

# 硫酸盐侵蚀下超高性能混凝土连接预制梁受弯性能研究

王玮哲, 袁世伟, 宁静, 陈刚\*

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年6月12日; 录用日期: 2024年7月5日; 发布日期: 2024年7月15日

## 摘要

为了研究5%硫酸盐浸泡不同时间段的超高性能混凝土连接预制梁力学性能, 设计并制作了五根超高性能混凝土预制梁。通过抗弯性能试验, 研究了浸泡不同时间硫酸盐溶液(0天, 30天, 60天, 180天, 390天)对于预制梁抗弯性能的影响。实验结果表明: 浸泡过后预制梁与未浸泡的弯曲破坏形式相似, 裂缝均出现了从支座处向受压区开展的趋向, 随着硫酸盐浸泡时间的增加, 破坏状态下的最大裂缝宽度呈现先降低后增大, 随着硫酸盐浸泡时间的大跨度增大, 试验梁裂缝开展的更为迅速, 且前期裂缝增大变化更为明显。其整体刚度先增大后降低, 试验梁均符合平截面假定, 经过混凝土本构模型的建立, 其压缩(拉伸)应力-应变曲线在腐蚀时间0~60天范围内呈现上升趋势, 而之后出现整体下降的趋势, 且侵蚀时间越长下降程度越来越大, 下降的速度成倍增加, ABAQUS有限元数值模拟结果与试验结果吻合程度较高。

## 关键词

超高性能混凝土, 预制梁, 硫酸盐侵蚀, 抗弯性能, 有限元

# Study on the Bending Performance of Precast Beams with Ultra-High Performance Concrete Joints under Sulfate Erosion

Weizhe Wang, Shiwei Yuan, Jing Ning, Gang Chen\*

Department of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 12<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 15<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 王玮哲, 袁世伟, 宁静, 陈刚. 硫酸盐侵蚀下超高性能混凝土连接预制梁受弯性能研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4335-4347. DOI: 10.12677/mos.2024.134392

## Abstract

In order to study the mechanical properties of ultra-high performance concrete joint precast beams immersed in 5% sulfate for different time periods, five ultra-high performance concrete precast beams were designed and fabricated. The effects of immersing sulfate solution for different time periods (0 Day, 30 Days, 60 Days, 180 Days, 390 Days) on the flexural properties of precast beams were investigated by flexural performance tests. The experimental results show that: after immersed precast beams and unimmersed bending damage form is similar, cracks have appeared from the support to the compression zone to carry out the tendency, with the increase of the sulfate immersion time, the maximum width of cracks in the damage state shows first decrease and then increase, with the sulfate immersion time of the span increase, the test beams cracks to carry out more quickly, and the early cracks to increase the change is more obvious. Its overall stiffness increases and then decreases, the test beams are in line with the flat cross-section assumption, after the establishment of the concrete constitutive model, its compressive (tensile) stress-strain curve in the range of corrosion time 0~60 d shows a rising trend, and after that there is an overall downward trend, and the longer the erosion time decreases the degree of decreasing is more and more, and the rate of decreasing increases exponentially. ABAQUS finite element numerical simulation results are in good agreement with test results.

## Keywords

Ultra-High Performance Concrete, Precast Beams, Sulfate Erosion, Bending Resistance, Finite Element

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

装配式预制混凝土结构体系受到普遍地关注,在日本及欧美已被广泛地推广使用,其中预制装配式混凝土结构依靠节点及拼缝将预制构件连接成为整体[1]。其中连接节点的选型和设计应注重概念设计,并通过合理的连接节点和构造,保证构件预制混凝土梁节点连接的质量和整体稳定性。较大的跨度和较复杂的截面形状会导致节点处承受更大的弯矩,因此节点处应采用新型连接方式,从而提高整体结构的安全性和稳定性。因此考虑在预制混凝土梁中搭接高强度复合材料来提高其力学性能和抗侵蚀性能。超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有超高强度、超高韧性,超高耐久性等优异性能,是当今世界上较为先进的水泥基复合机料[2]。UHPC 具有优异的力学性能,包括高抗拉强度和抗压强度,UHPC 同样具有更好的耐久性,能够抵抗化学腐蚀、冻融循环和其他环境影响[3] [4]。

硫酸盐广泛存在于海水、污水以及盐碱地区,硫酸盐的侵蚀是影响混凝土耐久性的重要环境因素,随着由表及里的逐步侵蚀,表现的侵蚀会促进形成的新式的一种循环,外部侵蚀环境同样会发挥耦合作用[5] [6],路宇等[7]研究了复合再生砂和超细粉煤灰对于超高性能混凝土(UHPC)抗硫酸盐的影响,并且测量了硫酸盐溶液腐蚀前后的抗压强度、相对动态弹性模量和质量变化;张志豪等[8]研究得出 UHPC 在海水高盐侵蚀作用下的力学性能受初始浸泡时间的影响最小,且长期力学性能保持稳定,也得出了 UHPC 具有良好的适应性和耐久性。上述通过研究复合材料,着重点在于超高性能混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力,

徐国强等[9]对经受硫酸镁溶液长期浸泡腐蚀后的石灰石复合矿物掺合料混凝土梁进行了抗弯承载力试验,结果表明,石灰石复合矿物掺合料混凝土梁采用 10%硫酸镁溶液浸泡 300 d 后,发生了以石膏结晶侵蚀为主导的破坏,与在水中浸泡的混凝土梁相比,混凝土梁的力学性能稍微降低。多数侵蚀试验时间偏短,侵蚀的时间效应得不到充分体现。本试验采用 UHPC 搭接混凝土梁且在硫酸盐中浸泡时长最长达到 390D,并通过静力加载分析评价 UHPC 预制梁的抗弯性能。

