

文章编号: 1008 - 2786 - (2020)3 - 402 - 14

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000520

岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击力链特征的影响

张志东¹, 樊晓一^{1*}, 姜元俊²

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 冲击力链特征反映了碎屑流颗粒间的接触关系, 为滑坡碎屑流冲击力特性的研究提供了一个新的理论方法。以物理模型实验数据为依据, 借助离散元模拟软件 PFC^{2D}, 探究不同岩土体颗粒级配条件下, 力链配位数、超强力链、强力链、弱力链占比和强弱力链分布位置的相关特性。结果表明, 碎屑流在运动过程中, 力链配位数和强、超强力链占比会经历一个先波动减小再增加最后保持稳定的过程, 并且力链配位数与颗粒的平均速度呈负相关关系; 岩土体颗粒级配中的不均匀系数 C_u 是影响力链配位数、超强力链、强力链、弱力链占比的主要因素; 在碎屑流冲击挡墙过程中, 强、超强力链主要集中于底部区域, 并且随着粗大颗粒含量的增加, 超强力链配位数峰值的作用位置逐渐升高。

关键词: 冲击力链; 配位数; 不均匀系数; 颗粒级配; PFC^{2D}

中图分类号: P 642.22

文献标志码: A

由于内部颗粒之间几乎不存在粘性, 滑坡碎屑流的整体运动实质上可以看作为数众多的单个颗粒相互运动的耦合, 这为从细观尺度上探究这一问题提供了理论依据。然而, 过去对碎屑流运动的研究多从宏观角度入手, 虽已取得较为丰富的理论、实践成果, 但在碎屑流颗粒簇团解体、颗粒间接触、摩擦、转动等细观问题^[1]上未能完全阐明其中机理, 也未能将碎屑流宏观运动及冲击问题同细观力学机制有效联系起来。

连续介质的力学分析方法不能有效描述作为非连续介质的碎屑流内部颗粒的破裂、解体、以及颗粒间的相互摩擦、转动和流动等一系列的细观力学过程。而物理—力学研究表明, 力链是非连续和散体介质传递载荷的主要形式^[1-2], 也是连接散体介质

的宏观力学行为和细观相互作用机理的桥梁^[3]。因此, 研究碎屑流冲击力链的相关特性有助于从细观尺度上进一步认识碎屑流的运动特性。

目前, 有关力链的研究多集中于细观颗粒体系内部力链网络的构成、破坏、力链的重组、排列等^[4-5]方面。且随着 PFC (Particle Flow Code) 等相关离散元软件的发展与进步, 不少学者已经能够借助力链的一些细观参数反应土体颗粒的宏观现象^[6-7]。在这些细观参数中, 配位数、强弱力链占比等能较为充分的反映颗粒的相互总用机理, 故得到了学界的普遍认可。如相关学者用离散元数值的方法揭示了颗粒材料的宏观弹性刚度与修正后配位数的线性关系, 证明了配位数是决定土体弹性模量的内在因素^[8]; 此外有学者通过模拟砂土的双轴试

收稿日期 (Received date): 2019 - 09 - 15; 改回日期 (Accepted date): 2020 - 05 - 10

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41877524); 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室开放基金项目 (18kfjk10) [National Natural Science Foundation of China (41877524); The Opening Fund of Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province (18kfjk10)]

作者简介 (Biography): 张志东 (1994 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 地质灾害。[ZHANG Zhidong (1994 -), male, M. Sc. candidate, research on geological disaster] E-mail: 591013567@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 樊晓一 (1974 -), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 地质灾害评价预测与防治处理。[FAN Xiaoyi (1974 -), male, Ph. D., professor, specialized in geological disaster evaluation, prevention and treatment] E-mail: xyfan1003@126.com

验,建立起了宏观现象与细观参数之间的关系,发现松砂的“减缩”与密沙的“剪胀”现象之间存在一个临界配位数^[9];在力链提取方面,国内外研究者通过光弹力链定量提取的方法,确定了颗粒体系接触力的集中分布范围,并定义了强弱力链,指出不同含量的强弱力链在力传递过程中起到的不同作用^[10]。

在上述研究中,颗粒级配作为力链相关特性研究的重要内容,其作用机理已得到了部分认识^[11-16]。同样,在滑坡碎屑流宏观研究方面,颗粒级配也时常被纳入考虑范围,并在大量文献中被证实其对碎屑流运动堆积特性、冲击作用机理具有较为深刻的影响^[17-22],因此颗粒级配是将宏观碎屑流运动同细观力链特性连接起来的有效媒介。

但目前以力链特性解释碎屑流运动、冲击的研究还较少,碎屑流运动过程中力链的分布、传递机理还未得到充分认识,而力链作为碎屑流内部颗粒之间接触关系的体现,又无法通过室内滑槽模型实验得到直接观测、进行定量的统计与分析,导致物理模型实验所得的结果可能无法真实反映碎屑流运动过程中力链的自身特性及其分布、传递机理。然而采用物理模型实验与离散元数值模拟相结合的方法则既能较为真实的反映碎屑流的运动过程,又能填补滑槽实验无法检测力链特性的空缺。故本文以滑槽模型实验结果和相关数据为依据,运用离散元素法,借助PFC^{2D}软件,建立离散元滑槽与挡墙模型,探究岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击力链特征的影响。

1 研究方法

1.1 离散元素法

离散元素法是20世纪70年代由Peter Cundall首先提出并用于岩石力学研究的一种数值计算方法。经过40多年的发展与延伸,该方法已经得到极

大的完善和广泛的认可。在滑坡碎屑流运动冲击作用机制及承载动力响应方面,该理论能良好的与物理模型实验甚至实际的滑坡碎屑流匹配。

离散元素法通过使每个元素满足牛顿第二定律把研究对象分离为刚性元素的集合,通过中心差分的方法对各元素的运动方程进行求解,得到研究对象的整体运动形态,完成对物理模型实验或实际滑坡碎屑流的模拟。然而,要使离散元模型最大限度的还原物理模型实验或实际滑坡碎屑流的运动状态,还必须选取适当的本构模型。本次室内模型实验材料取无粘接类球状碎石颗粒,其表面粘附性很小,滑体的整体性不强,故而在数值模拟中采用Hertz-Mindlin接触模型。

相比其他数值分析模型,离散元素法的优势在于能对整个模型体系中的所有几何单元进行运算和统计,每当两个单独的几何体(颗粒—颗粒,颗粒—墙面)相互接触、产生作用、传递能量时,几何体之间就会形成力链,因此,对力链的研究实质上是对碎屑流内部颗粒与颗粒、颗粒与滑槽(挡墙)的‘关系’的研究,是具有重要研究意义的。而碎屑流在在启动、运动、和冲击挡墙过程中,其内部颗粒的配位数、力链的强弱、各种强弱力链所占的比例又都处在不断的变化之中,故分别对其进行定量讨论以及定性分析显得尤为重要。

1.2 模型尺寸

如图1所示,滑槽总长度为2.93 m,宽0.3 m,高0.35 m,激发门位于距挡墙2.19 m处且垂直于滑槽底面。料槽内的初始堆积体为长0.44 m、宽0.3 m、高0.2 m的长方体。滑槽末端的挡墙高0.4 m并与滑槽底面垂直,倾角 $\alpha = 45^\circ$ 。试验所用监测仪器如图2所示,图2a中的高速摄像机用于监测碎屑流的堆积形态,图2b为试验所用刚性挡墙,

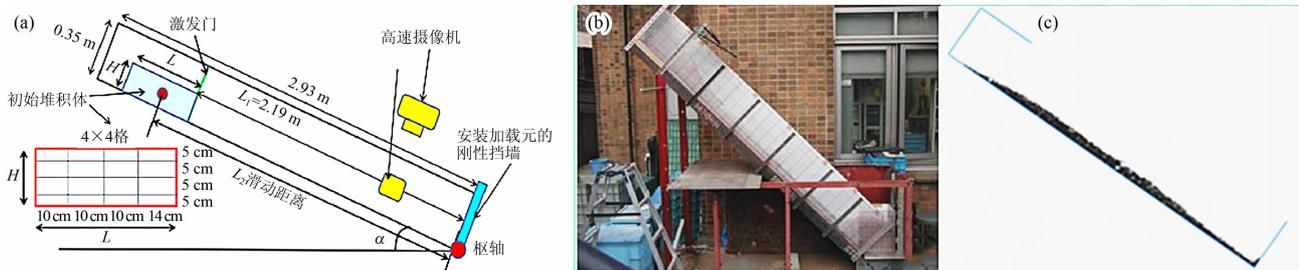


图1 滑槽模型试验示意图:(a)模型尺寸图;(b)滑槽模型实物图;(c)滑槽数值模拟图

Fig.1 Schematic diagram of flume experiment: (a) flume dimensions; (b) photo of flume; (c) numerical model of flume

