

设周边缝对小湾高拱坝工作性态的影响

杜成斌, 任青文

(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

[摘要] 用非线性有限元对小湾高拱坝(坝高 292.0 m)设周边缝时的工作性态进行研究。模型中考虑了缝面应力与变位的非线性重调整, 考虑了坝体、坝基材料非线性和周边缝接触非线性的耦合, 模拟了缝的开裂、滑移等非线性。对设缝深度、范围、以及干缝、湿缝等对高拱坝拱冠、坝踵和坝肩等关键部位的位移场和应力场的影响进行了分析研究, 并对设缝前后建基面、坝踵附近的开裂区和屈服区进行分析, 研究结果表明, 设周边缝可以有效地降低高拱坝坝踵的梁向拉应力, 对坝踵附近应力影响较大, 坝体其它部位应力和位移变化不大。

[关键词] 周边缝; 非线性有限元; 小湾高拱坝; 开裂; 屈服

如何防止高拱坝坝踵的开裂已引起学术界和坝工界的广泛重视。至今为止, 有两种处理方式。一种认为可采取局部加大拱端和梁底厚度的办法, 同时严格控制施工温度^[1]。这种方法具有可降低坝底的切应力和主拉应力, 施工简单等优点, 但缺点是无法为可能产生的裂缝设置止水。另一种认为坝踵附近的过大拉应力是由于坝体受地基固端的约束引起的, 只要放松地基约束, 就可以释放坝体周边的拉应力, 有助于使坝体趋于一种均匀受压的状态, 可以减少混凝土的方量, 加快施工进度。为此, 在坝体与地基接触的周边和底部设置预留缝, 在正常使用时, 这些部位允许其开裂, 并采取有效的止水措施, 以达到“以缝治缝”的目的。目前世界上已有一批周边缝高拱坝建成使用, 如 1960 年建成的意大利瓦依昂周边缝拱坝(高 262.0 m), 1972 年前苏联建成的英古里拱坝(高 272.0 m)等。南非学者 J.P.F.O'Connor 最早对英国土木工程师协会规定的第五型周边缝拱坝(高 120 m)进行过数值分析^[2], 后来俄罗斯专家曾对设周边缝对小湾高拱坝的影响进行过研究^[3]。但这些研究均未考虑坝体材料的非线性。总的说来, 对周边缝

拱坝的较全面、系统研究至今未曾见到。周边缝在有效地减少沿周界的拉应力的同时, 一定程度上也削弱了拱坝结构的整体性, 改变了坝体的应力场和位移场, 因此必须对设缝高拱坝的工作性态; 设缝前后坝体的开裂和屈服; 设缝的利弊等作出合理评估, 以便为安全经济、合理设计高拱坝提供依据。

1 非线性分析模型

1.1 周边缝的模拟

本文提出的三维非线性接触单元, 用实际缝中填充材料参数 E 、 μ 按常规有限元的方法形成刚度矩阵, 避免了 Goodman 单元等只考虑缝面变形及参数 k_n 取值的任意性, 本构关系上, 同时考虑了法向和切向的非线性特性, 考虑了缝面应力与变位的非线性重调整, 具体模拟了接触面粘结、滑移、张开等变形模式, 从而使计算更符合实际情况。

1.1.1 接触面单元数值模型的特点 对接触面法向应力变形关系, 借鉴 S.C.Bandis 岩石节理法向变形的双曲线模型^[4]:

$$k_{z'z'} = k_{z'z'0}(1 + \epsilon_{z'z'})^2, \quad (1)$$

[收稿日期] 2000-01-13; 回修日期 2000-06-12

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(59739180); “九五”国家科技攻关项目[96-221-04-02-04(1)]

