

■ウォーターハンマについて

管路において、流速の急激な変化により、管内圧力が上昇または降下する現象をウォーターハンマ(水撃)という。

ポンプの送水管では、停電によりポンプへの動力が急断されたときやポンプの急起動、弁の急閉または急開などの場合に起こる。ウォーターハンマによる圧力上昇または圧力降下の大きさは、流速の変化の度合(ポンプの停止または起動の方法、弁の閉または開に要する時間)管路の状態、流速、ポンプの特性などにより異なり、その対策方法も一定でない。

《ポンプの動力急断後の現象》

●第一段階

ポンプは停電後慣性エネルギーで回るが、これは水を送るのに必要な運動エネルギーとして急速に消費され、すぐに回転が減じ、ポンプの吐出圧力も吐出量もそれに伴って減少する。一方、吐出送水管内の水は慣性力で送水を継続しようとする。そのため、ポンプの出口付近では圧力降下を起こし、押し上げられる力を失った水は次第に減速し、ポンプは正転しながらも管中の水はいったん停止する。

●第二段階

いったん停止した水はつぎの瞬間から逆流を始め、正回転中の羽根車が逆流の抵抗となり、このためポンプの吐出口で圧力上昇が起こり始める。ポンプの吐出口にチェック弁(逆止弁)がある場合は水が逆流しはじめると弁がすぐに閉じるので、吐出送水管ではその瞬間から圧力上昇が起こる。ポンプは慣性エネルギーを消失し、遂にいったん停止する。

1. ウォータハンマによる被害

- (1) ウォータハンマ上昇圧により、ポンプ、弁、管路などが破損される(災害補償問題が起こることがある)。
- (2) 圧力降下により管路がつぶれる。
- (3) 圧力降下により管路のある点の負圧が水の蒸気圧以下になると、管内の水がその点で分離し空洞部ができる(水柱分離)。この空洞部がふたたび水で満たされるときに異常に高い衝撃圧が起こり、管を破損する。

2. ウォータハンマの軽減方法

○負圧(水柱分離)発生防止方法

- (1) ポンプにフライホイールをつける。
第一段階でのポンプの慣性を増し、吐出し量の急減を防ぐ。
- (2) サージタンク(調圧水槽)を設ける。
送水管路をサージタンクにより分離する。ポンプ出口において発生した圧力波はサージタンクの自由表面で反射するので、ポンプ系のウォーターハンマはポンプからサージタンクまでを考えればよい。また、圧力が低下すればタンクから水を補給し負圧発生を防ぐ。
- (3) エアチャンバーを設ける。
ポンプ吐出口付近に空気槽を設け、第一段階でのポンプの吐出し量の急減による圧力降下が軽減できるように空気槽から水または空気を送り出す。
- (4) 管内流速を低くする。

3. 簡易計算法(パーマキアンチャートによる方法)

3-1 必要資料

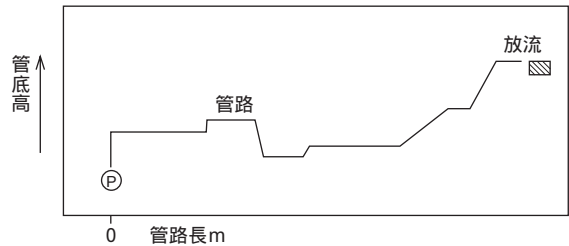
ポンプ仕様

	記号	数 値	備 考
出 力 (kW)			
周波数 (Hz)			
実揚程 (m)	Ha		
損失水頭 (m)			
全揚程 (m)	Ht		
吐出し量(m ³ /min)	Q ₀		ポンプ効率 η _P =
回転速度(min ⁻¹)	N		
羽根車No.			
ポンプ台数	n		

Q₀ = ポンプ 1 台当りの吐出し量 × 台数

管路状態

- a) 管路全長 L : m
 b) 管径 D : mm
 c) 管路プロフィール



各係数

- k : 水の体積弾性率 MPa
 E : 管材料の縦弾性係数 MPa
 t : 管の肉厚 mm
 g : 重力加速度 9.8m/s²
- k/E値
- | | |
|----------|-------|
| 鋼管 | 0.01 |
| ダクタイル鋳鉄管 | 0.013 |
| 鋳鉄管 | 0.02 |
| ヒューム管 | 0.1 |

