

地震入力総エネルギーおよび 地震入力単位エネルギーを考慮した RC橋脚の損傷度評価法の提案

井林 康¹・中沢正利²・尾坂芳夫³・鈴木基行⁴

¹正会員 修(工) 長岡工業高等専門学校助手 環境都市工学科(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

²正会員 工博 東北学院大学助教授 工学部土木工学科(〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-11)

³フェロー会員 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科(〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-11)

⁴フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

本研究では、地震時に入力されるエネルギーのうち、地震動の継続時間にわたって構造物に入力される地震入力総エネルギーと、ある単位時間に相当するエネルギーである地震入力単位エネルギーの両者に着目し、弾性系の解析のみによってRC単柱橋脚の地震時の応答塑性率、および履歴エネルギーの推定手法を示した。加えて、既往の損傷指標への応用をすることにより、弾塑性地震応答解析を行うことなく、構造物の損傷程度を推定する手法を示した。

Key Words : reinforced concrete structure, seismic design, earthquake input energy, energy spectrum, equivalent accumulative energy, damage index.

1. 概論

近年、わが国では大地震による土木構造物の被害が頻発している。例えば、平成5年の釧路沖地震や北海道南西沖地震、平成6年の北海道東方沖地震や三陸はるか沖地震、平成7年の兵庫県南部地震など、マグニチュードの大きな地震が数多く発生している。また、全国各地において直下型地震が頻繁に発生し、局地的な被害が発生している。特に平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、コンクリート構造物にも甚大な被害をもたらし、それまでの耐震設計法に関して全面的な再考を促される契機となった。

地震による被害が発生する度に、被害の調査結果を基に、地震の破壊力について議論されてきている。地震動強さの指標として、広く用いられてきたのは最大加速度であるが、最大加速度は被害との関連性から判断して、地震動強さの指標として必ずしも適しているかどうか明確ではない。そのため、どのような地震動特性が、構造物の被害に対して最も支配的であるかを検討すること、すなわち地震動の破壊力指標を検討することは、今後の構造物の耐震設計法を検討していく上で不可欠であることは共

通の認識であろう。

また、これからの地震防災の観点から、設計で想定している規模の地震が発生した場合、被害程度を予測する手法を確立しておくことは不可欠である。そのため、地震動および構造物のそれぞれの特性から、簡便に構造物の被害程度を推定できる手法を構築することは非常に有用であると考えられる。

地震時における構造物の損傷が、地震動の継続時間にわたって入力されるエネルギーによって引き起こされるという考え方は、比較的以前から研究されている。地震動によるエネルギーは、構造物に入力され、それが減衰エネルギーおよび弾性・塑性のひずみエネルギーとに分配されることにより、最終的に構造物の履歴エネルギーとなる。そのため、この継続時間にわたる地震入力エネルギーを検討することにより、構造物の履歴エネルギーの推定が可能になることになる。

また、地震動の継続時間にわたって入力される地震入力エネルギーよりも、ある単位時間に入力される瞬間的なエネルギー量に着目し、これと地震動の破壊力や構造物の損傷や最大応答変位を結びつけて考える研究が、衝撃的な地震力により大被害が発

生じた兵庫県南部地震以降、主に建築の分野で盛んに研究されてきている。ある単位時間あたりのエネルギー入力だけでなく、地震動の最大加速度を生じるパルスをつつだけ取り出し、それと応答塑性率との関連性を検討している例もある¹⁾。

構造物の損傷指標としては、塑性率や履歴エネルギー、あるいはそれらを組み合わせたもの、さらに低サイクル疲労則に基づいたものなど多数存在する。しかし、RC構造物の損傷度を検討する上で、塑性率と履歴エネルギーなどの2種類以上の指標を組み合わせて用いるべきだという考え方も以前から指摘されており、例えばBanan and Veneziano²⁾は、約30体の載荷実験データを用いて、回転塑性率、曲率塑性率、剛性劣化率、累積塑性率および累積消費エネルギー量の間にはそれぞれ強い相関関係があるとしながらも、それぞれの値には大きなばらつきがあり、任意の損傷指標を単独に用いて構造物の損傷を評価することは困難であるとしている。このようなことから、ある単位時間の地震入力エネルギーと継続時間にわたる地震入力エネルギーの両者から、それぞれ塑性率や履歴エネルギーなどを算定することができれば、そのまま既往の損傷指標に適用することにより、弾塑性応答解析を行うことなく、弾性系の解析から構造物の損傷度の算定が適切に行えると考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では地震動の継続時間にわたる地震入力エネルギー、すなわち地震入力総エネルギーと、ある単位時間に相当する地震入力エネルギー、すなわち地震入力単位エネルギーのそれぞれを、弾性系の解析から算定し、それと等価吸収エネルギーの考え方をを用いることによって、弾塑性系の塑性率や履歴吸収エネルギーを推定し、その結果を用いて、既往の損傷指標に適用して、弾塑性応答解析を行うことなく損傷度を算定できる手法を構築した。

2. 既往の研究

継続時間にわたる地震入力エネルギーに関する既往の研究として、Housner³⁾は、地震動の影響を受ける構造物の最大変位やせん断力に影響を与える地震動の性質は、速度応答スペクトルであり、地震によるエネルギー入力と構造物のエネルギー吸収能力から構造物の塑性変形量を求める方法を示している。加藤・秋山⁴⁾は、Housnerの考えを発展させ、エネルギー入力を地震動の全継続時間内に構造物に加えられるエネルギーの総量であると定義した。そして、これは主として総質量と一次固有周期に依存

する量であり、質量分布、剛性分布、減衰定数の依存度は小さいことなどを導き出している。Housnerや加藤・秋山はエネルギー則に基づく耐震設計法を明確に示したため、以降これらの研究に基づいた数多くの研究が行われるようになった。

大野ら⁵⁾や松島・松井⁶⁾は、塑性率、塑性ひずみエネルギー量やエントロピーに着目して構造特性とエネルギー量との関連を調べ、桑村⁷⁾は加速度パワーを地震動強さの指標と定義してこれから地震入力エネルギーが表現できるとしている。また、Hiraoら⁸⁾、中島ら⁹⁾、堀ら¹⁰⁾、入江ら¹¹⁾のように、エネルギースペクトルに着目して破壊力の指標や最大応答の予測を行ったもの等がある。しかしながら、これらの既往の研究は、ある特定の地震波形にしか適用不可能なもの、大幅な簡略化を用いていて精度に欠けると思われるもの、あるいは、相対的な判断のみを行い、実際に損傷度や応答値を算定するに至っていないものなど、それぞれ問題点を有している。

