

考虑岩体侧面阻滑力影响的重力坝 深层抗滑稳定分析

徐慰祖 黎保琨 彭一江

(华北水利水电学院北京研究生部, 100044)

提 要

本文从准平面问题的基本原理出发, 用非线性弹簧单元模拟侧面阻滑力作用, 建立了一种可以考虑岩体侧面阻滑力影响的重力坝深层抗滑稳定分析的非线性有限元实用计算方法, 并编制了相应的ZMF—2电算程序。通过模型试验验证和算例说明此种方法是可行的。

一、引 言

重力坝深层抗滑稳定问题通常是一个空间问题^[1]。当某部分岩体失稳时, 必然要受到相邻岩体的约束作用。近十几年来水电工程的地应力量测成果表明, 无论是高山峡谷地区(如二滩、龙羊峡等), 还是宽阔河谷地区(如葛洲坝等)的坝址, 往往存在一定量级的浅层水平地应力^[2-4]。以往工程上用平面有限元进行校核时, 通常是选取单位宽度或最不利断面进行研究, 未考虑与水平地应力有关的岩体侧面阻滑力的影响, 与坝基岩体受力情况不符。有些工程按平面问题核算时, 得出的安全系数较低, 甚至不稳定, 需要进行坝基处理。但实际上坝基并不需要进行处理或只需要进行很少的处理即可工作得很好, 无异常现象。这里, 岩体侧面阻滑力可能起了很大的作用^[1,2,4]。较为符合实际的方法是进行三维非线性有限元分析, 但其规模较大, 数据准备工作和上机时间也相应地大为增加, 在内存较小的计算机上难以实现。

本文在解决上述矛盾方面进行了一些探索, 提出了一种具有软弱夹层基岩上的重力坝抗滑稳定分析的准平面问题非线性有限元法(或称二维半非线性有限元法), 并在现有的非线性有限元程序^[5]的基础上加以扩充, 编制了ZMF-2电算程序。

二、计算模型

实践经验证明, 如果地基基岩坚硬完整, 绝少可能发生整体失稳问题。若坝基内存在不利的软弱面, 则必须验算坝体带动一部分基岩沿软弱面失稳的可能性。一些文献曾提到, 对河床宽阔且夹层大面积延伸的情况, 可按平面问题处理, 侧面阻滑力最好作为安全裕度不再考虑^[1]; 对河谷较窄或构造面延伸范围不长的情况(图1), 应考虑侧面阻滑力因素^[1,2]。鉴于多数文献未给出具体规定及约束条件, 本文拟就下述情况加以讨论。

对于坝基岩体浅层内有缓倾角的软弱夹层, 夹层走向与坝轴线平行, 且夹层延伸长度 L 与坝体横缝距离接近的情况(图1), 可取 L 作为计算宽度。同时认为其两侧的坝基岩体是足够稳定的, 并用侧向滑动面 aa' 及 dd' 上的侧面阻滑力来反映实际存在着的两侧岩体对所截取断面的约束作用。

阻滑力是存在于两侧岩体与所截断面之间的分布力, 是被动抗力。在荷载作用下, 平面有限元模型的任一结点 i 将发生位移。与此同时, 侧面阻滑力则限制着位移的产生, 这将在结点 i 处引起剪应力 $(\tau_{zx})_i$ 和 $(\tau_{zy})_i$ 。剪应力的大小可以近似地根据结点处的法向应力 $(\sigma_z)_i$ 和相应的剪应力 τ 与位移 u 的关系曲线得出。同时假设在由 i 结点周围各单元的边长中点及形心所围成的范围 A_i 内, 各点剪应力的大小是相同的。这样, 结点 i 所受的阻滑力应为

$$F_{ix} = A_i (\tau_{zx})_i \quad (1)$$

$$F_{iy} = A_i (\tau_{zy})_i \quad (2)$$

式中 F_{ix} , F_{iy} 的方向与位移的方向相反; A_i 等于 i 结点周围三角形单元面积总和的 $1/3^{[6]}$ 。

为考虑式(1)、(2)所示的阻滑力, 本文在平面有限元模型的结点 i 上, 在侧向滑动面内沿 x 、 y 方向各设置一个非线性弹簧, 来模拟未失稳岩体的阻滑作用(图2)。此外, 将在一定法向应力作用下由抗剪试验所得的剪应力 τ 与位移 u (v)曲线简化为图3所示的形式, 在剪应力不超过峰值剪应力的情况下, 侧向滑动面剪应力为:

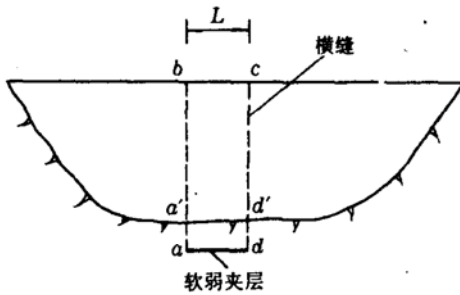


图1

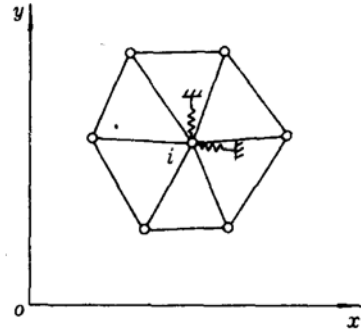


图2

$$\tau_{zx} = K_s u \quad (3)$$

$$\tau_{zy} = K_s v \quad (4)$$

式中 u , v 分别为侧向滑动面与侧向阻滑面之间水平和竖直方向的相对位移; K_s 为侧向滑动面的切向刚度系数, 通常可根据已知的 τ - u 曲线计算, 即

$$K_s = \frac{\partial \tau}{\partial u} \quad (5)$$

对于构造面走向与坝轴线垂直的情况(图4), 亦可以取出 $abcd$ (或 $abef$)部分来核算, 并设置非线性弹簧模拟侧向破裂面 dd' (或 ff')上的阻滑力。文献[1]提出, 如果 dd' 面上岩石新鲜完整, 阻力很大, 当计算宽度取得愈大, 材料强度储备安全系数也愈大时, 可以只核算最不利坝段 $abcd$, 否则应算到最危险的部位为止。

对于软弱构造面走向与坝轴线有一交角(图5)的情况, 由于侧向受到约束, 滑移方向只能是顺流向的, 故可沿视倾角方向切取一部分坝体 $abcd$ 连同其下基岩进行分析; 这时则应考虑在两个侧向滑动面上受到的侧面阻滑, 包括粘聚力和摩擦力。在核算沿侧向滑动面的稳定性时, 可设置非线性弹簧模拟侧面阻滑力。

考虑到初始水平地应力为 σ_{z0} , 则侧向滑动面的法向正应力 σ_z 的大小为

$$\sigma_z = \begin{cases} \mu(\sigma_x + \sigma_y) + \sigma_{z0} & (\text{准平面应变问题}) \\ \sigma_{z0} & (\text{准平面应力问题}) \end{cases} \quad (6)$$

2. 侧向滑动面上单元刚度矩阵

$$[k]^e = \begin{bmatrix} k_{ii} & 0 & 0 \\ 0 & k_{jj} & 0 \\ 0 & 0 & k_{mm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $[k_{rr}]$ 为 2×2 阶子矩阵, $r = i, j, m$ 。

$$[k_{rr}] = \begin{bmatrix} 2A_r K_s & 0 \\ 0 & 2A_r K_s \end{bmatrix} \quad (\text{双侧向滑动面时}) \quad (8)$$

其中 A_r 为结点 r 周围三角形单元面积总和的 $1/3$ 。

3. 简单超余应力转移法——剪应力非线性计算

当侧向滑动面单元中某结点 i 的剪应力 $|\tau_{zs}| \geq -f'\sigma_{zi} + c'$ 时, 该结点沿滑动面剪切破坏, f' 及 c' 为侧向破裂面的摩擦系数和粘聚力。

应转移的超余应力为

$$\tau_{z0} = \begin{cases} -f'\sigma_{zi} - \tau_{zs} & (\tau_{zs} > 0, \sigma_{zi} < 0) \\ f'\sigma_{zi} - \tau_{zs} & (\tau_{zs} < 0, \sigma_{zi} < 0) \end{cases} \quad (9)$$

