赵志鹏,唐元辰,张兵兵,等.地下综合体结构的惯容隔震方法及参数设计[J].地震工程学报,2027,49(1):112-119.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250318002

Zhao Zhipeng, Tang Yuanchen, Zhang Bingbing, et al. Design method and performance analysis of inerter-based seismic isolation for complex structures considering soil-structure interaction[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 112-119. DOI:10.20000/j.1000-0844.20250318002

地下综合体结构的惯容隔震方法及参数设计

赵志鹏[1], 唐元辰[1], 张兵兵[1], 洪 娜[2], 陈清军[1]

(1. 同济大学 结构防灾减灾工程系,上海 200092;
2. 兰州理工大学 防震减灾研究所,甘肃 兰州 730050)

摘要: 地下综合体结构是提升城市地下空间利用率的重要形式,具有特殊的复合结构形式与高标准的功能韧性需求,亟需开展其抗震性能评估与韧性提升技术研究。惯容系统的惯性放大效应及调谐吸振机制,可灵活实现受控结构的惯性特征调整与动力响应控制。文章提出适用于地下综合体结构的惯容隔震系统,明确其构造形式、模拟方法及参数设计流程。以某典型地下综合体结构为工程背景,开展土-惯容隔震系统-综合体相互作用体系的数值仿真分析,给出惯容隔震系统的建议设计参数。结果表明,该设计流程可有效关联设计参数与综合体结构响应,实现既定抗震设计目标。惯容隔震系统可有效控制地下综合体结构的加速度、位移和应力响应,且相较于传统隔震方案,可同时满足地下结构与隔震层变形的多目标协同控制。此外,该系统在显著抑制综合体上盖结构地震响应的同时,并未导致综合体地下结构响应的劣化。

关键词: 综合体结构;惯容隔震系统;土-结构相互作用;设计方法

中图分类号: TU93; TU352.12 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2027)01-0112-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250318002

Design method and performance analysis of inerter-based seismic isolation for complex structures considering soil-structure interaction

Zhao Zhipeng[1], Tang Yuanchen[1], Zhang Bingbing[1], Hong Na[2], Chen Qingjun[1]

(*1.Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
2.Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Underground complex structures play an important role in enhancing urban underground space utilization, but their special composite structural forms and high-level functional resilience requirements create an urgent need for research on seismic performance evaluation and resilience enhancement technologies. With its inertial amplification and tuning-based vibration absorption mecha-

收稿日期:2025-03-18

基金项目:国家自然科学青年基金(52308525);中央高校基本科研业务费专项;甘肃省青年科技基金计划(23JRRA801)

第一作者简介:赵志鹏(1994-),男,博士,助理教授,主要从事结构智能防灾减灾方面的研究。E-mail:zhaozhipeng@tongji.edu.cn。

通信作者:唐元辰(1996-),男,博士研究生,主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail:95tyuanchen@tongji.edu.cn。

nisms, the inerter system can flexibly adjust the inertial characteristics of the controlled structure and thereby govern its dynamic response. Building on this principle, this paper proposes an inerter-based isolation system applicable to underground complex structures and clarifies its installation methods, simulation approaches, and parameter design procedures. Using a typical underground complex structure as the engineering background, numerical simulation analyses were conducted on the soil-inerter isolation system-complex interaction system, yielding recommended design parameters for the isolation system. The results show that the proposed design procedure can effectively correlate design parameters with the structural response of the complex, thereby achieving the seismic design objectives. The system can effectively control the acceleration, displacement, and stress responses of the underground complex structure and, compared with conventional isolation schemes, can simultaneously satisfy the multi-objective coordinated control requirements of both the complex structure and the isolation layer. Moreover, it substantially controls the seismic response of the superstructure above the complex without degrading that of the underground portion.

Keywords: complex structure; inerter-based isolation system; soil-structure interaction; design method

0　引言

党二十届三中全会指出，要统筹推进城市地下空间合理开发利用，充分挖掘地下空间资源潜力[1-2]。地下综合体结构通常由地下结构与建在其上方的上盖结构组成，具有较高的土地资源利用效率[3-4]。目前，此类综合体结构已在各主要城市广泛应用，呈现出社会功能多样化、结构形式综合化等特点。然而，综合体特殊的结构形式常导致竖向构件不连续、截面突变及刚度突变等复杂情况[5-7]，其地震响应特性有别于传统地面结构，面临更高的地震危险性。一旦发生地震破坏，将造成巨大经济损失与恶劣社会影响。鉴于此，开展综合体结构抗震性能研究具有重要意义。

