

## 宁洱 6.4 级地震考察研究综述\*

张建国<sup>1</sup>, 周光全<sup>1</sup>, 崔建文<sup>1</sup>, 孙景江<sup>2</sup>, 戴君武<sup>2</sup>, 苏桂武<sup>3</sup>, 刘爱文<sup>4</sup>, 李永强<sup>1</sup>, 刘本玉<sup>5</sup>

- (1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 4. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;  
5. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 基于 2007 年 6 月 3 日云南宁洱 6.4 级地震现场近场强震与流动数字地震观测、各类建筑结构及生命线工程震害调查、政府及民众应急处置与响应调查等基础工作, 结合云南多年积累的大量地震现场调查资料与认识, 开展了震区各类建筑结构及生命线工程震害特征与机理、强震动观测与地震烈度分布关系、灾区恢复重建资金评估方法、政府应急处置与普通群众个体认知状况以及地壳结构、震源特性、强震动频谱与农居抗震调查等方面的综合分析与研究等工作。归纳和总结了可供我国其它多震地区在城市发展规划、工程结构抗震、地震应急管理和地震灾区恢复重建等领域参考和借鉴的技术、方法、措施和经验。

**关键词:** 宁洱地震; 震害; 强震观测; 应急响应; 恢复重建

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2012)01-0151-05

### 0 前言

2007 年 6 月 3 日云南宁洱县境内发生了 6.4 级地震。本次地震具有若干鲜明的特点: 是自 1976 年唐山地震以来在我国大陆为数不多的一次非常靠近城市的准“城市直下型”中强地震, 且震区跨越了盆地、半山区和山区等类型多样的工程地质单元, 造成了包括城市生命线工程系统、现代企业设施、现代与传统建筑等多种建筑结构类型遭到破坏以及滑坡、崩塌、震陷、液化等异常丰富的震害现象, 创下我国同等地震经济损失之最; 震区是我国乃至世界都十分罕见的中强地震重复率极高的典型构造区之一, 仅自 1970 年以来发生 6 级以上地震达 6 次。最近一次即 1993 年 6.3 级地震后开展的恢复重建工作在本次地震中得到了一次全面的检验, 这为震区及我国其它多震地区未来城乡建设发展中的抗震设防与地震应急相关技术研发应用与管理提供了一次难得的机遇和一个典型的震例; “九五”和“十五”期间在震区建成多个处于不同方位、震中距和场地条件的强震台获得了包括主震在内的多条宝贵的近场强震记录, 为开展不同场地条件下的地震响应、强震

动衰减规律以及地震动参数与地震烈度关系等重要课题提供了十分宝贵的基础数据。地震发生后, 云南省人民政府迅速组织了省地震灾害紧急救援队奔赴灾区开展救援工作, 这是我国组建国家和省级地震灾害紧急救援队以来首次在国内城市区域实施的地震应急救援行动, 获得了许多值得总结和为其它地区提供参考借鉴的救援经验。地震发生后, 中国地震局迅速组织了包括云南省地震局和各大直属研究所专家组成的阵容强大的地震现场工作队赴震区开展调查工作, 及时组织开展了应急阶段的科学考察。之后, 为避免灾区许多有研究价值的震害现象遭到破坏, 云南省地震局、中国地震局工程力学研究所、中国地震局地质研究所和中国地震局地球物理研究所等又组织多批次科技人员赴宁洱地震现场开展了内容丰富的补充调查, 获得了大量宝贵的第一手资料。

鉴于宁洱 6.4 级地震在许多方面的典型性和重要性, 由中国地震局震灾应急救援司组织, 云南省地震局、中国地震局工程力学研究所、中国地震局地质研究所、中国地震局地球物理研究所和云南大学共同参与, 在地震行业科研专项的支持下, 实施了“宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究”项目, 以期分析研究和总结归纳可供云南乃

\* 收稿日期: 2011-01-12.

