

国家地震科技创新工程之三

韧性城乡

(2021 年度报告)



中国地震局
CHINA EARTHQUAKE ADMINISTRATION

二〇二二年六月

目 录

一、2021 年工作开展情况.....	1
（一）有效支撑地震灾害风险防治体系建设	2
（二）有效提高地震预警业务体系科技支撑能力	5
（三）有效助力中国地震科学实验场建设和相关研究	5
（四）有效推进公共服务技术支撑和科技成果转化	6
二、亮点工作和成效	9
（一）地震灾害风险评估与区划技术	9
（二）地震预警与重大工程紧急地震处置技术	13
（三）高层建筑抗震韧性提升技术	17
三、下一步工作计划	23

一、2021 年工作开展情况

在组织协调方面，工力所作为“韧性城乡”科学计划牵头单位，充分发挥地震科技创新“国家队”和“主力军作用”，积极抓好组织实施，建立和完善科学计划实施机制，设立领导小组组织落实中国地震局关于国家地震科技创新工程实施的各项部署，开展顶层设计，推动《“韧性城乡”科学计划“十四五”实施方案》实施；设立专家委员会对科学计划实施进行技术指导；设立协调组开展科学计划实施的组织协调，动员国内外相关高校和科研院所投入科学计划实施；设立管理办公室统筹各类科技项目投入，支撑科学计划重点任务实施，落实国家科研管理相关政策等。同时充分发挥中国灾害防御协会城乡韧性与防灾减灾专业委员会学术交流平台作用，广泛团结国内外从事城乡韧性与防灾减灾事业的各界人士共同开展相关科学问题研究，发展地震灾害控制和预防技术，提升城乡抗震韧性水平。

在制度和条件保障方面，管理办公室作为日常办事机构，挂靠在工力所科技发展部，负责具体日常事务性工作，积极落地落实国家科技改革政策，及时落实国家科研项目经费管理、人员评价、科研自主权、成果转化等最新要求，制修订管理办法 10 余项，激励科研人员多出高质量科技成果，鼓励科技人员参与行业支撑和社会服务，激发科研人员成果转化活力。同时积极发挥中国地震学会城乡韧性与防灾减灾专委会作用，主办“第三届韧性城乡与防灾减灾论坛”，掀

起“抗震韧性”研究热潮。此外，工力所不断强化科技平台建设，联合哈尔滨工业大学申报的地震灾害防治应急管理部重点实验室获批创建，成为自应急管理部成立以来首批创建、地震系统唯一获批的重点实验室。

在人才培养方面，持续强化人才队伍建设，聚焦“韧性城乡”研究体系，组建科技创新团队发挥集群效应，解决重点科学问题。2 个团队入选中国地震局科技创新团队，3 人分别入选中国地震局领军人才、骨干人才、青年人才，1 人获评二级研究员；谢礼立院士荣获中国土木工程学会防震减灾工程终身成就奖，王涛当选为国际地震工程协会新一届执行理事。同时，充分发挥研究所基本科研业务费专项引领带动作用，本年度组织立项项目 87 项，支持国内相关科研院所和高校的 30 余位科研人员作为项目负责人，共同参与相关科学研究。

主要进展情况与取得成效如下：

（一）有效支撑地震灾害风险防治体系建设

1. 参与编制了全国地震灾害风险普查实施方案的编制，支撑了全国地震灾害风险普查“大会战”试点工作，编制并印发了《地震灾害风险评估及数据规范》《建（构）筑物地震灾害隐患等级划分方法》《地震灾害重点隐患排查技术与数据规范》三本试点版技术规范，支撑了全国风险普查工作。开展了全国地震灾害风险普查工作培训会，为各省级地震局提供了相关技术支持。开展了北京房山和山东岚山试点大会战，以及全国 11 个试点县的四个概率水平下的地震灾害风

险评估，并编制了 200 余幅评估与区划图件。将为即将开展的全国 109 个试点任务县的风险评估工作提供借鉴和支撑。

2. 建立了全球地震人员伤亡基础数据库和抗震能力评估基础数据库，系统地收集和整理了世界房屋百科全书的房屋建筑资料，总结了全球不同区域不同结构类型建筑物的分布与构造特点，简要陈述了建筑物抗震性能，同时分析了不同建筑物抗震能力。对全球不同区域的建筑物抗震能力进行分区，并绘制出区域建筑物抗震能力评估分级图，同时给出应急避险措施建议。实现了全球相关区域抗震能力评估，并在破坏性地震发生后及时给出应急产品及应急避险措施建议，在日本本州东岸近海 7.1 级地震中发挥了良好支撑作用。

3. 完成了地震易发区房屋设施加固工程的评估指标体系研究，研究成果被全国印发的《地震易发区房屋设施加固工程评估工作方案》采用，并与第三方公司中国国际工程咨询有限公司合作，完成了全国地震易发区房屋设施加固工程实施进展评估报告。梳理完善了我国常见不同结构类型建筑构造特点和结构损伤机理，基于既有建筑的抗震薄弱部位及典型震害特征，对症下药，提出不同抗震性能与建筑使用需求的修复与加固方案，编制《地震易发区既有房屋建筑抗震加固技术选编》，为加固工程实施提供技术支撑。初步研发了新型减隔震结构体系和多种结构抗震加固技术，提出了考虑结构及地震动特性的非结构抗震设计楼面反应谱，编制了地震易发区既有房屋设施抗震加固技术指南。组织编制科普性图书《农村房屋抗震实用手册》，由工程协调领导小

