

水泥砂浆体中三向压力传感器的测量特性

朱元广¹, 刘泉声^{1,2}, 蒋景东², 黄用世³, 潘阳⁴

- (1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木与建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 中国电力工程顾问集团 中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071; 4. 济南市人防建筑设计研究院有限责任公司, 山东 济南 250014)

摘要: 确定三向压力传感器实测应力与其周围待测介质初始应力的关系是实现其应力测量的必要条件。为了解三向压力传感器在实际应用中的测量特性, 利用 RMT 岩石力学试验系统对自行研发的三向压力传感器进行标定, 研究各个传感面的重复性和线性度, 得到各个传感面的标定系数。以水泥砂浆为材料, 浇筑制成嵌入三向压力传感器的立方体试样(边长 600 mm), 并利用自行研制的真三轴试验加载装置, 研究重复荷载作用下水泥砂浆体中三向压力传感器实测应力随外部加载应力状态的变化规律。水泥砂浆体的孔隙结构使得三向压力传感器的实测应力存在滞后现象, 但在重复荷载作用下, 水泥砂浆体中的孔隙结构逐渐被压密, 三向压力传感器的实测应力曲线逐渐趋于稳定。静水应力状态加载条件下, 三向压力传感器的实测应力与其对应面的加载应力呈线性相关关系; 非静水应力条件下, 三向压力传感器的实测应力不仅与其对应面的加载应力呈线性相关关系, 而且与其对应面的加载应力与其他 2 个面的加载应力之差也成线性相关关系。在此基础上, 提出用于描述介质初始应力状态对三向压力传感器实测应力影响规律的数学关系。

关键词: 岩石力学; 流变应力恢复法; 三向压力传感器; 实测应力; 初始应力; 模型试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)09-1877-09

MEASURING PERFORMANCE OF THREE-DIMENSIONAL PRESSURE SENSOR IN CEMENT MORTAR BLOCK

ZHU Yuanguang¹, LIU Quansheng^{1,2}, JIANG Jingdong², HUANG Yongshi³, PAN Yang⁴

- (1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group Corporation, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. Jinan Air Defence Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: The relationship between measured stress with three-dimension pressure sensor(3DPS) and initial stress of surrounding medium plays an important role in rock stress measurement. In order to know the performance of 3DPS for practical applications, calibration test was performed with the testing system of rock mechanics to investigate the repeatability and linearity of 3DPS and to obtain the corresponding calibration coefficients. A cubic sample of cement mortar with the side length of 600 mm was made with a 3DPS embedded in the center. The sample was under different repeated stress states applied by the true-triaxial loading system developed in-house. Due to the pore structure of the cement mortar block, the measured stress curves with 3DPS showed a hysteresis phenomenon when the loads were applied for the first time. The pore structures were denser after the compression of repeating loads, the measured stress curves tended to be stable. For the hydrostatic stress loading, the measured

收稿日期: 2014-11-10; **修回日期:** 2014-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11302242); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904)

作者简介: 朱元广(1985-), 男, 2007年毕业于河海大学工程力学专业, 现任助理研究员, 主要从事深部地下工程的长期稳定性方面的研究工作。E-mail: yuanguangzhu@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1487

stresses with 3DPS were linear to the loading stresses. For the non-hydrostatic stress loading, the measured stresses with 3DPS were linear both to the loading stresses in the same direction and to the differential stresses of the other two directions. An equation for describing the influence of loading stress on the measured stress with 3DPS in cement mortar block was proposed.

Key words : rock mechanics ; rheological stress recovery method ; three-dimension pressure sensor(3DPS) ; measured stress ; initial stress ; model test

1 引言

针对煤矿深部软弱破碎围岩应力难以测量的技术难题，基于深部围岩在高应力作用下具有强流变性的特点^[1-2]，张芳等^[3]提出了一种地应力测量新方法——流变应力恢复法地应力测量技术，如图 1 所示。该方法假设：在深部巷道软弱围岩中钻孔埋设压力传感器，由于深部软岩的强流变特性，传感器附近围岩的应力会随时间逐渐恢复，使得传感器的实测应力随时间逐渐上升并最终趋于稳定，进而可以根据传感器的实测应力来分析围岩的初始应力状态和巷道围岩应力分布的长期演化规律。基于这一设想，发明了一种可以同时测量 3 个正交方向正应力的三向压力传感器，如图 2 所示。该三向压力传感器为全密封防水设计，其外形为立方体结构，包含 3 个相互垂直嵌入的圆形压力传感面。同时，为减小地应力测量过程中的嵌入效应，对三向压力传感器的边角做了切割处理。

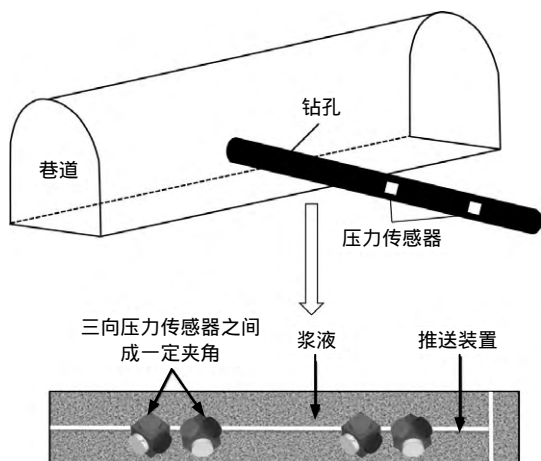


图 1 流变应力恢复法地应力测量技术示意图

Fig.1 Diagram of rheological stress recovery method for geostress measurement

然而，三向压力传感器的使用会产生与土压力传感器(土压力盒)使用类似的问题，即由于压力传感器材质与被测介质物理力学性质的差异，使得压力传感器埋设之后，其附近介质的原有应力场发生改

