

# (164) 常時微動を用いたRCラーメン高架橋の地震動特性とヤング率の推定

(財)鉄道総合技術研究所 中村 豊  
(財)鉄道総合技術研究所 中嶋 繁

## 1. はじめに

地震時に被災する恐れのある弱点構造物を把握し、これらに適切な処置を施すことは地震災害を軽減するために、重要な課題である。我々は常時微動を用いて地盤や構造物の地震動特性を把握する手法の開発を進めており、さらにこれらのデータを用いて弱点構造物を抽出する手法について研究を進めている。ここでは、RC1層ラーメン高架橋について常時微動測定結果に基づいて、土被りや基礎地盤の影響を補正して高架橋自体の固有振動数を正しく推定し、高架橋のヤング率を推定する方法を提案する。

## 2. 高架橋の地震動特性

常時微動で高架橋の地震応答特性が推定できることはすでに述べた<sup>1)</sup>。これは、高架橋の上に置かれた測点Tと、その直下の地盤上の測点Bで、同時に測定された常時微動のスペクトル比 $S_R (= S_T / S_B)$ を計算する事によって高架橋の地震動特性を推定するものである。こうして測定された高架橋の震動特性の例を図1に示す。

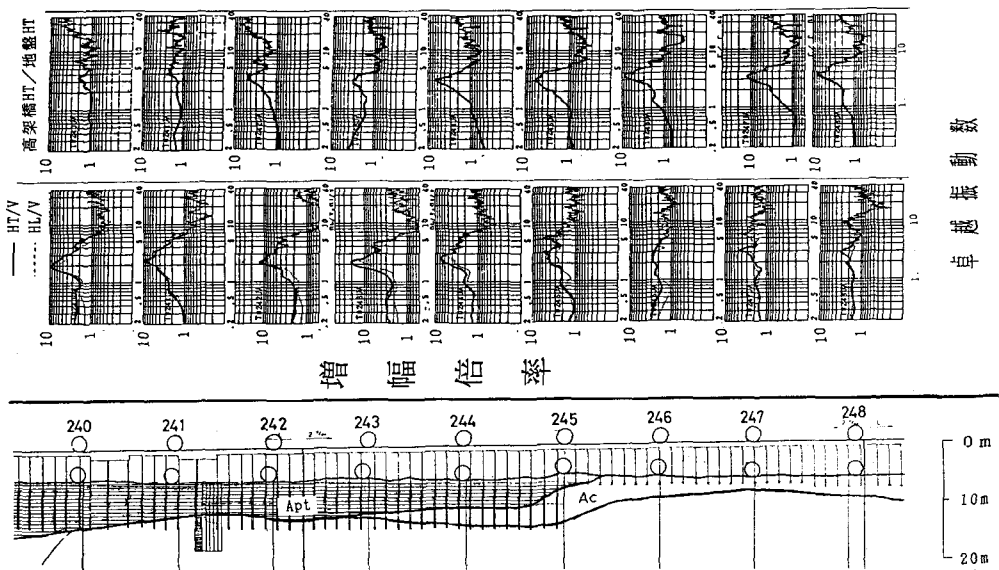


図1 常時微動による高架橋の振動特性

これは、非常に軟弱な地盤と比較的堅固な地盤にまたがった高架橋に対する測定結果である。これによると、同じ様な特性を持っていると考えられる高架橋が、軟弱な地盤上では剛体のように挙動するのに対して、硬い地盤の上ではしなやかに応答している。すなわち、高架橋の震動特性は基礎地盤の影響をかなり受けることがわかる。

図2は、高架橋の卓越振動数が土被り厚や表土のせん断波速度(S波速度)によって変化する様子をFEM解析により示したものである。高架橋の卓越

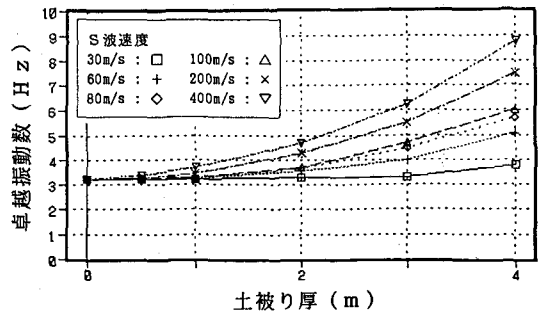


図2 卓越振動数の変化

振動数は、土被り厚や表土のS波速度によって大きく影響されている。

図3は、東海道新幹線の1層の標準ラーメン高架橋について、常時微動測定により推定した高架橋の卓越振動数Fを高架橋の地上高さに対して示したものである。同じ高さの高架橋であっても卓越振動数Fにはかなりのばらつきがあることがわかる。このばらつきには、それぞれの高架橋の基礎部の土被り厚や基礎地盤の特性が大きく影響しているものと考えられる。

