

論文 RC 構造の地震時最大塑性応答変形のエネルギー入力速度による推定

中村 友紀子*1, 壁谷澤 寿海*2

要旨：RC 構造物の耐震設計における限界状態を最大応答変形で定義するためには、地震動、構造物のパラメーターと最大応答変形の関係を一般的にあきらかにする必要がある。塑性応答変形に有効な地震動のパラメーターとしてエネルギー入力速度スペクトルを定義し最大応答値を推定する方法を示した。また、総エネルギー入力、継続時間との関係も検討した。

キーワード：エネルギー入力速度、応答変形、RC 構造物、限界状態設計法

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の限界状態設計では、供用期間中に構造物の基本性能として構造安全性がある確率以上で上回ることを目標に設計が行われる。終局限界状態では、大地震時には倒壊せず、人命が保護されれば、ある程度の損傷は許容している。このために一般に塑性域での限界状態を定義するには、応力による表現よりも応答変形によるのが適切である。最大応答変形を設計のクライテリアにするためには、入力地震動と塑性域での最大応答変形の関係が理論的な根拠があきらかな一般的な方法で設定されるのが望ましい。従来より、履歴減衰系の累積塑性応答変形に関しては、総エネルギー入力との間に極めて安定した関係があることが知られている [1]。これに対して、最大応答変形はむしろ単位時間あたりのエネルギー入力量（エネルギー入力速度）に支配されることが指摘されている [2]。本研究では、鉄筋コンクリート造建物を対象にして、塑性応答に有効なエネルギー入力速度の適切な定量化の方法を検討するとともに、これを用いて最大応答変形を推定する方法を示した。さらに、震源パラメーターとエネルギー入力速度との関係を一般化することを目指して、総エネルギー入力と継続時間との関係も検討したものである。

2. エネルギー入力速度

2. 1 エネルギー入力速度の定義

1 質点系の振動方程式に $dy = \dot{y}dt$ をかけて、時刻 $0 \sim t$ にわたり積分すれば (2) 式が得られる。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{y} \quad (1)$$

$$\int_0^t \ddot{x}\dot{x}d\tau + 2h\omega \int_0^t \dot{x}^2d\tau + \omega^2 \int_0^t x\dot{x}d\tau = -\int_0^t \dot{x}\ddot{y}_0d\tau \quad (2)$$

この右辺は、時刻 t までの地震動による構造物への単位質量当りのエネルギー入力の総量 $E_T(t)$ を表している。弾性応答解析により求まるエネルギースペクトルにより、地震動の総エネルギー

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学教授 地震研究所 王博 (正会員)

入力とは推定できる。また、応答が塑性域に及ぶ場合でも、周期を等価な周期に読み替えることによりおおむね推定可能である。しかし、単位時間内のエネルギー入力と履歴による消費エネルギーの関係を考えれば、最大変形に影響を及ぼすのはむしろ総エネルギー入力ではなく単位時間当たりのエネルギー入力量 V_D であることが予想される。

エネルギー入力速度は、エネルギー入力を (3) 式のように与えれば、この微分値として与えられ、速度応答と地動加速度との積であらわすことができる [3]。

$$E_T(t) = -m \int_0^t \dot{x}(\tau) \ddot{x}_0(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$EIR(t) = \left\{ \frac{\partial}{\partial t} E_T(t) \right\} / m = -\dot{x}(t) \ddot{x}_0(t) \quad (4)$$

しかし、この最大値は、あくまで瞬間の値であって、塑性応答量に対してはあまり意味をもたない。そこで、時間 Δt により平均化して、時間 Δt あたりの入力増分 ΔE を Δt で除したものをエネルギー入力速度と定義する。

$$\begin{aligned} V_D &= \{E_T(t) - E_T(t - \Delta t)\} / (m \cdot \Delta t) \\ &= -\int_{t-\Delta t}^t \dot{x}(\tau) \ddot{x}_0(\tau) d\tau / \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

