

第 13 章 管路および曲面構造物

13.1 管路構造物

13.1.1 適用範囲

この節は管路構造物の設計に適用する。

【解 説】 この節は、水圧鉄管、上下水道用鋼管、火力発電所循環水管、石油パイプライン、水管橋等の管路構造物の設計に適用する。

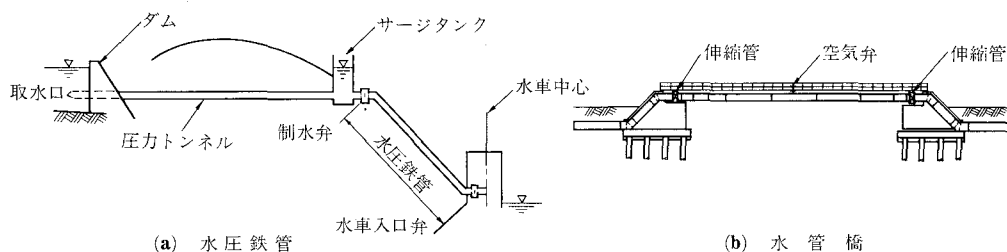
これら、液体、気体等を輸送する目的で設置される管路構造物は、輸送される内容物により、またその設置される型式により設計の考え方が異なる。

したがって、ここでは条文で設計に対する基本的な留意事項を述べるにとどめ、解説で代表的な 3 型式についてその内容を列挙した。

また、ここで扱う内容物としては液体とし、ガス等は含まないものとした。

3 型式としては、「水圧鉄管」に代表される岩盤内トンネルにコンクリート埋設される型式もしくは、地山に沿って、単スパンで連続支持される梁としての露出管型式、「石油パイプライン」に代表される土中に連続的に埋設される型式、そして「水管橋」に代表される長スパンで連続支持されるパイプビーム型式とした。

解説 図 13.1(a) に岩盤内に埋設される水圧鉄管、13.1(b) にパイプビーム型式の水管橋の構造概要を示す。



解説 図 13.1 構造概要

13.1.2 適用法規および基準

管路構造物の種類により、それぞれ基準が定められている。設計にあたっては、それらを遵守するものとする。

【解 説】 管路構造物に適用される法規および基準類には次のようなものがあり、これらを考慮して設計する必要がある。

- (1) 発電用水力設備に関する技術基準（通商産業省）
- (2) 電気設備に関する技術基準（通商産業省）
- (3) 河川管理施設等構造令・同施行規則（建設省政令第 199 号，省令 13 号）
- (4) 労働安全衛生規則（労働省令第 32 号）
- (5) ボイラ構造規格（労働省）

- (6) 圧力容器構造規格（労働省告示第11条）
- (7) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準，1978年12月（通商産業省）
- (8) 水門鉄管技術基準，1981年11月（水門鉄管協会）
- (9) 水道施設設計指針・同解説，1977年5月（日本水道協会）
- (10) 石油パイプライン技術基準（案），1974年6月（日本道路協会）
- (11) 水管橋設計基準，1981年3月（日本水道鋼管協会）
- (12) 下水道施設設計指針と解説，1984年7月（日本下水道協会）
- (13) 港湾の施設の技術上の基準・同解説，1980年9月（日本港湾協会）

13.1.3 材 料

管路構造物に使用する材料は，法規および基準がある場合にはそれらによるものとし，ない場合は，2章を参照して，責任技術者の判断により選定する。

【解 説】 13.1.2の解説で述べた法規および各基準には使用する材料が定められている。

これらの法規および基準が適用されない管路構造物においては2章に示す材料により選定することを原則とするが，それ以外の材料であっても適切なものがあれば，責任技術者の判断により使用することができる。

13.1.4 荷 重

管路構造物の設計にあたって考慮すべき荷重の種類とそれらの組合せは，法規および基準がある場合にはそれらによるものとし，ない場合には責任技術者の判断による。

【解 説】 管路構造物の設計にあたっての考慮すべき荷重としては，内圧，管路自重，内容液重量，温度変化，土圧，上載荷重，雪荷重，風荷重，地震荷重，施工時荷重，その他（振動，衝突等）がある。

関連する法規あるいは基準では，原則として，実際に作用する荷重が設計に用いる荷重を超えることがほとんどないと考えられる十分に大きな値を荷重値として規定している。具体的には，作用する荷重の最大値が明らかとなきには，その値が，必ずしも最大値が明らかでないが，ある程度の精度で超過確率の十分に小さな値が計算できるときや予測できるときは，それらの値に，多少の余裕を持たせたい。風や地震に代表される自然環境荷重の場合にも，同じ原則が用いられているが，経済性に対する配慮から，他の荷重に比べて少し小さ目の値が規定されていることもある。

これらの荷重の組合せは，その管路構造物の特性を考慮して決定する必要があるが，参考としてその一例を以下に示す。

個々の荷重の扱いについては，13.1.6にその一部を示すが，詳細については13.1.2の解説に述べる法規および基準などを参照されたい。

- (1) 水門鉄管技術基準¹⁾

解説 表 3.5 による。

- (2) 石油パイプライン技術基準（案）²⁾

解説 表 3.6 による。

- (3) 水管橋設計基準³⁾

	一般地方	多雪地域
常 時	主荷重	主荷重+雪荷重
積雪時	主荷重+雪荷重	

暴風時	主荷重+風荷重	主荷重+雪荷重+風荷重
地震時	主荷重+地震荷重	主荷重+雪荷重+地震荷重

ここで、主荷重とは、内圧、管の自重、管内水の重量、通行荷重、温度変化をいい、積雪時は通行荷重を考慮する必要はない。

13.1.5 構造一般

13.1.5.1 設計の原則

管路構造物は13.1.4に定める荷重に対して安全であり、十分な液密性、気密性を有し、耐久性に優れ、保守・点検が容易な構造でなければならない。

【解 説】 安全性の照査は13.1.4に定める荷重に対し13.1.6に示す要領で行う。

13.1.5.2 最小板厚

鋼材の最小板厚は、製作、運搬、現場施工および腐食、摩耗等を考慮して、適切に定めるものとする。

【解 説】 (1) 水門鉄管技術基準では、最小板厚を次のように定めている。

主要耐圧部に使用する管の最小板厚は、補剛材を使用しない場合には式(解13.1)によって求めた値以上としなければならない。ただし、管径が小さい場合および補剛材を使用した場合でも最小板厚6mmを下回ることはできない。

$$t = \frac{D+800}{400} \dots\dots\dots (解 13.1)$$

ここに、 t ：腐食代を含んだ管胴板厚 (mm)

D ：管の内径 (mm)

(2) 石油パイプライン技術基準(案)では最小厚を解説表13.1のように定めている。

解説表 13.1 最小板厚

外 径 (mm)	最小厚 (呼び厚) (mm)
114.3 未満	4.5
114.3 以上 139.8 未満	4.9
139.8 以上 165.2 未満	5.1
165.2 以上 216.3 未満	5.5
216.3 以上 355.6 未満	6.4
355.6 以上 508.0 未満	7.9
508.0 以上	9.5

13.1.5.3 腐食代

鋼材には、必要に応じ適切な腐食代を考慮するものとする。

【解 説】 鋼材の腐食代は使用条件、防食対策、維持管理、耐用年数、管路構造物の重要性等を考慮して決定する必要がある。

(1) 水門鉄管技術基準では次のように定めている。

主要耐圧部に使用する板厚は、腐食および摩耗に対して1.5 mm以上の腐食代を考慮しなければならない。ただし、特に腐食および摩耗に対して十分な工法を施した場合は、腐食代を緩和することができる。

また、同基準の解説の中では緩和について、次のように述べている。

『近來は塗料ならびに塗料技術が進んでおり、塗料以外に亜鉛溶射等の防食工法も一部で行われているので、優れた工法や特殊材料を採用すれば、かならずしも1.5 mmの余裕を要しないこともあるので、このような場合には緩和できるものとする。』

(2) 水管橋設計基準では、下記の理由により、管厚の公差、腐食代などは考慮しないことを原則としている。

『JIS G 3443に規定されている水道用塗覆装鋼管の原管となる配管用炭素鋼鋼管及び配管用アーク溶接炭素鋼鋼管の管厚公差はJIS G 3452, JIS G 3457にそれぞれ規定されている。また、熱間圧延鋼板の公差は、JIS G 3193に定められている。これらの公差は、許容応力度に含まれている。腐食代については近來、塗料並びに塗料技術が進んでいるので考慮しない。』

13.1.6 限界状態の照査

13.1.6.1 周方向応力に対する照査

周方向応力に対する照査は、次式により行うものとする。

$$\nu \frac{\sigma_t}{F} + \nu \frac{\sigma_m}{F} \leq 1 \dots\dots\dots(13.1)$$

ここに、 ν ：安全率

F ：5.2の設計強度 (kgf/cm²)

σ_t ：引張応力 (kgf/cm²)

σ_m ：曲げ応力 (kgf/cm²)

【解 説】 (1) 安全率は、各種基準、使用材質、荷重の組合せにより異なる。水門鉄管技術基準、石油パイプライン技術基準(案)、水管橋設計基準では次のように定めている。

各基準は許容応力に基づいて部材を設計することとしている。解説表13.2, 13.3は、これを限界状態照査の考え方に基づく安全率として逆算したものである。

1) 水門鉄管技術基準

式(解13.1)の照査には、解説表13.2の局部曲げ考慮せずを用いる。

解説表13.2 荷重の組合せと安全率

	58 kgf/mm ² クラス未満 ν		58 kgf/mm ² クラス ν	
	局部曲げ考慮せず	局部曲げ考慮	局部曲げ考慮せず	局部曲げ考慮
管内満水時	1.8	1.33	1.89	1.4
管内充水時	1.2	1.2	1.26	1.26
管内空虚時	1.2	1.2	1.26	1.26

溶接部については、継手効率を考慮し、上記の値の割増しを行う。

解説表13.2における局部曲げ応力とは、リングガード、補剛材、アンカブロック等により、管壁の変位が拘束される箇所等に生じる管軸方向二次応力である(式(解13.14)参照)。

また、周方向応力に対する照査での安全率 ν は解説表13.2の局部曲げ考慮せずの値を使用する。

2) 石油パイプライン技術基準(案)

解説表6.6による。

3) 水管橋設計基準

解説 表 13.3 荷重の組合せと安全率

	ν
主荷重	1.7
風荷重のみの場合	1.41
暴風時 (主荷重+風荷重)	1.36
地震時 (主荷重+地震の影響)	1.13
温度変化を考慮する時 (主荷重+温度変化の影響)	1.47
主荷重+風荷重+温度変化の影響	1.25
主荷重+地震の影響+温度変化の影響	1.03
一般地方の積雪時	1.36
充水時の円周方向の曲げ応力	1.13
水衝圧時の円周方向引張応力	1.13
二軸応力状態の検算	1.25

(2) 内圧による引張応力は解説 図 13.2 の応力状態に対し式 (解 13.2) により求めるものとする。

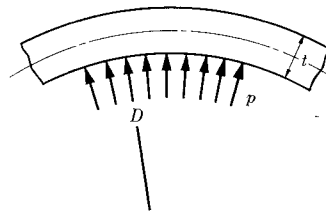
$$\sigma_t = \frac{pD}{2t} \dots\dots\dots (解 13.2)$$

ここに、 D : 内径 (cm)

t : 腐食代を除いた管厚 (cm)

σ_t : 引張応力 (kgf/cm²)

p : 応力を求めようとする位置の最大水圧 (kgf/cm²)



解説 図 13.2 内圧作用時状態

(3) 曲げ応力は各基準により、次の応力を考慮するよう定められている。

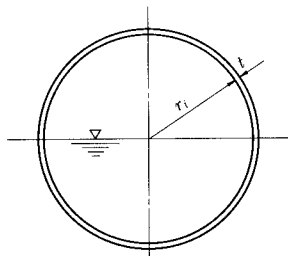
- 1) 水門鉄管技術基準および水管橋設計基準の露出管では管内充水時応力は、解説 図 13.3 の状態が最大となるので式 (解 13.3) により算出することとしている。

$$\sigma_m = 446.3 \times \frac{r_i^3}{t^2} \dots\dots\dots (解 13.3)$$

ここに、 σ_m : 応力 (kgf/cm²)

r_i : 管内半径 (m)

t : 管厚 (cm)



解説 図 13.3 半充水時状態

- 2) 石油パイプライン技術基準(案)の埋設管では、解説 図 13.4 に示す外部荷重による応力を式(解 13.4)により算出することとしている。

$$\sigma = \frac{D_t \cdot K_b \cdot W_o \cdot r \cdot E \cdot I_t}{E \cdot I_t + 0.61 \cdot K_h \cdot r^4 + 2 \cdot p_i \cdot D_t \cdot r^3 \cdot K_x} \cdot \frac{1}{Z_t} \dots \dots \dots \text{(解 13.4)}$$

ここに、 σ ：外部荷重による円周方向応力 (kgf/cm²)

D_t ：たわみ時間係数で 1.0~1.5 の値をとる。

W_o ：管軸方向単位長さ当りの鉛直外部荷重 (kgf/cm)

