

1 G場の静的実験における地盤—杭破壊時の相似則

The similarity law for the static model test in 1 G gravity field on failure of the ground and the pile

濱田 純次*, 土屋 富男*, 鬼丸 貞友*

Junji Hamada, Tomio Tsuchiya and Sadatomo Onimaru

*工修 研究員 竹中工務店技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1丁目5-1)

A lot of experimental studies were conducted to investigate the coefficient of subgrade reaction or to reveal the mechanism of the fracture of the piles. Recently, interaction experiment that the piles and ground failed has been carried out using large scale soil container. Previous similarity law conducting such experiments is following. No.1, the section performance of model and prototype is fitting together. No.2, stiffness ratio of the ground and pile is equal with model and prototype. However, when the piles and the ground were failed, these similarity conditions are not enough. Therefore, in this study, the similarity law on failure of the ground and the pile is examined. This law consists of thought that ultimate strength of the piles and ultimate load of the ground are similar with model and prototype. And also, approximate similar is expanded and simulation studies are conducted by beam-spring model.

Key Words: similarity law, pile, ground, fracture, 1G

キーワード: 相似則, 杭, 地盤, 破壊, 1G

1. はじめに

模型実験における相似則に関する研究は, Buckinghamのパイ定理にはじまり, 実験目的に応じた相似則を用いている。杭の実験に関しては, 地盤反力係数の算定実験や振動実験等, 地盤と杭の相互作用の実験が多くされており, 構造物—地盤系の相似則が適用されている。また, 最近では, 杭の破壊時の靱性等のメカニズム把握のための大変形実験が行われるようになってきた^{2),3)}。この杭の破壊実験には, 構造系の実験にならい, 杭材料を同一にし, 縮尺比を杭長, 杭径とも同一にした(歪み縮尺を1にした)相似則を用いているのが一般的である。しかし, 地盤が伴う場合, 地盤の非線形性が相似関係にない。地盤を伴う模型実験に関しては, 歪みレベルを模型縮尺により変化させ, 応力～歪み関係の相似則を立てて行う。しかし, この場合でも, 地盤の破壊時の相似則は成立していない。これらの問題を解決するのが遠心载荷装置を用いた実験であり, 近年, 非常に多くの実験がされてきており, プロトタイプとモデルとの検証も行われている⁴⁾。もう一方で大型の実験装置を用いた実験も多くなってきており, 相似則の問題を少しでも小さくするよう考慮されているものの, 相似則の問題が本質的に解決されたわけではない。

そこで, 本研究では, 今後, 益々, 増加する杭, 地盤の両方が破壊するような領域での1G場の模型実験に対する相似則を検討した。地盤の破壊は砂地盤の場合, 拘束圧に大きく依存しており, 地盤が破壊する時の歪み

縮尺と杭が降伏および塑性する時の歪み縮尺に注目して相似則を構成した。

2. 既往の相似則

ここでは, 構造物(杭)の実験や地盤の実験で一般的に用いられている相似則を, ごく簡単に述べる。

2.1 構造物に対しての相似則

地盤の無い杭構造物に対しては, 線形領域では, 曲げ運動が支配的な場合は, 曲げ剛性のみを合わせれば良く, 斜杭のように軸力も影響している場合は軸剛性も合わせる必要がある。また, 非線形領域あるいは破壊領域の模型実験では, 耐力や歪みによる剛性低下曲線を合わせる必要がある。一般的に構造物のみの場合, 実構造物と同一材料を用い, 模型を歪ませず(縦の縮尺率=横の縮尺率), 実験時の歪みレベルも実構造物と同一にすることにより相似則が成立する。

2.2 地盤に対しての相似則

土を扱った模型実験では, 歪みレベルによる剛性の低下と減衰率の増加に注意して相似則が立てられている。特に1G場では, 拘束圧が十分に得られない為, モデルとプロトタイプと同一歪み値による剛性低下, 減衰率増加割合が一致しない。Rocha⁵⁾はこのことに注目し, 静的な場合の土に対する相似則の開発を行った。また, 香川⁶⁾, 国生⁷⁾, Iai⁸⁾は1G場の振動実験を対象にした相似則を導

いた。これらは、拘束圧を変えた様々な実験により、歪みを拘束圧の 0.5 乗で除したものと G/G_0 (せん断剛性/初期せん断剛性) の相関により相似則を立てており、地盤と構造物の相互作用の実験に用いられている。風間⁹⁾は遠心載荷実験の為に任意の重力場の相似則を導いた。

3. 破壊時の相似則

この章では地盤、杭がそれぞれ破壊したときに必要な相似条件を述べる。相似則の立て方にはパイ定理を用いる方法、力の比を用いる方法、支配方程式を用いる方法(香川⁶⁾)があるが、ここでは、力による物理量の問題と考え、重要な力のバランスのみ議論できる「力の比を用いる方法」により議論する。また、ここでは、静的な実験時の相似則を対象とし、時間縮尺については議論しない。

