

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.036

受火时间对钢筋混凝土板柱节点的力学性能影响

牛富渊, 刘永军, 蔡炎, 齐振雷

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 主要依据 Salem 等人的试验, 采用有限元软件 ABAQUS 模拟板柱节点在火灾时的温度场分布, 以及在不同受火时间和不同板厚下节点处的力学性能。为了测量板内温度的变化, 设置了 4 个测点, 离受火面的距离为 0 mm、33.33 mm、66.66 mm、100 mm。数值模拟得出各个测点温度随着受火时间的增加而升高, 随着离受火面距离增大而减小, 测点 2、3、4 最高温度相比测点 1 依次损耗了 42.22%、63.50%、78.56%; 100 mm 厚的楼板相比常温下极限承载力依次降低了 11.53%、19.31%、25.73%、33.94%、40%、46.36%; 相比较常温下的位移分别增大了 15.6%、21.9%、28.1%、34.4%、43.8%、56.3%; 当板厚由 100 mm 增大到 120 mm 时, 在常温下节点的抗冲切性能可以提升 26% 左右, 在高温下, 其抗冲切性能最大可以提升 40% 左右。因此, 随着受火时间的延长, 板柱节点越容易发生冲切破坏; 增加楼板厚度可以提高节点的抗冲切性能。

关键词: 温度场; 力学性能; 板柱节点; 冲切破坏

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0199-05

Influence of Fire Duration on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Slab – Column Connection

NIU Fuyuan, LIU Yongjun, CAI Yan, QI Zhenlei

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: This article is based on the experiments of Hamed Salem, Heba Issa, Hatem Gheith, and Ahmed Farahat, the finite element software ABAQUS is adopted to simulate the temperature field distribution of the slab-column structure in fire. The mechanical properties of the connection different thicknesses. In order to measure the temperature change in the plate, four measuring points were set, and the distance from the fire surface was 0 mm, 33.33 mm, 66.66 mm, and 100 mm. Numerical simulations show that the temperature of each measuring point increases with the increase of the temperature of the fire duration, and decreases with the distance from the fire surface. The highest temperature of the measuring points 2, 3 and 4 is compared with the measuring point 1 loss of 42.22%, 63.50%, and 78.56%; the ultimate bearing capacity of 100 mm thick slabs reduced by 11.53%, 19.31%, 25.73%, 33.94%, 40%, and 46.36% at room temperature, and increased by 15.6%, 21.9%, 28.1%, 34.4%, 43.8%, and 56.3%, respectively. When the plate thickness is increased from 100 mm to 120 mm, the punching resistance of the connection can be improved by about 26% at normal temperature, and the punching resistance can be increased by about 40% at high temperature. Therefore, as the fire duration increases, the plate – column connection is prone to punching shear, and increasing the thickness of the floor can improve the punching resistance of the connection.

Keywords: temperature field; mechanical properties; slab-column connection; punching shear

板柱结构, 是由楼板和柱组成的一种建筑结构, 因其结构和经济优势而被广泛的使用, 例如地下车库、大型商场、多层厂房^[1]。但是板柱节点是板柱结

构中最关键最薄弱的部位, 当节点的剪力达到极限冲切承载力时, 楼板将发生冲切破坏, 形成冲切破坏锥^[2], 由于其脆性, 板柱节点处的剪切破坏可能造成

灾难性后果,因为荷载会转移到相邻节点,从而导致相邻节点负荷过重。也可能会导致相同楼层相邻节点的连续倒塌^[3]。图 1 是 2018 年 11 月 12 日广东中山无梁楼盖地下车库连续坍塌,是由于某个节点先发生冲切破坏,而引发的连续倒塌破坏。尤其火灾下钢筋混凝土的强度,刚度等力学性能会大幅度退化,变形能力急剧丧失。板柱节点更容易发生冲切破坏^[4-8],甚至也会引起周围节点发生冲切破坏,进而导致整个楼层发生连续性倒塌。2014 年瑞士西北部 Gretzenbach 镇的一个采用板柱结构地下车库,因 1 辆汽车燃烧而引发火灾,汽车燃烧附近的一个柱子先发生冲切破坏,接着附近 7 个节点相继发生冲切破坏,引起连续倒塌,导致 7 名消防员在救灾中牺牲。因此,研究火灾下板柱节点的力学性能时非常有必要的。

