

# 建築防火工学

野口貴文

# 耐火設計

## 耐火設計の考え方

### ■ 架構部材の火災時の挙動

火災による架構部材の加熱

→ 温度上昇

→ 熱膨張

→ 熱応力の発生、構成材料の劣化

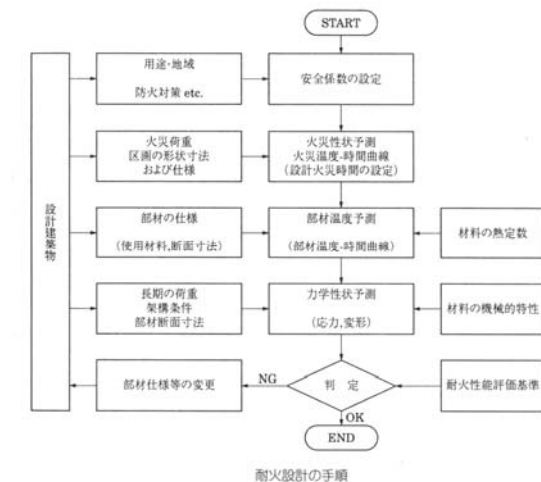
→ 耐力低下

→ 破壊・倒壊

→ 避難・消防活動の低下、周辺建物への加害

## 耐火設計の考え方

### ■ 架構部材の耐火設計の手順



# 火災荷重

## ■ 火災の温度・継続時間の支配要因

- 可燃物の量
  - 火災荷重 = 可燃物の量 / 火災室の床面積
- 開口部の大きさ

## ■ 可燃物

- 固定可燃物(建築時に持ち込む可燃物)
  - 床・壁・天井の下地、内装材料、建具・造りつけ家具
- 積載可燃物(建築後に持ち込む可燃物)
  - 家具・書籍・衣類・寝具

# 火災荷重

## ■ 等価可燃物量 (= 火災荷重)

- 可燃物と同一発熱量の木材重量
- $q = \sum G_i \cdot H_i / (H_0 \cdot A) = \sum Q_i / (18.9 \cdot A)$ 
  - $q$ : 火災荷重
  - $G_i$ : 可燃物の重量
  - $H_i$ : 可燃物の単位発熱量
  - $H_0$ : 木材の単位発熱量
  - $A$ : 火災区画の床面積
  - $\sum Q_i$ : 火災区画内可燃物の全発熱量

# 火災荷重

## ■ 事務所建築の固定可燃物量

建築名称 可燃物量 (kg/m<sup>2</sup>)

A	19.0
B	15.5
C	19.0
D	15.0
E	25.5
F	20.0
G	13.0
H	16.5
I	24.0
J	23.0
K	14.0
L	14.2

## ■ 用途別積載可燃物量

建物用途	室用途	積載可燃物量 (kg/m <sup>2</sup> )		
		範囲	平均値	標準偏差
事務所	事務系事務室	14.4~34.9	25.7	6.5
	会議室	2.5~15.5	7.8	4.6
	資料室	66.8~185.8	115.8	38.3
倉庫	倉庫	209.5~369.0	285.2	80.1
	ロビー	4.2~19.4	12.3	6.6
	客室	7.9~13.3	10.5	1.5
ホテル	宴会室	2.9~6.8	4.4	1.5
	ロビー		2.8	
倉庫	紙倉庫	844.6~1261.0	1061.4	142.6
	デパート	売場	9.3~31.0	19.2

# 火災荷重

室の種類	発熱量 (MJ/m <sup>2</sup> )
住宅の居室	720
住宅以外の建築物における寝室又は病室	240
事務室その他これに類するもの	560
会議室その他これに類するもの	160
教室	400
体育館のアリーナその他これに類するもの	80
博物館又は美術館の展示室その他これに類するもの	240
百貨店の売り場又は物販販売業を営む店舗その他これに類するもの	960
家具又は書籍の売場その他これに類するもの	480
その他の部分	480
飲食店その他の飲食室	240
簡易な食堂	480
その他の飲食室	480

# 火災進展

## ■ 防火区画内の火災の進展

### - 成長期

- 空間内にある可燃物に何らかの原因で着火すると、可燃物があれば室内の酸素を消費しながら、燃焼範囲は徐々に拡大
  - 天井面下のガス温度500℃
  - 窓ガラスの破損による空気の流入
  - 生成可燃ガスへの着火
  - 未燃可燃物の一斉燃焼

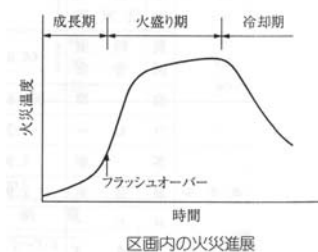
### - フラッシュオーバー(急激な温度上昇)

### - 火盛り期

- 建物の耐火性に大きく影響
- 火災を発生した空間内に留めて延焼拡大を防止する区画部材に対する対策と、柱や梁などの架構部材が火災時の高温加熱を受けても崩壊せず荷重を支持できるようにする対策が必要
  - 緩やかな温度上昇
  - 最高温度(可燃物の燃え尽き)

### - 冷却期

- 温度の急速な低下



# 火災進展と対策

## ■ 実際の火災性状

- 室形状や開口条件、空間周壁の熱的性質、可燃物の種類・量・配置などの要因で、異なる時間-温度関係で進展する
- 「成長期」「火盛り期」「減衰期」といった基本的な過程は同一

## ■ 火盛り期以降の火災

- 適切な対策が施されなければ、区画が破壊されたり、非加熱側温度が上昇して隣接区画へ火災が拡大したり、架構が部分的に崩壊したり、全体崩壊に至ったりするおそれあり

# 火災温度と火災継続時間

## ■ 火盛り期の火災温度と火災継続時間の予測

### - 基本仮定

- 防火区画内の火災温度は均一
- 開口部からの流入空気量による支配
- 可燃物の燃焼速度は一定

$$R=(5\sim 6)A_B\sqrt{H}$$

R: 木材換算燃焼速度(kg/min)

A<sub>B</sub>: 開口部面積(m<sup>2</sup>)

H: 開口部高さ(m)

