

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230068

某水电站边坡锚索框格梁联合支护研究

刘玉兴^{1,2}

(1. 中铁十八局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 063000; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对目前锚索框格梁联合支护在边坡加固中的研究较少等问题,以某水电站左岸边坡支护实际工程为例,结合极限平衡方法和有限元强度折减法分析了原始边坡稳定性,研究了锚索框格梁联合支护方案(包括锚索锚固力计算、锚索布置间距、锚索长度、最优入射锚固角度及框格梁尺寸等),并结合数值模拟对支护效果进行了研究。结果表明,原始边坡需进行强化支护,有限元强度折减法计算原始边坡安全系数较理论分析方法误差在1.5%~2.0%范围内;使用温度荷载方法模拟锚索预应力对锚索框格梁联合支护的边坡进行稳定性分析,联合支护效果显著,支护后无明显滑裂面出现,研究结果可为类似边坡支护工程提供参考。

关键词: 边坡稳定性; 数值模拟; 强度折减法; 联合支护

中图分类号: TU457; TV554⁺.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0162-05

1 引言

边坡稳定性问题一直是工程建设中研究的热点问题,边坡失稳不仅会产生巨大的经济损失,还会产生严重的安全问题^[1],目前针对此问题进行了许多数值模拟和理论分析^[2,3],如聂柏松等^[4]基于强度折减动力分析法分析了岩体边坡稳定性,并结合实例验证了理论的正确性;刘菁钰等^[5]建立了考虑多因素的边坡稳定性简化计算公式,并经验证误差均在10%以内;叶帅华等^[6]针对边坡稳定性分析及滑移面确定问题提出了一种解析解,并通过算例验证了安全系数的误差不超过±5%;孙吉书等^[7]提出了一种基于相关向量机(RVM)的边坡稳定性预测模型,并结合实例说明该方法能较为准确地预测出不同指标下的边坡安全系数。而针对支护方案的研究较少,框格梁锚索联合支护是一种新兴的复合边坡加固措施,布置方便、灵活,结构轻便且安全经济。为此,本文以某水电站左岸边坡支护实际工程为例,首先通过极限平衡理论与有限元强度折减法对原始边坡进行了稳定性分析,然后对锚索框格梁联合支护方案进行了设计研究,选择出合理的锚索间距、锚索长度、最优入射锚固角度和合理的框格梁尺寸等,并通过数值分析研究了支护方案的支护效果,

可为类似边坡支护工程提供方案设计思路与经验参考。

2 强化支护区域的确定

因某水电站下游边坡受泄洪产生的雾化现象的影响存在边坡失稳的风险,故分析下游左岸典型边坡时,首先需确定左岸边坡强化支护区域,采用天津大学建议公式^[8]确定强化支护区域,该公式根据坝高 h 进行估算。受雾流降雨区影响的强化支护区域长度 L 、宽度 W 、高度 H 计算公式分别为:

$$L = (2.3 \sim 3.4)h \quad (1)$$

$$W = (1.5 \sim 2.0)h \quad (2)$$

$$H = (0.8 \sim 1.4)h \quad (3)$$

根据工程基本资料,将其坝高 $h = 295$ m代入式(1)~(3)可分别求出受雾化降雨区影响的强化支护区域的纵向、横向及高度范围,所以本工程左岸Ⅳ区边坡强化支护区域平面范围为(左溢出)0+700~1+060,高程范围为2 627~2 780 m。

3 原始边坡稳定性分析

3.1 边坡稳定性计算

根据基本资料,左岸边坡Ⅳ区以洞式溢洪道出口挑坎(溢)桩号0+950为起点(溢出)桩号

收稿日期: 2022-12-27, 修回日期: 2023-01-30

基金项目: 水利工程仿真与安全国家重点实验室开放研究基金(HESS-2115)

作者简介: 刘玉兴(1974-),男,高级工程师,研究方向为水利水电工程勘察与施工,E-mail:1448054313@qq.com

0+000, IV 区桩号为(左溢出)桩号 0+700~1+060, 高程为 2 627~2 780 m, 该区地形坡度约 40°, 边坡高度 153 m。

取垂直剖面方向单位宽度进行计算, 边坡剖面见图 1。根据作图法近似确定圆弧滑动面位置, 得到滑动圆弧半径约为 $R=278$ m, 取土条宽度为 $b=0.1R=27.8$ m, 将滑动面以上部分分成 8 条竖直土条, 并从坡脚至坡顶按 1~8 依此进行编号。