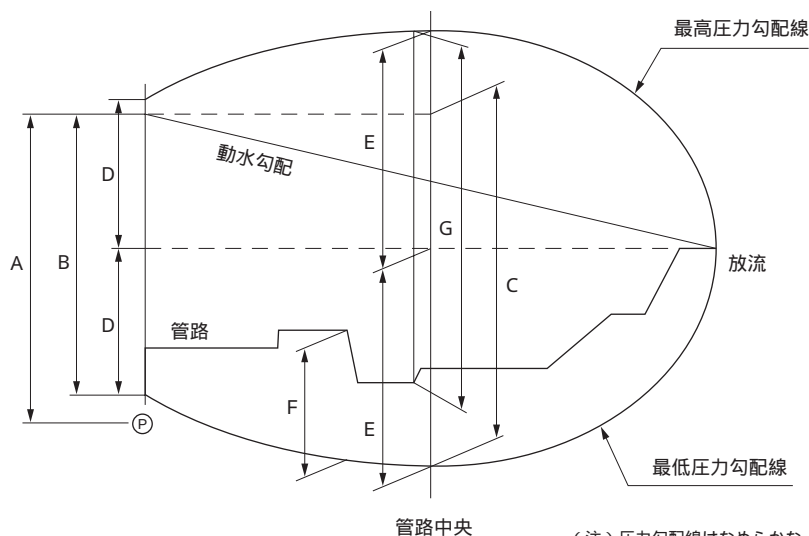
3-2 計算式

	数 値	計算式
GD ² (kg・m ²)ポンプ1台当り]		(一覽表参照)
慣性係数 k		$k = \frac{1.79 \times 10^6 \times Ht \times Q_0}{60 \times \eta_P \times GD^2 \times N^2 \times n}$
損失百分率 R(%)		$R = \frac{Ht - Ha}{Ht} \times 100$
圧力伝播速度 a(m/s)		$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + k/E \cdot D/t}}$
管内流速 V(m/s)		$V = \frac{Q_0}{60 \times \frac{\pi}{4} \times D^2}$
管路定数 2ρ		$2\rho = \frac{a \times V}{g \times Ht}$
サージ係数 S		$S = k \frac{2L}{a}$
圧力 降下	ポンプ位置(m)	Ht ×
	管路中央(m)	Ht ×
		パーマキアンチャート による

3 - 3 ウォータハンマ検討法

計算と作図

3 - 2 項の表に数値を記入し、3 - 1 項 で用意した管路プロフィールに下図のように圧力降下を記入する。



○記号説明

A : 全揚程

B : ポンプ位置での圧力降下

C : 管路中央での圧力降下

D : 放流点の管底高と、ポンプ位置での最低圧力との差

E : 放流点の管底高と、管路中央での最低圧力との差

F : 配管に発生する最大負圧(負圧が - 7mAq以内であれば、水柱分離は発生しない)

G : 管路は最高圧力に耐えられるか

(管種の衝撃水圧以内であれば耐えられる。衝撃水圧が不明である場合は試験水圧の $1/2$ 以内とする)

注) 最高圧力は管路と最高圧力勾配線の一番差の大きいところ

検討

i) 管路は最高圧力に耐え得るか。

ii) 水柱分離は起きないか。

を検討する。

対策

以上の計算により、水柱分離を起こす可能性がある場合には、弊社フライホイール付水中ポンプを採用し、再び、 の手順で検討する。

4 検討例

4 - 1 必要資料

- ポンプ型式：CN200-P(15kW4P) 50Hz 3台(内 1 台予備の 2 台並列運転)
- 全揚程：17.1m ○実揚程：9.72m ○吐出し量：6.5m³/min(2 台計)
- 配管径：350mm ○配管材質：ダクタイル鋳鉄管 1 種(衝撃水圧0.55MPa)

以上の条件により、計算を行う。

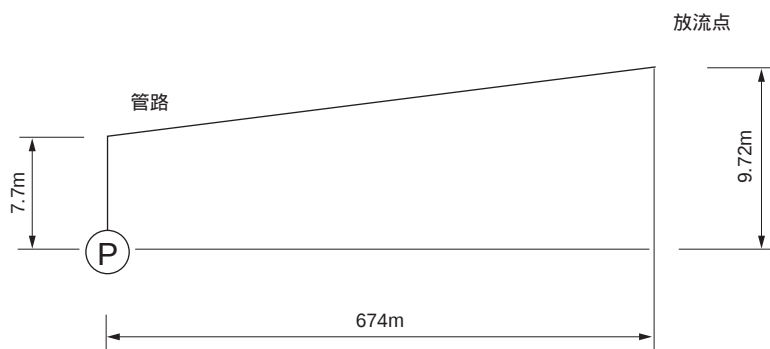
ポンプ仕様

	記号	数 値	備 考
出力 (kW)		15	
周波数 (Hz)		50	
実揚程 (m)	Ha	9.72	
損失水頭 (m)		7.38	
全揚程 (m)	Ht	17.1	
吐出し量(m ³ / min)	Q ₀	6.5	$\eta_P : 0.72$
回転速度(min ⁻¹)	N	1500	
羽根車No.		215	
ポンプ台数	n	2	(予備を除く)

管路状態

管路全長L：674m

管径 D：350mm



各係数

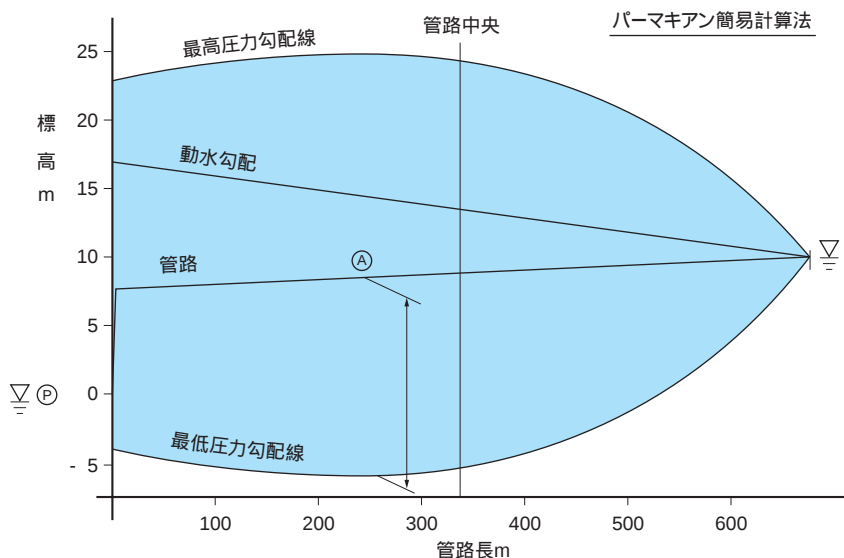
k/E：0.013(ダクタイル鋳鉄管 1 種)

