

中等火灾对地铁钢筋混凝土结构的影响研究

Study on the Influence of Moderate Fire on the Structure of Subway Stations

萧以苏

(南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 为探究中等火灾对地铁车站段内结构的影响, 采用缩尺寸试验和三维非稳态有限元模拟相结合的方法, 对地铁车站结构开展 1:4 比例缩尺寸的火灾试验, 探究钢筋混凝土结构的变化响应。结果表明: 试验所监测到的顶板、右墙和底板处温度变化呈现相似的趋势, 而相同监测深度下, 柱的温度变化明显高于板和右墙的温度变化; 热载荷导致的应变是造成钢筋总应变的关键因素。试验结果与仿真模拟结果的对比表明, 数值模拟对某些位置 (如右柱中心) 的温度预测存在较大偏差, 因而, 该三维非稳态有限元模型在应用时需进行改进与完善才能进行更准确的预测。

关键词: 中等火灾; 缩尺寸实验; 仿真模拟; 地铁车站段内结构

中图分类号: TU93

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0131-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.025

XIAO Yisu

(Nanjing Railway Vocational and Technical College, Nanjing 210000, China)

Abstract: To investigate the impact of moderate fires on the structure of subway station sections, a combined method of shrinkage tests and three-dimensional unsteady finite element simulation was used to conduct 1:4 scale shrinkage fire tests on subway station structures to explore the change response of reinforced concrete structure. The experimental results were compared and analyzed with the simulation results, and the main conclusion was that the temperature changes at the top plate, right wall, and bottom plate monitored by the experiment showed similar trends, while at the same monitoring depth, the temperature changes of the column were significantly higher than those of the plate and right wall; The strain caused by thermal load is a key factor causing the total strain of steel bars. The comparison between the experimental results and the simulation results indicates that there is a significant deviation in the temperature prediction of certain positions (such as the center of the right column) in the numerical simulation. Therefore, the three-dimensional non-stationary finite element model needs to be improved and perfected in application to make more accurate predictions.

Keywords: moderate fire; reduced size experiment; simulation; subway station structure

0 引言

对钢筋混凝土结构高温性能研究涉及混凝土的

热降解、热量和水分的传递、混凝土瞬态热应变、混凝土剥落以及混凝土与钢筋之间的相互作用等。吴明洋等^[1]探究了钢筋混凝土上盖平台在车辆火灾下的温度演化以及结构的火灾响应, 并开展了上盖平台的汽车火灾模拟试验; 韩兴博等^[2]通过建立地铁区间火灾烟气的三维温度场, 基于有限单元法求解了火灾时隧道衬砌内部的应力; Huang 等^[3]提出了一种可用于预测火灾条件下梁截面温度分布情况的

作者简介: 萧以苏 (1981—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 轨道交通工程。

收稿日期: 2023-09-26

建筑结构

非线性有限元程序；强健^[4]通过试验探究了火灾发生后混凝土的剩余强度等参数；郭信君^[5]则通过试验研究了火灾发生后衬砌结构的力学响应与承载强度的变化。

火灾对钢筋混凝土结构的影响评估具有重要研究意义，而前人的研究多基于数值仿真模型，模拟结果存在较大的不确定性，为此，采用缩尺寸试验和三维非稳态有限元模拟相结合的方法，对成都某地铁站双柱三跨钢筋混凝土结构开展 1:4 比例缩尺寸的火灾试验，探究钢筋混凝土结构的变化响应。

1 工程概况

某工程为地下二层双柱三跨矩形框架结构地铁车站，车站采用盖挖逆做法施工。基坑长 303.6 m，标准段宽 21.6 m，开挖深度 18.3 m。端头井段宽为 26.2 m，开挖深度为 19.96 m。附属共设置 3 个出入口、2 组风亭。车站主体建筑面积为 13133.6 m²，出入口通道建筑面积 1865.2 m²，风道建筑面积 1992.6 m²，出入口上盖，地面建筑面积 991.6 m²，地面风亭面积 307.8 m²，车站总建筑面积 17983 m²。

2 试验方案

三跨两层钢筋混凝土框架结构如图 1 (a) 所示。其中，两层的高度分别为 5950 mm 和 6190 mm，内部总跨度为 20700 mm，将框架细分为三个单元，柱的横截面积为 1200 mm × 800 mm。在实际结构中，隧道轴向上相邻柱的距离为 7500 mm。以 1:4 的缩尺寸比例对上层模型进行测试，其中结构宽度为 5260 mm，高度为 1880 mm，轴向长度为 1200 mm，如图 1 (b) 所示。测试结构中柱的横截面积为 240 mm × 160 mm，底板厚度设置为 190 mm。与实际结构相比，顶板、底板、柱和墙的配筋率分别为 1.22%、1.19%、2.95% 和 1.76%，钢筋的直径为 12 mm 和 14 mm。

