

機器配管系支持部及び結合部の耐震性評価に関する研究 報告書

(第1報 配管系の流体連成振動実験)

小川信行*・箕輪親宏*

国立防災科学技術センター

千葉敏郎**・小林博栄**・相田重一**

石川島播磨重工業株式会社

小柳良一***・勝山ヨシ子****

Research on Seismic Qualification of Nuclear Piping
and Equipment Interacted System
(Report-1, Vibration Test on Coupled Seismic Response of Piping and Liquid)

By

Nobuyuki Ogawa*, Chikahiro Minowa*

National Research Center for Disaster Prevention

Toshio Chiba, Hiroe Kobayashi**, Shigekazu Aida****

Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

Ryoichi Koyanagi*, Yoshiko Katsuyama******

Abstract

In recent years, it has been pointed out mainly by theoretical methods that liquid in a large piping behaves dynamically during earthquakes and a lumped mass model of liquid would give a non exact piping response in some conditions.

However, there has not been any comparison of theoretical and experimental results of a real piping system. So, the authors have conducted a large scale shaking table test of a piping model. A test piping system, which is 40 m in length and 254 mm in inner diameter, was supported by two main and some auxiliary frame structures on the shaking table. A part of piping system was extended outside of the shaking table, and supported by uniaxial smooth sliding supports. In this experiment, some test conditions for internal liquid were considered as the followings.

* 第3研究部, ** 原子力事業部技術開発部

*** (元) 石川島播磨重工業株式会社原子力事業部技術開発部

**** (元) 国立防災科学技術センター第4研究部

- 1) No water
- 2) Completely closed and pressurized (with orifice and without orifice)
- 3) Free surface tank and closed end at both boundaries (ditto)
- 4) Free surface tank and pump at both boundaries (ditto)

The experimental results showed that internal liquid behaved dynamically not as simple lumped mass, especially in pressurized condition, and liquid boundary conditions gave influence on the system behaviour during strong excitations.

This paper also presents a procedure of the analytical simulation and its application to the experimental piping model. The method used is a time domain modal analysis for piping structure and characteristics method for liquid, and can be easily applied to large complex pipings. The comparison of the predicted and measured responses have shown this method to be useful. Furthermore, the comparison of a lumped mass model with the pressure wave model of liquid is shown in this paper.

要 旨

本報告は「機器配管系の支持部および結合部の耐震性の評価に関する研究」の一つとして行なった配管系の振動実験と解析に関するものである。機器配管系の結合部等に作用する地震荷重を評価する場合、内部流体の地震時挙動が重要な要因になる場合が少なくない。このため、配管の地震応答に対する内部流体の動的効果の評価を目的として振動実験を行なった。常用の解析では配管内の液体はDead massとして取り扱われる。しかしながら、本実験の結果、配管内液体の動的圧力応答を生じ、この圧力応答および配管系の応答は流体の境界条件によって異なることがわかった。また、この実験結果をもとに配管系の流体連成地震応答の計算手法について検討しその有効性を確認した。

目 次

1. はじめに (研究の全体計画)	3
2. 配管系試験体	3
2.1 実験目的	3
2.2 実験条件と実験ケース	4
2.3 試験体の構造と特徴	5
3. 実験方法および計測	7
4. 実験結果と考察	7
4.1 各実験条件における圧力波伝播速度測定結果	7
4.2 各種流体条件での基本的な応答特性の比較	9
4.3 配管系各部の応答分布と流体条件	16
4.4 地震波加振による応答の比較	18
4.5 負圧を伴う応答とその影響	21
5. 地震応答解析	23
5.1 連成地震応答解析の考え方	23
5.2 計算式	23
5.3 実験と解析の比較および考察	27
6. 結 語	37
謝 辞	40
参考文献	40

1. はじめに（研究の全体計画）

原子力施設の耐震研究は地震動、地盤、建屋、機器系等の各対象について行われるが、特に機器配管系はそのレイアウト、支持方法および地震動の入力機構が建屋等に依存するところが多く、耐震設計に関係する問題点は多岐にわたっている。今後耐震信頼性のより一層の向上を図る上で、これらの問題点を究明し、より合理的な設計・解析手法を確立していくことが重要とされている。

このような観点から、国立防災科学技術センターでは昭和 57～61 年度に原子力配管に関する実験研究を実施し、配管系の多入力地震応答解析法の検証、劣化部を有する立体配管の耐震安全裕度の評価などを行なってきた。（小川他（1987）、（1989））

この研究に継続するものとして昭和 62 年度～平成 2 年度には「機器配管系支持部および結合部の耐震性の評価に関する研究」を実施している。機器の支持部、機器と配管との結合部等は、構造的に応力集中を生じ易い、振動的に非線形挙動を伴うことが多い、機器間相対変位等の荷重が作用し易い、等のため地震時には相対的にクリティカルポイントになりやすい。一般プラントや設備機器の地震被害の多くはこのような支持部、結合部で生じている。

このため、本研究では複数の機器から成る系を対象とし、支持部および結合部に作用する地震荷重の評価法の比較検証と合理化に関する研究を行う。複数機器からなる系の地震荷重は、内部流体の地震応答、実働荷重との相互作用の影響などを考えて評価する必要がある。このため本研究では、配管・容器などの機器単体の流体連成地震応答、容器配管結合系の地震応答、結合部などの要素試験による耐震性評価、アクティブシステムの地震応答などに関する一連の実験研究を実施する。なお、耐震性評価のための要素試験（破損実験）以外は、振動現象の把握と応答解析法の比較検証、合理化を目的としたものであるため機器の材料等の特性および設計、検査条件は一般プラントと同等の JIS 仕様としている。

2. 配管系試験体

2.1 実験目的

液体を圧送する配管系が地震動のような慣性加振を受けた場合、内部の液体の挙動は流送条件および配管系の構造などによって異なると思われるが、圧力変動など液体の動的応答を生じ、これが系の応答に一定の影響を与えることが考えられる。本実験はこのような配管の地震応答に対する内部液体の動的効果の評価を目的としている。

配管内流体の地震応答については従来は構造との連成を考えない流体だけの解析が行なわれた。すなわち、Young and Hunter（1979）は特性曲線法を用いて流体の地震応答を計算し、従来の動水圧評価手法が低すぎる評価を与える場合があることを示した。Ogawa（1980）は地盤等に拘束された大規模配管系の圧力応答を解析する手法を示し、共振の可能性などを指摘した。また Young and Padron（1983）は特性曲線法によるシミュレーション解析を基

に簡易的な評価式を提案し、実際の管路網に適用している。Obradovic *et al.* (1986) は特性曲線法および伝達関数法を用いて水力発電所取水管路内流体の地震応答解析を行い、地震時の流体力は条件によってはかなり大きくなり、今後流体と構造物の連成などを考慮した解析が必要であると述べている。

配管内流体の応答は必然的に構造系の応答を引き起こし、いわゆる流体構造連成応答を生ずる。水撃解析等では流体—配管系の連成を考慮するために特性曲線法とモーダルアナリシスを組み合わせて解析した例がある (Wiggert and Hatfield (1983))。しかし、配管の地震応答を対象とした連成振動解析は最近ようやく始められるようになったばかりである。Ogawa (1983) は直管モデルを用いた実験により、配管内流体が動的な応答挙動を示すこと、構造体との連成が生ずることを示すとともに、このような応答特性が理論解析により説明できることを示した。Hatfield and Wiggert (1987) は直管を対象とした連成地震応答解析を行ない、端末での流体配管の連成 (いわゆる集中的相互作用) の他に直管部での相互作用 (ポアソンカップリング) も薄肉管では考慮すべき点であるとしている。また、Hatfield and Wiggert (1988) は伝達関数法を用いて連成地震応答を解析する手法について考察している。一方、Hara (1988) は Z 型配管モデルを対象として基礎方程式に基づく理論解析を行ない、いわゆる Dead mass モデルが非安全側の応答評価を与えることがあること、高速増殖炉などの配管系では流体連成応答についても考える必要があることを指摘している。小川 (1988) は一般的な立体配管系のシミュレーション解析手法とその計算例を示し Dead mass モデルとの相違、負圧発生の可能性を示した。

しかし、これまでの研究は直管の実験例を除きもっぱら理論的な研究として行なわれてきており、立体配管を用いた実験による検証はまだ行なわれていない。流体の応答は配管長に依存するため実規模の立体配管系を対象とした実験が非常に有効と思われる。このため、本研究では比較的長い一定の配管系に対し、流体的な条件 (境界条件など) だけを変えた場合の応答挙動を調べるための各種振動実験を行なった。また、流体連成応答の時刻歴応答解析法によるシミュレーションを実験結果と比較するとともに、Dead mass モデルの問題点、圧力波速度の影響、配管支持剛性の効果などについても検討を加えた。

2.2 実験条件と実験ケース

本実験では配管両端の流体境界条件を基本的な条件として配管系の応答挙動を検討する。試験条件の設定および目的は以下の通りである。

配管長

長さ 25 m の振動台上立体配管系に台外への直延長管を接続して全長 40 m の配管系モデルを製作した。

流体境界条件

表1 実験ケース
Table 1 Test case

Test piping model (40 m)				Internal pressure (max.)
With orifice		Without orifice		
Test case	Fluid boundary condition	Test case	Fluid boundary condition	
C	No water		—	
D	Closed-Closed	F-1	Closed-Orifice-Closed	500 kPa
E-1	Tank-Closed	F-2	Tank-Orifice-Closed	20
E-2	Tank-Pump	F-3	Tank-Orifice-Pump	150

配管内流体の条件として、空水の場合、加圧密閉（両端閉）の場合、静止状態のタンク閉配管系の場合および流送の場合の4つの条件を考えた。流送の条件は境界条件を両端閉の場合と比較するために、ポンプタンクとしたものであるが、流速は極めて遅く（10 cm/sec以下程度）、定常流の影響等は考えない。また、空水以外の3つのケースについては配管系のほぼ中間にオリフィスを挿入したモデルも対象とした。

実験全体を総括的に示すと表1の通りである。

2.3 試験体の構造と特徴

(1) 全体形状

配管試験体の形状および寸法、構造上の主要点を図1に示す。

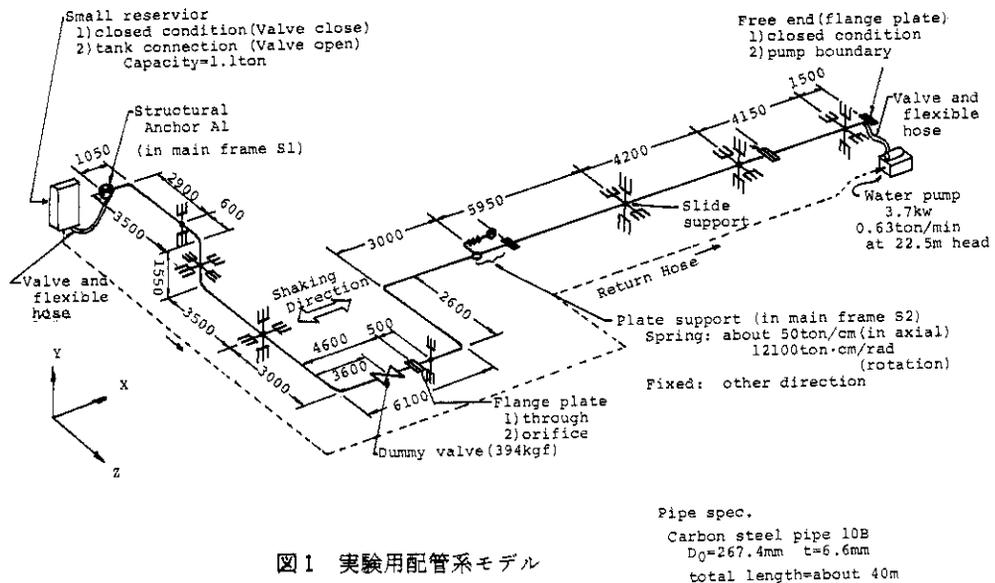


図1 実験用配管系モデル
Fig. 1 An outline of test piping

片端は構造的にはアンカーとし、流体的にはバルブ操作により閉端またはタンク接続としようようにしている。中央部には模擬バルブおよびオリフィス挿入用のフランジを設けている。直延長管との接続はフランジとした。延長管の端部は自由端とし盲フランジを取り付けた。なお、振動特性については1次の固有振動数が5~10 Hzとなるように設定し、模擬バルブの重量、位置により調整できるようにした。

(2) 配管支持装置

振動台上の立体配管は通常のレストレイント（ギャップ0）とするが、テフロンを挿入し摩擦の影響を小さくした。

台上配管と延長直管との接続部はプレート（9 mm）で支持し、加振直角方向への並進変位を拘束した。この支持部は、配管軸方向および回転変位に対してはバネとなる。このため設置後、バネ定数の測定を行った。但し、ねじりに対してはほぼ剛な拘束である。なお、末端が自由端であるという条件は実際の配管ではほとんどないものと思われるが、ここでは末端支持部に本来あるべき支持部のバネ特性を前記プレート支持部のバネに集中して考えている。

台外の延長管の支持は軸方向には自由にスライドでき、他方向には拘束がかかる方法で支持した。軸方向のスライドをスムーズにするためにレストレイントと同様、テフロンプレートを用いた。

(3) 流体境界条件の設定方法

空水条件

配管系自体の特性を確認するために空水で他の条件を同一にして実験した。

加圧密閉（両端閉）条件

配管の両端を閉鎖し、満水加圧とエア抜きを反復して試験条件を設定した。エア抜きは注水時のエア抜き、流送によるエア抜きの他、加振によるエア抜き（10 Hz）を併用して行った。

流送条件（ポンプ・タンク）

両端にポンプ及びタンクを設置し低速で水を循環させて加振した。タンクからポンプ吸い込み口までの戻りはゴムホースとし、これについては実験対象外となるようにした。

開放条件（タンク・閉端）

配管系の片端を前記の簡易タンク（満水）に接続し、他端を閉止とした。この場合、ポンプにつながるストップ弁を閉とした。なお、配管系の両端末は閉止フランジを用い、タンクおよびポンプへの接続はこの閉止フランジ付近から横管を出し、ホースに接続した。

オリフィス

以上の各モデルにはオリフィスを取り付けられるようにし、オリフィス有り、無しの実験が行えるようにした。オリフィス板（開口は配管内径の1/2、板厚5 mm）挿入は配管系中央部にフランジ接合部を設けて行なった。

なお、以上のうち、タンク（小型）およびポンプは配管の流体境界条件を設定するために

のみ使用するものであり、これらの機器自体は実験の対象外とした。このため配管との接続にはフレキシブルホースを用いた。

3. 実験方法および計測

実験は支持条件および流体条件（エア抜きを含む）を設定した後、P波速度の計測を行った。P波計測後、所定の手順で加振実験を行った。

入力波

入力波は正弦波等の規則波の他、以下の波形を用いた。

- (1) ランダム波 帯域 5~30 Hz
- (2) 地震波 S2床応答波（3 Hz 以下を減衰させた波）

計測

計測は加速度、水圧、変位および歪について行った。これらの計測点の位置、方向を図2~4に示す。計測値の記録はデジタルデータレコーダで行い、サンプリング 200 Hz、64チャンネル同時計測とした。なお、P波速度の計測では8チャンネル、2 kHz/chのサンプリングでデータ収録を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 各実験条件における圧力波（P波）伝播速度測定結果

