



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116296191 A

(43) 申请公布日 2023. 06. 23

(21) 申请号 202310384171.8

(22) 申请日 2023.04.12

(71) 申请人 中南大学

地址 410012 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

(72) 发明人 赵炼恒 谢周州 王曙光 黄栋梁
张子健 赵伟龙 吕国顺

(74) 专利代理机构 长沙惟盛赞鼎知识产权代理
事务所(普通合伙) 43228

专利代理师 马凤兰

(51) Int. Cl.

G01M 7/02 (2006.01)

G01M 7/08 (2006.01)

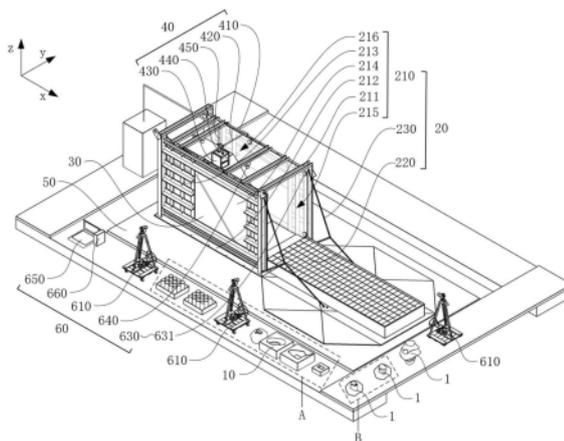
权利要求书2页 说明书14页 附图9页

(54) 发明名称

模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置

(57) 摘要

本申请涉及一种模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,属于岩土工程和地质工程试验技术领域,该试验装置包括非规则岩体构造系统、模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统、振动台以及数据监测与采集系统。本申请提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,在模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统和振动台的相互配合下,能够以多种工况条件进行地震作用下崩塌落石的全过程运动试验,数据监测与采集系统监测全过程运动试验并收集数据信息,获得的试验结果可靠,能够较好地诠释地震动效应下崩塌落石的全过程运动特征以及堆积体边坡的动力响应特征与变形特征,为地震高发区崩塌落石灾害评估和综合防控提供科学依据与技术支持。



1. 一种模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述试验装置包括非规则岩体构造系统、模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统、振动台以及数据监测与采集系统;其中:

所述非规则岩体构造系统,用于制备落石模型;

所述模型箱,包括箱身和延伸结构,所述箱身具有试验空间,所述箱身上至少设置有连通所述试验空间的侧部开口,所述延伸结构在所述侧部开口处与所述箱身连接,至少部分所述落石模型在所述延伸结构上停积;

所述堆积体模型,设置于所述试验空间内,所述堆积体模型具有向靠近所述侧部开口方向倾斜向下延伸的坡面;

所述崩塌落石投放系统,设置于试验空间内并处于所述堆积体模型的上方,所述崩塌落石投放系统用于装填所述落石模型后向所述坡面投放所述落石模型;

所述振动台,用于对所述模型箱、所述堆积体模型和所述崩塌落石投放系统施加振动;

所述数据监测与采集系统,用于实时监测试验全过程中所述落石模型的运动特性、停积位置以及所述堆积体模型的形变,并收集试验过程中产生的数据信息。

2. 根据权利要求1所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述落石模型由多个模拟天然岩样的人造非规则岩块粘结而成,不同种类的所述落石模型具有不同软硬程度和不同岩体结构特性。

3. 根据权利要求1所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述箱身包括:

立体框架;

底板,安装于所述立体框架的底部;以及

三个侧壁,分别安装于所述立体框架的三个侧部;

所述立体框架、所述侧壁与所述底板围合形成具有所述侧部开口和顶部开口的所述试验空间。

4. 根据权利要求3所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,相对的两个所述侧壁上均设置有窗口,所述窗口上安装有透明板。

5. 根据权利要求3所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述箱身通过所述底板可拆卸地连接于所述振动台的水平台面,所述堆积体模型安装在所述底板上,所述崩塌落石投放系统安装在所述立体框架上,以使所述箱身、所述堆积体模型和所述崩塌落石投放系统同步振动。

6. 根据权利要求5所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述箱身具有垂直于所述侧部开口第一水平方向和垂直于所述第一水平方向的第二水平方向,所述崩塌落石投放系统包括:

两个第一滑轨,均设置于所述坡面上方的所述立体框架上,两个所述第一滑轨均沿所述第一水平方向延伸并沿所述第二水平方向相互平行设置;

第二滑轨,沿所述第二水平方向设置,所述第二滑轨的两端分别滑动连接于所述第一滑轨;以及

落石投放箱,滑动连接于所述第二滑轨,所述落石投放箱包括箱体和自动启闭门,所述箱体的侧部和/或顶部设置有装填口,所述箱体的底部设置有投放口,所述自动启闭门安装

于所述投放口处的所述箱体上。

7. 根据权利要求6所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述崩塌落石投放系统还包括:

连接件,一端滑动连接于所述第二滑轨,所述连接件的另一端铰接于所述箱体的顶部;
以及

直线运动机构,具有能够沿竖向往复直线运动的运动端,所述运动端和所述连接件间隔分布并连接于所述箱体的顶部;

在所述运动端运动的过程中,所述运动端能够带动所述箱体绕所述连接件和所述箱体的连接处转动以改变所述投放口的朝向。

8. 根据权利要求7所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述连接件为伸缩杆。

9. 根据权利要求1所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述堆积体模型包括填筑而成的地质材料和覆盖于所述地质材料顶部的覆盖层。

10. 根据权利要求1所述的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,其特征在于,所述数据监测与采集系统包括:

高速相机,用于对试验现象进行逐帧记录;

无线加速度传感器,用于获取所述堆积体模型的振动加速度信号;

定位模块,用于获取所述落石模型的轨迹与姿态数据;

激光位移传感器,用于获取试验过程中所述堆积体模型的竖向沉降变形;

电脑控制器,用于控制所述高速相机、所述无线加速度传感器、所述定位模块和所述激光位移传感器的启闭以及数据互通;以及

数据存储器,用于存储所述电脑控制器的数据。

模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置

技术领域

[0001] 本申请涉及岩土工程和地质工程试验技术领域,特别是涉及一种模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置。

背景技术

[0002] 地震引发的次生灾害包括滑坡、崩塌落石、泥石流、地裂缝、地面塌陷、砂土液化等地质灾害。以山区地震为例,地震岩崩增长百分比高达617%,是滑坡、泥石流地灾增量的4~5倍,崩塌落石治理的占比达到地震地质灾害治理总量的40%。现有技术中,崩塌落石的研究方法主要包括理论分析、数值模拟、现场试验和模型试验,模型试验相比于其他研究方法具有试验条件相对可控、相对安全、可重复性强等优点,是研究崩塌落石的重要手段。

[0003] 但是,现有技术中涉及崩塌落石模型试验研究的试验装置的结构功能普遍比较单一,可设置的工况条件相对较少,难以真实地还原出地震作用下崩塌落石从下落到停积全过程的运动特性,严重影响了试验精度。

发明内容

[0004] 基于此,有必要提供一种模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,来较为真实地模拟地震作用下崩塌落石下落、与坡体相互作用碰撞破碎、沿坡面运动以及在坡脚处向前滚动滑移直至停积的全过程,且能考虑不同工况条件下如落石不同坠落高度、不同下坠角度、不同坠落位置,不同坡体材料及覆盖层等复杂多因素共同作用下,崩塌落石全过程的运动特征以及坡体的动力响应特征。

[0005] 为此,根据本申请的一个方面,提供了一种模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,该试验装置包括非规则岩体构造系统、模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统、振动台以及数据监测与采集系统;其中:

[0006] 非规则岩体构造系统,用于制备落石模型;

[0007] 模型箱,包括箱身和延伸结构,箱身具有试验空间,箱身上至少设置有连通试验空间的侧部开口,延伸结构在侧部开口处与箱身连接,至少部分落石模型在延伸结构上停积;

[0008] 堆积体模型,设置于试验空间内,堆积体模型具有向靠近侧部开口方向倾斜向下延伸的坡面;

[0009] 崩塌落石投放系统,设置于试验空间内并处于堆积体模型的上方,崩塌落石投放系统用于装填落石模型后向坡面投放落石模型;

[0010] 振动台,用于对模型箱、堆积体模型和崩塌落石投放系统施加振动;

[0011] 数据监测与采集系统,用于实时监测试验全过程中落石模型的运动特性、停积位置以及堆积体模型的形变,并收集试验过程中产生的数据信息。

[0012] 可选地,落石模型由多个模拟天然岩样的人造非规则岩块粘结而成,不同种类的落石模型具有不同软硬程度和不同岩体结构特性。

[0013] 可选地,箱身包括:

