

1. はじめに

近年市街地あるいは既設構造物に近接して突波工事が行なわれることがしばしばある。例えばロックオイルタンクや地下発電所など岩盤中に隣接して大型地下構造物を施工する場合や既設トンネルに隣接して新たなトンネルを構築する場合である。この様な場合施工中及び完成時の静的な応力検討はもうろんのこと施工中の突波振動についても十分な検討を加えなくてはならないであろう。そこで本報文では岩盤中の空間(例えばトンネル)近傍で突波工事が行なわれた場合を想定し、その空間周辺での動的応力状態を波動論を使い検討した。

2. 解析方法

本解析を行なうに当り次の仮定を設けた。

- (1) 突波振動は縦波が支配的であることから入射波としての突波振動はすべて縦波(平面波)とみなす。
- (2) 突波振動の主要動の継続時間は非常に短く、距離減衰が大きいことから地表面からの反射波は考えない。
- (3) 岩盤は近似的に均一地盤とする。
- (4) 施工中を考慮に入れ、ライニングは考えない。空間は円型断面とする。

以上の仮定の基に、まずPAOの理論より定常波動が円型空間に入射された時の空間周辺での応力及び変位を求める。次のようになる。(図-1の解析モデル参照)

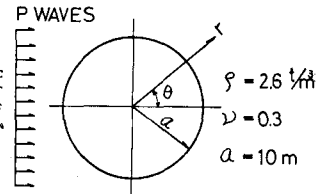


図-1 解析モデル図

$$U_r = r \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \phi_n i^n \alpha r J_n'(\alpha r) + A_n \alpha r H_n^{(2)}(\alpha r) + B_n n H_n^{(2)}(\beta r) \right\} \cdot \cos n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad \dots (1)$$

$$U_\theta = r \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \phi_n i^n n J_n(\alpha r) + A_n n H_n^{(2)}(\alpha r) + B_n \beta r H_n^{(2)}(\beta r) \right\} \cdot \sin n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad \dots (2)$$

$$\tau_{\theta r} = 2\mu r^2 \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \phi_n i^n \frac{1}{r} F_n^{(2)} + A_n F_n^{(2)} - B_n G_n^{(2)} \right\} \cdot \cos n\theta \cdot e^{-i\omega t} \quad \dots (3)$$

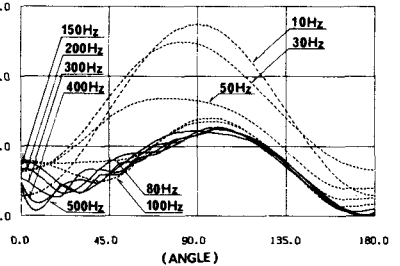


図-2 応力分布 ($\tau_{\theta r}$ 絶対値)

ここで A_n, B_n は係数で境界条件より求める。

$H_n^{(2)}$ はオイ種ハンセル関数

J_n はオイ種ベッセル関数

$$\alpha = \frac{\omega}{V_p} \quad \beta = \frac{\omega}{V_s} \quad \phi_n \text{ は定数}$$

$$\epsilon_n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 2 & n \geq 1 \end{cases} \quad \mu \text{ はラーメの定数}$$

$$F_{nr}^{(2)} = -(\eta^2 + n - \alpha^2 r^2 + \frac{1}{2} \beta^2 r^2) J_n(\alpha r) + \alpha r J_{n-1}(\alpha r)$$

$$F_{nr}^{(2)} = -(\eta^2 + n - \alpha^2 r^2 + \frac{1}{2} \beta^2 r^2) H_n^{(2)}(\alpha r) + \alpha r H_{n-1}^{(2)}(\alpha r)$$

$$G_{nr}^{(2)} = -(\eta^2 + n) H_n^{(2)}(\beta r) + \eta \beta r H_{n-1}^{(2)}(\beta r)$$

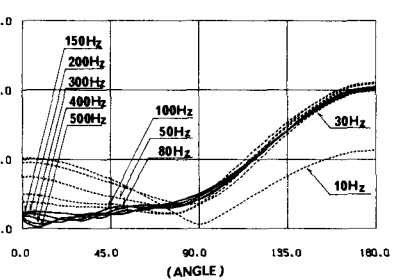


図-3 変位分布 (D_r 絶対値)

さうに実際の突波振動に適用するために本論ではFFTと上述した解を使い突波振動(ランダム波)に対する解を数値的に求める。

3. 数値解析例

解析モデルとして図-1に示す様に

$\rho = 2.6 \text{ t/m}^3$ $\nu = 0.3$ $a = 10 \text{ m}$ を採用する。まず振動数10Hzから500Hzの定常波が入力した時の空間表面上での変位(D_r, D_θ)

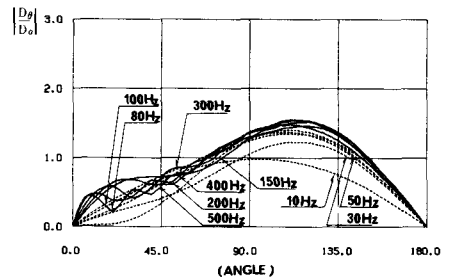


図-4 変位分布 (D_θ 絶対値)

