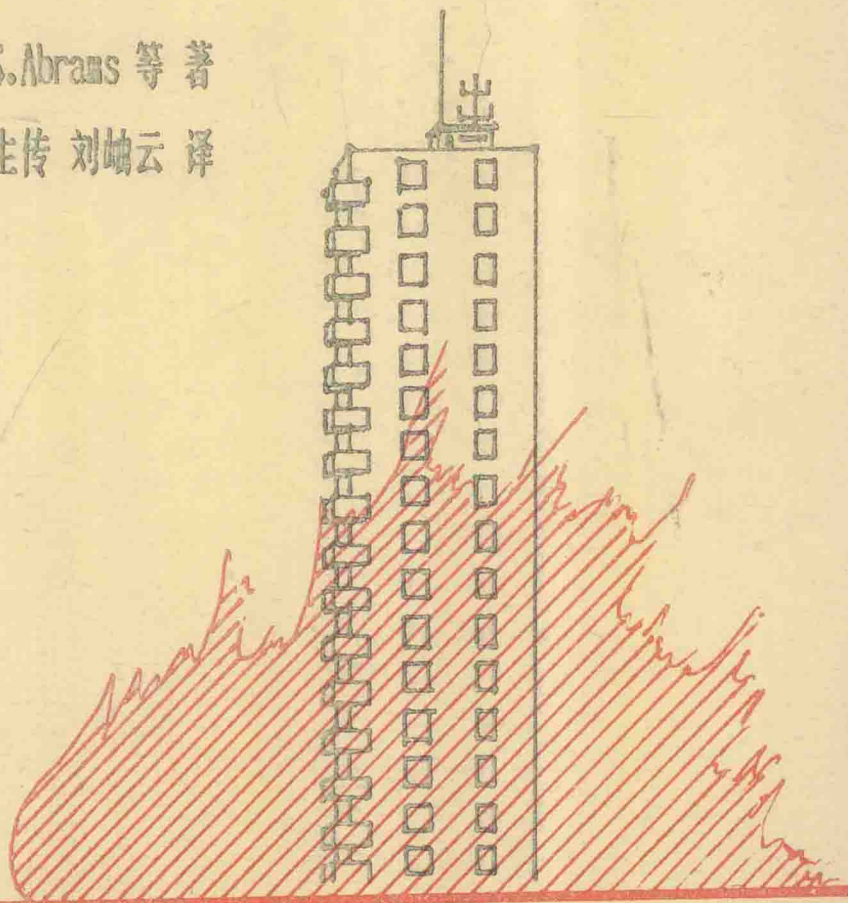


混凝土建筑物

防火设计试验和修复

美国 T.D.Lin M.S.Abrams 等著

沈曙东 张炳根 王生传 刘岫云 译



冶金工业部建筑研究总院技术情报研究室

混凝土建筑物

防火设计试验和修复

美国 T.D.Lin M.S.Abrams 等著

沈曙东 张炳根 王生传 刘岫云 译

冶金工业部建筑研究总院技术情报研究室

译者序

本资料概括了美国混凝土防火建筑物在试验研究、设计和火灾后修复方面的最新成就，文中涉及的某些新概念、理论和方法，在我国还是空白或者刚刚开始研究。这些成果将有助于进一步提高我国混凝土建筑物的防火水平。

本资料可供建筑结构科研、设计和施工等方面的工程技术人员参考。

本书第一篇、第二篇、第九篇、第十二篇由张炳根译，沈曙东校；第三篇、第四篇、第六篇、第八篇由沈曙东译，张炳根校；第五篇、第十篇由王生传译，张炳根校；第七篇、第十一篇由刘岫云译，张炳根校。

序

1980年9月在波多黎各的圣胡安召开的美国混凝土协会秋季会议上，美国混凝土协会2/6（结构防火）委员会召开了混凝土结构火灾安全性科学讨论会。这次会议专门交流了混凝土结构火灾安全性在研究和实践中的最新进展，包括以下题目：

- (1) 防火建筑物的设计和计算
- (2) 防火建筑物的设计准则
- (3) 火灾后混凝土结构的破坏和修复

这次讨论会上提出的12篇论文构成了本论文集。这些论文突出了一些新概念的重要性和实用性，其中包括火灾烈度作为火灾安全设计基础的重要性，混凝土结构防火设计的合理步骤、火灾后评价混凝土结构损伤的方法以及确定混凝土某些重要性能的新方法。

美国混凝土协会2/6委员会用了几年时间编写了《确定混凝土构件火灾耐久性指南》（美国混凝土协会报告单行本）就采纳了其中一些新概念。

美国混凝土协会2/6委员会主席

目 录

- 一、楼板和屋顶系统火灾试验时真实热约束的模拟…… (1)
- 二、预应力混凝土构件对火灾的反应…… (30)
- 三、火灾烈度：防火安全设计的基础…… (52)
- 四、混凝土结构防火性能设计中有关材料的一些问题… (74)
- 五、维也纳新“帝国大桥”的防火工程设计…… (90)
- 六、工业厂房的结构防火设计…… (105)
- 七、火灾后普通混凝土和轻质混凝土的剥落…… (117)
- 八、根据热平衡计算估计火隔间温度的方法…… (127)
- 九、新浇注混凝土火灾后破坏极少吗？ …… (137)
- 十、评价火灾破坏混凝土结构的经验…… (145)
- 十一、地下商场的火灾及灾后修复设计…… (151)
- 十二、热致发光：各种混凝土残余强度的比较…… (158)

