

鉄筋콘크리트構造의 耐火性

金 亨 杰

서울대학교工科大学 教授

序 言

最近에 建物이 高層化되어감에 따라 惹起되는 여러가지 問題中에서 火災에 關하여 建築에 從事하는 技術者들에게 深刻한 課題를 던져주고 있는 것 같다. 그리하여 建築에의 耐火防火에 關하여는 建築 計劃的으로, 材料面으로, 構造面으로 또는 施工面에서 再檢討되어야 하겠고, 더우기 設備面에서는 根本的인 研究와 再檢討가 要請된다고 하겠다. 本論에서는 鉄筋콘크리트 構造에만이 아니라 一般的으로 建築 構造部材에 要求되는 耐火性能을 記述하고 다음에 鉄筋콘크리트 構造의 耐火性에 對하여 論及하고자 한다. 根本的으로는 앞서 말한바와 같이, 建築耐火 및 防火에 關하여 關係되는 分野의 研究가 先行되고, 規格이나 規定 및 關係法規等이 制定 또는 強化되어야 할 것으로 생각된다.

§ 1. 建築構造部材에 要求되는 耐火性能

構造部材의 耐火性能은 各國마다 耐火試驗에 依하여 制定하게 되어있다. 그리고 이 試驗方法에서 規定하고 있는 加熱溫度曲線은 그림 1.1에 表示한 것과 같고 火災때의 室內溫度를 나타내는 것이다.

最近에 이 耐火試驗方法을 國際的으로 統一하자는 움직임이 일어나서 ISO 提案基準이 作成되어 있다. 그러나 試驗結果의 制定에 關해서는 各國마다 獨自의 規定을 만들고 있으나 그 基準은 다음과 같다.

A) 通常의 加熱試驗에서는 試驗體가 다음 各項에 適合한 것을 合格으로 한다.

- (1) 加熱하고 있는 途中에 耐火上 및 構造耐力上 有害한 變形이나 破壞 또는 脫落等의 變化가 일어나지 않을 것.
- (2) 壁 또는 바닥에 있어서는 加熱하고 있는 途中에 火災이 지나갈 龜裂이 일어나지 않을 것.

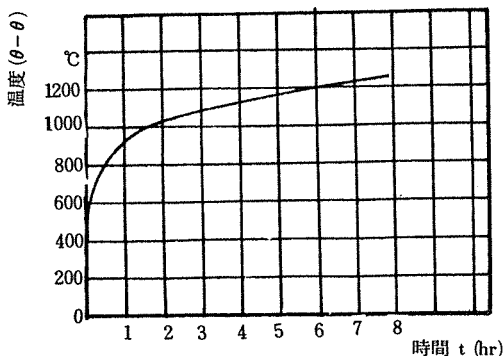


그림 1.1 標準加熱溫度曲線

(3) 鋼材의 最高 또는 平均溫度가 建築物의 部分 및 構造의 種類에 따라 다음 表 1.1 에 記載된 溫度를 넘지 않을 것.

表 1. 1

構造의 種類	溫度의 種別	기준값 (°C)	바닥·및 壁 (°C) (非耐力外壁除外)
鐵筋콘크리트	最高溫度	500	550
프레스트레스콘크리트	最高溫度	400	450
鋼 構 造	最高溫度	450	400
	平均溫度	350	

- (4) 壁 또는 바닥에 있어서는, 裏面溫度가 250°C를 넘지 않을 것. 但外壁의 內面に 對하여 加熱하였을 때의 裏面溫度는 그렇지 않아도 된다.
- (5) 構成材料의 一部가 不燃材料가 아닌 것에 있어서는, 加熱終了後 10分 동안 以上 火氣가 남아 있어서는 안된다.

B 載荷加熱試驗에서는, 構造耐力上 主要部分의 断面에 長期許容應力度의 2倍에 該當하는 應力度가 일어나도록 載荷하면서, 加熱試驗을 行하여가지고 試驗체가 다음 各項에 適合한 것을 合格으로 한다.

