

構造物の弾塑性モデルに及ぼす地震波の影響

The Effect of Ground Motions upon Simple Structures

松島 学*, 松井 邦人**

By Manabu Matsushima and Kunihiro Matsui

The energy input to a simple structure subjected to strong earthquake ground motion is investigated. The purpose of this study is to evaluate the performance of structures during various types of ground motions and attempt to identify the factors that influence structural deformation and damage. The examination focuses on the energy imparted to a structure, the energy dissipated by inelastic deformation, the displacement ductility, the number of yield excursions and reversals during the motion. To cast light on effects of difference of excitations upon structural response and damage, banded white noise and KANAI-TAJIMI spectrum are utilized as well as earthquake records of El Centro NS 1940, Taft SE 1952 and Hachinohe NS 1968.

1. はじめに

構造物が耐用期間に大きな地震動に遭遇することはまれであり、そのような地震に対して構造物を弾性範囲内で設計することは、かならずしも合理的な手法とは言えない。強震時に構造物が塑性変形することを許すと、その最大加速度応答値は、図1の例にみられるように、構造物を弾性体として取り扱った場合よりも小さな応答値となる。このように、降伏を許しても、応答値はかならずしも大きくはならない。構造物は降伏後も耐力が低下しないように、即ちこのような減衰効果を有効に利用し、地震の継続時間内で破壊に至らないように設計するのが望ましい。塑性変形を考慮した設計は、構造物の変形性能に期待するものであり、一般に損傷の指標として“塑性率”が利用されている。しかし、構造物の動的挙

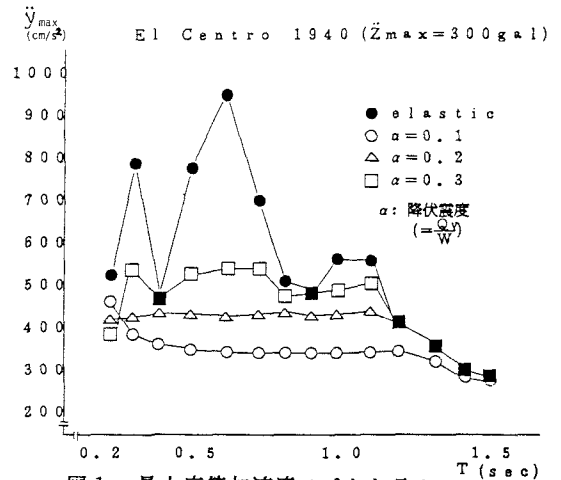


図1 最大応答加速度スペクトラム

* 工修 東電設計(株)第一土木本部送変電土木部・主任 (東京都港区西新橋1-4-6)
 ** Ph. D. 東京電機大学理工学部建設工学科・教授 (埼玉県比企郡鳩山町石坂)

動を考えると、そこでは、たとえ最大塑性率が同じでも、一度しか塑性に入らない場合と、何度も塑性域への繰り返しがある場合とでは構造物の損傷の程度は異なるであろう。一方、地震時に構造物の挙動を説明するのに、構造物の消費するエネルギーは、重要な要素であると考えられてきた。地震動は、構造物に地動のエネルギーを伝達し、構造物は与えられたすべてのエネルギーを消費しなければならない。入力されたエネルギーの一部は、一時的には弾性ひずみエネルギーや運動エネルギーとして構造物に蓄えられるが、最終的には構造物の塑性ひずみエネルギーや減衰エネルギーとして消費される。ここで重要なのは、構造物の崩壊を支配する塑性ひずみエネルギーであり、その値は構造物の耐力や剛性等を変化させることにより評価できる。Housner¹⁾によると構造物の損傷に寄与するエネルギーは、一定の減衰を持つならば平均的に弾性応答の最大応答速度とその質量で、 $E = m \cdot \dot{y}_e^2_{max} / 2$ のように表わされることを示した。そして、このエネルギーは構造物の固有周期が0.4secより大きいならば、固有周期に無関係であるとしている。さらに、この考え方を多質点系の場合にも適用し、振動系の次数やモードの形状とは無関係であり、構造物の剛性、形状、大きさとも無関係であり、全質量と減衰によって決まってくるとしている。加藤、秋山²⁾³⁾らは、この考えを拡張し、多質点系の損傷に寄与するエネルギーの推定方法を求め、各質点に均等な塑性ひずみエネルギーを分担させるための、最適な降伏せん断力の係数分布を求める方法を提案している。また、安藤、大野、山原、屋谷、Zahrah^{4) 5)6) 7) 8) 9)}らも、地震時に構造物の損傷を塑性ひずみエネルギーの観点から評価している。本研究は、地震時に構造物に入力される塑性ひずみエネルギーの値で構造物の損傷を評価できることに注目して、入力地震動の性質が構造物の損傷にどのように影響するのかを代表的な一質点系構造物を通して解析したものである。入力地震動の性質として、ここでは、i. 最大加速度、ii. 継続時間、iii. 地震動の持つエネルギー、iv. 地震動の周波数特性を取り上げた。特に、エネルギー論的な立場にたって、入力波の持つパワーが、構造物の損傷にどのように影響するのかが、定量的に評価することを試みた。さらに、入力地震動の不規則性についても、入力地震動のパワースペクトルの Entropy を調べることにより、定量的に評価を行なった。

