

재미로 읽는 構造

(5)

李 昌 男

(建築構造專門家)

29. 構造는 재미 없는 학문인가?

연 4회에 걸쳐 “재미로 읽는 構造”라는 제목의 재미 없는 글을 쓰고나서 여러 선배님들로부터 충고의 말씀을 들었습니다. 문맥중에 건축사의 실력을 과소평가하는듯한 표현이 있었다는 얘기였습니다. 머리숙여 용서를 빌겠습니다.

세상에서 제일 비싼책이 무엇인지 아느냐? 물으니 사 놓고 한번도 읽지 않은 책이라고 하드립니다.

그나마 읽고 충고까지 해 주신분들에게는 감사의 뜻을 전하고 싶습니다.

2월호에는 “지하실이 떠오른다”라는 제목으로 간단한 설명을 한 일이 있습니다. 장마철에 그 글이 실렸더라면 제가 존경하는 어떤 설계사무소 소장님이 어려운 일을 당하지 않았을터인데... 하는 아쉬운 마음을 갖게 됩니다. 들은 말에 의하면 지난번 장마때 지하실 주위에 물이 고이는것을 보고도 방수공사가 잘 되었는지 확인하기 위하여 물푸기작업을 중지한 결과 지하실이 떠올랐다는 것입니다.

건축사지는 비매품입니다. 회원들께서 읽고난 후에는 보조원들이 즐겨 읽는듯합니다. 장래의 건축사들인 이 보조원들에게서는 많은 질문을 받았습니다.

건축사지의 발간 목적에 위배되지 않는다면 이들 보조원들의 질문에 답하기위하여 쉬운 構造개념을 설명해 볼

까 합니다. 될수록 전문용어, 한자등을 피하겠습니다. 옛날사람들은 構造계산 없이 집을 지었습니다. 지금도 규모가 작은 건물은 구로계산을 하지 않고도 설계하고 있습니다. 조각가가 작품을 만들때, 가구점에서 의자나 책상을 만들때도 거의 대부분 구조계산을 하지 않습니다.

어린이들이 장난감을 만들때, 목수가 사다리를 만들때, 등산하는 사람이 밧줄에 생명을 맡길때에도 계산해 보고 단면을 결정하는것 같지는 않습니다.

필자는 어려서 산골에 살았습니다. 지금은 보기조차 힘든 장작을 연료로 사용했습니다. 나뭇꾼들이 도끼로 장작을 췌니다. 장작을 받침대에 얹을때에는 여러 각도로 궁리를 합니다. 내가 갖고 있는 이 도끼로 어느 지점을 어느 방향으로 얼마나 큰 힘으로 어떤 속도로 치면 쪼개질것인가? 그런 궁리를 하지 않고 내려 치는 나뭇꾼은 그 도끼가 아무리 날카로워도 곧 지치게 마련입니다. 능률도 안오르고 장작은 다 부서져 버리고 맙니다.

목수가 못을 박습니다. 곤은 못도 박다가 구부러지는데 처음부터 구부러진 못도 끝까지 잘 박을수 있는 기술이 있습니다.

우리는 이들 나뭇꾼이나 목수를 손재주가 있다고 합니다.

운동선수도 마찬가지입니다. 자동차 운전수, 칫과의사, 윗과의사, 이발사 등 손발을 움직여 무슨 일을 해내는 사람들은 재주가 없으면 곤란합니다.

우리나라에서는 재주가 있는 사람들을 천하게 여겨 왔습니다. 양반은 더운데서 테니스를 치면 체신머리가 없으니 종들에게 공치게하고 구경만 했습니다.

미국사람들은 어려서부터 모든 생활용구를 손수 만들고 조작합니다. 높은사람들도 손수 자동차 운전을 하고 또한 간단한 수리를 합니다. 영국에는 어린이들이 모든 공작기계, 공구를 갖고 만들고싶은것을 만들고 부수는 놀이장소가 있다고 합니다. 그들은 손으로, 몸으로 자연스럽게 구조역학을 배웁니다. 재료의 성질, 힘의 방향에 따르는 재료의 변형이 조금도 생소하지 않습니다.

손재주 있는 사람은 기능공으로나 성공할 자질이 있는 것처럼 생각하는 경향이 있습니다. 물론 그렇습니다. 그러나 한가지 분명한 사실은 이들 손재주 있는 사람들이 공부해서 전문적인 일에 종사하면 한결 수월하게 일을 하는 것을 보게 됩니다.

필자는 지금까지 많은 건물의 구조를 다루어 왔습니다. 그러나 그들의 거의 대부분의 구조개념은 책에서나 교육에서 얻은것이 아니라 체험에서 얻었다고 생각합니다. 책에서는 그 체험에서 얻은 지식을 체계화하고 확인하는 방법을 얻었을 따름입니다.

구조설계를 전문으로 하는 사람들의 작품 또는 그들과의 대화에서 때로는 너무나 초보적인, 교육 이전에 알아야 할 사항이 결여되어 있는것을 발견하게 됩니다. 그러가 하면 현장에서 또는 건축교육을 받지 않은 일반인들에게 너무나 전문적인 범주에 속할만한 사항의 얘기가 쉽게 이해되기도 합니다.

독일에서 원자력 발전소 설계에 종사 하는 기술자가 잠시 귀국했던 일이 있습니다. 서울문리대 독문학과를 졸업하고 독일어를 더 공부하기 위해 유학의 길을 떠났습니다. 가서 한학기 공부를 하고 나서 적성에 맞지 않는다고 느껴졌던것입니다. 서울에서 성공만을 고대하는 친지들에게 실망을 줄수도 없고 해서 어느날 지도교수에게 상의했더니 적성검사를 받아보라는 얘기였습니다. 몇시간에 걸친 적성검사 끝에 나온 결과는 기계공학에 소질이 있는데 참을성이 부족한편이니 “구조”를 택하라는 결론이었습니다.

