



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

地下综合管廊地震反应分析与工程设计 方法研究

(国家自然科学基金委创新研究群体科学基金 编号: 50621062/E0805)

(科技部国家重点实验室基础研究项目 编号: SLDRCE08-C-03)

姓 名: 蒋录珍

学 号: 0710020012

所在院系: 土木工程学院 建筑工程系

学科门类: 土木工程

学科专业: 结构工程

指导教师: 李 杰 教授

屈文俊 教授

二〇一一年六月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

**Research on Seismic Response and Design
Methods of Underground Utility Tunnel**

(Supported by the National Natural Science Foundation of China for
Innovation Research Groups, Grant No. 50621062/E0805)
(Research Fund for Young Teachers Supported by the State Key Laboratory
for Disaster Reduction in Civil Engineering, Grant No. SLDRCE08-C-03)

Candidate: Luzhen Jiang

Student Number: 0710020012

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Supervisor: Prof. Jie Li

Prof. Wenjun Qu

June, 2011

摘要

作为新型地下结构，地下综合管廊是现代化城市生命线基础设施的发展方向。而目前国内尚没有针对这种浅埋地下结构的抗震设计方法，本文即在此背景下，进行课题研究，主要包括：

1. 以本课题组进行的振动台试验为基础，进行了有限元数值分析，建模中考虑了土体材料的非线性特性、土-结构动力相互作用、模型箱效应、初始应力场的平衡、并用非线性弹簧单元来考虑接头的影响。计算结果表明：有限元计算结果与试验实测结果吻合很好，说明有限元建模方法合理，为后续工作奠定基础。

2. 建立了地下结构原型场地有限元模型，分析了三种地震波：P波、SV波和 Rayleigh 波作用下地下综合管廊结构的地震响应大小，结果说明：剪切波是引起浅层地下结构水平振动的主要原因，P波和 Rayleigh 波对浅层地下结构的作用主要集中在竖向振动。

3. 基于波动力学理论，考虑土-结构动力相互作用、土介质特性及地震波的传播特性，提出了地下结构地震作用下的动土压力简化抗震设计方法。将土-地下结构体系简化为单自由度的质量-弹簧-阻尼体系，得到作用在结构上的动土压力，进而可得整个结构上的动土压力分布。建议方法为地下结构的抗震设计提供了一种简单、实用的工具。

4. 以振动台试验结果和有限元原型场地模型对本文提出的动土压力简化抗震设计方法进行了验证，并以工程应用实例来说明该方法的应用。研究表明：地震作用下，地下结构的动力放大作用非常明显，最大可达到 2.8 倍，因此，考虑地下结构抗震设计是非常有必要的。对于双仓的地下综合管廊结构，中柱为结构抗震的薄弱环节，应加强设计。

关键词：地下综合管廊，振动台试验，土-结构动力相互作用，动土压力，抗震设计

ABSTRACT

As a new type of underground structure, underground utility tunnel is the development direction of modern urban lifeline facility. However, there is no seismic design method for this kind of shallow buried underground structure in China. This fact invokes the reseach of this paper. The content of this paper can be expressed as follows:

1. Based on the shaking table test, FEM numerical model is established, considering soil nonlinear property, soil-structure dynamic interaction, model box effect, initial stress balance and nonlinear spring element for the joint. The computational results show: the numerical results and the expermental measurements match quite well, which proves the numerical modeling method is in reason. The validated numerical model can be adopted for further analysis.

2. Underground structure prototype FEM model is established, under three types of seismic wave incidence: P wave, SV wave and Rayleigh wave. It draws the conclusion that SV wave is the key factor resulted in the shallow buried underground structure horizontal vibration, while P wave and Rayleigh wave induce the vertical vibration.

3. A dynamic soil pressure method is advanced based on wave mechanics, taking soil-structure dynamic interaction, soil properties and seismic wave propagation into consideration. Soil-structure system is simplified into a SDOF mass-spring-damp system, consequently dynamic soil pressure on the structure is obtained and so the pressure distribution on whole structure. The proposed method provides a simple and practical tool for underground structure seismic design.

4. The dynamic soil pressure method is validated by shaking table test results and FEM prototype model, and an engineering example illustrates the application of the proposed method. It comes to the conclusions that under earthquake excitation the response of underground structure has a significant amplification, and reaches 2.8 times. So it is essential to consider seismic design on underground structures. Centrol column of a double-hole underground utility tunnel is vulnerable to failure under earthquake.

