

水撃圧による管の動的破壊と準静的破壊の実験的比較研究

河野幸夫¹・菅野高弘²・渡辺雅二³

¹正会員 M. S. 東北学院大学助教授 工学部土木工学科 (〒985 多賀城市中央一丁目)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造振動研究室 (〒239 横須賀市長瀬三丁目1-1)

³Ph. D. 岡山大学教授 理学部数学科 (〒700 岡山市津島中一丁目1-1)

管路等で急閉鎖によって発生する水撃圧は急激な圧力上昇をもたらす、その水撃圧の影響による管等の破壊は理論的に動的解析ということ、ほとんど解析されて来なかった。本研究では水撃圧による動的破壊と静的破壊とで、どの程度の差異が現われるか、実際に塩化ビニール管を破壊する実験を行った。その結果、水撃破壊と準静的破壊とで載荷時間が約2000倍の差がある場合、水撃破壊の方が約25%高い圧力で破壊した。材料は塩化ビニール管と限定した上ではあるが、一般的な水撃圧の載荷範囲内であれば急閉塞による水撃破壊に対しても、静的な応力解析で破壊過程が表現でき、設計上安全サイドであることを示した。

Key Words : *water hammer, upstream finite difference method, dynamic pipe fracture, quasi-static pipe fracture, elastic analysis*

1. ま え が き

水撃圧に関する分野における最近の研究傾向として、水撃圧の水理学的特質の解析と同時に、管への作用についての構造力学とのインターアクションの研究が少しずつ増えてきた。水撃圧による管の破壊に関しては Tullis ら⁹⁾ や Davidson ら³⁾ の研究があるが、それらは管路などの水撃圧と管破壊との関係についての研究であり視点を水のみにしたものである。また、水理学的分野と構造力学的分野とのインターアクションとしては Heinsbrook ら⁴⁾ の研究があるが、これらは水撃圧による管の振動やサポートの振動に関するものであり、本研究の目的である水撃圧による管の破壊に関しては未解明な点が多いと思われる。

水撃圧によるダムのベンストック破壊事故や上水道管路等の管破壊事故は水撃圧による管への載荷時間が問題となる。圧力トンネルの緩閉塞における水撃圧発生とその圧力による圧力トンネルの静的応力解析については以前に文献⁶⁾にて発表した。それは、弁がある程度ゆっくりと閉塞する場合、水撃圧も弁のゆっくりした閉塞につれて徐々に圧力上昇をもたらすため、圧力トンネル内の水撃圧による岩盤に対する影響は静的応力解析で充分対応できると考えた故である。

しかし、一般的な水撃圧は動的と考えられ、その水撃圧の影響による管等の破壊は理論的に動的解析ということ、ほとんど解析されて来なかった。そこで、本研究

では水撃圧による管の動的破壊と水圧による準静的破壊との間に、どの程度の差異が現われるかを知るために、実際に、塩化ビニール管を用いた破壊実験を行った。水撃圧の解析への上流差分法の適用を試み、水撃波の圧力と載荷時間について実験値との比較を行い、有限要素法による静的応力解析を行い、実験値の準静的破壊強度および動的破壊強度との比較検討を行った。

2. 水圧による管の準静的破壊試験

(1) 供試体

内径 50 mm、厚さ 2 mm の塩化ビニール管を図—1 のように 300 mm の長さに切り落とし中央部分 100 mm を旋盤にて厚さ 0.4 mm まで削り落とす。両端にネジのついたソケットを接着剤を用いて取付ける。この供試体は水撃圧による動的破壊試験にも用いられる。

(2) 水圧による破壊試験装置と試験方法

図—2 静圧破壊試験装置に示されるように供試体の両端に圧力変換器が取付けられ、載荷された水圧は波形記憶装置で記憶されるようになっている。

供試体は 1. 鉄板で両端が固定され、引っ張り力がかからない場合、2. 下端部が固定されず引っ張り力がかかる場合、また、3. 鉄板で両端が固定され引っ張り力がかからないようになっているが、固定する時偏心荷重がかかった場合、の 3 ケースからなっているが、理論的

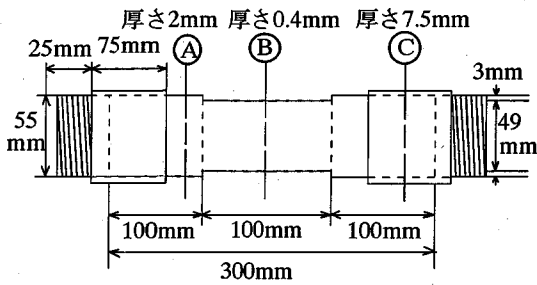


図-1 供試体 (塩化ビニール管)

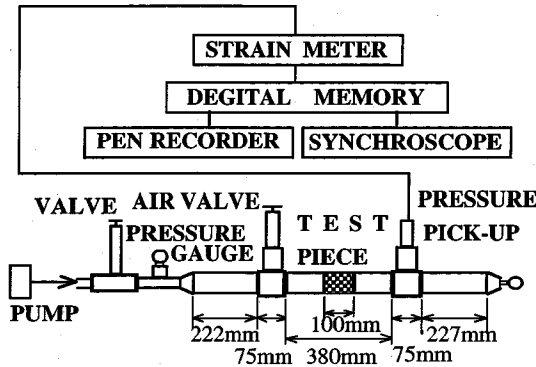


図-2 準静的破壊試験装置

解析における条件はケース1の場合で、現場における管の破壊はこの3ケースが交じり合っている。本研究では理論的解析と比較検討するためケース1を中心に研究を行う。

実験方法は载荷初期から破壊までの時間について約2分間を基準とし(それゆえに、準静的という言葉を使用している)、波形記憶装置の時間の設定を行い、ポンプで载荷を行う。水圧は供試体の両端に設置された2個の圧力変換器によって測定され、動歪計で増幅され、波形記憶装置で記憶される。水圧の準静的载荷により供試体が破壊された後、シンクロスコープで波形をチェックし、ペンレコーダーにて波形を書き出し、圧力時刻歴とする。この実験は同時にビデオカメラにて撮影され、ビデオに取られた破壊過程、破壊状況、ブルドン管式圧力計に示される破壊圧力、偏心荷重の有無および漏水等をチェックした後、準静的破壊試験のデータとして採用した。また、破壊した管の状態、破壊の開始した点、飛び散った水の到達点、破壊した管の破片の大きさ、飛び散り状況および到達点等も管の破壊による影響範囲のデータとして記録した。

