基础上,确定水下隧道的最小埋深。

据大量工程实际经验可知,预注浆加固能有效

地对天然岩土体进行加固和改良,而水下隧道同时采用了大管棚注浆与帷幕注浆技术对隧道开挖断面进行预加固,因此需考虑注浆加固对隧道覆盖层厚度的影响。对于大断面隧道,通常采用单层 280 mm 厚初期支护,分部开挖施工,根据地质情况,通过数值计算进行分析,施工期间存在塌方、涌水、支护结构破坏及大变形等风险。采用 CRD 与双侧壁导坑法施工,各施工步骤保证初期支护封闭成环,单循环进尺不超过 3 m,控制收敛变形,计算时根据工法确定施工步序。采取  $\phi 108$  超前大管棚和  $\phi 42$  超前小导管等预支护措施,静压注浆水泥浆液,分别采用杆单元按管径确定参数模拟,围岩裂隙得到填充和改善。在采取工程技术措施后,隧道按满足交通功能需求所确定的最小覆盖层厚度,能满足施工阶段围岩稳定和支护结构安全的要求<sup>[15]</sup>。结合模拟计算和工程实际案例,水下隧道最小覆盖层厚度 10 m 是可行的。

按覆盖层厚度减小最少的 5 m 计算,在相同接地点高程和纵坡情况下,隧道长度缩短了近 400 m,按照水下隧道 18 万元/m 造价指标估算,直接工程费减少 7 200 万元;隧道采用初期支护、超前支护和注浆加固等工程技术措施所增加的费用约为 1 200 万元。综合比较,工程造价降低约 6 000 万元。此外,按该法确定的隧道最小覆盖层厚度,能够满足隧道两岸的接线要求,并能充分发挥隧道的跨越和分流功能,其所产生的经济效益和社会环境效益也是非常显著的。

采用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟计算的方法(见图 7),从注浆加固后水压和渗水量的关系确定蓉江四路越江隧道预注浆的注浆范围,隧道加固范围为开挖轮廓线外 4 m,达到安全要求;研究了掌子面围岩安全系数与注浆范围和堵水效果的关系(见图 8)。

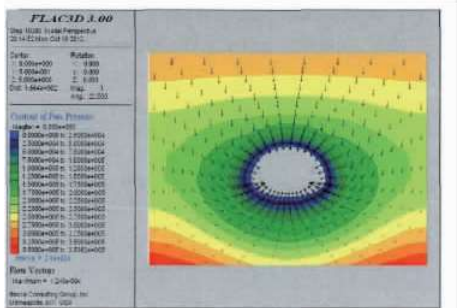


图 7 基于注浆加固的流固耦合计算

以基于注浆和排水费用之和最小的原则(见图 9),4 m 注浆圈达到两者之和极小,由此得到的渗流模型计算得到隧道允许排放量,确定了蓉江四路越江隧道允许排放量,其平均值为 0.35 m<sup>3</sup>/d,低于国外 0.43 m<sup>3</sup>/d 的排水量水平。



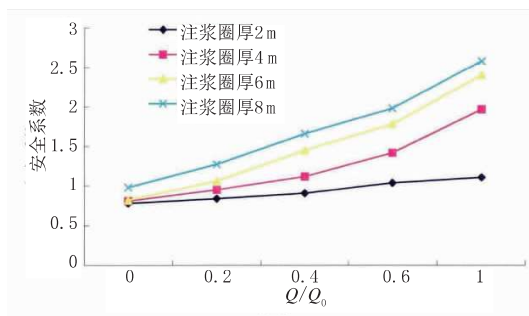


图8 注浆圈厚度与安全系数关系图

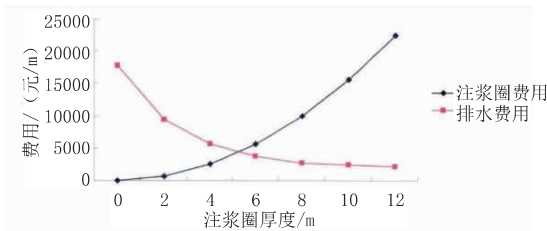


图9 费用与注浆圈厚度关系图

## 5 结论与建议

本文结合蓉江四路越江隧道所处的实际条件,按目前国内外常用的水下隧道最小覆盖层厚度确定方法推算的覆盖层厚度将无法满足隧道的接线要求,难以发挥隧道的交通疏解功能。在进行充分的调研和理论分析的基础上,提出了基于围岩加固的流固耦合模拟计算和结合工程类比水下隧道最小埋深的确定方法。该方法的具体步骤如下:

