

# 粘性土斜面地盤における杭の水平支持力特性

呉 正林<sup>1</sup>・佐々木 康<sup>2</sup>・日下部 治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 新日本技研株式会社 設計部 (〒105-0014 東京都港区芝2-1-23) (元広島大学大学院)

<sup>2</sup>フェロー 工博 広島大学教授 工学研究科構造工学専攻 (〒739-8527 広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 Ph. D. 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

傾斜地盤中に設置された単杭の室内水平載荷模型実験を通じて、傾斜地盤内の杭の支持挙動、地盤の塑性化特性、地盤反力特性、破壊メカニズムなどを検討した。これらの結果に基づき、地盤の進行性破壊特性を考慮し、杭前面地盤の塑性化領域における極限地盤反力を計算する複数の三次元塑性解析モデルを開発した。これらの解析モデルを用い、極限地盤反力の数値解析を実施した上で、杭と地盤の連成系の解析を行ない、水平荷重と杭頭変位の関係を求めた。斜面内の塑性化領域を考慮したこの弾・塑性複合地盤反力モデルを用いた数値解析結果は実験結果とよく一致することを示した。

*Key Words: slope, lateral resistance of pile, failure mechanism, earth pressure, slip surface*

## 1. はじめに

斜面における杭の水平支持力の発現機構を解明し、合理的な解析方法を開発するため、これまでに、筆者らは、杭を二次元的に取り扱うことに相当する矢板に関する模型実験とその数値解析<sup>1)</sup>を実施するとともに粘性土斜面に設置した杭の水平載荷模型実験<sup>2)</sup>を実施してきた。本論文では、これらの実験観察事実に基づき、杭前面地盤の三次元的な破壊メカニズムを考慮した杭前面地盤の極限地盤反力、ならびに水平荷重と杭頭変位の関係に関する数値解析を実施した。

斜面地盤内の杭基礎の水平支持力特性に関する既往の研究を、地盤反力のとらえ方から分類すると、主なものには下記の5種類がある。

### a) 仮想地表面法<sup>3), 4)</sup>

地中の杭の計算は、斜面の影響がなくなると考えられる位置を仮想地表面と仮定し、平坦地盤と同じ計算法で計算する。

### b) 非線形弾性地盤反力法

寺師、北詰ら<sup>5), 6), 7)</sup>は遠心装置を用いて、傾斜砂地盤に設置された杭の水平変位  $y$  と地盤反力  $p$  との関係を調査した。その結果は、傾斜地盤においても、地盤反力は久保<sup>8)</sup>の水平地盤を対象とした研究結果と同じ下式の関係があることを見出した。

$$p = k_s \cdot x \cdot y^{0.5} \quad (1)$$

ここに、

$k_s$  は地盤の横抵抗定数

$x$  は深さである。

この方法は上式を用いて地盤の非線形性を考慮しようとするものである。

また、冨永、山本らは、地盤を半無限弾性体と仮定して、Mindlinの解を傾斜地盤へ拡張し、杭及び地盤の非線形性を考慮した解析法(杭—地盤相互作用法)<sup>9)</sup>の傾斜地盤への拡張を試みている<sup>10), 11)</sup>。

### c) $p-y$ 曲線法

茶谷、西山ら<sup>12), 13), 14)</sup>は、崖地近傍の杭の水平抵抗について、模型実験に基き、任意深さにおける杭の水平変位と杭に作用する地盤反力との関係は次式で与えられるとしている。

$$p = k \cdot y^{0.5} \quad (2)$$

ただし、

$$p \leq p_{\max} \quad (3)$$

$$k = \rho \cdot k_0 \quad (4)$$

ここに、

$p_{\max}$  は地盤の極限水平支持力度

$k$  は斜面の影響を考慮にいれた地盤横抵抗定数

$k_0$  は平坦地盤の地盤横抵抗定数

$\rho$  は杭の加力方向、崖の位置、高さ、杭から崖までの距離などについての低減係数である。

**d) 地盤のせん断変形を考慮に入れた解析法**

傾斜地盤中の杭を対象とし、杭の回転中心より浅いところでは、杭の変形が地盤のせん断ひずみを生じさせるので、せん断ばねを考慮した弾性床上の梁として扱い、これより深いところでは土の縦ひずみによって、ウインクラー型ばねが支える梁として解析する宇都<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup>の計算法である。地盤反力が地盤のせん断変形によって生じるとする仮定はこの方法の特徴である。

**e) 複合地盤反力法**

複合地盤反力法として代表的なのは、日本道路公団、高速道路調査会<sup>17)</sup>、<sup>18)</sup>、東京電力<sup>19)</sup>などの研究である。それらの計算方法は、塑性化領域の地盤反力は地盤の破壊を単純に平面すべりと仮定して、土くさびの側面せん断抵抗と摩擦力を無視し、地盤の受働抵抗をクーロンの受働土圧理論と同じ極限釣り合い法により算定する。また、弾性領域においては、杭を弾性支承梁として扱う。杭先端部には、回転ばねとせん断ばねを与える。日本道路公団、高速道路調査会と東京電力の計算方法の違いは、平面すべり面の形状である。

上述の諸方法のうち、方法 a) は仮想地表面の位置を正確に決めることが難しく、仮想地表面以上の地盤反力を無視するため不経済になる。方法 b) と c) は斜面勾配及び杭から法肩までの距離の変化に伴う、地盤の幾何形状及び力学特性の変化に応じた適切な地盤反力定数の選定が困難である。また、全ての方法に共通して、地盤反力を求めるモデルが斜面勾配の変化に対応した地盤の破壊メカニズムと適合しているかどうか疑問が残っている。本論文では、実験で観察した破壊メカニズム、ならびにこれを単純化した幾つかの破壊メカニズムを考え、斜面内の杭の水平支持力特性を検討した結果を報告する。

**2. 実験概要と結果**

実験方法ならびにその結果は別報<sup>2)</sup>に詳しく報告したが、ここでは、実験概要と主要な結果を要約する。

**(1) 実験概要**

実験は重力場での室内模型実験で、根入れ長さ 8 m、断面 500×500mmの実杭の 1/20 程度として、25×25mmの正方形断面（実験 2 を除外）を持つ塩化ビニル模型杭を使用した。杭の根入れ長さは 390mm、先端拘束条件をヒンジとし、載荷過程中、杭の塑性ヒンジが現われない半無限長杭を想定した模型載荷実験を実施した。実験装置の概略図を図-1 に示す。

この研究では、粘性土地盤を対象とするが、実験効率を考え、圧密しないで均質な所要強度を持つ模型地盤を作成

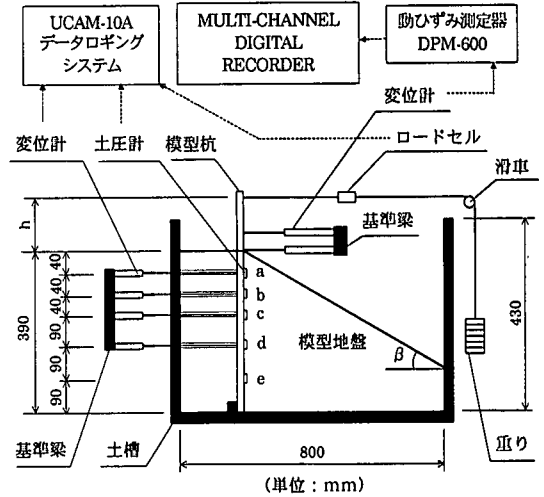


図-1 実験装置概略図

表-1 実験条件一覧表

実験 ケース	杭の曲げ 剛性 EI 10 <sup>6</sup> (N・cm <sup>2</sup> )	斜面 勾配 β	粘土種類 (養生日数)	単位体積 重量 γ (g/cm <sup>3</sup> )	非排水せ ん断強度 c <sub>u</sub> (kPa)	載荷高 h (cm)
実験1	1.262	50°	山口(2)	1.265	9.70	19.5
実験2	0.284	50°	山口(2)	1.378	9.50	19.5
実験3	1.262	40°	広島(2)	1.552	16.25	19.5
実験4	1.262	30°	広島(2)	1.535	19.20	19.5
実験5	1.262	50°	広島(2)	1.543	20.40	19.5
実験6	1.262	20°	広島(1)	1.533	11.20	14.0
実験7	1.262	10°	広島(1)	1.561	7.63	14.0
実験8	1.262	0°	広島(1)	1.534	8.50	14.0
実験9	1.262	30°	広島(1)	1.558	7.52	19.5

するために、セメントを添加した粘土を用いることとした。実験での模型地盤は、山口あるいは広島粘土にその乾燥重量の 4% の普通ポルトランセメントを混入して、一日または二日養生したセメント改良土で作った。使用した山口粘土及び広島粘土の含水比は 12.6% 及び 8.6% である。斜面勾配は 0° から 10° ごとに 50° まで変えた。実験条件を表-1 に示す。