3.1 自由地盤破壊時の相似則

自由地盤の相似則は、通常、せん断剛性と歪みレベルでの剛性低下曲線を合わせるが、ここでは、地盤破壊時の相似則を検討する。地盤の深さ縮尺を(1)式のように入とする。ここで下付添え字 p はプロトタイプ、 m はモデルとする。1 G 場では、必然的に有効拘束圧の縮尺も入となる。自由地盤の最大せん断力は(2)式で表せるが、今、砂地盤を考え、更に、内部摩擦角 ϕ は、モデルにより変化させることが困難であることを考えると、最大せん断力比 (τ_p/τ_m) も入となる((3)式)。一方、地盤のせん断剛性 (G) は締め固め等により、ある程度自由に变化させることが可能であるとし、 α をパラメタとした(6)式で定義する。この場合、歪みの縮尺は必然的に(8)式で導かれる。よって、地盤剛性の縮尺により、地盤破壊時を考えた場合、歪みの縮尺が決定する。

$$\lambda = \ell_p / \ell_m \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \sigma \tan \phi \quad (2)$$

ℓ_p : 実規模の地盤深さ

ℓ_m : 模型の地盤深さ

$\tau_{\max}$: せん断耐力

σ : 有効拘束圧

ϕ : 砂の内部摩擦角

λ : 地盤の深さ縮尺

$$(\tau_{\max})_p = \lambda (\tau_{\max})_m \quad (3)$$

$$\tau = G \gamma \quad (4)$$

$$G_p \gamma_p = \lambda G_m \gamma_m \quad (5)$$

τ : せん断力

G : せん断剛性

γ : 歪

ここで、

$$G_p = \lambda^\alpha G_m \quad (6)$$

とする。

(5) 式に (6) 式を代入すると

$$\lambda^\alpha G_m \gamma_p = \lambda G_m \gamma_m \quad (7)$$

$$\lambda_\varepsilon = \gamma_p / \gamma_m = \lambda^{1-\alpha} \quad (8)$$

λ_ε : 歪縮尺

3.2 杭周辺地盤破壊時の相似則

杭に作用する地盤反力の極限(P_y)は、例えば、式(9)として表現でき、有効拘束圧($\rho g z$)に比例する。ここで、 K_p は受働土圧係数であり、内部摩擦角を変えない限り、この比は 1 である((10)式)。よって、極限地盤反力比は (11) 式で表され、地盤反力係数(k_h)を考えた場合((12)式)、(13) 式~(15)式の展開より歪み縮尺比 (λ_ε) は (16) 式となる。

$$P_y \propto K_p \cdot \rho g z \quad (9)$$

P_y : 地盤の極限耐力

ρ : 土の密度

g : 重力加速度

z : 深度

K_p : 受働土圧係数

$$(K_p)_p = (K_p)_m \quad (10)$$

$$(P_y)_p = \lambda (P_y)_m \quad (11)$$

$$P_y = k_h \cdot \Delta X \quad (12)$$

ΔX : 地盤破壊時の水平変位

k_h : 地盤反力係数

(11)式に代入すると

$$(k_h \Delta X)_p = \lambda (k_h \Delta X)_m \quad (13)$$

(13)式を $\ell_p (= \lambda \ell_m)$ で除すると、

$$(k_h)_p \frac{\Delta X_p}{\ell_p} = \lambda (k_h)_m \frac{\Delta X_m}{\lambda \ell_m} \quad (14)$$

$$(k_h)_p \gamma_p = (k_h)_m \gamma_m \quad (15)$$

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = \frac{(k_h)_m}{(k_h)_p} = \lambda_{k_h}^{-1} \quad (16)$$

地盤反力係数 (k_h) と杭幅(D)の関係をいかに想定する

かにより、歪縮尺 (λ_ε)、地盤反力係数縮尺 (λ_{k_h}) が

決まり、地盤剛性を(6)式と置くと(17)式～(26)式となる。

○ $E_s/k_h \propto D$ (チャン式) の場合¹⁰⁾

$$\lambda_{kh} = \lambda^a \lambda_D^{-1} \quad (17)$$

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = \lambda_D \lambda^{-a} \quad (18)$$

ここで、

$$\lambda_D = D_p / D_m$$

λ_D : 杭径縮尺比 (D_p/D_m)

D : 杭幅 (杭幅)

E_s : 地盤の変形係数

○ $E_s/k_h \propto D^{3/4}$ の場合¹¹⁾

$$\lambda_{kh} = \lambda^a \lambda_D^{-3/4} \quad (19)$$

$$\lambda_\varepsilon = \lambda^{-a} \lambda_D^{3/4} \quad (20)$$

$$\text{○} k_h = \frac{1.3}{D} \frac{E_s}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{E_s D^4}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \quad \text{フランシス式の場合}^{12)}$$

$$\lambda_{kh} = \lambda^{\frac{13}{12}a} \lambda_D^{-1} \quad (21)$$

$$\lambda_\varepsilon = \lambda^{\frac{13}{12}a} \lambda_D \quad (22)$$

ν : ポアソン比

E : 杭のヤング率

I : 杭の断面 2 次モーメント

○ $E_s/k_h \propto D^{1/2}$ の場合

$$\lambda_{kh} = \lambda^a \lambda_D^{-1/2} \quad (23)$$

$$\lambda_\varepsilon = \lambda^{-a} \lambda_D^{1/2} \quad (24)$$

○ $E_s/k_h \propto D^0$ (杭幅によらない) の場合¹³⁾

$$\lambda_{kh} = \lambda^a \quad (25)$$

$$\lambda_\varepsilon = \lambda^{-a} \quad (26)$$

3.3 杭破壊時の相似則

杭破壊時の相似則として、杭の断面性能と地盤－杭の剛性比を合わせる必要がある。杭の断面性能を合わせる為には、同一材料を用いた場合、径(D)と厚み(t)の比を合わせる必要があり((27)式)、地盤－杭の剛性比に対しては杭の特性値(β)を合わせる必要がある((28)式)。