- (1) 前述한바 加熱試驗의 判定條件中에서 鋼材溫度의 項 以外의 各項에 適合할 것
- (2) 바닥에 있어서는 試驗체의 最大처짐量의 數値가 다음式에 適合한 것으로 한다.

$$\delta \leq \frac{L^2}{10,000} \quad (\text{單位cm})$$

그리고 試驗체를 單純支持狀態로 試驗하는가 또는 端部の 變形을 拘束하고 試驗을 하는가에 따라 그 耐火性能이 크게 달라 지리라는 問題는 아직도 解決되어 있는 狀態는 아니나, 構造耐力部材는 載荷加熱試驗에 依하여 判定하는 것이 原則的으로는 옳은 것으로 認定되어 있다.

§ 2. 鐵筋콘크리트構造의 耐火性

A) 概說

鐵筋콘크리트構造는 至今까지 耐火構造의 代表的인 것으로 取扱되어 왔다. 그러나 人工輕量骨材라든가 高張力鐵筋等의 新材料의 出現으로 이와같은 新材料가 어떤 耐火性能을 가지고 있는 것인지를 檢討할 必要가 생겼고 따라서 必然的으로 既往의 鐵筋콘크리트構造의 耐火性能도 再評價해볼 必要性이 생겼다.

一般的으로 構造部材에 要求되는 耐火性能은, 延燒防止의 觀點에서 防火區副部材에 要求되는 裏面溫度의 制限과 火災때에 建物の 倒壞를 防止하기 爲하여, 構造部材가 耐力를 喪失하므로써 破壞하게 되는 것을 制限하는 것으로 規定된다. 裏面溫度에 對하여는 構成材料의 斷熱性狀과 部材의 寸수가 問題가 되며, 構造耐力에 對해서는 構成材料의 高溫時의 強度低下와 構造部材에 일어나는 熱應力이 問題가 된다.

B) 部材內部的 溫度上昇

火災로 熱을 받은 構造部材의 内部溫度上昇은 主로 構成材料의 熱傳導率과 比熱에 左右된다. 그리고 이 값은 여러가지 條件에 依하여 變動하며 一定하지는 않다. 콘크리트의 熱傳導率은 100°C를 境界로하여 두개의 溫度領域에서 그 樣相을 달리한다. 100°C以下의 範圍에서는 熱傳導率은 主로 比重과 含水率에 左右된다. 常溫時에 있어서는 이 關係를 나타내면 그림 2.1에 表示한 것과 같다.

또 比重이 일정할 때에는 熱傳導率은 含水率뿐만 아니라 溫度에도 影響을 받는다. 100°C以上의 溫度에서는, 콘크리트는 完全히 乾燥하기 때문에 熱傳導率은 100°C以下일 때 보다 작게 된다. 또 高溫이 되

면 熱傳導率은 커진다는 것이 알려져 있다. 部材内部의 溫度上昇을 規制하는 것은 溫度傳導率 $\alpha = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$ (λ : 熱傳導率, C : 比熱, ρ : 比重) 이고, 콘크리트의 比熱은 溫度上昇과 더불어 增加하기 때문에, 熱傳導率이 溫度上昇과 더불어 增加한다 할지라도, 溫度傳導率의 값은 그다지 變化하지 않는다. 部材内部의 溫度上昇을 遲延시키는 主要한 役割은, 콘크리트内部에 包含되어 있는 물의 蒸發이다. 물의 蒸發潛熱은 539kcal/kg로서 큰값이기 때문에, 콘크리트部材의 内部溫度는 콘크리트의 含水率에 크게 左右된다. 같은 現狀이 石灰岩質의 骨材를 使用한 콘크리트에서도 볼 수 있다. 即 純粹한 $CaCO_3$ 는 898°C에서 CaO 와 CO_2 로 分解되는데, 實際의 岩石에서는 650°C에서부터 分解가 始作된다. 그리고 이때 396 kcal/kg의 熱이 吸收되기 때문에, 콘크리트部材内部의 溫度上昇은 大端히 遲延된다. 壁이나 바닥에서와 같이 한方向으로 加熱되는 部材의 内部溫度分布는 正常狀態에서 생각하면 그림 2.2 (a)와 같이 되며 耐火被覆層머위를 갖는 多層壁인 경우에는 그림 2.2 (b)와 같이 된다.