## 2. 试验方案

### 2.1. 材料配合比及制作

C30 混凝土通过厂商购买,采用的水泥为 P.O.42.5,烧失量 3.68%,比表面积 373 m<sup>2</sup>/kg,3D 抗压强度 27.2 MPa;矿粉为粒化高炉矿粉 S95,密度 2.9 g/cm<sup>3</sup>,烧失量 0.5%,比表面积 417 m<sup>2</sup>/kg;粉煤灰密度 2.28 g/cm<sup>3</sup>烧失量 1.14%,骨料采用中砂以及碎石,使用骨料属性如表 1 所示。

UHPC 采用水泥 P.O.52.5,烧失量 2.43%,比表面积 355 m<sup>2</sup>/kg,3D 抗压强度 36 MPa,28D 抗压强度 61.2 Mpa;硅灰采用厂家提供微硅灰,氯离子含量 0.005%,含水率 0.78%,烧失量 1.96%;采用粗砂和细砂;钢纤维采用 0.22 mm 直径镀铜平直钢纤维,长径比 70,抗拉强度 2480 Mpa;消泡剂采用聚二甲基硅氧烷消泡剂;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,氯离子含量 0.05%,总碱量 0.40%,含水率 0.2%,减水率 33%。

**Table 1.** Properties of aggregates used

**表 1.** 使用骨料属性

性能	C30		UHPC	
	粗骨料	细骨料	细骨料	
类型	碎石	中砂	粗砂	细砂
最大尺寸(mm)	25	3	0.825	0.425
氯离子含量(%)	0.005	0.003	0.0025	0.0042

制备时将灰料及外加剂加入拌合 3 min,加入石英砂再进行拌合 3 min,之后加入水拌合 7 min,其中灰料和砂料要注意倒置时最好两人进行操作,并且前期缓慢倒置,避免其过快导致从搅拌机进料口另一侧扬出去粉料,加入钢纤维时需要开机器使用筛网进行边筛边倒,进行拌合 3 min [10]-[12],UHPC 配合比如表 2 所示。

**Table 2.** UHPC Mixing Ratio

**表 2.** UHPC 配合比

混合物名称	水泥	硅灰	粉煤灰	石英砂	减水剂	水	钢纤维	消泡剂
UHPC (kg/m <sup>3</sup> )	740	100	210	999	11	210	147	2

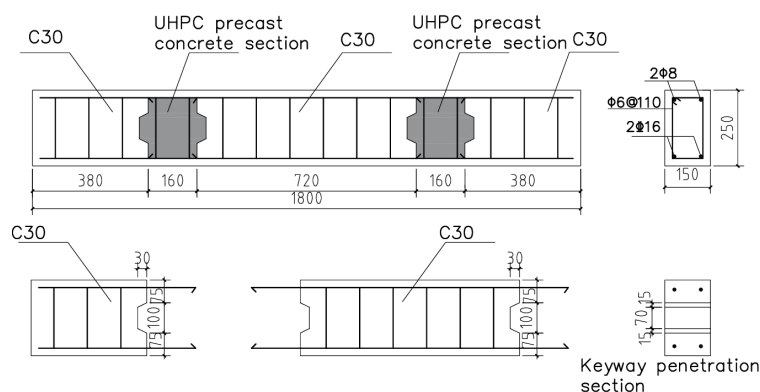
### 2.2. 试件设计

本文试验根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) [13],设计了 5 根 UHPC 连接预制装配梁,其中 UHPC 预制梁命名按照浸泡时间定义,梁截面均为 150 mm × 250 mm,梁长为 1800 mm,计算长度为 1600 mm,混凝土保护层厚度为 25 mm,均为三段 C30 混凝土预制段,连接段钢筋搭接长度为 10 d (d

为底部纵筋的直径), L0 为不浸泡侵蚀的对照实验梁, L1, L2, L6, L13 分别为在 5% 的硫酸钠溶液中完全浸泡侵蚀 30 天、60 天、180 天、390 天, 确保同一时间进行试验梁受弯实验, 用 UHPC 后浇的混凝土梁, 在 UHPC 后浇段界面设置 2 个键槽, 并在后浇前对界面进行打磨设置粗糙面, 并拼接 2 段预制梁使得预制梁外伸钢筋交错布置, 形成后浇段长度每段为 160 mm。试验梁侵蚀时间表如表 3 所示, 试验梁的设计和配筋图如图 1, 现场浇筑图如图 2。

**Table 3.** Erosion time  
**表 3.** 侵蚀时间

试验梁	侵蚀时间/天
L0	0
L1	30
L2	60
L6	180
L13	380



**Figure 1.** Test beam design and reinforcement drawings  
**图 1.** 试验梁和配筋图

### 2.3. 试件性能

本次试验的混凝土现浇的 C30 混凝土留有  $100 \times 100 \times 100$  mm 立方体试块, 后浇 UHPC 段也留有  $150 \times 150 \times 150$  mm 立方体试块, 后期进行硫酸盐浸泡后进行抗压实验得到相关混凝土的实验数据见表 5, 下部受力纵筋、箍筋和上部架立钢筋均有留样, 进行钢筋的抗拉试验获得钢筋的屈服强度, 破坏强度以及弹性模量见表 4。

