

推荐国家科技进步奖项目公示

项目名称	城市大型地下结构抗震设计理论与方法及工程应用
推荐单位	教育部
推荐单位意见： <p>我单位认真审阅了推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合国家科学技术奖励工作办公室的填写要求。</p> <p>我国目前正在进行大规模的城市地下空间开发与建设，其规模和速度居世界首位，结构型式多样、复杂，呈大型化趋势。然而，我国强地震发生频繁，历史震害损失惨重，如此大规模的城市地下工程建设，不可避免地面临严重的地震灾害威胁。由于各种原因，在抗震设计理论、方法和技术的研究成果和实践经验积累等方面，地下结构相对于地面建筑结构而言均严重滞后，远远落后于工程建设需求，亟需建立完善、系统的设计法规体系指导地下工程抗震设计实践。</p> <p>项目组在国家 973 计划课题和国家自然科学基金重点项目等资助下，采用理论分析、数值模拟、模型试验和震害对比等方法，经过 10 余年的系统研究，在地下结构地震反应的影响因素及规律、损伤破坏模拟模型与方法、破坏机理与失效模式、简化分析方法及抗震减震设计理论和方法与技术等方面取得了系列创造性成果，获授权国家发明专利 6 项，软件著作权登记 7 项，出版专著 3 部、编著 2 部，规范宣贯教材 1 部，发表期刊论文 230 篇（其中 SCI/EI 收录论文 146 篇，被 CNKI 引用 4000 余次），主编国家和行业以及地方相关规范、规程 4 部，研究成果已在北京、长春、太原、苏州、南京等城市地铁工程中获得广泛应用，产生了巨大的社会效益，为推进我国城市地下空间开发利用做出了重大贡献。同时，该项成果的数值模拟方法也在国防、水电、核电等重大工程结构抗震设计分析中获得了应用，推进了相关领域的科技进步，具有广阔的应用前景，获教育部科技进步一等奖 1 项。</p> <p>依托本项研究培养博士后研究人员 8 名、博士研究生 26 名、硕士研究生 20 名，获全国优秀博士论文 1 篇、省级优秀博士论文 5 篇，9 名博士研究生获得国际学术奖励；培养国家自然科学基金优秀青年基金获得者 2 人、青年长江学者 1 人；入选国家自然科学基金创新群体和教育部长江学者创新团队各 1 支。编著的《结构动力学》研究生教材已刊印 7 版，获省部级教育教学成果一等奖 1 项，为国家教育教学和人才培养做出了重要贡献。</p> <p>项目实施期间，承办国际学术交流会议 6 次，推动已持续 30 多年的中日美三边生命线地震工程学术交流发展活动发展为“国际生命线基础设施地震工程学会”，北京工业大学为理事长单位，产生了重要的国际学术影响。</p> <p>对照国家科技进步奖授奖条件，特推荐申报 2017 年度国家科技进步奖一等奖。</p>	

项目简介:

我国目前大规模城市地下空间开发亟需地下结构抗震设计理论、方法及技术与法规指导。经过 10 余年系统研究,在地下结构地震反应影响因素及规律、损伤破坏模拟模型和方法、破坏机理与失效模式、抗震减震设计理论和方法与技术及工程应用等方面取得了系列创造性成果,形成了较为完整、系统的城市地下工程抗震设计理论和方法及技术、法规,为即将颁布实施的第五代全国地震区划抗震设防全覆盖要求提供了方法、技术和法规保障。周福霖院士任组长的鉴定专家组认为该项成果“总体达到了国际领先水平”,主要创新成果包括:

1、完善和发展了时域整体分析方法并开发了计算平台,为分析城市大型地下结构地震非线性反应和损伤破坏机理提供了方法和手段。

时域整体分析方法主要涉及三个方面:(1) 截断人工边界条件模拟方法和地震输入模型;(2) 材料非线性和界面接触非线性行为模拟;(3) 大型复杂问题高效分析方法。针对这些问题开展了 20 余年研究工作,取得了系列原创性成果,并在大型商用软件上实现了其计算功能,自主研发了地下结构地震反应和损伤破坏数值模拟软件。

