

사이로 설계(말레이시아 시멘트 플랜트)



김승철 대표
(주)다원구조

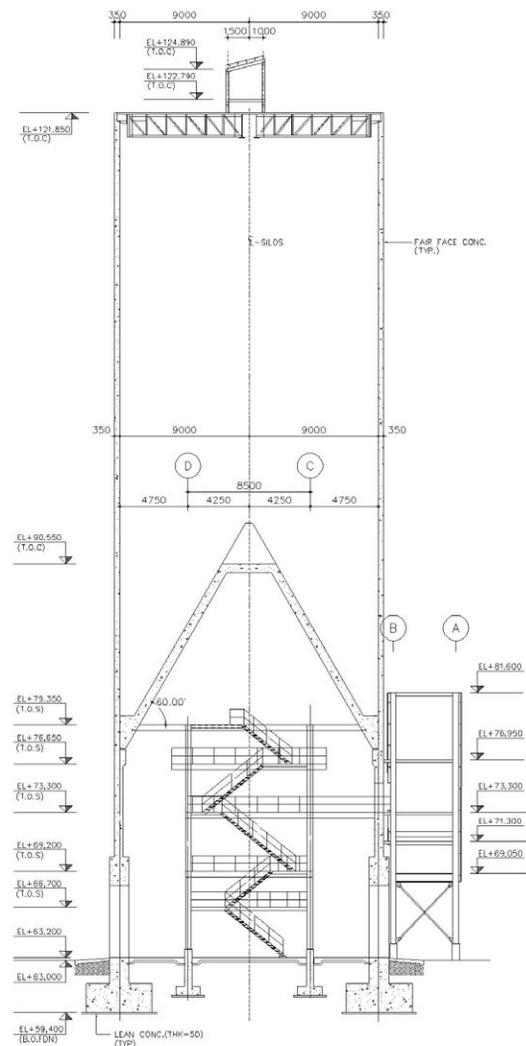
1. 서언

시멘트 플랜트의 설계는 40~50개의 건물로 이루어지는 크고 복잡한 Processing 과정을 이해하는 데부터 출발한다. 각공정은 크게 나누어 다음과 같다.

- 1) 광산에서 원자재를 채취하여 부수는 기능을 가진 Crusher Bldg.
- 2) 원자재의 수평수직 방향의 운송수단이 되는 Conveyer Belt 및 Bucket Elevator.
- 3) 재료를 섞기 전에 저장해두는 Storage (Lime stone, Dolomite, Iron-ore등).
- 4) 부수는 기능을 가지는 Mill Plant Bldg.
- 5) 섞고 저장하는 기능을 가지는 Silo(Blending silo 등).
- 6) 가열하고 굽는 기능을 가진 Pre-Heater Bldg, KILN, Burner/Cooler Bldg.
- 7) 잘게 부수는 기능을 가진 Finish Mill 및 Cement Mill Bldg.
- 8) 만들어진 Cement를 저장하는 Silo (Cement Silo).
- 9) 최종적으로 제품을 생산하는 Packing Plant로 이루어져 있으며 이 중에서 저장 기능을 가진 Silo의 설계에 대하여 말레이시아의 네게리 지역에 위치한 시멘트 플랜트를 중심으로 실시 설계한 내용에 대하여 소개하고자 한다.

2. 구조물 개요

본 Cement Plant는 말레이시아 네게리 지역에 Processing 과정을 한국 기술로 건립한 Project로 그 중 Silo에 대하여 그 설계 방법 및 Detail을 소개하고자 한다.