**(2) 実験結果**

**a) 水平荷重と杭頭変位関係**

杭と斜面との交点部を杭頭と定義する。水平荷重と杭の幅で無次元化した杭頭変位関係の例を、図-2 に示す。荷重の増加につれ、変位の増分量が大きくなり、非線形的な挙動を呈している。載荷する荷重の範囲内では、荷重—杭頭変位関係曲線は極大値が現われることなく、単調増加する。なお、実験 6 以外の荷重と杭頭変位関係は、解析結果

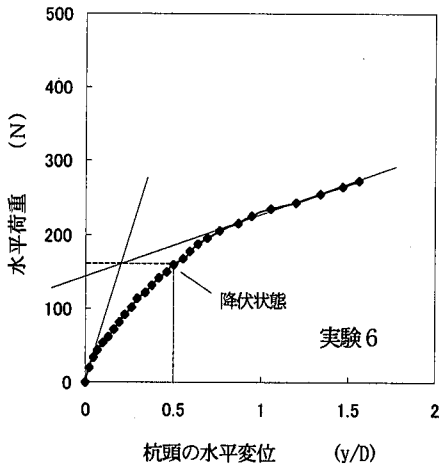


図-2 水平荷重—杭頭変位関係曲線

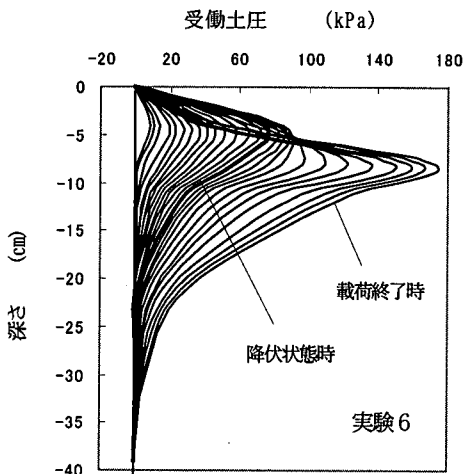


図-3 土圧分布図

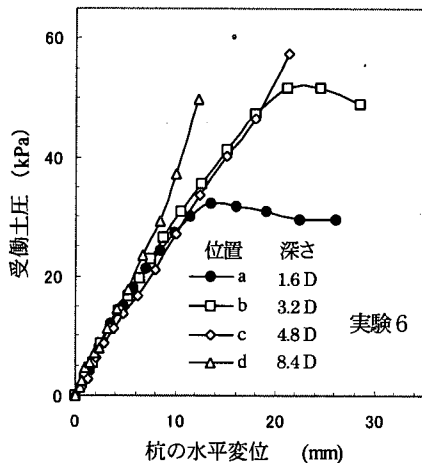


図-4 受働土圧と杭変位の関係

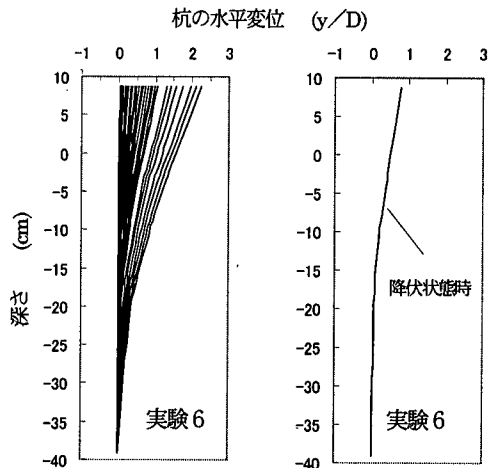


図-5 杭変位特性

と合わせて図-2 1 に示した。

観察された水平荷重—杭頭変位関係は、いずれも図-2 に示したように双曲線形状を示し、載荷初期から非線形性が強く、降伏点、破壊点を明確に定義することが難しい。従来実務では  $y/D=0.1$  時、あるいはワイブル曲線近似から降伏点を定義しているが、本研究では、斜面勾配の変化による支持力の変化を検討するため、図-2 に示すように、杭頭変位が杭径の 1.5 倍程度までの間の荷重—杭頭変位関係曲線の初期接線と最終段階の接線の交点を求め、この荷重状態をもって載荷実験の降伏状態とした。その時の杭頭変位は  $y/D=0.21\sim 0.59$  となり、従来の定義より大変形領域を対象としていることになる。

#### b) 受働土圧分布状態

杭前面の受働土圧を図-1 に示す a, b, c, d, e の 5 点で計測した。この 5 点での計測土圧を通る平滑な曲線を描くと、図-3 に示す杭前面の受働土圧分布曲線が得られる。地表面から受働土圧の最大となる深さまでの受働土圧は、ほぼ三角形分布と見ることができる。荷重の増加につれ、最大土圧の発生する位置は深いところに移行し、ある荷重段階になると、浅いところの土圧が増加しなくなる。

#### c) 受働土圧と杭の水平変位の関係

受働土圧とこの位置の杭の水平変位関係を、図-4 に示す。杭の変位が小さい載荷段階では、地盤内の各深さの杭変位と受働土圧関係曲線はほぼ同一勾配の線形関係を保っている。荷重を更に増加させると、これらの曲線は浅いところから地盤の塑性化につれ次第に降伏する。

#### d) 杭の変位特性

杭の幅 D で無次元化した杭の水平変位分布を、図-5 に示す。浅い部分が大きく、深い部分が小さい。近似的に

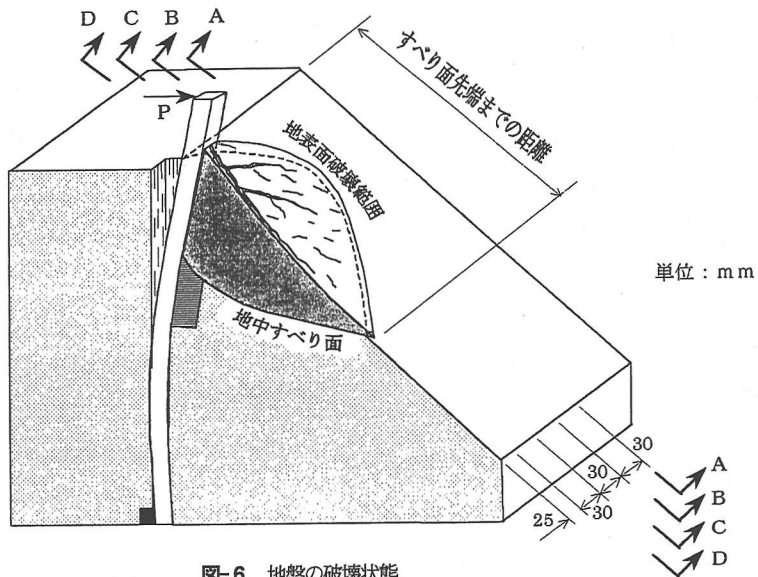


図-6 地盤の破壊状態



写真-1 A-A断面の写真



写真-3 C-C断面の写真

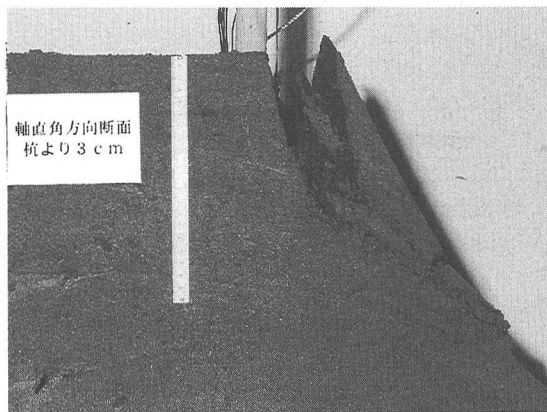


写真-2 B-B断面の写真



写真-4 D-D断面の写真

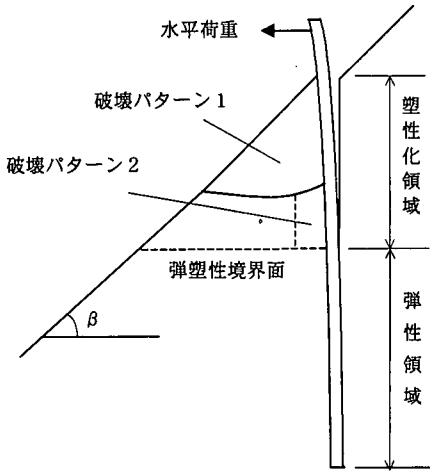


図-7 弾・塑性領域構成図

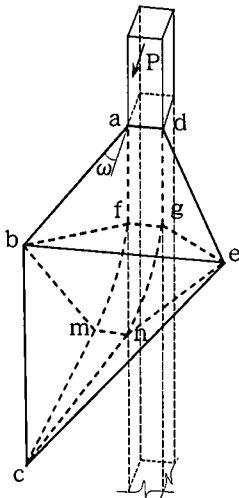


図-8 破壊パターン1

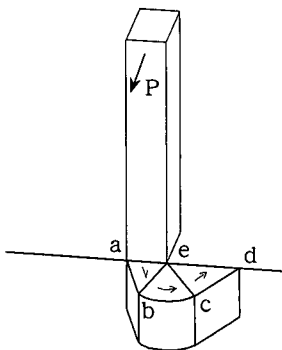


図-9 破壊パターン2

表-2 載荷実験の降伏状態時の実験結果一覧表

実験ケース	水平支持力 (N)	地盤反力強度 (kPa)	最大土圧深さ (cm)	杭頭変位 (y/D)
実験1	82.2	57.5	9.0	0.294
実験2	57.8	41.0	9.0	0.308
実験3	112.0	88.3	8.0	0.224
実験4	154.0	95.5	4.5	0.214
実験5	169.0	73.0	8.0	0.592
実験6	158.0	76.8	4.8	0.496
実験7	96.6	29.0	5.5	0.384
実験8	143.0	70.0	5.5	0.436
実験9	101.0	47.5	4.7	0.576

