

# ERSを中心とした機器・配管系の耐震設計 に関する研究の展開

Development of Anti-Earthquake Design Research on Equipment and Piping Systems  
in Industrial Facilities through the Activity of the ERS

柴田 碧\*

Heki SHIBATA

## 1. は し が き

機械の分野と耐震工学の出会いはその間に古くないことではない。昭和32年の秋から始まったわが国最初の原子力発電所導入問題が、翌33年の夏になって具体的に入札のための設計書のかたちをとるに至って、クローズアップされることとなった。著者はこの時点以来、機械系の耐震設計に関心を有するようになり、はじめは極めて少数の人々とこの仕事に専念することとなった。そのうちには、巨理、佐藤（当時大学院生、現在教授）、秋野（当時原子力研究所、現在日本原子力発電株式会社）が、現在のERSの関係では入っていた。その後昭和36年になって通商産業省が、原子力発電所安全基準第一次草案を作成し、その第19章が耐震設計に当てられ、一応の体系がそこででき上がった。この作業によって、いくつかの課題について具体的な研究開発が必要ながわたり、逐次それらが実施されるようになってきた。これが機械の分野における耐震設計の端緒であり、かつERSのメンバーのこの分野における活動の始点でもある。それ以後、約10年間のことは既に昭和43年に生産研究<sup>1)</sup>に詳しく記した。丁度この頃ERSが具体的なかたちをとるようになり、それから10年が経過し、合せて約20年の歴史を有するようになった。

## 2. 産業施設・ライフラインの耐震設計の動向

わが国の産業施設や電力・水道の供給網（いわゆるライフライン）がある程度の生長をとげた後に襲った最初の破壊的大地震は関東大地震（1923）であり、その後都市部を襲った地震としては、福井地震（1948）など6地震がある。関東大地震に際してのこれら施設の被害については、水道関係で詳しい資料があるほか、電力施設でも報告書<sup>2)</sup>があることが見出された。その後第二次世界大戦末期の東南海地震（1944）、南海地震（1946）については、不幸にして十分な記録が残されていない。とくに前者では名古屋市周辺の都市関係施設、航空機産業四日市の燃料廠関係などにかかなりの被害があったと伝え

られているが、極めて一部のものを除いては記述されたものは全くないと云ってよい。福井地震のあと、新潟地震（1964）、十勝沖地震（1968）があり、これらについては、たびたび報告<sup>3),4),5)</sup>してきた通りである。

この後昭和46年にアメリカ西部のロサンゼルス近郊San Fernando市周辺に局地的ではあるが、都市関係施設に大きな被害を与えた地震があり、わが国にも大きな衝撃<sup>6)</sup>を与えた。化学プラント関係についての被害はほとんどなかったものの、わが国の関係者、とくに一部自治体の関心を惹ききっかけとなった。一方アメリカではライフライン、公共建築物の耐震性につき深い関心もたれるようになった。昭和48年には神奈川県の高圧ガス製造施設の耐震設計基準が完成、行政指導のレベルで使われるようになったが、これは当時作業の進められていた高圧ガス保安協会のコンビナート保安・防災技術指針の<sup>7)</sup>耐震関係と基本的考え方ではほぼ一致するものであった。これは、その後昭和49年後半までに完成した。この間、通商産業省・科学技術庁が中心になって、昭和46～48年度の間、筑波の耐震工学センタでの振動実験を中心に球形タンクの耐震性に関する研究が実施された。通産省では引続き高圧ガス及び火薬類保安審議会のもとに地震対策分科会を設置し、コンビナートの耐震設計基準の原案作成を行っているが、現在、第3次案が完成するに至っている。

一方、建築物内の非常用電源、スプリンクラなどの消火施設について、東京消防庁は昭和48～50年度の間、消防用設備等の耐震化に関する委員会を火災学会の中に発足させ、電設工業会、消火装置工業会などの協力によりいくつか実施した。これはその後東京都の防災拠点計画の中に組み入れられ、昭和51年秋から最近にかけて、いくつかの機器について、耐震性実証試験が行われている。

このほか、ライフラインについても昭和43年の十勝沖地震後の日本電信電話公社内の特別委による電話施設の耐震性の検討をはじめ、いくつかの作業が積極的に実施された。石油貯槽を含む石油精製施設についても、自治省消防庁が地域防災の立場から関心を有していたが、昭和49年末の水島事故以来、社会の強い関心を惹くように

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

なっている。

このような国内の動きに関連する国際的な動きとしては、世界地震工学会議(第4回;1969年;チリ,第5回;1973年;イタリア,第6回;1976年;インド)で回を重ねるごとにこの種論文の数が増え、第6回では従来の原子力関係セッションのほかに産業施設・ライフラインのセッションが設けられた。また1971年,第1回がベルリンで開催された原子炉構造工学会議(いわゆるSMIRT)の中にも耐震のセッションが設けられ、毎回数10編の論文が発表されている。これは2年に1回開催され、本年8月にもサンフランシスコで、第4回が開かれる。ライフラインについては、昨年11月日米セミナーが東京で開催され、両国の現状、研究成果が発表・討論<sup>8)</sup>された。

