

충전탑의 구조설계

(2)

3-5 풍압력에 의해 생기는 응력
수평 풍압력에 의해 탑에 bending 응력 및 전단응력(水平)이 생긴다. 이것들은 어느 것이나 단기 하중이고, 탑정으로부터 아래로 진행함에 따라 커진다.

풍압력 및 속도압은 (1), (2) 식으로 표시된다. 따라서 탑정으로부터 아래로 진행함에 따라 커진다. 풍압력 및 속도압은 (1), (2) 식으로 표시된다. 따라서 탑정으로부터 x내려간 단면 X-X에서의 풍압력에 의한 Bending-moment M_x 는

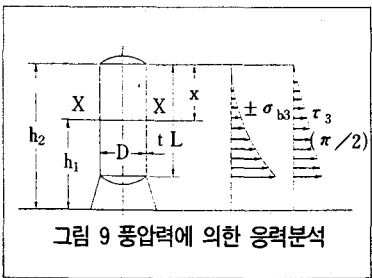


그림 9 풍압력에 의한 응력분석

$$M_x = f \cdot D \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$= \frac{1}{2} c q D x^2 \quad (14)$$

여기서 M_x = Bending-moment
 c = 풍압계수
 q = 속도압
 x = 탑의 외경 탑길이로부터 단면 X-X까지의 길이

Bending 응력 $\pm \sigma_{bz}$ 는

$$\pm \sigma_{bz} = \frac{100M_x}{Z} = \frac{100M_x}{\pi D^2 t}$$

$$= \frac{400M_x}{\pi D^2 t} \quad (15)$$

한편 전단응력 τ_2 는

$$\tau_2 = \frac{2F \sin \psi}{\pi Dt}$$

$$\tau_3 \left(\frac{\pi}{2} \right) = \frac{2F}{\pi Dt}$$

$$= \frac{2c q d x}{\pi Dt} \quad (16)$$

3-6 지진력에 의해 생기는 응력
수평 지진력에 의해 탑에 Bending 응력 및 전단응력이 생긴다. 이것은 어느 것이나 단기 하중이고 또한 탑정으로부터 아래로 내려감에 따라 커진다.

지진력이 수직방향으로 작용하는 경우는 다리나 수평수문에는 중요한 문제이지만 탑은 수직방향에는 대단히 안정하므로 문제가

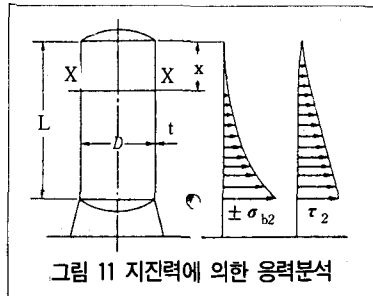
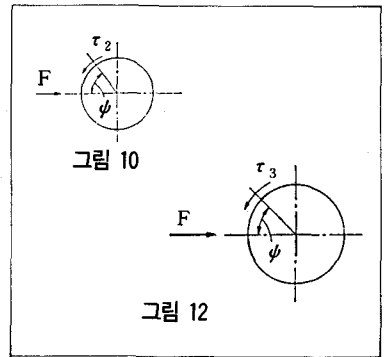


그림 11 지진력에 의한 응력분석

■ 본연합회 발행「폐가스흡수처리」



되지 않는다.
 탑정으로부터 x내려간 단면 X-X에서의 Bending-moment M_x 는

$$M_x = k \cdot W_x \cdot \frac{x}{2} = \frac{1}{2} k W_x x \quad (17)$$

여기서 W_x = 탑정에서 x내려간 단면까지의 탑 자중 + 부속물의 중량
 k = 설계진도

Bending 응력 $\pm \sigma_{b3}$ 는

$$\pm \sigma_{b3} = \frac{M_x}{Z} = \frac{k W_x \cdot \frac{x}{2}}{\pi D^2 t}$$

$$= \frac{2k W_x x}{\pi D^2 t} \quad (18)$$

전단응력 τ_3 는

$$\tau_3 = \frac{2F \sin \psi}{\pi Dt}$$

$$\tau_3 \left(\frac{\pi}{2} \right) = \frac{2F}{\pi Dt} = \frac{2k W_x}{\pi Dt} \quad (19)$$

3-7 총합응력 및 합성응력

이상의 응력 3-2~3-6을 각각 구하고 무시할 수 있는 정도의 것은 생략한다.