- [0014] 立体框架,由两个矩形边框和四根连接杆拼接而成;
- [0015] 底板,安装于立体框架的底部;以及
- [0016] 三个侧壁,分别安装于立体框架的三个侧部;
- [0017] 立体框架、侧壁与底板围合形成具有侧部开口和顶部开口的试验空间。
- [0018] 可选地,相对的两个所述侧壁上均设置有窗口,窗口上安装有透明板。
- [0019] 可选地,箱身通过底板可拆卸地连接于振动台的水平台面,堆积体模型安装在底板上,崩塌落石投放系统安装在立体框架上,以使箱身、堆积体模型和崩塌落石投放系统同步振动。
- [0020] 可选地,箱身具有垂直于侧部开口第一水平方向和垂直于第一水平方向的第二水平方向,崩塌落石投放系统包括:
- [0021] 两个第一滑轨,均设置于坡面上方的立体框架上,两个第一滑轨均沿第一水平方向延伸并沿第二水平方向相互平行设置;
- [0022] 第二滑轨,沿第二水平方向设置,第二滑轨的两端分别滑动连接于第一滑轨;以及
- [0023] 落石投放箱,滑动连接于第二滑轨,落石投放箱包括箱体和自动启闭门,箱体的侧部和/或顶部设置有装填口,箱体的底部设置有投放口,自动启闭门安装于投放口处的箱体上。
- [0024] 可选地,崩塌落石投放系统还包括:
- [0025] 连接件,一端滑动连接于第二滑轨,连接件的另一端铰接于箱体的顶部;以及
- [0026] 直线运动机构,具有能够沿竖向往复直线运动的运动端,运动端和连接件间隔分布并连接于箱体的顶部;
- [0027] 在运动端运动的过程中,运动端能够带动箱体绕连接件和箱体的连接处转动以改变投放口的朝向。
- [0028] 可选地,连接件为伸缩杆。
- [0029] 可选地,堆积体模型包括填筑而成的地质材料和覆盖于地质材料顶部的覆盖层。
- [0030] 可选地,数据监测与采集系统包括:
- [0031] 高速相机,用于对试验现象进行逐帧记录;
- [0032] 无线加速度传感器,用于获取堆积体模型的振动加速度信号;
- [0033] 定位模块,用于获取落石模型的轨迹与姿态数据;
- [0034] 激光位移传感器,用于获取试验过程中堆积体模型的竖向沉降变形;
- [0035] 电脑控制器,用于控制高速相机、无线加速度传感器、定位模块和激光位移传感器的启闭以及数据互通;以及
- [0036] 数据存储器,用于存储电脑控制器的数据。
- [0037] 本申请提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的有益效果在于:与现有技术相比,本申请的试验装置包括非规则岩体构造系统、模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统、振动台以及数据监测与采集系统,非规则岩体构造系统可以制备落石模型,来模拟真实的崩塌落石,提高试验的准确度;模型箱的试验空间内设置有堆积体模型和崩塌落石投放系统,崩塌落石投放系统向堆积体模型的坡面投放落石模型来进行试验,在模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统和振动台的相互配合下,本申请的试验装置能够以不同的空间坠落位置、坠落角度、堆积体模型的类型(如坡体材料、坡度、坡高等)、坡面覆盖层

类型、地震波类型等工况条件进行地震作用下崩塌落石的全过程运动试验;数据监测与采集系统能够实时监测试验全过程中落石模型的轨迹数据与姿态数据以及堆积体模型的内部加速度信息和沉降变形信息,并收集试验过程中产生的数据信息;如此,通过本试验装置获得的试验结果可靠,能够较好地诠释地震动效应下崩塌落石的全过程运动特征以及堆积体边坡的动力响应特征与变形特征,为地震高发区崩塌落石灾害评估和综合防控提供科学依据与技术支持。

[0038] 根据本申请的另一个方面,提供了一种用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法,该装置包括非规则岩体构造系统、模型箱、堆积体模型、崩塌落石投放系统、振动台以及数据监测与采集系统,该试验方法包括如下步骤:

[0039] 确定试验条件;

[0040] 制备落石模型,使用非规则岩体构造系统制备落石模型;

[0041] 安装模型箱、堆积体模型和崩塌落石投放系统,在振动台上安装模型箱,在模型箱内安装堆积体模型和崩塌落石投放系统;

[0042] 安装数据监测与采集系统;

[0043] 投放落石模型,崩塌落石投放系统向堆积体模型投放落石模型;

[0044] 监测和采集试验数据,数据监测与采集系统实时监测并采集试验全过程中落石模型和堆积体模型的数据;以及

[0045] 整理试验设备。

[0046] 可选地,试验条件包括落石模型的相似材料配比、落石模型的投放条件、堆积体模型的材质和振动台的工作参数。

[0047] 可选地,不同相似材料配比的落石模型具有不同的抗压强度。

[0048] 可选地,投放条件包括落石模型的投放高度和落石模型的投放角度。

[0049] 可选地,堆积体模型包括填筑而成的地质材料和覆盖于地质材料顶部的覆盖层,覆盖层的材质为混凝土、土质或草皮。

[0050] 可选地,在整理试验设备步骤之后还包括:

[0051] 更改试验条件,更改落石模型的相似材料配比、落石模型的投放条件和堆积体模型的材质中的一个或多个;以及

[0052] 重复进行试验。

[0053] 可选地,在更改试验条件的步骤中采用控制单一变量法,改变试验条件中的一个,另外的试验条件保持不变。

[0054] 可选地,模型箱包括具有一侧部开口的箱身以及在侧部开口处与箱身连接的延伸结构,堆积体模型具有向靠近侧部开口方向倾斜向下延伸的坡面,在投放落石模型的步骤中,落石模型的运动过程包括下落、碰撞坡面和解体,落石模型解体后形成多个岩块,岩块的运动过程包括沿坡面运动以及在模型箱上或延伸结构上停积,堆积体模型在被落石模型碰撞后产生形变。

[0055] 可选地,延伸结构的顶面贴设有透明网格刻度纸。

[0056] 可选地,在监测和采集试验数据的步骤中,试验数据包括落石模型、岩块和堆积体模型的逐帧图像信息,以及落石模型和岩块的轨迹数据与姿态数据,以及堆积体模型的加速度响应数据、沉降数据和全场变形数据。

[0057] 本申请提供的试验方法的有益效果在于:与现有技术相比,本申请的试验方法能够以不同的空间坠落位置、坠落角度、堆积体模型的类型(如坡体材料、坡度、坡高等)、坡面覆盖层类型、地震波类型等工况条件进行地震作用下崩塌落石的全过程运动试验,该试验方法操作简单、安全、试验结果可靠,能够较好地诠释地震动效应下崩塌落石的全过程运动特征以及堆积体边坡的动力响应特征与变形特征,为地震高发区崩塌落石灾害评估和综合防控提供科学依据与技术支撑。

附图说明

[0058] 为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0059] 图1为本申请实施例提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的立体结构示意图;

[0060] 图2为图1中A处的放大图;

[0061] 图3为图1中B处的放大图;

[0062] 图4为本申请实施例提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的落石模型的立体结构示意图;

[0063] 图5为本申请实施例提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的箱身的立体结构示意图;

[0064] 图6为本申请实施例提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的崩塌落石投放系统的立体结构示意图;

[0065] 图7为本申请实施例提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的落石投放箱的立体结构示意图;

[0066] 图8为本申请实施例提供的模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置的堆积体模型的截面示意图;

[0067] 图9为本申请一个实施例提供的用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的流程示意图;

[0068] 图10为本申请另一个实施例提供的用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的流程示意图。

[0069] 附图标记说明:

[0070] 10、非规则岩体构造系统;110、取芯岩样;120、人造岩样;130、3D打印硅胶模具;140、人造非规则岩块;150、人造顶盖;

[0071] 20、模型箱;210、箱身;211、立体框架;2111、1号槽钢;2112、2号槽钢;2113、3号槽钢;2114、4号槽钢;212、底板;213、侧壁;2131、1号角钢;2132、2号角钢;2133、3号角钢;2134、1号矩形钢板;2135、2号矩形钢板;214、透明板;215、侧部开口;216、顶部开口;220、延伸结构;230、铰链;240、三角钢板;

[0072] 30、堆积体模型;310、地质材料;320、覆盖层;321、坡面;330、水磨石颗粒;

[0073] 40、崩塌落石投放系统;410、第一滑轨;420、第二滑轨;430、落石投放箱;431、箱

体;4311、装填口;432、自动启闭门;4321、弹簧门;4322、门控;433、顶部抽板;434、侧部抽板;440、连接件;450、直线运动机构;451、液压升降杆;452、输油管道;453、液压控制系统;460、第一滑块;470、第二滑块;

[0074] 50、振动台;

[0075] 60、数据监测与采集系统;610、高速相机;620、无线加速度传感器;630、定位模块;631、定位基站;632、定位装置;633、姿态传感器;640、激光位移传感器;650、电脑控制器;660、数据存储器;

[0076] 1、落石模型。

具体实施方式

[0077] 为使本申请的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图对本申请的具体实施方式做详细的说明。在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本申请。但是本申请能够以很多不同于在此描述的其他方式来实施,本领域技术人员可以在不违背本申请内涵的情况下做类似改进,因此本申请不受下面公开的具体实施例的限制。

[0078] 在本申请的描述中,需要理解的是,术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”、“轴向”、“径向”、“周向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本申请和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本申请的限制。

[0079] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中,“多个”的含义是至少两个,例如两个,三个等,除非另有明确具体的限定。

[0080] 在本申请中,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或成一体;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系,除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

[0081] 在本申请中,除非另有明确的规定和限定,第一特征在第二特征“上”或“下”可以是第一和第二特征直接接触,或第一和第二特征通过中间媒介间接接触。而且,第一特征在第二特征“之上”、“上方”和“上面”可是第一特征在第二特征正上方或斜上方,或仅仅表示第一特征水平高度高于第二特征。第一特征在第二特征“之下”、“下方”和“下面”可以是第一特征在第二特征正下方或斜下方,或仅仅表示第一特征水平高度小于第二特征。