组以国务院抗震救灾指挥部名义下发各省份，供“地震易发区房屋设施加固工程”相关部门参考。

4. 研发的城市建筑群地震灾害情景仿真模拟平台以及风险评估方法在西昌、天津、广州、北京、红河镇、昭通等城镇的地震灾害情景构建中得到了示范应用。研发了城市地震灾害情景构建与风险评估综合软件系统 HAZ-China（灾害-中国）智慧云服务平台系统，已经在国内北上广等 16 个大中城市开展了不同区域地震灾害情景构建应用示范。牵头编写了《京津冀地区大震情景构建 2021 年度试点工作方案》，并印发到各单位。调研国内外研究工作现状，梳理了技术思路和方法，组织专家编写了《京津冀地区大震情景构建项目建议书》。初步提出了较为完善的工作内容和技术方法，初步再现了三河-平谷 8.0/7.0 级地震和唐山 7.8/7.0 级地震灾害情景。翻译 USGS 主编《海沃德地震情景之工程影响》《海沃德地震情景之地震危险性》等系列图书，拟于近期出版。

5. 形成了地震灾害风险区划图的总体工作方案，编制了 2022 年地震灾害风险区划图试点工作的项目建议书。完成了第六代地震灾害风险区划的技术预研究工作，包括群体建筑物易损性模型、地震灾害风险分析评估模型。

6. 提出了建筑群地震易损性评估方法和城市尺度的抗震韧性评估理论方法及技术标准，成果纳入了国家标准《建筑抗震韧性评价标准》GB/T 38591-2020，行业标准《城市抗震韧性评价导则》及地方标准《地震安全韧性城市建设导则》。

7. 发展了考虑震源-传播途径-场地条件的近场地震动数值模拟方法。建立了强震动记录数据处理流程并开发了相应程序。提出了场地特征参数经验估计模型。改进了等效线性化土层反应分析方法；提出了多指标参数的砂土、粉土地震液化判别方法和新的计算公式，成果纳入《建筑工程抗震性态设计通则》修订版；建立了珊瑚土地震荷载下液化稳态复现室内试验技术。

(二) 有效提高地震预警业务体系科技支撑能力

1. 完成地震预警新技术研究的整体顶层设计，在机器学习地震预警方法领域已开展前沿性探索，地震事件判别、大震破裂特征估计、震级估算、实时定位、现地影响场估计、紧急处置范围判断等较现有方法在准确性与时效性方面均有大幅提升。团体标准《地震预警参数测定》《地震预警场地校正》获中国灾害防御协会团体标准立项。

2. 以新方法研究为基础的海量数据秒级处理系统及海量预警信息亚秒级发布系统研发工作正稳步推进。研发的重大工程地震紧急处置与恢复方法已在轨道交通、燃气、核电三大行业开展示范应用。

3. 通过河南辉煌科技股份有限公司推广合作研发的二代地震预警监测系统，有效地助力高速铁路地震安全以及中国高速铁路“走出去”发展战略实施。

(三) 有效助力中国地震科学实验场建设和相关研究

1. 推动中国地震科学实验场国家重大科技基础设施项目，完成“城市与重大工程地震韧性监测系统”设计，设计

了复杂工程场地地震动观测系统，工程结构地震响应台阵、典型城市地震致灾观测系统，城乡地震致灾及恢复全过程混合仿真系统。在川滇地区建设了工程场地和结构观测台阵，其中部设在大理的结构台站在漾濞地震序列中获得了 30 余次地震结构反应观测数据，为实验场的设计提供了验证支撑。

2. 建立了应用于重大工程地震安全性评估的人工地震动合成方法和天然地震动选取与输入方法，在我国核工程、超高层建筑、大跨度桥梁等重大工程中得到了广泛的应用。

3. 初步研发了区域与城市地震风险评估与监测技术，提出了基于地震监测与结构台阵的城市地震灾害智能仿真方法。在川滇等地区布设了地震工程观测台阵集群，建立了城市典型工程、重大工程、工程场地观测示范基地。

4. 已在川滇地区建设 4 个观测台阵，包含 1 个场地台阵，1 个建筑结构台阵，2 个重大工程台阵。该系列建成台阵目前累计获取强震动记录 368 组，极大的丰富了我国结构强震动观测数据库。

（四）有效推进公共服务技术支撑和科技成果转化

1. 研发的新型减隔震技术均经过试验验证，具备良好的科研前景和工程应用价值，部分技术已经在故宫博物院文物保护和实际工程的加固改造中进行应用。应用减隔震等新技术新材料，与中核能源科技有限公司合作，开展了多模块高温气冷堆反应堆厂房整体模型抗震、摩擦摆隔震和橡胶支座隔震等工况下的振动台试验研究，研究成果为减隔震技术在

核电厂房的应用提供了支撑。与清华大学、日本东北大学和东京工业大学合作，研发了“非结构模拟器”，开展了隔震建筑中非结构构件地震反应特性试验，在实验室再现了足尺房间的地震反应，为理解隔震建筑的抗震韧性提供了试验支撑。

2. 研发了适用于村镇低多层建筑的轻型装配式框架结构，实现了建筑结构构件化，构件轻型化，适于在经济欠发达的村镇地区推广应用。参与编制了北京市地方标准《农村民居建筑抗震设计施工规程》。与中国人民解放军军事科学院国防工程研究院合作研发了框架结构填充墙设置配筋-砂浆条带加固法，完成了系列的振动台试验研究，研究成果为军队老旧营房加固提供了技术支持，同时合作编制了军队通用标准《砌体结构配筋-砂浆面层条带法加固技术规范》。