앞이 캄캄했다고 합니다. 대학 4년간, 독일유학 1학기가 구조와 무슨 관계가 있었겠습니까? 그러나 결론을 내 준 판정관은 당장 기초교육을 받을 준비를 갖추라는 명령(?)을 했다고 합니다. 지금 그는 세계적으로 권위를 갖고 있는 교수를 도와 성공적으로 일을 해내고 있으며 대단히 만족해 하고 있습니다.

構造를 공부하여야 하겠는데, 앞으로 構造를 전공하여야 되겠는데 무슨 책을 보면 좋겠는가? 라는 질문을 많이 받습니다. 나는 서슴치 않고 다음 책을 권하곤 합니다. 이 책에서 무슨 전문적인 지식을 얻거나 구조제산기술을 배우라는 얘기는 아닙니다. 다만 자기가 앞으로 구조공부를 할 적성에 맞는가를 시험하는 도구로 사용해도 거의 틀림 없다고 믿어지기 때문입니다.

이 책이 소설보다 재미 있으면 우선 적성에 맞는다고 보아도 좋을것입니다. 번역판으로도 출판된것으로 알고 있는데 Structure in Architecture (Salvadori and Heller) 입니다.

이 책을 재미있게 읽은 사람에게는 구조가 재미있는 학문일것임에 틀림없습니다.

構造공부를 계속하기 위한 수단으로는 수학과 어학이 있습니다. 구조의 모든 표현방법이 수학을 기초로 하며 외국어로 된 책이 많기 때문입니다. 그러나 크게 겁먹을 필요는 없습니다. 우리나라에는 구조를 전공하는 사람들이 너무나 적습니다. 필자가 15년간 구조만을 일감으로 삼아 왔으나 고등학교 수학 이상으로 어려운 수학을 꼭 필요로 했던 경우는 많지 않았습니니다. 거의 90%의 일들은 간단한 수학만으로도 해낼수 있었습니니다. 그러나 한가지 중요한 사항은 기초적인 수학에는 막힘이 없어야 합니다. 심지어는 국민학교 교과목에서 나오는 산술이 틀

려서 큰 구조물에 이상을 초래하는 경우도 있기 때문입니다.

이 글을 읽을만한 위치에 있는분들에게 이런 유치한 내용을 설명하는것은 한번 더 욕먹을 일인지 모르겠으나 돈 많은 건축주가 오히려 공사현장에 홀린 한개의 못을 줍는것같은 심정으로 읽다보면 혹시 작은못 한개라도 눈에 필수 있지 않을까 하는 마음입니다.

잔소리가 길어졌으나 이 얘기는 부서져가는 의자, 고장난 아이들의 장난감을 고치는 하찮은 아이디어가 수십층 건물 구조설계의 기본 개념과 다름이 없기때문에 어찌보면 거꾸로 공부하는 격이 되는듯한 감을 무릅쓰고 문제를 풀고자 합니다.

30. 인장재

Suspension bridge 를 보면 눈이 둥그렇게 되는 사람들이 빨래줄에 매달린 젖은 이불을 보고는 놀라지 않습니다. 씨커스에서 줄타기 하는것을 보면서 줄타는 사람이 발을 잘못디딜까 마음조이면서도 그 줄의 안전성, 줄이 묶여있을 지점(支點)상태를 염려하는 사람이 얼마나 될까? 남산의 케이블카(cable car), 마음놓고 드나드는 대형 건물 현관 캐노피(canopy)를 매달고 있는 철선, 운동회 때 줄다리기로 사용되는 밧줄, 무거운 물건을 달아올리는 크레인의 와이어 로프의(wire rope)사진들을 매다는 철사, 수박을수들고 가는 아낙네의 나이론망, 군번줄에 목매달아 죽었다는 어느 병사의 이야기, 한강을 가로지르는 전기줄의 곡선, 호화스러운 산테리아를 매달고 있는 쇠사슬, 항상 입고다니는 바지나 팬티가 흘러내리지 않게 도와주는 허리띠, 고무줄, 가방 손잡이, 책가방 멜빵, 포장노끈, 연줄, 풍선줄, 낚시줄등 우리 주변에 인장재란 너무나 혼합니다.

이들 인장재의 성질은 독자들이 벌써 다 공부한 것입니다. 몸으로 체험한것입니다. 가느다란 바느질 실로 수박을 묶어 들고가려 하는 주부도 없을뿐더러 10mm 철근으로 낚시줄을 만드는 낚시꾼도 없을것입니다. 빨래줄에 무거운 젖은이불을 널기 위해서는 중간을 작대기로 버틸줄을 알며 책가방 멜빵이 끊어졌을때 어떻게 기워야 하는가도 알고 있습니다.

이렇게 다 아는 원리를 간단한 수식으로 확인 설명하는 것이 구조제산입니다.

이 글을 읽고있는분의 몸무게는 몇kg입니까? 필자는 겨우 60kg입니다. 그럼 내가 매달릴수 있는 철사의 굵기를 계산해 보겠습니다. 철사의 항복강도를 여러분이 잘 아는 보통철근의 값과 같다고 가정하겠습니다. 즉 $F_y =$

2,400kg/cm² 입니다.

철사의 단면적 $A_s = 60 \div 2,400 = 0.025\text{cm}^2$ 입니다. 국
민학교에서 배운 실력으로 철사의 지름을 계산하면

$$A_s = \pi D^2 \div 4 \text{ 에서}$$

$$D \approx 0.178\text{cm} \text{ 즉 } 1.78\text{mm} \text{가 됩니다.}$$

이것이 우리나라 규정에서 말하는 단기하중에 안전한
철사의 굵기입니다. 현장에 굴러다니는 이른바 8번선에
는 나같은 사람 몇사람이 매달릴수 있을까?