其等效结点力为

$$\Delta \bar{P}'_i = -A_i \tau_{z0} \quad (10)$$

以新的荷载向量增量解平衡方程组, 求位移增量 $|\Delta \delta|$, 即求解

$$[K]|\Delta \delta| = |\Delta P| + |\Delta \bar{P}'| \quad (11)$$

式中 $[K]$ 为整体刚度矩阵; $|\Delta P|$ 为原荷载向量增量; $|\Delta \bar{P}'|$ 为整个计算模型超余应力的等效结点力向量增量。

经过迭代运算直至收敛为止, 就得到这一级荷载下的解。

4. 简单超余应力转移法——侧面阻滑力非线性计算

考虑到工程上常给定设计侧面阻滑力 F_0 , 故当计算得出的各结点上滑动力绝对值之和超过 F_0 时, 将其差值以一定的系数分配于周围各结点, 进行非线性迭代运算^[9]。

(三) 耦合计算问题

由于在准平面问题中, 所取有限元计算模型上的单元结点同属于平面内单元和平面外(侧向滑动面)单元, 故可在这些公共点上将两类单元刚度矩阵加以集合, 得到整体刚度矩阵 $[K]$, 并建立整体平衡方程, 求出这些结点的位移分量, 进而求出应力分量, 并进行非线性计算。

(四) 整体安全度评估

本计算方法可以确定具有复杂地质构造基岩内的应力及位移情况, 可了解沿软弱夹层或侧向滑动面的破坏部位和错动数值, 确定最危险的滑动通道, 并可确定滑动面上的抗滑稳定安全系数 K_r ,

$$K_r = \frac{\sum (-\sigma_{ni} f_i \Delta A_i + c_i \Delta A_i) + \sum (-\sigma_{zi} f'_i \Delta A'_i + c'_i \Delta A'_i)}{\sum \tau_{si} \Delta A_i + \sum \tau_{zi} \Delta A'_i} \quad (12)$$

式中 σ_{ni} , τ_{si} 分别为滑动面(软弱夹层)上单元的法向正应力和切向剪应力; f_b , c_b , ΔA_i 和 f'_b , c'_b , $\Delta A'_i$ 分别为底滑动面(软弱夹层)和侧向滑动面上的摩擦系数、粘聚力及单元面积。

此外, 本方法还可确定按沿滑裂面滑动力与阻滑力矢量投影所定义的抗滑稳定安全系数 K_r , 超载安全系数 K_p 及强度储备安全系数 K_c , 定量地分析地应力引起的侧面阻滑力对坝基稳定的影响。

四、验证及算例

(一) 模型试验验证

为了验证电算成果, 进行了具有侧面阻滑力的块体在倾斜夹层上的抗滑稳定地质力学模型试验^[8]。如图6所示, 侧面阻滑力是采用在模型两侧设夹板及砝码加载的方式来实现的。将木夹板表面刨光, 模型块体侧面包一层牛皮纸, 用来模拟岩体侧面的摩擦系数及其 τ - u 关系; 用红电光纸光面相对, 以模拟夹层的摩擦系数及 τ - u 关系, 模型材料的力学指标如表1所示。滑块上表面竖直荷载为100N, 上游水平荷载分四级加载, 前三级每级施加50N, 最后一级施加到35N时, 滑块沿滑移面破坏, 破坏荷载为185N。

