

文章编号: 1004-4574(2007)01-0123-04

# 地震荷载作用下沉管地基砂垫层液化的可能性

冉申德<sup>1</sup>, 钟辉虹<sup>2,3</sup>, 肖宏彬<sup>3</sup>

(1. 广州市市政园林局, 广东 广州 510060; 2. 广州市隧道开发公司, 广东 广州 510130; 3. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412008)

**摘要:**以广州仑头一生物岛沉管隧道为背景, 采用二维动力有限元模拟方法, 分析了地震荷载作用下沉管隧道地基的动力响应, 得到了地震荷载作用下地基土的动剪应力分布; 通过对试验资料的分析, 得到了沉管隧道地基砂垫层的抗液化剪应力, 以此分析了沉管隧道地基土在地震荷载作用下的液化可能性, 并提出了相应的抗液化措施, 可供沉管隧道的抗震设计参考。

**关键词:**沉管隧道; 地震响应; 砂土液化

**中图分类号:** TU441+.4 **文献标识码:** A

## Liquefaction possibility of immersed tunnel's sand ground under earthquake

RAN Shen-de<sup>1</sup>, ZHONG Hu+hong<sup>2,3</sup>, XIAO Hong-bin<sup>3</sup>

(1. Bureau of City Engineering and Gardening of Guangzhou Municipality, Guangzhou 510060, China; 2. Guangzhou Tunnel Development Company, Guangzhou 510130, China; 3. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

**Abstract** Taking Lun-tou-Shengwu-dao immersed tube tunnel in Guangzhou as an example, the paper analyzes the seismic response of the immersed tube tunnel by dynamic FEM. According to these models, the dynamic shear stress distribution of ground of the immersed tunnel is calculated. By analyzing the experiment data of the site, the liquefaction-resistant shear stress of the sand ground is obtained. Thus the possibility of sand ground liquefaction of the immersed tube tunnel is analyzed so as to give reference to future design and construction of immersed tube tunnel.

**Keywords** immersed tube tunnel; seismic response; sand liquefaction

疏松砂受到振动时砂体有变密的趋势, 如果砂的孔隙时饱水的, 要变密必须从孔隙水中排挤出一定的水分, 如果砂粒很细, 整个砂体的渗透性不良, 瞬时震动变形需要从孔隙中排除的水来不及排除砂体之外, 结果必然使砂体中孔隙水压力上升, 颗粒之间的有效正应力就随之降低, 当孔隙水压力上升使砂粒间有效正应力降为零, 砂粒就完全悬浮水中, 砂体就完全丧失了强度和承载力, 这就是砂土液化<sup>[1]</sup>。

长期以来, 人们认为地下建筑物具有较强的耐震性能。然而 1995年日本阪神地震中, 以地铁车站、地下隧道为代表的大型地下结构遭受严重破坏<sup>[2]</sup>, 暴露地下结构抗震能力的弱点<sup>[3]</sup>。由于地震波引起的震动大致可分为介质的竖直震动和介质的水平震动<sup>[4]</sup>, 目前关于地下结构抗震问题的研究中, 存在着忽略结构与

收稿日期: 2006-08-10 修订日期: 2006-10-10

基金项目: 广州市科技攻关项目 (2005Z3-D0151)

作者简介: 冉申德 (1950-), 男, 高级工程师, 主要从事地下结构工程研究. E-mail: ranshend@gzszyl.gov.cn

土体相对运动,认为隧道的破坏主要由水平震动引起的。本文以广州仑头—生物岛沉管隧道为工程背景,采用二维动力有限元模拟方法,分析地震荷载作用下沉管隧道地基的动力响应,得到地震荷载作用下地基砂垫层的液化可能性,以便为沉管隧道的进一步设计施工提供参考。

# 1 有限元计算原理

## 1.1 动力有限元方程

主要采用动力有限元法,地震反应的有限元求解方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \tag{1}$$

式中:  $u, \dot{u}, \ddot{u}$  分别是单元结点的位移、速度、加速度,  $F(t)$  是结点动荷载。  $M$  是整体质量矩阵,可用集中质量法求得,即假定每个单元的质量集中在结点上,  $K$  为整体刚度矩阵,可用常规有限元法求得,  $C$  为整体阻尼矩阵,由单元的阻尼矩阵集合而成,单元阻尼矩阵可表达为:

$$c_q = \alpha_q m_q + \beta_q k_q \tag{2}$$

式中,  $m_q$  和  $k_q$  是  $q$  单元的质量矩阵和刚度矩阵,其中  $\alpha_q, \beta_q$  可由下式确定:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_q &= \lambda_q \omega_1 \\ \beta_q &= \lambda_q / \omega_1 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中,  $\lambda_q$  为  $q$  单元的阻尼比,  $\omega_1$  为振动体系基本圆频率。