3. 与中海石油气电集团合作，完成了地震荷载作用下，筏板-LNG 储罐-罐内液体动力相互作用研究、桩-LNG 储罐-罐内液体相互作用研究，研究成果为该类工程的实施提供了科技支撑。通过本次合作，与中海石油气电集团建立了良好的合作关系，目前双方筹建中国地震局工程力学研究所-中海石油气电集团联合实验室已签署，将支撑国家重大基础设施建设，拓展新的行业合作领域。

4. 与唐山市人民政府和中震科建（深圳）控股有限公司分别签订合作协议，共同推进唐山市新型研发机构的组建。与中核能源科技有限公司合作，开展了多模块高温气冷堆反应堆厂房整体模型抗震、摩擦摆隔震和橡胶支座隔震等工况

下的振动台试验研究，研究成果为减隔震技术在核电厂房的应用提供了支撑。承担核电行业的软土地基核岛厂房动力响应实验科研项目，探究我国非基岩场地核岛桩基水平地震承载力及抗震设计方案。与中铁建设集团有限公司，合作开展装配式混凝土雨棚结构振动台试验研究，验证了装配式雨棚结构连接的可靠性，为新建太焦城际铁路太原南到晋城段长治东站建设提供科学依据。开展了“一带一路”沿线国家房屋结构安全性鉴定。

5. 自主研发了高频响、高分辨、耐久性系列化精密孔隙水压传感器，填补了国内在土体变形与破坏监测方面的高端监测仪器空白。研发产品在国内 27 个科研机构和政府部门取得应用，并出口荷兰和德国，支撑了道路和边坡工程监测项目。

二、亮点工作和成效

工力所积极抓好“韧性城乡”科学计划的组织实施，建立和完善科学计划实施机制，开展顶层设计，动员国内外相关高校和科研院所投入科学计划实施，广泛团结国内外从事城乡韧性与防灾减灾事业的各界人士共同开展相关科学问题研究，发展地震灾害控制和预防技术，提升城乡抗震韧性水平。2021年在韧性城乡计划的各个方面均取得了显著成效，其中的三个亮点工作介绍如下。

（一）地震灾害风险评估与区划技术

1. 重要意义

当前，我国正处于全面建成小康社会的决胜阶段，随着经济社会的快速发展，各类承灾体暴露量不断增加，承灾体脆弱性不断增大，所面临的地震灾害风险也日益严重。谢礼立院士指出，地震灾害的根本属性是房屋建筑等土木工程设施灾害。据有关部门统计，地震中约95%的人员伤亡是由于建筑物破坏和倒塌造成的。

因此，整体了解和掌握一个城市或区域工程结构抗震能力，尤其是建筑物抗震能力现状以及在不同区域中抗震能力差异性的分布，有助于政府震前做好防震减灾规划，民众了解可能面临地震灾害的威胁，震前采取有针对性地措施，如进行加固改造和应急准备等，震时能够在最短的时间内掌握灾情，有目标的采取应对措施。

面对复杂严峻的震情和灾情形势，地震灾害风险评估受

到了全社会的广泛重视。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视防灾减灾救灾工作，多次就防范化解重大风险、提高自然灾害防治能力作出重要指示批示。目前地震灾害风险评估被融入国家的多灾种的综合防灾体系，上升到了国家层面进行管理，地震灾害风险评估与区划、大震巨灾情景构建等已经成为地震灾害风险防治领域研究和实践的焦点和热点，已成为国家防灾减灾救灾领域的重大战略需求。

2. 主要创新

(1) 提出了适用于中国大陆城市和区域尺度的建筑物群（单）体地震易损性分析方法。通过对数据的深度挖掘，研究了建造年代、抗震设防状况、结构类型、材料性能等 25 个因素与地震易损性的相关性，建立了各类单体建筑结构考虑多因子影响的快速震害预测方法（模型）。与传统方法相比，该预测模型物理概念清晰、计算简捷，计算结果可靠，运算效率可提高 80% 以上，预测模型可移植、可扩展，已在数十个城市及工程项目中得到实际应用。该方法已经在数十个城市和区域开展了工作，取得了良好的社会效益。提出了基于实际震害的完善易损性矩阵预测方法，构建了中国大陆分区域地震易损性矩阵数据库。

(2) 建立了中国大陆区域建筑物抗震能力分类评价和灾害损失评估方法。通过对全国 26 个省份 400-500 个抽样点、近万栋房屋信息进行了深入分析和数据挖掘，研究了各区域建筑物抗震能力与社会经济、人口、土地利用、设防烈度、

行政区划等指标的相关性，建立了不同区域建筑物抗震能力的综合分区分类评价方法和空间展布模型，绘制了中国大陆不同区域建筑物抗震能力空间分布图。提出了各个烈度下的建筑物和基础设施（生命线工程）直接损失之间对应的统计关系，提出了基于分区分类的基础设施（生命线）工程地震经济损失评估模型。该模型在对汶川、九寨沟、尼泊尔、伊朗和意大利等数十次地震人员死亡的预测中得到了验证，计算误差在 30% 以内。

