

熱의 作用에 의한 콘크리트 力學的 性質의 變化

金 和 中

(慶北大 工科大学 建築工學科 教授, 工博)

1. 序論

콘크리트를 微視的으로 보면 그 成分은 간 骨材, 굵은 骨材, 未水和시멘트 粒子, 수산화칼슘결정립, 시멘트겔(Cement Gel), 겔空隙(Gel Pore), 毛細管空隙, 間隙水, 공기포로 構成된 多相材料이다.

콘크리트의 여러가지 材料特性은 이 微視的인 組成과 密接한 關係를 가진다. 따라서, 콘크리트에 熱이 作用하면 콘크리트의 力學的 性質은 이 組成들의 物理的, 化學的 變化에 의해 크게 變化한다.

具體的으로 살펴보면, 콘크리트 内部에는 自由水, 吸着水, 隕水, 毛細管水, 結合水등 다양한 形態의 水分을 함유하고 있기 때문에 熱의 作用에 의해 이들 水分이 증발, 移動 또는 凍結등으로 콘크리트의 力學的 性質에 여러가지 影響을 미친다. 또 溫度의 變化에 따라 骨材나 시멘트 水和物은 容積變化를 일으키며, 水分의 移動 또한 容積變化를 가져온다는 것은 말할 것도 없다. 그밖에 熱作用에 의해 水和가 급격히 進行하거나, 높은 溫度의 作用에 따라 시멘트水和物이나 骨材중의 결정등이 分解하여 버리는 경우도 있다.

다시 말하면, 콘크리트에 熱이 作用하면 시멘트水和物이나 骨材의 化學的 變化뿐만 아니라 콘크리트 各 組成의 容積變化 差와 熱이 作用

할 때의 溫度구배에 의한 熱應力등에 의해 콘크리트의 内部가 局部的으로 破壞하는 등 콘크리트 全體의 力學的 性質이 變化하게 된다. 이하에 1988年 9月 第17號의 “콘크리트와 熱”의 連載로서 熱의 作用과 콘크리트의 力學的 性質 變化에 대하여 概略的으로 서술한다.

2. 高溫作用에 의한 力學的 性質 變化

高溫作用에 의한 콘크리트의 力學的 性質의 變化를 端的으로 나타내기 위하여 普通 및 高強度 콘크리트의 熱間에서의 應力度-變形度 曲線을 그림-1, 2에 나타낸다. 또 그림-3에 高溫에 있어서 普通콘크리트의 反復荷重에 의한 應力度-變形度 曲線의 전형적인 例를 몇가

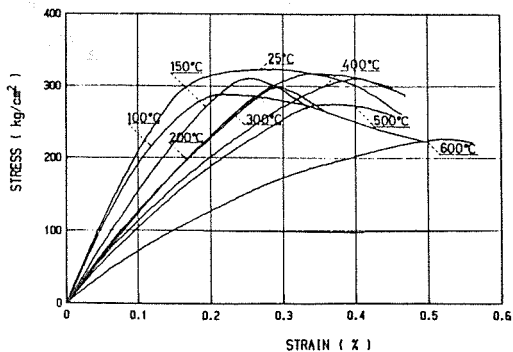


그림-1 普通強度콘크리트의 應力度-變形度關係

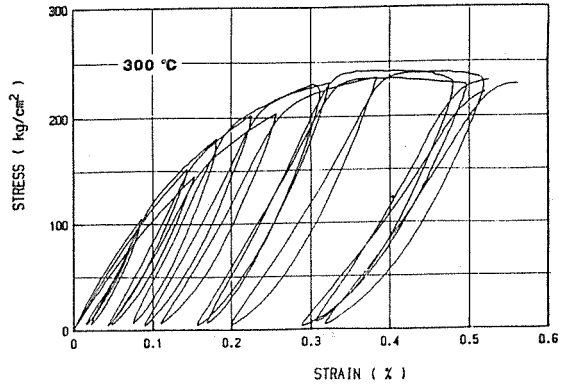
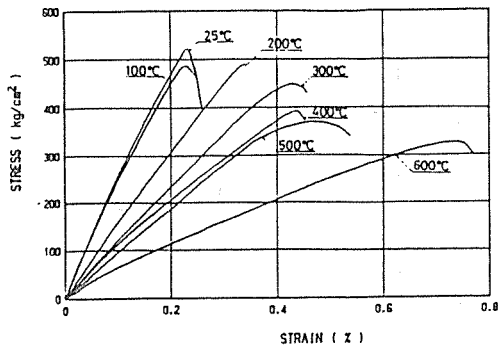


그림-2 高強度 콘크리트의 應力度-變形度 關係

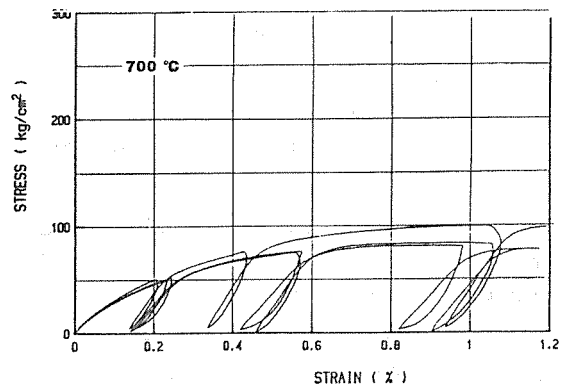
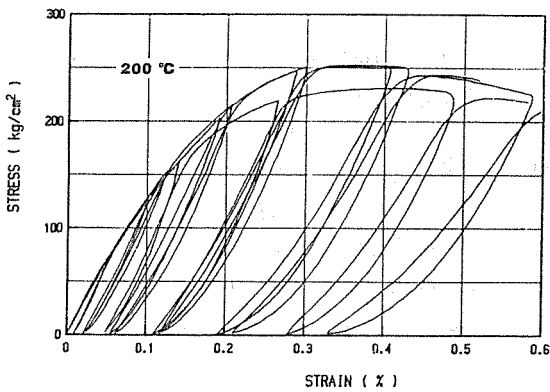
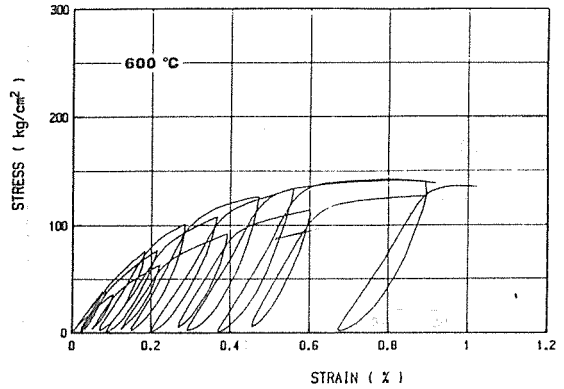
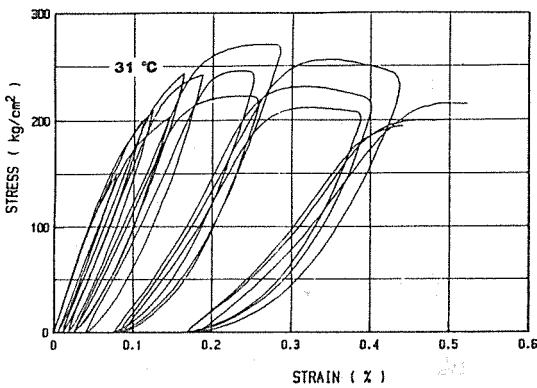


그림-3 反復荷重下에서의 普通콘크리트의 應力度-變形度 關係

지 나타낸다.

그림-4, 5, 6은 콘크리트 熱間에서의 最小強度, 最大強度 時의 變形과 彈性係數($E_{1\beta}$)의 溫度에 의한 變化를 나타낸 것이다.

이들 자료는 모두 溫度勾配의해 콘크리트가 破壞되지 않는 範圍위에 短時間에 加熱하여 구한 것이다.