エア抜きが比較的うまくいったほとんどのケースでは 1250 m/s 前後の値が、比較的條件の悪い場合で 1000 m/s 程度の値であった。代表的な計測波形および計測結果を図5および表2に示す。励振方法としては管端でのハンマー衝撃を用い、圧力計の感度を上げて計測した。

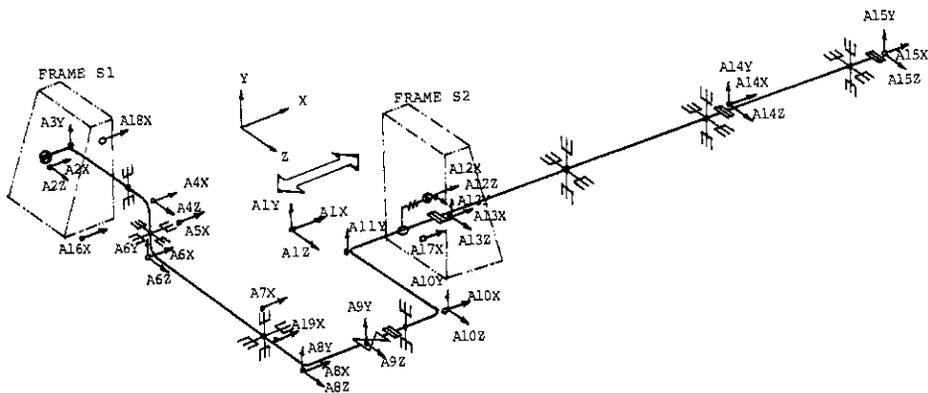


図2 センサー位置図（加速度）

Fig. 2 Measurement points of acceleration

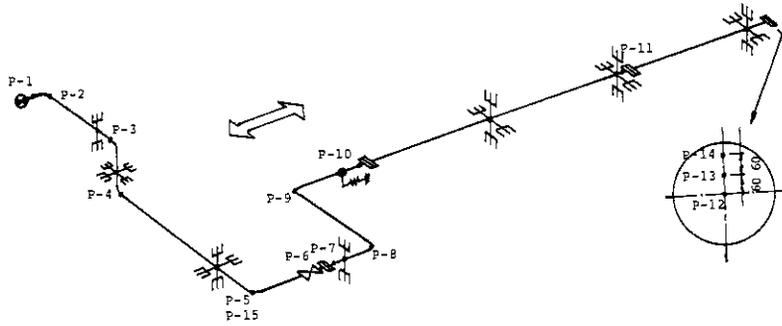


図3 センサー位置図(圧力)
Fig. 3 Measurement points of pressure

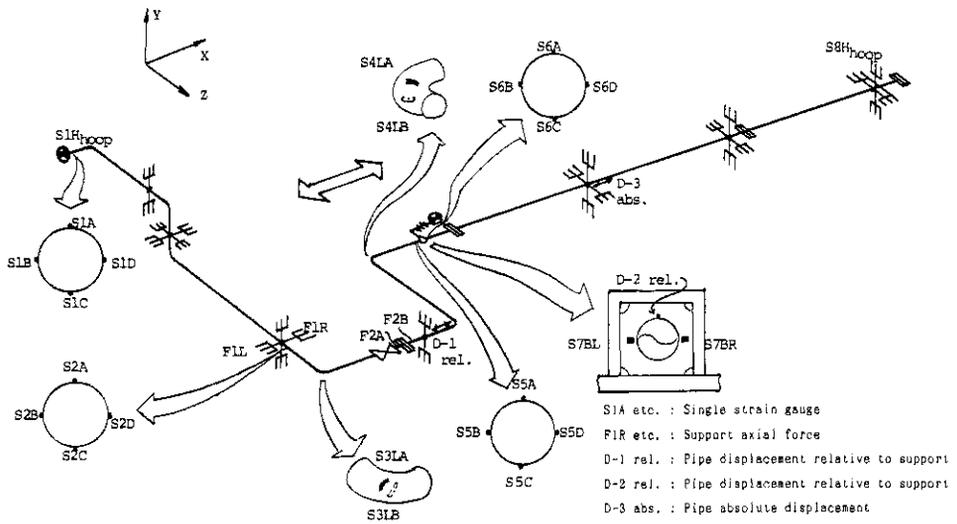


図4 センサー位置図(変位および歪)
Fig. 4 Measurement points of displacement and strain

表2 P波伝播速度測定結果
Table 2 Pressure wave velocity by measurement (typical value)

Case	Model	Velocity (m/sec)
D	40 m C-C	1257 (P 1-P 12)
E-1	40 m T-C	1218 (P 4-P 12)
E-2	40 m T-P	—
F-1	40 m C-O-C	1106 (P 1-P 12)
F-2	40 m T-O-C	1107 (P 10-P 12)
F-3	40 m T-O-P	—

(注) 境界条件
 C-C : Closed-Closed Piping
 T-C : Tank-Closed
 T-P : Tank-Pump
 C-O-C : Closed-Orifice-Closed
 T-O-C : Tank-Orifice-Closed
 T-O-P : Tank-Orifice-Pump

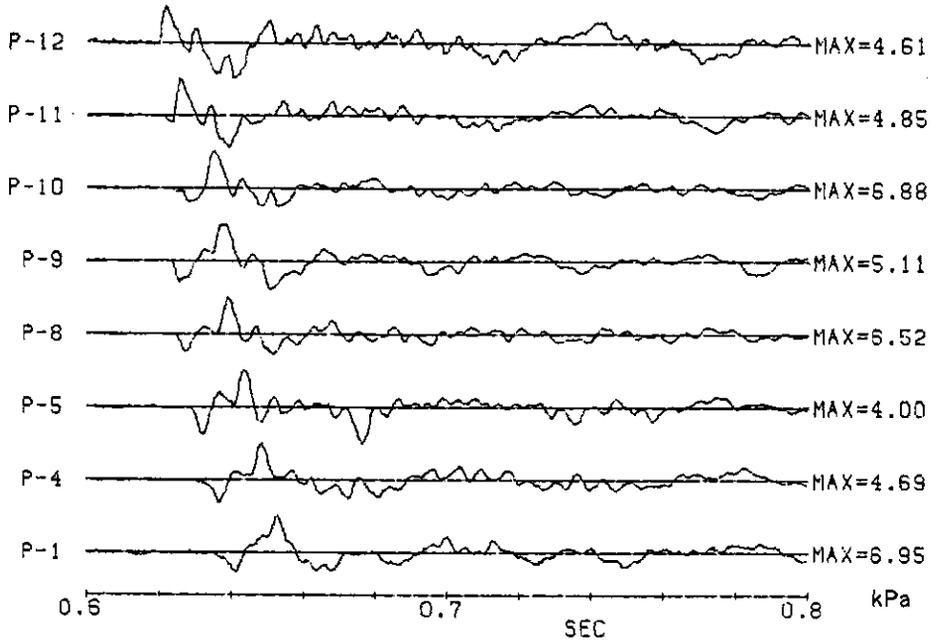


図5 配管内圧力波の伝播 (P-1 から P-12 への平均速度 1270 m/sec)
 Fig. 5 Typical measurement of pressure wave propagation
 (About 1270 m/sec from P-12 to P-1, model D)

計測された波形のうち、初動部のピークの走時から平均速度を算出したが、管体を伝わる波は中間の支持部等で吸収されるためか、圧力の波形にあまり影響していないようであった。

片端タンク、他端閉の条件 (E-1, 内圧はタンクのヘッドのみで 20 kPa 程度) では、センサー位置によるバラつきはあるが、ほぼ表のようであった。なお、他端ポンプの条件 (E-2) では流送雑音のため計測できなかった。

4.2 各種流体条件での基本的な応答特性の比較

流体境界条件が異なる場合の応答の差異をみるために、ランダム波加振による応答波形 (主要部 6 秒) を比べた。図 6 はこの場合の振動台加速度波形である。各ケースでの配管モデルへの入力波は波形およびレベルともほぼ一定であることがわかる。空水の場合は振動台に対する負荷重量が異なることもあって、有水の場合と波形が若干異なっている。

図 7 は圧力応答波形の比較である。圧力の応答は当然であるが流体境界条件によって顕著な差異を示す。加圧条件ではほぼ対称的な応答を示しているが、モデル E-1, 2 等では静圧が低いため負圧の拘束が生じ、応答は片ぶれとなっている。また、オリフィスのあるケースの方が応答値は低くなっており、圧力の応答に対してオリフィスが減衰効果を持つことがわか

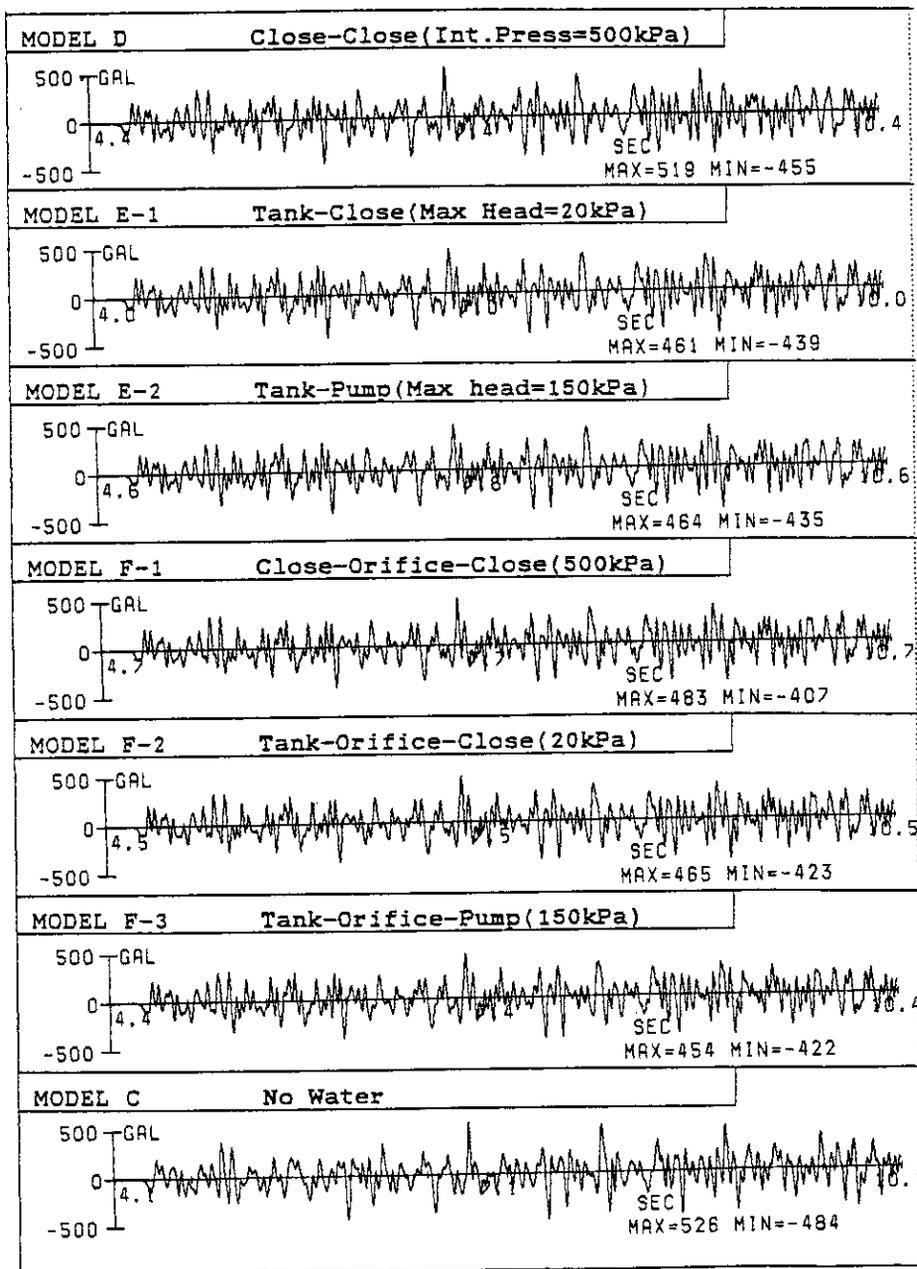


図6 振動台加速度波形(各流体条件での試験体への入力波, 元波は定常ランダム波)
 Fig. 6 Main part of shaking table acceleration waves for comparison of liquid boundary effects (Random wave excitation)

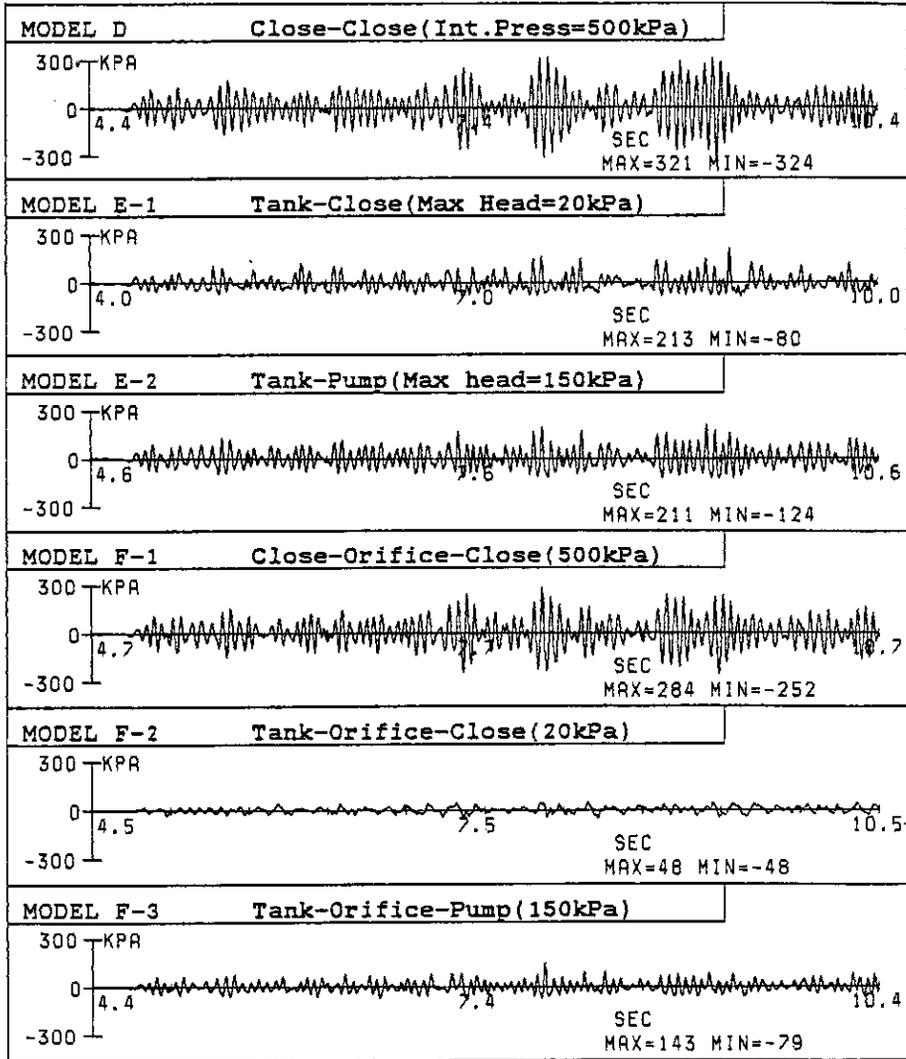


図7 各流体境界条件における配管内流体の地震応答 (圧力 P-1, ランダム波入力)
 Fig. 7 Comparison of liquid dynamic effects on pipe seismic response
 (Pressure P-1, random wave excitation)

