

(136) 相対変位応答スペクトルの提案とその特性

建設省土木研究所 正会員 ○佐藤 貴志
東京工業大学 正会員 川島 一彦

1. まえがき

構造物の耐震設計では、橋梁等の掛け違い部のように相対変位が重要な場合がある。掛け違い部では、固有周期の異なった2つの設計振動単位に生じる変位差(相対変位)に耐えられるようにしておかなければ、支持されている側の桁が支持している側の桁から落下することになる。掛け違い部のように2つの異なった固有周期を有する構造系の間に生じる相対変位は、動的解析により求めることができる。実際の構造物に発生する相対変位は、系の固有周期や地震動の特性によって複雑に変化することが予想されるため、簡単な系によって相対変位の基本的な特性を把握しておく必要がある。

本研究は、相対変位応答スペクトル定義とその基本的な特性について示したものである。

2. 相対変位応答スペクトルの定義

2つの異なった固有周期を有する構造系の間に生じる相対変位を解析するために、図-1に示すモデルを考える。2つの構造系は、それぞれ固有周期 T_1, T_2 を有する1自由度系によってモデル化し、両者は同一の地震動 $\ddot{u}_B(t)$ を受けるものとする。ただし、2つの構造モデルの間には何のインターアクションもなく、互いに独立して自由に振動できるものとする。また、解析を簡単にするため、2つの構造モデルは同一の減衰定数を有するものとする。一般的な橋梁等の土木構造物は減衰定数が0.05程度であることが多いので、ここでは減衰定数を0.05とする。

以上のような仮定のもとで、2つの構造モデルに同一の地震動が作用した場合の構造モデルに生じる変位をそれぞれ $u_1(T_1, t), u_2(T_2, t)$ とすれば、構造モデルの間の相対変位 $\Delta u(T_1, T_2, t)$ は、次のようになる。

$$\Delta u(T_1, T_2, t) = u_2(T_2, t) - u_1(T_1, t) \quad (1)$$

また、 $u_1(T_1, t), u_2(T_2, t), \Delta u(T_1, T_2, t)$ の最大値を、次のように表わす。

$$SD(T_1) = |u_1(T_1, t)|_{\max} \quad (2)$$

$$SD(T_2) = |u_2(T_2, t)|_{\max} \quad (3)$$

$$\Delta SD(T_1, T_2) = |\Delta u(T_1, T_2, t)|_{\max} \quad (4)$$

ここで、 $u(T, t)$ の最大値をいろいろな固有周期 T に対して計算したものが変位応答スペクトルである。したがって、いろいろな固有周期 T_1, T_2 に対して $\Delta SD(T_1, T_2)$ を計算したものを、ここでは相対変位応答スペクトルと呼ぶことと提案する。

いま、固有周期 T_1 と T_2 の差 ΔT (固有周期差)を簡単に表示するため、

$$T_2 = \alpha T_1 \quad (5)$$

と表わす。このようにすると、固有周期差 ΔT は、以下のように表される。

$$\Delta T = (\alpha - 1)T_1 \quad (6)$$

したがって、 $\alpha - 1$ は基本とする固有周期 T_1 に対する固有周期差 ΔT の比 $(\Delta T/T_1)$ を表わす。

式(5)の表現を用いれば、 $\Delta SD(T_1, T_2)$ は $\Delta SD(T_1, \alpha T_1)$ と表される。このため、下添字を省略して、相対変位応答スペクトルを $\Delta SD(T, \alpha)$ と表わすことにする。

また、変位応答スペクトル $SD(T_1)$ によって相対変位応答スペクトル $\Delta SD(T, \alpha)$ を次のように正規化する。

$$rD(T, \alpha) = \Delta SD(T, \alpha) / SD(T) \quad (7)$$

式(7)は、 $T = T_1, T_2 = \alpha T_1$ の相対変位応答スペクトルと $T = T_1$ の変位応答スペクトルの比を表している。 $rD(T, \alpha)$ を相対変位応答スペクトル比と呼ぶことにする。