특히 풍압력과 지진력에 관해서는 큰 쪽을 택한다. 여기서 그러한 것을 표 6과 같이 집계하고, 이 응력의 대수합을 계산한 총괄응력을 구하고 그의 합성응력을 구해 그것이 허용응력보다 적어야 한다.

1) 총괄응력(축방향 응력)

표 6에서 축방향 응력 σ_x 를 각각 선정하고 총괄하는 부호를 생각하여 그 최대치를 취한다. 예를 들면

㉑ 내압탑의 경우

$\sigma_{x1} = \sigma_z - \sigma_w + \sigma_{b1}$ (장기하중)

$\sigma_{x2} = \sigma_z - \sigma_w + \sigma_{b1} + \sigma_{b2}$ (단기하중인 풍압력을 더하는 경우)

$\sigma_{x3} = \sigma_z - \sigma_w + \sigma_{b1} + \sigma_{b3}$ (단기하중인 지진력을 더하는 경우)

㉒ 진공탑의 경우

$\sigma_{x4} = \sigma_z - \sigma_w - \sigma_{b1}$ (장기하중)

$\sigma_{x5} = \sigma_z - \sigma_w - \sigma_{b1} - \sigma_{b2}$ (단기하중의 풍압력을 더하는 경우)

$\sigma_{x6} = \sigma_z - \sigma_w - \sigma_{b1} - \sigma_{b3}$ (단기하중인 지진력을 더하는 경우)

2) 합성응력

탑의 축방향, 즉 x방향이 총괄응력 σ_x 외에 실제에는 원주방향, 즉 y방향의 응력 σ_y 및 수평전단력 τ 를 고려하여 이 합성응력에서 안전성을 점검할 필요가 있다.

재료 강도의 criterion(재료가 한 점에서 어떤 한계조건을 넘지 않기 위해 허용되는 응력상태의 한도)으로서 많은 가설이 있지만, 지금 축방향의 총괄응력을 σ_x , 원주방향의 응력을 σ_y , 전단응력을 τ 라 하면 이 합성응력은 각 가설에

표 6 응력집계표

하 중	축방향응력 : σ_x		원주방향응력 : σ_y		수 평 전단응력 : τ	분포상황
	㉑ 내압	㉒ 외압	㉑ 내압	㉒ 외압		
장기	1) 조작압	$+\sigma_z$	$-\sigma_z$	$+\sigma_t$	$-\sigma_t$	탑의 전체 길이에 걸쳐서 균일함
	2) 자체무게	$-\sigma_w$	$-\sigma_w$			하부일수록 큼
	3) 편심력	$\pm\sigma_{b1}$	$\pm\sigma_{b1}$			탑의 전체 길이에 걸쳐서 균일함
단기	4) 풍압력	$\pm\sigma_{b2}$	$\pm\sigma_{b2}$			τ_2 하부일수록 큼
	5) 지진력	$\pm\sigma_{b3}$	$\pm\sigma_{b3}$			"

($\tau \leq 0.85\sigma_x$)

기인하며 다음과 같은 식으로 표현된다.

㉑ 최대 주응력설(Max. Stress Theory)

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (20)$$

㉒ 최대 주왜설(Max. Principal Strain Theory)

$$\sigma = (1 - \nu) \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + (1 + \nu) \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (21)$$

㉓ 최대전단응력설(Max. Shearing Stress Theory)

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \quad (22)$$

㉔ 전왜 에너지설(Total Strain Energy Theory)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 - 2\nu\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 2(1 + \nu)\tau^2}{(1 + \nu)\tau^2}}$$

㉕ 전단왜 에너지설(Shearing Strain Energy Theory)

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} \quad (24)$$

단, ν = Poisson's ratio ($\approx 0.3 \sim 0.27$)

㉑식은 취약성 파손에 대해서는 비교적 잘 맞고 식이 간단하기 때

문에 일반적으로 잘 이용되고 있다.

㉒식은 탄성 파손의 법칙으로서는 역사적으로 가장 오래 됐지만 실험과 합치되지 않는 경우가 많다.

㉓식은 연성 금속의 sliding의 파손에 대해서는 대단히 잘 합치하고 또한 계산도 간단하므로 가소성 역학에서는 가장 널리 이용되고 있다.