[0082] 需要说明的是,当元件被称为“固定于”或“设置于”另一个元件,它可以直接在另一个元件上或者也可以存在居中的元件。当一个元件被认为是“连接”另一个元件,它可以是直接连接到另一个元件或者可能同时存在居中元件。本文所使用的术语“垂直的”、“水平的”、“上”、“下”、“左”、“右”以及类似的表述只是为了说明的目的,并不表示是唯一的实施方式。

[0083] 根据本申请的一个方面,请一并参阅图1至图8,本申请的实施例提供了一种模拟

地震作用下崩塌落石全过程运动的试验装置,该试验装置包括非规则岩体构造系统10、模型箱20、堆积体模型30、崩塌落石投放系统40、振动台50以及数据监测与采集系统60;其中:非规则岩体构造系统10用于制备落石模型1;模型箱20包括箱身210和延伸结构220,箱身210具有试验空间,箱身210上至少设置有连通试验空间的侧部开口215,延伸结构220在侧部开口215处与箱身210连接,至少部分落石模型1在延伸结构220上停积;堆积体模型30设置于试验空间内,堆积体模型30具有向靠近侧部开口215方向倾斜向下延伸的坡面321;崩塌落石投放系统40设置于试验空间内并处于堆积体模型30的上方,崩塌落石投放系统40用于装填落石模型1后向坡面321投放落石模型1;振动台50用于对模型箱20、堆积体模型30和崩塌落石投放系统40施加振动;数据监测与采集系统60用于实时监测试验全过程中落石模型1的运动特性、停积位置以及堆积体模型30的形变,并收集试验过程中产生的数据信息。

[0084] 本申请实施例中,该试验装置包括非规则岩体构造系统10、模型箱20、堆积体模型30、崩塌落石投放系统40、振动台50以及数据监测与采集系统60,非规则岩体构造系统10可以制备落石模型1,来模拟真实的崩塌落石,提高试验的准确度;模型箱20的试验空间内设置有堆积体模型30和崩塌落石投放系统40,崩塌落石投放系统40向堆积体模型30的坡面321投放落石模型1来进行试验,在模型箱20、堆积体模型30、崩塌落石投放系统40和振动台50的相互配合下,本申请的试验装置能够以不同的空间坠落位置、坠落角度、堆积体模型30的类型、坡面321覆盖层320类型、地震波类型等工况条件进行地震作用下崩塌落石的全过程运动试验;数据监测与采集系统60能够实时监测试验全过程中落石模型1的轨迹数据与姿态数据以及堆积体模型30的内部加速度信息和沉降变形信息,并收集试验过程中产生的数据信息;如此,通过本试验装置获得的试验结果可靠,能够较好地诠释地震动效应下崩塌落石的全过程运动特征以及堆积体边坡的动力响应特征与变形特征,为地震高发区崩塌落石灾害评估和综合防控提供科学依据与技术支持。

[0085] 在此需要说明的是,请参阅图1,为了便于解释说明,方向x为第一水平方向,方向y为第二水平方向。方向z为竖直方向。

[0086] 在一个实施例中,请参阅图4,落石模型1由多个模拟天然岩样的人造非规则岩块140粘结而成,不同种类的落石模型1具有不同软硬程度和不同岩体结构特性。

[0087] 示例性地,请一并参阅图2和图3,非规则岩体构造系统10主要包括取芯岩样110、人造岩样120、3D打印硅胶模具130、人造非规则岩块140以及人造顶盖150,主要用于制备具有软岩和硬岩材料特性以及岩体结构特性的人造非规则岩体,从而模拟落石材料。

[0088] 具体地,选择合适的依托工程,依托工程中获取的取芯岩样110,加工后开展圆柱形标准试样的单轴压缩试验、三轴试验等获取其物理力学参数如黏聚力、内摩擦角、抗压强度等,对不同配合比的相似材料配制而成的人造岩样120开展同样的参数测定试验,确定人造岩样120相似材料的配合比。

[0089] 具体地,以含有主控结构面的危岩体作为原型,按照几何相似比开展地形和危岩体非规则形貌的计算机辅助立体建模,利用3D打印技术和硅胶翻模技术制备用于非规则岩块浇筑的3D打印硅胶模具130,通过配比后的浆液浇筑试样,脱模养护后形成特定强度,分别制备具有软岩和硬岩特性的非规则岩块。岩块之间通过配比后的粘合剂粘结,形成远低于岩块本身的粘结强度,最终拼装出含主控结构面的落石模型1。

[0090] 进一步地,考虑崩塌落石的岩石强度。本实例的人造非规则岩块140分为硬岩相似

材料与软岩相似材料,抗压强度分别为 $\sigma_{c1}=10\text{MPa}$ 和 $\sigma_{c2}=2.5\text{MPa}$ 。

[0091] 在另一个实施例中,请一并参阅图1和图5,箱身210包括立体框架211、底板212和三个侧壁213;底板212安装于立体框架211的底部;三个侧壁213分别安装于立体框架211的三个侧部;立体框架211、侧壁213与底板212围合形成具有侧部开口215和顶部开口216的试验空间。

[0092] 可以理解的是,上述的侧壁213可以为一整块板材,或者由多块小面积的板材拼接而成大面积的组合框,或者其他能起到围挡作用的结构,在此不做唯一限定。

[0093] 其中,侧壁213为由多块小面积的板材拼接而成大面积的组合框,可以便于组装和后续改装。

[0094] 在一个具体的实施例中,请一并参阅图1和图5,相对的两个侧壁213上均设置有窗口,窗口上安装有透明板214。

[0095] 优选地,设置有窗口的侧壁213为多块小面积的板材拼接而成的组合框,剩下的一个侧壁213为一整块板材。多块小面积板材拼接而成的侧壁213在指定区域内空缺板材来形成窗口,而透明板214设置在侧壁213的内侧部并覆盖整个立体框架211的该侧部,来遮挡小面积板材之间的空隙。

[0096] 示例性地,透明板214为透明亚克力板,透明亚克力板具有可与玻璃比拟的透光率,但密度只有玻璃的一半;此外,它不像玻璃那么易碎,即使破坏,也不会像玻璃那样形成锋利的碎片,是作为本实施例透明板214的较优选择。

[0097] 具体地,箱身210主要包含可拆卸且带孔的槽钢、角钢、矩形钢板、透明亚克力板以及底板212,便于进行室内试验时灵活地组装与拆卸,所用槽钢截面尺寸保持一致,长度大小分为4种分别是1号槽钢2111、2号槽钢2112、3号槽钢2113与4号槽钢2114,所用角钢截面尺寸相同,长度大小分为3种分别是1号角钢2131、2号角钢2132与3号角钢2133,矩形钢板有两种尺寸大小分别是1号矩形钢板2134与2号矩形钢板2135。

[0098] 首先,沿下述的竖直方向z放置四根1号槽钢2111、沿下述的第一水平方向x放置四根2号槽钢2112以及箱体431前后两侧沿下述的第二水平方向y放置两根3号槽钢2113组装连接,进而形成矩形的立体框架211。同时,立体框架211的顶部还沿第二水平方向y布置有四根长度略短于3号槽钢2113的4号槽钢2114,四根4号槽钢2114沿第一水平方向x依次间隔布置来对箱身210的加固,箱身210顶部的两根2号槽钢2112近顶面处的单侧翼板上沿第一水平方向x不同间距处开设有若干成对的连接孔,而所有的4号槽钢2114腹板两侧相应位置处开设有同样大小的成对螺孔,4号槽钢2114可根据试验需求(如第一滑轨410沿第一水平方向x前后移动放置于不同位置处时),灵活拆卸组装搭接于顶部2号槽钢2112不同位置处。

[0099] 然后,箱身210的侧壁213主要由沿第一水平方向x布置的三种不同长度大小的角钢、2号角钢2132和3号角钢2133与沿竖直方向z布置的若干1号矩形钢板2134通过连接孔螺栓进行组合后连接紧固;2号矩形钢板2135作为箱身210后部的隔挡板,通过螺栓与箱体431后部两根1号槽钢2111进行连接固定,箱体431两侧的1号矩形钢板2134靠内侧面上喷涂结构胶,用于粘贴固定两块分别垂直于底板212的透明亚克力板,且亚克力板内表面粘贴有透明防刮花保护膜。

[0100] 最后,箱体431前部为自由面,箱体431通过模块化的三角钢板240与延伸结构220进行组装延长,延伸结构220顶面贴有透明网格刻度纸,箱体431与三角钢板240之间通过较

链230铰接相连,从而实现上下转动开合,延伸结构220根据室内试验需求可自由开闭。

[0101] 在另一个具体的实施例中,请参阅图1,箱身210通过底板212可拆卸地连接于振动台50的水平台面,堆积体模型30安装在底板212上,崩塌落石投放系统40安装在立体框架211上,以使箱身210、堆积体模型30和崩塌落石投放系统40同步振动。

[0102] 具体地,振动台50的水平台面上开设有螺栓孔位,用于连接固定置于其上的模型箱20的底板212,振动台50可沿图1中X、Y、Z三个方向来向底板212(也可视为箱身210与箱身210内部的堆积体模型30和崩塌落石投放系统40)加载规则波形和自定义波形。