콘크리트의 力學的 性質은 熱에 대하여 극히

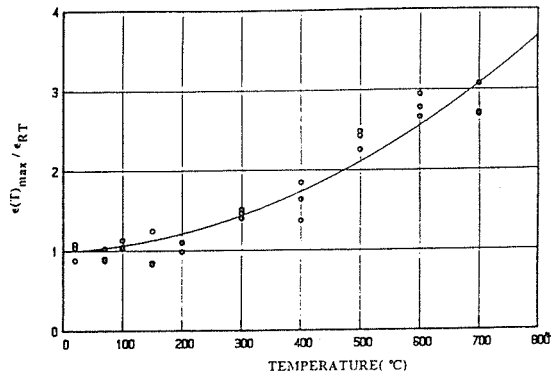
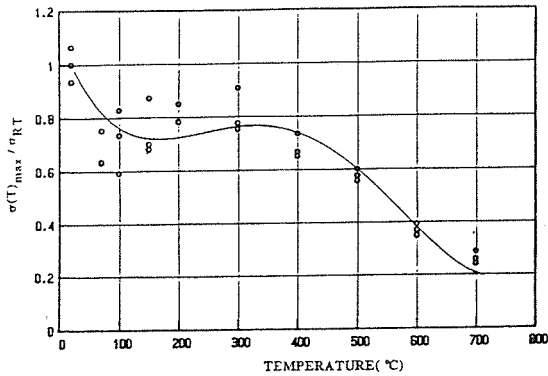
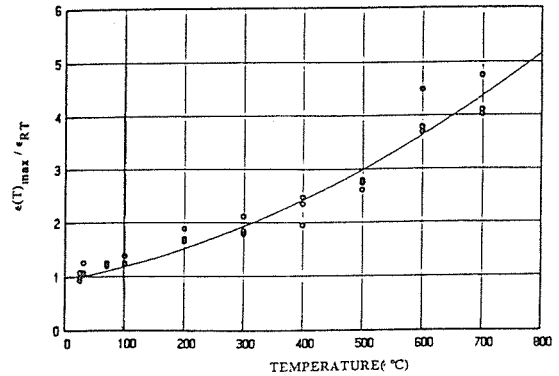
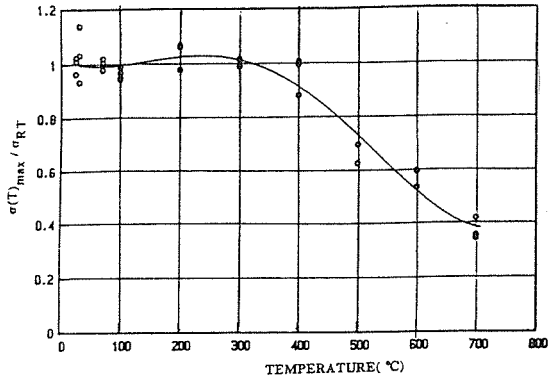


그림-4 最大應력과 溫度

그림-5 最大應力時의 變形과 溫度

민감하다. 그림-3에서도 알 수 있듯이 最大應力은 100°C 부근에서 減少하고, 200°C 근처에서 다시 增加한다. 200°C~400°C 溫度에 있어서 最大應力은 그다지 變動하지 않지만 그 後 700°C까지는 급격히 減少한다. 이들 現狀은 주로 콘크리트 内部水分의 증발, 시멘트 水和物의 變化, 骨材에 포함되어 있는 石英의 결정구조 變化에 의한 膨脹이 관계하고 있다고 생각된다. 이것은 그림-7, 8의 重量減少와 熱膨脹 試驗結果에 의해 어느정도 理解할 수 있다. 즉 實溫(20~30°C)에서 100°C 및 400~700°C 溫度範圍에 있어서 콘크리트 重量減少와 400~600°C에 있어서 콘크리트의 熱膨脹 變動은 他의 溫度 範圍와 比較하여 꽤 크다.

最大應力時의 變形은 溫度上昇에 따라 增加하는 반면에 彈性係數는 減少하며, 實溫~100°C의 溫度에서 彈性係數는 현저한 減少를 나타낸

다.

콘크리트의 力學的性質은 시멘트와 骨材 種類에 따라서도 크게 영향을 받는다. 外國의 實驗結果를 그림-9, 10에 나타낸다. 強度-溫度特性에 있어서 骨材 種類의 영향은 그림-9에서 보는 바와 같이 石灰石과 輕量骨材콘크리트는 珪岩콘크리트에 比較하여 強度 低下를 나타내는 溫度는 높다. 시멘트 種類의 영향은 거의 없으나 500°C를 넘으면 보통 포틀랜드시멘트 모르타르가 고로시멘트, 트래스(trass)시멘트 모르타르 보다 급격히 強度 低下한다.

콘크리트의 強度는 加熱溫度 뿐만 아니라 加力條件등에 의해서도 달라진다. 그림-11의 曲線은 加熱溫度와 콘크리트 強度의 關係를 百分率로 나타낸 것이다. 그림 중에서 ①의 部分은 약 33kg/cm²의 壓縮應力을 作用시킨 狀態에서 加熱하여 所定의 溫度에 도달한 後, 그대로 熱

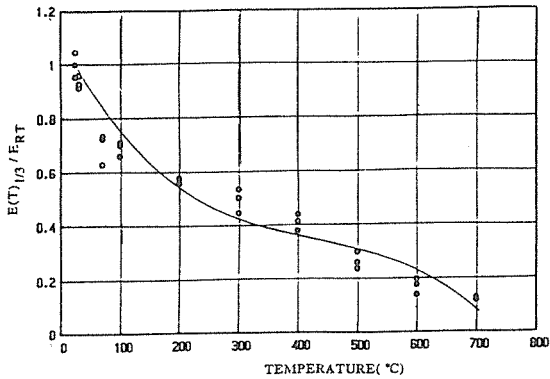


그림-6 彈性係數와 溫度

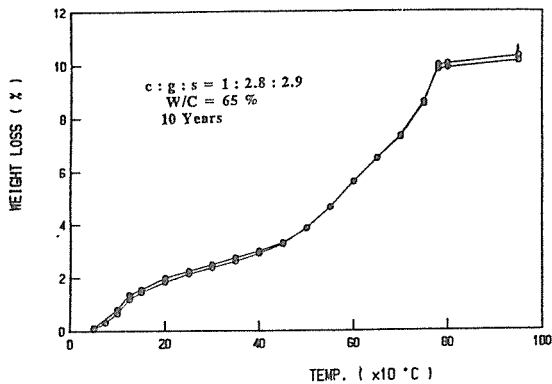
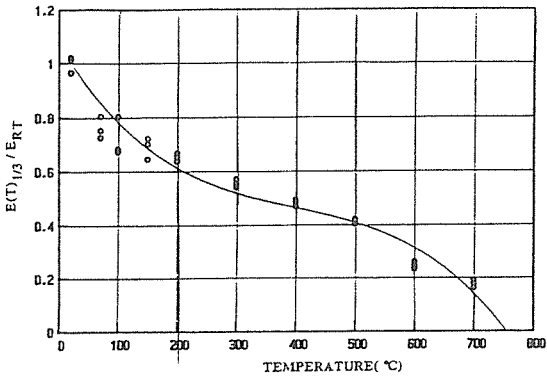


그림-7 콘크리트의 重量減少와 溫度

間에서 壓縮強度를 구한 것이고 ②는 無荷重에서 加熱하여 所定の 溫度가 된 후, 熱間에서 壓縮強度를 구한 것이고 ③은 無荷重에서 加熱하여 所定の 溫度에 도달한 후, 實溫까지 冷

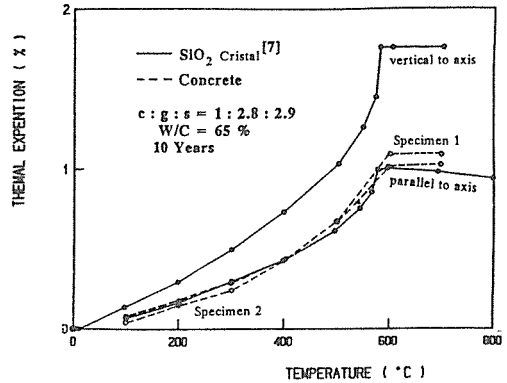


그림-8 콘크리트의 熱膨脹과 石英의 熱膨脹

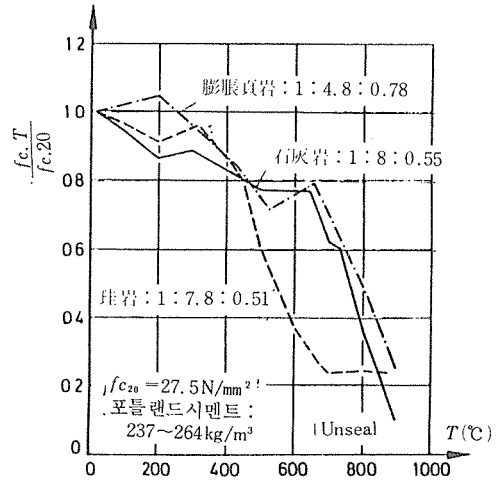


그림-9 高温下의 壓縮強度에 영향을 주는 骨材 種類의 影響¹⁾

却하여 實驗한 것이다. 強度의 百分率은 ①, ②, ③의 順으로 작아지고, 試驗條件이 같은 경우에는 시멘트에 대한 骨材의 量이 많을 수록 強度의 低下率은 적다. 이러한 이유는 콘크리트가 加熱되면, 콘크리트 内部의 骨材는 膨脹하고 시멘트페이스트水縮하므로 콘크리트 中에는 無數의 微細龜裂이 發生하기 때문이다. 이는 시멘트 페이스트 量이 많은 콘크리트일 수록 현저하다. 또 콘크리트를 加熱한 경우, 콘크리트 表面은 내부보다 溫度가 높으므로, 溫度勾配에 의해 콘크리트 表面에는 壓縮應力이, 内部에는 引張應

