

# 深水超长沉管隧道接头及止水带地震响应

刘 鹏<sup>1,2</sup>, 丁文其<sup>1,2</sup>, 杨 波<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 依托港珠澳沉管隧道工程, 建立了 3 维实体连续有限元模型, 对这条深水超长沉管隧道在地震作用时接头处的内力和位移情况以及止水带的压缩与变形进行了详细的模拟与研究, 重点分析了地震作用时沉管隧道接头处的相对位移(包括管节接头和节段接头)、管节接头处 GINA 止水带的变形, 为施工和运营期的安全与维护提供必要的指导和依据。

**关键词:** 沉管隧道; GINA 止水带; 地震; 接头

**中图分类号:** TU 435

**文献标志码:** A

## Joins and Gasket Seismic Response of Deep-water Long Immersed Tube Tunnels

LIU Peng<sup>1,2</sup>, DING Wenqi<sup>1,2</sup>, YANG Bo<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on Hong Kong-Zhuhai-Macao Cross-Harbor Tunnel Project, a three-dimensional continuous model is established to research joints' forces and displacements and GINA gaskets' deformation. The study focuses on joints' relative displacement, including pipe joints and segment joints, and GINA gaskets' deformation. There is an important guiding significance for design and construction of immersed tube tunnel.

**Key words:** immersed tube tunnel; GINA gasket; earthquake; joint

隧道等地下结构与地面结构相比, 其抗震性能要强一些。且其抗震能力随埋深的增加而有所增加, 未见有埋深超过 300 m 受到严重破坏的实例<sup>[1]</sup>, 因此, 以前一般情况下地下结构是不进行抗震设计的。然而, 近几十年来隧道震害的实例<sup>[2-5]</sup>表明这种认识

是片面的, 尤其是 1995 年的阪神地震, 推翻了日本专家认为的地铁抗震能力强且安全的定论。

沉管隧道是由多节位于水下的管段拼接而成, 这对管段接头的密封防漏性能有着非常苛刻的要求<sup>[6]</sup>。从沉管隧道自身的结构特点和埋设位置来看, 其一般都修建在软弱地层中, 而且一般埋置都比较浅, 因此不能忽略土与结构的动力相互作用, 在地震作用下牵涉到地基土的稳定性、隧道本身的抗浮、水与结构的耦合等问题。总之, 地震对沉管隧道的影响是很大的, 会在沉管隧道上产生复杂的应力分布。地震期间, 埋设于土层中的沉管隧道不太可能发生垮塌式的结构破坏, 最容易出现的问题并可能导致整个沉管丧失功能的薄弱环节在于其接头连接以及止水带的可靠性。同时沉管隧道由于其重要性及在水下的特殊性, 一旦破坏将产生灾难性后果, 且难于修复。因此, 对沉管隧道的接头和其上的止水带进行抗震研究, 以最大限度地减小和避免地震损失是十分必要的。

应用有限元法进行隧道地震响应分析的文献已为数不少, 但迄今尚未对隧道接头及止水带的抗震性能进行研究。在以前的研究中, 在接头处大多采用简化计算模型<sup>[7-10]</sup>来处理, 或将接头处的刚度进行折减, 或将接头简化为非线性弹簧元。而在沉管隧道周围土的模拟上, 往往是使用等价弹簧和阻尼器来代替, 不能适当模拟土既是地震波的传播介质又是结构物的支承介质的双重作用。

本文采用动力有限元法的 3 维连续介质模型, 对港珠澳沉管隧道进行抗震分析, 既建立了全程全长模型, 又在接头处建立了精细化模型, 对其上的端钢壳、GINA 橡胶止水带、垂直剪力键、水平剪力键进行了模拟, 进一步分析了沉管隧道接头、GINA 止水带及附近的动力响应。

收稿日期: 2012-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(50878149)

第一作者: 刘 鹏(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道及地下工程施工力学。E-mail: liupengreal@sina.com

通讯作者: 丁文其(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下工程施工力学。E-mail: dingwq2004@263.com

### 1 研究背景

港珠澳沉管隧道沉管段长 5 664 m,东、西岛现浇暗埋段长各 163 m,设计使用寿命为 120 年.隧址区地层岩性主要为:自海床面向下依次分布有淤泥、淤泥质土、粉质黏土、砂层及基岩(花岗岩).