2、揭示了浅埋地下结构地震破坏机理与失效模式,建立了地下结构抗震性能评价方法,提出了地下结构减震控制技术和措施。

首次从围岩土体对地下结构两种作用、组成结构构件不同的受力功能以及关键构件的力学性能与体系受力分配改变等方面,系统阐述了大开地铁车站的地震破坏机理和失效模式,并提出了抗震关键支撑柱概念。建立了地下结构抗震性能和极限抗震能力评价方法。提出了地下结构减震设计技术,核心是弱化内柱水平抗剪切功能,增强内柱抗侧力变形能力。

3、研发了系列有自主知识产权的地下结构-场地土体系地震反应和破坏模拟模型试验技术,开展了国际上迄今为止最为系统的地下结构普通和离心振动台地震反应和破坏模拟试验,获得了地下结构地震反应和破坏的系列规律性认识。

研发了自主知识产权的悬挂式层状多向剪切箱和可控连续体多振动台模型箱等试验装置,以及新型传感技术及数据采集、处理平台。开展了系列振动台模型试验研究,揭示了中柱是地下结构抗震的薄弱环节和埋深对地震反应和破坏的影响规律。

4、为解决复杂断面地下结构抗震设计问题,发展了反应位移法和反应加速度方法,提出了 Pushover 分析法和惯性力-反应位移法。

现有地下结构抗震设计实用分析方法不适用复杂型式断面地下结构的抗震设计分析。为此,本项目提出了地下结构抗震分析的整体反应位移法、改进的反应加速度法和 Pushover 分析法解决这一问题。针对浅埋地下结构的围岩作用特征提出考虑上覆土体竖向惯性效应的反应位移法,论证了其合理性。

主编国家和行业以及地方规范、规程 4 部;获授权发明专利 6 项,软件著作权 7 项;完成技术总结报告 1 本,出版著作 6 部,发表期刊论文 230 篇,其中 SCI/EI 收录论文 146 篇,被 CNKI 引用 4000 余次。成果在北京、沈阳、长春、石家庄、太原、苏州和南京等城市地铁工程抗震设计中获得应用,产生了巨大的社会效益。

客观评价:

本项研究针对我国城市地下空间资源开发建设中的城市大型地下结构抗震减震关键技术难题,在国家自然科学基金重大研究计划和国家重大基础科学研究计划以及一些省部级和企业课题资助下,系统地开展了理论分析、数值和物理模型模拟、简化分析方法与结合实际工程应用的研究。周福霖院士为专家组长,谢礼立、施仲衡和王复明等院士为专家组成员的项目鉴定专家组评价“该项目研究成果丰富、系统、创新性突出,总体上达到了国际领先水平”。主要取得了四项创造性成果:

(1)完善和发展了时域整体分析方法并开发了计算平台,为分析城市大型地下结构地震非线性反应和损伤破坏机理提供了方法和手段;(2)揭示了浅埋地下结构地震破坏机理与失效模式,建立了地下结构抗震性能评价方法,提出了地下结构减震控制技术和措施;(3)研发了系列有自主知识产权的地下结构-场地土体系地震反应和破坏模拟模型试验技术,开展了国际上迄今为止最为系统的地下结构普通和离心振动台地震反应和破坏模拟试验,获得了地下结构地震反应和破坏的系列规律性认识;(4)为解决大型复杂断面地下结构抗震设计问题,发展了反应位移法和反应加速度方法,提出了 Pushover 分析法和惯性力-反应位移法。

