

岩土中结构表面刚性压力 传感器动匹配问题的数值计算研究

曾 辉 李欢秋

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

提要 有限元计算结果表明:在升压时间大于0.3ms的动荷载作用下,结构表面刚性压力传感器动匹配误差与静匹配误差一样,都近似为零,可不考虑匹配问题的影响。

关键词 压力传感器,结构表面,动匹配

1 前言

岩土介质中结构表面压力传感器的动匹配问题,与外荷载特征有关,是非常复杂的力学问题,目前尚没有较彻底的解决办法。本文只是给出一种特定的动荷载作用在计算模型上,采用动力轴对称有限元程序,计算出结构表面上有与无传感器时反射压力随时间的变化规律,通过比较确定传感器的动匹配系数的变化规律。

岩土工程中的结构物一般都是用混凝土材料打筑而成。结构外围的覆盖介质,一般是土、砂或特制的软回填材料。通常结构比覆盖介质的变形模量大2个数量级以上,简称为刚壁。在测量刚壁表面的压力时为了减小匹配误差的影响,通常选用刚性传感器。因此,本文仅研究刚壁表面刚性压力传感器的动匹配问题。

2 原始参数及力学模型

2.1 计算用传感器

计算选取DY1和YT1型两种刚度很大的压电式岩土压力传感器,其结构如图1所示。传感器工作原理详见参考文献[3],具体尺寸列在表1中。传感器壳体、压块等零件用钢材加工,其弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$,泊桑比 $\nu = 0.27$;敏感元件选用石英晶体,其弹性模量为 $8 \times 10^4 \text{MPa}$,泊桑比0.17。

2.2 外加动荷载

外加动荷载选定为锯齿三角波(图2)。动荷载峰值压力1MPa,升压时间0.3ms,正压作用时间20ms。这类波形是理想化了的常见岩土中结构表面动压力波形。

1996年5月14日收到初稿,1996年8月14日收到修改稿。

表 1 计算传感器参数表

Table 1 Gauge parameters

型号	外径 D (cm)	高度 H (cm)	敏感直径 d (cm)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	d_1 (cm)	h (cm)	等效弹模 E_m (MPa)
DY1	3.0	0.8	2.0	0.2	0.4	1.0	0	9.0×10^4
YT1	5.0	1.2	1.6	0.4	0.4	1.0	0.2	16.3×10^4

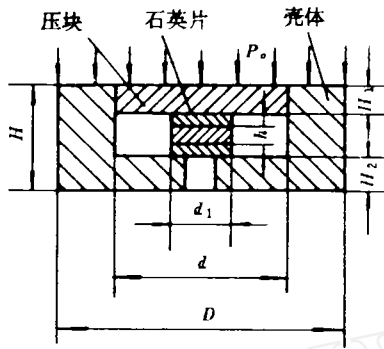


图 1 计算传感器示意图

Fig. 1 Diagram of pressure gauge

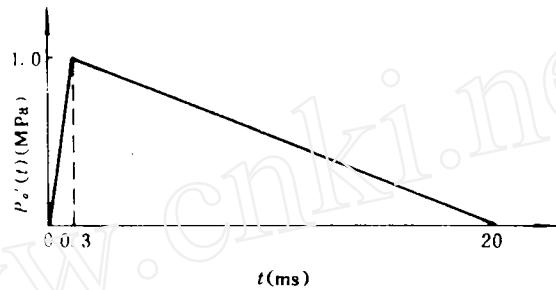


图 2 外荷载波形

Fig. 2 Wave form of active loading

2.3 计算力学模型

计算假定条件、单元模式选取和网格划分详见文[4]。力学模型如图 3 所示。取覆盖介质弹性模量 $E_s = 100\text{MPa}$ ，泊桑比 $\nu_s = 0.3$ ；刚性结构弹性模量 $E_c = 2 \times 10^4\text{MPa}$ ，泊桑比 $\nu_c = 0.3$ 。压缩波 $P'_0(t)$ 作用在模型上，模型只能沿轴向变形，侧向被约束，模型底面固定不动。整个模型划分 239 个 8 节点矩形等参单元，共有 785 个节点。计算误差小于 3%。