$$\left(\frac{t}{D} \right)_p = \left(\frac{t}{D} \right)_m \quad (27)$$

$$\left(\frac{1}{\beta} \right)_p = \lambda \left(\frac{1}{\beta} \right)_m \quad (28)$$

$$\text{ここで、} \beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4EI}}$$

t : 杭厚

地盤剛性を(6)式と置くと、杭径と地盤反力係数の相似比の関係が(34)式のように得られる。

(28)式より

$$(EI)_p = \lambda^4 \lambda_{kh} \lambda_D (EI)_m \quad (29)$$

$$E_p = E_m \text{ (同材料使用した時)} \quad (30)$$

$$I_p = \lambda^4 \lambda_{kh} \lambda_D I_m \quad (31)$$

(27)式より $I \propto D^4$ となり

$$D_p = \lambda \lambda_{kh}^{\frac{1}{4}} \lambda_D^{\frac{1}{4}} D_m \quad (32)$$

$$\lambda_D = \frac{D_p}{D_m} = \lambda \lambda_{kh}^{\frac{1}{4}} \lambda_D^{\frac{1}{4}} \quad (33)$$

$$\lambda_D = \lambda^{\frac{4}{3}} \lambda_{kh}^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

次に、破壊時における歪み縮尺について考える。縁応力がモデルとプロトタイプと等しいという条件((35)式)より、歪み(水平変位/杭長)の比は(37)式となる。

$$(\sigma_y)_p = (\sigma_y)_m \quad (35)$$

σ_y : 縁降伏応力

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_d / \lambda = \lambda^2 / \lambda_D / \lambda = \lambda / \lambda_D \quad (36)$$

λ_d : 水平変位の縮尺率

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_{kh}^{-1/3} \lambda^{-1/3} \quad (37)$$

4. 杭周辺地盤－杭破壊時の相似則

杭、地盤とも破壊する場合、3.2 の杭周辺地盤破壊時の条件と 3.3 の杭破壊時の条件を同時に成立させる必要がある。歪み縮尺は、地盤の条件から(16)式、杭の条件から(37)式が得られており、両条件((38)式)より、(39)式、(40)式となる。また、杭の条件((34)式)より杭径も必然的に決定する((41)式)。

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_{kh}^{-1} = \lambda_{kh}^{-\frac{1}{3}} \lambda^{-\frac{1}{3}} \quad (38)$$

$$\lambda_{kh} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

$$\lambda_{\varepsilon} = \lambda^{-\frac{1}{2}} \quad (40)$$

$$\lambda_D = \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (41)$$

更に、地盤反力係数と杭幅、地盤剛性（変形係数）の
関係により、地盤の剛性縮尺（(6)式の α ）が必然的に決
定される。

○ $E_s/k_h \propto D$ の場合

$$\lambda_{kh} = \lambda^{\alpha} \lambda_D^{-1} \quad (42)$$

$$\lambda^{\frac{1}{2}} = \lambda^{\alpha} \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (43)$$

$$\alpha = 2 \quad (44)$$

○ $E_s/k_h \propto D^{3/4}$ の場合

$$\lambda_{kh} = \lambda^{\alpha} \lambda_D^{-\frac{3}{4}} \quad (45)$$

$$\lambda^{\frac{1}{2}} = \lambda^{\alpha} \lambda^{\frac{9}{8}} \quad (46)$$

$$\alpha = \frac{13}{8} \quad (47)$$

$$\circ k_h = \frac{1.3}{D} \frac{E_s}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{E_s D^4}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \text{ の場合}$$

$$\lambda_{kh} = \lambda^{\frac{13}{12}} \lambda_D^{-1} \quad (48)$$

$$\lambda^{\frac{1}{2}} = \lambda^{\frac{13}{12}} \lambda^{-\frac{3}{2}} \quad (49)$$

$$\alpha = \frac{24}{13} \quad (50)$$

○ $E_s/k_h \propto D^{1/2}$ の場合

$$\lambda_{kh} \lambda_D^{1/2} = \lambda^{\alpha} \quad (51)$$

$$\lambda^{1/2} \lambda^{3/4} = \lambda^{\alpha} \quad (52)$$

$$\alpha = \frac{5}{4} \quad (53)$$

○ $E_s/k_h \propto D^0$ の場合

$$\lambda_{kh} = \lambda^{\alpha} \quad (54)$$

$$\lambda^{\frac{1}{2}} = \lambda^{\alpha} \quad (55)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \quad (56)$$

