

引用本文:曾佳明,朱忠义,吕辉,等.考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究进展[J].建筑科学与工程学报,2024,41(1):69-82.

ZENG Jiaming, ZHU Zhongyi, LYU Hui, et al. Research progress on seismic resistance of large-span spatial structures considering soil-structure interaction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(1): 69-82.

DOI:10.19815/j.jace.2023.06003

# 考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究进展

曾佳明<sup>1,2</sup>, 朱忠义<sup>3</sup>, 吕辉<sup>1,2</sup>, 张成明<sup>1,2</sup>, 李丹<sup>1,2</sup>

(1. 南昌航空大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 南昌航空大学 江西省装配式建筑与智能建造重点实验室, 江西 南昌 330063; 3. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

**摘要:**考虑土-结构相互作用 (SSI) 的大跨度空间结构抗震研究对于实现大跨度空间结构精确化分析, 保障结构抗震安全性具有重要意义。为了更好地应用已有大跨空间结构考虑土-结构相互作用的研究成果, 分别对土-结构相互作用研究分析方法、框架结构 SSI 效应影响分析、地下-土-地上结构相互作用研究现状、大跨度空间结构与下部支承体系协同工作及考虑 SSI 对大跨度空间结构动力性能的影响等方面的研究成果进行了梳理。结果表明:已有土-结构相互作用分析方法及计算模型对于大跨度空间结构的适用性有待商榷;框架结构 SSI 效应和大跨度空间结构与下部支承体系协同工作的研究相对成熟,其成果可供借鉴;带有大型复杂地下结构的大跨空间结构 SSI 效应显著;现有研究多以数值模拟为主,试验技术的发展对大跨空间结构土-结构相互作用抗震理论的验证至关重要;未来需要进一步研究实用的简化计算模型及分析方法、地下结构-土-大跨度空间结构体系、强震失效倒塌机理及减隔震研究、试验研究、参数分析、复杂效应耦合等。

**关键词:**大跨度空间结构;土-结构相互作用;抗震性能;研究进展

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)01-0069-14

## Research progress on seismic resistance of large-span spatial structures considering soil-structure interaction

ZENG Jiaming<sup>1,2</sup>, ZHU Zhongyi<sup>3</sup>, LYU Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Chengming<sup>1,2</sup>, LI Dan<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Prefabricated Building and Intelligent Construction, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 3. Beijing Institute of Architectural Design Co., Ltd., Beijing 100045, China)

**Abstract:** The seismic research of large-span spatial structures considering soil-structure interaction (SSI) is of great significance for achieving precise analysis of large-span spatial structures and ensuring seismic safety of structures. In order to better apply the existing research results on soil structure interaction in large-span space structures, the research and analysis methods of soil structure interaction, SSI effect analysis of frame structures, current research

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52268031); 南昌航空大学研究生创新专项资金项目 (YC2023-075)

通信作者: 朱忠义 (1972-), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, E-mail: 1027311973@qq.com.

status of underground soil above ground structure interaction, collaborative work between large-span space structures and lower support systems, and the impact of SSI on the dynamic performance of large-span space structures were summarized. The results indicate that the applicability of existing soil structure interaction analysis methods and calculation models for large-span spatial structures needs to be discussed. The research on the SSI effect of frame structures and the collaborative work between large-span spatial structures and lower support systems is relatively mature, and its results can be used for reference. The SSI effect of large-span spatial structures with large and complex underground structures is significant. The current research mainly focuses on numerical simulation, and the development of experimental techniques is crucial for verifying the seismic theory of soil structure interaction in large-span spatial structures. In the future, further research is needed on practical simplified calculation models and analysis methods, underground structure soil large-span spatial structure systems, strong earthquake failure collapse mechanisms and seismic isolation research, experimental research, parameter analysis, complex effect coupling, etc.

**Key words:** large-span spatial structure; soil-structure interaction; seismic performance; research progress

## 0 引言

空间结构具有受力合理、跨越能力大、造型美观、整体性好且工业化程度高等众多优势,日益广泛地应用于体育场、展览馆、航站楼等大型公共建筑及各交通枢纽工程。作为城市的地标建筑及灾后救援的避难场所<sup>[1]</sup>,此类结构遭受地震作用而破坏甚至倒塌将会给国民经济和人民生命财产带来严重的创伤。因此,确保地震灾害下空间结构的安全可靠性和使用功能的连续性始终是国内外学术界及工程界共同关注的课题。

实际上,在现阶段的空间结构抗震设计中,结构抗震安全性依然不能得到有效保障。1995 年日本阪神地震中,采用大跨度屋盖结构的阪神竞技场受震害而严重破坏,究其原因在于地基下沉,由此可见空间结构的抗震设计应考虑地基土的影响<sup>[2]</sup>。然而中国的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[3]</sup>规定,结构抗震计算一般可不考虑地基与结构相互作用(即刚性地基假定),或仅对计算结果进行折减以适应特殊情况。《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)<sup>[4]</sup>也仅对结构抗震分析应考虑支承体系作出要求,未提及考虑地基土。刚性地基假定的空间结构抗震分析虽简化了计算,但已有研究表明,考虑地基土的影响,结构地震反应将发生显著变化<sup>[5-6]</sup>。由此看来,若按文献[3]、[4]的规定进行分析或计算,其计算结果与实际受力状态相比可能存在较大偏差,地震作用下的结构安全性将难以得到保障。

鉴于此,针对考虑土-结构相互作用(Soil-structure interaction,简称 SSI)的大跨度空间结构开展更加精确的抗震分析研究意义深远。

近年来,基于地震作用下大跨度空间结构和下部支承的协同作用及框架结构的 SSI 效应两方面的研究成果,考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震分析研究也取得了显著的进步。本文对土-结构相互作用、大跨度空间结构土-结构动力相互作用等若干问题做出归纳和总结,并寻找研究趋势及共性问题,最后为考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究做出展望。

## 1 土-结构动力相互作用研究

目前,关于土-结构相互作用的研究已涉及框架结构<sup>[7-8]</sup>、空间结构<sup>[9-10]</sup>、风电核电结构<sup>[11-12]</sup>、桥梁结构<sup>[13-14]</sup>,针对框架结构的土-结构相互作用研究相对较为成熟,而对于空间结构而言仍处于初步探索阶段。土-结构动力相互作用的研究涉及一系列的关健科学问题,如:土体、基础、上部结构材料非线性的模拟,有时还包括地下室结构,土体和地下室或者基础之间接触面的几何非线性问题、人工边界条件、地震动输入等问题。针对上述复杂问题,诸多学者提出了较为系统的土-结构动力相互作用的研究分析方法以及计算模型,基于此,结构 SSI 效应影响分析研究获得了非凡的成就,其中框架结构尤为突出。另一方面,随着中国社会经济和建筑科学技术的发展,国家城市化进程持续深化,地下空间的开发利用

与日俱增。佛山 3 号线美旗站与万科天空之城合建<sup>[15]</sup>、深圳岗厦北地下综合交通枢纽站桥合建<sup>[16]</sup>、北京工人体育场<sup>[17]</sup>、日照奎山体育中心体育场<sup>[18]</sup>等工程项目在地下开发地铁站或地下停车场以充分利用地下空间,呈现出地上地下空间一体化发展的趋势。鉴于此,有必要深入研究建筑的土-结构动力