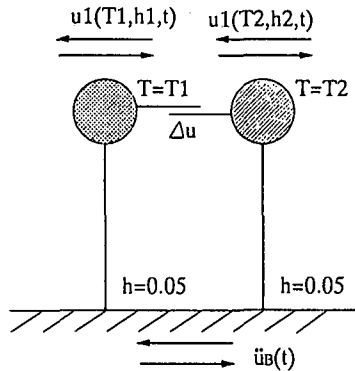
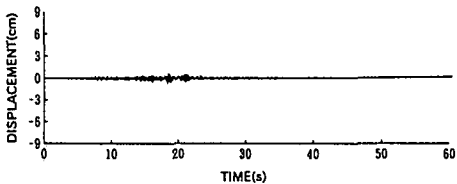


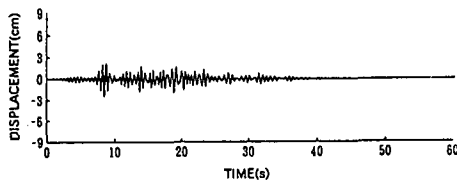
図-1 相対変位応答スペクトルの定義

3. 代表的な強震記録に対する相対変位応答スペクトル

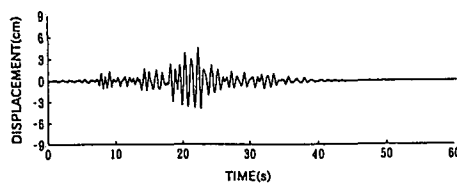
図-2は1968年日向灘地震による板島橋近傍地盤上で得られた得られた強震記録に対して固有周期 $T=0.25, 0.5, 1.0$ 秒の場合の変位応答 $u(T, t)$ を計算したものである。これより、相対変位 $\Delta u(0.5, \alpha, t)$ を計算すると、図-3のようになる。 α としては、0.5及び2に対する結果を示しているが、固有周期0.5秒の系を基本とし、固有周期0.25及び1.0秒の系との間に生じる相対変位を示している。 $T=0.5$ 秒の場合の最大変位は2.39cmであるが、最大相対変位は $\alpha=2$ の場合には5.48cmであり、最大変位よりも2.3倍程度大きい。このように、最大相対変位は一方の質点に生じる最大変位よりも大きくなることもある。



(a) $T=0.25$ 秒

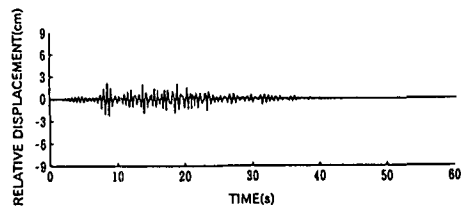


(b) $T=0.5$ 秒

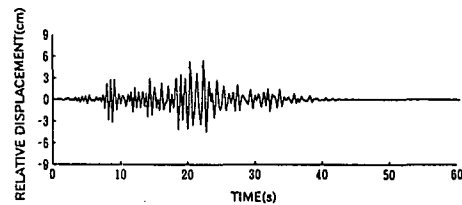


(c) $T=1.0$ 秒

図-2 応答変位 $u(T, t)$ (板島橋記録)



(a) $\alpha=0.5$



(b) $\alpha=2$

図-3 相対変位 $\Delta u(0.5, \alpha, t)$ (板島橋記録)

図-4は固有周期 T をパラメータとし、 rd と $\alpha-1(=\Delta T/T)$ の関係を示したものである。固有周期 $T=0.5$ 秒の場合を例に取れば、 rd は $\alpha-1=0(\alpha=1)$ の場合に0となり、 $\alpha-1=0.4(\alpha=1)$ の場合に最大値をとる。また、 $\alpha-1=-0.4$ 程度以下になると、 rd はほぼ1.0となる。これは式(7)の定義から明らかなように、 αT が小さくなると変位 $u_1(T, f)$ に比較して、 $u_2(T, f)$ が小さくなり、結果的に、 $\Delta u=u_1$ となるためである。

