

检修闸门门槽承载力性能及破坏模式

张 涛,喻 君,汪基伟

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过 3 个缩尺检修门槽试件的静力试验,研究了不同配筋率下检修门槽试件的极限承载力与破坏模式。采用 ABAQUS 软件,在验证了计算结果与试验结果吻合良好的基础上,以拉西瓦水电站进水口检修门槽原型为对象,分析了不同剪跨比、水平钢筋布置形式对检修门槽破坏形态的影响,明确了检修门槽破坏模式及其荷载传递机理。结果表明:二期混凝土内无构造措施时,门槽受剪承载力高于其局部受压承载力;在满足局部受压承载力的条件下,剪跨比大于或等于 0.18 时门槽主要发生混凝土压杆失效引起的剪切破坏,剪跨比小于 0.18 时门槽主要发生局部滑移破坏;增加顺水流方向水平钢筋层数可提高检修门槽受剪承载力。

关键词:检修门槽;剪跨比;破坏模式;数值模拟

中图分类号:TV663.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0088-07

Bearing capacity performance and failure modes of a maintenance gate slot//ZHANG Tao, YU Jun, WANG Jiwei
(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The ultimate bearing capacity and failure modes of the maintenance gate slot specimens with different reinforcement ratios were studied through static load tests of three scaled specimens. Based on ABAQUS, numerical simulation of the prototype of the Laxiwa Dam maintenance gate slot was conducted after the numerical model was validated by the experimental results. The failure modes and load transfer mechanism of the maintenance gate slot with different shear span ratios and reinforcement ratios were investigated. The results indicate that the shear capacity of the gate slot is higher than the local compressive bearing capacity if the second-stage concrete is cast without strengthening detailing. Provided that there is sufficient local bearing capacity, the gate slot mainly fails in shear due to the failure of the concrete compression strut if the shear span ratio is greater than 0.18, otherwise the local sliding damage is dominated. Adding the layers of the horizontal reinforcement along the water flow direction in the maintenance gate slot is able to effectively improve the shear bearing capacity.

Key words: maintenance gate slot; shear span ratio; failure mode; numerical simulation

随着我国水利事业的发展,门槽承受的水平推力越来越大,但对门槽受力性能研究却不多。DL/T 5057—2009《水工混凝土结构设计规范》第 13.15 节^[1]规定:“当闸门门槽高度每延米受载大于 2 000 kN 时,应对闸门门槽混凝土斜截面承载力进行复核。”但该条文没有给出相应斜截面受剪承载力计算方法,缺乏可操作性。杨静安等^[2]通过三维线弹性有限元分析,对工作门槽配筋方式与设计方法进行了探讨,但由于线弹性分析不能预计构件破坏形态,其所得结论是否合理有待商榷。吴松锋^[3]进行了 12 个工作门槽试件静力试验,提出了门槽剪切滑移破坏承载力计算公式,但采用的试件为竖立

在地面上的矩形柱,未考虑下游墩墙长度对荷载传递的影响。蔡睿恒等^[4]研究了门槽结构下游墩墙长度及颈部墩墙宽度对结构破坏模式的影响以及结构斜截面受剪承载力设计方法。

为了明确检修门槽破坏模式及承载力性能,本文以拉西瓦水电站进水口检修门槽(以下简称拉西瓦门槽)为原型制作 3 个缩尺试件,研究不同配筋率下检修门槽破坏模式与承载力,对 ABAQUS 软件应用于模拟门槽破坏模式进行验证。在此基础上,采用 ABAQUS 软件以拉西瓦门槽原型为对象,研究剪跨比与水平钢筋布置形式对破坏模式及承载力的影响。