按照《公路工程技术标准》和香港道路设计规范 TPDM 规定,设计净宽 14.25 m,净高 5.1 m.采用两孔一管廊横断面,全宽 37.95 m,高 11.4 m.两侧为行车道孔,中间为综合管廊;上部为专用排烟通道;中部为安全横通道,限界高 2.2 m;下部为电缆沟和泵房.管节结构采用 C45 钢筋混凝土预制,采用节段式管节形式(22.5 m×8=180 m).

### 2 三维有限元模型

沉管隧道 3 维连续介质模型采用 TureGrid 软件建模,在沉管隧道整体模型的创建过程中,充分使用了 TureGrid 软件实体建模、装配建模等多种功能,建立了沉管隧道、GINA 止水带、接头以及土的精细化模型,对整体有限元模型进行瞬态分析.

根据沉管隧道的实际尺寸和土层分布来建立模型.沉管隧道由 33 段管节组成,管节形式采用节段式(22.5 m×8=180 m),一共包含 264 个节段.管节接头包含端钢壳、垂直钢剪力键、水平钢剪力键和 GINA 止水带;节段接头包含垂直混凝土剪力键和水平混凝土剪力键.隧道部分全部采用六面体单元划分网格,对管段接头、节段接头等结构关键部位进行细分,单元数为 1 494 600.地基土采用四面体单元分层划分网格,单元数为 874 522.为了减小人工边界的影响,模型底部取至地面以下 80 m 的基岩层,整体模型大小 5 800 m×400 m×80 m,整体模型如图 1 所示.图 2、图 3 为整体模型的局部示意图.覆

盖层一 80 m 处做为地震波输入面.工程材料与相应材料模型见表 1.从地面至地下 80 m 左右共计 6 层地基土材料的力学参数见表 2.

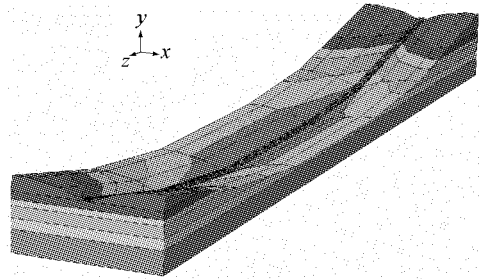


图 1 沉管隧道以及土层的整体模型图

Fig.1 The whole finite element computation model

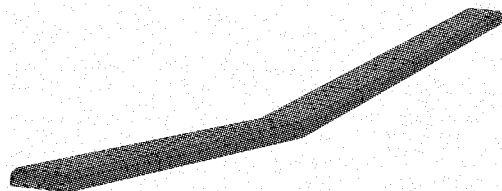


图 2 沉管隧道模型图

Fig.2 Computational model

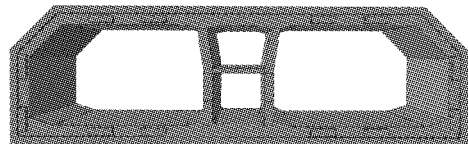


图 3 管节接头模型剖面图

Fig.3 Numerical analysis model of segment joints

表 1 工程材料与相应材料模型

Tab.1 Engineering materials parameters and material models

名称	材料	材料模型
沉管管片	混凝土标号 C45	线弹性模型
钢剪力键	碳素结构钢	弹塑性模型
GINA 止水带	橡胶	超弹性模型
地基土	岩土	德鲁克-普拉格材料

表 2 部分地基土土层的力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of foundation soil layers

