

文章编号: 1000-4750(2017)11-0145-13

单向面内约束混凝土双向板火灾试验及承载力分析

王 勇^{1,2}, 史伟男¹, 王腾焱¹, 袁广林¹, 吕俊利³

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏, 徐州 221008;

2. 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心, 江苏, 徐州 221008;

3. 山东建筑大学山东省建筑结构鉴定加固与改造重点实验室, 山东, 济南 250101)

摘 要: 为研究混凝土板在面内约束作用下的火灾行为, 对 1 块面内约束混凝土双向板进行了恒载-升温条件下的火灾试验, 获得了试验板沿板厚的温度场分布、钢筋温度、板挠度和平面外变形以及板角约束力等规律。基于 EC2 和 ASCE 两本构模型, 采用五种理论对四块不同面内约束作用下试验板的极限承载力进行对比分析。结果表明: 单向面内约束作用时, 试验板板顶出现沿约束力方向的平行裂缝; 与挠度相比, 板在垂直约束力方向的平面内膨胀变形较大且不可忽略; 面内约束作用和破坏准则对火灾下混凝土双向板极限承载力有重要影响。

关键词: 混凝土双向板; 火灾试验; 极限承载力; 温度; 位移; 约束

中图分类号: TU375.2; TU325.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.07.0533

FIRE TEST AND LIMIT CARRYING CAPACITY ANALYSIS OF TWO-WAY CONCRETE SLABS WITH UNILATERAL IN-PLANE RESTRAINTS

WANG Yong^{1,2}, SHI Wei-nan¹, WANG Teng-yan¹, YUAN Guang-lin¹, LÜ Jun-li³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construct Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Appraisal and Retrofitting in Building Structures, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: To investigate the fire behavior of concrete slabs with in-plane restraints, one fire test was conducted on the full-scale two-way concrete slabs. The testing results included the temperature along the depth, the reinforcement temperature, the vertical and in-plane deflection and constraint reaction forces at the four corners. According to EC2 and ASCE models, the load carrying capacity of four testing slabs with different in-plane restraints was analyzed using five theories. The results showed that the crack parallel to the in-plane restraint force direction was observed on the top surface of the slab. Compared to the out-of-plane deflection, the in-plane deflection perpendicular to the constraint direction was relatively larger and could not be neglected. The in-plane restraint force and failure criterion have an important effect on the limit carrying capacity of the concrete two-way slabs in fire.

Key words: concrete two-way slab; fire test; limit carrying capacity; temperature; deflection; restraint

收稿日期: 2016-07-14; 修改日期: 2016-10-26

基金项目: 国家青年自然科学基金项目(51408594); 中国博士后科学基金特别项目(2016T90525); 中国博士后科学基金项目(2014M560461); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014QNA78); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120095110027); 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心项目(SJXTQ1614); 国家级大学生创新创业训练计划基金项目(201610290008)

通讯作者: 王 勇(1984—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗火性能研究(E-mail: yongwang@cumt.edu.cn).

作者简介: 史伟男(1994—), 男, 黑龙江人, 硕士生, 主要从事结构抗火研究(E-mail: 1037903910@qq.com);

王腾焱(1992—), 男, 江苏人, 硕士生, 主要从事结构抗火研究(E-mail: wtycumt@163.com);

袁广林(1965—), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗火和工程加固研究(E-mail: ygl65@cumt.edu.cn);

吕俊利(1978—), 男, 山东省, 副教授, 博士, 主要从事结构抗火研究(E-mail: lj11978@163.com).

目前,国内外学者对混凝土简支板火灾行为及其薄膜机理分析研究较多,取得了大量的研究成果^[1-5]。事实上,结构中由于相邻构件之间的相互约束,使得约束板构件的火灾行为(如裂缝开展及其破坏模式)与独立板构件存在较大差别^[6]。值得指出的是,国内外学者在约束作用下(如面内约束)混凝土板构件的火灾试验及其理论分析还相对较少^[7]。

20世纪60年代, Selvaggio 等^[8]和 Issen 等^[9]开展了面内约束作用下板的火灾试验研究,结果表明:轴向约束可以提高楼板的防火性能。1989年, Lin 等^[10]开展了一块临边约束作用下混凝土双向板的防火性能试验研究。1993年, Cooke^[11]等约束板火灾试验表明:轴向面内约束力及其加载位置对板的防火性能有重要影响。2002年, Lim 等^[12]开展了板角约束混凝土板的防火试验研究,结果表明:板角约束时,其变形规律与未约束板的变形规律存在差别,特别是后期破坏阶段。2009年,王滨等^[13]开展了四边简支钢筋混凝土双向板火灾行为试验研究,结果表明:裂缝主要出现在板顶的长边跨中、距短边支座1/4处以及角部。2012年,朱崇绩等^[14]对足尺钢筋混凝土邻边简支邻边固支双向板进行试验研究,结果表明:邻边简支邻边固支双向板的顶部裂缝形成半椭圆形破坏形式。2011年~2014年,文献[15-17]开展了整体结构中足尺混凝土板不同板格的火灾试验研究,即中(角)区格、2×2区格和2×3区格等火灾试验,结果表明:由于约束边界条件的差别,不同板格的裂缝、变形及破坏模式明显不同。

近年来,国内外学者提出各自理论模型^[5,17-24],对火灾下板极限承载力理论开展了较多的研究。上述理论多是基于传统屈服线理论,通过不同的方法考虑钢筋薄膜效应对板极限承载力的影响,如文献[5,23]建立椭圆板块,文献[18]和文献[22]提出钢筋竖向分力或钢筋伸长做功,文献[19]考虑钢筋伸长和钢筋硬化效应等。值得指出的是,文献[19]考虑了火灾下钢筋和混凝土粘结性能对板极限承载力的影响。

基于上述研究,本文开展了单向面内约束作用下混凝土双向板的火灾行为试验研究及极限承载力分析。试验方面获得了受火双向板沿板厚温度场分布、钢筋温度、挠度和平面外的变形和板角约束力变化规律和裂缝开展情况等;理论方面即采用

EC2和ASCE热工和力学本构模型,对试验板的温度场进行数值分析,并采用屈服线理论、李国强理论^[5,23]、董毓利理论^[18,22]、Omer理论^[19]和修正板块平衡法等方法对本文试验板和文献[27]中三个试验板的极限承载力进行计算分析。

1 试验方案

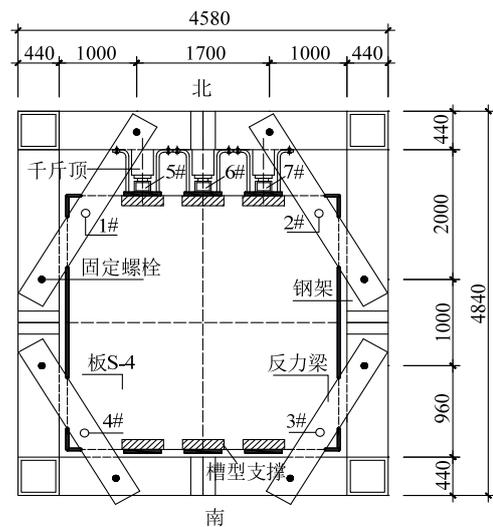
1.1 试件设计

根据现行混凝土结构设计规范^[25],设计了1块钢筋混凝土双向板试件,编号为板S-4,长宽厚($L \times l \times h$)为3300 mm×3300 mm×100 mm。试件采用C30商品混凝土浇筑,立方体抗压强度平均实测值 $f_c=25$ MPa。试验板仅板底双向配筋(HRB400),直径为8 mm,间距均为100 mm,即配筋率为0.65%;钢筋屈服强度平均实测值为414 MPa,抗拉强度平均实测值为475 MPa。混凝土保护层厚度为15 mm。板吊钩钢筋直径为22 mm。本试验在山东建筑大学火灾试验室进行。

1.2 加载方案

按照GB/T9978-2008《建筑构件耐火试验方法》进行火灾试验^[26],板边界为简支,即支座采用钢球和钢滚轴,且钢球之间填充防火岩棉,防止漏火。

如图1(a)和图1(b)所示,通过高强螺栓(10.9级)将四个反力梁固定于反力架四角,反力梁对板件的四个角施加平面外约束,在反力梁与试验板之间设置量程为10 t或20 t的BHR-4型压力传感器,编号分别为1#、2#、3#和4#,压力数据由静态电阻应变仪(DH3818)采集。