〈그림 1〉 시멘트 사이로 주단면

- 공사명 : Negeri Cement Plant in Malaysia
- 건물명 : Cement Silo
- Processing 설계 : 한라 중공업 및 한라 시멘트
- 건축설계 : 한라 설계 설계실
- 구조설계 : (주) 다원구조
- 시공사 : 한라건설
- 건물용도 : 시멘트 저장 Silo
- 구조 : 철근콘크리트구조

3. 설계하중

3.1 VERTICAL STATIC UNIT PRESSURES AT DEPTH Y.

$$q = \frac{\gamma R}{\mu' k} [1 - e^{-\mu' k Y/R}] \quad (\text{kg/m}^2)$$

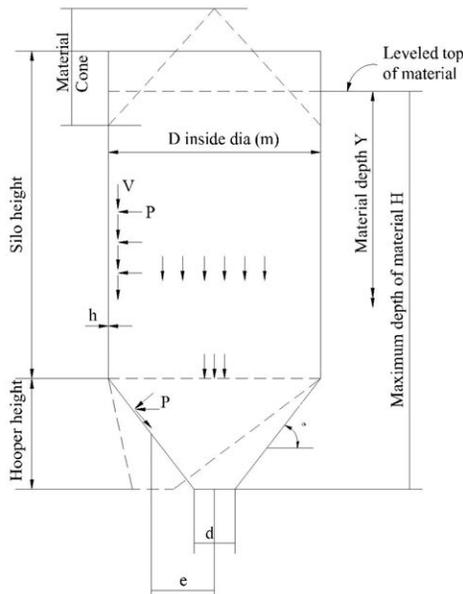
여기서,

- R : hydraulic radius (m)
 - = D/4 (for circular silo)
 - = De/4 (for regular polygonal silo)
 - = a/4 (for square silo or short side of rectangular silo)
 - = a'/4 (for long side of rectangular silo)
- a' = 2ab/(a+b) (a : short side, b : long side)

$$k = (1 - \sin\phi)/(1 + \sin\phi)$$

γ : Material의 단위 중량 (kg/m^3)

μ' : Material과 벽과의 마찰계수



〈그림 2〉 하중도

3.2 LATERAL STATIC UNIT PRESSURES AT DEPTH Y.

$$p = qk(\text{kg/m}^2)$$

3.3 경사면의 STATIC UNIT PRESSURES (경사각 α°)

$$q\alpha = p \cdot \sin^2\alpha + q \cdot \sin^2\alpha \quad (\text{kg/m}^2)$$

3.4 Vertical frictional force per unit width of wall perimeter on wall above depth Y.

$$V = (\gamma \cdot Y - 0.8 \cdot q) \cdot R \quad (\text{kg/m}^2)$$

3.5 DESIGN PRESSURE

저장물의 방출시 유동에 의한 동적압력을 고려하기 위해 수정계수 (C_d or C_i)를 곱하여 설계 압력을 구한다.

C_d ; Overpressure Correction Factor
(ACI 313-91 TABLE C.1 참조)

C_i ; Impact Factor
(ACI 313-91 TABLE C.2 참조)

C_d, C_i 중 총압력이 큰 값을 사용한다.

1) Eccentric Flow가 발생하지 않는 경우

$$p_{des} = p \cdot C_d$$

$$q_{des} = q \cdot C_d$$

$$q\alpha_{des} = q\alpha \cdot C_d$$

$$V_{des} = V$$

2) Eccentric Flow가 발생하는 경우

$P_{ecc} = 0.25p(e/r) \cdot C_d$; hopper의 top에서 지름(D)까지, D이상에
서는 직선보간.

여기서,

e : SILO 중앙에서 discharge opening 까지 의 거리. (m)

r : SILO의 반. (m)

$$P_{des} = P \cdot C_d + P_{ecc}$$

이하 1)과 동일

3.6 온도하중

$$M_{xu} = M_{yu} = 1.4 \cdot E_c \cdot h^2 \cdot \alpha c \cdot \Delta T / (1 - \nu)$$

$$= 1.4 \times 1.25 \cdot E_c \cdot h^2 \cdot \alpha c \cdot \Delta T \text{ (in} \cdot \text{lb/ft)}$$

$$= 1.4 \times 10.41 \cdot E_c \cdot h^2 \cdot \alpha c \cdot \Delta T \text{ (cm} \cdot \text{kg/m)}$$

