文章编号：1006-6616（2017）01-0105-10

汶川地震区崩滑堆积体强度现场直剪试验研究

吴瑞安[1,2]，张永双[1,2]，王献礼[3]，姚　鑫[1,2]，杨志华[1,2]，杜国梁[1,2]

（1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室，北京 100081；
3. 四川省川建勘察设计院，成都 610017）

摘　要：以汶川震区漩口一带地震诱发的松散堆积体为研究对象，开展碎石土原状样和重塑样的现场直剪对比试验，探讨不同法向应力、不同粒度组成和不同含水率等条件下碎石土的剪切强度特性。研究结果表明，地质成因和岩土体结构相似、粒度组成不同且级配不良的碎石土的剪切强度特性具有相似性；原状样剪切强度明显高于相同干密度和含水率的重塑样；级配良好的碎石土应变硬化程度略高于级配不良的碎石土，当粒径大于 5 mm 的粗颗粒含量大于 42.9% 时，随粗颗粒含量增加，碎石土的内摩擦角增加，而粘聚力则先减小后增大；抗剪强度指标与含水率呈线性负相关关系，随着含水率增高，碎石土抗剪强度降低，其中粘聚力较内摩擦角下降更明显。综合前人研究和本次试验结果，建议汶川震区类似结构组分碎石土天然状态下的剪切强度指标 c 值取 15 ± 3 kPa，φ 值取 30° ± 2°。

关键词：汶川地震；崩滑堆积体；剪切强度；现场试验；斜坡稳定性

中图分类号：P642.22　　**文献标识码：**A

0　引言

“5.12”汶川地震诱发的大量崩塌滑坡体堆积于斜坡表面及沟谷内，为龙门山区泥石流灾害的发生提供了大量碎石土物源[1~3]，这些崩滑堆积体的物理力学性质直接影响着斜坡稳定性以及转化为泥石流的危险性，因此，获取不同条件下崩滑堆积体的抗剪强度指标对研究斜坡稳定性和泥石流启滑机制具有重要意义。

崩滑堆积体是一种由细粒土、碎石组成的土石混合体，粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%，物质分布不均匀，结构复杂，地质成因多样，多为崩坡积物、冲洪积物、冰川堆积物等[4]。国内外学者对松散崩滑堆积体的结构特征和力学特性开展了一系列试验研究，并取得了较多认识[5~10]。Karma 等[11]采用不排水环剪试验研究了砾石含量对砂砾土力学性质的影响，当砾石含量较少时，砂粒的影响占主导地位，而当砾石超过一定数量时，其对砂砾土力学性质的影响远大于砂粒的影响，认为可能是砾石互相接触形成的结构咬合作用控制了整体的应力-应变特征；Wen 等[12]对三峡库区几个大型滑坡滑带土重塑样进行室内排水剪切试验，认为粒度组成较小的变化都会对剪切结果产生较大的影响，曲率系数、砂粒含量、碎石含量、粗粒与细粒比等颗粒组成指标与土体的残余强度关系密切；周永昆等[13]对重庆地区第四系残坡积层碎石夹粘性土滑坡的滑带土进行室内三轴剪切试验表明，在含水率相同的情况下，内聚力与碎石粒径呈正相关，内摩擦角则相反，抗剪强度随着砾石粒径的变大出现先增大后减小的现象；Taheri 等[14]采用室内多级三轴压缩试验研究了胶结性砾质土的强度和变形特征，认为水平应力对摩尔-库伦破坏包络线有明显的影响；彭东黎等[15]基于大型室内直剪试验对含石量及含水量分别与堆积体边坡崩滑堆积体粘聚力及内摩擦角的关系进行了深入研究，结果表明，崩滑堆积

收稿日期：2016-06-14
基金项目：中国地质调查局项目（1212010914025）；国家十二五科技支撑课题（2011BAK12B09）
作者简介：吴瑞安（1991-），男，博士研究生，主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail：wuruian1991@126.com
通讯作者：张永双（1968-），男，博士，研究员，博士生导师，主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail：zhys100@sohu.com

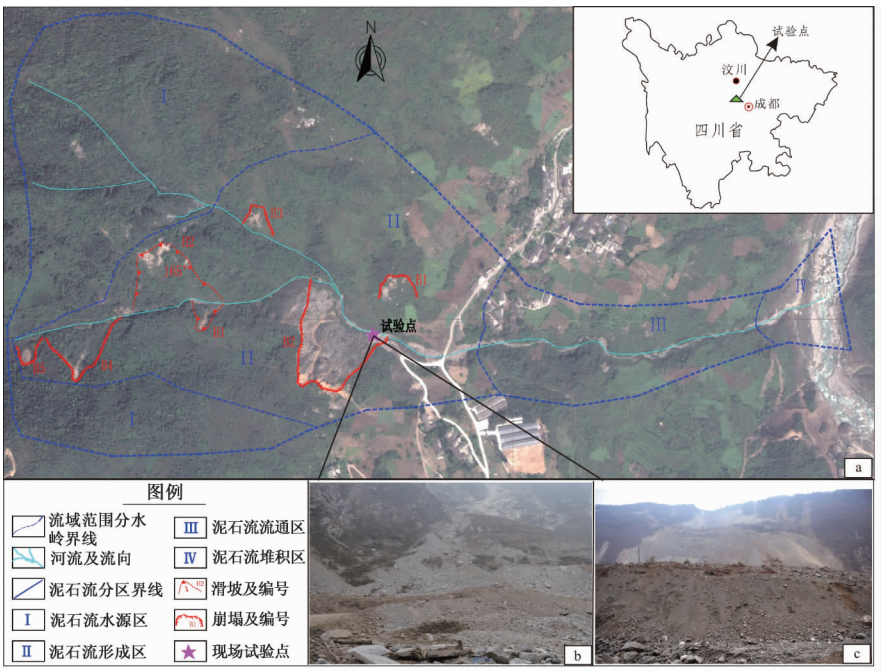
体粘聚力的大小随着含石量的增加，表现出先逐渐增大后减小的趋势，内摩擦角随着含石量的增大表现出逐渐增大的趋势，粘聚力随含水量的增大有一定程度的增大，超过崩滑堆积体中细粒土塑限含水量后逐渐减小。

