

エネルギーの等価性を考慮した構造物の応答評価に対する一考察

松田 泰治¹、大塚 久哲²、神農 誠³、内田 広明³、山田 純司⁴

¹博(工) 九州大学大学院 助教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
²フェロー-工博 九州大学大学院 教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
³九州大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
⁴九州大学工学部建設都市工学科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

1. はじめに

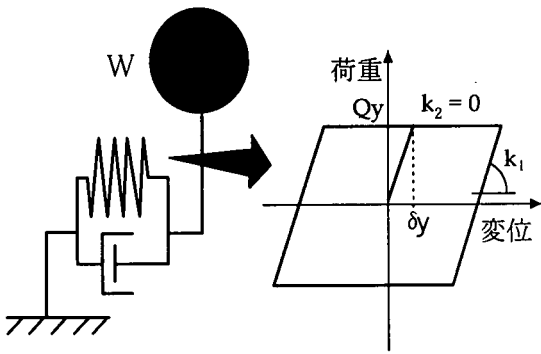
現在、道路橋の耐震設計においても性能設計への移行準備が始まっている。性能設計では想定される地震荷重レベルに応じて構造物のあるべき状態を保証するため、評価指標と評価値を定める必要がある。道路橋の単柱式橋脚の場合に当てはめると、タイプⅠやタイプⅡの地震動に対して免震支承のせん断ひずみや橋脚基部の塑性率を評価指標として限界性能を保証することが考えられる。その際には用いた評価値と構造物の状態の関係が合理的かつ明快であることが要求される。

兵庫県南部地震以降は道路橋の耐震設計において、地震時の損傷を橋脚基部に集中させる設計法が採用された。このため単柱式橋脚において非線形を考慮すべき箇所は免震支承等を採用した場合の支承部分と橋脚基部に限定されている。以上のような状況を踏まえ著者らはエネルギー入力量の総量の地震荷重指標としての有効性に着目し、非線形履歴挙動の合理的評価法に関する検討を重ねてきた。変電設備においては地震時の応答と正弦波入力時の応答の等価性に直目した耐震性評価法が採用されている。構造物の非線形挙動を考えた場合、地震動がエネルギー入力量の総量が等価な正弦波で置き換え可能となれば、地震荷重としてエネルギー入力量の総量のレベルを規定することにより構造物の損傷の程度が簡便に予測可能となる。ここではエネルギー入力量の総量が地震動と等価な正弦波入力を各種作成し、1自由度系モデルを用いて構造物の代表的損傷指標である塑性率に関して基礎的な検討を行った。

2. エネルギー等価な正弦波入力時の系の挙動

入力地震動をエネルギーの等価性を考慮した正弦波で単純化することの妥当性を検討するために、地震波入力と正弦3波入力に対して非線形時刻歴応答解析に

基づき代表的損傷指標である最大応答塑性率を比較する。



$h = 0.02, Q_y = 0.2W, g = 980 \text{ (cm/sec}^2\text{)}$
 $k_1 = 4m \pi^2 / T^2 \text{ (tf/cm)}, k_2 = 0 \text{ (tf/cm)}$
 m : 質点の質量 Q_y : 降伏荷重
 g : 重力加速度 δ_y : 降伏変位
 h : 粘性減衰定数 k_1 : 第1剛性
 T : 弾性固有周期 k_2 : 第2剛性

