# 鐵筋콘크리트 構造物의 耐火性能에 관한 硏究

## A Study on the Fire Resisting Properties of Reinforced Concrete Structures

金 武 漢*
Kim, Moo Han
宋 河 永**
Song, Ha Young

**Abstract**

Concrete is incombustible and has good fire resisting properties, i. e. when exposed to fire it continues to perform satisfactorily for a reasonable period of time. Nevertheless, with time and high temperature gradient, brought about the fire, causes cracking and spalling. Further deterioration and loss of strength are caused by gradual dehydration of concrete paste.

This paper is aimed to make a proposal for the design and construction of reinforced concrete structures with more sufficent resistance to fire by the theoritical analysis, which is based on investigation of general damages by the fire and change of properties on concrete influenced by high temperature.

## Ⅰ. 序 論

構造物의 耐火性에 관한 問題는 인명과 재산의 보호라는 視點에서 오랫동안 世界 各國으로부터 많은 實驗과 硏究를 행해 왔으며[1)~7)] 그成果 또한 상당히 축적되어 왔다. 우리나라에서도 여러 構造材料에 대한 耐火特性 관련연구를 활발히 하고 있기는 하지만, 아직도 質的·量的인 面에서 미흡한 점이 많이 있다. 그 중에서도 특히, 오늘날 많은 大型 建築物의 構造材料로 使用되고 있으면서, 아울러 예전부터 耐火·耐久的인 構造材料의 代名詞로 인식되어 設計 및 施工過程에서 소홀히 다루어진 面도 적지않은, 콘크리트의 耐火性能에 대해선 심각한 再檢討와 심도있는 硏究가 절실하다고 하겠다.

鐵筋콘크리트 構造로 되어 있다면 아무리 커다란 火災를 당해도 무관하다는 생각은 이제 잘못된 것으로서, 過去의 火災調査로부터 점차밝혀지고 있는 바 여러 사실에서 鐵筋콘크리트 構造의 耐火力에도 限度가 있어 어떠한 火災에 봉착해도 괜찮다고는 단언할 수 없으며, 콘크리트의 耐火性은 복잡하여 아직도 究明의 여지가 많다라는 것등이 새롭게 認識되고 있다.[1),8),9),11)]

사실, 火災라는 現象은 그 自體가 단순하지 않은데, 우선 火災는 人間이 生活하기 위해 使

* 理事, 忠南大 敎授, 工博
** 大田工業大 專講, 忠南大 大學院

用하는 發熱源이 原因으로 되어 發生하는 경우와 落雷에서와 같이 自然現象이 原因으로 된 경우가 있으며, 摩擦熱 등과 같이 兩者의 경계에 속한다고 생각되는 原因도 있다. 그러나 어느 경우든 熱源의 管理가 서툴러서 火災로 되는 것이지만 분명히, 放火와는 다르다고 할 수 있다. 또한 하루나 이틀까지도 계속 불이 타는 大火災로부터 30~40분에서 꺼지는 작은 불정도의 火災도 있다. 이와같이 다양한 性狀을 갖고 있는 火災가 콘크리트에 미치는 영향도 동시에 여러가지로 출현하고 있는 것이다.

이에 本稿에서는 鐵筋콘크리트 構造物의 火害에 대한 보편적인 現象을 살펴보고 이에 따른 콘크리트의 熱特性과 高温度에 있어서의 強度 및 物性變化를 중심으로 耐火性能의 一般的 考察을 실시하여 보다 耐火的인 鐵筋콘크리트 構造物을 만들기 위한 設計 및 施工上의 對策을 提示하고자 한다.

## Ⅱ. 鐵筋콘크리트 構造物의 火害

### 2. 1 直接的인 火害

一般的으로 火災가 發生하면 構造材의 表面은 800~1,200℃의 高温度로 數時間 접하게 된다. 이때 直接的인 火害는 주로 火災室의 中央部에 현저하게 發生되는 것으로서, 建築物의 경우 큰 보나 작은 보의 下端에서 급격히 熱을 받아서 局部的으로 高温度로 되고 콘크리트의 強度와 동시에 彈性을 잃고, 內部에 보강된 主筋도 温度의 上昇과 함께 彈性이 저하되고, 보는 全長에 걸쳐 아래로 처진다. 특히 隅角部 에서부터 바로 屈曲을 시작해서 실이 늘어뜨려진 것같이 變形을 나타낸다.