混凝土和钢材的刚度和强度在试验前都进行了测试，其中混凝土的抗压强度为 36.5 MPa，直径 12 mm 和 14 mm 的钢的屈服应力分别为 531.9 MPa 和 530.2 MPa。

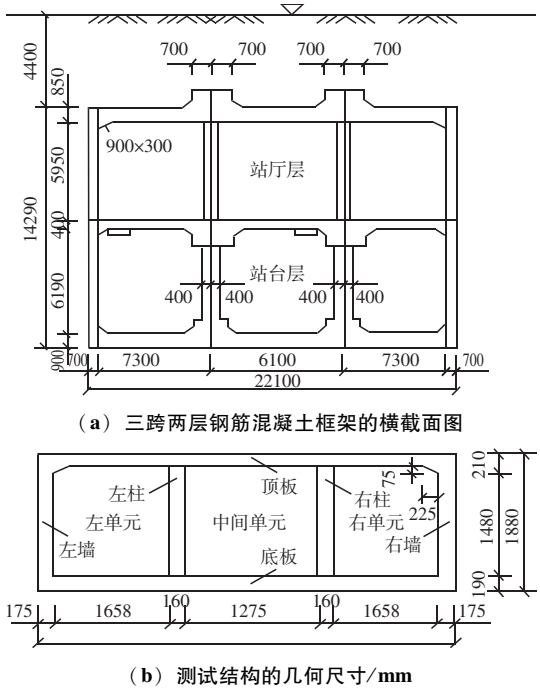


图 1 研究采用的试验结构及其尺寸
Fig. 1 The experimental structure and dimensions used in the study

2.1 监测点位设计

热电偶和应力计在混凝土浇筑之前被嵌入到测试结构中，热电偶被放置在测试结构内的 6 个位置，如图 2 所示。其中，3 个分布在顶板位置（3 个单元中的每个单元跨中各布置 1 个），右柱中、右墙中、底板的中间单元中各 1 个。几个传感器被放置在离受热表面不同距离的位置，以便监测进入结构的热量。热电偶的最小深度为 2 mm。应力计安装在内部和外部钢筋层的钢筋上。测量位置分别位于顶板、左侧单元的跨中和右墙中心。

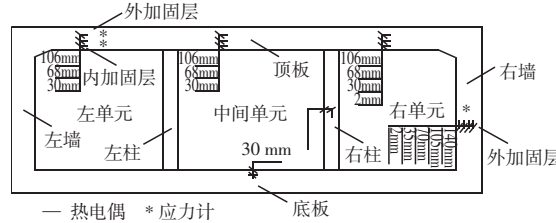


图 2 监测设备的布置图
Fig. 2 Layout diagram of monitoring equipment

2.2 机械载荷和热载荷设计

在两个水平方向上对结构进行机械载荷设计，所施加的载荷包括实际结构上方表面的有效交通载荷（20 kN/m）、两层楼上的行人载荷（4 kN/m），3.5 m 厚覆土层产生的土压力（比重为 19 kN/m³），

以及0.5 m厚地下水层产生的水压（比重为9.8kN/m³）。将这些载荷进行组合，使用恒定载荷和可变载荷的安全系数，分别为1.35和1.40。由此产生的载荷场景由P1、P2和P3三组集中载荷组成，分别为192.0、151.2和120.0 kN，如图3所示。加载分9步进行，耗时70 min。然后再进行火灾试验。

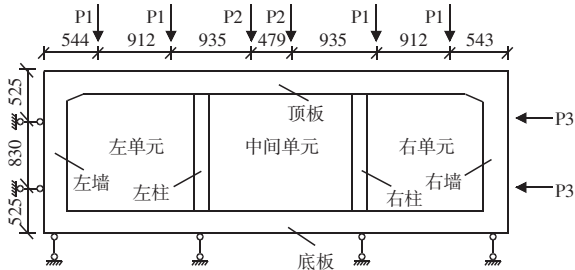


图3 机械载荷布置图示
Fig. 3 Diagram of mechanical load layout

在火灾试验中，横截面内的空气温度随时间的变化而升高，如图4所示。在25 min以内，温度升高到525℃的目标值，在此之后保持恒定。根据中国地铁设计标准^[6]规定，火灾载荷考虑了实际结构的通风，速度为2.5 m/s，并配备了自动喷水装置，火灾的热释放率为5 MW；使用火炉的两个受控热源