また、継続時間にわたる地震入力エネルギーではなく、ある単位時間に入力される衝撃的なエネルギーに関する研究が、兵庫県南部地震における衝撃的な地震動による被害も踏まえて近年盛んに行われている。西澤・金多¹²⁾は、実地震下のエネルギー応答の大勢は主要動近傍の極めて短時間の間に決定されるという点に注目し、主要動付近における衝撃的なエネルギー入力の問題について詳細な検討を加えており、瞬間的なエネルギーに関するもっとも基本的な考察を加えている。

以降、この考え方に基づいた研究が数多く行われている。大井ら¹³⁾や諏訪ら¹⁴⁾のエネルギー入力率スペクトル(EIRスペクトル)、矢花・和泉¹⁵⁾や井上ら¹⁶⁾の瞬間入力エネルギー、衣笠・野村¹⁷⁾や中村・壁谷澤¹⁸⁾のエネルギー入力速度(EIV)など、言葉と定義を若干変えられ、いずれも単位時間あたりの地震入力エネルギーを考慮することによって、地震動の破壊力の評価を行っているものやまた等価線形化法等を用いて最大応答変位の推定を行っているものがある。特に中村・壁谷澤¹⁸⁾は、兵庫県南部地震で記録された地震波を用いて応答を推定し、鉄筋コンクリート造建物について実際の被害との対応の検討まで行っている。しかし、既往の研究は、弾塑性系の応答計算結果に対して行っているものが多く、これらは弾塑性応答解析を行わずして応答の算定が行えないものであり、弾性系の応答から算定できるとしているものも、弾性系の履歴応答を逐一追うことによって算定しているため、簡便な定義によって算定できるとは言い難い。加えて、単位時間あたりの地震入力エネルギーと継続時間にわたる地震入力

エネルギーの両者を同時に考慮に入れた例はない。実際、桑村ら¹⁹⁾は、この2つのエネルギー量は理論的には独立であり得るものなので、倒壊に対する安全性評価を両方で照査する必要があるとしているが、現状ではこのような点から評価している研究は見られない。

3. 解析手法

(1) 解析対象構造物

対象としたのは、道路橋の鉄筋コンクリート単柱橋脚18種の実設計例である。設計の諸元を表-1に示す。これらは「昭和55年道路橋示方書」²⁰⁾、「平成2年道路橋示方書」^{21), 22)}(以下、H2示方書)および「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧にかかる仕様」²³⁾(以下、復旧仕様)によって新設されたもの、もしくは補強の設計を行った補強前後のものである。これらは研究の一般性を高めるため、ある特定の設計法・諸元に偏らないよう、なるべく多種多様になるように選んだ。また、P7橋脚は鋼板補強を行っている橋脚であり、補強に用いた鋼板量を帯鉄筋間隔に換算してあるため、帯鉄筋間隔が非常に小さな値となっている。

(2) 弾塑性応答解析モデル

弾塑性応答解析は、まず、材料特性として表-2および図-1の値を用い、橋脚躯体の高さ方向の分割数は20、各断面の要素分割数を20として断面のつり合い計算を行って荷重-変位曲線をモデル化した。これには軸方向鉄筋からの引き抜けによる回転変位を考慮に入れ、その引き抜け量は申ら²⁴⁾の方法によって求めている。これらをもとに、1質点系モデルとNewmarkの β 法を用いた逐次積分法によって応答解析を行い、履歴法則(ヒステリシスループ)は、武田モデル²⁵⁾、減衰定数は0.02、時間刻みは1/500秒として計算を行った。地震波入力方向は橋軸方向に対して行っている。

(3) 解析に用いた地震動

解析に用いた実地震波は宮城県沖地震、釧路沖地震、兵庫県南部地震など6地震のべ20加速度波形で、それらの最大加速度は192~817(gal)である。解析に用いた実地震記録波形の最大加速度を表-3に示す²⁶⁾⁻²⁹⁾。ここでは加速度データを拡大・縮小することはせず、観測された大きさをそのまま用いた。

表-1 橋脚実設計例の諸元

No.	B	H	a	N	SDI	d ₁	n	SDw	s	T	設計基準
P1	700	190	1000	3567	D29	15.5	180	D16	15.0	0.256	H2
P2	400	150	500	3567	D29	15.5	108	D16	15.0	0.153	H2X
P3	400	170	500	3567	D32	10.5	76	D19	15.0	0.127	H2
P4	400	300	1100	9800	D32	12.0	84	D16	15.0	0.299	H2X
P5	450	350	1100	9800	D32	12.0	102	D16	15.0	0.227	H2
P6	280	280	1100	4606	D32	10.0	130	D16	20.0	0.277	H7X
P7	280	280	1100	4606	D32	10.0	130	D16	2.2	0.277	H7
P8	320	250	1350	3371	D25	10.0	106	D13	30.0	0.376	H7X
P9	650	150	800	4498	D22	10.0	86	D22	30.0	0.283	H2
P10	250	190	950	4802	D32	10.0	92	D16	15.0	0.414	H7X
P11	300	240	950	4802	D32	15.0	114	D22	10.0	0.272	H7
P12	350	350	980	10290	D51	15.0	52	D16	22.5	0.217	H2
P13	350	350	980	10290	D51	15.0	72	D25	15.0	0.217	H7
P14	350	300	1050	10290	D38	15.0	84	D19	22.5	0.302	H2
P15	370	320	1050	10290	D38	15.0	84	D25	15.0	0.268	H7
P16	350	350	850	13582	D32	15.0	44	D19	22.5	0.198	H2
P17	350	350	850	13582	D38	15.0	80	D22	12.5	0.198	H7
P18	250	190	950	4802	D32	10.0	92	D16	15.0	0.414	H2