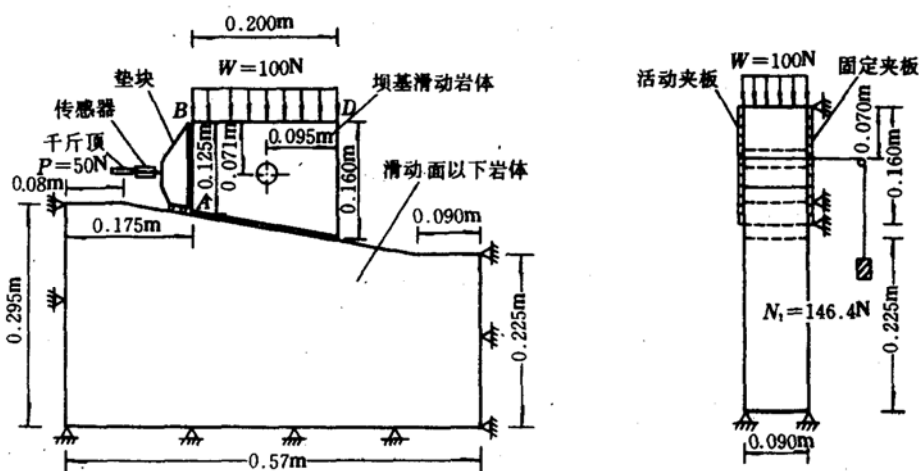


图 6

表1

材料名称	容重 γ (kN/m ³)	摩擦系数 f	粘聚力 c (MPa)	弹模 E (MPa)	泊松比 μ	切向刚度系数 K_s (kN/m ³)	法向刚度系数 K_n (kN/m ³)	抗拉强度 $[\sigma]$ (MPa)
块体及地基	24.8	1.5	0.03	140.08	0.31	/	/	0
夹 层	0.5	0.413	0	/	/	32 700	3 500 000	0
侧向滑动面	/	0.573	0	/	/	162 000	/	0

按模型试验条件, 用所编准平面非线性有限元程序ZMF—2进行电算时, 共被分成147个单元, 有96个结点, 其中约束结点10个, 为双向约束。当计算到荷载为185N时, 5个夹层单元、62个侧向滑动面单元全部破坏, D点荷载-水平位移曲线如图7所示。

从模型试验与电算结果对比可以看出, 电算和试验的破坏荷载相同, 荷载-水平位移曲

线基本吻合, 本文方法的可靠性得到了初步的论证。

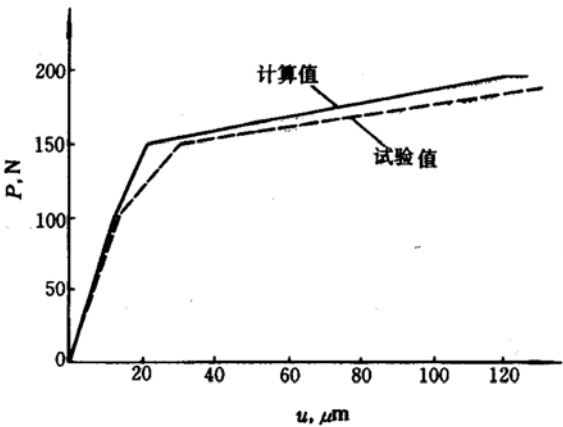


图 7

(二)算例

[算例1]

重力坝深层滑动^{5,8}的石膏模型如图8所示, 坝基中存在双斜夹层(厚度0.2mm)。坝体及基岩材料的力学指标如表2所示。

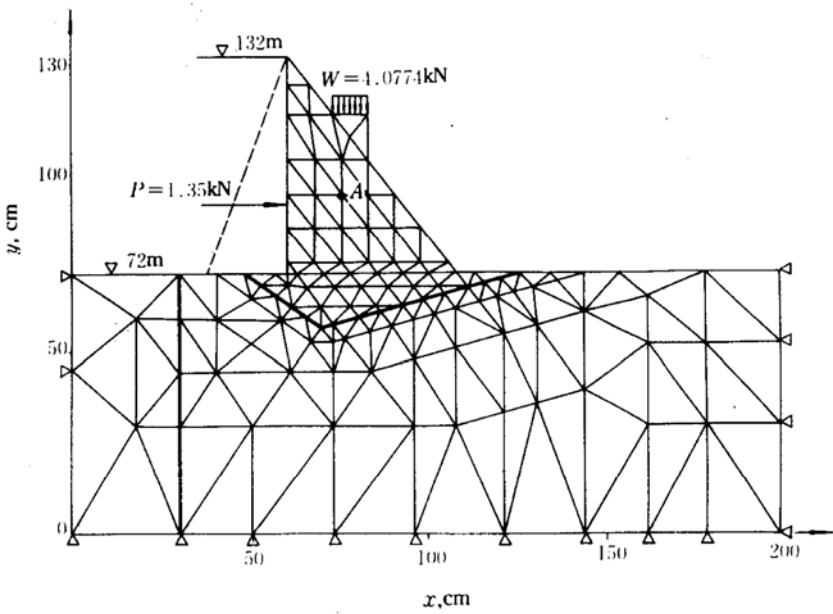


图 8

表2

材料名称	容重 γ (kN/m^3)	摩擦系数 f	粘聚力 c (kPa)	弹模 E (MPa)	泊松比 μ	切向刚度系数 K_s (kN/m^3)	抗拉强度 $[\sigma]_t$ (kPa)
坝及坝基	6.13	0.87	400	1650	0.2	/	456
夹层	0	0.317	0	1	0.2	/	0
侧向滑动面	/	0.56	0	/	/	5 000 000	0

