



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111289159 B

(45) 授权公告日 2022.10.04

(21) 申请号 201911257814.2

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2019.12.10

G01L 1/24 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 李文娟

申请公布号 CN 111289159 A

(43) 申请公布日 2020.06.16

(30) 优先权数据

62/777,404 2018.12.10 US

16/689, 163 2019.11.20 US

(73) 专利权人 香港理工大学

地址 中国香港九龙

(72) 发明人 殷建华 覃清琼 冯伟强

(74) 专利代理机构 北京世峰知识产权代理有限公司 11713

权利要求书3页 说明书9页 附图15页

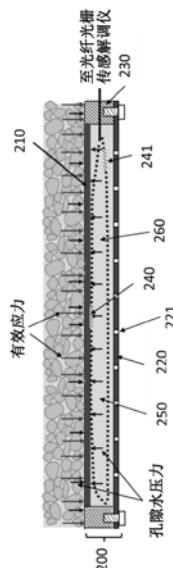
（54）发明名称

直接测量饱和土中的有效应力的有效应力

盒

(57) 摘要

本公开提供了一种用于直接测量饱和土中的有效应力的有效应力盒。有效应力盒包括感测膜片、多孔膜片、连接构件和应变传感器。多孔膜片允许孔隙水进入感测膜片和多孔膜片之间的内部空间，以在感测膜片的外表面和内表面实现孔隙水压力的完全平衡。因此，有效应力盒可以在一个位置仅使用一个膜片来直接而准确地测量饱和土中的有效应力，而无需测量孔隙水压力。



1. 一种有效应力盒, 用于直接测量饱和土中的有效应力, 所述有效应力盒包括:

一个感测膜片, 所述感测膜片包括外表面和内表面, 所述外表面用于承受来自所述感测膜片上方的土颗粒和孔隙水传递的总应力, 所述内表面与所述外表面相对, 但只承受孔隙水传递的孔隙水压力;

多孔膜片, 所述多孔膜片中包括多个孔隙, 所述孔隙允许所述多孔膜片下方的孔隙水穿过所述多孔膜片并防止所述多孔膜片下方的土颗粒穿过所述多孔膜片;

连接构件, 所述连接构件是刚性环, 所述连接构件与所述感测膜片和所述多孔膜片连接以形成被感测膜片的内表面、多孔膜片和连接构件包围的内部空间;

防渗不锈钢盘, 所述防渗不锈钢盘被配置为在校准标定中使用以代替多孔膜片, 所述刚性环和所述防渗不锈钢盘装配在一起并用O形圈密封, 以防止水进入单元内部; 以及

应变传感器, 所述应变传感器附接到所述感测膜片的内表面以测量在所述感测膜片上的应变变化;

其中, 所述多个孔隙允许所述多孔膜片下方的孔隙水进入所述内部空间, 以使所述孔隙水填充所述内部空间, 以完全平衡所述感测膜片的外表面和所述感测膜片的内表面上的孔隙水压力, 从而所述感测膜片的挠曲变形仅由有效应力引起, 使得所述有效应力直接由测得的应变变化确定, 而无需测量饱和土中的孔隙水压力;

其中, 所述有效应力盒是圆柱形的, 并且具有3cm至20cm的直径和10mm至20mm的厚度, 所述多个孔隙的孔隙排列密度在2个孔隙/cm²和5个孔隙/cm²之间, 每个孔隙是圆形的并且直径在0.2mm和1mm之间;

其中, 所述感测膜片是圆形板, 所述应变传感器是附接在所述感测膜片的内表面的中心上的光纤布拉格光栅(FBG)传感器, 有效应力 σ' 通过以下等式计算:

$$\sigma' = \frac{32D}{C_e h a^2 \lambda_{B0}} \Delta \lambda_B$$

其中, λ_{B0} 是光纤布拉格光栅传感器在初始状态下的布拉格波长, $\Delta \lambda_B$ 是应变变化 $\Delta \varepsilon$ 引起的波长偏移, C_e 是光纤布拉格光栅传感器对应于应变的系数, D是圆形板的弯曲刚度, h是圆形板的厚度并且a是圆形板的半径。

2. 根据权利要求1所述的有效应力盒, 其特征在于, 所述感测膜片的所述外表面用于接触所述感测膜片上方的所述土颗粒和所述孔隙水, 感测膜片的内表面和外表面的孔隙水压力相同。

3. 根据权利要求1所述的有效应力盒, 其特征在于, 所述感测膜片的弹性模量在193GPa和206GPa之间, 泊松比在0.24和0.3之间, 并且屈服应变在0.001和0.0015之间。

4. 根据权利要求1所述的有效应力盒, 其特征在于, 所述内部空间是圆柱形的并且具有在8mm和18mm之间的厚度。

5. 根据权利要求1所述的有效应力盒, 其特征在于, 所述多个孔隙均匀地分布在所述多孔膜片中。

6. 根据权利要求1所述的有效应力盒, 其特征在于, 所述感测膜片、所述多孔膜片和所述连接构件中的每一个由钢制成。

7. 根据权利要求1所述的有效应力盒, 其特征在于, 所述应变传感器附接到所述感测膜片的所述内表面的中心。

8. 根据权利要求1所述的有效应力盒,其特征在于,所述有效应力盒还包括:

保护盖,所述保护盖以在所述保护盖与所述感测膜片以及连接构件之间形成封闭空间的方式位于所述感测膜片的上方,其中,所述保护盖的顶面用于接触所述保护盖上方的所述土颗粒和所述孔隙水;以及

填充所述封闭空间的不可压缩流体,用于将来自所述保护盖上的所述土颗粒和所述孔隙水的总应力传递到所述感测膜片的所述外表面,所述不可压缩流体在感测膜片上施加均匀的压力。

9. 根据权利要求8所述的有效应力盒,其特征在于,所述不可压缩流体是汞、除气水或除汽油。

10. 根据权利要求1所述的有效应力盒,其特征在于,第一光纤布拉格光栅传感器位于感测膜片的内表面的中心,并且测量感测膜片上的应变变化;第二光纤布拉格光栅传感器位于内部空间的中间并测量内部空间中的温度变化以对第一光纤布拉格光栅传感器的测量进行温度补偿。

11. 一种用于测量饱和土中的有效应力的系统,包括:

根据权利要求1-10中任一项所述的有效应力盒;以及

应变测量设备,所述应变测量设备通过信号线连接所述应变传感器,以测量所述感测膜片上的应变变化,其中,所述应变测量设备是光纤光栅传感解调仪。

12. 根据权利要求11所述的系统,其特征在于,所述系统还包括处理器,所述处理器用于基于测得的应变变化来确定所述有效应力。

13. 根据权利要求11所述的系统,其特征在于,所述光纤布拉格光栅传感器的布拉格波长随应变变化 $\Delta \epsilon$ 和温度变化 ΔT 线性地变化,用于测量应变或温度的光纤布拉格光栅传感器的等式为:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_{B0}} = C_\epsilon \Delta \epsilon + C_T \Delta T$$

其中, λ_{B0} 是初始状态下的布拉格波长, $\Delta \lambda_B$ 是由应变变化 $\Delta \epsilon$ 和温度变化 ΔT 引起的波长偏移; C_ϵ 和 C_T 是分别对应于应变和温度的系数。

14. 一种用于测量饱和土中的有效应力的方法,包括:

通过施加水压力来对根据权利要求1-10中任一项所述的有效应力盒标定校准,其中,使用防渗不锈钢盘代替多孔膜片,将刚性环和防渗不锈钢盘装配在一起并用O形圈密封,以防止水进入单元内部,而后将带有防渗不锈钢盘的基于光纤布拉格光栅传感器的有效应力盒放置在带有水密盖的水容器中,使用压力控制器来提供稳定的水压,将光纤连接到光纤光栅传感解调仪以读取读数,所述标定过程包括加载和卸载的两个循环;

在饱和土中定位已标定的根据权利要求1-10中任一项所述的有效应力盒,其中,所述感测膜片朝上,所述多孔膜片朝下;

允许所述多孔膜片的下方的孔隙水通过多个孔隙进入内部空间,以用孔隙水填充所述内部空间,以完全平衡所述感测膜片的外表面和内表面上的孔隙水压力;

测量由饱和土中的有效应力引起的所述感测膜片上的应变变化;以及

基于测得的应变变化来确定所述有效应力 σ' ;

其中,所述有效应力 σ' 通过以下等式计算:

$$\sigma' = \frac{32D}{C_e h a^2 \lambda_{B0}} \Delta \lambda_B$$

其中, λ_{B0} 是光纤布拉格光栅传感器在初始状态下的布拉格波长, 是应变变化 $\Delta \epsilon$ 引起的波长偏移, C_e 是光纤布拉格光栅传感器对应于应变的系数, D 是圆形板的弯曲刚度, h 是圆形板的厚度并且 a 是圆形板的半径;

其中, 在标定过程中, 通过采用最小二乘法, 获得值为 0.9954 的线性相关系数, 其中斜率 $= \Delta \lambda_B / p$ 为 0.0032 nm/kPa , 即当光纤布拉格光栅传感器被具有 0.001 nm 波长分辨率的光学传感解制解调器连接时, 该有效应力盒的压力分辨率为 0.31 kPa 。

直接测量饱和土中的有效应力的有效应力盒

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2018年12月10日提交的美国临时专利申请第62/777,404号的权益，其通过引用方式整体并入本文。

技术领域

[0003] 本公开涉及一种用于直接测量饱和土中的有效应力的有效应力盒及其测量系统。

背景技术

[0004] 在岩土工程中，岩土结构的变形和稳定性都与土体中的有效应力直接相关。有效应力是分析岩土结构的变形和稳定性的重要且基本的参数。因此，有效应力的确定在岩土结构的安全性和稳定性评估中起着至关重要的作用。考虑到单元土体中垂直方向上所有力的平衡，根据有效应力原理计算有效应力的公式如下所示：

$$[0005] \frac{P}{A} = \frac{\sum N'}{A} + u \quad (1a)$$

$$[0006] \sigma = \sigma' + u \quad (1b)$$

$$[0007] \sigma' = \sigma - u \quad (1c)$$

[0008] 其中，P是单元土体的总外部垂直力， $\sum N'$ 是所有土颗粒传递的力在垂直方向上的分力总和，A是土壤单元体的横截面积，并且u是土体中的孔隙水压力。