**Table 4.** Mechanical properties of steel bars  
**表 4.** 钢筋力学性能

试样	屈服荷载/kN	屈服强度 $f_y$ /MPa	破坏荷载/kN	破坏强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E_s$ /MPa
HRB300A8	18.2	362.7	23.2	461.55	2.11
HRB300A6	20.5	725.5	22.8	826.29	2.21
HRB400D16	68.8	342.35	108.3	538.64	2.13

## 2.4. 加载装置

本次试验采用三分点静力加载，试验采用液压加载系统对试件施加荷载，千斤顶施加外荷由 50T 拉压传感器测定，荷载布置方式应与设计相符合，为使试验的内力图与设计内力图相一致，采用等效荷载原则，在千斤顶和试件梁之间加设钢梁(刚度足够大)作为荷载分配梁，通过分配梁将千斤顶的力传递到试验梁上，挠度变形设置了 5 个测点，采用量程 30 mm/50 mm 的位移传感器测定，分别布置在梁两端支座上方(用以监测支座沉降)、梁跨中和分配梁加载点。挠度变形和应变数据通过静态应变采集仪 DH3816N 采集。试验梁应变片及位移计布置见图 2。试验开始前在试验梁跨中沿高度方向等间距粘贴 5 个混凝土应变片，同时将应变测试仪与电脑相连进行数据采集，直至试验梁破坏。钢筋应变片布置在底部纵筋和左右箍筋处。同时在混凝土梁上进行分区划分，用于更直观的描述裂缝的开展。试验完成后，用东华测试软件进行应变数据分析，以量测加载过程中各级荷载作用下混凝土的应变发展情况并查看是否满足平截面假定[14]。

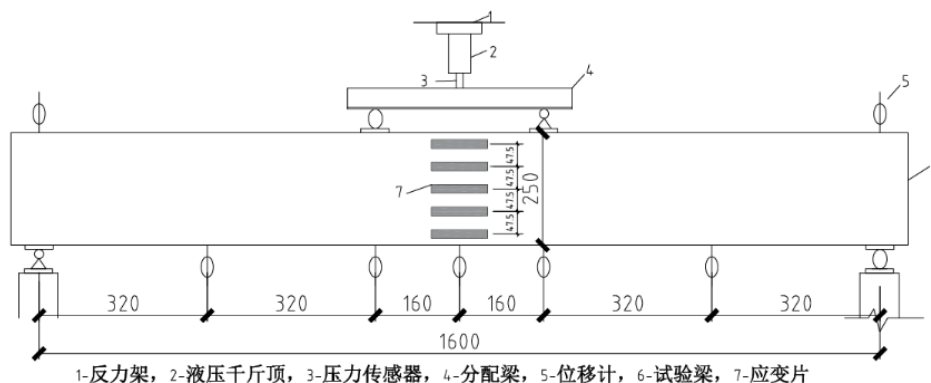


Figure 2. Arrangement of strain gauges and displacement gauges  
图 2. 试验梁应变片及位移计布置

## 2.5. 加载方案

首先对试件进行 5 kN 预加载，查看应变采集仪是否数据正常。正式加载采用分级加载，每级荷载增量为 20% 的计算开裂荷载。第一级荷载值包括试件梁和分配梁自重，不足部分用外加荷载补足；在荷载即将达到开裂荷载时，每级荷载增量减小为 5% 的计算开裂荷载；混凝土开裂后，每级荷载增量按 10% 的计算破坏荷载值进行加载，荷载即将到承载能力极限状态时，每级荷载增量小于 5% 的计算破坏荷载。

## 3. 试验现象及破坏

### 3.1. 侵蚀破坏描述

在硫酸盐自然浸泡试验过程中，由于试验仅仅受到硫酸盐单因素的侵蚀作用，所以试件表面变化情况在浸泡前期不是很明显。图 3 中随着侵蚀时间的不断增加，混凝土梁试件棱、角处开始出现微小剥落。硫酸盐对混凝土梁的侵蚀是一个持续的过程。在反应开始阶段，产生钙矾石和二水石膏等产物，这些产物吸水膨胀，填充混凝土内部原始孔隙和裂缝。随着时间推移，产物增多，导致混凝土梁内部膨胀，表面剥落并产生微小裂缝。随着反应进行，钙矾石和二水石膏填满孔隙和裂缝，受到孔隙壁的抑制，形成持续增大的膨胀应力。一旦达到阈值，混凝土将脱落开裂，产生新的孔隙和裂缝，为硫酸根离子进一步侵蚀提供通道，加剧破坏。





**Figure 3.** Sulfate-impregnated form  
**图 3.** 试验梁受硫酸盐浸泡过后的形态

### 3.2. 试验破坏描述

(1) L0: 荷载加载到 33 kN, 裂缝开始出现; 荷载加载到 42 kN 时, 两侧区域开始出现裂缝; 荷载加载到 72 kN, 裂缝发展到 D12, 荷载加载到 87 kN, 裂缝宽度扩展不明显。荷载加载到 117 kN, 在 111 kN 时试验梁出现脆响, 先前裂缝继续发展, 加载到 182 kN 时, 受压区出现横向裂缝; 破坏后荷载降到 148 kN, 混凝土受压区压碎, 裂缝图如图 4(a)。

