

地震加速度と構造物破壊の関係についての 一つのシミュレーション

A SIMULATION ON IMPORTANT FACTORS TO COLLAPSE OF STRUCTURES DUE TO EARTHQUAKES

伯野元彦*・森川修**

By Motohiko HAKUNO and Osamu MORIKAWA

Collapse of structures during strong earthquakes is studied using monte-carlo simulation on one mass system with the hysteretic restoring force. Decision of collapse is given by deformation of the system. Model system which collapse just due to static 0.2G acceleration (=design seismic coefficient popular in Japan) is made in computer and is applied by natural or simulated earthquakes with various duration and acceleration. Averaged acceleration of earthquake, duration time of earthquake, and ductility of the system have much effect on the collapse. In same cases, the maximum acceleration to collapse the model system with much ductility applied by short duration earthquake is several times more than 0.2G.

1. はじめに

最近、強震観測網が充実してくるとともに、得られた強震記録が増えてきた。そして、地震動の最大加速度がかなり大きくても、構造物の被害はそれほどでもないということがわかってきた。これは、われわれが地震の加速度から推定する被害よりも軽い被害であるということなのだが、この食い違いはどこから来ているのだろうか。われわれが地震の加速度という言葉から想像するのは、通常その最大値であって、構造物を耐震設計する場合に用いる設計震度に対応する地震加速度と頭の中でダブらせて考えるから被害が想像していたより軽いということになるのである。

つまり、設計震度 0.2、すなわち 196 ガルの地震加速度に耐えられるように作られている構造物が、最大加速度 350 ガルの地震を受けても壊れなかった、ということがあると、これは、構造物が不経済に強く造られているのではないかということになるのである。

その辺のカラクリを理解するために、いろいろな非線形ばね特性をもち、静的加速度では 0.2G すなわち 196

ガルでちょうど破壊するような、1 自由度振動系構造物モデルに、実地震記録と、人工地震波を作用させて、破壊時の入力地震最大加速度を求めた。その結果は、靱性のほとんどない場合を除いて、静的加速度の 2.9 倍から 7.5 倍というような大きな最大加速度でなければ崩壊はしないというもので、実際の地震時の被害をよく説明するものであった。

なお、このように、構造物の破壊が、地震の最大加速度のみによらないという指摘、研究は、戦前からあり、最近でも、15 年前に建築の分野で、小林、長橋^{2),3)}によるものがある。しかし、土木の耐震解析の分野では、現在でも最大加速度のみを念頭において、検討することが多いし、破壊を念頭においた耐震研究も最近になって緒についたというところなので、あえて投稿した次第である。

2. 1 自由度振動系の非線形応答解析

(1) 計算方法

本研究では、図-1 のような 1 質点系の構造物を扱う。質量 m 、減衰係数 c 、ばね定数 k の 1 質点系の構造物に外力 $F(t)$ が作用するときの振動方程式は、

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \dots \dots \dots (1)$$

両辺を m で割って

* 正会員 工博 東京大学教授 地震研究所

(〒113 文京区弥生 1-1-1)

** 建設省近畿地方建設局 (〒540 大阪市東区大手前元之町)

$$\ddot{y} + 2h\omega\dot{y} + \omega^2y = f(t) \dots\dots\dots(1)'$$

ただし、 $h=c/2\sqrt{mk}$, $\omega^2=k/m$, $f(t)=F(t)/m$

h ：振動減衰常数， ω ：固有振動数

また、ばねのみが非線形の場合、復元力を R とすると、式 (1)' は、

$$\ddot{y} + 2h\omega\dot{y} + R = f(t) \dots\dots\dots(2)$$

以後の応答解析には式 (2) を振動方程式として使うことにする。

数値計算方法には、線形加速度法、ニューマークの β 法、ルンゲ・クッタ法などがある。ここでは計算式の平易さ、誤差の出にくさなどから

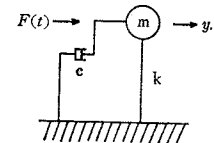


図-1 1 質点系構造物モデル

考えて、ニューマークの β 法を使うことにする。このとき、 $\beta=116$ とし、線形加速度法とした。また、加速度を仮定して収束させることにより、誤差が蓄積しないようにした。