3. 準静的破壊試験の結果

ケース1. 軸方向への引っ張り力が加わらないように

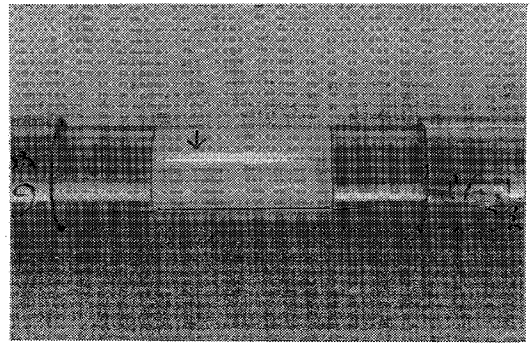


写真-1 破壊線

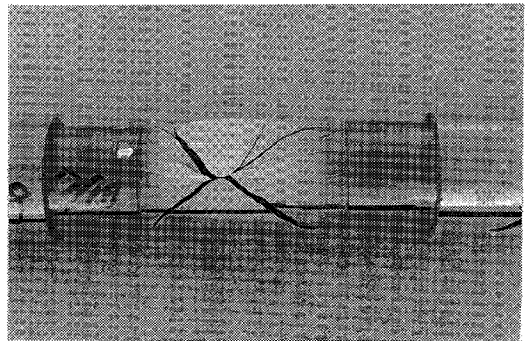


写真-2 破壊点とX型亀裂



写真-3 厚さ25倍(7.5mm)の部分まで破壊したケース

供試体の両端を固定し、载荷時間を2分間とした場合、管29本の平均破壊圧力は 11.57 kgf/cm^2 (1.137 MPa)となった。軸方向への引っ張り力が加わらないように供試体の両端を固定したが偏心荷重が加わった場合、管の平均破壊圧力は 8.74 kgf/cm^2 (0.857 MPa)となり、偏心荷重が加わらなかった場合に較べると 2.83 kgf/cm^2 (0.278 MPa)低い値で破壊した。

一般的に管の破壊は写真-1のように軸方向に一直線に白い線が入り(破壊線)、その上のある一点から破壊が発生(破壊点)し、その点を中心として写真-2のように八方にヒビが入り破壊するが、特に破壊点を中心に対角線方向、X型に四方に向かって大きな亀裂が発生し、その他の方向には小さな亀裂が数多く発生する。破壊点からX型に四方に向かって入った亀裂は厚さ0.4

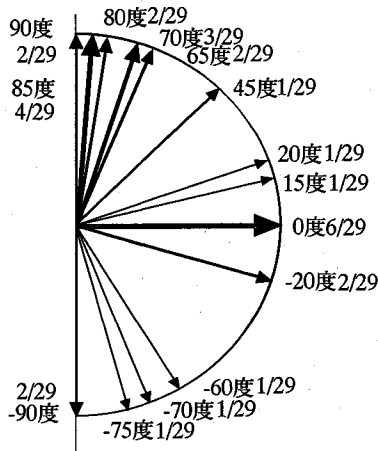


図-3 破壊発生点の位置と頻度

mm に削った面と厚さ 2 mm そのままの面との境界線まで走り、それから下方に境界線に添って走り、時には破壊点の裏側全体が抜け落ちる様に破壊する。X 型亀裂部で軸方向の左右 90 度に入った亀裂は厚さ 0.4 mm と厚さ 2 mm の境界も関係なく約 5 倍の厚さの部分にも亀裂が入ってしまう。供試体の厚さ 0.3 mm の場合で引っ張り力が働く時 7.7 kgf/cm² (7.55 MPa) の様な低い圧力で破壊し、写真-3 のように塩化ビニール管とソケットとを接着した最も厚い約 7.5 mm (この場合厚さ 0.3 mm で厚さの 25 倍) の部分やそれ以上厚いねじの部分までも破壊される場合がある。この事より圧力はそれほど高く無くとも、材質の欠陥などの初期不整の影響で、ある一点で破壊が始まれば他の強度の高い部分までもが破壊することがわかる。故に、高い圧力が発生するような管路や重要管路においては材質の欠陥や初期不整に十分注意を要するものと思われる。

軸方向への引っ張り力が加わらないように供試体の両端を固定する場合、固定に用いる鉄板のボルトの締め方が均一でないと供試体に载荷前にすでに偏心荷重が加わってしまう場合が生じる。このような場合には、圧力が非常に低い値で破壊する。これは破壊点が供試体の中心部分から離れて発生していることから、また、破壊後、供試体の中心軸がずれていることからわかり、偏心荷重が加わった所より破壊するため、破壊位置の測定は意味をなさなくなる。

管への応力の集中する箇所(破壊箇所)を特定するため、理論に合わせて左右対称とし、管の破壊発生点を表したものが図-3 である。盛り土等のない管のみにおける破壊位置は以上の実験結果より、角度 0 度で 29 ケース中 6 ケースと高い頻度で発生している場合もあるが全体的に発生しており、360 度どこからでも破壊する可能性があるという結果になった。

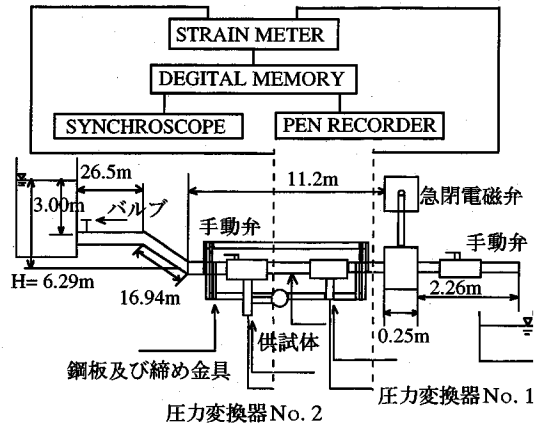


図-4 水撃破壊試験装置

平面ひずみ問題としての二次元応力解析を行う場合、軸方向への引っ張り力が加わらないものとして計算を行うので、ケース 1 の軸方向への引っ張り力が加わらないように供試体の両端を固定する場合の実験と条件が同じであり実験結果と比較検討が出来る様になっている。

この破壊実験は水圧の計測、管の断面における破壊位置の測定とともに、破壊した破片の大きさと数量、破片の飛距離、および、破壊箇所から飛び散った水の到達距離、および飛散状況についても同時に記録したが、本研究の目的よりはずれるので特徴のみを短く記す。これによると、破片の最大は 140 mm×55 mm、最大破片数は 12 個、破片の最大飛距離は 201.6 cm (管径の 40.3 倍、破片 24 mm×8 mm)、および、破壊箇所から飛び散った水の最大到達距離は 293.0 cm (管径の 58.6 倍) であった。

