

高層建築物の耐震設計

武 藤 清*

動的設計法

10数年前からいわゆる動力学的设计法が研究されて実用に浮び上ってきた。これは力学的に考えてみても耐震設計で取り扱うべき現象は、地震動が建物をゆすぶることであって、これを解明するのが動力学である。地震動がわかれば振動現象は動力学に解明されない筈はないことは誰もが考えることである。

アメリカにおいては強震の観測は1930年代の末期から実施され、今日迄30近い大地震の地動の記録がとれている。この地動を動力学的に建物にかけてみれば、当然建物の反応はわかるわけで、実際に建物に働く力は計算から解明出来る筈である。このような考え方で大地震の時の建物の現象、すなわち応答をみると、次のような結果になることがBoit. とか Robisonの研究で指摘されている。それは1階の建物に地動を与えた時に、周期の短いものには大きな加速度が働くが周期の長い建物に働く加速度は減るということである。これを力学的に拡張すれば、周期の短い建物、低い建物には大きな加速度すなわち大きな力が働き、高くなるに従い働く加速度が小さくなる。

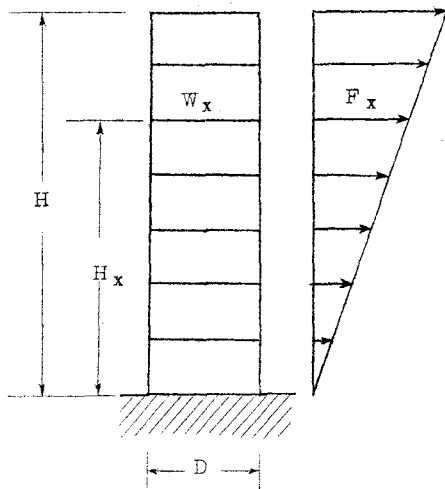
この考え方をもとにして、サンフランシスコの技術者グループの研究会は1956年のサンフランシスコ建築条例に取り入れられた新設計法を提案した。

この提案に対してその後の研究でいろいろな疑義が出されていたが、その後この作業がSan Francisco Engineers Association of California (SEAOC)に移って修正設計法SEAOC Codeを作った。それを図解的に示したのが才1図で、周期とともに建物に働く地震力は小さくなり、それが周期の3乗根に逆比例する式を提案した。この場合建物の周期を計算する必要があるが、それは建物の高さから概算するのもよいし、もっと簡単に階数に0.1をかけて周期を推定する(日本では、関東地震の直後に谷口忠博士は、建物の一次周期は階数 n に0.09をかければよいということを発表されておりますが、これを整数化したような形)等周期を決定し、全体の地震力を算定する。

たとえば10階建の建物は、その周期は1秒とすると、才1図の式から係数は0.05となる。

これは標準地震力であるが、さらにビル構造によってこの係数にまた定数 K をかけて修正する。

* 鹿島建設(株)副社長、東京大学名誉教授、工博



全地震力（ベース、シア） V

$$V = K C W$$

$$C = \frac{0.05}{3/T}$$

K = 構造別係数

$$T = \begin{cases} \text{計算} & T: \text{周期 (sec)} \\ 0.1 N & N: \text{階数} \\ \frac{0.05 H}{\sqrt{D}} & H: \text{全高 (ft)} \\ & D: \text{奥行 (ft)} \end{cases}$$

W = 全重量

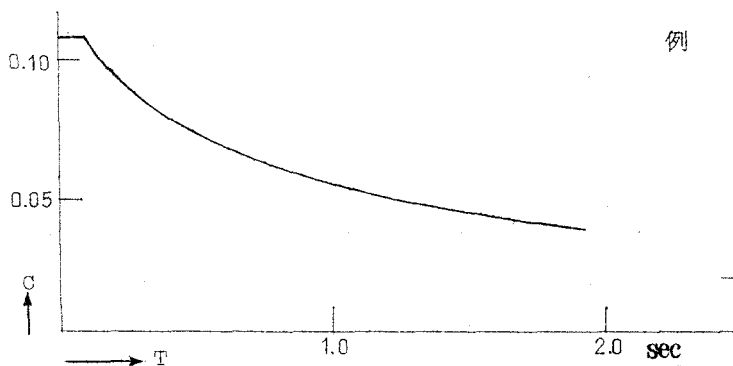
各階震力分布 $F_x = \frac{W_x H_x}{\sum W_x H_x} V$