B : 橋脚の断面の幅(cm) (橋軸直角方向)
H : 橋脚の断面の高さ(cm) (橋軸方向)
a : 橋脚の高さ(cm) N : 上載荷重(kN)
SDI : 軸方向鉄筋呼び名 SDw : 帯鉄筋呼び名
d₁ : 躯体最外縁から鉄筋中心までの距離(cm)
n : 軸方向鉄筋本数 s : 帯鉄筋間隔(cm)
T : 道路橋示方書による固有周期(s)
設計基準: H2は平成2年道路橋示方書による設計
H7は復旧仕様による設計
Xはそれらの基準を満たさないことを示す

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

コンクリート	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	23.5
	引張強度 f'_t (N/mm ²)	31.4
	最大圧縮応力時ひずみ ϵ_{c0}	0.002
	終局ひずみ ϵ_{cu}	0.0035
鉄筋	降伏強度 f_y (N/mm ²)	343
	引張強度 f_u (N/mm ²)	490
	降伏ひずみ ϵ_y	0.002
	ひずみ硬化開始時ひずみ ϵ_{sh}	0.02
	終局ひずみ ϵ_{su}	0.1

4. 地震入力総エネルギーおよび地震入力単位エネルギー

(1) 定義

1質点系の運動方程式は一般に次式のように表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F = -M\ddot{z} \quad (1)$$

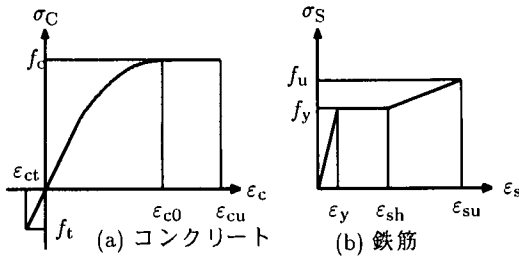


図-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性

表-3 解析に用いた地震波の最大加速度

地震名	観測点	方角	最大加速度
Imperial Valley	El Centro T. S. (BF)	NS	314.63
十勝沖	八戸市役所 (B1F)	NS	203.81
宮城県沖	開北橋 (GL)	LG	192.55
		TR	286.79
	仙台鉄道管理局 (B1F)	EW	232.61
		NS	432.42
	住友生命ビル (B2F)	EW	240.90
NS	250.90		
釧路沖	広尾町役場 (1F)	320	403.68
		050	518.05
	釧路地方気象台 (GL)	063	711.40
		153	637.24
北海道南西沖	七峰橋 (GL)	LG	386.21
		TR	379.10
兵庫県南部	東神戸大橋 (GL)	N78E	327.31
		N12W	280.72
	神戸海洋気象台 (GL)	EW	617.14
		NS	817.83
	JR 鷹取 (GL)	EW	666.20
NS	641.73		

LG : 橋軸方向 TR : 橋軸直角方向 単位: gal

ここで、 M : 質量、 C : 減衰係数、 F : 復元力、 x : 変位、 \ddot{x} : 地動加速度である。

式(1)の両辺に $\dot{x}dt$ を乗じて、時間 t について、地震動の開始 $t = 0$ から終了 $t = t_0$ まで積分すれば、次式のような地震終了時におけるエネルギーのつり合い式となる。

$$\int_0^{t_0} M \ddot{x} \dot{x} dt + \int_0^{t_0} C \dot{x} \dot{x} dt + \int_0^{t_0} F \dot{x} dt = - \int_0^{t_0} M \dot{x} \ddot{x} dt \quad (2)$$

式(2)の右辺は、地震時のエネルギー入力の総量であるため、これを地震入力総エネルギー E として、次のように改めて定義する。

$$E \equiv \int_0^{t_0} M \dot{x} \ddot{x} dt \quad (3)$$

次に、この地震入力総エネルギーにおいて、ある時間区間 Δt に相当する地震入力エネルギーは、次のように t_1 と Δt の関数として定義される。

$$\Delta E_{t_1}(t_1, \Delta t) = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} M \dot{x} \ddot{x} dt \quad (4)$$

ここに、 t_1 : 継続時間内のある任意の時刻、 Δt : 単位時間である。

ある地震動のなかで、エネルギー的に最も注目すべき時間帯は、エネルギー入力量がゼロから最大まで変化する時間帯である。既往の研究でも、実際の弾塑性応答解析の結果からエネルギーを算定して検討しているものが多いが、弾塑性応答解析を行わずに推定するという観点から見れば、弾塑性応答系でエネルギーが最大となる時刻を応答解析前に予測することは困難である。そのため、地震動の継続時間に対して、この単位時間あたりのエネルギーを逐次算定し、それが継続時間に対して最大となる単位時間の時刻を定める方が算定しやすくなる。

すなわち、本研究では任意の t_1 に対して、式(4)の最大値を地震入力単位エネルギー ΔE と定義する。すなわち、

$$\Delta E(\Delta t) \equiv \max_{t_1} \left\{ \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} M \dot{x} \ddot{x} dt \right\} \quad (5)$$

これを基に衝撃的な地震動入力の検討を行うことにする。

式(3)および式(5)で定義された地震入力総エネルギーおよび地震入力単位エネルギーは、速度次元で表示すると、それぞれ次のようになる。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (6)$$

$$V_{\Delta E} = \sqrt{\frac{2\Delta E}{M}} \quad (7)$$

以後、速度応答スペクトルなどとの比較を行うため、これらの速度次元表示でエネルギーの評価を行うことにする。

(2) 単位時間の設定

単位時間あたりのエネルギー量を考える際の単位時間の取り方について、既往の研究において、大井ら¹³⁾は極限值をゼロ、すなわち微分としており、他には翠川・作川³⁰⁾の1秒、矢花¹⁵⁾や中村³¹⁾、桑村³²⁾など1サイクルおよび1/4サイクルを検討しているものがある。

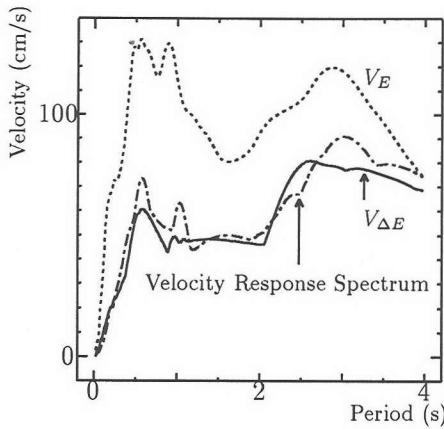


図-2 地震入力総エネルギーと単位エネルギーの例 (El Centro 地震波)