천정의 床版面이나 또는 보의 表面은 爆裂하고, 또한 큰 보, 작은 보의 主筋은 큰 熱膨脹때문에 被覆콘크리트를 壓出시켜 박리시키며 이에 따라 主筋이 노출되고 만다. 특히 결함이 集中하는 柱頭部에서는 隅角콘크리트가 박리하여 軸筋이 노출하기도 하며, 局部的으로는 屈曲現象을 일으키기도 한다.

상기와 같은 直接的인 火害는 高温이 되면 콘크리트와 鐵筋과의 協同作用이 곤란해지면서 發生하는 일차적인 現象으로 分類할 수 있다.

### 2. 2 二次的인 火害

二次的인 火害라는 것은 주로 熱應力에 따라서 일어나는 火災의 被害인데, 火災時는 주로 보의 침하에서부터, 熱에 의한 휨과 熱膨脹을 보임에 따라 라멘이나 벽체에는 비교적 큰 熱變形과 熱應力이 생겨난다.

즉, 火災室의 주변에 있는 外側 기둥의 柱脚部에는 큰 보의 伸張에 따라서 휨모멘트에 의한 큰 수평균열이 發生하고, 加熱된 보의 柱頭가까이에서는 전단성 균열이 바깥쪽으로 경사지게 생기며, 또한 큰 보의 端部가 좌굴한 建築物의 例도 있다.

이와같은 熱應力의 영향은 火災室을 뻗어나온 화염의 侵入이 없었던 層의 端部에 있는 화장실이나 계단실의 벽에도 균열을 隨伴하며, 이는 地震에 의한 横力의 被害와도 흡사하게 나타남을 알 수 있다.[6]

## Ⅲ. 콘크리트의 熱特性

### 3. 1 콘크리트의 熱膨脹

대부분 시멘트 硬化體를 加熱해가면 우선 105℃에서 遊離水, 겔水를 잃고, 계속하여 化學的 結合水도 消失하고, 250~350℃에서 칼슘실리케이트 水和物은 그 保有水分의 約 20%가 脫水되고, 500℃ 前後가 되면 保有水分의 대부분을 잃음과 동시에 수산화칼슘은 분해되어서 生石灰를 形成하게 된다. 그리고 750℃ 前後에 있어서는 탄산칼슘이 분해되는데 이와같이 高温에 의해서 變質한 콘크리트는, 冷却後 水分이 補合된다면 損傷은 상당히 회복하지만, 500℃ 以上으로 加熱된 경우에는 內部組織까지 損傷이 미치기 때문에 회복은 不可能하다고 밝혀지고 있다. 또한 生石灰는 水分의 吸收에 의해서 膨脹하고, 이 때문에 콘크리트에는 균열이 급격히 발생하고 최종적으로는 붕괴에 이르는 것이다.

한편, 骨材도 加熱됨에 따라 變質하게 되는데, 어느 정도는 岩質에 따라서 그 정도가 다르기도

하다.

高温度에 있어서 콘크리트나 시멘트모르타르 및 骨材의 種類에 따른 여러 變形性狀은 圖-3.1에서 보는 바와같이, 시멘트의 水和物은 100℃ 前後까지는 膨脹하지만, 그 이상에서는 純시멘트페이스트의 경우 收縮을 일으킨다. 그렇지만, 모르타르나 콘크리트는 使用한 骨材의 岩種과 配合比에 따라 상이한 膨脹을 나타낸다. 이 때문에, 高温에 있어서 모르타르나 콘크리트의 熱膨脹은, 熱膨脹과 温度曲線의 形狀에서 110~140℃를 限界로 하여, 低温度와 高温度의 膨脹으로 區分하여 생각할 수 있다.[1]

