

1. 概 説

地震動が構造物に与える影響度の工学的指標として、現在までのところ次の2者が一般的である。

- ① 地震動の最大振幅（一般に加速度の最大値。まれに速度または変位の最大値）
- ② 地震応答スペクトル

①は、構造物の特性とは無関係な地震動の振幅のピーク値を基準とし、従来からの耐震計算法である「震度法」の基本概念となるものである。この場合には、地震動の波形特性の影響は全く含まれない。

②は、構造物を単純な振動系と考え、これに地震動が作用したときに構造物に生ずる応答のピーク値を基準とし、いわゆる「応答を考慮した修正震度法」の基本となるものである。この場合には、地震動の波形特性の影響が現われるため、構造物の振動特性に応じて、地震動の影響が変化することとなる。

しかし、この2者は振動のピーク値（前者では地震動、後者では応答）に着目して、影響度を把握しようとする点では一致しており、ピーク値（あるいはそれに近い値）の繰返し回数や、あるレベル以上の振幅の継続時間等に関しては、直接的には定量的な表示がない。

一方、地震の震害と実測された地震動加速度の最大値との関係、さらに震害と応答スペクトルとの関係などから、上記の2者の方法は、地震動が構造物に与える影響の指標として、必ずしも満足できるものでないことが指摘されている。また、地震動のような繰返し荷重が、地盤や構造物の材料の終局的破壊に与える影響として、地震動または応答の最大値のみならず、継続時間や繰返し回数の効果が少なくないことが、実験的に判明しつつある。例えば、図・1は、飽和砂が、繰返しせん断応力をうけたときの流動化現象に関するSeed, Lee⁽¹⁾の動的3軸圧縮試験の結果である。これは均質な中砂について、動的せん断応力の繰返し回数(N)と流動化現象による破壊を起こすせん断応力(偏差応力 σ_{dp})との関係を示している。これから繰返し回数の増加と共に、試料の強度が低下していくことが判る。

上述した①または②以外の方法によって、地震動の強さを定量的に評価しようとする試みはすでに多くなされている。Housner⁽²⁾による、線型系の速度スペクトルの面積から算定するSpectrum Intensity, $SI = \int_{0.1}^{25} S_v dT$ (S_v は応答速度、 T は固有周期)の方法、Cloud⁽³⁾による、強震記録においてあるレベル以上の振幅が起こる純時間の長さを算定する方法、長橋、小林⁽⁴⁾らによる1自由度弾塑性系の応答のスペクトルの表示による方法、さらにSeed⁽⁵⁾によるDamage Potential, $\frac{S_A}{kg}$ または $\frac{S_v}{k}$ (S_A は応答加速度、 k は設計震度、 g は重力の加速度)の方法などの研究がある。

この報告では、より簡単な方法として、地震動の振幅の繰返し回数及び1自由度線型系の応答の繰返し回数に着目し、地震動が構造物に与える影響度を算定しようとする一つの試みを示す。

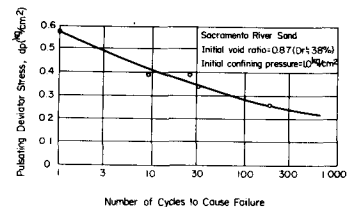


FIG. 1 RELATIONSHIP BETWEEN PULSATING DEVIATOR STRESS AND NUMBER OF CYCLES REQUIRED TO CAUSE FAILURE (AFTER SEED AND LEE (1))

2 対象とする地震動記録と線型応答スペクトル

表1に示す2種の強震記録を対象として検討を行なってみる。(A)1968年5月16日に発生したかなりの震害を伴った十勝沖地震の石狩川大橋地盤上における記録、および(B)1966年4月5日の軽微な震害を伴った松代地震(一連の松代地震では最大級のもの)の長野市内地盤上の記録で、共に沖積層上のものである。図2はこれらの記録の加速度波形および固有周期 $T=0.6$ sec、減衰定数 $h=0.02$ の1自由度線型系に対する応答波形を示す。両者の応答スペクトル

