

文章编号:1006-7329(2002)05-0052-06

# 大跨度地下结构振动性态试验研究\*

赵大鹏, 宫必宁, 晏成明

(河海大学 水利水电学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**介绍了某大跨度地下结构的振动台试验,通过试验对拟定结构的自振频率、阻尼比及动力响应进行分析,并重点分析了地下结构对竖向地震激励的响应。讨论了在不同埋深下,土与结构的相互作用对地下结构抗震性能的影响。

**关键词:**地下结构; 竖向地震; 振动台试验; 振动性态

**中图分类号:**TU311

**文献标识码:**A

目前地下结构抗震研究以数值模拟为主,但关于土与结构相互作用的基本动力学特性和物理机制研究不多,本文通过模拟地震振动台试验,研究地铁车站结构地震响应基本规律,对基本土体和结构形式考虑地震输入、土与结构相互作用,分析体系变形、结构地震动力响应、破坏形态的机制,并讨论各因素影响作用。

## 1 模型的设计和制作

考虑到现有的大多数地铁车站属于矩形断面,且此结构为多数大跨度地下结构所采用,因此试验选取矩形断面的拟定框架结构为研究对象。拟定结构用有机玻璃加工而成,结构模型尺寸为60 cm×60 cm×24 cm(如图1),其中柱横断面尺寸为1.2 cm×1.2 cm,顶底板厚度为1.2 cm,侧壁厚度为0.5 cm。实验用箱体(尺寸为2.7 m×1.2 m×0.8 m)装细干砂以模拟地基土,砂层的深度为1 m。实验中地下结构采用10 cm和36 cm两种埋深(见表1,表2)。拟定结构按1:50的比例模拟跨度30 m、高12 m的地下结构<sup>[1]</sup>,理想土体埋深分别为5 m(浅埋)和18 m(深埋)。

## 2 试验设备

试验采用大型振动台系统,系统配置功能很强的MTS地震软件包,可进行各种实时控制,振动分析及数据处理。数据采集使用中国水利科学研究院与河海大学共同研制的CDSF振动信号采集处理系统和分析软件。

## 3 测点布置

试验采用加速度传感器、电阻应变片、压力传感器和位移计,分别布置在结构和土体中。具体的测点布置如图1(其中各数字代表试验中各传感器所对应的通道号)。

## 4 试验工况

本次试验选择三种波形:白噪声、阪神波和El-Centro波。考虑到竖向地震及水平和竖向地震

\* 收稿日期:2002-07-05

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2001018)

作者简介:赵大鹏(1976-),男,硕士生,主要从事地下结构的抗震控制与分析研究。

的相互耦合,试验工况分别采用水平(X向)、垂直(Z向)和水平垂直双向地震波输入,垂直地震动加速度值取水平加速度的2/3;并分两种埋深进行试验。

表1 埋深为10 cm的部分加载方案(浅埋)

试验序号	加载方向		波形	量级 $g$		持时/s	工况名
	X	Z		X	Z		
1	✓	✓	白噪声	0.2	0.13	30	B1
2	✓		EL-Centro	0.1		10	E1
3	✓		Kobe	0.1		10	KB1
4	✓	✓	Kobe	0.1	0.1	30	KB2
8	✓	✓	白噪声	0.2	0.13	30	B2
9	✓		EL-Centro	0.3		10	E3
10	✓		Kobe	0.3		10	KB5
11	✓	✓	Kobe	0.3	0.2	10	KB6
26	✓		Kobe	0.7		10	KB13
27	✓	✓	Kobe	0.7	0.47	10	KB14
28	✓	✓	白噪声	0.2	0.13	30	B7
29	✓		EL-Centro	0.8		10	E8

注:表中的  $g$  为重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$ (下同)。

表2 埋深为36 cm的部分加载方案(深埋)

试验序号	加载方向		波形	量级 $g$		持时/s	工况名
	X	Z		X	Z		
1	✓		白噪声	0.2		30	L1
2	✓		EL-Centro	0.1		10	EL1
3	✓		EL-Centro	0.2		10	EL2
4	✓		白噪声	0.2		30	L2
5	✓		EL-Centro	0.3		10	EL3
6	✓		EL-Centro	0.4		10	EL4
7	✓		白噪声	0.2		30	L3
8	✓		EL-Centro	0.5		10	EL5
9	✓		EL-Centro	0.6		10	EL6
10	✓		白噪声	0.2		30	L4
11		✓	白噪声		0.2	30	LV4
12		✓	Kobe		0.1	10	BS1
13	✓		Kobe	0.17		10	BS2
14	✓	✓	Kobe	0.17	0.1	10	BS3
15		✓	Kobe		0.2	10	BS4
16	✓		Kobe	0.3		10	BS5
17	✓	✓	Kobe	0.3	0.2	10	BS6
18	✓	✓	白噪声	0.2	0.1	30	L5
19	✓		Kobe	0.37		10	BS7
20	✓	✓	白噪声	0.2	0.1	30	L6

