2025 年 2月

Feb. 2025

建筑结构

考虑土 - 结构相互作用的建筑结构抗震性能分析

Seismic Performance Analysis of Building Structures Considering Soil - structure Interaction

吴强^{1,2}

(1. 河南工业大学,郑州 450001; 2. 河南工大设计研究院有限公司,郑州 450001)

摘 要:为评估土-结构相互作用下建筑结构抗震性能的变化,以某工程为实例,运用有限元建立数值化 计算模型;构建地震模拟振动试验台,对建筑结构在地震激励下的层间位移角、水平结构受力及地基承受的最 大剪力等关键响应指标进行模拟与分析。结果表明:在土-结构相互作用下,随着土壤刚度的增加,建筑结构 从第1层到第5层的层间位移角呈下降趋势;随着基础承载力的增加,建筑结构在低频、中频和高频地震波作 用下的水平位移呈下降趋势;在横波、纵波和面波三种条件下,建筑结构基础的最大剪力随着地震波速的增 加先增加后减小。研究成果为优化建筑结构抗震设计、提升结构在土-结构相互作用下的整体性能提供了重 要依据。

关键词: 土 - 结构作用; 建筑结构; 数值模型地震波; 地震模拟振动试验台; 层间位移角
 中图分类号: TU352.11
 文献标志码: A
 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0113-06
 DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.021

WU Qiang^{1,2}

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan University of Technology Design and Research Academy Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China) Abstract: To evaluate the changes in seismic performance of building structures under soil – structure interaction, a numerical calculation model was established using the finite element method, taking a specific engineering project as an example. A seismic simulation shaking table was constructed to simulate and analyze key response indicators such as the interlayer displacement angle, horizontal structural forces, and maximum shear force borne by the foundation of the building structure under seismic excitation. The results indicate that under soil – structure interaction, as soil stiffness increases, the interlayer displacement angle of the building structure decreases from the 1st to the 5th floor. Additionally, with the increase in foundation bearing capacity, the horizontal displacement of the building structure exhibits a downward trend under low – frequency, mid – frequency, and high – frequency seismic waves. Under the conditions of transverse waves, longitudinal waves, and surface waves, the maximum shear force at the base of the building structure first increases and then decreases as the seismic wave velocity increases. The research findings provide an important basis for optimizing the seismic design of building structures and enhancing their overall performance under soil – structure interaction.

Key words: soil - structure effect; building structure; numerical model seismic wave; seismic simulation vibration test bed; inter storey displacement angle

0 引言

地震作用下,建筑结构的响应、安全及稳定性 深受土-结构相互作用的影响。而传统的抗震设计理 念多聚焦于结构本体,忽视了地基土壤在抗震性能中 的关键作用。因此,在遭遇强烈地震时,如何保障建 筑结构的稳固与完整,已成为工程界亟需攻克的核心 难题^[1]。传统设计理念虽提升了抗震能力,但在极端 地震条件下仍显不足,特别是未充分考虑地震波在土 壤中的非线性、非均匀性及传播衰减效应^[2-4]。

准确评估建筑在地震作用下的真实性能、优化 其抗震设计以及提升结构安全性, 需全面考虑地基 土与建筑结构之间的相互作用,这包括地震波的放 大效应、阻尼作用,以及可能发生的滑动和沉降等 现象[5]。近年来,随着工程技术领域的持续进步和 抗震设计理念的深化,学术界与工程界对于各类结 构在地震影响下的抗震性能研究给予了高度关注。 董慧慧等^[6]针对近场脉冲型地震作用下的附加支撑 双柱式摇摆桥墩进行了抗震性能研究,结果表明附 加支撑双柱式摇摆桥墩具有良好的抗震性能, 其独 特的响应机制有助于减小地震对桥墩的破坏: 倪韦 斌等^[7]通过试验研究了不同轴压比下浆锚连接装配 式异形柱框架结构的抗震性能,发现不同轴压比下 浆锚连接装配式异形柱框架结构的抗震性能存在差 异;杨参天等^[8]探讨了基于含转动摩擦型干式梁-柱节点的新型装配式混凝土框架结构抗震性能。结 果表明,该结构在地震作用下具有良好的耗能能力 和延性, 表现出优异的抗震性能。在材料结构方面, 金浏等^[9]通过试验研究了宽厚比对足尺方钢管混凝 土短柱抗震性能的影响,结果表明随着宽厚比的增 加,方钢管混凝土短柱的抗震性能逐渐减弱;赵云 丽等^[10]利用仿真技术,对考虑风险极限的建筑钢结 构抗震延性进行了检测,研究结果表明通过合理的 抗震设计,显著提高了建筑钢结构的抗震延性和整 体稳定性,为结构抗震性能的评估提供了新的方法; 李成玉等^[11]基于体系能力设计法,对设置连续柱钢 框架结构的抗震性能进行了研究,结果表明连续柱 的设置显著提高了钢框架结构的整体抗震性能。此 外,毛宇光等^[12]研究了梁纵筋黏结状况对矿渣地聚 物混凝土梁柱中节点抗震性能的影响,结果表明良