2. 塑性ひずみエネルギーの定式化

地震動を受ける1質点系の構造物の運動方程式は、次式のように表わされる。

$$M \ddot{y} + C \dot{y} + K(y) y = - M \ddot{y}_0 \quad (1)$$

ここで、M；質量、C；減衰係数、K(y)；系の復元力特性、y, \dot{y}, \ddot{y}, \ddot{y}_0；応答の変位、速度、加速度および地動加速度である。地震動によって生じる構造物の各エネルギー量は、(1)式の両辺に $dy = \dot{y} dt$ を乗じて、地動継続時間 t₁ まで積分することにより求まる。

$$M \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + C \int_0^{t_0} \dot{y} dt + \int_0^{t_0} K(y) y \dot{y} dt = - M \int_0^{t_0} \ddot{y}_0 \dot{y} dt \quad (2)$$

(2)式で、左辺の第1項は運動エネルギー、第2項は系の減衰機構による減衰エネルギー、第3項は系に蓄えられる塑性ひずみエネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーである。ただし、運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーは、地動終了後、しばらくして減衰機構により消費されるものである。ここで重要なのは、系の損傷に影響する塑性ひずみエネルギーであり、これは構造物の系の復元力特性・系の質量・入力地震動によって決定される値である。図2に、ひずみエネルギー入力の概念図を示す。図中のE_eは構造物が吸収できる最大の弾性ひずみエネルギー、E_pは地震継続時間の中に構造物に蓄積される塑性ひずみエネルギーである。強い地震動の作用を受けると、構造物は塑性域への変形の繰り返しにより、徐々にその耐力が低下

してゆく。この塑性変形の繰り返しの度合は塑性ひずみエネルギーで表わせる。従って構造物が同一であれば、塑性ひずみエネルギーの大きい方が小さいものに比べ損傷が大きいと言えることができるであろう。また、例えば柱の径が大小2種類あり、塑性ひずみエネルギーが同じであるとすると、径の大きな構造物は小さなものより損傷が小さいと推定できる。このように塑性ひずみエネルギーは、構造物の寸法の異いを考慮できないゆえ、かならずしも良い指標とはなり得ない。本研究では、塑性ひずみエネルギーを式(3)のように無次元化した量を

$$\eta = E_p / 2E_e \quad (\eta \geq 1.0) \quad (3)$$

で表わし、 η を累積塑性率と呼ぶことにする。

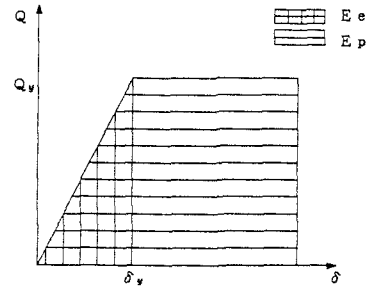


図2 塑性ひずみエネルギーの概念図

3. 塑性率と累積塑性率

一般に、構造物の耐震設計では、損傷の程度を評価する指標として最大応答変位 δ_{max} を降伏変位 δ_y で割った塑性率 μ ($= \delta_{max} / \delta_y$) が利用されている。しかし構造物が地震時に崩壊する現象は、地動による構造物の塑性変形の繰り返しが、耐力を徐々に減少させ、最終的には自重により崩壊するものと考えられている。前章で述べたように地動の継続時間の間に塑性率が同じでも一度しか塑性域に入らない場合と、何度も塑性域での繰り返しを受ける場合では構造物の損傷の度合が異なると推定される。累積塑性率はこの差異を示すことができる指標である。塑性率と累積塑性率の間には、

$$\eta \geq \mu - 1 \quad (4)$$

の関係が存在する。等号は、地動の継続時間の間に一度のみ塑性に入る場合に成立する。以下に一質点系の簡単な構造物を用いて、塑性率と累積塑性率を比較・検討することにした。

(1) 対象とした構造物

対象とした構造物は、鉄筋コンクリート構造物を念頭におき、比較的短周期の構造物 $T=0.15\text{sec}$ (弾性時の固有周期) とその値より少し長周期の構造物 $T=0.6\text{sec}$ を選んだ。減衰定数は、一定値として $h=0.05$ とした。系の復元力特性は、図3に示すような *Ri-leaner* モデルとして、2次剛性を初期剛性の0.05倍とした。降伏耐力、変位、せん断力などは、系に入力される地動の最大加速度を用いて、次式のように無次元量とし、 γ の値を、

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= Q_y / (m \cdot \ddot{z}_{max}) \\ \xi &= \delta / \delta_y \\ q &= Q / Q_y \end{aligned} \right\} (5)$$

パラメータとした。表1に、解析モデルの構造特性の一覧を示す。

(2) 入力地震動

構造物に入力される地震動の性質は、地震自体の規模およびその特性とともに、震源地から対象として構造物の建設地点までの距離や表層地盤特性で表される。よって、入力波のパラメータとしては、次のような

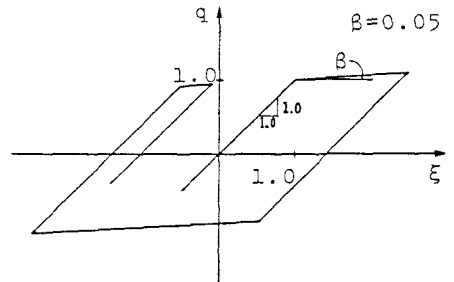


図3 系の復元力特性

	T (sec)	δ_y (cm)	Q_y (ton)	W (ton)	h	β
Case A	0.15	0.17	294	980	0.05	0.05
Case B	0.6	2.68	294	980	0.05	0.05

