

## 地震時の地動と地震波の入力損失

山原 浩  
広瀬 道孝  
伊藤 哲次

## § 1. はじめに

一般に建物を設計する場合、またとくに地震応答計算をするような場合、地震時に地盤はすべて同位相等振幅で動くという前提に基づいている。しかし学校建築や集合住宅のように、平面的に大きな拡がりを持った、細長い建物では、地震時にあたかも振動台に載せられたような動きをするものだろうか。このような疑問は、十勝沖地震が起きる以前から地震工学者の間で話題になっていた。

今回の十勝地震によって、学校建築いいかえれば平面的に大きな拡がりを持つ建物に被害が多かった。そこで直接には個々の建物の被害の原因を調べるため、間接には地震時の地動と建物の応答との一般的関連を調べる目的で、八戸地区の余震を利用してさまざまな観測を行った。その結果やはり想像していた通り、建物の基礎は決して同位相等振幅で動くものではないことが実証された。

さらに興味あることは、建物の基礎の動きと周囲地盤の動きとの関連を知ることができた。すなわちそれは、地表面を伝わる波、あるいは見かけ上地表面を伝わると見られる波の波長と密接な関係を有することが明らかにされた。結局、建物の基礎の動きは周囲地盤の動きよりも大きくはなり得ないこと、その差は一般に波長が短かいほど大きくなることがわかった。

今日まで強震計や地震計によって、数多くの大地震の記録が得られている。しかしそれらはすべてただ1つの点における動きであることを充分認識しなくてはならない。

もちろん地盤条件の異なる他の点では、同一地震であってもその振幅値や周波数特性が著しく変わることは、すでに著者の論文<sup>1)</sup>において紹介した。その他に建物の地震応答を考えると、その地震入力の与え方にも問題があることを強調しておきたい。たとえば波長の短かい(周期の短かい)波は、距離に対する位相のずれが著し

く、建物への入力としての勢力は著しく低下する。したがって短周期の波は、たとえその加速度値が大きくても、建物の応答の観点から見ればそれほど厳しいものではない。

一般の地震応答の計算においては、たとえ短周期の波であろうとすべて同位相等振幅として扱っているため、応答スペクトルにおける短周期の部分は、実際の建物の応答よりかなり過大に評価していることは否定できない。ここでいう短周期の意味は、波長と建物の平面的な大きさとの比によってきまる相対的なものであることはいうまでもない。

本紙においては、主としてこのような地震時の地動と建物の応答との関連について述べることにした。

## § 2. 地震時の建物基礎と周囲地盤の動きの関係について

まず、現実の実態を理解するため、観測結果を見ていただく。図-1に示すように、八戸高専において1階床上に3成分、周囲地盤上に4成分の地震計を設置し、幾多の余震を同時観測記録した。紙面の都合上、すべての記録を載せるわけにはいかないが、代表的な数例の原記録を複写して図-2~図-6に示した。

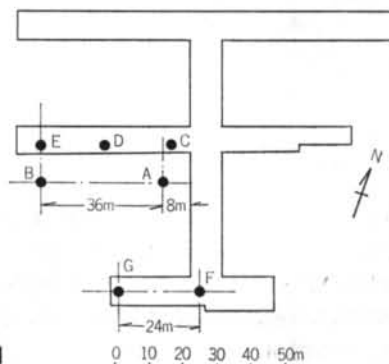
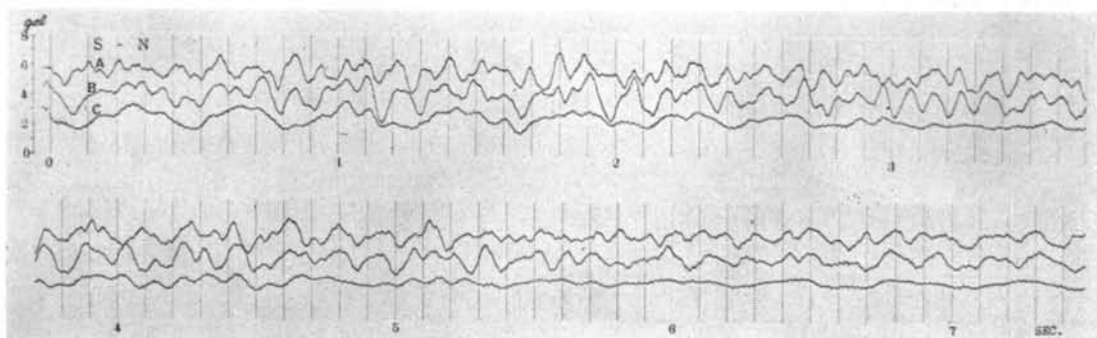
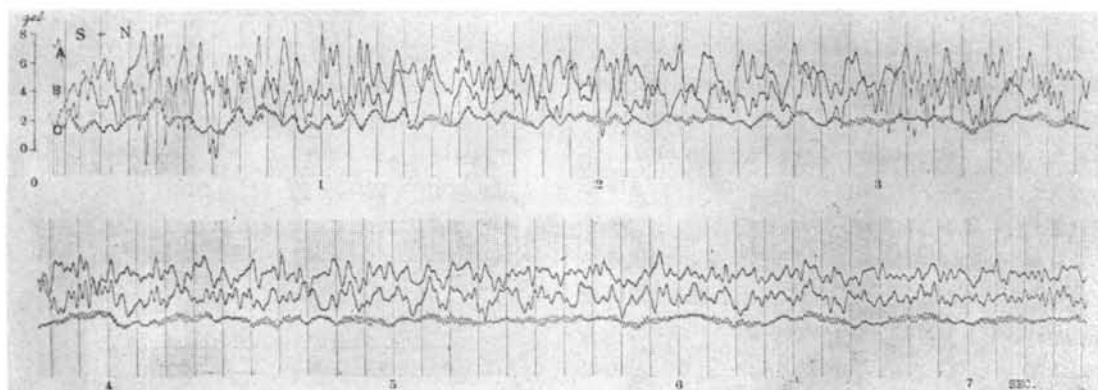


