

振弦式压力盒在刚性接触面应力监测中的应用研究

陈志坚¹, 游庆仲², 林 闽^{1,3}, 李筱艳¹

(1. 河海大学土木工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省交通厅, 南京 210004;
3. 云南省设计院勘察分院, 昆明 610041)

[摘要] 在阐述振弦式压力盒组成结构和测试原理的基础上, 结合江阴大桥(封面)南锚碇基底应力监测实践, 分析了振弦式压力盒在刚性接触面应力监测中的可行性和存在的问题, 推导出压力盒率定系数的表达式, 提出基于有限元模拟分析的压力盒实测资料修正方法, 建立了修正系数与被测介质刚度的关系式。研究成果表明, 在刚性接触面应力监测中, 振弦式压力盒的实测值普遍明显偏小, 甚至仅为理论值的十几分之一, 其原因是压力盒的实际受力条件与率定受力条件有明确而明显的不同, 被测介质刚度对压力盒测值有重要影响。

[关键词] 压力盒; 组成结构; 测试原理; 误差; 应力监测; 修正方法

[中图分类号] TV698.1; TV547.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)12-0080-06

1 引言

当荷载以水平向为主时, 重力式结构往往被作为首选的结构形式, 如承受水压力的水坝以重力坝和土石坝为最常见的结构形式, 承受土压力的重力式挡墙和承受悬索桥主缆力的重力式锚碇也十分常见。对于承受水平力的重力式结构, 其抗滑和抗倾覆稳定问题均较突出。显然, 重力式结构基底应力及其分布的确定对稳定分析是十分重要的。然而, 由于受力条件的复杂性以及扬压力的作用, 基底应力往往难以准确计算。尤其是大跨径悬索桥中的重力式锚碇, 其承受的水平分力和上拔力均巨大而集中, 受力条件复杂而多变, 故结构形式复杂的重力式锚碇基底应力的大小及分布的确定十分困难。在正应力观测中, 振弦式压力盒被认为是一种较成熟的观测技术^[1], 国内外均广泛应用。然而, 由于实际受力条件与率定受力条件之间存在较大的差异, 当将压力盒用于混凝土、基岩及其接触面应力观测时, 其观测值明显偏小。

2 振弦式压力盒测试技术

工程实践中, 许多岩土工程问题的分析评价都属于力学边值问题的求解, 但由于岩土体的复杂性, 其边值问题的理论解或数值解往往难以准确求得。对于重要的工程实践, 往往开展了大量的原型监测工作。监测的物理量可以是原因量(如荷载等), 也可以是响应量(如应力、应变等)。但无论是应力、应变, 还是渗透压力或温度等, 它们都是非电量型物理量, 其测值无法直接通过电缆传输。为了减小开挖对岩土体边值问题的影响, 测试期间被测部位是无法被人直接接触的, 要求将非电量被测物理量转换为可通过电缆长距离传输的电信号, 如电压等。为此, 在岩土体和结构内部监测中, 需采用传感器(如电阻应变片、振弦式压力盒等)测试技术。传感器的作用是将非电量的应力、应变等转换为电信号。同一类传感器, 可根据被测介质和被测物理量的特点而制成不同的结构形式, 如振弦式压力盒、钢筋计、渗压计等。在大坝、桥梁、深基坑等大型工程项目中, 为了查清应力及其分布, 常采用振弦式压力盒测试技术。

2.1 振弦式压力盒的组成结构与测试原理

如前所述，传感器的作用在于实现非电量与电量之间的转换，为了使这种转换关系简单、明确、真实，传感器多被设置于边界条件简单的结构内。为此，压力盒采用了扁平圆形盒状金属结构。为了避免恶劣工作环境对压力盒转换关系的影响，要求压力盒具有一定的强度和刚度。为此，压力盒的外壳通常采用钢质，并制作成封闭结构。压力盒的传感元件（承载板或称弹性膜）为支承（固定）于钢筒上的圆形钢板，它具有明确而简单的受力条件，其截面如图 1。当承载板承受法向推力 p 时，即产生弯曲变形，固定于承压板上的立柱（如图 1 中的 A、B）随之产生转动。显然，绷紧于两根立柱之间的钢弦所受的张力 T 也相应产生变化（理论分析表明，对于同一个压力盒，在弹性变形阶段， T 与 p 的关系是唯一的）。该钢弦即为振弦式压力盒的敏感元件。为了测定钢弦张力 T 的变化，需在钢弦的下方设置激振线圈，如果给线圈施加一个脉冲电压信号，线圈产生的磁场将使钢弦作正弦振动，从而使自振钢弦与线圈之间的间隙发生周期性的变化，线圈回路的磁阻抗也相应产生周期性变化，线圈感应出的磁阻的变化频率即为钢弦的自振频率。