る。なお、オリフィス前後の圧力応答、軸力を測定したが、応答レベルには明瞭な差がみられなかった。モデル E-1, 2 では圧力計 P-1 は開放タンク接続部付近に取り付けられており、圧力の変動は吸収される場所であるが、実際には配管末端は閉端でその付近から、横管でタンクに接続している。このため、図のようにレベルは低いが高動的圧力変動を生じている。

図8は3条件 (オリフィス無し) での圧力応答 (P-1) の伝達関数 (この場合は長さ 20 秒

のデータを用いた、また解析の入力は振動台加速度である)をみたものである。図によればモデルDの場合、15.2 Hzと19 Hzに2つの明瞭なピークを生じている。19 HzのピークはモデルE-2にも生じているがE-1ではピークがほとんどつぶれているようである。15.2 Hzの明瞭なピークはモデルDだけに生じている。モデルDの圧力波の速度(表2)から、配管系を長さ40.1 mの単純な1本の直管とした場合の液柱の第一次固有振動数は15.7 Hzであり、実際には配管系が剛ではないため、圧力の共振はこれより低くなると考えられる。従ってモデルDの15 Hz付近のピークは液柱の動的応答によるものといえる。

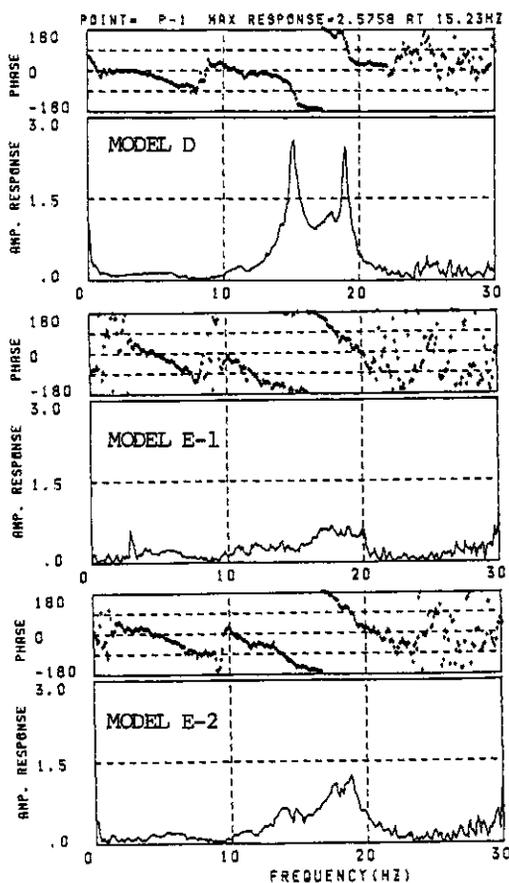


図8 3つの流体境界条件の場合の配管内圧力の応答伝達関数
Fig. 8 Comparison of pressure response functions for three liquid conditions (kPa/Gal)

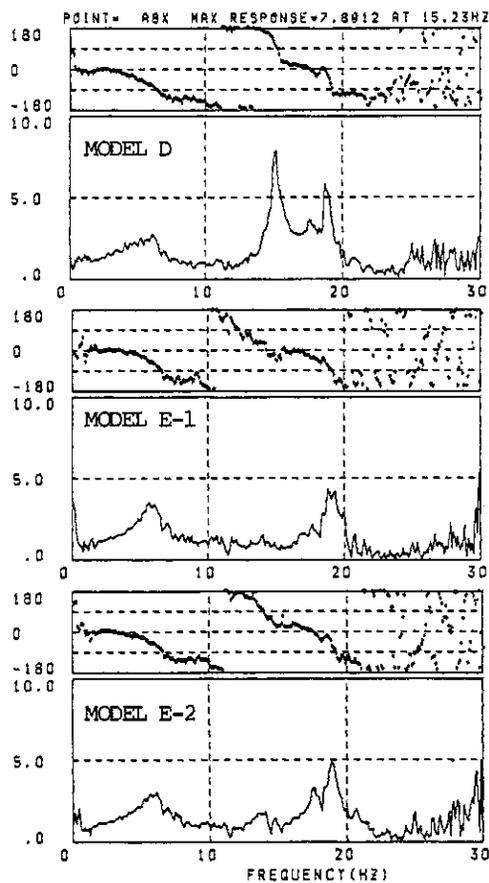


図9 3つの流体境界条件の場合の配管加速度の応答伝達関数
Fig. 9 Comparison of acceleration response functions for three liquid conditions (Gal/Gal)

図9に同様にして求めた配管加速度応答（加振方向 A8X）の伝達関数を示したが、同じ 15.2 Hz の振動数でモデル D のばあいに卓越ピークを生じ、他のケースではそれがみられない。従って、このピークは液柱の動的応答に関連して生じているものであり、その応答値は配管と液柱の連成応答によって決まっているものと考えられる。

一方、前述の圧力応答にも一部現われている 19 Hz のピークは配管加速度には流体条件に関わらずほぼ同程度に現われている。従ってこのピークは液柱の動的応答の成長を伴わない、すなわち液体が Dead mass としてふるまう振動数での配管系の固有振動が現われているものと考えられる。前図のモデル D での 19 Hz の圧力応答のピークは管の振動に付随して生じた圧力変動（Dead mass 効果に等価なもの）と思われる。なお、図9には 6.1 Hz 付近のピークも流体条件に関わらず現われているが、振動数が低いこともあり、図8の圧力応答にはほとんど現われていない。しかし、この振動数のモードで大きく動く配管中央部の圧力応答には多少その影響が現われた。

図10は配管の加振直角方向の加速度応答波形（A10Z）を比較したものである。この応答波形は圧力の応答と同一の傾向を示している。圧力応答との対応については次のように考えられる。すなわち、配管の中間部の圧力 P-8 および P-9（いずれもエルボ位置）でも圧力応答を生ずるが、それらは（圧力波の伝播などのため）時間的に位相差を生ずる。このため、両圧力計のついている配管部分（加振直角方向）には圧力差による起振力が作用する。モデル D のように圧力応答が他よりも高く生ずるような流体境界条件の場合はその効果が比較的顕著に現われるため、図10のような差異を生じたものと考えられる。また、逆にモデル E-1 などの場合、圧力応答が負圧による拘束のためやや異常な応答波形であったが、加速度の応答にもそれに対応した傾向（ピーク値がパルス状に生ずる、あるいは片振れの傾向がある点など）がみられる。

一方、比較的長い直管部（延長管）では圧力応答自体が中間部分より大きくなると同時に、前記のような圧力応答の位相差による配管起振力が顕著に現われることが予想されるが、実験結果をみると端末の圧力応答、直管部の加速度応答、変位応答はこの点を裏付ける応答を示した。図11はその例であり、直延長管の軸方向支持パネの変形（配管の相対変位）の応答である。圧力の応答ほど顕著ではないが応答波形をみるとほぼ同様の傾向が認められる。

以上の実験結果を元に若干の推定をつけ加えると配管と流体の連成挙動について以下のような場合が考えられる。

- (1) 流体の共振的な応答が成長し得る条件がある場合（モデル D など）、圧力応答は配管の応答に顕著な効果を与える。その振動数および応答レベルは配管と液柱の連成によって決まるものと思われる。
- (2) 流体の（配管との連成を伴う）共振を生じない領域でも、流体の Dead mass 効果を含む配管系の共振点で配管加速度および圧力の応答にピークを生ずる。この圧力の応答は配管

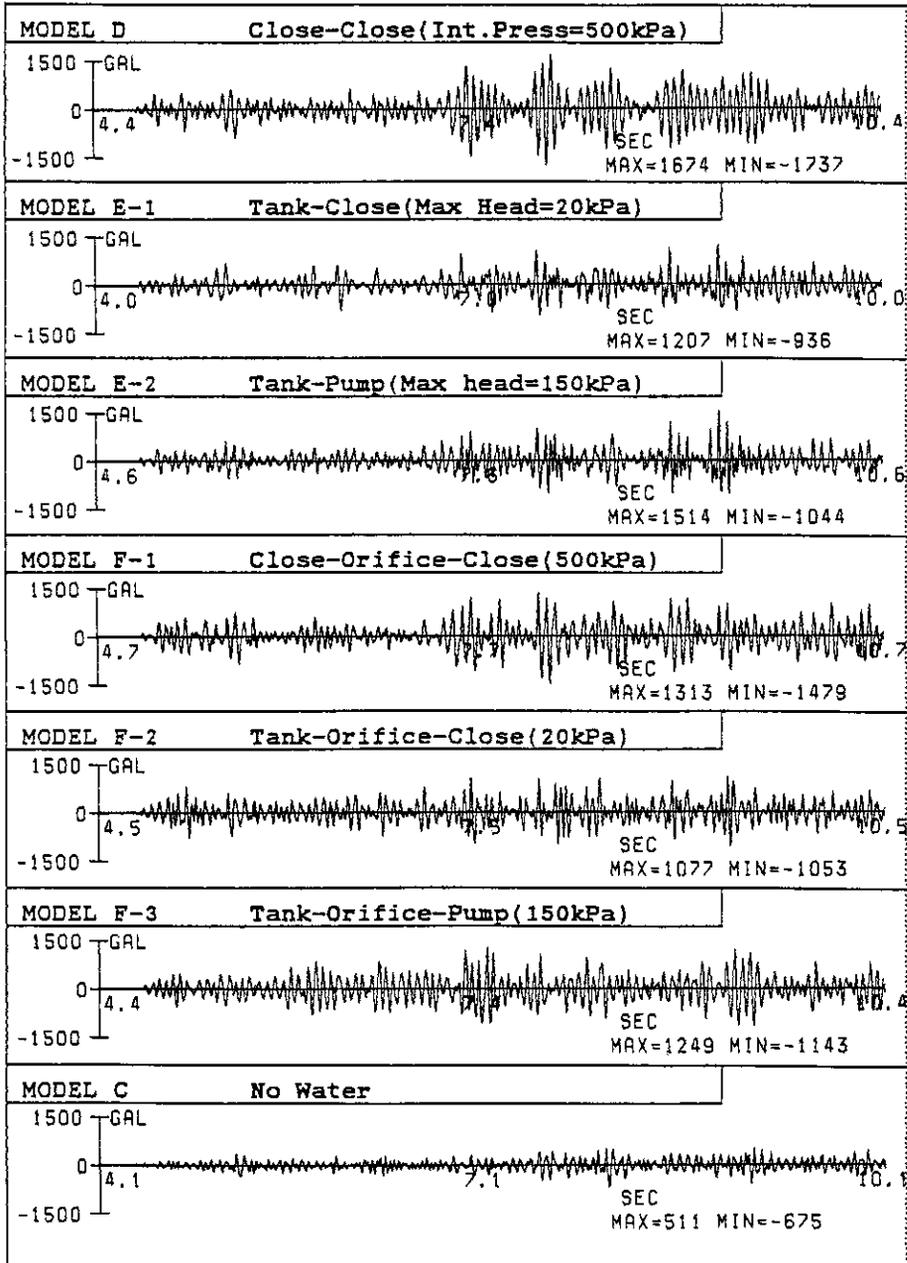


図10 各流体境界条件における配管の地震応答波形(加速度 A 10 Z)
 Fig. 10 Comparison of liquid dynamic effects on pipe seismic response
 (Acceleration A 10 Z, random wave excitation)

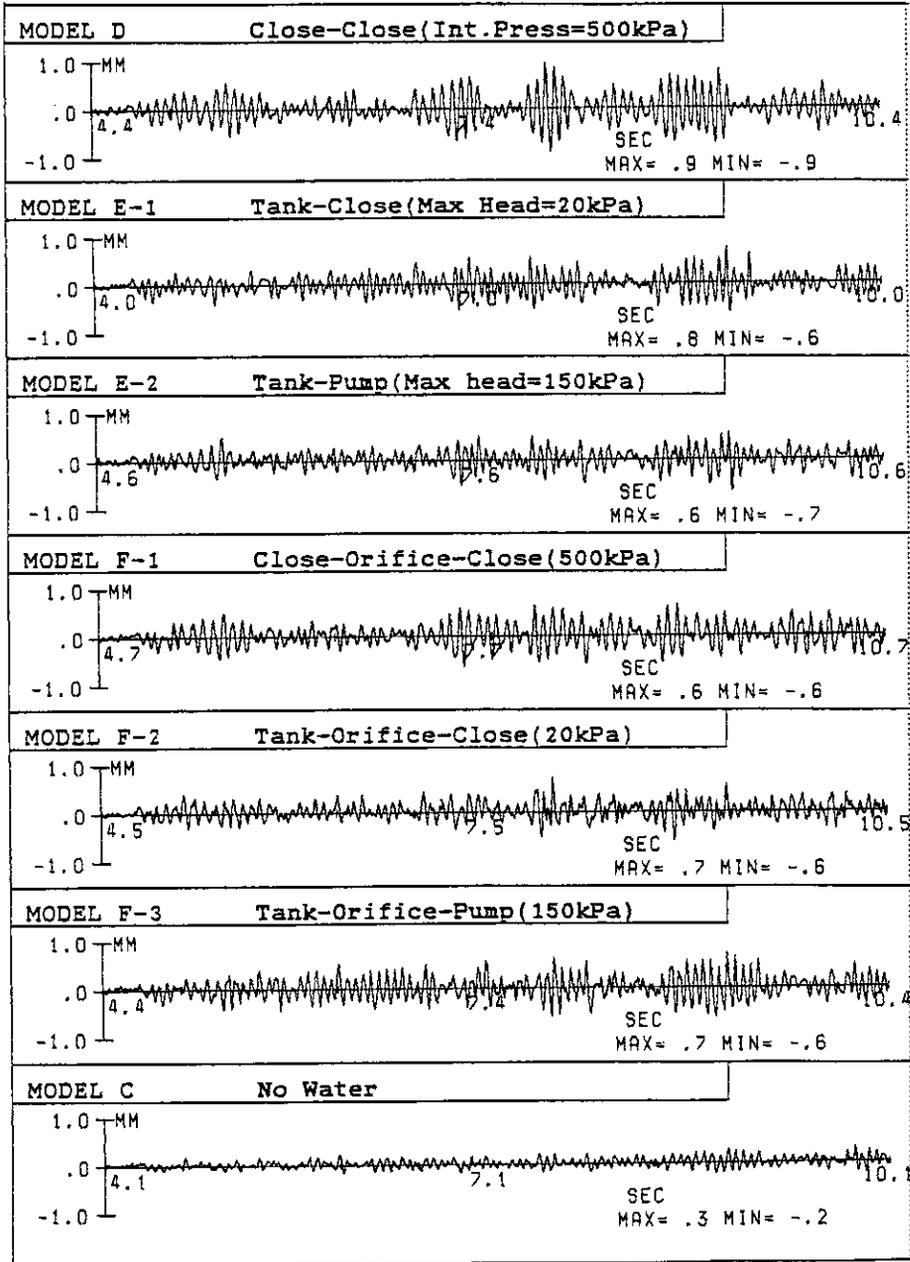


図 11 各流体境界条件における配管の地震応答波形 (支持部変位 D-2)
 Fig. 11 Comparison of liquid dynamic effects on pipe seismic response
 (Relative displacement D-2, random wave excitation)