여기서,

E_c : 콘크리트의 탄성계수 (kg/cm²)

h : SILO WALL의 두께 (cm)

αc : 콘크리트의 열팽창계수

(≈ 0.000006) (1/°F)

ΔT : 저장물과 외기와의 온도 차 (°F)

$$= K_t (T_{des} - T_o)$$

$K_t = 0.08h / (4.09+0.08h)$; cement silo 의 경우 (h : silo wall의 두께, inch)

ν : poisson's ratio for concrete, assumed to be 0.2

3.7 풍하중

Circular Bending(Horizontal Moment)

는 SILO가 빈 경우만 고려.

$$M_A = 0.163qwr^2$$

$$M_b = MD = -0.125qwr^2$$

$$MA = 0.087qwr^2$$

여기서,

qw : 풍압 (kg/m²)

r : SILO의 반경 (m)

VERTICAL MOMENT는 축력으로 환산하여 V값에 가감하여 고려한다.

$$P_W = Cf \cdot q_w \cdot A \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Cf : 풍압계수

A : 풍압면적 (m²)

$$M_{ver} = P_W \cdot H/2 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$$

H : SILO의 높이 (GL+0으로부터, m)

$$V_{max} = M_{ver}/Z_i \text{ (kg)}$$

Z_i : SILO의 단면계수 (m³)

$$= \pi (D_o^4 - D_i^4) / 32 D_o; \text{for circular silo}$$

3.8 지진하중

정확한 해석에 의하지 않는 경우의 최소 지진력

$$H_e = Z \cdot C_p \cdot (W_g + W_{eff}) \text{ (kg)}$$

여기서,

W_g : Weight of the structure (kg)

W_{eff} : Stored material 증량의 80%이상 (kg)

Z : 3/16, 3/8, 3/4, 1 for ZONE 1,2,3,4

C_p : 지면 위 바닥에 저장물이 쌓이는 SILO -0.2, 지면 위 바닥에 저장물이 쌓이는 SILO-0.1, 기타 - 0.1 ≤ C_p ≤ 0.2

4. 배근 설계

4.1 HORIZONTAL(HOOP) REINFORCEMENT

① Ultimate Tensile Force

$$F_u = 1.7 \cdot p_{des} \cdot D/2 \text{ (kg)}$$

$$A_s = F_u / (\phi \cdot f_y) \text{ (cm}^2\text{)} ; \phi = 0.9$$

② Thermal Reinforcement for Horizontal & Vertical : 온도응력에 의해 필요로 하는 철근 을 silo 외면에 전량 배근한다.

$$A_{sx} = M_{xu} / [f_y \cdot (d - d')]$$

$$A_{sy} = M_{yu} / [f_y \cdot (d - d')]$$

여기서,

d : Effective Depth (cm)

d' : 콘크리트 표면에서 철근 중심까지의 거리 (cm)

4.2 VERTICAL REINFORCEMENT

① Permissible Ultimate Vertical Stress

$$f_{c,vert} = 0.55 \cdot \phi \cdot f'_c \text{ (kg/m}^2\text{)} ; \phi = 0.7$$

$$A_s = (V_u - f_{c,vert} \cdot A_g) / (\phi \cdot f_y) \text{ (cm}^2\text{)} ; \phi = 0.7$$

여기서,

V_u : Factored Vertical Loads (kg)

② Vertical Bending Moment : Mu(from roof bracket)

$$A_{sf} = M_u / [0.9 \cdot f_y \cdot (d - d')] \text{ (cm}^2\text{)}$$

4.3 CRACK CONTROL에 의한 배근간격 ① CRACK WIDTH ; 0.2mm 이하

① CRACK WIDTH ; 0.2mm 이하

- 곡물류 및 습기에 민감한 저장물

② THE TOTAL CRACK WIDTH for a Vertical Crack ; w_{cr}

$$w_{cr} = w_1 - w_2 + w_3 \text{ (cm)}$$

여기서,

w_1 : Ttot에 의한 Crack (Static & Overpressure ; 단기하중 포함)

w_2 : Tst에 의한 Crack (Static 하중만 고려)

w_3 : Tst에 의한 Crack (장기 Static 하중만 고려)

$$w_n = \psi_n \cdot S_{cr} \cdot f_s / E_s$$

여기서,

f_s : Actual steel stress under theunfactored tensile force ; Tst or Ttot (kg / m^2)

$$= T / A_s$$

S_{cr} : Crack Spacing

$$= A\beta / \Sigma O$$

A : Gross concrete area per unit height (cm^2)