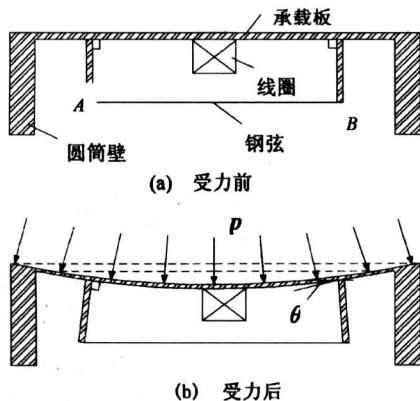


图 1 压力盒结构及测试原理示意图

Fig.1 The signal of pressure cell structure and measuring principle

理论分析表明，钢弦的自振频率取决于钢弦所承受的张力。据此，可通过钢弦张力的变化建立被测介质压力 p 与钢弦自振频率之间的关系。

2.2 振弦式压力盒的计算原理

设压力盒的钢弦是一根作微小振动的理想钢弦，在弦上取一段弧 MN，设 MN 两端受拉力 T

和 T' ，弦的线密度为 ρ 。根据弦在时刻 t 的受力情况，由牛顿第二定律，可列出满足于动位移 $y(x, t)$ 的弦振动方程为^[2]

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial^2 t} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial^2 x} \quad (1)$$

根据两端固定的弦的边界条件， $y(0, t) = y(l, t) = 0$ ，和初始条件 $v(x, 0) = \lambda \delta(x - l/2)$ ， λ 为 δ 的脉冲宽度， $\lambda = \pi/l$ ，采用分离变量法求解式 (1) 得

$$y(x, t) = \frac{2I}{\pi d^2 \sqrt{\rho \sigma'}} \sin \frac{\pi x}{l} \sin \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{\sigma'}{\rho}} t \quad (2)$$

式中： I 为激振冲量， l 为弦的长度， d 为弦的直径， σ' 为钢弦应力。

显然，式 (2) 为正弦函数，其频率为

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma'}{\rho}} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，钢弦的自振频率 f 取决于钢弦的长度、密度和所承受的拉应力。当钢弦的材料和尺寸一定时， f 主要取决于钢弦所受的拉应力 σ' 。将式 (3) 改写为

$$\sigma' = 4l^2 f^2 \rho \quad (4)$$

由式 (4) 可见， σ' 与 f 的二次方成正比。这就是振弦式压力盒测试技术的理论基础。

当承载板在压力 p 作用下，钢弦所受应力的增量 $\Delta\sigma$ 可由式 (5) 求得。由于压力盒钢弦的初始应力 σ' 是不变的，为方便起见，简称钢弦应力增量 $\Delta\sigma$ 为钢弦应力 σ 。由此可知， p 仅与 σ 有关，而与初始应力 σ' 无关。

$$\sigma = \Delta\sigma = k(f^2 - f_0^2) \quad (5)$$

式中： k 为钢弦灵敏系数， $k = 4l^2 \rho$ ， f 为压力盒在外力 p 作用下钢弦的频率， f_0 为钢弦初始频率。

2.3 率定系数的理论表达式

根据虎克定律，钢弦应变可由式 (6) 确定，

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

从图 1 可以看出，由于立柱与承载板保持相对位置的不变性，即立柱与承载板始终保持垂直，故受力后承载板在立柱所在位置切线的转角与立柱的转角相等，设为 θ 。显然，由几何分析可建立钢弦的长度 l 和应变 ϵ 与 θ 的关系，由静力分析可建立承载板所受压力 p 与 θ 的关系。由弹性力学圆形薄板轴对称弯曲计算理论可得出^[3]