[作者简介] 杜成斌(1965-), 男, 江苏盐城人, 河海大学工程力学系副教授

式中 $\epsilon_{z'z'} = \frac{\nu}{t}$ ， ν 为缝面法向相对位移， $k_{z'z'}$ 为初始法向刚度。接触面切向应力应变关系，采用应变硬化的双曲线模型，即 G.W.Clough 和 J.M.Duncan 20 世纪 70 年代提出的 τ - μ 双曲线模型：

$$k_{z'z'} = k_{z'z'0} \left(1 - \frac{1}{\sin\alpha} \frac{R\tau_{z'x'}}{C - f\sigma_{z'z'}}\right)^2$$

$$k_{y'y'} = k_{y'y'0} \left(1 - \frac{1}{\cos\alpha} \frac{R\tau_{y'x'}}{C - f\sigma_{z'z'}}\right)^2, \quad (2)$$

式中 $k_{z'z'0}$ 和 $k_{y'y'0}$ 为初始切向刚度。 C 为凝聚力， f 为摩擦系数，双曲线的渐近值为 $(C - k\sigma_{z'z'}) / R$ ， R 为小于 1 的数，在计算中可取接近 1 的数值， α 为摩擦剪切滑移角。

1.1.2 接触单元非线性判别 当法向应力大于零或大于抗拉强度时，接触面张开；当法向应力小于零或小于抗拉强度时，依据摩尔库伦准则判别接触面是否滑移。接触面张开时所不能承担的应力和接触面发生滑移时超过抗剪强度的应力将通过适当的超余应力转移在每一次荷载增量的迭代过程中重新分配给周围单元。

1.2 坝体混凝土材料的破坏准则和本构模型

小湾高拱坝在正常荷载组合下坝踵附近最大主拉应力达 5.45 MPa，而且沿拱厚方向的径向应力对应力应变状态及破坏模式的影响不容勿视。因此，对高拱坝的分析研究必须考虑坝体混凝土材料的三维非线性应力状态，本文采用 W.F.CHEN 1982 年提出的能较全面反映混凝土破坏曲面特征的四参数弹塑性-断裂模型，破坏形式有开裂破坏、压毁破坏和混合破坏三种。

当材料处于初始屈服前或拉伸破坏前状态，本构关系服从虎克定律。塑性阶段时应力界于初始屈

服面和破坏面之间，加载和卸载遵循不同的规律。根据初始屈服面与破坏面几何相似的假定，构造相应的加载曲面。

1.3 坝基材料的破坏准则和本构模型

小湾高拱坝坝基材料比较复杂，包括岩石和断层、节理等。岩石材料的破坏准则采用最大拉应力准则和 Drucker-prager 准则；断层和节理的破坏准则采用最大拉应力准则和 Mohr-Coulomb 准则，其破坏形式为沿层面的张开和滑移。坝基材料的本构模型采用与破坏面类似的屈服面。

2 周边缝设计和其他考虑

小湾拱坝为砼双曲拱坝。坝顶高程为 1 245.0 m，坝基面高程为 953.0 m，最大坝高 292 m，坝顶中心线弧长为 922.74 m，泄洪流量为 20 684 m³/s。上游正常蓄水位 1 240 m，下游 997.25 m；水库运行低水位 1 166 m，下游为 989.4 m。上游淤沙高程 1 097.0 m，淤沙容重为 9.5 kN/m³。内摩擦角为 24°。

设缝原则为周边缝的圆心均位于拱坝的中心面上，半径接近为常值。这样设置的周边缝可以保证曲率平顺，同时缝面应保持光滑，尽量使得坝体保持对称的形状。

对小湾拱坝设置了三种周边缝位置，拱冠处缝面至坝基底距离与缝处坝厚之比分别为 0.069，0.153 和 0.238。该处缝面高程分别为：958 m、964 m、970 m。坝体沿厚度方向分 4 层，沿高度方向分 14 层，基础深度为一倍坝高左右，单元总数为 9 423，结点总数为 11 490。

表 1 为混凝土、岩石和结构面计算所采用的有关参数。为便于说明问题表 2 给出了计算组合编号。

表 1 混凝土、岩体和结构面的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of concrete, rock and jointed rock

