

Ⅲ-B4

引揚力を受ける杭の荷重変形関係モデルの研究

東京電力（株） 正会員○佐藤 博

東電設計（株） 正会員 松島 学 正会員 高橋秀明

1. はじめに

送電用鉄塔、火力発電所燃料受け入れ施設などの電力土木構造物の基礎は上部構造物に作用する風、地震、波浪、船舶の接岸などの横方向荷重に起因する引揚力が支配的になる場合が多いのが特徴である。杭の引揚耐力と引揚に伴う変形性は杭周辺地盤の弾塑性挙動に強く依存する。本報告ではこの周辺地盤の弾塑性挙動を考慮し、さらに引揚により影響を受ける周辺地盤の範囲、終局時に杭近傍にせん断ひずみが局所化したすべり層が形成されることを考慮した杭の荷重変形関係モデルを作成した。

2. 引揚力を受ける杭の理論解

(1) 理論解

図-1のように、引揚力を受ける杭の微小要素に働く力の釣合いを考える。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。杭の微小要素の鉛直変位を u 、杭の軸力を T 、周辺地盤からの摩擦力を ΔP とすると、力の釣合式は式(1)のように表される。

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

杭体断面の直ひずみ ε 、摩擦力 ΔP は、杭体のヤング率 E 、杭の断面積 A 、杭径 D および杭周面におけるせん断応力 τ （周面摩擦力）を用いると式(2)で表される。

$$\varepsilon = \frac{du}{dz} = \frac{T}{EA} \quad \Delta P = \pi \cdot D \cdot \tau_0 dz \quad (2)$$

上記の式(2)を釣合式(1)に代入して、一般式は式(3)で表される。

$$\frac{d^2 u}{dz^2} EA - \pi \cdot D \cdot \tau_0 = 0 \quad (3)$$

境界条件は、杭頭部で荷重 P_0 と釣合い、杭下端で荷重が0になる必要があり、式(4)で表すことができる。

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = 0 \quad \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=l} = \frac{P_0}{EA} \quad (4)$$

(2) 地盤が弾性域の場合

杭周辺地盤中に生じるせん断応力は杭中心から反比例する¹⁾と仮定する。杭周辺地盤のせん断歪み γ は、杭周面のせん断歪みを γ_0 、地盤のせん断弾性係数を G とすると、図-2のとおり式(5)で示される。この考えは、弾性論による Mindlin の解と一致する。

$$\gamma(r) = \frac{\tau_0(\gamma_0)r_0}{G \cdot r} \quad (5)$$

従って、変位 u は式(5)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、さらに自重の影響があることから、ひずみが無限遠まで及ぶことはなく工

キーワード：杭、引揚、荷重変形関係モデル、地盤の弾塑性挙動、地盤の影響範囲、すべり層

連絡先：〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1 TEL 045-585-8605 FAX 045-585-8631

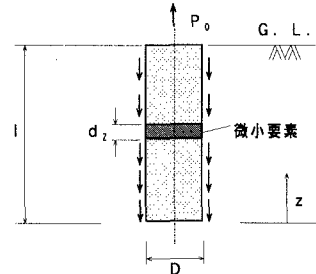


図-1 引揚力を受ける杭の力の釣り合い

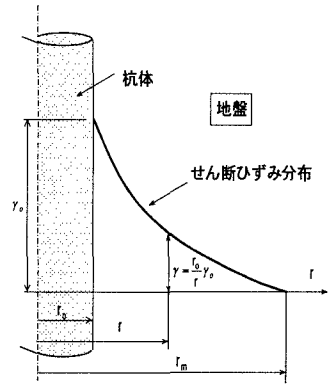


図-2 杭周辺地盤のせん断ひずみ分布（弾性域）

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(6)のように求めることができる¹⁾。

$$u = \frac{\tau_0(\gamma_0) \lambda_0}{G} \int_{r_0}^{r_m} \frac{1}{r} dr = \frac{\tau_0(\gamma_0) \lambda_0}{G} \ln \frac{r_m}{r_0} \quad (6)$$

