

建築構造設計에 관한 小考 (1)

鄭 日 榮 (서울工大教授)

序 論

(1) 構造設計의 目的

철근콘크리트 구조는 철근과 콘크리트라는 異質의 素材를 조합한 複合構造로서 각각의 소재의 特性을 발휘시킨 설계技法을 사용한 것이다. 1800年代 후반기에 실용화됨으로서 이미 수백십년의 實績을 가지면서 그동안 콘크리트나 철근의 品質향상, 설계, 시공등의 進보와 더불어 구조물의 主体構造로서 지위를 확보하고 있다는 것은 自他가 共認하는 바이다. 특히 耐火性, 耐久性, 低廉한 管理유지비 더구나 콘크리트의 可塑性을 이용한 造形의 多樣性등의 特長이 콘크리트의 보급, 보편화에 크게 影響을 주었다는 것은 特記할 事實이다. 재료의 品質향상 설계 시공기술이 발달함에 따라 과거 여러차례의 改計를 거친 끝에 오늘에 이르렀고 더구나 近年에 이르러서는 철근이나 콘크리트의 品種의 多樣化, 品質향상, 공법의 進보, 구조해석법의 발달이 顯著함에 따라 철근콘크리트 구조물의 설계 시공의 地침이나 기준을 재검토할 必要性을 가지게 되었고 1953년경부터 CEB (歐洲콘크리트委員會)에서 作業을 하게 되었다. 특히 1964년에서 1970년에 이르러서는 確率論的手法을 도입한 구조설계의 국제지침^{1),2)}이 제안되었다. 지금은 그 설계이념을 구체화하기 위한 資料가 충분히 整理되어 있지 않기 때문에 完전한 形體의 確率論的手法이 설계법으로는 되어있지 않으나 그 구조설계에 대한 생각은 參考할 點이 많다. 여기서 구조설계의 目的을 단적으로 말하면 建築主의 要求를 完전히 만족시키는 구조물을 提供하는 것이다. 이와같은 要求의 一般적인 사항으로는

- 1) 필요한 空間이 확보되어야 할것.
- 2) 耐用年限中 구조물이 만족스러운 性能을 지니고 있을 것.
- 3) 건설비, 유지비등의 總合經費가 低廉할 것등을 들 수 있다. 이 가운데서도 제 1항목은 구조 계획상 의 基本적 사항으로서 再論할 餘地가 없다. 제 2항목의 구조물이 만족할만한 性能의 內容은 대단히 다양하며 구조물이 놓여진 狀態에 따라 그 要求내용이 달라진

다. 보통의 使用狀態下에서는 구조물에 과대한 變形이나 振動障害等에 따라 그 기능을 잃은 경우는 없으며 所用의 使用性(serviceability)을 가지고 있으면 된다. 특히 철근콘크리트 구조에서는 過大한 龜裂은 철근에 녹을 슬 게하여 구조물의 耐力低下를 초래하므로써 균열폭을 所定의 범위내에 있게할 必要가 있다.또한 보통 使用狀態下에서 反復荷重을 받는 구조물에서는 구조체가 疲労破壞 하지 않도록 配慮하여야 한다. 한편 태풍과 같이 偶發的 이긴 하지만 구조물의 耐用年限中 받을 것이라고 예상되는 過大荷重에 대한 구조물은 所定의 구조안전성을 가지고 있어야하며 그 內容은 구조물의 종류와 重要度, 荷重의 規模및 發生頻度등이 다르기 때문이지만 어느 경우에도 人命을 손상시키지 않는다는 것이 最低限의 要求사항 일 것이다. 가령 학교나 병원과 같이 대다수인이 이용할 뿐 아니라 災害發生時에는 被災者나 負傷者의 수용장소가 될 가능성이 있는 구조물에서는 시종 구조물이 健全 하여야 한다는 것이 요망되겠으나 倉庫와 같이 住居人이 거의 없는 구조물의 경우 發生빈도가 대단히 적은 경우에는 구조물이 필요이상으로 健全한 것은 불경제이다. 人命이 損傷치 않은 範圍에서는 구조물의 局部的인 破壞는 허용된다. 또한 偶發的인 荷重으로서 태풍개스 폭발, 자동차 또는 항공기의 충돌등은 建物の 耐用年限中 반드시 작용한다고 限定할 수 없는 말하자면 異常한 偶發的 荷重일 것이다. 구조물이 만족하여야 할 또 한가지 性能으로는 火災時에 要求될 性能이 있다. 구조물은 화재시에 住居人이 피난하는데 충분한 時間적 余裕가 있어야 하며 또한 구조물이 화재로 因하여 인접한 건축물에 위험을 주거나 防水性能및 耐火性能을 장비하고 있어야한다. 제 3의 要求항목에 있어서의 經費문제도 또한 重要하다. 구조물에 소요되는 모든 경비로서는 설계비도 포함된 당초 건설비, 유지관리비, 災害등에 대한 保險料, 피해를 받았을 때의 補修費, 耐用年限에 達할 때의 撤去費등을 들을 수 있다. 이와같은 總合經費를 될수있는대로 적게하는 것도 구조설계상의 重要항목의 하나이다.

