

地下空洞의 遮斷壁(Plug)

— 設計例 —

金 周 範*
張 讚 洙**

1. 플러그(Plug)設計

貯油槽의 掘鑿이 完了되고 여러가지 設備가 配置된 後 貯油槽와 連結되어 있는 受入配管垂直坑, 作業터널等은 플러그로 遮斷되어 터널側은 設計壓力以上의 水壓이 作用하게 된다. 따라서 플러그는 이들 水壓에 견딜 수 있음과 同時에 万一 써비스터널內에서 爆發이 있을 때 이것에 견딜 수 있는 機能을 가지지 않으면 안된다. 이와같은 플러그는 構造가 坑道閉鎖用플러그와 같음으로 콘크리트로 만들어지며 設計壓力은 플러그의 自重, 水壓, 油壓, 貯油槽를 비울 때의 蒸氣壓(−0.5 kg/cm² G), 爆發할 때의 蒸氣壓(10 kg/cm² G) 等を 考慮하여 檢討하여야 한다.

더우기 플러그는 貯油槽周邊의 弛緩領域外側에 設置하므로 플러그 周邊岩盤掘鑿은 慎重하게 하여야 함으로 岩盤의 許容剪斷應力으로서 初期值(20~40 kg/cm²)는 5.5 kg/cm² 以上은 充分히 豫想된다고 생각된다. 따라서 設計許容剪斷應力은 5.5 kg/cm² 로 한다. 콘크리트의 設計強度는 240 kg/cm² 로 하였다.

1.1 플러그의 길이 決定法(日本의 例)

鑛山에서 坑水에 依한 鑛害를 防止하기 爲하여 坑口에 設置되는 閉鎖플러그를 鐵筋콘크리트로 만들때 다음 式을 利用한다.

$$L = \frac{P \cdot A}{\tau_a \cdot l} \times F_s$$

* 正會員, 南元建設엔지니어링(주) 副社長
** 正會員, 天一技術團 常務理事

여기서 L: 플러그의 길이

P: 플러그에 加해지는 壓力

A: 플러그의 前(作用)面積

τ_a : 許容剪斷應力(플러그位置의 岩盤의 強度가 콘크리트의 強度보다 클때에는 5.5 kg/cm²로 하고 적을 때에는 試驗値를 使用한다)

l: 플러그의 平均周長

F_s : 安全率(2를 標準으로 한다)

플러그의 設計例

1) 受入配管垂直坑

斷面積 $A = \pi \times 2.15^2 = 14.52 \text{ m}^2$

周長 $l = \pi \times 4.3 = 13.51 \text{ m}$

單位體積重量 2.3 t/m³

貯油槽內의 原油가 없고 써비스터널이 爆發하였을 때가 가장 危險함으로 이때를 檢討한다.

爆發壓 100 t/m²

플러그上部의 水壓 37-L t/m²

플러그의 自重 2.3 Lt/m²

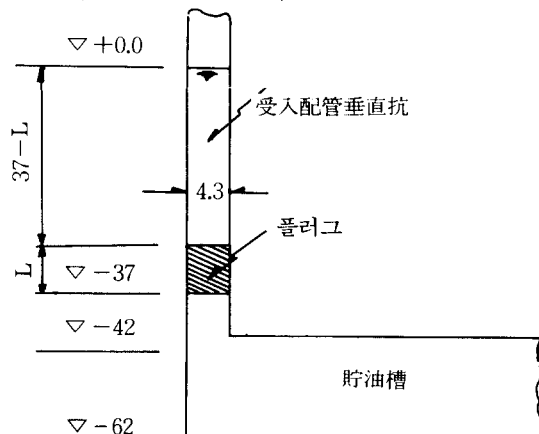


그림-1

配管機器 40 t

貯油槽内の 가스壓 -5 t/m^2 (眞空壓)