($W_s + W_m$)

r ：導管の半径 (cm)

W_s ：管軸方向単位長さ当りの鉛直土圧 (kgf/cm)

W_m ：管軸方向単位長さ当りの自動車荷重 (kgf/cm)

K_b ：導管の底部における曲げモーメント係数

K_x ：導管の鉛直方向の変形に対する係数

K_h ：水平方向地盤反力係数 (kgf/cm²)

E ：導管のヤング率 (kgf/cm²)

I_t ：管壁の断面二次モーメント $t^3/12$ (cm⁴/cm)

p_i ：内圧 (常用圧力) (kgf/cm²)

Z_t ：管壁の断面係数 $t^2/6$ (cm³/cm)

t ：管厚 (cm)

たわみとは、上載荷重による管の横方向への断面変形量であり、たわみ量 δ_x は直径の変化量とする。石油パイプライン技術基準(案)の解説では、以下のように述べている。

- a) 外部荷重による応力の計算式、式(解 13.4)は、たわみ性管についての Spangler の研究より導かれ、厳密には式(解 13.5)のようになる。

$$\sigma = \frac{K_b \cdot W_o \cdot r \cdot E \cdot I_t + (0.061 \cdot K_b - 0.082 \cdot K_x) W_o \cdot K_h \cdot r^5 + 2 \cdot (K_b - 0.125) \cdot K_x \cdot W_o \cdot p_i \cdot r^4}{E \cdot I_t + 0.061 \cdot K_h \cdot r^4 + 2 \cdot K_x \cdot p_i \cdot r^3} \cdot \frac{1}{Z_t} \dots \dots \dots \text{(解 13.5)}$$

一般に石油パイプラインの導管では式(解 13.5)の分子の 2 項および 3 項の影響は小さいので、これらを省略した近似式をここでは採用したものである。ただし、導管の管厚が導管外径の 75 分の 1 以下の場合には誤差が無視できないので、式(解 13.5)で計算するのが望ましい。

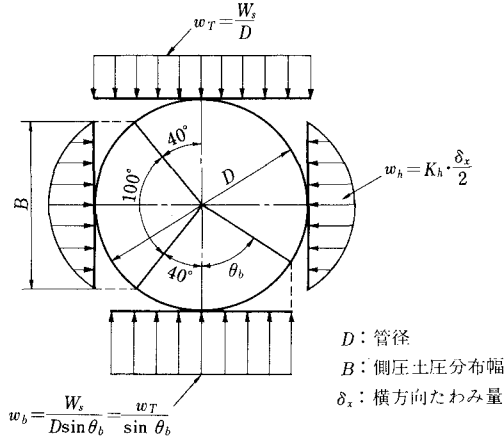
なお、大きめの応力が生じる簡略式としては式(解 13.6)がある。

$$\sigma = \frac{6 \cdot K_b \cdot W_o \cdot E \cdot r \cdot t}{E \cdot t^3 + 24 \cdot K_x \cdot p_i \cdot r^3} \dots \dots \dots \text{(解 13.6)}$$

- b) たわみ時間係数 D_t は、導管により導管の側面の土砂が押されて時間の経過とともにたわみ δ_x が増加することに対する割増係数である。このたわみ時間係数は側面土砂の土質、締固め度等によって異なり、一般には次の値を用いる。すなわち、十分締固まった砂もしくは砂質土の地盤に埋設する場合または、導管の側面が導管の半径以上の幅にわたり砂もしくは砂質土で置換されて十分締固めてある場合は 1.0、その他の場合は 1.5 とする。

解説 表 13.4 支持角度による係数値

$2 \theta_b$	K_b	K_x
120°	0.138	0.089
180°	0.125	0.083



解説 図 13.4 荷重分布

- c) 水平方向地盤反力係数 K_h は導管と同じ載荷面積，水平変位のときに相当する値を実測するか，または推定しなければならない。これについては，道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編⁴⁾等を参照のこと。
- d) 計算式中の係数 K_b ， K_x は解説 図 13.4 に示す支持角度 $2\theta_b$ の値に応じて解説 表 13.4 による。

13.1.6.2 軸方向応力に対する照査

軸方向応力に対する照査は次式により行うものとする。

$$\nu \frac{\sigma_t}{F} \leq 1 \dots\dots\dots (13.2)$$

- ここに， ν ：13.1.6.1 での安全率
- F ：5.2 の設計強度 (kgf/cm²)
- σ_t ：軸方向応力 (kgf/cm²)

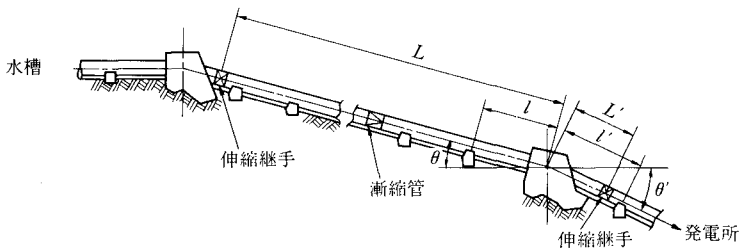
【解 説】 管軸方向に作用する軸方向応力としては，各基準で次のように定められており，これらの応力を算出し，加算した応力に対し式 (13.2) により軸方向応力に対する照査を行うものとする。

(1) 水門鉄管技術基準

安全率 ν の値は式 (解 13.8)，(解 13.14) を加算した場合は局部曲げ考慮の値を使用する。

1) 露出管の場合 (管内満水時)

解説 図 13.5 に露出管型式の水圧鉄管縦断面図を示す。



解説 図 13.5 水圧鉄管縦断面図

- a) 管をはりと考えたときの曲げ応力

$$\sigma = \frac{M_n}{Z_p} \dots \dots \dots (\text{解 13.7})$$

ここに, M_n : はりとしての曲げモーメント (kgf・cm)

Z_p : 管の有効断面の断面係数 $= \frac{\pi}{4} t D_m^2$ (cm³)

D_m : 板厚の中心の直径 (cm)

b) リングガード, 補剛材, アンカブロック等により管胴の変位が拘束されることによって生ずる局部曲げ応力

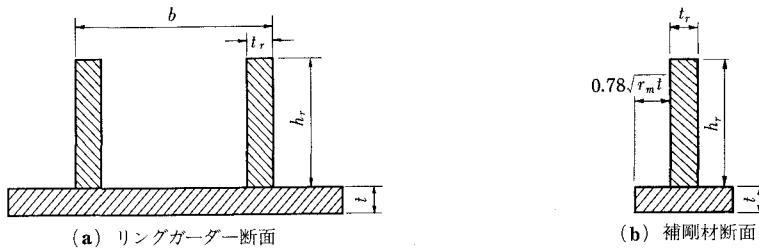
$$\sigma = 1.82 \frac{A_r - b t}{A_r + 1.56 t \sqrt{r_m \cdot t}} \cdot \frac{p D}{2 t} \dots \dots \dots (\text{解 13.8})$$

ここに, A_r : リングの断面積 $= 2 t_r h_r + b t$ (cm²) (解説 図 13.6 参照)

r_m : 板厚の中心の半径 (cm)

p : 内圧 (kgf/cm²)

D : 内径 (cm)



解説 図 13.6

計算に用いる b は次の範囲とする.

$$b \leq 1.56 \sqrt{r_m t} + 2 t_r \text{ (cm)}$$

局部曲げ応力により, リングガード等の付近の管厚を増す必要がある場合, この管厚を増すべき最小範囲の長さ L_r は次式から求められる.

$$L_r = 4.67 \sqrt{r_m \cdot t} + b \text{ (cm)}$$

c) 管の傾斜による応力

$$\sigma = \frac{\sum (\pi D_m t_n L_n)}{A_s} \gamma_s \sin \theta \dots \dots \dots (\text{解 13.9})$$

ここに, t_n : 管厚 (cm)

L_n : 板厚 t_n 部分の管長 (cm)

γ_s : 鋼材の単位重量 $= 7.85 \times 10^{-3}$ (kgf/cm²)

θ : 管軸と水平面とのなす角度

A_s : 応力を考慮する部分の管胴板の断面積 $= \pi D_m t_n$ (cm²)

Σ : 応力を考慮する部分より上流側の管自重の合計

d) 漸縮管に作用する内圧の管軸方向成分による応力

$$\sigma = \frac{\pi p_r}{4 A_s} (D_1^2 - D_2^2) \dots \dots \dots (\text{解 13.10})$$

ここに, D_1 : 漸縮前の位置の D に相当する内径 (cm)

D_2 : 漸縮後の位置の D に相当する内径 (cm)

p_r : 漸縮管の中心における最大水圧 (kgf/cm²)

e) 伸縮継手に作用する内圧の管軸方向成分による応力

$$\sigma = \frac{\pi D_m t_E p_E}{A_s} \dots\dots\dots (解 13.11)$$

ここに、 p_E ：伸縮継手の部分の水圧 (kgf/cm²)

t_E ：伸縮継手の内管の管厚 (cm)

f) 管の温度変化による応力

管に温度変化が生じた場合、その上昇、下降の方向によって摩擦力の方向が異なるが、安全側になるように次の応力を加算しなければならない。

i) 管と支台との摩擦による応力

$$\sigma = \frac{f_{sp}(R_s + R_w) \cos \theta}{A_s} \dots\dots\dots (解 13.12)$$

ここに、 R_s ：管の自重による支台の反力 (kgf)

R_w ：管内水の重量による支台の反力 (kgf)

f_{sp} ：摩擦係数

ii) 伸縮継手の摩擦による応力

$$\sigma = \frac{f_{EX} \pi (D_t + 2 t_E)}{A_s} \dots\dots\dots (解 13.13)$$

ここに、 f_{EX} ：伸縮継手の摩擦係数 (kgf/cm)

スリーブタイプ伸縮継手では $f_{EX} \doteq 7$ kgf/cm

D_t ：継手部内径 (cm)

g) 伸縮継手がない場合の管軸方向応力については、温度応力、ポアソン効果による管軸方向引張応力等を考慮する必要がある。

2) 埋設管の場合

a) 補剛材により管胴の変位が拘束されることによって生ずる局部曲げ応力

$$\sigma = 1.82 \frac{t_r h_r}{A_r} \frac{pD}{2 t} \dots\dots\dots (解 13.14)$$

ここに、 A_r ：リング断面積 = $t_r h_r + t(1.56 \sqrt{r_m t} + t_r)$ (cm²) (解説 図 13.6 参照)

b) 温度応力

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \dots\dots\dots (解 13.15)$$

ここに、 σ ：温度応力 (kgf/cm²)、ただし、温度変化が \oplus の時は引張応力、 \ominus の時は圧縮応力

α ：鋼の線膨張係数 ($1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$)

E ：鋼のヤング係数 2.1×10^6 (kgf/cm²)

ΔT ：温度変化 ($^\circ\text{C}$)

c) ポアソン効果による引張応力

管軸方向の変位は拘束されているため、円周方向応力に対するポアソン効果により式 (解 13.16) の軸方向応力が生ずる。

$$\sigma = \mu \cdot \sigma_r \dots\dots\dots (解 13.16)$$

ここに、 σ ：ポアソン効果による引張応力 (kgf/cm²)

μ ：鋼のポアソン比 (=0.3)

σ_r ：円周方向応力 (kgf/cm²)

$$\sigma_r = \frac{pD}{2 t}$$

(2) 石油パイプライン技術基準 (案)

1) 内圧による軸方向応力の算定

内圧による 1 軸方向引張応力は、以下によって算定する。

a) 非拘束導管

地上設置導管等で軸方向の変位が拘束されない導管は式 (解 13.17) による。

$$\sigma = \frac{p_i \cdot (D_o - t)}{4 \cdot t} \dots \dots \dots \text{(解 13.17)}$$

b) 拘束導管

地中埋設導管等で軸方向の変位が拘束されている導管は式 (解 13.18) による。

$$\sigma = \mu \cdot \frac{p_i \cdot (D_o - t)}{2 \cdot t} \dots \dots \dots \text{(解 13.18)}$$

ここに、 σ : 内圧による管軸方向引張応力 (kgf/cm²)

μ : ポアソン比

p_i : 内圧 (常用圧力) (kgf/cm²)

D_o : 導管の外径 (cm)

t : 管厚 (cm)

2) 自動車荷重による軸方向応力の算定

自動車荷重による埋設管の軸方向応力は式 (解 13.19) によって算定する。

$$\sigma = \frac{0.322 \cdot W_m}{Z_p} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_p}{K_v \cdot D_o}} \dots \dots \dots \text{(解 13.19)}$$

ここに、 σ : 自動車荷重による管軸方向応力 (kgf/cm²)

W_m : 自動車荷重 (kgf/cm) (解説 図 13.7 参照)

D_o : 導管の外径 (cm)

K_v : 鉛直方向地盤反力係数 (kgf/cm³)

E : 導管のヤング係数 (kgf/cm²)

I_p : 導管の断面二次モーメント (cm⁴)

