

杭頭荷重～沈下量曲線形状の特性

——特に開端鋼管杭について——

(Characteristics of the Load-Settlement Curve of Piles)

永井 興史 郎* (Koushiro Nagai)

山 肩 邦 男** (Kunio Yamagata)

キーワード：鉛直荷重／載荷試験／支持力／進行性
破壊／ぜい性破壊／沈下／深い基礎 (IGC : E 4)

1. 序

杭頭荷重 (R_0)～同沈下量 (S_0) 曲線の性状とその物理的意義に関する研究の流れは、ほぼ次のようにまとめることができよう。

Van der Veen (1953) は、曲線の形状を1本の指数曲線 $R_0 = R_{0U}(1 - e^{-\alpha S_0})$ (R_{0U} : 極限荷重) と近似することによって、 R_{0U} の推定法を提案した(図-1(c), (d) 参照)。またクリープ性状についても考察している¹⁾。

村山・柴田 (1958) は、レオロジー的考察に基づいて、摩擦杭の荷重～沈下量関係を考察し、その降伏荷重が摩擦抵抗のクリープ限界に相当することを示した。その結果、降伏荷重 (R_{0Y}) が $\log R_0 \sim \log S_0$ 図の折れ点等から求められることが明らかとなった²⁾。これは $R_0 \sim S_0$ 曲線が数本の指数曲線によって近似されることを意味している。

山肩 (1962) は、文献2) の解析法を支持杭の場合に拡張して考察を進め、杭体の材料力学的考察をも加えたうえで、支持杭の降伏荷重は多くの場合、杭体の降伏か杭先端の降伏現象によって生じていることを示した³⁾。

なお、最近では文献1) と同じ曲線を用いた宇都ら (1978) の研究がみられる⁴⁾。

以上のような研究の流れの結果として、わが国においては現在のところ、降伏荷重の判定に際しては次の3つの図を描くことが慣例となっている。

i) $\log R_0 \sim \log S_0$ 図 ii) $S_0 \sim \log t$ 図 iii) $\Delta S_0 / \Delta \log t \sim R_0$ 図 これらの図のうち、ii) と iii) は i) の折れ点の荷重から降伏荷重を判定するために補助的に使われているのが実情である⁵⁾。

$\log R_0 \sim \log S_0$ 図は、 $R_0 \sim S_0$ 関係を両対数紙上にプ

ロットして、より単純な数本の直線の関係に変換し、その特性を見やすくしたものとみることができる。したがって、 $R_0 \sim S_0$ 曲線の特性は、これら各直線の勾配 α と切片 β に集約されていると考えられる。しかし、現在この勾配 α と切片 β については模型杭の場合の値が示されている⁶⁾のみで、実杭については詳細に考察した文献は見当たらない。

筆者らは、このたび打込み鋼管杭(開端)の載荷試験結果報告書を幅広く収集し、数年がかりで統計的検討を行ってきた。本論文は、この集計結果に基づいて実杭の α と β を調査し、あわせて $R_0 \sim S_0$ 曲線の特性について推論したものである。なお、これらの資料は鋼管杭協会のご協力を得て収集したものであること、本論の一部は既に文献7) において発表済みであることをお断りしておく。

2. $R_0 \sim S_0$ 曲線とその関連する諸量

今回の統計的検討では、載荷試験から得られた R_0, S_0 (最終測定値) の値からすべての資料について $\log R_0 \sim$

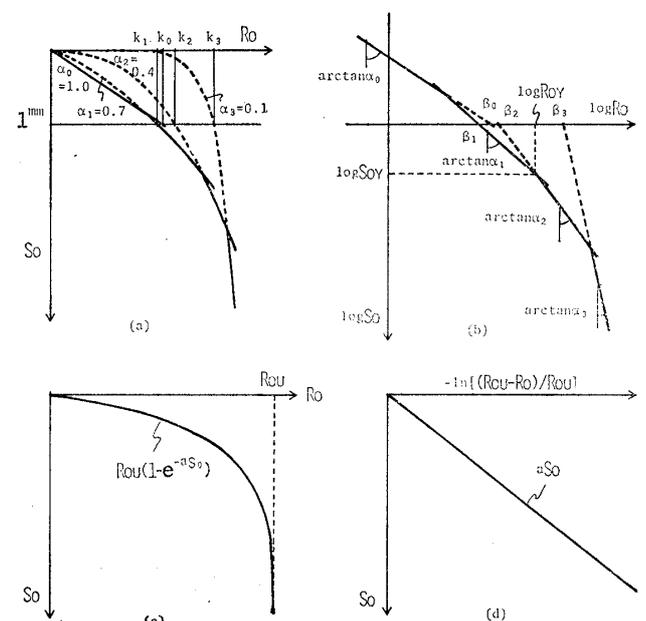


図-1 $R_0 \sim S_0$ 曲線の指数関数による近似

* 京都工芸繊維大学工学部 講師 (京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

** 関西大学工学部 教授 (吹田市山手町 3-3-35)

(1982.1.21 原稿受付・討議期限 1983.10.1)

$\log S_0$ 関係を求め、それを付録に述べる方法によって折れ線で最小二乗近似した。同一荷重階で2回以上変位の計測された資料については $S_0 \sim \log t$ 図をも描き、文献3,5) に示された方法によって R_{0Y} を求めた。

このようにして求められた R_{0Y} を基準として、図-1 (b) のように荷重域 i とその荷重域における $\log R_0 \sim \log S_0$ 直線の勾配 α_i および $\log R_0$ 軸上の切片 β_i を定義した。

まず、 R_{0Y} より小さい荷重を荷重域1とし、この荷重域での勾配および切片の値を α_1, β_1 とする。ただし、 R_{0Y} より小さい荷重でも折れ点を生じている場合は、その点より小さい荷重を荷重域0とし、勾配および切片の値を α_0, β_0 とする。同じく R_{0Y} 以上の荷重を荷重域2とし、勾配および切片の値を α_2, β_2 とする。 R_{0Y} 以上においても折れ点の生じている場合は、その点より大きい荷重を荷重域3とし、勾配および切片の値を α_3, β_3 とした。

図-2 に S_0, S_P が共に計測された場合の $R_0 \sim S_0, R_0 \sim S_P$ 曲線の一部が模式的に示されている。同図に示された諸量は次のような意味を有する。