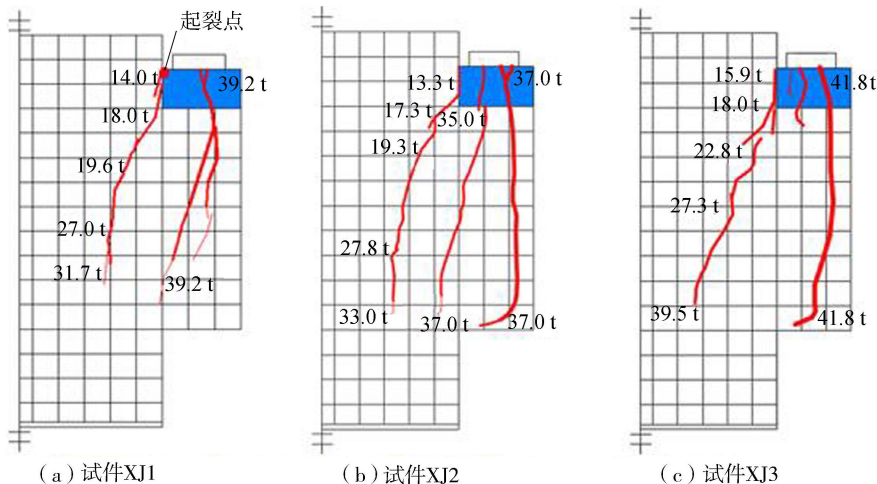


图4 试件破坏侧裂缝分布

斜裂缝与水平轴夹角介于 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间。当斜裂缝在二期混凝土内部延伸深度达到下游墩墙长度 $2/3$ 左右后,便逐渐转为竖直向下发展且发展缓慢。破坏前各试件剪切斜裂缝最大宽度介于 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ 之间。最后,由于二期混凝土的局部受压破坏,在垫块下产生数条裂缝并迅速发展至一期混凝土内直至试件破坏。表2列出了3个试件的开裂荷载和极限荷载等结果。试件开裂荷载约为按DL/T5057—2009《水工混凝土结构设计规范》^[1]第8.4.1条计算所得二期混凝土局部受压承载力的 $38.2\% \sim 45.6\%$ 。由于所有试件破坏由二期混凝土局部受压破坏引起,因此配筋率的变化未能对试件承载力产生显著影响。

表2 试验及模拟承载力

试件编号	P_{cre}/kN	P_{ue}/kN	P_{crs}/kN	P_{us}/kN	P_{crs}/P_{cre}	P_{us}/P_{ue}
XJ1	140	392	135	383	0.964	0.977
XJ2	133	370	135	386	0.964	1.043
XJ3	159	418	157	382	0.987	0.914

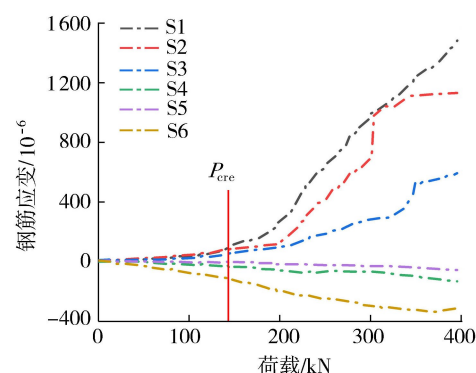
注: P_{cre} 、 P_{ue} 、 P_{crs} 、 P_{us} 分别为实测的开裂荷载、实测的极限荷载、模拟的开裂荷载、模拟的极限荷载。

2.2 钢筋受力状态分析

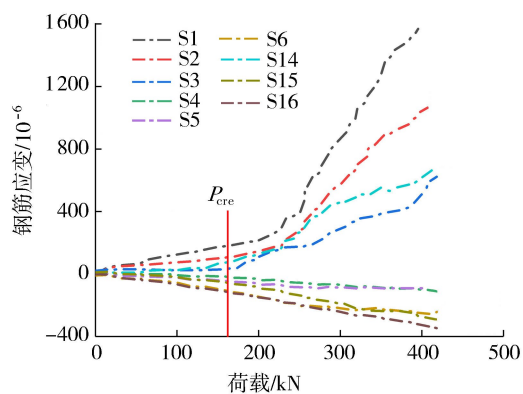
各试件钢筋受力状态相似,图5给出了典型试件(试件XJ1和XJ3)的荷载-钢筋应变曲线。由图5可见,混凝土开裂前钢筋应变小且增加缓慢,开裂后荷载应变曲线斜率显著增加,钢筋应变增加较快;水平钢筋受拉,离裂缝较近的应变片测点S1与S2处应变较大,增加速度最快;试件上侧斜筋受拉,下侧斜筋受压,受拉斜筋应力与邻近位置处水平钢筋应力相近,有利于抑制斜向裂缝开展;试件破坏时钢筋尚未屈服。