楼板和屋顶系统火灾试验时真实热约束的模拟

T. D. Lin 等

摘要 本报告叙述了包括五个阶段的试验计划。第 I 阶段试验中，试验了 13 个小尺寸试样，其中包括平板、带边梁的平板和肋形板。测定了这些试样在加热期间的水平和垂直温度分布、膨胀和挠度。

通过第 II 和第 III 阶段试验，提出了热流计算和应力分析的计算机程序。进行了 6 块 14 × 18 呎楼板的火灾试验。试验中，控制板在两个方向的膨胀，使之符合计算的时间——膨胀关系曲线。

第 IV 和第 V 阶段进行了另 4 块试样（尺寸为 14 × 18 呎）的火灾试验，来验证建立在固定框架炉中用可压缩材料制作的垫块模拟真实约束的方法所获得的研究结果。把用压缩垫块量测到的膨胀和约束力值与液压可控约束框架炉中对照试样的量测值进行比较，其结果相当吻合，说明在楼板火灾试验中可以采用固定框架炉来模拟真实热约束。

*

*

*

背 景

热膨胀的约束程度对楼板和屋顶的火灾试验结果有很大影响。建筑物的楼板和屋顶很少能完全摆脱热约束，因此尽管约束量为未知数，但大多数火灾试验都在有约束的条件下进行的。为了得出反映结构试样的真实性能，必须知道约束力并在火灾试验中加以控制。需要有一个简单的方法在固定框架炉内实现上述目的。

为建立这种方法，拟订了一项研究计划。这一题为《楼板和屋顶系统火灾试验

时真实热约束的模拟》的研究计划分成五个阶段：

阶段 I：小型试样在隔离火灾下的试验研究；

阶段 II：对阶段 I 的试验结果进行计算机模拟的分析研究；

阶段 III：用阶段 II 计算机模拟确定的程序约束进行足尺楼板试件的火灾试验。

阶段 IV：为建立用固定约束框架模拟真实约束的方法而进行分析研究；

阶段 V：为验证阶段 IV 的研究结果而进行的固定约束框架足尺楼板试件的火灾

试验。表 1 列出了五个阶段计划的主要任务。

表 1 五个阶段计划的主要任务

阶段	分析研究	计算机程序	试 样	火 灾 试验次数	报 告
I			13 块板, 尺寸为 3 × 3 呎、6 × 6 呎、 9 × 9 呎	13	两个半年度报告
II	a. 一维热流 b. 平板中的应力	a. 板中热流 b. 平面应力			第 I 和第 II 阶段 最终报告
III	a. 二维热流 b. 肋形板中的 应力	a. 肋形板中的热流 b. 包括肋在内的平 面应力 c. 板承受弯矩的能 力	6 块板 (2 块平板、 2 块井式板、2 块肋 形板) 尺寸为 13' 10 1/4" × 17' 9"	6	三个阶段报告
IV, V	压缩性材料的试验	试验期间的约束力	4 块板 (2 块平板、 2 块井式板、1 块肋 形板) 尺寸为 13' 10 1/4" × 17' 9"	4	试验计划的最终报告

第 I 阶段

第 I 阶段的任务是：

1. 量测板试样在隔离火灾作用下的膨胀；
2. 研究混凝土种类、配筋量、总面积与加热面积的比值、偏心加热以及圈梁、柱子和结构构件的附加约束等变数对膨胀和位移的影响。

在第 I 阶段中，设计、制作和试验了 13 块平面尺寸为 3 × 3 呎、6 × 6 呎或 9 × 9 呎的板试样，包括有边梁和无边梁两种平板以及肋形板。表 2 列出了试样和

火灾试验的数据。所有试样按照 A S T M E 1 1 9 [1] 进行 4 小时 3 分钟火灾试验。

一、试验程序

图 1 示出火灾试验中量测平板膨胀所用的装置。测量了平板受热部分两个水平方向的膨胀。采用望远镜观测配有滑动千

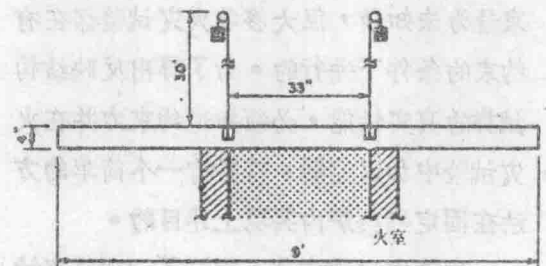






图 1 测量板膨胀的装置

表2 第I阶段试验

试样编号	板的型式	尺寸 (呎)	含钢率 ^(a) (%)	火灾区尺寸 (呎)	火灾区位置	有无边梁	有无附加支承	混凝土种类
1011	4"厚实心板	9×9	0.92	3×3	中心(b)	无	无	普通
1012	"	"	"	"	"	有	无	"
1013	"	"	"	"	"	有	无	轻质
1014	"	"	0.46	"	"	无	无	普通
1015	"	"	0.92	2×2	"	无	无	"
1016	肋形板(g)	"	1.58	3×3	"	无	无	"
1017	"	3×3	1.58	"	中心(c)	无	无	"
1018	4"厚实心板	6×6	0.92	"	"(b)	无	无	"
1019	"	9×9	"	"	边界(d)	无	无	"
1020	"	"	"	"	中心(b)	有	有	"
1021	"	3×3	"	"	中心(c)	无	无	"
1022	"	9×9	"	"	角部(e)	无	无	"
1023	"	"	"	"	中心(b)	无	有	"

(a) 试样钢筋体积占总体积的比率。

(b)  (c)  (d)  (e) 

