

应变计组的因果关系模型有效性判断算法研究

朱赵辉^{1,2,3}, 包腾飞^{1,3}, 汪亚超^{1,3}, 顾冲时^{1,3}

(1. 河海大学 水电学院 江苏南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院 工程安全监测中心, 北京 100044; 3. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏南京 210098)

摘要:根据第一应变不变量原理,分析了应变计组观测值的应变平衡原理,对部分损坏的应变计组的应变换算进行了探讨,并通过对应变计组不同状态的应力计算进行了验证,研究并总结了判定应变计组有效性的方法,编制了基于因果关系模型的应变计组有效性判断、应变换算和应力计算集一体的程序。

关键词:大坝;安全监测;应变计组;应变平衡;因果关系

中图分类号:TV698.1 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)05-0100-05

Validity Judgment Computation of a Causal Relation Model of Strain-gauge Arrays

ZHU Zhao-hui^{1,2,3}, BAO Teng-fei^{1,3}, WANG Ya-chao^{1,3}, GU Chong-shi^{1,3}

(1. College of Water and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Engineering Safety Monitoring Center, Beijing 100044, P. R. China; 3. National Engineering Research Centre of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: The balance principle of the strain-gauge arrays observation is analyzed in detail according to the first invariant of the stress. A partly damaged strain-gauge arrays' strain conversion is discussed. The stress computation through the strain gauge arrays under different condition is confirmed. A method for determining the validity of the strain-gauge arrays is studied and summarized. A collection procedure containing the strain-gauge arrays' validity judgment, strain conversion, and stress computation is established based on the causal relation model.

Key words: dam; safety monitoring; strain-gauge arrays; strain balance; causal relation

应力应变观测是混凝土坝内部观测的主要项目,在一座大坝内通常埋设几十到上百个应变计(组),应变计组是由多支应变计按照一定规则埋设在坝体内部的一组仪器,该埋设点的应力可由该组应变计与附近的无应力计读数计算而得,进而了解坝体内部应力状况^{[1],[2]}。然而,应变计组内某支或多支仪器可能出现故障,而应力应变观测属于内部观测,无法进行维修与更换,从而使应变计组无法进行应变平衡,很多情况下,监测单位都将整个应变计组做报废处理。事实上有些情况仍可以进行应力计算,但并没有相关文献明确指出对部分损坏的应变计组如何进行合理调整,使其计算的应力较为可信。

通常很多事情都可以用原因(cause)和结果

(effect)来解释。如工程领域将荷载作为原因,应力应变作为结果;医疗诊断领域将疾病视为原因,症状视为结果;物理系统将元件状态视为原因,故障输出作为结果等等。在本问题中,可以将应变计组单支应变计状态作为原因,应变计组最终状态作为结果来实现对应变计组状态的判定。

本文将对部分损坏的应变计组计算方法进行探讨,分析应变计组有效性判断条件,将因果关系模型应用于对应变计组状态的判定,编制了相应程序,分别计算某点应变计(组)状态良好和部分损坏的应力状态,通过比较几种典型的应变计组损坏状态的应力计算结果,并验证了因果关系模型在本例中的适用性。

* 收稿日期:2008-03-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50539030);国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539110)。

作者简介:朱赵辉(1981-),男,满族,工程师,博士研究生,主要从事水工结构工程和大坝安全监控研究,(E-mail)zzhtbb@163.com。

1 应变计(组)工作原理及应力计算方法

目前在大坝中普遍埋设的应变计(组)有单支应变计、三向应变计组、四向应变计组(平面)、五向应变计组、七向应变计组、九向应变计组,各自的安装组合示意图如图 1 所示(单支和四向从略),三向应变计组由三支互相垂直的应变计组成,用于观测主应力方向明确的部位,五向应变计组是由两个三向应变计组组成,