3 数值模拟

首先利用试件XJ1、XJ2及XJ3的试验结果验证



(a) 试件XJ1



(b) 试件XJ3

图5 典型试件荷载-应变曲线

ABAQUS软件模拟门槽结构破坏模式的可行性,然后对拉西瓦门槽原型进行数值模拟,研究剪跨比与水平钢筋配筋率对门槽承载力及破坏模式的影响。

3.1 有限元模型建立

混凝土、钢垫块和试件底部钢垫板均采用八结点六面体线性减缩积分单元C3D8R,钢筋采用三维两节点桁架单元T3D2。考虑到钢筋与混凝土之间的黏结滑移对试件极限承载力与破坏模式影响较小,故不考虑黏结滑移,用embed命令将钢筋埋入混凝土之中。采用tie命令将钢垫块与二期混凝土表面之间的接触绑定。通过网格敏感性分析,将六

面体单元尺寸取为 15 mm。

混凝土本构模型采用 ABAQUS 自带的混凝土塑性损伤模型(CDP),该本构模型能较好地模拟荷载作用下混凝土的刚度退化、材料的压碎与拉裂现象^[6-9],其拉伸损伤可以较为直观地表征裂缝的发展过程^[10]。混凝土单轴受拉受压应力-应变关系采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[5]附录 C 给出的公式;混凝土单轴受拉受压损伤因子采用王中强等^[11]基于 Sidoroff 能量等效原理推导的公式。钢筋采用理想弹塑性模型,不考虑其强化阶段作用。钢垫块采用线弹性模型,其弹性模量按现行规范^[5]取值。

采用库伦摩擦模型与内聚力模型相结合的方式模拟一、二期混凝土之间的界面行为^[12]。对于库伦摩擦模型,通过摩擦系数 μ 以及法向压力 F 确定临界切应力 τ_{crit} ,当界面切应力 τ 满足 $\tau < \tau_{crit}$ 时界面处于黏结状态,当 $\tau > \tau_{crit}$ 时界面处于滑移状态。内聚力模型可定义法向应力 σ_n 以及两个切向应力 τ_s 和 τ_t 与相对位移 δ 之间的关系,当界面应力达到峰值应力 τ^0 时,界面黏结发生损伤,刚度开始退化;当相对位移达到界面破坏时的位移 δ^f 时,界面黏结破坏。内聚力模型处于弹性阶段时,摩擦模型不工作;内聚力模型进入损伤阶段后摩擦模型启动,共同产生剪应力。界面模型具体参数取值如下:法向刚度 $K_{nn}=1000\text{ MPa/mm}$,切向刚度 $K_{ss}=K_{tt}=10\text{ MPa/mm}$,法向峰值应力 $\tau_n^0=2\text{ MPa}$,切向峰值应力 $\tau_s^0=\tau_t^0=1\text{ MPa}$,总位移 δ_m^f 与塑性位移 δ_m^p 的比值 $\delta_m^f/\delta_m^p=3$,摩擦系数 $\mu=0.7$,其中界面强度及本构模型选取详见文献^[12-13]。

3.2 试件有限元模拟

模拟结果与试验结果符合良好(表 2),其中开裂荷载计算值与试验值比值的均值为 0.972,变异系数为 0.011;极限荷载计算值与试验值比值的均值为 0.978,变异系数为 0.054。比较图 6 所示的受拉损伤云图和图 4 可知:模拟的剪切裂缝发展过程与试验现象相近;极限荷载时,各试件二期混凝土均发生严重的拉伸损伤,破坏由二期混凝土的压溃引起,与试验结果相符,这说明 ABAQUS 软件可用于模拟门槽结构破坏模式。

为了解门槽试件在不发生局部受压破坏下最终可能的破坏模式,对数值模型进行局部承压增强,在二期混凝土高度范围内布置 4 片钢筋网片(图 7),体积配箍筋率为 0.23,图 8 给出了局部承压增强后极限荷载时试件拉伸损伤及其变形(放大 10 倍)。由图 8 可见,配置钢筋网片后试件二期混凝土内未出现拉伸损伤,损伤区域主要集中在斜向临空面与

