

関西大学工学部 正員 楠見 晴重  
 関西大学工学部 正員 谷口敬一郎

1. まえがき

発破による締固め工法は、土中の発破機構がほとんど解明されていないため、合理的な発破設計ならびに締固め設計が実施されないことから、国内においてはほとんど用いられていない。しかし、発破による締固め工法は、他の動的工法と比べると、施工経費が格段に安く、しかも衝撃力を自由に選択できる等、すぐれた特徴を有する。

本研究は発破による締固め機構を解明するため、爆破作用の一つである爆薬の爆轟により直接地盤に投射される応力波による作用に着目し、乾燥、飽和地盤を対象として考察を行ったものである。なお解析は爆源周辺部を対象とすることより、地盤は弾性体と仮定した。

2. 解析方法

図-1 において爆源を原点とし、媒質内の任意点Aの座標を極座標( $r, \theta, \phi$ )で表わすとする。この球状爆薬が爆轟した場合、周囲の媒質内へ投射される波動の主要部分は縦波である。したがって、A点の変位の $r, \theta, \phi$ 方向の変位成分をそれぞれ $u_r, u_\theta, u_\phi$ とすれば

$$u_r = u(r, T), \quad u_\theta = u_\phi = 0 \quad \text{----- (1)}$$

となり、点Aの応力は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + 2\lambda \frac{u_r}{r} \\ \widehat{\theta\theta} &= \widehat{\phi\phi} = \lambda \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} + 2(\lambda + \mu) \cdot \frac{u_r}{r} \\ \widehat{\phi\phi} &= \widehat{\phi r} = \widehat{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \text{----- (2)}$$

ここで動的応力の場合には、任意点の $r$ 方向の変位 $u_r$ は、 $u_r$ の最高値を決定する距離 $r$ の関数 $u_p(r)$ と、その点の時間的変化状態を示す $T$ の関数 $u_w(T)$ との積として示される。すなわち

$$\left. \begin{aligned} u_r &= u(r, T) = u_p(r) \cdot u_w(T) \\ \text{ただし } T &= t - r/c_L \quad t: \text{時間}, c_L: \text{縦波の伝播速度} \end{aligned} \right\} \text{----- (3)}$$

したがって

$$\frac{\partial u(r, T)}{\partial r} = \frac{du_p(r)}{dr} u_w(T) + \frac{du_w(T)}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} u_p(r) \quad \text{----- (4)}$$

となる。一方その点の変位速度 $v(r, T)$ は、

$$v(r, T) = \frac{\partial u(r, T)}{\partial t} = \frac{du_w(T)}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} u_p(r) \quad \text{----- (5)}$$

で示され、また $\partial T / \partial r = -1/c_L$ ,  $\partial T / \partial t = 1$ を考慮すると

$$\frac{\partial u(r, T)}{\partial r} = \frac{du_p(r)}{dr} u_w(T) - \frac{v(r, T)}{c_L} \quad \text{----- (6)}$$

となる。更に変位、変位速度の最高値 $u_p(r)$ および $v_p(r)$ は、一般に $u_p(r) = A \cdot r^{-m}$ ,  $v_p(r) = B \cdot r^{-n}$ と表わされる。

以上より式(2)は、次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= (\lambda + 2\mu) \left\{ -\frac{mA}{r^{(m+1)}} u_w(T) - \frac{B}{c_L r^n} v_w(T) \right\} + 2\lambda \frac{A}{r^{(m+1)}} u_w(T) \\ \widehat{\theta\theta} &= \widehat{\phi\phi} = \lambda \left\{ -\frac{mA}{r^{(m+1)}} u_w(T) - \frac{B}{c_L r^n} v_w(T) \right\} + 2(\lambda + \mu) \frac{A}{r^{(m+1)}} u_w(T) \\ \widehat{\phi\phi} &= \widehat{\phi r} = \widehat{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \text{----- (7)}$$