設計壓力 $P=100+(37-L)+2.3L$

$$+\frac{40}{14.52} - (-5)$$

$$=144.75+1.3L$$

플러그의 길이

$$L = \frac{P \cdot A}{\tau_a \cdot l}$$

$$F_s = \frac{(144.75+1.3L) \times 14.52}{55 \times 13.51} \times 2$$

$$=5.657+0.0508L$$

$$\therefore L = \frac{5.657}{1+0.058} = 5.95 \text{ m} \rightarrow 6.0 \text{ m로 한다.}$$

$$P = 144.75 + 1.3 \times 6.0 = 152.55 \text{ t/m}^2$$

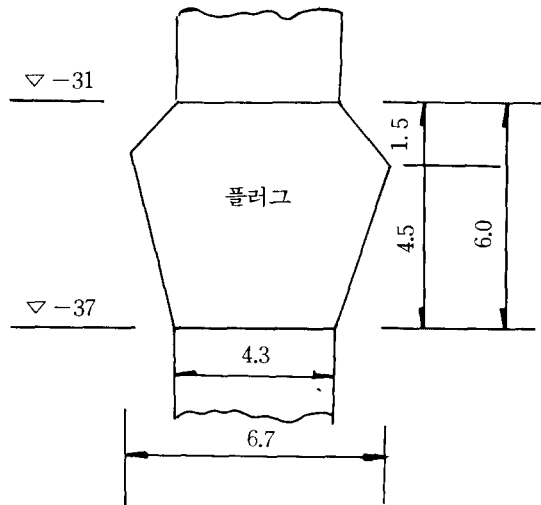


그림-2

貯油槽 내에서 爆發이 일어났을 때

$$P = 100 - (37 - 6) - 2.3 \times 6 - \frac{40}{14.52}$$

$$= 52.45 \text{ t/m}^2$$

2) 貯油槽와 作業터널사이

$$\text{斷面積 } A = \frac{1}{2} \pi \times 2.25^2 + 4.5 \times 2.25 = 18.08 \text{ m}^2$$

$$\text{周長 } l = \pi \times 2.25 + 2.25 \times 2 + 4.5 = 16.07 \text{ m}$$

貯油槽와 作業터널은 2個所에서 連絡되어 있으므로 플러그가 2個 必要하다.

처음 貯油槽内に 原油가 充滿된때 爆發하였다

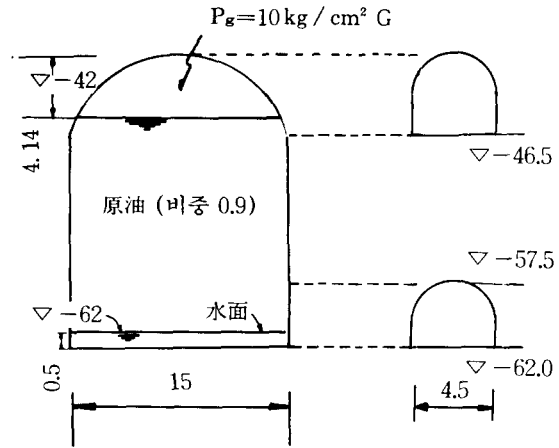


그림-3

고 본다. 液面位置는 그림 3 과 같고 爆發壓力은 10 kg/cm^2 이다.

$$\textcircled{1} P = 100 + 0 - 44.25 = 55.75 \text{ t/m}^2$$

$$\textcircled{2} P = 100 + 0.9(19.5 - 4.14) - 59.75 = 54.07 \text{ t/m}^2$$

다음 貯油槽內가 비어 있을 때를 檢討한다.

$$\textcircled{1} P = 44.25 - (-5) = 49.25 \text{ t/m}^2$$

$$\textcircled{2} P = 59.75 - (-5) = 64.75 \text{ t/m}^2$$

따라서 最大值는 64.75 t/m^2 가 됨으로 플러그의 길이는 비어 있을 때로 決定한다.

$$P = 64.75 \text{ t/m}^2$$

$$L = \frac{64.75 \times 18.08}{55 \times 16.07} \times 2 = 2.65 \rightarrow 2.8 \text{ m로}$$

한다.

3) 水封터널과 作業터널

$$\text{斷面積 } A = \frac{1}{2} \pi \times 2.0^2 + 4.0 \times 2.0 = 14.28 \text{ m}^2$$

$$\text{周長 } l = \pi \times 2.0 + 2.0 \times 2 + 4.0 = 14.28 \text{ m}$$

$$\text{設計壓力 } P = 25.5 \text{ t/m}^2$$

플러그의 길이

$$L = \frac{25.5 \times 14.28}{55 \times 14.28} \times 2 = 0.93 \rightarrow 2.0 \text{ m 한다.}$$

1.2 쇄기型

$$L = \frac{baP}{2\tau_{ca}} \times F_s$$

여기서 쇄기部의 길이(t)는 다음과 같이 求한다.

