(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105004662 A
(43)申请公布日 2015.10.28

(21)申请号 201510398349.X

(22)申请日 2015.07.08

(71)申请人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72)发明人 冯春 李世海 郭汝坤 乔继延

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所（普通合伙）11390
代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.
G01N 19/00(2006.01)

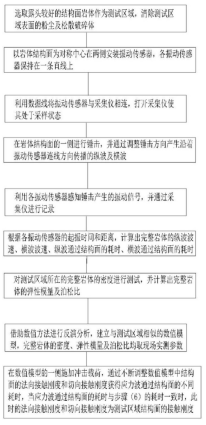
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种测试岩体结构面接触刚度的方法及装置

(57)摘要

本发明公开了一种测试岩体结构面接触刚度的方法，包括步骤：(1)选取测试区域；(2)安装振动传感器；(3)打开采集仪使其处于采样状态；(4)在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波；(5)通过采集仪进行记录；(6)计算纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；(7)计算完整岩体的弹性模量及泊松比；(8)借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型；(9)在数值模型的一侧施加冲击载荷，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度，获得测试区域结构面的接触刚度。还提供了使用该方法的装置。



CN 105004662 A

1. 一种测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：该方法包括以下步骤：

(1) 选取露头较好的结构面岩体作为测试区域，清除测试区域表面的粉尘及松散破碎体；

(2) 以岩体结构面为对称中心在两侧安装振动传感器，各振动传感器保持在一条直线上；

(3) 利用数据线将振动传感器与采集仪相连，打开采集仪使其处于采样状态；

(4) 在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波；

(5) 利用各振动传感器感知锤击产生的振动信号，并通过采集仪进行记录；

(6) 根据各振动传感器的起振时间和距离，计算出完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；

(7) 对测试区域所在的完整岩体的密度进行测试，并计算出完整岩体的弹性模量及泊松比；

(8) 借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型，完整岩体的密度、弹性模量及泊松比均取现场实测参数；

(9) 在数值模型的一侧施加冲击载荷，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度获得应力波通过结构面的不同耗时，当应力波通过结构面的耗时与步骤(6) 的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度。

2. 根据权利要求 1 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述结构面包括无厚度的干性结构面和含软弱夹层的结构面。

3. 根据权利要求 2 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述结构面每侧的振动传感器数量大于等于 2 支，结构面同侧传感器的间距大于等于 50cm，结构面两侧离结构面最近的传感器到结构面的距离小于等于 10cm。

4. 根据权利要求 3 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述振动传感器包括加速度传感器、速度传感器，振动传感器的频响大于等于 1KHz。

5. 根据权利要求 4 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述振动传感器通过石膏粘接、速凝水泥粘接，化学胶水粘接或膨胀螺栓连接的方式安装到岩体。

6. 根据权利要求 5 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述步骤 (4) 中，锤击方向与结构面垂直时产生纵波，锤击方向与结构面平行时产生横波。

7. 根据权利要求 6 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述步骤 (7) 中，根据公式 (1) 计算完整岩体的泊松比，根据公式 (2) 计算弹性模量：

$$\nu = 1 - c_p^2/(2c_p^2 - 2c_s^2) \quad (1)$$

$$E = 2\rho(1+\nu)c_s^2 \quad (2)$$

其中 ν 为泊松比、E 为弹性模量、ρ 为密度、c_p为纵波波速、c_s为横波波速。

8. 根据权利要求 7 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述步骤 (8) 中的数值方法包括有限元法、离散元法、有限体积法、有限差分法、无网格法。

9. 根据权利要求 8 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法，其特征在于：所述步骤 (9) 中的调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度的方法包括二分法、最速下降

线法、共轭梯度法、模拟退火算法。

10. 一种使用根据权利要求 9 所述的测试岩体结构面接触刚度的方法的装置，其特征在于：其包括锤击工具、若干振动传感器、采集仪、数据处理单元；

振动传感器配置来以岩体结构面为对称中心在两侧安装，保持在一条直线上，感知锤击产生的振动信号；

采集仪配置来利用数据线与振动传感器相连，记录锤击产生的振动信号；

锤击工具配置来在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波；

数据处理单元配置来计算完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；计算完整岩体的弹性模量及泊松比；借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型；不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度，当应力波通过结构面的耗时与纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度。