## 5 动力分析

### 5.1 自振频率

试验表明,土和结构的水平向自振频率一致,但在垂直方向有差别。土、结构的侧壁和结构的中柱垂直向的基频接近,但二、三阶频率离散较明显,中柱的频率高于侧壁的频率,侧壁和土体的垂直向自振频率比较接近。

在深埋情况,随着振动量级的增大,结构的水平向自振频率逐渐降低,其中一阶自振频率最终降低7.78%、二阶降低4.22%、三阶降低9.44%。在浅埋情况,体系的水平向自振频率逐渐减小,基频基本不变。垂直向一阶和三阶自振频率有增大趋势,二阶自振频率则在中间阶段上升而后下

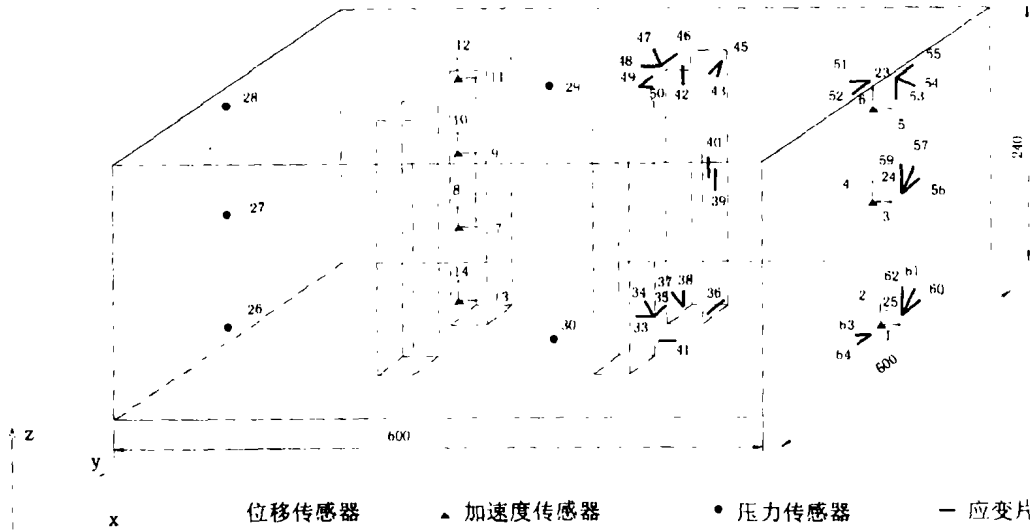


图1 拟定结构模型测点布置图

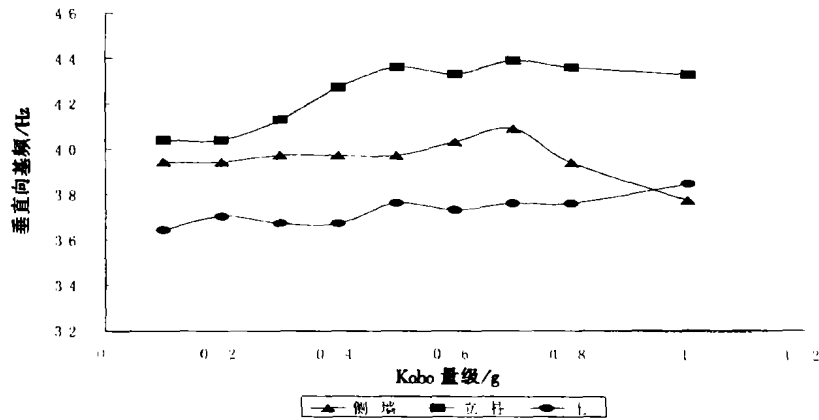


图2 结构各部分垂直向基频变化图(浅埋)