(g) 面板厚1寸，肋截面2寸×4寸

分尺的亮度计，亮度计安装在垂直的金属丝上。图2示出试验中测量膨胀所用的设备仪表(见第29页)。

二、试验结果摘要

对13次火灾试验结果进行了分析，以确定火灾试验中下列因素对平板膨胀的影响：

1. 配筋数量；
2. 加热面的位置；
3. 总面积与加热面积的比值；
4. 试样的几何形状；
5. 边梁；
6. 骨料；
7. 平面外的荷载。

图3~1-1示出了分析的结果。

根据火灾试验的结果，可以作出下列结论：

1. 双倍配筋对于试样的约束只有很小的影响。双倍配筋板的膨胀值几乎与一般配筋板的值相等(图3)。

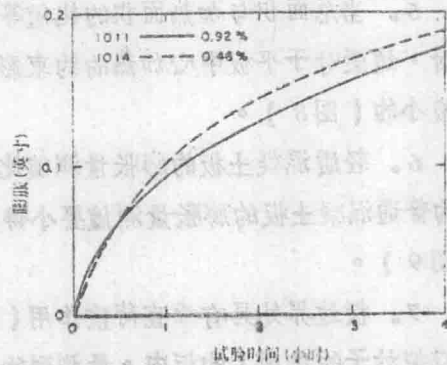


图3 配筋率对膨胀的影响

2. 加热区的位置对膨胀和约束力的影响很大。中心加热试样产生的膨胀比沿边加热或角部加热试样的膨胀要小得多 (图4)。

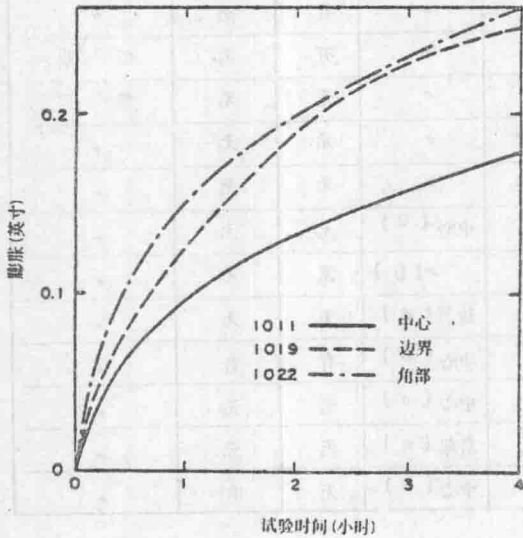


图4 加热区位置对膨胀的影响

3. 总面积与加热面积的比值对实测膨胀值有影响。这个比值较小时, 水平膨胀值较大 (图5和图6)。

4. 总面积与加热面积的比值相同时, 肋形板产生的膨胀比平板的膨胀要大得多 (图7)。

5. 当总面积与加热面积的比值等于9时, 边梁对于平板中心加热的约束影响是极小的 (图8)。

6. 轻质混凝土板的膨胀量测值比对照的普通混凝土板的膨胀量测值要小得多 (图9)。

7. 板边界处具有垂直荷重作用 (用以模拟柱子的作用) 的板中, 量测到的水平位移比没有平面外荷重的对照板的水平

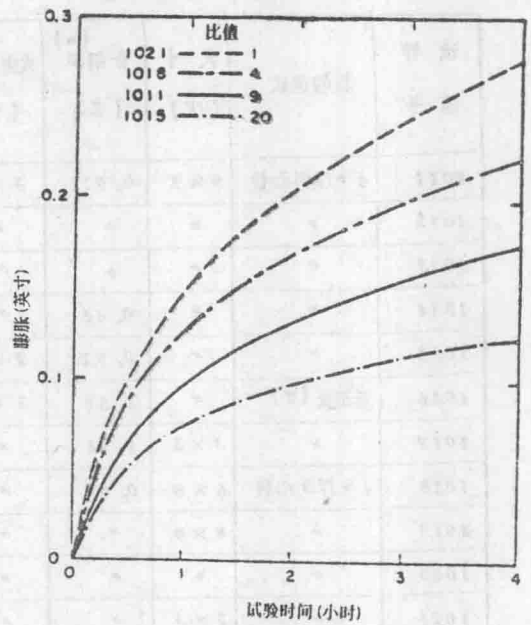


图5 总面积与加热面积的比值对膨胀的影响(平板)

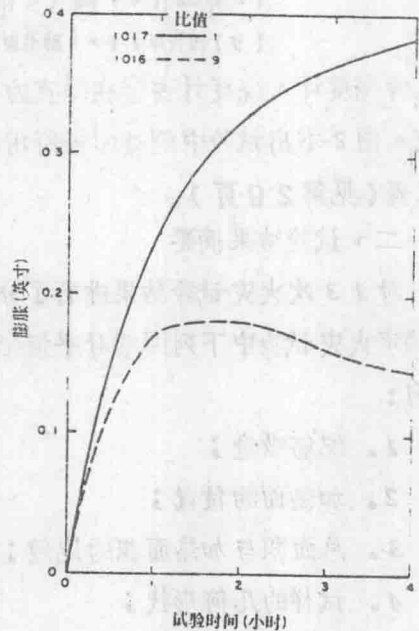


图6 总面积与加热面积的比值对膨胀的影响(肋形板)