名称	压缩模量/MPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
① <sub>1</sub> 淤泥	1.8	0.45	1.59	10.4	14.0
① <sub>2</sub> 淤泥	1.9	0.45	1.63	5.8	13.7
① <sub>3</sub> 淤泥质土	2.8	0.45	1.76	10.8	14.2
③ <sub>1-1</sub> 黏土及粉质黏土	5.3	0.36	1.81	17.7	18.9
③ <sub>2</sub> 粉质黏土夹砂	6.0	0.47	1.87	22.0	22.9
② <sub>1</sub> 黏土	5.4	0.36	1.95	24.9	18.2

地震烈度:据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001),珠海、澳门地区地震动峰值加速度为

0.10g,香港地区地震动峰值加速度为 0.15g.与之对应隧道区地震基本烈度为Ⅶ度,设计地震分组为

第一组.

### 3 沉管隧道中的三维接触模型

在沉管隧道及土层的 3 维连续介质模型中,不同部件之间存在着大量的接触,在受力之后,它们相互之间会发生滑移和挤压,这属于边界非线性问题.即在计算开始并没有给出边界条件,而是通过计算外荷载引起的接触体上接触面的面积和应力变化而计算得出的<sup>[11]</sup>.因此在模型中需要确定 3 类关键性接触:沉管与止水带的 3 维接触模拟参数、土体与沉管管节的 3 维接触模拟参数和混凝土与混凝土之间的 3 维接触模拟参数.

(1) 沉管与 GINA 止水带之间的接触,选取管节为主接触面,相应的 GINA 止水带为从接触面.管节与止水带之间的摩擦系数取 0.75. GINA 止水带的主要材料是橡胶,而橡胶的应力应变关系比较复杂,属于高度非线性的弹性体.再加之在接头处受到压缩、扭转、剪力和复合作用,变形与受力特性极为复杂,因此选用超弹性模型来模拟.超弹性材料的非线性是很严重的,体现在:非常大的应变(可达到百分之百);材料的应力应变呈高度的非线性关系;材料近似或完全不可压缩;很高的温度相关性.常见的超弹性橡胶材料的本构模型根据不同的应变能函数主要分为 Mooney-Rivlin 型、Yeoh 型和 Ogden 型 3 种形式.此处选用 Mooney-Rivlin 型,其应变能函数为<sup>[12]</sup>

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

式中: $W$  为由左柯西-格林变形张量的第一不变量  $I_1$  和第二不变量  $I_2$  确定的应变能函数; $C_{10}$  和  $C_{01}$  均为材料参数;根据生产商提供的材料参数,此处 GINA 止水带取  $C_{10} = 0.740$  MPa,  $C_{01} = 0.098$  MPa.

一般情况下,认为橡胶材料是近似于不可压缩的,但实际上只是橡胶材料的体积模量比剪切模量大很多.在有限元分析中,通常情况下,无论是使用相对不可压缩模型(泊松比取 0.5),还是使用可压缩模型(泊松比小于 0.5),最终的计算结果很接近.但是使用不可压缩模型,可能会导致有限元计算的不收敛.另外,为了模拟 3 维应力状态与刚性边界条件,也要求采用可压缩模型(泊松比小于 0.5),因此,此处 GINA 止水带橡胶材料的泊松比取 0.49.

(2) 在土体与隧道管体的接触面上,将隧道的管体取为主接触面(刚度较大者),土体作为从接触

面(相对更柔者).地基土用弹塑性材料模型模拟,采用德鲁克-普拉格屈服准则;沉管用线弹性材料模型,材料为混凝土 C45.

(3) 管节接头处混凝土之间的接触:在法向设置“硬接触”,这样保证在混凝土之间有空隙时,不能传递力,只有在相互压接时才能传递法向应力;在切向设置 Coulomb 摩擦接触,摩擦系数为 0.83.

接触算法如图 4 所示,它主要是利用 NETON-RAPHSON 方法建立的.它在每个增量部开始检查所有接触相互作用状态,以建立从属节点是开放还是闭合.