t：7.5mm

g：9.8m / s²

4 - 2 フライホイール無しのポンプでの計算例 計算と作図

		数 値	計算式	
GD ² (kg・m ²) [ポンプ1台当り]		0.9		
慣性係数	k	1.14	$k = \frac{1.79 \times 10^6 \times Ht \times Q_0}{60 \times \eta_P \times GD^2 \times N^2 \times n}$	
損失百分率	R (%)	43.2	$R = \frac{Ht - Ha}{Ht} \times 100$	
圧力伝播速度	a (m / s)	1137	$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + k/E \cdot D/t}}$	
管内流速	V (m / s)	1.23	$V = \frac{Q_0}{60 \times \frac{\pi}{4} \times D^2}$	
管路定数	2 ρ	8.35	$2 \rho = \frac{a \times V}{g \times Ht}$	
サージ係数	S	1.35	$S = k \frac{2L}{a}$	
圧力 降下	ポンプ位置 (m)	21.03	Ht × 1.23	パーマキアンチャート による
	管路中央 (m)	22.23	Ht × 1.30	



検討

- i) 図より最高圧力は約16.5mAq。0.55mPa以下であり安全である。
- ii) 最低圧力はA点で - 14mAqとなり - 7mAqを下まわるので、水柱分離を起こす。

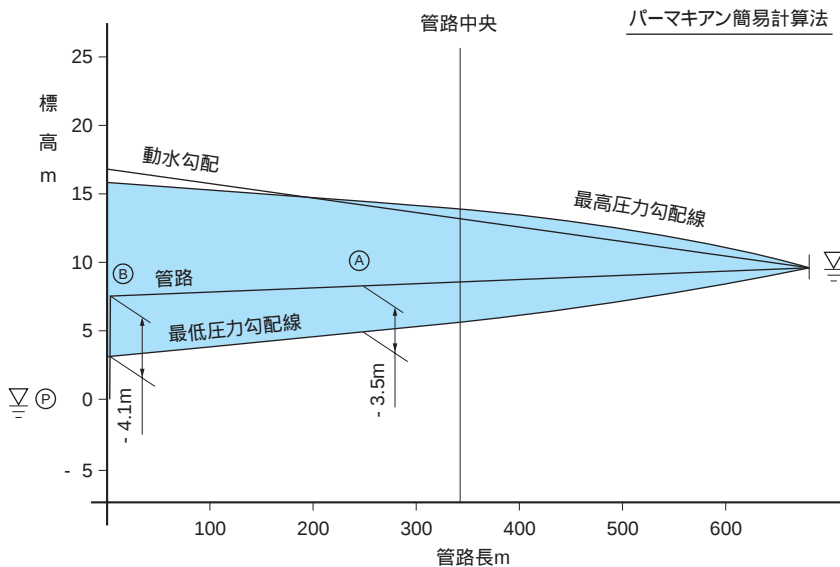
対策：ポンプにフライホイールをつける。

4 - 3 フライホイール付ポンプでの計算例

配管条件、ポンプ仕様は同じ。（GD²のみが変更となる）

計算と作図

		数 値	計算式	
GD ² (kg・m ²) ポンプ1台当り]		13.5	(一覧表参照)	
慣性係数	k	0.08	$k = \frac{1.79 \times 10^6 \times Ht \times Q_0}{60 \times \eta_P \times GD^2 \times N^2 \times \pi}$	
損失百分率	R (%)	43.2	$R = \frac{Ht - Ha}{Ht} \times 100$	
圧力伝播速度	a (m / s)	1137	$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + k/E \cdot D/t}}$	
管内流速	V (m / s)	1.23	$V = \frac{Q_0}{60 \times \frac{\pi}{4} \times D^2}$	
管路定数	2 ρ	8.35	$2 \rho = \frac{a \times V}{g \times Ht}$	
サージ係数 S		0.09	$S = k \frac{2L}{a}$	
圧力 降下	ポンプ位置 (m)	13.85	Ht × 0.81	パーマキアンチャート による
	管路中央 (m)	11.46	Ht × 0.67	



