

I-B 319

弾塑性応答スペクトルを用いた試算例

阪神高速道路公団 正会員 長沼 敏彦
 阪神高速道路公団 正会員 中島 裕之
 総合技術コンサルタント 正会員 西森 孝三

1. はじめに

耐震設計において構造物が強い地震動を受けたケースを対象にする場合、終局強度が問題とされ、応答解析においても構造物の非線形特性を考慮した解析が行われる。非線形特性の最も単純な例として、完全弾塑性型の復元力特性を有する1自由度系が挙げられ、この系に対しては弾性体の場合と同様に地震応答スペクトル手法を適用できる。このような試みは以前から行われていたが、今回の兵庫県南部地震で得られた強震記録を用いて完全弾塑性系の地震応答スペクトルを作成し、等価エネルギー法との比較や実際の構造物を対象とした試算を行い適用性の評価を試みた。

2. 弾塑性応答スペクトルの作成と照査手順

弾塑性応答スペクトルを作成するために、今回の兵庫県南部地震で得られた各地盤種別での代表的な強震記録を入力として1自由度系の弾塑性応答解析を行った。応答計算法としては1自由度系の簡単な完全弾塑性モデルであるため増分法を用いた。また、解析においては、減衰定数を $h=0.05$ 、バネ定数を $k=10^4 \text{ t/m}$ (＝一定)とし、質量 m を変えて固有周期 T を変化させるとともに、降伏変位 δ_y をさまざまに変化させて目標とする応答塑性率 μ を求め、 μ をパラメータとする弾塑性応答曲線を描いた。図-1に神戸海洋気象台(NS)記録を入力地震波形とした弾塑性応答スペクトルを一例として示す。

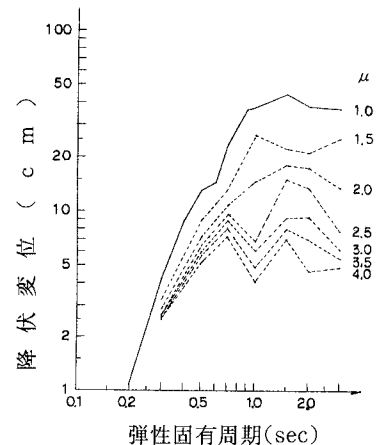
今回は四軸対数座標で表示していないが、照査手順としてはまず対象とする構造物の非減衰固有周期 T と降伏変位 δ_y から図-1の(a)を用いて応答塑性率 μ を求め、構造物の許容塑性率 μ_a が応答塑性率 μ より大きくなることを確かめればよい。またそのときの最大応答加速度などは非減衰固有周期 T と(a)から求められた応答塑性率 μ を用い図-1の(b)から求められる。

3. 弾塑性応答スペクトルの評価

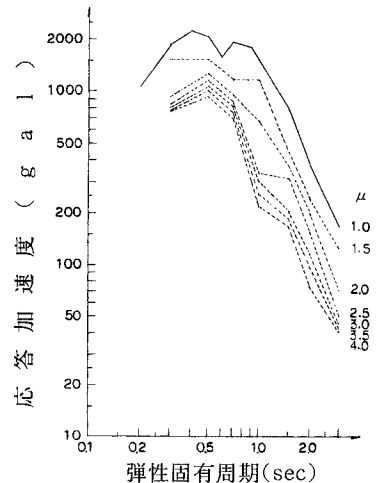
3-1 一般的傾向

図-1の(a)から同じ固有周期に対しては降伏変位が大きくなるにつれて応答塑性率が小さくなる傾向にあり、弾塑性応答スペクトルを用いた照査では構造物の許容塑性率は小さくてもよいことになる。しかしながら、図-1の(b)から対応する応答加速度を求めると、降伏変位が大きくなるにつれて応答塑性率が小さくなるため、大きい値となっており弾塑性応答スペクトルの一般的傾向を示している。一方、図-1の(b)からは固有周期により応答加速度が変わるが、 $\mu=1$ の弾性応答の場合と比較し弾塑性応答の場合は応答塑性率 μ に応じて応答加速度がかなり低減している。

