

論文 RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響

井上範夫*¹・堀 則男*²・中村孝也*³

要旨：RC 構造物の応答・損傷の評価に際しては、最大応答値と繰り返し応答性状を併せて考慮することが必要である。このため、RC 構造物の地震時エネルギー応答性状の検討を行い、地震動のエネルギー入力性状が与える影響について考察を行った。エネルギーの入力過程を瞬間入力エネルギーで評価することによって、地震動特性の違いによる RC 構造物の応答性状の評価が可能であると思われる。

キーワード：エネルギー応答、RC 構造物、瞬間入力エネルギー、1 自由度質点系

1. はじめに

構造物の地震時応答においては、急激なエネルギー入力によって大変形が生じる場合や、地震動の繰り返し効果によって累積損傷を受ける場合などが考えられる。構造物の応答には地震動エネルギーの入力の激しさが影響していると考えられ、地震動のエネルギー入力と構造物のエネルギー消費のメカニズムについて明らかにしていくことが必要である。本稿では RC 構造物の地震時エネルギー応答性状の検討を行い、地震動のエネルギー入力性状が応答変形に及ぼす影響について考察する。

2. 解析手法

弾塑性応答解析においては RC 構造物を対象とし、図 1 に示す Takeda モデル型の復元力特性を有する 1 自由度質点系を用いる。初期剛性 K_0 、降伏時剛性 K_y に対して、降伏時剛性低下率 $K_y/K_0 = 0.3$ とし、初期周期 T_0 、降伏時周期 T_y を次式のように与える。

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{K_0/m}} \quad (m \text{ は質点の質量}) \quad (1)$$

$$T_y = \frac{2\pi}{\sqrt{K_y/m}} = \frac{T_0}{\sqrt{0.3}} \approx 1.83T_0 \quad (2)$$

また、粘性減衰は瞬間剛性比例とし、減衰定数 $h = 0.05$ とする。

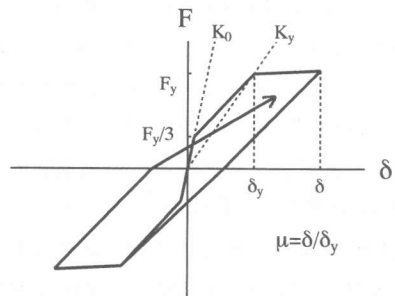


図 1 復元力モデル

3. 観測地震動による応答性状

図 2 及び表 1 に示す 4 種の観測地震動を用いて検討を行う。東北大波、釧路波は海洋型地震、Sylmar 波、神戸波は直下型地震である。また、表 1 に示す最大速度 V_{max} は、固有周期 10 秒、減衰定数 0.707 の弾性 1 質点系の応答最大速度とした^[1]。

*1 東北大学助教授 工学研究科都市・建築学専攻、工博（正会員）

*2 東北大学助手 工学研究科都市・建築学専攻、工博（正会員）

*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻

表 1 観測地震動

観測地・成分	地震名	A_{max} (cm/s^2)	V_{max} (cm/s)
東北大学建設系 NS	1978年 宮城県沖地震	258.2	41.6
釧路気象台 N63E	1993年 釧路沖地震	711.4	
Sylmar County Hospital NS	1994年 Northridge 地震	826.8	121.6
神戸海洋気象台 NS	1995年 兵庫県南部地震	817.8	82.6

3. 1 地震動の総エネルギー入力

1自由度質点系の運動方程式の各項に微小変位 $dx = \dot{x}dt$ を乗じて継続時間 T で積分すると、エネルギーのつり合い式が得られる。

$$\int_0^T m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^T D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_0^T F(x)\dot{x}dt = -\int_0^T m\ddot{x}_0\dot{x}dt \quad (3)$$

ここで、 x は質点の相対変位、 $D(\dot{x})$ は減衰力、 $F(x)$ は復元力、 \ddot{x}_0 は地動加速度である。

(3)式の左辺第1項を運動エネルギー E_V 、第2項を減衰消費エネルギー E_D 、第3項を履歴消費エネルギー E_H 、右辺を地震動入力エネルギー E_I とする。ここで履歴消費エネルギー E_H は、弾性歪エネルギーと塑性歪エネルギーの両者を併せたものである。