近年来，在崩滑堆积体及相关滑带土抗剪强度研究方面，原位剪切试验因能有效弱化室内剪切试验对试样粒度和尺寸的严格限制，保持试样结构完整性等而得到快速发展[16~20]。目前针对汶川震区大量崩滑堆积体的现场力学测试成果相对较少，不少地震滑坡稳定性分析和泥石流危险性评价所需的力学参数仍由相似类比法、经验法或小型样品的室内测试等途径获得，得到的参数难免与实际情况有一定出入。本文选取汶川震区漩口一带的地震崩滑堆积体为研究对象，通过原状样和重塑样的现场直剪试验对比，探讨不同法向应力、不同粒度组成和不同含水率等条件下，崩滑堆积体的剪切特性及抗剪强度指标变化特征，为地震扰动区崩滑堆积体边坡稳定性分析及泥石流灾害评价提供参考指标。

1 崩滑堆积体基本特征

1.1 场地基本条件

试验区位于汶川县漩口镇赵家坪村泥石流沟道内，沟域面积约 0.69 km^2，呈西高东低，平均纵坡比达 325.2‰，沟坡陡峻、沟道狭窄，呈“V”形，泥石流沟口为岷江主河道。2008 年 5 月 12 日汶川地震造成沟道中上游岸坡发生多处崩塌、滑坡（见图 1），为泥石流提供了丰富的物源。在强降雨作用下，斜坡中下部及沟道内松散堆积物遭受冲蚀，发生多次泥石流，其中 2012 年 7 月发生的泥石流摧毁沟道中下游的采石场和桥梁，造成多人伤亡。现场直剪试验点选在 B2 崩塌堆积体的前缘（见图 1a）。



a—泥石流沟域特征；b—崩滑体全貌；c—崩滑体前缘特征

图 1 赵家坪泥石流及物源发育特征图

Fig. 1 Development characteristic of Zhaojiaping debris flow and its provenance

1.2 崩滑堆积体宏观特征

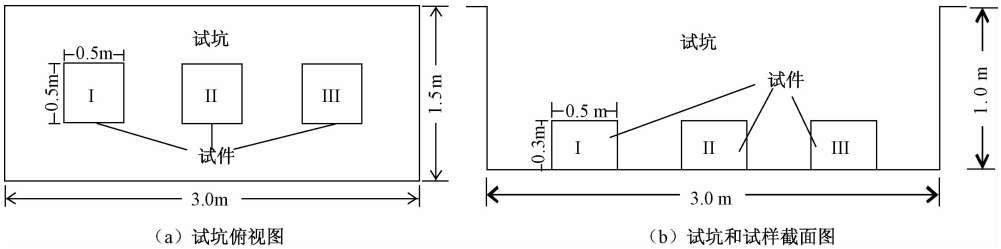
崩滑体前缘的碎石土堆积物局部堵塞沟道，形成小型堰塞体，改变了沟道形态。根据出露的断面，碎石土堆积物层厚一般为 5.0 ~ 8.0 m，自然坡角 25°—35°。遭受泥石流下切、侧蚀后，堆积物前缘普遍发生坍塌，形成高 3.0 ~ 6.0 m、坡度为 45°—50°的陡坎（见图 1b、1c）。崩滑堆积体呈灰色和灰白色，碎块石母岩成分主要为砂岩，夹少量灰岩，结构松散，分选差。

2 现场直剪试验方案

2.1 试验步骤

2.1.1 试样制备

考虑尺寸效应，选取颗粒小于 100 mm 的场地（不含大块石和漂石）开挖 3.0 m×1.5 m×1.0 m（长×宽×深）的试坑（见图 2（a）），在挖至深约 0.7 m 处开始制作试样，试样尺寸 0.5 m×0.5 m×0.3 m（长×宽×深），相邻的试样间距 0.5 m（见图 2（b）），尽量保证试样完整性。



（a）试坑俯视图　　（b）试坑和试样截面图

图 2　试坑与试样特征

Fig. 2　Sketch of test pit and test samples

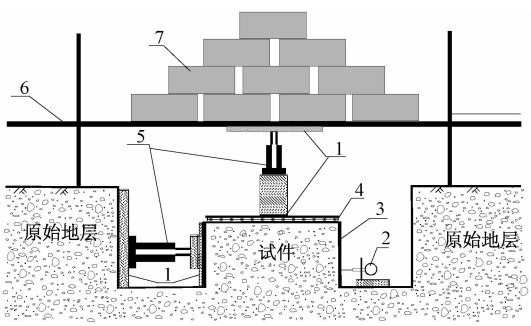
2.1.2　设备安装

①安装剪切盒：将剪切盒安装在试样上，用原土或粉细砂填实试样和剪切盒之间的空隙。

②安装反力支撑系统：采用堆载反压法，即在试坑上方安装钢管结构支架，并堆积大漂石以提供试验所需的支架反力。

③安装试验装置：待装样完毕后，依次在试样顶部平行放置两块钢板夹滚珠排组成的滚动滑板及千斤顶（千斤顶应垂直于试样顶面，且中轴线与试样中轴线保持一致），并确保试样在剪切过程中滚动滑板中的滚珠排及上部钢板不会与剪切盒接触。