($H/D = 5$ 以上のものは V の 10% を最上階にかけ残りを逆三角形分布とする。)

H_x : x 階高, W_x : x 階重量

F_x : x 階地震力

ベースシア係数 C



例 $N = 10$ (ラーメン)
 $T = 0.1 N = 1.0 \text{ sec}$
 $C = 0.05$
 $K = 0.67$
 $K C = 0.034$
 $K_{10} = 0.06$

K_{10} : 10 階の設計震度

第1図 SEAOG Code (1959)

壁の多いものでは大きな数 1.33 をとり、ラーメン構造ならば 0.67 をとって震力係数を決める。ラーメン構造とすると、結局 $0.05 \times 0.67 = 0.034$ が全地震力係数になる。この全地震力を逆三角形分布におきかえることになり、この公式は才1図の中の式を参照されたい。これを10階建の様なラーメン構造に適用すると最上階では設計震度が 0.06 の逆三角形分布になる。この規定

は1963年現在アメリカ諸都市で採用されている。

スペクトルの問題点

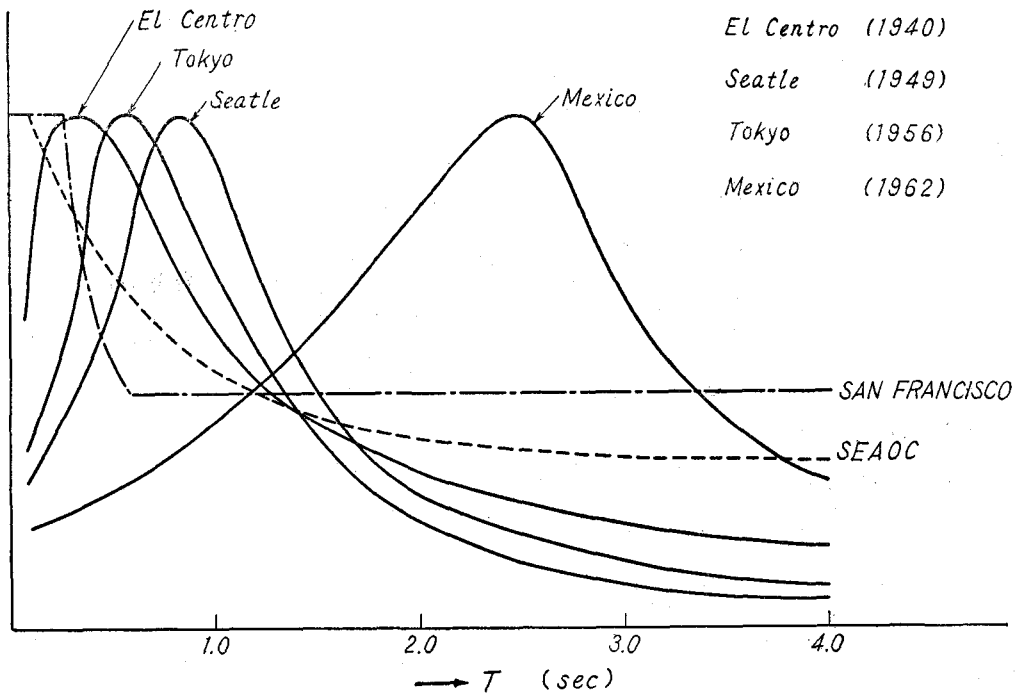
前述のようにアメリカで動的設計法(サンフランシスコ規定の原案)が発表されたとき、日本のグループが反論を書いた。その才1点は、サンフランシスコ規定案では周期に逆比例して地震力が減るとして最大ピークを周期0.3秒においているが、地震が大きくなれば、又地盤が柔らかくなればこのピークは周期の大きい方へ移るはずである。従って一般論として賛成できない。また才2点は実用化のために周期に限度をおいて、短いところと長いところの一定値をとるようにしている。規定に周期で変化をつけたのはごく一部であり、この変化はカーブで結ぼうと直線で結ぼうと大差ないのであって賛成出来ないという反対意見を述べた。

