

测量土、岩石介质中的动态 应力用的压电式应力计

张挺 金若冰
(中国科学院力学研究所)

摘要 本文介绍一种压电式应力计,它的主要性能是:测量量程为 $10-1000\text{kgf/cm}^2$;响应时间小于 $7\mu\text{s}$;线性误差小于 $\pm 1\%$;综合应力测量误差小于 $\pm 10\%$ 。该应力计可用于测量土、岩石和混凝土介质中的动态应力,也可用于测量动态力和流体介质中的动态压力。

关键词 压电式应力计,土、岩石介质,动态应力测量,匹配试验。

前 言

爆炸或冲击载荷作用下土和岩石(或混凝土)介质中的应力波及其历史的测量早已引起爆炸力学、材料科学和岩石力学研究人员和地下结构设计人员的关注。国内外有关人员从五十年代起陆续开展了这方面的研究工作^{[2],[4]}。

固体介质中的应力测量出现的一个突出的问题是:应力计这个“异物”埋入介质中后将使介质中原有的应力场发生畸变,畸变度的大小和介质的物理力学性质、应力计的物理力学性质及其结构形式都有关。应力计的研制、设计人员必须结合具体的应用背景提出合理的结构设计方案和技术措施,使原应力场的畸变(它决定了应力测量误差的大小)尽可能小。与此同时需要进行各种测量性能试验,鉴定应力计的性能并为使用者提供测量结果修正参数。

所设计的应力计用于地下化爆试验,测量量程为 $10-1000\text{kgf/cm}^2$ 。本文着重介绍设计原则、设计要点、性能试验结果和部分应用试验。

一、设计原则

设计一种力学性质完全和岩石介质相匹配的应力计,这在技术和工艺上都是很难实现的。一般说来,应力计在不匹配状态下工作。因此,问题的核心就在于合理设计一种应力计,使它的应力测量误差尽量减小,或者对于不同的介质,误差保持为常量(或控制在一定的误差范围内)。

1. 静态匹配误差分析

国内外很多研究人员对应力计埋设在无限介质中由于力学性质的不匹配而产生的静

本文于1984年5月14日收到。

态应力测量误差进行了理论分析和实验研究^{[1],[3],[4]}, 结论是为了减小测量误差或使误差在一定条件下保持为常量, 一般应满足(1)应力计的弹模 E_g 必须远大于介质的弹模 E_s , 一般要求 $E_g \geq (5-10)E_s$; (2)应力计的厚度 (H) 与直径 (D) 之比尽可能小, 一般要求 $\frac{H}{D} \leq (0.1-0.2)$. 对于固有频率较高的动态岩石应力计来说, 上述两个条件都不易实现.

解决的技术途径是: 尽可能采用高弹模、小厚径比结构设计方案, 使应力测量误差(或称为匹配误差)控制在较小的波动范围内. 对于精度要求较高的测量, 可利用匹配试验获得的匹配系数曲线对测量结果进行修正.

2. 动态匹配误差分析

在应力波测量中, 为了得到无畸变的测量结果, 除了满足静态匹配要求外, 还应满足应力计与介质波阻抗匹配条件 ($\rho_g c_g = \rho_s c_s$, ρ_g, ρ_s, c_g, c_s 分别为应力计与介质的密度和弹性波速). 否则由于波阻抗的失配, 在应力计与介质的交界面上将发生波的反射、透射和绕射现象. 图1是应力计埋设在介质中的简化模型, 其中 T, R 为界面 I 处的透射和反射系数 ($T = \frac{2\rho_g c_g}{\rho_g c_g + \rho_s c_s}, R = \frac{\rho_g c_g - \rho_s c_s}{\rho_g c_g + \rho_s c_s}$), T', R' 为界面 II 处的透射和反射系数(对于这类夹层模型有 $T' = 1 - R; R' = -R$). 根据分析和计算结果^[5], 在 $\frac{\rho_g c_g}{\rho_s c_s} = (4-6)$ 的情况下, 一般经过(3-4)次内反射, 界面 I 和 II 处的应力即达到平衡, 对应的平衡建立时间为 $t_B = (6-8)H/c_g$, 其中 H 为应力计的厚度, c_g 为波在应力计厚度方向的传播速度.