[0103] 在一个更为具体的实施例中,请一并参阅图1和图6,箱身210具有垂直于侧部开口215第一水平方向x和垂直于第一水平方向x的第二水平方向y,崩塌落石投放系统40包括两个第一滑轨410、第二滑轨420和落石投放箱430,两个第一滑轨410均设置于坡面321上方的立体框架211上,两个第一滑轨410均沿第一水平方向x延伸并沿第二水平方向y相互平行设置;第二滑轨420沿第二水平方向y设置,第二滑轨420的两端分别滑动连接于第一滑轨410;落石投放箱430滑动连接于第二滑轨420,落石投放箱430包括箱体431和自动启闭门432,箱体431的侧部和/或顶部设置有装填口4311,箱体431的底部设置有投放口,自动启闭门432安装于投放口处的箱体431上。

[0104] 通过如上设置,两个第一滑轨410沿第一水平方向x设置,沿第二水平方向y设置的第二滑轨420又滑动连接在两个第一滑轨410上,落石投放箱430又滑动连接于第二滑轨420上。通过滑动第二滑轨420上的落石投放箱430可以改变落石投放箱430沿第二水平方向y上的位置,通过滑动第一滑轨410上的第二滑轨420又可以改变落石投放箱430沿第一水平方向x上的位置。如此,试验人员可以灵活地在水平方向上设置落石投放箱430的位置,改变落石模型1的坠落位置,增加可以模拟的工况条件,尽可能地还原落石真实的坠落条件,提高试验的准确度。

[0105] 在其他的实施例中,为了使第二滑轨420在第一滑轨410上更加顺利地滑动,两个第一滑轨410上设置有第一滑块460,第二滑轨420的两端分别与两个第一滑块460连接;为了使落石投放箱430在第二滑轨420上更加顺利地滑动,第二滑轨420上设置有第二滑块470,落石投放箱430的顶部和第二滑块470连接。

[0106] 在其他的实施例中,为了使第二滑轨420在第一滑轨410上更加顺利地滑动以及落石投放箱430在第二滑轨420上更加顺利地滑动,第一滑块460和第二滑块470均连接有自动驱动机构(图未示),试验人员通过改变自动驱动机构的控制器的参数,即可方便地驱使第二滑轨420和/或落石投放箱430滑动,进而方便地改变落石模型1的坠落位置,得到更加多样的工况条件。

[0107] 优选地,箱体431的侧部和顶部均设置有装填口4311,侧部的装填口4311设置有能够在箱体431上抽插的侧部抽板434,顶部的装填口4311设置有能够在箱体431上抽插的顶部抽板433。

[0108] 进一步地,请参阅图7,侧部抽板434遮盖部分侧部的装填口4311,顶部抽板433遮盖全部的顶部的装填口4311。

[0109] 或者,侧部抽板434遮盖部分侧部的装填口4311,顶部抽板433也遮盖部分顶部的装填口4311,在此不做唯一限定。

[0110] 落石投放箱430通过顶部顶部抽板433和侧部的侧部抽板434实现落石模型1的装

填与固定,当顶部抽板433与侧部抽板434抽出后,可将落石模型1从装填口4311装填进箱体431内,插上顶部插板与侧部抽板434后,可以对箱体431进行封闭。

[0111] 示例性地,请参阅图7,自动启闭门432包括弹簧门4321和用于控制弹簧门4321启闭的门控4322。在装填与固定落石模型1的过程中,弹簧门4321属于闭合状态来封闭箱体431的投放口;在需要投放落石模型1时,通过门控4322控制弹簧门4321的开启来打开投放口,进而实现箱体431内落石模型1的投放。

[0112] 可选地,自动启闭门432还可以为自动磁吸门或自动抽拉门等,在此不做唯一限定。

[0113] 进一步地,请一并参阅图1和图4,崩塌落石投放系统40还包括连接件440和直线运动机构450,连接件440的一端滑动连接于第二滑轨420,连接件440的另一端铰接于箱体431的顶部;直线运动机构450具有能够沿竖向往复直线运动的运动端,运动端和连接件440间隔分布并连接于箱体431的顶部;在运动端运动的过程中,运动端能够带动箱体431绕连接件440和箱体431的连接处转动以改变投放口的朝向。

[0114] 如此,落石投放箱430的顶部抽板433固定连接有直线运动机构450的运动端和铰接相连的连接件440。其中,连接件440通过转轴和顶部抽板433铰接相连。

[0115] 通过如上设置,当直线运动机构450的运动端向上运动时,带动落石投放箱430在连接件440铰接的转轴上发生顺时针转动;当直线运动机构450的运动端向下运动时,带动落石投放箱430在连接件440铰接的转轴上发生逆时针转动。如此,试验人员可以通过控制直线运动机构450的运动端的上下运动,来带动落石投放箱430绕转轴顺时针转动或逆时针转动,来改变落石投放箱430投放口的朝向,进而对落石模型1的投放角度进行控制与调节。最终增加可以模拟的工况条件,尽可能地还原落石真实的坠落条件,提高试验的准确度。

[0116] 示例性地,直线运动机构450包括液压升降杆451、输油管道452和液压控制系统453,液压升降杆451通过输油管道452与液压控制系统453相连,通过液压控制系统453控制液压升降杆451的升降。

[0117] 可选地,直线运动机构450还可以为气缸、电动推杆、直线电机、丝杆螺母机构等。

[0118] 进一步地,请参阅图6,连接件440为伸缩杆。

[0119] 具体地,伸缩连杆通过其上的紧固螺栓进行松紧调节,当逆时针旋转紧固螺栓至松弛状态时,上下调节伸缩连杆使其伸长或缩短从而调节落石投放箱430竖向高度位置。如此,试验人员可以改变落石模型1的坠落高度,增加可以模拟的工况条件,尽可能地还原落石真实的坠落条件,提高试验的准确度。

[0120] 可选地,伸缩杆的伸长或缩短的方式为人工操作或自动伸缩,在此不做唯一限定。

[0121] 在另一个实施例中,请参阅图8,堆积体模型30包括填筑而成的地质材料310和覆盖于地质材料310顶部的覆盖层320。

[0122] 进一步地,地质材料310中埋设有用于强化数据监测与采集系统60的分析图像的颗粒。

[0123] 具体地,堆积体模型30采用人工堆砌的方式进行堆填,堆筑过程中,分层填筑、分层击实,以保证坡体的密实度。地质材料310可为黏土、砂土、碎石土等多种岩土材料类型,坡体结构如坡面321的坡高、坡度等可自由设置,通过开凿坡面321可使之形成具有三维微地形特征的曲面,堆积体模型30的表面可贴合整体式仿真草皮或现浇混凝土板等形成不同

的覆盖层320类型。

[0124] 具体地,在堆积体模型30分层填筑过程中,在每层的层面上嵌入一定量的水磨石颗粒330,颗粒粒径大小约为8mm左右,颜色为蓝色,来增加图像位移分析的灰度差。

[0125] 在其他的实施例中,请参阅图8,堆积体模型30内还埋设有如下述的无线加速度传感器620,无线加速度传感器620布置于堆积体模型30边坡的近坡表面与坡体内来获取振动加速度信号。

[0126] 在另一个实施例中,请一并参阅图1和图8,数据监测与采集系统60包括高速相机610、无线加速度传感器620、定位模块630、激光位移传感器640、电脑控制器650和数据存储器660,高速相机610用于对试验现象进行逐帧记录;无线加速度传感器620用于获取堆积体模型30的振动加速度信号;定位模块630用于获取落石模型1的轨迹与姿态数据;激光位移传感器640用于获取试验过程中堆积体模型30的竖向沉降变形;电脑控制器650用于控制高速相机610、无线加速度传感器620、定位模块630和激光位移传感器640的启闭以及数据互通;数据存储器660用于存储电脑控制器650的数据。

[0127] 具体地,请一并参阅图1和图3,作为试验过程中数据监测与数据信息收集的具体实施方式,在模型箱20的角点上安装八个用于无线载波测距的定位基站631,用于接收信号的定位装置632和姿态传感器633共同组装进单个非规则岩块的预制孔槽中,并通过人造顶盖150进行封闭,形成定位系统,定位系统用于记录各个岩块坡面321运动的轨迹数据和姿态数据。试验结束后统计崩塌落石停积碎片的大小和散落位置,分析各时程各个岩块的轨迹、姿态、速度和加速度,计算岩块铲刮坡面321的面积。

[0128] 具体地,请参阅图6,作为试验过程中数据监测与数据信息收集的具体实施方式,在堆筑边坡近坡表面和内部安装埋入式无线加速度传感器620,测量坡体的地震动响应;在不同位置处的4号槽钢2114底面上布置有磁吸式激光位移传感器640,用于监测地震动效应下坡体不同位置处的沉降变形。

[0129] 具体地,作为试验过程中数据监测与数据信息收集的具体实施方式,在模型箱20侧面不同位置处布置两台高速相机610,正面布置一台高速相机610,配合灯控系统采集试验过程的影像。

[0130] 具体地,PIV图像分析系统图形处理及变形分析模块可集成在电脑控制器650中,并具有专门的可视化操作软件,高速相机610可捕捉地震作用下堆积体模型30的移动参数;试验过程中,通过高速相机610拍摄照片,试验结束后运用PIV图像分析系统提取边坡不同试验阶段的全场变形。

[0131] 根据本申请的另一个方面,请一并参阅图1至图8,本申请的实施例还提供了一种用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法。

