

# 基于模态等效法的地铁车站抗震 虚拟实时混合试验研究<sup>\*</sup>

袁 勇<sup>1</sup> 杨澄宇<sup>1</sup> 蔡雪松<sup>2\*\*</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 200092, 上海;

2. 哈尔滨工程大学烟台研究(生)院, 265501, 烟台//第一作者, 教授)

**摘 要** 地铁车站结构抗震混合试验技术采用地层-结构模式研究结构的抗震性能, 其中数值子结构的计算量大。本文在模态等效法虚拟混合试验架构的基础上, 根据地铁车站结构受力特点进行子结构划分, 提出了基于模态等效法的地铁车站结构抗震虚拟实时混合试验方法, 并以实际工程为背景进行了虚拟试验, 分析了地铁车站关键构件在地震过程中的响应。结果表明: 混合试验结果与数值结果匹配较好, 子结构划分技术合理。所提出的混合试验方法可为后续物理实时混合试验提供理论基础。

**关键词** 地铁车站; 抗震分析; 实时混合试验; 质点弹簧模型

**中图分类号** TU352.1<sup>+</sup>1:U231<sup>+</sup>.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.08.042

## Research on Virtual Real-time Hybrid Test of Metro Station Seismic Resistance Based on Modal Equivalent Method

YUAN Yong, YANG Chengyu, CAI Xuesong

**Abstract** Metro station structure seismic resistance hybrid test technology adopts stratum-structure mode to study the structure seismic performance, of which the numerical sub-structure has large calculation volume. Based on modal equivalent method virtual hybrid test architecture, sub-structure is divided considering metro station structure stress features. A metro station structure seismic resistance virtual real-time hybrid test method based on modal equivalent method is proposed. Taking actual engineering project for background, virtual test is carried out to analyze the response of metro station key components during ground motion. Results show that the hybrid test result matches well with numerical result, and the sub-structure division technology is reasonable. The proposed hybrid test method provides theoretical basis for subsequent

physical real-time hybrid simulations.

**Key words** metro station; seismic analysis; real-time hybrid test; mass-spring model

**First-author's address** State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China

## 0 引言

地铁车站抗震性能对地铁交通整体系统的安全运营尤为重要。数值分析与模型试验是研究地铁车站结构抗震性能的两种主流方法。混合试验则是近年兴起的一种以关键构件为试验对象的动力试验技术<sup>[1]</sup>。该方法将结构体系中的关键部分进行物理试验, 其余部分采用数值模拟, 可充分利用数值分析与物理试验的优势。虚拟混合试验指将本应进行物理试验的部分也采用数值模拟, 可用于混合试验前的子结构划分和原理研究。

在以车站结构抗震为分析对象的混合试验中, 文献[2]基于 UT-SIM 平台, 对大开车站进行地震响应分析, 采用等效线性化方法考虑周围的地层模型, 且通过修正斜压场本构模拟受剪为主的车站结构。然而, 等效线性化方法不能准确反应土体的强非线性特征与塑性行为。文献[3]采用 OpenFresco 平台对同一问题进行分析, 数值模型中土体采用多重屈服面模型模拟, 车站结构采用单轴非线性材料模拟, 通过该方法可校准确考虑周围土体的弹塑性行为。文献[4-8]进行了一系列地下结构虚拟混合试验与物理混合试验, 试验取中柱反弯点作为试验子结构的控制点, 通过控制较少的自由度实现地下

<sup>\*</sup> 土木工程防灾国家重点实验室课题(SLDRCE19-A-13)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

结构混合试验过程。然而,上述研究均为慢速混合试验,不能充分反应关键构件在地震过程中惯性力与阻尼的影响。因此,为了扩展地铁车站结构混合试验技术的应用范围,需要提出一种针对地下结构的虚拟实时混合试验方法。

本文旨在探索一种实时混合试验的框架:通过模态等效方法建立地层-车站结构简化分析模型,将车站部分中柱构件选作试验子结构,结合等效地层和车站结构的数值模型,进行虚拟实时混合试验方法的研究;将未经子结构划分的数值模型定义为完整模型,进行虚拟混合试验的质点弹簧模型定义为离散模型,比对完整数值模型与虚拟混合试验的结果,验证所提出的试验架构的适用性与准确性。