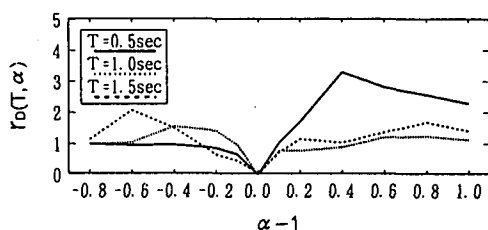


図-4 相対変位応答スペクトル比 rd と $\alpha-1$ の関係

4. 相対変位応答スペクトルの特性

相対変位応答スペクトルをわが国の地盤上で得られたマグニチュード6.5以上の63成分の強震記録に対して行った。記録の得られた地点の地盤条件を道路橋示方書の地盤種別によって分類すると、Ⅰ種地盤、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤上の記録数はそれぞれ13、37、13である。

強震記録の得られた地震のマグニチュード M 及び震央距離 Δ によって rd がどのように変化するかを $\alpha=2$ 、 $T=0.5$ 秒の場合を例に図-5に示す。これによれば、 rd は M や Δ によって有意に変化しないとみることができる。

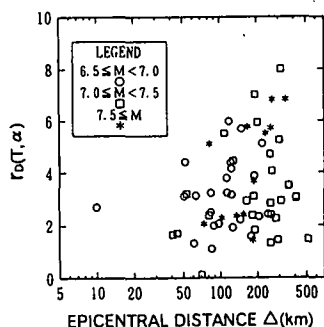
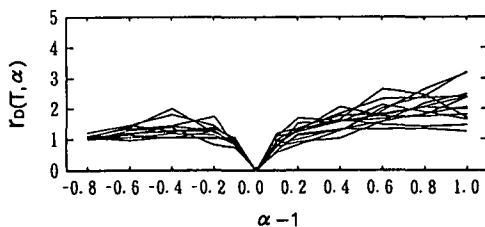
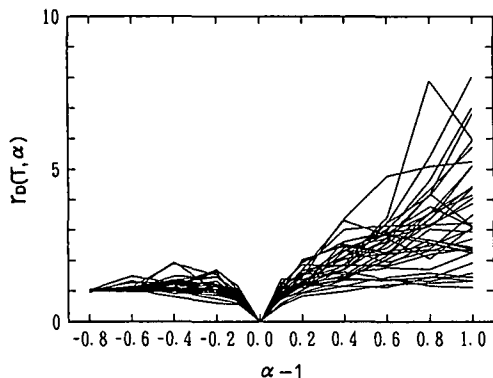


図-5 相対変位応答スペクトルと地震のマグニチュード、震央距離の関係

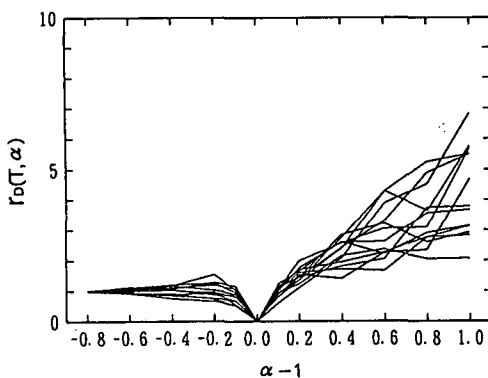
図-6は、 $T=0.5$ 秒における rd と $\alpha-1$ の関係を地盤種別ごとに比較したものである。Ⅱ種及びⅢ種地盤の場合には、 $\alpha-1=0.6$ 程度以上でのばらつきが大きい。しかし、図-7に示すように、全体として平均値と比較すると、実務的には rd は地盤条件によって顕著に変化しないとみてよい。