[0132] 请一并参阅图1至图8,该装置包括非规则岩体构造系统10、模型箱20、堆积体模型30、崩塌落石投放系统40、振动台50以及数据监测与采集系统60。

[0133] 用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的一个实施例:

[0134] 请参阅图9,该试验方法包括如下步骤:

[0135] 步骤S10:确定试验条件;

[0136] 步骤S20:制备落石模型1,使用非规则岩体构造系统10制备落石模型1;

[0137] 步骤S30:安装模型箱20、堆积体模型30和崩塌落石投放系统40,在振动台50上安

装模型箱20,在模型箱20内安装堆积体模型30和崩塌落石投放系统40;

[0138] 步骤S40:安装数据监测与采集系统60;

[0139] 步骤S50:投放落石模型1,崩塌落石投放系统40向堆积体模型30投放落石模型1;

[0140] 步骤S60:监测和采集试验数据,数据监测与采集系统60实时监测并采集试验全过程中落石模型1和堆积体模型30的数据;以及

[0141] 步骤S70:整理试验设备。

[0142] 本申请实施例中,该试验方法能够以不同的空间坠落位置、坠落角度、堆积体模型30的类型(如坡体材料、坡度、坡高等)、坡面321覆盖层320类型、地震波类型等工况条件进行地震作用下崩塌落石的全过程运动试验,该试验方法操作简单、安全、试验结果可靠,能够较好地诠释地震动效应下崩塌落石的全过程运动特征以及堆积体边坡的动力响应特征与变形特征,为地震高发区崩塌落石灾害评估和综合防控提供科学依据与技术支持。

[0143] 进一步地,试验条件包括落石模型1的相似材料配比、落石模型1的投放条件、堆积体模型30的材质和振动台50的工作参数。

[0144] 进一步地,不同相似材料配比的落石模型1具有不同的抗压强度。

[0145] 进一步地,投放条件包括落石模型1的投放高度和落石模型1的投放角度。

[0146] 进一步地,堆积体模型30包括填筑而成的地质材料310和覆盖于地质材料310顶部的覆盖层320,覆盖层320的材质为混凝土、土质或草皮。

[0147] 进一步地,请参阅图9,在整理试验设备步骤之后还包括:

[0148] 步骤S80:更改试验条件,更改落石模型1的相似材料配比、落石模型1的投放条件和堆积体模型30的材质中的一个或多个;以及

[0149] 步骤S90:重复进行试验。

[0150] 进一步地,在更改试验条件的步骤中采用控制单一变量法,改变试验条件中的一个,另外的试验条件保持不变。

[0151] 进一步地,模型箱20包括具有一侧部开口215的箱身210以及在侧部开口215处与箱身210连接的延伸结构220,堆积体模型30具有向靠近侧部开口215方向倾斜向下延伸的坡面321,在投放落石模型1的步骤中,落石模型1的运动过程包括下落、碰撞坡面321和解体,落石模型1解体后形成多个岩块,岩块的运动过程包括沿坡面321运动以及在模型箱20上或延伸结构220上停积,堆积体模型30在被落石模型1碰撞后产生形变。

[0152] 进一步地,延伸结构220的顶面贴设有透明网格刻度纸。

[0153] 进一步地,在监测和采集试验数据的步骤中,试验数据包括落石模型1、岩块和堆积体模型30的逐帧图像信息,以及落石模型1和岩块的轨迹数据与姿态数据,以及堆积体模型30的加速度响应数据、沉降数据和全场变形数据。

[0154] 用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的另一个实施例(本实施例的试验方法可以视为上一实施例的试验方法的细化):

[0155] 请参阅图10,该试验方法包括如下步骤:

[0156] 步骤A1:确定试验工况:确定落石模型1的投放条件、堆积体模型30的材质和振动台50的工作参数。

[0157] 步骤A2:相似材料配比:依托合适工程,获取硬质岩的取芯岩样110,加工成直径50mm、高度100mm的圆柱形标准试件,测试其物理力学参数,设计不同相似材料配合比的正

交试验(不少于15组),每一组相似材料配合比浇筑制成与前述取芯岩样110相同尺寸大小的人造岩样120,测试其物理力学参数并与取芯岩样110进行对比标定,得到符合试验要求的硬岩相似材料配合比,硬岩相似材料配比为石英砂:石膏:水泥:水=1:0.6:0.050:0.4,其抗压强度 $\sigma_{c1}=10\text{MPa}$ 。

[0158] 步骤A3:人造非规则岩体制作:以工程实地含有主控结构面的危岩体作为原型,按照试验前期设计的几何相似比1:20对危岩体非规则形貌进行计算机辅助立体建模,形成三维概化模型,利用3D打印技术和硅胶翻模技术制备用于人造非规则岩块140浇筑的3D打印硅胶模具130,危岩体包含有7块人造非规则岩块140,因而3D打印硅胶模具130一共有7个,通过配比后的浆液浇筑试样,脱模养护后形成特定强度,分别制备7块人造非规则岩块140,人造非规则岩块140中留有预制槽孔,安装轨迹姿态定位传感器,并通过人造顶盖150进行封闭,岩块之间通过配比后的粘合剂粘结,形成远低于岩块本身的粘结强度,最终拼装出含主控结构面的落石模型1,拼装完成后的落石模型1高度约为40cm、宽度约为20cm。

[0159] 步骤A4:组装模型箱20箱身210:本实施例试验方法所用模型箱20的箱身210内部尺寸的长×宽×高为2.5m×1.2m×2.1m:。

[0160] 具体地,步骤A4还包括如下步骤:

[0161] 步骤A41:底板212置平;

[0162] 步骤A42:连接槽钢形成矩形的立体框架211结构;

[0163] 步骤A43:连接角钢与侧面矩形钢板形成侧壁213;以及

[0164] 步骤A44:两侧安装透明亚克力板,后侧安装用于隔挡的矩形钢板。

[0165] 步骤A5:填筑堆积体模型30:在模型箱20内采用分层填筑、分层击实的人工填筑方式进行堆积体模型30的构建,堆积体材料可为黏土、砂土、碎石土等,分层填筑过程中每一层填筑完成时,测定每层的三相指标即密度、含水率与颗粒比重,保证每层的三相指标相当,在设定的指标变化阈值范围内波动,则认为箱身210内堆积体模型30性质均匀;模型分层填筑过程中,在层面上靠近边坡侧面处嵌入一定量的水磨石颗粒330;填筑过程中填筑到设计高度时,在坡体标记位置处埋设无线加速度传感器620;开凿填筑边坡表面使之形成具有三维微地形特征的曲面,表面可贴合整体式仿真草皮或现浇混凝土板等形成不同的坡面321覆盖层320类型。

[0166] 具体地,堆积体填料类型选用黏土,含水率为6%,密度为1.9g/cm³;堆积体模型30采用分层填筑的方式进行堆填,每层的厚度约为20mm,填料在箱体431内的压实度控制为75%;颗粒粒径大小约为8mm左右,颜色为蓝色。

[0167] 步骤A6:吊装模型箱20:将模型箱20箱体431吊装至振动台50台面上,通过底板212预留的螺栓孔与振动台50台面进行拴紧固定。

[0168] 步骤A7:安装检测仪器:在模型箱20角点上安装八个用于无线载波测距的定位基站631,用于接收信号的定位基站631和组装进落石模型1内部的定位装置632及姿态传感器633,形成定位系统;在模型箱20顶部的不同位置处安放激光位移传感器640,用于监测堆积体模型30坡体的沉降。

[0169] 具体地,激光位移传感器640的量程为200mm。

[0170] 步骤A8:搭接延伸装置:拼装模块化的三角钢板240与延伸结构220,模型箱20的箱身210与延伸结构220的钢板间通过铰链230连接,从而能够上下开合,延长坡脚平台的长

度,延伸结构220的顶面贴有透明网格刻度纸。

[0171] 步骤A9:安放落石:将上述制作好的落石模型1放入落石投放箱430中。

[0172] 具体地,在步骤A9中,还包括崩塌落石投放系统40通过滑轨搭接于模型箱20箱顶槽钢之上。

[0173] 步骤A10:调节落石下落的空间位置及释放角度:调节落石投放箱430距箱身210右侧内面60cm,调节落石投放箱430距箱身210后侧面120cm,调节伸缩杆使落石投放箱430距模型箱20的底板212的高度为180cm,通过调节液压升降杆451使落石投放箱430的底面与水平面保持 15° 倾斜。

[0174] 步骤A11:启动振动台50系统,释放落石:开启振动台50加载系统,例如施加沿水平向、竖向双向振动的脉冲地震动汶川波,振幅控制为 $0.4g$,持时 $10s$,在施加地震波的同时,控制落石投放箱430的门控4322打开弹簧门4321释放落石模型1,落石模型1随即下落并与坡面321产生接触,落石模型1发生碰撞并解体成多个岩块,岩块在坡面321上运动滑移直至停积。

[0175] 步骤A12:收集试验数据,整理试验设备:试验加载结束后,对延伸结构220上停积的岩块的大小和散落位置进行统计记录,收集并导出数据存储器660中记录到的试验过程中所产生的数据信息如无线加速度传感器620中的动力响应数据,定位模块630记录到的各个岩块运动的轨迹数据和姿态数据,激光位移计中的坡体沉降数据,以及通过高速相机610拍摄的试验过程中的每一帧图像;试验完成后,卸下模型箱20箱体431顶部的崩塌落石投放装置以及前侧的延伸结构220,卸下模型箱20箱体431底板212与振动台50台面连接的螺栓,通过模型箱20箱体431顶部四个角点的吊耳将模型箱20吊出振动台50系统,清理箱身210中的堆积体填料,收集整理试验所用监测仪器。