针对上述创新成果,教育部查新报告给出了如下结论:“建立可考虑峰值强度后应变软化特性的土、混凝土三维弹塑性本构模型,并基于非线性土-结构动力相互作用分析的时域整体分析模型,建立地下结构地震破坏模拟数值分析方法,揭示浅埋地下结构地震破坏机理与失效模式,提出地下结构抗震最不利埋深;利用大型振动台,开展地下结构地震反应试验,在可液化场地条件下实现了结构的地震破坏,进而通过模型试验进一步揭示地下结构的抗震性能与地震破坏机理”,除该查新项目课题组所发表的文献外,未见有其他相同文献报道。“基于浅埋地下结构地震破坏机理与失效模式分析成果,提出地下结构抗震性能评价指标为抗震关键支撑构件的水平变形与其考虑了动轴力效应影响的极限变形值之比,并据此提出地下结构抗震性能分级标准和极限抗震能力分析方法;为解决任意形状大断面地下结构抗震设计问题,提出整体式反应位移法(将地下结构与围岩土体作为一个系统进行抗震分析),并提出一种考虑上覆土体竖向惯性力影响的惯性力-位移分析法”未见有相同文献报道。

以欧进萍院士为组长的国家重大基础科学研究计划(973)项目课题(城市地下基础设施的地震破坏与抗震理论)结题验收专家组认为“该课题研究成果丰富,基础资料翔实,理论上有所创新和突破,体现了国内城市地下基础设施地震破坏研究的最高水平”。国家自然科学基金重大研究计划“重大工程的动力灾变”专家组对“城市大型地下结构强震动力灾变机理及过程模拟研究”重点课题给出了综合评价等级 A(优秀)的结题验收意见,对重点课题“大型地下结构地震灾变过程模拟与集成研究”、“地下结构地震灾变机理与破坏模式研究”给出了“圆满完成了研究计划书规定的任务的评价”(所有验收专家组成员均给出了 A(优秀)的成绩)。

推广应用情况：

编写的国家和行业以及地方相关规范、规程（国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范(GB 50909-2014)》（首部），住建部行业标准《市政公用设施抗震设防专项论证技术要点(地下工程篇)》、《城市轨道交通工程设计文件编制深度规定》，北京市地方规范《城市轨道交通工程设计规范(DB11/995-2013)》）在指导地震区的城市轨道交通工程建设中发挥了重要作用；研究成果为城市地下工程的防震减灾提供了分析理论与方法，已在北京、沈阳、长春、石家庄、太原、苏州和南京等城市的复杂地铁工程抗震设计分析中获得广泛应用，部分成果还在国防、水电、核电等重大工程结构抗震设计分析中获得应用，具有重大的科学和使用价值以及宽阔的推广应用前景，产生了巨大的社会效益。

研发的模型试验技术，包括模型试验箱、数据量测与传输、处理技术及软件等，已获应用。

主要知识产权证明目录:

1. 代表性论文

- [1]Du Xiuli and Zhao Mi. Stability and identification for rational approximation of frequency response function of unbounded soil. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(2): 165-186.
- [2]Zhao Mi, Du Xiuli, Liu Jingbo. Explicit finite element artificial boundary scheme for transient scalar waves in two-dimensional unbounded waveguide. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2011, 87(11): 1074-1104.
- [3]Lu Dechun, Du Xiuli, Wang Guosheng, et al. A three-dimensional elastoplastic constitutive model for concrete. *Computers and Structures*, 2016, 163: 41-55.
- [4]Chen Guoxing, Wang Zhihua, Zuo Xi, et al. Shaking table test on the seismic failure characteristics of a subway station structure on liquefiable ground. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2013, 42(10): 1489-1507.
- [5]Chen Guoxing, Chen Su, Zuo Xi, et al. Shaking-table tests and numerical simulations on a subway structure in soft soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 76: 13-28.
- [6]Zhuang Haiyang, Hu Zhonghua, Wang Xuejian, et al. Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modelling. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 13(12): 3645-3668.
- [7]王苏, 路德春, 杜修力. 地下结构地震破坏静-动力耦合模拟研究. *岩土力学*, 2012, 11: 3483-3488.
- [8]杜修力, 王刚, 路德春. 阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(2): 1-7
- [9]刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲, 赵冬冬. 土-结构动力相互作用系统离心机振动台模型试验. *土木工程学报*, 2010, 11: 114-121
- [10]刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 复杂断面地下结构地震反应分析的整体式反应位移法. *土木工程学报*, 2014, 01: 134-142