3-2 等価エネルギー法などとの比較



(a) δ_y と T の関係



(b) 応答加速度と T の関係

図-1 神戸海洋気象台(NS成分)に対する完全弾塑性系の応答スペクトル

線形系に対する弾塑性系の最大応答の比と塑性率の関係については、固有周期が短周期であるような構造物では、線形系と弾塑性系の最大ひずみエネルギーは等しいと考えられることから、線形弾性解による加速度応答スペクトルに $1/(2\mu-1)^{1/2}$ を乗じれば弾塑性系の加速度応答スペクトルが得られると考えられる。しかしながら、長周期の構造物で線形弾性解と弾塑性解が同様な応答変位を示すと考えられる場合は、線形弾性解による加速度応答スペクトルに $1/\mu$ を乗じることで弾塑性系の加速度応答スペクトルが得られることになる。表-1は応答塑性率をパラメーターとして各固有周期に対する最大応答加速度を弾塑性応答スペクトルを用いた場合と等価エネルギー法を用いた場合などと比較したものである。このケースでは $\mu=1.5$ の場合、 $T=0.5$ 以上になるといずれの方法も比較的よく一致しているが、 μ が大きくなると短周期の領域で最大ひずみエネルギー一定、長周期の領域で最大変位一定として算定した最大応答加速度が弾塑性応答スペクトルを用いて求めた値と比較的よく一致している。

表-1 各方法による最大応答加速度の比較

固有周期 T(sec)		0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0
$\mu=1.0$	$A_1(\text{gal})$	1842	2101	1924	1504	789	379	167
$\mu=1.5$	$A_p(\text{gal})$	1513	1525	1157	1160	444	238	126
	$A_1 \times \beta$	1302	1486	1360	1063	558	268	118
	$A_1 \times \gamma$	1228	1401	1283	1003	526	253	111
$\mu=2.0$	$A_p(\text{gal})$	928	1263	954	671	368	197	70
	$A_1 \times \beta$	1063	1213	1111	868	456	219	96
	$A_1 \times \gamma$	921	1051	962	752	395	190	84
$\mu=3.0$	$A_p(\text{gal})$	810	1065	807	302	206	116	45
	$A_1 \times \beta$	824	940	860	673	353	169	75
	$A_1 \times \gamma$	614	700	641	501	263	126	56

A_1 : 弾性応答、 A_p : 弾塑性応答、 $\beta=1/(2\mu-1)^{1/2}$ 、 $\gamma=1/\mu$

表-2 I種地盤入力に対するL3レベルの試算例

	例1 RC橋脚	例2 鋼充填	例3 鋼単独
構降伏変位 δ_y (cm)	5.62	6.80	10.70
造等価質量 W(t)	1179	534	534
条固有周期 T(sec)	0.706	0.974	0.992
件許容塑性率 μ_s	7.23	5.47	2.01
保有水平耐力 P_s (tf)	731	417	353
①等価設計震度 K_h	0.46	0.46	0.84
作用力 $K_h \cdot W$ (tf)	542	247	450
②上部工加速度(gal)	849	725	658
等価水平力(tf)	611	362	340
③応答塑性率 μ	5.5	2.7	2.1
応答加速度 A_p (gal)	500	350	550
作用力 $A_p \cdot W$ (tf)	602	191	300

ときに問題があったのではないかと考えられる。鋼単独断面のときは①の照査では許容値を超えるが、②の照査では許容値内に収まっており、③の照査では応答塑性率が若干許容値を超えている。

5. おわりに

今回、兵庫県南部地震で得られた強震記録に対し、完全弾塑性系の加速度応答スペクトルを作成したが、さらに詳細な弾塑性スペクトルを作成するとともに、各地盤種別に想定される地震波形に対して得られるスペクトルを平均化し一般的に適用できるものにする必要があろう。また、非線形系で重ね合わせができないため、一自由度で構造物の挙動が表現できる簡単な構造物に対してのみに適用が可能であるが、構造物の実際の挙動が完全弾塑性系の復元力特性で近似できるか今後さらに検証する必要がある。照査手法においては、応答塑性率と構造物の許容塑性率との比較だけで照査するので、橋脚が負担する地震慣性力には粘性減衰項が負担する慣性力は含まれておらず、等価エネルギー法を用いた静的照査との整合を図る必要があろう。