

# 汶川地震诱发的地面塌陷成因

吴超凡<sup>1 2</sup> 邱占林<sup>1</sup> 杨为民<sup>3 4</sup> 张永双<sup>3 4</sup>

( 1. 龙岩学院资源工程系 福建 龙岩 364012; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 江苏 徐州 221008;  
3. 中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081; 4. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 北京 100081)

**摘 要:** 针对目前由汶川地震诱发的地面塌陷研究尚少的现状,以北川县安昌镇开茂村水没河流域地面塌陷坑群为研究对象,根据所处的地质环境条件,通过现场调查、工程勘察及钻孔岩土试验,探讨了地震诱发的地面塌陷成因及机制。认为塌陷区第四系松散层上部含细颗粒的饱和粉土、粉质粘土和下部粗颗粒的饱和砂层、砂砾层等的存在是产生地面塌陷的前提,强烈的地震诱发了砂土液化是产生地面塌陷的内因,而塌陷坑的陆续出现说明了地面塌陷一般都有个时间发展过程,是一种渐进性质的破坏;且地下水动力条件的改变、真空吸蚀作用、余震作用以及强降雨加剧了潜蚀作用,最终导致地面塌陷的产生与发展。结果表明:这些塌陷坑群的出现主要是由地震砂土液化和潜蚀作用共同作用的结果。

**关键词:** 汶川地震;地面塌陷;砂土液化;潜蚀作用;成因

中图分类号: P642 X141

文献标识码: A

“5.12”汶川地震发生后,在北川县安昌镇开茂村二组水没河流域(图1)出现了不同程度的地面塌陷现象。沿河床及两岸陆续出现60多个塌陷坑,平面形态多呈圆形、椭圆形及不规则形等,其中以圆形、椭圆形为主(图2),剖面形态大致可分为竖井状、坛状及漏斗状等类型,以前两种居多。直径从十几厘米至几十米不等,最深可达3.0 m。这些地震诱发的地面塌陷坑的出现在给人们带来灾难和损失的同时,也为研究此类灾害提供了直接的平台。目前对汶川地震引起的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的研究已取得较多成果,而有关地震砂土液化诱发地表塌陷方面的研究相对较少。根据以往的研究,地面塌陷机理主要有真空吸蚀论、潜蚀论、振动论、液化论、致塌论、气爆论等。“水动力机制”观点强调水动力条件,认为水动力条件为致塌的外因,包括

地下水天然流场的变化、水位变幅、水力坡度、水流速度等一系列水力特征,这些特征的改变激活了潜蚀、吸蚀及气爆作用的进行。大多数研究者都认为地质体结构为内因,上部覆盖层及下部岩溶发育是致塌的必要条件。此外,还有失托增荷观点、地表水下渗、气爆致塌等观点。上面提到的成因机制主要强调水动力条件和地质体结构,涉及地震引发的地面塌陷的研究实例更是少见<sup>[1-8]</sup>。本文以开茂村水没河流域地面塌陷坑群为研究对象,对其成因及形成机制进行分析,初步认为这些塌陷坑群的出现主要是由地震砂土液化和潜蚀作用共同作用的结果。

## 1 研究区地质环境条件

研究区位于龙门山构造带与四川盆地的过渡地

收稿日期(Received date): 2011 - 11 - 20; 改回日期(Accepted): 2011 - 12 - 03。

基金项目(Foundation item): 国家“十二五”科技支撑计划课题资助项目(2011BAK07B02); 中国地调局资助项目(1212010914025); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01262)。[The "Twelfth Five - Year" National Science and Technology Support Program Funded Project (2011BAK07B02); China Geological Survey Project(1212010914025); the Natural Science Foundation Funded Project of Fujian Province (2010J01262).]

作者简介(Biography): 吴超凡(1964 -),男,福建仙游人,硕士,副教授,主要从事工程地质与灾害防治的教学与研究工作。[Wu Chaofan (1964 -), male, a native of Xianyou of Fujian Province, master, associate professor, specialized in engineering geology and geohazard prevention research and teaching.] E-mail: cf6606@163.com; Tel: 13605916606

