

中・小規模水道施設の水撃対策

Water Hammer Control on Small or Middle Scale Pumps

堀江俊夫* Toshio Horie

田川幸男* Yukio Tagawa

中・小規模のポンプ設備でも経済的な観点より、その吸込・吐出し配管路がますます長くなり、且つ管路形状も悪いケースが多く、またモートルの小形化が進み回転部分の慣性モーメント(GD^2)も小さくなってきている。そのため、従来あまり問題にならなかった水撃対策について、設備計画時に十分検討しておく必要に迫られている。

特に、汎用ポンプ級の水道用及び農地かんがい用ポンプ設備の計画件数も年々増加しているため、これに携わる技術者も多くなってきている。本稿は、ポンプ設備計画時に留意すべき上記の点について実務的見地から実施例などを通じて平易に述べる。

1 緒言

近年、浄水場より高所の配水池などに送水するポンプ系の管路敷設は、起伏が激しく、且つ長大なものが多くなってきている。このような場合には、水撃により危険とされている水柱分離が発生する可能性がある。

水柱分離対策としては、管内の圧力降下を未然に防ぐ方法を採用することが多く、軸系にはずみ車を設ける、あるいは管路系にサージタンク、ワンウェイ サージタンク、吸・排気弁を設けるなどがある。これらは価格や地理的条件に伴う管路状況などによって使い分けをしなければならない。

中・小規模の汎用ポンプを用いた上水道機場、農地かんがいの機場では、経済的な面から標準化されたはずみ車を用いることが多い。しかし、はずみ車による方法は、管路系によってその効果が十分でなく、また水中ポンプのようにはずみ車を付けられない場合もある。このような場合には、ワンウェイ サージタンクを使用しているのが一般的である。以下、水撃対策を、はずみ車装置とワンウェイ サージタンクとにより行なう場合について、中・小規模のポンプ場設備の面から設備計画上の留意点とその実施例につき述べる。

2 水撃対策

2.1 水撃対策に当たっての留意点

水撃対策を要する場合、計算実務担当者は計算に先立ち汎用ポンプとしての特殊性を配慮し、次の諸点に留意する必要がある。

(1) 運転点の確認

管路縦断面図により、起こり得る最高実揚程と最低実揚程を確認する。最高実揚程と最低実揚程の差が数メートルの場合は、吐出し量の多い最低実揚程における運転点を求め、この点で水撃を試算をする。最高実揚程と最低実揚程との差が十数メートル前後ある場合は、両方の運転点を求め、そのいずれについても検討を行なう。次にポンプの運転点を左右する管路の抵抗は、ポンプの最大運転台数における吐出し量について求め、同時に配管は旧管になった場合を想定する。また、配管系に仕切り弁などの弁がある場合は、全開のままで使用するか否かを確認する。弁を絞って使用する場合にはこの抵抗を考慮しなければならない。

(2) モートルの慣性モーメント(GD^2)の一般的傾向

ポンプを駆動する汎用モートルも、冷却方式や絶縁方式の進歩改良によりかなり小形軽量化されている。このため、回転部分の慣性モーメント(GD^2)もまた小さくなり水撃現象が発生しやすい傾向にある。ちなみに、日立F種モートル「ハイパクト シリーズ(低圧)」の慣性モーメントは従来品の約55%で、水中ポンプはモートルが水没し冷却効果が良いため更に慣性が小さく、陸上の全閉外扇形インダクション モートルの約10%である。

(3) 使用する管種の強度チェック

水撃対策後の圧力降下時の管内許容負圧は約-3 m以内とし、それ以上の負圧にならぬようにする。圧力低下の次に起こる圧力上昇値に対しては、使用する管種、例えば水道用遠心ダクタイル鋳鉄管などでは、安全係数を2.5~3.5以上にとり、管の許容最高圧力以上の上昇圧にならぬよう管種を選定する。ポンプについては吐出し側に逆止め弁を付けて直接上昇圧が加わらぬようにする。

$$\text{水撃時の管の許容最高圧力} \leq \frac{\text{管の試験水圧}}{\text{安全係数}}$$

水撃時、管に加わる圧力上昇値 < 管の許容最高圧力
なお、管路の接合部、支持部の構造、支持物の軟弱の程度など管路の周囲条件により、更に余裕をみた安全係数にする場合もある。なお、硬質塩化ビニル管では上記式の「管の試験水圧」は「瞬間破壊圧」に相当し、安全率は7.0~9.0としている。

(4) ポンプの始動頻度

一般にポンプを運転する場合の始動頻度は、過大な始動電流によるモートルの焼損を防止するため、表1に示す許容始動頻度を参考にしている。同表の値ははずみ車を付けない場合であるため、水撃防止用としてはずみ車を付けるものでは、その慣性モーメントの大小によって更に始動頻度を少なくする必要がある。

