

三峡工程永久船闸中隔墩裂缝扩展及加固效果数值分析*

徐平

(华中理工大学土建学院 430074 武汉)

杨启贵 徐年丰

(长江水利委员会设计院 430010 武汉)

摘要 选取三峡工程永久船闸典型剖面,采用断裂力学分析方法对中隔墩岩体不同长度及不同倾角的单条裂缝和多条裂缝情况,进行了多种方案的裂缝扩展稳定性数值分析。对无锚、设计锚固和实际锚固程序分别开展了数值分析,并对无锚和不同锚固方式作了对比,最后探讨了裂缝的扩展机理与有效的止裂措施。

关键词 三峡工程,岩体,裂缝,断裂力学,数值分析,加固

分类号 O 346 11, TV 223 24

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)01-0011-05

1 前言

三峡工程永久船闸形成高达 170 余米的陡高双边坡双线闸室和高达 50~ 70 余米的中隔墩。永久船闸区岩体属坚硬的多裂隙岩体,闸室开挖后应力重分布产生拉应力区,文[1]曾指出中隔墩岩体在闸室开挖后三向卸荷、局部四面卸荷,岩体由受压转为受拉,裂缝由压剪转为拉剪的趋势更为明显,裂缝扩展的可能性较大。

据现场观测二、三闸室中隔墩顶面找平混凝土出现较多裂缝,最大张开超过 20 mm,引起参建各方高度关注。因此,裂缝张开的条件及裂缝深部扩展情况,锚杆(索)支护对裂缝扩展的控制效果等已成为工程施工与运行安全的主要问题。

本文选取典型剖面采用断裂力学分析方法,对中隔墩岩体不同长度及不同倾角的单条裂缝和多条裂缝情况,进行了多种方案的裂缝扩展稳定性数值分析。对无锚、设计锚固和实际锚固程序分别开展了数值分析,并对无锚和不同锚固方式作了对比,最后探讨了裂缝的扩展机理与有效的止裂措施,可为中隔墩的加固设计与永久船闸的竣工验收提供依据。

2 计算原理及裂缝扩展稳定性分析方法

对平面问题,裂缝扩展有 2 种类型,即 I 型(张开型)和 II 型(剪切型)。工程岩体中裂缝扩展并非纯 I 型或纯 II 型,而可能是既有 I 型又有 II 型的 I-II 复合型。人工高边坡的开挖面附近岩体及中隔墩上部存在拉应力区,裂隙扩展必定存在 I-II 复合型。

据文[1, 2],永久船闸区微新岩体裂缝扩展的 I-II 复合型断裂判据有如下抛物线经验公式:

$$K_I/K_{Ik} + 1.89(K_{II}/K_{Ik})^2 = 1 \quad (1)$$

微新岩体断裂韧度 $K_{Ik} = 1.751 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

有限元计算裂缝缝端的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 见文[1]。规定拉为正、压为负,如果 K_I 为负值,且同时又存在 K_{II} ,则为 I-II 压剪复合;若 K_I 为正,同时又存在 K_{II} ,则为 I-II 拉剪复合。

另外,计算出了缝端的 K_I 和 K_{II} 后,裂缝扩展的稳定性分析采用判据式(1),式(1)左端小于、等于和大于 1 分别对应裂缝稳定、临界状态和失稳扩展。

裂缝扩展方向按最大拉应变理论计算,如果裂缝扩展,令其在裂缝扩展方向增加某一单位长度,然后重复以上分析。如此继续下去,可以得到裂缝整个

1999年8月30日收到初稿,1999年11月5日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(59679020)资助项目。

作者徐平简介:男,36岁,硕士,1987年毕业于青岛海洋大学应用数学专业,现任长江科学院高级工程师,主要从事岩石力学试验与数值分析方面的研究工作。

扩展路径, 最终判断裂缝是否继续开裂或者止裂。

3 地质概况与裂缝概化模型

三峡工程永久船闸区岩体为前震旦系闪云斜长花岗岩, 间含片岩捕虏体和数量不多的中细粒花岗岩脉、伟晶岩脉、辉绿岩脉及石英脉, 并有 NNW, NE~NEE, NNE, NW~NWW 四组断层。

