

水撃圧による動的管破壊の 管材料特性について

STUDY ON CHARACTERISTICS OF PIPE MATERIAL OF DYNAMIC PIPE FRACTURE BY WATERHAMMER, JSCE

河野幸夫¹・真鍋健一²・佐藤清彦³・佐藤裕久⁴

¹正会員 工博 東北学院大学助教授 工学部土木工学科 (〒985 多賀城市中央1-13-1)

²工博 東京都立大学助教授 工学部機械工学科 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)

³学生員 東北学院大学大学院 工学研究科土木工学科専攻

⁴工博 東北学院大学教授 工学部機械工学科 (〒985 多賀城市中央1-13-1)

The PVC test pipes were fractured by the waterhammer which occurred intentionally by closing the valve at the end of pipeline. It was analyzed by the method of characteristics. The elastic analysis concerning with the dynamic characteristics of PVC pipe material was applied to find the area of quasi-static zone and dynamic zone. Finally the acceleration influence zone is clarified by analyzing the momentum equation of thin walled pipes.

Key Words : waterhammer, pipe fracture, MOC, FEM, dynamic characteristics of PVC pipe, dynamic analysis

1. はじめに

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本研究は水撃圧による管の破壊に関して取り扱う。特に、水撃圧による上水道管路等の管破壊事故は、水撃圧による管への载荷時間が問題となる。管材料の準静的特性を考慮に入れた、準静的破壊に関しては実験および解析により準静的载荷範囲について明らかとなってきた¹⁾。

しかし、水撃圧による管路への载荷は、管材の動的特性が影響をおよぼす動的载荷範囲については明らかでない。また、慣性項の影響が大きくなる、载荷速度の速い場合、どのような影響がでるのかも明らかでない。

よって、本研究の目的は管材の動的特性を考慮した動的引張試験を行い、動的管破壊実験および解析結果より動的载荷範囲と準静的载荷範囲とを明らかとする。また、慣性項を考慮した運動方程式を解析することより衝撃的载荷範囲の存在をも特定し、水撃圧の作用する管路の設計の可能性をも検討する。

2. 水撃実験装置のモデル化と水撃解析

水撃実験装置は図-1のように落差5.94m、水道用鋼管(管径5cm)延長54.69mの下流部に塩化ビニルで作製された供試体(30cmの中央部10cmを2mmから0.4mmに削ってある)が取り付けられ、弁を急に閉鎖することにより、水撃圧を発生させて、この供試体を破壊する。

(1) 水撃破壊実験方法

破壊実験に使用した供試体は、内径56.0mm、肉厚2.0mmの塩化ビニル管(JIS-K6741)を用いた。破壊しやすくするため中央部分100mmを肉厚0.4mmに削り落とし、両端にソケットを取り付けてある。

概略図が示す通り、装置の落差5.94m、管の延長54.7mを利用し、水を自然流下させる。下流端には電磁式による急閉弁が設置され、その上流46cmのところに塩化ビニル製の供試体を取り付けた。流速の調整は急閉弁の下流19.5cmの位置に設置された

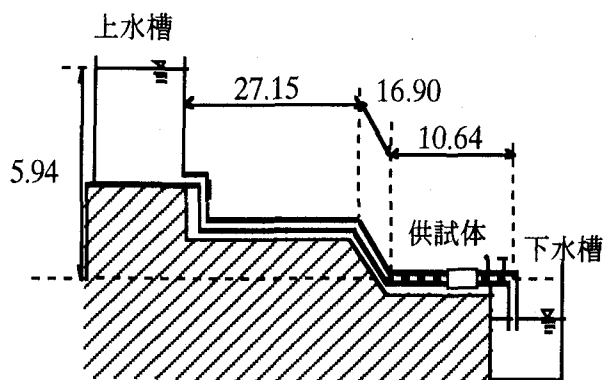


図-1 水撃実験装置 (m)

手動弁によって行われる。平均流量および平均流速は下水槽に流入した水の体積および流入時間を測定することにより求めた。

破壊圧力を測定する際に注意することは、水撃圧の伝播速度が管の破壊速度より高速なため、入力波と出力波の圧力の誤差が $\pm 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 以内のもので、管破壊に必要な最小水撃圧を起こす流速で実験しなければならないことである。