### 3.1.1 低温膨脹

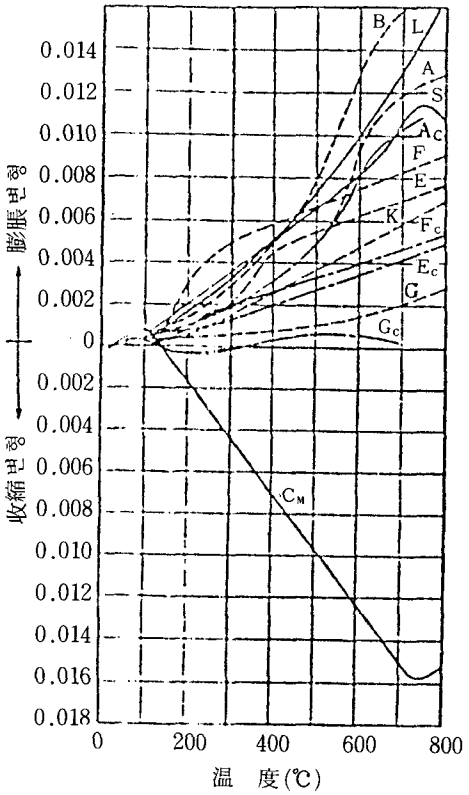
一般的으로 骨材主成分도 純시멘트페이스트와 함께 膨脹하는 경우로서 시멘트모르타르의 常温線膨脹係數는, 주로 骨材主成分의 膨脹係數에 따른 값이면서 동시에 含有한 純시멘트페이스트가 갖는 큰 常温 膨脹係數에도 지배된다. 純시멘트페이스트 量의 증가와 함께 증대하고 貧調合일수록 減小한다.

콘크리트의 常温膨脹係數는 骨材主成分과 純시멘트페이스트와의 中間値를 갖고, 1:5 모르타르의 2~3배나 되고 1:1모르타르와 비슷하다. 또한 一般的으로 이용되는 강모래, 강자갈, 즉, 砂岩質 骨材의 콘크리트에서는 骨材主成分의 150% 內外이고 鐵筋의 約 80%이다.[6]

### 3.1.2 高温膨脹

널리 이용되고 있는 강모래·강자갈 콘크리트에서는 主成分인 砂岩의 膨脹曲線에 비교적 가깝게 接近하고, 常温에서 시작한 膨脹曲線은 骨材主成分의 常温膨脹係數보다 20%정도 큰 값을 가지고 膨脹을 시작하여, 第1次 頂點인 800℃부근에서는 圖-3.2에서 보는 바와 같이 收縮 傾向으로 바뀐다. 그리고 移向點 110℃ 內外에서는 骨材主成分의 膨脹曲線과 거의 合致한다. 또한 石英變態點 부근에서 급격한 膨脹을 일으켜 鐵筋의 S曲線과 交叉한다.

岩石의 熱的 性質은 岩質에 따라 다른데, 例를 들면 石英을 포함한 화강암 및 砂岩系의 骨材는 575℃에서 $\alpha$-石英으로부터 $\beta$-石英으로 轉移하고, 그후 급격한 膨脹을 일으키지만, 大理石이나 石灰岩 등의 石灰系의 骨材는 750℃ 前後에서 前述한 바와같이 탄산칼슘의 分解가 나타나고, 이것에 의해 骨材의 內部組織이 느슨해져 콘크리트의 材質變化가 촉진되는 傾向이 있다. 또한 安山岩이나 玄武岩系 岩石의 耐熱温度는 1,000℃ 以上으로 밝혀져 있다.




〔骨材〕
A : 砂 岩　　B : 花崗岩
E : 安山岩　　F : 安山岩
G : 軽 石　　L : 石灰岩
K : 徐冷高爐슬래그碎石
〔콘크리트〕
$A_c$ : 砂岩質콘크리트　　$C_M$ : 純시멘트페이스트
$E_c$, $F_c$ : 安山岩質콘크리트　S : 鐵筋
$G_c$ : 軽石콘크리트

**圖-3.1 高温度에 있어서 純시멘트페이스트, 골재, 콘크리트 및 鐵筋 등의 熱膨脹[6]**

구체적으로는 石英質 骨材를 使用한 콘크리트의 加熱溫度와 火害의 結果를 圖-3. 3 에서 볼 수 있는데, 圖中의 350, 450, 573℃의 경계선은 각각 褐鐵鑛에서 赤鐵鑛으로의 變換, $Ca(OH)_2$의 分解, $\alpha$-石英에서 $\beta$-石英으로의 轉移 등의 온도경계선을 나타내고 있다. 또한 350℃에서의 等溫度線과 0.5~1.5㎝층의 굵은 선과의 交線은 赤鐵鑛轉移에 의해서 생기는 骨材의 爆裂範圍를 나타내고 있다.[7] 이 圖를 이용하면, 火害를 받은 石英質骨材를 使用한 콘크리트 構造物의 보수깊이를 결정할 수 있다.

