

(100) 液状化防止対策としてのグラベルパイルの設計

山口大学工業短期大学部 ○山本哲朗
山口大学工学部 大原資生
九州大学工学部 小坪清真

1. まえがき 本文はグラベルパイルの設計上の最適な径および間隔を最低の施工費用と間隙圧設定値から求めた結果を述べている。解析はグラベルパイルを打設した砂地盤内に生じる最大の間隙圧を求めることで、影響円の直径を決めた。この影響円に基づいて単位面積当たりのグラベルパイルの施工本数を求めて施工費を計算した。

2. 解析方法 解析に用いた砂地盤および解析の方法は先の論文^{1),2)}で述べたと同ようであるので、ここでは簡単に述べる。

飽和砂地盤および砂の物理常数は図-1に示すとおりである。地下水位は地盤表面に一致させた。地盤厚は20mである。解析幅すなわちグラベルパイルの外周から地盤の境界までの距離は1.0mから6.0mまで1.0m毎に変えた。グラベルパイルの長さは20mで一定とし、半径(r_g)は0.075, 0.15, 0.25, 0.40mに変えた。

解析では、地盤は深さおよび半径方向に1/6mの間隔に分割された。

間隙水の流れがダルシー法則にしたがい、また、地盤の厚さは幅よりもかなり大きいので鉛直方向の間隙水の流れが無視できると仮定すると、間隙圧は式(1)より求まる。境界条件は式(2)に示す。

$$C_v \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$(u)_{r=r_g} = 0, \quad (\partial u / \partial r)_{r=r_o} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $C_v (=k_H / (m_v \cdot \gamma_w))$: 圧密係数、 k_H : 水平方向の透水係数、 m_v : 土の体積圧縮係数、 γ_w : 水の単位体積重量、 t : 時間、 r_g : グラベルパイルの半径、 r_o : グラベルパイルの中心から円形地盤の端までの距離。

地盤内のせん断応力は地盤を集中質量系モデルに置きかえて得られた、運動方程式(3)より求めた。応答計算はNewmark- β 法で行った。

$$M \cdot \ddot{U}(t) + C \cdot \dot{U}(t) + K \cdot U(t) = -M \cdot \ddot{U}_g(t) \quad (3)$$

ここで、 M : 質量マトリックス、 C : 減衰マトリックス、 K : 剛性マトリックス、 U : 地盤の変位ベクトル、 \ddot{U}_g : 地動加速度ベクトル。減衰マトリックス C は $C = h \cdot \omega_1 \cdot [M] + h / \omega_1 \cdot [K]$ で与えた。ここで、 h は地盤の減衰定数で、0.1とした。 ω_1 は地盤の第1次固有円振動数で、本解析の地盤では $\omega_1 = 14.917 \text{ rad/s}$ である。

本解析に用いた地震波は表-1に示す、5種の地震波および減衰ホワイトノイズである。各地震波の最大加速度は100galとした。

地盤内の各格子点での間隙圧は次のようにして求めた。まず、地盤内の各深さでのせん断応力が最初にゼロクロスする($n=1, n$:ゼロクロスの回数)までの時間(半周期に相当する)およびその間のせん断応力の最大値を求める。次に、式(4)から求めた間隙圧蓄積量 u_a を格子点の初期値とし

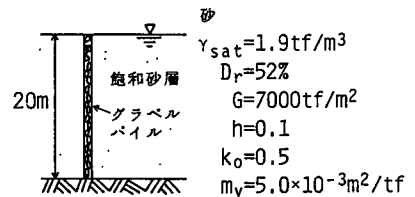


図-1 解析に用いた砂地盤

表-1 計算に用いた地震波

地震波	年・月・日	成分	最大加速度(gal)
エルセントロ	1940. 5. 18	N-S	326. 0
タフト	1952. 7. 21	N21E	152. 7
八戸	1968. 5. 16	N-S	232. 7
新潟	1964. 6. 16	E-W	156. 9
関北橋	1978. 6. 12	Tr	286. 8

て与え、式(1)から $n=1$ での間隙圧を求める。

同様に、せん断応力が次にゼロクロスする($n=2$)までの時間とせん断応力の最大値を求める。このせん断応力と $n=1$ での間隙圧減少率($\Delta u/\bar{u}$)を式(5)に代入して u_n を求める。この u_n を $n=1$ での間隙圧に加えた値を改めて初期値とし、式(1)から $n=2$ での間隙圧を計算する。