弾性時の速度応答スペクトル S_V を図3に、地震動入力エネルギー E_I をエネルギー等価速度 $V_I = \sqrt{2E_I/m}$ に置換して図4に、それぞれ示す。

Sylmar 波や神戸波は S_V 、 V_I とともに大きな値を示しており、また比較的広い周期範囲に及んでいる。東北大波や釧路波の S_V はそれほど大きくないが、東北大波で1.0秒、釧路波で0.3秒の付近で V_I が大きな値を示しており、継続時間内の繰り返しによるエネルギー入力で損傷を与えるタイプの地震動であるといえる。

3. 2 エネルギーの入力過程

地震動を受けた RC 構造物の損傷には、繰り返しの効果による累積損傷と、急激なエネルギー入力による大変形が考えられる。このような地震時応答性状の違いを評価するため、構造物へ地震動のエネルギーが入力されていく過程についての検討を行う。

瞬間入力エネルギー 地震動エネルギーの入力の激しさを表す指標として、ここでは図5に

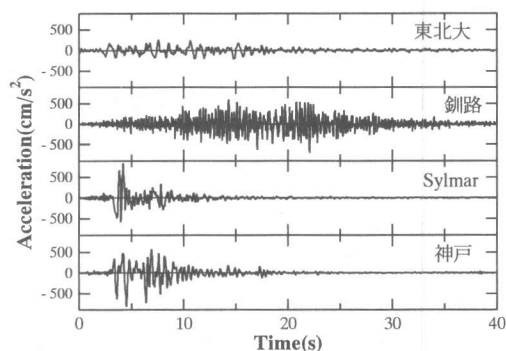


図2 観測地震動

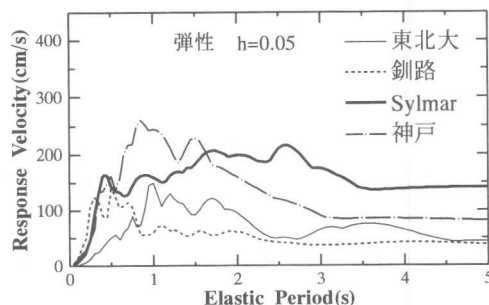


図3 速度応答スペクトル (弾性)

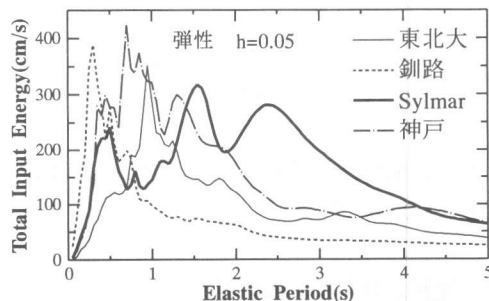


図4 地震動入力エネルギー (弾性)

示すような瞬間入力エネルギー ΔE を用いる。

E_I は地震動によって入力されたエネルギーであるが、運動エネルギー E_V の値が 0 から再び 0 になるまでの時間 Δt において構造物が消費したエネルギー ($E_D + E_H$) を考えて、これに対応する E_I の増分を (4) 式の瞬間入力エネルギー ΔE と定義する。この定義では Δt は履歴ループ 1/2 サイクルの時間に対応しており、各サイクルごとに異なる値をとる。