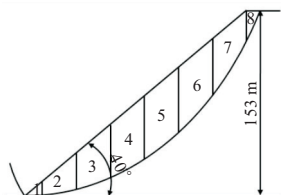


图 1 条分法计算边坡剖面图

Fig. 1 Calculation of slope profile by slices method

3.1.1 瑞典条分法

瑞典条分法计算边坡稳定安全系数 F_s 公式为:

$$F_s = \frac{\sum (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \varphi_i' + \sum c_i' l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (4)$$

式中, F_s 为边坡稳定安全系数; W_i 为第 i 块小土条的重量; α_i 为第 i 块小土条底面与水平面的夹角; u_i 为第 i 块小土条底面的孔隙水压力; l_i 为第 i 块小土条滑动面长度; φ_i' 为第 i 块小土条底面的有效内摩擦角; c_i' 为第 i 块小土条底面的有效粘聚力。

查阅工程雾化区地质岩体基本资料并对比规范^[9], 取天然状态边坡岩土体有效粘聚力 $c=75$ kPa, 有效内摩擦角 $\varphi=33^\circ$, 所以根据式(4)计算可得原始边坡稳定性安全系数 F_s 为 1.051。

3.1.2 简化 Bishop 法

简化 Bishop 法计算边坡稳定安全系数 F_s 公式为:

$$F_s = \sum A_i / \sum W_i \sin \alpha_i \quad (5)$$

其中
$$m_i = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i'}{F_s} \sin \alpha_i \quad (6)$$

经过 5 次试算可知安全系数 F_s 为 1.049。

3.1.3 有限元强度折减法

强度折减法假定不同的折减系数 F_r , 对岩土体的 c 和 φ 进行折减, 然后通过 Abaqus 实现边坡稳定安全系数的计算:

$$c_m = c / F_r \quad (7)$$

$$\varphi_m = \arctan[\tan \varphi / (F_r)] \quad (8)$$

式中, c_m 、 φ_m 分别为通过 F_r 折减后的 c 、 φ ; c 、 φ 分别为土体的粘聚力、内摩擦角; F_r 为强度折减系数。

选取左岸边坡典型坡面尺寸建立数值分析模型, 并对原始边坡的应力变形进行数值分析, 相应地提高折减系数, 直至边坡达到临界破坏, 提取坡顶处 x 方向位移与折减系数的数据, 得到的曲线见图 2, 可知位移拐点处得到的折减系数即为安全系数, 本文原始边坡达到临界破坏时的稳定安全系数为 1.070, 其中原始边坡塑性应变云图见图 3, 可看出存在明显的滑动面, 原始边坡位移变形云图见图 4, 可知总位移最大为 5.29 cm, 发生在坡顶处, x 方向位移最大为 -2.74 cm, 发生在坡脚处, 需进行边坡强化支护。