在试样的水平顶推面分别放置垫枕及千斤顶，调整好千斤顶的高度并放平，使得千斤顶中轴线位于试样的中轴面内，确保水平剪力正确施加。待垂直和水平方向的千斤顶安装完毕后，安装与千斤顶配套的压力传感器和显示表，及用于测量水平位移和垂直位移的百分表。试验装置见图 3。



1—垫枕；2—百分表；3—剪切盒；4—滑动板；5—千斤顶；6—钢架；7—堆载

图 3　现场直剪试验装置及装置断面示意图

Fig. 3　Cross-section diagram of in-situ experimental devices for direct shear test

2.1.3　固结

根据预定法向应力，分 4 级施加荷载，每施加一级荷载，立即测记垂直变形值；此后每 5 min 测记一次，当 5 min 内垂直变形值不超过 0.05 mm 时，可施加下一级荷载；施加最后一级荷载后，按 5 min、10 min、15 min、15 min……的时间间隔测记垂直变形值，当连续 2 个 15 min 垂直变形累计值不超过 0.05 mm 时，即认为垂直变形已经稳定，可施加剪切荷载。

2.1.4　剪切

采用固结快剪方式进行试验，待试样固结完毕后，开始缓慢摇动千斤顶施加水平剪力，控制每 15～20 s 内的剪切位移在 2 mm 左右，尽量保持剪切过程中垂直荷载相对稳定。取剪切试验曲线的峰值或随剪切位移增加而无明显变化时的剪应力，若无明显峰值，取剪切位移为试样尺寸的 1/10 时对应的剪应力为其抗剪强度值。

2.1.5　试验后的样品观测

拆卸试验设备，移除上部剪坏的岩土体以便观察崩滑堆积体的三维破坏滑面，观察并记录剪切带附近粒度组成及破坏情况。

2.2　对比试验设置

为了研究颗粒级配和含水率相同条件下原状样（第 1 组）和重塑样（第 2 组）的剪切强度特性差异，对比分析相同级配不同含水率条件下重塑样（第 5、6、7 组）的剪切特性，以及相同含水率不同级配条件下重塑样（第 2、3、4、5 组）的剪切特性，设置了多组剪切试验，即 1 组原状样和 6 组重塑样，具体参数见表 1、表 2。每组试验分别有 3 个试样，同一组内的不同试样分别施加不同的法向压力，每组试样的级配、含水率、密度等取平均值。第 1 组的 3 个原状样剪切结束后，对其进行现场颗

分试验，取其平均值作级配分析（见表 1），根据《建筑地基基础设计规范（GB 50007—2011）》，将其定名为角砾土。根据不同试验目的，制备相应含水率和颗粒级配条件的重塑样来进行剪切试验。需要说明的是，在制备各组重塑样时，是将剪切面以上破坏了的崩滑堆积体连带剪切面以下 5 cm 基座范围内的崩滑堆积体一起制备的，以确保剪切破坏面从重塑试样体内穿过。

表 1 重塑土样颗粒组成

Table 1 Particles of remolded soil samples

编号	颗粒组成/%								
	<0.075 mm	1.25~0.075 mm	2.5~1.25 mm	5.0~2.5 mm	10.0~5.0 mm	20.0~10.0 mm	26.5~20.0 mm	50~26.5 mm	50~100 mm
第 2 组	10.4	11.1	10.2	10.7	11.2	11.8	11.1	11.3	12.2
第 3 组	8.6	9.1	8.3	8.8	9.3	9.8	9.2	26.7	10.2
第 4 组	7.4	7.8	21.9	7.5	7.9	8.4	7.8	22.7	8.6
第 5 组	28.4	6.0	16.9	5.8	6.1	6.5	6.1	17.5	6.7

表 2 崩滑堆积体大型直剪试验计算结果

Table 2 Calculation results of large direct shear test of gravel soil

编号	密度	含水率/%	P_5/%	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
第 1 组	2.12	15.8	57.6	19.4	32.8
第 2 组	2.12	15.8	57.6	14.7	31.2
第 3 组	1.95	15.8	65.2	16.7	31.5
第 4 组	1.97	15.8	55.4	17.0	30.9
第 5 组	1.92	15.8	42.9	20.4	30.3
第 6 组	2.01	25.0	42.9	14.2	29.0
第 7 组	2.05	30.0	42.9	12.2	27.9

现场筛分发现，第 1、2、5、6、7 组试样小于 0.075 mm 的颗粒超过试样总质量 10%，在室内补充进行了 0.075 mm 以下的颗分试验。计算各组试样的颗粒不均匀系数（C_u）和曲率系数（C_c）（见表 3），结果表明，只有第 4 组试样的级配良好，且 C_c值接近 1。总体来说，试验点的崩滑堆积体颗粒级配不良。郭庆国[21]建议将 5 mm 作为砂和砾的分界粒径，在筛分结束后分组统计了粗粒含量 *P*5（*P*5 表示粒径大于 5 mm 粗粒部分质量占总质量的百分比），用来探讨粗粒含量对崩滑堆积体剪切强度特性的影响。

表 3 崩滑堆积体的粒径分布特征指标

Table 3 Particle size distribution index of gravel soil

编号	d10/mm	d30/mm	d60/mm	C_u	C_c	级配评价
第 2 组	0.05	2.1	16	320	5.51	不良
第 3 组	0.13	3.2	25	192	3.15	不良
第 4 组	0.2	2.0	19.5	97.5	1.03	良好
第 5 组	0.015	0.2	7.0	466.7	0.38	不良