4. 水撃圧による動的破壊試験

(1) 水撃破壊試験装置と実験方法

図-4 は水撃圧による塩化ビニール管供試体の破壊装置で落差 6.29 m を利用し、水道用鋼管(管径 50 mm)の延長 57.15 m を自然流下式にて流下した水は下の水槽に溜められ、ポンプで上の水槽に送られる様になっている。平均流量並びに管の平均流速は下の水槽に流入した水の体積及び流入時間を測定することにより求められる。

水道用鋼管の下流端には急閉弁が設置され、その上流部 46 cm の所に静圧破壊試験に用いられたと同じ塩化ビニール管の供試体が取付けられ、その両端に 1 個ずつ圧力変換器が取付けられている。流速の調整は急閉弁の下流側 19.5 cm の位置に設置された手動弁によって行われる。

遮断弁で急激に閉鎖されることによって発生した水撃

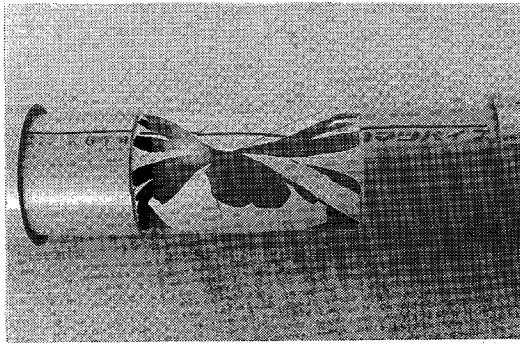


写真-4 水撃圧による供試体の破壊

圧は供試体の両端に設けられた圧力変換器によってピックアップされ、動歪計にて増幅された後、波計記憶装置により msec オーダーから、必要に応じて μsec オーダーにて 4 k words 分記憶される。記憶された圧力波形はシンクロスコープでチェックした後ペンレコーダーにて書き出され、すぐに最大圧力と圧力の継続時間が計算されるようになっている。弁閉鎖後、発生した水撃波は管の上流端までの往復する時間が弁直前での荷荷時間であるが、ここでは供試体の破壊によって、急激に圧力が0となり途中で波形が途切れる。

供試体の下流部に設けられた No.1 圧力変換器によって破壊した圧力までの波形が描きだされ、供試体の上流部に取付けられた No.2 圧力変換器によって供試体が破壊する直前までに通過した圧力波形が描きだされる。また、供試体に軸方向への引っ張り力が加わらないように遮断弁は固定してある。

(2) 水撃破壊実験結果

水撃圧による供試体の破壊は写真-4 のように準静的破壊試験の結果と非常に良く似た破壊パターンを示した。しかし、その相違点としては、準静的破壊の場合は徐々に荷荷されることにより、管も徐々に白く膨らみ、破壊線が軸方向に走り、破壊点から四方に X 型に破壊するのであるが、水撃圧による供試体の破壊は一瞬のうちに破壊するため、供試体には白く、膨れた跡はあまり残らず激しく X 型に破壊している。

水撃波形が図-5 の様に圧力が徐々に増加して破壊寸前に最大圧力となる場合や理論値のように矩形波ならば発生した最大水撃圧が破壊圧力となる。しかし、図-6 のように始めに最大水撃圧が発生し、それが半周期の間に小さな減衰振動を繰り返しながらある時点で破壊する場合、どの圧力をもって破壊圧力とするか疑問点があり、また、供試体に繰り返し荷荷が加わったことにもなるので実験結果には採用していない。このようなケースは最大値にて供試体が破壊せず供試体が伸縮した場合や入力

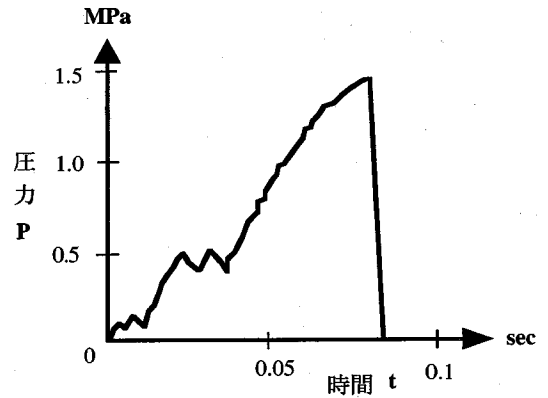


図-5 水撃圧が徐々に増加する場合

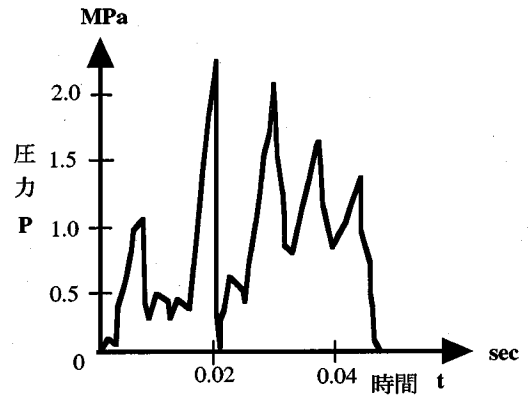


図-6 水撃圧の最大値が先にくる場合

する水撃波の高い場合で水撃圧発生による管の振動が水撃波形へ重複した場合などであり、最大値でちょうど供試体が破壊するように流速を調整しなければならない。水撃破壊圧力として実験結果より採用するデータは供試体に偏心荷重や引っ張り力のない、そして上の条件を満たした実験結果でなければならない。

また、No.2 変換器の出力波形のみを計測すれば管の破壊圧力および荷荷時間が求められると思われたが、実際は水撃波速が 20 回の平均で 1270 m/s となり、管の破壊速度（これは計測していないが）より速く管が破壊する前に通過してしまうため、出力波のみによって破壊圧力を計測することは供試体の長さ 30 cm のような短い供試体では不可能であることが数多くの試験により判明した。しかし、その計測法としては管内の流速をコントロールし、弁閉鎖により発生する水撃圧を徐々に下げ最低値によって破壊する圧力を求めることにより可能である。ただし、それには入力波と出力波が一致して供試体が破壊する圧力と荷荷時間を計測しなければならず、この試験方法は難しく、熟練したうえで 3、4 割の結果が出来れば上々である。