外部からエネルギー入力を受けて構造物が被害を受けると考えると、構造物を共振させる周期でエネルギー入力がある場合が、最も被害を受けやすい状況と考えられる。すなわち、構造物の固有周期 T の $1/4$ の時間に、1方向の入力エネルギーが加わる場合である。そのため本研究では、単位時間 Δt の値を $\Delta t = T/4$ とした。

また、実際には地震動の継続時間中に、構造物の塑性化によって固有周期は延びるために、その影響も考えられるが、桑村³²⁾によればほとんど影響はないとしており、さらに、応答解析を行わずに構造物の塑性域での固有周期を求めることも困難であることから、ここでは単位時間を構造物の初期固有周期の $1/4$ として検討を行った。

(3) 弾性系の地震入力総エネルギーと単位エネルギースペクトル

1質点弾性系の地震入力総エネルギー V_E と地震入力単位エネルギー $V_{\Delta E}$ 、および減衰係数 $h = 0.1$ としたときの弾性速度応答スペクトルをEl Centro地震波について算定した例を図-2に示す。ここで、弾性速度応答スペクトルの減衰係数を $h = 0.1$ としているのは、終局状態に近い応答を示す場合には構造物局部には何らかの塑性変形によるエネルギー吸収が存在し、それを粘性減衰に換算すれば $h = 0.1$ 程度として考慮されるという既往の研究⁴⁾によるものである。

図より、地震入力単位エネルギーと速度応答スペクトルは非常に酷似している。これは、構造物のばね定数を k 、最大変位を x_{\max} 、固有円振動数を ω 、変位応答スペクトルを S_d 、速度応答スペクトルを

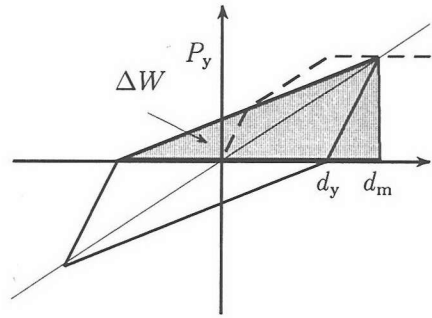


図-3 等価吸収エネルギー

S_v とした場合、単位質量あたりの最大エネルギーは、

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{k}{M} x_{\max}^2 = \frac{1}{2} (\omega x_{\max})^2 \simeq \frac{1}{2} (\omega S_d)^2 \simeq \frac{1}{2} S_v^2 \quad (8)$$

となる³³⁾ため、速度応答スペクトルは地震動が構造物に与える最大のエネルギーを表していることになる。よって、単位時間を長くして $\Delta t = T/4$ とした場合でも概形が似てくるものと考えられる。

(4) 構造物の等価吸収エネルギー

構造物の $1/4$ 周期に地震動から入力されるエネルギーに対応する、構造物の許容吸収エネルギーは、 $1/4$ 等価周期に構造物が吸収可能なエネルギー吸収量と考えられる。すなわち、履歴系で正負の最大変形が同じと考えたときの復元力0の点から最大応答変位まで吸収エネルギー量であり、図-3のように定義できる^{15), 18)}。

図-3における ΔW は、

$$\Delta W = \frac{1}{2} \pi h_{eq} \cdot \mu P_y d_y + \frac{1}{2} \mu P_y d_y \quad (9)$$

と表せる。ここに、 μ : 塑性率(= d_m/d_y)、 h_{eq} : 等価粘性減衰定数、 P_y : 降伏耐力、 d_y : 降伏変形である。また、等価剛性 K_e とした場合に、等価周期 T_e は

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_e}} \quad (10)$$

と表せる。

式(9)より、この等価吸収エネルギー ΔW の速度換算値 $V_{\Delta W}$ は次のように表される。

$$V_{\Delta W} = \sqrt{\frac{2\Delta W}{M}} = \sqrt{\frac{\mu}{M} P_y d_y (\pi \cdot h_{eq} + 1)} \quad (11)$$

構造物の等価吸収エネルギーは、構造物の降伏耐力および塑性率によって変化する。周期-エネルギー

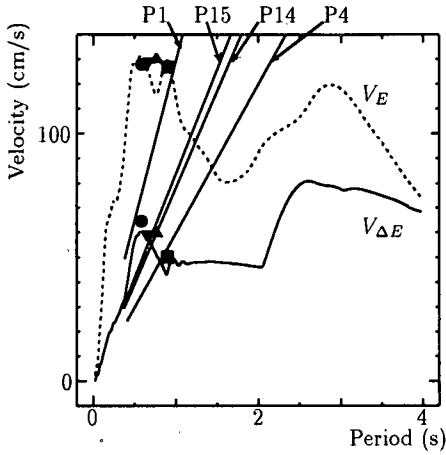


図-4 エネルギースペクトル El Centro (NS)

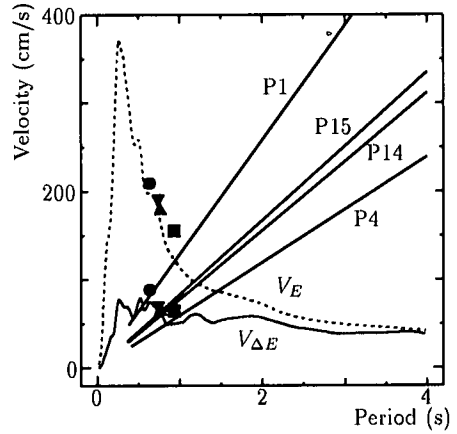


図-6 エネルギースペクトル 釧路地方気象台 (NS)

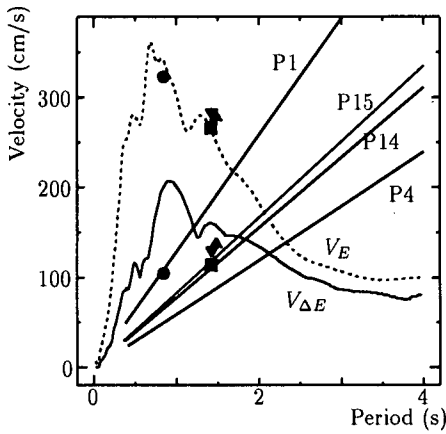


図-5 エネルギースペクトル 神戸海洋気象台 (NS)