の振動加速度に対応して発生するものであり、いわゆる Dead mass 効果と等価的なものと考えられる。

(3) 系の常圧が低い場合、あるいは開放端があるような場合、負圧の拘束または発生圧力の逸散により、配管系には前項(1)の効果はほとんど消滅し、また、(2)の Dead mass と等価な効果についても減衰効果が生じて応答がなまる。ただし、逆に後述のように負圧にとまらう挙動が現われる。

4.3 配管系各部の応答分布と流体条件

モデル配管系の主要応答について流体境界条件による差異を前節で検討したが、その他の測定点を含めて全体的な応答状況が流体境界条件によってどの程度かわるかについて取りまとめてみる。ここでは応答の波形特性を一応無視してランダム波加振主要部6秒の最大応答値のみで各流体条件の効果を比較してみた。なお、最大応答値を求める場合、応答波形を0~33 Hz 帯域でフィルタリングしたものについて求めた。

図12はオリフィスのないケースについて圧力応答の最大値の分布を示したものである。両端で応答が大きく中間で小さくなる傾向は、圧力応答の第一次モードとほぼ一致しているが、モデルD(両端閉)の場合がその傾向が明瞭である。これは、モデルDの場合、設定圧が高く負圧の拘束が少ないため圧力応答が成長しやすいためといえる。圧力分布の特徴としてはP-10で応答が最小になっていることがわかる。(図12の場合、P-9は圧力計損傷で欠測となっているが他の地震波などの結果をみるとP-10付近が圧力応答の節となっている)。このP-10の位置は配管の中央位置ではなく自由端から約15.7mの位置である。すなわち、全体が1本の直管であれば、ちょうど中央位置(自由端から20.5m、P-8とP-9の中間でP-8から90cmのところ)で圧力応答(一次モード)の節を生ずるはずであるが、実際には中間の曲がり部等で圧力波の反射を生じ、配管剛性との連成も影響して図のような圧力分布を示しているものと考えられる。

図13は同様に加速度の応答を前記と同様3つの流体条件で比較したものであるが、参考に空水の場合の応答も示した。流体条件によって応答値がかなり変わる点とあまり変わらない点があることがわかる。図をみると流体条件の影響は加振方向加速度(水平X)で顕著であり、他の方向については顕著ではないが場所によっては前述のA10Zのように差異が明瞭に現われている。

直延長管の軸方向加速度(A13-15X)は差異が顕著でまた圧力の挙動と反対に密閉加圧条件の方が他の条件の場合より応答が低くなっている。伝達関数をみるとモデルDでは前記の連成応答成分(15.2 Hz)が卓越しているが、モデルE-1, 2の場合はその成分がなく、前項で述べた流体条件に関わらず配管応答に生じていた振動数成分(19 Hz)のところに山を生じている。この山はモデルDの場合にも生じているが、モデルE-1, 2に比べピーク値は約半分

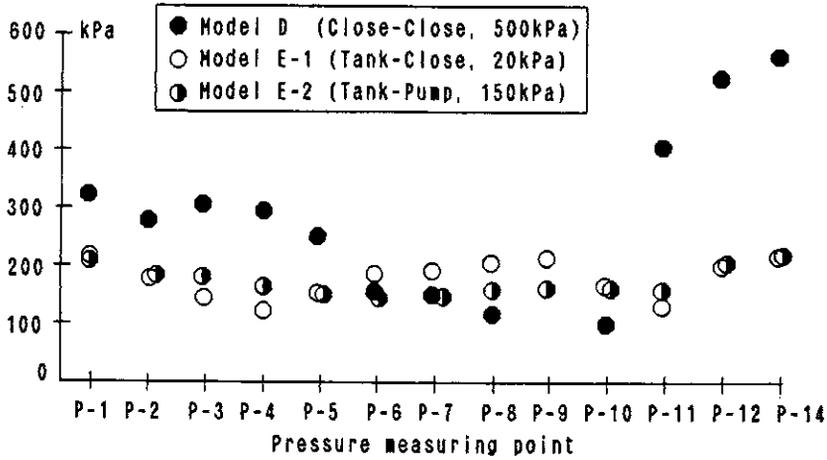


図 12 配管各部の圧力応答最大値と流体境界条件 (ランダム波入力)
 Fig. 12 Maximum values of pressure response for typical liquid conditions
 (Random wave excitation, 6 sec, without orifice)

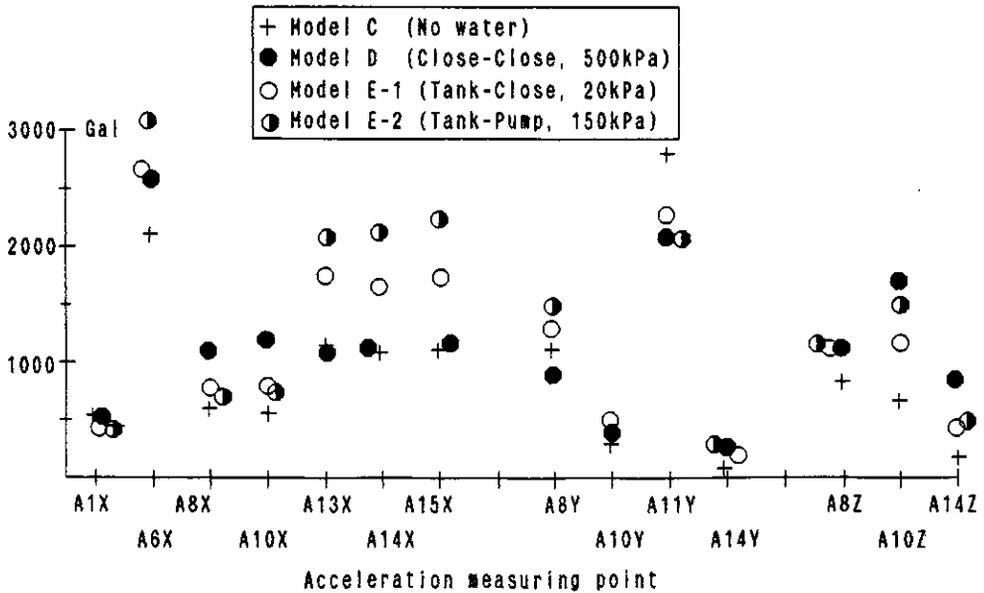


図 13 配管各部の加速度応答最大値と流体境界条件 (ランダム波入力)
 Fig. 13 Maximum values of acceleration response for typical liquid conditions
 (Random wave excitation, 6 sec, without orifice)

である。このためモデル E-1, 2 の方が最大応答が高くなっている。自由端が閉端でなくポンプに接続されている E-2 でこの成分による応答が最大になっていることから、19.2 Hz で現われる振動モードに対して延長直管部の液体の Dead mass としての寄与が小さいということが考えられる。しかし、配管全体が空水である場合は、モデル D と同じく応答が他より低くなっている。

次にオリフィスの影響を代表的なケースについて比較してみる。図 14 は密閉加圧のケースでオリフィスの有無による圧力応答の違いを示したものである。オリフィスにより圧力応答が全体として低下することが示されている。加速度応答の場合の差異をみたものが図 15 である。オリフィスにより応答が低下する場合とそうでない場合があり、その傾向は一様でないが、配管の上下動 A8Y と A11Y で差異がめだつようである。

オリフィスの有無を含め、各実験ケースでの変位応答最大値を比べたものが図 16 である。流体境界条件だけの変化により配管の変位応答に 2 倍程度の差を生じ得ることがわかる。

4.4 地震波加振による応答の比較

地震波による応答が流体境界条件によってどの程度変わるかをみるために各モデルの応答を比較してみた。加振レベルは前のランダム波の場合よりかなり高くしている。振動台加速度のピーク値は約 2.1 G である。各流体境界条件の場合の入力（振動台加速度）はランダム波加振の場合と同様わずかに差があるが波形、レベルともほぼ同じであった。実験の結果、圧力、加速度等の応答は基本的にはランダム波による場合と同様の傾向を示した。

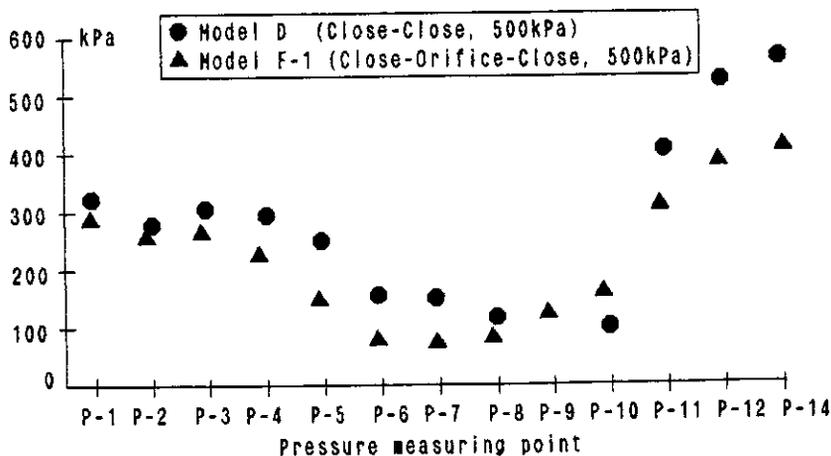


図 14 オリフィスの有無による配管各部の圧力応答最大値の比較（ランダム波入力）
 Fig. 14 Comparison of pressure response of pipings with and without orifice
 (Closed boundary condition, random wave excitation)

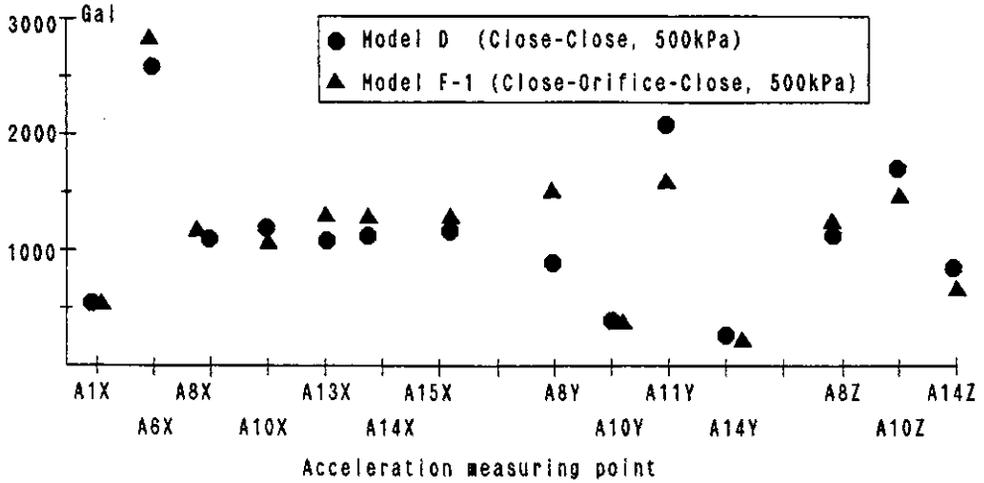


図 15 オリフィスの有無による配管各部の加速度応答最大値の比較 (ランダム波入力)
 Fig. 15 Acceleration response of pipings with and without orifice
 (Closed boundary condition, random wave excitation, 6 sec)

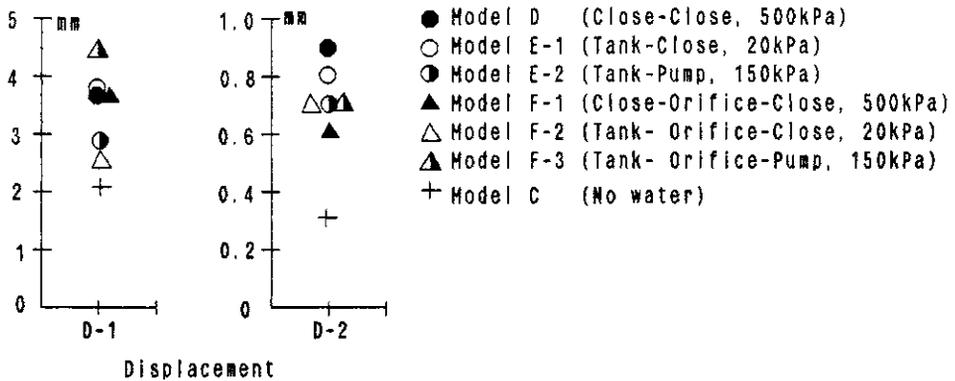


図 16 各流体境界条件での配管変位応答最大値の比較 (ランダム波入力)
 Fig. 16 Displacement response for various liquid condition
 (Random wave excitation, 6 sec)

代表例として、5 ケースの流体境界条件について (ケース F-1 は対応するレベルの地震波加振を行っていない) 前と同様の方法で配管歪応答の最大値を求めて比較したものが図 17 である。この図から延長直管部付近での配管の歪が大きくまた流体条件による差異がめだつことがわかる。特に、エルボ S4LA およびプレート支持部の配管の曲げ歪にその傾向が顕著である (図の歪 B と D から算出した水平曲げ歪が同じ傾向を示す)。すなわち、ケース名で応

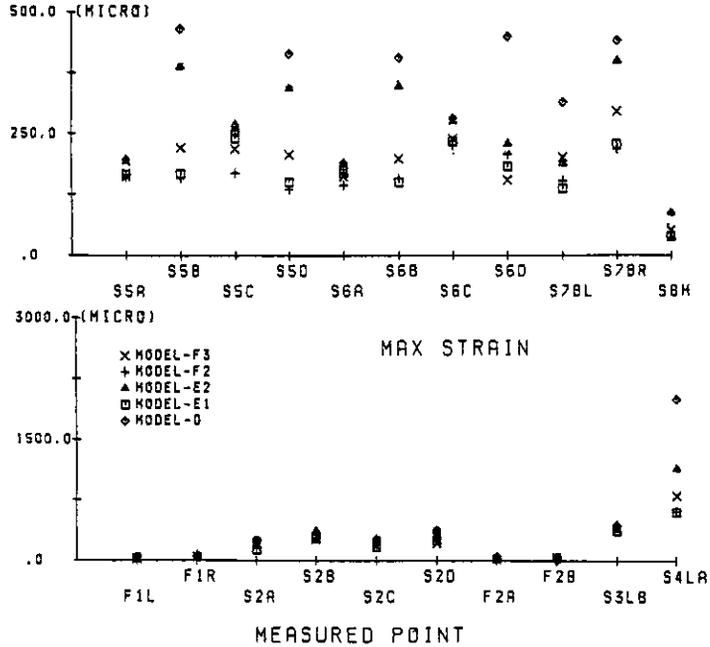


図 17 各流体条件での配管各部の歪応答最大値の比較
 (地震波加振, 振動台加速度最大値は約 2100 Gal)
 Fig. 17 Comparison of pipe strain response by earthquake wave excitation
 (Peak acceleration of excitation=about 2100 Gal)

答量を代表させると

$$D, E2 > F3, F2, E1$$

となっている。内圧がある場合（加圧またはポンプ送水）で応答が大きく、またオリフィスのある場合で小さくなっている。（ただし、F2とE1はあまり差がない）。また、ここには示していないが加速度 A10Z も同様の傾向を示している。

