

引揚力を受ける杭の荷重変形関係モデル

A THEORETICAL MODEL ON LOAD-DISPLACEMENT RELATIONSHIP OF PILE FOUNDATION SUBJECTED TO UPLIFT LOAD

佐藤 博*, 松島 学**, 高橋秀明***

Hiroshi SATO, Manabu MATSUSHIMA and Hideaki TAKAHASHI

*東京電力株式会社 電力技術研究所 土木グループ(〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

**工博 東電設計株式会社 技術開発本部 コンクリート・材料チーム(〒110 東京都台東区東上野 3-3-3)

***工修 東電設計株式会社 第二土木本部 送変電土木部(〒110 東京都台東区東上野 3-3-3)

This paper describes a theoretical model on load-displacement relationship of pile foundation subjected to uplift load. This theoretical model has the characteristics, such as, 1) Elasto-plastic stress-strain relationship of soil around the pile is taken into account. 2) Shear band where shear strain of soil is concentrated is generated around the pile during uplift load closes to maximum value, and this phenomenon is generally observed in the past field tests. 3) Influenced area of the ground around the pile by uplift load is wide near the surface of the ground and is narrow near the deep part of the pile, and this phenomenon is also generally observed in the past field tests.

In order to investigate the adequacy of the model, a steel pile pull-out test was conducted in mudstone. The diameter of the pile is 40cm and the length of the pile under the ground is 3m. The theoretical solution of uplift behavior of pile foundation was discussed by comparing to those of the field test. The results of theoretical solution, the load-displacement relationship, the distribution of surface ground displacement and the distribution of the friction around the pile agree well with those in the field test.

Key Words: *theoretical model, uplift behavior of pile, elasto-plastic relationship of soil, shear band, influenced area around the pile*

1. まえがき

一般に、杭基礎に作用する主たる荷重は押込力と水平力である。しかし、上部構造物に風、地震、波浪、船舶等による横方向荷重が作用した場合には、杭基礎に引揚力が伝達される。このような構造物として電力施設では、送電用鉄塔基礎、火力発電所燃料受け入れ施設などがあり、引揚力が支配的になる場合が多いのが特徴である。

杭の引揚力に関する研究は鉛直支持力や水平抵抗力に関するものに比べて相対的に少なく、引揚抵抗力の評価方法に対する十分な検証がなされていないのが現状である¹⁾。

このような背景から、港湾施設の技術上の基準²⁾、道路橋示方書³⁾等の各種基準によれば、杭の引揚抵抗力は試験によって求めることが推奨されているものの、試験を行わない場合には、押込時の杭周面摩擦力の算定方法に準拠しているのが実状である。さらに、引揚抵抗に関する研究データが相対的に乏しいことに加え、ストレスパスの違いから押込力が作用する場合に比べて周辺地盤をゆるめる傾向をもつこと、杭が引抜かれた場合の上部構造に与える影響が大きいこと等

から、押込時に比べて摩擦力を小さく取ったり⁴⁾、安全率を大きくすることがなされている^{2), 3)}。

押込と引揚の周面摩擦力の比較に関しては、いくつかの報告がある。Mansur, Hunter⁵⁾は中密砂層における鋼管杭、コンクリート杭、H型鋼杭、木杭について押込と引揚実験を行い、引揚時の摩擦力は押込時に比べ小さいと報告している。また、鬼頭ら⁶⁾は砂礫層における場所打ち杭の押込と引揚実験から、引揚時の摩擦力は押込時に比べて小さくなり、特に引揚に伴ってゆるみやすい土かぶりの浅い領域ではその差が大きくなると報告している。一方、Coyle ら⁷⁾、O'Neil ら⁸⁾はそれぞれ砂質土、粘性土における現場載荷実験から、引揚時の摩擦力は押込時とほぼ等しいと報告している。このように引揚と押込の摩擦力の相違については断定できるような結果は得られていない。

杭の引揚に対する合理的な設計法を確立するためには、引揚に関する実データの蓄積と実データを踏まえた適切なモデルを構築することが重要である。杭の引揚耐力は周面摩擦力によって決定され、周面摩擦力は杭周辺地盤の弾塑

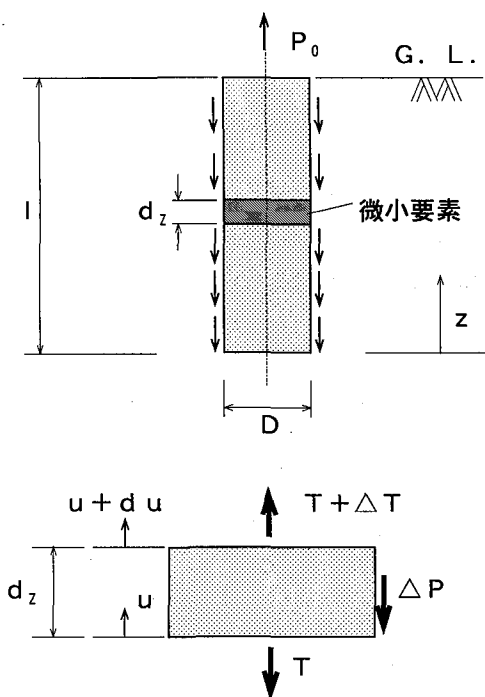


図-1 引揚力を受ける杭の力の釣り合い

性挙動に強く依存する。従ってモデルの構築に当たって、実験データに基づく周辺地盤の弾塑性挙動を取り入れることが重要である。

本研究は、周辺地盤の弾塑性挙動を考慮するとともに、引揚により影響を受ける周辺地盤の範囲を既往の実験データ⁶⁾から杭下端で小さく、杭頭部で大きくなる特性があること、さらに終局時には杭近傍にせん断ひずみが局所化したすべり層^{1), 9)}が形成されることを考慮したモデルを提案する。さらに、鋼管杭の現場載荷実験を行い、モデルの理論解と実験結果を比較し、本モデルの妥当性を検討する。

2. 引揚力を受ける杭の理論解

(1) 理論解

図-1に示すように、引揚力を受ける杭における微小要素に働く力の釣り合いを考える。杭体は弾性で、杭側面の地盤の摩擦力により支持されていると仮定する。引揚に対して杭を支持する力には、この摩擦力の他に引揚に伴い杭下端面と地盤との間に発生する引張力と負圧がある¹⁰⁾。引張力は多くの場合小さいこと、また負圧は主に非排水状態の飽和粘性土地盤で生じやすいという特殊性があること、さらに構造上安全側に作用することを考慮し、本研究では杭を支持するのは杭周面の摩擦力のみと仮定した。

