

DOI: 10.7672/sjgs2025200136

特殊保护环境库区泄洪闸加强松动控制 爆破拆除关键技术*

王文己¹, 周政国¹, 高鑫^{1,2,3}, 杜洋^{1,2}, 李帅¹, 赵宁博¹(1. 中建六局水利水电建设集团有限公司, 天津 300350; 2. 中国建筑第六工程局有限公司
工程技术研究院, 天津 300171; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354)

[摘要] 依托田岗水库泄洪闸拆除重建工程, 重点阐述特殊保护环境库区泄洪闸的松动微差控制爆破拆除工艺。通过理论分析、现场试验及监测数据, 研究布孔、装药、爆破网络、安全防护等因素对地基扰动、既有建(构)筑物振动、冲击波及飞石的影响。针对超长龄期、表面碳化混凝土及特殊保护环境, 形成泄洪闸高效爆破拆除关键技术, 实现了爆破块体“塌而不飞”, 振动、冲击波等有害效应受控, 保障了周边建(构)筑物及地基安全, 取得了良好的拆除效果与资源利用效益。

[关键词] 泄洪闸; 爆破; 拆除; 动态响应; 试验; 监测

[中图分类号] TV62

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0136-05

Key Technology of Enhanced Loosening and Controlled Blasting Demolition for Floodgates in Protected Environmental Reservoir Areas

WANG Wenji¹, ZHOU Zhengguo¹, GAO Xin^{1,2,3}, DU Yang^{1,2}, LI Shuai¹, ZHAO Ningbo¹

(1. China Construction Sixth Engineering Bureau Hydropower Construction Co., Ltd., Tianjin 300350, China;

2. Institute of Engineering Technology, China Construction Sixth Engineering Bureau Co., Ltd.,

Tianjin 300171, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Based on the demolition and reconstruction project of the floodgate of Tiangan Reservoir, the research of controlled blasting demolition technology with enhanced loosening and millisecond delay for floodgates in environmentally sensitive reservoir areas is focused on. Through theoretical analysis, field tests, and monitoring data analysis, the impacts of factors such as borehole layout, charge design, blasting network, and safety protection on ground disturbance, existing buildings (structures) vibrations, shock waves, and flyrock were studied. Aiming at the super-long age, surface carbonized concrete and special environmental protection, the key technology of efficient blasting demolition of flood discharge sluice is formed, which realizes the collapse without flight of blasting block, the control of harmful effects such as vibration and shock wave, ensures the safety of surrounding buildings (structures) and foundation, and achieves good demolition effect and resource utilization benefit.

Keywords: floodgates; blasting; demolition; dynamic response; tests; monitoring

0 引言

20 世纪中后期, 我国修建了大量涵闸结构, 由于闸体混凝土风化严重, 碳化深度大, 裂缝多, 局部混凝土强度偏低, 已难以满足现有水利需求, 需整

修重建^[1-2]。因此, 对老旧涵闸爆破拆除的研究具有迫切的现实意义, 可填补涵闸不同部位爆破拆除在炮孔布设、装药结构、起爆网络设计及安全防护措施等方面的研究空白, 攻克相关技术难题, 对保障水利工程的安全可持续发展、维护区域生态平衡及社会稳定至关重要^[3-4]。大坝水库的泄洪闸及溢洪道通常对周边环境较为敏感, 体积庞大、结构及

* 国家自然科学基金(52171273)

[作者简介] 王文己, 高级工程师, E-mail: 841862771@qq.com

[收稿日期] 2025-05-01

受力复杂,采用传统拆除方法进度缓慢,而爆破拆除可瞬间使闸室及附属结构失去承载力,瞬间完成拆除工作^[5-6]。

田岗水库泄洪闸爆破拆除爆源中心毗邻水库管理所、民房建筑群、水库土石坝及高压线路及地下管线等复杂施工环境,且需保证闸室地层中承压水及软弱土“零扰动”等要求。采用分区分段微差加强松动控制爆破技术,既保证了拆除对象充分破碎,又规避了爆破飞石及振动等负面效应。本文对爆破振动、塌落振动、冲击波等负面效应及飞石进行分析,给出关键保护建(构)筑物的质点峰值振速、飞石距离、钢筋与混凝土剥离程度等爆破动态响应数据。基于现场爆破试验,对高敏感环境下泄洪闸爆破参数进行优化校核及动态修正:①优化分区分段孔位布设、单位耗药量、单孔装药量、装药结构、起爆网络设计及最大单响起爆药量等参数;②采取炮孔上方覆盖装土编织袋、钢丝网包裹闸墩等近体防护措施;③对毗邻建筑物搭设防护网。通过上述工作,实现了“以爆带破”效果,达到了应拆尽拆目标,形成了泄洪闸整体爆破拆除关键技术,为后续同类工程提供参考。