(2) 構造設計의 現況과 問題點

구조설계의 목적은 앞서 말한바와 같이 건축주의 모든 요구항목을 만족시키는 구조물을 제공하는데 있었다. 그러나 이와같은 모든 요구를 완전히 만족시키는 구조설계의 system은 지금까지는 확립되어 있지 않다. 앞서 기술한 CEB 國際指針의 구조설계법도 上記의 모든 요구항목을 될수있는대로 많이 만족할 수 있게 配慮되어 있으나 그 설계이념을 具體化하기 위한 뒷받침이 되어있지 않다. 현재 日常的으로 시행하고 있는 철근콘크리트 구조물의 구조설계의 순서를 概略하면 <그림 - 1>과 같이 된다.

<그림 - 1> 構造設計의 順序

構	造	計	劃
構	造	解	析
		(應力計算)	
		(断面計算)	
		構造 図 面	
		構造 計算書의 作成	
		完	了

이것을 크게 나누면 구조설계의 제 1 단계로서의 구조계획과 제 2 단계인 구조해석 및 구조계산서 및 구조도면의 작성과 같은 순서로 작업이 진행된다. 먼저 구조계획의 단계에서는 구조물의 평면계획, 立地條件, 건설예산 등을 생각하면서 구조형식 (Rahmen 構造, 壁式構造, Shell構造等), 구조물의 dimension (기둥間隙, 層高), 기초의 형식 (獨立基礎, 말뚝基礎別) 등을 결정한다. 이와같은 구조계획은 구조물의 성능이나 경제성에 깊은 관계가 있는 것은 사실이지만 지금까지는 体系的으로 설계방법이 확립되어있지 않다. 구조설계의 제 2 단계로서의 구조해석은 먼저 해석상 필요한 部材断面치수, 사용재료의 품질 등의 假定을 한 다음에 應力計算을 하여 構造各部의 断面力 (휨모멘트, 비틀모멘트, 剪斷力, 軸方向力等)을 구하고 이에 대한 단면계산을 하여 應力計算의 결과와 대조하면서 구조안전성 또는 사용상의 입장에서 部材의 断面치수, 配筋의 詳細等を 결정한다. 최종적으로 構造計算書나 構造図面作成은 구조설계의 작업을 終了하는 것이 된다. 여기서 CEP-FIP 國際指針 이외에 현재 實用되고 있는 구조설계 방법으로는 許容応力度法 (allowable stress method) 荷重係數法 (Load factor method)의 두가지로 대별하게 되고 前者는 재료의 역학적 특성을 完全彈性으로 보고 재료의 응력도가 구조안전성 또는 사용성을 고려하여 정한 허용응력도 以下에 있게 되도록

설계하는 방법으로서 옛부터 사용되어온 구조설계법이다. 우리나라의 철근콘크리트 구조물의 설계기준은 아직도 이 방법에 의거하고 있다. 일반적으로 철근콘크리트 구조는 철근과 콘크리트라는 異質의 素材를 조합한 複合構造이기 때문에 이론해석이 까다롭지만 각각의 재료를 完全彈性으로 보기 때문에 철근과 콘크리트의 Young's Modulus의 比의 개념을 사용하여 이론해석을 簡單化할 수 있었다.

