

数值方法确定海底隧道最小岩石覆盖厚度研究

李树忱¹, 李术才², 张京伟³, 徐帮树⁴

(1. 山东大学土建与水利学院地下系, 山东 济南 250061; 2. 山东大学岩土与结构研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东省建筑设计研究院, 山东 济南 250001; 4. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 目前国内正在修建或拟修建多条海底隧道, 其中最小岩石覆盖厚度直接制约着海底隧道的安全和造价。本文根据国内外有关文献资料, 探讨了利用数值方法确定海底隧道最小岩石覆盖厚度的方法, 应用断裂损伤有限元和通用数值分析软件, 根据隧道在同一剖面处不同底板线位置, 隧道上方同一个点的位移收敛情况, 建立了确定海底隧道最小覆盖厚度的位移收敛法。通过对国内 2 条海底隧道开展的研究, 其中一条已开始施工, 总结出了数值方法确定最小岩石覆盖厚度的思路和过程。为定量确定海底隧道最小岩石覆盖厚度建立了数值分析基础, 最后应用数值方法确定某海底隧道最小岩石覆盖厚度。

关键词: 海底隧道; 最小岩石覆盖厚度; 数值方法; 位移收敛法; 断裂损伤有限元; FLAC^{3D}

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)10-1304-05

作者简介: 李树忱(1973-), 男, 博士, 副教授。主要从事计算岩土工程和地下空间稳定性理论的研究和教学工作。

Study on numerical method for the minimum rock covers of subsea tunnels

LI Shu-chen¹, LI Shu-cai², ZHANG Jing-wei³, XU Bang-shu⁴

(1. Department of Underground Space, School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Geotechnical & Structural Engineering Research Center of Shandong University, Jinan 250012, China; 3 Shandong Provincial

Architecture Design and Research Institute, Jinan 250001, China; 4. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of

Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: At present, many subsea tunnels are being constructed and planned. The safety and cost of subsea tunnels are directly restricted by the minimum rock covers. On the basis of domestic and foreign literature about subsea tunnel, the numerical methods which could obtain the minimum rock covers of the subsea tunnel were discussed. In the numerical method, using damage-fracture model and numerical analytical software, the displacement convergence criterion for the minimum rock covers of the subsea tunnel was developed. Namely, the displacement convergence condition and the allowable displacement value were discussed at the same point above the tunnel for the same cross section at the different bottom floor position. The basic idea of the numerical method to obtain the minimum rock covers of the subsea tunnels was given by investigation of two subsea tunnels. The minimum rock covers of the subsea tunnel could be determined by numerical analysis quantitatively.

Key words: subsea tunnel; minimum rock cover; numerical method; displacement convergence method; fracture-damage finite element method; FLAC^{3D}

0 引 言

目前我国在海底隧道方面也已开始筹划和建设, 除最近已开工或即将开工的厦门翔安海底隧道、青岛至黄岛海底隧道及大连湾海底隧道外, 在最近的 20~30 a 内中国正考虑建造 5 项跨海工程: 大连到烟台的渤海湾跨海隧道; 由上海到宁波的杭州海湾工程; 连接香港、澳门与广州、深圳和珠海的伶仃洋跨海工程; 连接广东和海南两省的琼州海峡跨海工程; 连接福建和台湾的台湾海峡跨海工程。“这些宏伟艰巨的工程方案可能是桥隧结合, 其中海底隧道将是主要的部分。

有许多岩土工程的课题有待解决。”这是钱七虎院士在“中国岩石(地下)工程的成就、进展和挑战”报告时指出的^[1]。

中国第一条海底隧道——厦门翔安海底工程已破土动工, 预计 2008 年建成。该隧道全长 9 km, 隧道最深在海平面下约 70 m。第二条海底隧道——青岛到黄岛海底隧道将于明年动工, 全长 5.5 km。和建桥相

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574053)

