

复合单元法的物理和数值试验验证

强 晟^{1,2}, 李桂荣², 陈胜宏^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

摘 要: 简述了复合单元法的基本原理和算法, 该方法的主要优点在于可以明显地减少前处理的工作量和难度, 且可以与有限单元很好地耦合在一个系统中。介绍了宝珠寺重力坝的物理模型超载试验。分别采用三维弹黏塑性复合单元法和三维弹黏塑性有限单元法对宝珠寺重力坝的超载工况进行了数值试验, 并与物理试验进行比较。结果表明, 三种方法得到的特征点位移吻合得较好, 两种数值试验方法的整体位移和应力也基本一致。研究验证了复合单元法的正确性, 也说明了该算法的主要优点: 前处理简单, 计算精度与有限单元法相当, 同时还证实了复合单元法可以较好地解决复杂岩基上重力坝的变形与破坏问题。

关 键 词: 复合单元法; 有限单元法; 模型试验

中图分类号: TV 641, TV 115

文献标识码: A

Validation of composite element method by physical and numerical tests

QIANG Sheng^{1,2}, LI Gui-rong¹, CHEN Sheng-hong^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The principle and algorithm of composite element method (CEM) are briefly described. The major merits of the method are the preprocessing work load and difficulty can be reduced remarkably; and it can be coupled with finite element method (FEM) system very well. Then the physical model overloading test for Baozhushi Gravity Dam is illustrated. The overloading cases of numerical tests are carried out by three dimensional elasto-viscoplastic FEM and three dimensional elasto-viscoplastic CEM separately for the dam. The computational results are compared with the results from the model test. The comparison shows the displacements of the key points match closely. The whole displacements and stresses of two numerical methods also agree each other well. This research shows the validation of the CEM, and the main advantage of the algorithm: simple in preprocessing and accurate as FEM. Meanwhile, it is proved that CEM is an effective way to solve the deformation and destroy problems for the gravity dam on complicated rock base.

Key words: composite element method (CEM); finite element method (FEM); physical model test

1 引 言

复合单元法^[1-4]是一种新的数值模拟方法。它沿用有限元的形函数, 对同一复合单元覆盖下的多个子单元采用多组位移分别进行插值计算各物理量。适合于分析含锚固件、不连续面的岩体以及渗流、开裂等问题。

不连续面是岩体中节理、裂隙、断层等的统称。长期以来, 不连续面的模拟一直是岩基、边坡和地下洞室的变形和稳定分析中不易解决的问题。基于

复合单元法的不连续岩体模型^[3,4]能够有效地处理这类问题。这种模型最显著的特征是每个复合单元可以含有一组或几组有明确倾向和倾角的不连续面, 如断层或节理。复合单元法的主要优点是, 它能整合到常规有限元分析过程中, 另外对于含有较多不连续面的复杂岩体结构, 且这些不连续面在计算中要求进行离散处理, 网格生成的限制较小。目前, 该方法已经在简单算例^[4,5]的模拟中取得很好的效果, 但其在复杂算例中的正确性还有待于进一步检验。

本文针对宝珠寺重力坝, 分别进行了超载工况下三维弹黏塑性复合单元法和三维弹黏塑性有限单元法^[5,6]的数值试验, 并与相同工况下的物理试验^[7]进行了比较。三种方法得到的特征点位移吻合得较好。两种数值试验方法还在整体位移、应力方面进行了对比, 结果也基本一致。

2 复合单元法原理

复合单元法中使用的网格与常规有限单元法相似, 但划分网格时不用过多考虑不连续面的影响。根据不连续面和有限单元网格的信息进行代数 and 几何运算, 可以得到复合单元网格信息。在新的网格系统中, 有部分单元含有一条或多条不连续面, 这部分单元称为复合单元。

在实际工程中, 一个复合单元中可能含有任意多条不连续面, 该单元被分割成任意多个子单元。设一个复合单元被 n_j 个不连续面分割成 n_r 个子单元。在图 1 中, 子单元 r_2 被 3 条节理所割, 与 3 个子单元相邻。记相邻的两个子单元 rl 和 rm 之间的节理面编号为 $J_{rl,rm}$, 各子单元在复合单元节点上的位移增量记为 $\{\Delta\delta\}_{rl}$ 。在规定了以上记号后, 可以推导出基本控制方程的通式如下:

$$\begin{bmatrix} [K]_{r1,r1} & \cdots & \cdots & \cdots & [K]_{j_{r1},nr} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & [K]_{rl,rl} & \cdots & [K]_{j_{rl,rm}} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [K]_{j_{nr},r1} & \cdots & \cdots & \cdots & [K]_{nr,nr} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\Delta U\}_{r1} \\ \cdots \\ \{\Delta U\}_{rl} \\ \cdots \\ \{\Delta U\}_{rm} \\ \cdots \\ \{\Delta U\}_{nr} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta F\}_{r1} \\ \cdots \\ \{\Delta F\}_{rl} \\ \cdots \\ \{\Delta F\}_{rm} \\ \cdots \\ \{\Delta F\}_{nr} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{\Delta F^{vp}\}_{r1} \\ \cdots \\ \{\Delta F^{vp}\}_{rl} \\ \cdots \\ \{\Delta F^{vp}\}_{rm} \\ \cdots \\ \{\Delta F^{vp}\}_{nr} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} [K]_{j_{rl},rm} = - \iint_{\Gamma_{j_{rl},rm}} [N]^T [L]^T [D]_{j_{rl},rm} [L] [N] d\Gamma \\ [K]_{rl,rl} = \iint_{\Omega_{rl}} [B]_{rl}^T [D]_{rl} [B]_{rl} d\Omega - \sum_{rm=1,rm \neq rl}^{n_j} H_1(rl,rm) [K]_{j_{rl},rm} \\ H_1(rl,rm) = \begin{cases} 1, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 是相邻子单元} \\ 0, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 不是相邻子单元} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \{\Delta F^{vp}\}_{rl} = \iint_{\Omega_{rl}} [B]_{rl}^T [D]_{rl} \{\dot{\varepsilon}^{vp}\}_{rl} \Delta t d\Omega \\ \quad + \sum_{rm=1,rm \neq rl}^{n_j} H_2(rl,rm) \{\Delta F^{vp}\}_{j_{rl},rm} \\ \{\Delta F^{vp}\}_{j_{rl},rm} = \iint_{\Gamma_{j_{rl},rm}} [N]^T [L]^T [D]_{j_{rl},rm} \left\{ \Delta u^{vp} \right\}_{j_{rl},rm} \Delta t d\Gamma \\ H_2(rl,rm) = \begin{cases} 1, & \text{若 } rl > rm \\ -1, & \text{若 } rl < rm \\ 0, & \text{若 } rl \text{ 和 } rm \text{ 不是相邻子单元} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

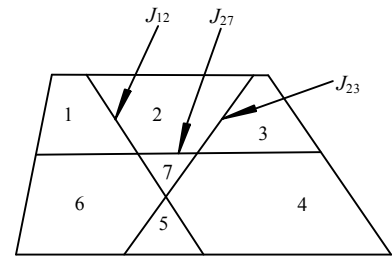


图 1 含任意节理面的复合单元
Fig.1 Composite element containing arbitrary discontinuities

式 (1) ~ (3) 中:

$[N]$ 为形函数, $[L]$ 为节理面坐标转换矩阵, $[D]$ 为弹性矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{\dot{\varepsilon}^{vp}\}$ 为岩块的黏塑性应变率, $\{\Delta U\}$ 为位移增量, $\{\Delta U^{vp}\}$ 为节理面的黏塑性位移增量, $\{\Delta F\}$ 为荷载增量, $\{\Delta F^{vp}\}$ 为黏塑性荷载增量。

3 物理模型试验

3.1 工程概况^[7]

宝珠寺重力坝最大坝高 131.0 m, 大坝建基面高程为 464.0 m, 坝底宽 92.0 m (不含厂房段), 断面形式如图 4 所示。厂、坝基础为奥陶系条带状粉砂岩, 下游为志留系页岩 (S1), 主要地质构造有 F4、F2 断层和 D5、D7、8、D1、D3、D6 等泥化夹层, 见图 2。基岩和软弱结构面材料的物理力学参数如表 1 和表 2。在建成蓄水达到 550.0 m 水位之前, 厂坝独立工作; 蓄水达到 550.0 m 水位时进行并缝灌浆, 此后厂坝联合作用。

