

文章编号: 1006—2106(2010)03—0071—05

水底隧道最小安全顶板厚度的确定方法^{*}

晏才彬 周 玮^{**}

(中铁二局股份有限公司, 湖南 衡阳 421600)

摘要: 研究目的: 以工程类比和数值分析为基础, 提出确定水下隧道最小岩石覆盖厚度的方法, 供同类工程参考。

研究结论: (1) 挪威经验曲线方法最简便, 适合工期紧迫时地质勘察前期的初步判断, 但结果偏于保守, 还需后续阶段进行更详细经济论证; (2) 隔水岩柱经验公式能较准确地确定水下隧道最小顶板厚度, 在地质详勘探明地质条件之后, 可作为一定的参考依据; (3) 数值分析所得到的结果最为精确, 但要求苛刻。数值分析需要在工况场地条件、工程地质条件和水文地质条件等外在条件完全确定的条件下, 才能建立较好的还原施工现状的模型。故可作为最后的判据参考。

关键词: 水下隧道; 顶板厚度; 工程类比; 数值分析

中图分类号: U45 文献标识码: A

Method for Determining the Minimum Security Coving Thickness of Sub-aqueous Tunnel

YAN Cai-bin ZHOU Wei

(China Railway No.2 Engineering Group Co., Ltd., Hengyang Hunan 421600 China)

Abstract: Research purposes: Based on the engineering analogy and numerical analysis, the method is offered for determining the minimum security coving thickness of sub-aqueous tunnel for offering the reference to the similar works.

Research conclusions: (1) The Norwegian Experience Curve Method is the simplest and the most easy and it is suitable for the primary determination at the early stage of geological survey while the construction period is pressed, but its result is conservative and needs to be economically verified at later stage. (2) The Water-resisting Rock Column Experience Formula can accurately determine the minimum security coving thickness and its result can be as the reference after the geological condition is well known. (3) The result obtained with numerical analysis is the most accurate, but the numerical analysis needs lots of certain conditions. Only when the external conditions, such as working condition, engineering geological condition and hydrogeologic condition are determined, can establish the model for returning the original construction condition, so its result can be as the reference to the final determination.

Key words: sub-aqueous tunnel; coving thickness; engineering analogy; numerical simulation

随着我国隧道修建技术的快速发展和交通需求量的日益增大, 高速公路隧道的建设规模越来越大。但近年来, 伴随环保意识的增强, 要求严格控制对环境的破坏性影响程度, 即需要在保护和利用自然环境、人文

景观的同时, 还需综合考虑路线总体线型和工程造价等因素, 大量涌现了水下隧道方案。水下隧道多适用于城市隧道, 布线严格受限制的地段, 且能减少洞口边坡加固工作量。同时可保持线路线型流畅, 减少拆迁。

^{*} 收稿日期: 2010-01-22

^{**} 作者简介: 晏才彬, 1976年出生, 男, 工程师; 周玮, 1978年出生, 男, 工程师。

在我国水下隧道顶板安全厚度的出现和研究较晚,目前还没有明确的规范,仍处于探索研究阶段。近年来,国内不少学者和研究人员做了大量的研究工作。李术才教授等就厦门海底隧道的设计过程中应用工程类比和数值计算方法对其最小顶板厚度的设计做了专门研究;孙钧就水下隧道的施工及设计关键技术作了深刻的论述,介绍国内外跨海隧道工程建设现况及其设计施工和研究特色,论述海床基岩工程地质、水文地质特征与综合地质勘察,对影响水下隧道最小覆盖层厚度、隧道最小埋置深度进行讨论,并就施工探水与治水、隧洞围岩防塌险情预报与预警、围岩稳定性评价,以及施工期对隧道支护原设计参数的调整与修正等问题做了分析与探讨;王梦恕对水下隧道最小岩石覆盖层厚度、水压力设计值的确定,衬砌结构断面优化与防排水方案,穿越海底不良地质地段断层、溶槽的施工措施及服务隧道设置的必要性问题进行了分析,提出应从围岩稳定性和隧道涌水量的大小综合考虑最小岩石覆盖层厚度,采用限量排放的防排水方案对水下隧道较为适宜。但这都是针对海底隧道即硬质围岩条件下水下隧道顶板厚度的研究,对于市政过江隧道安全顶板厚度的研究报道很少,特别是在软弱围岩条件下鲜有听闻。