$$\text{tg} \theta = \frac{pl}{128D} (l^2 - L^2) \quad (7)$$

式中： p 为作用于承载板上的均布荷载 (MPa)， l 为钢弦长度 (mm)， L 为承载板直径 (mm)， D 为承载板的弯曲刚度， $D = E \cdot t^3 / 12 (1 - \mu^2)$ ， E 为承载板弹性模量 (MPa)， μ 为承载板泊松比， t 为承载板厚度 (mm)。

由式 (6) 有

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l} = E \frac{2b \sin \theta}{l}, \quad (8)$$

式中： b 为立柱的高度 (mm)。

由于变形微小， $\text{tg} \theta \approx \sin \theta$ ，故

$$\sigma = E \frac{2b}{l} \frac{pl}{128D} (l^2 - L^2). \quad (9)$$

由式 (5)，并考虑到弹性力学中对应力正负号的规定，则有

$$E \frac{bp}{64D} (L^2 - l^2) = k(f^2 - f_0^2), \quad (10)$$

即

$$p = \frac{64kD}{Eb(L^2 - l^2)} (f^2 - f_0^2). \quad (11)$$

将式 (11) 改写为式 (12)，其系数 K 为仅与压力盒 (含钢弦) 尺寸和材质有关的常数，式 (13) 即为压力盒率定系数 K 的理论表达式。但由压力盒的制造工艺可知，不同压力盒的钢弦长度、承载板尺寸等很难加工得完全一样，故每个压力盒的系数 K 均不同，实用中，系数 K 均由率定试验确定 (故称 K 为率定系数)，通过率定试验建立油压 p 与 f 的对应关系^[4]。

$$p = K(f^2 - f_0^2), \quad (12)$$

$$K = \frac{256l^2 \rho \cdot D}{Eb(L^2 - l^2)}. \quad (13)$$

由压力盒的结构、测试原理以及率定试验方法 (油压率定) 的分析可知，当将压力盒用于水压、液压测定时，理论上可根据率定系数 K 和钢弦初始频率 f_0 以及实测频率 f ，由式 (12) 获得水压或液压的精确值。而当将压力盒用于理想刚体应力测试时，从理论上讲，无论应力多大，其测值始终为零。在实际应用中，被测介质越松软 (如松沙、软土)，其压力测值越精确。随着被测介质刚度的增大，压力盒的测试精度相应急剧降低 (测值明显偏小)。江阴大桥南锚碇基底应力的实测结果表明，当将压力盒用于岩体、混凝土或其接触面应力测试时，实测应力仅为实际应力的几分之一，甚至十几分之一。为此，需对实测应力进行修正，以满足工程需要。

3 南锚碇基底应力监测概况

江阴大桥^[5]主体工程南锚碇属重力式嵌岩锚，地基岩体主要由泥盆系中统定山组的砂、页岩组成，岩层呈中厚-薄层软、硬互层，发育有 35 层软弱 (泥化) 夹层。锚碇所处岸坡呈单斜构造，岩层倾向长江，倾角 $20^\circ \sim 35^\circ$ 。故南锚碇需以具不稳定结构的缓倾顺向坡为抗力体，稳定问题突出^[6,7]。为此，开展了锚碇基底应力监测，共埋设测试仪器 132 套，其中 59 套用于观测垂向接触应力 (基底反力)，55 套用于观测水平向抗力，在近 4 年时间内共进行了 88 次观测工作。锚碇基坑开挖面底高程 6.7 m，西南侧开挖深度 66 m。南锚碇的主要功能是安全承受 6.4×10^5 kN 的主缆拉力 (仰角 24.2°)，并将其传递给地基岩体。为了满足抗滑稳定的要求，南锚碇重约 23.5×10^4 kN，属现浇大体积混凝土结构，锚体最大厚度 43 m。为防止混凝土水化热导致锚体开裂，锚体采用分区、分层浇筑方案，共分 29 层，6.7~12.7 m 高程每层厚 1 m，12.7 m 高程以上每层 1.5 m，浇筑时间为 1995 年 5 月 10 日至 1997 年 7 月 29 日，历时 2 年多。锚碇浇筑期间进行了 34 次应力监测，在锚碇浇筑过程中，其基底受力条件简单，基底应力以自重应力为主。实测结果表明，由于采取了多项温控措施^[8]，混凝土水化热对应力测值的影响时间不超过 50 d。故锚体浇筑期间的应力监测为压力盒测值的修正创造了有利条件。