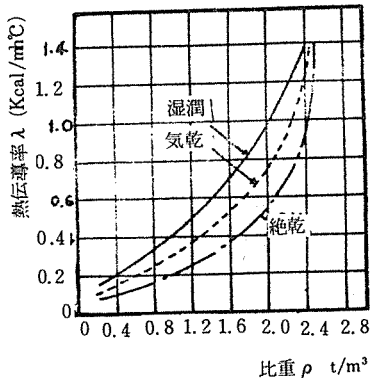


그림 2.1 常溫時의 콘크리트의 熱傳導率

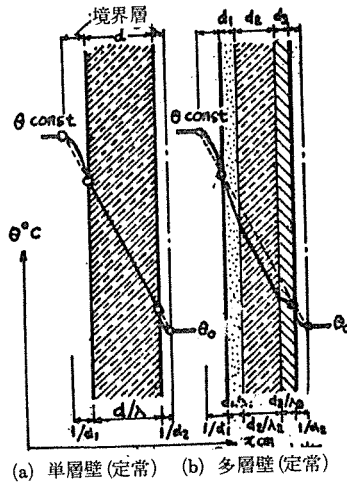


그림 2.2 一方向加熱壁의 溫度分布

普通 콘크리트보다 가벼운 콘크리트일수록 耐火性能은 좋아지나, 比重이 1.2程度의 콘크리트를 最高로 하여 더 輕量이 되면 다시 耐火性能은 低下되는 傾向이 있다. 裏面溫度의 觀點에서 두時間의 耐火性能을 생각할 때, 氣泡콘크리트로 7.5cm, 普通콘크리트로 12cm의 部材치수를 確保하면 充分하다. 또 이 部材의 斷熱性狀은 構成材料의 含水量에 크게 影響을 받는다. 水分이 蒸發하기 때문에, 熱이 많이 吸收되고, 다시 凝縮하여 放出하게 되므로, 含水量이 큰部材의 内部溫度는, 100°C까지 急速으로 上昇하고 그후 얼마동안 100°C에서 停止한다. 裏面溫度는 이 影響을 받아 80~100°C에서 溫度上昇이 停止된다. 普通콘크리트의 경우, 含水率 1%의 差는 含有水 全部가 蒸發한 후의 裏面溫度에 約 25°C의 差가 생긴다고 한다. 鐵筋콘크리트바닥의 内部各點의 溫度上昇을 나타내면 그림 2.3에 表示한 것과 같다.

加熱面에서 멀리 떨어질수록 溫度上昇은 緩慢이 되고, 直線的으로 되어감을 알 수 있다. 鐵筋콘크리트 보는 바닥과는 달리 3方向으로부터 加熱되기 때문에 같은 깊이에 있어서의 内部溫度를 比較하면 바닥 보보다 높다. 長方形斷面보의 内部溫度를 그림 2.4에 表示하였다. 加熱後 30分에 보下端부터 2cm의 곳은 380°C, 5cm의 곳은 200°C가 되는데 比하여, 10cm두께의 鐵筋콘크리트床版에서는 各各 350°C 및 130°C가 된다. 보의 隅角部에서는 溫度上昇이 大端히 커지고 또 部材斷面이 작은 보에서는 이 影響을 더 받게 된다.

溫度上昇係數는 熱傳導率에 依하여 決定되는 것이기 때문에 部材의 熱容量과 關聯이 있는 部材斷面積이라든가 콘크리트의 被覆에 左右될 뿐만 아니라, 콘크리트의 種類에도 關係가 된다. 鐵筋콘크리트 기둥은 火災때에 全둘레로 부터 加熱되는 故로 長方形斷面보의 下側과 大略 같은 溫度分布를 이룬다.