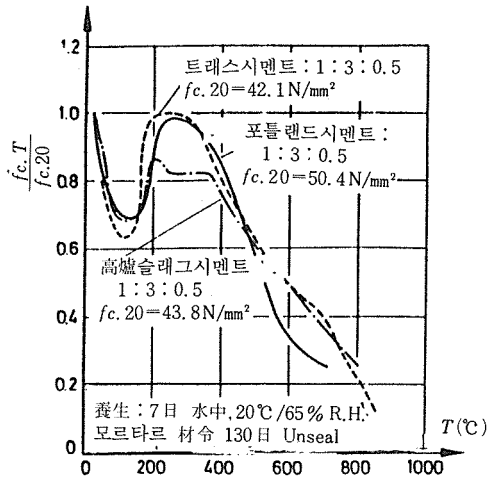


그림 - 10 高温下의 壓縮強度에 영향을 주는 시멘트 種類의 影響

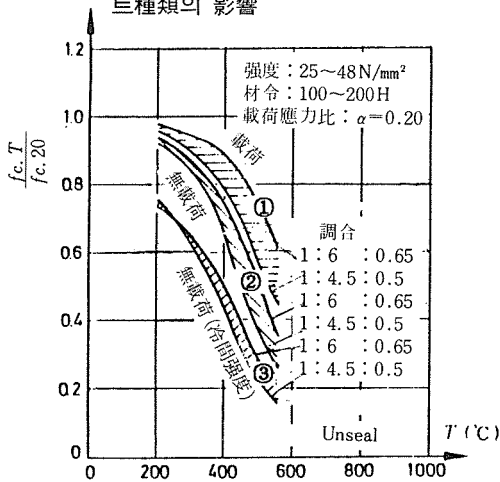


그림 - 11 콘크리트 壓縮強度에 미치는 調合과 實驗方法의 影響

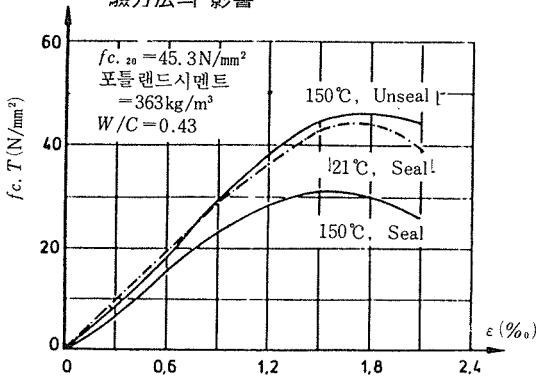


그림 - 12 石灰岩콘크리트 高温舉動에 미치는 seal의 影響

력이 발생한다. 따라서 콘크리트는 引張力이 極히 약하므로 이 溫度勾配에 의하여 생긴 引張應力으로 인해 損傷을 받기 쉽다. 요컨대, 이 引張應力을 없앨 수 있는 壓縮應力을 작용시켜 加熱하면, 그 損傷을 防止할 수 있다.

한번 高温에 加熱한 콘크리트를 冷却한 경우는, 加熱하는 경우와는 반대로 콘크리트의 表面에 引張應力이, 内部에 壓縮應力이 발생한다. 그러므로 加熱後 冷却한 콘크리트는 熱間 試驗의 것 보다도 더욱 더 심한 損傷을 받게되어 強度는 一層 低下한다. 이상의 이유에서 加熱한後 冷却한 것이 더 弱하고, 적당한 壓縮應力을 作用시킨 狀態에서 加熱하여 試驗한 것이 더 強하게 된다. 그림-12는 脫水防止를 위한 표면 密封콘크리트(sealed concrete)와 密封하지 않은 콘크리트(unsealed concrete)의 高温에 있어서 應力度-變形度 曲線이다. 그림에서 알 수 있듯이 sealed concrete가 unsealed concrete에 비해 強度와 彈性係數가 큰것을 보아 水分移動이 콘크리트의 力學的 性質에 影響을 주는 것을 알 수 있다.

그림-13은 高温에서의 콘크리트의 全變形(彈性變形+크리이프變形)曲線을 나타내고, 그림-14는 각 應力水準에서의 크리이프變形만을 나타낸다. 또 그림-15는 이들 크리이프變形試驗과 동시에 얻어진 應力度-變形度曲線이다. 콘크리트의 크리이프變形은 高温에서 加熱되어 지면 크리이프變形은 급격히 增大한다. 그림-16은 時間과 크리이프變形的 兩代數關係를 나타내는 것으로 크리이프變形과 時間은 指數關係를 가지고 있는것을 이 그림에서 알 수 있다.

그림-17은 各 應力水準과 크리이프變形關係를 나타내고 있다.

일반적으로 最大應力의 2/3이하의 作用應力下에서 應力과 크리이프關係는 線形的 關係라 일컬어 지고 있으나 이 試驗의 結果에서 보면 作用應力에 대한 크리이프에 變形的 增加는 반드시 線形은 아니다. 크리이프變形에 대한 溫度影響을 그림-17에 표시한다. 크리이프變形에 대한 溫度의 影響은 作用應力에서의 影響과

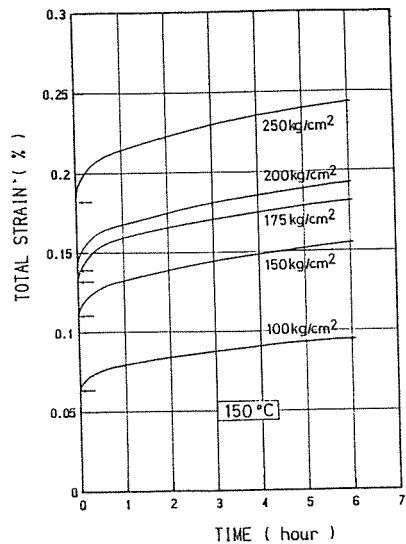
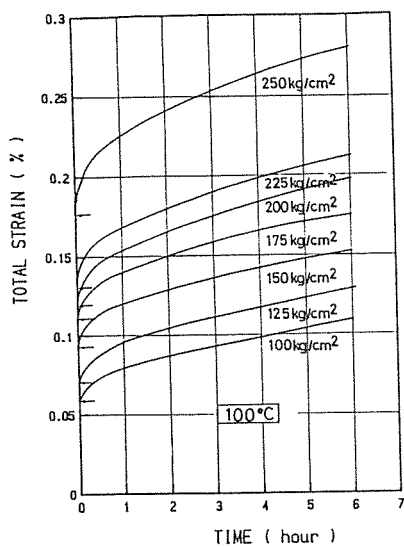


그림 - 13 普通콘크리트의 全變形과 時間關係

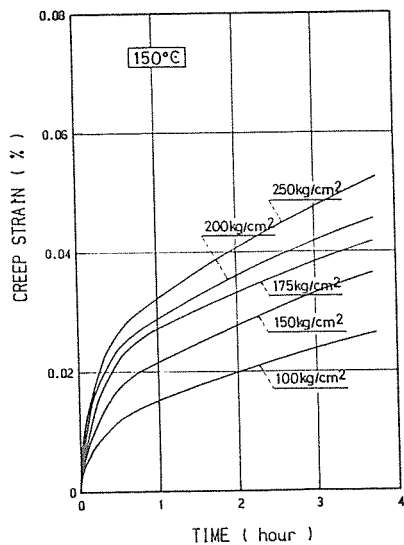
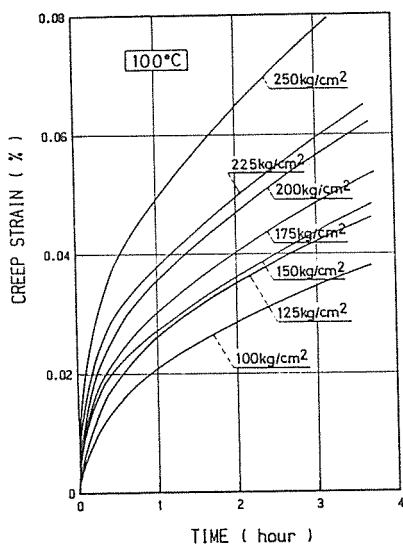


그림 - 14 普通콘크리트의 크리이프變形과 時間關係

마찬가지로 복잡하다. 일반적으로 一定應力下에서 100°C의 크리이프變形은 150°C~300°C의 크리이프變形보다 크고, 150°C~300°C의 크리이프變形은 거의같다. 그러나 400°C를 넘어서 부터는 급격히 增加한다. 이 현상은 應力度-變形