好的梁纵筋黏结状况可以显著提高节点的抗震性能; 左光恒等^[13]对法兰连接预制拼装双柱式桥墩的抗震 性能进行了研究,结果表明,法兰连接预制拼装双 柱式桥墩在地震作用下具有良好的整体性和稳定性; 王国林等^[14]通过试验研究和有限元分析,探讨了 CFRP 板条嵌入式加固 RC 框架节点的抗震性能,结 果表明 CFRP 板条嵌入式加固可以显著提高 RC 框架 节点的抗震性能;何应道等^[15]以济南黄河隧道为例, 研究了公轨合建盾构隧道管片 - 内部结构复合体系 的横向抗震性能,结果表明该复合体系在地震作用 下具有良好的整体稳定性和抗震性能。

综上所述,当前对各类结构在地震作用下的抗 震性能研究已经取得了显著成果,基于以上研究成 果,研究在考虑土-结构相互作用的前提下,分析 建筑结构抗震性能。研究将采用数值模拟和物理模 型试验相结合的方法。通过建立合理的数值模型对 建筑结构进行地震振动试验,以分析其抗震性能。

1 工程背景

1.1 工程概况

某高层建筑位于地势较高的斜坡地区,总高度 为60.5 m (至女儿墙),共20 层。建筑长45 m,宽 30 m,总建筑面积15 300 m²。地基采用桩 - 箱基 础,沉管桩直径为0.6 m,长度为30 m,桩顶标高 为-6.5 m。桩基和箱型基础的混凝土强度等级均为 C30。施工现场的土层厚度为30 m,共15 个土层, 其中包括多层黏土、粉质黏土、砂土、砾石以及不 同风化程度的花岗岩,没有暴露出可液化的饱和砂 或粉土。抗震设防烈度为8 度。

1.2 建筑结构体系

剪力墙结构平面尺寸为 25.9 m×33.0 m,高宽 比为1.45,偶数层平台面宽为 14 m,进深为 27.6 m。 主要分布在建筑物的周围和核心区域,形成坚固的 垂直和水平支撑系统。剪力墙的厚度从底部的 0.6 m 逐渐减小到顶部的 0.4 m。此外,剪力墙的混凝土强 度等级为 C40。剪力墙结构平面如图 1 所示。

框架剪力墙结构由钢筋混凝土梁和柱组成,形成灵活的平面和空间布局。框架的梁截面尺寸为0.3 m×0.6 m,柱截面尺寸为0.6 m×0.6 m。框架和剪力墙通过节点连接,共同承受建筑物的水平和

垂直荷载。连体平台最大柱尺寸为 700 mm × 500 mm, 梁的主要尺寸为 200 mm × 400 mm。框架剪力墙结构 平面布置示意图如图 2 所示。



图 1 剪力墙结构平面布置示意图 Fig. 1 Schematic diagram of shear wall structure layout plan



Fig. 2 Schematic diagram of the layout plan of the frame shear wall structure

除了剪力墙结构和框架剪力墙结构这两个主要 结构体系之外,还安装了多个抗震支架和阻尼器作 为辅助结构,以减少地震对结构的影响。抗震支架 的横截面尺寸为0.2 m×0.2 m,由高强度钢材制成, 通过吸收和分散地震能量来减少结构振动。

2 试验设计

2.1 模型土-结构相互作用参数设置

采用有限元法设置建筑的土-结构相互作用参数。 通过地质勘探获取地基土的物理和力学参数。

见表1。

结合地基土参数,计算地基土阻抗,公式为下:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\eta_r q_r}{l_w e_g} \\ k_2 = \frac{\sigma_f m_w}{g_b} \\ a_0 = \frac{S_e}{A_r p_f} \end{cases}$$
(1)