図より力の釣合は式(1)のように表される。

$$\frac{dT}{dz} dz - \Delta P = 0 \quad (1)$$

ここで、Z: 杭下端を原点とした鉛直上向き方向の座標

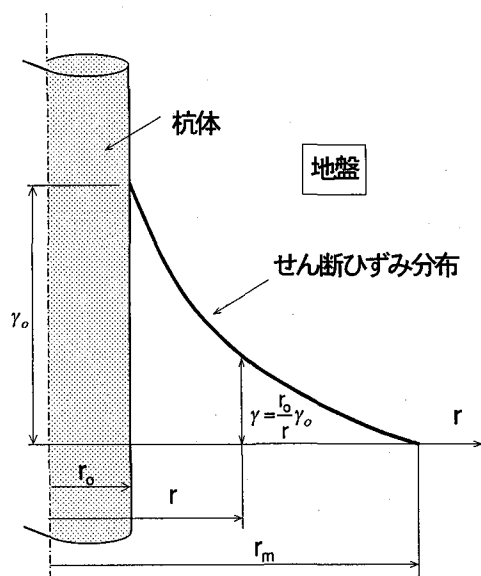


図-2 杭周辺地盤のせん断ひずみ分布(弾性域)

u: 微小要素の鉛直変位

T: 微小要素の鉛直方向断面力

ΔP: 周辺地盤から微小要素に作用する摩擦力

杭体断面の直ひずみ ε は、式(2)で表される。

$$\varepsilon = \frac{du}{dz} = \frac{T}{EA} \quad (2)$$

ここで、E: 杭体のヤング率、A: 杭の断面積

微小要素の側面の摩擦力 ΔP は、杭径を D とすると、式(3)のように求められる。

$$\Delta P = \pi \cdot D \cdot \tau_0 dz \quad (3)$$

ここで、τ0: 杭周面におけるせん断応力(周面摩擦力)

上記の式(2)、(3)を力の釣合式(1)に代入して、一般式は式(4)で表される。

$$\frac{d^2 u}{dz^2} EA - \pi \cdot D \cdot \tau_0 = 0 \quad (4)$$

境界条件は、杭頭部で荷重 P0 と釣合い、杭下端で荷重が 0 になる必要があり、式(5)で表すことができる。

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = 0 \quad \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=l} = \frac{P_0}{EA} \quad (5)$$

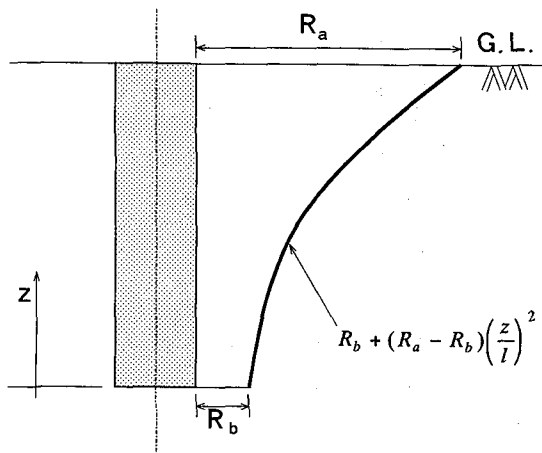


図-3 せん断ひずみの影響範囲

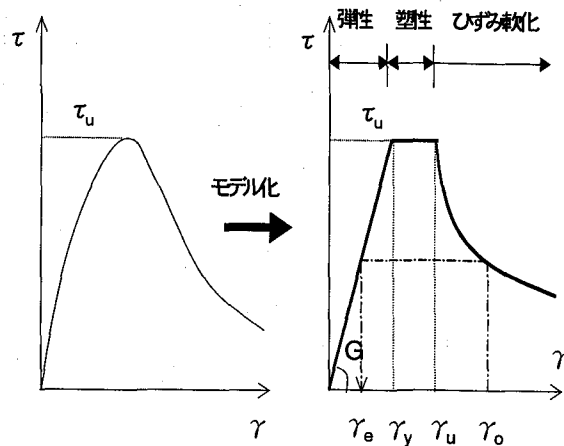


図-4 地盤の応力・ひずみ関係のモデル化

(2) 杭および地盤が弾性体の場合

地盤を弾性体とした場合の杭周辺地盤のせん断ひずみ分布を図-2のように仮定する。本研究では、杭周辺地盤中に生じる応力は、鉛直面上のせん断応力が卓越し、それは杭中心から反比例すると仮定した¹¹⁾。この考えは、弾性論による Mindlin の解と一致する。

図-2を参照し、せん断ひずみ $\gamma(r)$ は、式(6)、(7)から式(8)で表される。

$$\gamma(r) = \frac{r_0}{r} \gamma_0 \quad (6)$$

$$\tau_0(\gamma_0) = G \cdot \gamma_0 \quad (7)$$

$$\gamma(r) = \frac{\tau_0(\gamma_0) r_0}{G \cdot r} \quad (8)$$

ここで、 γ_0 、 τ_0 : それぞれ杭周面における地盤のせん断ひずみ、せん断応力(周面摩擦力)

G : 地盤のせん断弾性係数

従って、変位 u は式(8)を杭側面から無限遠まで積分することにより求めることができる。しかし、実際の地盤は完全な弾性体ではないことから、ひずみが無限遠まで及ぶことはなく、ここでは工学的にみて地盤のひずみが無視できるほど小さくなる距離 r_m (影響範囲) まで積分すると式(9)のように求めることができる¹¹⁾。

$$u = \frac{\tau_0(\gamma_0) r_0}{G} \int_{r_0}^{r_m} \frac{1}{r} dr = \frac{\tau_0(\gamma_0) r_0}{G} \ln \frac{r_m}{r_0} \quad (9)$$

ここで、引揚荷重が作用する場合の地盤の影響範囲 r_m については、境界条件の違いにより深度方向に大きさが異なると考えられる。即ち、地表面に近い杭頭部ではせん断変形の拘束が小さいため r_m は大きく、逆に杭下端では周辺地盤に