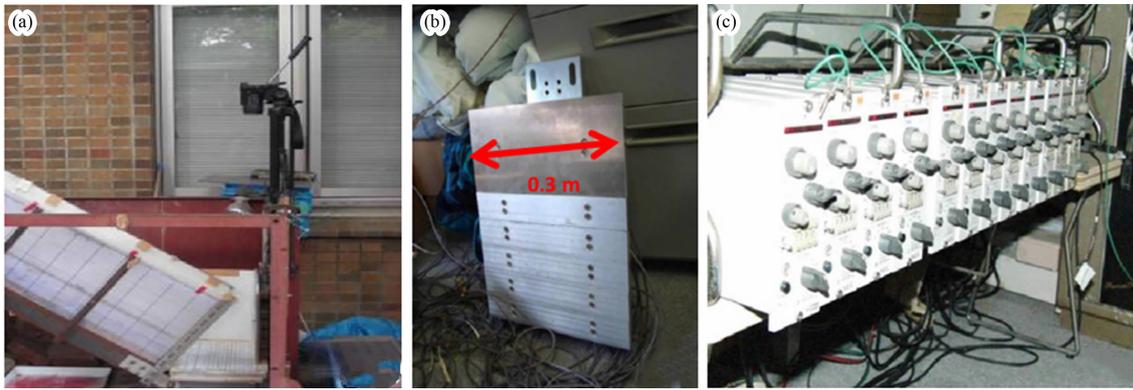


图2 监测仪器图:(a)试验量测平台;(b)刚性挡板;(c)试验测力元件

Fig.2 Schematic diagram of experiment equipment: (a) experiment platform; (b) a rigid wall; (c) force measuring apparatus

其高度方向上布置有应力传感器,并通过图2c中的测力元件监测冲击力。

1.3 岩土样级配组成

力链作为碎屑流颗粒间接触力的传递途径,其长度、大小、方向以及作用位置都要受到碎屑流粒组本身级配的影响。在碎屑流高速运动过程中,粒径较大的颗粒在高速运动中往往携带较大的能量、较多的力链配位数,易对其他颗粒以及挡墙造成较大的冲击作用。而粒径较小的颗粒则易与其他颗粒作用形成较为细小的力链,进而对其他强力链起到支撑和填充作用。因此,探究大粒径颗粒与小粒径碎屑的含量及分选效应对冲击力力链的性质研究具有重要意义。通过改变不均匀系数 C_u 等粒度特征指标,结合不同的粒组分配比率,能有效的反映岩土样的均匀程度,体现岩土样的级配组成。在此基础上结合相关文献^[17],本文以控制粒径 d_{60} 、不均匀系数 C_u 作为参数指标,建立了如表1所示的5种不同级配的滑体模型,曲线见图3。

如表1所示,M1、M2、M3分别代表小粒径颗粒(1~10 mm)、中等粒径颗粒(10~20 mm)和大粒径

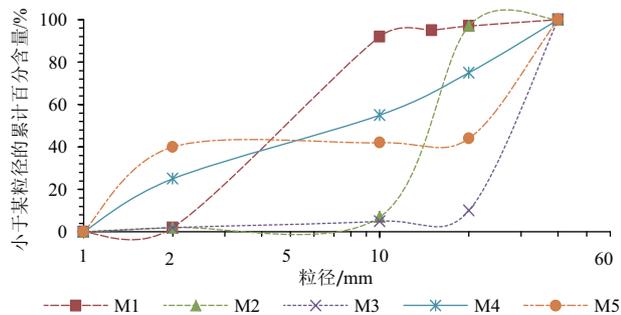


图3 滑体模型材料级配曲线

Fig.3 Gradation curve of composite granular material in flume experiment

颗粒(20~40 mm)含量占绝对优势(90%)的粒组,其中主要的特征指标为控制粒径 d_{60} 与不均匀系数 C_u ,在本实验中, d_{60} 越大表明粗大颗粒占比越多。另两组级配 M4、M5 分别代表粒组级配范围中等($C_u = 8.9$)及粒组级配较广($C_u = 20.6$)的颗粒。并与级配 M1、M2、M3(C_u 均小于5)形成对照,其主要的特征指标为不均系数 C_u , C_u 越大表明粒组级配越广。而曲率系数 C_c 作为岩土体级配另一指标,由于各组较为接近,故不对其进行讨论。

1.4 数值模型参数

本文采用 PFC^{2D} 软件中的 Hertz-Mindlin 模型对滑槽实验进行数值模拟,基本本征参数主要包括:剪切模量、泊松比、摩擦系数和密度。离散元数值模拟中,泊松比、剪切模量和密度为材料的本征参数,表示各种材料的自身属性,与外界条件无关,改变滑体粒径或级配不会影响材料属性^[17],故可直接用于数值模拟。摩擦系数表征的是两接触面间的摩擦力与作用在其一表面上的垂直力的比值,受接触面粗糙度的控制。由于试验中真实颗粒的不规则形状与数值模拟中球体的规则外形存在差异,使得通过试验测得的摩擦系数不能直接运用于数值模拟中,故需对模拟中材料的摩擦系数进行多次调试,以使模拟契合模型试验的结果。经过多次调试,结果如表2所示。

2 模拟运动与模型实验验证

如图4、图5所示,以 M3 为例,对不同级配条件下模拟运动与物理模型试验对比发现,采用表2中相关特征参数的模拟运动,其不同时刻的运动状态及挡墙所受冲击力,能够较好的与物理模型实验相

表 1 试验岩土样级配组成表

Tab.1 Particle size distribution of geo-material samples

滑体模型	各粒径颗粒质量占比				d_{10}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c	颗粒个数
	1~2 mm	2~10 mm	10~20 mm	20~40 mm					
M1	2%	90%	5%	3%	2.40	5.00	2.10	0.65	6782
M2	2%	5%	90%	3%	10.30	14.00	1.40	0.76	3017
M3	2%	3%	5%	90%	20.00	30.00	1.50	0.66	2276
M4	25%	30%	20%	25%	1.40	12.50	8.90	0.63	25245
M5	40%	2%	2%	56%	1.25	25.70	20.60	0.77	43762

表 2 模拟参数

Tab.2 Model parameter settings

材料	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比	剪切模量/MPa	摩擦系数
颗粒	1680	0.200	500	2.327
底板	7600	0.300	1400	0.460
挡板	7900	0.300	1400	0.510

吻合。试验中挡墙所受冲击力与模拟中挡墙所受冲击力的变化趋势相同,且在整个运动过程中,同一时刻二者的误差不超过 10%。这表明离散元素法能够模拟碎屑流沿滑槽运动、冲击挡墙的全过

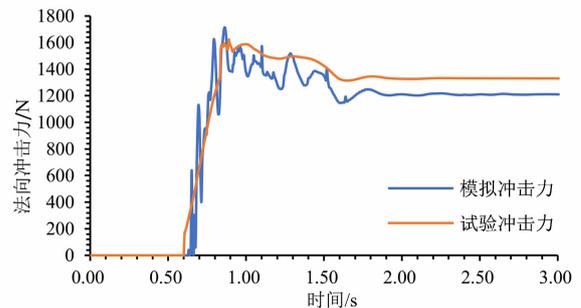


图 5 实验与数值模拟冲击力曲线对比

Fig.5 Comparison of impact force curves between experiment and numerical simulation

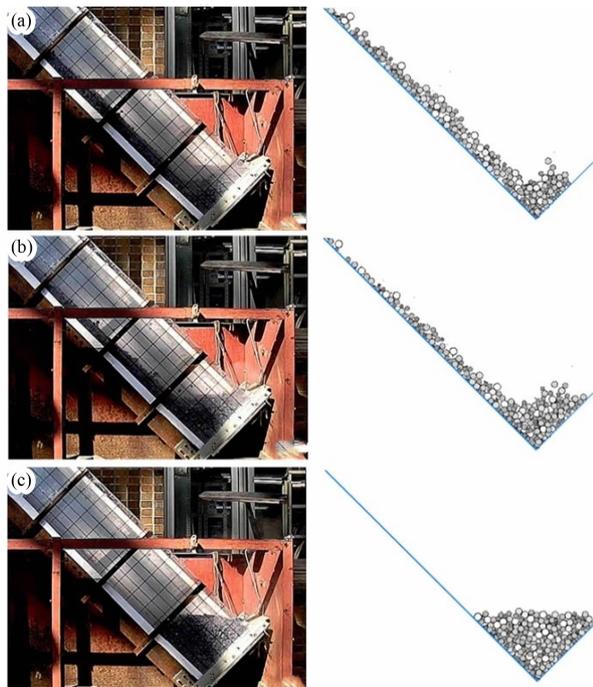


图 4 实验与数值模拟滑体运动形态对比

Fig.4 Comparison of deposition formations between numerical simulation and model test:

(a) $t=1.15\text{ s}$; (b) $t=1.45\text{ s}$; (c) $t=2.20\text{ s}$

程。且表 2 中的相关参数可以用于后续数值模拟研究,从而弥补物理模型实验中由于仪器设备自身缺陷、技术手段的局限造成的误差。至于模拟中冲击力波动幅度较大、曲线平滑度较差则是由数值模拟中较大的监测频率($f=1500\text{ Hz}$ 左右)造成的,即较大的监测频率导致单位时间内采集的数据较多、冲击力波动幅度较大。相反,模型试验受到测力元件仪器精度的限制,测力频率较小($f=1000\text{ Hz}$ 左右),数据点相对较少,数据点之间依据拉格朗日差值法进行连接,故曲线较平滑,波动幅度较小。

3 同级配条件对冲击力链特征的影响

3.1 颗粒级配对力链配位数的影响

力链的配位数是碎屑流在运动过程中每个颗粒上的平均接触数量,计算方法为:

$$N = 2N_c / N_b \tag{1}$$

式中, N_c 为力链总数; N_b 是颗粒总数。

力链的配位数处在不断变化之中并能在一程度

度上反映碎屑流在运动过程中内部颗粒的相互接触程度:配位数越多表明颗粒间的接触越多、接触越紧密、对应的碎屑流颗粒之间的孔隙越少;反之,配位数越少,则颗粒间孔隙越大,碎屑流越松散。因此,可以通过力链配位数解释碎屑流在运动及冲击过程中的相关力学性能。

3.1.1 运动前后力链平均配位数的变化

对5组不同级配条件下力链配位数随时间的变化关系进行分析发现,如图6所示,在5组级配条件下力链配位数的变化曲线均呈现出相似的变化趋势,即力链的配位数先波动减小后增加,最后保持稳定。这是由于碎屑流内部无粘聚力存在,使得碎屑流启动后,其内部在重力作用下发生沿高度方向的崩解,进而导致碎屑流在滑槽上的逐渐展开,颗粒变得松散,力链配位数减少,而挡墙的拦挡作用,阻碍了碎屑流颗粒间的进一步分离,促使碎屑流颗粒重新堆积并产生接触,最终导致力链配位数在减少后又有所增加(过程可见图4)。分析配位数的前后变化可知,所有级配条件下碎屑流完成堆积后的力链的配位数均大于运动发生前的配位数。其主要原因是碎屑流在撞击挡墙过程中,由于前缘颗粒先撞击挡墙而停积,导致中后缘颗粒与前缘颗粒不断发生剧烈碰撞,使得中后缘颗粒中的较小颗粒在惯性力的作用下冲入前缘堆积颗粒的缝隙中,并与前缘颗粒产生接触,通过形成新链的方式改变了前缘颗粒的力链网络。

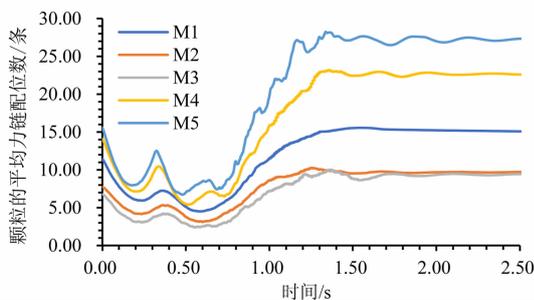


图6 M1~M5力链配位数时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of coordination number for sample M1 ~ M5

为了定量解释这一现象,把滑动前和堆积完成后力链配位数的变化率记为 Δ ,计算公式为:

$$\Delta = (N_{\text{end}} - N_{\text{star}}) / N_{\text{end}} \quad (2)$$

式中, N_{end} 为碎屑流停止时刻力链配位数; N_{star} 为初

始时刻力链配位数。

从表3可以看出,级配为M4、M5的粒组,其 Δ 值要远大于其他三组,且 $\Delta 5 > \Delta 4 > \Delta 1 > \Delta 2 \approx \Delta 3$ 。而如图5所示,在整个运动过程中5组曲线代表的力链配位数也表现出相同的大小关系,将5组级配下的力链配位数分别记作 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 则结果显示 $N_5 > N_4 > N_1 > N_2 \approx N_3$ 。在5组不同级配中,M5的不均匀系数最大($C_u = 20.6$),且显著高于其他4组(M1、M2、M3、M4的不均匀系数分别为2.1、1.5、1.4、8.9)。可见,较大的不均匀系数代表较广的粒组级配,而颗粒的粒组级配越广,颗粒间越容易形成紧密的接触,进而有利于力链的形成。因此,不均匀系数的大小差异是导致不同级配岩土体颗粒运动前后力链平均配位数、 Δ 值差异的主要原因。

表3 运动前后力链平均配位数变化率 Δ

Tab. 3 Change rate of average coordination number before and after sliding

级配	M1	M2	M3	M4	M5
Δ	32.44%	25.79%	24.79%	61.08%	75.61%

3.1.2 力链配位数与碎屑流平均速度的关系

Δ 值反映的只是滑坡碎屑流发生前和滑坡堆积完成后力链总数的变化情况,它未能对碎屑流运动过程中力链配位数数量的变化机理做出充分的解释,而速度作为碎屑流运动过程中最重要的特征指标,其变化会对力链的各项特性造成一定的影响,因此本节以速度为研究对象,探究碎屑流平均速度与力链配位数的关系(图7)。将5组不同级配条件下力链的配位数、平均速度(所有颗粒在同一时刻下速度的代数平均值)随时间的变化关系作对比,可以发现所有级配条件下力链配位数和平均速度都呈现相似的对比关系:即平均速度与力链配位数大致呈现一种负相关的关系:力链配位数随平均速度的增大而减少,反之亦然。其原因在于随着碎屑流的启动,碎屑流内部崩解,在重力作用下,平均速度的增加,碎屑流沿滑槽长度方向逐渐展开,碎屑流的高度降低,颗粒间的接触减少,力链的配位数减少。但从图7中可以发现,力链配位数的最小值与平均速度峰值的时刻不一致,力链配位数出现最小值的时刻略微滞后于平均速度的峰值时刻。通过对碎屑流

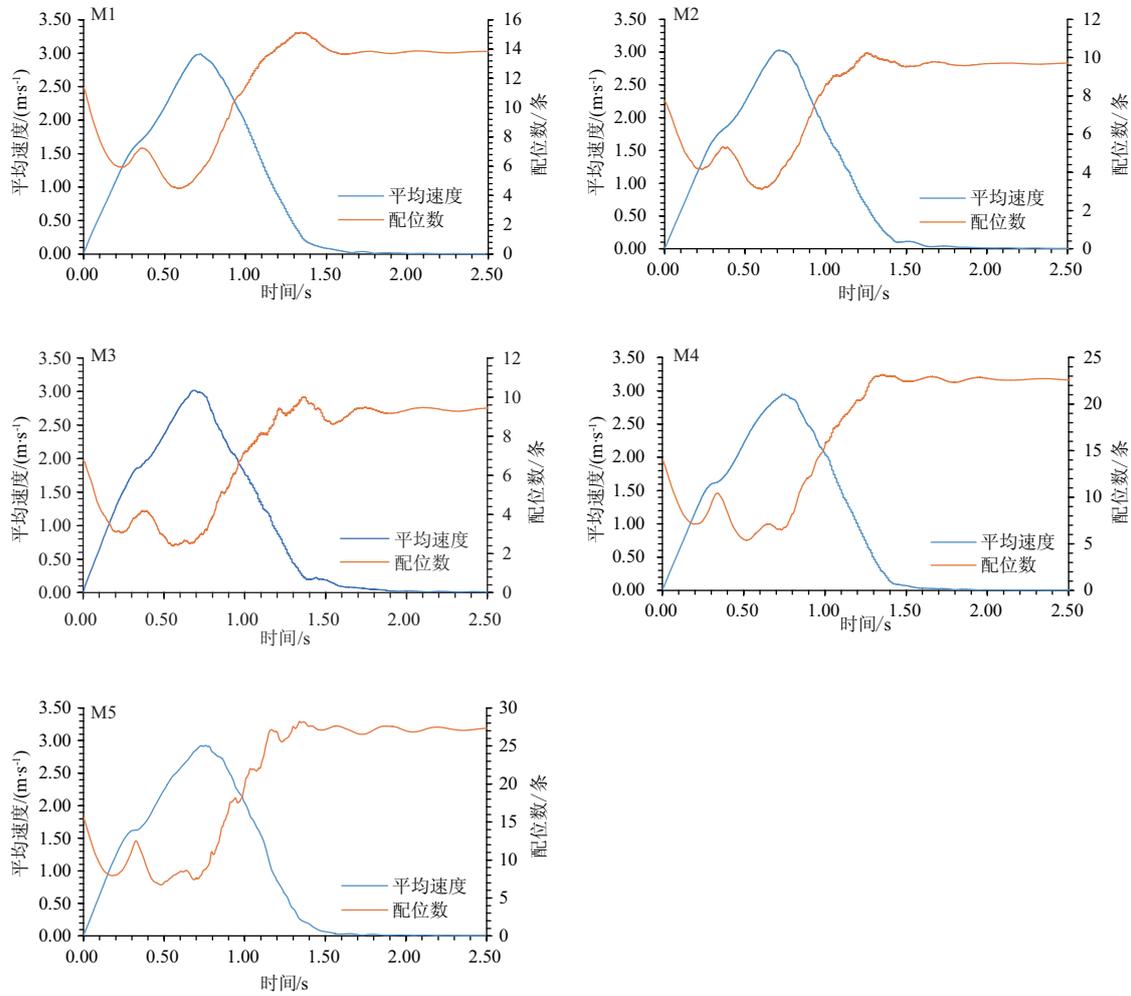


图 7 M1 ~ M5 平均速度、力链配位数时程曲线

Fig. 7 Time-history curve of average speed and coordination number of force chain for sample M1 ~ M5