關係에서의 溫度影響과 마찬가지로 주로 콘크리트 内部의 水分移動, 시멘트水和物의 變化, 骨材의 결정의 變化에 의한 膨脹에 關係하고 있다고 생각된다. 그림-18에는 應力이 段階的으로 變化할 때의 全變形과 時間關係를 나타내

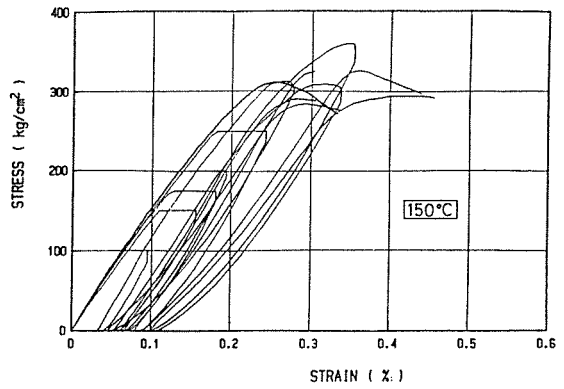
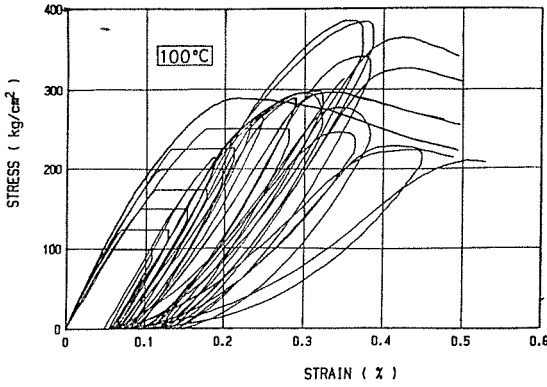


그림-15 크리이프實驗에서 同時에 얻어진 應力度-變形度 關係

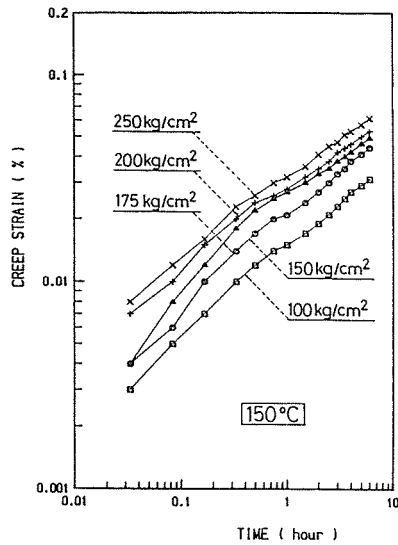
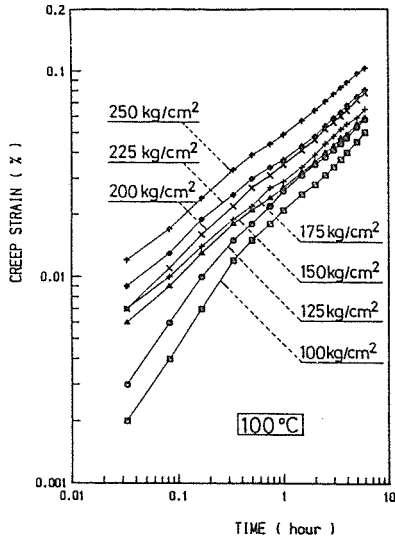


그림-16 콘크리트의 크리이프變形과 時間의 兩對數 關係

고 있으며, 그림-19는 그와 同時에 얻어진 應力度-變形도를 나타낸다.

그림-20은 高溫加熱 後의 철근의 附着強度를 百分率로 나타낸 것이다. 100°C까지의 加熱에 의한 附着強度의 低下는 크고, 強度, 彈性係數, 크리이프變形 등의 다른 力學的性質은 加熱에 의한 變化와 비슷하다. 熱間에서의 철근의 力學的性質에 대한 變化를 나타내기 위하여 그림-21에 高溫에서 SS41材의 應力度-變形度曲線의 變化를 나타낸다.

3. 低溫作用에 의한 力學的性質 變化

低溫에서 콘크리트의 力學的性質에 관한 실험은 현재까지 별로 없다. 0°C근방에서의 凍結 용해에 대한 耐久性에 관한 문헌은 상당히 많지만, -30°C이하의 溫度環境에서의 콘크리트 性質에 관한 문헌은 거의 없다. 이는, 이와 같은 溫度에서의 콘크리트 性質이 콘크리트 構造物을 實際로 築造하는 경우에 있어서 그 필요

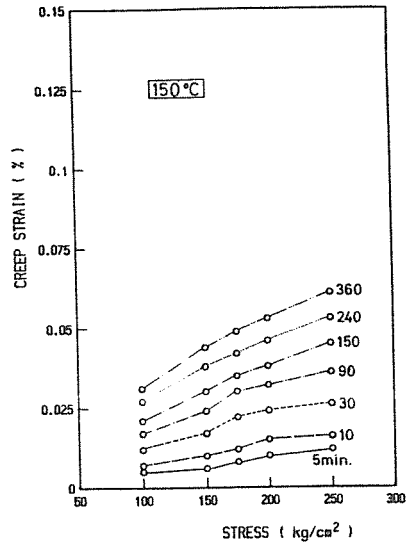
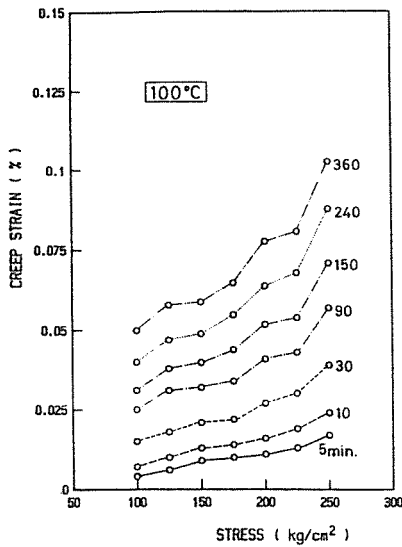


그림 - 17 콘크리트의 크리이프變形과 作用應力關係

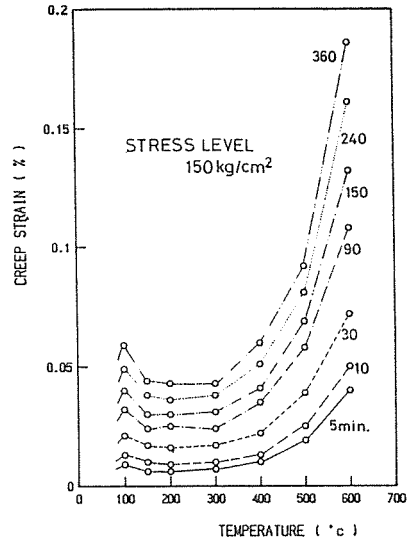
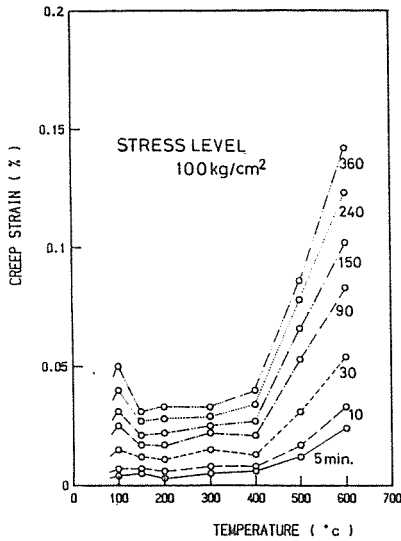


그림 - 18 콘크리트의 크리이프變形과 溫度關係

성이 적기때문인 것으로 생각된다.

그러나, 최근에 있어서는 天然가스 資源의 開發進展과 에너지원으로서 天然가스의 利用進歩에 의해 液化天然가스(주성분은 메탄, -162°C 에서 液化)저장을 위한 탱크가 철근콘크리트로 제조됨에 따라 招低溫에서의 콘크리트의 諸般性質

이 중요시되게 되었다. 이하에 低溫에서의 콘크리트의 力學的性質에 관하여 개괄하여 설명한다.

