

# 青岛小间距海底隧道施工优化的有限差分分析

蔚立元, 李术才, 徐帮树

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 介绍青岛胶州湾湾口海底隧道的工程概况和国内小间距隧道的研究现状。由位于断层破碎带  $f_{3-1}$  中的典型断面 ZK5+607 的几何参数和地质资料构建三维尺寸为 215.0 m×86.1 m×100.0 m 的数值计算模型, 考虑混凝土衬砌, 而钢拱架则以等效方法折算给混凝土衬砌。根据各条隧道开挖支护施工步的空间时间关系、工作面开挖方法、掘进进尺、各掌子面空间间距和覆盖层厚度等多种因素制定 12 种施工方案并用 FLAC<sup>3D</sup> 进行相应的三维数值计算。分析特定方案下 3 条隧道工作面后拱顶下沉量随与相应掌子面距离逐渐增大时的变化曲线后得到有益于施工和现场监测的结论。通过对比各方案的隧道工作面拱顶下沉量、衬砌最大压应力、相互扰动情况以及塑性区体积等因素, 对施工方案进行优选。给出多个覆盖层厚度情况的对比, 从而验证覆盖层厚度建议值的合理性。最后, 通过分析小间距隧道施工相互扰动程度最大断面的服务隧道洞周关键点的位移和最大主应力的分布情况, 明确施工、监测中应该重点关注的部位。

**关键词:** 隧道工程; 小间距海底隧道; 施工方案优选; 覆盖层厚度; 相互影响; 拱顶下沉量; 塑性区体积

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 2 - 3564 - 07

## FINITE DIFFERENCE ANALYSIS FOR CONSTRUCTION OPTIMIZATION OF LITTLE DISTANCE SUBSEA TUNNELS IN QINGDAO CITY

YU Liyuan, LI Shucui, XU Bangshu

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract:** The subsea tunnel engineering that lies at Jiaozhou Bay in Qingdao is introduced, as well as the research status of little distance parallel tunnels in China. The section ZK5+607 which is located in the fault  $f_{3-1}$  is chosen as a typical cross section, and a three-dimensional model(215.0 m×86.1 m×100.0 m) for numerical analysis is established according to geometrical parameters and geological information of the typical cross section. The concrete lining is considered while the rigid arch is converted into concrete lining through a equivalent mode. 12 construction schemes are constituted according to the space temporal relationship between construction steps, the excavating method, the length of drive cycle, the space distance among each working face and the overburden thickness of each tunnel. Then these schemes are simulated with FLAC<sup>3D</sup> program. The spacial curves of vault sinkage values after working faces for a given scheme are studied, and some conclusions and suggestions which will benefit construction and survey are obtained. By analyzing vault sinkage values of working faces, the maximum principal stresses in concrete lining, as well as the disturbance of neighborhood tunnels and volumes of plastic zones, the reasonable scheme is chosen. The rationality of recommendatory thickness of overburden is validated via contrasting five cases of overburden thickness. Eventually, in order to definitude the positions of the maximal construction interaction cross section that should be concerned in construction and monitoring,

**收稿日期:** 2008 - 05 - 15; **修回日期:** 2008 - 08 - 02

**基金项目:** 国家自然科学基金国际合作项目(50820135907); 国家杰出青年科学基金项目(50625927)

**作者简介:** 蔚立元(1982 -), 男, 2005 年毕业于山东大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道稳定性数值分析和监控量测方面的研究工作。E-mail: yuliyuan@mail.sdu.edu.cn

displacements of key points along the ministrant tunnel and distributing of major pricinple stress are given.

**Key words:** tunneling engineering; little distance subsea tunnels; construction scheme optimization; overburden thickness; interaction; vault sinkage value; plastic zone volume

## 1 引 言

青岛胶州湾湾口海底隧道全长为 6.17 km, 穿越海域段为 3.3 km。大部分海域基岩裸露, 线路纵断面发育多条断层破碎带, 断层破碎带上覆基岩全风化、强风化层较厚。行车隧道为左右线设置, 左右线隧道中线间距为 55 m, 在左右线隧道间平行设置服务隧道(接线隧道不设置服务隧道)。行车隧道毛洞洞高为 12.2 m, 洞跨为 16.1 m; 服务隧道毛洞洞高为 7.35 m, 洞跨为 7.1 m。毛洞开挖后行车隧道与服务隧道之间的最小净距为 15.9 m, 小于  $1 B(B = 16.1 \text{ m}$  为行车隧道的洞跨), 根据相关规范<sup>[1]</sup>规定为小净距隧道。