$n=3$ 以後の間隙圧も同様の計算を繰返すことによって求めた。

$$\begin{aligned}
 u/\sigma_3 &= 1.005 \cdot (\sigma_d/2\sigma_3) - 0.0931 && (n=1) && (4) \\
 u/\sigma_3 &= \left[\{-0.0805 \cdot (\Delta u/\bar{u}) + 0.0378 + 0.7273 \cdot e^{-1000 \cdot (\Delta u/\bar{u})}\} \right. \\
 &\quad \cdot (\sigma_d/2\sigma_3) + \{0.0092 \cdot (\Delta u/\bar{u}) - 0.0030 - 0.0823 \\
 &\quad \cdot e^{-1000 \cdot (\Delta u/\bar{u})}\} \cdot n + 0.2400 \\
 &\quad \left. \cdot (\sigma_d/2\sigma_3) - 0.0079 \right] && (n \geq 2) && (5)
 \end{aligned}$$

ここで、 σ_d : 軸差応力、 σ_3 : 側圧、 u : 間隙圧、 Δu : 間隙圧の減少量、 \bar{u} : 間隙圧を減少させる前の値。

本文では、せん断応力の半周期毎に間隙圧が計算されたので、式(4)、(5)で与えた、部分排水条件下での間隙圧蓄積量は先の論文²⁾で示した値の $1/2$ となっている。

式(4)、(5)を用いて実地盤内の間隙圧を計算する場合には、式(6)の関係を用いればよい。

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_3 &= \frac{1+2k_0}{3} \cdot \sigma_v \\
 (\sigma_d/2\sigma_3) &= \frac{3}{1+2k_0} (\tau/\sigma_v)
 \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで、 σ_v : 有効鉛直圧、 τ : せん断応力、 k_0 : 静止土圧係数。

3. グラベルパイルを打設した地盤内の間隙圧 図-2は5種の地震波および減衰ホワイトノイズに対する、地盤内の間隙圧比 u/σ_v (u : 間隙圧、 σ_v : 有効鉛直圧)と地震動の継続時間 t との関係を示す。深さ(z) = 6mでの結果である。地盤の解析幅は1.0mで、グラベルパイルの半径は0.25mである。したがって、グラベルパイルの中心から地盤の外側までの距離(r_0) = 1.25mである。

図-2から入力地震波の違いによって間隙圧の上昇に明瞭な差異があることがわかる。すなわち、タフト波および八戸波の場合には地盤は液状化を生じている。一方、エルセントロ波、開北橋波、新潟波および減衰ホワイトノイズの場合には地盤内の間隙圧はある値まで増加した後、減少している。ここで、液状化は地盤内に発生する間隙圧が有効鉛直圧に等しくなった時と定義した。

図-3は減衰ホワイトノイズの加速度波形および $z=6$ mでのせん断応力波形を示す。

4. グラベルパイルの径・間隔 前述の既往の地震

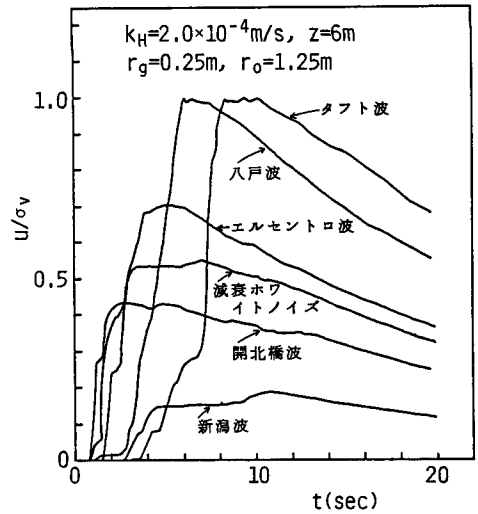


図-2 間隙圧上昇曲線

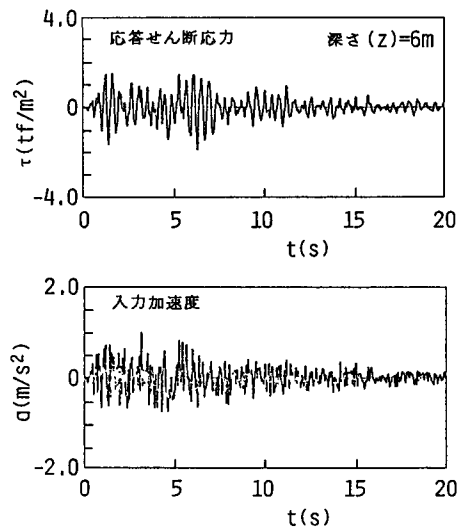


図-3 入力加速度およびせん断応力時刻歴 (入力波: 減衰ホワイトノイズ)

