

시시한 구조계획 영성한 구조계산

이 창남

구조설계와 구조계산의 차이점은 건축설계와 건축제도의 차이점에 해당될 것이다. 건축제도 솜씨가 좋으면 도면이 깨끗하고 아름답게 보이듯이 구조계산도 잘 되어 있어야 믿음직스럽고 정확해 보인다. 건축설계가 건축제도가 필수적으로 부수되어야 함과 같이 구조에서도 계산은 중요하고 소중히 다루어야 한다.

그런데 건축활동이 활발해지고 수가 많아짐에 따라 건축설계와 구조설계의 비중이 적어지고 건축제도와 구조계산으로만 건축이 이루어지는 것 같은 인상이 짙어짐은 통탄할 일이다. 자동차 생산공장에서 1분간 몇대의 차를 조립하는가를 내세우는 것과 같이 하루에 도면 몇장을 그릴 수 있는가와 몇층 몇평짜리 건물 구조계산을 얼마만에 완성한다는 것이 능력을 표시하는 척도가 되어가고 있다.

외국 설계사무실 제도중에 눈에 띄는 것은 건축설계와 건축제도가 분리되어 가는 현상이다. 설계사무실에서의 일은 대부분 설계업무에 그치고 시공에 필요한 도면제작은 대부분 재료생산 업자와 시공자에 의해 제작된다. 구조설계도 마찬가지다. 기본구조 형태, 방식 및 부재의 용력 정도만 제시하면 그에 적당한 상세와 보조부재를 메이커와 계산해 내고 있다. 이렇게 건축제도와 구조계산 업무를 설계사무실에서 분할해 놓는다면 건축의 질적 향상에 도움이 될 것으로 믿는다.

구조설계 방법을 잘 살펴보면 병법(兵法)과 닮아 보인다. 敵을 잘 알고 자기 兵力을 알면 이기기 쉬운 것 같이 구조에서도 外力을 잘 알고 거기에 대응할 구조재료의 능력을 잘 알아야 합리적인 구조설계가 가능하다. 대수롭지 않은 적의 침입에 대적하기 위해 많은 병력을 투입하는 전략가는 국민의 세금을 잘못 소비하는 무능한 장군이고 아랍대국과 맞 겨루는 다얀장군은 유능하다고 평가 받는다. 우리는 이순신 장군을 聖雄이라 부른다. 그가 세계 최초로 거북선을 설계했다는 사실은 우연한 것이 아니다. 그는 전략가일 뿐 아니라 재료역학, 유체역학, 구조역학에 능통한 공학박사였다면 지나친 말일까? 그에게 성웅 이순신이란 칭호와 더불어 공학박사라고 불러보고 싶어진다.

구조설계 계산업무에 종사하다 보면 이런구조는 가능한가? 라는 질문을 수시로 받게 된다. 이 질문의 내용을 보면 대략 다음과 같은 것이다.

① 이런 구조를 해결해 낼 능력이 있는가?

② 이런 구조가 세워질 수 있는가?

③ 경제적으로 타당성이 있는가? 이다. 이런 경우 앞의 제 ③항을 염두에 두지않은 답변은 요구하지 말아야 하며 또 답변도 되지 않아야 할 것이다. 구조설계 행위가 이행되지 않은 채 구조계산으로 직행하여 경제적으로 타당성이 적은 구조물이 설계 시공되어지고 있음을 많이 보게 되기 때문이다.

피라미드는 수천년 세월을 잘 견디어 낸 지극히 비싼 구조물이다. 너무 지나친 비교인지는 몰라도 우리 주변에도 이런 방식으로 설계 시공된 구조물이 있음을 본다. 이같은 구조물이 생겨나게 된 이유는 구조설계 계산을 거치지 않고 적당히 설계하였거나 계산은 하면서도 어떤 상태에서도 잘 지탱할 수 있도록 안전 제일주의 사고방식으로의 설계이다. 이런 구조물은 건축주만 그대로 지나쳐 버린다면 가장 말썽 없는 것이다. 시공자가 시공을 약간 소홀히 해도 되고 건축도면이 조금 틀려도 된다. 사무실로 설계된 것을 창고로 용도변경해도 좋고 거리적 거리는 보나 기동은 몇개 배 버려도 된다. 건축주의 필요에 따라 층속도 가능하다. 대단히 편리한 구조물이다. 그러나 우리는 우리가 사용하는 구조재료가 노동력이 사회공유의것임을 인식하고 아껴야 할 것이다.