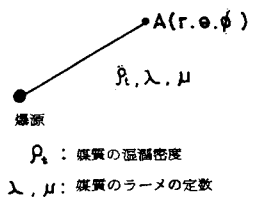


図-1 媒体と爆源との関係

ここで、 $\mu$  はラーメの定数で、これらの値は次式から求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} C_L &= \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \quad , \quad C_T = \sqrt{\mu/\rho} \\ G: \text{横波の伝播速度}, \rho: \text{媒質の湿潤密度} \end{aligned} \right\} \text{----- (8)}$$

また式(7)において、 $u_w(t)$ 、 $\dot{u}_w(t)$ は変位および変位速度の時間的変化状態を表す関数であるが、爆源周辺部においては図-2のような正弦波的变化を示す。

以上より、媒質内の任意点に発生する応力は、変位および変位速度の最高値と距離 $r$ との関係、縦波、横波の伝播速度ならびに媒質の湿潤密度を決定すれば式(7)、(8)の関係を用いて求めることができる。

### 3. 模型地盤による実験

任意点の応力を計算するために必要な諸数値を、乾燥、飽和模型地盤(2.23×2.76m、層厚0.6m)を使用して求めた。爆源としては6号電気雷管1個とし、表面から40cmの深さに装薬した。初期乾燥密度は乾燥、飽和地盤とも1.48 t/m<sup>3</sup>であり、使用した砂は、最大粒径4.76mm、 $U_c=4.58$ の川砂である。各地盤の縦波、横波の伝播速度は表-1に示す通りである。この測定結果から式(8)を用いて、 $\mu$ を求めたものが表-2である。図-3は各地盤における発破後の地表面沈下の断面図である。図より乾燥地盤より、飽和地盤の方が広範囲に沈下が生じているのが認められる。式(9)は発破振動測定によって得られた変位速度の最高値 $\dot{u}_p$ と距離 $r$ との関係である。

$$\left. \begin{aligned} \text{乾燥地盤: } \dot{u}_p &= 8.40 \times 10^5 r^{-2.4} \\ \text{飽和地盤: } \dot{u}_p &= 7.65 \times 10^3 r^{-1.8} \end{aligned} \right\} \text{----- (9)}$$

また、振動が弾性波であることより、任意点の変位の最高値は、各測定点で得られた $\dot{u}_p$ に $2\pi f$ ( $f$ :周波数)で除することによって求めることができる。このようにして求めた変位の最高値 $u_p$ と距離 $r$ との関係は式(10)のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \text{乾燥地盤: } u_p &= 2520 r^{-2.4} \\ \text{飽和地盤: } u_p &= 13 r^{-1.8} \end{aligned} \right\} \text{----- (10)}$$

### 4. 解析結果および考察

以上の実験によって得られた諸数値を式(7)に適用して任意点の $\hat{r}\hat{r}$ 、 $\hat{\theta}\hat{\theta}$ の時間的変化および最高値( $\hat{r}\hat{r}_{max}$ 、 $\hat{\theta}\hat{\theta}_{max}$ )を求めた。表-3は各地盤の $r$ に対する最高値を示したものである。この表より、乾燥地盤では $\hat{r}\hat{r}_{max}$ 、 $\hat{\theta}\hat{\theta}_{max}$ は $r$ が変わっても、ともに圧縮応力となっている。飽和地盤では $\hat{r}\hat{r}_{max}$ は圧縮応力、 $\hat{\theta}\hat{\theta}_{max}$ は引張り応力となっている。ここで砂の引張り強度は圧縮強度に比べてかなり小さいことから、発破による締め固め作用は応力波により、生ずる引張り応力によって砂の骨格構造が破壊されて締め固められるものと考えられる。したがって、爆薬の爆轟により周囲の地盤へ投射される応力波による締め固め作用は、ほとんどの地点において引張り応力が発生する飽和地盤に対して大きな影響力を与えるものと考えられ、爆源を中心として非常に広範囲に地表面沈下が生ずるものと推察される。これは図-3の実験結果とほぼ一致することが認められた。乾燥地盤においてはすべての地点において引張り応力が発生しないことから、応力波によって締め固められる部分は爆源直近部の非常にせまい部分と考えられる。