(a) 平面图

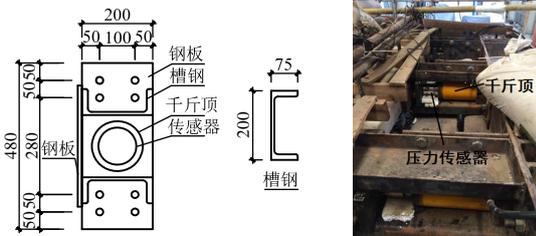


(b) 实景图

图1 试验加载装置图 /mm

Fig.1 Layout of the testing frame

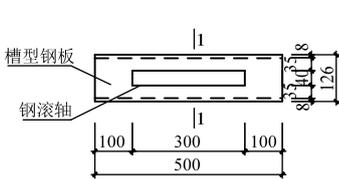
板面放置砂袋,模拟均布活荷载 2.0 kN/m^2 。本试验在竖向加载后,再施加面内力。如图 2(a)和图 2(b)所示,通过固定装置将 3 组液压千斤顶和 3 个压力传感器(编号分别为 5#、6#和 7#)固定在钢架上,对板施加 2 MPa 面内约束力 $N(200 \text{ kN/m})$,试验过程中该力保持不变, N 与板刚度之比(fch)是 0.08 。此外,槽型支撑如图 2(c)和图 2(d)所示。



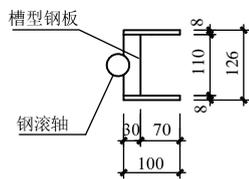
(a) 固定装置



(b) 实景图



(c) 槽型支撑



(d) 1-1 断面

图2 固定装置和槽型支撑

Fig.2 Fixed device and trough type support

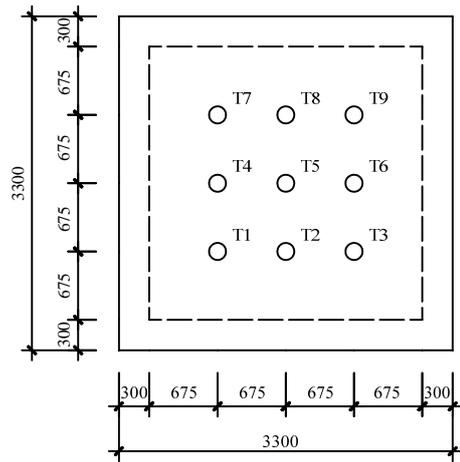
1.3 温度测量方案

采用安捷伦数据采集仪(34980A)对炉温(两个测点)、板截面温度和钢筋温度进行测量。

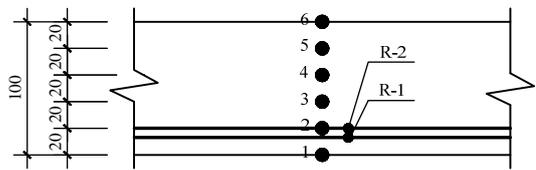
如图 3(a)所示,混凝土板 S-4 内共布置了 9 组测点,其中编号为 T1~T9。如图 3(b)所示,每组测点共有 8 个热电偶测点,其中编号 1~6 为混凝土温度测点,编号 R-1、R-2 为钢筋温度测点。采集温度时间间隔为 15 s 。

1.4 位移测量方案

挠度(平面外位移)和平面内位移采用差动式位移传感器(简称 LVDT)进行测量。试验中位移测点有 13 个,如图 4 所示。其中,编号 V1~V11 为竖向挠度(平面外)测点,编号 H1、H2 为平面内测点。



(a) 平面布置图



(b) 截面布置

图3 板内热电偶布置图 /mm

Fig.3 Positions and details of thermocouples in the slab

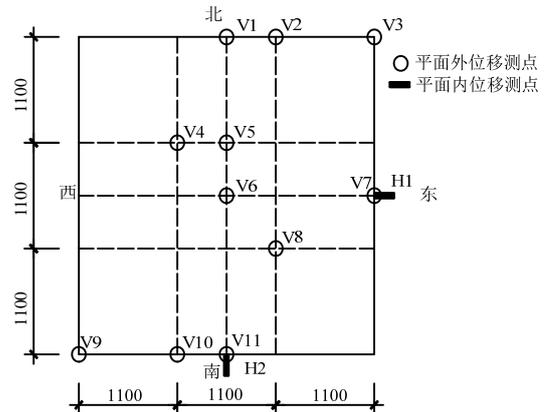


图4 挠度、平面内位移差动式位移传感器布置

Fig.4 Positions of vertical deflection/in-plane LVDT

2 试验结果

2.1 试验现象及分析

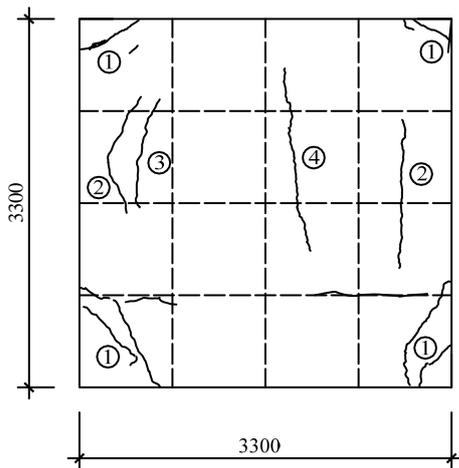
2.1.1 试验现象

升温 3 min 反力梁接连传来几声响声,反力梁中间部位出现轻微的翘曲。如图 5(a)和图 5(b)所示,板东南角首先出现斜裂缝①,紧接着西南角出现斜裂缝①; 14 min 试验板北侧跨中 $1/2$ 处中出现一条近似垂直板边的裂缝④,裂缝从北侧跨中向板中心发展; 20 min 试验板东侧与西侧出现大致呈南北方向的长裂缝②和③; 22 min 裂缝③处开始向外冒水; 23 min 板面的水逐渐连成一片,并向板中心聚集;

26 min 西北角出现斜裂缝①, 板中心区域出现大量水蒸汽; 28 min 试验板四角槽钢翘曲, 板角与支座脱离, 呈悬空状态; 随着板温度升高, 板面水不断蒸发, 板面裂缝的宽度逐渐增大; 180 min 停火, 板中心点处位移达到最大值。停火 200 min 后, 试验板顶面的水分已经完全蒸发, 并留下一些水渍, 整个试验板的变形有所恢复。待板 S-4 冷却后, 绘制板顶裂缝图, 如图 5(b)所示。



(a) 板顶裂缝实景图



(b) 板顶裂缝分布图

图 5 板 S-4 板顶裂缝图

Fig.5 Crack pattern on the top surface of slab S-4

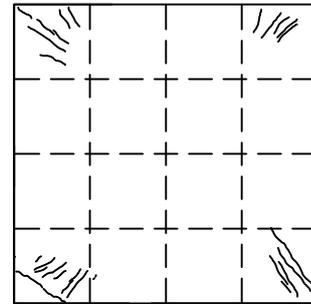
如图 5(a)和图 5(b)所示, 四个板角均存在多条呈弧形状的斜裂缝, 与相邻两外板边近似成 45° 。这是由于板角反力梁施加平面外约束, 板角产生了较大的负弯矩作用。由此可知, 应在板角部位增加受力钢筋布置, 以增强其抗火性能。值得指出的是, 试验过程中, 板受到南北方向的面内约束力, 南北方向膨胀变形受到约束, 可知板 S-4 东西方向产生拉应力, 即在板面南北方向产生裂缝②、③和④。

板底裂缝及爆裂情况如图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)所示。结合图 5(a), 可知混凝土板未产生贯穿板厚裂缝, 即未出现完整性破坏。同时, 板底部分区域出现爆裂, 部分钢筋外露, 如图 6(b)所示。



(a) 板底实景图

(b) 板底钢筋



(c) 板底裂缝

图 6 板 S-4 底面破坏模式

Fig.6 Failure pattern on bottom surface of slab S-4

2.1.2 对比分析

由上可知, 对于板 S-4, 其板中部未出现南北通长裂缝且沿板厚贯穿(图 5(a)和图 6(a))。这与文献[27]中约束板 S-2 出现南北纵向(约束方向)贯穿板厚的裂缝明显不同。其中, S-2 板尺寸、混凝土和钢筋材料性、约束力、荷载及受火条件等均与 S-4 板相同, 主要区别在于 S-2 板底钢筋间距为 200 mm。因此, 对比可知提高配筋率会有效防止约束板出现贯穿板厚裂缝, 即防止出现完整性破坏。

