RC 橋脚の地震時損傷度推定のための地震入力エネルギー特性に関する検討

長岡工業高等専門学校専攻科　学生会員　○赤原　健太
長岡工業高等専門学校　　正会員　　井林　　康

1. はじめに

土木構造物の設計時に，弾塑性地震応答解析を行わずに，構造物の被害程度を簡便に推定する手法を構築することは非常に有用である．本研究では弾塑性地震応答解析を行わずに地震入力エネルギーから，簡便に RC 橋脚の損傷度を算定できる手法の構築と，その適用範囲を明らかにすることを目的とした．

2. 理論

(1)　地震入力エネルギー

1 質点系の運動方程式の一般式の両辺に$\dot{x}dt$を乗じて，時間 t について，地震動の開始時間 $t=0$ から $t=t_0$ まで積分すれば，地震終了時におけるエネルギーのつり合い式となり，地震入力総エネルギーE として式(1)に示す．また，任意の t_1 に対して地震時における入力エネルギーの最大値を地震入力単位エネルギー ΔE と定義し，式(2)に示す．

$$E \equiv \int_0^{t_0} M\ddot{z}\dot{x}dt \qquad (1)$$

$$\Delta E(\Delta t) \equiv max_{t_1}\left\{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} M\ddot{z}\dot{x}dt\right\} \qquad (2)$$

式（1），(2）を速度次元で表したもので検討した．

(2)　等価吸収エネルギー

構造物が許容できる吸収エネルギーを，1/4 周期に吸収可能なエネルギー量と考え，図 1 に示すように復元力が 0 の点から最大応答変位までの三角形の面積ΔWが等価吸収エネルギーと定義できる．ここで，P_y：降伏耐力，d_y：降伏変位，d_{m}：最大変位とする．

モデルは，降伏後の剛性がない TypeA と降伏後も剛性を持つ TypeB の 2 種類を用いた．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り変化するが，等価周期に関する関数に書き換えると TypeA は直線となり，TypeB は放物線の形の等価吸収エネルギー線が得られる．

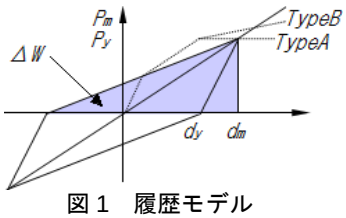

図 1　履歴モデル

表 1　解析に用いた橋脚

橋脚名	幅 (cm)	奥行き (cm)	高さ (cm)	上載荷重 (kN)	軸方向鉄筋名	かぶり (cm)	軸方向鉄筋本数
p96	400	142	700	7150	D32	6.91	130
p02	400	150	670	7150	D32	6.91	132
p07	500	250	1000	6701	D29	10.27	150

表 2　解析に用いた地震波

地震波名	EW		NS	
	最大加速度(gal)	卓越周期(s)	最大加速度(gal)	卓越周期(s)
JMA川口	1675.8	1.30	1141.9	0.22
JMA小千谷	897.6	0.86	779.2	0.38
JMA山古志	721.8	0.86	538.4	1.76
JMA長岡	430.3	0.34	395.8	0.40

3. 解析方法

解析対象構造物として，表 1 に示す各年のコンクリート標準示方書耐震性能照査編もしくは設計編に記載されているもの計 3 種を用いた．地震波は気象庁による強震観測データのうち表 2 に示す新潟県中越地震の 8 波形を用いた．ここでの卓越周期とは，速度応答スペクトルの卓越周期である．弾塑性地震応答解析としては，FEM 解析ソフトウェアの OpenSees を用い，RC 橋脚を 1 質点系モデルとし，減衰定数を 0.02 として解析を行った．

図 2 は地震入力総エネルギーV_E と単位エネルギー$V_{\Delta E}$，および等価吸収エネルギー$V_{\Delta W}$ をまとめた例である．横軸に周期，縦軸にエネルギーをとり，波形は V_E および $V_{\Delta E}$ のスペクトル，直線および放物線は $V_{\Delta W}$ を示している．$V_{\Delta E}$ スペクトルと $V_{\Delta W}$ の交点から周期を読み取り，その周期に対応する V_E スペクトルのエネルギーを入力されるエネルギー量として，弾塑性地震応答解析値と比較する．

このような検討を行う場合，1 つの地震波に対して 1 種類の V_E および $V_{\Delta E}$ のエネルギースペクトルで検証を行うと，交点を持たない地震波と橋脚の組合せも多い

キーワード　地震入力エネルギー，等価吸収エネルギー，エネルギースペクトル，弾塑性地震応答解析
連絡先　　〒940-8532　新潟県長岡市西片貝町 888　長岡工業高等専門学校環境都市工学科　TEL　0258-34-9271

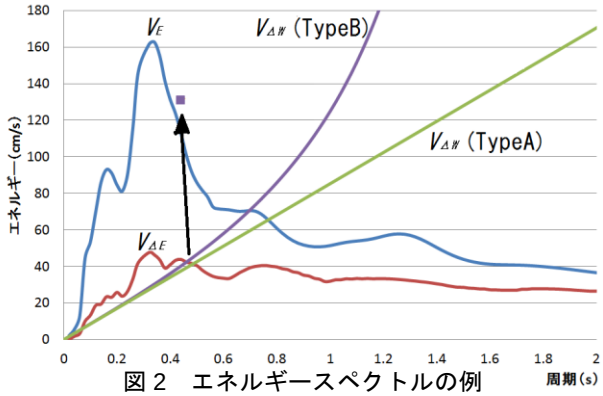

図 2　エネルギースペクトルの例

ため，本研究では，地震波を 100gal から 2000gal まで 100gal 刻みに拡大・縮小して使用した．横軸に地震波の最大加速度，縦軸に読み取られたエネルギー量をとり，近似直線から元の最大加速度における平均的な入力エネルギー量を推定した．