[0009] 在等式(1b)中，总应力为 $\sigma = P/A$ ，有效应力 σ' 定义为：

$$[0010] \sigma' = \frac{\sum N'}{A} \quad (2)$$

[0011] 上式中，有效应力 σ' 被定义为在单元土体横截面上颗粒接触力在垂直(法向)方向上的分力平均值。确定此有效应力的常用方法是分别测量超孔隙水压力u和总应力 σ ，进而可以使用等式(1c)来计算有效应力。这种使用等式(1c)的传统方法是一种间接测量方法。使用这种方法，需要两个分开的传感器，一个用于测量超孔隙水压力，另一个用于测量总土压力。

[0012] 这种间接测量方法可能导致有效应力计算中的误差，因为用于测量孔隙水压力和总应力的两个单独的传感器对施加的压力的响应可能是不完全相同的。另外，间接测量方法需要两个分开的传感器，所以测量过程变得复杂并且设备和安装成本大大增加。

[0013] 因此，需要一种有效的应力测量装置，该装置消除或至少减少上述缺点和问题。

发明内容

[0014] 本发明公开了一种有效应力盒，其可以仅使用一个膜片直接且准确地测量饱和土中的有效应力，而无需测量孔隙水压力。有效应力盒具有直接测量、高精度、长期稳定、低信号损耗、可多个串联等优点。

[0015] 本文提供了一种用于测量饱和土中的有效应力的有效应力盒，其包括：包括外表

面和内表面的感测膜片,该外表面受到来自感测膜片上方的土颗粒和孔隙水传递的总应力,内表面与外表面相对,但只承受孔隙水传递的孔隙水压力;多孔膜片,其包括多个孔隙以允许多孔膜片下方的孔隙水穿过多孔膜片并防止多孔膜片下方的土颗粒穿过多孔膜片;连接构件,其以形成被感测膜片的内表面、多孔膜片和连接构件包围的内部空间的方式连接感测膜片和多孔膜片;以及应变传感器,其附接到感测膜片的内表面以测量在感测膜片的应变变化;其中,多个孔隙允许多孔膜片下方的孔隙水进入内部空间,以使孔隙水填充内部空间,以完全平衡外表面和内表面上的孔隙水压力,从而感测膜片的挠曲变形仅由有效应力引起,使得有效应力可直接由测得的应变变化来确定,而无需测量饱和土中的孔隙水压力。

[0016] 在某些实施例中,有效应力盒是圆柱形的,并且直径在3cm至20cm之间,厚度在10mm和20mm之间。

[0017] 在某些实施例中,感测膜片的外表面用于接触感测膜片上方的土颗粒和孔隙水。

[0018] 在某些实施例中,感测膜片的弹性模量在193GPa和206GPa之间,泊松比在0.24和0.3之间,屈服应变在0.001和0.0015之间。

[0019] 在某些实施例中,内部空间是圆柱形的并且具有在8mm和18mm之间的厚度。

[0020] 在某些实施方案中,多个孔隙的孔隙排列密度在2个孔隙/cm²和5个孔隙/cm²之间,每个孔隙是圆形的并且直径在0.2mm和1mm之间。

[0021] 在某些实施例中,多个孔隙均匀地分布在多孔膜片中。

[0022] 在某些实施例中,连接构件是刚性环。

[0023] 在某些实施例中,感测膜片、多孔膜片和连接构件中的每一个由钢制成。

[0024] 在某些实施例中,应变传感器附接在感测膜片的内表面的中心上。

[0025] 在某些实施例中,应变传感器是光纤布拉格光栅(FBG)传感器或应变片。

[0026] 在某些实施例中,有效应力盒还包括:保护盖,其以在保护盖和感测膜片之间形成封闭空间的方式位于感测膜片的上方,其中,保护盖的顶表面用于接触保护层上方的土颗粒和孔隙水;以及填充封闭空间的不可压缩流体,用于将来自保护盖上的土颗粒和孔隙水的总应力传递到感测膜片的外表面。

[0027] 在某些实施例中,连接构件还连接保护盖。

[0028] 在某些实施例中,不可压缩流体是汞、除气水或除气油。

[0029] 在某些实施例中,有效应力盒还包括位于内部空间内的温度传感器,用于测量内部空间的温度。

[0030] 本文提供了一种用于测量饱和土中的有效应力的系统,该系统包括:上述有效应力盒;以及应变测量设备,其通过信号线连接应变传感器,用于测量感测膜片上的应变变化。

[0031] 在某些实施例中,上述系统还包括用于基于测得的应变变化来确定有效应力的处理器。

[0032] 在某些实施例中,应变传感器是FBG传感器,应变测量设备是光纤光栅传感解调仪(optical sensing interrogator)。

[0033] 在某些实施例中,感测膜片是圆形板,应变传感器是附接在内表面中心上的FBG传感器,处理器利用以下方程式来计算有效应力 σ' :

$$[0034] \quad \sigma' = \frac{32D}{C_e h a^2 \lambda_{B0}} \Delta \lambda_B$$

[0035] 其中, λ_{B0} 是FBG传感器在初始状态下的布拉格波长, $\Delta \lambda_B$ 是应变变化引起的波长偏移, C_e 是FBG传感器对应于应变的系数, D 是圆形板的弯曲刚度, h 是圆形板的厚度, a 是圆形板的半径。

[0036] 本发明提供了一种用于测量饱和土中的有效应力的方法, 该方法包括: 将上述有效应力盒放置在饱和土中, 其中, 感测膜片朝上而多孔膜片朝下; 允许多孔膜片的下方的孔隙水通过多个孔隙进入内部空间, 使得孔隙水填充内部空间, 以完全平衡感测膜片的外表面上和内表面上的孔隙水压力; 测量由饱和土中的有效应力引起的感测膜片的应变变化; 以及, 基于测得的应变变化来确定有效应力。

[0037] 通过以下对附图的简要描述, 某些实施例的详细描述和所附权利要求, 本公开的这些和其他方面、特征和优点将变得更加显而易见。

附图说明

[0038] 附图包含某些实施例的图, 以进一步展示和阐明本发明的以上和其他方面、优点和特征。需指出的是, 这些附图展示了本发明的实施例, 但并不意图限制其范围。通过使用附图, 将以附加的特性和细节来展示和阐释本发明, 其中:

- [0039] 图1A是描绘根据某些实施例的有效应力盒的侧视图的示意图;
- [0040] 图1B为描绘有效应力盒的感测膜片的示意图;
- [0041] 图1C是描绘有效应力盒的多孔膜片的示意图;
- [0042] 图2是描绘根据某些实施例的有效应力盒的有效应力测量的示意图;
- [0043] 图3是描绘根据某些实施例的具有不可压缩流体保护的有效应力盒的有效应力测量的示意图;
- [0044] 图4是描绘根据某些实施例的用于测量饱和土中的有效应力的系统的示意图;
- [0045] 图5是描绘根据某些实施例的用于测量饱和土中的有效应力的方法的流程图;
- [0046] 图6A是描绘根据某些实施例的圆柱形有效应力盒的工作原理的示意图;
- [0047] 图6B是描绘有效应力盒的圆形感测膜片的薄板理论的示意图;
- [0048] 图7是描绘根据某些实施例的基于FBG的有效应力盒的示意图;
- [0049] 图8是描绘针对图7的基于FBG的有效应力盒的标定测试的结果的图;
- [0050] 图9A是描绘根据某些实施例的物理模型测试的俯视图的示意图;
- [0051] 图9B是描绘物理模型测试的侧视图的示意图;
- [0052] 图10A是展示了通过物理模型测试的常规的孔隙水压力和总土压力传感器在短时间内测量的结果的图;
- [0053] 图10B是展示了常规计算出的有效应力与物理模型测试的直接测定的有效应力之间在短时间内的比较结果的图;
- [0054] 图11A是展示了通过物理模型测试的常规的孔隙水压力和总土压力传感器在长时间内测量的结果的图; 并且
- [0055] 图11B是展示了常规计算出的有效应力与物理模型测试的直接测定的有效应力之间在长时间内的比较结果的图。

具体实施方式

[0056] 本公开提供了一种用于直接测量饱和土中的有效应力的有效应力盒。这种直接测量的主要理念是基于作用在感测膜片的外表面和内表面上的孔隙水压力的完全平衡,因此直接测量由于土颗粒的作用而产生的平均有效应力。有效应力盒包括位于应力盒正面的、承受来自土颗粒和孔隙水的总应力的感测膜片,位于应力盒底面的多孔膜片,连接构件,以及附接在感测膜片的内表面以用于测量感测膜片的应变变化的应变传感器。感测膜片和多孔膜片通过连接构件连接以形成被感测膜片、多孔膜片和连接构件包围的内部空间。多孔膜片允许孔隙水进入内部空间。由于感测膜片的外表面和内表面上的孔隙水压力是相同的且完全平衡,因此土体中的孔隙水压力不会引起感测膜片的任何挠曲,而感测膜片的挠曲只会由土颗粒接触力的所有垂直(法向)方向的分力平均值引起。颗粒接触力的所有垂直(法向)方向的分力平均值就是有效应力 σ' 。因此,有效应力盒仅使用一个膜片并在一个位置直接测量有效应力。

[0057] 如图1A-1C所示,根据某些实施例的有效应力盒100包括感测膜片110、多孔膜片120、连接构件130和应变传感器140。外表面111受到来自感测膜片110上方的土颗粒和孔隙水传递的总应力,内表面112与外表面111相对,但只承受孔隙水传递的孔隙水压力。多孔膜片120包括多个孔隙121以允许多孔膜片120下方的孔隙水穿过多孔膜片并防止多孔膜片120下方的土颗粒穿过多孔膜片120。连接构件130以形成被感测膜片110的内表面112、多孔膜片120和连接构件130包围的内部空间150的方式连接感测膜片110和多孔膜片120。应变传感器140附接到感测膜片的内表面112,以测量感测膜片110上的应变变化。多个孔隙121允许多孔膜片120下方的孔隙水进入内部空间150,用于用孔隙水填充内部空间150,以完全平衡感测膜片110的外表面111和内表面112上的孔隙水压力,使得感测膜片110朝向内部空间150的挠曲仅由有效应力引起,使得有效应力可由测得的应变变化直接确定,而无需测量饱和土中的孔隙水压力。