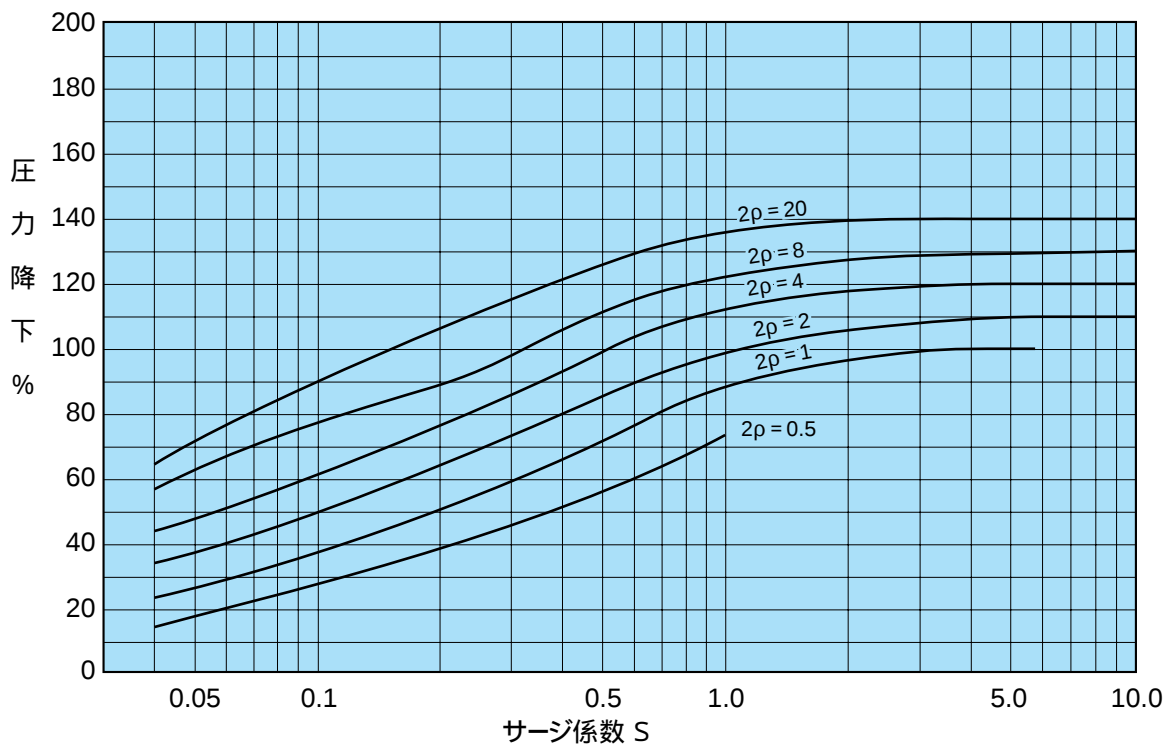
本計算例ではフライホイール付ポンプを採用することで、水柱分離の発生を防止できます。

検討

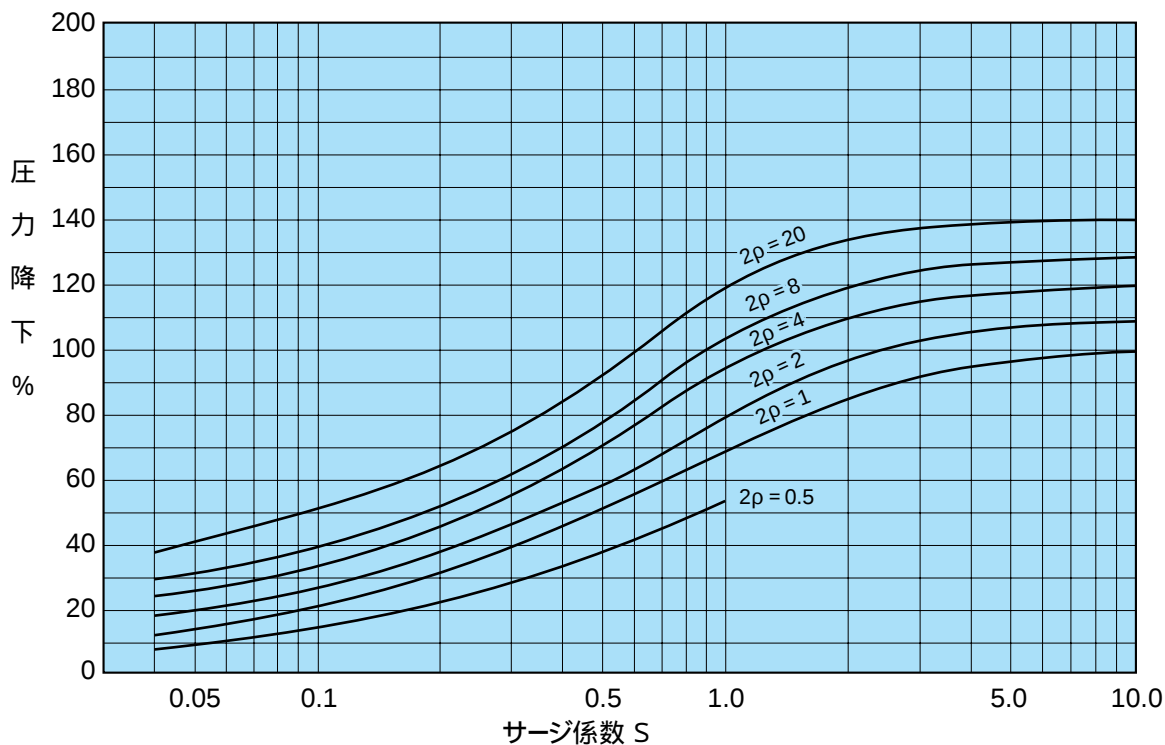
- 図より最高圧力は約8.3mAq。0.55MPa以下であり安全である。
- 最低圧力はA点で - 3.5mAq、B点で - 4.1mAqとなり共に - 7mAq以上であるので水柱分離は発生しない。