电算中, 计算模型厚度为0.1m, 未换算成原型尺寸; 共划分218个单元, 152个结点, 坝体及滑动岩体自重由模型坝体下游加载平台上施加等量均布力来模拟。基岩初始水平地应力按岩体自重应力乘以侧压力系数计算⁸。采用平面内的增量弹塑性应力转移法与平面外的简单超余应力转移法进行耦合计算, 研究在考虑侧面阻滑力影响和不考虑侧面阻滑力影响两种计算方法下坝基的抗滑稳定性。从两种计算结果的比较(图9)可以看出, 考虑侧面阻滑力作用的计算方法与不考虑侧面阻滑力的计算方法相比较, 其位移有所减少, 极限承载能力有所提高。

[算例2]

本例讨论夹层延伸宽度 L 对重力坝坝基稳定的影响³。如图10所示, 坝高 $H=100\text{m}$, 夹层倾角 $\theta=10^\circ$, 夹层发育宽度为 L , 下游有一厚破碎带(在刚体极限平衡法中按临空面考虑)。坝基扬压力系数 $\alpha=0.185$, 水平地应力 $\sigma_{x0}=260\text{kPa}$ 。坝体及基岩材料的力学指标如表3所示。

分别应用刚体极限平衡法(考虑侧面阻滑力)及ZMF-2电算程序对含若干种夹层延伸宽度 L 的坝基进行稳定性分析, 得到按刚体极限平衡法计算的安全系数 K_r 及按准平面有限元法计算的超载安全系数 K_p 列于表4, 绘成 $K_p(K_r)-L$ 关系曲线如图11所示。

表3

材料名称	容重 γ (kN/m^3)	摩擦系数 f	粘聚力 c (kPa)	弹模 E (MPa)	泊松比 μ	切向刚度系数 K_s (kN/m^2)	抗拉强度 $[\sigma]_t$ (kPa)
坝体	25	/	/	20 000	0.167	/	/
坝基	26	/	/	16 000	0.25	/	0
夹层	20	0.30	50	1 000	0.10	/	0
断层	22	/	/	5 000	0.30	/	0
侧向滑动面	/	0.68	300	/	/	2 000 000	0

表4

$L(\text{m})$	1	3	10	15	20	25	40	50	60	70	80
K_r	16.86	4.20	2.62	2.09	1.82	1.66	1.43	1.35	1.29	1.25	1.23
K_p	15.56	3.97	2.77	2.42	2.38	2.33	1.86	1.51	1.45	1.39	1.38