Key Words: Underground utility tunnel, Shaking table test, Soil-structure dynamic interaction, Dynamic soil pressure, Seismic design

目录

摘要.....	i
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 地下结构的震害.....	1
1.2.1 地下结构的震害特征.....	1
1.2.2 地下结构的破坏形式.....	3
1.3 地下结构抗震分析方法综述.....	4
1.3.1 静力或拟静力方法.....	4
1.3.2 土-结构拟静力相互作用法.....	9
1.3.3 土-结构动力相互作用法.....	13
1.3.4 动土压力法.....	14
1.3.5 各种分析方法比较.....	14
1.4 地下结构抗震分析中的关键问题.....	15
1.4.1 边界处理.....	15
1.4.2 土体动力本构模型.....	16
1.4.3 土-结构接触面.....	18
1.5 本文的主要工作.....	19
第 2 章 地下综合管廊振动台试验有限元建模分析.....	21
2.1 引言.....	21
2.2 振动台试验简介.....	21
2.2.1 试验目的和内容.....	21
2.2.2 试验设备.....	22
2.2.3 模型设计和模型制作.....	23
2.2.4 试验输入地震波.....	24
2.2.5 试验工况与步骤.....	26
2.2.6 传感器布置及加载制度.....	26
2.3 有限元建模.....	32
2.3.1 试验数据的预处理.....	32
2.3.2 模型建立.....	33
2.4 结果分析.....	38

2.4.1	一致激励试验.....	38
2.4.2	纵向非一致激励试验.....	46
2.4.3	横向非一致激励试验.....	49
2.5	本章小结.....	53
第 3 章	地震波波型对地下结构地下响应的影响分析.....	55
3.1	引言.....	55
3.2	人工边界条件.....	55
3.3	波动输入方法.....	56
3.3.1	体波输入方法.....	56
3.3.2	瑞利波的生成与输入.....	59
3.3.3	Rayleigh 波自由场模型验证.....	61
3.4	地震波波型对地下综合管廊结构的影响分析.....	63
3.4.1	瑞利波作用下地下综合管廊地震响应分析.....	63
3.4.2	地震波波型影响分析.....	64
3.5	大开车站破坏机理分析.....	66
3.5.1	阪神地震中神户大开地铁车站震害概况.....	66
3.5.2	大开车站文献研究综述.....	72
3.5.3	有限元计算模型及相应参数.....	73
3.5.4	计算结果分析.....	74
3.6	本章小结.....	76
第 4 章	地下综合管廊动土压力工程计算模型.....	79
4.1	引言.....	79
4.2	挡土墙动土压力计算文献综述.....	79
4.3	地下结构模型简化.....	82
4.3.1	基本假定.....	82
4.3.2	简化模型的提出.....	83
4.4	波动方程的建立与求解.....	83
4.4.1	基本方程.....	83
4.4.2	波动方程求解.....	85
4.4.3	模型参数 M、C、K 的确定.....	88
4.4.4	土体阻抗的确定.....	89
4.4.5	确定等效外荷载.....	90
4.4.6	基准动土压力.....	90

4.5 地震作用下地下结构动土压力分布函数.....	91
4.5.1 基本分布函数.....	91
4.5.2 顶板动土压力放大系数 κ	92
4.6 动土压力计算步骤.....	92
4.7 几点讨论.....	93
4.7.1 埋深的影响.....	93
4.7.2 模型适用性.....	93
4.7.3 本文模型与拟静力法的区别.....	94
4.8 本章小结.....	94
第 5 章 地下结构动土压力模型的验证.....	95
5.1 引言.....	95
5.2 验证 1: 振动台试验.....	95
5.2.1 与试验实测结果比较.....	96
5.2.2 与振动台试验的数值模拟结果比较.....	99
5.3 验证 2: 原型场地.....	102
5.3.1 动土压力法计算.....	102
5.3.2 结果比较.....	102
5.4 本章小结.....	104
第 6 章 地下综合管廊工程实例分析.....	105
6.1 工程概况.....	105
6.2 场地地震效应.....	105
6.3 材料参数.....	106
6.4 荷载条件.....	106
6.4.1 静力荷载.....	106
6.4.2 动力荷载.....	109
6.5 有限元计算.....	112
6.6 结果分析.....	113
6.7 本章小结.....	116
第 7 章 结论与展望.....	117
7.1 研究结论.....	117
7.2 工作展望.....	118
致谢.....	119

参考文献.....	121
附录 A 非一致激励振动台试验的数值模拟结果.....	131
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	141