1 工程概况

田岗水库泄洪闸至今已运行约 25 年。闸体混凝土风化严重,碳化深度大,裂缝多,部分混凝土强度偏低,分洪期间已难以正常运行,且原泄洪标准已无法满足当下及未来区域防洪需求,经河南省发改委批准,需整体拆除重建田岗水库泄水闸及附属设施。待拆除的 11 跨泄洪闸位于田岗村南侧,北侧距水库指挥部 30m、距水库大坝 50m,西侧距柏都大道 1 285m,西北侧距市委党校 915m,东北侧距大程庄村 960m,南侧距郭庄 170m,西侧距高压线路 100m,东侧距地下管线 150m,交通便利,周边环境如图 1 所示。新设计溢洪道为 10 孔闸,单孔净宽 10.8m,总宽度 126.5m,采用开敞式平底板结构形式。

在综合分析待拆对象结构特征、体量规模、安全风险及成本效益后,对田岗水库泄洪闸及附属设施采用以控制爆破拆除为主、机械破碎为辅的综合拆除方案。机械拆除部分包括:①桥头堡、平板钢闸门及提升装置、检修桥及交通桥的电器设施设备;②进口渐变段边块及中块防渗铺盖、进口段上游翼墙、闸室段两侧挡墙;③出口段两侧下游翼墙及消力池两岸挡墙等。控制爆破拆除部分包括:①泄洪闸闸室段底板;②一级消力池水平段及陡坡段;③闸墩、混凝土排架、检修桥等 11 跨泄洪闸闸

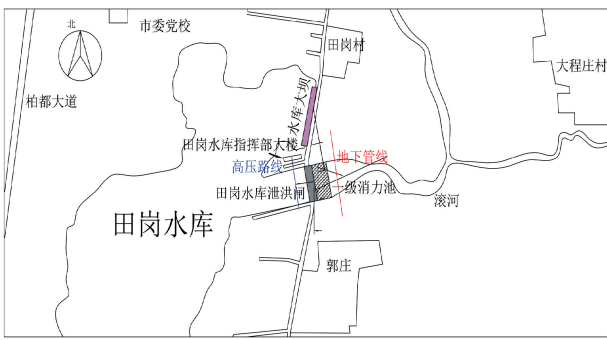


图 1 周围环境
Fig. 1 Surrounding environment

室段。

2 拆除总体施工方案

爆破拆除前,采用破碎锤对部分结构设施进行预拆除,以增加爆破临空面。根据主体各部分混凝土强度、钢筋分布、泄洪闸结构特征及断面复杂形状、周边环境、地下管线等相关因素及地基“零扰动”要求,分 4 区进行爆破拆除。爆区 1 为泄洪闸闸室段底板,爆区 2 为一级消力池水平段底板,爆区 3 为一级消力池陡坡段底板,爆区 4 为闸墩、排架柱等闸室段。

对于边墩、中墩及分缝墩,采用潜孔钻在闸墩顶部钻垂直孔,进行深孔微差控制爆破拆除;排架柱采用手风钻在上游一侧连系梁以下的立柱钻水平孔,实施浅孔定向爆破,待排架柱倒塌后采用液压破碎锤破碎;闸室底板、一级消力池底板采用手风钻钻凿垂直孔。为减少爆破对地基的扰动,采取适当增加底部保留厚度及减少炮孔底部集中药量的方案。

3 爆破参数设计

3.1 爆破分析

3.1.1 爆破振动分析

建(构)筑物爆破拆除会引起地表质点震动,影响既有建(构)筑物的安全。需对受保护的建(构)筑物质点峰值振速、位移等动态响应特征参数进行分析,并结合现有爆破安全规程进行评估。泄洪闸距水库指挥部及大坝的最近距离分别为 30、50m,安全允许质点峰值振速均≤2.5cm/s。

