

地盤と上部構造物の相互震動作用の数値解析上の一考察

電力中央研究所 林 正 夫

○日比野 敏

1 序 地盤と構造物を連成させた震動解析を試み、(1)取扱い地盤の大きさの影響、(2)上部構造物の震動に及ぼすベースコンクリートの根入れの影響、(3)ベースコンクリートの横方向の広がりの影響などを試算したので報告する。

2 解析法 地盤および構造物よりなる非均質な連続体を有限個の三角形要素によつて表現し、それらの三角形の節点について多自由度系の運動方程式を作り、その方程式を数値積分する。

地震時に地盤および構造物を形成する系について(1)式の運動方程式が成立する。

$$\{M\}\{\ddot{\delta}\} + \{C\}\{\dot{\delta}\} + \{K\}\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに $\{M\}$ 、 $\{C\}$ および $\{K\}$ はそれぞれ質量、減衰および剛性マトリックスである。 $\{\delta\}$ は変位ベクトルであり $\{\dot{\delta}\}$ は変位の時間に関する微分を示す。 $\{F\}$ は地震により生ずる外力ベクトルである。ここでは $\{C\}\{\dot{\delta}\}$ の項は、材料の応力-ひずみ関係の非線型性にもとづき $\{K\}\{\delta\}$ に含めて考える方が自然であり、この課題については次回に報告するとし、ここでは $\{C\}$ の項を省略し、弾性震動として数値解析を行なつた結果のみを報告している。

(1)式の $\{M\}$ は分布質量を用いる。これは三角形要素の質量の $\frac{1}{3}$ が各節点にあるとして考える塊状質量に比べ、地盤および構造物をより現実に近い状態で表現できる。¹⁾ 質量の慣性力 $\{p\}$ は要素の単位体積あたりの質量を ρ とすれば、

$$\{p\} = -\rho \frac{d^2 \tau}{dt^2} = -\rho \{\ddot{\tau}\} \quad (2)$$

となる。ここに $\{\tau\}$ は要素内の変位である。 $\{P\}$ を節点変位で表現すると、

$$\{p\} = -\rho \{N\}\{\ddot{\delta}\}^e \quad (3)$$

ここに $\{N\} = \{IN'_i, IN'_j, IN'_k\}$ $I = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}$

$$N'_i = (a_i + b_i x + c_i y) / 2\Delta \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_i = x_j y_k - x_k y_j \\ b_i = y_j - y_k \\ c_i = x_k - x_j \end{cases}$$

x_j や x_k は三角形要素の節点 i, j, k の座標であり、 Δ は要素の面積である。

(3)式をさらに節点外力 $\{F\}_p^e$ に仮想仕事の原理により、仮想変位 $\{\bar{\tau}\}^e$ による外部仕事を $(\{\bar{\tau}\}^e)^T \{F\}_p^e$ 、要素の仮想内部変位 $\{\bar{f}\}$ による内部仕事を $\int -\{\bar{f}\}^T \{p\} dvol$ とすると $(\{\bar{\tau}\}^e)^T \{F\}_p^e - \int \{\bar{\tau}\}^T \{N\}^T \{p\} dvol$ の関係から、

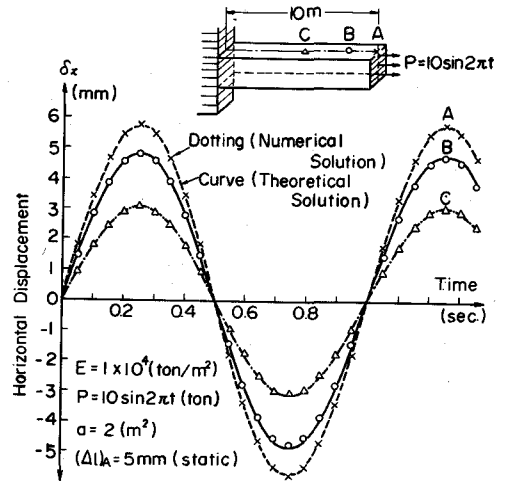


Fig. - 1 Displacement of the Rod

$$\begin{aligned}
 \{F\}_p^e &= \iint \{N\}^T \{P\} \, dx dy \\
 &= \{ \iint \{N\}^T \rho \{N\} \, dx dy \} \{\ddot{\delta}\}^e \\
 &= \{m\}^e \{\ddot{\delta}\}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