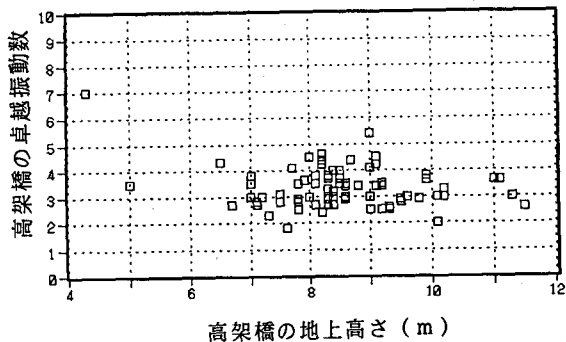


図3 地上高さと卓越振動数

### 3. 高架橋のヤング率推定

#### (1) 基本的な考え方

常時微動測定から得られる高架橋の卓越振動数F、増幅倍率Aおよび基礎地盤の卓越振動数、増幅倍率を基に、高架橋の土被り厚や基礎地盤特性などの影響を除去して、剛体基礎上の高架橋の固有振動数F<sub>0</sub>を推定し、これと高架橋諸元を用いてヤング率を算定する。高架橋のヤング率推定の手順を図4に示す。

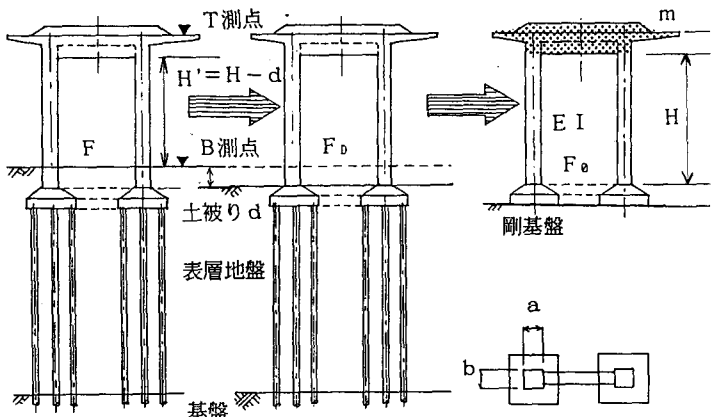


図4 影響補正とヤング率推定の基本的考え方

#### (2) 剛体基礎上の高架橋の固有振動数の推定

図5は、数種類の高さの高架橋について、FEM解析による1次固有振動数と柱の剛性を梁理論により見積って算定した固有振動数とを比較したものである。梁理論で柱の剛性を算定する際、柱の長さとしては、図4に示すようにハンチ部を除いた部分の長さを採用した。

これによると、両者は3%以内の精度で一致しており、高架橋の固有振動数F<sub>0</sub>は梁理論に基づいて次式により的確に推定できることが確認された。

$$F_0 = \frac{\{(24 E_c I) / (m H^3)\}^{0.5}}{2 \pi} \quad (\text{構造力学公式集より})$$

ここに、E<sub>c</sub>=柱のヤング率、

I=断面2次モーメント (= a<sup>3</sup> b / 12)、

m=質量 (図4の網掛け部分)、

H=柱の長さ (図4参照)

したがって、F<sub>0</sub>と高架橋の諸元 (m、H、I) を測定すれば、E<sub>c</sub>を次式により推定することができる。

$$E_c = (2 \pi F_0)^2 (m H^3) / (24 I)$$

#### (3) 土被りの影響補正

土被りによって高架橋の柱が短くなる。表土が剛体とみなせるほど堅ければ、高架橋は土被り厚だけ柱が短くな

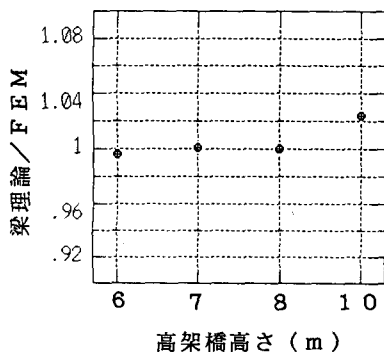


図5 固有振動数比較

ったような応答を示す。また、高架橋の動きを規制できないほど表土が軟弱であれば、土被りは高架橋の卓越振動数にほとんど影響を与えない。すなわち、高架橋の卓越振動数 $F$ は、柱の長さを土被りの分だけ短くした場合 ( $H' = H - d$ ,  $d$ : 土被り厚) の固有振動数 $F_{MAX}$ と土被りがない場合の固有振動数 $F_D$ の間の値を取る。したがって、 $F$ は次式で表現することができる。

