

宽级配弱固结土入渗及抗冲性对泥石流起动的影响

庄建琦^{1,2}, 游勇², 陈晓清², 裴来政²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:震后诱发的大量崩塌滑坡松散物质,为泥石流的形成提供了极为丰富的固体物源,使得震后灾区泥石流一直处于群发、频发状态。这些松散土体由于扰动强度大,属于宽级配弱固结土体。在降雨作用下产生的水土耦合作用促使土体结构破坏,从而起动形成泥石流。通过对该种土体进行的入渗和抗冲试验的结果表明:(1)震后的宽级配弱固结土体的入渗强度是蒋家沟流域类似土体的 1.5~6.0 倍,直接导致了在降雨入渗作用下土体内部细颗粒被侵蚀搬运,并伴随着土体结构的破坏。(2)抗冲性显示了由于其弱固结特性,土体的抗冲性系数很小,在表面径流作用下,土体易崩解而被径流冲刷流失,增强了径流侵蚀能力。(3)震后降雨与特殊土体的耦合作用促使了灾区泥石流一直处于群发、频发状态,并将持续到土体恢复至震前状态,在此期间灾区的泥石流激发雨量也会随之变化。

关键词:宽级配弱固结土;入渗率;抗冲性;泥石流

文献标识码:A

文章编号:1000-288X(2012)04-0043-05

中图分类号:S157.4

Effect of Infiltration and Anti-scourability of Mixed-grain-sized, Unconsolidated Soil on Debris Flow Initiation

ZHUANG Jian-qi^{1,2}, YOU Yong², CHEN Xiao-qing², PEI Lai-zheng²

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Changan University, Key Laboratory of Western China Mineral Resources and Geological Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Numerous landslides occurred owing to the Wenchuan earthquake, leading to the accumulation of loose solid materials on valleys and slopes that trigger debris flows. The debris flows induced by rainfalls occurred frequently due to the presence of the wide-grade-unconsolidated soil. The loose soils that were disturbed intensively during the earthquake and mixed with rainfall after the earthquake became highly unstable and resulted in debris flows easily under storm rainfalls. It was found through the experiments of the infiltration and erosion that the rate of the infiltration of the post-earthquake, mixed-grain-sized, unconsolidated soil was 1.5~6.0 times those of the similar soils in Jiangjia Gully, and resulting in the loss of finer particles in the soil and eventually the destruction of soil structure. The results of anti-scourability experiments show that the anti-scourability of the unconsolidated soil was weak due to the intensive disturbance it experienced, resulting in disintegration of soil aggregates and the soil was then eroded and transported away by surface runoff. The frequent occurrence of debris flows might be attributed to the strong rainfall along with the unconsolidated state of the soil. This phenomenon could keep occurring until the soil structure return to the original status before the earthquake. The critical rainfall for debris flow initiation may also change during this period.

Keywords: wide-grade-unconsolidated soil; rate of the infiltration; anti-scourability; debris flow

地震引起的强烈地表振动对灾区山体结构和岩体结构的影响显著,大量斜坡松散固体物质进入沟道,为泥石流提供了大量的松散固体物质,使得泥石流的规模、频率和危害程度明显增加^[1]。汶川地震极

收稿日期:2011-04-05

修回日期:2011-09-27

资助项目:国家自然科学基金项目“黏性泥石流沟床大幅度冲淤机理研究”(40971014);国家重点基础科学(973)研究项目“中国西部特大山洪泥石流形成机理与风险控制”(2011CB409902)