S_{0E} : 杭頭変位の弾性戻り量, S_{0R} : 杭頭の残留沈下量, S_{PE} : 杭先端変位の弾性戻り量, S_{PR} : 杭先端の残留沈下量, δ : 杭体の圧縮変形量, δ_F : 杭体変形弾性戻りの周面摩擦による拘束量

$R_0 \sim S_0$ 曲線の1サイクルごとに S_{0E} と S_{0R} を算出することができる。また S_P も計測されておれば同様にして $S_{PE}, S_{PR}, \delta, \delta_F$ も算出することができる。そこで R_0 とこれら諸量の関係を示す図を描き、 $\log R_0 \sim \log S_{0E}, \log R_0 \sim \log S_{0R}, \log R_0 \sim \log \delta, \log R_0 \sim \log \delta_F$ についても $\log R_0 \sim \log S_0$ と同様の方法によって折れ線で近似した。図-3 にその代表例を示しておいた。

表-1 には、このようにして得られた α_i および各荷重域での $\log R_0 \sim \log S_{0E}, \log R_0 \sim \log S_{0R}$ の勾配の平均値を示しておいた。

$\log R_0 \sim \log S_{0E}$ 直線の勾配は荷重の増大に関係なくほぼ一定のものが多かった。そのため表-1 における各荷重域での勾配の平均値にも大きな変化はみられない。他方、 $\log R_0 \sim \log S_{0R}$ 直線の勾配は R_{0Y} 以後急に小さくなり R_{0Y} 後(荷重域2)の $\log R_0 \sim \log S_0$ 直線と平行なものが多かった。平均値においてもその傾向が現れている。なお、 R_{0Y} の近傍で $\log R_0 \sim \log S_{0E}$ は28件中5件(18%)が、 $\log R_0 \sim \log S_{0R}$ は21件(75%)が折れ点を生じていた。

R_{0Y} 時の S_0 および S_{0R} の値をそれぞれ S_{0Y}, S_{0RY} , 5. で述べる方法によって推定した R_{0U} 時の S_0 の値を S_{0U} とし、 $S_{0Y}/d, S_{0U}/d, S_{0RY}/d$ (d : 杭径) を求めた結果が図-4 に示されている。 S_{0U} は $R_0 \sim S_0$ 曲線がほ

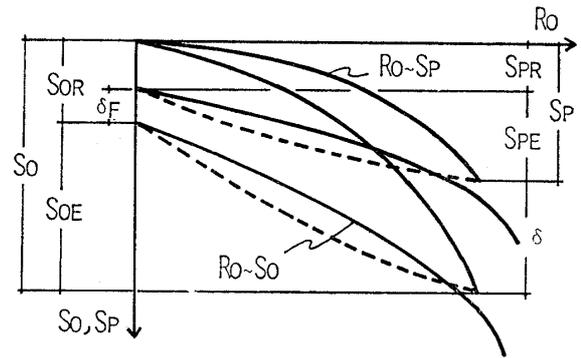


図-2 $R_0 \sim S_0, S_P$ 曲線の模式図

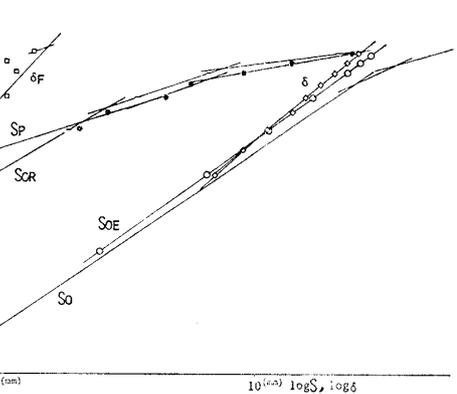
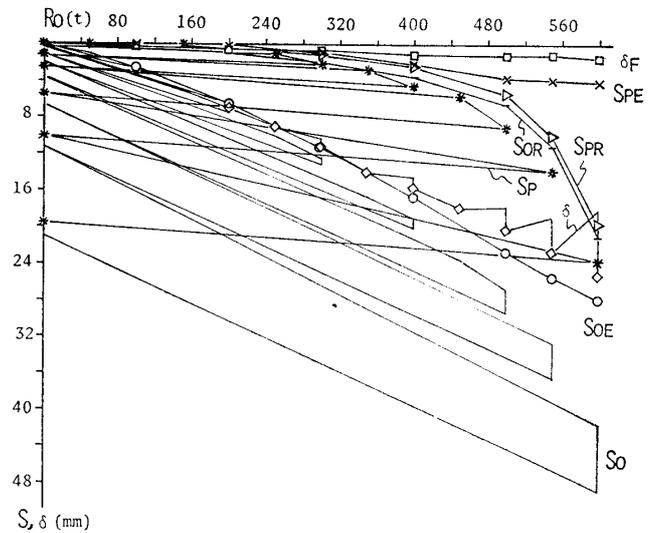


図-3 $R_0 \sim S_0$ 曲線の解析例

ぼ S_0 軸に平行となるときの値であるから、その推定値の分散は大きい、20% 以下のものが多い。 S_{0Y}/d は1~2% をピーク値とするポアソン分布に近い。また S_{0RY}/d は指数分布に近い。

3. $\log R_0 \sim \log S_0$ 直線の勾配 α , 切片 β について

図-1 (b) の荷重域 i における $\log R_0 \sim \log S_0$ 直線は $\log R_{0i} = \alpha_i \log S_{0i} + \beta_i$ (1) と表される。よって $R_{0i} \sim S_{0i}$ 曲線とその勾配は

表-1 各荷重域における α 等の平均値

	荷重域 0			荷重域 1			荷重域 2		
	平均値	標準偏差	件数	平均値	標準偏差	件数	平均値	標準偏差	件数
$\Delta \log R_0 / \Delta \log S_0$	0.80	0.12	20	0.64	0.14	27	0.27	0.11	26
$\Delta \log R_0 / \Delta \log S_{0E}$	0.77	0.05	9	0.72	0.08	24	0.69	0.13	14
$\Delta \log R_0 / \Delta \log S_{0R}$	0.68	0.26	11	0.54	0.25	24	0.18	0.07	23