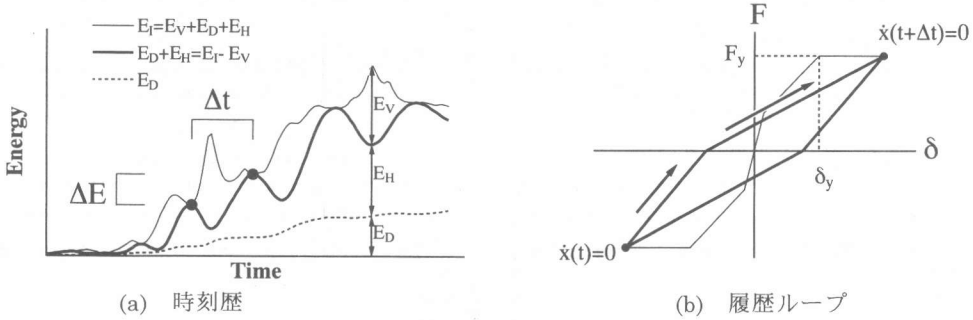


図5 エネルギー応答のモデル

$$\Delta E = \int_t^{t+\Delta t} D(\dot{x}) \dot{x} dt + \int_t^{t+\Delta t} F(x) \dot{x} dt = - \int_t^{t+\Delta t} m \ddot{x}_0 \dot{x} dt \quad (4)$$

また、瞬間入力エネルギー ΔE の最大値を瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} とし、 ΔE_{\max} が入力されたときの Δt を $\Delta t_{(\max)}$ と表す。

応答の時刻歴 質量

$m = 1 \text{ t} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$ 、減衰定数 $h = 0.05$ 、初期周期 $T_0 = 0.5$ 秒及び 1.0 秒の弾塑性 1 質点系に対して、応答最大塑性率 $\mu = 2.0$ となるような地震動の大きさをそれぞれの地震動について算定して、表 2、3 に示す。なお降伏ベースシア係数 C_B の値は $T_0 = 0.5$ 秒に対して $C_B = 0.3$ とし、 $T_0 = 1.0$ 秒に対しては振動特性係数 R_I (第 2 種地盤) を考慮して $C_B = 0.273$ と低減した。これは各初期周期ごとに、同一の構造物に対して同等の損傷(応答最大塑性率)を与えるように、地震動の破壊力を規準化することを目的としている。

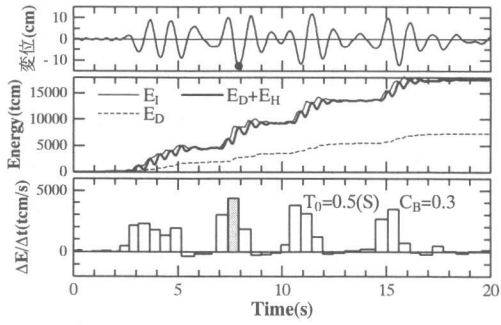
表 2 $T_0 = 0.5$ 秒の場合の入力地震動の大きさと応答値

	A_{\max} (cm / s^2)	V_{\max} (cm / s)	E_I (t m)	ΔE_{\max} (t m)	$\Delta t_{(\max)}$ (s)
東北大	253.1	40.8	185.6	21.8	0.50
釧路	1329.9	60.8	150.9	33.7	0.35
Sylmar	502.5	73.9	42.1	22.6	0.62
神戸	259.9	26.3	45.7	25.3	0.48

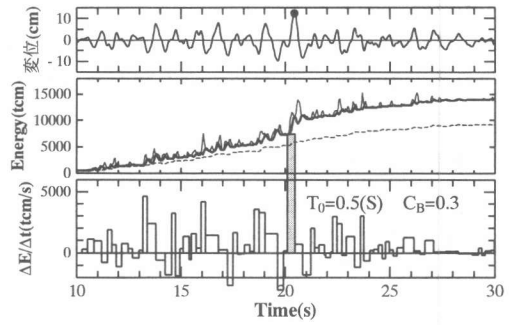
表 3 $T_0 = 1.0$ 秒の場合の入力地震動の大きさと応答値

	A_{\max} (cm / s^2)	V_{\max} (cm / s)	E_I (t m)	ΔE_{\max} (t m)	$\Delta t_{(\max)}$ (s)
東北大	455.3	73.4	218.3	77.5	1.08
釧路	3295.5	150.8	368.0	69.0	0.45
Sylmar	630.2	92.7	203.0	84.6	0.96
神戸	1262.5	127.6	241.3	84.1	0.94