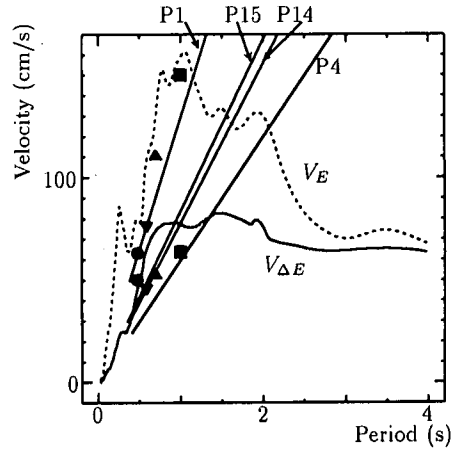


図-7 エネルギースペクトル 仙台鉄道管理局 (NS)

関係として表すために、式(11)を式(10)を用いて等価周期 T_e に関する関数に書き換えると、

$$V_{\Delta w} = \frac{P_y}{2\pi \cdot M} \sqrt{\pi \cdot h_{e,q} + 1} \cdot T_e \quad (12)$$

となる。ここで用いている履歴モデルは、トリリニア型であり、 $h_{e,q} = 0.02$ とした。これにより、構造物の降伏耐力に依存する等価吸収エネルギー直線が描かれることになる。

また、弾塑性応答解析の結果による応答値は、 $(T_e, V_{\Delta E})$ および (T_e, V_E) によって図化される。ここでの T_e の算定は、

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_c}} = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{P_y} M \mu} \quad (13)$$

によって可能となる。

5. 解析結果

(1) 実地震動による検証

前章までに定義された、地震入力単位エネルギーと地震入力総エネルギー、および等価吸収エネルギー直線を、地震動および構造物の諸元を基に、弾性の応答解析から算定する。

ここでは、表-3に示したImperial Valley地震波 (El Centro, NS)、兵庫県南部地震波 (神戸海洋気象台, NS)、釧路沖地震波 (釧路地方気象台, 063) および宮城県沖地震波 (仙台鉄道管理局, NS) の4地震波に対して算定した結果を、それぞれ図-4から図-7に示す。図中の曲線は総エネルギースペクトル V_E および単位エネルギースペクトル $V_{\Delta E}$ であり、図に示した直線は傾きが低いものから、表-1のP4、

P14, P15, P1 橋脚に対応する構造物の等価吸収エネルギー直線である。この4橋脚は等価エネルギー直線の傾きが比較的ばらつくように橋脚を選んでいる。また、図中の■, ▲, ▼, ●の点は、弾塑性応答解析結果から求められた、総エネルギーや単位エネルギーの実際の値であり、それぞれ、P4, P14, P15, P1 橋脚に対応している。仮に、地震入力単位エネルギーと構造物の等価吸収エネルギーが等値とおけるならば、その2つの曲線の交点上に弾塑性系の $V_{\Delta E}$ が来ると考えられ、これと同じ固有周期の総エネルギー曲線上の点に弾塑性系の V_E が乗ると考えられる。

図より、地震入力単位エネルギーについて、神戸海洋気象台波については予測値と若干ずれている。この図からは応答時の固有周期が1~2秒程度まで伸びると予測されるものの、あまりに衝撃のかつ大きなエネルギーが作用したため、それほどエネルギーを吸収できぬままに破壊に至り、予測された固有周期まで至る途中で留まってしまったものと考えられる。また、仙台鉄道管理局波についても、応答時の固有周期が高くなると予測される橋脚の場合に、予測値とのずれが大きくなっており、全体として、応答時の固有周期があまりに高くなると予測される場合に、結果に対して注意が必要であると思われる。しかしながら、あまり塑性化が進まず、応答時の固有周期が比較的大きくならない場合については、ほどほどの精度で推定していることがわかる。また、地震入力総エネルギーに関しては、全ての地震波・橋脚に対してかなりよい精度で推定されている。

これより、この2つのエネルギースペクトルと等価吸収エネルギーを用いた弾塑性応答の推定は十分可能であり、あまり塑性化が進まず、固有周期がせいぜい1秒以内に留まる場合にはよい精度で、固有周期が大きくなる場合については、予測値よりも実際の応答の方が小さくなり、安全側に推定できることがわかる。

(2) 地震入力単位エネルギーから塑性率の推定

弾塑性系の塑性率を、エネルギー系で推定された単位入力エネルギーから算定するための何らかの手法が必要であるが、まず弾塑性系で、実際に算定された部材の塑性率(変位塑性率)と、地震入力単位エネルギーがどのような関係にあるかを検討した。

式(5)から求められる ΔE を、部材の単調載荷時の降伏時までの面積 E_y で除したもの(以下、エネルギー塑性率)とを比較したものを図-8に、およびその拡大図を図-9に示す。

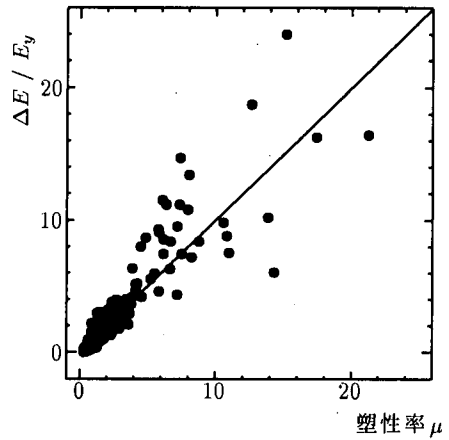


図-8 塑性率とエネルギー塑性率の関係

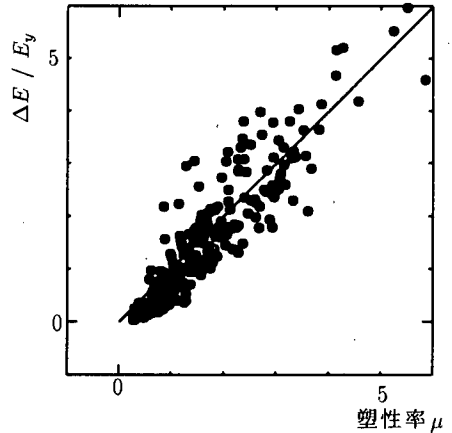


図-9 塑性率とエネルギー塑性率の関係(拡大図)

2者の相関係数は0.91となっており、エネルギー塑性率と変位塑性率がほぼ1対1対応になることがわかる。しかし、塑性率の大きい範囲ではややばらつきが大きくなっていく。