相互作用及地下结构-土-地上结构动力相互作用。

1.1 研究方法

科学研究进程不断推进,土-结构相互作用的研究方法也随之得到持续完善。目前可将其归结为试验法和理论方法,各研究方法之间的关系如图 1 所示。

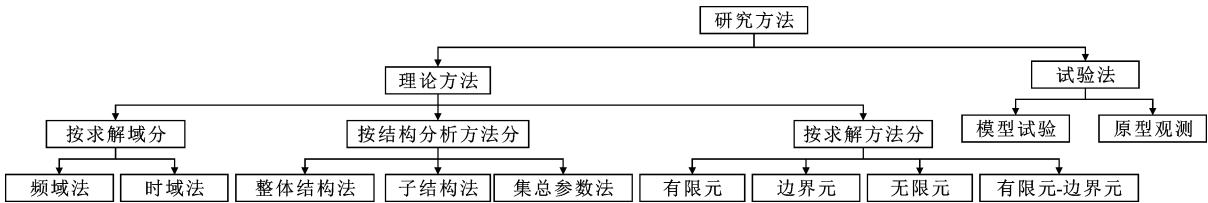


Fig.1 Classification of research methods in soil-structure interaction

1.1.1 试验法

试验法主要包括模型试验法和原型观测法两种方法,模型试验法主要有现场模型激震试验、室内振动台试验和离心机试验。

1.1.2 理论方法

理论方法按照求解域划分为频域和时域;按结构分析方法分为整体分析法(直接法)、子结构法<sup>[19]</sup>和集总参数法;按求解方法可分为解析法、数值法、半解析半数值法。

(1)分析方法。表 1 列出了土-结构相互作用的分析方法及其优缺点。

(2)计算方法。解析法结果精确度低。因此,多选用数值法或半解析半数值法求解。数值法被认为

是研究 SSI 的最有效工具之一,包括有限元法、边界元法和有限元-边界元法等。半解析半数值法是一种将地基视为弹性半空间,采用解析法求解,而结构采用数值模型求解,将数值法与地基解析结合起来的方法,具有突出优点。无限元法属于半解析半数值法。表 2 列出了土-结构相互作用体系的计算方法及其特点。

表 2 计算方法

Table 2 Calculation methods

计算方法	特点
有限元法	模拟真实性强,可处理各种复杂问题,考虑非线性;计算耗时长,需引入人工边界。常用人工边界有透射边界、黏弹性边界、黏性边界和无限元等。
边界元法	仅需处理物体边界;对边界进行离散化,维数降低一维,自由度和原始信息量减少;无需引入人工边界。
无限元法 <sup>[20]</sup>	在有限元的基础上沿外法线无限延伸计算部分的边界单元,在延伸方向引入解析函数。
有限元-边界元法 <sup>[21]</sup>	综合有限元和边界元法优点;通常有限元用于模拟上层建筑、基础和近场土壤,而边界元用于模拟远场土壤。

(3)计算分析模型。土-结构相互作用体系的数值计算模型常用的有 S-R 模型、并列质点模型(Penzien 模型)、混合模型、子结构模型、有限元模型。各数值计算模型特点及简图<sup>[22]</sup>如表 3 所示。

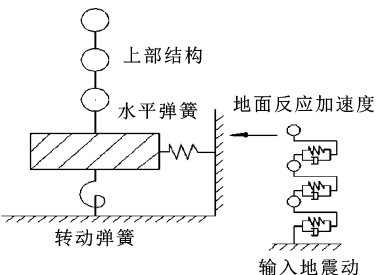
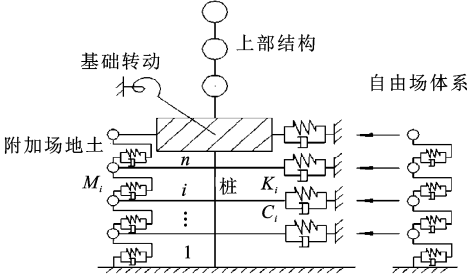
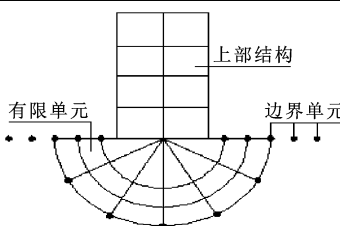
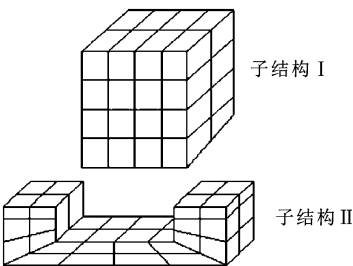
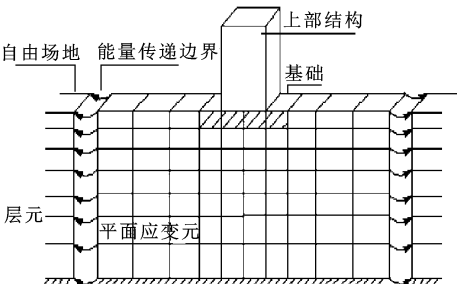
此外,近年来学者们在土-结构相互作用体系的简化计算、提高计算效率等方面做出了诸多努力。胡静静等<sup>[23]</sup>首次尝试基于隔离非线性有限元方法,建立大型框架剪力墙高层结构的土-结构相互作用整体模型,该新型分析方法实现了土-结构非线性接触的高效模拟。刘毅等<sup>[24]</sup>考虑到上述简化分析模

表 1 土-结构相互作用分析方法

Table 1 Analysis method for soil-structure interaction

分析方法	特点	优点	缺点
整体分析法	上部结构、基础和地基作为一个整体。	可同时计算上部结构和场地土;直观且最符合体系实际工作状态。	计算成本高。
子结构法	地基和上部结构离散分析,根据接触界面上的连续性条件考虑子结构间的相互作用。	计算量较小;计算灵活,可检验。	仅限于结构的线性或等效线性反应分析;不能计算自由场地的振动响应。
集总参数法	基础视为刚度无穷大,将地基简化为弹簧-阻尼-质量体系。有 S-R 模型、并列质点系模型等。	物理意义明确、模型简单、计算量小。	对于高阶振型的计算精度较低;对于大跨度空间结构计算误差较大。

表 3 数值计算模型  
Table 3 Numerical calculation model

数值计算模型	特点	简图[22]
S-R 模型	在结构基础底部设置水平弹簧和转动弹簧来模拟地基土的作用;模型简单、实用,但未解决土体与基础之间的非线性问题。	
并列质点模型 (Penzien 模型)	把自由场地简化为单位面积的土柱,将场地划分为若干土层,将质量集中于土层界面;对于结构体系,建筑物各层质量集中于各楼层,两体系之间设水平弹簧和阻尼器。	
混合元模型	对应于有限元-边界元法的模型。	
子结构模型	对应于子结构分析方法的模型。	
有限元模型	对应于有限元法的模型。	

型无法适应大跨度空间结构对高阶振型与竖向动力特性的需求,修正了 S-R 模型,修正模型参数和大跨度空间简化计算模型如图 2(其中, $L$  为基础底面半长度, $B$  为基础底面半宽度)、3 所示;以动力阻抗函数明确给出了基础的 6 种运动模式,而非仅以水平弹簧和转动弹簧简化原 S-R 模型。将其与 3-D 模型比较可知修正 S-R 模型精确度较高,计算效率

也得到明显提高,修正 S-R 模型在土-大跨度空间结构研究领域具有重要的理论指导意义。综上,今后结合大跨空间结构自身特点,进一步研究更加高效且适用的简化计算模型与分析方法至关重要。

