

콘크리트 技術의 現況과 展望

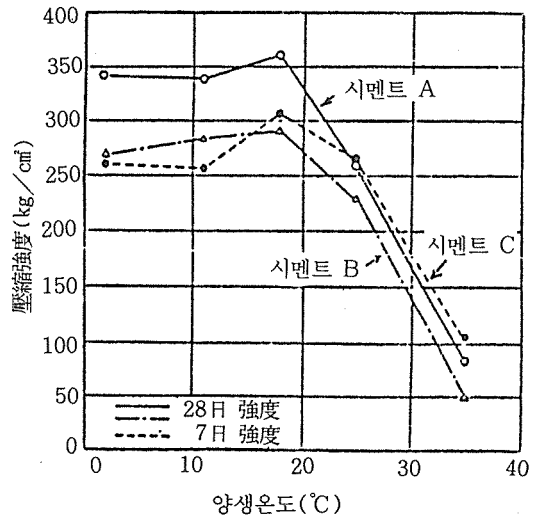
鄭 日 榮

〈서울大學校 工科大學 建築學科 教授〉

콘크리트는 비빈후 30분이 경과하면 어떤 형태로든 결함이 생기기 시작한다. 이와같은 취약점을 감소시키는 수단으로서 같은 材畧에 콘크리트가 Activation상태가 되도록 강구하면 強度의 저하를 적게 할 것이다. 이와같이 初期 材畧에 Activation한다는 것은 콘크리트가 凝結狀態에서 水和熱이 20℃를 쉽게 넘어서 強度가 1/3~1/5로 低下되는 경우를 경험하게 된다. Polymer Cement Concrete의 경우는 일단 떨어진 強度가 常溫으로 되돌아 가면 회복되지만 Cement Concrete는 強度가 떨어지면 회복되지 않는다. 가령 凝結狀態에서 水和熱이 20℃를 초과하지 않게 하여야 한다. 여기서 化學反應은 촉진되고 이로인한 水和熱의 上昇을 억제하는 混和劑가 출현되어 콘크리트의 취약점으로 인한 早期 材畧에 Activation 시키는 過程을 쉽게 할 수 있게 만들었다.

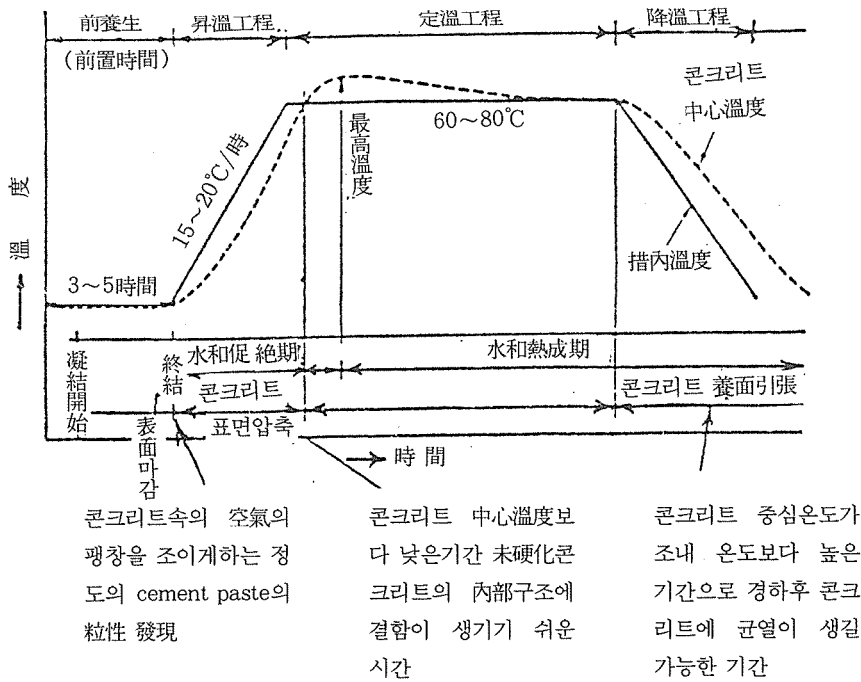
특히 콘크리트는 複合材料로서 強度의 變動이 심한 材料이다. 그 내용을 내적인 요인과 외적인 요인으로 나누어 생각하면 내적 요인의 대표적인 것으로는 콘크리트의 乾燥收縮으로 인한 龜裂이 強度를 低下시키며, 두번째는 材料分離 현상이 強度를 떨어뜨리는데, 극심할 때는 200kg/cm²인 강도의 콘크리트가 절반 이하인 80kg/cm²까지 떨어지는 극히 信賴性이 없는 상태로 된다. 세번째로는 應力과 溫度에는 관계가 없으나 時間이 경과하는데