이와 같이 하여 합성응력 σ 가 그 조작용도 및 하중의 성질에 따르는 허용응력 이하로 되게 판 두께를 결정한다. 탑의 높이에 따라 달라지는 응력을 계산하는 경우는 탑을 적게 구분할수록 정도가 높아지지만, 대체로 판은 위로부터 판 폭의 치수 또는 그 배수의 길이로 구분하여 계산하는 것이 보통이다. 또한 부식부분을 더하여 실제의 판 두께로 하는 것이 물론이다.

4. 탑 지지부의 설계

탑 지지부의 구성물로서는 Skirt-plate, Base plate, Gusset plate, Anchor bolt가 있다. 이 member의 강도계산은 수평력(풍압력 또는 지진력 등)에 의한 전도 모멘트(轉倒 moment)를 고려하는 것이 중심

이 된다.

이 경우 전도 moment에 의한 반력(反力)의 중심선의 위치를 구하고, 지지부의 각 부마다 생기는 응력을 계산해야만 된다. 그러나 때로는 neutral axis의 위치가 bolt circle의 중심선이라고 가정하여 충분히 근사하게 되는 경우도 있으므로 상황에 따라서 어느 쪽인가의 입장을 취한다.

4-1 Neutral axis의 계산

탑에 수평력이 작용하는 up side (그림 13의 neutral axis의 좌측)는 양카볼트의 장력에 의해 인하하도록 작용을 받고 down side(우측)는 기초 콘크리트의 반력에 의해 받쳐지도록 작용을 받아 평형을 이룬다.

Neutral axis를 k로 표시해 본다.

- 지금 f_a = 양카볼트의 인장응력
- f_c = 콘크리트의 압축응력
- E_a = 양카볼트의 탄성계수

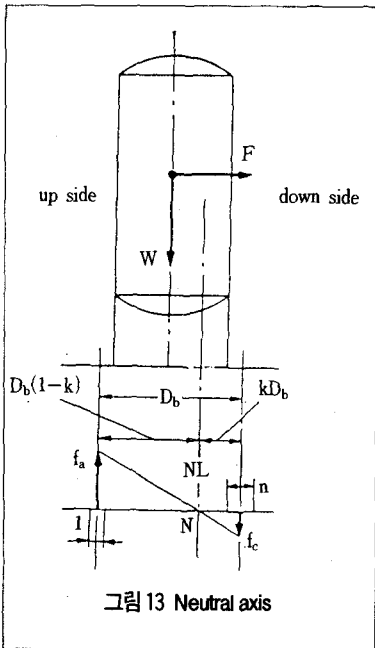


그림 13 Neutral axis

E_c = 콘크리트의 탄성계수

D_b = bolt circle 직경

$$n = \frac{E_a}{E_c}$$

Young의 법칙에서

$$f_c = E_c \epsilon_c, f_a = E_a \epsilon_a$$

그런데 $\epsilon_c = \epsilon_a$ 라 생각할 수 있으므로

$$f_a = n f_c$$

그림 13에서 neutral axis가 N의 위치에 있다고 하면 3각형의 닮은꼴 법칙에서

$$\frac{f_a}{D_b(1-k)} = \frac{n f_c}{k D_b} \quad (25)$$

$$\therefore k = \frac{n f_c}{n f_c + f_a} + \frac{1}{1 + \frac{f_a}{n f_c}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{1,600}{15 \times 50}} = 0.33 \quad (26)$$

$$\text{단, } E_a = 21 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 1.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$n = \frac{21 \times 10^5}{1.4 \times 10^5} = 15$$

$$f_a = 1,600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (장기)}$$

$$f_c = 50 \text{ kg/cm}^2$$

4-2 Skirt plate의 계산

i) Neutral axis의 위치가 bolt circle의 중심선이라고 가정할 수 있는 경우 전술한 총괄응력에서 조작압에 의한 응력 $\sigma_z = 0$ 의 경우를 생각하면 된다.