β : 0.7 for Deformed Hoop

: 1.0 for Plain Hoop

ΣO : 단위 높이당 Hoop Bar의 주장의 합 (cm)

$$\psi_1 = 1 - 0.7 (0.8 \cdot f'_t \cdot A / T_{tot}) \geq 0.3$$

$$\psi_2 = 1 - 0.7 (0.8 \cdot f'_t \cdot A / T_{st}) \geq 0.3$$

$$\psi_3 = 1 - 0.35 (0.8 \cdot f'_t \cdot A / T_{st}) \geq 0.65$$

T : Tensile force in the wall at level under investigation ()

f'_t : Ultimate tensile strength of concrete

$$= 1.194 \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$= 4.5 \sqrt{f'_c} \text{ (ksi)}$$

③ Crack Control에 의한 최대 배근 간격 ; $maxS$ (cm)

(복배근)

$$A_s = 2 \cdot A_v \cdot 100 / S \text{ (복배근) (cm)}$$

A_v : 철근의 개당 단면적 (cm^2)

$$\Sigma O = 2 \cdot D_v \cdot 100 / S \text{ (복배근) (cm)}$$

D_v : 철근의 개당 주장 (cm)

$$f_s = T \cdot S / 2 \cdot 100 \cdot D_v \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$S_{cr} = A \cdot \beta \cdot S / 2 \cdot 100 \cdot D_v \text{ (cm)}$$

$$w_n = [\psi_n (T \cdot S / 2 \cdot 100 \cdot D_v \cdot A_v) \cdot$$

$$(A \cdot \beta \cdot S / 2 \cdot 100 \cdot D_v)] / E_s \text{ (cm)}$$

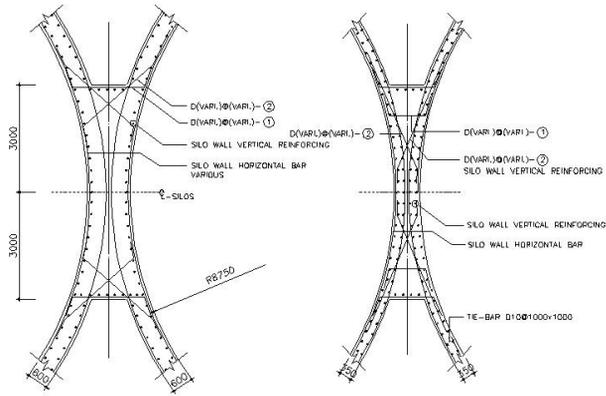
$$w_{cr} = S^2 \cdot \psi_n \cdot T \cdot A \cdot f_s / (4 \cdot 10^4 \cdot A_v \cdot D_v \cdot E_s)$$

$$- \psi_2 \cdot T_{st} \cdot A \cdot \beta / (4 \cdot 10^4 \cdot A_v \cdot D_v \cdot E_s)$$

$$+ \psi_3 \cdot T_{st} \cdot A \cdot \beta / (4 \cdot 10^4 \cdot A_v \cdot D_v \cdot E_s)]$$