[0058] 在该实施例中,感测膜片110和连接构件130同时形成在一起,并且多孔膜片120通过螺钉132连接到连接构件130。多孔膜片120是圆形的,并且多个孔隙121在多孔膜120中径向对称地分布。由于多个孔隙121是通孔,因此饱和土中的孔隙水可以通过多个孔隙121进入内部空间150。

[0059] 在该实施例中,应变传感器140附接到感测膜片110的内表面112的中心,以感测最大的挠曲,从而提高了测量精度。应变传感器140连接到信号线141,并且连接构件130具有信号线141的出口131,使得应变传感器140可以经由信号线141连接到应变测量设备。有效应力盒100进一步包括用于测量内部空间150内的温度的温度传感器142。温度传感器142也连接到信号线141。

[0060] 在某些实施例中,有效应力盒是圆柱形的,并且直径在5cm至20cm之间,厚度在10mm至20mm之间。

[0061] 在某些实施例中,感测膜片是圆形的,并且直径在5cm至20cm之间,厚度在1mm至3mm之间。在某些实施例中,感测膜片的弹性模量在193GPa和206GPa之间,泊松比在0.24和0.3之间,屈服应变在0.001和0.0015之间。

[0062] 在某些实施例中,多孔膜片是圆形的,并且具有在5cm至20cm之间的直径和在1mm至3mm之间的厚度。

[0063] 在某些实施例中,连接构件是环形的,并且直径在5cm至20cm之间,厚度在5mm至15mm之间。在某些实施例中,连接构件是位于感测膜片和多孔膜片的周边并且在感测膜片和多孔膜片之间的刚性环,用于将感测膜片和多孔膜片分开。

[0064] 在某些实施例中,感测膜片、多孔膜片和连接构件中的每一个由金属制成。金属可以是铜、铝或钢。钢可以是不锈钢或镀锌钢。

[0065] 在某些实施例中,内部空间是圆柱形的并且具有在8mm至18mm之间的厚度。

[0066] 在某些实施例中,每个孔隙是圆形的并且具有在0.2mm至1mm之间的直径。具有较小尺寸的孔隙可以在毛细作用下促进孔隙水进入内部空间。在某些实施方案中,多个孔隙的孔隙排列密度在2个孔隙/cm²和5个孔隙/cm²之间。

[0067] 在某些实施例中,多个孔隙均匀地分布在多孔膜片中。在多孔膜片中均匀地分布的孔隙可以促进孔隙水均匀地进入内部空间。在某些实施例中,多个孔隙径向且对称地分布在多孔膜片中。

[0068] 在某些实施例中,连接构件和感测膜片同时一起形成。

[0069] 在某些实施例中,感测膜片、多孔膜片和连接构件通过焊接、软钎焊、螺钉连接或螺栓和螺母连接。

[0070] 可以改变有效应力盒的参数,例如尺寸、厚度、材料,以满足压力容量和压力灵敏度的不同要求。

[0071] 在某些实施例中,应变传感器是光纤布拉格光栅(FBG)传感器或应变片。在某些实施例中,应变传感器附接在感测膜片内表面的中心上。

[0072] 在某些实施例中,应变传感器是FBG传感器。FBG传感器具有以下优点:抗电磁干扰(EMI),其可确保高质量的信号和数据;长期稳定性(因为基于光波长的变化测量),这使得传感器适合于长期监测,原则上可达50到100年;高精度(例如高达 1×10^{-6} 的应变),这使测量更加准确;高抗腐蚀性(由于芯纤维是二氧化硅),使传感器在腐蚀性环境中能长期使用,FBG传感器可多个传感器串联使用,其可沿着一条光纤线在多个点测量应变和温度(或基于FBG的其他参数特殊设计的传感器);用于在很小的区域内测量参数(局部应变、裂缝、位移等)(由于光纤传感器的细小尺寸);以及可以在大范围或远距离进行测量的长距离感测,非常适合大型岩土结构。

[0073] 在某些实施例中,一个FBG传感器用于感测膜片的应变测量,并且另一个FBG传感器用于感测膜片与多孔膜片之间的内部空间中的温度测量,从而可以实现温度补偿。

[0074] 图2是描绘根据某些实施例的有效应力盒的有效应力测量的示意图。有效应力盒200包括感测膜片210、具有孔隙221的多孔膜片220、刚性环230(即,连接构件)、位于感测膜片210的内表面的中心处的第一FBG传感器240以及位于有效应力盒200内的内部空间250的中间的第二FBG传感器241。感测膜片210的外表面接触土颗粒和孔隙水,并经受来自土颗粒和孔隙水的总应力。孔隙221允许饱和土中的孔隙水260进入内部空间250以填充内部空间250,从而完全平衡感测膜片210的外表面和内表面上的孔隙水压力。因此,感测膜片210上的应变变化仅由有效应力引起,并且有效应力可以由测得的应变变化直接确定。第一FBG传感器240位于感测膜片210的内表面的中心,并且测量感测膜片210上的应变变化。第二FBG传感器241位于内部空间250的中间并测量内部空间250中的温度变化以对第一FBG传感器240的测量进行温度补偿。第一FBG传感器240和第二FBG传感器241经由信号线连接至光纤

光栅传感解调仪。

[0075] 图3是示出根据某些实施例的具有不可压缩流体的有效应力盒的有效应力测量的示意图。有效应力盒300包括感测膜片310、具有孔隙321的多孔膜片320、刚性环330、用于测量感测膜片310上的应变变化的第一FBG传感器340、用于测量温度的第二FBG传感器341、保护盖370以及不可压缩流体371。孔隙321允许饱和土中的孔隙水360进入有效应力盒内的内部空间350,以填充内部空间350,使得感测膜片310的外表面和内表面上的孔隙水压力是完全平衡的。保护盖370位于感测膜片310上方,并连接至刚性环330,以形成由保护盖370、感测膜片310的外表面和刚性环330包围的封闭空间372。不可压缩流体371填充了封闭空间371以用于保护感测膜片310。保护盖370的顶表面接触饱和土中的土颗粒和孔隙水,并受到来自土颗粒和孔隙水的总应力。由于不可压缩流体371是不可压缩的,所以作用在保护盖370上的总应力通过不可压缩流体371直接传递到感测膜片310的外表面。因此,保护盖370和不可压缩流体371可以保护感测膜片310免受土颗粒影响,而不影响有效应力测量的精度,从而提高了有效应力盒300的寿命。此外,不可压缩流体371可以在感测膜片310上施加更均匀的压力。

[0076] 在某些实施例中,保护盖包括板和位于板的周边处的用于连接到感测膜片的突出部分。

[0077] 在某些实施例中,保护盖包括铜、铝或钢。钢可以是不锈钢或镀锌钢。

[0078] 在某些实施例中,封闭空间的高度在3mm至7mm之间。

[0079] 在某些实施例中,不可压缩流体是汞、除气水或除汽油。

[0080] 本公开提供一种用于测量饱和土中的有效应力的系统。图4是描绘根据某些实施例的用于测量饱和土中的有效应力的系统的示意图。系统40包括上述有效应力盒41、应变测量设备42和处理器43。应变测量设备42经由信号线44连接有效应力盒41的应变传感器,用于测量感测膜片上的应变变化。处理器43基于测得的应变变化来确定有效应力。

[0081] 在某些实施例中,应变传感器是FBG传感器,应变测量设备是光纤光栅传感解调仪。

[0082] 本公开提供一种用于测量饱和土中的有效应力的方法。图5是描绘根据某些实施例的用于测量饱和土中的有效应力的方法的流程图。在步骤S51中,上述有效应力盒位于饱和土中。感测膜片朝上,多孔膜片朝下。在步骤S52中,允许多孔膜片下方的孔隙水通过多个孔隙进入内部空间,使得孔隙水填充内部空间,以完全平衡感测膜片的外表面和内表面上的孔隙水压力。在步骤S53中,测量在由饱和土中的有效应力引起的感测膜片的应变变化。在步骤S54中,基于测得的应变变化来直接确定有效应力。

[0083] 根据某些实施例,提供了基于FBG的有效应力盒,用于直接测量土中的有效应力。FBG传感器的布拉格波长随应变变化 $\Delta \varepsilon$ 和温度变化 ΔT 线性地变化。因此,用于测量应变或温度的FBG传感器的等式为:

$$[0084] \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_{B0}} = C_\varepsilon \Delta \varepsilon + C_T \Delta T \quad (3)$$

[0085] 其中, λ_{B0} 是初始状态下的布拉格波长, $\Delta \lambda_B$ 是由应变变化 $\Delta \varepsilon$ 和温度变化 ΔT 引起的波长偏移; C_ε 和 C_T 是分别对应于应变和温度的系数,典型值分别为0.78和 $6.67 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

[0086] 图6A是示出根据某些实施例的有效应力盒的工作原理的示意图。厚度为1mm的圆

形不锈钢板用作感应膜片。假定压力均匀地施加在感测膜片的整个区域上。根据如图6B所示的薄板理论,当用均匀的压力(p)施加到边缘被夹紧的圆形薄板时,在距板中心一定径向距离(r)处引起的挠曲(ω)的量被计算为:

$$[0087] \quad \omega = \frac{3p(1-\nu^2)}{16Eh^3} (a^2 - r^2)^2 \quad (4a)$$

[0088] 其中, ν 和 E 分别是板材的泊松比和弹性模量, h 是圆形板的厚度, a 是板的半径。

[0089] $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 表示为板的弯曲刚度, 该挠曲可表示为:

$$[0090] \quad \omega = \frac{p}{64D} (a^2 - r^2)^2 \quad (4b)$$

[0091] 径向方向上的应变为:

$$[0092] \quad \varepsilon_r = -z \frac{d^2\omega}{dr^2} = z \frac{p}{16D} (a^2 - 3r^2) \quad (5)$$

[0093] 其中, z 是距板的中性轴的距离。

[0094] 如果FBG传感器粘附在板的背面($z=h/2$)和中心($r=0$), 则FBG传感器将测量通过以下方法获得最大应变:

$$[0095] \quad \varepsilon_{r,\max} = \varepsilon_{r,r=0} = \frac{h}{2} \frac{p}{16D} a^2 = \frac{p}{32D} ha^2 \quad (6)$$