図-1



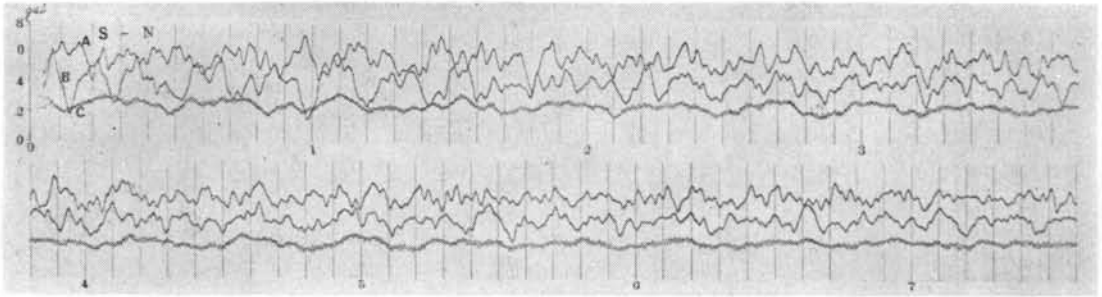
地動の最大加速度が1.8galという小さな地震の記録で、地盤上の2点(A, B)と建物の床上(C)の3点を並べてある。比較的短周期成分が目立つ地震の例である。地盤上の2点AB間は約36m離れているが、比較的波長の長い長周期成分はほぼ同位相であるが、波長の短い短周期成分にはかなり位相のずれが認められる。建物には地動の短周期成分が全く現われず、かなり長い周期で動いている。この周期は周波数解析の結果、地盤の卓越周期に一致していることがわかった。当初この周期は建物の固有周期ではないかと考えてみたのであるが、常時微動による建物の固有周期は0.30sec.であり、それより0.1sec.も長い。この程度の地震で周期が30%以上も延びるとは考え難い。つきに一見して建物の動きが地動に比べて小さいことがわかる。地動の最大加速度が1.8galに対して、建物1階床上の最大加速度は0.8galと $\frac{1}{2}$ 以下になり、平均的に見ても建物の加速度は地盤上の $\frac{1}{2}$ 以下になっている。

図—2 地震 昭和43年8月19日 6時35分



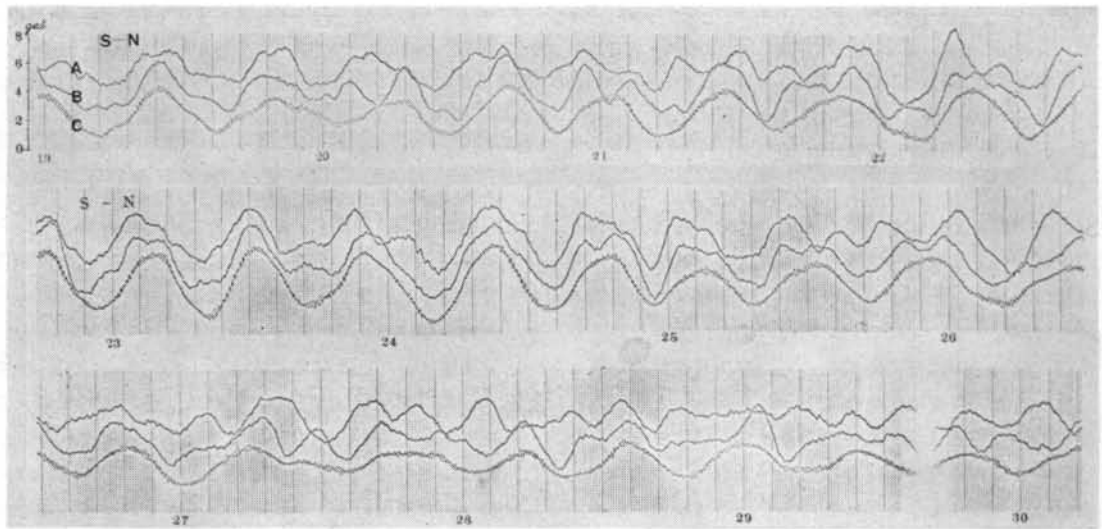
前図までの2つの地震に比べてさらに短周期成分が卓越した例である。このように短周期になると、わずか36mしか離れていない地盤面上の2点間で、位相関係は完全に乱れてしまう。しかもその短周期成分の影響を受けて、建物の基礎にもかなり短い周期成分が現われてくる。またこのように短周期成分が卓越すると、地盤面と建物内の加速度比はますます小さくなる。この場合地動の最大加速度が4.5galであるのに対し、建物内では1.2galとほぼ $\frac{1}{4}$ になっている。