한편 위와는 반대로 그 안에 들어가기 겁날 정도의 구조물도 있다. 30년 묵은 일본 사람들의 목조 아파트. 언제 무너질지 모르는 불안한 구조물이다.

우리 기억에 새로운 청구대학 건물, Washington의 Tacoma bridge, 청구대학 건물은 시공자에게도 많은 책임이 있었던 것으로 논의 되었으므로 해당 안될는지 모르나 Tacoma bridge에서는 약간 역설적인 이야기를 하고 싶다. 이 다리의 설계자는 Leon S Moisseff로서 George Washington bridge, Triborough bridge, Manhatan bridge를 설계하고 deflection theory를 체계화하여 flexible tower도 설계한 유명한 사람이라고 한다. 만약 이 다리가 무너지지 않고 잘 사용된다면 우리는 그 다리를 잊어버렸을 것이고 설계자의 이름도 우리에게 알려지지 않았을 것이다. 비록 무너지기는 했어도 그의 설계가 얼마나 경제적이었는가는 그 자리에 다시 세워진 새로운 다리를 보면 알 수 있다. Chales E Andrew에 의해 설계된 새로운 다리는 그 중량이 전번 것이 50% 만큼 더 무거워 졌다고 한다.

엄밀하게 말하자면 구조설계는 가정한 하중을 지탱하기에 알맞도록 되어야 하므로 예상하지 않았던 하중을 받았을 경우 또는 계획에 없던 증축을 했을 때는 기존 구조체에 어떤 변형이나 표적이 나타남은 오히려 당연한 것이다.

4층 건물 위에 또 4층을 올려 놓는때도 아무런 이상이 없는 그런 건물이 많이 설계되었기 때문에 구조설계 계산은 별로 정확하지 못하고 권위가 없는 것으로 취급받게 된 것이다.

구조설계는 구조물이 여러가지 하중을 받았을 때 원하는 형상대로 유지시키고 이들 하중에 의한 변형이 사용상 지장을 주지 않는 범위에 들도록 剛性을 가지는 경제적 단면을 결정하기 위한 창작 활동이다. 구조설계 계산을 하는 과정에서 우리는 여러가지의 가정을 세워 놓아야 한다. 즉 구조물

의 사용 목적, 그 목적에 따라 구조체에 가해질 하중, 바람하중, 지진, 온도변화, 진동, 충격, 지내력, 지하수위, 산화, 부식, 지반침하 또는 용기 작용, 겨울철의 凍害, 虫害 등의 외적 조건과 구조재료의 일양성, 응력과 변형이 어떤 범위내에서는 비례한다는 가정, 온도 팽창 수축계수와 같은 것 들이다. 또한 계산 도중에도 계산 수단으로 가정해야 할 사항이 많다. pin이 아닌 joint를 pin 이라고 가정하고 계산하는 truss도 마찬가지다. 거기에는 가장 모험적인 가정도 해야 한다. 즉 시공업자는 설계도면대로 집을 지어 주리라는 것이다. 그러나 이상의 모든 가정은 실제와 꼭 맞는 경우가 거의 없을 것이다. 이런 맞지 않는 가정 투성이를 토대로 계산해 낸 결과가 어떻게 정확하겠는가? 계산 방법이 아무리 정확하고 계산 결과가 아무리 잘 맞아 보여도 실제와는 같을, 도리가 없다. 그래서 구조계산은 略算이란게 잘 통용되는 매우 어수룩한 것이다.

구조계산 기준이란게 있다. 건축학회, 토목학회, 콘크리트 협회, 철강협회 등 여러 학술 단체에서는 각기 규정 교범을 만들고 각 나라에서는 그 나라대로 권위있는 법규를 제정하여 이에 맞추어 계산하도록 요구한다. 그런데 이들 여러 곳에서 나오는 규정, 교범, 법규가 서로 같지 않은 것은 무슨 이유인가? 그것은 이 업무에 종사하는 사람들이 가정해 놓은 사항들이 서로 다르고 각기 그들의 연구 결과와 경험 및 적용범위가 다르기 때문이다.