(1)根据水下隧道工程两岸的接线条件和线路的坡度初步确定隧道的最小覆盖层厚度。

(2)采用注浆加固的流固耦合模拟数值计算方法分析该覆盖层厚度条件下隧道施工过程的安全性。

(3)在以上分析的基础上,计算隧道埋深减小时为保证施工安全所增加的工程措施费用,隧道埋深增加造成的隧道长度加长所增加的费用,隧道埋深改变引起的隧道两端接线位置的变化所造成的环境影响。在综合比较的基础上,确定水下隧道的最小覆盖层厚度。

(4)在水下隧道施工中,注浆加固和防渗是减少流固耦合效应影响的主要手段,且能最大程度上优化水下隧道最小安全覆盖层厚度。因此,有必要对水下隧道注浆施工工艺及其效果进行控制,围岩注浆

效果将对优化水下隧道最小安全覆盖层厚度有重要意义。

(5)在工程实施阶段,应特别加强超前地质预报与实时监控量测工作,相对普通钻爆法隧道,应加密监测断面,运用信息化施工技术,全面掌控各类工序的施作时机。蓉江四路越江隧道工程的顺利实施是在丰富的设计与施工经验基础上完成的,本文提出的水下隧道最小覆盖层厚度确定方法,是在成功案例上的一种提炼,类似工程能否直接采用本工程的相关参数,应经认真斟酌分析后确定。

### 参考文献:

- [1] 钱七虎.水下隧道工程实践面临的挑战、对策及思考[J].隧道建设, 2014, 34(6): 503-507.
- [2] 王梦想.皇浦明海底隧道修建中的关键问题[J].建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 1-4.
- [3] 李术才,李树忱,等.海底隧道最小岩石覆盖厚度确定方法研究[J].岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2289-2295.
- [4] 王培勇,刘元雪,刘亚辉,等.水下隧道合理覆盖层厚度的有限元模拟研究[J].现代隧道技术, 2007, 44(2): 5-9.
- [5] 陈海军.基于工程技术措施下的水下隧道最小覆盖层厚度确定方法——以长沙市营盘路湘江隧道为例[J].隧道建设, 2015, 35(11): 1134-1140.
- [6] 孙钧.海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J].岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1513-1521.
- [7] 张艺博.考虑流固耦合的水下隧道力学特性研究[D].兰州:兰州交通大学, 2016.
- [8] 谭光宗.大断面海底隧道建设的安全风险评估与控制对策[D].北京:北京交通大学, 2014.
- [9] 刘丹,谢锋.工程类比法确定重庆朝天门两江隧道最小覆盖层厚度[J].公路交通技术, 2010(4): 92-95.
- [10] 蔚立元.水下隧道围岩稳定性研究及其覆盖层厚度确定[D].济南:山东大学, 2010.
- [11] 张聚文.水下浅埋暗挖隧道的覆盖层安全厚度研究及开挖工序模拟[D].长沙:中南大学, 2010.
- [12] 张燕琼,陈颖芳,杜素云.工程类比经验法确定水下隧道岩石覆盖层厚度[J].山西建筑, 2009, 35(22): 341-343.
- [13] 王芳.岩石地层水底隧道合理覆盖层厚度研究[D].成都:西南交通大学, 2009.
- [14] 蒋树屏,刘元雪,谢锋,等.重庆市朝天门两江隧道越江段盾构法合理覆盖层厚度研究[J].岩石力学与工程学报, 2007(6): 1188-1193.
- [15] 张燕琼.软硬岩交互地层水下隧道最小岩石覆盖层厚度研究[D].重庆:重庆大学, 2007.