因此, 当一个应力计沿应力波传播方向的几何尺寸(一般为厚度尺寸)远远小于应力波波长 λ , 而回填材料的力学性质和介质基本匹配时, 所谓动态匹配问题就不成为主要矛盾. 测量结果仅在波头的某一区段由于多次内反射造成波形记录局部畸变. 对于应力波的上升时间几倍于应力平衡建立时间的测量来说, 应力峰值及其波形的测量误差主要决定于静态匹配误差.

综上所述, 岩石应力计应采用高弹模、小厚径比设计方案, 对于动态应力测量, 应尽可能减小应力计的厚度尺寸 H , 以满足 $H \ll \lambda$ 条件. 此外, 由于应力计密度 ρ_g 与介质密度 ρ_s 不同, 在应力计随介质作整体运动的过程中, 也会产生一些附加惯性力而带来一些测量误差, 但由于目前这方面的理论分析与试验数据不多, 尚难定量确定其大小. 因此, 设计应力计时应尽量使 ρ_g 与 ρ_s 相差不要太大, 尽可能缩小这种误差的影响.

二、应力计简介及设计要点^[5]

考虑到上述设计原则、使用中的具体技术要求及技术上实现的可能性等因素, 选择了压电式方案. 图2是应力计的结构图. 它由底座、盖板、晶体片 ($2 \times \phi 10 \times 1\text{mm}$)、中心电极、保护环和 L , 高频插座等几个主要部件组成, 最后焊接成全密封结构. 根据使用技

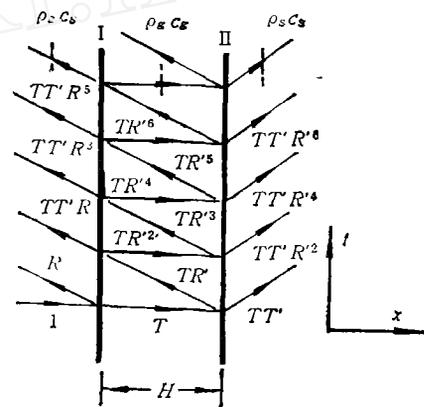


图1 应力波的反射、透射波系

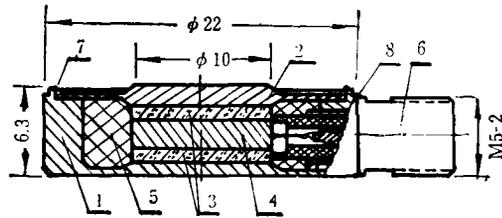


图 2 压电式应力计结构图

1. 底座; 2. 盖板; 3. 晶片; 4. 中心电极; 5. 保护环;
6. 高频插座; 7, 8 处焊接密封

术要求,设计要点是:

(1) 采用薄饼状结构方案,为使用和安装工艺简便,防潮和密封可靠等因素,输出信号采用高频插座引出。

(2) 应力计在埋设和使用过程中对密封、防潮性能要求较高,因此采用焊接全密封方案。考虑到密封要求以及降低焊接时应力计的温升、减小零件焊接变形、确保性能的稳定性等因素,高频插座和底座的封装采用高频氢炔焊。盖板和底座的封装采用电子束焊。

(3) 实际使用时应力计埋设点处于一个复杂应力状态。测量要求应力计具有选择性(即只对某个应力分量敏感)。为此,(i)在敏感元件和应力计外壳之间设计了一个环状空隙,其中设置了一个环状聚四氟乙烯保护环,起着隔离侧向应力并兼有定位环作用;(ii)敏感元件选用侧向灵敏度低的晶体——Z轴切割的电气石;(iii)装配时晶片和底座及盖板之间不采用粘结剂粘结。

三、应力计性能试验及结果^[5]

1. 静态标定试验

静态标定试验的目的是测量应力计的电荷灵敏度、线性误差和迟滞误差。由于在盖板上设计了一个 $\phi 10 \times 0.5\text{mm}$ 的凸台,

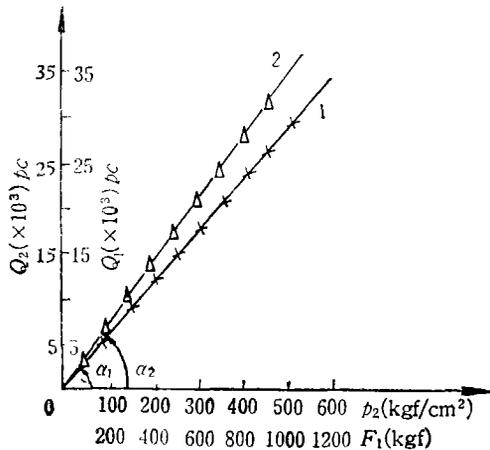


图 3 × 机械加载 Δ 油压加载
 $S_{QF} = \text{tg}^{-1}\alpha_1 = 35.00\text{pC/kgf}$
 $S_{QP} = \text{tg}^{-1}\alpha_2 = 58.22\text{pC/kgf/cm}^2$

