

東京都立大学工学部 正会員 国井隆弘  
東京都立大学大学院 学生会員 荻本孝久

1. まえがき

耐震工学の面からも地震観測が重視されるようになり、現在、全国数百ヶ所で、SMAC型強震計等を用いて強震観測が実施されている。観測システムも地盤と構造物での同時記録観測が行われ、両者の相互作用の問題にとって貴重なデータとなっている。一方記録された地震波は、定常不規則な確率過程のランダム波として解析されてきたが、最近、その非定常的な特性が注目され、時間的周波数特性の変化が問題となってきた。そこで、松代地震時に長野県落合橋で観測された地盤上と橋脚上の同時記録を用いて、両波形のランニングフーリエスペクトル解析による応答特性から、2自由度のロッキング振動を生じると考えられる橋脚の固有円振動数の時間的变化を推定した。その結果より、橋脚-地盤の振動系の地震時の挙動の性質が実記録から推定できる。次に、橋脚-地盤の振動系を、剛体とバネからなる力学的なモデルに置換し、バネ定数と減衰定数の時間的变化に注目した。

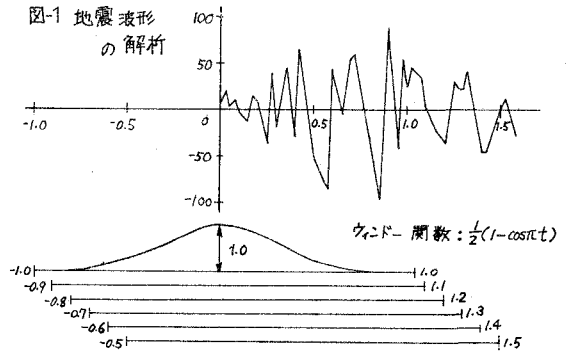
2. 地震波の解析(ランニングフーリエスペクトル解析)

解析に用いた地震記録は、表-1に示すように、入力最大の加速度値と、入力と応答の最大加速度の比がそれぞれ異なる3つの波形を用いた。ランニングフーリエスペクトル解析では、図-1に示すように、地盤上及び橋脚上で記録された原波形(0.01秒間隔のデジタル値)の2秒間毎のデータに、ウィンド関数を掛けながら、0.1秒づつオーバーラップしながら移動させて、各時間間隔について両波形のフーリエスペクトルを求め、この操作を地震の全継続時間に渡って行った。2秒間という時間間隔は、橋脚の固有周期が約0.3~0.5秒と推定され、2秒間に数サイクルづつ特性が含まれていると思われることから決定した。したがって、スペクトル面上に表われる1, 2次のピークは、数サイクル間の平均的な固有値である。そして代表とする時間として、時間間隔の中心の時間をとることにする。

表-1 最大加速度 (gal)

	橋脚上(A)	地盤上(B)	A/B
No.47	121.38	230.50	0.53
No.197	99.88	95.75	1.04
No.16	25.38	14.50	1.75

図-1 地震波形の解析



3. 固有円振動数の時間的变化

各波形のフーリエスペクトルの一例と、推定される1次, 2次の固有円振動数の時間的变化を図-2~図-3に示す。図示したスペクトルからもわかるように、ピークが多数複雑に現われ、どれを固有値としてピックアップするかという重要な疑問が生じる。そこで今回は、次のような基準を考えてピックアップすることにした。a) 地盤上と橋脚上のフーリエスペクトルの両者の間の応答特性より、明らかに共振していると考えられるピークであること。b) 固有値の時間的变化として、比較的滑らかに、かつ長く継続しているピークであること。

図中、●印の欠けている所は、相当する固有値のピークが明確ではなかった所であり、○印は、明らかに1つの固有値を示すスペクトルの高まりであると考えられるにもかかわらず2つのピークが存在している所である。後の場合は、平均値をもって固有値とした。これは、地盤の非線形的な挙動によるものでないかと考えられる。