小净距隧道开挖支护引起 2 隧道间岩土体的移动方向不一样, 相互影响作用剧烈, 较之标准分离式隧道, 应力重分布更加复杂, 多次扰动使得围岩容易发生失稳, 因此特别需要研究以找到合理的开挖支护方法。在我国, 小间距隧道的出现和研究较晚, 目前还没有较明确的规范, 仍处于边施工边探讨的总结阶段, 理论研究滞后于工程建设需求的发展<sup>[2~4]</sup>。近年来, 国内工程技术人员和相关学者对此做了大最的研究工作, 如: 肖正勤等<sup>[5, 6]</sup>对小间距隧道的施工技术进行了探讨和总结; 张玉军等<sup>[7]</sup>用二维、三维黏弹塑性有限元分析方法, 对京珠国道粤境沿线近距离双隧道开挖与支护问题进行了研究; 荆春燕等<sup>[8]</sup>对小间距隧道在洞口偏压和 2 个洞口有错台的情况下进行施工动态监测和平面数值模拟分析, 重点研究了 2 个隧道中夹岩体的稳定性; 刘胜利等<sup>[9]</sup>采用有限元数值方法, 对复杂地质条件下小间距双线城市交通隧道的围岩稳定特征进行了分析研究; 王明年等<sup>[10]</sup>通过有限单元法和模型试验对软岩 3 孔小间距平行隧道浅埋隧道施工力学行为进行了细致研究分析; 蔡小林等<sup>[11]</sup>认为对于近距离双孔平行隧道, 2 隧道相互之间的影响, 不仅与围岩类别、隧道间距、开挖和支护方式有关, 而且不同的开挖顺序, 会有不同的结果; 凌昌荣和张力新<sup>[12]</sup>以偏压隧道为背景将有限元数值模拟结果和楔体结构模型计算结果进行对比分析, 得到了关于小间距

隧道荷载结构计算模型的几条结论; 吴波等<sup>[13]</sup>针对深圳地铁小间距隧道工程, 以地表沉降为控制目标, 对不同的施工方案以及开挖路径、不同台阶长度的施工效应进行了优化分析, 并对该工程进行了施工过程的动态三维仿真分析; 李云鹏等<sup>[14]</sup>从不同围岩类别发, 对 3 车道小间距隧道采用典型双侧导坑法的开挖施工过程进行数值模拟研究, 比选出了 3 车道隧道中隔墙最小间距的工程设计参考值。还有不少学者对小间距隧道进行了许多有意义的研究工作, 并取得了一些很有应用价值的研究成果。尽管如此, 对小间距问题目前仍然处于探索研究阶段, 尤其是海底小间距隧道方面的研究鲜有报道, 而且海底隧道的地质荷载条件比山岭隧道复杂的多, 因此青岛海底隧道施工相互影响分析的工作是非常有必要的。

本文根据地质条件、隧道尺寸及施工方案等资料, 建立合适的模型, 采用岩土工程界通用的大型有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>, 开展真三维数值模拟来分析小间距隧道施工的相互影响程度, 对施工方案进行了优选。FLAC<sup>3D</sup>(三维连续体快速拉格朗日分析)采用了混合离散方法、动态松弛方法和显式差分方法, 不形成刚度矩阵; 适合于模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏和塑性流动的力学行为; 适合于模拟地质材料的大变形、失稳、动力、流变、支护及加固、建造及开挖等问题。这些优点使其可以灵活地模拟多种隧道的开挖支护方式, 进而研究邻近隧道施工的相互影响。

## 2 计算方案和参数

### 2.1 计算模型及边界条件

以隧道穿越断层破碎带  $f_{3-1}$ (见图 1)的部分作为研究对象, 选择位于其中的断面 ZK5+607 为典型断面。该断面围岩级别为 IV 级, 海水深度为 43.6 m(按最大高潮海水位+3.1 m), 建议的覆盖层厚度为 27 m。为建立数值模型选取的该横断面的计算尺寸如图 2 所示。为了进行真三维施工情况的模拟以及考虑隧道开挖掌子面的端部效应, 选取以典型断面 ZK5+607 为中面的 100 m 的里程段 ZK5+557~