收稿日期: 2005-07-05

比, 越江跨海隧道可以不受大雾、台风等气候变化的影响, 具有稳定的运行能力和较强的抗地震能力, 还可一隧多用^[2]。

在修建海底隧道时, 最为关心的问题是海底隧道的最小埋深, 因为这个指标直接关系到修建整条海底隧道的费用和安全, 因此有必要对此进行深入研究。海底隧道的选线主要取决于隧道的坡度和最小岩石覆盖厚度, 隧道坡度一旦确定, 那么决定海底隧道长度的主要参数就是隧道的最小岩石覆盖厚度。如果最小岩石覆盖厚度过于保守, 就会增加隧道的长度, 从而增加隧道额外的修建费用。但是如果基岩条件比较差, 而岩石覆盖厚度又过于薄, 那么海底隧道就有面临严重的稳定问题和海水涌入的危险。因此, 有必要对海底隧道的最小岩石覆盖厚度进行详细研究。

目前, 挪威在修建海底隧道主要是利用工程类比法来确定最小岩石覆盖厚度, 而本文主要应用数值方法来确定最小岩石覆盖厚度。针对海底隧道最小岩石覆盖厚度, 提出了确定海底隧道最小岩石覆盖厚度的数值分析方法和基本思想。在数值计算方法中, 应用断裂损伤模型和国际通用数值分析软件, 根据隧道在同一剖面不同底板线位置, 隧道上方同一个点的位移收敛情况, 建立了确定海底隧道最小覆盖厚度的位移收敛判据。最后应用数值计算方法确定某海底最小岩石覆盖厚度。

1 利用数值分析方法确定最小岩石覆盖厚度

目前在岩土和地下工程稳定分析中, 经常用到的数值方法有有限元法和有限差分法。其中有限元法比较成熟的商用程序有 ABAQUS 和 ANSYS, 有限差分法比较成熟的商用程序主要是 FLAC。而 FLAC 主要是以岩土和地下工程稳定性为主开发的适合模拟地下工程商用程序^[3]。

通过数值分析, 要想判断围岩是否稳定及稳定的范围, 各种计算方法只是手段, 因此需要建立围岩稳定的失稳判据, 以表明岩体处于何种状态。目前的围岩稳定判别方法较多, 可以大体归纳为以下 2 类^[4]:

(1) 围岩强度判据。这一类主要是以应力状态的变化作为依据, 该判据在隧道地下结构围岩稳定性的数值分析中得到广泛应用, 其理论基础是强度破坏理论, 如 Mohr-Coulomb 或 Drucker-Prager 准则等。

(2) 围岩变形量或变形率判据。这一类主要是以位移的变化作为依据, 在国内外有关规范中, 围岩稳定性判据多以变形值或变形速率为主, 认为围岩变形

量或变形速率超过一定值岩体即发生破坏。

但是要想判断海底隧道最小岩石覆盖厚度, 目前还没有很好的判据, 本文位移变化作为判据, 来分析海底隧道最小岩石覆盖厚度。位移变化主要是依据同一剖面位置不同底板线拱顶同一位置的位移收敛且允许位移变化作为主要判据来进一步分析海底隧道的最小岩石覆盖厚度。进而, 提出适合分析海底隧道最小岩石覆盖厚度的位移收敛判据。

为了定量分析海底隧道最小岩石覆盖厚度, 运用数值方法和位移收敛判据对海底隧道最小岩石覆盖厚度进行分析, 其基本思路见图 1。

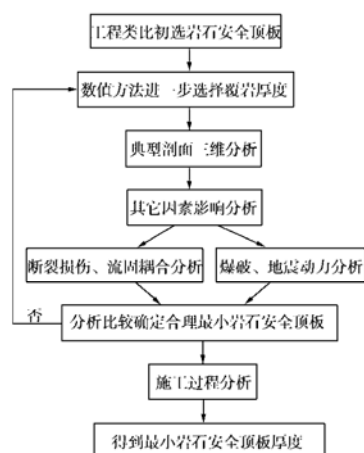


图 1 数值方法确定最小岩石覆盖厚度的基本思路

Fig. 1 Basic idea of the minimum safe roof rock obtained by the numerical method

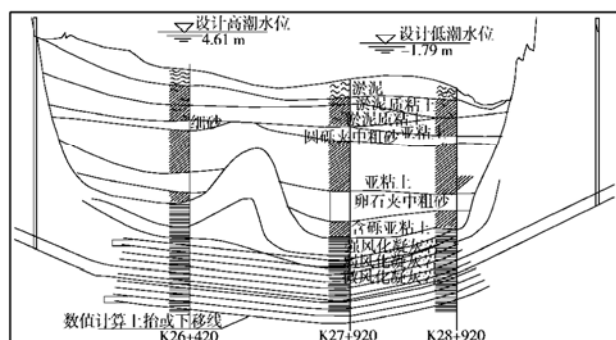


图 2 初选不同底板线分析位置

Fig. 2 Analytical initial location for different bottom floor positions of the tunnel