発生した水撃圧波形は圧力変換器を通じ、動ひずみ計にて増幅された後、オシロスコープに表示される。表示された波形から電圧、時間を計測し、較正值により破壊圧力を計算した。さらに、水温、気温、管の破壊形状、破壊位置、破片の飛距離等を計測した。実験データは偏心荷重、漏水の無いもののみを採用した。

(2) 水撃波伝播速度

水撃圧の伝播速度は液体の単相においては配管の管の材質と管路の固定条件などによって決定され、その伝播速度は定数として取り扱われる。この水撃実験装置は水道用铸铁管で出来ている。水撃波の伝播速度 a は境界条件が管路の両端固定における薄肉管の式を用いる²⁾。

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

ここで、 D ：管の内径 50 mm 、 e ：管の肉厚 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 $101.97 \text{ kgf/s}^2/\text{m}^4$ (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(1)式に代入すると伝播

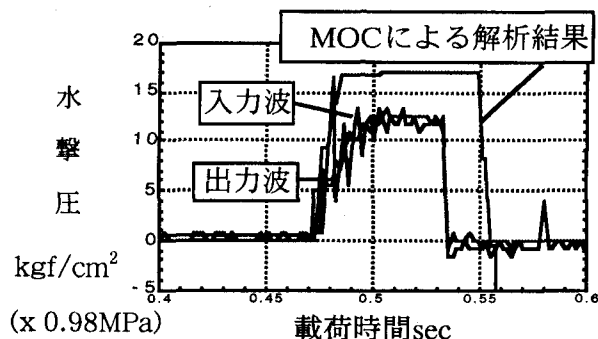


図-2 水撃実験結果と解析結果

速度 a は 1324 m/s となる。

(3) 水撃圧の解析

水撃圧の理論は一般的に一次元非定常流として取り扱われ、運動方程式は(2)式で、連続方程式は(3)式で表される³⁾。

$$\frac{\partial V}{\partial x} V + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V^2 = 0 \quad (2)$$

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} V + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial x} V = 0 \quad (3)$$

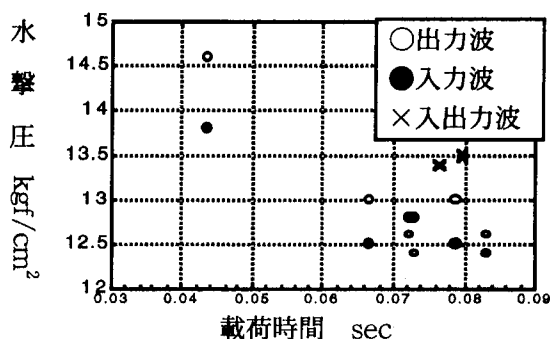
ここで、 V は流速、 H は水頭、 t は時間、 x は x 軸、 z は位置水頭、 f は摩擦損失係数、 g は重力の加速度である。(2)式と(3)式の線形結合より、特性曲線法によって数値解析される。

管の上流端は貯水槽に接続され、下流端には弁が取り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。

(4) 水撃解析結果と実験結果

図-2は特性曲線法による水撃解析結果(実線)と供試体前後に取り付けられた圧力変換器で採られた入力波形と出力波形の実験結果で、解析結果が水撃圧の最大値 17.39 kgf/cm^2 ($1.71 \times 10^6 \text{ Pa}$)、载荷時間が 0.08 秒となり、実験結果は入力波 12.82 kgf/cm^2 ($1.45 \times 10^6 \text{ Pa}$)、出力波 12.93 kgf/cm^2 ($1.45 \times 10^6 \text{ Pa}$)、载荷時間は平均 0.076 秒となった。

図-3は実験結果を水撃载荷時間と破壊圧力の比較として表したもので、初速を 1.211 m/s として実験を行っている。これ以上速い流速で弁閉



図一3 水撃载荷時間と破壊圧力

鎖を行うと、出力波も入力波同様に高くなり、時には逆に出力波がより高くなることもある（左の高い部分）。これは水撃波速が速いため、管が破壊するよりも速く、水撃波が進行することによって起こる現象である。よって、実験では、右のグループの様に、管が破壊するぎりぎりの圧力、つまり、入力波も出力波もほとんど同じ圧力で破壊するように行う。図で、Xの入出力波とは入力波の最大値と出力波の最大値が同じ値を示した場合である。

