

汶川地震对村镇建筑地基破坏模式分析

唐益群^{1,2}, 杨 奇², 周 洁²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:“5.12”汶川 8 级大地震,摧毁了村镇大批建筑物,造成了大批的人员伤亡,引发了大量的次生地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流、堰塞湖等。在汶川地区地质构造背景条件下,结合野外次生地质灾害和现场房屋震害的详细调研,从地震响应和破坏机理入手,分析了地震对村镇建筑地基破坏程度的影响因素,总结了汶川地震中村镇房屋建筑和地基的主要破坏模式;基于土-结构动力相互作用的理念提出了基于刚性地基和柔性地基基础分类的地震震害预防和缓解措施;同时从经济可行性的角度提出乡镇和城区分型而治、分区预防的系统构想。

关键词:地震;村镇建筑地基;地震响应;破坏机理;防治理念

中图分类号: TU471.4

文献标志码: A

Mechanism Analysis of Wenchuan Earthquake Damage to Building Foundation

TANG Yiqun^{1,2}, YANG Qi², ZHOU Jie²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Wenchuan Earthquake destroyed a large number of buildings and induced a lot of casualties and many secondary geological disasters such as rock fall, landslide, debris flow and damming lake. Based on the geological structure of Wenchuan and a detailed field investigation of housing damage and secondary geological disasters, the earthquake damage to the building foundation is analyzed from the seismic response and failure mechanism. The main failure modes of house construction and foundation are summed up in earthquake. From the point of interaction of soil and structure, the corresponding earthquake disaster prevention and mitigation measures are proposed based on the classification of rigid and flexible foundations. Meanwhile, the classification treatment and division prevention are pointed out from the economical

perspect.

Key words: earthquake; construction foundation; earthquake response; failure mechanism; prevention concept

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,以四川省汶川县为震中的地区发生里氏 8 级大地震,造成大批的人员伤亡,给国家和人民带来了巨大的损失。同时,由于这次强震能量大,波及面广,在强震发生后,引发了大量的次生地质灾害,给灾后重建带来了极大的困难。这次强震源于由三条断裂带组成的龙门山断裂带,属于逆冲型地震。在这场大地震中,由于房屋破坏严重而造成大批人员伤亡,因此如何从地震震害响应和破坏机理入手,结合房屋震害的现场调研,总结分析汶川地震中房屋建筑地基破坏程度的影响因素和主要破坏模式,是本文试图要讨论的问题。

“5.12”汶川大地震受灾最严重的北川县、青川县与映秀同处于龙门山脉断裂带的中心位置(见图 1),也是地震后引发的滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖与地下水污染等次生地质灾害主要发生、发育的地区。往往地震引发的次生地质灾害造成的损失与地震本身造成的损失相比要惨重得多。Bird 等^[1]分析认为由土体破坏带来的地震损失很大程度上都归咎于次生灾害。

汶川这个地区的地质环境极为脆弱,岩性多以板岩、砂岩、片岩、灰岩为主,岩体破碎,而且多表现为高山峡谷的地貌特征,地形切割大,人口又相对密集,当地居民房屋大多建在山间盆地或者山坡上,这些因素是本次地震灾害造成损失极为惨重的主要原因。这些损失不仅由地震直接导致,而且是由于地震诱发的山体滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖^[2-8]等次生地质灾害所导致或加重的,同时,地下水也面临着受污染的危险。这些崩塌、滑坡、泥石流、堰塞湖等灾害

收稿日期: 2011-11-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ11B04);国家自然科学基金(41072204);上海市重点学科建设项目(B308)

第一作者: 唐益群(1952—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为城市工程地质与环境地质。E-mail: tangyiqun2@tongji.edu.cn

沿地震带和极震区带状分布,规模之大、数量之多、造成损失之重,举世罕见,是改变汶川地区山河面貌特征的主要因素。

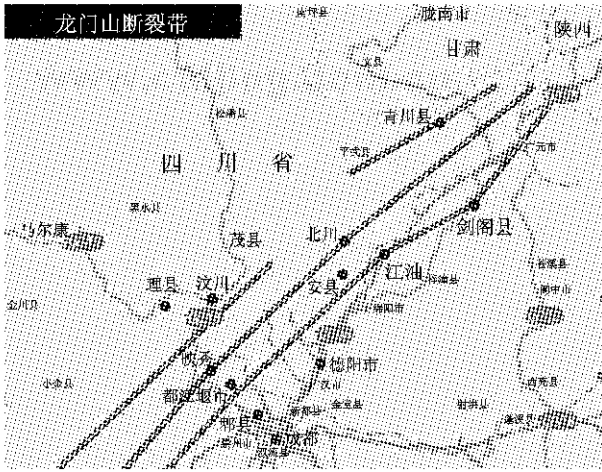


图 1 龙门山断裂带(来源:中国地质调查局)

Fig.1 Fault zone of Longmen Mountain(From: China Geological Survey)