■ パーマキアンチャート

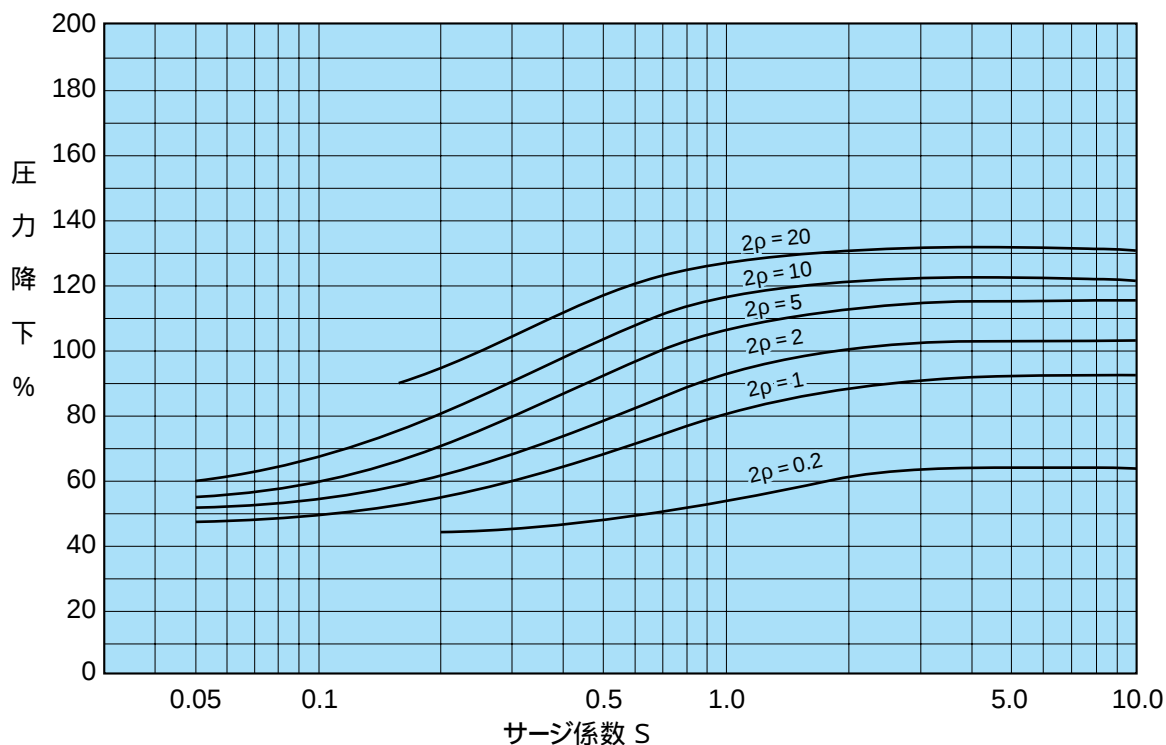
管路損失 (損失百分率) 0% ポンプ位置での圧力降下



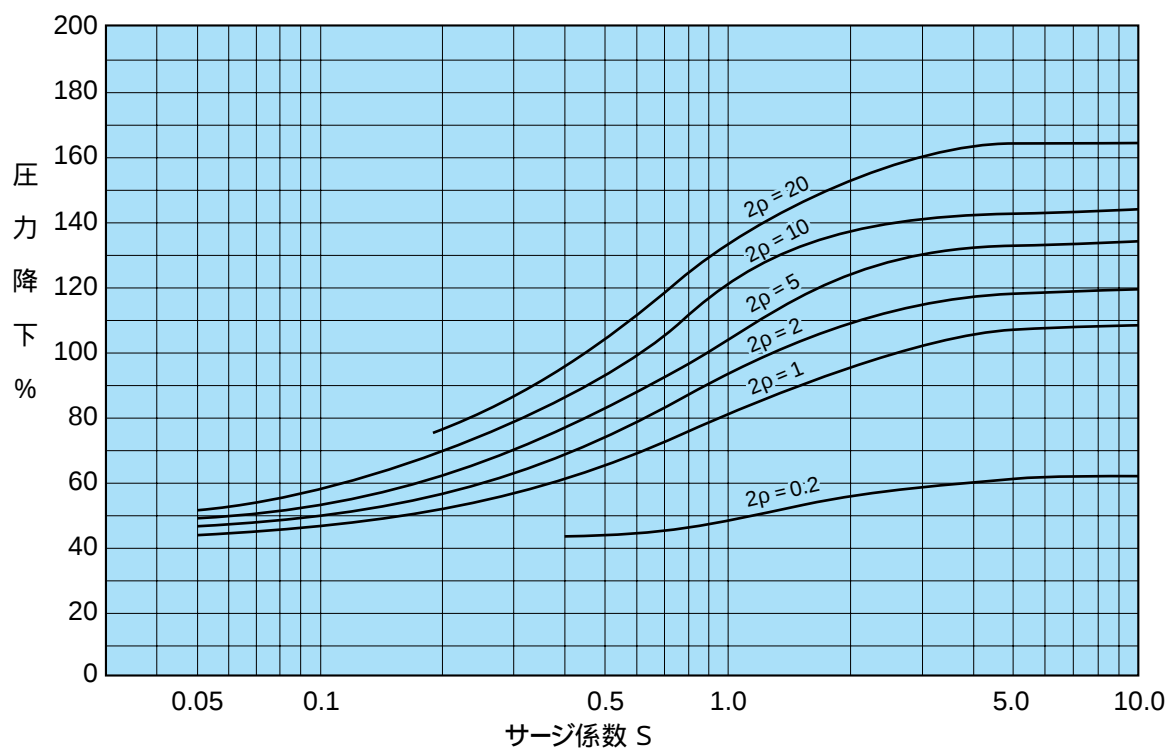
管路損失 (損失百分率) 0% 管路中央位置での圧力降下