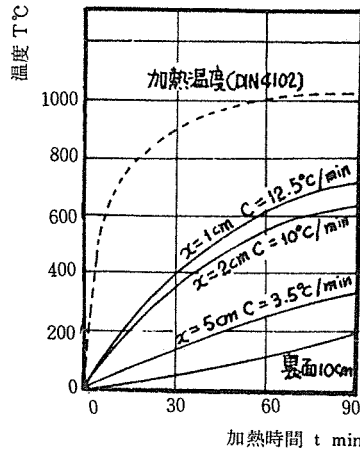


그림 2.3 鉄筋콘크리트床版의 溫度分布

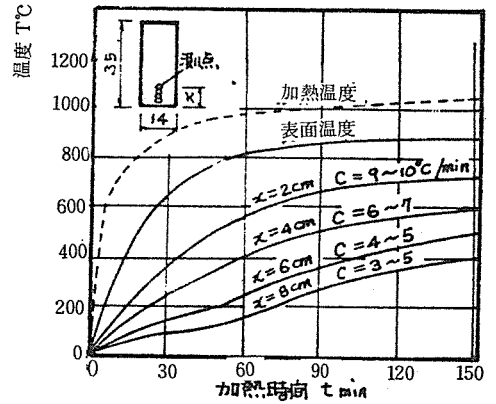


그림 2.4 長方形梁의 溫度分布

C) 高溫度의 鉄筋의 性狀

高溫度의 鉄筋의 降伏點 및 彈性係數等은 鉄筋콘크리트部材의 火災때의 性狀을 解明하는데 大端히 重要한 要素가 된다. 鉄筋은 加熱되면 그 機械的性質이 현저하게 低下된다. 특히 鉄筋콘크리트 휨部材의 引張側鉄筋이 加熱될 境遇에 그 降伏點이 低下하여 存在應力度값 以下로 떨어져게 되면, 部材는 降伏現象을 나타내어 破壞하게 된다. 따라서 構造耐力上 主要한 鉄筋은 그 降伏點이 存在應力度以下로 低下되지 않게 하기 爲하여, 어떤 溫度以上으로는 加熱되지 않도록 保護할 必要가 있다. 또 鉄筋의 高溫度의 降伏點低下는 그 材質에도 크게 左右된다. 鉄筋은 200°C 以上의 溫度에서 降伏點은 低下되고, 400°C에서 600°C 사이의 溫度에서 其鉄筋의 長期許容應力度값 까지 低下한다. 一般의으로 鋼材는 高溫으로 加熱되므로서 強度性狀이 低下가 된다 하더라도 其後의 冷却過程에서 어느程度 回復되는 것이다. 火害를 입은 鉄筋콘크리트 構造部材의 強度性狀은 使用鉄筋의 材質과 溫度履歷에도 左右된다.

D) 高溫때의 콘크리트의 性狀

高溫時의 콘크리트의 壓縮強度, 應力度變形交曲線의 모양 및 膨脹係數는 鉄筋콘크리트構造部材가 火災때에 어떻게 舉動하는가를 解明하기 爲하여 大端히 重要한 것이다. 그러나 高溫때의 콘크리트의 強度 및 變形의 性狀은 現在로서는 아직 完全히는 알려져 있지 않다. 이것은 大部分의 境遇, 콘크리트의 組成, 斷面形狀, 加熱速度, 其他 여러가지 條件의 差에 依하여 影響을 받기 때문이다.

콘크리트의 高溫時의 強度性狀에 가장 影響을 주는 것은 콘크리트構成材料사이의 膨脹係數의 差異와, 콘크리트内部의 溫度分布가 直線的이 아니라는 것이다. 이 때문에 콘크리트에 内部應力이 發生하고, 龜裂이 생겨서 強度가 減少한다. 이 影響은 콘크리트의 加熱過程은 勿論, 冷却過程에도 關係되기 때문에, 大端히 重要한 것이다. 即 콘크리트는 加熱時의 強度보다도 加熱后의 強度가 弱하다는 것은 이 때문이다. 콘크리트의 主要 構成材料인 骨材는 콘크리트의 高溫性狀中에서 그 膨脹係數에 가장 많은 影響을 준다. 시멘트풀은 高溫때에 收縮하는 故로, 콘크리트의 膨脹係數는 骨材의 그것보다 작다. 시멘트量이 많으면 콘크리트의 膨脹係數는 작아지지만, 普通配合의 콘크리트에서는 骨材의 膨脹係數와 大差없다고 말할 수 있다. 各 骨材를 使用한 콘크리트의 高溫時의 膨脹率을 圖示하면 그림 2.6과 같다.

