

# 基于 ANSYS 的拱坝动力及可靠度分析

李原<sup>1</sup>, 杨玉田<sup>2</sup>

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国建设银行股份有限公司鞍山分行, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:** 为研究拱坝在地震荷载作用下可靠度指标的变化规律, 基于 ANSYS 对某一拱坝实例进行模态分析和抗震动力分析后, 使用二次响应面法计算拱坝在地震荷载作用下第 90 个计算步的各点可靠度指标, 分析得到在地震荷载作用下坝肩处作为抗拉薄弱部分更应重视, 拱坝上游坝面中部的可靠度指标变化规律复杂而非单纯降低。为拱坝动力设计及加固措施提供了理论支持。

**关键词:** 地振荷载; 拱坝; ANSYS 动力分析; 二次响应面法; 可靠度

**中图分类号:** TV642.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2015)02-0212-04

## Analysis of arch dam dynamic and reliability based on ANSYS

LI Yuan<sup>1</sup>, YANG Yutian<sup>2</sup>

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Anshan Branch of China Construction Bank Co., Ltd., Anshan 114000, China)

**Abstract:** In order to study the change rule of reliability index of arch dam under seismic load, after the analysis of mode state and seismic dynamic for of a typical arch dam example based on ANSYS, the paper used the quadratic response surface method to calculate reliability index of each point of arch dam of the 90th calculation step under the action of earthquake load. The result is that it should be paid more attention that dam shoulders being under the action of earthquake load is taken as a weak tensile part. The change rule of reliability index of the middle part of arch dam surface upstream is complex and not to simply reduce. The result can provide a theoretical support for dynamic design and reinforcement measure of arch dam.

**Key words:** seismic load; arch dam; ANSYS dynamic analysis; quadratic response surface method; reliability

拱坝是水利工程中十分常见的坝型, 其具有节省材料、超大承载能力、能充分利用材料强度等特点, 只要两岸坝肩岩体足够坚硬则拱坝的安全度较其他混凝土坝都高。拱坝结构对地震的反应很复杂, 一旦遭受地震灾害破坏, 将会引发严重的次生灾害。因此, 通过对拱坝进行基于有限元的动力结构分析, 研究拱坝结构在动力荷载下的动力特性及可靠度变化, 具有很强的实际作用和现实意义。

## 1 拱坝动力分析理论

### 1.1 拱坝结构动力分析特点

拱坝是复杂的空间壳体结构, 其应力分析复杂, 而在地震作用下的坝体动力分析更为复杂。21 世

纪初, 日本学者冈本顺三提出用地震系数(即地震加速度与重力加速度的比值)乘以大坝坝体质量得到坝体地震惯性力, 以此荷载作为静力荷载来计算拱坝结构响应, 这就是拱坝抗震设计的静力法<sup>[1]</sup>。后来其他学者们以动力理论为基础, 对各类拱坝进行分析, 在得到这些坝的动力反应后概括提出一个静力形式的地震荷载分布, 即将地震影响用一种折算的静载荷来表示, 称之为拟静力法。该方法比之静力法在一定程度上考虑了坝体动力反应的一些基本特征, 在相当长的时间内在世界各国得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。然而随着各国的水利水电事业的高速发展, 基于拟静力法的抗震设计已经越来越不能适应高拱坝抗震设计的需求。拱坝动力分析方法也随着

水工抗震学和计算机技术的快速进步而得到了迅速的发展。人们在基于结构力学方法的拱坝动力拱梁分载法和基于弹性力学方法的有限元基础上,在影响拱坝动力特性和地震动力响应的诸多因素的研究方面,陆续开发了很多方法用于描述地基岩体与坝体的动力相互作用、水库库水与坝体的动力相互作用以及坝体横缝强震开合的动力非线性行为等<sup>[3]</sup>。