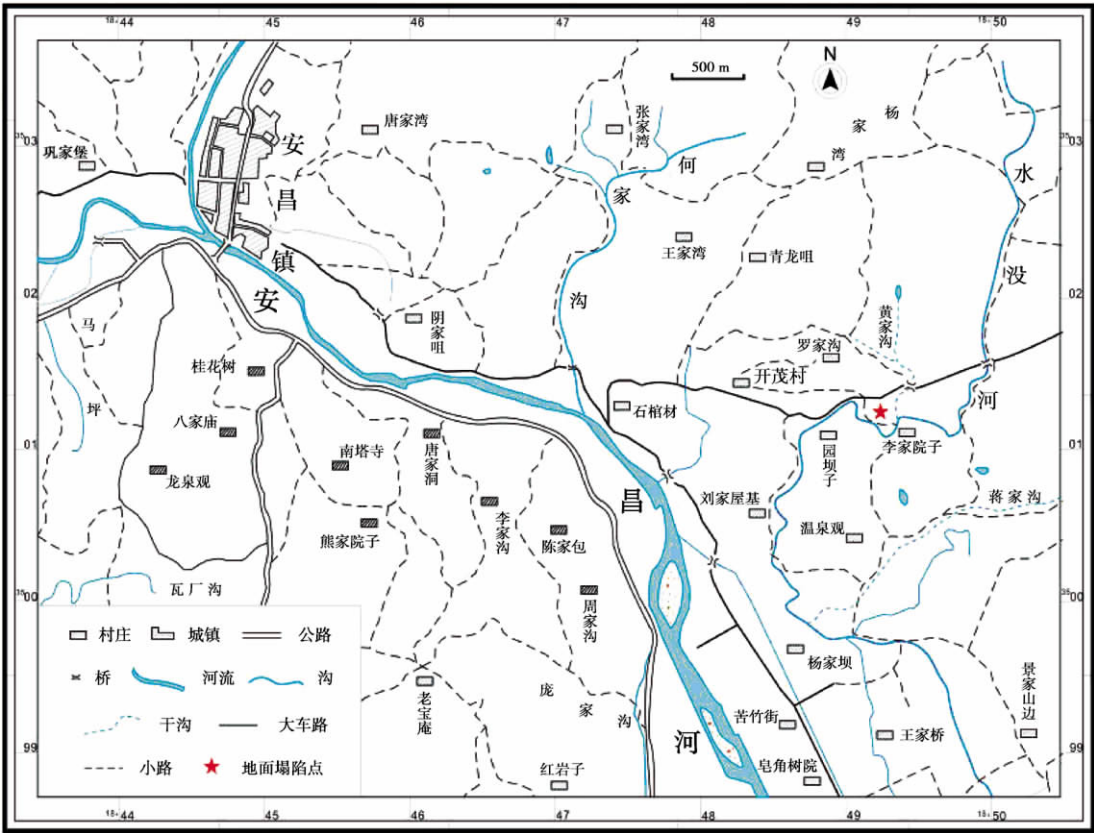


图 1 地面塌陷位置图

Fig.1 Location of ground collapse



图 2 地面塌陷坑形态

Fig.2 Shape of ground collapse pits

a. 圆形; b. 椭圆形; c. 不规则形; d. 河床中出现的塌陷坑

带。在地貌单元上包括构造山地、低山丘陵、冲洪积河谷平原和剥蚀台地等多种类型。地貌上差异较大,地势总体上呈北西高南东低,龙门山前山断裂带地形起伏大,地势相对高峻,而龙门山与成都平原接壤处地势则显得比较平坦。该区常年地表径流强烈。龙门山山前地带以冲积扇平原为主,松散沉积物很厚,地下水丰富。该区地处亚热带季风气候区,年降水量 900 ~ 1 200 mm。水没河流域常年有地表径流,微地貌属于山间谷地。

塌陷坑群周围主要出露上侏罗统莲花口组厚层状钙质砾岩和第四系地层。在已有基础地质资料研究的基础上,为了更加详细地查明地面塌陷的成因,在水没河出现塌陷坑的一级阶地上进行了工程勘察。结果显示,第四系以冲、洪积地层为主。该区上部主要由含砾粉土、粉土、粉质粘土等细粒土组成,厚约 3 m,下部主要为碎石土、含砾砂层、砂砾层等粗粒土组成,厚 8.0 ~ 10.0 m。下伏基岩为上侏罗统莲花口组砾岩(图 3a: ZK-1 孔; b ZK-2 孔)。地下水静水位为地表下 4.0 ~ 4.2 m。据现场调查和实测,开茂村村民所用生活用水水井目前水位处于 4.0 ~ 4.6 m。

## 2 地面塌陷成因

地面塌陷的实质是致塌力与抗塌力综合作用的结果,当致塌力大于总抗塌力时,塌陷将随之发生<sup>[9]</sup>;是在内外动力作用下岩石和土层发生变形,当力的作用与累积超过岩土层内部的结合力时,岩土层发生破裂,其连续性遭到破坏,形成的裂隙,继