爆破拆除中爆破振动安全公式^[7-8]如下:

$$Q = R^3 \left(\frac{v}{k'K} \right)^{3/\alpha} \tag{1}$$

式中: R 为爆心距; v 为保护对象所在质点峰值振速,取 2.5cm/s; K, α 分别为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数,根据有关地质资料,取 $K = 340, \alpha = 1.8$; k' 为折减系数,一般

取 0.15~0.35,本工程取 0.35; Q 为最大单响药量。
计算得到水库指挥部和大坝最大单响药量分别为 43.2,199.9kg。依据爆破影响区内各受保护建(构)筑物质点振速控制要求,确定最大单响药量 $\leq 43.2\text{kg}$ 。

3.1.2 塌落触地振动分析

大量爆破实测数据表明,高大建筑物爆破倒塌时产生的地面振动远比炸药爆炸所引起的地面振动大^[9]。爆破引起的振动波与塌落振动波相互独立,塌落振动波传播得更慢,且振动持续时间更长。因此,降低地表振动中的塌落振动,是泄洪闸拆除爆破控制的关键之一。倒塌物自重、结构、材质、重心高度及塌落处的地面刚度等均会影响塌落振动。一般采用周家汉^[10]提出的公式进行计算,如式(2)所示。

$$v=K_t\left(\frac{R}{\sqrt[3]{MgH/\sigma}}\right)^\beta \tag{2}$$

式中: v 为塌落引起的地面振速; M 为下落构件质量,单跨取 172.5t; g 为重力加速度; H 为构件中心高度, $H=14\text{m}$; σ 为地面介质破坏强度,一般取 10MPa; R 为观测点至冲击地面中心的距离; K_t,β 分别为塌落振动度衰减系数和指数,取 $K_t=1.36,\beta=-1.66$ 。

计算得到水库指挥部和大坝塌落振动速度分别为 0.78,0.34cm/s,均在安全范围内。

3.1.3 爆破冲击波分析

炸药爆炸过程会产生空气冲击波,若冲击波压力和流速较高,会伤害周围人员及周边建(构)筑物和设备。一般认为其超压在 $0.02\times 10^5\text{Pa}$ 内不会对人体及建筑物造成伤害。

空气冲击波超压值计算^[11]如式(3)所示。
$$\Delta P=K_p(Q^{1/3}/R)^{\alpha'} \tag{3}$$

式中: ΔP 为空气冲击波超压值,取 10^5Pa ; K_p,α' 分别为经验系数和指数,炮孔爆破取值 $K_p=0.84,\alpha'=1.7$ 。

$Q=20\text{kg},R=30\text{m}$,计算可得 $\Delta P=0.014\times 10^5\text{Pa}$,该数量级的冲击波对混凝土结构及人员无危害。

3.1.4 爆破飞石控制

炸药爆炸时会产生爆破飞石,特别是在二次爆破时,产生飞石的可能性更大。目前尚无成熟的爆破飞石飞散距离计算公式,一般根据工程经验公式进行估算,如式(4)所示^[12]。

$$R_{\max}=70q^{0.58} \tag{4}$$

式中: $R_{\max}$ 为个别飞石飞散最大距离; q 为最大炸药

单耗,取 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 。
计算得出爆破飞石飞散距离为 52.1m,考虑到指挥部距离爆源中心距离为 30m,因此需对爆破拆除部位实施近体防护措施,并对受保护建筑物进行针对性防护设计。

3.2 闸室底板爆破设计

闸室底板钻垂直浅孔,孔径 $d=42\text{mm}$,孔深 $H=1.3\text{m}$,堵塞长度 $h_1=0.4\text{m}$,孔间距 $a=1.3\text{m}$,孔排距 $b=1.1\text{m}$,呈梅花形布置。选用直径 32mm 乳化炸药,单耗 $q=0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3.3 一级消力池爆破设计