2. 2 エネルギー入力速度の算定

1 質点系弾塑性応答解析をおこない、エネルギー入力速度、応答変形を算定する。

Δt は (6) 式であらわす等価周期 T_e とし 1 周期あたりのエネルギー入力速度をもとめた。

$$T_e = 2\pi \sqrt{(m / K_e)} \quad (6)$$

ここで、質量 $m = 1$ 、 K_e は等価剛性 $K_e = P_y / d_m$ とし、このとき P_y, d_m は正、負の最大耐力、応答変形の平均値をとった。減衰は、減衰定数 $H = 0$ とした。

解析結果を図 1 に◆印で示す。縦軸は V_D の最大値、横軸は T_e とした。解析にあたり、モデル、パラメーター、入力地震波は次のようにした。

復元力特性モデルは武田モデルをもちい、ひび割れ耐力 $P_c = 0.3P_y$ 、初期剛性 $K = 3 \times K_{ey}$ とし、徐荷時剛性 K_r は、(7) 式により求めた。

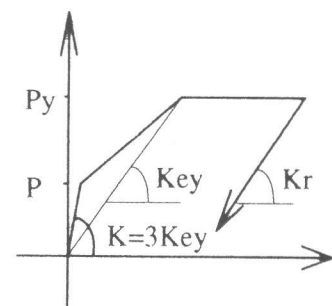
$$K_r = \frac{p_c + p_y}{d_c + d_y} \left| \frac{d_m}{d_y} \right|^{-\alpha} \quad (7)$$

ここに、 K ：初期剛性、 K_{ey} ：降伏時剛性、 K_r ：徐荷時剛性、

p_y ：降伏耐力、 p_c ：ひび割れ耐力、 d_y ：降伏変位、

d_c ：ひび割れ変位、 d_m ：最大変位、 α ：徐荷時剛性低下率

パラメータは、降伏耐力 P_c (0.2mg~0.6mg)、降伏点周期 T_{ey} (0.3~3.0s)、徐荷時剛性低下率 α (0.0, 0.8) の組み合わせ 12 種類とした。



また、地震波は以下の6種を用いた。東北大学 (NS、1978)、釧路気象台 (EW、1993)、神戸気象台 (NS、1995)、神戸葺合大阪ガス (N30W、1995)、建築センター模擬波2波 (レベル1、レベル2)、以下TOHNS, KSIEW, KOBNS, FIN30W, BCJL1, BCJL2と略称する。TOHNS、およびBCJL1は原波形を2倍して用いた。

2. 3 線形および非線形エネルギー入力速度スペクトル

1質点系の弾性解析を行い、地震動による単位質量当りの入力エネルギーについて固有周期 T あたりの入力増分 ΔE を T で除したものをエネルギー入力速度とする。各固有周期でのエネルギー入力速度の最大値をとりエネルギー入力速度スペクトルとした。減衰は、減衰定数 $H=0.0$ 、 0.05 、 0.20 として計算した値を図1に示す。弾性解析から求めたエネルギー入力速度は、非線形応答解析により求めたエネルギー入力速度と比較すると、弾性解析から求まるエネルギー入力速度が、周期が大きくなるほどエネルギー入力量が大きくなる領域では、スペクトルより小さい値となっているが、その外の領域では、よく対応しており、周期 T を等価周期 T_e と読み替え可能であると思われる。また、短周期領域であわないのは、減衰定数の設定のしかたが実際の応答とあっていない、 V_D が最大値となるときの周期がそこまで伸びていない為、などが考えられる。