すでに述べたように、静的震度法と比較するために、

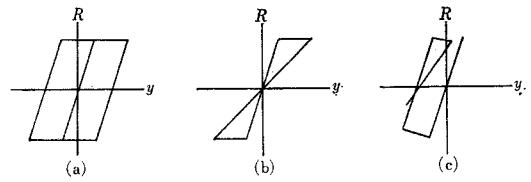


図-2 採用した変位～復元力関係

静的加速度として 0.2G をとったとき、ちょうど破壊に至るように系の降伏条件などを定め、また系の固有周期を 0.5 秒にとった。なお、減衰常数は 0.05 とした。

次に復元力～変形関係であるが、図-2 のような 3 個を用いた。まず、(a) はバイリニア型である。これは韌性に富む構造物のためのモデルである。次に、(b) は原点指向型モデルである。降伏するとばねが軟化するモデルである。(c) は、柱状構造物をモデル化したもので、断面の右側に亀裂が入っても右方に変位するとき、左側は元の剛性と強度を保持していると考えられることにより

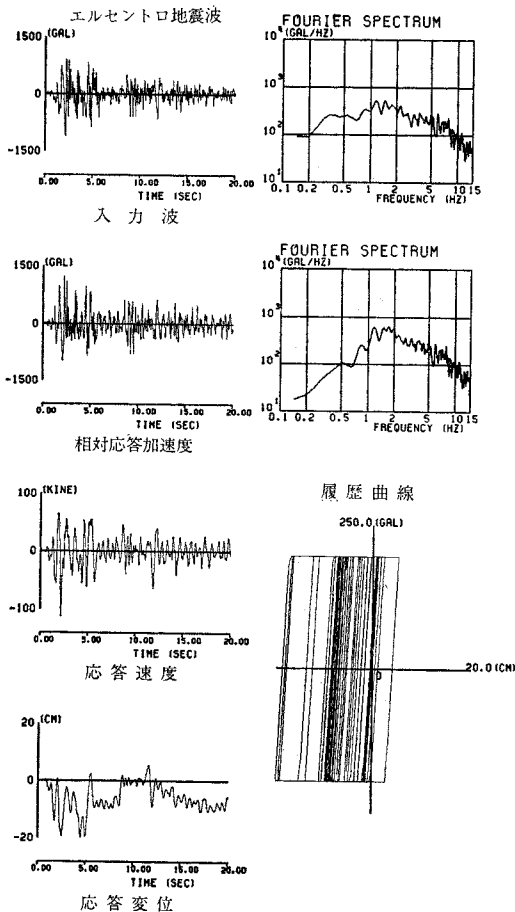


図-4 1 自由度系の応答 (エルセントロ波)

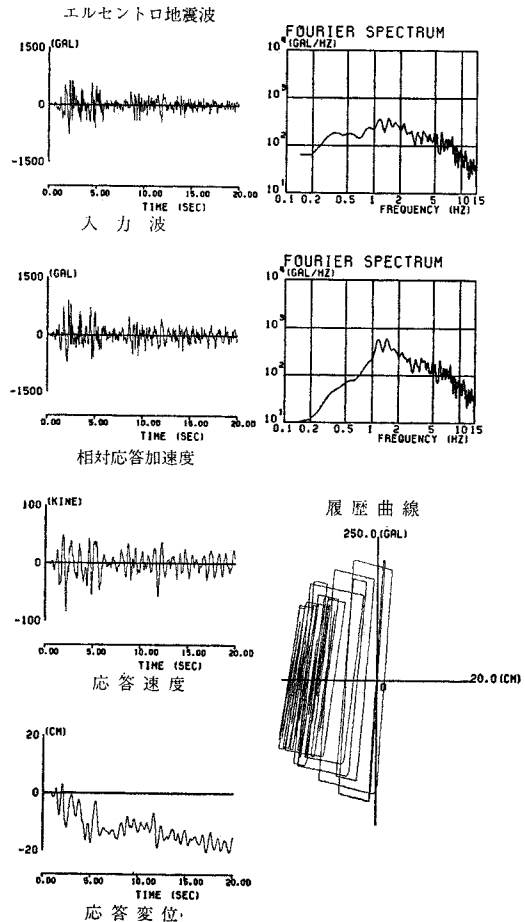


図-5 1 自由度系の応答 (エルセントロ波)