采用多打眼,少装药,强覆盖,微差爆破的控制爆破拆除方案。一级消力池底板钻垂直浅孔,孔径 $d=42\text{mm}$,孔间距 $a=1.4\text{m}$,孔排距 $b=1.2\text{m}$,孔深 $H=0.65\sim 0.80\text{m}$,堵塞长度 $h_1=0.20\sim 0.30\text{m}$,呈梅花形布置。选用直径 32mm 乳化炸药,单耗 $q=0.36\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3.4 闸墩爆破设计

墩柱采用 C20 钢筋混凝土,闸门槽采用 C25 钢筋混凝土。闸墩采用大孔径原地坍塌爆破法,利用潜孔钻钻凿垂直深孔。选用直径 60mm 乳化炸药。闸墩爆破参数如表 1 所示。

表 1 闸墩爆破参数								
Table 1 Blasting parameters for gate piers								
位置	直径/ mm	孔深/ m	孔间 距/m	孔排 距/m	单耗/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	药卷直 径/mm	装药 方式	堵塞长 度/m
边墩	70	7.4	0.9	1 排	0.6	60	间隔	2.0
中墩	70	7.4	1.5	1 排	0.5	60	间隔	2.0
分缝墩	70	7.4	0.9	0.91	0.5	60	间隔	2.0

3.5 排架柱爆破设计

排架呈门形结构,中间存在连系梁,在上游侧连梁以下立柱布置炮孔,形成爆破缺口,采用向上游的定向倒塌方式进行控制爆破拆除,倒塌后采用破碎锤进行二次解体清运。爆破参数如表 2 所示。

表 2 排架柱爆破参数								
Table 2 Blasting parameters for bent columns								
位置	直径/ mm	孔深/ m	孔距/ m	排距/ m	单耗/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	药卷直 径/mm	装药 方式	堵塞长 度/m
边墩	42	0.53	0.375	1 排	1.2	32	连续	0.3
中墩	42	0.53	0.375	1 排	1.2	32	连续	0.3
分缝墩	42	0.53	0.30	0.42	1.2	32	连续	0.39

3.6 起爆网络连接

为确保爆破过程的稳定和安全,采用毫秒微差延时起爆技术控制起爆网络,减少爆破振动的叠加效应,降低施工风险与难度,并减小对既有建(构)筑物爆破振动及塌落振动的影响。起爆网络采用

导爆索与数码电子雷管串联,一次性实现精细延时起爆。

闸室底板单响最大药量 19.04kg,各响间隔 30ms;一级消力池段单响最大药量 7.2kg,各响间隔 30ms;泄洪闸闸墩及闸墩上立柱的网路布置(立柱延时时间由两侧爆孔时间决定)如图 2 所示,最大单响药量 7.5kg。最大单响药量均小于计算允许值,以进一步降低爆破对周边环境的影响,并通过预留一定的安全系数,确保施工的安全性和可靠性。

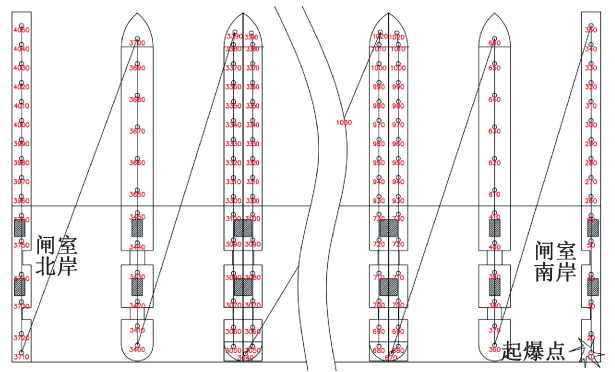


图 2 闸墩起爆网络
Fig. 2 Blasting network of gate pier

3.7 爆破安全设计

根据爆破周边环境、泄洪闸主体各部分结构及构造形式和防护原则,采用主动与被动防护消能相结合的方法。安全控制措施包括有效爆破冲击波控制、有效爆破振动控制、有效爆破飞石控制。安全防护措施主要有:①底板炮孔先覆盖 1 层装土编织袋,上压钢板,再用湿土袋重压,进行强覆盖;②闸墩及闸墩上立柱的爆破区域周围外壁悬挂 2 层密目式安全网;③邻近建筑物搭设 2 道防护立网,水库指挥部前方敷设直径 5mm 钢绞线和密目式安全网;④墩柱挂设防飞石安全铁丝网;⑤排架柱先使用棉毡、铁丝网加竹笆进行包裹,然后利用铁丝缠绕固定。现场防护如图 3 所示。