一种测试岩体结构面接触刚度的方法及装置

技术领域

[0001] 本发明属于地质学和力学的技术领域，具体地涉及一种测试岩体结构面接触刚度的方法，以及使用该方法的装置。

背景技术

[0002] 地质体中存在大量断层、节理、劈理等结构面，上述结构面的力学性质将直接影响地质体的稳定程度及潜在的失稳破坏模式。结构面的力学性质包括结构面法向接触刚度、切向接触刚度、粘聚力、内摩擦角及抗拉强度等。在上述结构面的力学性质中，结构面的接触刚度不仅影响地质体的静态应力应变关系，更直接影响地质体的动态力学行为，如应力波在地质体中的传播规律、地质体在动载荷作用下的破坏演化规律等。

[0003] 目前，对于结构面粘聚力、内摩擦角及抗拉强度的测试及实验技术已经较为成熟，如原位剪切实验，室内直剪实验、室内三轴实验及室内巴西劈裂实验等。但关于结构面接触刚度的测试方法及分析技术较少，一般采用单轴压缩实验完成法向接触刚度的测试，采用直剪实验完成切向接触刚度的测试。法向接触刚度测试时，首先测试完整岩块的法向刚度，而后测试含结构面岩体的法向刚度（测试时结构面保持水平状态），最后根据相关公式计算出结构面的法向接触刚度。切向接触刚度测试时，将结构面作为直剪面，通过对结构面上下的完整部分施加切向载荷，观察结构面处的切向位移随切向力的变化规律，进而计算出结构面的切向接触刚度。

[0004] 上述测试结构面接触刚度的方法只能在实验室完成，因此需要进行现场取样及试件加工，工序较为复杂、对结构面扰动较大、且无法反映原岩应力对结构面刚度的影响。此外，受实验设备的限制，待测试的试样及结构面尺寸一般在分米量级，无法测量大型结构面的接触刚度。最后，上述方法测试的刚度值为结构面的静态刚度，当把此测试的刚度值用于动态问题分析时，将存在较大的误差。

发明内容

[0005] 本发明的技术解决问题是：克服现有技术的不足，提供一种测试岩体结构面接触刚度的方法，其能够在野外直接对结构面岩体实施测量分析，测试精度高，测试工序简单，能反映原岩应力对结构面刚度的影响，且可以测量大型结构面的接触刚度。

[0006] 本发明的技术解决方案是：这种测试岩体结构面接触刚度的方法，该方法包括以下步骤：

[0007] (1) 选取露头较好的结构面岩体作为测试区域，清除测试区域表面的粉尘及松散破碎体；

[0008] (2) 以岩体结构面为对称中心在两侧安装振动传感器，各振动传感器保持在一条直线上；

[0009] (3) 利用数据线将振动传感器与采集仪相连，打开采集仪使其处于采样状态；

[0010] (4) 在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连

线方向传播的纵波及横波；

[0011] (5) 利用各振动传感器感知锤击产生的振动信号，并通过采集仪进行记录；

[0012] (6) 根据各振动传感器的起振时间和距离，计算出完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；

[0013] (7) 对测试区域所在的完整岩体的密度进行测试，并计算出完整岩体的弹性模量及泊松比；

[0014] (8) 借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型，完整岩体的密度、弹性模量及泊松比均取现场实测参数；

[0015] (9) 在数值模型的一侧施加冲击载荷，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度获得应力波通过结构面的不同耗时，当应力波通过结构面的耗时与步骤 (6) 的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度。

