

汶川地震堰塞体及相关力学问题*

孙其诚^{1, †} 王光谦¹ 胡凯衡²

(1 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084)

(2 中国科学院部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

摘要 2008年5月12日,爆发了里氏8.0级汶川特大地震,120多秒内,形成了南起康定,北至青川,呈北东—南西走向的长约300km、宽约30km的破裂带,当时山崩地裂,秀美河山被疯狂撕扯,无数生灵瞬间淹没于碎石瓦砾之中。由于四川复杂的地质地貌条件和丰沛水系,这次地震诱发了大量的崩塌、滑坡、泥石流和堰塞湖等山地灾害。极震区有明显危害和威胁的堰塞湖34个,其中唐家山堰塞湖为震后最大的山地次生灾害,严重威胁下游沿岸城镇、村庄、水利水电设施和100余万人生命财产安全,是震后抢险的重中之重。清华大学水利水电工程系部分师生不畏艰险,始终奋战在抗震抢险第一线,为唐家山堰塞湖抢险提供水文预报和决策咨询服务等,对肖家桥堰塞湖进行现场踏勘,获得了翔实的第一手资料。目前正在深入开展有关堰塞体的几个具有挑战性的关键力学问题研究。首先,堰塞体形成机制问题,亦即地震诱发的崩塌和巨型滑坡填充河道的动力过程;其次,堰塞体的溃决机制问题,除了关心泻流时下游洪峰流量外,更关注堰塞体的冲刷过程,以及砾石、块石等大粒径滑坡堆积物构成的堰塞体蠕变和变形机理等。这些问题正是侧重机理研究的颗粒物质力学的主要研究内容之一。由于堰塞体颗粒组成复杂,基于唯象描述的土力学和散体力学显然不适合堰塞体力学行为的基础研究。

关键词 汶川地震 山地灾害 堰塞体 颗粒物质

Quake lakes in the Wenchuan Earthquake and challenging mechanical problems

SUN Qi-Cheng^{1, †} WANG Guang-Qian¹ HU Kai-Heng²

(1 State Key Laboratory for Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract The Great Wenchuan Earthquake which measured 8.0 Ms on the Richter scale occurred on May 12, 2008 in Sichuan province of China. Seismic activities were concentrated in the mid-fracture of the Longmenshan fault (known as Yingxiu-Beichuan fracture). Starting from the epicenter at Wenchuan, the rupture propagated at an average speed of 3.1 km/s, 49° toward the northeast, rupturing a total of about 300 km. Very disastrous damages resulted. As of May 27, 2008, 34 large quake lakes had formed in nine earthquake-affected counties, the most precarious being that located in the extremely difficult terrain of Mount Tangjiashan. Faculty and graduate students from the State Key Laboratory for Hydrosience and Engineering in Tsinghua University not only took part in rescue activities but also conducted site surveys in the Xiaojiaqiao and Tangjiashan lake areas, collecting first-hand data on site. Quake lakes present challenging questions of mechanics. First, how are dams formed during the processes of massive landslides, rockfills and debris flows, and secondly how strong are they? Dams may be regarded as a loose packing of granular materials on a huge scale, exhibiting quite different properties from common materials, which is exactly the key issue in the study of granular mechanics.

Keywords Wenchuan Earthquake, mountain hazards, quake lake, granular matter

* 国家自然科学基金(批准号 50679032)、国家重点基础研究发展计划(批准号 2007CB714100)资助项目
2008-09-24 收到

† 通讯联系人. Email: qcsun@tsinghua.edu.cn

1 汶川特大地震简况

2008年5月12日是全世界人民应该铭记的日子,下午2时28分,四川省汶川县爆发了里氏8.0级汶川特大地震。自震源映秀镇起,向东北方向发生单侧破裂,在120多秒的时间内,形成南起康定,北至汶川,呈北东—南西走向长约300km、宽约30km的破裂带。破裂带所到之处山崩地裂,秀美河山被疯狂撕扯,无数生灵瞬间淹没于碎石瓦砾之中。全国哀恸,举世动容!面对前所未有的灾难,中华民族万众一心,共同抗击灾难,重建美好家园。清华大学水利工程系部分师生不畏艰险,始终奋战在抗震抢险第一线,先后投入到紫坪铺面板堆石坝震后风险评估、肖家桥堰塞湖现场踏勘以及唐家山堰塞湖抢险等工作中,提供水文预报和决策咨询,受到了水利部的表彰。