以上が産業施設・ライフラインの耐震設計を中心とした機器設計の最近の動向の略述であるが、ここに書かなかったことも数多くあり、それは機会をみてまとめる積りである。

### 3. ERS 内の機械系分野の活動

前章で述べた各種問題については、久保、片山、佐藤、藤田らが関連することが多く、最近では川井、岡田らも参加している。一方、岡本、田村らのダムその他の研究が昭和30年以前から実施されているが、このようにしてみると、ERS メンバのほとんど大部分がこの種施設の耐震設計に関連してきていると云える。機械系の分野では昭和33年、吉沢\*(工学部、故人)、亘理、藤井\*(工学部)の指導のもとに佐藤および著者らがこの分野での研究を開始し、井口\*(工学部)とともに発展させてきた。ERS が組織された後は、佐藤、重田、著者らにこの10年間、講師、研究員、大学院学生等として本所に在籍していた、原(東理大)、山室(中部電力)、鈴木(都立大)、清水(千代田化工)、曾我部(上智大)、堤(大学院生)などとともこの面の研究に従事してきた。またこの間、藤田は大震時火災、避難の面についての研究をこの分野に導入した。川井、藤谷らは有限要素法その他の数値解析の分野で活躍しているが、この面から機械系分野の研究を支援しており、また秋野(日本原子力発電)も原子力発電所の耐震設計の豊富な経験を生かして協力している。以上が研究態勢の概略であるが、以下、研究内容を略述する。

#### 3.1 ERS 発足以前の研究

前述のように昭和35年頃より科学技術庁原子力平和利用委託費により東京電力あるいは日本機械学会が母体となって行われた、原子力発電所機器・配管系の耐震設計<sup>9)</sup>は、佐藤および著者らが、奥村\*(早大理工)、井口\*らとともに行ったものである。

その内容は大別すると、配管系の固有値と応答に関

注\*はERSメンバ外

するものと、機器系の応答に関するものとなる。これらは理論解析のほか、模型実験、在来の火力発電所における現地計測などを併用して行われた。

配管系の固有値解析には、伝達行列法が導入され大型コンピュータ用の汎用計算プログラムDYNAPS が作成された。これはIBM704がFORTRANベースのコンピュータとして、初めて導入されるとほとんど同時期にスタートし、昭和40年には完成している。このプログラムは主として、径2mm程度の針金による配管モデルによりその実証が行われたが、非常に精度の高いものであった。

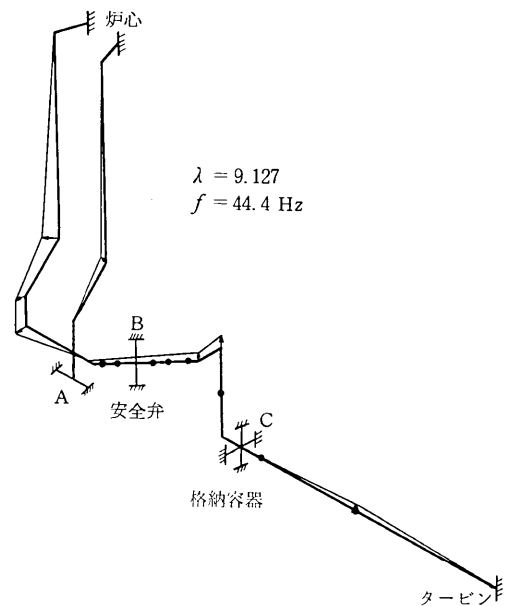


図1 DYNAPS による原子炉主蒸気管・固有振動モードの計算例

伝達行列法は、配管(梁)上のある点の内部力、モーメント、と変位、ねじりと共に状態ベクトルで表し、2点間のその関係を行列で結ぶことで出発している。両端、中間支持点での境界条件が与えられると、全体の伝達行列(梁のような直列要素では、個々の要素のその積として求まる)から固有値方程式が求まる。この固有値方程式は一般には解析解が得られないので、step-by-step法で固有値とモードを求めることになる。各要素の伝達行列は、その要素(たとえば直線梁)について解析解があれば、数式で記述できることが特徴である。対象となる系の大きさによって、行列のサイズが左右されないという利点のある反面、行列の積を求める際、行列式の値を求める際の桁落ちの問題が厳しく、一般に倍長精度計算を必要とする。しかしながら、導入し得る要素の多様性、高精度など集中質量系による有限要素法にはない利点があり、世界的にかなり使われている。