우선, 氣象條件에 의한 低溫作用으로서 콘크리트의 水分이 凍結용해에 의한 콘크리트 力學的性質의 노화가 있다. 콘크리트 内部의 水分이 凍結하는 溫度는 0°C 가 아니고 약간 氷点降下

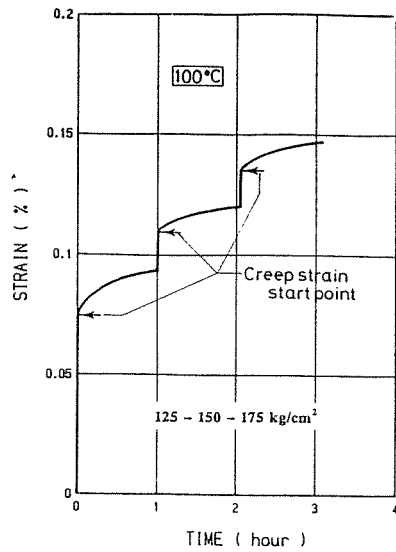
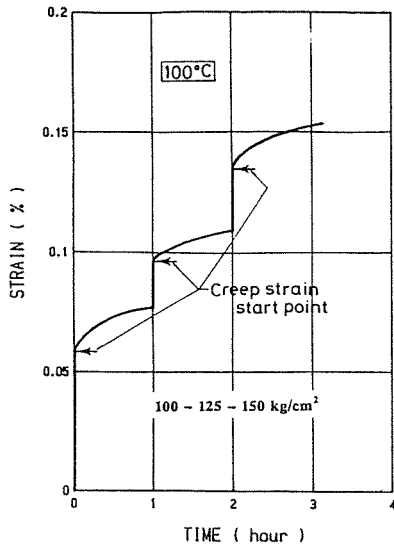


그림 - 19 단계荷重下에서 콘크리트의 全變形

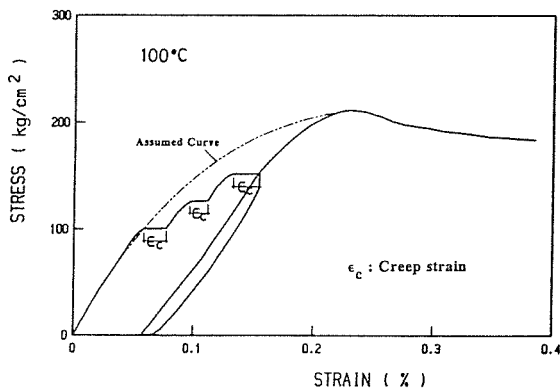
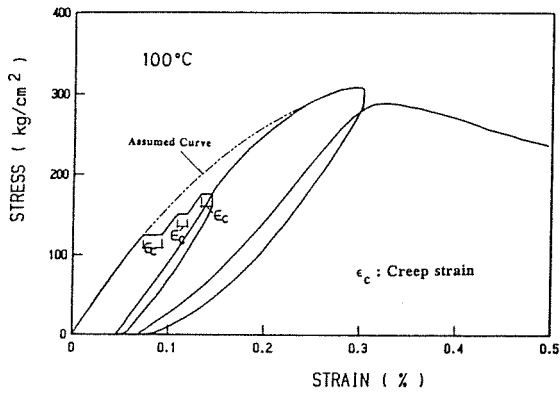


그림 - 19 단계荷重下의 콘크리트 크리이프 實驗에서 얻어진 應力度 - 變形度 關係

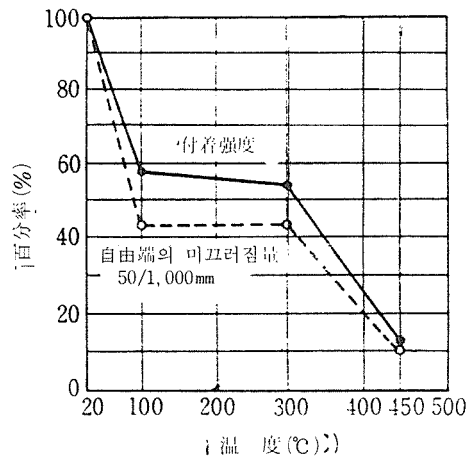


그림 - 20 高温加熱 後에 있어서 鐵筋의 附着強度의 百分率

를 나타내어 0~ -1°C 사이에서 凍結한다고 알려져 있다.

물이 얼음으로 변할때 그 체적은 비약적으로 증대한다. 0°C 일때의 얼음 密度는 약 0.92g/cm^3 이므로 이 때 체적은 1.09배로 증가한다. 얼음의 熱膨脹係數는 53×10^{-6} 이고, 콘크리트 구성재료의 熱膨脹係數와 비교하면 상당히 크다. 溫度

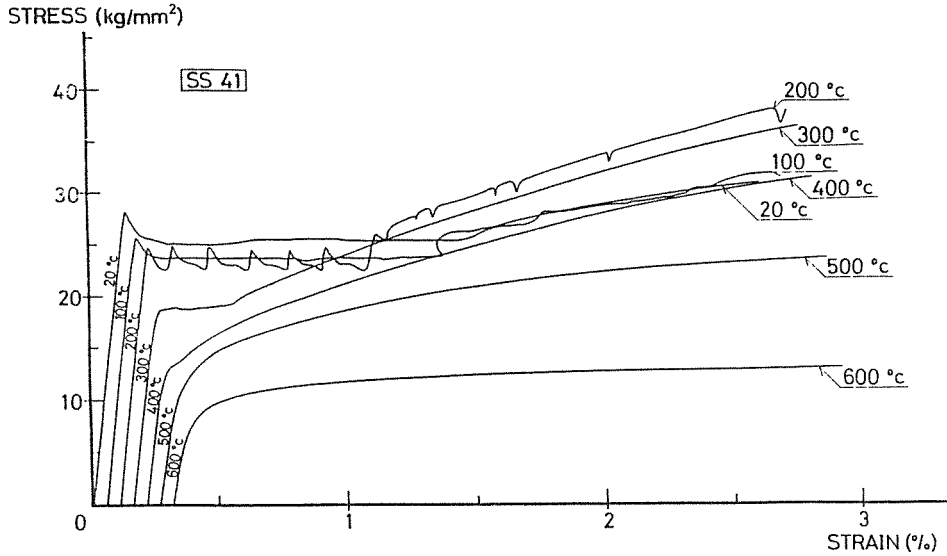


그림-21 鐵材(SS 41)의 應力度-變形度 關係

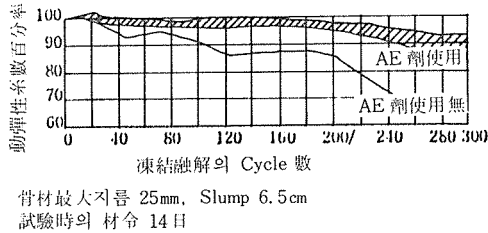


그림-22 凍結融解 Cycle에 의한 動彈性係數의 低下

가 점차 낮아지는 경우도 이값은 거의 변하지 않는다. 콘크리트는 주로 毛細管水가 氷結할 때의 체적증가에 의한 水壓의 原因으로 내부조직이 파괴되고, 強度나 彈性係數가 低下한다.

이 氷結時의 水壓은 시멘트페이스트의 含水狀態, 凍結速度, 공기포 간격 및 크기 空氣, 骨材의 種類등의 요인에 의해 영향을 받는다.

凍結융해에 의한 콘크리트의 노화를 개선하기 위해서는 적당한 크기, 간격 및 量의 空氣를 시멘트에 넣어야 한다. 그림-22는 AE劑를 사용한것과 사용하지 않은것에 대하여 凍結융해 사이클에 의한 動彈性係數의 低下를 나타내고 있다.

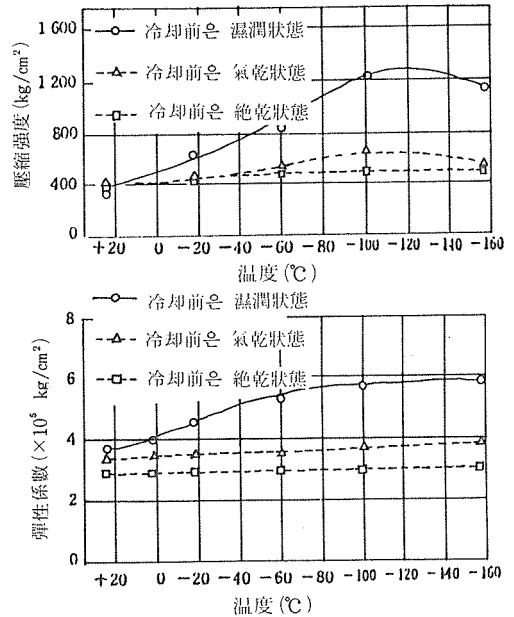


그림-23 冷却한 콘크리트의 壓縮強度와 彈性係數의 變化

常溫~超低溫에서 콘크리트의 力學的性質 變化를 나타내기 위하여 그림-23에 冷却전의 각종 常態에 있는 콘크리트를 低溫에서 冷却한

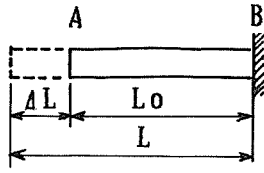


그림 - 24

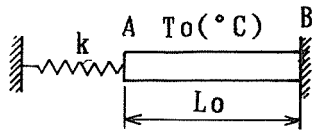


그림 - 25

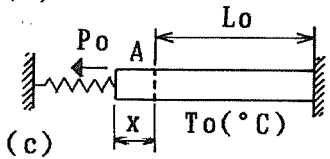
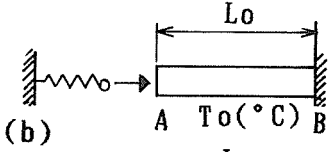
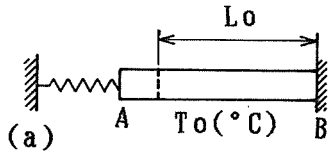