表1 構造物の特性

因子が考えられる。

- ① 最大加速度 (\ddot{Z}_{max})
- ② 継続時間
- ③ 地震動のエネルギー量
- ④ 周波数特性

これらの因子を考慮して、① Band limited white noise を利用した人工地震波、②金井・田治見のスペクトル^{11) 12)}を用いた人工地震波、③実地震波の3種類の地震動を設定した。

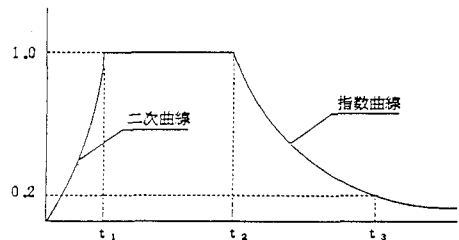
①での Band limited white noise は、周波数特性を持たない波であり、パワースペクトル密度は、 $T_g=0.05\sim 2.0\text{sec}$ の一樣分布とした。②では、地盤の特性を持たせた波であり、地盤特性は、(6) 式¹¹⁾の金井・田治見によるスペクトルを利用し、2種地盤を想定し $T_g=0.6\text{sec}$, $H_g=0.4$ を採用した。

$$S(\omega) = \frac{1 + 4 (H_g C_\omega)^2}{(1 - C_\omega^2)^2 + 4 (H_g C_\omega)^2} \quad C_\omega = \frac{\omega}{\omega_g} \quad (6)$$

地震動の包絡線は、地震の大きさにより決まる値であり、ここでは、Jenningsらによる方法¹³⁾で M6, M7, M8 に対応するものを利用した。継続時間も、同様な方法によった。図4・aに、Jenningsらの包絡線の形状を示す。

最大加速度は、まれにしか生じない地動から、耐用期間内に一度生ずる可能性のある地動の範囲として、590gal, 420gal, 295galのパラメータ ($\gamma=0.5, 0.7, 1.0$) とした。また、実地震波も、最大加速度を同様な値に合わせた。図4・bに、人工地震波形の Band limited white noise の例を示す。

このようにして作成された入力波形を用いて、塑性率と累積塑性率の比較をモデルの構造物を通して検討する。前にも述べたように、累積塑性率は、地震動による繰り返し力を評価できるという点が、有効であると考えているので、入力波の継続時間が、構造物の損傷の両指標にどのように影響するのかを比較する。ここで言う、地震動の継続時間は、次の定義により決められたものとする。継続時間は、工学的には、構造物に影響を及ぼす時間と考えられる。しかし、継続時間の定義はいろいろ提案されているが、明確な方法がないのが現状である。そのため、



Magnitude	t ₁ (sec)	t ₂ (sec)	t ₃ (sec)
M6	2.0	4.0	10.0
M7	4.0	15.0	30.0
M8	4.0	35.0	80.0

図4・a 地震波の包絡線 (Housner and Jennings)

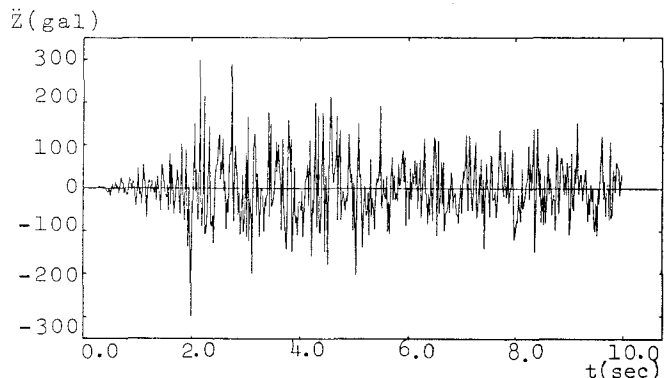


図4・b Band Limited White Noise ($\ddot{Z}_{max}=300\text{gal}, M6$)

Trifunac and Brady⁽⁴⁾によるパワーの蓄積時間に基づく継続時間⁽⁵⁾の決め方を利用し、全パワーの5%~95%の値になる時間を有効継続時間と定義した。図5に、継続時間を決定した地動の例を示す。

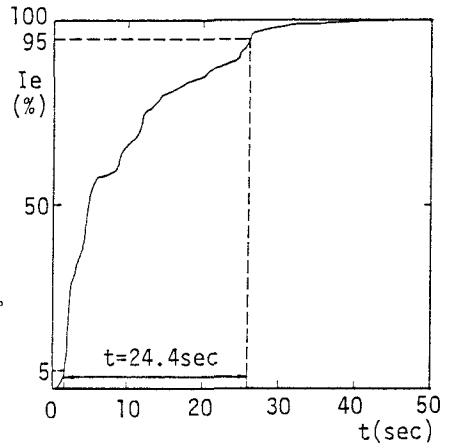


図5 地震動の有効継続時間 (El Centro 1940 NS)