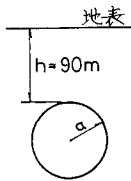


図-5 静的モデル

	最大応力 (T_0) kg/cm^2	
静的 応力	$\theta = \pi$ 60	$\theta = \pi/2$ -7
動的 応力	$\theta = \pi/2$ ± 14	

表-1

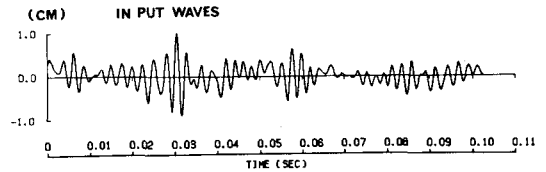


図-6 発破振動の変位波形

応力 (T_0) を求め、それを図-2,3,4 に示す。次に実際の発破振動 (図-6 参照) が入力した時の空洞表面上での変位、応力分布を求め、その結果を定常波 500 Hz に対する解と合わせて図-8,9,10 に示す。さらに空洞表面における T_0 の静的応力と動的応力 (発破) が実際にどの程度の値になるか概略的に調べてみた。その結果を表-1 に示す。なお静的応力 T_0 を求めるに当っては地表面の影響を無視し、弾性論より求めた。また動的応力 T_0 を求めるに当っては入射波の速度振幅 10 kine と仮定し求めた。(図-5 参照)

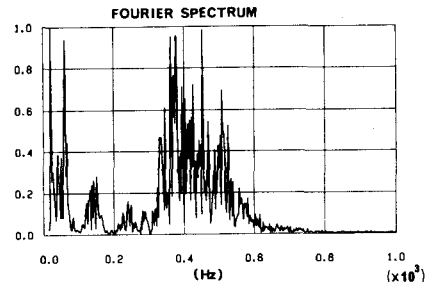


図-7 フーリエスペクトル

4. 考察とまとめ (1) 図-2,4 をみてわかる様に周波数によって各分布は変化するが高振動数になるとある値に収束する傾向がある。最大応力 T_0 は 1.2 付近に ($\theta=90^\circ$)、最大変位 D_0 は 2.0 付近に ($\theta=180^\circ$)、また最大変位 D_0 は 1.5 付近 ($\theta=120^\circ$) にある。また周波数が低いと $\theta=90^\circ$ を軸に対称に分布している。(2) 今回の発破振動の様に高い振動成分を多く含んでいる場合は (400 Hz ~ 500 Hz ただし 50 Hz 付近のピークは電気ノイズと思われる)、空洞周辺での変位及び応力集中係数は比較的小さく 1.2 ~ 1.5 付近の値である。(3) 今回の様な発破振動が入力した時の空洞表面での変位応力は定常波の解から十分予測でき、工学的には定常波に対する解で検討してもよいと思われる。(図-8,9,10) (4) 空洞表面での T_0 の静的応力と動的応力について概略的ではあるがその値を比較してみると引張力の発生位置及びその値はほぼ同程度であった。このことは発破振動による空洞周辺での応力集中係数としては比較的小さいが、入射波としての発破振動の振幅の大きさや静的応力の値のいかんによっては岩盤の許容値を越えることも考えられるので十分な注意が必要であろう。(5) 今回用いた手法は従来より使われている FEM や差分に比べて計算時間や計算容量が軽減でき、また定性的な傾向をみるのに適している様に思われる。

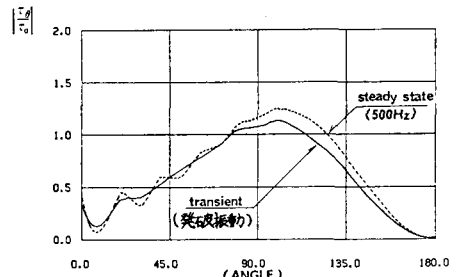


図-8 応力分布 (T_0 絶対値)

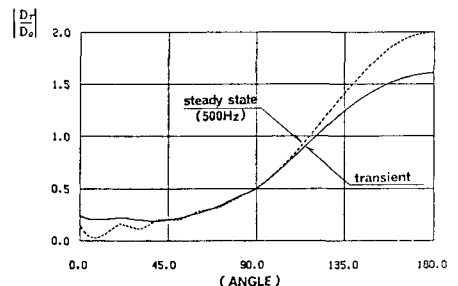


図-9 変位分布 (D_0 絶対値)

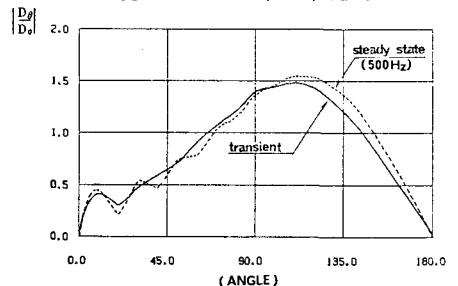


図-10 変位分布 (D_0 絶対値)

(註) T_0 , D_0 は入射波の応力及び変位振幅値

5. おわりに 理想化されたモデルにおける基礎的な検討にとどまったが、発破振動の持っている不規則性、及び現象の複雑さを考慮に入れると、今後さらに実則を踏えたデータの蓄積も必要となろう。

文献(1) YIH HSIG PAO, DYNAMIC STRESS CONCENTRATION IN AN ELASTIC PLATE, J. APPL. MECH, 1962