따라 재료의 파괴가 심하여 強度가 1/4까지 떨어지는 예도 볼 수 있다.



<그림 1> 養生溫度에 따른 強度의 變動值

한편 외적 요인으로는 재료자체가 아니라 이를 둘러싸고 있는 환경조건에 따른 것으로 火災로 인한 피해, 기온이 강하하였을 때의 피해, 地震이 내습하였을때의 피해, 酸性의 침식으로 인한 老化현상 등을 들 수 있다. 우선 내적인 요인인 乾燥收縮은 콘크리트가 化學反應을 일으키는데 소요되는 최소한의 물의 양이 시멘트중량에 대하여 W/C=20~25%인데 비하여 콘크리트 비빔작업을 하는데 편리한 물·시멘트比는 40~60%이므로 화학 반



<그림 2> 蒸氣養生의 溫度履歷의 一例와 各 工程에 있어서 物理化學的 現象의 概要

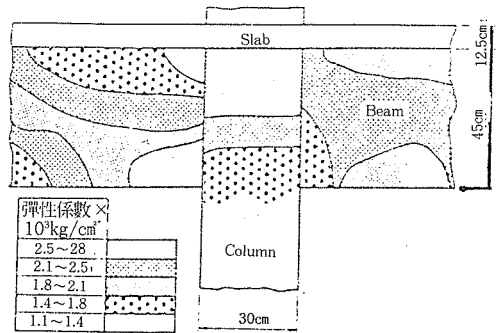
응이 시작되면 이에 소요되는 물이 시멘트 속에 스며들고 나머지 물은 여분으로서 콘크리트 내에 遊離狀態로 남게 된다. 이 여분의 물이 건조한 환경에서 증발하면 乾燥收縮이 일어나고 Syneresis 현상으로 強度가 떨어지는 원인이 된다. 따라서 물의 증발을 막기 위한 방법은 대략 세가지가 있다. 첫번째는 여분의 물이 증발하지 않게 수증양생 또는 증기양생을 하여 Swelling 상태로 하면 된다. 조기材수에 Activation하기 위하여 증기 양생을 할 경우 제품이 어떻게 물리적 또는 화학적 작용을 일으키며 硬化하고 強度를 발현하는지를 <그림 2>에 모형적으로 표시하였다. 증기양생을 개시할 때 까지의 前 養生기간이 적당치 않으면 콘크리트에 결합이 생기는데 이때 養生溫度가 20°C를 넘게 되면 強度가 떨어지게 된다. 시멘트제품의 거푸집 脫型時期를 빠르게 하고 생산기능을 높이기 위해서는 Hot Concrete를