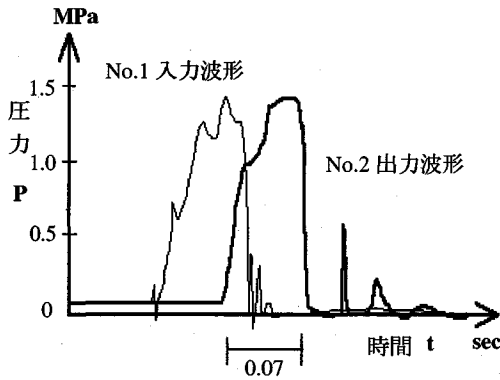


図-7 水撃波形 (入力波と出力波)

よって、供試体の上流部に設けられた No.2 変換器と下流部に設けられた No.1 変換器とによってピックアップされた最大水撃圧が図-7 のように、一致したデータのみを採用している。これは水撃圧が塩化ビニール管の供試体を通して伝播するため上流部では水撃圧が少し減衰するがほぼ等しい値を示していなければならない。このように、No.1 (入力波) と No.2 (出力波) 地点の水撃波形が一致し、上で述べた偏心荷重の加わらない等の条件を満たした試験結果 20 回の破壊圧力の平均値は 14.55 kgf/cm^2 (1.427 MPa) となった。

準静的破壊試験と水撃破壊試験との結果の比較検討としては、準静的破壊試験の結果は破壊圧力 11.57 kgf/cm^2 (1.137 MPa) となり、水撃破壊試験の破壊圧力は 14.55 kgf/cm^2 (1.427 MPa) となった。つまり、水撃圧による動的破壊試験の結果の方が 2.98 kgf/cm^2 (0.292 MPa)、いわゆる 25.8% だけ準静的破壊試験より高い圧力で破壊する結果となった。この時、準静的破壊試験の载荷時間が約 2 分間 (120 秒間) に対して、水撃破壊試験の载荷時間は 0.07 秒と約 2000 倍の差となっている。

水撃圧による破壊点の発生する位置は図-8 のようになり、0 度にて 3 回の高い頻度があるとは言え、準静的破壊試験結果と同様、どの角度からでも破壊が発生する可能性があることを示している。

この両試験の結果において、破壊圧力に差異が生じた理由の一つには、供試体の材料である塩化ビニール管の静的、準静的強度に対して、動的破壊では材料の構成則が変化し、つまり、Timoshenko⁷⁾ によると動的強度が見掛け上上昇するためである。もう一つの理由に、水撃圧の波速が約 1300 m/s に対し、前に述べたとおり、塩化ビニール管の破壊速度、つまり管の応答速度が遅いため、破壊するためには準静的破壊試験より高い圧力が必要となるため、写真-2 の準静的な水圧によって破壊し白く膨らんだ跡のある供試体と写真-4 の動的な水撃

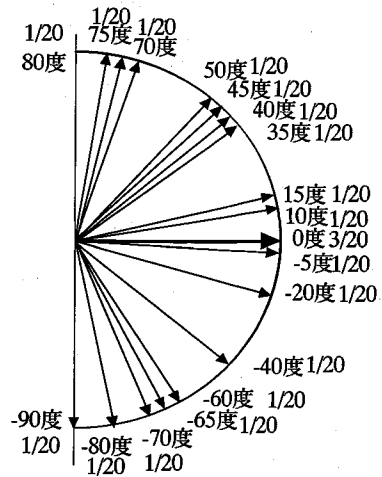


図-8 水撃破壊発生点の位置と頻度

圧によって破壊した供試体からも推測出来るように、慣性項の影響が強くなるため⁸⁾、以上の二つの理由またはこれらの複合された原因によるものと考えられるが、これらは大きな研究テーマであり、今回の研究においては両試験の試験方法や問題点その結果としての破壊圧力の差異などの提示に留め、それらの原因の究明等に関しては今後の課題としたい。

5. 水撃理論

(1) 水撃波伝播速度

この実験管路は水道用鋼管で出来ており、供試体のみ必要な材質で作製し、組み入れるようになっているので、水撃波の伝播速度 a は境界条件が水道用鋼管の両端固定における式を用い、次式で表される¹¹⁾。

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)(1 - \mu^2)}} \quad (1)$$

ここで、 D : 管の内径 50 mm 、 e : 管の内厚 3 mm 、 K : 水の弾性係数 $2.07 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$ (2.03 GPa)、 ρ : 水の密度 $101.97 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ (1000 kg/m^3)、 E : 管の弾性係数 $2.0 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$ (196 GPa)、 μ : ポアソン比 0.3 の値を式 (1) に代入すると伝播速度 a は 1325 m/s となる。実験では伝播速度は 1270 m/s となり、解析結果および実験結果とも約 1300 m/s と比較的一致した値が得られている。

(2) 水撃圧の理論解析

管内の流れの変化を解析するために管に沿って座標軸を設定する。その座標上の位置を表す変数を x 、時間を表す変数を t とする。その時に流速 V と圧力水頭 H の

x と t に対する変化は次の運動方程式と連続方程式によって表される。

$$\left. \begin{aligned} V_i + VV_x + gH_x + \frac{fV|V|}{2D} &= 0 \\ H_i + VH_x - V \sin \alpha + \frac{a^2}{g} V_x &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 f は摩擦係数 0.02、 α は管の傾斜角、 D は管の直径 50 mm、 g は重力の加速度を表す。式 (2) に対する数値計算法としては、特性曲線の方向への解の変化を計算する方法が良く知られている¹¹⁾。

ここでは、 (x, t) 平面上に長方形格子を設定し、各格子点における解の近似値を差分方程式の解として計算するという、従来の特性曲線を利用する方法とは異なる方法を用いて数値解析を行う。

式 (2) における運動方程式と連続方程式は 1 階の準線形偏微分方程式系を構成する。ここで、

$$v = \begin{pmatrix} V \\ H \end{pmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} V & g \\ \frac{a^2}{g} & V \end{bmatrix}, \quad h = \begin{pmatrix} -\frac{fV|V|}{2D} \\ V \sin \alpha \end{pmatrix}$$

とすると式 (2) は

$$v_t + Av_x = h \quad (3)$$

となる。行列 A は 2 つの異なる実数の固有値 $V-a$ 、 $V+a$ を持つので式 (2) は双曲線型である。1 階の双曲型準線形偏微分方程式系に対しては、差分法を用いた数値計算法が文献²⁾で紹介されている。その中でも特に長方形格子上の格子点における解の近似値を計算する方法をここで応用する。行ベクトル

$$l^- = \frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}}(a, -g), \quad l^+ = \frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}}(a, g)$$

