

内圧管の設計について

本誌編集小委員会

1. はじめに

本協会では、管路更生の基礎的な教材として、「管路更生工法、技術者研修会必修テキスト」を平成19年より発刊してきた。本年度、「下水道管路更生管理技士」の資格試験制度を創設するにあたり、テキストを改訂し「下水道管路更生技士 必修テキスト」とした。そのため、従来掲載していた農業用水関係の項目を外したこともあり、今回内圧管の設計について掲載することとした。掲載にあたり、本誌第6号で掲載した内圧管の考え方に加筆した。

既設管に内圧が作用する管路は、「ガス導管」「上水道管」「下水圧送管」「農業用水管」「工業用水管」「油送管」と流体は変われど、多岐にわたり存在する。その全てを網羅することはできないので、ここでは下水圧送管や農業用水管を主体に解説を行う。

2. 内圧管

自然勾配の高低差を利用したり、ポンプ等を用いて流体を搬送しているものの総称である。その際に既設管には内圧が作用し、内圧が作用しないときには、外圧が作用することになる。「水道施設設計指針、(社)日本水道協会2012」¹⁾では、内圧（静水圧+水撃圧）および外圧（土圧+活荷重等）に対し、安全であるよう管厚を求めることが記載されている。

3. 内水圧

内水圧は、静水圧と水撃圧との和となり、自然圧送およびポンプ圧送の場合で異なる。図-1に静水圧と水撃圧の概要を示す。

3-1. 静水圧

管体に作用する静水圧は、パイプライン形式によって異なり、一般にオープンタイプでは設計流量時の動水勾配線から求めた動水圧であり、セミクローズドおよびクローズドタイプは送配水停止時の静止水位から求めた静水圧である。送配水方式が圧力水槽式の場合は、ポンプ停止時における圧力水槽内の水頭に換算した静止水位から求めた静水圧である。

3-2. 水撃圧

水撃圧は、バルブ等を短時間に操作してパイプライン組織の流量調節を行った結果、圧力波が組織内の水理的な境界点に向かって固有の伝播速度で伝播運動を起こし、水圧が急激に上昇あるいは下降する現象である。この水撃圧そのものが、バルブの特性および開閉速度、管路延長、管内流速、静水圧、さらに管の材質等によって異なるので一律に決めるこ

