I-367　ヒステリシス復元力の等価線形化法に関する基礎的考察（非定常応答の場合）

埼玉大工学部　正　員　渡辺啓行
埼玉大大学院　学生員　○栃木　均

1．はじめに　構造物の非線形地震応答解析においては非線形復元力特性を近似化あるいは簡略化せざるを得ないが、その1つの手法として等価線形化法がある。この手法は1周期当りの損失エネルギーが等しいという条件の下に、ヒステリシス復元力特性を等価なバネ定数と減衰定数とにより粘弾性Voigt体に置換するものである。前報告では、正弦加振を受ける1質点系の等価線形解とKryloff-Bogoriuboff法による理論近似解とを比較し、定常応答においては等価線形化による近似が妥当であることを示した。[1] ランダム波の解析においては、動的定数を定める有効振幅値として最大応答変位の2/3の値が採用されているが、その理論的根拠はあいまいである。本報告では、ランダム波を入力した場合に等価線形化法によりどの程度まで近似し得るのかという点に関して検討し、それに対して一考察を与える。

2．解析手法　非線形復元力特性を持つ1質点振動系に非定常波を入力し、等価線形化法により解析を行ないその応答波形、フーリエスペクトルを厳密解と比較、検討する。等価線形動的定数は、バネ定数k_{se}としてヒステリシスループの最大点どうしを結ぶ割線係数をとり、減衰定数h_{eg}にはループ面積ΔWとループの頂点を通る割線より下側の三角形の面積Wとにより定められる次式を採用した。[2]

$$h_{eg}=\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\Delta W}{W} \qquad (1)$$

ランダム波の解析においてはk_{se}とh_{eg}を設定し数値解を求め、これより新たなk_{se}とh_{eg}を定めて再び数値解析を行ない、安定した解を得るまでこれを繰返す。動的定数を定めるのに必要な有効振幅値は慣用的に最大応答変位の2/3の値とした。ここではこの係数を"有効振幅係数"[2]と仮称し、その値が応答に及ぼす影響を調べる。等価線形解と比較するため荷重伝達法[3]により厳密解を求めた。非線形復元力は鋼材、土質材料などの軟化系ヒステリシスとし、その定式化においてはRamberg-Osgoodモデルを用いた。R-Oモデルの計算への導入に際してはスケルトン曲線に拘束することにより数値計算によって生じるドリフトの影響を排除した。入力地震動は、系の固有振動数1.6Hzを含む卓越振動数1.0～2.5HzのEl-Centro NS・EW, Taft NS・EW, Olympia EW の5波形とし、その最大振幅はすべて系の降伏力の2倍となるようにした。

3．解析結果　等価線形化法による加速度、速度、変位の応答波形およびこれらのフーリエスペクトルの厳密解との比較の一例をそれぞれ図1，図3に示す。以上から認められる事実を要約すると下記のようになる。

i）加速度応答波形では等価線形解と厳密解とが比較的良く一致し、特に最大応答付近での一致は良好である。

ii）速度応答波形でも最大応答付近での一致は比較的良好であるが、応答が小さい時間帯においては厳密解は等価線形解よりかなり大きくなっており、周期のそろったなめらかな定常的応答を示している。このことは厳密解では応答の小さい状態が線形範囲にあって初期剛性系の共振振動数成分が助長されることを示唆する。

iii）変位応答波形では速度波形にみられた傾向がさらに顕著になっており、特に最大応答付近では等価線形解が厳密解よりかなり小さくなる場合も認められ、減衰定数をやや過大に評価している可能性を示唆している。

iv）等価線形化法の加速度のスペクトルは入力波形のものと類似しており、厳密解のスペクトルは加速度、速度、変位共に系の初期剛性に基づく振動数1.5～1.6 Hz付近で著しく卓越し、上記ii）で示唆されたことを裏付けている。また、入力波形の卓越する振動数において等価線形解と厳密解のスペクトルはほぼ一致している。

以上から非定常な入力に対して等価線形解は、加速度応答においては厳密解をかなり良く近似し特に最大応答付近では非常に良い近似となっているが、応答の比較的小さい領域では厳密解との誤差が大きくなると言える。この傾向は速度応答、変位応答でより顕著になり、最大応答変位が過小評価され設計上やや危険側となり得る。