は固有値 $V-a$ 、 $V+a$ に対応する固有ベクトルである。即ち、 l^- と l^+ は

$$l^- A = (V-a)l^-, \quad l^+ A = (V+a)l^+$$

を満足する。固有ベクトル l^- と l^+ を式 (3) の両辺に掛けることにより次の 2 つの式が得られる。

$$l^- v_t + (V-a)l^- v_x = l^- h,$$

$$l^+ v_t + (V+a)l^+ v_x = l^+ h$$

ここで、 a と g が定数であることに注意すると、

$$\left. \begin{aligned} Y = l^- v &= \frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}}(aV - gH) \\ Z = l^+ v &= \frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}}(aV + gH) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

とおくことにより、これら 2 つの式は次のように式 (5) となるのがわかる。

$$\left. \begin{aligned} Y_i + (V-a)Y_x &= -\frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}} \left(\frac{afV|V|}{2D} + gV \sin \alpha \right) \\ Z_i + (V+a)Z_x &= -\frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}} \left(\frac{afV|V|}{2D} - gV \sin \alpha \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式 (4) より V と H は

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{\sqrt{a^2 + g^2}}{2a}(Y+Z) \\ H &= \frac{\sqrt{a^2 + g^2}}{2g}(-Y+Z) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と与えられることがわかる。

ここで、管の長さが L のとき、ある自然数 n に対して $\Delta x = L/n$ とする。更に、ある $\Delta T > 0$ を選ぶ。式 (5) に対して差分法を応用するために $x_i = i\Delta x$ 、 $i=0, 1, 2, \dots, n$ 、 $t_j = j\Delta t$ 、 $j=0, 1, 2, \dots$ を満足する点 (x_i, t_j) を格子点とする (x, t) 平面上の長方形格子を考える。式 (3) の解 V, H と式 (5) の解 Y, Z の格子点 (x_i, t_j) における値を近似する差分方程式の解の値を $V_{i,j}$ 、 $H_{i,j}$ と $Y_{i,j}$ 、 $Z_{i,j}$ で表す。その場合に、式 (5) に対して前進および後退差分を用いることにより次の差分方程式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Y_{i+1}^{j+1} - Y_i^j}{\Delta t} + (V_i^j - a) \frac{Y_{i+1}^j - Y_i^j}{\Delta x} \\ = -\frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}} \left(\frac{afV_i^j|V_i^j|}{2D} + gV_i^j \sin \alpha \right) \\ i=0, 1, 2, \dots, n-1, \quad j=0, 1, 2, \dots \\ \frac{Z_{i+1}^{j+1} - Z_i^j}{\Delta t} + (V_i^j + a) \frac{Z_i^j - Z_{i-1}^j}{\Delta x} \\ = -\frac{1}{\sqrt{a^2 + g^2}} \left(\frac{afV_i^j|V_i^j|}{2D} - gV_i^j \sin \alpha \right) \\ i=1, 2, 3, \dots, n, \quad j=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

管の上流端は貯水槽に接続され、下流端には弁が取付けられた場合を考える。上流端における圧力水頭は変化せず、下流端の弁は一定の速度で閉鎖されると仮定して解析を行う。

(3) 水撃解析結果と水撃破壊実験値との比較検討

その結果は図-9 のように理論的水撃解析結果では、弁の閉鎖開始より完全閉鎖まで 0.015 秒かかるのであるが、圧力は弁の閉鎖開始より立ち上がり始め 0.012 秒でピークに達する、その後、多少の上下動はあるが 0.07 秒までピークを維持し 0.051 秒で最大値 16.86 kgf/cm² (1.65 MPa) を示した後、急激に下降し 0.083 秒より負圧に転ずる。

実験では水撃圧発生後、同様に 0.027 秒かかってピークに達し、その後、ピークを維持しながら供試体を押し続け、0.068 秒にて最大値 14.5 kgf/cm² (1.43 MPa) を示し供試体が破壊した。この実験での流速は 1.195 m/s であった。弁の急激な閉鎖 (0.015 秒) による水撃波の立ち上がりは理論値および実験値とも良く似ているが理論値の方が急激な上昇を示した。

以上のように水撃理論の式 (2) には管路の材質を考

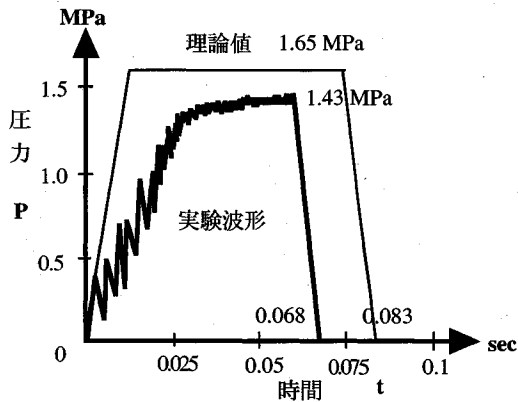
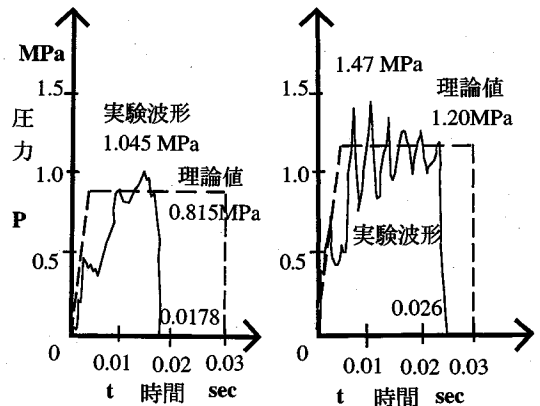