来产生热载荷，热量通过自然对流的方式传递到测试结构上。

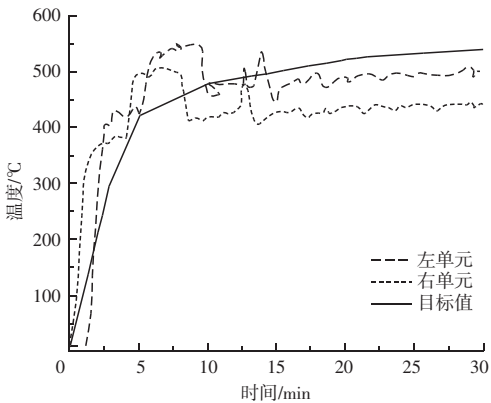


图4 测试结构内空气温度变化情况
Fig. 4 Change of air temperature in the test structure

3 监测结果分析

热电偶和应力计每20 s读取一次数据。因此，火灾测试的前30 min由每个传感器记录90条数据。

在火灾试验的前30 min，靠近顶板内表面的温度，在右单元的跨中，上升了约90℃，温度随距受热内表面距离的增加而降低（见图5（a））。当距离

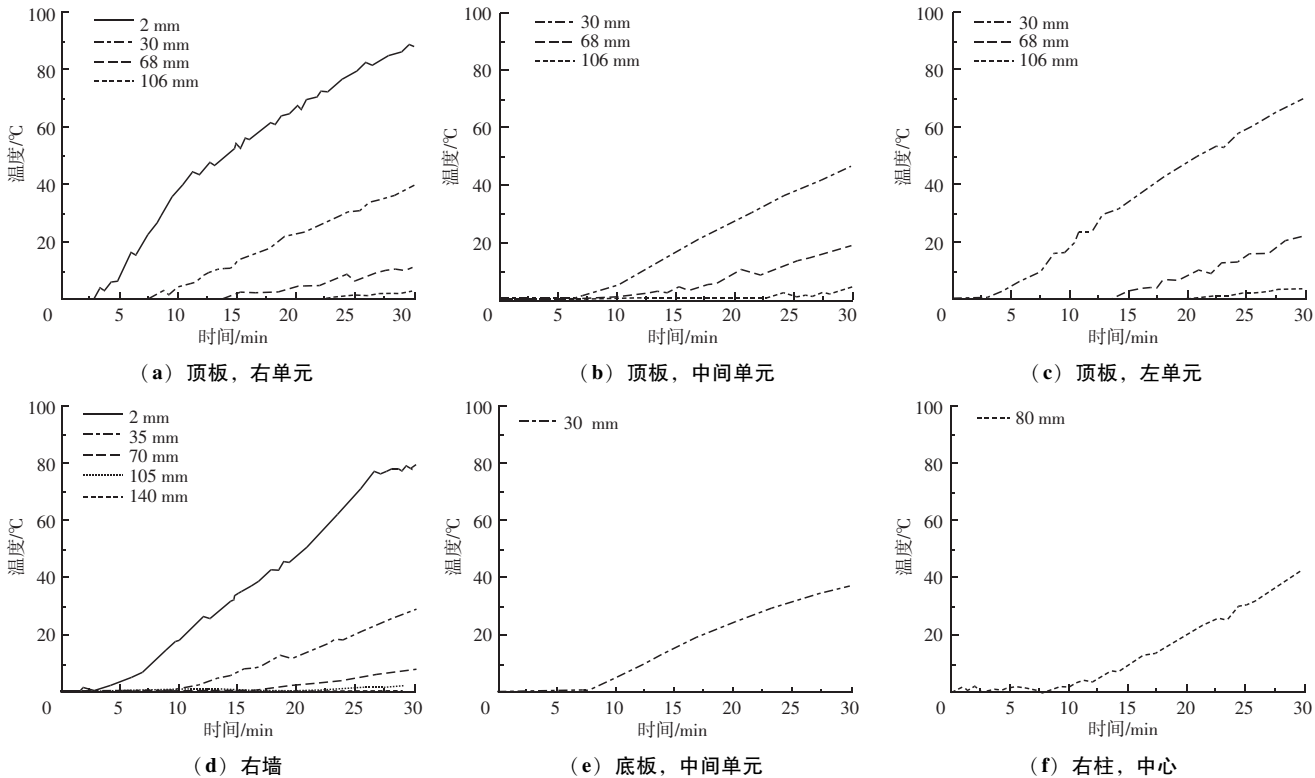


图5 不同监测位置的温度变化情况
Fig. 5 Temperature changes at different monitoring locations

建筑结构

受热表面大于 106 mm 时, 温度几乎保持不变。顶板、右墙和底板处的温度变化曲线呈相似趋势, 如图 5 (b) ~ (e) 所示, 在右墙的中心位置处, 靠近内表面的温度上升了约 80 °C, 而距离超过 105 mm 的温度几乎没有发生变化。右柱的温度在其中心位置处测量, 测量位置距离最近受热表面 80 mm, 结果如图 5 (f) 所示, 相同监测深度下, 柱的温度明显高于板和右墙的温度。