而发生塌陷<sup>[10]</sup>。地震地面塌陷是受多种因素影响的结果,而开茂村二组地面塌陷主要是由地震砂土液化和潜蚀作用致塌,这与研究区特定的地质环境条件密不可分。

### 2.1 地震砂土液化导致地面塌陷机制

安昌镇开茂村二组地面塌陷坑群处在水没河一级阶地上,第四系松散层主要为含细颗粒的粉土、粉质粘土和粗颗粒的砂层、砂砾层,具二元结构特征(图 4(a))。据现场实测和钻孔土性测试结果(表 1) 地下水使其砂层处于饱水状态,从而具备了砂土液化最基本的条件。粒间无内聚力的松散砂体,主要靠粒间摩擦力维持本身的稳定性和承受外力<sup>[11]</sup>。“5.12”汶川地震时,在震动的作用下,粒间剪力使砂粒间产生滑移,改变排列状态,而处于松散状态下的饱和砂体就会有变为紧密排列状态的趋势。要变密实就需要从孔隙中排出一部分水,同时,由于上覆细粒土本身孔隙度小和渗透性差的性质,加之强震活动引起含水层导水性、含水层结构和岩层透水性等发生显著变化<sup>[12-14]</sup>,使震动时需要从孔隙中排出的水来不及排出,而水是不可压缩的介质,必然使砂体中孔隙水压力上升(图 4(b))。根据土体的有效应力原理,在总应力一定的情况下,有效正应力就应该随着震动的持续而降低,当孔隙水压力上升到总应力值时,砂粒间的有效应力就降到 0,颗粒悬浮在水中,此时砂层就处于临界液化状态。当水继续不能及时排出时,这种悬浮状态的砂土范围将会向深处扩展,待整个砂土层都处于悬浮状态时,砂土体也就完全丧失了强度和承载能力,砂土层处于完全液化状态。这种砂水悬浮液在上覆土



图 3 塌陷区钻孔岩芯

Fig. 3 Drilling cores of the collapse area  
( a ZK-1 孔; b ZK-2 孔)



层压力作用下,可能首先冲破土层中薄弱部位,导致地下水溢出,相伴出现地下水携带砂粒喷出地表,砂土层的孔隙水压力由此而得到宣泄,出现地震引发的喷水、冒砂现象(图4(c))。据当地村民介绍,地震时可见多个塌陷坑喷水冒砂,水呈混浊状。这一典型地表现象正好验证该处地下发生砂土液化。而且主震过后,大部分塌陷点上的喷砂冒水现象消失,说明喷水冒砂的出现与强震动相关,地下砂土液化由强震动诱发<sup>[7-8]</sup>。

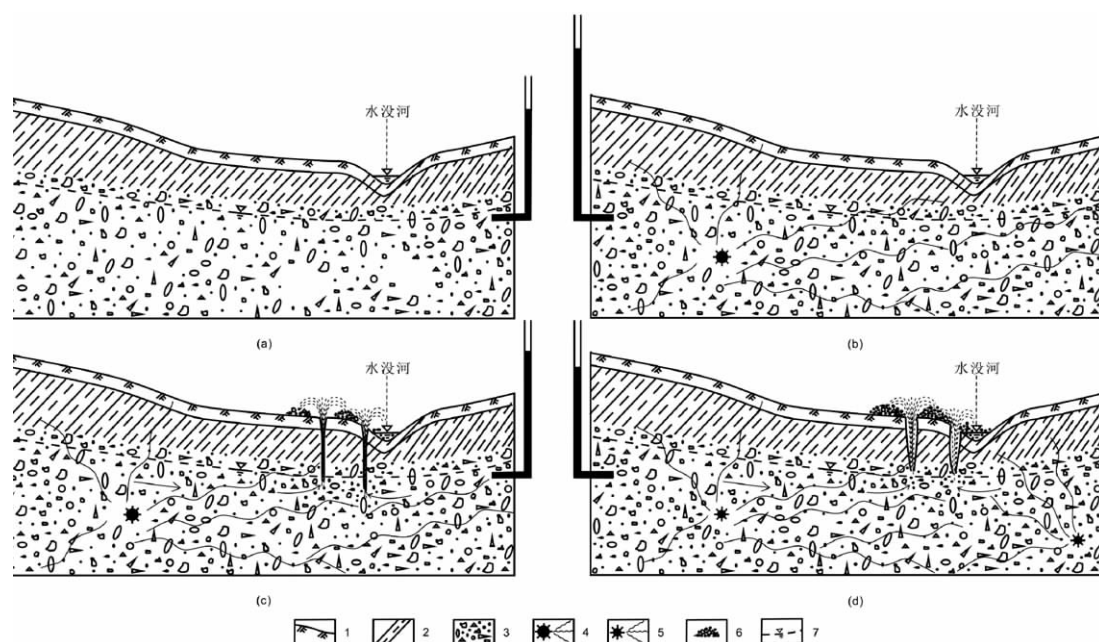
随着程度的进一步加强,水力梯度超过临界水力梯度时,相应液态砂土层出现定向流动,出现喷水冒砂的部位进一步扩大,由于下部的地下水和砂粒喷出地表造成下伏砂土流失,地层出现空洞导致出现应力集中效应而诱发地面塌陷。主震之后的数次余震震动作用加剧了这一过程的发生,促使塌陷坑进一步扩展(图4(d))。因此,可推断开茂村二组地面塌陷坑群的出现系地震砂土液化进一步发展而成。