基金项目: 地震行业科研专项经费项目“宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究 (200808061)”资助。

至全国中小城市有效应对与处置地震事件借鉴的技术、方法、措施和经验。

## 1 考察研究工作

### 1.1 各类结构房屋震害调查

结合汶川大地震经验(孙景江等, 2009; 林淋, 孙景江, 2011)和宁洱地震特点, 深入调查灾区房屋破坏情况, 记录各类房屋的典型破坏特征, 搜集部分结构的图纸资料, 并进行了详细记述和总结。调查覆盖Ⅷ度、Ⅶ度及Ⅵ度区的主要城镇及乡村, 调查房屋约 2 000 栋, 拍摄照片约 3 100 张, 搜集图纸 55 份。提供 139 个单位(或小区或村寨)的房屋概况及地震破坏描述和照片。对居住建筑、公共建筑、工业建筑、学校和医院建筑以及古建筑等分门别类地进行地震破坏情况介绍。对所搜集到的 55 个结构图纸采用 CAD 重新进行了绘制, 为进一步深入研究这些结构的破坏机理等提供了完整的资料。对本次地震的重灾区宁洱县城区的房屋进行了重点调查, 基于 1694 栋房屋震害结果, 统计、分析并提供不同年代、不同结构类型的房屋的地震易损性。

### 1.2 生命线工程震害调查

开展了震区供水、供电、交通、通讯、水利等生命线工程震害的调查和整理。供水系统: 完成 2 处水源地水库震损情况、2 座水厂的破坏情况以及宁洱城区主干管道 52 处破坏点调查; 供电系统: 完成 4 座变电站(110 千伏变电站 2 座、35 千伏变电站 2 座), 1 座水电站(箐门口电站)的震害情况调查, 核实变压器移位和扭转现象、输电线杆分别受砂土液化和河堤滑移影响情况; 交通系统: 完成 10 余处公路约 30 km 的路面开裂、路基失效、滚石等受损情况调查, 重点调查了国道 G213 在庙山垭口和勐海田的 2 处公路滑坡, 实地调查 2 座拱桥及宁洱城区所有的梁式桥; 通信系统: 完成宁洱电信、移动、联通、网通和广电局 5 个相关部门的调查, 实地勘察电信通信大楼中心机房的设备以及 10 余个移动基站的震害情况; 水利基础设施: 实地调查 6 座水库的震害情况, 收集相关坝体裂缝分布等资料。对各系统震害机理分别进行分析, 其中对大河边水库的土坝震害现象进行了三维有限元数值模拟(刘爱文等, 2010; 夏珊, 刘爱文, 2009)。

### 1.3 强震动观测与地震烈度调查

以震区多台强震动观测台所获得的近场强震记录和地震烈度调查为基础, 结合震区地震地质构造, 对宁洱地震烈度分布进行再核实, 探讨基于强震动记录建立的烈度分布与实际震害的关系。开展地震烈度与强地震动参数、场地条件以及地震烈度衰减关系的分析研究。完成震区 7 个获得强震动记录台站场地的钻孔、剪切波速测试以及土样动三轴实验; 对宁洱以及近年来云南其它强震记录进行整理, 建立川滇地区中强地震震动衰减关系; 基于强震动记录和震区烈度评估资料, 建立日本 JMA 的 A0 值与仪器烈度、谱烈度与仪器烈度的关系, 开发基于多种地震动参数的预测仪器烈度的人工神经网络系统; 建立宁洱 6.4 地震的随机有限断层模型, 讨论基于动角频率的随机有限断层法模拟宁洱地震近场强震动的有效性, 并计算若干特殊点的强地面运动; 基于模拟的地震动时程, 采用 A0 值、USGS、谱烈度值以及模糊烈度 4 种仪器烈度计算方法计算震区的仪器烈度分布, 并与现场调查评估的烈度进行对比分析(王赞赞等, 2009; 崔建文等, 2009; 施伟华等, 2010)。

### 1.4 恢复重建资金调查与评估方法研究

通过包括宁洱地震在内的国内重要地震震例恢复重建投入资金数据, 验证并修正发展相应恢复重建资金评估方法, 为今后其它地震发生后能够为政府提供迅速的恢复重建所需资金评估数据提供可靠方法。调查获得政府机关、交通、通讯、供水、供热、供气、电力、水利、卫生、教育、企业等分类的不同类型工程结构的恢复重建单价及宁洱震灾区各行业恢复重建实际投入数据。依据宁洱地震、汶川地震、攀西地震等震例资料, 本项目采用 BP 神经网络、统计等方式提出了 BP 神经网络评估、人均指标评估、基于城乡住房震后恢复重建工程资金的比例评估、基于生产总值的比例评估以及基于直接经济损失的比例评估等 5 种震后恢复重建工程资金评估方法, 并通过玉树地震、新疆于田地震等实际震例验证并修正发展相应的震后恢复重建资金评估方法(王艳茹等, 2010)。