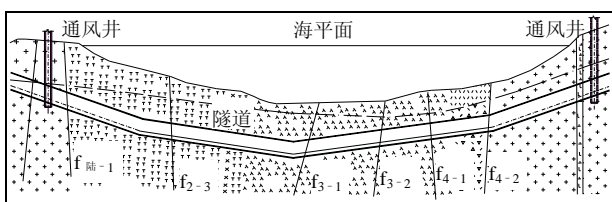


图1 胶州湾海底隧道纵断面地质图

Fig.1 Longitudinal section geological chart of Jiaozhou Bay subsea tunnel

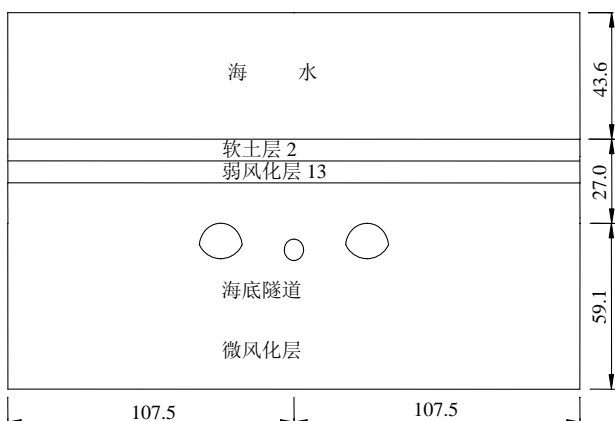


图2 断面 ZK5+607 尺寸示意图(单位: m)

Fig.2 Sketch of sizes for cross-section ZK5+607(unit: m)

ZK5+657 为计算区域。根据设计阶段所提供的地质资料, 在计算范围内的围岩, 按其物理力学性质分为 3 层即软土层、弱风化层和微风化(基岩)层。由于海底面和各地质分层界面比较平坦, 隧道纵向坡度也很小(见图 1)。可以把图 2 的图形沿垂直纸面的 Z 轴拖拉 100 m 建立数值模型如图 3 所示。隧道附近采用小尺寸单元进行了加密, 模型共有 173 961 个节点, 166 200 个单元。

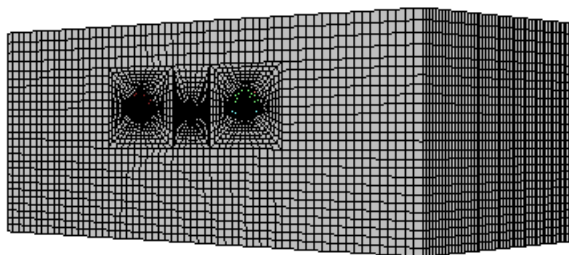


图3 海底隧道计算模型

Fig.3 Calculation model of subsea tunnel

由于海水黏性对海底面的影响可略去不计<sup>[15]</sup>, 故模型上表面为施加海水质量的应力边界, 而 4 个侧面和底面设置法向约束。6 个边界在未开挖时都是固定孔隙水压力条件, 而在隧道已开挖完条件下计算时, 掌子面的孔隙水压力为 0。

## 2.2 计算参数

围岩物理力学参数沿隧道走向变化不大, 故计算中可以采用断面 ZK5+607 的围岩参数见表 1。围岩材料采用实体单元模拟, 力学模型为莫尔-库仑模型。服务隧道的衬砌采用强度等级为 C40 的钢筋混凝土, 而主隧道的衬砌采用强度等级为 C50 的钢筋混凝土。钢筋混凝土衬砌属于壳体结构, 但其  $t/R$  值( $t$  为壳体厚度,  $R$  为壳体中面的最小曲率半径)分别为 0.15(服务隧道  $t = 0.65$  m,  $R = 4.26$  m)和 0.11(主隧道  $t = 0.85$  m,  $R = 7.83$  m), 远大于薄壳理论的适用范围  $t/R \leq 0.05$ , 因此衬砌应当作一般空间问题<sup>[16]</sup>, 采用实体单元来模拟, 力学模型为各向同性弹性体模型。钢拱架的作用应用等效方法予以考虑, 即将钢拱架弹性模量折算给混凝土, 其计算方法<sup>[13]</sup>为

$$E = E_0 + S_g E_g / S_c \quad (1)$$

式中:  $E$  为折算后混凝土弹性模量,  $E_0$  为原混凝土弹性模量,  $S_g$  为钢拱架截面积,  $E_g$  为钢材弹性模量,  $S_c$  为混凝土截面积。混凝土的容重也进行相似的等效。折算后的衬砌计算参数如表 2 所示。锚杆和钢筋网没有进行模拟, 其加固效果作为安全储备考虑。海水、围岩及衬砌自重为计算中主要荷载, 侧压力系数按勘测设计资料取为 0.8。