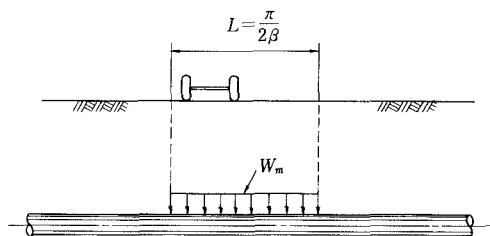
$$\frac{\pi}{64} \cdot \{D_o^4 - (D_o - 2t)^4\}$$

Z_p : 導管の断面係数 (cm³)

$$\frac{\pi}{32} \cdot \frac{\{D_o^4 - (D_o - 2t)^4\}}{D_o}$$

t : 管厚 (cm)

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{4E \cdot I_p}{K_v \cdot D}}$$



解説 図 13.7 自動車荷重

3) 温度変化による軸方向応力の算定

温度変化による軸方向応力は、式 (解 13.15) による。

(3) 水管橋設計基準

水管橋の軸方向応力の算出に当っては、水門鉄管技術基準による露出管の項に準ずるものとする。

13.1.6.3 せん断応力に対する照査

せん断応力に対する照査は次式により行うものとする。

$$\nu \frac{\tau}{\tau_u} \leq 1 \dots\dots\dots (13.3)$$

ここに、 ν ：13.1.6.1での安全率
 τ_u ：式(5.7)のせん断強度 (kgf/cm²)
 τ ：せん断応力 (kgf/cm²)

【解 説】 せん断応力は管軸に垂直な方向の応力として式(解13.20)により算出するものとする。

$$\tau = \frac{2S}{A_s} \dots\dots\dots (解13.20)$$

ここに、 S ：はりとしてのせん断力 (kgf)
 A_s ：管の断面積 (cm²)

13.1.6.4 合成応力に対する照査

合成応力に対する照査は適切な算式により行うものとする。

【解 説】 合成応力に対する照査をせん断ひずみエネルギー説 (Mises-Hencky-Huberの説)により行うものとすれば式(解13.21)のようになる。

$$\frac{\nu}{F} \times \{(\sigma_t + \sigma_m)^2 - (\sigma_t + \sigma_m)\sigma_t + \sigma_t^2 + 3\tau^2\}^{1/2} \leq 1 \dots\dots\dots (解13.21)$$

ここに、 ν ：13.1.6.1での安全率
 F ：5.2の設計強度 (kgf/cm²)
 σ_t ：周方向引張応力 (kgf/cm²)
 σ_m ：周方向曲げ応力 (kgf/cm²)
 σ_t ：軸方向応力 (kgf/cm²)
 τ ：せん断応力 (kgf/cm²)

13.1.6.5 座屈に対する照査

座屈に対する照査は次式により行うものとする。

$$\nu \frac{p_a}{p_k} \leq 1 \dots\dots\dots (13.4)$$

ここに、 ν ：安全率
 p_k ：限界座屈圧力 (kgf/cm²)
 p_a ：作用圧力 (kgf/cm²)

【解 説】 管の座屈に対しては、管内空虚時について外圧に対する照査を式(13.4)により行うものとする。
 外圧に対する限界座屈圧力の算定は、基準により次のように定められている。

- (1) 水門鉄管技術基準

1) 露出管の場合

a) 補剛材のない場合

式(解 13.22)により限界座屈圧力を算出する。

$$p_k = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{t}{D_0} \right)^3 \dots\dots\dots (\text{解 13.22})$$

ここに、 p_k : 限界座屈圧力 (kgf/cm²)

E : 鋼のヤング係数 (2.1×10^6 kgf/cm²)

μ : 鋼のポアソン比

D_0 : 管外径 (cm)

t : 管厚 (cm)

b) 補剛材のある場合

i) 管胴本体

管胴本体の限界座屈圧力の計算には徳川の式または、R. Southwell の式がよく用いられる。

徳川の式

$$p_k = \frac{E \frac{t}{D_0}}{n^2 - 1 + \frac{\alpha^2}{2}} \left[\frac{2\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{t}{D_0} \right)^2 \cdot \left\{ (n^2 + \alpha^2)^2 - \frac{n^4(2n^2-1)}{(n^2 + \alpha^2)^2} \right\} \right] \dots\dots\dots (\text{解 13.23})$$

ここに、 n : 座屈モードの波数

l : 補剛材の間隔 (cm)

$$\alpha = \frac{\pi D_0}{2l}$$

近似的に $\alpha^2 \ll 1$ とすれば、

$$p_k = 2.4 E \left(\frac{D_0}{l} \right) \left(\frac{t}{D_0} \right)^{2.5}$$

座屈モードの波数 n は限界座屈圧力の最小値を与える $\frac{\partial p_k}{\partial n} = 0$ の条件から求めるが、近似的に

$$n = 1.63 \left(\frac{D_0}{l} \right)^{0.5} \left(\frac{D_0}{t} \right)^{0.25}$$

で求められる値にもっとも近い整数をとる。

R. V. Southwell の式

$$p_k = \frac{Et}{r_m} \left\{ \frac{\pi^4}{n^4(n^2-1)} \left(\frac{r_m}{l} \right)^4 + \frac{n^2-1}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{r_m} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (\text{解 13.24})$$

近似的に $n^2 - 1 = n^2$ とすれば

$$p_k = 2.59 E \frac{t^{2.5}}{l D_m^{1.5}}$$

ここに、 D_m : 板厚中心の直径 (cm)

r_m : 板厚中心の半径 (cm)

ii) 補 剛 材

式(解 13.25)により限界座屈圧力を算出する。

$$p_k = \frac{24 EI}{(1-\mu^2) D_0^3 l} \dots\dots\dots (\text{解 13.25})$$

ここに、 I : 補剛材合成断面の断面 2 次モーメント (cm⁴)

2) 埋設管の場合 (コンクリート埋設)

a) 補剛材のない場合

E. Amstutz の式がよく用いられる。

式 (解 13.26) により限界座屈圧力を算出する。

$$p_k = \frac{\sigma_N}{\frac{r_m}{t} \left(1 + 0.35 \frac{r_m}{t} \frac{\sigma_y^* - \sigma_N}{E^*} \right)} \dots\dots\dots \text{(解 13.26)}$$

E. Amstutz の式 (この式は $\frac{r_m}{t} > 35$ の範囲で実際と適合する)

$$\left(\frac{k_0}{r_m} + \frac{\sigma_N}{E^*} \right) \left(1 + 12 \frac{r_m^2}{t^2} \cdot \frac{\sigma_N}{E^*} \right)^{1.5} = 3.36 \frac{r_m}{t} \cdot \frac{\sigma_y^* - \sigma_N}{E^*} \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{r_m}{t} \cdot \frac{\sigma_y^* - \sigma_N}{E^*} \right)$$

ここに、 k_0 : コンクリートと管外面とのすき間 (cm)

k_0 は一般に $0.4 \times 10^{-3} r_m$ とされることが多い。

σ_N : 変形を生じた部分の管胴板の円周方向応力 (kgf/cm²)

$$E^* = \frac{E}{1 - \mu^2}$$

$$\sigma_y^* = \zeta \frac{\sigma_Y}{\sqrt{1 - \mu + \mu^2}}$$

σ_Y : 材料の保証降伏点強度 (kgf/cm²)

$$\zeta = 1.5 - 0.5 \frac{1}{\left(1 + 0.002 \frac{E}{\sigma_Y} \right)^2}$$

グラウト等により $k_0 = 0$ であり、管に初期圧縮応力 σ_v が加わっているときは、第 1 項 $\frac{k_0}{r_m}$ のかわりに $-\frac{\sigma_v}{E^*}$ とおけばよい。

上の式から σ_N を求める。

b) 補剛材のある場合

i) 管胴本体

S. Timoshenko の式がよく用いられる。

式 (解 13.27) により限界座屈力を算定する。

$$\frac{(1 - \mu^2) r_0 p_k}{E t} = \frac{1 - \mu^2}{(n^2 - 1) \left(1 + \frac{n^2 l^2}{\pi^2 r_0^2} \right)^2} + \frac{l^2}{12 r_0^2} \left\{ (n^2 - 1) + \frac{2n^2 - 1 - \mu}{1 + \frac{n^2 l^2}{\pi^2 r_0^2}} \right\} \dots\dots\dots \text{(解 13.27)}$$

ここに、 r_0 : 管外面半径 (cm)

ii) 補剛材

E. Amstutz の式がよく用いられる。

式 (解 13.28) により限界座屈圧力を算出する。

$$p_k = \sigma_N \left\{ 1 - \frac{r_0}{e} \frac{\sigma_Y - \sigma_N}{\left(1 + \frac{3}{2} \pi \right) E} \right\} \dots\dots\dots \text{(解 13.28)}$$

E. Amstutz の式

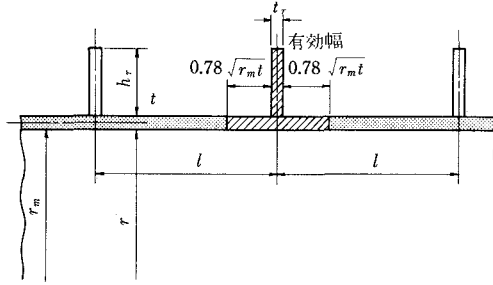
$$\left(\frac{k_0}{r_m} + \frac{\sigma_N}{E} \right) \left(1 + \frac{r_m^2}{i^2} \cdot \frac{\sigma_N}{E} \right)^{1.5} = 1.68 \frac{r_m}{e} \cdot \frac{\sigma_Y - \sigma_N}{E} \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{r_m}{e} \cdot \frac{\sigma_Y - \sigma_N}{E} \right)$$

ここに、 i : 解説 図 13.8 に示す補剛材合成断面の回転半径 (cm)

e : 解説 図 13.8 に示す補剛材合成断面の重心から管内面までの距離 (cm)

グラウト等により $k_0 = 0$ であり、補剛材に初期圧縮応力 σ_v が加わっているときは、第 1 項の $\frac{k_0}{r_m}$ のかわりに $-\frac{\sigma_v}{E_s}$ とおけばよい。

上の式より σ_N を求める。



解説 図 13.8 補剛材をつけた埋設管

この場合、補剛材の平均圧縮応力を p_a とすると

$$p_a = \frac{p' r_0 (t_r + 1.56 \sqrt{r_m t})}{S_0 + 1.56 t \sqrt{r_m t}}$$

p' は作用圧力 p より次式により算出する.

$$p' = \frac{p}{t_r + 1.56 \sqrt{r_m t}} \left\{ (t_r + 1.56 \sqrt{r_m t}) + 2 \cdot \frac{\frac{r_0^2}{t} \frac{(t_r + 1.56 \sqrt{r_m t}) r_0^2}{S_0 + 1.56 t \sqrt{r_m t}}}{\left[3(1-\mu^2)^{0.75} \left(\frac{r_0}{t}\right)^{1.5} \frac{\sinh \beta l + \sin \beta l}{\cosh \beta l - \cos \beta l} + \frac{2 r_0^2}{S_0 + 1.56 t \sqrt{r_m t}} \right]} \right\}$$

ここに、 $s_0 : t_r(t + h_r)$

$$\beta : \frac{[3(1-\mu^2)]^{0.25}}{\sqrt{r_m t}}$$

(2) 水道鋼管の場合 (土中埋設)

藤田式⁹⁾がよく用いられる.

限界座屈圧力は、埋戻し土の拘束を考慮して式 (解 13.29) より算出する.

$$p_k = \frac{E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{r}\right)^3 (n^2 - 1) + \frac{\beta r}{2(n^2 - 1)} \dots \dots \dots \text{(解 13.29)}$$

ここに、 p_k : 限界座屈圧力 (kgf/cm²)

n : 座屈モードの波数 ($n=2, 4, 6 \dots$)

通常 $n=2$ で p_k が最小となる.