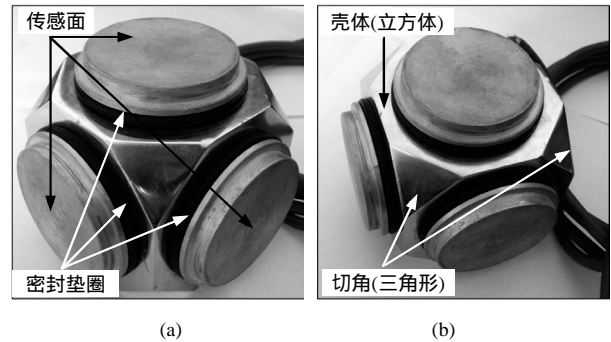


图 2 三向压力传感器的外部结构

Fig.2 External structure representation of 3DPS

变，引起应力集中和应力重分布等现象，导致压力传感器的实测应力与介质初始应力场关系的重大不确定性。因此，揭示各种因素对压力传感器实测应力的影响规律，建立压力传感器实测应力与介质初始应力场之间的关系，对推广压力传感器在岩土工程中的应用具有重要的意义。

早在 1927 年，F. Kogler 和 A. Scheidig 用其自行研制的土压力传感器测量地基反力时就发现，当土压力传感器的刚度大于周围土介质的刚度时，测量结果偏大，形成“被动拱”，反之则偏小，形成“主动拱”，如图 3^[4-5]所示。D. W. Taylor 等^[6-9]也得到了类似的结论，并通过理论研究提出了土压力传感器测量值与实际值之间的数学关系。刘宝有^[10]总结了国内外关于土压力传感器的理论和试验研究进展，并将这种由于传感器与介质物理力学性质不同所产生的测量误差称为“匹配误差”，定义如下：

$$\beta = \frac{P_c}{P_0} = \frac{P_t - P_0}{P_0} = \frac{P_t}{P_0} - 1 \quad (1)$$

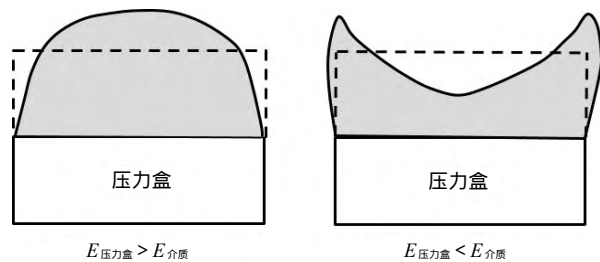


图 3 土压力传感器表面应力的非均匀分布^[4-5]

Fig.3 Non-uniform stress distribution on EPC^[4-5]

式中： β 为匹配误差， P_e 为传感器扰动产生的附加应力， P_t 为传感器扰动后的应力， P_0 为均布应力场中原存应力。

由于影响土压力传感器匹配误差的因素有很多，因此对于匹配误差存在很多不同的表达形式^[6,8-9,11-12]，但各形式中均包含 2 种因素，一是土压力传感器的几何特性，主要为感应膜的厚度和直径，二是土压力传感器和土体的力学性质，主要为弹性模量。W. A. Weiler 和 F. H. Kulhawy^[13]总结了影响土压力传感器测量结果的主要因素，并将之分为 4 类：一是土压力传感器的嵌入效应，具体因素包括压力盒厚度与直径的比值、角部应力集中、临近结构或压力盒以及土的应力-应变行为等；二是土压力传感器与土的相互作用，具体因素包括土与压力传感器的刚度比、感应膜的挠曲和偏心以及不均匀荷载和点荷载的作用；三是填筑效应，主要是由于上覆土层的填筑压实会扰动土体，使得土压力传感器过多承担土体的应力；四是环境和动力学因素，主要包括温度、动态应力测量、湿度及腐蚀性。

由于影响土压力传感器测量结果的因素众多，其标定方法和技术也在不断地改进之中。目前，土压力传感器的实验室标定方法主要有 3 种，分别为气压标定^[5,14-16]、液体标定(油标)以及土体中标定^[17-19](砂标)。W. A. Weiler 和 F. H. Kulhawy^[13]指出，土压力的气压标定或油压标定方法虽然经济，但如果不在土体中进行标定，其结果是不能接受的。R. J. Finno^[20]通过试验研究发现：如果土压力盒的标定条件与其安装及监测过程的条件不一致，最终实测的值可能会很有限。V. Askegaard^[21]建议，当土压力盒在未知的加载历史条件中应用时，应该在尽可能多的状态下进行测试，进而对压力传感器能达到的准确性进行评估。可以看出，对不同工作状态下的传感器进行模拟测试是保证测量结果准确、可靠的必要条件。

与土压力传感器相比，三向压力传感器的三向正交设计使得影响传感器实测应力的因素更为复杂。除了三向压力传感器的几何特性、与介质的力学性质差异之外，介质初始应力状态对三向压力传感器的实测应力也有可能产生影响。本研究将以水泥砂浆体为模拟介质，通过水泥砂浆体中三向压力传感器的模型试验研究，揭示水泥砂浆体的初始应力状态对三向压力传感器实测应力的影响规律，了解三向压力传感器埋设后的测量特性，为建立三向

压力传感器实测应力与介质初始应力之间的关系提供依据。

2 三向压力传感器的测量原理

三向压力传感器的内部结构如图 4 所示，其由受力弹性形变的承载板、钢弦、立柱、线圈等组成。当承载板受到外荷载的作用时，产生弹性弯曲变形，使得紧固夹头张拉的钢弦伸长。通过钢弦旁的激振线圈激励钢弦振动，从而使得钢弦与线圈之间及线圈回路中的磁阻抗发生周期性变化，线圈感应出的磁阻变化频率即为钢弦的自振频率。当承载板受一均布压力 P 后，承载板将发生弯曲。承载板弹性模量为 E 、泊松比为 ν 、厚度为 T 、直径为 L 。由于立柱始终垂直于承载板且保持形状不变，因此承载板与立柱相交位置处的切角与立柱的转角相同，表示为 θ 。