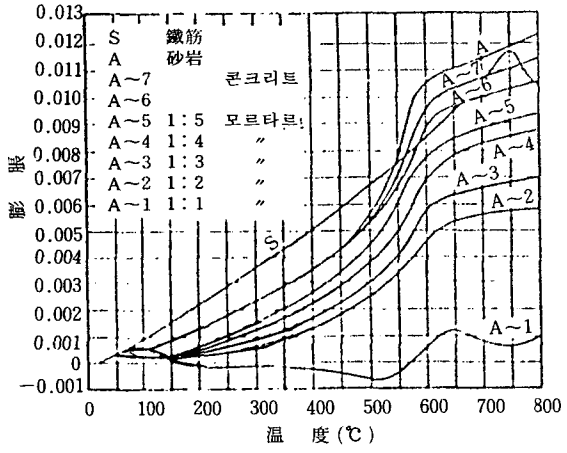



圖-3. 2 日本綠川産骨材 콘크리트의 熱膨脹(砂岩質系)[6]

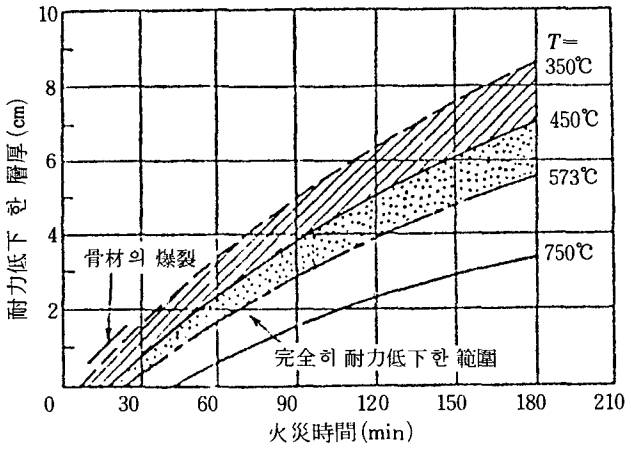



圖-3. 3 火災時間과 콘크리트층의 耐力低下 범위의 관계[7]
(石英質骨材使用의 경우)