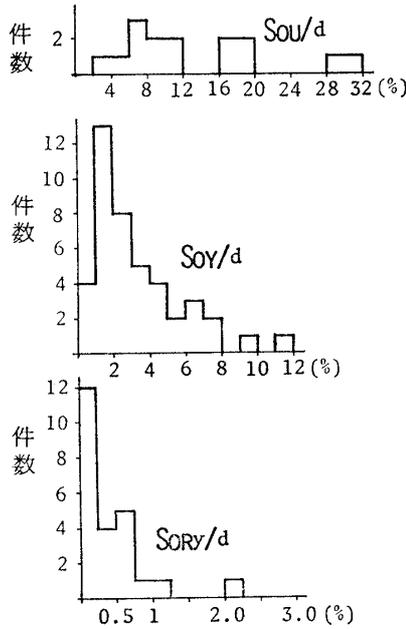


図-4 $S_{0U}/d, S_{0Y}/d, S_{0RY}/d$ の分布

$$R_{0i} = 10^{\beta_i} S_{0i}^{\alpha_i} = k_i S_{0i}^{\alpha_i} \quad (k_i = 10^{\beta_i}) \quad (i=0, 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$dR_{0i} / dS_{0i} = \alpha_i k_i / S_{0i}^{(1-\alpha_i)} \quad (3)$$

と表される。

$R_0 \sim S_0$ 曲線全体は、これらの曲線を図-1 (a) のように結合したものと考えることができる。同図 (b) の $\log R_0$ 軸上においては $\log S_0 = 0$, つまり (本解析においては) $S_0 = 1 \text{ mm}$ である。よって β_i は $S_0 = 1 \text{ mm}$ のときの R_{0i} の指数部であり、(2) 式からも分かるように、図-1 (a) の $R_{0i} \sim S_{0i}$ 曲線が $S_0 = 1 \text{ mm}$ において示す値 $R_{0i} = k_i = 10^{\beta_i}$ と対応する。

杭径 d および杭の閉鎖断面積 $A = \pi d^2 / 4$ 等は定数であるから、例えば

$$\begin{aligned} \Delta \log \frac{S_0}{d} &= \log \frac{S_0 + \Delta S_0}{d} - \log \frac{S_0}{d} \\ &= \log(S_0 + \Delta S_0) - \log S_0 = \Delta \log S_0 \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \log \frac{R}{A} &= \log \frac{R_0 + \Delta R_0}{A} - \log \frac{R_0}{A} \\ &= \log(R_0 + \Delta R_0) - \log R_0 = \Delta \log R_0 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\therefore \alpha = \frac{\Delta \log R_0}{\Delta \log S_0} = \frac{\Delta \log (R_0/A)}{\Delta \log (S_0/d)} \quad (6)$$

等である。すなわち、一般に α の値は杭の断面積や杭径等の諸元によって直接的に影響を受けるものではないことが分かる。この事実は、文献6) の模型実験によって

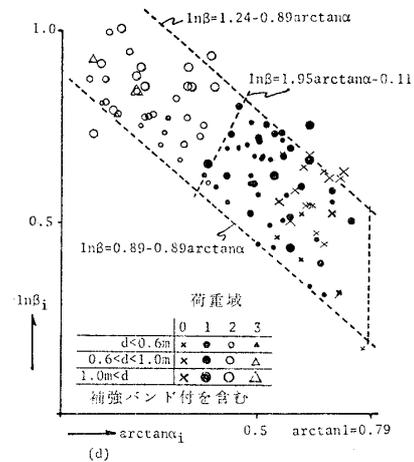
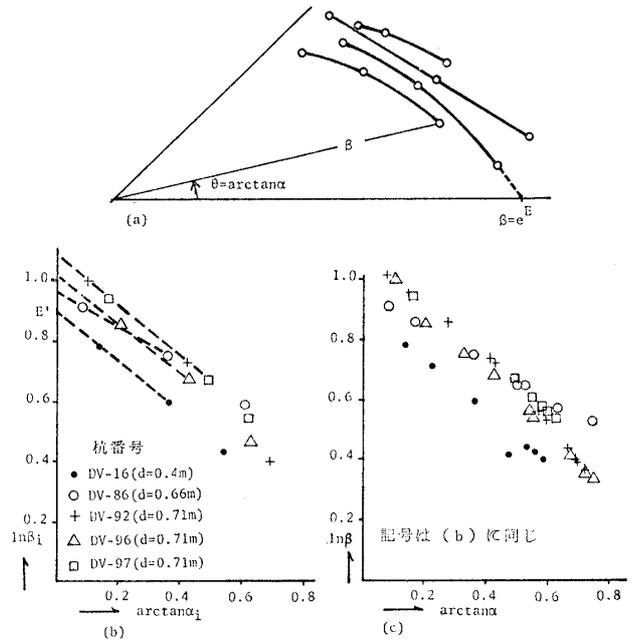


図-5 $\arctan \alpha_i \sim \ln \beta_i$ 関係

も確認されている。また、

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\Delta \log R_0}{\Delta \log S_0} = \frac{\log(R_0 + \Delta R_0) - \log R_0}{\log(S_0 + \Delta S_0) - \log S_0} \\ &= \frac{\log \{(R_0 + \Delta R_0) / R_0\}}{\log \{(S_0 + \Delta S_0) / S_0\}} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{R_0 + \Delta R_0}{R_0} = \left(\frac{S_0 + \Delta S_0}{S_0} \right)^\alpha \quad (8)$$

である。したがって、 α_i は荷重域 i における荷重の増大率 $(R_{0i} + \Delta R_{0i}) / R_{0i}$ と変位の増大率 $(S_{0i} + \Delta S_{0i}) / S_{0i}$ の関係を表す無次元量であることが分かる。