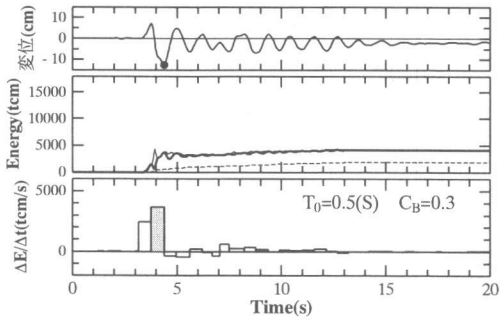
このような地震動によって応答解析を行い、得られた応答変形、エネルギー応答、瞬間入力エネルギーの時刻歴を図 6、7 に示す。ここで、瞬間入力エネルギー ΔE のグラフの縦軸は $\Delta E / \Delta t$ で示しており、ヒストグラムの面積がエネルギー ΔE を表している。また、網掛け部が ΔE_{\max} を示す。



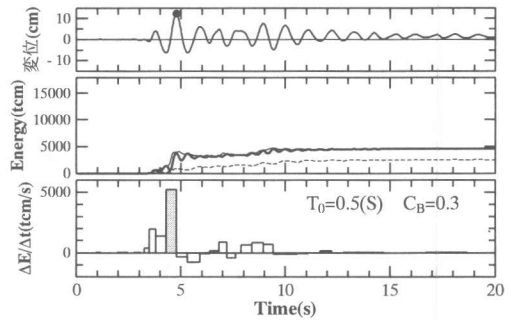
(a) 東北大学建設系 NS



(b) 釧路気象台 N63E

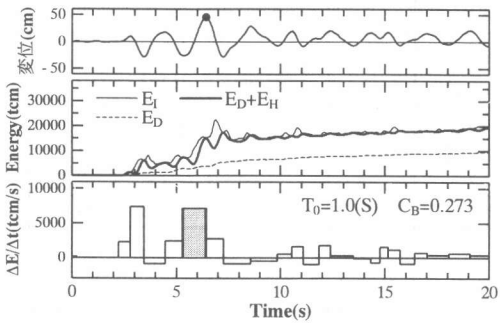


(c) Sylmar NS

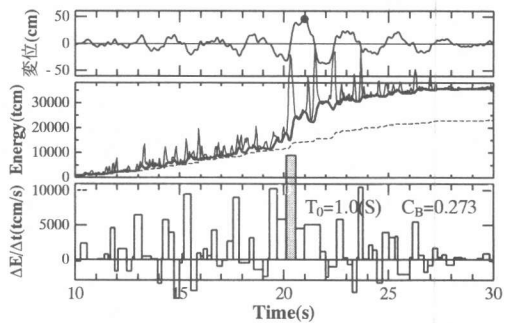


(d) 神戸海洋気象台 NS

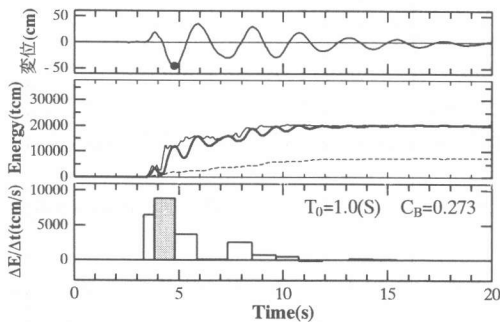
図6 初期周期 $T_0=0.5$ 秒の場合の応答の時刻歴 (弾塑性)



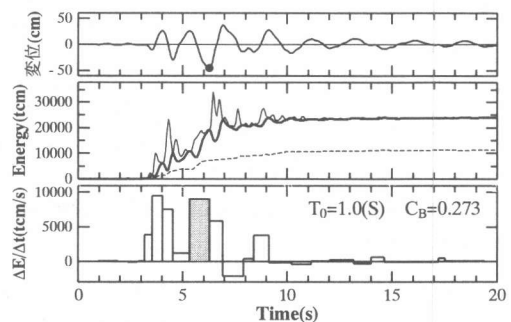
(a) 東北大学建設系 NS



(b) 釧路気象台 N63E



(c) Sylmar NS



(d) 神戸海洋気象台 NS

図7 初期周期 $T_0=1.0$ 秒の場合の応答の時刻歴 (弾塑性)