図-1 解析モデルと復元力特性

地震略名	項目	地震名	方向	最大加速度(gal)
(TYPE I)				
KAIHOKU BRG.LG		宮城県沖地震(1978)	LG	318.8
KAIHOKU BRG.TR		宮城県沖地震(1978)	TR	319.9
SHICHIHOU BRG.LG		北海道南西沖地震(1993)	LG	322.7
ITAJIMA BRG.LG		日向灘沖地震(1968)	LG	362.6
ITAJIMA BRG.TR		日向灘沖地震(1968)	TR	384.9
ONNETTO BRG.TR		北海道東方沖地震(1994)	TR	364.8
TSUGARU BRG.TR		日本海沖地震(1983)	TR	433.4
TSUGARU BRG.LG		日本海沖地震(1988)	LG	424.0
KUSHIROGAWA EMB.LG		北海道東方沖地震(1994)	LG	438.5
(TYPE II)				
JMAKOB.E OBS.NS		兵庫県 南部地震(1995)	NS	812.0
JMAKOB.E OBS.EW		兵庫県 南部地震(1995)	EW	765.9
HEPC INAGAWA.NS		兵庫県 南部地震(1995)	NS	780.0
JR TAKATORI STA.NS		兵庫県 南部地震(1995)	NS	686.8
JR TAKATORI STA.EW		兵庫県 南部地震(1995)	EW	672.6
OGAS FUKIAI.N27W		兵庫県 南部地震(1995)	N27W	736.3
HEPC HIGASHIKOB.N12W		兵庫県 南部地震(1995)	N12W	591.0
KOBE PORT ISLND.NS		兵庫県 南部地震(1995)	NS	557.4
KOBE PORT ISLND.EW		兵庫県 南部地震(1995)	EW	619.2

表-1 解析に用いた地震波

(1) 非線形時刻歴応答解析

完全弾塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度系モデルに対して、現行の道路橋示方書耐震設計編に示されているタイプⅠとタイプⅡの標準波を入力とした非線形時刻歴応答解析を行う。解析では、系の弾性固有周期(0.05秒～5.00秒)をパラメータとして弾性剛性を定め、粘性減衰定数を2%、降伏荷重は質点の重量の0.2倍と設定した。1自由度系のバイリニア型モデル及び復元力特性を図-1に示す。地震応答解析に使用した入力地震動を表-1に示す。

(2) エネルギー入力

1自由度系の振動方程式よりエネルギーの釣り合い方程式を導くと式(1)のようになる。

$$m \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = -m \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad (1)$$

右辺は地震終了時($t=t_0$)の地震動による振動系へのエネルギー入力の総量、すなわち地震外力によって系になされた仕事の総量を表している。左辺の第1項は地震終了時の運動エネルギーを表し、左辺の第2項は粘性減衰による吸収エネルギーを表している。左辺第3項はバネ系の弾塑性変形による履歴吸収エネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーを表す。

(3) エネルギー等価な正弦波の作成

(1)式に基づき標準波に対するエネルギー入力の総量を計算したのち、等価なエネルギー入力となる正弦波を作成する。構造物の弾性固有周期を正弦波の周期とし、波数を3波とした時の正弦波のエネルギー入力の総量が地震波のエネルギー入力の総量に等しくなる正弦波の加速度振幅を収束計算により定める。この収束計算における正弦波のエネルギー入力の総量と地震波のエネルギー入力の総量の誤差は1%以内とした。

(4) 最大応答塑性率の比較

図-2～図-7は地震波の入力加速度の最大値とエネルギー等価な正弦波の加速度振幅とを比較したものである。正弦波の加速度振幅は短周期側では地震波の加速度振幅に対して大きくなり、長周期側では逆に小さくなる。また、図-8～図-13は地震波を入力したときと正弦波を入力したときの最大応答塑性率を比較したものである。図-8～図-13よりわかるように長周期側