Band limited white noiseを用いた入力波は、 $T=0.05\sim 2.0\text{sec}$ の構造物に影響する範囲でのwhite noiseであり、特性を持たない波形のように見える。しかし、周期の短い波ほど継続時間内の出現回数が多くなっており、 $T=0.6\text{sec}$ の構造物の応答値は小さい。そのため、 $T=0.15\text{sec}$ の構造物の応答に注目して、有効継続時間の影響を比較する。図6は、 $\gamma=0.5, 0.7, 1.0$ の場合について、塑性率 μ と累積塑性率 η を有効継続時間を変えて求めたものを示している。この図より、塑性率は有効継続時間に無関係にほぼ一定の値となり、一方、累積塑性率は、有効継続時間が長くなるにつれて増加している。このように、塑性率は、地動の継続時間の間にかかる塑性変形の繰り返しの影響を反映することができない。しかし、累積塑性率ではそれが可能である。図7に、構造物が塑性に入る回数を示す。ここで、塑性回数の定義として、正の方向に塑性化した後、負の方向に塑性化してはじめて1回と数えた。そして、一方向だけ何度塑性域に入入りしても塑性の回数に考慮しなかった。この理由として、損傷に結びつく塑性とは、正負の繰り返しがあって初めて、損傷を受けると考えたからである。図にみられるように、塑性の繰り返し回数は、入力波の継続時間が長くなればなるほど塑性の繰り返し回数は増大する。しかし、継続時間1秒当たりの塑性回数になおすと、図8のようになり、1秒間に1~2回の塑性の入力回数となっている。

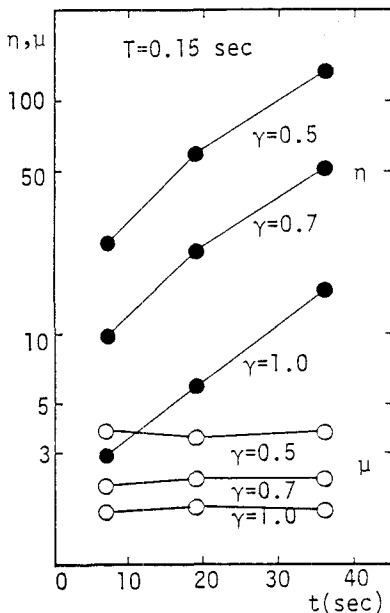


図6 入力波の有効継続時間を変化させた場合の塑性率と累積塑性率 (Band Limited White Noise)

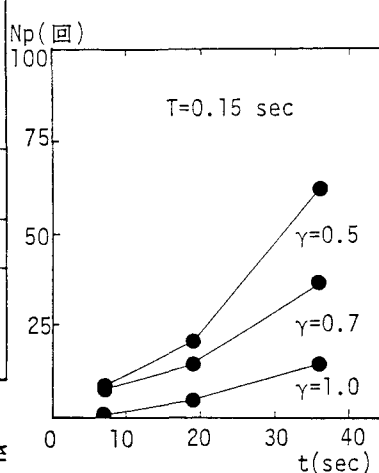


図7 塑性に入る回数 (Band Limited White Noise)

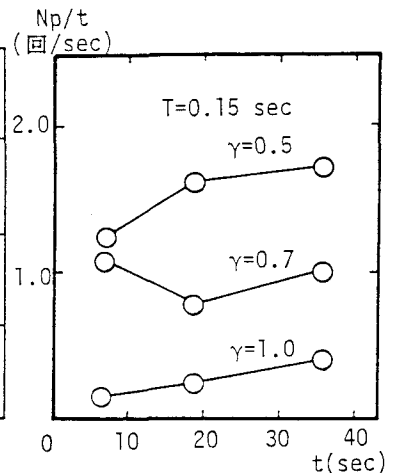


図8 1秒あたりの塑性回数 (Band Limited White Noise)

ている。

金井・田治見のパワースペクトル密度のモデルにより作成された人工地震波による応答値は、地動の卓越周期を $T=0.6\text{sec}$ としたため、 $T=0.15\text{sec}$ の構造物よりも、 $T=0.6\text{sec}$ の場合の方が応答値は大きくなる。応答値の大きい $T=0.6\text{sec}$ の構造物に注目すると図9のようになる。

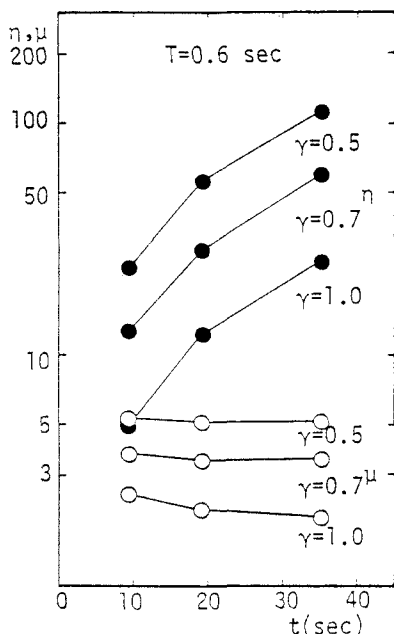


図9 入力波の有効継続時間を変化させた場合の塑性率と累積塑性率
(金井・田治見モデルによる人工地震波)