这次地震震级高,烈度大,涉及的范围广,救灾十分困难,仅重灾区就有13万平方公里,涉及两千万人口,是我国30多年以来最严重的地震灾害。汶川地震发生于龙门山断裂带上,它是巨大的复合型构造带,处于活动强烈的青藏高原块体与活动较弱的四川盆地块体的交界面,大致分为3条主要的断裂带:后山断裂、中央断裂和前山断裂。龙门山断裂带形成于中生代,它自新生代以来,在印度板块与欧亚板块强烈碰撞而产生的强大推挤力作用下,发生大规模的逆掩推覆构造变形,使龙门山继续抬升,山前强烈拗陷,构造应力能量长期积累,最终于5月12日沿龙门山中央断裂的北川—映秀段突然集中释放,造成汶川特大地震,如图1所示^[1]。

由于四川特有的地质构造和丰沛水系,这次地震诱发了大量崩塌、滑坡、泥石流和堰塞湖等山地灾害。极震区有明显危害和威胁的堰塞湖34个,以唐家山堰塞湖为最,成为震后最大的山地次生灾害,严重威胁下游沿岸城镇、村庄、水利水电设施和100余万人的生命财产安全,是震后抢险的重中之重。同时堰塞体给我们提出了挑战性的力学问题:(1)山体崩塌和巨型滑坡中岩石块体和土体如何沿山体流动?滑入河水后在水流作用下的重力沉积过程又是如何?这就涉及颗粒物质的流动问题和液固耦合作用等问题;(2)堰塞体形成后力学稳定性如何?亦即会不会发生溃决?如何溃决?在现有条件下大约何时发生溃决?这就涉及到砾石、块石等大粒径滑坡堆积物的堰塞体蠕变性能、变形机理等和堰塞体的

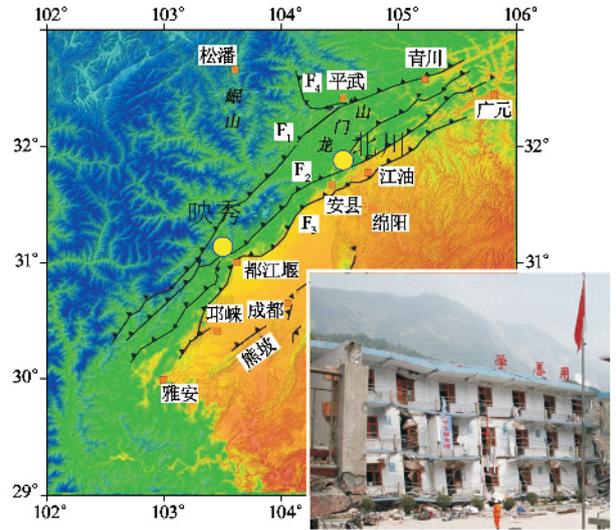


图1 龙门山的三条主要断裂带,在中央断裂(F_2)的北川—映秀段爆发了汶川特大地震。 F_1 为汶川—茂汶断裂, F_2 为映秀—北川断裂, F_3 为安县—灌县断裂。内插图是北川职业中学教学楼。地震造成该楼第一层塌陷地下,其余楼层严重扭曲

泻流冲刷过程等。这些问题都是侧重机理研究的颗粒物质力学的主要研究内容之一。我们已经对肖家桥堰塞湖进行了现场踏勘,掌握了宝贵的现场资料,比如测定了堆积物级配、拍摄了坝体泻流冲刷过程、测定了破坏后的山体坡面及植被等,为开展上述堰塞体力学问题的研究提供了翔实的数据。