1.2 框架结构 SSI 效应影响分析

框架结构的 SSI 效应研究多以结构动力特性及抗震性能影响分析为主。康帅等<sup>[25]</sup>开展了考虑土-

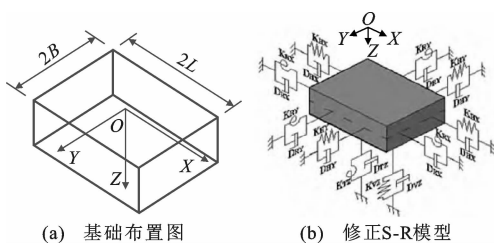


图 2 修正的 S-R 模型

Fig. 2 Revised S-R model

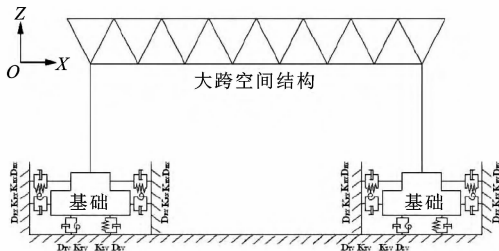


图 3 大跨空间结构简化计算模型

Fig. 3 Simplified calculation model for large-span spatial structure

结构相互作用的框架结构振动台试验,发现考虑土-结构相互作用的框架结构地震反应较刚性地基结构大。Requena-garcia-cruz 等<sup>[26]</sup>建立了考虑非线性 SSI 效应的某框架结构易损性曲线,研究结果表明,与刚性地基相比,该结构抗震能力降低,地震破坏加重,震后经济损失也会增加。Kamal 等<sup>[27]</sup>对土-桩-高层结构进行易损性分析,结果显示 SSI 效应导致结构易损性增加。由此可见,土-结构相互作用体系的易损性分析研究值得重视。与此同时,张昊等<sup>[28]</sup>发现框架结构考虑 SSI 后,周期延长,底部剪力减小,最大层间位移角显著增大,结构破坏集中在首层,震害更符合实际情况,文献<sup>[29]</sup>得出了类似的结果。此外,严飞<sup>[30]</sup>指出地震作用下土-框架结构相互作用体系的层间位移角大小同场地频率和地震波特性密切相关。

隔震结构研究是当前 SSI 领域的研究前沿,依据隔震支座的布置位置不同分为基础隔震<sup>[31]</sup>和层间隔震<sup>[32]</sup>,SSI 效应会致使隔震结构自振频率减小,周期延长,层间位移角及结构层位移峰值等动力响应增大,同时还削弱了结构隔震效果,地基土越软,影响越显著<sup>[33-37]</sup>。此外,刘德稳等<sup>[38-39]</sup>分析指出,远场地震作用下的 SSI 效应对土-层间隔震结构地震响应的影响较普通地震作用下显著,随着土体剪切波速的增加,SSI 效应对隔震层位移影响减小。赵畅等<sup>[40]</sup>对考虑 SSI 效应的基础隔震框架结构进

行损伤评估,结果表明,损伤程度由结构-土刚度比和地震波特性共同决定,随着结构-土刚度比增大,结构损伤加重,隔震支座损伤先于上部结构。在考虑 SSI 效应的减震结构研究方面,杨金平等<sup>[41]</sup>开展了考虑 SSI 的金属阻尼器减震框架结构振动台试验,发现 SSI 体系的减震效果优于刚性地基结构。

总体而言,与刚性地基假定相比,地震作用(减隔震)框架结构受土-结构相互作用的影响可归纳为以下 4 个方面:结构动力特性改变,结构动力响应改变,结构抗震能力改变,震后破坏程度改变。框架结构的土-结构相互作用研究包括 SSI 效应影响分析和隔震结构研究可为该领域的大跨空间结构研究提供借鉴。另外,考虑 SSI 的大跨度空间结构地震易损性也值得关注,易损性分析是基于性能设计的理论基础。与框架结构相比,大跨度空间结构的特点主要体现在结构高宽比小,对竖向地震动敏感,土-结构刚度比是重要控制因素等方面。

### 1.3 地下结构-土-地上结构相互作用研究现状

地下结构-土-地上结构相互作用依托于土-结构相互作用的研究成果和进展,诸多学者在此方面的前沿领域开展工作,取得了重大进展<sup>[42]</sup>。地下结构-土-地上结构存在着地表结构与地下结构相互独立和地上一体化结构(即地表结构与地下结构合建)两种形式。针对前者,程业等<sup>[43]</sup>开展了地下结构-土-地上框架结构体系振动台试验,对比发现地下结构降低了地上结构和场地的基频,且增大了上部结构的加速度和变形。可见,有必要考虑地下结构的影响。与此同时,洪娜等<sup>[44]</sup>针对地下结构-土地表隔震结构进行了振动台试验并建立了三维数值计算模型,研究发现地下车站放大了地表结构的加速度和层间剪力等响应,而隔震支座能够有效削弱此类不利影响。韦浩浩等<sup>[45]</sup>指出地铁车站的存在放大了场地土的响应,继而增大了地表结构响应。此外,郑小琼<sup>[46]</sup>指出地下结构对地上结构地震响应放大程度与上部建筑尺寸、地上地下结构相对位置和土体刚度等均有密切关联。

针对地上地下一体化结构,李钢等<sup>[47]</sup>基于整体分析法探讨了土-结构相互作用、地下地上耦联对土-地下室-地上大底盘双塔结构体系的抗震性能影响。结果表明:考虑土体作用减小了结构位移和加速度;地下结构的存在有利于控制结构变形;地下结构在地震动强度较高时,对地上结构地震响应放大作用显著。赵典等<sup>[48]</sup>探讨了考虑土-结构相互作用时地下室对地表框架结构地震响应的影响,发现输

入地震动较小时,地下室结构减小了地表结构的加速度和层间位移角;地震动较大时,影响不显著。韩学川等<sup>[49-51]</sup>系统地研究了地铁地下车站-土地上框架建筑一体化结构的地震响应规律及破坏机理,而考察重点在于地下结构而非地表结构。

由此可见,地震时地下结构-土地上结构之间的动力相互作用不容忽视。以上地下结构-土地上结构相互作用研究均针对框架结构形式,大跨度空间结构在该领域的研究还未见报道。无论是与地上空间结构相互独立还是同地上空间结构合建的地下结构,如地下室、地铁车站,其对大跨度空间结构地震响应的影响都值得考虑,同时应考虑 SSI 效应。

## 2 大跨度空间结构土-结构动力相互作用研究

近三四十年来,中国空间结构蓬勃发展,在结构形式拓展创新<sup>[52]</sup>、结构分析方法<sup>[53]</sup>及结构性能分析<sup>[54]</sup>方面取得了丰硕的研究成果,已形成了较为系统的理论体系<sup>[55]</sup>,并于工程实践中得到应用<sup>[56]</sup>。空间结构的跨度也日益增大,随之而来的是抗震设计及分析愈加复杂。迄今为止,已有不少学者对大跨度空间结构的抗震问题进行了研究,依据研究对象的不同将大跨空间结构抗震问题的研究分为 3 个阶段,大跨度空间结构抗震分析的精确度在这 3 个阶段得到了不断的提升和完善。第一阶段仅对屋盖结构进行分析,将支承体系简化为固支、简支或者弹性支座;第二阶段下部支承与大跨屋盖结构协同工作体系;第三阶段则是考虑土-结构动力相互作用的大跨度空间结构抗震研究。第二阶段的大跨度空间结构与下部支承协同工作体系抗震研究已相对成熟,可作为第三阶段大跨度空间结构考虑土-结构相互作用的研究基础,当前国内关于大跨度空间结构考虑土-结构相互作用领域的研究主要集中于考虑 SSI 对结构动力性能的影响及考虑 SSI 的结构减隔震研究,而国外还未涉及此领域的探索。