基于此,本文依托某过江隧道,对国内外水下隧道顶板最小安全厚度的确定方法进行了分类对比,得出了软弱围岩条件下水下隧道安全顶板厚度的3种较可靠的确定方法,对于指导隧道结构设计和施工,提高隧道工程质量,降低工程费用等均有重大的现实意义。

1 水下隧道顶板最小安全厚度的影响因素

水下隧道顶板合理安全厚度的影响因素比较复杂,既有水体对岩土体的渗透和弱化作用等内在因素,又有开挖和注浆等人为的外在因素,其影响相互干扰,同时复杂多变的地质、水文条件也给水下隧道安全顶板厚度的确定带了诸多困难与难以想象的麻烦。经过分析,水下隧道安全顶板厚度的影响因素主要有:

1.1 内因

内因主要包括岩体的物理力学性质,岩层产状与节理裂隙状况,岩层的断层变化与岩体的完整程度,岩层结构与其他,隧道顶板跨度及基岩裸露情况等。

1.2 外因

外因主要包括开挖爆破扰动,水体深度,地球自震与爆破振动影响,岩层的隔水性能与流固耦合作用影响等。

2 水下隧道顶板最小安全厚度的确定方法

当前的水下隧道最小安全厚度确定方法多半为半定量法,进行了过多的人为简化与抽象,而不能全面地客观反映水下隧道的应力应变状态与岩体特征及其破坏扩展状况,所以分析的结果可靠性受到很大限制。鉴于此,通过对国内外水下隧道修建技术的总结归纳,得出在考虑施工技术、工程造价以及地质条件等各种因素的基础上,水下隧道最小安全顶板厚度的确认方法主要有:日本的最小涌水量法,挪威经验曲线,顶水采煤经验,隔水岩柱经验。

2.1 日本的最小涌水量法

京都大学小林博士针对关门隧道海底部分渗漏水等进行了预测,并提出了渗水量的方程式。

对于拟建隧道,水深 H 隧道半径 r 和隧道长度 L 为既定值,则最小岩石覆盖厚度与水深、隧道半径之间的关系式为:

$$h = \frac{10}{2} \frac{H}{r} \quad (1)$$

式中 h ——岩层覆盖厚度 (m);

H ——水深 (m);

r ——隧道半径 (m)。

2.2 挪威的经验曲线

挪威在过去30年里修建了40条海底隧道,积累了丰富的经验,形成了被称为“挪威海底隧道概念”的一整套技术。提出典型的挪威海底隧道衬砌是按不承受外水压力的排水结构设计,结构本身由作为支护的喷锚结构和自立的防水防冻的内衬砌组成。而最小顶板安全厚度的确定,需在兼顾隧道安全和造价的同时,还要根据岩石条件、稳定要求、渗水量等充分论证。其中享有盛誉的要数挪威专家 Nilsen Blindheim 总结归纳出的一条挪威经验曲线——通过对已建的海底隧道最小岩石覆盖厚度进行的统计分析,得到的海底隧道最小岩石覆盖与基岩深度的对应关系曲线如图1所示。

根据挪威经验曲线,最小顶板安全厚度与岩石强度和基岩以上水深有关,岩石强度高,基岩以上海水浅,顶板安全厚度可以降低。此外,顶板安全厚度还与灌浆压力有关,要保证预灌浆质量,必须用足够高的压力,而高灌浆压力则要求足够的岩石覆盖厚度。在挪威,海底隧道最小顶板安全厚度的确定通常用工程类比法,凭经验确定。考虑到输入数据的不准确性,很少进行理论分析和数值计算。

