

新潟地震における配管の被害（文献42より）

機械系構造物の耐震設計

——原子力発電所に関する研究を中心として——

柴田 碧・佐藤 壽芳

験⁴⁾などを行ない、中寸法・小寸法模形とも比較して、その固有振動数、振動形、減衰定数などがどのようにすれば測定できるかを検討した。それとともに、これらの配管類の振動形の分布は複雑であり、その減衰定数などからみて地震時の応答推定法を本格的にやらなければならないことを知った。

安全基準の1次報告書草稿⁵⁾は以上の過程で明らかになった振動学的立場にもとづいて機械関係は書かれた。力学的にみて明瞭なことがあっても、実際の設計に際しては未解決のことも多く、また手法がいくつかに分かれていることもあったので、実際の解説書（あるいは手引き書）の作製はその後の問題として残った。

1961年度当初は東京電力（株）が行なった実験の整理を行なう一方、前年度末の2月から日本原子力産業会議の安全特別研究会内に地震小委員会が軽水炉の耐震性について問題点の抽出、調査を2カ年計画で行ない、最終的にはその評価を行なうことを目標として発足した。現在この委員会はある仮空の炉形式を設定して試算を行なっている。

これらの作業と安全基準1次報告書の再検討との結果は数点の問題について、さらに強力な研究活動を必要とすることを示していた。その結果1962年度において日本機械学会は研究協力委員会下の研究分科会としてこの研究を実施することに決め、研究経費は前々年の東京電力（株）が受託したのと同様原子力平和利用研究委託費と参加各社の負担金によることになった。分科会名は耐震設計法研究分科会となり、配管系を中心とした機械系の地震応答の推定法を第1にとりあげ、それと平行して压力容器との接続部の応力集中、低サイクル疲労の問題についての予備調査を行なうことにした。後者の問題は1963年度压力容器構造設計基準研究分科会に引き継がれ、現在まで活発に活動している。耐震設計法分科会は⁶⁾その後1カ年延長して、ややその範囲をひろげながら研究を進め1965年4月でその研究を終了し、後期分の成果報告書を準備中である⁷⁾。

東海発電所は完工に近づいており、その建設の各段階で常時微動測定を何回か実施して、建物その他の固有振動数を確かめてきたが、1964年末には高圧蒸気管などについて強制加振の振動実験を行ない、固有振動数、減衰定数などを求め若干のデータを得て必要と認められた

1. 現在までの経過

日本における機械系の耐震設計は原子力発電所の安全に関連のふかい問題の一つとして発足した。最初にこの分野におけるいままでのなりゆき、現状とその問題点をかんたんに述べる。

原子力発電所全般の耐震設計の現況については原子力学会誌1964年9月号の“私のノートから”¹⁾で日本原子力発電（株）の秋野氏が書かれている。われわれ機械工学の分野の者が、この面に最初に触れたのは1958年夏、日本原子力発電（株）の東海発電所²⁾の問題からである。この段階で、原子力発電所の安全性ということとは別に、配管系いわゆるパイプの振動特性を求めること、压力容器のノズル部などにおける応力集中、およびこれらの部分の地震荷重の決め方と許容応力の関連という三つの問題点が浮かび上がってきた。そこで1959年から2年間にわたり文部省科学試験研究費により、この第1の点を理論的な立場から着手した（メンバー：東京大学工学部および本所）。その後この年度中頃から通産省関係の原子力発電所安全基準専門委員会内の地震小委員会で、資料の取りまとめと1次報告書の草稿の作製にとりかかった。

その間パイプの振動特性と地震の際の応答を求めることを目標に、理論研究とモデル実験³⁾とを行ない、さらに東京電力（株）品川火力発電所においてガバナ・テストの際の蒸気管の振動状況を観察し、その固有振動数・減衰定数からみて、耐震性について検討しなければならぬ点のあることを確認した。東海発電所の各部の検討、上記の観測などの結果により、本格的な研究の発展の必要性を感じ、1960年度に科学技術庁による原子力平和利用研究委託費を東京電力（株）が受け、前述の品川火力発電所で、主蒸気管などの強制加振実験、常時微動実

点の補強を行なった。

一方、日本原子力発電(株)の第2発電所の建設予定地も敦賀近辺におおよそ定まり、その土地の地質構造や地震の特性の調査が行なわれ、設計のための資料の集積と設計法の検討が完了し、続いて関西電力、東京電力、中部電力も同様な道を歩んでいる。

以上がここ数年間のなりゆきであるが、JPDR などについて、またアメリカでの事情については前述のように秋野氏が書かれているので省略する。

このように日本におけるプラントの耐震設計を機械の分野から見ての近年の動きはほとんど原子力発電所に限られているが、ボイラ、配管系についてはこれ以外の分野にも見られる。1961 年には国鉄川崎火力における建屋とボイラを含めた系の解析についての論文⁸⁾があり、火力発電所の配管については現在数例についてダンパを使用した支持法の例が³³⁾、またアメリカにおいての特別な例としては、スナッパとダイナミック・ダンパの効果を比較した論文⁹⁾がある。また化学プラントにも日本、アメリカにおいて配管へダンパを使用した例があるが、この場合ダンパを使用していることが、耐震設計に必要な動的解析を十分に行なったということにはつながらぬようである。しかしダンパの性質上それを装備したことは、地震がなんらかの形で検討されていることを意味している。

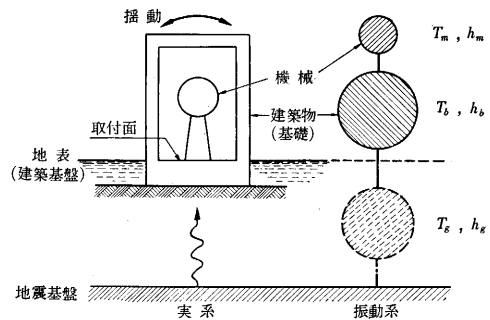
このようにして機械系の耐震設計の手法が徐々にまとまりつつあるわけで、以下その概略を順を追って説明する。

2. 耐震設計のあらまし

建築、土木の分野における耐震の設計は地震による破壊を経験することにより始められ、成長した。しかしプラント、機械系ではこの経験はすくない。1923 年の関東地震のときには工業はいまだ幼年期に近く、1944 年の東南海道沖地震の記録は、戦時中であつたのでほとんど残っていない。1961 年日向沖地震では塔槽類の共振による破壊が若干記録された。1964 年新潟地震では一部の化学工場の被害は大きかったが、動的現象は液面など長周期系の共振がもっとも目立ち、配管などの共振による破壊は少なく、砂質地盤の流動化による諸現象が被害を大きくした⁴²⁾。

このようなことから、標準的な大地震下で機械系がどのような状況になるかを知らうとするなら、それはほとんど予測に終始することになり、なかなか困難な仕事ではある。

この文の表題の機械系がなんであるかを、もし厳密にいうならば、地盤の上にある建築物あるいは基礎といったコンクリートを中心とした構造物に、さらに付加されていて、主として金属材料で出来ているものであるが、振動学的モデルで描くならば第1図のような振動系で表



第1図 建築物・機械系と振動系モデル

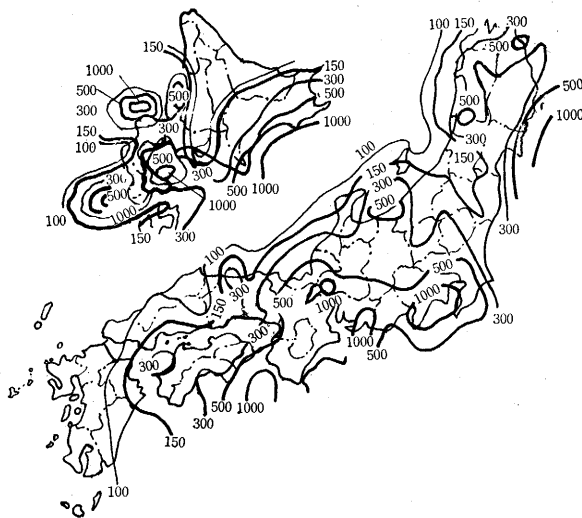
わされる。

このように付加物を伴う構造物を振動系として数値的に表わすこととともに、地盤(建築基盤)の地震動の振動特性と強さを定めること、振動系の地震動による振動応答を求めて部材の応力あるいは相対変位など設計上に関心のある数値でそれを表現すること、およびそれら数値の表われ方(最大値、ピーク値とその発生率、平均値など)を許容応力などの一定基準にあわせて比較してその可否を決定すること、これが否の場合には対策を見出すことが機械系の耐震設計の筋道となる。以下 § 3. で地震動に関することのあらまし、§ 4. で機械系の振動特性、§ 5. でそのうちの配管系を中心として、§ 6. で応答、§ 7. で応力を中心とした諸点を述べる。