## 1 地铁车站抗震虚拟实时混合试验原理与框架

在车站虚拟实时混合试验中,可将车站结构的关键构件划分为附属模型,车站结构其余部分与土体划分为主模型,试验中分别由主程序(负责计算主模型)与附属程序(负责计算附属模型)执行计算模拟。在车站结构中,层间位移是重要的结构指标,因此采用位移型混合试验方法。其原理如下:

$$M\ddot{u}_{i+1} + C\dot{u}_{i+1} + P_A(u_{i+1}, \dot{u}_{i+1}) + P_E(u_{i+1}) = -Ma_{g,i+1} \quad (1)$$

式中:

$M$ 、 $C$ ——分别为质量矩阵、阻尼矩阵;

$P_A$ 、 $P_E$ ——分别为主模型荷载向量与附属模型荷载向量;

$\ddot{u}_{i+1}$ 、 $\dot{u}_{i+1}$ 、 $u_{i+1}$ ——分别为时刻  $i+1$  的加速度向量、速度向量和位移向量;

$a_{g,i+1}$ ——时刻  $i+1$  的地震加速度向量。

通过所搭建的 OpenSEES 平台和 OpenFresco 平台的混合试验框架中,在主程序与附属程序交互点上需额外增加刚度较大的适配单元<sup>[9]</sup>。通过罚函数理论以保证离散后主-附属子结构模型的计算结果与完整数值模型计算结果一致。其原理如下:

$$g(u) = Qu - \bar{u} = 0 \quad (2)$$

$$\Pi(u) = \frac{1}{2}u^TKu - u^TP + \frac{1}{2}g^T(u)\kappa g(u) \quad (3)$$

$$[K + Q^T\kappa Q]u_\kappa = P + Q^T\kappa\bar{u} \quad (4)$$

$$p_{\text{adpt}} = k_{\text{adpt}}(u_{\text{adpt}} - u_{\text{imp}}) \quad (5)$$

式中:

$g(u)$ ——约束方程;

$Q$ ——转换矩阵;

$u$ ——全模型位移向量;

$\kappa$ ——约束点单元刚度向量;

$\bar{u}$ ——强制位移约束向量;

$K$ ——刚度矩阵;

$u_k$ ——离散模型位移向量;

$p_{\text{adpt}}$ ——适配单元内力向量;

$k_{\text{adpt}}$ ——适配单元刚度向量;

$u_{\text{adpt}}$ ——适配单元位移向量;

$u_{\text{imp}}$ ——强制位移向量。

在该混合试验框架上,采用大刚度适配单元,将车站结构进行离散计算,以保证完整模型与离散模型分析结果的一致性。

## 2 地铁车站抗震虚拟实时混合试验的简化分析模型

### 2.1 简化思路

在地铁车站抗震虚拟实时混合试验中,首先应保证数值模型计算速度的延时可以忽略。然而,在传统的地层-结构有限元分析的数值模型中,土体通常采用实体单元,单元数量较多,数值计算速度难以达到实时要求。因此,如何开发一个实时数值模型是实现典型车站实时混合试验的一个首要问题。通过该模态等效方法,可将二维场地的实体有限元分析模型转化为质点-弹簧系统,以提高计算效率。本文根据模态等效方法推导计算模型中的计算参数,并依此建立车站-地层结构的简化分析模型。地层反应分析的模态等效理论<sup>[10]</sup>,其基本思想是采用模态等效的离散方法建立一个含有较少自由度的简化体系来恰当反应场地的动力响应。首先,通过振型分析获得场地土层自由振动的模态特性参数;再根据模态等效原则,即等效多自由度体系的固有频率、模态有效质量、模态有效高度和模态阻尼比分别与场地土层自由振动的对应模态特性参数一一等价,通过求解包括质点质量、弹簧刚度、阻尼系数和质点高度在内的物理参数,从而建立模态等效模型。

### 2.2 模态等效法

场地中的土体按照模态等效原则进行离散,离散后场地模型与原自由场模型具有相同的模态参数。相比其他离散方法,模态等效法离散模型可以体现土体的动力特性。如图 1 所示,将车站两侧土体离散为  $n$  个质点,质点间通过水平向弹簧和阻尼

连接,模拟土体间的相互作用。等效质点与结构之间通过水平向弹簧连接,模拟结构与土体之间的相互作用。其计算参数可由下式确定:

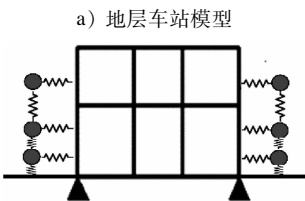
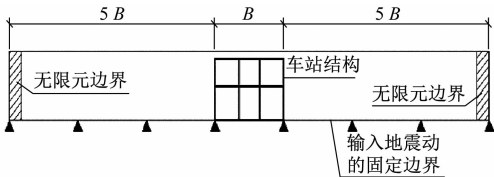
$$m_j = \frac{\Theta_{j-1}^2}{\Psi_{j-1}\Psi_j} \tag{6}$$

$$k_j = \frac{\Theta_{j-1}\Theta_j}{\Psi_j^2} \tag{7}$$

$$h_j = \sum_{j=1}^N \phi_{jn} \Gamma_n h_{n,e} = \sum_{j=1}^N r_{jn} h_{n,e} \tag{8}$$

式中:

- $m_j$ ——质点参数;
- $k_j$ ——刚度参数;
- $h_j$ ——高度参数
- $j$ ——第  $j$  个质点;
- $N$ ——质点总数;
- $n$ ——振型阶数;
- $r$ ——模态参与系数;
- $h$ ——质点高度;
- $\Gamma$ ——模态参与系数;
- $h_{n,e}$ ——模态有效高度;
- $\phi_{jn}$ ——多自由度体系中第  $j$  个质点的第  $n$  阶振型;
- $r_{jn}$ ——多自由度体系中第  $j$  个质点的第  $n$  阶模态参与系数;
- $\Psi_j, \Theta_j$ ——模态相关参数<sup>[11]</sup>。



注:  $B$  为车站的宽度。

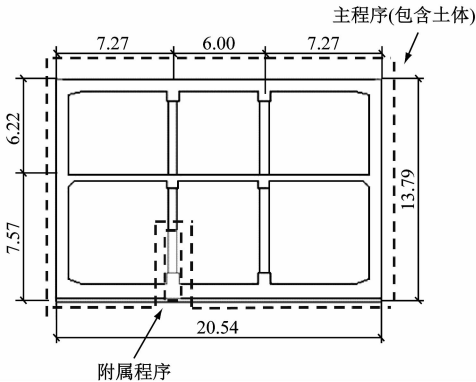
图 1 地层车站分析模型与质点弹簧分析模型  
Fig. 1 Stratum station analysis model and mass spring analysis model

### 3 地铁车站抗震虚拟实时数值试验

#### 3.1 结构与场地

如图 2 所示,本文参考实际工程,设计两层三跨

现浇混凝土箱形框架车站结构,其顶板埋深为 1.66 m,车站整体高度为 13.79 m,站厅层高度为 6.22 m,站台层高度为 7.57 m。车站整体宽度为 20.54 m,中跨宽为 6.00 m,边跨宽为 7.27 m。车站顶板、中板、底板厚度分别为 0.8 m、0.4 m、1.0 m,中柱截面尺寸为 0.6 m(长)×0.6 m(宽),纵梁高度为 0.8 m,侧墙厚度为 0.8 m。车站结构采用 C40 混凝土,其体积质量为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 32.5 GPa,泊松比为 0.2。根据车站地震过程中的受力特点,选取站台层混凝土柱作为附属程序,车站结构剩余部分与土体作为主程序。



尺寸单位:m

图 2 车站结构竖剖面尺寸图

Fig. 2 Size diagram of metro station structure vertical section

#### 3.2 离散模型

采用 OpenSEES 结构分析软件,车站结构采用弹性梁单元,场地土体质量采用质点模拟,土层与结构之间的相互作用以弹簧单元模拟。质点弹簧模型参数如表 1 所示。

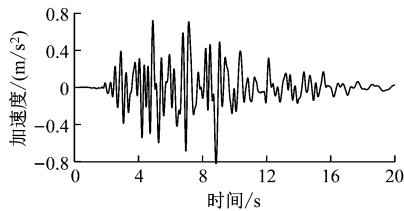
表 1 质点弹簧模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of mass spring model				
质点编号	高度/m	质量/m	竖向刚度 /Nm	水平刚度 /Nm
N 1	12.2	$3.99 \times 10^4$	$8.04 \times 10^7$	$4.18 \times 10^7$
N 2	5.57	$2.18 \times 10^4$	$1.10 \times 10^8$	$2.98 \times 10^7$
N 3	2.84	$1.78 \times 10^4$	$1.51 \times 10^8$	$1.77 \times 10^7$