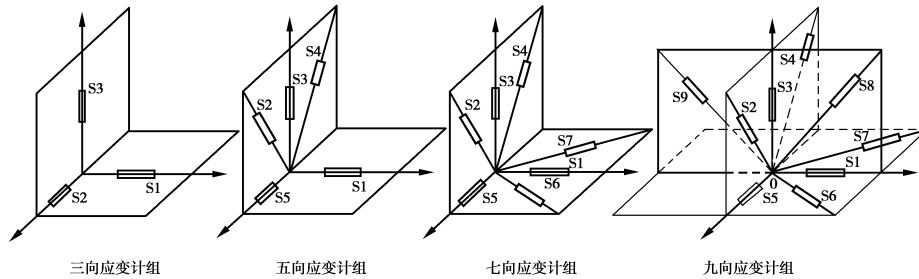


图 1 应变计组安装示意图

1.1 应变计组平衡算法分析

由于混凝土会产生自身体积变形,这部分应变不是由坝体应力引起的,因此需要从应变计组的应变中扣除应变计组对应的无应力计的应变。

$$\epsilon = \epsilon_m - \epsilon_0 \tag{1}$$

式中: ϵ 是外力和内力引起的应变, ϵ_0 是由非应力因素引起的应变, ϵ_m 是应变计实测的总应变。

由于应变计的测量误差比较大,因此在计算应力之前需要进行应变平衡来尽量减小应力值的失真。应变计组的各向应变计测值应服从第一应变不变量的原理,即:

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yz} + \epsilon_{zx} \tag{2}$$

式中: $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 分别为 x, y, z 坐标方向的正应变, ϵ_{xy} 为和 x, y 坐标轴成 45° 角方向的正应变, ϵ_{yz} 为和 y, z 坐标轴成 45° 角方向的正应变, ϵ_{zx} 为和 z, x 坐标轴成 45° 角方向的正应变。

对于七向应变计组,结合图 1,有下式成立:

$$\epsilon_{S1} + \epsilon_{S3} + \epsilon_{S5} = \epsilon_{S1} + \epsilon_{S2} + \epsilon_{S4} = \epsilon_{S3} + \epsilon_{S6} + \epsilon_{S7} \tag{3}$$

式中: $\epsilon_{S1}, \dots, \epsilon_{S7}$ 分别为七向应变计组扣除非应力因素变形后的应变。

下面进行平衡计算,首先化成两个平面组考虑,计算不平衡值 Δ_{11} 和 Δ_{12} :

$$\begin{aligned} (\epsilon_{S3} + \epsilon_{S5}) - (\epsilon_{S2} + \epsilon_{S4}) &= \Delta_{11} \\ (\epsilon_{S1} + \epsilon_{S5}) - (\epsilon_{S6} + \epsilon_{S7}) &= \Delta_{12} \end{aligned} \tag{4}$$

七向应变计组由两个五向应变计组(或三个三向应变计组)组合而成,九向应变计组由三个五向应变计组(或四个三向应变计组)组成,由此可见,三向应变计组是基本单位,根据不同工程特点和监测需要,应变计组的安装结构有所不同,但其原理都是一样的。不失一般性,下面以七向应变计组为例进行分析介绍,其他应变计组计算方法依此类推。

再求两个平面组的平均不平衡量 Δ :

$$\Delta = \frac{\Delta_{11} + \Delta_{12}}{2} \tag{5}$$

各支仪器的配值为:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{S1} = \Delta\epsilon_{S3} = \Delta\epsilon_{S5} &= -\frac{\Delta}{4} \\ \Delta\epsilon_{S2} = \Delta\epsilon_{S4} &= \frac{\Delta_{11}}{2} - \frac{\Delta}{4} \\ \Delta\epsilon_{S6} = \Delta\epsilon_{S7} &= \frac{\Delta_{12}}{2} - \frac{\Delta}{4} \end{aligned} \tag{6}$$

经过平衡处理后即可进行应力计算,相关文献^[3-5]已经做了较为深入的研究,鉴于篇幅原因,此处不再赘述。

1.2 部分损坏应变计组算法分析

如果因为损坏个别仪器而将整个应变计组报废是不科学的,对仪器也是一种浪费,为了最大程度的应用现有仪器了解大坝工作性态,在某些情况下,即使一个应变计组有部分应变计损坏,也可以计算应力以供工作人员参考。下面介绍应变计组部分损坏的计算方法,其原理同样应用第一应变不变量原理。对于一个多向应变计组,仪器损坏情况有多种可能,如某一支应变计损坏,两支或多支同一平面上的应变计损坏,两支或多支不同平面上的应变计损坏,两支或三支主应力方向上的应变计损坏等等,表 1 列出了部分可能损坏情况及其计算方法。