8번선의 지름은 약 4mm입니다.

$$\text{단면적 } A_s = \pi D^2 \div 4 = \pi \times 0.4^2 \div 4 \approx 0.126\text{cm}^2$$

$$\text{단기허용인장력} = 2,400 \times 0.126 = 301.6\text{kg}$$

$$\text{사람수} = 301.6 \div 60 = 5.03\text{명} \text{ 즉 } 5 \text{ 사람입니다.}$$

우리나라 규정에 허용된 장기값으로는 $5.03 \div 1.5 = 3.35$
명입니다.

인장재의 공부 끝났습니다. 이러한 간단한 계산방법
은 남해대교의 Wire에도 적용되며 지금 설계중인 사장교
(한강)에도 쓰여집니다. 30m span의 트라스의 인장재
계산에도 적용하며 사무실 천장을 매다는 앙카볼트에도 쓰
입니다.

필자는 화투놀이를 못합니다. 바둑, 장기도 물론 못
합니다. 이들 놀이에서는 외워야 할 법칙이 너무 많습니
다. 족보도 어려울뿐더러 장기 말이 건너뛰는 방법도 어
렵습니다. 마작은 더 어렵다니 아예 생각도 못해봅니다.
이렇게 머리나쁜 사람이 그것도 직업으로 할수 있는것이
구조입니다. (다른 구조전문가는 이 글 서두에서 몇마디
욕과함께 책장을 넘겨버렸을터이니 별 걱정은 없습니다.)

※ 생각해볼 일 :

1. 같은 굵기의 로프에 매달렸는데 로프의 길이가 길
때에는 왜 휘청거리며 많이 늘어날까요?
2. 인장재의 양쪽 끝은 어떻게 붙들어 댈까요?

31. 압축재

인장재의 반대는 압축재입니다. 재료에 따라 인장응력
에 강한것이 있는가 하면 압축재로 적합한것이 있습니다.
일반적으로 부스러지기 잘하는 재료는 인장재로보다는 압
축재로 잘 활용됩니다. 돌, 콘크리트같은 것들입니다.
나무나 강철은 압축재로도 쓰이고 인장재로도 사용합니다.

필자는 지름1.78mm의 철사에 매달릴수 있다고 했는데
그런 가느다란 철사 위에 올라설수 있겠습니까? 철사의
길이가 짧아서 이른바 장주효과(長柱効果)가 생기지 않고
올라설수 있는 받침대가 마련된다면 가능할것입니다. 즉
철재와 목재는 압축응력과 인장응력에 다 같이 강합니다.

그러나 무슨 재료를 막론하고 압축재는 그 길이에 따라
버티는 능력이 크게 달라집니다.

인장재는 그 단면적의 크기에 비례하여 지탱하는 내력
이 커지지만 압축재는 단면의 생김새에 의한 영향도 고려
하여야 합니다. 같은 크기의 단면적이라고 해서 같은 크
기의 압축력에 견디다고 말할수 없습니다. 동그란 단면
의 파이프에 압축력을 가하면 어떻게 될까요? 처음에는
잘 견디다가 점점 큰 힘으로 누르거나 더 긴 파이프를 사
용했을때는 어느 한 방향으로 구부러지려고 하는 경향이
생겨날것입니다. 그러나 그 방향이 어디인지는 알수가 없
습니다. 책받침이나 합판을 눌러봅시다. 그 구부러지는
방향은 누구나 알고 있을것입니다. 널판, 각목, H형
강, I형강, 이들 모든 단면은 각기 방향성이 있습니다.
약축이니 강축이니 하는 말로도 설명합니다. 각각의 단
면은 그 방향에 따라 단면 2차모멘트가 다릅니다. 예를들
면 폭이 6cm, 높이가 9cm 되는 각재의 단면 2차모멘
트는 얼마일까요? 역학책에 보면

$I = \frac{bh^3}{12}$ 이라고 되어 있습니다. 화투할때 외
워야 하는 족보 보다 어려운가요? 그러나 이들 공식들은
외울 필요가 없습니다. 책에 다 있습니다. 책 들춰가며
구조계산 한다고 나무라는 사람은 아무도 없습니다.

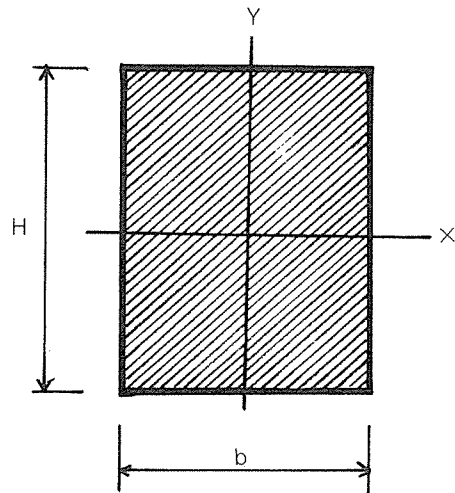


그림 55

X, Y 축에 관한 단면 2차모멘트 I_x, I_y 는 각각

$$I_x = \frac{6 \times 9^3}{12} = 364.5\text{cm}^4$$

$$I_y = \frac{9 \times 6^3}{12} = 162\text{cm}^4 \text{ 입니다.}$$

즉 같은 단면인데 가로방향, 세로방향에 따라 단면 2
차모멘트의 값이 많이 다릅니다. 이 값은 뒤에 나오는
재료의 허용 모멘트와 관계가 있는 단면계수를 계산하는
데 도움이 됩니다. 우선 여기서 한가지 더 알아야 할 족
보는 단면 2차반경이라는것인데 구조를 싫어하느냐 좋아

하느냐 하는 갈림길이 이곳인것 같습니다. 그놈의 단면 2차모멘트라는 족보도 h^3 이니 뭐니 해서 골치아왔는데 단면 2차반경은 또 뭔가? 하고 책장을 넘겨버리면 영영 장주(長柱)가 무엇인지 좌굴이 뭔지 모르게 됩니다.