2. 授权发明专利

- [1]杜修力, 李立云. 一种模拟地震发生及传播土结相互作用的试验装置. 201010259996.X
- [2]杜修力, 李立云. 用于地下结构振动台试验的悬挂式层状多向剪切模型箱装置. 201010128793.7
- [3]李立云, 杜修力. 一种适用于非一致激励土工模型振动台试验的万向节对装置. 201010249129.8
- [4]杜修力, 李霞, 赵密. 用于振动台试验的模拟地基辐射阻尼效应装置. 201110053827.5
- [5]杜修力, 李霞. 悬挂式多维输入水平多向剪切模型箱装置. 201110350064.0

3. 人才培养

- [1]国家自然科学基金优秀青年获得者 2 人
- [2]全国优秀博士学位论文 1 篇
- [3]省部级优秀博士学位论文 5 篇
- [4]获得国际性学术奖励博士生 9 名

主要完成人情况:

1.杜修力, 排名 1, 副校长, 长江学者特聘教授, 工作单位: 北京工业大学, 完成单位: 北京工业大学, 是该项目主要负责人, 对创新点 1、2、3、4 均有重要贡献, 提出总体技术思路,对四个创新点均有贡献, 对于创新点[1]完善和发展了时域整体分析方法, 主持研发了计算机软件平台, 实现了地下结构地震破坏过程模拟; 创新点[2]揭示了地下结构地震破坏机理与失效模式, 提出地下结构抗震最不利埋深和关键支撑柱概念、抗震性能和极限抗震能力分析方法; 创新点[3]主持研发了悬挂式模型试验装置, 开展了双向振动模型试验研究; 创新点[4]建立了地下结构抗震惯性力-反应位移法, 提出大型地下结构减震控制技术和措施; 开展了工程应用研究, 负责了金安桥站等抗震专项论证,参编国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》。

2.路德春, 排名 2, 教授, 工作单位: 北京工业大学, 完成单位: 北京工业大学。主持完成了国家自然科学基金重点项目与集成项目重点课题,对创新点[1]和[2]有贡献, 对于创新点[1]提出了非线性统一强度模型, 建立了考虑应变软化特性土和混凝土材料弹塑性本构模型、土与混凝土材料界面弹塑性本构模型; 基于下加载面模型提出了弹塑性应力更新算法; 对于创新点[2]参与提出了地下结构抗震性能和极限抗震能力评价方法, 结合北京等城市地铁工程开展了应用研究。

3.陈国兴, 排名 3, 教授, 工作单位: 南京工业大学, 完成单位: 南京工业大学。对创新点[3]和[4]有贡献, 对于创新点[3]研发了层状剪切模型试验装置与地下结构地震破坏模型试验技术; 研发多通道数据采集与传输技术与软件; 开展了可液化场地地下结构振动台模型试验, 揭示了中柱是地下结构抗震的薄弱环节等规律; 创新点[4]结合南京、苏州等城市地铁工程, 开展了大型复杂地下结构的抗震应用研究, 参编国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》。

4.刘晶波, 排名 4, 教授, 工作单位: 清华大学, 完成单位: 清华大学。对创新点[1]、[3]和[4]有贡献, 对于创新点[1]提出地震动斜入射输入方法; 创新点[3]系统地开展了地下结构地震反应离心机振动台模型试验研究, 获得规律性认识; 创新点[4]提出了地下结构抗震实用分析方法, 包括整体式反应位移法、反应加速度法与 Pushover 分析方法; 结合北京等城市地铁工程开展了应用研究; 参编国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》。

5.许成顺, 排名 5, 教授, 工作单位: 北京工业大学, 完成单位: 北京工业大学。主持完成国家自然科学基金重大研究计划集成项目重点课题; 对创新点[1]、[3]和[4]有贡献, 对于创新点[1]开展了复杂应力条件下岩土材料力学性能试验、和本构模型及参数影响研究; 揭示了侧限条件下土体液化机理, 提出判断准则; 合作提出液固耦合饱和两相介质的黏弹性人工边界和双显式积分算法; 创新点[3]开展了地下结构土与结构相互作用模型试验, 获得规律性认识; 创新点[4]参与提出惯性力-反应位移法。