表1 七向应变计组部分应变计损坏情况分析

应变计损坏情况	应变计组应力状态	计算方法
S1 或 S6 或 S7	可以计算空间应力	竖直面可以进行应变平衡,水平面可以由第一应变不变量原理计算损坏的应变值
S5	可以计算空间应力	不能进行应变平衡,可由任一平面其它应变值根据第一应变不变量原理计算损坏的应变值
S2 和 S4 或 S6 和 S7	可以计算空间应力	按五向应变计组计算方法进行计算
S2 和 S6	可以计算空间应力	不能进行应变平衡,可以由其它应变值根据第一应变不变量原理计算损坏的应变值
S1 和 S6 或 S1 和 S7	可以计算平面应力	按四向应变计组计算方法进行计算
S1 和 S3	可以计算空间应力	不能进行应变平衡,可以由其它应变值根据第一应变不变量原理计算损坏的应变值
S2 和 S3 和 S4	可以计算平面应力	按四向应变计组计算方法进行计算
S2 和 S3 和 S5	可以计算平面应力	不能进行应变平衡,可以由其它应变值根据第一应变不变量原理计算 S5 的应变值,
S2 和 S5 和 S6	应变计组损坏	无法计算

假设 S4 损坏,则水平面可以进行类似于五向应变计组的应变平衡,见式(7),由竖直面的另外三支应变计计算出 S4 的应变值,见式(8)。

$$\begin{aligned} \epsilon_{S1}' &= \epsilon_{S1} - \frac{\Delta_{12}}{4}, \epsilon_{S5}' = \epsilon_{S5} - \frac{\Delta_{12}}{4}, \\ \epsilon_{S6}' &= \epsilon_{S6} + \frac{\Delta_{12}}{4}, \epsilon_{S7}' = \epsilon_{S7} + \frac{\Delta_{12}}{4} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\epsilon_{S4} = \epsilon_{S3} + \epsilon_{S5} - \epsilon_{S2} \quad (8)$$

对于式(7)和式(8)的计算先后顺序问题,有3种计算方法,一种是首先对水平面四支应变计进行应变平衡,平衡后再由式(8)计算 ϵ_{S4} ;第2种是先由式(8)计算 ϵ_{S4} ,然后再对水平面四支应变计进行应变平衡;第3种是在第一种算法得到 ϵ_{S4} 后再进行整体的应变平衡或在第2种算法得到 ϵ_{S4} 后再进行整体应变平衡。前两种算法对于计算水平面几支应变计的应力没有影响,但由于对水平面进行平衡后, ϵ_{S5} 会改变,导致平衡前后计算所得的 ϵ_{S4} 也不一样,因此,对竖直面的几支应变计的应力结果有影响,笔者认为由于 S4 已经损坏,S4 和 S2 的应力结果只能用于参考,因此前两种算法基本一致,但第一种算法从理论上优于第2种算法。应变平衡的目的是对测得的应变值进行误差处理,由于竖直面的应变计 S4 本身已经损坏,如果将其测值用于平衡其它应变计,将会导致应力结果失真,因此第3种算法是错误的。

假设应变计 S4 和 S6 同时损坏,则无法进行应变平衡,但可以由式(8)和式(9)计算出 ϵ_{S4} 和 ϵ_{S6} ,然后直接进行应力计算。

$$\epsilon_{S6} = \epsilon_{S1} + \epsilon_{S5} - \epsilon_{S7} \quad (9)$$

对于任意两支主应力方向应变计损坏的情况,从理论上也可以进行应用第一应变不变量原理推算出损坏的两支应变计的应变值,但需要先推导出一个值,再由推导出的值结合其它应变计得到另外一个损坏的应

变计的参考值,由于这种二次推导是建立在第一次推导的基础上的,第2次得到的参考值已经不可信赖,因此,没有实际意义,这种情况下我们认为该组应变计报废。

2 因果关系模型构建

因果关系推理主要解决两个问题^[6]:一是对行为进行推理,预测其结果;二是找出给定事实的真正原因。按照因果分析的目的,因果分析模型分为如下几类:(1)因果预测:给定事实库,调用规则库中的相关规则,根据因果关系进行预测;(2)因果解释:给定一个问题目标,调用符合作用域的因果默认规则库,给问题目标以准确的回答,组成一条因果链;(3)因果诊断:有时前提满足却得到了一个与期望相反的结论,根据规则,这是由事件前提与事实库中事实发生冲突而产生的,因果诊断通常与因果解释共同发挥作用,它们都是反向推理模型。