機器系の応答については、いわゆる時刻歴応答法、すなわち直接時間積分する方法がわが国は実用面での主流

であるが、波形に対する依存性が強いなどいくつかの問題点がある。そこで、応答スペクトル、それも平滑化と広帯域化の行われたものが、世界的に使われるようになりつつある。このような応答スペクトルの作成は多分に工学的直観と判断にもとづくものである。佐藤は昭和35年当時、既に地震波がある種の確率過程で表現でき、定常を仮定して構造物系フィルタを通すことにより、応答を求めることができるという田治見（日大理工）の考え方から出発し、定常確率過程の極値の分布を求める手法を完成した。基盤における地震波を加速度において有限帯域の白色雑音、正規分布と考え、これを1質点系で表される地盤フィルタを通したものを構造物系への入力とする。機器系は構築物系により支持され、一般にその自重は構築物系に比べ軽く、反力による影響は無視できるとする。このようにして系全体は6自由度となる。白色雑音の極値分布は正規分布であるが、それをこのようなフィルタを通すと、Rayleigh 分布へと近付いてゆき、いわゆる不規則度指数  $\epsilon$  を導入することにより、両者の間の関係を連続的に表現できる。Rayleigh 分布を極値分布に有する波は、一見正弦波波形に近く、ゼロ線をはば周期的に横切るが、波高だけが変動しており、その分布が上述の分布となっている。構造物系フィルタが伝達関数で表されるなら、極値分布は伝達関数を基に留数積分を行うことにより求めることができる。いわゆる応答倍率を求めるには、構築物への入力の極値分布と、機器系の応答の極値分布間で、適当な条件下、たとえば上限へむけて90%となる値の比をとればよい。このようにして、構造物系の諸定数をパラメータにして得られた応答スペクトルは、時刻歴による応答曲線をほぼ包括する関係にあり、現在行われている平滑化応答スペクトルと同様に工学的目的にかなうものである。その一方において

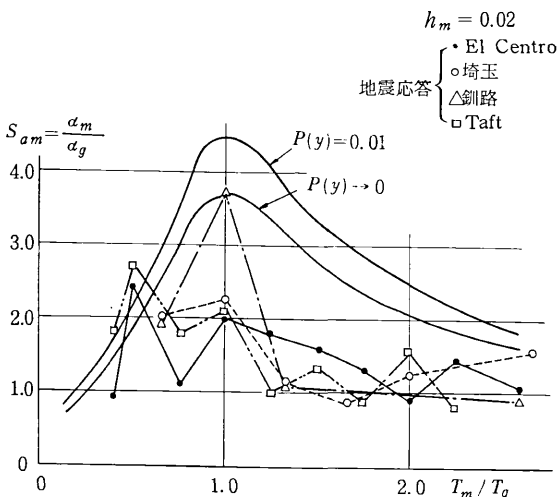


図2 確率的手法による応答曲線と自然地震のそれとの比較

地震動の特性が単純化されているので、結果の見通しがよく、たとえば、構築物系と機器系の固有周期が一致すると最悪の条件となるなど、応答スペクトルについての一般的知見が得られ易いものとした。

以上のことが基礎となって、ERS 発足後の研究が進展してゆくのである。

### 3.2 ERS 発足後の研究

ERS 発足後の研究も、佐藤・鈴木らのグループと、著者ら、柴田、重田、清水、曾我部、山室らのグループによる二つの流れがある。前者は極値分布から応答倍率を求める方法を多入力問題、地盤特性が複雑な場合へと拡張して行った。後者は、日本機械学会による軸対称殻体の固有値解析プログラム開発のための、模型実験を行った後は、その主点は、プラント内で見られるような各種構造体の自然地震に対する応答の問題に力点が移っていった。この研究は、地震ごとでの応答倍率の差異、すなわち、応答のゆらぎに関するもので、松代群発地震、アナログ計算機によるシミュレーション、理論計算などを、化学プラントモデル（千葉実験所設置）の応答観測の結果と関連させつつ発展させてきている。またこれと平行し、液体貯槽の耐震設計、がたのある非線形系の応答問題などについての研究が行われたり、行われつつある。これらの研究は前章で述べたような基準などの作成に当たって、重要な判断資料を提供している。これら2グループとは別に藤田は藤井\*、原、著者らの協力のもとで大地震時における火災延焼のシミュレーションの手法を確立し、さらに避難の最適化問題へと発展した。これは本所第2次臨時事業とも連なるものである。以下いくつかまとめて、もうすこし詳しく述べる。

#### i) 多入力系の応答問題<sup>10)</sup>

配管など連続体が複数個の点で支持されていて、それらの点の地震動が異なる場合の応答問題である。この研究は二つに分かれており、佐藤・鈴木らの研究は、連続体の相対変形に力点を置いている。解析の対象としたモデル系は、2質点から構成される構築物系の両質点間にまたがるかたちで連結されている1質点系、両支持点間に時間差（むだ時間）のある同一波形の地震動が加わっ