E : 鋼のヤング係数, 2.1×10^6 (kgf/cm²)

μ : 鋼のポアソン比, 0.3

t : 管厚 (cm)

r : 管内半径 (cm)

β : 埋戻し土の側面受働土圧係数 (kgf/cm²/cm)

13.1.6.6 使用限界状態の照査

必要に応じてたわみ等の使用限界状態の照査を行うものとする。

使用限界状態の照査は 7.5 によるものとする。

【解 説】 水管橋等で梁としてのたわみに制限のある場合、もしくは石油パイプラインで横方向断面内でのたわみに制限のある場合は、使用限界状態の照査を 7.5 により行うものとする。

13.1.6.7 地震時に対する照査

地震時に対しては、構造物の諸特性、用途、種別、規模、立地条件、類似構造物および地盤の震害経験等を考慮し、それに適合した耐震設計法を採用し、構造物の安全性の照査を行うものとする。

【解説】 水圧鉄管、水管橋等の地上管路構造物では、通常、震度法により地震時の安全性の照査を行っている。

また、地中埋設管のような地中にある長大な構造物では地震時の慣性力によるより、むしろ地盤に発生する変形により応力を生ずることから、応答変位法により地震時の安全性の照査を行っているのが一般的である。

13.2 水門扉

13.2.1 適用範囲

この節は各種の水門扉の設計に適用する。

【解説】 本節は発電用、治水用、利水用ダム、取水堰、その他に用いられる水門扉の設計に適用する。条文には基礎的な留意事項を述べ、解説で注意事項、代表例などを示す。

13.2.2 適用法規および基準

水門扉の設計にあたっては、種々の関連する法規および基準等を遵守するものとする。

【解説】 関連する法規及び基準類としては次のようなものがある。

- (1) 水門鉄管技術基準, 1981年11月(水門鉄管協会)
- (2) 水門扉管理要領, 1977年9月(水門鉄管協会)
- (3) 水門扉設計参考例, 1973年11月(水門鉄管協会)
- (4) 発電用水力設備に関する技術基準及び細目(通商産業省令第59号)
- (5) 電気設備技術基準(通商産業省令第61号)
- (6) 河川管理設備等構造令・同施行規則(建設省政令第199号, 省令第13号)
- (7) 水門開閉装置技術基準・同解説, 1983年3月(建設省)
- (8) 河川用ゲート設計指針(案)鋼製ゲート編, 1985年6月(建設省)
- (9) クレストラジアルゲート設計要領(案)・同解説, 1985年8月(建設省)
- (10) 道路橋示方書・同解説, 1980年2月(日本道路協会)
- (11) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979年3月(日本港湾協会)

13.2.3 材 料

水門扉に使用する材料は、法規および基準がある場合はそれによるものとし、ない場合は、2章を参照して、責任技術者の判断により選定する。

【解説】 この規定は、性質が明確な材料を使用するために設けられたものである。水門鉄管技術基準(以下、

〔水鉄基準〕と呼ぶ) では以下のように定めている。〔水門扉製作者は使用前に材料試験を行い、JIS に合格していることを確かめなければならない。ただし、その材料の性質が、製鋼所において行われた材料試験成績表によって明らかにされているものについては、そのかぎりではない。〕

13.2.4 荷 重

扉体の設計には自重、静水圧、泥圧、波圧、浮力、開閉力、氷圧、地震時動水圧、地震時慣性力、風荷重、雪荷重、温度変化による影響、流水による水圧の変化およびこれに起因する振動による荷重増加を考慮しなければならない。

【解 説】 水鉄基準の規定を準用した。

各荷重に対する具体的算定方法が水門鉄管技術基準・水門扉設計参考例に述べられている。荷重の組合せについては、常時と地震時について次の組合せを考慮する。

1. 常時：自重、静水圧、泥圧、波圧、浮力、風荷重、雪荷重、温度変化による影響、流水による水圧変化、およびこれに起因する振動による荷重増加と、開閉力または氷圧。
2. 地震時：自重、静水圧、泥圧、波圧、浮力、氷圧、雪荷重、地震時動水圧、地震時慣性力。

13.2.5 構造一般

13.2.5.1 設計の原則

予想される荷重に対して安全であり、十分な水密性を持ち、開閉が容易かつ確実であり、耐久性が大で、使用に際して有害な振動がなく、かつ、保守性を考慮した設計を行うものとする。

【解 説】 水鉄基準の規定を準用した。

水門扉を設計する場合に考慮すべき基本的条件を示したものである。この他に、騒音等の発生が考えられる場合は、その防止に配慮するものとする。

13.2.5.2 構造解析

各荷重により水門扉に生じる応力および変位の算定は、適切な方法に基づいて行うものとする。特に、ラジアルゲートについては、脚柱の座屈強度の検討を行うものとする。

【解 説】 水鉄基準・水門扉設計参考例において、ラジアルゲート、ローラーゲート（解説図 13.9, 13.10 参照）のある一形式に対して、「少なくともこの程度の計算は必要である」との立場に立った計算例が示されている。水門扉の設計計算は、通常、各架構を平面内のはりおよびラーメン構造などに置換して行うが、近年の数値計算技術の発達に伴い、全体構造を立体的に計算するのが容易になってきている。ラジアルゲートの場合、平面構造に置換した計算結果と立体的相互作用を考慮した計算結果で、かなり異なることのある事実に注意すべきである。一般に、平面構造に置換した計算結果は主げた、脚柱の応力、変位が実際より大きな値となり、安全側評価になるが、立体的解析ではより実際に近い値を与え、実測値ともかなりよく一致する。その理由の一つとして、平面構造置換の場合に無視しているスキンプレーートの剛性が一般に高く、主げたとの協働を無視しえないことが考えられる。

13.2.5.3 主要部材の剛性

扉体の各部は所定の位置を保ち、かつ、十分な剛性を有しなければならない。扉体の曲げによるたわみは、特殊な場合を除いて、径間の1/800以下としなければならない。

【解 説】 水鉄基準の規定を準用して定めた。

水鉄基準には以下のように述べられている。『水門扉は、定期的な塗装以外、特に大きな補修を行うことなく40～50年使用される。耐用期間中には、流水による振動等、動的な荷重や流芥、流木等による衝撃や予期しない荷重を受けることもあるので、各部材は荷重方向のみならず、それに直角な方向の安定と剛性を保持できるような構造としなければならない。』

13.2.5.4 スキンプレート

図13.1に示すような、水圧により長方形平板に生じる曲げ応力は、式(13.5)によって計算することができる。

$$\sigma = \frac{1}{100} k a^2 \frac{p}{t^2} \dots\dots\dots (13.5)$$

ここに、 σ ：曲げ応力 (kgf/cm²)

k ：表13.1に示す係数

a ：区画の短辺 (cm)

b ：区画の長辺 (cm)

p ：水圧 (kgf/cm²)

t ：板厚 (cm)

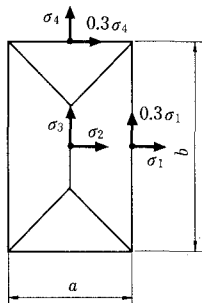


表13.1 応力算定に用いる係数

b/a	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
1.00	30.9	13.7	13.7	30.9
1.25	40.3	18.8	13.5	33.9
1.50	45.5	22.1	12.2	34.3
1.75	48.4	23.9	10.8	34.3
2.00	49.9	24.7	9.5	34.3
2.50	50.0	25.0	8.0	34.3
3.00	50.0	25.0	7.5	34.3
∞	50.0	25.0	7.5	34.3

図13.1 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ の位置と方向

また、主桁の設計において、スキンプレートが主桁と一体構造に溶接されている場合、その有効幅を主桁と協働させてもよい。

【解 説】 水鉄基準を準用して定めた。

水鉄基準に述べられている通り、本条文はDIN 19704の算式にしたがっている。これは、周辺固定の長方形平板の曲げ解析そのものであり、前提となる仮定、すなわち、

- a) 四辺固定の完全にフラットな長方形板
- b) 等分布圧力が作用

が満たされる限り、スキンプレート表面に生じる応力の厳密解を与える。したがって、ローラーゲートのような場合には適用できるが、ラジアルゲート、ローリングゲートなどのような曲面板の場合まで拡張して適用するのは、必ずしも適切とはいえない。曲面板では、曲げより面内力で水圧に耐えるため、条文の算定法による値より実測値ははるかに小さいのが通常である。なお、条文中、 a 、 b は、スキンプレートと桁との溶接線間距離、または、リベット中心間距離をとればよい。

13.2.5.5 腐食代

扉体の接水する部材および摩耗のおそれのある部材については、計算板厚に表 13.2 の値以上を加算するものとする。ただし、常時接水していない水門扉の場合は、片面について表中の値の 0.5 mm 減としてよい。

表 13.2 腐食代 (単位: mm)

場 所	スキンプレート		その他主要部材
	片面	両面	両面
常時淡水中で使用	1 (1)	2 (1)	2
常時海水中で使用	1.5	3	2

注) () 内は摩耗に対する余裕厚を示している。摩耗のおそれのある場合は、この値を加算する。

【解 説】 水鉄基準の規定を準用して定めた。

水鉄基準では次のように述べている。【水門扉の腐食はスプラッシュゾーンが最も著しいため、腐食代は接水する面と水面上 1 m までの部材に加えるものとする。常時使用状態にない水門扉でも水中に入る機会の多いものについては、常時使用状態にある水門扉とするのが望ましい。ただし、修理用角落しのように使用がごく希な水門扉は腐食代を見込まなくてもよい。設置後接近が難しく、塗装および清掃不可能な扉体については条文の 1.5 倍以上 (最大 4 mm 程度) つけるのが望ましい。】

13.2.5.6 最小板厚

扉体に使用する主要部材の鋼材最小板厚は、腐食代を含み鋼板では 6 mm 以上、形鋼では 5 mm 以上としなければならない。

【解 説】 水鉄基準の規定を準用して定めた。水門扉は大小さまざまな形のものがあり、扉体に使用する鋼材の厚さもさまざまであり、最小板厚を一律に規定するのは困難であるが、腐食しやすい環境に置かれ、かつ摩耗のおそれもあり、その製作運搬中の取扱い等のことも考えて、条文の値を定めた。

13.2.6 限界状態の照査

水門扉に生じる応力は、13.2.5.2 の規定により算定された応力に対し、限界状態の照査を行うものとする。

地震時の安全率については、常時の 2/3 に下げることができるものとする。ただし、PC 鋼材には適用しない。

【解 説】 限界状態の照査については、7 章の考え方にもとづいて行うものとする。

座屈に対する照査を行う場合、有効座屈長は 13.2.7 などにしたがい、構造物の性質に応じて適切に定めるこ

とが重要である。

13.2.7 構造設計

13.2.7.1 ラジアルゲート

(1) 形状と構造

ラジアルゲートは、使用目的に応じた形状で、安全かつ確実に開閉できる構造とし、部分開放流時にも振動を生じないものでなければならない。

(2) 架 構

各架構は原則として、トラニオン部を固定とし、脚柱および主桁の中立軸を結んだラーメン構造として計算する。

(3) 脚柱および脚柱間連結トラス

脚柱の水平面内座屈に対する有効座屈長については、トラニオンピン中心から主桁の中立線までとし、垂直面内の有効座屈長については、トラス形式の補剛を行う場合は、連結トラスの格点間距離とする。

脚柱および脚柱間連結トラスは、軸力のほかに自重および開閉時のトラニオン部の摩擦による曲げモーメント、開閉力による荷重を考慮し部材断面を決定しなければならない。

(4) 脚柱間連結トラスの取付部

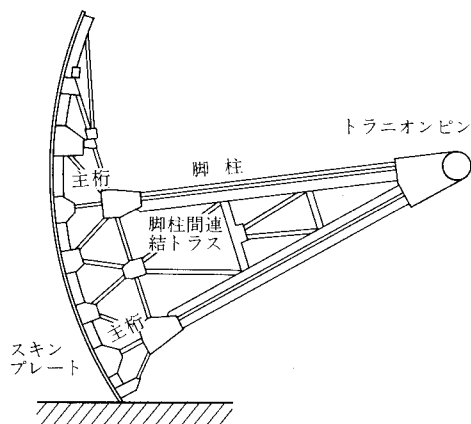
トラス形式の補剛を行う場合、脚柱間連結トラスの取付部は、トラス格点における強度を保持できるような構造としなければならない。

(5) アンカレイジ

アンカレイジは扉体の支承部からの全水圧荷重を集中して受ける重要部分なので、この荷重を安全、確実にコンクリート内に広く分散させて伝える構造とし、使用目的に合致した形式のものを選定しなければならない。

【解 説】 水鉄基準の規定を準用した。

(1) ラジアルゲートは複雑な立体構造をしており、かつ、細長比の大きな部材が多く用いられ、また、トラニオンピン部に荷重が集中するため、十分強度に留意して設計、製作する必要がある。



解説 図 13.9 ラジアルゲート

(2) この規定は、横主げた方式について定めたものである。脚柱と主げたは平面形状でラーメンを形成する。架構の形状には門形と π 形がある。

(3) ラーメン形式の補剛を行う場合の有効座屈長は規定で述べていないが、各格点間距離よりも相当大きくなるので、十分検討する必要がある。検討にあたっては、7.2.1の解説が参考になろう。

(4) 脚柱は水圧荷重等の他に、開閉時、トラニオンピン部の摩擦によるモーメントの影響を受けるが、トラニオン近傍では通常、脚柱が互いに隣接しているので斜材を入れ難く、脚柱のフランジを大きくするとか、ガセットプレートを大きくする等、十分な配慮が必要である。

13.2.7.2 ローラーゲート

(1) 形 状

ローラーゲートは使用目的に応じて確実に開閉でき、かつ、底部放流時においても、できるだけ振動が少なく、下向き力または上向き力の少ない形状にしなければならない。

(2) 主 げ た

主げたは各けたが全水圧を合理的に分担し、所定の強度・剛性のある形状としなければならない。

(3) 補 助 げ た

補助げたは、スキンプレートの支持補剛、および主げたの連結補剛、扉体全体の剛度等を考えて、配置し、それぞれに適合した構造形状としなければならない。

(4) 端 縦 げ た

端縦げたは、水圧荷重を安全に主ローラーに伝えるような構造としなければならない。

(5) 主ローラー

主ローラーはあらゆる開度において水圧荷重、自重および風荷重等を安全に戸当りに伝えるよう、その大きさ、個数、取付け位置を決めなければならない。また、荷重を受けた状態において円滑に回転し、保守管理の容易なものでなければならない。