对于应变计(组)状态判断系统,建立因果预测模型。因果关系是一个四元组 $R(C, E, S, L)$,其中: C 是原因; E 是结果; S 是激活条件; L 是作用域。这个四元组的含义是只要满足原因为真,激活条件不为假,这个情形在作用域内,则就可以由原因 C 推理出结果 E 。从原因到结果的映射可以用规则方法表示为:

$$\delta = \alpha : \beta / \gamma \quad (10)$$

式中: α 为前提, β 为判据, γ 为结论

那么因果关系的映射规则可以表示为:

$$R = C : S / E \quad (11)$$

可以解释为:如果 C 成立,激活条件 S 不假,则 E 成立。对于作用域 L 可以认为是这条规则成立的作用域。应变计组状态判定因果关系属于多原因对应多结果的情形,我们可以对公式(11)作如下变换:

$$R = c_1 \wedge \dots \wedge c_m : s_1 \wedge \dots \wedge c_n / e_1 \wedge \dots \wedge e_u \in \varphi_L \quad (12)$$

算法如下:首先根据找到作用域 L 对应的入口,得到可用的默认规则库,然后根据当前事实寻找所有默认规则 $R=c_1 \wedge \dots \wedge c_m : s_1 \wedge \dots \wedge c_n / e_1 \wedge \dots \wedge e_u$,使得前提 c_1, \dots, c_m 被事实库中的事实所匹配,对于每一条规则 R ,检查它的判据 s_1, \dots, s_n 是否与事实库中的一致,如果一致,则得到返回值 e_1, \dots, e_u ,如果不一致则推理结束。

3 实例分析

结合某大坝应变计组观测资料进行应力计算,七向应变计组的安装方法如图 1 所示。为了验证第二节假设的情况,鉴于篇幅所限,分三种不同的损坏状况进行计算,分别是完好、S4 损坏、S4 和 S6 同时损坏,并只对 S1、S4 和 S6 三支具代表性的应力结果进行比较分析。其计算流程如图 2 所示,经过因果关系模型判断后,上述三种状况均可以进行应力计算,应用式 1 扣

除无应力计测值,然后根据因果关系模型判断应变计组状态,如果状态完好,则应用式(4)~式(6)进行应变平衡计算;如果部分损坏,则根据损坏情况和式(7)~式(9)进行应变换算最后进行应力计算和结果输出。如果已经报废,则直接结束程序。其计算结果如图 3~图 6 所示。

