

土中自由场应力与结构表面压力测量的差异

The difference between measurements of stress in soil and pressure on wall-surface

余尚江^{1,2}, 曾 辉¹

(1. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023; 2. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 在土木工程试验测量中, 往往把土中自由场应力传感器与结构表面压力传感器不加区分, 互相代用。本文给出了这两类情况下传感器匹配误差的定量计算公式, 详细阐明了两类传感器在设计原则、测量误差计算方法、误差范围、应力场分布状态和扰动范围等方面的差异, 以期克服土中应力和压力测量的盲目性。

关键词: 应力; 压力; 传感器; 匹配误差

中图分类号: TP 212

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2003) 06- 0684- 04

作者简介: 余尚江(1968-), 男, 1991 年北京理工大学毕业, 2001 年获西南交通大学硕士学位。现在总参工程兵科研三所主要从事岩土工程试验测试技术和测量仪器的研究及应用。

YU Shang-jiang^{1,2}, ZENG Hui¹

(1. The Third Science and Technology Institute of Engineering Corps, General Staff, PLA., Luoyang 471023, China; 2. College of Electrical and Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Usually the transducers are indiscriminately used to measure stress in soil and pressure on wall-surface in civil engineering test. The formulae of match error in these two circumstances are derived and the differences in design principles, computing methods and ranges of error, stress field and disturbed zone of these two kinds of transducer are expounded in this paper. The purpose is to avoid the incorrect use of transducers in measurement of stress in soil and pressure on wall-surface.

Key words: stress; pressure; transducer; match error

0 前 言*

在土介质中测量自由场应力和土中结构压力, 常用接触式传感器埋置到介质里, 由传感器输出的信号来确定介质的真实应力(含压力)。由于传感器的物理和力学性质与周围介质不相同, 势必改变介质原来的应力场, 产生应力集中和重分布现象。此时传感器测得的是扰动后的应力而不是真实应力, 由此产生的误差通常称“匹配误差”。该误差及与其相关的“匹配系数”按如下定义:

$$\alpha = P_i / P_0, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{P_e}{P_0} = \frac{P_i - P_0}{P_0} = \alpha - 1, \quad (2)$$

式中 α 为传感器匹配系数; β 为传感器匹配误差; P_i 为实测介质扰动后的应力; P_0 为介质扰动前的真实应力; P_e 为传感器与周围介质相互作用产生的附加应力。

土中应力测量有 3 种情况, 如图 1 所示。①自由场应力测量; ②结构表面压力测量, 通常是刚性结构表面(以下简称刚壁)压力测量; ③刚性基础压力测量。后两种情况都是测量介质与结构的接触压力, 但传感器埋置的位置不同。这 3 种情况传感器的边界条件不一样, 其与周围介质的相互作用也不相同。可是, 从解析理论研究、有限元数值计算及实验研究的结果来看,

影响传感器匹配误差的因素对情况①和③是基本一样的, 仅仅是匹配误差计算公式中使用条件系数相差一倍^[1]。所以, 本文仅研究前两种情况的差异。

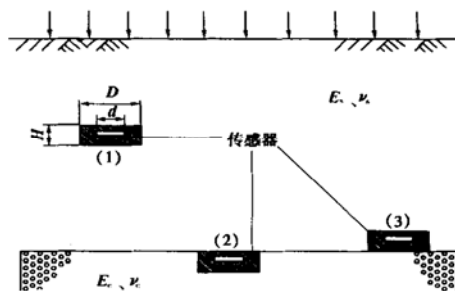


图 1 土中应力测量传感器的 3 种使用情况

Fig. 1 Three circumstances of transducers used in soil to measure stress

1 两类情况传感器匹配误差计算公式

根据最近研究成果^[1], 当传感器边壳为高弹模材料时($E \gg E_s$, 为传感器边壳杨氏弹模), 两类情况下传感器匹配误差的计算公式如下:

(1) 自由场应力传感器
匹配误差

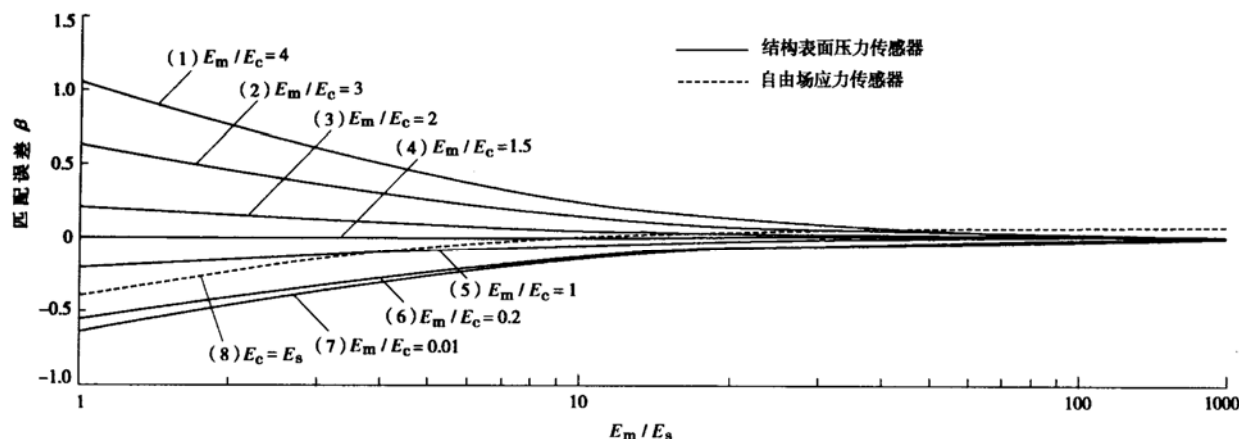


图2 匹配误差与模量比的关系曲线

Fig. 2 Relations between match error and modulus ratio

$$\beta = \frac{0.176(1 - \nu_s^2) \frac{d}{D} \cdot \frac{E_m}{E_s} - 1}{0.211(1 - \nu_s^2) \frac{2dE_m}{HE_s} + 1} \quad (3)$$

对绝对刚性传感器 ($E_m/E_s \rightarrow \infty$), 上式简化为

$$\beta^* = 0.417H/D \quad (4)$$

(2) 结构表面压力传感器

匹配误差

$$\beta = \frac{\frac{dE_m}{DE_s} - 1}{0.191(1 - \nu_s^2) \frac{dE_m}{HE_s} + 1} \quad (5)$$

对刚性传感器 ($E_m \gg E_s, E_m \gg E_c$), 上式简化为

$$\beta = HE_s / 0.191(1 - \nu_s^2) DE_c \quad (6)$$

对绝对刚性传感器 ($E_m/E_s \rightarrow \infty$) 且 E_c 不远小于 E_m , 则由式(5)得

$$\beta^* = 0.$$

式中 β^* 为绝对刚性传感器匹配误差; E_m 为传感器敏感区等效杨氏模量; E_c 为结构的杨氏模量; E_s 为介质切线变形模量; ν_s 为介质泊松比; D 为传感器外直径; d 为传感器敏感区直径; H 为传感器高度。

对常用参数的传感器 ($E \gg E_s, d/D = 2/3, H/d = 0.3, \nu_s = 0.3$), 其测结构表面压力和自由场应力时, 匹配误差 β 与模量比 E_m/E_s 的关系曲线是不同的, 如图2所示。图中曲线(1)~(7)是测结构表面压力时对应各种 E_m/E_s 的 β 与 E_m/E_s 关系曲线; 曲线(8)是测自由场应力时 β 与 E_m/E_s 关系曲线。

2 自由场应力与结构表面压力测量的差异

(1) 影响匹配误差的因素不完全相同

由式(3)、(5)看出, 虽然 d/D 、 d/H 和 E_m/E_s 是影响两类情况下传感器匹配误差的共同因素。但是, 结构表面压力传感器的匹配误差还与其敏感区等效模量与结构模量之比 E_m/E_c 关系很大。这点从图2中曲线(1)~(7)看得很清楚。

(2) 匹配误差的范围和变化趋势不同

由图2可见, 自由场应力传感器的匹配误差 β 随 E_m/E_s 增大而增大; 当 E_m/E_s 约大于10时, β 增大缓慢且趋近于正的稳定值, 这个值 β^* 只与 H/D 有关。结构表面压力传感器的匹配误差 β , 当 $E_m/E_s > D/d$ 时为正, 当 $E_m/E_s < D/d$ 时为负, 当 $E_m/E_s = D/d$ 时恒为零; 随 E_m/E_s 增大, β 的绝对值减小; 当 E_m/E_s 大到超过一定程度时, β 变化缓慢且趋近于零。