하지만 사실은 너무나 쉽습니다. 적어도 건축을 직업으로 할 생각이 있는 분이면 아무리 작은 계산기라도 삼각함수, \sqrt{x} , y^x 같은게 붙어있는것을 사셔야지요. 남대문 시장 생선장수도 갖고 있는 계산기, 거기에서 메모리(Memory)장치만 있으면 전적하는데 지장이 없으니 그것만으로도 건축설계는 다 된다는 고집은 당장 버려주셨으면 고맙겠습니다. 요것 하나 제대로 갖춘 설계사무실도 흔하지 않습니다.

본론으로 돌아가서 앞의 각재 단면적 A는 $A = 6 \times 9 = 54\text{cm}^2$ 입니다.

이 각재가 앞에서 설명한 인장재로 사용되었다면 장기허용응력도가 90kg/cm^2 일 경우 $90 \times 54 = 4,860\text{kg}$ 일것입니다. 그러나 같은 각재를 압축재로 사용할때 그 내력이 얼마나 될까를 검토하면 다음과 같습니다.

우선 족보 하나를 더 알아봅시다. 모든 재료의 단면 2차반경은 단면 2차모멘트를 단면적으로 나눈값의 평방근입니다. 그러므로 앞의 각재는 x 축에 관한 단면 2차반경 i_x 와 y 축에 관한 단면 2차반경 i_y 가 각각 다음과 같이 계산됩니다.

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{364.5}{54}} \approx 2.6\text{cm}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{162}{54}} \approx 1.73\text{cm}$$

압축재의 길이가 길면 지탱하는 힘이 줄어든다는 평범한 사실, 연필심이 길면 살짝 눌러도 부러진다는 경험을 표로 만들어 놓은것이 여러분의 건축수첩에 있는 좌굴계수(ω)입니다.

각재의 길이를 앞에 계산한 단면 2차반경으로 나눈값을 세장비(λ)라 부릅니다. 또 하나의 족보입니다.

각재의 길이를 ℓ_k 라고 하면 :

$$\lambda_x = \ell_{kx} \div i_x \quad \lambda_y = \ell_{ky} \div i_y$$

이들 세장비를 알면 좌굴계수는 친절하게도 책마다 계산해서 표를 만들어 놓은 것을 이용할수 있습니다. 세장비가 크면 클수록 좌굴계수 ω 도 커집니다. ω 의 값이 1이면 이 부재는 인장재와 같은 방법으로 단면을 결정해도 됩니다. 다만 목재의 경우 허용 인장응력도와 허용 압축응력도의 값이 약간 다르다는것을 책에서 보아 알것입니다. ω 의 값이 2 라면 각재가 지탱할 수 있는 W의 압축력은 반으로 줄어듭니다.

실제로 목재의 장기허용 압축응력도를 80kg/cm^2 라고 하면 위 각재의 길이가 30cm 일때 $\lambda_y = 30 \div 1.73 = 17.34$ 로 20미만이 됩니다 이때에는 ω 의 값이 그대로 1 이어서 허용압축력은 $N = 80 \times 54 = 4,320\text{kg}$ 입니다. 한편 같은 각재라도 그 길이가 250cm 라면 $\lambda = 250 \div 1.73 = 144.5$ 로서 ω 의 값은 무려 6.96이나 되어서 허용압축력은 $4,320 \div 6.96 = 620\text{kg}$ 뿐입니다.

만약 위 각재의 넓은면(9cm)의 중앙에 이른바 브레싱을 설치하여 좌굴을 방지하면 좌굴장 $\ell_{ky} = 250 \div 2 = 125\text{cm}$ 로 줄어들게 됩니다. 그러면 이번에는 i_x 가 이 단면을 결정하는 요소가 되고 맙니다.

$$\lambda_x = \ell_{kx} = 250 \div 2.6 \approx 96.2$$

$$\lambda_y = \ell_{ky} \div i_y = 125 \div 1.73 \approx 72.3 < 96.2$$

즉 λ_x 가 λ_y 보다 크며 이번에는 ω 의 값이 3.06이 되고 허용압축력은 $4,320 \div 3.06 = 1,412\text{kg}$ 이 됩니다.

구조계산의 대부분은 이런 간단한 작업의 연속입니다. 이런 경우 압축부재를 각재로 쓸것인가? 각재라면 가로 세로 단면을 무엇으로 할것인가? 또한 브레싱(bracing)을 두어 좌굴장을 줄이는것이 좋은지 차라리 다른재료로 바꿀것인지를 이리저리 궁리하는것이 이른바 구조계획에 속한다고나 할까요?

트라스에서도 압축재는 굵은선으로 표시하고 인장재는 가는다란 선으로 그립니다. 압축재는 굵기를 너무 적게 하려 할때 무리한점이 생깁니다.

철근콘크리트 기둥에서도 단면의 좁은 폭의 15배를 넘는 높이가 되면 우선 장주효과를 고려하여야 합니다. 20cm폭의 기둥이라면 기둥높이가 3m를 넘을때 허용응력이 감소하기 시작합니다.

철재를 예로 들어보겠습니다. 강관트라스, 박스 칼럼(box column)에 관해서 전에 설명한바 있지만 파이프(pipe)가 압축재로는 좋은 형태라는것을 증명해 보이겠습니다. 가로 세로가 각각 10cm, 두께 4mm인 각관의 단면적은 14.95cm^2 , 단면 2차모멘트는 226cm^4 입니다. 재질은 보통(KSSO41)강재이며 파이프(pipe)의 길이는 3m입니다. 장기허용 지지력은 얼마나 됩니까?

$$i = \sqrt{\frac{226}{14.95}} = 3.89\text{cm} \quad \lambda = 300 \div 3.89 = 77.1$$

강재의 허용압축응력도 표를 보면 λ 가 77.1일때의 장기허용압축응력도는 $1,130\text{kg/cm}^2$ 입니다. 단면적이 14.95cm^2 이므로 장기허용압축력은 $1,130 \times 14.95 = 16,894\text{kg}$ 즉 약 17ton을 견딜수 있습니다.