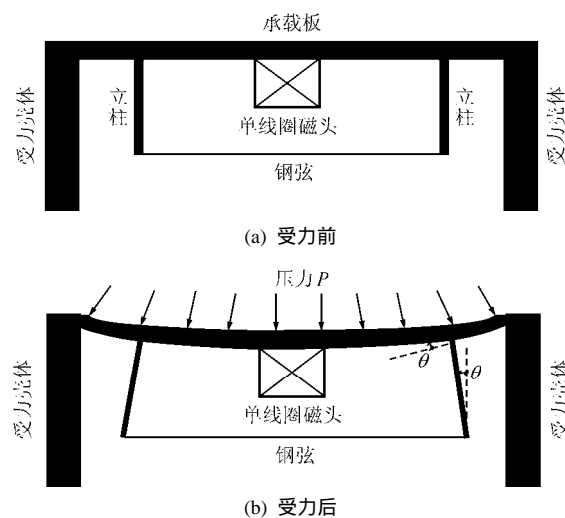


图 4 三向压力传感器内部振弦结构
Fig.4 Internal structure of 3DPS

通过弹性力学中圆形薄板轴对称弯曲问题的分析^[22]，可以建立转角 θ 与压力 P 、承载板刚度 D 、直径 L 之间的数学关系。同样，通过几何分析可以建立 θ 与钢弦长度 l 和应变 ϵ 之间的数学关系。进而可以建立承载板所受压力 P 与转角 θ 之间的数学关系^[23]：

$$\tan \theta = \frac{Pl}{128D}(l^2 - L^2) \tag{2a}$$

其中，

$$D = ET^3 / [12(1 - \nu^2)] \tag{2b}$$

根据胡克定律可知，钢弦应力与应变之间的关系为

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l} = E \frac{2H \sin \theta}{l} \quad (3)$$

式中： H 为立柱高度， Δl 为钢弦变形。

由于转角 θ 比较小，因而可以近似地认为 $\tan \theta = \sin \theta$ 。进而，将式(2a)代入式(3)，并考虑弹性力学中应力的正负号规定，可得

$$\sigma = E \frac{2H}{l} \frac{Pl}{128D} (l^2 - L^2) \quad (4)$$

下面考虑钢弦振动频率与应力之间的关系。振弦这种等幅连续振动的工作状态，符合柔软无阻尼微振动的条件，振弦的振动频率可由下式确定：

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (5)$$

式中： f 为钢弦的频率， ρ 为钢弦的材料密度。

由于钢弦的质量、长度、截面积、弹性模量可视为常数，因此钢弦的应力 σ 与振动频率 f 之间可以直接建立关系。令未施加外力时钢弦的输出频率为初始频率 f_0 ，施加外力后钢弦的振动频率为 f ，根据式(5)可以确定被测外力的大小：

$$\sigma = \Delta\sigma = k(f^2 - f_0^2) \quad (6a)$$

其中，

$$k = 4l^2 \rho \quad (6b)$$

式中： k 为钢弦的灵敏系数。

根据式(4)和(6a)，可得到压力 P 与频率之间的关系为

$$P = \frac{64kD}{Eb(L^2 - l^2)} (f^2 - f_0^2) \quad (7)$$

将式(7)改写成：

$$P = K(f^2 - f_0^2) \quad (8a)$$

其中，

$$K = 64kD / [Eb(L^2 - l^2)] \quad (8b)$$

式中： K 为标定系数，与压力传感器(含钢弦)尺寸及材质相关。由于在制造过程中压力传感器的钢弦长度、承载板尺寸等难以加工完全一致，故每个压力传感器的标定系数 K 均不同，在实际应用中，标定系数一般通过标定试验来确定。

3 标定试验

在进行水泥砂浆体模型试验之前，需要对三向压力传感器进行标定，以获得 3 个传感面的标定系数。标定试验是在中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的 RMT150C 岩石力学试验系统(见图 5)上进行的。

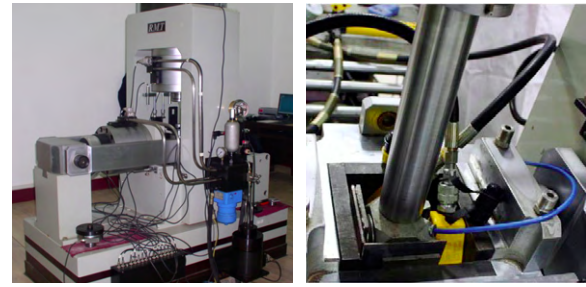


图 5 RMT150C 岩石力学试验系统

Fig.5 RMT150C rock mechanical testing system

试验采用力-位移控制方式，荷载设定为 0, 6, 12, ..., 54, 60 kN，加载速率为 0.2 kN/s。为弥补试验机加载装置长度的不足，在加载装置与三向压力传感器之间插入一根圆柱形钢柱作为传力杆。具体操作步骤如下：(1) 将三向压力传感器放置于试验机的承压板上，并将传力杆放在待加载的压力传感面上，缓慢移动三向压力传感器和传力杆，使得三向压力传感器的压力传感面、传力杆中心以及试验机加压探头中心在同一条铅垂线上。将三向压力传感器的电缆线连接至数据采集仪，并记录三向压力传感器各个传感面的初始频率。(2) 打开试验机的伺服测控装置，按照设定的速率加载至设定压力值。同时，利用数据采集仪记录该压力下三向压力传感器各个传感面的频率。当加载至最大设定压力值之后，将压力卸载至 0，再次进行加载，总计加载 3 次。(3) 重复上述 2 个步骤，直至三向压力传感器的 3 个传感面均标定完毕。