(2) L1: 荷载加载到 39 kN, E18、E24 出现极小裂缝发展到 D18。荷载加载到 54 kN 时, E18、E24 裂缝开始扩大, 荷载加载到 84 kN, 未出现新裂缝。荷载加载到 114 kN, E29 延伸到 B28; 荷载加载到 140 kN, 清晰听到裂开的响声, 同时先前裂缝继续开展, 荷载加载到 165 kN, 裂缝数量不变, 但宽度都有所增加, 跨中裂缝 E18 出现分叉; 加载到 173 kN 时, 加载过程可听到清脆响声; 破坏后荷载降到 148 kN, A14、A15 左支座区域混凝土压碎, 裂缝图如图 4(b)。

(3) L2: 荷载加载到 54 kN, 此时梁跨中底侧首先出现细微裂缝 E12、E17、E24; 荷载加载到 54 kN 时, 先前三条裂缝继续发展, 荷载加载到 84 kN, 裂缝宽度扩展不明显。荷载加载到 114 kN, 跨中主裂缝数量基本稳定, 此时多个裂缝发展重合, E17 出现新裂缝, 其他裂缝延伸不明显, 荷载加载到 140 kN, C8 分裂到 B10, 荷载加载到 170 kN, 此时纵向受拉钢筋应变达到屈服应变, 此后, 荷载加载缓慢, 裂缝宽度迅速增大, 跨中挠度迅速增大。加载到 180 kN 时, 混凝土出现被压碎掉落声, 荷载降到 145 kN, A15-A20 混凝土压碎, 裂缝图如图 4(c)。

(4) L6: 荷载加载到 43 kN, 出现两条极小裂缝 E14、E21; 荷载加载到 58 kN, 出现三条新裂缝, 先前 E14 裂缝继续开展到 D14; 荷载加载到 88 kN, E18 分叉出一个新裂缝; 荷载加载到 103 kN, 出现四条新裂缝, 斜截面出现裂缝, E6 底部出现细小裂缝; 荷载加载到 118 kN, 出现两条新裂缝; 荷载加载到 133 kN, 钢筋屈服, 出现四个新裂缝; 荷载加载到 163 kN, 到达极限荷载, 荷载下降到 132 kN, A12-A17 混凝土压碎, 裂缝图如图 4(d)。

(5) L13: 荷载加载到 31 kN, 此时梁跨中底侧首先出现细微裂缝 E15, E18, E22; 荷载加载到 47 kN 时, E12、E13 分裂到 D12、D13 中间; 荷载加载到 77 kN, E7 出现裂缝到 D7; 荷载加载到 122 kN, 钢筋屈服, 荷载加载到 164 kN, 混凝土出现被压碎掉落声, 裂缝图如图 4(e)。