[0016] 还提供了一种使用这种测试岩体结构面接触刚度的方法的装置，其包括锤击工具、若干振动传感器、采集仪、数据处理单元；

[0017] 振动传感器配置来以岩体结构面为对称中心在两侧安装，保持在一条直线上，感知锤击产生的振动信号；

[0018] 采集仪配置来利用数据线与振动传感器相连，记录锤击产生的振动信号；

[0019] 锤击工具配置来在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波；

[0020] 数据处理单元配置来计算完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；计算完整岩体的弹性模量及泊松比；借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型；不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度，当应力波通过结构面的耗时与纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度。

[0021] 本发明通过在结构面一侧分别按照垂直于结构面及平行于结构面两种方向锤击岩体，使其分别产生沿着传感器连线方向传播的纵波及横波，借助采集仪捕捉各传感器感知到的起振时间，根据各传感器间的距离计算完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时及横波通过结构面的耗时，根据岩体的密度、纵波波速及横波波速计算完整岩体的弹性模量及泊松比，利用数值计算方法对纵波及横波通过结构面的耗时进行分析计算，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度及切向接触刚度，使得数值计算获得的纵波耗时及横波耗时与已计算的耗时一致，此法向接触刚度及切向接触刚度即为测试区域结构面的接触刚度，因此这种测试岩体结构面接触刚度的方法能够在野外直接对结构面岩体实施测量分析，测试精度高，测试工序简单，能反映原岩应力对结构面刚度的影响，且可以测量大型结构面的接触刚度。

附图说明

[0022] 图 1 示出了根据本发明的单结构面锤击实验系统布设图。

[0023] 图 2 示出了根据本发明的双结构面锤击实验系统布设图。

[0024] 图 3 示出了根据本发明的测试岩体结构面接触刚度的方法的流程图。

具体实施方式

[0025] 从图 3 中可以看出，这种测试岩体结构面接触刚度的方法，该方法包括以下步骤：

[0026] (1) 选取露头较好的结构面岩体作为测试区域，清除（利用毛刷等）测试区域表面的粉尘及松散破碎体；

[0027] (2) 以岩体结构面为对称中心在两侧安装振动传感器，各振动传感器保持在一条直线上；

[0028] (3) 利用数据线将振动传感器与采集仪相连，打开采集仪使其处于采样状态；

[0029] (4) 在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波；

[0030] (5) 利用各振动传感器感知锤击产生的振动信号，并通过采集仪进行记录；

[0031] (6) 根据各振动传感器的起振时间和距离，计算出完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；

[0032] (7) 对测试区域所在的完整岩体的密度进行测试，并计算出完整岩体的弹性模量及泊松比；

[0033] (8) 借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型，完整岩体的密度、弹性模量及泊松比均取现场实测参数；

[0034] (9) 在数值模型的一侧施加冲击载荷，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度获得应力波通过结构面的不同耗时，当应力波通过结构面的耗时与步骤 (6) 的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度。

[0035] 另外，所述结构面包括无厚度的干性结构面和含软弱夹层的结构面。

[0036] 另外，所述结构面每侧的振动传感器数量大于等于 2 支，结构面同侧传感器的间距大于等于 50cm，结构面两侧离结构面最近的传感器到结构面的距离小于等于 10cm。

[0037] 另外，所述振动传感器包括加速度传感器、速度传感器，振动传感器的频响大于等于 1KHz。

[0038] 另外，所述振动传感器通过石膏粘接、速凝水泥粘接，化学胶水粘接或膨胀螺栓连接的方式安装到岩体。

[0039] 另外，所述步骤 (4) 中，锤击方向与结构面垂直时产生纵波，锤击方向与结构面平行时产生横波。

[0040] 另外，所述步骤 (7) 中，根据公式 (1) 计算完整岩体的泊松比，根据公式 (2) 计算弹性模量：

[0041] $$\nu = 1 - c_p^2/(2c_p^2 - 2c_s^2) \quad (1)$$

[0042] $$E = 2\rho(1+\nu)c_s^2 \quad (2)$$

[0043] 其中 ν 为泊松比、E 为弹性模量、ρ 为密度、c_p为纵波波速、c_s为横波

[0044] 波速。

[0045] 另外，所述步骤 (8) 中的数值方法包括有限元法、离散元法、有限体积法、有限差分法、无网格法。

[0046] 另外，所述步骤 (9) 中的调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度的方法包括二分法、最速下降线法、共轭梯度法、模拟退火算法。