그림 - 26

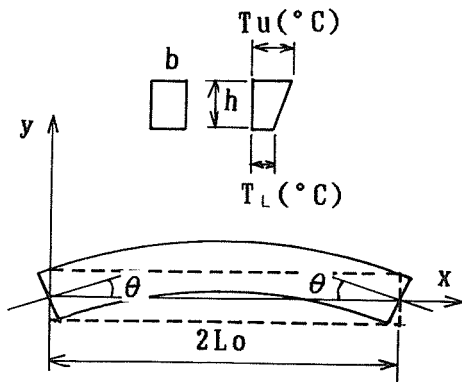


그림 - 27

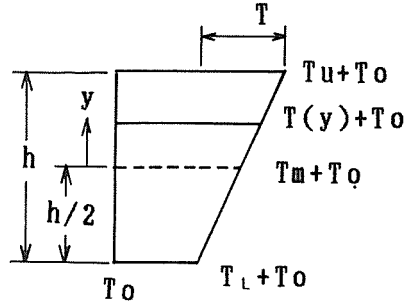


그림 - 28

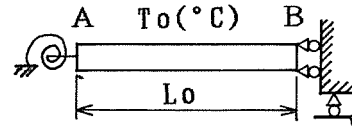


그림 - 29

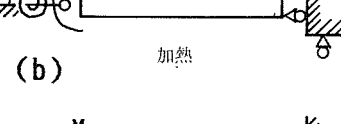
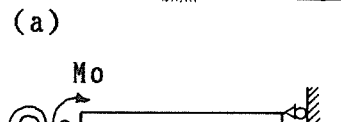
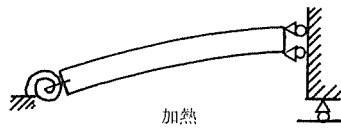


그림 - 30

경우의 壓縮強度 및 動彈性係數의 變化를 나타낸다. 冷却前 濕潤常態에 있는 콘크리트는 低溫下에서 強度, 彈性係數가 급격히 증대하고, -100°C 에서의 強度는 常溫의 약 3 배, 彈性係數는 약 1.5배까지 증대한다. 이 以下の 低溫度에

서는 強度와 彈性係數는 거의 증대하지 않는다. 이는 콘크리트 내부의 얼음이 6각형의 構造를 가진 얼음(溫度: 0~ -115°C)에서, 정사방형의 구조를 가지는 얼음(溫度: -115~ -115°C)으로 變態하는데 그 원인이 있다고 생각되고 있다.

冷却前 乾燥常態 및 絶乾狀態에 방치한 콘크리트는 低溫에서 거의 強度와 彈性係數는 變化하지 않는다.

低溫에서 콘크리트의 크리이프에 관하여서는 아직 충분한 研究結果가 없으나 低溫이 됨에 따라서 크리이프 變形은 減少하는 경향이 있다고 한다.

4. 熱作用에 의한 철근콘크리트의 部材에 생기는 應力

철근콘크리트의 構造部材는 熱의 作用을 받으면 材長變化와 만곡이 생긴다. 材端을 구속시키지 않은 單一部材에서는 이들 變形이 그대로 나타나지만 보통 構造部材는 材端이 彈性固定되어 있으므로 部材의 熱變形은 그 彈性固定度에 따라 拘束되어 内部應力을 일으킨다. 이 内部應力을 熱應力이라 한다.

이 熱應力이 상당히 크거나 작용하는 熱이 상당히 高溫인 경우에는 콘크리트는 소성變形이나 크리이프變形을 수반하여 材端의 拘束도 彈性固定이 아니고 점탄소성固定이 된다.

콘크리트에 引張力이 作用하는 경우에는 약간의 힘으로도 균열이 발생하며 또한, 콘크리트는 高溫에 의하여 力學的性質 및 熱的性質이 대폭적으로 變化함으로, 熱의 作用下에서의 철근콘크리트内部의 力學的 舉動은 일반적으로 논하기 매우 어렵다. 여기서, 說明을 간단히 하기 위하여 콘크리트와 철근의 線膨脹率은 溫度에 關係없이 일정하다고 하자. 또, 콘크리트 및 철근은 完全彈性體로 보고 그 彈性係數만 溫度의 函數로 한다. 이하에 있어서 應力 및 均열은 引張을 陽으로 한다.

우선 材長 L_0 , 斷面積 A_0 (A_c : 콘크리트 斷面積, A_s : 철근의 斷面積)의 部材가 溫度 T_0 (C)에서 T (C)로 전길이에 걸쳐서 일정하게 溫度

가 上昇하여 材長이 L 로 늘었다고 한다.(그림-24), 材의 熱變形 L 은 다음식으로 나타내진다.

$$\Delta L = L - L_0 = \alpha(T - T_0) L_0 \dots\dots(1)$$

여기서, α : 콘크리트 및 철근의 線膨脹率이다. 따라서 원길이 L_0 에 대한 伸張率(變形) ϵ' 는

$$\epsilon' = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha(T - T_0) \dots\dots(2)$$

이다.

材端 A는 완전한 自由端이므로, 部材中에 熱應力은 생기지 않는다.

다음으로 材端 A에 그림-25와 같이 材長變化를 拘束하는 彈性용수철을 설치한 경우를 생각하자. 여기서 이 용수철의 단위길이의 變形을 일으키는데 필요한 힘을 K 라고 하자. (용수철 계수 K)

部材 AB에 $T - T_0$ (C)인 溫度上昇을 주면, 그림-26(a)와 같이 용수철의 拘束力에 따른 熱變形밖에 허용되지 않으므로, 부재 AB에는 熱應力이 생긴다. 여기서는 다음 순서로 이 熱變形과 熱應力을 구한다. 우선, 그림-26(b)와 같이 加熱전에 A端에서 용수철과 部材를 떼어 둔다. 加熱하면 部材AB는 늘어나려 하지만 여기서는 이를 완전히 저지할 수 있도록 A端에 壓縮力 P_0 를 가한다. 다음에 다시 部材와 용수철을 接合하여 원래의 構造로 한다. 이 構造에 (b)에서 가한 荷重 P_0 를 반대방향으로 가한다. 이를 그림-26(c)와 같이 나타낸다. (b)와(c)를 합친 것이 (a)의 狀態이다. 결국, 端部 A에서 外力은 서로 상쇄되어 熱應力만이 남게 된다. 또한, 熱應力은 (c)의 變形狀態에서 구할 수 있다. 그림(b)에서 가할 수 있는 荷重 P_0 는 식(2)에 주어진 自由膨脹을 저지하는 힘이므로,

$$P_0 = -AeE_T \epsilon' = -AeE_T \alpha(T - T_0) \dots\dots(3)$$

여기서, E_T : 溫度 T (C)에서의 콘크리트 彈性係數

$$Ae : (AcE_T + AsE_T') / E_T = Ac + As(E_T' / E_T)$$

E_T' : 溫度 $T(C)$ 에서의 철근 彈性係數

다음 (c)에서 x 만큼 變形이 생기고 外力 $-P_0$ 와 평형되었다고 하면, A점에서의 힘의 평형식은 다음식으로 얻어진다.

$$-P_0 = Kx + AeE_T \frac{x}{L_0} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, (c)에서의 部材의 變形 ϵ'' 는

$$\epsilon'' = \frac{x}{L_0} = \frac{AeE_T \alpha (T - T_0)}{KL_0 + AeE_T} \dots\dots\dots(5)$$

가 된다. 따라서, 熱應力에 의한 變形 ϵ 는

$$\begin{aligned} \epsilon &= -\epsilon' + \epsilon'' = -\alpha(T - T_0) + \frac{AeE_T \alpha (T - T_0)}{KL_0 + AeE_T} \\ &= \frac{-\alpha(T - T_0)KL_0}{KL_0 + AeET} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

그러므로, 部材에 생기는 熱應力은,

$$P = AeE_T \epsilon = -KL_0 \epsilon'' \dots\dots\dots(7)$$

가 된다.

더우기, 그림-25에서 加熱전에 荷重 P 가 作用하고 있을 때의 熱應力도 위와같은 수법으로 구할 수 있다. 다음에 部材의 斷面內에 溫度 구배가 생겨 만곡되는 경우를 생각하자. 이하에서 曲率은 위로 볼록한(凸)경우를 陽으로 한다.