中隔墩顶面高程 159.75m, 据二闸室~三闸首中隔墩顶面与南北两侧直墙 2954 条裂隙统计, 按走向裂隙可分为四组: NE~NEE, NNW, NNE, NW~NWW 组。一般在同一地段以 1~2 组占优势, 其他组稀少。裂隙类型以硬性结构面平直稍粗型为主, 长度大多小于 10m, 以陡倾角裂隙为主, 占裂隙总数的 60% 以上, 缓倾角裂隙最少, 不到总数的 10%。

到 1999 年 6 月永久船闸开挖已基本完成, 根据施工期现场地质编录, 对二闸室的典型剖面, 自中隔墩顶向下设置初始长度为 10m 的单裂缝, 其倾角分 60 和 90 两种, 以下简称斜裂缝(图 1(a))和直裂缝(图 1(b))。对三闸首的典型剖面, 考虑了 4 条裂缝, 初始长度分别为 6, 10, 8 和 15m, 倾角分别为 75°, 66°, 60 和 74°, 另外还考虑了 f₃ 断层, 以下简称多裂缝(图 1(c))。

4 计算条件

4.1 网格划分与计算参数

根据选取剖面的地质情况和开挖过程以及裂隙分布剖分有限元网格, 单元类型为 8 节点四边形和 6

节点三角形等参单元。单裂缝情况下剖分单元与节点最多时有 2 298 个和 6 707 个, 多裂缝情况下剖分单元与节点最多时达 2 889 个和 8 240 个。

全风化、强风化、弱风化、微新及断层等的物理学参数参见文[1]。

计算荷载考虑了初始地应力场, 参见文[3]。

4.2 开挖与加固模拟

对二闸室的典型剖面, 根据实际开挖过程并作适当简化, 以 10~15m 作为一个开挖步, 开挖为两闸室并行下挖方式。对三闸首的计算剖面基本上模拟实际开挖过程, 少数开挖高程与时间作了简化。

有限元分析中锚杆用杆单元模拟, 长度按穿过裂缝 2m 考虑; 锚索作用按集中力模拟, 均采用对穿锚。开挖与支护步数最多有 17 步。

4.3 计算方案

对二闸室的计算剖面, 根据不同裂缝倾角、不同的加固方式组合, 共进行了 8 种方案的计算分析; 对三闸首的计算剖面, 针对无支护和不同的支护情况共进行了 3 种方案的计算分析, 见表 2。