같은 단면적을 갖는 각봉을 사용했을때는 어떻게 될까

요? 단면적 14.95cm²가 되는 각봉(정방형) 1번의 길이는 $\sqrt{14.95}=3.867\text{cm}$ 입니다. 각재단면에서 배운 것을 그대로 이용하면 단면 2차 모멘트는 $I=\frac{3.867^4}{12}=18.63$

cm⁴이며

단면 2차반경 i 는 $i=\sqrt{\frac{18.63}{3.867}}=2.19$ 입니다.

각관때와 같은 방법으로

$$\lambda=300\div 2.19\approx 137$$

역시 강재의 허용압축응력도 표를 찾으면 장기허용응력도는 510kg/cm²임을 알수 있고 따라서 장기허용압축력은:

$510\times 14.95\approx 7.625\text{kg}$ 에 불과하며 같은 단면적인 각관에 비하여 반도 안되는 내력을 갖게됩니다.

우리가 건축구조에 사용하는 구조재료의 종류는 너무나 많습니다. 같은 단면적을 갖는 각관에도 여러가지가 있습니다. 혹은 두께가 얇고 외형 규격이 큰것도 있고 한쪽 길이가 더 긴것도 있습니다. 원형관, 7형강, H형강, I형강, T형강, C형강등... 이들 각각의 종류에서도 수많은 규격이 있습니다.

흔히 철근콘크리트조 보다는 철골조가 낫다느니 하는 말을 합니다. H형강으로 설계하면 누가 계산해도 같은 단면이 나오는 것으로 아는분도 있습니다. 같은 물감과 같은 붓으로 그림을 그리면 같은 그림이 나오니까? 세상에선 여러가지 약이 있습니다. 어떤 의사는 병을 잘 고치고 돌팔이 의사에게 몸을 맡긴 환자는 고생만 합니다. 어떤 체질에 어떤 병에 어떤 체중 어떤 나이일때 무슨 약을 얼마의 양으로 얼마동안 복용하면 가장 부작용 없이 병을 고칠수 있는가를 아는 의사는 명의입니다. 종기 하나 난 어린아이에게 페니실린, 마이신 주사를 놓아주는 의사, 6" 파이프로도 충분한 기둥에 400mm H형강을 쓰라고 설계하는 구조계산과 다를바 없습니다.

환자가 의사에게 몸을 맡기듯 건축주는 장래의 건축사에게 건축설계를 의뢰할 것입니다. 약을 조제하는 방법을 배우듯 우리는 재료의 선택 조합 방법을 배우고 있습니다.

32. 단순보(simple beam)란 무엇인가?

개천을 건너지르는 외나무다리, 무거운 물건을 운반하기 위하여 두 사람이 끼워서 양쪽 끝을 들고갈때의 막대기, 이름 그대로 가장 단순한, 간단한 보입니다. 물건을 막대기의 중간에 매달았으면 양쪽 사람은 그 물건 무게의 반만큼씩의 무게만 들어주면 됩니다. 그러나 그 막대기는 적당한 굵기라야 합니다. 너무 가늘면 부러지거나 심하게 구부러져서 들고 갈수 없게 됩니다.

피를 쓰면 같은 막대기라도 두사람의 거리를 좁혀서 운반할수가 있습니다. 아니면 더 굵은 막대기를 사용해도

됩니다. 그러나 막대기가 굵어지면 굵어질수록 막대기 무게가 점점 무거워져서 더 힘이들게 됩니다. 굵은 막대기는 값도 비쌉니다. 동그란 막대기, 각재 각재에도 정방형 장방형이 있습니다.

장방형 막대기는 세워서 쓸때와 눕혀서 쓸때 어떤쪽이 튼튼합니까? 다 아는 사실을 수식으로 증명해 보겠습니다.

앞 31장 압축재에서 설명한 6cm×9cm의 각재를 다시 예로 들어 보겠습니다. 우리는 이 각재의 단면적은 54cm²이며 단면 2차모멘트는 각각 $I_x=364.5\text{cm}^4$, $I_y=162\text{cm}^4$ 라고 배웠습니다. 이제 족보 하나를 더 알아 두겠습니다.

단면계수(Z)입니다. 단면계수는 단면 2차모멘트를 도심(圖心)에서 가장 먼 거리로 나눈값입니다.

$$Z_x=\frac{I_x}{\left(\frac{h}{2}\right)}=\frac{364.5}{4.5}=81\text{cm}^3$$

$$Z_y=\frac{I_y}{\left(\frac{b}{2}\right)}=\frac{162}{3}=54\text{cm}^3$$

단면계수가 큰 부재는 큰 모멘트(moment)를 지탱할수 있습니다. 즉 각재를 세워서 쓰는것이 눕혀서 쓰는것 보다 유리합니다. 그렇다고 해서 각재의 두께를 한없이 줄이고 높이를 한없이 높일수는 없습니다. 합판의 단면계수를 계산해보면 굉장히 큰 값인데도 세워서 보로 쓰지는 못합니다. 강통으로 높은 H형강을 만들어 쓰지 못하는것도 같은 이유입니다. 적당한 두께가 필요합니다.