表-1に代表的なパラメタの相似率を示す。 E_s/k_h と D
（杭幅）の関係が影響するのは地盤剛性（地盤の変形係
数）のみである。

表-1 杭周辺地盤-杭破壊時の相似則

パラメータ		プロト/モデル	$E_s/k_h \propto D$ $\alpha=2$	$E_s/k_h \propto D^{3/4}$ $\alpha=\frac{13}{8}$	フランス $\alpha=\frac{24}{13}$	$E_s/k_h \propto D^{1/2}$ $\alpha=\frac{5}{4}$	$E_s/k_h \propto D^0$ $\alpha=\frac{1}{2}$
長さ	杭長 λ_l	λ	λ				
	杭径 λ_D	λ_D	$\lambda^{\frac{3}{2}}$				
	杭厚 λ_t	λ_D	$\lambda^{\frac{3}{2}}$				
	変位 λ_d	$\lambda_{\varepsilon} \lambda$	$\lambda^{\frac{1}{2}}$				
	歪み(変位/杭長) λ_{ε}	λ_{kh}^{-1}	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$				
	縁歪み $\lambda_{縁}$	1	1				
力	軸力 λ_N	λ_D^2	λ^3				
	モーメント λ_M	λ_D^3	$\lambda^{\frac{9}{2}}$				
	せん断力 λ_Q	$\lambda_D^3 \lambda^{-1}$	$\lambda^{\frac{7}{2}}$				
	応力 λ_{σ}	1	1				
杭の断面性能	ヤング率 λ_E	1	1				
	断面2次モーメント λ_I	λ_D^4	λ^6				
	曲げ剛性 λ_{EI}	λ_D^4	λ^6				
	傾斜角 λ_{θ}	λ_{ε}	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$				
	曲率 $\lambda_{曲率}$	λ_D^{-1}	$\lambda^{-\frac{3}{2}}$				
地盤定数	変形係数 λ_{Es}	λ^{α}	λ^2	$\lambda^{\frac{13}{8}}$	$\lambda^{\frac{24}{13}}$	$\lambda^{\frac{5}{2}}$	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
	せん断剛性 λ_G	$\lambda_{Es} = \lambda^{\alpha}$	λ^2	$\lambda^{\frac{13}{8}}$	$\lambda^{\frac{24}{13}}$	$\lambda^{\frac{5}{2}}$	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
	地盤反力係数 λ_{kh}	$\lambda_{\varepsilon}^{-1}$	$\lambda^{\frac{1}{2}}$				
	単位体積重量 λ_{γ}	1	1				
	内部摩擦角 λ_{ϕ}	1	1				
	極限地盤反力 λ_{py}	λ	λ				

5. 近似した相似則

実際の実験においては、表-1に示したような地盤剛性や杭径の相似則を満たしたモデルを作成するのが困難な場合が多々ある。そこで、厳密には相似則を満たさないが、杭条件から決まる歪み縮尺と地盤から決まる歪み縮尺が必ずしも一致しない相似則を求め、杭径や地盤定数に自由度を高める工夫をした。

杭の条件から杭径縮尺は(34)式であり、チャンの式に従うとき、杭幅の相似比は、(57)式となる。

$$\lambda_D = \lambda^{1+\frac{\alpha}{4}} \tag{57}$$

杭から決まる歪み縮尺は、(58)式、地盤から決まる歪み縮尺は、(59)式である。4章で述べたように $\alpha=2$ の場合、両者は一致するが、敢えて α を規定しない。

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{-\frac{\alpha}{4}} \tag{58}$$

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{1-\frac{3}{4}\alpha} \tag{59}$$

以上の方法により求めた相似則を表-2に示す。これは、表-1に示した相似則を包含したものとなっている。

フランス式の場合を例に取り、 α による杭の歪みと地盤の歪みを比較したのが図-1である。但し、杭の長さ縮尺(地盤の深さ縮尺)(λ)を5とした。 $\alpha=24/13=1.846$ で杭と地盤の歪みが一致するが、 α を小さくしていくと急激に両者は離れていく。