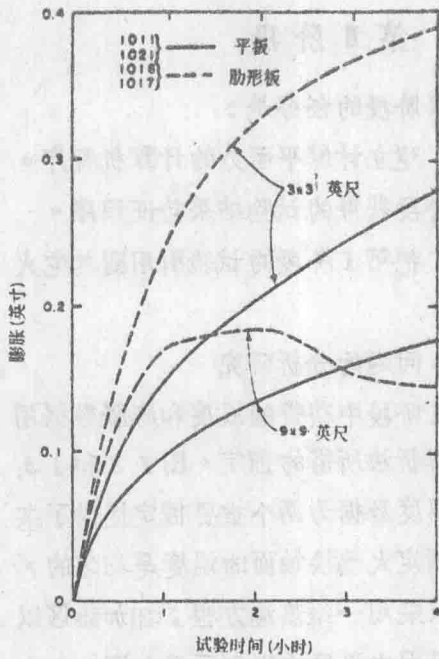


图7 试样几何形状对膨胀的影响

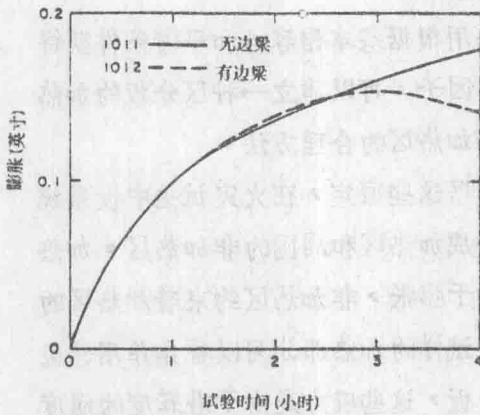


图8 边梁对膨胀的影响

膨胀要大一些(图10、11)。

8. 温度测量表明,在任何水平面内,整个加热区的温度分布是均匀的。在试样的非火焰直接作用区几乎没有发生温度的升高。

9. 大多数试验中,几乎所有的垂直变形都发生在试验的第一个小时。

10. 试验开始后大约5分钟,测出了径向裂缝。试验开始后的不同时间内,在边界加热和角部加热的试样以及作用有平面外边界力的试样中,在加热区的四周量测到环向裂缝。

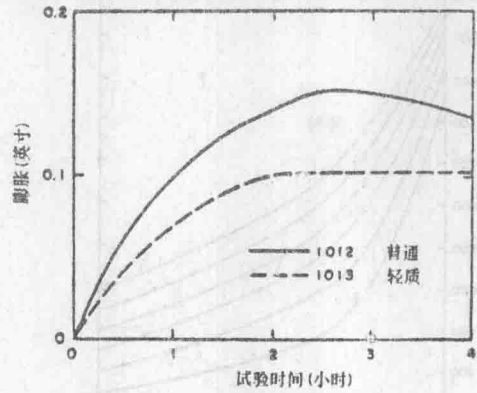


图9 骨料对膨胀的影响

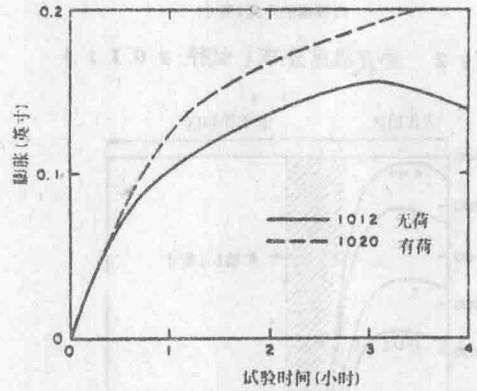


图10 平面外荷重对膨胀的影响(带边梁平板)

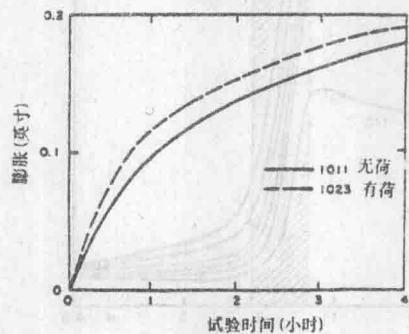


图11 平面外荷重对膨胀的影响(无边梁平板)

三、温度分布

为了建立计算平面力的解析法，除了膨胀数据外，还需要温度的数据。根据第 I 阶段试验获得的资料，推导出温度的分布，温度分布的例子示于图 1 2 和 1 3。

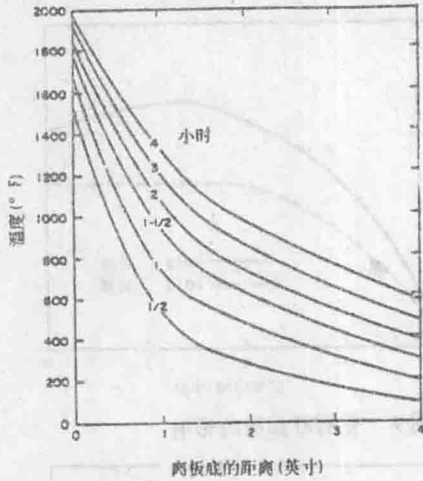


图 1 2 垂直温度分布 (试样 1 0 1 1)

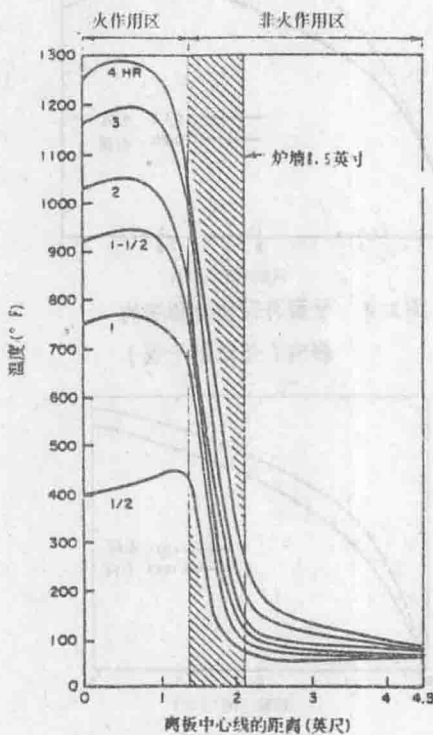


图 1 3 离板底面 $\frac{1}{8}$ 吋处的水平温度分布 (试样 1 0 1 1)