Xie 等^[9]以及 Han 等^[10]通过现场踏勘和区域归类,分析了汶川地震对桥梁基础设施的破坏模式,但是都不考虑地基的作用,而仅仅单独考虑桥梁结构形式的不同来分析地震对其破坏是不全面的。因为往往相同结构形式的桥梁在不同的地基基础上对地震的响应是不同的,最终造成的破坏也会非常迥异。另外国外对地震破坏模式的分析也比较集中在构筑物本身结构上。Hanshimoto 等^[11]从钢筋混凝土的屈曲和剪切角度出发,将支柱的破坏进行分类并提出了响应的防护措施。Tokida 等^[12]通过地震灾害分类,如滑坡、泥石流、桥梁破坏,以及道路交通封闭等,对地震灾害进行统计分析,其分类并不是根据不同破坏机理来进行,因此很难得出非常全面和完整的结果。

Kanamori^[13]介绍了一种实时地震破坏减缓措施,它是指严重地震发生后,立即快速地确定其地震源参数,估计其地震强度的分布信息给不同的用户,包括紧急服务系统、交通系统、水电煤公司以及媒体和公众等。这些及时信息将对减轻地震灾害带来很大帮助。

因此,本文主要针对汶川地区的地震灾害,从地震震害响应和破坏机理入手,结合房屋震害的现场调研,总结分析了汶川地震中房屋建筑的主要破坏模式;基于土-结构动力相互作用的理念提出了地基分类地震震害预防和缓解措施;同时从经济可行性的角度提出乡镇和城区分型而治、分区预防的系统

构想。

1 汶川地震破坏程度的影响因素

该区是一个地震活动频繁的地区,根据四川省地震烈度分区图,调查区地震基本烈度为 VI~Ⅷ度区,属地震强烈和邻区强震波及区。有关证据表明该区断层至今仍在活动。

地层除缺失奥陶系外从元古界到第四系均有出露,总厚度达 2 万余米。

汶川强震地区岩体与第四系松散堆积物的分布特征,以及土-结构体系的动力相互作用构成村镇房屋建筑和地基的主要破坏模式。

1.1 建筑物的形式和材料对建筑结构 with 房屋地基的影响

首先需要说明的是,房屋地基土质地软硬不同对上部结构及基础有着明显的影响,由于地基所处岩土质地软硬不同,上部框架的内力发生了重分布,硬度大的地基,底层框架柱普遍加载,而软地基,底层框架柱则普遍卸载,框架中的次应力由低层向高层传递;地基由硬变软基础内力同样增大。所以,在不同地基上建造建筑物时,设计过程中要考虑这些附加内力所带来的不利影响。一般构筑物的分析会考虑目前经常提到的土-结构体系的动力相互作用(soil-structure interaction)。这种地上地下一体化的设计思想在软土地区已经非常成熟,在汶川地区由于断裂构造非常发育,山体岩体破碎,坡积物、洪积物、沉积物等不同成因形成的土层相互交错,造成地基土不均性严重,对于分析汶川地震的震害,必须考虑房屋地基的类型和分布。因此,非常有必要分析汶川地区地基与基础还有上部结构的共同作用对于震害影响的模式。

汶川地震的最大损失是房屋倒塌所致人员伤亡。该地区房屋结构类型主要为多层砌体结构、多层钢筋混凝土结构、底层框架结构、单层工业厂房(单厂)以及建设年代较早的低矮民居等。多层砌体结构房屋最多,占 53.2%^[14];其次为底层框架建筑房屋,单层厂房结构数量最少。按照建筑用途分类主要包括住宅、商业、商业和住宅两用建筑、政府和医疗建筑、学校等教育用建筑,另外还有厂房和其他用途的建筑等,存在明显的房屋结构体系混乱,甚至还有很多简易木质屋顶以及抗震构造措施缺失等严重问题,使得汶川地震震害响应程度提高了很多。

地震中受灾最为严重的是砖混结构的农村民

居^[15]. 近年富裕起来的农民大量兴建低层(2~3层)砖混结构住宅. 其竖向多为单砖墙(甚至为半砖墙或空斗墙),且墙体多数未设置钢筋混凝土构造柱,楼层之间也不设封闭圈梁;水平向则为预制预应力圆孔板浮搁在砖墙上形成楼板、屋盖,也未采取加强整体性的连接构造措施;甚至还有楼板出挑,形成悬挑阳台. 这种装配式砖混结构房屋多数未经正规设计、施工,多为乡村工匠建造的农民私有房屋. 地震时多发生墙体倾覆,造成预制楼板脱落、断裂而下坠,引发整体或局部倒塌. 在重灾区,往往以这类结构形式建造房屋的整座村庄都被夷为平地,造成了巨大的人员伤亡(见图 2).



图 2 非规范建造的砖混结构房屋倒塌

Fig.2 The collapsed masonry-concrete building in non-standard construction

其次就是村镇地区教学楼和学生宿舍楼,90年代以前建筑多为装配式楼盖的多层砖混结构房屋,倒塌的原因基本同前. 而且由于教室的跨度更大、荷载更重、楼层更高、结构体型更不稳固、传力途径更单薄、连接构造措施更缺失,因此在地震中更容易倒塌而造成重大伤亡(见图 3a, b).

90年代前我国中小城市兴建了许多砖混结构装配式楼盖的多层住宅,其中有不少未经正规的设计、施工,缺乏圈梁-构造柱体系及配套的连接构造措施. 这些楼房往往在地震中严重受损或倒塌(见图 4). 另外一些抗震设计较差的框架结构式住宅,缺乏剪力墙的抗震设计,遇到地震时梁或柱结构断裂受损非常严重(见图 5).