### 2.1 大跨度空间结构与下部支承体系协同工作

第二阶段的抗震研究往往忽略土-结构相互作用,针对屋盖结构与下部支承协同工作体系开展研究,主要体现在考虑下部支承对屋盖结构的动力性能影响、整体结构协同工作的强震失效分析及减隔震研究等方面。考虑下部支承的网壳结构自振频率降低,结构刚度减弱,动力稳定荷载降低,整体耦合体系的抗震能力较铰支模型减小<sup>[57-58]</sup>。在影响因素分析方面,网壳结构的地震动力特性和动力响应对

支承刚度最为敏感,其主要表现是随支承刚度的增大,自振周期减小,动力稳定荷载增大,极限荷载呈现先增大后减小的趋势<sup>[59-60]</sup>。

单独屋盖结构的强震失效模式分为动力失稳破坏和动力强度破坏,而整体耦合体系的失效模式很大程度上取决于屋盖结构与支承结构的刚度比<sup>[61-62]</sup>。考虑下部支承的柱面、球面网壳结构的强震失效模式均分为弱支承结构(支承动力强度破坏即支承倒塌)、中等支承结构(二者共同作用)、强支承结构(网壳动力强度破坏)3 种形式;上下部结构刚度较匹配时,结构抗震性能最好<sup>[57,63]</sup>。据此推断,考虑土-结构相互作用的空间结构失效模式很大程度上也与土、下部支承、屋盖三者的刚度比密切相关,而具体强震失效机理尚待研究。

在减隔震方面,考虑了下部支承的屋盖结构使得一些应用于空间结构中的新型减隔震技术成为可能。现已有学者将考虑整体协同工作的空间结构应用在框架结构中,比如使用较为成熟的防屈曲耗能支撑、摩擦耗能支撑等减震技术<sup>[64-66]</sup>。另一方面,下部支承结构体系及隔震支座布置位置会对空间结构隔震效果造成影响,学者们在此方面展开了探究<sup>[67-68]</sup>。发现考虑下部支承的网壳结构的三维隔震效果低于不考虑这一因素的隔震效果,下部支承高度的增加会减弱该支座隔震效果,基础隔震效果优于层间隔震。以上减隔震研究均未考虑土-结构相互作用。

空间结构考虑下部支承结构协同作用研究已趋于成熟。近年来随着理论研究的深入,大跨度空间结构抗震分析趋向于精确化,这更促使学者对大跨度空间结构土-结构动力相互作用进行研究。尽管考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究仍处于完善阶段,但包括考虑下部支承结构的影响分析、整体结构协同工作的强震失效机理和减隔震领域的相关研究成果可供借鉴,具备了良好的研究基础。

### 2.2 考虑 SSI 对大跨度空间结构动力性能的影响

考虑大跨度空间结构 SSI 效应起始于董亮等<sup>[69]</sup>的研究,他于 1999 年首次提出空间结构动力分析应考虑地基土的作用。随后,楼梦麟等<sup>[70-71]</sup>采用整体有限元分析法进行了落地双层柱面网壳结构在行波效应及 SSI 效应耦合作用下的地震反应分析,指出该土-结构相互作用体系可忽略行波效应。余光霞<sup>[72]</sup>针对土-桩基-下部支承-大跨度网架共同作用体系开展了动力时程分析,发现桩刚度增大,结

构自振周期、柱底弯矩及柱顶相对位移减小,网架内力有所增加,而地基土弹性模量增大,上述指标均减小。

现阶段学者们侧重于考察考虑土-结构动力相互作用和刚性假定下的结构动力性能差异,研究土-结构相互作用对大跨空间结构的影响。在动力特性方面,学者们一致得出了考虑土-结构相互作用会导致结构刚度降低、周期延长和自振频率减小的结论,在结构地震反应方面则无统一规律。研究多以建立整体分析模型进行数值模拟为主,地基土通过三维实体模型或简化模型考虑。

### 2.2.1 基于简化模型的研究

对于简化模型的考虑,薛素铎等<sup>[73]</sup>先是采用弹簧-阻尼体系模拟地基土的作用,研究发现较刚性地基假定而言,网架整体结构的地震响应差异不大。此后又基于前期修正的 S-R 模型探讨了单层球面网壳-支承结构-地基土的地震响应,研究发现:高阶竖向振型受地基刚度影响显著;软土地基对结构竖向抗震有利,对水平抗震不利;地基土越软,周期越长,抗震设计考虑地基土作用越有必要<sup>[74]</sup>。李雄彦等<sup>[9]</sup>同样基于修正的 S-R 模型分析了三向地震作用下土-结构相互作用对弦支网壳结构的影响,结果表明,考虑相互作用后,节点三向位移增大明显,而节点加速度减小;上部网壳环向杆件、径向杆内力增大,其余杆件及索内力减小;环索初始预应力损失显著增大。支旭东等<sup>[75]</sup>基于 Winkler 地基梁简化模型,建立了地基土-桩基-落地球面网壳屋盖模型,分析发现土-结构相互作用放大了超大跨网壳结构的地震响应,倒塌风险增大,而各环杆件响应规律无明显变化。修正的 S-R 模型为大跨度空间结构土-结构相互作用研究的简化分析提供了良好的开端。采用更加适用且高效的简化计算模型及分析方法可有效解决大跨度空间结构复杂相互作用体系的抗震计算问题,为该体系的抗震设计提供有力支撑,是未来发展的趋势。

### 2.2.2 基于整体分析法的研究

刘毅等<sup>[76]</sup>、韩庆华等<sup>[10]</sup>建立了整体三维有限元实体模型进行动力时程分析,探讨了土-结构动力相互作用对网架结构的影响,考虑 SSI 效应后整体结构的节点加速度、位移内力等响应均明显增大,可见简化模型考虑存在一定误差。文献<sup>[77]~[80]</sup>的研究表明:三向地震作用下考虑土-结构相互作用致使柱面和球面网壳、网架结构位移增大,节点水平位移增大,竖向位移减小,而杆件内力既有增大,也有减

小。同时指出了软弱地基土对结构抗震不利的规律。鉴于当前由屋盖大跨度空间钢结构、下部钢筋混凝土框架结构组成的枢纽车站抗震分析多将下部结构简化的现状,丁阳等<sup>[81]</sup>研究了土-框架结构-屋盖结构相互作用体系的动力特性及地震响应规律,发现体系呈现“上柔下刚”的特点,场地土对体系自振频率的降低程度与土、上下结构的刚度比密切相关;考虑场地土作用增大了屋盖结构变形,杆件应力趋于均匀。武英英<sup>[82]</sup>和刘倩<sup>[83]</sup>分别选用集总参数法和整体有限元法开展了考虑土-结构相互作用的大跨空间枢纽结构的地震响应影响分析,两者研究结论相近。此外,文献<sup>[83]</sup>还提出,对于管桁架枢纽结构,随着基岩加速度幅值的增大,杆件、节点塑性稳定发展,而下部框架结构首层由于土-结构相互作用使其变形过大先破坏,对于网壳枢纽结构,则是屋盖结构塑性发展程度逐渐加深,直到变形过大破坏。