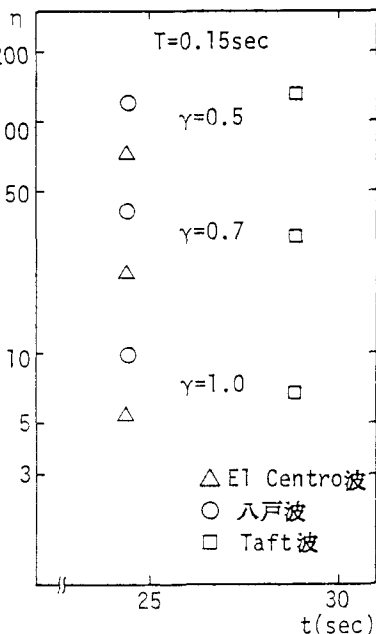


図10 実地震波による累積塑性率と有効継続時間
有効継続時間はほぼ同じであることと考えると、むしろ地動の周波数特性の影響が大きいようである。

前述の white noise と同様に、塑性率は、ほぼ一定値を取るのに対して累積塑性率は主要動の継続時間が長くなるにつれて増加する。同様に塑性の繰り返し回数についても、同様に継続時間が長くなるにつれて増加するが、1秒あたりの塑性回数になおすと1～2回と、継続時間とはほぼ無関係となる。

図10は実地震波と有効継続時間の関係を示している。パラメータは当然ではあるが、累積塑性率に大きな影響を与えている。しかし地動の有効継続時間の影響は顕著ではない。E1 Centro波と八戸波の

また、図11は、E1 Centro波、Band limited white noise、八戸波の最大加速度を420galに調整した波の実時間に対する1質点系の塑性入力状況を示している。E1 Centro波と八戸波の有効継続時間は、ほぼ同じとなるが、塑性変形を生じる時間幅は、八戸波がE1 Centro波と比べ広い範囲にわたっていることがわかる。このことは、地震波の周波数特性が累積塑性率に大きな影響を与えていることを意味している。また

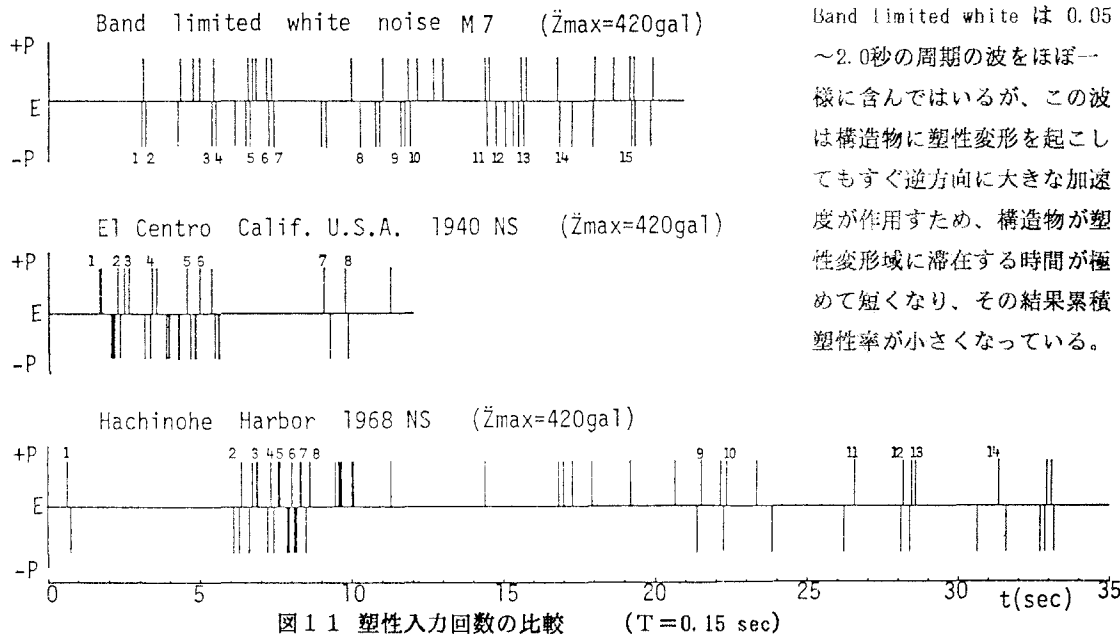


図11 塑性入力回数の比較 (T=0.15 sec)

Band limited white は 0.05～2.0秒の周期の波をほぼ一様に含んでいるが、この波は構造物に塑性変形を起こしてもすぐ逆方向に大きな加速度が作用するため、構造物が塑性変形域に滞在する時間が極めて短くなり、その結果累積塑性率が小さくなっている。

4. 入力波の性質が構造物に及ぼす影響

入力波の性質としては、前章で説明したように、①最大加速度、②継続時間、③エネルギー量、④周波数特性などが考えられる。ここでは、前章で説明した構造系 $T=0.15\text{sec}$, $T=0.6\text{sec}$ で、それらの入力波の性質が構造系に影響する因子について検討する。

(1) 最大加速度

Jenningsによる M6, M7, M8 の包絡線を用い、最大加速度を変えて ($\gamma=1.0, 0.7, 0.5$) Band limited white noise を作成し、それ等の波を用いて求めた塑性率、累積塑性率を図12・aに示す。また、El centro波、Taft波、八戸波の最大加速度を変え ($\gamma=1.0, 0.7, 0.5$) 同様の計算を行った結果を図12・bに示す。これ等の結果は最大加速度が増加すると塑性率と累積塑性率の両指標とも、増加することを示している。本論文に記載していないが、塑性の繰り返し回数 N_p についても同様の結果を得ている。