$R_0 \sim S_0$ 曲線は主として、杭周の摩擦抵抗と杭先端の抵抗の挙動によって規定される。したがって、これらの

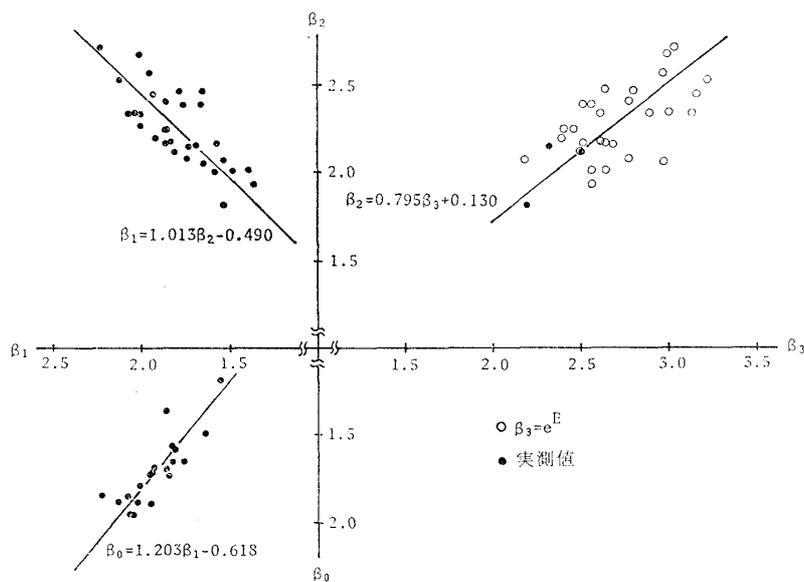


図-6 $\beta_i \sim \beta_{i+1}$ 関係

抵抗値と地盤の変形との関係が線型であれば、 $\alpha=1$ である。また、その関係がいずれも極限状態であれば、 $\alpha=0$ と推定される。実際には α は1~0の間の値をとり、表-1によると平均値は $\alpha_0=0.80$, $\alpha_1=0.64$, $\alpha_2=0.27$ であった。

α_i および β_i は、 i が增大するにつれて α_i は減少し、 β_i は増大する関係にある。そこで β_i を半径、 $\theta_i = \arctan \alpha_i$ を傾角として、極座標で示すと図-5 (a) のように対数ら旋

$$\beta = e^{E-C\theta} \quad (E, C \text{ は正の定数}) \quad (9)$$

の関係にあることが想定され、上式の自然数 e を底とする対数をとれば、 $\ln \beta$ と θ の線型関係

$$\ln \beta = E - C\theta \quad (10)$$

が推測される。

実際に各試験杭ごとに $(\theta_i, \ln \beta_i)$ をプロットすると、ほぼ直線状に並ぶことが見いだされた。その一部(5件)を図-5 (b) に示しておいた。式 (10) の定数 C および E はそれぞれこの直線の勾配および $\ln \beta$ 軸の切片の値である。ただし、図-1 (b) から分かるように $\log S_{0i} \leq 0$ であれば、 $\log R_{0i} \sim \log S_{0i}$ 直線の β_i の値は他との大小関係が逆転する。よって、そのような $(\theta_i, \ln \beta_i)$ は図-5 (b) には示されていない。同図 (c) には (b) 図と同一の杭について $\log R_0 \sim \log S_0$ 図上の隣り合う2測定値を通る直線の勾配と切片を算出した結果が示されている。(b) 図と同様、ほぼ (10) 式の関係が成り立つことが分かる。(d) 図には今回得られたすべての $(\theta_i, \ln \beta_i)$ が示されている。 $(\theta_i, \ln \beta_i)$ はある帯域内に分布し、杭径 d の大なるものほど、上縁に近く分布する傾向がみられる。

図-6 には $\beta_i \sim \beta_{i+1}$ ($i=0, 1, 2$) の関係を示しておい

た。ただし、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ がすべての資料において見いだされたわけではない。特に β_3 の見いだされたものは少ないので (9) 式において $\theta=0$ とおいた値 $\beta_3 = e^E$ によって代えたものが多い。この図から $\beta_i \sim \beta_{i+1}$ 関係には強い相関があることが分かる。

図-7 には E および α_i が同一で C の値が異なる2つの $R_0 \sim S_0$ 曲線を示しておいた。同図より C が小さい場合には S_{0Y} および S_{0U} が小さく、いわゆるぜい性破壊に至る性状を示すが、 C が大きいと逆に進行性破壊の性状を示すことが分かる。5. で述べるように E の値は R_{0U} と対応するものである。したがって E および C はそれぞれ $R_0 \sim S_0$ 曲線の漸近線および「曲率」に対応し、その形状を決定する代表的な定数といえる。図-8 には E および C と d の関係が示されている。同図によると E の値は d とともに増大するが、その増大傾向は d が大きいとき小さい。逆に C の平均値は $d < 0.8m$ では d の増大とともに減少するが $d > 0.8m$ ではほぼ一定値とみることができる。

4. $R_0 \sim S_0$ 曲線の推定

α_i, β_i および E, C は各試験杭の $R_0 \sim S_0$ 曲線の特徴を表すパラメータと考えることができる。しかし、 E および C の信頼できる値の得られた資料は少ない。そこで前節までの考察を補強するために、得られた諸統計値から逆に $R_0 \sim S_0$ 曲線の諸特性を推定してみることにした。

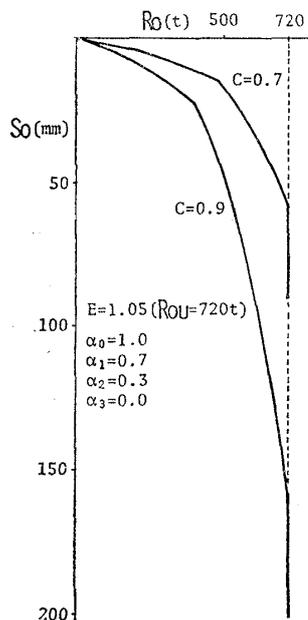


図-7 定数 C だけが異なる2つの $R_0 \sim S_0$ 曲線

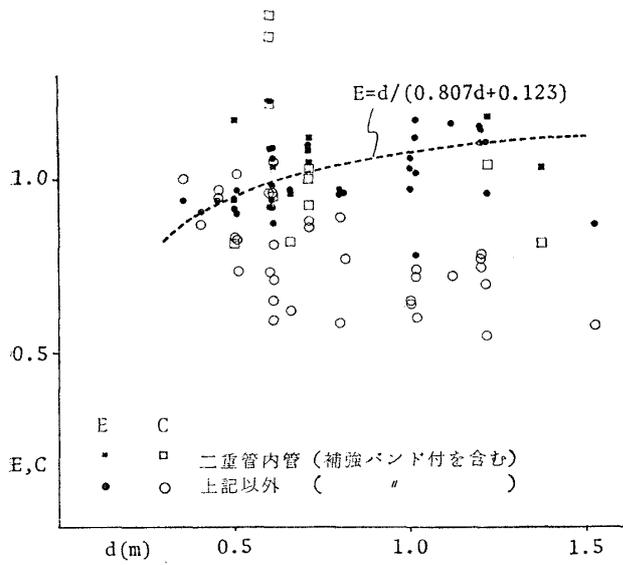


図-8 E, C~d 関係

図-5 (d) に $(\arctan \alpha_i, \ln \beta_i)$ の分布域を示したが、破線で示したように大まかに区分することができよう。したがって、次式のように単純化して考える。

$$\left. \begin{aligned} 1 > \alpha_i > 0 \\ 1.24 - 0.89 \arctan \alpha_i > \\ \ln \beta_i > 0.89 - 0.89 \arctan \alpha_i \end{aligned} \right\} (i=0, 1, 2, 3) \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \ln \beta_1 < 1.95 \arctan \alpha_1 - 0.11 \\ \ln \beta_2 > 1.95 \arctan \alpha_2 - 0.11 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ただし、 $R_{0U} > R_{0Y}$ かつ $S_{0U} > S_{0Y}$ だから

$$\frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} > \frac{\beta_{i+1} - \beta_{i+2}}{\alpha_{i+1} - \alpha_{i+2}} \quad (i=0, 1) \quad (13)$$