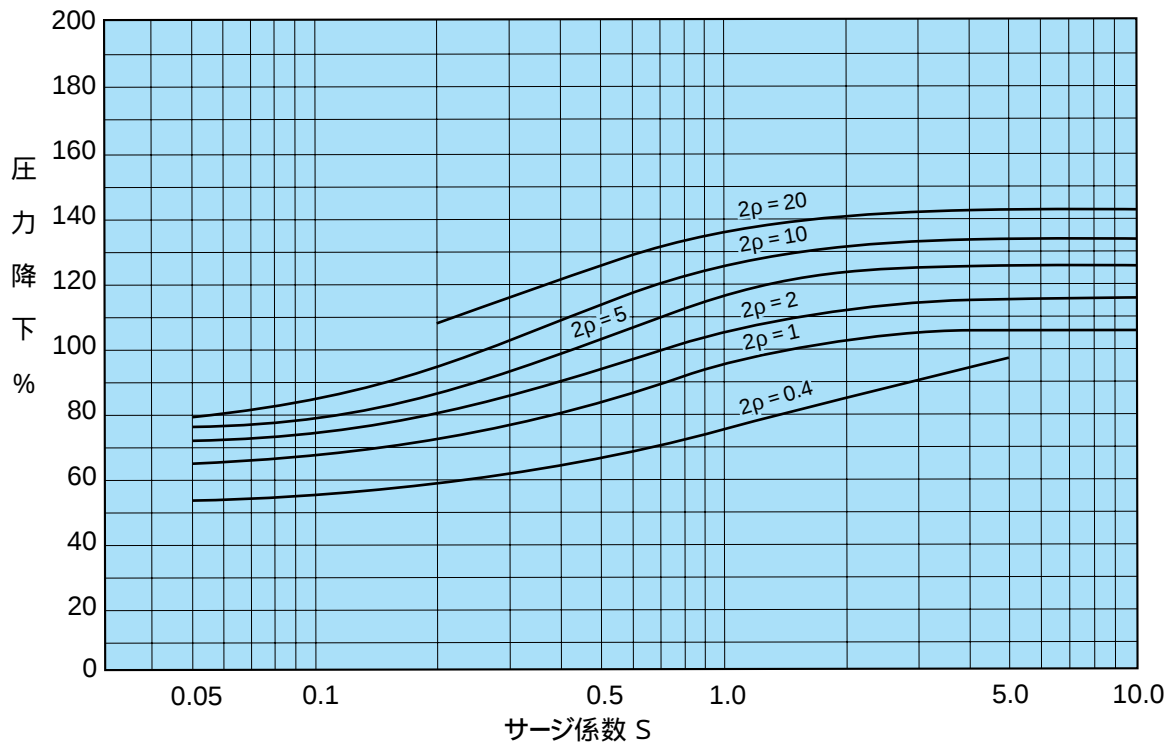
管路損失（損失百分率）30% ポンプ位置での圧力降下



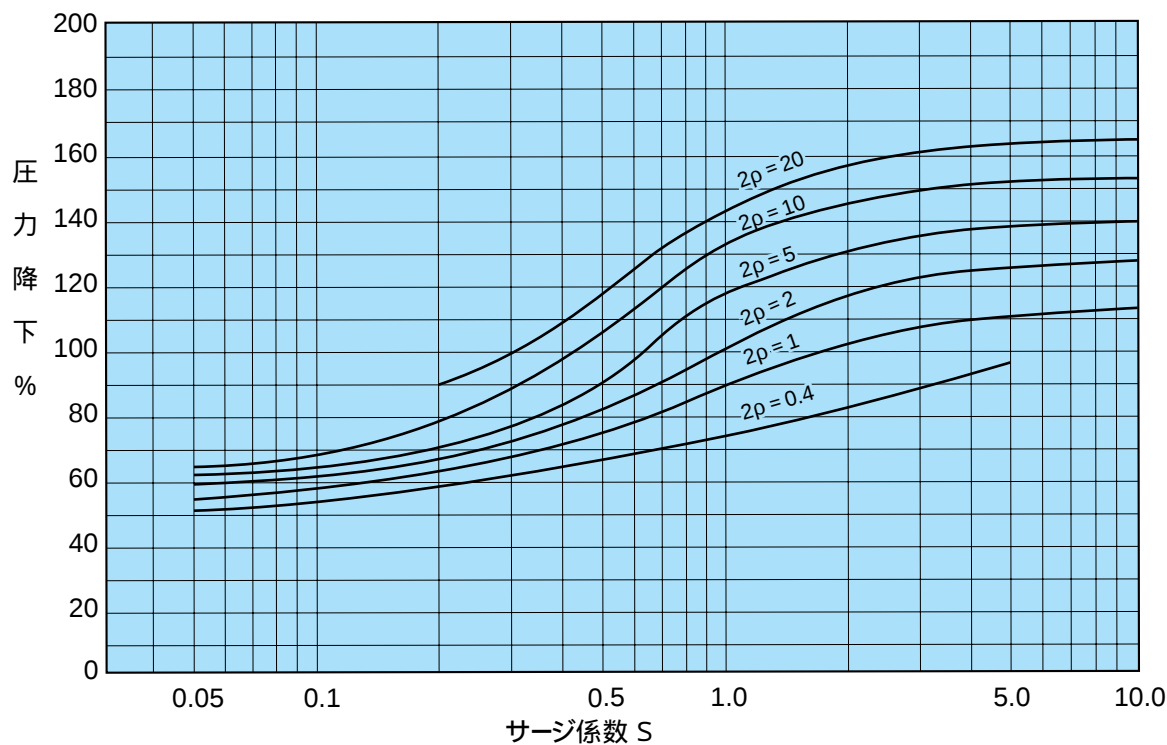
管路損失（損失百分率）30% 管路中央位置での圧力降下