사용하는 수도 있다. 다음에 15~20°C/hr로 온도를 상승시켜 60~80°C로 6시간 정도 경과한 후에 증기의 공급을 중지하여 降溫단계에 들어간다. 두번째로 콘크리트 내의 여분의 물을 減水시켜서 전부 없애버린다. 그러면 乾燥收縮을 일으킬 水分이 전부 없어졌기 때문에 별 문제가 없다. 이 과정에서 W/C=60% 일 때 콘크리트가 Activation하는데 28日 소요되었던 것이 減水되면서 W/C=40%일 때는 14日만에 Activation되고 W/C=30%까지는 減水되면서 1日에 Activation된다. 이以上是 化學反應이 일어나지 않은 상태이므로 W/C=30%는 한계점이며 乾燥收縮을 일으키는 水分을 모두 減水시켰으므로 결국은 普通 Portland Cement에서 高強度콘크리트로 바뀌어진 것이다. 이로서 乾燥收縮으로 인한 強度의 저하는 없어질 것이다. 그런데 콘크리트의 취약점이 일어나는 材수 30分과 이를 최소화한

으로 감소시키기 위하여 Activation하는 材
 30분에 이루어진다면 이로 인한 強度저하
 는 거의 없을것이다. 그래도 콘크리트 내의
 여분의 물을 減水시키므로써 材齡이 28日에서
 1日로 단축되며 強度의 低下를 상당히 막을
 수 있다. 그런데 이때는 減水도 化學反應이
 일어나지 않을 정도로 한계점에 달하게 된다.
 따라서 다른 방법으로 Activation이 되는 材
 齡을 30분에 접근시켜야 할 것이다. 즉 콘크
 리트의 化學反應을 촉진시키는 물이 가장 좋
 아하는 성분을 증가시키는 방법을 택하기로
 하자. 시멘트의 골격을 형성하는 C_3S 와 C_2S
 가운데서 물이 좋아하는 화합물은 C_3S 로서 보
 통 Portland Cement에는 51% 내외가 포함
 되어 있으며 Activation이 되는 材齡은 28日
 인데 비하여 C_3S 의 양을 68%로 늘일 경우
 Activation이 되는 材齡은 1日로 단축된다.
 그러나 C_3S 量의 증가도 한계점에 달하여
 Portland Cement가 Activation 되는데 소요
 되는 材齡은 빨라도 1日이므로 Portland Ce-
 ment를 1 day concrete라고도 한다. Port-
 land Cement Concrete는 콘크리트의 취약점
 에 저항할 수 있는 능력이 부족하므로 다른
 종류의 Cement를 사용하여야 할 것이다. 즉
 Activation이 材齡 2時間만에 이루어지는
 Activation Cement를 사용하여야 한다.
 Alumina Cement는 주 성분인 Al_2O_3 와 CaO
 가 Portland Cement와 거의 同量인 36~42
 %씩 포함되어 있으나 SiO_2 는 Portland Ce-
 ment보다 훨씬 적은 4~10%에 지나지 않는
 다. 여러가지 유리한 조건을 지닌 Alumina
 Cement에도 몇가지 결함이 있다. 첫째 水和
 作用이 촉진되기 때문에 시멘트 外殼이 형성
 되지않아 Alumina의 粒子가 Colloid를 2배로
 팽창시켜서 Conversion 현상이 생기고 가령
 $W/C=29\%$ 일 때는 強度 $910kg/cm^2$ 에서
 $540kg/cm^2$ 로, $W/C=65\%$ 일때는 強度 430
 kg/cm^2 에서 $50kg/cm^2$ 까지 떨어지는 현상을
 볼 수 있다.

여기서 Stein과 Stevel이 주장한 바와 같이

Cement 粒子에 保護膜을 形成시켜서 Colloid
 를 팽창시킬 수 없게 하자는 理論이 제창되었
 고 Budnikov는 Portland Cement와 石膏 또
 는 無水鹽($CaSO_4$)을 重量비로 1 : 4로 하고
 Alumina를 가하여 Calcium Sulfo Alum-
 inate 성분인 膜을 形成시키면서 強度의 低下
 를 저지하였다. 다른 한가지는 天然 骨材내에
 散在하고 있는 石英 성분이 過多할 경우에는
 常溫에서도 Alumina Cement가 물에 잘 녹지
 않으므로 熱을 가하여야 한다. 이때 高溫으로
 長期強度가 떨어지므로 여기에 高壓을 가하여
 高溫으로 인하여 생기는 팽창을 막자는 것이
 다. 이것이 高溫 $180^\circ C$ 와 10氣壓인 高壓을
 가하여 행하여지는 Autoclave 養生法이다.



