

(64) ウェル・レジスタンスを考慮したグラベルドレーンの杭径比設計図

清水建設機技術研究所 正会員 尾上篤生

1. はじめに

緩い砂地盤の地震時の液状化を防止するグラベルドレーンの杭径比の設計には、従来Seed・Bookerの提案図¹⁾が使われてきたが、その図にはウェル・レジスタンス（以下W. R. と記す）が考慮されていない。しかし、グラベルドレーン材として現実には有限の透水性をもった礫材料を使うので、W. R. を無視することができない。宮前ら²⁾、尾上ら³⁾は、グラベルドレーンの現位置実験を行なって、W. R. の影響を無視し得ないことを定量的に明らかにした。

最近では、W. R. を考慮した杭径比算定図や算定式、あるいは数値解析法がいくつか提案されている。大北⁴⁾らは、ウェル・レジスタンス係数を1.0、水圧比を0.5の場合に限定してはいるが、W. R. を考慮した上でSeed・Bookerの図を読み取るノモグラムを示している。また時松・吉見⁵⁾はせん断応力比が1.3の場合についてW. R. を考慮した水圧比算定図を示した。石原⁶⁾の等価透水係数法は、ドレーンの透水性を考慮した解析法であるが、ドレーンの細長比が変わるたびに浸透流解析を行う必要がある。

田中ら⁷⁾は、非排水条件下の繰返しせん断に伴う水圧上昇曲線に対し、水圧比と繰返し回数比が直線関係をなすとの仮定を設けて、簡易な水圧比予測式を提案した。尾上ら³⁾は、田中らの簡易解をHansboのドレーン圧密の解を導入して拡張し、W. R. を考慮した設計例を示した。しかし、非排水条件下の水圧上昇曲線は、一般にSeedら⁸⁾の式示であるarcsin関数が実験値に合うと言われている。

本稿は、Seed・Bookerと同じ間隙水圧発生モデルに基づき、ウェル・レジスタンスを考慮したグラベルドレーンの効果を数値解析して現位置実験結果が説明出来ることを示し、併せて設計水圧比、W. R. 係数、繰返し回数比の各値が通常の設計に要求される諸範囲をカバーした、グラベルドレーンの杭径比設計図を提案するものである。

2. 解析方法

2.1 基礎方程式と記号の説明

水圧の発生と消散が同時に生ずる場合、過剰間隙水圧 u は式(1)を満たす¹⁾。また式(1)の右辺第2項は、Seed・Booker¹⁾に倣えば式(2)に変形できる。一方ドレーンの透水性が有限である場合の、ドレーンと砂地盤の境界における間隙水の連続条件式は式(3)である。解析は、 $\alpha=0.7$ として¹⁾式(1)~(3)を差分方程式に直し、連立して解いた。⁹⁾ 式中で用いた記号を含め、本稿で用いる記号とその定義は表1のとおりである。

$$\frac{k_s}{m_v r_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \quad \text{..... (1)}$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial N} \left[\frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_\ell} \right)^{1/(2\alpha)} \right] \cdot \frac{N_{eq}}{t_d} \quad \text{..... (2)}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=r_w} + \frac{r_w}{2} \cdot \frac{k_w}{k_s} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)_{r=r_w} = 0 \quad \text{..... (3)}$$

2.2 初期条件と境界条件

初期条件は、 $t=0$ で $u=u_g=0$ である。境界条件は図1に示す通りである。ドレーンに向う水平方向排水と砂層上面に向う鉛直方向排水の両者を考慮する場合は、両方向の透水係数として k_s を用いるが、ドレーンによる水圧消散効果だけを考える場合は、鉛直方向透水係数 k_v を0とした。

2.3 鉛直方向排水を考慮する場合と考慮しない場合の計算水圧比の差異

鉛直方向排水を考慮する場合は、ドレーンの細長比 $\ell (=H/d_w)$ の値によってその影響の程度が変わるが、一般に直径(d_w)が30cm~50cmのグラベルドレーンの施工深度(H)は5~15mで、 ℓ は20前後であることが多い。そこで解析では $\ell=20$ とした。この細長比のもとでは水平方向排水に関する時間係数 T_d が2~400のとき、鉛直方向排水に関する時間係数 T_{dv} は0.00125~0.25である。 T_d の値が大きいは鉛直