구조계산 법규는 일반 법규와 같이 그 업무에 종사하는 사람들이 지켜야 할 최소한의 조건에 관한 제약 조건이다. 거기에는 타당한 이유가 있어야 하며 또 당연히 지켜야 한다. 그런데 불행히도 우리나라에는 우리 풍토에 맞도록 우리 손으로 연구 제정한 구조계산법이 없다. 건축법 시행령에 있는 것은 대부분 옛날 일본 것을 그대로 옮겨놓은 것에 불과하다. 한마디로 우리에게는 지켜야 할 법이 없는 무법천지다. 따라서 구조업무에 종사하는 사람은 각자 자기의 경력과 취향에 따라 외국 것을 이것 저것 따다 쓰게 마련이다. 이렇게 이것 저것 섞어 보면 잘못하다가는 갖 쓰고 양부입는 격의 구조계산이 되는 경우가 생기게 되니 조심하여야 한다.

철근 콘크리트 고층구조 설계에 말썽이 되고 있는 기둥단면을 예를 들어 설명해 본다.

우리나라는 일본과 달리 지진이 없고 기초지반이 견고하며 철근 콘크리트 구조를 20층, 30층, 심지어는 50층, 100층으로도 경제적인 설계가 가능하다고 본다.

기둥단면을 계산하다 보면 저층부에서 무려 1평이나 되는 큰 것이 생겨난다. 이것을 줄이기 위해서는 여러가지 방법을 쓰게 되는데 그 방법들을 비교 검토함으로써 문제점을 발견해 내기로 한다.

철근 콘크리트의 탄성이론에 의한 계산방식에 의하면 기둥의 耐軸壓力은 철근 단면적을 탄성계수비로 곱한 숫자만큼 加한 값 즉 콘크리트의 등가 단면적에 콘크리트 허용압축 응력도를 곱한 값이 된다. 日本建築學會制定 鉄筋 콘크리트 構造計算 規準 19조에 의하면 기둥의 耐軸壓力은

$$N_1 = \frac{fc}{\frac{1}{Ae} + \frac{g+e-\frac{D}{2}}{Ig}g}$$

$$N_2 = \frac{r fc}{n \left\{ \frac{1}{Ae} + \frac{g+e-\frac{D}{2}}{Ig} (g-dc) \right\}}$$

중에서 적은 값을 택하도록 되어 있다. 여기서 탄성계수비 n은 同規定 15조에 아래와 같이 적혀 있다.

Young 계수비 (断面算定用)	
콘크리트의 종류	Young 계수비 장 기 단 기
보통콘크리트	C 180 24 16 C 225 21 14

이 규정에는 기둥철근의 최소 철근비는 규정해 놓고 최대 철근비는 규정해 놓지 않았다. 그러나 규정 해설문 중에는 多량의 철근을 사용한 帶鉄筋柱의 실험에 적어서 철근의 효과가 불명하고 과도한 철근을 사용하면 경제상 불리하다는 것이 쓰여 있고 또 사실상 지진이 많은 일본에서는 기둥의 軸荷重 보다는 휨하중에 의한 bending moment 때문에 단면이 결정되는 경우가 대부분이어서 이 식이 실용적인 것이다.

20층 30층 철근 콘크리트 건물은 기둥 단면이 너무 커져서 철골구조로 하여야 된다는 말이 사실인것 처럼 된 이유가 여기에 있는 것 같다. 그렇다고 해서 실험에 적기 때문에 다량의 철근을 배근하기를 꺼려하는 이 식을 그대로 이용하면 되겠는가? 상기 식을 사용하여 기둥 단면을 계산해 본다. 예를 간단히 하기 위하여 편심하중이 없는 이상적인 경우를 생각한다. 즉 $e = 0$ 일때의 위 식을 정리하면,

$$N_1 = \frac{fc}{\frac{1}{Ae}} = Ae fc$$

$$N_2 = \frac{Ae \cdot rfc}{n}$$

이 되고 이들 중 적은 값을 취하게 된다. 보통 콘크리트에서는 $n \times fc < rfc$ 이므로 N_2 의 값은 해당되지 않으므로 결국 콘크리트의 등가 단면적에 콘크리트 허용압축 응력도를 곱한 것이 허용 압축응력이 되는 것이다.