主要完成单位及创新推广贡献:

1.北京工业大学

主持承担了国家 973 计划课题、国基金重大研究计划集成项目重点课题、重点项目等，参编国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》与地方规范，对四个创新点均有贡献，对于创新点[1]完善和发展了时域显式整体分析方法。建立了构建高精度应力型人工边界的理论和方法；提出了成层场地土介质地震作用的时域斜入射输入方法；建立了土、混凝土材料考虑应变软化特性的三维弹塑性本构模型，以及土-混凝土界面接触滑移模拟的弹塑性本构模型；提出了下加载面弹塑性应力更新算法、流固耦合多孔饱和介质以及多种介质体动力相互作用分析的时域显式积分方法。创新点[2]揭示了城市大型地下结构地震破坏机理、失效模式，提出抗震性能评价方法与地下结构减震控制技术。明晰地震作用下围岩土体对地下结构的两种作用效应；提出地下结构抗震最不利埋深和最不利刚度比概念；系统阐述了大开地铁车站的地震破坏机理和失效模式。提出了地下结构抗震关键支撑柱概念，结合关键构件提出了抗震性能定量评价指标，并建立了地下结构抗震性能评价方法；创新点[3]研发模型试验技术，开展地铁车站与隧道体系双向振动输入等模型试验，获得地震反应的规律性认识；创新点[4]基于对浅埋地下结构地震破坏机理和失效模式的新认识，提出了考虑上覆土体竖向惯性效应的反应位移法；结合北京、长春、太原等城市地铁工程开展抗震专项研究；提出地下结构减震设计技术概念，通过设置具有抗高轴力的摩擦滑动装置、分体柱、摇摆柱，核心是弱化内柱的水平抗剪切功能，增强变形能力。

2.清华大学

对创新点[1]、[3]和[4]有贡献，对于创新点[1]提出了地震动斜入射输入方法；创新点[3]系统地开展了地下结构地震反应离心机振动台模型试验研究，获得了地下结构地震反应的规律性认识，揭示了围岩土体对地下结构的动力作用效应；创新点[4]针对目前反应位移法只能求解规则断面弹簧系数的不足，发展了整体式反应位移法，该方法不需求解结构与土界面的弹簧系数，可适用于大型复杂断面形式的地下结构的抗震分析；为反映围岩土体与结构的非线性变形特性，提出了地下结构抗震分析的 Pushover 方法，解决了深埋复杂地下结构的抗震分析与设计难题；参编国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》。

3.南京工业大学

对创新点[3]和[4]有贡献，对于创新点[3]研发了用于地下结构地震反应的系列模型试验技术，包括层状剪切模型试验箱，非接触式数据采集与多通道传输技术等，有效地解决了利用大型振动台难于实现地下结构地震破坏反应试验；开展了地下结构地震反应(地震破坏)系列振动台模型试验，系统考虑了地震动特性、地震动输入方式、场地条件、不同结构形式及模型结构材料、不同应力状态等因素，揭示了地下结构的地震反应规律，并为验证、分析和评价时域整体分析方法提供了基础数据；创新点[4]参编国家规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》。

完成人合作关系说明：

本项成果的主要完成人具有长期合作关系，包括共同承担科研项目、编写国家规范、发表学术论文、联合申请专利等。

1、共同承担的科研项目包括：

- 1)国家 973 计划课题：城市地下基础设施的地震破坏与抗震理论(2007CB714203)；
- 2)国家自然科学基金项目：大型地下结构地震灾变过程模拟与集成研究(重大研究计划集成项目重点课题，912153014)；城市大型地下结构强震动力灾变机理及过程模拟研究(重点项目，90715035)、地铁地下结构抗震理论分析与试验研究(面上项目，50478014)。

2、共同编写国家规范情况：

《城市轨道交通结构抗震设计规范》，2014 年 12 月颁布实施

3、共同撰写科技论文

详见代表性论文[1-10]