方向排水の効果は大きく、繰返し回数比 r_N が1のときは鉛直方向排水を考慮する場合と無視する場合とで解析結果に差がある。しかし、 $r_N \geq 2$ の場合は T_d が400 でも鉛直方向排水に起因する最大水圧比の低減はないので、鉛直方向排水の考・非考慮の如何は砂層内の水圧比に全く差をもたらさない。従って、 r_N が1のときだけ、鉛直方向排水を考慮する場合と考慮しない場合との2通りの杭径比早見図ができる。

3. 解析結果

3.1 最大過剰間隙水圧比の半径方向平均値と空間内平均値

せん断力が繰返し載荷されると砂地盤内の水圧は次第に上昇し、やがてある最大値に達する。このときの過剰間隙水圧を、最大過剰間隙水圧 u_{max} と呼ぶ。これを水圧比に変換した最大過剰間隙水圧比 ru_{max} は、位置の関数であると共に時間の関数でもある。グラベルドレーンの設計にあたって、設計水圧比として ru_{max} を考える方法と、その空間内全体における平均値 $\overline{ru}_{max}$ を考える方法とがある。ここではその両者の大きさの相互関係を調べた上で、空間内平均値 $\overline{ru}_{max}$ に基づく杭径比早見図を作成する。

図2は、様々のウェル・レジスタンス係数 L_w に対する無次元深度 $z/H=0.5$ における最大過剰間隙水圧比 ru_{max} の半径方向分布である。ただし、 r_s が0.3, r_N が1, T_d が10の場合である。図中の点線は、各々の分布曲線の半径方向平均値 $(ru_{ave})_{max}$ である。同図によれば、有効円外縁 ($r=r_e$) における水圧比は $(ru_{ave})_{max}$ よりやや大きいが、 $(ru_{ave})_{max} \geq 0.3$ の範囲ではその差は0.05未満である。

次に図3は、 $(ru_{ave})_{max}$ の深度分布を示しているが、どの分布も深度が浅いほど水圧比は大きい。 $r_s=0.1, 0.2, \dots, 0.6, r_N=1, 2, \dots, 4, T_d=2, 5, \dots, 400, L_w=0.01, \dots, 50$ の全ての組合せについて計算した $(ru_{ave})_{max}$ の深度分布のうち、無次元深度が0.1と0.5における $(ru_{ave})_{max}$ の値の差が0.05~0.1のものを点線で、またその値の差が0.1以上あるものを実線で示した。その値の差が0.05以下のものは、この図には示していない。図3によれば、これら点線と実線の無次元深度 $z/H=0.5$ における $(ru_{ave})_{max}$ の値は0.536以上である。つまり、 $z/H=0.5$ における $(ru_{ave})_{max}$ が0.536より小さければ、その値を全深度に亘る $(ru_{ave})_{max}$ の代表値として用いても、水圧比の過小評価は0.05を超えない。従って図2と図3によって、 $z/H=0.5$ における $(ru_{ave})_{max}$ の値が0.536以下であれば、その値を円筒砂塊の任意の点の ru_{max} の代表値としても、過小評価はほぼ0.1を超えないことが分る。

一方、空間内平均最大過剰間隙水圧比 $\overline{ru}_{max}$ は、 $z/H=0.5$ における $(ru_{ave})_{max}$ よりも常にごく僅かに小さいかまたはほぼ等しいから、設計に当たってはその値を0.6以下にすれば、上述の理由により土中の任意の位置における ru_{max} がほぼ0.7以下に抑えられる。

3.2 現位置実験結果と解析結果の比較

図4, 5は、 r_N が1及び2における空間内平均最大過剰間隙水圧比

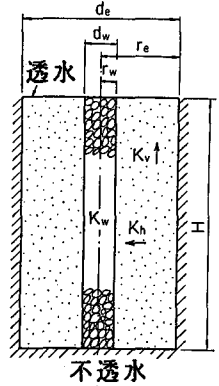


図1 グラベルドレーンの模式図と境界条件

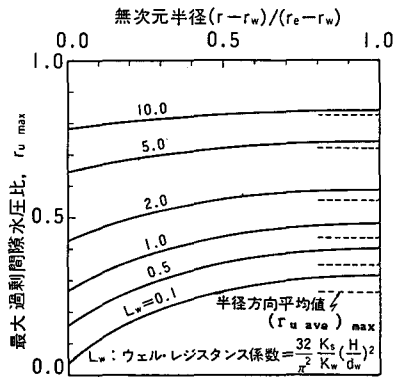


図2 $Z=H/2$ における最大過剰間隙水圧比, ru_{max} の半径方向分布 ($r_s=0.3, r_N=1, T_d=10$)