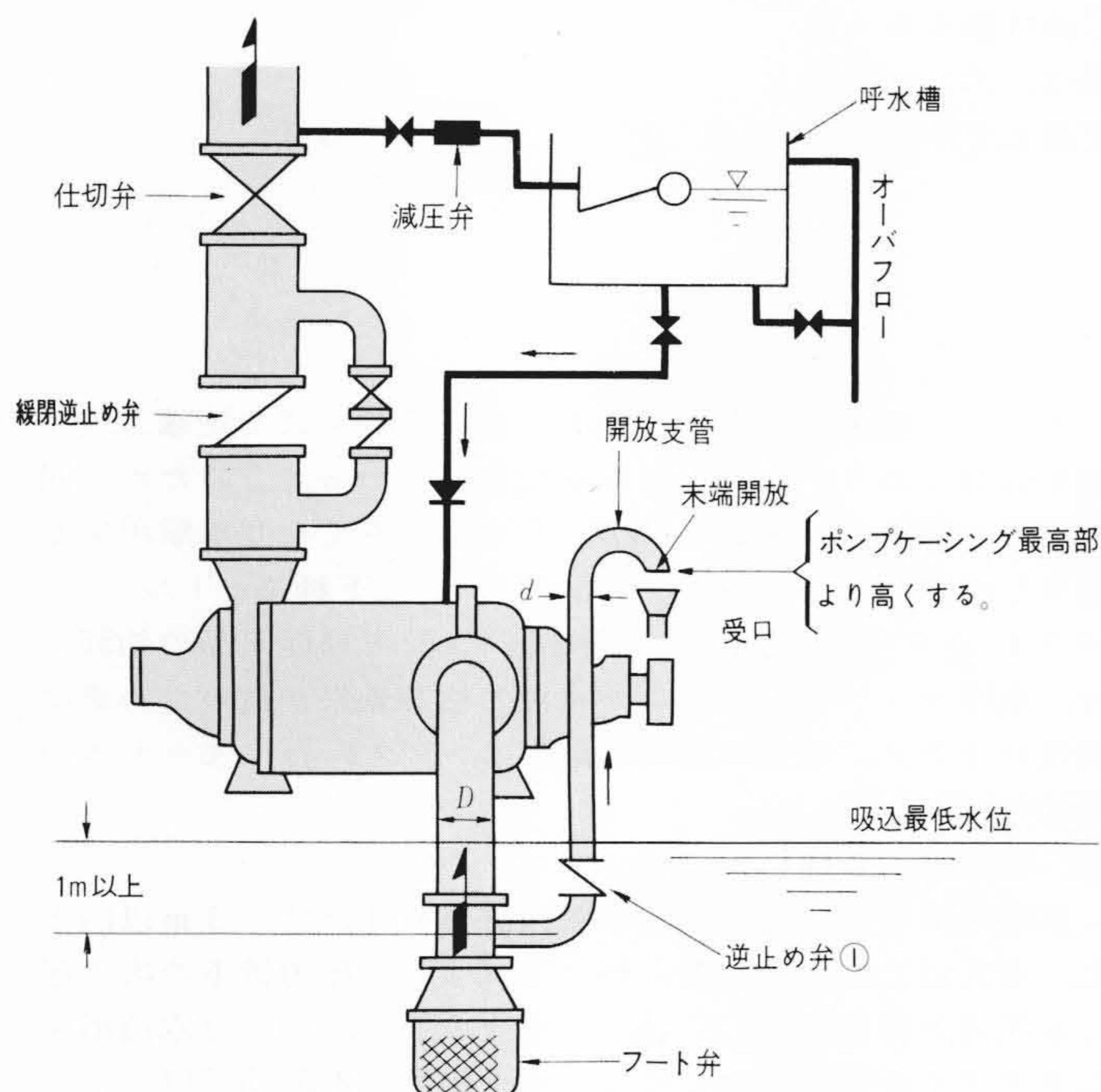
(5) ポンプの満水方法

ポンプの満水は、停止中のポンプを待ち時間なく直ちに始動させるために講じられている方法で、ポンプ口径がほぼ300 mm以下のものでは図1に示すように呼水槽とフート弁を組み合わせたものが多い。このような満水方法にしたポンプ設備に水撃が発生すると、その影響がフート弁にまで及ぶ場合がある。このため、図1に示すようにフート弁の上部短管から

* 日立製作所習志野工場

表1 はずみ車をもたない一般汎用ポンプの始動頻度 はずみ車をもたない一般の汎用ポンプの許容始動頻度は表の値を参考値としている。はずみ車をもつものでは、その慣性モーメント(GD^2)の大小で更に始動頻度が少なくなる。

ポンプ原動機容量(kW)	始 動 頻 度
7.5以下	1 時間に 6 回以下
11~22	同 4 回以下
37以上	同 3 回以下



注：Dは、ポンプ吸込管内径
dは、開放支管内径 $d = \frac{3}{8} D$ とする。

図1 ポンプ満水方法と水撃に対するポンプ保護法 汎用ポンプの満水方法で、フート弁と呼水槽を組み合わせた代表的なものである。この満水方法で、水撃が発生するおそれがある場合、フート弁の上部に図のような、開放支管を設けてポンプ、フート弁を保護する。

分岐管を煙突状に、ポンプ本体最高部以上に立て、水撃を逃す方策を講ずる必要がある。

(6) ポンプ流入側管路の水撃のチェック

近時、吐出し管路が長く起伏の多い形状に加え、ポンプ流入側管路も長く、且つ押込条件の、いわゆる昇圧ポンプに属する管路系がかなり多く見受けられる。この場合、吐出し側だけでなく流入側にも水撃が発生することが予測される。しかし、この種の計算は複雑で時間がかかる。このため、昇圧ポンプの管路系のものでは管摩擦を考慮に入れた特性曲線法⁽¹⁾を用い、電子計算機で求めたほうが確実に計算時間も短く、精度の良い予測計算結果が得られる。

(7) ワンウェイ サージタンクの設置条件

ワンウェイ サージタンクを設置する場合は、設置予定地と主送・配水管との地理的条件を十分吟味して、タンクと主送・配水管との接続配管が5m程度、長くても7~8m以内に抑え、管路抵抗値が少なくなるようにする。

特に接続配管には空気だまりがないよう管路形状、管内径及びサージタンクの位置について留意することが必要である。

汎用ポンプ級の場合、サージタンクの容積が割合小さく、タンク内の水位変化もわずかである。このため、管路の長さ及び抵抗などが不確定であると、計算結果の誤差が大きくなるため十分注意する必要がある。

2.2 計算方法及び検討手順

一般に行なわれている水撃計算及び対策案について述べる。

(1) パーマキアンの簡易計算図表による近似計算⁽²⁾

水撃対策を要するポンプ設備があった場合、前述の留意点を踏まえたうえでパーマキアンの簡易計算図表などの実績をもとにして近似計算を行なう。この結果、次に述べる計算条件(a)~(d)を満足し、はずみ車で対策ができればこの計算結果をもって最終結論とする。なぜならば、本計算だけで実用的に十分精度のある結果が得られるからである。

この近似計算は、ポンプ吐出し口、管路の中間点における圧力の降下・上昇などをパーマキアンの簡易計算図表によって求める方法である。図2にその図表の例を示す。同図に、ポンプ系から求めたサージ係数 $K_1 \cdot \frac{2L}{a}$ 及び管路常数 2ρ の値を与えると各部の圧力降下などを知ることができる。パーマキアンの図表は、次に述べる条件下で計算した結果をもとに作成されたものである。従って、本図表を使用する場合には次の点に留意しなければならない。

- (a) 管路の摩擦損失は無視している。
- (b) ポンプ吐出し側になんらの弁をもっていない、弁があっても弁は全開のままである。
- (c) 吸込管は短く、吐出し管は断面積の大きな貯水池、あるいは普通形のサージタンクに達している。
- (d) 1台のポンプ、あるいは同一仕様のポンプが同時に駆動力を失った場合。

また、この簡易計算によるサージ係数、管路常数は次によって求められる。

$$\text{サージ係数: } S = K_1 \cdot \frac{2L}{a} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{管路常数: } 2\rho = \frac{a}{g} \cdot \frac{V_0}{H_0} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{慣性係数: } K_1 = 2.98 \times 10^4 \frac{H_0 \cdot Q_0}{GD^2 \eta_0 N_0^2} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{圧力波の伝わり速度: } a = \frac{1,425}{\sqrt{1 + \frac{k}{E} \cdot \frac{D}{t}}} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 a : 圧力波伝わり速度(m/s)

g : 重力加速度(9.8m/s²)

V₀ : 正常運転時の管路の平均流速(m/s)

H₀ : 正常運転時のポンプの全揚程(m)

L : 管路の全長(m)

Q₀ : 正常運転時のポンプ吐出し量(m³/min)