新しいSEAOCの規定では完全な曲線となって、指摘した矛盾点は解消している。しかしピークは依然として約0.1秒の低いところにあるのが問題である。

地盤とスペクトル

最近になってピークは必ずしも短周期のところに表われないという証拠がはっきりと現われている。種々の地震動の記録を計算機にかけそのスペクトルを見ると、最大の応答を与える周期は地震によって著しく違うことがわかった。

才2図で一番左の線はアメリカ、エルセントロ1940年の地震によるスペクトルで0.25秒辺りにピークがある。次の1956年東京の明治大学の地下室での地震動のスペクトルでは、0.5～0.6秒に出ている。3番目の1949年アメリカ、シヤトル地震のピークは0.8～0.9秒である。さらに最近1962年5月メキシコ市に地震があった。メキシコ市は非常に軟かい地盤のところである。丁度地震の時に日本のSMAO強震計が設置されていたので見事にその記録がとれて、それを解析したスペクトルがアメリカから送られて来ているので最後の曲線としてあげた。短周期部分では小さく、ピークは2.0～2.5秒にあらわれ、これを越せばまた小さくなる。軟弱地盤ではこのように最悪の周期が中周期、長周期に現われることを最近の地震が示している。このことは日本では昭和の初めから卓越周期として予見していたのであるが、はっきりした世界的データがないために一方的に論じていたものが、今日に至って証明されたのである。



オ2図 加速度応答スペクトル型

エルセントロ、シアトル、東京、メキシコなどの地震をさまざまな周期をもつ線型の1質点系にかけて、加速度応答の最大値を求め、横軸に周期、縦軸に最大値をとってあらわすと、**加速度応答スペクトル**が得られる。オ1図では、各々の応答スペクトルの大体のかたちを、ピークをそろえて示してある。なおサンフランシスコとSEAOCの震度規定のかたちもあわせて示した。

地震応答の計算

—SERAC電子計算機—

強震の記録が得られると、次の段階としてこれらの地震動が既存の建物に、あるいは、今設計している建物に作用するときに、どの階に如何なる亀裂が初めに出来、続いてどの階がどうこわれて全体にどういふ変形が起り、地震がすんだあとどの階では何cm柱が曲ってしまったということまでも解析したくなる。

力学的にいうと、Non-Linear(非線形)の解析が問題になる。こういう破壊の状態をも計算に入れて建物の実際の変形、あるいは応力を計算するには、2つの方法が考えられる。

オ1は地震に対する応答をアナログ計算機で解く方法、オ2はIBMのようなデジタル計算機によって答を求めようとするものである。

デジタル計算機は非常に正確な答を出してくれるが、経費がかかるのが欠点である。実用的に

はこの目的に合った電氣的な回路を用いたアナログ計算機によって直接に答えを求める方がより簡単である。

私どもがこの方面の研究を始めたのはすでに6年位前になるが、東京大学地震研究所の高橋龍太郎博士を主査として、文部省の研究費によって計算機の開発を始めた。RAC-1、RAC-2、そしてRAC-3と3つの形をつくって研究したが一昨1961年に東洋レーヨン科学振興財団が私共セラック委員会の補助金申請をうけ入れて、最も新しい形が多質点形非線形アナログ計算機の製作研究費を寄贈された。それが東京大学に設置されたSERAC計算機で1昨年の10月から動いている。計算機というものは非常にむずかしいものであり、作っても調整に非常に時間がかかるが、このSERACは設置以来今日まで殆んど故障なく作動している。

