SHULLI XUEBAO

文章编号:0559-9350(2005)08-0961-05

考虑渗流和应力相互作用下高坝坝基参数的相关性

张贵金¹.徐卫亚²

(1. 长沙理工大学 河海工程学院,湖南 长沙 410076;2. 河海大学 岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:高坝坝基处在渗流应力耦合作用的水文地质工程地质环境,涉及的物理力学参数及水力学参数之间存在着 显著的多重相关性,本文引入偏相关系数度量这种相关关系,综合考虑河床典型基岩的力学参数、水力学参数及其 荷载效应。作为算例,对水布垭工程典型坝段基岩的水力力学参数的相关性进行了研究。计算得到这些参数之间 的简单相关关系和偏相关关系,结果表明偏相关系数能很好的解释各类参数间相互关系的物理意义。特别是在对 高坝坝基进行参数敏感性分析和可靠度风险研究时,考虑这种相关性才是完整合理的。

文献标识码:A

关键词:坝基;力学参数;多重相关性;偏相关系数

中图分类号:TV223

1 问题提出

在内、外荷载下,固体(应力)变形与流体压力(流动)交互作用的研究,已成为分析土木工程和环境 工程设计、运行和安全的重要内容。水电工程、石油开采、采矿工程等领域的大型工程中,往往需要考虑 渗流场和应力场之间的相互作用^[1]。受岩土工程本身及其与上部结构的交互作用,使得高坝坝基处于 多场耦合作用的水文地质环境,一般包括应力场、渗流场和温度场等。文献[2,3]考虑渗透水压力(即渗 流体积力)进行的等效连续岩体渗流场与应力场的耦合研究表明,考虑耦合作用时,各应力分量不同程 度地增大,由于耦合作用使各应力分量增大 10%~20%,说明不考虑耦合作用得出的应力结果偏于不 安全,特别是当水力坡度较大时必须考虑渗流体积力的影响。目前,对岩土工程耦合场的机理研究还不 成熟。国外的研究重点集中在核废料地下埋藏的安全问题,文献[4]建立了地下水流方程的随机公式, 但未考虑耦合作用。对裂隙岩体渗流应力耦合机理的研究及渗流应力耦合模型的建立,国内外许多学 者^[5,6]做了大量工作,并将研究成果应用于多个大型水电工程,提出水工建筑物设计应进行坝基的耦合 分析以确保工程安全,但未涉及随机影响。

岩土工程应用可靠度理论进行概率极限状态设计已成为研究的热点。在极限状态设计中,变量的 概型选取、分布参数及变量间的相关性对计算结果均有直接影响,是否考虑变量间的相关性,可靠度计 算结果将是不同的,研究表明,参数间的相关性对结构的可靠度(风险)有着明显的影响,特别是在高度 正相关或高度负相关时。严春风^[7]系统研究岩土强度参数 c、 的相关性对岩土破坏准则的影响时发 现,其相关性对风险的影响是双向的,在不同的应力状态下对强度可能有利可能不利,特别是在 c、 的 变异接近时,这种影响会产生突变。在地基承载力可靠度分析中,岩土剪切强度参数之间的相关性对可 靠度分析结果影响很大^[8];土体工程可靠度分析和计算中,极限状态方程的各变量不计入相关性,则计 算结果偏于保守,文献[9]经研究表明,c、 呈正相关时,可靠度随相关系数的增大而减小,当 c、 呈负 相关时,可靠指标随相关系数的绝对值增大而增大。这在实际应用中应采取措施避免发生。

收稿日期:2004-11-05

- 961 -

基金项目:湖北省"十五"科技攻关项目(2002507430);教育部科学技术研究重点项目(01099)

