

I-444

地震動の速度成分に関する特性について

---速度成分による地震荷重の評価とその振動数特性---

三祐コンサルタンツ 富樫 豊
 首都高速道路公団 ○植木 博
 三祐コンサルタンツ 長谷川貴織

1. はじめに 地震動の大きさや構造物被害の程度が(地震動や系の応答波形の)最大加速度のみで規定されにくい面が多々あることが指摘されて以来、系の地震応答や地震動の大きさを速度成分と対応させる主旨の研究が急速に進められ、設計面においても地震動の速度成分の利用について考えられるようになってきた。しかしながら現状では、構造物の被害に及ぼす速度成分波の影響は十分に解明されているとはいいがたく、また設計面において速度成分そのものを地震荷重の評価に十分利用されているともいいがたい。そこでここでは、設計面において速度成分の利用・活用を目的として速度成分のもつ工学的意味を考察し、応答解析の立場から速度成分が地震荷重や応答について如何に関与するかを検討し、従来の加速度成分による地震荷重との関連を探ることにした。すなわち、速度成分を考慮した系の運動方程式を検討し、静的解析に速度成分を如何に考慮すべきか(震度法における速度成分の考慮)を明らかにし、また加速度成分と速度成分との関係を時間領域におけるみかけ上の振動数(等価振動数)により探った。

2. 速度成分のとりえ方 速度成分が重要であることが種々の立場から指摘されているが、ここでは二つの観点からその重要性を考え、設計的立場から速度成分の特性を把握することにした。すなわち、系の応答ともっともよく対応する入力地震動が速度成分であると認識して、系の応答と入力の速度成分は如何に関連するか、また従来の考えである加速度成分に着目した場合、速度成分に着目する場合との互換性が如何なるものかということが、重要な論点と考えた。具体的には、①前者については地盤における地下逸散減衰が支配的な要因であるとして、速度成分による地震荷重の評価を考えた。②後者については速度波の振動数性状を加速度波のそれとの比較の意味で等価振動数の特性(両者の変換係数として意味もある)について考えた。以下、3章、4章で解説する。

3. 速度成分による地震荷重 3.1 定式化 A. 動的解析 地震時の構造物の応答を求めるには、通常二つの方法がある。一つは動的解析の範ちゅうのものであり、他の一つは静的解析(震度法)のものである。ここで動的な範ちゅうにおいては速度成分を入力条件とした運動方程式は、 M を質量行列、 K を剛性行列、 d を地下逸散行列、 ∂t を時間微分、 U を変位ベクトル、 v を入射速度波とすると、 $(\partial^2 U / \partial t^2 + \partial U / \partial t + U) = d v$ (1)である。この式では、地震荷重は $d v$ である。他方、加速度波を入力項とする場合の運動方程式は、露頭基盤の地動加速度を α 、露頭基盤に対する相対変位場を u として、 $(\partial^2 U / \partial t^2 + \partial U / \partial t + U) = -M \alpha$ (2)である。ただし、式(1)(2)では、対象とした地盤は半無限体であるが、層状地盤の場合でも同様の定式化が可能である。B. 等価静的解析 設計においては震度法にみられるように時間現象を凍結して静的現象に置き換え、復元力項を左辺に、外力項を右辺において運動方程式を解いている。ここでも同じようにして、地下逸散減衰を考慮した形で運動方程式をたてると、 $(K + d \partial / \partial t) U = -M \alpha + d v$ (3)となる。ここで、 $\partial / \partial t$ の作用子を系の卓越円振動数 ω ($i 2 \pi f$)と置き換えれば、 $(K + i \omega d) U = -M \alpha + i \omega d v$ (4)を得る。この式で、 α と v を各々与えれば U が決まることになる。一方、従来の静的解析では、基礎が固定であることを前提にしている。この場合の運動方程式を導く。基礎固定の場合の剛性行列を K_r 、基礎上の構造物のバネ定数を k 、基礎固定のときの構造物の相対変位場を U_r 、基礎の変位場を U_b とすると、式(3)より

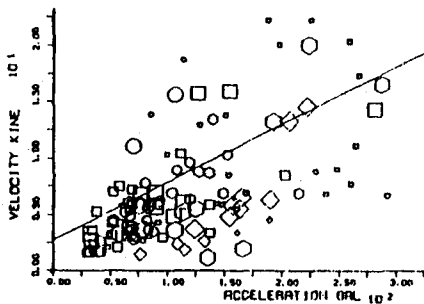
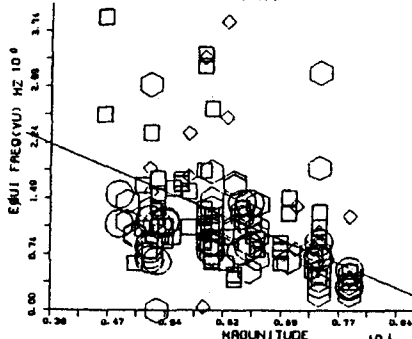
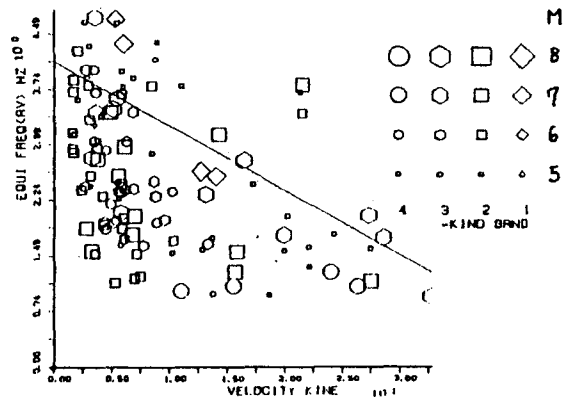
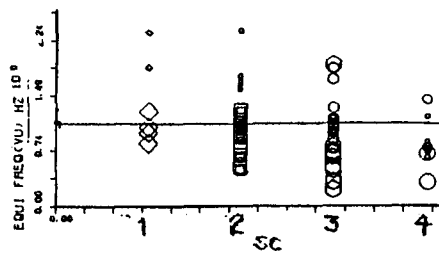
$$\begin{bmatrix} K_r & (0, k)^T \\ (0, k) & (k + d \partial / \partial t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_r \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M r \alpha_r \\ -M b \alpha_r + d v \end{bmatrix}$$