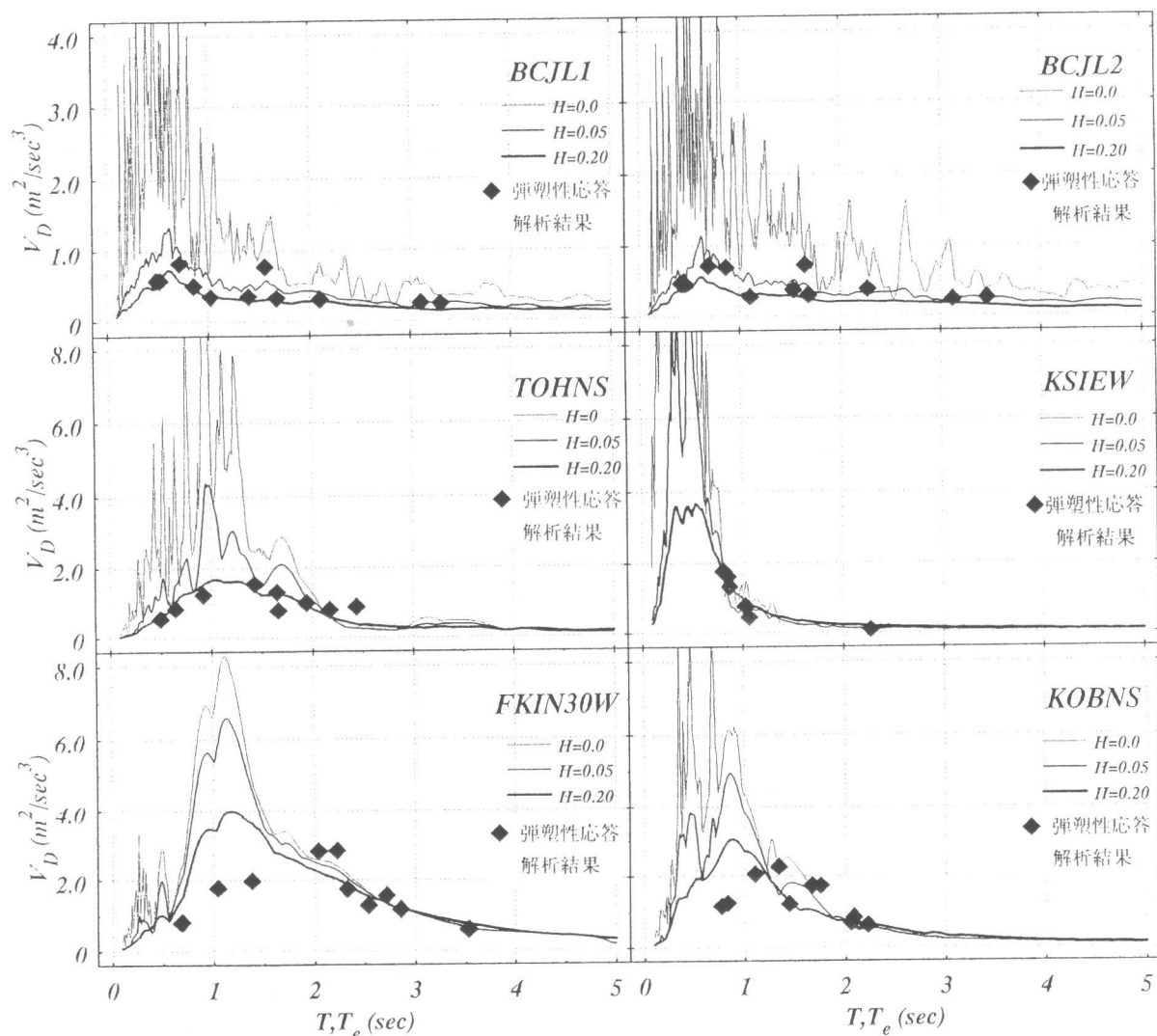


図1 エネルギー入力速度スペクトル

3. エネルギー入力速度による応答推定

3. 1 構造物のエネルギー吸収能力

地震応答解析により求めたエネルギー入力速度と等価周期の関係を図2に示す。各パラメーターごとにみると、入力地震動によらず一定の傾向を示している。構造物が履歴エネルギー消費量として吸収可能なエネルギー入力速度 V_c は、以下に示すように、構造物が最大変位 d_m で定常振動していると考えたときの1サイクルあたりの履歴面積であらわせる。1サイクルで吸収される履歴エネルギー消費量 W は(8)式で与えられ、エネルギー入力速度としては W を等価周期 T_e で除すことにより求まる。図中に太破線でしめす。