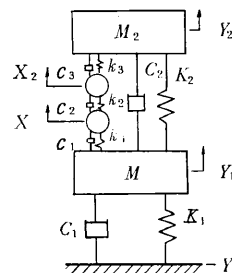


図3 複数入力系モデルの1例

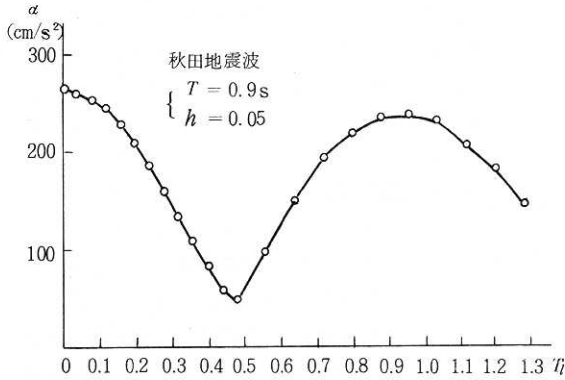


図4 時間差のある入力を受ける1質点系の応答

た場合などである。この問題で重要なことは応答解析が加速度基準のものであっても、入力に変位波形が必要となる点である。このため、加速度波の積分が問題となるが、二次時間おくれを2段組合せたかたちの積分回路を導入しよい結果を得ている。またむだ時間問題は、波形に主な卓越周期のような時定数があり、この時間のずれがあるときは同相として、加速度応答が最大で、この時間の半分のずれのときは、逆相で加速応答は最小であるが、逆に相対変形は最大になることを示した。時間のずれが更に大きくなればこの繰返しとなる。

## ii) 軸対称殻体の固有値測定

日本機械学会が原子力平和利用委託費を受けて、軸対称殻体の固有値解析プログラムSHELVIAを開発するために行われた実験で重田が主になって進められた。数種の鋼板製殻体についてかなりの次数範囲にわたって固有値とモードが求められた。

だるま型の場合、剛性の高い肩の影響が顕著で一見、それより上と下の節線が不連続に見えること、また円筒型に近い場合、片持梁タイプのモードで断面がひしゃげて、いわゆるオーバルカップリングを生じ、このようなことがないとして解いた場合に比べ著しく固有値が低下することなどが主として重田によって明らかにされた。後者の問題は、川股、半谷研究室に引継がれその理論的根拠が明らかとなった。

## iii) 応答のゆらぎに関する研究<sup>11)</sup>

この研究は前述の殻体の固有値問題と平行して分担した配管の多入力応答問題に附随して生じたものであるがその後複雑に発展して、現在でも柴田研究室の研究の主流をなしている。二つの独立した建物にまたがっている配管系の応答をアナログシミュレーションによって求めた際、入力として、同一特性を有する白色雑音をベースとした擬似地震波100個を使用した。この入力に対する系の応答は、系のパラメータの組合せによって若干の差はあるが変位係数(標準偏差/平均値)にして20~30%

という大きな値を示した。この値は一見、異常に大きなものと思え、それが一連の研究のきっかけとなった。1質点系に、定常確率過程を有限時間で切り取った入力を加えたときの変異係数が、Riceの研究などを基にして清水によって理論的に求められたが、これは前述のシミュレーション結果を裏付けるような値のものであった。この研究により、系のパラメータと変異係数との間の定性的性質も明らかとなり、1質点系でも条件によっては50%程度にもなり、また系の自由度が増すと大きくなる事が明らかとなった。当時は松代群発地震が最盛期を過ぎたところであったが、原子力平和利用委託費により、長野郊外に応答観測モデル(鉄筋コンクリート造3階建)の

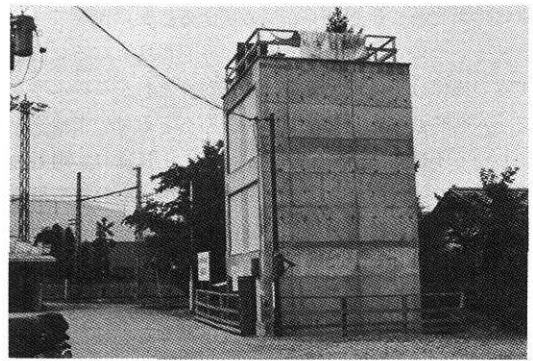


図5 長野における自然地震応答観測用試験体建屋

建屋と、その内部に配管、機器系のモデル数種が設けられた。この応答観測結果も著しいゆらぎを示した。ここから二つの研究が派生した。一つは、この建屋などを電力中央研究所、我孫子分室の振動台上に再現し、実地震を再び加えてみようというものである。これら実験は各電力会社の共同研究というかたちで、日本電気協会の手で行われてきたが、我孫子での加振実験は中部電力・総合技研と柴田研によって実施された。この結果もゆらぎについては、ほぼ予期したようなものであったが、同一波形の繰返し印加によっても、配管系などはその応答にかなりのゆらぎを示すことがわかった。これは系の非線形性と、入力波形の多少の差に起因するものと判断された。また、ほぼ同一震源域からと考えられる地震波、11について、自己相関関数、スペクトルを求めたところ、卓越周期と思われるピークについても、スペクトル成分の変異係数は30%程度であり、最大加速度値で規準化した場合の全パワのゆらぎ、逆にいえばパワで規準化した際の最大加速度値のゆらぎが大きいことがわかった。

昭和47年9月以降、千葉実験所に化学プラントモデルを、また48年1月からは径4mの貯槽モデルを設置し、自然地震に対する応答観測を行い、約100波程度の解析可能な波形が得られている。このプラントの建設は、重田、大槻\* (元技官)、著者によって行われ、計測は重田