在综合体上盖结构与地下结构的连接部位设置隔震层，是控制结构地震响应的有效途径之一。虽然隔震层内安装橡胶支座可降低结构地震响应，但普遍存在隔震层变形控制与隔震效率之间的固有矛盾。惯容作为一种双节点惯性控制元件，其出力与两端节点的相对加速度成正比，具有显著的惯性增效机制[8-10]；它可依托近乎为0的物理质量调节受控结构的惯性特征与动力响应，并以动能形式实现能量的转移、吸收与临时存储。将惯容元件、阻尼元件与弹簧元件组合成为惯容隔震系统[11-14]，并与隔震装置并联使用，有望实现对地下综合体结构加速度、位移及应力响应的协同控制。

本文基于惯容元件，提出一种兼具调谐吸能与增效耗能功能的惯容隔震系统，建立其力学简化模型，并给出面向地下综合体结构的惯容隔震系统性能设计流程。以某典型综合体结构为工程背景，建立土-惯容隔震系统-综合体相互作用数值模型，选取6条地震动作为输入，对上海软土场地的综合体结构进行地震反应分析。通过与无控综合体及普通隔震综合体的响应结果进行对比，验证所提惯容隔震系统在控制综合体结构地震响应方面的性能优势。

1　综合体结构惯容隔震模型介绍

1.1　惯容隔震系统力学模型

如图1(a)所示，惯容隔震系统由两部分组成：一部分为惯容元件与阻尼元件并联；另一部分为惯容元件与弹簧元件并联，二者再相互串联。该系统的出力可以表示为：

$$F_{\mathrm{in}} = m_{\mathrm{in\text{-}1}}\ddot{u}_{\mathrm{in\text{-}1}} + c_{\mathrm{in}}\dot{u}_{\mathrm{in\text{-}1}} = m_{\mathrm{in\text{-}2}}\ddot{u}_{\mathrm{in\text{-}2}} + k_{\mathrm{in}}u_{\mathrm{in\text{-}2}} \tag{1}$$

式中：$m_{\mathrm{in\text{-}1}}$、$m_{\mathrm{in\text{-}2}}$、c_{in}、k_{in}分别为惯容隔震系统两支路中惯容元件的惯容系数、阻尼元件的阻尼系数以及弹簧元件的刚度系数；$\ddot{u}_{\mathrm{in\text{-}1}}$、$\ddot{u}_{\mathrm{in\text{-}2}}$、$\dot{u}_{\mathrm{in\text{-}1}}$、$u_{\mathrm{in\text{-}2}}$分别为惯容隔震系统中对应元件两端的相对加速度、相对速度及相对位移。由于系统中两个惯容元件为刚性串联，二者存在耦合作用，惯性效应相互干涉，需满足下式：

$$u_{\mathrm{iso}} = u_{\mathrm{in\text{-}1}} + u_{\mathrm{in\text{-}2}} \tag{2}$$

式中：u_{iso}为隔震层的相对位移；$u_{\mathrm{in\text{-}1}}$、$u_{\mathrm{in\text{-}2}}$分别为惯容元件两端相对位移。此外，隔震层本身可简化为弹簧元件与阻尼元件并联的系统，其出力可以表

示为：

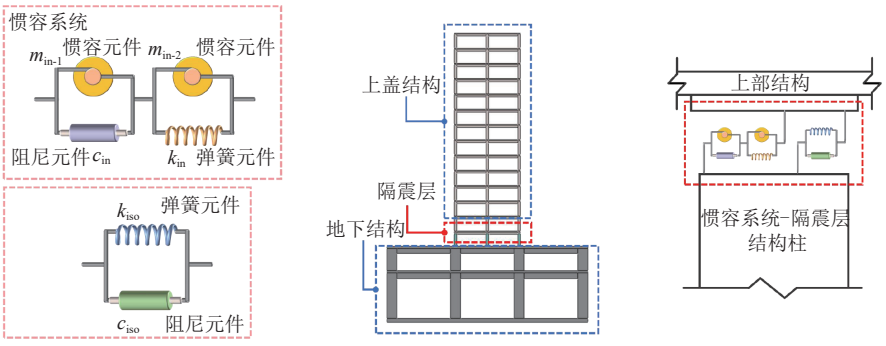
$$F_{\mathrm{iso}}=k_{\mathrm{iso}}u_{\mathrm{iso}}+c_{\mathrm{iso}}\dot{u}_{\mathrm{iso}} \tag{3}$$

式中：k_{iso}、c_{iso}分别为隔震层的刚度系数与阻尼系数；u_{iso}、$\dot{u}_{\mathrm{iso}}$分别为隔震层的相对位移与相对速度。