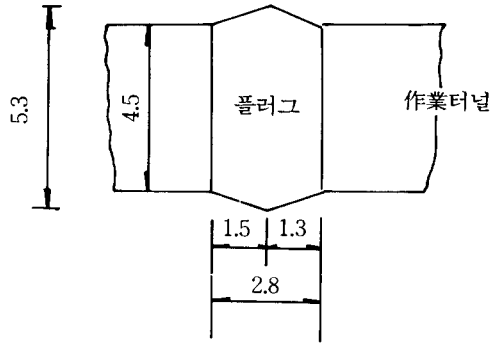


그림-4

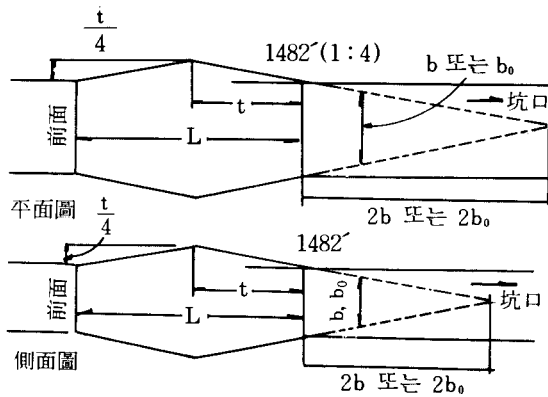


그림-5 썰기형 플러그

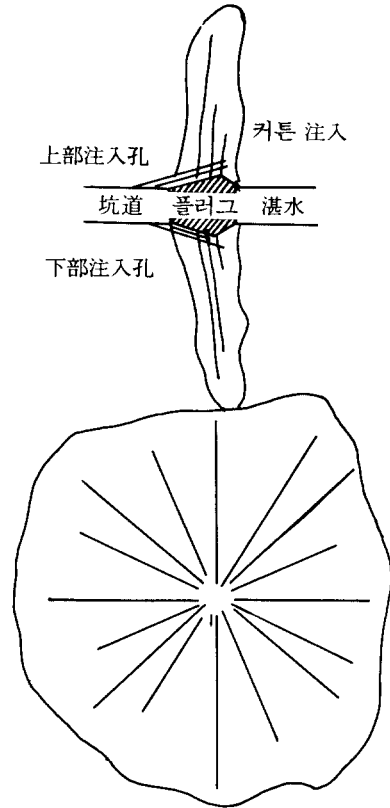


그림-6 플러그 주변 투입

$$t = \frac{b}{2\sigma_{ca}} \{2aP + \sqrt{ap(4ap + 3\sigma_{ca})}\} \times F_s$$

(단, $t \geq 0.375b \times F_s$ 로 한다)

L: 플러그의 길이

t: 플러그의 썰기의 길이

p: 플러그에 작용하는 수압

$$a = \frac{b_0^4}{b_0^4 + b^4}$$

b_0 : 플러그 설치地點의坑道の幅과 높이中 큰 값

b: 플러그 설치地點의坑道の幅과 높이中 작은 값

σ_{ca} : 콘크리트의許容壓縮強度(550 t/m²)

τ_{ca} : 콘크리트의許容剪斷強度(55 t/m²)

F_s : 安全率(2를標準으로 함)

플러그는 岩盤이 좋고 透水性이 나쁜 곳에 設置하여야 한다. 萬一 漏水가 있는 곳에는 注入(그라우팅)을 하여 水密性을 얻도록 하여야 한다.

1.3 플러그設計(노르웨이의 例)

플러그는 支間(span)에 比하여 높이가 比較的 큰 特殊한 境遇의 보로서 아취(Arch)로서 作用 한다.

即 $\frac{\text{보의 높이}(t)}{\text{支間}(s)} > \frac{1}{4}$ 인 경우이다.