### - 防火区画内での微小時間当たりの熱収支

$$Q_H=Q_W+Q_B+Q_L+Q_R$$

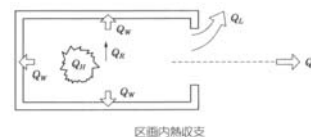
Q<sub>H</sub>: 防火区画内の発熱量

Q<sub>W</sub>: 床・壁・天井など周壁への吸収熱量

Q<sub>B</sub>: 開口部から外へ放射される熱量

Q<sub>L</sub>: 開口部から噴出する火炎が持ち去る熱量

Q<sub>R</sub>: 防火区画内ガスの温度を上昇させる熱量



# 火災温度と火災継続時間

## ■ 火盛り期の火災温度と火災継続時間の予測

### - 火災継続時間t<sub>f</sub>

$$t_f=W/R$$

W: 防火区画内の木材換算可燃物量

### - 燃焼温度が大きい

- 火災継続時間は短く、火災温度は高くなる

### - 防火区画内の全表面積が大きい

- 周壁への吸収熱量が増して火災温度は低くなる

### - 火災温度の支配(温度因子)

$$A_B\sqrt{H}/A_T$$

A<sub>B</sub>: 開口面積

H: 開口高さ

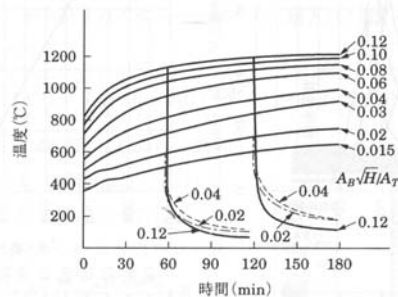
A<sub>T</sub>: 防火区画内の全表面積

### - 等価火災継続時間

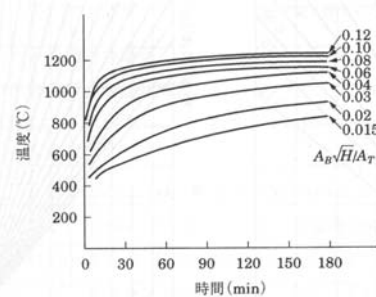
- 火災温度時間曲線を耐火試験に用いられる標準的な加熱温度曲線と等価にした場合の火災の継続時間

# 火災温度と火災継続時間

## ■ 種々の温度因子に基づく火災温度－時間曲線



種々の温度因子に基づく火災温度－時間曲線 ( $\lambda=1.0, C=0.3, \rho=2400$ )



種々の温度因子に基づく火災温度－時間曲線 ( $\lambda=0.5, C=0.24, \rho=1700$ )

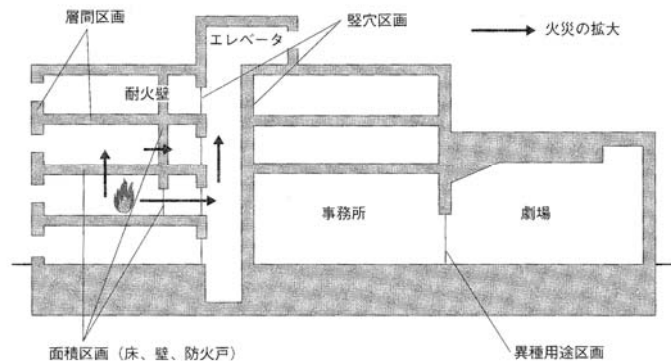
# 区画部材の役割

## ■ 防火区画の役割

- 危険回避のための防火区画
  - 建築物の用途や規模、構造などにに基づき配置する。
  - 特に火気使用室等の出火頻度の高い部分や多量の可燃物を収容する部分等を区画すれば有効になる。
- 避難経路を守るための防火区画
  - 避難経路に直接面する部分の区画は、直接、安全な避難行動に影響する。
- 消防活動支援のための防火区画
  - 消防隊による救助・消火活動の拠点を構成し、安全な活動を可能にする。

# 区画部材の役割

## ■ 防火区画の種類



# 区画部材の役割

## ■ 防火区画の分類

- 層間区画
  - 上下の層間の延焼拡大を防止するための区画
  - 床、外壁スパンデル、ひさし、バルコニー
  - 開口部を防火設備とする対策
  - スパンデル裏打ち材(耐火材)と床の間や配管等の区画貫通部まわりも充填剤で埋め、火炎の通り道とならないようにする
- 縦穴区画
  - 垂直方向に連続した空間を他の部分と区画する
    - 階段室、エレベーターシャフト、エスカレーター、設備シャフト、吹き抜け空間
  - 人が垂直方向に移動する空間：建築物の被害防止、避難上重要
  - 階段室、非常用エレベーターの昇降路及び乗降ロビー：消防隊の救助・消火活動の拠点
    - 火炎の侵入防止、煙の侵入防止上、重要

## 区画部材の役割

### ■ 防火区画の分類

#### － 面積区画

- 一定の床面積ごとに設ける区画
- 耐火建築物の場合、面積区画の基本は1,500㎡
- スプリンクラー設備等の自動消火設備を設置した場合は割増
- 11階以上の高層部分や地下街については、小さく制限

#### － 異種用途区画

- 使われ方や管理形態が異なる用途が混在する場合に設ける
- 例：劇場と事務室の間に異種用途区画を設ける
- 防火上、独立の建物とし、火災時に影響し合わないようにする

## 架構部材の役割

### ■ 架構部材の役割

#### － 架構部材(柱・梁など)が火災時に耐えない場合

- 建物が部分的に、或いは、全体が倒壊
- 物的損害、人命の危険

#### － 架構部材と区画部材

- 表裏一体の関係
- 架構部材が損傷を受けると、架構部材に支持された区画部材も過大に変形し、損傷を受け、本来の延焼防止機能を喪失
- 火災時において、架構部材が倒壊しないよう、適切な対策が必要

## 架構部材の役割

### ■ 耐火性能の定義

#### － 非損傷性

- 火災時に構造耐力上の支障となるような変形、溶融、亀裂などの損傷や、過剰な温度上昇による耐力低下を生じない性能であり、荷重支持部分が火災時に必要な耐力を保持する性能

#### － 遮炎性

- いずれかの面から火災を受けたときに反対側の面に火炎を噴出するような亀裂等を生じない性能。建築基準法においては、壁、屋根などの外気に面する区画部材や開口部に設ける防火設備(防火戸、ドレンチャーなど)について一定範囲の要求がある