1.2 地下综合体结构的惯容隔震系统安装示意

如图1(b)所示，综合体结构由上盖结构与地下结构组成。由于构件尺寸差异显著，结构往往存在刚度突变等薄弱特征。这些因素将导致上盖结构的地震响应高于传统地面结构。考虑到综合体结构具有较高的社会价值与广泛影响力，亟需进一步提升其抗震性能。

为有效控制上盖结构的地震响应，在一层柱顶设置了由惯容系统构成的隔震层。该系统与隔震层并联，其两端分别连接上部结构与柱顶[15]，如图1(c)所示。在此布置下，惯容隔震系统与隔震层共同工作，二者的加速度、速度及位移响应均保持一致。



(a) 惯容隔震系统力学模型 (b) 综合体结构示意图 (c) 安装示意图

图1 惯容隔震系统力学模型与综合体结构安装示意图

Fig. 1 Mechanical model of inerter-based isolation system and schematic diagram of its installation in complex structure

2 面向地下综合体的惯容隔震系统性能设计

惯容隔震系统通过配置隔震层中的柔性支座，使结构隔震周期避开场地土的卓越周期。在此基础上，以上盖结构隔震周期为中心对惯容系统进行调谐设计，基于其惯性放大效应产生的动力吸振机理，实现地下综合体结构增效隔震和隔震层变形性能的协同控制。

针对面向综合体结构的惯容隔震系统，提出了标准化设计流程。首先，定义以下无量纲设计参数：

$$\begin{cases}\mu=\dfrac{k_{\mathrm{iso}}}{k_{\mathrm{up}}},\ \xi_{\mathrm{iso}}=\dfrac{c_{\mathrm{iso}}}{2\sqrt{m_{\mathrm{up}}k_{\mathrm{iso}}}}\\ \chi=\dfrac{m_{\mathrm{in\text{-}1}}}{m_{\mathrm{up}}}=\dfrac{m_{\mathrm{in\text{-}2}}}{m_{\mathrm{up}}},\ \kappa=\dfrac{k_{\mathrm{in}}}{k_{\mathrm{iso}}},\ \xi_{\mathrm{in}}=\dfrac{c_{\mathrm{in}}}{2\sqrt{m_{\mathrm{in\text{-}1}}k_{\mathrm{iso}}}}\end{cases} \tag{4}$$

式中：μ和ξ_{iso}均为隔震层的设计参数，分别表示隔震层的刚度比与阻尼比；k_{up}和m_{up}分别为上盖结构的抗侧刚度与质量；χ、κ和ξ_{in}均为惯容隔震系统的设计参数，分别表示惯容隔震系统的惯质比、刚度比与阻尼比。

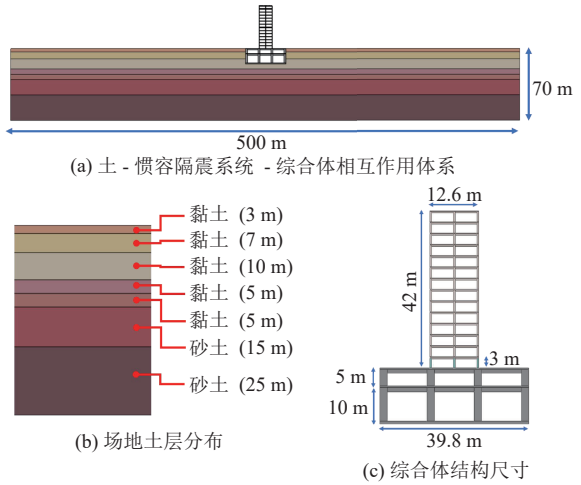
无量纲参数设计流程如下：(1)明确设计约束条件与优化目标；(2)预设隔震层设计参数μ与ξ_{iso}，计算仅布置隔震层时综合体上盖结构的地震响应；(3)预设惯容隔震系统设计参数χ、κ与ξ_{in}，计算布置惯容隔震系统-隔震层后综合体上盖结构的地震响应；(4)验算是否满足设计约束条件与优化目标。

采用上述方法可实现惯容隔震系统-隔震层参数的有序设计，后续将通过算例对该设计方法进行验证与分析。

3 土-惯容隔震系统-综合体地震响应分析

3.1 土-惯容隔震系统-地下综合体算例信息

本文以一典型综合体结构为工程背景[16]，建立土-惯容隔震系统-综合体相互作用数值模型，如图2(a)所示。土体选用上海软土场地[17-18]，深度为70 m；场地宽度约取深度的7倍，即为500 m，以消除边界反射对分析结果的影响[19-21]。结构与土体的相互作用通过接触面模拟；法向采用硬接触，切向采用摩擦接触，土与结构之间的摩擦系数取0.4。场地土层分布见图2(b)，参数信息列于表1。该综合体结构上盖14层、地下2层；上盖结构高42 m，分为两跨，宽12.6 m；地下结构高15 m，分为三跨，宽39.8 m，如图2(c)。