2.3 顶水采煤经验公式

地表水和松散含水层下开采的核心问题就是确定

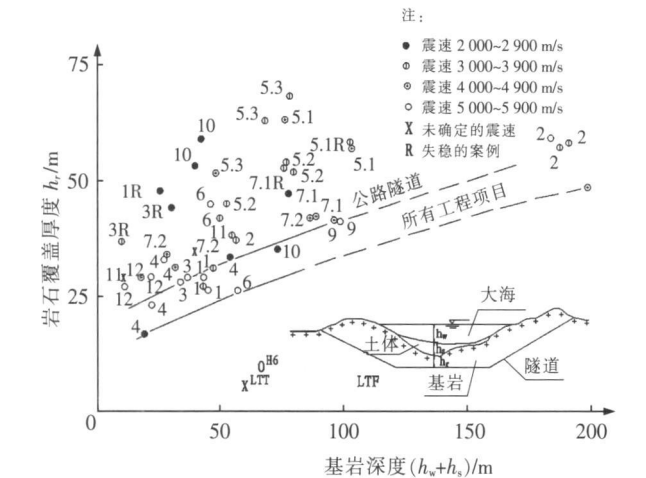


图 1 世界主要海底隧道与挪威海底隧道最小岩石覆盖对比

合理的开采上限,或者说就是确定合理的安全开采深度。这样留设安全煤柱,既要保证水下的安全开采,又要减少留设煤岩柱而造成的资源浪费,即达到既经济又安全的目的。这一点在水下隧道最小安全岩土覆盖层厚度的确定有异曲同工之处,值得借鉴。目前国内主要采用 3 种安全煤岩柱:安全防水煤岩柱、安全防砂煤岩柱、安全防塌煤岩柱。根据水下隧道的特点及工程要求,主要借鉴采煤中的安全防水煤岩柱的经验。

2 3 1 基岩直接裸露时的开采上限

基岩直接裸露,水下没有冲积层时如图 2 所示。

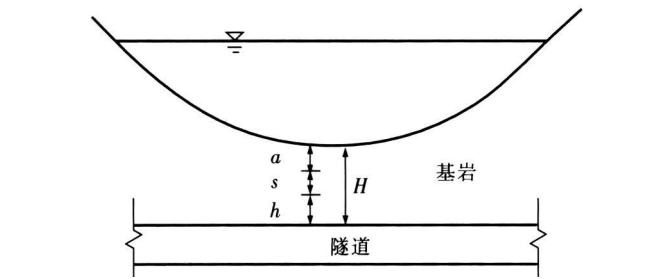


图 2 基岩直接裸露剖面示意图

图 2 中:

$$H = a + s + h \quad (2)$$

- 式中 H ——开采上限高度 (m);
 a ——表面裂隙深度 (m), 基岩经验值取 10 ~ 15 m;
 s ——保护层厚度 (m);
 h ——爆破引起的扰动高度 (m)。

2 3 1.1 保护层厚度 s 的确定

根据多年的煤矿开采经验,推导出的经验公式为:

$$s = 1.5 \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{f}} + c \quad (3)$$

- 式中 h_1 ——水头高度 (m);
 h_2 ——坑道宽度 (m);

- c ——为岩层强风化带厚度,一般取 5 m;
 f ——为普氏强度,查表或取样试验获得。

2 3 1.2 导水裂隙带高度 l 的确定

由岩石爆破力学有:

$$h = k \cdot w \cdot \sqrt[3]{F(n)} \quad (4)$$

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

2 3 2 基岩顶部有沉积岩层时的开采上限

当基岩顶部有沉积层时如图 3 所示。

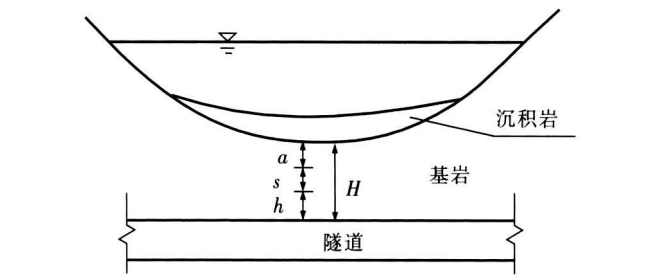


图 3 基岩顶部有沉积岩剖面示意图

图 3 中:

- $H = a + s + h$
当沉积岩厚度大于 5 m 时 a 取为 0;
当沉积岩层为相对隔水层时,其厚度可考虑在 s 值之内,即 $H = s + h$ 保护层厚度 s 之内包括隔水层厚度。