### 2.2.3 试验研究

在试验研究方面,刘毅等<sup>[84]</sup>用九子台阵系统开展了土-独立基础-单层柱面网壳结构的振动台试验,并与有限元模拟结果相互验证,发现误差主要来源于土体边界效应。随后,刘毅等<sup>[85]</sup>进一步试验研究了地震波斜入射下的土-单层柱面网壳结构体系的地震响应,为土-结构相互作用下大跨空间结构多点激励研究奠定了基础,但其不足之处在于试验均未与刚性地基假定时进行对比。考虑到土-大跨空间结构的振动台试验存在跨度大、土体边界效应造成的成本高、操作复杂等问题,现有研究以数值分析为主,试验研究较为匮乏。此外,动力子结构试验方法在大跨桥梁领域得以应用,为大跨度空间结构土-结构相互作用试验研究提供了新的可能<sup>[86]</sup>。

## 2.3 考虑 SSI 的大跨度空间结构减隔震研究

当前,减震、隔震技术研究主要集中于屋盖结构或屋盖与下部支承协同工作体系,对同时考虑土-结构相互作用和减隔震耦合条件下大跨空间结构抗震性能的研究鲜有报道。这方面虽已引起一定关注,但同屋盖与下部支承协同工作体系及框架结构土-结构相互作用的减隔震研究相比,研究成果尚缺乏。刘宏睿等<sup>[87]</sup>通过对比结构考虑土-结构相互作用与否及隔震与否的抗震性能,探究了土-结构相互作用对单层球面网壳隔震性能的影响及变刚度三维隔震支座的隔震效率。结果表明土-结构相互作用导致了隔震效率降低,该新型隔震支座控制效果优异。此外,刘毅等<sup>[88-89]</sup>采用整体有限元法建立了土-结构相互作用和铅芯橡胶支座隔震的网架结构耦合模

型,探究了 SSI 效应对隔震网架的影响,发现 SSI 效应致使隔震网架结构加速度及位移等地震响应增大;采用同样的方法建立了桩-土-结构相互作用的隔震单层柱面网壳结构模型,经分析得知隔震效果极佳,且地震波的频谱特性及入射角度对该体系地震响应的影响不容忽视。何金明<sup>[80]</sup>基于考虑土-结构相互作用的单层球面网壳地震响应的研究,施加黏弹性阻尼器于结构薄弱部位以获得最优减振效果,并对施加该阻尼器的网壳结构土-结构相互作用体系的减振效果及影响规律进行了探讨;研究发现考虑土-结构相互作用的黏弹性阻尼结构有效降低了结构地震响应,同时还改变了结构的动力特性,等效弹簧刚度和等效阻尼系数两因素对其影响尤为显著。

综上,SSI 效应的大小与地基土的刚度密切相关,地基土越软,空间结构抗震分析考虑 SSI 效应越有必要。其他因素对大跨空间结构土-结构相互作用地震响应影响的量化还需进一步研究。此外,SSI 效应在一定程度上会削弱大跨空间结构的减隔震效果。鉴于大跨空间结构对竖向地震更为敏感的特征,三维隔震技术是大跨度空间结构土-结构相互作用体系研究与应用的趋势。

### 3 结 语

(1)目前的土-结构相互分析方法和计算模型大多针对框架结构所提出,而对于大跨度空间结构的适用性还有待商榷。今后应结合大跨空间结构自身特点,进一步提出高效、高精度的土-大跨空间结构相互作用体系简化计算模型和分析方法。

(2)随着地下空间的开发利用,地下结构-土地-地上结构相互作用问题日益凸显。当前该领域的研究多是针对框架结构形式<sup>[90]</sup>,带有大型复杂地下结构的大跨度空间结构的土-结构相互动力作用效应更为显著。因此,应当将地下结构-土地-地上结构相互作用推广到大跨度空间结构,深入探讨土、大型地下结构和大跨度空间结构三者之间的动力相互作用机理及相互作用规律。

(3)现有部分研究发现考虑土-结构相互作用存在着对大跨度空间结构抗震不利的情况,从而可能导致结构失效倒塌风险提高。鉴于此,大跨度空间结构土-结构相互作用体系的强震失效倒塌机理有待进一步明晰。在此基础上,合理利用地基土及地下结构的作用,提出更加有效的减隔震技术对于防止结构倒塌意义非凡,同时减隔震效果的参数影响

量化值得进一步研究和深化。

(4)大跨度空间结构的土-结构动力相互作用研究多以数值模拟为主,而要对大跨空间结构土-结构相互作用抗震理论进行验证,发展大型土-大跨度空间结构相互作用体系及基于子结构概念和联机试验思路的试验技术十分有必要。虽已有少数学者开展了振动台试验研究,但土体边界效应导致试验精度不高,且未设置刚性地基对比试验,缺乏考虑地基土作用的大跨度空间结构减隔震试验研究。

(5)现阶段的研究多考虑地基土刚度因素和地震波特性和,而大跨空间结构及地下结构相关因素包括结构尺寸、结构类型、地下结构埋深等,值得进一步考虑。另外,综合考虑体系非线性三维建模、非一致随机地震动的输入、初始缺陷、节点刚度等复杂问题与 SSI 效应耦合的研究也亟待开展。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 武 陈. 体育场馆作为救灾的避难场所的功能和作用研究[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 175-179.  
WU Chen. Research on the function and function of gymnasium as a refuge for disaster relief[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 175-179.
- [2] 蓝 天, 张毅刚. 大跨度屋盖结构抗震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
LAN Tian, ZHANG Yigang. Seismic design of long-span roof structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [3] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [4] 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [5] WANI F M, VEMURI J, RAJARAM C, et al. Effect of soil structure interaction on the dynamic response of reinforced concrete structures[J]. Natural Hazards Research, 2022, 2(4): 304-315.
- [6] WANG J S, XIE Y Z, GUO T, et al. Predicting the influence of soil-structure interaction on seismic responses of reinforced concrete frame buildings using convolutional neural network[J]. Buildings, 2023, 13(2): 564.