2 堰塞体的形成与危害

我国西部地区地质构造运动和地表动力过程最为强烈,对内外营力作用最为敏感,容易频繁引发大量次生山地灾害,比如崩塌、滑坡、泥石流和堰塞湖等。据不完全统计,四川省是我国产生地震堰塞湖最多的省份。这首先是因为四川大部分地区处于强地震带上,属于高烈度地震频发区域,其次境内山壑纵横、河流下切作用强烈、河床与两侧山体高差较大且两侧山体间距离较近,再次径流量较大的沱江、涪江、岷江和嘉陵江等水系穿越山区,具备了这些孕育堰塞湖的背景条件,在地震荷载作用下,岩体应力易于释放,产生众多大规模滑坡、崩塌和泥石流。这些灾害产生的松散岩体堆积在河道中,拦截河水形成堰塞湖,一旦堰塞体溃决,则会在下游造成洪水灾害。在这次高烈度的汶川地震中,诱发的山地灾害很明显地形成山地灾害链:崩塌、滑坡→(泥石流→)堰塞湖→溃决洪水,其中堰塞湖溃决成为震后最大的次生灾害威胁,严重危害下游沿岸江油和绵阳等

城镇、村庄、水利水电设施和 100 余万人生命财产安全,是震后抢险的重中之重^[2]。

对堰塞体分布与 4.0 级以上地震分布叠加分析发现,堰塞体基本上沿破裂带密集分布,在同一流域上的堰塞体呈梯级排列。汶川地震极震区内有明显危害和威胁的堰塞湖 34 个,其中涪江流域中的堰塞体最多,占总数的 57% 左右。比如涪江支流湔江右岸山体发生巨型滑坡(距北川县城上游约 6 公里处),阻塞了湔江,形成唐家山堰塞湖,是这次地震诱发的最大堰塞湖。它的平面形状为长条形,顺河长约 803m,横河宽最大约 611m,汇水面积约 $3.6 \times 10^5 \text{m}^2$,坝高 82—124m,坝顶面宽约 300m,体积约 $2.037 \times 10^7 \text{m}^3$ 。唐家山堰塞湖库容约 $3 \times 10^8 \text{m}^3$,日入湖水量约 $7 \times 10^6 \text{m}^3$,水位每天上涨 1m 左右。2008 年 5 月 21 日 17:00 时,库内水位为 716.01m,相应蓄水量为 $9.77 \times 10^7 \text{m}^3$,水深 52m;至 6 月 10 日 1 时 30 分,水位已上升到 743.10m^[3]。

汶川地震主震以后余震不断,到 2008 年 8 月底超过 26000 次,6 级以上的地震达到 8 次。地震堰塞体是松散岩土和石块快速堆积所致,坝体结构较为松垮,容易发生溃堤。堰塞湖的溃决方式取决于构成坝体的结构特征。如果以岩石为主,发生瞬时溃决的可能性较小;如果以土体为主,就比较松软,经水的浸泡容易形成大规模的瞬时溃决。从渗流情况来看,岩石构成的堰塞体渗流量较大,而以土体为主的堰塞体则很小,当地百姓总结出的规律是:渗水的海子不垮,不渗水的海子早晚要垮(当地居民称堰塞湖为海子)。以唐家山堰塞湖为例,它的堰塞体物质构成复杂,主要由两岸岩体解体形成的碎裂岩等组成,具有一定的稳定性。但是堰塞体右侧垭口沟槽主要由碎石土构成,随着堰塞体内水位的持续上涨,水流首先会从右侧垭口沟槽过流,逐步淘蚀并可能导致堰塞体溃决^[4]。