[0096] 将等式(6)代入等式(3), 注意 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{r,\max}$, 可得到布拉格波长的偏移与施加压力的关系为:

$$[0097] \quad \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_{B0}} = C_\varepsilon \frac{p}{32D} ha^2 + C_T \Delta T \quad (7)$$

[0098] 温度变化 ΔT 可以单独测量。当保持恒温时, ΔT 为零。因此, 等式(7)简化为:

$$[0099] \quad \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_{B0}} = C_\varepsilon \frac{p}{32D} ha^2 \quad (8)$$

[0100] 由此可知, 布拉格波长的偏移与所施加的压力 p 成比例。

[0101] 如图6A所示, 多孔膜片在底面的重要作用是允许孔隙水进入感测膜片和多孔膜片之间的内部空间, 并将孔隙水压力传递到感测膜片的内表面。感测膜片的正面和背面的孔隙水压力相同且完全平衡, 因此土体中的孔隙水压力不会引起感测膜片的任何挠曲。感测膜片的挠曲仅由土颗粒接触力的所有垂直(法向)方向的分力平均值引起。土颗粒接触力的所有垂直(法向)方向的分力平均值就是有效应力 σ' 。考虑图6A中的设计, 等式(8)可以写成:

$$[0102] \quad \sigma' = p = \frac{32D}{C_\varepsilon ha^2} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_{B0}} = \frac{32D}{C_\varepsilon ha^2 \lambda_{B0}} \Delta \lambda_B \quad (9)$$

[0103] 等式(9)用于直接测量有效应力。

[0104] 图7是根据某些实施例的基于FBG的有效应力盒的示意图。基于FBG的有效应力盒700包括圆形感测膜片710、圆形多孔膜720、刚性环730和FBG传感器740。基于FBG的有效应力盒700的外径和总厚度分别为120mm和16mm。感测膜片710的直径为100mm, 厚度为1mm。多

孔膜片720的直径为120mm,厚度为2mm,并且包括直径为2mm的孔隙。刚性环730的直径为120mm,宽度为10mm,厚度为14mm。感测膜片710、多孔膜片720和刚性环730由316不锈钢制成,其弹性模量为193GPa,泊松比为0.3,屈服应变为 $\pm 1050\mu\epsilon$ 。将所有值代入等式(6),基于FBG的有效应力盒的最大压力p为201.9kPa。长度为10mm且中心波长 λ_{B0} 为1542nm的FBG传感器740附接至感测膜片710的内表面的中心,并由环氧粘合剂很好地保护。考虑到多个有效应力盒的串联使用,FBG传感器740通过使用电弧熔接器与两芯单模光纤连接。刚性环730具有光缆出口750,并且两芯单模光纤可以经由光缆出口750连接到光纤光栅传感解调仪。

[0105] 图7的基于FBG的有效应力盒通过施加水压力来标定校准,其中在水容器中将多孔膜片暂时替换为防渗不锈钢盘。当在校准标定中使用防渗不锈钢盘代替多孔膜片时,将刚性环和防渗不锈钢盘装配在一起并用O形圈密封,以防止水进入单元内部。将带有防渗不锈钢盘的基于FBG的有效应力盒放置在直径为300mm,高度为500mm的带有水密盖的水容器中。使用压力控制器来提供稳定的水压,精度为1kPa,压力范围为0至2000kPa。此外,将光纤连接到光纤光栅传感解调仪配以电脑以读取读数。为了评估基于FBG的有效应力盒的可重复性并获得更准确的校准系数值,标定过程包括加载和卸载的两个循环。

[0106] 在标定中,以20kPa的增量施加0至200kPa范围内的水压。图8展示了加载和卸载的校准结果。两个加载-卸载循环的结果表明,所设计的基于FBG的有效应力盒具有良好的可重复性。此外,观察到反射的布拉格波长与施加的水压之间的线性关系。随着水压从0kPa增加到200kPa,反射的布拉格波长从1541.96nm增加到1542.58nm。通过采用最小二乘法,获得值为0.9954的良好的线性相关系数,并在图8中示出。发现图8中的斜率(斜率 = $\Delta \lambda_B / p$)为0.0032nm/kPa,即当FBG传感器被具有0.001nm(或1pm)波长分辨率的光学传感解调器(SM125)连接时,该有效应力盒的压力分辨率为0.31kPa。根据等式(6),计算出的斜率(斜率 = $\Delta \lambda_B / p$)为0.0053nm/kPa,大于测量值0.0032nm/kPa。主要有两个原因:(a)FBG传感器测得的应变是FBG传感器长度10mm内的平均应变;而等式(6)中的应变是中心处的最大应变($r=0$),以及(b)环氧树脂粘合剂的粘合强度和厚度增加了感测膜片的弯曲刚度,从而在相同施加压力下减小了应变。因而,测得的斜率更可靠。

[0107] 标定校准结果表明,基于FBG的有效应力盒在所施加压力下显示出高精度的良好线性。对于基于FBG的有效应力盒,在应用中可以采用0.0032nm/kPa的压力灵敏度。当FBG传感器被波长分辨率为0.001nm(或1pm)的光纤光栅传感解调仪连接时,基于FBG的有效应力盒的压力分辨率为0.31kPa。

[0108] 图9A和9B中展示了大型物理模型中采用基于FBG的有效应力盒的检验测试。物理模型的容器的内部尺寸为长1000mm,宽600mm,高830mm。顶盖的内表面固定有橡胶膜。利用压力控制器来控制橡胶膜内部的水压,从而可以控制物理模型内部的、饱和的、完全风化的花岗岩土体(CDG)上的垂直压力。容器的内表面衬有光滑的不锈钢板。润滑油涂抹在不锈钢板上,并使用柔性塑料膜覆盖钢板,从而减少了土体和容器的侧壁之间的摩擦。

[0109] 为了监测由橡胶膜提供的施加压力,常规的孔隙水压力传感器(PPT2)安装在大容器的顶盖上。图7的基于FBG的有效应力盒(FBG-ESC)与常规土压力盒(EPT)一起埋入深度为400mm的完全饱和、完全风化的花岗岩土(CDG)中,常规孔隙水压力传感器(PPT1)安装在大容器的侧壁上与图9A和9B所示的高度相同的高度。EPT、PPT1和PPT2均在密封的有机玻璃容器中用水压力进行校准。在测试过程中,FBG传感器由光纤光栅传感解调仪来连接,而常规

传感器的数据则由数据记录器获取。

[0110] 首先将平均上覆压力为30kPa的准备阶段施加于土顶部。保持30kPa的压力1000小时,以实现(a)橡胶膜与顶部土体表面之间的接触压力,以及(b)所有传感器与周围土的接触。1000小时后,将橡胶膜中的水压力卸载至零,然后增加至100kPa。在100kPa的平均上覆压力下,包括由常规传感器(PPT2、EPT和PPT1)测量的施加压力、总土压力和孔隙水压力的测试结果显示在图10A中。由于多余的孔隙水压力消散或土随时间推移而固结,因此测得的孔隙水压力逐渐降低。

[0111] 由于物理模型测试是在饱和土体中进行的,因此可以通过使用等式(1c)从总土压力中减去孔隙水压力来计算有效应力,作为间接测量方法。计算出的用于测试的有效应力在图10B中示出。图10B中还展示了在测试中使用基于FBG的有效应力盒直接测量的有效应力以进行比较。随着时间的增长,图10B中测得的有效应力随着超孔隙水压力的消散而逐渐增加,表现出基于FBG的有效应力盒的良好可靠性。在700个小时的长时间内进行了相似的物理模型测试,并且当长的时间段长达700小时也获得了相似的测试结果,如图11A和11B中所示。基于FBG的有效应力盒的测量数据与整个加载期间的计算值非常吻合。因此,可以测量单个单元中的有效应力并放置在一个位置的这种新开发的基于FBG的有效应力盒与在两个不同位置使用两个传感器的间接测量方法相比,可以对饱和土体中的有效应力提供更好且更可靠的测量结果。

[0112] 通过与由常规传感器提供的测得的总土压力和孔隙水压力计算出的有效应力值进行比较,验证了基于FBG的有效应力盒具有良好的精度,用于以可靠地直接测量饱和土中的有效应力。

[0113] 因此,可以看出,已经公开了一种改进的有效应力盒,其消除了或至少减少了与现有技术的工艺和装置相关联的缺点和问题。根据某些实施例的有效应力盒的多孔膜片允许孔隙水进入感测膜片和多孔膜片之间的内部空间,以在感测膜片的外表面和内表面实现孔隙水压力的完全平衡。因此,有效应力盒能够通过仅使用一个膜片在一个位置而非使用至少两个传统传感器在两个位置来直接测量饱和土中的有效应力。

[0114] 本文所述的有效应力盒可以用于但不限于:在施工期间和之后监测重要地基的有效应力,这可以帮助准确确定地基的位移;监测斜坡的有效应力,这有助于评估斜坡的稳定性,并为滑坡、泥石流等地质灾害提供预警;或监测与土体接触的挡土墙或其他结构的有效应力,这有助于评估这些挡土墙和结构的变形和稳定性。