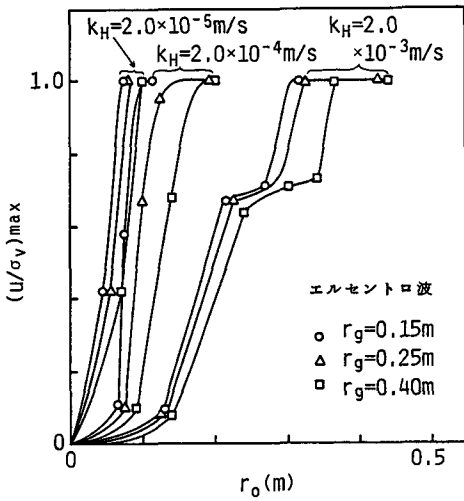


図-4 $(u/\sigma_v)_{max} \sim r_0$ 関係 (エルセントロ波)

波および減衰ホワイトノイズを入力波として用いて、地盤内に生じる最大の間隙圧比 $(u/\sigma_v)_{max}$ を調べることでグラベルパイルの設計について考察した。

図-4は入力地震波がエルセントロ波の場合の $(u/\sigma_v)_{max}$ と r_0 の関係を示す。各々の $(u/\sigma_v)_{max} \sim r_0$ 曲線は各々のグラベルパイルの半径 (r_g) および地盤の水平方向の透水係数 (k_H) に対して示されている。図-4からわかるように $(u/\sigma_v)_{max}$ が同じ場合、 r_g および k_H が大きいほど、 r_0 は大きい。すなわち、 r_g 、 k_H が大きい場合にはパイルへ流れ込む間隙水の量が多いため、パイルによる間隙圧の減少の効果が大となる。

$(u/\sigma_v)_{max}$ はグラベルパイルの設計における間隙圧の設定値と考えられる。この間隙圧の設定値をいくらにとればよいかということはまだ明確にされていない。たとえば石原ら³⁾によれば地震動継続30秒以内での間隙圧比の最大値0.4である。

ところで、動的三軸試験機等を用いた液状化実験によって飽和砂の軸ひずみが増し始める時の間隙圧比は、0.6~0.7であることがわかっている。そこで、本文では設定間隙圧比 $(u/\sigma_v)_{max}$ は0.6とした。さらに、 $(u/\sigma_v)_{max} = 0.8, 0.9, 1.0$ とした場合についても検討を行った。

図-4における $(u/\sigma_v)_{max} = 0.6, 0.8, 0.9$ および 1.0 としたときの r_0 と r_g の関係を求めた (図-5)。

以上の方法で求めた r_0 を用いて縦、横が各々10m×10mの地盤内に長さ20mのグラベルパイルを正方形配置した場合 (図-6) の施工費を計算する。図-7は $(u/\sigma_v)_{max} = 0.6$ とした場合の施工費と r_g の関係を示す。 $k_H = 2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ である。図からわかのように、地震波の種類によって施工費がかなり異なり、また施工費が最小となる r_g が存在することがわかる。同ような結果は $(u/\sigma_v)_{max} = 0.8, 0.9, 1.0$ の場合にも得られた。なお、 $(u/\sigma_v)_{max}$ が大きいほど、パイルの本数が少なくなるので施工費は小さくなる。

図-7での施工費が最小となる時の r_g はグラベルパイルの施工での最適なパイルの半径と考えられる。図-8はこの r_g と $(u/\sigma_v)_{max}$ の関係を示す。この図から、新潟波の結果を除けば、パイルの施工で

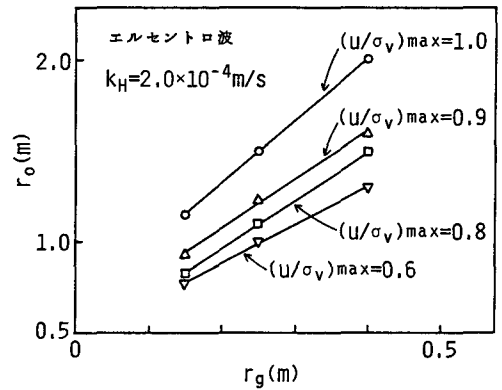


図-5 $r_0 \sim r_g$ 関係 (エルセントロ波)

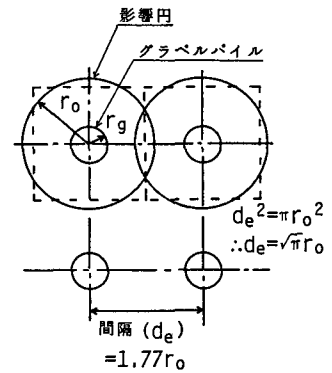


図-6 グラベルパイルの半径 (r_g) および間隔 (d_e)