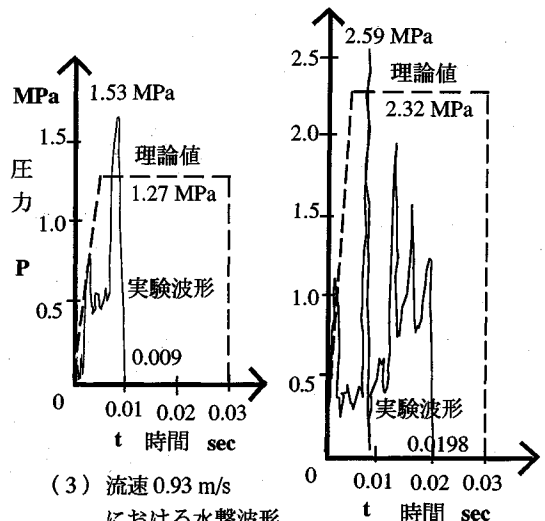
図-9 理論値と水撃破壊実験波形

慮に入れた水撃波の伝播速度を含んでいるが基本的には流体の運動方程式と連続方程式であり、塩化ビニール管の破壊条件（慣性項や材料の動的構成則など）は含まれていない。それでも、解析された水撃理論値はこの管路で弁閉鎖によって発生する水撃圧を示すものであり、供試体に載荷する圧力との比較検討より、実際に供試体を破壊させる水撃圧の発生条件である流速および載荷時間に関する管路長などが前もって決定される。それらを考慮に入れての検討において、弁の閉鎖時間が15/1000秒程度の場合水撃圧は27/1000秒かかって急激にピークに達し、その後管を押し続け68/1000秒で管を破壊するのであり、準静的破壊実験120秒と比較するための載荷時間はこの破壊にかかる時間をとり0.068秒とすると約2000倍の差があることになる。これは一般的管路においては最悪の場合と考えられる。一般的な水撃圧の載荷範囲は、急閉鎖の場合、伝播速度 a が管路を往復する前に弁を閉鎖した場合で $2L/a$ 秒で表されるのであるが、一般的な管路長 L はこの実験管路より長く載荷時間も長い場合が殆どである。また、圧力においては 2.24 kgf/cm^2 (0.22 MPa) だけ実験値が理論値よりも低い値で破壊した。

前にも述べたように、破壊圧力を測定するには、入力波と出力波との一致した水撃圧の最も小さい圧力で破壊したデータのみを採用するため、管路長も流速も一定の値で水撃波を発生するので、理論値はもとより実験波形は20回とも図-9のような値となる。しかし、予備実験では管路長を20m、供試体の肉厚を0.3mmとし、流速を(1) 0.59 m/s、(2) 0.88 m/s、(3) 0.93 m/s、(4) 0.59 m/sと変化して水撃波を発生させて供試体を破壊した。その実験波形と理論値とを示したのが図-10である。この管路にて発生した水撃波が上流端への往復にかかる時間、いわゆる載荷時間の最大が0.03秒であるが、実験では破壊に要する載荷時間は図のように色々



(1) 流速 0.59 m/s における水撃波形
(2) 流速 0.88 m/s における水撃波形



(3) 流速 0.93 m/s における水撃波形
(4) 流速 1.71 m/s における水撃波形

図-10 流速変化による水撃波形

である。発生する水撃波の圧力は理論値と大体似た値を示し、また、破壊圧力は(1)から(4)までどの圧力でも破壊し、圧力が高くなるにつれて波形が不安定になる傾向にある。これも水撃圧の最低値で破壊させることにした理由の一つである。またこれらの予備実験より載荷時間を長くするため管路長を約50mとし、また供試体の肉厚が薄いと偏心荷重が掛かり易く取付けなどが難しいため肉厚を0.4mmと決定した。

6. 水撃圧による管の静的応力解析

水撃圧による管の破壊に関する研究は水撃の難解さに加え、管の破壊も動的と考えられ未解決の部分が多い。

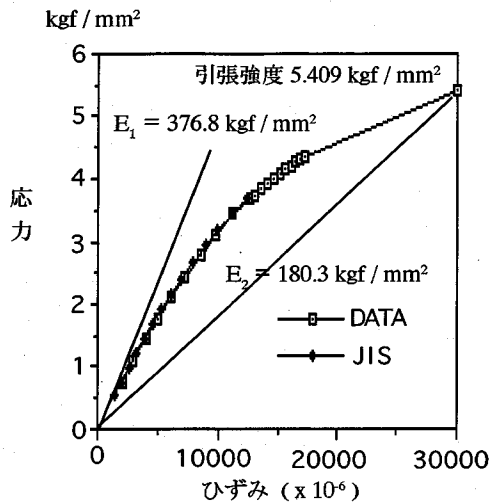


図-11 応力-ひずみ曲線

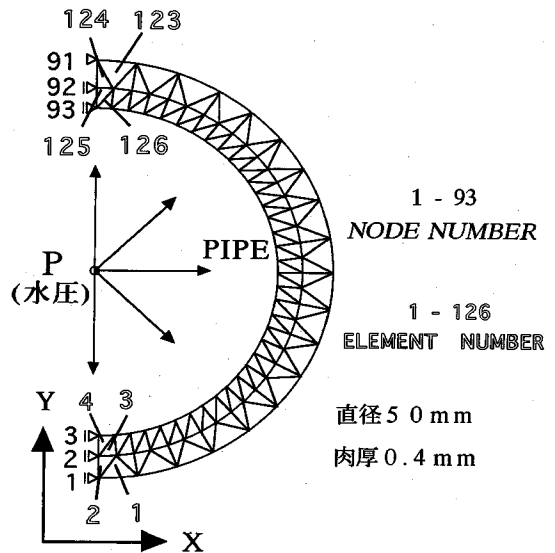


図-12 要素分割

しかし、管の設計においては従来より静的と考え安全率を考慮に入れ簡易計算がなされてきた。ここでは管内に作用する水撃圧を静的な水圧と仮定し、静的応力解析を試み、実験値との比較検討より有限要素法を用いた静的応力解析が水撃圧による管の破壊に関する研究にとって、管の水撃作用開始から破壊に至るまでの挙動を知るなど、非常にメリットがあり、また、動的解析への足掛かりとしても重要であることを示す。

(1) 応力解析

水撃圧が作用している管の変形・破壊を解析するにあたって、管路軸直角方向の断面を対象とした平面ひずみ状態について有限要素法を用いて行った。

解析は、管の水撃作用開始から破壊に至るまでの挙動を知るために接線剛性増分法を用い、最終荷重段階までを15ステップで荷重するものとしている。各ステップにおいて、各要素の応力状態から弾性、破壊の判定を行っている。本解析においては6節点線形ひずみ三角形要素を用いた。

(2) 塩化ビニール管の引張試験

将来の動的引張試験への適用を考慮に入れて、JIS規格より小さい試験片を破壊実験に使用する塩化ビニール管から切り出し、重りを少しずつ荷重する試験装置を製作し、静的な引張試験を行った。また、JIS規格でも引張試験を行った。その結果は図-11の応力-ひずみ曲線に示すようにほとんど同じ値となった。この応力-ひずみ曲線より弾性係数は10回の平均で $1.8 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ (1.77 GPa) と $3.7 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ (3.63 GPa) の間の値となり、引張強度は7回の平均で $\sigma = 541 \text{ kgf/cm}^2$