[0115] 尽管已经根据某些实施例描述了本发明,但是对于本领域普通技术人员显而易见的其他实施例也在本发明的范围内。因此,本发明的范围仅由所附权利要求书限定。

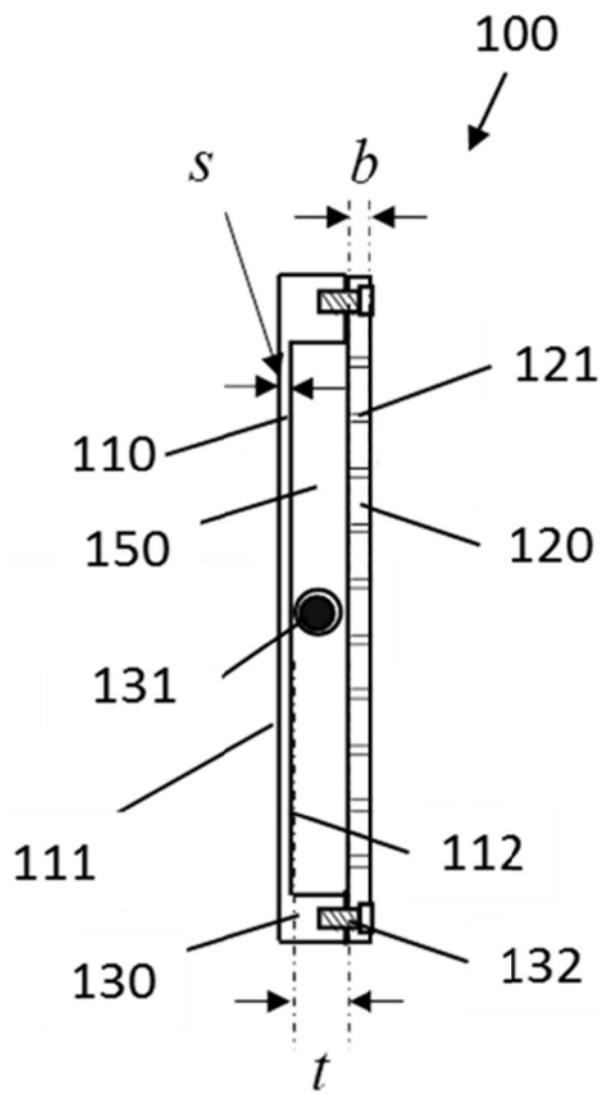


图1A

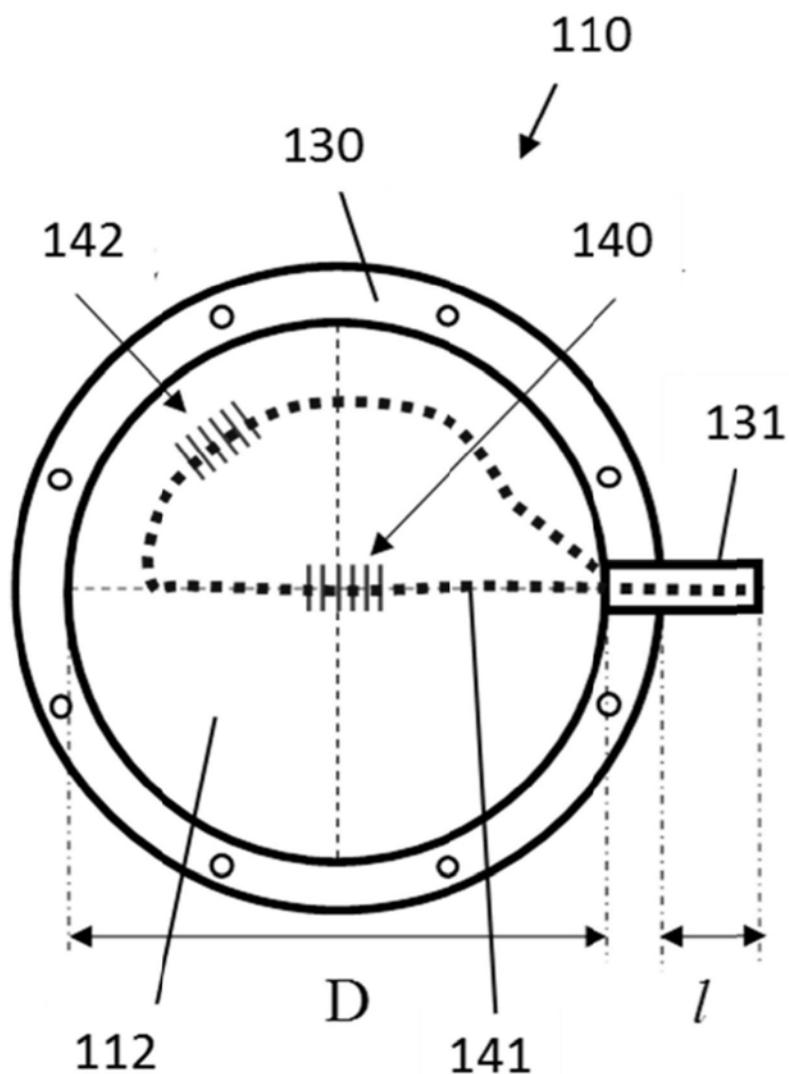


图1B