#### － 遮熱性

- 壁、床などの区画部材について、いずれかの面から加熱を受けたとき、それ以外の面の温度が上昇しにくい性能

## 架構部材の役割

### ■ 主要構造部に必要な性能

表10.1 主要構造部に必要な性能<sup>1)</sup>

必要な性能	主要構造部の部分						
	外壁	間仕切壁	柱	はり	床	階段	屋根
屋内火災に対する非損傷性	(○)	(○)	○	○	○	○	○
屋内火災に対する遮炎性	○						○
屋内火災に対する遮熱性		○			○		
屋外火災に対する非損傷性	(○)						
屋外火災に対する遮熱性	○						

○：必要、(○)：耐力壁のみ必要、無印：必ずしも必要でない

耐火構造のレベル：耐火構造、準耐火構造、防火構造、準防火構造

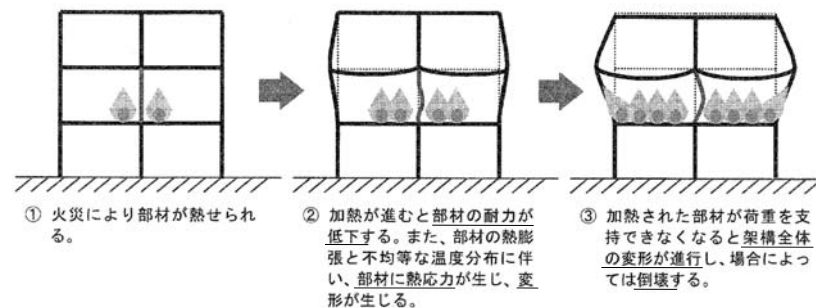
➤耐火構造：火災加熱終了後においても、耐火性能を確保する必要がある

➤準耐火構造、防火構造、準防火構造：加熱開始後一定時間までの性能が要求される

# 構造物の火災時の性状

- ① 構造物が火災時に加熱を受けると、構成材料の機械的特性は、温度上昇と共に低下する。
  - ② また、部材は熱膨張による材長変化と断面内の不均等温度分布により湾曲を生じようとするが、部材の端部が拘束されているため、部材内部に熱応力が発生する。
  - ③ 火災時の部材には、常温時の存在応力度に熱応力度が加算して作用することになり、この火災時の存在応力度と構成材料の高温時の機械的性質が構造物の耐火性を決定する。
- ✓ さらに、RC造では、爆裂現象が耐火性に大きな影響を及ぼすことがある。

# 構造物の火災時の性状



# 建築物の耐火設計

## ■ 耐火建築物の定義

－ 建築基準法第2条第9号の2

九の二 耐火建築物 次に掲げる基準に適合する建築物をいう。

イ その主要構造部が(1)又は(2)のいずれかに該当すること。

(1) 耐火構造であること。

(2) 次に掲げる性能(外壁以外の主要構造部にあつては、(i)に掲げる性能に限る。)に関して政令で定める技術的基準に適合するものであること。

(i) 当該建築物の構造、建築設備及び用途に応じて屋内において発生が予測される火災による火熱に当該火災が終了するまで耐えること。

(ii) 当該建築物の周囲において発生する通常の火災による火熱に当該火災が終了するまで耐えること。

ロ その外壁の開口部で延焼のおそれのある部分に、防火戸その他の政令で定める防火設備(その構造が遮炎性能(通常の火災時における火炎を有効に遮るために防火設備に必要とされる性能をいう。)に関して政令で定める技術的基準に適合するもので、国土交通大臣が定めた構造方法を用いるもの又は国土交通大臣の認定を受けたものに限る。)を有すること。

➢イ(1)に相当する部分：仕様規定(ルートA)に対応

# 建築物の耐火設計

## ■ 階数・部位ごとの要求耐火時間

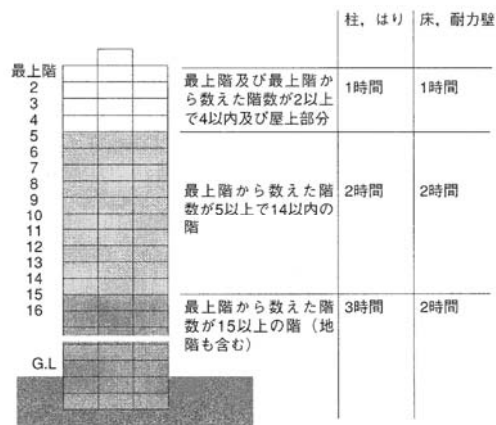
- － 建築基準法施行令第107条
- － 要求耐火時間(ルートA)

建築物の部分		非損傷性			遮炎性	遮炎性
		最上階・最上階から2～4の階	最上階から5～14の階	最上階から15以上の階		
壁	間仕切壁	耐力壁	1時間	2時間	2時間	—
		非耐力壁		—		
	外壁	耐力壁	1時間	2時間	2時間	1時間
		非耐力壁(延焼部分)		—		1時間
	非耐力壁(上記以外)		—		30分	30分
	柱	1時間	2時間	3時間	—	—
	床	1時間	2時間	2時間	1時間	—
	はり	1時間	2時間	3時間	—	—
	屋根		30分		—	30分
	階段		30分		—	—

# 建築物の耐火設計

## ■ 階数・部位ごとの要求耐火時間

- 建築基準法施行令第107条
- 非損傷性に関する要求耐火時間



# 建築物の耐火設計

## ■ 構造制限

- 建築物を耐火建築物や準耐火建築物に
  - 建築物の用途と規模
    - 不特定又は多数の人が利用したり、就寝に利用する建築物 (特殊建築物)