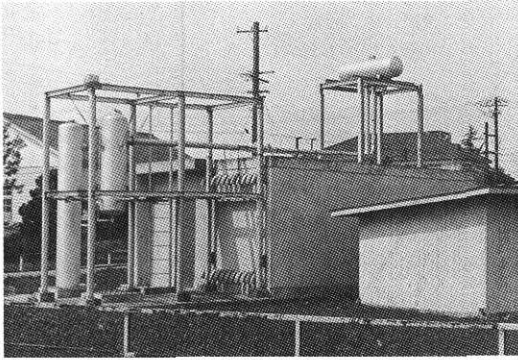


図6 千葉実験所・自然地震応答観測用化学プラントモデル

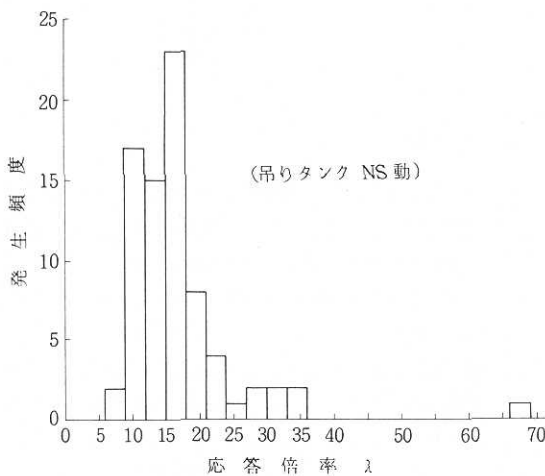


図7 図6の吊りタンクの応答倍率ヒストグラム

データの解析は重田、曾根（技官）によって行われている。これによると、固有振動数4～5Hz程度の系、たとえば吊ったタンクなどの応答倍率のゆらぎはほぼ30～40%である。しかしながら、その固有振動数が地盤の卓越振動のスペクトルのピークの一つに合致すると、この変異係数に対し、いわゆる3σのレンジの外に出ることになる（図7）。このことの生起する率は、これら機器などの固有振動数を地盤の卓越振動数のピークのいずれかになるべく合うように設計したこともあって、約10%にも及んでいる。このようなことが起こるのは比較的震源域が近い地震に多い。貯槽モデルは約4mの水タンクであって、そのスロッシングの一次周期を地盤の変位波の卓越周期のピークの一つ、2.1 sec に合わせて設計してある。水面変異、液位変動、変動圧、側板歪などと地表面の変位振幅を測定している。応答には二種あり、主に加速度波形と同様な応答を示す場合と、自由液面が大きく振動する云々ゆるスロッシング現象が発生する場合とがある。

どちらが発生するかは、主として地震のマグニチュードによっており、比較的マグニチュードが大きい、近くの地震では両者が混合して現れる。貯槽の設計面からみた事項については、IV)で述べるが応答のゆらぎの面からみると、現象が二つのその混合から成立しているの、非常に大きなものとなっている。

このようなゆらぎは結局、耐震設計の信頼性<sup>12)</sup>を低下させることになり、その具体的評価を試みたが、基本的には材料の応力と破損確率の関係についてのデータが重要であるが、直接使用できるかたちのものは非常に少ないことが判明した。結論としては、前述のように変異係数が30～50%であることは、構造物の地震時の信頼性を著しく損う可能性があるが、それは許容応力に対する地震応力の比率、地震荷重率によって大きく左右される。この値が20%程度までの配管系などと、100%に近い支持構造物では全然事態が異なることが明らかとなった。

#### IV) 液体貯槽の耐震設計に関する研究<sup>13)</sup>

この研究は新潟地震（1964年）の昭和石油新潟製油所の第1火災に端を発している。30,000 KLの原油貯槽からスロッシング現象により原油が溢流噴出して、空中で着火したといわれている。ロングビーチ地震（1933年）、カーン郡地震（1952年）、アラスカ地震（1964年）、サンフェルナンド地震（1971年）などアメリカ西海岸などでも同種現象は多く、しばしば大火災となっている。わが国でも新潟地震のほか関東地震（1923年）、十勝沖地震（1968年）などを主に、また日向灘を震源とする1961年の地震その他についても被害が報告されている。

研究は球形貯槽と円筒（いわゆる平底）貯槽の二つを対象として行われた。固有値解析、応答解析、変動圧の算出などがその骨子で、さらに横ずれや転倒なども重要な問題であるが、これは上下動が関与するので、むしろ今後の問題といえる。

固有値などについては、一般軸対象容器内の流体についての算出プログラムを作成し、実験的にも検討した。かんたんな表現をすれば、自由液面を切り口とする半球体内の流体のみが動き、したがって固有値も自由液面の径ではほぼ決まってしまうといえる。その範囲は径90cm強で1sec程度であり、約90mで10secとなり、従来の耐震設計の対象とならなかった長周期領域に広がっている。殻体と流体の連成は理論的には問題があるが、一般に殻体の固有振動数が高いので、設計面からは比較的重要度が低いと考えられているが、昭和51年度後半から研究を開始している。

