



申请同济大学工学博士学位论文

地下综合管廊地震反应分析与抗震可靠性研究

(国家自然科学基金委创新研究群体资助项目 编号:50321803,50621062)

培养单位: 土木工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 结构工程

研究生: 岳庆霞

指导教师: 李杰 教授

二〇〇七年八月



A Dissertation Submitted to
Tongji University in Conformity with the Requirements for
the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering

Seismic Response Analysis and Reliability of Utility Tunnel

(Funded by National Natural Science Foundation of China for
Innovative Research Groups, Grant No. 50321803 & 50621062)

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Candidate: Yue Qingxia

Supervisor: Prof. Jie Li

August, 2007

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：

学位论文作者签名：

年 月 日

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：

年 月 日

摘要

地下综合管廊是将两种或两种以上的管线放置其中而形成的一种公共基础设施。它是城市生命线工程基础设施发展的方向，与此同时，对其进行地震作用下的响应及抗震可靠度研究具有重要的理论和现实意义，但这方面却基本未见文献提及，基于这种背景，提出了本文的研究课题。

本文首先对影响地下综合管廊结构地震响应分析正确性的关键因素（如人工边界条件、有效应力法等）进行了研究，并用算例进行了说明，这些研究为地下综合管廊的地震响应分析奠定了基础。然后借助有限元软件 ABAQUS，建立了三维有限元整体分析模型。在有限元模型中，考虑了人工边界条件、接触面、土体塑性以及土体有效应力等要素。对地下结构的地震动输入形式进行了研究，指出用位移输入可以得到更精确的结果。在以上研究的基础上，对地下综合管廊在地震作用下的响应进行了分析，并对主要影响因素，如人工边界条件、接触面、有效应力、行波效应以及非一致地震激励分别进行了分析比较。研究发现，地下综合管廊在剪切波作用下呈现整体弯曲变形，与土体在剪切波作用下的变形相同。边界条件及非一致激励对结构响应的影响最大，其中自由边界与无限单元的情况，相对误差最大可达 153.03%，最小也达到了 66%。而非一致激励比一致激励应变幅值有很大增加，最小达到了 30%，最大则达到了 8 倍。因此，在地下综合管廊结构分析中应对边界条件及多点地震动输入特别注意。

地下综合管廊属于浅层地下结构，埋深较浅，面波尤其是 Rayleigh 波将对其响应影响巨大。本文研究了土体中 Rayleigh 波的传播特性，根据 Rayleigh 波的特点，首次提出了近似 Rayleigh 地震波场的概念，并利用傅立叶变换求得近似 Rayleigh 地震波场，研究了地下综合管廊结构在 Rayleigh 波作用下的响应。研究表明：对于浅埋地下结构而言，Rayleigh 波的影响不可忽略，且呈现出与剪切波作用不同的特点，结构顶面对应点的轴向应变幅值是对应底面点的 2 倍左右。

借助本课题组进行的振动台试验，将数值结算结果与试验结果进行了对比，结果表明，二者符合较好。这一方面验证了本文计算建模方法的正确性，也为后续的研究奠定了基础。

结构设计的最终目的，是试图实现基于可靠度的设计。本文将基于物理随机

地震动模型进行了扩展，与谱表现方法相结合，合成了多点随机地震动。利用概率密度演化方法，计算了地下综合管廊结构在随机地震动作用下的随机地震反应。并分析了地下综合管廊结构的破坏机制，利用等价极值事件思想，计算了地下综合管廊结构的抗震可靠度，为实现地下综合管廊动力可靠性的精细化分析奠定了基础。

关键词：地下综合管廊，随机地震动，非一致地震激励，Rayleigh 波，振动台试验，概率密度演化方法，抗震可靠度

ABSTRACT

A utility tunnel is a public underground structure that holds wires, conduits, and pipes of power, gas, water supply and communication utility system and provides also enough space for maintenance operation. Construction of utility tunnel represents the future orientation of development for underground infrastructure system in both megalopolis and small towns due to its many advantages as improving the reliability, reducing deferred maintenance and improving the environment. However, few researches have been carried out so far about the dynamic responses and reliability of utility tunnel under earthquake attack. This fact invokes the research of this paper.

This paper first investigates some key factors that are crucial for proper earthquake response analysis of utility tunnel, such as artificial boundary conditions and the effective stress method. And some examples are investigated. This has laid a solid foundation for modeling of utility tunnel. Taking ABAQUS as a platform, a three dimensional finite-element-model (FEM) of soil-structure system is established, in which the artificial boundary conditions, contact between soil and structure, the plasticity of soil and the effective soil stress method are considered. The type of input for underground structure analysis is then studied and it is found more accurate responses can be obtained when displacement time history of earthquake wave is adopted. Based on all the above results, the dynamic seismic response of utility tunnel has been calculated using the proposed model. The influences of factors as artificial boundary conditions, contact feature, effective stress method, wave passage effect and inconsistent seismic excitation on the dynamic responses of utility tunnel has been investigated. The results reveal that the utility tunnel show global bending deformation pattern under shear wave excitation and the amplitude of deformation is the same as soil. The artificial boundary conditions and the inconsistent excitation have much more significant influence on the structural responses than other factors. Therefore, special attention should be paid on these two factors for seismic responses analysis.