一般に、履歴吸収エネルギー量を基にしたエネルギー塑性率と変位塑性率は、ある程度の相関はあるものの、これほど相関が高くないとされているが、ここでの相関が高いのは、地震入力単位エネルギーを基にエネルギー塑性率を計算しているため、最大の単位入力エネルギーがある時刻と最大応答変位をもたらす時刻がほぼ同じであるためと考えられる。これよりエネルギー塑性率は塑性率と等価であると考え、エネルギー塑性率の算定から、塑性率の推定が簡便に行えることになる。

(3) 地震入力総エネルギーから履歴エネルギーの推定

地震入力総エネルギーのどの程度の割合が、実際の履歴エネルギーになるかを示す低減係数については、既往の研究がいくつかある。例えば、加藤・秋山^{4),34)}は、構造物の減衰定数に依存する関数として表し、桑村³⁵⁾は、これに加えて、累積塑性変形倍率に依存する関数として提案している。また大野⁵⁾は、弾塑性剛性比（塑性域と弾性域の剛性の比）と減衰定数、平尾³⁶⁾は固有周期、堀ら¹⁰⁾は塑性率に依存する関数として提案しており、それぞれ特徴がある。

本研究では、解析途中で変化する塑性率や累積塑性率等を、弾塑性解析を行わずに算定することが困難であることから、減衰定数以外のパラメーターに依存することなく算定可能な、加藤・秋山の式を用いた。

$$\frac{V_D}{V_E} = \frac{1}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} \quad (14)$$

ここに、 V_E : 総エネルギー速度、 V_D : 履歴エネルギー速度、 h : 減衰定数である。

この式で $h = 0.1$ とした場合、すなわち $V_D/V_E = 0.595$ を低減係数とした。ここで $h = 0.1$ としたのは、4.(3)で速度応答スペクトルの減衰定数を $h = 0.1$ としたのと同様の理由である。

6. 地震入力単位・総エネルギーに基づく地震被害算定指標

(1) 算定フロー

これまでの地震時損傷度推定の方法をまとめると次のようになる。

1. 地震波加速度データより、定義にしたがって弾塑性系の V_E および $V_{\Delta E}$ スペクトル図を作成する
2. 橋脚諸元および式(12)より、等価吸収エネルギー直線をエネルギースペクトル図に書き込む。
3. 交点より、 $V_{\Delta E}$ 、 V_E の予測値を読みとる
4. $V_{\Delta E}$ よりエネルギーを算定し、構造物の降伏までの静的エネルギー E_s で除することで塑性率の推定が可能となる
5. V_E よりエネルギーを算定し、低減係数0.595をかけることによって履歴エネルギーの推定が可能となる

(2) 実際のエネルギーの算定例

実際に、地震動の単位エネルギー（または速度応答スペクトル）・総エネルギースペクトルと、構造

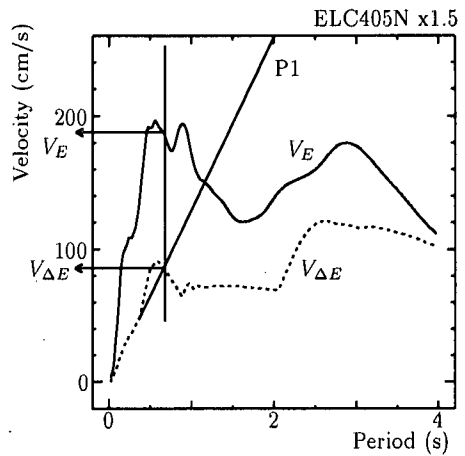


図-10 総エネルギー量、単位エネルギー量の実際の算定

物の等価吸収エネルギー直線から、構造物への入力単位エネルギー量・総エネルギー量を推定する方法を示す。

例示したのは、Imperial Valley地震・El Centro地震波を1.5倍に拡大したものである。

エネルギースペクトルと等価吸収エネルギー直線の交点から、エネルギーを算定する方法は図-10のようになる。これより、単位エネルギー速度が $V_{\Delta E} = 90$ (cm/s)より、 $\Delta E = 19.6$ (m³/s²)、構造物の静的載荷時の降伏エネルギーで除すことによって、この場合の推定塑性率は、 $\mu = 1.99$ となる。

また、総エネルギー速度が $V_E = 190$ (cm/s)より、低減係数0.595を考慮して $V_D = 113$ (cm/s)、これより推定履歴エネルギーは $E = 31.0$ (m³/s²)となる。

(3) Park and Angの損傷指標への応用例

前節までの手法で、塑性率や最大応答変形、および履歴吸収エネルギーを、弾塑性応答解析を行うことなく算定が可能であることから、この結果をもとに、既往の損傷指標にそのまま応用することも可能である。

ここでは、次式で示される、Park and Ang³⁷⁾の損傷指標を例にとり、本解析法の適用を行った。ここでParkらの損傷指標を用いたのは、本解析で算定できる塑性率や履歴エネルギーの両者を考慮できる指標の一つであるからである。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_s \delta_u} \int dE \quad (15)$$

$$\beta = (-0.447 + 0.073 \frac{l}{d} + 0.24n_0 + 0.314p_1) \cdot 0.7^{p_w} \quad (16)$$

表-4 Park の損傷指標と損傷程度との関係

Park の損傷度	損傷の程度
0 ~ 0.1	わずかな損傷 - まばらなひびわれ
0.1 ~ 0.2	軽微な損傷 - 小さなひびわれ
0.2 ~ 0.4	中程度の被害 - ひびわれ・剥離
0.4 ~ 1.0	大被害 - 圧壊・鉄筋の座屈
1.0 ~	崩壊 - 全体的, 部分的崩壊

ここに、 δ_M : 最大応答変形、 δ_u : 単調載荷時の終局変形、 Q_y : 降伏耐力 (計算値)、 dE : 消費エネルギーの増分、 l/d : せん断スパン比、 n_0 : 軸力比、 p_t : 主鉄筋比 (%), p_w : 拘束筋比。

前節の、1.5 倍にした El Centro 波・P1 橋脚の場合、前節で算定された塑性率 μ と履歴エネルギー E の値、および構造物諸元より、Park の損傷指標の第1項は $D_1 = 0.83$ 、第2項は $D_2 = 0.16$ となった。これより $D = 0.99$ と算定される。これを表-4に示される Park の損傷分類³⁸⁾にあてはめると、「大被害-圧壊・鉄筋の座屈」として被害程度が推定できることになる。