## 1.2 二次响应面法

响应面法于 1985 年提出,随后各国学者以此为基础进行了大量研究<sup>[4]</sup>,国内也有许多学者进行了很多有益探讨<sup>[5-8]</sup>。其实质就是曲线(面)拟合,核心是如何根据输入、输出变量之间的关系分析确定响应面函数。早期的响应面函数通常选取变量的一次多项式,后随着计算手段发展,为了更准确拟合响应面法,更多地采用二次响应面法,其表达式为<sup>[9]</sup>:

$$g'(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (1)$$

通过提取一定数量的样本点并迭代计算来修整响应面函数,用以逼近目标函数,随后使用梯度优化法进行可靠度计算。相较于其它方法,二次响应面法因其目标函数模拟准确、计算耗时少、精度高而得到广泛使用。故本文通过使用大型有限元软件 ANSYS 并配合二次响应面法可以较好地对拱坝进行模态和抗震动力分析,并计算所需位置的可靠度指标。

## 2 工程实例及模型建立

### 2.1 工程概况

本文以某一混凝土双曲拱坝进行计算分析。拱坝最大坝高 313 m,坝顶宽 6.0 m,坝底厚 63.0 m。大坝为 I 等大(1)型工程。建基面最低高程 1 615 m,坝顶高程 1 928 m,正常蓄水位 1 920 m<sup>[10]</sup>。工程区位于区域地质构造相对稳定地段,坝址处无区域性断裂构造通过,参照《建筑抗震设计规范》及《中

国地震参数区划图》,抗震防烈度为 6 度。

## 2.2 模型建立

使用 ANSYS 建模,采用 solid45 单元,在坝底部施加 X、Y、Z 三向约束。坝基上、下游边界面施加 Y 向约束,坝基左、右侧边界面施加 X 向约束。计算工况为正常蓄水位 + 相应下游水位 + 自重。正常蓄水位为 305 m,相应下游水位为 62 m。坝体自重按坝体完成后一次施加,有限元模型见图 1<sup>[11-12]</sup>,随机变量统计量见表 1。

表 1 随机变量统计量

随机变量	随机变量统计量		
	均值	变异系数	分布类型
$E_1$ 坝体弹性模量/GPa	30	0.10	正态
$E_2$ 岩体弹性模量/GPa	15	0.10	正态
$\tan\varphi$ 岩体摩擦系数	0.48	0.25	正态
$c$ 粘聚力/MPa	0.70	0.25	正态
$H_1$ 上游水位/m	305	0.10	正态
$H_2$ 下游水位/m	62	0.10	正态
$R_t$ 坝体抗拉强度/MPa	2.50	0.20	正态

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 拱坝模态分析

ANSYS 软件中的模态分析是所有动力分析类型的最基础的内容,有助于在其他动力分析中估算、求解、控制参数,故在进行的其他的动力分析之前,都要进行结构的模态分析<sup>[13]</sup>。拱坝结构在顺水流方向上基本为对称结构,空间振动的耦联影响较小。所以,可以将拱坝结构简化为顺河流向进行抗震动力分析。通过 ANSYS 软件计算提取工况下拱坝各阶模态的振型图,对拱坝整体进行模态分析,提取拱坝第一、三、五阶振型图如图 2、3、4 所示<sup>[14]</sup>。

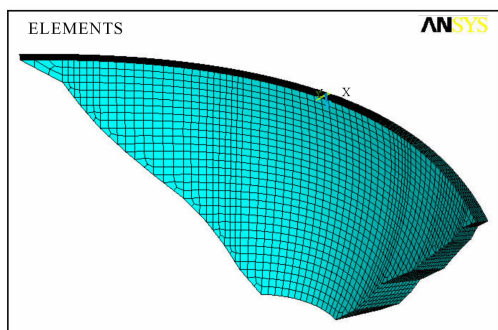


图 1 拱坝有限元模型

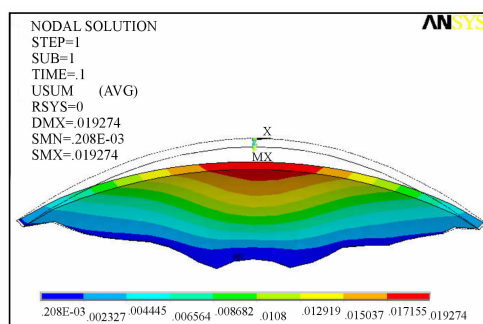


图 2 拱坝模型一阶振型图(应力单位:MPa)

