

考虑建筑群结构 - 土 - 结构对隔震性能的影响

王泰泽, 刘德稳*

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年4月22日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

层间隔震对于高层建筑的抗震效果是近年来研究效果较好的一种抗震方式, 而由于城市发展, 建筑群之间的距离呈现缩短的趋势, 而土 - 结构与结构 - 土 - 结构的作用方式对于如今建筑群的抗震有着重要的意义, 如何将其的影响因素考虑到建筑在设计层间隔震的研究较少, 本文对其中土壤因素对建筑层间隔震的影响进行了研究, 得出土壤的软硬对于层间隔震的影响。

关键词

层间隔震, 土 - 结构相互作用, 结构 - 土 - 结构相互作用

Consider the Influence of the Building Complex Structure-Soil-Structure on the Isolation Performance

Taize Wang, Dewen Liu*

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Apr. 22nd, 2025; accepted: May 14th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

The seismic effect of mid-story isolation structure on high-rise buildings is a seismic resistance method with relatively good research results in recent years. However, due to urban development, the distance between building complexes shows a shortening trend. The interaction modes of soil-structure and structure-soil-structure are of great significance for the seismic resistance of building complexes nowadays. There are relatively few studies on how to take its influencing factors into account in the design of buildings. This paper studies the influence of soil factors on the mid-

*通讯作者。

storyisolation structure and concludes the influence of soil softness and hardness on the spacer vibration of floors.

Keywords

Mid-Storyisolation Structure, Soil-Structure Interaction, Structure-Soil-Structure Interaction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着世界经济的不断发展提高,城市的建筑密度逐渐增大,使得建筑之间的间距逐渐缩小。地震是对人类影响最大的自然灾害之一,过去较大的地震往往会对人类产生巨大的影响导致在经济,人类安全和精神伤害方面损失严重。传统建筑往往允许结构损伤来消耗地震能量,而层间隔振作为当前工程领域应用广泛的消能减震技术,通过设置隔震层显著提升建筑抗震性能。根据隔震层设置的位置不同,隔震技术可分为基础隔震与层间隔震两类。其中,层间隔震通过在建筑楼板与竖向承重构件(如柱、墙)间植入柔性隔离层,形成地震波传播的物理屏障,有效阻断地震能量向建筑上部传递。此技术不仅对传统抗震设计理念进行了革新,还通过优化结构整体抗震体系显著降低地震破坏效应,为提升建筑安全性能开辟了创新路径。

近年来大型建筑逐渐增多,建筑密度增大,导致建筑之间间距减小,周围的建筑由地基土相连,组成了一个相对开放的整体结构。这对单个建筑的抗震也有了新的要求,建筑不被看作单个的抗震单元,而是与附近建筑和建筑之间的土壤条件有着密不可分的关系,也就是说建筑的抗震要同时受到地基土和相邻建筑的影响。在城市建筑群的抗震性能研究中,考虑多建筑动力耦合效应对于模拟真实地震响应至关重要。通过建立相邻建筑物之间的地震动相互作用模型,能够有效反映建筑群在地震激励下的协同响应机制。这种分析方法可为层间隔震设计的优化提供更加可靠的理论依据,从而有效提升城市建筑群的整体抗震安全性。

针对相邻建筑群间的结构-土-结构动力耦合效应及其与层间隔震技术的协同作用展开系统性研究,具有深远的理论价值与实践意义,该研究不仅能够深化建筑抗震体系与周边建筑群动力耦合机制的理论认知,还可为城市高密度建筑群的抗震设计提供一定理论依据,也可以促进对结构-土-结构动力相互作用的继续研究与探讨。

2. 研究现状

目前经过初步的研究与探索,层间隔震在国外的研究较多,大多研究集中在日本。Murakami [1]提出了层间隔震的两质点模型,Kobayashi [2]等研究了三质点模拟层间隔震结构,提出隔震层震动会引起振兴的耦合,降低了隔震层的减振效果。国内也有一定的研究,轩鹏[3]等利用两质点模型来分析层间隔震结构,考察了隔震层上、下部结构的质量比和频率比对体系的影响,同时也考察了对其动力特性及地震反应的影响。李进波[4]等对三质点模型地震响应方面做了系统性分析。

土-结构相互作用也称 SSI (Soil-Structure Interaction)是地震工程中的重大研究课题,在几十年来一直得到国内外的广泛重视和研究[5]-[8]。而在此基础上进行进一步的研究——结构-土-结构相互作用也称 SSSI (Structure-Soil-Structure Interaction),是对土-结构相互作用问题研究的一个更深的分支领域,

它围绕相邻建筑物之间在地震荷载作用下同周边建筑与其之间的土壤材料之间的动力反应, 即一个建筑物的地震反应, 不仅受到周边土壤材料的影响, 同时也要考虑与其相邻建筑物通过二者之间的土壤材料对其作用的影响。