[0176] 用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的另一个实施例:

[0177] 改变人造非规则岩块140的相似材料配比,采用软岩相似材料配比,即石英砂:石膏:水泥:水:重晶石 $=1:0.350:0.025:0.613:1$,抗压强度 $\sigma_{c2}=2.5MPa$,其余试验条件保持相同,重复进行步骤A1至步骤A12。

[0178] 用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的另一个实施例:

[0179] 考虑落石不同下落高度的影响,本实施例中通过控制单一变量法,设置3组不同的落石模型1的下落高度,即落石投放箱430距模型箱20的底板212的高度分别为170cm、180cm和190cm,其余试验条件保持相同,重复进行步骤A1至步骤A12。

[0180] 用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的另一个实施例:

[0181] 考虑落石不同投放角度的影响,本实施例中通过控制单一变量法,设置3组不同的落石模型1的投放角度,即落石投放箱430的底面与水平面分别保持 15° 、 30° 与 45° 的夹角,其余试验条件保持相同,重复进行步骤A1至步骤A12。

[0182] 用同一装置模拟地震作用下崩塌落石全过程运动的试验方法的另一个实施例:

[0183] 考虑堆积体模型30的坡面321的覆盖层320的影响,本实施例中通过控制单一变量法,设置3组不同的坡面321覆盖类型,即堆积体模型30的坡面321上分别采用混凝土覆盖、土质覆盖与草皮覆盖,其余试验条件保持相同,重复进行步骤A1至步骤A12。

[0184] 综上,本申请试验装置的结构简单,试验方法的操作便携、安全,试验装置包含的各个组件可灵活拆卸与调节,便于室内模型试验的进行,且试验过程中数据采集与监测方

法科学、高效,能够获取较为准确的试验结果。本申请创新性地提出了用于模拟地震作用下崩塌落石下落碰撞破碎停积全过程运动的试验系统与方法,很大程度上填补了当前针对地震动效应下崩塌落石试验研究方法的空白,具有非常重要的参考意义和研究价值。

[0185] 以上所述实施例的各技术特征可以进行任意的组合,为使描述简洁,未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。

[0186] 以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但不能因此而理解为对申请专利范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。因此,本申请专利的保护范围应以所附权利要求为准。

