

# 低温下早龄期混凝土爬模连接件受剪性能研究

周伟善<sup>1</sup>, 狄鹏<sup>1</sup>, 严文亮<sup>1</sup>, 孔国斌<sup>2</sup>, 杨晓霞<sup>2</sup>, 严加宝<sup>2\*</sup>

(1. 中铁四局集团第三建设有限公司, 天津 300300; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 冬季施工环境下, 早龄期混凝土在模板爬升过程中部分区域易暴露于低温环境中, 面临冻害风险, 这可能会影响爬模连接节点的抗剪性能, 从而影响施工的安全性。为研究低温条件下早龄期混凝土爬模连接节点的抗剪性能, 文中设计了6个试件并对其进行推出试验, 还基于低温下混凝土与钢材的本构关系, 采用ABAQUS有限元软件建立了爬模连接件的有限元模型。研究参数包括温度、混凝土龄期、抗剪螺栓直径与强度。基于试验及数值模拟结果, 分析试件的破坏模式、荷载-滑移曲线、荷载-应变曲线等。结果表明: 低温下试件发生了脆性破坏, 降低温度会提高试件的抗剪承载力与初始刚度, 但会降低其延性; 在其它条件相同的情况下, 延长混凝土龄期有利于提升爬模连接件的承载力, 但会使其延性降低; 提高高强螺栓的强度对爬模连接件的抗剪承载性能影响较小, 但可提高试件的延性。最后, 将采用各国规范计算的结果与试验结果进行对比, 发现各国规范均能保守估计低温下早龄期混凝土爬模连接件的抗剪承载力。

**关键词:** 低温; 早龄期混凝土; 爬模连接件; 推出试验; 抗剪性能; 荷载-滑移曲线

中图分类号: TU755.2, TU375

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0092-13

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240718004

## Study on Shear Performance of Early-Age Concrete-Climbing Formwork Connection at Low Temperature

ZHOU Weishan<sup>1</sup>, DI Peng<sup>1</sup>, YAN Wenliang<sup>1</sup>, KONG Guobin<sup>2</sup>,  
YANG Xiaoxia<sup>2</sup>, YAN Jiabao<sup>2\*</sup>

(1. The Third Construction Co., Ltd. of CTCE Group, Tianjin 300300, China;

2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

\*Corresponding author: yanj@tju.edu.cn

**Abstract:** During winter construction, early-age concrete is partially exposed when formwork is lifted, exposing it to the risk of frost damage. This could affect the shear performance of the connection joints between the formwork and the structure, thereby impacting the safety of construction operations. To study the shear performance of early-age concrete formwork connection joints under low temperatures, six specimens were designed for push-out tests. Based on the constitutive relationships of concrete and steel under low temperatures. Finite element models of the push-out test for formwork connection specimens were established using ABAQUS software. The study parameters included temperature, concrete age, shear bolt diameter and strength. Analysis of test results and numerical simulations showed that under low temperatures, the members experienced brittle failure. Lowering the temperature increased the shear bearing capacity and initial stiffness of the members, but reduced their ductility. Increasing the concrete age was

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(52178494)

作者简介:

周伟善(1992—), 男, 学士, 工程师, 主要从事建筑结构施工方面的研究。E-mail: 1211175669@qq.com。

通信作者:

严加宝(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事低温下组合结构的研究。E-mail: yanj@tju.edu.cn。

beneficial for the bearing capacity of the formwork connection specimens, but reduced their ductility. Enhancing the strength of high-strength bolts had a minor impact on the shear bearing capacity of the formwork connection specimens, but improved their ductility. Finally, comparisons were made between the specifications of various countries and the test results, revealing that the specifications of all countries could conservatively estimate the shear bearing capacity of early-age concrete formwork connection joints under low temperatures.

**Keywords:** low temperature; early-age concrete; climbing formwork connection; push-out test; shear resistance; load-slip curve

超高层建筑的超高建筑高度与桥梁具备的超大结构跨度特性,给工程施工带来了安全控制、质量保障、工期管控及经济性优化等挑战。传统滑模、翻模等模板施工技术已难以满足工程施工要求<sup>[1]</sup>,液压爬模施工技术应运而生。液压爬模施工技术在质量保障、安全控制、工期管控上相较传统技术具有明显优势,因此发展迅速。天津滨海新区气象局新一代天气雷达塔项目采用了液压爬升模板对塔体剪力墙结构进行施工,液压爬升模板在混凝土强度达到 10 MPa 后开始爬升,而项目冬季施工阶段面临昼夜温差大等难题,而早龄期混凝土与爬模连接节点的抗剪性能对工程质量与施工安全性具有重要影响。

国内外针对爬模连接节点的研究较为成熟,何夕平等<sup>[2]</sup>通过理论结合试验分析了斜向爬升爬模结构预埋系统的抗滑移性能,发现该埋件板最先发生受剪破坏,因此需适当加厚埋件板。夏巨伟<sup>[3]</sup>通过比较风吸力与压力作用下爬模连接节点反力的大小,提出了连接节点反力的求解方法。卞佳等<sup>[4]</sup>详细介绍了爬锥式预埋件的常用设计与验算方法及其施工工艺。李剑飞等<sup>[5]</sup>针对 DOKA 液压爬模系统中爬锥预埋系统的种种问题提出了有效的解决方案。于光等<sup>[6]</sup>提出了一种可伸缩承载体,并利用有限元软件进行受力分析验证了其安全性。彭继园<sup>[7]</sup>依托赵河镇特大桥工程,针对边跨直线段浇筑施工采用托架法的技术方案,对托架爬锥预埋件进行了设计与计算。

已有资料表明,我国天津最低气温可达到 $-27.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;东北严寒地区最低气温可达到 $-52.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>;我国青藏高原地区最低温度可达到 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[9]</sup>。冬季低温施工环境下,新浇筑的混凝土未采取防冻措施,同时爬模爬升时混凝土的保温质量难以保证,进而对混凝土的养护质量及强度发展造成不利影响<sup>[10]</sup>,最终给施工过程的安全性及结构质量带来风险。现行液压爬升模板设计与规范至今尚未完善,且无低温环境下爬模结构的设计方法。因此,本文研究低温下早龄期混凝土爬模连接节点的抗剪性能对该类工程的施工安全性具有重要意义,对其它类似项目也具有一定的参考价值。

## 1 低温下推出试验

### 1.1 试件设计及制作

该类工程爬模抗剪连接节点的预埋件由埋件板、预

埋螺杆、爬锥、塑料锥套和受力高强螺栓组成,如图 1 和图 2 所示。埋件板和预埋螺杆在混凝土的内部起到抗拉拔作用;受力高强螺栓是承担混凝土结构剪力的核心传力构件,其与爬锥连接配套预埋螺杆共同构成节点剪力传递体系。为研究低温环境对早龄期混凝土爬模连接节点抗剪性能的影响,本文共设计了 3 组推出试件,各试件参数如表 1 所示,温度参数为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试件编号分别对应为 ST20、ST-20、ST-40,每组试件设计制作了 2 个平行试件,即试件编号的后缀-1/2。推出试件尺寸参照欧洲规范 EN 1994-1-1:2004<sup>[11]</sup>的标准进行设计。

表 1 推出试件参数

Table 1 Parameters of push-out specimens

试件编号	$T/(\text{ }^{\circ}\text{C})$	混凝土龄期/d	混凝土强度等级	$h_{ef}/\text{mm}$	$h_{bt}/\text{mm}$
ST20-1/2	20	3			
ST-20-1/2	-20	3	C40	92	22
ST-40-1/2	-40	3			

注: $h_{ef}$ 为爬模预埋系统的预埋深度; $h_{bt}$ 为受力螺栓拧进爬锥的埋入长度。



图 1 爬模连接节点

Fig. 1 Climbing formwork connection joints

试件详细信息如图 3 所示。混凝土的强度等级均为 C40,且在板内配置直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋,保护层厚度为 30 mm。H 型钢采用 Q345 级钢材,其截面尺寸为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ ,构件总高度为 500 mm。受力螺栓采用 8.8 级 M14 $\times$ 30 高强螺栓,