进行标准贯入试验,其判别结果(表2)说明开茂村二组地面塌陷的形成机制为地震诱发的砂土液化,且液化主要集中在6.5~14.5 m的深度范围内。此外,根据钻孔的土性测试结果(表1)可知,在地下水位以上由于土的类型和性质满足不了地震液化条件,发生砂土液化的可能性不大。因此,汶川地震发

生时,首先引起6.5~14.5 m内的饱和土液化,继而引起该处的地面塌陷。

## 2.2 潜蚀作用导致地面塌陷机制

开茂村二组处于山间谷地,由于地形起伏变化较大,浅层地下水活动频繁,交替强烈,对侏罗系层状钙质砾岩产生强烈的溶蚀作用,结果导致溶蚀裂隙(图5a)与溶洞的大量出现(图5b),造成砾岩颗粒之间的连结力减小,相应的强度随之降低。这过程中主要以化学潜蚀作用为主,其间也伴随着渗透压密作用。在渗透力的作用下,发生土体整体或局部体积缩小的现象。汶川地震强烈的震动作用破坏了其连续性,加剧了这一过程的发生。同时,由于砾岩体本身存在的节理(图5c)及溶洞的应力集中效益,在地震诱发下引起下伏基岩顺节理发育方向拉开,局部出现溶洞坍塌现象,从而使砾岩体的裂隙进一步扩展以及空洞的扩大。这为地下水渗流提供了更为便利的条件(图6a)。出现地下水快速汇聚,渗流强度加强,相应的地下水流速加快,水力梯度加大。沿着新导通的通道形成高压径流,伴随着地下水携带砂粒及少量细颗粒物质的搬运。这一过程的发生导致地下水水位迅速下降,而上覆孔隙含水层水位下降缓慢,导致上下具有水力联系的含水层之间水头差增大,在水头差的作用下,地下水产生垂直向下运动,发生渗透潜蚀作用<sup>[9]</sup>,对沿途产生潜蚀、