3. 地震動の強さと振動特性

たとえば原子力発電所建設の際のようにその安全性が重要視される場合には、敷地選定にあたっての耐震的な考慮が大きな比重をもってくる。すなわち過去の地震被害についての歴史をふり返ってなるべくそれが少ない地点を選べば、建設するプラントの受ける地震力も少なくともすむと期待できると考えられる。一般の発電所、化学工学プラントについては、原子力発電所ほど決定的でないにしても、建設費などとの関連で、このことはやはり重要である。そこで敷地を決定する際には、その地点で起こり得る地震規模を過去の歴史を参考に推定すること、またその地点の地震動の工学的性質を知ることが第一段階の仕事となる。一方構造物の振動特性、地震に対する応答特性を知った後、両者合わせて初めて地震時に構造物にかかる力が推定でき設計が可能になる。これらの諸点に関して絶えず活発な研究が続けられてきたし、現在も続けられている。以上の点を考えながら、これまで明らかにされている諸点についてかんたんに述べる。

地震によってひきおこされる被害の大きさは、構造物の剛性、震央距離、地盤条件など多くの条件によって支配されると考えられるが、最も大きい影響を与えるのは地震規模である。通常地震規模は地震の総エネルギーと関係のある規模等級(マグニチュード= M)で表わされる。これは観測値を震央距離 100km の点にある周期 0.8sec、倍率 2,800 倍の地震計で測った最大振巾に μ を単位と



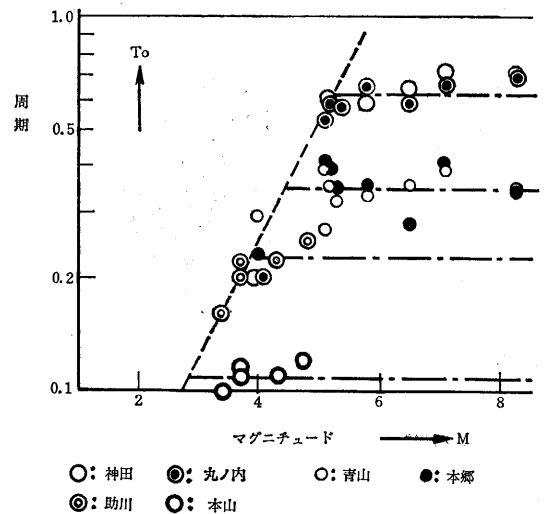
第2図 200年間の最高震度期待値の分布(河角)

して換算, その常用対数をとったものである. わが国でおこった地震のうち最大のものは, 1933年3月3日の三陸沖地震で $M=8.5$ であった. また工学的に問題になる規模は, $M>6$ である^{10),11)}.

幸か不幸かわが国では有史以来地震が社会の大事件であったことには変わりなく, 時期によっては一地方に偏っているきらいはあるけれども, そのときどきの記録が残っている場合が多い. そしてこれらの記録から震源や規模を推定し, 日本地図の上でどのように分布しているかということを知るのには, 敷地選定などにあたっては参考になることである. 実際このような結果をもとに, 第2図^{5),12)}に示すような200年間に来襲の可能性がある地震の最高震度期待値の分布図その他の資料が作られ, 参考にされている.

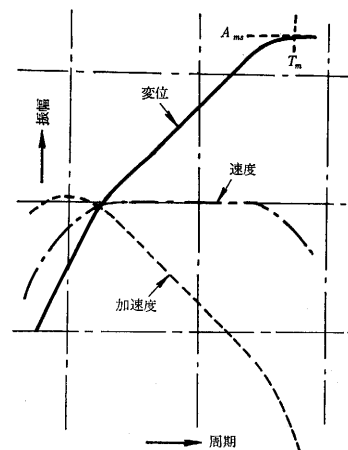
一つの観測点で記録された種々の地震波形を検討すると, 各地震波にそれぞれ卓越している周期(振動数)成分があり, この周期に対する地震の個数はある周期で最大となるような分布を示すことが多い. 一方同一の地震に対して観測点が変わると, 地震動中にみられる周期の頻度分布, 各周期に対する加速度頻度分布等も変わったものになる. またいくつかの地震記録について, 地上の地震動の最大振巾と, それに相当する地下300mの波の振巾との比一増巾度一に対する地下300mにおける波の周期の関係が求められ, ある周期の波が選択的に増巾される傾向が確かめられた. これらの事実を, 地震動が地盤条件によって各地点に特有の卓越周期(振動数)をもっていることを意味していると考えられる¹²⁾.

第3図は, 地震動の卓越周期成分 T_0 と M の関係について調べられたものである¹⁰⁾. この図から, 1) 地震がある程度以上大きくなると地震の大きさに無関係に各場所に固有な卓越周期があり, その値は地盤固有周期

第3図 地震の大きさ (M) と地震動の卓越周期の関係(金井)

T_0 ($T_0=4H/V$; H : 地盤厚さ, V : 地盤中のS波一横波の速度)に大体一致すること, 2) 地震の大きさがある程度以下では, 地震が小さくなるにしたがって卓越周期も短くなること, 3) 各場所について卓越周期がほぼ一定になる M の下限は, その卓越周期の値が大きい場所ほど大きいことなどがわかる.

地盤表面で記録される地震動中の振巾と周期の関係については, 定性的に地盤が軟らかいほど卓越周期が長く変位振巾が大きくなること, また同じ地震で加速度振巾は小さくなること, 硬い地盤ではこの傾向とは逆になって表われること, 等の傾向がみられる. 地下300mで観測されたいわば地盤(地表層)の影響をうけないままの地震記録について, 変位スペクトルを計算した結果を, 模式的にまとめられたのが第4図である. ある周期巾で速度スペクトルが一定となり, 各周期成分のエネルギー分



第4図 基盤における地震動の周期特性(金井)

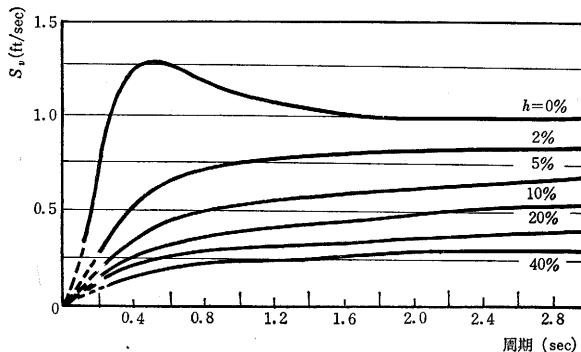
布が等しくなることが示されている。

以上は地震動にみられる性質であるが、地盤がたえず微小振巾で振動している現象—常時微動—中にも卓越周期がみられ、これが地震記録中にある卓越周期と一致することが確かめられている。また標準貫入試験打撃回数の地下分布から判断して地盤が一層を構成しているところでは常時微動の頻度曲線に一つの顕著な山ができること、頻度最大の周期はほぼ卓越周期と一致していること、地盤構成が二層になると、頻度曲線の山が二つになる場合もあることなどが明らかにされている¹⁰⁾。

