## 2.4 応答結果の検討

## 2.4.1 エネルギー的観点から見た変位応答

ある初期周期と履歴モデルを持つ系の弾塑性応答の違いについては、入力エネ ルギーの観点より説明できるとされている。もし、入力エネルギーが直接最大応 答変位に関係し、消費エネルギーが履歴エネルギーのみであるとすれば、これは Appendix Aに示したように等価周期の伸びによる変形増加と、履歴減衰の増加に よる変位減少を組み合わせた等価線形化法で説明できるはずである。しかしなが らAppendix Aに示された結果は十分な説明ができない事を示している。最大応答 変位は入力エネルギーの直接の関数ではない。入力エネルギー(*Em*)は、減衰エネ ルギー(*Ed*)と履歴エネルギー(*Eh*)の和であり、履歴エネルギーは、変位応答の積分 であり、最大応答変位と直接関係していないからである。履歴エネルギーと最大 変形時の見掛けの最大エネルギー(図-2.12の斜線部分)の比を累積率として*Ra*と すれば、

$$R_a = \frac{E_h}{A} = \frac{E_h}{Q_{y(x \max - x_y/2)}}$$
(2.19)

ここで、

$$E_m = E_h + E_d - \dots$$
 (2.20)

よって、

$$x \max = \frac{Eh}{RaQy} + \frac{x_y}{2} = \frac{Em - Ed}{RaQy} + \frac{x_y}{2}$$
 ------(2.21)

この式は、もし履歴エネルギー Eh と累積率 Ra が強度比 SR の関数として与えられるならば、最大変位 xmax が SR の関数として与えられる事を示している。

履歴エネルギー Eh と累積率 Ra が一定値であるとすると、最大変位 xmax が 弾性応答スペクトルに対してSRの単純な関数(応答変位比DR)として与えられる。 モデル1に対して秋山<sup>16</sup>は主としてEl Centro NSに対する応答解析結果より累積率 Raと同様の係数、累積塑性率として4を与え、To>Tcの応答変位比DRを次式で与 えている(原式と表現は異なる)。

$$DR = \frac{1}{8} \left( \frac{1}{SR} + 7 \cdot SR \right)$$
 (2.22)

この式は、*SR*>0.14のとき1を超えないが、本論の結果と比べると*SR*が大きいときには*DR*を小さく評価し、*SR*が小さいときには*DR*をかなり大きく評価している。



図-2.12 履歴エネルギーと最大変形時の見掛けの最大エネルギー

2.4.2 弾塑性系への入力エネルギー

秋山<sup>16</sup>はモデル1で示されるような弾塑性モデルにおいて、入力エネルギーは弾 性初期周期と、降伏に伴って伸びる有効等価周期の間の平均値として求められる としている。従って、エネルギースペクトルはこの2つの周期の間の矩形フィルタ ーを掛けて求めた平滑化フーリエスペクトルといえる。一方、菊田他<sup>17)</sup>はモデル5 で示されるような弾塑性スリップモデルにおいては、三角形のフィルターを掛け て求めた平滑化フーリエスペクトルとして求められるとしている。実際には、こ れらのフィルターは、周期域や履歴モデル、最大変形量により異なるので一般的 には求まらないが、弾塑性システムに対するエネルギー入力の説明ととして有益 である。

Berg<sup>18)</sup>は弾塑性系の入力エネルギーは初期周期の同じ弾性系の入力エネルギー よりも小さいと結論している。初期周期が*Tc*よりも大きい場合には、塑性化に伴 う周期の伸びによりエネルギースペクトルが減少する傾向にあるため、この結論 が成立すると考えられる。一方*To*<*Tc*の場合には、ある程度までは強度の低下に 伴い有効周期が伸びる事により入力エネルギーは増加する。しかし、ある強度以 下となると入力エネルギーは減少する。強度がほとんど0のシステムでは、初期 周期に関係なく入力エネルギーはほとんど一定値(*Ve*=*x*gmmx)となる。

図-2.13は、El Centro NSをそのままのスケールで入力したときのモデル3のエネ ルギースペクトルを示したものである。ここで説明した弾塑性系に対するエネル ギー入力の傾向を良く示している。



図-2.13 強度比SRの変化による入力エネルギーの違い

2.4.3 減衰エネルギー

1質点系の解析モデルにおいてエネルギーは、減衰エネルギーと履歴エネルギー により消費される。減衰は鉄筋コンクリート構造の解析では一般的に瞬間剛性に 比例させるため、弾性応答では減衰エネルギーが、弾塑性応答では履歴エネルギ ーが支配的となる。