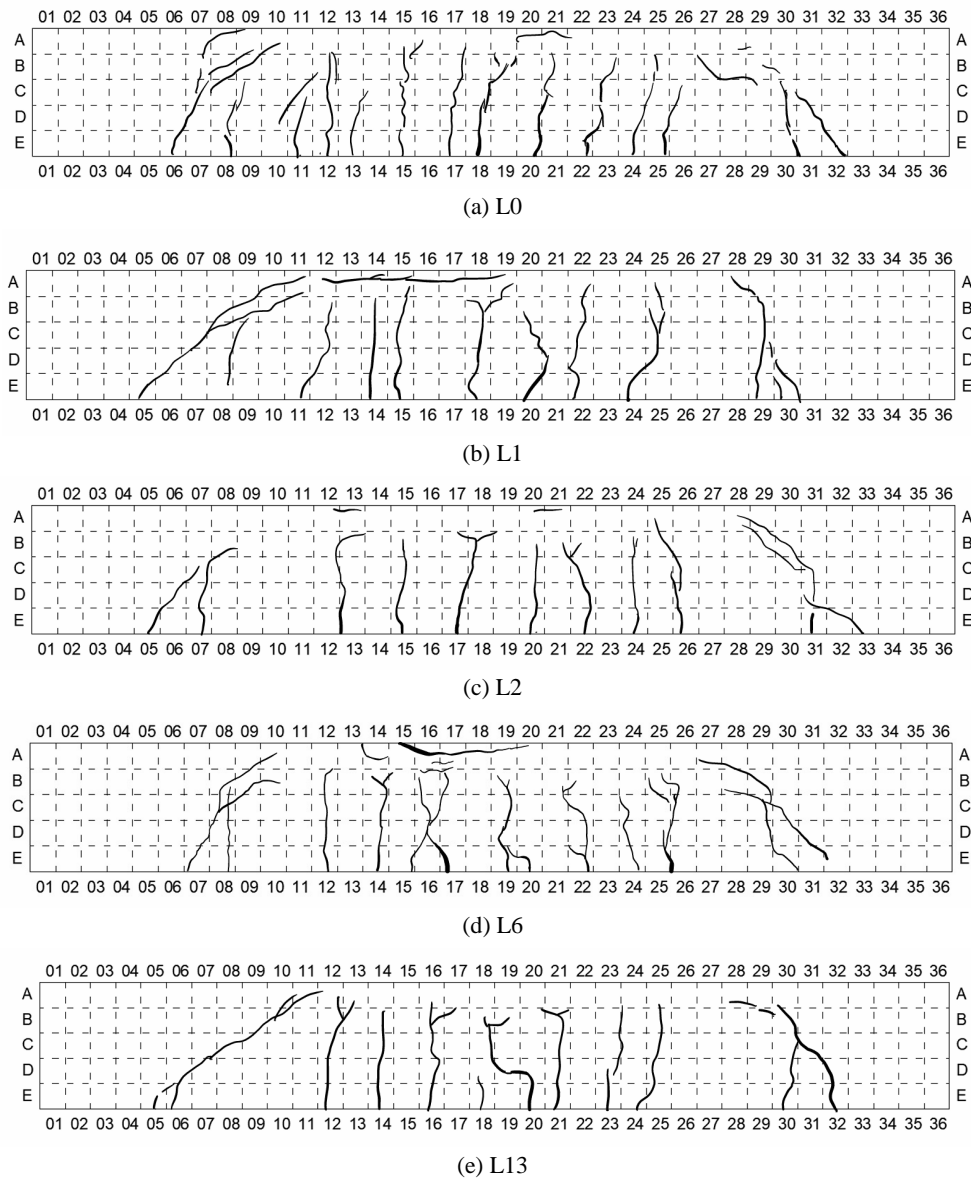


Figure 4. Specimen damage pattern  
图 4. 试件破坏形态

## 4. 试验结果及分析

### 4.1. 荷载裂缝曲线

以试验梁在当前荷载下所对应的最大裂缝宽度进行研究，由图 5 可见各试验梁的最大裂缝宽度随荷载的增大发展趋势一致；在破坏状态下，L0 其最大裂缝宽度达到了 3.7 mm，而 L1、L2、L6、L13 分别为 2.338 mm、2 mm、2.082 mm、3.225 mm，呈现一种先降低后增加的发展趋势，硫酸盐浸泡 30 天~60 天，破坏状态裂缝缩小也表明了前期硫酸盐浸泡试验梁对其整体性与强度进行了提高。硫酸盐浸泡 390 天后，此时试验梁内部化合物的产生导致试验梁在实验加载前内部产生了大量孔隙，从而裂缝出现的最早，且在发展过程中，L6 和 L13 斜率变化幅度最大，这表明随着后期硫酸盐侵蚀时间的大跨度增大，试验梁裂缝开展的更为迅速，且前期裂缝增大变化更为明显。

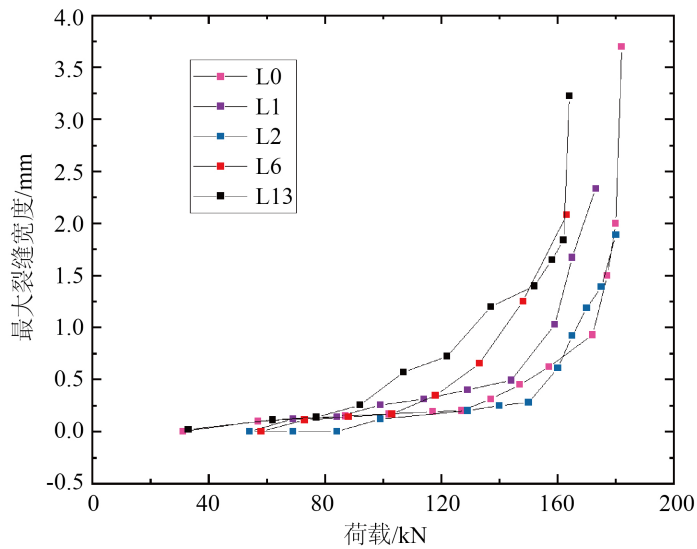


Figure 5. Load-maximum crack width curve

图 5. 荷载-最大裂缝宽度曲线

#### 4.2. 荷载挠度曲线

如图 6 所示为 UHPC 预制梁的荷载 - 挠度关系曲线，试验结果表明五组试验梁的荷载挠度曲线表现出三段式曲线，第一个阶段是加载初期到试验梁混凝土开裂前的线弹性状态，荷载 - 挠度曲线呈线性增长，直到混凝土发生开裂，曲线出现第一个拐点；试件开裂后进入第二个阶段，为试件带裂缝工作状态，相较于第一个阶段，曲线的斜率有所下降，钢筋屈服时，曲线上出现第二个拐点；试验梁的钢筋屈服之后，曲线开始变得平缓，荷载缓慢增加，挠度增加的更加明显，直到最后出现试件破坏。

Table 5. Characteristic loads and corresponding deflections of test beams

表 5. 试验梁特征荷载和对应挠度

试件编号	试验梁开裂		钢筋屈服		极限状态		试验梁破坏	
	$P_{cr}$ /kN	$\omega_{cr}$ /mm	$P_y$ /kN	$\omega_y$ /mm	$P_u$ /kN	$\omega_u$ /mm	$P_f$ /kN	$\omega_f$ /mm
L0	33	0.887	157	5.942	182	16.13	148	22.794
L1	39	1.413	144	6.125	173	18.957	148	24.673
L2	54	1.144	150	4.443	180	15.519	145	19.713
L6	43	1.588	133	5.447	163	14.57	129	18.182
L13	31	1.01	137	5.686	164	21.6	127	25.34