作者简介:张贵金(1964-),男,湖南慈利人,工学博士,副教授,从事岩土工程、水电工程风险研究。E-mail:gizhang98 @yahoo.com.cn

本文研究高坝坝基耦合环境下物理力学参数及水力学参数之间的相关性,并应用于水布垭工程,计算说明该相关性可以得到量化。

2 高坝坝基渗流和应力相互作用下的参数相关性及其度量方法

2.1 参数相关性及其影响 实际坝基中,其物理力学参数、水力学参数之间存在一定的相关性,特别是 高坝坝基部位尤为显著,存在更复杂的多重相关性。比如,在岩溶坝区,岩溶含水介质的渗透性一般与 岩溶化岩体溶隙的宽度、密度、充填程度、发育方向、岩性、地下水、水头、岩层走向等因素有关,而这些因 素是相互影响、互为因果的,即这些因素组成的自变量与渗透特性这个因变量的相互作用是与各个自变 量之间的相互作用同时混合的。这些因素的描述参数之间势必存在着多重相关性。由于这些参数变量 中重叠信息的交叉影响,使得同一因素对因变量的解释效应要在几个变量中分摊,而这些变量中又包含 其他方面的因素。

如何度量这种具有多重相关性的各类参数的相关性,且能较好解决小样本的客观情况,成为一个非常值得研究的问题。王惠文^[10]给出了多重相关性的诊断方法,研究表确,回归系数的估计方差随着自变量之间的相关程度的不断增强而迅速扩大,必然使得回归系数的置信区间不断扩大,从而使回归系数估计值的精确度逐渐降低,回归方程的使用价值也随之不断降低。当两个自变量的关系密切相关时,它们的回归系数很容易出现不同符号或近似于零的现象,使得物理意义无法解释。这在岩土工程使用的响应面函数法(或趋势面法)等方法中确定荷载效应的数学模型时应引起注意。

简单相关关系只遗于度量变量两两之间的关系,没有考虑其他变量对这两个变量的影响,而偏相关系数则可以更准确、真实地反映变量之间的相关关系。本文基于偏最小二乘回归理论,引入偏相关系数,辨识和度量岩土体的各物理力学参数之间的关系。偏最小二乘回归采取的是一种循环式的信息分解与提取方法。它在自变量集合中逐次提取成分 *t*₁,*t*₂,...,*t_m*,他们对因变量 *y*的解释能力最强,又最能概括自变量 *x* 中的信息^[10]。且对于样本少(甚至少于变量个数),普通多元回归不能解决的情形,采用偏最小二乘回归方法可得到较好解决。

2.2 多重相关性的偏相关系数度量方法 基本方法是,因变量 y 和自变量 $x_1, x_2, ..., x_p$ 在去除掉 $x_2, x_3, ..., x_p$ 的影响之后,再考虑 y 与 x_1 的相关程度。如有 n 个样本,考虑回归模型为

 $y_i = c_0 + c_2 x_{i2} + ... + c_p x_{ip} + ... ; \quad x_{i1} = d_0 + d_2 x_{i2} + ... + d_p x_{ip} + ... i = 1, 2, ..., n$ (1) 利用最小二乘法可求得这两个总体模型的拟合模型,分别求出它们的残差为

 $u_i = y_i - (c_0 + c_2 x_{i2} + ... + c_p x_{ip});$ $v_i = x_{i1} - (d_0 + d_2 x_{i2} + ... + d_p x_{ip})$ i = 1, 2, ..., n (2) 这两个残差向量 $u = (u_1, u_2, ..., u_n), v = (v_1, v_2, ..., v_n)$ 的简单相关关系,即为 $r_{y_{12}...p}$,称为 $y = x_1$ 的偏相关关系。

若只有两个自变量 x1、x2 的情形,两个模型的常数项均为零(设 y、x1、x2 均为中心化变量)则

$$\operatorname{Var}(u) = \prod_{i=1}^{n} u_{i}^{2} = \prod_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{c}_{2} x_{i2})^{2}$$
$$= \prod_{i=1}^{n} y_{i}^{2} - \hat{c}_{2}^{2} \prod_{i=1}^{n} x_{i2}^{2} = \prod_{i=1}^{n} y_{i}^{2} - \left[\frac{y_{i}^{2}}{\sum_{i=1}^{n} x_{i2}^{2}} \right] \prod_{i=1}^{n} x_{i2}^{2} = \prod_{i=1}^{n} y_{i}^{2} (1 - r_{y2}^{2})$$
(3)

同理

$$\operatorname{Var}(v) = \prod_{i=1}^{n} x_{i1}^{2} \left(1 - r_{12}^{2}\right)$$
(4)

$$\operatorname{Cov}(u, v) = \bigvee_{i=1}^{n} \frac{y_i^2}{y_i^2} x_{i1}^2 (r_{y1} - r_{y2} r_{12})$$
(5)