1.2 地形、地貌与地层特征对地基稳定性影响

整个地震区地势西北部高,东南部低,跨成都平原与龙门山山区两个不同的自然地理区域,高山、中山、低山、丘陵和平原呈阶梯状分布. 区内海拔最高与最低相差 4 000 m 左右,地形切割严重. 区域内的地貌特征,明显地反映出受到地层岩性和地质构造的控制(见图 6a, b),按其成因和形态可分为侵蚀堆



a 教学楼(映秀中学)



b 学生宿舍楼(映秀中学)

图 3 村镇地区多层砖混结构房屋倒塌

Fig.3 Multi-story masonry-concrete building collapsed in town areas

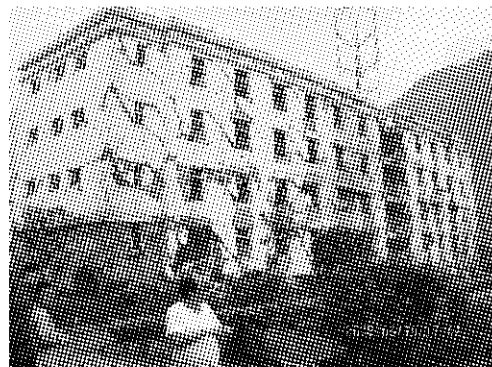


图 4 多层砖混结构住宅局部开裂

Fig.4 Multi-story masonry-concrete building locally cracked

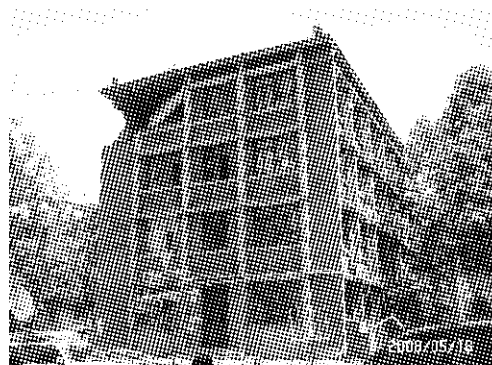
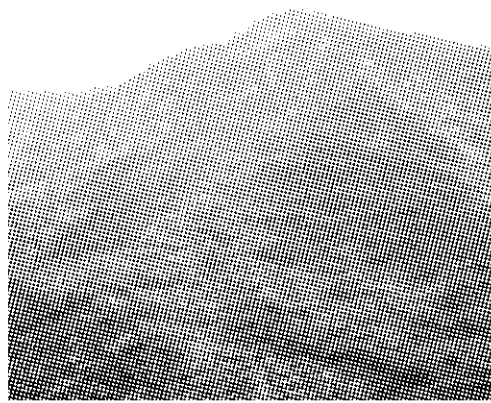


图 5 框架结构住宅柱体断裂

Fig.5 The cracked columns of frame structural building



a 山体构造带(岩体破碎)



b 片理劈理化(岩体松动)

图6 青川地区地震后受地层岩性和地质构造控制的岩体破碎带和松动处

Fig.6 The rock fracture zone and loose area controlled by the lithology and geological structure in Qingshan area after earthquake

积地貌、构造侵蚀地貌和构造侵蚀溶蚀地貌三大类, 这些不同的地形、地貌与地层特征、山体构造带在地震中对房屋地基稳定性产生重大影响, 分述如下:

1.2.1 侵蚀堆积地貌

主要为冲洪积、冰碛、冰水堆积平原, 如都江堰东部地区由黄褐色粉砂质土、黏质砂土及砂卵石组成. 当发生地震作用时, 此类地形地貌地区的房屋地基在地震作用下都发生了不同程度的破坏, 而且由于地下水埋深的问题, 此类地层没有给地基任何减震作用, 同时松散的堆积土层, 造成大部分农村地区非均匀柔性地基, 地震放大效应很明显(见图7a).

1.2.2 构造侵蚀地貌

(1) 褶皱低山

海拔高程在700~1000m左右, 一般高差200~300m左右, 局部形成丘状低山, 切割深度50~100m左右, 山顶平缓, 起伏不大. 由三叠系、侏罗系、白垩系及第三系砂岩、泥岩、页岩、砾岩组成.

褶皱低山岩体破碎, 泥岩、页岩雨后容易崩解破碎, 造成地基土出现节理分叉裂隙很多, 不利于地基整体稳定性. 对于城区刚性基础地基, 地震时由于岩体松动, 容易造成地基局部倾斜影响建筑的稳定性.



a 松散堆积层上的房屋



b 山体滑坡淹没的公路

图7 广元地区地震中地形地貌对构筑物的影响
Fig.7 The influences of the topography on the construction in Guangyuan earthquake

(2) 断裂构造中山

海拔高程在700~2100m左右, 高差200~900m左右, 由震旦系、三叠系、侏罗系及白垩系的砂岩、泥岩、页岩、砾岩组成. 深切沟谷发育, 坡陡坡长, 厚层砂岩及厚层砾岩常形成陡坎或陡崖, 斜坡稳定性较差, 规模不大的崩塌、滑坡较发育, 处于断裂构造部位有大型的滑坡或崩塌发生; 支沟口常发育规模不等的洪积锥、泥石流扇等. 断裂构造山体岩体破碎, 基本处于无人区, 是震后次生地质灾害诱发密集区. 此区居民较少, 山坡处建、构筑物的地基基本都处于凌空似稳定状态, 地震发生时由于岩体破碎、松动, 其上的建筑物或道路路基因整体失稳而滑塌. 图7b显示地震后诱发山体整体滑坡破坏公路路基.