材料 类型	容重 V /kN·m ⁻³	弹模 E_0 /10 ⁴ MPa	泊松比 μ	摩擦系数 f	凝聚力 c /MPa	抗拉强度 σ /MPa	热膨胀 系数
坝体砼	24	2.1	0.167	1.20	4.00	2.5	0.86×10^{-5}
I、II 类岩体	27	2.2	0.180	1.35	1.50	7.0	0.86×10^{-5}
III、IV 类岩体	27	0.9	0.260	1.10	0.70	3.0	0.86×10^{-5}
F7	27	0.2	0.300	0.35	0.04	0.0	0.86×10^{-5}
F11	27	0.2	0.300	0.35	0.04	0.0	0.86×10^{-5}
缝单元	24	2.1	0.167	1.00	0.80	0.0	0.86×10^{-5}

* 河海大学，“九五”国家科技攻关项目，防止拱坝坝踵开裂的工程措施（周边缝、底缝）研究报告，1999 年 9 月

表 2 计算组合编号

Table 2 Calculation number based on characteristics of joint

材料及设缝	PJ1	PJ2	PJ3	PJ4	PJ5	PJ6	PJ7	PJ8
坝体材料	线弹性	非线性	线弹性	非线性	非线性	非线性	非线性	非线性
是否设缝	未设缝	未设缝	设缝	设缝	设缝	设缝	设缝	设缝
设缝范围	-	-	至 1130m	至 1245m	至 1130m	至 1130m	至 1130m	至 1245m
设缝深度	-	-	全截面	全截面	全截面	1/2 截面	1/4 截面	全截面

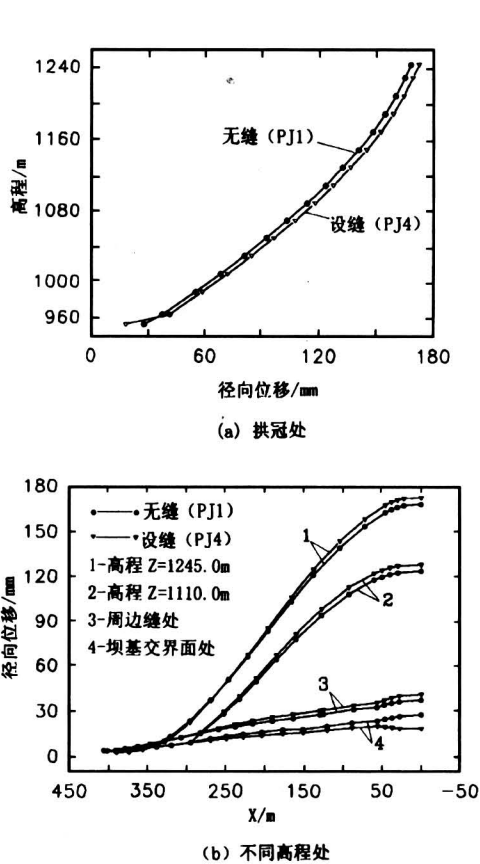


图 1 拱坝上游面径向位移/mm

Fig.1 Radial displacement on the upstream face of the dam

计算的加载顺序为坝体自重，正常水荷载，温度荷载（温降），泥沙压力等。表 2 中 PJ8 为湿缝，其余均为干缝。湿缝计算时，在上游面开裂处对缝面施加全水头的水压。限于篇幅，表 2 中给出的设缝高程为 964.0 m。

3 计算结果分析

3.1 坝体位移场

图 1 (a)、(b) 分别为拱冠处径向位移和不同高程处（右半拱）径向位移变化。

3.1.1 顶拱拱冠处位移 未设缝时的线弹性分析顺河向位移最大值为 167.90 mm，设缝后弹性分析结果为 167.94 mm，考虑材料非线性和设缝后顺河向位移有所增加（171.28 mm~174.17 mm），设缝高程逐渐下降时，拱冠顺河向位移有所增加。说明设缝后拱坝整体性有所降低，而且设缝高程越低，相对来讲，整体性越差。至于缝的深度，当其大于 1/4 坝厚后，对位移的影响不大。湿缝时拱冠径向位移要大于相同情况干缝时的值。