さらに地震動と常時微動の関係については、1) 常時微動で明確な卓越周期が現われる地盤上の地震動は、その卓越周期と同じ周期の波が卓越する。2) 常時微動の頻度曲線に二つ以上の山ができる地盤上で、地震動はそのうちの一つあるいは二つ以上の山にあたる周期の卓越したものとなり、震央距離が近い地震では短周期の波が卓越する。3) 常時微動に鋭い山がなく頻度が広い分布をしているときは常時微動と同じ分布をする場合と、ある周期の波が特に卓越する場合とがある。等のことが知られている。

つぎに地震が起こったとき、ある地点でその大きさかどの程度になるかということについては、震央距離と M を与えて基盤における速度を知る金井式¹³⁾、地盤密度、地盤中の S 波の速度、 M と震央距離を与えて地表加速度を知る Blume の方法¹⁴⁾ 等がある。しかし近距離に震源のある大地震については実情にそぐわない点があったり、観測データが十分でないこともあり、さらに精密に推定をするためには、今後の研究にまたなければならない。

このような研究の成果によって構造物に加わる地震動の性質をかなりよく知ることができる。すなわち、ある地点がきまると、過去にその地点で地震記録が得られていれば一層明確になるが、たとえ得られていなくても常時微動をはかって周期特性を知り、過去の震源記録、地震規模等を参考に加速度の大きさを推定することができるわけである。



第 5 図 標準速度応答曲線 (Housner)

一方このような性質をもつ地震動に対して構造物がどのような運動をするかということも非常に重要である。最近、構造物を適当な質点で置き換え計算機で模擬し、すでに得られている地震記録(加速度など)を入力として応答を求めるという方法でこの点に関する解析がすすめられ、その結果は設計の資料としても用いられるようになり、卓越周期だけを使う方法より精度の高い地震動の振動特性の一表現法としてその地位を確立してきた。

建築構造物を 1 自由度系で模擬し、アメリカの強震記録を用いて系の周期・減衰定数(制振度)をパラメータとし、応答の最大値を求める計算を系統的にすすめたのは Housner¹⁵⁾ 等であった。その結果周期と応答速度の平均的な関係として、第 5 図に示すようなある値以上の周期に対して、速度が一定となるという性質のあることが得られた。これまでの建築基準法などでは、一般構造物の設計震度は種々の条件にもかかわらず一律な値としているのに対し、応答速度の質点系が近似的に正弦振動をすることにより 1 階微分、積分を行なうことによって応答加速度・変位を推定できるから、地盤卓越周期、構造物固有周期、同減衰定数に応じて、それらの値を与えうのような、より合理的な設計法の端緒が開けたのである。最近では地震が記録された地盤条件を参考にして応答曲線を整理することにより、いくつかのかたちに分けられることなども報告されている¹⁶⁾。

実際の建築構造物が地震時にどのような運動をしているかということについては、新潟地震にもその例がみられるが、おいおいデータが蓄積されつつある。加速度倍率については一般のビルであると、地下に比べて最上階は平均して 3~5 倍、中層は 2 倍位になることが報告されている¹⁷⁾。JPDR (原研動力実験炉) については、地震計が主要各部につけられている^{18), 19)} から、今後原子炉構造物としての貴重な記録、解析の結果も発表されると思う。

実際問題としては、プラント設計検討の段階でどんな地震記録を用いるのがよいか、という問題がある。現時点では、すでに述べたような地震動の性質、常時微動との関係などから、常時微動の頻度曲線を参考に同じ種類の地盤条件で記録された地震記録を利用することが奨められている。また普通地震動と強震動では、工学的立場からする限りみかけ上の波形もスペクトルも本質的な差はないことがみとめられている¹⁰⁾。この外地震動から卓越周期の影響を除き、ある一定の広さの地域でそのまま耐震設計の標準として利用できる標準強震動を求めることも試みられている²⁰⁾。また後に述べるようにノイズ発振器から得られる不規則振動波形を地震とする模型の方法²¹⁾や、地盤を多質点系としそのステップ応答を擬似地震波²²⁾とすることなども提案されている。

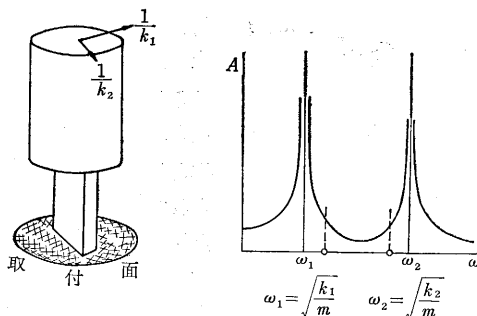
4. 機械系の振動特性^{3),23),24)}

常識的にいって機械は剛なものが多いが、付加物という見方で考えると必ずしもそうではないので、振動応答を求める際に（あるいは耐震設計という見地から）、取り付け面で予想される地震動の卓越振動数を中心に、2倍ないし1/2倍の間の固有振動数を有するものを共振構造物(体)それより高いものを有するものを剛構造物、低いものを柔構造物と分類することが第一歩となる。一般にこの卓越振動数は $3\sim 10^\circ$ であるので、固有振動数が 1° 以下と 20° 以上とが一応の境界になる。このうち剛構造の領域に入るものは取り付け面に働く加速度だけを問題として静的な力を加え、それによる応力などを求めれば目的を達し、その固有振動数、減衰定数などは数値的には関係しない。したがって必要なことは、その機械系が剛構造物に分類されるか否か判断するに足る精度で固有振動数が求まればよいわけである。常識でみて十分剛であると思われる電動機やポンプの本体などについては格別計算する必要はない。また、たとえば径が $2\sim 30\text{mm}$ 、長さ $4\sim 5\text{m}$ の鋼管のように木ハンマなどで叩いてみて、かんたんに $3\sim 40^\circ$ の固有振動数を有することが類似のものから知ることができるのも同様である。

共振の可能性のある構造物では、それ自体の固有振動数の精度が応答振巾の精度に直接影響する。設計としては共振を避けるのが原則であるが、もしも共振領域に入った場合はなるべく精密に求めることが必要となる。

柔構造物は、本来は剛構造物と同様それほど正確な値を必要としないはずであるが、応答がそれ自体の固有振動数に近い波であること、また地震波の変位の卓越成分に共振する可能性があることなどから剛構造物ほどかんたんには扱えない。

計算で固有振動数を求めようとする際、第1に行なわれることは、振動系のかたちを決めることである。たとえば自動車のサスペンションのように明らかにばね系と剛な質量系から構成されているものは、この場合多くはない。対象系の重心付近に一定力を加え、最大たわみ軸と最小たわみ軸を求める。この2軸は直交するはずで、さらにこれらに直交する第3の軸がある。一般に最小軸



第6図 振動系の異方性と固有振動数

ときには第2の軸方向も、たわみが第1軸方向のそれに比し非常に小であることが多い。この場合振動は平面的、あるいは直線的に拘束されている。地震に関連して考えると機械系ではその大部分が水平面内で平面的である。しかし、これはどの機械もが水平面内に振動すると考えて計算を行えばよいということ意味するのではない。

この弾性主軸は振動主軸と一致する。したがって固有振動数の計算はどの方法によるのであっても、これを考慮しなければならない。Rayleigh法で求める際にたわみ(振動)の方向をこの主軸に無関係に定めると、その結果は二つの正しい値の間に入ってしまう。いずれにしてもその形状から、静剛性の計算か実験により主軸方向と主値を求めなければならない。実験などでは応力における手法、Mohrの応力円などが有効である²⁴⁾。

このようにして形状が1質点系に近い対象で、重心点のばね定数の主値が求まればこれと質量とで固有振動数が得られる。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{M}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{M}}, \dots \quad (1)$$

平面内に2軸があるような場合、当然基本次の固有振動数は二つとなる。

つぎに重心に全質量が集中できない場合は

- i) 集中質量と梁のようにモデル化し集中化係数²⁶⁾ r を使用する。

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{M_0}}, \quad M_0 = M + rm \quad (2)$$