(6) 戸 当 り

戸当りは扉体の支承部からの荷重を安全に支持構造物に伝える構造とし、使用目的に応じ適切な形状のものでなければならない。

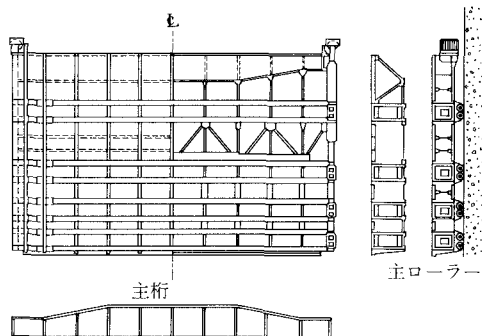
【解 説】 水鉄基準の規定を準用した。

(1) ローラーゲートは複数の主げたを補助げた（縦げたおよび横げた）で連結して構成し、止水する厚肉板状構造物である。3方水密構造と4方水密構造に分類できるが、安定した放流を行い、振動を防止するには、最下段主げたの位置、戸溝の形状などに配慮することが必要である。

(2) 主げたは各けたともなるべく同一断面のものを使用し、水圧を等分に受け持たせて、そのたわみが同じになるように配置するのがよい。主げたの形状、数については、スキンプレートの厚さ、主ローラーの個数と取付け位置、底部放流時の影響等の関連を考え、製作運搬および設置等に支障のないように定めればよい。

(3) 大型水門扉では、全体系の剛性を上げるため適当な間隔に板構造またはトラス構造の縦げたを設けなければならない。また、主げた間隔が大きく、吊り荷重、横荷重に対し、全体系の剛性を必要とする場合は、背面对傾構を設けるのもよい。

(4) 端縦げたは主ローラーを支持点として主げたの集中荷重を受ける単純ばり、または連続ばりとして計算



解説 図 13.10 ローラーゲート

し、特に、主げた取付け部および主ローラー取付け部の荷重集中点は、ウェブに無理なく荷重を伝えるよう補剛材を設ける。

端縦げたにはこのほか水圧荷重、補助ローラー反力および開閉時の吊り荷重が作用するので、特に大きな影響のあるものについては検討しなければならない。

13.3 貯 槽

13.3.1 適用範囲

この節は貯槽の設計に適用する。

【解 説】 この節では主として貯槽について、条文に基本的事項を述べ、解説に代表的なものを例示した。またサイロについても適宜言及した。

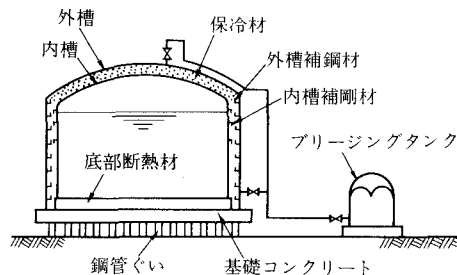
貯槽およびサイロの種類を解説 表 13.5 に示す。

ここでは近年設置数が著しく増加している地上式平底円筒形低温貯槽(解説 図 13.11)および地上式貯油槽(解説 図 13.12)に重点を置いて記述する。

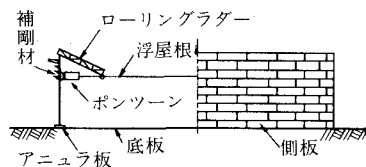
解説 表 13.5 貯槽およびサイロの種類

圧力分類	名 称		主 な 用 途
高 圧	高圧貯槽及び ガスホルダー	球 形	LPG, 液体エチレン, 高圧ガス
		堅または横置円筒形	一般高圧ガス
低* 圧	地 上 式 低 温 貯 槽	平 底 円 筒 形	LNG, LPG, 液体アンモニア
		球 形	液体酸素, 液体窒素
		堅または横置円筒形	液体水素, 液体ヘリウム, 液体酸素
	ガスホルダー	有 水 式	一般ガス(水溶性でないもの)
乾 式		一般ガス	
大 気 圧	地 上 式 貯 油 槽	固 定 屋 根 式	軽油, 灯油, 重油
		浮 屋 根 式	原油, ガソリン
		固定屋根付浮屋根式	ジェット燃料, 無水アルコール
特 殊 形	スフェロイド 高 架 水 槽 等	ガソリン 水	
サイロ	平 底 式 ホ ッ パ ー 式	穀物, セメント	
		家畜の飼料	

* 低圧とは大気圧よりやや高い圧力をいう。



解説 図 13.11 地上式平底円筒形低温貯槽



解説 図 13.12 浮屋根式貯槽

13.3.2 適用法規および基準

貯槽には、災害防止の目的から構造上あるいは取扱い上種々の法的規制がある。したがって、貯槽の設計にあたってはそれらを遵守しなければならない。

【解説】 貯槽およびサイロに適用される法規および基準類には次のようなものがある。貯槽については使用目的および貯蔵物の種類により適用法規が異なるので事前に当該貯槽に適用される法規を確認しておく必要がある。

- (1) 高圧ガス取締法：特定設備検査規則（通商産業省令第4号）
- (2) 高圧ガス取締法：高圧ガス設備等耐震設計基準（通商産業省告示第515号）
- (3) 電気事業法：発電用火力設備に関する技術基準を定める省令（通商産業省令第60号）
- (4) 電気事業法：火力発電所の耐震設計指針（日本電気協会）
- (5) ガス事業法・電気事業法：LNG地上式貯槽指針，1981年12月（通商産業省）
- (6) ガス事業法：ガス工作物の技術上の基準を定める省令（通商産業省令第98号）
- (7) 労働安全衛生法：圧力容器構造規格（労働省告示第11条）
- (8) 消防法：危険物の規制に関する規則（政令第306号，自治省）
- (9) 石油コンビナート等災害防止法（法律第84号，政令第129号，自治省令第17号）
- (10) 平底低温貯槽基準（案）（高圧ガス保安協会）
- (11) 高張力鋼使用基準，1980年11月（高圧ガス保安協会）
- (12) LPG貯槽指針，1980年8月（日本ガス協会）
- (13) 球形ガスホルダー指針，1985年3月（日本ガス協会）
- (14) 有水式ガスホルダー指針，1982年3月（日本ガス協会）
- (15) 容器構造設計指針・同解説，1984年（日本建築学会）
- (16) JIS B 8243 圧力容器の構造，1981年
- (17) JIS B 8250 圧力容器の構造（特定規格），1983年
- (18) JIS B 8251 アルミニウム合金製液化天然ガス貯槽の構造，1981年
- (19) JIS B 8501 鋼製石油貯槽の構造，1985年
- (20) JIS B 8511 アルミニウム製円筒形サイロの構造，1978年
- (21) JLPA A 201 球形貯槽，1981年（日本エルピーガスプラント協会）
- (22) JLPA A 601 平底低温貯槽指針，1985年（日本エルピーガスプラント協会）
- (23) JPI-7 R-35 スカートを有する塔槽類の強度計算，1978年（日本プラント協会）
- (24) JPI-7 R-52 横置容器サドル周りの強度計算，1976年（日本プラント協会）

13.3.3 材 料

貯槽の材料は、法規または基準がある場合はそれらによるものとし、ない場合は、2章を参照して責任技術者の判断により選定する。

【解 説】 低温用構造物では脆性破壊が問題になる。

溶接構造物の場合、脆性破壊の発生は溶接継手部から生じることが多いが、これは溶接継手部の材質が溶接熱サイクルにより脆化しているために、そこに切欠と溶接欠陥が存在した場合、溶接残留応力、角変形および目違いなどの製作誤差要因が重畳して破壊が生じることになる。

脆性破壊が発生すると亀裂が母材内あるいは溶接継手内を伝播して重大事故になることが多いが母材材質が特によい場合には、母材内で亀裂が停止する。

したがって、低温用材料の選定にあたって、母材については脆性発生特性と共に脆性停止特性を、溶接継手については溶接金属、ボンド部および熱影響部の脆性発生特性を十分に把握しておく必要がある。

低温貯槽に用いられる材料の例としてLNG地上式貯槽指針（通産省）⁶⁾（以下LNG指針という）の規定を解説表2.6に示している。

13.3.4 荷 重

貯槽の設計にあたって考慮すべき荷重の種類とそれらの組合せは、法規または基準がある場合にはそれらによるものとし、ない場合には責任技術者の判断による。

【解 説】 (1) JIS B 8501「鋼製石油貯槽の構造」⁷⁾では、貯槽に加わる荷重を次のように定めている。

- 1) 静荷重：自重、貯蔵液体による荷重、断熱材による荷重、雪荷重
- 2) 動荷重：風荷重、地震荷重

風荷重と地震荷重は、それぞれ別個に作用するものとする。

なお、地震荷重については13.3.8耐震設計に詳しく記述することとした。

(2) 低温用貯槽の荷重の種類例として、LNG指針の規定を解説表3.9に示している。

また、同指針に定められた内槽の荷重の組合せを解説表13.6に、外槽の荷重の組合せを解説表13.7に示す。

(3) 球形または横置円筒貯槽等において、貯蔵物の荷重条件が最も厳しくなるのは必ずしも満液状態とは限らないので、部分的な液量の場合、ガス圧が低い場合および試験時などについて検討しなければならない。

(4) サイロの場合には、内圧が投入時よりも排出時に異常な大きさを示すことがあるので注意が必要である。その他にアーチング（貯蔵物がアーチを形成して側壁部に反力として荷重をもたらすこと）、アーチの崩壊、通気および偏心排出などによる圧力増加並びに、貯蔵物の液状化現象などについて十分に配慮しなければならない。

解説 表 13.6 内槽の荷重の組合せ

荷重の種類		荷重条件	長期			
			通常運転時	短期		耐圧試験時 水張試験時
				地震時	変位時 ^{注(1),(2)}	
			加速度型 ^{注(1)}	変位型 ^{注(1),(2)}		
通常荷重	自重	○	○	○	○	
	内槽ガス圧力	○	○	○		
	内外槽間ガス圧力	○	○	○		
	静液圧	○	○	○		
	保冷材圧力	○	○	○		
	温度荷重	○	○	○		
地震荷重	加速度型水平地震動による内槽等の慣性力		○			
	加速度型水平地震動による動液圧		○			
	加速度型鉛直地震動による内槽等の荷重の増減分		○			
	加速度型鉛直地震動による動液圧		○			
	変位型地震動による動液圧			○		
	スロッシングによる波頭衝撃圧および腰掛圧			○		
試験荷重					○	

注(1) 加速度型地震動とは短周期が卓越した地震動をいい、変位型地震動とは長周期が卓越した地震動をいう。

(2) 地震動に対する荷重の組合せにおいては、スロッシングによる波頭衝撃圧と腰掛圧（液面上昇にともなう液圧の増加）に注意が必要である。スロッシングの腰掛圧の負荷周期は、屋根の全体振動の固有周期に比較して十分長い、波頭衝撃圧の作用時間は屋根の固有周期に比較して短い。

しかしスロッシングによる腰掛圧同様、波頭衝撃圧についても静的な荷重として取扱う。

一方、スロッシングにより屋根に作用する腰掛圧と波頭衝撃圧は時間的に変化する。スロッシング液面が上昇するとともに、腰掛圧は増大するが、波頭衝撃圧はある時刻で最大値になり、液面が最高位になった時点で腰掛圧は最大になるが、波頭衝撃圧は再び0となる。

ただし腰掛圧と波頭衝撃圧が最大になる時刻が一致しないのでこれらを適切に組合せるものとする。

(3) 荷重の組合せは、各荷重が同時にかつ不利な方向に作用するものとする。

解説 表 13.7 外槽の荷重の組合せ

荷重の種類		荷重条件	長期			
			通常運転時	地震時	強風時	保守・点検時
通常荷重	自重	○	○	○	○	○
	内外槽間ガス圧力	○	○	○	○	
	保冷材圧力	○	○	○	○	
	雪荷重	○	○	○	○	
地震荷重	加速度型水平地震動による外槽等の慣性力		○			
	加速度型鉛直地震動による外槽等の自重の増減分		○			
風荷重				○		
活荷重 ^{注(1)}					○	
試験荷重						○

注(1) 活荷重は水平投影面積 1 m² 当り 120 kgf とする。

(2) 荷重の組合せは各荷重が同時にかつ不利な方向に作用するものとする。

13.3.5 構造一般

13.3.5.1 設計の原則

貯槽は予想される荷重に対して安全であり、十分な液密、気密性を有し、耐久性に優れ、保守・点検が容易な構造でなければならない。

【解 説】 貯槽を設計する場合に考慮すべき基本的条件を示したものである。

危険物用貯槽を設計する場合には個別の安全を考慮すると共に、延焼防止対策および有害物質の漏洩防止対策等を講ずるべきである。

13.3.5.2 貯蔵能力

貯蔵能力は、法規または基準がある場合には、それらによるものとし、ない場合には責任技術者の判断による。

【解 説】 高圧ガス取締法・一般高圧ガス保安規則（通産省令第53号）⁸⁾に定められた貯蔵能力の算定例を式（解13.30）に示す。

$$X = 0.9 \rho \cdot V \dots\dots\dots (解 13.30)$$

X：貯槽の貯蔵能力 (kgf)