通过对图 6 以及表 5 的分析，试验结果表明，经过 5% 硫酸盐的侵蚀，L2 试验梁的破坏挠度相较于 L0 降低了 13.5%，这表明在 UHPC 预制梁在 5% 硫酸盐溶液中浸泡 60 天，一定程度上增加了试验梁的密实度。L1 试验梁的破坏挠度相较于 L0 增加了 7.6%，而且极限抗压强度较 L0 降低了 4.9%，这是由于在试验梁制作时，L1 的浇筑不密实，内在存在气泡和空隙，导致硫酸盐浸泡 30 天，虽然整体性以及密实性提高了，但是仍然强度不如 L0。L6、L13 试验梁的极限抗压强度相较于 L0 降低了 10.4% 和 9.8%，相较于 L2 降低了 9.4% 和 8.8% 这表明在 UHPC 预制梁在 5% 硫酸盐溶液中浸泡的 180 天和 390 天，试验梁的整体力学性能在降低。在荷载 120 kN 时，L1、L2 挠度前期增长较缓慢，L0、L6、L13 挠度前期增长



较为相似,均高于 L1、L2,这表明试验梁在硫酸盐浸泡短期对其整体刚度是提高的,但长期浸泡会使其整体刚度下降。

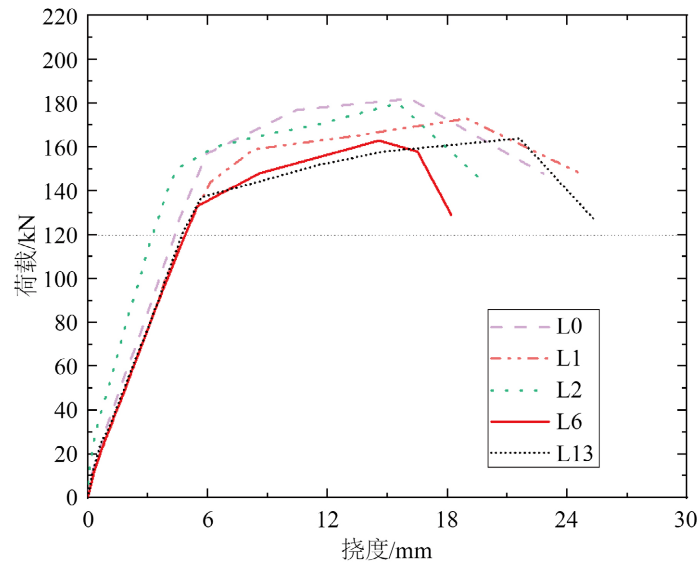


Figure 6. Load-maximum crack width curve  
图 6. 荷载 - 最大裂缝宽度曲线

### 4.3. 混凝土应变

为了验证 UHPC 预制梁混凝土应变沿截面高度的变化是否符合平截面假定,跨中沿梁高等间距粘贴了 5 个混凝土应变片,以量测不同荷载作用下各测点混凝土应变沿梁高的分布规律。典型试件的混凝土应变发展曲线如图 7 所示。

由图 7 可知, L0、L13 的应变发展规律基本相同,均满足平截面假定,中和轴随荷载的增大而增大,其余 3 个试件变化规律同试件 L0、L13。

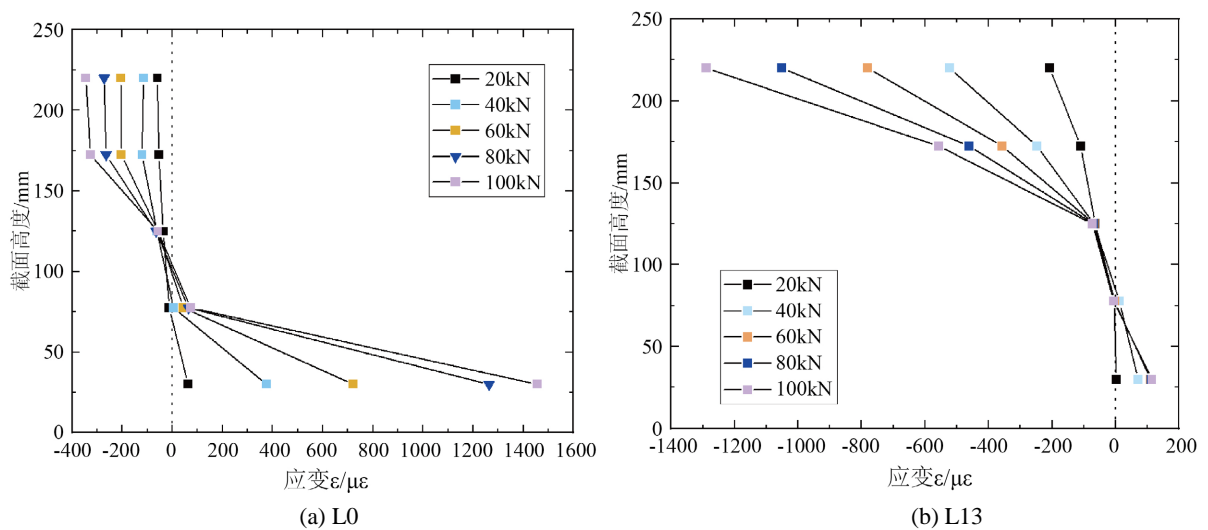


Figure 7. Mid-span section strain curve of a beam  
图 7. 梁的跨中截面应变曲线

## 5. 有限元计算

模型采用 ABAQUS 建模分析 5 个试件的试验情况, C30 混凝土和 UHPC 选取 C3D8R 三维实体单元, 钢筋选用 T3D2 桁架单元。混凝土采用塑性损伤模型, 钢筋采用理想弹塑性模型, 钢筋骨架内置于梁内, 模拟钢筋与混凝土之间的滑移。为提高计算精度, UHPC 现浇段网格划分小于预制部分, 混凝土和 UHPC 采用 C3D8R 三维实体单元, 该单元每个节点有三个自由度, 具有塑性变形和蠕变特性, 可以形象描述混凝土带裂缝工作性质; 钢筋采用 T3D2 桁架单元, 对几何规整的混凝土采用结构化划分网格方法以形成较为规整的四边形网格。对网格收敛性进行验证后, 取混凝土网格尺寸为 20 mm。UHPC 网格尺寸为 10 mm, 钢筋网格为 15 mm。