对肖家桥堰塞湖现场踏勘发现,该堰塞坝是由右岸岩质顺层滑坡形成。该河段处,岩层走向与河流流向基本平行,倾向坡外,为顺向坡,在河流不断下切过程中,切割了岩质边坡的坡脚,形成临空面;垂直于岸坡的裂隙发育,贯通性好,在地震力的作用下,引发了该顺层边坡失稳,造成河道堵塞,形成该堰塞坝。组成该堰塞体的物质主要是以灰岩,以孤、块、碎石土为主。现场踏勘初步分析推测,右岸侧表层有 3—10m 碎石土及强风化灰岩块碎石,左岸侧以弱风化岩块和新鲜的灰岩块碎石为主。目测表层粒径 > 1m 的块石约占 5%—10%, > 0.4m 的约占

30%—40%。结构松散,部分有架空现象。下部主要为弱风化岩块和新鲜的灰岩块碎石。部分岩体在下滑过程中,结构破坏不强烈,形成大体积块石,结构为稍密至中密。从右侧已开挖的泄流槽揭示,滑坡体前沿快速下滑与左岸山体强烈撞击,形成堆积物以碎石为主,其中粒径 > 0.2m 的约占 15%—20%。结构松散,抗冲刷力低(抗冲流速为 1.2—1.5m/s),透水性强(渗透系数为 10—2cm/s),如图 2 所示。



图 2 四川省安县茶坪乡和晓坝交界处茶坪河上的肖家桥堰塞体的组成物质主要是灰岩,并以碎石为主

历史上,四川境内两次大地震形成的堰塞湖都发生了溃决洪水,造成了极大灾害。详细史料记载的 1786 年康定大地震和 1933 年叠溪大地震,堰塞湖溃坝造成的死亡人数,数倍于地震直接死亡人数。1786 年 6 月 1 日(清乾隆五十一年五月初六),在我国北纬 29.9°、东经 102.3°的四川康定、泸定区域内发生了震级 7.5 级、震中烈度 9 度的强地震,泸定至汉源的磨西附近发生山崩,导致大渡河上游堵水形成堰塞湖,堵水蓄水量约 2 亿立方米。堰塞湖形成后第 9 日,水流漫过堰塞坝顶导致溃决,大渡河出现历史大洪水。据文献记载:“河水奔腾,汹涌异常”,大渡河最下游 300 多公里的乐山市河段“涛头高数十丈,城南有铁牛高丈许亦随流而没”,造成“滞水泄洪,水打嘉定府(乐山市)”。1933 年 8 月 25 日(农历七月初五)15 时 50 分 30 秒,在北纬 32.0°、东经 103.7°的四川省茂汶北叠溪,发生震级 7.5 级、震中烈度 10 度的强地震。地震造成山崩、岩石横断,使岷江上游叠溪河段形成堵水堰塞湖,堵水蓄水量约 3 亿立方米。堰塞湖形成后的第 45 日,岷江叠溪堰塞湖坝体开始溃决,估计溃决坝体的 2/3,造成岷江历史最大洪水。据文献记载:“湖水奔泻”;“洪水位高十余丈”,造成下游“亘古未有之奇灾”,下游 210km 的灌县洪水灾害惨重。

在这次高烈度汶川地震中,仅 1 万平方公里的破裂带极震区内就产生大量松散岩土,严重破坏了

山体斜坡内在结构的完整性,降低了山体的抗剪强度.在小震级或降雨条件下,必然发生大量的滑坡、崩塌和泥石流,还可能再次阻塞河道形成堰塞湖.因此,开展堰塞体形成机制和堰塞体稳定性的基础研究和应用研究已迫在眉睫^[5].