■ BREAKING POINT
 ▨ NEW BREAKING POINT
 □ ELASTIC CONDITION

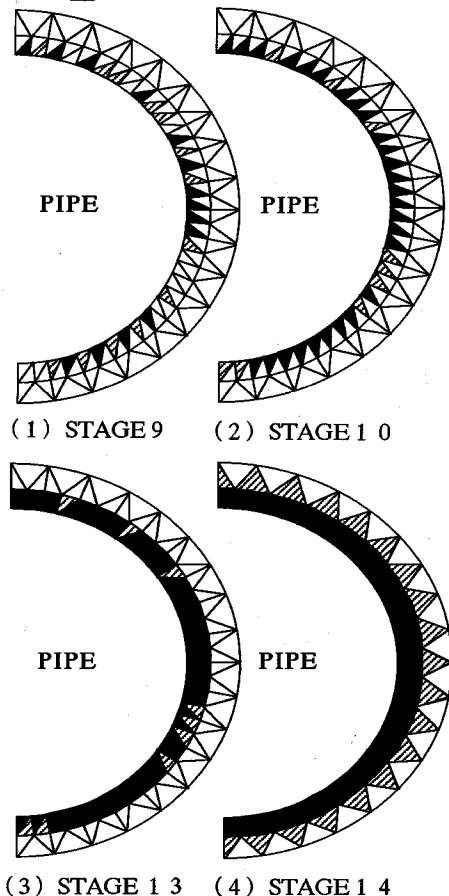


図-13 応力解析結果

表一 載荷時間および破壊圧力の比較

	載荷時間	破壊圧力
1 静的応力 解析結果	無限	7.8 kgf/cm ² (0.76 MPa)
2 準静的破壊 試験結果	1 2 0 秒	1 1.5 7 kgf/cm ² (1.137 MPa)
3 水撃破壊 試験結果	0.0 6 8 秒	1 4.5 5 kgf/cm ² (1.427 MPa)
圧力差		
(1 & 2) 3.7 7 kgf/cm ² (0.370 MPa) (4 8.3 %)		
(2 & 3) 2.9 8 kgf/cm ² (0.292 MPa) (2 5.8 %)		
(1 & 3) 6.7 5 kgf/cm ² (0.662 MPa) (8 6.5 %)		

(53.01 MPa) となった。

(3) 管の構成式とモデル化

解析対象となる塩化ビニール管の引張試験より弾性係数 $E=3.1 \times 10^4$ kgf/cm² (3.04 GPa), ポアソン比 $\mu=0.37$, 破壊応力 $\sigma=541$ kgf/cm² (53.01 MPa), せん断弾性係数 $G=1.19 \times 10^4$ kgf/cm² (1.17 GPa) の弾性体として解析を行った。

管の断面を図一12に示すように管の直径は50 mm, 肉厚0.4 mm, 総節点数93, 総要素数126のように要素分割を行った。載荷荷重は管内に最大10 kgf/cm² (0.98 MPa) が作用するものとして, 載荷荷重を増加させることによって管のみの破壊水圧を解析している。境界条件としては, 節点番号91を拘束し, 節点番号1, 2, 3及び92, 93をX方向変位拘束境界とした。

(4) 解析結果

水圧が管に作用している場合についての解析結果は各ステージごとに引張強度に達した要素が黒く塗られ, 図一13(1) stage 9, (2) stage 10, (3) stage 13, (4) stage 14で示されるように管の水撃作用開始から破壊に至る傾向が表わされ, 破壊する方向に関しては等方向性が示され, 破壊圧力は7.8 kgf/cm² (0.76 MPa) となった。

7. 解析結果と実験結果の比較と考察

本研究では水撃圧による管の動的破壊と水圧による準静的破壊との差異を明らかにすることを目的とし, これまでとは異なる差分による水撃解析および管の破壊に関する解析法を開発し, 静的応力解析適用上の安全性およびメリット等について検討を行った。本研究によって行われた解析結果と実験結果の比較および考察は以下のとおりである。

(1) 準静的破壊試験と水撃破壊試験および静的応力解析結果との比較を表一に示した, その比較検討とし

ては, 準静的破壊試験の結果は破壊圧力11.57 kgf/cm² (1.137 MPa) となり, 水撃破壊試験の破壊圧力は14.55 kgf/cm² (1.427 MPa) となった。つまり, 水撃圧による動的破壊試験の結果の方が2.98 kgf/cm² (0.292 MPa), いわゆる25.8%だけ準静的破壊試験より高い圧力で破壊する結果となった。この時, 準静的破壊試験の載荷時間が約2分(120秒)に対して, 水撃破壊試験の載荷時間は0.068秒と約2000倍の差となっている。また, 静的応力解析結果としては破壊強度が7.8 kgf/cm² (0.76 MPa) となり, 破壊する方向に関しては等方向性が示された。破壊する方向に関しては準静的破壊試験の結果についても, 水撃破壊試験結果についても同様に等方向性を示した。静的応力解析結果と準静的破壊試験結果との差は3.77 kgf/cm² (0.370 MPa) (48.3%) となり, 水撃破壊試験結果との差は6.75 kgf/cm² (0.662 MPa) (86.5%) となった。

(2) 理論的水撃解析では伝播速度は1325 m/sとなり, 弁の閉鎖開始より完全閉鎖まで0.015秒かかるが, 圧力は弁の閉鎖開始より立ち上がり始め0.012秒でピークに達する。その後, 多少の上下動はあるが, 0.07秒までピークを維持し0.051秒で最大値16.86 kgf/cm² (1.65 MPa) を示した後, 急激に下降し0.083秒より負圧に転ずる。

それに対して, 実験では伝播速度は1270 m/sとなり, 水撃圧発生後, 同様に0.027秒かかってピークに達し, その後, ピークを維持しながら供試体を押し続け, 0.068秒にて最大値14.5 kgf/cm² (1.43 MPa) を示し供試体が破壊した。この実験での流速は1.195 m/sであった。弁の急激な閉鎖(0.015秒)による水撃波の立ち上がりは理論値および実験値とも非常に良く似ている。準静的破壊実験の載荷時間120秒と比較するため, この破壊にかかる時間を0.068秒とすると載荷時間の差は約2000倍となる。このような弁の急閉鎖は一般的管路においては最悪の場合である。