以上より、爆破作用の一つである応力波による締め固め作用について考察を行ったが、乾燥地盤では応力波によって締め固められる部分は非常にせまく、その効果は小さいことが認められた。したがって、乾燥地盤ではもう一つの爆破作用である爆発生成ガス圧による作用のみによって締め固められるものと考えられる。

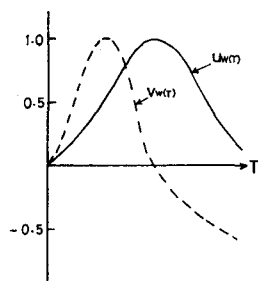


図-2  $u_w(t)$ 、 $\dot{u}_w(t)$ の時間的変化状態

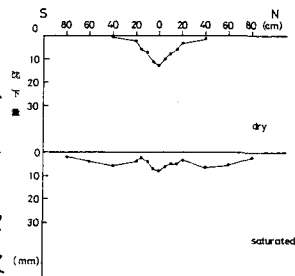


図-3 沈下状況

表-1 初期定数

|      | $\rho_w$ (t/m <sup>3</sup> ) | $\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> ) | $C_L$ (m/sec) | $C_T$ (m/sec) |
|------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| 乾燥地盤 | 1.48                         | 1.48                         | 530           | 220           |
| 飽和地盤 | 1.48                         | 1.92                         | 1550          | 510           |

表-2 各地盤の $\lambda$ 、 $\mu$

|      | $\lambda$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\mu$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------|----------------------------------|------------------------------|
| 乾燥地盤 | 2780                             | 730                          |
| 飽和地盤 | 36800                            | 5100                         |

表-3 各地盤の $\hat{r}\hat{r}_{max}$ 、 $\hat{\theta}\hat{\theta}_{max}$

| $r$ (cm) | 乾燥地盤                                          |                                                         | 飽和地盤                                          |                                                         |
|----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|          | $\hat{r}\hat{r}_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\hat{\theta}\hat{\theta}_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\hat{r}\hat{r}_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\hat{\theta}\hat{\theta}_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 30       | -7.18                                         | -2.09                                                   | -13.46                                        | 18.25                                                   |
| 40       | -2.46                                         | -6.17×10 <sup>-1</sup>                                  | -6.69                                         | 8.58                                                    |
| 50       | -7.77×10 <sup>-1</sup>                        | -2.42×10 <sup>-1</sup>                                  | -3.95                                         | 4.84                                                    |
| 60       | -3.54×10 <sup>-1</sup>                        | -1.14×10 <sup>-1</sup>                                  | -2.60                                         | 3.07                                                    |
| 70       | -1.83×10 <sup>-1</sup>                        | -6.07×10 <sup>-2</sup>                                  | -1.84                                         | 2.10                                                    |
| 80       | -1.03×10 <sup>-1</sup>                        | -3.54×10 <sup>-2</sup>                                  | -1.37                                         | 1.52                                                    |
| 90       | -6.27×10 <sup>-2</sup>                        | -2.21×10 <sup>-2</sup>                                  | -1.06                                         | 1.15                                                    |
| 100      | -4.02×10 <sup>-2</sup>                        | -1.45×10 <sup>-2</sup>                                  | -8.49×10 <sup>-1</sup>                        | 8.98×10 <sup>-1</sup>                                   |
| 110      | -2.70×10 <sup>-2</sup>                        | -9.97×10 <sup>-3</sup>                                  | -6.94×10 <sup>-1</sup>                        | 7.21×10 <sup>-1</sup>                                   |
| 120      | -1.88×10 <sup>-2</sup>                        | -3.39×10 <sup>-3</sup>                                  | -5.78×10 <sup>-1</sup>                        | 5.91×10 <sup>-1</sup>                                   |

(-は圧縮応力)