3.1.2 拱冠设缝处位移 允许坝体和缝面开裂和屈服后，缝处顺河向位移相对增加值要高于拱冠处，如缝高程为 970.0 m 时，缝处顺河向位移增加了 5.55 mm，达到 43.03 mm，增加了 14%，而拱冠处仅增加 3.38 mm，约为 2.0%，使周边缝以上坝体呈现出刚体位移的特征。图 1 (a) 也证实了这一点。基底面设缝后径向位移变小。缝的深度变化，对缝处位移的影响不大。

3.1.3 坝肩缝处位移 计算表明左坝肩顺河向位移要大于右坝肩，这是由于拱坝不完全对称，左边弦长大于右边弦长造成的。设缝后，左坝肩缝处顺河向位移略有增加，横河向位移变号，向下竖向位移略有增加。右坝肩顺河向位移变化不大，横河向位移略有减小。同样，周边缝的深度大于 1/4 坝厚后，对位移量的影响很小。

3.2 坝体应力场

3.2.1 坝体应力极值 表 3、4 分别为上、下游面应力极值及其位置。计算结果表明，上、下游面应力分布基本呈对称分布。表 1 示出 PJ2 和 PJ4 时坝体上游面最大主拉应力发生较大幅度的下降，与 PJ1 相比降低大约 40%，梁向拉应力降低幅度更大，最大达 71%。上游面最大主压应力和最大拱向压应力有所增加，尤其后者增加幅度较大，由

-1.5 MPa增至-6.6 MPa, 说明设缝后一部分由梁承担的荷载转为拱承担。下游面拱向拉应力有所减小, 主压应力有所增加。但其最大主压应力和最大梁向压应力变化不大(见表4)。PJ2和PJ4计算结果基本相同是由于PJ2考虑坝体开裂和屈服后, 产生了周边缝的效果。材料非线性对上游面的 σ_1 、 σ_3 、 σ_z 和下游面的 σ_1 影响较大。设缝后弹性分析表明, 仍有较大的主拉应力(4.20 MPa), 有可能

使坝体发生开裂, 而梁向拉应力降幅相对较大(2.5 MPa), 近33%。当设缝高程抬高时, 梁向拉应力变大, 说明设缝高程越低减小坝踵拉应力的效果越好, 此时, 上游面的开裂范围也将减小, 但越低会引起整体性差。改变设缝范围, 对应力极值的影响较小, 从缝深的影响来看, 当缝深大于1/4厚度之后, 应力极值也变化很小。湿缝时, 上游坝踵附近的 σ_1 和 σ_z 有所下降, σ_3 有所增加。

表3 上游面应力极值及其位置/MPa

Table 3 Maximum and minimum stress and location on the upstream face

编号	最大主应力 σ_1	最小主应力 σ_3	最大拱向压应力 σ_θ	最大梁向拉应力 σ_z
PJ1	5.45 (▽953m 拱冠)	-6.53 (▽1170m 拱冠)	-1.51 (▽1170m 拱冠)	3.75 (▽953m 坝踵)
PJ2	3.38 (▽975m 左拱)	-8.36 (▽987m 左拱)	-6.62 (▽1170m 拱冠)	1.48 (▽990m 右拱)
PJ3	4.20 (▽953m 拱冠)	-6.80 (▽1170m 拱冠)	-6.51 (▽1170m 拱冠)	2.50 (▽953m 坝踵)
PJ4	3.58 (▽975m 左拱)	-9.12 (▽987m 左拱)	-6.62 (▽1170m 拱冠)	1.57 (▽975m 左拱)
PJ5	3.58 (▽975m 右拱)	-9.12 (▽982m 左拱)	-6.62 (▽1170m 拱冠)	1.58 (▽975m 左拱)
PJ6	3.56 (▽975m 左拱)	-9.10 (▽982m 左拱)	-6.62 (▽1170m 拱冠)	1.57 (▽975m 左拱)
PJ7	3.47 (▽975m 左拱)	-8.20 (▽982m 左拱)	-6.63 (▽1170m 拱冠)	1.49 (▽975m 左拱)
PJ8	3.34 (▽975m 左拱)	-10.37 (▽982m 左拱)	-6.62 (▽1170m 拱冠)	1.42 (▽1030m 右拱)