计算采用 ADINA 程序，动力方程求解用 Newmark 法，方法中两个参数 δ' 取 0.5， $\alpha = 0.25(\delta' + 0.5)^2 = 0.25$ 。计算时间步长取为十分之一升压时间，即 0.03ms，计算 46 个点，走时 1.38ms。

为了减小压缩波在模型上、下界面反射波的影响，一般要求模型界面反射波到达结构表面的时间，大于被测反射波的升压时间。根据一维波动理论^[5]，弹性纵波在介质中的传播速度为：

$$C = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

式中： C 为弹性纵波传播速度(m/s)； ν 为介质泊桑比； E 为介质弹性模量(KPa 即 kN/m^2)； ρ 为介质密度($\text{KN} \cdot \text{S}^2/\text{m}^4$)。已知原始条件和有关资料给出：一般覆盖介质 $E_s = 100 \times 10^3\text{KPa}$ 、 $\rho_s = 1.6\text{KN} \cdot \text{S}^2/\text{m}^4$ 、 $\nu_s = 0.3$ ，取结构 $E_c = 2 \times 10^7\text{KPa}$ 、 $\rho_c = 2.3\text{KN} \cdot \text{S}^2/\text{m}^4$ 、 $\nu_c = 0.3$ 。由式(1)计算得出： $C_s = 290\text{m/s}$ 、 $C_c = 3421\text{m/s}$ 。所以压缩纵波在模型上、下界面反射

后, 到达传感器的时间为 $t_s = 1.07\text{ms}$ 和 $t_c = 0.23\text{ms}$ 。可见, 计算模型所取覆盖介质的高度能满足要求。而结构所取的高度偏小, 模型底面反射波对被测一次反射波已有所影响。

3 计算结果及分析

传感器的动匹配系数是时间的函数, 由下式表示:

$$\alpha(t) = \frac{P(t)}{P_o(t)} \quad (2)$$

式中: $\alpha(t)$ 为动匹配系数; $P(t)$ 为外荷载压力波经覆盖介质垂直入射到刚壁和传感器表面反射后的压力波, 由有限元数值计算得到; $P_o(t)$ 为外荷载压力波经覆盖介质垂直入射到没有埋置传感器的刚壁表面反射后的压力波, 由有限元数值计算得到。

根据一维波动理论, 压力波作用到两种介质分界面的反射系数, 由下式计算:

$$F = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \quad (3)$$

式中: F 为波的反射系数; ρ_2 为第二种介质的密度; ρ_1 为第一种介质的密度, C_2 为第二种介质的波速; C_1 为第一种介质的波速。把前文已知参数代入式(3), 得出压力波经覆盖介质作用在刚壁上的反射系数等于 1.89。而由于刚壁和传感器的波阻抗 ($\rho_2 C_2$) 远远大于空气的波阻抗 ($\rho_1 C_1$), 故压力波直接作用在刚壁上的反射系数等于 2。

DY1 型传感器的 $P(t)$ 、 $P_o(t)$ 、 $\alpha(t)$ 的计算结果列在表 2 中, YT1 型传感器的计算结果与其基本一样。依据计算结果画出两种传感器的 $P(t)$ 、 $P_o(t)$ 和 $\alpha(t)$ 随时间 t 变化曲线如图 4—6 所示。