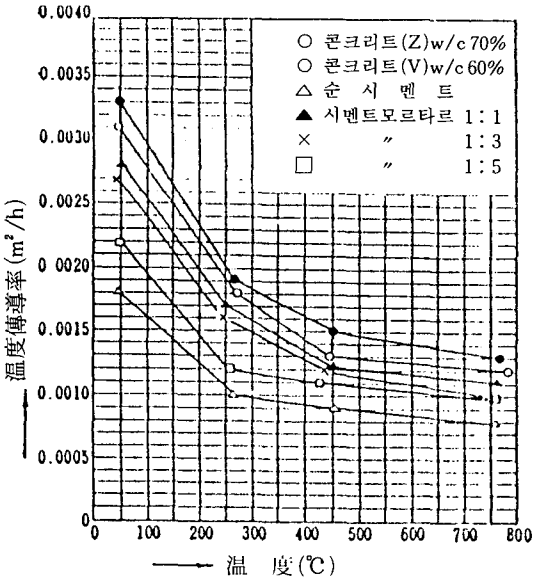
3. 1. 3 加熱時間과 時間效果

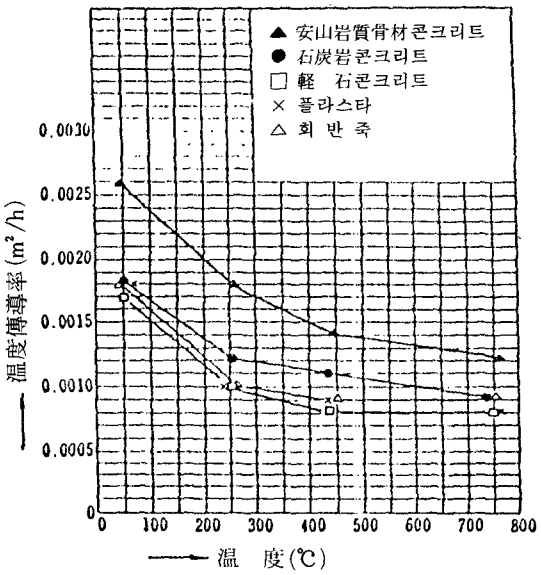
純시멘트페이스트의 경우 內部溫度가 일정하게 되도록 아주 느린 속도로 加熱하면 膨脹曲線은 90~80℃에서 수축곡선으로 바뀌고 750℃내외에서 재차 膨脹曲線으로 일정하게 변한다. 다만, 加熱溫度가 급격하게 되어 주변온도와 내부온도에 차이가 있게되면, 팽창의 외부정점온도는 加熱時間에 따라 일정하지 않고 내부와는 전혀 다르게 된다.

加熱하는 일정온도가 낮은 것일수록 수축은 작은 값을 취하는데, 이러한 현상을 가열에 따른 時間效果라고 부르며 純시멘트모르타르의 경우가 가장 뚜렷하다.

3. 2 콘크리트의 熱傳導性

콘크리트의 熱膨脹에 의한 熱應力의 發生을 산정하기에는 火災時 被熱部材의 내부온도 분포를 확인할 필요가 있다. 高溫에서의 콘크리트 및 시멘트모르타르의 熱傳導率, 또는 溫度傳導率 값은 콘크리트의 溫度自體가 변화하는 복잡한 값이기는 하지만, 내부에 포함된 含有水의 이동이나 증발 혹은 結晶水의 問題도 있고, 物理的, 化學的 變化가 서로 섞어서 온도 상승에 따른 변화는 상당히 복잡하기 때문에 결정적인 값을 구하기가 곤란한 것으로 알려지고 있다.





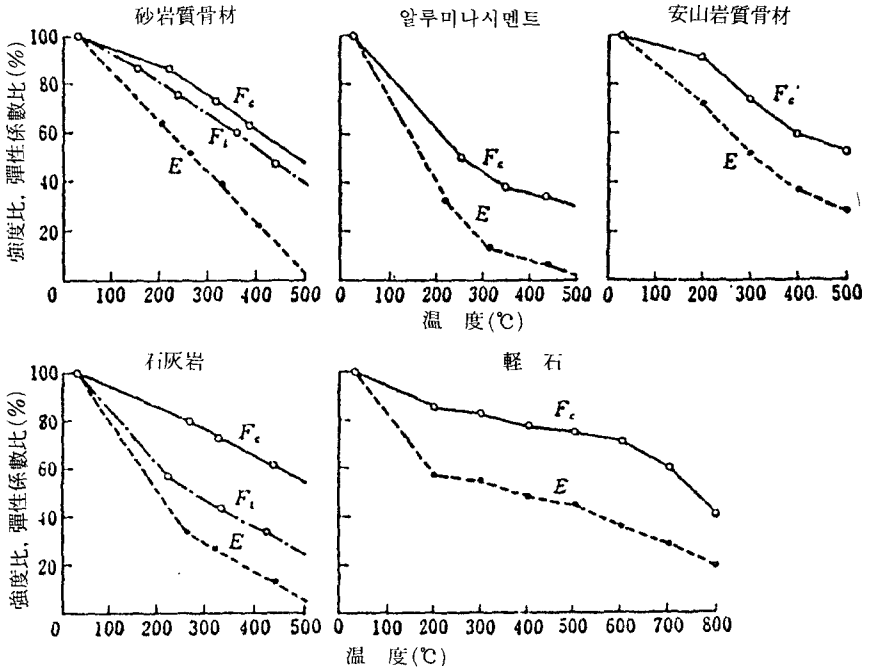

圖－3. 4 高温度에 있어서 콘크리트의 温度傳導率 變化(m²/h)