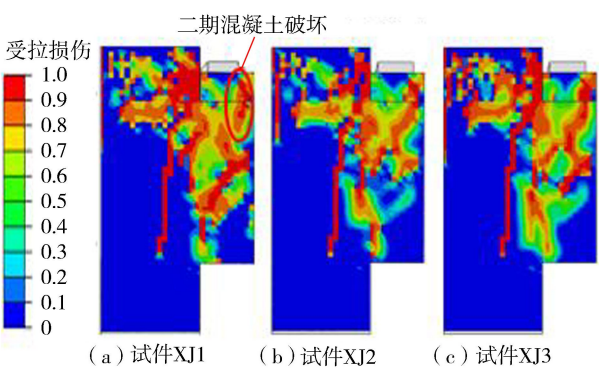


图 6 试件极限荷载时受拉损伤云图

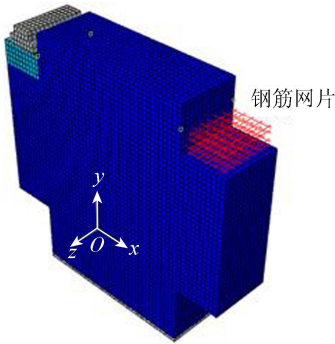


图 7 试件模型钢筋网片布置

水平轴呈约 60°夹角的滑移面附近。从试件变形也可以看出,所有试件均有发生斜向临空面滑移破坏的趋势。因此试件极限荷载均由滑移面抗滑承载力决定,水平钢筋配筋率的增加未能显著提高试件极限承载力。在水平钢筋配筋率相同的情况下,试件极限承载力较未增强局部受压试件承载力提高约 16%。

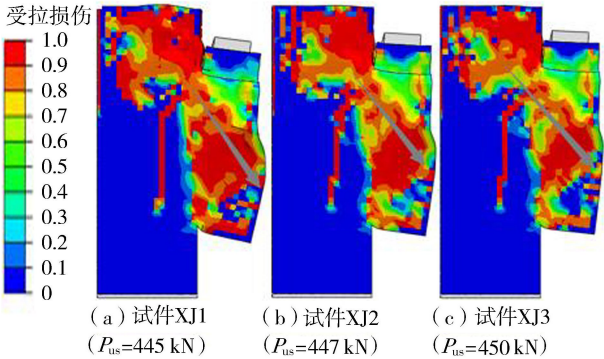


图 8 局部受压增强试件极限荷载时受拉损伤云图

3.3 原型尺寸门槽有限元模拟

鉴于试件数值模拟结果与试验结果吻合良好,本节以拉西瓦门槽原型为对象,通过改变下游墩墙长度 h 以及水平钢筋的布置形式来研究剪跨比与水平钢筋布置对门槽破坏模式及承载力的影响。图 9 为门槽有限元模型示意图,其中一、二期混凝土及预埋件尺寸均与实际工程相同;模型厚度取为 740 mm,沿厚度方向布置 3 层钢筋,钢筋形式及间距与实际工程相同。为提高计算精度,将重点关心区域网格加密,加密区网格尺寸取为 45 mm。表 3

给出了5个门槽模型主要参数,其中门槽 YX1 下游墩墙长度与实际相同,门槽 YX2 ~ YX5 下游墩墙长度逐渐减小。

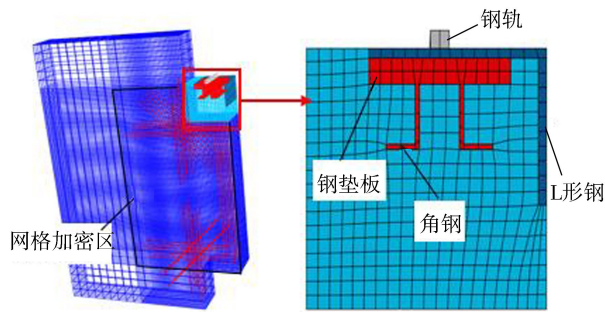


图9 检修门槽模型示意图

表3 门槽模型主要参数

门槽编号	b/mm	d/mm	a/mm	h/mm	a/h	配筋率/%
YX1	900	800	500	3450	0.15	0.19
YX2	900	800	500	3000	0.17	0.19
YX3	900	800	500	2800	0.18	0.19
YX4	900	800	500	2500	0.20	0.19
YX5	900	800	500	2000	0.25	0.19