となる。この $\{m\}^e$ が要素についての分布質量である。

3 理論解と本数値解析法との比較

地盤と構造物の連成震動解析を行なうに先立つて、理論的に解きうる矩形棒の強制縦振動について予備計算を行ない、数値解析の精度について確認を行なった。(図-1)

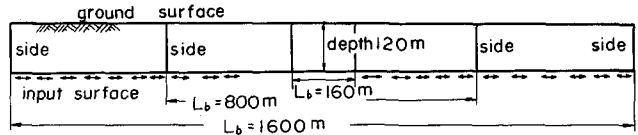


Fig- 2 3 Boundaries of Side of Ground

4 解析上の仮定

(a) 減衰効果 いわゆる減衰の現象は震動過程において物性に変化することにより生ずる現象や構造つき目での減衰など複雑な機構である。これに対し従来の慣用の減衰定数は地盤および構造物の物性の変化による影響が直接的に考慮されていないらみがあった。今後は震動過程での材料の物性の変化による減衰の考察が望まれる。この解析法ではそれら物性の変化をも基本的には扱っているが、その考察は次報に譲り今回は弾性震動の範囲にとどめた。

(b) 地中での地震入力波の扱い

地盤と構造物の連成震動の解析を行なう場合には取扱う地盤の深さに応じた地中深部での地震入力波形を用いる必要がある。しかしながら地中岩盤での地震波形データは未だ少なく、今回はやむなく地上記録の波形(タフト)はそのまま加速度値を基準化(瞬間最大加速度を $100 \, g a l$ とした)して地中での地震波として用いた。しかしこれはきわめて安易なやり方なので今後は地中での地震入力波形の観測値に基づきたいと考えている。

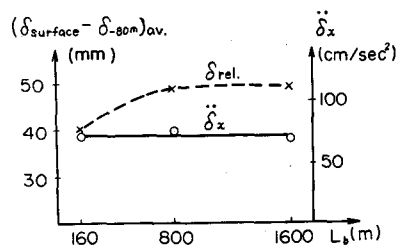


Fig- 3 Horiz. Aver. Relative Displ. and δ_x vs. Assumed Horiz. Width L_b

5 震動地盤系の境界条件

地盤の底面の地震入力加速度の作用する面は水平動のみが作用するとした。また地震の遠方の

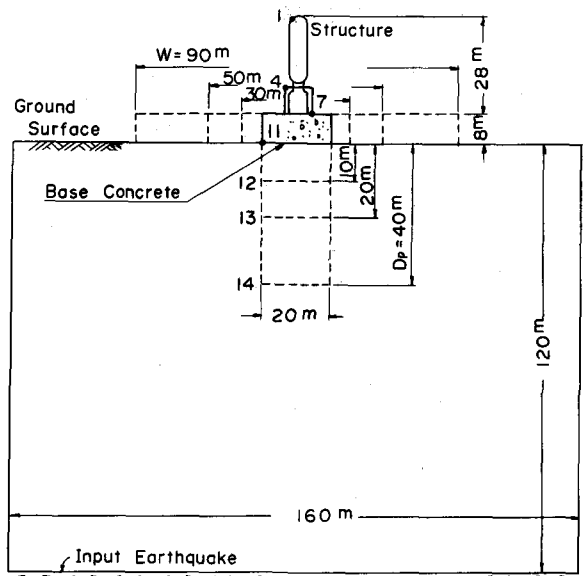


Fig- 4 Structures and Ground

側方境界は変形自由とした。この側方の境界は実際には地震波が到達するまでは固定条件に近く、地震波が到達した後はこの周辺で地震波に応じた変位をすすると思われる。このような境界条件に改良するように試みつつある。