的运动分析发现力链配位数达到最小的时刻与碎屑流前缘与挡墙最初接触时刻一致。此时,碎屑流在滑槽上沿长度方向完全展开,颗粒间的相对速度达到最小,颗粒间的接触最少,而碎屑流前缘最初开始接触时,虽然前缘部分颗粒速度减小,但中部和后缘的颗粒的速度继续增加,所以平均速度呈现出短暂的增加。因此,碎屑流颗粒的平均速度的演化控制了力链配位数的分布变化。

3.2 颗粒级对接对强弱力链占比及其转化的影响

碎屑流在运动过程中,力链的强弱反映颗粒间接触力的大小,较强的力链成为碎屑流运动过程中力的主要传递路径,而较弱力链则起到填充和支撑强力链的作用^[2]。因此探究碎屑流运动过程中,强弱力链的占比是具有重要意义的。为了定量描述“强力链”和“弱力链”,引入颗粒法向接触力与平均

法向接触力的比值 f , 计算方法为:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{n_{step}} (\sum_{i=1}^{n_{M1}} F_i + \sum_{i=1}^{n_{M2}} F_i + \sum_{i=1}^{n_{M3}} F_i + \sum_{i=1}^{n_{M4}} F_i + \sum_{i=1}^{n_{M5}} F_i)}{\sum_{i=1}^{n_{step}} (n_{M1} + n_{M2} + n_{M3} + n_{M4} + n_{M5})} \quad (3)$$

式中, F_i 表示力链 i 的接触力; n_{M1} 、 n_{M2} 、 n_{M3} 、 n_{M4} 、 n_{M5} 分别表示 M1、M2、M3、M4、M5 级配条件下的力链总数; n_{step} 为得到统计的时间步数量。

在相关文献调研^[23-24]及多次数值模拟的基础上,将接触力 $F_i < 0.5f$ 的力链定义为“弱力链”, $0.5f < F_i < f$ 的力链定义为“强力链”, $F_i > f$ 的力链定义为“超强力链”。通过对比不同颗粒级配下的强弱力链占比进一步讨论碎屑流在运动过程中颗粒之间的相关力学特性。

3.2.1 运动前后力链占比的变化

如图 8 所示,5 组级配弱力链占比随时间的变

化关系均表现为:先波动增加后减小最后保持稳定。而强力链、超强力链的变化规律则与弱力链的相反,即先波动减小后增加最后保持稳定。以堆积完成后和碎屑流启动前不同级配条件下弱、强、超强力链占比的变化关系为研究对象(β = 堆积完成后的力链占比 - 滑坡发生前自然堆积体的力链占比,表4),探究碎屑流发生前后,强、弱、超强力链之间的相互转化规律。

表4 运动前后力链占比差值 β

Tab. 4 Force chain ratio β before and after sliding

	M1	M2	M3	M4	M5
弱力链	1.87%	12.20%	7.99%	2.76%	1.48%
强力链	-1.05%	-9.77%	-6.78%	-2.72%	-1.45%
超强力链	-0.82%	-2.44%	-1.21%	-0.04%	-0.03%

注:负号表示力链占比减小。

如表4所示,在所有级配条件下,堆积完成后的弱力链占比相比碎屑流启动前均有所增加。而强力链和超强力链的占比则有所减小。说明在碎屑流冲击挡墙过程中,一部分强力链和超强力链被转化为弱力链,且对比强力链和超强力链减少的百分比发现,5组级配条件下超强力链减少的百分比均小于强力链减少的百分比。这是因为超强力链比强力链

强度大、稳定性强、不易破坏。而相比超强力链,强力链代表的接触力与弱力链更接近,强力链转化为弱力链更为“容易”。而造成运动前后力链占比变化的原因主要归结于碎屑流在堆积过程中,内部颗粒密集程度的增加(从3.1.1节中配位数的变化关系可知)。力链配位数的增加,分担了原来超强、强力链内存储的接触力,使得超强、强力链的占比减少,而弱力链占比增加。

3.2.2 颗粒级配对弱、强、超强力链占比的影响

5种不同级配条件下强弱力链占比的大小关系如图8所示,若以P1、P2、P3、P4、P5分别代表M1、M2、M3、M4、M5级配条件下力链的占比大小,则各级配间弱力链占比呈 $P5 > P4 > P1 > P2 \approx P3$ 的关系,强力链呈 $P3 \approx P2 > P1 > P4 > P5$ 的关系,超强力链呈 $P3 > P2 > P1 > P4 > P5$ 的关系。结合颗岩土样级配组成表发现,不均匀系数 C_u 可以较好地解释这一规律,即随不均匀系数的增加弱力链占比增大,强、超强力占比减小,这主要是由于 C_u 较大的级配,粒组分布较广,颗粒间的接触较充分,冲击力的传递路径既多且分散,不容易形成强和超强力链;而 C_u 较小的级配,由于颗粒粒径分布范围较窄,颗粒间接触不充分,较易发生冲击力集中的现象,产生强力链和超强力链。

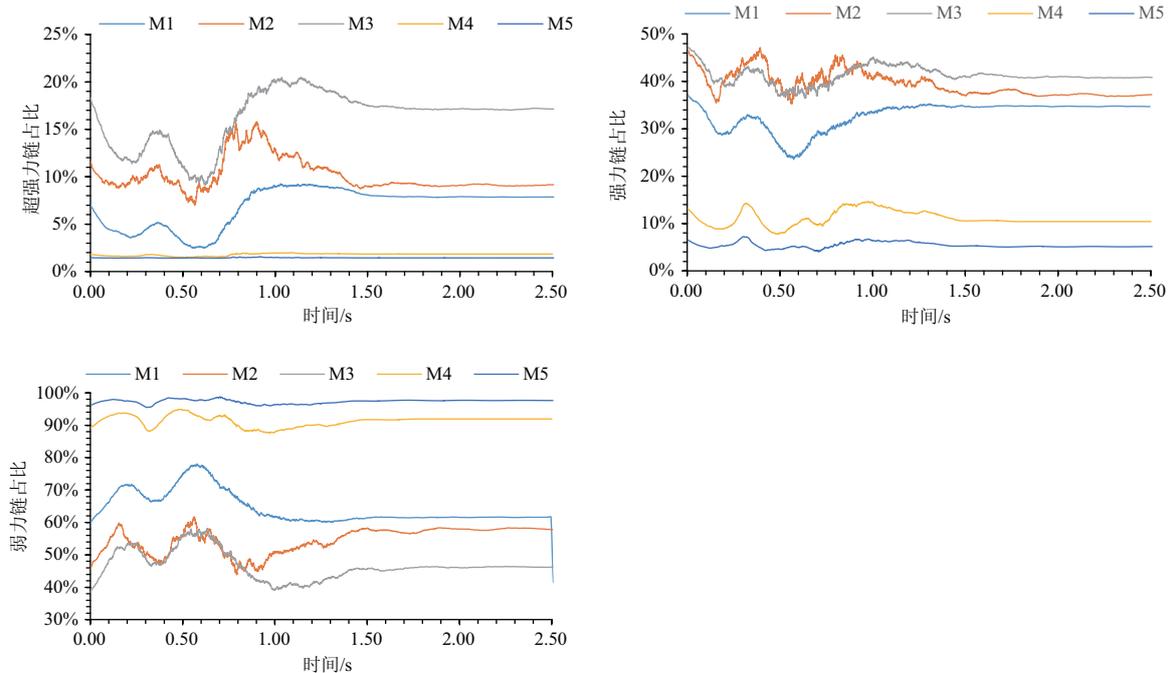


图8 超强、强、弱力链占比时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of the ratio of super strong force chain, strong force chain and weak force chain for sample M1 ~ M5