注：C_u—不均匀系数；C_c—曲率系数；d_{10}—小于某粒径的土粒质量累积百分数为 10% 的相应粒径，也称有效粒径。d_{30}—小于某粒径的土粒质量累积百分数为 30% 的相应粒径；d_{60}—小于某粒径的土粒质量累积百分数为 60% 的相应粒径，也称限定粒径。

3 原状样与重塑样对比试验

3.1 原状样与重塑样剪切特性分析

根据每组试样在不同法向应力下的抗剪强度绘制崩滑堆积体剪切强度包络线（见图 4），采用回归直线方程分析得到相应的剪切强度指标 c，φ 值（见表 2）。

对比第 1 组原状样与第 2 组重塑样的剪切试验结果（见图 5）可知，原状样和相同干密度和含水率重塑样的剪切位移-剪切应力曲线形态相似，均为弱应变硬化型，无明显峰值强度。但原状样的剪切强度明显高于重塑样，说明崩滑堆积体虽然胶结程度低，但经过长时间的固结压密作用，碎石和土粒之间逐渐嵌紧咬合具有相对密实稳定的结构，从而具有一定的结构强度，而重塑样破坏了岩土体原有结构的完整性，其剪切强度有所降低。

根据崩滑堆积体现场大型直剪试验结果，绘制不同法向应力条件下各组重塑样的剪切应力-位移曲线（见图 6），分析发现，各组重塑样的剪切应力-位移曲线整体呈现 3 个不同的发展阶段：①线弹性阶段，曲线近似为直线，剪应力随着剪切位移大致呈线性变化；②初始屈服阶段，曲线由陡峭变平缓，崩滑堆积体中作为充填成分的土体首先达到屈服；③应变硬化阶段，崩滑堆积体中充填的土体遭受破坏，导致原来没有接触的碎石逐渐接触，依靠碎块石之间的咬合和摩擦，崩滑堆积体的强度缓慢增加，这一阶段应力值增幅很小，而位移增幅较大。从图 6 中还可以看出，各组重塑样的剪切曲线均无明显的峰值抗剪强度，呈现出弱硬化特征；剪切曲线在初始屈服阶段上下

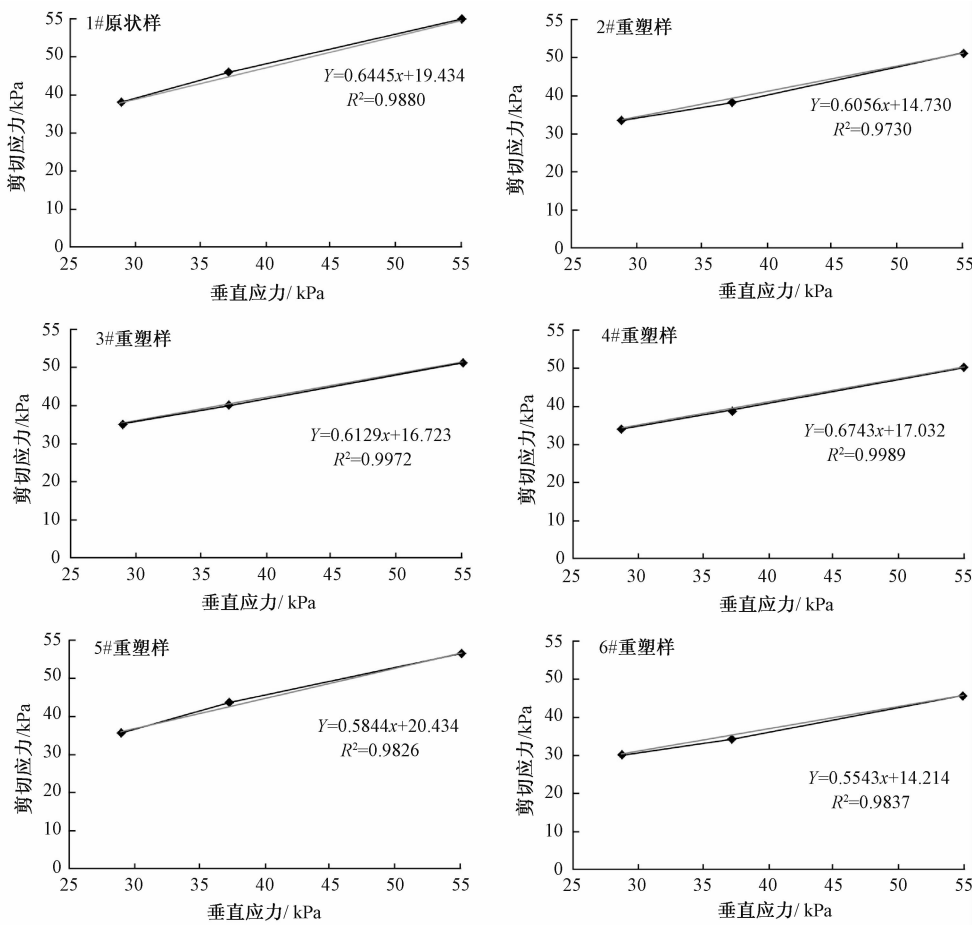


图 4　崩滑堆积体试样剪切强度包络线

Fig. 4　Shear strength envelope of gravel soil samples

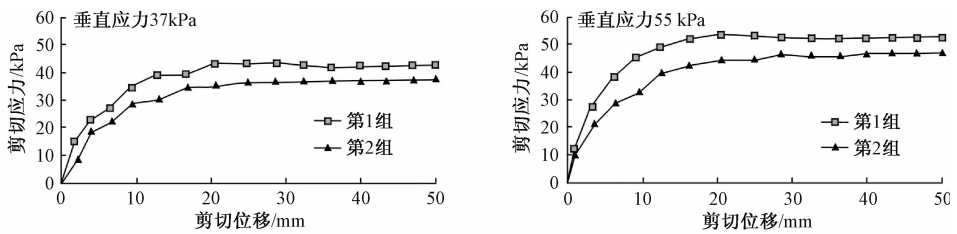


图 5　原状样与重塑样剪切应力-位移关系曲线对比图

Fig. 5　Comparison of the curves of shear stress-shear displacement between undisturbed and remolded samples