3.3.1 有限元计算结果

计算所得门槽 YX1 的极限荷载 P_{us} 为 7 130 kN, 图 10 为不同荷载阶段门槽 YX1 的受拉损伤云图。当荷载达到极限荷载的 22% (即 $P=1\,580\text{ kN}$) 时, 门槽一、二期混凝土界面上角点开裂, 裂缝随荷载增加斜向一期混凝土内发展; 当荷载达到极限荷载的 70% (即 $P=5\,000\text{ kN}$) 时, 斜裂缝发展趋缓, 二期混凝土

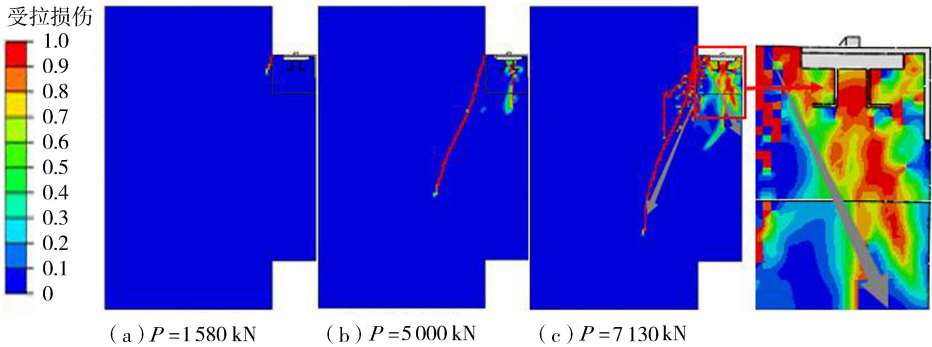


图10 门槽 YX1 受拉损伤云图

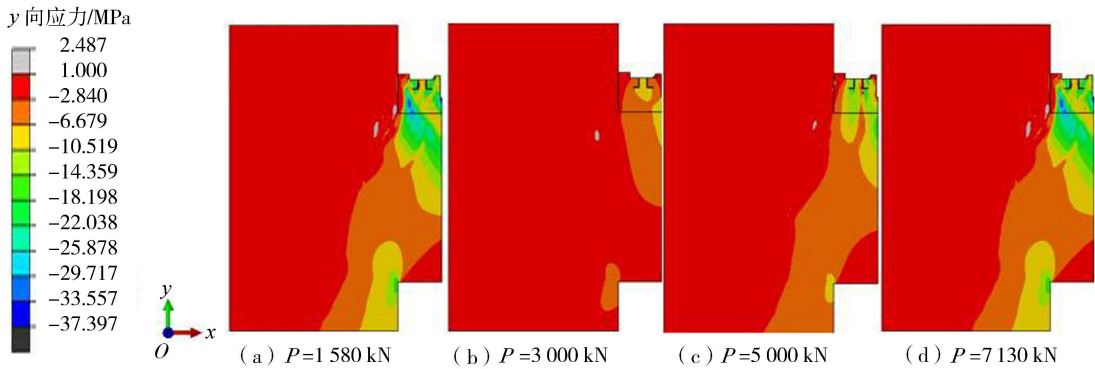


图11 门槽 YX1 顺水流方向应力云图

土内出现竖向劈裂裂缝; 当荷载达到极限荷载的 80% ~ 90% 时, 在一、二期混凝土界面附近出现新的斜裂缝但发展深度较浅; 极限荷载 (即 $P=7\,130\text{ kN}$) 时斜向门槽内部的裂缝与斜向临空面的裂缝成“八”字形分布, 预埋件下出现斜向临空面的滑移面, 模型发生局部滑移破坏, 此时水平钢筋并未屈服。结合顺水流方向应力云图 (图 11) 分析可知: 在加载初期压应力流主要斜向临空面传递, 随荷载增加压应力流逐步向门槽下游传递形成斜压杆, 但由于下游墩墙长度较长, 压应力流传递路径长, 因而高应力区主要集中在钢轨下侧, 并最终形成斜向临空面的滑移破坏。