作者简介:庄建琦(1982—),男(汉族),河南省商丘市人,博士,主要研究方向为山地灾害评价和预测。E-mail: rockfans09@163.com。

重灾区的震后三个雨季的泥石流活动特征也证实了震后泥石流活动特征明显不同于震前泥石流,如北川县“20080924”泥石流^[2]和绵竹市清平乡“20100813”泥石流^[3]。震后泥石流形成的临界雨量明显降低,泥石流暴发的高频性与群发性特征显著,并且形成的泥石流容重较震前提高 10%~30%^[4],震后泥石流所表现出来的鲜有特征,最直接的原因就是松散物质的快速增加,这些松散物质由于形成速度快,不仅结构松散,孔隙率大,属于宽级配弱固结土体,而且大都处于不稳定状态^[1]。泥石流的起动主要是由于水的入渗,引起土体内聚力和内摩擦角的降低,再加上表面径流的冲蚀作用,从而起动形成泥石流。由于震后崩塌滑坡堆积的宽级配松散土体孔隙度增加和结构受到破坏,因此其入渗和抗冲性质与震前发生了明显改变^[5-6],使得松散土体在强降雨作用下极易起动形成泥石流。因此,降雨或者径流在松散土体上的入渗和冲蚀情况是研究泥石流起动的一个关键问题。本研究通过对汶川地震极重灾区魏家沟流域松散土体进行原位入渗和土体抗冲试验,对宽级配松散土体的入渗特征和抗冲性对泥石流形成的影响进行了分析,以期深入了解震后泥石流形成机理和预报提供科学依据。

1 试验地点及土体概况

为了选择具有代表性的震后宽级配土体,选择了地震极重灾区魏家沟源头进行入渗试验,该部位具有不同类型的宽级配土体,为试验提供了非常便利的试验条件。分别在坡面泥石流堆积体、滑坡堆积体表面、泥石流沟道和扰动土体(发生明显位移,但是没有破碎)4个试验地点进行了原状土和扰动土体的原位入渗试验;同时采集坡面泥石流堆积体、滑坡堆积体表面、泥石流沟道样品3个进行土体抗冲性试验,采样深度为0—10 cm,抗冲性样品采集工具为矩形环刀。矩形环刀的规格为长20 cm×4 cm×3 cm,抗冲性样品采好后,用塑料带装好,密封。并在周边取样进行颗粒级配和孔隙度试验,得到了颗粒分布曲线和孔隙度数据。试验地点的选择均考虑了土体结构的差异(图1)。

从颗粒级配结果来看(图2),4个试验地点的土壤颗粒级配有较大差异,扰动土黏粒含量较高,达到5.69%,其次是滑坡体表面,泥石流沟道黏粒含量最少,仅为1.01%;其中滑坡体表面、泥石流松散堆积体和泥石流沟道土体砂粒含量较大,基本属于碎石土体。通过样品曲线比较,可以看出扰动土体的细粒组份含量相对较高,该扰动土体在地震作用下只是发生了位移,没有出现破碎化现象,扰动强度较低,此后在

降雨作用下细颗粒含量流失少,而其他3个试验地点的土体均经过降雨搬运、再堆积作用,扰动强度大,细颗粒运移明显。孔隙度结果显示,泥石流松散堆积体孔隙度最大,为48%;其次是泥石流沟道为46.3%;扰动土的孔隙度最小,仅为36%。