よる拘束が大きいため r_m は小さいと考えられる。このような現象は既往の引揚荷重試験からも確認されている⁹⁾。そこで本研究では、図-3に示すように杭下端は $r_m = R_b$ までを、杭頭部は $r_m = R_a$ までを影響範囲とし、その間を式(10.b)に示すように二次関数で補完することにした。 R_a は、弾性論による既往の解析や実験によると杭径の 10~75 倍程度と言われている¹¹⁾。また、 R_b は、 R_a に比べ非常に小さく、後述するすべり層の幅程度と考えられる。

$$Z=0 \quad r_m = R_b \quad (10.a)$$

$$0 < z < l \quad r_m = R_b + (R_a - R_b) \left(\frac{z}{l} \right)^2 \quad (10.b)$$

$$Z=l \quad r_m = R_a \quad (10.c)$$

以上から、式(7)、(9)をそれぞれ一般式(4)の τ_0 、 u に代入すればよい。

(3) 地盤が弾塑性の場合

杭基礎の対象となる地盤は土質地盤から軟岩まで広い範囲に及ぶ。これらの地盤の弾塑性挙動は、一般に正規圧密状態の土質地盤では降伏後のひずみ軟化は起こりにくい、過圧密状態ではひずみ軟化する傾向にある¹²⁾。また軟岩についても杭の設置深度程度の拘束圧下では、降伏後のひずみ軟化がみられる¹²⁾。これらのことを考慮し、地盤の弾塑性挙動のせん断応力とせん断ひずみの関係を図-4のように①弾性域、②塑性域、③ひずみ軟化域の3つの状態にモデル化する。

① 弾性域 ($\gamma_y > \gamma_0$)

$$\tau = G \cdot \gamma_0 \quad (11.a)$$

② 塑性域 ($\gamma_y < \gamma_0 < \gamma_u$)

$$\tau = \tau_u \quad (11.b)$$

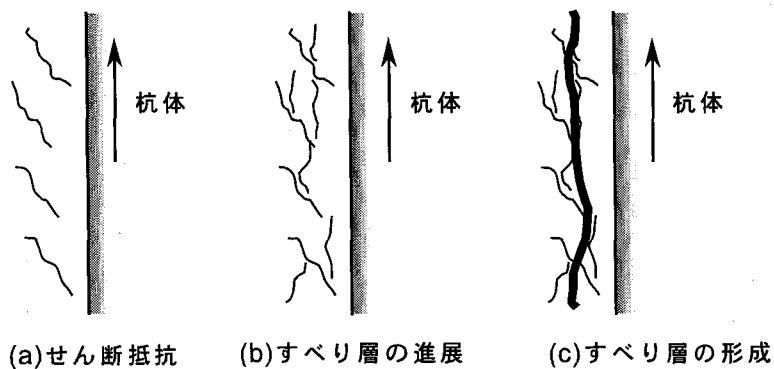


図-5 引揚げに伴う杭近傍地盤のすべり層の形成過程⁹⁾

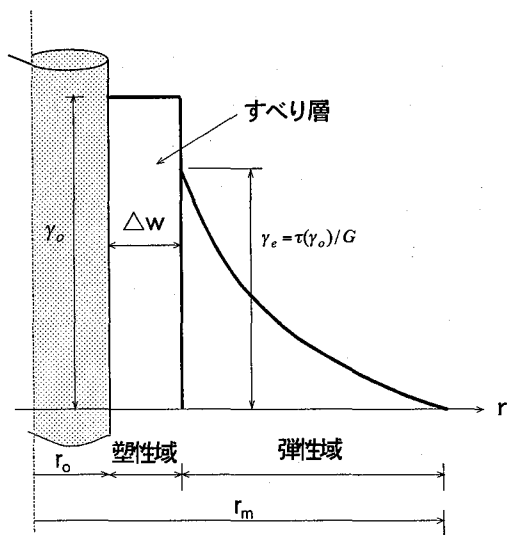


図-6 杭周辺地盤のせん断ひずみ分布(塑性域)

じると考え、地盤が弾塑性の場合の地盤モデルを図-6のように仮定する。図に示すように、引揚力が大きくなり杭近傍地盤が塑性化すると、ひずみが局所化してすべり層(幅: Δw)が形成され、その外側の部分は弾性のまま残されると仮定した。この現象は、実際の引揚载荷実験でも見られる現象であり¹⁾、送電用鉄塔基礎等で用いられている設計式¹⁴⁾のせん断法の裏付けとなっている。すべり層の大きさは、杭径や荷重の大きさに依らず、地盤固有の特性により決定される値と言われている¹⁵⁾。

杭の微小要素の摩擦力および変位は、弾性域とひずみ軟化域を含めた塑性域に区分され、式(12)のように求められる。

① 弾性域 ($\gamma_y > \gamma_0$)

$$\tau_0 = \tau_0(\gamma_0) \quad (12.a)$$

$$u = \frac{\tau_0(\gamma_0) r_0}{G} \ln \frac{r_m}{r_0} \quad (12.b)$$

② 塑性域 ($\gamma_0 > \gamma_y$)

$$\tau_0 = \tau_0(\gamma_0) \quad (12.c)$$

$$u = u_e + u_p \quad (12.d)$$

ここで、 u_e 、 u_p :それぞれ変位の弾性変形分、塑性変形分

u_p は塑性化したすべり層におけるひずみを一定と仮定したことから、式(12.e)で表される。

$$u_p = \gamma_0 \cdot \Delta w \quad (12.e)$$

また、せん断応力 $\tau_0(\gamma_0)$ がすべり層に発生したとき、すべり層とその周辺地盤との境界においてひずみは不連続であるが、せん断力が釣り合うことから、図-4に示すとおり、境界

③ ひずみ軟化域 ($\gamma_0 > \gamma_u$)

$$\tau = \tau_u (\gamma_u / \gamma_0)^n \quad (11.c)$$

引揚げに伴う杭周辺地盤の破壊のメカニズムについては Stewart, Kulhawy⁹⁾の研究があり、図-5のような杭近傍地盤のすべり層の形成過程が示されている。これによると、初期の荷重段階では引揚げに伴い杭近傍に受働的なクラックが断続的に発生し(図-5. (a))、荷重が増加して杭の変位が大きくなると杭に沿ったクラックが形成される(図-5. (b))。終局段階では断続的なクラックがつながり、杭近傍にすべり層が形成されるとしている(図-5. (c))。また、単純せん断装置を用いて鋼材と砂や粘土の摩擦実験を行った岸田ら¹³⁾の研究がある。これによると、鋼材が非常になめらかな場合(表面粗さが $20 \sim 30 \mu m$ 程度以下)は鋼材と土の間ですべりが生じるが、これより粗くなると土中に破壊面が生じるとされている。本研究では、実際の杭の表面は粗く、地盤中に破壊が生