따라서 $\sigma_x = -\sigma_w + \sigma_{b1} + \sigma_{b2}$

(or σ_{bs})

즉,

$$\sigma_x = \frac{W + W_p + W_c + W_L + \dots}{\pi D t} +$$

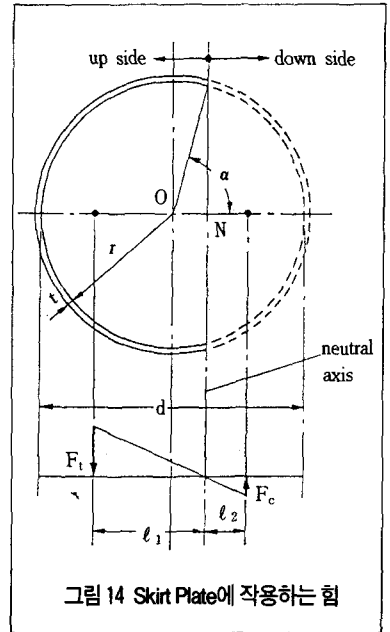


그림 14 Skirt Plate에 작용하는 힘

$$\frac{4W_c t}{\pi D^2 t} + \frac{400M_x}{\pi D^2 t} \text{ (or } \frac{2kW_x X}{\pi D^2 t} \text{)} \quad (27)$$

단, σ_{b2} 와 σ_{b3} 중 큰 쪽을 취한다.

ii) Neutral axis를 고려하는 경우

Skirt plate에 생기는 up side 유효장력의 합력을 F_t 라 하면

$$F_t = \left\{ \frac{2}{1 + \cos \alpha} \{ (\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha \} \right\} f_s \cdot t \cdot r \quad (28)$$

단,

f_s = Skirt plate의 최대 인장응력

r = Skirt plate의 반경

α = 그림 중의 각도

t = Skirt plate의 판 두께

여기서

$$c_1 = \frac{2}{1 + \cos \alpha} \times \{ (\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha \}$$

라 하면 $F_t = c_t \cdot f_s \cdot t \cdot r$
 F_t 의 neutral axis의 주위의 moment M_t 는

$$M_t = 2f_s \cdot t \cdot r^2 \cdot \frac{(\pi - \alpha) \cos^2 \alpha + 3/2(\sin \alpha \cdot \cos \alpha) + 1/2(\pi - \alpha)}{1 + \cos \alpha} \quad (29)$$

한편 $M_t = F_t \cdot l_1$ 인 관계에서

$$l_1 = \frac{M_t}{F_t} = r \cdot \frac{(\pi - \alpha) \cos^2 \alpha + 3/2(\sin \alpha \cdot \cos \alpha) + 1/2(\pi - \alpha)}{(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha} \quad (30)$$

콘크리트에 생기는 down side 유효 압축력의 합력을 F_c 라 하면

$$F_c = \frac{2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha} \cdot (b + nt) \cdot r \cdot f_c \quad (31)$$

단, f_c = 콘크리트의 최대 압축응력
 b = Base plate의 폭
 여기서

$$c_c = \frac{2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha}$$

라 하면

$F_c = c_c \cdot f_c \cdot (b + nt) \cdot r$
 F_c 의 neutral axis 주위의 moment M_c 는

$$M_c = 2f_c \cdot (b + nt) \cdot r^2 \cdot \frac{\cos^2 \alpha - 3/2(\sin \alpha \cdot \cos \alpha) + 1/2 \alpha}{1 - \cos \alpha} \quad (32)$$

한편 $M_c = F_c \cdot l_2$ 인 관계에서

$$l_2 = \frac{M_c}{F_c} = r \cdot \frac{\cos^2 \alpha - 3/2(\sin \alpha \cdot \cos \alpha) + 1/2 \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (33)$$