波动，与剪切过程中碎石翻滚、滑移甚至破碎重排导致剪切面变化等有关。

3.2　不同粒度组成的重塑样抗剪强度分析

第 2、3、4、5 组重塑样的含水率相同，粒度组成不同，其中只有第 4 组重塑样的级配良好。对比分析几组试样在相同法向应力条件下的剪切应力-位移曲线（见图 7），同一法向应力下，各组重塑样的剪切曲线均呈现弱应变硬化特征，曲线整体形态基本相似。这说明，尽管崩滑堆积体不同粒组的颗粒含量不同，但由于地质成因和岩土体结构相似，其剪切特性和剪切强度具有相似性。第 4 组重塑样的应变硬化程度略高于其他试样，主要由于级配良好的崩滑堆积体具有更低的孔隙比和更高的密实度，因而粗颗粒之间咬合更充分，所受的约束更大，在剪切过程中崩滑堆积体的整体密度增大更快，抵抗剪切破坏的能力增长迅速，表现出更明显的应变硬化特征。

单从不均匀系数与崩滑堆积体的内摩擦角、粘聚力之间的关系分析，很难得出颗粒粒度组成对崩滑堆积体剪切强度的影响，为此分析了粗粒

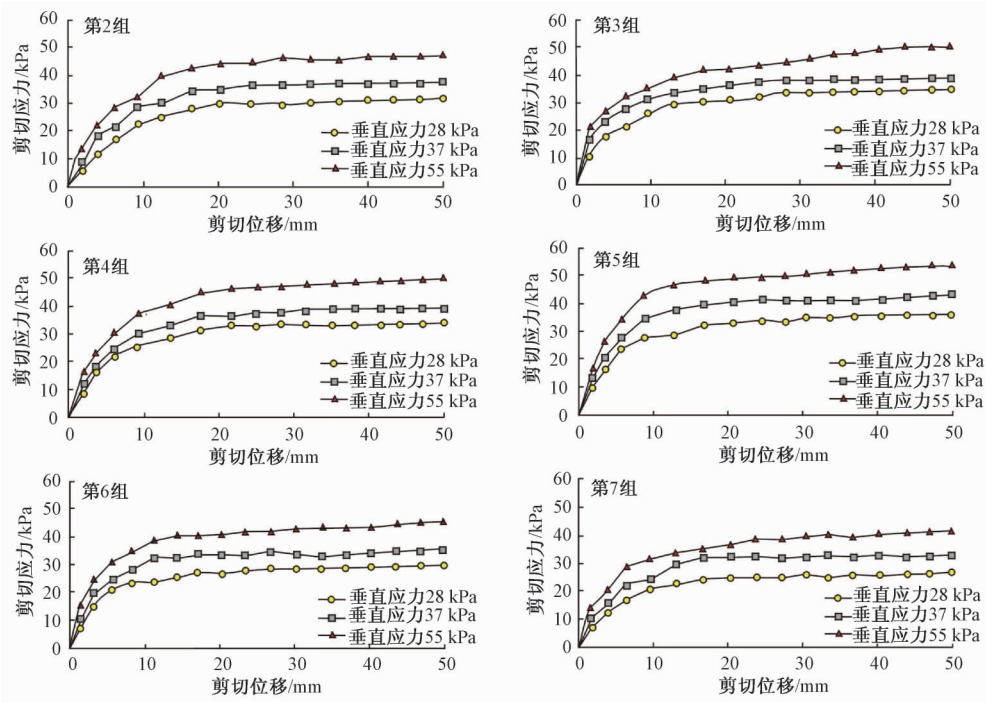


图 6 崩滑堆积体剪切应力-位移关系曲线

Fig. 6 The curves of shear stress-shear displacement of gravel soil

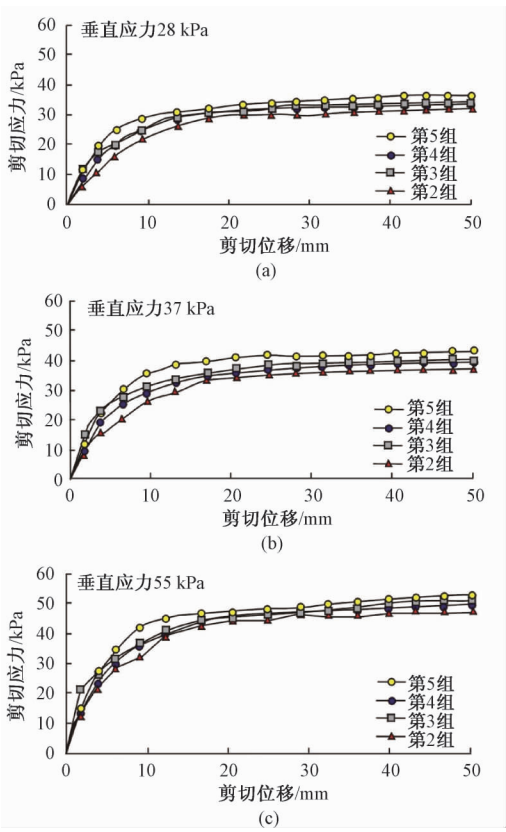


图 7 不同粒度组成的崩滑堆积体剪切应力-位移曲线

Fig. 7 The curves of shear stress-shear displacement of gravel soil with different size composition