図—4 地震 昭和43年8月25日 9時02分



地動最大加速度が2.3galの地震記録である。図-2の場合よりさらに短周期成分が卓越した例である。したがってAB2点間の位相のずれはさらに著しくなっている。一方建物も地動の短周期成分にひきずられて、前図より短かい周期で動いている。建物1階床上の最大加速度は0.7galで地盤の $\frac{1}{3}$ 以下になっている。

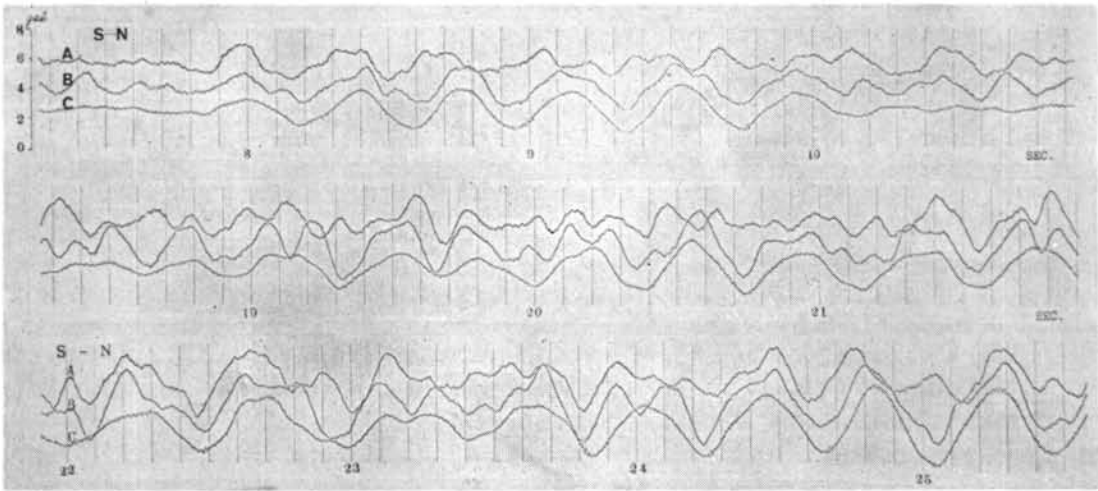
図-3 地震 昭和43年8月22日 5時50分



本例は前図までの地震と異なって、比較的長周期の波が著しく卓越した場合である。実は八戸高専においてはこの種の地震が来る頻度が非常に高い。同建物が建つ付近の地盤の卓越周期が約0.4sec.で、しかも非常に高い選択度を有している。したがって地表には約0.4sec.に著しく卓越した波が現われ、しかもそれが正弦波状になっている。このような傾向は、基盤に入射するもとの地震波に0.4sec.付近の周期成分が多く含まれているような場合に特に著しくなる。観測中甚だ面白い現象に気がついた。それは、八戸測候所で発表する震度と八戸高専で記録される地震波の加速度との間に、規則的な喰違いを生ずることであった。もとの地震波に短周期成分が卓越しているような場合、八戸測候所で発表する震度は一般に大きい。本例のように0.4sec.付近に著しく卓越した波形を示すような場合、八戸高専で観測される加速度は大きくても、測候所で発表する震度は不思議なくらい小さい。たとえば本例の地震は地動の最大加速度が2.4galであるにもかかわらず、測候所の発表では震度0となっている。このような現象から、もとの地震波に0.4sec.付近の周期成分が多く含まれていると、八戸高専の地盤は著しく刺激を受け地動が大幅に増幅されるが、測候所の地盤ではそのような選択増幅作用がないため、地動そのものが小さいと推定される。

さて、本例のように地震波の波長が長くなると、AB2点間の位相および振幅ともに非常に良く一致してくる。また地盤面上と建物内との振幅比も1.0に近づき、位相差もほぼ0に近くなる傾向を見ることができる。

図-5 地震 昭和43年8月25日 18時08分



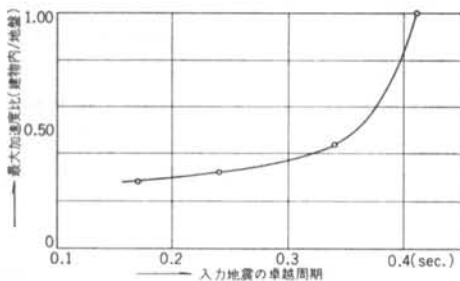
図—5 の例と全く同じ傾向を持つ別の地震記録を載せておこう。前例および本例の記録から特に注意して見ていただきたいことは、地動と建物の動きの相互関係である。