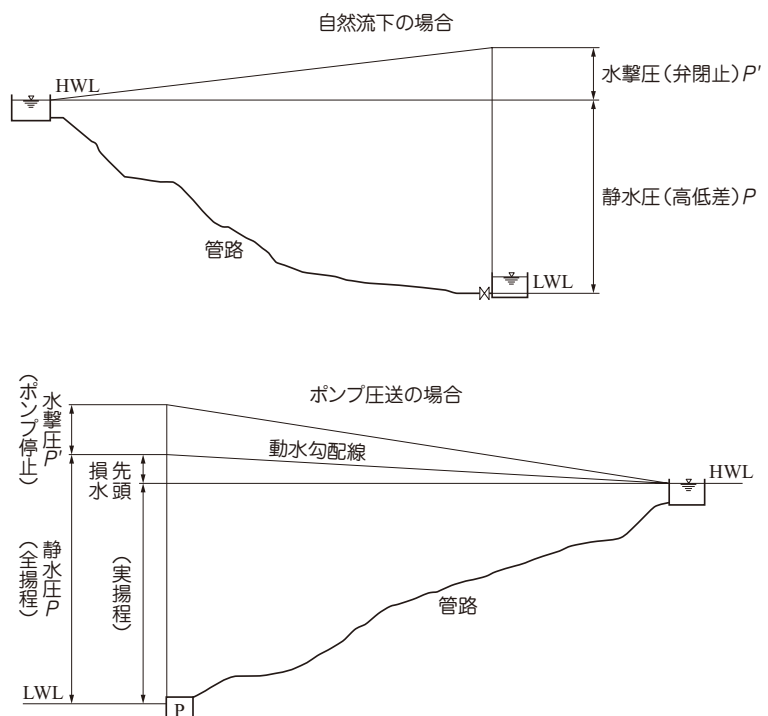


図-1 静水圧と水撃圧

とは困難である。特に上水道管・下水圧送管と農業用水管では、配管形状（曲がり角度、曲がり数等）や埋設状況に違いがあるため、水撃圧に対する考え方が少し異なっている。

(1) 上水道管および下水圧送管の場合
水撃圧は計算によって求めることができるが、計算によらない場合は次による。

①自然圧送

0.34MPaまたは静水圧の40%のいずれか大きい値を採用する。

②ポンプ圧送

静水圧が0.44MPa未満の場合はその100%、静水圧が0.44MPa以上の場合は、その60%または0.44MPaのいずれか大きい値を採用する。

(2) 農業用水管²⁾の場合

過去の設計事例、施工事例等の経験を整理した経験則による方法により決定する。

①自然圧送

静水圧が0.34MPa未満の場合は静水圧の100%とする。静水圧が0.34MPa以上の場合は静水圧の40%、または0.34MPaのうち大きい値を採用する。

②ポンプ系パイプライン

通水時水圧（動水圧）が0.44MPa未満の場合はその100%を、0.44MPa以上の場合はその60%もしくは0.44MPaのいずれか大きい値を採用する。

③ポンプ圧送

ポンプの計画吐出圧（水位）を静水圧が0.44MPa未満の場合はその100%を、0.44MPa以上の場合はその60%もしくは0.44MPaのいずれか大きな方を採用する。

4. 下水圧送管、工業用水管（上水道管）の設計

ASTM F1216-03³⁾には、内圧と外圧とも「完全に劣化した管路」「部分的に劣化した管路」に大別し設計を行うようになっているが、先述した「水道施設設計指針、(社)日本水道協会2012」においては、新管を布設することが前提となっているため「部分的に劣化した管路」の考え方はない。何れも内圧に関しては薄肉円筒式のNaday式の変形でありそれを採用する。外圧においては、「水道施設設計指針、(社)日本水道協会2012」では、JSWAS K-1「下水道用硬

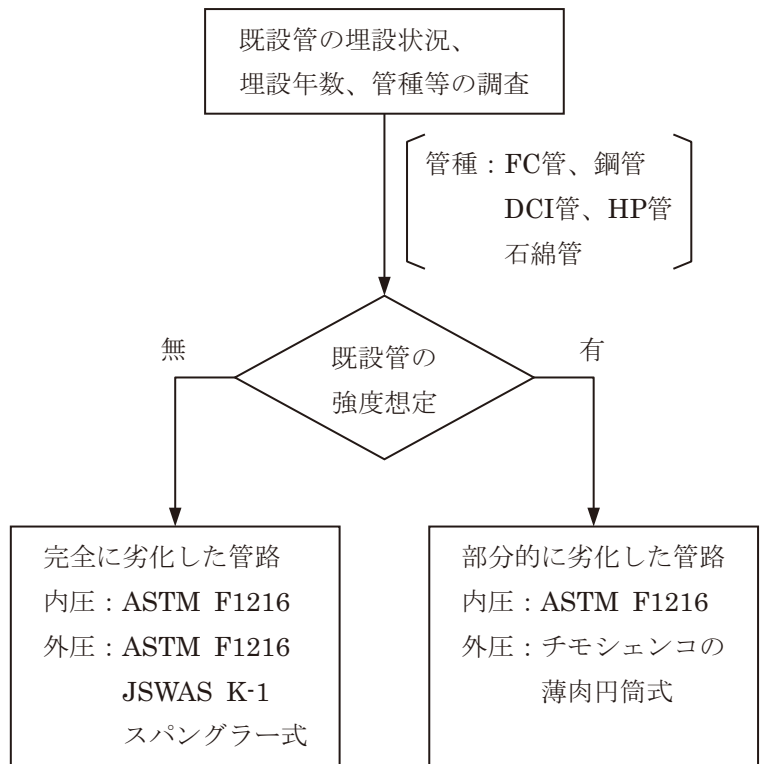


図-2 設計フロー

質塩化ビニル管⁴⁾に準じた外圧式やスパンングラー式を用いている。何れも内圧管を更生するにあたって、外圧の考え方が定かではなく、今後検討する必要がある。参考までに設計フローを図-2に示す。

4-1. 完全に劣化した管路

言葉に表わされているように、既設管の残存強度が期待されない管路で、強度は更生する材料で持たせる。「管きょ更生における設計・施工管理ガイドライン(案)(社)日本下水道協会2011」では自立管に相当する。

(1) 内圧に対する設計

① ASTM F1216⁻⁰³

$$P_i = \frac{2\sigma_{TL}}{(SDR-2) \cdot N} \dots\dots\dots(式4-1)$$

式(4-1)を展開し、式(4-2)を求める。

$$t = \frac{D}{2 + \frac{2\sigma_{TL}}{N \cdot P_i}} \dots\dots\dots(式4-2)$$

ここに、 P_i : 内圧 (Mpa)

SDR : 既設管内径と厚さの比 (= D/t)

D : 既設管内径 (mm)