Table 1 Physical and mechanical parameters of foundation soil								
层号	岩土名称	含水量 /%	重度/ (kN/m ³)	孔隙比	比重	压缩模 量/MPa		
1	素填土	22.3	18.5	0.68	2.69	12.1		
2	粉质黏土	25.1	19.2	0.72	2.70	15.2		
3	黏土	28.7	19.8	0.85	2.71	18.0		
4	细砂	12.5	20.1	0.40	2.68	12.3		
5	中砂	15.3	20.5	0.45	2.69	10.5		
6	粗砂	10.8	21.5	0.38	2.75	11.8		
7	砾石	8.0	22.0	0.35	2.72	14.7		
8	含砂粉质黏土	23.7	19.5	0.70	2.71	14.0		
9	粉质黏土夹卵石	20.1	20.7	0.65	2.69	16.0		
10	卵石	5.0	21.5	0.30	2.73	12.9		
11	全风化花岗岩	16.5	22.8	0.25	1.28	17.9		
12	强风化花岗岩	24.0	25.0	0.33	0.25	16.6		
13	中风化花岗岩	14.8	23.6	0.41	3.98	13.8		
14	微风化花岗岩	13.9	24.1	0.66	4.22	15.2		
15	素混凝土垫层	11.8	24.0	0.28	3.07	22.0		

地基土物理力学参数

表1

式中: k_1 为土体与建筑结构的静刚度; η_r 为第 r 层 土体的孔隙比; l_w 为土体等效侧向应力; q_r 为第 r 层 土体的重度; e_g 为土体与建筑结构的刚度; k_2 为结 构刚度系数; σ_f 为频率参数; g_b 为剪力墙结构的自 振频率; m_w 为地基土土层类别数量; a_0 为结构阻尼 系数; G_e 为混凝土的弹性模量; A_t 为混凝土应变参考 值; p_f 为影响系数。

基于建筑物的结构形式与地基土条件,计算建 筑结构的等效刚度。即:

$$f_{y} = \frac{k_1 k_2}{a_0 R_r} \tag{2}$$

式中: R_r 为第 r 层土体的压缩模量。

根据上述计算结果,设定土与结构相互作用参数,见表2。

表 2 土 - 结构相互作用参数定义 Table 2 Definition of interaction parameters between soil - structure

between soil – structure					
参数	数值				
结构高度/m	90				
土体分层厚度/m	第一层3,第二层5				
土体宽度/m	80				
土体深度/m	40				
接触容限/m	0. 1				
分离力/kN	10				
土壤变形量/mm	10				
土壤应力/N	5				
土弹簧单元刚度	0. 1				
土剪切模量/Pa	1.26				

2.2 数值计算模型建立

选择三次单元格作为网格基本单元,并在结构 应力集中区域增加网格密度和尺寸。设置网格大小 为0.5 m×0.5 m×0.5 m,在密集区域将网格密度增 加至0.25 m×0.25 m×0.25 m。当网格的平均扭曲 度为0.05,最大扭曲度为0.1 时,则认为模型网格 质量符合要求。

2.3 地震环境模拟

2.3.1 地震模拟振动台搭建

搭建地震模拟振动台,如图3所示。





台面尺寸为8m×10m,利用动作器产生并传递 振动能量到振动台面,模拟地震时的地面运动。其 中,横向动作器模拟地震的水平剪切波;纵向动作 器模拟地震纵波;垂直动作器记录位移变化。

2.3.2 地震波生成

按照1:10 000 的比例制作物理模型,模拟建筑 地基地质构造与地质体及断层结构。选取时长为50 s 的人工波作为地震波,波峰值区 200 m/s²。地震波 的波形与反应谱如图4 所示。

设置地震波输入方向为 X 方向和 Y 方向双向输入,持续时间为50 s,振动频率为低频0.5 Hz、中频5 Hz 和高频 15 Hz,时程最大振幅为0.105 g,频谱 主频为5.02 Hz。



图4 地震波时程曲线及反应谱

Fig. 4 Time history curve and response spectrum of seismic waves 将生成的地震波输入构建的建筑三维数值模型

中,对建筑抗震性能进行研究与分析。

3 建筑结构抗震性能分析

3.1 层间位移角响应

基于地震波时程曲线和反应谱曲线,对建筑结构进行拟动力分析。探究地震作用下建筑层间位移 角与建筑地基土壤刚度之间的关系,从而研究建筑 抗震效果。结果如图5所示。



Fig. 5 Inter story displacement angle response of buildings

土壤刚度的提升使得从第1层至第5层的层间位 移角呈递减趋势。在相同土壤刚度下,楼层越高, 层间位移角越小,且其增长率逐渐降低。这是因为 土壤刚度增大对建筑结构的约束作用增强,减少了 地震荷载下的变形,提升了建筑物的整体稳定性。 楼层越高,建筑物在垂直方向上的累积变形越小, 因此层间位移角也越小。当楼层高度增加到一定程 度时,土壤刚度的约束作用逐渐减弱,层间位移角 可能会有所增加。不过,总体而言,土壤刚度的提 升能增加建筑结构在受力时的整体刚度,减少变形, 从而进一步减小层间位移角。此外,土壤刚度的增 强也意味着基础承载力的提高,有助于提升建筑结 构的整体稳定性和安全性。