3.3 颗粒级配对强弱力链分布位置的影响

在碎屑流冲击力的相关研究中,冲击力峰值的作用位置一直是学界关心的重点。但由于冲击力峰值多来自于单个较大颗粒的瞬时撞击,而监测仪器的采集频率、灵敏度往往不足,使得通过物理模型实验的方法很难找到最大冲击力精确的作用位置;数值模拟的方法可以较为精准的测出最大冲击力,但由于需要较大的采样频率,使得运算极为耗时。本节以力强弱力链的分布位置为研究对象,探究强弱力链的分布位置与最大冲击力作用位置的关系,并探究颗粒级配对强弱力链分布位置的影响。

冲击力的力链的分布(图 9)反映了颗粒之间接

触力的传递方向。为了进一步探究碎屑流冲击挡墙过程中强弱力链分布与挡墙所受最大冲击力作用位置的关系,在原有数值模型的基础上,建立碎屑流冲击挡墙的细观模型(图 10)。考虑到要与物理模型实验保持一致,该模型沿挡墙高度分为 6 个测量区(由下到上依次记作:1#、2#、3#、4#、5#、6#),具体尺寸如图 10b 所示;测量区沿滑槽长度方向的尺寸由碎屑流堆积完成后碎屑流颗粒覆盖滑槽的长度来决定。堆积完成后各测量区内的颗粒如图 10c 所示。由于挡墙所受的最大冲击力多由单个大颗粒的碰撞、飞溅造成,因此本节以不同测量区内超强、强、弱力链的配位数(而非力链总数)为监测对象,计算公

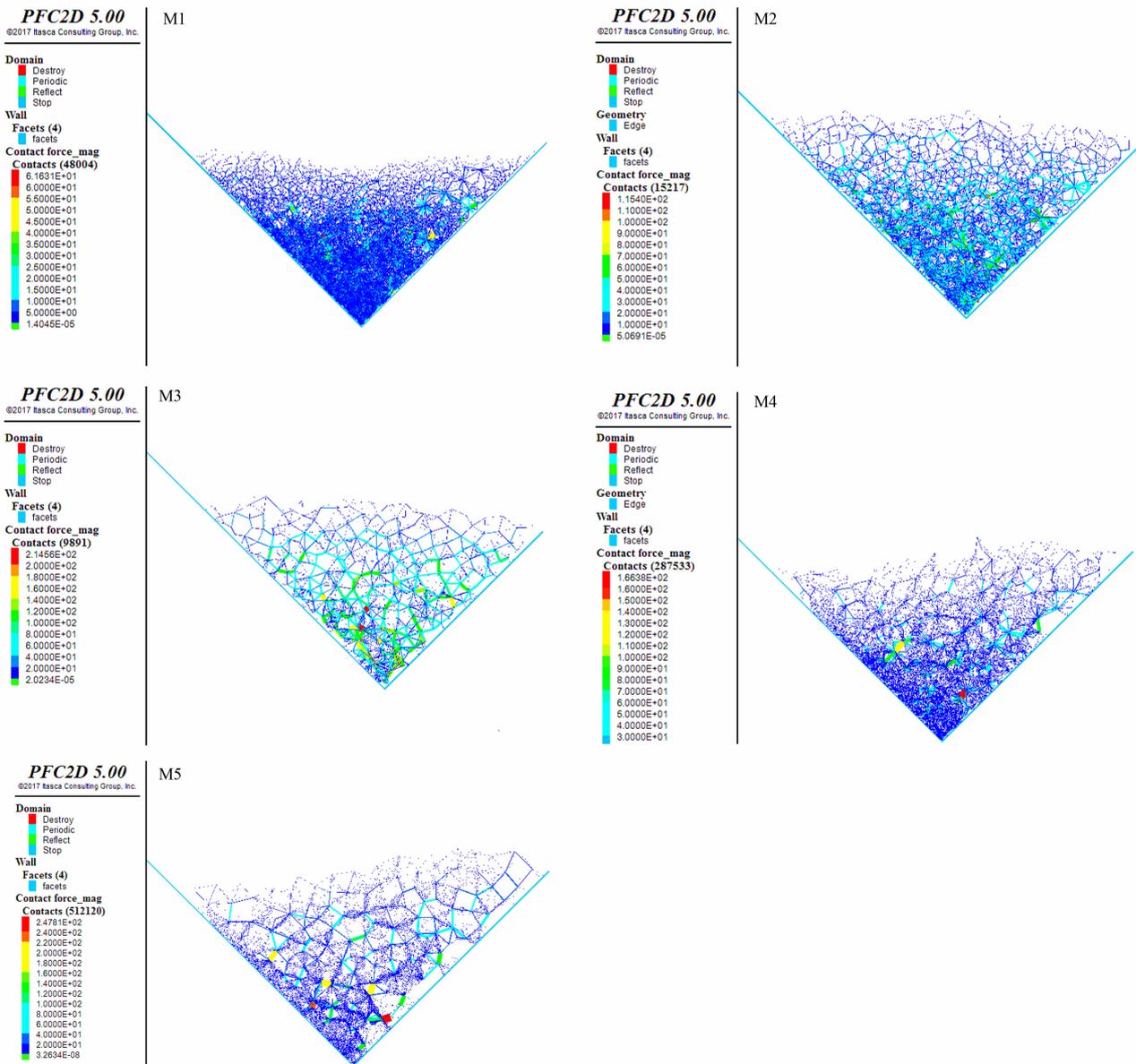


图 9 力链分布图

Fig.9 Force chain distribution

式为:

$$N1 = 2N_p / N_b \quad (4)$$

式中, $N1$ 为超强力链配位数; N_p 为超强力链总数; N_b 是颗粒总数。同理, 强、超强力链配位数也可计算求出。

力链配位数随时间的变化关系, 对曲线进行分析可以发现, M1 级配条件下各测量区内的超强力链配位数(图 11)在其各自峰值时刻的大小关系为: $1\# > 2\# > 3\# > 4\# > 5\# > 6\#$ 而 M2 级配条件下各测量区内超强力链配位数的大小关系在峰值时刻表现为: $1\#$

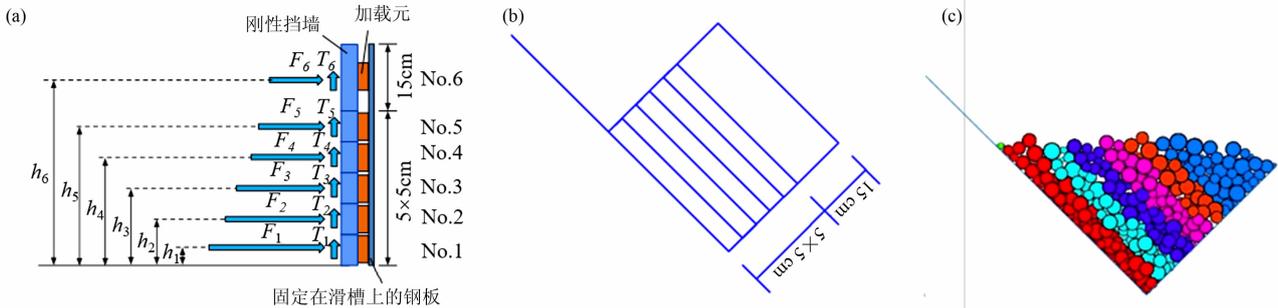


图 10 冲击力微观模型示意图: (a) 模型示意图; (b) 数值模型图; (c) 堆积颗粒分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the mesoscopic model of impact force

(a) Schematic diagram of the model; (b) numerical model; (c) schematic diagram of stacked particle distribution

图 11 ~ 13 分别为 1# ~ 6# 测量区内超强、强、弱 $\approx 2\# > 3\# > 4\# > 5\# > 6\#$, 同理 M3、M4、M5 级配条件