4 影响压力盒测值的因素分析

上述分析表明，当将压力盒用于刚度较大的介质的应力测试时，压力盒实际受力条件与率定时的受力条件有着明显的区别，但该区别是明确的。由式 (13) 并结合江阴大桥南锚碇基底应力监测的实践表明，影响压力盒应力测值的主要因素有以下几个方面。

4.1 被测介质刚度的影响

由于压力盒率定时，建立的是油压与钢弦频率之间的关系，当被测介质刚度较小时，介质不制约承载板的变形响应，这时承载板的受力条件与油压率定时的受力条件比较一致，实际应力能全部被压力盒感应，故实测应力与实际应力的差值较小，其精度一般能满足工程要求。但当被测介质刚度较大时，由于介质具有较大的自承能力，变形量小，制

约了承载板的变形响应, 故其应力无法被压力盒的敏感元件全部感应。从静力平衡角度分析, 相当一部分压应力将由压力盒侧壁承担, 从而使承载板的变形偏小, 故实测应力小于实际应力。随着被测介质刚度的增大, 实测应力偏小的现象将加剧。

4.2 被测介质厚度的影响

被测介质刚度对实测应力的影响与被测介质厚度有关, 当厚度较小时, 被测介质刚度的影响很小, 可不予考虑; 随着厚度的增大, 被测介质刚度的影响突显, 实测应力与实际应力的差值迅速增大。但当厚度大于某一数值后, 被测介质厚度的影响趋于稳定, 实测应力与实际应力的差值不再随厚度的变化而改变, 本文称该厚度为迟钝厚度 h_0 。

4.3 压力盒结构尺寸的影响

为适应恶劣的工作环境, 压力盒采用钢结构。为保证压力盒性能稳定, 其整体强度和刚度需满足一定要求, 故其侧壁均较厚, 且压力盒量程越大, 厚度越大, 显然实测应力偏小越多。

由于被测介质的应力需通过承载板传递给钢弦, 因此压力盒承载板的直径也对实测值产生影响。直径越大, 钢弦对承载板的变形越敏感, 所得出的实测值越接近于实际应力。然而受埋设条件的限制, 压力盒的直径一般仅为 10~20 cm。

4.4 压力盒埋设状态的影响

压力盒埋设是监测工作中最重要的一个环节, 其对测值的影响主要表现在埋设状态的正确、准确与否以及泌水层形成的空隙, 它所造成的实测值偏差属人为误差, 可通过严格执行埋设规程而加以消除。

5 压力盒测值修正方法

如前所述, 压力盒实测值的准确程度与被测介质的刚度和厚度有密切关系, 在刚度较大的介质中使用压力盒测试技术必须对实测值进行修正。本文采用三维有限元法模拟岩体与混凝土接触面上压力盒的实际受力状态, 从而建立压力盒实测应力的修正方法。

5.1 计算模拟方案

本文模拟的压力盒 (TXR ϕ 108 型) 结构尺寸为: 钢弦长度 65 mm, 压力盒外径 108 mm, 承载板直径 89.8 mm, 侧壁厚度 9.1 mm, 承载板厚度 1.8 mm, 压力盒厚度 27.6 mm。模拟计算中首先取被测介质的弹性模量为 3 GPa, 分别计算在不同