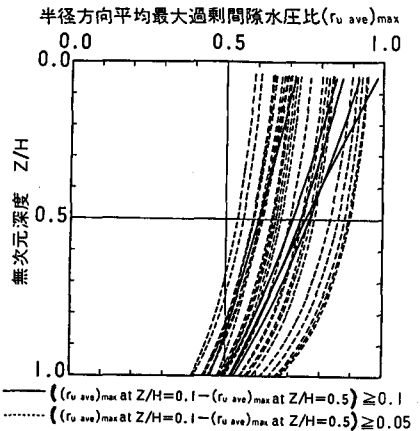


図3 半径方向平均最大過剰間隙水圧比, $(ru_{ave})_{max}$ の深度分布 ($ru(Z/H=0.1) - ru(Z/H=0.5) \geq 0.05$ を満すもの)

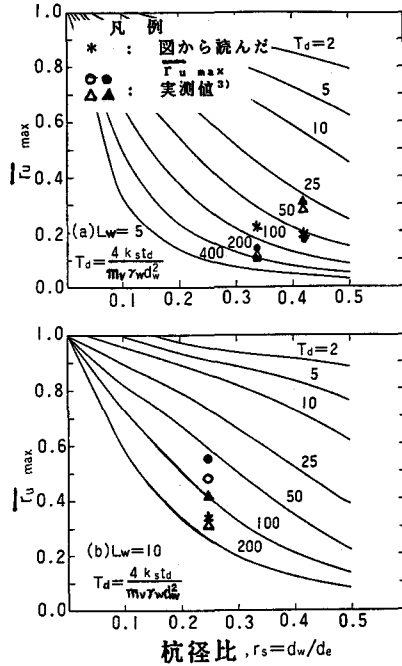


図4 ウェル・レジスタンスを考慮した空間平均最大過剰間隙水圧比と杭径比の関係 ($r_N = 1$ の場合)

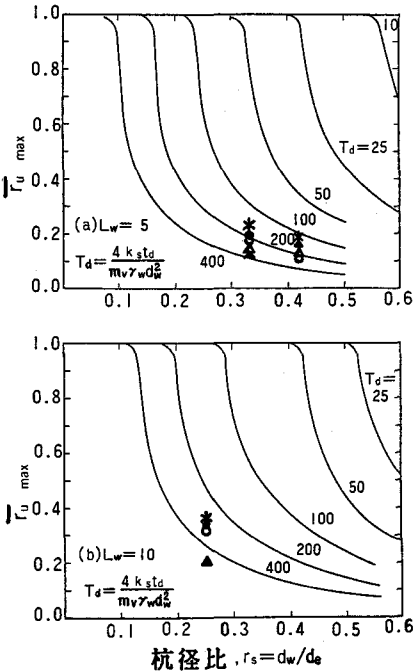


図5 ウェル・レジスタンスを考慮した空間平均最大過剰間隙水圧比と杭径比の関係 ($r_N = 2$ の場合)

表 1 記号と定義

(d_w, d_w) : (有効円, ドレーン) の直径	r_N : 繰返し回数比 ($= N_{eq}/N_d$)
H : ドレーン長	r_s : ドレーンの杭径比 ($= d_w/d_e$)
(k_w, k_v) : 地盤の (水平, 鉛直) 方向透水係数	r_u : 過剰間隙水圧比 ($= u/\sigma'_{vo}$)
(k_w, k_w) : (地盤, ドレーン) の透水係数	$\bar{r}_u$: r_u の空間内平均値 (t の関数)
L_w : ウェル・レジスタンス係数 ($= (32/\pi^2) \cdot (k_s/k_w) \cdot (H/d_w)^2$)	$r_{u \max}$: r_u の最大値 (r, z の関数)
ℓ : ドレーンの細長比 ($= H/d_w$)	$\bar{r}_{u \max}$: $\bar{r}_u$ の最大値
m_v : 地盤の体積圧縮係数	$(r_{u \max})_{\max}$: 半径方向平均 r_u の最大値 (z の関数)
N : 一定せん断応力振幅のもとでの繰返し載荷回数	T_d : 時間係数 ($= k_s t_d / (m_v \gamma_w r_w^2)$)
(N_{eq}, N_d) : (時刻 t_d までの等価, 液状化に至るまでの) 繰返し回数	T_{dv} : 鉛直方向 (一次元) 排水に関する時間係数 ($= k_s t_d / (m_v \gamma_w H^2)$)
(r, z, t) : (半径, 深度, 時間) 座標	t_d : 地震動継続時間
r_w : ドレーンの半径	$(u, \bar{u})$: (過剰, 空間内平均過剰) 間隙水圧
	u_s : 非排水条件下で繰返しせん断によって発生する水圧
	σ'_{vo} : 鉛直方向初期地盤内有効応力