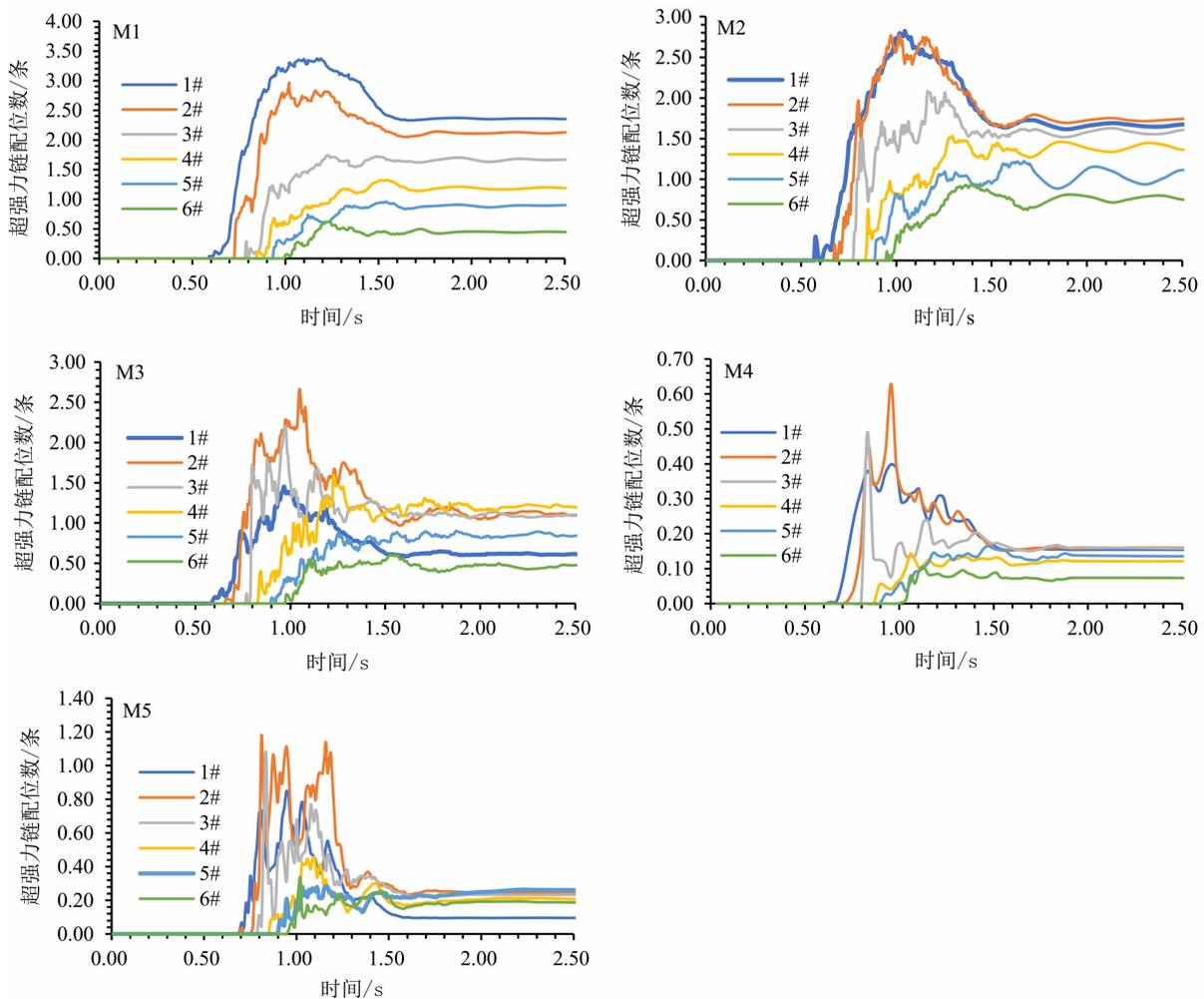


图 11 M1 ~ M5 超强力链配位数

Fig. 11 Time-history curve of coordination number of super strong force chain for sample M1 ~ M5

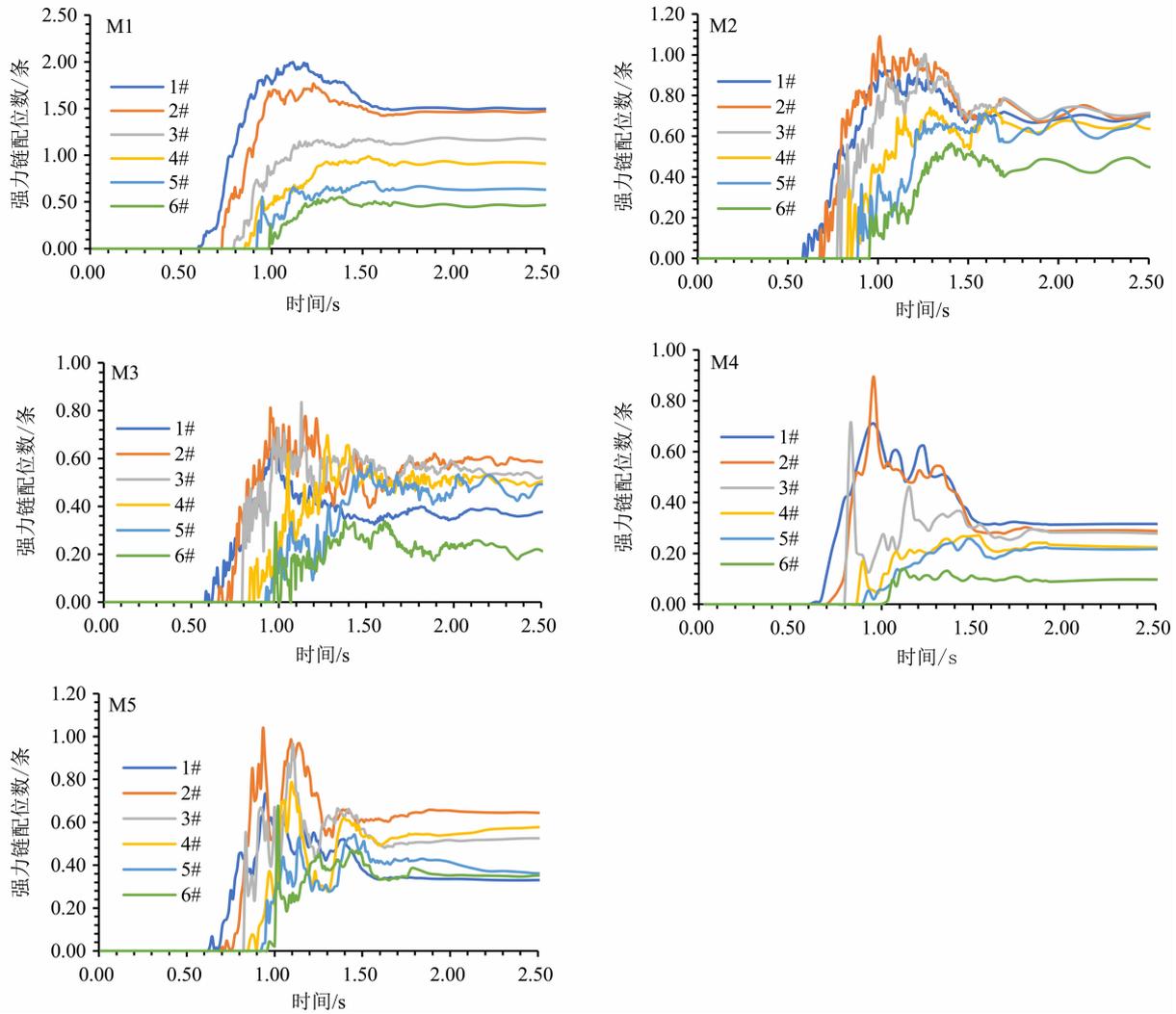


图 12 M1 ~ M5 强力链配位数

Fig. 12 Time-history curve of coordination number of strong force chain for sample M1 ~ M5

下分别表现为: $2\# > 3\# > 4\# > 1\# > 5\# > 6\#$ 、 $2\# > 3\# > 1\# > 4\# > 5\# > 6\#$ 、 $2\# > 3\# > 1\# > 4\# > 5\# > 6\#$; 对比发现, 各级配超强力链配位数的峰值均集中于 1# ~ 3# 之间, 并且随着粗大颗粒占比的增加, 超强力链配位数出现峰值的位置逐渐升高 (M1 级配下 #1 区域的超强力链配位数最多; M2 级配下 #1 与 #2 区域的超强力链配位数共同最多; M3 级配下 #2 区域的超强力链配位数最多)。这主要是由于粗大颗粒占比的增加减少了颗粒间的摩擦耗能、使得冲击能的传递效率增加, 单个颗粒更易获得较大冲击力, 形成更强的力链, 并且由于粗大颗粒组冲击能传递效率高、运动速度快, 使得碰撞发生时, 颗粒更易飞溅且飞溅高度更高、与挡墙作用时则表现为较高的作用位置。图 12 中, 强力链配位数在不同测量区的大小分布与

图 11 一致, 表明此解释具备合理性。并且通过对各监测区域内颗粒的平均速度进行分析 (图 14) 可知, 不同级配条件下各区域内颗粒平均速度的大小关系与超强、强力链配位数大小关系相同。表明颗粒速度的大小是造成冲击力链强弱、分布位置高低的主要原因。

图 13 中, 不同级配下, 各测量区内弱力链配位数的关系均表现为 $1\# > 2\# > 3\# > 4\# > 5\# > 6\#$ 。表明弱力链配位数的分布与颗粒的级配无关。区域 1#、2#、3# 弱力链配位数较高, 是由于这些区域距底板较近, 受到上层颗粒的重力作用较大, 使得颗粒间接触较紧密; 同理, 区域 4#、5#、6#, 配位数较低则是上层颗粒较少, 受到重力较小所致; 此结果进一步证实了, 弱力链在碎屑流运动中, 仅起到填充和支撑强