### 1.5 政府处置及社会公众认知调查

本章节主要包括政府及相关部门和社会公众两大方面。政府及相关部门方面, 开展灾区省、

市、县、乡政府及与应急救援有关的行业部门在地震应急处置的不同阶段,对保障灾民生命、恢复社会秩序所采取的应急处置对策,充分挖掘调查获取的经验,总结不同级别政府、不同行业部门针对不同震害程度、不同救灾进程所采取的措施和所取得的效益,共收集资料 427 份,其中省级单位的 120 份,普洱市市级单位的 163 份,宁洱县及其他受灾县各单位的 154 份。社会公众方面,共调查样本点 60 多个,调查中学生不同年级的班级群体 14 个,完成访谈和发放问卷约 4 000 份(次),收回问卷 3 500 多份,得到总调查数据至少 34 万个。同时,还收集宁洱地区若干以村、乡为单位的人口、经济、土地利用、年鉴、地方志和当地地震灾情等方面的数据与资料,建成标准化数据库。开展灾区民众个体层面的地震灾害认知与响应特点与规律的调查,分析相应的防震减灾宣传教育策略。开展灾区家庭层面的地震灾害认知与响应特点调查,分析提高家庭层次防震减灾能力的对策。以上述调查分析为依托,进一步完善地震灾害认知与响应研究的理论与实际应用体系,探讨相应的技术方法,同时从正反两个方面,探索灾区社会功能恢复的主要影响因素及符合我国国情和社会现实的地震应急处置对策(齐文华等,2011;李永强等,2011;王若嘉等,2009)。

### 1.6 云南地区震害特征分析

在全面系统收集整理和分析自 1992 年国家正式、规范开展地震灾害调查、损失评估和科学考察工作以来,云南地区包括宁洱 6.4 级地震在内共计 70 次破坏性地震现场调查所获资料和数据的基础上,开展云南地区地震构造与地震烈度关系、地震灾害分布特征及经济影响、房屋建筑的震害矩阵、地震灾害损失的基本特征、地震灾区人口与经济总损失的关系、地震应急救援对策等方面的综合研究。通过云南地区破坏性地震的地震地质构造背景分析和地震烈度分布、地震灾害损失特点分析、次生灾害分析;建立不同震级档的地震灾害分布、震级与经济损失相关性、总经济损失与不同工程结构经济损失相关性、受灾人口与经济损失相关性的统计模型。通过历次地震灾害房屋建筑破坏程度研究,给出不同烈度区不同房屋建筑破坏比、损失比的统计分析,最终给出震害矩阵。通过地震对社会经济的影响分析以及云南应急救援案例分析,结合云南地震灾害和社会经济状况实际,

有针对性地研究并提出了对应不同震级的应急救援模式(周光全等,2009,2010)。

### 1.7 地壳结构、震源特性、强震动频谱与农居抗震调查

收集云南地区 26 个宽频台网的地震记录,以叠加谱比方法计算该区 Q 值及频率相关性系数;利用多重滤波技术求得 1 ~ 20 s 内面波群速度频散;计算远震 P 波接收函数,开展面波频散与接收函数的联合反演,求得震区地壳 S 波速度精细结构;开展震源拐角频率、应力降的关系研究,总结出持时、几何扩散因子与震级和距离之间的关系;收集云南地区 168 个强震台网的地震记录,经仪器校正,获取了真实的地面运动峰值;以震源特性、地壳结构为背景,计算地面峰值,通过与强震观测结果对比,修订相关参数,建立震区衰减关系;计算研究强震观测的反应谱特征,为抗震设防提供参数;结合现场调查,提出一套快速评定农村房屋震害等级的方法;对震区农村主要建筑材料的抗震力学性能进行测试,研究其在给定地震作用下的力学行为;根据当地民居建筑的功能布局特点与当地工匠的施工特征,研究在当地的震区地面运动特征条件与当地建筑条件下,模拟建筑物在地震作用下的破坏过程,并与实际破坏现象进行了对比研究。提出一套结合当地民居习惯的农村民居抗震图集。

## 2 主要认识

“宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究”项目不仅对宁洱地震震害、强震动观测、恢复重建资金、政府与社会应急处置响应等诸多方面开展了全面、系统、深入的考察和研究,还综合了云南自 1992 年以来 70 次破坏性地震现场调查所获得的大量资料、数据、分析和认识。同时,在本项目执行期间又有姚安、玉树、汶川等多次中强震、大震和特大地震相继发生,项目组及时把握这些地震所提供的相关信息,使本项目的研究内容得以进一步丰富、研究视野得以进一步拓展、研究程度得以进一步深入。截至目前,本项目已有大量研究论文、论著陆续发表,其阶段成果已被用于指导多次破坏性地震的应对和处置。本文仅就项目取得的主要认识作初步归纳。