6 解析例

6-1 取扱う地盤の大きさの影響

数値解析上はある限られた範囲の地盤しか表現できないので、解析上妥当な地盤の横方向のひろがりについての目安を得るために、地盤の深さを120mで一定とし、巾 L_b を160m、800m、1600mの場合(図-2)について動的弾性係数 $40000 t/m^2$ 、ポアソン比0.3、単位体積重量 $23 t/m^3$ の弾性地盤だけを震動系として計算した。その結果(図-3)によると地表の加速度応答は L_b によつてはあまり変わらないが平均相対変位は地盤巾 L_b とともに大きくなるが一定値に近づくように思われた。

つまり加速度応答を中心に考えるならば地盤巾 L_b は160mぐらいでよいかもしれないが平均相対変位を中心に考えるならば L_b は800mぐらいを扱う必要があるのではないかと思われる。これはただの一試算にすぎないので、今後は地盤の解析上の広がりについてはさらに研究を進める必要がある。

6-2 上部構造物の基礎コンクリートの形状効果について

前記の $L_b=160m$ の場合について上部構造物は約20自由度とし、また地盤は約70自由度とし、合計約90自由度で計算した。

(a) ベースコンクリートの根入れ効果

根入れ深さ D_p を0m, 10m, 20m, 40mの4種とし、それぞれの場合を計算した(図-4),

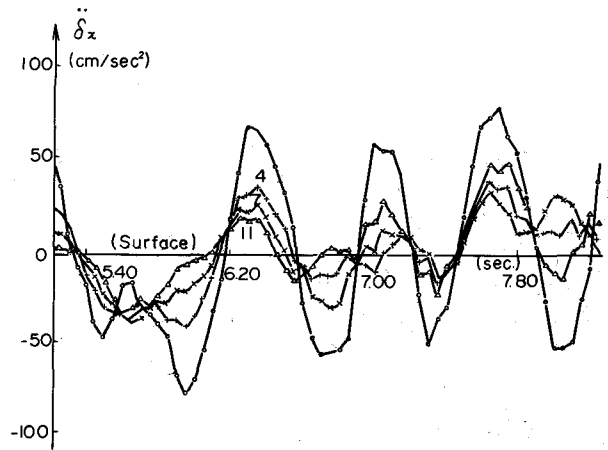


Fig. - 5 Horiz. Accel. in Structure ($D_p=1.0m$)

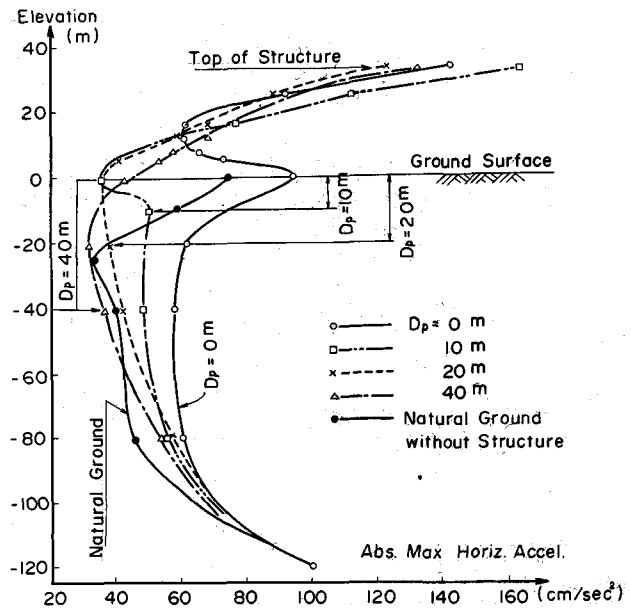


Fig. - 6 Acceleration vs. Elevation

(図-5)にはその結果の1例を示す。

(1) ここで、数値計算上の1つの課題をまづ述べておこう。それは図-6に示したように、入力加速度が一旦減少したのちに、地表面ちかくから増幅されだし、上部構造物でさらに増幅されていく傾向が数値計算上、あらわれたことである。卒直に云つて、この現象は実際の経験的事実といささか異なるように思うので今後