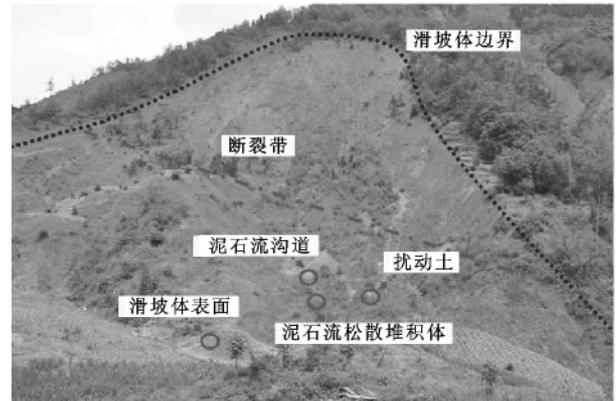


图1 野外入渗试验及取样地点

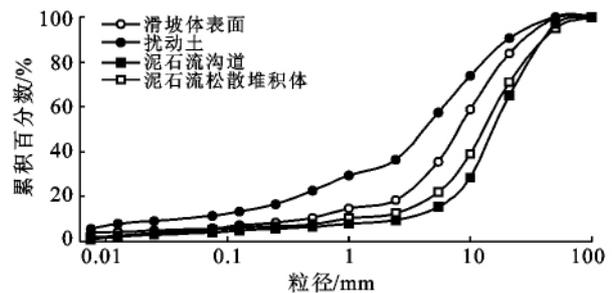


图2 土体组成颗粒级配曲线

2 试验方法

2.1 入渗试验

对于宽级配砾石土体的取样,要保证土体的结构不受扰动很困难,甚至不可能,从而采用室内渗透试验法来测试。采用扰动土样进行室内渗透试验时,由于须剔除大量的大颗粒导致所得到的结果不能反映原位的土体渗透特征,根据陈晓清等^[6]在蒋家沟的试验方法,采用双环进行原位土体渗透试验进行测试,双环的外环直径为50 cm,内环直径为30 cm,双环高度均为25 cm。试验时,先将双环打入土体中10 cm深,并在内、外环分别放一钢尺用以记录水位变化情况,在环内注入一定高度的水,观测变水头作用下的土壤入渗情况。在测试时按照设定的时间间隔记录内环下渗的水量。试验采用了统一的时间记录标准,总共记录时间69 min,前3 min每10 s记录一次,3 min后每30 s记录一次。然后根据单位时间内环内水体下渗高度,计算入渗率(mm/min)。

2.2 土体抗冲性试验

目前土壤抗冲性试验研究方法还不统一,各家所得的资料可比性较差。蒋定生等^[7]采用类似索波列夫的装置,将原状土置于特制的冲刷槽中,在一个大气压下,出水管直径为1 mm时的出射水流直接冲刷土体,以单位水量冲离土体的土壤重量(g/L)作为土壤抗冲性指标。邹翔等^[8]利用该方法对泥石流多发区域——蒋家沟流域不同植被类型进行了土壤抗冲性试验,效果较好。本研究主要分析震后准泥石流土体的抗冲特征,为了便于对比,也采用该试验方法研究汶川地震灾区准泥石流土体的抗冲性,冲刷时间固定为10 min。冲刷完毕,对冲走土壤进行过滤烘干称重,计算抗冲系数,并将试验结果与邹翔等的试验结果进行对比分析。采用冲走1 g土所需的水量(L)和时间t(min)来表示土壤抗冲性(C)。即:

$$C=Qt/m \quad (\text{式中:}m\text{——冲走土壤的质量})$$

3 试验结果与分析

3.1 入渗试验

图3显示的是不同松散土体的入渗试验结果。从图3可以看出,不同土体的稳定渗透系数差异较大,泥石流松散堆积体的稳定渗透系数最大(约5.5 mm/min),其次是泥石流沟道土体(约3.0 mm/min);扰动土体稳定渗透系数最小(约0.55 mm/min)。初始入渗率也同样表现出一定的差异,泥石流松散堆积土体初始入渗率最大(约27 mm/min),其次是泥石流沟道土体(约23 mm/min);扰动土体初始入渗率最小(约19 mm/min)。稳定渗透系数和初始入渗率主要与土体颗粒级配和孔隙度有关,从颗粒级配和孔隙度可以看出,稳定入渗率与孔隙度和细颗粒含量之间关系较为明显,土体孔隙度愈大,其稳定入渗率和初始入渗率也愈大,细颗粒含量越多,其稳定入渗率和初始入渗率越小。