でなければならない注1)。

次に図-6 の実線の関係に基づいて、 $\beta_i \sim \beta_{i+1}$ 関係を

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= 1.203 \beta_1 - 0.618 \\ \beta_1 &= 1.013 \beta_2 - 0.490 \\ \beta_2 &= 0.795 \beta_3 + 0.130 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

と推定する。 α_3, β_3 については確かな統計値が得られていないので、近似的に

$$\alpha_3 = 0, \quad \beta_3 = e^E \quad (15)$$

注1) 荷重域 i と $i+1$ の $\log R \sim \log S$ 直線の交点は $\log R, \log S$ を未知数とする連立方程式

$$\begin{aligned} \log R &= \alpha_i \log S + \beta_i \\ \log R &= \alpha_{i+1} \log S + \beta_{i+1} \end{aligned}$$

より、

$$(\log S, \log R) = \left(-\frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}}, \beta_i - \alpha_i \frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} \right)$$

と求められる。荷重域 $i+1$ と $i+2$ の $\log R \sim \log S$ 直線の交点の沈下量と荷重は上記の (S, R) より大きいから

$$-\frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} < -\frac{\beta_{i+1} - \beta_{i+2}}{\alpha_{i+1} - \alpha_{i+2}}$$

$$\beta_i - \alpha_i \frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} < \beta_{i+1} - \alpha_{i+1} \frac{\beta_{i+1} - \beta_{i+2}}{\alpha_{i+1} - \alpha_{i+2}}$$

となる。したがって、

$$\frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} > \frac{\beta_{i+1} - \beta_{i+2}}{\alpha_{i+1} - \alpha_{i+2}} \quad \text{あるいは} \quad \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_{i+2}}{\alpha_i - \alpha_{i+1}} > \frac{\beta_{i+1} - \beta_{i+2}}{\beta_i - \beta_{i+1}}$$

でなければならない。

とする。また 3. において述べたように、 $S_0 \leq 1 \text{ mm}$ に対応する荷重階の β の値は、 β_0 として採用されていない。したがって、上式の β_0 の値は載荷初期の β の推定値としては適切ではない。そこで載荷初期における $(\arctan \alpha, \ln \beta)$ も $(\arctan \alpha_i, \ln \beta_i)$ ($i=0, 1, 2$) と同一直線上にあるものとして、

$$\ln \beta_1 = E - C \arctan \alpha_1 \quad (16)$$

と推定することとした。ただし、 $\alpha_0 \leq \alpha_1 \leq 1$ とし、 $(\arctan \alpha_1, \ln \beta_1)$ も図-5 (d) の破線内に分布するものとする。

上記の諸関係 (11)~(16) 式を用いれば、 E, C および α_i の平均的な関係を推定することができる。図-9 (a) にはこのようにして推定された (E, C) の分布域が示されている。ただし、同時にその (E, C) に対応する α_i の値を示すために α_i ($i=0, 1, 2$) の濃淡図として示されている。また実測された (E, C) の分布 (×印) も示しておいた。同図から、推定された (E, C) は実測値の分布の中央付近に分布していることが分かる。また濃淡の記号から α_i ($i=0, 1, 2$) の値は

$$\left. \begin{aligned} 1 > \alpha_0 > 0.55 \\ 0.65 > \alpha_1 > 0.35 \\ 0.35 > \alpha_2 > 0.15 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

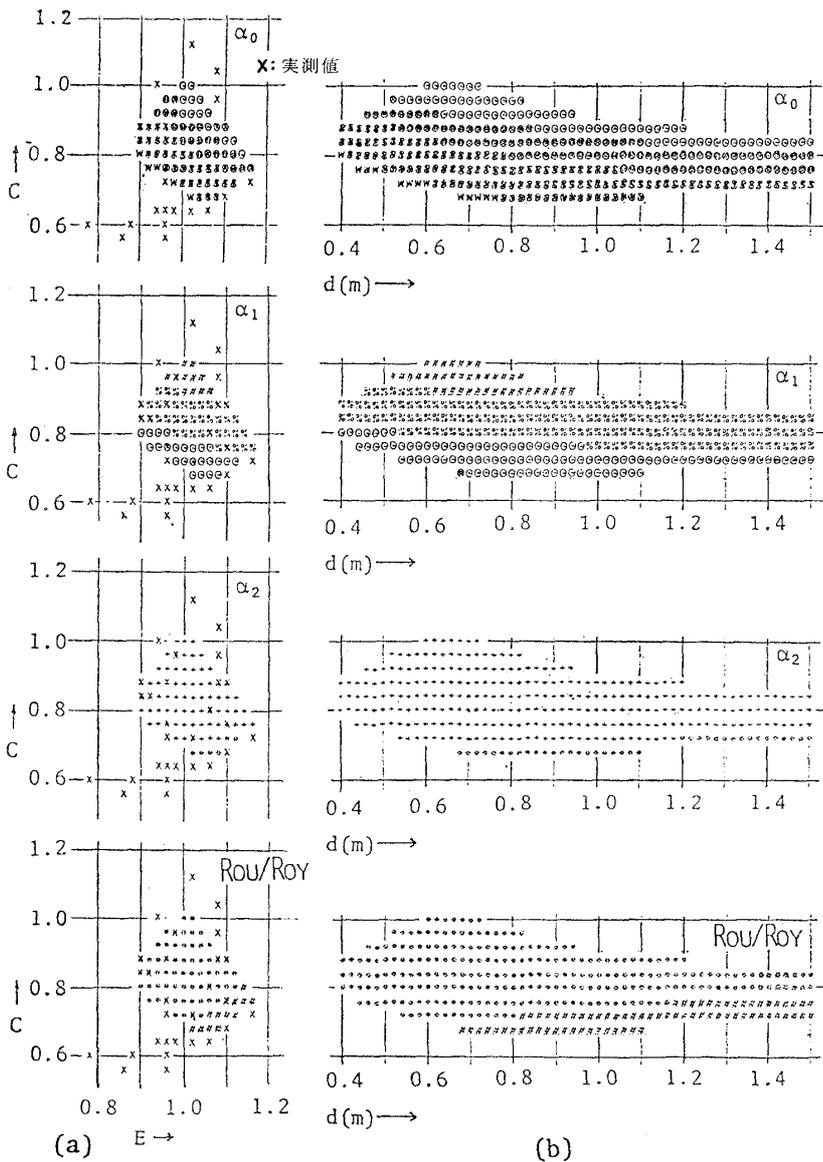
である。 α_1 の値は表-1 の実測値の値に比べて小さく推定されている。これは、 R_{0Y} より小さい荷重において $\log R_0 \sim \log S_0$ 関係に折れ点が見い出されない場合、実測値においては、図-5 (d) に示すように α_1 がかなり大きな値を示すためである。 α_0 および α_2 はほぼ実測値の傾向と一致している。また E の同一値に対する α_i の推移をみると、 C が大なるほど α_i が小となり、図-7 によって説明した現象を表している。同図中には R_{0U}/R_{0Y} の推定値も示されているが、その値は 1.3~1.5 であり、特に 1.3~1.4 の場合が多い。