の課題として残すことにしたが、軟弱地盤の場合には加速度が地盤の上、下で位相がとくにずれるのとの関係があるのではないと思われる。その位相のずれの一例として地盤のみを扱った場合の結果を図-7に示す。

(2) 根入れ D_p を深くすると構造物頂部の平均加速度は減少するが、最大加速度でみると、根入れが深くなつても応答は小さくならない場合もあり根入れ側面からの地震力の吸込の影響が無視できないように思われる。(図-8)

さらに言葉を加えれば、ベースコンクリートの根入れが塔状作用を呈し、逆効果を生むのではないかと表現してもよいかも知れない。この点は今後さらに綿密な検討を加えたいと考えている。

現実の設計に当つては、最大応答値とともに主要動の間での平均応答値さらに詳しく云えば主要動の間での力積(質量×加速度×持続時間)の概念を導入することは1つの今後の課題となりうるであろう。

(3) 自然地盤内での地震加速度の地表面にむかつての増幅度よりも、重量構造物が地表面にとりついた場合の増幅度は半減することもある。(図-6)したがつて、自然地盤での地震観測値から地表面の設計増幅度を論じることとはできない。また上部構造物だけの動的解析をおこなう場合には、この種の増幅度の軽減傾向を加味した入力加速度を考慮するのが妥当な場合もあると思う。

(b) ベースコンクリートの拡巾効果²⁾ 図-4に示すようにベースコンクリートを水平方向に、巾 $W=20\text{ m}$, 30 m , 50 m , 90 m とした場合について構造物の挙動を計算した。その結果によると、

- (1) $W=30\text{ m}$ のところでは1つのピークがある。(図-9)この現象は構造物系に入力として入る加速度の周波数特性と構造物の周波数特性の相互関係によるのではないと思われるが詳細については今後検討したい。
- (2) 拡巾をすると頂部の振動周期をひきのばす効果はきわめて大きく(20mの巾のとき周期が0.6秒であつたものが90mの場合に4.4秒までのびた)、上部構造物の振動周期を人為的に制御するのに、ベースコンクリートの巾は一役をはたすことができるように思う。(図-9)
- (3) 震動中の接地圧について調べた結果が図-10である。この結果によるとベースコンクリートの端を境にして σ_y とせん断応力 τ_{xy} が急激な変化をしている。したがつて地盤が動的に破壊されないようにこのようなベースコンクリート端部の地盤の補強、改良、排水、圧密に留意する必要がある。

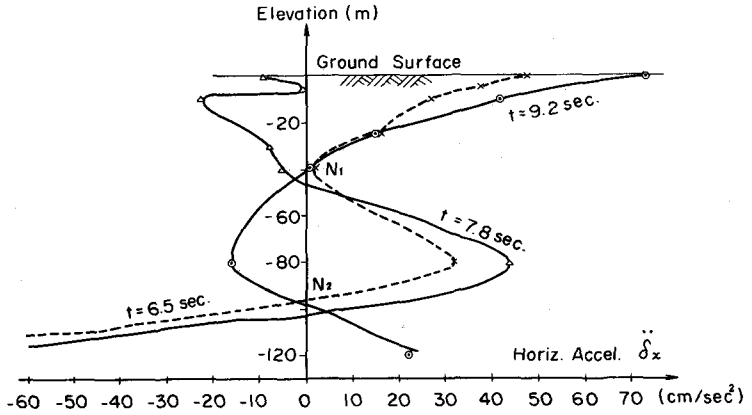


Fig. -7 Horiz. Accel. at Several Times (Case-5)
(Natural Ground without Structures)