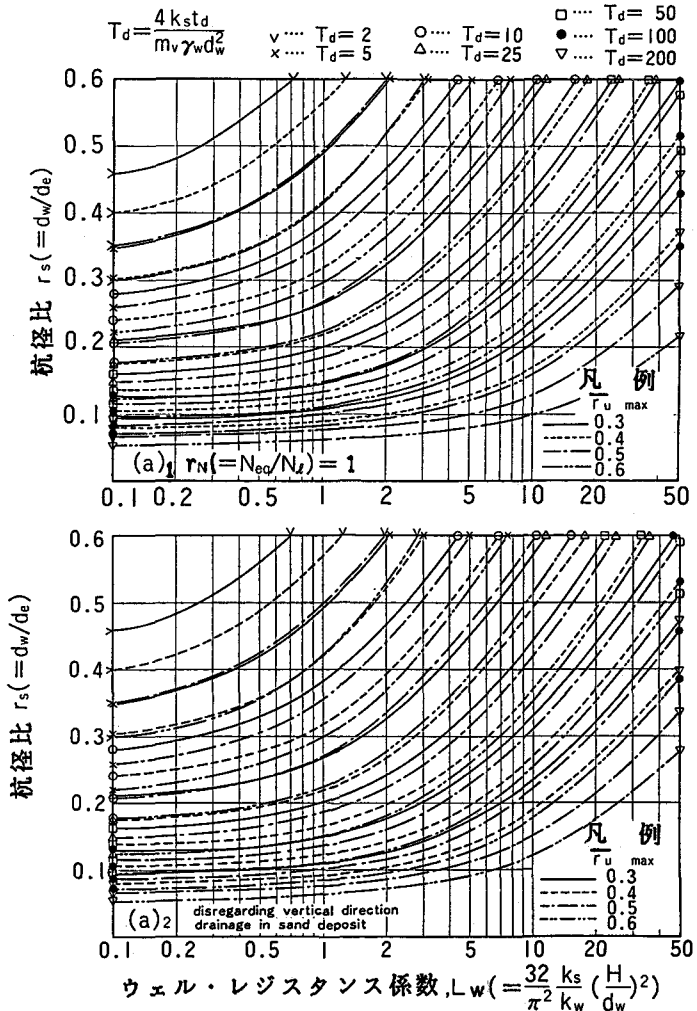


図6.1 ウェル・レジスタンス係数と杭径比の関係 (空間内平均最大過剰間隙水圧比 $\bar{r}_{u \max} = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$, 繰返し回数比 $r_N = 1$)

と杭径比との関係である。いずれも(a), (b)は、それぞれウェル・レジスタンス係数が5, 10の場合である。図中に現位置実験結果³⁾を併記したが、図から読み取った*印の水圧比は実験結果とよく一致している。従って当解析方法によって作られた図表を設計に用いることは妥当と考えられる。

4. ウェル・レジスタンスを考慮した グラベルドレーンの杭径比算定図

図6.1と図6.2は、設計水圧比が0.3, 0.4, 0.5, 0.6のいずれかに設定された場合の杭径比とウェル・レジスタンス係数の関係図である。図6.1は $r_N=1$ の場合の図であり、図6.2は $r_N=2 \sim 4$ の場合の図である。それぞれ時間係数 T_d をパラメータとしている。図6.1の(a)₁はドレーンと砂層上面からの両方向排水を考慮した場合で、(a)₂はドレーンによる排水だけを考慮した場合である。図6.2の(b), (c), (d)については、鉛直方向排水考・非考慮の場合の違いによる差はない。

5. 設計例

例えば設計水圧比が0.5で、 $r_N=2$, $T_d=25$, $L_w=5$ ならば、 $r_s=0.48$ である。 $L_w=0$ すると $r_s=0.23$ であるから、ウェル・レジスタンスを考慮すれば4倍以上の本数を必要とする。また L_w が0.2以下でも、W.R.を無視すると水圧比を0.1程度過少評価することになるから、ウェル・レジスタンスを無視することは出来ないと考えられる。