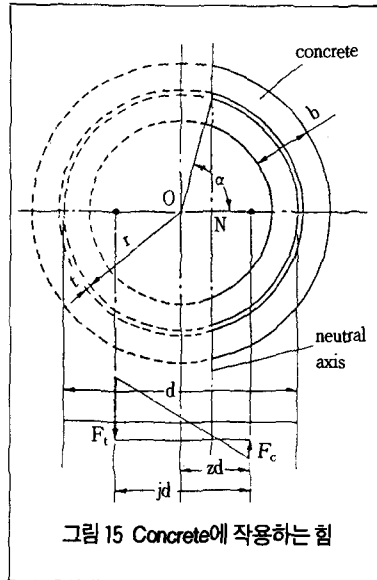


그림 15 Concrete에 작용하는 힘

표 7 점수(상수)의 값

k	c_t	c_c	r	z	$\cos \alpha$
0.3	2.442	1.510	0.781	0.438	0.40

이상에서

$$j = \frac{l_1 + l_2}{2}$$

$$z = \frac{l_2}{d} + \frac{\cos \alpha}{2}$$

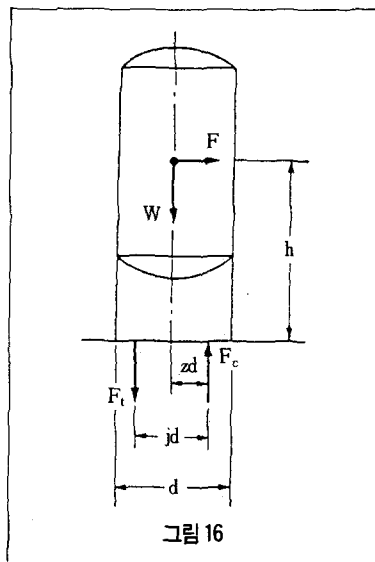


그림 16

여기서 $k=0.3$ (실제문제로서는 가장 타당한 값이다)인 경우의 각 상수를 구하면 표 7과 같이 되고 이 수치로써 설계하면 된다.

그런데 그림 16에서 Bending moment의 평행방정식을 세우면 $(Fh) - (Wzd) - (F_t j d) = 0$

$$\therefore F_t = \frac{Fh - Wzd}{jd}$$

한편 $F_t = c_t \cdot f_s \cdot t \cdot r$ 이므로 이로부터

$$\therefore t = \frac{Fh - Wzd}{c_t \cdot f_s \cdot r \cdot jd}$$

Skirt plate는 보통 용접구조이므로 용접효율을 고려하여

$$t = \frac{Fh - Wzd}{c_t \cdot f_s \cdot r \cdot jd \cdot \eta} \quad (34)$$

4-3 Base plate의 계산

그림 16에서 수직방향에 대해 평행방정식을 세우면

$$F_t + W - F_c = 0$$

$$c_t \cdot f_s \cdot t \cdot r + W - c_c \cdot f_c \cdot (b + nt) \cdot r = 0$$

이로부터

$$b = \frac{W + (c_t f_s - c_c f_c) \pi r t}{c_c \cdot f_c \cdot r}$$

한편 탑에 전도 moment가 작용할 때, down side의 하부 Base plate는 콘크리트의 압축응력과 같은 위로 향한 균등분포 하중을 받는다.

하부 Base plate의 단위폭에 대해 외팔보(cantilever)로써 계산한다. 부착부에서의 Bending moment M 은

$$M = f_c \cdot l_1 \cdot \frac{l_1}{2} = \frac{l_1^2}{2} f_c$$

허용 Bending 응력을 f_b 라 하면

$$f_b = \frac{M}{z} = \frac{l_1^2 / 2 \cdot f_c}{t_1^2 / 6 \cdot 1}$$

$$= \frac{3 l_1^2 f_c}{t_1^2}$$

따라서

$$\therefore t_1 = l_1 \sqrt{\frac{3 f_c}{f_b}} \quad (36)$$

한편 상부 Base plate는 up side의 앵카볼트에 걸리는 장력을 P라 하면 span S인 중앙에 P의 집중하중을 받는 beam의 Bending으로서