(2) 継続時間

地震動の継続時間について、定説がないようであるが、本論文では構造物の応答に有意な継続時間として文献(4)に基づき図5で示した継続時間を採用し、有効継続時間と定義した。図6及び図9は人工地震波の加速度が同じでも有効継続時間が長くなると累積塑性率は増加する。一方塑性率はほとんど変化していないことを示している。また図10は、実地震波について有効継続時間と累積塑性率の関係を示したものである。八戸波と El centro波は、ほぼ有効継続時間が同じであるが、累積塑性率は八戸波による結果が大きくなっている。これは、実地震波の周波数特性の違いによるものと思われる。塑性率についても同様の結果を得ている。

(3) エネルギー量

地震動のエネルギーは、継続時間や最大加速度等により決まる値である。ここでは入力波のエネルギーとして、次式のように入力加速度の2乗したものを地動終了時まで積分したパワーを考えた。

$$I_0 = \int_0^{t_0} \ddot{z}_0^2 dt \quad (7)$$

ここでは、前に示したJenningsらによる M7 に相当する包絡線で作成された最大加速度295galの人工地震波のパワーを基準とした。包絡線の主動部の継続時間 t_2-t_1 を基準値の11秒に対し6秒、及び1秒としたものを用い、基準とした人工地震波のパワーと同じになるように最大加速度を設定した。こ

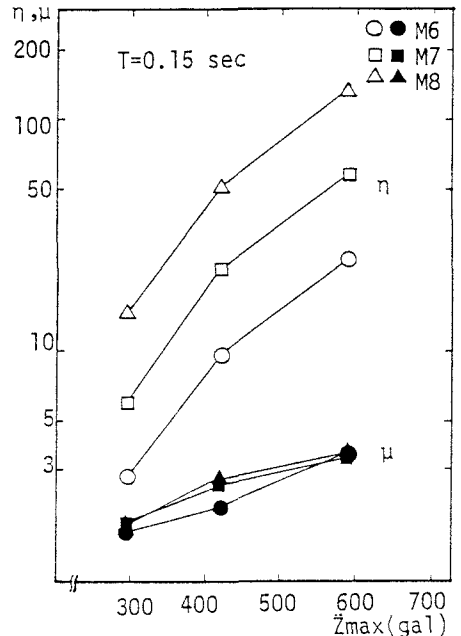


図12・a 入力波の最大加速度が塑性率、累積塑性率に及ぼす影響 (Band Limited White Noise)

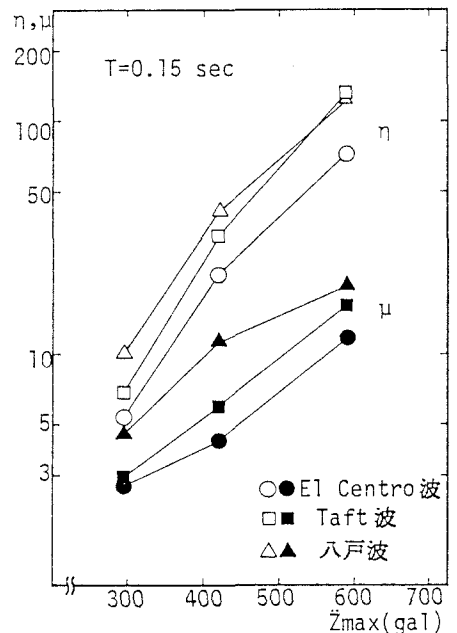


図12・b 入力波の最大加速度が塑性率、累積塑性率に及ぼす影響 (実地震波)

の3種類の継続時間についてBand limited white noiseを用いた試算結果を図13・aに示す。図12のように、単に最大加速度を増加させた場合と比べ、塑性率ではほぼ同じような増加傾向を示しているが、累積塑性率は、入力波のパワー一定の時、変化が非常に小さい。図14にこのときの塑性変形の繰り返し回数

N_p を示している。最大加速度が大きくなると継続時間が短くなるが、 N_p はほとんど変化がない。このことは、累積塑性率の変動が小さいことを裏付けている。図13・bは基準となる人工地震波のパワーと一致するように、実地震波の最大加速度を設定し、応答解析した結果である。累積塑性率は、3種類の実地震波でほぼ一定と見ることができ

る。金井・田治見モデルでの人工地震波では、図15に示すように地盤の卓越周期 $T_g=0.6\text{sec}$ が構造物の固有周期と一致した場合、累積塑性率は一定値を取るが、構造物が固有周期 $T=0.15\text{sec}$ の時、加速度が大きくなるにつれて、累積塑性率は大きくなる。この理由としては、固有周期 $T=0.15\text{sec}$ が塑性化すると等価な固有周期が延びるため、地盤の卓越周期に近づき、最大加速度が大きくなるほどその傾向がでやすいためである。

(4) 周波数特性

入力波の特性の1つは、その卓越周期である。波の卓越周期と構造物の固有周期の関係が構造物の応答、即ち塑性率、累積塑性率に大きく影響していることは図15からも明らかである。ここ