1 表土层; 2 细粒土; 3 粗粒土; 4 主震作用; 5 余震作用; 6 喷出物堆积; 7 地下水位线

图4 地震砂土液化导致地面塌陷机理示意图

Fig.4 Schematic diagram of ground collapse caused by seismic sand liquefaction

表 1 安昌镇开茂村钻孔土性测试结果

Table 1 Drilling soil test results of Kaimao Village ,Anchang Town

| 分析号  | 原编号            | 深度<br>/m    | 地质特征与名称          | 含水量<br>/% | 密度<br>/( g • cm <sup>-3</sup> ) | 干密度<br>/( g • cm <sup>-3</sup> ) | 孔隙比  | 液限<br>/% | 塑限<br>/% | 塑性<br>指数 | 液性<br>指数 |
|------|----------------|-------------|------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------------|------|----------|----------|----------|----------|
| 6130 | ZK - 1 (3)     | 0.70 ~ 0.80 | 褐色砂质粘土、可塑        | 18.00     | 2.06                            | 1.75                             | 0.55 | 27.14    | 18.64    | 8.50     | 0.08     |
| 6131 | ZK - 1 (4)     | 1.00 ~ 1.10 | 褐色砂质粘土 ,硬塑 ,偶含角砾 | 18.28     | 2.05                            | 1.73                             | 0.57 | 29.19    | 19.47    | 9.92     | 0.13     |
| 6132 | ZK - 1 (5)     | 1.30 ~ 1.40 | 褐色砂质粘土 ,硬塑 ,偶含角砾 | 19.79     | 2.08                            | 1.74                             | 0.56 | 27.20    | 19.26    | 7.94     | 0.07     |
| 6133 | ZK - 1 (6) - 1 | 2.00 ~ 2.10 | 褐色粘土夹少量角砾        | 22.80     |                                 |                                  |      |          |          |          |          |
| 6134 | ZK - 1 (6) - 2 | 2.50 ~ 2.60 | 褐色粘土 ,可塑 ,偶夹角砾   | 23.34     | 2.02                            | 1.64                             | 0.65 |          |          |          |          |
| 6135 | ZK - 1 (6) - 3 | 3.00 ~ 3.10 | 褐色粘土 ,可塑 ,偶夹角砾   | 24.38     | 2.02                            | 1.62                             | 0.67 |          |          |          |          |
| 6136 | ZK - 1 (7)     | 4.50 ~ 4.70 | 褐色泥质砾质土 ,饱和      |           |                                 |                                  |      |          |          |          |          |
| 6137 | ZK - 1 (8)     | 5.10 ~ 5.20 | 褐黄色粘土夹卵石 ,饱和     | 26.24     |                                 |                                  |      |          |          |          |          |
| 6138 | ZK - 2 3 - 1   | 2.70 ~ 2.80 | 黄褐粉质粘土 ,硬塑       | 20.95     | 2.04                            | 1.69                             | 0.61 | 30.57    | 20.01    | 10.56    | 0.09     |
| 6139 | ZK - 2 3 - 2   | 3.20 ~ 3.30 | 灰黄色粉质粘土          | 16.11     | 2.02                            | 1.74                             | 0.56 | 28.02    | 19.14    | 8.88     | 0.34     |
| 6140 | ZK - 2 4       | 3.50 ~ 3.60 | 黄褐色饱和含砾粘土        | 30.73     |                                 |                                  |      |          |          |          |          |

表 2 标准贯入试验测试结果

Table 2 Standard penetration test results of Kaimao Village ,Anchang Town

| 钻孔编号   | 地下水位 $d_w$ /m | 标贯点深度 $d_s$ /m | 标贯实测击数 $N_{63.5}$ /击 | 标贯临界锤击数 $N_{cr}$ /击 | 是否液化( Y /N) |
|--------|---------------|----------------|----------------------|---------------------|-------------|
| ZK - 1 | 4.6           | 4.5            | 10.0                 | 3.9                 | N           |
|        |               | 6.5            | 16.0                 | 17.4                | Y           |
|        |               | 8.5            | 18.0                 | 20.6                | Y           |
|        |               | 10.5           | 19.0                 | 23.8                | Y           |
|        |               | 12.5           | 19.0                 | 27.0                | Y           |
|        |               | 14.5           | 25.0                 | 30.2                | Y           |
|        |               | 15.5           | 17.0                 | 13.6                | N           |
|        |               | 16.0           | 20.0                 | 12.8                | N           |

冲刷和掏空作用 ,从而在土层底部形成土洞锥形。随着水流携带物数量的增多 ,扩大了导水通道 ,导致水力坡度和地下水流速增大 ,动水压增强 ,进一步增强了地下水潜蚀、冲刷和搬运的能力 ,使土洞不断向上扩展。在此阶段物理(机械)潜蚀作用占主导地位 ,化学潜蚀作用已变得很微弱。与此同时 ,地下水位的骤降 ,而覆盖层透气性差 ,大气很难透过 ,于是在上下含水层之间出现了“真空”区<sup>[15]</sup> ,使得上下含水层之间水头差变大 ,溶洞、裂隙以及土洞内产生真空吸蚀作用。从而加剧了对土体的潜蚀作用 ,加速了土体的破坏以及土洞空间的向上发展(图 6b)。

此外 ,余震也参与了土洞的扩展过程。余震的作用相当于在土体上施加了一个循环附加荷载 ,促使土体应力重分布以达到新的平衡状态。余震作用势必对覆盖层土体的结构产生影响 ,使其连续性遭