図-2~図-4の固有円振動数の時間的变化からもわかるように、橋脚上での記録波形と対応してみると、加速度レベルの大きい時間帯で固有円振動数が低下しており、段々と上昇して行く過程がみられ、周波数特性における

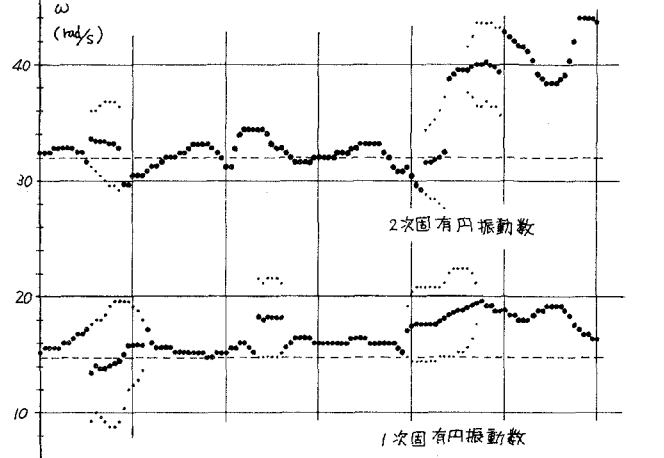
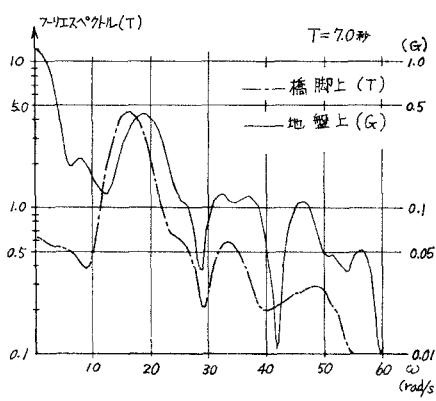
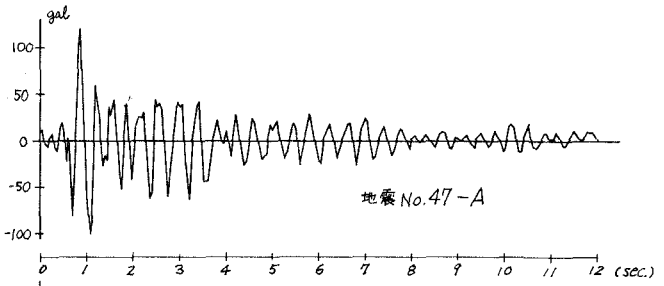
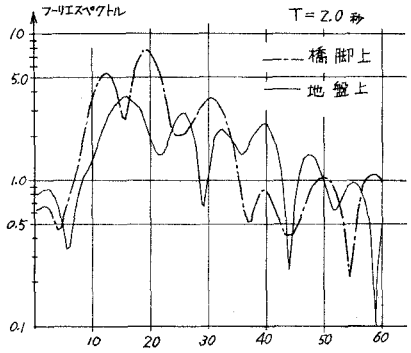


図-2 固有円振動数の時間的变化 (No.47)