本実験より, 水撃圧による動的破壊試験の結果の方が2.98 kgf/cm² (0.292 MPa), 25.8%だけ準静的破壊試験より高い圧力で破壊する結果となり, 設計上安全側となることがわかった。

以上の結果より, 一般的な載荷範囲の急閉鎖ならば, 塩化ビニール管において, 水撃圧による動的破壊も, 静的応力解析および弾塑性解析によって十分に表現出来るものと考えられる。

(3) 水撃圧による動的破壊が, 静的応力解析および弾塑性解析で充分表現し得るとした場合, これまでにほとんど解析が出来なかった水撃圧による管の破壊状況や破壊事故の解析, 水撃圧による埋設管の破壊状況および盛土や地盤の塑性化状況等が解析可能となる。また, 逆に管の破壊状況より, 管の破壊をもたらした水撃圧の発

生を弾性解析および弾塑性解析と水撃解析より求めることも可能となることが明らかとなった⁵⁾。

(4) 破片 (24 mm×8 mm) の最大飛距離は 201.6 cm (管径の 40.3 倍) で、破壊箇所から飛び散った水の最大到達距離は 293.0 cm (管径の 58.6 倍) であった。この結果より、直ちに破片が定量的に管径の約 40 倍、水は約 59 倍程飛ぶとは言えないが、破壊が発生した場合、管の破片および流出した水が想像以上に遠くまで達し、大きな被害を与え、時には人的被害をもたらす可能性を示している⁵⁾。

(5) 準静的破壊試験および水撃破壊試験において、供試体の最も薄い部分から破壊するが、その亀裂は厚さ 2 mm の部分にまで簡単に達する。特に引っ張り力が働く場合には、7.7 kgf/cm² (7.55 MPa) の様な低い圧力で破壊する時にでも、亀裂は厚さ 2 mm の部分を走り、塩化ビニール管とソケットとを接着した最も厚い約 7.5 mm (0.3 mm の 25 倍) の部分やそれ以上のねじの部分までも破壊される場合がある。この事より圧力はそれほど高く無くとも、材質の欠陥や初期不整の影響で、ある一点で破壊が始まれば他の強度の高い部分までもが破壊することがわかる。故に、高い圧力が発生するような管路や重要管路においては材質の欠陥や初期不整に十分注意を要する。

8. 結 論

(1) 水撃圧の解析に上流差分法の適用がはじめて試みられた。これは本研究での流体における水撃解析ばかりでなく、これまでの特性曲線法では解決不可能であった水撃負圧部の気液混相流問題における非線形部の解析への道を開いた。

(2) 塩化ビニール管の準静的破壊および水撃破壊に対して、水撃圧および圧力を静的な水圧と仮定して静的応力解析を適用することにより、これまで未知であった水撃圧による管破壊の挙動が明らかとなり、管破壊事故の状況および埋設管などへの適用等の可能性がでてきた。安全率を考慮にいれての簡易計算はこれまでも行われてきたことで、準静的破壊および水撃破壊に対して、静的応力解析を適用することは可能で、それにより多くのメリットがあることが明らかとなった。しかし、準静的破壊実験と静的応力解析で載荷時間と破壊圧力の差があり、また静的応力解析と水撃破壊実験においても破壊圧力の差は 86.5% となった。水撃破壊実験の結果を見る

と動的解析による慣性項の影響による振動に似た波形が出ている。今後の課題としては静的応力解析で対応出来ない範囲と慣性項が大きくなり動的解析をしなければならない範囲とを明らかとし、慣性項を含めた水撃圧による管の動的破壊解析の研究が必要である。

最後に、本研究を行うに当たり初期の段階で文部省科学研究費の補助を得た。また、本論文の取りまとめに当たりパイプラインの水撃専門家である農林水産省農工学研究所の島田正志氏にご指導いただいた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Britto, A.M. and Gunn, M.J.: *Critical state soil mechanics via finite elements*, JohnWiley & Sons, 1987.
 - 2) Courant R., Issacson E. and Rees: *On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences*, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, pp.243-255, 1952.
 - 3) Davidson, J.W. and Goulter, I.C.: *A new probability distribution to model water main breakage patterns*, *Proceeding of international conference on water pipeline systems*, Mechanical Engineering Publications Ltd, 1994.
 - 4) Heinsbroek, A.G.T.J.: *The influence of support rigidity on waterhammer pressures and pipe stresses*, *Unsteady Flow and Fluid Transients*, pp.43-52, 1992.
 - 5) Kono, Y., Sugano, T. and Sugai, Y.: *Analysis of penstock fracture by water hammer*, *Pipeline Systems*, pp.165-170, 1992.
 - 6) 河野幸夫, 菅井幸仁: 特性曲線法による水撃解析と有限要素法による圧力トンネルの静的応力解析, 第 29 回水理講演論文集, pp.657-662, 1985.
 - 7) Timoshenko, S.P. and Young, D.H.: *Elements of Strength of Materials*, Van Nostrand Company, INC., p.377, 1968.
 - 8) 戸部俊美, 佐藤裕久, 高津宣夫: 円管の高速張出し変形に関する一考察, 塑性と加工, 第 25 巻第 283 号, pp. 716-722, 1984.
 - 9) Tullis, J.P. and Watkins, R.K.: *Pipe collapse caused by a pipe rupture-a case study*, *Proceeding of international meeting on hydraulic transients with water column separation*, Universidad Politecnica de Valencia, pp.319-333, 1991.
 - 10) 渡辺雅二, 河野幸夫: 数値計算による管内気液 2 相流の水撃解析, 日本応用数理学会平成 5 年度年会講演予稿集, pp. 59-60, 1993.
 - 11) Watters, C.Z.: *Modern analysis and control of unsteady flow in pipelines*, *Ann Arbor Science*, p.251, 1979.
- (1993. 12. 14 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC FRACTURE OF PIPES BY WATER HAMMER AND QUASI-STATIC FRACTURE BY WATER PRESSURE

Yukio KONO, Takahiro SUGANO and Masaji WATANABE

The stress analysis and fracture analysis of pipeline by water hammer has seldom been studied because water hammer effect is the dynamic phenomena except the water hammer created by gradually closed valve in a long line. In this research experiments of pipe fracture were conducted in order to examine the difference between the strength of the PVC test pipes by water hammer in about 0.07 second loading and by static pressure in about two minutes loading. The pressure of dynamic fracture by water hammer was about 25% higher than the static fracture, though the loading time difference is 2,000 times. From this result it is possible that the static stress analysis could be applied to the pipe to the pipe fracture by water hammer even in a case of sudden valve closure.