含量（P_5）对崩滑堆积体剪切强度的影响。从第2、3、4、5组重塑样的 P_5 与其内摩擦角及粘聚力之间的关系曲线可以看出，随着粗颗粒含量增加，崩滑堆积体的内摩擦角增加，粘聚力则先减小后增大（见图8），说明存在一个粗粒含量临界值使得崩滑堆积体的粘聚力最小。

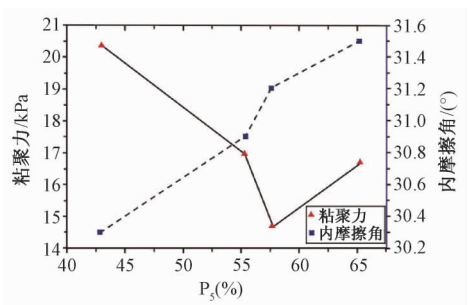


图 8 剪切强度指标与 P_5 关系

Fig. 8 Relationship of shear strength index and P_5

由于试验施加的法向应力较低，在试样剪切过程中，不能有效限制岩土体的体胀，加上几组试样的粗粒含量变化幅度较小，粗粒接触咬合程度变化不大，其引起的崩滑堆积体内摩擦角变化值因而较小，但粘聚力的变化大，故出现了第5组重塑样粗粒含量最低而剪切强度最高的现象。

3.3 不同含水率的重塑样抗剪强度分析

第5、6、7三组重塑样含水率不同，粒度组成

相同，对比分析这三组重塑样的剪切应力-位移关系曲线（见图 9）发现，试样均呈现出弱应变硬化特征，没有明显的峰值强度出现。崩滑堆积体抗剪强度受含水率的影响较大，在相同法向应力下，当含水率较低时，土体的结构强度较大，土体破坏需要克服颗粒间较强粘结作用。随着含水率的增大，土体结构类型发生转变，水对土颗粒润滑、软化作用明显，使得土颗粒间的阻力减小，颗粒间的粘结减弱，对应的土体刚度减小，故抗剪切强度也减小。

同时可以看出，剪切曲线形态受含水率的影响较大，主要表现为低含水率曲线波动更大。这主要是因为含水率较低时，少量的自由水对土颗粒表面润滑作用较弱，颗粒间摩擦咬合力较大，对崩滑堆积体的抗剪强度影响较大。随着含水率的增大，颗粒表面水膜厚度增加，相对丰富的自由水对土颗粒表面润滑作用增强，弱化了颗粒间摩擦咬合作用，因而剪切应力-位移曲线相对平滑。

通过对抗剪强度指标与含水率进行线性拟合（见图 10），相关系数 $R^2 \approx 1$，具有较高的可信度。分析曲线可知，在含水率大于 15.8% 条件下，抗剪强度指标与含水率呈线性负相关关系，且粘聚力较内摩擦角下降更明显。

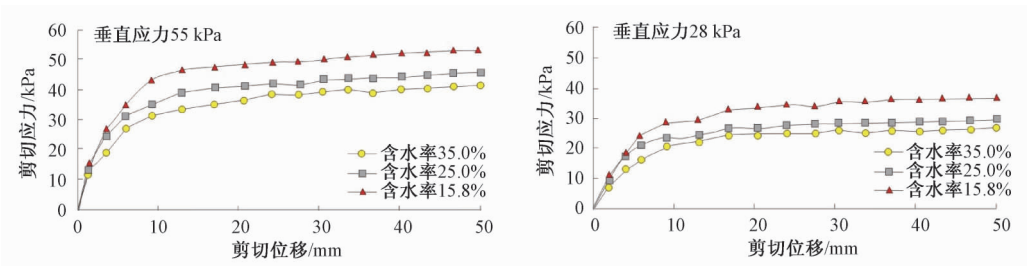


图 9　不同含水率崩滑堆积体剪切应力-位移曲线

Fig. 9　The curves of shear stress-shear displacement of gravel soil with different moisture

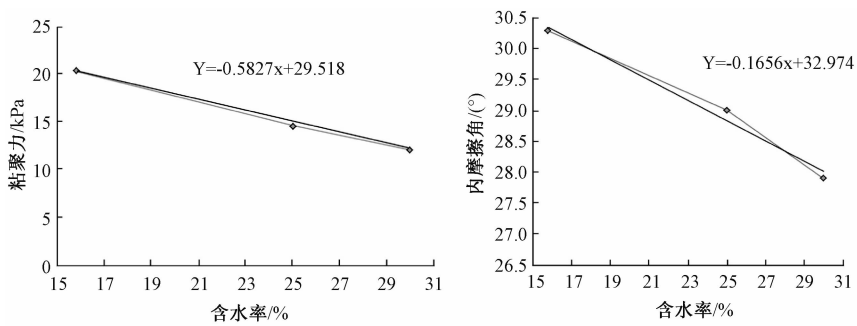


图 10　崩滑堆积体粘聚力和内摩擦角与含水率之间的关系

Fig. 10　Relationship of cohesion and internal friction angle and moisture of gravel soil