图2 预埋件

Fig. 2 Embedded parts

预埋板采用 28 mm×28 mm×4 mm 的 Q345 钢板,与预埋板相连的预埋螺杆采用直径  $\varphi$  为 8 mm 的 Q345 螺杆,爬锥采用型号规格为 M14/D25 的锥筒结构。本研究的推出试件按照《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)<sup>[12]</sup> 的相关规定制作。

### 1.2 材料的力学性能

混凝土材性试验的研究参数包括龄期( $t_0$ )与温度( $T$ ),共设计 13 组混凝土立方体试件。其中,龄期参数  $t_0$  分别取 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d,温度参数  $T$  分别取 20 °C、-20 °C、-40 °C,每组设置 3 个混凝土试件,共 39 个试件。本研究混凝土材性试验所用立方体试件与抗剪连接节点推出试件采用同一批次混凝土浇筑成型。所有试件先在 20 °C 环境下养护  $t_0-1$  天,待养护至龄期的前 1 天,转

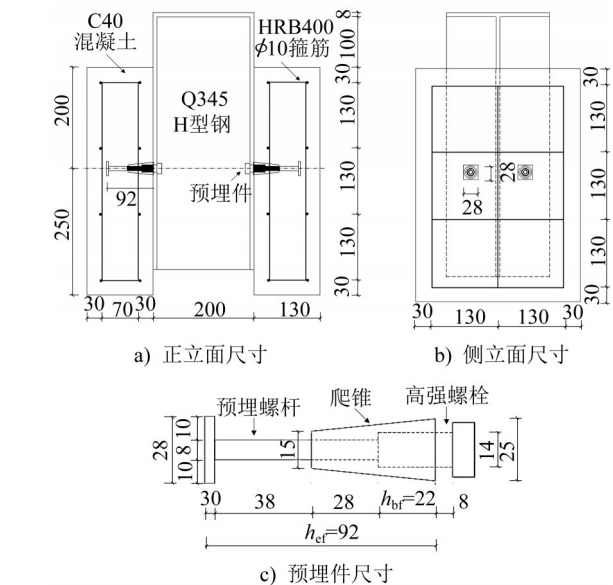


图3 试件尺寸及配筋示意(单位:mm)

Fig. 3 Diagram of specimen dimensions and reinforcement(unit: mm)

移至预设目标低温环境中养护 24 h 后进行材性试验。根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[13]</sup> 和《低温环境混凝土应用技术规范》(GB 51081—2015)<sup>[14]</sup> 中的相应规定进行混凝土材性试验,试验结果如表 2 所示。可以看到:在相同龄期下,随着温度的降低,混凝土的抗压强度明显提高,这是因为低温使混凝土的孔隙水冻结,使其微观结构更紧密<sup>[10]</sup>。

表2 立方体抗压强度实测值

Table 2 Measured compressive strength of the cube

龄期/d	温度 $T/(^{\circ}\text{C})$	混凝土立方体抗压强度/MPa			强度平均值/MPa	变异系数
		①	②	③		
1	20	8.40	7.47	9.23	8.37	0.11
	20	11.78	10.99	11.48	11.41	0.03
3	-20	13.45	12.00	11.53	12.33	0.08
	-40	16.53	14.15	14.69	15.12	0.08
7	20	19.42	19.23	18.22	18.96	0.03
	-20	24.39	22.18	25.44	24.00	0.07
14	-40	27.05	27.90	24.69	26.55	0.06
	20	22.68	21.87	25.75	23.43	0.09
28	-20	26.97	29.72	25.96	27.55	0.07
	-40	35.42	33.00	29.75	32.72	0.09
28	20	28.28	31.86	26.17	28.77	0.10
	-20	28.81	32.94	29.94	30.56	0.07
	-40	31.85	33.78	37.05	34.23	0.08

注:表中①、②、③分别代表第1、2、3组试验。

本次钢材材性试验所用的受力螺栓、预埋螺杆及钢梁的翼缘与腹板,均与爬模抗剪连接节点推出试验采用同一批次钢材加工制作。本次试验的核心目的是为后续推出试验结果的定量分析及有限元数值模拟提供材性数据支撑。按照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[15]</sup>和《金属材料 拉伸试验 第3部分:低温试验方法》(GB/T 228.3—2019)<sup>[16]</sup>中的规定对试件进行取样及开展拉伸试验研究。受力螺栓、预埋螺杆、钢梁及钢筋的材料属性如表3所示。

表3 钢材材性  
Table 3 Steel material properties

材料名称	T/(°C)	$E_s$ /GPa	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$\epsilon_u$ /%
8.8级高强螺栓	20	210	465	674	6.3
	-20	219	488	708	6.0
	-40	216	501	727	6.1
Q345预埋螺杆	20	205	348	512	24.4
Q345型钢	20	223	359	496	21.0
HRB400钢筋	20	203	442	644	21.7

注:T为低温温度; $E_s$ 为钢材弹性模量; $f_y$ 为钢材的屈服强度; $f_u$ 为钢材的极限抗拉强度; $\epsilon_u$ 为钢材的极限应变。

### 1.3 加载装置及测量内容

本次推出试验在天津大学土木工程结构实验室1500 t电液伺服液压机上进行,试验加载装置及测点布置如图4所示。常温与低温试件均在每个预埋螺杆上部与爬锥连接处根部粘贴应变片,编号为SL/1/2/3、SR1/2/3,用于监测试验过程中连接件的应变变化;额外在常温试件爬锥上部中间截面粘贴应变片,以验证爬锥连接功能是否能有效发挥及是否会屈服。

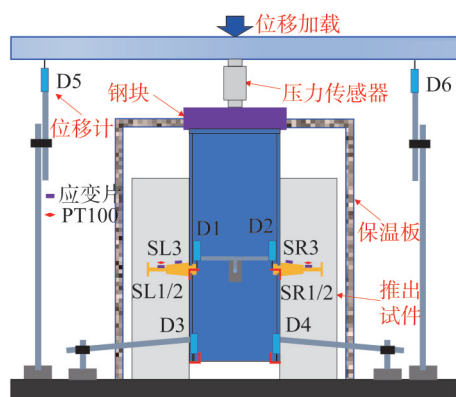


图4 测点布置

Fig. 4 Arrangement of measuring points

考虑到在实际工程中,液压爬模在混凝土强度达到10 MPa时开始爬升,本文首先将推出试件在20 °C环境下

养护2 d后,再将试件在目标温度(20 °C、-20 °C、-40 °C)下养护24 h。根据表2可知:C40混凝土养至3 d龄期时,在试验设定的不同温度工况下,其抗压强度在10 MPa~17 MPa之间,满足爬升要求。试验预加载阶段,将荷载预加至试件预估峰值荷载的20%,预估峰值荷载根据《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)<sup>[17]</sup>中的规定计算所得。正式加载时采用位移控制加载,在弹性阶段设定加载速率为0.1 mm·min<sup>-1</sup>;之后加载速率设定为0.2~0.5 mm·min<sup>-1</sup>,直至试件发生破坏。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏模式

试件的破坏模式总结为两种:(1) 高强螺栓受剪破坏;(2) 混凝土开裂伴随高强螺栓受剪破坏。其中,试件ST20-1/2的破坏模式为混凝土开裂伴随高强螺栓受剪破坏,其余试件均发生高强螺栓受剪破坏。可知低温改变了试件的破坏模式,原因在于低温会使混凝土的强度提升<sup>[10]</sup>,使得混凝土与钢材的黏结作用增强<sup>[18]</sup>。

试件ST20-1/2在加载初期处于线弹性阶段,当加载至峰值荷载的65%~75%时,混凝土板表面出现了细小裂缝;随着荷载继续增加,混凝土出现明显的竖向裂缝(图5a)、45°斜裂缝(图5b),侧面出现贯通的水平裂缝(图5c);当荷载达到峰值荷载后继续加载,试件上部混凝土表面逐渐出现剥落现象,荷载随之呈骤降趋势,最终高强螺栓发生受剪破坏。由于混凝土破坏较早,试验过程中H型钢与混凝土始终维持良好的黏结状态,试件破坏前其剪力均由混凝土、抗剪连接件、钢-混凝土界面共同承担。如图5d)所示,试件发生破坏后,预埋螺杆和预埋板变形明显,爬锥预埋件与H型钢的接触界面变形明显,爬锥出现微小弯曲。