3 堰塞体形成机制研究

堰塞湖的形成过程可以分为两个过程:松散滑坡体沿山体的滑动过程和高速滑入河水后的沉积过程.因为震级高,部分山体被震碎,前者可以视为土石颗粒沿着斜面起运、运动和堆积的过程.目前在实验室内通常进行二维或三维的实验,颗粒从斜面顶部储料仓流出,流量大小由储料仓开口大小决定.为了增加斜面的摩擦阻力,通常在表面上粘接一层颗粒或一层布,研究粗糙边界、不同通道宽度以及不同斜面倾斜角对二维颗粒流的影响.在理论分析方面,斜面颗粒流介于准静态颗粒流和快速颗粒流之间,其运动规律极为复杂,虽然斜面上颗粒流表现出某些类似流体的性质,但其运动规律却不像经典流体那样可以用 Navier - Stokes 方程描述^[6].近期的一个重要进展是 Jop 等人受宾汉体启发,提出了新的颗粒流动本构关系^[7],在一些特定边界条件下得到了与实验结果基本一致的三维密集流.松散山体组成复杂,既有细小沙粒,又有粗大石块,在流动过程中往往发生分选现象,粗大石块富集在前端和边缘,而中后部主要为细小颗粒.在运动山体的前端和边缘处,则是粗大颗粒间发生持续接触,形成力链.诸多力链相互交接构成支撑整个运动体重量的内在骨架,其构型及强度在重力和地面局部阻力作用下发生复杂演化,像水坝一样阻碍了中后部细小颗粒主体的运动.其中需要回答一些关键问题,比如:运动过程中颗粒是如何分选的?大颗粒力链如何形成?边界条件、初始条件和外载荷如何影响力链演变,进而影响流动性质?

松散山体颗粒滑入河水后,在水流拖曳力和重力作用下运动并发生沉积,由于颗粒分级,大的岩石块体必然首先堆积在底部,而堰塞体上部基本为细小岩土颗粒,所以在流速较大的河道中,细小颗粒更容易被水流冲走.整个流动和沉积耦合直至形成堰塞体的过程尚不清晰^[8].我们还可以预计,在汶川地震中,尽管一些堰塞体目前不足以构成威胁,但是山体滑坡后滑入河道中的粗大破碎岩石等已经抬高了河床,如果后续发生滑坡或泥沙堆积,则很可能发

展成为较大的堰塞体,这是潜在的危险,需要密切关注.

4 堰塞体稳定性研究

堰塞体形成后,我们关心的就是堰塞体的稳定性,亦即会不会跨塌?在现有降雨条件、流量情况下,大约什么时候跨塌?又如何跨塌?另外一个实际问题是岩石和土体经受多次余震,密实度提高且坝体架构稳定,坝壁厚实,溃决的可能性不断减小,能不能利用这次的唐家山堰塞湖修建一个水库,利用宝贵的水资源为灾区重建做贡献呢?对这些问题有一较准确分析后,才能为堰塞湖处置决策提供可靠信息.从颗粒物质力学的角度看,堰塞体其实就是大规模颗粒松散堆积体,比如唐家山堰塞体大约有 2037 万立方米的土体,具有复杂本构关系(比如 Duncan - Chang 双曲线模型,是 Duncan 和 Chang 于 1970 年提出的,很好地反映了土体变形的非线性)和复杂的蠕变特性,目前需要在综合分析国内外研究情况的基础上,特别针对坝体颗粒的基本特性、坝体颗粒的工程特性及其本构关系、蠕变特性、变形机理等进行系统深入的试验和数值研究.

4.1 堰塞体蠕变特性

根据我们对堰塞体蠕变特性的研究发现,即使经过碾压的堰塞体一般要 3 年时间才基本稳定.这主要与密实度有关,地震残余变形和砂土液化也与密实度有关.堰塞体流变性能正在成为广泛关注而亟待深入研究的问题,国内外学者已在与之相关的粗颗粒蠕变特性研究方面作了有益的探索.1985 年,Parkin 尝试采用压缩仪研究粗粒料的蠕变特性,认为沉降速率与时间成对数关系.1991 年,沈珠江采用应力式三轴仪研究了面板坝垫层料的蠕变特性,试验分四级加荷,每级持续 7 天,每个试验历时 1 个月,试样直径 100mm,分饱和试样及干样两种情况,控制侧压力为 100 kPa 及 200kPa,共进行四组试验.沈珠江采用指数衰减函数来拟合上述蠕变曲线,并认为最终体积蠕变与围压成正比,最终剪切蠕变量与应力水平呈双曲线关系,在此基础上提出了粗粒料流变的三参数模型.此项研究为粗粒料流变研究奠定了基础.不过,试验围压与试样尺寸不适用于研究粒径更大的粗粒料,在全面反映粗粒料的流变特性并根据试验成果拟合流变本构模型及其参数方面尚存在一定困难.