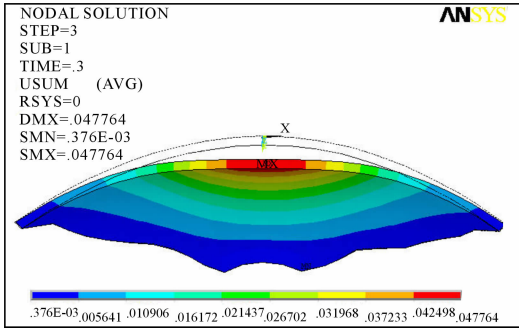


图3 拱坝模型三阶振型图(应力单位:MPa)

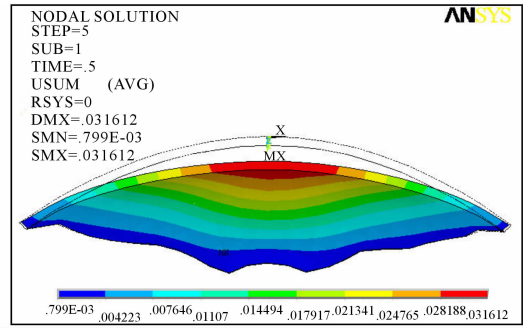


图4 拱坝模型五阶振型图(应力单位:MPa)

从以上振型图中可以看出,在顺流方向,拱坝因其刚度最小而振动较为明显,出现弯曲变形;在横河方向,拱坝因其刚度最大而振动较小。

### 3.2 拱坝抗震动力分析

3.2.1 施加地震波 采用时程分析法对拱坝进行抗震动力分析时需要直接输入地震波加速度时程曲线。由于地震的不可预知性,因此选择合理的地震波进行动力分析是确保计算结果可靠的重要因素。

本文选取某地震波的前 19 s 做为代表,输入时间间隔是 0.1 s,共有 190 个计算点,通过后期分析发现所选地震波的时间历程曲线的主要参数符合条件,能够比较真实地体现未来地震动力作用下的结构反应。

3.2.2 时程分析 在时程分析方法中,为了能够反映位移和应力的时程响应,需选取典型点来进行分析,通过节点的位移时程曲线为代表,分析地震波作用下拱坝受到的影响。如图 5 所示,点 1 为右岸坝肩处,点 2 为拱梁顶部中心处。

11 所示,通过对所选取的节点的位移时间历程曲线分析,可以得出坝体在 X 方向的最大位移发生在点 2 处,发生在 10 s,最大值为 5.1 mm;Y 方向最大位移发生在点 2 处,发生在 9 s,最大值为 46 mm;Z 方向最大位移发生在点 2 处,发生在 0.2 s,最大值为 17 mm。坝体位移以顺河向位移为主,最大位移出现在坝顶中部的点 2 处;在横河方向,坝体的最大位移同样出现在坝顶中部点 2 处,离边界越远的部分位移也越小;地震荷载下,拱坝位移情况出现与地震波相近的周期性,说明拱坝模型受地震荷载影响比较明显。