[0047] 还提供了一种使用这种测试岩体结构面接触刚度的方法的装置，其包括锤击工具、若干振动传感器、采集仪、数据处理单元；

[0048] 振动传感器配置来以岩体结构面为对称中心在两侧安装，保持在一条直线上，感知锤击产生的振动信号；

[0049] 采集仪配置来利用数据线与振动传感器相连，记录锤击产生的振动信号；

[0050] 锤击工具配置来在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波；

[0051] 数据处理单元配置来计算完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时；计算完整岩体的弹性模量及泊松比；借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型；不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度，当应力波通过结构面的耗时与纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度。

[0052] 本发明通过在结构面一侧分别按照垂直于结构面及平行于结构面两种方向锤击岩体，使其分别产生沿着传感器连线方向传播的纵波及横波，借助采集仪捕捉各传感器感知到的起振时间，根据各传感器间的距离计算完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时及横波通过结构面的耗时，根据岩体的密度、纵波波速及横波波速计算完整岩体的弹性模量及泊松比，利用数值计算方法对纵波及横波通过结构面的耗时进行分析计算，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度及切向接触刚度，使得数值计算获得的纵波耗时及横波耗时与已计算的耗时一致，此法向接触刚度及切向接触刚度即为测试区域结构面的接触刚度，因此这种测试岩体结构面接触刚度的方法能够在野外直接对结构面岩体实施测量分析，测试精度高，测试工序简单，能反映原岩应力对结构面刚度的影响，且可以测量大型结构面的接触刚度。

[0053] 以下给出本发明的两个具体实施例。

[0054] 实施例 1：

[0055] 对某露天矿灰岩结构面的法向接触刚度及切向接触刚度进行测试分析，实验过程如图 1 所示。选取结构面 2 露头较好的区域，利用毛刷对结构面 2 及两侧完整岩体 1 进行清理，清除表面浮尘及松散破碎体。利用石膏，将振动加速度传感器 3 至 6 按一定间距固定在结构面 2 两侧的完整岩体 1 上，传感器布设时需保证传感器 3 至 6 在一条直线上，且垂直于结构面 2。加速度传感器 4 和 5 到结构面 2 的距离均为 5cm，加速度传感器 3 和 6 到结构面的距离均为 50cm。利用数据线 7 将加速度传感器 3 至 6 连接至采集仪 8，打开采集仪 8 使其处于采样状态。选取锤击点 9 及锤击点 11 两个锤击点，在锤击点 9 按照锤击方向 10 进行锤击，产生向结构面 2 方向传播的纵波；在锤击点 11 按照锤击方向 12 进行锤击，产生向结构面 2 方向传播的横波。利用加速度传感器 3 至 6 对振动信号进行拾取，并利用采集仪 8 对振动信号进行记录。根据传感器 3 至 6 的起振时间及传感器 3 至 6 间的距离，计算出完整岩体 1 的纵波波速为 3917m/s，横波波速为 2165m/s，纵波通过结构面 2 的耗时为 0.21ms，横波通过结构面的耗时为 0.65ms。采用天平、量筒等对测试区域岩体 1 的密度进行测试，为 2500kg/m^3，由此计算出该结构面 2 两侧完成岩体 1 的弹性模量为 30GPa，泊松比为 0.28。