ある深さを中心とし回転変位と見なすことができる。

### e) 地盤の破壊メカニズム

杭前面地盤の支持挙動を表現する適切な解析モデルを確立するため、地盤の破壊メカニズムを実験結果に基づき設定する。このため、模型載荷実験中の杭の変形過程を変位計で計測し、模型地盤表面に現れる亀裂などを目視観察した。また、載荷を終了した後、図-6に示すように模型地盤の半分をAからDまでの鉛直断面で切り、地盤の載荷終了時の終局破壊状態を観察した。残った半分の模型地盤のうち上部の塑性化した領域（後述の破壊パターン1部分）の土を除去して、その下の破壊形状を確認した。

変形の途中経過は二次元の矢板実験における地盤の破壊過程<sup>1)</sup>を参考にすることとした。

地盤の破壊状態を写真-1～4に示す。観察の結果、杭が水平荷重を受けると、杭前面の斜面地盤の浅い部分は塑性化するものの、深い部分は弾性状態に止まっていることが確認された。また、浅い部分での地盤の塑性化領域には図-7に示すように二種類の破壊パターンがあることが分かった。この破壊過程をやや詳しく記述すると以下のようなものである。

荷重の初期段階では、地盤の浅い部分の破壊は、杭前方の斜面に向かい、幾つかの平面と曲面の組合せから構成されるすべり面を形成し、三次元的なすべり破壊を生じる。この破壊は斜面勾配が変化すると、破壊する範囲、すべり面の方向が変化する。斜面勾配が大きい場合は、図-6に示したすべり面先端までの距離が長くなり、斜面勾配の小さい場合には、それとは反対に短くなる。上述のすべり面より浅い部分の破壊を塑性化領域破壊パターン1と名付ける（以下は破壊パターン1と略称する）。破壊パターン1の破壊形状は鉛直断面の写真-1～4に記録されている。モデル化した破壊パターン1を図-8に示す。荷重の増加につれ、破壊パターン1は徐々に下に移行して行く。ある深さを越えると、杭から斜面までの距離が遠くなり、杭前面の地盤の塑性化に対する斜面の影

響が小さくなる。また、この上部の土の上載圧効果及び周辺地盤の拘束力のため、杭前面の地盤の破壊は破壊パターン1のような斜面表面までの破壊を起せず、杭近傍の地盤内部に限定され、水平面で変位し、**図-9**に示すabcdのような水平方向に走るすべり線を持つ二次元すべり破壊を生じる。この部分は塑性化領域破壊パターン2と定義する(以下は破壊パターン2と称する)。破壊パターン2は鉛直断面の**写真-1~4**からは確認できないが、地盤を鉛直断面で切った後、残った半分の地盤の上部にある破壊パターン1部分の土を除去して、目視観察で破壊パターン2の破壊形状を確認した。なお、塑性化領域より深いところでは、杭の変位が小さいため、弾性領域と考えられる。

二次元問題の矢板の破壊特性<sup>1)</sup>と比較すると、破壊パターン1の領域では、すべり土塊bcenmのブロックの側面が周辺の土の拘束を受けているため、破壊面低部のすべり面の長さが二次元問題より短い。

それぞれ実験ケース毎に載荷実験の降伏状態時の水平支持力、地盤反力強度、最大土圧深さ、及び杭の幅で無次元化した杭頭の変位を**表-2**に示す。

### 3. 地盤反力に関する解析

地盤反力は杭体の計算においては外力の一つである。地盤反力を正確に評価することができれば、杭体の断面力と変形を精度よく計算できる。

#### (1) 塑性化領域の地盤反力の解析

水平荷重を受ける斜面中の杭に関する塑性化領域での水平地盤反力を求める問題は三次元塑性問題である。現在まで三次元塑性問題を解析的に解くことができるのは対称性のある特別な問題のみである。杭のような複雑な三次元問題については、解析方法は確立されていない。

今回の解析では、実験で観察された地盤の破壊メカニズムに基づき、杭の根入深さまでの地盤を**図-7**に示すように塑性化領域と弾性領域から成るものと考え、塑性化領域では、浅い部分と深い部分とで破壊特性が異なっているから、浅い部分には破壊パターン1および深い部分には破壊パターン2を考慮する。

地盤反力は破壊パターン1で計算すると、深くなるに伴い、無限に大きくなる。しかし、実際の杭前面の斜面では、深いところは土被り厚が厚くて、斜面まですべり破壊を起こすことが不可能であるから、地盤反力は無限に増加することはできない。ある深さから地盤の塑性破壊は斜面内部で発生し、**図-9**に示すように地盤の破壊範囲はほとんど変わらない。**図-9**に示すすべり面に沿って

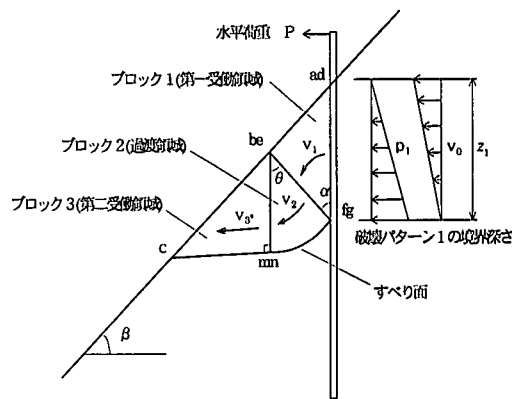


図-10 破壊メカニズムa縦断面図

計算したせん断抵抗は一定であるが、ed面の土圧は深さとともに大きくなるため、杭前面の地盤反力も深いところではやや大きくなる。しかし、その増加率は破壊パターン1より小さい。破壊パターン2を考慮すると、破壊パターン1の地盤反力の増加は有限となる。実験結果から得られるこの塑性化特性を地盤反力の計算に反映させるためには、塑性化領域を破壊パターン1と破壊パターン2に分けて計算する。

地盤反力の計算はエネルギー法に属する塑性解析理論の上界定理に基づく計算法(以下上界法と呼ぶ)<sup>20), 21)</sup>を用いて解析を行う。

#### a) 上界法解析の基本仮定

上界法解析では以下の基本的な仮定を置く。

- ① 地盤は等質、等方性の剛塑性材料である。
- ② 土の強度表現式は

$$\tau_{\max} = c_u \quad (5)$$

ここに、 $c_u$ は土の非排水せん断強度である。

- ③ 杭と地盤の間の摩擦力を無視する。

#### b) 塑性化領域の破壊パターン1の地盤反力

塑性化領域の地盤反力を求めるため、地盤の破壊メカニズムと可容速度場を設定し、それから導かれる外力による仕事と内部塑性仕事を等値して水平地盤反力の上界解を求める。

塑性化領域の破壊パターン1の破壊メカニズムについては、実験で観察した破壊形状に基づき、まず破壊メカニズムaを設定する。破壊メカニズムaのほか、以下に説明するように既往の研究結果を参考にして破壊メカニズムb、破壊メカニズムc、破壊メカニズムdなど3種類の破壊メカニズムを設定した。それぞれの破壊モデルを**図-8**と**図-10**、**図-11**と**図-12**、**図-13**と**図-14**