このことから流体条件による歪応答の差異はエルボ S4LA につながる配管の加振直角方向の変位を含む振動モードによることがわかる。この振動数は（図 18 のエルボの歪応答波形から）約 6.3 Hz であり、配管系の低次での主要モードである。このモードでは流体はほとんど Dead mass として振舞うものと考えられるにもかかわらず、流体境界条件により応答の差異を生じている。すなわち、前のランダム波による結果（加速度 A10Z）では、加振直角方向の流体起振力の効果を生じ、その結果流体境界条件により応答が変わることを述べたが、それ以外にも差異を生ずる場合があることを図 17, 18 が示しているようである。

図 18 の S4LA の最大値は主要部の単一ピークで生じおり、その値はほぼ降伏域に達してい

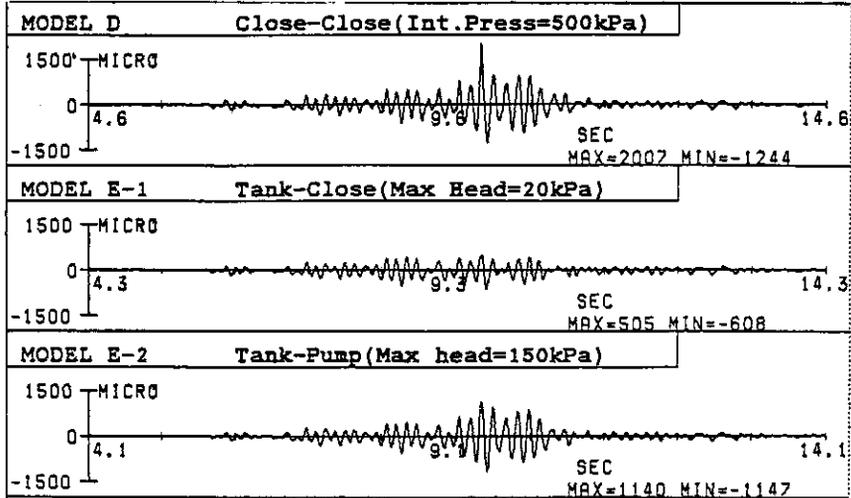


図 18 3つの流体条件での配管エルボ S4 LA の歪応答波形の比較

(地震波加振, 振動台加速度最大値は約 2100 Gal)

Fig. 18 Response waves of elbow strain S4 LA for three liquid conditions

(Earthquake wave excitation ; peak acceleration of excitation = 2100 Gal)

ることが分かる。なお、加振直角方向の加速度 A10Z にも対応するところで 1 波程度の大きいピークを生じている。図 18 のモデル D と E-2 を比べると、モデル D に生じている卓越する 1 波のピーク部分を除くと両者はほぼ一致していることがわかる。すなわち、モデル D と E-2 は配管の主要モードでほとんど同じ応答を全体として示しているが、D の場合、応答のピーク付近でさらに応答が伸びている。この原因としては、前述のような流体起振力あるいは次項で述べる負圧による衝撃が考えられる。しかし、圧力計 P-9 が損傷により欠測していたためこの点については推定の域を出ない。

他方、モデル E-1 は他よりかなり応答が低くなっている。この理由としては、系内圧が低くまた開放端を持つため、圧力の応答が成長しないのは当然であるが、それ以上に、流体の Dead mass 効果（管から流体に伝えられる加振力）に対応する圧力応答も逸散するため系に大きい減衰効果を生じたのではないかと考えられる。

4.5 負圧を伴う応答とその影響

正弦波加振で入力レベルが高くなると、各モデルとも流体の負圧応答と配管系のハンマリングを生じた。定常内圧がないケースでも、負圧により衝撃的な圧力を生じている。またこの時、応答に伴う異常音を発生した。地震波でも高レベルの加振では負圧に伴うハンマリングを生じたようである。圧力計測が負圧の測定に適していなかったため、負圧時とその後の

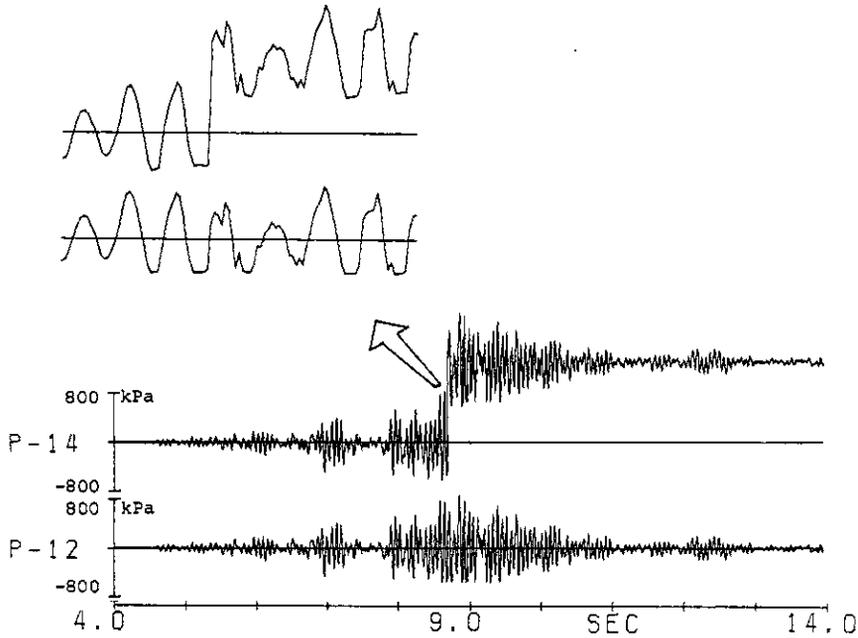


図19 負圧に伴う衝撃によると思われる圧力計の異常応答
(地震波加振, モデルDと同じ流体条件)

Fig. 19 Abnormal response of pressure gauge diaphragm due to negative pressure
(Earthquake wave excitation and same liquid condition as model D)

衝撃の圧力(のピークなど)は明確ではないが圧力計受圧面の損傷を何回も生じた。これは受圧面が直接振動圧にさらされるタイプの圧力計であったため、ハンマリングによる衝撃を受けたものと考えられる。その代表的な例を図19に示した。この計測位置は延長直管の自由端であり、配管断面の最上部の圧力計P-14(ダイアフラムタイプ、容量 $100 \text{ kgf/cm}^2 = 9800 \text{ kPa}$)に受圧面の変形と思われる異常応答を生じた。なお、この位置での圧力計の取付は端末フランジ板に直接取付ネジを設けており、受圧面はフランジ板内面とほぼ同一面になっている。配管中心軸高さにある圧力計P-12の場合は異常を生じていない。図の拡大波形にみられるようにいずれの圧力計も負圧によるマイナス側圧力の頭打ちを生じていると思われる。従って、負圧に伴うキャビテーションとそれによるハンマリングが配管末端の上部に生じたものと考えられる。このような現象は自由端だけでなくエルボ位置にある圧力計P-9などでも生じている。負圧に伴うハンマリングは衝撃的な圧力や加速度を生ずるため配管付属物などに損傷を与える可能性があるが、配管系の全体的な応答に対しては負圧の拘束により圧力応答が制限を受け、また系の減衰効果を増すものと思われる。

5. 地震応答解析

5.1 連成地震応答解析の考え方

配管と流体の連成は比較的長大な配管系において生ずるものと思われる。このため、地震応答を評価するためのモデルも複雑なものになることが考えられる。従って、応答解析の手法は、大規模な配管系に容易に適用でき、また計算の効率の高いものが適している。

このような点からみて、配管系および流体系をそれぞれに適した手法で解析し、これらの連成を適当な方法で考慮するのが一つの基本的な考え方であろう。本報告ではこのような考え方で解析を行なった。すなわち、配管系の解析では最も一般的な手法である Modal Analysis を適用する。また、流体の地震応答の解析も同様に大規模な系に適用しやすい手法を採用する必要がある。時刻歴応答の解析では、水撃の解析などに多く使われている特性曲線法 (Streeter and Wylie (1967)) が平易かつ計算効率がよい手法の一つであり、本報告でもこれを適用した。配管と流体の連成に関して本手法の要点を述べると次の通りである。すなわち、流体の配管系に対する効果を2つに分けて考え、配管のたわみ振動に対しては Dead mass として配管系の固有値解析に組み込み、他方配管系の軸方向振動に対しては流体の圧縮性による効果が大きいことから Dead mass とはせず、配管系を境界条件と考えて流体独自の応答計算を配管系の応答計算とは別に行なう。これによって得られる流体の応答圧力から各時刻ごとに境界節点での (配管に作用する) 流体力を算出し、配管系の応答計算に用いる。また、ねじりに対しては流体の効果は小さいとし、流体の質量は無視する。

なお、特性曲線法による流体の応答計算では簡単のため以下の仮定の基に計算を行なった。

- 1) 直管路の集合とし、両端で境界条件を適用する。
- 2) 各直管路は1次元の波動伝播式で取り扱う。
- 3) 圧力波の伝播に対する管摩擦および境界点での圧力損失の効果はないものとする。また、定常流は考えず圧力についても変動圧のみを評価の対象とする。

また、連成についても同様以下の仮定を用いた。

- 4) 液体から配管に作用する流体力については運動量の変化によるものを無視し、圧力によるもののみを考慮する。
- 5) 境界点での質量保存則および個別条件については管と液体の相対速度を用いて評価する。

計算の流れは、図 20 に示す通りである。基本のステップは管系、流体系とも Euler 法によっているが、全系の応答推定値が得られた段階でこれを1次推定値とする修正 Euler 法を反復適用した。

5.2 計算式

5.2.1 配管系

配管系の動的変位に関する運動方程式は、FEM 等により最終的に次のマトリクス形式で表わ

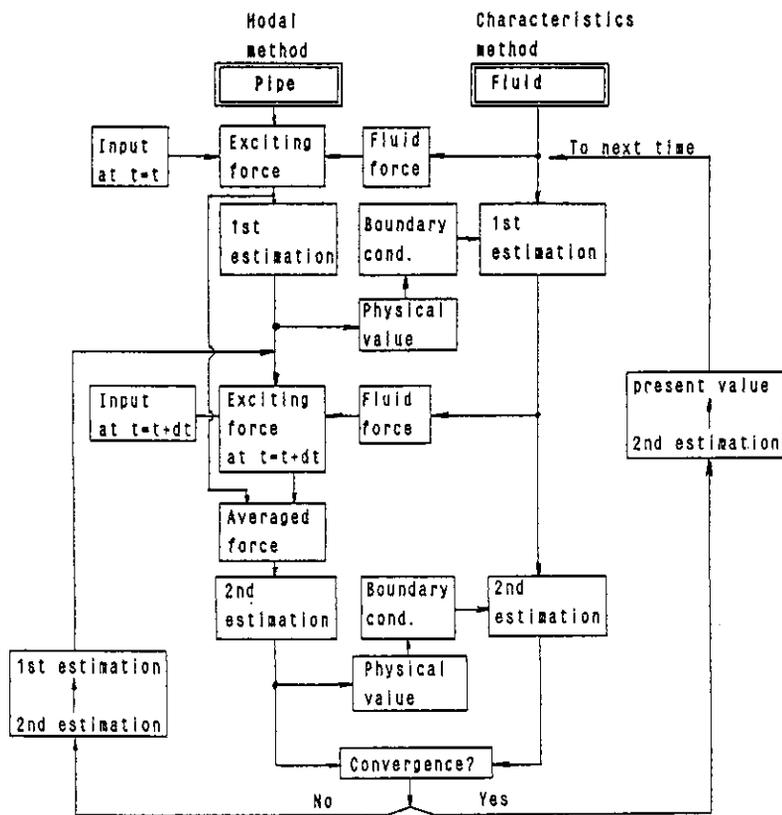


図20 地震応答計算の流れ
Fig. 20 Flow of coupled seismic response calculation

される。なお、質量マトリクス算出の際の流体の取り扱いについては前項で述べた点を考慮する。

$$[M_a]\{\ddot{X}_d\} + [C_a]\{\dot{X}_d\} + [K_a]\{X_d\} = \{[M_a][K_a]^{-1}[K_{ab}] - [M_{ab}]\}\{\ddot{X}_b\} + \{F\} \quad (1)$$

ここに

$\{X_b\}$: 拘束点の変位 (一般には多入力)

$\{X_d\}$: 動的変位ベクトル

$\{F\}$: 流体力ベクトル (各節点の x, y, z 並進成分のみ)

$[M_a], [M_{ab}]$: 質量マトリクスの部分マトリクス

$[K_a], [K_{ab}]$: 剛性マトリクスの部分マトリクス

$[C_a]$: 減衰マトリクスの部分マトリクス

上式にモーダルアナリシスを適用すると最終的に*i*次モードの応答計算式（準静的応答を除く）として以下のような式が得られる。

$$\ddot{q}_i + 2h_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = -\sum_{k=1}^S\beta_{ik}\ddot{X}_{bk} + \sum_{j=1}^L[\gamma_{ij}^x F_j^x + \gamma_{ij}^y F_j^y + \gamma_{ij}^z F_j^z] \quad (2)$$

ここに

q : 配管のモーダル応答変位

ω_i : 配管系の固有振動数

h_i : モーダル減衰定数

β_{ik} : 刺激係数 (*i*次モード, *k*次入力点)

X_{bk} : 拘束点変位ベクトルの成分

S : 入力点数

L : 流体力の作用する節点数 (流体境界点, $j=1, 2, \dots, L$)

γ_{ij}^x : 流体力のモード係数 (*i*次モード, *j*-境界点, *x*方向流体力)

F_j^x : *j*境界点での *x*方向流体力 (物理量)

上式右辺の第2項が流体力による外力項であるが、この項自体（圧力応答）が管系の応答量に依存して決まる（いわゆる疑似外力項である）ので、図20のように収束計算を要する。この流体力は前述の仮定から次のように得られる。すなわち流体の運動量保存則を考えると、外力の総和=圧力+管壁からの反作用力=運動量（流出-流入）であるが、右辺を小さいとして外力の総和=0とする。これから管壁に作用する流体力を求めたものが次式である。

$$\{F_n\} = \sum_{c=1}^{m_n} \text{sgn}(r_c) A_c p_{nc} e_c \quad (3)$$

ここに、

$\{F_n\}$: 節点*n*での流体力ベクトル

r_c : 節点*n*につながる管路 (m_n 個) の番号, $c=1, 2, \dots, m_n$

A_c : 管路断面積

p_{nc} : 管路 r_c の解析から得られた *n* における圧力応答値

e_c : 管路 r_c の正方向単位ベクトル

sgn : 管路の向きの定義から決まる符号

5.2.2 計算式（流体系）

水撃解析等では流体の運動および連続の式として

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f}{2D} (v-u)|v-u| + g \sin\phi \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho a^2 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (5)$$

を用い、これらを特性曲線表示に変換した式

$$\frac{dH^+}{dt} = G \quad \text{on} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (6-1)$$

$$\frac{dH^-}{dt} = G \quad \text{on} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (6-2)$$