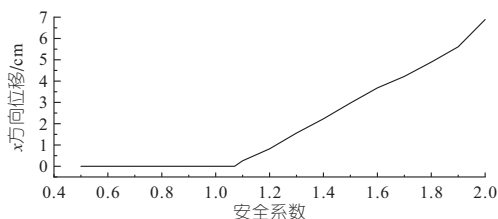


图 2 原始边坡安全系数

Fig. 2 Original slope safety factor

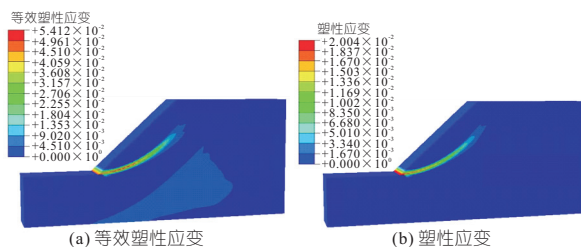


图 3 塑性应变云图

Fig. 3 Plastic strain cloud diagram

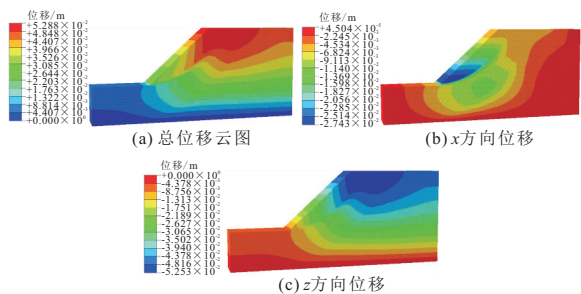


图 4 位移变形云图

Fig. 4 Displacement deformation cloud diagram

3.2 结果对比

某水电站工程永久性主要建筑物为 1 级建筑物, 岩体较破碎, 浅表覆盖层及破碎岩体在雨雾影响下稳定性差, 可能出现塌滑或泥石流, 对建筑物影响较严重, 根据规范^[9]确定某水电站下游左岸边坡为 2 级边坡, 可知边坡稳定安全系数应为 1.15~1.20。

由边坡稳定计算可知, 采用瑞典条分法、简化 Bishop 法、有限元强度折减法三种方法计算的边坡稳定安全系数分别为 1.051、1.049、1.070, 使用有限元法得出的安全系数与两种极限平衡方法

的结果相比误差为 1.8% 与 2.0%，可见数值模拟方法是可靠的。原始边坡的安全系数不能达到规范要求，因此需对该边坡采取一定的支护措施进行强化支护使其满足规范要求。

4 联合支护设计

综合考虑本文工程边坡的重要性、安全性、经济美观和环境保护的需要，并结合本工程左岸雾化 IV 区边坡的现状稳定条件，选定支护方案为锚索框格梁联合支护。

4.1 锚索与框格梁设计

4.1.1 锚索锚固力

根据条分法稳定性反算设计锚固力，即在假设有锚固力作用条件下采用瑞典条分法对土条进行稳定性计算，推算出在锚索作用下边坡满足安全系数标准时所需施加的锚固力，即锚索锚固力的设计值。在稳定性计算基础上，土条上施加一锚固力 T 后，则土条受力图见图 5。

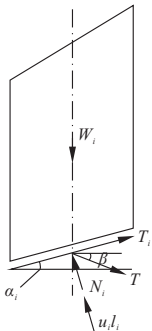


图 5 边坡某土条受力分析图

Fig. 5 Force analysis diagram of a soil strip in slope

预应力锚索按最优锚固角 β 安设，其计算公式为^[9]：

$$\beta = \theta - (45^\circ + \varphi/2) \quad (9)$$

式中， θ 为滑动面倾角，对条分法和原始边坡稳定性有限元结果进行测量确定滑动面倾角为 38° ； φ 为滑动面内摩擦角。

根据式(9)，则最优锚固角为 -24° (负号表示该角为俯角)。

该受力条件下，瑞典条分法进行边坡稳定性计算的公式为：

$$F_s = \frac{\sum [W_i \cos \alpha_i + T \sin(\alpha_i + \beta) - u_i l_i] \tan \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i - \sum T \cos(\alpha_i + \beta_i)} \quad (10)$$

式中， T 为施加在土条底部的锚固力； β_i 为锚索入射角。

根据式(10)，锚索入射角为 $\beta_i = 24^\circ$ 。

依据规范^[9]，由式(10)可得边坡稳定时的安

全系数为 $F_s = 1.20$ 。由此可得 $T = 6\ 621.5\ \text{kN/m}$ 。

4.1.2 锚索尺寸

第 2、3 块土条在垂直剖面单位宽度上按竖直线间距 2 m 布置 8 排锚索，每根锚索的设计锚固力为 828 kN/m，第 4 块土条按竖直线间距 2 m 布置 9 排锚索，设计锚固力为 739 kN/m，第 5 块土条按竖直线间距 2 m 布置 10 排锚索，设计锚固力为 662 kN/m，第 6 块土条按竖直线间距 3 m 布置 9 排锚索，设计锚固力为 739 kN/m，第 7 块土条按竖直线间距 3 m 布置 12 排锚索，设计锚固力为 552 kN/m。