如图 6 所示，给出了 3 次重复加载条件下三向压力传感器各个传感面振弦频率 f^2 随加载压力 P 的变化规律，可以看出标定结果具有很好的重复性。根据式(8a)，计算得到三向压力传感器标定系数 $K_i (i=1, 2, 3)$ 值，如表 1 所示。拟合曲线与试验值之间的良好相关性表明了三向压力传感器具有较好的线性度。

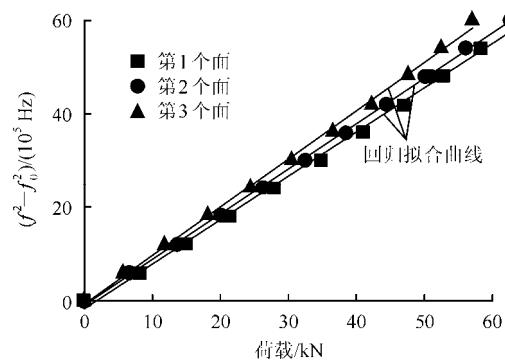


图 6 荷载与频率关系

Fig.6 Relations between load and frequency

表 1 三向压力传感器 K 值
Table 1 K values of 3DPS

传感器编号	K_i 值	R^2
1 [#]	1.02×10^{-5}	0.999 3
2 [#]	9.48×10^{-6}	0.999 5
3 [#]	9.06×10^{-6}	0.998 7

4 模型试验

4.1 试验系统

为满足水泥砂浆体试样的体积及三向加载要求，自行研制了一台真三轴加载系统，如图 7 所示。该试验系统主要由支撑钢架结构、千斤顶、加压油泵、传力钢板及压力表组成。其中，支撑钢架结构是用 20 mm 厚的钢板焊接而成；千斤顶可施加的最大压力为 5 000 kN；压力表量程为 60 MPa，精度 0.1 MPa，系统最大加载应力可达 100 kN。该试验系统可以进行边长为 600 和 800 mm 两种规格立方块体试验。试样放置时，相互垂直的 3 个面紧贴支撑钢架结构，另外的 3 个面利用千斤顶通过表面平整的传力钢板施加均布荷载。

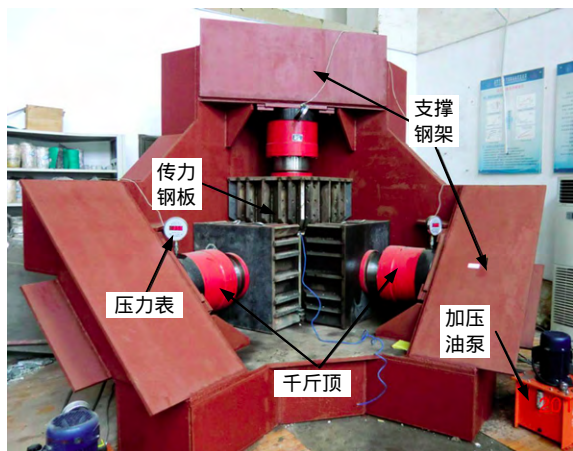


图 7 真三轴模型试验加载系统

Fig.7 Loading system of true-triaxial model test

4.2 试样准备

为反映深部软岩巷道围岩的低强度特征，参考《砌筑砂浆配合比设计规程》，浇筑试样采用的砂浆体设计强度为 2.5 MPa，材料比例为：普通硅酸盐水泥 43 kg，河砂 334 kg，水 71.3 ~ 75.9 kg。

根据试验要求，需要将三向压力传感器预埋到水泥砂浆体中，具体浇筑过程(见图 8)如下：(1) 将用于浇筑水泥砂浆体的刚模板拼接紧密，在内部刷一层机油以便后期脱模；(2) 分层浇筑搅拌好的水

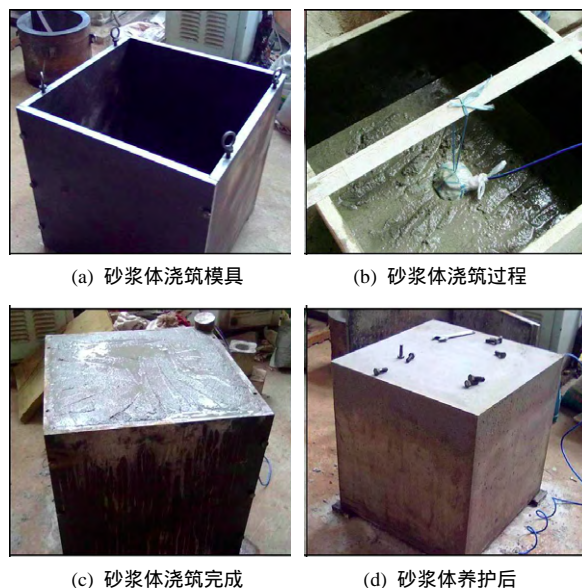


图 8 砂浆体的浇筑过程

Fig.8 Casting process of cement mortar block

泥砂浆，并振捣密实，当砂浆浇筑至 1/2 模具高度时放入三向压力传感器，利用悬挂装置固定三向压力传感器，并使得压力传感面与模具平面平行；(3) 继续浇筑水泥砂浆直至其填满整个模具；(4) 进行洒水覆盖养护，7 d 后拆模，养护 28 d 后开始试验。在浇筑立方体试块时同时浇筑水泥砂浆体标准试样，用以测定水泥砂浆体物理力学性质。

4.3 试验过程

在水泥砂浆体试样养护成型之后，利用吊机将水泥砂浆体试样吊装到加载系统上，使得 3 个方向的千斤顶中心与水泥砂浆体各面中心重合，并在水泥砂浆体试样表面设置 2 层聚四氟乙烯薄层，以减小加载过程中的摩阻力。然后，在千斤顶与水泥砂浆体试样表面之间安装传力钢板，使得传力钢板中心与千斤顶中心重合，确保水泥砂浆体试样表面均匀受力，并记录此时三向压力传感器的初始读数。