図 6、7 から、 ΔE と応答変形には対応関係があり、 ΔE_{\max} が入力されたときに応答最大変形が生じる傾向があるといえる。また、Sylmar 波と神戸波は入力エネルギーのほとんどが最初の数回に集中しており、建物に対する瞬間的な破壊力が大きいと考えられる。一方、東北大波と釧路波はエネルギーが入力している時間が長く、構造物は何度もエネルギー入力を受けて損傷が累積すると考えられる。

総エネルギー入力 E_I 、瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} 、 ΔE_{\max} が入力されたときの時間 $\Delta t_{(\max)}$ を表 2、3 に併せて示す。 A_{\max} 、 V_{\max} 、 E_I は地震動ごとに大きな違いがあるものの、 ΔE_{\max} は $T_0=0.5$ 秒の釧路波を除いて、それぞれの初期周期ごとに比較的類似した値であり、 ΔE_{\max} と応答最大変形には関連性があると考えられる。 $\Delta t_{(\max)}$ は、各初期周期ごとに $T_y/2$ ($T_0=0.5$ 秒では 0.46 秒、 $T_0=1.0$ 秒では 0.91 秒) に近い値であるが、釧路波のみは小さい値を示しており、構造特性よりも入力地震動の特性が強く現れたものと思われる。

4. モデル波による応答性状

地震動による RC 構造物のエネルギー応答性状を理解するため、図 8 に示すような加速度時刻歴を持つモデル波を入力地震動とした検討を行う。Gabor 波は海洋型地震のような定常的な地震動、Ricker 波は直下型地震のような衝撃的な地震動のモデルとして用いており、両者とも卓越周期は 0.5 秒としている。

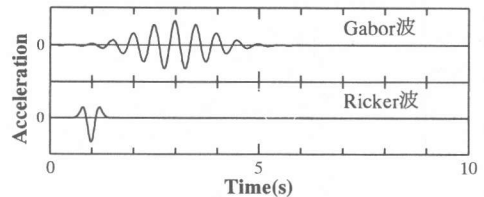


図 8 モデル波

応答の時刻歴 観測地震動の場合と同様に、初期周期 $T_0=0.5$ 秒及び 1.0 秒の弾塑性 1 質点系に対して、応答最大塑性率 $\mu=2.0$ となるような地震動の大きさをそれぞれ算定して表 4 に示す。また、このような地震動によって応答解析を行い、得られた応答変形、エネルギー応答、瞬間最大入力エネルギーの時刻歴を図 9、10 に示し、総エネルギー入力 E_I 、瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} 、 ΔE_{\max} に対応する $\Delta t_{(\max)}$ を表 4 に併せて示す。

Gabor 波は地震動エネルギーが連続的に入力されており、構造物の履歴繰り返し回数も多くなっている。Ricker 波はエネルギー入力が 1、2 回の ΔE に集中しており、総エネルギー入力 E_I は Gabor 波と比較してかなり小さくなっている。

表 2、3、4 を見ると、各初期周期ごとに A_{\max} 、 V_{\max} 、 E_I の値は地震動の種類による差が大きいですが、 ΔE_{\max} の値は比較的近似しており、 ΔE_{\max} と応答変形には関係があることが伺える。ここで、Ricker 波の場合、 ΔE_{\max} は観測地震動よりもかなり大きめの値となっているが、これは衝撃的な地動入力によって片振幅の応答になっているためと考えられる。図 10(b)の場合、 ΔE_{\max} の次に入力される ΔE において最大応答変形が生じているので、そのときの ΔE の値を求めてみると、 $\Delta E=69.8(\text{tm})$ で

あり、これは観測地震動による応答で入力される ΔE_{\max} (表 3) と類似した値といえる。

表 4 入力地震動の大きさと応答値

T_0 (s)	入力波	A_{\max} (cm/s^2)	V_{\max} (cm/s)	E_I (t m)	ΔE_{\max} (t m)	$\Delta t_{(\max)}$ (s)
0.5	Gabor 波	1464.9	116.0	130.8	21.1	0.26
	Ricker 波	713.1	52.6	41.7	32.2	0.31
1.0	Gabor 波	6252.1	495.0	674.2	107.9	0.26
	Ricker 波	4120.2	303.7	190.5	120.7	0.51