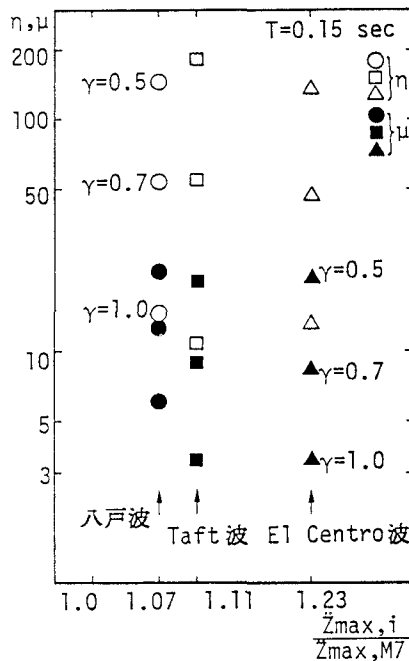
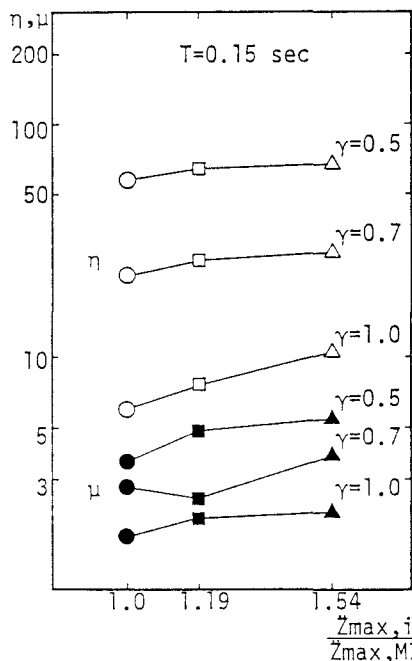


図13・a パワーが一定の場合の塑性率と累積塑性率 (Band Limited White Noise) 図13・b パワーが一定の場合の塑性率と累積塑性率 (実地震波)

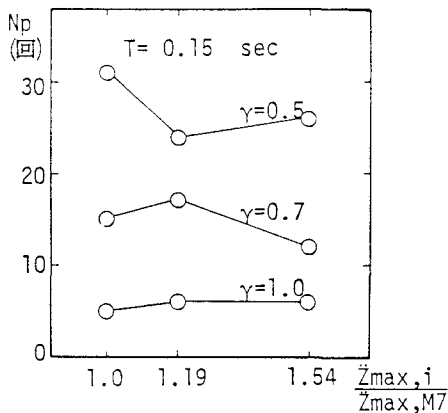


図14 パワーが一定の場合の塑性の繰返し回数 (Band Limited White Noise)

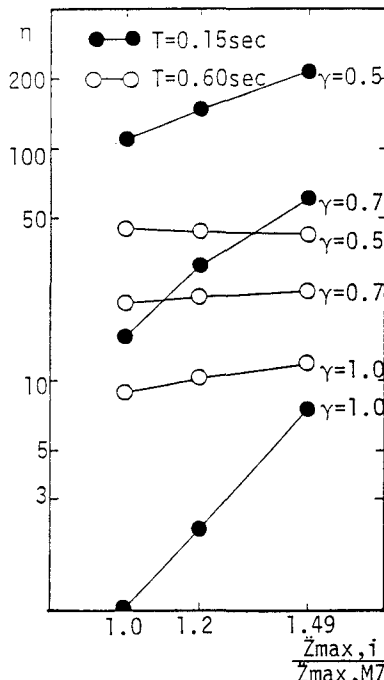


図15 パワーが一定の場合の累積塑性率 (金井・田治見モデル)

では波形の複雑さをパワースペクトルの分布形状の点に着目する。このパワースペクトルの分布形状の複雑さの尺度とし、Entropy¹⁶⁾¹⁷⁾を考える。Entropyの計算では、地震動のパワースペクトル分布の10Hz以下を考慮し、横軸は振動数で0.1Hz巾のヒストグラムを求め、縦軸はヒストグラムの総面積が1となるように調整した。Entropyは

$$E = - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1.0$$

で求めることができる。ここではn=100、この計算では自然対数を用いているのでEntropyの単位はナット(nat)となる。一般にEntropyが大きいたることは情報量が多いということであるが、この場合どの周波数が特に卓越と言えないことを意味している。即ちWhite noiseのEntropyが大きくなっている。また逆にEntropyが小さいと言ふことは周波数特性が強いと言ふことになる。M6, M7, M8のJennings包絡線を用いて人工地震波を作成しているため、有効継続時間がEntropyに及ぼす影響を調べた。その結果を図16に示す。有効継続時間が20sec以上となるとEntropyの値はほぼ一定となっている。また実地震波のEntropyを併せて図16に記した。実地震波のEntropyは、White noiseと特性のある波の間の値となっている。

構造物の固有周期0.6secとし、前節で述べたようにパワーを一定とした人工地震波、実地震波を用いて得られた累積塑性率とそれらの波のEntropyの関係を図17に示す。Entropyの小さい方が累積塑性率が大きくなる傾向がある。

5. 結論

本研究は、入力地震動の特性が、構造物の損傷に寄与する塑性ひずみエネルギーにどのように影響するかを検討するものである。使用した実地震波の数も少なく、一般性に欠けることもあるが、次のような成果が得られた。