において両者の最大応答塑性率は一致している。一方短周期側では正弦波入力時の応答を上回るケースが多い。

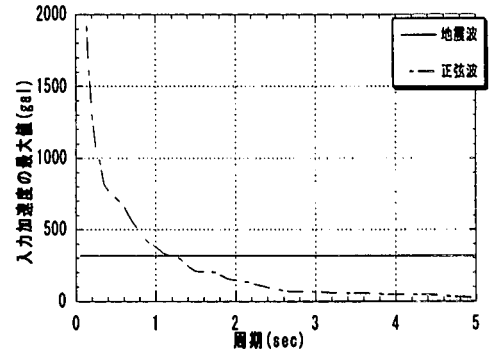


図-2 TYPE1-1の入力加速度と弾性固有周期の関係

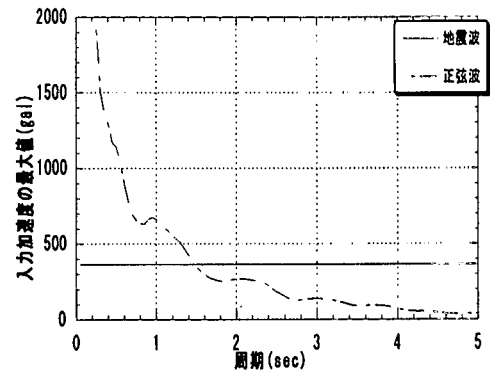


図-3 TYPE1-4の入力加速度と弾性固有周期の関係

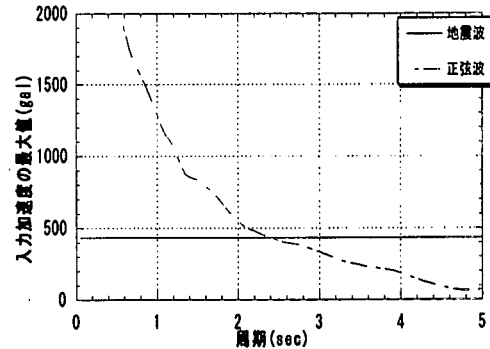


図-4 TYPE1-7の入力加速度と弾性固有周期の関係

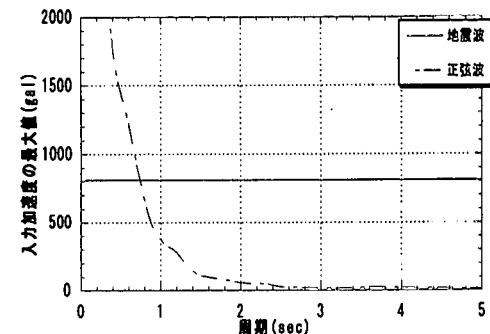


図-5 TYPE2-1の入力加速度と弾性固有周期の関係

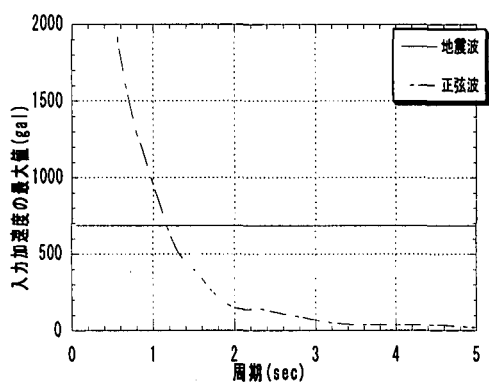


図-6 TYPE2-4の入力加速度と弾性固有周期の関係

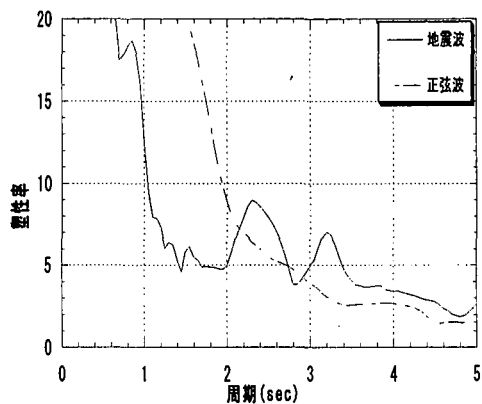


図-10 TYPE1-7の最大応答塑性率と弾性固有周期との関係

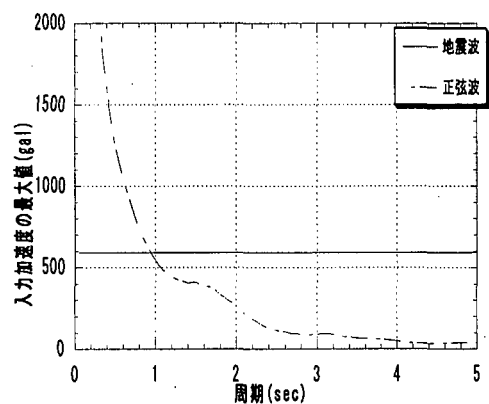


図-7 TYPE2-7の入力加速度と弾性固有周期の関係