- [7] EL HOSENY M, MA J X, DAWOUD W, et al. The role of soil structure interaction (SSI) on seismic response of tall buildings with variable embedded depths by experimental and numerical approaches[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 164:107583.
- [8] SCARFONE R, MORIGI M, CONTI R. Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: a 3D numerical approach[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128:105864.
- [9] 李雄彦, 王国鑫, 薛素铎, 等. 土-结构相互作用下弦支穹顶结构动力性能分析[J]. *工业建筑*, 2015, 45(8): 30-36.
- LI Xiongyan, WANG Guoxin, XUE Suduo, et al. Analysis of dynamic behavior of suspen-dome structure considering soil-structure interaction[J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(8): 30-36.
- [10] 韩庆华, 何金明, 刘铭劼. 考虑土-结构相互作用的空间网格结构地震响应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(2): 42-52.
- HAN Qinghua, HE Jinming, LIU Mingjie. Seismic response analysis of space frame structure considering soil-structure interaction[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2018, 38(2): 42-52.
- [11] BOZYIGIT B, BOZYIGIT I, PRENDERGAST L J. Analytical approach for seismic analysis of onshore wind turbines considering soil-structure interaction[J]. *Structures*, 2023, 51: 226-241.
- [12] ZHAO J Y, CHEN H, ZHOU Z G. Shaking table test study of nuclear power plant model considering soil-structure interaction effect[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 168: 107859.
- [13] TOCHAEI E N, TAYLOR T, ANSARI F. Effects of near-field ground motions and soil-structure interaction on dynamic response of a cable-stayed bridge[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 133: 106115.
- [14] GALLO M, TOMEO R, NIGRO E. The soil-structure interaction effect on the seismic vulnerability assessment and retrofitting of existing bridges[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2023, 44: 618-625.
- [15] 龙喜安. 地下站与城市综合体设计一体化方案研究: 以佛山3号线美旗站与万科天空之城合建为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(8): 1341-1349.
- LONG Xi'an. Integrated design scheme for underground station and urban complex: a case study of integrated construction of meiqi station on Foshan line No. 3 and Vanke sky city project[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(8): 1341-1349.
- [16] 张素梅, 李爱东, 王玉银, 等. 深圳岗厦北地下综合交通枢纽站桥合建大跨度组合结构复杂节点受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(2): 1-15.
- ZHANG Sumei, LI Aidong, WANG Yuyin, et al. Behavior of composite structural joints of Shenzhen Gangxia North large span underground transportation-hub structures integrated with overpass piers[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(2): 1-15.
- [17] 盛平, 张龔华, 甄伟, 等. 北京工人体育场结构改造设计方案及关键技术[J]. *建筑结构*, 2021, 51(19): 1-6.
- SHENG Ping, ZHANG Yanhua, ZHEN Wei, et al. Structural reconstruction design schemes and key technologies of Beijing Workers Stadium[J]. *Building Structure*, 2021, 51(19): 1-6.
- [18] 孙绍东, 胡海涛, 朱忠义, 等. 日照奎山体育中心体育场轮辐式索膜结构屋盖设计[J]. *建筑结构*, 2021, 51(22): 1-8.
- SUN Shaodong, HU Haitao, ZHU Zhongyi, et al. Design on wheel-spoke shaped cable-membrane structure roof of stadium of Kuishan Sports Center in Rizhao[J]. *Building Structure*, 2021, 51(22): 1-8.
- [19] HAYATI Y, HAVAEI G, ESLAMI A, et al. 3D soil-structure interaction analysis with a combined substructure-FEM under external forces and seismic waves[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(25): 3773-3793.
- [20] BAKHTAOUI Y, CHELGHOUM A. Solution for soil-structure interaction with direct infinite element in time domain[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2020, 50(4): 655-663.
- [21] 梁建文, 杨晶丽, 韩冰, 等. 土体非线性对土-结构动力相互作用的影响: 以 Millikan 图书馆为例[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(3): 1-10.
- LIANG Jianwen, YANG Jingli, HAN Bing, et al. Effects of the soil nonlinearity on dynamic soil-structure interaction: a case study of Millikan library building[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(3): 1-10.
- [22] 薛素铎, 刘毅, 李雄彦, 等. 大跨空间结构协同工作问题研究现状及展望[J]. *工业建筑*, 2015, 45(1): 1-9, 22.
- XUE Suduo, LIU Yi, LI Xiongyan, et al. Advances and prospects for large span spatial structure considering cooperative work[J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(1): 1-9, 22.
- [23] 胡静静, 余丁浩, 李钢, 等. 考虑土-结构相互作用的

- 大型结构高效地震分析方法[J/OL]. 工程力学, 1-16 [2023-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20221027.1356.031.html>.
- HU Jingjing, YU Dinghao, LI Gang, et al. Efficient seismic analysis method of large structures considering soil-structure interaction [J/OL]. Engineering mechanics, 1-16 [2023-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20221027.1356.031.html>.
- [24] 刘毅, 薛素铎, 李雄彦, 等. 土-结构动力相互作用下网架结构简化分析方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 75-82.
- LIU Yi, XUE Suduo, LI Xiongyan, et al. Simplified analysis method of grid structure considering soil-structure dynamic interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 75-82.
- [25] 康帅, 楼梦麟, 孔庆梅. 土-结构相互作用问题中的放大效应研究[J]. 世界地震工程, 2018, 34(1): 9-16.
- KANG Shuai, LOU Menglin, KONG Qingmei. Amplification effect of soil structure interaction problem [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(1): 9-16.
- [26] REQUENA-GARCIA-CRUZ M V, ROMERO-SANCHEZ E, MORALES-ESTEBAN A. Numerical investigation of the contribution of the soil-structure interaction effects to the seismic performance and the losses of RC buildings[J]. Developments in the Built Environment, 2022, 12: 100096.
- [27] KAMAL M, INEL M, CAYCI B T. Seismic behavior of mid-rise reinforced concrete adjacent buildings considering soil-structure interaction [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104296.
- [28] 张昊, 康帅, 王自法, 等. 考虑土-结构相互作用的框架结构抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2022, 38(2): 29-37.
- ZHANG Hao, KANG Shuai, WANG Zifa, et al. Seismic performance analysis of frame structures considering soil-structure interaction[J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(2): 29-37.
- [29] 张望喜, 刘睿, 曹亚栋, 等. 考虑土-独立基础-结构相互作用的钢筋混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(4): 86-97.
- ZHANG Wangxi, LIU Rui, CAO Yadong, et al. Study on aseismic performance of reinforced concrete frame structures considering the soil-footing-structure interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(4): 86-97.
- [30] 严飞. 不同场地及地震输入下的土-框架结构相互作用体系地震反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(3): 17-23.
- YAN Fei. Seismic response analysis of frame structures considering soil-structure dynamic interaction [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(3): 17-23.
- [31] FORCELLINI D. The assessment of the interaction between base isolation (BI) technique and soil structure interaction (SSI) effects with 3D numerical simulations[J]. Structures, 2022, 45: 1452-1460.
- [32] 周旺旺, 刘德稳, 赵洁, 等. 三维远场长周期地震下考虑 SSI 层间隔震结构地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 362-371.
- ZHOU Wangwang, LIU Dewen, ZHAO Jie, et al. Seismic response analysis of inter-story isolation structures considering SSI under three-dimensional far-field long-period ground motions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 362-371.
- [33] 周旺旺, 刘德稳, 赵洁, 等. 考虑土-结构作用的层间隔震结构三维地震响应[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2394-2400.
- ZHOU Wangwang, LIU Dewen, ZHAO Jie, et al. Effect of soil-structure layer isolation structural three-dimensional seismic response[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2394-2400.
- [34] 曾建仙, 潘钦锋, 方艺文, 等. 土-结构相互作用效应对长周期地震动下层间隔震结构减震性能的影响[J]. 工业建筑, 2018, 48(11): 81-86.
- ZENG Jianxian, PAN Qinfeng, FANG Yiwen, et al. Impact of soil-structure interaction on seismic-reduction performance of interstory isolation structures under long-period ground motions[J]. Industrial Construction, 2018, 48(11): 81-86.
- [35] 苏毅, 李静珠, 何强, 等. 土与结构相互作用对层间隔震结构影响的参数分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 9-13, 34.
- SU Yi, LI Jingzhu, HE Qiang, et al. Related parameter analysis of story isolation structure considering soil-structure interaction [J]. Industrial Construction, 2015, 45(11): 9-13, 34.
- [36] 徐刚, 陈欣, 孙加华. 土-结构相互作用对隔震体系的影响[J]. 施工技术, 2015, 44(增2): 631-635.
- XU Gang, CHEN Xin, SUN Jiahua. Influence of soil-structure dynamic interaction on base-isolation structure[J]. Construction Technology, 2015, 44(S2): 631-635.
- [37] 罗翔, 戴靠山, 吕洋, 等. 软土地基基础隔震建筑减震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(1): 213-222.