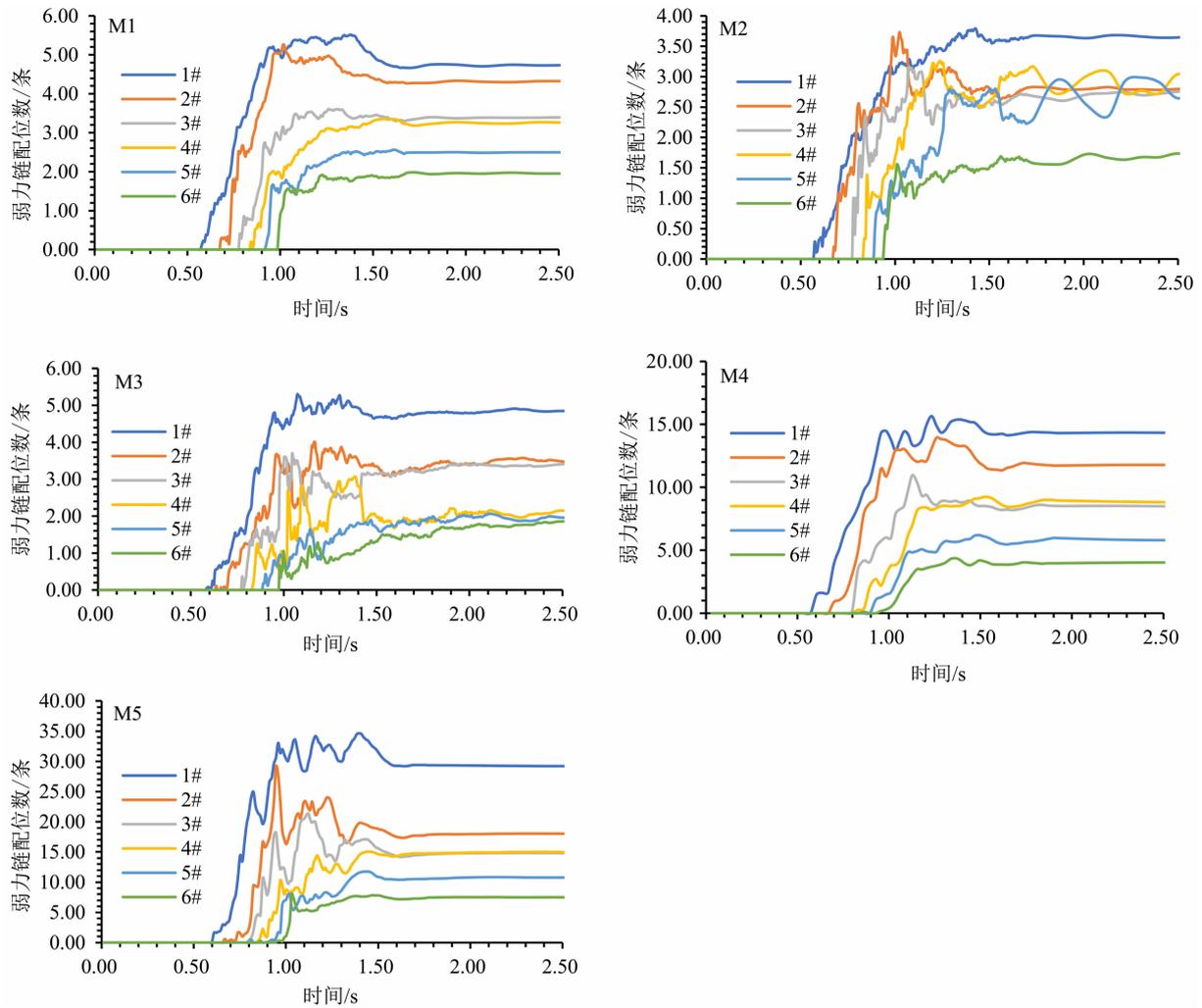


图 13 M1 ~ M5 弱力链配位数

Fig. 13 Time-history curve of coordination number of weak force chain for sample M1 ~ M5

力链作用,而不是冲击力的主要传递途径的理论。将上述超强力链、强力链配位数峰值沿测量区高度的分布关系与现有关于碎屑流冲击力峰值作用位置的相关实验结果作对比可以发现:超强力链配位数峰值的作用位(1#~3#)与实验中最大冲击力作用位置(0.04~0.13 m)是相一致的^[25];且超强、强力链配位数出现峰值时,其作用位置会呈现出:随粗大颗粒占比增加而升高的现象,这也与相关研究^[13]的等效冲击力作用高度理论相符合。

4 结论

本文以物理模型实验及相关文献资料为依据,借助离散元数值模拟软件 PFC^{2D},探究了岩土体颗

粒级配及对碎屑流冲击力力链特征的影响,得出主要结论如下:

(1) 在碎屑流的运动过程中,力链平均配位数、会经历一个先波动减小再增加最后保持稳定的阶段,并且相比碎屑流发生滑动之前,堆积完成后的力链平均配位数有所增加。力链平均配位数与颗粒的平均速度近似呈负相关关系。

(2) 不均匀系数 C_u 是影响力链平均配位数,强弱力链占比的主要因素。随着 C_u 的增加,力链平均配位数增加,强、超强力链占比增加,弱力链占比减小。

(3) 5种级配条件下,超强、强力链配位数峰值均集中于区域1#~3#内,并随着粗大颗粒占比的增加,峰值配位数所在区域的高度增加。然而,

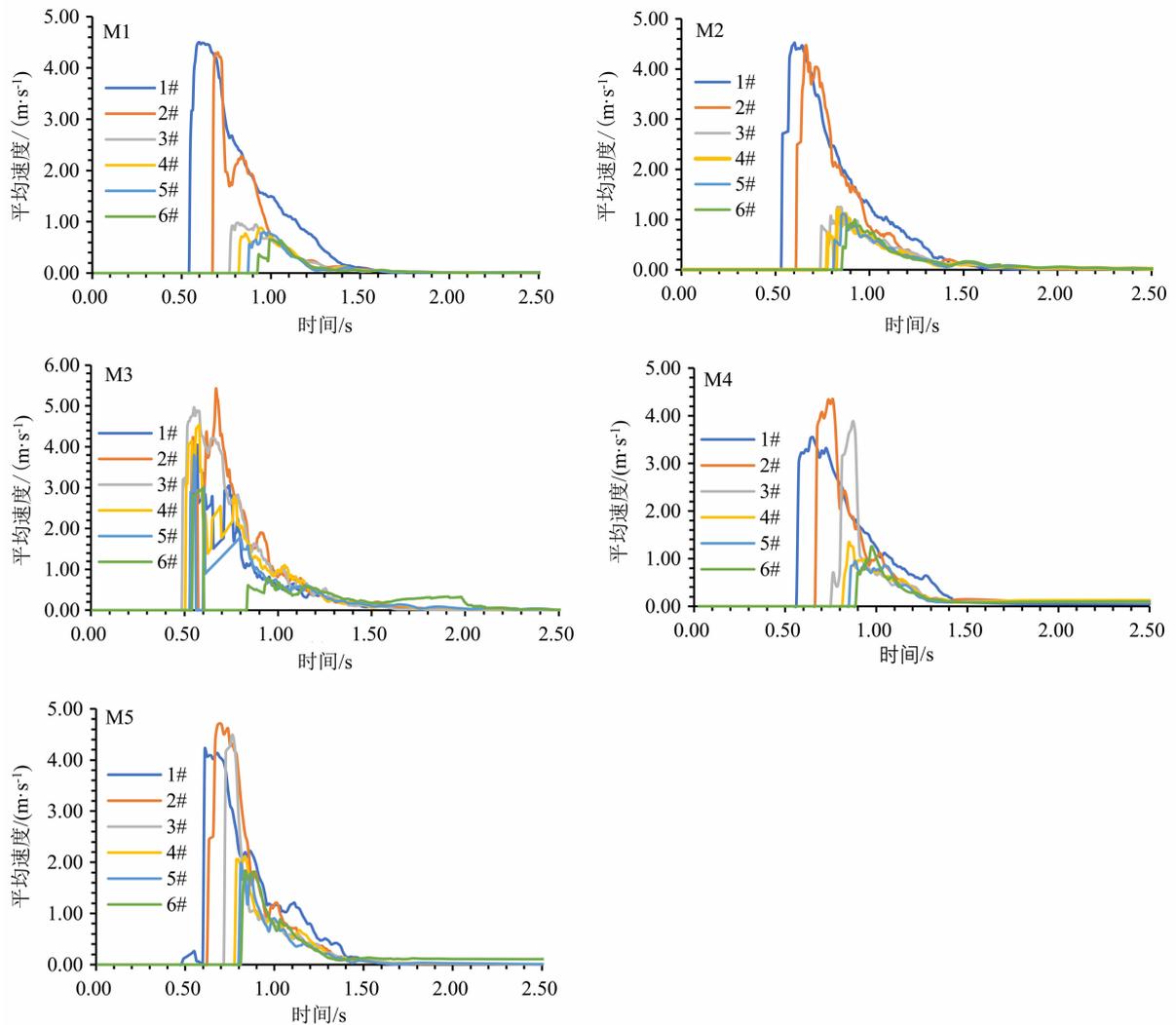


图 14 M1 ~ M5 监测区内平均速度时程曲线

Fig. 14 Time-history curve of average speed in M1 ~ M5 monitoring area

各区域弱力链配位数的大小关系却不随级配变化而改变。

参考文献 (References)