降(如图2)。这可能是由于结构上覆盖土层厚度较小,土体在振动过程由紧密变松散,再由松散变紧密,影响了整个体系的特性,导致上述自振频率的变化。

5.2 拟定结构水平向阻尼比

试验表明,拟定结构的立柱和侧壁以及土体在水平方向的振动特性呈较好的一致性(如图3,4)。与一般地面结构相比,地下结构的阻尼比增大很多。以一阶阻尼为例,相同的拟定结构,如果是地面结构,其阻尼比一般在0.05以下,而埋入地下后则大于0.15<sup>[2]</sup>。

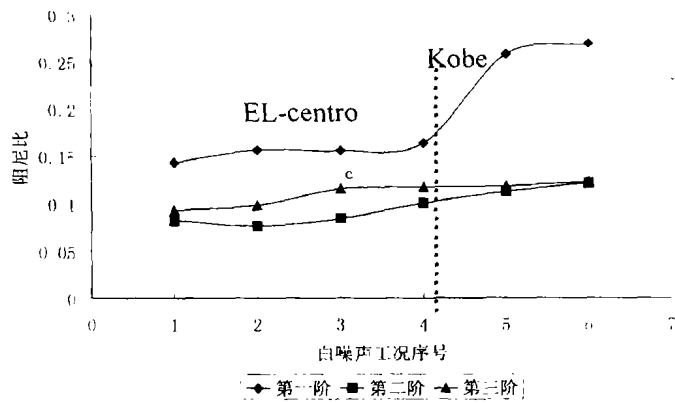


图3 模型水平向阻尼比变化图(深埋)

在深埋情况,各阶阻尼比均有所增加,这说明在土体的承载能力范围内,随着振动次数的增加,土体变得密实,土和结构接触紧密,增加了体系的整体性,改变了整个体系的自振特性,即自振频率降低,阻尼比增加。当有阪神波参与时,拟定结构的一阶阻尼比大幅度增加,这说明此种情况 Kobe 波比 El - Centre 波更易影响结构的特性,尤其是竖向激励的参与。

但浅埋时,结构的阻尼比则呈波动变化。因为浅埋时土体的约束作用相对较小,在振动过程中,土体时密时松导致结构的阻尼比的波动变化。

### 5.3 加速度响应

随着振动次数和量级的增加,各测点水平向和垂直向加速度均呈递增趋势。无论是土、结构侧壁或是结构的立柱,均是上部测点的加速度值最大(如图5,6)。这表明,对于类似于本次试验的场地土对基岩传递的地震有放大作用。当大量级激励时,加速度分布呈马鞍状,结构顶部响应剧烈。在地震作用下结构上部和侧壁顶部要承受的地震响应最大,极易遭到破坏。体系中各点的水平加速度时程曲线差别不大,且相位一致;但各点垂直向加速度的差别要大一些,立柱较侧壁的曲线相位滞后。这种结构中不同位置的相位差可能会增加结构的扭转变形,进而加大结构中的垂直向内力,导致垂直向地震引起更大的结构破坏<sup>[3]</sup>。

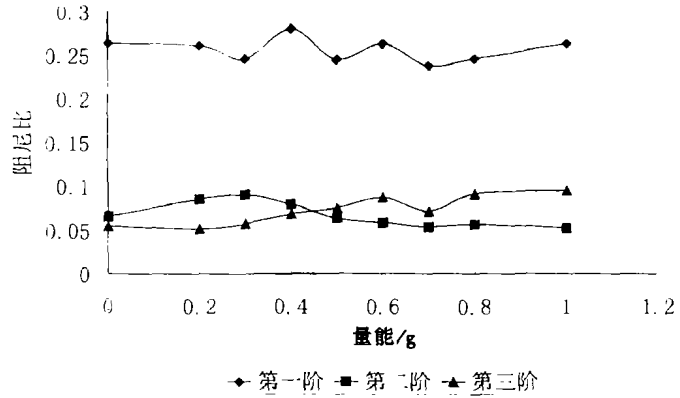


图4 模型水平向阻尼比变化图(浅埋)