σ_{TL} : 長期引張強さ (N/mm²)

N : 安全率

②水道施設設計指針

$$t \geq \frac{P_i \cdot D \cdot N}{(2\sigma_{TL} + P_i)} \dots\dots\dots \text{(式 4-3)}$$

(2) 外圧に対する設計⁵⁾

① ASTM F1216⁻⁰³

本誌第3号⁵⁾にも記載されているが、基礎式であるラスチャーの座屈荷重解析式に、浮力係数、安全率、楕円変形率、更生材の長期曲げ弾性係数を考慮して式(4-4)が導かれる。

$$q_t = \frac{C}{N} \cdot \sqrt{32R_w \cdot B' \cdot e' \cdot \left(E_L \cdot \frac{I}{D^3} \right)} \dots\dots\dots \text{(式 4-4)}$$

また、式(4-4)を変形して式(4-5)を導く。

$$t = \sqrt[3]{\frac{12D^3 \cdot (q_t \cdot N / C)^2}{32R_w \cdot E_L \cdot B' \cdot e'}} \dots\dots\dots \text{(式 4-5)}$$

ここに、 q_t ：外圧の総計

$$q_t = W_V + W_W + P_O$$

W_V ：鉛直土圧 (N/mm²)

W_W ：活荷重 (N/mm²)

P_O ：管底における作用外水圧 (N/mm²)

$$P_O = 0.000001 \cdot H_{WL}$$

H_{WL} ：地下水頭圧 (mm)

C ：扁平による減少係数

$$C = \left\{ 1 - \frac{q}{100} / \left(1 + \frac{q}{100} \right)^2 \right\}^3$$

q ：既設管の楕円率

$$q = \frac{\text{平均直径} - \text{最小直径}}{\text{平均直径}} \times 100$$

または、

$$q = \frac{\text{最大直径} - \text{平均直径}}{\text{平均直径}} \times 100$$

R_w ：浮力

$$R_w = 1 - 0.33 \cdot (H_{WL} / H)$$

B' ：弾性支持係数

$$B' = 1 / (1 + 4e^{-0.0027I})$$

H ：土被り (mm)

e' ：土の反力係数

E_L ：長期曲げ弾性係数 (N/mm²)

I ：断面二次モーメント

$$I = t^3 / 12$$

②水道施設設計指針

i. 曲げ応力による検討

$$\frac{\sigma_L}{N} = \frac{(K_1 \cdot W_V + K_2 \cdot W_W) r^2}{Z} \dots\dots\dots \text{(式 4-6)}$$

式(4-6)を変形して式(4-7)を導く。

$$t = \frac{D}{1 + \sqrt{\frac{2\sigma_L}{3(K_1 \cdot P_e + K_2 \cdot P_i) N}}} \dots\dots\dots \text{(式 4-7)}$$

ここに、

W_V ：更生管にかかる土圧 (N/mm²)

W_W ：更生管にかかる活荷重 (N/mm²)

σ_L ：長期曲げ強度 (N/mm²)

r ：管厚中心半径 ($(D - t) / 2$) (mm)

N ：安全率 (= 2)

Z ：断面係数 (= $t^3 / 6$)

K_1 ：曲げモーメント係数 (管頂、管底)

K_2 ：曲げモーメント係数 (管頂、管底)

ii. たわみ率による検討

$$\frac{\delta}{2r} = (K_3 \cdot W_V + K_4 \cdot W_W) \cdot \frac{r^4}{2r \cdot E \cdot I} \times 100 \dots\dots\dots \text{(式 4-8)}$$

式(4-8)を変形して式(4-9)を導く。

$$t = \frac{D}{1 + \sqrt[3]{\frac{E \cdot V}{75(K_3 \cdot P_e + K_4 \cdot P_i)}}} \dots\dots\dots \text{(式 4-9)}$$

ここに、

δ ：土圧及び活荷重によるたわみ (mm)

E ：短期曲げ弾性係数 (N/mm²)

I ：断面二次モーメント (= $t^3 / 12$)

r ：管厚中心半径 (mm)

K_3 ：たわみ係数 (土による)

K_4 ：たわみ係数 (活荷重による)

V ：たわみ率 (= $\delta / 2r \times 100$)

③スパングレーによる埋設可とう性管の円周方向及びたわみ解析⁶⁾

まず曲げ応力を求める式からトライアンドエラーまたは逐次代入法などの間接的計算法により許容応力度以内となる厚さを求め、次にその厚さでたわみが許容値に入るかどうかを検証することで決定する。

i. 曲げ応力による検討

$$\sigma_a \geq 12 \left(\frac{r}{t} \right)^2 \left(k - \frac{F_r \cdot e' \cdot r^3}{E_L \cdot I + 0.061 e' \cdot r^3} \right) P_V \dots\dots (式 4 - 10)$$