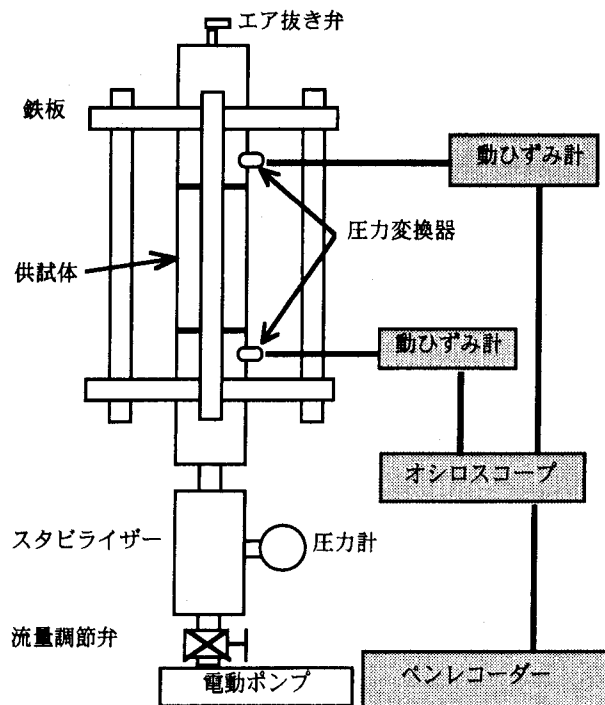
(5) 水圧による塩化ビニル管の動的破壊実験

供試体は水撃圧による破壊実験と同じものを用い、水撃圧による破壊との差異を求めるため電動ポンプによって水圧を管に徐々に加え、管を破壊させた。図-4は動的管破壊実験装置の概略図である。水圧を加えるための電動ポンプと供試体部分の間に水の脈動を防ぐためのスタビライザーをつなぎ、供試体は管路軸方向の伸張を防ぐため4本の鉄板にて十字に固定した。破壊圧力、载荷時間を測定するための装置は水撃破壊実験と同じものを使用した。

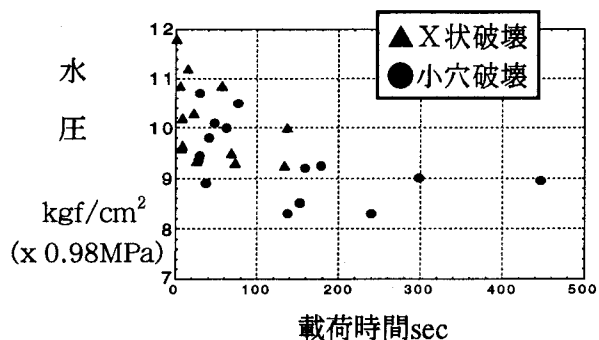
実験方法は、初めに装置内部を水で充満させ、载荷開始から破壊までの時間をポンプ側のバルブで調節し、管を破壊させた。破壊圧力、载荷時間を測定し、管の破壊形状、破壊位置、破片の飛距離等を計測した。

(6) 動的破壊実験結果と考察

図-5は縦軸を破壊圧力、横軸を圧力の载荷時間としてデータを集計したものである。破壊形状は大きく分けて2つに分かれた。1つは破壊面がX状に亀裂を生じて破壊する場合、もう1つは肉厚の薄い部分が膨張し、小さな穴を形成する破壊である。図中の▲は管がX状に破壊したもので、●は



図一4 動的破壊実験装置



図一5 動的载荷時間と破壊圧力

管が膨張し、小さな穴ができ破壊したものである。実験結果より、管の破壊形状は载荷時間が短くなるにつれてX状に破壊し、かつ管の膨張が小さくなる傾向が得られた。また、水撃実験と同じように破壊圧力と载荷時間は反比例の関係が得られた。