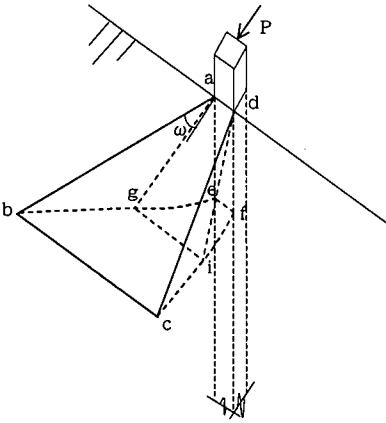


図-11 破壊メカニズムb

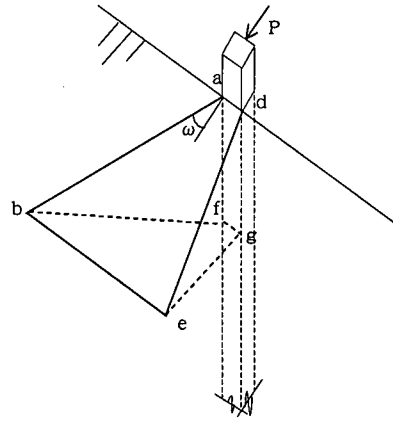


図-13 破壊メカニズムc

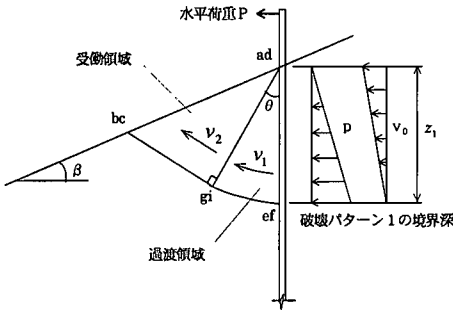


図-12 破壊メカニズムb断面図

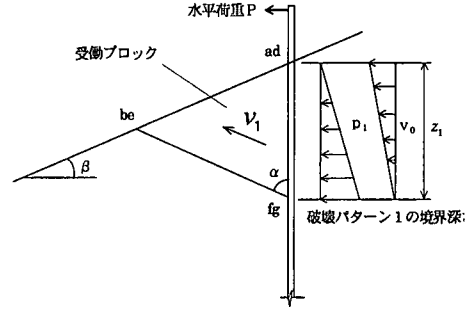


図-14 破壊メカニズムc断面図

及び図-15と図-16に示す。

破壊メカニズムaは、実験で観察した結果をモデル化して、図-8と図-10に示すように三つのブロックから構成されると想定した。ブロック1は5つの面で囲まれるプリズム abedfg である。ブロック2は台形の回転体 begfmn である。ブロック3は五つの面に囲まれるプリズム bceemn である。このブロック1, 2, 3の力学特性により、それぞれ第一受働領域、過渡領域、第二受働領域と呼ぶ。

ブロック1については、四方形平面 adfg (杭との接触面)に杭の水平接触応力を直接に受けている。三角形平面afbとdegは互いに対称で、対称面(杭中心の垂直縦断面)と $\omega$ (広がり角)をなす。afbとdeg面はほぼ鉛直面内にあり、破壊面と地盤の変形方向は一致しない。この面には主に引っ張り応力が作用し、応力状態は複雑で完全なせん断破壊面ではない。ブロック1は杭との境界面の変位条件を満たし、fg軸に対して回転すると想定する。

ブロック2は回転中心をbe軸としての台形回転体のせん断ブロックである。このブロックは、すべり面が斜面までに最も短いせん断経路で過渡する特性を持っている。

ブロック3はせん断ブロックで、斜面に向かって押し出される。

破壊メカニズムaでは、支持力関数の最小化パラメータとしての媒介変数は過渡ブロックを表現する角 $\theta$ とする。第一受働領域を表現する角 $\alpha$ は降伏状態時の杭のたわみの平均値と同じ $\alpha = 5^\circ$ 、及び斜面勾配の違いによる、破壊パターン1の形状変化を表現できるように、 $\alpha$ は斜面勾配と等しい $\alpha = \beta$ の二種類を仮定して計算を行った。

破壊メカニズムbは、James and Bransby<sup>22), 23)</sup>が平坦地盤内の矢板の水平受働抵抗に関する実験において観察した破壊メカニズムや、本研究のうち勾配が小さい傾斜地盤の観察結果を基に、図-11と図-12に示すように二つのブロックから構成されていると想定した。破壊

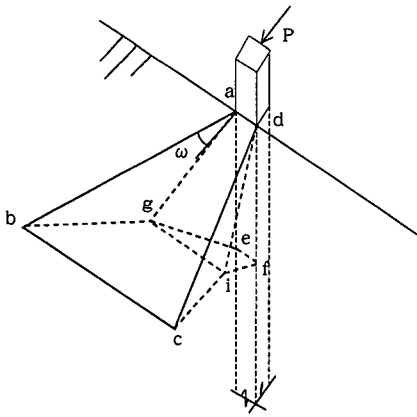


図-15 破壊メカニズムd

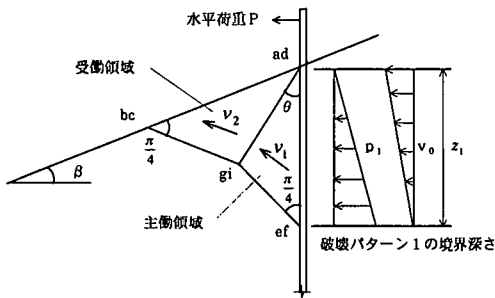


図-16 破壊メカニズムd断面図

メカニズムbは斜面勾配が小さい時破壊メカニズムaの第一受働領域がなくなったことに相当する。

破壊メカニズムbのブロック1とブロック2は4つの面で囲まれるプリズムagidefとabcdgiである。ブロック1はad軸を中心として円弧すべり面を形成し、過渡ブロックと呼び、ブロック2の下面は平面すべり面で受働ブロックと呼ぶ。支持力関数の最小化パラメーターとしての媒介変数は過渡ブロックを表現する角 $\theta$ とする。

破壊メカニズムcは、クーロンの受働抵抗ブロックの考え方と同じく、最も簡単な平面すべり面を想定し、図-13と図-14に示すような一つの受働ブロックから構成されると想定した。支持力関数の最小化パラメーターとしての媒介変数はこの受働ブロックを表現する角 $\alpha$ とする。

破壊メカニズムdは、鋭角くさびの側面に分布荷重が作用するときの破壊メカニズム<sup>24)</sup>にならって、図-15と図-16に示すようにブロック1の主働ブロックと、ブロック2の受働ブロックから構成されると

考えた。

破壊パターン1に作用している杭からの水平力は破壊パターン1で発生する水平地盤反力と等しいので、これを破壊パターン1の境界外力と定義する。その境界外力の分布状態は実験で計測した受働土圧分布状態(図-3参照)と同じ三角形分布とする。境界外力作用面の変位は破壊パターン1を形成する時の杭の変位条件を満たすから、境界外力可容速度場は、上が大きく、下が小さく、図-10、図-12、図-14、図-16に示すような杭の変位形状と相似する三角形分布の変速度場と仮定する。解析では、境界変位条件を満たす変速度場の解析を行い、また、境界変位条件を満たさない定速度場の解析も行った。

破壊パターン1の極限地盤反力の上界値の計算は、全外力仕事と全内部消散エネルギーを等値して求める。

$$W = E \quad (6)$$

ここに、  
全ての外力仕事は

$$W = W_p + W_y \quad (7)$$

全ての内部消散は

$$E = \sum_1^n E_i \quad (8)$$

$W_p$  は境界外力仕事

$W_y$  は土塊自重による仕事

$E_i$  は第*i*個すべり面の内部塑性仕事

$n$ はすべり面の総数量

である。

最初に行なった各破壊メカニズムの適合性比較のための計算では、土の重量を無視して、杭から受けた境界外力による外力仕事を計算する(二次元の矢板の計算結果では、粘土の場合に土の重量が地盤反力計算結果に与える影響は4%より小さい)<sup>1)</sup>。

内部消散エネルギーの計算は、杭の載荷過程における杭前面地盤の進行性破壊特性を考えなければならない。実験で観察された杭前面の斜面地盤の破壊は、同一時点で破壊面を形成するのではなく、載荷に伴い、杭近傍及び浅い部分から破壊面が発生しはじめ、次第に深く、深いところへ進行する。このような進行性破壊では、破壊面において地盤の強度が同時に全部発揮されるのではなく、先に発生した破壊面の強度が低下する。したがって、破壊メカニズムaのブロック1のafbとdeg面、及び破壊メカニズムb、c、dのブロック側面の大部分は、降伏状態に至る前に既に形成されており、この部分の破壊面強度を実験観察結果に基づき無視することができると



考えられる。以下の計算ではこの部分の破壊面の強度を無視した。

土の重量を無視する場合、設定した各破壊メカニズムにより計算した破壊パターン1の地盤反力強度の関数表現式は以下の支持力に関する一般表現式で表示できる。

$$p_{u1} = c_u \cdot N_c \quad (9)$$

ここに、水平抵抗係数  $N_c$  は、杭の寸法、破壊メカニズムの幾何形状及び破壊パターン1の境界深さと関係する無次元係数である。

各破壊メカニズムにより  $N_c$  は

破壊メカニズム a :

$$N_c = \frac{z_1}{D} \cdot \frac{2 \cdot \theta \cdot \cos \beta}{\cos^2(\alpha - \beta)} \left[ 2 \cdot \frac{D}{z_1} \cdot \cos(\alpha - \beta) + \sin \alpha \cdot \tan \omega + \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot \tan^2 \omega + \cos^2 \beta} \right] + \frac{1}{\cos(\alpha - \beta)} \left[ \frac{\cos \beta}{\tan(\beta + \theta - \alpha)} + \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot \tan^2 \omega + \cos^2 \beta} \cdot \sqrt{1 + \frac{z_1^2}{D^2} \cdot \frac{4 \cdot \cos^2 \beta \cdot \cot^2(\beta + \theta - \alpha)}{\cos^2(\alpha - \beta)}} \right] \quad (10)$$