$Fc = 225 \text{ kg/cm}^2 \dots$ 콘크리트 4 주 압축강도

철근 : KSSBD 40...항복점 응력 4 t/cm²

$rfc = 2,200 \text{ kg/cm}^2 \dots$ 철근의 장기 허용 압축응력도

장기하중 $N=600 \text{ ton}$

기둥단면을 $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ 로 하면

$$N = Aefc$$

$$Ae = \frac{N}{fc} = \frac{600,000}{225/3} = 8,000 \text{ cm}^2$$

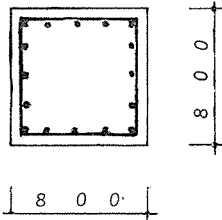
철근의 소요량이 단면적 A_s 는

$$A_s = 8,000 - 80^2 = 1,600 \text{ cm}^2$$

철근의 소요 단면적 a_s 는

$$a_s = 1,600 / 21 = 76.2 \text{ cm}^2 \rightarrow 16 - D25$$

$$p_r = 1.19 \% > 0.8 \%$$

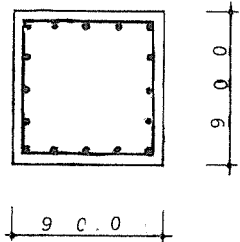


위 기둥은 단면이 75 kg/cm^2 이내에 들도록 하고 규정에 허용하는 최소 철근비 0.8% 를 배근하는 아래 방식 보다 좋아 보인다.

$$A = 600,000 / 75 = 8,000 \text{ cm}^2 \rightarrow 90 \text{ cm} \times 90 \text{ cm}$$

$$p_g = 0.8 \%$$

$$a_s = 64 \text{ cm}^2 \rightarrow 14 - D25$$

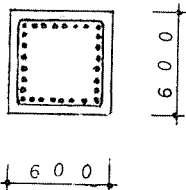


만약 이 기둥 단면을 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 로 줄인다면 어떻게 배근하면 될까? (기둥의 최소 폭 제한은 고려하지 않았음)

$$A_s = 8,000 - 60^2 = 4,400 \text{ cm}^2$$

$$a_s = 4,400 / 21 = 210 \text{ cm}^2 \rightarrow 28 - D^*$$

$$p_g = 5.84 \%$$



위의 세가지 단면을 ACI-318-63에 의거 허용 내력을 계산해 보면 다음과 같다. (철근은 편의상 主鉄筋만 표시하고 Hoop는 생략함)

$$N = 0.85 A_g (0.25 f_c' + f_s p_g)$$

$$f_s = 0.4 f_y = 0.4 \times 4,000 = 1,600 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{단면 ① } N = 0.85 \times 80^2 (0.25 \times 225 + 1,600 \times 0.0119)$$

$$\approx 410 \text{ ton}$$

$$\text{단면 ② } N = 0.85 \times 90^2 (0.25 \times 225 + 1,600 \times 0.008)$$

$$\approx 475 \text{ ton} \quad \text{이 되나 } p_g < 1.0 \%$$

이므로 규정에서 이를 인정하지 않는다.

$$\text{단면 ③ } N = 0.85 \times 60^2 (0.25 \times 225 + 1,600 \times 0.0584)$$

$$\approx 458 \text{ ton}$$

600 ton에 견디도록 설계된 단면들이 ACI 규정에 의하면 각각 410 ton, 475 ton, 458 ton으로 엄청나게 적은 耐力를 가진 것으로 계산된다. 여기서 그 이유를 찾아 보기로 하자.

콘크리트가 완전 탄성체가 아님은 누구나 다 아는 사실이다. 콘크리트의 creep에 관한 연구와 실험결과에 의하면 철근 콘크리트 기둥에 載荷된 경우 철근이 항복점에 달할 때 까지 콘크리트의 압축응력이 계속 상승하지 않음이 확인되었다. 즉 탄성이론이 성립되지 않는다는 중요한 결론이다. 일본건축학회 계산식은 탄성이론을 근거로 한 것이고 ACI 규정은 실험결과를 근거로 한 중국강도에 기본을 둔 것이다. ACI 규정에는 탄성계수비도 다르게 표시되어 있다.

$$\text{즉 } n = \frac{2,039,000}{w_1 4,270 f_c'} \text{ 에서 } C180 \text{ 은 } n=10 \text{ 이고 } C225 \text{ 는 } n=9 \text{ 에 불과하다.}$$