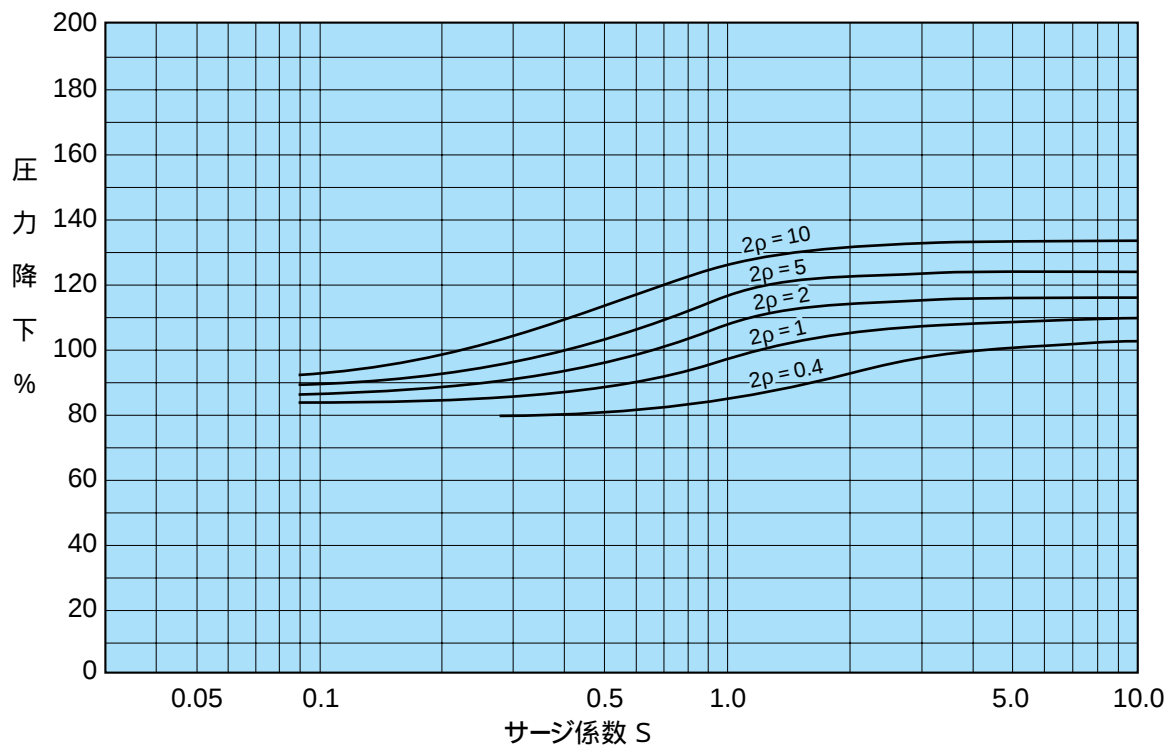
管路損失 (損失百分率) 50% ポンプ位置での圧力降下



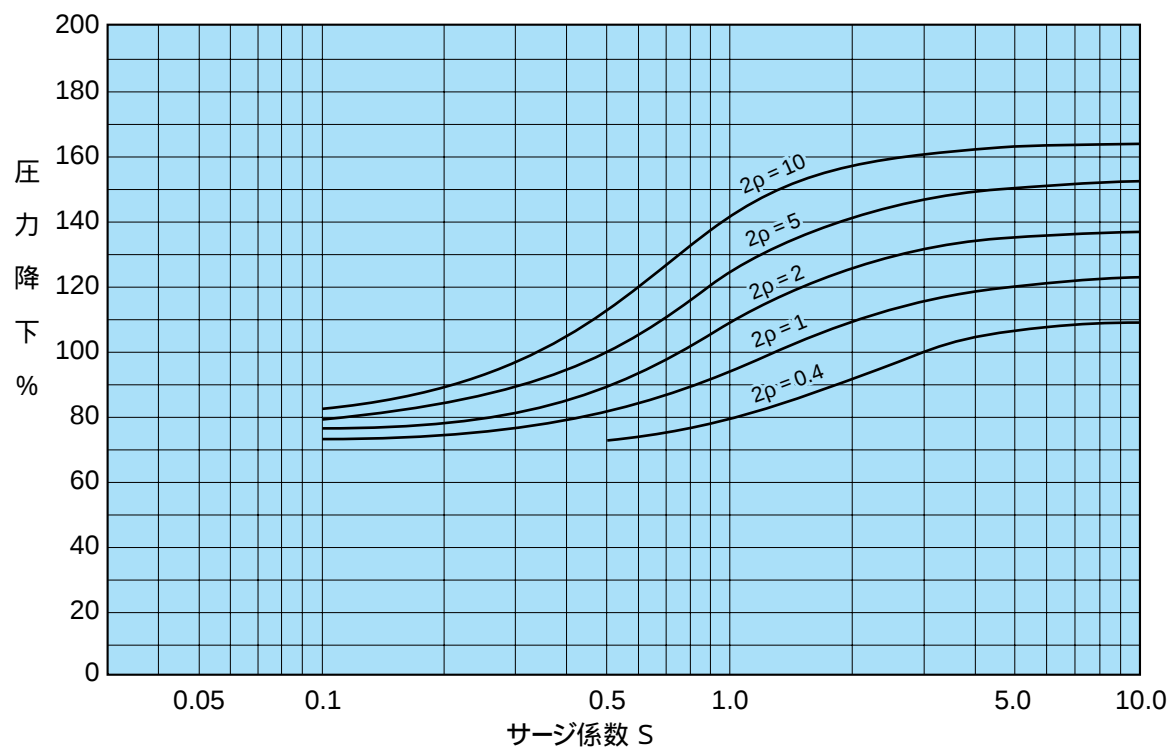
管路損失 (損失百分率) 50% 管路中央位置での圧力降下