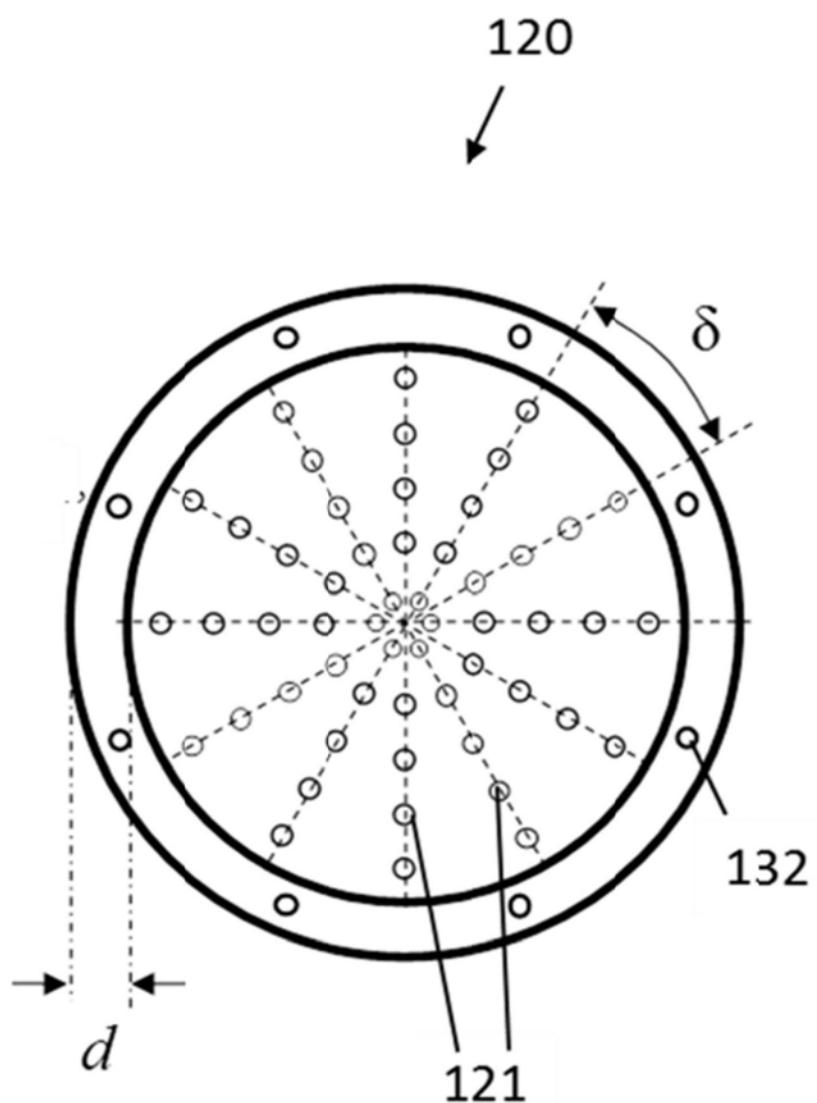


图1C

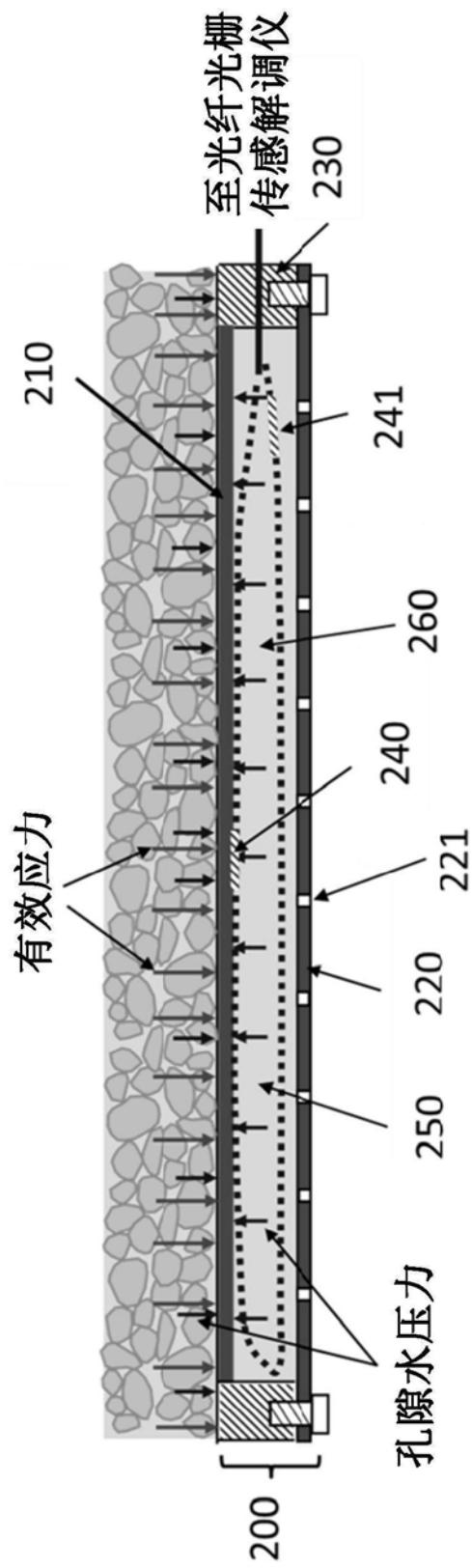


图2

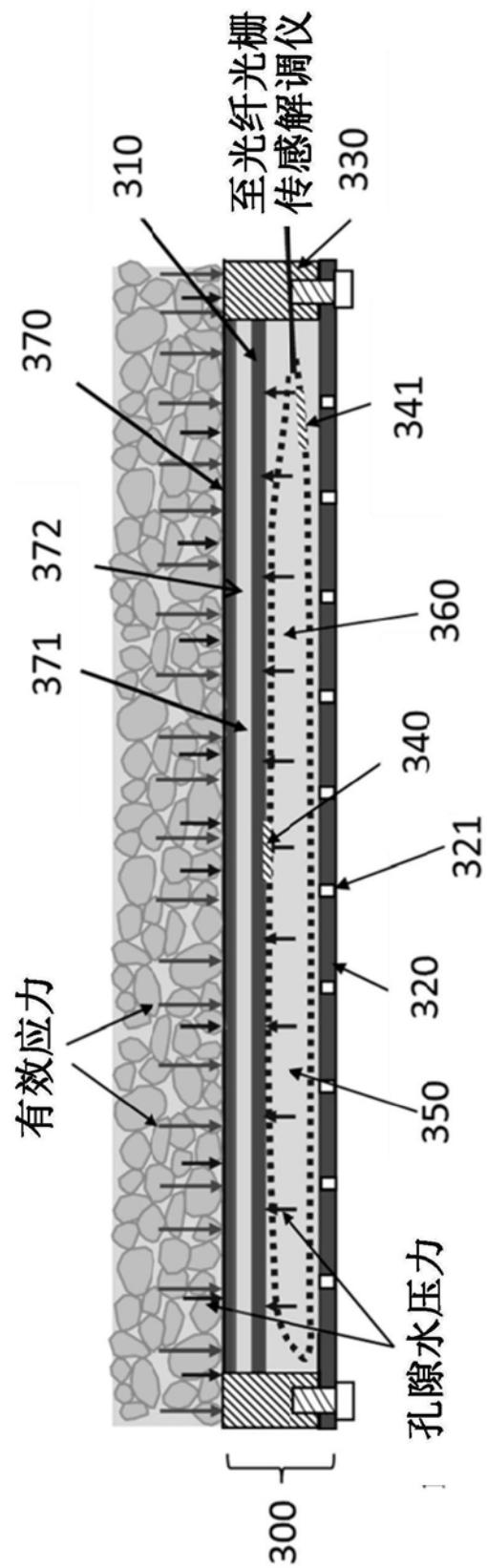


图3

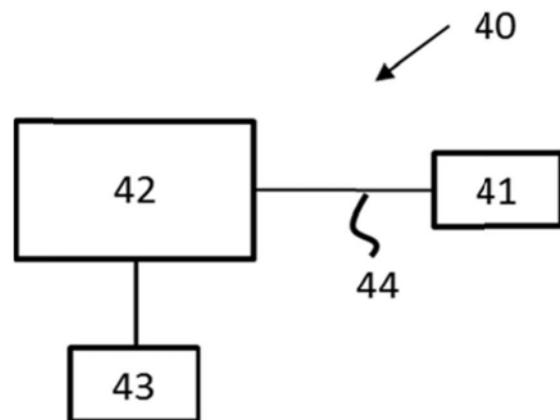


图4

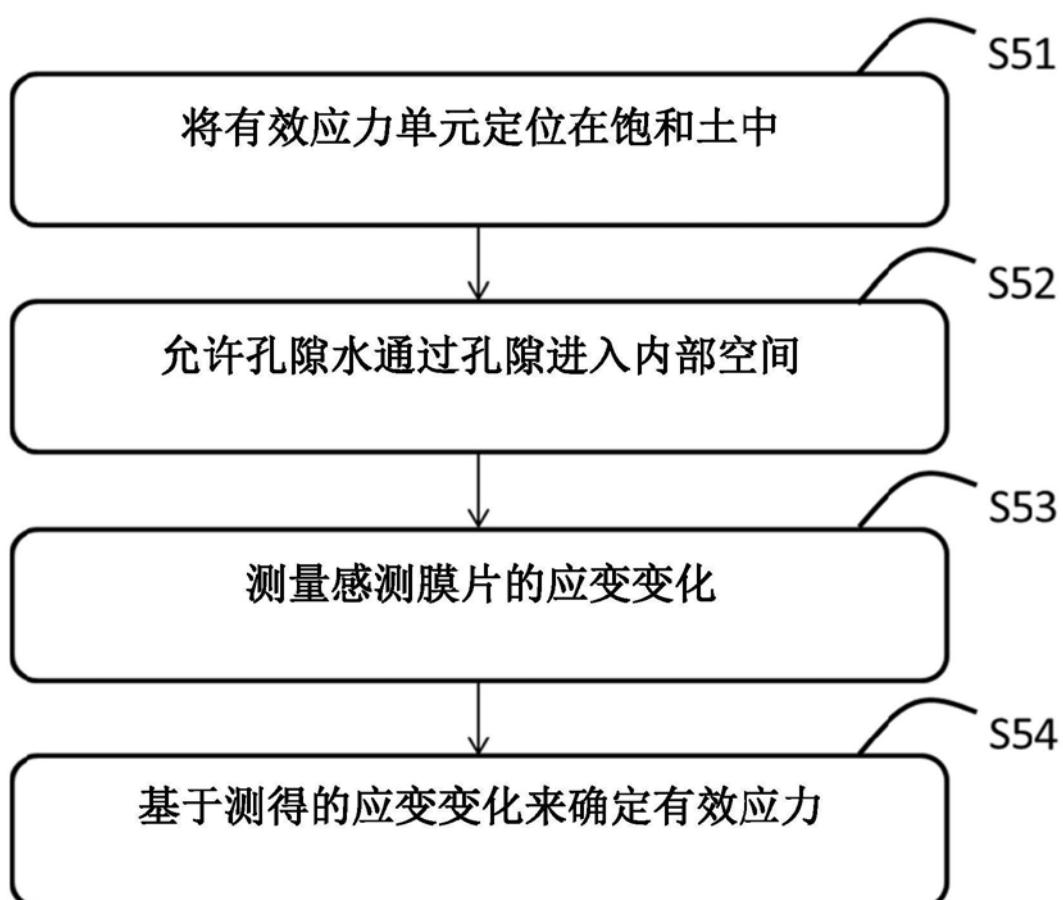