受破坏 ,渗透性增强 ,抗破坏的能力降低<sup>[16]</sup> ,从而加剧了渗透压密及渗流潜蚀的发生 ,导致土洞的进一步扩展(图 6c)。

除上述因素之外 ,降雨对潜蚀作用导致地面塌陷也起到重要作用。据调查得知 ,“5. 12”地震后 ,该区一度出现强降雨。降雨促进潜蚀作用的发生主要体现在两方面:一方面降雨对岩土体起到充水增重和软化作用 ,从而降低颗粒之间的抗剪强度 ,使得潜蚀作用易于进行;另一方面强降雨引起地下水水位的猛烈回升 ,在其作用下 ,垂向渗流加快 ,水动力条件增强 ,导致垂直渗透潜蚀作用明显加强。潜蚀作用的增强促使土洞加快向上扩展(图 6c)。

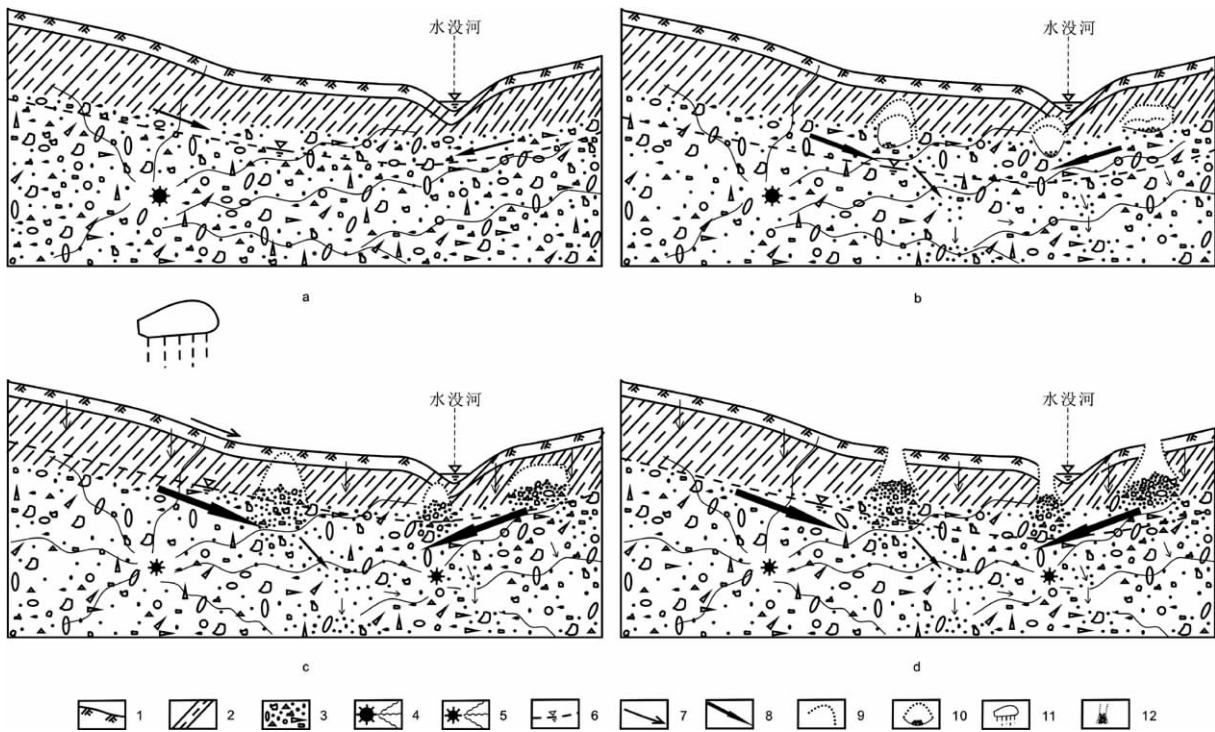
随着潜蚀作用的持续进行和土洞的逐步往上扩展 ,经上述作用的影响以及受力状态的重新调整 ,此时土洞顶板已接近极限平衡状态 ,当土洞周边应力超



a. 溶蚀裂隙; b. 溶洞; c. 节理

图 5 砾岩中发育的岩溶形态与节理

Fig. 5 Karst forms and joints of conglomerate



1 表土层; 2 细粒土; 3 砾岩; 4 主震作用; 5 余震作用; 6 地下水位线; 7 地表径流;  
8 渗流; 9 土洞; 10 真空吸蚀作用; 11 强降雨; 12 塌陷坑

图 6 潜蚀作用导致地面塌陷机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ground collapse caused by suffusion

过其极限强度时<sup>[17-19]</sup>,周边土体呈破碎状剥离,使土洞进一步扩大;当顶板自重超过其抗剪强度时,岩土体结构失稳,地面开始开裂、下沉直至塌陷(图6d)。又由于上覆土层工程地质特性的控制,塌陷坑呈现出圆形、椭圆形及不规则形态(图2)。