第 II 阶段

第 II 阶段的任务是：

1. 建立计算平面力的计算机程序。用第 I 阶段获得的试验结果验证程序。
2. 把第 I 阶段的试验引用到其它火灾情况。

一、问题的分析研究

第 I 阶段中获得的温度和膨胀数据用于验证解析法所需的假定。图 1 2 和 1 3 所示的温度数据为两个重要假定提供了基础：(1)假定火焰接触面的温度是均匀的，因此可以采用一维热流方程；(2)加热区以外的水平面内温度的剧烈下降(图 1 3)说明在整个试验中加热区附近的单元可看作保持室温。

采用根据基本相容性和平衡条件获得的比例因子，可以建立一种区分板的加热区和非加热区的合理方法。

根据这些假定，在火灾试验中板系统可以分成加热区和周围的非加热区。加热区趋向于膨胀，非加热区约束着加热区的膨胀。试样的加热部分可以看作作用着应力的平板，这些应力是由于沿厚度的温度梯度和平面内的压力引起的。非加热的约束区可以看作由平面力组成的应力单元，这种应力是影响板在火灾时持久性的主要因素。

承受火焰作用的钢筋混凝土板的结构特性可作如下描述：

- (1)在一定的荷载和温度条件下，混凝土和钢筋弹性受压和受拉。

(2)超出此条件以后，混凝土和钢筋中产生塑性变形，同时混凝土受拉而开裂。开裂的混凝土可以看作是连续体，但只能抵抗平行于裂缝方向的垂直应力。表3概要地说明了结构的性能(表见第10页)。

有限单元法[2]已被用来计算由于温度梯度引起的平面应力。开裂和不开裂单元的材料刚度表示式已发展成问题的弹塑性解法的矩阵方程。计算中需要的钢材和混凝土的热工性能和材料性能取自文献[3]。

二、计算机程序的建立

用分析研究中得到的方程建立了计算机程序。受到隔离火灾作用的钢筋混凝土板的弹塑性解所用的程序可用 Fortran语言写出。它包括一个主程序，12个子程序和3个连接程序，连接程序形成温度数据，并将其储存在磁盘文件存储器中。上述计算机程序是在IBM 1130计算系统中导出的，这个系统是由1131个20型中央处理部件(内磁盘机和16K磁心存储容量)、1442个卡片阅读穿孔机和1132个宽行打印机组成的。

整个程序的结构如图14所示。主程序和子程序的简要说明见表4(见第10页)。

输出包括输入数据的四波打印、单元编号顺序、节点位移(每个节点两个)、单元应力、裂缝方向和约束力。试验中，用一分钟时间打出输出数据。在试验开始后的第一个小时，打印的时间间隔为10分钟。一小时以后到第四小时试验结束期间，打印的时间间隔为30分钟。

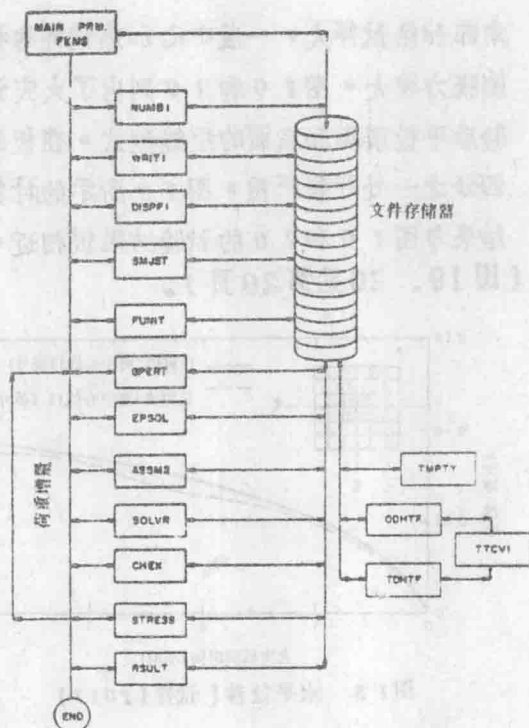


图14 计算机程序总框图

三、结果比较

对第I阶段13个试样中的8个试样进行了位移、应力、约束力和裂缝的计算。计算中采用了由许多研究人员求得的混凝土特征值，这种混凝土与火灾试验中所用的混凝土相同。对于中心区加热的所有试样，加热区边界中心处的水平位移计算值与量测值相吻合。对于边界和角部加热区，计算位移比量测位移小10~20%。计算约束力与水平位移一致。径向裂缝开展的计算值与量测值相吻合。

图15~18列出了平板的水平膨胀、膨胀曲线、约束力和裂缝型式的计算值。

中心加热试样的计算约束力比边界和

角部加热试样大，一般中心加热试样的抗膨胀力较大。图19和20列出了火灾试验后平板顶面和底面的裂缝型式。在板的四分之一处开裂严重，图18所示的计算结果与图19和20的试验结果很相近。(图19、20见第29页)。