在水泥砂浆体试样安装完毕之后，启动加压油泵进行加载试验，加载包括静水应力状态加载和非静水应力状态加载 2 种模式。静水应力状态加载时，3 个方向同步逐级加载，每级荷载间隔 0.5 MPa，最大荷载 14 MPa，每级荷载稳定 10 min 后开始读数。一个加载过程结束之后，将所有千斤顶同步缓慢卸压至 0，然后重复上述加载过程 2 次，总计加载 3 次。非静水应力状态加载时，考虑 3 种围压条件，分别为 2，5 和 8 MPa。以 2 MPa 围压为例，首先将 3 个面同步逐级加载至 2 MPa，每级荷载间隔 1 MPa，每级荷载稳定 10 min 后开始读数；然后，保持其中 2 个面荷载不变，第 3 个面荷载逐级增加到

15 MPa, 每级荷载间隔 1 MPa, 每级荷载稳定 10 min 后进行读数; 加载过程结束后, 将所有千斤顶同步缓慢卸压至 0, 按照上述步骤, 进行另外 2 个面加载到 15 MPa 的试验。

5 试验结果与讨论

图 9 给出了静水应力状态加载条件下三向压力传感器的实测应力随加载应力的变化规律。比较 3 次重复加载曲线可以看出: 第一次加载时, 3 个面的实测应力曲线均向下凸起, 近似于二次函数曲线, 第二次加载时, 曲线的凸起效应逐渐减弱, 到第三次加载时, 曲线已经接近线性。当加载应力水平处于 14 MPa 时, 3 次实测应力水平基本相当。该现象说明, 在加载之前, 水泥砂浆体内部存在孔隙结构, 导致初始加载时三向压力传感器的实测应力出现滞后现象, 在重复荷载作用下, 水泥砂浆体的内部孔隙结构不断调整至密实状态, 使得三向压力传感器的实测应力与加载应力关系进入稳定状态。

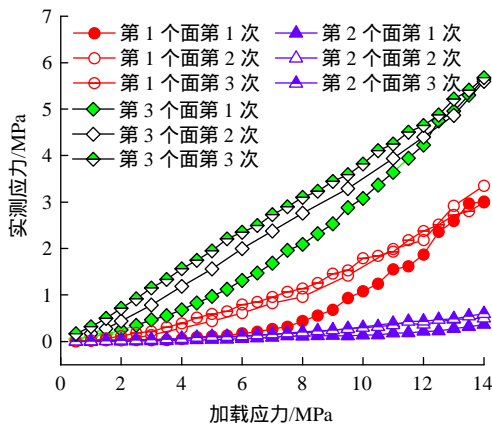
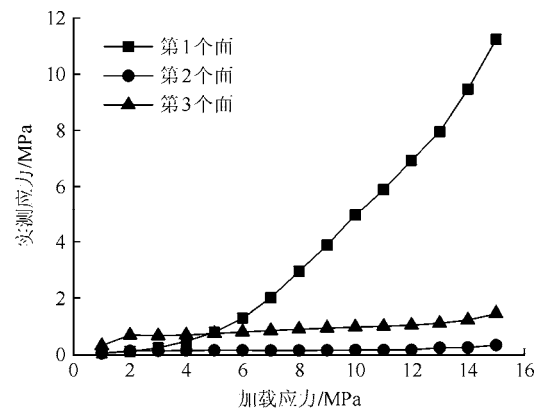


图 9 静水应力加载状态下三向压力传感器的实测应力
Fig.9 Measured stresses with 3DPS under hydrostatic loading

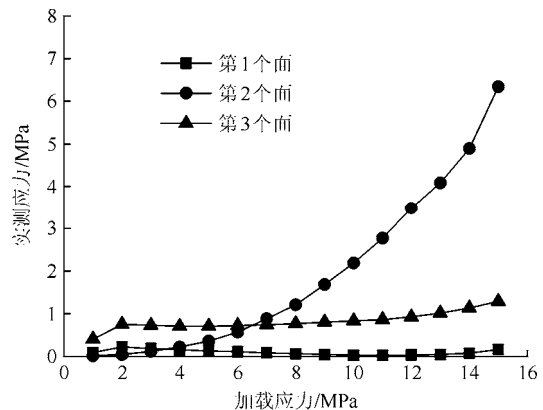
从图 9 可以看出: 三向压力传感器的实测应力与加载应力之间具有比较明显的差距, 这主要是由于三向压力传感器承载面弯曲刚度与其壳体刚度以及水泥砂浆体刚度之间的差异所导致的, 即由于三向压力传感器壳体的刚度远大于其承载面的弯曲刚度, 导致加载应力大部分都转移到三向压力传感器的壳体上。另外, 三向压力传感器 3 个面的实测应力也存在一定的差异, 这主要是由于水泥砂浆体在分层浇筑过程中产生的各向异性导致, 表现为垂直方向(第 3 个面)的实测应力要大于其他 2 个水平方向(第 1 个面和第 2 个面)的实测应力。