目前,国内外对粗粒料流变特性的研究还存在一些问题。堰塞体中颗粒粒径较大,室内普通三轴试验较难反映实际的流变特性,同时堰塞体一般处于高应力水平和一定的应力路径下,其流变特征的研究需要考虑相应的应力状态和应力路径。因此根据汶川地震堰塞体的具体情况,研制可长期维持压力恒定、专用于粗大粒料蠕变研究的大型应力式高压三轴仪,这样才能开展堰塞体蠕变性能的研究。根据长江科学院的初步试验研究发现,粗颗粒体的蠕变量 ε_L 与时间 t 的关系可采用幂函数表达, $\varepsilon_L = \varepsilon_f (1 - t^{-\lambda})$, 其中 ε_f 为某一应力状态下的最终蠕变量, λ 是常数,与粗颗粒级配有关。

4.2 堰塞体变形的试验研究

常规室内三轴试验能获得堰塞体颗粒体的宏观力学性质,在此基础上有必要研究内部填料变形的微观机理,可进行 CT 三轴试验研究,并应用计算机图像测量系统分析三轴试验中颗粒的运动规律。图 3(a) 是长江科学院测定的一个试样(围压 0.2 MPa) 某一剖面位置的 CT 图像,颗粒粒径 10—20 mm,试样尺寸 300 mm × 600 mm。从图中可以直观地看到,对于颗粒集合体,经振动密实后,不同形状的颗粒形成相互嵌入、空间中相互接触的、稳定的颗粒结构体系。由于颗粒大小差别不大,局部存在一定架空现象。大小颗粒位置和颗粒长轴方向的分布具有很强的随机性。在整个压缩变形过程中,相邻颗粒的位置将发生相应调整,颗粒的接触关系发生调整。可以推论,对其中某一颗粒而言,其相邻颗粒作用在该颗粒上的作用力的数量、方向和作用点位置将有可能随试样变形发生变化,即颗粒的平衡方式将发生变化。颗粒集合体的塑性应变是伴随着颗粒的位置调整产生的,所有颗粒平衡方式不变时,将发生弹性变形^[9]。

图 3(b) 是颗粒的位移矢量。因受约束效应的影响,试样顶部和底部三角形区域内颗粒水平位移较小。在高轴向压力作用下,在试样两侧中部,水平位移较大,几乎呈对称分布;竖向位移呈分层状,顶部位移大,颗粒转角在顶、底部都比较小,在对角线区域较大。粗粒料颗粒的运动特征反映了其作为散体材料的特殊性,很难用现有的连续体力学特性予以解释。可以看出,颗粒集合体的变形源于颗粒的位置调整(相邻颗粒的位置变化),颗粒自身的形变很小,这种位置调整在试样变形的初期就随之产生;在某一宏观应变下,试样中颗粒的平动和转动有很强

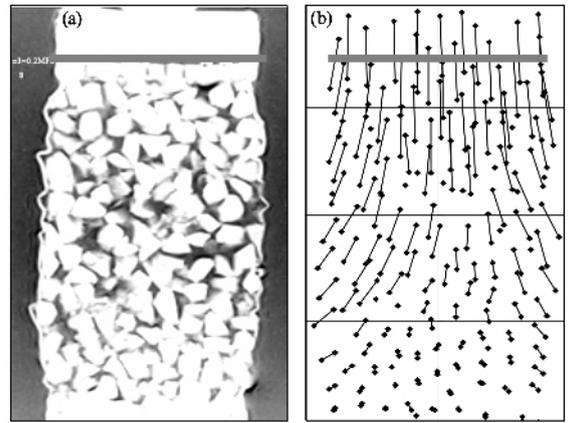


图 3 三轴试验中应变 $\varepsilon = 14.4\%$ 时的变形情形,围压 0.2 MPa,图中上部水平横线是轴向压缩位置(由长江科学院提供)
(a) 内部变形 CT 图像 (b) 颗粒位移场