TABLE 1 CHARACTERISTICS OF TWO RECORDS ANALYZED

RECORD NO/COMPONENT	(A) 1303-GR-1 (N-S)	(B) 905-C-7 (N-S)
NAME OF EARTHQUAKE	TOKACHI-OKI	MATSUSHIRO
DATE AND TIME	MAY 16, 1968, 9 49 am	APRIL 5, 1966, 5 51 pm
MAGNITUDE ON THE RICHTER SCALE	7.9	5.4
EPICENTRAL DEPTH	40°44'N, 143°35'E, 20 km	36°35'N, 138°19'E, 0 km
EPICENTER DISTANCE	322 km	11 km
MAXIMUM ACCELERATION	181.25 gals	230.38 gals
OBSERVATION STATION	ON THE GROUND NEAR SHIN-ISHIKARI OHASHI, ISHIKARI, HOKKAIDO	ON THE GROUND IN NAGANO LOCAL OFFICE, MINISTRY OF CONSTRUCTION, NAGANO
SOIL CONDITIONS	SOFT ALLUVIUM DEPOSIT DEPTH 0-4m: SILTY SANDS, N+2-6 DEPTH 4-19m: GRAVEL, N+40 DEPTH 19-35m: CLAY, N+15	SOFT ALLUVIUM DEPOSIT DEPTH 0-7m: SILTY SANDS, N+1-11 DEPTH 7-9.5m: GRAVEL, N+25 DEPTH 9.5-15.5m: SILT, N+7
INSTRUMENT	SMAC-B2 ACCELEROGRAPH	SMAC-B2 ACCELEROGRAPH

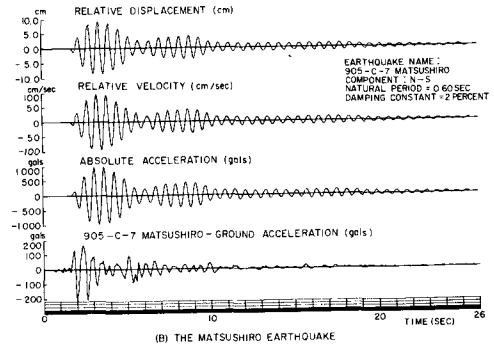
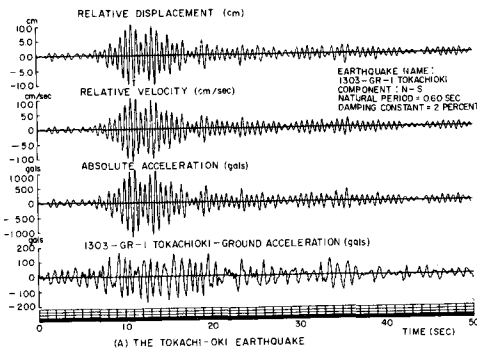


FIG. 2 GROUND ACCELERATIONS AND RESPONSES OF AN ONE-DEGREE-OF-FREEDOM SYSTEM

ル曲線(加速度倍率 β)

を図3に示す。また減衰定数 $h=0.1$ の場合について、両者の絶対応答加速度スペクトルを比較したのが図4である。

以上の資料から、両者の地震動の特徴を比較してみると次の事が判る。

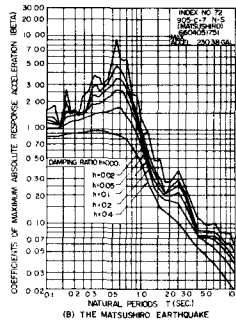
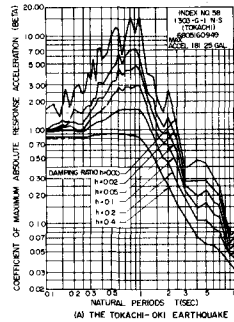


FIG. 3 RESPONSE SPECTRUM CURVES

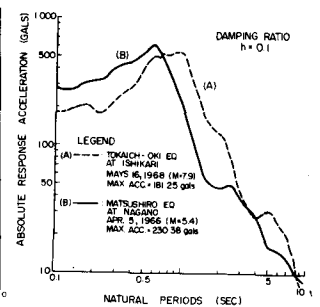


FIG. 4 COMPARISON OF RESPONSE SPECTRA (DAMPING RATIO $h=0.1$)

(1)図2の(A)と(B)の対比から、最大加速度は(B)が大きいが、主要動の継続時間と繰返し回数の点からは、(A)の方が激しい。(2)図3から(A)は $T=0.7 \sim 1.0$ 秒で β -スペクトルはピークとなり、比較的長周期の応答が大きい。一方、(B)は $T \approx 0.6$ 秒でピークを示し、短周期の応答が大きい。また(A)では減衰定数の大きさによる応答値の差が(B)に比して大きい。

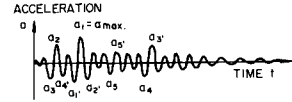
(3)図4から、絶対応答加速度は、 $T < 0.7$ 秒の範囲では(B)が大きく、 $0.7 < T < 3$ 秒の範囲では(A)が大きい。

(4)両者の波形の特性に差異があることが認められるが、全体的にみて、(A)、(B)どちらの地震動が構造物に大きい被害を与えるかに関して、以上の資料だけでは定量的判断が下せない。