(3) 研发了国内首个面向政府、行业、公众免费开放的 HAZ-China（灾害-中国）智慧云服务平台。为解决基础数据收集困难，无法获取统一标准的全国范围详细的基础数据而造成评估盲区的难题，提出了多层次多精度的数据库格式及构建方法，建立了适用于不同数据精度的算法模型，分别为普适型数据库、欠详实型数据库和详实型数据库。基于云计算技术研发了一套具有插件式、数据接口开放、可实时评估等优势的综合性 HAZ-China(灾害-中国)智慧云服务平台，集成了区域地震风险评估、建筑物震害预测、生命线工程震害预测等 47 个可实时模拟、评估与展示的功能模块。与传统系统相比，该系统统一了数据库格式和模型方法，打通了“数据壁垒”，可为政府和行业提供全国普适型数据、详实型数据和欠详实型数据的数据上传接口，功能模块可根据用户需求自主扩展和管理，完全实现了震前、震时、震后全过程、一体化的地震灾害预测、模拟与评估，且面向政府、行业、公众免费开放。

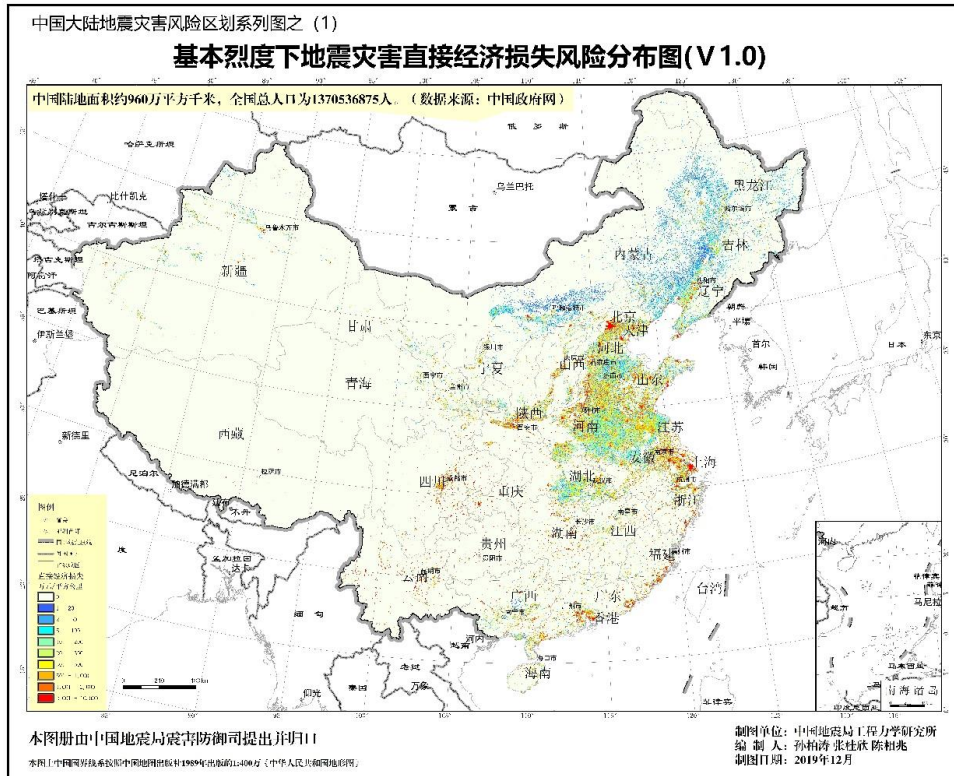


图 1 中国大陆在基本设防烈度地震作用下直接经济损失风险分布图

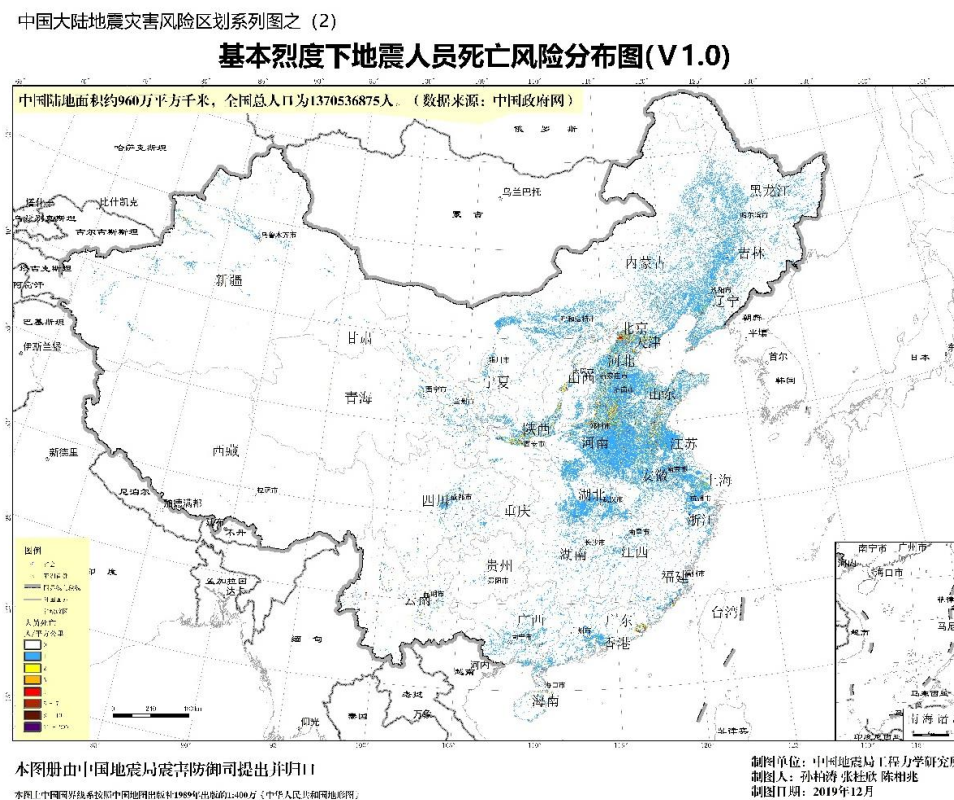


图 2 中国大陆在基本设防烈度地震作用下人员死亡风险分布图

3. 对行业支撑

上述研究成果支撑了多项国家重大战略实施。

2021 年以来，孙柏涛研究员作为第一次全国风险普查总体组专家和地震专家组长，参与制定了《全国第一次自然灾害综合风险普查实施方案》，牵头制定“地震灾害风险评估与区划省级业务体系”，牵头开展了 2 个大会战试点、44 个重点县试点和 2 个试点市的地震灾害风险评估与区划工作，共产出核心图件 700 余幅，为其他地区和全国范围全面铺开奠定了基础，形成的典型经验做法被国务院第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组办公室提出表扬。

2021 年以来，孙柏涛研究员作为首席科学家牵头探索性开展了大震巨灾情景构建试点工作，拟围绕情景构建的核心技术和攻关目标，形成大震巨灾情景构建工作总体思路、技术路线和工作方案，提出试点区域地震灾害情景构建的实用化、标准化方法和防灾减灾备灾对策。主持编译了 USGS 主编《海沃德地震情景构建--工程影响》，拟于近期出版。作为特邀主编，组织在工力所国家核心期刊《世界地震工程》长期设置专栏刊出情景构建优秀成果。

（二）地震预警与重大工程紧急地震处置技术

1. 重要意义

突发性是地震致灾的基本特点，震时持续数秒至分钟的强烈地震动是瞬间致灾的根本原因，震后数分钟至数小时是灾情获取和震后救援的黄金时期，这是进行地震灾害风险早期识别、精准防控和灾害链条阻断的关键时间段。2018 年 10

月，习近平总书记在主持召开中央财经委员会第三次会议强调“实施自然灾害监测预警信息化工程，提高多灾种和灾害链综合监测、风险早期识别和预报预警能力”，2019年10月，习近平总书记在主持中共中央政治局第十九次集体学习时强调“坚持从源头上防范化解重大安全风险，真正把问题解决在萌芽之时、成灾之前”。