此外, 文献[27]中简支板 S-1, 四板角施加竖向约束, 面内未施加约束力, 其裂缝主要集中在板角及板边界区域, 多为弧状裂缝, 未出现平行板边的相关裂缝。因此, 面内约束作用对混凝土双向板的裂缝发展及破坏模式有重要影响。

2.2 温度和变形

2.2.1 炉温

试验板 S-4 中一侧点炉温-时间曲线如图 7 所示, 另一测点损坏未获得相应炉温数据。由图 7 可知, 在升温初期, 炉内温度迅速升高, 12 min 平均炉温达到轰燃温度 600°C ; 随后, 由于炉墙和混凝土板吸收大量热量, 炉温经历较长的升温发展期; 最终, 停火时(180 min)板 S-4 平均炉温为 837°C 。值得指出的是, 平均炉温-时间曲线与 ISO-834 标准升温曲线大体一致, 存在一些差异; 主要原因在于试验过程中燃烧器雾化性能和炉体保温性能还有待改进。然而, 温度差异并不影响对约束试验板火

灾行为相关规律的定性分析。

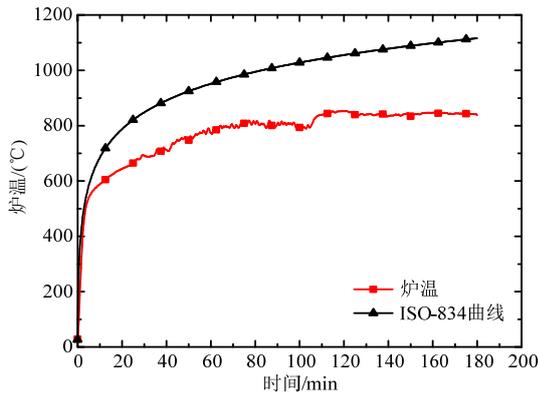


图7 板 S-4 炉温-时间曲线

Fig.7 Furnace temperature-time curves of slab S-4

2.2.2 板温

图 8 表示板 S-4 中截面 S-4-T9 温度-时间曲线。停火时,板底最高温度为 722℃。同时,由于混凝土的自由水和结合水的蒸发和迁移作用,板内部分测点温度在 100℃左右时,出现一显著的温度平台段(10 min~40 min),且越接近板背火面,该平台段越长。此外,与文献[27]中三约束试验板截面温度场进行对比,可知不同约束试验板具有相似的板底(顶)温度、截面温度梯度以及温度平台(100℃),可见约束作用对板的截面温度分布影响较小。

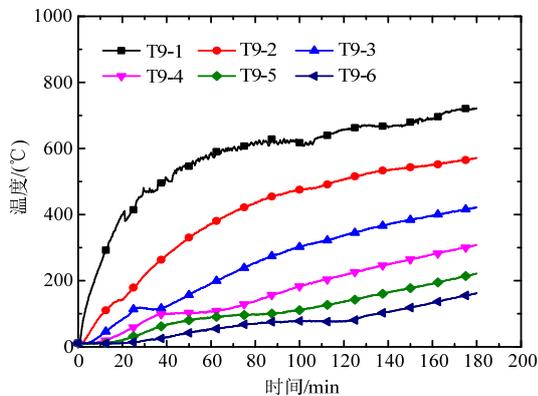


图 8 板 S-4 混凝土温度-时间曲线

Fig.8 Concrete temperature-time curves of slab S-4

图 9 为板 S-4 的温度-板厚-时间关系曲线。由图可知,随着时间的发展,截面温度梯度逐渐增加。例如,停火时截面温度梯度最大,约为 560℃。因此,沿板截面高度将产生较大的温度应力^[20-21]。

板 S-4 板底钢筋温度-时间曲线如图 10 所示。由图可知,升温阶段前期,各测点钢筋温度较为接近。随着炉温升高,各测点钢筋温度存在一定差别,原因可能在于混凝土为非均质材料或水分迁移、板底混凝土爆裂和钢筋实际位置差异。

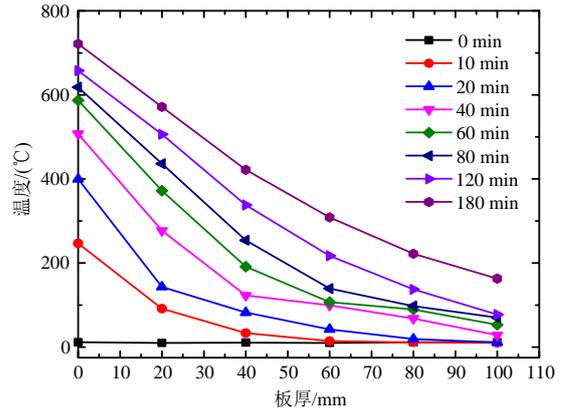


图 9 板 S-4 温度-板厚-时间关系曲线

Fig.9 Temperature-depth-time curves of slab S-4

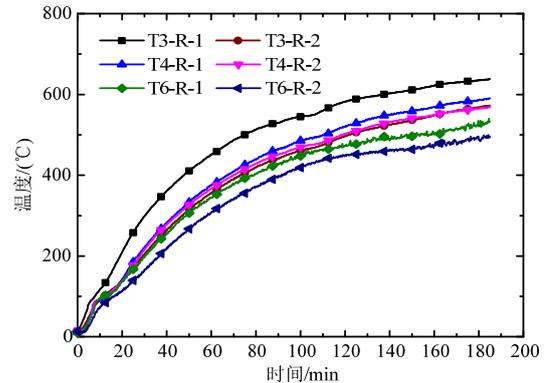


图 10 板 S-4 钢筋温度-时间曲线

Fig.10 Steel temperature-time curves of slab S-4

停火时(180 min),板 S-4 钢筋温度测点 T3-R-1、T3-R-2、T4-R-1、T4-R-2、T6-R-1 和测点 T6-R-2 温度分别是 635℃、568℃、587℃、565℃和 521℃、488℃,且平均温度为 561℃。

2.2.3 挠度

板 S-4 各测点挠度-时间曲线如图 11 所示。其中,负值代表向下,正值代表向上。

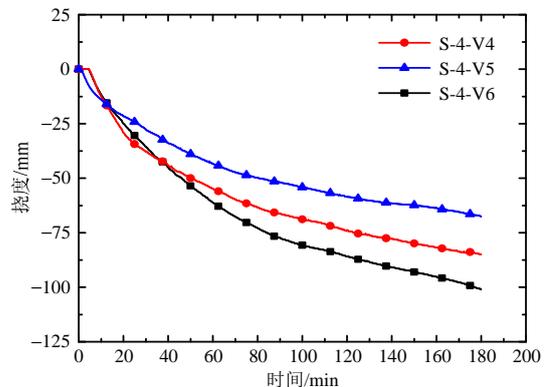


图 11 板 S-4 挠度-时间曲线

Fig.11 Vertical deflection-time curves of slab S-4

由图 11 可知,相比其他测点,约束板跨中测点 V6 挠度绝对值最大。随着时间发展,试验板挠度逐渐趋于平缓,变形速率减小。其中,早期阶段

变形由热膨胀(截面平均温度)和热弯曲(截面温度梯度)引起;随着变形增加,试验板产生较强的受拉薄膜效应^[1-5],变形速率逐渐降低。值得指出的是,本文试验板变形规律与文献[27]中面内约束试验板变形规律类似。

图 12 为板 S-4 的挠度-炉温关系曲线。由图可知,以炉温 550℃为分界点,该曲线明显分为两个变形阶段。具体地,低于 550℃时,挠度随炉温增长均较为缓慢,550℃时跨中位移值为 6.4 mm,相应的线性变形速率为 0.012 mm/(℃);相比第一阶段,第二阶段板的变形速率快速增加,该阶段跨中测点变形速率为 0.27 mm/(℃),约为前一阶段的 23 倍,原因在于板内截面温度梯度(热弯曲作用)逐渐增加和材料性能降低。此外,文献[13-14]和文献[27]中试验板具有类似的规律,可知炉温是影响约束板火灾行为的关键因素之一,即炉温增加,截面温度梯度迅速增大,热膨胀和热弯曲效应快速增大,致使变形及其速率增加。