まず地盤面上の2つの点 $AB$ の位相が合致したとき、建物の動きは最大になる。もし $AB$ 点の位相が大ききずれたり乱れたりすると、建物内の動きもたちまち小さくなる。つぎに建物が大きく動きだす初めをを観察すると、 $AB$ 2点の動きの位相が合致して振幅が大きくなると同時に建物の動きも大きくなっている。もし地動に対する応答という考え方は、地動と建物内の動きの間に相当な位差と、振幅が成長するまでの時間的遅れがなくてはならない。むしろ建物は、あたかも大波に乗った船のように、地動の動きのままそれに乗って揺れ動いているといった感じである。

図—6 地震 昭和43年8月25日 18時14分

以上実際の記録について、地盤と建物内の動きの相互関係について解説をしてきた。このような観測は八戸東高校でも行なったが、紙面の都合上観測結果の報告は本紙では割愛することにした。同校の場合、大きな被害を受けた建物の両端部の地盤そのものの周波数特性が著しく異なるという更に悪条件にあったが、地動と建物内の動きの相互関係は八戸高専の場合と全く同じことがいえる。すなわち地震時の建物の基礎の動きは、その周囲地表面の動きよりも必ず小さい。その差は波長の短い短周期成分が卓越するほど大きくなる。

八戸高専で観測された幾つかの地震について、それぞれ



図—7

れの地震の卓越周期と、地動と建物内の最大加速度比との関係を示すと図—7のようになる。実際に建物の地震応答を論ずるとき、その建物の基礎の動きを建物に対する入力として考えるべきである。したがって同図より、地動加速度がたとえ非常に大きなものであったとしても、その周期が短いものであれば、建物に対する入力としてはかなり小さいものになることが理解されよう。

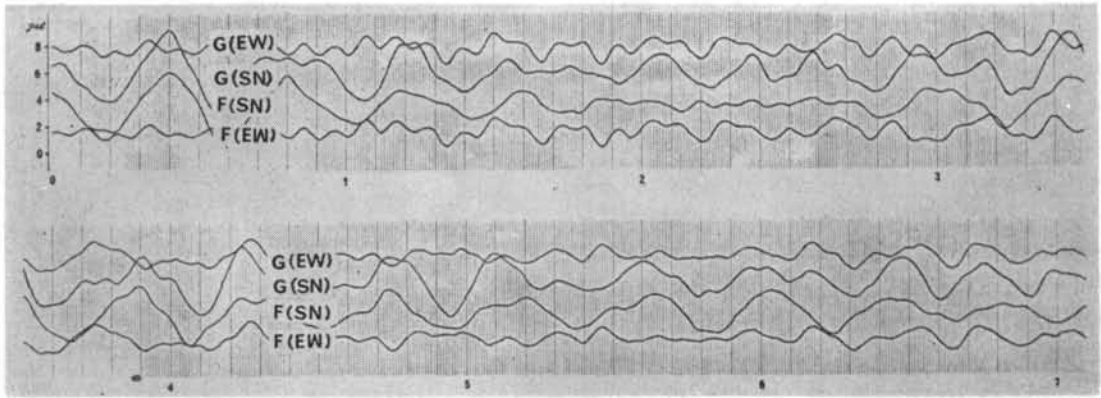
この場合の長周期とか短周期とかいうことの意味は、建物の固有周期に対する相対的なものではなく、地表面に現われる地震波の波長と、建物の平面的な大きさとの相対的な関係で定まる。たとえば100mの波長を持つ波は、50mの長さの建物に対しては長周期であるといえるが、200mの長さの建物には短周期であるということになる。

### § 3. 地震時の建物の基礎の動きについて

一般に建物の基礎部は梁や床版によって、かなり剛に連なっている。そのためもし地盤の動きに位相差振幅差があったとしても、その上に建つ建物は地盤に密着して同じ動きをするわけにはいかない。ちょうど建物直下の

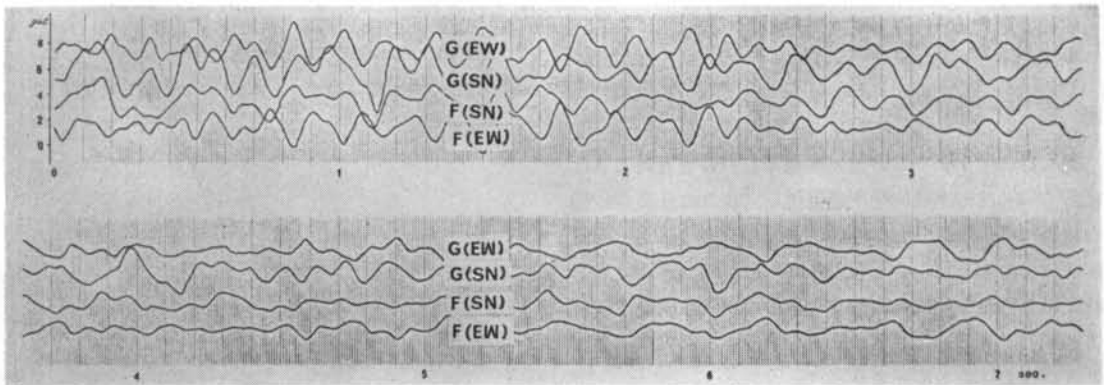
地盤の動きを合成したような動きを示す。すなわち地動が建物の基礎版によって拘束される。この時基礎版には両者の動きの相対的差によって、引張、圧縮、せん断、