3.4　讨论

不同学者通过剪切试验得到关于崩滑堆积体粘聚力与含石量之间的关系并不相同。徐文杰等[22]、董辉等[23]认为，含石量增加时崩滑堆积体粘聚力减小，主要由于细粒成分减少引起的粘聚力衰减值远大于崩滑堆积体密度增加引起的粘聚力增加值；彭东黎等[15]通过大型室内直剪试验得出了崩滑堆积体粘聚力的大小随含石量（粒径大于 5 mm）增加表现出先逐渐增大后减小的趋势，并认为主要是由于含石量小于 20% ~40% 时，因含石量增加引起的土体密度增大产生的粘聚力值增大部分大于因细粒土减少引起的粘聚力衰减部分而造成；而魏厚振等[24]采用室内现场两用大型直剪仪对蒋家沟砾石土进行了剪切试验，发现粗粒（粒径大于5 mm）含量小于 48.7% 时，试样粘聚力值随着粗粒含量增大而减小，粗粒含量大于 48.7% 时，c 值随粗粒含量增大而减小，并认为在粗粒含量小于 48.7% 时，粗粒部分未充分接触咬合，c 值主要由细粒部分的粘聚力提供，试样整体平均密度一致时，P_5 含量增加使得细粒成分密度变小，故 c 值随 P_5 增加而减小，而当 P_5 大于 48.7% 时，粗粒部分能接触充分从而提供更大的咬合力，使得 c 值随 P_5 增加而增大。本文基于试验结果分析，得到崩滑堆积体粘聚力随 P_5 含量增加呈先减小后增大的趋势。不同的研究结果表明，崩滑堆积体的粘聚力不仅与含水量、含石量有关，

可能还与崩滑堆积体颗粒级配、干密度、密实程度以及粗颗粒的表面形态等有密切关系。崩滑堆积体的本构关系复杂，结构不均一，与细粒土、粗颗粒的剪切性质不同，故而仅从崩滑堆积体的含水量、含石量、颗粒级配、干密度等表观物性去探讨粘聚力的变化特征显然不够，还应从崩滑堆积体的微观结构等方面进行深入研究。

在降雨作用下，崩滑堆积体斜坡容易发生失稳滑动，甚至转化成泥石流。准确获取不同含水条件下崩滑堆积体的剪切强度，可以为崩滑堆积体斜坡稳定性评价提供依据。由于崩滑堆积体结构复杂，有关规范均未给出其抗剪强度指标建议值，而原位大尺寸剪切试验是获取岩土体力学参数的有效手段，通过分析不同含石量、不同含水率的崩滑堆积体剪切特征，能为该地区类似崩滑堆积体抗剪强度参数选用提供参考。综合以往研究成果和本次现场试验，建议对该地区类似地质成因和结构组分的崩滑堆积体天然状态下的剪切强度指标 c 值取 15 ±3 kPa，φ 值取 30° ±2°；当含水量超过 30% 时，根据建议值折减后选用。

4 结论

崩滑堆积体剪切应力-位移曲线特征显示出松散堆积体变形破坏的 3 个不同阶段，即线弹性阶段、初始屈服阶段及应变硬化阶段。

在相同粒度组成条件下，原状崩滑堆积体的剪切强度明显高于相同干密度和含水率的重塑样。

漩口一带的松散堆积体属级配不良的崩滑堆积体，当大于 5 mm 的颗粒含量大于 42.9% 时，随粗颗粒含量增加，崩滑堆积体的内摩擦角增加，而粘聚力则先减小后增大。

同一法向应力下，含水率低的崩滑堆积体剪切应力-位移曲线形态波动大，当含水率大于 15.8% 时，抗剪强度指标与含水率呈线性负相关关系，其中粘聚力较内摩擦角下降明显。

地质成因和岩土体结构相似、粒度组成不同且级配不良的崩滑堆积体剪切特性具有相似性，建议对汶川震区类似结构组分崩滑堆积体天然状态下的剪切强度指标 c 值取 15 ±3 kPa，φ 值取 30° ±2°。

参 考 文 献

[1] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (2): 153 ~ 166.
YIN Yue-ping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (2): 153 ~ 166.

[2] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (2): 145 ~ 151.
HUANG Run-qiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (2): 145 ~ 151.

[3] Zhang Y S, Guo C B, Lan H X, et al. Reactivation mechanism of ancient giant landslides in the tectonically active zone: a case study in Southwest China [J]. Environmental Earth Science, 2015, 74: 1719 ~ 1729.

[4] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (6): 1270 ~ 1277.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of Longpan in Tiger-leaping Gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (6): 1270 ~ 1277.

[5] Li X, Liao Q L, He J M. In-situ tests and stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges Reservoir area [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (3): 1 ~ 5.

[6] Vallejo L E, Mawbyr, et al. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 125 ~ 136.

[7] 张永双, 曲永新, 王献礼, 等. 中国西南山区第四纪冰川堆积物的工程地质分类探讨 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (5): 581 ~ 589.
ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin, WANG Xian-li, et al. On the engineering geological classification of quaternary glacial deposits in southwestern mountain area of China [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (5): 581 ~ 589.

[8] 胡瑞林, 刘衡秋, 谭儒蛟, 等. 内外动力地质作用与斜坡稳定性—以虎跳峡地区为例 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.
HU Rui-lin, LIU Heng-qiu, TAN Ru-jiao, et al. Coupling effect of endogenic and exogenic geological processes and slope stability-Case study from Tiger-leaping Gorge area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.

[9] 周敢. 土石混合填料现场直剪试验研究 [J]. 中外公路, 2011, 31 (5): 235 ~ 239.
ZHOU Gan. On-site direct shear test of rock and soil mixture [J]. Domestic and Foreign Road, 2011, 31 (5): 235 ~ 239.

[10] 郭喜峰，晏鄂川，刘洋. 三峡库区碎石土滑坡体抗剪强度研究［J］. 重庆交通大学学报：自然科学版，2015，34（1）：38～71.
GUO Xi-feng，YAN E-chuan，LIU Yang. Shear Strength of Gravel Soil Landslide in the Three Gorges Reservoir Zone［J］. Journal of Chongqing Jiaotong University：Natural Science，2015，34（1）：38～71.