<그림 3> 물로 인한 材料分離가 일어날때 생기는
 탄성계수의 변동치

<표 1> 콘크리트強度의 變動係數

용 도	변동계수 (%)
콘크리트 연목	6
dam	10
PC 교양	13
공장	15
주택	20
공장 (관리불량)	25

다음은 콘크리트에서 材料分離 현상이 일어
 날때 콘크리트 強度는 <그림 3>에서와 같이

變動이 심하다. 가령 $200\text{kg}/\text{cm}^3$ 強도의 콘크리트가 $80\text{kg}/\text{cm}^3$ 까지의 變動을 일으키는 수도 있다. 따라서 여러가지 용도에 따라 콘크리트의 強度變動에 따른 許容範圍를 정한것이 <표1>이며 Granholm에 의하여 제안된 것이다. 콘크리트를 구성하는 材料중에서 Cement와 물은 콘크리트의 強度를 결정하는 역할을 하는 Matrix Phase이며 이 材料가 材料分離를 일으키게 될 경우에는 콘크리트를 비빈후에 일어나며 넓은 뜻의 Segregation이라 한다. 한편 콘크리트의 施工軟度を 調節하는 역할을 하는 骨材를 Particle Phase라 하고 콘크리트의 구성재료는 強도와 軟度を 적절하게 하기 위하여 配合設計를 하게되며 Particle Phase가 Segregation을 일으킬 경우 비비고 있는 동안에 일어나며 좁은 뜻의 Segregation이라 한다. 좀 더 자세히 설명하면 骨材는 묽은콘크리트일 때 材料가 한군데 모이게 된다. 한편 고체인 시멘트 분말에 물을 부어서 비비면 고체입자가 흐트러져서 水中에 遊離가 되는 경우와 粒子가 상호밀착되어 凝集體를 형성하는 경우가 있으며 凝集體內에서 가끔 시멘트입자가 덩어리 상태로 그대로 남아있는 경우가 있다. 여기서 Cement Paste에 淡黃色의 분말로 된 分散劑를 섞어서 물과 비비면 Cement 표면에 電子的 二重層이 형성되며 입자표면에 생긴 貧 電氣인 Anion을 띄우고 입자상호간에 反撥하여 입자의 分散을 가지게 되어 Cement로 인한 Segregation을 막을 수 있다. 그리고 물로 인한 Segregation은 $W/C=60\%$ 일 때 원칙적으로 일어나지 않으나 경우에 따라서는 일어나는 수도 있다. 이때 콘크리트 아래쪽에 있는 水分의 일부가 滲出하여 표층에 고이게 된다. 이와 같이 고인 물은 맑은 것으로서 Bleeding Water라 한다. 상부콘크리트는 아래쪽보다 強도가 떨어지게 되고 이것을 Water gain이라 한다. 한편 材料分離가 일어나는 $W/C=70\%$ 와 같은 poor mixed의 경우 콘크리트 내에 毛細管이 형성되고 이와같이 하여 생긴 水路에 따라 아래쪽

에 있는 물의 일부가 빨리 올라가는데 이때 結合力을 잃은 시멘트일부도 같이 올라가게 된다. 이와같은 것을 sand streak라 한다. 그리고 콘크리트 표층에는 수분과 結合力을 잃은 시멘트가 섞인 것이 쌓이게 되는데 이것을 Laitance라 한다. 이때에도 強度變動은 심하게 분포된다. 따라서 재료의 Segregation을 일어나지 않게하기 위해서는 $W/C=60\%$ 로 配合하는 동시에 slump 8~12cm인 硬練Base Concrete(독일에서는 대부분 空氣 非連行, 일본에서는 空氣連行量이 4%)를 공장에서 비빈후에 현장까지 운반하고 Concrete를 打設하기 직전에 콘크리트를 流動化시켜 타설하기 쉬운 Slump값 21~23cm로 만들면 2시간 후에 다시 Slump값 8~12cm로 되돌아가므로서 물로 인한 Segregation을 완전히 막을 수 있다.