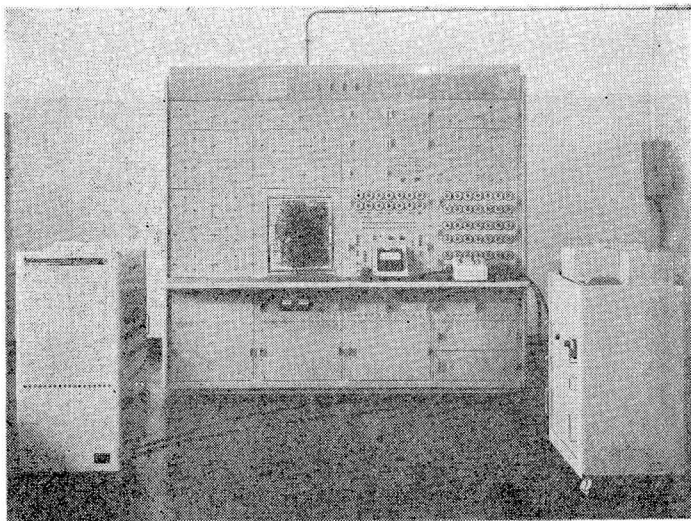


写真1 SERAC 全景

日立製作所の製作で、これがその全貌です。中央が計算機本体、右がカードリーダー、左がレコーダーとなっています。

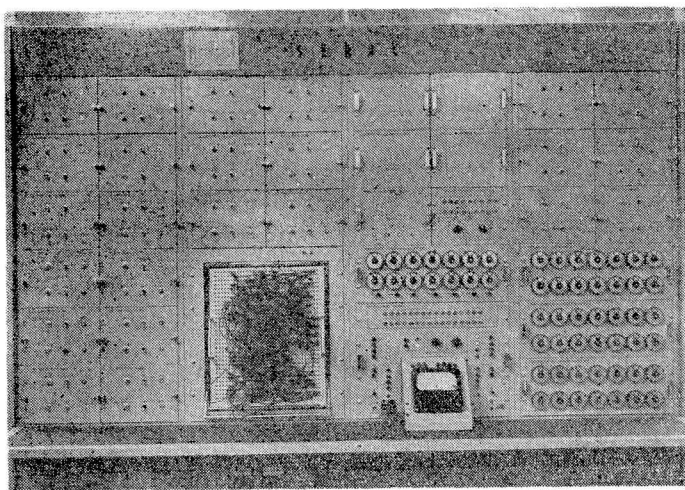


写真2 SERAC 前面

制御盤附近の様子です。

この機械では剪断変形型の5質点までのものの計算が可能である。しかし高層のものでも層をまとめて5質点の振動系におきかえる方法をとれば大体の性質をみる事が出来る。現在私どもはこ

のおきかえによって高層の建物の反応を推定している。しかしこれはあくまで概算であるので最終的には経費がかかってもIBMなどを使ってその層数だけの質点系としての正解を出すのが正道である。