3. 管材の動的特性を考慮した弾性解析

管材への水撃圧载荷には、载荷時間により準静的、動的の2つの範囲に分けられ、動的範囲の解析では、慣性項と管の試験速度依存特性の二つを考慮する必要がある⁴⁾。

慣性項は無視できるが、管材料の試験速度依存

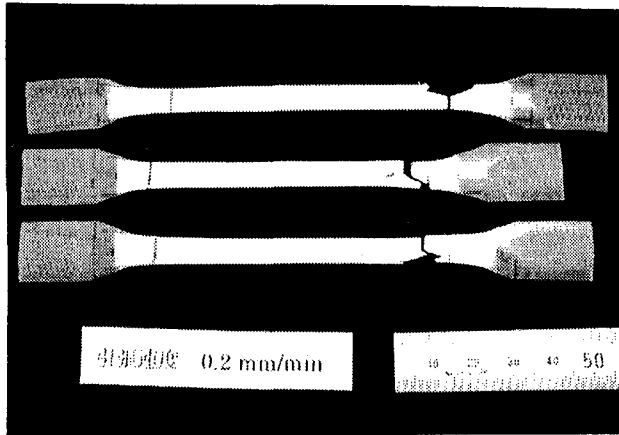


図-6 管材料試験片

特性は無視できない動的範囲が存在し、ここでは、管材料の動的特性を考慮した弾性解析と準静的領域における解析法を明らかにし、その結果、準静的領域と動的領域の境界を水圧载荷時間によって示すことである。

(1) 準静的応力解析と管材料の動的特性を考慮した弾性解析

管に水圧が作用している場合について弾性解析を行なうため、管路軸直角方向の断面を対象とした平面ひずみ状態、6節点線形ひずみ三角形要素について有限要素法を用いた。三角形要素の内部仮想仕事は仮想ひずみと応力をかけ、要素全体を積分することによって得られる。また、外部仮想仕事は仮想変位と節点に作用する外力の積により求められる。そして、内部仮想仕事と外部仮想仕事は等しいと置く。求められた力と変位の方程式に境界条件を入れて解くと、未知接点変位と未知反力が求まる。応力は各三角形要素において、既知となった変位を使用することにより、計算することができる。

(2) 塩化ビニル管の動的 material 特性試験

高分子材料（塩化ビニル等）の一般的な応力-ひずみ曲線は試験速度によって変化する⁵⁾。一般に試験速度の上昇とともに弾性率、降伏値、引張強度は増大する⁶⁾、と言われている。図-6は引張試験後の供試体（試験速度が0.2 mm/分の場合）で、塩化管よりJIS規格の試験片を削り出して作製されたものである。島津製作所製引張試験機を用いて動的 material 特性の試験を行う。試験速度

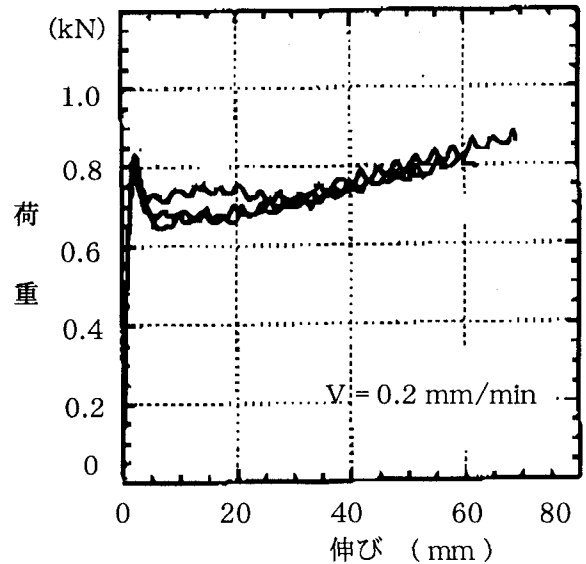


図-7 荷重伸び線図
(引張速度0.2 mm/min)

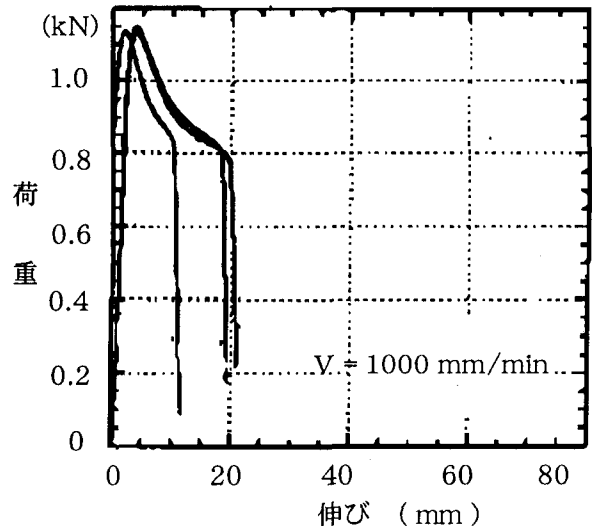


図-8 荷重伸び線図
(引張速度1000 mm/min)