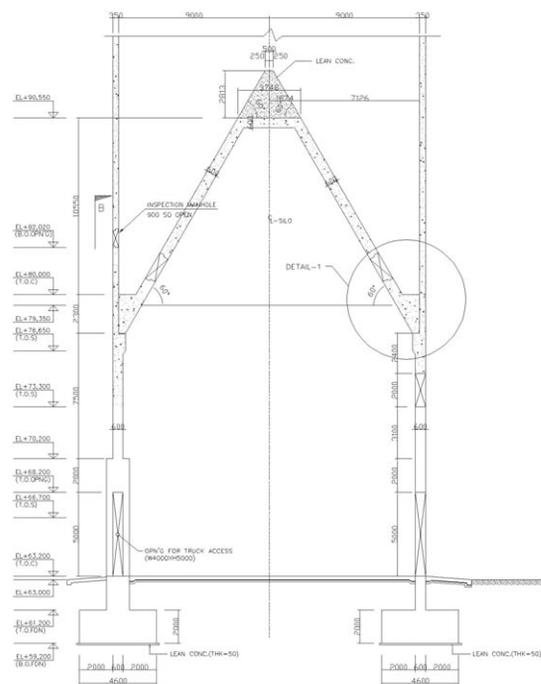
$$= S^2 \cdot A \cdot \beta (\psi_1 \cdot T_{tot} - \psi_2 \cdot T_{st} + \psi_3 \cdot T_{st}) / (4 \cdot 10^4 \cdot A_v \cdot D_v \cdot E_s) \text{ (cm)}$$

$$maxS = \sqrt{\frac{0.02 \text{ or } 0.03}{A_v (\psi_1 \cdot T_{tot} - \psi_2 \cdot T_{st} + \psi_3 \cdot T_{st}) / (4 \cdot 10^4 \cdot A_v \cdot D_v \cdot E_s)}}$$



<그림 3> 벽체 철근 배근

5. CORNICAL HOPPER 설계



<그림 4> Cornical hopper 단면

(1) CONE SELF WEIGHT

$$w_d = 2.4 \times 0.6 = 1.44t/m^2$$

$$F_{m1} = -\frac{w_d}{2\sin^2\alpha} \cdot H_{c1}$$

$$= -\frac{1.44}{2\sin^2 60^\circ} \times 16.182 = -15.53 \text{ tf/m}$$

$$F_{t1} = -w_d \cdot H_{c1} \cdot \cot^2\alpha$$

$$= -1.44 \times 16.182 \times \cot^2 60^\circ = -7.77 \text{ tf/m}$$

2) UNIFORMLY DISTRIBUTED VERTICAL LOADING, q_{des}

$$q_{des} = C_d \cdot q_{st} = 1.35 \times 24.35 = 32.87 \text{ tf/m}$$

$$F_{m2} = -\frac{q_{des} \cdot \cos\alpha}{2\sin^2\alpha} \cdot H_{c1}$$

$$= -\frac{32.87 \times \cos 60^\circ}{2\sin^2 60^\circ} \times 16.182 = -177.3 \text{ tf/m}$$

$$F_{t2} = -\frac{q_{des} \cdot \cos^3\alpha}{\sin^2\alpha} \cdot H_{c1}$$

$$= -\frac{32.87 \times \cos^3 60^\circ}{\sin^2 60^\circ} \times 16.182 = -88.65 \text{ tf/m}$$

3) VERTICAL TRAPEZOIDAL UNIT WEIGHT

$$\gamma = 1.6 \text{ tf/m}^3$$

$$= 27.24 \text{ tf/m}^2$$

$$F_{m3} = -\frac{q_{Hc2} \cdot \cos\alpha}{3\sin^2\alpha} \cdot H_{c2}$$

$$= -\frac{27.24 \times \cos 60^\circ}{3\sin^2 60^\circ} \times 12.612 = -76.34 \text{ tf/m}$$