膨脹率이 작은 것일수록, 또 直線的變化를 하는 것일수록, 콘크리트의 高溫性狀은 좋아진다. 花崗岩質 骨材 콘크리트는 500°C부터 600°C 사이에서 急激히 膨脹하여 耐火上 가장 좋지 못한 性狀을 나타낸다. 이것은 骨材中에 含有되어 있는 石英이 575°C에서 急激히 膨脹하여 體積을 急增하기 때문이다. 花崗岩, 石英砂를 갖는 砂岩이외의 骨材를 使用한 콘크리트는, 其耐火性이 良好하다. 그 中에서도 石灰岩, 玄武

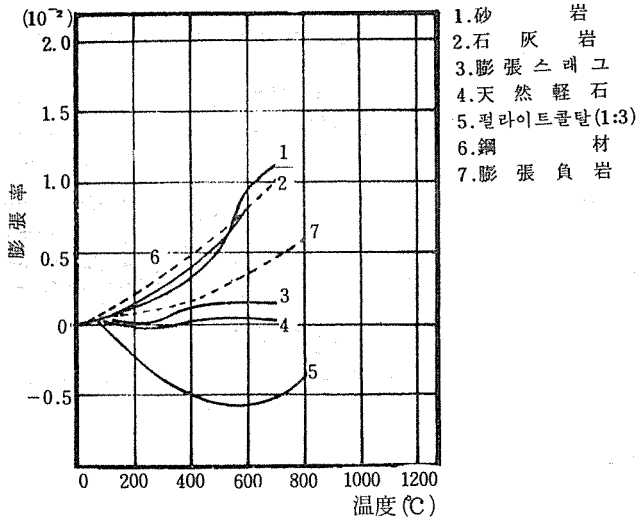


그림 2.6 各種骨材콘크리트의
高温時의 膨脹率

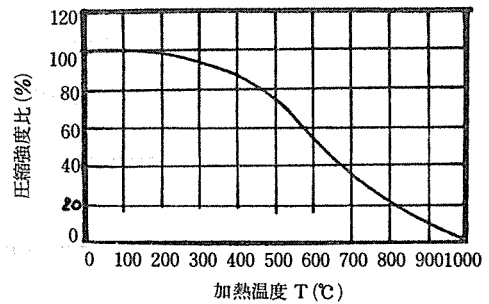


그림 2.7 콘크리트의 高温時 壓縮強度

암, 안산암, 人工輕量骨材 등을 사용한 콘크리트는 高温時狀이 좋은 것으로 되어 있다. 常溫時의 콘크리트 壓縮強度에 影響을 주는 要素인 시멘트의 種類와 量, 骨材의 種類, 多分布, 水시멘트比, 比重, 및 材令 등은 그대로 高温時의 콘크리트 壓縮強度에도 影響을 준다. 그러나 그 影響의 程度는, 各要素에 따라 差異가 있다.

普通의 氣乾狀態의 콘크리트는 400°C까지의 加熱은, 壓縮強度에 그다지 變化를 주지 않는다. 그러나 高温이 되면 壓縮強度는 顯著하게 低下된다. 이것은 $Ca(OH)_2$ 의 分解가 400°C以上에서 顯著하게 나타나고, 더욱이 高温에서는 骨材가 分解하기 때문이다. 또 시멘트량이 많으면 高温強度나 殘留強度가 다 같이 加熱에 依하여 減少된다. 콘크리트의 高温時의 壓縮強度는 여러가지 條件에 影響을 받아 一定하지는 않으나, 콘크리트의 標準인 高温時 壓縮強度를 圖示하면 그림 2.7과 같다.

다음에 加熱에 依한 콘크리트의 組織變化는 彈性係數도 低下시킨다. 그리고 이것은 壓縮強度가 받는 影響보다도 크고, 이것은 高温時의 壓縮強度의 境遇와 거의 같은 條件에 左右된다고 볼수 있다. 實驗結果로 보면 差異는 있으나, 500°C에 加熱되면 彈性係數는 常溫時의 40~50%로 低下되기 때문에, 壓縮側이 加熱되는 鉄筋콘크리트 휩部材의 變形狀에는 大端히 重要한 問題가 된다.