表1 围岩材料计算参数

Table 1 Calculation parameters of surrounding rock

地层	容重 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性 模量 /GPa	泊 松 比	黏 聚 力 /MPa	内 摩 擦 角 /( $^\circ$ )	厚度 /m	抗拉 强度 /MPa	孔隙 率	渗透系数 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
软土层	20.6	0.73	0.35	0.02	15	2.0	0.20	0.38	$20.0 \times 10^{-5}$
弱风化 层	22.2	7.20	0.33	1.44	24	13.0	0.48	0.10	$8.0 \times 10^{-5}$
基岩层	25.8	13.20	0.29	3.03	30	71.1	1.01	0.02	$0.5 \times 10^{-5}$

表2 海底隧道衬砌计算参数

Table 2 Calculation parameters of lining of subsea tunnel

混凝土强度 等级	弹性模量/GPa	泊松比	容重( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	厚度/m
C40	34.6	0.2	24.42	0.65
C50	36.5	0.2	24.38	0.85

## 2.3 施工顺序模拟

在海底隧道施工中服务隧道总是先于主隧道开挖, 由于服务隧道断面较小, 可以采用全断面开挖法, 而断面比较大的主隧道则可以根据地质条件采用全断面法或者上下台阶法开挖。为了模拟真实施

工情况, 本次计算中首先建立隧道未开挖时的模型, 通过程序计算围岩在自重作用下的初始位移  $\{u\}^0$ 、应力  $\{\delta\}^0$ , 然后把位移场设置为 0, 对 3 个隧道进行开挖支护, 形成初始开挖条件, 得到位移  $\{u\}^1$ 、应力  $\{\delta\}^1$ , 最后再把位移场设置为 0, 进行一个掘进进尺的开挖得到位移  $\{u\}^2$ 、应力  $\{\delta\}^2$ , 并进行重点分析。最终的位移场  $\{u\}^2$  与  $\{u\}^0$ ,  $\{u\}^1$  没有任何关系, 不是二次位移场, 只是由开挖一个掘进进尺引起的; 而应力场  $\{\delta\}^2$  则是有  $\{\delta\}^0$ ,  $\{\delta\}^1$  发展而来的, 是二次应力场。

为了对多种施工情况进行分析优选, 确定了多种初始开挖条件。为了便于说明, 先介绍其中一种初始条件如图 4 所示: 服务隧道开挖 70 m, 支护 50 m; 左线隧道上台阶开挖 60 m, 下台阶滞后 10 m, 支护 30 m; 右线隧道上台阶开挖 50 m, 下台阶滞后 10 m, 支护 20 m。

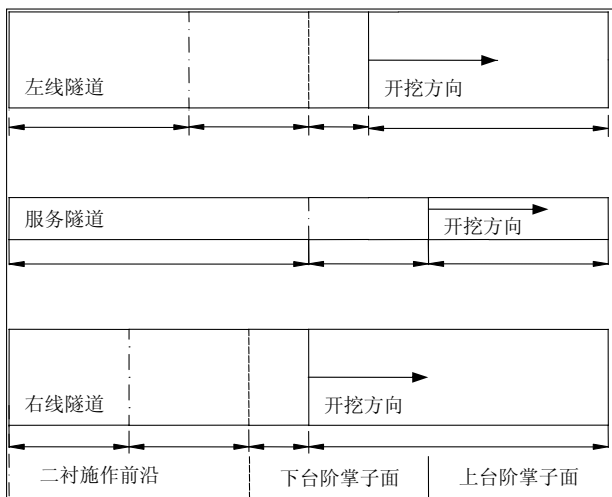


图 4 空间异步初始开挖条件示意图

Fig.4 Schematic diagram of spacial asynchronism initial condition

### 3 计算结果分析及施工方案优选

#### 3.1 施工方案初选

图 4 所示的初始开挖条件由于左右线隧道开挖支护不同步, 可以称为空间异步, 相应的空间同步初始条件为: 左右线隧道开挖支护相同, 即上台阶开挖 60 m, 下台阶滞后 10 m, 支护 30 m, 而其他条件不变。