[11] Karma K，Ikuo T，Roland P O，et al. Undrained torsional shear tests on gravelly soils［J］. Landslides，2004，1：185～194.

[12] Wen B P，Aydin A，Duzgoren-Aydin N S. Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area，China［J］. Engineering Geology，2007，93：82～98.

[13] 周永昆. 滑带土的力学行为特性试验研究［D］. 重庆：重庆大学. 2010.
ZHOU Yong-kun. Study of mechanics behavior and properties of landslide soil via laboratory test［D］. Chongqing：Chongqing University，2010.

[14] Taheri A，Saski Y，Tatsuoka F，et al. Strength and deformation characteristics of cement-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression［J］. Soils and Foundations，2012，52（1）：126～145.

[15] 彭东黎，李志勇. 堆积体边坡碎石土抗剪强度试验研究［J］. 公路工程，2014，39（2）：254～257.
PENG Dong-li，LI Zhi-yong. Experimental study on shear strength of rock-soil aggregates in accumulation slope［J］. Highway Engineering，2014，39（2）：254～257.

[16] 徐文杰，胡瑞林. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究［J］. 岩石力学与工程学报，2008，27（5）：996～1007.
XU Wen-jie，HU Rui-lin. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008，27（5）：996～1007.

[17] 许建聪，尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究［J］. 岩土力学，2008，29（1）：106～118.
XU Jian-cong，SHANG Yue-quan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall［J］. Rock and Soil Mechanics，2008，29（1）：106～118.

[18] 宋丙辉，谌文武，吴玮江，等. 锁儿头滑坡滑带土不同含水率大剪试验研究［J］. 岩土力学，2012，33（S2）：77～84.
SONG Bing-hui，CHEN Wen-wu，WU Wei-jiang，et al. Experimental study of large scale direct shear test of sliding zone soil of Suoertou landslide with different moisture contents［J］. Rock and Soil Mechanics，2012，33（S2）：77～84.

[19] 安维忠，李永祥，刘生奎. 输电线路戈壁碎石土地基现场直剪试验［J］. 电力建设，2010，31（5）：66～69.
AN Wei-zhong，LI Yong-xiang，LIU Sheng-kui. Field direct shearing tests of Gobi gravel soil in Northwest for 750 kV transmission line engineering［J］. Electric Power Construction，2010，31（5）：66～69.

[20] 李晓，廖秋林，赫建明，等. 土石混合体力学特性的原位试验研究［J］. 岩石力学与工程学报，2007，26（12）：2377～2384.
LI Xiao，LIAO Qiu-lin，HE Jian-ming，et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2007，26（12）：2377～2384.

[21] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用［M］. 郑州：黄河水利出版社，1999.
GUO Qing-guo. The engineering properties and application of coarse grained soil［M］. Zhengzhou：The yellow river conservancy press，1999.

[22] 徐文杰，张海洋. 土石混合体研究现状及发展趋势［J］. 水利水电科技进展，2013，33（1）：80～88.
XU Wen-jie，ZHANG Hai-yang. Research status and development trend of soil-rock mixture［J］. Advances in Science and Technology of Water Resources，2013，33（1）：80～88.

[23] 董辉，陈玺文，傅鹤林等. 堆积碎石土剪切特性的三轴试验［J］. 长安大学学报（自然科学版），2015，35（2）：59～66.
DONG Hui，CHEN Xi-wen，FU He-lin，et al. Triaxlal test of shear properties of eluvial gravel［J］. Journal of Chang' an University（Natural Science Edition），2015，35（2）：59～66.

[24] 魏厚振，汪稔，胡明鉴，等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征［J］. 岩土力学，2008，29（1）：48～52.
WEI Hou-zhen，WANG Ren，HU Ming-jian，et al. Strength behavior of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine［J］. Rock and Soil Mechanics，2008，29（1）：48～52.

IN-SITU DIRECT SHEARING TEST ON LANDSLIDE ACCUMULATION BODY INTENSITY OF WENCHUAN EARTHQUAKE REGION

WU Rui-an[1,2], ZHANG Yong-shuang[1,2], WANG Xian-li[3],
YAO Xin[1,2], YANG Zhi-hua[1,2], DU Guo-liang[1,2]

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China*;
2. *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resourses, Beijing* 100081, *China*;
3. *Sichuan Provincial Chuanjian Investigation and Design Institute, Chengdu* 610017, *China*)

Abstract: In this paper, the earthquake-induced loose sediments near Xuankou, Wenchuan County, Sichuan province are selected to conduct the in-situ direct shear tests of undisturbed gravel soil and remolded soil sample direct shear tests with different situations to explore the shear properties of gravel soils under different vertical pressure, particle size composition and moisture. The study results show that (1) Gravel soils which have similar geological genesis, similar rock mass structure, different size composition and poor gradation have similar shear properties and shear strength. (2) The shear strength of undisturbed gravel soil samples is significantly higher than remolded samples with the same dry density and moisture. (3) Strain hardening strength of well-graded gravel soils is slightly higher than bad-graded gravel soil, when the content of coarse particle whose size is greater than 5 mm is more than 42.9%, friction angle increases with increment of coarse-grained contents, while cohesion decreases firstly and then increases. (4) When moisture content is more than 15.8%, there is a negative correlation between shear strength indexes and moisture content, with gradual increase of moisture, the shear strength of gravel soil will gradually reduce, among which the decrease of cohesion is more remarkable than internal friction angle. Considering others' research and experimental results, we suggest that the gravel soils having similar structure components in Wenchuan earthquake area can select the shear strength indexes c of 15 ±3kPa and Phi of 30° ±2°.

Key words: Wenchuan earthquake; landslide accumulation body; shear strength; in-situ test; slope stability