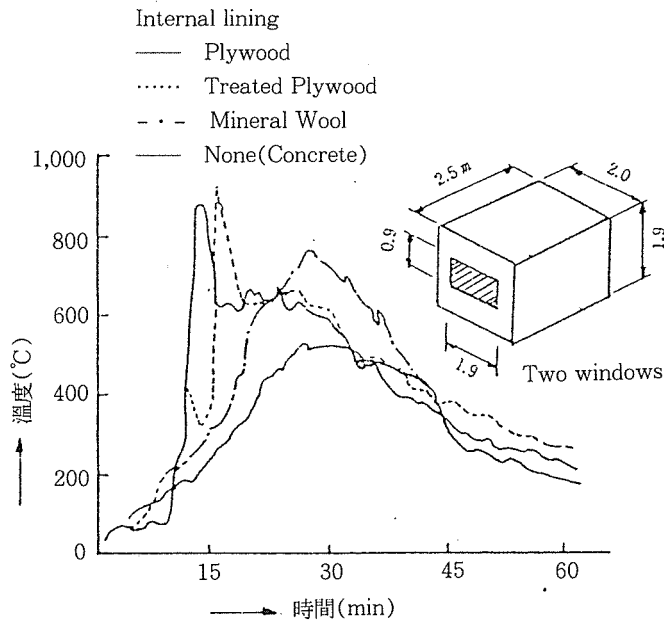
이것은 單位水量을 $170\ell/\text{m}^3$ 이하로 하여 작업성의 개선을 목적으로 개발된 것이다. 流動劑의 첨가는 Base Concrete의 配合, 流動化 전후의 Slump差, 현장까지의 수송시간, 온도에 의하여 영향을 받으므로 현장실험에서 결정된다. 配合는 Cement와 0.25mm 이하의 微砂의 합계가 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 이상인 것이 원칙적으로 모래/골재比는 軟練인 Field Concrete와 같다. 여기서 콘크리트의 強도는 管理가 소홀할 때에는 分布의 變動이 극심하여 變動幅은 設計基準値의 $1/3\sim 1/5$ 이다.

그런데 콘크리트는 引張強度에 弱한 것을 鐵筋으로 補強하는데 鐵筋이 피로를 느끼는 降伏點 이내에서의 設計強度가 일정한 것은 鐵의 제조 과정에서 이루어진다. 첫째로 鐵鑛石에 高熱을 가하여 鎔解還元하여 酸素와 다른 불순물을 제거시키고 鐵分을 集積하는 공정이며 두번째는 鐵의 組織을 정돈하므로서 鐵筋의 強度를 일정하게 할 수 있다. 鐵의 組織을 정돈하는 방법은 두 가지가 있는데 하나는 Hot Working으로서 鐵의 組織을 움직여서 정돈시킬 수 있는 變態點은 純鐵일때는 91°C 이고 炭素成分을 0~1.7% 포함하는 鐵鋼

에서는 726°C 이지만 1단계로는 1200°C로 熱을 가한후에 서서히 냉각시킨다. 이와같은 조작을 爐안에서 행할때 Annealing이라 하며 空中冷 할때는 Normalizing이라 한다. 이 과정에서 鐵의 組織이 어느정도 정돈되었으며 이 과정을 설 담금질이라 한다. 2단계로는 1200°C까지 熱을 가한 후에 急冷시킨다. 이것을 담금질(guenching, Hardening)이라 한다. 이 과정에서 鐵의 組織은 더욱 더 정돈된다. 3단계로는 變態点인 726°C 이하로 다시 熱을 가하여 鐵의 조직을 완전히 정돈시킨다. 이 과정을 되 담금질(Tempering)라 한다. 그런데 鐵의 信賴強度인 降伏点을 設計基準強度로 삼고 設計強度를 결정한다면 不足한 콘크리트의 實際強度를 도와줄 수 있다.