参考までに、同じ地震波・橋脚を用い、実際に地震応答解析を行って算定した Park の損傷指標の値は、 $D = 1.13$ となった。ここで、実際に被害を受けた橋脚を対象にして算定を行わなかったのは、被害を受けた橋脚の地点における地震動の推定における不確定性、この算定法自体の不確定性、Park の損傷指標自体の不確定性等を考慮すると、この手法によって被害の推定して実際の被害との比較を行うのは、まだかなりの不確定要因が残っていると判断したためである。

(4) 2つのエネルギースペクトルの簡便な算定法

本研究では、弾塑性応答解析をする代わりに、弾性系の応答解析を用いてエネルギースペクトルを算定し、弾塑性応答を推定している。しかし、弾塑性応答解析より簡便とはいえ、エネルギースペクトルの作成のためには弾性系の応答解析を数多く行うことが必要であるため、必ずしも効率がよいわけではない。

前述したように、単位入力エネルギースペクトルと、速度応答スペクトルは非常に酷似している。そのため、速度応答スペクトルから、単位入力エネルギーを算定することは十分可能と考えられる。

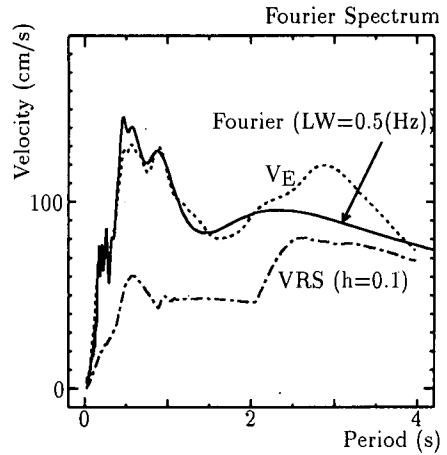


図-11 平滑化されたフーリエスペクトルと総エネルギースペクトル

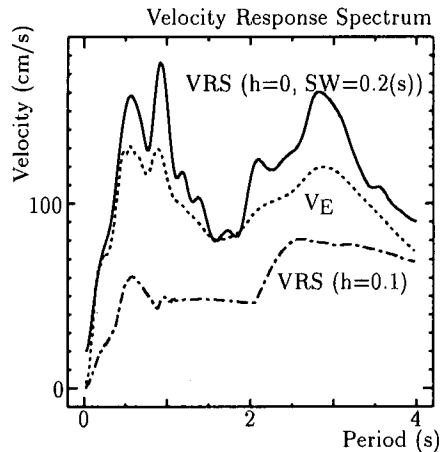


図-12 平滑化された速度応答スペクトルと総エネルギースペクトル

また、平滑化されたフーリエスペクトルは減衰系の V_E スペクトルと一致する、という既往の研究^{30), 39)}があり、もともと非減衰系の速度応答スペクトルとフーリエスペクトルは外形がおおた一致するもの³³⁾とされている。すなわち、 V_E スペクトルと $V_{\Delta E}$ スペクトルは、同じ速度応答スペクトルの減衰定数や平滑化という差だけ、という言い方もできよう。

例として、El Centro 地震波を取り上げ、平滑化されたフーリエスペクトルと総エネルギースペクトルの比較の例を図-11に、平滑化された速度応答スペクトルと総エネルギースペクトルの比較の例を図-12に示した。平滑化の方法は、フーリエスペクトル

ルに関しては、Parzenのラグウィンドウ(LW)を用い、バンド幅0.5(Hz)とし、速度応答スペクトルについてはParzenのスペクトルウィンドウ(SW)を用い、バンド幅0.2(s)としている。図中のVRSとは速度応答スペクトルのことである。

このように、フーリエスペクトルや速度応答スペクトルから、弾性の応答解析さえ行うことをせずに、 V_e スペクトルや $V_{\Delta e}$ スペクトルを算定でき、この方面の検討を行うことも可能である。

ただし、図-11の例は比較的よい精度を見せているが、図-12の例は形状は類似しているもの、値はそれほど正確とは言えない。弾性での地震応答解析が、現在の計算機の演算能力ではあまり大きな負担にならないことを考えると、精度を落としてまで簡便法を用いる必要性はそれほど高くないと思われるが、今後この方面への応用も可能と考えられる。

7. 結論

本研究により得られた主な結論は次のとおりである。

1. ある単位時間あたりの地震入力エネルギーを、地震入力単位エネルギーとして定義し、それは速度応答スペクトルと酷似する性質を持つことを示した。
2. 地震入力単位エネルギーおよび地震入力総エネルギーのスペクトルと、構造物の許容吸収エネルギー直線の考え方より、弾塑性系の塑性率および履歴吸収エネルギーの推定が可能であることを示した。
3. 弾塑性地震応答解析を行うことをせずに、既往の損傷指標を算定する手法の提示などの応用例を示した。
4. フーリエスペクトルや速度応答スペクトルの減衰定数の値の変更や平滑化手法により、地震入力単位エネルギー・総エネルギーのスペクトルのより簡便な算定法への方向性を示した。

本算定法の問題点として、等価固有周期の考え方をを用いているため、塑性域に入って等価固有周期が伸びた点でないことと算定できないため、塑性率が1以下となるような、損傷度が小さい場合に対しては算定不能であること、また、地震波と構造物の組み合わせによっては、等価固有周期が2秒やそれ以上と、構造物としては非現実的な値を導き出すこともある。そのため、現時点では橋脚の塑性率1程度から、崩壊までは達しない程度の損傷度までの適用範囲と考えられるため、さらなる検討が必要であると思われる。また、 $V_{\Delta e}$ スペクトルの形が複雑である

と、構造物の等価吸収エネルギー直線との交点が複数になる場合もあり、このような場合どう判断すべきかという問題も残る。

しかしながら、弾塑性応答解析を行わずに塑性率や履歴エネルギーの算定が可能であること、そしてBanonなど多くの研究者によって指摘されている塑性率と履歴エネルギーの両者を考慮した損傷指標も簡便に直接算定が可能であることは、非常に有用であると考えられ、今後さらに検討を重ねることによって、将来有望な分野であると思われる。