ρ：通常の使用状態での温度における液体の比重量 (kgf/l)

V：貯槽の幾何容積 (l)

また、消防法・危険物の規制に関する規則（総理府令第55号）⁹⁾にも貯槽の内容積および空間容積の算定方法を規定しているので参考にするとよい。

13.3.5.3 最小板厚と最大板厚

貯槽に使用する鋼材は使用目的に応じ適切な最小板厚および最大板厚を設定するものとする。

【解 説】 (1) 最小板厚は計算に含めにくい外力や、加工、運搬、設置時に対する配慮から定めているものであり成形後の板厚が最小板厚以上でなければならない。

JIS B 8501 および LNG 指針では最小呼び厚さを解説表 13.8 のように定めている。

ただし、同表において、呼び厚さとは公差を許容したものであるが JIS B 8501 の底板のみは実際の厚さについて規定したものである。また最小板厚は 13.3.5.4 の腐食代を含んだもので考えてよい。

解説表 13.8 最小呼び厚さ (mm)

規 格	屋 根	側 板					アニュ ラ 板	底 板
		直径 16 m 以下	16 超 35 以下	35 超 60 以下	60 超 75 以下	75 m 超		
JIS B 8501	4.5	4.5	4.5	6	8	10	12	6
L N G 地上指針	内槽	4.5	6	8	10	12	6.5 (8)	6 (6)
	外槽	(6)	(8)	(10)	(12)	(12)	—	4.5 (4.5)

注1)：() 内寸法はアルミニウムおよびアルミニウム合金の場合を示す。

(2) 最大厚さは溶接部の継手性能を考慮して定めている板厚であり、JIS B 8501 では、軟鋼の場合 38 mm、

高張力鋼の場合 45 mm としている。

また、高圧ガス取締法・特定設備検査規則（通産省令第 4 号）¹²⁾（以下特定則という）では母材厚さが次の値を超える場合、炉内における応力除去熱処理を行うものとしている。

- 1) 炭素鋼：38 mm
- 2) 低合金鋼：16 mm
- 3) 2.5 % および 3.5 % ニッケル鋼：16 mm
- 4) オーステナイト系ステンレス鋼，アルミニウム，アルミニウムマンガン合金，アルミニウムマグネシウム合金，アルミニウムマグネシウムけい素合金，銅，銅合金，9 % ニッケル鋼またはチタン：制限なし

13.3.5.4 腐食代

腐食代および摩耗代（以下腐食代という）は次による。

- (1) 腐食または摩耗（以下腐食という）が予想される部分に対しては、腐食代を加えるものとする。
- (2) 使用する部分によって腐食の度合いが異なることが予想される場合にはすべての部分に同じ腐食代をとらなくてよい。

【解 説】 JIS B 8243 「圧力容器の構造」¹¹⁾ 3.3 の規定に準拠して定めた。

貯槽の腐食は貯蔵物による内面の腐食と大気，土壤などによる外面腐食とに区別される。

石油製品および LNG には腐食性がほとんど無いので内面の腐食代は設けなくてもよいとされている。

内・外面合わせて腐食代を考慮する場合には、解説表 13.9 に示す JIS B 8243 の規定を参考にするるとよい。

解説表 13.9 腐食代の基準

グレード 項 目	1	2	3	4
腐食の度合	侵食されない	侵食はわずかである	侵食される	かなり侵食される
腐食の速さ	<0.05 mm/年	0.05~0.13 mm/年	0.13~0.25 mm/年	>0.25 mm/年
腐食代	0	1 mm 以上	2 mm 以上	3 mm 以上

グレードの適用は次による。

(a) 経験的事実によって証明される場合

(b) 実際の使用状態に近い環境で長期にわたって行う試験によって証明される場合は原則として 1 グレード繰り上げる。

13.3.6 限界状態の照査

貯槽に生じる応力は適切な算定式を用いて算出し、限界状態の照査を行わなければならない。

【解 説】 貯槽については用途が多用であるため、限界状態の照査を条文で一律に規制することは適切ではないと判断し、解説で述べることにした。

貯槽に適用される法規および基準は許容応力度法を採用している。以下に述べる照査式は限界状態照査の考えに基づいて書き換えたものである。

- (1) 引張応力に対する照査

引張応力に対する照査は式（解 13.31）により行うものとする。

$$\nu \frac{\sigma_t}{\sigma_{tu}} \leq 1 \dots\dots\dots (解 13.31)$$

ここに、 ν ：安全率

σ_t ：引張応力 (kgf/cm²)

σ_{tu} ：設計強度 (kgf/cm²)

1) 設計強度は材料の降伏点並びに引張強さをとるものとする。その場合の安全率は解説 表 13.10~13.12 に示す値が式 (解 13.31) を満足しなければならない。

(a) 高圧ガス取締法・特定則および高圧ガス設備等耐震設計基準 (通産省告示第 515 号)¹²⁾ (以下耐震基準という。)

解説 表 13.10 荷重の組合せと安全率

荷 重 の 組 合 せ		設計強度	安全率
常 時	ガス圧+静液圧	降伏点	1.6
		引張強さ	4.0
地 震 時	ガス圧+静液圧+自重+積載荷重 +内容物重量+雪荷重+地震荷重	降伏点	1.1
		引張強さ	1.7

(b) LNG 指針

解説 表 13.11 荷重の組合せと安全率

荷 重 の 組 合 せ			設計強度	安全率
内	長期荷重	通常運転時	降伏点	1.6
			引張強さ	4.0
槽	短期荷重	地震時および耐圧試験時	降伏点	1.2
			引張強さ	2.0
外	長期荷重	通常運転時	降伏点	1.5
			引張強さ	2.2
槽	短期荷重	地震時、強風時、保守点検時および気密試験時	降伏点	1.0
			引張強さ	1.4

注) 使用材料・板厚によっては、さらに細かく安全率が計算される。

(c) 消防法・告示第 99 号

解説 表 13.12 荷重の組合せと安全率

荷 重 の 組 合 せ	安全率
主 荷 重	1.70
主 荷 重 + 風 荷 重	1.10
主 荷 重 + 地 震 荷 重	1.10
主 荷 重 + 従 荷 重 (上記以外)	1.10

注) 設計強度は降伏点をとるものとする。

2) 引張応力の算定

式 (解 13.31) における引張応力 σ_t は各基準により式 (解 13.32~35) を用いて算出することになっている。

i) 円筒部

$$\sigma_t = \frac{p}{\eta} \left(\frac{D}{2t} + 0.6 \right) \dots \dots \dots \text{(解 13.32)}$$

ii) 球面部

$$\sigma_t = \frac{p}{\eta} \left(\frac{D}{4t} + 0.1 \right) \dots \dots \dots \text{(解 13.33)}$$

iii) 円錐部

$$\sigma_t = \frac{p}{\eta} \left(\frac{D}{2t \cdot \cos \theta} + 0.6 \right) \dots \dots \dots (\text{解 13.34})$$

b) 消防法・危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示（自治省告示第99号）¹³⁾

$$\sigma_t = \frac{D(H-30) \cdot \rho}{2t} \times 1000 \dots \dots \dots (\text{解 13.35})$$

ここに、 σ_t ：引張応力 (kgf/cm²)

p ：設計圧力 (kgf/cm²)

D ：内径 (cm)

H ：引張応力を求める段の最下端から貯蔵物の最高液面までの高さ (cm)

t ：板厚 (cm)

ρ ：貯蔵物の比重量 (g/cm³)

θ ：円錐頂角の1/2

η ：溶接継手効率

(2) せん断応力に対する照査

せん断応力に対する照査は式（解 13.36）により行うものとする。

$$\nu \frac{\tau}{\tau_{ul}} \leq 1 \dots \dots \dots (\text{解 13.36})$$

ここに、 ν ：安全率

τ ：せん断応力度 (kgf/cm²)

τ_{ul} ：せん断強度 (kgf/cm²)

高圧ガス取締法・特定則では、せん断強度は解説表 13.10 に示す設計強度の 85 % をとるものとし、その場合の安全率は解説表 13.10 の値を満足することとしている。

(3) 座屈に対する照査

1) 軸方向圧縮力と曲げモーメント（転倒モーメント）を受ける場合

地震または風荷重の作用により軸方向圧縮力と曲げモーメント（転倒モーメント）を受ける場合の座屈に対する照査は式（解 13.37）、（解 13.38）によるものとする。

$$\nu \frac{\sigma_c}{\sigma_{cul}} \leq 1 \dots \dots \dots (\text{解 13.37})$$

$$\sigma_c = \frac{N}{A} + \frac{M}{Z} \dots \dots \dots (\text{解 13.38})$$

ここに、 ν ：安全率=1.5

σ_c ：圧縮応力の最大値 (kgf/cm²)

σ_{cul} ：式（解 13.39）、あるいは（解 13.40）に示す圧縮強度、あるいは責任技術者が適当と判断する圧縮強度 (kgf/cm²)

N ：軸方向圧縮力 (kgf)

A ：側板の断面積 (cm²)

M ：曲げモーメント（転倒モーメント）(kgf・cm)

Z ：側板の断面係数 (cm³) で薄肉円筒殻の場合、略算式 $Z = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot t$ を用いてよい。

t ：側板の板厚 (cm)

D ：側板の内径 (cm)

また、圧縮強度 σ_{cul} の算定式について、高圧ガス取締法・特定則、LNG 指針および JIS B 8501 では式（解 13.39）を採用している。

$$\sigma_{cul} = \frac{0.5 E \cdot t}{D} \dots \dots \dots (\text{解 13.39})$$

また、消防法・告示第99号では式(解13.40)を採用している。

$$\sigma_{cul} = \frac{0.4 E \cdot t}{D} \dots\dots\dots (解13.40)$$

ここに、
 E ：ヤング係数 (kgf/cm²)
 t ：側板の板厚 (cm)
 D ：側板の内径 (cm)

圧縮強度算定式の根拠について JIS B 8501 の解説では、次のように述べている。

一般に薄肉の円筒殻が軸圧縮荷重 N と曲げモーメント M の組合せを受ける場合に、壁面座屈を発生する限界応力は近似的に式(解13.41)で与えられることが知られている。

$$\frac{N/A}{f_c} + \frac{M/Z}{f_b} = 1 \dots\dots\dots (解13.41)$$

ここに、
 M ：曲げモーメント (転倒モーメント) (kgf・cm)
 A ：円筒殻の断面積 (cm²)
 Z ：円筒殻の曲げ断面係数 (cm³)
 f_c ：軸圧縮荷重に対する座屈限界応力 (kgf/cm²)
 f_b ：曲げモーメントに対する座屈限界応力 (kgf/cm²)

a) 軸圧縮荷重に対する薄肉円筒殻の壁面座屈限界応力は、微小変形の古典理論によれば、式(解13.42)となる。

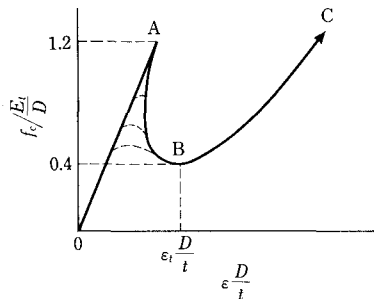
$$f_c = \frac{N_k}{A} = \frac{2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解13.42)$$

ここに、
 N_k ：圧縮座屈荷重 (kgf/cm²)
 D ：円筒殻の平均径 (cm)
 t ：円筒殻の板厚 (cm)
 E ：ヤング係数 (kgf/cm²)
 μ ：ポアソン比

この式は、 $\mu=0.3$ にとれば、式(解13.43)となる。

$$f_c = 1.21 \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解13.43)$$

一方、有限変形理論により、薄肉円筒殻の軸圧縮における圧縮応力 σ_c と圧縮ひずみ ϵ の関係を解析した結果は解説図13.13のようになる。



解説 図13.13 圧縮応力とひずみの関係

式(解13.43)の値は図中のA点に対応する。しかし、円筒殻に初期不整があると、座屈限界値は低下して図中に破線で示すような経過をたどり、その最低値は、式(解13.44)

$$f_c = 0.388 \frac{Et}{D} \doteq 0.4 \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解13.44)$$

で与えられる。過去に得られた多くの実験値が式(解 13.43)の理論値の1/3~1/2に現れ、式(解 13.44)の値に近いのは、このためである。

b) 薄肉円筒殻が曲げを受ける場合、圧縮側に壁面座屈を生じる限界曲げ応力の理論値は式(解 13.45)

$$f_c = \frac{M_k}{Z} = \frac{2k}{\pi(1-\mu)} \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解 13.45)$$

で与えられる。ここに、 M_k は座屈限界曲げモーメントであり、 k は座屈モードに関する係数で、最小値は $k=0.72$ であるが、従来の実験結果の平均値は $k=1.14$ 程度である。したがって、 $\mu=0.3$ にとれば式(解 13.46)

$$f_b = 0.5 \frac{Et}{D} \sim 0.8 \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解 13.46)$$

