強震計記録の解析と構造物レスポンス

東京大学地震研究所 佐藤泰夫・小竹美子・嶋 悦三

(昭和 46 年 7 月 14 日受理)

Analysis of Strong Motion Seismograms and the Response of Structures

YASUO SATO, YOSHIKO KOTAKE and ETSUZO SHIMA

Earthquake Research Institute

(Received July 14, 1971)

Seismograms of JMA type strong motion seismograph (magnification 1.0, damping ratio 8.0 and natural period 6.0 sec) have been scarcely used for a quantitative study of earthquakes because of the difficulty of actual treatment even when a good record is obtained. In this paper, a method of analysing such seismograms is proposed and tested. As an example, the seismograms of the Niigata earthquake (June 16, 1964) obtained by JMA at Tokyo was carefully analysed giving the correction of zero-line shifting, effect of a mechanical arm etc., and the ground displacement and velocity were calculated. Maximum displacement proved to be about 3 cm and the velocity about 5 cm/sec. Applying this ground motion to pendulums with the damping $h = 0.05$ and the natural frequency 0.026 (0.013) 0.4 cps, forced oscillation of each pendulum was calculated, and thus the response of structures with various frequencies was studied by the method of numerical simulation. By this procedure it becomes clear what kind of structure will or will not be shaken in the case of strong earthquakes and how the oscillation grows up and dies away. The maximum displacement (or velocity) was chosen from each curve and plotted as a function of natural frequency of the structure. For the periods around 5 seconds the displacement becomes maximum and is about 20 cm (velocity about 20 cm/sec for the period around 4 seconds). Seismic waves having the periods thereabouts are extremely important from the view point of engineering seismology, since the natural periods of many high rise buildings already constructed as well as now in blueprints are of that order.

A similar calculation was carried out for two earthquakes recorded by the DC3 strong motion seismograph at Matsushiro area in 1966, and the displacement, velocity, acceleration of the ground and the response of pendulums (structures) with various frequencies were calculated. For one of these two earthquakes, besides the above calculations, the displacement which is expected on the surface of a typical soft sediment (Toyosu, Tokyo) is calculated when the above displacement is given at the bottom of the soft layers. The surface displacement becomes several times as large as the original motion.

Acceleration spectrum of the Imperial Valley earthquake in 1940 observed at El Centro is shown together with the Niigata earthquake for reference.

1. 緒 言

大地震に襲われた時、構造物がどのように反応するかという問題は地震工学の面からみて重

要な課題であり、多くの研究がなされているが、最も簡単には最大の加速度を採り、構造物がこれに耐えられるか否かを調べる方法がある。しかし実際の地震の場合には共振や減衰の問題、振動継続時間の影響等を考慮しなくてはならないし、単に最大加速度一つをとって考えるのでは不十分と言わなくてはならない。一方地震動の方も単純な $\sin$ 型を仮定したのでは実状とかけ離れた理論となるおそれがある。そこで地震動としては実際の大地震の時の地動に近いものを取り、これが適当な減衰と周期を持つた振動体に加えられた時、どのような反応を示すか——即ちレスポンス——を調べるのが、地震動の構造物に対する影響を問題にする場合、実状に即した方法であろうと考えられる。

この際用いる大地震の波形としては、最近は加速度計の進歩によつて、震央近くでの忠実な記録が得られているから、これを使用することがまず考えられる方法であり、第5、第6節はこうした取扱いの例を示すものである。しかし0.1秒程度の短い周期を持つ加速度計では周

Fig. 1. Seismogram of Niigata earthquake obtained at JMA, Tokyo, by a seismograph with magnification 1.

Below: Peaks and troughs are measured and then connected by straight lines.

Fig. 2. Left: An illustration of the deformation of seismogram caused by a mechanical arm with a finite length and the shifted zero-line.

Right: The relation between t_k , the times of peaks and troughs, and k . If adequate corrections are given there should be no decrease in the series of t_k .