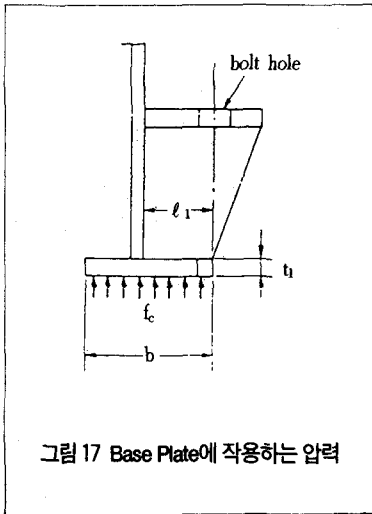


그림 17 Base Plate에 작용하는 압력

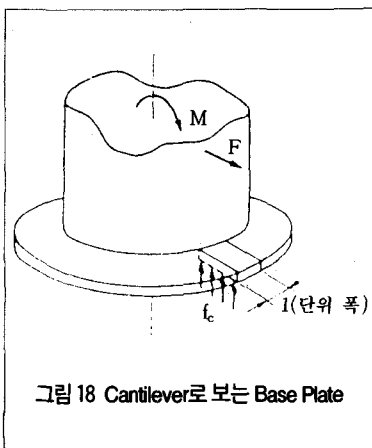


그림 18 Cantilever로 보는 Base Plate

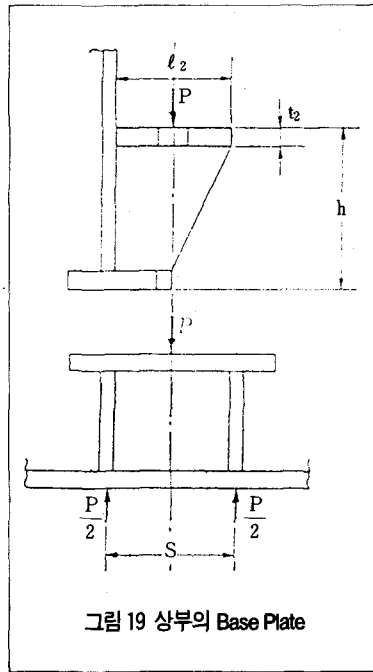


그림 19 상부의 Base Plate

의 계산으로 된다. 즉, 양단을 고정된 Beam이라 생각해 Bending moment M은

$$M = \frac{P \cdot S}{8}$$

허용 Bending 응력을 f_b 라 하면

$$f_b = \frac{M}{z} = \frac{PS/8}{(1/6) l_2 t_2^2}$$

$$= \frac{3Ps}{4 l_2 t_2^2}$$

따라서

$$\therefore t_2 = \sqrt{\frac{3Ps}{4 l_2 f_b}}$$

한편 Gusset plate는 P/2의 압축력을 받는 3변 고정, 1변 자유의 판이라고 생각한다.

단지 압축재라고 생각하는 경우는 $P/2 = \sigma_b \cdot l_1 \cdot t_3$ 에서

$$t_3 = \frac{P}{2 \sigma_b l_1} \quad (38)$$

단, σ_b = 허용 압축응력
으로 되지만, 좌굴을 고려한
경우는 좌굴응력을 σ' 라 하면

$$\sigma' = K \left(\frac{E}{1 - \nu^2} \right) \left(\frac{t^3}{l_1} \right)^2$$

허용의 좌굴응력을 σ 라 하면

$$\sigma = \frac{\sigma'}{n}$$

따라서

$$t_3 = l_1 \sqrt{\frac{(1 - \nu^2) \cdot n \cdot \sigma}{KE}} \quad (39)$$

단, E = Gusset plate의 탄성계수

ν = Poisson's 비 ($\approx 0.27 \sim 0.3$)

n = 안전계수 (단기 하중에
대해서 1.5 ~ 2.0)

K = 정수 (표 8)

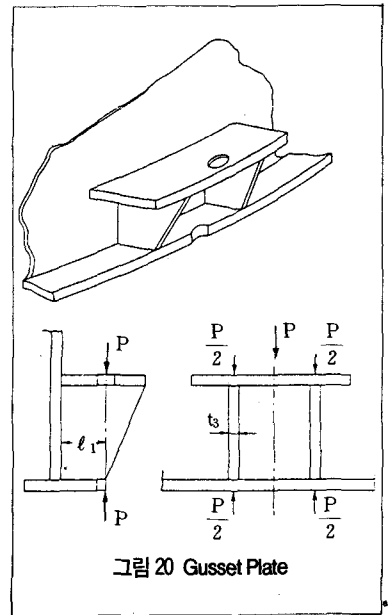
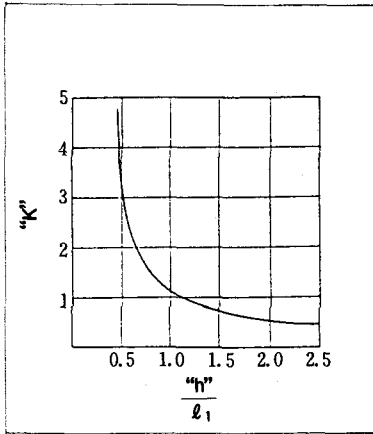


그림 20 Gusset Plate



4-4 기초 볼트(Anchor bolt)

i) Neutral axis의 위치가 bolt circle의 중심선이라고 가정할 수 있는 경우 N개의 양카볼트가 bolt circle상에 같은 간격으로 배치되어 있다고 하면 1개의 Bolt가 부담하는 하중면적은 $A = \pi d \cdot t / N$ 이다.