— 962 —

$$r_{y12} = r(u, v) = \frac{\text{Cov}(u, v)}{\sqrt{\text{Var}(u)} \cdot \text{Var}(v)} = \frac{r_{v1} - r_{v2} r_{12}}{\sqrt{(1 - r_{y2}^2)(1 - r_{12}^2)}}$$
(6)

设有 *m* 个随机变量 *x*₁,*x*₂,...,*x_m*,*x_i* 与 *x_j* 的偏相关系数记为 *r_{ij}*,则有

$$r_{ij} = \frac{-r^{ij}}{\sqrt{r}}; \qquad (7)$$

式中: r^{i} 是简单相关系数矩阵 R 的逆矩阵 R⁻¹中(i,j)位置上的元素。

3 算例

水布垭水电枢纽工程最大坝高 233 m,根据水布垭工程坝基典型岩体的力学特性(水利部长江委员 会《湖北清江水布垭水利枢纽可行性研究第十五篇科学试验研究》)和水力学参数。选择水布垭河床坝 段的典型断面进行二维有限元结构计算和有限元渗流计算。然后对这些计算参数和结果样本进行分 析,研究其相关关系^[11]。结构计算采用 *Flac3D* 商业软件进行非线性有限元计算。计算模型网格图如 图 1、图 2。对同一几何模型采用自编渗流有限元程序进行渗流计算。





图 1 水布坝基河床段典型剖面有限元网格

图 2 河床帷幕局部网格模型

首先基于水布垭初设报告提供的坝基力学参数和水力学参数样本,对每一组参数进行结构和渗流 计算,得到一组对应的荷载效应的结果样本,包括各单元的应力应变、水力梯度等。渗流应力计算参数 和计算结果见表1(仅列出帷幕顶端单元的结果)。从表1可看出,同一部位基岩随渗透系数的增大,水 力梯度呈正增大趋势。

帷幕单元	围岩渗透性变 异 x ₁ /(<i>cm/s</i>)	弹性模量 x ₂ /GPa	内聚力 x/MPa	摩擦角 _{x4} /(%	主应力(X方向) y ₁ /MPa	主应力(Y方向) y ₂ /MPa	主应力(Z方向) y ₃ /MPa	水力梯度 _{Z1}
	3.64 <i>E</i> - 4	30.90	8.86	63	- 4.28 <i>E</i> +04	- 4.71 <i>E</i> +05	-3.36 E + 06	6.56
623(帷幕	2.00 E - 4	47.50	7.00	58	- 6.69 <i>E</i> + 06	- 7.41 <i>E</i> + 06	- 2.88 $E + 07$	7.18
顶端单	5.00 E - 4	38.16	5.00	55	- 5.59 $E + 05$	- $1.07 E + 06$	-5.77 E + 06	11.63
元)样本	8.00 E - 4	26.64	3.00	50	4.92 $E + 05$	4.25 $E + 04$	- 1.46 $E + 06$	3.92
	1.00 E - 3	17.88	1.20	48	- 6.72 $E + 05$	- 9.09 $E + 05$	-5.75 E + 06	16.83
变异系数	1. 13 <i>E</i> + 00	6.99 <i>E</i> - 01	1.219185	2.21 E - 01	- $3.94 E + 00$	- 3. 13154 <i>E</i> + 00	- 2.48 <i>E</i> + 00	1.15

表1 计算参数及渗流应力计算结果

注:表中符号拉应力为正,压应力为负。

再将参与考察的所有变量数据作标准化处理,本文采取无量纲化处理。由于不同变量的测量单位 不同,要消除由于量纲不同带来的假变异,对所有变量的量值进行压缩处理,这里采用 X_{ij} = $X_{ij}/\max\left\{X_{ij}\right\}$ 的方法,其中 $\max\left\{X_{ij}\right\}$ 为同一系列数据中的最大值, X_{ij} 为该列数据中待进行无量纲化处 理的量值。结果列于表 2。