일반적으로는 原田[1]의 실험에 의한 圖－3. 4에서 보는 바와같이 使用骨材의 種類나 配合에 따라 차이가 있지만, 보통 200℃를 넘으면 급격히 低下한다. 또한 温度의 上昇에 따른 傳導性의 低下現象이 전체적으로 명료하게 나타나고 있는데, 이 원인은 시멘트의 水和物중 수분이 빠져나가기 때문이라고 생각되어지고 있다. 이와같은 傳導性의 低下性質은 콘크리트의 內部温度 上昇에 있어서는 遲延效果가 되기 때문에 耐熱性에 있어서는 유리하게 作用하기도 한다. 다만 이것의 측정치는 骨材의 岩質이나 産地, 시험체의 含水率 등에 의해 많은 차이를 나타내고 있는 것이다.

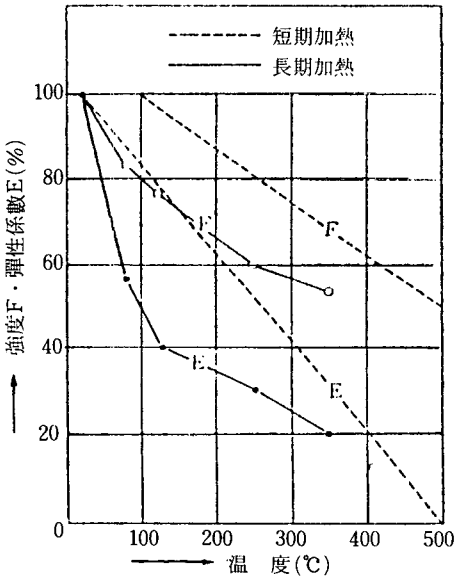
## Ⅳ. 火災에 의한 콘크리트의 物性變化

### 4. 1 콘크리트의 殘存強度와 彈性[6),12)]

高温에 접한 콘크리트는 일반적으로 強度나 彈性이 低下하는데 이와같은 加熱된 콘크리트의 強度와 彈性의 低下는 전술한 骨材와 시멘트페이스와의 熱膨脹率이 현저하게 틀린 점에 의해 콘크리트組織의 弛緩 및 温度上昇에 따른 自由水나 水和物의 脫水, 기타 物理的, 化學的인 변화에 기인하는 것이다.




圖－4. 1 加熱된 콘크리트의 殘存強度(F)와 彈性係數(E)[1)]