- [1] 杨柳, 李飞, 王金安, 等. 综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化特征[J]. 煤炭学报, 2018, **43**(8): 2144 - 2154. [YANG Liu, LI Fei, WANG Jinan, et al. Structures and evolution characteristics of force chains in top coal and overlying strata under fully mechanized caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, **43**(8): 2144 - 2154]
- [2] 孙其诚, 王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. 物理学报, 2008, **57**(8): 4667 - 4674. [SUN Jicheng, WANG Guangqian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. Acta Physica Sinica, 2008, **57**(8): 4667 - 4674]
- [3] 王金安, 韩现刚, 庞伟东, 等. 综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化光弹试验研究[J]. 工程科学学报, 2017, **39**(1): 13 - 22. [WANG Jin'an, HAN Xian'gang, PANG Weidong, et al. Photoelastic experimental study on the force chain structure and evolution in top coal and overlying strata under fully mechanized top coal caving minings[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, **39**(1): 13 - 22]
- [4] LO C M, LIN Minglang, TANG C L, et al. A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit[J]. Landslides, 2014, **11**(2): 293 - 304.
- [5] John Mark Nicholas Timm Gray. Particle segregation in dense granular flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2018, **50**(1): 407 - 433.
- [6] MAJMUDAR T S, BEHRINGER R P. Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials[J]. Nature, 2005, **435**(745): 1079 - 1082.
- [7] ZHOU Yuanyuan, SHI Zhenming, ZHANG Qingzhao, et al. 3D DEM investigation on the morphology and structure of landslide dams formed by dry granular flows[J]. Engineering Geology, 2019, **258**:

- 1 - 11.
- [8] 顾晓强, 杨朔成. 基于离散元数值方法的砂土小应变弹性特性探讨[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 785 - 791. [GU Xiaoqiang, YANG Shuocheng. Numerical investigation on the elastic properties of granular soils by discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 785 - 791]
- [9] 刘洋, 吴顺川, 周健. 单调荷载下砂土变形过程数值模拟及细观机制研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3199 - 3204 + 3216. [LIU Yang, WU Shunchuan, ZHOU Jian. Numerical simulation of sand deformation under monotonic loading and mesomechanical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3199 - 3204 + 3216]
- [10] 李飞, 杨柳, 王金安, 等. 混合颗粒体光弹性力链定量提取方法[J]. 工程科学学报, 2018, **40**(3): 302 - 312. [LI Fei, YANG Liu, WANG Jinan, et al. A quantitative extraction method of force chains for composite particles in a photoelastic experiment[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, **40**(3): 302 - 312]
- [11] 胡敏云, 肖斌, 张旭俊, 等. 粗粒土细观组构分析的影响因素研究[J]. 浙江工业大学学报, 2018, **46**(3): 342 - 349. [HU Minyun, XIAO Bin, ZHANG Xujun, et al. Study on influential factors of micro-fabric analysis of granular sand[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2018, **46**(3): 342 - 349]
- [12] TORDESILLAS A, O'SULLIVAN P, WALKER D M, et al. Evolution of functional connectivity in contact and force chain networks: Feature vectors, k-cores and minimal cycles [J]. Comptes Rendus Mécanique, 2010, **338**(10/11): 556 - 569.
- [13] 常明丰, 裴建中, 黄平明, 等. 考虑级配颗粒物质间接触力力链的分布概率分析[J]. 材料导报, 2018, **32**(20): 3618 - 3622. [CHANG Mingfeng, PEI Jianzhong, HUANG Pingming, et al. Analysis on the distribution probability of force among granular matter considering gradation [J]. Materials Review, 2018, **32**(20): 3618 - 3622]
- [14] 樊晓一, 杨海龙, 田述军, 等. 滑坡碎屑流运动参数与影响因素敏感度研究[J]. 山地学报, 2016, **34**(6): 724 - 731. [FAN Xiaoyi, YANG Hailong, TIAN Shujun, et al. Susceptibility degree of factors influence on the movement parameters of landslide-debris avalanches[J]. Mountain Research, 2016, **34**(6): 724 - 731]
- [15] RATTANADIT K, BOBARU F, PROMRATANA K, et al. Force chains and resonant behavior in bending of a granular layer on an elastic support[J]. Mechanics of Materials, 2009, **41**(6): 691 - 706.
- [16] YI Chenhong, YUAN Liu, MIAO Tiande, et al. Force transmission in three-dimensional hexagonal-close-packed granular arrays with point defect submitted to a point load [J]. Granular Matter, 2007, **9**(3/4): 195 - 203
- [17] 李天话, 樊晓一, 姜元俊. 岩土体颗粒级配碎屑流冲击作用的影响研究 [J]. 山地学报, 2018, **36**(2): 289 - 297. [LI Tianhua, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Influence of Gradation on the Impact Effect of Landslide Debris Flow [J]. Mountain Research, **36**(2): 289 - 297]
- [18] GORDON G Z, CHARLES W N. Numerical investigation of reverse segregation in debris flows by DEM [J]. Granular Matter, 2010, **12**(5): 507 - 516.
- [19] YANG Qing, FEI Cai, UGAI K, et al. Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume [J]. Engineering Geology, 2011, **122**(3/4): 249 - 260.
- [20] 李天话, 樊晓一, 姜元俊. 不同颗粒级配滑坡碎屑流等效冲击力及作用位置分布研究 [J]. 山地学报, 2018, **36**(5): 740 - 749. [LI Tianhua, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Study on equivalent impact force and impact distribution range of landslide debris flow with different gradation [J]. Mountain Research, 2018, **36**(5): 740 - 749]
- [21] 王金安, 梁超, 庞伟东. 颗粒体双轴加载双向流动力链演化光弹试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, **37**(11): 3041 - 3047 + 3064. [WANG Jinan, LIANG Chao, PANG Weidong. Photoelastic experiment on force chain evolution of particle aggregate under the conditions of biaxially loading and bilaterally flowing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(11): 3041 - 3047 + 3064]
- [22] JIANG Yuanjun, TOWHATA I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, **46**(4): 713 - 729.
- [23] 张伟, 周剑, 于世伟, 等. 双轴压缩下颗粒物质接触力与力链特性研究 [J]. 应用力学学报, 2018 (3): 530 - 537 + 687. [ZHANG Hui, ZHOU Jian, YU Shiwei, et al. Investigation on contact force and force chain of granular matter in biaxial compression [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018 (3): 530 - 537 + 687]
- [24] 孙其诚, 金峰, 王光谦, 等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构 [J]. 物理学报, 2010, **59**(1): 30 - 37. [SUN Jicheng, JIN Feng, WANG Guangqian, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2D [J]. Acta Physica Sinica, 2010, **59**(1): 30 - 37]
- [25] 眭静, 姜元俊, 樊晓一, 等. 碎屑流冲击刚性挡墙的力学模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(1): 121 - 132. [SUI Jing, JIANG Yuanjun, FAN Xiaoyi, et al. An impact model of granular flows on a rigid wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(1): 121 - 132]

Effect of Granularity of Rock and Soil Mass on Regularity of Impact Force Chain in a Fluidized Landslide

ZHANG Zhidong¹, FAN Xiaoyi^{1*}, JIANG Yuanjun²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

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

Abstract: The characteristics of impact force chain reflect the contact relationship between debris flow particles, which provides a new theoretical method for the study of characteristics of the impact force of landslide debris flow. Based on experimental data of physical model, and assisted with discrete element simulation software PFC^{2D}, it explored the relevant characteristics of position distribution of force chain coordination, super-strong force chain, strong force chain, weak force chain and strong and weak force chain under different grading conditions of rock and soil. The results suggested that during the movement of debris flow, the force-chain coordination number, the ratio of strong and super-strength chains underwent a process of fluctuated reduction and then increased to a final stable stage, and the force chain coordination number had a negative correlation with average velocity of particles; the uneven coefficient C_u in the rock and soil grain composition was major factor affecting coordination number of the force chain, the super-strong force chain, the strong force chain, and the weak force chain; in process of debris flow impacting retaining wall, the strong and super-strong force chains mainly happened in the bottom, and the position of the super-strong force chain coordination peak increased gradually as content of coarse particles increased.

Key words: impact force chain; coordination number; non-uniformity coefficient; particle gradation; PFC^{2D}