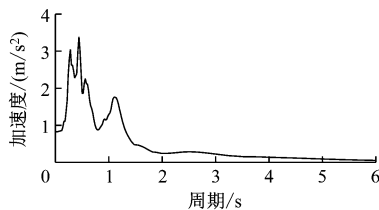
#### 3.3 地震动输入

取 70 m 厚的土层作为场地分析对象,建立结构-地层分析模型。计算可得,场地土层的加权剪切波速为 265 m/s,土层的加权体积质量为 1 840 kg/m<sup>3</sup>,取土层泊松比为 0.3。将上海人工波作为地震动输入,记录结构-地层模型结构底板处的加速度

时程。将记录的加速度时程作为质点弹簧模型的地震动输入。质点弹簧模型的地震动输入与加速度反应谱如图 3 所示。



a) 地震加速度时程



b) 加速度反应谱

注:阻尼比  $\zeta = 0.05$ 。

图 3 地震动输入和加速度反应谱

Fig. 3 Ground motion input motion acceleration response spectrum

### 3.4 结果分析

在地下结构设计中,将关键构件的内力(弯矩,轴力和剪力)与变形作为控制指标。由于本文采用弹性模型,层间位移、剪力等结果的准确性可由弯矩结果表征。因此,选取柱底端部的最大弯矩来表征虚拟混合试验方法的合理性。图 4 为柱底弯矩时程曲线(完整模型与离散模型)。由图 4 可看到,完整模型与离散模型的柱底弯矩峰值接近,曲线匹配程度较好;同时,完整模型与离散模型的地震波时间均小于实际地震动时间。图 5 为混合试验累积能量误差图。由图 5 可知:截止到试验结束,累积能量误差小于 5%,在可接受范围内。由于地震动能量

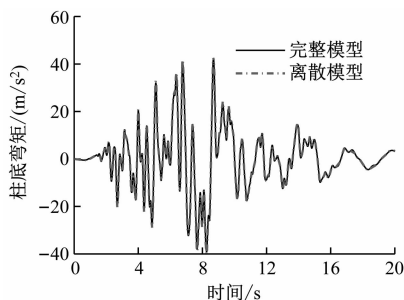


图 4 完整模型与离散模型的柱底弯矩时程

Fig. 4 Moment time-history at column bottom of complete model and discrete model

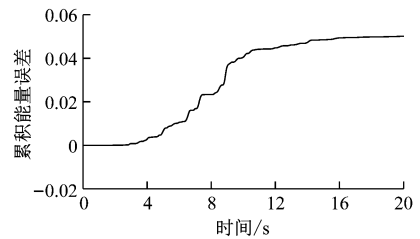


图 5 混合试验累积能量误差图

Fig. 5 Error diagram of hybrid test cumulative energy

主要集中在时间中段(4~10 s),因此误差累积较大。由完整模型与离散模型结果与实际时长可知:本文提出的典型地铁车站结构虚拟实时混合试验方法可用于后续的相关实时混合试验研究中。

## 4 结语

本文在 OpenSEES 与 OpenFresco 的模拟框架上,应用虚拟混合试验方法,根据模态等效原则建立质点弹簧简化分析模型,进行以车站结构为分析对象的虚拟实时混合试验研究。通过分析完整模型与离散模型在地震过程中的柱底弯矩结果,验证了本文提出的典型地铁车站结构虚拟混合试验方法的适用性与准确性,为后续物理试验提供相关理论支持。在后续研究中,将采用振动台试验等方法对地铁车站模态等效法虚拟实时混合试验方法进行试验验证。

## 参考文献

- [1] NAKASHIMA M. Hybrid simulation: an early history[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2020, 49(3):1.
- [2] SAYED M A, KWON O S, PARK D, et al. Multi-platform soil-structure interaction simulation of Daikai subway tunnel during the 1995 Kobe earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 105643.
- [3] YU H, LI Y, SHAO X, et al. Virtual hybrid simulation method for underground structures subjected to seismic loadings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103831.
- [4] 杨澄宇,蔡雪松,袁勇. 地铁车站钢筋混凝土中柱试件抗震混合试验研究[J]. 振动与冲击, 2020(15): 126.  
YANG Chengyu, CAI Xuesong, YUAN Yong. Hybrid simulation for aseismic performance of subway station with its RC central column as test specimen[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020 (15): 126.
- [5] 杨澄宇,蔡雪松,马原驰,等. 基于 OpenFresco 平台混合试验时长研究[J]. 工程科学与技术, 2020(4): 124.

(下转第 197 页)