となり、曲げ座屈限界応力 f_b の最小値は式(解 13.44)で与えられる圧縮座屈限界応力 f_c の最小値の1.25倍程度となる。ただし、貯槽では転倒モーメント M により底板が一部浮き上がるようになると、側板に作用する軸圧縮応力が部分的に集中を生じ、その最大値は上述における M/Z よりも大きくなるという問題もある。

c) 貯槽のように軸圧縮荷重と同時に内圧の働く円筒殻では、内圧が増すにつれて、側板に発生する円周方向引張応力の作用により、軸圧縮の座屈限界応力が高くなることもよく知られており、R. S. Wozniakら¹⁴⁾はこれを考慮して式(解 13.47)

$$f_c = 0.5 \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解 13.47)$$

を提案しており、また、API-650, Appendix E (貯槽の耐震設計)では式(解 13.48)

$$f_c = 0.626 \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解 13.48)$$

を与えている。

d) これらの理論的、実験的研究を背景とし、かつ内外の設計指針を参考として、本解説では座屈限界応力 f_c 、 f_b を式(解 13.49)

$$f_c = f_b = 0.5 \frac{Et}{D} \dots\dots\dots (解 13.49)$$

とおき、貯槽の自重および鉛直地震動に基づく側板の軸圧縮応力と、水平地震動に基づく転倒モーメントからの圧縮応力とを同格に扱い、かつ式(解 13.49)の座屈限界応力に対して安全率 $\nu=1.5$ をとって側板の地震時圧縮応力の許容値 σ_a を与え、側板の座屈強度を評価することとした。ただし、水平地震動と鉛直地震動との同時性、同位相性に関する確率を考慮して、両地震動による応力の重ね合わせは、2乗和の平方根によるものとしているのである。

なお、JIS B 8243「圧力容器の構造」では円筒胴の軸圧縮許容応力を式(解 13.50)で与えている。

$$\sigma_a = \frac{0.3 Et}{D(1+0.004 E/\sigma_y)} \dots\dots\dots (解 13.50)$$

ここに、 σ_a : 許容座屈応力 (kgf/cm²)

D : 円筒胴の平均径 (cm)

σ_y : 材料の設計温度における降伏点または耐力 (kgf/cm²)

式(解 13.50)はL. H. Donnellの求めた円筒胴の軸圧縮座屈および曲げ座屈に関する半実験式¹⁶⁾(解 13.51)

$$f_c = E \frac{0.6 t/R - 10^{-7} R/t}{1 + 0.004 E/\sigma_y} \dots\dots\dots (解 13.51)$$

からきているが、通常の圧力容器の R/t の範囲では、式(解 13.51)の右辺の分子第2項は第1項に比べて省略できるものとし、かつこれに安全率4をとって導かれたものである。ここに、 R は円筒胴の平均半径である。このDonnellの式(解 13.51)は、塑性座屈が問題となる $R/t=160\sim 1500$ の範囲の実験結果に合うように導かれたもので、この式は $R/t > 2450$ では $f_c < 0$ を与えて無意味となる。一般に貯槽は圧力容器に比べ非常に薄肉であって、ほとんどが $R/t=500\sim 5000$ の範囲にあるから、式(解 13.50)または式(解 13.51)の適用範囲

から外れることが多く、これらの式と貯槽一般に適用するには無理がある。

2) 外圧を受ける場合

外圧を受ける場合の座屈に対する照査は本指針 13.1.6.5 の規定に準じて行ってよいものとする。
詳細については LNG 指針等を参照するとよい。

(4) 疲労限界状態の照査

貯槽で疲労限界状態が問題となるのは側板とアニュラ板の溶接継手の内側溶接止端部(解説 図 13.15 参照)である。一般には安全を見込んでアニュラ板の厚さを十分大きくとることで対抗しているため、疲労に対する照査を省略することが多いが、特に照査を行う場合 LNG 指針では次のように定めている。

1) 繰返し荷重の種類

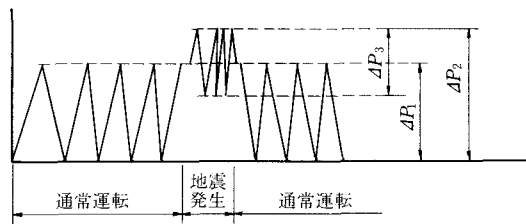
繰返し荷重の種類は解説 表 13.13 によるものとする。

解説 表 13.13 繰返し荷重の種類

繰 返 し 荷 重	
通常運転による繰返し荷重	ΔP_1
通常荷重と地震荷重の組合せによる変動荷重	ΔP_2
地震による変動荷重	ΔP_3

- (a) 通常運転による繰返し荷重 (ΔP_1)……ガス圧力を含む静液圧の変動を対象とし、その荷重繰返し数を LNG の荷役回数より求める。
- (b) 通常荷重と地震荷重の組合せによる変動荷重 (ΔP_2)……通常荷重としては最大液位を考え、地震荷重と組合せる。耐震設計用基準地震動は、貯槽の設計寿命中に少なくとも 1 回起るものとする。
- (c) 地震による変動荷重 (ΔP_3)……荷重の繰返し数は、1 回の地震発生によって生じる疲労寿命に影響する主要振動数とする。

これらの変動荷重の関係の概要を解説 図 13.14 に示す。



解説 図 13.14 繰返し荷重

- 2) 許容繰返し回数は設計疲労曲線より求める。
- 3) 疲労強度の評価は線形被害則式 ≤ 1 (解 13.52) により行うものとする。

$$D = n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots \dots \dots \text{(解 13.52)}$$

ここに、D：累積係数

$n_1, n_2 \dots$ ：種々の荷重の繰返し回数

$N_1, N_2 \dots$ ：種々の荷重に対する許容繰返し回数

13.3.7 構造設計

(1) 貯槽のアニュラ板の設計にあたっては基礎の形式およびアンカーの有無等を考慮し、十分安全なように設計しなければならない。

- (2) 内圧を有する貯槽の側板と屋根板の接合部はナックルプレート形式またはコンプレッションリング形式とする。
- (3) 屋根の設計においては屋根形式の種類の特性を考慮しなければならない。
- (4) ノズルおよび付属品取付部は、通常運転時、地震時、強風時の他、温度変化による変位に対して安全な構造とする。
- (5) 支持方法、支持部材の配置および本体への取付方法は最大負荷を考慮して決めるものとする。
- (6) アンカーの設計にあたっては、温度変化による側板の変位を考慮しなければならない。
- (7) 貯槽に断熱を行う場合、要求される断熱性能を満足するとともに、作用荷重に対して十分な強度を有するものとする。

【解 説】 (1) アニュラ板は扇形に成形した板を底板の外周部に円環状に敷き並べて溶接したものをいう。LNG 指針ではアニュラ板について解説 表 13.14 により厚さを決定するか、またはこの表によらない場合、短期荷重に対する強度の評価を行うとともに、側板とアニュラ板の溶接継手の内側溶接止端部の疲労に対する照査を本指針 13.3.6 により行うよう定めている。

解説 表 13.14 アニュラ板の厚さ (単位: mm)

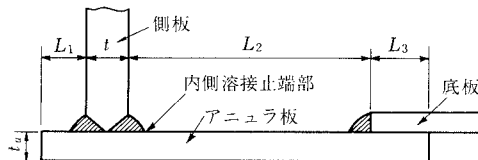
側板最下段の厚さ t	アニュラ板の厚さ
$15 < t \leq 20$	12
$20 < t \leq 25$	15
$25 < t \leq 30$	18
$30 < t$	$0.6 t$

また、消防法・告示第 99 条ではアニュラ板の板厚および寸法を解説 表 13.15 のように定めている。

解説 表 13.15 アニュラ板の板厚および寸法 (単位: mm)

側板最下段の厚さ t	側板外面からの張出し寸法 L_1	側板内面からの張出し寸法 $L_2 + L_3$	最小厚さ t_a
$15 < t \leq 20$	75	1 000	12
$20 < t \leq 25$	100	1 500	15
$25 < t \leq 30$	100	1 500	18
$30 < t$	100	1 500	21

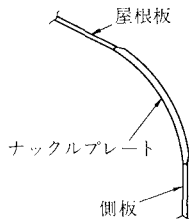
注(1) 各記号は解説図 13.15 による。 L_3 は 60 mm 以上とする。



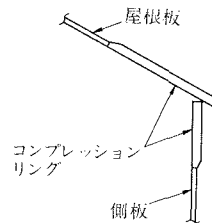
解説 図 13.15 アニュラ板の寸法

(2) ナックルプレート形式およびコンプレッションリング形式の例を解説 図 13.16 および解説 図 13.17 に示す。

なお、これらの形式に対する設計方法は平底低温貯槽基準 (案)(高圧ガス保安協会)¹⁷⁾ に詳しく述べられている。



解説 図 13.16 ナックルプレートの例



解説 図 13.17 コンプレッションリングの例

(3) 屋根の設計について JIS B 8501 では次のように定めている。

- 1) 屋根骨支持形円すい屋根：屋根のこう配は 1/16 以上とする。
- 2) 自己支持形円すい屋根：屋根のこう配は最小 1/6，最大 3/4 とする。
- 3) 球面屋根：屋根の曲率半径は $R=D$ ，ただし指定がある場合には $R=0.8\sim 1.2D$ とすることができる。
ここに、 R ：屋根の曲率半径 (cm)
 D ：側板の内径 (cm)

4) 浮屋根：貯蔵液体に腐食性がある場合には、油蒸気と空気の混合物がデッキの下に滞留しない構造とする。

(4) LNG 指針の解説ではノズル取付部について次のように述べている。

ノズル取付部については、配管からの荷重に対する安全性を確認する必要がある。ここで、配管からの荷重によるノズル取付部の応力を求める方法には有限要素法および Bijlaard 法^{18), 19)}がある。

有限要素法を用いる場合には、ノズル反力による影響が無視できるような十分広い範囲までノズル回り胴板のモデル化を行う必要がある。

また、Bijlaard 法を用いる場合は、ノズルの相当半径および胴板の相当板厚のとり方に十分注意する必要がある。

地震時の荷重の算出については、ノズル取付部から通常、固定とみなしうる点までの配管系について動的解析法（修正震度法，モード解析法，時刻歴応答解析法等）を用いて地震応答解析を行い，地震時の配管からの荷重を求めることが望ましい。

なお，緊急しゃ断弁は貯槽と同一基礎上で支持し，上記配管系に含む必要がある。

(5) 支持構造は，13.3.4 で定める荷重の他に本体の温度変化による局部応力または内圧による変形等を考慮して局部座屈を防止するような構造にしなければならない。

支持構造部の設計にあたっては 13.3.2 の項の解説に示す関連基準 (12)，(13)，(14)，(15)，(20)，(23)，(24) を参考にするとよい。

(6) アンカーの取付部は過大な局部応力が発生しない構造とし，アンカー取付座回りの側板については適切な解析手法により，十分に安全であることを確認する。

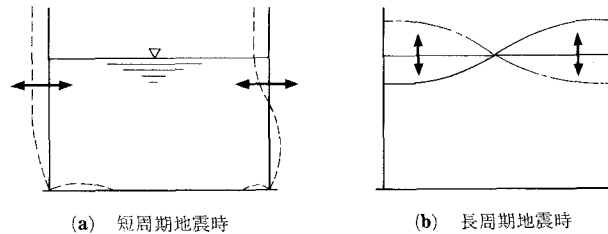
また，アンカー下端は直接または間接に基礎に強固に固定するものとし，基礎との取付部についても十分に安全であることを確認するものとする。

13.3.8 耐震設計

耐震設計にあたっては，貯槽の構造諸特性，重要度，種別，規模，立地条件，類似構造物および地盤の震害記録等を総合的に勘案しそれらに適合した耐震設計を行うものとする。

【解説】 火力発電所の耐震設計指針²⁰⁾第 2 章 2.1 の規定に準拠して定めた。

貯槽の耐震設計にあつて考慮すべき地震外力としては貯槽本体の運動と関連する加速度型の短周期地震動と液



解説 図 13.18 平底円筒形貯槽の2種類の振動性状

面揺動（スロッシング）と関連する変位型の長周期地震動がある（解説 図 13.18）。短周期地震動に対する貯槽の耐震設計法には、①静的震度法 ②修正震度法 ③モード解析法 ④時刻歴応答解析法があり、長周期地震動に対しては、①正弦波過渡応答解析（3波共振法） ②正弦波定常応答解析 ③時刻歴応答解析がある。

ここでは一般によく用いられている修正震度法と3波共振法および時刻歴応答解析法について述べる。

(1) 短周期地震動に対する応答計算（修正震度法）

- 1) 地震基盤震度0.15（加速度の場合は150 Gal）に重要度係数、地域係数および表層地盤増幅係数を乗じて地表面の設計震度を求める。
- 2) 貯槽の固有周期に対応する応答倍率を標準スペクトルから減衰をパラメータとして読みとり、地表面設計震度に乗じて貯槽の設計震度を得る。貯槽と液体の連成振動の性状は貯槽の形状比、（高さ／直径）によって大きく異なりその比が大きいた時にははりと類似の性状が見られるが、小さい時にはシェル変形——円断面のゆがみ（断面変形）——が卓越する。高圧ガス取締法・耐震基準および消防法・告示第99条ではシェルの理論を基に板厚変化のある場合の固有周期を近似式 式（解 13.53）より求めることとしている。

$$T = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{W}{\pi g E t_{1/3}}} \dots\dots\dots \text{（解 13.53）}$$