(a) Group I

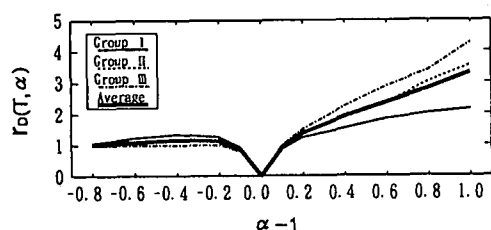


(b) Group II

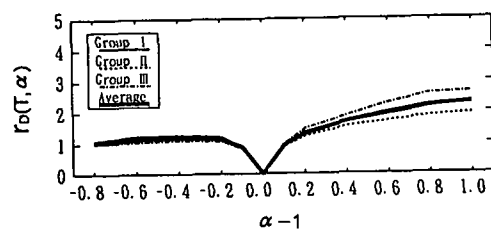


(c) Group III

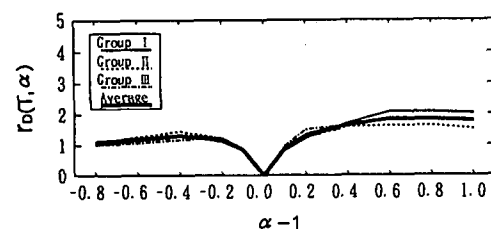
図-6 相対変位応答スペクトルに及ぼす地盤種別の影響



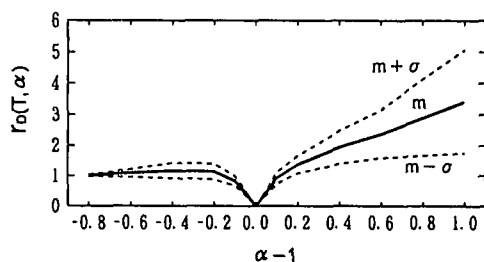
(a) $T=0.5$ 秒



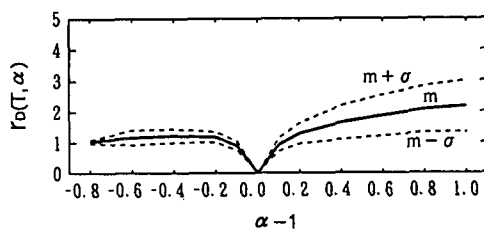
(b) $T=1.0$ 秒



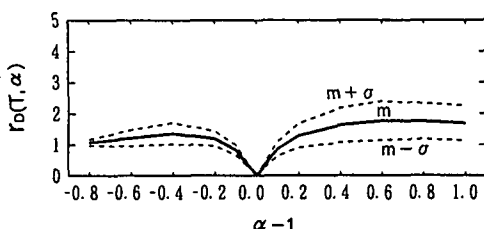
(b) $T=1.5$ 秒



(a) $T=0.5$ 秒



(b) $T=1.0$ 秒



(c) $T=1.5$ 秒

図-7 地盤種別ごとに平均した相対変位応答スペクトル

図-8 平均相対変位応答スペクトル

以上のように、 rd はマグニチュード M や震央距離 Δ 、地盤条件によって有意に変化しない。このため、 rd を平均し、平均値 m とこれに標準偏差 σ を加減した値を図-8に示す。また、 rd のばらつきが大きいことを考慮し、図-8の平均値に標準偏差を加えた値を設計用相対変位応答スペクトル比として提案する。図-9は、設計用相対変位応答スペクトル比を主要な $\alpha-1$ 、 T に対して示したものである。

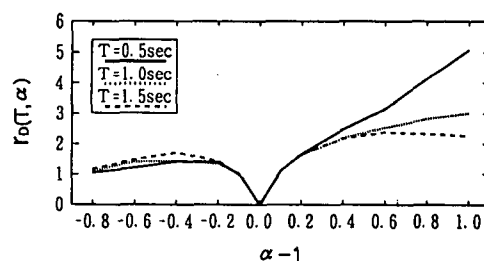


図-9 設計用相対変位応答スペクトル

6. まとめ

相対変位応答スペクトルを提案し、その特性を検討した。相対変位応答スペクトル比は、地震のマグニチュード、震央距離、地盤種別によって複雑に変化するが、実務的に見れば、 rd と $\alpha-1$ の関係に及ぼす影響は著しいものではない。