1개의 bolt에 걸리는 하중은

$$P = A \sigma_x = \frac{1}{N} \left\{ (W + W_p + W_c + W_L + \dots) + \frac{4W_c \ell}{d_1} + \frac{400M_x}{d_1} \left(\text{or } \frac{2kW_x X}{d_1} \right) \right\} \quad (40)$$

단, d_1 = bolt circle 직경
한편 $P = (\pi/4) d_a^2 \sigma_a$ 이므로

$$d_a = \sqrt{\frac{4}{\pi \sigma_a N}}$$

$$\frac{\left\{ (W + W_p + W_c + W_L + \dots) + \frac{4W_c \ell}{d_1} + \frac{400M_x}{d_1} \left(\text{or } \frac{2kW_x X}{d_1} \right) \right\}}{\pi \sigma_a N} \quad (41)$$

단, d_a = 양카볼트 직경
 σ_a = 양카볼트의 허용응력
ii) Neutral axis를 고려하는 경

우

Up side(neutral axis로부터 장력 측)에 있는 양카볼트의 장력을 계산한다. 그림 21에서 moment의 평균 합에서

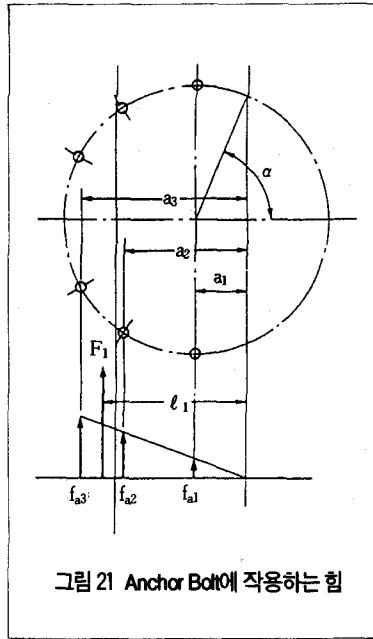


그림 21 Anchor Bolt에 작용하는 힘

$$F_t \ell_1 = 2 \left\{ \frac{\pi}{4} d_a^2 f_{a3} a_3 + \frac{\pi}{4} d_a^2 f_{a2} a_2 + \frac{\pi}{4} d_a^2 f_{a1} a_1 \right\}$$

여기서 f_{a1}, f_{a2}, f_{a3} = 양카볼트의 인장응력

a_1, a_2, a_3 = neutral axis까지의 거리

삼각형의 닮은꼴 법칙에서

$$\begin{aligned} \frac{f_{a1}}{a_1} &= \frac{f_{a2}}{a_2} = \frac{f_{a3}}{a_3} = c \\ f_{a1} &= a_1 c = \frac{a_1}{a_3} f_{a3} \\ \therefore f_{a2} &= a_2 c = \frac{a_2}{a_3} f_{a3} \\ f_{a3} &= a_3 c \end{aligned}$$

따라서

$$\begin{aligned} F_t \ell_1 &= \frac{\pi}{2} d_a^2 \left(f_{a3} a_3 + \frac{a_2^2}{a_3} f_{a3} + \frac{a_1^2}{a_3} f_{a3} \right) \\ &= \frac{\pi}{2} d_a^2 f_{a3} \left(a_3 + \frac{a_2^2}{a_3} + \frac{a_1^2}{a_3} \right) \end{aligned}$$

$\therefore d_a =$

$$\sqrt{\frac{2F_t \ell_1}{\pi \cdot f_{a3} \left(a_3 + \frac{a_2^2}{a_3} + \frac{a_1^2}{a_3} \right)}} \quad (42)$$

여기서 $f_{a3} = 1600 \text{ kg/cm}^2$ 로 계산하면 된다.

iii) 양카볼트의 길이

기초 콘크리트와 양카볼트와의 부착력을 ν 라 하면

$$\frac{\pi}{4} d_a^2 \sigma_t = \nu \pi d_a \ell$$

σ_t = 양카볼트의 허용응력 (= $1600 \text{ kg/cm} \cdot g$)

ℓ = 양카볼트의 길이

$\nu = 15 \sim 25 \text{ kg/cm}^2 g$ (보통)

$$\therefore \ell = \frac{\sigma_t}{4\nu} d_a = (16 \sim 27) d_a$$

이에 안전율을 고려하면

$$\ell = (25 \sim 35) d_a \quad (43)$$

$$1 + \frac{f_a}{nf_c} \quad 1 + \frac{1600}{15 \times 50}$$

* 지면관계로 이번호 '신제품, 신기술'란은 쉽니다.