$$F_B = -q_{Hc2} \cdot \cot^2\alpha \cdot \cos\alpha \cdot H_{c2}$$

$$= -27.24 \times \cot^2 60^\circ \times \cos 60^\circ \times 12.612$$

$$= -57.26 \text{ tf/m}$$

4) DESIGN LOAD

a) MERIDIONAL FORCE : F_{mu}

$$F_{mu} = 1.4F_{m1} + 1.7(F_{m2} + F_{m3})$$

$$= (1.4 \times 15.53) + 1.7(17.73 + 76.34)$$

$$= 452.93 \text{ tf/m (for COMPRESSION)}$$

b) TANGENTIAL FORCE : F_{tu}

$$F_{tu} = 1.4F_{t1} + 1.7(F_{t2} + F_B)$$

$$= (1.4 \times 7.77) + 1.7(88.65 + 57.26)$$

$$= 258.93 \text{ tf/m (for COMPRESSION)}$$

c) SERVICE LOAD

$$w_{md} = F_{m1} \times 18.0 \times \pi$$

$$= 15.53 \times 18.1 \times \pi = 878.2 \text{ tf}$$

$$w_{ml} = (F_{m2} + F_{m3}) \times 18.0 \times \pi$$

$$= (177.3 + 76.34) \times 18.0 \times \pi = 14343.0 \text{ tf}$$

$$\therefore W_D = w_{md} \cdot \sin 60^\circ$$

$$= 878.2 \times \sin 60^\circ = 760.54 \text{ tf}$$

$$\therefore W_L = w_{ml} \cdot \sin 60^\circ$$

$$= 14343.0 \times \sin 60^\circ = 12421.4 \text{ tf}$$

5) COMPRESSION CHECK

$$F_a = 0.55\phi f'_c$$

$$= 0.55 \times 0.7 \times 2.1 = 0.809 \text{ tf/mm}^2$$

$$f_{am} = F_{mu}/A = 452.93 \times 10^3 / (1000 \times 600)$$

$$= 0.755 \text{ tf/mm}^2 < F_a \text{ O.K}$$

$$f_{at} = F_{tu}/A = 258.93 \times 10^3 / (1000 \times 600)$$

$$= 0.432 \text{ tf/mm}^2 < F_a \text{ O.K}$$

\therefore COMPRESSIVE REINFORCEMENT IS NOT REQUIRED

- for MERIDIONAL DIRECTION

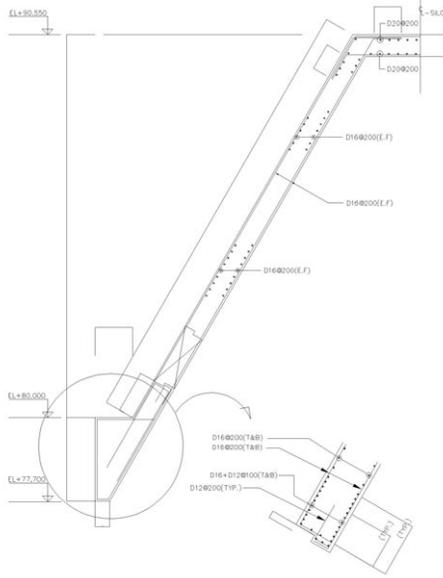
$$A_{smin} = 0.002 \times 100 \times 60 \times 12.0 \text{ cm}^2/\text{m}$$

USED REINFORCEMENT ; HD16@200
DOUBLE ($A_s = 19.9 \text{ cm}^2/\text{m}$) $> A_{smin}$