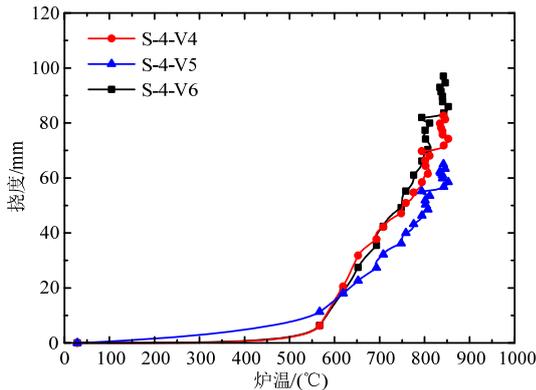


图 12 板 S-4 挠度-炉温曲线

Fig.12 Vertical deflection-furnace temperature curves of slab S-4

2.2.4 平面内位移

板 S-4 平面内位移-时间曲线如图 13 所示。其中,负值代表膨胀,正值代表收缩。

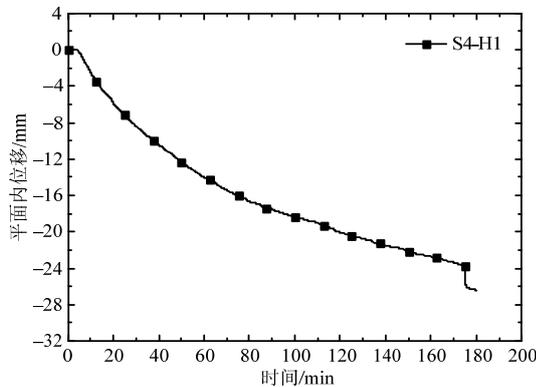


图 13 板 S-4 平面内位移-时间曲线

Fig.13 In-plane deflection-time curves of slab S-4

由图 13 可知,板 S-4 平面内位移与时间为非线性关系。180 min 时, H-1 测点平面内位移值为 26.4 mm;与挠度相比,可知板在垂直约束力方向(东西)的膨胀位移较大,且约为跨中位移值的 1/5。其中,这一点与文献[12]和文献[13]普通简支板的试验结果明显不同,停火时混凝土双向板平面内、外跨中位移比值约为 1/20~1/45,可见平面内变形基本可忽略。由此可知,约束压力致使板在无约束力方向的平面内位移趋于增大,且不可忽略。

2.3 约束力

2.3.1 面内约束力

板 S-4 面内约束作用力设计值为 2 MPa。由图 14 所示,试验过程中通过三个千斤顶所施加的面内压力总体上较为稳定,基本满足试验要求。

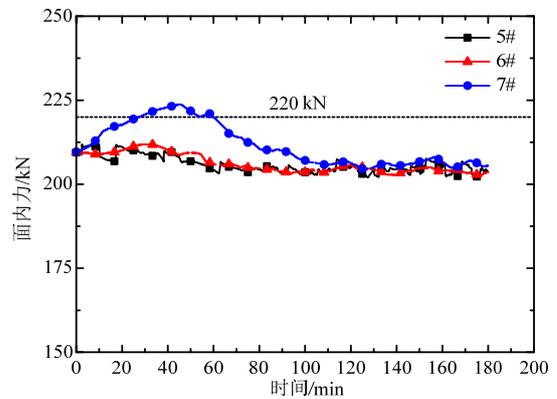


图 14 板 S-4 面内约束力-时间曲线

Fig.14 In-plane restraint force-time curves of slab S-4

2.3.2 板角约束力

板 S-4 四个板角约束反力-时间关系曲线如图 15 所示。

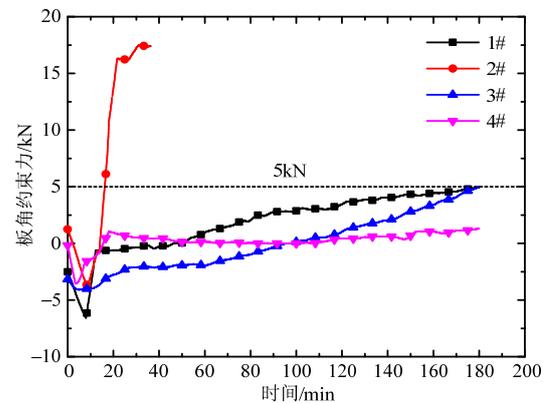


图 15 板 S-4 角部约束反力-时间曲线

Fig.15 Constraint reaction force-time curves on the corners of slab S-4

由图 15 可知,对于 1#和 3#测点,除试验早期

阶段, 其板角约束力在试验过程中逐渐增大, 停火时约束力分别为 4.90 kN 和 5.01 kN。对于 2#测点, 试验早期, 约束急剧增大, 33 min 时约束力最大值为 17.6 kN, 随后压力传感器出现故障, 未能测得后续约束力数据, 但板角一直处于约束状态。对于 4#测点, 除早期阶段, 试验过程中该板角约束力较为稳定, 停火时约束力为 1.30 kN。

由上可知, 试验过程中板角约束力变化规律较为复杂, 主要原因在于板角区域裂缝的影响。结合图 5(a)和图 5(b)可知, 板角(1#、2#和 3#)位置裂缝较少, 尤其是板角 2#位置, 刚度较大, 其能够承担较大的约束力; 板角 4#位置裂缝较多, 刚度较小, 所能承担约束力较小。由此可知, 板角区域裂缝的数量及位置对板角约束力有重要影响。

因此, 可知板角区域应当加强配筋, 避免在板整体破坏前板角先出现材料破坏而失去抵抗更大变形的能力, 进而充分发挥受拉薄膜效应的有利作用。此外, 限于试验条件, 数据较少, 火灾条件下板角约束反力变化规律还有待于深入研究。

3 承载力分析

3.1 温度场分析

基于 EC2 和 ASCE 热工模型^[28], 编程对文献[27]混凝土板(S-1、S-2 和 S-3)和本文 S-4 板温度进行分析。在进行温度分析中, 采用四节点矩形单元进行一维温度分析(仅厚度方向)。此外, 受(背)火面对流系数 h_c 分别为 35.0(10.0)W/(m²·K), 受(背)火面辐射系数 ε_r 分别为 0.3(0.2), 初始温度为 20℃。骨料类型为硅质。两模型温度计算结果和混凝土板温度试验结果对比如图 16(a)~图 16(d)和图 17(a)~图 17(d)所示。

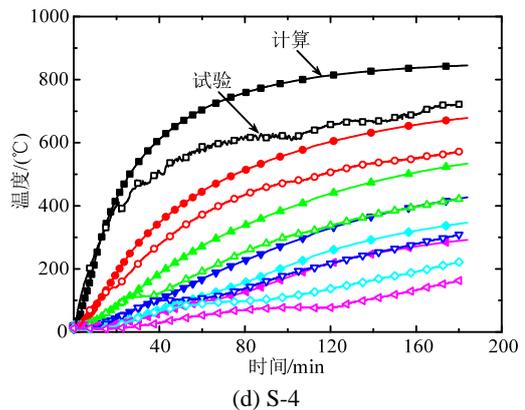
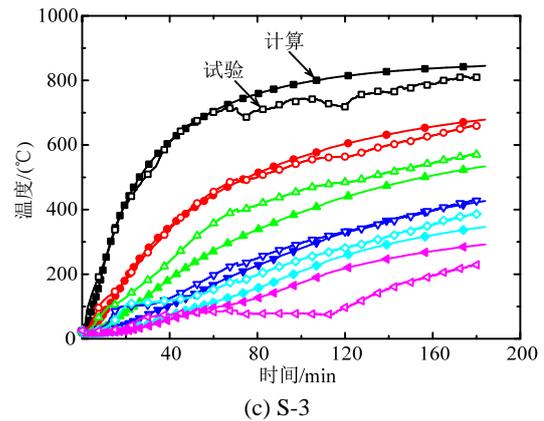
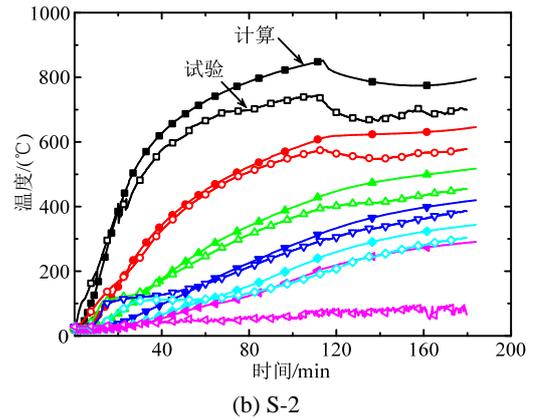
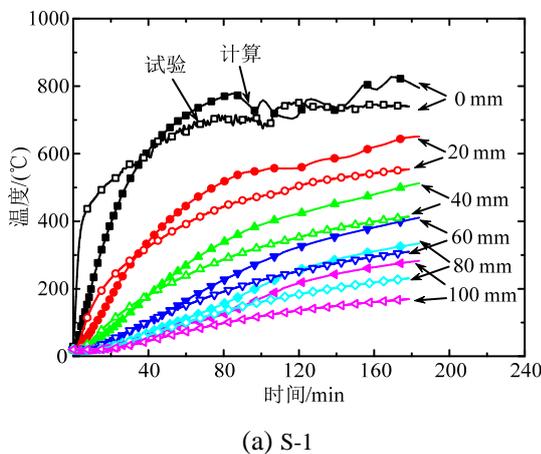
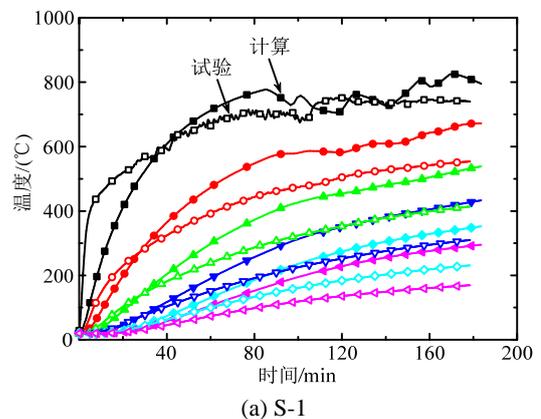