- ii) 静的荷重による変形 $f(\xi)$ を求めて Rayleigh法²⁶⁾で計算する。この場合の荷重は集中荷重のみでも、また分布荷重的なものを含めたものでもよく、

形式	両端固定	両端支持	片持
係数	$\frac{13}{35}$	$\frac{17}{35}$	$\frac{33}{140}$

第7図 集中化係数

変形曲線の誤差は結果にあまりひびかない。

$$\omega_1^2 = \frac{\int_0^L \rho(\xi) f(\xi) d\xi}{\int_0^L \rho(\xi) f(\xi)^2 d\xi} \cdot C \quad (3)$$

ここに $\rho(\xi)$ は質量の分布であって、集中したものがあるならば積分に積和の項が加わる。なお $f(\xi)$ が有次元量であるならば C は $1/g$ である。これは等価質量 M_0 を求める方法とも考え方は同様である。

$$M_0 = \int_0^L \rho(\xi) f(\xi)^2 d\xi \quad (4)$$

で求められる。この場合変形 $f(\xi)$ は M_0 の付加さ

れる点 M において $f(\xi_M)=1$ であるとする。

- iii) ii)の方法の精度もかなり高いが、変形曲線に動的なものを使用すればより良い結果が得られる。この変形曲線を得る方法は模形実験によったり類似の形状のものを使うなどがある。とくに模形実験では静的なものより動的なものが求めやすい。

以上は基本振動についてであるが、質量が 1 点に集中できない場合は集中の度合により 2 質点系にも、多質点系、連続体ともなり、それに応じ多数の固有振動数が存在するようになる。集中化係数は元来その変形曲線つまり振動形が関係しているので、高次振動についてはかんたんに適用はできないはずであるが、多質点系では各点間の質量はそのまま両端に配分してしまう。これはこの区間が、ほぼ併進すると考えてのことなので、高次になると当然誤差が大きくなる。Rayleigh-Ritz 法²⁶⁾は変形曲線 $f(\xi)$ を適当な一連の関数 $f_i(\xi)$ に係数 a_i を乗じた和と考えて変形によるエネルギー V と運動エネルギーから

$$\omega_i^2 = \frac{V}{\int_0^L \rho(\xi) f(\xi)^2 d\xi} \quad (5)$$

が最小となるよう係数 a_i を定める。

$$\frac{\partial}{\partial a_i} \frac{V}{\int_0^L \rho(\xi) f(\xi)^2 d\xi} = 0 \quad (6)$$

が条件式となり、これから a_i の同次 1 次式が得られ、その係数行列の行列式が振動数方程式となる。いずれの場合も V を求める際に変形原因を明確に落ちのしないようつかまなければならない。その他 n 次までの固有振動数を得るのに $(2n-1)$ 個の点をとって、そのばね定数 k_l 、影響係数 k_{lm} などを静的に求めて、規準関数を消去して求める方法も考えられる²⁵⁾。

なお固有振動数算出の問題点としては、設計時と、完成時の諸定数の差がある。直観的にもわかるとおり質量、剛性とも、その誤差は高次振動により厳しく表われる。これについては最近とくに新しい課題として取り上げられている。

一般に減衰定数(制振度)は

$$\zeta, h=c/c_0 \quad c_0=2\sqrt{mk}=2\omega m \quad (7)$$

と臨界減衰係数 c_0 との比で表わされる。機械系の有するこの値は巾が広く、その構造によって大きく左右される。単純な小規模の塔槽類では 0.5~1.0% と建築物に比し小であるが、保温材などを使用してあれば、この値にはとどまらない^{4),6),7)}。振動数との関連は発生機構にもよるが振動数の 0 乗から -1 乗の間に比例している(第 8 図参照、これについては次節でも触れる)。したがって上述の例は剛領域にあり、共振領域にあるものは一般にはやや大で純溶接構造のものでも 1~2% ではないか

と考えられるが、この点の資料は多くはない。

実験的には常時微動法あるいは過渡振動法で求める^{4),6),7)}。円形断面でも多少の異方性があることが多く、その差による 2 種の自由振動から過渡振動にうなりが現われることも、しばしばあり、整理法に若干の工夫を要する²⁷⁾。

5. 配管の振動特性^{3),6),7),25),28),29)}

大出力の火力発電所における主蒸気管、再熱管などの配管は長大で、熱応力の関係から、その支持法はきわめてやわらかである。原子力発電所にもこのようなものが使われる傾向にある。ただ化学プラント関係では温度条件などからこわくできるものも多いのでこのようなものは一部に見られるだけである。

このような配管系は、力学的に見れば梁の一種であって、曲げ振動を中心にねじり振動と縦弾性振動が関与している。計算の対象となる配管は比較的長いものである。せん断振動あるいは局所の回転慣性は考えない、細長い針金状のモデルに相当する。一方地震時の変位は大形のものでも 100mm 程度と考えられるので、微小変位、線形として扱い軸力ないしは接続端における力の分力といったものは無視する、などが要点ある。このようにして基本の振動方程式は

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

を使用する。上述の仮定によって解 y は

$$y = \sum_j X_j(x) \varphi_j(t) \quad (9)$$

と時間の関数と位置の関数(規準関数)の積で各振動形に分離できる、これは外力が加わっても成り立つので、いまの場合、きわめてべんりである。

このような仮定をおいた理論と細い針金の模形とでは固有値などよく合うが、これらと実物の系と一致については、つぎの諸点が問題となる。第 1 に境界条件がある。端末の境界条件は一般に固定として扱われるが現実ではあいまいことが多い。これは接続される压力容器などの静剛性を求め、それを考慮して計算すればほぼ解ける。配管沿いには各種の吊手、定力吊手、ばね吊手、ロッド吊手そしてまれには、平衡錘を使った定力吊手がある。定力吊手のばねとしての性質は複雑で、わずかな調整で正から負にわたって変化する。ばね吊手はばねであるが初期荷重のあるものも多い。ロッド吊手は一部の自由度を拘束することになる。平衡錘形のは等価の付加質量とみなす。

計算上はこれらを重錘、ばねの付加物と部分境界に分類して考えるわけであるが、これらの正確な評価は重要である。一方現実の設計にあたっては、これらの定数や位置はなかなか定まらず、またなるべく効果的な位置に設けたい。そのため、これらの効果を概算することが本格的な計算を行なうに先立って必要となる。配管の形状

が定まったなら付加物を除いた裸のかたちで固有振動数 ω_j , 振動形 X_j を規準化して求めれば, 付加物の効果はその定数に X_j^2 を乗じたものとなるので評価できる。

これらの振動特性値は模形実験でも求まる。ばねなどの付加物がなければ, その製作はかんたんである。

第2に保温材や水の効果である。これらは管部材のみかけ重量を増して計算を行なえばよいといえる。保温材の剛性はほとんど問題にならぬが, そのほかなお考えねばならぬことがある。取り付けがゆるい場合, 振巾が微小である場合は一体となって振動しないことがある。これはまた後述するように減衰定数にも複雑な影響を与える。第3は配管の屈曲部の剛性低下の問題である。静的にはすでに検討されているが動的には解析されていない。鋭く曲がるものとし, 静的計算によって推定される剛性低下分を等価なばねの挿入で代えるか, あるいは適当な長さに分割して集中定数系として解くのが現在では最良の解決である。

配管の振動特性は前節で述べた一般的な方法や模形実験でも求めることができるが, 遷移行列法による大形電子計算機の使用がきわめて有効である。計算方法は配管を直線部分, 屈曲部, 支持部, 継手部(スプラインなど), 分岐点などに分類し, おのおのについて一般変位, 一般力の12要素の遷移行列をつくる。この遷移行列は固有振動数(固有値)の関数である。支持部, 分岐した管などは主管からみた動ばね定数として表わして, 一端から他端へ逐次乗じてゆき全体の行列を得る。両端の境界条件から, これを4分割した小行列式が零となる条件が与えられ, 固有値方程式となる。