E) 鉄筋콘크리트 構造部材의 火災時의 性狀

鉄筋콘크리트 構造部材의 火災時의 性狀은, 그 構成材料인 鉄筋과 콘크리트의 高温時의 性狀에 支配된다. 構造部材가 加熱되면, 콘크리트의 高温時의 熱傳導에 依하여, 内部溫度의 分布가 決定되고, 콘크리트 및 鉄筋의 高温膨脹과 強度性狀에 依하여, 部材의 應力分布와 變形이 決定되며, 各材料의 高温時強度의 低下에 依하여, 部材의 終局耐力가 決定된다.

(1) 휩應力을 받는 部材

휩應力을 받는 鉄筋콘크리트 構造部材의 火災時의 破壞는, 主로 引張側 鉄筋이 加熱되므로 因하여 壓縮強度가 低下되기 때문이다. 또 콘크리트의 剪斷強度 低下나 附着強度 低下에 起因되는 破壞도 생긴다.

(a) 鉄筋降伏에 起因하는 破壞

바닥이나 보는 火災때 下面으로부터 加熱되기 때문에 下端鉄筋은 急速히 溫度가 上昇한다. 鉄筋에 引張應力이 作用하고 있을 때에는, 그存在應力度 값까지 鉄筋의 降伏點이 低下하였을때에, 鉄筋이 強하고, 變形이 急速히 增加하여, 壓縮側콘크리트가 壓壞하고 마침내는 部材가 破壞하게 된다. 前述한 바와 같이 鉄筋이 降伏하는 限界溫度는 鉄筋의 種類, 存在應力度, 加熱溫度에 影響을 받고, 따라서 鉄筋의 存在應力度가 큰 部材는 작은 部材보다 耐火性能은 弱하다. 또 鉄筋을 保護하는 被覆콘크리트가 두꺼우면, 그 溫度上昇이 적어질 것은 當然하고, 따라서 耐火性能은 向上된다. 그러나 이 被覆콘크리트에 큰 龜裂이라든가 剝落이 생겨서 鉄筋이 露出되게 되면, 鉄筋溫度는 急速히 上昇하여 破壞하게된다. 所謂콘크리트의 爆裂現象은 이 危險性이 大端히 크고, 콘크리트構造部材의 耐火性能을 크게 左右하는 問題이다.

(b) 콘크리트의 壓縮破壞와 剪斷破壞

引張側에서 加熱되는 樑部材에서는, 普通의 境遇, 壓縮側콘크리트는 直接 加熱되지 않으므로 溫度는 徐徐히 오른다. 따라서 壓縮側콘크리트는 部材의 直接的인 破壞原因은 되지 않는다. 이것과는 反對로 壓縮側콘크리트가 直接 加熱될 때에는 콘크리트의 溫度上昇으로 因하여 壓縮強도와 彈性係數가 低下되기 때문에, 壓縮應力을 負擔하는 콘크리트領域이 低溫側으로 移動하여, 應力中心 거리가 漸漸 작아져서 마침내 콘크리트에 壓縮破壞가 일어나게 된다. 連結보의 端部 같은 것은 壓縮側콘크리트가 加熱되는 例이다. 加熱에 依한 콘크리트의 剪斷力低下는 普通의 境遇에는 그다지 問題가 되지 않는다.

剪斷應力을 負擔하는 것은 部材의 樑部(Web)部分이고 兩側面에서 加熱된다 하더라도 어느程度의 部材 寸수를 가지고 있기만하면 그 中央部 콘크리트까지 그強度를 잃기 까지에는 어느程度 長時間 加熱할 必要가 있다. 一般的으로는 引張側鉄筋이 降伏하거나 또는 壓縮側 콘크리트가 먼저 破壞될 때가 많다. 그러나 樑部部分이 얇을때에는 이 部分이 剪斷破壞를 일으킬 念慮도 없지는 않다. 그리고 이때에는 이 部分이 爆裂될 可能性이 커진다. 即 樑部콘크리트가 欠損되어 剪斷破壞와 비슷한 破壞를 일으키게 되므로 爆裂에 對하여 配慮할 것이 더 重要한 問題가 된다.