图 16 混凝土板温度计算值(EC2 模型)和试验值对比
Fig.16 Comparison of predicted (EC2 model) and tested temperature of concrete slabs



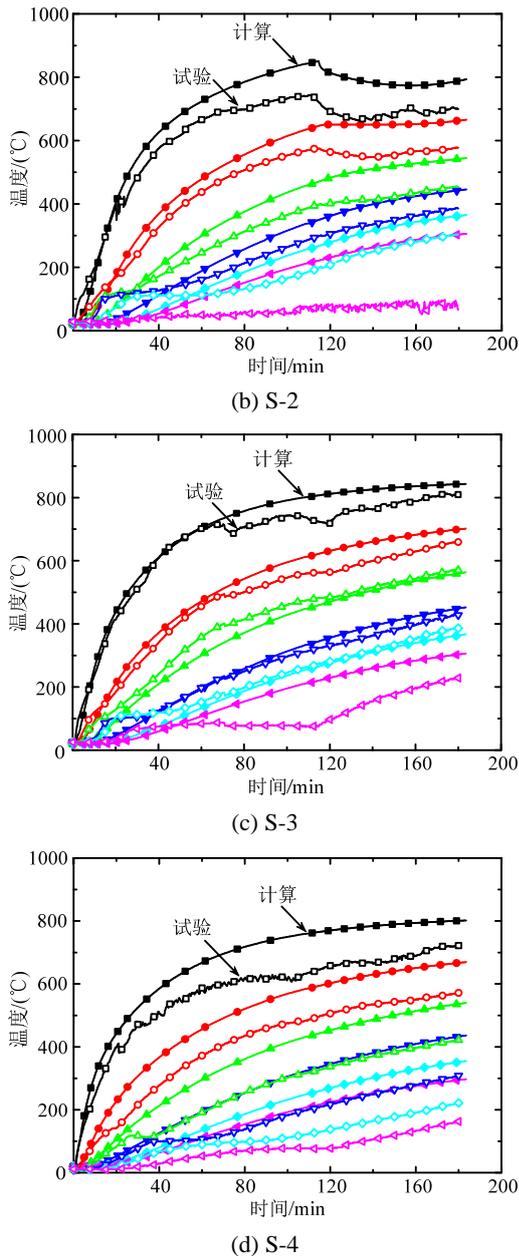


图 17 混凝土板温度计算值(ASCE 模型)和试验值对比
Fig.17 Comparison of predicted (ASCE model) and tested temperature of concrete slabs

由图 16(a)~图 16(d)和图 17(a)~图 17(d)可知,在受火面区域,两模型温度计算结果均高于试验结果,原因在于受火面的辐射系数偏高;对于板内部测点,温度场计算结果和试验结果总体吻合较好。此外,对于背火面附近测点,两模型未能合理地反映背火面附近 100℃左右出现的温度平台,原因在于两模型未能有效考虑水分的迁移和蒸发作用。

3.2 理论分析

3.2.1 理论模型

采用五种理论对四块混凝土试验板的极限承载力进行分析,即经典屈服线(塑性铰线)理论^[29]、

李国强理论^[5,23]、董毓利理论^[18,22]、Omer 理论^[19]和修正板块平衡法理论。限于篇幅,本文仅对后四种理论进行简要介绍,具体如下:

1) 李国强理论

文献[5]建立火灾下混凝土板极限承载力计算模型,即将混凝土板划分为 5 部分,包括周边 4 个刚性板块和中间一呈椭球面板块。随后,对板块的内力和弯矩进行分析,根据内力平衡方程及位移协调方程,推导出了火灾下考虑薄膜效应的混凝土板极限承载力计算公式。此外,文献[23]对该理论进行了改进,本文采用该改进理论对火灾下试验板的极限承载力进行分析。该理论采用钢筋应变破坏准则,即 2.5%(直径≤12 mm)和 5%(直径>12 mm)。值得指出的是,通过计算分析,该理论中关键参数 K 取 0.47。

2) 董毓利理论

董毓利等^[18]基于塑性铰线理论,提出大挠度时混凝土板的薄膜效应是由钢筋的受拉伸长做功引起,且大挠度时钢筋内力在竖向产生一个分量,随着挠度增大该分量逐渐增大。随后,根据板块平衡法和能量原理,建立了混凝土板极限承载力计算模型。该理论采用变形破坏准则(如 $l/20$)。此外,文献[22]对该理论进行了改进。

3) Omer 理论

Omer 等基于屈服线理论,考虑受拉薄膜效应、热膨胀(弯曲)、钢筋硬化效应和粘结滑移效应,结合能量方法,建立了轻骨料混凝土双向板的承载力计算模型^[19]。该模型采用钢筋应变破坏准则,与文献[5,23]取值明显不同(如 2.5%和 5%),Omer 模型钢筋的极限应变值较大,如 15%~19%。此外,粘结强度 σ_b 常温取值为 0.15 N/mm,粘结强度降低系数采用抗压强度降低系数^[19]。

4) 修正板块平衡法

结合经典屈服线破坏模式和文献[22],考虑面内约束力的影响,本文建立火灾下约束板极限承载力计算方法。

根据屈服线理论,矩形板分为 4 个板块: ABE、BCFE、CDF 和 DAEF,见图 18(a)和图 18(b)。

图 18(a)中: L 、 l 分别为板的长边、短边尺寸; x_1 、 x_2 、 y_1 和 y_2 为塑性铰线位置参数; $m_{x(y)}$ 为 $x(y)$ 方向每单位宽度塑性铰线上的抵抗矩; N 为 x 方向面内均布约束力。图 18(b)中: C 为混凝土压力; T 为钢筋拉力; q 为均布荷载; θ 为钢筋合力与水平

方向夹角。显然，方板情况为矩形板特例。

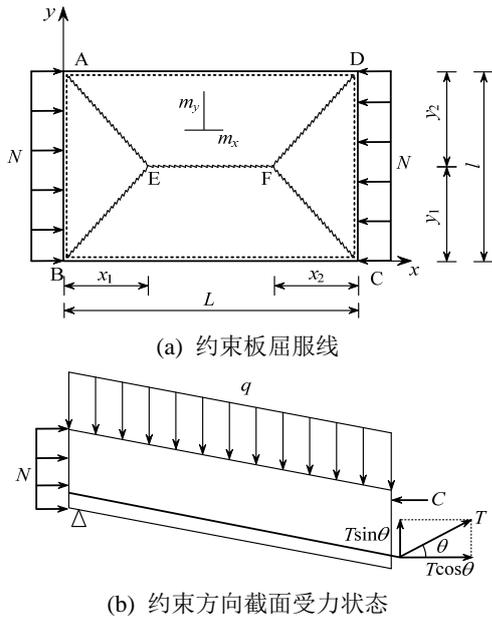


图 18 单向面内约束双向板屈服截面受力状态

Fig.18 Forces at the yield line section of one-way in-plane constraint slab

约束力方向(如 x 方向)ABE 板块平衡方程为:

$$m_{x,T}l + T_{x,T}l \sin \theta \times \frac{1}{2} x_1 = \frac{1}{2} x_1 \times \frac{1}{3} x_1 \times q \times l + N \times h \times \frac{1}{2} h \times l \quad (1)$$