首先根据工程类比法得到初选隧道底板线的位置如图 2, 在初选隧道底板线位置每隔 2 m 上台和下移底板线得到计算分析的底板线位置, 然后利用数值分析方法进行弹塑性分析, 考虑具体的水文地质和工程地质, 运用位移收敛判据, 得到初选底板线的位置。在初选底板线位置选择典型剖面进行三维弹塑性分析, 确定较为合理的底板线位置。在重点选择确定的

较为合理的底板线位置,进行断裂损伤、流固耦合分析和爆破、地震等动力分析对最小岩石覆盖厚的影响。如果各种影响分析对选择的最小岩石覆盖厚度影响较小,则进行施工过程分析,确定较优的最小岩石覆盖厚度和相应的施工过程。如果不满足,则返回到进一步选择,重新进行分析。

2 工程实例

某海底隧道穿越海域水面宽度约 4300~6100 m,见图 3,设计高潮位 4.64 m(黄海高程),设计低潮水位-1.79 m,隧址区海域深度 10~30 m,局部发育深槽,深槽段最大水深 37.14 m;两岸基岩出露,海域大部分发育第四纪地层,自上而下依次为淤泥、淤泥质粘土、亚粘土、砂层、亚粘土、卵石夹中粗砂、含砾粘性土、全-强风化凝灰岩、弱-微风化凝灰岩等等,基岩埋深较大见图 4。

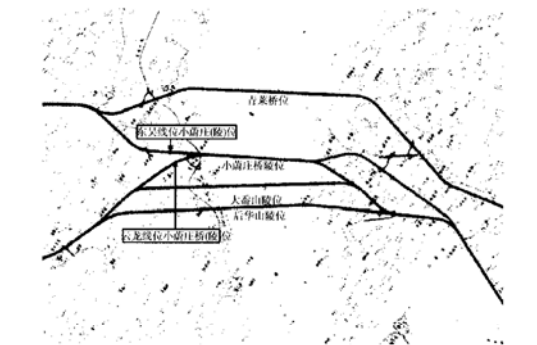


图 3 某海底隧道所处海域位置
Fig. 3 Location of the subsea tunnel

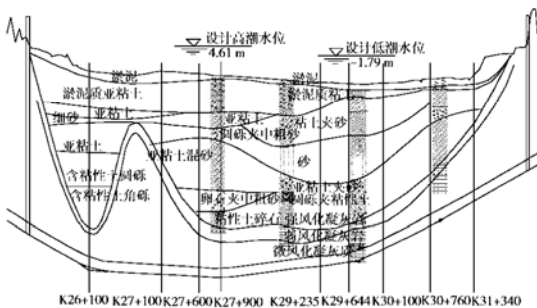


图 4 某海底隧道各典型剖面及地质图
Fig. 4 Main section and geological layers

根据工可钻孔资料,基岩埋深分别为-115.75, -76.69, -81.17, -99.25, -105.12, -114.96, -47.75 m,全风化基岩层厚为 0.8~15 m,弱风化凝灰岩层顶最大埋深-117.75 m。根据区域地质构造发育规律及断点的位置和性质,推测某海底隧道隧位含有 f_{2-1} 、 f_{2-2} 、 f_{2-3} 条断层,其中 f_{2-1} 断层位于海域北部,走向近南北向, f_{2-3} 断层穿越某海底隧道隧位海域南侧,走向北