$$W = 2\mu p_y d_y \left\{ 1 - \frac{1 + (d_c / d_y)}{1 + (p_c / p_y)} \mu^\alpha \frac{1}{\mu} \right\} \quad (8)$$

$$V_c = W / T_e$$

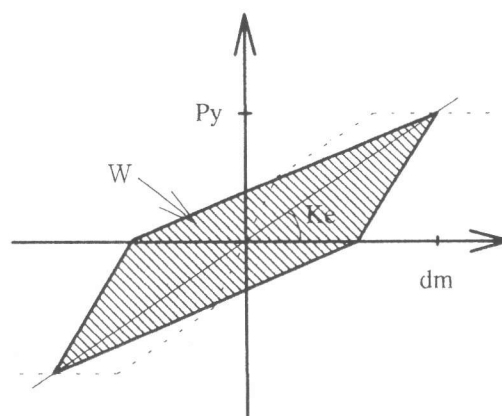
ここで

$$T_e = 2\pi \sqrt{(m / K_e)}$$

$$K_e = P_y / d_m$$

W : 1周期当りの履歴エネルギー消費量

μ : 塑性率



また、エネルギー入力が急激であるときには、弾性エネルギーが支配的になり、1サイクルあたりではなく、片サイクルのみでエネルギー吸収されると考える。この半サイクルあたりのエネルギーを(9)式のように与え、これを $T_e / 2$ で除し、エネルギー入力速度 V_c を求める。この V_e が V_c を上回る周期では、構造物のエネルギー入力速度は V_e により決まる。図中に細実線でしめす。

$$W = p_y (d_m - d_y) + \frac{1}{2} \{ P_c \times d_c + (p_c + p_y)(d_y - d_c) \} \quad (9)$$

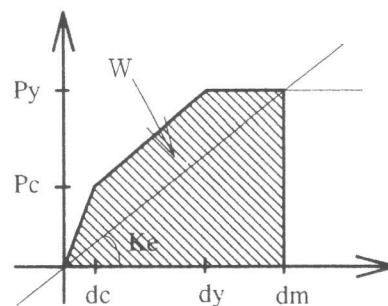
$$V_e = W / \left(\frac{T_e}{2} \right)$$