이러한 理論을 說明하고 있는 內容中에서 支持面의 기울기가 1:3인 것을 基準으로 하고 있으며 이 角度는 理論과 實際施工成果를 折衷한 것이라고 하고 있다.

現場에서 1:3의 勾配를 正確하게 만들기란 大端히 어려운 點이 많았다.

플러그 두께 H와 曲面의 半徑사이의 理論的인 關係를 나타내면 다음과 같다.

$$R = \frac{T^2 + B/2 - T \cdot H}{2(T - H)}$$

$$= \frac{T^2 + (1 - \alpha) + B/2}{2T(1 - \alpha)} \quad \left(\frac{H}{T} = \alpha \right)$$

反力

$$N = \sigma_c \cdot \alpha \cdot T = qR$$

아치의 最大內部應力은

$\alpha = X - \sqrt{X(X-1)}$ 일때 發生한다.

여기서 $X = 1 + (\frac{B}{2T})^2$

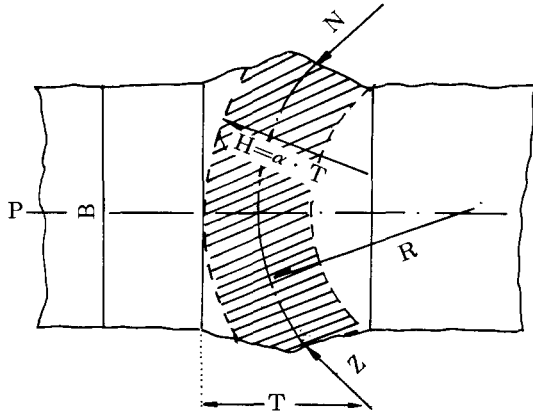


그림-7

주어진 荷重에 依한 플러그의 所要 두께는

$$T_{min} = \frac{B}{2} \left[\frac{q/\sigma_c (2\alpha - q/\sigma_c)}{(1-\alpha)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ 이다.}$$

[例題]

幅 $B = 6.0 \text{ m}$

두께 $T = 2.0 \text{ m}$

$$X = 1 + (\frac{6}{2 \times 2})^2 = 3.25$$

$$\alpha = 3.25 - \sqrt{3.25(3.25-1)} = 0.5458$$

$$H = \alpha \cdot T = 0.5458 \times 2.0 = 1.09 \text{ m}$$

$$R = \frac{2^2(1-0.546) + 6/2}{2 \times 2(1-0.546)} = 5.956 \text{ m}$$

$$q = \sigma_c \frac{H}{R} = 0.183 \times 210 = 38.43 \text{ kg/cm}^2$$

여기서 動荷重係數(Dynamic Load Factor)

= 1.75를 적용하여 極限荷重은

$$q_{ult} = 38.43 / 1.75 = 22 \text{ kg/cm}^2$$

1.4 플러그의 支持角度

1) 計算에 利用한 諸元

콘크리트의

設計強度 $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$

引張強度 30 kg/cm^2

彈性係數 $2,600,000 \text{ t/m}^2$

포앗슨比 0.3

스프링常數 $3.611,000 \text{ t/m}$

引張스프링常數 100 t/m

作用荷重 150 t/m^2

플러그와 岩盤의 支持角度

1:0.2, 1:0.5, 1:1, 1:3, 1:5, 1:10 및 垂直의 7種에 對하여 有限要素法으로 플러그의 內部應力 및 反力을 算定하였다.

2) 應力

1:3 勾配에 對한 最大主應力을 計算하면 다음과 같다.

最大壓縮應力은 빔(Beam)으로 作用할 때이며 1:0.2인 때가 最小이다.

壓縮應力에 對하여서는 安全하나 빔일 경우 最大引張應力이 65 kg/cm^2 임으로 鐵筋으로 補強해야 한다.

3) 反力の 크기와 作用方向

支持面의 勾配 1:3인 境遇

水平反力の 合計 $\Sigma H = 574 \text{ t/m}$

垂直反力の 合計 $\Sigma V = 567 \text{ t/m}$

임으로 그 合力은

$$R = \sqrt{\Sigma H^2 + \Sigma V^2} = 806 \text{ t/m}$$

合力의 方向은

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\Sigma V}{\Sigma H} = 44^\circ 65'$$

4) 結果

① 最大壓縮應力, 反力の 크기 및 方向

角度變化에 따른 應力의 最大値, 反力の 크기와 作用方向을 圖示하면 다음 그림 10과 같다.