式中, h 为板厚。

结合文献[22], 简化计算可得:

$$q = \frac{6m_{x,T}}{(nL)^2} \left[1 + \frac{\sin \theta \times (nL)}{2\gamma_{sx} h_{0x}} \right] - \frac{3Nh^2}{(nL)^2} \quad (2)$$

式中: n 为位置参数; γ_{sx} 为 x 方向力臂系数; h_{0x} 为 x 方向钢筋有效高度。

从极限承载力(稳定性)角度, 国内外学者采用变形破坏准则($l/30$ 或 $l/20$)。然而, 由于热应变(膨胀应变和徐变等)的影响, 大变形并不代表构件的力学应变较大。因此, 文献[5]和文献[23]提出根据钢筋破坏应变建立了板的破坏准则, 即:

$$\Delta = l \times \sqrt{\frac{3 \times (\epsilon_s + \alpha_s \times \Delta T)}{8}} \quad (3)$$

式中: α_s 为钢筋热膨胀系数(14×10^{-6}); ΔT 为钢筋温度变化值; l 为短跨长度; ϵ_s 为 0.025 [5]。

3.2.2 对比分析

1) 模型对比

采用上述理论和温度场计算结果, 结合 EC2 和 ASCE 两规范本构模型(混凝土和钢筋)^[30], 对文献[27]三板和 S-4 板极限承载力进行了计算分析,

如图 19(a)~图 19(d)和图 20(a)~图 20(d)所示。其中, 以图 19(d)为例, 2 MPa 为单向面内约束力, 100 mm 为板底钢筋间距。

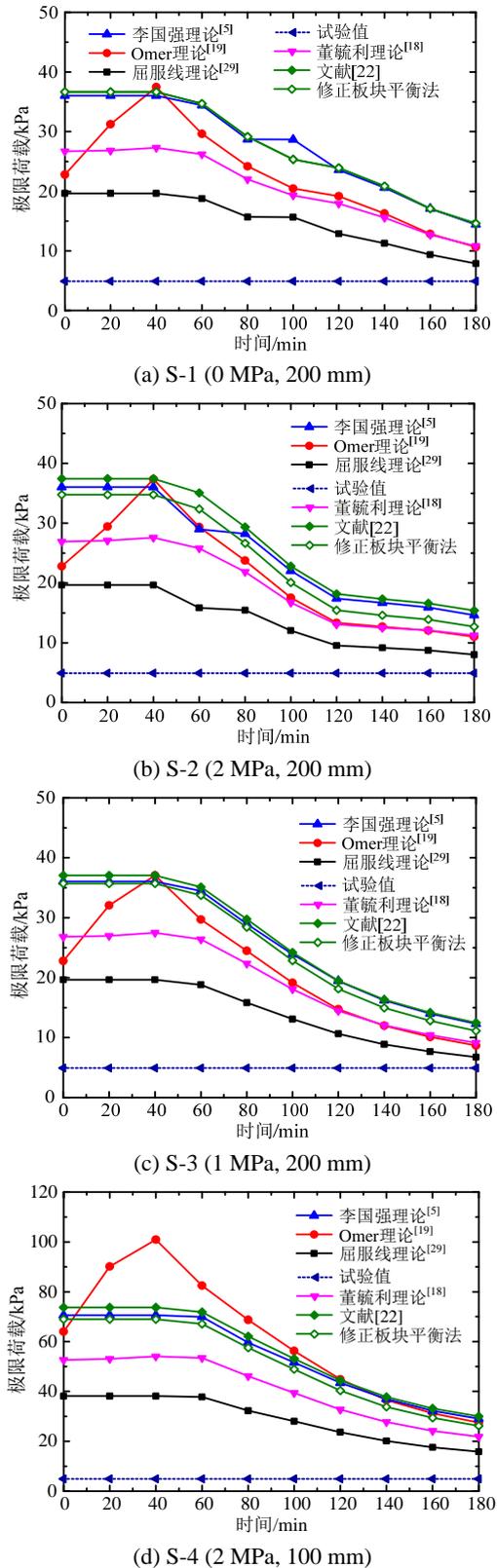
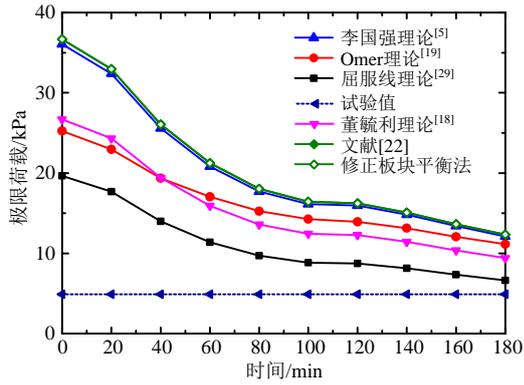
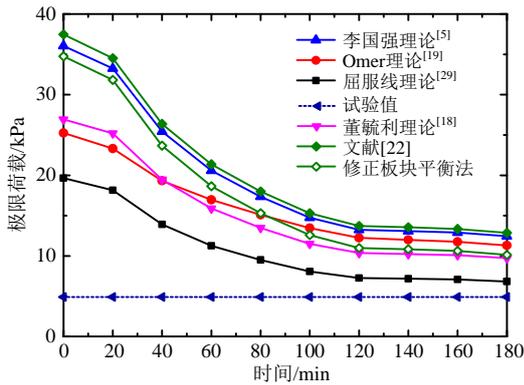


图 19 混凝土板极限承载力-时间曲线(EC2 模型)

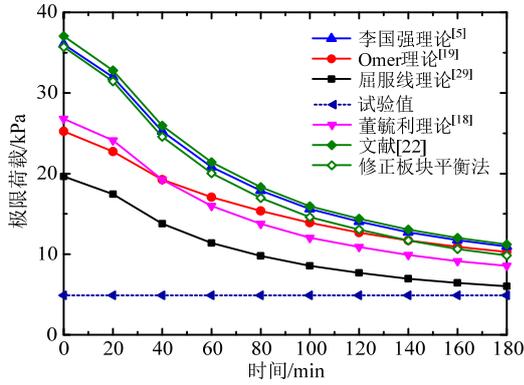
Fig.19 Ultimate load carrying capacity-time curves of concrete slabs (EC2 model)



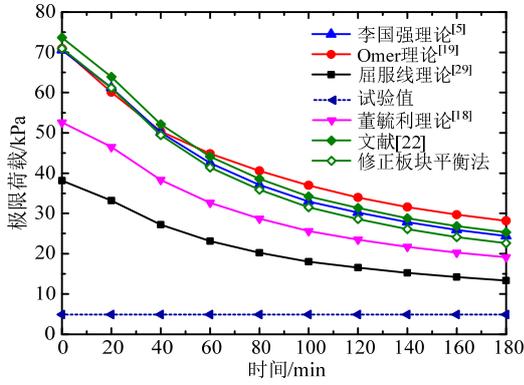
(a) S-1 (0 MPa, 200 mm)



(b) S-2 (2 MPa, 200 mm)



(c) S-3 (1 MPa, 200 mm)



(d) S-4 (2 MPa, 100 mm)

图 20 混凝土板极限承载力-时间曲线(ASCE 模型)
Fig.20 Ultimate load carrying capacity-time curves of concrete slabs (ASCE model)

通过对比分析, 可得:

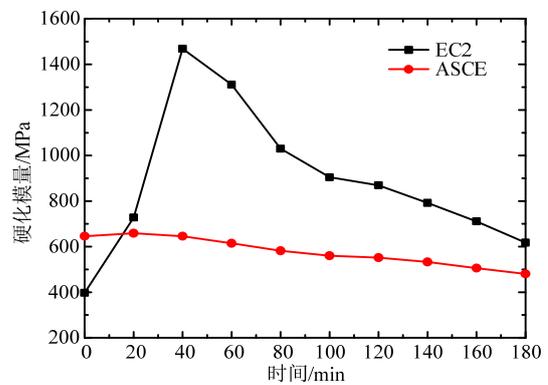
1) 对比每一理论模型, 由于考虑薄膜效应的影响, 其任一时刻极限承载力计算值均高于屈服线理论计算值, 约为 2 倍~3 倍。同样, 对于每一理论模型, 相比 ASCE 模型, 总体上 EC2 模型计算值略大, 原因在于高温下 EC2 钢筋降低系数较大^[28]。以图 19(d)(图 20(d))为例, 180 min 时, 文献[5]、文献[18]、文献[19]、文献[22]、文献[29]和本文修正板块平衡法 ($l/20$) 所得极限荷载分别为 29 kPa(24.4)、21.8 kPa(19.1)、27.5 kPa(28.2)、30.0 kPa(25.3)、15.8 kPa(13.3)和 26.2 kPa(22.6)。

可见, 根据极限承载力值(从大到小), 依次是文献[22]方法、李国强理论^[5]、修正板块平衡法、董毓利理论^[18]和屈服线理论^[29], 而 Omer 模型波动较大; 主要原因在于 Omer 模型考虑了高温下钢筋硬化特性(硬化模量)^[19], 其余模型均未考虑这一特性。

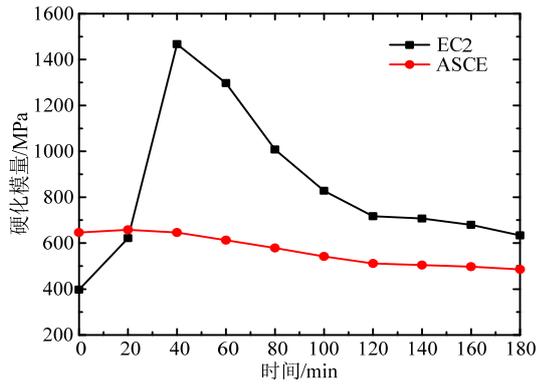
2) 对于 EC2 规范模型, 除 Omer 模型先增大后减小外, 其余模型随着温度增加先保持水平, 随后逐渐降低; 然而, 对于 ASCE 模型, 所有模型均随着温度的增加逐渐降低。

一方面, 对于任一理论, 两本构模型计算值存在一定差异, 特别是钢筋温度低于 400℃。另一方面, 相比其他理论模型, 两本构模型对 Omer 模型极限承载力计算影响较大, 主要原因在于两本构模型所得硬化模量变化规律差别较大, 如图 21(a)~图 21(d)所示。

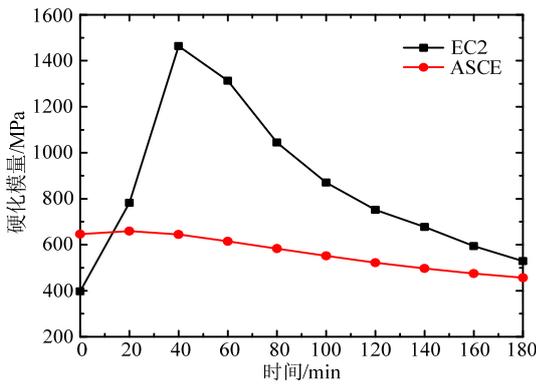
3) 面内约束作用对板的极限承载力有重要影响。值得指出的是, 本文方法和文献[22]结果进行对比, 明显地两者计算结果差别较大, 特别是后期阶段(图 19(b)和图 20(b))。因此, 对于约束板, 面内约束力对其极限承载力影响不可忽略, 即采用传统简支边界理论模型计算约束板承载力不合理的。



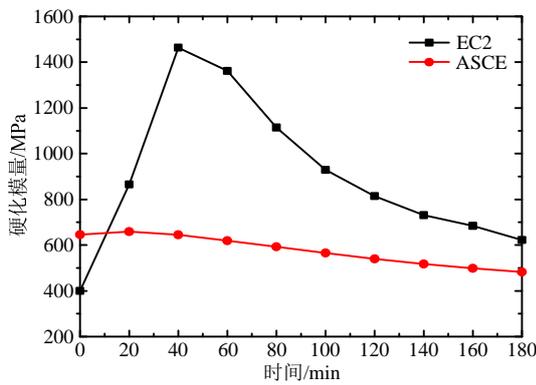
(a) S-1



(b) S-2



(c) S-3



(d) S-4

图 21 混凝土板钢筋硬化模量-时间曲线

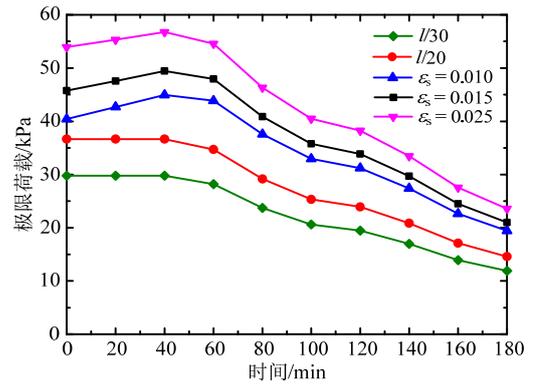
Fig.21 Steel hardening modulus-time curves of concrete slabs

2) 破坏准则分析

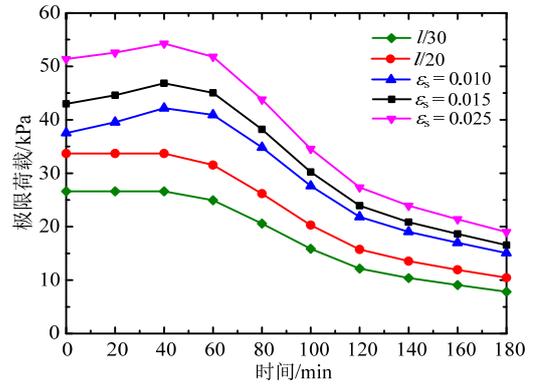
图 22(a)~图 22(d)为破坏准则对混凝土板极限承载力计算值的影响。其中,本构模型采用 EC2 模型,破坏准则包括变形破坏准则($l/30$ 和 $l/20$)和钢筋应变破坏准则(式(3)),即 $\varepsilon_s = 0.01$ 、 0.015 和 0.025 。

由图可知,对于本文方法,破坏准则对极限承载力计算值影响较大,即随着变形或应变 ε_s 值的增大,极限承载力逐渐增大,原因在于随着变形的增大,钢筋较大的竖向分力。以图 22(a)为例,180 min 时, $l/30$ 、 $l/20$ 、 0.01 、 0.015 和 0.025 所得极限荷载值为 11.9 kPa、14.6 kPa、19.5 kPa、21.1 kPa 和

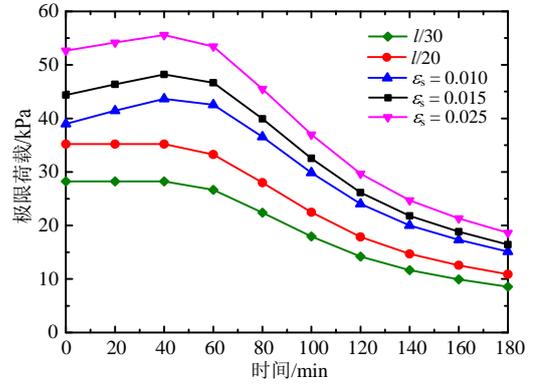
23.7 kPa。



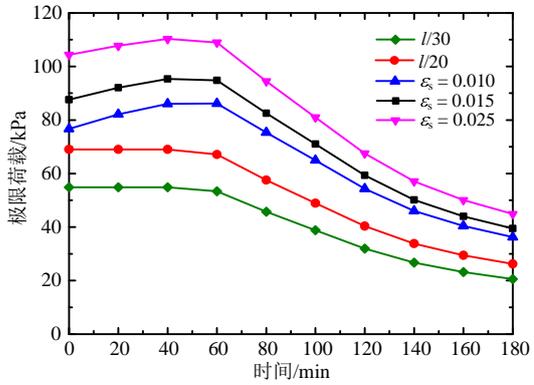
(a) S-1



(b) S-2



(c) S-3



(d) S-4

图 22 破坏准则对混凝土板极限承载力的影响(EC2 模型)