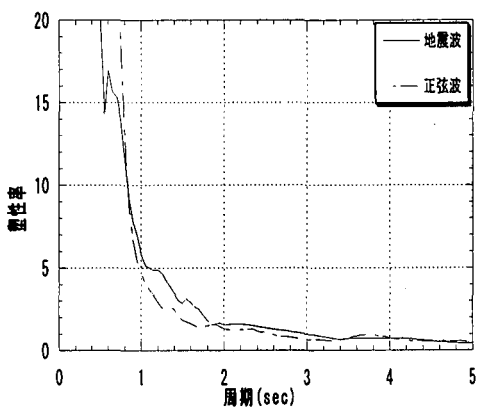


図-11 TYPE2-1の最大応答塑性率と弾性固有周期との関係

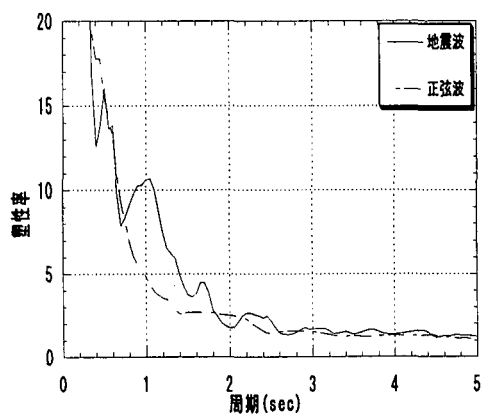


図-8 TYPE1-1の最大応答塑性率と弾性固有周期との関係

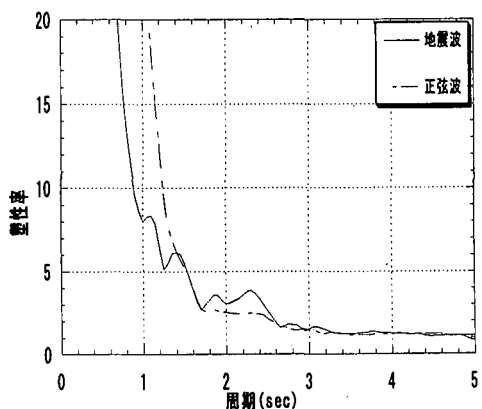


図-12 TYPE2-4の最大応答塑性率と弾性固有周期との関係

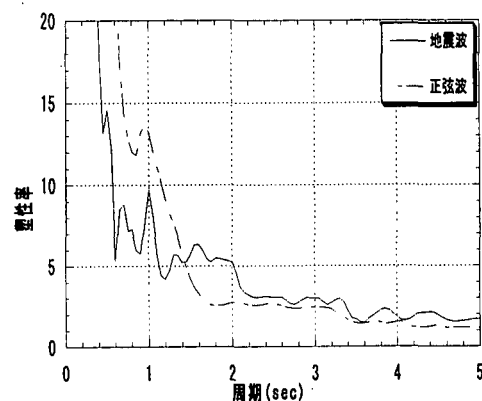


図-9 TYPE1-4の最大応答塑性率と弾性固有周期との関係

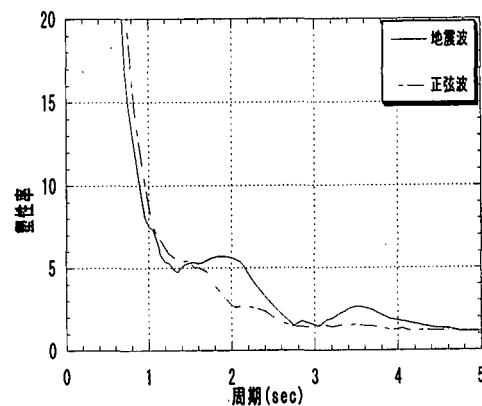


図-13 TYPE2-7の最大応答塑性率と弾性固有周期との関係

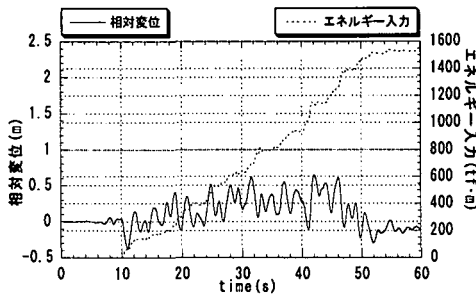


図-14 $T_0=1.5$ (S)においてTYPE1-7の地震波を入力したときの相対変位とエネルギー入力の時刻歴

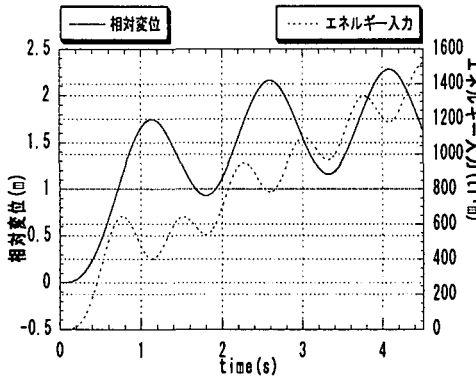


図-15 $T_0=1.5$ (S)においてTYPE1-7の正弦波を入力したときの相対変位とエネルギー入力の時刻歴