により流体応答の計算を行なう。ただし、

$$H^+ = v + \frac{p}{\rho a}, \quad H^- = v - \frac{p}{\rho a} \quad (7)$$

$$G = g \sin\phi - \frac{f}{2D} (v-u)|v-u| \quad (8)$$

ここに

ρ : 液体密度	v : 液体粒子速度
a : 管内圧力波の伝播速度	u : 管速度
ϕ : 傾斜角	p : 圧力
D : 管内径	f : 摩擦係数

であり、いずれも各管路ごとの値である。また、 t は時間、 x は管路に沿う座標、 g は重力加速度である。本論では摩擦項を省略し、さらに定常流を考えないので $\sin\phi$ の項が略せて上式の $G=0$ となり流体の応答計算は極めて簡単となる。

次に流体応答計算に必要な境界条件の処理は以下の通りである。

1) 質量保存則

境界点に集まる管路の流入流出条件であり、曲がり点等通常の節点*i*では次式となる。

$$\sum_{c=1}^{m_n} \text{sgn}(r_c) \rho A_c (v_{nc} - u_{nc}) = 0 \quad (9)$$

ここに、 v_{nc} 、 u_{nc} は節点*n*における管路 r_c 方向成分値を表わす。

2) 境界点固有の条件

曲がり点、分岐点において各管路の圧力が等しいこと、タンクのような定圧端の条件等、境界点固有の条件を計算において考慮することが必要である。これについては個々の特性を表す式を特性曲線法の式と連立させて用いる。

なお、以上の流体系の境界条件処理に必要な節点における管速度の管路 r_c 方向成分は前記の配管の応答とベクトル e_c を用いて求められる。

5.3 実験と解析の比較および考察

本報告では配管系の両端が流体的に完全閉鎖である場合（実験ケース D）を計算の対象とする。流体（水）の静圧は約 500 kPa (5 kgf/cm²) であるが、圧力応答の計測はこれを除く動的応答成分のみについて行なっている。従って、シミュレーションでも動的応答分のみを対象とする。

5.3.1 配管系試験体のモデル化

解析には実験結果をふまえ、図 21 のようなモデルを用いた。モデル配管系の主な支持部である架構 S1 および S2 自体が明瞭な振動数特性を持つことが判明したのでこれを解析モデルに組み込んでいる。従って入力振動台からの 1 入力とした。また、中間の各支持架構も完全に剛ではないのでこれらの剛性を測定しモデルに組み込んでいる。但し、剛性計測を行っていない支持部については適宜仮定値を用いた。設定したモデルの定数等は図の通りである。

なお、計算用の入力は、実験時の振動台加速度記録をそのまま用いたが、空水の場合と満水加圧の場合で入力レベルが異なっている。図 22 に波形とパワースペクトルを示す。なお、波形は原子力施設の設計評価用入力波から求めた床応答波形をさらに振動台性能に合わせて変形したものである。

図 21 のモデルを用いて算出した固有振動数を表 3 に示した。表には空水の場合、Dead mass モデルの場合および連成計算に用いるモデルの 3 つのケースについて計算している。連成計算に用いるモデルは前述のように、流体の質量の扱いが Dead mass モデルと異なるだけであり、従ってこの表の固有値自体には動的連成の効果はなんら入ってはいない。

なお、前記手法による応答計算において使用するモード数が少ない場合、妥当な計算結果が得られない場合がある。すなわち、地震応答の評価で通常用いられる振動数より高いモードを省いた場合、圧力変動による管の縦変形等が無視されることがあり圧力応答、配管の振動ともに本来と違ったものになる。従ってこの種の計算では少なくとも境界点での圧力応答に対応する配管の変形が考慮されるよう必要な次数までのモードを用いなければならないと思われる。

表 3 には計算に用いた減衰定数も示した。これらの値は実験結果を参考にしたが、最終的には計算と実験による応答を比較して良好と思われる値に設定している。なお、ここでは簡単のため、連成モデルと Dead mass モデルは同じ減衰値を用いた。

5.3.2 空水条件での実験と計算の比較

図 23 に空水の場合の計算と実験の比較を示す。固有値およびモードのずれのため計測点によっては若干の差異が認められるが、全体として計算と実験はほぼ一致している。本試験体の場合、計測点 D-1 の近くの上下方向レストレイントの支持部において摩擦による非線形挙動が生じたと思われる、図の A-8X、A-10Z 等の差異はその影響によることが考えられる。なお、変位 D-2 は直管部の軸方向支持バネ（板バネ）部での配管の軸方向変位（板バネの変形

- M Mass of reaction frame (Mg=15tonf)
- K₁, K₂ Equivalent stiffness at support (10,5tonf/cm)
- K₃ Equivalent stiffness at support (5tonf/cm)
- K₄ Equivalent stiffness of support friction (1tonf/cm)
- K₅ Axial stiffness of plate support (50tonf/cm)
- K₆, K₇, K₈ Equivalent vertical stiffness of sliding support (1.5, 10, 10tonf/cm)
- R₁, R₂ Rotation stiffness of reaction frame S1 (4.70×10⁴, 3.35×10⁴ton.m/rad)
- R₃, R₄ Rotation stiffness of reaction frame S2 (5.65×10⁴, 5.45×10⁴ton.m/rad)
- R₅, R₆ Rotation stiffness of of plate support (1.21×10², 1.21×10²ton.m/rad)

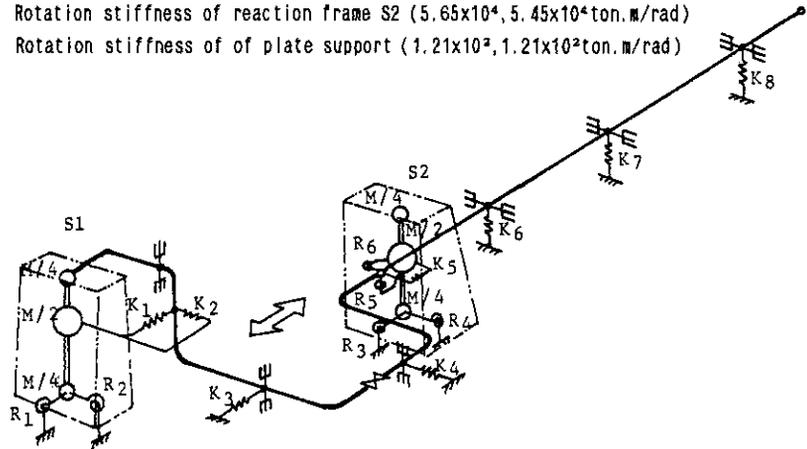


図21 試験体配管の解析モデル
Fig. 21 Analytical model of test piping system

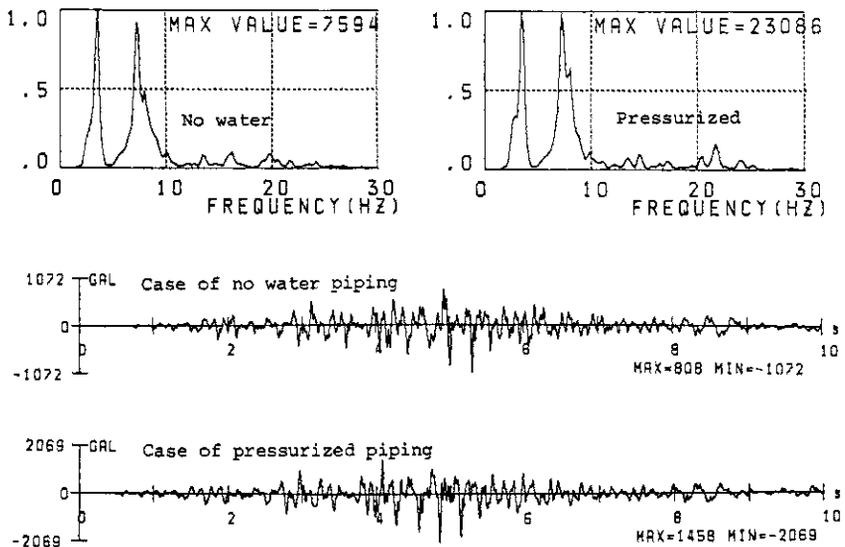


図22 シミュレーション用入力波とそのパワースペクトル(振動台加速度)
Fig. 22 Input waves for simulation and power spectra (Shaking table acceleration)

量)である。

5.3.3 加圧条件での実験と計算の比較

(1) 流体応答の計算条件

加圧条件での計算には、前記の配管系の構造的条件の他に、圧力波の速度等、流体の応答を計算するための条件が必要である。図 24 はこれを示したものである。すなわち、配管モデルは圧力の計測点、エルボなどを流体の境界点として設定して 9 管路（両端を含め 10 流体節点）に分割した。各管路の分割は、管路 1 を基本長（分割無し）とし、これから特性曲線法の時間刻みを図のように定めた。また、これから決ってくる各管路の分割数は図に示した通りである。圧力波の速度は実験値が 1280 m/sec 前後の値であったので図に示した値を用いた。

(2) 加速度応答の比較

図 25 は加圧条件での実験と計算を加速度応答で比較したものである。空水の場合と同様、

表 3 解析モデルの固有値および応答計算に用いたモーダル減衰値
Table 3 Eigen value of analytical models and damping for simulations

	Natural frequency (Hz)			Damping for calculation	
	No water	Wholly lumped mass	Semi-lumped mass	No water	Water filled
1	8.23	6.70	7.39	0.09	0.09
2	10.02	7.74	7.91	0.1	0.1
3	11.16	8.77	9.62	0.06	0.06
4	11.80	10.75	11.44	0.05	0.03
5	13.87	11.50	11.55	0.05	0.03
6	16.77	13.56	13.61	0.01	0.03
7	17.46	14.41	15.24	0.05	0.02
8	19.38	15.24	16.18	0.01	0.02
9	22.15	16.67	17.26	0.02	0.05
10	23.83	16.93	17.51	0.02	0.05
11	25.35	18.91	19.68	0.02	0.02
12	27.44	20.14	22.59	0.02	0.02
13	33.61	24.85	24.85	0.02	0.02
14	34.35	25.31	28.02	0.02	0.02
15	40.41	27.67	28.46	0.02	0.02
16	40.94	27.88	31.25	0.02	0.02
17	43.63	31.25	33.40	0.02	0.02
18	48.05	33.04	33.82	0.02	0.02
19	51.6	36.69	36.69	0.02	0.02
20	66.21	45.37	49.07	0.02	0.02

(Note)

Wholly lumped mass: conventional model of liquid

liquid mass = dead mass for all pipe motions

Semi-lumped mass: a model for coupled response calculation in this paper

liquid mass = neglected for axial and torsional motion

= dead mass for pipe lateral motion

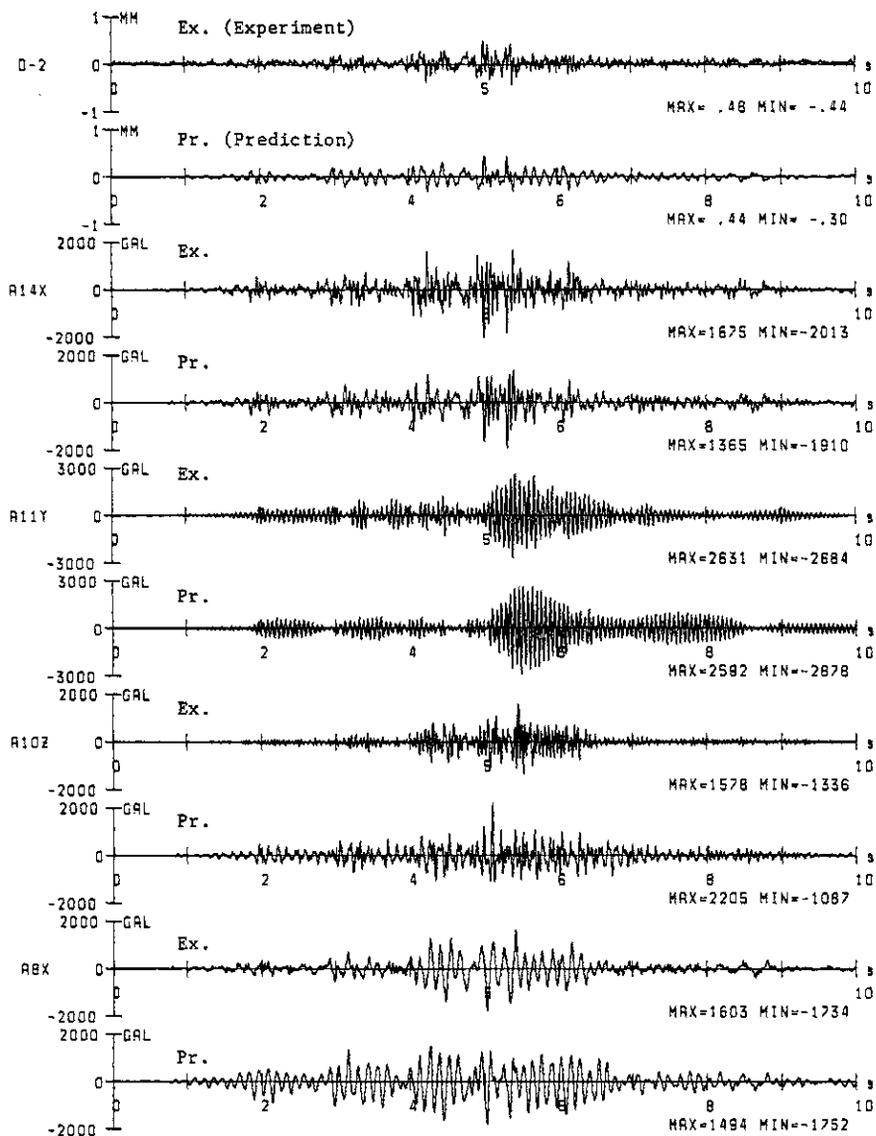


図 23 計算波形と実測波形の比較 (空水条件の場合)
 Fig. 23 Comparison of predicted and measured response
 (Case of no water piping)

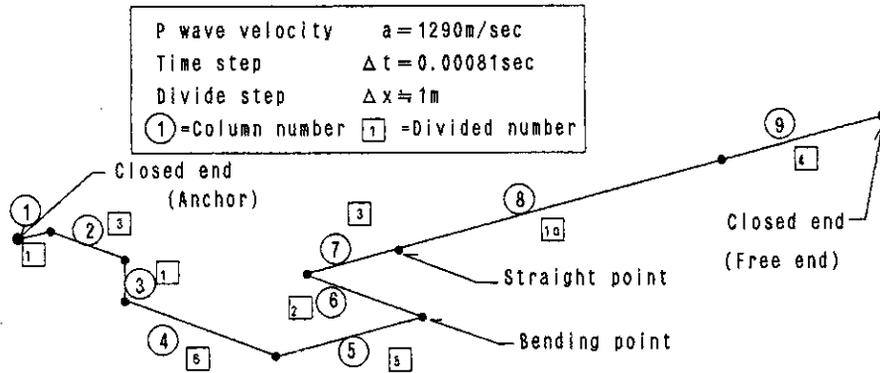


図 24 流路の分割と計算パラメータ
 Fig. 24 Divided fluid column number and calculation parameter for fluid response

計測点によっては差異がやや大きいのが全般的にみて計算はほぼ妥当な結果を与えているものと思われる。加圧条件の場合は、入力レベルが高いこともあり、摩擦の影響は空水の場合より小さいように思われるが、A10Z などでは差異がやや大きい。