吉田徳次郎도 탄성이론에 의한 식은 기둥에 가해진 하중이 적고 또 일시적 활하중을 받을 때에 실용적이란 글을 썼다. 그의 글에 의하면 철근 콘크리트 기둥의 파괴 중심축 방향하중 N' 는 콘크리트 단면의 강도와 축방향 철근 단면적에 철근의 압축항복점 응력도를 곱한 값의 합과 같다. 또한 실험결과에 따라 콘크리트 압축강도 표준 공시체에 나타난 압축강도의 약 85% 를 곱한 것과 같다. 이것을 식으로 표시하면,

$$N' = 0.85 f_c' A + f_s a_s$$

N' 에 적당한 계수 α 를 곱하면

$$N = \alpha (0.85 f_c' A + f_s a_s) \text{ 가 된다. (일본 토목학회 표준시방서 규정 계산식)}$$

이 식으로 각 단면의 耐力를 역산해 보면,

$$\text{단면 ① } N = \alpha (0.85 \times 225 \times 80^2 + 4,000 \times 76.2) \approx 510 \text{ ton}$$

$$\text{단면 ② } N = \alpha (0.85 \times 225 \times 90^2 + 4,000 \times 64) \approx 600 \text{ ton}$$

$$\text{단면 ③ } N = \alpha (0.85 \times 225 \times 60^2 + 4,000 \times 210) \approx 510 \text{ ton}$$

이상에서 발견할 수 있는 것은 단면 ② 가 600 ton 의 하중을 견디는데 충분한 것으로 알고 있고 우리도 이 방법으로 설계를 한 경험이 많은데도 ACI 규정에 맞지 않는다는 것이다. 그러면 우리는 어떤 방법으로 설계할 것인가? 필자 자신은 기둥 단면 크기가 건축계획상 크게 지장이 없는 저층 건물에서는 탄성 이론식에 따라 계산하고 고층 건물에서는 ACI 규정대로 계산하고 있다. 왜냐하면 기둥이 받는 압축 응력도가 허용압축응력도 (일본 규정에서는 $\alpha f_c'$) 를 초과할 때에는 아직 탄성이론에 의한 설계 시공경험이 드물기 때문이다.

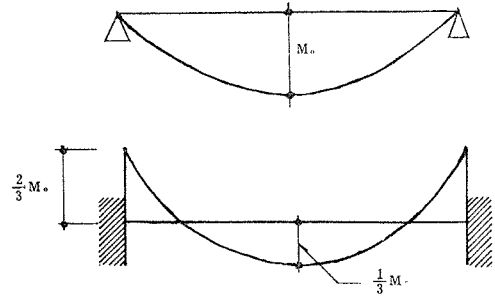
그런데 한가지 또 어려운 일은 고층건물의 상층부 기둥을 탄성식에 맞추어 계산하고 하층부는 A CI규정대로 설계할 것인가 하는 방식이다. 차라리 불평하면서도 지켜야 하는 우리의 규정이나 법규가 곧 제정되는 편이 오히려 마음 편할 것 같다.

앞에 언급한 바대로 구조계산에는 계산 이전에 가정된 사항이 너무나 많다. 그 가정은 적어도 안전측에 가깝도록 되어 있고 확실하지 않은 사항은 보다 안전한 쪽으로 가정을 세웠고 또 그래야 할 것이다. 만약 고르는 사항을 잘못 가정했다면 구조물 자체의 안전뿐만 아니라 그 구조물 내외의 인명 재산에 큰 손실을 가져오기 때문이다. 구조일을 하다 보면 이 건물은 몇배의 안전률이 있도록 계산된 것인가? 혹은 콘크리트의 28일 압축강도가 225kg/cm² 일 때 계산은 그 총인 75kg/cm² 로 했으니 구조내력은 사실상 3배나 되는게 아니냐? 그러니 6층으로 설계된 건물 위에 6층정도 더 올려 놓는것은 당연하다는 것이다. 건물이 자꾸만 고층화 하다 보니 증축설계가 많아지고 또 시공된 것도 많다. 아직 무너졌다는 말도 못들었고 크게 변형이 일어났다는 건물이 없었으니 우선 다행으로 생각한다. 그러므로 증축이 끝나면 처음 구조설계 계산할 때 너무 안전하게 적당히 또 과대한 부재를 채택했기 때문이라 인정하고 그로 인하여 구조계산 결과를 보면 그대로 받아들여야 하지 않고 어느정도 줄여도 된다고 판단한다. 이 때문에 현장판리는 소홀해지고 심하면 고의적으로 부재단면을 줄이는 예가 생기게 되었다. 이런 사실을 아는 구조계산하는 사람은 구조물의 안전과 자신의 안전을 위해서도 더욱 더 튼튼하도록 계산결과를 수정한다. 이러한 악순환은 계속되어 극단적으로는 구조계산 無用論까지 생겨나게 되었고 구조계산은 건축자가 수속서류에 필요하기 때문에 하는 수 없이 첨부하는 것으로 까지 생각하기에 이르렀다. 그런 것이 Nerv가 말한 대로 구조계산 결과가 설계당시 가정단면과 다름이 없다면 다행한 일이겠으나 그렇지 못하면 어떤 결과가 생겨날지 명백한 것이다.