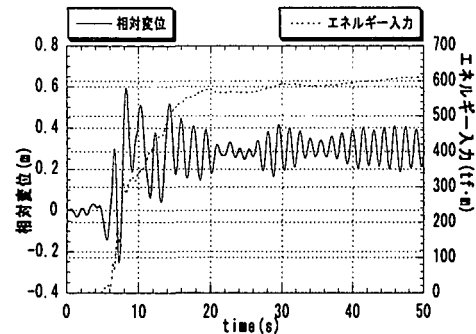


図-16 $T_0=1.5$ (S)においてTYPE2-7の地震波を入力したときの相対変位とエネルギー入力の時刻歴

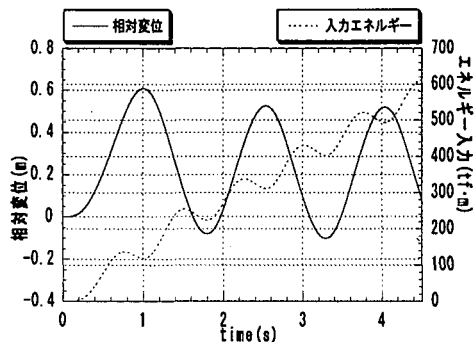


図-17 $T_0=1.5$ (S)においてTYPE2-7の正弦波を入力したときの相対変位とエネルギー入力の時刻歴

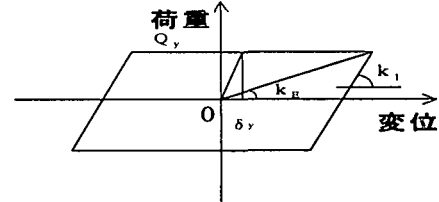
(5) 最大応答塑性率における傾向の分析

短周期側における例として系の弾性固有周期が1.5秒でTYPE2-7の場合と系の弾性固有周期が1.5秒でTYPE1-7の場合を図-14から図-17に示す。

図-14のように、TYPE1-7の地震動のエネルギー入力の勾配は緩やかであり、約50秒と長時間かけてエネルギーが入力されるのに対し、図-16のTYPE2-7のエネルギー入力の勾配は急で、約20秒と短時間でエネルギーが入力されている。これに対し、正弦波による単純化では4.5秒と短時間でエネルギー入力となるため、長時間でエネルギーを入力するTYPE1-7の場合はうまく再現できず、短時間でエネルギーを入力するTYPE2-7に近い値となっている。