表4 下游面应力极值及其位置/MPa

Table 4 Maximum and minimum stress and location on the downstream face

编号	最大主应力 σ_1	最小主应力 σ_3	最大拱向压应力 σ_θ	最大梁向拉应力 σ_z
PJ1	1.96 (▽987m 左拱)	-14.68 (▽1010m 左拱)	0.34 (▽1245m 右拱)	-9.55 (▽977m 坝踵)
PJ2	1.21 (▽987m 左拱)	-15.0 (▽1070m 左拱)	-0.08 (▽1245m 左拱)	-9.46 (▽977m 坝踵)
PJ3	1.85 (▽987m 左拱)	-14.72 (▽1010m 左拱)	0.24 (▽1245m 右拱)	-9.75 (▽977m 坝踵)
PJ4	1.79 (▽987m 左拱)	-15.02 (▽1070m 左拱)	0.12 (▽1245m 右拱)	-9.45 (▽977m 坝踵)
PJ5	1.79 (▽984m 左拱)	-15.06 (▽1070m 左拱)	-0.09 (▽1245m 左拱)	-9.45 (▽971m 坝踵)
PJ6	1.20 (▽984m 左拱)	-15.01 (▽1070m 左拱)	-0.09 (▽1245m 左拱)	-9.40 (▽971m 坝踵)
PJ7	1.19 (▽984m 左拱)	-15.02 (▽1070m 左拱)	-0.09 (▽1245m 左拱)	-9.56 (▽971m 坝踵)
PJ8	1.76 (▽987m 左拱)	-15.03 (▽1070m 左拱)	-0.29 (▽1245m 右拱)	-9.47 (▽977m 坝踵)

3.2.2 拱冠断面应力变化 图2(a)、(b)给出了拱冠断面梁向和拱向应力的变化。线弹性计算时上游面梁向拉应力 σ_z 达3.7 MPa, 非线性分析时为0.8 MPa。缝面高程958 m时为0.6 MPa。表明缝设得越低, 拱冠底部梁向拉应力就越小。设缝后坝踵附近拱向应力 σ_θ 有所增大, 由线弹性分析的-2.0 MPa增加到-4.0 MPa左右。相对来讲, 下游面梁向和拱向应力变化不大。梁向拉应力 σ_z 仅在1090 m附近略有增大。缝深逐渐减小时, 拱冠

断面梁向拉应力在上游侧略有变大, 拱向应力在下游侧有增大; 拱向应力在中上部略有减小, 梁向应力 σ_z 有所增大, 但变化幅度不大。湿缝时拱冠附近上游面的梁向拉应力 σ_z 有较大下降, PJ8时只有0.35 MPa。