在改善线性和降低零件加工工艺要求方面有所得益,但在应用和加载方式不同时,它将呈现不同的响应(灵敏度不同)。因此应力计进行了两种静单轴标定试验,供不同的测量目的选用。此外,为了检验应力计的选择性(或侧向灵敏度),还进行了静态液压三轴标定试验。

(1) 机械加载式静单轴标定试验

机械加载试验在 TB01 型标定机上进行。通过一个刚性压块直接在感受面的 $\phi 10$ 凸台上施加已知的载荷 (F), 载荷由三等测力计测量。它模拟应力计用于测量动态力或应力时的受载情况。应力

计的电荷输出由电荷放大器(5001 型)和数字电压表(PZ-8 型)测量。机械加载标定试验

可以获得应力计的电荷-力灵敏度 (S_{QF}) 及电荷-应力灵敏度 ($S_{Q\sigma}$), 及相应的线性误差, 迟滞误差. 图 3 曲线 1 是典型的标定曲线. 测量结果列于表 1.

(2) 液压加载静单轴标定试验 这种加载方式模拟应力计用于测量流体介质中的动态压力时的受载情况. 液压标定试验在 YU-600 型压力表校验仪上进行. 输入压力由砝码测定. 试验获得应力计的电荷-压力灵敏度 (S_{QP}) 及相应的线性误差和迟滞误差. 典型的标定曲线如图 3 曲线 2, 标定结果列于表 1.

(3) 液压三轴标定试验 液压三轴试验也在 YU-600 型压力表校验仪上进行. 为此设计了一个专用的加压容器. 三轴试验结果表明, 所设计的应力计的侧向灵敏度小于单轴灵敏度的 2% (其中包含了实验误差).

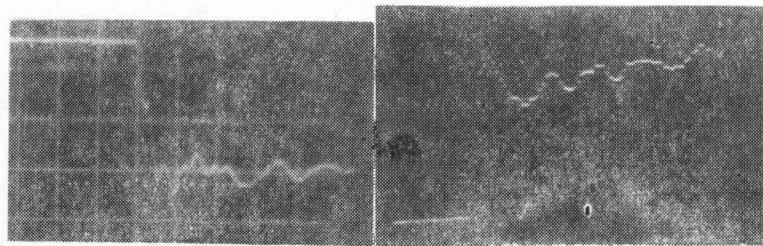
表 1 应力计静单轴标定试验结果综述

	灵敏度	线性误差	迟滞误差	批生产(45只)灵敏度的离散度
机械加载标定试验	35.70pc/kgf 28.02pc/kgf/cm ²	±1%	±1%	±2.6%
液压加载标定试验	58.95pc/kgf/cm ²	±1%	±1%	±4.7%

2. 动态标定试验

动态标定试验在激波管上进行. 试验的主要目的是测定应力计在空气中的主要动态参数 (包括在阶跃压力作用下 0--100% 稳态值的响应时间——上升时间 t_r 及固有频率 f_n).

对于一个典型的单自由度二阶系统来说, 若阶跃响应的上升时间 t_r 和振荡频率 f_0 已知, 则系统的传递函数即可完全确定. 而对于阻尼较小的压电式传感器, 振荡频率 f_0 和固有频率 f_n 相差无几, 作为工程近似可认为 $f_0 \approx f_n$. 图 4 是应力计激波管试验的典型波形.



(a) 扫描速度 10 μ s/div

(b) 采样速度 1 μ s/W

图 4 应力计激波管试验典型波形

动态标定结果如下: 固有频率 $f_n > 70\text{kHz}$; 上升时间 $t_r < 7\mu\text{s}$; 过冲 (超调量) $< 15\%$. 由于该应力计敏感面上设计了一个 $\phi 10 \times 0.5\text{mm}$ 的凸台, 因此实测的上升时间偏大.