가령 鐵의 降伏点을 2400kg/cm²이라 하면 鐵의 設計強度는 $\sigma_{wc} = 2400 \times \frac{2}{3} = 1600 \text{kg/cm}^2$ 이며 콘크리트의 設計強度보다 強度가 떨어지는 實際強度까지 도와줄 수 있게 考案된 設計法이 許容應力度 設計法이다. 따라서 이 設計

法은 信賴性있는 設計法이 된다. 그러나 鐵筋과 Concrete가 협력하여 外力에 저항할 때 두 재료의 특성이 지나치게 차이가 있다. 強度는 鐵筋이 콘크리트의 10배, 콘크리트는 온도와 應力에 관계없이 시간이 경과함에 따라 疲로를 느끼게 되는 반면, 鐵筋은 信賴強度에 해당하는 降伏点 이내에서는 疲로를 느끼지 않지만 降伏点을 넘으면서 부터는 熱이 발생되고 應力이 작용하는 작용선상에 집중되어 Chain Molecular가 형성되면서부터 鐵筋의 強度는 변동이 생기게 된다. 그리고 變形특성도 서로 달라서 콘크리트는 脆性인데 비하여 鐵筋은 延性이다. 이와같이 두 재료의 특성에 큰 차이가 있기 때문에 信賴性에 초점을 맞추다 보면 經濟性의 문제가 생기며, 經濟性에 초점을 맞추면 信賴性에 문제점이 생긴다. 이 해결방법으로는 콘크리트의 特性을 鐵筋의 level까지 끌어올려서 材質改善하는 방법이다. 두 재료의 特性이 접근 할때는 設計段階에서 信賴性和 經濟性이 동시에 만족할 수 있다는



Series I의 경우

<그림 4> 화재시 鐵筋콘크리트 구조물의 화재온도

점에서 콘크리트를 材質改善하여 鐵筋特性에 접근시킨 후에 두 재료를 設計하면 信賴性和 經濟性を 동시에 만족할 수 있는 設計라 할 수 있는 새로운 設計法이라는 점에서 전망된다. 콘크리트 強度를 變動시키는 외적 요인으로는 地震이 내습할 때의 생기는 건물 強度의 저하현상이라든가, 환경조건으로 인한 強度變動, 火災 발생시에 건물에 미치는 強度저하, 凍結로 인한 건물 強度의 저하등을 들 수 있다. 常溫에서 온도가 상당히 상승하는 火災가 발생한 경우와 온도가 상당히 하강되어 발생하는 凍害의 경우 모두 콘크리트가 팽창되는 表層剝離현상과 균열이 생긴다. 다만 다르다면 火災때에는 균열의 모양이 크고 凍害의 경우는 작다는 점이다. 건물이 火災가 발생하여 온도가 상승하면 80°C에서 콘크리트내의 수분이 증발되기 시작하면서 750°C에 도달하면 콘크리트내의 물은 거의 증발되어 脫水상태가 된다.

가령 목조건물의 최대 화재온도는 1200°C이며, 鐵筋콘크리트구조에서는 세 가지 類型이 있는데 첫번째는 치장이 없을 때는 최고 화재온도는 200°C를 넘지 않는다.