図-8 から $E \sim d$ 関係の推定曲線として次式を採用し、

$$E = d / (0.807d + 0.123) \quad (18)$$

更に、(11)~(16) 式を用いると C および α_i と d の関係を推定することができる。その結果を図-9 (b) に α_i ($i=0, 1, 2$) の濃淡図として示した。同図によると d に対する C の関係はほぼ図-8 と同様の傾向を示している。同図の各杭径における C の最大値および最小値の時の $R_0 \sim S_0$ 曲線を描き、図-10 の実測曲線図中に破線で示した。 $R_0 \sim S_0$ 曲線の形状は杭径だけではなく地盤条件によっても影響を受ける。したがって、図-10 は我が国の都市部にみられる沖積層を主体とする地盤における打込み開端鋼管杭 (補強バンド付を含む) の代表的な $R_0 \sim S_0$ 曲線の分布域を推定したものといえる。

図-11 には、上記の方法によって推定された $R_0 \sim S_0$ 曲線における $S_{0Y}/d, S_{0U}/d$ と d の関係が濃淡図として



濃淡記号の値	1	+	o	△	□	◇	▽	◎	⊙	⊚	⊛
$\alpha_i (i=0, 1, 2, 3)$	0 ~ .1	.1 ~ .2	.2 ~ .3	.3 ~ .4	.4 ~ .5	.5 ~ .6	.6 ~ .7	.7 ~ .8	.8 ~ .9	.9 ~ 1.	
Rou/Roy	1.3 ~ 1.4 ~ 1.5										

図-9 (E, C) および (C, d) の分布と $\alpha_i, R_{0U}/R_{0Y}$

示されている。同図の記号よりいずれも d が大なるほど小さいが

$$\left. \begin{aligned} 2\% < S_{0Y}/d < 10\% \\ 5\% < S_{0U}/d < 50\% \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

の範囲内に分布している。この値は図-4の実測値の分布域とほぼ一致するといえる。

5. R_{0U} の推定法

図-1 (a), (b) および式 (2) から分かるように、もし $\alpha_3=0$ であれば、 $R_{03} \sim S_{03}$ 曲線は S_0 軸に平行となり、 $R_{03}=R_{0U}=k_3=10^{\beta_3}$ である。このとき (9) 式より $\beta_3=\exp(E)$ だから $R_{0U}=10^{\exp(E)}$ と推定される。

図-5 (b) に示した同一杭における $(\theta_i, \ln \beta_i)$ は厳密にはやや曲線状の関係にある。したがって R_{0U} を正確に推定するにはこの曲線を延長して $\ln \beta$ 軸上の切片を求めるとよい。しかし、その曲線として2次曲線を採用した場合、やや大きな誤差を生じることが分かった。そこで、ここでは取りあえず、 $\ln \beta$ 軸 (b) のに最も近い2点を結んだ直線 (図-5 破線) の切片 E' を用いて $R_{0U}=10^{\exp(E')}$ と推定することにした。

図-12 には図-5 (b) と対応する杭の $R_0 \sim S_0$ 曲線を示した。実線は (2) 式によって描いたものである。破線は (2) 式を使って延長した最大荷重以後の推定曲線である。また矢印によって、 R_{0Y} と上記 E' による R_{0U} の推定値を示した。杭番号 DV-16 と DV-86 においては R_{0U} が最大荷重よりも小さく推定されているが、曲線の形状から判断してそれほど大きな誤差ではない。

従来用いられてきた Van der Veen の方法¹⁾は図-1 (c), (d) に示すように $R_0 \sim S_0$ 曲線を1本の指数曲線によって近似しているが、このように近似できるとすることには精度上不満がある。かつ R_{0U} を定めるのに試行錯誤による判定を要する。

本報で示した方法は、同図 (a), (b) に示すように $R_0 \sim S_0$ 曲線を数本の指数曲線によって近似し、そのうち最も R_{0U} に近い2本の指数曲線の特性を用いて一度で推定することができる。ただし、 E' が R_{0U} の指数の指数となっているため、 E' に含まれる誤差の影響が大きくなりやすい点に注意する必要がある。なお、 E' の決定に当たっては、 α_i の大きな値は資料として妥当とはいえず、少なくとも $\alpha_i < 0.4$ であるような2点を用いるべきである。これは R_{0U} を十分な精度で推定するためには、載荷試験の管理に際して α_i に留意すべきことを示している。

図-13 には $R_{0U}=10^{\exp(E')}$ と R_{0Y} の関係を示していた。平均すると $R_{0U}=1.28 R_{0Y}$ と推定される。 E' によって推定したため図-9 に示した R_{0U}/R_{0Y} よりもやや小さい値を示している。