3. 匹配试验

匹配试验的目的是检验应力计埋设在介质中的测量性能. 通过实验测定应力计在不

同介质中的应力测量误差(匹配误差)值,获得匹配误差在不同性质的介质中的分布规律,以便在实际应用中对测量结果进行修正。

(1) 静态匹配试验 根据工程上常见的岩石材料的物理特性,选用了三种岩石模拟材料(薄胶泥)作为匹配试件材料,它们的配方及有关参数列于表 2。为了消除侧向边界的影响并使埋设在试件中部的应力计所在断面承受一个均布的单轴应力作用,试件尺寸

表 2 薄胶泥配方及有关参数

	材 料 组 成 及 重 量 比					典型弹模 ($\times 10^3$) (kgf/cm ²)	密度 (g/cm ³)	
	水泥	水	标准砂	棕刚玉				水灰比
	#600			#16	#46			
1	45	11				2.0	2.15	
2	22	6	33			1.0	2.32	
3	20	6		33	17	6.0	2.94	

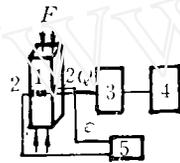


图 5 静态匹配试验测量系统图

1. 应力计, 2. 应变片, 3. 电荷放大器,
4. 数字电压表, 5. 静态应变仪

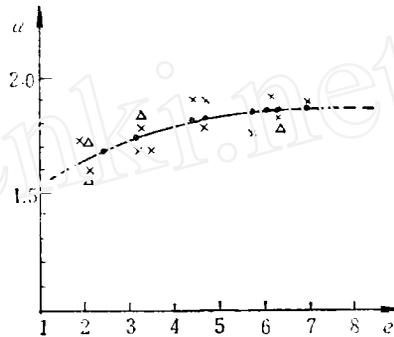


图 6 应力计的匹配系数曲线

× 静态匹配试验点
▲ 动态匹配试验点
● 经验公式计算点

设计为 $100 \times 100 \times 300 \text{mm}^3$ 。静态匹配试验在材料试验机上进行,图 5 为静态匹配试验测量系统图。要测量的参数为 (i) 试件中的实际应力值 σ_0 ; (ii) 试件的变形 ϵ , 从而获得试件材料的 σ - ϵ 曲线及材料弹模 E_s ; (iii) 应力计的输出电荷 Q' 。

通过实验测定的应力计在介质中的响应 $Q' = f(\sigma_0)$, 可以得到它在介质中的电荷-应力灵敏度 $S'_{Q\sigma} = \frac{dQ'(\sigma_0)}{d\sigma_0}$ 。设应力计在空气中标定的电荷-应力灵敏度为 $S_{Q\sigma}$, 根据定义

$$\text{有匹配系数 } \alpha = \frac{S'_{Q\sigma}}{S_{Q\sigma}}, \text{ 匹配误差 } \beta = \alpha - 1 = \frac{S'_{Q\sigma}}{S_{Q\sigma}} - 1.$$

根据不同材料中的试验结果可以得到应力计的匹配系数曲线 $\alpha = f(E_g/E_s)$ (见图 6), 由于测量技术条件的限制, E_g 为近似计算值。在 $1.8 \leq E_g/E_s \leq 7$ (或 $1.8 \times 10^3 \leq E_s \leq 7 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$) 范围内, α 的经验公式为

$$\alpha = 1.38 + 0.151\epsilon - 0.012\epsilon^2 \pm 0.165 \quad (\epsilon = E_g/E_s).$$

匹配试验详细结果见“力学所科研报告《压电式岩石应力计技术总结报告》附件三”。

匹配试验结果说明：(i) 在 E_r 已知时，应力测量结果可根据 α 的经验公式进行修正， α 值的极限误差为 ± 0.165 ，综合相对误差小于 $\pm 10\%$ 。(ii) 当 E_r 未知时，若采用 α 值的算术平均值 $\bar{\alpha} = 1.765$ 处理测量结果，则在 $1.8 \times 10^3 \leq E_r \leq 7 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 范围内，综合测量误差小于 $\pm 18\%$ 。