(3) 圧力応答の比較

図 26 は同様に圧力応答について実験と計算を比較したものである。細かくみると差異があるが、計算波形は実験とかなりよく一致しているものと思われる。応答量をみると P-10 で特に小さくなっており、計算でもこの点が明瞭に現われている。なお、この P-10 は管の端末 (P-1 側) から約 25 m の位置にあり、全体での中間点 (P-8 と P-9 の間) からややずれている。この圧力応答の実験波形は 14.7~17 Hz に数本のスペクトルがあり、P-10 以外で約 14.7 Hz が卓越している。計算波形のスペクトルも分布の形に多少の違いがあるがほぼ同様である。図 27 にパワースペクトルの比較を示す。(なお、前の図 8 などに示した伝達関数では応答のピークは 15.2 Hz 付近となっているが、パワースペクトルの場合はこれより少し低いところにピークを生じている。これはパワースペクトルの場合、入力波の特性を反映すること、また図 27 のように地震波加振の場合、前のランダム波加振の場合より入力レベルがかなり高くなっているため共振振動数が少し下がったことによるものと思われる)。P-10 では様子が異なり、配管の 1 次モードである 7 Hz 付近 (配管の振動により受動的に生じた圧力応答) が主成分となっており、応答量は小さい。これは計算波形についても同様である。P-10 付近が連成をとともなう圧力応答において節となっているものと考えられる。一方、配管長 40 m と圧力波速度 1290 m/sec から単純に 1 本の液柱と考えた場合の 1 次共振振動数を評価すると約 16.1 Hz となる。従って、前記卓越スペクトルとその分布は連成によって生じたものといえる。ちなみに配管材および支持部の剛性を非常に剛な値に設定して計算した場合 (1 次の固有振動数が 80 Hz)

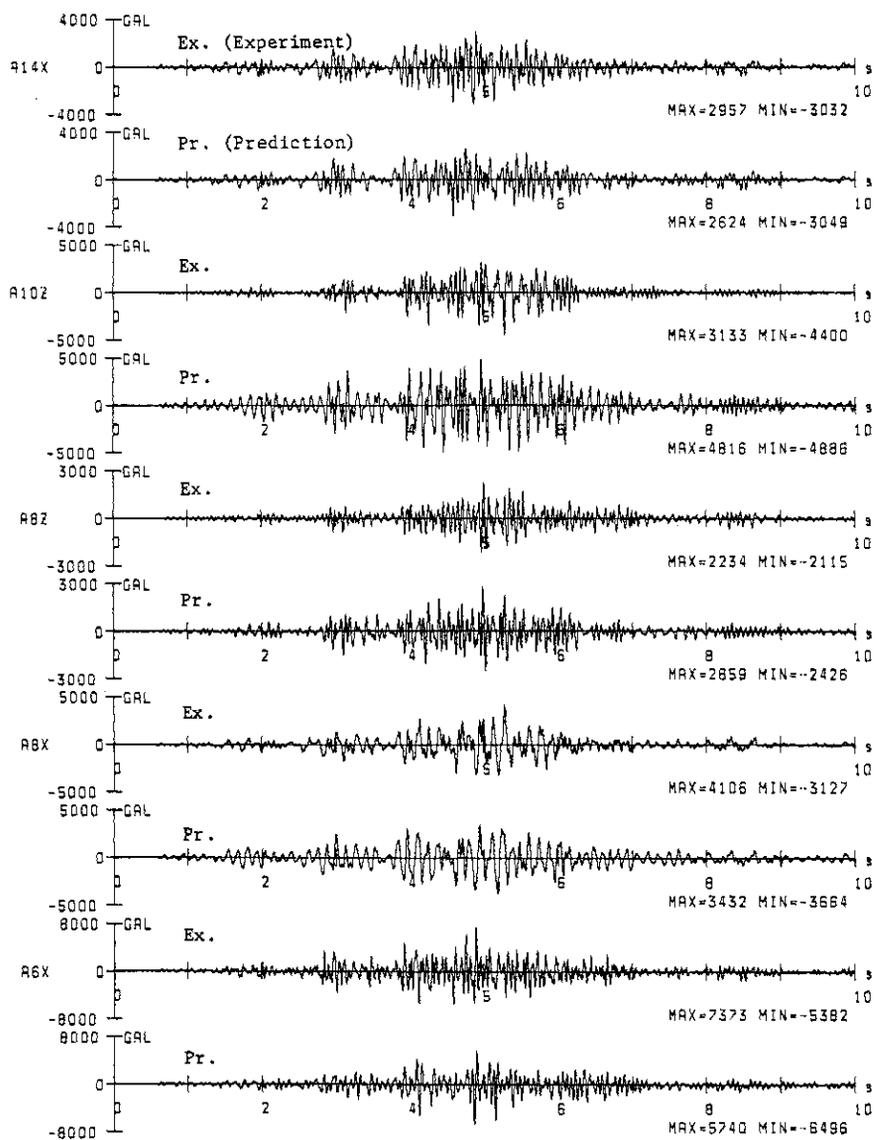


図 25 計算波形と実測波形の比較 (加速度応答, 加圧密閉条件の場合)
 Fig. 25 Comparison of predicted and measured acceleration
 (Case of pressurized piping)

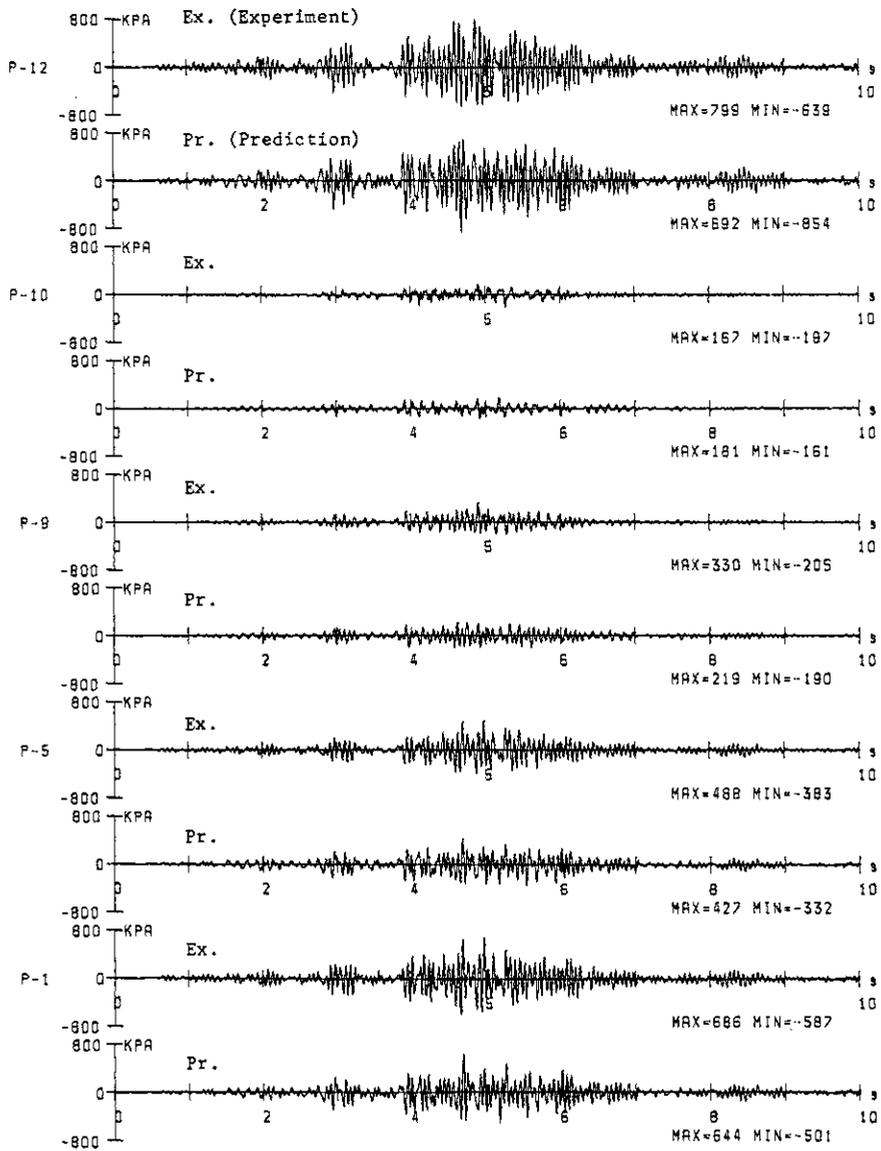


図 26 計算波形と実測波形の比較 (圧力応答, 加圧密閉条件の場合)
 Fig. 26 Comparison of predicted and measured pressure response
 (Case of pressurized piping)

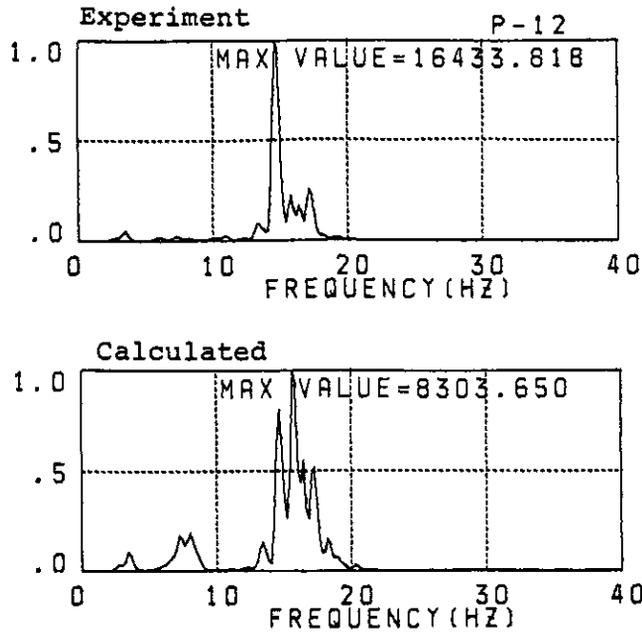


図27 計算および実験での圧力応答のパワースペクトル
 Fig. 27 Power spectra of pressure response of figure 26

の圧力応答の卓越スペクトルは16 Hzであった。

(4) 変位応答の比較

次に図28は同様に、配管変位応答の比較である。配管支持部の変位D-2は実験、計算ともに圧力応答の卓越成分(14.7 Hz)が主成分となっている。

5.3.4 考察

計算方法の妥当性がほぼ確認されたので以下では、パラメータの影響、Dead Massモデルとの差異などを計算結果をもとに検討する。

(1) 圧力波の速度と配管の応答について

圧力波の速度がわずかな含有空気量によってかなり変わることはよく知られている。従って、この速度が異なった場合、連成応答の結果として生ずる配管の加速度、変位がどの程度変わるかは検討すべき問題点の一つである。

ここでは、前項までの条件と同じ条件で、圧力波の速度だけを変えて応答計算を行なった。図29はその結果である。実験値およびDead massモデルによる計算値もあわせて示した。圧力波の速度が1300 m/secの場合は実測速度に近いので各計測点での応答は実験値にほぼ一致している。圧力波の速度が変わった場合、応答値がかなり変わる点(A10Zなど)とほとんど変わらない点がある。このモデルの場合は全般的にみて圧力波速度が1300, 1200, 1100 m/

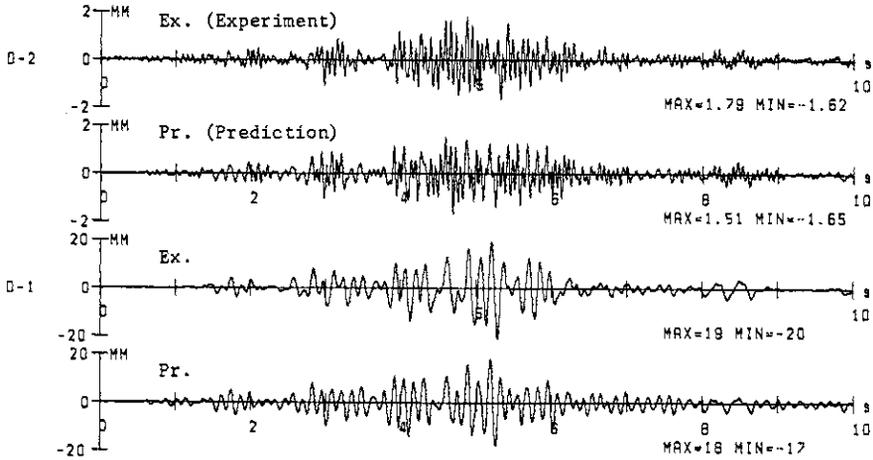


図 28 計算波形と実測波形の比較 (配管変位応答)
 Fig. 28 Comparison of predicted and measured displacement
 (Case of pressurized piping)

sec の順に応答が高くなっている。

Dead mass モデルによる応答については後にも述べるが、本図をみると全般的に低めの応答評価を与えていることがわかる。配管の上下動 A-11Y は実験値が計算値 (連成モデルおよび Dead mass モデルのいずれも) より大幅に大きくなっている。この A-11Y の実験波形のスペクトルをみると 2 つのピークがあり、圧力応答と同じ振動数成分が最も卓越している。解析では圧力波動は 1 次元で考えているため計測点 A-11Y の位置で上下の起振力を生ずることはないが、実験では単純な 1 次元波動でないため配管の上下方向の加振力を生じたことが考えられる。しかし、この点についてはさらに検討が必要と思われる。

なお、圧力の最大応答値を図 30 に示したが、P-8, 9 などの応答は圧力波速度に対して加速度 A-10Z と同様の傾向を示している。すなわち、P-8, 9 の差から決まる流体力により加振直角方向の起振力を生じこの起振力の圧力波速度に対する依存性が A-10Z の応答変動をもたらしたものと考えられる。ちなみに、上記流体力を算出したが、そのピーク値は 1.03 ton f ($a=1100 \text{ m/s}$), 0.77 ton f ($a=1200 \text{ m/s}$), 0.51 ton f ($a=1300 \text{ m/s}$) の順となっている。またこの流体力のスペクトルをみると $a=1100 \text{ m/s}$ の場合に連成成分 14.7 Hz が最も顕著に現われ、また A10Z の計算波形のスペクトルも同一の傾向を示している。流体圧によるこのような起振力効果は連成応答の一つの特徴であるといえる。

(2) 支持部剛性と配管圧力応答について

配管支持部の剛性が変われば固有値が変わり、圧力応答も当然変化すると考えられる。支持部の剛性のうち、圧力応答による流体力と関連が強いのは長い直管部の軸方向支持部であ

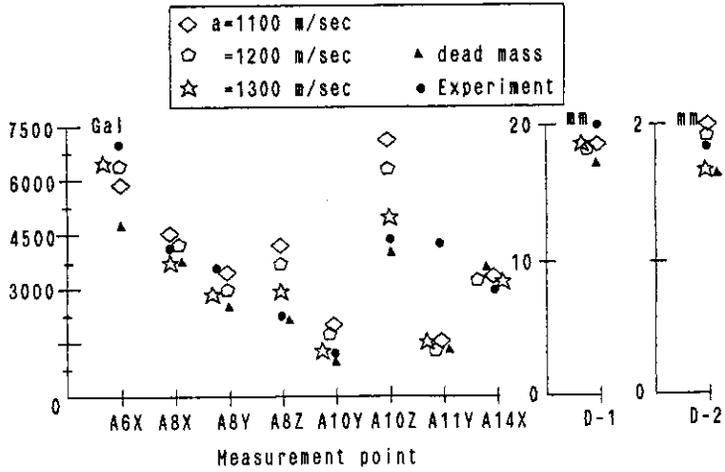


図 29 圧力波速度が異なる場合の配管加速度および変位応答最大値の比較
(他の条件は実験モデル D と同様加圧密閉条件)