开挖前及以后每一步模拟开挖时均计算裂缝端部的应力强度因子 K_I 和 K_{II}。

5 计算成果分析

5.1 单裂缝计算结果

图 2、3 分别为单条裂缝在不同的计算方案下裂缝扩展长度、裂缝张开宽度的比较。

(1) 变形与应力

没有裂缝出露的部位岩体的变形形态及量

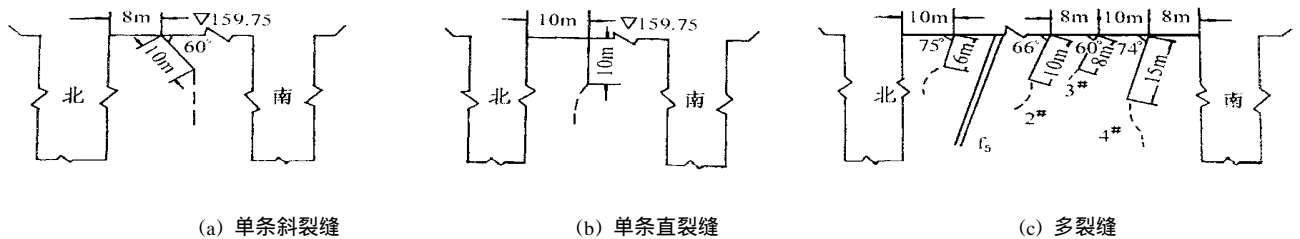


图 1 裂缝概化模型示意图

Fig 1 Diagram of cracks model

表 1 开挖与加固模拟简表

Table 1 Modeling of excavation and reinforcement

计算剖面	开挖模拟	锚杆布置	锚索布置	锚固时间
二闸室	10~15m 作为一个开挖步, 两闸室并行下挖	直径 40mm, 排距 1.5~2.5m	对穿锚, 锚固力为 3 MN, 排距 3~5m	某一开挖步完成后立即对开挖面施锚
三闸首	模拟实际开挖过程, 少数开挖高程作了简化		对穿锚, 锚固力为 3 MN, 实际锚固高程	与实际开挖和锚固时间对应

表 2 计算方案

Table 2 Schemes of numerical simulation

计算剖面	计算方案	加固方式及高程/m	裂缝概化模型
二 闸 室	1	无锚	图 1(a)
	2	锚杆 158 5, 157, 155 23, 153 6, 151 76, 149 32, 147 22 锚索 157, 153 6, 149 32, 145, 140	
	3	锚杆 155 23, 153 6, 151 76, 149 32, 147 22 锚索 153 6, 149 32, 145, 140	
	4	无锚	
	5	锚杆 158 6, 156 6, 155 2, 153 3, 151 6, 150, 148 4, 147, 145, 143 锚索 156 6, 151 6, 148 4, 145, 140	
	6	锚杆 155 2, 153 3, 151 6, 150, 148 4, 147, 145, 143 锚索 151 6, 148 4, 145, 140	
	7	锚杆 158 6, 156 6, 155 2, 153 3, 151 6, 150, 148 4, 147, 145, 143 锚索 156 6, 151 6, 148 4, 145, 140	
	8	锚索 156 6, 151 6, 148 4, 145, 140	
三 闸 首	9	无锚	图 1(c)
	10	锚索 151 5, 138 5, 136 5, 133, 130 5	
	11	锚索 156 6, 151 5, 146, 138 5, 136 5, 133, 130 5	

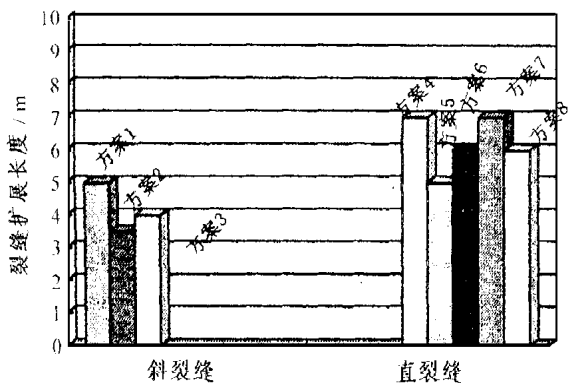


图 2 单裂缝扩展长度比较

Fig 2 Comparison of cracking length of single crack

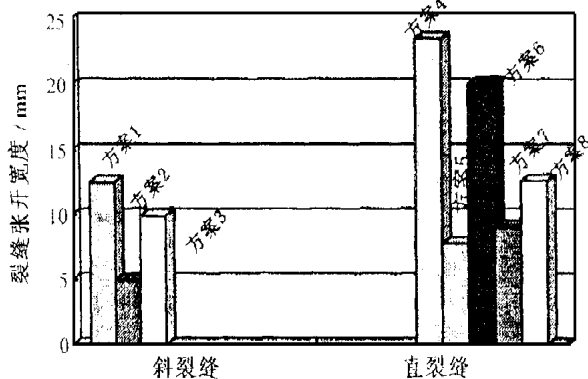


图 3 单裂缝张开宽度比较

Fig 3 Comparison of open width of single crack

值、应力状态及量值同以往数值计算结果基本一致，但裂缝处的变形增大且应力有明显集中，最大拉应力超过 35MPa。裂缝向前扩展后，原尖端应力释放，新尖端应力集中逐步缓解。