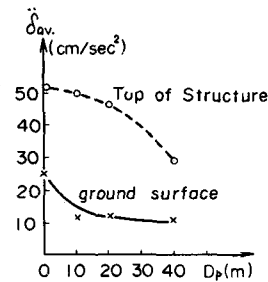


Fig-8 Horiz. Average Accel. vs.
Depth of Base Concrete

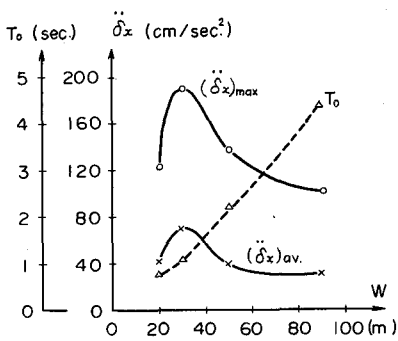


Fig-9 Horiz. Accel. of Structure (pt.1) and Period vs. W

7 結 論

地盤と構造物より成る連成弾性系に限定して、ある特定の任意波の場合だけであるが、震動解析を試みそれらの結果よりつぎのように考えられる。

- (1) 取扱う地盤を深さ120mを下辺とし、自由側面間の横巾を160m, 800m, 1600mと増して計算した場合、地表の最大加速度はほぼ一定であつたが、地中と地表との相対変位は横巾とともに増大するが一定値に近づいた。したがつて今回の弾性地盤では取扱う地盤の巾は最大加速度を問題とするならば160mでよいかもしれないが、相対変位を考える場合には800mぐらい必要となる。
- (2) 構造物のベースコンクリートの根入れを10m~40m程度に深くしても構造物の最大加速度についてはとくに制震効果は生じなかつた。この理由は根入れが深くなることにより塔状化作用が増し、根入れ側面よりの地震入力が増すからであろうと思われる。一方最大加速度でなく、主要震動時間内の平均加速度応答に着目すると、根入れが深くなるとともに応答は明らかに小さくなり制震効果が認められた。
- (3) 構造物のベースコンクリートの横巾を20m~90mと変化させた場合、加速度の抑制効果はあまり顕著でなかつたが、頂部の振動周期をひきのばす効果がきわめて大きいことに長所を見出した。
- (4) ベースコンクリートの動的接地圧や地盤のせん断応力はベースコンクリートの端で急変し、地盤の地震時の破壊に関してもつとも重要であることが明らかに示された。このことは耐震的な地盤設計の要点を示唆するものである。

今回は、弾性震動にとどまつたので、実際の地盤を表現し切つてないことは明らかであり、今後さらに非線型震動について考察をすすめたい。

参 考 文 献

- 1) O.C.Zien Kiewicz and Y.K. Cheung : *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, 1967
- 2) 林 正夫, 日比野 敏 : 地震時の地盤と構造物の連成震動の解析(ランダム地震波), 第3回土質工学研究発表会講演集, 1968年6月および
林 正夫, 日比野 敏 : 地震時の地盤と上部構造物の連成震動の数値解析上の一考察(その2), 第4回土質工学研究発表会講演集, 1969年6月

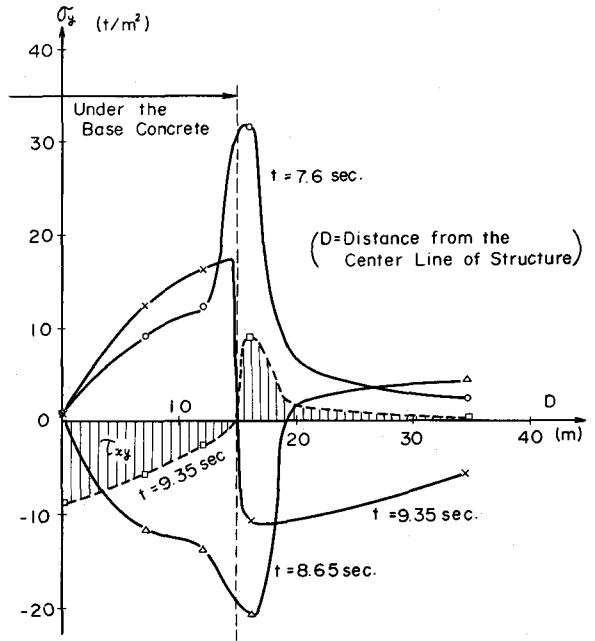


Fig-10 Dynamic Contact Stress at 5m beneath the Base Concrete (Case-II, W = 30m)