东东向。
在进行数值模拟计算时,主要以 k26+100 里程号作为研究主要剖面,限于海底部分地质调查资料有限,不同风化层分界限难以区分,仅根据地质剖面图将岩体力学参数按全风化、强风化和弱风化~微新凝灰岩 3 种给定,综合参考原岩测试结果及其它地区相同岩性的岩石测试结果,根据工可阶段岩土物理力学实验所得的参数和岩石力学参数手册及相关工程经验,本次计算岩土参数选取见下表确定计算中采用的岩体物理力学参数,见表 1,侧压力系数为 0.8。

模拟海底隧道自上而下的逐级开挖过程,海水深度为 19 m,上覆软土厚度为 103 m,弱风化凝灰岩和微风化凝灰岩厚度为 22.45 m,设计底板标高为-150 m。取单位厚度对其围岩稳定性进行分析,隧道轴线两侧取洞室直径的 8 倍。整体计算区域剖分成 1500 个空间区域单元和 3200 个节点,单元和地层区域见图 5。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical parameters of the rockmass						
名称	容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹模 (MPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	摩擦角 ($^{\circ}$)	抗拉强度 (MPa)
粘土	19.4	5.08	0.35	19.1	27.0	0.008
粗砂	19.4	8.8	0.35	15.5	33.3	0.005
亚粘土	19.4	7.17	0.35	234.0	22.6	0.010
圆砾	19.4	10.2	0.35	434.0	30.0	0.010
凝灰岩	25.0	1.5×10^4	0.25	1.5×10^3	40.0	0.010
砂岩	23.0	1.0×10^4	0.26	0.2×10^3	20.0	0.80

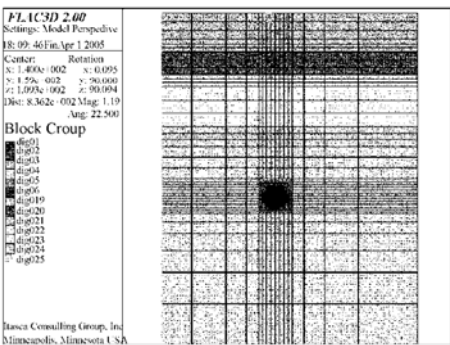


图 5 计算区域和单元网格图

Fig. 5 Mesh and zone of the analyzed problem

本文在设计线位置,沿整个海底隧道轴线方向共选 9 个典型剖面,在每个典型剖面位置分别上台或下移 2 m 作为一个计算工况,具体位置见图 2,以便选出更加合理的海底隧道底板线。限于篇幅,本文只给出典型剖面 k26+100 在 2 种地应力状态下,用位移收敛法确定底板线的过程。

为了得到拱顶隧道顶部关键点位移曲线变化规律, 在各种计算工况中取隧道拱顶最高点为起始点, 然后向上每个 2 m 取一个点, 得到拱顶各关键点的位移变化曲线图 6 和图 7, 从其变化规律来看, 各曲线的拐点均在岩层与土层的交界处, 其主要原因是土层与岩层间物理参数的差异所带来的。不同计算工况计算所得的各曲线的变化规律相同, 随着隧道埋深的增加, 拱顶各点位移也随之增加, 但相互间的差异不大, 主要原因在于隧道所在的岩层的物理参数变化不大的原因。在各曲线的变化过程来看, 岩层中各关键点中随着隧道埋深的不同, 总有相近的两种工况位移变化趋于不变, 根据位移收敛准则, 就可以得到最小岩石覆盖厚度的底板等高线位置。

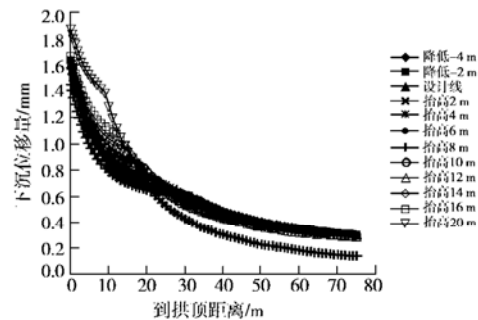


图 6 k26+100 断面隧道拱顶上覆岩土层下沉位移曲线（自重）
Fig. 6 Displacement of the key point above the tunnel at k26+100 (under deadweight)