Since the utility tunnel is a typical shallow-buried structure, the earthquake surface wave especially Rayleigh wave will have considerable effect on the structural response. To learn the effect of Rayleigh wave, the propagation characteristics of Rayleigh wave in soil is reviewed and approximate Rayleigh earthquake wave is simulated using Fourier transform technique. Taking the simulated Rayleigh wave as input, the seismic response of utility tunnel is calculated. The results demonstrate that the effect of Rayleigh wave on the seismic response of shallow-buried underground structures can not be ignored. And it shows that the deformation is mainly the bending and the amplitude of the strain at the top of the structure is about 2 times bigger than the corresponding bottom point.

The numerical model suggested is then applied to an experimental model and the computational results are compared with shaking table test results. The numerical results and the test results match quite well. The feasibility and efficiency of the proposed FEM model is validated by the comparison, and it can be adopted for further investigations.

Reliability-based design is the final goal of structural design. This paper extends the physical stochastic earthquake model, using the spectral representation method, to get the stochastic inconsistent excitation. Then based on the probability density evolution method (PDEM), the probability density surface is calculated. Furthermore, the failure criterion of utility tunnel is analyzed and the equivalent extreme value event is introduced and applied to calculate the seismic reliability.

Key Words: Utility tunnel, Statistic seismic motion, Inconsistent seismic excitation, Rayleigh waves, Shaking table test, Probability density evolution method, Dynamic reliability

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 地下结构的抗震研究现状	2
1.2.1 拟静力方法	5
1.2.2 数值计算方法与结构破坏机理.....	8
1.2.3 振动台试验研究	10
1.3 地下结构抗震研究中的关键问题	12
1.3.1 土的非线性动力本构关系.....	12
1.3.2 总应力法和有效应力法.....	13
1.3.3 人工边界条件	15
1.3.4 土与结构接触面的研究.....	17
1.3.5 随机地震动输入	21
1.4 动力可靠度研究进展	26
1.5 本文主要工作	28
第二章 地下综合管廊抗震分析中的关键问题研究.....	30
2.1 引言	30
2.2 ABAQUS 有限元简介	30
2.3 土体本构模型—Drucker-Prager 模型简介	31
2.3.1 模型简介	31
2.3.2 模型标定	32
2.4 土体与结构之间接触面的模拟	34
2.5 人工边界条件	38
2.5.1 各种边界条件的简要说明.....	38
2.5.2 对比分析案例	46
2.5.3 小结	49

2.6 饱和土体的有效应力法	49
2.6.1 基本理论	50
2.6.2 算例	52
2.6.3 小结	54
2.7 本章小结	54
第三章 地下综合管廊结构确定性地震反应研究	55
3.1 引言	55
3.2 非一致地震激励的合成	55
3.2.1 一维单变量的情况	57
3.2.2 一维多变量的情况	58
3.2.3 FFT 技术在随机过程模拟中的应用	60
3.3 地震动合成实例	64
3.3.1 合成的参数	64
3.3.2 合成结果	66
3.3.3 合成地震动的验证	67
3.3.4 小结	69
3.4 地下结构的地震作用特点	69
3.4.1 地下结构地震作用的特点	69
3.4.2 地震动加速度时程积分	71
3.5 地下综合管廊结构响应分析	73
3.5.1 计算模型及参数说明	73
3.5.2 计算结果	75
3.6 影响因素分析	77
3.6.1 边界条件的影响	77
3.6.2 接触面的影响	78
3.6.3 饱和土体的影响	79
3.6.4 行波效应	80
3.6.5 非一致地震激励的影响	82

3.7 本章小结	83
第四章 近似 Rayleigh 波作用下地下综合管廊响应分析	85
4.1 引言	85
4.2 波动有限元简介	86
4.3 Rayleigh 波简介	88
4.4 Rayleigh 近似地震波的模拟	92
4.5 正弦波脉冲作用下自由场波动分析	97
4.6 Rayleigh 波作用下地下综合管廊结构的响应分析	101
4.6.1 Rayleigh 稳态波作用下的响应分析	101
4.6.2 近似 Rayleigh 地震波作用下的响应分析	105
4.7 Rayleigh 波峰值与地震烈度的近似对应关系	111
4.8 本章小结	112
第五章 地下综合管廊结构振动台模型试验研究	113
5.1 引言	113
5.2 试验简介	113
5.3 自由场试验	115
5.3.1 试验概况	115
5.3.2 模型说明	117
5.3.3 计算结果与试验结果的对比	119
5.4 一致激励下地下综合管廊结构横向振动台试验	121
5.5 本章小结	125
第六章 地下综合管廊随机地震反应及抗震可靠度研究	126
6.1 引言	126
6.2 随机系统的概率密度演化方法	126
6.2.1 随机系统地震反应分析的概率密度演化方程	127
6.2.2 概率密度演化方程的数值求解	128
6.3 地下综合管廊结构的随机地震反应研究	132

6.3.1 随机地震动模型	132
6.3.2 地下综合管廊结构随机地震反应.....	135
6.4 地下综合管廊结构的动力可靠度	137
6.4.1 等价极值事件	138
6.4.2 极值分布的数值算法.....	137
6.4.3 地下综合管廊结构的可靠度.....	140
6.5 本章小结	142
第七章 结论和展望	143
7.1 主要结论	143
7.2 研究展望	143
参考文献	145
个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果	155
致谢	156