固有値 λ の値は広く知られているように真直な梁の曲げ振動で2~4程度に基本次がある。火力発電所などの主配管系の基本振動数は1~3 cps にあることが多く3次~4次まで検討する必要がある。 λ としては10~15の範囲まで求めることが要求される。このような固有値の領域では計算精度が重要な問題となる^{3), 30)}。

固有値方程式は管末における不平衡変位を零とするわけであるが, 高次の領域では慣性力が非常に大きくなっており, そのわずかな差で変位が定まるので, 大きな有効桁数が必要となる。単純梁の計算では

$$\cosh^2 \lambda - \sinh^2 \lambda = 1$$

が重要な計算であるが, $\lambda=15$ では, これらは 10^8 位の値となり, その差が1とでは10桁を必要とする。

このようにして固有値を求めた後, この小行列からなる支持点における一般力の一次の同次方程式を解いて支持条件が得られる。つぎに支持点より配管上の1点に至る遷移行列を同様の手法で求めて, 支持条件に乗ずると振動形(変形, 力とも)が得られて一連の計算が終わる。この振動形は規準化されていないので, その操作を必要とするが, 付加物のある系の規準関数は裸の系のように

一通りに定義することはできない。

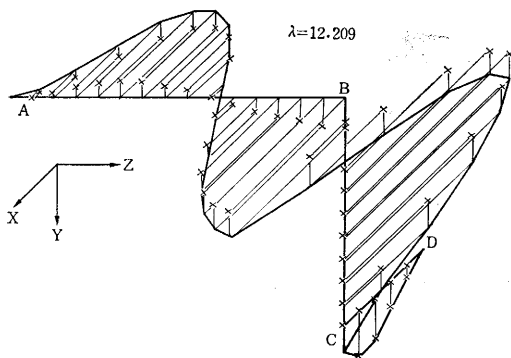
この計算のためのコード作製は1962年から1965年初頭にわたって, 科学技術庁より日本機械学会に委託され, 耐震設計法研究分科会でIBMデータ・センタの協力を得て行なった。またその間著者の一人はカリフォルニア大学バークレ計算センタにおいてもその一部を行なった。プログラムは11段階作製され, このうちおもなものはNo.4, 7, 7改, 8, 9, 10, 11の7種類でそれぞれ使用し得る。No.4~No.10はFORTRAN IIで, No.7, No.11はFORTRAN IVで書かれている。第1段のものは部材数10以内の分岐, 付加物など一切ない一様断面の基本形用のもので, No.4~No.9がこれに属する。No.10は単分岐, 付加物のある系用でNo.11の開発のためのもので洗練度も低い。No.11はそれまでの結果をまとめて, 直線部材, 屈曲点, 付加物, 分岐点などいずれも1枚の入力カードで表わし, このようなカード50枚に相当する配管まで計算できる。分岐部内に分岐を含むことは10例まで, また不完全拘束や不完全接続は1点で3座標系まで(ただしいずれのところでも同数の条件があり, 隣接する条件間で振動形が独立でない。文献(7, 28)参照), 任意回の太さの変更などが許されている。

計算は固有値と行列式の値を求め行列式の値の符号が反転する点(零をはさんで)を見出し固有値の近似値を求める。近似値を出発値として所要の精度の固有値を求める。この固有値の支持条件を求めて振動形を描く。の3段階となっている。

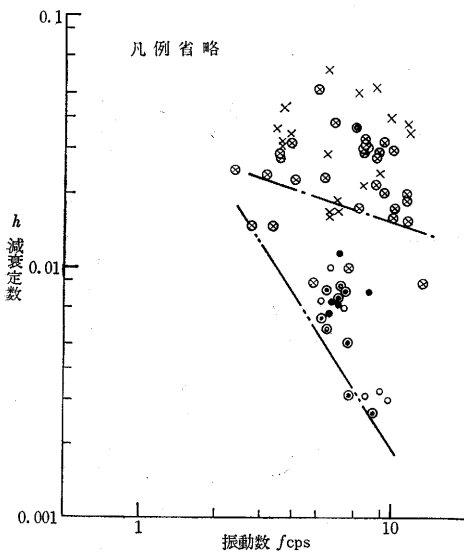
この外任意形状の配管の振動特性を求める方法については, 定数集中化によるものやその変形ともいうべき方法³¹⁾, それに静剛性計算を基本にしたエネルギー法³²⁾などが試みられている。

模形実験とくに径1~3mm ぐらいのいわゆる針金による全長1,000mm 内外までのものは, 前述のように計算結果ともよく一致するので有用である。得られるデータは固有値だけでなく振動形があり, 計算ではかなりの時間を要するが, 実験によれば明瞭に観察され, その変化なども捕えやすい。計算の補助手段としてもきわめて有効である。なお静剛性の振動主軸の決定などにも比較的手軽に使える。一方径10~15mm ぐらいの模形は応力分布などを知るのによい。固有振動数の決定にあたっては振巾が過大にならぬよう注意しなければならない。振動形はまた写真撮影により, かなりの精度で求めることができる^{3, 7)}。

配管系の減衰は吊手類の摩擦や保温材相互や管材との運動によっている。したがってかなりの振巾依存性がみられる。低い振動数ではややばらつきが小さく保温材なども一体として揺れる傾向があるが, 高い振動数ではときには微小振巾でかなり小さい値が現われることがあ



第 8 図 立体 Z 形梁振動形計算例



第 9 図 蒸気配管系減衰定数の実測例

る。振巾の大きい方の値はあまり振動数に関与しないともいえる(第 9 図)。

1~3% という減衰定数は共振的な場合にはやや小であり適当な制振手段が必要となる。オイルダンパ(ここでは速度比例形をいう)を付加することによって系全体の減衰定数を 10~20% 程度に引き上げるのが一方法である。このようなダンパの効果については前述の日本機械学会などの研究委員会において東京電力(株)千住火力発電所その他において各種の実験⁷⁾が行なわれた。しかし配管は、熱変形のような非常な微速度のものを除いては動く必要がないのでオイル・ロック(振動的な動きにたいしては固定として作用する。ハイドロリック・ロック、オイルストップともいう)の方がダンパの製作上の問題点を考えると有利であるとも考えられる。オイル・ロックの使用例は大容量火力³³⁾をはじめ、各方面に徐々に増加しつつある。この外熱変形範囲をやや上回る間隙を設け、地震時に振巾を制限するストップ、あるいはダイナミック・ダンパ、スナッパ⁹⁾なども考えられているが十分な研究はまだ行なわれていない。

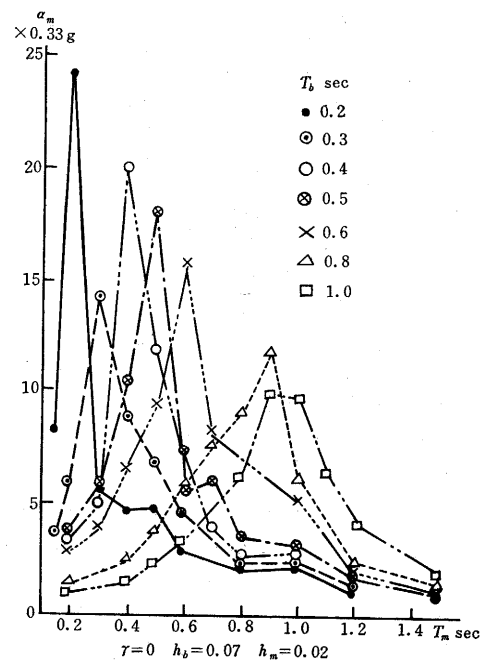
6. 振 動 応 答

発電所などで機器配管系が建築構造物に取り付けられている場合、振動系モデルとしては建築・機械構造物の 2 自由度系と考えることができる。一般的には、後者は前者に比べて軽く、質量比(γ とする)はかなり小さいと考えてよい。機械系が配管系のような分布定数系である場合には、各振動形ごとに 1 質点系で置き換え、それが建築・構造物モデルの 1 質点系についているとして扱えよう^{23),34)}。この系が地震時にどのような応答を示すかは、自由度が増えただけに電子計算機の使用が一層必要かつ有効になる。以下ではこのような応答計算の結果明らかになった耐震設計上注意すべき諸点について述べたのち、不規則振動理論の応用により地震をモデル化し、応答を推定する方法などについてかんたんに触れる。