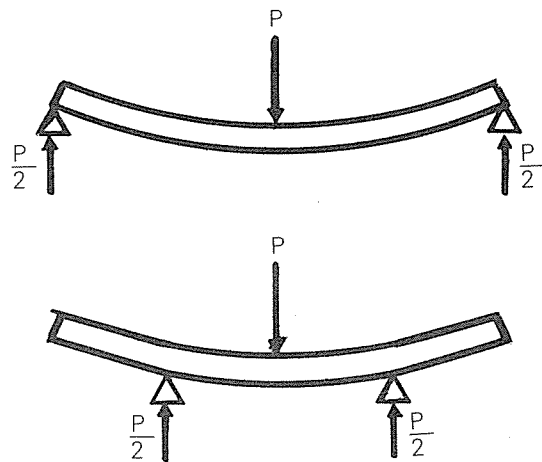


그림 56

(그림-56)에서 보는바와 같이 같은 무게의 물건 P를 같은 굵기의 막대기에 매달았을때에도 길이가 길면 많이 구부러지고 짧으면 덜 구부러집니다. 그러나 들고가는 사람은 길게 잡으나 짧게 잡으나 힘들기는 마찬가지입니다.

즉 $\frac{P}{2}$ 씩 들어주면 됩니다. 이 값을 지점반력이라고 부릅니다. 이렇게 막대기의 무게를 무시했을 때는 막대기의 길이가 길거나 짧거나 지점반력은 마찬가지로입니다. 그러나 막대기의 무게가 없으리 는 없습니다. 긴 막대기는 무겁고 짧은 막대기는 가볍습니다. 짧게 잡고 잘 바에야 끝을 잘라버리고 들고갈 것입니다. 1m짜리 막대기의 무게가 2kg이라고 합시다. 두사람이 양쪽 끝을 들고 가려면 각각 1kg씩만 힘을 쓰면 될것입니다. 2m짜리 막대기면 2kg씩 3m면 3kg씩, 이렇게 막대기가 길어지면 길어질수록 더 무거워지는것은 당연합니다. 이것을 전단력이라고 하겠읍니다. 한편(그림56)에서 보는바와 같이 물건 P가 막대기 중앙에 매달렸으면 막대기 길이가 길던 짧던 관계 없이 지점반력은 항상 $\frac{P}{2}$ 로 일정합니다. 따라서 보를 설계할때에는 이들 두가지 요소를 합한값(전단력)에 안전해야 합니다. 만약 P가 왼쪽으로 치우쳐지면 왼쪽사람은 무겁게 느껴질것이고 아주 왼쪽사람손 위에 얹혀지면 오른쪽사람은 작대기만 들고가면 될것입니다.

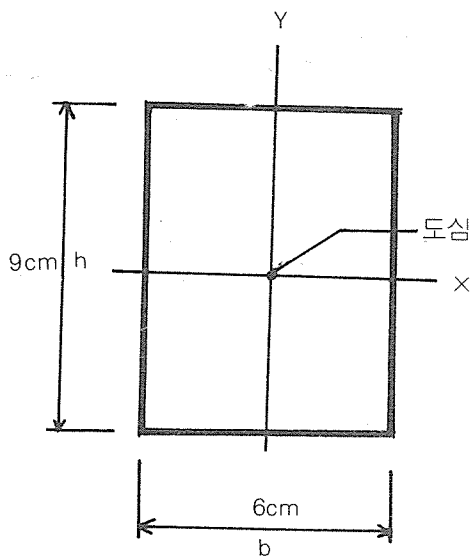


그림 57

그러나 막대기가 구부러지는 모양은 어떻게 될까요? 같은 길이의 막대기의 끝을 잡았을때는 물건이 가운데 있을 때 가장 많이 구부러질것이고 어느 한쪽으로 치우칠수록 적게 구부러집니다. 어느 한쪽사람 손에 아주 올려놓으면 막대기는 전혀 구부러지지 않을 것입니다. 이것을 벤딩 모멘트(bending moment)라는 이름으로 설명합니다.

단순보의 벤딩모멘트는 다음과 같습니다. 길이가 l m, 1m당의 무게가 ω t/m이면 보 중앙에서의 최대 모멘트(moment)는 M_0 라고 표시하며

$$M_0 = \frac{\omega l^2}{8}$$

지점반력 또는 최대 전단력은 $V = \frac{\omega l}{2}$ 입니다.

집중하중에 관해서는 중앙집중하중일때

$$M_0 = \frac{Pl}{4}$$

여기에서 등분포하중을 받는 보의 벤딩모멘트는 길이의 제곱에 비례한다는 것을 알게 됩니다. 5m짜리의 보보다는 10m길이의 보가 4배의 벤딩모멘트에 견디어야 한다는 뜻입니다. 한편 Z_x, Z_y 는 I_x, I_y 를 각각의 높이의 반값으로 나눈 것이므로 높이의 제곱에 비례합니다. 즉 폭에 비례하고 높이의 제곱에 비례하므로 벤딩 모멘트가 커지면 보의 높이를 줄이고 폭을 크게하여 설계변경 하라는 요구는 그래서 잘 받아들여지지 않는 것입니다. 6cm×9cm의 각재를 세워 놓으면 눕혀놓았을때의 $81 \div 54 = 1.5$ 배 튼튼하다는 뜻입니다.

단순보에 등분포하중이 걸리면 중앙 모멘트가 최대이고 지점으로 나갈수록 적어져서 바로 지점에서는 0이 됩니다. 제 1 한강교의 아치(arch), 공장 트라스의 형태가 중앙은 높고 지점에서는 높이가 적은 이유는 응력에 맞추어 단면을 결정했기 때문입니다.