图 10~12 分别给出了围压为 2, 5, 8 MPa 加

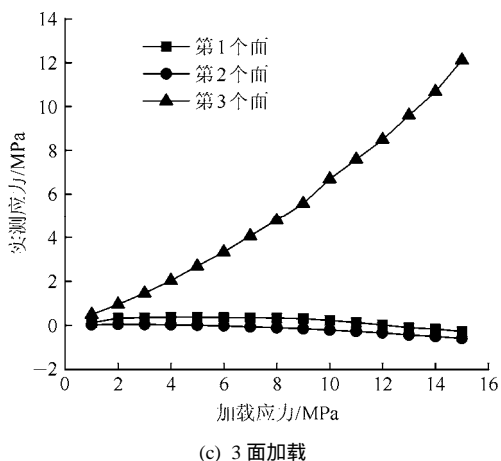
载条件下, 三向压力传感器实测应力随加载应力的变化规律。可以看出, 在 3 个面同步逐级加载至指定围压的过程中, 随着加载应力的增加, 三向压力传感器的实测应力基本保持线性增长, 并且为一个相对较小斜率的增长水平。当围压保持不变, 第三个面的加载应力逐渐增加时, 围压保持不变, 另外 2 个面的实测应力变化较小, 可以忽略不计, 但第三个面的实测应力水平迅速增加, 其增长斜率超过了其在静水应力状态加载时实测应力的增长斜率。这一现象说明了加载应力状态对三向压力传感器的实测应力具有重要的影响, 而且与静水应力相比, 差应力水平对三向压力传感器实测应力的影响更大。这里, 定义差应力为 2 倍实测应力面的加载应力与另外 2 个面的加载应力之差。如图 13 所示, 给出了非静水加载条件下三向压力传感器的实测应力与差应力之间的关系。这里的实测应力曲线已减去初始静水应力加载结束时对应的实测应力值, 即当差应力为 0 时, 实测应力也为 0。可以发现, 在不同的围压条件下, 当三向压力传感器实测应力面的差应力水平相同时, 曲线中对应的实测应力大小也基本相当, 这说明除了静水应力之外, 三向压力传感器的实测应力与差应力也有着独立的关系。



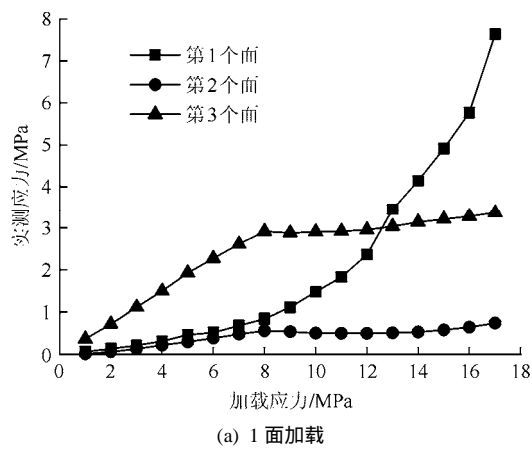
(a) 1 面加载



(b) 2 面加载



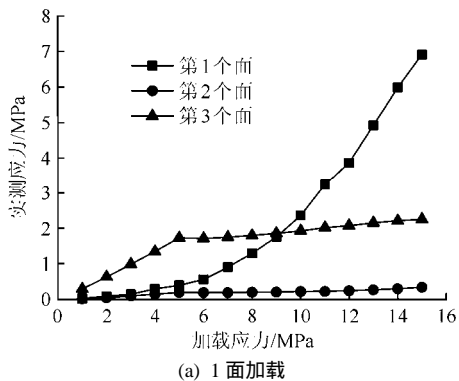
(c) 3面加载



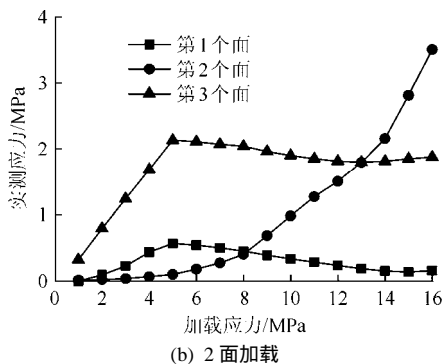
(a) 1面加载

图 10 三向压力传感器的实测应力(围压 2 MPa)

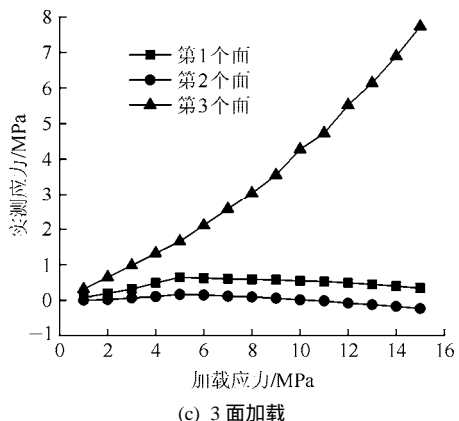
Fig.10 Measured stress with 3DPS under confining pressure of 2 MPa



(a) 1面加载



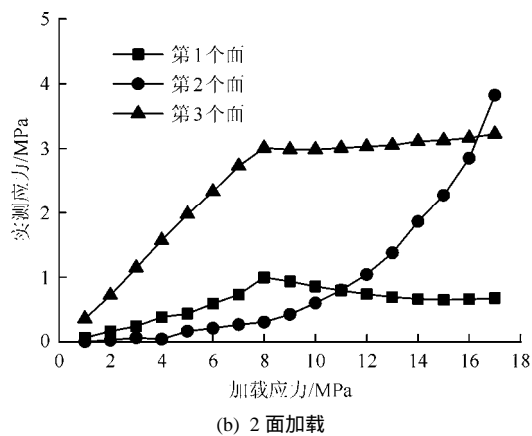
(b) 2面加载



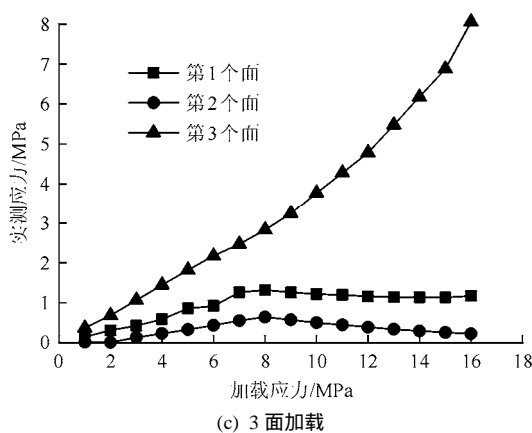
(c) 3面加载

图 11 三向压力传感器的实测应力(围压 5 MPa)