期数秒におよぶ長い波を正しく再現することに不安を感じるようなこともあり、こうした場合利用しうる資料の一つとして気象庁の1倍強震計の記録があることに思いつく。しかしこの記録は従来あまり使われていない。少なくとも、波形の定量的な研究に用いられたことをほとんど聞いていない。これは機械的なス書きのアームの影響で波形が変形していること、0-線的位置がはつきりしないこと、倍率と紙おくりのスピードの関係で、適当な振幅の波はその波形まで読取ることが困難なこと、等の理由によるものと思われる。しかしこうした困難は現在では労をいとわないならば克服し得ないほどのものとは考えられない。

2. 新潟地震、記録の補正

第1図上は1964年の新潟地震を気象庁の東京の強震計で観測した原記録であり、一般的にみて極めてよい記録といえよう。しかし上述の理由でこのままでは使用し難いので、これについて以下の補正を行なうことにする¹⁾。先ず山と谷の点を読取り直線でつないだものが同じ図の下に示されている。

1) 0-線の決定とアームの影響の除去

原理的に困難であつて完全には解決し得ないのが0-線の決定である。アームが真の0-線をはずれた所を中心として振動する場合には第2図左のごとき線を描く。従つてこのまま読取つたのでは、 $t_1, t_2, t_3 \dots$ の中には時に減少するものも現われ、一見してその不自然なことは明らかである。番号 k を横軸にとり、 t_k のグラフを書けば一そう見やすくなる(第2図右)。この場合さまざまな0-線を仮定した上で、アームの長さを与えて補正を行ない、得られた (t_k, y_k) を用いて第2図右に相当するグラフを書き、最も無理のないと見られる折線の得られるも

1) 標準地震動の解析(原子炉配管系の耐震設計法に関する研究)(日本機械学会、昭和38年)

Fig. 3. 1st and 5th curves: Corrections for a finite mechanical arm and zero-line shift are given to the curves in Fig. 1 below. These are the basic data for the following calculation.

2nd and 6th curves: Peaks and troughs in the above curves are connected by cosine-curves.

3rd and 7th curves: Ground displacement calculated by the application of Fourier analysis method to the above data.

4th and 8th curves: Ground velocity calculated by a similar method as above.

のを真の 0-線とした。このようにして最終的に得られた折線の記録が第 3 図の最上段および五段目に示されている。多少の不満が残らないではないが、これ以上進めることは困難であろう。

2) cos- 補間

更に山と谷を、これらの点で曲線が平らになるよう、cos-曲線の半波長ずつつないでなめらかな曲線としたものが第 3 図 2 段目、6 段目の曲線である。時間間隔は一定 (0.16129 秒) に

とつて描いてある。

3) 線形項の除去

以下この曲線を基本として計算を行なう。但しあらかじめ全体の曲線に最もよく合う 1 次式を最小二乗法で決め、これを除去しておく。

3. フーリエ変換による地動の算出

地震計による影響を去つてもとの地動を求めるためにフーリエ変換を用いた。地震計の描いた地動 $f(t)$ はフーリエの定理により、

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(p) \exp(ipt) dp$$

$$f^*(p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-ipt) dt \quad (1)$$

と表現されるはずであり、地震計を通す以前の地動 $g(t)$ のスペクトル $g^*(p)$ は

$$g^*(p) = f^*(p)/V(p) \quad (2)$$

と表わすことが出来よう。ここに $V(p)$ は位相差をも考慮に入れた地震計の倍率（複素数）である。

前節迄に得られている地震動の記録 $f(t)$ を用いて (1) 式によつて $f^*(p)$ を、更に (2) によつて $g^*(p)$ を計算することが出来る。この際 $V(p)$ は気象庁より発表されている地震計の定数（倍率 1, 減衰比 8.0, 周期 6.0 秒）を採用して計算で求めた。 $g^*(p)$ が得られれば

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(p) \exp(ipt) dp \quad (3)$$

によつてもとの地動 $g(t)$ を、更に必要ならば

$$\frac{d}{dt} g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(p) (ip) \exp(ipt) dp$$

$$\frac{d^2}{dt^2} g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(p) (-p^2) \exp(ipt) dp \quad (4)$$

によつて速度、また加速度を求めることができる。

実際の積分の数値計算に当つての p （角速度）のきざみは $1.55^\circ/\text{sec}$ 、最大値は $558^\circ/\text{sec}$ である。得られた変位には意味のあると思えない長周期の波が含まれているので、フィルターによつて十数秒程度より長い波をカットした。速度についてはこの操作を行なつていない。

第 3 図 NS および EW 成分においてそれぞれ下の二つの曲線がかくして得られた結果である。この結果からみて、微細な点を除けば、強震計の記録は変位記録としてかなりよいもののように思われる。NS, EW 各成分とも最大変位は約 3 cm（片側）速度は 5 kine 程度と求められた。記録上で読みとられるより、ごくわずかに大きめである。

Fig. 4. Given the ground motion of Niigata earthquake at Tokyo, which is shown in Fig. 3 by 2nd and 6th curves, the forced oscillation of structures with one degree of freedom, damping $h=0.05$, and various free oscillation periods was calculated. The numerals and the length of straight line at the left shoulder of each curve give the period of that structure. The black circle is the point of maximum displacement.