図-2.14(a)はEl Centro NSを入力したときの減衰エネルギーの全エネルギーに対 する比を各周期毎に各履歴モデルに対してSRを変化させて示したものである。縦 軸は減衰エネルギーの全入力エネルギーに対する比を示し、横軸は強度比SRを示 している。SRが小さくなると非線形性が増加する。周期の長いところでは、SRが 1のところにおいても、減衰エネルギーの比が1になっていない。これは、本解析 を地震動記録の間のみにおいて行っているため、周期の長い系においては入力エ ネルギーの多くが運動エネルギー(もしくはポテンシャルエネルギー)として貯 えられているためである。振動が十分減衰して振動しなくなるまでの自由振動解 析を行えば、地震記録の最後までの入力エネルギーは減衰によってすべて消費さ れる。

減衰エネルギーの全入力エネルギーに対する比は、履歴モデルによる差があり、 降伏時以外は初期剛性で応答するモデル1と降伏後は剛性の低下するモデル2~4と では傾向が異なっている。モデル1では、この比は強度比SRに比例して低下してお り、モデル2~4ではおおむね2乗に比例して低下している。スリップ型のモデル5 ではSRが大きいときにはモデル1に近く、SRが小さくなるとモデル2~4に近くな っている。また、この低下の傾向は周期比TRにはあまり関係しないようである。

図-2.14(b)はモデル3に対して減衰エネルギーの全エネルギーに対する比を各周 期毎に5種の入力地震動に対してSRを変化させて示したものである。地震動により 差はあるが、左下がりの傾向は同様である。

これらのことより、減衰によって消費されるエネルギーは、強度比*SR*の低下に 伴い減少していることが分かる。

45



減衰エネルギーの入力エネルギーに対する比

(



減衰エネルギーの入力エネルギーに対する比



2.4.4 履歴エネルギー

1質点系の解析モデルにおいて履歴によって消費されたエネルギーは、入力エネ ルギーと減衰によるエネルギーの差として求められるが、入力エネルギーには1次 的に貯えられるポテンシャルエネルギーが含まれているため同一にはならない。

図-2.15(a)は、El Centro NSを入力したときの履歴によって消費されたエネルギーを、図-2.16(a)は、履歴エネルギーに系に1時的に貯えられたポテンシャルエネルギーを加えたものを各周期毎に各履歴モデルに対してSRを変化させて等価速度で示したものである。初期周期がTcより大きく、SRの低下により入力エネルギーが減少する領域であっても、履歴エネルギーは減少していない。これは、SRの減少により減衰エネルギーも減少しているためである。

モデル1のSRの変化に伴う履歴エネルギーの変化は他のモデルに比べて傾向が異なる。これは、このモデルが降伏後も初期周期で振動する事が多い事に起因している。

図-2.15(b)は、モデル3に対し履歴によって消費されたエネルギーを、図-2.16(b) は、履歴エネルギーに系に一時的に貯えられたポテンシャルエネルギーを加えた ものを等価速度として求め、平滑化した速度応答スペクトルで規準化したものを、 各周期毎に5種の地震動に対してSRを変化させて示したものである。地震動の差に よる違いはあまり目立たなく、傾向的には、本論で示した無次元化により、地震 動の差をなくすることができると考えられる。

初期周期がTcより小さい周期域では、SRの減少により履歴エネルギーが直線的 に増大している。初期周期がTcより大きい領域では、SRの変化に履歴エネルギは 無関係のようである。



図-2.15(a) 履歴モデルによる履歴ネルギーの相違 (El Centro NS に対する応答値)





図-2.15(b) 入力地震動による履歴ネルギーの相違 (平滑化した速度応答スペクトルで規準化した モデル3 に対する応答値)



図-2.16(a) 履歴モデルによる履歴+ポテンシャルエネルギーの相違 (El Centro NS に対する応答値)





図-2.16(b) 入力地震動による履歴+ポテンシャルエネルギーの相違 (平滑化した速度応答スペクトルで規準化した モデル3 に対する応答値)

図-2.12 履歴エネルギーと最大変形時の見掛けの最大エネルギー	42
図-2.13 強度比 SR の変化による入力エネルギーの違い	44
図-2.14(A) 履歴モデルによる減衰エネルギーの比の相違	46
図-2.14(B) 入力地震動による減衰エネルギーの比の相違	
( モデル3 に対する応答値)	47
図-2.15(A) 履歴モデルによる履歴ネルギーの相違	49
図-2.15(B) 入力地震動による履歴ネルギーの相違	
(平滑化した速度応答スペクトルで規準化した モデル3 に対する応答値)	) 50
図-2.16(A) 履歴モデルによる履歴+ポテンシャルエネルギーの相違	
(EL CENTRO NS に対する応答値)	51
図-2.16(B) 入力地震動による履歴+ポテンシャルエネルギーの相違	

図-2.16(B) 入力地震動による履歴+ホテンシャルエネルキーの相違 (平滑化した速度応答スペクトルで規準化した モデル3 に対する応答値) 52