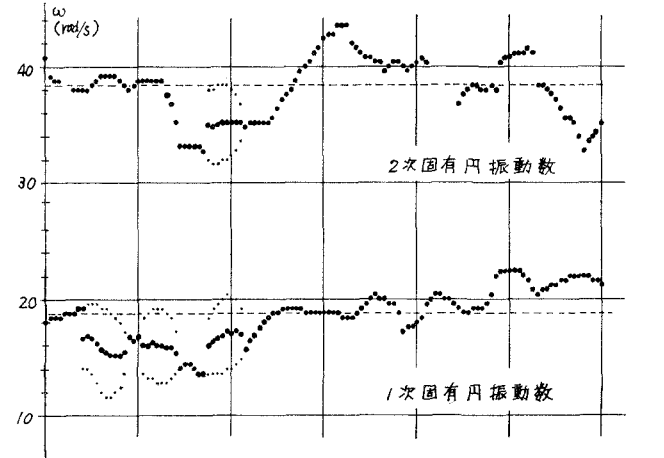
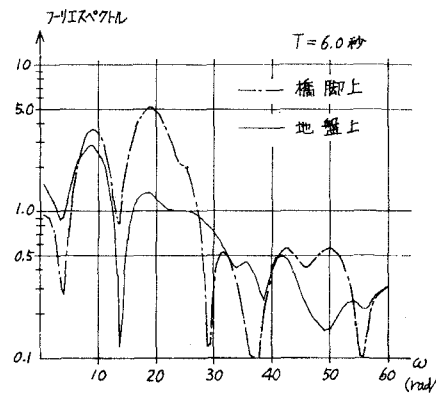
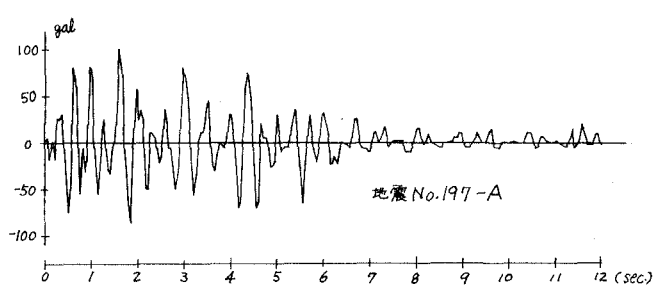
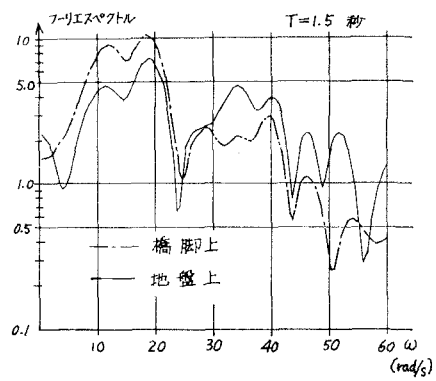


図-3 固有円振動数の時間的变化 (No.197)

非定常的性質を示している。また全継続時間におけるフーリエスペクトルから得られる固有値を点線で示してある。

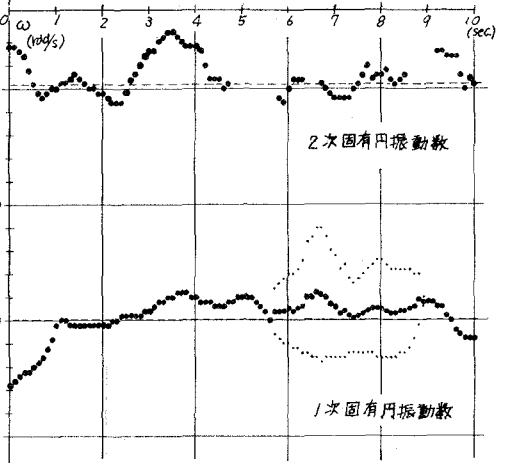
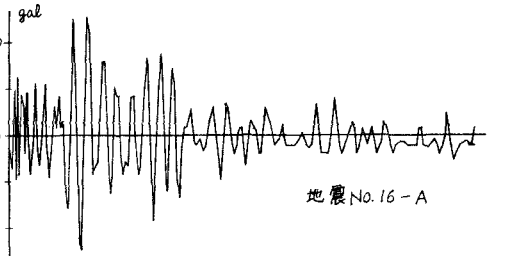
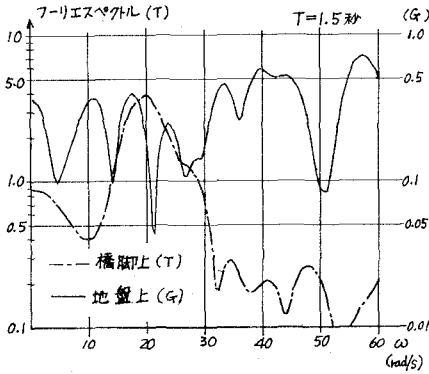