表-1 地盤条件

項目	単位	試験値
単位体積重量	gf/cm ³	1.52~1.81, 平均 1.63 (n=48)
一軸圧縮強度	kgf/cm ²	32~54, 平均 44 (n=28)
静弾性係数	"	4.2~7.7×10 ³ 平均 5.9×10 ³ (n=28)
変形係数	"	1.9×10 ³ (n=1)
せん断抵抗角	度	40 (n=1)
N値	—	50 以上

注:nは試験数量を示す。

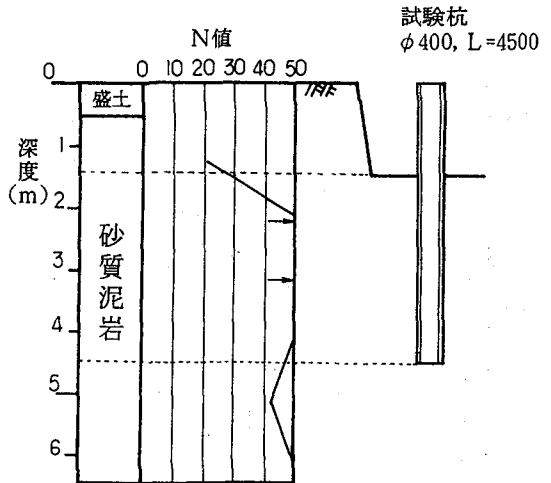


図-7 ボーリング調査結果

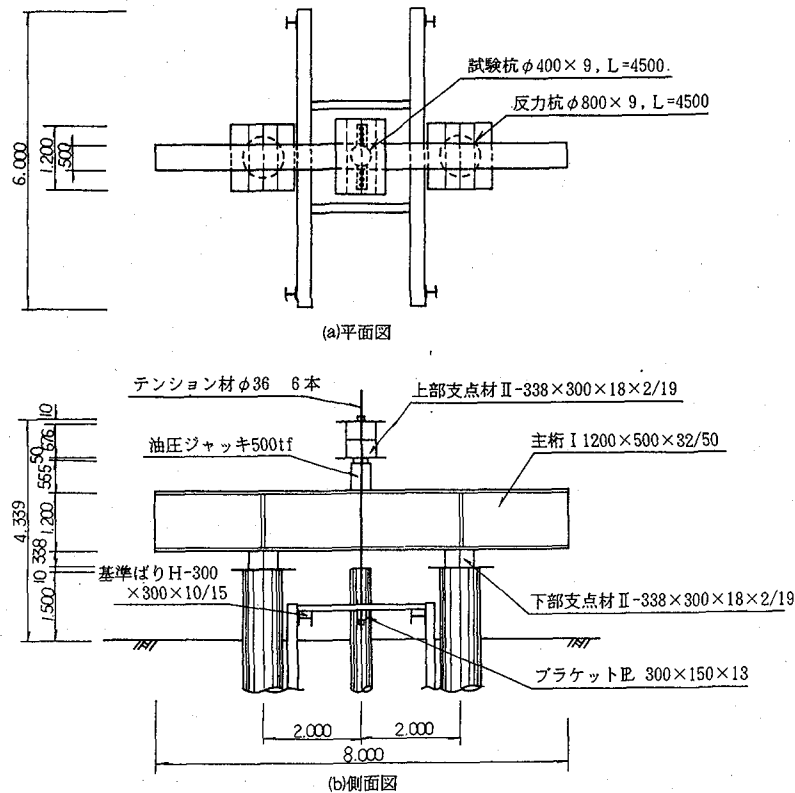


図-8 実験装置の概要

における弾性せん断ひずみ γ_e は $\gamma_e = \tau_0(\gamma_0)/G$ となる。この γ_e が半径方向の距離に反比例して小さくなると仮定することから、 u_e は式(12.f)で求められる。

$$u_e = \frac{\tau_0(\gamma_0)(r_0 + \Delta w)}{G} \ln \frac{r_m}{r_0 + \Delta w} \quad (12.f)$$

以上から、式(12)を一般式(4)の τ_0 、 u に代入すればよい。

3. 鋼管杭の引揚実験

すべり層幅、影響範囲を定量的に把握し、理論解で求められる杭と地盤の挙動を実際の挙動と比較することにより理論解の妥当性を検討するため、実規模大杭基礎の現場引揚げ試験を実施した。試験杭は火力発電所燃料受け入れ施設などの基礎に多く用いられている鋼管杭とし、杭の打設方法も標準的な工法である埋込み工法とした。

(1) 地盤条件

試験地点の地質は新第三期鮮新世富岡層の様な砂質泥岩であり、地層の傾斜は緩やかである。岩層は暗緑灰色を呈する泥岩を主体とし、砂質シルト岩、砂岩、固

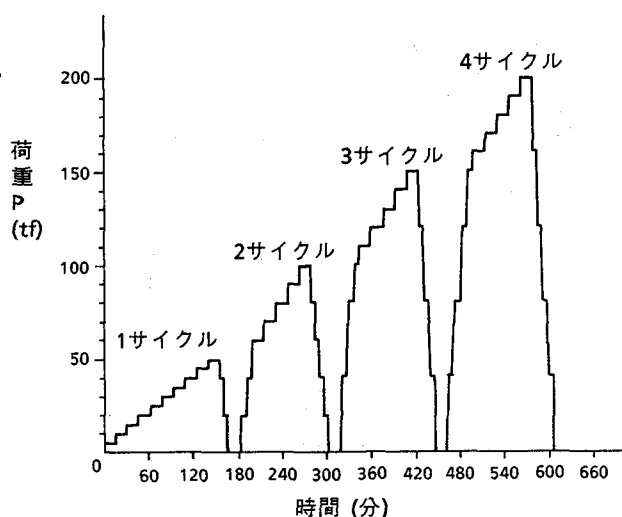


図-9 荷重パターン(計画)