最后计算参数变量间的偏相关系数。变量间的协方差及偏相关系数计算结果见表 3、表 4。

视应力状况、水力梯度为荷载效应,可作如下分析。

简单相关关系反映出渗透系数 X_1 除与水力梯度 Z_1 强相关,基岩弹性模量 X_2 与三个方向主应力 Y_1, Y_2, Y_3 强相关,内聚力 X_3 及摩擦角 X_4 与荷载效应,包括主应力、水力梯度均呈弱相关,结果中的主

— 963 —

应力与水力梯度弱相关。这种解释显然不符合真实情形的物理意义。

表 2 参数标准化处理结果

X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y ₂	Y ₃	Z_1
4.55 E - 01	6.50 <i>E</i> - 01	1.00 E + 00	1.00 E + 00	- 6.00 <i>E</i> - 03	- 6.00 E - 02	- 1.27 E - 01	3.90 E - 01
2.50 E - 01	1.00 E + 00	7.90 <i>E</i> - 01	9.20 <i>E</i> - 01	- $1.00 E + 00$	- $1.00 E + 00$	- $1.00 E + 00$	4.27 E - 01
6.25 <i>E</i> - 01	8.03 <i>E</i> - 01	5.64 <i>E</i> - 01	8.70 <i>E</i> - 01	- 8.00 E - 02	- 1.40 <i>E</i> - 01	- 2.00 E - 01	6.90 <i>E</i> - 01
1.00 E + 00	5.60 <i>E</i> - 01	3.40 <i>E</i> - 01	7.90 <i>E</i> - 01	7.00 <i>E</i> - 02	6.00 <i>E</i> - 03	- 5.00 E - 02	2.30 E - 01
1.25 <i>E</i> - 02	3.76 <i>E</i> - 01	1.35 <i>E</i> - 01	7.60 <i>E</i> - 01	- 1.00 <i>E</i> - 01	- 1.20 E - 01	- 2.00 E - 01	1.00 E + 00
4.69 <i>E</i> - 01	6.78 <i>E</i> - 01	5.66 <i>E</i> - 01	8.68 <i>E</i> - 01	- 2.23 E - 01	- 2.63 <i>E</i> - 01	- 3.15 <i>E</i> - 01	5.47 E - 01
1.13 <i>E</i> - 01	4.50 <i>E</i> - 02	4.75 <i>E</i> - 01	3.79 <i>E</i> - 02	1.54 <i>E</i> - 01	1.38 E - 01	1.20 E - 01	7.30 <i>E</i> - 02

表 3 变量间的协方差矩阵

X ₁	X_2	X ₃	X_4	Y_1	Y ₂	Y ₃	Z_1
0.1120	0.0049	0.0042	- 0.0010	0.0577	0.0511	0.0510	- 0.06500
	0.0450	0.0430	0.0110	- 0.0620	- 0.0605	- 0.0555	- 0.02320
		0.4750	0.0266	- 0.0399	- 0.0399	- 0.0363	- 0.04380
			0.0379	- 0.0095	- 0.0095	- 0.0087	- 0.01020
				0.1540	0. 1461	0. 1363	0.00849
					0.1385	0.1290	0.01070
						0.1203	0.00744
				1250			0.07300

表4 水布垭坝基力学参数、渗流参数间的多重相关关系

X_1	X_2	X3	X 4	Yı	Y ₂	Y ₃	Zı	X_1	X2	X3	X_4	Y_1	Y ₂	Y ₃	Z_l	
1.00	0.07	0.02	- 0.02	0.44	0.41	0.44	- 0.72	1.00	0.81	- 0.27	- 0.71	- 0.26	0.65	- 0.54	- 0.91	
	1.00	0.29	0.27	- 0.75	- 0.77	- 0.75	- 0.41		1.00	0.22	0.81	0.42	- 0.78	0.64	0.67	
		1.00	0.20	- 0.15	- 0.16	- 0.15	- 0.24			1.00	- 0.38	0.06	0.03	- 0.02	- 0.26	
简单相关关系			1.00	- 0.12	- 0.04	- 0.13	- 0.20	偏			1.00	- 0.57	0.92	- 0.79	- 0.71	
				1.00	0.99	0.99	0.09	相				1.00	0.68	- 0.22	- 0.28	
					1.00	0.99	0.11	大系					1.00	0.85	0.65	
						1.00	0.08							1.00	- 0.58	
							1.00								1.00	