入力地震のいかんにかかわらず、1 自由度系の応答が系の固有周期の非常に卓越した波形になることを考えるならば、その系の質量よりはるかに小さい質量をもち、固有周期の等しい振動系が付加されると、共振に近い状態になることは容易に推察される。

第 10 図は、横軸に機械系の固有周期 T_m 、縦軸に応答加速度の最大値(縦軸の 0.33g は入力に使った地震動の最大加速度)パラメータに建築構造物系の固有周期 T_b をとって応答波形から計算した結果をまとめた例である。減衰定数の $h_b=0.07$, $h_m=0.02$ はそれぞれコンクリート造構造物、大型配管等に特徴的な値である。

このような計算の結果によれば、一、二の例外的な場合はあるにせよ、いずれの T_b についても応答の最大加速度は両系の周期が一致したときに鋭い山をつくり、最



第 10 図 2 質点系加速度応答曲線

大となってくる。最も大きい値は 20 倍をこえ、1 質点系応答曲線の加速度倍率が、約 3 倍程度であったのに対し、著しく大きくなっている。しかしところによっては、二つの周期がたがいに僅かにずれても、一致した場合に比べて応答加速度が著しく減少することがわかる。このような曲線は速度・変位についても描けるが、これらの図から機械系の耐震設計の第 1 の要点は、両系の固有周期（固有振動数）の一致をさけるべきであるということが見出される。

第 11 図は、耐震的見地からすれば最悪の条件である $T_b = T_m$ となる点をつらねたものである。パラメータは質量比および機械系の減衰定数 h_m である。この図は、 $T_b = T_m$ となる場合でも h_m を大きくすると応答を著しく減少しうること示している。すなわち、実際問題としてはダンパをつけて防振しうる可能性を示している。

以上は最も重要な点であるが、これらの計算結果を参考に機械の耐震設計の考慮すべき点としてつぎのようなことがまとめられる。

1) $T_b = T_m$ となるときに、機械構造物の応答は最悪の条件になる。このことは、加速度については短周期（高振動数）側で、変位については長周期（低振動数）側で著しい。

2) 1 質点系応答曲線で加速度応答倍率が最大となる周期 T_{bmax} とするとき、2 質点系応答曲線では $T_{bmax} = T_m$ における応答倍率が最大となる。なおこの T_{bmax} は、多くの場合地盤の卓越周期と一致する。

3) 1 質点系加速度応答曲線が二つの山をもつ場合にそれに対応して $T_b = T_m$ とし 2 質点系応答曲線を求めると、加速度応答倍率は短周期側で大きくなる傾向がある。 $T_b = T_m$ となる点をつなぎ $T_b - T_m$ 応答曲線とすると、加速度・速度・変位のそれは、速度応答曲線がある周期以上で一定になるという性質で代表される。1 質点系の応答曲線と同様な傾向を示す。

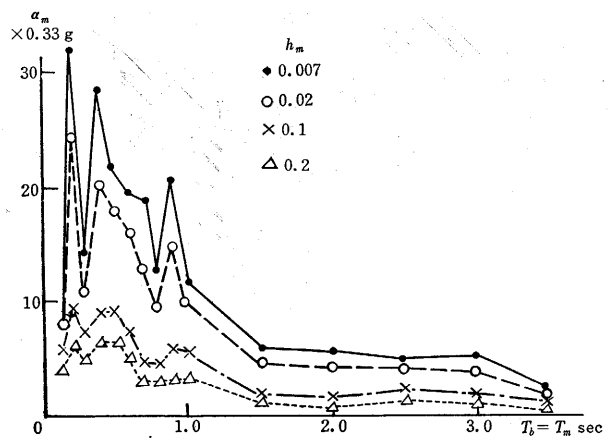
4) 質量比あるいは機械系の減衰定数を小さくすると機械の加速度応答倍率は増大するが、その傾向は $T_b = T_m$ の近傍で顕著である。

5) $T_b - T_m$ 応答曲線で、建築構造物系の減衰定数は一定にし、機械系の減衰定数を大きくするときは機械系の加速度応答倍率を減少させることができる。またその最大応答倍率は入力地震にかかわりなくほぼ一定となる。

6) 2 質点系応答曲線でパラメータ T_b の各曲線について最大の加速度応答倍率を 1 とするとき、その両すそで T_m の変化に対して応答倍率が $1/2$ となる周期 T_u もしくは T_l までの拡がり、 $h_b = 0.07$, $h_m = 0.02$ にたいして

$$T_b > T_g \text{ のとき } T_u/T_b = 1.2, T_l/T_b = 0.6 \quad (10)$$

(建築構造物長周期)



第 11 図 $T_b - T_m$ 加速度応答曲線

$$T_b < T_g \text{ のとき } T_u/T_b = 1.6, T_l/T_b = 0.7 \quad (11)$$

(同前 短周期)

のように与えられる。ここでは T_g は 1 質点系の加速度応答曲線が山になる周期（地盤の卓越周期に相当）とする。この解析によれば、地盤の卓越周期が建築構造物の周期より長ければ機械系はその影響を受け、短かければその成分は建築構造物系で阻止され、機械系の応答には影響がないことがわかる。

7) 地盤・建築構造物・機械構造物の周期がわかれば、 $T_b = T_m$ としたときの加速度応答によって、2 質点系の加速度応答曲線のだいたいの形を、推定することが可能である。

8) 建築構造物上の地震時振動記録にたいし 1 質点系の応答を求めると、建築構造物系に付加された質点系の応答を求めたことになるが、これとすでに述べた建築構造物の応答特性を考慮した 2 質点系の応答とをくらべると、ほぼ等しい値になる。

9) 応答曲線に示される最大値の生ずる時刻に注目すると、 T_b と T_m が異なるとき、あるいは一致しても h_m の大きいときは、地震加速度が最大となる点よりわずかにおくれて最大値ができるのになら、 h_m が小さく、 $T_b = T_m$ となるとはるかにおくれて生ずる。すなわち応答振巾が成長するのに時間がかかる²³⁾。

つぎに質点系が非線形振動—弾塑性振動—をする場合の解析も電子計算機を使用することが有効である。普通程度の地震時と大地震時の建築構造物の振動記録は、まだ十分にその数が見られている段階ではないが、一般的にいって大地震時にその周期が非線形特性のためにのびるとされている。建築・機械構造物系で、建築系のみ非線形特性を入れたアナログ計算機による応答計算の 1 例によれば、建築系の応答加速度が塑性域では減少するから、たいがいは機械系のそれも線形のときに比べて減少する。しかしみかけ上の周期も同時に変わるため応答

倍率がそれほど減少せず、同程度の振巾の波が続いてくりかえされるという点で、線形の場合よりも条件が悪くなる場合があることは実際に問題を考えるにあたって注意を要する²³⁾。

これらの結果は、実際の地震記録について得られたものであるが、地震動が不規則な波形を有すること、地盤卓越周期があること、それに対する構造物応答が上に述べたような結果になること等を参考に、不規則振動理論の応用により、加速度応答倍率等を求めることが試みられた。著者の一人は、地震動が基盤において加速度スペクトルが一定のガウス分布定常不規則振動であること、地盤モデルが工学的には 1 自由度系モデルで表わしうること、極値密度関数が十分小さくなった点が最大値に対応すること等を仮定して、地震動に相当する不規則振動とそれに対する機械構造物の応答に相当する不規則振動について最大値を計算し、応答倍率を求めた²³⁾。第 12 図はその 1 例であるが、この結果は、いくつかの地震記録にたいする包絡線の形に似てかなりよく合っているといえる。しかし h_m が小さくなると、仮定の定常性が実際とそぐわなくなり、理論による計算の結果の方が大きくなる。