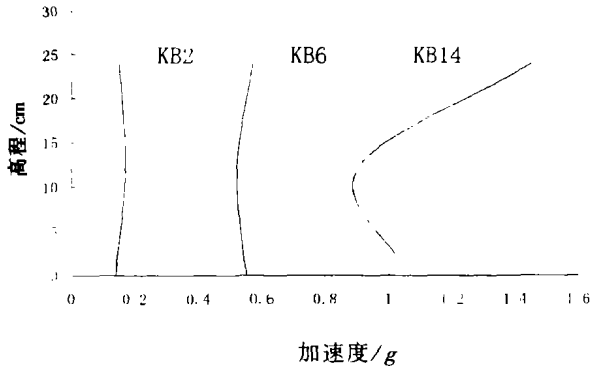


图5 侧壁水平加速度随高程变化

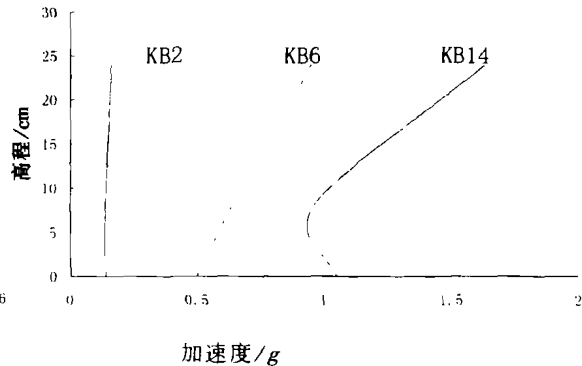
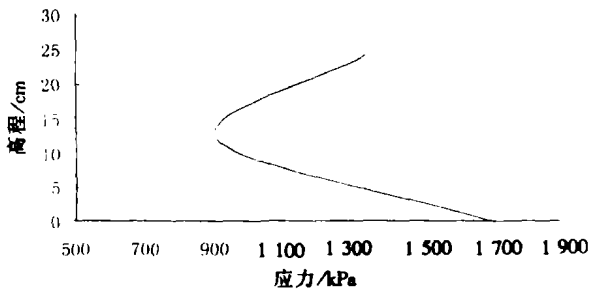


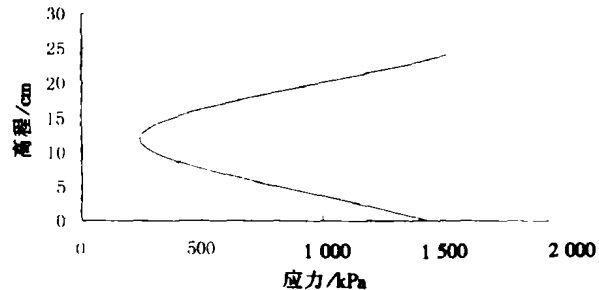
图6 立柱水平加速度随高程变化

### 5.4 应力响应

拟定结构立柱的竖向应力最大值在根部,约为1.7 Mpa(如图7)。柱上测点的竖向应变值远大于横向,说明立柱的应力主要为弯矩应力和剪切应力。柱根部应力大于柱中部的应力,是因为结构的摆动所产生的弯矩由立柱来承担,在立柱的两端引起大的弯矩,所以在根部产生较大的垂直向应力,而且当有竖向激励参与时,也会在立柱产生较大的轴向应力<sup>[3]</sup>。



KB14 立柱应力随高程的变化



KB14 侧壁应力随高程的变化

图7 结构应力随高程的变化

侧壁的竖向应力最大值在顶部,约为1.5 MPa。因为结构的垂直荷载在侧向变形下将产生附加弯矩,过大的侧向变形使结构产生附加内力。埋深对结构不同位置的影响也不同。结构中部的

应力值在浅埋时要大于深埋的情况,因为浅埋时土体的约束作用减小,结构扭转变形加大,结构的运动幅度也增大,导致与土体的相互作用加剧,产生拉压、扭转和错动作用的迭加。

### 5.5 位移响应

在振动量级增大过程中,各测点的相对位移呈波动变化,但各工况下最大值都在结构的顶部。对于两种不同埋深,浅埋情况下的相对位移值要大于深埋。这说明深埋能更好的限制结构的相对位移。对于双向激励,在振动开始阶段,各测点的位移值要大于任一单向激励的情况。但随着量级的增大,单向激励所引起的相对位移则要稍大一些(如图9,其中BS5、BS6分别为深埋单、双向激励工况)。这说明在大量级振动情况下,垂直输入反而限制了各测点的相对运动。垂直激励造成土体的沉陷,影响了土体的密实度,进而增大了对结构的约束作用。