높은 보가 벤딩 모멘트에 잘 견딘다는 사실을 알았읍니다. 그러나 합판이나 책받침처럼 너무 얇아도 보의 구실을 못한다는 것도 알았읍니다. 벤딩 모멘트를 받는 부재는 도심에서 거리가 먼데 있는 입자일수록 많은 응력을 받습니다. 도심에 가까울수록 응력이 적어지고 바로 도심에서는 응력이 0입니다. 아까운 일입니다. 어떻게 하면 응력이 많이 작용하는 부분을 보강하고 도심측 노는 단면을 줄일수 있을가를 연구하여 나온 단면들이 파이프, H형강, I형강, C형강등 입니다. 트라스도 마찬가지입니다. 플레이트 가더(Plate girder), 허니콤(honey comb)도 그렇습니다.

물건을 들고가는 막대기가 너무 가늘면 어떤때는 부러지지 않는데 휘청거려서 즉 너무 많이 구부러져서 못 쓴다고 했습니다. 처짐이 문제가 된것입니다. 일반적으로 재료의 강도가 큰것을 사용했을때 이런 문제가 발생합니다.

높이가 너무 크니 줄여달라는 요구와 함께 고강도 강을 쓰면 될게 아니냐는 해결방안까지 제시해 읍니다. 불행히도 고강도강이나 보통강이나 처짐의 크기를 결정하는 요소가 되는 영(Young)계수는 마찬가지로입니다. $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 입니다. 단순보의 중앙최대 처짐은

$$\delta = \frac{5\omega l^4}{384 EI}$$

단위중량 ω 에 비례하며 길이의 4승에 비례합니다. 영(Young)계수와 단면 2차모멘트에 각각 반비례합니다. 따라서 처짐을 줄이는 가장 좋은 약은 보의 길이를 줄이는 것입니다. 단위 중량을 줄이고 단면 2차모멘트와 영(Young)계수를 크게 하여야 하는데 철골재에서 영(Young)

계수를 일정하니 늘일진 단면 2차모멘트 뿐입니다.

크레인 가더 (crane girder)를 설계할때, 스팬(span)이 진 건물에 설계할때 이런 문제에 가끔 부딪칩니다. 또 한가지 중요한 사항이 있습니다. $\frac{5}{384}$ 라는 상수입니다. 이 값은 단순보에만 적용됩니다. 만약 단순보의 양단을 고정시킬수만 있다면 같은 재료 같은 하중 같은 길이의 보일 때 그 처짐이 $\delta = \frac{\omega l^4}{384EI}$ 로 즉 $\frac{1}{5}$ 로 줄게 됩니다.

처짐의 크기는 두가지 이유에서 제한합니다. 처짐 그 자체에 의해서 구조물이나 건축물 각 부위에 다른 변형이나 균열을 발생시키지 않도록 하기 위해서가 한가지 이유이며 또 한가지는 처짐이 과대할때 용도상 지장이 있거나 심리적인 불안감을 초래할 수 있으므로 이를 방지하기 위함입니다.

구조책에 보면 보의 길이를 일정한 상수 즉 360이니 480이니 하는 값으로 나눈것 이상의 처짐은 허용할수 없다고 규정하고 있습니다. 서울역 앞에는 육교가 있습니다. 그러나 이것만으로는 불충분합니다. 벌써 몇년동안 잘 쓰고 있습니다. 물론 안전합니다. 그러나 시골사람들이 기차에서 내려서 육교 중간에 이르렀을때 일어나는 현기증을 차멀미인줄로만 알지 않을만큼 심한 흔들림을 느낄 수 있을것입니다. 구조재료의 강도가 커질수록, 보의 스팬(span)이 길어질수록 이런 현상은 큰 골칫거리로 등장합니다. P. S. 콘크리트 같은 재료로 설계할때도 이점에 특별히 유의하여야 합니다.

단순보의 지점반력은 단부의 전단력과 같습니다. 전단력을 부재 단면적으로 나눈값에 적당한 보정을 하면 허용치인지 아닌지를 알게됩니다. 단면 형태에 따라 재료에 따라 보정 방법은 조금씩 다릅니다. 각목인 경우 전단력 $\times 1.5 \div$ 단면적의 값이 허용전단응력도 이내에 들어야 합니다.

이제 우리는 단순보 설계에서 고려하여야 할 사항 세 가지를 배웠습니다.

첫째 벤딩 모멘트(bending moment)에 안전하고 둘째 심각한 처짐이 일어나지 않아야 하며 셋째로는 허용전단응력도 이내에 들어야 합니다.

화투놀이에서는 족보를 다 외우고도 돈을 잃는수가 많습니다. 그러나 구조에서 배운 족보는 한번 배워두면 평생토록 실제 설계에 성공적으로 사용할 수 있습니다.

단순보의 단부에는 벤딩 모멘트(bending moment)가 0이라는것은 틀림 없습니다. 양 지점이 자유롭게 회전할 수 있는 상태로 되어 있어서 고정상태가 0이라는 설명이 됩니다.

다음과 같은 질문은 아주 많이 받았읍니다. 단순보의 양

단부는 끊어 놓아야 된다고 배웠는데 붙여서 시공하면 위험하지 않은가? 라는 것입니다. 거기에 대한 필자의 대답은 이렇습니다.

10년동안 안전하게 쓰던 외나무다리 양끝에 콘크리트를 부어버리면 당장에 그 외나무다리가 부러지겠느냐? 는 반문입니다. 그냥 었어 놓고도 잘 쓰는 각재의 양끝을 풀로 붙이면 어떻게 됩니까? 물론 보의 처짐에 의한 단부 회전각이 있으므로 풀이 약하거나 하면 붙였던 면이 다시 떨어집니다. 외나무다리 양측에 부은 콘크리트에는 균열이 생길수 있습니다. 그러나 절대로 위험하다거나 부러질 염려는 없습니다. 거꾸로 말하면 단순보로 설계된 보는 일단봉에 붙인 풀이 너무나 강하여 보의 처짐을 구보는 일반적으로 항상 안전합니다. 다만 양측단부에 붙인 풀이 너무나 강하여 보의 처짐을 구속한다든지 더 심하여 인접보다 캔틸레버(cantilever)와 완전히 묶여 그의 영향을 받게 될 경우 콘크리트보와같이 당면이 균일하지 않을 때는 말썽이 나는 수가 있습니다.