4．考察及び結論　等価線形解析における有効振幅係数の値として慣用的に2/3をとることは加速度応答に関しては有効であるが変位応答を過小に評価する傾向にある。本研究では有効振幅係数をξと表示しξを種々変えて等価線形解の最大応答変位の収束値y_0を求め、厳密解の最大応答変位と比較した。その結果を図2に示す。大部分の入力地震動においてはξを増し1.0に近づけるにつれて減衰が増加するためy_0が低下する傾向を示すが、El-Centro EW や Taft EWのように必ずしもその傾向にないものもある。これらは、ξを変化させることにより減衰と固有周期が変化し入力波形の卓越する部分が移動することに起因するものと考えられる。例えば Taft EW では、$\xi \geq 0.6$では安定した傾向を示すのに、$\xi=0.5$ではそれまでの傾向が逆転し、$\xi=0.4$とすると繰返し計算において異なる時刻に最大変位を持つ二種の応答波形が交互に現われる（本計算では正規化した時刻$\tau=5$と$\tau=8$）。$\xi=2/3$とした実設計計算においてもしばしばこのような飛び移り現象を経験するが、この原因は上述した入力波形の卓越する部分の移動によるものと考えられる。このほか図2の示していることは、$\xi=2/3$のときの最大応答変位がどの入力地震動においても厳密解よりも小さいということである。このことは有効振幅係数を2/3とすることにより過大な有効振幅 設定され減衰定数を過大に評価することを示している。図1に示した変位応答時刻歴の厳密解とのずれはここにあるといえる。上述した検討から全ての地震動に共通する有効振幅係数の値は存在しないのであるが、設計上何らかの値が必要である。本研究における地震動はわずか5波形であるが、等価線形解のy_0が厳密解と一致するξの平均値が0.48となることをもとに、有効振幅係数として0.5を提案したい。

参考文献

1) 第38回年次学術講演会概要集I-36, 1983
2) 渡辺啓行：繰り返し載荷時の土の応力〜ひずみヒステリシスの等価線形化法に関する一考察　電力中央研究所報告, No.377019, 1978年
3) 土岐憲三：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動、土木学会論文報告集，第302号，1980年10月

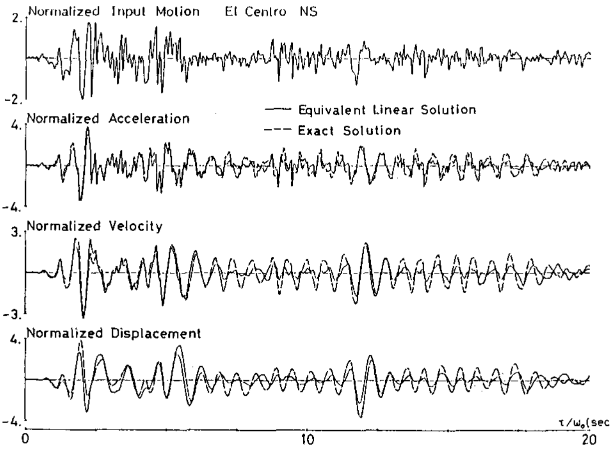

図1．等価線形解と厳密解の時刻歴による比較

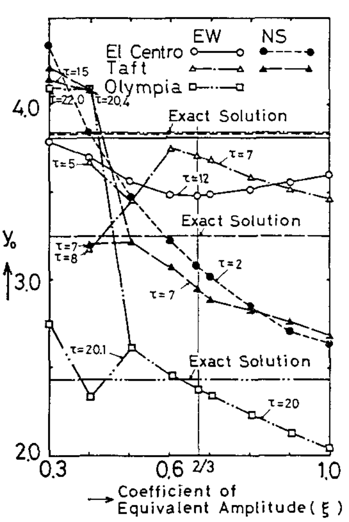

図2．有効振幅係数ξの影響

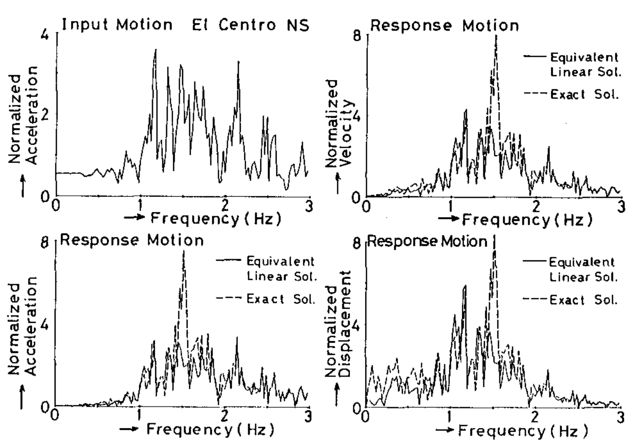

図3．等価線形解と厳密解のフーリエスペクトルによる比較