采用可变形块体离散元方法进行数值反演，参数调整策略选用二分法，经过计算分析，结构面 2 的法向接触刚度为 10.1GPa/m，切向接触刚度为 3.5GPa/m。

[0056] 实施例 2：

[0057] 对某边坡开挖揭露出的花岗岩结构面进行法向接触刚度及切向接触刚度的测试分析，实验过程如图 2 所示。对开挖揭露出的两个结构面 2 及周围完整岩体 1 进行清理，清除表层杂质。利用膨胀螺栓将振动速度传感器 3、4、5、6、13、14 安装至结构面 2 周围完整岩体 1 的对应位置；并确保传感器 3、4、5、6、13、14 处于一条直线上，且垂直于结构面 2。传感器 4、传感器 5 到左侧结构面 2 的距离均为 10cm，传感器 6、传感器 13 到右侧结构面 2 的距离也为 10cm，传感器 3 与传感器 4 之间、传感器 5 与传感器 6 之间、传感器 13 与传感器 14 之间的距离为 5m。利用数据线 7 将传感器 3、4、5、6、13、14 与采集仪 8 相连，打开采集仪 8 使其处于采样状态。在锤击点 9 按照锤击方向 10 进行锤击，产生向两个结构面 2 传播的纵波；在锤击点 11 按照锤击方向 12 进行锤击，产生向两个结构面 2 传播的横波。根据传感器 3、4、5、6、13、14 记录的振动起跳时间及各传感器的间距计算获得，纵波通过右侧结构面 2 的耗时为 0.33ms，纵波通过左侧结构面 2 的耗时为 0.24ms，横波通过右侧结构面 2 的耗时为 0.78ms，横波通过左侧结构面 2 的耗时为 0.65ms，完整岩块的纵波波速为 4307m/s，横波波速为 2527m/s。根据现场测试获得的岩体密度 2600kg/m^3，计算出该花岗岩的弹性模量为 41GPa、泊松比为 0.24。利用含结构面模型的有限体积法进行数值分析，参数调整方法选为共轭梯度法，经过计算分析，右侧结构面 2、左侧结构面 2 的法向接触刚度分别为 9.4GPa/m、15GPa/m，右侧结构面 2、左侧结构面 2 的切向接触刚度分别为 2.8GPa/m 及 6.4GPa/m。

[0058] 以上所述，仅是本发明的较佳实施例，并非对本发明作任何形式上的限制，凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属本发明技术方案的保护范围。