随着地震学、工程地震学和地震工程学等基础研究的发展，以及信息技术和地震观测技术的进步，实时地震学发展迅速，实时地震减灾已经成为现实，当前已经形成了多种理论、方法和应用技术系统。如地震预警技术，可在地震发生时，根据部分观测站点的有限波形记录，快速持续地估计地震基本参数，进而实现对破坏性地震波到达前的地震动参数场分布的预测，作为震时工程紧急处置和应急避险的依据。2018年开始建设的投资18.7亿元的国家重点建设项目“国家地震烈度速报与预警工程”已经基本完成主体建设任务，超过1.5万台实时测震、强震动和地震烈度仪数据已经完成接入，地震预警技术链条初步贯通，并试点对外服务。已取得减灾实效为主要目标，全面开展地震预警与重大工程紧急地震处置技术的深入研究具有重要意义。

中国地震局工程力学研究所在国家重点研发计划“重大工程地震紧急处置技术研发与示范应用”、“地震预警新技术研究与示范应用”等项目支持下，联合中国铁道科学研究院、生态环境部核与辐射安全中心、北京市煤气热力工程设计院有限公司、中国科学院大学和河南辉煌科技股份有限公司等

科研院所、高校和科技公司，在地震预警与重大工程紧急地震处置技术方面进行了更深入研究，并取得大量成果。

2. 主要创新

(1) 提出了基于人工智能的地震预警参数持续测定成套方法。将人工智能和大数据分析方法引入地震预警数据处理全流程，形成了基于人工智能的地震预警参数持续测定成套方法，包括波形干扰排除、地震事件识别、P波拾取、震级估算、破裂尺度及地震动场预测等，提升了地震预警相关参数估计的准确性与时效性。

(2) 构建了地震预警全链条技术体系。分别针对点、线、面状的重大工程地震安全运行和地震破坏特点，以核电站、高铁（城市轨道交通）和燃气管网等重大工程为例，构建了处置阈值与处置范围模型，形成了地震预警等紧急地震信息产出-发布-接收-处置-管理的全链条技术体系。

(3) 研发了关键基础设施的地震监测预警与紧急处置装置。研发了应用于城市燃气管网燃气系列、城市轨道交通、核电站和电梯等地震紧急处置的系列地震安全阀门、专用设备、软硬件系统与平台，并进行了示范应用。研发了第一代高铁地震监测预警系统，并在京石武、兰新、贵广、郑西、海南西环等近十条高速铁路上部署应用。

3. 对行业支撑

基于人工智能的地震预警新技术和新方法，将地震预警数据处理从传统方法提升至人工智能时代，为地震预警系统的升级换代和国家地震烈度速报与预警工程减灾效能的进

一步发挥奠定了技术基础。

重大工程地震紧急处置技术将地震预警等紧急地震信息的应用推广到重大工程，实现了高铁、城轨、核电和燃气等行业地震紧急处置、运营恢复策略成套技术，实现了定制化的地震紧急处置设备和平台的成套产品研发，解决了国内重大工程相关行业对地震紧急处置产品的迫切需求。这些产品已在全国多个地区开展了示范应用，在2020年7月12日唐山古冶MS5.1级地震中安装在唐山市5个居民小区的燃气地震安全阀门全部实现自动触发切断，紧急处置成功，保障了人民生命财产安全，减灾实效得到了检验。学习强国、今日头条、黑龙江日报等国内多家媒体宣传报道了此次事件，营造了良好的社会影响。