$$F = F_D + k (F_{MAX} - F_D) = F_D [1 + k \{ (F_{MAX}/F_D) - 1 \}] \\ = F_D [1 + k \{ (H/H')^{1.5} - 1 \}]$$

$$\text{ゆえに、} \quad F_D = F / [1 + k \{ (H/H')^{1.5} - 1 \}]$$

ここに、 $k$ は土被りの影響を表わす係数である。 $k$ は0から1の間の値をとり、土被り地盤の硬さに依存すると考えられる。そこで $k$ を次式で表現してパラメータ $\alpha$ をFEM解析結果に基づいて統計的に算定することとした。

$$k = 1 - 1 / (\alpha V_s + 1)$$

剛基盤上の高さ8mの高架橋に対して、種々の表層S波速度と土被り厚の組合せについてFEMによる応答解析を行い、高架橋の卓越振動数を算定した。計算した組合せは、表層地盤のS波速度 $V_s$ については、30m/s、60m/s、80m/s、100m/s、200m/s、400m/sおよび1000m/sの7種類、土被り厚さ $d$ については、0m、0.5m、1.0m、2.0m、3.0mおよび4.0mの6種類の合計42ケースである。しかし、 $d$ が小さい間は $F_{MAX}$ と $F_D$ の差異が小さく、計算誤差の影響も少なくないので、 $d=2\sim 4$ mの21ケースについて $k$ 値を求めた。算定された $k$ 値を、 $V_s$ を説明変数として回帰分析して、 $\alpha=0.00524$ を得た。このときの相関係数は0.97であった。

図6は、土被りがある場合のFEM計算結果の土被りの影響を上式により補正して、土被りのない場合のFEM計算結果と比較したものである。良好に補正されていることがわかる。

しかしながら、実際の場面では $V_s$ はわかっていないことが多い。そこで、比較的想定しやすい基礎のせん断波速度 $V_B$ とB測点の常時微動から推定される表層地盤の増幅係数 $A_G$ を使って、 $V_s = V_B / A_G$ により $V_s$ を推定する。

$$F_D = F \times \frac{(\alpha V_B + A_G)}{\{\alpha V_B (H/H')^{1.5} + A_G\}}$$

ここで、 $\alpha=0.00524$ 、 $V_B=600$ m/sとおくと、 $\alpha V_B \approx 3.14$ となる。

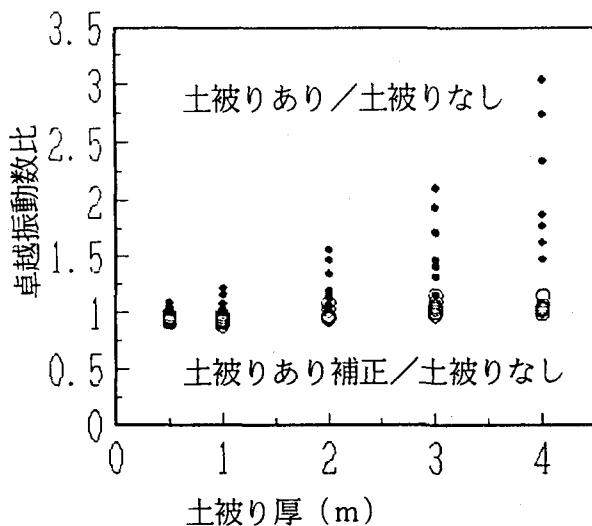


図6 土被りの補正効果

#### (4) 基礎地盤の影響補正

基礎地盤の影響を次式のように、基礎地盤がある場合の高架橋の卓越振動数 $F_D$ と、剛体基礎の場合の高架橋の卓越振動数 $F_G$ の比 $j = F_D / F_G$ で表わす。

$$\text{したがって、} \quad F_G = F_D / j, \quad 0 < j \leq 1$$

$j$ に関係する因子として、高架橋の高さ $H$ と地盤の卓越振動数 $F_G$ を考える。高さ6m、7m、8mおよび10mの高架橋について、表層地盤のS波速度 $V_s$ を、60m/s、80m/s、100m/s、150m/s、200m/s、300m/sおよび400m/sの7種類に変化させ、表層地盤厚さを10mおよび20mの2種類に変化させた。これら56ケースの計算結果から $j$ を算定し、 $H$ および $F_G$ を説明変数として回帰分析して、次式を得た。このときの相関係数は0.948であった。

$$j = 1 - 1 / (1430H^{-2.33} F_G^{0.5} + 1)$$

図7は、基礎地盤がある場合のFEM計算結果を上式により補正して、剛基盤上の場合のFEM計算結果と比較したものである。この場合の基礎地盤の影響はもともと大きくないが、補正後は $1.0 \pm 5\%$ 以内とさらに小さくなり、影響の補正は概ね良好である。