4. 建造物のレスポンス

前にも述べた通り建造物の地震時における反応—安全性—をみるには、実際の地震動またはこれに近い動きを与え、これに対するレスポンスを見るのが望ましいと考えられる。その際の振動系としては建造物の特性になるべく近い系を扱うのも一つの方法であるが、最も基本的な問題として、ここでは先ず1自由度の、従つて単振子のごときものを対象とし、その減衰の係数 h を一定にとり、自由振動周期を次々に変えてレスポンスを見ることにする。これは考える系と同じ特性を持った一連の地震計の動きを求めることであり、かつて末広恭二によつて作られた地震波分解器²⁾を数値的にシミュレートすることに相当する。

4. 1 新潟地震に対するレスポンス

新潟地震の東京における観測の解析は第2, 3節において試みてきた。本節ではこの地動に対するレスポンスを前節の筋道に従つて求めることにする。第4図において曲線の上左に書かれた数値と線分の長さは建造物の自由振動周期を、曲線は第3図の変位が与えられた時、上の周期と減衰 ($h=0.05$) を持つ振動体の示すべき変位を与えるものである。極度に周期の長いものは精度もあまり高くないと想像されるが、これらを除いてかなり忠実に地震時の建造物の動きを表わしていると思われる。これによつて地震の際にどのように振動が大きくなり、またおさまっていくかの有様、自由振動周期の違いによつて揺れ方に大小の差が生ずること、等を見ることが出来よう。最大変位は図中黒丸で示されているが、これを建造物の振動数(周期)の関数として表わしたものが第5図である。あまり顕著な山はなく、周波数が高くなるとゆるやかに減少している。周期数秒の所で変位は20 cm程度と算出される。

このようにして求められたレスポンスは、当然地震動のスペクトルそのものと密接な関係を持つことが予想されるので第6図左には地震動スペクトルのグラフを(実線)示す。(この中に上記レスポンスの値を○印と破線によつて書き込んである)。振動数の高い所ではレスポンス曲線の方が

Fig. 5. The point of maximum displacement (black circle) is chosen from each curve in Fig. 4 and then plotted as a function of the free oscillation period (angular velocity) of the structure.

2) 末広恭二; 地震研究所集報 1 (1926), 59

Fig. 6. Left: Spectrum of the calculated ground displacement (3rd and 7th curves in Fig. 3) of Niigata earthquake. Open circles are the response in the previous figure 5.

Right: Spectrum of the displacement seismogram given by the 2nd and 6th curves in Fig. 3.

上に、低い所では逆にフーリエ振幅の方が大きくなつて多少のくい違が見られ、フーリエ・スペクトルをもつてそのままレスポンスの代用とするのは難かしい。第6図右には第3図2, 6番目の曲線のスペクトル(地震計の影響の入つたまゝの)を参考迄にかいてある。

こうした計算は変位について行ない得ると同様、速度についても実行することが出来る(第3節(3)(4)式参照)。変位の計算では、あまり周期の長い波に関してはフィルターを通す等の操作を行なわなくてはならないこともあり、精度に疑問が生じやすいが、速度についてはこのような問題がない等、却つて有利な点もある。結果は第7図に示してある。この図を見ると、最大振幅のあたりでは専ら構造物自身の周期を以て振動している。即ち共振によつて動きが大きくなつていると見られ、変位と速度二つの図を比べる時、変位の振幅に振動数を乗じたものがほぼ速度振幅になっていることが明らかになる。こうした事情は振動のくり返し回数が耐震の問題を論ずる時大きな要素となることを示すものといえよう。第8図に各曲線の最大(小)値をとつて作つたレスポンスのグラフを示す。3—4秒の所で最も大きな値(20kineあまり)をとる。

Fig. 7. Calculation similar to that which was performed in Fig. 4, was carried out with regard to the velocity of the forced oscillation of structures. The parameters are the same, and the black circle gives the point of maximum velocity. Compared with Fig. 4, an approximate relation

$$(\text{Maximum velocity}) = (\text{Maximum displacement}) \times (\text{Characteristic frequency of the structure})$$

is observed, which fact implies that the maximum motion of the structure is caused by the resonance.