② 플러그와 岩盤面사이의 支壓應力, 剪斷應力 및 摩擦係數

플러그와 岩盤面사이의 關係를 알기 위하여 反力 R를 接觸面에 垂直인 힘과 平行한 힘으로 나누어 岩盤에 所要되는 支壓強度와 콘크리트와 岩盤面의 所要摩擦係數를 求하면 다음과 같다.

$$\gamma = \beta - \alpha = 45 - 18 = 27^\circ$$

$$R_n = R \cos \gamma = 806 \times \cos 27^\circ = 718 \text{ t}$$

$$R_s = R \sin \gamma = 806 \times \sin 27^\circ = 365 \text{ t}$$

垂直應力

$$\sigma_n = \frac{R_n}{A} = \frac{718}{t/2 \cos \alpha} = \frac{718}{2/\cos 18^\circ} = 682 \text{ t/m}^2$$

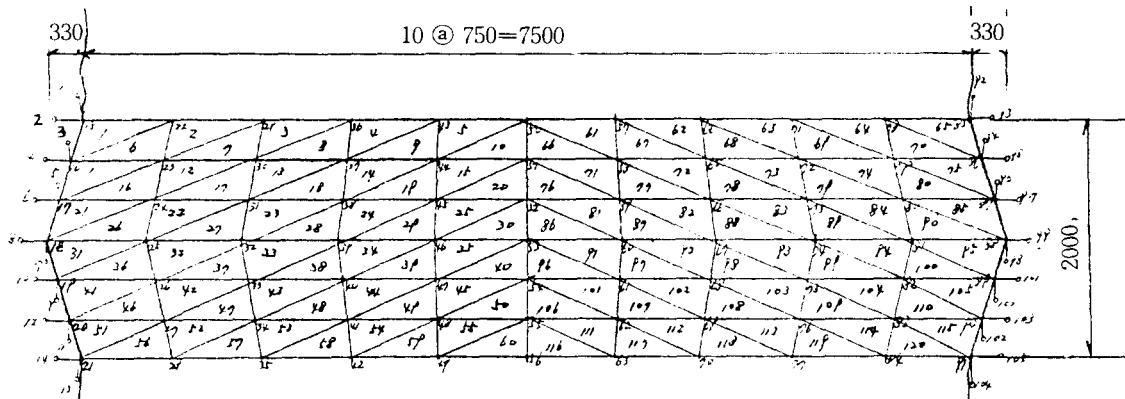


그림-8 Modelling of the finite element

구배	1:0.2	1:0.5	1:1	1:3	1:5	1:10	수직	빔
각도	79°	63°	45°	18°	11°	60°	0	
최대주응력 kg/cm ²	40	109	134	127	127	127	125	142

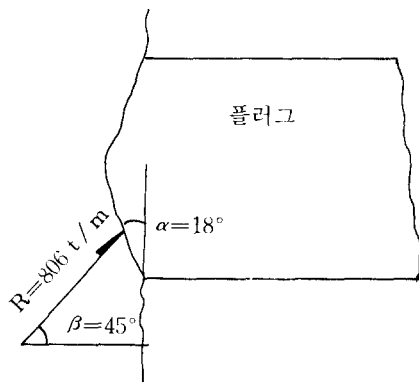


그림-9

표 2. 合力의 크기와 作用方向

勾配	1:0.2	1:0.5	5:1	1:3	1:5	1:10	수직	빔(Beam)
ΣH(t/m)	196	393	513	574	578	567	553	562
ΣV(·)	860	840	700	567	569	568	568	427
R(·)	882	927	867	806	811	802	792	705
β(°)	77	65	54	45	45	45	45	