荷载 (取 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 1.1 MPa) 作用下被测介质厚度为 0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.14, 0.18, 0.22, 0.26, 0.30, 0.34, 0.40, 0.50, 1.00 m 时压力盒的应力响应值, 以确定迟钝厚度 h_0 。在此基础上, 取被测介质厚度为迟钝厚度 h_0 , 分别计算在不同荷载 (与上同) 作用下被测介质弹性模量为 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 42, 84, 210 GPa 时, 压力盒的应力响应值, 从而建立考虑被测介质弹性模量的压力盒测值修正方法。计算中利用了轴对称条件, 模拟计算采用三维非线性有限元法, 被测介质采用空间六面体弹塑性单元。计算中将压力盒介质视为弹性材料, 将岩体视为具有应变强化阶段和应变软化阶段的弹塑性材料。屈服准则采用 4 参数准则。

5.2 计算成果的整理及分析

考虑到压力盒敏感元件——钢弦的直径细小, 且受力条件简单, 故计算中未予模拟。考虑到钢弦张力较小, 在压力盒受力过程中, 固定钢弦的立柱基本上处于自由状态, 并始终与承载板垂直, 故计算中也未予模拟。为此, 需根据承载板的变形计算结果, 整理计算钢弦应力的变化, 从而建立压力盒实际受力与钢弦实测频率之间的关系, 并据此建立压力盒实测值的修正方法。

根据有限元变形计算结果, 可获得固定钢弦之立柱所在部位承载板单元的转角 θ , 由立柱高度 b (19 mm)、钢弦长度 l (65 mm) 和弹性模量 E (200 GPa), 可由式 (8) 求得钢弦应力为

$$\sigma = 1.1692 \times 10^5 \text{tg}\theta (\text{MPa})。 \quad (14)$$

由式 (3) 求得钢弦的自振频率为

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2 \times 65 \times 10^{-3}} \cdot \sqrt{\frac{1.1692 \times 10^5 \times \text{tg}\theta}{6.16 \times 10^{-3}}} = 3.35 \times 10^4 \sqrt{\text{tg}\theta}。 \quad (15)$$

根据上式可建立不同弹性模量条件下, 压力盒埋设部位实际应力与压力盒实测频率之间的关系, 并由此计算在该埋设条件下压力盒的率定系数 K' 。当 p 直接作用于压力盒 ($h_0 = 0$) 时, 可由式 (15) 计算出油压率定条件下的压力盒率定系数 K 。显然, 考虑被测介质刚度影响的压力盒修正系数可由下式确定:

$$\alpha = K' / K。 \quad (16)$$

值得指出的是, 由上述数值模拟方法确定的压

力盒率定系数 K 很难与由物理方法确定的压力盒率定系数完全一致。但与由物理率定（油压率定）确定的率定系数相比，本次计算误差不大于 15%。计算中应根据该差异对不同方案的有限元计算结果进行修正。

根据上述研究思路，求得在荷载为 1.1 MPa（江阴大桥锚碇基底最大应力），被测介质弹性模量

为 3 GPa（锚碇地基弹性模量最小值）时，介质迟钝厚度 h_0 为 0.2 m。

为保守起见，取被测介质厚度为 0.5 m，由式（14）和式（15）可求得在不同荷载、不同弹性模量条件下的钢弦应力响应，并可获得压力盒实测值的修正系数 α 如表 1 示。

表 1 压力盒实测值修正系数 α 汇总表

Table 1 The modified coefficient summary of pressure cell observed value

p/MPa	E/GPa									
	3	6	9	12	15	18	21	42	84	210
0.3	3.4	5.2	7.2	8.7	10.6	11.6	13.3	21.8	32.0	53.9
0.4	3.2	5.0	6.1	7.4	9.0	10.7	11.2	18.3	32.7	52.3
0.5	3.1	4.3	5.8	6.9	8.1	8.8	10.1	16.4	28.0	51.0
0.6	2.8	4.1	5.6	6.6	8.1	8.7	9.9	16.2	25.6	50.0
0.8	2.6	4.0	5.4	6.4	8.0	8.5	9.7	15.7	25.0	42.9
0.9	2.6	4.0	5.4	6.4	7.7	8.4	9.6	14.8	24.6	41.2
1.1	2.6	4.0	5.3	6.3	7.6	8.3	9.4	14.2	24.1	39.7