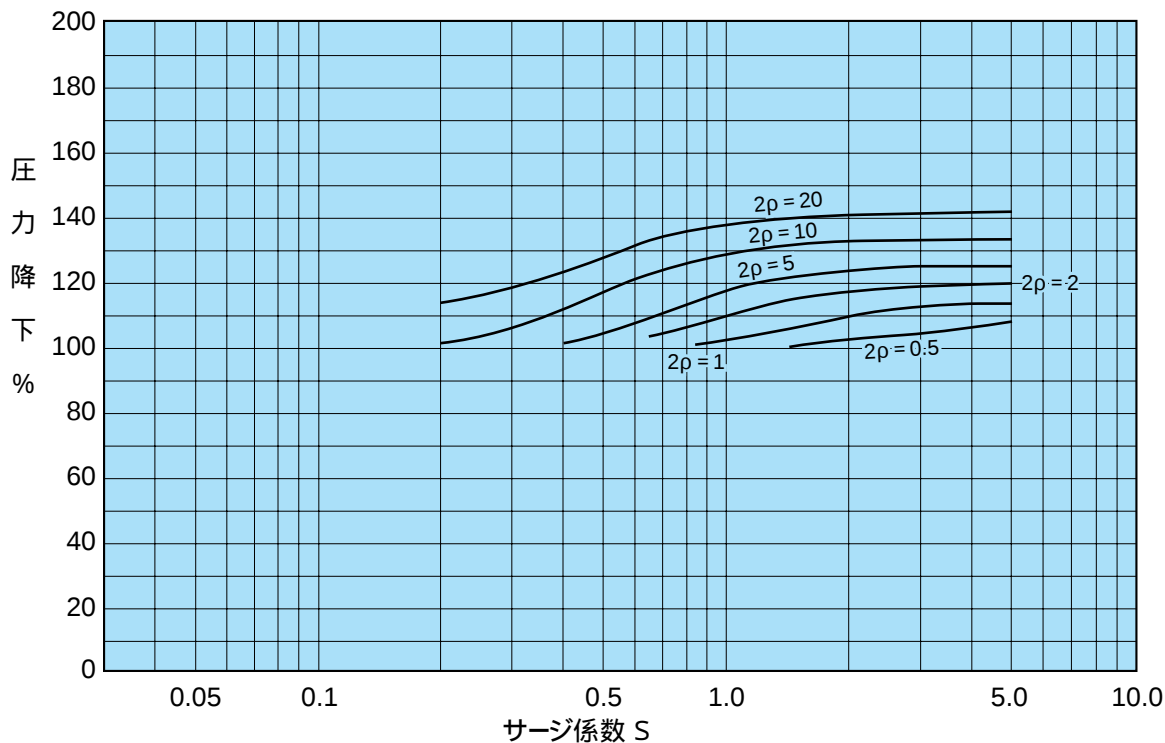
管路損失（損失百分率）70% ポンプ位置での圧力降下



管路損失（損失百分率）70% 管路中央位置での圧力降下



管路損失(損失百分率)100% ポンプ位置での圧力降下



管路損失(損失百分率)100% 管路中央位置での圧力降下