由于已有的模型计算过于复杂, 且有限元模型建立效率较低, 且受限之前计算能力较弱, 大多数研究模型简化为二维进行计算, 三维模型研究计算案例较少。而且研究大多限制在弹性范围, 非线性情况较少考虑, 这方面也较为欠缺, 不能准确反映地震波在土体传播时的非线性现象。应考虑相邻建筑的多个影响因素对层间隔震的影响, 如间隔距离、不同基础埋置深度的建筑物以及不同数量的相邻建筑物对层间隔震性能带来的不同的影响等。本文通过提高有限元建模过程效率, 将现有研究成果进行交叉对比, 找出结构-土-结构的哪些因素对层间隔震有着影响。

3. 有限元分析法

姜忻良等[9]提出了一种复合数值分析方法, 其技术路线包含三个关键点: 首先, 基于基底有限区域土体(A区)及建筑间相互作用土体区域(C区)进行建模。其次, 采用半解析无限元法分析外围土体无限域(B区)的波场传播特性。基于惯性耦合法, 通过边界条件连接刚性基础及位移协调条件对接各区域, 最终得到结构-桩基-土体系动力方程。

而经过建模对比, 二维建筑模型在加速度峰值方面, 与三维建筑模型有着较大的差别, 在较低楼层处, 二维建筑模型的位移峰值图与三维建筑模型的位移峰值比较接近, 并且随着楼层高度的提升, 这种差别逐渐放大, 对于建筑的顶部位置, 在单一建筑物情形和两个建筑物情形时, 三维建筑模型的位移峰值均比二维建筑模型的位移峰值大[10]。则从峰值图中可以得出采用三维有限元模型进行数值模拟更为精确, 所以采用三维建筑模型更加妥当。

4. 研究成果

4.1. 考虑 SSI 作用下层间隔震的影响因素

采用三维有限元模型进行数值模拟, 结合地基土参数与地基土阻抗系数, 得出基于建筑物的结构形式与地基土条件下的建筑结构的等效刚度[11]-[13]:

$$f_y = \frac{\frac{\eta_r q_r \sigma_f m_w}{l_w e_g g_b}}{\frac{\zeta_e}{A_f p_f}} \quad (1)$$

其中: 为第 η_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; σ_f 为频率参数; g_b 为剪力墙结构的自振频率; m_f 为地基土土层类别数量; ζ_e 为混凝土的弹性模量; A_f 为混凝土应变参考值; p_f 为影响系数。

从中可以得出, 各层土体的重度越大, 各层土体的孔隙比越大, 土体与建筑结构的刚度越小, 地基土土层类别数量越多, 建筑结构的等效刚度越大。在考虑 SSI 效应的层间隔震时, 土体对于建筑的抗震性能有着占比较大的影响, 为了进一步研究基础土质的软硬对于土体的影响, 对软土(剪切波速(Vs) < 150 m/s; 土体刚度模量(G) < 50 MPa)地基上抗震与隔震结构的自振周期进行了研究分析, 研究得出在硬土(剪切波速(Vs) > 300 m/s; 土体刚度模量(G) > 150 MPa)地基条件下其自振周期延长倍数略有增大。在地震动作用下, 采用软土地基的建筑上层间隔震结构的自振周期、楼层峰值加速度和基础转角加速度与在相同条件下使用硬土地基的建筑相差不大, 但在硬土地基条件下的建筑上层间隔震结构的楼层位增大显著, 相比于同样使用软土地基的建筑, 减震效果相比要差。当考虑 SSI 效应时, 结构基底所处的土层刚度及

基础埋深会对动力响应产生显著影响：相较于软土基础，硬土基础会导致更大的基底剪力和各层层间位移；而深埋基础与浅埋基础相比，同样会引发更强的基底剪力响应和更显著的层间位移发展。

4.2. 考虑 SSSI 作用下层间隔震的影响因素

在有着临近建筑的情况下，结构的竖向位移和倾覆转角在邻近结构的影响下有增大的趋势[10] [11] [14]-[18]。而大量研究表明，当两相邻结构的距离大于 2.5 倍基础宽度时，两结构间的动力相互作用已不明显表现为相关，可近似认为其相互作用已经消失。而随着建筑群建筑的高度增加，也增加了相邻建筑之间结构-土-结构的相互作用。综合可得，在考虑 SSSI 作用下的相邻建筑下，在两建筑地基距离较远时，则无需考虑，而在考虑距离范围内的两建筑，又需要考虑地基土的软硬，若地基土过硬，则 SSSI 作用的效果增大，若地基土较软，则 SSSI 作用效果较硬地基土情况来说较不明显。地基土较软则建筑的层间隔震效果会更佳，但地基土过软，其层间隔震体系的弹塑性层间位移角增大现象越明显，在软土地地上隔震结构体系的减震效果又会显著变差。基于上述内容，在城市临近建筑群考虑抗震设计时，更加应该考虑在 SSSI 作用效应下，建筑与周边土体与建筑的耦合反应，不能再将建筑单独看作为一个抗震单元，而是要将临近建筑一起作为抗震设计条件进行设计。