以上のようにTYPE I ではエネルギー入力の勾配が緩やかなため正弦波の周期が長い、系の長周期側では、地震波入力時と正弦波入力時の最大応答塑性率が近い値となるが、正弦波の周期が短い、系の短周期側では、両者が離れた値をとりやすい。一方、TYPE II ではエネルギー入力の勾配が急になり、TYPE I に比べると正弦波入力が応答をよく再現する。そのため、長周期側で両者の最大応答塑性率が一致し、短周期側で一致しないケースが生じると考えられる。

3. 入力正弦波の周期変化と最大応答塑性率



$$\text{等価剛性: } k_E = Q_y / \delta_{\max} = k_1 / \mu$$

$$\text{等価周期: } T_E = 2\pi \sqrt{m / k_E} = \sqrt{\mu} T$$

図-18 等価周期の定義

無減衰弾性系においては系の弾性固有周期に等しい周期を持つ正弦波を入力したとき、最も応答が大きくなり、厳しくなる。一方、完全弾塑性のバイリニア型モデルに対しては、必ずしも弾性固有周期に等しい正弦波入力が厳しくなるとは考えられない。弾性固有周期よりもっと長い周期を持つ正弦波を入力した時、応答が最大となるケースも考えられる。そこで、等価周期を図-18のように定義して、この等価周期を正弦波の周期とし、波数を3波としたときの正弦波のエネルギー入力の総量が地震波のエネルギー入力の総量に等しくなる加速度振幅を収束計算により求めた。また、この収束計算における正弦波のエネルギー入力の総量と地震波のエネルギー入力の総量の誤差は1%以内と

した。ここでは、塑性率を1～10と変化させた等価周期を有する正弦波を入力したときの最大応答塑性率をTYPE1-1について比較・検討した。

等価周期に関わる塑性率をパラメータとして、加速度振幅をプロットしたものを図-19に示し、最大応答塑性率を弾性固有周期でプロットしたものを図-20、図-21に示す。

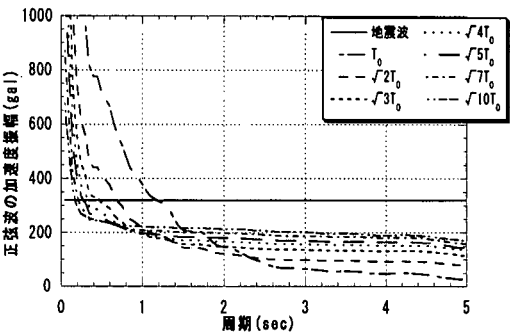


図-19 TYPE1-1の加速度振幅と弾性固有周期の関係

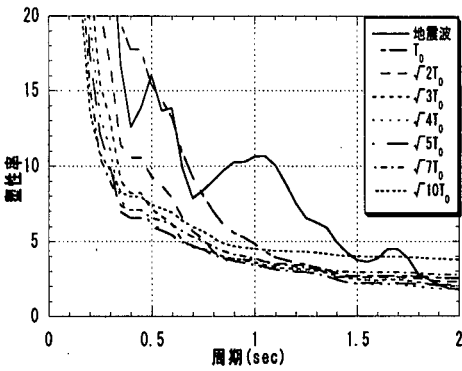


図-20 TYPE1-1の最大応答塑性率と弾性固有周期の関係
(短周期側)