그림-27과 같이 溫度 $T_0(C)$ 인 철근 콘크리트 部材가 加熱되는 경우를 생각한다. 加熱 후 部材內의 溫度분포는 部材의 길이방향에서는 일정하지만, 縱방향에서는 直線의으로 變化하고 있다. 그 결과 部材斷面의 縱方向의 위치 y 에 의해 伸張量이 달라지므로, 部材전체는 圖示한 바와 같이 變形한다.

그림-28에서와 같이 y 의 위치에서 初期溫度 T_0 에서 上昇한 溫度 $T(y)$ 는 다음 식으로 된다.

$$T(y) = T_m + \frac{\Delta T}{h} y \dots\dots\dots(8)$$

여기서, $T_m = \frac{1}{2}(T_u + T_l)$, $\Delta T = T_u - T_l$

이다.

따라서, 部材의 斷面中心에서의 伸張率은

$T(0) = T_m$ 이므로,

$$\epsilon_m = \alpha T_m$$

이고 y 의 위치에서의 伸張率은,

$$\epsilon(y) = \alpha T(y) \dots\dots\dots(9)$$

가 된다.

여기서, 部材에 생긴 曲率은 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{1}{\rho'} = \frac{\epsilon(h/2) - \epsilon_m}{h/2} = \frac{\alpha \Delta T}{h} \dots\dots\dots(10)$$

여기서, 端部の 回轉角 θ 는

$$\theta = L_0 \frac{\alpha \Delta T}{h} \dots\dots\dots(11)$$

中央部の 처짐 δ 는 다음식으로 된다.

$$\delta = \frac{L_0^2}{2} \frac{\alpha \Delta T}{h} \dots\dots\dots(12)$$

결국, 部材는 伸張 ϵ_m 에 의한 伸縮과 曲率 $1/\rho'$ 에 의한 만곡이 생기게 된다.

그러나, 이하에서는 材측방향의 伸張은 전에 간단한 예로써 설명하였으므로 溫度구배에 의한 만곡의 효과만을 생각한다.

그림-29와 같이 材端의 回轉을 拘束한 彈性 용수철을 붙인 경우를 생각한다. 여기서, 이 용수철이 端에 回轉角을 주는데 요하는 힘을 k 라 한다. 部材 AB에 앞에 생각하였던 것과 마찬가지로 溫度구배를 주었을때 部材중에서 생기는 熱應力 및 熱變形을 구한다. (그림-30)

순서는 材長變形的의 경우와 같다. 우선 그림-30와 같이 加熱하기 전에 A端에서 용수철과 部材를 떼어준다. 加熱하면 部材 AB는 휘려고 하지만 이를 완전히 저지할 수 있도록 A端에 彎모멘트 M_0 를 가한다. 다음에 다시 部材와 용수철을 接合하여 원래의 構造로 한다. 이 構造에 (b)에서 가한 荷重을 반대 방향으로 가한다. 이것은 그림-30(c)에 나타낸다. (b)와 (c)의 狀態를 합친 원래의 狀態가 (a)이다. 熱變形은 (c)에서 구해진다.

溫度 T (T 는 常溫이나, T_m , T_u , T_l 등의 값을 넣어도 좋다)에서의 콘크리트의 彈性係數를 E

라한다. 이외에 溫度에서 콘크리트 및 철근을 彈性係數 E_T 와 等價한 콘크리트 斷面으로 치환하여 구한 斷面이차모멘트를 I_e 로하면 그림-30(b)에서 가해야 하는 모멘트 M_0 는 $-1/\rho'$ 의 曲率을 생기게 하는데 필요한 모멘트이므로,

$$M_0 = -\frac{1}{\rho'} E_T I_e = -E_T I_c \alpha \frac{\Delta T}{h} \dots\dots\dots (13)$$

가 된다.

다음에 (c)에서 θ_x 만 회전시켜 外力모멘트 M_0 와 平行하다고 하면, A점의 平衡식은 다음 식으로 된다.

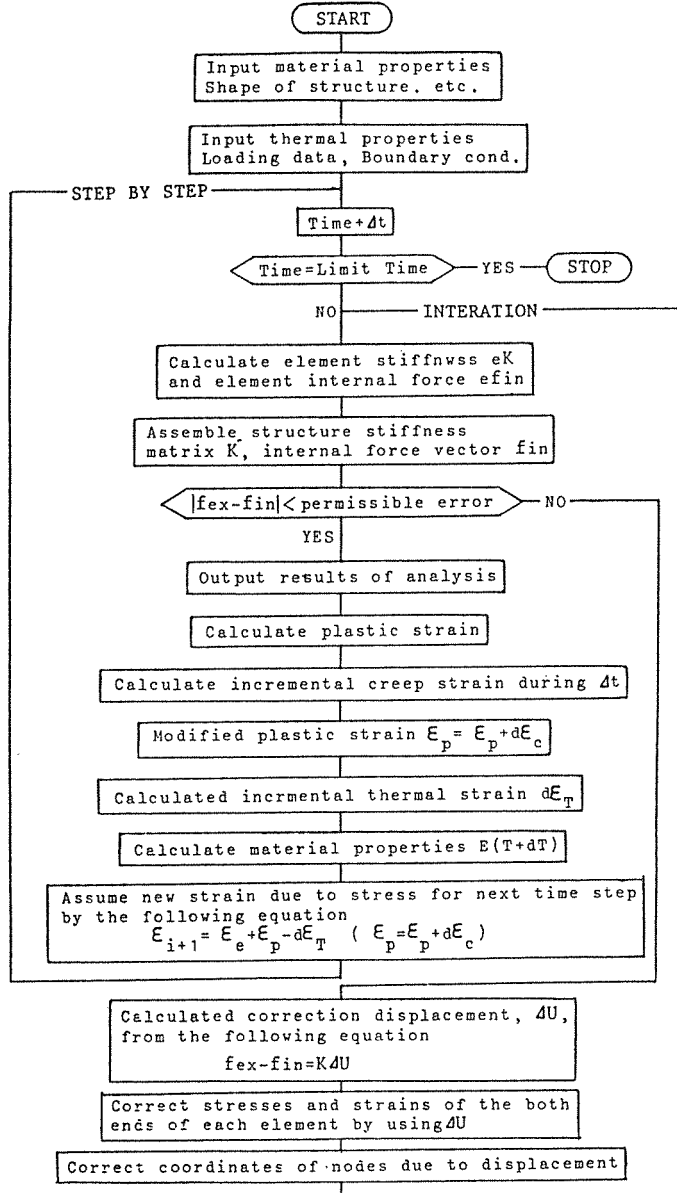


그림-31 熱應力 解析 順序

$$-M_0 = K\Theta_x + E_T I_e \frac{\Theta_x}{L_0} \dots\dots\dots(14)$$

여기서, (c)에 있어서 部材중에 생긴 曲率 $1/\rho''$ 는

$$\frac{1}{\rho''} = \frac{\Theta_x}{L_0} = \frac{E_T I_e}{K L_0 + E_T I_e} \alpha \frac{\Delta T}{h} \dots\dots(15)$$

가 된다.

따라서, 熱應力에 의한 曲率 $1/\rho''$ 는,

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= \frac{1}{\rho'} + \frac{1}{\rho''} = -\alpha \frac{\Delta T}{h} + \frac{E_T I_e}{K L_0 + E_T I_e} \alpha \frac{\Delta T}{h} \\ &= \frac{K L_0}{K L_0 + E_T I_e} \alpha \frac{\Delta T}{h} \end{aligned}$$

그러므로 部材에 생긴 熱應力은,

$$M = E_T I_e \frac{1}{\rho} = -K L_0 \frac{1}{\rho''}$$

가 된다.

결국, 伸張과 만곡이 同時에 일으키는 경우에 대해서도 같은 방법으로 熱應力을 구할 수 있다.

5. 高溫, 低溫을 받은 콘크리트의 構造物

콘크리트의 構造物에 熱이 作用하면, 熱應力이 各 部材에 생기고, 경우에 따라서는 構造物의 各 部位에 損傷이 생긴다.

構造物에 熱이 作用할 때의 力學的性質에 대해서는 지금까지 서술한 各種溫度下에서의 콘크리트 諸般性質에 관한 자료를 이용하여 熱應力 解析法으로 해명할 수 있다. 1次元 複合非線形有限要素法에 의한 解析順序를 그림-31에 나타낸다. 이 順序에 따라 解析한 例의 結果를 그림-34, 35, 36에 나타낸다. 解析한 部材의 溫度分布는 그림-32와 같고, 모델은-33과 같다.