图 3 爆破防护措施
Fig. 3 Blasting protective measures

3.8 爆破振动安全监测

爆破振动控制标准为:拆除界面以下部分混凝土允许质点峰值振速<5.0cm/s,周边其他建(构)筑物允许质点峰值振速均<2.5cm/s。

爆破振动监测采用 L20-X 型爆破测振仪,监测点 1 位于水库大坝,监测点 2 位于水库指挥部,爆破拆除平面与监测点布置如图 4 所示。

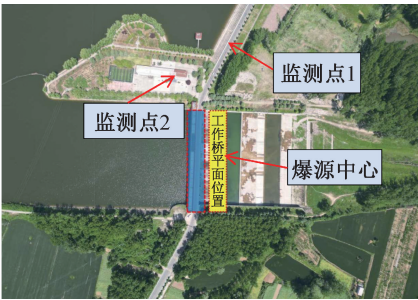


图 4 监测点布置
Fig. 4 Layout of monitoring points

4 施工方法

爆破拆除施工流程如图 5 所示,包括:①搜集闸室原始设计资料,人机料到场等施工准备阶段;②进行爆破试验,确定钻爆参数;③爆破孔位放样及布局;④爆破孔钻凿及检查验收;⑤爆破孔装药;⑥炮孔封堵;⑦起爆网络连接,并确定最大单段装药量、总装药量,核对起爆时间、顺序等编程信息;⑧设置安全防护,保证毗邻建(构)筑物的安全;⑨对起爆网络、装药情况及现场环境进行核验,起爆器起爆;⑩专业爆破人员进行检查,确认无盲炮后,清理运输爆渣。

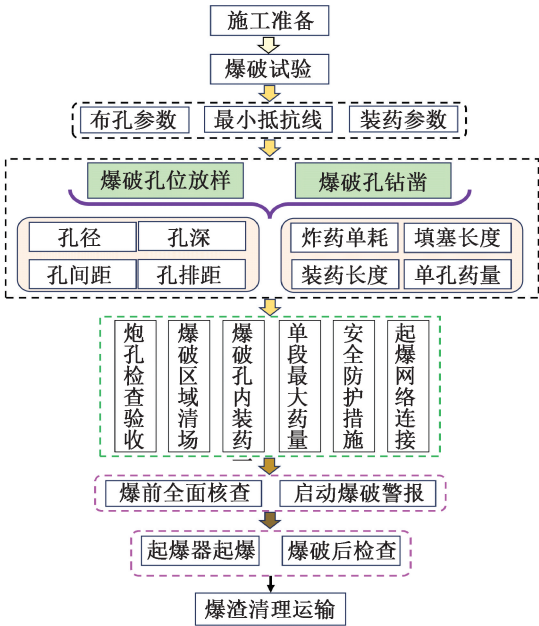


图 5 爆破拆除施工流程
Fig. 5 Construction process of blasting demolition

5 爆破拆除效果

4 次爆破拆除过程中水库大坝监测点 1 及水库指挥部所监测点 2 质点峰值振速如表 3 所示。由表 3 可知,水库大坝监测点峰值振速为 0.488m/s,水库指挥部监测点峰值振速为 0.665m/s,均在安全范围内。

表 3 爆破振动监测数据

Table 3 Monitoring data of blasting vibration					
位置	爆破部位	爆心距/m	质点峰值振速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	主振相频率/ Hz	控制值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
水库大坝	闸室底板	100.5	0.174	4.5	2.5
	一级消力池平坦段	120.6	0.126	5.7	2.5
	一级消力池斜坡段	115.2	0.092	4.7	2.5
	闸室段	100.5	0.488	7.1	2.5
水库指挥部	闸室底板	80.5	0.388	11.3	2.5
	一级消力池平坦段	100.6	0.665	8.3	2.5
	一级消力池斜坡段	95.2	0.298	6.2	2.5
	闸室段	80.5	0.355	5.5	2.5