3.2.3 缝面和建基面法向应力 图3(a)、(b)分别为设缝前后建基面法向应力等值线图。

线弹性计算时, 建基面的上游侧有较大的主拉应力, 坝踵附近达3.0~5.45 MPa, 拱冠断面沿厚

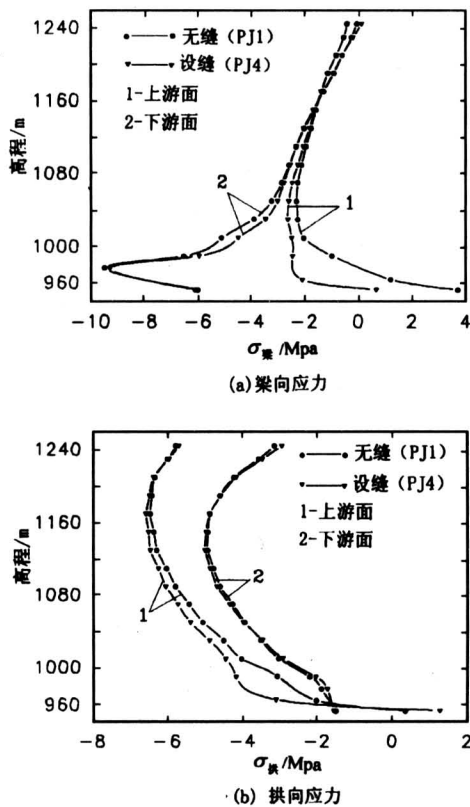


图2 拱冠断面梁向和拱向应力/Mpa

Fig 2 Cantilever stress and arch stress at the crest

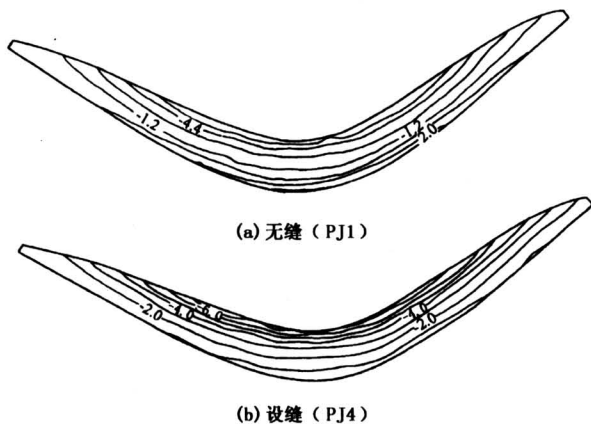


图3 设缝前后建基面法向应力等值线图 /Mpa

Fig 3 Normal stress isolines on dam - foundation face with or without joint

度方向拉应力区大约为厚度的 1/5, 大于 2.5 MPa 的范围为厚度的 1/7 左右, 接近 15 m 左右。从相应缝面高程处的法向应力可看出其拉应力区基本在高程▽1 130 m 以下, 拱冠附近沿厚度方向近 1/5。

允许坝体开裂和屈服时缝面法向拉应力区明显减小, 相应缝面高程处基本变为受压区。设缝之后, 设缝高程上升时, 下游侧法向压应力有所增加, 由 -9.4 MPa → -10.3 MPa → -11.2 MPa。

考虑坝体材料非线性和缝的非线性后, 建基面法向拉应力明显减小, 最大值由线弹性时的 5.0 MPa 减小到 2.0 MPa 左右, 低于砼材料的抗拉强度 (2.5 MPa), 说明设缝是能降低坝踵附近的最大拉应力的。设缝高程变化时, 建基面法向应力变化不大。缝范围减小至▽1130.0 m 时, 坝踵附近建基面法向应力基本相同, 左右坝肩附近法向拉应力减小。缝深减小时, 建基面法向应力基本不变 (缝深大于 1/4 坝厚)。湿缝时建基面法向压应力有所增加。

3.3 坝体开裂和屈服区

表 5 给出了上游坝踵附近缝的相对位移。

表 5 坝踵附近缝相对位移 (上游侧) /mm

Table 5 Relative displacement of joint near dam heel

分量	PJ1	PJ2	PJ3	PJ4	PJ5	PJ6	PJ7	PJ8
沿缝面	1.45	2.16	3.10	1.85	1.90	1.85	0.52	2.20
垂直缝面	0.19	0.31	0.56	0.42	0.43	0.42	0.39	0.60

注: 表中 PJ1、PJ2 的数值为缝处相应位置的位移值

从表 5 可以发现, 设缝之后, 缝的相对位移要大于无缝相应位置的相对位移。考虑材料和缝的非线性的缝的相对位移要小于仅考虑缝的非线性的相对位移。设缝高程越低, 张开度越大。缝的范围变小时, 张开度也就减小。设缝深度减小时, 沿缝面的错动及张开呈减小趋势。