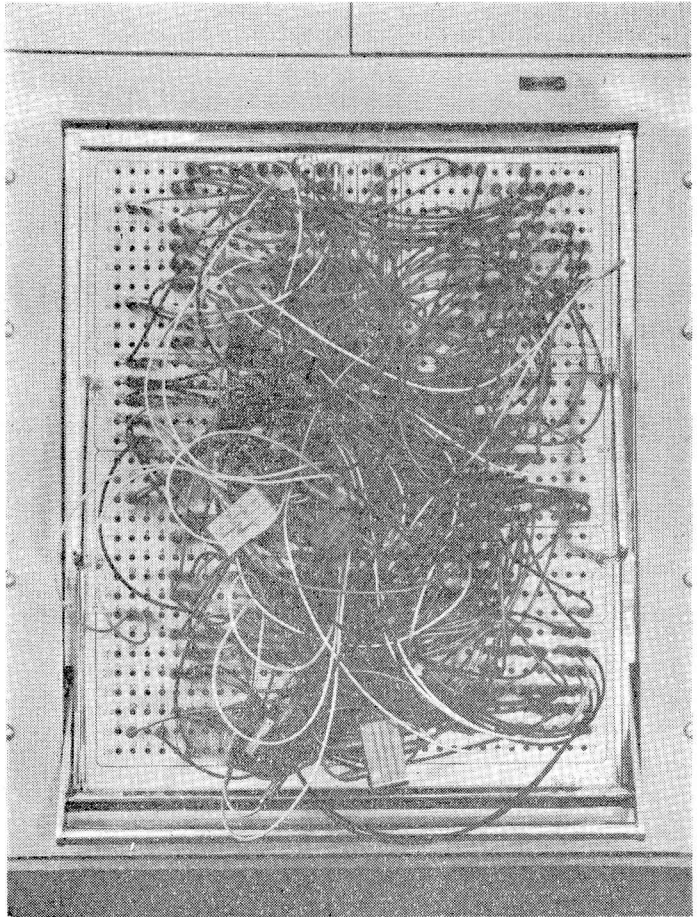


写真3 パッチボード配線写真

この線の結び方で5層建物の場合のさまざまな応答記録をとることが出来る。

超高層ビルの新動的設計法

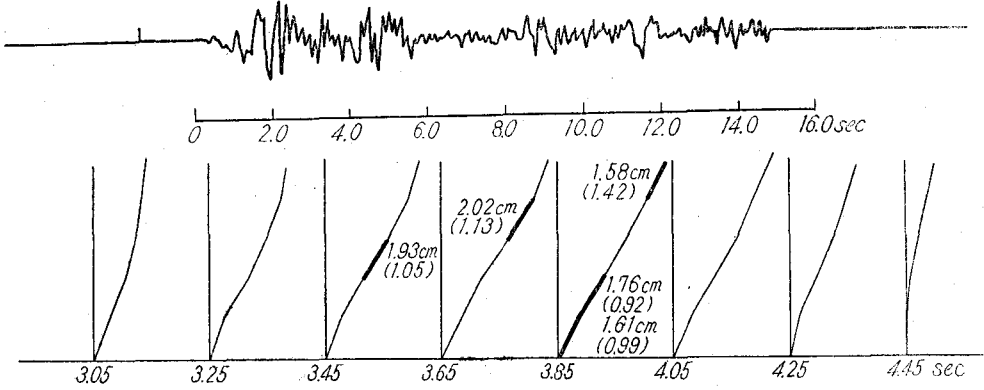
現在私共は超高層ビルの経済的耐震設計の可能性について研究を進めている。この方法は、(1)適当な設計震度で設計して、(2)各種の形の地震によってどの程度の最大加速度のときに、どこに最初の亀裂が入り、(3)地震の加速度が大きくなると、どんな塑性変形が起るかを追求し、(4)応答を検討して更に設計を改良し、素直な振動性状をもち、そして塑性変形の少ないものに仕上げようというものである。