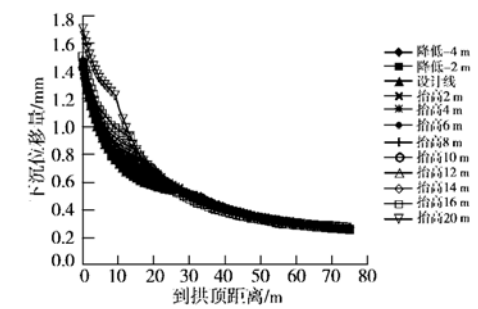


图 7 k26+100 断面隧道拱顶上覆岩土层下沉位移曲线图（侧压
力系数为 0.8）
Fig. 7 Displacement of the key point above the tunnel at k26+100 (coefficient of lateral side pressure 0.8)

现将各工况位移变化过程及建议底板等高线的位置列于表 2 和表 3。其建议最小覆岩厚度以位移收敛为依据, 从各种工况二步间位移变化趋于收敛且允许位移变化量值最小为依据, 给出最小岩石覆盖厚度。由表 2 和表 3 可以看出, 各工况分别取距拱顶一定距离的固定点, 其位移收敛速度有所不同, 靠近拱顶的点收敛速度较快。在自重的情况下, 其建议覆岩厚度大于侧压为 0.8 时所得到的建议覆岩厚度, 说明构造应力的存在对海底隧道最小覆岩厚度有一定影响。

表 2 k26+100 位移收敛建议覆岩厚度（自重）

Table 2 Proposed rock cover thickness at k26+100 based on displacement convergence criterion (deadweight)					
底板线 偏移量 /m	距拱顶参 考点距离 /m	位移 /mm	参考 点位 移差	设计覆 岩厚度 /m	建议覆 岩厚度 /m
0	6.95	1.40		17.95	
-2		1.37	-0.03		
-4		1.36	-0.01		
-6		1.32	-0.04		
-8		1.30	-0.02		25.95
-10		1.28	-0.02		
0	4.36	1.57			
-2		1.54	-0.03		
-4		1.55	-0.01		
-6		1.51	-0.04		
-8		1.50	-0.01		25.95
-10		1.49	-0.01		

表 3 k26+100 位移收敛建议覆岩厚度（测压 0.8）

Table 3 Proposed rock cover thickness at k26+100 based on displacement convergence (coefficient of lateral pressure 0.8)					
底板线 偏移量 /m	距拱顶参 考点距离 /m	位移 /mm	参考 点位 移差	设计覆 岩厚度 /m	建议覆 岩厚度 /m
0	6.95	1.29		17.95	
-2		1.19	-0.10		
-4		1.18	-0.01		
-6		1.17	-0.01		23.95
-8		1.16	-0.01		
-10		1.15	-0.01		
0	4.36	1.45			
-2		1.34	-0.11		
-4		1.33	-0.01		
-6		1.33	0.00		23.95
-8		1.33	0.00		
-10		1.33	0.00		

同理, 根据位移收敛法分别对 9 个剖面不同工况组合的数值模拟, 可以得到海底隧道在不同剖面的最小岩石覆盖厚度, 将各剖面最小岩石覆盖厚度对应的底板线高程用直线连接起来, 就可以得到整条海底隧道的底板线位置图 8。由图 8 可以看出, 自重得到的隧道底板线埋深大于侧压 0.8 时隧道埋深。从整个底板线来看, 设计线在有些剖面位置处于不安全, 为了安全起见, 建议采用自重计算得到的底板线。

通过大量的流固耦合和断裂损伤本构理论的数值计算和工程类比, 将各种工程类比法得到的底板线高程与原设计底板线高程、计算最终建议底板线高程绘于图 9, 通过与工程类比法得到的底板线高程进行对比可知^[5], 计算得到的最小安全顶板厚度位于挪威均值附近, 大于国内顶水采煤经验, 小于挪威经验完整好岩石。各种工程类比法确定的最小岩石覆盖厚度, 不能全面考虑海底隧道的实际地质条件和水文条件, 因此各种工程类比法只能作为选择最小岩石覆盖厚度