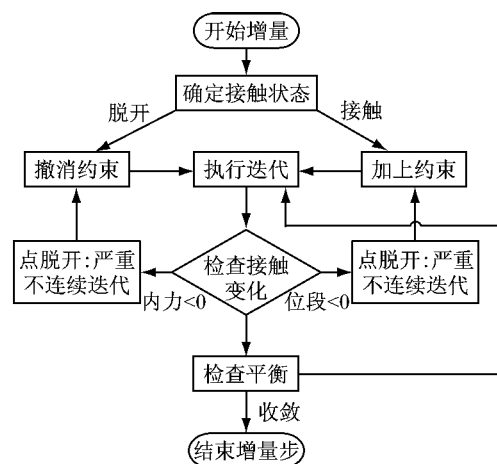


图 4 接触算法示意图

Fig.4 Contact algorithm

## 4 结果及讨论

### 4.1 沉管隧道接头处相对位移研究

从图 5—8 中可以得出,当沉管隧道受到地震波横向作用时,绝大部分沉管管节的顶部相对位移值在(8 mm, 10 mm)之间,围绕在 8.4 mm 周围,最大位移量为 67.4 mm,发生在 E3 管节上;绝大部分沉管管节的底部相对位移值在(7 mm, 9 mm)之间,围绕在 7.4 mm 周围,最大位移量为 51.7 mm,发生在 E5 管节上.当沉管隧道受到地震波纵向作用时,绝大部分沉管管节的顶部相对位移值在(6 mm, 7.5 mm)之间,围绕在 6.4 mm 周围,最大位移量为 59.6 mm,发生在 E3 管节上;绝大部分沉管管节的底部相对位移值在(4 mm, 5 mm)之间,围绕在 4.4 mm 周围,最大位移量为 58.3mm,发生在 E5 管节上.表 3 为各接头处最大相对位移值,从地勘资料上可以看出, E3, E5 管节处的地基土层发生突变,造成地基刚度的剧烈变化,因此引起相对位移量的增大.而无论

是管节接头还是节段接头,剪力键之间的空隙都为 20 mm,所以绝大多数的位移量在容许的变形空间之内.超过 20 mm 容许范围的相对位移,会引起接头处剪力键的破坏,造成沉管管节的结构破坏,可能会引起漏水等病害,因此应对计算中相对位移超过 20 mm 的接头进行处理,可以采用增加预应力锚索的方法,增加接头处的刚度,减小相对错动.

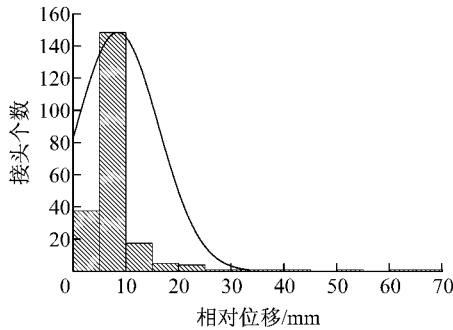


图 5 地震时沉管接头顶部相对位移分布图(地震波横向)

Fig.5 Relative displacement maps of the joints' top (in the transverse seismic waves)

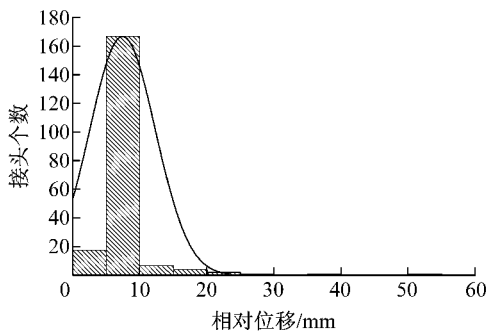


图 6 地震时沉管接头底部相对位移分布图(地震波横向)

Fig.6 Relative displacement maps of the joints' bottom (in the transverse seismic waves)