Fig. 8. The point of maximum velocity (black circle) is chosen from each curve in Fig. 7 and then plotted as a function of the free oscillation period (angular velocity) of the structure. (cf. Fig. 4)

5. 松代地震

1965～1967 年にわたって活動した松代地震は地震の研究，またその対策に従事するものに多くの貴重な資料を与えてくれたが，その中の代表的な地震二つ³⁾を選んで以下の計算を行なった．基本的な方針は先の新潟地震と変らないが，a) 周期の短かい加速度計 (SMAC, DC 3 等) による観測であること，b) 山と谷のみでなく，波形がよく記録されていること，c) 震央の極めて近くで観測がなされていること，等のため実際の取扱いは多少異なる点もある．

5.1 変位・速度・加速度 (松代地震 No. 123)

3 節に述べた方法をここにも使い，地震計の影響を除去して松代地震 (地震番号 No. 123) の変位，速度，加速度を算出した．結果は第 9 図に示す．いずれの成分を見ても加速度計としての性能は良好で，地震計の描いたものは，計算された加速度とよく似ている．ただ加速度の絶対値にいくらかの相違が見られるが，これは使用した機械の定数に多少の相違があるためか

Fig. 9. 1st and 5th curves: Original seismogram of Matsushiro earthquake No. 123 by a DC-3 strong motion seismograph.

The other curves: Acceleration, velocity and displacement of the same earthquake calculated by the method of Fourier analysis.

3) 東京大学地震研究所強震観測センター松代地震群強震記録 No. 123 および No. 300

Fig. 10. Response (displacement) of Matsushiro earthquake No. 123. Using the data given in Fig. 9, a calculation similar to that which is shown in Fig. 4 and Fig. 7 was carried out. Black circle is the point of maximum displacement. Numeral and the length of straight line at the left shoulder of each curve give the free oscillation period of that structure.

Fig. 11. Left: Response (displacement) of Matsushiro earthquake No. 123. Point of maximum displacement (black circles in Fig. 10) is taken and plotted as a function of the period of the structure.
Right: Response (velocity) of the same earthquake. (cf. Fig. 12)

もしれない。

5. 2 松代地震 (No. 123) に対するレスポンス

新潟地震について行なつたと同様のレスポンス計算を松代地震についても行ない、似たような結果を得た。第 10 図がそれであり、最大振幅の点を選んで、周期の関数として表わしたものが第 11 図左である。先の新潟地震における類似の性質を見ることが出来る。ただ、松代地震の観測は震央に極めて近い場所、しかも堅い地盤の上で行なわれているので、短かい周期の波が強く表われているのが異なっている。変位ばかりでなく速度について行なつた計算結果が第 12 図および 11 図右である。レスポンスは大体右上りとなつてはいるが、2.5 サイクルのあたりから減少しはじめている。

6. 地盤の影響 (松代地震 No. 300)

いろいろな場所で地震動の大きさを調べてみると、所により著るしく大きくゆれている個所があるのはよく知られた事実であり、これはいわゆる悪い地盤のなす所とされている。堅くてよい地盤の上で観測された松代地震と同じ動きが、かりに東京の基盤に与えられたとした時、軟弱な悪い地盤がこれをおほっている時には、果してどのような地動となつて表われるであろうか。またここに建つ構造物はどのようなレスポンスを示すであろうか。これらの間に対する一つの答が第 13 図に示してある。地震としては松代地震 No. 300、軟弱地盤の代表として東京豊州 (東京地盤地質図第 5 図地質断面図、地点番号 17~20.5) を例にとつた。この図にえ

Fig. 12. Response (velocity) of Matsushiro earthquake No. 123. (cf. Figs. 4 and 10)

Fig. 13. 1st and 6th curves are the seismograms of Matsushiro earthquake No.300 by a DC-3 strong motion seismograph. By the method of Fourier analysis acceleration of ground is calculated and given as 2nd and 7th curves. Velocity and displacement are given by 3rd and 8th, and 4th and 9th curves respectively.