3.3.2 剪跨比对破坏模式的影响

图 12 给出了门槽 YX2 ~ YX5 极限荷载时受拉损伤云图。由图 12 可见: 当剪跨比 a/h 为 0.17 ($h=3\,000\text{ mm}$) 时, 门槽裂缝分布仍呈“八”字形, 同时在混凝土压杆区域出现拉伸损伤, 但程度较轻, 门槽最终发生局部滑移破坏; 当剪跨比增大至 0.18 ($h=2\,800\text{ mm}$), 裂缝均斜向门槽内部发展, 预埋件下未形成滑移面, 混凝土压杆区域出现裂缝并向下游墩墙根部发展形成通缝, 门槽呈现典型的混凝土斜向压坏引起的剪切破坏; 随着剪跨比进一步增大, 混凝土压杆区域的拉伸损伤范围随之扩大, 剪切破坏特征愈加明显。结合极限荷载时顺水流方向应力云图 (图 13) 进一步分析可知: 门槽 YX2 由于下游墩墙较长, 荷载传递路径过长, 荷载主要斜向临空面传递, 破坏时局部滑移面处出现了明显的卸载现象; 门槽 YX3 ~ YX5 由

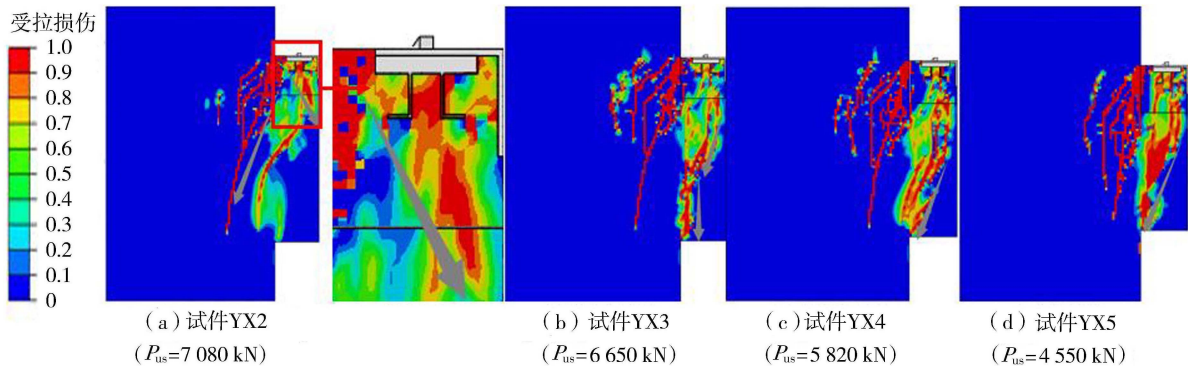


图 12 门槽 YX2 ~ YX5 受拉损伤云图

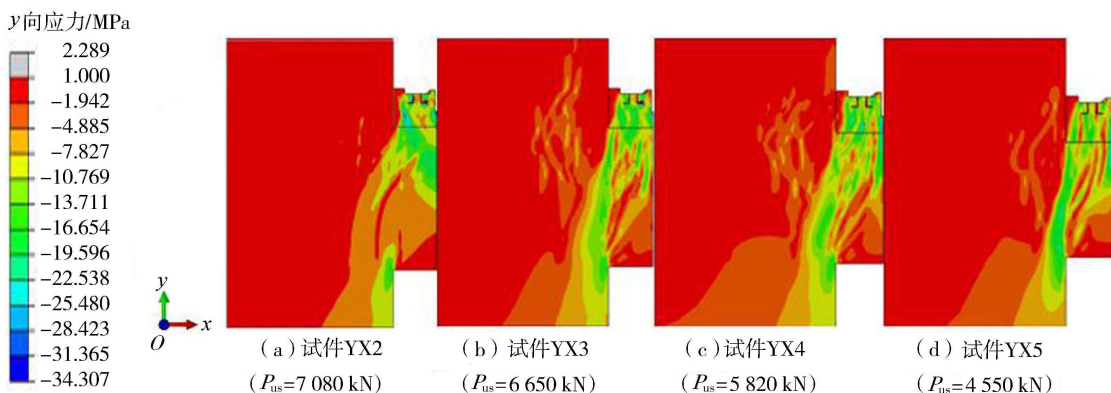


图 13 门槽 YX2 ~ YX5 顺水流方向应力云图

于随剪跨比增大(即墩墙长度减少),荷载可以有效地向下游传递,破坏时在混凝土斜压杆范围内出现大量卸载现象。门槽剪跨比与名义剪应力及破坏模式关系如图 14 所示,门槽 YX1 与 YX2 均发生局部滑移破坏,极限承载力由滑移面的抗滑承载力决定,因而其极限承载力相近;门槽 YX3 ~ YX5 呈现明显的剪切破坏特征,其极限承载力随剪跨比的增大而减小。

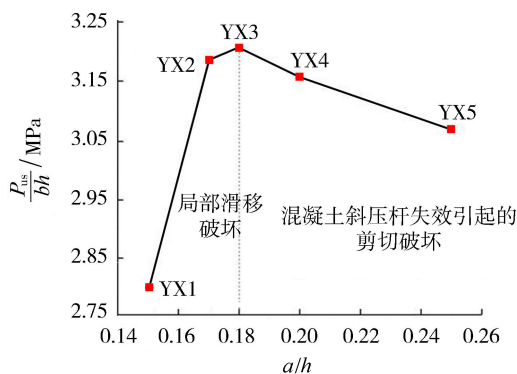