Fig.22 Effect of the failure criteria on the ultimate load carrying capacity of concrete slabs (EC2 model)

此外, 可见变形破坏准则和钢筋应变破坏准则所得极限承载力表现为不同的变化规律, 前者是先保持不变随后逐渐降低, 而后者是先增大后减小。原因在于混凝土力臂系数先减小后增大(式(2))。

明显地, 从承载力角度试验板并未破坏, 仍然具有较大的承载力。然而, 值得指出的是, 结合试验现象(图 5(a)和图 5(b)), 约束试验板最终可能出现隔热性或完整性破坏^[11]。因此, 在建立隔热性或完整性破坏准则时, 在考虑温度或贯穿裂缝基础上, 需要考虑边界约束作用的影响, 特别是面内约束作用的不利作用。

4 结论

本文开展了单向面内约束作用下足尺混凝土双向板的抗火性能研究, 对约束板的裂缝开展规律及破坏模式、温度、挠度、平面内位移以及板角约束力等火灾行为进行试验研究, 并与相关文献结果进行了对比; 在此基础上, 结合 EC2 和 ASCE 模型(热工参数和力学参数), 采用五种火灾下混凝土板承载力理论, 对约束试验板的极限承载力进行了计算分析, 得出以下结论:

(1) 在单向面内约束作用下, 混凝土双向板中部区域及边界区域易出现沿约束力方向的平行裂缝; 对比表明增加配筋率有助于降低约束力方向裂缝开展数量、宽度及深度, 避免过早出现完整性破坏;

(2) 与混凝土板竖向挠度相比, 其无约束力方向的平面内膨胀变形较大, 不可忽略;

(3) 由于薄膜效应计算方法、极限破坏模式和破坏准则不同, 不同理论所得极限承载力值及其变化趋势存在较大差异; 面内约束力和破坏准则对约束板极限承载力影响较大, 建立理论模型时应考虑面内约束力作用和合适的破坏准则。

参考文献:

- [1] Huang Zhaohui, Burgess I W, Plank R J. Effective stiffness modeling of composite concrete slabs in fire [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22(9): 1133—1144.
- [2] Lim L, Buchanan A, Moss P, et al. Numerical modelling of two-way reinforced concrete slabs in fire [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(8): 1081—1091.
- [3] Wang Yong, Dong Yuli, Zhou Guangchun. Nonlinear numerical modeling of two-way reinforced concrete slabs subjected to fire [J]. *Computers and Structures*, 2013, 119(4): 23—36.

- [4] Bailey C G, Toh W S. Small-scale concrete slab tests at ambient and elevated temperatures [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(10): 2775—2791.
- [5] 李国强, 周昊圣, 郭士雄. 火灾下钢结构建筑楼板的薄膜效应机理及理论模型[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(5): 40—47.
Li Guoqiang, Zhou Haosheng, Guo Shixiong. Mechansim and theoretical model of membrane action in slabs of steel buildings subject to fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(5): 40—47. (in Chinese)
- [6] 英明鉴, 李易, 陆新征, 等. 某超高层混凝土结构火灾作用下的力学响应分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 19—27.
Ying Mingjian, Li Yi, Lu Xinzheng, et al. The mechanical response analysis of a super tall concrete structure under fire [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5): 19—27. (in Chinese)
- [7] 吴波, 唐贵和. 近年来混凝土结构抗火研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(6): 110—121.
Wu Bo, Tang Guihe. State-of-the-art of fire-resistance study on concrete structures in recent years [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(6): 110—121. (in Chinese)
- [8] Selvaggio S L, Carlson C C. Effect of restraint on fire resistance of prestressed concrete [C]. *American Society for Testing and Materials, STP 344, Reprinted as PCA Research Department Bulletin 164*, 1963: 1—25.
- [9] Issen L A, Gustaferro A H, Carlson C C. Fire tests of concrete members: An improved method for estimating thermal restraint forces [C]. *Fire Test Performance, ASTM*, 1970: 153—185.
- [10] Lin T D, Zwiers R I, Shirley S T, et al. Fire test of concrete slab reinforced with epoxy-coated bars [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(2): 156—162.
- [11] Cooke, G M E. Results of tests on end-restrained reinforced concrete floor strips exposed to standard fires [R]. Report prepared for the Construction Directorate of the Department of the Environment, Fire Research Station, Hertfordshire, U.K., 1993.
- [12] Lim L, Wade C. Experimental fire tests of two-way concrete slabs [R]. *Fire Engineering Research Report 02/12*. University of Canterbury and BRANZ Ltd, New Zealand, 2002: 24—53.
- [13] 王滨, 董毓利. 四边简支钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(6): 23—33.
Wang Bin, Dong Yuli. Experimental research of four-edge simple support two-way reinforced concrete slab under fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(6): 23—33. (in Chinese)
- [14] 朱崇绩, 董毓利, 朱崇钊. 足尺平板无梁楼盖抗火性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 34(3): 12—19.
Zhu Chongji, Dong Yuli, Zhu Chongzhao. Experimental study on fire resistance properties of full-scale flat-plate floor subjected to fire [J]. *Journal of Building Structures*,

- 2012, 34(3): 12–19. (in Chinese)
- [15] 杨志年, 董毓利, 吕俊利, 等. 整体结构中钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 96–103.
Yang Zhinian, Dong Yuli, Lü Junli, et al. Experimental study of two-way reinforced concrete slab subjected to fire in a whole structure [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 96–103. (in Chinese)
- [16] Wang Y, Dong Y L, Li B. A fire test on continuous reinforced concrete slabs in a full-scale multi-story steel-framed building [J]. Fire Safety Journal, 2013, 61(5): 38–48.
- [17] 李兵, 董毓利, 娄永杰, 万乐. 足尺钢框架中连续板格火灾试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 145–153.
Li Bing, Dong Yuli, Lou Yongjie, Wan Le. A fire test of continuous panels in a full-scale steel-framed structure [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(1): 145–153. (in Chinese)
- [18] Dong Yuli, Fang Yuanyuan. Determination of tensile membrane effects by segment equilibrium [J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(1): 17–23.
- [19] Omer E, Izzuddin B A, Elghazouli A Y. Failure of lightly reinforced concrete floor slabs with planar edge restraints under fire [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(9): 1068–1080.
- [20] Cameron N J K, Usmani A S. New design method to determine the membrane capacity of laterally restrained composite floor slabs in fire Part 1: Theory and method [J]. The Structural Engineer, 2005, 83(19): 28–33.
- [21] Usmani A S, Rotter J M, Lamont S, et al. Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects [J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(8): 721–744.
- [22] Wang Y, Dong Y L, Yuan G L, Zou C Y. New failure criterion to determine the load carrying capacity of two-way reinforced concrete slabs [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(2): 221–235.
- [23] 张娜思, 李国强. 火灾下组合楼板薄膜效应分析的改进方法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 29–35.
Zhang Nasi, Li Guoqiang. An innovative analytical method for the membrane action of composite floor slabs in fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 29–35. (in Chinese)
- [24] Herraiz B, Vogel T. Novel design approach for the analysis of laterally unrestrained reinforced concrete slabs considering membrane action [J]. Engineering Structures, 2016, 123(9): 313–329.
- [25] 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.
GB 50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and building Press, 2010. (in Chinese)
- [26] GB/T 9978-2008, 建筑构件耐火试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 9978-2008, Fire-resistance tests-elements of building [S]. Beijing: China standard Press, 2008. (in Chinese)
- [27] 李志奇. 单向面内约束混凝土双向板抗火性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
Li Zhiqi. Study on fire resistance of two-way reinforced concrete slab with one-way in-plane constraint [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [28] 王勇, 袁广林, 李志奇, 董毓利. 钢筋混凝土双向板火灾行为的数值分析[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 218–227, 250.
Wang Yong, Yuan Guanglin, Li Zhiqi, Dong Yuli. Numerical analysis of fire behaviour of two-way reinforced concrete slabs [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11): 218–227, 250. (in Chinese)
- [29] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 396–410.
Shen Jumin, Wang Chuanzhi, Jiang Jianjing. Finite elements method of reinforced concrete and limit analysis of concrete slabs and shells [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993: 396–410. (in Chinese)
- [30] 王勇, 董毓利. 火灾下混凝土双向板非线性分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015: 1–50.
Wang Yong, Dong Yuli. Nonlinear analysis of concrete two-way slabs in fire [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2015: 1–50. (in Chinese)