

地震動波形の繰返し特性に関する統計解析

建設省土木研究所 ○東 拓生

萩原 良二

二宮 嘉朗

1. まえがき

土構造物のように地震外力を繰返し受けて徐々に損傷が蓄積するような構造物あるいは地盤の液状化等を考える場合、地震動が作用している間の1回の強い地震動の値(最大振幅)だけでなく、強い地震動が何回作用するかについても、地震時の耐震性を検討する上で重要であると考えられる。

本研究は、地震動の繰返し特性を表す指標と、地震動のパラメータ(地震規模、震央距離、地盤種別)との関係を、既往の強震記録を用いて統計解析により検討するものである。

2. 地震動の繰返し低減係数およびその推定方法

地震動波形中に、あるレベル以上の地震動(パルス)が何回含まれるかを表す指標として、地震動の繰返し低減係数を考える。いま図-1に示すように加速度波形が零線と交わった瞬間から次に零線と交わる瞬間まで1回の繰返しとする。加速度波形の継続中での繰返しのピーク値の大きい順にカウントしたN番目のピーク加速度 $a_p(N)$ を最大加速度 a_{max} で除したものを地震動の繰返し低減係数と定義する。 $\eta a(N)$ は加速度波形中に $\eta a(N) \times a_{max}$ 以上のピークがN回含まれていることを示す。

図-1 加速度波形の繰返し特性を考慮した最大加速度の定義

佐々木らは、この $\eta a(N)$ をわが国において観測された394成分の加速度強震波形について統計解析を行い、地震のマグニチュード、震央距離および地盤種別をパラメータとして $\eta a(N)$ の重回帰分析を行い、以下の式で整理している。

$$\eta a(N) = \frac{1}{1 + a(M, \Delta, GCI)\{N-1\}} = \frac{1}{1 + \{e1(GCI) \times 10^{e2(GCI)M \times (\Delta+30)^{e3(GCI)}}\}\{N-1\}} \quad \text{式(1)}$$

ここでMは地震のマグニチュード、 Δ は震央距離、GCIは「道路橋示方書V 耐震設計編」に示す地盤種別($l=1, 2, 3$)、Nは $\eta a(N) \times a_{max}$ 以上の振幅が発生する回数である。また $e1(GCI), e2(GCI), e3(GCI)$ は、地盤種別ごとに定まる定数であり、また $a(M, \Delta, GCI)$ は、地震の規模、震央距離および地盤種別によって定まる係数である。係数 a が小さい波形は正弦波に近い波形になり、 a が大きくなるほどショック波的な波形となる。

佐々木ら¹⁾が式(1)の係数 a の回帰分析に用いた地震記録は、マグニチュードの小さい記録は近距離のものしかなく、逆にマグニチュードが大きい記録は近距離のものが少ないという特性を有しているため、マグニチュードが大きいものの繰返し特性には震央距離の大きいものの特性も含まれていることになる。そこで本研究では、わが国で1968年～1993年までに発生した震源深さ60km未満の46地震において観測された488成分の加速度波形について、このような強震記録数の偏りの影響をなくするため、各地震ごとに式(1)を回帰分析するという方法により、波形の繰返し特性の検討を行なう。また地盤の液状化等では、最大振幅発生後に受ける繰返し荷重に対しては液状化が進みにくくなることから、加速度波形の最大振幅が発生する前のみについて係数 a を計算し、加速度波形全体で計算した場合との比較も行った。

図-2に、震央距離

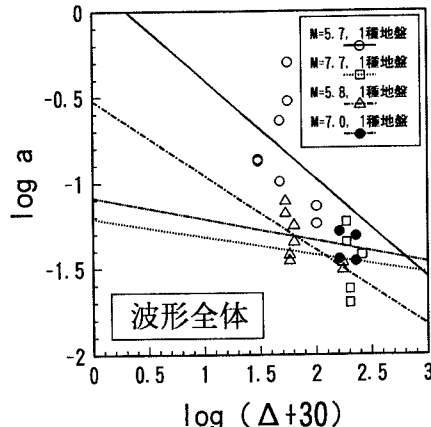


図-2 震央距離と係数aの関係

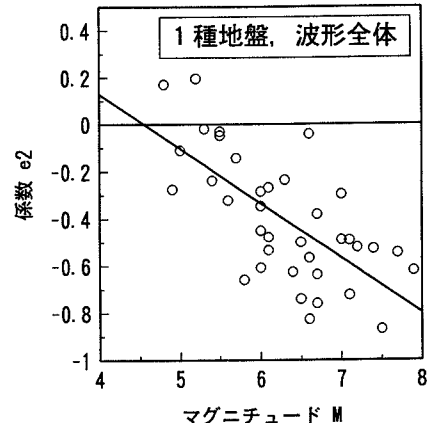


図-3 マグニチュードと図-2のY切片の関係

3. 計算結果

図-2に、震央距離

と係数 a の関係の例を示す。今回統計解析に用いた強震記録の中には、1 地震の強震記録が非常に少ないものもあり、そのまま回帰を行うと精度が悪化するため、まずこの図のように強震記録数が4つ以上で、観測地点の震央距離の範囲が50km以上に分散している地震について、1つの地震で係数 a と震央距離の関係の直線回帰して、その平均的な傾きを