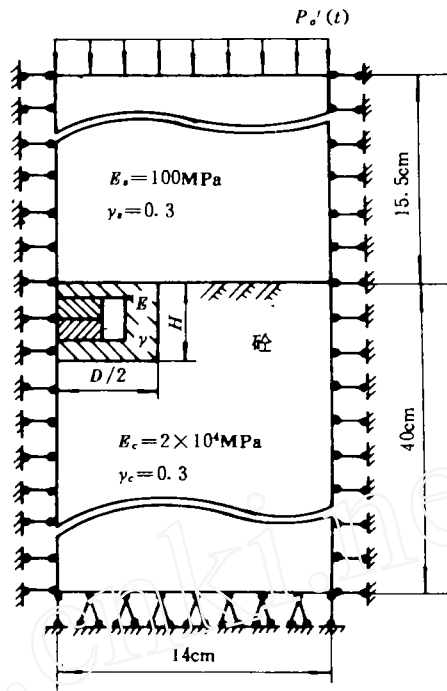


图 3 力学模型
Fig. 3 Calculation model

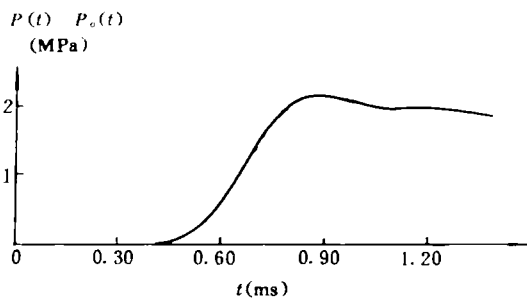


图 4 DY1 型传感器反射压力曲线

Fig. 4 Curve of reflected pressure on DY1 gauge

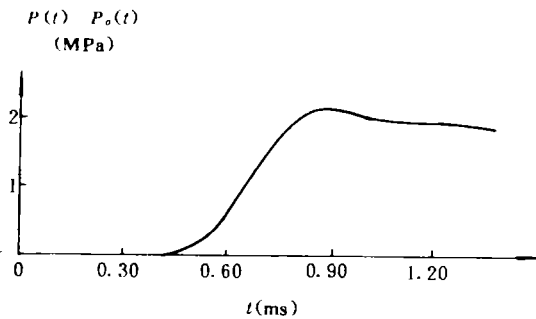


图 5 YT1 型传感器反射压力曲线

Fig. 5 Curve of reflected pressure on YT1 gauge

表 2 DY1 型传感器动匹配计算结果

Table 2 Calculating results of dynamic matching for DY1 gauge

时间 t (ms)	$P_o(t)$ (MPa)	$P(t)$ (MPa)	$\alpha(t) = \frac{P(t)}{P_o(t)}$	时间 t (ms)	$P_o(t)$ (MPa)	$P(t)$ (MPa)	$\alpha(t) = \frac{P(t)}{P_o(t)}$
0.39	0.0083	0.0087	1.048	0.90	2.152	2.153	1.000
0.42	0.0197	0.0204	1.035	0.93	2.128	2.129	1.000
0.45	0.0423	0.0437	1.033	0.96	2.091	2.091	1.000
0.48	0.0831	0.0856	1.030	0.99	2.051	2.051	1.000
0.51	0.150	0.155	1.033	1.02	2.014	2.016	1.001
0.54	0.253	0.259	1.024	1.05	1.987	1.988	1.001
0.57	0.393	0.404	1.028	1.08	1.969	1.971	1.001
0.60	0.578	0.590	1.021	1.11	1.963	1.966	1.001
0.63	0.797	0.810	1.016	1.14	1.966	1.970	1.002
0.66	1.040	1.055	1.014	1.17	1.975	1.979	1.002
0.69	1.291	1.306	1.012	1.20	1.980	1.983	1.002
0.72	1.531	1.546	1.010	1.23	1.976	1.979	1.002
0.75	1.744	1.757	1.007	1.26	1.965	1.967	1.001
0.78	1.917	1.927	1.005	1.29	1.948	1.949	1.001
0.81	2.042	2.049	1.003	1.32	1.927	1.928	1.001
0.84	2.118	2.123	1.002	1.35	1.904	1.903	0.999
0.87	2.152	2.155	1.001	1.38	1.875	1.074	0.999