ここに、 T ：固有周期（s）

λ ：式（解 13.54）により得られる値

$$\lambda = 0.067 \left(\frac{H}{D} \right)^2 - 0.30 \left(\frac{H}{D} \right) + 0.46 \dots\dots\dots \text{（解 13.54）}$$

ここに、 D ：貯槽の内径（cm）

H ：貯槽底面から最高液面までの高さ（cm）

g ：重力の加速度（980 cm/s²）

E ：側板のヤング係数（kgf/cm²）

$t_{1/3}$ ：底面から最高液面高さの1/3の高さにおける側板の腐食代を除いた板厚（cm）

W ：運転重量（kgf）

- 3) 応力解析のために先の設計震度に見合う動液圧を求める。大型貯槽の地震時動液圧はポテンシャル理論またはHousner理論の衝撃圧と振動圧のほかに側板の弾性変形にともなう連成振動圧を考慮しなければならない。特に貯槽と内容液の連成系の固有周期が地震動の卓越周期に近い貯槽に関しては側板の変形により増幅される連成振動圧の影響を無視できない。
- 4) 鉛直震度は水平震度の1/2とし、同時に不利な方向に作用するものとする。
- 5) 応力解析は有限要素法により、軸対称シェル要素に非軸対称な地震荷重を入力して行うのが一般的である。

計算モデル作成にあたって、アニュラ板および底板は基礎（または断熱基礎）の弾性を考慮したバネ支持とするのが好ましい。

(2) 長周期地震動に対する応答計算

長周期地震動が内容液の自由表面の1次固有周期に近くなると液表面は大きく揺動し、いわゆるスロッシングが発生する。固定屋根を有する貯槽では内容液が屋根に当り、屋根本体および側板との接合部を破損する可能性がある。

高圧ガス取締法および消防法では入力地震動および液面応答波高について次のように定めている。

1) 高圧ガス取締法・耐震基準

(a) 入力地震動

入力地震動は解説表13.16によるものとする。

T	V_H または D_H
7.5 以下	$V_H=50\beta_1\cdot\beta_2$
7.5 超	$D_H=60\beta_1\cdot\beta_2$

ここに、 T ：液面揺動の固有周期 (s) であって、式 (解13.55) により得られる値

$$T=2\pi\sqrt{\frac{D}{3.682g}\coth\left(\frac{3.682H}{D}\right)} \dots\dots\dots (解13.55)$$

- g ：重力加速度 (cm/s²)
- D ：内径 (cm)
- H ：最高液面高さ (cm)
- V_H ：地表面における水平地動速度 (cm/s)
- D_H ：地表面における水平地動変位の片振幅 (cm)
- β_1 ：重要度係数
- β_2 ：地域別補正係数

(b) 液面波高

最大液面応答波高 ζ は、スロッシング1次モードの側板と接する位置での波高であり、減衰を0.5%とし、入力変位振幅を D_H とすると式 (解13.56) で求まる。

$$\zeta=\frac{297.4D_H\cdot R}{T^2\cdot g} \dots\dots\dots (解13.56)$$

ここに、 R ：貯槽半径 (cm)

- T ：液面揺動の固有周期 (s)
- g ：重力加速度 (980 cm/s²)
- D_H ：入力変位振幅 (cm)
- $T\leq 7.5$ (s) のとき $D_H=\frac{50T\cdot\beta_1\cdot\beta_2}{2\pi}$
- $T> 7.5$ (s) のとき $D_H=60\beta_1\cdot\beta_2$ (m)

2) 消防法・告示第99号

(a) 入力地震動

入力地震動は式 (解13.57) により求める。

$$K_h=0.15\times\gamma_1\times\gamma_2 \dots\dots\dots (解13.57)$$

ここに、 K_h ：液面揺動の設計水平震度

- γ_1 ：地域別補正係数
- γ_2 ：液面揺動の固有周期を考慮した応答倍率

$$\gamma_2=\frac{4.5}{T}$$

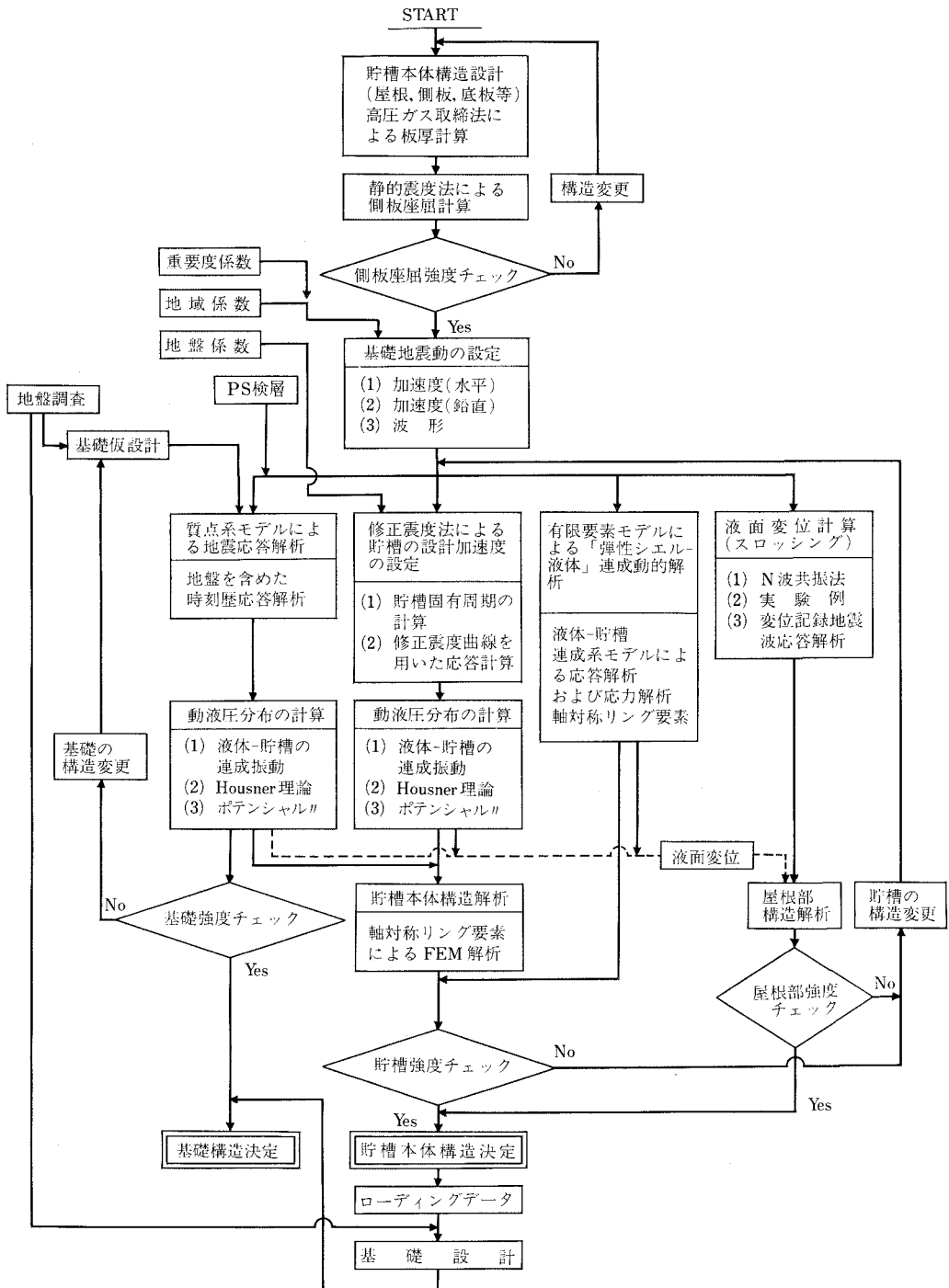
T : 液面揺動の固有周期式 (解 13.55) による.

(b) スロッシング波高 (JIS B 8501)

スロッシング波高は式 (解 13.58) により求める.

$$\zeta = 0.418 DK_s \dots\dots\dots (解 13.58)$$

ここに, ζ : スロッシング波高 (cm)



解説 図 13.19 低温貯槽耐震設計フローチャートの例

D ：貯槽の内径 (cm)

K_h ：式 (解 13.57) による。

(3) 時刻歴応答解析法の入力地震波について LNG 指針では次のように述べている。

入力地震波は、貯槽を設置する地域の過去の地震記録、地盤調査および想定する地震の規模等を考慮して、その地域に適した周期特性を有する波形を3種類以上用いることが望ましい。上記の方法によらない場合は、たとえば次の3種類の波形を使うことにより、それぞれの地震波形の特殊性を調整することができる。

- 1) 貯槽の設置点付近で記録された地震記録のうち代表的なもの
 - 2) Imperial Valley 地震の EL Centro における NS 方向地震記録
 - 3) 十勝沖地震の八戸における地震記録
- (4) 高圧ガス取締法が適用される場合の低温貯槽の耐震設計フローチャートの例を解説 図 13.19 に示す。

13.3.9 基礎の設計

基礎の設計にあたっては、貯槽の規模、形状、用途および構造等の特性を考慮し、上部構造物の設計思想との統一をはかると共に、設置地点の地盤および環境条件に適合するものとする。

【解 説】 (1) 上部構造物から基礎に要求される主な条件および注意事項

- 1) 通常時、強風時、地震時および試験時の諸荷重に対して十分な強度を有するものとする。特に転倒や、滑動をおこさないよう十分に検討を行うものとする。
 - 2) 上部構造物の機能および構造に悪影響を与えるような沈下ならびに不等沈下を生じないものとする。
 - 3) 内圧の作用する貯槽については、アンカーボルト等により貯槽の浮上がりに対する措置を施すものとする。
 - 4) 底板下面の腐食防止については、直接底板裏面に防食対策を行うことは底板溶接時に防食剤が溶解し、好ましくないので、基礎表面にアスファルトサンドを敷く等の措置を講じるものとする。
 - 5) 使用上あるいはメンテナンスに支障がないものとする。
 - 6) 低温貯槽の基礎は次のいずれかの方法により地盤の凍上を防止するものとする。
 - (a) 加熱装置の使用
 - (b) 地盤面と基礎との間に空間を設ける
 - (c) その他凍上防止に適切と認められる方法
 - 7) 低温貯槽の基礎にはスラブの上下面間の温度こう配により常に温度応力が発生するので注意を要する。
- (2) 将来おこる可能性のある地盤の状況 (沈下、すべり、液状化等) に対して安全でなければならない。
- (3) 貯槽が設置地点周辺におよぼす影響、既設構造物および将来隣接して建設されるであろう構造物やその施工によって受ける影響を十分調査しておく必要がある。
- (4) 基礎の設計にあたっては、本指針 13.3.2 解説に示す関連基準 (5), (12), (14), (19) などを参考にするとよい。

参 考 文 献

- 1) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，1981年11年
- 2) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準案，1974年6月
- 3) 日本水道鋼管協会：水管橋設計基準，1981年3月
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編，1980年5月
- 5) 藤田博愛：大口径鋼管の設計上の問題点とその合理的管厚算定法について，水道協会 雑誌 318号
- 6) 通産省：LNG 地上式貯槽指針，1982年12月 (資公部第427号通達)
- 7) JIS B 8501：鋼製石油貯槽の構造，1985年

- 8) 通産省：高圧ガス取締法・一般高圧ガス保安規則（省令 第53号）
- 9) 自治省：消防法・危険物の規制に関する規則（総理府令 第55号）
- 10) 通産省：高圧ガス取締法・特定設備検査規則（省令 第4号）
- 11) JIS B 8243：圧力容器の構造 1981年
- 12) 通産省：高圧ガス取締法・高圧ガス設備等耐震設計基準（告示 第515号）
- 13) 自治省：消防法・危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示（告示 第99号）
- 14) R. S. Wozniak, W. W. Mitchell：“Basis of Seismic Design Provisions for Welded Storage Tanks”, Proc. Refining Dept. API (1978)
- 15) API-650. Welded Steel Tanks for Oil Storage : Appendix E. Seismic Design of Storage Tanks (1979)
- 16) L. H. Donnell：“A New Theory for the Buckling of Thin Cylinders Under Axial Compression and Bending”, Trans. ASME, 56-11 (1935), 795~806
- 17) 高圧ガス保安協会：高圧ガス取締法・平底低温貯槽基準（案）
- 18) BS 5500-1976 : Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels
- 19) Bijlaard P. P. : Stresses from Local Loading in Cylindrical Pressure Vessels, Trans. ASME 77, 1955
- 20) 日本電気協会：火力発電所の耐震設計指針 (JEAG 3605-1983)