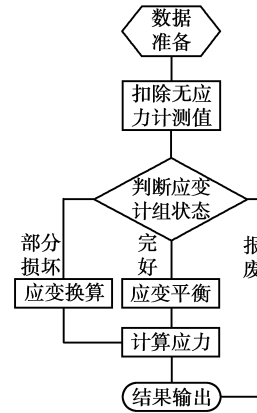


图 2 应变计组计算流程

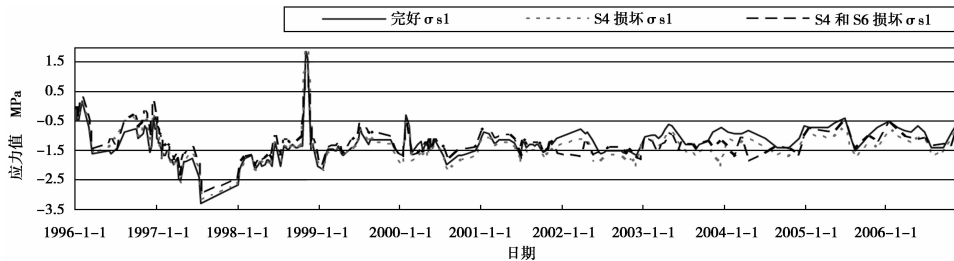


图 3 三种状态下 S1 应力计算结果

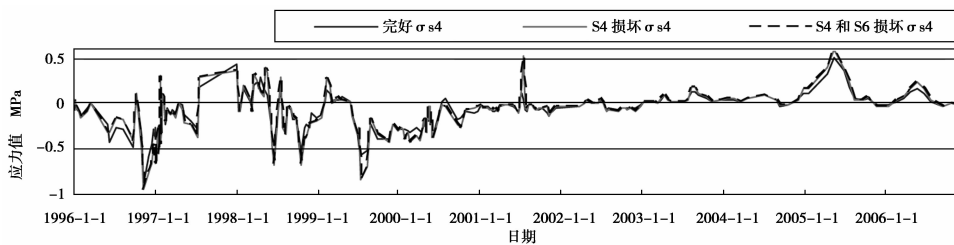


图 4 三种状态下 S4 应力计算结果

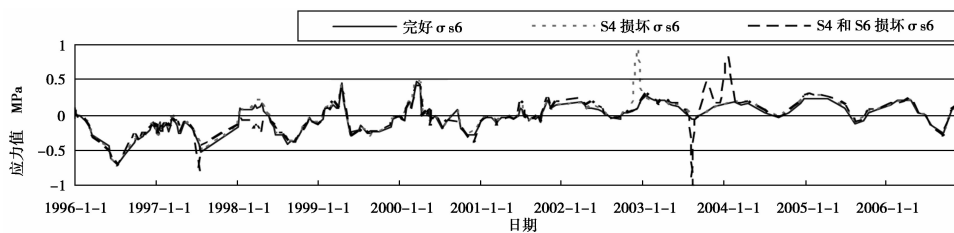


图 5 三种状态下 S6 应力计算结果

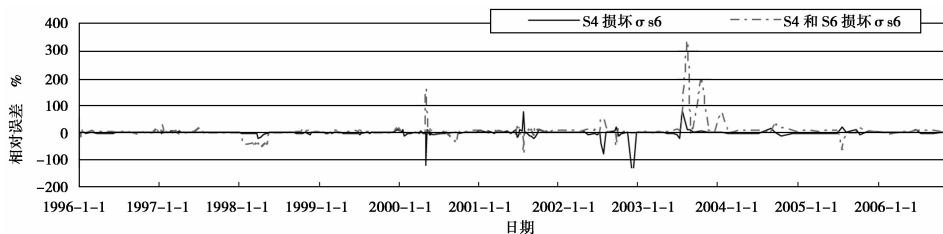


图6 损坏状态相对于完好状态的误差(S6)

由图3~图6可知:(1)该应变计组在三种不同状态下的应力计算结果趋势大体一致,即使在两支应变计同时损坏的情况下,也能够反映出大坝应力状态^①;(2)S4和S6同时损坏的状态下的应力计算结果比S4一支应变计损坏的状态下的应力计算结果偏离比较大,说明应变计损坏的越多,计算结果误差越大;(3)应变计S1的应力计算结果明显比另外两支应变计应力大,由图1可知,S1的埋设方向为大坝的主应力方向,这证实了当初埋设仪器时的假设;(4)图6列出了两种损坏状态下相对与完好状态的应变计S6应力计算结果的相对误差,除个别时段相对误差较大外(原因前面已给出),其它时段的相对误差基本在15%以内。

4 结语

本文基于第一应变不变量原理分析了应变计组部分应变计损坏状态下的应变补偿方法,总结了应变计组失效判断条件,在此分析基础上将因果关系模型应用于应变计组状态判定,将此条件作为因果关系模型判据,每支应变计的状态作为输入,应变计组的状态作为输出,来判定应变计组状态,最后结合实例分析判断的有效性,结论证明,经过因果关系模型判断为部分损坏的应变计组,其应力计算结果与状态完好的计算结果趋势性基本一致,能够在一定程度上反映该部位的应力状态,可以为分析人员提供参考。

参考文献:

- [1] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] 李静, 殷建军, 王卫锋, 等. 广州广清卫生河大桥施工监控中的应力监测[J]. 重庆大学学报, 2006, 28(4): 68-71.
LI Jing, YIN Jian-jun, WANG Wei-feng, et al. Stress measuring during the construction monitoring of weisheng river bridge in guangzhou [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(4): 68-71.
- [3] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 彭海波, 卢文富, 梁波. 混凝土应力应变观测的探讨[J]. 水利水文自动化, 2005, (1): 36-39.
PENG Hai-bo, LU Wen-fu, LIANG Bo. Discussion on stress and strain observation for concrete dams [J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2005, (1): 36-39.
- [5] 顾冲时, 吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.
- [6] 林海, 孙吉贵. 因果知识的表示和推理[J]. 计算机科学, 2004, 31(5): 123-126.
LIN Hai, SUN Ji-Gui. The representation and reasoning of causal knowledge [J]. Computer Science, 2004, 31(5): 123-126.

(编辑 陈 蓉)

^① 图中也出现了部分时间段的应力计算结果趋势不一致的现象,分析其主要原因是由于应变计组中完好的应变计在该时段状态不稳定或受到干扰,再加上部分应变计损坏后无法进行应变平衡,从而导致应力计算结果相差较大。