(3) 断块构造高山

海拔高程在2000~4582m左右, 高差1100~2000m左右, 由花岗岩、闪长岩、安山岩、凝灰岩、安

山玄武岩及部分变质岩组成。由于地壳抬升强烈,高差大,常形成不对称“V”型谷,坡麓地段常形成岩屑坡积锥,局部坡面上有小型坡面泥石流,支沟支谷中时有泥石流(或水石流)发生,山高坡陡,岩土破碎,极易产生滑塌。此区居民很少,房屋分散,地震发生时,由于山体岩土破碎,山坡上的民居房屋基本都是随着整体破碎的岩质和土质滑坡而破坏。

1.2.3 构造侵蚀溶蚀地貌

海拔高程在 800~1 700 m 左右,高差 400~700 m 左右,由泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系下统的灰岩组成。深切沟谷发育,断崖峭壁常见,坡陡坡长,一般斜坡稳定性较好,坡脚有崩坡积,处于断裂构造破碎带上,有滑坡或崩塌发生。溶蚀形态有:洼地、平台、漏斗及落水洞、溶洞、峰丛等。该区的民居房屋地基在地震发生时由于下部很多溶洞塌陷而发生地基沉陷或在破碎带容易发生房屋地基整体崩塌。

2 地震响应和破坏机理以及对建筑结构对地基稳定性的影响

地震响应因地基土的软硬、断层的分布、地貌的不同而有所不同,主要表现为地表断层和隆起、液化和侧向扩张,以及滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等。地表断层和隆起主要分布在褶皱低山和断裂构造中山带,地表地层破裂的高值区是地下破裂的最大静态滑动位移区在地表的响应。而液化和侧向扩张主要发生在乡镇没有正规规划的刚性地基基础覆盖地区,一般该区地处残积砾、砂土层,基岩埋深较断裂活动中心带要深,当地震发生时,首先响应的是房屋地基液化带来的影响。

2.1 地表断层和隆起与次生地质灾害

地表地层破裂,是地表断层位移的体现,一般在震级大于 6 级的地震中经常发生。地表断层破裂对建筑物以及重大工程设施具有毁灭性的作用。因此,在大多数情况下,一些重大公共项目,如天然气、石油管道、埋藏水管等项目,在规划设计时要考虑一定的破裂位移量,以缓解地层位移造成的破坏。

四川汶川 8 级地震发生在我国南-北地震构造带的中段、青藏高原东缘的东北向龙门山断裂带上。地震后除地表破裂外^[16-17],还引发土体液化现象。地表破裂带沿映秀-北川断裂带的走向断续分布,破裂带切割了多种类型的地貌单元,包括基岩、河流阶地、冲洪积扇、公路、桥梁等,同时也使道路路基发生弯曲与破坏、房屋地基的破坏与民居建筑的倒塌,以

及桥梁垮塌或移位。

地表破裂位移量的影响因素有很多,包括震级、震源深度、断层几何构造、地震破裂过程、近地表土壤性质、断层蠕变等,发生在乡镇农村郊区,虽然对房屋破坏没有造成直接明显的结果,但是对土体结构的影响却很大,使得如滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等潜在次生地质灾害发生率提高了很多,大部分次生地质灾害都是沿着地表断层破裂带发生(见图 8, 9)。如果发生在城区住宅密集区,轻则房屋与地基裂缝频生(见图 10a),重则地基破坏,房屋张裂倒塌(见图 10b)。

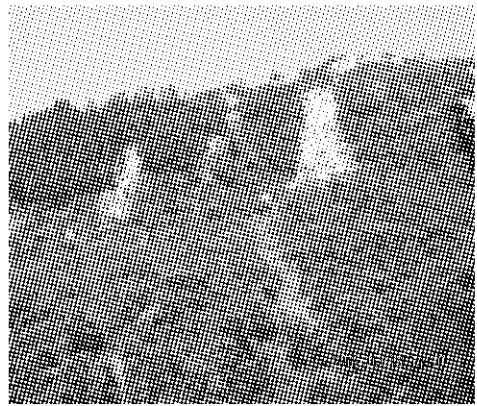


图 8 汶川地震引发青川断层破裂带处山体滑坡
Fig.8 The landslides in Qingchuan fault zones in Wenchuan earthquake

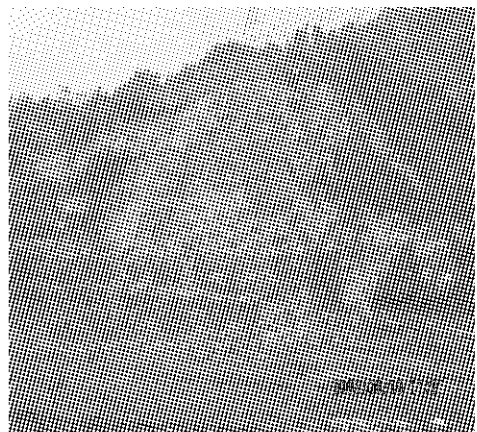
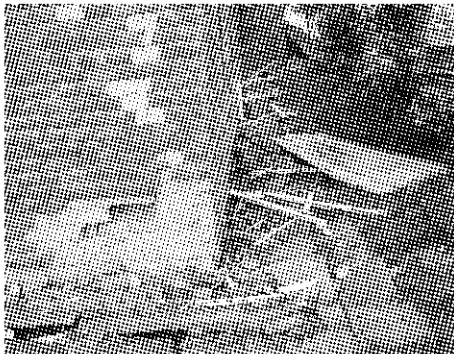