参考文献

- 1) 堀淳一, 川島一彦, 武村浩志: 試設計に基づく耐震技術基準の変遷に伴うRC橋脚の耐震性向上度の検討, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.833-842, 1997.3.
- 2) Banon, H. and Veneziano, D.: Seismic safety of reinforced concrete members and structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp.179-193, 1982.
- 3) Housner, G. W.: Behavior of structures during earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of ASCE*, Vol.85, No.EM4, pp.109-129, October 1959.
- 4) 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, Vol.235, pp.9-18, 1975.9.
- 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, pp.91-99, 1983.5.
- 6) 松島学, 松井邦人: 構造物の弾塑性モデルに及ぼす地震波の影響, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.815-824, 1986.3.
- 7) 桑村仁: 構造物に対する地震動強さの尺度, 構造工学論文集, Vol.33B, pp.49-56, 1987.3.
- 8) Hirao, K., Sasada, S., and Nariyuki, Y.: The effect of duration and frequency content of earthquake motion on energy responses of SDOF structures, *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.V, pp.141-146, August 1988.
- 9) 中島章典, 工藤宏生, 阿部英彦, 倉西茂: 圧縮軸力を受ける上端支持柱の動的強度特性についての基礎的考察, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.263-269, 1993.3.
- 10) 堀則男, 井上範夫, 柴田明徳: 鉄筋コンクリート造建物の地震時エネルギー応答性状及び応答最大塑性率とエネルギー消費に基づく所用耐力の検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.481, pp.17-25, 1996.3.
- 11) 入江達雄, 松田泰治, スマヤアラン: エネルギーの釣り合いによる構造物の応答推定法の適用, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.793-799, 1997.3.
- 12) 西澤英和, 金多潔: 1自由度振動系のエネルギー応答について, 日本建築学会構造系論文集, Vol.424,

- pp.117-124, 1991.6.
- 13) 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, Vol.420, pp.1-7, 1991.2.
 - 14) 諏訪仁, 野畑有秀, 鈴木哲夫: エネルギー入力率に基づく必要耐力の推定に関する一手法, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.523-530, 1997.3.
 - 15) 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法, 第9回日本地震工学シンポジウム, 1994.
 - 16) 中村孝也, 堀則男, 井上範夫: 地震動エネルギーの入力過程を考慮した鉄筋コンクリート造建物の応答最大変形推定法, 構造工学論文集, Vol.44B, pp.359-368, 1998.3.
 - 17) 衣笠秀行, 野村説郎: 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 — その1 エネルギー入力速度EIVを考慮した性能評価型設計法 —, 日本建築学会構造系論文集, Vol.486, pp.85-94, 1996.8.
 - 18) 中村友紀子, 壁谷澤寿海: 等価減衰を考慮したスペクトルによる応答の推定, 構造工学論文集, Vol.44B, pp.313-318, 1998.3.
 - 19) 桑村仁, 伊山潤, 竹田拓也: 地震動のエネルギー入力率スペクトルの特性 — 変位一定説とエネルギー一定説の調和 —, 日本建築学会構造系論文集, Vol.498, pp.37-42, 1997.8.
 - 20) 岡田哲夫編: 道路橋の設計と施工, 道路実務講座10, 山海堂, 1983.
 - 21) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説, 丸善, 1990.
 - 22) 川島一彦, 大志万和也, 長谷川金二, 運上茂樹, 桶田憲一, 前原康夫: 道路橋の耐震設計計算例, 山海堂, 1992.
 - 23) 日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995.6.
 - 24) 申鉉穆, 前川宏一, 岡村甫: 繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の復元力解析, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム, Vol.II, pp.45-56, 1988.3.
 - 25) Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, December 1970.
 - 26) 鹿嶋俊英, 北川良和: 平成5年(1993年)釧路沖地震強震観測速報, 建設省建築研究所, 1994.7.
 - 27) 建設省土木研究所: 土木構造物における加速度強震記録, 第64号, 土木研究所彙報, 1995.6.
 - 28) 建設省土木研究所: 平成5年(1993年)釧路沖地震災害調査報告, 第193号, 土木研究所報告, 1994.1.
 - 29) 建設省土木研究所: 平成5年(1993年)北海道南西沖地震災害調査報告, 第194号, 土木研究所報告, 1994.7.
 - 30) 翠川三郎, 作川孝一: 地震エネルギー入力の時刻歴特性に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.57-63, 1993.11.
 - 31) 中村友紀子, 壁谷澤寿海: 地震動特性にもとづく最大塑性変位応答に関する研究, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.485-492, 1997.3.
 - 32) 桑村仁, 竹田拓也, 佐藤義也: 地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率 — 直下型地震と海洋型地震の比較を通して —, 日本建築学会構造系論文集, Vol.491, pp.29-36, 1997.1.
 - 33) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
 - 34) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980.
 - 35) 桑村仁: 耐震建築物の限界状態と破壊規範式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第387号, pp.45-53, 1988.5.
 - 36) 平尾潔, 沢田勉, 成行義文, 笹田修司: 強震下における一自由度系の履歴吸収エネルギーと弾性応答値との関係について, 土木学会論文集, 第368号 /I-5, 1986.4.
 - 37) Park, Y.-J. and Ang, A. H.-S.: Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol.111, No.4, pp.722-739, April 1985.
 - 38) Park, Y.-J., Ang, A. H.-S., and Wen, Y. K.: Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, *Journal of Structural Engineering*, Vol.111, No.4, pp.740-757, April 1985.
 - 39) 桑村仁, 秋山宏, 桐野康則: フーリエ振幅スペクトルの平滑化による地震入力エネルギーの評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp.53-60, 1992.12.

(2000.3.27 受付)

DAMAGE EVALUATION METHOD BASED ON TOTAL EARTHQUAKE INPUT ENERGY AND UNIT EARTHQUAKE INPUT ENERGY IN REINFORCED CONCRETE PIER

Kou IBAYASHI, Masatoshi NAKAZAWA, Yoshio OZAKA and Motoyuki SUZUKI

In this study, an evaluation method is proposed about plastic factor and hysteresis energy by only elastic analysis considering total input energy within earthquake duration and unit input energy within a unit period in the earthquake. Furthermore, damage estimation method of structures is proposed by this method applied to past a damage index.