为了分析厂坝联合作用下基础面的应力及变位、厂坝联合下的极限承载能力、薄弱部位在正常荷载及超载下的破坏机理等问题, 需要进行单坝段的应力及地质力学模型试验。

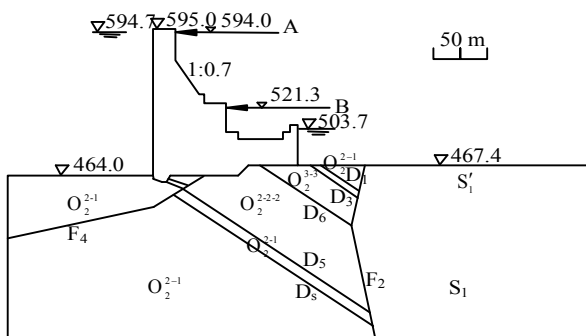


图 2 宝珠寺重力坝地质力学模型简图

Fig.2 Schematic of the geology mechanics model of the Bao Zhusi gravity dam

表 1 基岩和混凝土的材料参数

Table 1 Parameters of the rock masses and concrete

材料 类型	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	摩擦角 / $(^\circ)$	黏聚力 / MPa	变形模量 / GPa	泊松 比	抗拉 强度 / kPa
O_2^{2-1}	23.52	45.0	0.6	7.53	0.27	10.0
O_2^{2-2-1}	25.97	45.0	0.6	2.89	0.30	6.6
O_2^{2-2-2}	25.48	45.0	1.0	18.70	0.18	47.6
O_2^{2-3}						
O_2^{2-4}	25.87	45.0	0.8	11.90	0.25	29.0
S_1	25.48	26.6	0.4	4.00	0.30	22.0
S_1'	25.87	31.0	0.5	5.95	0.27	22.0
混凝土	23.52	45.0	2.5	17.00	0.17	33.0

表 2 不连续面的材料参数

Table 2 Parameters of the discontinuities

不连 续面	变形模量 / MPa	泊松比	摩擦角 / $(^\circ)$	黏聚力 / MPa	厚度 / m	备注
$D_{1,3}$	30.0	0.40	20.8	0.01	0.01	
D_6	50.0	0.40	19.3	0.02	0.01	
$D_{7,8}$	50.0	0.40	21.8	0.01	0.01	F_4 上盘
$D_{7,8}$	300.0	0.30	21.8	0.02	0.01	F_4 下盘
D_5	40.0	0.40	14.0	0.01	0.01	F_4 上盘
D_5	300.0	0.30	16.7	0.02	0.01	F_4 下盘
F_4	1 400.0	0.35	26.6	0.02	0.50	
F_2	3 000.0	0.35	24.2	0.05	1.00	

3.2 试验条件

试验以第 17 坝段为代表进行,以该坝段两侧横缝为界截取 21.5 m 的坝体和地基作为模拟对象。基岩上游方向长度约为坝高的 1.0 倍,基岩深度约为坝高的 1.2 倍,基岩下游方向长度按 2.0 倍坝高考虑。试验所用的主要相似常数为:

几何比尺: 170 变形模量比尺: 170 容重比尺: 1 位移比尺: 170 摩擦系数比尺: 1

模型材料采用重晶石粉和掺和料、黏结料调配而成。模型由预制块砌筑而成,块体之间用黏结材

料黏结,变形模量较低的断层用橡皮代替。整个模型布置情况见图 3。



图 3 物理模型试验布置

Fig.3 Layout of the physical model test

破坏试验时只考虑了自重和水平向的水压力。自重按体积力模拟,水压力以乳胶盛水袋施加并用测压管及压力表控制加载及超载水头。开始超载后,先按超载前最大水深的 12 % 逐步增大水位,到最大水深的 1.4 倍时再按超载前最大水深的 6 % 逐步增大水位,直到坝体出现第一条裂缝为止。超载程序如表 3 所示。表中荷载增量 P_i 和超载系数 K_p 的计算公式是:

$$P_i = \frac{1}{2} \gamma (2H_i - H) H \quad (9)$$

$$K_{p_i} = \frac{2H_i}{H} - 1 \quad (10)$$

其中, H 为开始超载时的上游水深, H_i 为第 i 个荷载步时的上游水深。

表 3 超载程序

Table 3 Overloading procedure

序号	上游水位 Z_u/m	上游水深 H_i/m	荷载增量 P_i/MN	超载系数 K_p	备注
1	594.70	130.70	0.0	1.00	
2	610.38	146.38	103.90	1.24	
3	626.07	162.07	124.01	1.48	
4	646.98	182.98	150.82	1.80	
5	654.82	190.82	160.88	1.92	
6	659.50	195.50	166.87	1.99	
7	660.05	196.05	156.83	2.00	起裂

3.3 主要试验结论

最终的超载系数值可以认为是坝体的安全在物理模型试验中,裂缝出现在上游坝面高程约 558.4 m 处,此时超载系数为 2.0。当超载系数超过 2.0 时,在第一条裂缝和坝踵之间的上游面又出现几条裂缝,裂缝扩展迅速,最终坝体破坏。所以坝体的安全系数定为 2.0。