图 9 汶川地震中断层破裂带处山体滑坡造成公路破坏
Fig.9 The road damage by the landslide in Wenchuan earthquake

2.2 液化和侧向扩张与液化震害

地震时,由于瞬间突然受到巨大地震力的强烈作用,砂土层中的孔隙水来不及排出,孔隙水压力突然升高,致使砂土层突然呈现出液态的物理形态,导致地基承载力大大下降,使地面建筑物地基在形成的流沙中下沉,产生极大的破坏。一般认为,地震时

的喷砂冒水现象,也是埋在地下的砂土层产生液化的结果。



a 房屋地面与地基局部破裂



b 地基破坏与房屋张裂倒塌

图10 地震引发的房屋破坏

Fig. 10 The building damages by earthquake

本次地震中某些地区喷水冒砂、地表裂缝、地面沉降等液化宏观现象普遍,同时液化也对农田、公路、桥梁、居民住宅、工厂、学校等造成了不少破坏,一些房屋建筑、学校教学楼、厂房和水井等因液化而废弃。

据曹振中等^[18]在震后的统计调查和研究,目前在成都、德阳、绵阳、眉山、乐山、遂宁及雅安等七个地区中已有118个液化点(带)被发现,涉及长约500 km、宽约200 km的区域,但分布很不均匀,液化集中在长约160 km、宽约60 km的长方形区域内。

侯龙清等^[19]通过各液化调查点的液化情况与地层关系的分析,发现与液化发生有直接关系的地层为全新统层,该层下部为砾石层,顶部为砂层。

另外曹振中等^[20]又分析了不同地区的液化震害分布与砂土液化的条件。

因此,液化震害分布与液化分布有一定关系,但两者有所不同,液化分布和液化震害不能等同而语,液化等级高的地区液化震害不一定最严重,这和当地地形、地质构造、地貌形态以及周围建筑物地基形式密切相关。

对于汶川地震,地震液化主要发生在农村地区,没有发现像日本新潟地震那样整栋大楼因液化而整体下沉、倾覆的现象。液化伴随地裂缝导致工程结构严重破坏,几乎所有液化场地均伴随地裂缝,这与成都平原地层分布不均匀密切相关。同时液化伴随地裂缝几乎使所有液化震害被加重,我国的通海地震、海城地震、唐山地震中,都有液化减轻上部结构破坏的现象^[21],特别是在海城地震中,群众中普遍有“湿震不重,干震重”,即有很多实例说明发生液化的地方,建筑物破坏反而相对较轻,到目前为止汶川地区没有发现液化减震实例,只要液化出现的地方,震害均比周围重。这和汶川的地形和房屋建筑分布有很大关系。液化减震是由于场地一旦发生液化,一方面固然会造成上述各种震害,但另一方面也会使地震波到达地面后能量减弱,这是因为液化层对剪切波自下而上的传递起一定的阻隔作用,并且由于液化与相随的喷水冒砂消耗比较多的能量,使分配到地面运动的能量减少,从而缩短地面运动的振动历时。很重要一点就是液化减震作用在基础密集处体现明显,因为刚性越大,液化层对剪切波的减弱程度就明显。但是汶川地震由于地层分布和建筑物的分布,使得液化区和液化震害区并不同一,液化减震就更加不明白了,反而液化所相随的地裂缝等对后期地质灾害起到了诱发作用。

2.3 滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖^[2-9]等次生地质灾害的破坏影响

汶川强震发生期间,在地质环境脆弱的中-高山区地震触发了大量的滑坡、崩塌等次生地质灾害,大量的滑坡把山体“剃”成了“癞子头”,破碎斑驳。据成都理工大学黄润秋教授估计,地震诱发不同规模的滑坡、崩塌,滑坡最少有3万处,公路2/3是由于地质灾害损坏的,山区房屋的损毁约1/3是滑坡、崩塌等地质灾害所致。根据灾后的地质灾害调查,灾区主要的次生地质灾害有滑坡、崩塌、不稳定斜坡、泥石流、堰塞湖等地质灾害类型。

在地震灾区的滑坡数量众多,种类齐全,规模大小不等。具体有以下几种形式:顺层滑坡(沿层面或结构面)、切层滑动、均质滑坡(多为覆盖层滑坡)。其中规模较大的滑坡往往是顺层滑坡。

地震引起山体松动有时伴随着降雨引发泥石流,往往给人类生命财产构成危害。泥石流冲进乡村,摧毁村镇住宅,淹没人畜,毁坏土地,殃及人民生命;泥石流可以在毫无征兆的情况下发生,能够对其运动路径上的物体施加巨大的冲击荷载。即使小型