## 1.2 等效线性模型

土的动剪切割线模量与动剪应变幅值之间的关系基本符合双曲线关系,1972年,Hardin和Dmievich提出了著名的Hardin-Dmievich模型<sup>[5]</sup>。Martin等曾对6个不同场地,分别采用等效线性化方法和真非线性方法进行了地震反应分析,结果表明两者基本一致<sup>[6]</sup>。本文采用等效线性模型中的Davilenkov模型的土骨架曲线作为土体动力本构模型,具体描述如下:

$$\frac{G_d}{G_{max}} = 1 - H(\gamma_d) \tag{4}$$

其中

$$H(\gamma_d) = \left[ \frac{(|\gamma| / \gamma_\tau)^{2B}}{1 + (|\gamma| / \gamma_\tau)^{2B}} \right]^A \tag{5}$$

$$G_{max} = \rho V_s^2 \tag{6}$$

$$\gamma_\tau = \gamma'_\tau (0.01 \sigma'_0)^{1/3} \tag{7}$$

式中:  $A, B$  是试验参数;  $G_{max}$  是最大动剪切模量,  $\rho$  是土的密度,  $V_s$  是土的剪切波速,  $\gamma_\tau$  是参考剪应变,  $\sigma'_0$  是土的平均有效围压。对于土的滞回曲线  $D_{max} - \gamma$ , 根据有关试验结果可以用如下经验公式表示:

$$\frac{D_d}{D_{max}} = \left[ 1 - \frac{G}{G_{max}} \right] \tag{8}$$

其中,  $D_{max}$  为最大阻尼比,  $\beta$  为  $D - \gamma$  曲线的形状系数,对于大多数土,  $\beta$  的取值在 0.2~1.2 之间。

## 1.3 震动孔压上升规律

在地震荷载作用下,超孔隙水压的产生将引起有效应力的减小;如果土体属于各向同性固结,有效应力可能减小到 0 当超孔隙水压不断产生时,Seed及Lee(1966年)认为超孔隙水压增大到有效应力土体开始液化。曾经有人用过许多方法,做过许多试验来判断潜在的液化区域并预测地震荷载下的孔隙水压力。一种普遍被接受的方法是Seed等人于1967年创立的循环应力法,孔压比与循环次数比之间的关系式如下所示:

$$\frac{u_{excess}}{\sigma'_{3c}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left[ 2 \left( \frac{N}{N_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right] \tag{9}$$

式中:  $\alpha$  为常数,一般取 0.7;  $N$  为震动次数;  $N_1$  达到破坏所需的振动次数。

## 2 数值分析

### 2.1 数值分析模型

以 CZK5 断面为例,有限元网格划分见图 1,计算模型中沉管及土体均采用实体单元,模型长 260 m,约为沉管断面宽度的 11 倍,深度直到基岩。模型的上边界为自由边界,底边界固定,两侧边界为限制水平地震作用下的竖向变形,为减小边界影响,靠近两侧边界的单元阻尼比增大 2 倍。土层计算参数见表 1。

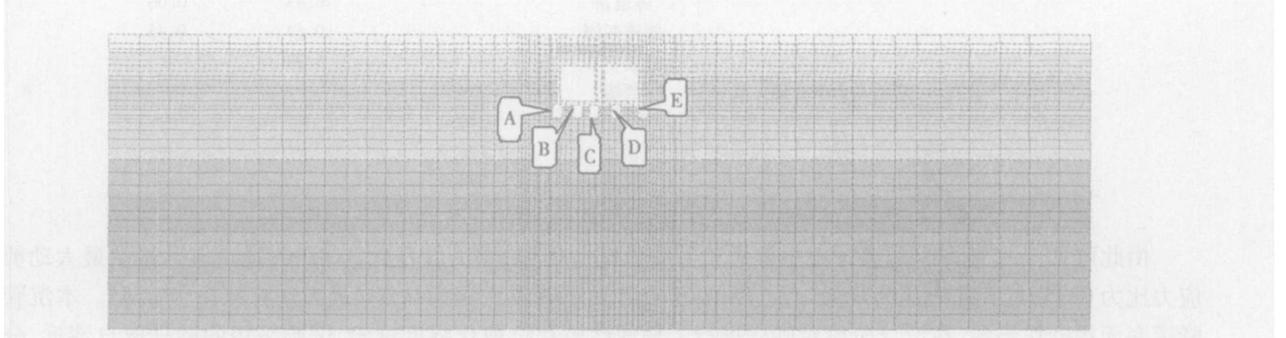


图 1 有限元网格

Fig 1 Mesh of finite element

表 1 土的动、静力计算参数

Table 1 Static and dynamic parameters of soil layers

土层	$\gamma / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$G_{\text{max}} / \text{MPa}$	$E_0 / \text{MPa}$	$\mu$	$D_{\text{max}}$	$E_d / \text{MPa}$
3-1 A 淤泥	15.6	13	2	0.43	0.25	38.7
3-2 粉细砂	18.0	18	15	0.27	0.2	54
5-2 砂质粘土	19.0	48	48	0.30	0.2	144
6 全风化岩	19.5	140	100	0.30	0.1	420
7 强风化岩	20.1	340	210	0.29	0.1	1020
8 中风化岩	25.0	910	200	0.27	0.05	2700
9 微风化岩	26.9	2000	5100	0.25	0.05	6000
片石覆土	19.0	48	48	0.25	0.2	140
砼衬砌	25.0	20000	20000	0.20	0.05	60000