η₀ : 正常運転時のポンプ効率(%) (但し、小数表示)

N₀ : 正常運転時のポンプ回転数(rpm)

GD² : ポンプ、モートルを含む回転部の慣性モーメント(kg-m²)

k : 水の体積弾性率(kg/m²)

E : 管材料の縦弾性率(kg/m²)

k/E : 鋳鉄管の場合は0.02、鋼管の場合は0.01、ヒューム管の場合は0.1、硬質塩化ビニル管は0.69

D : 管の内径(m)

t : 管の肉厚(m)

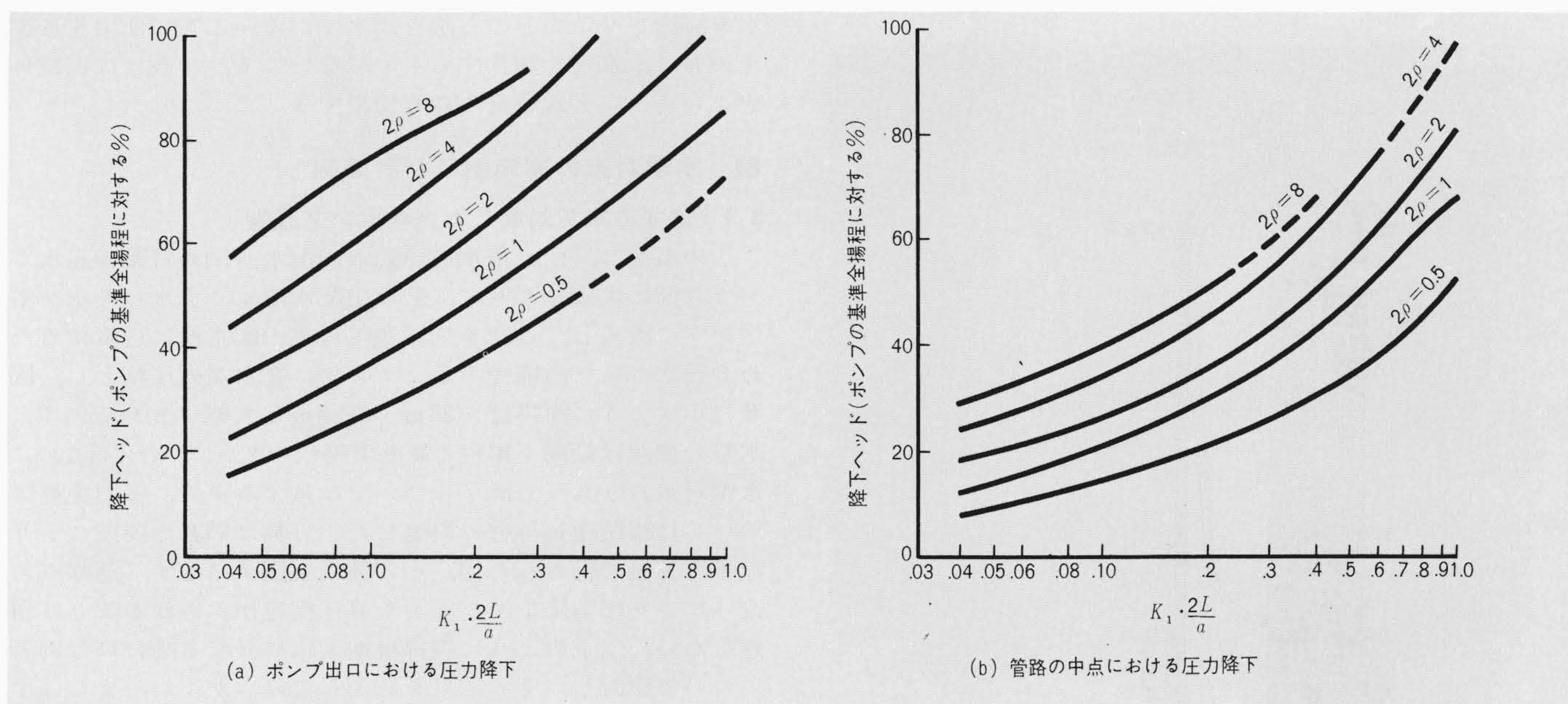


図2 パーマキアンの図表 サージ係数 $K_1 \cdot \frac{2L}{a}$ と管路常数 2ρ をパラメータとし、ポンプ出口や管路中点における降下ヘッドを求めることができる。

(2) 特性曲線法の解析プログラムによる電子計算機での計算

吸込、又は吐出し管路が数キロメートルと長く、管路の摩擦損失を無視できない場合、あるいはサージタンクが複数個取り付けられ計算が複雑で手数のかかるものでは、特性曲線法による水撃解析をプログラム化し、電子計算機により計算する。

特性曲線法は、管摩擦を考慮した場合の水撃の偏微分方程式を、特性曲線を求めることにより常微分方程式に変形して数値計算を行なう方法であって、その計算精度は高い。

2.3 各種対策案の検討⁽³⁾

水撃対策としては、水柱分離の発生を防止する圧力降下対策と圧力上昇防止対策の2種類がある。圧力低下の防止法としては、ポンプ回転部の慣性モーメントを増してやるものと、直接圧力水を管路に補給してやるものとがある。前者ははずみ車、後者はサージタンク、空気槽及びワンウェイ サージタンクがある。しかし、汎用ポンプ級の中・小規模のポンプ場では、ほとんどははずみ車で対策を施している。慣性モーメントの小さいものは、ポンプとモートルを直結している継手部に慣性モーメントを増してやる方法もある。更に慣性モーメントが大きいと、図3に示すようにポンプとモートルの間にははずみ車装置を別置する。

他の圧力降下の防止策としてサージタンクがあるが、ポンプ運転中、タンク内の上水面は管路の動水こう配線に等しい水位となる。このため、タンクの高さが数十メートル以上にもなる建設上の難点があるため、この方法を適用することはほとんどない。

空気槽は圧縮空気槽をもった水槽を吐出し管路に接続し、停電時圧縮された空気の膨張により圧力水を補給してやる方法である。この方法には、圧縮空気が水に溶解込むため圧縮空気補給装置を必要とするという問題点がある。但し、図4に示すように窒素ガスをゴム袋内に封入した一種の小容量の空気槽がある。これは、圧力降下の防止に役立つが極めて小形なので、高層ビルなどの給水ポンプの始動・停止時の圧力上昇の緩和や、管路の脈動防止などに使用して有効である。