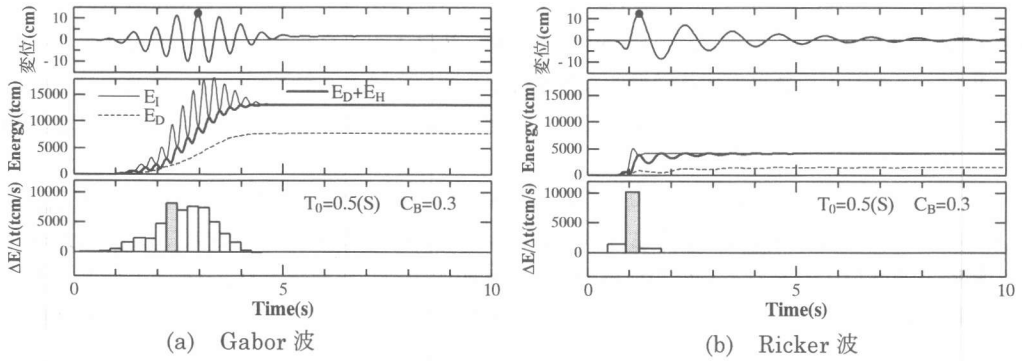


図9 初期周期 $T_0=0.5$ 秒の場合の応答の時刻歴（弾塑性）

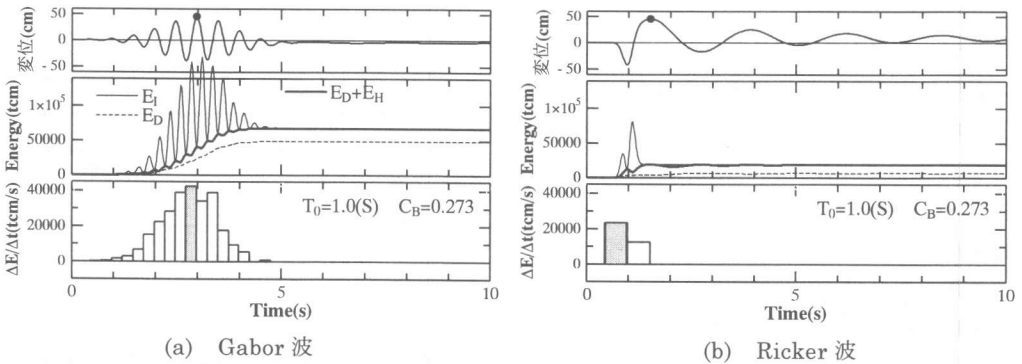


図10 初期周期 $T_0=1.0$ 秒の場合の応答の時刻歴（弾塑性）

5. まとめ

本研究では、履歴ループ1/2サイクルの間での瞬間入力エネルギー ΔE を定義し、RC構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響について検討を行った。 ΔE と応答変形は深い関連性があると考えられ、構造物の最大応答推定に利用できる可能性があるといえる。また、東北大波や釧路波のような海洋型地震では地震動エネルギーが連続的に入力され、Sylmar波や神戸波のような直下型地震では1、2回の衝撃的なエネルギー入力によって構造物の応答が励起されている傾向が明らかとなった。

定常的な両振幅の応答と衝撃的な片振幅の応答ではエネルギー入力性状が異なるので、地震動の破壊力特性の評価・分類と、入力地震動の破壊力特性を考慮したRC構造物の応答評価・耐震設計に対して、瞬間的なエネルギー入力の考え方を導入していくことが必要であると思われる。

【参考文献】

- [1]高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について，ビルディングレター，pp.49-50，1986.6
- [2]矢花修一，和泉正哲：地震時のエネルギー授受に着目した非線形応答推定，第9回日本地震工学シンポジウム，Vol.2，pp.1633-1638，1994.12
- [3]中村友紀子，壁谷澤寿海：RC構造物の地震時最大応答変形のエネルギー入力速度による推定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.251-256，1996.7