Assuming that this ground motion, observed on a hard foundation of Matsushiro area, is given at the bottom of the surface layers of Toyosu, one of the typical examples of soft foundation in Tokyo, the motion expected at the free surface was calculated. The underground structure at Toyosu is shown in the small figure, right of the 5th curve. (Ordinate: thickness of the layer in m. Abscissa: S-wave velocity in m/sec.) The multiple reflections in the layers are assumed for the calculation.

がかれているのは、上から順に加速度地震計記録，フーリエ変換を用いて計算によつて地震計の影響を補正して出した加速度，同じく速度および変位であるが，もつとも下の曲線は豊州における地盤の影響を考慮に入れて，ここでの振動拡大率（位相をもとり入れた複素数）をスペクトルに乘じ，その上でフーリエ合成を行なつて得たもので，軟弱地盤の上で観測されるべき地動を示すものである⁴⁾。ここでは地盤が線型の範囲で挙動するものとして計算した。あまり

4) 河角広ほか；東京都防災会議（昭和 46 年 3 月）

長周期の振動は信頼性も低く、フィルターをかけてとり除いてあるが、しかもなお、もとの地動に比べて数倍の大きさを示している。

6. 1 松代地震 (No. 300) に対する

レスポンス

こうしたことがあれば、ここに立つ建物が大きくゆれることは当然であり、さきに行なったと同様の計算をすれば、構造物のレスポンスの形で地盤の影響を見ることができる。

先ず第 14 図は松代地震 No. 300 の変位そのまま (第 13 図上より 4, 9 番目の曲線) を与えた時の構造物の動きを示すもので、第 10 図の地震 No. 123 についての計算に対応するものである。一方第 13 図第 5, 10 番目の曲線で与えられる、軟弱地盤で拡大された地動に対する構造物の動きが第 15 図である。構造物自身の周期が数値と線分で各曲線の上左に示されていること、減衰は $h=0.05$ 一定であることなど前と変らない。振幅の増

加は一見して明らかであるが、更に、もつとも大きく揺れている点をとって作ったレスポンス曲線第 16 図においても振動の拡大はよく見ることができる。(破線がもとのままの松代地震 No. 300 に対するもの、実線が軟弱地盤、東京 17-20.5 を入れたもの。) 地盤の影響をこれらの図に見ることができるであろう。ただ地表層による振動の拡大は鉛直下方から入射した波に対するもので、周期の長い部分については、値をそのままに信用することには多少困難があると考えられる。

7. 結 語

大地震の際の構造物の動きを知ること、その際に地盤が受持つ役割について明らかにすることは地震工学の上で重要な課題であり、さまざまな方面から研究がなされている。ここでは 1 倍強震計の記録に手を加えて、最近重要性を増した周期の長い波についてのレスポンスをも

Fig. 16. Points of maximum displacement are chosen both from Fig. 14 and Fig. 15 and plotted against the period of the structure. Broken line shows the response for the original Matsushiro earthquake No. 300 (Fig. 14), while the solid line gives the response expected on the surface of soft layers at Toyosu, Tokyo.

Fig. 14. Response (displacement) of Matsushiro earthquake No. 300.
(cf. Fig. 10, which gives the calculation of Matsushiro earthquake No. 123.)

Fig. 15. Response of structures on the earth's surface when the ground motion of Matsushiro earthquake No. 300 (4th and 9th curves in Fig. 13) is given at the bottom of the surface layers at Toyosu, Tokyo. The same parameters for the calculations shown in Figs. 10 and 12 are used. Compare with Fig. 14. and notice the amplification caused by the surface soft layers.

Fig. 17. Acceleration spectra of Imperial Valley earthquake in 1940, observed at El Centro, and Niigata earthquake observed at Tokyo.

忠実に導くこと，フーリエ変換を応用して地震計のかいた記録から，変位，速度，加速度および1自由度の振動体のレスポンスを求めること，等を行なつた．今後方法に検討を加えると共に，十分なデータを得てより完全な結果を得たいと考える．

付 Imperial Valley 地震と新潟地震の 加速度スペクトル

よく知られている Imperial Valley の地震 (1940) の El Centro における観測は第4図に示されているような，山と谷の座標が公表されているから，これを利用して第2，3節にのべたと同様の操作を行ないスペクトル

(加速度) を求めた．一方これと比較するために，新潟地震については第3図の記録をフーリエ解析したものに振動数をかけて加速度スペクトルを求めた．観測器械の特性による制約があるため，比較は必ずしも正確とはいひ難いが，何らかの参考になるであろう．