项目形成的研究成果将助力中国地震局提出实施的“韧性城乡”国家地震科技创新工程，服务于“美丽中国”建设；可支撑国家“一带一路”建设，为区域地震安全提供保障；同时也有助于多学科的协同合作、培养科技创新人才，实现地震科技创新的可持续发展。

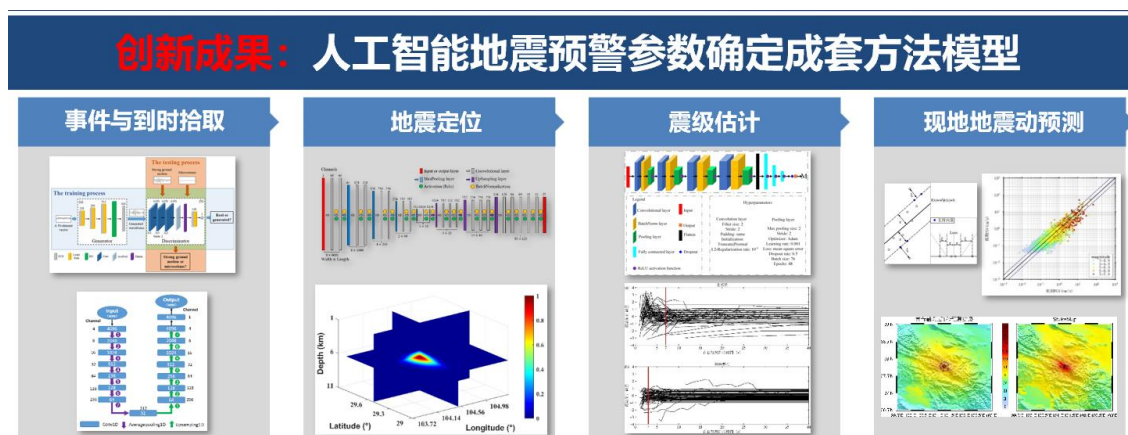


图3 人工智能地震预警参数确定成套方法模型

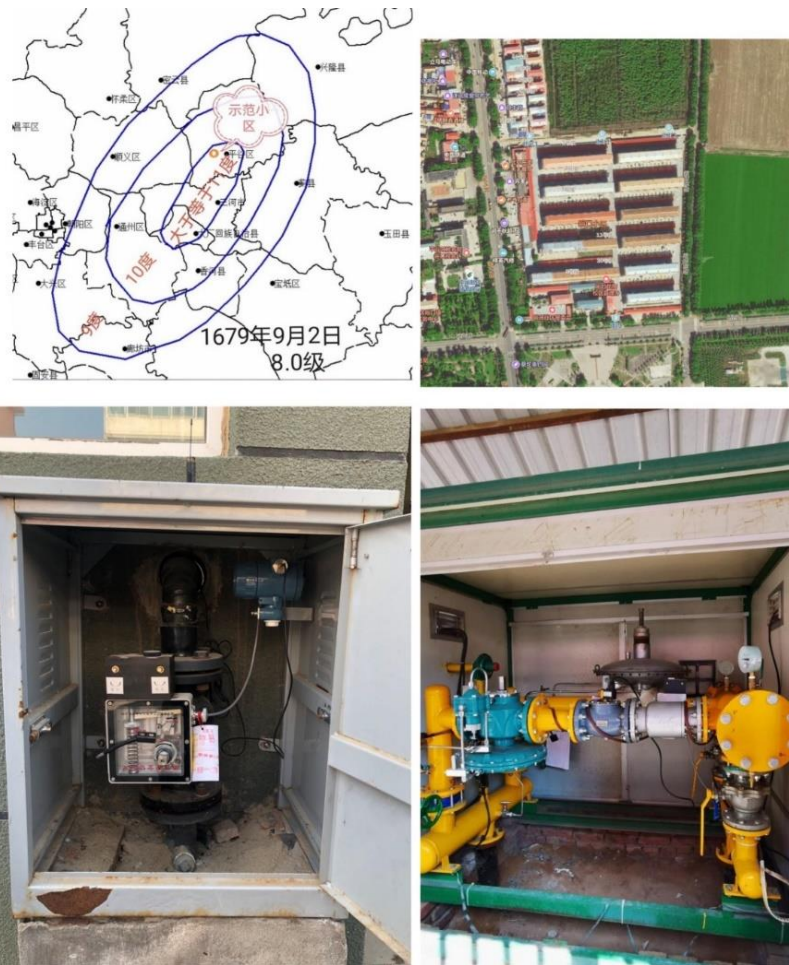


图4 安装在北京市平谷区某小区的燃气紧急处置系统与阀门装置

(三) 高层建筑抗震韧性提升技术

1. 重要意义

城市防灾减灾是国家重要战略之一，高层建筑作为城市地标，近年来呈现体量大型化、结构复杂化、构件新型化等显著特点，其建设规模日益庞大和复杂，人口和财富在有限空间高度集中，地震灾害链易发，对社会的可持续发展造成了巨大威胁。另一方面，现代抗震设计理念亟需从传统抗倒塌设防目标转向灾后可恢复功能目标，国内外尚未建立起可恢复功能高层结构体系理论方法和成套解决技术方案，因此可恢复功能高层结构体系既是国家重大需求问题，又是世界