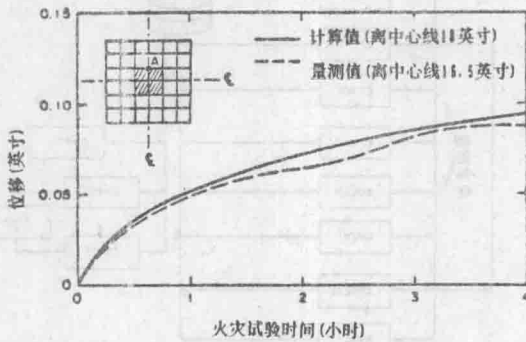


图15 水平位移(试样1011)

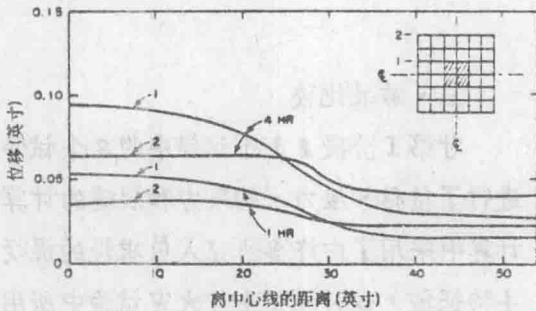


图16 计算水平位移(试样1011)

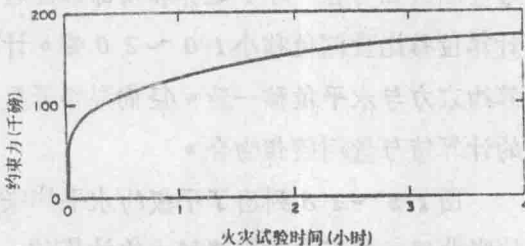


图17 计算水平约束力(试样1011)

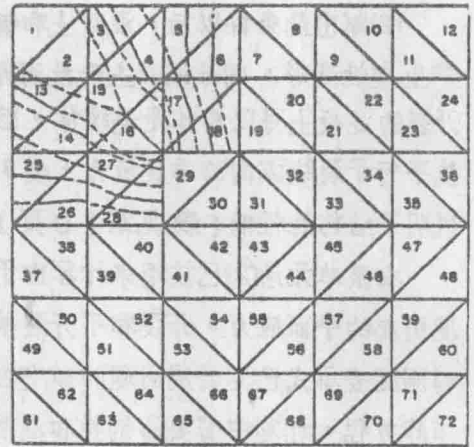


图18 10—240分钟的裂缝计算图形
(试样1011)

第Ⅲ阶段

第Ⅲ阶段的任务是：

1. 对于直接受火作用的典型的结构内跨和外跨按允许膨胀值或约束力进行足尺试验的设计。

2. 进行平板和肋形楼板的火灾足尺试验，用模拟真实结构的性能控制膨胀。试验中，时间——膨胀关系曲线是基于第Ⅱ阶段计算机程序计算得到的膨胀值。

3. 量测在程序膨胀下的约束力，与计算约束力相比较。

本阶段的主要工作包括6块14×18呎楼板的设计、制作和火灾试验。试验板包括2块平板、2块井式板和2块肋形板，平面尺寸均为14×18呎。每种楼板的试验是模拟火灾中混凝土多跨连续楼板系统的内跨板或外跨板的性状。

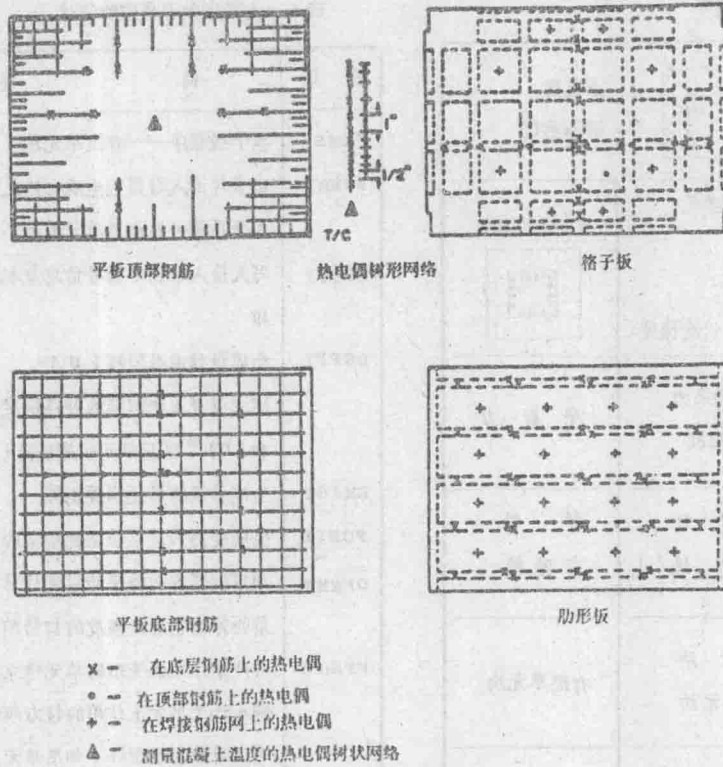


图 2-1 热电偶位置 (T/C)

一、试样说明

试样的平面尺寸为 13 呎 10 $\frac{1}{2}$ 吋 × 17 呎 9 吋，平板厚度为 7 吋，有 7 吋 (宽) × 14 吋 (高) 的边梁与板整体浇注。

井式板总高度为 11 $\frac{1}{2}$ 吋，有 3 $\frac{1}{2}$ 吋厚的板和 8 吋高的小梁组成。小梁底部宽度 6 吋，边斜度为 1 : 8。大部分小梁的中心距为 3 呎。为了获得所需的小梁外形，采用三种圆顶，包括 12 个 30 × 30 吋，6 个 20 × 30 吋和 8 个 14 $\frac{1}{2}$ × 30 吋的圆顶。另外，在每个井式板试样的周界上使用局部圆顶。圆顶的高度均为 8 吋。