(3) 传感器达到刚性的标准不同

由上可知, 两类情况下当传感器敏感区等效模量与被测介质模量比 E_m/E_s 趋近于无穷时, 匹配误差 β 趋近于某个稳定值(一个正值或零)。事实上传感器的 E_m 不可能做到绝对刚性, 但当绝对刚性传感器的匹配误差 β^* 与某传感器匹配误差 β 的差值 γ ($\gamma = \beta^* - \beta$) 小于某个规定值时 $\gamma_{\max}$, 则该传感器认为是刚性的。通常取 $\gamma_{\max} = 0.05$ 作为误差极限, 当 γ 小于0.05时, 认为此传感器与绝对刚性传感器已很接近。由于这两类情况下传感器的 β 计算公式不一样, 所以其达到刚性的标准并不相同。取 $\gamma_{\max} = 0.05$ 对以上公式分析试算, 得出满足刚性条件的要求大致如下:

自由场应力传感器

$$\frac{E_m}{E_s} \geq 60 \frac{H}{d} \quad (7)$$

结构表面压力传感器

$$\frac{E_m}{E_s} \geq 100 \frac{H}{d} \quad (8)$$

为了降低对传感器敏感区等效模量的要求,或以期得出较小的匹配误差,一般对这两类传感器还要求

$$\frac{H}{d} \leq 0.3. \quad (9)$$

(4) 传感器设计原则和匹配误差修正不同

a) 自由场应力传感器设计原则

按刚性传感器原则设计,即满足式(7)、(9),得到一个较小且稳定的匹配误差。鉴于匹配误差是一种系统误差,实际应用时可以用绝对刚性传感器的匹配误差,对实测应力值进行修正。

b) 结构表面压力传感器设计原则

由于被测土中结构一般是混凝土类结构,其变形模量较大且可近似按线弹性处理。所以要使匹配误差近似为零是可能的。因此,首先可以按完全匹配原则设计。假定 $\beta = 0$,由式(5)得到

$$E_m = \frac{D}{d} E_c. \quad (10)$$

由于 $D > d$,所以 $E_m > E_c$ 。对结构表面压力测量,一般都满足 $E_c \gg E_s$,故 $E_m \gg E_s$ 。只要传感器偏离式(10)不是太大,由式(5)可知并不影响 $\beta \approx 0$,从图2中曲线(3)、(5)可看出。其次,按刚性传感器原则设计,即满足式(8)和(9),就可得到很小且稳定的匹配误差。刚性传感器原则与完全匹配原则没有矛盾,往往传感器满足一个原则也必然满足另一个原则。由于绝对刚性传感器的匹配误差为零,所以刚性结构表面压力传感器实际应用时,不必进行匹配误差修正。

c) 两类刚性传感器使用时的相对误差计算

刚性传感器实际应用时一般按绝对刚性处理,事实上刚性传感器与绝对刚性传感器的匹配误差并不完全相同,以下分析这种处理所产生实测值的相对误差。

由前述公式和定义可推得刚性传感器的实测真实值为

$$P_0 = \frac{P_i}{1 + \beta^* - \gamma}. \quad (11)$$

(I) 自由场应力测量时相对误差

a 若用式(4) $\beta^* = 0.417H/D$ 对 P_i 进行修正,得出带有误差的真实应力 P_0' 为

$$P_0' = \frac{P_i}{1 + 0.417 \frac{H}{D}}. \quad (12)$$

这种修正后产生的相对误差 δ 由上两式可推得

$$\delta = \frac{P_0' - P_0}{P_0} = \frac{-\gamma}{1 + 0.417 \frac{H}{D}}. \quad (13)$$

b 若不用 $\beta^* = 0.417H/D$ 对 P_i 进行修正,则带有误差的真实应力 $P_0' = P_i$,由式(11)可推得相对误差为

$$\delta = \frac{P_0' - P_0}{P_0} = + 0.417 \frac{H}{D} - \gamma. \quad (14)$$

(II) 结构表面压力测量时相对误差

由于 $\beta^* = 0$,故无需对 P_i 进行修正,只有取带有误差的真实应力 $P_0' = P_i$,由式(11)可推得

$$\delta = \frac{P_0' - P_0}{P_0} = -\gamma. \quad (15)$$

鉴于刚性传感器条件式(7)和(8)是在 $\gamma_{\max} = 0.05$ 的前提下得出的,所以按刚性条件设计的传感器实际应用时,实测真实值的相对误差 δ ,对结构表面压力测量不超过 $\pm 5\%$,对自由场应力测量若做匹配误差修正, δ 也不超过 -5% ;若不做匹配误差修正, δ 在 $\beta^* - (\beta^* \sim 0.05)$ 范围内。