的规律性,试验中各部位的颗粒位置调整的幅度差异较大,相同部位不同颗粒的调整幅度也不相同,相邻颗粒间错动明显,并伴有一定的转动。这一现象引起我们对堰塞体变形分析的思考:室内试验的试样与工程中微单元体之间的变形模式是否具有相似性,如果两者之间存在差异是否仅仅是由于试样端部的约束效应引起的。

4.3 堰塞体变形的 DDA 数值模拟

堰塞体力学特性的研究手段主要有原型试验、室内试验和数值模拟。由于室内试验和原型试验受试样尺寸和设备能力的限制,很多问题难以解决,如级配相似、复杂应力路径等。数值模拟试验不需要大量的人力、物力投入,不受时间、场地的限制,最重要的是其对试件尺寸没有限制,可作为室内试验和原型试验的一种补充手段。堰塞体属于非连续介质,目前非连续介质变形的数值模拟方法主要有非连续变形分析(DDA)和离散元法(DEM)。DEM 计算简单,但假定颗粒形状为圆形或圆球,与工程粗粒料的实际形状相距甚远。试验表明,球形颗粒集合体与一般堰塞体的变形特性存在明显差异,其宏观应力-应变关系表现为典型的理想弹塑性。因此,期望通过圆盘或球形颗粒模型的数值分析来反映一般堰塞体的力学特性可能是不合适的。DDA 方法是假定颗粒形状为任意的多边形或多面体,适合于堰塞体的力学特性研究。采用 DDA 方法对堰塞体的平面应变试验进行模拟,揭示其弹塑性、剪胀性、应变软化、循环加载时出现的滞回圈、卸载体缩以及剪切带的形成等独特的应力变形现象和特性的微观机理。图 4 是模拟得到的块体颗粒密集堆积时内部接触力形成的力

链网络,其演变规律决定堰塞体宏观力学性能,比如上面说的弹塑性、剪胀性和应变软化等。

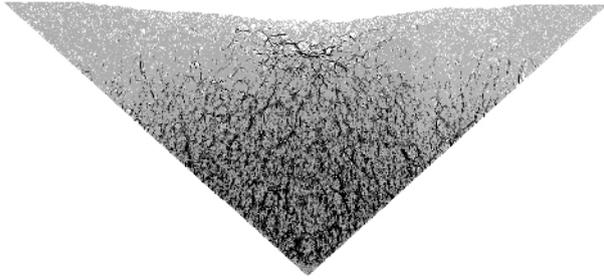


图4 V形河道中堰塞体内部的颗粒密集堆积,颗粒相互挤压形成传递接触力的力链网络

4.4 堰塞体的本构模型

堰塞体是在大规模滑坡或山体崩塌时形成的。上、下游坝体或者左、右岸岩石材料粒径分布差异较大,模量显然也有较大差距,比如,砂砾料与碎石渣的变形模量之比为5:1。这必然使得堰塞体上下游坝体或者左右岸坝体变形差异很大,引起堰塞体裂缝的发生。目前常用的 Duncan - Chang 模型体现了粗颗粒体系的非线性特征,考虑了应力历史对变形的影响。它是非线性弹性模型,其优点是模型简单,易于实现,在工程中得到广泛的应用,且积累了较多的经验,其缺点是由于体变曲线采用双曲线函数形式,因而不能反映剪胀(缩)性,不能反映粗粒体的各向异性以及卸荷与加荷状态下的泊松比的变化等。