肋形板试样为 3 $\frac{1}{2}$ 吋厚的平板，小梁在长度方向跨设，中心距为 3.5 呎，在平板下小梁净高 10 吋，肋形板的总高为

13 $\frac{1}{2}$ 吋。小梁底宽为 5 吋，边斜度为 1 : 12。宽度 6 吋的横梁在试样端部整体浇注，以便于运输。

1. 配筋 所有配筋均为 ASTM A615 级 60，最小屈服极限为 60,000 磅/吋²。一般采用 4 根主筋。底部、边部和顶部钢筋的混凝土保护层最小厚度为 $\frac{3}{4}$ 吋，井式板和肋形板试样的面板中采用焊接钢筋网，网格 6 × 6 吋，网筋直径 6 毫米。

平板中，长方向上柱列线上顶部钢筋的中心距为 10 吋，其余顶部钢筋的中心距为 16 吋；短方向上柱列线上顶部钢筋的中心距为 17 吋，其余顶部钢筋的中心距为 26 吋。平板底部钢筋在两个方向上的中心距均为 14 吋。

表3 结构性能概要

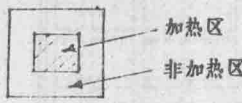
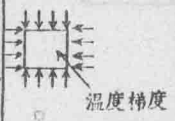

完整单元		
结构和约束力的分解	<p>火作用单元</p> 	<p>非火作用单元</p> 
荷重型式	平面约束力 温度梯度	平面力
问题特性	热弹性 热塑性	弹性 非弹性
求解方法	解析法 有限单元法	有限单元法
应力分布	底部—压应力 顶部—拉应力	底部—拉应力 顶部—拉应力

表4 主程序和子程序的简述

项目	简述
FEMS	主干线程序——有限单元法
NUMBI	由卡片读入数据,生成有限网格和节点编号系统,并识别单元类型
WRITI	写入输入数据、编号信息及标题的回波打印
DSPFI	生成位移函数矩阵(B)
	建立混凝土和钢筋的材料刚度矩阵(D) ⁰ 和(D) ¹ 以及单元刚度矩阵(k)
SMJST	生成肋梁的单元刚度矩阵
FUNIT	生成受热构件单位温度增量的力向量
OPERT	根据板厚方向的平均温度计算混凝土和钢筋的弹性模量及强度的初始值百分率
FPSOL	对产生弹性变形的单元建立单元刚度矩阵。如果单元上作用的拉力超过600磅/吋 ² ,可以看作出现裂缝;如果单元上作用的压力超过0.4 f' _c ,则混凝土产生塑性变形
ASSM2	构成结构刚度矩阵(K),把半带矩阵分量储存到矩阵中,同时在柱向量中形成节点荷重矩阵
SoLVR	用平方根法解线性方程组
CHECK	由得到的位移向量计算节点力,并检验平衡条件
StRESS	由位移向量计算值计算应力和应变
RSULT	写入计算结果:节点位移、单元应力、裂缝方向以及约束力
TMPTY	生成混凝土和钢筋的材料特性——温度曲线,并存入磁盘文件存储器
ODHTF	计算标准火灾下板内温度分析
TDHTF	计算“T”形断面内温度分布
TTCVI	按ASTM E119生成温度——时间曲线

表5 混凝土数据

项目	配料(磅/码 ³)		
	平板	井式板	肋形板
水泥(I型)	517		
水	252(a)		
砂	1345		
砾石(最大粒径1吋)	1840		
加气剂	6液盎司		
平均坍落度(吋)	4.9	4.4	6.0
平均空气含量(%)	3.9	5.2	6.8
平均湿容重(磅/呎 ³)	149.2	146.6	143.7
28天平均抗压强度(磅/吋 ²)	4435	4283	3920

(a) 以饱和面干骨料为准

表6 骨料的物理性能

项 目	指 标
砂的比重	2.67
砾石的比重	2.68
砂的含水率(%)	5.0
砾石的饱和面干容重(磅/呎 ³)	102.4
砂的饱和面干容重(磅/呎 ³)	109.5
砾石的含水率(%)	0.5
细骨料的细度模数	2.7
粗骨料的细度模数	6.97

井式板中每个小梁都配有两根直筋和一根弯起的4号钢筋束。横梁中的钢筋支承在纵向钢筋上，净保护层厚度为1½吋。焊接钢筋网(网格6×6吋，网筋直径6毫米)支承在3号钢筋上，从板顶面算起，净保护层厚度为¾吋。

肋形板试样的每根肋都有两根纵向钢筋，其中一根是5号直筋，另一根是4号弯起钢筋束。这些试样设有同样的焊接钢筋网，从板顶面算起，净保护层厚度为¾吋。

2. 热电偶 每个试样包含有若干铬铝-铝镍热电偶，用以量测主筋的温度。所有热电偶都配置在钢筋半高处。在井式板和肋形板的焊接钢筋网上也配置有热电偶。平板试样包含有一个热电偶树状网格，用以测量混凝土的垂直温度分布。热电偶的位置如图2-1所示。