用途	耐火建築物とするもの		準耐火建築物とするもの
	左記の用途に供する階	左記の用途に供する部分の床面積の合計	左記の用途に供する部分の床面積の合計
劇場、映画館、演芸場	3階以上の階または主階が1階にないもの	客席床面積200㎡以上 (屋外観覧席の場合、1,000㎡以上)	—
観覧場、公会堂、集会場	3階以上の階	—	—
病院、診療所 (患者の収容施設があるものに限る)、ホテル、旅館、共同住宅、寄宿舎、下宿、児童福祉施設等	3階以上の階	—	2階に病室があるとき2階部分の床面積合計300㎡以上 (病院及び診療所については2階部分に患者の収容施設があるものに限る)
学校、体育館、博物館、美術館、図書館、スポーツ練習場等	3階以上の階	—	2,000㎡以上
百貨店、マーケット、展示場、カフェ、飲食店、物品販売業を営む店舗等	3階以上の階	3,000㎡以上	2階部分の床面積の合計500㎡以上
倉庫	—	200㎡以上 (3階以上の階に限る)	1,500㎡以上
自動車車庫、自動車修理工場、映画スタジオ等	3階以上の階	—	150㎡以上

# 建築物の耐火設計

## ■ 構造制限

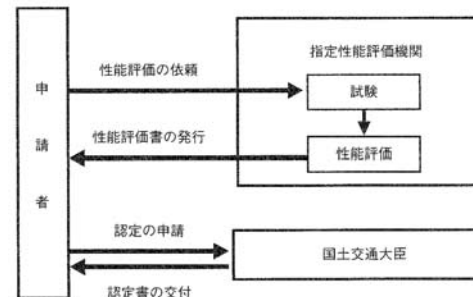
- 建築物を耐火建築物や準耐火建築物に
  - 立地と規模の条件
    - 防火地域・準防火地域

地域	耐火建築物とするもの	準耐火建築物とするもの	一定の技術的基準に適合する木造建築物等とするもの	適用除外
防火地域	階数が3以上、又は延べ面積が100㎡を超えるもの	左記以外のものすべて	—	注1)
準防火地域	地階を除く階数が4以上、又は延べ面積が1,500㎡を超えるもの	地階を除く階数が3、又は延べ面積が500㎡を超え1,500㎡以下のもの	左記以外で、地階を除く階数が3のもの	注2)

# 耐火試験

## ■ 耐火構造の大臣認定

- 通常の火災による火熱を再現した耐火試験に合格
- 性能評価
  - 国土交通大臣から指定を受けている指定性能評価機関が実施
- 大臣認定取得の流れ



## 耐火試験

- 耐火試験の時間
  - 耐火構造 (fire-resistive construction)
    - 通常の火災が終了するまで性能を満たす必要がある
    - 要求耐火時間の加熱終了後も一定時間、性能を確認する試験方法
    - 耐火構造の要求耐火時間: 30分、1時間、2時間、3時間 (部位・階数による)
  - 準耐火構造、防火構造、準防火構造
    - 加熱開始後一定時間までの性能が要求
    - 加熱終了とともに測定が終了する試験方法
    - 準耐火構造の要求耐火時間: 30分、45分、1時間 (部位・階数による)

## 耐火試験

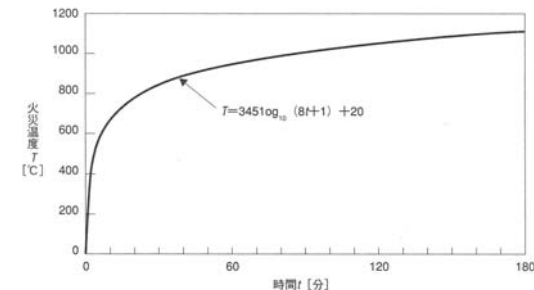
- 耐火試験の時間
  - 防火構造 (fire preventive construction)
    - 建築物の周囲において発生する通常の火災による延焼を抑制する外壁又は軒裏の構造
    - 防火構造の要求耐火時間: 30分
  - 準防火構造 (quasi-fire-resistive construction)
    - 建築物の周囲において発生する通常の火災による延焼に一定の効果を発揮する外壁の構造
    - 準防火構造の要求耐火時間: 20分

## 耐火試験

- 試験体
  - 個数
    - 原則として加熱面ごとに2体
  - 形状と大きさ
    - 原則として実際と同一
    - 壁 : 3×3 m 以上
    - 床、屋根: 4×3 m 以上
    - 柱 : 3 m 以上
    - 梁 : 4 m 以上
    - 階段 : 幅1.2 m 以上、段数 5段 以上

## 耐火試験

- 試験条件
  - 加熱条件
    - ISO 834 に規定した標準加熱曲線による
    - $T = 345 \log_{10} (8t + 1) + 20$   
T: 平均炉内温度 (°C)、t: 試験の経過時間 (分)





## 耐火試験

### ■ 試験条件

#### － 載荷条件

##### ■ 常時垂直荷重を支持する構造

- 原則として、構造耐力上必要な部分の断面に長期許容応力度に相当する応力度が生じるように載荷しながら試験
- 鋼材を用いた構造の場合は、載荷をしないで加熱することができる

##### ■ 屋上として利用しない屋根

- 屋根面1㎡以内ごとに区分し、区分されたそれぞれの中央部に、階段にあつては段板の中央部に、65 kgのおもりを用いて載荷しながら試験

## 耐火試験

### ■ 試験条件

#### － 試験時間

- 要求耐火時間に等しい時間の加熱を実施したのち、
  - 加熱をしない状態で、要求耐火時間の3倍の時間放置し、測定を継続する
- 構造上主要な構成材料が、準不燃材料であるもの
  - 要求耐火時間の1.2倍の時間加熱を実施し、
  - その間測定を継続して行う事ができる

## 耐火試験

### ■ 判定

#### － 非損傷性

##### ■ 壁、柱

- 最大軸方向収縮量 :  $h/100$  (mm)
  - 最大軸方向収縮速度:  $3 h / 1000$  (mm/分)
- h: 試験体初期高さ(mm)

##### ■ 床・梁・屋根

- 最大たわみ量 :  $L^2/400 d$  (mm)
  - 最大たわみ速度:  $L^2/9000 d$  (mm/分)
- L: 試験体の支点間距離(mm)  
d: 試験体の構造断面の圧力縁から引張縁までの距離(mm)