3 地震動および地震応答における振動の繰返し回数

図3および図4では、応答の絶対最大値を基準にとってスペクトルを示したが、次に振動の繰返し回数を考慮した検討を行なってみる。

まず図5に繰返し回数を考慮する場合における、最大振幅に対する低下率Dおよび平均低下率 $\bar{D}$ の定義を示す。いずれも振動振幅の最大値を基準にしたときの繰返し回数(N)による振幅の減少の程度を示す無次元の比率である。



N	1	2	3	4	5	REMARKS
a	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	Peak values in order
D	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	Ratio to a _{max}
$\bar{D}$	$\bar{D}_1$	$\bar{D}_2$	$\bar{D}_3$	$\bar{D}_4$	$\bar{D}_5$	Average ratio

$$D_N = \frac{a_N}{a_1} \text{ and } \bar{D}_N = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_N}{N}$$

FIG. 5 DEFINITION OF D-Value (Ratio to the maximum value) AND $\bar{D}$ -Value (Average ratio)

図6はこの方法によって算定した、上記(A)、(B)両者の地震動加速度(図2参照)についてのNに対するD値および $\bar{D}$ 値の変化を示したものである。これから、両地震動の間には、Dおよび $\bar{D}$ 値に大きい差異のあることが判る。すなわちN=10を考えると、(A)では $D_{10}=0.65$ 、 $\bar{D}_{10}=0.81$ であるのに対し、(B)では $D_{10}=0.18$ 、 $\bar{D}_{10}=0.40$ であり、(B)の方が繰返し回数に対する振幅の低下の具合が大きいことを示している。

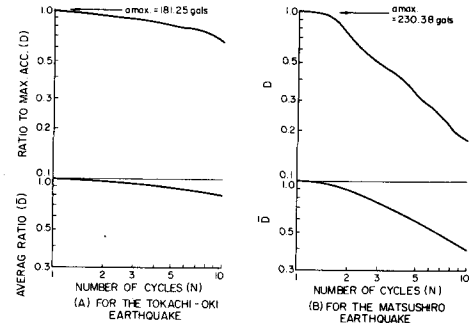


FIG. 6 RELATIONSHIP BETWEEN NUMBER OF CYCLES AND GROUND ACCELERATIONS

図6は、地盤上で記録した地震動の波形について調べたが、次にこれらの波形を線型の構造物に入力として作用させたときの応答波形について、

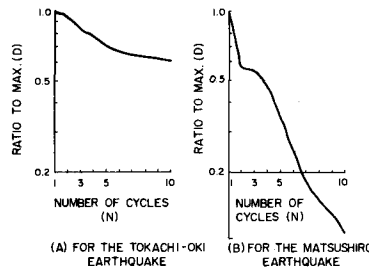


FIG. 7 RELATIONSHIP BETWEEN N AND D

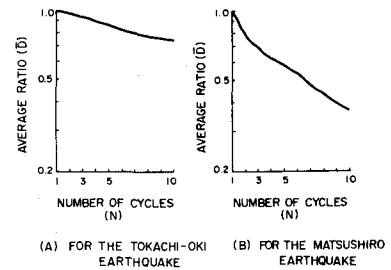


FIG. 8 RELATIONSHIP BETWEEN N AND $\bar{D}$

同様の検討を行なってみよう。この場合には、通常の応答スペクトルを求める場合と同様の計算を行なって時刻応答を求め(スペクトルでは応答の最

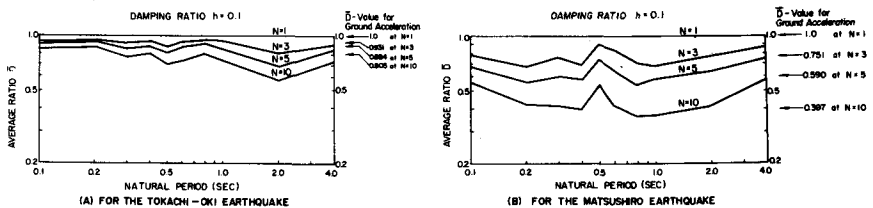


FIG. 9 RELATIONSHIP BETWEEN T AND $\bar{D}$ (FOR N=1,3,5,10 AND h=0.1)

大値のみに着目する)、絶対振幅の大きい順にピーク値を定めて、図5に示した操作を行なって繰返し回数Nによる低下率Dおよび平均低下率 $\bar{D}$ を求める。このようにして実施した計算結果の一部を図7~10に示す。

図7は固有周期T=1.0秒、減衰定数h=0.1の線型系に対するN-D関係を示したものであり、図8は同様の系に対するN- $\bar{D}$ 関係を示したものである。