所有试样包含有Monfore型套管(4)，用以量测混凝土试样的相对湿度。

3. 混凝土 所有试样都采用预拌混凝土，对每立方码的混凝土试验测定坍落度、容重、及空气含量。配料数量、塑性混凝土的性能和强度数据如表5所示。

混凝土采用伊利诺斯州的碳酸盐砂和砾石，粗骨料最大尺寸为1吋。骨料的物理性能如表6所示。

4. 试样的制作和处理 平板的模板采用涂聚酯的胶合板，它放置在一个重金属框架内。所有板中都采用金属架，使钢筋定位并确保钢筋下部保护层的厚度。如前所述，制作井式板时采用三种金属圆顶。对于肋形模板，采用30吋(宽)×10吋(厚)的金属底壳做模板，其余的用胶合板。

用高架底卸料斗浇注混凝土，然后用内部振捣器捣实。用刮板使上表面保持平整。试件用镁质整平器修整。

模板内的混凝土在湿麻袋下养护7天，然后试样从浇注台上提起，拆除模板。试样放置在温度为70—75°F、相对湿度30—40%的空气中，使之干燥到试验要求的合适水分。为了确定抗压强度，在板成型的同时制作6吋(直径)×12吋(高)的混凝土圆柱体。

二、计算机程序

为了进行第Ⅲ阶段的火灾试验，必须建立三个主要方面的计算机程序：(1)计算肋形板的温度分布；(2)分析肋形板的应力；(3)建立使用Hewlett Packard 910 B计算机的程序。为了求出温度分布，对在另一种情况下用非线性热态特征(5)建立的二维热流的计算机程序进行了修正。图2-2(a)是火作用2小时肋板内的

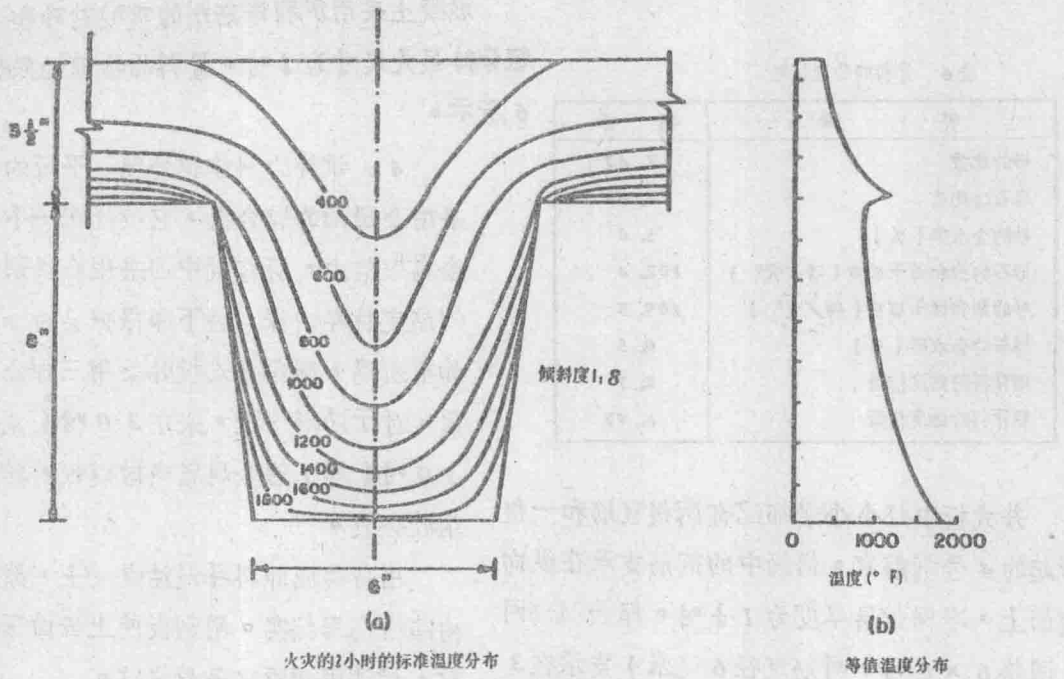


图2 2 实际的和等值的温度分布

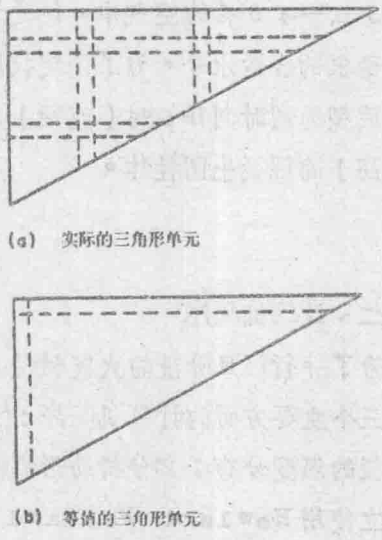


图2 3 肋体系实际的和等值的三角形单元

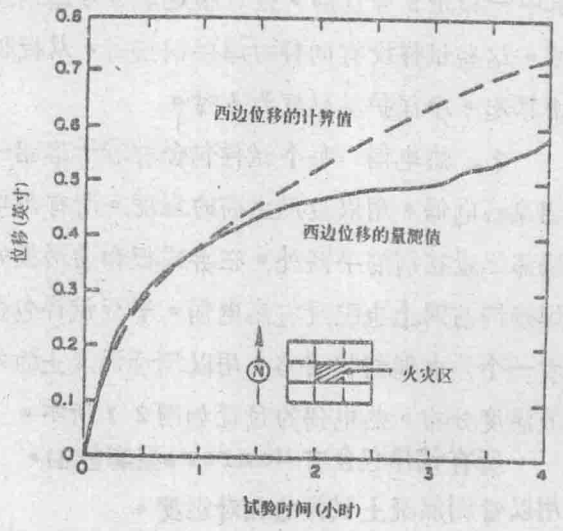


图2 4 位移的比较(内跨平板试样S-55)