5. 结论与展望

5.1. 结论

在经过对层间隔震的研究学习与对 SSI 和 SSSI 影响因素的研究后，可知建筑地基土壤条件与相邻建筑间的土壤条件对相邻建筑的抗震性能有着重要的影响关系，可将建筑地基土的情况与周边土壤与周边建筑地基土的情况综合考虑，将临近建筑群与地基土视为整体系统进行抗震设计，避免孤立分析单栋建筑。进而将土壤软硬对考虑 SSSI 作用下相邻建筑使用层间隔震的抗震效果进行设计和评估。在考虑 SSI 作用效率的情况下，对于软土地基来说，隔震结构自振周期延长倍数较大，但过软的地基会导致弹塑性层间位移角显著增大，使得减震效果变差。对于硬土地基来说，基底剪力和层间位移显著增大，减震效果较差，需通过深埋基础或加固措施降低动力响应。在考虑 SSSI 作用下，硬土地基中 SSSI 效应更显著，会导致竖向位移和倾覆转角增大，而软土地基 SSSI 效应较弱，但仍需警惕层间隔震体系的位移角非线性增长。

5.2. 展望

目前对于层间隔震的研究已经较为发展完全，但是对于考虑 SSSI 作用的相邻建筑的层间隔震影响还有较大空缺，由以上研究可知 SSSI 对于分析城市中相邻建筑群的抗震效果有着重要的影响，有限元分析法对于三维建筑模型的研究还缺少大量案例，其对于层间隔震的影响因素也有较大的空白，由于土材料的非线性，增加三维建筑模型的非线性条件的研究，增加影响因素对结构抗震效果的研究，有助于对城市间相邻建筑群的结构-土-结构的研究。

基金项目

西南林业大学大学生创新创业项目(省级，2022 年)。

参考文献

- [1] Murakami, K., Kitamura, H. and Matsushima, Y. (2001) The Prediction for Seismic Responses of the Two-Mass Model with the Mid-Story Isolation System. *Journal of Structural and Construction Engineering*, **66**, 51-58.
- [2] Kobayashi, M. and Kohut (2008) Model Coupling Effects of Mid-Story Isolation Buildings. *Proceedings of the 14th*

- WCEE, Beijing, 2008, 114-117.
- [3] 轩鹏, 李爱群, 包霞, 等. 基于两质点模型的层间隔震体系参数分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 14-18+44.
- [4] 李进波. 层间隔震多层框架结构及三质点模型地震响应分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [5] Whitman, R.V. (1969) The Current Status of Soil Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*, **22**, 1-8.
- [6] Richardson, J.D. (1969) Forced Vibrations of Rigid Bodies on a Semi-Infinite Elastic Medium. University of Nottingham Department of Mechanical Engineering.
- [7] Warburton, G.B., Richardson, J.D. and Webster, J.J. (1971) Forced Vibrations of Two Masses on an Elastic Half Space. *Journal of Applied Mechanics*, **38**, 148-156. <https://doi.org/10.1115/1.3408735>
- [8] Warburton, G.B., Richardson, J.D. and Webster, J.J. (1972) Harmonic Response of Masses on an Elastic Half Space. *Journal of Engineering for Industry*, **94**, 193-200. <https://doi.org/10.1115/1.3428111>
- [9] 姜忻良, 黄艳, 丁学成. 相邻建筑物-桩基-土相互作用[J]. 土木工程学报, 1995(5): 32-38.
- [10] 陈晶, 陈清军. 结构-土-结构相互作用的模型对比与影响因素分析[C]//中国力学学会结构工程专业委员会, 内蒙古科技大学, 中国力学学会《工程力学》编委会, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学). 第 25 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 17-21.
- [11] 吴强. 考虑土-结构相互作用的建筑结构抗震性能分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(1): 113-118.
- [12] 吴应雄, 胡贤忠, 唐贞云, 等. 长周期地震动下考虑 SSI 效应三种地基的层间隔震结构试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(6): 143-148+194.
- [13] 房思彤, 刘德稳, 张亚飞, 等. 考虑 SSI 效应的层间隔震结构地震响应研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(3): 82-88.
- [14] 潘旦光, 高莉莉, 靳国豪, 等. 结构-土-结构体系动力特性的模型实验[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(12): 1720-1728.
- [15] 王淮峰, 楼梦麟, 陈希, 等. 建筑群结构-土-结构相互作用的影响参数研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 510-514.
- [16] 高艳华, 宋俊磊, 潘旦光, 等. 相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(24): 106-113.
- [17] 韩冰, 陈少林, 梁建文. 结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1574-1580.
- [18] 王国波, 袁明智, 苗雨. 结构-土-结构相互作用体系地震响应研究综述[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 837-847.