(a) 土 - 惯容隔震系统 - 综合体相互作用体系

(b) 场地土层分布

(c) 综合体结构尺寸

图 2　土-惯容隔震系统-综合体相互作用数值模型示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the numerical model for soil-inerter isolation system-complex structure

表 1　场地土层参数[17]

Table 1　Parameters of site soils[17]

编号	类型	顶板埋深/m	厚度/m	密度/(kg/m³)	剪切波速/(m/s)	泊松比
1	黏土	0	3	1 900	100	0.33
2	黏土	3	7	1 750	130	0.35
3	黏土	10	10	1 750	160	0.38
4	黏土	20	5	1 820	190	0.30
5	黏土	25	5	2 000	260	0.30
6	砂土	30	15	1 920	290	0.28
7	砂土	45	25	1 900	320	0.33

因为地震动选取以软土场地为基本条件，依据 30 m 剪切波速，选用 5 条天然地震动（CHY039、El-Centro、KAU011、TTR008、AIC003）及 1 条人工地震动（上海人工波）（表 2）。各地震动参数如下：CHY039 波时间间隔为 0.02 s，持时 70.48 s；El-Centro 波时间间隔为 0.01 s，持时 53.74 s；KAU011 波时间间隔为 0.005 s，持时 90 s；TTR008 波时间间隔为 0.01 s，持时 90 s；AIC003 波时间间隔为 0.01 s，持时 71 s；上海人工波（SHW 波）时间间隔为 0.02 s，持时 81.92 s。

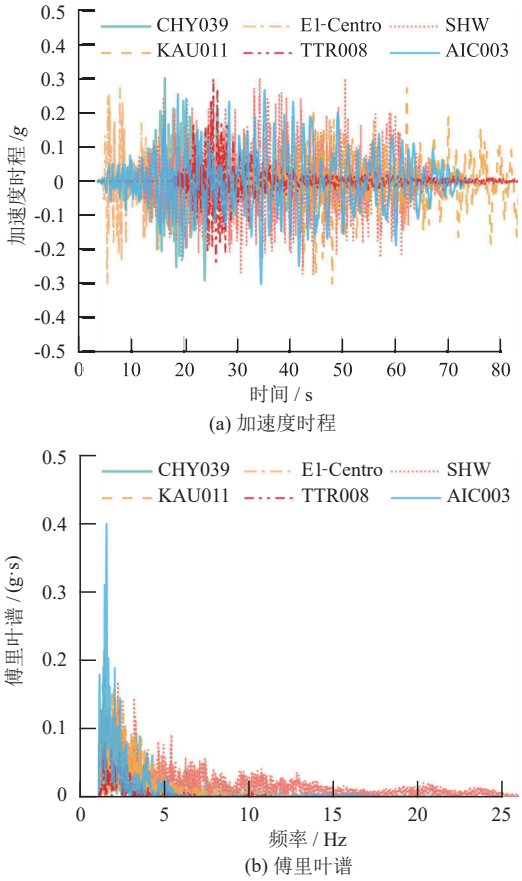
6 条地震动的加速度时程与傅里叶谱如图 3 所示，其卓越周期均在 3 Hz 以内，可使上海软土场地产生明显的加速度放大效应。在土-惯容隔震系统-综合体相互作用数值模型中，将 6 条地震动统一调幅至 0.3g，并从场地底部基岩面输入水平向地震动，开展动力时程分析。

基于第 2 节的设计方法，首先确定隔震层刚度

表 2　输入地震动信息

Table 2　Information of input ground motions

编号	台站	地震动名称	震级	30 m 剪切波速/(m/s)	持时/s
NW1	CHY039	集集地震	7.62	201.2	70.48
NW2	El-Centro	帝王谷地震	7.10	213.4	53.74
NW3	KAU011	集集地震	7.62	155.3	90.00
NW4	TTR008	鸟取地震	6.61	139.21	90.00
NW5	AIC003	新潟地震	6.63	144.4	71.00
AW1	-	上海人工波	-	-	81.92



(a) 加速度时程

(b) 傅里叶谱

图 3　输入地震动加速度时程与傅里叶谱

Fig. 3　Acceleration time histories and Fourier spectra of input ground motions

比 μ 为 0.5，阻尼比 ξ_{iso} 为 0.05，经计算求得隔震层刚度为 18 045.41 kN/m，阻尼系数为 676.94 kN·s/m。在此基础上，进一步确定惯容隔震系统的惯质比 χ、刚度比 κ 与阻尼比 ξ_{in}，经校验后最终取值分别为 0.1，0.154 与 0.05。