本研究の主点は貯槽の耐震設計のための応答推定方法の確立にあり、このため前項で述べた自然地震に対する応答観測のほか、千葉実験所に設置された高精度振動台（後述）による応答実験を行った。設計面からみても、前述のように、加速度波に対する応答と変位波に対する

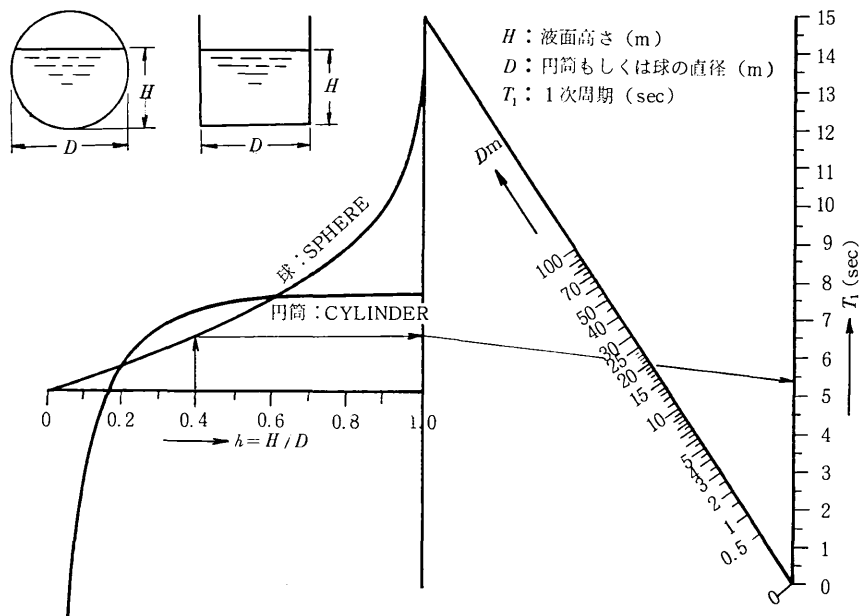


図8 液体貯槽（円筒・球型）の固有周期計算ノモグラフ

スロッシング応答の2段で行う必要のあることが明らかとなった。前者は従来から行われている方法でよく、後者は、貯槽スロッシングの1次周期に相当する正弦波が数波来るものとして応答計算を行えばよいこと、自然地震応答観測では2～3波相当の応答が多く、4波相当になることは稀であることなどの結果が得られた。このことから、一般には3波を使うことが妥当であろうという結論を出した。しかしながらマグニチュードの大きい地震、また最悪の共振状態ではさらに波数を多くとることが必要であると思われた。なお両者の応答の発生時期は通常は60sec 以上の間があり、主要動にすぐ続いて起こる余震の問題を除外すれば、合算する必要はないと判断された。貯槽の他の問題としては、揺動、横ずれがある。両方とも上下動の関与する度合いが大きい。横ずれについては上下動の存在下でスロッシングによる動圧が作用すると顕著に発生することが明らかとなった。しかしながらこの実験は水平加振用の高精度振動台上に不平衡錘式の上下動振動台を載せて行ったもので、実験としてははなはだ不十分なものであり、三次元振動台による今後の研究が必要である。

V) 地震動特性に関する研究

これもiii)項で述べた千葉実験所における観測が主体となっているが、大別すると三次元地震動に関するもの、長周期(1～10sec)波に関するもの、振り地動に関するものがある。三次元地震動については、各成分間の相関、 $\tau = 0$ における相関行列の主値を求める問題などが中心である。後者についてはPenzien・Watabeの研究があるが、それを個別の地震について検討することにより、

いくつかの興味深いことが明らかとなった。かなり震源が遠い地震であっても、その入射角はかなり鉛直に近いといったことなどである。長周期地動は主としてスロッシング応答の倍率をみるためのもので、とくに変わったことはない。振り地動は新しいピックアップが中央大学古川教授により開発されたのを動機として、昭和49年2月より実施されている。約90の記録が得られたが、このうち最大水平加速度が1～30galのものについてみると、0.05～0.7 m rad/secの最大振り角速度を示している。一部のものについてスペクトル解析等を行い、加速度のそれと比較すると、4～5 Hz 付近では一致しているが高い方では異なったものがある。ただ初期に使用したピックアップは加速度と角加速度の間に若干の連成があり、その点につき検討を続けている。

vi) 複数の卓越周期を有する模擬地震波とそれに対する応答

貯槽の応答のところで詳しく述べたように、構造物応答で、二つ以上のかかり分離した地動の卓越周期に対するものの重ね合せが問題となることがある。佐藤<sup>14)</sup>は、既に述べた定常不規則過程を基礎とする手法に、地盤系を複数の一質点系を並列に置いたモデルを導入し、これにより機器系の応答を求めることを行った。自然地震のそれとの比較も行っているが、新潟地震(1964年)は、新潟地区の記録に限らず長周期領域と短周期領域に分離したピークを持つ点で特徴のある地震である。