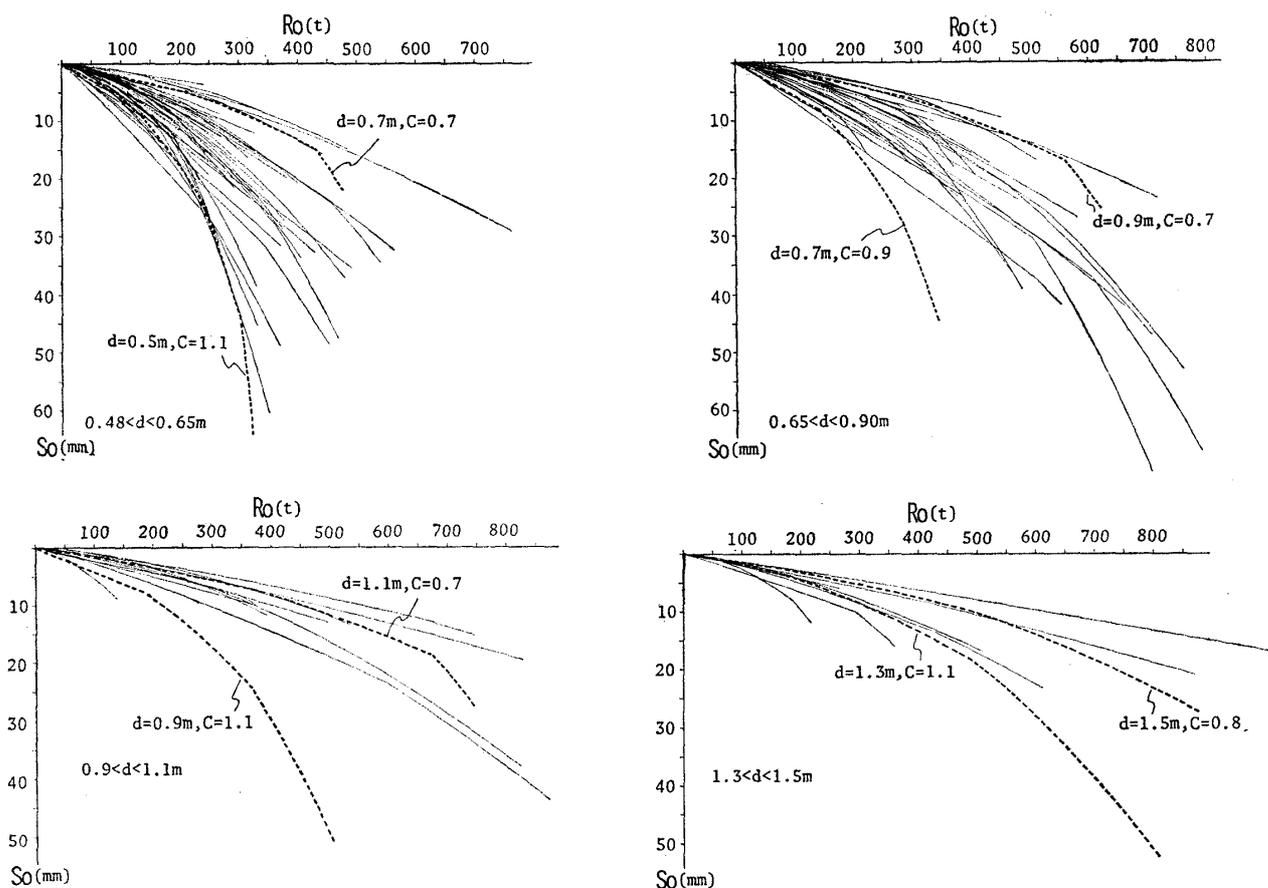


図-10 実測 $R_0 \sim S_0$ 曲線とその推定曲線

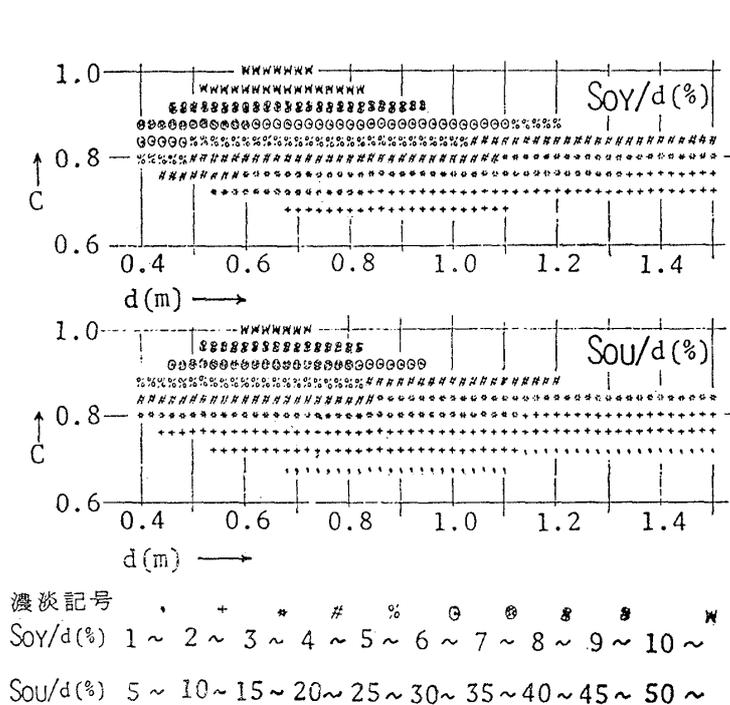


図-11 $S_{0Y}/d, S_{0U}/d$ の推定値

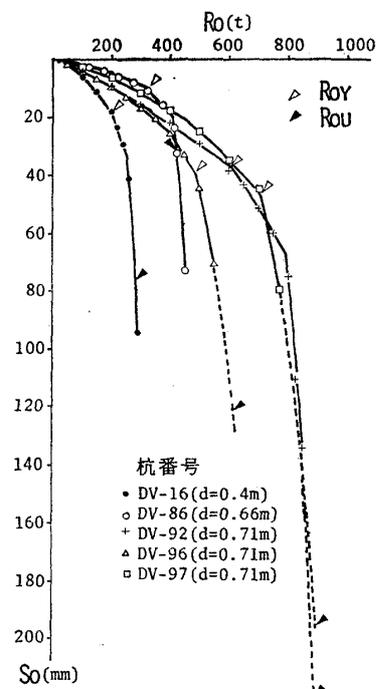


図-12 R_{0U} の推定

6. ま と め

$R_0 \sim S_0$ 曲線の形状に関する上述の理論と統計的考察は以下のように要約することができる。

1. 図-1 に示す各荷重域の $\log R_0 \sim \log S_0$ 直線の勾配 α_2 の値は杭の諸元とは無関係であり、(8) 式に示すように各荷重域における荷重の増大率と変位の増大率の間の関係を示す指数である。また線型弾性域から極限