剪斷應力

$$\tau = \frac{R_s}{A} = \frac{365}{1.05} = 347 \text{ t/m}^2$$

콘크리트와 岩盤사이의 剪斷應力을 期待할 수 없는 境遇에는 摩擻力으로 支持해야 하므로

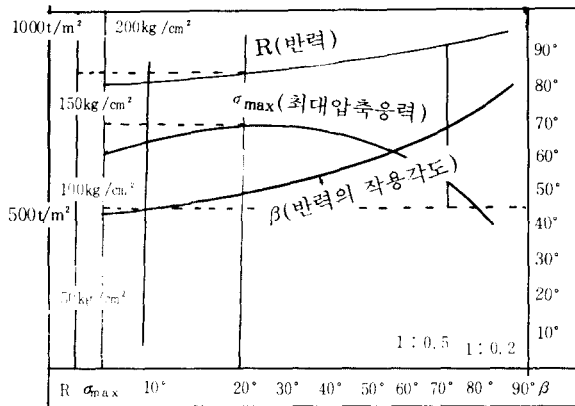


그림-10 최대 압축응력, 반력 및 작용각도

$$\sigma_n \times f > \tau$$

이어야 한다.

따라서 要求되는 摩擻係數는

$$f > \frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{347}{682} = 0.508$$

이와같이 各各의 境遇에 對하여 計算하면 다음 表 3과 같으며 이것을 圖示하면 다음 그림 12와 같다.

1.5 結 言

1) 플러그設計에 있어서 日本에서 使用하고 있는 式과 노르웨이에서 使用하고 있는 式과를 比較하면 日本것이 非經濟的이다.

2) 플러그콘크리트에 發生하는 最大壓縮應力은 支持角度 45°에서 134 kg/cm²이다.

표 3.

구 배	1:0.2	1:0.5	1:1	1:3	1:5	1:10	수직	비 고
α (plug의 각도)	79°	63°	45°	18°	11°	6°	0°	
β (반력의 작용각도)	77°	65°	54°	45°	45°	45°	45°	
$\gamma = \beta - \alpha$	-2°	2°	9°	27°	34°	39°	45°	
R(반력) t/m	882	927	867	806	811	802	792	
$R_n = R \cos \gamma$ t/m	881	926	856	718	672	623	560	
$R_s = R \sin \gamma$ t/m	30	145	135	365	453	504	560	
$\sigma_n = \frac{R_n}{A}$ t/m ²	168	420	605	682	659	519	560	지압응력
$Z = \frac{R_s}{A}$ t/m ²	6	65	95	361	444	501	560	전단응력
$f = \frac{\tau}{\sigma_n}$	0.93	0.15	0.15	0.53	0.67	0.81	1.00	소요마찰계수

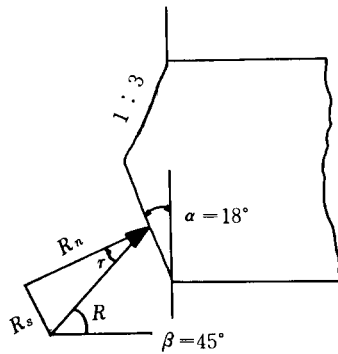


그림 11. Layout of mesh considered self weight

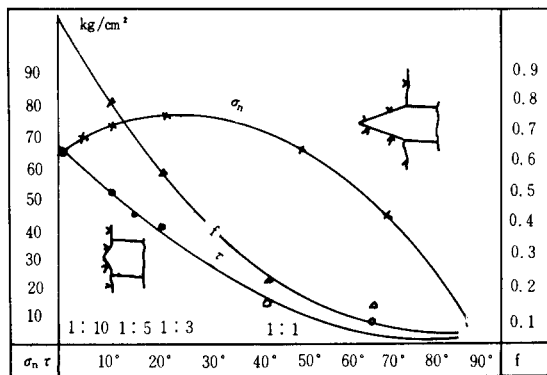


그림 12. 수직응력, 전단강도 및 마찰계수

3) 플러그와 岩盤面 사이에 미끄러짐이 일어나지 않기 위하여 必要한 摩擦係數는 支持角度가 커지면 減少된다.

다만 1:3 인 때 剪斷應力이 垂直應力의 半값이 된다.

以上에서 보는 바와 같이 노르웨이에서 使用하는 式이 經濟的이며 接觸面을 一般的으로 1:3을 많이 使用하고 있다.

參考文獻

地下水 핸드북 건설산업조사회(日本)
 FORTIFIKASJON A/S 노르웨이용역회사
 u-2 pre-Engineering Report Vol.2
 日本電力研究所(駒田) 1984. 5. 30