泥石流也可以剥蚀植被,阻塞排水通道,破坏房屋住宅,危及人类生命。

地震后引发的大量不稳定边坡如定时炸弹,如不及时处理,随时还有失稳的危险。大量的崩滑体为后续的危害创造了条件,植被的破坏为雨水的入渗提供了条件,同时使岩体的本身稳定性也降低了许多。地震后堆积于沟谷、坡角的土石体,为大规模的泥石流发生创造了条件。地震引发山体崩塌,滑体在狭窄的沟谷中堵江,形成了大大小小的堰塞湖,这些天然堤坝是否经得起考验,特别是雨季是否会发生溃坝,其后果是不堪设想的。地震引发山体滑塌后的堆积体,本身是个极限平衡体,处理不当会再次发生坍塌。

滑坡、泥石流、堰塞湖^[2-8]等次生地质灾害对房屋的破坏影响是显而易见的。规模小的,破坏房屋地基或单栋房屋屋毁人亡,规模大的,淹埋整个村庄。因此,在地震发生后必须高度重视由其引发的次生地质灾害,做好有关防范工作。

3 汶川地震对建筑地基破坏模式分析

土-结构体系的动力相互作用(soil-structure interaction)是指震源引起的地震波通过场地土的传播输入到结构体系,使结构发生振动,同时振动的结构产生惯性力如同新震源又反过来作用于场地,引起新的场地振动再作用于结构体系。土-结构动力相互作用一般包含两个方面:一是刚体运动相互作用忽略上部结构质量时,土体在地振动作用下的运动。对明置基础的结构,该运动为自由场反应的结果;对埋置刚性基础的结构,该运动为开挖后土体的运动;对埋置柔性基础的结构,该运动计算较复杂。二是惯性相互作用,即作用在结构上的惯性力使土体产生变形,进而改变结构运动。惯性相互作用部分的荷载为刚性运动相互作用的结果。在强烈地震作用下,结构和与基础相邻的地基土会进入塑性状态,而结构和地基接触面上可能发生脱离、滑移现象。弹塑性状态下地基与结构相互作用动力特性的不同导致了汶川地震房屋建筑与地基破坏模式的不同。

根据第2节地震响应的分析可以把汶川地震区的城区和乡镇区地基基础相应划分为刚性地基区和柔性地基区,同时根据地表以下地基土的分布和上部建筑物构造的区分,城区主要分布在冲、洪积物堆积的盆地,由黄褐色粉砂质土、黏质砂土及砂卵石组成,而乡镇区主要分布在褶皱低山和断裂构造中山

地带。从土-结构体系的动力相互作用角度分析,城区房屋建筑密集区,基础部分可视为刚性连接,而乡镇地区的地基基础连接则应为柔性连接(文献[22-24]中明确写明农村砖混房屋都没有设置正规基础,直接和地基相连,可谓100%柔性连接),在上部结构共同作用下,基础刚度的增大会导致地基土中附加应力扩散在基础下面地基中的程度。往往在基础和地基某一深度处会存在一道应力比较大的“应力拱”,尤其是基础由柔性基础转变为刚性基础,基础边缘受力最大,基础中心受力最小,形成应力扩散现象。当地震发生时,刚性连接对地震的响应最直接反映在上部建、构筑物上。而柔性连接对地震的响应有减震作用,但由于地下断层构造的影响,次生地质灾害的发生,使得城区房屋密集建筑区主要以建筑结构破坏的灾害为主,而乡镇主要是次生地质灾害,如滑坡、泥石流等带来的各种人员、经济损失为主。

3.1 城区房屋建筑密集区地震时刚性地基与上部结构震害分析

城区主要分布在冲、洪积物堆积盆地,海拔高程在800~1700m左右,高差400~700m左右,由泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系下统的灰岩组成。根据地质资料分析此区基岩埋深较浅,属于硬性地基土,刚性基础连接。地震破坏模式以房屋震害为主。

在刚性地基区,地震时土体与上部结构是相互作用的。地震时,结构受到地基传来的地震波影响产生地震作用,在进行结构地震反应分析时,一般都假定地基是刚性的,实际上地基并非为刚性,故当上部的地震作用通过基础反馈给地基时,地基将产生局部变形,从而引起结构的移动和摆动,这种现象称为地基与结构的相互作用。

地震是横纵波同时出现,所以地基与结构同时存在着剪力和轴力两种荷载,基础的强度可以保证整个建筑物在地震中的安全性。

汶川地震的最大损失是房屋倒塌所致人员伤亡。财产的损失可以由人的劳动重新创造,而人的脆弱生命一旦消逝就再也不能复生。汶川地区建筑结构类型主要包括多层砌体结构、多层钢筋混凝土结构、低层框架结构、单层工业厂房(单厂)以及建设年代较早的低矮民居等。城区震害中各类房屋倒塌最多的有多层砖混结构住宅、低层框架结构房屋、多层现浇纯框架房屋和大跨工业厂房。从倒塌现场分析可得:

建筑结构方案存在缺陷^[25-26]:单独大跨布置,结构刚度不匀,质量分布头重脚轻,体型曲折蜂腰瓶

颈,底层端角构件软弱,竖向构件抗侧力能力差,缺乏分缝控制倒塌范围。连接构造存在缺陷:构件间连接薄弱、预制-装配节点缺陷、砌体缺乏围箍-约束、各类结构(钢、砌体、混凝土)匹配不良、预制构件浮置、箍筋薄弱、预埋件不牢。材料性能不良:钢筋及混凝土强度不足,脆性砌体未采取改善性能的措施,冷加工钢筋(冷轧带肋、冷轧扭、冷拔丝)脆断,致使构件变形能力差而折断解体。