図-4 固有円振動数の時間的変化 (No.16)

4. 振動系の力学モデル  
橋脚-地盤の振動系を、図-5に示すような剛体とバネからなる力学モデルに置換した。

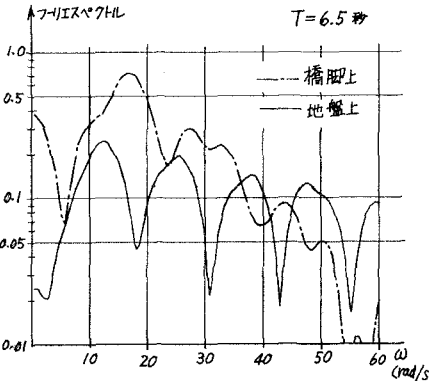
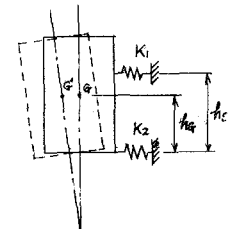


図-5 力学モデル



を行おうとして、水平運動と回転運動の連立した運動方程式から求まる1次、2次の固有円振動数 $\omega_1, \omega_2$ とするとバネ定数 $K_1, K_2$ は次式で求まる。

$M$ : 剛体の質量  
 $J$ : 剛体の慣性モーメント

$$\begin{cases} X_1 = MJ(\omega_1^2 + \omega_2^2) \\ X_2 = MJ(\omega_1^2 - \omega_2^2) \\ X_3 = J + M(h_2 - h_1)^2 \\ X_4 = J + Mh_2^2 \\ X_5 = J^2 - MJ(h_2^2 + 2h_2h_1 - 2h_1^2) + M^2h_1^2(h_2 - h_1)^2 \end{cases}$$

$$K_1 = \frac{X_1 - \sqrt{X_1^2 - \frac{2X_3X_4(X_1^2 - X_2^2)}{X_3X_4 - X_5}}}{2X_3} \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{X_1 - X_3K_1}{X_4}$$

5. バネ定数の時間的変化

図-2-図-4で推定された固有円振動数 $\omega_1, \omega_2$ の時間的変化を用いて、(1)式から求まるモデルのバネ定数 $K_1, K_2$ の時間的変化を図-6に示す。ここに示されるバネ定数は、前述と同様にモデルの振動における数サイクル間の平均的なバネ定数であると考えられる。

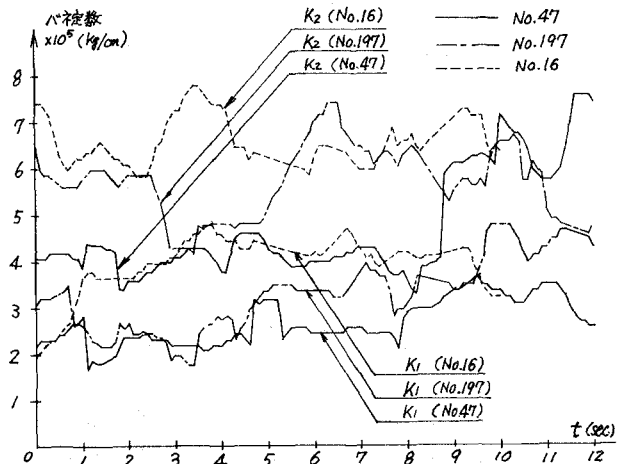


図-6 バネ定数の時間的変化

固有円振動数の変化と対応して、バネ定数の

時間的变化も、ほぼ同様な傾向を示している。これは、バネ定数 $K_1$ がロッキング振動の1次モード、すなわち $\omega_1$ に強く影響され、 $K_2$ が2次モード、すなわち $\omega_2$ に強く影響されるためであると考えられる。