试件ST-20-1/2与ST-40-1/2的破坏模式均为螺栓受剪破坏,如图6、7所示。在加载初期试件处于线弹性阶段,剪力由混凝土、抗剪连接件、钢-混凝土界面共同承担。当荷载加载至峰值荷载的65%~75%时,混凝土与钢板表面的黏结作用失效,荷载剧降,此后剪力由混凝土与抗剪连接件承担,试件进入弹塑性阶段。当荷载达到峰值荷载时,预埋件发生了较大的剪切变形,受力螺栓变形较大,试件承载力剧降。试件ST-40-2因加工过程中存在尺寸偏差,导致4个预埋件受力不均,当荷载加载至235 kN时,其中一根受力螺栓发生剪断破坏,如图7所示。该4个试件破坏时,仅混凝土板角部混凝土发生压碎剥落。试验结束后对混凝土黏结面进行观测,发现爬锥连接件对应位置的混凝土接触区域出现“环形”裂纹,此现象系爬锥对周边混凝土产生的集中应力所致,环形裂纹处的混凝土也承担了一部分剪力。

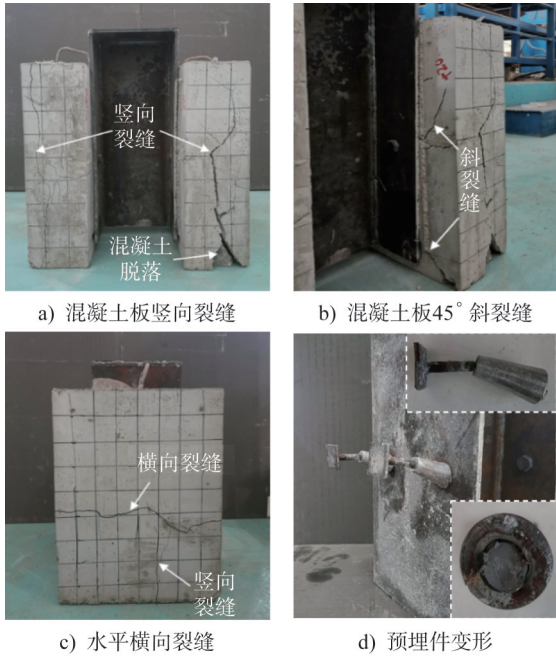


图5 试件ST20-1/2破坏模式

Fig. 5 Failure modes of specimen ST20-1/2

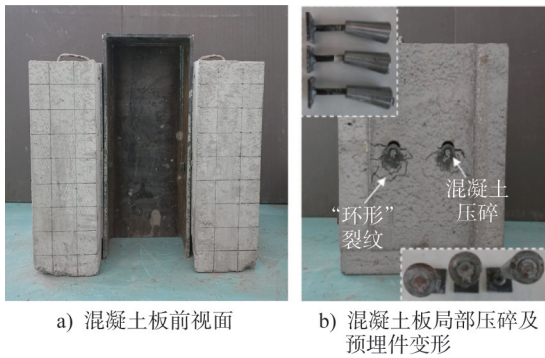


图6 试件ST-20-1/2和ST-40-1破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimen ST-20-1/2 and ST-40-1



图7 试件ST-40-2破坏模式

Fig. 7 Failure modes of specimen ST-40-2

### 2.2 荷载-滑移曲线

原始的(试验直接得到的,未经处理的)试件荷载-滑移曲线如图8所示,低温环境下,钢-混凝土黏结面易形

成冰层;当试件承受剪力作用时,黏结作用率先失效,具体表现为荷载-滑移曲线出现骤降;随后抗剪连接件开始发挥作用。由于黏结作用并非本文研究内容,将曲线骤变部分进行调整,得到试件的荷载-滑移曲线如图9所示。根据试件破坏模式的差异,荷载-滑移曲线可划分为两类:一类是高强螺栓受剪破坏为特征的破坏类型,另一类是混凝土开裂伴随高强螺栓受剪破坏的破坏类型,如图8d)所示。两种类型的荷载-滑移曲线均可分为3个工作阶段:弹性阶段I,荷载值与滑移值近似呈线性关系增长;弹塑性增长阶段II,预埋件发生弹塑性变形,试件的剪切刚度不断变小,直达到螺栓抗剪承载力;衰退阶段III,竖向荷载达到峰值后,荷载-位移曲线进入下降阶段;其中试件ST20-1/2的曲线降幅平缓,而试件ST-20-1/2与ST-40-1/2的曲线则降幅显著且呈阶梯式下降。这是因为常温试件在达到峰值荷载后,混凝土的变形继续增大,使得滑移量继续增大,其延性较好。而低温试件由于达到峰值荷载后其混凝土变形较小,当螺栓的单圈螺纹发生剪切断裂时,荷载-滑移曲线同步呈现一次阶梯下降,最后螺栓出现明显颈缩现象后,试件失效。

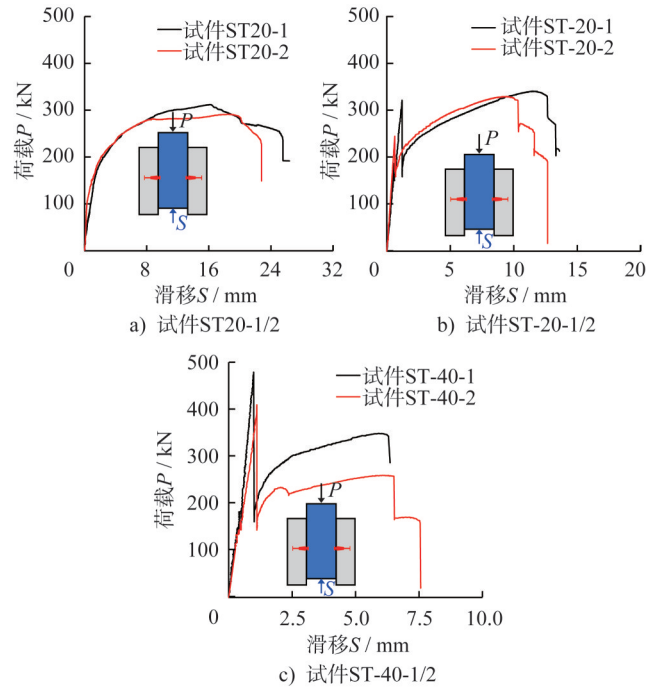


图8 原始的试件荷载-滑移曲线

Fig. 8 Original load-slip curves of specimens

### 2.3 荷载-应变曲线

将测得各试件荷载和应变进行均值处理,绘制试件的荷载-应变曲线如图10所示。常温试件ST20-1/2的最大应变均超过了屈服应变,且预埋件的抗剪作用得到了充分发挥。对于低温试件,预埋件应变在荷载达到较高荷载后发生骤降,其原因是钢-混凝土界面的黏结作

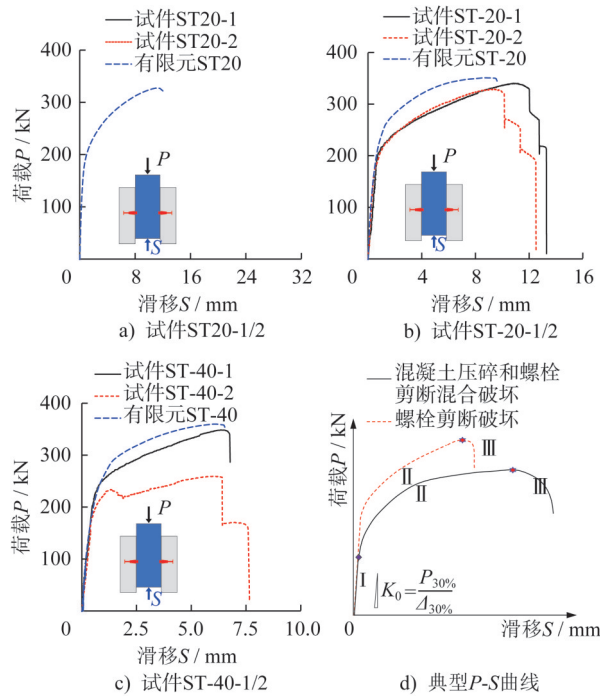


图9 去除黏结作用后不同温度下试件的荷载-滑移曲线  
Fig. 9 Load-slip curves of specimens at different temperatures after removal of bonding