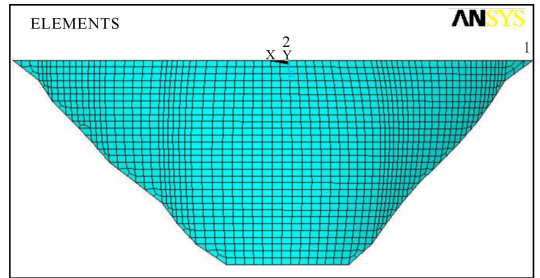


图5 拱坝上选取的计算点

点 1、2 在 X、Y、Z 三方向的位移时程曲线如图 6 ~

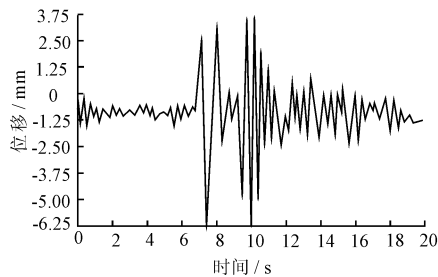


图6 点 1 在 X 方向的位移时程曲线

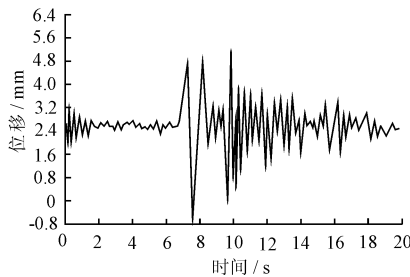


图7 点 2 在 X 方向的位移时程曲线

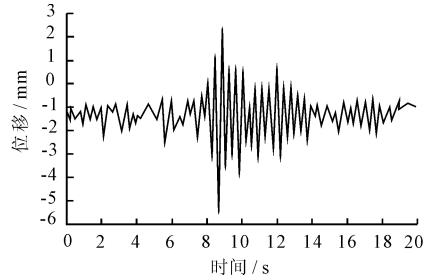


图8 点 1 在 Y 方向的位移时程曲线

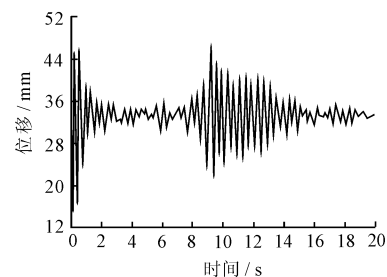


图9 点 2 在 Y 方向的位移时程曲线

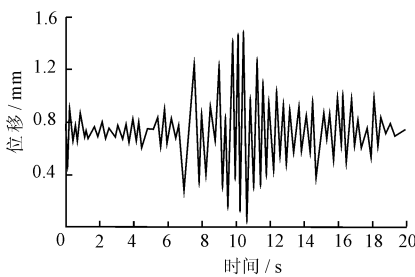


图10 点 1 在 Z 方向的位移时程曲线

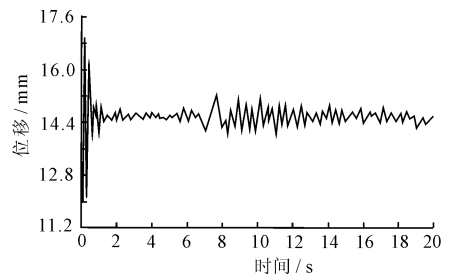


图11 点 2 在 Z 方向的位移时程曲线

点 1、2 的第一主应力时程曲线如下图 12 ~ 13 所示。通过对所选节点的第一主应力时程曲线分析,可以得出施加地震荷载后,点 1 处的第一主应力时程曲线在 7.55 MPa 附近处波动,最大值为 7.75 MPa,出现在 9 s;点 2 处的第一主应力时程曲线在

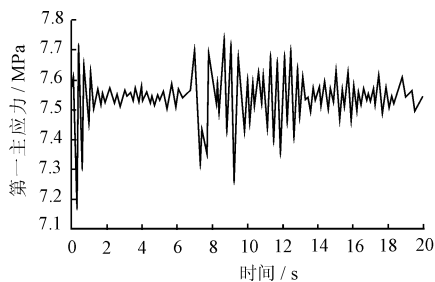


图 12 点 1 第一主应力时程曲线

0.45 MPa 附近处波动,最大值为 1.15 MPa,出现在 11 s。

从图中竖向坐标轴的数值变化可以看出,点 2 的时程曲线数值变化幅度较大,说明拱梁顶部中心处受地震荷载影响更为明显。

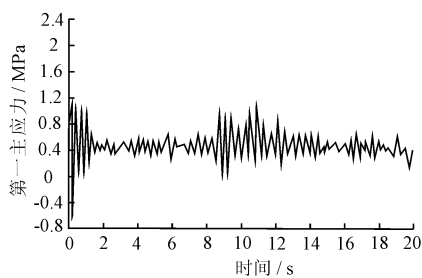


图 13 点 2 第一主应力时程曲线

3.2.3 可靠度计算 根据二次响应面法的算法,坝体混凝土可靠度极限状态方程为:

$$g'(x) = R - S \text{ 其中 } R = R(dR + eR)^2 \quad (2)$$

$$S = S \left[ a + \sum_{i=1}^6 b_i (E_1, E_2, \tan\varphi, c, H_1, H_2) + \sum_{i=1}^6 c_i (E_1^2, E_2^2, \tan\varphi^2, H_1^2, H_2^2) \right] \quad (3)$$

式中: $g'(x)$  为坝体结点拉应力,对应由非线性有限元计算得出的结点第一主应力。 $R$  为坝体混凝土的抗拉强度, $S$  为荷载效应,是关于随机变量 6 个材料参数的隐式函数。采用 Matlab 软件在随机变量  $(m - 2\sigma, m + 2\sigma)$  区间内随机取 15 组数据后,组成 15 阶的非齐次线性方程组,解出唯一解,得到拱坝坝体混凝土可靠度极限状态方程的显式表达式。对显式表达式通过编程,使用梯度优化法计算可靠度指标。

通过分析拱坝模型地震荷载下第一主应力时程曲线,得到坝肩处第一主应力最大值出现在第 9 秒(第 90 个计算步),故使用二次响应面法计算方法计算地震荷载下的第 90 个计算步的拱坝结构可靠度指标所得结果如表 2 所示<sup>[15]</sup>。

表 2 拱坝坝体可靠度指标

计算编号	结点编号	结点位置	第一主应力值/MPa	可靠度指标
1	11914	坝肩	6.791	1.108
2	11992	坝肩	10.900	0.747
3	8754	坝顶右部	5.353	1.655
4	3606	坝顶右部	1.349	3.420
5	10709	坝顶右部	3.175	2.378
6	3626	坝顶中部	0.041	5.372
7	3257	坝体中部	0.002	6.013
8	197	坝体中部	0.002	6.207

从结构可靠度计算结果可知,可靠度指标最低处为 0.747,并且在坝肩附近位置可靠度指标变化梯度很大,这说明坝肩处作为抗拉薄弱部位,在地震荷载下,更应该加以重点关注;上游坝面右部、中部位置的可靠度指标起伏变化明显,计算编号 7 和 8 的可靠度指标为 6.0 左右,大于静力分析时的可靠度指标,说明地震荷载下,拱坝的可靠度指标变化规律比较复杂,并不是单纯的降低。

## 4 结 语

为研究拱坝在地震荷载下可靠度指标的变化规律,本文采用 ANSYS 对某一拱坝实例进行抗震动力分析,并使用二次响应面法求得第 90 个计算步下的拱坝所选节点的可靠度指标。结果表明,在地震荷载作用下坝肩处作为抗拉薄弱部分应更加关注,拱坝上游坝面右部、中部的可靠度指标变化规律复杂而非单纯降低,希望可以为今后拱坝的抗震设计提供借鉴,并为拱坝的抗震加固措施提供理论支持。此外,本文的计算模型中并未考虑地基的质量,故今后应着重研究更加符合工程实际的有限元模型,从而更加全面的反映地震对结构的影响。

## 参考文献:

[1] Yu Minghui, Xu Jinjun, Wan Yuanyang, et al. Simulation and dynamic visualization of flow and sediment motion downstream of Cuijiaying Dam[J]. Journal of Hydrodynamics( Series B), 2006, 18(4): 492 - 498.  
 [2] 孙大为,蔡海勇,李华强,等.长岭水库拱坝加固前后三维有限元分析[J]. 人民黄河, 2010, 23(10): 130 - 131.