(5) 应力场分布状态和扰动范围不同

根据对介质中这两类传感器有限元数值计算结果^[2,3],得到了土中自由场3种绝对刚性传感器承压面上轴向应力 σ_x 的分布规律,见图3;对 $H/d = 0.3, d/D = 2/3$ 的自由场应力传感器给出了在4种模量比情况下承压面上轴向应力的分布规律,见图4;给出了在3种模量比情况下介质中轴向应力沿传感器对称轴和对称平面的分布规律,见图5;同时对这种传感器测刚壁压力时,给出了在4种模量比情况下覆盖介质中轴向应力沿传感器对称轴和承压平面上的分布规律,见图6。综合以上分布图及参考文献[2,3],可得出:虽然影响两类传感器应力场分布状态和扰动范围的因素基本相同,但影响效果不大一样,有的截然相反,主要有以下4个方面:

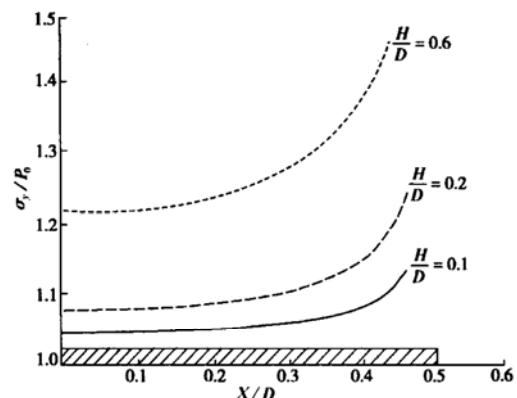


图3 绝对刚性自由场应力传感器 σ_x/P_0 的分布

Fig. 3 Distribution of σ_x/P_0 above absolutely rigid transducer in soil

a) 绝对刚性传感器在测量自由场应力时,轴向应力沿承压面均大于未扰动应力且分布不均匀,其中部平缓、边缘应力集中较大,这种不均匀性随 H/D 增大而增大(见图3);在测量结构表面压力时,轴向应力沿承压面 and 对称轴等于未扰动应力且分布均匀,其不扰动应力场,这种均匀性不受 H/D 影响(见图6)。

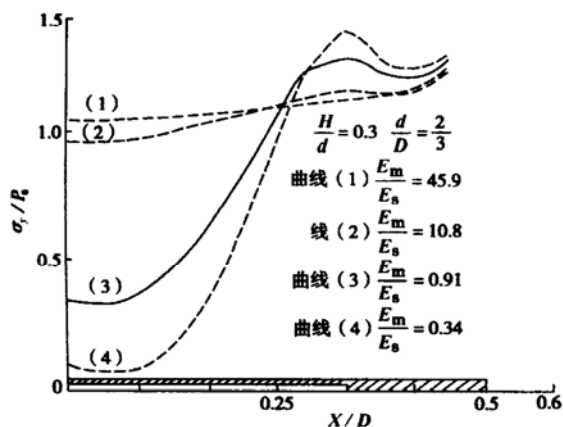


图4 $H/d = 0.3, d/D = 2/3$ 自由场应力传感器 σ_y/P_0 的分布

Fig. 4 Distribution of σ_y/P_0 above transducer in soil with $H/d = 0.3, d/D = 2/3$

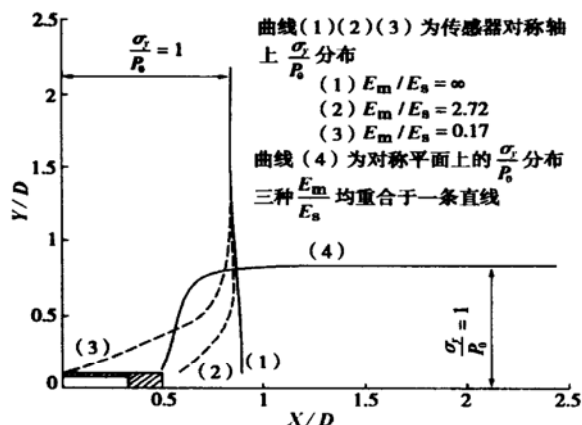


图5 $H/d = 0.3, d/D = 2/3$ 自由场应力传感器 σ_y/P_0 的扰动范围

Fig. 5 Disturbed zone of σ_y/P_0 above transducer in soil with $H/d = 0.3, d/D = 2/3$