また，今回は表 3 のような 5 つの条件で入力エネルギー量の算定を試みた．また，各条件を評価するため，解析値と推測値の差を解析による吸収エネルギー量で除した誤差率を用いた．

4. 結果

各条件の誤差率を表 4 に示す．条件 1 と条件 2 を比較すると，条件 2 で平均の誤差率が小さくなっている．これは，交点が地震終了時の RC 橋脚の固有周期を示していることと，地震終了時における RC 橋脚の固有周期が 1s を超えるものが本研究で用いた橋脚になかったことを考えると，交点を読み取る範囲を 0s～1s に狭めることで精度が向上したと考えられる．

また，条件 2 と条件 3 を比較すると，条件 3 で誤差率が僅かに小さな値のものが多数ある．これより，橋脚上部 1/3 の重量を考慮する必要があると考えられる．

次に，条件 3 と条件 4 を比較すると，両条件で似たような誤差率が多数ある．これは，降伏直後までは吸収エネルギー量に差がないためであると考えられる．しかし，条件 4 の誤差率が全体的に小さくなっていることより，降伏後しばらくすると履歴モデルとして TypeB の方が TypeA より実際のものに近いと考えられる．条件 4 と条件 5 を各地震波の卓越周期と関連付けて見ると，条件 4 は JMA 川口(EW)，JMA 小千谷(EW)の卓越周期が 0.8s～1.3s の間の地震波に対して，条件 5 は JMA 川口（NS），JMA 小千谷（NS）の卓越周期が小さい地震波に対して良好な結果が得られた．また，JMA 山古志（EW），JMA 長岡（NS）は，卓越周期があまり明確でない地震波であり，このような地震波では，卓越周期以外の周期においても強い影響をもつため，あまり良好な結果が得られなかったと考えられる．また，JMA 山古志（NS）は，卓越周期が大きい地震波であり，このような地震波では RC 橋脚がエネルギーを吸収しにくいため，どの条件でも明確な結果が得られなかったと考えられる．また，JMA 長岡（EW）は，両条件で比較的良い結果が得られた．これは，JMA 長岡（EW）が入力するエネルギー量が小さいため，$V_{\Delta E}$ スペクトルと $V_{\Delta W}$ の交点が得られやすく，交点の範囲に影響されにくいためだと考えられる．

表 3　各条件の特徴

条件	交点の範囲	重量	$V_{\Delta W}$
1	全周期	上載荷重のみ	TypeA
2	周期0s～1s		
3		上載荷重と上部1/	
4			TypeB
5	周期0.4s～0.6s		

表 4　各条件の誤差

地震波	橋脚	誤差率P				
		1	2	3	4	5
JMA川口（EW）	P02	6.1	7.7	5.5	0.9	22.7
	P07	12.4	36.2	17.4	6.3	20.9
	P96	15.8	6.7	13.1	19.6	40.8
JMA川口（NS）	P02	5.9	13.0	12.8	8.9	3.9
	P07	20.7	23.4	16.2	15.6	11.3
	P96	24.7	24.0	22.1	23.1	13.4
JMA小千谷（EW）	P02	19.5	9.4	7.5	9.8	43.8
	P07	16.5	17.7	11.8	9.2	45.7
	P96	34.5	7.8	48.5	9.2	33.6
JMA小千谷（NS）	P02	31.6	33.1	32.9	32.4	0.6
	P07	32.5	34.5	34.3	32.2	2.8
	P96	31.7	37.0	35.7	30.5	2.7
JMA山古志（EW）	P02	14.4	29.4	129.3	58.8	11.9
	P07	36.5	59.4	70.5	50.4	9.6
	P96	2.8	126.8	37.2	37.1	17.0
JMA山古志（NS）	P02	173.1		2.1	14.3	2.2
	P07	264.7	24.2	22.0	6.7	22.0
	P96	44.0		8.9	41.2	8.7
JMA長岡（EW）	P02	15.3	13.7	10.3	9.2	21.0
	P07	12.6	6.1	0.9	17.2	10.0
	P96	11.7	8.4	1.1	1.8	3.1
JMA長岡（NS）	P02	35.4	35.1	36.5	35.2	13.9
	P07	28.9	29.5	24.4	25.0	27.6
	P96	21.5	26.7	26.2	19.9	21.5
平均		38.0	27.7	26.1	21.4	17.1

5. まとめ

エネルギースペクトルが明確な卓越周期をもたない場合や，卓越周期が 1.3s 以上の場合，吸収エネルギー量を推定することは難しいが，卓越周期が 0.8s～1.3s のエネルギースペクトルの場合は条件 4 で，卓越周期がそれ以下の場合は条件 5 を用いることで，吸収エネルギー量が概ね推定できることが判明した．

文献

井林康ら：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，土木学会論文集，No.676／V - 51，1 - 11，2001.5