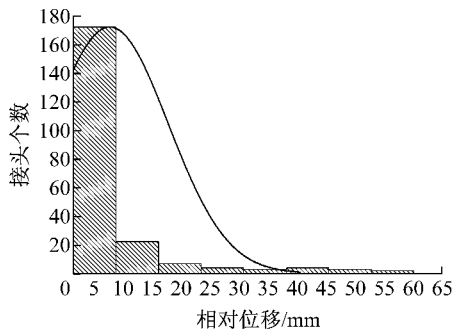


图 7 地震时沉管接头顶部相对位移分布图(地震波纵向)

Fig.7 Relative displacement maps of the joints' top (in the longitudinal seismic waves)

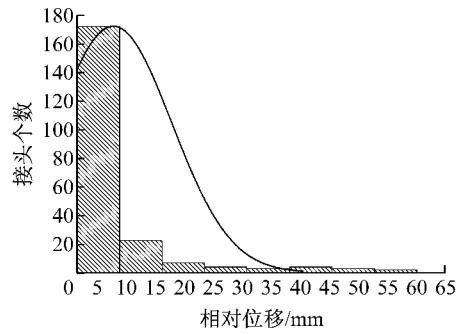


图 8 地震时沉管管节底部相对位移分布图(地震波纵向)  
Fig.8 Relative displacement maps of the joints' bottom (in the longitudinal seismic waves)

表 3 各接头处最大相对位移

Tab.3 The max relative displacement of the joints

mm					
沉管隧道接头	x 方向最大相对位移	y 方向最大相对位移	z 方向最大相对位移	最大相对位移	
横向	顶部	8.4	31.1	66.3	67.4
	底部	9.7	18.2	48.5	51.7
纵向	顶部	16.8	37.7	58.3	59.6
	底部	9.6	19.6	55.3	58.3

#### 4.2 GINA 止水带变形研究

管节接头的错动和张开,使接头部位止水效果降低甚至失去止水效果,对沉管隧道的安全正常运营造成很大威胁,接头密封防水历来是对沉管隧道接头进行研究的焦点.管节接头的防水一般采用“GINA 橡胶止水带+OMEGA 止水带”双层组合的方式,但实际上接头防水主要还是依靠布置在接头断面外侧的 GINA 止水带.OMEGA 止水带仅作为二次止水用来增加止水的可靠性,当 GINA 止水带止水失效时仅靠 OMEGA 止水带止水是无法确保接头的止水效果的. GINA 止水带能很好地适应管段不均匀沉降所产生的变形,具有良好的止水效果,其缺点是出现问题以后无法进行修复和替换. GINA 止水带在沉管水力压接成功之后就只能永久使用,而 OMEGA 止水带则可以拆卸更换.

GINA 止水带作为管节接头密封防水的首道防线,其工作状态是反映接头结构寿命和沉管隧道止水安全性能的关键.其中压缩量是描述和评价 GINA 止水带状态最敏感的参数,对 GINA 止水带工作性能进行评价也基于对 GINA 止水带当前压缩状态的判断和对 GINA 止水带剩余压缩量的估算<sup>[13]</sup>.图 9 和图 10 为地震时引起的 GINA 止水带的压缩量.

从图中可以看出,GINA 止水带受到扭曲、剪切、压缩等位移荷载的组合作用,受力情况很复杂,

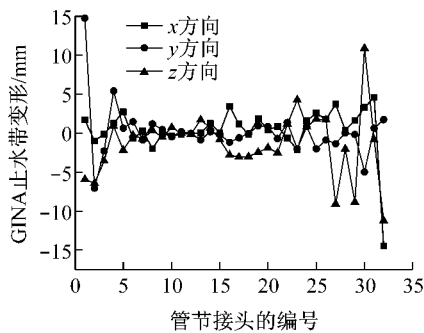


图9 管节接头处GINA止水带压缩量示意图(地震波横向)

Fig.9 GINA gasket compression amount in the tube joint (in the transverse seismic waves)