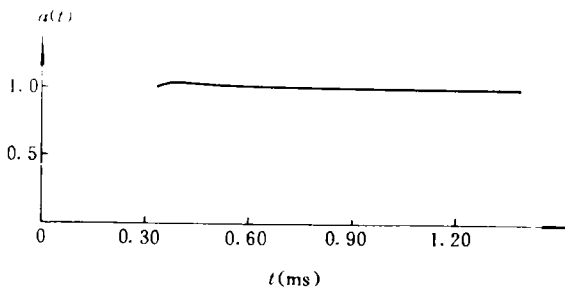


图 6 DY1 和 YTI 型传感器匹配系数曲线

Fig. 6 Curve of dynamic matching coefficient for DY1 and DY2 gauge

分析上面图表，可得到以下看法：

(1) 由于两种型号传感器都接近绝对刚性，所以其计算结果基本一致。

(2) 刚壁表面有与无传感器时，反射压力波 $P(t)$ 和 $P_o(t)$ 基本上是一样的。这是因为传感器与刚壁都可近似认为绝对刚性，传感器的存在对反射波已基本没有影响。

(3) 传感器反射压力波 $P(t)$ 和 $P_o(t)$ 都变为平滑了的近似锯齿三角波，其升压时间增长到约 0.5ms，且叠加上一个振幅很小、周期为约 0.33ms 的振荡。这个小振荡可能是入射波激励刚壁及传感器体系产生的。

(4) 有限元法计算得出两种传感器的反射系数约为 2.15，而按波动理论式(3)计算得出的反射系数为 1.89，前者偏大 13%。这可能是计算模型底面反射波传播到结构表面后，

与被测一次反射波叠加所致。前文给出压力波不经覆盖介质直接作用在刚壁上的反射系数为 2, 这 3 种反射系数相差不大。

(5) 动匹配系数 $\alpha(t)$ 线是一条较直的水平线, 只是在反射压力波刚起跳时 $\alpha(t)$ 达到其最大值, 后缓慢下降到 1 并保持不变。最大值偏离 1 的误差小于 +5%。由于反射压力波 $P(t)$ 和 $P_0(t)$ 都同样受计算模型底面反射波的影响, 所以利用式(2) 计算 $\alpha(t)$ 时, 能抵消该种影响得出较为真实的 $\alpha(t)$ 。

4 结论

在升压时间为 0.3ms 锯齿三角波荷载作用下, 动、静匹配系数基本一致, 都近似等于 1。这说明刚壁表面刚性压力传感器动态测量, 一般可按静匹配理论处理, 可不考虑动态条件的影响。

参 考 文 献

- 1 曾辉: 传感器与岩土介质相互作用研究综述. 防护工程, 1990; (2): 30—37
- 2 俞儒一等: 土压力传感器动力匹配问题初探. 岩土工程学报, 1988; (6): 38—47
- 3 曾辉: 压电式岩体动应力传感器. 岩土工程学报, 1990; (4): 53—51
- 4 李欢秋, 曾辉, 余尚江: 膜片结构表面式压力传感器匹配问题理论研究. 防护工程, 1993; (4): 48—60
- 5 王礼立: 应力波基础. 北京: 国防工业出版社, 1985;

ON DYNAMIC MATCH OF RIGID PRESSURE GAUGE MOUNTED ON THE SURFACE BETWEEN STRUCTURE AND GEOMATERIAL BY FEM

Zeng Hui Li Huanqiu

(The 3rd Science and Technology Institute, Corps, General Staff, PLA, Lou Yang 471023)

Abstract The dynamic matching problems have been studied for the rigid pressure gauge mounted on the surface between structure and geomaterial by finite element method. Under dynamic Loading with the rising time of pressure more than 0.3ms, the dynamic matching tolerance is the same as the static one for the rigid pressure gauge on the structural surface, that is, the error is equal to zero approximately and the matching influence may be ignored in the measurement.

Key words pressure gauge, structure surface, dynamic match