用失效。试件ST20-1/2的4根预埋螺杆应变均达到了屈服应变,试件ST-20-1的4根预埋螺杆应变均接近或超

过屈服应变,其它试件仅部分预埋螺杆应变达到屈服应变,这是由试件加工及加载偏差造成的。爬锥上的应变片SR/L3的应变值均较小,说明爬锥主要起连接作用,其应变并未达到屈服应变。

### 2.4 温度参数对试件各抗剪性能指标的影响

试件ST20-1~ST-40-2的各抗剪性能指标的试验结果如表4所示,温度对预埋件的抗剪承载力 $P_u$ 、极限滑移 $S_{max}$ 和初始剪切刚度 $K_0$ 的影响如图11所示。初始剪切刚度 $K_0$ 参考YAN等<sup>[19]</sup>的研究结果进行计算。

从图11a)可以看出:在低温环境下预埋件的第一抗剪承载力峰值 $P_{u1}$ 与温度 $T$ 的相关性较差,且相同温度下两个平行件的承载力也相差较大,这是因为该承载力包含了型钢与混凝土板的黏结作用,而黏结作用受多种因素影响是不确定的<sup>[18]</sup>;预埋件的第二抗剪承载力峰值 $P_{u2}$ 与温度 $T$ 的相关性较高,在低温环境下预埋件的第二抗剪承载力峰值 $P_{u2}$ 比常温下的相应值高;随温度的降低,预埋件的抗剪承载力逐渐增大,其极限滑移值 $S_{max}$ 逐渐减小,且延性大大降低。本文将延性定义为峰值荷载处的滑移量与屈服荷载处的滑移量的比值。已有研究表明:低温环境可提升混凝土和钢材的材料强度,但会使混凝土的延性变差<sup>[20]</sup>。从图11b)可以看出:在低温环境下

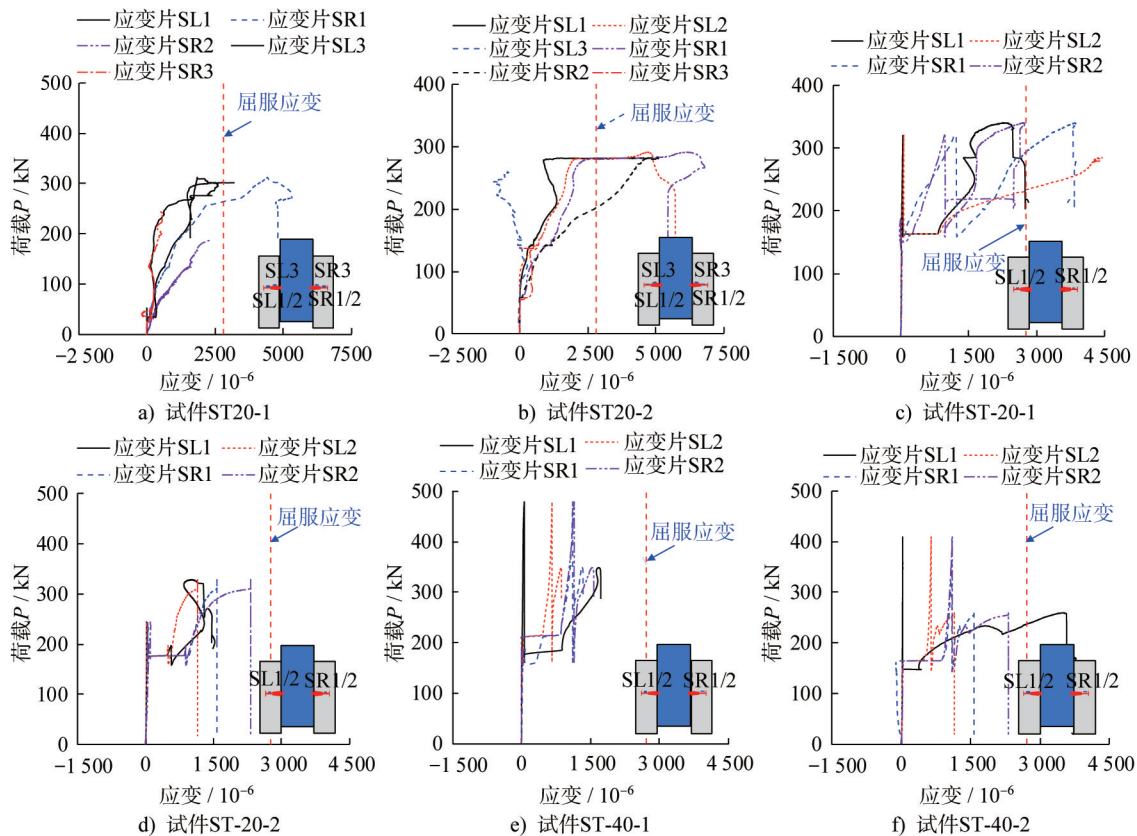


图10 试件的荷载-应变曲线

Fig. 10 Load-strain curves of specimens

表4 试件抗剪性能指标  
Table 4 Shear performance index of specimens

试件编号	$T/(^{\circ}\text{C})$	$P_{u1}/\text{kN}$	$P_{u2}/\text{kN}$	$P_{uF}/\text{kN}$	$P_{u2}/P_{uF}$	$S_{\text{max}}/\text{mm}$	$S_{\text{mF}}/\text{mm}$	$S_{\text{max}}/S_{\text{mF}}$	$K_0/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$K_{0F}/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$K_0/K_{0F}$
ST20-1	20	312	312	327	0.95	25.6	11.8	2.17	223	393	0.57
ST20-2	20	290	290	327	0.89	22.8	11.8	1.93	240	393	0.61
ST-20-1	-20	320	340	351	0.97	12.0	9.6	1.25	303	402	0.75
ST-20-2	-20	250	329	351	0.94	10.2	9.6	1.05	395	402	0.98
ST-40-1	-40	480	356	360	0.99	6.8	6.5	1.03	373	430	0.87
ST-40-2	-40	413	259	360	0.72	6.4	6.5	0.98	394	430	0.92
平均值	—	—	—	—	0.89	—	—	1.40	—	—	0.77
标准差	—	—	—	—	0.16	—	—	0.42	—	—	0.18

注： $T$ 为温度； $P_{u1}$ 为第一抗剪承载力峰值，其考虑了型钢与混凝土板的黏结作用； $P_{u2}$ 为第二抗剪承载力峰值； $S_{\text{max}}$ 为去除黏结作用后的极限滑移； $K_0$ 为初始剪切刚度； $P_{uF}$ 、 $S_{\text{mF}}$ 和 $K_{0F}$ 分别为有限元模拟的抗剪承载力、极限滑移和初始剪切刚度。