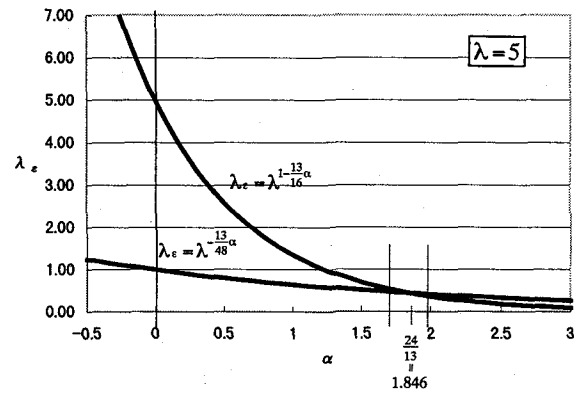


図-1 地盤剛性 (α) による歪み縮尺

表-2 近似した杭周辺地盤-杭破壊時の相似則

パラメータ		プロト/モデル	$E_s/k_h \propto D$ $\alpha=2$	$E_s/k_h \propto D^{3/4}$ $\alpha=13/8$	フランス $\alpha=24/13$	$E_s/k_h \propto D^0$ $\alpha=1/2$
長さ	杭長 λ_l	λ	λ	λ	λ	λ
	杭径 λ_D	λ_D	$\lambda^{1+\frac{\alpha}{4}}$	$\lambda^{16\frac{4\alpha}{15}}$	$\lambda^{13\frac{\alpha}{48}}$	$\lambda^{4\frac{\alpha}{3}}$
	杭厚 λ_t	λ_D	$\lambda^{1+\frac{\alpha}{4}}$	$\lambda^{16\frac{4\alpha}{15}}$	$\lambda^{13\frac{\alpha}{48}}$	$\lambda^{4\frac{\alpha}{3}}$
	変位 λ_d	$\lambda_\epsilon \lambda$	$\lambda^{1-\frac{\alpha}{4}}$	$\lambda^{-\frac{1}{15}\alpha+\frac{11}{15}}$	$\lambda^{1-\frac{13}{48}\alpha}$	$\lambda^{-\frac{1}{3}\alpha+\frac{2}{3}}$
	杭歪み λ_ϵ		$\lambda^{-\frac{\alpha}{4}}$	$\lambda^{-\frac{4}{15}\alpha-\frac{1}{15}}$	$\lambda^{-\frac{13}{48}\alpha}$	$\lambda^{-\frac{1}{3}\alpha-\frac{1}{3}}$
	地盤歪み		$\lambda^{1-\frac{3}{4}\alpha}$	$\lambda^{-\frac{4}{5}\alpha+\frac{4}{5}}$	$\lambda^{\frac{13}{16}-1}$	$\lambda^{-\alpha}$
	縁歪み $\lambda_{\text{縁}}$	1	1	1	1	1
力	軸力 λ_N	λ_D^2	$\lambda^{2+\frac{\alpha}{2}}$	$\lambda^{32\frac{8\alpha}{15}}$	$\lambda^{24\frac{13}{24}\alpha}$	$\lambda^{8\frac{2\alpha}{3}}$
	モーメント λ_M	λ_D^3	$\lambda^{3+\frac{3}{4}\alpha}$	$\lambda^{48\frac{4\alpha}{15}}$	$\lambda^{36\frac{13}{16}\alpha}$	$\lambda^{12\frac{4}{3}\alpha}$
	せん断力 λ_Q	$\lambda_D^3 \lambda^{-1}$	$\lambda^{2+\frac{3}{4}\alpha}$	$\lambda^{11\frac{4}{15}\alpha}$	$\lambda^{24\frac{13}{16}\alpha}$	$\lambda^{3\frac{4}{3}\alpha}$
	応力 λ_σ	1	1	1	1	1
杭の断面性能	ヤング率 λ_E	1	1	1	1	1
	断面2次モーメント λ_I	λ_D^4	$\lambda^{4+\alpha}$	$\lambda^{64\frac{16}{15}\alpha}$	$\lambda^{48\frac{13}{12}\alpha}$	$\lambda^{16\frac{4}{3}\alpha}$
	曲げ剛性 λ_{EI}	λ_D^4	$\lambda^{4+\alpha}$	$\lambda^{64\frac{16}{15}\alpha}$	$\lambda^{48\frac{13}{12}\alpha}$	$\lambda^{16\frac{4}{3}\alpha}$
	傾斜角 λ_θ	λ_ϵ	$\lambda^{-\frac{\alpha}{4}}$	$\lambda^{-\frac{4}{15}\alpha-\frac{1}{15}}$	$\lambda^{-\frac{13}{48}\alpha}$	$\lambda^{-\frac{1}{3}\alpha-\frac{1}{3}}$
	曲率 $\lambda_{\text{曲率}}$	$\lambda_D^{-1} (= \lambda_\epsilon \lambda^{-1})$	$\lambda^{-1-\frac{\alpha}{4}}$	$\lambda^{-\frac{16}{15}\alpha-\frac{4}{15}}$	$\lambda^{-1-\frac{13}{48}\alpha}$	$\lambda^{-\frac{4}{3}\alpha-\frac{4}{3}}$
地盤定数	変形係数 λ_{Es}	λ^α	λ^α	λ^α	λ^α	λ^α
	せん断剛性 λ_G	λ^α	λ^α	λ^α	λ^α	λ^α
	地盤反力係数 λ_{kh}	λ_ϵ^{-1}	$\lambda^{\frac{3}{4}\alpha-1}$	$\lambda^{\frac{4}{5}\alpha-\frac{4}{5}}$	$\lambda^{\frac{13}{16}\alpha-1}$	λ^α
	単位体積重量 λ_γ	1	1	1	1	1
	内部摩擦角 λ_ϕ	1	1	1	1	1
	極限地盤反力 λ_{py}	λ	λ	λ	λ	λ

6. 梁-バネ系モデルによるシミュレーション

杭を梁、地盤をバネとした梁-バネ系モデルにより、5章で求めた近似相似則の検討を行った。

6.1 解析条件

解析対象は、図-2、表-3 に示すようにプロトタイプで杭長 24m とし、地盤反力係数を $1.176 \times 10^3 z$ ($\text{kN/m}^3/\text{m}$)、 z :深度(m)とした。また、極限地盤反力(P_y)を $3Kp \gamma z$ とし、地盤反力を図-3 で示すようなバイリニアでモデル化した。

解析ケースは、表-4 に示すように、プロトタイプ 1 つに対して、 α を変化させたモデルタイプを 4 ケースとした。杭長縮尺(λ)は 5 とした。 $m1$ は、単純に杭径も 1/5 にしたモデルであり、 $m4$ は厳密に線形時と破壊時の相似則を満足させたものである。