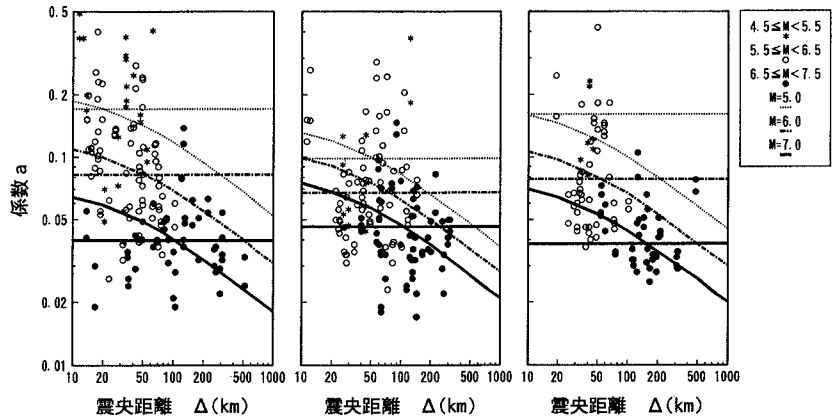


図-4 地盤種別ごとの全データと回帰結果

を式(1)の $e3$ として算出した。ただし $e3$ は、震央距離に関係する係数で地盤種別には関係ないと考えられるので、全地盤種別で同一の値とした。しかし、図-2を見ると震央距離と係数 a に相関はあまり見られないため、回帰式中に震央距離を含まないものについても検討し、震央距離を含めた式との比較も行った。

図-3に図-2で求めた $e3$ の値を使って、同じ地盤種別(図-3にはI種地盤を示す)で、震央距離0kmでの $\log a$ の値とマグニチュードの関係を示す。この図から、マグニチュードが大きくなると係数 a は全体的に小さくなる傾向がみられる。この関係を直線回帰して、その傾きを式(1)の地盤種別ごとの $e2$ とした。次に上記でもとめた $e3, e2$ の値を使い、1つの地震 (M = 一定) について、一つの $e1$ を求める。これを強震記録数で加重平均して各地盤種別ごとの $e1$ を求める。

表-1 係数 a の回帰により得られた各係数

係数	係数 $e1$	係数 $e2$	係数 $e3$	重相関係数 R	回帰手法
I 種地盤	11.401	-0.232	-0.391	0.704	震央距離を考慮
	6.768	-0.319	-	0.680	震央距離を考慮しない
	22.40	-0.177	-0.743	-	佐々木らの方法
	182.10	-0.209	-0.821	0.574	最大加速度発生前のみ(震央距離を考慮)
	62.384	-0.393	-	0.516	最大加速度発生前のみ(震央距離を考慮しない)
II 種地盤	2.258	-0.122	-0.391	0.345	震央距離を考慮
	0.647	-0.164	-	0.399	震央距離を考慮しない
	2.240	-0.161	-0.266	-	佐々木らの方法
	113.55	-0.164	-0.821	0.286	最大加速度発生前のみ(震央距離を考慮)
	11.797	-0.276	-	0.416	最大加速度発生前のみ(震央距離を考慮しない)
III 種地盤	5.199	-0.178	-0.391	0.487	震央距離を考慮
	5.594	-0.309	-	0.470	震央距離を考慮しない
	0.556	-0.0225	-0.407	-	佐々木らの方法
	210.42	-0.200	-0.821	0.338	最大加速度発生前のみ(震央距離を考慮)
	245.50	-0.476	-	0.415	最大加速度発生前のみ(震央距離を考慮しない)

図-4に、各地盤種別ごとのデータと回帰結果を示す。図中の直線は震央距離を考慮せずに回帰を行った結果である。これらの回帰の結果得られた式(1)の係数 $e1, e2, e3$ を表-1に示す。この式より、想定する地震動のマグニチュード、震央距離および地盤種別から、地震動の繰返し特性を推定することができる。震央距離を考慮した場合と考慮しない場合での相関係数はあまり差が見られず、震央距離の係数 a に与える影響は小さいものと考えられる。

図-5に加速度波形全体で計算した係数 a (aA) と最大加速度発生前のみで計算した係数 a (aF) の関係を示す。前半部のみで計算した aF は、 aA より大きくなる。また1種地盤での aF は、 aA の約3.4倍程度であるが、2, 3種地盤ではそれぞれ4.7倍、5.8倍程度となり、硬い地盤であるものほど前半部に大振幅が集中することになる。

4. まとめ

今回の統計解析から、マグニチュード M が大きくなると、係数 a が小さくなり(大振幅のパルスを多く含む)正弦波に近づいていくが、 M が小さくなるとショック波的な波形になることがわかった。この傾向は佐々木らの報告より大きく見られた。しかし、震央距離については係数 a に与える影響は少ないことがわかった。また、最大加速度発生前のみで計算した aF は、 aA より大きくなる。またその比は、1種地盤で3.4倍程度、2種地盤では4.7倍、3種地盤では5.8倍程度となる。今後は、地震動波形を用いた繰返し三軸試験により、液化強度に及ぼす地震動の繰返し特性の影響について検討を行う予定である。

【参考文献】

1) 佐々木, 田村, 相沢, 高橋: 最大地震動および地震応答スペクトルの推定法—(その9) 地震動の繰返しを考慮した最大加速度—, 土木研究所資料2282号, 1986

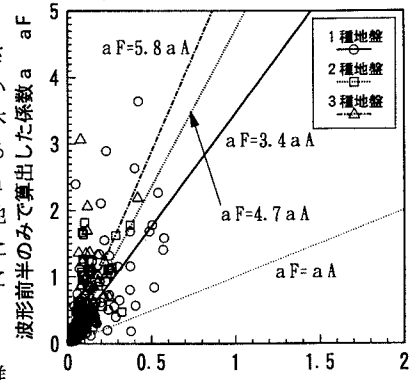


図-5 波形全体で算出した係数 a (aA) と最大加速度発生前での係数 a (aF) の比較