按优化后的爆破方案对泄洪闸进行爆破拆除,爆破后泄洪闸及附属结构按设计定向倒塌及原地坍塌。同时,可达到以爆带破、破碎而不飞散的效果,有效控制飞石。根据爆破过程影像、爆后检查、第三方检测报告可知,极少飞石系因混凝土表面风化且局部无钢筋约束所致。爆破引起的周边建(构)筑物质点峰值振速和塌落触地峰值振速均<2.5cm/s,爆炸冲击波及其他有害效应均控制在设计及规范要求的限值以内;破碎块度满足清运要求。施工安全快捷,省工省力,为重建新闻创造了条件,达到了预期爆破拆除效果,如图 6 所示。



图 6 爆破前后对照

Fig. 6 Comparison before and after blasting

6 结语

1)合理设置爆破参数,包括分段分区、分层装药、控制单孔装药量、降低孔底装药量、重视炮孔堵塞质量,可实现对待拆结构的精准爆破拆除,且对周边受保护建筑物及环境起到良好防护作用。

2)采用加强松动延时控制爆破技术,成功实现

了以爆带破,使混凝土破碎而不飞散,钢筋与混凝土充分剥离,二次破碎难度显著降低,钢筋易回收,从而节约了成本。

3)加强对混凝土表面局部强风化部位的爆破防护,可显著抑制飞石等次生灾害发生。

4)采用一次性钻孔方式,并依据爆破试验,仅调整装药量可有效加快施工进度;同时,排架柱采用定向爆破,使其向上游倒塌,进一步缩短工期,并为后期清运创造有利条件。

5)11 跨泄洪闸及附属设施的拆除用时约 9d,为后续主体工程施工争取了时间,且为相似工程爆破拆除提供指导。

6)宜针对风化钢筋混凝土爆破拆除的实际情况进行反演,以优化和修正爆破参数,进一步提高爆破方案的精准性。

参考文献:

[1] 张治军,张波,苏利军,等.大型水工建筑物拆除施工方案初步探讨[J].人民长江,2021,52(S1):257-259,267.
ZHANG Z J,ZHANG B,SU L J,et al. Preliminary discussion on demolition construction scheme of large hydraulic structures[J]. Yangtze River,2021,52(S1):257-259,267.

[2] 方志梅,翟清翠.切割爆破成型技术在进洪闸桥墩拆除中的应用[J].煤矿爆破,2024,42(2):6-10.
FANG Z M,ZHAI Q C. Application of cutting blasting prototyping technology on pier demolition of intake sluice[J]. Coal mine blasting,2024,42(2):6-10.

[3] 刘治峰,李保林,郭永为,等.王快水库溢洪道闸室爆破拆除[J].工程爆破,2004,10(2):38-42.
LIU Z F,LI B L,GUO Y W,et al. Blasting demolition of the floodgate in the spillway of Wangkuai Reservoir[J]. Engineering blasting,2004,10(2):38-42.

[4] 高文平.西大洋水库混凝土闸室整体快速安全拆除[J].水科学与工程,2010(6):66-69.
GAO W P. Xidayang Reservoir spillway floodgate whole blasting demolition[J]. Water sciences and engineering technology, 2010(6):66-69.

[5] 聂自然.毫秒延时爆破在水车水库泄洪闸部分拆除中的应用[J].广西水利水电,2012(6):33-38,44.
NIE Z R. Application of millisecond delay blasting in partial blasting demolition of spillway gate at Shuiche Reservoir[J]. Guangxi water resources & hydropower engineering,2012(6):33-38,44.

[6] 任跃勤,李姗姗,邓晓琴.桐子林水电站导流明渠一期围堰拆除方案[J].施工技术,2012,41(S1):340-343.
REN Y Q,LI S S,DENG X Q. I period cofferdam dismantling scheme of diversion channel in Tongzilin Hydroelectric Power Station[J]. Construction technology,2012,41(S1):340-343.

[7] 余红兵,尚钰姣,赵明生,等.地下室爆破拆除对紧邻建筑的危害控制[J].爆破,2017,34(1):148-151,159.

LIU L, SUN Z J, LIU J L, et al. Fragility curves of precast concrete shear walls with vertical joints [J]. Engineering mechanics, 2024, 41(S1): 150-156.