2016 年 Ngekpe 等^[9]采用 MIDAS 有限元软件,研究了板柱边节点的冲切破坏和裂缝扩展形态。2015 年 Adam 等^[10]基于 ABAQUS 混凝土塑性损伤模型研究了板柱节点的冲切破坏,得出冲切破坏是由于受拉面裂纹扩展引起的。Genikomsou 等^[11]采用数值模拟和试验对比得出,合理的板柱节点模型可以正确的预测板柱节点的冲切破坏。本文主要是通过用有限元软件 ABAQUS 来模拟火灾时板柱节点处的温度场分布,模拟分析不同受火时间和不同板厚下板柱节点的位移、极限承载力等力学性能。



(a) 局部

(b) 全景

图 1 广东中山地下车库连续坍塌

1 模型设计

本文采用的试验数据均来自 Salem 等^[12]做的 14 个三分之一的缩尺试件,板的受拉侧为受火面,

柱顶上施加荷载。其中板的截面尺寸为 1 100 mm × 1 100 mm,板厚为 100 mm 和 120 mm。在板的受压面加载短柱,短柱位于板的中央,柱的截面尺寸 150 mm × 150 mm,柱高为 400 mm,板和柱的配筋如图 2 所示。试件中混凝土的强度等级均采用 C30,混凝土的保护层厚度为 25 mm,所有钢筋均采用 HRB400 级钢筋。

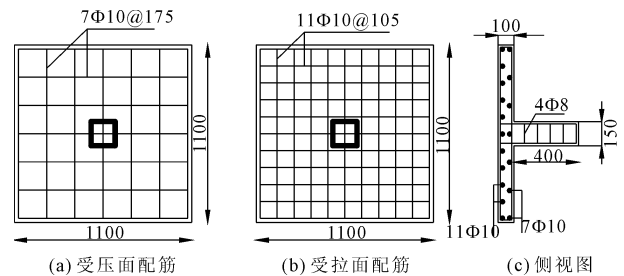


图 2 板和柱的配筋及截面尺寸(单位:mm)

2 温度场分析

2.1 温度场计算原理

本文模拟钢筋混凝土板的受拉面受火,热量通过对流和辐射传递到钢筋混凝土板的受拉面,然后以热传导的方式在板内传递^[13]。假设受火面沿板的长度方向均匀受火,结构体内无热源,对其内部任一微元体 $dx dy dz$,根据能量守恒定律,可建立热传导基本微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, T 为温度。

受火前,结构的周围环境为 $T_0 = 20^\circ\text{C}$,即初始条件: $T(x, y, z, t = 0) = T_0$,受火时,结构受火面的边界条件: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T_a - T_b)$, T_a 为周围气体温度, T_b 为边界温度。背火面的边界条件: $T(x, y, z, t) = f(t)$,本文以对流和辐射为主要热量传递方式的边界条件为:

$$-\lambda \frac{\partial T_b}{\partial n} = h_c(T_b - T_f) + \epsilon\sigma[(T_b + 273)^4 - (T_f + 273)^4] \quad (2)$$

式中: n 为边界外法线方向; h_c 为对流换热系数,取 $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$; σ 为 Stefan - Boltzmann 为常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ 。绝对零度取 -273°C 。

2.2 材料的热工性能

高温下混凝土和钢筋的导热系数、比热容、热膨胀系数等热工性能如表 1 所示。

表 1 钢筋和混凝土的热工参数

材料类型	导热系数 λ /($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	$T_{导}/^\circ C$	比热容 C /($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	$T_{比}/^\circ C$	热膨胀系数 α_s /($m \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	$T_{热}/^\circ C$	密度 /($kg \cdot m^{-3}$)
混凝土	1.335 1.7162 - 0.001214T	$0 \leq T \leq 239$ $T > 239$	$900 + 80(\frac{T}{120}) - 4(\frac{T}{100})^2$	$20 \leq T \leq 1200$	$(0.008T + 6) \times 10^{-6}$	$20 \leq T \leq 1200$	2400
钢筋	$54 - 3.33 \times 10^{-2}T$	$0 \leq T < 800$	$425 + 7.73 \times 10^{-1}T -$ $1.69 \times 10^{-3}T^2 +$ $2.22 \times 10^{-6}T^3$	$20 \leq T < 600$	$1.2 \times 10^{-5}T +$ $0.4 \times 10^{-3}T^2 -$ 2.416×10^{-4}	$20 \leq T < 750$	7850
	27.3	$800 \leq T \leq 1200$	$666 + 13002/(738 - T)$ $545 + 17820/(T - 731)$ 650	$600 \leq T < 735$ $735 \leq T < 900$ $900 \leq T < 1200$	1.1×10^{-2} $2 \times 10^{-5}T - 6.2 \times 10^{-5}$	$750 \leq T \leq 860$ $860 < T \leq 1200$	