城区房屋破坏基本都属于刚性基础应力集中导致的房屋裂缝破裂和倒塌,主要破裂点基本都发生在建筑一层靠近基础1 m内,属于梁柱构建震害现象,也有房屋属部分楼层垮塌型,但是总体上都属于刚性破坏。汶川地震中位于重灾区的钢筋混凝土框架结构的梁柱破坏极为普遍,柱子的破坏在柱顶、柱身、柱底等部位都有发生,有些柱出现水平裂缝或斜裂缝、局部钢筋保护层脱落主筋外露,有些出现混凝土脱落、压碎、压酥、主筋压曲外露、箍筋崩落等破坏现象。现场调查发现有些破坏的框架柱的箍筋设置存在严重缺陷,箍筋间距过大和箍筋过细,不少混凝土骨料基本都是大直径卵石,导致混凝土强度无法保证,在往复荷载作用下强度和变形能力更差,有些梁的端部出现近45°的斜裂缝及交叉剪切裂缝。

3.2 乡镇次生灾害集中区地震时柔性地基与上部结构震害分析

汶川乡镇主要海拔高程在700~1 000 m左右,一般高差200~300 m左右,局部形成丘状低山,切割深度50~100 m左右,山顶平缓,起伏不大。由三叠系、侏罗系、白垩系及第三系砂岩、泥岩、页岩、砾岩组成;同时部分属于断裂构造山带,深切沟谷发育,坡陡坡长,厚层砂岩及厚层砾岩常形成陡坎或陡崖,斜坡稳定性较差,规模不大的崩塌、滑坡较发育,处于断裂构造部位有大型的滑坡或崩塌发生;支沟口常发育规模不等的洪积锥、泥石流扇等,部分地区海拔高程在2 000~4 582 m左右,高差1 100~2 000 m左右,由花岗岩、闪长岩、安山岩、凝灰岩、安山玄武岩及部分变质岩组成。由于地壳抬升强烈,高差大,常形成不对称“V”型谷,坡麓地段常形成岩屑坡积锥。

该地区大部分面积上分布有侵蚀地貌堆积物,地基土主要为松散的砾、砂层夹少量黏性土堆积物,地震发生时导致松散的砾、砂层建筑地基破坏,公路滑塌,隧、桥倒塌,同时诱发多种次生地质灾害。由于该地区的基础连接为柔性连接,上部构筑物刚度不大,基本都属于整体倒塌型,即为发生破坏性裂缝之

前就已经由于地基的破坏而产生整体倒塌破坏(见图11)。

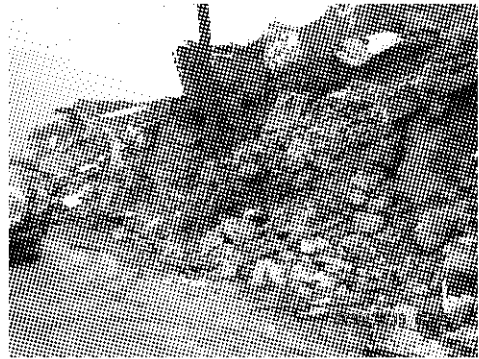


图11 残积层上整体倒塌破坏的建筑物

Fig.11 The integer collapse of construction in eluvium soils

震害模式主要是地震次生地质灾害造成的,包括滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等。乡镇震害严重的地区房屋多为砖混结构的农村民居、90年代以前的村镇地区教学楼等。该类建筑群大部分都没有正规施工的基础结构,地震发生时,主要破坏模式属于房屋整体垮塌型,和传言的“豆腐渣工程”其实没有很大的关系。由于乡镇地区的地形地貌背景,地震容易诱发次生地质灾害且灾害多发。没有基础的乡镇砖混结构房屋,还有木顶盖的单砌房屋,破坏程度直接由下部地基和房屋所在位置的地形来决定。

4 汶川地震各破坏模式的防治措施

结合野外次生地质灾害和现场房屋震害的详细调研,从地震响应和破坏机理入手,分析了地震破坏程度的影响因素,总结出汶川地震中房屋建筑的主要破坏模式分为两种:一种是城区房屋结构的梁柱刚性破坏,另一种就是乡镇地区次生地质灾害过程中的整体倒塌破坏(包括液化区)。前面一种属于刚性地基区的结构性破坏,可以根据改进房屋结构性和整体刚度协调性来提高城区房屋抗震性能。后一种属于柔性地基区地震震害,从震害房屋本身来改造功效不大,而且在乡镇地区从经济可行性来说也不合适,花钱不得力,对于此种情况主要从防护方面来考虑比较有效,如采用一些柔性防护系统,经济而简单,因为次生地震灾害很大程度上无法避免,但是采取一些相应的防护系统,对地震震害的减轻有很大的改善。如早期的钢丝绳网系统(因山体上的锚杆布置施工困难,无法恰到好处地发挥作用),可以采

用钢丝绳锚杆改善这一点。一般采用柔性防护系统的目标在于提高防护能力,减少材料消耗,提高施工速度和降低维护需求,如泥石流柔性坝。总之,城区防护宗旨是以刚性防护为主,而乡镇地区震害防护措施则是以柔性防护为主。