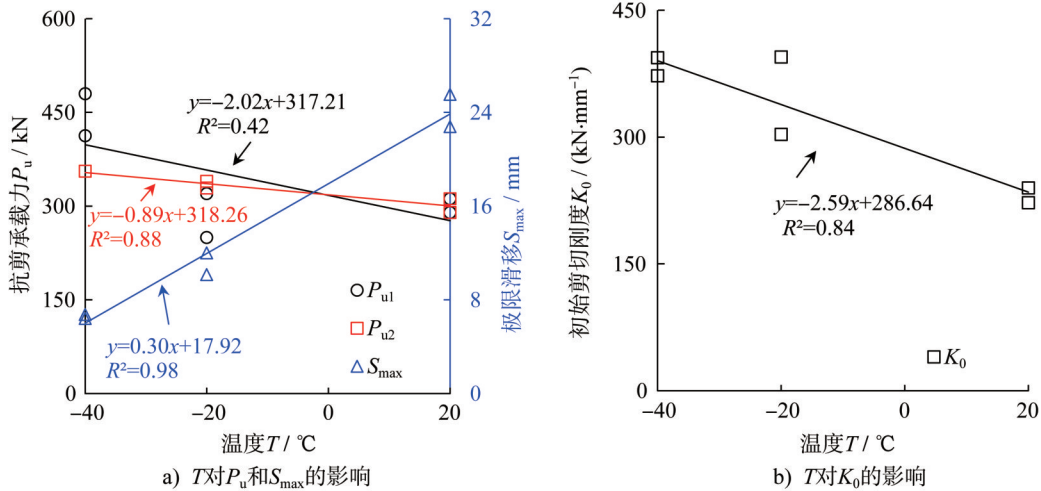


图11 温度对试件抗剪性能指标的影响

Fig. 11 Influence of temperature on shear performance index of specimens

预埋件的初始剪切刚度  $K_0$  比常温下的相应值高，这是因为在低温环境下，混凝土中的水分逐渐凝结，增大了混凝土板与钢梁之间的摩擦，使得混凝土与钢材的黏结作用增强<sup>[18]</sup>。

### 3 有限元分析

#### 3.1 有限元模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 建立了爬模连接节点推出试件的有限元模型，为提高计算效率，本研究仅建立四分之一模型进行计算，网格划分如图 12 所示。对模型的对称面施加对称约束，约束型钢的  $y$  对称面  $U_x = U_{Ry} = U_{Rz} = 0$ ，约束型钢及混凝土  $x$  对称面  $U_z = U_{Rx} = U_{Ry} = 0$ ，约束底板的底面  $U_x = U_y = U_z = 0$ 。有限元模型中，爬锥与高强螺栓、预埋螺杆之间采用 Tie 连接，其余各部件之间均设置为硬接触约束；将型钢和混凝土的摩擦系数设

为  $\mu = 0.6$ ，其余接触摩擦系数设为  $\mu = 0.4$ 。钢筋采用嵌入 (Embedded) 约束设置，将其嵌入混凝土板中。

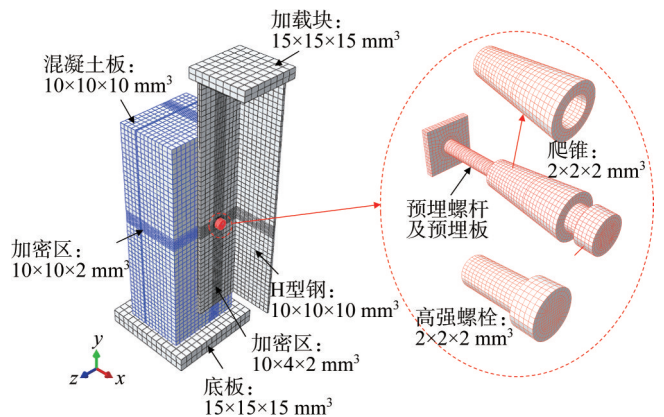


图12 有限元模型

Fig. 12 Finite element models

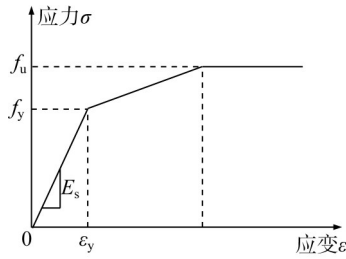


图 13 三折线弹塑性模型

Fig. 13 Trilinear elastic-plastic model

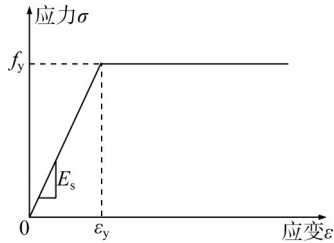


图 14 双折线理想弹塑性模型

Fig. 14 Bilinear elastic-plastic model

### 3.2 材料本构模型

本文主要研究在常温和低温环境(20℃、-20℃、-40℃)下预埋件的抗剪性能。因此,在有限元模拟过程中,模型各部件的材料属性均采用常温与低温下的本构模型。

#### (1) 混凝土材料本构模型

本文采用ABAQUS有限元软件中的混凝土塑性损

伤模型(damage plasticity model),通过定义混凝土的受压本构、受拉本构及塑性损伤参数来模拟混凝土的拉伸和压缩行为。本研究中混凝土的低温受压本构关系采用谢剑等<sup>[20]</sup>、吴洪海<sup>[21]</sup>的研究成果,以过镇海等<sup>[22]</sup>的混凝土应力-应变本构关系为基础,以确定低温下混凝土的本构关系,不同温度下C40混凝土的抗压承载力如表5所示。

#### (2) 钢材材料应力-应变本构关系

本次推出试验中受力螺栓采用8.8级高强螺栓,型钢、爬锥、预埋螺杆及预埋板均采用Q345钢材,钢筋为HRB400级,各部件钢材常温下的弹性模量 $E_s$ 、屈服强度 $f_y$ 和极限强度 $f_u$ 取值详见表3。所建立的爬模连接节点推出试件的有限元模型中,型钢、爬锥、预埋螺杆及预埋板的应力-应变关系均采用三折线弹塑性模型,如图13所示。钢筋的应力-应变关系则采用双折线理想弹塑性模型,如图14所示,不考虑钢筋屈服后的应变强化现象。而高强螺栓的本构关系除需明确其基础弹塑性本构特征外,还通过引入延性金属损伤模型与剪切损伤模型,构建其连续性损伤演化模型(CMD),这两种失效模型通过输入宏观的应力和应变来描述材料的断裂和失效过程。

### 3.3 有限元模型验证

图15给出了爬模连接节点推出模型数值模拟破坏模式与试验结果的对比,可以看出二者的破坏模式一致。

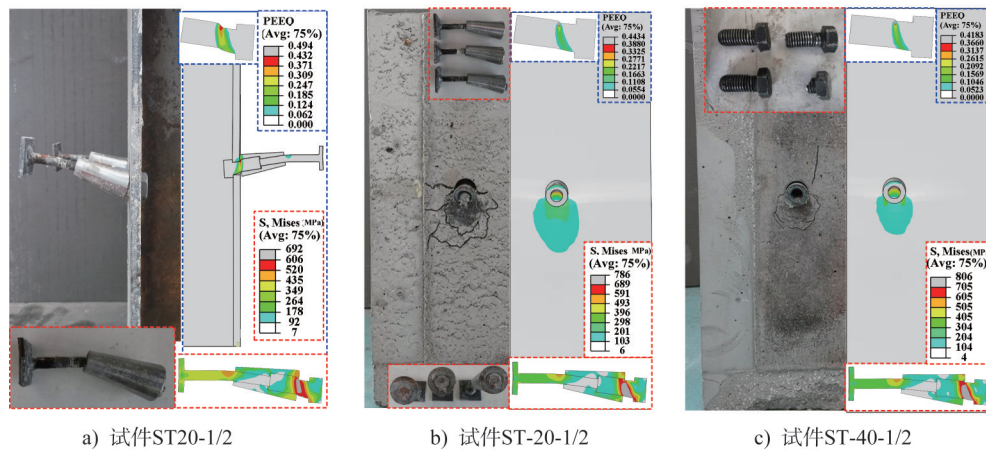


图 15 有限元模拟与试验破坏模式对比

Fig. 15 Comparison of failure modes between finite element simulation and test

图9给出了预埋件推出试验的数值模拟荷载-滑移曲线与试验实测荷载-滑移曲线的对比结果。有限元模拟计算的抗剪承载力 $P_{uF}$ 、极限滑移 $S_{mF}$ 及初始剪切刚度 $K_{oF}$ 如表4所示,由表4可知:有限元模拟得到的抗剪承载力和刚度偏大,但误差在合理范围内,这是因为试件在加工过程中存在尺寸偏差,导致破坏时非所有连接件同时