Fig.11 Measured stress of 3DPS under confining pressure of 5 MPa



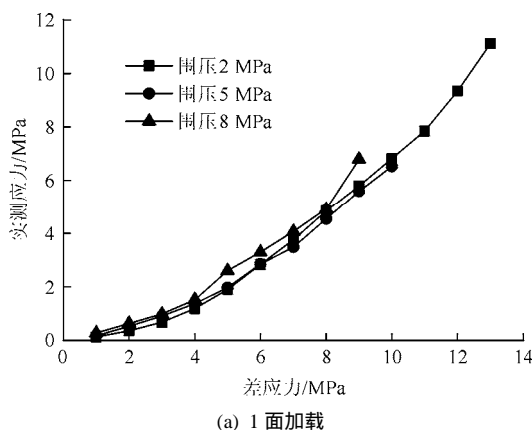
(b) 2面加载



(c) 3面加载

图 12 三向压力传感器的实测应力(围压 8 MPa)

Fig.12 Measured stress with 3DPS under confining pressure of 8 MPa



(a) 1面加载

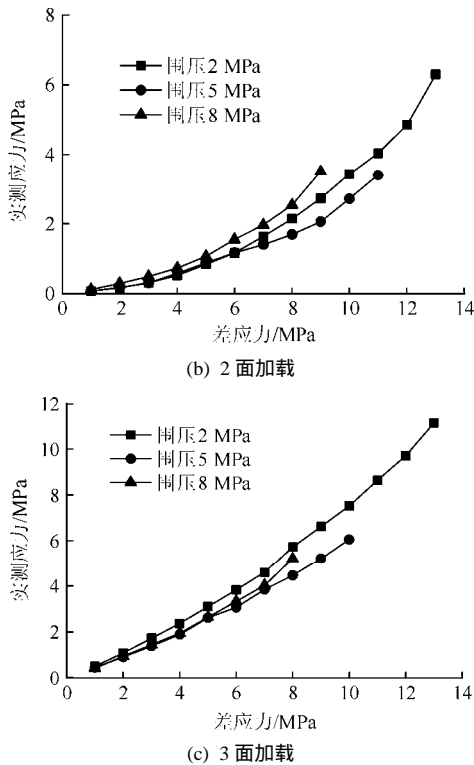


图 13 三向压力传感器的实测应力与差应力关系

Fig.13 Relationships of measured stress and differential stress of 3DPS

根据前面的分析可以看出，三向压力传感器的实测应力结果不仅与介质的对应面的初始应力相关，而且与其他 2 个面的初始应力也有着密切的联系。因此，为描述三向压力传感器实测应力与水泥砂浆体初始应力场的关系，提出如下表达式：

$$\sigma_i^M = C_1 \sigma_i^1 + C_2 D_i \quad (9)$$

式中： C_1 ， C_2 均为拟合系数； σ_i^M 为 i 面的实测应力； σ_i^1 为 i 面的初始应力； D_i 为 i 面的差应力，根据前述定义，可以表示为

$$D_i = \sigma_j^1 + \sigma_k^1 - 2\sigma_i^1 \quad (10)$$

式中：下标 j, k 表示其他 2 个面。

当介质初始应力场为静水应力状态时，即本文试验中的加载应力为静水应力状态时，式(9)中的 $D_i = 0$ 。此时，可以通过线性拟合得到三向压力传感器 3 个面的拟合系数 C_1 ，如图 14 所示。良好的拟合结果表明三向压力传感器的实测应力与其对应面的加载应力呈线性关系。同样，减去三向压力传感器对应加载面的实测应力，即扣除式(9)中的第一项，可以基于图 13，通过线性拟合得到三向压力传感器实测应力与差应力的关系，如图 15 所示。可以看出，第 1 个面和第 3 个面的线性拟合结果较好，而第 2 个面的拟合结果则不够理想，分析认为是由于第 2

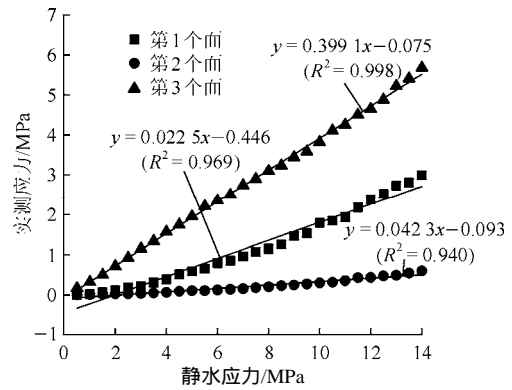


图 14 三向压力传感器实测应力与静水应力关系拟合

Fig.14 Linear fitting of measured stress versus hydrostatic stress of 3DPS

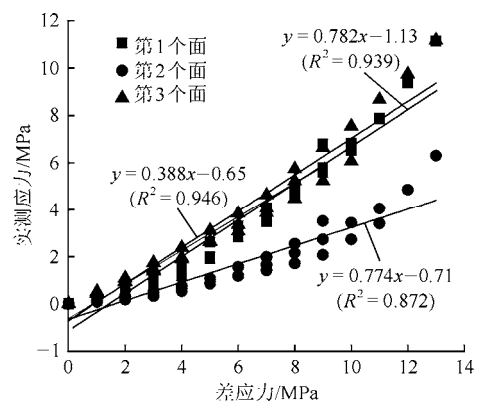


图 15 三向压力传感器实测应力与差应力关系拟合

Fig.15 Linear fitting of measured stress versus differential stress of 3DPS

个面加载面的水泥砂浆体在加载过程中不够密实，使得 2 面的实测应力出现一定的非线性特征。

在土压力盒的使用中，由于其是单向应力测量，一般不考虑介质初始应力状态对实测应力结果的影响，而水泥砂浆体中三向压力传感器的加载试验结果表明，介质初始应力状态对其实测应力结果是有影响的，但是这种影响可以通过明确的数学关系来表征，因此利用三向压力传感器进行地应力测量是切实可行的。但这里需要注意的是，对于土压力盒而言，其较小的厚径比(一般小于 0.2)使得其几何外形对介质初始应力场的影响比较小，而三向压力传感器的近似立方体外形则对介质初始应力场的影响比较大，而且这种影响不仅很难从结构设计方面消除，而且很难从理论上给出其数学描述。因此，正如 V. Askegaard^[21]对土压力盒的使用给出的建议：当三向压力传感器在未知的加载历史条件中应用时，应该在尽可能多的状态下进行测试，进而对三向压力传感器能达到的准确性进行评估。