[5] 淡浩, 吴体, 肖承波, 等. 预制混凝土构件结合面抗剪性能试验及分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(3): 100-104.

DAN H, WU T, XIAO C B, et al. Test and analysis on shear behavior of precast component interface[J]. Building science, 2020, 36(3): 100-104.

[6] 吴香国, 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复层与既有混凝土界面黏结短期性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 156-163.

WU X G, ZHANG X C. Investigation of short-term interfacial bond behavior between existing concrete and precast ultra-high performance concrete layer[J]. Journal of building structures, 2018, 39(10): 156-163.

[7] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay[J]. Construction and building materials, 2012, 36: 538-548.

[8] 王溧泓, 孙新建. 基于 DIC 技术的混凝土剪切力学性能研究[J]. 混凝土, 2025(3): 6-11.

WANG L H, SUN X J. Research on shear mechanical properties of concrete based on DIC technology[J]. Concrete, 2025(3): 6-11.

[9] 苏怀智, 张林海, 佟剑杰. 混凝土结构损伤声发射检测进展[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 90-95.

SU H Z, ZHANG L H, TONG J J. Review on acoustic emission detection for concrete damage [J]. Nondestructive testing technology, 2015, 37(1): 90-95.

[10] GU J X, WANG Z H, KUEN J, et al. Recent advances in convolutional neural networks[J]. Pattern recognition, 2018, 77: 354-377.

[11] HARALICK R M, SHAPIRO L G. Image segmentation techniques[C]//Proceedings of the Conference on Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985.

[12] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net; convolutional

networks for biomedical image segmentation[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.

[13] SI C Y, YU W H, ZHOU P, et al. Inception transformer[M]. Cambridge: MIT Press, 2022.

[14] DOSOVITSKIY A, BEYER L, KOLESNIKOV A, et al. An image is worth 16×16 words; transformers for image recognition at scale[Z]. 2020.

[15] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 2017.

[16] SU J H, CHEN Z H, HE C H, et al. GSENet: global semantic enhancement network for lane detection[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2024.

[17] LI B N, HU Y H, NIE X C, et al. DropKey for vision transformer [C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2023.

[18] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.

[19] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors [J]. Nature, 1986, 323(6088): 533-536.

[20] CORDTS M, OMRAN M, RAMOS S, et al. The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.

[21] 吴胜男. 多层复合盾构隧道管片混凝土接合面力学及渗透性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.

WU S N. Study on mechanics and permeability of segment concrete joint surface of multi-layer composite shield tunnel[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

[22] 陈子轩. 预制 UHPC 壳局部增强装配式混凝土框架节点的抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

CHEN Z X. Study on seismic performance of precast UHPC shell locally reinforced precast concrete frame joints [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

(上接第 140 页)

YU H B, SHANG Y J, ZHAO M S, et al. Hazards control of basement explosive demolition to adjacent building[J]. Blasting, 2017, 34(1): 148-151, 159.

[8] 侯江. 倾斜烟囱小角度切口定向爆破拆除技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(15): 17-20, 88.

HOU J. Inclined chimney small angle incision directional blasting demolition technology [J]. Construction technology, 2024, 53(15): 17-20, 88.

[9] 王建国, 罗世云, 尹久清, 等. 极近保护条件下烟囱爆破拆除技术[J]. 施工技术, 2021, 50(3): 49-51.

WANG J G, LUO S Y, YIN J Q, et al. Chimney blasting demolition technology under extremely close protection condition[J]. Construction technology, 2021, 50(3): 49-51.

[10] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 1-4, 40.

ZHOU J H. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition[J]. Engineering blasting, 2009, 15(1): 1-4, 40.

[11] 王秀贞, 李秀辰. 岗南水库溢洪道门槽爆破拆除施工技术[J]. 水利建设与管理, 2010, 30(8): 31-32, 35.

WANG X Z, LI X C. Blasting demolition construction technology of spillway gate slot in Gangnan Reservoir[J]. Water resources development & management, 2010, 30(8): 31-32, 35.

[12] 汪旭光, 于亚伦. 拆除爆破理论与工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

WANG X G, YU Y L. Demolition blasting theory and engineering example[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.