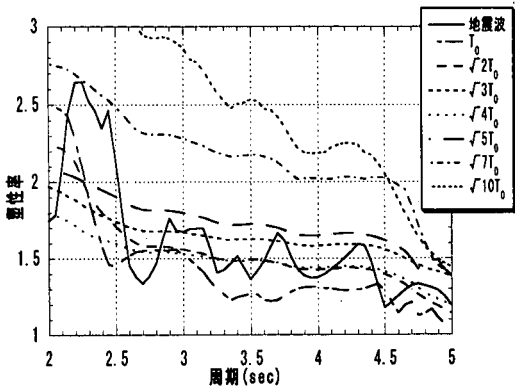


図-21 TYPE1-1の最大応答塑性率と弾性固有周期の関係
(長周期側)

(1) 短周期側における比較及び検討

短周期側では、図-19、図-20のように、等価周期が増加するにしたがって加速度振幅は減少し、最大応

答塑性率は減少する。弾性周期 T_0 のケースで応答が最大で地震波入力時の結果に近い。

このような傾向は、解析モデルの弾性固有周期の短周期側において、等価周期が小さい範囲では図-22に示すように一方向に変形が累積し、その結果応答が大きくなり、また、等価周期が増加していくと図-23に示すように交番载荷的なものに近づき、その結果応答が減少するために生じると考えられる。

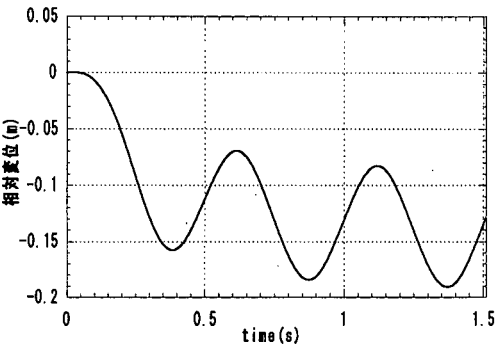


図-22 TYPE1-1の等価周期に関わる塑性率が1である正弦波を入力したときの相対変位の時刻歴

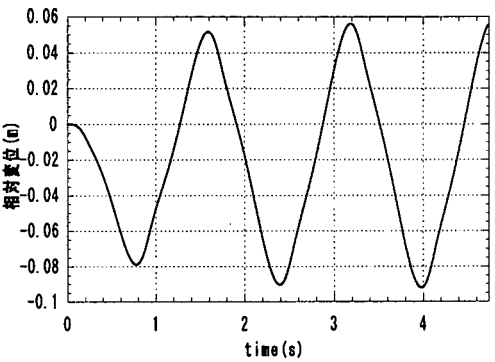


図-23 TYPE1-1の等価周期に関わる塑性率が10である正弦波を入力したときの相対変位の時刻歴

(2) 長周期側における比較及び検討

長周期側では、図-19のように等価周期が増加するにしたがって加速度振幅は増加し、また図-21のように最大応答塑性率は増加する傾向がある。

等価周期の増加とともに加速度振幅、最大応答塑性率が増加するという傾向は以下のような理由で生じると考えられる。それは正弦波の長周期化により、荷重の状態が静的な载荷に近づくため応答速度が小さくなり図-24に示すように粘性減衰エネルギーが減少する。しかし、エネルギー入力の総量は一定であるので弾塑性変形による履歴吸収エネルギーを増加させなければならず、その結果加速度振幅が大きくなり、応答が大

きくとなると考えられる。

また、図-24で弾性周期 T_0 のケースで系の弾性固有周期が4～5秒の間において先に述べたような傾向に当てはまらないのは、この範囲で図-25のように正弦波入力終了時の応答塑性率が図-26のように他の場合と比較して大きく、そのため地震終了時の弾性ひずみエネルギーが大きく、またエネルギー入力の総量は一定であるので、粘性減衰による吸収エネルギーが小さいためと考えられる。