3.2 建筑结构水平位移响应

表 3 为不同地震波频率下建筑结构水平位移随地 基承载力的变化情况。

表3 建筑结构水平位移响应								
Table 3 Horizontal displacement response of building structures								
地基承载力	地震波的水平位移/mm							
∕kPa	0.5 Hz 低频	5 Hz 中频	15 Hz 高频					
100	2.5	4.0	6.5					
150	2.0	3.5	5.5					
200	1.5	3.0	4.5					
250	1.2	2.5	4.0					
300	1.0	2.0	3.5					
350	0.8	1.8	3.0					
400	0.6	1.5	2.5					

随着基础承载力的增加,建筑结构在低频、中 频和高频地震波作用下的水平位移均呈下降趋势。 这表明,提高基础的承载力有助于减少建筑结构的 水平位移,从而提高其抗震性能。在相同的地基承 载力下,高频地震波引起的水平位移最大,其次是 中频波,低频波引起的位移最小。这是因为高频地 震波具有更高的能量和更短的周期,使其更易在建 筑结构中引起显著的振动和位移。根据表中数据, 当地基承载力达到或超过 300 kPa 时,建筑结构在低 频、中频和高频地震波作用下的水平位移相对较小, 变化趋于平缓。这表明,当地基承载力超过 300 kPa 时,建筑结构具有良好的抗震性能。

3.3 最大基底剪力响应

试验验证地震波传播因素对于建筑结构抗震性 能的影响,结果如图6所示。

在横波、纵波和面波三种条件下,建筑结构基



图6 建筑结构地基最大剪力响应

Fig.6 Maximum shear response of building structure foundation 础的最大剪力随着地震波速的增加先增加后减小。 这表明地震波速度对建筑结构基础的最大剪力有显 著影响,并且存在一个最佳波速范围,使基础的最大 剪力达到峰值。在相同的地震波速度下,纵波引起的 基底最大剪力总是大于横波和面波。这是因为纵波的 传播方向与粒子的振动方向一致,可以更直接地传递 地震能量,导致建筑结构上的剪力更大。由于面波的 传播路径复杂,其产生的最大基底剪力位于横波和纵 波之间。地震波波速为2000 m/s 时,建筑结构地基 剪力在横波、纵波和面波的作用下均能够达到最大, 分别为 437、438 和 453 kN。而当地震波波速超过 2000 m/s 后,建筑结构的整体稳定性呈现下降趋势。

4 结束语

基于实际建筑工程概况,采用有限元分析方法, 结合土-结构相互作用参数,构建了建筑结构数值 计算模型,并通过地震模拟振动平台深入探讨了 土-结构相互作用对建筑结构抗震性能的影响,得 到以下主要结论:

(1) 在相同的土壤刚度下,楼层越高,层间位 移角越小,增长率逐渐降低;当建筑结构地基承载 力为400 kPa时,高频地震波引起的水平位移最大, 为2.5 mm,低频波引起的位移最小,为0.6 mm。

(2) 地震波波速为2000 m/s时,建筑结构地基 剪力在横波、纵波和面波的作用下均能够达到最大, 分别为437、438 和453 kN。

参考文献

[1] 梁宇,孟祥强.基于2021年版广东省高规的某含错层超限高层
 结构抗震性能化设计[J].建筑结构,2024,54 (15):52 -

建输结构

56, 51.

- [2] 丁发兴,罗开源,吕飞,等.钢管混凝土柱-钢梁外加强环螺 栓连接节点抗震性能有限元分析 [J].建筑科学与工程学报, 2024,41 (4):10-19.
- [3] 邱增美,李孟鸽,李帼昌,等.不同含钢率下内置工字形 CFRP 型材方钢管混凝土压弯构件抗震性能试验研究 [J].建筑结构 学报,2024,45 (增刊1):133-141.
- [4] 王春刚,李姗珊,张壮南,等.带边缘约束构件的双钢板混凝
 土组合剪力墙抗震性能研究 [J].建筑结构学报,2024,45
 (增刊1):206-215.
- [5] 高润东,张永群,李向民. 砖砌体结构耐久性劣化与加固修复的抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (16): 151-158.
- [6] 董慧慧,古智钧,杜修力,等.近场脉冲型地震作用下附加支 撑双柱式摇摆桥墩的抗震性能研究 [J].工程力学,2024,41
 (5):13-25.
- [7] 倪韦斌,张旭,王少杰,等.不同轴压比下浆锚连接装配式异形柱框架结构的抗震性能试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2719-2732.
- [8] 杨参天,李爱群,贾军波.含转动摩擦型干式梁-柱节点的新 型装配式混凝土框架结构抗震性能研究 [J].工程力学,2022,

39 (8): 223-231.