2.3 温度场有限元模拟

2.3.1 建模

采用有限元软件 ABAQUS 进行构件三维建模时,混凝土板和柱采用八节点线性传热六面体单元 DC3D8,钢筋采用两节点传热连接单元 DC1D2,板与柱之间采用绑定约束,钢筋与混凝土之间采用嵌入区域约束。使用瞬态热分析法,所建的实体模型经网格划分转化为有限元模型,为了使划分的网格更规则,更合理,采用映射网格划分法,划分后的有限元模型如图 3 所示。

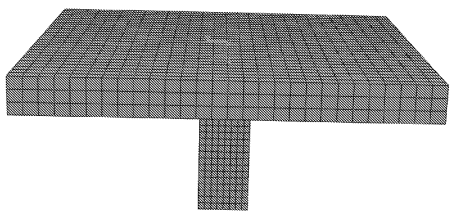


图 3 有限元网格划分几何模型

2.3.2 边界条件及加载

板的受拉面为受火面,在受火面上考虑热对流和热辐射两种边界条件。采用国际标准升温曲线 ISO834,其表达式为:

$$T_0 = 345lg(8t + 1) \quad (3)$$

式中: t 为试验所经历的时间; T 为升温到 t 时间的温度; T_0 为初始温度。

2.3.3 计算结果和分析

通过有限元模拟可得到不同受火时间下受火面的最高温度和节点处沿板厚度方向的温度分布。受火 30 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min 下受火面的最高温度依次为 678 $^\circ C$ 、864.39 $^\circ C$ 、950.92 $^\circ C$ 、1 006.97 $^\circ C$ 、1 048.43 $^\circ C$ 、1 081.15 $^\circ C$ 。沿板的厚度方向设置 4 个测点,分别为测点 1、测点 2、测点 3、测点 4,离受火面的距离为 0 mm、33.33 mm、66.66 mm、100 mm,如图 4 所示。各测点的温度随时间的变化曲线如图 5 所示,4 条曲线的总体趋势是

随着受火时间的增加温度逐渐升高,测点温度随离受火面距离增大而减小,且不是均匀分布。由于测点 1 在受火面上,升温时受到外界的影响最大,温度最高,升温速度最快,故测点 1 的升温曲线与国际标准升温曲线大体吻合。测点 2、3、4 的最高温度与测点 1 相比依次降低了 42.22%、63.50%、78.56%,这是因为混凝土为热惰性材料,随着受火时间的增加导热系数较低,越远离受火面,向内部传递热量的路径就会越长,热量损耗就越大,升温速度就越慢。

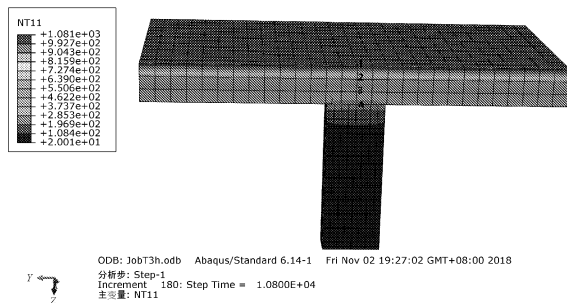


图 4 测点的位置分布

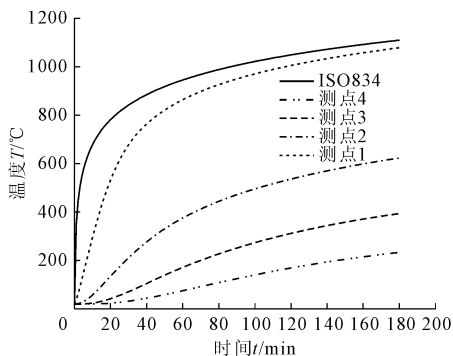


图 5 各测点的温度随时间的变化曲线

3 高温下混凝土板柱节点的力学性能

3.1 高温下材料的应力 - 应变关系

高温下钢筋的本构关系本文采用过镇海等^[14]提出的。过镇海等将高温下钢筋的应力 - 应变曲线

分为屈服前和屈服后两部分,给出与温度的函数关系式:

$$\sigma_s(T) = \begin{cases} \frac{f_y(T)}{\epsilon_y(T)} \epsilon_s = E_s(T) \epsilon_s(T), & \epsilon_s(T) \leq \epsilon_y(T) \\ f_y(T) + (f_T(T) - f_u(T)) \eta, & \epsilon_y(T) \leq \epsilon_s(T) \leq \epsilon_u(T) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\eta = \frac{\sigma_s(T) - f_y(T)}{f_u(T) - f_y(T)}$, $f_u(T)$ 为 $T^\circ\text{C}$ 时钢筋的极限抗拉强度; $\epsilon_u(T)$ 为 $T^\circ\text{C}$ 时钢筋的极限应变。

高温下混凝土的应力 - 应变关系采用清华大学过镇海建议的公式

$$y = \begin{cases} 2.2x - 1.4x^2 + 0.2x^3 & x \leq 1 \\ \frac{x}{0.8(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x = \epsilon_c^T / \epsilon_{cp}^T$; $y = \sigma_c^T / f_c^T$, σ_c^T 、 ϵ_{cp}^T 是温度为 $T^\circ\text{C}$ 时混凝土棱柱抗压强度和对应的峰值应变; ϵ_{cp} 是常温下混凝土受压峰值应变。

$$\epsilon_{cp}^T = \left[1 + 5 \left(\frac{T}{1000} \right) \right] \epsilon_{cp} \quad (6)$$

3.2 建立有限元模型

在结构高温受力分析中采用了顺序热力耦合的方法,即先用纯热分析求出火灾下构件的温度场分布,然后将温度场作为预定义场导入力学分析中,从而分析高温下的板柱节点的力学性能。在力学分析时,混凝土选用八节点线性六面体单元(C3D8R),钢筋选用两节点线性三维桁架单元(T3D2)^[15],为了让 ABAQUS 得以计算,力学分析时的网格划分与温度场相同。其边界条件约束板的侧边: $U_1 = U_2 = U_3 = 0$,即约束 X、Y、Z 方向的位移,释放 X、Y、Z 的转角。采用位移加载方式来求结构的极限承载力,施加在柱面耦合的参考点上(如图 6 所示),其中位移的施加速度为 1 mm/s,加载幅值 30 mm,其等效荷载为 157.30 kN。

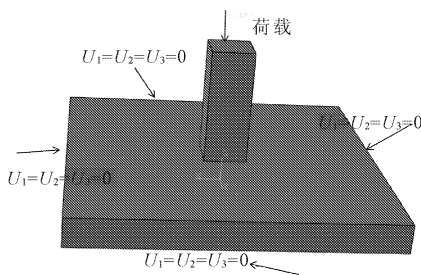


图 6 边界条件和荷载加载位置

3.3 模拟结果分析

3.3.1 不同受火时间和不同板厚下节点的极限承载力

不同受火时间下钢筋混凝土板柱节点荷载 - 位移曲线如图 7 所示,分别做了在常温下($t = 0 \text{ min}$)、升温到 30 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min 板厚为 100 mm 时节点的荷载 - 位移曲线。所有曲线的共同特点是均有上升段和下降段,不同点是在常温和受火 30 min 时曲线的上升段和下降段均特别显著,而在受火达到 60 min 以后,曲线的变化相对平缓。极限荷载就是板柱节点在发生冲切破坏之前所承受的最大荷载,对应荷载 - 位移曲线就是曲线的最大值。相比常温下节点极限承载力依次降低了 11.53%、19.31%、25.73%、33.94%、40%、46.36%,因此可知随着温度的不断增加,由于钢筋混凝土的变形能力、强度、刚度等性能均衰退,导致节点的抗冲切性能越来越差,表明受火时间越长,节点越容易发生冲切破坏。