##### ■ 階段

- 段板の最大たわみ量: 段板の支持長さの1/300

## 耐火試験

### ■ 判定

#### － 遮熱性

##### ■ 壁、床

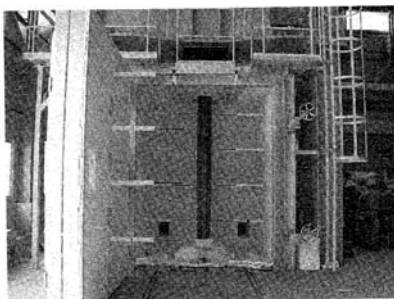
- 裏面の温度上昇: 平均140 (K)以下  
最高180 (K)以下

#### － 遮炎性

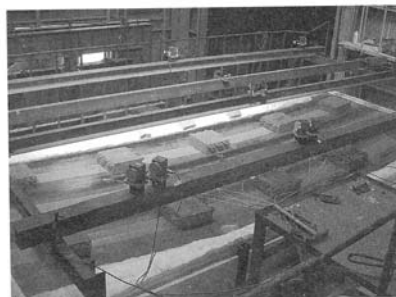
##### ■ 壁・床・屋根

- 非加熱側へ10秒を超えて継続する火炎の噴出がないこと
- 非加熱面で10秒を超えて継続する発炎がないこと
- 火炎が通る亀裂等の損傷を生じないこと

## 耐火試験



柱耐火試験炉



屋根の耐火試験状況

## 構造耐火設計の基本的考え方

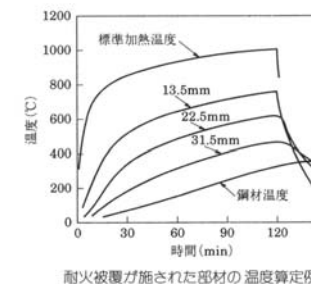
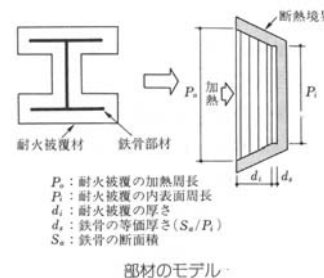
- 非損傷性の確保
  - 架構の安定性が損なわれないこと
  - 有害な変形が生じないこと
  - 構造種別ごとに特有の手段

## 部材の内部温度

- 柱・梁部材の内部温度の予測
  - 鉄筋コンクリート構造、合成構造
    - 三次元非定常熱伝導解析手法
    - 熱伝導とともに水分移動を考慮した解析手法
  - 鉄骨構造
    - 鋼材の熱伝導率が大きく比較的均一な温度分布
    - 簡易計算が可能
  - 裸鉄骨部材が周辺から一様に加熱を受ける場合
    - $T_s(t+\Delta T) = T_s(t) + \{F_s / (C_s \cdot \rho_s \cdot V_s)\} \cdot [af \cdot \{T_f(t) - T_s(t)\} + \epsilon \cdot \sigma \cdot \{T_f(t)^4 - T_s(t)^4\}] \cdot \Delta t$   
 $T_s(t+\Delta T)$ ,  $T_s(t)$ : 時間(t+ΔT), tの鋼材温度  
 $T_f(t)$ : 時間tの火災温度  
 $F_s$ : 部材の単位長さ当たりの表面積  
 $C_s$ : 部材の比熱  
 $\rho_s$ : 部材の密度  
 $af$ : 対流熱伝達率  
 $\epsilon$ : 火炎と部材の合成放射率  
 $\sigma$ : ステファン・ボルツマン係数

## 部材の内部温度

- 柱・梁部材の内部温度の予測
  - 耐火被覆が施された鉄骨部材の場合
    - 鉄骨断面を加熱周長に沿って層分割
    - 一次元差分法



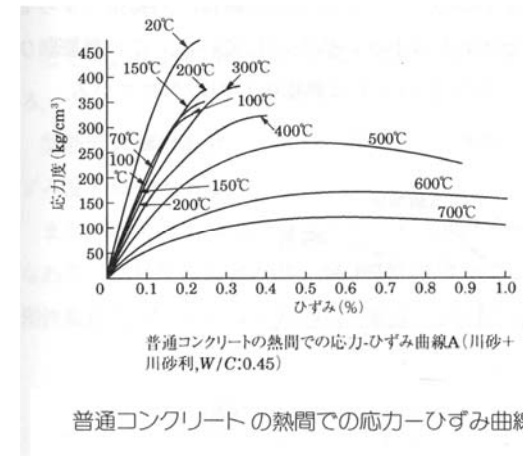
# 鉄筋コンクリート造

## ■ 鉄筋コンクリート造

- 通常、部材が表面から徐々に加熱され高温域が内部に進行
  - 表面が最も高く、深さ方向に低い温度
- 鉄筋コンクリート造が火災加熱を受けると
  - 温度上昇に伴う材料的な劣化
  - コンクリート内部温度が非線形で不均一となることによる、熱変形や内部応力の発生
- 鉄筋コンクリート造を構成するコンクリートの圧縮強度や鉄筋の強度
  - 温度の上昇と共に、低下

# 鉄筋コンクリート造

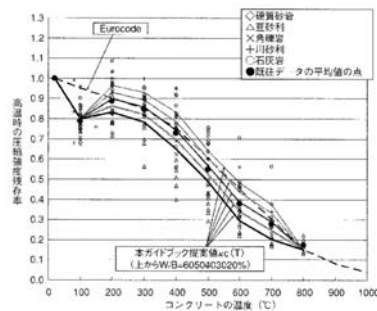
## ■ コンクリートの力学的性質



# 鉄筋コンクリート造

## ■ 高温時のコンクリート圧縮強度残存率

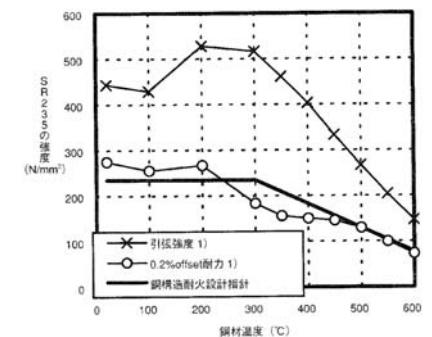
- 100°Cで低下し、200°Cで一旦回復
- 300°Cを超えると、温度上昇に伴い、強度は低下
- 水素結合が低い程(高強度である程)、高温時の圧縮強度残存率は小さくなる傾向
- 500°C~600°Cで残存率はほぼ50%
- 800°Cで15%程度