但从偏相关关系显示出,渗透系数与水力梯度强相关,还与弹性模量、摩擦角以及Y、Z方向(即垂 直河床方向和沿坝轴线方向)的主应力强相关,弹性模量除与应力强相关外,对水力梯度也有贡献,摩擦 角与主应力和水力梯度也呈强相关,Y、Z方向的主应力对水力梯度也有贡献。只有内聚力对荷载效应 呈弱相关。

显然,在岩溶高坝坝基的渗流应力耦合环境中,其力学参数与渗流参数以及荷载效应之间相互影响,存在的多重相关性,只有采用偏相关系数才具有较好的解释作用。当然,该相关系数在有限元不同 单元(即在坝基不同部位)是不同的,所以要对所有单元做这样的分析和计算工作量是很大的,一般可对 防渗帷幕的最危险部位进行偏相关系数的分析和计算,将结果应用于荷载效应、敏感性分析以及可靠度 风险分析中。

4 结语

高坝坝基处于多场耦合作用的工程地质水文地质环境,其各类参数变量之间受耦合作用存在着多 重相关性。对于这些变量之间的多重相关关系,本文提出用偏相关系数进行描述。工程实例表明,偏相 关系数能较好地解释参数间的物理关系。在对坝基,特别是高坝坝基进行参数敏感性分析和可靠度风

— 964 —

考 文 献:

- [1] 杨延毅,周维垣.裂隙岩体的渗流-损伤耦合分析模型及其工程应用[J].水利学报,1991,(5):18-27.
- [2] 柴军瑞.考虑渗透动水压力时等效连续岩体渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J].四川大学学报(工程 科学版),2001,33(6):13-17.
- [3] 柴军瑞.大坝及其周围地质体中渗流场与应力场耦合分析研究综述[J].水利水电科技进展,2002,(4):12-16.
- [4] Gomez-Hernandez J J, Hedricks Franssen H J, Cassiraga E F. Stochastic analysis of flow response in a three dimensional fractured rock mass block[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2001, 38:31 - 44.
- [5] Hendricks Franssen H J, Gomez Hernandez J J. 3D inverse modeling of groundwater flow at a fractured site using a stochastic continuum model with multiple statistical populations [J]. Statistic Environmental Research and Risk Assessment, 2002, 16:155 - 174.
- [6] 段小宁,李鉴初,刘继山.应力场与渗流场相互作用下裂隙岩体水流运动的数值模拟[J].重庆建筑大学学报, 1992,32(6):712 - 717.
- [7] 严春风,王桂林,冯劲,朱可善.基于 Mohr-Coulomb 抗鹩强度准则的岩体可靠度分析[J].大连理工大学学报, 1999,21(2):89 - 94.
- [8] 李楚雄,程晔. 广义随机空间内的地基承载力可靠度分析[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版),2004,17(2): 81 - 84.
- [9] 李猛,王复明,乐金朝.相关变量下边坡可靠度的蒙特卡罗模拟[J].河南科技,2004,22(1):76-79.
- [10] 王惠文.偏最小二乘回归方法及其应用[M].北京:国防出版社,1999.
- [11] 张贵金. 岩溶地区重大水电工程防渗帷幕的风险研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.

Correlations of related parameters of dam foundation in consideration of the interaction between seepage and stress

ZHANG Gui-jin¹, XU Wei-ya²

(1. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Multiple correlations exist among related mechanical parameters and hydraulic parameters of seepage. The partial correlative coefficient is introduced to measure these correlations and used to comprehensively describe the effects of mechanical parameters of foundation rock, hydraulic parameters and stress. The proposed method is applied to analyze the related parameters in the dam foundation of the Shuibuya Project. It is found that the partial correlative coefficient can be well used to explain the correlations among various parameters in the sense of physics. It is very important to the sensitivity analysis of parameters and reliability analysis on dam.

Key words: dam foundation; mechanical parameters; hydraulic parameters; interaction between seepage and stress ;multiple correlation ;partial correlative coefficient ;Shuibuya Project

(责任编辑:王冰伟)