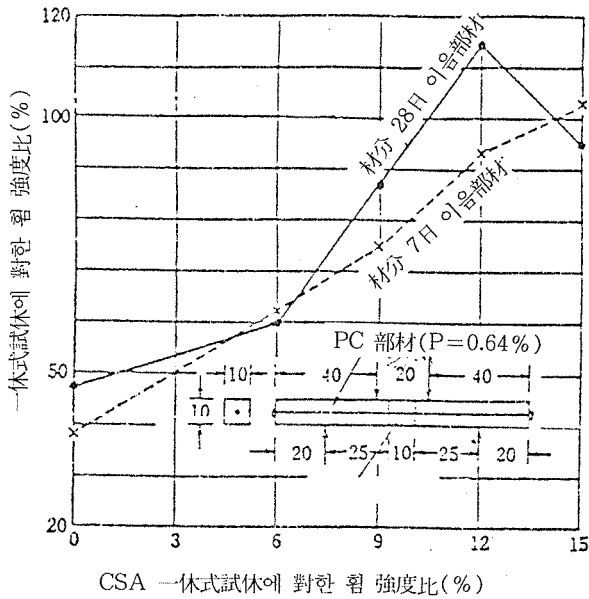
두번째로는 실내에 치장을 하였을 때에는 <그림 4>에서와 같이 화재 발생 10분까지는 100°C를 넘지 않지만 그후 단숨에 900°C까지 상승하는 Flash Over현상을 볼 수 있고 최고 온도는 1000°C를 넘지 않는다. 세 번째로는 難火燃 材料 또는 不火燃 材料를 사용하는 경우에는 보통 베니아板내에 약폼처리를 하는데 화재가 발생하여 10분정도 연소해 들어간 위치에 약폼처리를 하였기때문에 불꽃이 가라앉아서 얼핏보면 불이 꺼져가는 것으로 착각을 일으킨다. 내용인즉 다만 불은 타고 있으나 불꽃만 적게 만든것이다. 이것은 불꽃을 가라앉혀야만 들어가서 불을 끌 수 있기때문이다. 만약 이런 경우 약폼처리로 불꽃이 적어진것을 불이 꺼져가는 것으로 착각하여 적당히 물을 뿌리면 얼마후에 약폼처리한 층을 지나가면서 불꽃이 다시 솟고 1000°C를 훨씬 넘어 건물

을 철거하여야만 하는 결과를 초래한다.

가령 화재온도가 200°C이내에서는 검게 거슬리며 콘크리트 強度가 떨어지기 시작되는 200°C(보통 200~300°C 범위내)일 때는 콘크리트 색깔이 灰色에서 Pink색으로 변하며 콘크리트 품질이 떨어지는 580~600°C 범위 내일 때는 콘크리트 색이 變色해서 淡灰色으로 변화하는데 이때에는 콘크리트가 손으로도 쉽게 부슬어지는 老化현상을 일으킨다. 그리고 1600°C에서는 콘크리트가 녹아서 흐른다.

한 예로서 대연각 호텔의 화재도 아마 1000°C를 넘지 않았고 다만 붉게 변색된 콘크리트만 남아서 새로운 콘크리트로 메꾸면 될것으로 생각된다.

1000°C의 화재 때 철근의 피복 콘크리트 두께가 3cm 이라면 철근부근의 콘크리트의 온도는 200°C 정도이므로 건물을 철거하지 않아도 된다는 결론이다. 다른 한편 온도가 떨어져서 콘크리트가 凍害를 입으면 콘크리트안의 물이 얼어서 팽창하며 이로인한 압력이 클 때는 1000氣壓이 되는 수도 있다. 이와같은 壓力에 콘크리트가 견디지 못하면 깨지므로 AE劑를 사용하여 0.25mm 크기의 空隙를 만들어 두면 얼어서 생기는 壓力에 쿠션역할을 할 수 있기 때문에 콘크리트가 깨지는 것은 막을 수 있다. 한편 骨材도 습수하여 겨울에 온도가 떨어지면 骨材안의 물이 얼어서 骨材가 깨지면 Cement Paste에도 파급된다. 이와 같은 것을 막기 위해서는 자갈의 size도 제한하여 35mm 이하로 하게되면 pop out현상을 방지하게 된다. 콘크리트의 老化는 화재온도가 580°C이상일 때만 일어나는것은 아니다. 보통 콘크리트는 強 Alkali 性으로서 P.H. 12.5~13.0인 경우로서 鐵筋주변에는 피막이 형성되어 습기가 콘크리트안에 들어와도 鐵筋의 부식은 막을 수 있다. 그러나 콘크리트안에 酸性침식이 있을때 가령 大氣中에 있는 炭素가스의 침식을 받어서 콘크리트의 P.H.의 값이 6~10 정도로 떨어지게 되면 鐵筋주변에 둘러싸고 있던 피막이 파괴되면서 鐵筋이 녹슬게 되며