图 14 剪跨比与名义剪应力及破坏模式关系

3.3.3 水平钢筋布置方式对门槽受剪承载力的影响

在门槽 YX4 沿门槽顺水流方向(沿 h 方向)分别布置 2、3、4 层水平钢筋,来讨论水平钢筋布置方式对门槽受剪承载力的影响,图 15 给出了门槽 YX4 受拉损伤云图(图中 n 为水平钢筋层数)。从图 15 可见,不同水平钢筋层数下门槽均发生剪切破坏。

当 $n=3$ 时,门槽极限承载力较 $n=2$ 时提高 6.7%,混凝土斜压杆区域裂缝发展更加充分;当 $n=4$ 时,门槽极限承载力可进一步提高,较 $n=2$ 时增加约 10.5%,此时下游墩墙裂缝进一步扩展。由此可见,增加水平钢筋层数可有效提高门槽受剪承载力,但提高幅度随层数增加而逐渐下降。

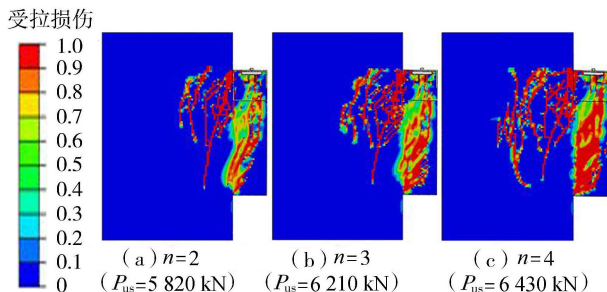


图 15 不同水平钢筋层数下门槽 YX4 受拉损伤云图

4 结 论

a. 门槽二期混凝土的局部受压承载力低于门槽整体抗剪承载力,实际工程设计时应首先对二期混凝土局部受压承载力进行验算。

b. 在门槽局部受压承载力得到保证的前提下,当门槽剪跨比小于 0.18 时,门槽裂缝发展呈“八”字形,门槽最终发生局部滑移破坏,极限承载力由滑移面抗滑承载力决定,此时增加下游墩墙长度无法提高其极限承载力;当检修门槽剪跨比大于或等于

0.18 时,门槽主要发生由混凝土压杆失效引起的剪切破坏,门槽极限承载力随剪跨比的增大(即下游墩墙长度的减小)而减小。

c. 增加水平钢筋层数可有效提高门槽受剪承载力,但提高幅度随层数增加而下降。

参考文献:

[1] 电力行业水电规划设计标准技术委员会. 水工混凝土结构设计规范:DL/T5057—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.