ここに、 K ：モーメント係数（管位置、基礎条件により決定する）

- F_r ：基礎条件により決まる支承角係数
- E_L ：長期曲げ弾性係数（N/mm²）
- e' ：埋め戻し土の受働土圧係数（N/mm²）
- P_V ：埋設管に作用する全土圧（N/mm²）
- $P_V = W_V + W_W$
- σ_a ：許容曲げ強さ（N/mm²）
- r ：更生管の中心半径（mm）
- $r = (D - t) / 2$

ii. たわみ率による検討

$$V = \frac{\delta}{2r} \times 100 = \frac{F_d \cdot F_r \cdot r^3}{E_L + 0.061 e' \cdot r^3} P_V \times 100 \dots\dots (式 4 - 11)$$

ここに、 δ ：埋戻し土と活荷重によるたわみ量の和（mm）

- F_d ：埋戻し土の締め具合の遅延係数（= 1.5）
- ：たわみ率（%）

4-2. 部分的に劣化した管路

部分的に強度が低下している管路で継ぎ手部の腐蝕や電食により発生した孔食等が発生している管路のことを指す。

(1) 内圧に対する設計

式（4-12）の条件を満たす場合において、式（4-13）が成り立つ。

$$\left(\frac{d}{D} \right) \leq 1.83 \sqrt{\frac{t}{D}} \dots\dots (式 4 - 12)$$

$$P_i = \frac{5.33}{(SDR - 1)^2} \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_L}{N} \dots\dots (式 4 - 13)$$

式（4-13）を展開し、式（4-14）を求める。

$$t = \frac{D}{1 + \left(\sqrt{\frac{5.33 \cdot \sigma_L}{N \cdot P_i}} \cdot \frac{D}{d} \right)} \dots\dots (式 4 - 14)$$

- ここに、 d ：欠損孔（mm）
- σ_L ：長期曲げ強さ（N/mm²）

(2) 外圧に対する設計⁷⁾

本誌第4号⁷⁾にも記載されているが⁸⁾、チモシェンコの薄肉円筒式を用いて設計を行う。

$$P_o = \frac{2K \cdot E_L}{(1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{(D/t - t)^3} \cdot \frac{C}{N} \dots\dots (式 4 - 15)$$

式（4-15）を展開し、式（4-16）を求める。

$$t = \frac{D}{1 + \sqrt[3]{\frac{2K \cdot E_L \cdot C}{P_o \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}}} \dots\dots (式 4 - 16)$$

- ここに、 K ：支持向上係数（= 7.0）
- C ：楕円変形率（%）
- P_o ：管底における作用外水圧（N/mm²）
- ν ：更生材のポアソン比

5. 農業用水管の設計

農林水産省構造改善局から平成21年3月に改訂された「土地改良事業計画設計基準設計パイプライン」基準書・技術書²⁾を標準として設計を行う。当該図書において管更生の設計に関する記述はないが、一般的に、複合管は“不とう性管”として、単独管は“とう性管”として考え設計を行っている。その場合、設計は管体の横断方向のみについて行う。

5-1. 管体の縦断方向の設計

一般に埋設管では、埋め戻し土や盛土による荷重とその反力が管体の縦断のどの部分をとってもほぼ均衡し、従ってこの方向には曲げモーメントは加わらないか、または非常に小さいとみなし得るので、縦断方向の強度は通常の場合は検討しない。

しかし、管体に支台を設けたり、カラー部分が支点となるおそれのある場合等では無視し得ない曲げモーメントが管体の縦断方向に作用することがあるので、このような場合には管体が荷重に対し安全に耐え得るか否かを確認、必要であればその部分の縦断方向の補強、管種の変更、継ぎ手の構造や位置および施工法等を再検討する等の対策を講じる必要がある。

5-2. 管体の横断方向の設計

管体の横断方向の設計では、管体に同時に働く内外圧の複合作用について検討し、これに対して十分安全であるように設計する。

5-3. 不とう性管

ここで取り上げる不とう性管は、遠心力鉄筋コンクリート管およびコア式プレストレスコンクリート管であり複合管を対象とする。許容内圧を算定し、水理解析より求められた設計水圧と比較検討を行う。

(1) 設計内圧の計算

$$\left[\frac{P_H}{P_C/S} \right]^n + \left[\frac{H_P}{H_C/S} \right] = 1 \dots\dots\dots (式 5-1)$$