<그림 5> 이음새가 있는 시험체의 強度 補強狀態

鐵筋이 팽창되어 콘크리트표면은 鐵筋의 배치 위치에 따라 균열이 생긴다.

콘크리트의 酸性침식은 鐵筋의 皮복 두께에 따라 다르며 Shell Concrete가 1~1.5cm 일때는 鐵筋 주변의 皮막이 파괴되고 부식하는데 5~10년이 걸리고 鐵筋의 皮복두께가 3cm 일때는 15~20년 후에나 鐵筋을 부식시키게 된다. 近年에 와서는 建物도 인스턴트성 성질을 보이고 있고 수리, 보강하지 않고 철거시키는 경향이 있으므로 대략 建物の 수명을 20년으로 본다면 鐵筋이 부식하거나 콘크리트의 酸性침식은 문제되지 않을 것이다. 그리고 콘크리트에서 생기는 팽창은 콘크리트의 收縮현상에 대한 보상으로 팽창시키는 경우가 있다. 팽창시키는 방법은 熱을 가하는 경우와 Clinker속의 magnesia 粒子가 있으면 팽창을 일으키게 되는데 Cement속에 2%가 있으면 팽

창의 원인이 되며 30~60 μ 정도 있으면 1%가 팽창한다. 콘크리트에 海砂를 사용하거나 공장의 폐수에 접촉되었을 때에는 시멘트속에 있는 Alumin酸 石灰의 존재로 콘크리트가 異常팽창을 일으키는 수가 있다.

보통 Portland Cement 收縮을 보상하기 위하여 팽창시키는데 Alumin酸 석회 10%를 사용하고 있다. 가령 黃酸鹽이 들어있는 海水, 海砂, 工場排水에 Alumin酸 石灰가 접촉하면 콘크리트의 異常 팽창으로 파괴된다. 이것은 Alumin酸 石灰의 水和物에 黃酸鹽이 反應하여 큰 부피의 Cement Bazillus현상이 일어나기 때문이다. 이와같은 것을 방지하려면 Alumin酸 石灰가 4%정도만 들어가 있는 Special Cement를 사용하면 큰 부피가 형성되어 일어나는 콘크리트의 파괴는 막을 수 있다. 한편 콘크리트를 팽창시키는 목적은 部材들을 연결시키기 위하여 만든 이음部材에 있어서도 특성을 나타낸다.

보통 콘크리트 部材의 이음새는 본체 콘크리트의 強度의 40%정도가 저하하지만 이음새를 팽창콘크리트로 施工하면 強度가 기대된다. 이것은 이음부분에 타설한 膨脹콘크리트가 팽창되어 그 양쪽을 구속하므로써 이음부분에서의 팽창요인인 Ettringite결정이 본체 콘크리트 空隙속으로 들어가 박혀서 완전히 접착된 결과라 하겠다.

이것은 콘크리트部材를 운반하기 쉬운 무게 또는 길이로 만들어서 현장까지 운반한 후에 이들을 일체로 연결하여도 원래 한개로 만들어진 부재와 동등한 力學的 特性을 가지게 된다.

이것은 Precast部材로서 組立 構造물을 축조 하는것을 바라던 꿈이 실현되어가고 있음을 알 수 있다.