破坏;而有限元模型未计入此类实际工程偏差。因此,通过上述分析可知:本文建立的有限元模型能够较好地模拟爬模预埋系统的低温抗剪性能。

### 3.4 有限元参数分析

为探究爬模连接件的抗剪性能,本文在原缩尺爬锥

节点推出试验模型的基础上,开展足尺模型数值分析,并进一步扩充研究参数与加载工况,选取温度  $T$  (20 °C、-20 °C、-40 °C),混凝土龄期  $t$  (3 d、7 d、14 d),高强螺栓直径  $D_1$  (30 mm、36 mm、42 mm),高强螺栓等级  $H$  (6.8级、8.8级、10.9级)为研究参数,预埋螺杆直径为26.5 mm。模型其它信息如表5所示。

表5 有限元模拟结果

Table 5 Finite element simulation results

模型编号	$t/d$	$T/(^{\circ}\text{C})$	$D_1/\text{mm}$	$f_{cT}/\text{MPa}$	$f_{yT}/\text{MPa}$	$f_{uT}/\text{MPa}$	$P_u/\text{kN}$	$S_{\max}/\text{mm}$
A1B1C1-1	3	20	42	11.41	465	674	1 924	25.15
A1B1C1-2	3	-20	42	12.33	488	708	2 045	15.27
A1B1C1-3	3	-40	42	15.12	501	727	2 277	10.76
A2B1C1-1	7	20	42	18.96	465	674	2 110	2.99
A2B1C1-2	7	-20	42	24.00	488	708	2 379	2.93
A2B1C1-3	7	-40	42	26.55	501	727	2 442	2.53
A3B1C1-1	14	20	42	23.43	465	674	2 084	2.34
A3B1C1-2	14	-20	42	27.55	488	708	2 220	2.15
A3B1C1-3	14	-40	42	32.72	501	727	2 460	2.04
A1B2C1-1	3	20	30	11.41	465	674	942	2.44
A1B2C1-2	3	-20	30	12.33	488	708	1 234	2.07
A1B2C1-3	3	-40	30	15.12	501	727	1 331	2.06
A1B3C1-1	3	20	36	11.41	465	674	1 653	7.23
A1B3C1-2	3	-20	36	12.33	488	708	1 769	5.21
A1B3C1-3	3	-40	36	15.12	501	727	1 851	3.82
A1B1C2-1	3	20	42	11.41	359	521	1 846	6.69
A1B1C2-2	3	-20	42	12.33	377	547	1 770	4.86
A1B1C2-3	3	-40	42	15.12	387	562	1 705	2.70
A1B1C3-1	3	20	42	11.41	571	827	2 081	24.74
A1B1C3-2	3	-20	42	12.33	599	869	2 088	22.62
A1B1C3-3	3	-40	42	15.12	615	892	2 284	14.65

注:在模型编号中,A代表混凝土龄期 $t$ ,1~3分别代表3 d、7 d、14 d;B代表螺栓直径 $D_1$ ,1~3分别代表42 mm、30 mm、36 mm;C代表螺栓等级,1~3分别代表8.8级、6.8级、10.9级; $f_{cT}$ 、 $f_{yT}$ 和 $f_{uT}$ 分别为C40混凝土的抗压承载力、螺栓的屈服强度和抗拉强度。

#### (1) 温度 $T$ 的影响

由图16a)~g)可以看出:温度对所建立的有限元模型抗剪承载力的影响规律与试验所得的规律相似,例如:对 $t$ 为3 d、 $D_1$ 为42 mm、 $H$ 为8.8级的模型,随着温度 $T$ 从20 °C降低至-20 °C和-40 °C时,爬模连接件的抗剪承载力 $P_u$ 分别增大了6%和18%,其极限滑移值 $S_{\max}$ 分别减

小39%、57%;对 $t$ 为7 d、 $D_1$ 为42 mm、 $H$ 为8.8级的模型,随着 $T$ 从20 °C降至-20 °C和-40 °C时, $P_u$ 分别增大了7%和18%, $S_{\max}$ 分别减小8%和13%。因此,降低温度提高了模型的抗剪承载力,但降低了其延性。

#### (2) 混凝土龄期 $t$ 的影响

由图16h)可以看出:随着龄期 $t$ 从3 d分别增加到7 d和14 d时,在温度为20 °C(-20 °C和40 °C)下,爬模连接件的抗剪承载力 $P_u$ 分别增大了10%(16%和7%)和8%(9%和8%),其 $S_{\max}$ 分别减小88%(81%和77%)和91%(86%和81%)。由此可知:随着混凝土龄期的增加,模型的承载力得到了提高。在加载前期,模型的承载力发展更为迅速,受力螺栓更早进入塑性阶段,并因此提前发生剪切失效,最终导致模型整体延性表现更差。

#### (3) 螺栓直径 $D_1$ 的影响

由图16i)可以看出:随着螺栓直径 $D_1$ 从30 mm分别增加到36 mm、42 mm时,在温度为20 °C(-20 °C和-40 °C)下,爬模连接件的抗剪承载力的 $P_u$ 分别增大了75%(43%和39%)和104%(66%和71%),其 $S_{\max}$ 分别增加了196%(151%和85%)和930%(637%和423%)。因此可知,螺栓直径 $D_1$ 对爬模连接件的抗剪性能和延性影响较大,考虑到工程经济性,采用直径为36 mm的螺栓仍能满足该类工程的实际要求,建议将螺栓直径从42 mm改为36 mm。

#### (4) 螺栓等级 $H$ 的影响

由图16j)可以看出:随着螺栓等级 $H$ 从6.8级逐渐增加到8.8级和10.9级时,在温度为20 °C(-20 °C和-40 °C)下,爬模连接件的抗剪承载力 $P_u$ 分别增大了4%(16%和34%)和13%(18%和34%),其 $S_{\max}$ 分别增加了276%(214%和298%)和270%(366%和442%)。因此可知,螺栓的强度对爬模连接件的抗剪承载力影响较小,但其可以有效提高爬模连接件的延性。

## 4 抗剪承载力计算方法

目前,关于爬模连接节点预埋件中高强螺栓的受剪承载力的计算研究较少,中国现行规范仅《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)<sup>[17]</sup>给出了关于高强螺栓承载力的计算公式。而国内外对栓钉连接件已经进行了较为完善的理论研究,并将其破坏模式分为混凝土破坏与栓钉根部剪断两种类型,与本文预埋件破坏模式类似,针对两种不同的破坏模式,各国规范中给出了对应的计算公式如下:

(1)《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)<sup>[17]</sup>中的计算公式如式(1)~(3)所示:

① 螺栓与混凝土冲切承载力见式(1):