# 鉄筋コンクリート造

## ■ 鉄筋の高温時強度

- SR 235(代表的な鉄筋)
- 耐力は、温度の上昇と共に徐々に低下
- 引張強度は、温度が300°Cを超えると急激に低下



## 鉄筋コンクリート造

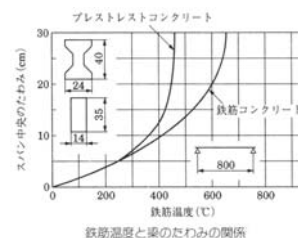
- 鉄筋コンクリート造の建物が火災被害を受けた場合
  - 部材の強度・剛性の低下、熱応力の発生、爆裂
    - コンクリートの変色
    - 梁や床板のたわみ・ひび割れ
    - コンクリートの欠損
- コンクリートと鉄筋の熱膨張率の違い
  - 加熱を受けた際に、鉄筋の付着強度が低下
  - 構造的な被害の要因
- 鉄筋コンクリート造の耐火性
  - 鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さに依存
  - 鉄筋の温度上昇を遅延
  - 爆裂によるかぶりコンクリートの損傷→耐火性低下
    - 鉄筋の温度上昇
    - 断面欠損

## 鉄筋コンクリート造

- 爆裂
  - 加熱を受けたコンクリートが突発的に剥落
    - コンクリート表面にとどまるもの
    - 鉄筋が露出するまで欠損するもの
    - 床板が貫通する程激しいもの
  - 爆裂は、比較的、火災初期に発生
    - 急激な加熱を受ける場合
    - コンクリート含水分が多い場合
    - 圧縮力を多く負担する場合(導入プレストレス力が大)
    - 高強度コンクリートの場合
    - 部材の隅角部や厚さの薄い部材

## 鉄筋コンクリート造

- 火災時の熱応力変形状
  - 鉄筋コンクリート構造部材
    - コンクリートの熱伝導→内部温度分布→鉄筋とコンクリートの強度低下→部材の終局耐力
  - プレストレストコンクリート構造部材
    - 鋼材の高温性状が鉄筋と多少異なる
    - 初期応力が導入されている
    - 低温でクリープ
      - プレストレス力の低下
      - 曲げ変形の急増



## 鉄筋コンクリート造

- 火災時の熱応力変形状
  - 曲げ応力を受ける部材(床板、梁)
    - 下面加熱→下端鉄筋の急激な温度上昇→降伏点作用引張応力度まで低下→変形の急速な増大→圧縮側のコンクリートの圧壊→部材の崩壊
  - 作用応力の大きい部材
    - 低い温度で部材の崩壊

# 鉄筋コンクリート造

## ■ 火災時の熱応力変形状

- 圧縮応力を受ける部材(柱)の耐力 $p'$ 
  - 鉄筋とコンクリートの圧縮強度・弾性係数の低下
  - $p' = F_c \cdot ACO + \sigma_y' \cdot A_s$ 
    - $F_c$ : 常温時のコンクリート強度
    - $A_s$ : 鉄筋の断面積
    - $\sigma_y'$ : 鉄筋の高温時の降伏点
    - $ACO$ : コンクリートの等価断面積
  - $ACO = (1/F_c) \cdot \int F_{cn}' dA = (A_c - A_s) - ACT$ 
    - $F_{cn}'$ : 表面より $n$ 層目のコンクリートの高温時強度
    - $A_c$ : 柱断面積
    - $ACT$ : 高温時の強度低下を生じたコンクリートの欠損断面積
  - $ACT = (A_c/k) \cdot \{(k-1) \cdot (1-\mu) - (\mu/F_c) \cdot (\sigma_y - k \cdot \sigma_y')\}$ 
    - $F_c \cdot (A_c - A_s) + \sigma_y \cdot A_s$ : 柱の常温時耐力 ( $=k \cdot p'$ )
    - $\mu$ : 鉄筋比 ( $=A_s/A_c$ )

# 鉄筋コンクリート造

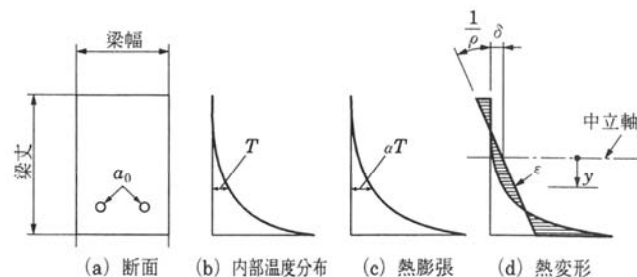
## ■ 火災時の熱応力変形状

- 圧縮応力を受ける部材(柱)の耐力
  - $ft$ : 単位時間当たりの柱コンクリート断面の欠損 ( $=ACT/t$ )
    - 柱の耐火性能を示す基準
    - 粗骨材の種類に依存
      - 石灰岩質骨材:  $ft = 1.55 \text{ cm}^2/\text{min}$
      - 花崗岩質骨材:  $ft = 2.5 \text{ cm}^2/\text{min}$
  - $\sigma_y' = 0$ 
    - 普通のかぶり厚さの鉄筋コンクリート柱では耐火限界に達するときの鉄筋温度  $\geq 700^\circ\text{C}$
  - $t$ : 柱の耐火時間
    - $t = \{A_c / (ft \cdot k)\} \cdot \{(k-1) \cdot (1-\mu) - (\mu/F_c) \cdot \sigma_y\}$

# 鉄筋コンクリート造

## ■ 火災時の熱応力変形状

- 端部拘束を受ける曲げ部材
  - 底部よりの急加熱



鉄筋コンクリート部材の火災時の熱変形

# 鉄筋コンクリート造

## ■ 火災時の熱応力変形状

- 端部拘束を受ける曲げ部材
  - 部材内部のコンクリートのひずみ度 $\epsilon$ 
    - $\epsilon = \delta + y/\rho - \alpha_c \cdot T_c$
  - 中心軸のひずみ
    - $\delta = (\int E' \cdot \alpha \cdot T da - \int E_s' \cdot \epsilon t da + P_0 + P) / (E_c \cdot A_e')$
  - 曲率
    - $1/\rho = \{ \int E' \cdot \alpha \cdot T \cdot y da - \int E_s' \cdot \epsilon t \cdot y da + M_0 + M + (P_0 + P) \cdot y_n \} / (E_c \cdot I_e)$
  - 拘束軸力
    - $P / (E_c \cdot A_e) = -\eta \cdot \{ (\delta - y_n/\rho) - (\delta_0 - y_0/\rho_0) \}$
  - 拘束曲げモーメント
    - $M / (E_c \cdot I_e) = -\gamma \cdot (1/\rho - 1/\rho_0)$