6 结 论

(1) RMT 标定试验表明，三向压力传感器的各个传感面具有良好的重复性和线性度。

(2) 初始荷载作用下，由于水泥砂浆体中的孔隙结构，三向压力传感器的实测应力存在滞后现象，但在重复荷载作用下，水泥砂浆体中的孔隙结构逐渐被压密，三向压力传感器的实测应力曲线逐渐趋于稳定。

(3) 三向压力传感器的实测应力与其对应面的加载应力呈线性相关关系，与其对应面的差应力也成线性相关关系。

(4) 提出了用于描述初始应力状态对三向压力传感器实测应力影响规律的数学关系，为建立三向压力传感器实测应力与介质初始应力场之间的一般性关系提供依据。

参考文献(References)：

- [1] 何满潮,袁 越,王晓雷,等. 新疆中生代复合型软岩大变形控制技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 433-441. (HE Manchao, YUAN Yue, WANG Xiaolei, et al. Control technology for large deformation of mesozoic compound soft rock in Xinjiang and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 433-441. (in Chinese))
- [2] 孙 钧,潘晓明. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1957-1968. (SUN Jun, PAN Xiaoming. Research on large squeezing deformation and its nonlinear rheological mechanical characteristics of tunnel with weak surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1957-1968. (in Chinese))
- [3] 张 芳,刘泉声,张程远,等. 流变应力恢复法地应力测试及装置[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 3273-3279. (ZHANG Fang, LIU Quansheng, ZHANG Chengyuan, et al. Measurement of geostress and sensor about rheological stress recovery method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 3273-3279. (in Chinese))
- [4] DAVE T N, DASAKA S M. A review on pressure measurement using earth pressure cell[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2011, 4(6): 1031-1034.
- [5] LABUZ J F, THEROUX B. Laboratory calibration of earth pressure cells[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(2): 1-9.
- [6] TAYLOR D W. Review of pressure distribution theories, earth pressure cell investigations, and pressure distribution data[R]. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1945.
- [7] MONFORE G E. An analysis of the stress distribution in and near stress gauges embedded in elastic soils[R]. Denver: U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Co., 1950.
- [8] LOH Y C. Internal stress gauges for cementations materials[J]. Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, 1954, 21(2): 13-28.
- [9] TORY A C, SPARROW J W. The influence of diaphragm flexibility on the performance of an earth pressure cell[J]. Journal of Scientific Instruments, 1967, 44(9): 781-785.
- [10] 刘宝有. 土压力传感器国外理论和实验研究概况[J]. 传感器技术, 1988, (2): 48-53. (LIU Baoyou. A review of theoretical and experimental research of soil pressure cells[J]. Journal of Transducer Technology, 1988, (2): 48-53. (in Chinese))
- [11] 汪恩清, 丁世敬. 土应力传感器动态匹配误差理论研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 78-83. (WANG Enqing, DING Shijing. The investigation for dynamic matching error in the registration of soil pressure cells[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 78-83. (in Chinese))
- [12] 曾 辉, 余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 99-105. (ZENG Hui, YU Shangjiang. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 99-105. (in Chinese))
- [13] WEILER W A, KULHAWY F H. Factors affecting stress cell measurements in soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, 108(12): 1529-1548.
- [14] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressure on retaining walls near rock faces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(6): 586-599.
- [15] TALESNICK M. Measuring soil contact pressure on a soil boundary and quantifying soil arching[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(2): 1-9.
- [16] CHEN W, RANDOLPH M F. Measuring radial total stresses on model suction caissons in clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 30(2): 1-9.
- [17] REDSHAW S C. A sensitive miniature pressure cell[J]. Journal of Scientific Instrumentation, 1954, 31(12): 467-469.
- [18] PANG P L R. A new boundary stress transducer for small soil models in the centrifuge[J]. Geotechnical Testing Journal, 1986, 9(2): 72-79.
- [19] RAMIREZ A, NIELSEN J, AYUGA F. On the use of plate type normal pressure cells in silos part 1: calibration and evaluation[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 71-76.
- [20] FINNO R J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance[J]. Engineering Geology, 1988, 30(2): 237-238.
- [21] ASKEGAARD V. Applicability of normal and shear stress cells embedded in cohesionless materials[J]. Experimental Mechanics, 1995, 35(4): 315-321.
- [22] 邓铁六, 白泰礼, 马俊亭, 等. 单线圈电流型振弦式传感器[J]. 传感器技术, 2000, 19(4): 22-25. (DENG Tielu, BAI Taili, MA Junting, et al. Vibrating wire sensor with single coil and current excitation[J]. Journal of Transducer Technology, 2000, 19(4): 22-25. (in Chinese))
- [23] 汪清标, 贾宏俊, 王渭明, 等. 矿山压力检测仪器技术新进展及其应用[J]. 地下空间工程学报, 2006, 2(8): 1473-1476. (WANG Qingbiao, JIA Hongjun, WANG Weiming, et al. New developments and applications of self-excitation vibrating-wire sensor technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(8): 1473-1476. (in Chinese))