$$F \leq 2.8(b+s-30)(s-30)f_t \quad (1)$$

式中: $b$ 为预埋件锚固板边长或直径(mm); $s$ 为锥形承

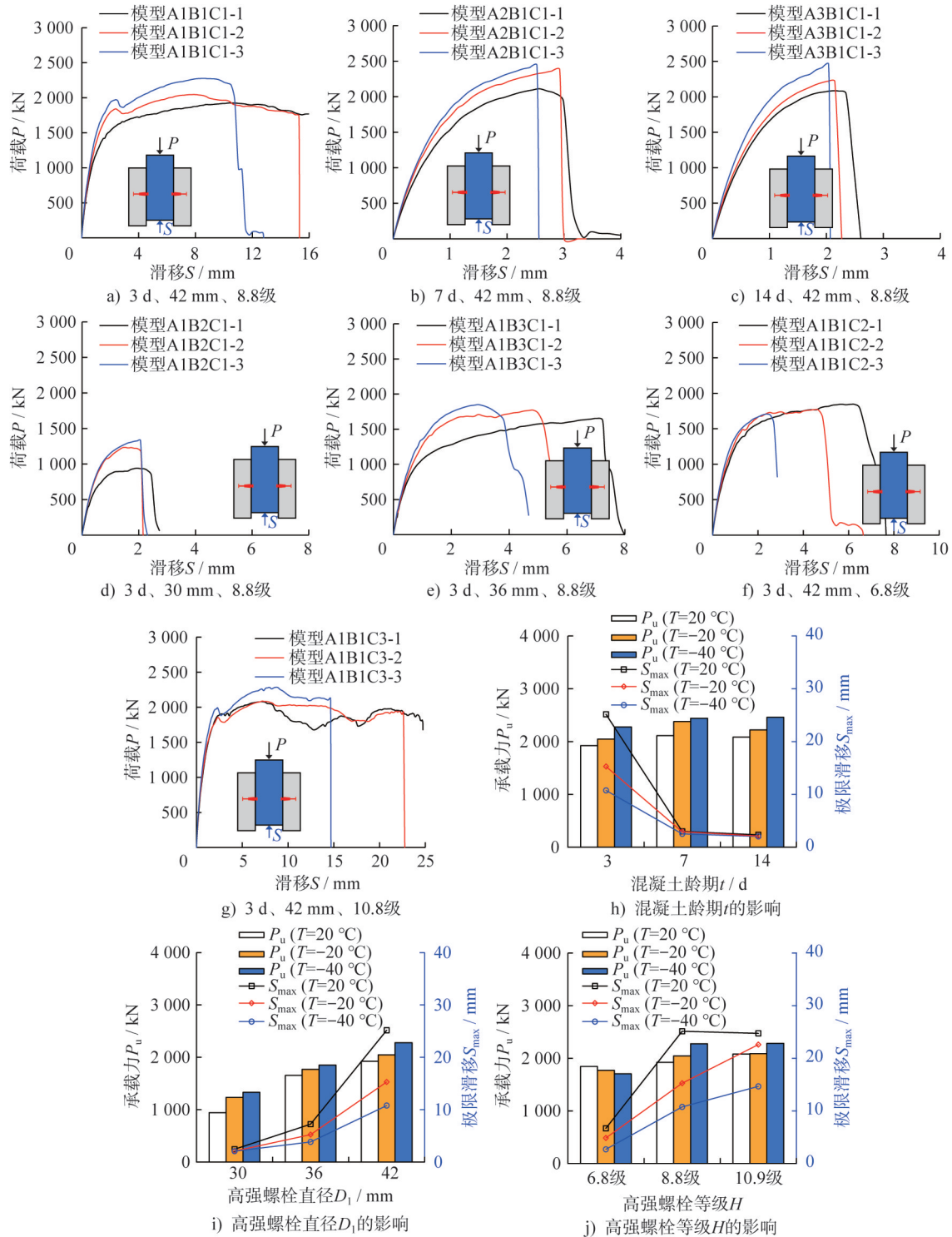


图 16 有限元模拟结果

Fig. 16 Finite element simulation results

载接头埋入长度(mm); $f_t$ 为混凝土轴心抗拉强度设计值( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )。

② 螺栓与混凝土接触面的局部受压承载力见式(2):

$$F \leq 1.35\beta_c\beta_1f_{cd}A_{ln} \quad (2)$$

式中: $\beta_c$ 为混凝土强度的影响系数; $\beta_1$ 为混凝土局部受压的提高系数; $f_{cd}$ 为混凝土轴心抗压强度设计值

( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ); $A_{ln}$ 为混凝土局部承压净面积( $\text{mm}^2$ )。

③ 高强度螺栓的受剪承载力见式(3):

$$N_v^b = n_v A_s f_v^b \quad (3)$$

式中: $N_v^b$ 为承载力螺栓受剪承载力; $n_v$ 为抗剪分项系数; $f_v^b$ 为螺栓抗剪强度设计值( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ); $A_s$ 为栓钉横截面积。

(2) 欧洲规范 EN 1994-1-2:2005<sup>[23]</sup>中的计算公式如式(4)~(6)所示:

① 混凝土破坏承载力见式(4)~(5):

$$P_u = 0.29\kappa d^2 \sqrt{E_c f_{ck}} / \gamma_v \quad (4)$$

$$\kappa = \begin{cases} 0.2(h/d + 1) & h/d \leq 4.0 \\ 1 & h/d > 4.0 \end{cases} \quad (5)$$

② 栓钉剪断承载力见式(6):

$$P_u = 0.8A_s f_u / \gamma_v \quad (6)$$

式中: $\kappa$ 为考虑栓钉长径比的参数; $E_c$ 为混凝土弹性模量; $f_{ck}$ 为混凝土圆柱体抗压强度标准值; $h$ 为栓钉埋深; $\gamma_v$ 为分项系数,取1.25; $f_u$ 为栓钉极限抗拉强度。

(3) 美国规范 AISC 360-16<sup>[24]</sup>中的计算公式见式(7):

$$Q_u = 0.5\varphi A_s \sqrt{E_c f_{ck}} \leq \varphi A_s f_u \quad (7)$$

式中: $\varphi$ 为抗力系数,取0.85。

各种破坏模式下,试件承载力的试验值与公式计算值如表6所示。从表6中可以看出:采用各国相关设计规范对爬锥节点的抗剪承载力进行计算,结果表明,规范预测的破坏模式均为混凝土受压破坏,且对应的混凝土控制抗剪承载力显著低于试验实测的节点抗剪承载力,其中《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)计算得到的承载力最大,美国规范 AISC 360-16次之,欧洲规范 EN 1994-1-2:2005 预测的混凝土控制抗剪承载力最低。具体而言,该规范在计算混凝土受压破坏主导的抗剪承载力时,未计入爬锥包裹受力高强度螺栓所产生的混凝土承压接触面积增大的有利效应,导致计算结果显著偏低;而其预测的螺栓剪切断裂承载力与试验实测值更为接近,但整体仍偏保守。因此,在低温环境下设计早龄期混凝土爬模预埋连接件节点时,预埋件的抗剪承载力按 $P < 0.3N_v^b$ 进行设计, $N_v^b$ 按式(3)计算。

表6 试验值与计算值汇总

Table 6 Summary of test and calculated results

试件编号	$P_T$ /kN	$P_{J,a}$ /kN	$P_{J,b}$ /kN	$P_T/P_{J,a}$	$P_T/P_{J,b}$	$P_{E,a}$ /kN	$P_{E,b}$ /kN	$P_T/P_{E,a}$	$P_T/P_{E,b}$	$P_{A,a}$ /kN	$P_{A,b}$ /kN	$P_T/P_{A,a}$	$P_T/P_{A,b}$	破坏模式
ST20-1	312	143	197	2.17	1.58	59	247	5.26	1.26	109	263	2.87	1.19	CC+BS
ST20-2	290	143	197	2.02	1.47	59	247	4.89	1.17	109	263	2.67	1.10	CC+BS
ST-20-1	340	155	207	2.19	1.64	63	260	5.40	1.31	115	276	2.95	1.23	BS
ST-20-2	329	155	207	2.12	1.59	63	260	5.22	1.27	115	276	2.85	1.19	BS
ST-40-1	356	190	212	1.87	1.68	74	267	4.83	1.33	135	283	2.64	1.26	BS
平均值	—	—	—	2.02	1.64	—	—	5.06	1.30	—	—	2.77	1.23	—
标准差	—	—	—	0.15	0.10	—	—	0.25	0.08	—	—	0.14	0.08	—

注: $P_T$ 为预埋件抗剪承载力试验值; $P_{J,a}$ 、 $P_{E,a}$ 、和 $P_{A,a}$ 分别为用中国《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)规范、欧洲 EC4 和美国 AISC 360-16 计算的混凝土破坏承载力值; $P_{J,b}$ 、 $P_{E,b}$ 、和 $P_{A,b}$ 分别代表用《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)规范、欧洲 EC4、和美国 AISC 360-16 计算的螺栓剪断承载力值;CC为混凝土压碎破坏;BS为高强螺栓剪断破坏。

## 5 结论

本文对实际工程的爬模连接节点预埋件进行了1/3缩尺设计,制作了6个爬模连接节点推出试件,从破坏模式、承载力、荷载-滑移曲线、初始剪切刚度等方面对预埋件的抗剪性能进行了分析。同时,建立了爬模预埋件推出试件的有限元模型,通过对比分析数值结果和试验结果,验证了有限元模型的合理性,并进行了参数分析。主要结论如下:

(1) 低温会改变爬模连接节点的破坏模式。在常温下,推出试件的破坏模式为混凝土开裂伴随高强螺栓受剪破坏;在低温环境下,推出试件的破坏模式均为高强螺栓受剪破坏。

(2) 推出试件荷载-滑移曲线可分为3个工作阶段,分别为弹性阶段(阶段I)、弹塑性阶段(阶段II)和衰退

阶段(阶段III)。相对于高强螺栓受剪破坏,混凝土开裂伴随高强螺栓受剪破坏试件的弹性工作阶段结束时刻更早,其弹性极限荷载约为 $0.3P_u$ ,且该类试件的弹塑性工作阶段持续范围更广,表现出更为优异的延性性能。

(3) 低温会影响爬模预埋件的抗剪性能,温度降低会提高预埋件的抗剪承载力 $P_u$ 与初始抗剪刚度 $K_0$ ,但会使其极限滑移值 $S_{max}$ 降低,延性变差。在 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,平均每降低 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 其 $K_0$ 的增长幅度最大,为 $2.95\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;在 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围,爬模预埋件的延性会大大降低,每降低 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 其 $S_{max}$ 的减少幅度最大,为 $0.34\text{ mm}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

(4) 文中还建立了低温下爬模连接节点的有限元分析模型,将模拟结果与试验结果进行对比,二者吻合较好,并以此为基础进行参数分析:发现增加混凝土龄期会

提高预埋件的抗剪承载力,但会使受力螺栓更早地进入损伤状态,使预埋件的延性变差;提高抗剪螺栓的强度对预埋件的抗剪承载力影响不大,但有利于其延性发展。

(5) 将试验结果与按《液压爬升模板工程技术标准》(JGJ 195—2018)、欧洲规范 EN 1994-1-2、美国规范 AISC 360-16 计算得出的栓钉连接件抗剪承载力值进行对比,得出各国规范均能保守地估计预埋连接节点的抗剪承载力的结论。并建议在低温环境下设计早龄期混凝土爬模预埋连接件时,预埋件的抗剪承载力按  $P < 0.3N_v^b$  进行设计。

## 参考文献:

- [1] 庄亮.超高层建筑液压爬模施工技术[J].建筑机械,2019(2):89-91.DOI:10.14189/j.cnki.cm1981.2019.02.011.  
ZHUANG Liang. Construction technology of hydraulic climbing formwork for super high-rise building [J]. Construction Machinery, 2019 (2) : 89-91. DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2019.02.011. (in Chinese)
- [2] 何夕平,郑磊,刘睿,等.超厚大倾角剪力墙斜向爬模技术的研究[J].工业建筑,2014,44(4):104-110.DOI:10.13204/j.gyz20140423.  
HE Xiping, ZHENG Lei, LIU Rui, et al. Study on applied technology of slant climbing formwork for super thick-big tilt angle shear wall[J]. Industrial Construction, 2014, 44(4) : 104-110. DOI: 10.13204/j.gyz20140423. (in Chinese)
- [3] 夏巨伟.液压爬模外爬架节点反力的近似解析方法[J].建筑施工,2016,38(8):1152-1155.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2016.08.057.  
XIA Juwei. Approximate analytical method for counter-force of external climbing frame node in hydraulic climbing formwork[J]. Building Construction, 2016, 38(8) : 1152-1155. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2016.08.057. (in Chinese)
- [4] 卞佳,王学才.爬锥式预埋件设计及施工[J].公路与汽运,2018(1):129-133. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-2668.2018.01.033.  
BIAN Jia, WANG Xuecai. Design and construction of climbing cone embedded parts [J]. Highways & Automotive Applications, 2018 (1) : 129-133. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-2668.2018.01.033. (in Chinese)
- [5] 李剑飞,吴章熙,方虎,等.DOKA液压爬模系统悬挂点常见问题探讨[J].建筑施工,2018,40(3):395-397,407.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2018.03.035.  
LI Jianfei, WU Zhangxi, FANG Hu, et al. Discussion on common problems of suspension point in DOKA hydraulic climbing formwork system [J]. Building Construction, 2018, 40(3) : 395-397, 407. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2018.03.035. (in Chinese)
- [6] 于光,唐浩,王冬雁,等.液压爬模可伸缩承载体设计与分析[C]//2020年工业建筑学术交流会议论文集.北京:出版者不详,2020:847-850,836..  
YU Guang, TANG Hao, WANG Dongyan, et al. Design and analysis of telescopic load-bearing item of hydraulic climbing formwork [C]//Proceedings of the 2020 Academic Conference on Industrial Architecture. Beijing: [s.n.], 2020: 847-850, 836. (in Chinese)
- [7] 彭继园.铁路高墩节段梁现浇托架爬锥设计及应用[J].住宅与房地产,2021(6):137-138.  
PENG Jiyuan. Design and application of climbing cone for cast-in-place bracket of railway high pier segmental beam [J]. Housing and Real Estate, 2021(6) : 137-138. (in Chinese)
- [8] QIAO Y, WANG H F, CAI L C, et al. Influence of low temperature on dynamic behavior of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 214-220. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.046.
- [9] 侯文崎,叶梅新.低温下钢-混凝土组合结构疲劳试验和极限承载力[J].中南大学学报(自然科学版),2004,35(6):1025-1030.DOI:10.3969/j.issn.1672-7207.2004.06.032.  
HOU Wenqi, YE Meixin. Fatigue performance and ultimate capability of Steel-concrete composite structures under low temperature [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2004, 35 (6) : 1025-1030. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7207.2004.06.032. (in Chinese)
- [10] XIE J, KANG E C, QIAN X D, et al. Static compressive stress - strain behaviours of normal weight concrete at Arctic low temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131474.
- [11] EN 1994-1-1: 2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, part 1-1: general rules and rules for buildings[S].
- [12] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].  
GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures[S]. (in Chinese)
- [13] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].  
GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures[S]. (in Chinese)
- [14] GB 51081—2015 低温环境混凝土应用技术规范[S].  
GB 51081—2015 Technical code for application of concrete under cryogenic circumstance[S]. (in Chinese)
- [15] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].  
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—tensile testing: part 1: method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [16] GB/T 228.3—2019 金属材料 拉伸试验 第3部分:低温试验方法[S].  
GB/T 228.3—2019 Metallic materials—tensile testing—part 3: method of test at low temperature. (in Chinese)
- [17] JGJ 195—2018 液压爬升模板工程技术标准[S].  
JGJ 195—2018 Technical standard for the hydraulic climbing formwork engineering[S]. (in Chinese)
- [18] YAN J B, XIE W J, ZHANG L X, et al. Bond behaviour of

- concrete-filled steel tubes at the Arctic low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 118-131. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.168.
- [19] YAN J B, WANG X T, WANG T. Compressive behaviour of normal weight concrete confined by the steel face plates in SCS sandwich wall[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 437-454. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2018. 03.143.
- [20] 谢剑, 李小梅, 吴洪海. 超低温环境下箍筋约束混凝土轴心受压性能试验研究[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集第II册. 乌鲁木齐:[出版者不详], 2013:155-160.  
XIE Jian, LI Xiaomei, WU Honghai. Experimental study on axial compression performance of concrete confined by stirrup under ultra-low temperature [C]//Proceedings of the 22nd National Conference on Structural Engineering (II). Urumqi: [s.n.], 2013:155-160.(in Chinese)
- [21] 吴洪海. 超低温环境下箍筋约束混凝土轴心受压性能试验研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- WU Honghai. Experimental study on axial compression performance of concrete at cryogenic temperatures [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.(in Chinese)
- [22] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(1): 1-12. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.1982.01.001.  
GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. Experimental investigation of the complete stress-strain curve of concrete[J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(1): 1-12. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.1982.01.001.(in Chinese)
- [23] EN 1994-1-2: 2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings[S].
- [24] AISC 360-10 Specification for structural steel buildings[S].
- [25] YAN J B, XIE J. Shear behavior of headed stud connectors at low temperatures relevant to the Arctic environment [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(9): 04018139. DOI:10.1061/(ASCE)st.1943-541x.0002149.