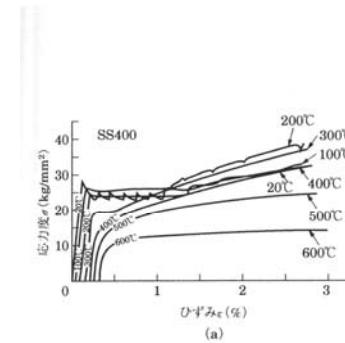
# 鉄骨造

## ■ 火災時の挙動

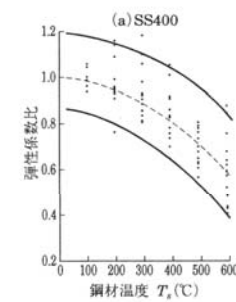
- 初期
  - 火熱の影響による熱膨張→構面内外への変形→架構安定性の消失
    - はりの熱膨張→柱頭の変形(部材角)、梁の横座屈
- 長時間
  - 機械的特性の劣化
    - 降伏点の低下、溶融・脱落による断面欠損
- 断面内温度分布は比較的均一
- 熱膨張率が大きいので、加熱時の材長変化が大きく発生
- 端部拘束を受ける通常の構造物では、架構形式によっては大きな熱応力が発生し、構造的な損傷を生じる
- 耐火被覆を施さない場合
  - 火災を受けると、部材が大きく変形し、大きな被害を生じる

# 構造材料の高温性状

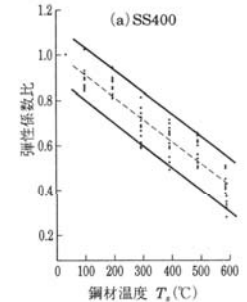
## ■ 鋼の力学的性質



構造用鋼材の高温での応力-ひずみ曲線



鋼材の弾性係数比 (Er/Ert)

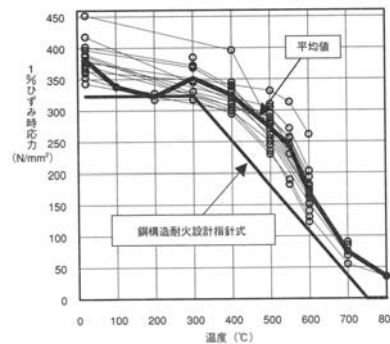


鋼材の降伏応力度比 (σy,T/σy,RT)

# 鉄骨造

## ■ 鋼材(SS400)の高温時の降伏強度(1%ひずみ時強度)

- 1%ひずみ時強度は、鋼材温度が400°Cを超えると急激に低下
- 600°Cでは常温時の30~40%となる



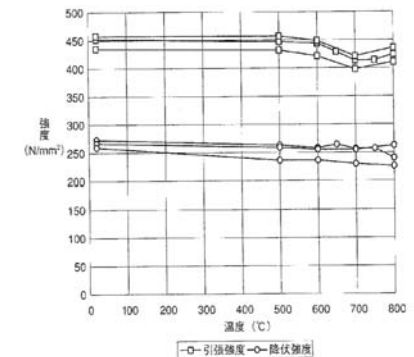
$$\sigma_y' / \sigma_y = (750 - T) / 450$$

σ<sub>y</sub>' : 高温時の降伏応力度  
 σ<sub>y</sub>' : 常温時の降伏応力度  
 T : 鋼材温度

# 鉄骨造

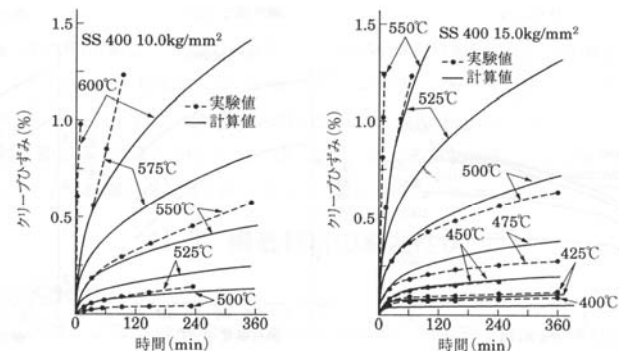
## ■ 加熱冷却後の鋼材の強度(SS 400)

- 降伏強度と引張強度
- 600°C以上に加熱されると、引張強度に影響
- 700°Cに加熱されると引張強度は約90%になる



# 構造材料の高温性状

## ■ 鋼のクリープひずみ



SS400鋼材の高温クリープ曲線

# 鉄骨造

## ■ 耐火被覆

- 鉄骨造の耐火性向上のため、架構部材の温度上昇抑制
- 被覆材料
  - 熱伝導率が小さく熱容量が大きい
  - 高温時の膨張・収縮が小さい
  - ひび割れ・剥離を生じない
  - 鋼材との付着性、追従性がよい
- 工法(被覆材料の取付け方、目地部の処理方法)の影響

構法	主な材料(例)
打込構法(現場打ち工法)	普通コンクリート、軽量コンクリート、気泡コンクリート
左官構法(塗仕上げ工法)	普通モルタル、軽量モルタル、パーライトモルタル、ひる石モルタル、パーライトプラスター、ひる石プラスター
吹付構法	吹付けロックウール、ひる石モルタル、ひる石プラスター
貼付構法(接着工法)	けい酸カルシウム板、ALC板、石こうボード、PC板
複合工法	上記の各種組合せ

# 鉄骨造

## ■ 耐火被覆

セラミック系吹付け工法



## ■ 耐火被覆

繊維混入珪酸カルシウム板張り工法



# 鉄骨造

## ■ 耐火塗料

- 近年、有機質系耐火被覆材である加熱発泡性耐火塗料の適用が増加



# 鉄骨造

## ■ 火災時の熱応力変形性状

### － 単純支持曲げ部材

- 長さで梁丈dの単純梁の中央たわみ $\delta$

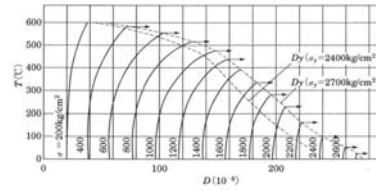
－  $\delta = C \cdot (\sigma/E) \cdot (l^2/d) = C \cdot \varepsilon \cdot l^2/d = D \cdot l^2/d$