破壊メカニズム b :

$$N_c = 4 \cdot \theta + \frac{z_1}{D} \cdot \frac{\tan \theta \cdot \tan \omega}{\sin(\beta + \theta)} \cdot \frac{[3 \cdot \theta + 2 \cdot \cot(\beta + \theta)]}{[\tan \theta + \cot(\beta + \theta)]} + 2 \cdot \cot(\beta + \theta) \cdot \left[ 1 + \frac{z_1}{D} \cdot \frac{\tan \omega}{\sin(\beta + \theta)} \right] \quad (11)$$

破壊メカニズム c :

$$N_c = \frac{2 \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \beta)} \cdot \left[ 1 + \frac{z_1}{D} \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \tan \omega}{\cos(\alpha - \beta)} \right] \quad (12)$$

破壊メカニズム d :

$$N_c = \frac{\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi - \beta}{4} - \frac{\beta}{2}\right)}{\cos \frac{\beta}{2}} \cdot \left\{ 4 + 2 \cdot \frac{z_1}{D} \cdot \tan \omega \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right) + 1} \right] \right\} \quad (13)$$

ここに、

- $\alpha$  と  $\theta$  : ブロックを表示する角
- $\omega$  : 広がり角
- $\beta$  : 斜面勾配
- $z_1$  : 破壊パターン1の境界深さ
- $D$  : 杭の幅

である。

上界法から求めたそれぞれの地盤反力強度の関数表現式を最小化パラメーターで極小化すると、各破壊メカニ

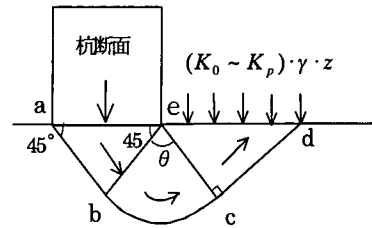


図-17 破壊パターン2平面図

ズムに関する破壊パターン1の極限地盤反力を求めることができる。

破壊パターン1の範囲を表現する広がり角  $\omega$  は、上界法解析における変数として最小化パラメーターの特性を持っていない。本研究では、実験で観察した結果と既往の研究<sup>18), 19)</sup>を参考にして、 $\omega = 30^\circ$  とした。

### c) 塑性化領域の破壊パターン2の地盤反力

前述のように実験結果では、破壊パターン1より深いところでは、斜面の影響がなくなり、上部土の上載効果及び周辺地盤の拘束があるため、杭前面の地盤の塑性化は地盤内部で進行する。破壊パターン2の極限地盤反力は、図-17に示すようなすべり線を持つ破壊メカニズムと考え、二次元の平面問題として検討する。

図-17に示すようなすべり面の終端 ed 面の土圧は静止土圧と仮定して、上界法を用いて解析すると、破壊パターン2の地盤反力強度の関数表現式は

$$p_u(\theta) = c_u \cdot [1 + 2 \cdot \theta + \cot(\theta - 45^\circ)] + K_o \cdot \gamma \cdot z \quad (14)$$

となる。

ここに、

- $\theta$  : 過渡領域を表現する角度
- $\gamma$  : 土の単位体積重量
- $z$  : 計算位置の深さ
- $K_o$  : 静止土圧係数

である。

式(14)を最小化パラメーター  $\theta$  で極小化すると、 $\theta = 90^\circ$  の時、関数  $p_u(\theta)$  は最小値を取る。極限地盤反力強度は

$$p_{u2} = 5.14 \cdot c_u + K_o \cdot \gamma \cdot z \quad (15)$$

である。

この結果は、Terzaghi<sup>25)</sup>が提案した粘性土地盤上の底面が滑らかな帯状基礎の全般せん断に対する支持力係数の計算結果と一致している。また、Gibson<sup>26)</sup>及びLukas and Bussy<sup>27)</sup>により得られた実験結果

$$p_u = (5 \sim 6) \cdot c_u + p_o \quad (16)$$

表-3 破壊メカニズム a, b, c, d で計算した  
極限地盤反力強度と実験結果一覧 (kPa)

実験 ケース	実験 結果	解析結果			
		a	b	c	d
実験 1	57.5	63.4	53.9	40.4	58.9
実験 2	41.0	62.1	52.7	39.6	57.7
実験 3	88.3	128.8	111.3	78.8	108.0
実験 4	95.5	128.6	121.3	83.5	107.9
実験 5	73.0	121.7	104.8	79.0	114.9
実験 6	76.8	95.7	91.5	60.0	73.8
実験 7	29.0	83.6	80.8	50.8	62.2
実験 8	70.0	138.6	135.9	79.5	94.9
実験 9	47.5	52.1	49.0	33.9	43.1

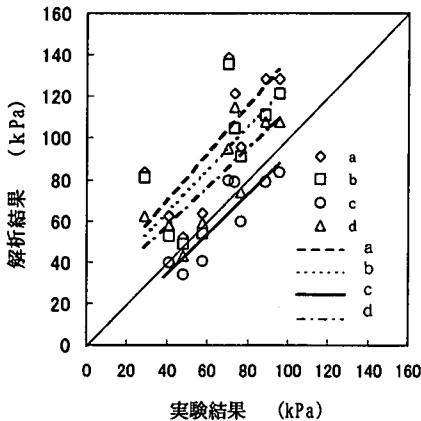


図-18 破壊メカニズム a, b, c, d で計算した結果と実験結果の比較図

ここに、 $p_x$  : 水平方向の土圧  
ともほぼ一致する。

塑性化領域の破壊パターン1と破壊パターン2の境界深さ  $z_1$  は、境界条件 (境界面上、下の地盤反力が等しい) から求めることができる。

## (2) 塑性化領域の地盤反力の解析結果

破壊パターン1の各破壊メカニズムを用いて解析した降伏状態における地盤反力と実験結果を比較すると、粘土斜面地盤の二次元矢板問題の解析結果と同じく、変速度場の各ケースの計算結果は、いずれも実測値より大き過ぎることが分かった。この原因は二次元問題と同様、杭前面地盤の進行性破壊特性が理由であると考えられる<sup>1)</sup>。以下では定速度場の各ケースの計算結果のみを議論する。

各破壊メカニズムに対する破壊パターン1の定速度場による地盤反力の計算結果を、表-3に示す。この表に示

した計算結果は、実験における降伏状態時の破壊パターン1の深さと対応する位置の極限地盤反力である。なお、破壊メカニズム a の計算結果は、 $\alpha = 5^\circ$  の計算結果だけを示した。 $\alpha = \beta$  の計算結果は、斜面勾配  $\beta > 5^\circ$  の時  $\alpha = 5^\circ$  の計算結果より大きい。表-3に示した結果を図示すると図-18のようになる。図中の直線は直線近似した破壊メカニズムごとの相関関係である。この図を見ると、各破壊メカニズムから計算した降伏状態における地盤反力は、ほぼ破壊メカニズム a, b, d, c の順で小さくなり、破壊メカニズム c は実測値に最も近い。

実験で観察した破壊メカニズムに最も近い形をしている解析モデルは破壊メカニズム a であるが、地盤反力の解析結果について見ると破壊メカニズム c が最も近い値を与える。その原因は、現在のところ判明していないが、地盤の進行性破壊や塑性化範囲の不完全性などが考えられる<sup>1)</sup>。杭頭への载荷に伴う杭前面地盤の破壊は、浅いところで、かつ杭近傍からはじまり、徐々に深く、また遠いところに発達するために、破壊面全域にわたり応力とひずみは均一な分布でない。杭近傍に先に発生した破壊面の強度は、破壊面が発達する後の段階では低減する。また、斜面近傍ではすべり面の発展はまだ斜面までに完全に形成されておらず、この部分のひずみが小さくて、応力は地盤の極限せん断強度に達していない。解析モデルではこのような影響を十分に考慮することができないため、破壊メカニズム a で実験値より大きな反力を与える結果となったと考えられる。これらの問題に関してはさらなる検討が必要であるが、ここでは、実務への適用を優先させ、進行性破壊の効果が加わって、結果的に実際の破壊状態と等価なモデルになったと見なして破壊メカニズム c を塑性化領域破壊パターン1の地盤反力の計算方法として採用し、斜面勾配の変化に対する適用性を検討する。

土の重さを考慮した破壊メカニズム c の破壊パターン1の地盤反力強度表現式は

$$p_{u1} = c_u \cdot N_c + \frac{\gamma \cdot z_1}{2} \cdot N_\gamma \quad (17)$$

ここに、

$$N_\gamma = \frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos(\alpha - \beta)} \left[ 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{z_1}{D} \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \tan \omega}{\cos(\alpha - \beta)} \right] \quad (18)$$