#### 4. 提案手法により推定した高架橋のヤング率とコアを採取して測定したヤング率との比較

3高架橋について、常時微動測定により卓越振動数を推定し、構造物の寸法諸元と合わせて、提案手法によりヤング率を推定した。図8は、この推定したヤング率と高架橋からコアを採取して圧縮試験を行って測定したヤング率とを比較したものである。コアは、常時微動測定地点と同一ブロックの高架橋または隣接ブロックの高架橋の梁部分で採取され、地点毎に3個のコアが採取されている。コア採取によるヤング率推定も、コアの抜き出しや資料端面の処理によって値が変動するが、常時微動によるものはこれらの平均的なものと一致している。また、コア採取により測定したヤング率はABCの順で低下している傾向が認められるが、常時微動により推定したヤング率もこれと一致した傾向を示している。

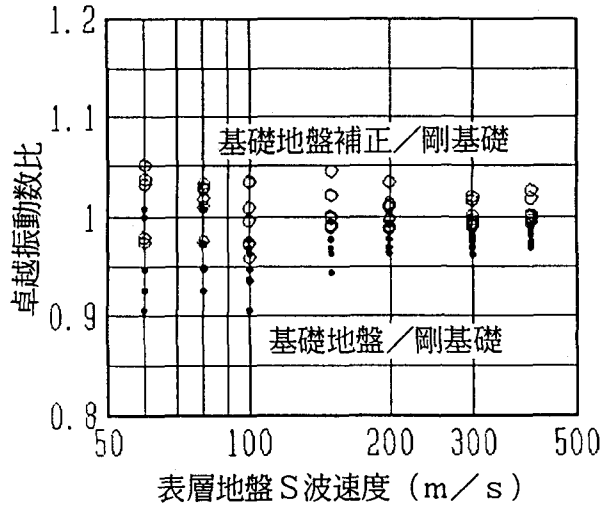


図7 基礎地盤の補正効果

#### 5. まとめ

ここでは、高架橋の固有振動数を常時微動を用いて推定し、これから高架橋のヤング率を推定する方法を提案した。常時微動で測定される高架橋の卓越振動数は、高架橋の柱の土被りの厚さや基礎地盤の影響を受けている。そこで、これらの影響の程度をFEM解析により定量的に把握し、地盤および高架橋の常時微動測定結果を使って、剛体基礎上に高架橋がある場合の固有振動数を推定する補正式を作成した。これにより、推定された高架橋の固有振動数と構造物の寸法諸元を合わせて、高架橋のヤング率が推定できるようになった。直接的に高架橋からコアを採取してヤング率を測定した結果と比較し、その妥当性を確認した。

なお、この研究は運輸省の助成研究「地震防災および復旧支援システム技術開発」の一環として実施したものである。

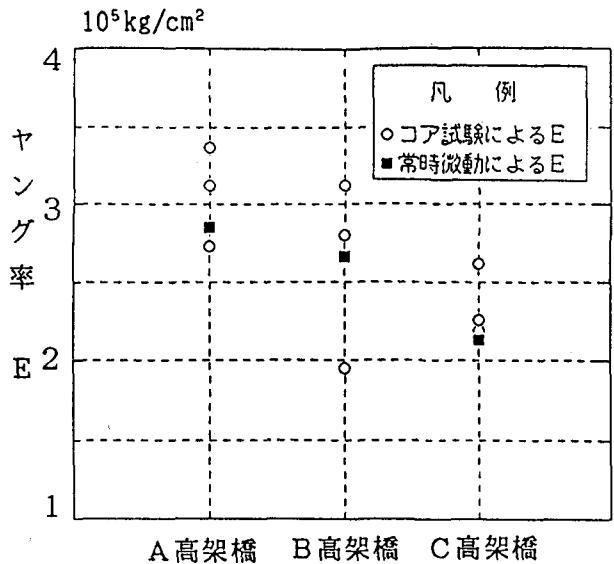


図8 高架橋のヤング率推定比較

謝辞：測定データを提供して頂いたJR東海の関係者の方々に謝意を表します。また、解析に協力して頂いた榎福山コンサルタントの西永雅行氏に謝意を表します。

#### 文献

- 1) 中村・中嶋: 常時微動による高架橋の地震応答特性の推定、第44回土木年次学術講演概要集I-437, 1989.10
- 2) 中村・滝沢: 常時微動による表層層厚と基礎および表層地盤のS波速度の推定、鉄道総研報告Vol.4, No.9, 1990.9