ここで

$$T_e = 2\pi \sqrt{(m / K_e)}$$

$$K_e = P_y / d_m$$

これらの V_c 、 V_e での大きい方の値を構造物のエネルギー吸収能力と考えると、非線形解析から求まる応答値とよく一致している。



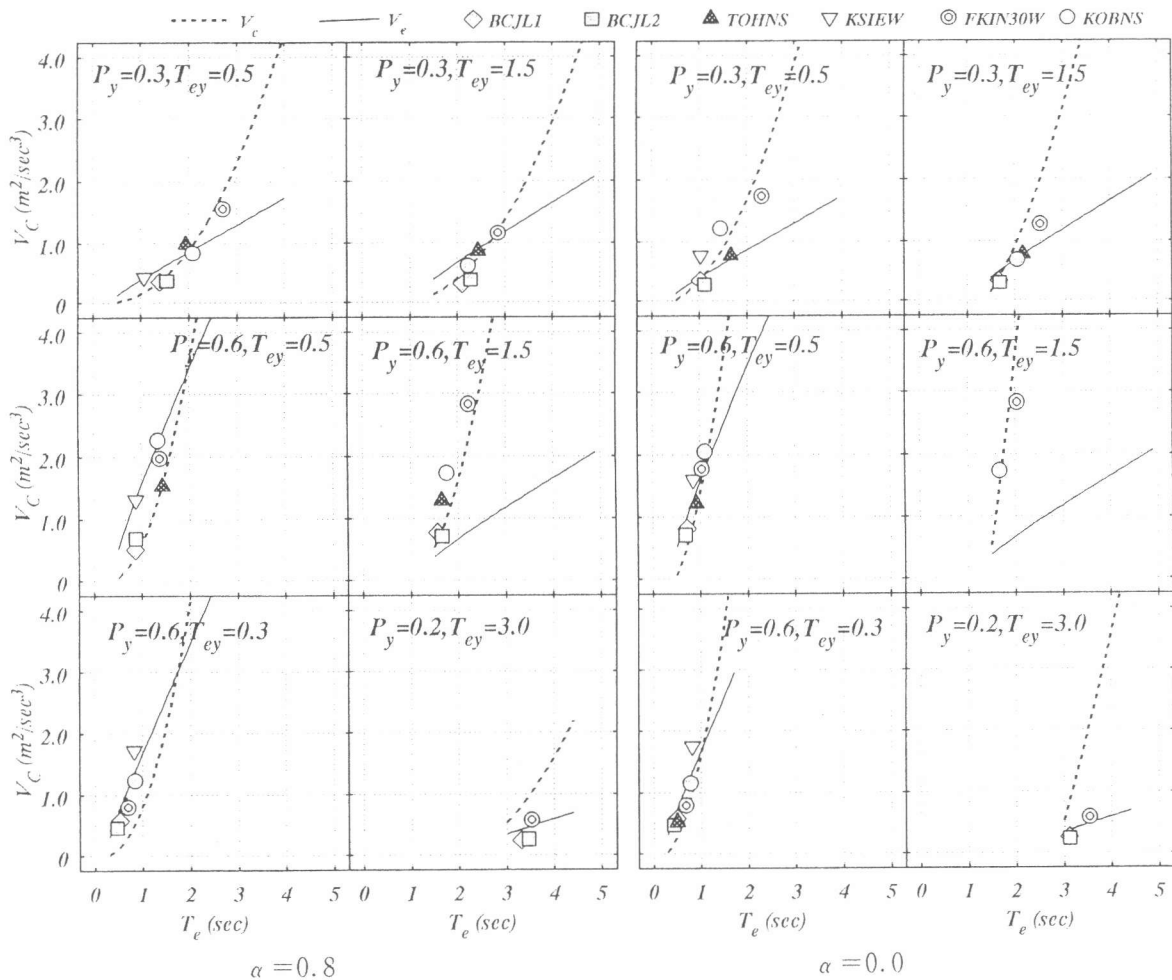


図2 構造物のパラメーターごとのエネルギー入力速度と吸収能力

3. 2 エネルギー入力速度スペクトル

による応答変形の推定

構造物の地震時最大塑性応答変形を入力地震動のエネルギー入力速度スペクトル、構造物の吸収可能なエネルギー入力速度とにより推定する。構造物のエネルギー吸収能力が大きくなるまで応答変形が進み周期が伸び、単位時間あたりのエネルギー吸収量が増えるが、1サイクルあたりの吸収エネルギー量で代表させて、これと入力地震動のエネルギー入力速度スペクトルと一致する点として最大応答変形を推定する。また、 V_c が支配的になる周期では、この入力速度とエネルギー入力速度スペクトルが一致する点とする。この推定値、非線形解析による解析値を $P_y=0.3$, $T_{ey}=0.5$, $\alpha=0.8$ のケースについて図3に示す。よく対応していることがわかる。