사람이나 다른 生命体는 정신력으로도 어느정도의 過載荷重을 지탱해 낼 수 있다. 그러나 건축재료는 그 능력한도 이상의 어떤 하중에도 초과내력을 발휘해 주지 않는다. 그 대신 파병이란게 없다. 능력껏 버티다 지나친 요구를 받았을 때는 항복하고 만다.

이젠 건축재료가 얼마나 솔직하게 버티어 주는가를 철근 콘크리트 보의 예를 들어 설명하기로 한다. 등분포하중을 받는 보의 고정단 모멘트의 크기는 단순보의 중앙 최대모멘트의 총인테 보의 양단 고정상태가 부실하거나 보의 양단 주철근량이 부족하여 항복점에 달했다고 하자.

만약 이 보의 중앙 밑 부분 배근이 총 M_o 에만 견디도록 되어 있다면 이 보의 전체적으로 여유가 없는 것이다.



그러나 만약 중앙 밑부분에도 단부 윗부분과 같이 총 M_o 에 해당할 만큼 배근되어 있다면 단부 고정도가 총 M_o 까지만 있어도 전체적으로 큰 변형이 없는 안전한 구조물 구실을 할 것이다. 이렇게 되기 위해서는 그 단부에 plastic hinge의 역할을 하도록 미세한 Crack이 발생함은 피치못할 것이다. 그러면 보의 양단 고정도가 커져 고정단모멘트를 충분히 받을 능력이 있다면 단부와 중앙부의 모멘트 내력의 합계가 보의 내력이 될 것이다. 그렇다면 보를 계산할 경우에 total moment에만 달하도록 하면 모멘트 분배에 관여하지 않아도 될 듯 하지만 그렇게 하면 구조설계 목적에 위배되는 일이 나타내게 된다. 왜냐하면 plastic hinge 역할을 하기 위해서는 고정단의 고정도가 풀려야 하며 그럴려면 그 부분에 변형이 일어나야 하는데 이 변형은 사용상 지장을 줄 뿐 아니라 구조물의 내구력에도 영향이 있기 때문이다.

철근콘크리트 slab 시공 현장에서 보면 단부 철근이 계산당시 가정 위치 보다 바닥으로 내려가는 것을 자주 보게 된다. slab 단부 윗쪽 다시 말하면 보 윗쪽에 쉽게 금이 생기는 것이 이 때문이다.

slab 배근이 밑으로 가라앉을 염려가 많으니 차라리 중앙 아랫부분에 철근을 집중적으로 배근하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

다시 철근콘크리트 구조물의 내력이 설계하중의 3배가 아니라는 것에 대해 설명한다. 콘크리트의 28일 압축강도라는 것은 부어 나가는 콘크리트 중에서 채취한 Test piece 몇개의 압축파괴시험(단기하중) 결과의 평균치이며 실제 구조물의 콘크리트 부어넣기, 철근이나 거푸집 장애에 의한 곰보 및 양생불량은 시험결과치보다 내력을 적어지게 하는 원인이 된다. 또한 시험치의 높은 장기 하중에 대한 내력이고 단기하중에 대해서는 물론 가정한다. (일본건축학회 방식)

또 철근은 항복점을 단기하중에 대한 내력으로 보고 장기하중에는 그의 1/3을 취한다. 이것 만으로도 구조물의 내력의 안전계수가 3이 아님이 증명된다.

또한 "안전"이란 뜻이 다만 무너짐을 면하는 직전의 상태를 뜻함이 아니며 사용상 지장을 주지 않도록 하여야 함을 재확인 한다면 결론은 명확해진다.