

鹿児島大学工学部	正員	河野 健二
鹿児島大学工学部	正員	吉原 遼
春本 鉄工所(株)		花田 愛一郎

1. まえがき

構造物の地震応答解析においては、一般に地震波は地表層へ垂直に入射するものと考え、同時同位相入力として扱われることが多い。これは同時記録に基いた地震波の構造物の各支点への入力特性が十分解明されていないため工学的な取り扱い易さなどに基いたものであるが、構造物の長大化とともに入力の位相差を考慮した多点入力系としての解析が行われるようになった。特に地震波の波長に比較して構造物の代表的な長さが無視できない程に大きい長大構造物の地震応答解析では各支点で位相差をもつ入力による応答について検討する必要があること、また多点入力系としての構造物の地震応答は地盤の振動特性や振動モードなどにより大きな影響をうけることなどがこれまでの研究で指摘されている。

本研究では地震入力の位相差が構造物の応答に及ぼす影響を簡単に表わす方法として応答スペクトルの利用について述べ、高橋脚を有する多径間橋の地震応答解析を行った。

2. 多点入力系構造物の地震応答解析法

本研究では Fig. 1 に示すような高橋脚を有する径間連続橋を解析モデルとして選ぶ。橋軸を含む鉛直面に直角な方向の面外振動について解析を行っている。本解析では入力地震動の位相特性を応答スペクトルを用いて表わしており、地盤を含む橋脚基礎と径間構造物との動的相互作用は考慮していない。橋脚の基礎が固定された場合、高橋脚橋の解析モデルの運動方程式は入力点を含む拘束点(添字 b)と、それ以外の自由節点(添字 a)に分けて表わされる。いま自由節点の変位を各支点入力による変位 $\{x_b\}$ と動的応答 $\{x_a\}$ に分離して表わすと運動方程式は

$$[M_{aa}]\{\ddot{x}_a\} + [C_{aa}]\{\dot{x}_a\} + [K_{aa}]\{x_a\} = [P_{ef}]\{\ddot{x}_b\} \quad (1)$$

$$\text{ただし } [P_{ef}] = -[M_{aa}][K_{aa}]^{-1}[K_{ab}]$$

となる。式(1)において非減衰時の固有値解析からモーダルマトリックス $[u]$ を求め、非比例形の減衰マトリックスを仮定すると、次のように変換される。

$$\{\ddot{q}\} + [2\beta_j\omega_j]\{\dot{q}\} + [\omega_j^2]\{q\} = [\bar{A}]\{\ddot{x}_b\} \quad (2)$$

$$\text{ただし } \{x\} = [u]\{q\}, \quad [\bar{A}] = [u]^T[P_{ef}]$$

いま地震波が伝播速度 V_s で橋軸直角方向に対して θ の角度で橋梁の一端 ($k=1$) から入射するとき、第 k 点における地震波は ($k-1$) 支点における地震波より

$$\tau_k = l_{k-1} \sin \theta / V_s \quad (3)$$

だけ遅れる。ただし l_{k-1} は 第 k 点と第 $(k-1)$ 点の距離を表わす。各支点入力による j 次モードの応答は式(2)から求められる。すなわち

$$q_j = \sum_{k=1}^N \frac{\bar{A}_{jk}}{\omega_d} \int_{\tau_k}^{t+\tau_k} \ddot{x}_{bk}(u) \exp[-\beta_j\omega_j(t-u+\tau_k)] \sin[\omega_d(t-u+\tau_k)] du \quad (4)$$

$$\text{ただし } \omega_d = \omega_j \sqrt{1-\beta_j^2}$$

一般に地震動の継続時間 t に対して各支点における位相差 τ_k は微小である。したがって j 次モードに関する最大応答を 2 乗平均の形で表わすと近似的に

$$|B_j|_{\max} = \Delta(\beta_j, \omega_j, t) \left[\left\{ \sum_{k=1}^n \bar{\Delta}_{jk} \exp(-\beta_j \omega_j T_k) \left(\frac{\cos \omega_d T_k}{\omega_j} \right) \right\}^2 + \left\{ \sum_{k=1}^n \bar{\Delta}_{jk} \exp(-\beta_j \omega_j T_k) \left(\frac{\sin \omega_d T_k}{\omega_d} \right) \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{ただし } \Delta(\beta_j, \omega_j, t) \doteq \int_0^t \ddot{x}_b(u) e^{-\beta_j \omega_j (t-u)} \cos[\omega_j (t-u)] du \Big|_{\max}$$

と表わされる。つまり $\Delta(\beta_j, \omega_j, t)$ が速度応答スペクトルを表わすため、各支点間における入力位相差は式(5)により評価することができる。