vii) 大震時火災と避難に関する研究<sup>15), 16)</sup>

この研究は主として、藤田によって行われた。第一段階としては、大規模な延焼火災のシミュレーションであ

る。浜田の延焼速度式を基本に微小延焼火面の概念を導入し、逐時的にシミュレーションを行った。火源、風向、風速、家屋構成などを入力とし、

12.5 m × 12.5 mのメッシュを主として使用して行われた。鳥取大火などの実データともよい一致を示した。ただし、飛び火はランダムな現象なので、それをこのようなかたちで行うことはできない。避難のシミュレーションは、街路をネットし、街路で囲まれた面としての地域から避難すべき群集が湧出し、それが避難指定地へ流れていくとするものである。群集の移動速度と密度の間にはある関係があり、密度が高くなると閉塞現象を起す。このシミュレーションと火災のシミュレーションと組合せると、大震時の火災によってどの程度の人口が避難が不能になる恐れがあるかを推定することが可能となる。

次の段階として、このような避難不能人口をどのようにして減らすかの研究を行った。これは昭和50年度共同研究計画推進費により、ERSメンバ有志のほか、安田\*、高羽\*、越\*らと、所外のこの分野の関係者が参加した研究会を8回ほど持った。話題の焦点は、現在東京都などで考えられている定避難路方式を、火災の発生、延焼状況に応じ、中央で数時間後の状況を予測し避難路を選択、指示し、人命の損失を最小限にしようとするものである。この際の研究の重点は、出火点、現地の風向、風速など地域内の定点からの情報の収集と、シミュレーションを行い、その時点での最適避難路を決定したものを現地に指示する両方向の通信方式にあり、前者については非同期多重通信方式が安田\*により開発され、第2次臨時事業費により、その試作が行われた。

この方面の研究は、昭和47～50年の間、科学技術庁総合調整費により、建設省建築研究所、消防庁、東京消防庁などとともに、大学関係者など多くの研究者が参加して、多面的に行われた。この際ERSのメンバも数多く参加した。この面の研究を通じて感ぜられる困難さは、災害を最小限に抑える目的を以って最適化を計ろうとすると、第一には都市計画の問題に、また現状を認めると第二には行政ないしは現場指揮の判断と効率をどのようにみるかに、全てが帰着してしまい、大学、研究所のレベルの研究としては、かなり難しいものであることが判った。

#### VIII) ライフラインなどの研究<sup>8)</sup>

サンフェルナンド地震(1971年)の調査<sup>6)</sup>では、電力関係施設、水道、パイプライン、高速道路関係の被害が顕著であった。このうち、機械系で強い関心を持ったのは電力関係施設についてである。火災と避難の問題が面と網の問題であると同様、この問題も面網モデルによるものであるが、現在なお展開中である。

また、これのスケールを若干変えた問題として、ビルとくに超高層ビル内の、非常用電源、ガス、消火設備、

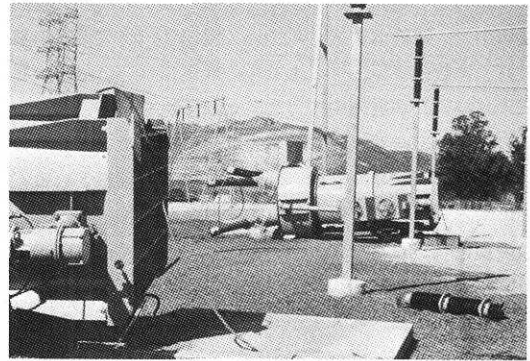


図9 サンフェルナンド地震におけるライフラインの破損例 — Pacific Inter-tie D.C.-A.C. Converter Stationのリアクトルの転倒

エレベータなどの耐震化の問題がある。東京消防庁の委託により昭和48～50年度、藤井\*、梅村\*、青山\*(工学部)その他の関係者とともに、佐藤、原、藤田、著者が参加して、実設備の振動試験を中心に行われた。これはその後、東京都の防災拠点の設計、施工の問題に移され、曾我部も参加して現在展開中である。

これらの研究の重点は、機器の強度限界、機能限界を加振試験により確認することにある。いわゆる実証試験といわれるもので、原子力発電所の機器についても重視されているものである。現在、日本原子力研究所から三菱重工、高温構造技術研究組合に余熱除去系ポンプの振動試験と評価が委託されており、この試験方式、とくに異常の診断方式について、佐藤、藤田、著者と中桐\*、秋月\*(早大理工)によって研究が進められている。

#### IX) その他

千葉実験所に設置されている高精度振動台の開発は、主として日立製作所により行われたが、この制御方式の決定については、かなりの期間の開発研究がなされている。制御信号、フィードバック信号とも、変位、速度、加速度という状態ベクトルとして考えることにその特徴がある。このように考えることにより、かなりの広帯域にわたって、良好な制御特性を得ることができ、100 gal以上での波形の再現性がきわめてよいものとなった。この間の討議に著者および高橋\*(カルフォルニア大)が参加した。