性的科技问题。美国、日本、新西兰等多地震国家于 2009 年启动可恢复功能结构研究，已有工程应用实例；我国紧密并跑地开展了可恢复功能结构体系探索。

同济大学、中国地震局工程力学研究所、北京交通大学、清华大学组成的研究团队围绕可恢复功能高层结构体系，通过地震可恢复功能新体系、动力响应特征、破坏机制与失效模式、性态控制、设计方法的系列研究，逐步由传统抗倒塌设计理念过渡到可恢复功能设计理念，提高高层结构抗灾能力，并实现了可恢复功能理念在我国高层建筑中的首次应用，为全面提升强震下高层结构的可恢复功能能力做出基础研究与示范。

2. 主要创新

(1) 提出了自复位联肢剪力墙结构体系。自复位联肢剪力墙由自复位剪力墙、自复位连梁以及消能减震装置组成。传统联肢剪力墙的连梁构件以及剪力墙在底部的破坏较为严重，而自复位联肢剪力墙中的自复位剪力墙以及自复位连梁均为低损伤构件，可以有效降低结构受到的损伤。自复位联肢剪力墙的耗能主要由耗能构件提供。研究团队系统化开展自复位联肢剪力墙概念设计、关键构件研发、数值及试验研究、和性能抗震设计方法研究。

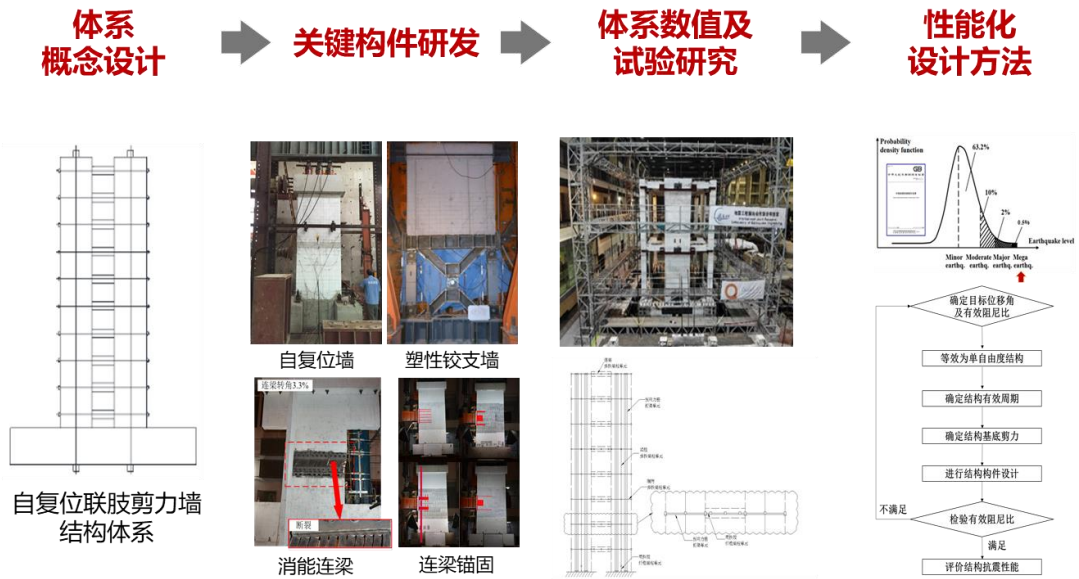


图5 自复位联肢剪力墙

(2) 提出了自复位支撑-摇摆框架结构体系。传统摇摆框架结构通过后张拉预应力筋提供侧向承载力和自复位能力，并通过界面开缝实现摇摆，其楼板-框架变形不协调、摇摆界面混凝土局部破坏等问题难以解决。研究团队提出自复位支撑-摇摆框架结构体系，采用高性能摇摆节点实现变形协调，采用自复位支撑提供侧向承载力，竖向和水平向承载系统分离。为实现自复位支撑-摇摆框架结构体系，对其关键可恢复功能构件进行了研究,包括预压碟簧自复位支撑、低预应力支撑和高性能摇摆节点。开展了带自复位支撑的高层及超高层结构体系数值模拟研究，并与屈曲约束支撑体系进行对比。研究表明，带自复位支撑体系具有更优越的结构性能，其损伤低于屈曲约束支撑体系，残余变形减小。