图5

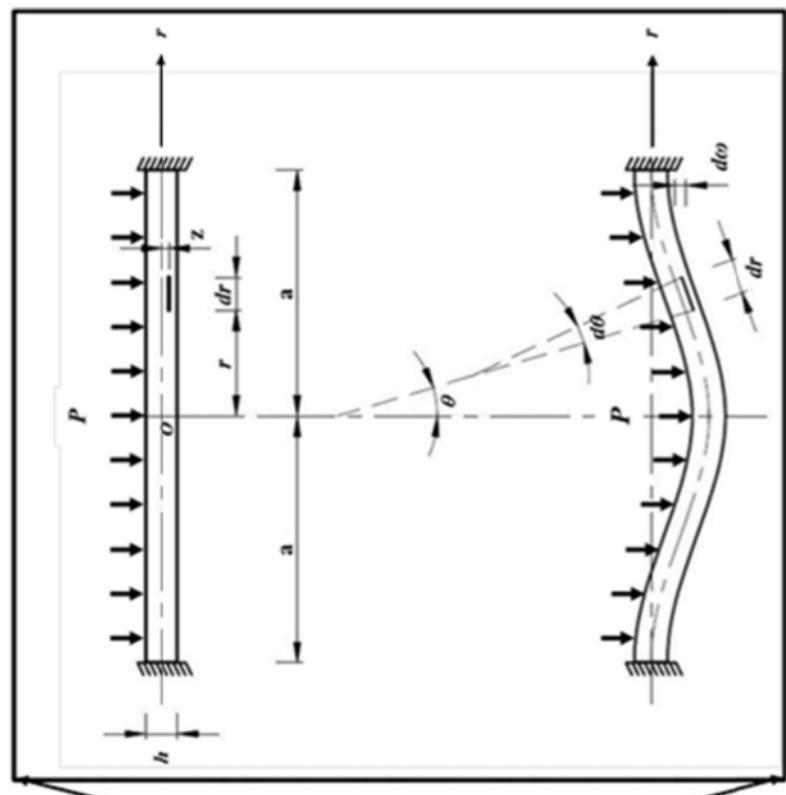


图 6B

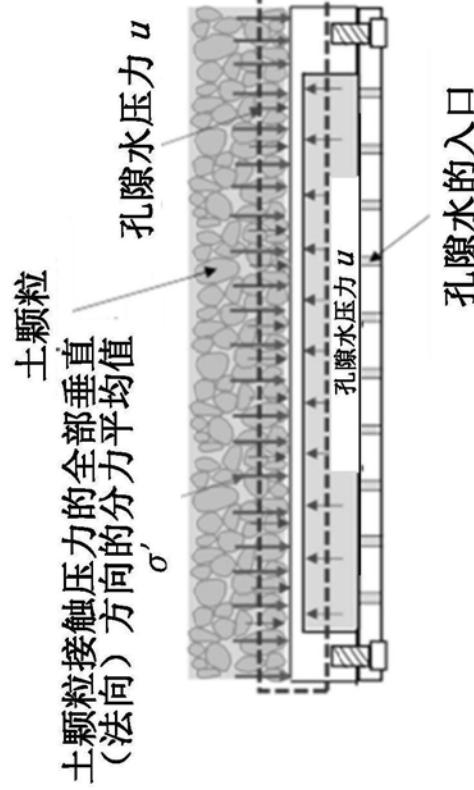


图 6A

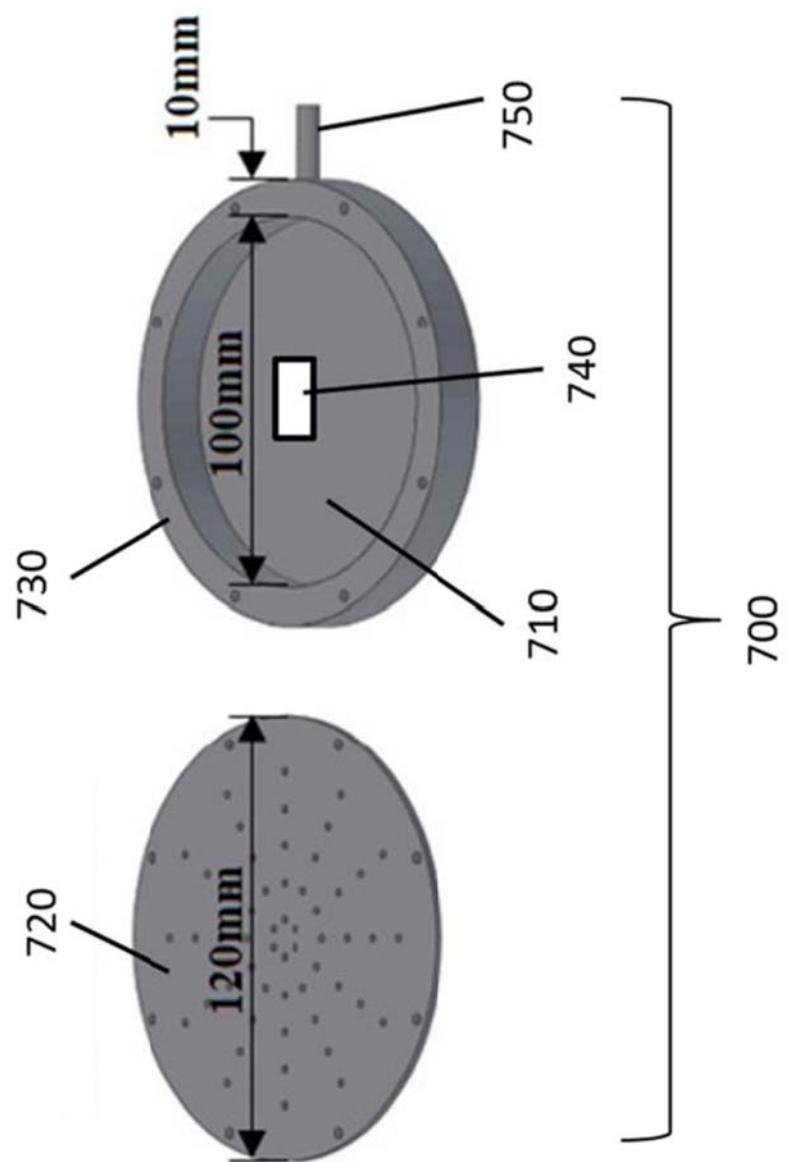
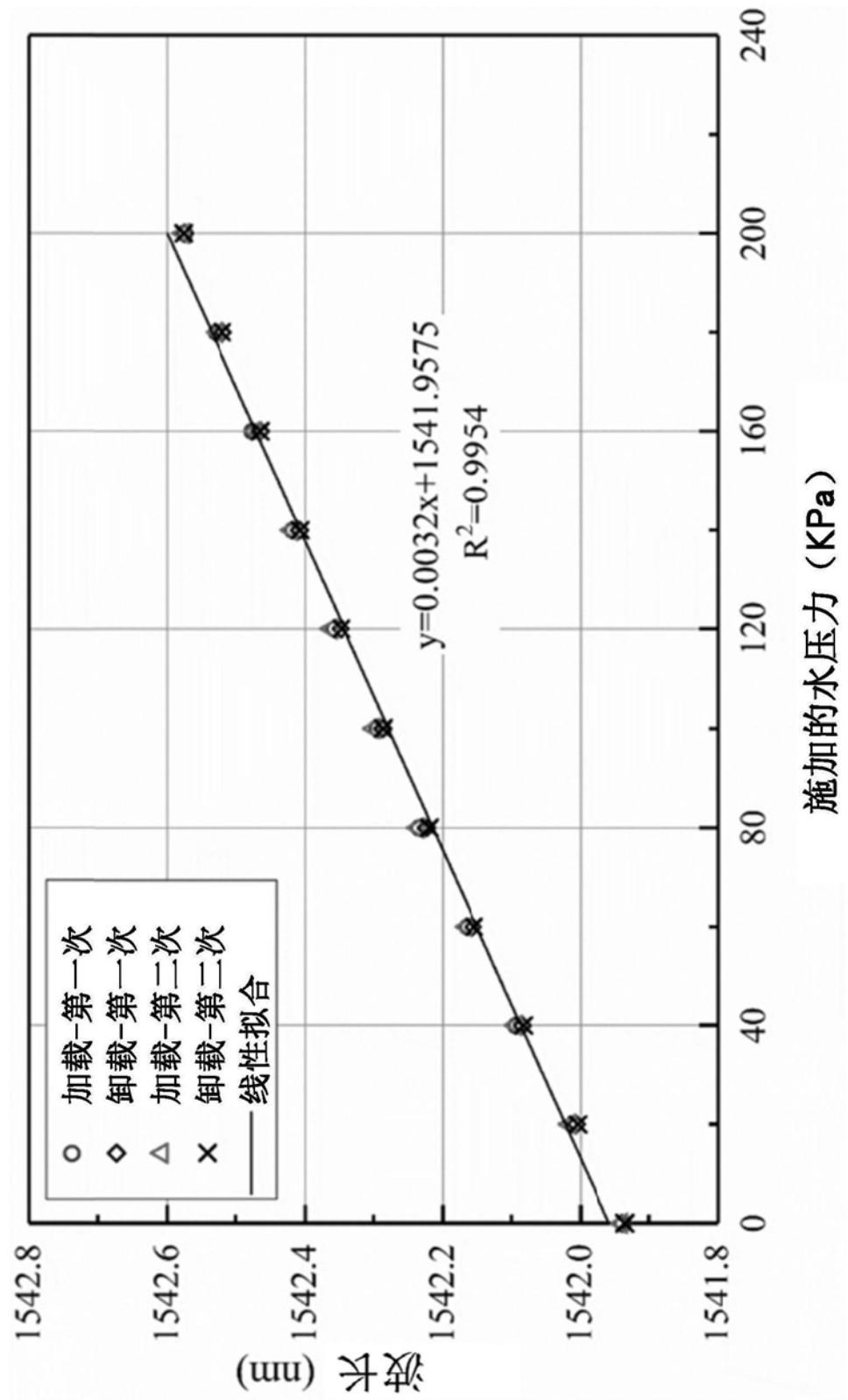