- (1) 地震波の周波数特性が同じであるなら、累積塑性率は地震動の有効継続時間が長くなるにつれ、増大するが、塑性率はほぼ一定である。また更に有効継続時間も同じであるとすると、 γ の値が小さくなるに従い、 μ 、 η は増加する。(図6・9)
- (2) 有効継続時間がほぼ同じ長さである場合、周波数特性の違いが累積塑性率に影響している。(図10)
- (3) 入力地震動のパワーを一定とした場合、塑性率は、最大加速度が大きくなるにつれて増大するが、累積塑性率の増加は、単に最大加速度を変化させた場合と比べ僅少である。(図13 a, b)
- (4) Band limited white noiseを利用した人工地震波は、同じ最大加速度、継続時間を持つ実地震波よりも、塑性率、累積塑性率の応答値は小さくなる。その理由として、入力波の波形が複雑なため塑性域に達し

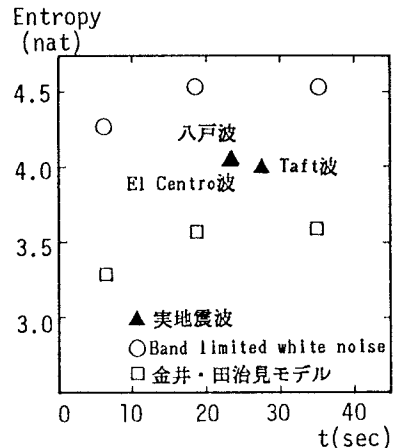


図16 有効継続時間がEntropyに及ぼす影響 (実地震波, 人工地震波)

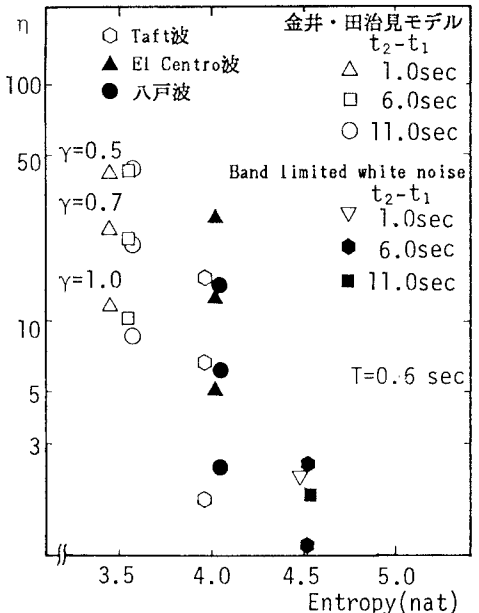


図17 パワーが一定の場合の累積塑性率とEntropyの関係 (実地震波, 人工地震波)

ても、すぐに逆方向の加速度により塑性の進行が打ち消されるためである。

(5) 実地震波の Entropy は、White noise の Entropy 及び、特性のある人工地震波の Entropy の中間の値となる。また、一般性には欠けるが Entropy の小さいほど累積塑性率が大きくなる傾向がある。

(図16, 17)

<謝辞>

本研究に関し、東京電機大学理工学部奥村教授には、常に適切な助言を頂いた、ここに深く感謝致します。また、同教授の卒論生笠原健一氏、西条徳人氏には論文作成に協力を頂いたことに対し深く感謝いたします。

(参考文献)

- 1) Housner, G.H, Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proc of 1th WCEE
- 2) 加藤 勉、秋山 宏、強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷、日本建築学会論文報告集、第 235号、昭和50年 9月
- 3) 秋山 宏、「建築物の耐震極限設計」、東京大学出版会、1980年 9月
- 4) 安藤範平、手塚武仁、峯岸茂、田中恵司、地震時に構造物が消費する塑性エネルギーについて、(その1~その3) 日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和52年10月
- 5) 大野友則、西岡 隆、藤野陽三、構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価、土木学会論文報告集、第 333号、1983年 5月
- 6) Ohno, T and Nishioka, T, Relation between the Hysteretic Characteristics of Structures and the Plastic Energy Dissipation under Earthquake Motion, Proc. of the 6th Earthquake Engineering Symposium
- 7) 山原 浩、エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答、日本建築学会論文報告集、第 187号、昭和46年 9月
- 8) Zahrah, E.F, William J.H, Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures, ASCE, Vol. 110, SF8, August, 1984
- 9) 星谷 勝、山崎武文、地震動エネルギーに基づく応答解析、土木学会論文報告集、第 291号、1979年11月
- 10) 大崎順彦、「地震と建築」、岩波新書、1983年 8月
- 11) 田治見宏、「建築振動学」、コロナ社、1982年 9月
- 12) 柴田明德、「最新耐震構造解析」、森北出版、1981年 6月
- 13) 「地震と地盤振動シンポジウム 10年の歩み」、日本建築学会、1983年 7月
- 14) Trifunac, M.D., and Brady, A.G., A Study on the duration of strong earthquake ground motion, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 65, No3, 1975
- 15) 神山 真、地盤の影響を考慮した震動継続時間およびその関連パラメーターの統計解析、土木学会論文集、第 350号、1984年10月
- 16) 日野幹雄、「スペクトル解析」、朝倉書店、1977年10月
- 17) 金井秀樹、「情報理論」、昭晃堂、1984年10月

(1985年10月18日受付)