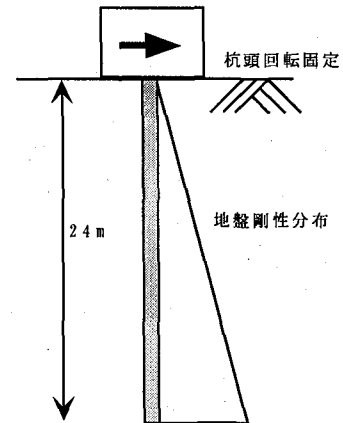


図-2 解析断面 (プロトタイプ)

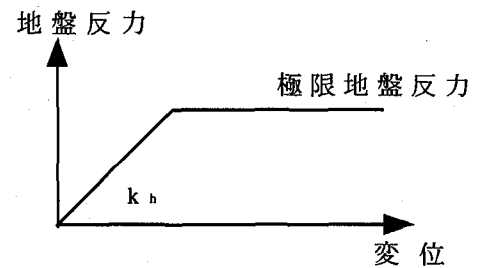


図-3 地盤反力

表-3 プロトタイプの杭, 地盤仕様

杭	杭長	24 (m)
	杭幅	82.6 (cm)
	杭厚	18.5 (mm)
	降伏応力	3.1×10^5 (kN/m^2)
地盤	内部摩擦角	35 度
	地盤反力係数	$1.176 \times 10^3 z$ ($\text{kN/m}^3/\text{m}$)
	単位体積重量	1.57 (kN/m^3)

表-4 解析ケース

パラメータ		プロト/モデル	p	m1	m2	m3	m4
			プロトタイプ	$\alpha=0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	$\alpha=24/13$
長さ	杭長 λ_c	λ	1	5	5	5	5
	杭径 λ_D	$\lambda \lambda_{48}^{13}$	1	5	6.22	7.73	11.18
	杭厚 λ_t	$\lambda \lambda_{48}^{13}$	1	5	6.22	7.73	11.18
	変位(杭) λ_d	$\left(\lambda^{1-\frac{13}{48}\alpha} \right)$	1	5	4.02	3.23	2.24
	歪み λ_e	$\lambda \lambda_{48}^{13}$ 杭の歪	1	1	0.80	0.65	0.45
		$\lambda \lambda_{16}^{13\alpha+1}$ 地盤の歪	1	5.00	2.60	1.35	0.45
	縁歪み λ_{te}	1	1	1	1	1	1
力	軸力 λ_N	$\lambda^2 \lambda_{24}^{13}$	1	25	38.66	59.78	125
	モーメント λ_M	$\lambda^3 \lambda_{16}^{13}$	1	125	240.36	462.19	1397.54
	せん断力 λ_Q	$\lambda^2 \lambda_{16}^{13}$	1	25	48.07	92.44	279.51
	応力 λ_σ	1	1	1	1	1	1
杭の断面性能	ヤング率 λ_E	1	1	1	1	1	1
	断面2次モーメント λ_I	$\lambda^4 \lambda_{12}^{13}$	1	625	1494.48	3573.53	15625
	曲げ剛性 λ_{EI}	$\lambda^4 \lambda_{12}^{13}$	1	625	1494.48	3573.53	15625
	傾斜角 λ_θ	$\lambda \lambda_{48}^{13}$	1	1	0.80	0.65	0.45
	曲率 $\lambda_{曲率}$	$\lambda^{-1} \lambda_{48}^{13}$	1	0.2	0.16	0.13	0.09
地盤定数	変形係数 λ_{Es}	λ^α	1	1	2.24	5	19.52
	せん断剛性 λ_G	λ^α	1	1	2.24	5	19.52
	地盤反力係数 λ_{kh}	$\lambda_{16}^{13\alpha+1}$	1	0.2	0.38	0.74	2.24
	単位体積重量 λ_γ	1	1	1	1	1	1
	内部摩擦角 λ_ϕ	1	1	1	1	1	1
	極限地盤反力 λ_{py}	λ	1	5	5	5	5

6.2 解析結果

解析結果の一例を図-4（水平変位 2.5cm）、図-5（水平変位 17.5cm）および図-6（水平変位 35cm）に示す。すべて、プロトタイプに換算して結果を比較している。図-4 は、まだ地盤、杭とも線形領域であり、全ての相似則でプロトタイプを模擬できている。図-5 は、杭頭部で塑性化しており、 $m1, m2, m3$ は地表面付近の地盤が、極限耐力に達し、地盤反力係数が低下している。 $m1$ は、せん断力がプロトタイプの 6 割近くしか発生していないが、 $m3$ は、近似した相似則ではあるが、大方、模擬できている。図-6 は、杭が地盤内でも塑性化した状態であり、 $m4$ 以外はどれもプロトタイプを模擬できていない。

$m1$ モデルでは、地盤が早くから破壊に至るので水平耐力が小さくなっている。また、地中部の最大曲率が発生する深度もプロトタイプでは杭の塑性化とともに浅くなってきているが、 $m1$ では地盤剛性が低下しているため少し下方で生じている。

この解析は、地盤剛性をバイリニアとしており、拘束圧による剛性～歪みの効果を考慮していない。その為、実際には、地盤が破壊に至る以前では $m4$ でも完全に模擬できないと思われるが、相似則を導く際に仮定した条件と解析条件が等しい為、 p と $m4$ は完全に一致している。