例をMビルの研究にとって説明することにする。

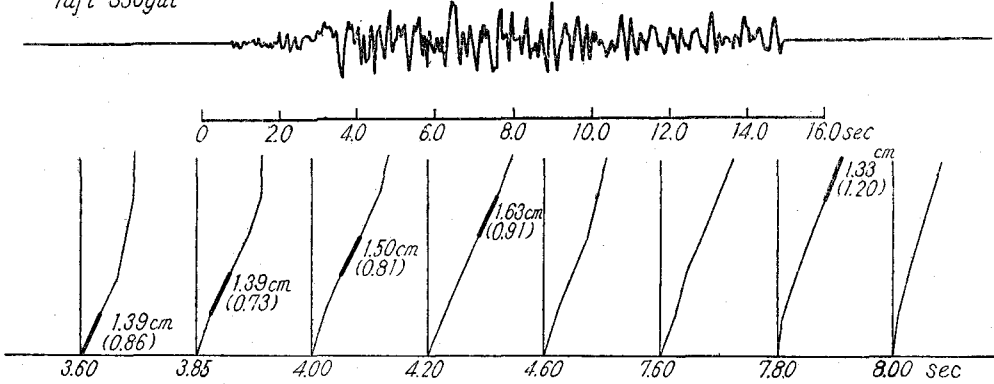
建物の地震応答

いろいろと試算設計を行ったが、その一つの建物についてそれぞれエルセントロ、タフト、埼玉

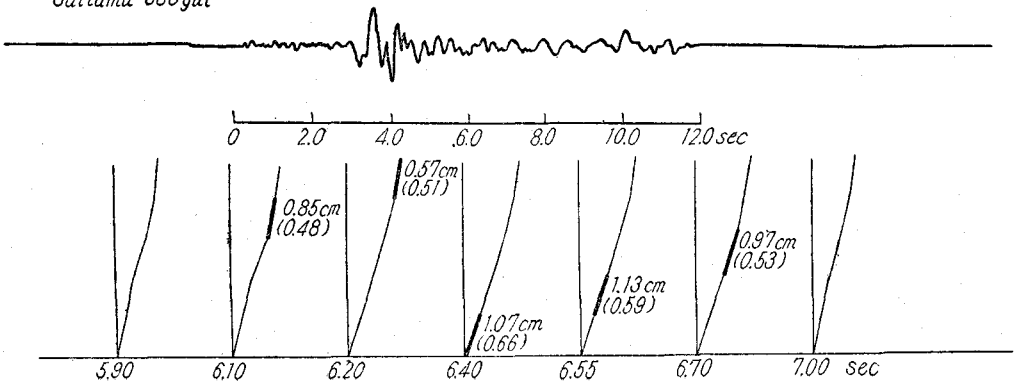
El Centro 330gal



Taft 330gal



Saitama 330gal



オ 3 図 各層最大変形時の振動形

高層のものを合理的に設計しようと思えば、結局は変形を何cmに押えるかというのが、最後の問題点と思う。筆者は各階の相対変位 2cm くらいに押えて、(安全率をとって 3cm くらいまでは大丈夫なように) 各部構造を設計することが実際のでないかという気持を持っている。

形で最大加速度 $0.33g$ のものについて才 3 図に振動記録を示す。これをみると基礎からの波がだんだん上に上ってゆく状態が良くわかる。ここに使った地震動の記録は世界の各種の地盤のものを網羅しているものではない。エルセントロは地盤のよいところであるシフトも同様である。埼玉地震は東京大学地震研究所の観測であるが、これも割合地盤のよい処というべきである。したがって以上の解析は地盤のよいところだけ、例えば東京の山の手で硬い砂利層に建つ建物に当てはまる。

しかし東京でも下町にいったら？ 杭打地業のときは？ 名古屋にいったら？ 大阪も下町ではどうか？ 不幸にも適当な地震記録がない。地盤によって地震動の性能が全く違うことが予想されるが今のところ軟弱地盤についての大、中地震記録は全く不足である。といってメキシコ市の記録を使うというわけにもいきかねる。とすると軟弱地盤を論ずるにはどうしても軟弱地盤の地震動をキャッチする必要がある。

む す び

横力に対して十分な強さをもたせることはもっとも賢明な耐震法則であることは過去の地震が明らかに物語っている。従って、現在の日本の建築法規のような設計法で従来の慣用に従って構造設計をするならば少々の不用意があっても人命に危険を与えとか、躯体に損傷を起すとかいうことはないと思う。

これに代っていま述べたような動力的設計をする場合には、その経験の浅い点から考えて、躯体構造ばかりでなく、いわゆる仕上構造、建築構造の面でも十分に注意を払う必要がある。私達が今、動力的にタッチすることができるのは固い地盤の上に立つ建物だけであって柔かい地盤や杭打地業の建物では全く違った現象になることは、さきほど例示したメキシコの観測結果などからも明らかである。この点、特に誤りのないよう理解いただきたいと思う。東京、名古屋、大阪、川崎などでも軟弱なところでは、今すぐに動的設計にふみ切る自信はない。今後の検討を要するところである。

本研究に当ってセラック委員会、その他関係各方面の御厚志に厚く謝意を表します。