(2) 动态匹配试验 此动态试验主要是验证前述的动态匹配误差分析结论的正确性。试验利用已有的匹配试件在落锤式动加载机上进行，量程为 $60T_f$ ，载荷上升时间在 $(0.5-2.0)\text{ms}$ 之间可调。相对该应力计来说，它等效于准静态匹配试验，或作为一种动态

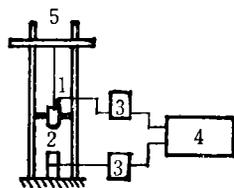


图 7 动态匹配试验测量系统图

1. 标准加速度计， 2. 试件， 3. 电荷放大器，
4. 双通道瞬态记录仪， 5. 落锤式动加载机

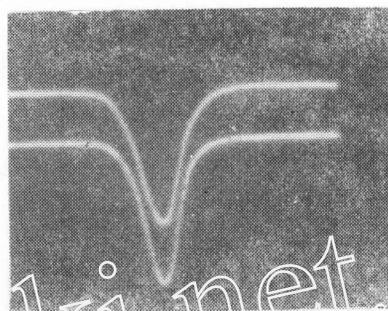


图 8 动态匹配试验典型波形

1. 载荷波形， 2. 应力计波形

校核试验。图 7 是动态匹配试验的测量系统图。由于安装不便等技术上的原因，试验中采用标准加速度计间接测量锤头作用于试件的冲击载荷。在图 6 中同时标出了动态匹配试验的测量结果，它们基本上分布在静态匹配试验的误差带范围内。图 8 是实验记录的典型波形。

四、应用 试 验

为了检验应力计的测量性能曾进行了两种应用试验。

1. 一维应力杆碰撞试验

实验装置是一个由水泥砂浆制成的大型霍布金生杆装置(图 9)。试件尺寸为 $100 \times$

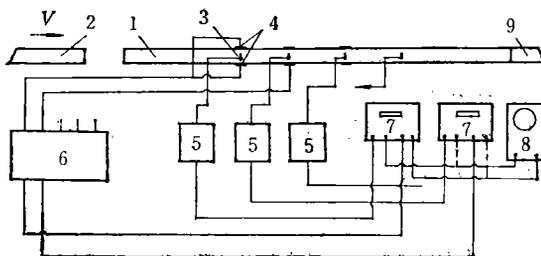


图 9 一维碰撞试验装置及测量系统图

1. 试件， 2. 撞击杆， 3. 应力计， 4. 应变片， 5. 电荷放大器，
6. 多通道超动态应变仪， 7. 双通道瞬态记录仪， 8. 阴极射线
示波器， 9. 波导杆

$100 \times 3500 \text{mm}^3$, 撞击杆尺寸为 $100 \times 100 \times 1000 \text{mm}^3$. 试验内容一是利用杆中埋设的应力计测量应力波在该介质中传播时的衰减规律; 二是利用杆上粘贴的电阻应变片和超动态应变仪(工作频带为 $10 \text{c/s} - 1 \text{Mc/s}$) 测量相应断面的应力波形及幅值与对应的应力计测量结果进行对比, 评价应力计的测量性能.

由于设备等条件限制, 试验改用锤撞击和杆撞击来获得一个输入脉冲载荷. 试验结果如下: (i) 应力波在杆中传播时的衰减规律呈指数形式, 即 $\frac{\sigma_i}{\sigma_0} = e^{\gamma(L_i)}$, 实测的衰减系数 $\gamma = -3.66 \times 10^{-5} / \text{mm}$. (ii) 应力计测量系统和应变计测量系统所测同一断面的应力波十分相似, 两系统所测同一断面的应力幅值的综合相对误差小于 6.8% .