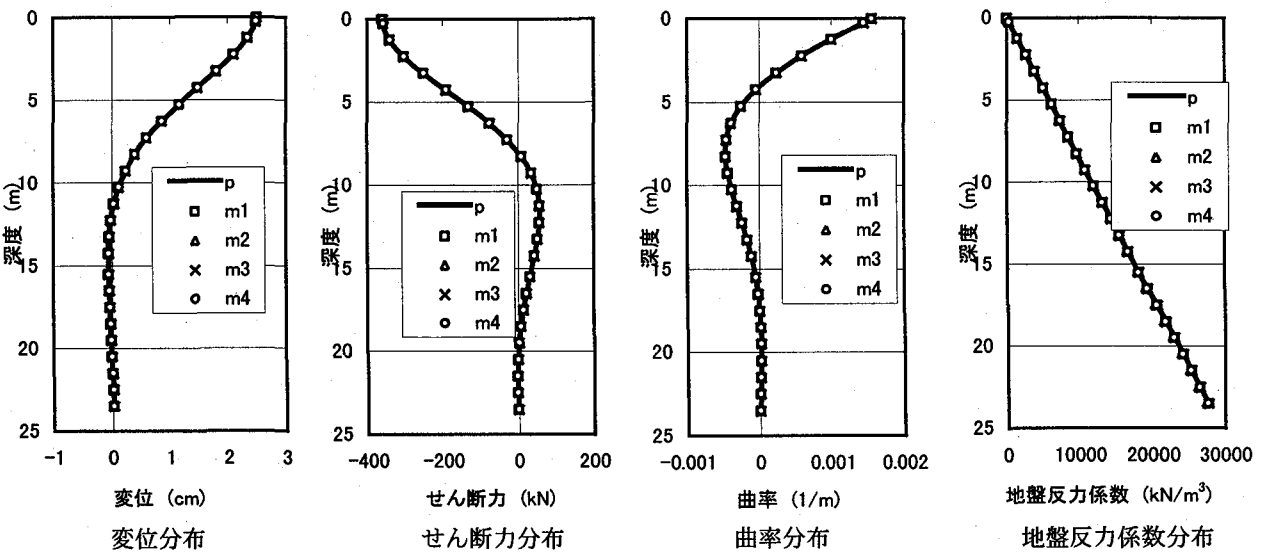


図-4 分布図（杭頭部水平変位 2.5cm の時）

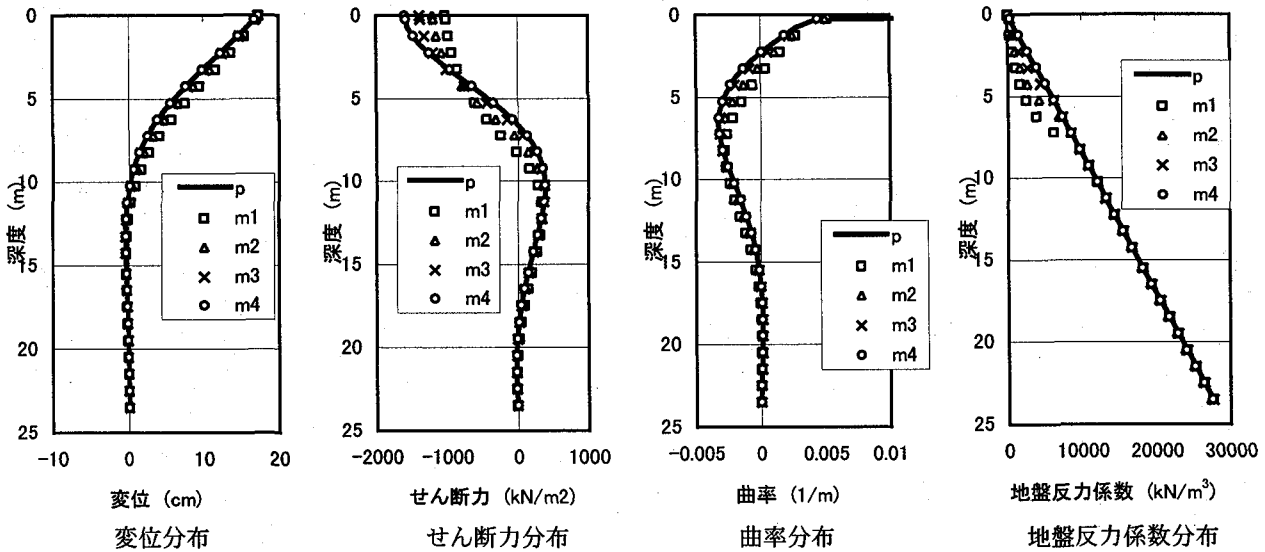


図-5 分布図（杭頭部水平変位 17.5cm の時）

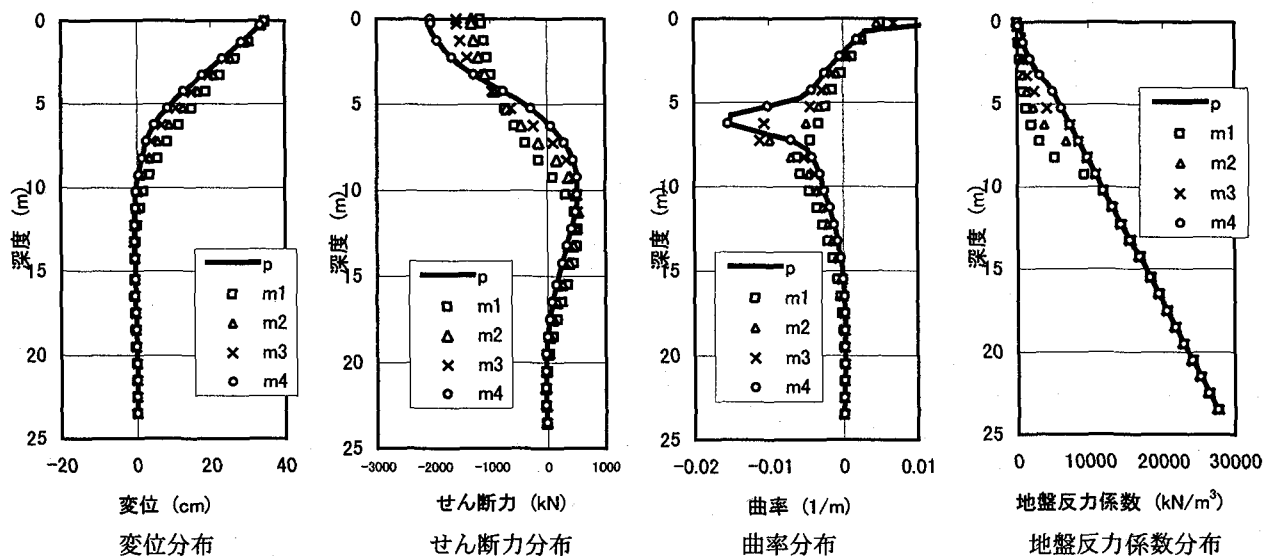


図-6 分布図 (杭頭部水平変位 35cm の時)

7. まとめ

破壊時の釣り合いと、歪みレベルの小さい時の力の釣り合いを合わせ、1 G 場での杭、地盤、破壊時の相似則を提案した。また、杭の歪み縮尺と地盤の歪み縮尺を一致させないかわりに地盤剛性、杭径に自由度を持たせた近似相似則を導いた。この近似式は、歪み縮尺が 1 となる通常の相似則 (杭長と杭径が同じ比) や杭の歪みと地盤の歪みが一致する厳密な相似則が含まれている一般型である。

近似した相似則でのシミュレーションの結果、地盤の破壊が小さい範囲では、近似式が使えるものの、大変形する様な破壊実験には、厳密な相似則にのみ従った。模型 (特に地盤) の製作上、厳密な相似則が適用できない場合、変位-荷重曲線が実際より上がらない (荷重値が小さくなる) 点に注意が必要である。

本相似則は、拘束圧によって地盤の歪みによる地盤せん断剛性の低下率が異なる影響を含んでいないため、破壊に至るまでの非線形領域では必ずしも満足していない。また、本相似則の検討は、梁-バネ系の簡単なモデルで地盤バネも簡易的にパイリニアでモデル化しており、モデル化の問題も残っている。今後は、スケール比を変えた実験を通して相似則の妥当性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 寺師昌明, 北詰昌樹, 川畑浩二: 砂地盤中の単杭の横抵抗に関する遠心模型実験, 土質工学研究発表講演集, pp.1431-1434, 1988
- 2) 土屋富男, 高田健司, 乃村和浩ら: 水平力を受ける杭の大地震時の設計に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.517-518, 1999.
- 3) 広瀬利光, 田蔵隆, 清水勝美ら: 杭基礎模型の破壊振

動実験, 第 44 回土木学会年次講演会講演梗概集, 第 1 部, pp.1062-1063, 1989.