无锚固时，方案 1(斜裂缝)和方案 4(直裂缝)

中隔墩顶裂缝最大张开度分别为 12.24 和 24.09 mm。开挖完成后裂缝出露侧的中隔墩直墙顶朝闸室的位移，方案 1 为 11.06mm，方案 4 为 22.67mm，分别是另一侧的 2.74 倍和 5.53 倍，可见中隔墩直墙顶的变形主要由裂缝张开引起，岩石本身的变形是很小的，且斜裂缝的张开度明显小于直裂缝。

有锚时，斜裂缝的方案 2, 3 中隔墩顶裂缝最大张开度分别为 5.65 和 10.67mm；直裂缝的方案 5, 6, 7, 8 中隔墩顶裂缝最大张开度分别为 8.46, 20.99, 9.23 和 18.89mm。开挖完成后斜、直裂缝出露侧的中隔墩直墙顶朝闸室的位移较无锚时小 2.3~12.5mm。

方案 2 与方案 1、方案 5 与方案 4 比较可知，施加锚杆与锚索后，裂缝最大张开度较无锚时分别小 53.8% 和 64.9%。

将取消中隔墩上部 2 排锚杆和 1 排锚索的方案 3 与方案 2、方案 6 与方案 5 比较，中隔墩顶裂缝最大张开度，前者分别是后者的 1.89 和 2.48 倍。

(2) 裂缝扩展分析

无论是斜裂缝，还是直裂缝，开挖前均处于压剪状态，将 K_I 和 K_{II} 代入式(1)，其左端均小于 1，表明裂缝是稳定的。随着开挖加深应力逐步释放，裂缝的复合状态将由压剪变成拉剪。

无锚固时，斜裂缝和直裂缝均随闸室下挖其尖端逐步扩展，开挖完成后直裂缝扩展长度 6~7m，斜裂缝扩展长度 5m 左右，可见相同的初始裂缝长度，斜裂缝扩展长度小于直裂缝。

施加锚杆与锚索方案 2 和方案 5，开挖完成后裂缝扩展长度分别为 3~3.5m 和 3~5m，与无锚方案 1 和方案 4 比较，扩展长度有所减小。

取消中隔墩上部 2 排锚杆和 1 排锚索的方案

3 和方案 6, 其裂缝的扩展不能得到有效控制, 斜直裂缝的扩展长度分别达 3~ 4 m 和 5~ 6 m, 与方案 2 和方案 5 比较, 扩展长度有所增大。

5.2 多裂缝计算结果

图 4 和 5 分别为多裂缝在有锚和无锚计算方案下裂缝扩展长度、裂缝张开宽度的比较。图 6 为方案 9 开挖完成后边坡变形图。

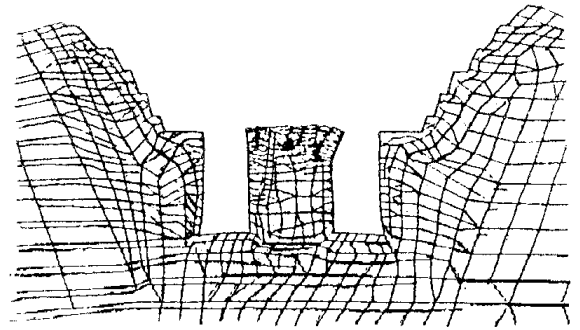


图 6 方案 9 开挖完成后边坡变形图

Fig 6 Deformation of slope after excavation (scheme 9)