- LUO Xiang, DAI Kaoshan, LV Yang, et al. Seismic response reduction of base-isolated buildings located on soft soil sites[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 213-222.
- [38] 刘德稳, 杨帆, 徐靖然, 等. SSI效应对层间隔震结构地震响应影响研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(增1): 232-238.
- LIU Dewen, YANG Fan, XU Jingran, et al. Seismic response research of SSI effect on inter-story isolated structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(S1): 232-238.
- [39] 刘德稳, 赵洁, 刘阳, 等. 考虑SSI的层间隔震结构在三维长周期地震下的响应研究[J/OL]. *应用力学学报*: 1-10[2023-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20221124.1321.004.html>.
- LIU Dewen, ZHAO Jie, LIU Yang, et al. Study on the response of mid-story isolation structure considering SSI subjected to three-dimensional long period earthquake[J/OL]. *Journal of Applied Mechanics*: 1-10[2023-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20221124.1321.004.html>.
- [40] 赵畅, 于旭, 庄海洋, 等. 考虑SSI效应的基础隔震框架结构抗震性态水平分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(5): 1024-1034.
- ZHAO Chang, YU Xu, ZHUANG Haiyang, et al. Horizontal analysis of seismic behavior of base isolated frame structure considering SSI effect[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(5): 1024-1034.
- [41] 杨金平, 孙开心, 李培振, 等. 考虑土-结构相互作用的软钢阻尼器作用效果分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(3): 494-501.
- YANG Jinping, SUN Kaixin, LI Peizhen, et al. Efficiency analysis of metal dampers considering soil-structure interaction[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(3): 494-501.
- [42] LIU B, ZHANG D W, LI X, et al. Seismic response of underground structure-soil-aboveground structure coupling system: current status and future prospects[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122: 104372.
- [43] 程业, 潘旦光, 陈清军, 等. 地下空间结构对邻近地上结构地震反应影响振动台实验[J]. *工程力学*, 2022, 39(1): 91-99.
- CHENG Ye, PAN Danguang, CHEN Qingjun, et al. Shaking table test on the influence of underground space structure on the seismic response of adjacent superstructure[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(1): 91-99.
- [44] 洪娜, 陈清军, 杜永峰, 等. 面向地下结构-土-地表隔震结构相互作用体系的性能评估框架研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(增1): 160-167.
- HONG Na, CHEN Qingjun, DU Yongfeng, et al. Performance evaluation framework for isolated structures considering underground structure-soil-aboveground structure interaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(S1): 160-167.
- [45] 韦浩浩, 王国波. 地下结构与不同刚度地表结构体系地震响应规律研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(2): 258-264.
- WEI Haohao, WANG Guobo. Study on seismic response of underground structure and surface structure system of different stiffness[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(2): 258-264.
- [46] 郑小琼. 地下结构地震响应及其对地表的影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- ZHENG Xiaoqiong. Seismic response analysis of underground structures and its influence on ground surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [47] 李钢, 张晗, 王睿, 等. 综合体结构地震失效与影响因素分析[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(4): 188-203.
- LI Gang, ZHANG Han, WANG Rui, et al. Analysis of seismic failure and influencing factors of complex structures under seismic excitation[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(4): 188-203.
- [48] 赵典, 巴峰. 地下室对邻近地表和地下结构地震响应的影响[J]. *桂林理工大学学报*, 2020, 40(3): 530-534.
- ZHAO Dian, BA Feng. Influence analysis of basement on structure seismic response[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2020, 40(3): 530-534.
- [49] 韩学川, 陶连金, 安韶, 等. 地铁车站结构下穿地表建筑地震响应分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(2): 488-495.
- HAN Xuechuan, TAO Lianjin, AN Shao, et al. Seismic response analysis on subway station structures undergoing surface buildings[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(2): 488-495.
- [50] 韩学川, 陶连金, 张宇. 城市轨道交通枢纽一体化车站结构震害机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 925-935.

- HAN Xuechuan, TAO Lianjin, ZHANG Yu. Seismic damage mechanism of integrated station structure of urban rail transit hub[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 925-935.
- [51] 韩学川,陶连金,张宇,等.土-上盖一体化地铁车站结构耦合作用下振动台试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(9):30-42.
- HAN Xuechuan, TAO Lianjin, ZHANG Yu, et al. Experimental study on shaking table test under structure coupling action of integrated underground station with soil and upper cover[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(9): 30-42.
- [52] 董石麟,吕辉,陈照全,等.鼓蜂窝四撑杆型索穹顶的结构构形及预应力态分析[J].空间结构,2022,28(4):3-15.
- DONG Shilin, LV Hui, CHEN Zhaoquan, et al. Structural form and initial prestress analysis on drum-shaped honeycomb-type cable dome with quad-strut layout[J]. Spatial Structures, 2022, 28(4): 3-15.
- [53] 董石麟,郑晓清,涂源,等.蜂窝单撑杆型索穹顶的构形及预应力态的简捷计算法[J].建筑钢结构进展,2020,22(4):1-9.
- DONG Shilin, ZHENG Xiaoqing, TU Yuan, et al. Study on the configuration and prestressing distribution simplified calculation method of honeycomb-type cable dome with single strut[J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(4): 1-9.
- [54] CHEN L M, LI Z B, LIU Y J, et al. Analysis and evaluation of the progressive collapse behaviour of a cable dome structure[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1700.
- [55] 董石麟,罗尧治,赵阳.新型空间结构分析、设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2006.
- DONG Shilin, LUO Yaozhi, ZHAO Yang. Analysis design and construction of new space structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [56] 董石麟,刘宏创.鸟巢四撑杆型索穹顶大开口体育场挑篷结构形态确定、参数分析及试设计[J].空间结构,2020,26(3):3-15.
- DONG Shilin, LIU Hongchuang. Morphologic determination, parametric analysis and tentative design of a novel bird nest-type cable dome structure with quad-strut layout as stadium canopy[J]. Spatial Structures, 2020, 26(3): 3-15.
- [57] 聂桂波,支旭东,尚玉珠,等.考虑下部支承效应的单层柱面网壳结构抗震性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(增1):10-16.
- NIE Guibo, ZHI Xudong, SHANG Yuzhu, et al. Seismic performance of single-layer cylindrical latticed shell considering effect of lower supporting structure[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1): 10-16.
- [58] 李红梅,路维,王军林,等.考虑下部支承结构的单层球面网壳的动力稳定分析[J].河北农业大学学报,2016,39(4):104-108.
- LI Hongmei, LU Wei, WANG Junlin, et al. Dynamic stability behavior of single-layer lattice domes with substructures[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 39(4): 104-108.
- [59] 李潞.多点输入下考虑下部支承 K8 单层球面网壳强震响应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- LI Lu. The seismic responses of K8 Single-layer reticulated domes with substructures under multi-support excitations[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [60] 邹剑.考虑下部支承影响的柱面网壳结构强震失效机理及灾变控制研究[D].广州:广州大学,2017.
- ZOU Jian. Failure mechanism and catastrophe control of cylindrical shells with the consideration of substructure under severe earthquakes[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [61] 于志伟,支旭东,范峰,等.单层球面网壳与支承结构整体强震失效特征[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(10):1519-1523.
- YU Zhiwei, ZHI Xudong, FAN Feng, et al. Failure behavior of reticulated domes with substructures subjected to the severe earthquake[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(10): 1519-1523.
- [62] 支旭东,于志伟,范峰.下部支承结构对网壳结构强震响应的影响研究[J].建筑钢结构进展,2012,14(4):27-31.
- ZHI Xudong, YU Zhiwei, FAN Feng. Influence study of substructure upon dynamic responses of reticulated shells under severe earthquakes[J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(4): 27-31.
- [63] 翟永梅,刘瑶,陈贻辉,等.单层连方型球面网壳与下部支承结构协同工作的强震失效研究[J].地震工程学报,2020,42(2):299-303,310.
- ZHAI Yongmei, LIU Yao, CHEN Yihui, et al. Failure modes of single-layer lamellar spherical reticulated shells under cooperative work with lower supporting structures and severe earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 299-303, 310.
- [64] 苗峰.空间结构考虑整体工作的性能及耗能减震研究[D].兰州:兰州理工大学,2013.