的参考依据。顶水采煤经验建议的最小岩石覆盖厚度,其主要是保证了煤层顶部水的安全性,不能很好反应围岩的稳定性;另外对于挪威经验法得到的完整好岩石和破碎岩石建议的底板线高程,也存在不能全面考虑海底隧道的实际地质条件和水文条件,只能给出一个大致的范围。只用利用数值分析的方法才能很好地考虑海底隧道实际地质条件和水文条件,利用确定性的方法进一步确定最小岩石覆盖厚度。

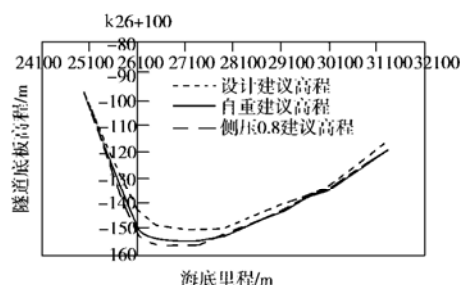


图8 设计线高程与计算建议底板线高程图

Fig. 8 Floor position of tunnel determined by the initial design and numerical method

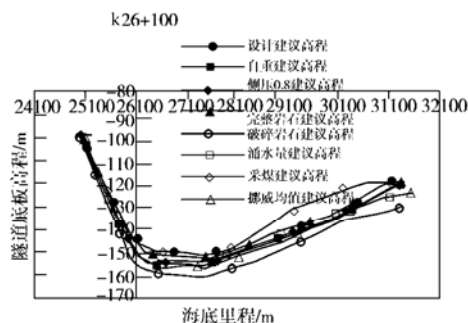


图9 设计线高程、计算建议线高程和工程类比高程图

Fig. 9 Axial position of tunnel determined by the initial design, numerical method and analogical method

由于数值方法全面考虑了隧道所在位置的水文地质和工程地质条件,参考工程类比法得到的最小岩石覆盖厚度,建议选用数值分析方法在自重条件下得到的最小岩石覆盖厚度作为设计厚度。

3 结 语

给出了数值方法确定最小岩石覆盖厚度的基本思路和相应的判据,为确定海底隧道最小岩石覆盖厚度提供了思路和解决方法。

通过数值计算得到了最小岩石覆盖厚度,其厚度

位于挪威均值附近,大于国内顶水采煤经验,小于挪威经验完整好岩石。由于数值方法可以很好结合工程地质和水文地质条件,其得到的最小岩石覆盖厚度更趋合理。

通过数值方法,研究了各种工况组合,各种不同地质条件下隧道围岩力学状态,提出了适合确定海底隧道最小安全顶板厚度的判据,给出了某海底隧道各典型剖面的最小安全顶板厚度。

通过与各种工程类比法得到的最小岩石覆盖厚度相比,说明了数值方法可以全面考虑海底隧道的工程地质和水文地质条件,利用定量的方法确定海底隧道的最小岩石覆盖厚度。

参考文献:

- [1] 钱七虎.中国岩石(地下)工程的成就、进展和挑战[R].中俄工程科技研讨会,北京,2005.(QIAN Qi-hu. Achievement, advancement and challenge of Chinese rock (underground) engineering [R]. Seminar of the Engineering and Science between Russia and China, Beijing, 2005.)
- [2] 李术才,李廷春,陈卫忠,邱祥波.厦门海底隧道最小顶板厚度三维弹塑性断裂损伤研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18):3138-3143.(LI Shu-cai, LI Ting-chun, et al. Application of 3D elastoplastic fracture damage model to determination of minimum roof thickness of Xiamen subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3138-3143.)
- [3] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D} (Version 2.0) users manual [R]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 1997.
- [4] 邵国建,卓家寿,章青.岩体稳定性分析与评判准则研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):691-696.(SHAO Guo-jian, ZHUO Jian-shou, ZHANG Qing. Research on analysis method and criterion of rockmass stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 691-696.)
- [5] 李术才,李树忱.象山港海底隧道最小岩石覆盖厚度研究[R].山东:山东大学岩土与结构研究中心,2005,6.(LI Shu-cai, LI Shu-chen. Study on the minimum rock covers of the subsea tunnel in the Xiangshan harbor [R]. Shandong: Geotechnical & Structural Engineering Research Center of Shandong University, 2005,6.)