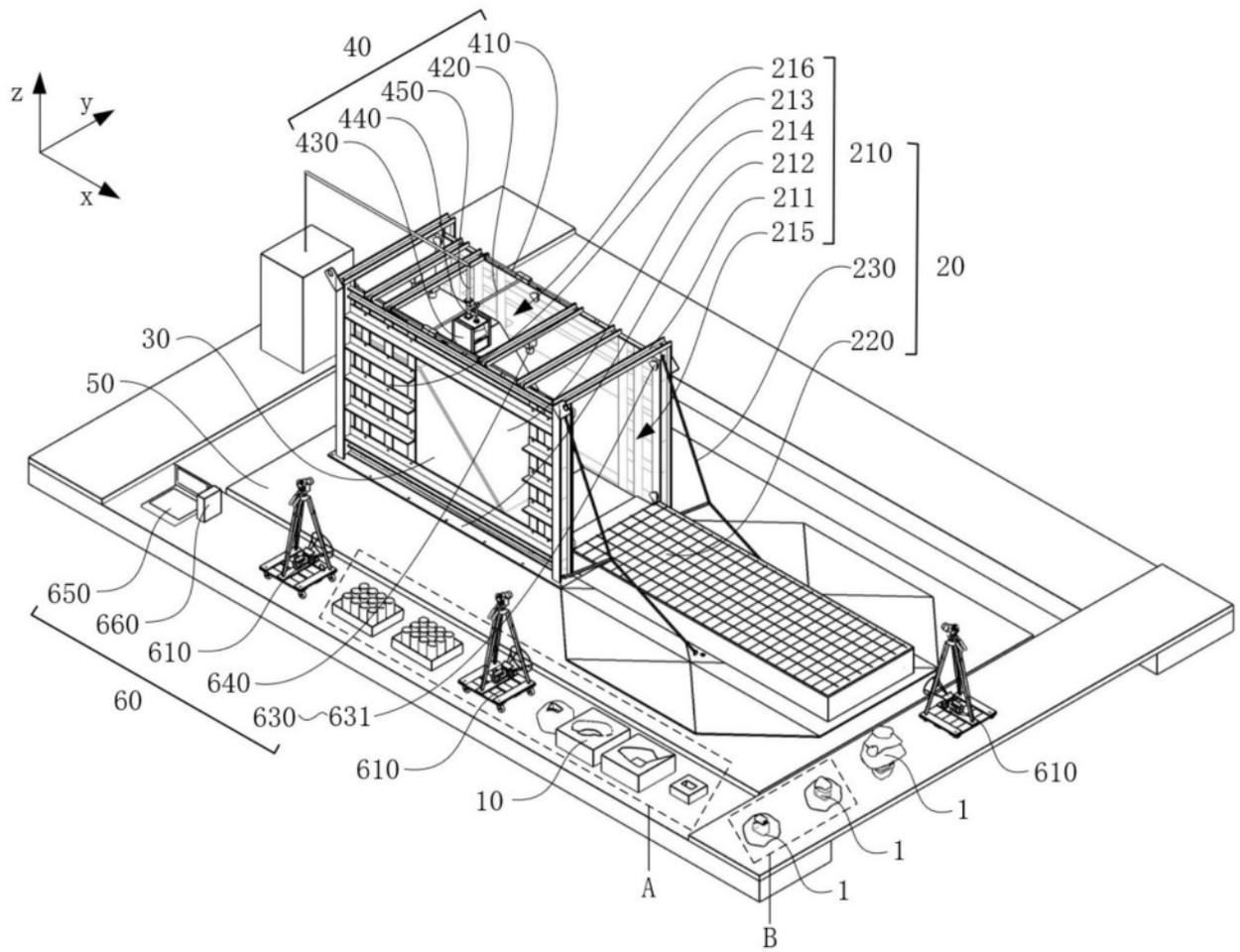


图1

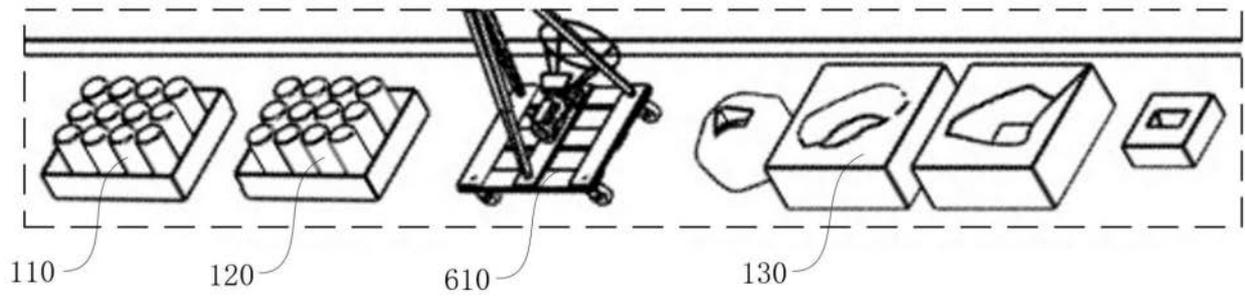


图2

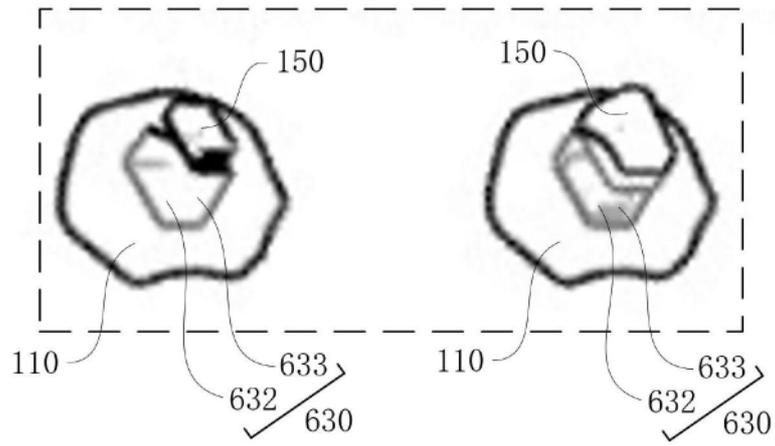


图3

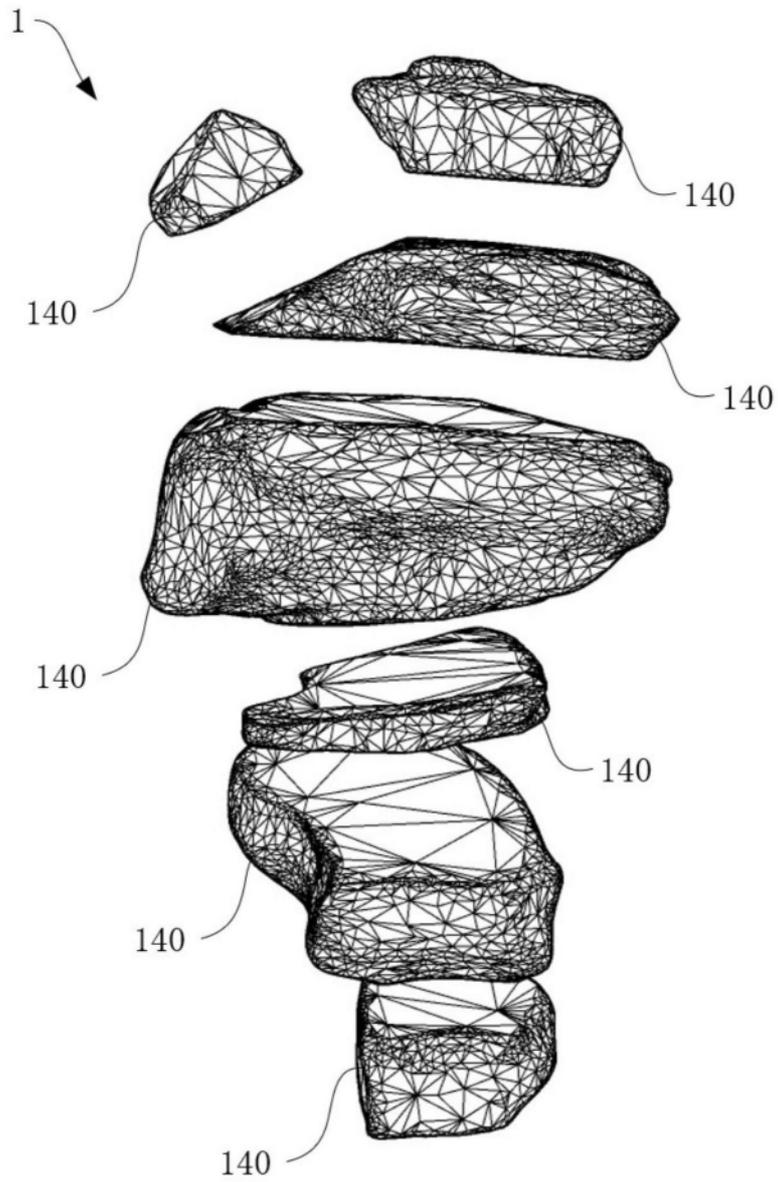


图4

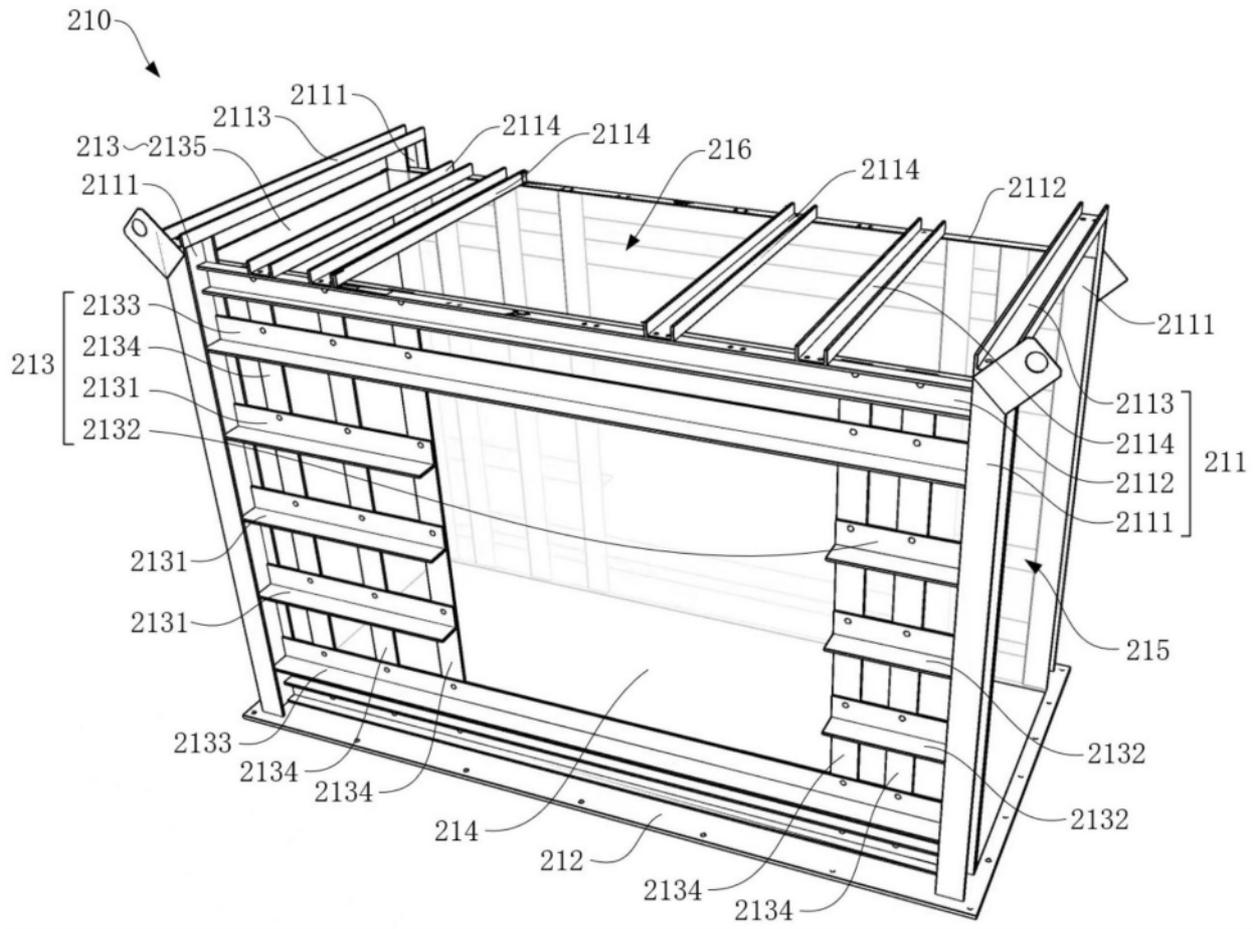