振りといった力を受けることはいうまでもない。このような事象をやはり八戸高専における実際の観測記録から確かめてみよう。

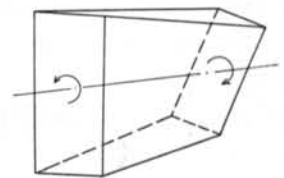


建物内の中央部と端部の2つの点の同時記録である。まずS—N方向の2つの記録を見ると、本例は地動が比較的長周期の場合で、大局的に見て2つの点は同じ位相、同じ振幅で動いているといえる。E—W方向に関しては、建物の長辺方向に当り、2つの点の動きは完全に同位相等振幅になっている。すなわちFG間の地動に位相差があったとしても、建物の基礎や床版はそれによる力に耐えて、一体となって振動していることがわかる。

図—8 地震 昭和43年8月7日 17時02分



前図と同じ観測点において、もし比較的短周期の波が入ってくるとどうなるだろうか。まずS—N方向の2点間の動きを見ると、かなり位相のずれが目立つ。一方E—W方向に関してはやはり完全に同位相等振幅であることがわかる。(E—W方向の2成分は記録紙上位相が180°反転している)。このように、もし地動に位相差があったとしても、建物の長辺方向には引張および圧縮の力が作用することになり、基礎版がこわれないうち基礎版の動きは同位相等振幅になる。短辺方向に対してはせん断および振りの力が作用することになり、後者によって基礎版が変形することがわかる。すなわち一般の細長い建物では、図—10に示すような振りに対する剛性はそれほど高いものではなく、地震時にこの種の強制変形を受けることは充分覚悟しなくてはならない。



図—9 地震 昭和43年8月13日 5時05分

図—10

#### § 4. 地動と建物への地震入力の関係について

前章までに実際の地震記録によって解説したように、地震時の地表面の動きは決して同じ位相、同じ振幅ではない。とくに平面的に大きな拡がりを持つ建物では、それが問題になる。一般に建物の基礎版はこのような地動によって受ける引張、圧縮、せん断に対してはかなりの剛性と強度を持っているように思える。したがって基礎版は、その直下の各点の地動のベクトルを合成したような強制運動を受けることになる。いいかえれば地動は連続的に連なる基礎版によって動きが相殺され、あるいは拘束され、実際に建物を強制振動させる地震入力は、実際の地動よりも必ず小さくなる。このように建物によって拘束され失なわれる地震勢力を、後々の便利のために地震波の入力損失と呼ばせていただく。地震波の入力損失は地表に現われる地震波の波長と建物の平面的規模によってきまることがなる。いま簡単なモデルについて、地震波の入力損失を定量的に検討してみよう。

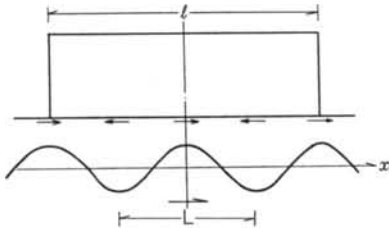


図-11

図-11に示すように、長い建物にその長さ方向に並行に走る調和波形連続波動を想定する。これは任意の地動の建物に並行な成分と、地動に含まれるある特定の周波数成分を取出した場合と考えれば、決して一般性は失われていない。地動に含まれるすべての周波数成分について個別に計算し、それらの結果を合成すれば実状にかなり近づけることができよう。

さて、地表面を伝わる波動の式は

$$u = u_0 \cos \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{T}{L} x \right) \quad \dots (1)$$

ここで、 $u$  : 波動変位、 $u_0$  : 変位振幅、 $T$  : 波動の周期、 $L$  : 波長、 $x$  : 波動の進行方向の座標、 $t$  : 時間 である。建物直下の波動の合成変位  $U$  は

$$U = \frac{1}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} u_0 \cos \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{T}{L} x \right) dx$$

上式は  $t = 0$  のとき最大になるから

$$U_{max} = \frac{1}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} u_0 \cos \frac{2\pi}{L} x dx \quad \dots (2)$$

$$= u_0 \frac{L}{\pi \ell} \sin \frac{\ell}{L} \pi \quad \dots (3)$$

ここで

$$\eta = U_{max}/u_0, \quad \xi = L/\ell \quad \dots (4)$$

とおけば

$$\eta = \frac{\xi}{\pi} \sin \frac{\pi}{\xi} \quad \dots (5)$$

となる。 $\eta$  は地動と建物の基礎版との変位振幅比、 $\xi$  は建物の長さとの波長の比である。式(5)より

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \frac{\xi}{\pi} \sin \frac{\pi}{\xi} = 1$$