$N_c$  は式(12)に示す。

地盤の材料定数は一定とし、土の単位体積重量  $\gamma = 15$  (kN/m<sup>3</sup>)、地盤の非排水せん断強度  $c_u = 10$  (kPa)、広がり角  $\omega$  を  $30^\circ$  とし、斜面勾配を  $0^\circ$  から  $50^\circ$  まで  $10^\circ$  つづ変えて計算した破壊パターン1及び破壊パターン2の極限地盤反力強度の深さ分布を図-19に示し

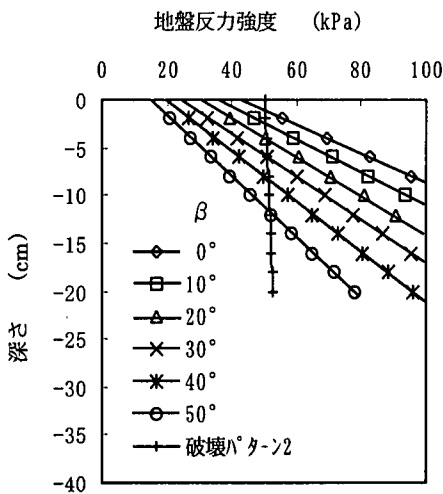


図-19 斜面勾配 $\beta$ ごとの破壊パターン1と破壊パターン2の計算結果

た。この図において、破壊パターン2の地盤反力は斜面勾配に拘らず深さだけの関数となるので1本の直線で表される。これに対し破壊パターン1の地盤反力は、斜面勾配と深さの関数となる。斜面勾配が与えられると各深さでの地盤反力は、2種類の地盤反力のうち小さい方の反力がその斜面の塑性化領域の地盤反力を与えることになるので、2種類の反力の交点から上では破壊パターン1、交点から下では破壊パターン2による反力が求められる。この結果から見ると、斜面勾配が小さいと、計算した破壊パターン1の極限地盤反力が大きく、破壊パターン1と破壊パターン2の境界深さ（曲線の交点）は浅くて、塑性化領域の極限地盤反力が主に破壊パターン2で支配される。斜面勾配が大きくなると、計算した破壊パターン1の極限地盤反力が小さくなり、破壊パターン1と破壊パターン2の境界深さは深くなる。水平支持力に及ぼす斜面の影響はこのことにより表現されており、計算した地盤反力に斜面の影響が反映されていることが分かる。

### (3) 弾性領域の地盤反力の検討

図-4に示している地盤反力と杭変位の関係の実験結果（実験6の例、図中のa, b, c, dは図-1中に示した位置である）を見ると、地盤を塑性化させる受働土圧は深いところほど大きくなるが、地盤が塑性化する前の弾性地盤では、地盤反力と変位関係曲線はほぼ線形で、地盤反力係数は深さにより変わらず、一定と見られる。このような場合には、Chang<sup>28)</sup>の提案するように、弾性領域の水平地盤反力の評価には、線形弾性理論を適用するのが適当と考え、深さと無関係に地盤反力係数は一定

とする。すなわち、弾性領域の水平地盤反力強度は、杭の水平変位の一次関数として、式(19)で表わされる。

$$p_3 = k_h \cdot y \quad (19)$$

ここに、

$$k_h = \frac{E_s}{B} \quad (20)$$

$E_s$  : 地盤の弾性係数

$B$  : 杭の幅。

塑性化領域と弾性領域の境界深さ $z_1$ は、境界条件から決めることができる。

## 4. 杭本体の解析

荷重と地盤反力が杭に作用するとして、基本微分方程式(21)により杭本体の解析を行う。

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + D \cdot p(x, y) = 0 \quad (21)$$

ここに、

$E$  : 杭材のヤング率

$I$  : 杭の断面二次モーメント

$D$  : 杭の幅

$x$  : 鉛直座標

$y$  : 杭の水平変位

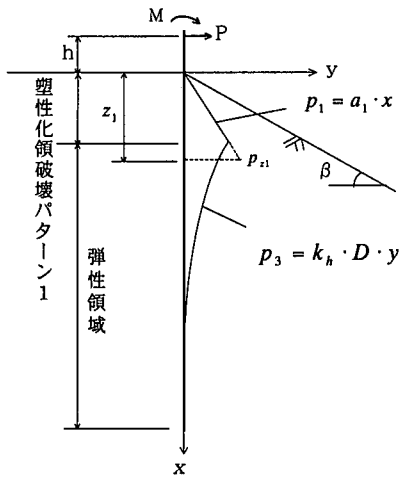
$p(x, y)$  : 杭本体に作用する水平地盤反力強度。

### (1) 解析モデル

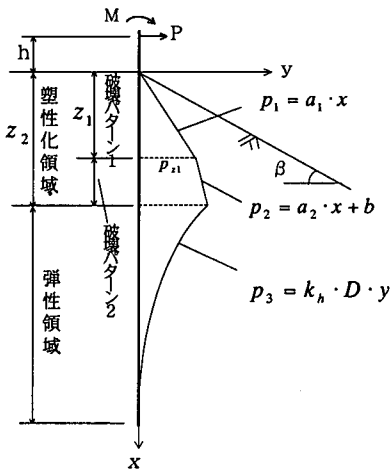
杭本体の変位の解析にあたり、杭前面地盤の塑性化領域の発達過程を考えなければならない。杭に作用する荷重が小さい時、地盤反力は破壊パターン1と破壊パターン2の境界面の極限地盤反力 $p_{11}$ （後述）に達しておらず、地盤反力は塑性化領域の破壊パターン1と弾性領域で構成される。この時を、塑性化過程1と呼ぶ。荷重が大きくなると、地盤反力が破壊パターン2の極限地盤反力に達し、地盤反力は塑性化領域の破壊パターン1、破壊パターン2及び弾性領域で構成されるようになる。この時を、塑性化過程2と呼ぶ。二つの塑性化過程を考慮した解析モデルを図-20に示す。

杭本体の解析に用いる地盤反力は、上界法で計算して得られた塑性化領域の破壊パターン1と破壊パターン2の塑性地盤反力、及び式(19)から得られた弾性領域の弾性地盤反力から構成される。

破壊パターン1の地盤反力 $p_1$ は、上界法から求めた破壊パターン1と破壊パターン2との境界深さ $z_1$ ならびにその位置の地盤反力 $p_{11}$ から定まる三角形分布と仮定す



( 塑性化過程 1 )



( 塑性化過程 2 )

図-20 杭本体解析モデル

る。すなわち、

$$p_{z1} = D \cdot (5.14 \cdot c_u + K_0 \cdot \gamma \cdot z_1) \quad (22)$$

$$p_1 = a_1 \cdot x \quad (x \leq z_1) \quad (23)$$

ここに、

$$a_1 = \frac{D}{z_1} \cdot (5.14 \cdot c_u + K_0 \cdot \gamma \cdot z_1) \quad (24)$$

である。

破壊パターン2の地盤反力分布は

$$p_2 = a_2 \cdot x + b \quad (z_1 \leq x \leq z_2) \quad (25)$$

ここに、

$$a_2 = K_0 \cdot \gamma \cdot D \quad (26)$$

$$b = 5.14 \cdot c_u \cdot D \quad (27)$$

である。

弾性地盤反力分布は

$$p_3 = k_h \cdot D \cdot y \quad (z_2 \leq x) \quad (28)$$

ここに、

$k_h$  : 水平方向の地盤反力係数

である。

## (2) 基本微分方程式とその解

図-20に示すようなモデルを考え、杭頭に水平荷重PとモーメントMが作用したとき、塑性化過程2の杭の基本微分方程式は下の式(29)、(30)、(31)、(32)となる。

地上部では

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0 \quad (29)$$

塑性化領域パターン1では

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + a_1 \cdot x = 0 \quad (30)$$

塑性化領域パターン2では

$$EI \frac{d^4 y_3}{dx^4} + (a_2 \cdot x + b) = 0 \quad (31)$$

弾性領域では

$$EI \frac{d^4 y_4}{dx^4} + k_h \cdot D \cdot y = 0 \quad (32)$$

である。

塑性化過程1の基本微分方程式は、式(31)がなく、(29)、(30)、(32)だけである。塑性化過程1についての基本微分方程式の解は既に紹介されており<sup>29)</sup>、ここでは紹介を省略し、塑性化過程2の基本微分方程式の解を説明する。

杭は半無限長であれば(杭の根入れ長さ $L > \pi / \beta$ )、塑性化過程2の基本微分方程式の一般解は

$$y_1 = -\frac{1}{EI} \left( \frac{A_1}{6} x^3 + \frac{A_2}{2} x^2 + A_3 x + A_4 \right) \quad (33)$$

$$y_2 = -\frac{1}{EI} \left( \frac{a_1}{120} x^5 + \frac{B_1}{6} x^3 + \frac{B_2}{2} x^2 + B_3 x + B_4 \right) \quad (34)$$

$$y_3 = -\frac{1}{EI} \left( \frac{a_2}{120} x^5 + \frac{b}{24} x^4 + \frac{C_1}{6} x^3 + \frac{C_2}{2} x^2 + C_3 x + C_4 \right) \quad (35)$$

$$y_4 = e^{-\beta x} (D_1 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x) \quad (36)$$