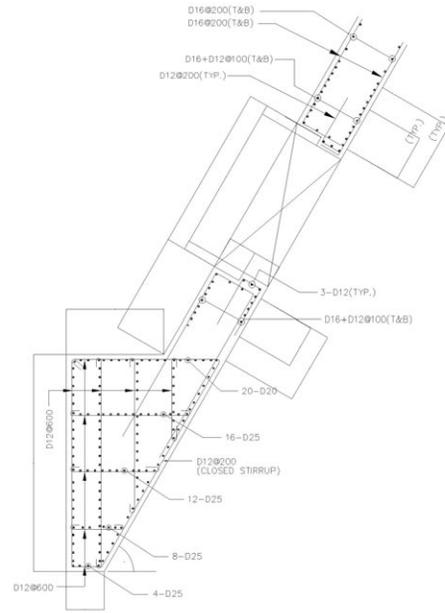
- for TANGENTIAL DIRECTION

$$A_{smin} = 0.0025 \times 100 \times 60 = 15.0 \text{ cm}^2/\text{m}$$

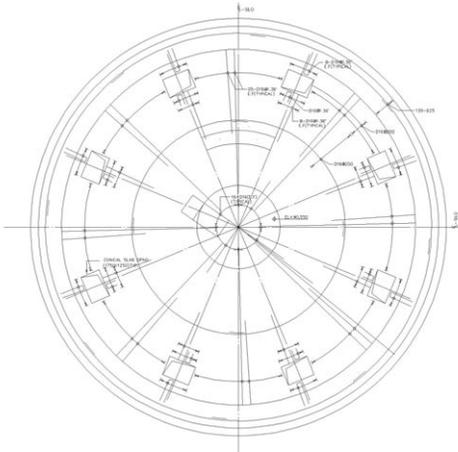
USED REINFORCEMENT ; HD16@200
DOUBLE ($A_s = 19.9 \text{ cm}^2/\text{m}$) $> A_{smin}$



〈그림 5〉 철근 배근 Section



〈그림 7〉 Ring Beam 배근도



〈그림 6〉 철근 배근 평면

6. RING BEAM의 설계

$$F_{mu} = 452.93 \text{ tf/m}$$

$$H_u = F_{mu} \cdot \cos 60^\circ = 226.47 \text{ tf/m}$$

$$P_u = F_{mu} \cdot \sin 60^\circ = 392.25 \text{ tf/m}$$

$$\text{Area} = (0.35 + 2.198) \times 3.2 / 2 = 4.077 \text{ m}^2$$

$$\bar{y} = \frac{(3.2 \times 0.35 \times 1.6) + (1.8475 \times 3.2 \times 0.5) \times 3.2 / 3}{4.077}$$

$$= 1.213 \text{ m}$$

$$\bar{x} = \frac{(3.2 \times 0.35 \times 0.175) + (1.85 \times 3.2 \times 0.5) \times 0.35 + 1.85 / 3}{4.077}$$

$$= 0.748 \text{ m}$$

EQUIVALENT SECTION SIZE

$$a = 2 \cdot \bar{x} = 2 \times 0.748 = 1.496 \text{ m}$$

$$b = 2 \cdot \bar{y} = 2 \times 1.213 = 2.426 \text{ m}$$

$$e = \{ (3.2 - 1.213) / \tan 60^\circ + 0.35 \} - 0.748 - 0.3 / \sin 60^\circ = 0.403 \text{ m}$$

TORSIONAL MOMENT

$$T_u = P_u \cdot e = 392.25 \times 0.403 = 158.08 \text{ tf} \cdot \text{m}$$

TENSILE FORCE (RING TENSION)

$$N_u = H_u (D_i - 2\bar{x}) / 2 = (18.0 - 2 \times 0.748) / 2 = 1868.83 \text{ tf}$$

CLOSED STIRRUP for TORSION

$$\phi T_c = \phi 0.21 \sqrt{f'_c} \sum a^2 b$$

$$= 0.85 \times 0.21 \times \sqrt{210} \times 1.496^2 \times 2.43 \times 10$$

$$= 140.44 \text{ tf} \cdot \text{m}$$

$$R.F = (1 - N_u / 35 A_g)$$

$$= (1 - 1868.83 \times 10^3 / 35 (4.077 \times 10^4))$$

$$= -0.31 < 1.0$$

$\phi T_c \times R.F < 0 \rightarrow \therefore \Gamma_c$ is NEGLECTED.

$$\therefore S_{reg} = \frac{A_t \cdot \alpha_t \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot f_y}{T_s}$$

$$= \frac{A_t \cdot \alpha_t \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot f_y}{T_u / \phi}$$

$$= \frac{(2 \times 1.27) \times 1.221 \times 140.3 \times 233.3 \times 4}{158.08 \times 10^2 / 0.85}$$

$$= 21.83 \text{ cm} < \text{HD13@300}$$

(USED CLOSED STIRRUP)