作ったモデルである。このモデルは (b) のように右変位と左変位とで別々の強度と剛性を使うようにし、式 (3) によってそれらを低下させる。

$$\left. \begin{aligned}
 &[\text{剛性}] = [\text{初期剛性}] \\
 &\quad \times \frac{[\text{破壊エネルギー}] - [\text{塑性エネルギー}]}{[\text{破壊エネルギー}]} \\
 &[\text{強度}] = [\text{初期強度}] \\
 &\quad \times \frac{[\text{破壊エネルギー}] - [\text{塑性エネルギー}]}{[\text{破壊エネルギー}]} \\
 &\dots\dots\dots (3)
 \end{aligned} \right\}$$

ここに、塑性エネルギー = \sum [復元力] \times [非線形変位]
 破壊エネルギー：想定した部材が破壊するまでに消費するエネルギー。本研究では仮定した値を採用した。

(2) 入力地震波

入力波としては、エルセントロ NS 波 (1940) と過渡的なホワイトノイズ波を使う。ホワイトノイズ波は、継続時間 20 秒、0~10 Hz を 0.05 Hz ごとに分けて合成し、逆フーリエ変換した波である。また、このホワイト

ノイズ波に 図-3 に示す包絡線をかけて、継続時間の違う 2 種類の波、TIME 1 と TIME 2 を作った。TIME 1 は、立ち上がり 0.5 秒間、振幅平坦部分 1 秒間、尾部 2 秒間の衝撃的な波であり、TIME 2 は、立ち上がり 3 秒間、振幅平坦部分 10 秒間、尾部 6.9 秒間の継続時間の比較的長い波である。

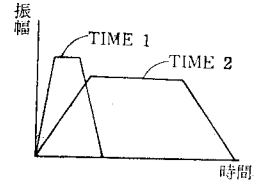


図-3 包絡線関数

(3) 解析

本研究では破壊を最大変位により規定した。計算にあたっては、最大変位 20 cm (塑性率 16.0) で破壊する場合と塑性率 1.5 で破壊する場合の 2 通りを考えた。塑性率が 16 というのは、あまりに靱性が大きいので、実際の構造物としては鉄骨構造物にそのようなものがあるかもしれないというくらいのものである。次に降伏変位であるが、これは静的 0.2G を入力したときに破壊条件を満たすように決めた。こうした応答計算の結果の数

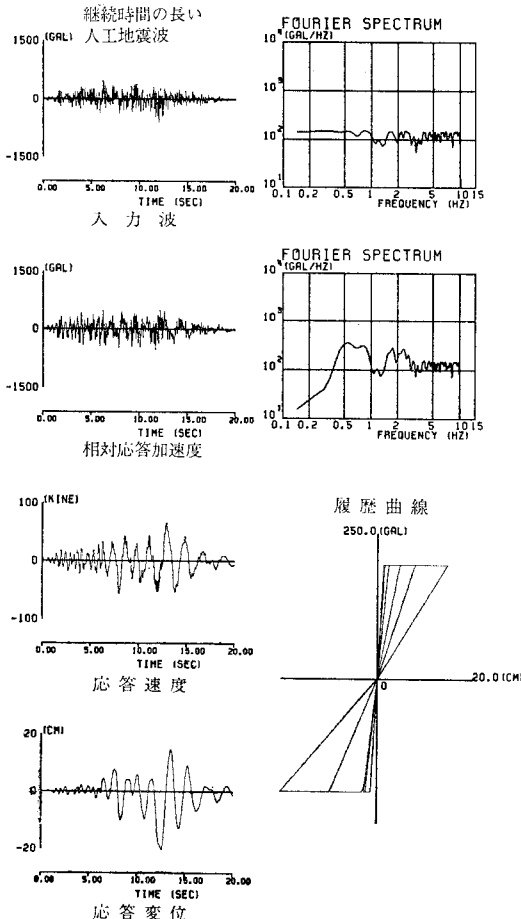


図-6 1 自由度系の応答 (人工地震波)