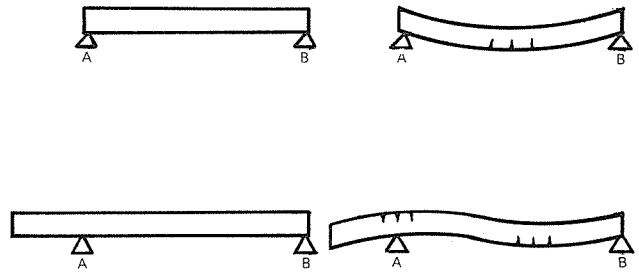


그림 58

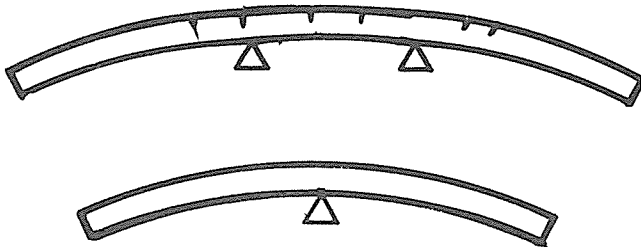
위의(그림58)에서 단순보로 설계된 보(A-B)에 덧붙여서 캔틸레버(cantilever)를 시공했다고 하면 이 A-B 보는 이미 단순보가 아닙니다. 양쪽에 다 캔틸레버를 붙이면 이제는 양단이 다 고정되고 맙니다. 그 고정되는 정도의 차이는 있어도...

양단 캔틸레버의 길이가 길어지면 길어질수록 A-B보는 중앙 하단의 응력이 줄어들게 되며 급기야는 반대방향의 응력이 발생하기에 이릅니다.

가운데 지점 하나만 있는 구조물, 어린이 놀이터에 있는 시이소오, 옛날 중국 사람들이 메고 다니던 C+동통걸이, 막대저울... 이들을 받치고 있는 지점을 톱으로 잘라 놓으면 어떻게 될까요? 또는 잘못알고 톱으로 잘랐을때 붙이려면 어떻게 해야 할까요?

시이소오의 중간지점을 기준으로 양쪽은 각각 하나의 캔틸레버입니다. 등분포 하중을 받는 단순보의 중앙최대 모멘트는 $\frac{\omega l^2}{8}$ 이라 했습니다. 캔틸레버일때는 역시 등분포하중을 받을때의 최대 모멘트가 $\frac{\omega l^2}{2}$ 입니다. 단순보의 4 배입니다.

재질이 균등한 아주 긴 나무토막이 있습니다. 잘못 취급하면 부러질것같은 긴 나무입니다. 두 지점 어디를 택해서 들면 가장 안전할까요? 예를 들어 15m짜리 목재라면 양 끝에서 몇m 위치를 지점으로 하는것이 좋겠습니까? 한번 계산해 보시기 바랍니다. 답은 양쪽에서 약3.107m씩 되는 지점입니다.

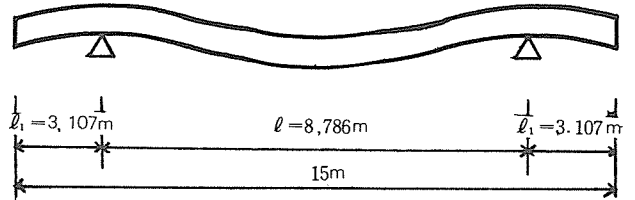


(그림 59)

힌트를 드리겠습니다. 캔틸레버 모멘트(cantilever moment)와 보 중앙모멘트의 값이 같아지는 지점을 찾아내는 것입니다. 단순보의 중앙최대 모멘트는 $\frac{\omega \ell^2}{8}$ 이라고 했고 캔틸레버 모멘트와 보의 중앙모멘트의 값이 같아지려면 이 값의 $\frac{1}{2}$ 즉 $\frac{\omega \ell^2}{16}$ 이 되도록 조작하면 됩니다.

보의 양단에 적당한 길이의 캔틸레버를 붙이면 경제적

인 설계가 됩니다. 캔틸레버의 고정단모멘트와 보의 중앙모멘트의 값이 같아진다면 기둥에는 모멘트가 전달되지 않아서 축방향력만으로 계산해도 됩니다. “압축재”에서 배운대로 계산하면 된다는 뜻입니다. 보가 H형강이나 목재같은 균일단면으로 생산된 재료일때는 아주 효과적입니다. 20장 gerber beam에서도 이 문제에 관하여 언급한 바 있습니다.



(그림 60)

단순보의 양단이 완전고정되었다고 함은 중앙최대모멘트 값의 $\frac{2}{3}$ 즉 $\frac{\omega \ell^2}{12}$ 만큼 고정되었다는 뜻이고 우리는 이를 고정단모멘트라고 부릅니다. 어떤 보와 인접한 다른 보의 응력이 엄청나게 커서 그 영향을 받는 경우를 제외하고는 단순보일 경우의 최대모멘트를 가지고 단부에 얼마가 올라붙는가를 찾아내는 작업이 이른바 모멘트 분배입니다 이에 관해서는 후에 설명하겠습니다. ■

會員計劃作品기고要領

*本誌에 會員여러분의 設計計劃作品을 發表할 수 있는 란을 新設하였습니다. 많은 利用있으시기 바랍니다.

*設計計劃作品이란?

- 1) 市庁, 区庁의 建築심의회에 제출할 作品
- 2) 懸賞設計에 참여한 作品

*구비도서말 작성요령, 사진, 건물개요 및 계획설명등의 작성요령은 회원작품 원고작성 요령에 준한다.