ここで、この影響範囲 r_m については、既往の引揚載荷試験²⁾でみられるように、境界条件の違いにより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大きく、逆に杭下端では小さいことから図-3に示すように仮定した。 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¹⁾。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。以上から、式(6)を一般式(3)に代入すればよい。

(3) 地盤が塑性域の場合

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とから、地盤のせん断応力とせん断ひずみの関係を図-4のように弾塑性でモデル化する。引揚に伴う杭周辺地盤の挙動については、Stewart, Kulhawy³⁾により図-5のようなすべり層の形成過程が示されている。このように、終局状態に近づくとき杭周面に歪みの局所化したすべり領域（幅： Δw ）が形成されることを考え、塑性域の場合の地盤モデルを図-6のように仮定する。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⁴⁾。

地盤の塑性域における杭の微小要素の変位は弾性変形分 (u_e)、塑性変形分 (u_p) の和として式(7)のように求められる。

$$u = u_e + u_p \quad (7)$$

ここで、 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(8)で表される。

$$u_p = \gamma_0 \cdot \Delta w \quad (8)$$

また、せん断応力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せん断力が釣り合うことから、図-4を参照すれば、境界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ことから、 u_e は式(9)で求められる。以上から求められる杭変位 u を一般式(3)に代入すればよい。

$$u_e = \frac{\tau_0(\gamma_0) \lambda_0 (r_0 + \Delta w)}{G} \ln \frac{r_m}{r_0 + \Delta w} \quad (9)$$

3. 今後の予定

今後は、仮定した各パラメータ (r_m 、 Δw) を既往の載荷試験結果を用いて同定していく予定である。また、今回のモデルは塑性域で生じるすべり層の両側で力の釣合を満たしていないため、力の釣合を満たすモデルに改良する予定である。

【参考文献】1) (社)土質工学会(現(社)地盤工学会):支持力入門 2) 鬼頭他: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 3) 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, 1980 4) (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

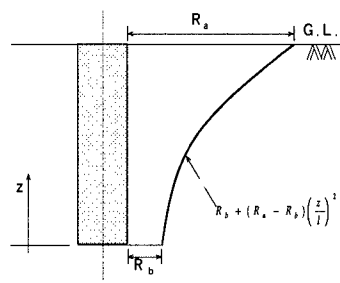


図-3 せん断ひずみの影響範囲

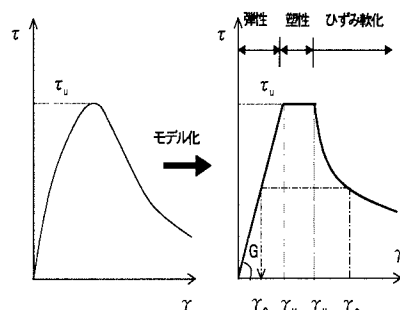


図-4 地盤の応力・ひずみ関係のモデル

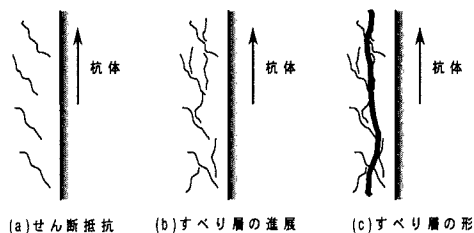


図-5 杭近傍地盤のすべり層の形成過程³⁾

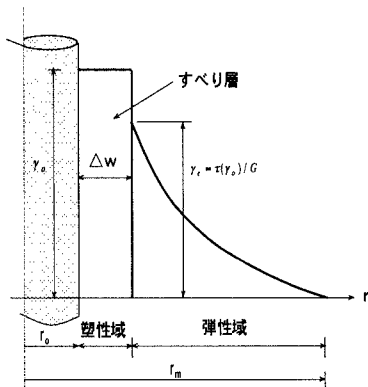


図-6 杭周辺地盤のせん断ひずみ分布 (塑性域)