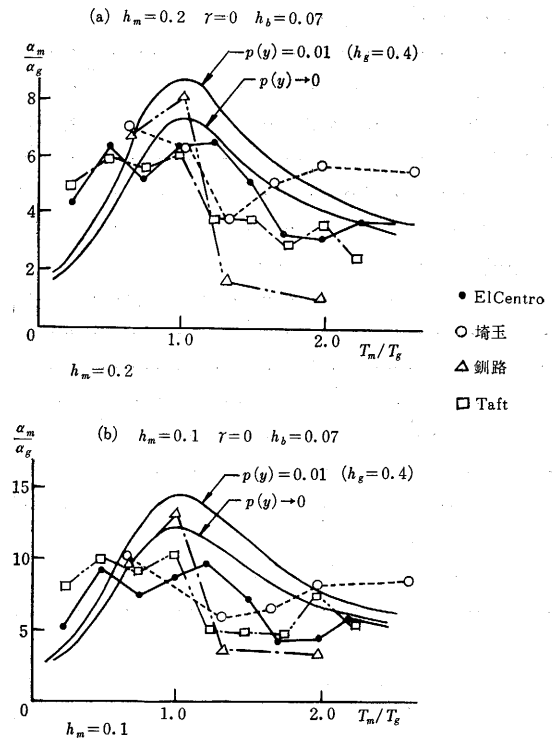
このような計算によって、すでに述べた地盤卓越周期の機械系への影響などもかなり定量的に知ることができる。またこの計算の結果を、種々のパラメータについて求めておけば、設計時に構造物のパラメータを知って応答倍率を推定することも容易であろう。このための計算コードは機械学会配管系耐震設計法研究分科会の研究の一環として完成され、数表も一部分のパラメータについて作られている⁶⁾。

応力などの計算には加速度より変位が必要なこともあるが、その場合各系の周期を考慮して推定加速度から換算する方法⁷⁾、あるいは初めから変位の形で表わしておくことなどが考えられる。

この外、建築構造物については田治見³⁵⁾により同様な仮定で最大値が標準偏差に比例するとし、やはり応答倍率が求められている。また任意のパワ・スペクトルをもつ定常不規則振動に対する質点系の応答については Caughey が、³⁶⁾ 地震を衝撃とみなし不規則パルス列に対する質点系の応答については Rosenblueth³⁷⁾ が研究をおこなっている。Bogdanoff³⁸⁾ らは、振動数、位相を確率変数として包絡線が地震動に似ている非定常不規則振動をつくり、それに対する応答を求めている。またこのうち定常不規則振動で模擬する考え方については、ノイズ発生器を使って実験的検討も試みられている³⁹⁾。

7. 応力とその許容値について

このようにして配管なり機械なりの応答がその加速度あるいは変位なりで得られたとする。これらの相対変位とか、これらに取り付けられている制御機器に加わる



第 12 図 統計的計算と応答曲線の比較

力とかが、設計に際して検討すべき問題点であれば上述の数値がそのまま使える。しかし配管や機器類自体の地震応力を求めることになる、ことは複雑になる。

機械系の場合、地震応力としては曲げモーメントによる諸応力が第一に考えられる。もちろんせん断力など力そのものによるものもあるが、特別な形状のものを除き曲げモーメントによるものより小さい。自重などの常時応力が重要であることはもちろんであるが、地震の発生に伴う過渡的な熱応力を忘れてはならない。

地震の場合、このようにして得られた応力値は引張り強さ、降伏点、弾性限応力、それに疲労特性などを考えて定められる許容応力と比較されるわけである。応答の最大値だけが問題となる場合も多いが、それと同時に低繰返し回数の疲労も重要なものの一つである。この場合には最大応力よりむしろ、応力の極値の平均値やその分布とか、あるいは一つの地震においてある値を超える極値をもつ応力変動の回数がいくらであるかということが問題となる。

応力の求め方はその系の自由度によって変わる。1 質点として扱える系では、重心に相当するところに振動軸方向に静的に力を加え、それによって生ずる応力分布が動的な場合にも生ずると考える。力の大きさはつぎのようになる。剛構造物の場合には重心に働く加速度 α に質量 m を乗じた力 $F = \alpha m$ となる。柔、共振構造物では応答は相対変位 y で表わされることが多い。構造

物の静的ばね定数を k とすると $F=ky$ がそれになる。

これらの構造物で応答が加速度 α で与えられたとしても適確な応力が算出し得るとは限らない。たとえば固有振動数の非常に低い系の質点上の加速度はほぼ零と考えられる。しかし地動に対する相当変位は地動にほぼ等しい。したがってばねに相当する部材の応力は零ではない。したがって加速度 α から直接に力を求めてよいのは剛構造体に限られる (§ 6 参照)。

2 質点以上の系では振動形が § 4, 5 に述べたような手順で得られているのでそれによる。すなわち剛構造物では加速度の分布から直接 1 質点系の場合と同様に静的な力を求める。振動形としては基礎を含めたものを知ることが必要である。柔、共振構造物では振動形中で柔、共振領域に入るものについて取り上げ、各振動形ごとに相対変位で求めて各質量間のばね定数を乗じて集中力を定める。この集中力による静的荷重によって発生する応力が動的応力となる。光弾性実験などの場合においても、荷重が集中力として求められれば、それをそのまま適用することができる。

2 次応力の定義とが取り扱いにも問題はあがるが、根本的な思想は局部で、降伏点を越える応力が生じたとしても、塑性変形でそれが緩和されるのなら問題としないということである。荷重が与えられれば応力集中などの問題も含めどのような精度でも計算できる段階にあるとしても、必要性を考えて計算の限度を定めるべきである。

配管系では前述の計算コード^{6),7)}により曲げモーメントの分布が直接算出される。曲げモーメントの絶対値を定めるには配管の相対変形量を算定しなければならず、このためには加速度応答倍率だけでは不十分なことは前述のとおりである。概算としては加速度応答 α よりその振動形の固有振動数 ω_i を使って $y_i = \alpha / \omega_i^2$ として絶対振巾を求め、一方取り付け面の絶対振巾を求めて、そのベクトル差を求めてそれを相対振巾とする。なお共振倍率が十分高い場合には相対値のまま使っても大きな誤差は生じない^{25),29)}。

応力の計算はいずれの場合にも〔力→モーメント→応力〕という経過をふむので、応力集中などについては静的計算と同様に考えればよい。実験についても弾性域については同じである。また最大値以外の諸数値(平均値、その分布その他)についても加速度などについて得られた関係をそのまま適用することができる。

このようにして得た応力値の判定もきわめて困難なことである。許容応力の決定は第 1 に設計条件の地震の強さと関連してくる。第 2 にその構造体のじん性あるいは安定性が関連する。これは設計条件としての地震の強さはあくまで仮定であって、それ以上のものがあるかどうかは未知の問題に近い。他の機械設計と異なる点である。払い、さらに疲労破壊の可能性を考えている。地震荷重

とくにプラント全体の地震条件は建築・土木の面から決定されることが多い。したがって、評価法にかなりの巾があるので、そのくい違いを許容応力で調整することになる。第 1 表に原子力発電所についての例を示す。つき

第 1 表 アメリカにおける動力炉の許容応力

地 点	Humbolt Bay	Bodega Bay	San Onofre ^{*3}
基本地震力	重要なもの 0.25g その他 0.20g (横力)	Class I 0.33g ^{*1}	Class I 0.25 g
設計条件	重要なものについては、さらに mode of failure を検討する	応答曲線による動的解析を行なう	応答曲線による動的解析を行なう
許容応力 (通常の許容応力を 1 とする)	1.33	1.00	地震 + 1 次定常 < 1.00 地震 + 1 次定常 + 2 次 < 0.9 σ_y ^{*2}

P.G. & E 社にて柴田調 (1964.1)