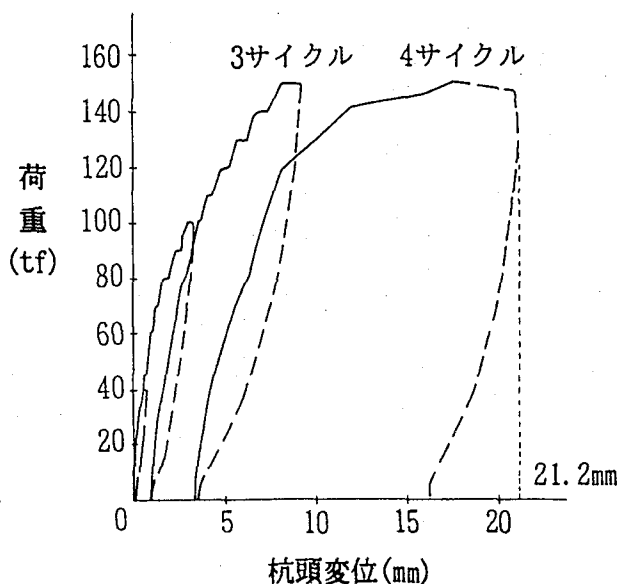


図-10 荷重と杭頭変位の関係

結した砂を挟んでいる。また、その上部には第四期洪積層が不整合に数mから十数m堆積しているが、試験地点ではこれらの洪積層は掘削され、砂質泥岩が露頭している。試験地点から 100m程度以内の周辺地盤の地質調査結果を表-1に示す。また、試験杭の近傍で実施したボーリング調査結果(φ 66mm)を図-7に示す。単位体積重量、一軸圧縮強度および静弾性係数は、周辺地盤のボーリング(φ 66mm)より採取した試料を整形し、作成したφ 50×h100mm の供試体の試験結果である。変形係数は図-7に示す試験杭近傍ボーリングの GL-4.5mにおいて実施した孔内水平載荷試験(等圧分布載荷方式)から求めた値である。せん断抵抗角は試験杭の近傍から採取したブロックサンプリング試料を整形し、作成したφ 100×h40mm の供試体を用いて実施した単純せん断試験から求めた値である。また、周辺地盤のボーリング 28 孔の標準貫入試験によるN値は概ね 50 以上と試験杭傍ボーリングとほぼ同様の結果である。表-1に示すように物性値に大きなばつきは見られず、試験地点は一般的な砂質泥岩である。また、施工過程から対象地盤は過圧密状態にあることがわかる。

(2) 実験方法

実験装置の概要を図-8に示す。試験杭は杭径 40cm($t=9$ mm)、杭長 4.5m、反力杭は杭径 80cm($t=9$ mm)、杭長 4.5m の鋼管杭(開端杭)であり、地盤中に 3m 打設した。杭体と周辺地盤との間には水セメント比 40%のセメントミルクを注入し、一ヶ月間養生した。

荷重方法は、土質工学会(現地盤工学会)「杭の鉛直載荷試験・同解説」に準じ、荷重方法Aの多サイクル方式によって実施した。荷重速度は増荷時 10tf/分、減荷時 20tf/分、荷重保持時間は 15 分とした。荷重パターンを図-9に示す。

引揚に伴う杭体および地盤の挙動を把握するため、荷重

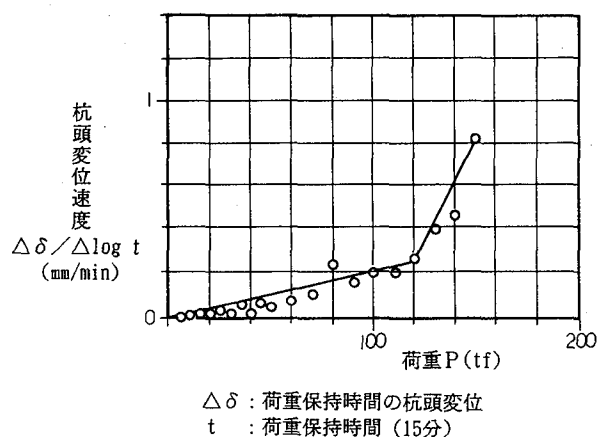


図-11 荷重と杭頭変位速度との関係

、杭頭変位、他、杭の軸ひずみ、周辺地盤の地中鉛直変位、地中鉛直ひずみおよび地表面の鉛直変位を計測した。杭ひずみは、鋼管外側に鋼製チャンネルで保護したひずみ計を設置し、計測した。地中鉛直変位は、ボーリング孔の所定深度に設けたアンカーとこれに連結したロッドにより地表とアンカーの相対変位を地表の変位計で計測し、この相対変位と図-8に示した基準より計測した地表面変位から算出した。また地中ひずみはボーリング孔の所定深度に相対変位計を設置し、これを周辺地盤の剛性と同程度の剛性のセメントグラウトで固めて地盤と同じように挙動させるようにし、この相対変位から求めた。

(3) 実験結果

a. 荷重と杭頭変位の関係

荷重と杭頭変位との関係を図-10に示す。杭頭変位は

荷重とともに増加し、150tf で 9.3mm(3 サイクル)であった。除荷後再度載荷(4 サイクル)した際には、一時的には 150 tf まで載荷できたものの、その荷重では所定の時間を保持できず、その後杭頭変位が増加し続けたため、杭頭変位が 21.2mm の時点で試験を終了した。また、図-11 に示す荷重と杭頭変位速度の関係から降伏荷重は 120tf と考えられ、この時杭頭変位は 4.9mm であった。

b. 杭周辺地盤の挙動

杭周辺地盤における鉛直方向の地表面変位、地中変位ならびに地中ひずみの分布を図-12 に示す。地表面変位は、荷重が小さい段階では、荷重の増加に伴い杭中心から 3m までの範囲で比較的なめらかに分布しているが、終局段階では杭頭変位との間に明瞭な離れが認められ、2章で述べたような杭周面にすべり層の存在がうかがえる。今回の試験結果からは、その幅は 0 から 30cm の間と考えられる。

地中変位は、杭下端より浅い部分において全般的に深部ほど小さくなり、それ以深では顕著な動きを示していない。また 1m 以浅の変位がそれ以深に比べて荷重の増加に伴って大きな動きを示しており、この部分が杭の引揚に伴って持ち上げられるような挙動をしている。このように、杭の引揚に伴い影響を受ける範囲は、地表では杭中心から 3m 程度、深度方向には杭下端を頂点とするコーン状の範囲であり、2章で述べた影響範囲の特性とよく一致している。

本試験結果から、影響範囲は地表で杭中心から約 3m、即ち杭径の 7~8 倍であり、2章で述べた一般的な値よりやや小さい結果となった。また、杭下端は、すべり層程度の範囲と考えられる。