を0.2、2、20、200、1000 mm/分と変化させて引張試験を行った。動的引張試験は各試験速度で3回づつ行った。同じJIS規格の試験片を用いても、この3本の様に長さが一定とはならない。しかし、本研究の目的である上降伏点の最大値は一定となっている。

図-7は試験速度が0.2 mm/分の場合の引張試験結果で、図-8は試験速度が1000 mm/分の場合の引張試験結果である。その結果、クロス

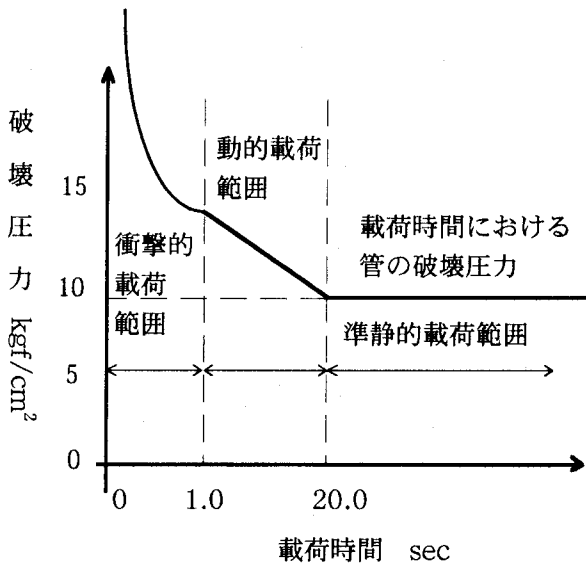


図-9 準静的、動的、および衝撃的载荷範囲

ヘッドの速度が0.2 mm/分の場合強度は4.5 MPa、2 mm/分の場合強度は4.8 MPa、20 mm/分の場合強度は5.1 MPa、200 mm/分の場合強度は5.8 MPa、そして、1000 mm/分の場合強度は6.2 MPa、となった。

(3) 塩化ビニル管の有限要素解析

ここで取り扱う塩化ビニル管の構成値は肉厚0.4 mm、管径50.0 mmであり、弾性係数 $3.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.37、せん断弾性係数 $1.17 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、上記の引張強度である。また、管の断面は総節点数93、総要素数126に要素分割を行った。実際のパイプは円であるが、今回はすべて半円モデルで解析を行なっている。

载荷最大内圧は管内に15~20 kgf/cm²が作用するものとし、载荷内圧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、管を二つに切りその切り口の最上部節点をXY方向に拘束し、その他の切り口節点はX方向変位拘束境界条件としている⁷⁾。

(4) 準静的および動的解析結果との比較検討

準静的応力解析結果と管材料の動的特性を考慮した弾性解析結果および佐藤ら⁸⁾の実験結果を载荷時間により、準静的範囲と動的範囲とに分けて直線近似したものが図-9である。この図より、準静的範囲は载荷時間約20秒以上となる。载荷時間20秒以下では载荷時間の減少とともに破壊圧

力が急上昇し、その範囲では管の材料的载荷速度効果が重要となる動的载荷範囲といえる。载荷範囲が1秒以内の衝撃的载荷範囲については次の節で検討を行う。

4. 衝撃的载荷範囲

前節では準静的载荷範囲と動的载荷範囲についての検討を行った。動的载荷範囲とは管の材料的载荷速度効果が影響する範囲である。

この節で検討を行う衝撃的载荷範囲とは、慣性項の加速度が影響してくる範囲で、圧力の载荷時間は1秒以内で0.1、0.01、0.001秒と短くなるに従い(6)式の拡張速度Vの2乗に比例して運動エネルギーが大きくなることを示している。内圧がなした仕事の大部分が運動エネルギーに費やされる場合、管の設計に用いられる強度(図-9の破壊圧力)は全く意味を成さなくなる。よって、衝撃的载荷範囲の载荷時間が非常に短くなる所では従来の方法による管の設計は不可能であることを示している。