2 4 隔水岩柱经验公式

目前国内外对合理确定隔水岩柱尚无成熟的理论与规范可供借鉴。根据国内相关经验及大量水下隧道实践总结,提出了经验公式 (5)。

隔水岩柱经验公式:

$$h \geq \frac{1}{f} \left[\frac{B}{2} + H \tan \left(45^\circ - \frac{\theta}{2} \right) \right] + h_p \quad (5)$$

- 式中 h ——隔水岩柱高 (m);
 h_p ——保护层厚度 (m), 根据具体条件确定, 借鉴国内部分煤矿水下采煤经验, 一般大于 10 m;
 f ——岩石硬度系数;
 B ——隧道开挖宽度 (m);
 H ——隧道开挖高度 (m);
 θ ——岩石内摩擦角。

需要明确的是, 隔水岩柱厚度不能将江底的风化带及裂隙发育的冲积层视作隔水层, 否则会给施工带来很大的危害。

2 5 数值分析

根据隧道顶板安全厚度确定原则、荷载施加方式、

边界条件给定办法、土体和衬砌的破坏准则、土体—衬砌相互作用接触单元类型、以及土体和衬砌结构的变形本构关系、材料非线性力学性能等的优选,运用断裂损伤和流固耦合等有关理论,对软弱围岩条件下不同顶板厚度的水下隧道掘进施工进行数值模拟,综合分析得出水下隧道最小安全顶板厚度。

2 5 1 模型的建立

本文以某水下隧道为例。隧道采用矿山法施工,围岩设计级别Ⅴ级,隧道覆盖厚度分别取 10 ~30 m,隧道断面宽度 12 m,高度 10.4 m。围岩单元采用六面体单元,初支和二衬单元采用壳单元,隧道开挖过程中的临时支护采用梁单元。根据锚杆在低级别围岩中的作用原理,用提高围岩加固区 φ 值的方法对锚杆进行等效处理。模型边界条件均采用位移边界条件,上边界为自由面,两侧及底边均受法向约束。计算模

型网格如图 4所示,计算软件采用 FLAC^{3D}。

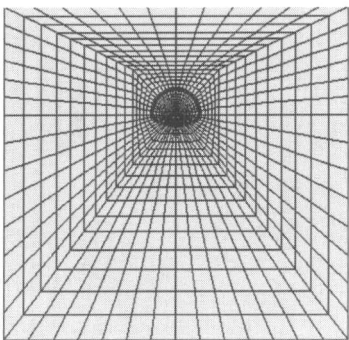


图 4 计算模型网格图

依据工程现场地质勘查资料,得到岩层岩性及隧道围岩初始力学参数如表 1所示。根据隧道实际结构设计,隧道初支为 25 cm C20素混凝土,二衬为 50 cm C25钢筋混凝土,具体隧道支护体系的物理力学参数取值见表 1所示。

表 1 各岩层物理力学参数

岩层	厚度 /m	岩性	重度 /(kN· m ⁻³)	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 ρ_{hi} /(°)	体积模量 K /MPa	剪切模量 G /MPa	泊松比
1	10	粘土	20	50	30	4.5	1.7	0.40
2	15	强风化砾岩	22	45	30	208	119	0.35
3	35	中风化砾岩	23	45	30	500	230	0.26

2 5 2 屈服流动准则

本文在数值模拟计算过程中采用 Mohr—Coulomb模型,该模型的破坏包络线对应于 Mohr—Coulomb判据(剪切屈服函数)加上拉伸分离点(拉应力屈服函数),与拉应力流动法则相关联,而与剪切流动法则不相关联。

Mohr—Coulomb剪切屈服函数为:

$$\tau = \sigma_1 - \sigma_3 N + 2c \sqrt{N}$$
(6)

Mohr—Coulomb拉应力屈服函数为:

$$\tau = \sigma^t - \sigma_3$$
(7)

式中 σ^t ——抗拉强度; $N = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$ 。

Mohr—Coulomb模型的流动法则通过三维应力空间中中边界附近的混合屈服函数定义:

$$h = \sigma_3 - \sigma^t + \alpha^p (\sigma_1 - \sigma^p)$$
(8)