钢筋采用 embedded 功能嵌入混凝土梁当中, 模拟钢筋与混凝土之间的滑移。混凝土梁与加载板以及支座与混凝土梁之间采用 tie 连接; 对支座采用简支梁边界约束; 为提高计算的收敛性, 模型通过加载板设置指定位移进行加载, 同时采用 coupling 连接控制加载板与支座的位移。有限元模型见图 8。

由图 9 可知: 试验梁只有纯弯段内的底部受拉纵筋屈服, UHPC 现浇段内的钢筋并未承担较大的应力, 这是因为 UHPC 具有较大的刚度和强度, UHPC 内的钢纤维也能抑制内部裂缝的产生, 且由于试件在破坏过程中新旧混凝土交界面容易出现裂缝, 所以在试件破坏时, UHPC 可承担较大的拉力, 内部钢筋不会屈服。

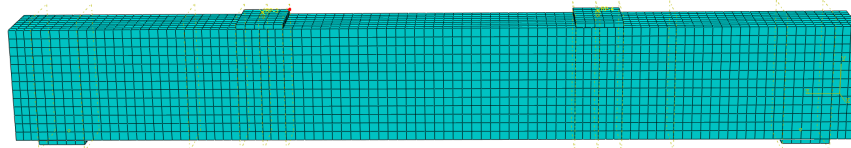
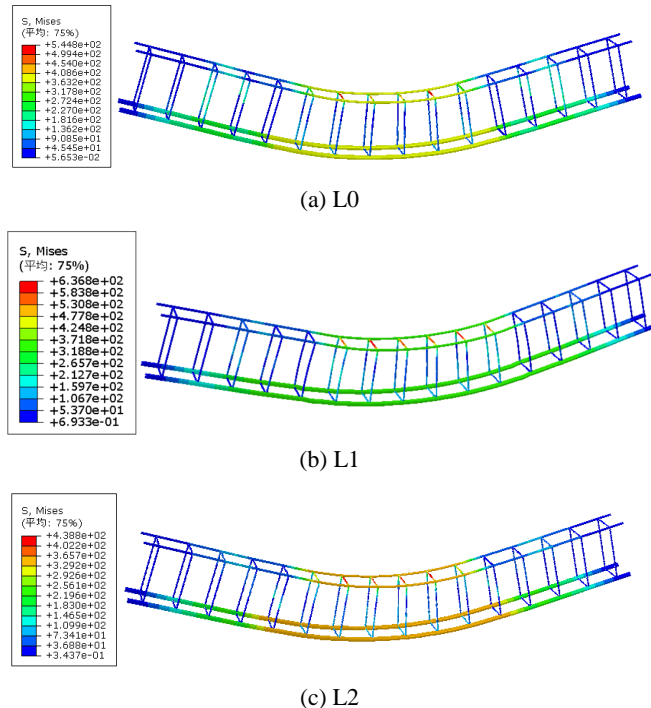


Figure 8. Finite element model  
图 8. 有限元模型



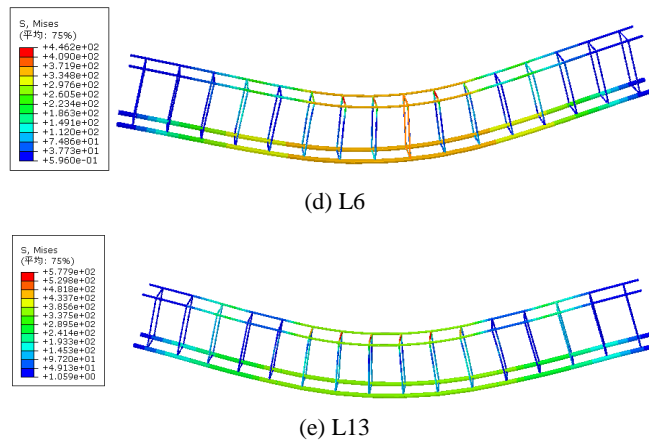
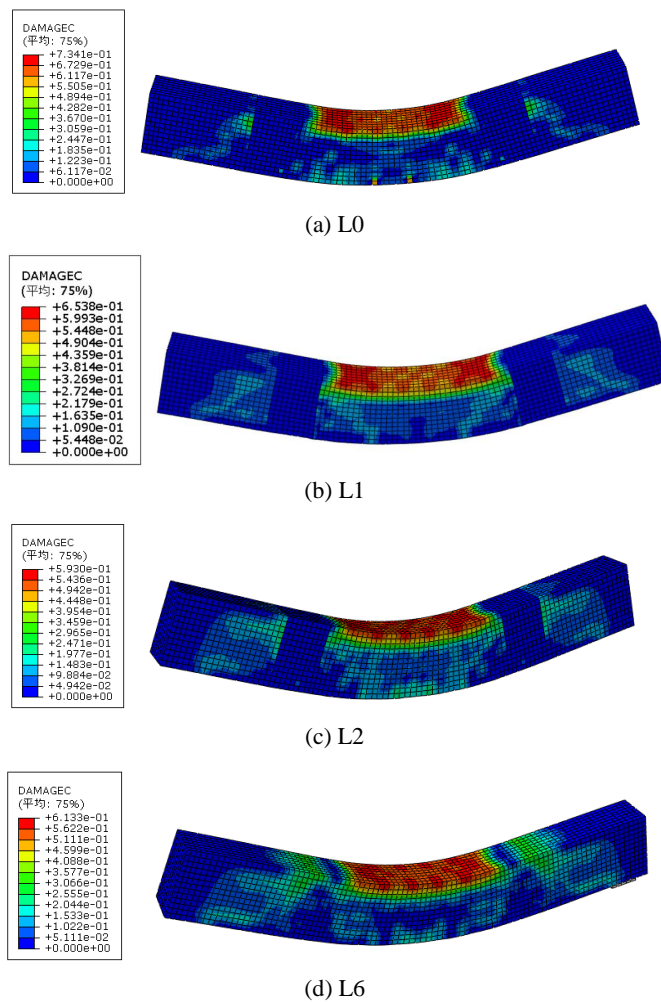
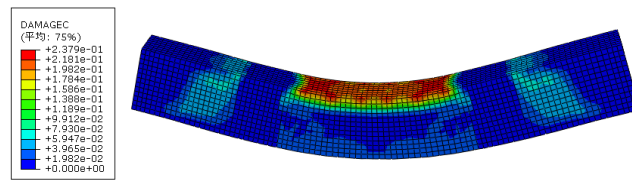