この高精度振動台とともに設置された油圧加力機とその制御系については、別途に記されているが、それを使用した研究の一つとして、配管の極限特性の試験が挙げられる。東京都の委託として行われたLPG配管についての試験は重田、喜山\*(東京工専)、大槻\*(現代空調)が著者とともに行ったが、この際、地震荷重が印加した際にのみ、開口し洩液するクラックがあることが見出された。このほか、スプリンクラー配管などの試験も行われた。

ガタのある非線形系の振動問題についての研究も現在展開中で、連続体の振動について渡辺\* (研究員・山梨大)、多数のギャップのある系の衝突について藤田、服部\* (技官) が実施中で、大きな進捗をみせている。

以上述べてきたような耐震設計は、システムとしての安全設計の面が強く、法、基準などにより規制されることになる。そして、その対象とする系が複雑となると当然のことながら、その基準等も複雑、大規模となる。その場合、その内容間に重複、矛盾もしくは脱落がないかなど組織的に調べることが必要となる。これを計算機を使用して論理的に行うことの研究<sup>(8)</sup>が、堤、著者によって行われつつある。LISPによる論理計算が主体となっているが、最大の問題は基準の文章の入力にあり、日本語を取扱うことの難しさを強く感じている。

#### 4. むすび

以上の研究は、甚だ多岐にわたっているように見えるが、いずれも、原子力発電所、化学プラント等の産業施設、ライフライン設備の耐震設計と災害防止に重点が置れている。これらの成果は原子力発電所の耐震設計の国内基準の設定、国際原子力機構 (IAEA) の Safety Guide の設定などに、また高圧ガス製造設備の耐震設計基準の原案作成に、コンビナートの防災診断基準の設定<sup>(17)</sup>にと反映しつつある。

最後にこれらの研究は、以上の記述の中に名前を挙げることでできなかった、学内外の多くの方のご指導、ご協力のたまものであることを記し、感謝の意を表する。

(1977年3月18日受理)

#### 参考文献

これらの内容についての1次文献すべてを引用すると莫大な数となるので、ここではごく基本的なものの一部の2次文献を挙げることに留めた。

- 1) 柴田碧：原子力発電所の耐震設計 — 10年のあゆみ，生産研究，Vol. 20, No 8, (昭43-8), p. 388
- 2) 電気工作物震災豫防調査会調査書 (電気学会，電気協会)，(大13-9)，226 pp
- 3) 機械耐震設計グループ：新潟地震における工場施設の被害について — 機械配管関係の被害，原因とその対策，生産研究，Vol. 16, No 10, (昭39-10), p. 293
- 4) 佐藤壽芳：機械・配管関係の震害について (十勝沖地震-1968)，生産研究，Vol. 20, No 20, (昭43-12), p. 632
- 5) 柴田碧：産業施設の地震被害，機械学会誌，Vol. 75, No 643, (昭47-8), p. 1193
- 6) 柴田碧：産業施設の被害 (サンフェルナンド地震の被害)，生産研究，Vol. 23, No 8, (昭46-8), p. 335
- 7) 高圧ガス保安協会：コンビナート保安・防災指針 KHK E 007-1974, (昭49-6), 215 pp
- 8) Shibata, H.: Fundamental Concept of Aseismic Design Code of Lifeline Systems and Industrial Facilities, *Proc. of U.S.-JAPAN Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems* (Tokyo), (Nov. 1976), p. 487
- 9) Shibata, H. and others: Development of Aseismic Design of Piping, Vessels and Equipment in Nuclear Facilities, *Nuclear Eng'g. and Design*, Vol. 20, No 2, (July 1972), p. 393
- 10) 佐藤壽芳，鈴木浩平：複数の入力をうける機械構造物の地震応答解析，機械学会論文集，Vol. 38, No 305, (昭47-1), p. 93
- 11) Shibata, H. and others: On Fluctuation of Responses of a Structure, *Proc. of 5th World Conf. on Earthq. Eng'g.* (Rome), 8B, # 367, (June 1973)
- 12) Shibata, H.: On Response Analysis for Structural Design and Reliability, *Proc. of 4th Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technology* (London) K 4/3\*, (Sept. 1975)
- 13) 曾我部潔ほか：液体貯槽の耐震設計，機械学会誌，Vol. 79, No 689, (昭51-4), p. 305
- 14) 佐藤壽芳：二つの卓越周期を有する模擬地震動にたいする付加機器系の応答，機械学会論文集，Vol. 41, No 348, (昭50-8), p. 2347
- 15) 藤田隆史：大震災時における住民避難の最適化 — 火災延焼シミュレーション，計測学会論文集，Vol. 11, No 5, (昭50-10), p. 501
- 16) 藤田隆史：大震災時における住民避難の最適化 — 避難群集の流動シミュレーション，計測学会論文集，Vol. 12, No 4, (昭51-8), p. 424
- 17) 柴田碧：産業施設の耐震設計基準の現状とあり方，機械学会誌，Vol. 79, No 689, (昭51-4), p. 342
- 18) 柴田碧，堤泰治郎：ライフライン，産業施設の耐震設計の基準化についての一考察，生産研究，Vol. 29, No 3 (昭52-3), p. 163