### 6. 減衰定数の時間的变化

No.47の地震波形について、図-2に示される固有円振動数の時間的变化及び力学モデルを用いて応答計算値が記録波の特性に合うような減衰定数を求めるわけである。すなわち、固有値の変化に対応して振動モードが時間的に相異なる振動系モデルと考え、0.5秒毎の減衰定数の変化と、ランニングフーリエスペクトル解析の時と同様にして、2秒間の応答計算値の各時間間隔毎でのフーリエスペクトル値・最大加速度値及びパワー値の3つの面から求めることにした。したがって、この3つの特性から求められるそれぞれの減衰定数値が一致すれば、最も望ましい値となる。結果を図-7に示す。

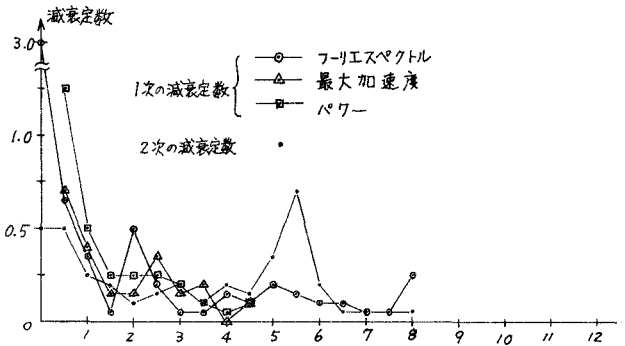


図-7 減衰定数の時間的变化

計算方法としては、1次、2次の減衰定数 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ をパラメーターとして、変化させ、応答計

算の結果、そのスペクトル値が、1次、2次ともに、実際の波形のスペクトル値と最もよく合うものを減衰定数として決めた。次に、 $\beta_2$ による応答波形への影響は小さいと考えられるので、 $\beta_2$ を前述の値に固定して、 $\beta_1$ だけを变化させ、最大加速度値・パワー値が合うように $\beta_1$ と決めた。

### 7. 結果

種々の特性を含んでいる地震の実際の記録波形のランニングフーリエスペクトル解析より、地盤と構造物の相互作用により生じる固有値の時間的变化が、ある程度推定できる。それによると、周波数特性は明らかに非定常性を示し、それは入力及び応答の加速度レベルの時間的な変化に対応し、また入力加速度の最大値の大きさにも影響される。すなわち、時間的には、入力加速度が大きい時間帯では、固有値が低下し、地盤の非線型性が考えられる。その後、入力加速度の減少に伴い固有値の回復が見られるが、単に一樣に回復するわけではなく複雑な過程を経ていることが推測される。また、入力加速度の最大値が大きいほど、低下率は大きくなっている。

地震波列を見ると、No.16は、加速度レベルも小さく、固有値の変動もそれほど大きくはないが、1次の固有円振動数の後半に疑問がある。No.197、No.47は、かなり大きな地震で、最大加速度が生じる時間帯で、ほぼ同程度の著しい固有値の低下が生じているが、後半の回復率がNo.47では、きわめて悪く大きな地盤の塑性化を受けているためのものと思われる。モデル化によっても、同様なバネ定数の変化が見られている。減衰定数については、バラシキが大きく検討の余地がある。

### 8. あとがき

今回の場合のように橋脚の天端での記録波形では、2次の固有値があまり明確に現われず、特に加速度レベルが小さい場合に顕著である。したがって、今後、解析上の面からも回転成分を含む同時記録が望まれる。

また、本研究としては、更に固有値と減衰定数の変化を用いて、橋脚上での応答波形の再現性を検討すると共に、力学モデルを用いて、地震に対する応答時に考えられる最適な復元力特性を推定し、復元力特性の面から固有値の変化を求めて、図-2との対応を検討するつもりである。

<文献>

- 1) 国井・菊池 「強震記録から推定される井筒基礎橋脚の動特性」土木学会第29回講演概要集
- 2) 福井・国井・金井 「強震記録から推定される井筒基礎橋脚の動特性(初稿)」土木学会第30回講演概要集