Fig. 29 Calculated acceleration and displacement response for various value of pressure wave velocity
(Other conditions are same as the experimental model D)

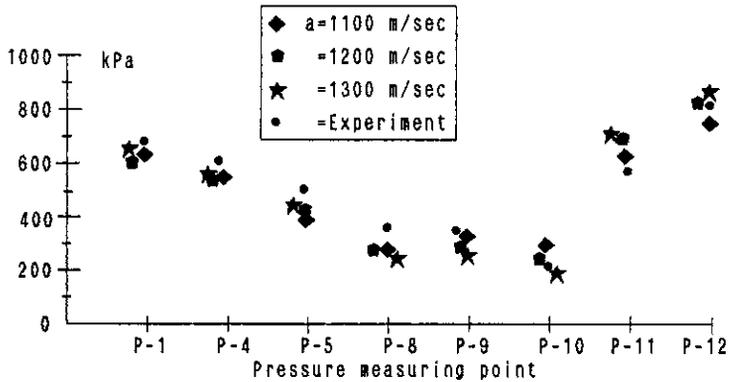


図 30 圧力波速度が異なる場合の配管圧力応答最大値の比較
(他の条件は実験モデル D と同様加圧密閉条件)

Fig. 30 Calculated pressure response for various value of pressure wave velocity
(Other conditions are same as the experimental model D)

るといえる。そこで、図 21 にある軸方向主要支持部 K5 の剛性（実験では 50 ton f/cm）を変えた場合（他の条件は前記と同じ）の圧力応答を比較したものが図 31 である。この図から本試験体の場合、支持部 K5 の剛性による圧力応答の変化は特に大きくはないが、200 kPa 程度は変わり得ることを示している。圧力応答の大きい P-11, P-12 で支持部の剛性による差異が大きいことがわかる。また、剛性による変化をみると図の場合、剛性が特に高い場合と低い場合（100 ton f/cm と 10 ton f/cm）で応答はやや低く、中間的な剛性値で応答が高くなる傾向がみられる。一方、配管加速度などの応答は図 32 に示す通りであり、支持点 K5 での変位 D-2 は剛性にほぼ反比例して応答が小さくなっている。しかし、配管加速度は A10Z 以外はこの支持部の剛性による変動が小さい。

(3) Dead mass モデルによる解析との比較

図 33 は配管変位応答の波形を Dead mass モデルを用いて求めたものである。D-2 については明らかに連成モデルの方が実験とよく適合している。すなわち、図 34 に示すように Dead mass モデルの卓越するスペクトルは実験および連成モデルとは異なっている。一方、D-1 についてはいずれのモデルもほぼ同じ評価を与えている。

加速度応答についても同様に、両モデルがほぼ同じ評価を与える場合と Dead mass モデルが連成モデルおよび実験と異なった評価を与える場合がある。図 35 にその例を示す。A14X は明らかに D-2 と同一の傾向を示しており、実験と連成モデルがほぼ一致し Dead mass モデルは異なった応答を与え、また A-8X では D-1 と同様、両モデルおよび実験値がほぼ一致している。A6X の場合は両モデルの計算はほぼ一致しているが、実験とはやや差がある。すなわち、実験値には A-14X と同様の連成成分が現われているようであるが、計算値にはそれがみられない。これは前述の A-11Y と同様、エルボ部における流体圧の不均一性が一つの要因として考えられる。加振直角方向の配管加速度 A-10Z の場合、計算および実験のスペクトルにはいずれも 14 Hz 付近のピークがある。これは Dead mass モデルの場合は、その固有値 14.4 Hz (7 次) がそのまま現われているものである。一方、実験および連成モデルの計算値はこれよりわずかに高くなっており、流体連成によるものと思われる。A-14X などでは流体の圧力応答による成分が卓越しているが、この A-10Z などの場合はそれ以外に Dead mass 効果（たわみ振動を主とする応答）も混在しているといえることができる。

6. 結 語

各種流体境界条件をもつ配管系の振動実験を行ない、流体の圧力応答とその効果、流体条件が応答の増大あるいは減衰に及ぼす影響について考察した。また、配管系と液柱との連成応答について計算法の検討、立体配管系モデル実験との比較検討を行い、配管系にモーダルアナリシス、液柱系に特性曲線法を適用し、これらを配管系への疑似外力（流体力）および液柱の境界条件により結びつける計算手法が連成応答を評価する一つの有効な手法であるこ

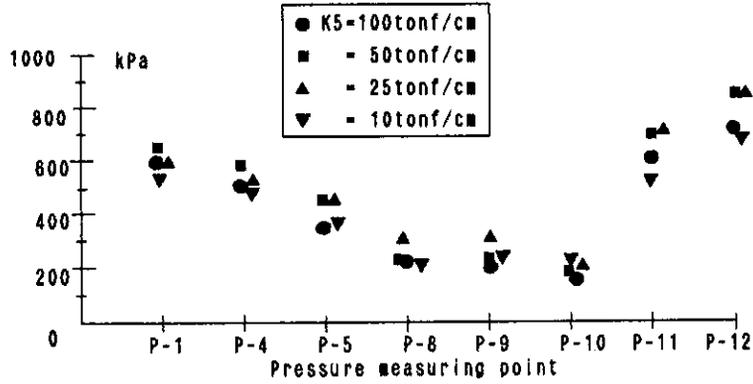


図31 支持部(図21のK5)の剛性が異なる場合の配管圧力応答最大値の比較
 Fig. 31 Calculated pressure response for various value of support stiffness (K5 in figure 21), $a=1290$ m/sec

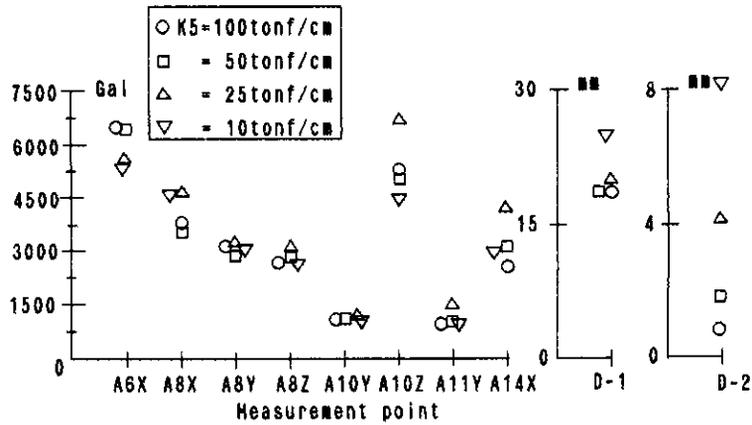


図32 支持部(図21のK5)の剛性が異なる場合の配管加速度および変位応答最大値の比較
 Fig. 32 Calculated acceleration and displacement response for various value of support stiffness (K5 in figure 21), $a=1290$ m/sec

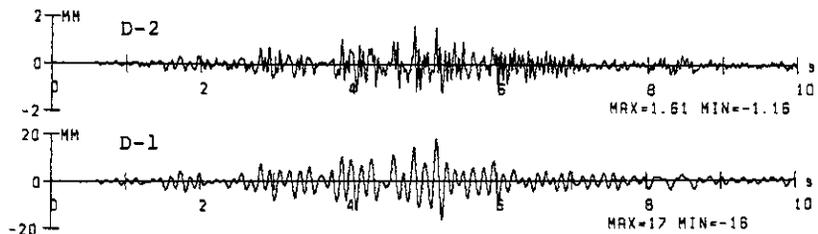


図33 Dead mass モデルを用いて計算した配管変位応答波形
 Fig. 33 Pipe displacement predicted by dead mass model

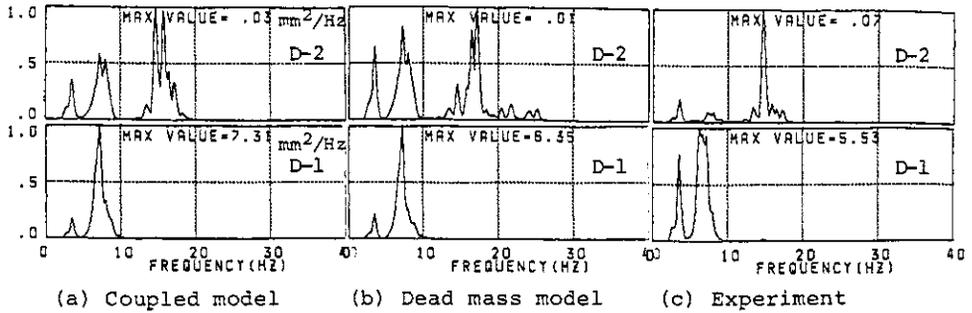


図 34 連成モデル, Dead mass モデルおよび実験による配管変位応答のパワースペクトルの比較

Fig. 34 Comparison of power spectra of pipe displacement response by coupled model, dead mass model and experiment

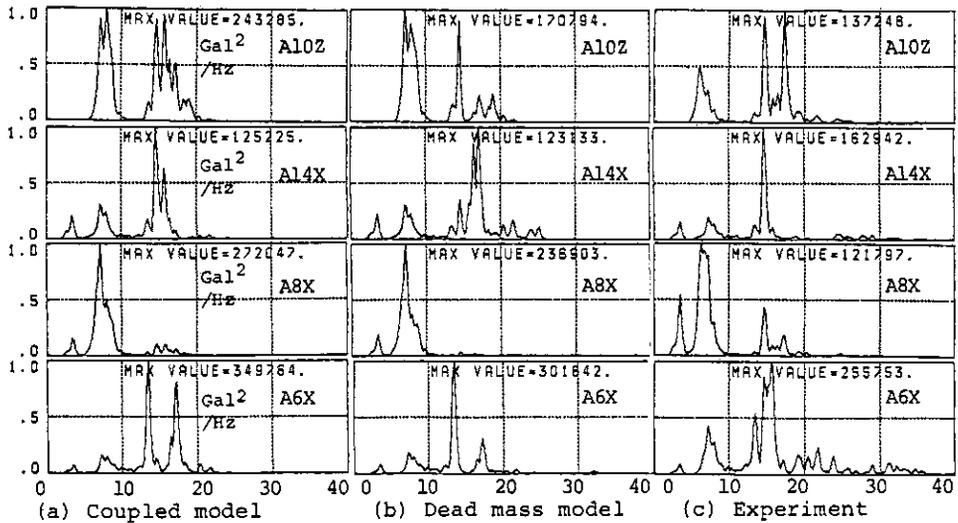


図 35 連成モデル, Dead mass モデルおよび実験による配管加速度応答のパワースペクトルの比較

Fig. 35 Comparison of power spectra of pipe acceleration response by coupled model, dead mass model and experiment

と、またこれを用いて Dead mass モデルとの差異を計算によって検討できることを示した。

配管系の地震応答評価の確度をあげるためには、このような内部流体の挙動、流体的境界条件を考慮することが必要と考えられる。しかしながら、配管系とその流体条件は一般に多種多様な形態があり、これを考慮した地震応答の評価手法、特に簡便な手法を開発することが今後の一つの課題と思われる。さらに、容器との接続など、より実際の境界条件および流送条件等の考慮、負圧を生ずる場合の評価手法などが今後検討すべき問題点と考えられる。

なお、本実験とあわせて昭和62年度に実施した容器単体の振動実験、および昭和63年度に実施した容器配管結合系の振動実験については別途取りまとめる予定である。

謝 辞

本研究全般について東京大学生産技術研究所教授柴田碧博士のご指導をいただいている。東京理科大学教授原文雄博士および東京都立大学教授鈴木浩平博士には実験に際して有益なご助言をいただいた。この場をかりて、深甚の謝意を表する次第である。

研究の計画、実施に当たっては当センターの、高橋博前所長、広部良輔第2研究部長、大谷圭一耐震工学研究室長、管理部施設課各位他多くの方々のご指導、ご助力をいただいた。試験体の製作では石川島播磨重工業株式会社の関係各位の、また実験計測では穂鷹精器株式会社のご協力をいただいた。なお、本報告書作成にあたって、当センターの大八木規夫第3研究部長のご助言をいただいた。また、データ解析については国府田正義氏の一方ならぬご尽力をいただいた。

以上の方々に厚くお礼申し上げる次第である。

最後に、本研究は原子力安全研究年次計画（原子力委員会）にもとづき、国立機関原子力試験研究費（科学技術庁）を用いて実施しているものである。科学技術庁原子力局技術振興課はじめ関係各位の日頃のご指導、ご援助に対し深く感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Hara, F. (1988) : Seismic Vibration Analysis of Fluid-Structure Interaction in LMFBR Piping Systems, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.110.
- 2) Hatfield, F. J. and Wiggert, D. C. (1987) : "Response of Pipelines to Seismic Motion in the Axial Direction", *5th PVP*, ASME, San Diego.
- 3) Hatfield, F. J. and Wiggert, D. C. (1988) : "Seismic Time-Response of Liquid-Filled Piping", *6th PVP*, ASME, Pittsburgh.
- 4) Obradovic, D., Pejovic, S., and Gajic, A. (1986) : Analysis of Earthquake Effects upon Hydraulic Structures, *Proc. of 5th Int. Conf. on Pressure Surges*, BHRA.
- 5) Ogawa, N. (1980) : A Study on Dynamic Water Pressure in Underground Pipelines of Water Supply Systems During Earthquakes, *Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering*

- in Japan*, PVP-43 (Edited by H. Shibata, T. Katayama and T. Ariman), ASME.
- 6) Ogawa, N. (1983) : A Vibration Test of Earthquake Induced Hydraulic Transients of Liquid-Filled Pipelines, *Earthquake Behaviours and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77 (Edited by T. Ariman), ASME.
 - 7) 小川信行・箕輪親宏・勝山よし子・千葉敏郎・小柳良一・相田重一 (1987), (1989) : 原子力配管系の多入力振動実験報告書 (その1), 同 (その2), 国立防災科学技術センター研究速報第75号, 同第79号.
 - 8) 小川信行 (1988) : 配管と液柱の連成地震応答に関する研究 (第3報), 日本機械学会論文集C編, 54巻497号.
 - 9) V. L. Streeter & E. B. Wylie (1967) ; *Hydraulic Transients*, McGraw-Hill.
 - 10) Wiggert, D. C. and Hatfield, F. J. (1983) : Time Domain Analysis of Fluid-Structure Interaction in Multi-Degree-of-Freedom Piping Systems, *Proc. of 4th Int. Conf. on Pressure Surges*, BHRA.
 - 11) Young, F. M. and Hunter, S. E. (1979) : Hydraulic Transients in Liquid Filled Pipe-lines During Earthquakes, *Life-Line Earthquake Engineering Buried Pipelines, Seismic Risk, and Instrumentation* (Edited by Ariman, T., Liu, S. C., and Nickell, R. E.), ASME.
 - 12) Young, F. M. and Padron J. M. (1983) : Hydraulic Transients in Liquid-Filled Piping Networks Due To Seismic Excitation, *4th PVP*, ASME, Portland.

(1989年7月10日原稿受理)