ここに、 P_C ：内圧が0のとき、破壊またはひび割れが発生する外圧 (N/mm)

H_C ：内圧が0のとき、破壊またはひび割れが発生する内圧 (N/mm²)

P_H ：内圧が H_P のとき、破壊またはひび割れが発生する(許容)外圧 (N/mm)

H_P ：内圧が P_H のとき、破壊またはひび割れが発生する(許容)内圧 (N/mm²)

S ：安全率 (1.5以上とする)

n ：管の種類や構造によって決まる係数

(2) 外圧による線荷重

$$P_H = \frac{\pi \cdot M}{r} = \frac{M}{0.318r} \dots\dots\dots (式 5-2)$$

ここに、 P_H ：外圧による線荷重 (N/mm)

M ：外圧によって延長1mm当たりの管体に発生する最大曲げモーメント (N・mm/mm)

5-4. とう性管

とう性管は、管厚中心半径の数%までたわんでも実質的に損傷を起こさない特性を有しているが、水平たわみ量 ΔX が異常に大きくなると、継ぎ手部から漏水したり、管内外面に施してある塗装等の被覆に亀裂が入ったり、必要な通水断面が確保できなかったりすることとなる。これを防止するため、とう性管ではたわみ量を制限することとして許容たわみ率を定めている。したがって、更生材の許容応力度から定まる管厚と設計たわみ率から定める管厚を求め、大きい値を採用する。

5-4-1. 許容応力度からの設計

内外圧に対して、更生材の設計厚みで満足しているのか確認する。

$$t \geq \frac{0.5D \cdot H + \sqrt{(0.5D \cdot H)^2 + 24a \cdot \sigma_u \cdot M}}{2\sigma_u} \dots (式 5-3)$$

ここに、 H ：設計内圧 (N/mm²)

$$H = H_1 + H_2$$

H_1 ：静水圧 (N/mm²)

H_2 ：水撃圧 (N/mm²)

M ：横断方向に生ずる最大曲げモーメント (N・mm/mm)

$$M = M_V + M_P + M_O + M_H$$

M_V ：鉛直等分布荷重による最大曲げモーメント (N・mm/mm)

M_P ：管体自重による最大曲げモーメント (N・mm/mm)

M_O ：管内水重による最大曲げモーメント (N・mm/mm)

M_H ：側面水平荷重による最大曲げモーメント (N・mm/mm)

a ：引張強さと曲げ強さとの比

$$a = \sigma_t / \sigma_a$$

σ_t ：引張強さ (N/mm²)

σ_a ：曲げ強さ (N/mm²)

σ_u ：許容引張強さ (= $\sigma_t/3$) (N/mm²)

5-4-2. 設計たわみ率による設計

$$V = \frac{\Delta X}{2r} \times 100 \leq \text{設計たわみ率} \dots\dots\dots (式 5-4)$$

ここに、 ΔX ：水平たわみ量

$$\Delta X = \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 + \Delta X_4$$

ΔX_1 ：鉛直荷重によるたわみ量 (mm)

ΔX_2 ：活荷重によるたわみ量 (mm)

ΔX_3 ：管体自重によるたわみ量 (mm)

ΔX_4 ：管内水重によるたわみ量 (mm)

V ：たわみ率

設計たわみ率を表5-1に示す。

表5-1 設計たわみ率 (%)

締固めの程度	締固めⅠ	締固めⅡ
許容たわみ率 (%)	5	5
たわみ率のバラツキ (%)	± 2 (± 1)	± 1
設計たわみ率 (%)	3 (4)	4

参考 圧力管の施工状況



塗布状況



反転施工風景



反転中



硬化養生後管口

【参考図書】

- 1) 「水道施設設計指針」 2012年 (社)日本水道協会
- 2) 「土地改良事業計画設計基準設計パイプライン」 基準書・技術書 平成21年3月農林水産省構造改善局
- 3) 「ASTM F1216-03」
ASTM : American Society for Testing and Materials
F1216 : Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by The Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube
- 4) JSWAS K-1 平成22年3月 (社)日本下水道協会
- 5) 「季刊 管路更生 No.3」 2007年7月 日本管路更生工法品質確保協会
- 6) 「管更生の設計手法2002」 2002年3月 管渠更生工法連絡会 (現日本管路更生工法品質確保協会)
- 7) 「季刊 管路更生 No.4」 2007年10月 日本管路更生工法品質確保協会
- 8) 「季刊 管路更生 No.6」 2008年1月 日本管路更生工法品質確保協会