### 2.2 地震波的选取

该工程场地处于地震基本烈度 7 度区,设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度 0.10g,特征周期 0.45s。本计算中选用国内学者普遍采用的唐山地震波进行计算,计算时根据场地卓越周期进行了调整,地震持续时间 25s。地震的时程曲线见图 2。

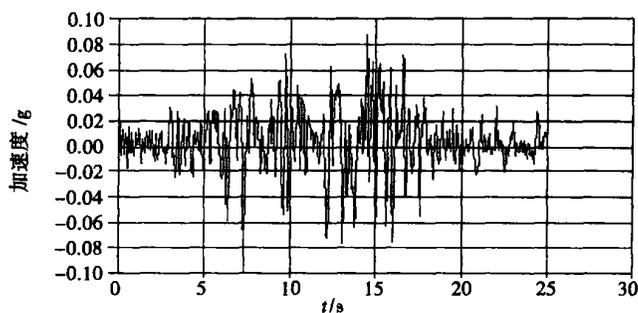


图 2 地震加速度时程曲线

Fig 2 Earthquake acceleration time history

### 2 3 计算结果分析

7度地震下,隧道结构最大动剪应力、结构周围土体中最大动剪应力比、孔压比结果见表 2。

表 2 隧道周围最大动剪应力(比)及动孔压比

Table 2 Maximum dynamic shear stress (ratio) and pore pressure ratio around tunnel

断 面	部 位	最大动剪应力 /kPa	动剪应力比	孔压比	
(Czk- 5断面)	土体动力响应最大值	隧道底		0.35	0.46
		隧道顶		0.93	0.06
		隧道两侧		0.64	0.45
		地表中心		0.83	0
	盾构动力响应最大值	侧墙	284.2		—
		中隔墙	346.4		—
		顶板	226.9		—
		底板	234.9		—

由此可见,7度地震时隧道顶土中最大动剪应力比为 0.93,最大孔压比为 0.06,隧道底砂垫层最大动剪应力比为 0.35,最大孔压比为 0.46,隧道两侧土中最大动剪应力比为 0.64,最大动孔压比为 0.45。本沉管隧道底面用砂作垫层,在设计阶段对砂样进行了物理性质和抗液化强度试验,试验采用的砂样取自清远,分别为清 1号 and 清 2号砂。由试验结果可知,清 1号纯砂的密实度为到 0.62时,其抗液化剪应力比为 0.385,加配 5%水泥熟料后,其抗液化剪应力比提高到 0.425;清 2号纯砂的密实度为 0.66时,其抗液化剪应力比为 0.347,加配 5%水泥熟料后,其抗液化剪应力比提高到 0.366。

### 3 结语

本文采用动力有限元模型,通过计算分析得到全面考虑工程场地土动模量、阻尼比、振动孔隙水压力发展规律的沉管隧道的地震响应,结论如下:

- (1) 7度地震下,隧道顶土中最大动剪应力比为 0.93,最大孔压比为 0.06,隧道两侧土中最大动剪应力比为 0.64,最大动孔压比为 0.45。
- (2) 7度地震作用下,沉管隧道底最大动剪应力比为 0.35,加配 5%水泥熟料后试验砂样清 1号砂、清 2号砂抗液化剪应力比分别能达到 0.425、0.366,其强度均能满足隧道底砂垫层抗液化剪应力比的要求。
- (3) 本文通过有限元计算得到的结论将为广州沉管隧道设计提供理论依据,并为今后类似工程提供参考。

### 参考文献:

[ 1 ] 高红杰.砂土地震液化的机制与形成条件[ J].科技交流, 2003, ( 33): 118.

[ 2 ] Takashi Matsuda et al. A study on damage of under-ground subway structures during the 1995 hyogokennanbu earthquake. Geotechnical engineering in recovery from urban earthquake disaster. Kagaku 97: 339- 348.

[ 3 ] 吴晓峰,周健,董鹏.软土地层中双圆盾构法隧道的抗震分析[ J].工程抗震, 2004 ( 4): 27.

[ 4 ] 杨小礼,李亮.层状地基中交通隧道地震反映分析[ J].长沙铁道学院学报, 2000 ( 12): 18.

[ 5 ] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves[ J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 1972, 98( SM 7): 667- 691.

[ 6 ] Martin P P, Seed H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[ J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108 (GT7): 935- 952.