4. 実験結果と理論解の比較

現場引揚実験から求めたすべり層幅、影響範囲を用いて理論解による計算を行い、荷重と杭頭変位の関係、地表面変位分布および周面摩擦力分布について実験結果と比較し、理論解の妥当性を検討した。

(1) 解析モデル

実験からすべり層幅 Δw は 0~30cm の間であるが、ここでは 30cm とした。また影響範囲 r_m は、地表で 3m(R_d)、杭下端ではすべり層幅程度とし 0.3m(R_b)とした。

次に地盤モデルは、前述の試験地点から採取したブロックサンプル試料の単純せん断試験結果(供試体寸法:径 100mm、高さ 40mm)から作成した。図-13 に単純せん断試験による砂質泥岩の応力・ひずみ関係を示す。これによると、拘束圧によらずせん断応力はひずみが 1%程度で

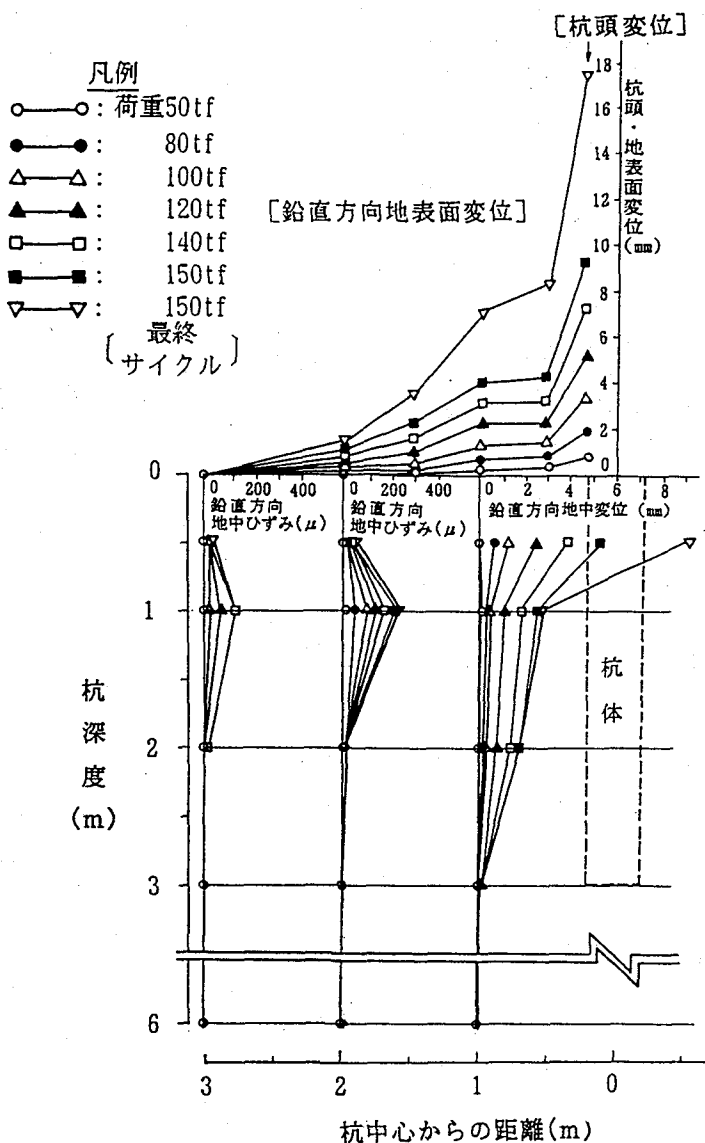


図-12 杭周辺地盤の挙動

ピークに達し、その後ひずみ軟化して一定値で安定となる挙動を示している。試験地点は十数m程度の原地山を掘削、造成し過圧密状態にあることを考慮すれば、 K_0 は3~6程度^{10), 16)}、拘束圧は3kgf/cm²と想定される。このことから地盤モデルは拘束圧が2kgf/cm²と5kgf/cm²の試験結果を用い、ピーク強度、残留強度を内挿し、ピーク強度までの剛性を一定として作成した。このようにして作成した地盤モデルを図-13 に実線で併せて示す。

(2) 実験結果と解析結果の比較

a. 荷重と杭頭変位の関係

荷重と杭頭変位の関係について、実験値と計算値を比較して図-14 に示す。荷重の初期段階については比較的良好に一致しているが、荷重が 80tf 以上になると両者に差異が認められる。これは図-13 に示すように、単純せん断試験結果はピーク強度に近づくにつれ剛性が低下しているのに対して、地盤モデルはピーク強度まで弾性と仮定

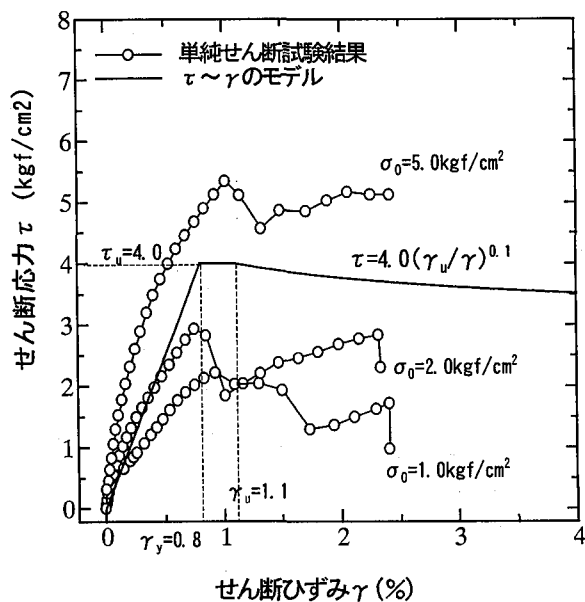


図-13 単純せん断試験結果と地盤モデル

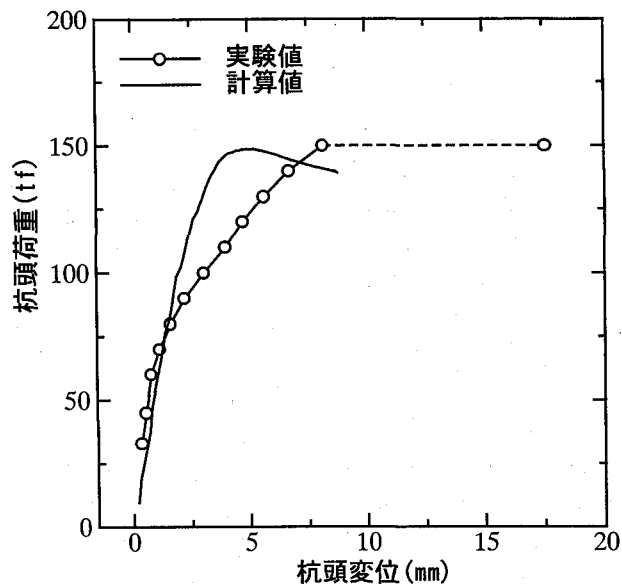


図-14 荷重と杭頭変位の関係
(実験値と計算値の比較)