(1) 建设工程选址是否合理、抗震设计是否

严格、施工质量是否达标是影响震害最重要的因素。孤立、突出地形及类型变化复杂场地等不利抗震场所应尽量避免;校舍建筑应尽量采用框架结构,并避免采用单樑外走廊形式;采用砌体结构应杜绝预制楼板,纵、横墙数量、墙间距等要严格满足要求;顶层空旷钢筋混凝土框架仿古结构应采用轻质材料屋盖,并合理增设框架柱;城市自建房屋是抗震薄弱环节,应纳入抗震管理。

(2) 关于生命线工程,震害的共性特征是与不良工程地质条件,如滑坡、崩塌、砂土液化、震陷等相关,因此同样涉及建设选址与布局的合理性;个性特征方面,供水系统震害主要与供水截断阀门配置太少、支线管道铺设过于贴近房屋墙基、使用灰口铸铁管、预应力钢筋混凝土管、PVC 塑料管等不利抗震材料及刚性接口有关;供电系统震害主要与抗震性能弱的小型变压器等电气设备的使用有关,另一方面,合理、果断的应急处置措施则有效避免或减轻了震害;通讯系统备用电源的配置、维护和抗震措施到位有效减轻了震害。

(3) 仪器烈度与现场评估烈度有一定的差异,但现场评估烈度与地震动相对强度的分布还是比较吻合,表明现场评估烈度基本能反映真实的地震影响情况;仪器烈度可以较好地反映实际地震的影响情况;应用随机有限断层法模拟震区的强地面运动,并进而计算仪器烈度、应用震区烈度分布的快速估计是可行的。但需要对有限断层模型参数和虚拟节点场地影响函数有较充分的了解。

(4) 基于破坏烈度、震区人口密度或人口、经济发展等条件的震后恢复重建资金需求量及优化投入方向问题,提出了五种分别考虑地震破坏等级、震区人口密度或人口、宏观经济特征等因素的震后恢复重建工程资金评估方法。这五种方法应用于数据粗细程度不同的情况,可快速给出震后恢复重建工程资金,为政府的恢复重建决策提供依据。

(5) 提出了地震灾害认知与响应研究及政府地震应急处置研究的基础架构,完善了地震灾害认知与响应研究的问卷调查与访谈方法,地震政府应急处置调查研究的资料收集方法,积累了大量第一手政府及社会地震应急调查数据和资料,揭示了震区灾害认知、响应及政府应急处置的特点与规律。一是民众认知与响应地震灾害的总体

状况尚不理想,并存在年龄、学历、城乡等方面的显著差异,尚有较大提升空间;二是政府决策符合灾民需求并易于操作、人员分工合理、统筹处置时间节点把握准确、应急避难场作用重要、横向联动协调及预案的分级性和可操作性有待加强。

(6) 提出适合云南地区特点的地震应急救援措施:① 推进指挥部办公室实体化,健全抗震救灾工作新机制。完善应急准备、信息共享、协作联动、快速响应、灾情发布和国际支援等机制,定期开展应急演练;② 完善应急救援预案工作体系。应急救援预案修订和完善的重点是加快向社区、农村和企事业单位深入,同时加大和加强国家专业力量和社会专业力量共同参与的应急演练;③ 云南省应急救援工作应按照分级响应作为基本原则,同时根据震级、时间、地点并结合历史地震情况进行相应处置;④ 应建立广域信息交流沟通机制。需要建立横向沟通和整合机制,通过一定的渠道迅速收集上报,确保灾情信息的有效传递并保持准确。⑤ 要完善应急救援专业队伍建设体系。⑥ 完善应急物资储备和物流运输体系。加强应急物资监测网络和预警体系建设;加强应急物资生产能力储备建设;加强省级应急物资仓储与配送能力建设;加强应急救援物资管理体系建设;加强物流运输体系的完善;加强对专业救援队员和生活物资远程投送机制建。

(7) 定量计算了震源、介质结构对地面运动峰值的影响,通过分析地震波在介质表面的反射和折射效应研究深部介质对地震波传播的影响,弥补了常规方法仅考虑震中距介质效应的不足。利用实际地震动记录,研究具有区域特征的地震动反应谱。尤其是研究农村建筑在这样的地震作用下的效应,并以实际地震破坏现象来检验所建立的物理模型的正确性。以大量的实际震害资料并结合地震观测记录研究农村建筑的抗震特点。为当地民居建筑的功能布局及工匠施工习惯为基础,提出了相应的施工规定和设计导则。