图7



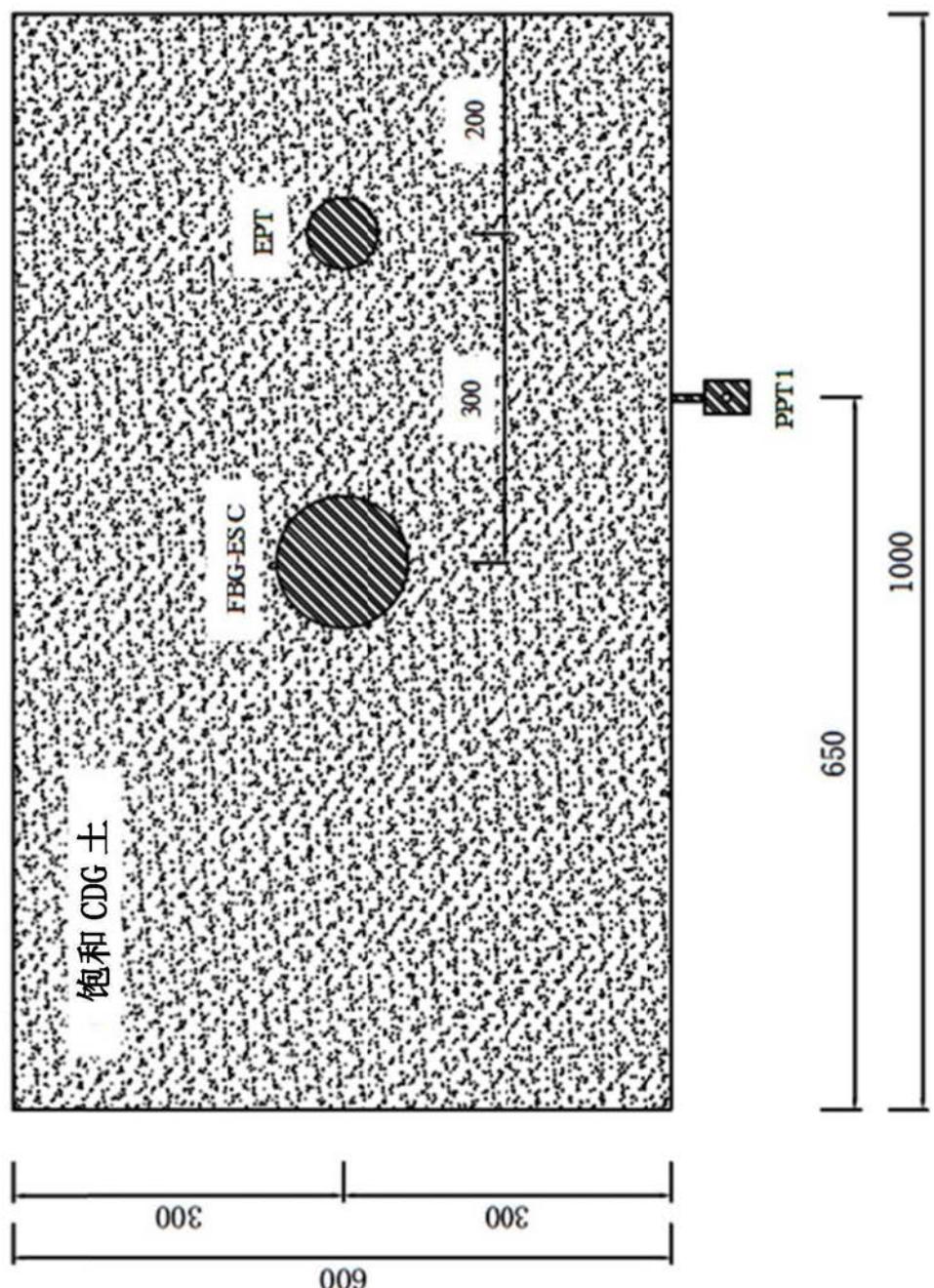


图9A

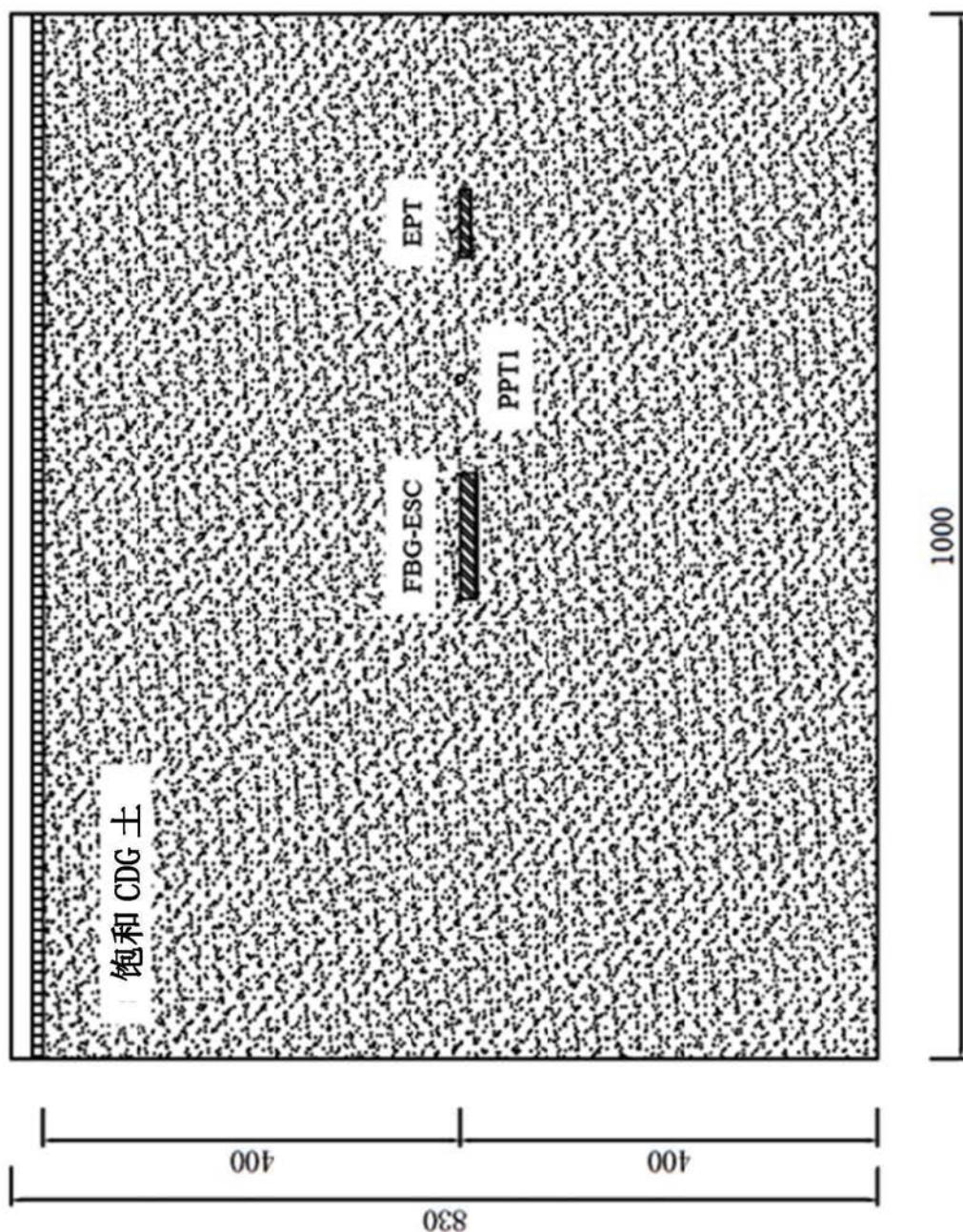


图9B

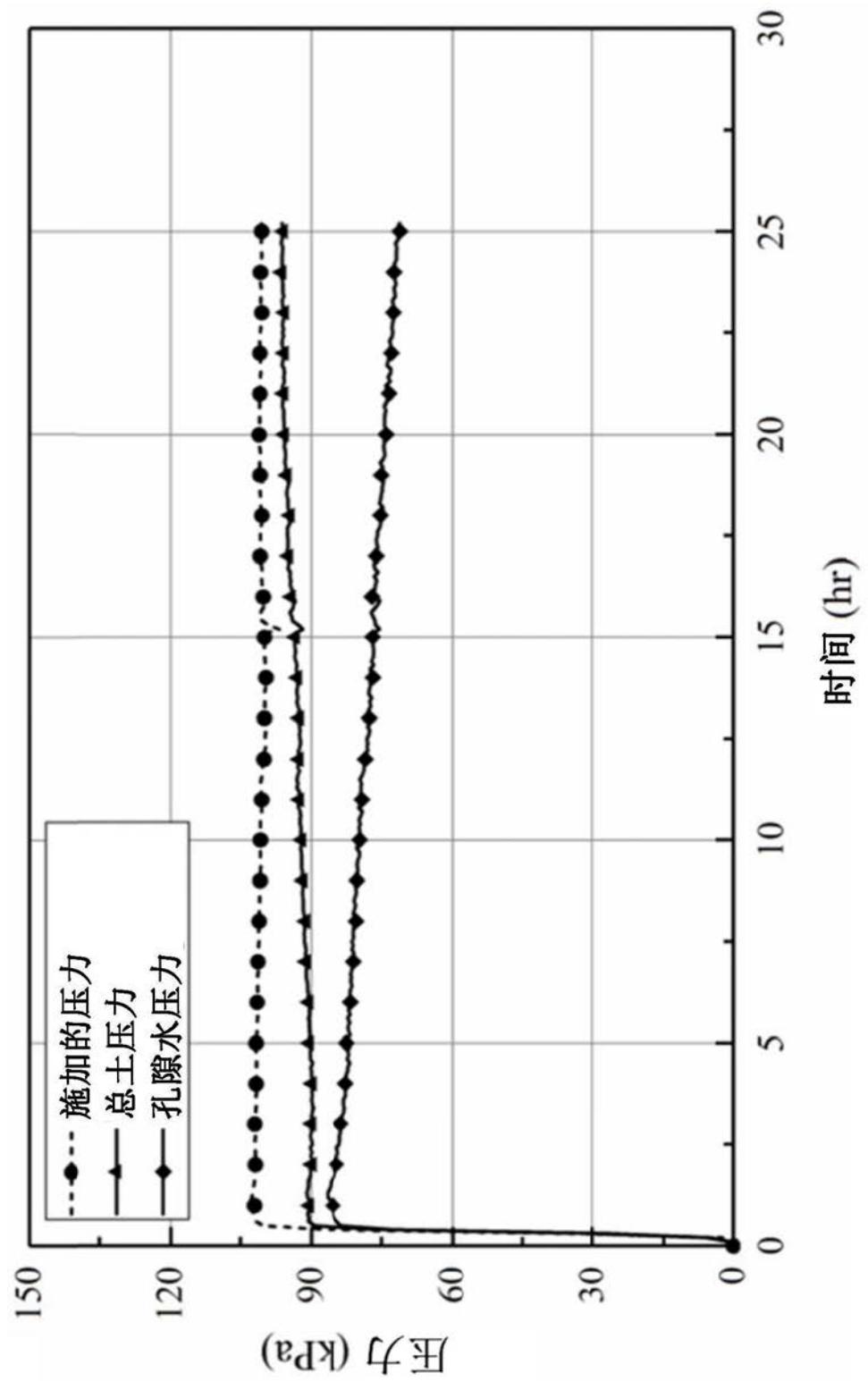


图10A

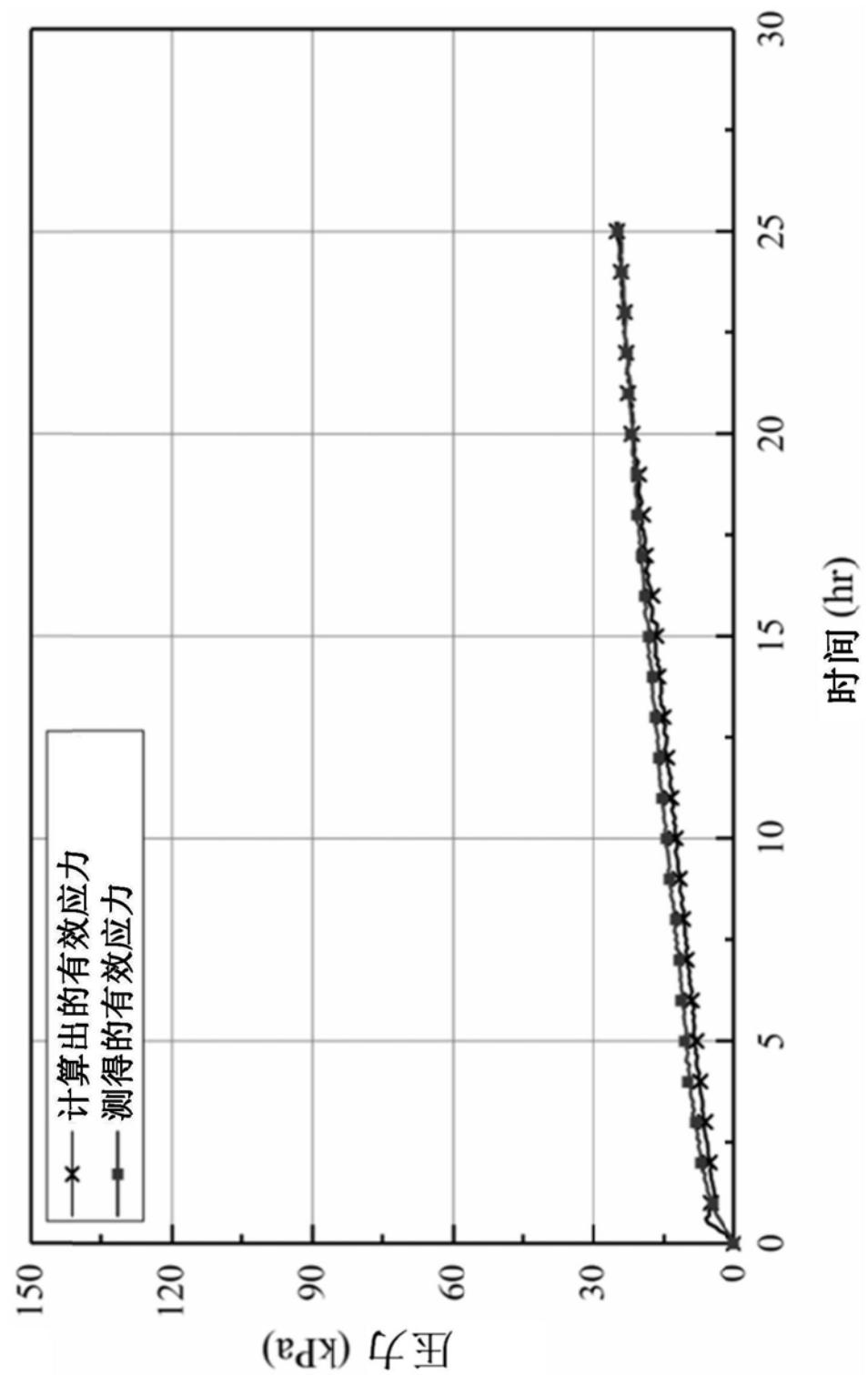


图10B