3.2　惯容隔震系统性能分析

为对比分析惯容隔震系统的地震响应控制效果，分别建立土-无控综合体结构模型与土-隔震层综合体结构模型。后续分析中，将土-无控综合体结

构模型命名为MS1,土-隔震层综合体结构模型命名为MS2,土-惯容隔震系统综合体结构模型命名为MS3。

表3展示了6条地震动作用下,综合体上盖结构与地下结构的加速度响应结果。对于上盖结构,增设隔震层或惯容隔震系统均可有效降低其加速度响应;惯容隔震系统对上盖结构加速度峰值与均方根响应的控制效果更为显著。与MS2相比,MS3的上盖结构加速度峰值响应平均降低19.32%,加速度均方根响应平均降低26.12%。特别是在控制加速度均方根响应方面,惯容隔震系统表现出远优于传统隔震层的性能(表4)。

表3 综合体结构上盖结构加速度峰值分析

Table 3 Peak acceleration analysis of superstructure of the complex structure

地震动	上盖结构加速度峰值/(m/s²)			对比分析/%		
	MS1	MS2	MS3	(MS2−MS1)/MS1	(MS3−MS1)/MS1	(MS3−MS2)/MS2
NW1	4.382	2.911	2.371	−33.57	−45.89	−18.55
NW2	1.885	1.443	1.028	−23.45	−45.46	−28.76
NW3	3.549	2.475	2.286	−30.26	−35.59	−7.64
NW4	2.405	0.860	0.699	−62.24	−70.94	−18.72
NW5	2.875	1.511	1.251	−47.44	−56.49	−17.21
AW1	3.466	2.839	2.128	−18.09	−38.60	−25.04

表4 综合体结构上盖结构加速度均方根分析

Table 4 RMS acceleration analysis of superstructure of complex structure

地震动	上盖结构加速度均方根/(m/s²)			对比分析/%		
	MS1	MS2	MS3	(MS2−MS1)/MS1	(MS3−MS1)/MS1	(MS3−MS2)/MS2
NW1	1.308	1.045	0.805	−20.11	−38.46	−22.97
NW2	0.493	0.491	0.315	−0.41	−36.11	−35.85
NW3	0.911	0.847	0.691	−7.03	−24.15	−18.42
NW4	0.414	0.146	0.108	−64.73	−73.91	−26.03
NW5	0.912	0.512	0.417	−43.86	−54.28	−18.55
AW1	1.086	0.985	0.641	−9.30	−40.98	−34.92

对于地下结构,惯容隔震系统的控制效果与隔震层基本相当(表5、表6)。与MS2相比,MS3的地下结构加速度峰值响应平均仅降低0.13%,加速度均方根响应平均仅降低0.35%,表明地下结构的地震响应主要受场地条件控制,受上部隔震措施的影响较小。上述算例结果表明,惯容隔震系统能够在不劣化地下结构抗震性能的前提下,显著提升上盖结构的地震响应控制能力。

表5 综合体结构地下结构加速度峰值分析

Table 5 Peak acceleration analysis of underground structure of the complex structure

地震动	地下结构加速度峰值/(m/s²)			对比分析/%		
	MS1	MS2	MS3	(MS2−MS1)/MS1	(MS3−MS1)/MS1	(MS3−MS2)/MS2
NW1	2.017	1.835	1.834	−9.02	−9.07	−0.05
NW2	1.132	1.051	1.051	−7.16	−7.16	−0.00
NW3	1.628	1.496	1.494	−8.11	−8.23	−0.13
NW4	1.196	1.083	1.082	−9.45	−9.53	−0.09
NW5	1.348	1.259	1.255	−6.60	−6.90	−0.32
AW1	1.685	1.517	1.514	−9.97	−10.15	−0.20

表6 综合体结构地下结构加速度均方根分析

Table 6 RMS acceleration analysis of underground structure of the complex structure

地震动	地下结构加速度均方根/(m/s²)			对比分析/%		
	MS1	MS2	MS3	(MS2−MS1)/MS1	(MS3−MS1)/MS1	(MS3−MS2)/MS2
NW1	0.445	0.440	0.439	−1.12	−1.35	−0.23
NW2	0.233	0.230 9	0.230 8	−0.88	−0.93	−0.04
NW3	0.386	0.380	0.379	−1.55	−1.81	−0.26
NW4	0.254	0.251	0.250	−1.18	−1.57	−0.40
NW5	0.311	0.304	0.302	−2.25	−2.89	−0.66
AW1	0.401	0.395	0.393	−1.43	−1.88	−0.51