여기서,

$$A_t = 1.27 \text{ cm}^2 \text{ (HD13)}$$

$$x_1 = a - 2(d_c - D/2)$$

$$= 149.6 - 2 \times (4 + 1.3/2) = 140.3 \text{ cm}$$

$$y_1 = b - 2(d_c - D/2)$$

$$= 242.6 - 2 \times (4 + 1.3/2) = 233.3 \text{ cm}$$

$$\alpha_t = (2 + y_1/x_1)/3$$

$$= (2 + 233.3/140.3)/3 = 1.221$$

→ [F Tc is CONSIDERED,

$$T_s = (T_u - \phi T_c) / \phi$$

$$= (158.08 - 140.44) / 0.85 = 20.75 \text{ tf} \cdot \text{m}$$

$$\therefore S_{reg} = \frac{(2 \times 1.27) \times 1.221 \times 140.3 \times 233.3 \times 4.0}{20.75 \times 10^2}$$

$$= 195.69 \text{ cm}$$

$$S_{max} = \begin{cases} (x_1 + y_1) / 4 = 93.4 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{cases}$$

→ USED STIRRUP O.K

$$P_u = 392.88 \text{ tf/m}, H_u = 226.83 \text{ tf/m}$$

1) BEARING CHECK

$$\phi P_{nb} = \phi(0.85 f_c' A)$$

$$= 0.7 \times 0.85 \times 2.4 \times 1000 \times 300 \times 10^{-3}$$

$$= 428.4 \text{ tf/m} > P_u = 392.88$$

2) DIRECT SHEAR-TRANSFER FORCE

ALONG THE SHEAR PLANE

$$V_u = P_u \sin \alpha_f + (H_u \cos \alpha_f)$$

$$= 392.88 \times \sin 70^\circ + (-)$$

$$= 369.19 \text{ tf} \text{ (IF } H_u = 0)$$

$$= 291.61 \text{ tf} \text{ (WHEN } H_u = -226.83 \text{ tf)}$$

3) NET TENSION (OR COMPRESSION)

ACROSS THE SHEAR PLANE

$$N_u = H_u \sin \alpha_f + P_u \cos \alpha_f$$

$$= -226.83 \times \sin 70^\circ - 392.88 \times \cos 70^\circ$$

$$= -347.52 \text{ tf} \text{ (NET COMPRESSION)}$$

- COMPRESSIVE FORCE IS NEGLECTED

4) RING TENSION FROM H_u

$$T_u = 226.83 \times 8.8 = 1996.1 \text{ tf/m}$$

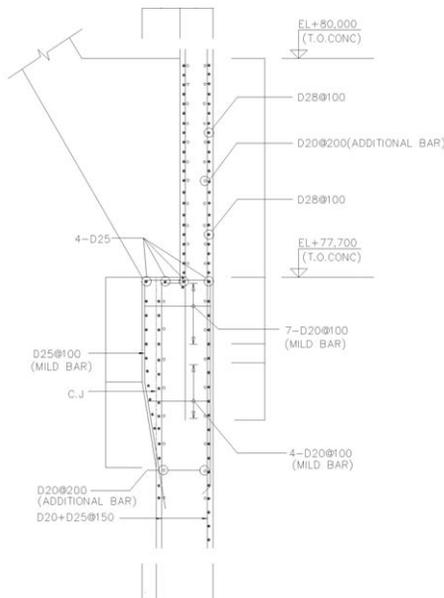
$$A_{reg} = T_u / \phi f_y = 1996.1 / (0.9 \times 4.0)$$

$$= 554.47 \text{ cm}^2$$

5) SHEA FRICTION REINFORCEMENT TO

RESIST DIRECT SHEAR-TRANSFER FORCE

7. SUPPORTING WALL의 설계



<그림 8> Supporting wall 배근도

참고 자료

1. ACI 318-91.
2. ACI 318-95.
3. Sargis S. Safarian, Ernest. C. Harris, "DESIGN AND CONSTRUCTION OF SILO AND BUNKERS"