허용응력도는 장기적으로 작용하는 普通荷重에 대하여는 콘크리트의 許容壓縮応力度를 材今28日 壓縮強度의 40%程度, 철근의 許容引張応力度를 公稱降伏點의 60%前後로 택하고 있다. 또한 振動 바람과 같이 偶發的으로 작용하는 過大荷重에 대한 콘크리트의 허용압축 응력도는 압축강도의 2/3程度, 철근의 허용인장응력도는 公稱降伏點으로 잡는 것이 보통이다. 部材의 變形量 균열폭의 제한등 구조물의 사용성에 관한 檢定은 變形量, 균열폭을 직접 산정하는 방법에 의한 경우도 있으나 대부분의 경우 변형량은 부재단면의 憵 d와 span l과의 比 d/l를 제한함으로써 또한 균열폭은 균열부분을 貫通하는 철근의 응력과 밀접한 관계가 있는 것을 이용하여 철근의 허용인장응력도에 제한을 둌으로써 각각 간접적으로 그들의 크기를 制御하는 방법이 취하여져 있다. 앞서 말한바와 같이 허용응력도법은 線形理論을 적용하기 위한 해석이 비교적 容易하다는 利點을 가지고 있다. 그러나 실제로는 非線形材料일 뿐만 아니라 철근콘크리트 부재는 載荷初期段階에 균열이 발생하고 결코 完全한 彈性的 挙動을 나타내지 않고 있다. 이때문에 허용응력도법에 의하여 구한 部材의 許容耐力는 終局耐力의 指標로 하기에는 적합하지 않다는 缺點을 지니고 있다. 다음에 荷重係數法이란 所定의 하중계수를 곱하여 얻은 荷重値를 가지고 설계용 断面力을 구하고 塑性理論에 의하여 구한 部材의 終局耐力이 설계용 단면력을 上廻하게 설계하는 방법으로서 이미 歐美 各國에서는 널리 사용하고 있다.^{3),4)} 다만 이 하중계수법의 경우에도 부재의 단면력을 구하는 경우의 응력계산은 彈性解析에 의하는 경우가 많고 균열에 의한 剛性低下나 塑性變形을 고려하여 단면력을 구하는 일은 드물다. 부재의 終局耐力은 塑性理論에 의하여 비교적 정확히 추정할 수 있으므로 하중계수를 적당히 선정함으로써 구조물 또는 부재에 所定의 구조안전성을 출수 있다. 그러나 이 하중계수의 設定에 대하여는 그다지 명확한 근거가 없이 하는 試行錯誤的으로 그 값을 決하는 현상이고 <표 - 1>에 나타낸 바와같이 하중계수법을 채용하여 각국의 설계기준^{3),4),5)}을 보아도 그값은 모두 相違하다. 그리고 부재의 처짐이나 균열폭의 검토는 별도로 할 필요가 있다. 한가지 방법으로는 처짐이나 균열폭을 소정의 公式에서 산정하여 검정하는 방법과 앞서 말한 허용응력도법에 있어서의 間接的 即 처짐량은 부재의 断面憵과 Span과의 比 d/l를 제한함으로써 균열폭을 철

(丑-1) 各国規準의 荷重係數

美 国*	西 独**	英 国
ACI 318-70	DIN 1045	CP 110
$u=1.4D+1.7L$	$u=(1.75\sim 2.10)(D+L)$	$u=1.4D+1.6L$

u : 所要強度

D : 固定荷重에 의한 断面力

L : 積載荷重에 의한 断面力

* 휨에서는 0.9, 壓縮은 0.7, 剪斷力에서는 0.85等的 耐力低減率을 생각하게 된다.

** 휨에서는 1.75, 壓縮은 2.1 10

근의 허용인장응력도에 한계를 설정함으로써 각각 制御하는 방법이 있다. 이미 記述한 허용응력도법 또는 하중계수법에서는 구조안전성에 관련이 있는 허용응력도의 크기나 하중계수의 값은 그다지 명확한 근거가 없이 결정하였는데 反하여 최근 논의되어온 限界狀態 設計法은 사용재료의 품질이나 施工精度 및 작용하중의 분포등을 고려하여 확률론적으로 구조물의 안전성을 검정하고자하는 구조설계 방법으로서 주목을 하고 있다. 실제 구조물의 경우 사용재료의 품질이나 施工精度의 차이는 불가피하기 때문에 구조물이나 부재내력을 推定하는데 있어서 差異가 생기므로 영향이 있는 것을 고려하여 확률론적으로 취급할 필요가 있다. 지금 사용재료의 품질이나 施工精度에 관한 값과 하중에 상응한 통계자료가 확률론의 적용이 가능한 정도로 정리되어 있다면 이 자료를 사용하여 作用荷重下에서 구조물이 破壞하는 확률을 이론적으로 구할 수 있고 구조물의 안전성은 이 破壞確率을 소정의 범위내에 들어가게 함으로서 確保된다. 그러나 실제에는 재료의 품질이나 施工精度의 분포에 관한 자료는 고사하고 荷重에 대한 統計的 資料도 지금 같아서는 아직 不充分하다. 따라서 현시점에서는 완전한 뜻에서의 확률론적 수법을 적용한 구조설계법을 확립한다는 것은 대단히 곤란하지만 缺陷된 자료부분은 장래문제로서 남기고 가지고 있는 자료를 부분적으로 수정하여 完備된 구조설계법으로 한다는 前提下에 확률론적 생각을 基調로 하는 구조설계법의 체계를 세운다는 것은 불가능한 일은 아니다. CEB (歐洲콘크리트 委員會)에서는 일찌기 이와같은 생각에서 재료품질이나 施工精度의 분포상태에 의한 영향을 反映시켜 확률론적 뜻을 가진 안전성이 확보될 뿐 아니라 구조물의 使用性 (Serviceability)도 만족시키는 새로운 설계이념에 기초를 둔 구조설계법의 체계를 확립하고자 노력을 거듭한 결과 1964년 철근 콘크리트 구조설계를 위한 國際指針 原案¹⁾을 제시하여 내외의 주목을