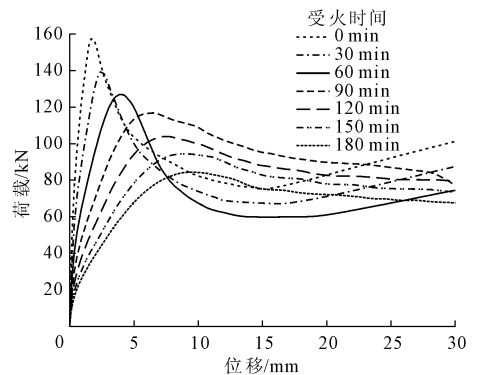


图 7 荷载 - 位移曲线

图 8 是不同板厚下板柱节点的极限承载力在不同受火时间下的变化曲线。

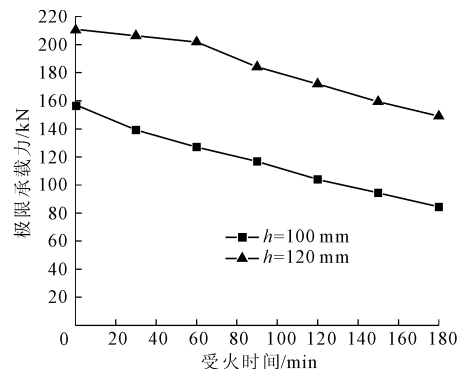


图 8 极限承载力 - 受火时间曲线

当板厚为 100 mm 时,不同受火时间下的极限承载力依次为 157.30 kN、139.17 kN、126.94 kN、

116.83 kN、103.91 kN、94.39 kN、84.37 kN,当板厚为120 mm时,极限承载力依次为210.88 kN、206.30 kN、201.84 kN、184.09 kN、172.00 kN、159.40 kN、149.03 kN,极限承载力依次提高了25.41%、32.24%、37.11%、36.54%、39.59%、40.78%、43.39%。当板厚由100 mm增大到120 mm时,在常温下节点的抗冲切性能可以提升26%左右,在火灾时,其抗冲切性能最大可以提升40%左右,由此可以得出提高楼板的厚度可以增强板柱节点的抗冲切性能,故而在板柱结构设计中应对楼板的厚度做出一定的要求。

3.3.2 不同受火时间下节点的位移

分别测定在常温下、受火30 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min时板厚为100 mm板柱节点处的最大位移。

在常温下板的最大位移为32 mm,受火30 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min时板的最大位移依此是37 mm、39 mm、41 mm、43 mm、46 mm、50 mm,相比较常温下的位移分别增大了15.6%、21.9%、28.1%、34.4%、43.8%、56.3%,这表明随着受火时间的增加,钢筋混凝土板柱节点处产生了很大的变形。这是由于在高温下混凝土和钢筋的弹性模量的降低,导致钢筋混凝土的截面刚度降低,并且由于高温膨胀作用,所以才会产生很大的变形。在模型中柱在Z轴的正方向,而板柱节点变形的沿Z轴的反方向,故 U_3 越小表示节点处的位移越大,通过板柱节点沿板的宽度方向板的位移随受火时间的变化规律如图9所示,在沿板的长度方向上,离板柱节点越近,板的位移就越大。随着受火时间的增加,节点处的位移增大,节点处产生的变形就越大,这表明在高温下板柱节点更容易发生冲切破坏。

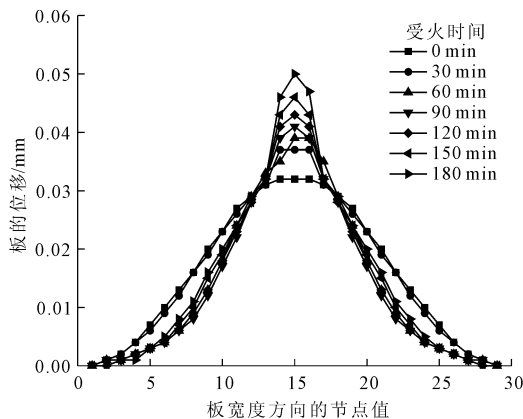


图9 节点的位移随受火时间的变化曲线图

4 结论

采用有限元软件 ABAQUS 进行钢筋混凝土板柱结构的温度场模拟分析和不同受火时间下板柱节点的力学性能。分析结果表明:

(1) 各个测点温度随着受火时间的增加而升高,随着离受火面距离增大而减小,测点2、3、4最高温度相比测点1依次损耗了42.22%、63.50%、78.56%。

(2) 100 mm厚楼板处的节点在不同受火时间下的极限承载力相比较常温下依次降低了25.87%、29.83%、35.82%、49.87%、61.16%、66.66%,故受火的时间越长,其极限承载力的下降幅度越显著,由此可以得出高温下板柱节点更容易发生冲切破坏。