先把掘进进尺定为 2 m, 在进行一个掘进进尺开挖时, 各断面同时开挖称为时间同步条件, 相应的时间异步条件的施工步顺序为: 服务隧道全断面→

左线隧道上台阶→左线隧道下台阶→右线隧道上台阶→右线隧道下台阶, 各施工步之间进行 100 个时步的迭代计算。这样就有 4 种计算方案: 方案 1, 空间异步时间同步; 方案 2, 空间同步时间同步; 方案 3, 空间异步时间异步; 方案 4, 空间同步时间异步。

选取各隧道已开挖段的拱顶为关键点进行分析, 从掌子面开始每 2 m 一个。先分析方案 1, 图 5 所示为各拱顶下沉量随与相应掌子面距离逐渐增大时的变化曲线。

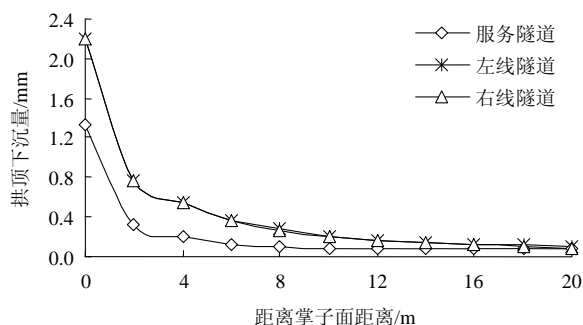


图 5 方案 1 各拱顶下沉量空间变化图

Fig.5 Spacial curves of vault sinkage value for scheme 1

从图 5 中可以看出:

(1) 各隧道拱顶下沉量随与掌子面距离的增大而迅速衰减, 10 m 后的下沉量值已经很小, 并且掌子面的下沉量非常大, 因此监控量测工作必须紧跟掘进面, 及时布置监测断面。

(2) 左右线隧道的变化情况基本一致, 且掌子面后 10 m 范围内比服务隧道的下沉量大, 前者约为后者的 2 倍。这是由于主隧道开挖面面积比服务隧道大引起的, 从而说明各隧道的二次位移场主要是由于本隧道开挖引起的, 邻近隧道开挖的影响并不大。

分析计算结果可以发现, 小间距隧道施工的相互影响主要体现在服务隧道关键点下沉量在随与掌子面距离变大而衰减的过程中出现了明显的波动, 发生在 14~22 m 的范围内, 是由左右线隧道的开挖引起的。各方案的扰动情况如图 6 所示。

把各方案扰动曲线上波峰位置的下沉量称为  $u^1$ , 而波峰前的波谷下沉量为  $u^2$ , 则可以定义扰动率  $R$  为

$$R = (u^1 - u^2) / u^2 \tag{2}$$

各计算方案的掌子面拱顶下沉量、衬砌最大压应力、扰动率以及塑性区体积见表 3(每条隧道栏里

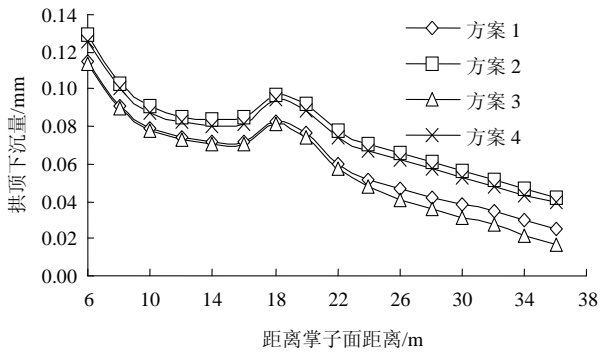


图6 服务隧道拱顶下沉量扰动曲线

Fig.6 Disturbance curves of vault sinkage value of service tunnel

的 2 项依次为掌子面拱顶下沉量和衬砌最大压应力, 表 4, 5 相同)。从中可以看出各方案的掌子面拱顶下沉量、衬砌最大压应力变化不大; 并且最大压应力值很小, 混凝土衬砌不会开裂破坏。方案 4 的扰动率相对较大, 为 17.3%, 其他方案小于 16.0%; 方案 3 的塑性区体积比其他方案小很多。再结合图 6, 可以认为方案 3, 即空间异步时间异步的开挖方案是比较合理的, 因此实际施工时应该做好施工组织, 使各掌子面有一定的空间间距, 并且各施工步之间要有时间间隔。