圧力上昇の防止策としては、大形ポンプの場合、油圧によ

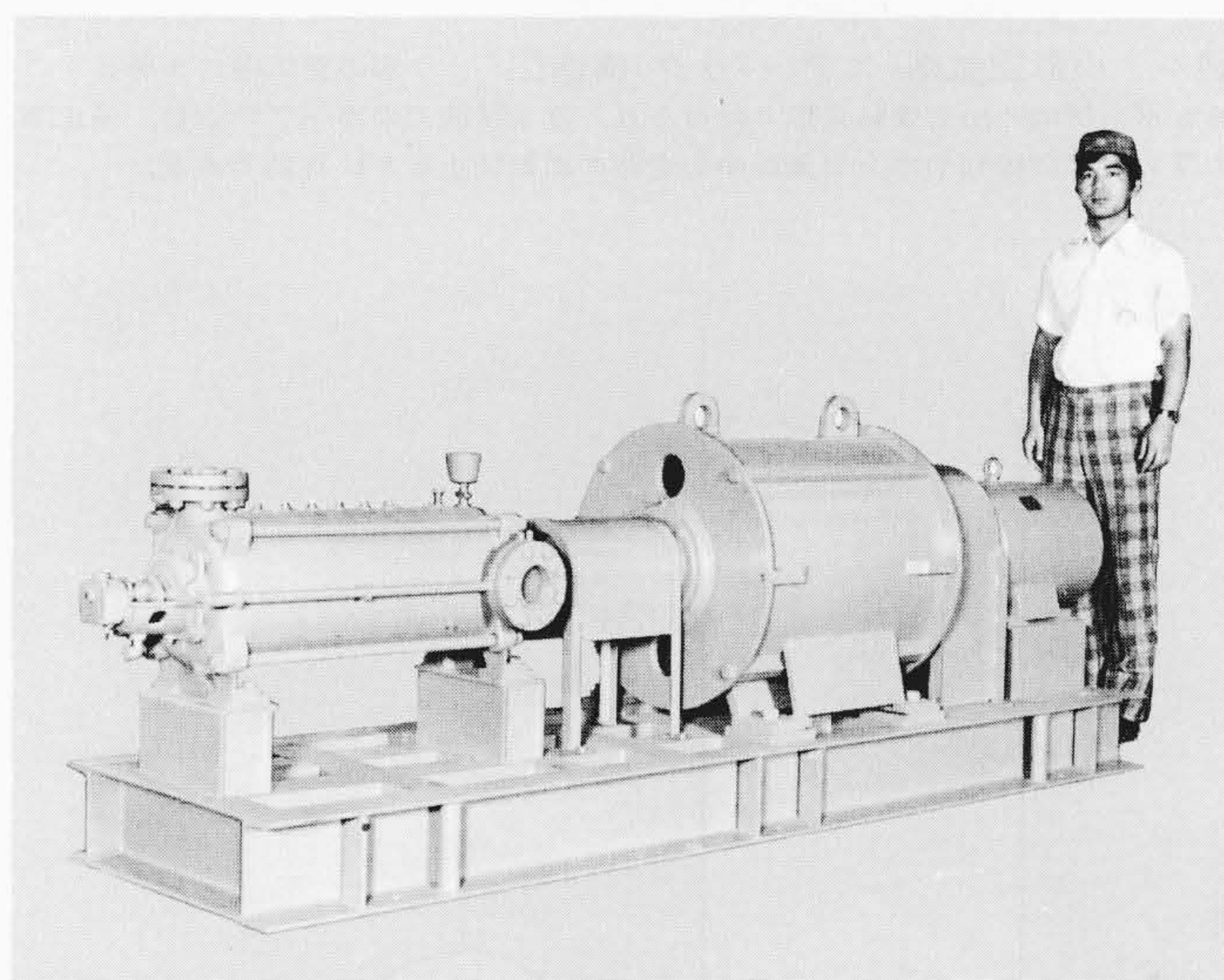


図3 はずみ車付ポンプ 慣性性能(GD^2)の小さいものは、ポンプとモートルを直結している継手部分で GD^2 を増してやるが、更に大きな GD^2 を必要とするものは、本図のようにポンプとモートルの間にはずみ車装置を別置する。

るニードル弁、コーン弁、あるいは緩閉逆止め弁を使用している。しかし、汎用ポンプ級のものには急閉逆止め弁を使用するのが一般的である。急閉逆止め弁にはスモレンスキー逆止め弁、無水撃逆止め弁及びウエイト付逆止め弁などがある。これらの急閉逆止め弁は、緩閉逆止め弁のように圧力上昇を緩和、減少させる作用はないが、逆止め弁の閉じ遅れによる圧力上昇を減少させる効果がある。スモレンスキー逆止め弁は、ばねの力を利用しているので抵抗損失は大であるが価格は安い。無水撃逆止め弁は開閉するスイング弁板裏面を半球形に近い形状にし、閉鎖時の閉鎖遅れの原因になる弁板裏面の真空を生じさせないようにしているものである。これは、スモレンスキー逆止め弁とほぼ同じ機能を持ち抵抗損失も少ないが高価である。特に圧力上昇値の高いものについては緩閉逆止め弁を用いることがある。