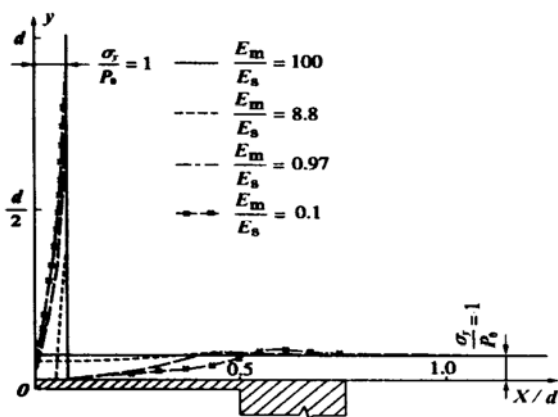


图6 $H/d = 0.3, d/D = 2/3$ 刚壁压力传感器 σ_y/P_0 的分布

Fig. 6 Distribution of σ_y/P_0 in soil above transducer on rigid wall surface with $H/d = 0.3, d/D = 2/3$

b) 模量比 E_m/E_s 相同时, 自由场应力测量时的轴向应力沿承压面分布变化的应力梯度比结构表面压力

测量时大。

c) 模量比 E_m/E_s 越大, 自由场应力测量时, 扰动应力场范围越大^[2], 结构表面压力测量时, 扰动应力场范围越小, 应力分布越均匀(见图6)。

d) 若规定轴向应力与自由场未扰动应力之比 σ_y/P_0 变化 $\pm 3\%$ 为扰动区的边界, 则对自由场中应力测量, 在传感器 $H/d = 0.3$ 时, 应力扰动范围沿径向和轴向均约为离传感器中心 1 倍直径 D ; $H/d = 0.9$ 时, 扰动范围约为 $1.67D$ ^[2]。但对 $H/d \leq 0.9$ 时刚壁压力测量应力扰动范围沿径向约小于 $D/2$, 沿轴向约小于 d 。可见, 结构表面压力测量时比自由场应力测量时传感器对介质应力场的扰动范围小约 1 倍。

3 结 论

(1) 虽然刚性饼状是这两类情况下传感器共同的设计原则, 但达到刚性的标准相差较大, 即要求结构表面压力传感器比自由场应力传感器敏感区的等效模量约大一倍。所以, 刚性结构表面压力传感器完全可以测量自由场应力, 而刚性自由场应力传感器测量结构表面压力时可能不再是刚性的, 故应注意匹配误差的变化。

(2) 满足本文刚性条件要求的传感器, 一般按绝对刚性传感器处理, 在自由场应力测量时匹配误差趋近于较小且正的稳定值, 在结构表面压力测量时趋近于零。两类情况下刚性传感器实际应用时都可不进行匹配误差修正, 所产生实测真实值的相对误差, 对自由场应力测量一般不超过 10%; 对结构表面压力测量不超过 $\pm 5\%$ 。

(3) 近似绝对刚性传感器承压面上轴向应力的分布状态, 在自由场应力测量时是不均匀的, 且这种不均匀性随 H/D 增大而增大; 在结构表面压力测量时是均匀的, 且这种均匀性不受 H/D 影响。

(4) 对常见 $H/d = 0.3, d/D = 2/3$ 的传感器, 在测量自由场应力时对应力场扰动范围沿径向和轴向均为 D ; 而同样传感器测刚壁压力时, 对应力场扰动范围沿径向小于 $D/2$ 、沿轴向小于 d 。可见, 一般传感器在结构表面压力测量时比自由场应力测量时对介质应力场的扰动范围小约 1 倍。

参考文献:

- [1] 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, (1): 99- 105.
- [2] 侯岳衡. 膜片式应力传感器匹配系数的理论估计[J]. 防护工程, 1980, (3): 100- 124.
- [3] 曾 辉. 土中结构表面压力测试技术的研究[J]. 土木工程学报, 1998, (2): 59- 68.