### 3.2 多种因素综合比选

实际施工时各种具体条件是复杂多变的, 为了达到全面的、符合实际情况的施工方案优化选择, 必须进行多因素的计算模拟, 比如断面开挖方法、掘进进尺和各掌子面空间间距等。在已确定的方案 3 的基础上分别调整各因素得到如下初始条件的方案: 方案 5, 主隧道进行全断面开挖, 即左线隧道全断面开挖 60 m, 右线隧道全断面开挖 50 m; 方案 6, 掘进进尺增大为 4 m; 方案 7, 各掌子面的空间间距由 10 m 增大到 14 m; 服务隧道开挖 80 m, 衬砌 52 m, 左线隧道上台阶开挖 66 m, 下台阶开挖

52 m, 衬砌 24 m, 右线隧道上台阶开挖 52 m, 下台阶开挖 38 m, 衬砌 10 m; 方案 8, 各掌子面空间间距为 6 m: 服务隧道开挖 60 m, 衬砌 48 m, 左线隧道上台阶开挖 54 m, 下台阶开挖 48 m, 衬砌 36 m, 右线隧道上台阶开挖 48 m, 下台阶开挖 42 m, 衬砌 30 m。

由计算结果得到表 4, 经过分析可以发现:

(1) 各隧道全断面开挖的方案 5 要比主隧道上下台阶法开挖好, 这是因为上下台阶法开挖对围岩的扰动次数多。故在围岩自稳能力允许时要尽量采用全断面开挖, 充分利用围岩承载。

(2) 掘进进尺 4 m 的方案 6 和 2 m 的方案 3 相比, 掌子面拱顶下沉量增大 30% 左右, 塑性区增加一倍多。可见掘进进尺是施工中的重要参数, 应尽量采用小进尺开挖, 这与王明年等<sup>[10]</sup>的结论一致。

(3) 随工作面空间间距的减小, 塑性区体积增大很多, 而各掌子面拱顶下沉量、衬砌最大压应力变化不大。间距为 14 m 的方案 7 的服务隧道扰动率很大, 达到了 38.8%, 造成这种现象的原因是: 服务隧道掌子面的开挖对本隧道工作面后间距很大的断面影响较小, 而主隧道开挖是服务隧道该段拱顶下沉的主要因素。综合比较各因素, 实际施工中应注意增大各隧道掘进面的空间间距。

### 3.3 覆盖层厚度优选

海底隧道的垂直线路主要取决于隧道的限制坡度和合理埋置深度, 如果限制坡度给定, 决定隧道长度的主要参数就是合理埋置深度。覆盖厚度的确定存在一个优选的问题, 如何确定海底隧道的最小覆盖厚度, 既能确保施工期与运营期的安全与稳定, 又能保证隧道的经济性, 是一个亟待解决的问题。

在方案 3 的基础上, 只变化覆盖层厚度形成方案 9~12, 对应的覆盖层厚度分别为 21, 24, 30 和 33 m。对各方案进行对比得到表 5。

表 3 方案 1~4 各评价因素对比

Table 3 Contrast of estimating factors for scheme 1 - 4

方案编号	掌子面拱顶下沉量/mm			衬砌最大压应力/MPa			服务隧道扰动率 R/%	服务隧道塑性区体积/m <sup>3</sup>
	服务隧道	左线隧道	右线隧道	服务隧道	左线隧道	右线隧道		
1	1.34	2.20	2.19	0.528	0.557	0.556	15.5	79.19
2	1.37	2.22	2.13	0.525	0.556	0.584	15.8	77.91
3	1.34	2.20	2.20	0.528	0.557	0.556	15.7	55.46
4	1.36	2.21	2.10	0.525	0.556	0.584	17.3	71.46

表 4 方案 3, 5~8 各评价因素对比

Table 4 Contrast of estimating factors for schemes 3, 5 - 8

方案编号	掌子面拱顶下沉量/mm			衬砌最大压应力/MPa			服务隧道 扰动率 R/%	服务隧道 塑性区体积/m <sup>3</sup>
	服务隧道	左线隧道	右线隧道	服务隧道	左线隧道	右线隧道		
3	1.34	2.20	2.20	0.528	0.557	0.556	15.7	55.46
5	1.33	2.11	2.11	0.528	0.557	0.556	18.8	40.59
6	1.65	2.95	2.95	0.525	0.553	0.554	11.4	120.40
7	1.35	2.18	2.18	0.520	0.554	0.553	38.8	51.30
8	1.32	2.19	2.21	0.525	0.577	0.584	18.2	131.30