2.4 ワンウェイ サージタンク

ワンウェイ サージタンクは、図5に示すように満水した水

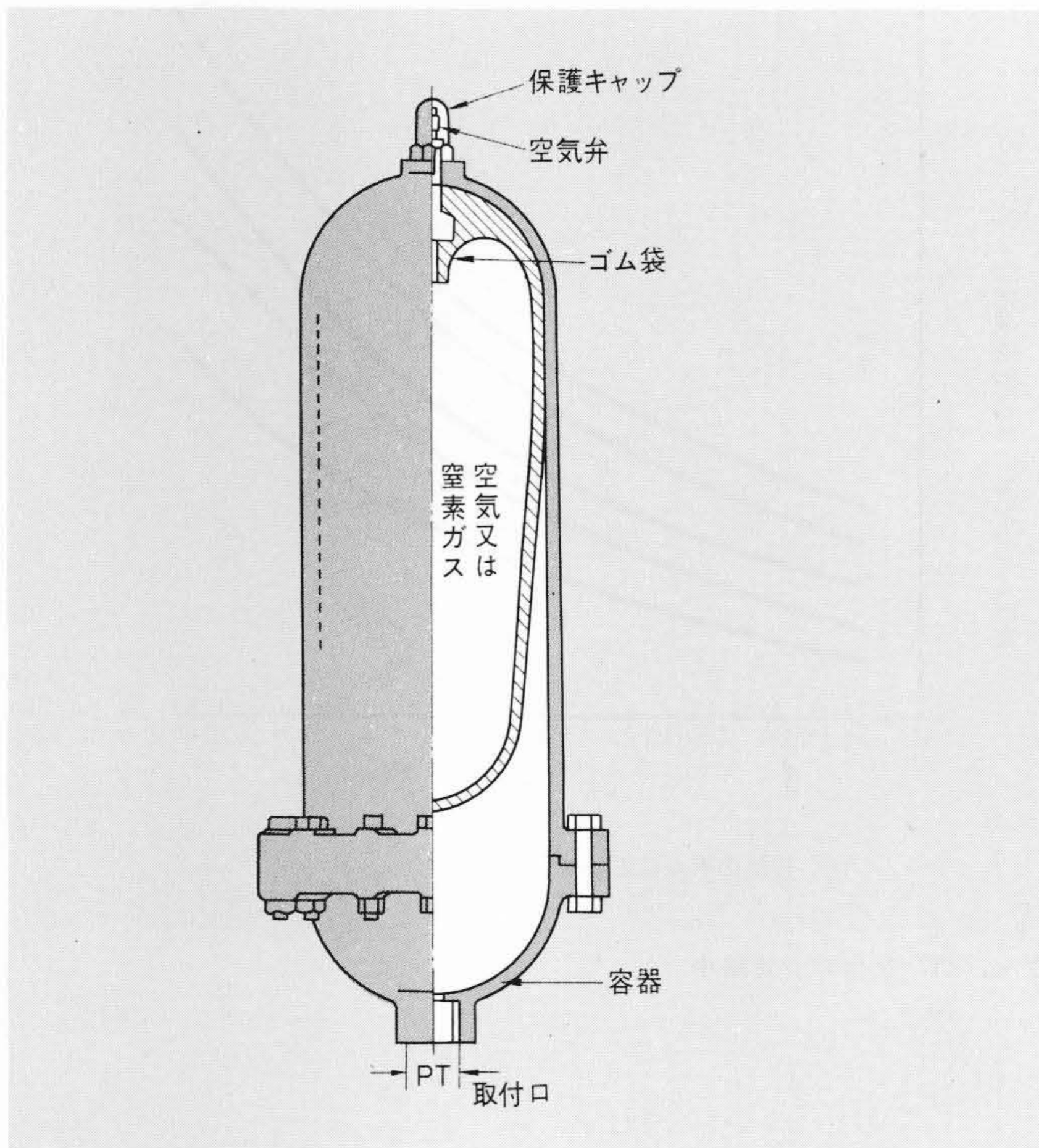


図4 小形空気槽(エアバック)構造図 小形の空気槽は高層ビルの給水ポンプの吐出し管路に取り付けられ、定常状態でのポンプの始動、停止時の圧力上昇の緩和やポンプ運転中の管路の脈動防止などに有効である。

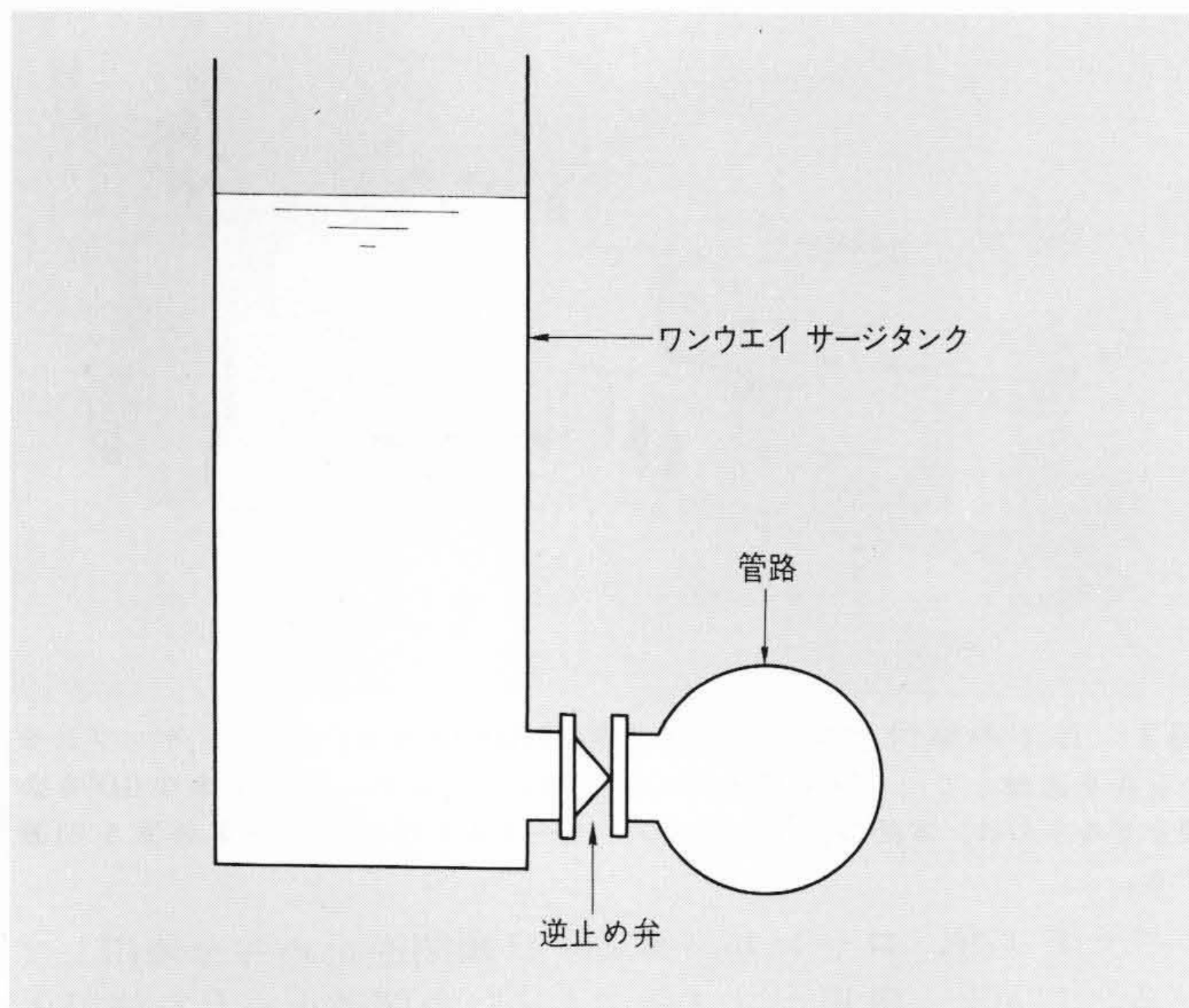


図5 ワンウェイサージタンクの機能図 タンク接続部の管路内圧力が、タンクの水位より低くなると逆止め弁が開き、タンクから管路に水が補給され管路の圧力が更に低下することを防止する作用をする。

槽を逆止め弁を介して管路に取り付けたものである。サージタンク接続部の管路内圧力がタンクの水位より低くなると、逆止め弁が開いてタンクから管路に水が補給され、管路の圧力が更に低下することを防止する作用をもち、数個のタンクを使用する場合がある。このサージタンクは、普通形サージタンクに比べ構造はやや複雑であるが、高さは低くて済み、一般に普通形サージタンクより設備費が安い。ポンプ運転中、タンク内の水は静止しているので、水道の場合そのまま放置しておくと死水となり、非衛生的で且つ寒冷地では凍結のおそれもあるため別に補給水装置を付ける。一般には主管路より小配管でタンク内に導水し、別にタンク内上部より少量の