- MIAO Feng. The study on overall model performance and shock absorption in spatial structure [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [65] 于志伟, 卢晨, 支旭东, 等. 柱间防屈曲支撑网壳结构强震失效控制研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增1): 214-220.
- YU Zhiwei, LU Chen, ZHI Xudong, et al. Catastrophe control of reticulated domes with buckling restrained braces in substructures[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S1): 214-220.
- [66] 庄鹏, 王文婷, 韩森, 等. 摩擦-SMA 弹簧复合耗能支撑在周边支承单层球面网壳结构中的减震效应研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 99-109.
- ZHUANG Peng, WANG Wenting, HAN Miao, et al. Seismic control effect of friction-SMA spring hybrid energy dissipation braces in a single-layer spherical lattice shell with surrounding columns[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 99-109.
- [67] 李辉, 聂桂波, 朱兴龙. 考虑下部支承的空间双层柱面网壳强震响应规律及隔震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(5): 214-222.
- LI Hui, NIE Guibo, ZHU Xinglong. Study on strong earthquake response and seismic isolation of space double layer cylindrical shell with lower supporting structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(5): 214-222.
- [68] 朱兴龙. 考虑下部支承的双层柱面网壳三维隔震研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.
- ZHU Xinglong. Study on three-dimensional seismic isolation effect of double layer cylindrical shell with lower supporting structure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019.
- [69] 董亮. 考虑不均质地基影响时单层球面网壳地震反应分析[J]. 空间结构, 1999, 5(4): 54-61, 21.
- DONG Liang. Seismic analysis of the single layer latticed dome considering the effect of irregular ground[J]. Spatial Structures, 1999, 5(4): 54-61, 21.
- [70] 楼梦麟, 邸龙. 考虑土-结构相互作用双层柱面网壳在多点输入下的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 228-231.
- LOU Menglin, DI Long. Seismic response analysis of double-layer cylindrical reticulated shell under multiple-support excitations considering dynamic soil-structure interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 228-231.
- [71] 邸龙. 复杂条件下大跨度空间柱面网壳结构的抗震研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- DI Long. Study on seismic response of long-span cylindrical reticulated shell under complex conditions [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [72] 余长霞. 大跨空间网架结构共同作用分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- YU Changxia. Analysis and research on the interaction of long-span space grid structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [73] 薛素铎, 孙艳坤, 李雄彦, 等. 考虑土-基础-结构相互作用的网架结构地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增2): 34-38.
- XUE Suduo, SUN Yankun, LI Xiongyan, et al. Seismic response analysis of space grid structure considering soil-foundation-structure interaction[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S2): 34-38.
- [74] 薛素铎, 刘毅, 李雄彦. 协同工作条件下地基土对单层球面网壳结构动力性能的影响[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 133-141.
- XUE Suduo, LIU Yi, LI Xiongyan. Analysis of foundation soil effect on dynamic performance of single-layer spherical latticed shell under cooperative work[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 133-141.
- [75] 支旭东, 范峰, 乔达. 超大跨网壳结构在强震作用下的复杂效应影响研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(9): 91-98.
- ZHI Xudong, FAN Feng, QIAO Da. Research on complexity effect of super-large span reticulated dome under severe earthquakes[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 91-98.
- [76] 刘毅, 薛素铎, 李雄彦. 土-结构相互作用下网架结构动力性能研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(10): 22-28, 61.
- LIU Yi, XUE Suduo, LI Xiongyan. Grid structure dynamic performance analysis considering soil-structure interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(10): 22-28, 61.
- [77] 李海山, 张逸青, 陈磊. 考虑土-结构相互作用的双层柱面网壳结构三维地震反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(2): 29-34.
- LI Haishan, ZHANG Yiqing, CHEN Lei. 3D seismic response analysis of double-layer cylindrical latticed shell considering soil-structure interaction[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(2): 29-34.
- [78] 李文娟. 地基-支承体系-网壳屋盖共同作用下网壳结构的地震响应分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- LI Wenjuan. Seismic responses analysis of latticed shell considering soil-structure interaction [D].

- Lanzhou; Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [79] 漆文. 考虑地基-基础-结构相互作用的柱面网壳结构动力性能分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- QI Wen. Dynamic performance analysis of cylindrical latticed shell considering soil-foundation-structure interaction[D]. Lanzhou; Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [80] 何金明. 考虑土-结构相互作用的空间结构地震响应及减振研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- HE Jinming. Research of seismic response and vibration reduction of space structures considering soil-structure interaction[D]. Tianjin; Tianjin University, 2018.
- [81] 丁阳, 石运东, 宗亮, 等. 枢纽车站结构地震响应特征[J]. 工程力学, 2023, 40(4): 1-11.
- DING Yang, SHI Yundong, ZONG Liang, et al. Research on seismic response characteristics of hub structures[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(4): 1-11.
- [82] 武英英. 考虑下部结构及土-结构相互作用的大跨空间枢纽结构抗震性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- WU Yingying. Seismic performance analysis of large-span spatial hub structure considering substructure and soil structure interaction[D]. Tianjin; Tianjin University, 2021.
- [83] 刘倩. 考虑土-结构相互作用的大跨空间枢纽结构抗震性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- LIU Qian. Seismic performance analysis of large span spatial hub structure considering soil-structure interaction[D]. Tianjin; Tianjin University, 2021.
- [84] 刘毅, 薛素铎, 王国鑫, 等. 土-结构相互作用下单层柱面网壳振动台试验及数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 223-232.
- LIU Yi, XUE Suduo, WANG Guoxin, et al. Shaking table test of single-layer latticed cylindrical shell considering soil-structure interaction and its numerical analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 223-232.
- [85] 刘毅, 薛素铎, 单明岳. 地震波斜入射下土-单层柱面网壳结构振动台试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 562-571.
- LIU Yi, XUE Suduo, SHAN Mingyue. Experimental investigation for soil-single-layer cylindrical reticulated shell interaction system considering oblique incidence of earthquake wave[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 562-571.
- [86] 郭珺, 唐贞云, 李易, 等. 基于子结构试验的土-结构相互作用实现研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增1): 214-219.
- GUO Jun, TANG Zhenyun, LI Yi, et al. The simulation of soil structure interaction based on substructuring testing[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S1): 214-219.
- [87] 刘宏睿. 变刚度三维隔震大跨空间结构支座研发与隔震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- LIU Hongrui. Study of three-dimensional bearing with variable stiffness and its seismic isolation performance for long-span spatial structures[D]. Tianjin; Tianjin University, 2019.
- [88] 刘毅, 薛素铎, 潘克君, 等. 桩-土-结构相互作用下新型抗拔摩擦摆支座对单层柱面网壳结构地震响应的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 967-976.
- LIU Yi, XUE Suduo, PAN Kejun, et al. Effect of a new friction pendulum bearing on seismic response of single-layer cylindrical reticulated shell considering pile-soil-structure interaction[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 967-976.
- [89] 刘毅, 薛素铎, 潘克君, 等. 桩-土-结构相互作用下新型抗拔摩擦摆支座对单层柱面网壳结构地震响应的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 967-976.
- LIU Yi, XUE Suduo, PAN Kejun, et al. Effect of a new friction pendulum bearing on seismic response of single-layer cylindrical reticulated shell considering pile-soil-structure interaction[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 967-976.
- [90] ABDULAZIZ M A, HAMOOD M J, FATTAH M Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil-structure interaction[J]. Structures, 2023, 52: 348-369.