综上所述,开茂村二组地面塌陷坑群的出现主要有其特有的地质环境条件所决定的。而地下水活动是产生地面塌陷的动力因素,“5.12”汶川特大地震主要起诱发作用。在此基础上,出现下伏砾岩破碎,为地下水动力条件的改变提供便利,对潜蚀作用(化学潜蚀和物理潜蚀)起促进作用,从而导致土洞的出现。在这一过程中,真空吸蚀、余震以及强降雨作用加剧了潜蚀作用的强度,使得土洞进一步向上扩展。当潜蚀作用发展到一定程度时,最终导致地面塌陷。

### 3 结 论

通过现场调查、工程勘察、试验研究和初步分析,本文对汶川地震诱发的地面塌陷成因取得了一些初步认识,概括如下:

1. 目前对“5.12”汶川地震诱发的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的研究较多,而对地震引发的地面塌陷研究相对较少。因此,开展这方面的研究具有重要的理论和实际意义的。

2. 地面塌陷的实质是致塌力与抗塌力综合作用的结果,是内外动力耦合的产物。而开茂村二组地面塌陷是由多种因素共同作用造成的,主要是地震砂土液化和潜蚀作用。

3. 塌陷坑的形成与发展是与当地特有的地质环境条件密不可分的,尤其是岩性及其结构。经工程勘察揭露显示,塌陷区地层具有二元结构。在强震触发下,出现砂土液化和潜蚀作用。同时,地下水活动及余震作用加快了砂土液化的进程,而地下水动力条件的改变、真空吸蚀作用、余震以及强降雨加剧了潜蚀作用,从而导致地面塌陷的产生与发展。

4. 地面塌陷一般都有个时间发展过程,是一种渐进性质的破坏。在此过程中地下水动力条件、余震、强降雨等各种因素的叠加,加快了地面塌陷的发展速度。

致谢:感谢四川省北川县与安县国土局的大力支持和帮助!

### 参考文献(References)

- [1] Yin Yueping, et al. Great Wenchuan earthquake seismogeology and landslide hazards [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 2009. [殷跃平,等.汶川地震地质与滑坡灾害概论[M].北京:地质出版社,2009]
- [2] Deng Ronggui, Zhang Zhuoyuan, Liu Hong. On the procedure from dynamic liquefaction to seepage liquefaction of saturated sand soil [J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(5): 430-435 [邓荣贵,张俤元,刘宏.饱和砂土动力液化到渗流液化过程探讨[J].山地学报,2001,19(5):430-435]
- [3] Yuan Xiaoming, Cao Zhenzhong, Sun Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296 [袁晓铭,曹振中,孙锐,等.汶川8.0级地震液化特征初步研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1288-1296]
- [4] Cao Zhenzhong, Yuan Xiaoming. Shear wave velocity-based approach for evaluating gravel soils liquefaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 943-951 [曹振中,袁晓铭.砂砾土液化的剪切波速判别方法[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):943-951]
- [5] Yao Xin, Wen Dongguang, Dai Fuchu, et al. Discussions on possible causes of the formation of more than fifty ground collapse pits in Anxian County in front of Longmenshan after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 577-583 [姚鑫,文冬光,戴福初,等.“5.12”汶川地震震后龙门山山前地表塌陷成因探讨[J].工程地质学报,2008,16(5):577-583]
- [6] Zhang Yongshuang, Shi Jusong, Sun Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2): 131-141 [张永双,石菊松,孙萍,等.汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J].地质力学学报,2009,15(2):131-141]
- [7] Cao Zhenzhong, Yuan Xiaoming, Chen Longwei, et al. Summary of liquefaction macrophenomena in Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 645-650 [曹振中,袁晓铭,陈龙伟,等.汶川大地震液化宏观现象概述[J].岩土工程学报,2010,32(4):645-650]
- [8] Du Guoyun, Xing Xiucheng. Research on the soil liquefaction in the piedmont region of the Longmen Mountain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(1): 108-112 [杜国云,邢秀臣.龙门山山前砂土液化初步研究[J].水文地质工程地质,2010,37(1):108-112]
- [9] Xu Gongzhan, Zhou Lai, Feng Qiyuan. Karst collapse mechanism of Zaozhuang area [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(1): 41-44 [许公瞻,周来,冯启言.枣庄岩溶地面塌陷机理研究[J].地质灾害与环境保护,2005,16(1):41-44]
- [10] Leng Wei, Sun Qiang. Analysis on mechanism of collapse and ground fissure caused by structure instability under seismic action [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 23-26 [冷巍,孙