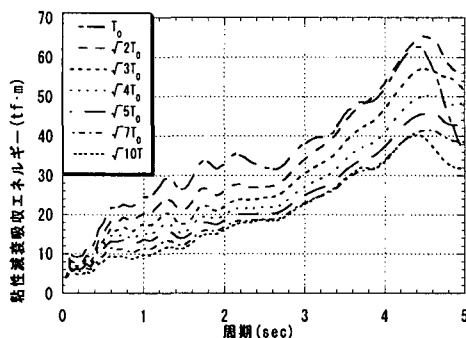


図-24 TYPE1-1の粘性減衰吸収エネルギーと弾性固有周期の関係(等価周期をパラメータとしたもの)

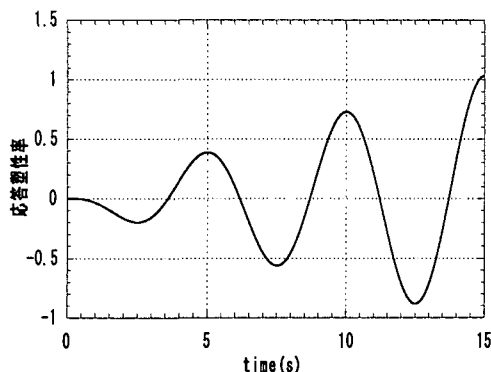


図-25 TYPE1-1の等価周期に関わる塑性率が1である正弦波を入力したときの相対変位の時刻歴

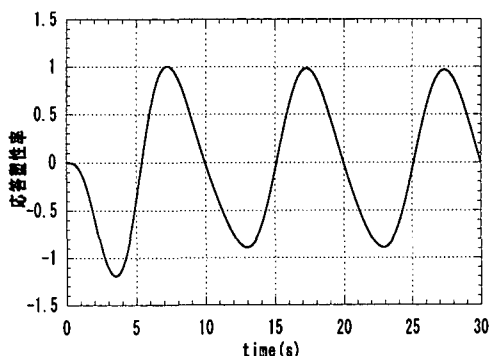


図-26 TYPE1-1の等価周期に関わる塑性率が4である正弦波を入力したときの相対変位の時刻歴

4. まとめ

入力地震動をエネルギーの等価性を考慮した系の弾性固有周期を周期とする正弦3波で単純化した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- ・正弦波の加速度振幅は系の短周期側では地震波の加速度振幅に対して大きくなり、長周期側では逆に小さくなる。

- ・地震波入力時と正弦波入力時の最大応答塑性率は系の長周期側において両者が一致し、短周期側では正弦波入力時の応答が大きいケースが多い。

また、このような正弦波の等価周期を長くすると以下のような傾向が認められた。

- ・正弦波の加速度振幅は系の短周期側では減少し、長周期側では逆に増加する。

- ・最大応答塑性率は系の短周期側では減少し、弾性周期 T_0 のケースで応答が最大で地震波入力時に近い。また、長周期側では増加する。

今後はさらに非線形系における入力と応答の関係を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松田泰治、入江達雄：弾塑性変形を伴う構造物の応答推定に関する一考察、阪神・淡路に関する学術講演会論文集、pp.531-536, 1996.
- 2) 松田泰治、入江達雄、大塚久哲、山本智弘：エネルギー入力を考慮した構造物の応答推定に関する一考察、第二回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文、pp.339-344, 1997.
- 3) 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.793-800, 1997.
- 4) Housner, G. W. : Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering, pp.5.1-5.13, 1956.
- 5) Housner, G. W. : Behavior of Structures During Earthquakes, ASCE, EM4, pp.109-129, 1959.
- 6) 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、第23号、pp.9-18, 1975.
- 7) Kitamura, K. and Akiyama, H. : Seismic Response Prediction for Base-Isolated Building by Considering The Energy balance, Proceedings of International Workshop on Recent Developments in Base-Isolation Techniques for Building, pp.95-106, 1992.
- 8) 境 有紀、南 忠夫、壁谷澤 寿海：構造物の弾塑性応答を考慮して地震動をサイン波1波に単純化する方法、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)構造Ⅱ, pp.459-460, 1999