構造部材는 火災時의 加熱에 依하여 部材內의 溫度가 上昇하므로 材長方向으로 伸張을 일으키고 또 部材內의 溫度分布가 不均等하게 되기때문에 彎曲을 일으킨다. 材端이 拘束되어 있지 않는 單純 支持部材는 그 加熱에 依한 變形이 그대로 나타나지만, 實際의 部材의 境遇에는 一般的으로 彈性固定으로 되어있기 때문에 이와같이 加熱에 依한 變形은 拘束되어서 内部應力이 發生하게 된다. 그리고 이 内部應力이 部材의 耐火性能에 影響을 주게 된다. 따라서 이 内部應力 即 熱應力이 解明되었을 때에 콘크리트部材의 火災時의 性狀에 關한 研究는 一応完結된다고 하여도 過言이 아닐 것이다. 樑에 對하여 拘束되어 있는 部材는 單純支持部材보다 耐火性能이 크다는 것은, 말할나위도 없다. 또 一般的으로 樑部材의 耐火性能을 向上시키기 爲하여는 端部斷面의 上端鉄筋을 補強하는 것이 大端히 效果的이다.

(2) 壓縮應力을 받는 部材

기둥과 같이 壓縮應力을 받는 鉄筋콘크리트構造部材가 火災때에 破壞되는 것은 高溫때에 鉄筋 및 콘크리트의 壓縮強도와 彈性係數가 低下되기 때문이다. 鉄筋콘크리트기둥의 耐火性은 그 斷面積에 支配됨과 同時에 鉄筋의 被覆 두께에도 影響을 받는다. 火災初期에 部材周辺部 콘크리트는 熱應力에 依하여 큰 壓縮應力을 받기 때문에 鉄筋의 被覆콘크리트는 剝落되기 쉽고 特히 斷面이 작은기둥에서는 耐火性이 더욱 低下되기 쉽다. 따라서 기둥의 耐火性을 增大시키기 爲한 가장 效果的인 方法은 鉄筋의 被

콘크리트를 火災中에도 破壞되지 않게 維持시키는 것이다. 結論으로 鉄筋콘크리트기둥의 耐火性能은 斷面積, 骨材種別, 安全率, 鉄筋比, 콘크리트強度, 鉄筋降伏點等에 關係되므로 斷面積과 安全率 및 콘크리트의 強度를 增大시키고 鉄筋比 및 鉄筋降伏點을 低下시키면 耐火性能은 上昇하게 된다.

F) 콘크리트의 爆裂

콘크리트部材는 火災初期에 表面層 콘크리트가 剝落하여 鉄筋이 露出되는 特異한 破壞現象을 일으킬 때가 있다. 이것을 콘크리트의 爆裂이라 부르며 콘크리트部材의 耐火性能을 크게 左右하는 問題이다. 이 現象은 特히 프레스트레스트 콘크리트構造와 프레카스트 콘크리트構造部材에 對하여 危險한 것이다. 다음에 載荷되어 있는 樑部材는 加熱側의 壓縮變形이 減少하기 때문에 無載荷部材보다도 爆裂이 적다는 것이 實驗으로 立証되어 있다. 또 部材의 隅角部는 高溫領域이 넓고 破壞域도 넓기 때문에 다른 部分보다도 爆裂이 생기기 쉽다. 또한 實際建築物에 있어서의 鉄筋 콘크리트 바닥의 爆裂이나 無筋콘크리트의 局部的加熱로 因한 爆裂같은것도 全部 周辺拘束 때문에 熱應力이 커져서 發生하는 것이다. 그러면 이와 같은 爆裂에 對한 對策은 무엇일까 하면 急激한 加熱을 阻止하기 爲한 被覆, 高溫膨脹을 적게하는 骨材의 使用, 斷面의 急變防止等 일 것이다. 또 最近에 이르러 脚光을 받고 있는 人工輕量骨材를 使用한 콘크리트는 其斷熱性이 優秀하다는 것이 오히려 部材内部의 溫度分布를 急變시키는 結果가 되어서 急激加熱의 境遇와 類似한 狀態를 만들므로써 爆裂을 誘發하기 쉽게 하고있다. (끝)