していることが主要因と考えられる。杭の引揚耐力については実験値を再現できている。また、前述のとおり、実験では最終載荷サイクルにおいてピーク荷重を所定時間保持できなかったことから、この間を波線で示している。実際には計算結果と同様にひずみ軟化していると考えられる。

b. 地表面変位の分布

杭周辺地盤の変位のうち地表面変位について、実験値と計算値を比較して図-15に示す。荷重が50tfの時には両者はよく一致しているが、100tf、150tfの時には、実験値に比べて計算値は小さい結果となっている。これは、前述のように地盤モデルをピーク強度まで弾性と仮定していることが主要因と考えられる。地盤の変形量を再現するためには材料の非線形性をモデル化することが必要であり、今後の課題である。

また、実験結果のところで述べたように、最大荷重150tfの時に地表面変位と杭頭変位がかい離する傾向は計算値でも再現できている。この時、杭頭変位と杭に最も近い地表面変位から計算されるせん断ひずみは、実験値で約2%、計算値で約1%であり、また後述する図-16から杭頭部の周面摩擦力は実験値、計算値ともに4kgf/cm²に達していることから、図-13の応力ひずみ関係から見て杭頭部周面の地盤は塑性化していると考えられる。そのため、実験、計算ともに地表面変位と杭頭変位がかい離し、すべり層が生じていると考えられる。

c. 周面摩擦力の深度分布

杭体の軸方向ひずみから軸力を求め、式(13)を用いて求めた周面摩擦力について、実験値と計算値を比較して図-16に示す。軸力は、本実験では杭の軸ひずみより杭体は弾性領域にあることから、軸ひずみに杭体のヤング率と断面積を乗じて求めている。

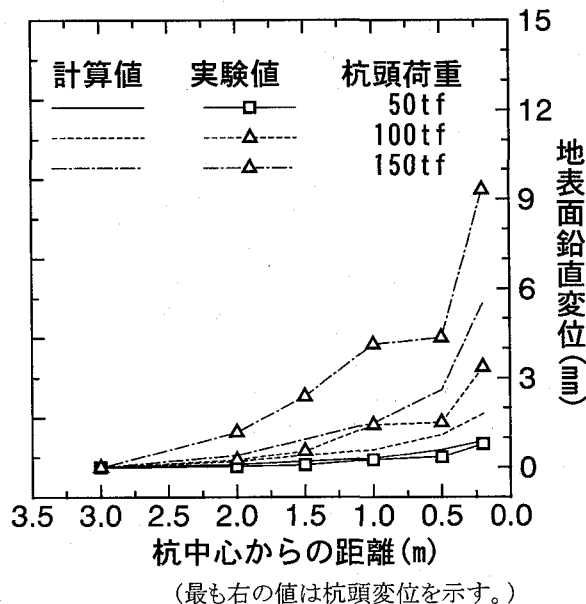


図-15 地表面変位の分布
(実験値と計算値の比較)

$$f_{i,i+1} = (p_{i+1} - p_i) / (\pi D L_{i,i+1}) \quad (13)$$

ここで $f_{i,i+1}$: 杭深度 $i \sim i+1$ 間の周面摩擦力

p_i : 杭深度 i における杭の軸力

D : 杭径

$L_{i,i+1}$: 杭深度 $i \sim i+1$ 間の区間長

周面摩擦力の実験値は、荷重が小さい段階から杭深部に行くほどで大きくなる台形に近い分布形状を示す傾向

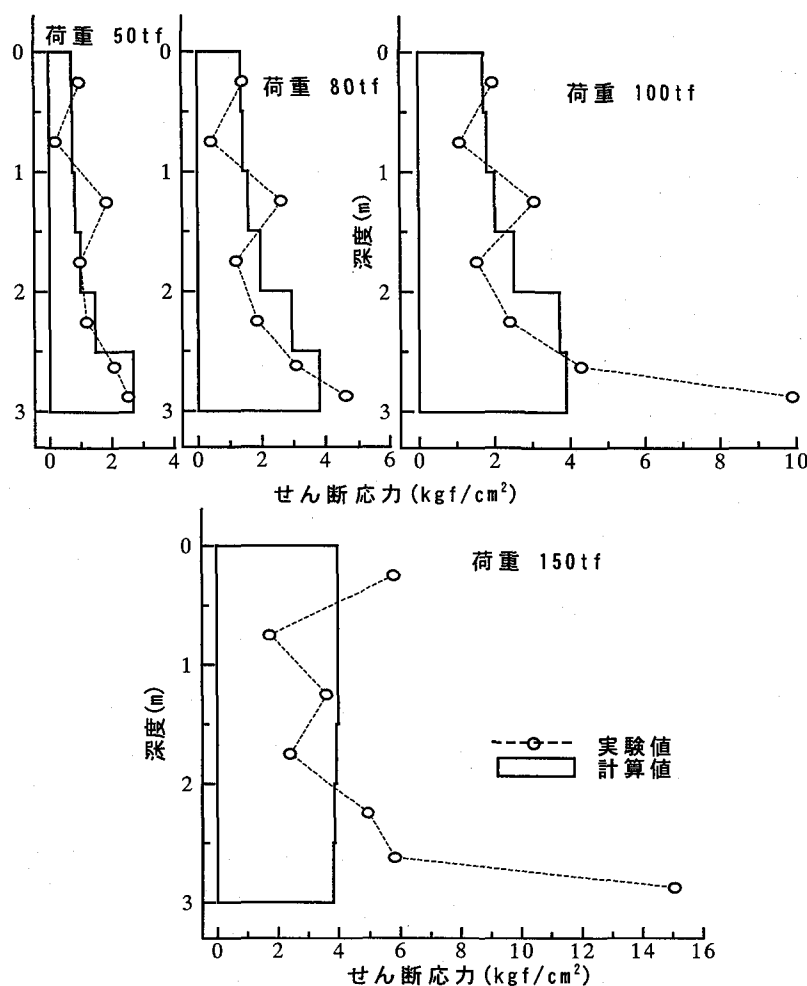


図-16 周面摩擦力(せん断応力)の分布
(実験値と計算値の比較)