在顶板的外加固层, 由机械加载引起的应变约为 -50×10^{-6} , 对应 $t=0$ min 时虚线的纵坐标值; 在随后 30 min 的防火测试中, 应力值从约 -50×10^{-6} 增加到约 100×10^{-6} , 如图 6 所示。这表明, 在火灾试验开始后不久, 热载荷引起的应变是影响总应变的重要因素, 而温度升高引起的特征应变和热载荷引起的结构载荷重新分布是钢筋内部应变变化的主要原因。

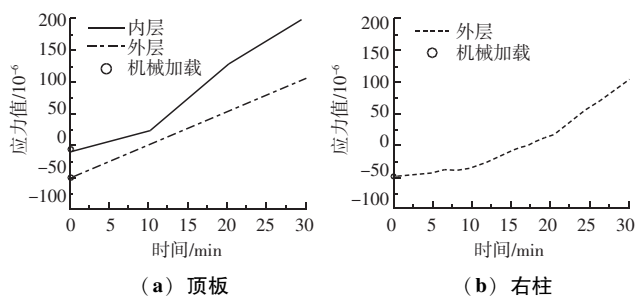


图 6 不同监测位置的钢筋总应力的变化情况
Fig. 6 Changes in the total strain of steel bars at different monitoring locations

4 仿真模拟分析

4.1 仿真模型构建

采用有限元仿真模拟软件, 通过三维非稳态有限元模拟的方式测试了图 1 (a) 所示的结构内部热

传导情况, 有限元模型如图 7 所示。为了提高模拟精度, 并尽可能缩短计算耗时, 仿真模拟中用 139 040 个线性六面体有限元组成, 每个有限元包含 8 个节点, 有限元的特征尺寸设定为 3 cm。

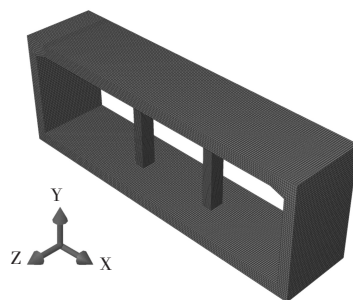


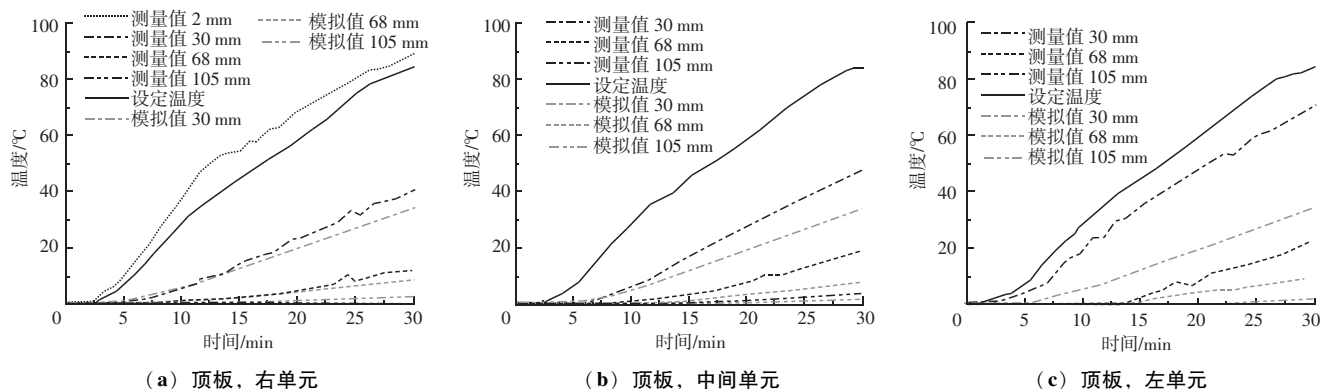
图 7 被测结构的三维有限元模型
Fig. 7 Three-dimensional finite element model of the test structure

混凝土的热容和导热系数的值是根据相关建筑规范^[7]估算得到, 其中热容值为 900 J/(kg · K), 导热系数为 1.6 W/(m · K)。在模拟过程中, 模拟结构外表面温度设为 $T_{ini} = 10$ °C。