图5

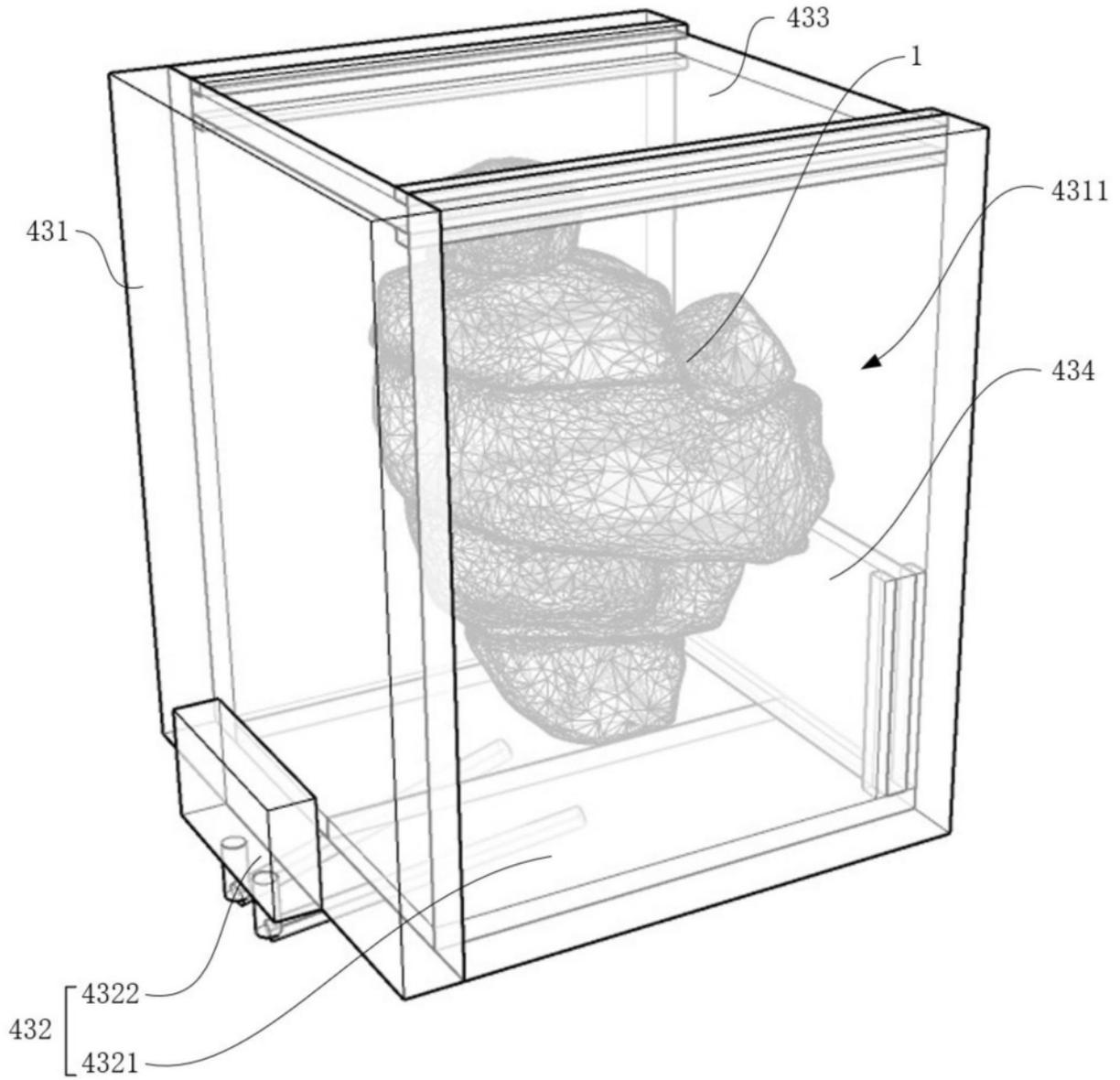


图7

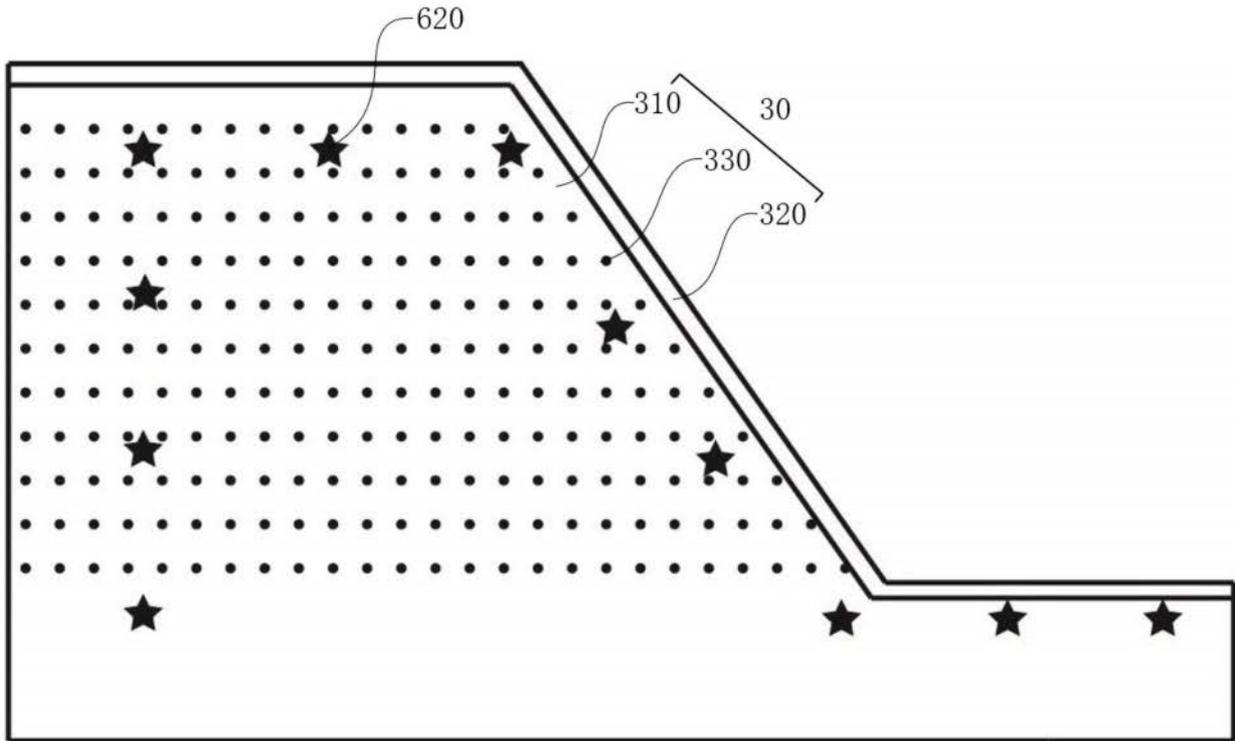


图8

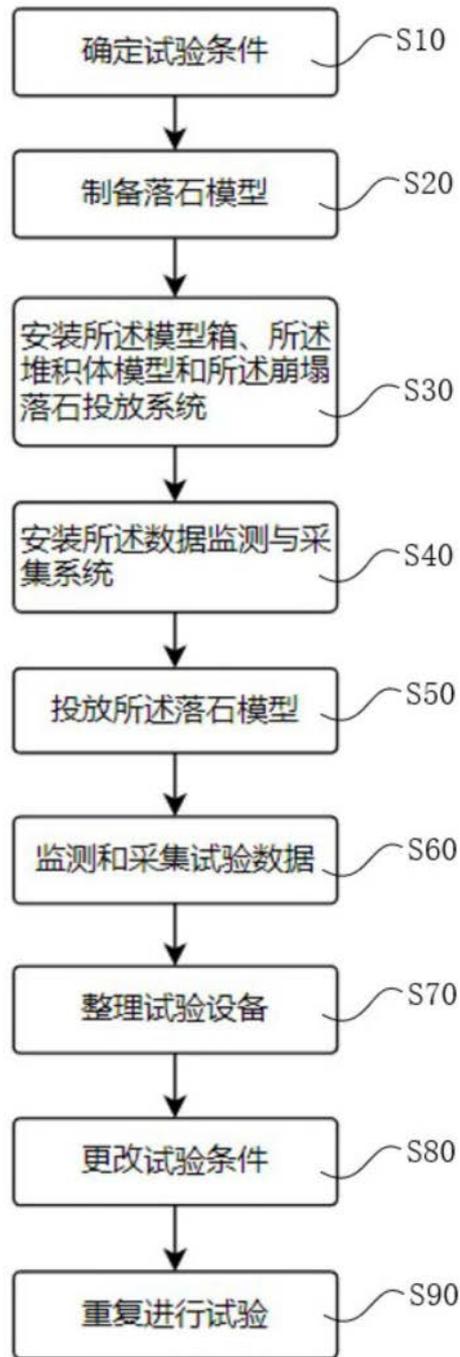


图9

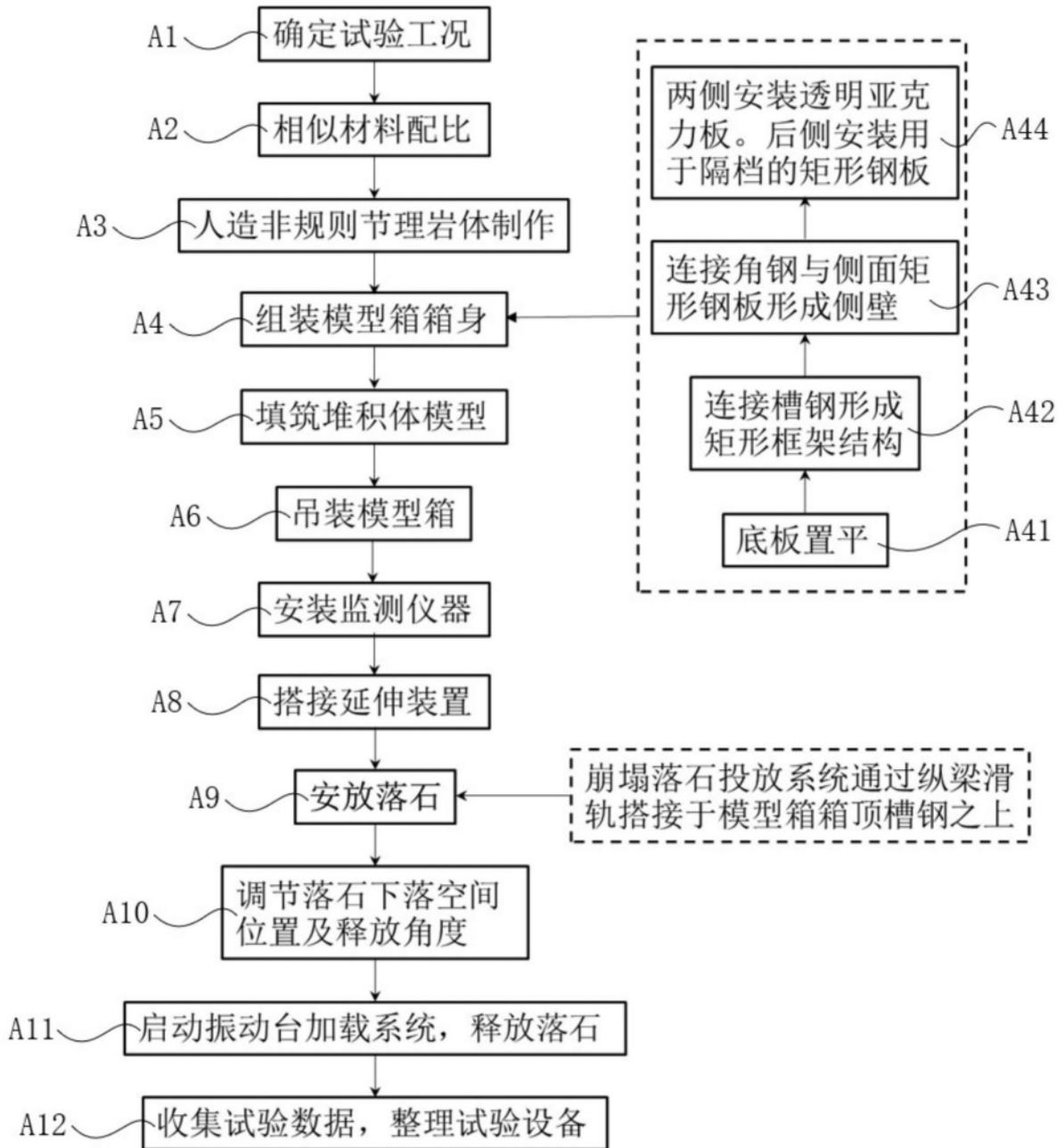


图10