図9は減衰定数=0.1の場合について、固有周期Tと平均低下率 $\bar{D}$ の関係を、Nをパラメータにとって

描いたものである。

図10は、繰返し回数 $N=3, 5$ および 10 の場合について、減衰定数 h をパラメータとして、固有周期 T と平均低下率 $\bar{D}$ との関係を示したものである。

また、図11は通常の応答スペクトル ($N=1$) とともに、繰返し回数を考慮した応答スペクトル ($N=3, 5, 10$ の場合) を示している。

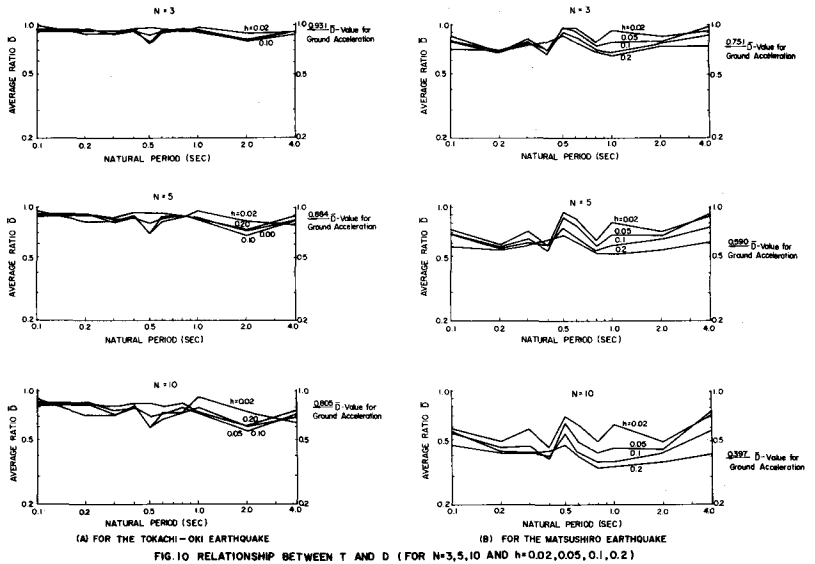


FIG.10 RELATIONSHIP BETWEEN T AND $\bar{D}$ (FOR $N=3, 5, 10$ AND $h=0.02, 0.05, 0.1, 0.2$)

4. 結 語

以上の検討から次の諸点を指摘できる。

- (1) 減衰(h)のある系に対する応答波形に関しても、地震動の場合と同様繰返し回数(N)によつて振幅はかなり低下する。低下の程度は地震波によつて異なる。
- (2) N および h が決められた場合、平均低下率 $\bar{D}$ は固有周期 T に対して、大略一定値を保つ。そして $h=0.02 \sim 0.2$ の場合の $\bar{D}$ 値は、ほぼ地震動波形の $\bar{D}$ 値 (図6 参照) に近い。
- (3) 長周期に対しては、 h が大きいほど $\bar{D}$ はやや低下する傾向がみられる。
- (4) 繰返しを考慮した応答スペクトルは、最大応答のスペクトルと比べて低下し (低下の程度は地震動の波形特性に影響される)、構造物に与える地震動の影響を算定する一方法となり得る。
- (5) 簡単な検討を行なう場合は、地震動記録から直接 $\bar{D}$ を求め、繰返しを考慮した応答スペクトルを算定することも可能である。

〔参 考 文 献〕

- (1) Seed, Lee: Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading, Journal, ASCE, Vol. 92, No. SM6, Nov. 1966
- (2) Housner: Spectrum Intensities of Strong Motion Earthquakes, Symp. Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute, 1952
- (3) Cloud: Comments on Earthquake Records and Analysis, UJNR, May, 1969
- (4) 長橋, 小林: 構造物の破壊作用を対象とした地震動の強さの評価, 建築学会論文報告集, 160号 44-6
- (5) Seed: The Influence of Local Soil Conditions on Earthquake Damage, 7th ICSMFE, Aug. 1969

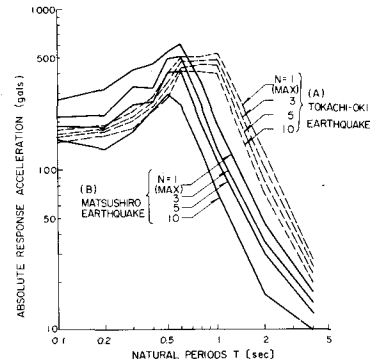


FIG. 11 RESPONSE SPECTRA CONSIDERING THE EFFECTS OF NUMBER OF REPEATING CYCLES