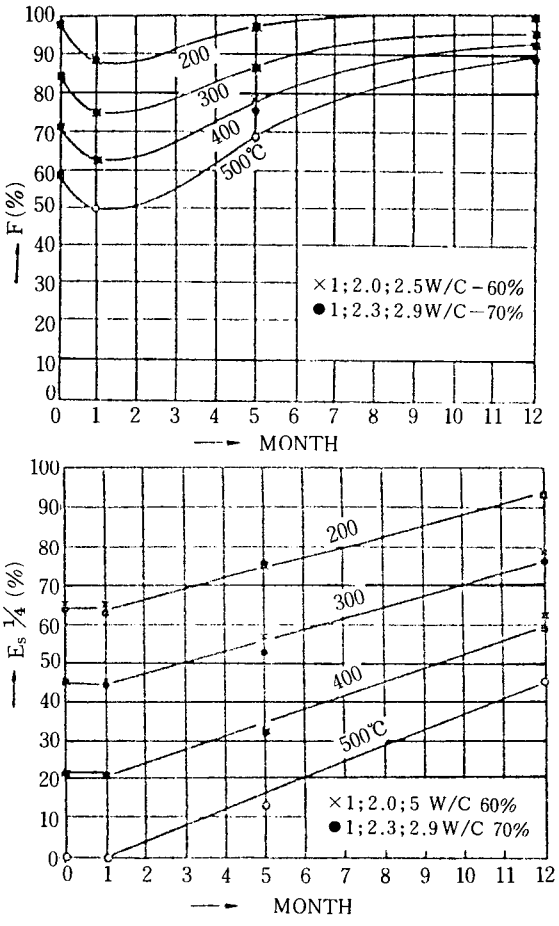

**圖－4. 2 반복 長期加熱 콘크리트의 強度·彈性係數의 低下**
**(8개월 加熱, 피복없음)**

加熱温度의 上昇과 동시에 強度와 彈性係數가 低下하는 관계는 圖－4. 1에서 알 수 있는데 이들 가운데 특히 彈性係數의 低下가 현저하고, 일반적으로 使用되고 있는 砂岩質 骨材 콘크리트 경우에서는 500℃ 이상의 加熱에서 彈性係數가 거의 소실되어 버림을 알 수 있다. 아울러 이러한 경향은 使用되는 骨材의 종류에 따라서 상당히 다르고, 熱에 의한 材質變化가 급격한 石英質이나 石灰質로 된 骨材를 使用하면, 콘크리트의 材質變化가 촉진되고, 그 때문에 強度特性의 低下가 현저하게 된다.[5]

日本建築學會 「耐熱콘크리트委員會」의 實驗에 의하면 350℃에서 8개월간 長期 加熱한 경우의 彈性係數比는 약 20%, 殘存強度는 약 55% 정도로 低下되는 것으로 밝혀졌다. 圖－4. 2에 이 관계가 나타나 있는데, 短期加熱의 직선적 저하와 비교되고 있다. 이 實驗은 보통 建築工事에 잘 使用되는 강모래·강자갈 콘크리트로서 슬럼프 15~20cm 정도의 것을 도입하였으며, 短期加熱 값은 火災加熱을 목표로 한 것이다. 또한 長期加熱이라 함은 火災와는 달리 연돌, 工業爐, 原子爐 등과 같이 長期間 계속 加熱을 접하는 콘크리트 構造物의 硏究에 중요한 과제로 평가되고 있다.

4. 2 加熱된 콘크리트의 強度回復

전술한 바와같이 일반적으로 加熱温度가 上昇함에 따라 殘存強度比는 직선적으로 低下하고, 700℃를 넘어서면 대부분의 콘크리트는 殘存強度比가 50% 이하로 되며, 그후의 強度回復도 기대할 수 없는 것으로 알려지고 있다. 그러나 圖－4. 3을 참조하면 加熱温度가 500℃ 以下의 경우에는 콘크리트의 強度는 冷却後 약 1개월에서 최저치를 나타내지만, 그 이하에서는 時日이 경과함에 따라 回復하여, 冷却後 1年에서 90% 以上으로 됨을 알 수 있다. 또한 彈性係數도 냉각후의 수분보급에 의해서 強度와 같은 양상으로 어느정도의 回復이 기대된다.[5),10)]




**圖－4. 3 加熱된 콘크리트 強度와 彈性의 自然回復**

4.3 高温度에 있어서 鐵筋과의 附着強度

역시, 鐵筋도 圖-4.4에 나타나는 것처럼 거의 모든 物性이 低下하고, 특히 引張強度와 降伏點은 대략 500℃ 加熱에서 常温에서보다 약 1/2까지 低下한다.[3]

아울러 鐵筋콘크리트 構造物이 高温에 접하게 되는 경우, 被熱의 정도가 部材 혹은 斷面에 따라서 다른 점이나, 材料의 熱膨脹 係數가 다른 점에 의해 상이한 變形과 2次應力이 생겨 콘크리트에 균열이 발생하고 鐵筋과 콘크리트와의附着強度가 低下하게 된다. 圖-4.5의 加熱温度와 附着強度와의 관계에 의하면 加熱温度가 上昇함과 동시에 附着強度는 현저하게 低下함을 알 수 있다.[4]