4 计算与试验的对照验证

4.1 计算条件

为了和试验成果能够合理对比, 计算时所选取的计算范围、加载过程等都与试验一致。材料参数有两种方法可供选择: 一是采用模型尺寸和模型参数解出模型的力学量, 再换算为原型量; 另一方法是将模型尺寸和材料参数按照相似比转换为原型值, 然后直接计算出相应于原型的力学量。下面给出的计算结果是按后一种方法得出的。

沿坝轴线方向 (Y 轴方向) 取 1.0 m 厚坝段, 分别运用复合单元法和有限单元法进行分析。图 4 为复合单元法网格, 含单元 4 936 个, 节点 10 140 个, 图 5 为有限单元法网格, 含单元 4 736 个, 节点 9 796 个。可以看出, 复合单元法网格较为简单。

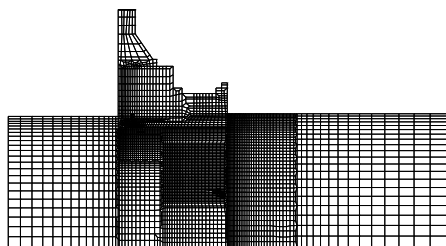


图 4 复合单元法网格

Fig.4 Mesh of composite element method

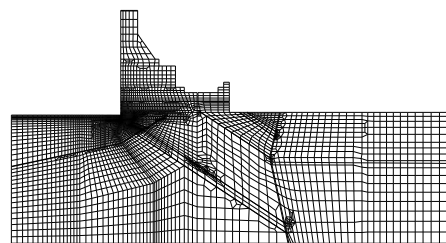


图 5 有限单元法网格

Fig.5 Mesh of finite element method

在运用两种方法进行计算时, 所有单元在坝段厚度方向上均施加约束, 地基部位的计算范围与周边岩体的交界处也施加垂直于交界面的约束。计算和试验都未考虑渗流作用, 上下游河床上没有垂直于坝体断面方向的水压力。首先只施加混凝土和基岩的自重, 近似模拟初始应力场, 然后再施加上游库水压力和超载水压力。

开始超载后, 按照试验的超载程序加载进行弹黏塑性计算。未超载时计算得到的应力作为超载时弹黏塑性计算的初应力计入; 由于试验过程中位移和应变的量测是以开始超载时为零点逐步累计的, 因此未超载时计算得到的位移和应变不进入超载后

的计算。

4.2 计算结果和分析

4.2.1 位移

图 6 是两种数值方法计算得到的总体位移矢量, 这些位移是超载系数从 1.0 到 1.99 每一步水荷载引起位移的叠加值。从图中可以看出, 两种方法求得的位移矢量很接近。

为了便于位移的比较, 在坝顶下游面取位移特征点 A, 在坝中部下游面取位移特征点 B, 见图 2。图 7 和图 8 表达了在两个特征点处观察到的位移和超载系数之间的关系。物理模型试验的结果在这里和两种数值计算的结果进行了对比。

可以看出, 两种数值试验的曲线非常接近, 和物理模型试验的曲线比较接近。数值试验的位移结果都要比物理模型试验的位移结果大一点, 可能的原因是 (1) 物理试验存在一定的误差; (2) 数值试验的网格划分比较密。因为坝体的网格越密, 在相同计算条件下求得的位移就越大。

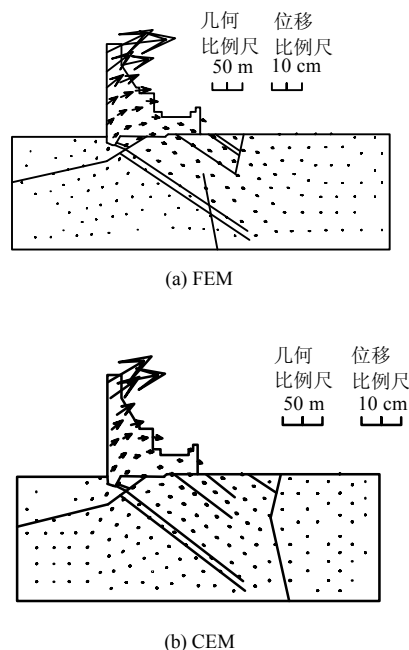


图 6 超载系数为 1.99 时水压力引起的位移矢量
Fig 6 Displacement induced by water pressure when K_p equals 1.99