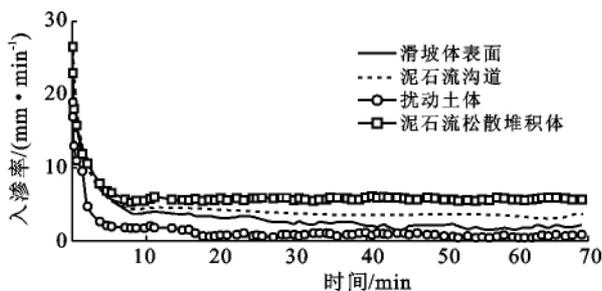


图3 泥石流源地土体入渗曲线

通过与其他松散土体试验结果数据对比,结果表明滑坡体表面土体的稳定渗透系数是蒋家沟滑坡体

下沿土体稳定入渗率的1.6倍,是荒地的6倍;泥石流松散堆积土体是蒋家沟泥石流堆积扇稳定入渗率的2倍^[6];与陈宁生等对蒋家沟自然泥石流物源渗透系数对比,震后滑坡体表面土体的稳定渗透系数是其1.5倍^[5]。由于震后受到破坏的宽级配松散土体在其后的降雨径流等作用下,受到强烈扰动,土体的内部结构在震后短短的两年多时间内还未恢复到自然状态,内部孔隙结构联通性较强,同时土质疏松,入渗过程又产生了土体内部侵蚀,导致细颗粒带走,孔隙联通加强,从而使之渗透系数明显较其他地区大。渗透系数越大,越有利于水的入渗而不利于土体表面产流,但是入渗后的水体在土体内部移动会产生内部侵蚀,同时增加土体自重和土体含水量,在特定区域(土体分层处)已形成饱和水层,使土体的孔隙水压力急增,导致土体失稳下滑,在一定程度上促使了泥石流的形成。

3.2 抗冲性试验

从试验结果来看(表1),滑坡体表面和泥石流松散堆积体抗冲性系数较小,沟道中的松散物质抗冲性系数较大。位于滑坡表面的松散堆积体,主要是滑坡体在向下滑动过程中处于前缘的松散土体和滑坡顶部的土壤在降雨等因素作用下向下流动后堆积的土体,这部分松散土体细颗粒含量较多,扰动较大,固结时间短,没有根系分布。因此,在径流作用下,松散土体容易崩解,崩解后的细颗粒被带走,土体的抗冲性系数较小,容易被冲蚀;位于泥石流堆积区的松散土体,由于细颗粒被带走,黏粒含量很少,孔隙度较大,黏结性很差,崩解性较强,因此,在水流作用下,这种类型的土体极易被水流崩解,抗冲性较差。位于沟道中的松散土体,属于没有被泥石流带走的黏度较大的流体,在经过固结之后,胶结程度较好^[9],具有很好的孔隙发育,同时细颗粒含量较小,因此,其抗冲性系数相对较大。

表1 抗冲性试验结果

试验土体	试验前 土重/g	试验后 土重/g	冲水量 Q/L	流失量 m/g	抗冲 性C
滑坡体表面	213.5	186.5	2.98	27.0	175.4
泥石流沟道	319.6	301.8	4.52	17.8	271.0
泥石流松散堆积体	463.0	436.2	3.00	26.8	180.0

由于试验仅仅是对地震后松散土体进行的抗冲性试验,因此,其本身没有对比性,根据文献调查,选择试验方法相同的其他地区的抗冲性数据进行对比,分析震后松散土体的抗冲性强度。邹翔等^[8]利用与本试验相同的方法研究了小江流域不同土体利用类

型下的土壤抗冲性,得到土壤类型为褐红壤的抗冲性系数最小,为 220.23,土体利用类型为裸地的抗冲性系数最小,为 382.12。但是二者的抗冲性系数均较震后松散土体的抗冲性系数大。由此可以看出,由于地震的影响,大量的松散快速堆积,在震后两年多时间内土壤微生物对其改造作用弱和胶结性能差,这些松散物质抗冲性差,极易在径流作用下再次起动形成泥石流,因此,震后泥石流的临界雨量较震前明显偏低,且泥石流的规模增大,均与土体的抗冲性能有着直接关系。抗冲性能越差,土体就极易被水流冲刷形成高含沙水流,增加了水流的冲刷和携带能力,并逐渐形成泥石流,同时也促进了泥石流规模的增加。