为直观展现惯容隔震系统的优势,图4给出了NW1地震动作用下,综合体上盖结构顶部加速度、地下结构加速度、上盖结构相对位移与隔震层位移的时程曲线。图4(a)表明,惯容隔震系统对上盖结构加速度具有优异的控制效果;与MS1相比,MS3的上盖加速度峰值降低45.89%;与MS2相比,下降18.57%。如图4(b)所示,与对上盖结构的控制效果不同,惯容隔震系统对地下结构加速度的控制主要体现在峰值响应上,而对整体加速度时程响应的影响并不明显。

上盖结构相对位移时程如图4(c)所示。与加速度响应规律类似,惯容隔震系统显著减小了上盖结构的变形,其中MS3的变形峰值较MS1降低45.65%,较MS2降低18.58%。隔震层位移时程如图4(d)所示。过大的隔震层变形会导致震后结构复位困难,且不利于隔震系统的修复与更新。可以看出,MS3的隔震层变形峰值较MS2降低19.41%,表明引入惯容隔震系统不仅有效降低了综合体上

盖结构与地下结构的加速度响应，同时也实现了对隔震层变形的抑制。此外，在MS3工况中，阻尼元件的相对变形时程大于隔震层位移时程，其阻尼变形放大倍率为2.11。这说明惯容元件具有放大阻尼元件变形的作用，体现了其等效负刚度效应及相应的耗能增效效果。

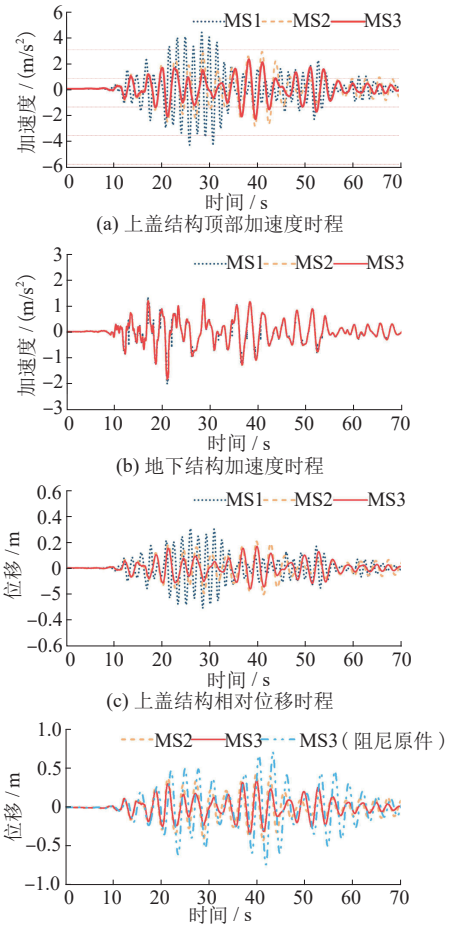


图4　NW1地震动作用下综合体结构加速度响应与位移响应时程曲线对比

Fig. 4　Comparison of acceleration and displacement time-history curves of the complex structure under NW1 ground motion

图5给出了NW1地震动作用下，综合体上盖结构与地下结构的剪力时程曲线。对于上盖结构，隔震层的设置有效阻断了地震能量向上部结构的传递。与MS1相比，MS2与MS3的上盖结构剪力峰值分别降低33.56%与45.90%。惯容隔震系统提供了额外的能量吸收、储存与耗散途径，进一步削减了上盖结构剪力；与MS2相比，MS3的上盖结构剪力峰值降低18.57%。地下结构剪力受上盖结构与场地条件的双重影响。隔震层的引入削弱了上盖结构与地下结构之间的相互作用，使得MS3的地下结构剪力峰值较MS1下降48.74%，而与MS2相比仅下降0.43%。

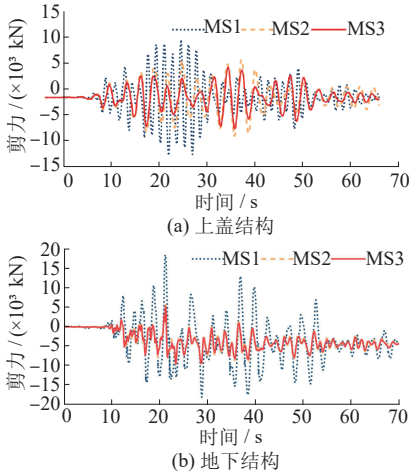


图5　NW1地震动作用下综合体结构剪力时程曲线对比

Fig. 5　Comparison of shear force time-history curves of the complex structures under NW1 ground motion

图6展示了NW1地震动作用下综合体上盖结构的应力响应情况。与MS1相比，MS2因设置隔震层，上盖结构应力降低6.95%；MS3采用惯容隔震系统，上盖结构应力较MS1降低24.05%，较MS2降低18.37%。这表明惯容隔震系统能有效降低上盖结构应力响应，使其应力水平进一步低于C35混凝土的抗压强度标准值。