【参考文献】

- 1) H.B.Seed, & J.R.Booker: J.GED., ASCE, Vol. 13, No. GT7, 1977.
- 2) 宮前, 他: 電力土木, No. 197, 1985.
- 3) 尾上, 他: 土質工学会論文報告集, Vol. 27, No.2, 1987.
- 4) 大北, 他: 第21回土質工学研究発表会, 1986.
- 5) K.Tokimatsu, 他: Proc.Int.Conf.on Eng. for Protection from Natural Disasters, 1980.
- 6) 石原: 「液状化と対策」, 最近の土質・基礎に関する諸問題講演会資料, 1982.
- 7) 田中, 他: 電中研報告, 38058, 1983.
- 8) H.B.Seed, et.al: J.GED., ASCE, Vol.102, No.GT4, 1976.
- 9) 尾上: 第一回地盤工学における数値解析法シンポジウム論文集, 日科技連, 1986.

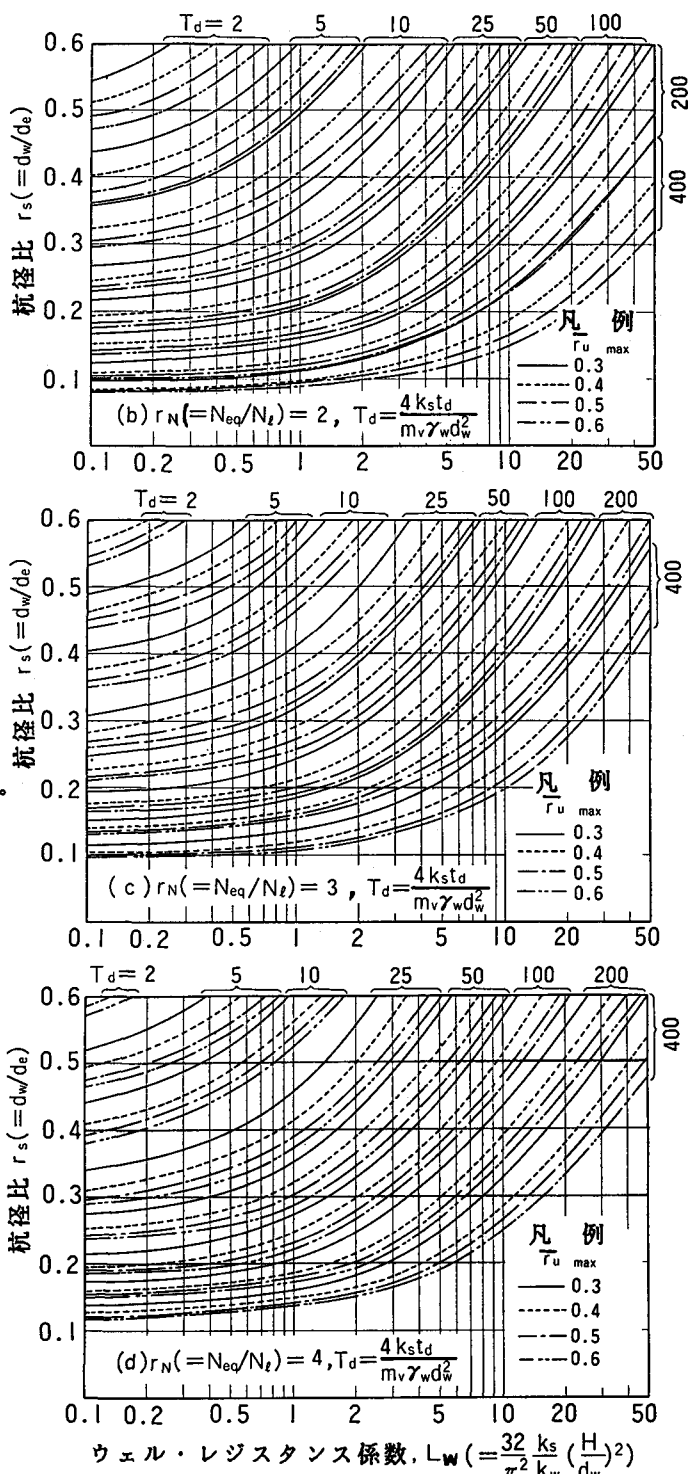


図6.2 ウェル・レジスタンス係数と杭径比の関係
(空間内平均最大過剰間隙水圧比 $r_u \text{ max} = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$, 繰返し回数比 $r_N = 2, 3, 4$)