4 土体结构对泥石流形成的影响

地震后,大量的松散物质堆积在坡面和沟道中,尤其是地震造成的松散土体堆积情况(快速堆积、颗粒混杂)不同于常规的裸地,正由于这种宽级配砾石土的颗粒组成级配很宽,其表现出不同于一般窄级配土体的渗透特性,具有粒径范围大,空隙大,入渗快,对于泥石流的起动极为有利^[9-10]。在大孔隙情况下,雨水能够自由在孔隙中运动,虽然不会引起孔隙水压力的急剧变化,但是其发生的内部侵蚀和在运动过程中对土体内部结构的改变,对土体强度带来不利影响,虽然含水量可能不会达到很高,但是土体内部具有自由水流,这种现象非常有利于土体的液化^[11]。而在松散堆积土体中的黏粒含量,其伴随着自由水(入渗)而在土体中运移,产生内部侵蚀。细颗粒在土体运移过程中会与大颗粒发生相互作用,使得空隙变大,改变内部结构,土体强度降低。

由于受到地震作用,极重灾区土体扰动强烈,随后扰动土体又经过了降雨作用,部分再次发生滑动,形成新的滑坡,部分则起动形成泥石流。这些宽级配松散土体经过细颗粒迁移、土体搬运和堆积,表现出的特征均与降雨入渗有关,降雨入渗关系到松散土体表面产流^[12],而产流后又对松散土体产生侵蚀,土体内部结构和表面特征均会发生明显改变。对于泥石流起动,土体结构是其决定性因素之一^[13],土体结构影响到土体的抗冲和入渗情况,在超强降雨作用下,坡体或沟道均产生超渗产流,在超渗产流作用下,土体内部入渗和表面径流均对土体结构产生作用,表面径流主要是冲刷侵蚀^[12],而土壤入渗则是对土体内部结构产生影响,表现为内部侵蚀和改变土体结构,降低土体稳定性,促使土体失稳起动形成泥石流。随着土体结构的恢复,这种水土耦合机理会逐渐变化,并伴随着泥石流形成临界雨量的变化。

泥石流物源特征对泥石流形成起到关键性作用,其影响到泥石流起动的临界雨量条件和地形条件,并且影响到泥石流体的运动和堆积。颗粒级配决定了松散堆积体结构和连接强度,并且随着准泥石流体的细颗粒含量的不同,其与水分的相互作用以及对水分加入的响应程度差异显著,甚至有着根本性的区别^[14-15]。降雨入渗和表面径流通过内部侵蚀和冲蚀,均可以改变土体细颗粒含量,从而影响到泥石流的起动模式和机理。对于震后泥石流沟道和泥石流堆积土体的黏粒含量甚少,细颗粒在与水的相互作用表现出的水化学作用(膨胀和收缩)在泥石流起动过程中可以忽略^[16],其主要受到水动力条件和孔隙水作用影响,因此开展震后宽级配松散土体泥石流形成机理的研究,应该重视水在土体内部的作用而引起的土体结构变化过程。

试验中土体所表现出来的入渗和抗冲特性,也反映了土体结构和颗粒级配的影响。震后由于土体扰动强烈,大多呈快速堆积,堆积体颗粒级配混杂状态,随后又经过降雨侵蚀搬运等,其结构和颗粒级配均与原状自然风化堆积土体差异较大,因此表现出的特性具有一定差异,影响到泥石流的形成过程和临界条件,造成了震后泥石流的形成特征多样和临界条件明显降低。

5 结论

地震后,由于松散土体的形成条件特殊,大量的崩塌滑坡体在地震动作用下快速堆积在沟道或者坡面上,随后在降雨作用下形成泥石流和新的滑坡,通过分析这些松散土体的物理和力学特征,可以更好地分析震后泥石流的活动特征和形成机理。