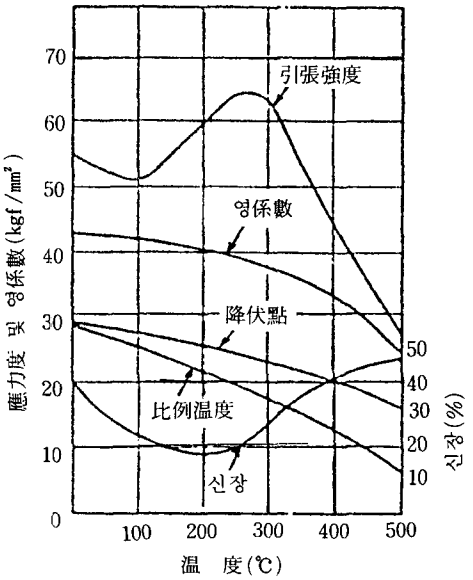



圖-4.4 構造用軟鋼의 高温性狀

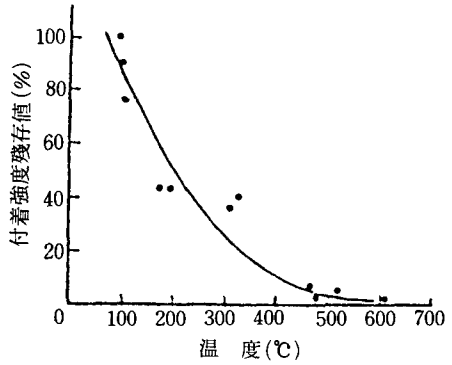



圖-4.5 加熱温度와 附着強度[4]

## V. 結 論

鐵筋콘크리트 構造物의 耐火特性이라 함은 被熱時間, 火災温度 등에 의한 外的 要因과 構造物 內部組織의 構成要素 즉, 骨材의 종류와 시멘트페이스트, 鐵筋의 被覆關係 등에 의한 內的 要因에 따라 차이가 있으며, 또한 부재의 형상과도 적지않은 상관성이 있다. 이에 本稿에서는 이들 복잡한 耐火性能에 대해 基本的인 콘크리트의 熱特性과 高温에 접한 콘크리트와 鐵筋의 物性變化를 중심으로 考察하였으며, 그 結果 設計·施工時 耐火性 確保를 위한 대책으로 다음과 같은 結論을 얻었다.

① 콘크리트 調合時 耐火性이 우수한 岩種의 骨材를 使用하고, 石英質骨材의 使用은 적극 피한다.

② 耐火性이 작은 鐵筋을 保護하기 위하여 被覆두께를 충분히 취하고, 設計時 필요 이상으로 부재치수가 얇지 않도록 주의할 필요가 있다.

③ 耐火性의 向上을 위한 構法의 硏究와 함께 내화피복재료 및 도장재료의 개발 등이 적극적으로 검토되어야 할 필요가 있다.

④ 短期的인 火災뿐만 아니라, 長期間 被熱되는 鐵筋콘크리트 構造物에 대해서도 심도있는 硏究가 요망된다.

## 參 考 文 獻

1. 原田 有, 建築耐火構造法, 工業調査會, 1973.
2. 岸谷孝一他, コンクリート用骨材として 急冷高爐スラグおよび徐冷高爐スラグ砕石を 使用したコンクリートの耐火性能, 日本建築學會 關東支部大會梗概集, 1978.
3. 浜田 稔他, 建築防火論(建築大系21), 彰國社, 1970.
4. 日本土木學會編, フレッシュコンクリート・硬化コンクリート(新體系土木工學29), 技報堂, 1981.
5. 岡田 清編, コンクリートの耐久性, 朝倉書店, 1986. pp. 111~117.
6. 原田 有, コンクリートおよび部材の火災特性について, コンクリートジャーナル 第11巻 8號, 1973. 8, pp. 37~58.

7. C. Meyer-Ottens, Verhalten von Betonbauteilen im Brandfall, Beton, No. 4. 1974, No. 5. 1975.
8. I. Soroka, Portland Cement Paste and Concrete, Macmillan, 1979, pp. 278~280.
9) A. M. Neville, Properties of Concrete, Pitman, 1981, pp. 498~506.
10. 金武漢外, 建築材料學, 文運堂, 1986, pp. 208~209.
11. 伊東茂富, コンクリート工學, 森北出版社, 1985, pp. 154~158.
12. 岸谷孝一, 耐火設計法, コンクリートジャーナル第11卷 8號, 1973. 8, pp. 14~20.
13. 吳昌熙, 鐵筋コンクリート造火災建物の 火害とその補修に關する 硏究, 東京工業大學博士學位論文, 1985. 7.