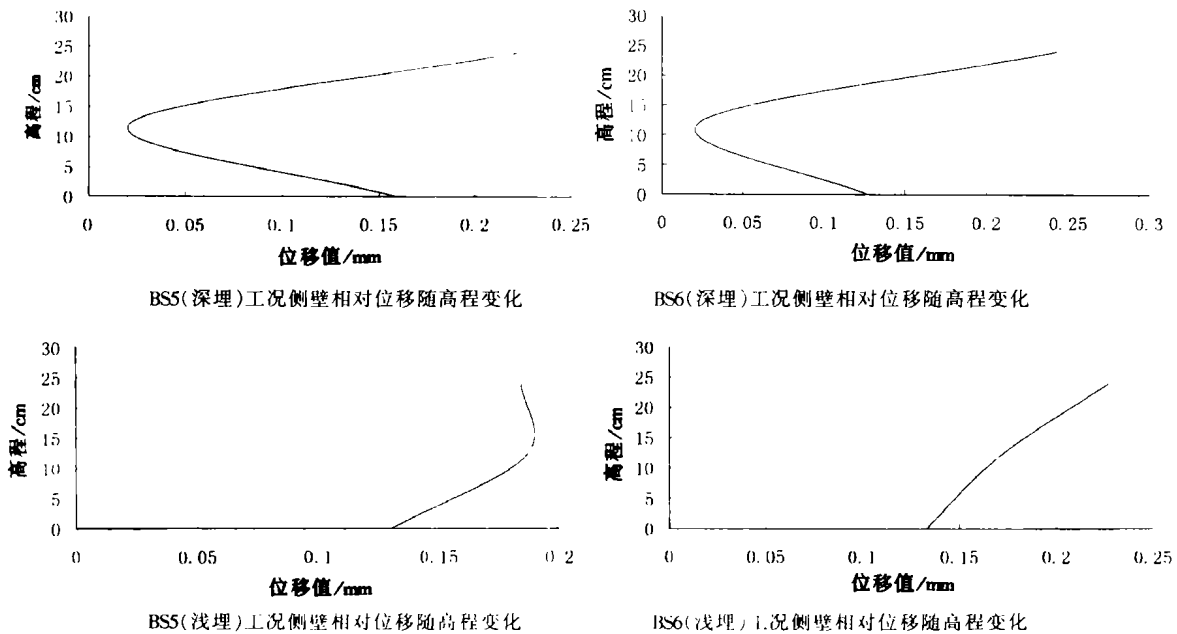


图8 相对位移随高程变化图

## 6 结论

1) 对于由土体和地下结构组成的结构体系,由于土体和结构之间的相互作用,两者的自振特性都有所变化,且趋于一致,其中土体起主导作用。不同埋深所对应的体系的自振频率也有所不同,浅埋深情况的自振频率分布频段比深埋深情况要广。

2) 与一般地面结构相比,地下结构体系的阻尼比增大很多。当有 Kobe 波(包含大量级竖向激励)参与时,体系的阻尼比将大幅度增加。

3) 无论是土、结构侧壁或是结构的立柱,均是上部测点的加速度最大。

4) 结构立柱的最大正应力发生在底部,侧壁的最大应力则是在顶部。在有垂直激励时,立柱中产生较大的拉压应力,尤其在立柱的中上部。

(5) 地下结构侧壁的位移分布,深埋时呈马鞍状分布,浅埋时由下至上依次增大。

## 参考文献:

- [1] 左东启,等.模型试验的理论和方法[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [2] 傅志方,等.振动模态分析与参数识别[M].北京:机械工业出版社,1990.

[3] 钱培风. 竖向地震力和抗震砌块建筑[M]. 北京: 中国大地出版社, 1997.

## Experimental Analysis of Vibration Behavior for Large – span Underground Structure

ZHAO Da – peng, GONG Bi – ning, YAN Cheng – ming

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In this paper, a shaking table test for large – span underground structure is introduced. Based on the test, the frequency of inherent vibration, damping ratio and the dynamic response of the structure are studied. The response of the underground structure for vertical seismic excitation is studied as a key point. With the different imbedding depth, the influence of interaction of soil and structure on the earthquake – resistant capacity of the underground structure is discussed.

**Keywords:** underground structure; vertical earthquake; shaking table test; vibration behavior

(上接第 51 页)

## Review and Verification of Warping Theory by Computer

LI Kai – xi, WANG Yong – ning, BAI Hong – yuan

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing University B, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The stress and deformation of thin – wall beam formed structure is calculated by "movable coordinate method" of warping theory on computer. By comparison with the classical theory of thin – wall structure, it is proved that the new theory is correct and the results are credible. On this basis, the advantage of this method and the future of its application are reviewed.

**Keywords:** Warping theory; dynamic coordinate method; thin – wall beam formed structure