그림-32의 骨造 上部 보의 中央部分의 처짐을 보면 콘크리트의 熱에 의한 膨脹과 損傷에 의해 溫度上昇과 더불어 커지고 있으며 引張側의 콘크리트가 破壞되면서 부터 처짐은 다시 減少하고 있다. 그리고 철근의 항복과 함께 처짐

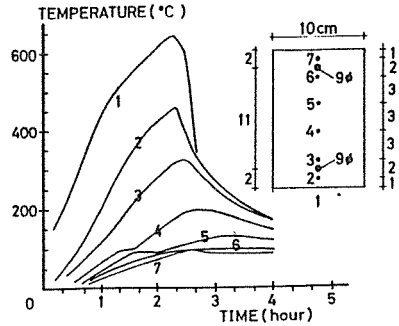


그림-32 加熱時 上部보의 溫度分布

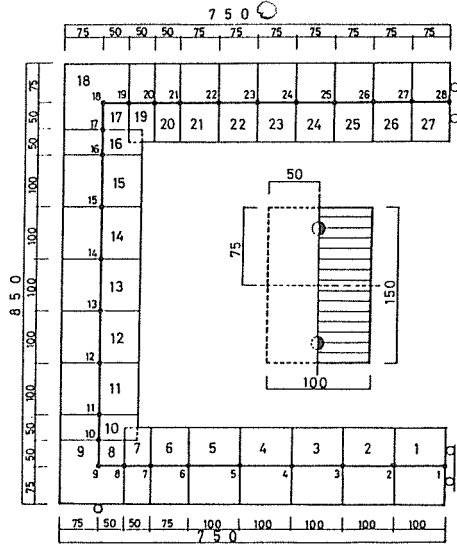


그림-33 骨組의 解析모델

은 또다시 커지는 現狀을 나타내고 있다.

그림-33의 上部 보 伸率의 變化는 콘크리트의 熱膨脹에 의해 溫度上昇과 더불어 커지고 있다. 또한 그림-32와 그림-33의 結果를 종합하여 그림-34에 時間에 따른 骨組全體의 變形을 나타낸다.

사진 1, 2와 3에 火災에 의한 철근콘크리트 構造物의 火害實例를 나타낸다.

그림-37은 철근콘크리트조의 低溫倉庫의 劈에 生길 變形과 均열의 想定圖이다. 低溫倉庫에서는 50°C前後의 溫度降下(+20°C ~ -30°C)에 의하여 기초보가 收縮되지 않고 變形拘束이 되

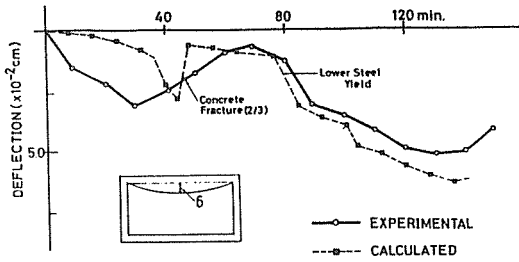


그림-34 加熱時 上部부의 처짐

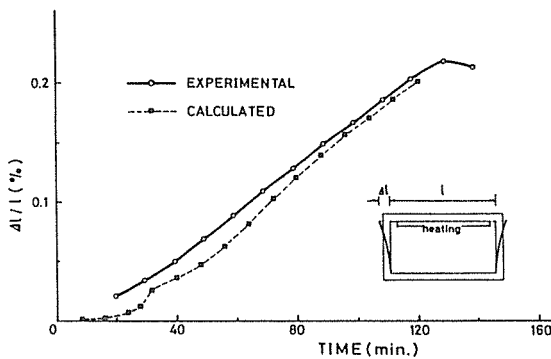


그림-35 加熱時 上部부의伸率

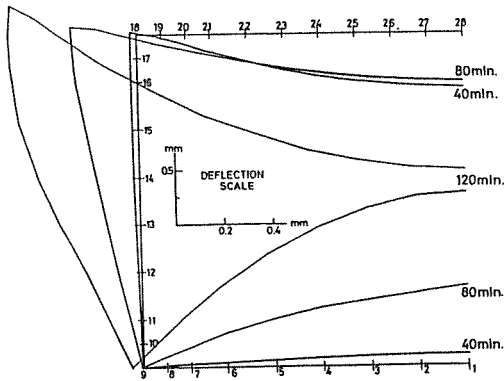


그림-36 加熱時 骨組의 變形

므로 벽면에는 균열이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 原子爐壓力容器, 海水淡水化裝置, LNG 탱크등 심한 熱의 作用을 받는 構造物을 콘크리트로 구축하는 것이 점차 增加하고 있는 실정에서 대개의 경우, 熱作用하에서의 콘크리트 性質을 충분히 알고 있으면, 적절한 設計를 할 수 있다. 또한, 콘크리트는 構造材料로서 뿐만

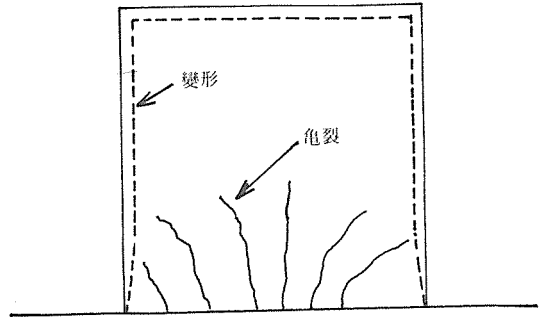


그림-37 低溫창고의 壁에 생길 變形과 균열의 想定圖

아니라 斷熱材料로서도 충분히 活用해야 할 것이다.

끝으로 資料를 提供하여 주신 日本 東京工業大學 教授 古村福次郎 先生에게 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

- 1) 古村福次郎：高湿度におけるコンクリートの力学的性質に関する研究(その 1~3), 日本建築学会論文報告集, No. 172~174, 昭和 45年 6~8月
- 2) 古村福次郎：高温度におけるコンクリートの第一期クリープについて、日本建築学会大会梗概集, 1976
- 3) Fire Research 1957 Report of the Fire Research Board and the Report of the Director of Fire Research, Department of Scientific and Industrial Research and Fire Offices' Committee, Joint Fire Research Organization, Her Majesty's Stationery Office, London, 1958
- 4) H.L. Malhotra : The effect of temperature on the compressive strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 18, No. 23, Aug. 1956
- 5) F. Furumura, T. Harada, J. Takeda and S. Yamane : Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, ACI Seminar on Concrete for Nuclear Reactor, West Berlin, Oct. 1970
- 6) 古村福次郎：高温度における建築用鋼材の第一期クリープに関する実験、日本建築学会大会梗概

集, 1978

- 7) 狩野春一監修, 岸谷孝一: 콘크리트技術事典
- 8) G. E. Moufore and A. E. Lentz: Physical properties of concrete at very low temperatures, Journal of the PCA, May 1962
- 9) 岩崎訓明: 콘크리트의特性, 共立出版
- 10) R. Johansen and C. H. Best: Creep of concrete with and without ice in the system, RILEM Bulletin, N. S. Not 16, 1962
- 12) 古村福次郎: 火熱을うけた鉄筋콘크리트構造の被害について, 日本建築学会論文報告集, No. 103, 昭和 39年 10月
- 12) 日本建築学会編: 鉄筋콘크리트煙突の構造設計指針
- 13) 池田昭男, 林俊雄, 藤井俊二: 温度応力による壁式 RC 造冷凍庫の収縮, 日本建築学会大会梗覽集, 1978
- 14) 金和中: 高温度における콘크리트의力學的拳動에關する實驗的研究, 東京工業大學博士論文
- 15) Schneider, U.: Behaviour of Concrete at High Temperature, BERLIN 1982, RILEM COMMITTEE 44-PHT

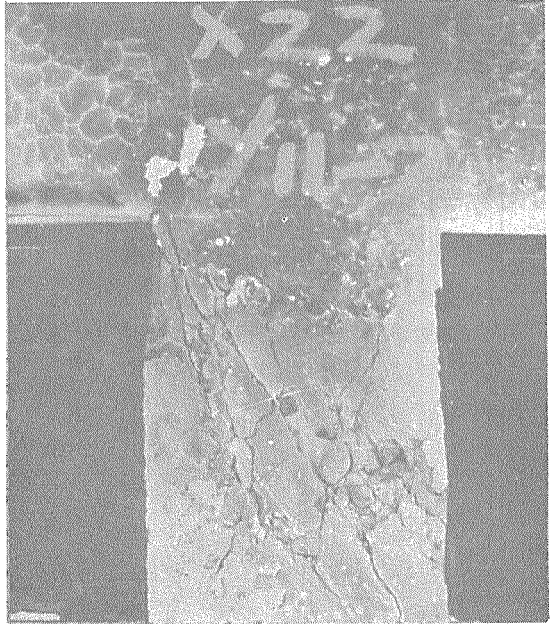


사진-2 火災에 의한 보의 처짐



사진-1 보의 熱膨脹에 의한 기둥의 전단破壞



사진-3 火熱에 의한 材料의 熱膨脹差로 인한 損傷