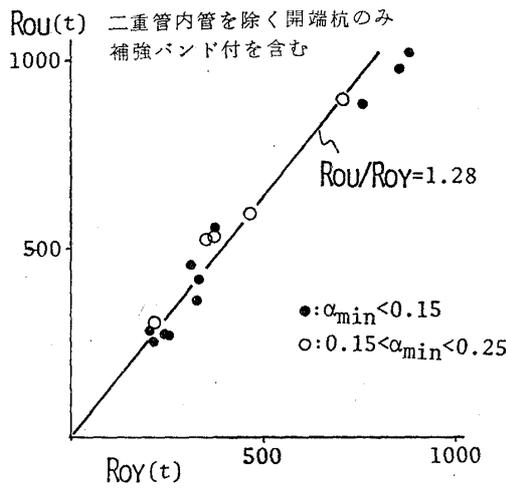


図-13 $R_{OY} \sim R_{OU}$ 関係

状態に推移する過程で $1 > \alpha_i > 0$ の間の値を示す。表-1 には今回解析した開端鋼管杭の α_i の値の分布域と平均値が示されている。また $\log S_0$ 軸上の切片 $\beta_i \sim \beta_{i+1}$ ($i = 0, 1, 2$) の間には図-6 に示すような強い相関関係がある。

2. 各荷重域の $\ln \beta_i$ と $\arctan \alpha_i$ ($i = 0, 1, 2, 3$) の間にはほぼ線型の関係 $\ln \beta_i = E - C \arctan \alpha_i$ が成り立ち、定数 E および C は $R_0 \sim S_0$ 曲線の漸近線 (極限荷重) および「曲率」に対応する。図-5 (d) には開端鋼管杭の $(\ln \beta_i, \arctan \alpha_i)$ の分布域が示されている。

3. $\ln \beta_i$ と $\arctan \alpha_i$ の間に見いだされた上記の関係は、厳密にはやや曲線状を呈している。そこで $\arctan \alpha_i$ 軸に近い2点を結ぶ直線の $\arctan \alpha_i$ 軸上の切片 E' によって $R_{OU} = 10^{\exp(E')}$ と推定した。図-12 にはその結果の一部が示されている。また開端鋼管杭の場合には、この推定値と R_{OY} の関係は平均すると $R_{OU} = 1.28 R_{OY}$ であった。

4. 上述の理論と統計値を用いて逆に開端鋼管杭の $R_0 \sim S_0$ 曲線を推定することができる。その結果は図-10 に示されている。また図-9 に示された α_i の傾向および E, C の値の分布域は表-1 および図-8 の実測値の傾向とはほぼ一致しており、その平均的挙動を示している。これは、上記諸統計値と理論の妥当性を示すものと考えられる。

謝 辞

本研究に用いた資料は鋼管杭協会ならびに関係各社の御協力によって収集された。また図の清書は京都工芸繊維大学技官小山清司氏の御協力を得た。記して謝意を表します。

付 録

$\log R \sim \log S$ 関係の折れ点を見い出すために次のよう

な手順を採用した。

1) まず、測定値 R_k, S_k から $\log R_k$ および $\log S_k$ (k : 荷重階) を算出する。ついで $\log R \sim \log S$ 図上の勾配

$$\alpha_k = (\log R_{k+1} - \log R_k) / (\log S_{k+1} - \log S_k) \quad (\text{付1})$$

を求め、

$$\theta_k = \arctan \alpha_k \quad (\text{付2})$$

によって、角度 (rad.) に変換する。

2) θ_k の最大値 θ_{\max} , 最小値 θ_{\min} によって

$$u = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) / 6 \quad (\text{付3})$$

を求める。分母の6は経験的な値である。そして付図-1 に示すように θ_{\min} および θ_{\max} を含む7つの等区間 (幅: u) を考える。この各区間に θ_{\min} から θ_{\max} に向かって番号1~7をつける。

3) 1) で得た θ_i を次式によって、上記の1~7の区間に振り分ける。

$$J_i = \left[\frac{\theta_i - \theta_{\text{ult}}}{u} + 1 \right] \quad (\text{付4})$$

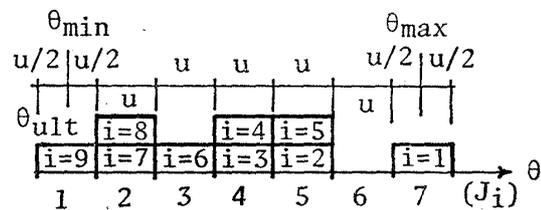
ここに $\theta_{\text{ult}} = \theta_{\min} - 0.5u$, [] は小数点以下を切り捨てて整数とする記号

つまり、番号 i の勾配 θ_i は付図-1 の区間 J_i ($1 \leq J_i \leq 7$) に属する。

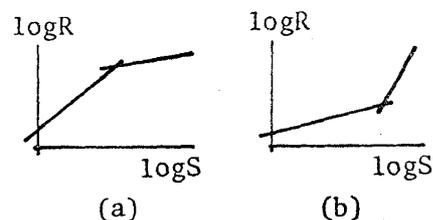
次に上記の結果を用いて $\log R \sim \log S$ 図上の点 ($\log R_i, \log S_i$) をグループ分けする。

4) 番号 $i = 1$ から始めて、 $|J_i - J_{i+2}| \leq 1$ となるすべての ($\log R_i, \log S_i$), ($\log R_{i+1}, \log S_{i+1}$) をまとめて1組とし、最小二乗直線を求める。 i と $i+1$ の勾配 (隣り合う勾配) ではなく、 i と $i+2$ の勾配 (1つ置き) の勾配) を比較する方が折れ点が見出しやすい。

5) 同様に最大値から始めて $J_{i-2} - J_i \leq 1$ となるすべての点 ($\log R_i, \log S_i$), ($\log R_{i-1}, \log S_{i-1}$) をまとめて1組とし、最小二乗直線を求める。



付図-1



付図-2