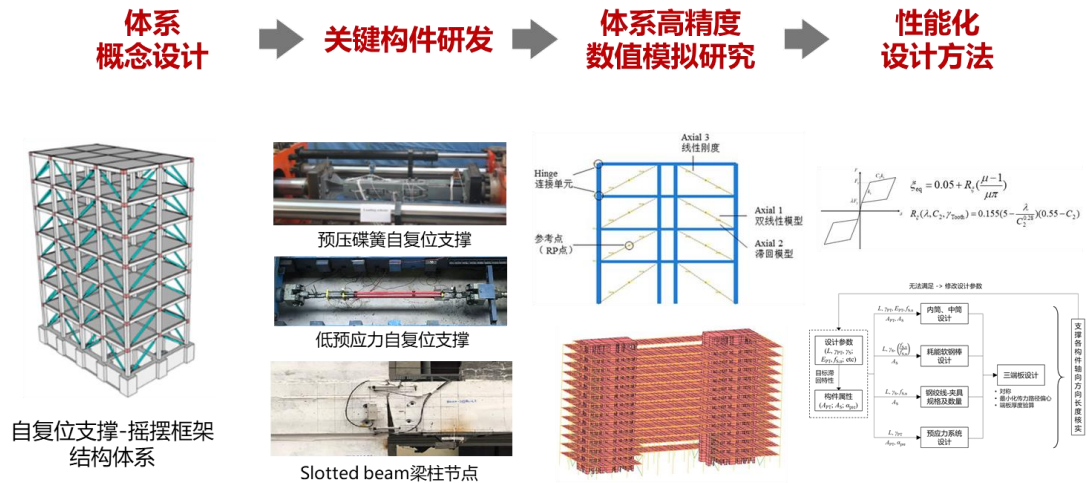


图 6 自复位支撑-摇摆框架结构体系

(3) 提出了四水准设防目标下基于位移抗震设计方法。由于可恢复功能结构体系与传统结构体系相比具有更优异的抗震性能，亟需提出一种与可恢复功能结构体系相适应的、具有更高要求的抗震设防目标。为与 2015 年颁布的第五代《中国地震动参数区划图》相适应，研究团队提出对于可恢复功能结构体系地震设防水准，考虑多遇地震（小震）、基本烈度地震（中震）、罕遇地震（大震）、极罕遇地震（巨震）四个水准，区别于传统建筑结构体系“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标，提出了可恢复功能结构体系的“小震及中震不坏，大震可更换、可修复，巨震不倒塌”的更高抗震设防目标，并给出了四水准地震动参数，为建立可恢复功能结构抗震设计方法体系提供科学依据。

(4) 提出了一种智能自监测隔震支座（SRB）。结合基于压电材料的波动分析法，基于传统的叠层橡胶隔震支座，提出了一种智能自监测隔震支座。提出了基于深度学习的支座多状态监测方法。支座的轴压和剪切变形状态会相互影

响，基于小波包能量谱的支座轴压指标和剪切变形指标鲁棒性和泛化能力不足，因此进一步考虑 SRB 轴压和剪切变形的耦合影响，提出了基于深度学习的支座多状态监测方法。对信号特征提取方式，深度学习网络层数，每层节点数，初始学习率及学习率调整策略等超参数进行了优化，提出了一种基于小波包能量谱的数据增加方法，提高了网络的识别效果。基于深度学习的支座多状态监测方法对于不同支座，不同换能器布置和不同剪切变形方向均有很好的泛化能力，对支座轴压识别的误差为 0.06MPa，对支座剪切变形识别的误差为 0.1%。

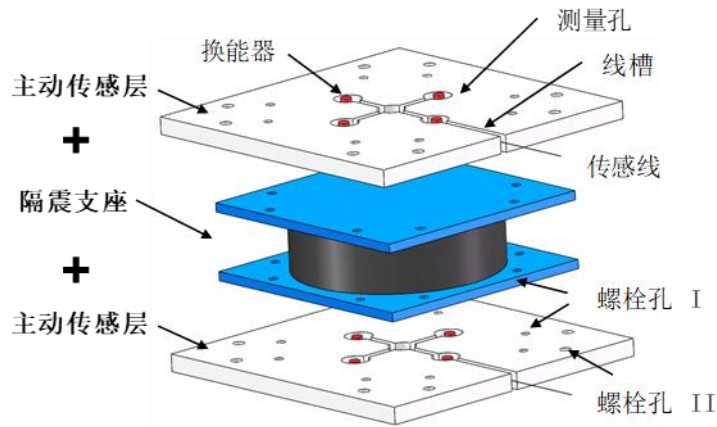


图 7 智能自监测隔震支座构造示意图

3. 对行业支撑

同济大学、中国地震局工程力学研究所、北京交通大学组成的研究团队所提出的可恢复功能结构体系具有震后低损伤、残余位移小等特性，且通过构件预制装配而成，符合国家抗震韧性城市建设和建筑业转型升级重要战略，具有广泛的应用前景。在可恢复功能结构体系抗震性能研究基础上，提出了其基于四水准抗震设防的性能化抗震设计理论，

解决了可恢复功能结构体系在工程应用中的设计技术难题。研究团队研究成果已在浙江实现国内首个高层自复位墙可恢复功能结构示范工程。



图 8 可恢复功能高层结构示范工程

三、下一步工作计划

（一）加强“韧性城乡”科学计划顶层设计，把“韧性城乡”科学计划作为研究所“十四五”事业发展规划和现代化建设主要任务。继续组织落实落“韧性城乡”科学计划“十四五”实施方案，推进重点任务实施。

（二）继续围绕工程场地和结构地震破坏与成灾机理，地震风险区划与地震灾害风险评估，地震灾害链形成机理与地震次生灾害风险评估，减隔震、新型材料、功能可恢复等工程韧性技术，防灾规划、性能设计理念、智能化应急救援辅助决策等韧性社会支撑技术，韧性城乡建设评价指标体系等重点科技问题开展科技攻关，并积极推进重大基础设施地震灾害风险监测与评估工作。

（三）强化“韧性城乡”科技产出对自然灾害风险调查与重点隐患排查工程、地震易发区房屋设施加固工程、地震灾害情景构建、中国地震科学实验场建设、国家地震烈度速报与预警工程等重大项目的科技支撑，实现科研、业务的无缝结合。

（四）加强国家地震科技创新工程各计划间的协调发展，依托“中国灾害防御协会城乡韧性与防灾减灾专业委员会”，强化现有平台运行机制。建立常态化的“韧性城市减灾论坛”，主动宣传和引导，扩大影响力。

（五）积极向财政部、科技部、国家自然科学基金委提出设立抗震韧性城乡建设方面的重大研究计划。继续利用研究所基本科研业务费专项支持相关科学研究。

(六) 积极推进“韧性城乡”示范建设。