4.5 重力坍塌变形

由于堰塞体堆积物十分松散,伴随着泄流的冲刷,两岸坡度变陡后将因重力作用而发生河岸崩塌变形,这一过程对堰塞湖泄流过程有十分重要的影响。国内外对河岸在重力等作用下的侵蚀崩退进行了较多的研究。目前在数学模型中常引用 Osman 和 Throne 根据河岸土体在重力作用下的破坏机制建立的模式。在他们的模式中,当河床冲刷到一定程度后,河岸岸高达河岸土体破坏临界值时,河岸塌落后退。我们也曾在模型中应用该模式来模拟河岸的侵蚀崩退过程。但该模式本质上适用于粘性土河岸在重力作用下的破坏过程,对于地震形成的堰塞体而言,其堆积物质是由松散的大颗粒构成,因此该模式是不适用的。我们认为,可采用堆积物休止角与实际岸坡的比较来判断河岸的稳定性,即当河岸时间坡度大于堆积物休止角时,河岸失稳,发生滑坡,滑坡后河岸坡度按休止角修正^[3],这一问题尚待进一步研究。

5 结论

“5.12”汶川地震已经造成了极大的人民生命和财产损失,而堰塞湖作为威胁最大的山地次生灾害依然存在。百余处堰塞体,普遍由高度风化的岩石颗粒堆积形成,堰塞体质地疏松,稳定性和抗冲击性极差。根据历史经验,震后崩塌、滑坡的活跃期可能持续5-10年,泥石流的活跃期将可能持续20年,堰塞体可能不断形成,特别集中在今后10年内。从我们现场勘测资料来看,堰塞体就是组成复杂、排布疏松的大规模颗粒体系,给我们提出了一系列亟待解决的科学问题。基于我们已经开展的相关理论和应用研究^[10],进行深入、系统和持续的堰塞体形成机制和稳定机制的探索,应该是近10年内的主要研究内容。只有这样,颗粒物质的研究才能有的放矢,研究结果才能更好地服务于堰塞体治理;同时堰塞体蕴含着丰富的研究课题,必然促进颗粒物质力学基础理论的完善。

致谢 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室王皓和李铁键等同学震后赶赴肖家桥堰塞湖现场,获得了宝贵的第一手资料,文中部分资料和照片是他们提供的,特此致谢。

参考文献

- [1] 贾秋鹏,贾东,朱艾斓等. 地质科学,2007,42(1):31 [Jia Q P, Jia D, Zhu A L et al. Chinese J. Geology, 2007, 42(1): 31 (in Chinese)]
- [2] 崔鹏,韦方强,陈晓清等. 中国科学院院刊,2008,4:317 [Cui P, Wei F Q, Chen X Q et al. Bull. Chinese Academy Sci. 2008, 4: 317 (in Chinese)]
- [3] 王光谦,钟德钰,张红武等. 科学通报,2008,52:312 [Wang G Q, Zhong D Y, Zhang H W et al. Chinese Sci. Bull., 2008, 52: 312 (in Chinese)]
- [4] 陈晓清,崔鹏,程尊兰等. 地学前缘,2008,15(4):244 [Chen X Q, Cui P, Cheng Z L et al. Earth Sci. Front., 2008, 15(4): 244 (in Chinese)]
- [5] 魏迎奇. 中国水利,2008,37 [Wei Y Q. China Water Resour., 2008, 37 (in Chinese)]
- [6] 孙其诚,王光谦. 力学进展,2008,38:87 [Sun Q C, Wang G Q. Adv. Mech., 2008, 38: 87 (in Chinese)]
- [7] Jop P, Forterre Y, Pouliquen O. Nature, 2006, 441(7094): 727
- [8] 邢景棠,周盛,崔尔杰. 力学进展,1997,27(1):19 [Xing J T, Zhou S, Cui E J. Adv. Mech., 1997, 27(1): 19 (in Chinese)]
- [9] 程展林,丁红顺. 岩土工程学报,2004,26:473 [Chen Z L, Ding H Y. Chinese J. Geotech. Eng., 2004, 26: 473 (in Chinese)]
- [10] 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论. 北京:科学出版社,2009 [Sun Q C, Wang G Q. Introduction to The Mechanics of Granular Materials. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)]