水を溢流させるなどの方法を講じている。ここで使用する逆止め弁は、水撃を防止するものでないので、一般には抵抗の少ないスイング式逆止め弁を使用する。

3 水撃対策の実施例及び計画例

3.1 はずみ車で対策した送水ポンプ設備

この事例は、仙台市水道局釣取山配水所納め青葉山送水ポンプ設備に実施した例で、釣取山配水池より分水した水を本ポンプに流入し、これを加圧して青葉山配水池に送水するための送水ポンプ設備である。ポンプは2台並列運転とし、図6に示すように実揚程が23m、35.5mと大幅に変わるので、水撃の検討は最高実揚程と最低実揚程の2点について行ない、水撃対策のうち圧力降下についてははずみ車で、圧力上昇については緩閉逆止め弁で対処した。計算は顧客の要望により電子計算機で行なったが、その結果を図7に示す。運転点の違いにより圧力降下及び圧力上昇に相違がみられることに留意したい。以上のように実揚程が大幅に異なる場合には両者について検討し、その結果を確認したほうがよい。またははずみ車で対策した場合、制御上注意しなければならないことは、

- (1) モートルの始動頻度と始動方式の検討
- (2) ポンプ始動及び停止時の吐出し側電動仕切り弁の開閉の取扱い

の2点である。(1)は回転部の慣性モーメント(GD^2)の大小により決まるが(2)はかなり見落とされるので特に留意する必要がある。はずみ車付きポンプの場合、始動時には全閉でよいが停止時は全開のまま電源を断したほうがよい。従来のように、弁の開鎖時間が短すぎると電動仕切り弁を全閉してからポンプを停止するシーケンスでは、全閉前の開度10～0%付近で急激な流量変化が起こり、吐出し管路に圧力降下と圧力上昇が起こることがある。また緩閉逆止め弁を使用している場合は、予弁の緩閉動作をつかさどるピストン、シリンダを有する油圧機構が停電時以外は働かずまれに起こる停電時の動作緩慢を防ぐ意味もある。すなわち、定常運転時でもポンプ停止時、油圧機構を働かせこの部分を円滑な状態に保ち、停電に備えておく必要がある。特に管路が長く全揚程が100m前後の高いものほどその傾向が強い。

3.2 ワンウェイサージタンクで対策した水道用ポンプ

鹿児島市効外、海拔約130mの高地地区に開発された原良団地向け上水道用の機場で中迫ポンプ所前後の管路は、図8に示すように吸込側管路全長4.6km、吐出し側管路全長2.7kmと長大なものでポンプ吸込側は押込状態になっている。

また同図は、電子計算機による水撃計算を行なった結果も示しているが、図示のように、圧力降下量が大きくはずみ車では対策できない。このため、2個のワンウェイサージタンクで対策している。ここで、吸込側管路は複雑になっているので1本の仮想配管径に換算し、また、ポンプの実揚程が大幅に変動するのでポンプの運転点は、図8、9に示す実験②の条件に示す値で計算した。

2個のサージタンクを設置後、現地で電源を断時の水撃の実測を行なったが、その結果は図9に示すとおりで、実測結果は計算結果とほぼ一致した。本機場のように長大な吸込管路をもちポンプに押込みで導水されるケースでは、電源を断後ポンプはブレーキ作用として働くので、吸込管路には圧力上昇が生じ、次いで圧力降下が生ずる。また吸込側管路の圧力変動が吐出し側管路に伝わり、途中のサージタンクの水位にも影響を及ぼすこともあらかじめ留意しておく必要がある。

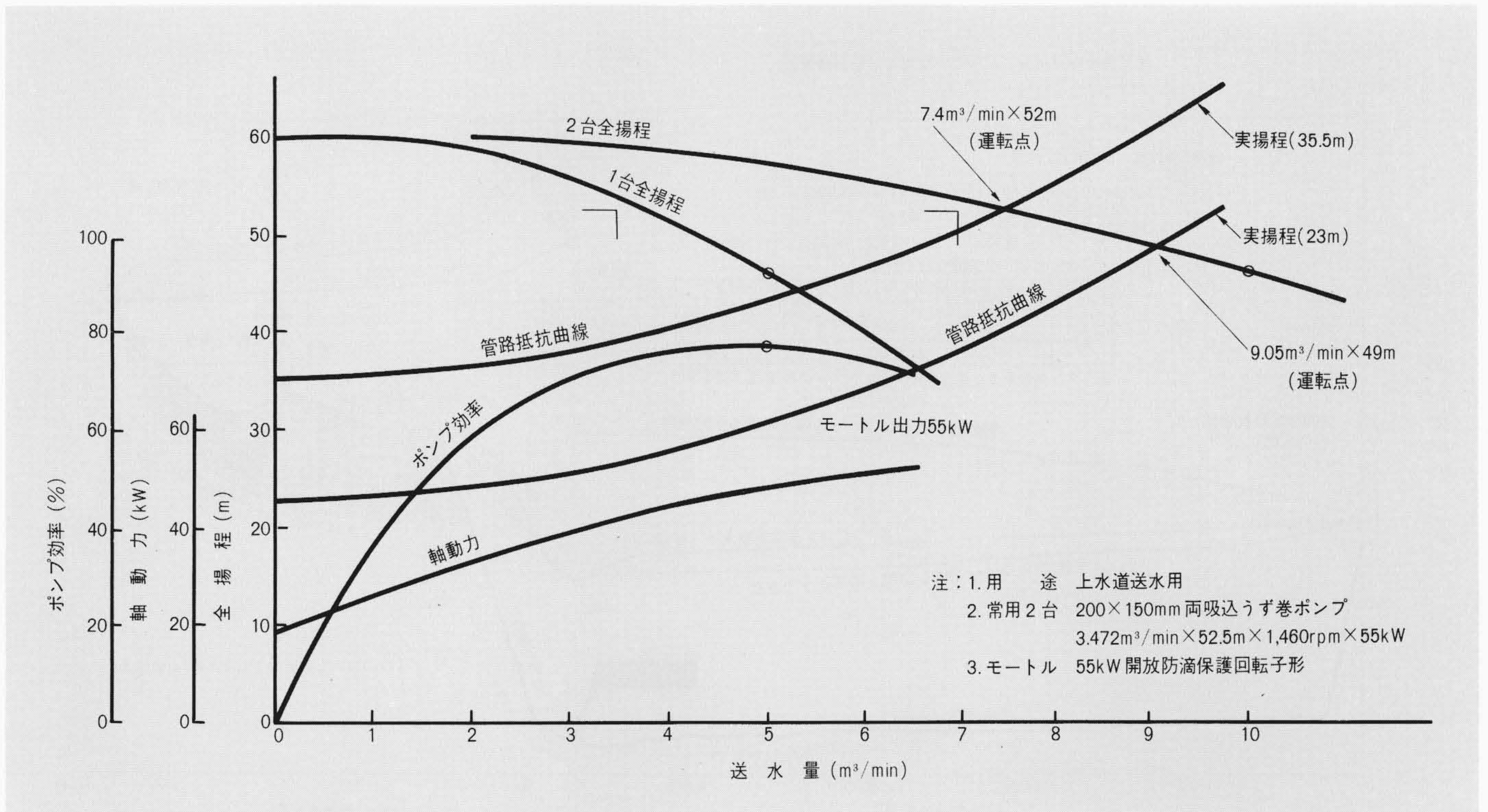


図6 仙台市水道局釣取山配水所青葉山送水ポンプ並列運転曲線図 実揚程が大幅に変わり、実際の運転点が変わる場合は、並列運転曲線図でその点を確認、最高実揚程と最低実揚程の2点の仕様で水撃計算を行ない、その現象を確認するほうがよい。