锚索锚固段长度公式^[9]为：

$$L_a = KT' / (\pi D f_{mg} \psi) = KT' / (n \pi d \xi f_{ms}) \quad (11)$$

式中， K 为抗拔安全系数，取 2.0； T' 为锚索拉力设计值； L_a 为锚固段长度； f_{mg} 、 f_{ms} 均为砂浆强度，查规范^[9]取 $f_{mg} = 2.5\ \text{MPa}$ 、 $f_{ms} = 3\ \text{MPa}$ ； D 为锚索锚固段钻孔直径； d 为钢绞线直径； ξ 为界面粘结强度降低系数，取为 0.8； ψ 为影响系数，根据规范取为 0.8； n 为钢筋或钢绞线根数，取 7。

所以根据设计锚固力计算锚索锚固段长度，见表 1。

表 1 锚固段长度计算
Tab. 1 Anchorage section length calculation

锚索锚固力设计值 / (kN · m ⁻¹)	锚索间距 / m	锚固体直径 / mm	钢绞线股数	钢绞线直径 / mm	锚固段长度 / m		最终锚固段长度 / m
					式(10)	式(11)	
828	2	130	7	15.2	4.055	4.128	5
828	2	130	7	15.2	4.055	4.128	5
736	2	130	7	15.2	3.604	3.670	4
662	2	130	7	15.2	3.242	3.301	4
736	3	130	7	15.2	5.406	5.505	6
552	3	130	7	15.2	4.055	4.128	5

按规范规定^[9]，锚索自由段的长度不得小于 5.0 m，且至少要穿过潜在滑裂面 1.5 m。锚索布置见表 2。

表 2 锚索布置方案
Tab. 2 Anchor cable arrangement plan

土条编号	布置排数	锚固力设计值 / kN/m	截面面积 / mm ²	锚固体直径 / mm	间排距 / m	自由段长度 / m	锚固段长度 / m	总长 / m	入射角度 / (°)	杆体材料
2	8	828	5 594.06	130	2	10~22	5	17~29	24	7 股直径
3	8	828	5 594.06	130	2	23~31	5	30~38		$d = 15.2\ \text{mm}$
4	9	736	4 972.50	130	2	32~36	4	38~42		钢绞线
5	10	662	4 472.55	130	2	37~38	4	43~44		
6	9	736	7 458.75	130	3	35~38	6	43~46		
7	12	552	5 594.06	130	3	19~32	5	26~39		

注：锚固力设计值单位为 kN/m。

4.1.3 框格梁尺寸

本工程中设计框格梁采用现浇钢筋混凝土框格梁，方型布置，编号 2、3、4、5 土条框格间、排距取为 2 m，编号 6、7 土条框格间、排距取 3 m，框格梁尺寸为 0.8 m × 0.8 m，混凝土强度等级采用 C35，其中，框格梁示意图见图 6。

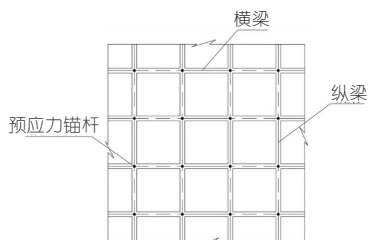


图 6 框格梁结构示意图

Fig. 6 Diagram of frame lattice beam structure

4.2 联合支护数值分析

对原始边坡典型坡面模型进行锚索框格梁联合支护,因原始模型边坡的宽度为 2.4 m,故选定建立 4 排纵梁,锚索共选取 38、42 m 两种典型长度,竖直方向上间隔布置,弹性模量 1.5×10^{11} Pa,泊松比 0.25,为模拟锚索预应力,建立锚索的膨胀系数参数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,并设置温度预定义场,初始温度为 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$,联合支护分析步温度为 $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。通过在联合支护分析步中降低锚索部件的温度参数来达到初始预应力,即锚固力,降温法的原理在于降温使其收缩,而与之相邻的边界为抵抗收缩自然会受到拉力作用,即实现了预应力荷载的施加:

$$\Delta T = F_p / (E\alpha) \quad (12)$$

式中, F_p 为锚索预应力,为保证工程施工的安全余量,选取锚索预应力为 500 kPa; E 为锚索弹性模量,取值 1.5×10^{11} Pa; α 为锚索线膨胀系数,取值 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