- 强. 地震作用下结构失稳诱发的塌陷和地裂缝机理分析[J]. 灾害学 2007 22(1): 23-26]
- [11] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Analysis principle of engineering geology[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1994 [张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994]
- [12] Wang Genxu, Cheng Genwei. Some thoughts on hydrology and water environment problems in reconstruction in earthquake-hit areas[J]. Journal of Mountain Science 2008 26(4): 385-389 [王根绪, 程根伟. 地震灾区重建中有关水文与水环境问题的若干思考[J]. 山地学报 2008 26(4): 385-389]
- [13] Lee M, Liu T K, Ma K F, Chang Y M. Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan[J]. Geophysical Research Letters 2002, 29: 1824-1835
- [14] Wang Chiyuen, Wang Chungo, Michael Manga. Coseismic release of water from mountains: Evidence from the 1999 (Mw = 7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan[J]. Geology 2004, 32(9): 769-772
- [15] Wu Chaofan. Discussion on formation condition and collapsible area classification of karst collapsing in Hushang Village of Anxi County[J]. Coal Science and Technology 2004, 32(11): 70-73 [吴超凡. 安溪湖上乡岩溶塌陷形成条件及易发区划分探讨[J]. 煤炭科学技术 2004, 32(11): 70-73]
- [16] Wu Chaofan, Gao Zhongjun, Dai Dingxian. On hazard prediction of earth sinking in Jiandou area of Anxi County[J]. Mining Research and Development 2009 29(6): 88-91 [吴超凡, 戴定祥, 高宗军. 安溪县剑斗地区地面塌陷探讨[J]. 矿业研究与开发, 2009 29(6): 88-91]
- [17] Wu Chaofan, Gao Zongjun, Dai Dingxiang. On hazard prediction of earth sinking in Jiandou area of Anxi County[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology 2010 30(1): 9-12 [吴超凡, 高宗军, 戴定祥. 安溪县剑斗地区岩溶地面塌陷危险性预测[J]. 安徽理工大学学报 2010 30(1): 9-12]
- [18] Wu Chanfan, Yang Weimin, Wu Wenjin. The hazard analysis on the earth sinking in the mined-out area of Beijing Chengmenzhen Town[J]. Mining Safety & Environmental Protection 2009, 36(5): 81-83 [吴超凡, 杨为民, 吴文金. 北京门城镇煤炭采空区地面塌陷危险性分析[J]. 矿业安全与环保 2009 36(5): 81-83]
- [19] Wu Chaofan. Research on the causes for the earth sinking in Jiandou Town, Anxi County[J]. Industrial Minerals & Processing, 2010 39(10): 38-41 [吴超凡. 安溪县后井矿区地面塌陷形成机理与防治[J]. 化工矿物与加工 2010 39(10): 38-41]

## Cause of Ground Collapse Triggered by the Wenchuan Earthquake

WU Chaofan<sup>1 2</sup>, QIU Zhanlin<sup>1</sup>, YANG Weimin<sup>3 4</sup>, ZHANG Yongshuang<sup>3 4</sup>

( 1. School of Resource Engineering Longyan University Longyan 364012 Fujian China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008 Jiangsu China; 3. Institute of Geomechanics Chinese Academy of Geological Sciences Beijing 100081 China;

4. Key Lab of Neotectonic and Geohazard MLR Beijing 100081 China)

**Abstract:** According to the current situation of the limited research on ground collapse caused by the Wenchuan earthquake, the groups of ground collapse pit in the Shuimo River Basin are regarded as research objects in Kaimao Village, Anchang Town. The cause and mechanism of ground collapse induced by the Wenchuan earthquake are discussed by site investigation and engineering investigation, embarked on the geological environmental background in the paper. Ground collapse occurs on the premise that the upper area of Quaternary alluvium saturated with fine particles of silt, silty clay, and lower saturated coarse sand, gravel and other produce sand liquefaction which is triggered by the strong earthquake is the internal cause of ground collapse. Furthermore, the emergence of ground collapse pits in succession shows that there is a development process of time in common when it occurs, while it is also a gradual damage. And the change of hydrodynamic conditions, vacuum erosion process, aftershocks and heavy rainfall aggravate the process of suffosion, the interaction of those process results in the emergence and development of ground collapse finally. It is indicated that those collapse pit groups are mainly caused by seismic sand liquefaction and suffosion.

**Key words:** the Wenchuan earthquake; ground collapse; sand liquefaction; suffosion; cause