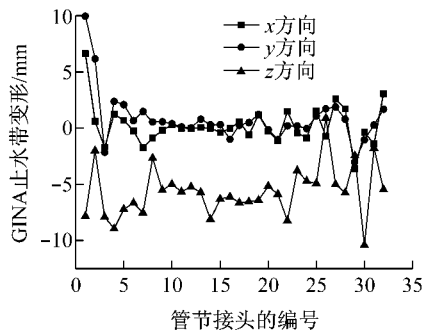


图10 管节接头处GINA止水带压缩量示意图(地震波纵向)

Fig.10 GINA gasket compression amount in the tube joint (in the longitudinal seismic waves)

GINA 止水带的变形量在 15 mm 以内,而这些值均小于GINA 止水带正常工作的剩余压缩量 25 mm.因此可以看出,受到地震荷载时,GINA 止水带是正常工作的。

## 5 结论

(1) 沉管隧道接头允许位移量为 20 mm,绝大多数接头相对位移量都在容许的变形空间之内.对位移量超过允许范围的接头可以采用增加预应力锚索的方法,增加接头处的刚度来减小相对错动。

(2) GINA 止水带受到扭曲、剪切、压缩等位移荷载的组合作用,受力情况很复杂. GINA 止水带的变形量在 15 mm 以内,而这些值均小于GINA 止水带正常工作的剩余压缩量。

### 参考文献:

[1] 叶世强,肖扬. 地下工程震害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报,1993,4(4):66.

- YE Shiqiang, XIAO Yang. Seismic damage of underground engineering and its prevention [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(4): 66.
- [2] 卢振恒. 日本兵库县南部地震灾害及其启示[J]. 山西地震, 1995(2): 48.
- LU Zhenheng. Earthquake disaster and revelation of the earthquake in the south of Hyogo County, Japan [J]. Earthquake Research in Shanxi, 1995, 2(81): 48.
- [3] 郑永来,杨林德. 地下结构震害与抗震对策[J]. 工程抗震, 1999(4): 23.
- ZHENG Yonglai, YANG Linde. Underground structures earthquake damages and countermeasures [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999(4): 23.
- [4] Lee C F. Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan Earthquake [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1987, 2(2): 199.
- [5] 季倩倩,杨林德. 地下铁道震害与震后修复措施[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 31.
- JI Qianqian, YANG Linde. Seismic damage and restoration measures of subway [J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(2): 31.
- [6] 于洪丹,陈卫忠,郭小红,等. 潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究[J]. 岩石力与工程学报, 2009, 28(增1): 2905.
- YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on effect of tide on stabilities of channel tunnel lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supplement 1): 2905.
- [7] Kiyomiya O. Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995, 20(4): 463.
- [8] 严松宏,高峰,李德武,等. 南京长江沉管隧道的地震安全性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2800.
- YAN Songhong, GAO Feng, LI Dewu, et al. Estimation on seismic safety of Nanjing Changjiang submerged tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supplement 2): 2800.
- [9] 杨辉,陆建飞,王建华,等. 黄浦江越江隧道的动力抗震分析[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1512.
- YANG Hui, LU Jianfei, WANG Jianhua, et al. Vibration analysis of a subaqueous tunnel of Huangpu River during earthquake [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(10): 1512.
- [10] 郭毅之,金先龙,丁峻宏,等. 沉管隧道地震响应分析中的三维接触模型与算法研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 49.
- GUO Yizhi, JIN Xianlong, DING Junhong, et al. Three-dimensional contact model and algorithm for earthquake response of immersed tunnel [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(1): 49.
- [11] 宫龙颖. ABAQUS 接触问题浅析[J]. 煤炭科技, 2009, 35(7): 66.
- GONG Longying. On the use of ABAQUS for analyzing the problem of contacts [J]. China Coal, 2009, 35(7): 66.
- [12] Mooney M. A theory of large elastic deformation [J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9): 582.
- [13] 刘正根,黄宏伟. 沉管隧道GINA止水带性能评估与安全预警[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 347.
- LIU Zhenggen, HUANG Hongwei. Performance evaluation and safety Pre-warning of GINA in immersed tube tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 347.