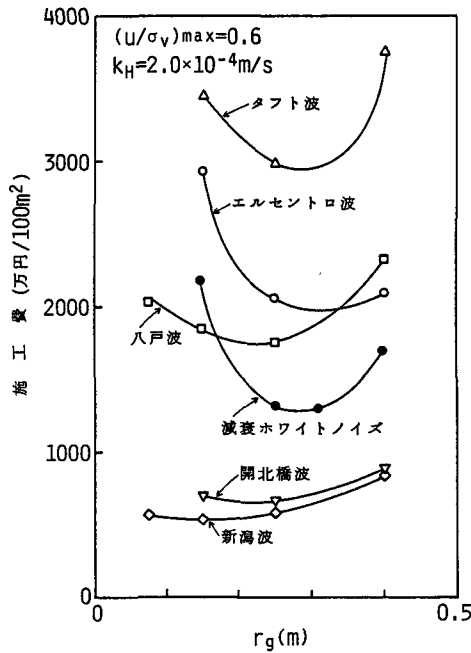


図-7 施工費と r_g の関係
($(u/\sigma_v)_{max} = 0.6$)

の最適な r_g は $(u/\sigma_v)_{max}$ の値に関係なく 0.2 ~ 0.3m であるとの結論が得られる。

既往の地震波は、その伝播経路に当たる地盤の影響を受けていると考えられる。したがって、減衰ホワイトノイズの結果を用いて設計用のパイルの径および間隔を求めることによる。すなわち、減衰ホワイトノイズに対する $r_g \sim r_0$ 関係から所定の設定間隙圧比 $(u/\sigma_v)_{max}$ に対して最適なパイルの半径 r_g と間隔 d_0 ($= 1.77 r_0$) の関係を求めた。その結果は図-9である。

5. 結論 飽和砂地盤の液状化対策としてグラベルパイルを設計する場合の径と間隔が施工費および間隙圧設定値から検討された。その結果、刚性率 $= 7000 \text{ t f/m}^2$ で、水平方向の透水係数がそれぞれ 2.0×10^{-5} , 2.0×10^{-4} , $2.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ の地盤にグラベルパイルを施工する場合の最適なパイルの半径と間隔が示された (図-9)。

参考文献 1) O-hara, S., Kotsubo, S. and Yamamoto, T.: Pore pressure developed in saturated sand subjected to cyclic shear stress under partial drainage, Soils and Foundations, Vol.25, No.2, pp.45-56, 1985 2) 山本哲朗・大原資生・小坪清真: 液状化対策としてのグラベルパイル工法に関する基礎的研究, 九州大学工学部集報, 58巻, 3号, 1985 3) 石原研而・斉藤彰・有馬宏: 護岸液状化対策としての碎石パイルの適用例, 土質工学会誌, 28巻, 4号, pp.8-15, 1980

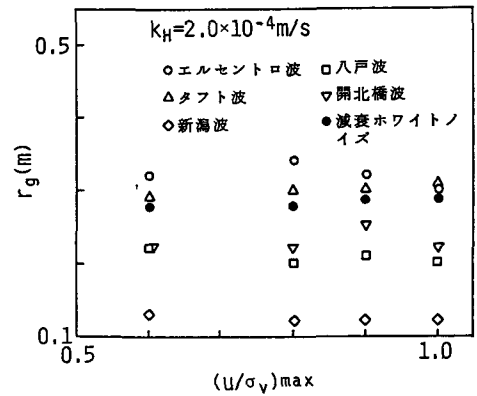


図-8 各地震波の $r_g \sim (u/\sigma_v)_{max}$ 関係

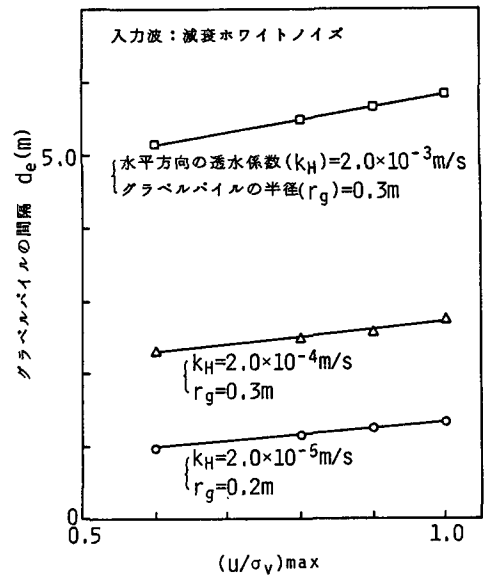


図-9 グラベルパイルの半径および間隔