- 4) 佐藤正義, 田地陽一, 西村昭彦ら: 基礎と地中埋設構造物の大型振動実験 その 11, 第 33 回地盤工学研究発表講演集, pp.1061-1062, 1998.
- 5) Rocha, M.: The possibility of solving soil mechanics problems by use of models, *Proc. of 4th. I.C.S.M.F.E.*, Vol.1, pp.183-188, 1957.
- 6) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第 275 号, pp.69-77, 1978.
- 7) 国生剛治: 低拘束圧下の砂の動的物性と模型振動実験に適用される相似則, 第 15 回地盤工学研究発表講演集, pp.265-268, 1979.7.
- 8) Iai, S.: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1 G Gravitational Field", *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.27, No.3, pp.3-24. (1988),
- 9) 風間基樹, 稲富隆昌: 遠心力載荷模型実験手法の振動実験への適用について, 土木学会論文集, No.477, 1-25, pp.83-92, 1993.10.
- 10) Y. L. Chang: Discussion on "Lateral pile loading tests" by Feagin, *Trans., ASCE*, Vol.102, pp.272-278, 1937.
- 11) 建設省建築技術審査委員会建築基礎検討小委員会: 地震力に対する建築物の基礎の設計指針, 日本建築センター, 1984.
- 12) Francis, A. J.: Analysis of Pile Groups with Flexural Resistance, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, Vol.90, No.SM3, pp.1-32, 1964.
- 13) 沢口正俊: 杭の横抵抗における地盤常数に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.7, No.2, 1968.

(1999 年 9 月 17 日受付)