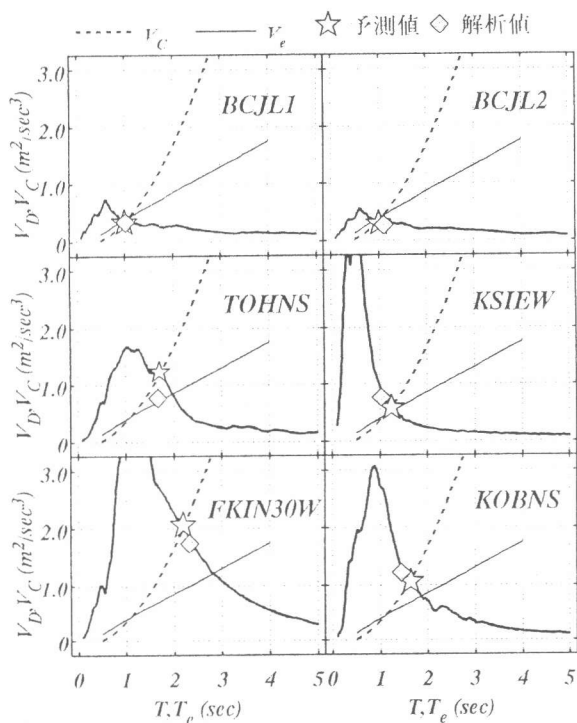


図3 エネルギー入力速度スペクトル

4. エネルギー入力速度スペクトルと総エネルギー入力、継続時間 t_{0e} との関係

エネルギー入力速度スペクトルと総エネルギー入力、継続時間との関係を見るために、総エネルギー入力スペクトル($H=0.2$)を継続時間で除したものとエネルギー入力速度スペクトルを比較する。地震動の継続時間は、各地震動の加速度時刻歴の2乗累積が(5%から95%)に達するまでの時間とした。

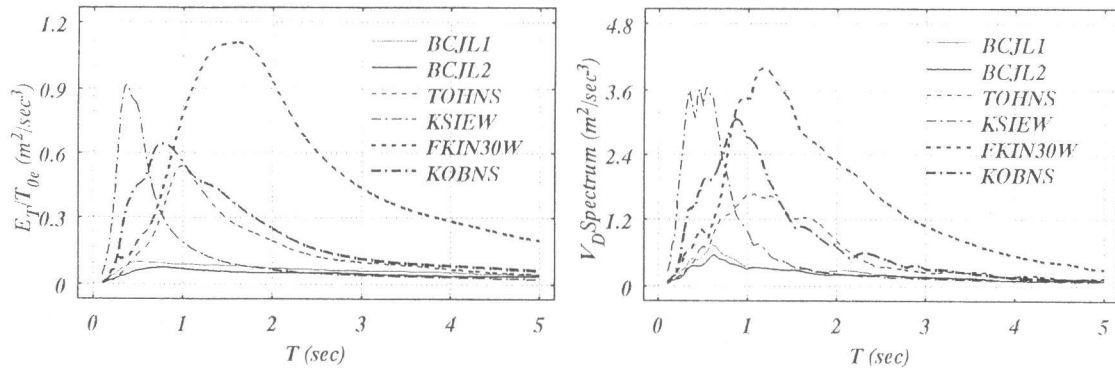


図4 エネルギー入力速度スペクトルと継続時間で除した総エネルギー入力

表1 地震振動の継続時間

	BCJL1	BCJL2	TOHNS	KSIEW	FKIN30W	KOBNS
継続時間 t_{0e} (s)	33.7	65.3	19.5	19.0	6.8	8.4

各地震波どうしの相対関係や周期に対する特性は、エネルギー入力速度スペクトルと同じ傾向を示しており、エネルギー入力速度はエネルギー入力を継続時間で除したものの4倍程度になっていることがわかる。エネルギー入力速度スペクトルは総エネルギー量や継続時間により、推定可能な量であると推測できる。

5. まとめ

地震動エネルギー入力速度スペクトルを定義して、RC構造物の地震時最大塑性変形を推定する方法をしめした。1質点系の地震応答解析を行い、エネルギー入力速度による応答変形の推定法は有効である。また、エネルギー入力速度は、総エネルギー入力、継続時間に関係づけることが可能であり、震源パラメーターによる一般的な指標として有効であろう。

参考文献

- [1] 秋山 宏：建築物の耐震極限設計第2版、東京大学出版会、1987.9
- [2] 衣笠秀行、野村設郎、狩野貴子：RC構造物のエネルギーに基づく設計法開発のための基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1995.8
- [3] 大井謙一、高梨晃一、本間靖章：地震動のエネルギー入力率スペクトル、日本建築学会構造系論文報告集第420号、1991.2
- [謝辞] 本研究で用いた兵庫県南部地震算合記録は大阪ガスにより観測されたものです。ここに謝意を表します。