であるから、波長が無限に長くなれば地動と建物は同じ動きをする。また式(5)を数値計算してグラフに示すと図-12のようになる。同図より  $\xi > 4$  すなわち波長が建物の長さの4倍以上になれば、 $\eta > 0.9$  すなわち建物の基礎版の動きは地動の動きとほぼ同じ程度になることがわかる。いま仮に地表面に現われる地震波の見かけの速度を 200m/s、周期を 0.5sec. とすれば波長は 100m になり、 $\xi > 4$  は 25m 以下の建物の長さに対応する。したがって実在の建物は多かれ少なかれこの種の影響を受けることになる。

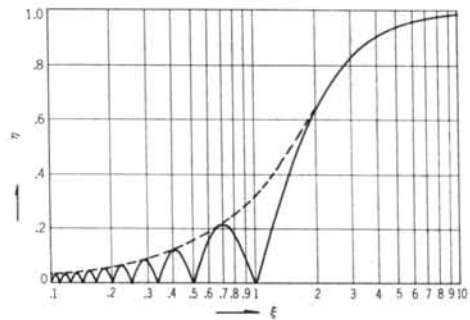


図-12

さて地表面に現われる地震波であるが、地表面を伝播する表面波といった単純なものではない。地表面にわずか30~40mの距離をおいて設置された地震計の記録を見ても、波形そのものが大きく変化して、波がどのように伝わっているのか全く見当がつかない場合が多い。地中からある入射角をもって地表面に到達する波も、地表の各点では時間遅れや位相ずれを生ずるのであろう。そのうえ、地形的にあるいは地中構造物等によって反射する波も加われば、地動はますます複雑になる。これらを実際

の地盤について解析的に求めることは不可能に近いであろう。結局地表面における地震波の伝播機構は良くわからないが、結果として現われる各点の位相のずれが、本論の問題の対象になっている。本論において見かけの波動（波長）などという表現を用いたのも、このような理由によることを付け加えておきたい。

### § 5. 地震波の入力損失と建物の地震応答

地震波の入力損失は、建物の平面的大きさに比べて波長が短いほど著しい。実際に地表面において得られた SMA C や地震計の記録は、ある 1 つの点における動きを表わすものであり、その中に含まれる短周期成分の入力損失は著しい。したがって実際に建物の強制振動に有効に使われる勢力は、原波形から短周期成分をそれぞれの周期に応じて除去したようなものになるであろう。またそのフィルター特性は、図-12 に示すようなものになるであろう。そこでまず原波形から短周期成分を除去する方法を検討しよう<sup>2)</sup>。

いま原波形を  $f(t)$ 、その読取時間間隔を  $\Delta t$  とし、

$$f(k\Delta t) = f_k$$

で表わす。

$f_k$  を中心としその前後に合計  $n$  個の数列を取出し、それらの平均値を  $g_k$  とする。すなわち

$$\frac{f_{k-(n-1)/2} + \dots + f_{k-1} + f_k + f_{k+1} + \dots + f_{k+(n-1)/2}}{n} = g_k \quad \dots (6)$$

によって作られる新しい数列  $g_k$  を考える。ただし、ここで  $n$  は奇数とする。 $f_k$  と  $g_k$  との関連を調べるため、 $f(t)$  を調和波形とすれば、

$$f(t) = e^{i\omega t} = e^{i\omega k\Delta t}$$

よって

$$g_k = \frac{e^{i\omega k\Delta t}}{n} \{ e^{i(n-1)\omega\Delta t/2} + \dots + e^{i\omega\Delta t} + 1 + e^{-i\omega\Delta t} + \dots + e^{-i(n-1)\omega\Delta t/2} \}$$

$$= \frac{f_k}{n} \left( 2 \cos \frac{n-1}{2} \omega\Delta t + 2 \cos \frac{n-3}{2} \omega\Delta t + \dots + 2 \cos \omega\Delta t + 1 \right) \quad \dots (7)$$

ここで

$$H(\omega\Delta t) = \frac{1}{n} \left( 1 + 2 \cos \omega\Delta t + 2 \cos 2\omega\Delta t + \dots + 2 \cos \frac{n-1}{2} \omega\Delta t \right) \quad \dots (8)$$

とおけば、

$$g_k = H(\omega\Delta t) f_k \quad \dots (9)$$

と表わされる。 $H(\omega\Delta t)$  は  $k$  に関係なく、振動数だけによってきまるいわゆるフィルターの特性を表わす。また  $H^2(\omega\Delta t)$  は  $f_k$  と  $g_k$  のパワースペクトルの比を表わす。

式(8)より  $n$  をパラメーターとして  $H^2(\omega\Delta t)$  を計算し、振動数および周期について作図すると図-13 および図-14 のようになる。