非线性分析时在建基面上游坝踵附近出现较大开裂区, 靠近上游的第一排单元开裂, 第二排单元大都表现为屈服。设缝后的弹性分析时, 缝面开裂较深; 设缝之后, 周边缝右侧上游基本开裂, 在左右两坝肩处也有开裂, 但开裂屈服深度要小于 PJ2。当缝面长度减小时, 周边缝向左右的两侧开裂变得较为均匀且左右坝肩两侧无开裂发生。且设缝高程越低时, 张开度越大, 可达 0.5 mm。同时计算表明设缝之后, 坝基交界面仍有个别点开裂, 沿周界有一定范围的屈服, 但其深度要远小于未设缝情形。湿缝时, 缝面开裂范围有所增大。

4 结论

(1) 设缝后坝体位移呈刚体位移特征。小湾拱

坝未设周边缝时, 弹塑性分析的顺河向位移为 172.36 mm (PJ2) 与设缝后的非线性分析 (172.26 mm (PJ4)) 结果较为接近, 大于线弹性分析的位移结果 (167.90 mm (PJ1)) 和设缝后的弹性分析 (仅考虑周边缝的非线性, 坝体材料为线弹性) 位移结果 (170.49 mm)。

(2) 小湾拱坝在正常水位作用下线弹性分析时上游坝踵最大主拉应力达 5.45 MPa, 梁向拉线线性分析时最大的主拉应力降至砼的抗拉强度, 梁向拉应力降低更大, 为 1.50 MPa 左右。同时上游面拱向最大压应力有较大增加, 由 -1.5 Mpa 增加至 -6.60 Mpa 左右。上、下游面的主压应力均有所增加, 下游面最大梁向压应力变化不大。

(3) 周边缝对坝踵附近应力影响较大, 而对坝体中上部应力影响不大。改变设缝高程对上游最大梁向拉应力影响较大, 缝越低, 梁向拉应力越小。当缝深大于 1/4 坝厚后, 缝深和缝长对坝体应力和位移影响不大。

(4) 设置周边缝可减小建基面的开裂和屈服。不设周边缝时, 小湾拱坝坝踵附近有较大开裂和屈服区, 最大开裂深度达坝厚 1/7 左右。设缝后的弹

性分析时, 缝面开裂较深; 设周边缝时, 同时考虑材料非线性后建基面开裂范围及深度明显减小, 开裂深度仅为坝厚的 1/15 左右。

(5) 缝深改变时, 对缝面开裂、错动范围影响较大, 缝深为 1/4 坝厚时, 开裂、错动范围较大, 缝深为全截面时, 明显减小。湿缝时, 上游面最大主拉应力和梁向拉应力有所减小。最小主应力有所增加。

参考文献

- [1] 朱伯芳. 从拱坝的实际裂缝情况分析边缘缝和底缝的作用[J]. 水力发电学报, 1997, (2): 59~66
- [2] O'Connor J P F. The modeling of cracks, potential crack surfaces and construction joints in arch dams by curved surface interface element [C]. 15th ICOLD. 1985, Q57, R22: 385~406
- [3] 杜成斌, 任青文, 王超. 周边缝、底缝拱坝分析研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19 (1): 31~33
- [4] Bandis S C. Mechanical properties of rock joints [M]. Rotterdam: Barton & stephamsson, 1993. 122~119

Effect of Perimeter Joint on the Performance of Xiaowan High Arch Dam

Du Chengbin, Ren Qingwen

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

[Abstract] The nonlinear effect of perimeter joint on the performance of Xiao Wan high arch dam (292.0m high) is studied with nonlinear FEM in this paper. Nonlinear relation between the stress and deformation on the surface of the joint is adopted, and coupling effect between material nonlinearity of the dam, foundation and contact nonlinearity of joint is considered, opening and slipping of the joint are modeled in the analysis. Variation of the stress and displacement at the key location of the arch dam with perimeter joint on different crack depth, different elevation and with or without water pressure on the crack face is compared. Crack and yield near dam heel with or without joint are studied, The result of analysis demonstrates that setting perimeter joint could reduce cantilever stress near the dam heel effectively, and the stress near dam heel with joint has a great improvement, while little difference of stress and displacement occurs on the other location of the dam.

[Key words] perimeter joint; nonlinear FEM; Xiaowan high arch dam; crack; yield