5 结论

(1)房屋地基类型的不同是导致汶川地震过程中不同构筑物破坏模式的最根本原因。

(2)次生地质灾害是震后防治的关键所在。

(3)汶川地震中房屋建筑的主要破坏模式归结分为两种:一种是城区也是刚性连接区结构的梁柱刚性破坏;另一种就是乡镇地区也是柔性连接区的次生地质灾害过程中的整体倒塌破坏(包括液化区)。

(4)根据破坏模式的不同需采取刚性防护和柔性防护系统措施的分区防治理念方可达到防治效果最大化。

参考文献:

- [1] Bird J F, Bommer J J. Earthquake losses due to ground failure [J]. *Engineering Geology*, 2004, 75: 147.
- [2] 杨日红, 杨金中, 王治华, 等. 干将坪滑坡特征信息遥感提取及滑坡成因机理分析[J]. *地球与环境*, 2007, 35(1): 85.
YANG Rihong, YANG Jinzhong, WANG Zhihua, et al. The remote sensing image information interpretation and mechanism of Qianjiangping Landslide in Three Gorges [J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(1): 85.
- [3] 王治华. 数字滑坡技术及其在天台乡滑坡调查中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(4): 516.
WANG Zhihua. Digital landslide technology and its application in investigation of Tiantai Town landslide [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(4): 516.
- [4] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2004, 29(8): 664.
LI Deren, LIAO Mingsheng, WANG Yan. Progress of permanent scatterer interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(8): 664.
- [5] 马东涛, 祁龙. 关家沟泥石流灾害及其防治对策研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1997, 8(4): 94.
MA Dongtao, QI Long. An approach to debris flow disaster and its prevention countermeasures in Guanjiagou Gully [J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1997, 8(4): 94.
- [6] 于晓光. 本溪市下马塘镇泥石流灾害成因分析及防治建议[J]. *中国水土保持*, 2003(2): 39.
YU Xiaoguang. Cause analysis and prevention recommendation on the debris flow in Xiamatang Town, Benxi City [J]. *Chinese Soil-water Conservation*, 2003(2): 39.
- [7] 王彦海, 江巍. 泥石流的危害与综合防治[J]. *灾害与防治工程*, 2006(1): 60.
WANG Yanhai, JIANG Wei. Disasters and comprehensive prevention measures of debris flow [J]. *Hazards and Prevention Engineering*, 2006(1): 60.
- [8] 聂高众, 高建国, 邓砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. 第四季研究, 2004, 24(3): 293.
NIE Gaozhong, GAO Jianguo, DENG Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake [J]. *Quaternary Science*, 2004, 24(3): 293.
- [9] XIE Fuqi, HUANG Yong, WANG Junjie. The seismic damage mode of bridge in Wenchuan earthquake [C]// 2011 International Conference on Multimedia Technology (ICMT), Hangzhou. 2011, 4213-4216.
- [10] Han Q, Du X, Liu J, et al. Seismic damage of highway bridges during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 8: 263.
- [11] Hanshimoto S, Fujino Y, Abe M. Damage analysis of Hanshin expressway viaducts during 1995 Kobe Earthquake II; damage mode of single reinforced concrete piers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(1): 54.
- [12] Tokida K, Oda K, Nabeshima Y, et al. Damage level of road infrastructure and road traffic performance in the mid Niigata prefecture earthquake of 2004 [J]. *Structural Engineering Earthquake Engineering*, 2007, 24(1): 51.
- [13] Kanamori H. Real-time earthquake damage mitigation measures [C]// *Earthquake Early Warning System*. Berlin and Heidelberg: Springer, 2007: 1-8.
- [14] 娄宇, 叶正强, 胡孔国, 等. 四川汶川 5.12 地震房屋震害分析及抗震对策建议[J]. *建筑结构*, 2008, 38(8): 1.
LOU Yu, YE Zhengqiang, HU Kongguo, et al. Damage analysis of Wenchuan earthquake and suggested seismic fortification measures [J]. *Building Structure*, 2008, 38(8): 1.
- [15] 于文, 葛学礼, 朱立新. 四川汶川 8.0 级地震都江堰周边村镇房屋震害分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2008, 30(4): 45.
YU Wen, GE Xueli, ZHU Lixin. Damage analysis on building in towns and village around Dujiangyan of Wenchuan Ms 8.0 Earthquake engineering [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2008, 30(4): 45.
- [16] 黄静宜, 关会妹, 宋洋. 汶川地震北川县城地表断层破裂特征[J]. *防灾科技学院学报*, 2010, 11(1): 62.
HUANG Jingyi, GUAN Huimei, SONG Yang. The surface fracture rupture characteristics of Beichuan Town in Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Institute of Disaster-prevention Science and Technology*, 2010, 11(1): 62.
- [17] 周荣军, 黄润秋, 雷建成, 等. 四川汶川 8.0 级地震地表破裂与震害特点[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2173.
ZHOU Rongjun, HUANG Runqiu, LEI Jiancheng, et al. Surface rupture and hazard characteristics of Wenchuan earthquake with magnitude 8.0 in Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2173.
- [18] 曹振中, 侯龙清, 袁晓铭, 等. 汶川 8.0 级地震液化震害及特征[J]. *岩土力学*, 2011, 31(11): 3549.
CAO Zhenzhong, HOU Longqing, YUAN Xiaoming, et al. Characteristics of liquefaction-induced damages during Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 31(11): 3549.