松散土体入渗试验表明震后强烈扰动的宽级配松散堆积体土体孔隙大,利于入渗形成土体内部径流,从而造成内部侵蚀使得土体结构遭到破坏,易于失稳液化形成泥石流。土体抗冲试验显示,滑坡表面土体和泥石流堆积区的松散土体抗冲性系数较小,沟道中的松散物质抗冲性系数较大;通过对比分析,震后堆积的松散物体抗冲性系数均较其他土体小,地震形成的松散堆积物,快速堆积,震后经过雨水作用,土体扰动性较强,孔隙度大,降雨对土体的作用程度显著增强,在强降雨作用下土体结构易受到破坏,形成泥石流。因此,地震重灾区泥石流的形成临界条件较震前明显降低,并表现出规模大、频率高的特征,震后几年内泥石流将成为灾区最为严重的次生山地灾害之一。

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010,42(5):10-19.
- [2] 唐川,梁京涛. 汶川震区北川“9·24”暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751-758.
- [3] 徐强. 四川省“8·13”特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010,18(5):596-608.
- [4] 游勇,柳金峰,陈兴长. “5·12”地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征[J]. 山地学报, 2010,28(3):358-366.
- [5] 陈宁生,张军. 泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律[J]. 山地学报, 2001,19(1):169-17.
- [6] 陈晓清,崔鹏,陈杰,等. 云南东川蒋家沟宽级配砾石土原位渗透试验初步研究[J]. 山地学报, 2006, 24(S): 190-197.
- [7] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [8] 邹翔,崔鹏,陈杰,等. 小江流域土壤抗冲性实验研究[J]. 水土保持学报, 2004,18(2):71-73.
- [9] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [10] Reid M E, Lahusen R G, Iverson R M. Debris-flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers [M]//Chen Chenglung. Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. ASCE, 1997:1-11.
- [11] Chen H, Lee C F. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes[J]. Geomorphology, 2003,3(51):269-288.
- [12] Cannon S H, Gartner J E, Wilson R C, et al. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in Southwestern Colorado and Southern California [J]. Geomorphology, 2008, 96 (3):250-269.
- [13] 陈晓清,崔鹏,冯自立,等. 泥石流源地的滑坡转化泥石流起动试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1):106-116.
- [14] Chen Ningsheng, Zhou Wei, Yang Chenglin, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. Geomorphology, 2010,121(3/4):222-230.
- [15] Cui Peng. Studies on condition and mechanism of debris flow initiation by means of experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 1992,37(9):759-763.
- [16] Takahashi T. Debris Flow[M]. Rotterdam: Monograph of IAHR, 1991.
- [17] 吴淑安,蔡强国,靳长兴. 内蒙古东胜地区土壤抗蚀性实验研究[J]. 干旱区资源与环境,1996,10(2):38-45.
- [18] 魏朝富,高明,谢德体,等. 有机肥对紫色水稻土水稳性团聚体的影响[J]. 土壤通报,1995,26(3):114-116.
- [19] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I: Theory and methodology[J]. Eur. J. Soil Sci., 1996,47(4):425-435.
- [20] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [21] 朱立安,李定强,魏秀国,等. 广东省土壤可蚀性现状及影响因素分析[J]. 亚热带水土保持,2007,19(4):4-16.

(上接第35页)

- [13] 高华端,孙泉忠,袁勇. 喀斯特地区不同土地利用类型土壤侵蚀特征研究[J]. 水土保持通报,2010,30(2):92-96.
- [14] 李智广. 水土流失测验与调查[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:77-85.
- [15] 钟壬琳. 江西省土壤抗侵蚀性指标区域分布特征分析[D]. 湖北 武汉:长江科学院,2010.
- [16] Williams J R, Sharply A N. EPIC Erosion Productivity Impact Calculator I: Model documentation[C]. USA: Agricultural Research Service, 1990:20-28.