(1) 薄肉円管の高速拡張

円管の微小要素の半径方向の運動方程式は次式で表される⁹⁾。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \dot{v} \quad (4)$$

ここに、 ρ は着目要素の現在の密度で、円周方向の応力は σ_θ で、ひずみは ϵ_θ である。

薄肉円管の場合、半径方向の応力 σ_r は0なので、運動方程式は次式で表わされる。

$$\rho h \dot{v} = p - \frac{\sigma_\theta h}{r} \quad (5)$$

ここに、 h, r は刻々の円管の肉厚、平均半径である。

さらに、管の変形が大きい場合、管は剛塑性体と仮定する。このとき、この式に t_0 から t にわたるエネルギー積分を施し、定数倍して整理すると次式のように表現できる。

$$2\pi \int_{r_0}^r p r dr = 2\pi r_0 h_0 \int_0^{\epsilon_\theta} \sigma_\theta d\epsilon_\theta + \pi \rho r_0 h_0 v^2 \quad (6)$$

ここに、拡張の初速を0とした。また、 h_0, r_0 は円管の変形前の肉厚と平均半径である。

単位長さの円管について、内圧の成した仕事、塑性変形仕事、運動エネルギーをそれぞれ、 W_e, W_p, W_k とすると次式となる。

$$W_e = W_p + W_k \quad (7)$$

即ち、この種の高速変形の場合には、円管を押し広げるのに費やされた仕事が、塑性変形仕事と運動エネルギーとに明確に分離されることがわかる。

5. 結論

(1) 本研究の結果、水撃圧の载荷時間により、管路への载荷領域を3つの範囲に分けることができた。1つは破壊圧力がほぼ一定となり载荷速度効果の影響がない準静的载荷範囲であり、準静的範囲は载荷時間 20.7 秒以上となり、内圧 15.0 kgf/cm^2 で応力が管の引張強度に達した。2つ目は材料の動的特性により破壊圧力が上昇する動的範囲である。最後に、慣性項が影響する衝撃的範囲である。

(2) 準静的载荷範囲については簡易式、または静的材料特性を使用した弾性解析によって管路を設計することができる。また、動的な水撃圧の発生する管路で、比較的载荷速度の速い管路においても、動的な材料特性のみを考慮に入れ、慣性項を考慮に入れない静的応力解析によって管路の設計することが可能であることを示した。

慣性項が無視出来なくなるような、载荷速度の速い衝撃的载荷範囲では、運動エネルギー項が変形速度の2乗に比例して大きくなり、円管を押し広げるのに費やされた仕事が、塑性変形仕事よりも、大部分が運動エネルギーに費やされてしまう不安定な状態となり、管路の設計が不可能となることが明らかとなった。

謝辞：本研究を実施する上で、一部は文部省科学研究費から基盤研究(C)の補助を得た。ここに付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) Kono, Y., Sugano, T. and Sugai, Y. : Water hammer suppression methods in water distribution systems in a hilly city, Unsteady Flow and Fluid Transients, IAHR, A.A.BALKEMA, pp.53-61, 1992.
- 2) Watters, G.Z. : Modern analysis and control of unsteady flow in pipelines, Ann Arbor Science, 1979.
- 3) Wylie, E.B. and Streeter, V.L. : Fluid Transients, McGraw-Hill, p. 384, 1978.
- 4) 河野幸夫 他：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、土木学会論文集、No.509/II-30, 55-65, 1995.2.
- 5) 佐藤裕久、河野幸夫 他：塩化ビニル管のダイナミックな応力・ひずみ曲線、第27回塑性加工春季講演会、1996.5
- 6) 成沢郁夫：高分子材料強度学、オーム社、1982年
- 7) Britto, A.M. and Gunn, M.J. : Critical state soil mechanics via finite elements, Ellis Horwood, 1987.
- 8) 佐藤清彦、河野幸夫、佐藤裕久：塩化ビニル管の水圧破壊における载荷速度効果の実験的研究、東北学院大学工学部研究報告、1996.
- 9) 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.

(1997.9.30受付)