表 5 方案 3, 9~12 各评价因素对比

Table 5 Contrast of estimating factors for schemes 3, 9 - 12

方案编号	掌子面拱顶下沉量/mm			衬砌最大压应力/MPa			服务隧道 扰动率 R/%	服务隧道 塑性区体积/m <sup>3</sup>
	服务隧道	左线隧道	右线隧道	服务隧道	左线隧道	右线隧道		
3	1.34	2.20	2.20	0.528	0.557	0.556	15.7	55.46
9	1.99	3.71	3.72	0.655	0.765	0.765	7.2	92.86
10	1.82	3.91	3.90	0.596	0.100	0.710	7.9	44.68
11	2.39	4.11	4.12	0.765	0.884	0.884	4.8	268.20
12	2.59	4.42	4.43	0.820	0.947	0.947	4.2	382.40

从表 5 可以看出, 拱顶位移、衬砌最大压应力随着覆盖厚度的增加, 基本上是先减小, 后增加, 存在最小值。下沉量最小值对应的方案 3 的覆盖层厚度为 27 m, 此时的塑性区体积也比较小, 从而验证了 ZK5+557~ZK5+657 里程段覆盖层厚度建议值的合理性。此时服务隧道的扰动率比较大, 应当注意加强支护。

### 3.4 扰动波峰断面的分析

为了确定小间距隧道相互影响情况下施工中应注意的要点, 对方案 3 服务隧道扰动波峰对应的断面 ZK5+609(掌子面后 18 m)进行详细分析。服务隧道洞周关键点的位移情况如图 7 所示, 图 8 为该断面隧道周围的最大主应力等值线图(负值表示压应力)。

该断面服务隧道的位移情况是: 拱部位移比较大, 尤其是拱顶下沉量最大, 左半部的位移较右半部大, 即先开挖的左线隧道比右线隧道对服务隧道的影响要大。服务隧道的拱部、仰拱和左线隧道靠近服务隧道的右边墙出现了压应力集中的现象, 并且最大主应力值也相对较大。在实际的施工中需要对这些部位加强支护, 现场量测也需要进行重点监控。

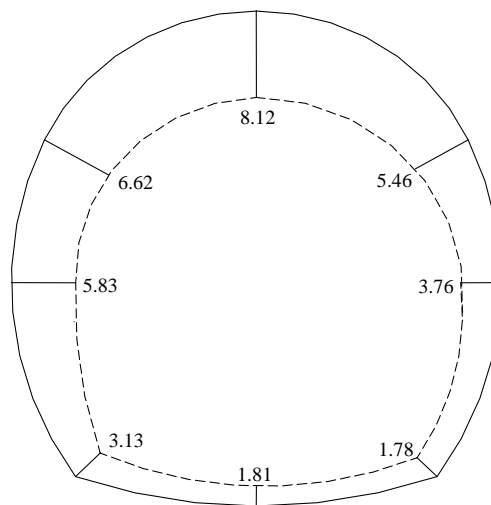


图7 服务隧道洞周关键点位移示意图(单位: 10<sup>-1</sup> mm)  
Fig.7 Schematic diagram for displacements of key points along service tunnel(unit: 10<sup>-1</sup> mm)

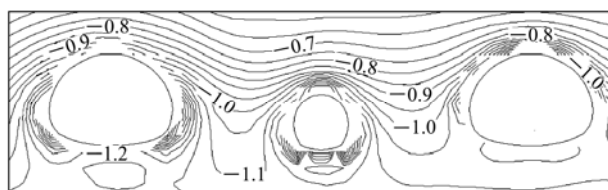


图8 ZK5+609断面最大主应力等值线图(单位: MPa)  
Fig.8 Contour map of the maximum principal stress for cross section ZK5+609(unit: MPa)

## 4 结论与建议

通过数值模拟可以看出海底小净距隧道施工时,各隧道的变形、应力和塑性区的变化主要是本隧道开挖引起的,邻近隧道开挖的影响并不大。经过分析得出以下结论:

(1) 监控量测工作必须紧跟掘进面,及时布置监测断面。

(2) 空间异步时间异步的开挖方案比较合理,实际施工时应该使各掌子面有一定的空间间距,并且各施工步之间要有时间间隔。

(3) 上下台阶法开挖对围岩的扰动大,在围岩自稳能力允许时要尽量采用全断面开挖;掘进进尺对围岩稳定性影响非常大,开挖时尽量采用小进尺;实际施工中应注意增大各隧道掘进面的空间间距。