锚索与框格梁之间建立耦合约束(Coupling),锚索与框格梁结构分别与边坡模型建立嵌入约束(Embedded region),模型网格总数 41 910 个,见图 7。

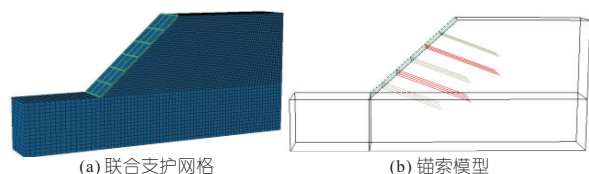


图 7 联合支护有限元模型

Fig. 7 Finite element model of combined support

图 8 为联合支护后安全系数。由图 8 可知,经联合支护后,安全系数增长为 1.410,超过规范^[9]要求的 1.20,联合支护效果良好。图 9 为锚

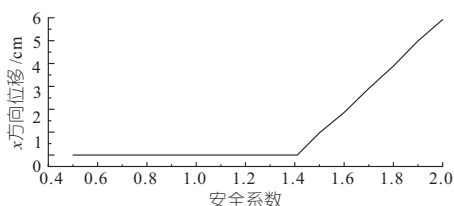


图 8 联合支护后安全系数

Fig. 8 Safety factor after combined support

索框格梁联合支护后塑性应变云图。由图 9 可知,不存在明显的滑动面,虽然坡脚处未形成滑动面,但在工程施工时应对坡脚处加强支护。图 10 为联合支护后位移变形云图。对比图 4、10 可知,联合支护后边坡最大位移由支护前的 5.29 cm 减小为 3.53 cm,再一次验证了锚索框格梁联合支护方案效果良好,可满足预期与规范^[9]要求。

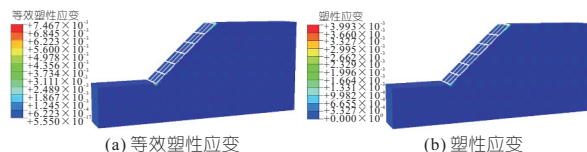


图 9 联合支护后塑性应变云图

Fig. 9 Plastic strain cloud after combined support

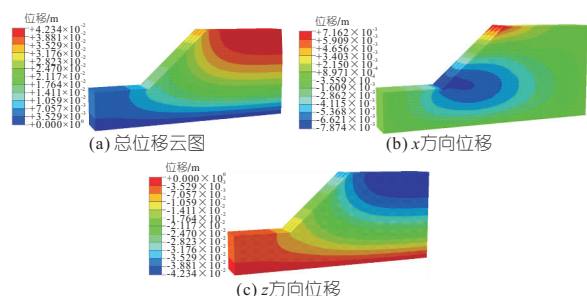


图 10 联合支护后位移变形云图

Fig. 10 Displacement deformation cloud after combined support

5 结论

a. 采用瑞典条分法、简化 Bishop 法、有限元强度折减法对某水电站原始边坡进行了稳定性分析,安全系数分别为 1.051、1.049、1.070,结果表明有限元法安全系数误差仅为 1.5%~2%,结果可靠;原始边坡需进行强化支护。

b. 依据安全系数对锚索锚固力进行了反算,结合有限元计算结果对锚索框格梁联合支护方案进行了设计计算。

c. 使用温度荷载方法可有效模拟锚索预应力,结合数值模拟对联合支护的边坡稳定性进行了验证,结果表明联合支护效果良好,满足工程与规范要求。

参考文献:

[1] 杜力普,孙树林. 数值模拟与实际监测相结合的边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 137-140.
 [2] 闫云明,崔树军,刘见宝. 强度折减法改进及在边坡稳定性评价中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(7): 79-82, 87.
 [3] 刘彦,聂磊,刘志鹏,等. 边坡稳定性有限元强度折减法的若干讨论[J]. 土工基础, 2021, 35(3): 380-384.
 [4] 聂柏松,沈振中,仲良,等. 基于强度折减动力分析法的岩体边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2013,

31(9):131-134.