从图7中可以看出,随着挡土墙高度的增大,无量纲化的挡土墙主动土压力强度也逐渐变大;这与Paik等<sup>[1]</sup>的变化趋势是一致的。以上两个实例表明,本文方法能适应于不同高度的刚性挡土墙主动土压力计算,且具有较好的一致性。

## 4 结 语

本文考虑土拱效应对平动挡土墙主动土压力强度的影响,通过对不同微分单元划分方式的对比分析,提出采用二分法原理来求解最优划分单元方式,从而建立主动土压力强度的计算方法。

(1)通过对不同划分单元方式的对比得出:沿割线方向划分微分单元方法得出的主动土压力强度要小于沿切线划分微分单元方法。

(2)与沿切线和割线划分微分单元相比,采用二分法求出的最优单元划分方式得出的主动土压力分布最接近于实测结果。

### 参考文献:

[1] Paik K H, Salgado R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect [J]. *Geotechnique*, 2003, 53(7): 643 - 653.

[2] Goel S, Patra N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2008, 8(2): 123 - 133.

[3] 蒋波,应宏伟,谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(1):131 - 136.

[4] 应宏伟,蒋波,谢康和. 平行竖墙间的土拱效应与侧土压力计算[J]. *水利学报*, 2006, 37(11): 1303 - 1308.

[5] 吴明,彭建兵,徐平,等. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(11):89 - 95.

[6] 章瑞文,徐日庆,郭印. 考虑土层剪力作用的挡土墙主动土压力分布研究[C]//. 中国水利学会,第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集(下册),昆明,2006: 847 - 850.

[7] 王梅,李镜培. 考虑土拱效应的刚性挡墙主动土压力计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5):865 - 870.

[8] Li Jingpei, Wang Mei. Simplified method for calculating active earth pressure on rigid retaining walls considering the arching effect under translation mode [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(2):282 - 290.

[9] 卢坤林,朱大勇,杨扬. 考虑土拱效应的非极限主动土压力计算方法[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(1):19 - 25.

[10] 俞缙,周亦涛,蔡燕燕,等. 基于土拱效应的刚性挡墙墙后主动土压力[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2306 - 2310.

[11] 李庆扬. 数值分析[M]. 第5版. 北京:清华大学出版社,2008.

[12] Tsagareli Z V. Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1965, 2(4):197 - 200.

(上接第215页)

[3] Li Jing, Chen Jianyun. Seismic response analysis of arch dam with joints based on rate-dependant plastic damage model [C] // . *International Conference on Engineering Computation*, Hong Kong, 2009.

[4] Adhikari S. Reliability analysis using parabolic failure surface approximation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(12):1407 - 1427.

[5] Chen Xiutong, Li Lu. 3 - D Nonlinear finite element dynamic analysis on Guandi RCC gravity dam [C] // . *New Progress on Roller Compacted Concrete Dams—Proceedings of the Fifth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, Guiyang: China Water Power Press, 2007.

[6] 武清玺,卓家寿. 结构可靠度分析的变f序列响应面法及其应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(2):75 - 78.

[7] 武清玺,俞晓正. 混凝土面板堆石坝可靠度计算方法研究[J]. *岩石工程学报*, 2004, 26(4): 468 - 472.

[8] 陈建康,朱殿芳,赵文谦,等. 基于响应面法的地下洞室结构可靠度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(2):351 - 356.

[9] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[10] 杨玉田,武运磊,宫扬威. 基于有限单元法拱坝结构可靠度分析[J]. *电子测试*, 2014(5):159 - 160 + 158.

[11] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[12] 何本国. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[13] 张洪才,何波. 有限元分析 ANSYS13.0 从入门到实践 [M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[14] 朱一飞,郝哲,杨增涛. ANSYS 在大坝数值模拟中的应用[J]. *岩土力学*, 2006, 27(06):965 - 968 + 972.

[15] 丁泽霖,王婧,黄德才. 基于 ANSYS 的拱坝坝肩及坝基整体稳定分析[J]. *华北水利水电学院学报*, 2012, 33(3):4 - 8.