其中: $\alpha^p = \sqrt{1 + N^2} + N$,

$$\sigma^p = \sigma^t N - 2c \sqrt{N}.$$

2 5 3 数值结果分析

通过函数回归分析,得出隧道临界埋深 13.8 m,隧道在台阶法开挖得到围岩应力场、位移场。台阶开挖以后,水平方向有效应力最大值为 2.6 MPa,出现在

拱顶附近,而竖直方向有效应力最大值为 1.5 MPa,出现在台阶拱脚处,均为压应力。位移沉降最大值为 22 mm,为拱顶下沉。

3 几种计算方法的结果对比

通过数值模拟和以上理论计算所得结果如表 2所示。

表 2 几种确定方法的比较

参数 方法	断面尺寸		水深 /m	最小安全顶板厚度	
	跨度 /m	高度 /m		计算值 /m	实际值 /m
日本最小涌水量法	10.4	8.8	37	27.3	14.0
挪威经验曲线	10.4	8.8	37	30.0	
顶水采煤经验公式	10.4	8.8	37	27.6	
隔水岩柱经验公式	10.4	8.8	37	16.6	
数值分析	10.4	8.8	37	13.8	

附注 (1) 上层为卵石层,下层为强风化砾岩;
(2) 河底基层为中风化砾岩;
(3) 水深取历年最高洪水位

4 结论

针对水下隧道修建的高风险性, 隧道顶板的最小安全厚度是隧道建筑经济和安全的一项重要指标。基于工程类比和数值分析, 本文通过 FLAC^{3D}对拟建隧道进行了数值模拟计算并结合日本最小涌水量方法、顶水采煤方法、隔水岩柱经验公式和挪威经验曲线等方法进行了综合分析, 得出以下结论:

(1) 挪威经验曲线方法最简便, 适合工期紧迫时地质勘察前期的初步判断, 但结果偏于保守, 具体还需后续阶段进行更详细的经济论证。

(2) 隔水岩柱经验公式能较准确地确定水下隧道最小顶板厚度, 在探明地质条件后, 可作为一定的参考依据。

(3) 数值分析所得到的结果最为精确, 但要求苛刻。数值分析需要在工况场地条件、工程地质条件和水文地质条件等外在条件完全确定的条件下, 才能建立较好的还原施工现状的模型。故可作为最后的判据参考。

(4) 结合工程实例, 运用本文方法成功确定了某隧道最小岩石覆盖厚度, 其分析结果被设计院所采纳。

参考文献:

- [1] Itasca公司. FLAC^{3D} 3.0版用户手册 [K]. 美国: Itasca公司, 2005: 22—29.
Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D}, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.00 User's Manual [K]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 2005: 22—29.
- [2] JTCD 70—2004 公路隧道设计规范 [S].
JTCD 70—2004 Design Specification of Highway Tunnel [S].
- [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(11): 2289—2295.
Li Shucai, Li Shuchan, etc. Study on Determination Method of Minimum Rock Cover of Sub-sea Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(11): 2289—2295.
- [4] 王梦恕, 皇甫明, 等. 海底隧道修建中的关键问题 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005(4): 1—4.
Wang Mengshu, Huang Fuming, etc. Key Problems on Sub-sea Tunnel Construction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005(4): 1—4.
- [5] 孙钧, 等. 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(8): 1513—1521.
Sun Jun, etc. Discussion on Some Key Technical Issues for Design and Construction of Undersea Tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(8): 1513—1521.
- [6] 张明平, 徐园园, 等. 海底隧道最小安全顶板厚度优化决策研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2008(1): 14—18.
Zhang Mingping, Xu Yuanyuan, etc. Research on the Optimized Decision-making Method of the Least Security Covering Thickness of Sub-sea Tunnel [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008(1): 14—18.
- [7] 吕明, 丁万涛, 等. 挪威海底隧道经验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(23): 4219—4225.
Lv Ming, Ding Wantaop, etc. Norwegian Experience in Sub-sea Tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(23): 4219—4225.
- [8] 王刚. 裂隙岩体海底隧道最小岩石覆盖厚度研究 [D]. 山东: 山东科技大学, 2005.
Wang Gang. Study on Rock Cover of Sub-sea Tunnel in Jointed Rock Mass [D]. Shandong University of Science and Technology, 2005.
- [9] 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.
Zhang Yanqiong. Study on Rock Cover of Sub-sea Tunnel Meeting the Alternately Layers of Soft and Hard Rocks [D]. Chongqing Chongqing University, 2007.