[2] 杨静安,杨鑫平,杜永. 导流洞平面闸门门槽结构计算分析[J]. 西北水电,2015(6):49-53. (YANG Jing'an, YANG Xinping, DU Yong. Calculation an analysis of slot structure of plane gate for diversion tunnel [J]. Northwest Hydropower, 2015(6):49-53(in Chinese))

[3] 吴松锋. 闸门门槽受剪切性能试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2009.

[4] 蔡睿恒,喻君,汪基伟. 门槽结构受剪破坏界限条件试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):144-150. (CAI Ruiheng, YU Jun, WANG Jiwei. Experimental study on the limit conditions of shear failure of gate slot [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(2):144-150. (in Chinese))

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[6] 钱向东,景洋. 地震作用下重力坝非线性振型响应的耦合性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):211-218. (QIAN Xiangdong, JING Yang. Modal coupling analysis of nonlinear seismic response of gravity dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(3):211-218. (in Chinese))

[7] 吴波,赵新宇,杨勇,等. 薄壁圆钢管再生混合柱-钢筋混凝土梁节点的抗震试验与数值模拟[J]. 土木工程学报,2013,46(3):59-69. (WU Bo, ZHAO Xinyu, YANG Yong,et al. Seismic test and numerical simulation of with recycled concrete columns with thin walled circular steel tubes-reinforced concrete beams joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (3): 59-69 (in Chinese))

[8] 张劲,王庆扬,胡守营,等. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构,2008,38(8):127-130. (ZHANG Jin, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Parameters Verification of Concrete Damaged Plastic Model of ABAQUS [J]. Building Structure, 2008, 38 (8):127-130. (in Chinese))

[9] 金玉,王向东,徐道远,等. 基于无损弹塑性模型的混凝土损伤定量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),

2003,31(6):659-661. (JIN Yu, WANG Xiangdong, Xu Daoyuan, et al. Elastic-plastic undamaged model-based quantitative analysis of concrete damage [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(6):659-661. (in Chinese))

[10] 方秦,还毅,张亚栋,等. ABAQUS混凝土损伤塑性模型的静力性能分析[J]. 解放军理工大学学报,2007,8(3):254-260. (FANG Qin, HUAN Yi, ZHANG Yadong, et al. Investigation into static properties of damaged plasticity model for concrete in ABAQUS [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(3):254-260. (in Chinese))

[11] 王中强,余志武. 基于能量损失的混凝土损伤模型[J]. 建筑材料学报,2004,7(4):365-369. (WANG Zhongqiang, YU Zhiwu. Concrete damage model based on energy loss [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7 (4):365-369. (in Chinese))

[12] 赵作周,周剑,侯建群,等. 上下层插筋连接预制混凝土空心模剪力墙有限元分析[J]. 工程力学,2017,34(1):117-129. (ZHAO Zuozhou, ZHOU Jian, HOU Jianqun, et al. Finite element analysis of shear walls with precast concrete hollow moulds and splice rebar connection between the upper and lower floors [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (1): 117-129. (in Chinese))

[13] 刘沛林. 装配式钢筋混凝土简支板梁桥铰缝受力性能研究[D]. 北京:清华大学,2010.

(收稿日期:2018-09-27 编辑:雷燕)

+++++

(上接第81页)

[12] 陈建生,刘建刚,焦月红. 接触冲刷发展过程模拟研究[J]. 中国工程科学,2003,5(7):33-39. (CHEN Jiansheng, LIU Jiangang, JIAO Yuehong. Simulation study on the contact scouring development between underground layers [J]. Engineering Science, 2003, 5 (7): 33-39. (in Chinese))

[13] 朱亚军,彭君,陈群. 砂砾石与黏土的接触冲刷试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(2):92-97. (ZHU Yajun, PENG Jun, CHEN Qun. Contact scouring tests on sandy gravel and cohesive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (2): 92-97. (in Chinese))

[14] 赵寿刚,汪自力,张俊霞,等. 黄河下游堤防土体抗冲特性试验研究[J]. 人民黄河,2012,34(1):11-13. (ZHAO Shougang, WANG Zili, ZHANG Junxia, et al. Experiment study of soil scouring on the Lower Yellow River dike [J]. Yellow River, 34 (1): 11-13. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-28 编辑:雷燕)