(4) ZK5+557~ZK5+657 里程段采用 27 m 的覆盖层厚度时,关键点下沉量和塑性区相对较小,覆盖层厚度的建议值是比较合理的。

(5) 在相互影响较大的断面,服务隧道的拱部、仰拱和先行开挖主隧道的内边墙是现场施工和监测工作中应注意的部位。

## 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D70 - 2004 code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 铁道部基本建设总局. 铁道隧道新奥法指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.(Infrastructure Bureau of Railway Ministry. Directory for new austria method in railway tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988.(in Chinese))
- [3] 孙 钧. 隧道力学问题的若干进展[J]. 西部探矿工程, 1993, 5(4): 1 - 22.(SUN Jun. Some advances of tunnel mechanics[J]. West-China Exploration Engineering, 1993, 5(4): 1 - 22.(in Chinese))
- [4] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册(隧道)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.(Second Reconnaissance and Design Corporation of Railway. Ministry design manual for railway engineering (tunnel)[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [5] 肖正勤. 小间距隧道施工技术探讨[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(3): 144 - 146.(XIAO Zhengqin. Discussion on construction technology for little distance parallel tunnels[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(3): 144 - 146.(in Chinese))
- [6] 倪新兴. 小净距隧道施工技术[J]. 西部探矿工程, 2002, 14(3): 78 - 79.(NI Xinxing. Construction technology for little distance parallel tunnels[J]. West-China Exploration Engineering, 2002, 14(3): 78 - 79.(in Chinese))
- [7] 张玉军, 朱维申, 杨家岭. 近距离双隧道开挖与支护稳定性的黏弹塑性有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增2): 855 - 859.(ZHANG Yujun, ZHU Weishen, YANG Jialing. Viscidity-elastic-plastic finite element method in stability of excavation and supporting for two little distance parallel tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(Supp.2): 855 - 859.(in Chinese))
- [8] 荆春燕, 黄宏伟, 张子新, 等. 小间距隧道施工动态监测与数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 503 - 508.(JING Chunyan, HUANG Hongwei, ZHANG Zixin, et al. Dynamic monitoring and numerical simulation analysis of closely-spaced tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 503 - 508.(in Chinese))
- [9] 刘胜利, 施成华, 彭立敏, 等. 小间距隧道施工期间洞室与结构的稳定性评判[J]. 西部探矿工程, 2003, 13(3): 108 - 111.(LIU Shengli, SHI Chenghua, PENG Limin, et al. Evaluation on stability of chamber and structure of smallinterval tunnel during construction[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 13(3): 108 - 111.(in Chinese))
- [10] 王明年, 李志业, 关宝树. 3 孔小间距浅埋暗挖隧道地表沉降控制技术研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 821 - 824.(WANG Mingnian, LI Zhiye, GUAN Baoshu. Research on controlling measures for ground surface settlement of three little distance parallel shallow embedded tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 821 - 824.(in Chinese))
- [11] 蔡小林, 吴从师, SWOBODA G. 小间距浅埋隧道的支护设计探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 943 - 5 949.(CAI Xiaolin, WU Congshi, SWOBODA G. Discussion on support system between two parallel closely-spaced shallow tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 943 - 5 949.(in Chinese))
- [12] 凌昌荣, 张子新. 偏压小间距隧道荷载结构计算模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1 148 - 1 153.(LING Changrong, ZHANG Zixin. A study of computation model with load-structure method for unsymmetrically loaded closely-spaced tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1 148 - 1 153.(in Chinese))
- [13] 吴 波, 高 波, 索晓明, 等. 城市地铁小间距隧道施工性态的力学模拟与分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 84 - 89.(WU Bo, GAO Bo, SUO Xiaoming, et al. Mechanical simulation and analysis of construction behavior of urban metro tunnelling with small interval[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 84 - 89.(in Chinese))
- [14] 李云鹏, 王芝银, 韩常领, 等. 不同围岩类别小间距隧道施工过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 11 - 16.(LI Yunpeng, WANG Zhiyin, HAN Changling, et al. Simulating study on construction process of tunnels with small spacing for different classes of surrounding rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 11 - 16.(in Chinese))
- [15] 朱镜清, 周 建. 海底地震动估计的一个流体力学基础[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 87 - 93.(ZHU Jingqing, ZHOU Jian. A fluid mechanics basis for estimating undersea ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 87 - 93.(in Chinese))
- [16] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1990.(XU Zhilun. Elastic mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1990.(in Chinese))