3. 多点入力系高橋脚橋の地震応答解析

Fig. 2 は各支点での入力の位相差が各次振動モードの刺激係数に及ぼす影響について示したものである。応答に卓越した影響を及ぼす振動モードは特に位相速度が 500 m/s ~ 1000 m/s の時、入力の位相差の影響を受けていることがわかる。Fig. 3 および Fig. 4 は入力地震動の位相差が、上段桁の面外方向の変位応答に及ぼす影響を示したものである。ここで入力地震動の最大加速度は 200 gal として計算を行っている。これらの図において細線は β 法を用いて求めた実地震入力時の応答を示したものであり、太線は各々の地震波に対する応答スペクトルを計算し、式(5)から求めた応答を示したものである。両者を比較すると、比較的良好一致した応答を示しているが、入力地震動の特性によって若干の相違がみられることがわかる。一般に入力の位相差が大きくなると変位応答は減少するが、振動モードによって大きく異なることがわかる。したがって、卓越する振動モードが位相差によって異なる場合、同時同位相入力の場合に比べて大きい応答を示す位相差があることがわかる。

また逆に位相差を考慮すると変位応答が減少する場合もあり、その影響は位相速度が 500 m/s ~ 1000 m/s の範囲で特に大きい。Fig. 5 は入力の位相差が橋桁の面外曲げモーメント応答に及ぼす影響を式(15)を用いて求めた結果を示している。これより全長 300 m ~ 500 m 程度の高橋脚橋では入力の位相速度が 500 m/s ~ 1000 m/s のとき、特に位相差の影響が大きいことがわかる。このように応答スペクトルに式(5)を適用すると、入力の位相差が応答に及ぼす影響を定量的に表わすことができる。

参考文献、小坪他

土木学会論文報告集、102、270、1978

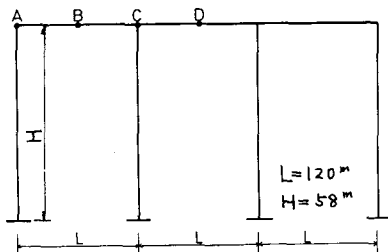


Fig. 1 解析モデル

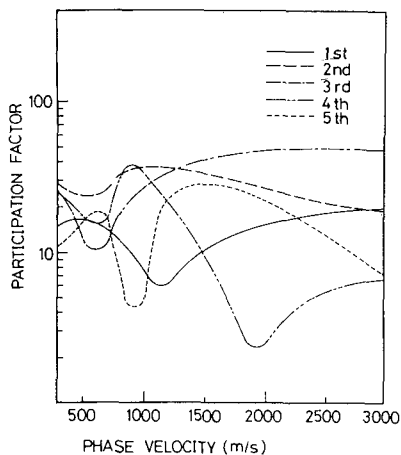


Fig. 2

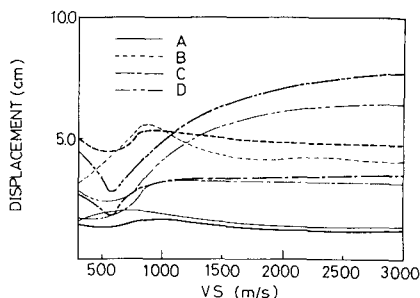


Fig. 3

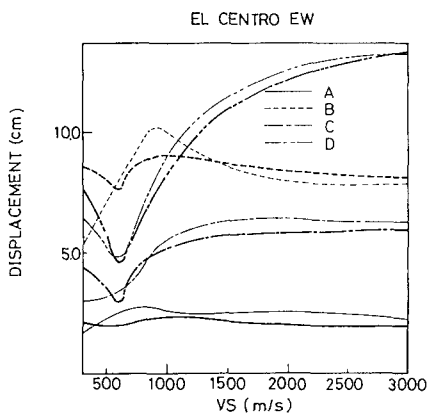


Fig. 4

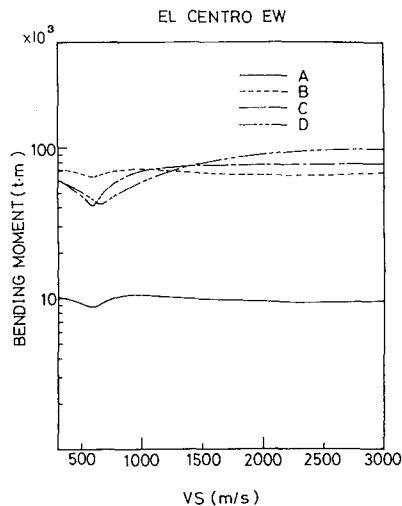


Fig. 5