一方、波長と建物の長さの比でもきまる地震波の入力損失を、比較のためパワースペクトル比 ( $\eta^2$ ) で表わす

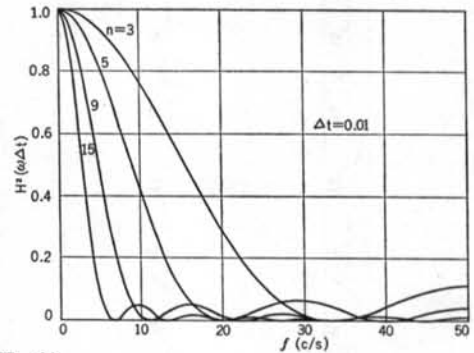


図-13

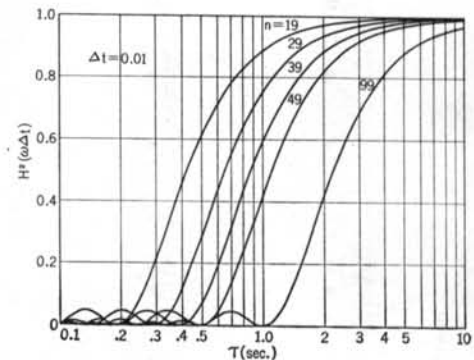


図-14

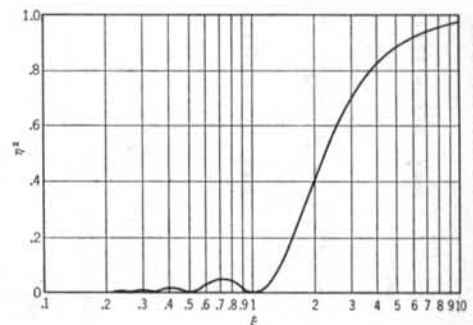


図-15

TOKACHI-OKI EARTHQUAKE HACHINOHE N-S 1968. 5. 16.

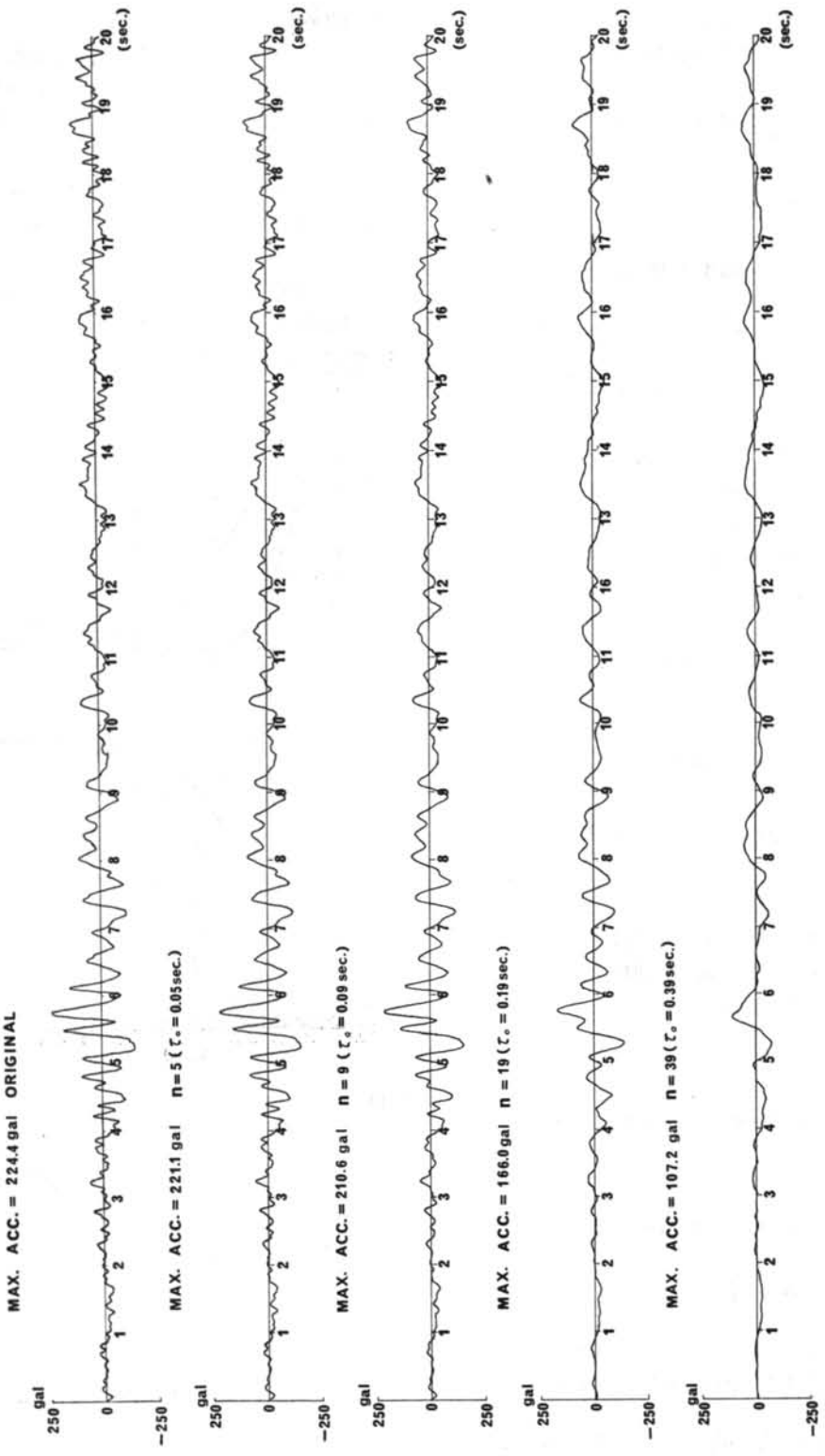


图-16



と式(5)より図-15のようになる。これを図-14と比較すると非常に似た特性を示すことがわかる。したがって本方法による原波形の平滑化によって、地震波の入力損失と同等の効果を得ることが立証された。