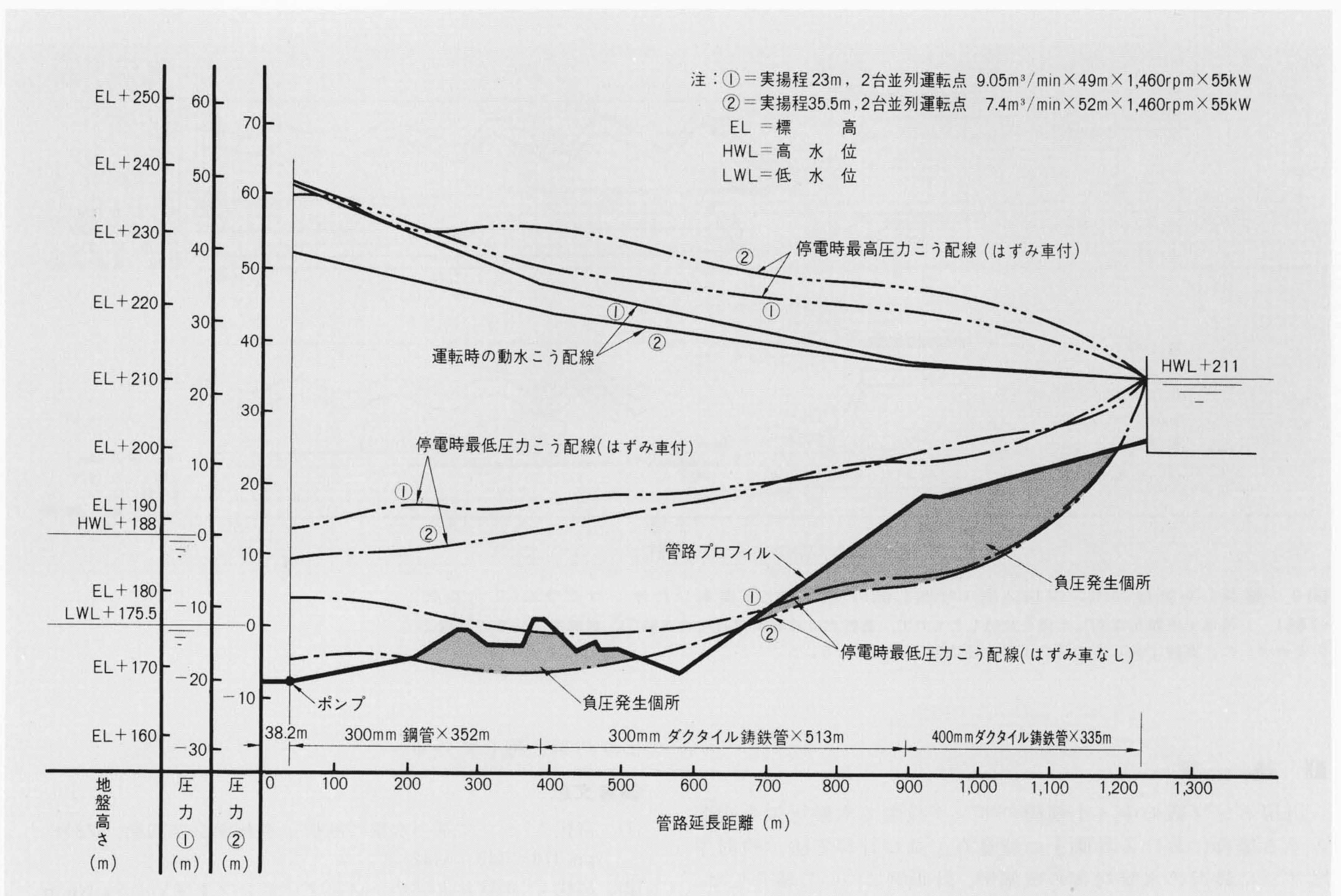


図7 仙台市水道局釣取山配水所青葉山送水ポンプ水撃検討図 実揚程23m(①), 35.5m(②)の運転点における水撃検討を電子計算機で行なった結果を示す。実揚程、はずみ車による最低圧力、最高圧力及び負圧発生個所に留意を要する。