表 2 不同荷载作用下的 A 及 m 值

Table 2 The value of A and m in different load

p/MPa	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1
A	1.683 1	1.509 5	1.347 0	1.271 6	1.251 4	1.255 1	1.260 9
m	0.663 4	0.661 0	0.669 7	0.673 9	0.668 4	0.660 8	0.656 2

5.3 修正系数与被测介质弹性模量关系的确定

由表 1 可以看出，压力盒应力修正系数与被测介质弹性模量呈乘幂函数关系，可表示为

$$\alpha = A \cdot E^m (E \geq 0.7), \quad (17)$$

式中： A 、 m 均为常数，与施加的荷载大小有关， E 为被测介质的弹性模量（GPa）。

通过一元回归分析，可得出不同荷载条件下所对应的 A 及 m 值，如表 2 所示。根据表 2，即可得出在不同荷载和不同被测介质弹性模量条件下压力盒实测应力的修正系数 α ，并由下式计算被测部位的实际应力。

$$p = \alpha \cdot K (f^2 - f_0^2). \quad (18)$$

经过江阴大桥南锚碇基底应力 132 个测点在近 4 年时间、不同工况条件下的 88 次监测结果检验，上述修正方法是可行的，对压力盒测值的修正也是必要的，值得在类似工程实践中推广应用。应指出的是，当介质厚度小于迟钝厚度时，介质厚度对修正系数的影响比较复杂，应对具体厚度进行具体的模拟分析。

6 结语

由于岩土体的复杂性，在重要的岩土工程实践中，监测措施的采用是十分必要的。也由于岩土体的复杂性，监测成果的准确性和可靠性的判别和评价往往是困难的，对之回避（目前往往如此）并盲目崇拜监测值的态度显然是不可取的，甚至会误导并酿成严重后果。当然，因噎废食的态度同样是不可取的。问题的关键是每一种监测手段都有其适用条件（但往往较苛刻）。然而，由于介质条件和环境条件的复杂性，完全适用的监测手段往往难于寻觅。重要的是应深入了解各种监测手段的测试原理及其仪器的组成结构，并据以对观测值进行客观的、必要的修正。

参考文献

- [1] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 13~18, 149~151
- [2] 刘蕴华, 张乃良. 数学物理方程及其应用 [M]. 南京:

- 河海大学出版社, 1994. 63~72
- [3] 徐芝伦. 弹性力学(下册, 第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 30~40
- [4] 李造鼎. 岩体测试技术(修订版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 180~181
- [5] Jeffrey S. Y, 周世忠. Jiangyin Yangze Bridge, China [A]. 江苏省长江公路大桥建设指挥部编. 江阴长江公路大桥工程建设论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 530~533
- [6] 陈志坚, 卓家寿, 刘世君. 干扰位移法及层状岩质边坡滑动边界的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 630~633
- [7] 陈志坚. 层状岩质高边坡稳定监测技术[J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 86~91
- [8] 丁腊荣. 江阴长江公路大桥南锚碇施工温度控制 [A]. 江苏省长江公路大桥建设指挥部编. 江阴长江公路大桥工程建设论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 162~165

Application of Vibrating Wire Pressure Cell for Stress Monitoring on Rigid Interface

Chen Zhijian¹, You Qingzhong², Lin Min^{1,3}, Li Xiaoyan¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Bureau of Communication of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China; 3. Design Institute of Yunnan Province, Kunming 610041, China)

[Abstract] In this paper, the structure and testing principle of vibrating wire pressure cell are presented firstly. Then, combined with the practice in the south anchorage of Jiangyin Yangtze Bridge, the feasibility and difficulty to monitor stress of rigid interface using vibrating wire pressure cell are analyzed. The expression of rating factor is deduced. And on the base of FEM, the method to modify observation data is introduced. Finally, the relationship between modification factor and medium rigidity is deduced. Study results indicate that, while monitoring the stress of rigid interface, the observed values are less than the actual stress values. Even, they are approximately one tenth of the theoretical value. The reason is that the real load condition of the pressure cell is obviously different from the rating load condition. The rigidity of medium affects observation results.

[Key words] pressure cell; structure; testing principle; error; stress monitoring; modification method