- [9] 金浏,梁健,陈凤娟,等.宽厚比对足尺方钢管混凝土短柱抗 震性能影响的试验研究 [J].振动与冲击,2023,42 (22): 1-9,59.
- [10] 赵云丽,李冉.考虑风险极限的建筑钢结构抗震延性检测仿真 [J].计算机仿真,2024,41 (8):562-566.
- [11] 李成玉,李冬奎,柏入宁,等.基于体系能力设计法的设置连续柱钢框架结构抗震性能研究[J].建筑钢结构进展,2022,24 (11):91-100,112.
- [12] 毛宇光,刘钰中,杜运兴,等.梁纵筋黏结状况对矿渣地聚物 混凝土梁柱中节点抗震性能的影响[J].重庆交通大学学报 (自然科学版),2022,41 (11):89-98.
- [13] 左光恒,戴少鹏,张盛飞,等.法兰连接预制拼装双柱式桥墩 抗震性能研究 [J].北京工业大学学报,2022,48 (5):496-506.
- [14] 王国林,杨冀锟,祁尚远,等. CFRP 板条嵌入式加固 RC 框架节点的抗震性能试验研究及有限元分析 [J]. 地震工程学报, 2022,44 (6): 1260-1267.
- [15] 何应道,肖明清,封坤,等. 公轨合建盾构隧道管片-内部结构复合体系横向抗震性能研究——以济南黄河隧道为例 [J].
 隧道建设(中英文),2022,42 (8):1404-1413.

endre no pendra con pe

(上接第97页)

率即使从-90 ℃到25 ℃几乎没有变化,不表现出温 度依赖性。

(2)结合扫描电镜试验发现冷却过程中饱和岩石 热扩散率取决于孔隙结构,而不是整个岩石的含水量。

(3)可以通过测量造岩矿物的孔径分布和热物 性来估计冷却过程中热扩散率的变化行为。

参考文献

- [1] 栾锡武,高德章,喻普之,等.我国东海陆架地区新生代地层的热导率 [J].海洋与湖沼,2002 (2):151-159.
- [2] 宋小庆,江明,彭钦,等.贵州主要岩石地层热物性参数特征 及影响因素分析 [J].地质学报,2019,93 (8): 2092-2103.
- [3] VILA M, FERNANDEZ M, IMENEZ M I. Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling [J]. Tectonophysics, 2010, 490 (3): 152-164.
- [4] ZHOU Y, MU G, ZHANG H, et al. 2017. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin [J]. Geology in China, 44 (5): 1017 – 1026 (in Chinese with English abstract).

- [5] 刘善琪,李永兵,田会全,等. 2012. 含湿孔隙岩石有效热导率的数值分析 [J]. 地球物理学报,55 (12):4239-4248.
- [6] 刘绍文,李香兰,郝春艳,等. 2017. 塔里木盆地的热流、深 部温度和热结构 [J]. 地学前缘,24 (3):41-55.
- [7] 陈振鸣,武旭,王宏伟,等.高温条件下花岗岩导热特性研究[J].科学技术与工程,2016,16 (24):193-197.
- [8] BRODSKY N S, RIGGINS M, CONNOLLY J. Thermal expansion, thermal conductivity, and heat capacity measurements at Yucca mountain, Nevada [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34 (3-4): 74. el-74. el5.
- [9] 刘建军,刘海蕾.岩石热物理性质测试与分析 [J].西部探矿 工程,2009,21 (4):144-147.
- [10] 李继山. 油藏岩石热物理性质测试 [J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33 (5): 23-26, 117, 118.
- [11] 赵秀峰.温度变化对碳酸盐岩储层岩石热物性的影响 [J].
 地质学刊, 2023, 47 (1): 100-105.
- [12] 赵秀峰,曹景洋,罗惠芬.岩土热物理性质室内测试方法探讨
 [J]. 安徽地质, 2016, 26 (1): 61-64, 68.
- [13] CHEN N J, MORIKAWA J, KISHI A, et al. Thermal diffusivity of eutectic of alkali chloride and ice in the freezing thawing process by temperature wave analysis [J]. Thermochimica Acta, 2005, 429: 73-79.