上式の次元を縮小してまとめると、 $(K_r - K_d) U_r = -M r \alpha_r - Q (-M b \alpha_r + d v)$ (5)を得る。ここに、 $Q = (0, k)^T (k + d \partial / \partial t)^{-1}$ 、 $K_d = Q (0, k)$ である。上式には、地下逸散の項が剛性と地震荷重に反映されていること、入力波として速度成分が組み込まれていることがわかる。

3.2 速度成分表示の地震荷重 A. 地震荷重 式(5)によれば、地震荷重は地震動の α と v に関する二つの項であることがわかる。このうち、式(5)の右辺第一項は従来どおりの加速度による荷重項である。また右辺第二項では分母にある振動数(K_d は ω に比例的)と分子の振動数($\alpha = \omega v$)とが約分されて、第二項は速度次元の荷重項 P になる。よって、地震加重は $P = -Q M \alpha + Q' M v$ (6)である。ここに $Q' = Q d$ 。以上のように考えれば、①地下逸散減衰を考慮するには速度成分の入力項の存在が必要となること、あるいは逆に②地下逸散減衰を考えることにより速度成分の入力項が意味を持つことがわかる。なお、第二項を除去すれば、荷

重項は加速度によるもののみとなり、式(5)は従来の震度法の式と同一となる。ただし、従来の式では地下逸散減衰を正しく評価していないので、系の応答は一般に過大になると考えられる。B. 一質点系における地震荷重の例 構造物を2質点系にモデル化する（基盤上に1質点、構造物頂部に1質点、慣例によれば1質点）。このときの荷重項Pは、 $P = -m\alpha - mk(-U_b + kv/i\omega)/d$ (7)である。これより、地震荷重は基盤上質点による慣性力の分だけ小さくなり、虚数部において速度入射の項が加算される。もちろん、系の応答は、複素数の剛性と複素数の地震荷重とにより決まる。

4. 速度成分と加速度成分の振動数関係 地震荷重の速度成分と加速度成分との関係を見るための第一段階として、速度成分と加速度成分との関係を振動数の次元で把握する。一般には、速度成分の振動数特性を把握するには、波形・スペクトルの両面からのアプローチが必要であるが、設計の面では最大振幅が最も使い易いので（加重評価も最大振幅値が利用）、時間領域からのアプローチを考えることにした。すなわち、時間領域の諸量をもって等価振動数の世界をつくり、具体的には時系列の最大加速度 α_{max} と最大速度 v_{max} とにより等価振動数を $f_{av} = 2\pi\alpha_{max}/v_{max}$ で定義する（同様に $f_{vu} = 2\pi v_{max}/u_{max}$ ）。このような振動数と波形の卓越振動数とは当然一致しないが、卓越振動数と等価振動数の二つの量によれば、時系列現象をより詳しく把握できるものと考えられる。この種の議論は別の機会にまわして、ここでは地震動の等価振動数の特性について地震動の精元との関係で把握することにした。すなわち、1953～1978の強震記録（78地震156水平成分）を対象として、加速度波を積分して速度波を求め、地震のマグニチュードMや震央距離 Δ 、地盤条件SCによる影響を検討した。その結果、 α と v には相関は十分明瞭にはみられないが（図1）、 f_{av} と v については、相関性がみいだせ、 v が大きくなると等価振動数が低下する傾向にあることを確認できる（図2）。また、等価振動数には、震央距離依存性がみられないが、マグニチュードMについてはMの増加に対して等価振動数が現象する特徴を有しており（図3）、また等価振動数は地盤条件の影響をも強く受けている（図4）。これより、最大加速度波が地盤条件の影響を受けてゆらぎの強いものであるということができようである。5. まとめ 地震動の速度成分について加速度成分との比から振動数特性を検討し、また速度成分により地震荷重を評価する方法を考案した。これらの結果をもとにして、実際構造物への適用を考えていく予定である。A. 参考文献 1)富樫、植木、影山；振動現象における等価振動数の物理的意味とその利用、土木学会中部支部研、1988、pp108-109. 2)富樫、板橋、河合；速度成分を考慮した静的地震応答解析手法について、土木学会中部支部研、1988、pp18-19.


図1 α と v の関係

図3 Mと f_{vu} の関係

図2 v と f_{av} の関係

図4 地盤種別SCと f_{vu} の関係