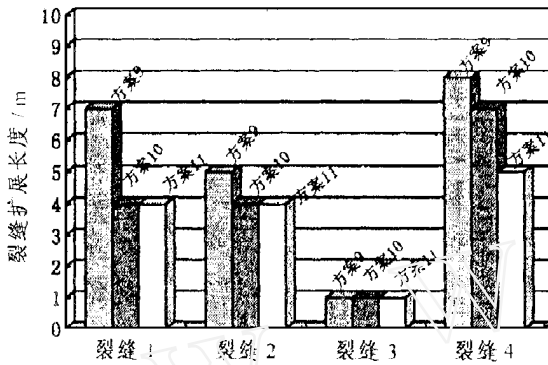


图 4 多裂缝扩展长度比较

Fig 4 Comparison of cracking length of multi-cracks

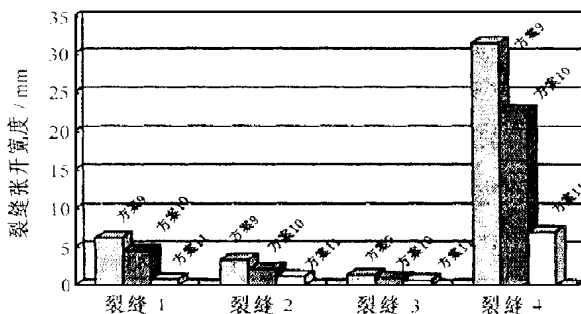


图 5 多裂缝张开宽度比较

Fig 5 Comparison of open width of multi-cracks

(1) 变形与应力

有、无锚固时, 裂缝朝深部扩展前其尖端也表现为应力集中, 长裂缝(4# 裂缝) 尖端最大拉应力超过 50MPa, 而短裂缝(3# 裂缝) 尖端最大拉应力小于 4MPa, 但靠近边墙的短裂缝(1# 裂缝) 尖端最大拉应力仍在 30~ 40MPa 之间。可见当中隔墩岩体长、短裂缝同时存在时, 长裂缝及靠近中墩边墙的短裂缝受到的拉应力远大于中墩中部的短裂缝。

无锚固时(方案 9), 中隔墩顶 4 条裂缝开挖完成后最大张开分别为 6.29, 3.38, 1.36 和 31.55 mm, 总张开度为 42.58 mm, 而南北直墙顶朝闸室方向的位移分别为 29.06 和 14.15 mm, 相对变形为 43.21 mm。可见中隔墩的变形仍主要由裂缝张开引起, 长裂缝及靠近中墩边墙的短裂缝张开位移大于中墩中部的裂缝。

有锚时(方案 10) 开挖完成后 4 条裂缝张开度较无锚时减小, 4# 裂缝减小达 87.9 mm, 直墙顶朝闸室相对变形为 31.85 mm, 较无锚时小 11.36 mm。

将增加上部 2 排锚索的方案 11 与方案 10 比较, 中隔墩顶 4 条裂缝的张开度均有减小, 尤其是靠中墩边墙的裂缝减小的幅度更大。

(2) 裂缝扩展分析

无锚固时, 4 条裂缝开挖完成后扩展长度分别为 6.5~ 7 m, 4.5~ 5 m, < 1 m 和 7~ 8 m, 可见当中隔墩岩体长、短裂缝同时存在时, 长裂缝及靠近中墩边墙的短裂缝的扩展长度大于中墩中部的裂缝, 中部的短裂缝的扩展长度较小。

施加锚索的方案 10, 开挖完成后 4 条裂缝扩展长度分别为 3.5~ 4 m, 3.5~ 4 m, < 1 m 和 6~ 7 m。与无锚的方案 9 比较, 扩展长度有所减小。

增加上部 2 排锚索的方案 11 裂缝的扩展长度较方案 10 也有所减小, 上部锁口锚索对裂缝扩展特别是对靠近边墙的裂缝的扩展发挥了控制作用。

(3) 与现场监测的比较

裂缝张开度及扩展深度的比较

1997 年初, 中隔墩二闸首支持体顶面南北两侧入槽开挖最早并出现了裂缝。1998 年 6 月后二闸首至四闸首段中隔墩顶均出现不同程度的裂缝, 其中以二闸室至三闸首段较为严重。至 1999 年 2 月对二闸室至三闸首段中隔墩顶找平混凝土面裂缝调查统计, 共发现裂缝 140 条。采用测缝计观测, 裂缝开度一般 3~ 5 mm (占裂缝总条数的 76%), 少量开度 5~ 10 mm, 开度大于 10 mm 的仅 4 条(占裂缝总条数的 3%), 最宽达 23 mm; 裂缝下切深度一般小于 10 m, 少量 10~ 20 m, 最大下切深度 20 m。