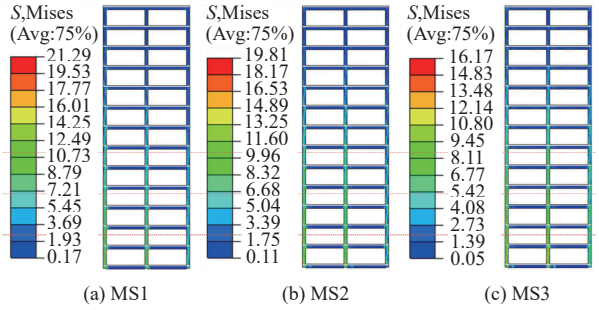


图6　NW1地震动作用下综合体上盖结构应力云图对比（单位：MPa）

Fig. 6　Comparison of stress contours of the superstructure of the complex structure under NW1 ground motion (unit: MPa)

图7展示了NW1地震动作用下综合体地下结构的应力响应情况。隔震层的设置削弱了上盖结构与地下结构之间的相互作用，从而降低了地下结

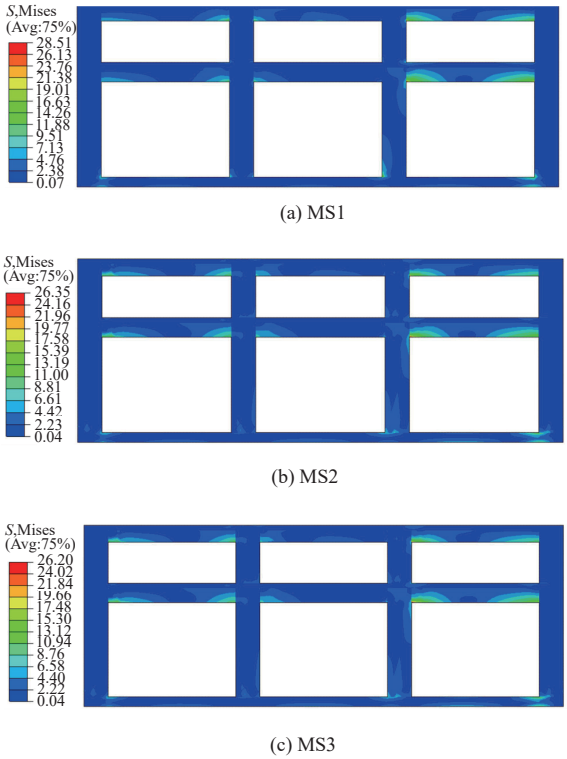


图 7 NW1 地震动作用下综合体地下结构应力云图对比(单位:MPa)

Fig. 7 Comparison of stress contours of the underground structure of the complex structure under NW1 ground motion (unit: MPa)

构的应力响应,MS2 相较于 MS1,地下结构应力下降 7.58%。惯容隔震系统对地下结构应力响应的影响并不明显,MS3 相较于 MS1 应力下降 8.10%,仅较 MS2 下降 0.57%,表明该系统在改善上盖结构应力响应的同时,不会造成地下结构应力响应的劣化。结合图 6 与图 7 的应力云图可以看出,上盖结构的薄弱部位位于一层柱顶,地下结构的薄弱部位则位于地下二层梁端;惯容隔震系统虽有效降低了整体结构的应力水平,但未引起结构薄弱部位的改变。

4 结论

通过对安装惯容隔震系统的地下综合体结构开展参数化设计和动力响应分析,可以得出以下结论:

(1) 本文所提出的惯容隔震系统及其参数设计方法,可有效实现地下综合体结构的地震响应控制。

(2) 层间惯容隔震系统在不增大地下结构加速度响应与应力响应的前提下,能显著降低上盖结构的加速度响应、应力响应、剪力响应及隔震层位移。

(3) 算例分析表明,惯容隔震系统中惯容元件通过等效负刚度效应实现隔震增效,阻尼元件承担能量耗散,弹簧元件发挥质量调谐作用,三者共同构成能量传递路径清晰的混合隔震体系,可满足地下综合体结构多目标响应的协同控制需求。

参考文献(References)

[1] 董杰, 孙萍, 张鹏, 等. 青岛市地下空间开发建设: 进展与展望[J]. 华东地质, 2024, 45(3): 264-280.
Dong Jie, Sun Ping, Zhang Peng, et al. The progress and prospects of underground space development and construction in Qingdao[J]. Resources Survey & Environment, 2024, 45(3): 264-280.