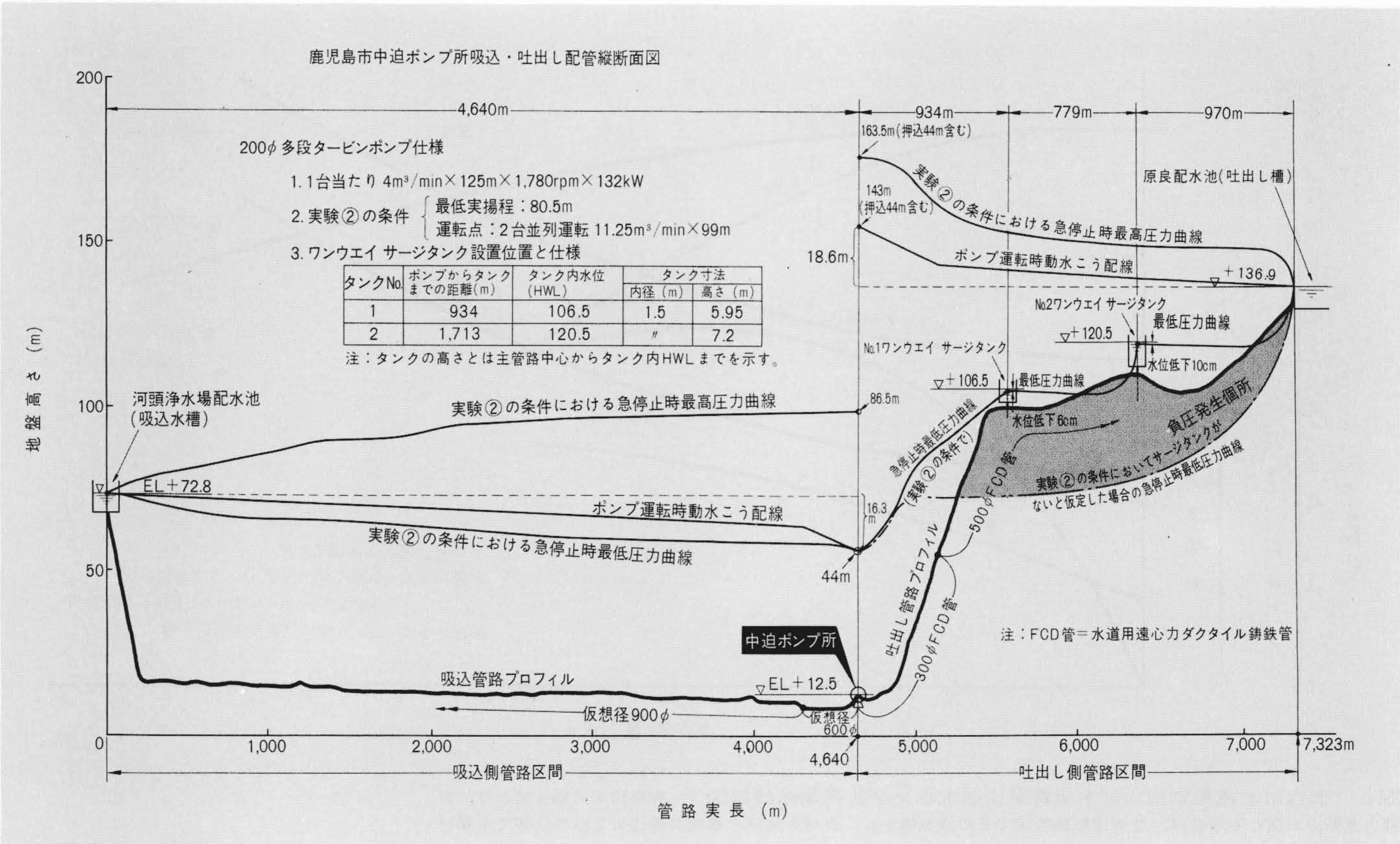


図8 鹿児島市中迫ポンプ所水撃検討図 吸込側管路全長4.6km、吐出し側管路2.7kmと長大な管路をもっているポンプ所である。水撃対策はワンウェイ サージタンク2個で行なった。吸込側にも水撃が発生し、吐出し側に影響する。

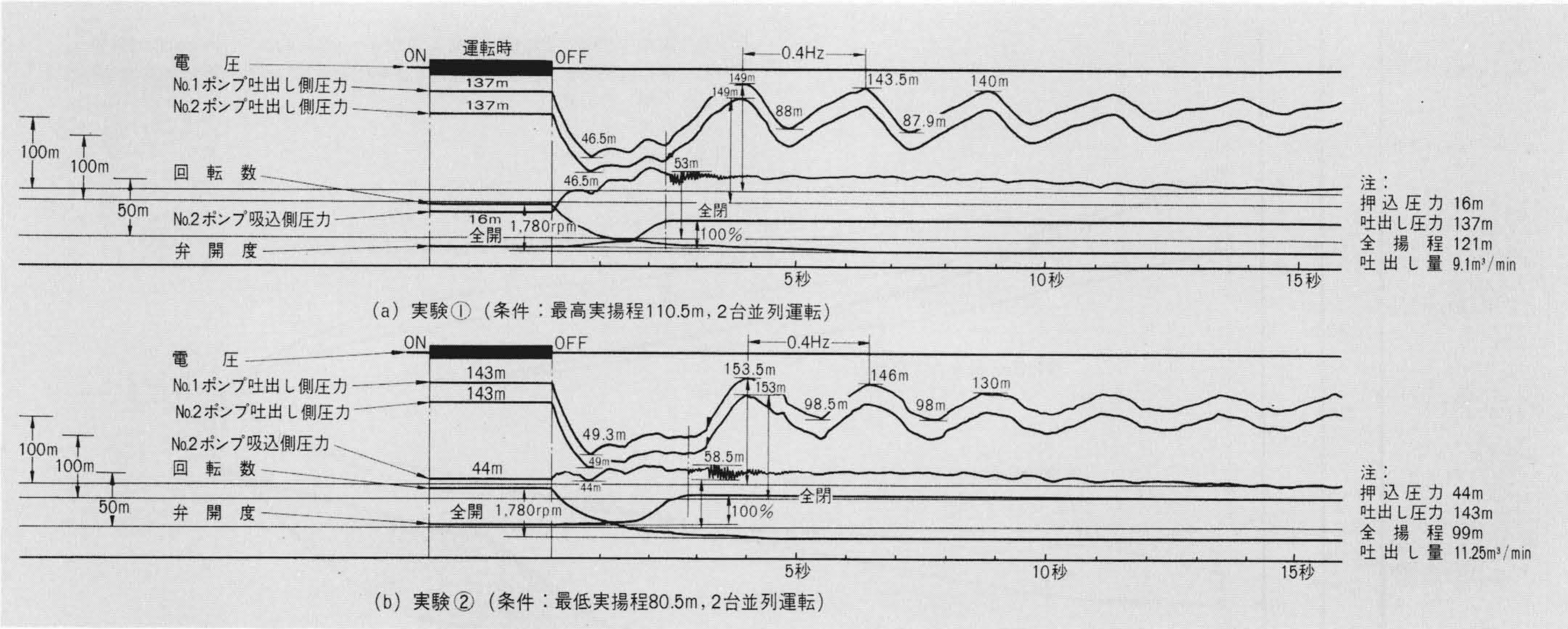


図9 電源しゃ断後のポンプ吸込側・吐出し側の圧力変化を実測したオシログラム(2台並列運転) 現地で水撃を実測した値を記録したもので、運転点は最高実揚程時の実験①、最低実揚程時の実験②の2点とした。実験②のときの圧力上昇・圧力低下が大である。

4 結 言

汎用ポンプ級の中・小規模のポンプ設備で水撃対策を必要とする場合における計画上の留意点、及び計算方法、検討手順並びに最近の水撃対策の実施例、計画例について紹介した。汎用ポンプ級のポンプ設備で水撃対策を要するものは、ほとんどはずみ車装置を付帯することにより解決している。はずみ車装置で対策できないものだけワンウェイ サージタンクに

より対策を施している。

参考文献

- (1) 宮代:「ポンプ系の水撃の解析」, 機械学会誌70巻, 578号 pp.376~383 (昭42-3)
- (2) 宮代:「水撃およびサージング」ポンプ工学Vol. 9, No. 6 pp.381~397 (昭和48年6月)
- (3) 畑:「最近の水道用ならびにかんがい用ポンプ設備のウォーターハンマ対策」, 日立評論49, 542 (昭42-5)