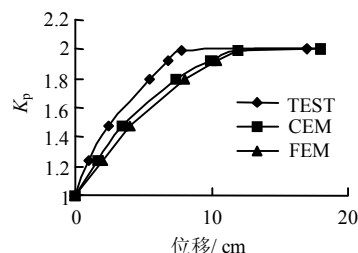


图 7 特征点 A 的位移与 K_p 的关系
Fig.7 Relation of displacement of point A with K_p

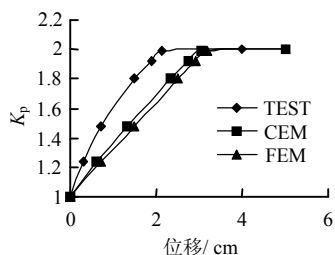


图 8 特征点 B 的位移与 K_p 的关系

Fig.8 Relation of displacement of point B with K_p

计算中发现: 当超载系数大于 2.0 时, 位移迅速增长且不能收敛, 说明计算的超载安全系数可以定为 1.9 左右。

4.2.2 应力

由于地质力学物理模型试验无法提供应力结果, 所以这里的应力结果仅仅是由两种数值试验得到的, 二者对比可以验证复合单元法在工程应用上与有限单元法有同样的精度。

图 9 是当超载系数等于 1.99 时两种数值方法求得的总体主应力矢量。拉应力约在 0.3~0.8 MPa 之间, 主要分布在上游坝面和坝踵处。可以看出, 两种数值方法得到的主应力矢量非常接近。

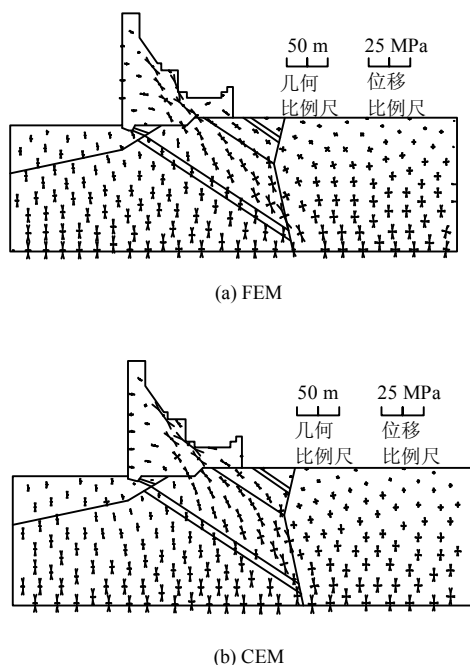


图 9 超载系数为 1.99 时的主应力矢量

Fig.9 Vector diagram of principal stresses when K_p equals 1.99

5 结 论

本文简述了复合单元法的基本原理和算法, 该方法的主要优点在于可以较多地减少前处理的工作

量和难度。在一个含有多个不连续面的复杂结构中, 可以先不考虑不连续面的存在而直接对结构本身划分网格, 然后用不连续面去和网格做几何运算。凡是被不连续面切割到的单元即为复合单元, 其它单元仍为有限单元。复合单元可以与有限单元很好地耦合在一个系统中。

分别采用复合单元法和有限单元法计算了宝珠寺重力坝的在超载工况下的变形、应力和稳定性等问题, 将计算结果与物理模型试验结果作了对比分析。通过对比可以发现, 计算结果与试验结果在规律上基本吻合, 证实了复合单元法可以较好地解决复杂岩基上重力坝的变形与破坏问题。

参 考 文 献

- [1] 陈胜宏, 强晟, 陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1—8.
- [2] S H CHEN, S QIANG, S F CHEN, et al. Composite element model of the fully grouted rock bolt[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2004, 37(3): 193—212.
- [3] 强晟, 陈胜宏. 不连续岩体的三维弹黏塑性复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 390—3 396.
- [4] S H CHEN, S QIANG. Composite element model for discontinuous rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, 41(5): 865—870.
- [5] CHEN S H, PANDE G N. Rheological model and finite element analysis of jointed rock masses reinforced by passive, fully-grouted bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1994, 31(3): 273—277.
- [6] CHEN S H, EGGER P. Three dimensional elasto-viscoplastic finite element analysis of reinforced rock masses and its application[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1999, 23(1): 61—78.
- [7] CHEN S H, LI Y M, WANG W M, SHAHROUR I. Analysis of gravity dam on a complicated rock foundation using an adaptive block element method[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004, 130(7): 759—763.