[2] 徐雅洁, 陈湘生. 地铁域地下空间综合开发研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 1-12, 21.
Xu Yajie, Chen Xiangsheng. Current situation and prospect of comprehensive development of underground space in metro area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(1): 1-12, 21.

[3] 旷文杰, 周浩, 卜丹, 等. 超长大跨度商业综合体结构关键问题分析与设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 459-464.
Kuang Wenjie, Zhou Hao, Bu Dan, et al. Analysis and design of key problems of super long span commercial complex structure[J]. Building Structure, 2023, 53(S2): 459-464.

[4] An J H, Feng F Q, Zhang Y H, et al. Response displacement method for seismic calculation of subway station complex structure of TOD mode[J]. Buildings, 2023, 13(12): 2987.

[5] 沈安迪, 陈清军. 不同类型地震波作用下地下综合体结构地震反应分析[J]. 力学季刊, 2018, 39(3): 562-572.
Shen Andi, Chen Qingjun. Seismic response of underground complex subjected to different types of ground motions[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2018, 39(3): 562-572.

[6] Qian Q H. Present state, problems and development trends of urban underground space in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 280-289.

[7] Zhou Y, Chen Q D, Wu H, et al. Seismic performance of a frame-supported shear wall over-track building through shaking table test[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2024, 33(9): e2098.

[8] Pan C, Zhang R F. Design of structure with inerter system based on stochastic response mitigation ratio[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(6): e2169.

[9] Lazar I F, Neild S A, Wagg D J. Vibration suppression of cables using tuned inerter dampers[J]. Engineering Structures, 2016, 122: 62-71.

[10] 张瑞甫, 曹嫣如, 潘超. 惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 8-27.
Zhang Ruifu, Cao Yanru, Pan Chao. Inerter system and its

state-of-the-art[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 8-27.

[11] 张瑞甫, 吴敏君, 潘超. 对惯容减震系统基本概念及设计范式的讨论[J]. 振动工程学报, 2024, 37(11): 1848-1861.
Zhang Ruifu, Wu Minjun, Pan Chao. Discussion on the basic concept and design paradigm of inerter system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2024, 37(11): 1848-1861.

[12] Deastra P, Wagg D J, Sims N D, et al. Experimental shake table validation of damping behaviour in inerter-based dampers [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21(3): 1389-1409.

[13] 贺智铭, 唐贞云, 董晓辉, 等. 调谐质量惯容阻尼器对核安全壳的减震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2025, 45(1): 51-60.
He Zhiming, Tang Zhenyun, Dong Xiaohui, et al. Study on the damping performance of tuned mass damper inerter for nuclear containment structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2025, 45(1): 51-60.

[14] 石岩,石赟山,韩建平,等. 惯容组合减震策略对连续刚构桥的损伤控制分析[J/OL]. 振动工程学报, 2025-03-18. https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20250124.1141.002.
Shi Yan, Shi Yunshan, Han Jianping, et al. Seismic damage control of continuous rigid frame bridges based on thecombined seismic isolation strategy with inerter system[J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 2025-03-18. https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20250124.1141.002.

[15] Zhao Z P, Tang Y C, Hong N, et al. Interaction-performance-driven design of negative-stiffness friction pendulum systems for aboveground structure-connected underground structure-soil system with ground motion effects[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 88: 108970.

[16] 林志波. 隔震技术在地铁上盖建筑结构中的应用分析[J]. 福建建筑, 2017(7): 97-103, 134.
Lin Zhibo. Application and analysis of isolation technology in building structure of metro[J]. Fujian Architecture & Construction, 2017(7): 97-103, 134.

[17] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海软土场地的地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 773-778.
Huang Yu, Ye Weimin, Tang Yiqun, et al. Characteristic analysis for seismic ground response of soft soils in Shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 773-778.

[18] Huang Y, Ye W M, Chen Z C. Seismic response analysis of the deep saturated soil deposits in Shanghai[J]. Environmental Geology, 2009, 56(6): 1163-1169.

[19] 楼梦麟, 邵新刚. 应用通用程序计算深覆盖土层地震反应的几个问题[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 63-68, 109.
Lou Menglin, Shao Xingang. Several problems in seismic response calculation of soil layer with deep deposit using general software[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4): 63-68, 109.

[20] 周强, 陈斯, 汪云龙, 等. 可液化粉土地层地铁车站结构地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1331-1344.
Zhou Qiang, Chen Si, Wang Yunlong, et al. Seismic response of subway station structure in liquefiable silt layer[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1331-1344.

[21] Li W T, Chen Q J. Effect of vertical ground motions and overburden depth on the seismic responses of large underground structures[J]. Engineering Structures, 2020, 205: 110073.

(本文编辑:张向红)