が認められる。これは荷重が杭下端までよく伝達されていることを示しており、杭の根入れ長が3mと短いと考えられる。荷重の増加に伴い、杭下端近傍の限られた区間を除いては、周面摩擦力の分布は台形分布が保持され、この区間を除いては増分荷重が杭長に亘って分担されている。また、杭下端近傍の周面摩擦力は終局段階に近づくにつれ大きな値を示す傾向が認められる。

これに対し、計算値も荷重の初期段階から台形分布を示し、前述の杭下端近傍を除いては実験結果を再現している。また、計算値は最大荷重 150tf の時には杭下端でひずみ軟化が進行しているが、実験値はひずみ軟化がみられず、周面摩擦力が大きくなっている。実験終了後、杭周辺を掘削し杭下端面を観察したところ地盤と縁が切れていたこと、また載荷速度から考えて杭下端面に負圧が発生したとは考えにくいことから、杭下端面の軸力を0として周面摩擦力を算定している。杭下端部で周面摩擦力が大きくなった主要因の1つとしては、今回提案したモデルでは考慮していない杭下端より深部の地盤の影響と考えられる。杭の周面に働くせん断力は周辺地盤の応力を積分したも

のであることから、杭下端近傍では引揚に伴って生じる杭より深い地盤の応力の影響が生じているものと考えられる。また、実験値の周面摩擦力が 4kgf/cm^2 を大幅に超えてもひずみ軟化しないことについては現時点でその原因は不明であり、今後の課題と考えている。

但し、本実験では、このように周面摩擦力が大きくなる区間は短く、引揚耐力への影響は軽微なものと考えられる。一般に、杭が長くなれば杭下端まで伝達する荷重は小さくなることから、杭下端より深部の地盤の影響はさらに小さくなると考えられる

5. まとめ

杭の引揚に伴う杭と地盤の挙動に関する理論解を求め、鋼管杭の現場実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。その結果得られた知見を示すと以下の通りである。

(1) 杭の引揚に伴う周辺地盤の弾塑性挙動、杭周面のすべり層の存在ならびに周辺地盤の影響範囲とその分布特性を考慮した理論解を提案した。

(2)理論解で仮定した、終局段階では杭周面にすべり層が形成されること、引揚に伴う地盤の影響範囲は杭頭部で大きく、杭下端で小さい特性を示すことを現場実験により確認することができた。

(3)現場の実験結果から得られたすべり層の幅、影響範囲の大きさをを用い、提案モデルで計算した結果と、荷重・杭頭変位の関係、地表面変位分布および周面摩擦力分布の実験結果を比較した。その結果、終局荷重、地表面変位の分布形状とすべり層の形成および周面摩擦力が杭深部で大きくなる台形分布を示すこと等を概ね再現することができた。しかしながら、終局に近い段階における杭頭変位、地盤変位および杭下端部の周面摩擦力を定量的に再現することはできなかった。これは今回提案したモデルが、地盤は降伏まで弾性と仮定していること、杭下端より深部の地盤の影響を考慮していないことが主要因と考えられ、これらを考慮に入れたより精度の高いモデルの構築が今後の課題である。

さらに、今回提案したモデルにおいて、すべり層の幅は地盤特性に依存すること、周辺地盤の影響範囲の大きさは杭と地盤の挙動に依存することから、今後は既往の多くの載荷実験結果を用いてこれらの値を同定し、より一般化したモデルを構築していくことが重要と考えている。

参考文献

- 1)伊藤圭典、前原雅幸:場所打ち杭の引抜き抵抗に関する実験と考察、土木学会論文集 第 376 号/Ⅲ-6、pp.59~ 67、1986.12
- 2)(社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻)、pp.369~373、1989.6
- 3)(社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 IV下部構造編、pp.337~338、1996.12
- 4)(社)日本建築学会:建築基礎構造設計指針、pp.263~267、1991.2
- 5)Mansur,C.I.,and Hunter, A.H.: Pile Tests-Arkansas River Project, Proc. of ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1545~

1582, Sept.,1970

- 6)鬼頭、田辺、佐藤、古賀:砂礫層における場所打ち杭の押し込み時と引き抜き時の挙動の違い、第 31 回地盤工学研究発表会、1996.7
- 7)Coyle,Harry M. and Castello Reno R.:New Design Correlations for Piles in Sand, Proc. of ASCE,Vol.107, No.GT7,pp.965~986,July,1981
- 8)O'Neil, Michael W., Hawkins Richard A. and Audibert, Jean M.E.:Installation of Pile Group in Overconsolidated Clay,Proc. of ASCE, Vol.108, No.GT11, pp.1369 ~ 1386,Nov.,1982
- 9)Stewart,J.P.and Kulhawy,F.H.:Behavior of Drilled Shafts in Axial Uplift Loading,Contract Report B-49(5),Niagara Mohawk Power Corporation, Syracuse, NY, pp.261, Jan., 1980
- 10)Electric Power Research Institute:Transmission Line Structure Foundation for Uplift-Compression loading, EPRI EL-2870,Research Project 1493-1,Final Report, pp.8-1~9-15,Feb.,1983
- 11)(社)土質工学会(現(社)地盤工学会):支持力入門、pp.141~165、1990.11
- 12)足立紀尚、小川豊和:堆積軟岩の力学特性と破壊基準、土木学会論文報告集、第 295 号、1980.3
- 13)岸田英明:杭の鉛直載荷試験と荷重-沈下関係、第3回日建設計中瀬土質研究所講演会、NNGI Report、pp.23~46、1994
- 14)例えば、東京電力(株):UHV基礎設計要項(案)(社内基準)、1988.3
- 15)(社)土質工学会(現(社)地盤工学会):わかりやすい土質力学原論、pp.2、1988.12
- 16)Mayne,P.W.and Kulhawy,F.H.: K_0 -OCR Relationships in Soil, Proc. of ASCE, Vol.108, No.GT6, pp.851 ~872,June, 1982

(1997年9月26日受付)