[5] 刘菁钰, 彭文哲, 赵明华. 边坡稳定性分析的简化计算方法[J]. 公路工程, 2022, 47(5): 55-62.

[6] 叶帅华, 章瑞环, 袁中夏. 边坡稳定性分析及滑移面快速确定[J]. 地震工程学报, 2021, 43(6): 1361-1367.

[7] 孙吉书, 夏健超, 王建平, 等. 相关向量机模型在

边坡稳定性预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12234-12242.

[8] 张华, 练继建, 李会平. 挑流水舌的水滴随机喷溅数学模型[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 21-25.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范:GB 50330-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

Study on Combined Support of Anchor Cable and Frame Lattice Beam on Slope of A Hydropower Station

LIU Yu-xing^{1,2}

(1. The Second Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Tangshan 063000, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In view of the current problems such as less research on the combined support of anchor cable and frame lattice beam in slope reinforcement, the actual project of slope support on the left bank of a hydropower station was taken as the background. The stability of the original slope was analyzed by combining the limit equilibrium method and the finite element strength reduction method. The combined support scheme of anchor cables and frame lattice beams was studied. It mainly included anchor cable anchoring force calculation, anchor cable arrangement spacing, anchor cable length, optimal incidence anchoring angle and frame lattice beam size, etc. Finally, the support effect was studied by combining with numerical simulation. The results show that the original slope needs to be reinforced and supported. The error of the original slope safety coefficient obtained by the finite element strength reduction method is less than 1.5%-2.0% with the limit equilibrium method. The temperature loading method was used to simulate anchor cable prestressing for stability analysis of slope with combined support of anchor cable and frame lattice beams, and the combined support is effective and no obvious slip crack surface appears after the support. The study can provide reference for similar slope support projects.

Key words: slope stability; numerical simulation; strength reduction method; combined support

(上接第 183 页)

[3] 胡伟华, 彭刚, 黄仕超, 等. 基于声发射技术的混凝土动态损伤特性研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 123-127, 132.

[4] CHEN D, WANG E Y, LI N. Temporal and spatial evolution of acoustic emission and waveform characteristics of specimens with different lithology [J]. Journal of geophysics and engineering, 2018, 15(5):1878-1899.

[5] CHEN CHEN, XIANGQIAN FAN, XUDONG CHEN. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission [J]. Construction and building

materials, 2020, 237: 117472.

[6] 刘妙燕, 陆俊, 明攀, 等. 疲劳荷载对橡胶混凝土损伤和断裂性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1594-1603.

[7] BING C, LIU J. Experimental study on AE characteristics of three-point-bending concrete beams [J]. Cement & concrete research, 2004, 34(3):391-397.

[8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工混凝土断裂试验规程:DL/T5332-2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[9] 于江, 吕旭滨, 秦拥军, 等. 基于声发射技术的再生混凝土梁受弯过程的损伤特性研究[J]. 混凝土, 2020(8): 27-31.

Damage Rate Effect of Hydraulic Concrete Based on Acoustic Emission Parameters

CHEN Qian, JIA Yi-heng, CHEN Qing-hua, BU Jing-wu, XU Bo

(School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to study the influence of loading rate on the damage evolution of hydraulic concrete, notched cubic specimens with side lengths of 300 mm and 450 mm were tested by wedge splitting test with different loading rates of 0.1 mm/s, 0.01 mm/s, 0.001 mm/s. Acoustic emission technology was used to monitor the acoustic emission signals of concrete in the damage process. Test results show that the variation of AE event rate during failure process of concrete can be divided into quiet, active, and attenuation period, among these the active period increases with the decrease of loading rate. The damage was defined according to the AE events, and it is found that the damage process of hydraulic concrete can be divided into three stages: crack initiation, acceleration and failure. The smaller the loading rate is, the faster the growth rate of the acceleration stage is. The damage evolution model based on the AE event obeys Weibull distribution, which can better reflect the influence of loading rates on the damage evolution of hydraulic concrete.

Key words: hydraulic concrete; loading rate; acoustic emission; damage; Weibull distribution