ここに,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h \cdot D}{4EI}} \quad (37)$$

$A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4, D_1, D_2$ は未定積分定数で、各領域の境界条件から決まる。

すなわち,

$$A_1 = B_1 = -P \quad (38)$$

$$A_2 = B_2 = M - P \cdot h \quad (39)$$

$$C_1 = \frac{(a_1 - a_2)}{2} \cdot z_1^2 - b \cdot z_1 - P \quad (40)$$

$$C_2 = -\frac{(a_1 - a_2)}{3} \cdot z_1^3 + \frac{b}{2} \cdot z_1^2 + (M - P \cdot h) \quad (41)$$

$$D_1 = \left[ N_4 + \beta \cdot \left( \frac{\sin \beta z_2}{\cos \beta z_2} + 1 \right) \cdot N_3 \right] \cdot \frac{\cos \beta z_2}{2\beta^3 e^{-\beta z_2}} \quad (42)$$

$$D_2 = \left[ N_4 - \beta \cdot \left( \frac{\cos \beta z_2}{\sin \beta z_2} - 1 \right) \cdot N_3 \right] \cdot \frac{\sin \beta z_2}{2\beta^3 e^{-\beta z_2}} \quad (43)$$

$$C_3 = -EI \cdot \beta e^{-\beta z_2} [D_2 (\cos \beta z_2 - \sin \beta z_2) - D_1 (\cos \beta z_2 + \sin \beta z_2)] - \left( \frac{a_2}{24} \cdot z_2^4 + \frac{b}{6} \cdot z_2^3 + \frac{C_1}{2} \cdot z_2^2 + C_2 \cdot z_2 \right) \quad (44)$$

$$C_4 = -EI \cdot e^{-\beta z_2} (D_1 \cos \beta z_2 + D_2 \sin \beta z_2) - \left( \frac{a_2}{120} \cdot z_2^5 + \frac{b}{24} \cdot z_2^4 + \frac{C_1}{6} \cdot z_2^3 + \frac{C_2}{2} \cdot z_2^2 + C_3 \cdot z_2 \right) \quad (45)$$

$$A_3 = B_3 = -\frac{(a_1 - a_2)}{24} \cdot z_1^4 + \frac{b}{6} \cdot z_1^3 - \frac{(B_1 - C_1)}{2} \cdot z_1^2 - (B_2 - C_2) \cdot z_1 + C_3 \quad (46)$$

$$A_4 = B_4 = -\frac{(a_1 - a_2)}{120} \cdot z_1^5 + \frac{b}{24} \cdot z_1^4 - \frac{(B_1 - C_1)}{6} \cdot z_1^3 - \frac{(B_2 - C_2)}{2} \cdot z_1^2 - (B_3 - C_3) \cdot z_1 + C_4 \quad (47)$$

ここに,

$$N_4 = -\frac{1}{EI} \left( \frac{a_2}{2} \cdot z_2^2 + b \cdot z_2 + C_1 \right) \quad (48)$$

表-4 杭本体の解析条件と使用した各定数

実験 ケース	杭曲げ剛性 EI (N・cm <sup>2</sup> )	載荷高さ h (cm)	地盤弾性係数 Es (N/cm <sup>2</sup> )
実験1	1262000	19.5	97.0
実験2	283800	19.5	80.1
実験3	1262000	19.5	137.0
実験4	1262000	19.5	178.0
実験5	1262000	19.5	216.0
実験6	1262000	14.0	63.3
実験7	1262000	14.0	31.1
実験8	1262000	14.0	32.3
実験9	1262000	19.5	27.0

$$N_3 = -\frac{1}{EI} \left( \frac{a_2}{6} \cdot z_2^3 + \frac{b}{2} \cdot z_2^2 + C_1 \cdot z_2 + C_2 \right) \quad (49)$$

である。

### (3) 境界深さ

境界深さ  $z_1$  と  $z_2$  は、境界面上、下の地盤反力が等しいという境界条件

$$P_{1(z_1)} = P_{2(z_1)} \quad (47)$$

$$p_{2(z_2)} = k_h \cdot D \cdot [y_4]_{x=z_2} \quad (48)$$

から求める

境界深さ  $z_1$  は、図-19に示すような破壊パターン1と破壊パターン2の上界法計算結果を用い、グラフを作って両曲線の交点から求めるのが便利である。

境界深さ  $z_2$  は、式(33)を式(48)に代入すると、 $z_2$ に関する三次方程式(49)となる。この三次方程式の正実根は  $z_2$  である。

$$J_1 z_2^3 + J_2 z_2^2 + J_3 z_2 + J_4 = 0 \quad (49)$$

ここに,

$$J_1 = \frac{a_2}{6} \quad (50)$$

$$J_2 = \frac{a_2 + \beta \cdot b}{2\beta} \quad (51)$$

$$J_3 = \frac{a_1 - a_2}{2} z_1^2 - b z_1 + \frac{b}{\beta} - P + \frac{2\beta^2 \cdot E \cdot I \cdot K_0 \cdot \gamma}{k} \quad (52)$$

$$J_4 = -\frac{a_1 - a_2}{2} z_1^3 + \left( \frac{a_1 - a_2 + \beta b}{2\beta} \right) z_1^2 - \frac{b}{\beta} z_1 + \left( M - Ph - \frac{P}{\beta} + 5.14 C_u \cdot \frac{2\beta_2 EI}{k} \right) \quad (53)$$

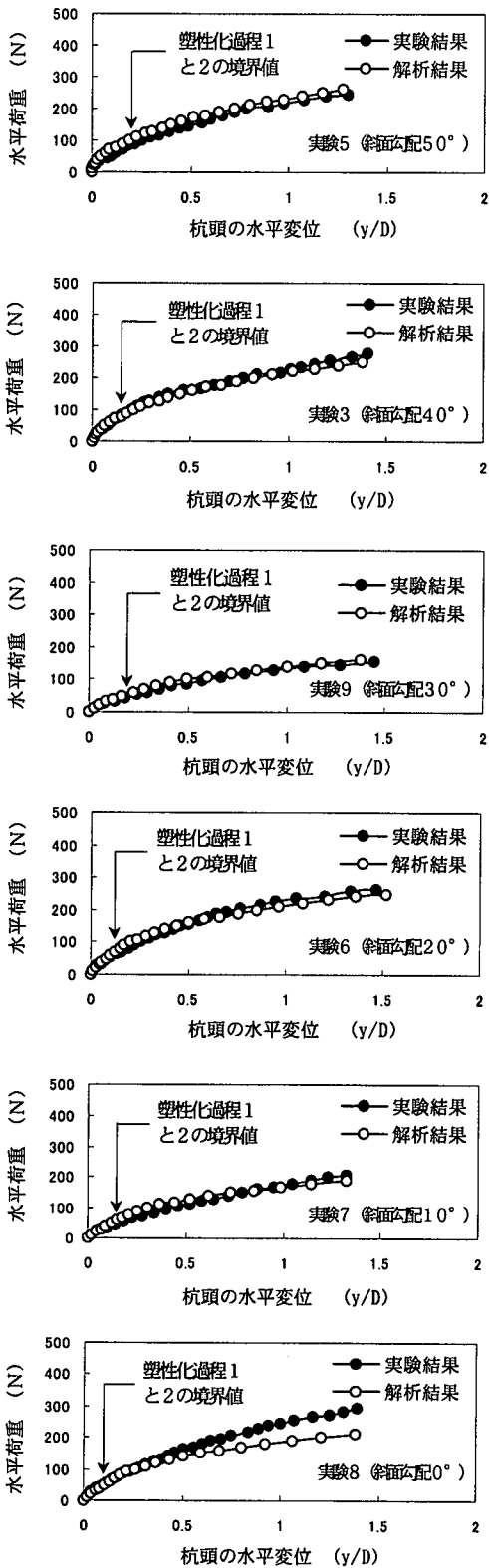


図-21 水平荷重—杭頭変位関係  
解析結果と実験結果の比較

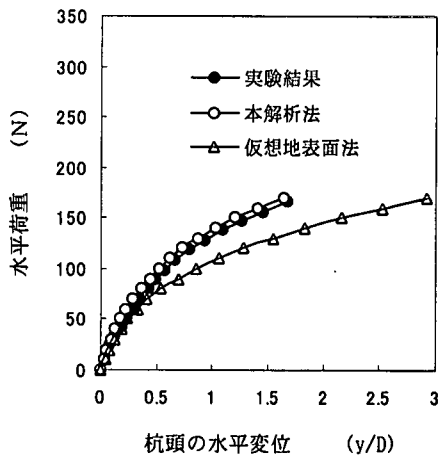


図-22 実験9の計算結果比較図

#### (4) 杭頭の変位

杭頭の変位は、下式から求める。

$$[y_1]_{x=0} = -\frac{A_4}{EI} \quad (54)$$

#### (5) 解析結果と実験結果の比較

上述の塑性化領域の地盤反力の上限法計算結果及びこの結果から求めた破壊パターン1と破壊パターン2の境界深さを用いて、実験した杭の変位解析を行った。この計算においては破壊メカニズムcを用いた。