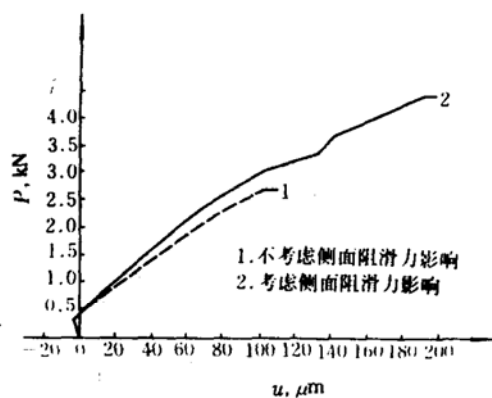


图9

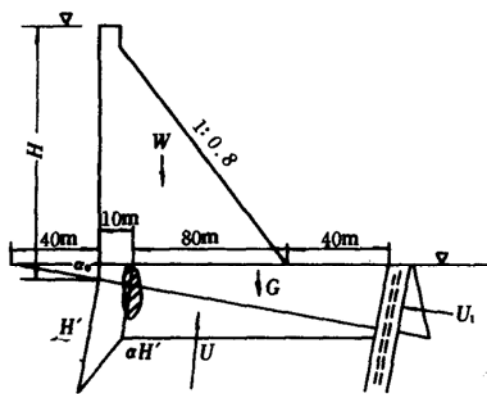


图10

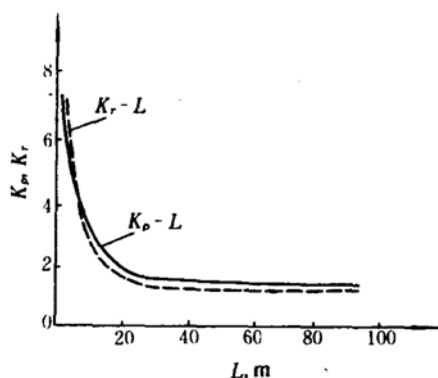


图11

从以上结果分析可以看出, 当 $L \leq 20\text{m}$ 时, 侧面阻滑力对坝基稳定的影响是显著的; 但当 $L > 20\text{m}$ 时, 这种影响则不显著。由于假定坝基下游为厚破碎带, 抗力较小, 因此 K_p 与 K_r 相近, 可进行对比。从图中看出, 用ZMF-2程序计算所得结果的规律性与刚体极限平衡法所得结果基本吻合。

五、结 语

1. 侧面阻滑力的影响在重力坝深层抗滑稳定中是实际存在的。若按平面问题计算, 忽略了侧向的阻力, 使抗滑稳定安全系数偏低。如果侧向滑动面上的阻力是可靠的, 则宜将其考虑在内。特别当计算的侧向滑动面较为新鲜完整时, 其上 c 值可能很大, 从而可能大大提高抗滑安全系数, 节省工程投资, 加快施工进度。

2. 地应力是水利工程中经常遇到的工程地质问题之一, 它对大坝稳定的影响如何, 以及如何合理地考虑地应力来增加大坝的抗滑稳定性等, 越来越引起广大工程界的关注。本文考虑了这一因素, 提出用非线性弹簧来模拟由水平地应力引起的侧面阻滑作用, 并采用平面内问题和平面外(侧向滑动面)问题耦合计算方法, 编制了准平面非线性有限元电算程序ZMF-2, 可进行定量分析。通过模型验证和算例分析说明用该方法进行坝基抗滑稳定分析能对大坝安全度作一较为符合实际的评价, 且具有使用简便, 节省机时的优点, 可供设计单位参考。

3. 本文仅对需考虑侧面阻滑力影响的坝基稳定问题提供了一种实用的工程算法; 今后尚需在实践中不断完善。

本文模型试验验证工作得到北京水利电力经济管理学院孙志恒同志的大力帮助, 算例2中引用了北京水电勘测设计院高延伟同志的计算数据, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 潘家铮. 重力坝设计. 水利电力出版社, 1987: 158~184.
- [2] 李著. 岩体中有缓倾角夹层时重力坝的深层抗滑计算. 水利学报, 1987, (8): 49~53.
- [3] 高延伟, 黎保琨. 重力坝深层抗滑稳定可靠度分析. 华北水电学院北京研究生部科技情报, 1991, (3): 33~41.

- [4] 项伟. 地应力场中的坝基岩体稳定分析初探. 武汉地质学院, 1985.
- [5] 华北水电学院, 河北省水利厅设计院合编. 重力坝非线性有限元程序及说明. 1986.
- [6] 徐慰祖. 考虑侧面阻滑力影响的平面有限元模型. 水利电力经济管理学院学报, 1988, (1): 61~63.
- [7] 孙钧, 侯学渊等. 地下结构(上册). 科学出版社, 1987: 468~475
- [8] 彭一江. 考虑侧面阻滑力影响的重力坝深层抗滑稳定分析[硕士论文]. 华北水电学院北京研究生部, 1990: 4~64.
- [9] 裴觉民, 李仲奎. 岩体考虑弱面影响时的三维及二维破坏模式和强度判别. 岩土工程学报, 1988, 10(2): 31~40.

Stability Analysis of Gravity Dam against Deep Sliding in Consideration of the Effect of Lateral Shearing Resistance of Rock Mass

Xu Wei-zu Li Bao-kun Peng Yi-jiang

(Graduate School, North-China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Beijing)

Abstract

A nonlinear finite element method is presented for stability analysis of gravity dam against deep sliding in consideration of the effect of lateral shearing resistance of rock mass. The method is based on the principle of quasi-planar problems and simulates the effect of lateral shearing resistance of rock mass by using nonlinear spring elements. The computer program ZMF-2 was compiled accordingly and examined by a model test and an example. It is shown that the method is feasible.