(3) 当板厚由100 mm增大到120 mm时,在常温下节点的抗冲切性能可以提升26%左右,在火灾时,其抗冲切性能最大可以提升40%左右,由此可以得出提高楼板的厚度可以增强板柱节点的抗冲切性能,故而在板柱结构设计中应对楼板的厚度做出一定的要求。

(4) 100 mm厚楼板处的节点在不同受火时间下的节点位移相比较常温下依次增大了15.6%、21.9%、28.1%、34.4%、43.8%、56.3%,这表明随着受火时间的增加,钢筋混凝土截面刚度降低,高温爆裂,节点处更容易产生大变形。

参考文献:

- [1] 王璐,薛彦涛,王翠坤.板柱结构体系与板柱节点研究的新进展[J].工程抗震与加固改造,2017,39(2):1-10.
- [2] 易伟建,刘彪.混凝土板柱节点冲切承载力的极限分析[J].工程力学,2017,34(8):125-133.
- [3] Liu J R, Tian Y, Orton S L, et al. Resistance of flat-plate buildings against progressive collapse. I: modeling of slab-column connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(12):1-13.
- [4] Arnaot F H, Abid S R, Ozakca M, et al. Review of concrete flat-column assemblies under fire conditions[J]. Fire Safety Journal, 2017, 93:39-52.
- [5] Liao J S, Cheng F P, Chen C C. Fire resistance of concrete slabs in punching shear[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(1):1-9.
- [6] 谷凡,吴敏,刘永军.板柱结构抗火性能研究综述[J].建筑与预算,2017(3):32-41.

- temperature condition[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2001, 38(7):1029-1034.
- [4] Park C, Synn J H, Shin H S, et al. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2004, 41(3):81-86.
- [5] Yavuz H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(2):187-192.
- [6] Bayram F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 83-84(none):98-102.
- [7] 朱杰,徐颖,亓燕秋.冻结红层软岩的蠕变特性研究[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(4):26-32.
- [8] 杨林,焦厚滨.基于冻融循环蠕变特性的沥青路面车辙试验研究[J]. *中外公路*, 2016, 32(2):69-74.
- [9] 田佳.深埋软岩供水隧洞蠕变特性研究进展[J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, 15(4):182-189.
- [10] 郭臣业,鲜学福,姜永东,等.破裂砂岩蠕变试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5):990-995.
- [11] 张树光,马涛,王有涛.辽西花岗岩三轴蠕变时效性试验[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(10):1343-1348.
- [12] 肖明砾,卓莉,谢红强,等.三轴压缩蠕变试验下石英云母片岩各向异性蠕变特性研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S1):73-81.
- [13] 黄达,杨超,黄润秋,等.分级卸荷量对大理岩三轴卸荷蠕变特性影响规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 34(S1):2801-2807.
- [14] 陈国庆,郭帆,王剑超,等.冻融后石英砂岩蠕变特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(S1):203-210.
- [15] 公路工程岩石试验规程:JTG E41—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [16] 黄兴,刘泉声,康永水,等.砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S1):2653-2662.

(上接第 203 页)

- [7] 刘永军,毕然,腾飞,等.钢筋混凝土框架结构火灾反应全过程数值分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(3):405-411.
- [8] Annerel E, Lu L, Taerwe L. Punching shear tests on flat concrete slabs exposed to fire[J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 57:83-95.
- [9] Ngekpe B E, Ode T, Eluozo S N. Application of total-strain crack model in finite element analysis for punching shear at edge connection[J]. *International of Engineering and Social Sciences*, 2016, 6(12):1-9.
- [10] Adam Wosatko, Jerzy Pamin, Maria Anna Polak. Application of damage-plasticity models in finite element analysis of punching shear[J]. *Computers and Structures*, 2015, 151:73-85.
- [11] Genikomsou A S, Polak M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS[J]. *Engineering Structural*, 2015, 98:38-48.
- [12] Salem Hamed, Issa Heba, Gheith Hatem, et al. Punching shear strength of reinforced concrete flat slabs subjected to fire on their tension sides[J]. *HBRC Journal*, 2012, 8(1):36-46.
- [13] 张帅,刘永军.板柱节点火灾中力学性能数值模拟[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(1):131-136.
- [14] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土的高温性能及其计算[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [15] 王建平,丁慧,宋力.抗冲切元件对板柱节点受力性能的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(3):205-208.