计算结果, 无锚固时(方案 9), 1# 与 4# 裂缝张开度大于 5 mm, 2# 与 3# 裂缝张开度小于 5 mm; 有支护时, 与实际锚固程序较接近的方案 10 的 1#, 2# 与 3# 裂缝开挖完成后张开度均小于 5 mm, 4# 裂缝张开度为 22.76 mm, 与现场调查结果较接近。

无锚固时(方案9), 4条裂缝开挖完成后的长度(初始长度+扩展长度)分别为13, 15, 9和23m, 方案10的4条裂缝开挖完成后的长度(初始长度+扩展长度)分别为10, 14, 9和22m, 与现场调查的裂缝下切深度也是较接近的, 但由于计算中所取裂缝的初始长度较长, 故加上扩展长度后的总长度较实际裂缝长度稍大。

岩体变形的比较

位于二、三闸室的监测断面13-13, 15-15及17-17在中隔墩北南两侧布置了多个外观测点, 至1999年5月, 13-13剖面北侧点向北变形31.27mm, 南侧点向南变形5.98mm, 二者相对变形37.25mm; 垂直方向回弹分别为9.88和0.46mm。15-15剖面北、南两侧点向北变形分别为17.18和11.76mm; 北侧点垂直方向下沉1.82mm, 南侧点垂直方向回弹17.61mm。17-17剖面北、南两侧点向北变形分别为31.72和30.69mm; 垂直方向回弹分别为12和21.98mm。

本次计算无锚固时(方案9)直墙顶朝闸室相对变形为43.21mm, 与实际锚固程序较接近的方案10相对变形为31.85mm, 与13-13剖面实测相对变形量值相当。方案9北、南直墙顶的垂直方向的回弹

分别为22.62和17.03mm, 方案10北、南直墙顶的垂直方向的回弹分别为23.78和19.55mm, 计算值与15-15, 17-17剖面的实测值也较接近。

6 结 语

(1) 对单条裂缝, 斜裂缝的张开宽度与扩展长度均小于直裂缝; 中隔墩岩体长、短裂缝同时存在时, 长裂缝及靠近中墩边墙的短裂缝张开位移、扩展长度大于中墩中部的裂缝。故对靠近中墩边墙的长裂缝及与船闸轴线近于平行的直裂缝要重点加固。

(2) 上部锁口锚杆(索)对裂缝张开与裂缝扩展的控制作用好于中墩腰部及下部的锚杆(索), 因此, 宜适当加大上中部锚固强度。

参 考 文 献

- 1 徐平, 夏熙伦. 花岗岩 I-II 复合型断裂试验及断裂数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 62~70
- 2 徐平, 夏熙伦. 三峡工程花岗岩蠕变断裂与 I-II 型断裂试验研究[J]. 长江科学院院报, 1995, 12(3): 31~36
- 3 夏熙伦, 徐平, 丁秀丽. 岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 312~322

NUMERICAL SIMULATION ON CRACK PROPAGATION AND REINFORCEMENT EFFECTIVENESS OF ISOLATED ROCKMASS BETWEEN SHIPLOCKS OF THREE GORGES PROJECT

Xu Ping¹, Yang Qigu², Xu Nianfeng²

⁽¹⁾ Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China

⁽²⁾ Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010 China

Abstract With application of fracture mechanics, the propagation rule of single crack and multi-cracks with different length and dip on the selected typical cross section of shiplock are numerically simulated. The different reinforcement schemes in design, real construction, and without any anchor are compared with each other.

Key words Three Gorges Project, rockmass, crack, fracture mechanics, numerical simulation, reinforcement