4.2 仿真结果与实验结果的对比分析

在模拟中所设定的温度变化如图 8 中的实线所示, 温度变化曲线来自试验中热电偶的监测数据, 其中两个热电偶分别设置在被加热内表面约 2 mm 的位置, 测量的结果如图 8 (a)、(d) 中的“测量值 2 mm”所示。

如图 8 (a) ~ (c) 及 (e) ~ (f) 所示, 顶板、底板及右墙处的数值模拟得到的温度均低于试验所测量得到的温度, 其中, 对于右柱中心位置处的低估值最大, 火灾试验开始后 30 min 得到的最大低估值约为 70%; 根据图 8 (d) 可以发现, 数值模拟得到的温度略高于试验所测量的右墙温度, 但是相差并不大。数值模拟得到的各位置的温度曲线变



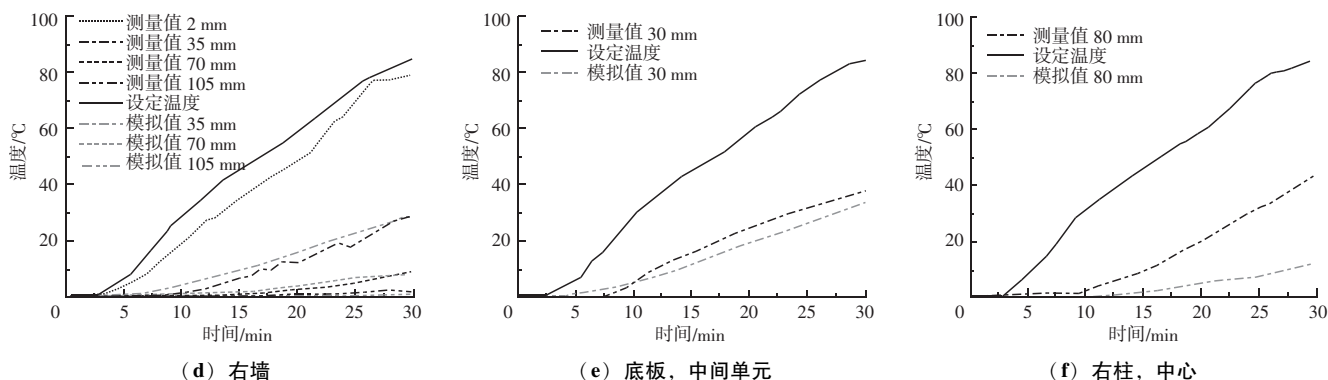


图8 仿真模拟与试验条件下不同监测位置的温度变化对比

Fig. 8 Comparison of temperature changes at different monitoring locations under simulation and test conditions

化趋势与试验测量得到的温度曲线变化趋势相似,表明有限元仿真模拟对地铁车站段内结构在中度火灾下的温度场变化模拟具有可行性。

5 结论

基于缩尺寸试验和三维非稳态有限元模拟相结合的方法,对成都某地铁站双柱三跨两层钢筋混凝土结构开展1:4比例缩尺寸的火灾试验,探究了钢筋混凝土结构的变化响应,主要结论如下:

(1) 顶板、右墙和底板处所监测到的温度变化曲线呈现相似的趋势,而相同监测深度下,柱的温度变化明显高于板和右墙的温度变化。

(2) 热载荷引起的应变是影响钢筋总应变的关键因素,即使是中等火灾也会威胁到钢筋混凝土结构的完整性。

(3) 尽管数值模拟得到的各位置处的温度曲线变化趋势与试验测量得到的温度曲线变化趋势相似,但是其对某些位置(如右柱中心)的预测存在较大

偏差,因而,该三维非稳态有限元在应用时需进行改进与完善才能更准确预测。

参 考 文 献

- [1] 吴明洋,余敏,唐智,等. 钢筋混凝土地铁上盖平台车辆火灾模拟试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 31-40.
- [2] 韩兴博,赵伟封. 火灾下衬砌开裂形式与范围研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 33-42.
- [3] HUANG Z, PLATTEN A, ROBERTS J. Non-linear Finite Element Model to Predict Temperature Histories within Reinforced Concrete in Fires[J]. Building & Environment, 1996, 31(2): 109-118.
- [4] 强健. 地铁隧道衬砌结构火灾损伤与灾后评估方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [5] 郭信君. 盾构隧道混凝土管片构件抗火性能试验及模拟分析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [6] GB50157-2013. 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [7] American Society of Civil Engineers (ASCE). Structural Fire Protection; ASCE: Reston, V A, USA, 1982.