^{*1}: El Centro 地震ではなく San Francisco 地震の 0.22g × 1.5

^{*2}: σ_y = 降伏点応力

^{*3}: 一説に 0.20g - 1.33 倍を基本とする。

第 2 表 分野別引張り許容応力例 (kg/cm²)

分 野	建 築	土 木	機 械
一般構造用材 (SS 41)	1,600	1,400	1,030
溶 接 用 材 (SM 41)	1,600	1,300	1,030

に設計地震力が加わった際の構造物の被害状況の想定が分野によって異なることによっても許容応力に差が生ずる(第 2 表)。構造物のじん性——一部が破断したり、あるいは亀裂を生じた場合、それが自重、内圧のような地震力以外の定常荷重によって、さらに拡大するか否かがもう一つ重要な点である。この点、コンクリート構造物などでは局部に亀裂が入るような状態になっても全体が崩壊するまでにはほど遠いとされている。一方圧力容器などは内圧による応力の許容値を引張り強さの 1/4 とはるかに低くとしている。これは圧力容器に入った亀裂の安定性という面からみてもうなずけることである。

ここで問題となるのは原電 1 号炉 (英国型ガス冷却原子炉) のように圧力容器とその支持部が同一材質の部材を使って溶接によって完全に一体となっている場合²⁾ である。スカートとよばれる部分は自重、熱応力に地震応力が加わるわけであるが、内圧による応力は直接は加わらない。したがっていわゆる構造材であるから高い許容応力を使うという考え方になりやすいが、これはつぎのように考えるのが妥当であろう。スカートの局部に降伏亀裂が入った場合に、一般的な条件下で圧力容器本体に達するかどうか。もし達する可能性があるならば、機能材に準じた許容応力をとらなければならない⁵⁾。

いわゆる ASME の Section III⁴⁰⁾ は原子炉容器の設計のためのコードであるが在来のもものと異なる点は最大せん断応力説をとり、応力を類別して計算しその種類に応じた許容応力を定める。とくに熱応力についても考慮を

を対象に考えたものではないが、その根本の思想は耐震設計の際の指針になり得るものであり、とくに重積疲労の考え方はこの場合重要である。

構造物については弾性限（あるいは降伏点）および伸び率を基準にして、塑性変形によって吸収し得るエネルギーが、一つの地震で加えられると想定されるエネルギーにある安全率（たとえば 3）を乗じたものになるよう、部材寸法を定めるといった方法も試算されている²⁴⁾。

8. お わ り に

建築・土木の分野では、その対象物が剛構造物に属するものが多いということから、いわゆる静的設計が久しい間本筋であった。過去に機械系のための耐震設計法が考えられた際、対象の振動特性の差を検討することがときには忘れられたこともあった。しかし最近では地震工学の分野の重点は動的解析に関するに移っており急速な進歩をとげつつある。したがって機械系の分野においても、本文中で展望、解説したようにすでにごく基本の線は確立したように思える。

しかしこの面の研究が行なわれるようになってからの日が浅いので検討されねばならぬ各論的なことは非常に多い。

最後に本文の内容は長い期間にわたるいくつかの耐震関係委員会における活動を通じて諸委員（企業体）から得たものであることを記し、厚く感謝の意を表する。また、これらの方々のご意見と筆者らの意見を本文中で明確に区別することができなかったことをおびする。

(1965年9月17日受理)

参 考 文 献

- 1) 秋野金次：原子力誌，6，8，470 (1964)。
- 2) 武藤 清：原子力誌，1，7，447 (1959)；2，1，25 (1960)，ほか。
- 3) 柴田 碧，重田達也：日本機械学会論文集，29，200，783，(1963.4)，ほか。
- 4) 東京電力(株)：原子炉配管系の耐震安全設計に関する研究 試験成果報告書（本文および付録），(1962.4)
- 5) 通産省原子力発電所安全基準委：原子力発電所安全基準第一次報告書 (1961.4)
- 6) 日本機械学会：原子炉配管系の耐震設計法に関する研究 成果報告書 (1963.12)
- 7) 同：後期成果報告書 (1965.12. 予定)
- 8) 馬場知己：鉄道技術研究所報告，No. 244 (1961.8)
- 9) G. C. Kaercher：Eng'g. Res. Dep. Report of Detroit Edison Co., 61 C 87 (1962.4) —
- 10) 金井 清：Proc. of Japan Nat. Symp. on Earthquake Eng'g., 27 (1962.11)
- 11) 理科年表 (丸善)
- 12) 大築志夫，金井 清：耐震設計 (1961) コロナ社
- 13) 金井 清：建学論，57 (1957.7)

- 14) J. Blume：Proc. of 3rd World Conf. of Earthquake Eng'g., (New Zealand) IV/B/17 (1965.2)
- 15) J.L. Alford, G. W. Housner and R.R. Martel：Bull. of Seism. Soc. Am., 43 (1953.)
- 16) T. Hisada, Nakagawa and Izumi：ARI Occasional Rep., 23 (1965.6)
- 17) 高橋竜太郎，平能金太郎：Proc of Japan Nat. Symp. on Earthq. Eng'g., 1 (1962.11)
- 18) 田治見宏，市野市郎，後藤春雄：機学誌，68，559，1013 (1965.8)
- 19) 田治見宏ほか：JPDR の建家自然地震時の振動測定及びその解析（未発表）
- 20) 河角広，嶋悦三：Proc. of Japan Nat. Symp. on Earthq. Eng'g., 13 (1962.11)
- 21) 佐藤壽芳：機学誌，65，520，686 (1962.5)
同：機械構造物の耐震設計に関する研究，東京大学博士論文 (1963.3)，および
同：東京大学生産技術研究所報告，15，1 (1965 印刷中)
- 22) 柴田 碧：第 1 回災害科学シンポジウム前刷，IV-5，114 (1964.9)
- 23) H. Shibata, H. Sato, T. Shigeta：Proc. of III WCEE, II/S/17, (1965.1)
- 24) US. AEC：Nuclear Reactors and Earthquakes, (TID-7024), (1963.8)
- 25) S. チモシェンコ (谷下，渡辺訳)：工業振動学，55節，57 節ほか (1956) オーム社
- 27) 柴田碧，原亮一：生産研究，17，8，208 (1965.8)
- 28) 藤井登二ほか：機学会 42 期通常総会前刷，No. 132，303 (1965.4)
- 30) 柴田 碧：偏微分方程式の数値解法に関するシンポジウム前刷，32 (1965.1)
- 31) L. Crawford：J. of Am. Soc. of Naval Eng'rs., 345 (1956.5) および G.E. Fink：Vibration Analysis of Piping Systems(M.S. thesis at U.S. Naval Postgraduate School) (1964)
- 32) 加賀万亀男：機学会 41 期通常総会前刷，No. 107，227 (1964.4)，ほか
- 33) 名越仁彦：火力発電誌，16，2，149 (1965.2)
- 34) J. Penzien and A.K. Chopra：Proc. of III WCEE, II/F/11 (1965.2)
- 35) H. Tajimi：Proc. of II WCEE, 781 (1960.7)
- 36) T.K. Caughey and H.J. Stumpp：J. of Appl. Mech 28，4 (1961.12)
- 37) E. Rosenalueth and J.I. Bustamante：Proc. of Am. Soc. of Civil Eng'rs., EM 3-88, 75 (1962.6)
- 38) J.L. Bogdanoff, J.E. Goldberg and M.C. Bernard：Bull. of Seism. Soc. Am. 51，2 (1961.4)
- 39) G.N. Bycroft：Proc. of ASCE, EM 5-99(1964.10)
- 40) ASME：ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III (Nuclear Vessels) (1963.11)
- 41) 横山喜淳：石川島播磨技報，25，5 (1965.9)
- 42) 機械耐震設計グループ：生産研究，16，10，293(1964.10) ほか

委員会関係資料

- 25) 日本原子力産業会議，安全特別研究会，地震小委員会資料，E-1～E-94 (1961.1～1965.4)
- 29) 日本機械学会，耐震設計法研究分科会資料，D-1～D-126 (1962.5～1965.4)