끌었다. 더구나 同委員會는 국제 Prestressed Concrete 협회와 협력하여 1970년에 Prestressed Concret 設計法도 포함한 CEP-FIP 콘크리트 구조물 설계시공 국제지침에 나타난 구조설계법의 개요를 소개하기로 한다. 이 설계법은 확률론적인 생각을 바탕으로 뒤에서 기술하는 바와같이 두 限界狀態 (limit state)를 규정하여 설계하므로 限界狀態 設計法 (limit state design method) 이라 칭하고 있다. 이와같은 구조설계법은 이미 영국규준 CP-110²⁾에 채용되고 있다. 이 설계 방침으로는 구조물 또는 부재가 耐用年限中에 사용하기에 적당하지 않게 되는 확률이 소정의 한도이하로 되게 한다. 여기서 말한 소정의 한도란 구조안전성 이외에 당초 건설비, 유지비, 구조물의 기능이 손실될 때의 補償費等的 總經費도 勘案하여 결정하는 것이 이상적이다. 또한 사용에 적합치 않은 상태로는 다음 두가지 한계상태를 생각할 수 있다.

終局限界狀態 (ultimate limit state) : 구조물에 작용하는 작용하는 하중이 그 耐力를 超過한 狀態.

使用限界狀態 (Serviceability limit state) : 過度의 처짐이나 균열에 의하여 기능이나 외관이 損傷된 狀態로서 振動障害도 여기에 포함된다.

그리고 재료적인 취급으로서 재료의 分布值를 고려한 재료강도의 特性值 (Characteristic value)를 다음 式으로 정한다. 다만 철근의 特性值로는 降伏点 保證值를 取하면 된다.

$$f_k = f_m - k_s \dots \dots \dots (1.1)$$

여기서

f_k = 재료강도의 特性值

f_m = 재료강도의 平均值

S = 강도의 標準偏差

K : 강도가 f_k 이하로 되는 확률에 의하여 결정되는 계수, 이 확률을 5%라 하였을 때 $k=1.64$ 이다.

다음에 上記의 特性值를 部分安全率 r_m 으로 나눈 값을 설계용 강도라 한다.

$$f = \frac{f_k}{r_m} \dots \dots \dots (1.2)$$

여기서

f : 설계용 강도

f_k : 강도의 特性值

r_m : 部分安全率 (丑-2 参照)

(丑-2) 材料에 對한 部分安全率 r_m 의 값

狀 態	鉄 筋	콘 크 리 트	
		工場打設	現場打設
終局限界狀態	1.15	1.4	1.5
使用限界狀態	1.0	1.0	

이 部分安全率은 試驗體 강도와 구조체 강도의 差異등을 고려하여 정한다. 다음 荷重의 취급법도 기본적으로는 재료적 취급법과 같다.

$$F_k = F_n (1 + kg)$$

여기서

F_k : 荷重의 特性值

F_n : 가장 不利한 荷重狀態로서 구조물의 耐用年限 中에 이 값을 넘는 확률이 50%인 값.

S : 荷重分布의 標準偏差

K : 荷重이 F_k 를 넘는 확률에 의하여 결정되는 係數.