### 3 讨论

随着国民经济快速发展,城市化进程加快,人口和物质财富向城市高度集中,“城市直下型”地震是城市人口生命和物质财富的严重隐患。2007年6月3日云南宁洱县境内发生了6.4级地震,是

中国大陆为数不多的一次非常靠近城市的准“城市直下型”中强地震,震区工程地质环境复杂,震害现象丰富,对震区震害现象作详细调查与研究,无疑可对我国其它多震地区在城市发展规划、工程结构抗震、地震应急管理和地震灾区恢复重建等领域提供参考和借鉴的技术、方法、措施和经验。

## 参考文献:

- 崔建文,卢大伟,高东,等. 2009. 利用强震动观测记录计算宁洱 2007 年 6.4 级地震震源参数[J]. 地震研究, 32(增刊): 443-448.
- 李永强,杨杰英,杨东生. 2011. 1996 年云南丽江 7.0 级地震人员死亡的社会学特征[J]. 震灾防御技术, 6(3): 64-70.
- 林淋,孙景江. 2011. 不同地震动参数与地震烈度相关性对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 31(1): 6-10.
- 刘爱文,李小军,郭恩栋,等. 2010. 玉树和宁洱等近城镇中强地震对中小城市影响的启示[J]. 应用基础与工程科学学报, 18(增刊): 152-161.

- 齐文华,苏桂武,魏本勇,等. 2011. 2010 年青海玉树 Ms7.1 级地震灾害的综合特征[J]. 地震地质, 26(3): 533-548.
- 施伟华,李世成,李正光,等. 2010. 宁洱 Ms6.4 地震的强震记录与地震烈度[J]. 地震研究, 33(4): 337-344.
- 孙景江,唐玉红,孙忠贤,等. 2009. 汶川地震Ⅷ度和Ⅶ度区城市房屋震害及若干典型震害讨论[J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 65-73.
- 王若嘉,苏桂武,张书维,等. 2009. 云南普洱地区中学生认知与响应地震灾害特点的初步研究—以 2007 年宁洱 6.4 级地震灾害为例[J]. 灾害学, 24(1): 133-138.
- 王艳茹,戴君武,苗崇刚. 2010. 房屋震后恢复重建工程资金评估方法[J]. 自然灾害学报, 19(4): 163-168.
- 王赞赞,钱进,崔建文,等. 2009. 利用宁洱地震强震记录分析场地响应[J]. 地震研究, 32(2): 151-154.
- 夏珊,刘爱文. 2009. 抗震设防地区评定烈度的平均震害指数法[J]. 地震学报, 31(1): 92-99.
- 周光全,卢永坤,非明伦,等. 2010. 地震灾害损失初步评估方法研究[J]. 地震研究, 33(2): 208-215.
- 周光全,王慧彦,李西. 2009. 2000 年云南地震灾害概况[J]. 地震研究, 32(3): 312-315.

## Overview of the Survey and Study on Ning'er M6.4 Earthquake

ZHAMG Jian-guo<sup>1</sup>, ZHOU Guang-quan<sup>1</sup>, CUI Jian-wen<sup>1</sup>, SUN Jing-jiang<sup>2</sup>, DAI Jun-wu<sup>2</sup>,  
SU Gui-wu<sup>3</sup>, LIU Ai-wen<sup>4</sup>, LI Yong-qiang<sup>1</sup>, LIU Ben-yu<sup>5</sup>

(1. Earthquake Administrator of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(3. Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

(4. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

(5. School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

## Abstract

Based on the basic works of near-site strong motion and mobile digital seismic observation of Ning'er M6.4 earthquake occurred on Jun. 3, 2007, the seismic damage survey of various building structures and lifeline engineering, the investigation of emergency treatment and response of the government and public et al, integrated with massive investigated data and understanding of the earthquake sites accumulated in Yunnan for years, we carried out the comprehensive analysis and study on the characteristics and mechanism of seismic damage of various building structures and lifeline engineering, the distribution relationship between strong motion observation and the distribution of earthquake intensity, the cost evaluation method of post-earthquake rehabilitation and infrastructure, the situation of the government emergency handling and the public cognition, the crustal structure, the focal feature, the strong motion frequency spectrum, and the earthquake resistance of country residential building etc. And then we concluded and summarized the technique, method, measure and experience about the urban development, the earthquake resistance of engineering structure, the emergency management of earthquake and rehabilitation and infrastructure, which can be used as the reference for the other seismically active areas in China.

**Key words:** Ning'er earthquake; seismic damage; strong motion observation; emergency response; restoration and rehabilitation