C: 荷重形式による定数

E: 弾性係数

$\sigma$ : 縁応力度

$\varepsilon$ : 縁ひずみ度



単純梁のたわみ (荷分布荷重  $\delta = D \cdot (l^2/d)$  の場合)

- 塑性変形が起きないための単純梁の許容たわみ限度

－  $\delta = Dy \cdot l^2/d$

Dy: 荷重形式と鋼材温度による定数

# 鉄骨造

## ■ 火災時の熱応力変形性状

### － 端部拘束部材

- 加熱された場合

－ 断面内の温度上昇による材長の変化

－ 断面内の不均等な温度分布による彎曲

－ 材端拘束→内部応力の発生

－ 鋼構造部材

- 断面内の温度分布は比較的均等

- 彎曲による熱応力は無視

- 材長変化は大きい

- 材端で軸方向伸びが拘束されている場合、熱応力は極めて大

- 火災時の無損傷を確保することは不可能

# 鉄骨造

## ■ 火災時の熱応力変形性状

### － 端部拘束部材

- 火災前、初応力度 $\sigma_1$ 、ひずみ度 $\varepsilon_1$ が存在

- 火災により部材温度が均等に $T^\circ\text{C}$ 上昇して熱応力 $\sigma_T$ が発生

- $\sigma_1$ と $\sigma_T$ による部材のひずみ度が $\varepsilon_T$ 、見かけの伸張率 $\varepsilon$

－  $\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$

－  $\sigma_1 + \sigma_T = E_T \cdot \varepsilon_T$

－  $\varepsilon = \alpha \cdot T - \varepsilon_T + \varepsilon_1$

- E,  $E_T$ : 常温時、高温時の鋼材の弾性係数

- $\alpha$ : 鋼材の線膨張率

- 部材断面積A、部材長lの梁がバネ定数kの柱で熱膨張を拘束された場合

－  $\sigma_T = (k/A) \cdot l \cdot \varepsilon = K \cdot \varepsilon$

- K: 材端拘束度

- － 火災時の部材の存在応力度と見かけの伸張率

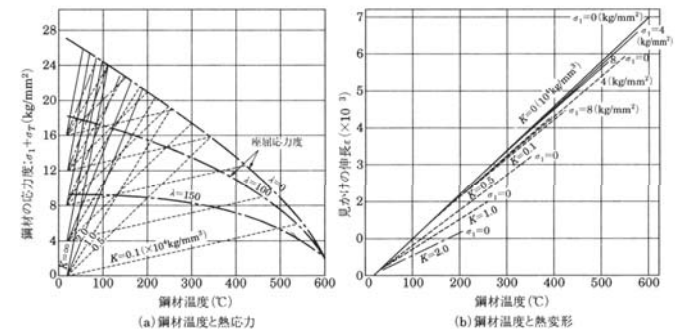
■  $\sigma_1 + \sigma_T = [E_T / \{1 + (E_T/K)\}] \cdot \{(1 + E/K) \cdot \varepsilon_1 + \alpha \cdot T\}$

■  $\varepsilon = [1 / \{1 + (K/E_T)\}] \cdot \{\alpha \cdot T - (E/E_T - 1) \cdot \varepsilon_1\}$

# 鉄骨造

## ■ 火災時の熱応力変形性状

### － 端部拘束部材



端部拘束を受ける鋼材の熱応力と熱変形



# 鉄骨造

## ■ 火災時の熱応力変形状

### － 端部拘束部材

#### ■ 熱応力度

- － 温度の上昇とともにほぼ直線的に増加
- － 部材の細長比 $\lambda$ によって決定される高温時の座屈応力度に到達→座屈

#### ■ K: 大、加熱された部材が低温で座屈

- － 拘束を与える部材は無損傷

#### ■ K: 小、加熱された部材がかなり高温まで座屈しない

- － 拘束を与える部材の強制変形は大

# 木造

## ■ 火災時の挙動

- － 火災時に着火すれば、構造部材自身が燃焼
  - 着火後、表面から燃焼進展
  - 徐々に炭化層を形成・進展
  - 荷重支持に有効な断面が欠損
- － 残存断面が荷重支持に必要な断面を下回れば崩壊
- － 着火のおそれのない部分での使用に制限

## ■ 新しい動き

- － ツーバイフォー工法
  - 木造での耐火構造1時間の認定を取得
- － 木材被覆鉄骨柱・梁の認定
- － 耐火構造とするためには
  - 木材が着火しない、または、着火しても燃え止まる

# 木造

## ■ 燃え代設計(準耐火構造)

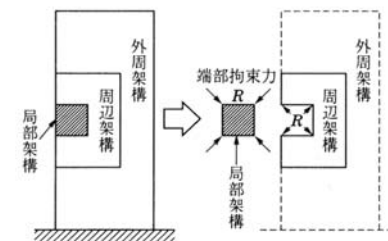
- － 大断面集成材
- － 避難・消火に必要な時間までは崩壊しない(火災終了までではない)
- － 火災時に炭化する部分を除いた残存断面で耐力を保持できるかどうかを評価
  - 伝統的な木造の耐火設計手法
  - 準耐火構造に適用

	燃えしろ (mm)		
	30分	45分	60分
構造用集成材	25	35	45
構造用単板積層材			
構造用製材	30	45	60

# 架構骨組の火災時挙動

## ■ 解析手法

- － 火災加熱の熱応力は局所的
- － 直接火に曝される区画の柱梁部材・隣接部材
  - 熱応力変形は大
- － 数層・数スパン離れた部材
  - 熱膨張の影響は小さい
- － 架構部材
  - 局部架構
    - － 火災加熱の影響大
    - － 塑性解析が必要
    - － 熱膨張を周囲の架構が拘束
  - 周辺架構
    - － 熱膨張の影響あり
    - － 弾性的挙動に留まる部分
  - 外周架構



架構の分割と凝縮

# 架構骨組の火災時挙動

## ■ 解析手法