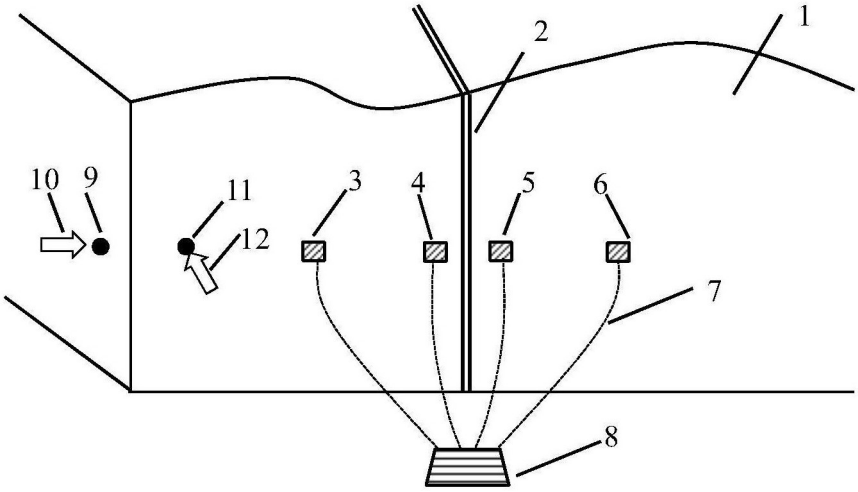


图 1

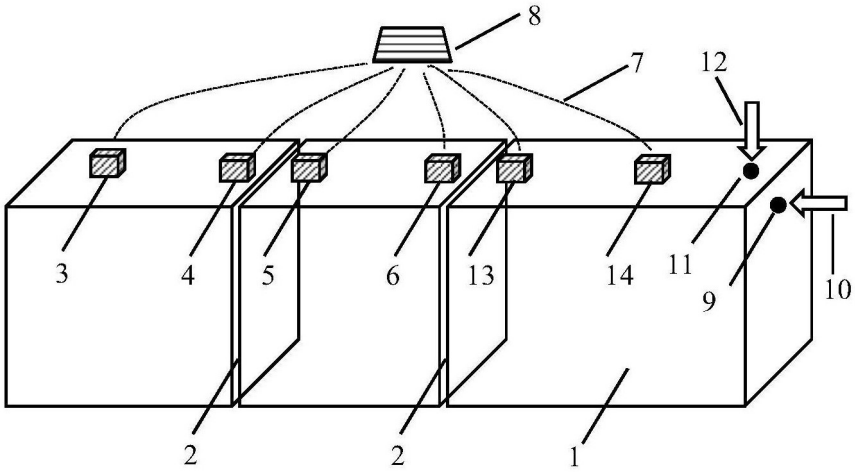


图 2

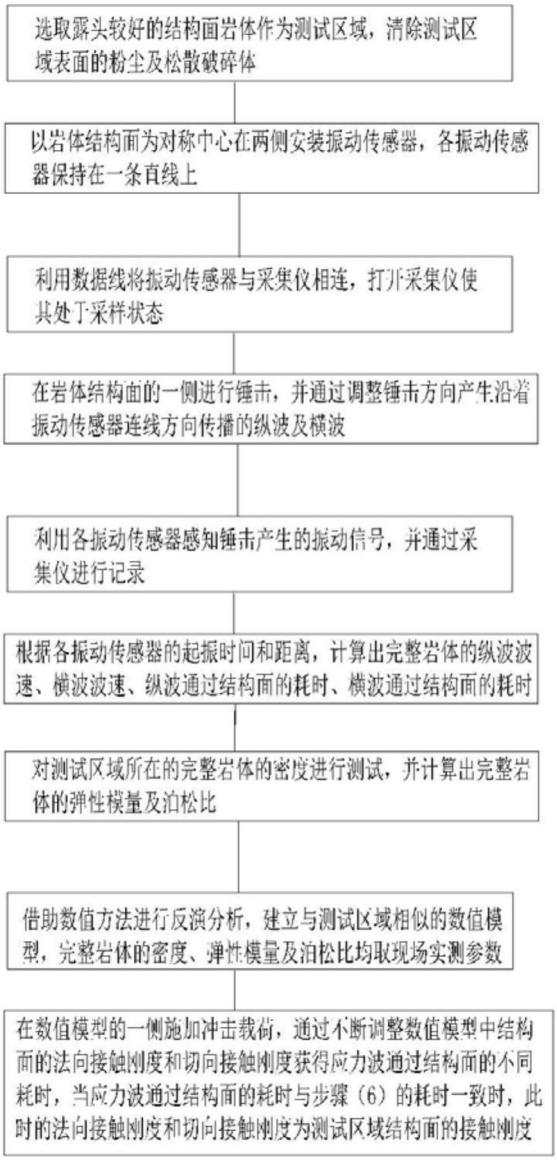

选取露头较好的结构面岩体作为测试区域，清除测试区域表面的粉尘及松散破碎体
以岩体结构面为对称中心在两侧安装振动传感器，各振动传感器保持在一条直线上
利用数据线将振动传感器与采集仪相连，打开采集仪使其处于采样状态
在岩体结构面的一侧进行锤击，并通过调整锤击方向产生沿着振动传感器连线方向传播的纵波及横波
利用各振动传感器感知锤击产生的振动信号，并通过采集仪进行记录
根据各振动传感器的起振时间和距离，计算出完整岩体的纵波波速、横波波速、纵波通过结构面的耗时、横波通过结构面的耗时
对测试区域所在的完整岩体的密度进行测试，并计算出完整岩体的弹性模量及泊松比
借助数值方法进行反演分析，建立与测试区域相似的数值模型，完整岩体的密度、弹性模量及泊松比均取现场实测参数
在数值模型的一侧施加冲击载荷，通过不断调整数值模型中结构面的法向接触刚度和切向接触刚度获得应力波通过结构面的不同耗时，当应力波通过结构面的耗时与步骤（6）的耗时一致时，此时的法向接触刚度和切向接触刚度为测试区域结构面的接触刚度

图 3