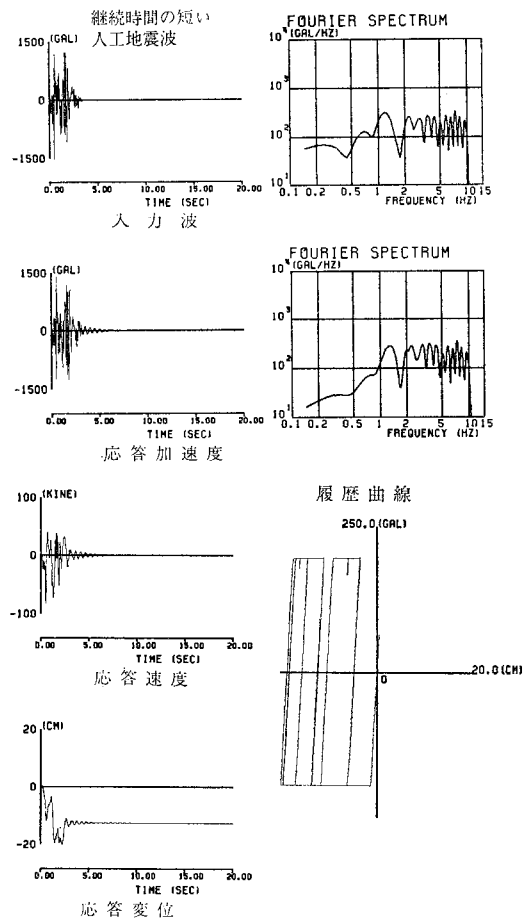


図-7 1 自由度系の応答 (衝撃人工地震波)

表—1 静的加速度 196 Gal (震度 0.2) を加えたとき、ちょうど壊れる 1 自由度系に地震加速度を加えて破壊させたときの地震加速度のうち最大のもの

復元力～変位関係	破壊変位	入力地震波		
		エルセントロ (Gal)	衝撃地震 TIME 1 (Gal)	長い地震 TIME 2 (Gal)
a) バイリニア ヒステリシス	塑性率 16.0	1097	1511	808
	塑性率 1.5	305	405	299
b) 原点指向型 ヒステリシス	塑性率 16.0	575	1480	581
	塑性率 1.5	162	440	272
c) 軟化 ヒステリシス	塑性率 16.0	760	1361	603
	塑性率 1.5	179	398	282

例を 図—4～7 に示す。また 表—1 は、それぞれ前述の破壊条件をもった 1 自由度系が、継続時間の長い地震、短い地震を受けたときの、破壊する最大加速度を表にしたものである。

3. 結果の考察

表—1 から、当然のことながら次の事柄が知られる。

(1) 塑性率が大きくならなければ破壊しない構造物、すなわち粘りのある構造物は、最大加速度が、設計震度加速度 (196 Gal) よりかなり大きな値でなければ破壊しない。

(2) 一方、粘りのほとんどない構造物 (破壊塑性率 1.5) では、継続時間が数秒というような短い衝撃的地震では、破壊加速度は、設計震度より大きい、継続時間の長い地震 (この例では、エルセントロ地震) では設計震度より小さな最大加速度でも破壊してしまった。これは、共振によるものと思われる。

(3) 地震の継続時間は、長ければ長いほど、構造物を破壊させる作用がある。これは、永久変形を進行させるからではないかと思う。

(4) その意味で、昔からいわれている軟弱地盤上の構造物に被害がひどいというのは、その理由として、地表層の共振、地震動が大きくなるなどが提唱されたが、地震動の継続時間が長くなるということも一つの主要な原因として提唱したい。というのは、硬地盤から軟地盤へは地震波動は入りやすいが、逆の場合には反射してしまい、いったん、地表軟弱層へ入射した地震波動はその軟弱層の中で反射を繰り返すため、地表層の共振現象も起こるわけであるが、一方、見方を変えれば、軟弱層の中から地震波動が逃げて行きにくいということは、継続時間が長くなるということでもあるわけである。

4. 結 論

結局、本研究によって、次の結論が得られた。

構造材料の粘りのなさ、地震動の継続時間の長さが、構造物の地震時破壊に大きく影響する。地震の強さを最大加速度だけで議論することがあるが、継続時間も同時に考慮しないと、間違った結果を導くことになりかねない。

謝 辞：本研究は文部省科学研究費の補助を受けました。感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 伯野元彦・森川 修：設計震度・地震動最大加速度・被害の関係についての一つのシミュレーション，土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集，第 1 部，I-382。
- 2) 長橋純男・小林啓美：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，No. 160, 1968 年 6 月。
- 3) 小林啓美・長橋純男：木造建築物地震被害率による地震動の強さの評価，建築学会論文報告集，No. 163, 1968 年 9 月。

(1983.8.25・受付)