以上の結果を要約すれば、建物の長さが周期 $T$ の波の波長と等しい場合、原波形  $f(t)$  から  $n = T/\Delta t$  として得られた出力波形  $g(t)$  が、建物に対する有効な地震入力になる。

八戸港湾で記録された十勝沖地震の波形について、 $\Delta t = 0.01\text{sec.}$  とし  $n = 5 (T = 0.05\text{sec.})$ ,  $n = 9 (T = 0.09\text{sec.})$ ,  $n = 19 (T = 0.19\text{sec.})$ ,  $n = 39 (T = 0.39\text{sec.})$  とした場合の出力波形  $g(t)$  を図-16に示した。同図から  $n$  が大きくなるにつれて短周期成分が次第に除去されていく傾向が理解されよう。

さて建物の地震応答を計算するような場合には、このようにして得られた出力波形を建物に対する地震入力として与えることになる。このような建物に対する有効地震入力波形のせん断力応答スペクトルを、 $n$  をパラメーターとして示すと図-17のようになる。同図より地震波の入力損失によって、建物の応答値そのものがかなり低下し、その傾向は  $n$  が大きくなるにつれて特に短周期の領域で著しいことが理解されよう。

このような論法で建物の地震応答を考えれば、地動の

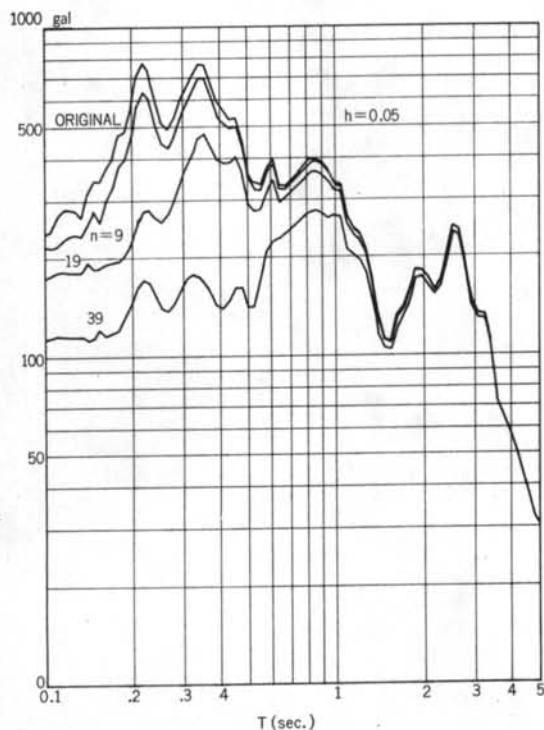


図-17

記録から従来一般に計算されている応答スペクトルは、実際の建造物の応答よりも過大に評価していることになる。その差は特に周期が短かいほど大きいということになる。

## おわりに

本研究において、建物の地震応答を考えると、地震波の入力損失によって地動がすべて建物の入力として有効に使われないことを説いてきた。地震時の地動は振動台などによって再現されるような単純なものではないこともよくわかった。したがってSMACや地震計などで記録された地動を、そのまま建物の入力として与える場合にも問題はあつた。建物の平面的規模が地震波の波長に比べて充分大きい場合に、その影響は特に著しい。すなわち一般に短周期成分は波長が短いから地震波の入力損失が大きく、建物の加振に有効に使われる勢力はかなり緩和される。建物の応答スペクトルなどにおいて、比較的短周期の応答値は地動の短周期成分の影響を大きく受けている。しかし建物は平面的に必ずある大きさを持つものであるから、実際の応答値は、特に短周期の領域では、計算値よりもかなり小さいものになるであろう。

一方、地震波の入力損失があるということは、建物がその基礎の部分において地動そのものの変形による力を受けるといふことにほかならない。その力は建物の基礎の部分において、引張、圧縮、せん断、振りといった形態をとる。建物の応答に対しては入力損失は有利であるが、そのほかに上記の別の力を建物は受けることになるから、実際の建造物の設計に当ってはその点の配慮も忘れてはならないであろう。

## 謝 辞

本論文に引用した八戸高専におけるさまざまな地震記録は本論文の共同著者のほか、研究所の渡辺弘之君、藤井邦雄君、市之瀬紘一君の協力によって得られたものである。

本研究が、現地観測において一応の成功をおさめたのも、ひとえに上記諸氏の努力の賜であり、心から敬意を表する次第である。

また、始終前向きな励みと貴重な助言をいただいた研究所長の大築志夫氏に、末筆ながら心からの謝意を表する次第である。

<参考文献>

- 1) 山原 浩：“地盤の周波数特性と建物の地震被害” 日本建築学会論文報告集に1969年5月に投稿
- 2) 吉沢 正：“数値解析Ⅱ” 岩波講座基礎工学(4)