다음에 설계용 전단력 S^* 를 안전률 r_s 를 사용하여

$$S^* = r_s \times (F_k \text{가 작용할 때의 断面力}) \dots\dots (1.4)$$

또한 非線形解析을 할 경우에는 설계용 하중 $F^* = r_s F_k$ 를 사용하여 설계용 전단력 S^* 를 정한다.

$$S^* = F^* \text{作用時의 断面力} \dots\dots\dots (1.5)$$

그러나 限界狀態設計法에 있어서도 몇가지 問題點들은 지니고 있다. 이들을 항목별로 들어보면

(7) 荷重·部材強度등의 統計的 調査 限界狀態에 대한 안전도의 개념을 명백히 하기 위하여서는 설계계산에 確率의 개념이 도입되어 있으나, 이 이론적인 취급에 견딜 수 있는 荷重, 部材強度등에 관한 統計資料가 충분하지 않다. 가령 荷重의 特性值 F_k 는 $F_k = F_n (1 + kd)$ 라고 정의 되어있으나, F_n , d 의 統計的 資料를 基準으로 하는 것은 지금은 실재상 곤란하다. 또한 콘크리트의 強度에 관하여서는 円柱 試驗體의 強度와 構造物에 있어서의 콘크리트의 強度와의 관계는 명확하지 않고, 현저에서의 打設, 굳힘, 養生 등 시공의 良否에 관한 調査는 그다지 행하여지지 않고 있다.

(L) 部材強度의 연구

PC 및 RC 部材 또는 構造物의 모든 性狀에 관하여서는 명백하지 않은것이 적지않다. 특히 剪斷, 비틀림등의 応力을 받은 구조물의 性狀에 관하여서는 今後의 연구에 의하여야 한다. 가령 分布荷重을 받은 部材의 剪斷性狀, 下端에 荷重을 받은 部材의 剪斷性狀, 비틀림性狀, Slab 보의 비틀림性狀, 2軸応力, 3軸応力등을 받은 部材의 變形性狀등, 아직 콘크리트의 Creep, 乾燥収縮 및 그 영향에 관하여서는 많은 연구가 되어있는데도 不拘하고 아직도 충분히 설계계산을 합리화 되어있지 않을뿐 아니라 龜裂의 연구도 더 하다.

(C) 設計 計算

구조물의 설계계산에서 限界狀態를 적용하여 各 断面의 安全度를 검토하는것은 실용상 번잡하다. 실제의 구조물에서는 荷重의 性質, 自然環境의 條件등에 따라 部材 断面의 形狀, 치수등을 결정한다는 限界狀態를 명백히 하며 설계 계산을 간편화 하는것이 중요하다.

(2) 安全度

材料의 계산용 強度는 재료의 特性치를 減少係數로 나타내므로 하며, 계산용의 荷重은 荷重의 特性치에 增加係數를 곱한 값으로 하고, 이들 계수에 限界狀態, 구조물의 使用條件, 구조물의 중요도 등에 따라 정하는것이 필요하다. 荷重作用의 增加係數 $K = f(k_1, k_2, k_3)$ 의 형으로 나타내고 있으며 k_1 는 荷重作用이 그 特性치 이상의 불리한 값이 되는 確率을 고려한 계수, k_2 는 特性치 보다 불리한 몇가지 荷重作用이 동시에 작용하는 確率을 고려한 계수, k_3 는 설계계수의 誤差등을 고려한 계수이다. 이들 각 係數의 값은 理論的, 經驗的으로 이것을 결정하는 것이 필요하고 이 방법으로 설계 시공할때 구조물의 타당성을 실험적으로 확인하는 것이 구조물에서는 중요하다. 지금까지 콘크리트 구조물의 限界狀態 設計法에 있어서의 중요한 문제점을 개략적으로 기술하였다. 이 설계 방법은 현재 세계 각국의 관계자들이 검토하여 왔으며 차차 완성 단계에 있다. 또한 이에 대한 기초적 연구를 필요로 하는 문제, 실용상의 모든 문제, 統計資料의 조사, 수집등이 남아있는 문제들이다.

《引用文献》

- 1) Comité Européen du Béton, "Recommandations Pratiques Unifiées pour le Calcul et l'exécution des ouvrages en béton armé, en Vue d'un règlement international de béton armé, :1964.
- 2) Comité Européen du Béton-Federation Internationale de la Précontrainte. "Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton, 1970.
- 3) ACI 318-71. "Building code Requirements for Reinforced concrete"
- 4) DIN 1045 (Ausgabe 1971) : Beton und stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung.
- 5) B. S. I. Code of Practice CP 110 : The structural use of Concrete, 1972.

《参考文獻》

- 1) Baker A. L. L. "dimit state Design of Reinforced Concrete, Cement and Concrete Association" London, 1970.
- 2) UNESCO "Reinforced Concrete, an International Manual, Buterworths, London, 1971.
- 3) Cement and Concrete Association "Handbook on the Unified Code for structural Concrete" (CP 110), 1972.
- 4) Regan P. E. & Yu C. W "dimit State Design of Structural Concrete" Chatto and Windus, Londo Lon, 1973.

계속