Figure 9. Cloud chart of reinforcement stress  
图 9. 钢筋应力云图

由图 10 可知试验梁均发生上部压碎现象，除 L6UHPC 段出现变形外，其余试验梁试件跨中现浇段内的混凝土应力小于 UHPC 抗拉强度，UHPC 未发生开裂，与试验现象一致。





(e) L13

Figure 10. Cloud chart of concrete stress

图 10. 混凝土应力云图

## 6. 结论

通过对 5 根试验梁的试验过程以及试验结果进行分析和对比, 得出以下结论:

- 1) 所有试验梁均为明显的弯曲破坏, 裂缝均出现了从支座处向受压区开展的趋向, 经过 5% 硫酸盐浸泡后, L1、L2、L6 试验梁相较于 L0 以及 L13, UHPC 预制段并未开裂。
- 2) 在破坏状态下, 最大裂缝宽度呈现一种先降低后增加的发展趋势; 随着后期硫酸盐侵蚀时间的大跨度增大, 试验梁裂缝开展的更为迅速, 且前期裂缝增大变化更为明显。
- 3) 试验梁在硫酸盐浸泡短期对其整体刚度是提高的, 但长期浸泡会使其整体刚度下降。
- 4) 试验梁均经历了混凝土开裂、受拉钢筋屈服及受压混凝土被压碎三个过程, 表现出适筋梁的破坏特征; 并且现浇梁和预制梁的应变沿截面高度的分布规律基本满足平截面假定。
- 5) 经过 ABAQUS 建模分析得出采用混凝土塑性损伤模型, 除 L6UHPC 段出现变形外其余与试验数据基本一致。

## 参考文献

- [1] 刘琼, 李向民, 许清风. 预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J]. 施工技术, 2014, 43(22): 9-14, 36.
- [2] 冯军晓, 郑七振, 龙莉波, 陈刚, 谢思昱, 彭超凡. 超高性能混凝土连接的预制梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(8): 59-65.
- [3] Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q. and Zhang, Z. (2020) Durability of Ultra-High Performance Concrete—A Review. *Construction and Building Materials*, **255**, Article 119296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- [4] Raghda, S., Salah, E., Mariam, F., Metwally, A. (2023) Performance of Pre-Cracked Beams Exposed to Corrosion Environment Cast with Ultra-High Performance Concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, **14**, Article 102171. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102171>
- [5] 康迎杰, 郭自利, 叶斌斌, 潘鹏. ECC 全包裹混凝土的抗硫酸盐侵蚀和抗冻性能[J/OL]. 材料导报: 1-17. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20231205.0903.004>, 2024-04-24.
- [6] Ahmad, H., Necip, A., Abdulkadir, C. and Azad, A. (2024) Experimental Study on Direct Shear Strength of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete under Acid and Sulfate Attack. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **68**, 392-402. <https://doi.org/10.3311/PPci.22519>
- [7] 路宇, 吴晨洁, 王德志, 赵晏. 复掺再生砂和超细粉煤灰对超高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 10(42): 3671-3678.
- [8] 张志豪, 陈露一, 黄有强, 盖珂瑜. 海洋侵蚀环境下超高性能混凝土的力学与耐久性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(7): 1-4, 9.
- [9] 徐国强, 张薇, 唐伟, 王梦赛. 硫酸盐侵蚀下石灰石复合矿物掺合料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(1): 61-64.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合发布. GB/T:50080-2016 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [11] 中国工程建设标准化协会标准. T/CECS:864-2021 超高性能混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

- 
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ:55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
  - [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合发布. GB:50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
  - [14] 李新星, 周泉, 李水生. 基于 UHPC-钢筋错位连接的预制装配式混凝土梁抗弯性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(9): 47-53.