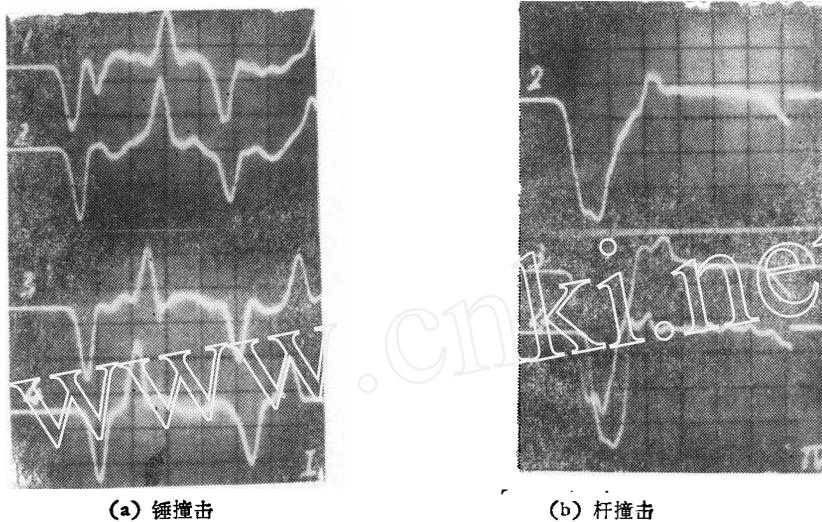


图 10 杆中不同断面记录的应力波形

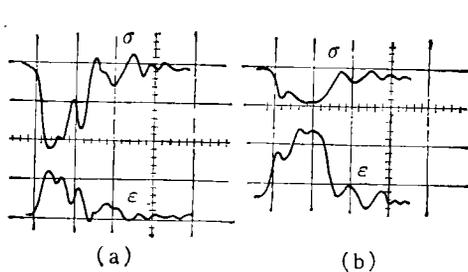


图 11 应力计和应变计系统记录的应力波形
 σ 应力计测量波形, ϵ 应变计测量波形

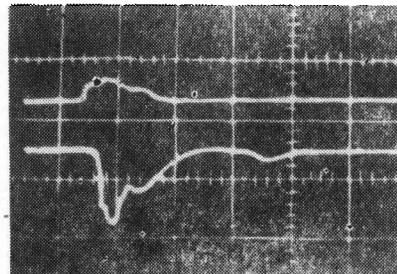


图 12 典型的化爆现场试验波形

图 10 是撞击时 4 个断面埋设的应力计测量的应力波形. 图 11 是应力计和应变计测量系统记录的同一段面的典型波形.

2. 化爆现场试验

在研制过程中曾参加过洞库爆炸试验, 图 12 为现场试验获得的典型波形记录.

五. 结 论

1. 通过应力计的各项性能试验测定的应力计的主要性能指标如下: (i) 测量量程

10—1000kgf/cm², 分辨力 0.1kgf/cm²; (ii) 线性误差 < ±1%, 迟滞误差 < ±1%; (iii) 电荷-应力灵敏度(埋在介质中)约 50pc/kgf/cm²; (iv) 上升时间(空气中) < 7μs, 固有频率(空气中) > 70kHz; (v) 应力测量综合误差 < ±10% (修正值), < ±18% (未修正值)。

2. 设计、试制中考虑了工艺流程的定型问题, 小批生产的应力计性能稳定, 参数离散度小, 为生产创造了条件。

3. 静态、动态和应用试验结果表明: 该应力计可用于土、岩石或混凝土介质中的动态应力测量, 也可在一定范围内用作测量动态力或动态流体压力的传感器。

在试制过程中, 赵蜀北、戴铭容同志参加了部分试验工作, 作者对他们表示感谢。现场试验是和 89002 部队合作进行的, 作者对合作者表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Loh, Y. C., "Internal stress gauge for cementitious materials" *Proc. S. E. S. A XI*, 2 (1954).
 [2] Heusinkveld, M., et. al. "Stress history measurement with piezoelectric crystal." *AEC. PNE*, (1962)105.
 [3] William. B. Truesdale. "Stress and Strain gauges for use in soil dynamics research" *ISA Transactions* 7, 3. (1968).
 [4] "非弹性介质压力测量"(译文集)中国人民解放军工程兵司令部编 (1974).
 [5] 张 挺等. "压电式岩石应力计"力学研究所研究报告 (1983).

A PIEZOELECTRIC STRESS GAUGE FOR MEASURING DYNAMIC STRESS IN SOIL AND ROCK MEDIUMS

Zhang Ting Jin Ruobing

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract A piezoelectric stress gauge is described in this paper. Its major performances are: measuring range 10—1000 kgf/cm², response time less than 7 μs, linear error within ±1%, Total error of stress measurement within ±10%. This stress gauge is used for measuring dynamic stress in soil, rock and cementations mediums. It can also be used for measuring dynamic force and dynamic pressure in fluid medium.

Key words : piezoelectric stress gauge, soil and rock Medium, dynamic stress measurement, match test