各実験ケースに対する解析条件と解析に使用した諸定数を、表-4に示す。表中の地盤弾性係数は一軸圧縮試験から求められた $E_{s0}$ を用いた。

斜面勾配が $0^\circ$ から $50^\circ$ まで、解析で得られた杭に作用する水平力—杭頭の水平変位関係、ならびに実験結果を図-21に示す。

解析結果と実験結果を比較して見ると、本解析は傾斜地盤において斜面勾配の増加に伴う水平支持力の低下、及び杭頭の水平変位の増加に伴う水平支持力の非線形特性などが良く再現できていることが分かる。また、平坦地盤( $\beta = 0^\circ$ )において解析した水平荷重は載荷実験の降伏状態付近まではよく実験値を再現できるが、さらに大きい変位に対する荷重は実験値よりやや小さい。

また、斜面勾配 $30^\circ$ の実験9を例にとり、本解析法ならびに仮想地表面法<sup>3) 4)</sup>による解析結果を比較すると図-22のようになる。この図を見ると、仮想地表面法により計算した水平荷重は過小で不経済になることが分かる。

## 5. 考察

水平荷重を受ける杭の挙動は、杭前面の地盤反力を正確に評価できれば、精度よく解析できる。この論文で述べた解析では、杭前面の地盤反力は塑性化領域の破壊パターン1、破壊パターン2及び弾性領域の三つの部分の地盤反力を考えている。この三つの部分の地盤反力に与える斜面勾配の影響が最も大きいのは破壊パターン1である。今回の破壊パターン1の地盤反力の解析では、実験から観察された破壊形状に基づき設定した破壊メカニズムa、ならびに想定した三つの破壊メカニズムを用いて得られた地盤反力を比較した。その結果、実験値と同じ大きさの地盤反力を与える解析モデルは、実験から観察された破壊メカニズムと形状の似ている破壊メカニズムaではなく、破壊メカニズムcであった。これは二次元問題の矢板の解析結果<sup>1)</sup>と同様であり、また、高速道路調査会<sup>18)</sup>や東京電力<sup>19)</sup>が実施した現場実験でも載荷実験後に観察したすべり面は、それぞれが解析のために仮定したすべり面とは異なっていた。この原因は、破壊パターン1の水平地盤反力は最終の破壊形状及び力学特性に依存するだけでなく、地盤の破壊過程と破壊特性などの多くの要素にも関連している。すなわち、塑性化領域の形成における破壊の進行性特性や地盤の不完全剛塑性特性に伴い不完全破壊現象が破壊メカニズムaの計算で十分反映できていないためと考えられる。

本論文では、現時点の実務への適用を優先させ、破壊メカニズムcは、進行性破壊や不完全破壊などの影響が加わって、結果的に実際の破壊に等価なモデルになったと見なして、便宜的に採用した。このモデルを用いることにより、実験結果に近い値を与える地盤反力の最小上界値を解析的に得ることができる。また、破壊メカニズムcを利用して解析した結果は、従来の方法では考慮することができなかった斜面の傾斜角の影響についても対応でき、急斜面から平坦地盤まで、杭と地盤の連成系の荷重—変位関係の複雑な非線形特性をよく表現できることが分かった。

しかし、上述の問題を解決するため、破壊面における応力とひずみ分布の不均一性や破壊の不完全性について検討し、実際の破壊メカニズムを再現することができる解析モデルを構築することが必要である。

## 6. おわりに

粘土斜面地盤に設置された杭の模型実験から塑性化領域における地盤反力には深さに応じた上限値があることを示し、このことを考慮した数値解析を実施した。この

解析における杭前面地盤の塑性反力は異なる破壊特性を持つ破壊パターン1と破壊パターン2の二種類の塑性地盤反力から求め、弾性地盤反力は地盤の弾性係数と杭の変位特性から求めた。地盤の反力特性を考慮したこの弾・塑性地盤反力法から求めた杭の荷重と変位の関係は、斜面勾配が $0^\circ$ から $50^\circ$ までのいずれの実験結果ともよく整合していることを示した。

今後、地盤の進行性破壊特性や不完全剛塑性特性に対する取り扱い方法などについてさらに検討し、より良い手法に改善していきたい。

## 参考文献

- 1) 呉正林, 佐々木康, 日下部治: 傾斜地盤中に設置された矢板の水平抵抗に関する実験と解析, 土木学会論文集, No. 631/III-48, pp. 257-272, 1999.
- 2) 呉正林, 佐々木康, 日下部治: 粘性土斜面地盤における杭基礎の水平支持力特性に関する模型実験, 第4回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp. 115-120, 1999.
- 3) 日本道路公団高速道路調査会: 「基礎構造に関する調査研究昭和45年度・報告書」, 1971.
- 4) 港湾技術協会: 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」, pp. 142-148, 1988.
- 5) 寺師昌明, 北詰昌樹, 丸山敦司: 斜面を有する砂地盤中の単杭の横抵抗に関する遠心模型実験, 第25回土質工学研究発表会, pp. 5-7, 1990.
- 6) 寺師昌明, 北詰昌樹, 山本芳生: 斜面を有する砂地盤中の単杭の横抵抗に関する遠心模型実験(その2), 第26回土質工学研究発表会, pp. 1439-1442, 1991.
- 7) 寺師昌明, 北詰昌樹: 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗, 港湾技術研究所報告, 第30巻2号, pp. 327-348, 1991.
- 8) 久保浩一: 杭の横抵抗の新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol. 2, No. 3, pp. 1-37, 1964.
- 9) 富永晃司: 鉛直力を受ける鋼管杭の水平挙動に関する非線形解析法, 日本建築学会構造系論文報告集第309号, pp. 125-133, 1988.
- 10) 村本昌志, 富永晃司, 山本春行: 傾斜地盤中の水平抵抗理論(変位影響係数に関する考察), 日本建築学会中国支部研究報告集, 第19巻, pp. 109-112, 1995.
- 11) 村本昌志, 富永晃司, 山本春行: 傾斜地盤中杭の水平抵抗理論(塑性地盤反力と解析) 日本建築学会大会学術梗概集, pp. 1059-1060, 1995.
- 12) 茶谷文雄: 有限平面地盤における杭の水平抵抗について, 第27回土質工学研究発表会, pp. 1653-1656, 1992.
- 13) 西山高士, 茶谷文雄: 有限平面地盤における杭の水平抵抗について(その2. 模型実験結果), 第28回土質工学研究発表会, pp. 1801-1804, 1993.

- 14) 茶谷文雄, 西山高士: 有限平面地盤における杭の水平抵抗について(その3. 模型実験結果の解析), 第28回土質工学研究発表会, pp.1805-1808, 1993.
- 15) 宇都一馬, 前田弘, 吉井幸雄, 竹内幹雄, 古賀明, 谷伸二郎: 深礎杭の水平抵抗と土のせん断変形特性, 第28回土質工学シンポジウム, pp.29-34, 1983.
- 16) Uto, K., Maeda, H., Yoshii, Y., Takeuchi, M., Kinoshita, K. and Koga, A.: Horizontal behavior of pier foundation in a shearing type ground model, the 5th ICONMIG, pp. 781-788, 1985.
- 17) 日本道路公団高速道路調査会: 「基礎構造に関する調査研究 昭和47年度・報告書」, 1973.
- 18) 日本道路公団高速道路調査会: 「基礎構造に関する調査研究 昭和48年度・報告書」, 1974.
- 19) 東京電力: 深礎杭基礎の合理的設計検討委員会報告書, 1983.
- 20) Wai-Fah Chen: Developments in Geotechnical Engineering 7. LIMIT ANALYSIS AND SOIL PLASTICITY. Chapter3. pp.47-99, Library of Congress Card Number:74-84058, 1975.
- 21) 木村 孟, 日下部 治: 「土の強さと地盤の破壊入門」第4章 pp.273-331, 土質工学会 1978.
- 22) James, R.G. and Bransby, P.L.: Experimental and Theoretical Investigations of A Passive Earth Pressure Problem, Geotechnique 20, No. 1, pp.17-37, 1971.
- 23) James, R.G. and Bransby, P.L.: A Velocity Field for Some Passive Earth Pressure Problems, Geotechnique 21, No. 1, pp.61-83, 1971.
- 24) 最上武雄編: 土質力学, pp.831~834, 技報堂, 1969.
- 25) Terzaghi, k.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons Inc., pp.129, 1963.
- 26) Gibson, R.E.: In-Site Measurement of Soil Property with the Pressuremeter, Civil Engineering Workes Review, Vol.56, No.658, pp.615-618, 1961.
- 27) Lukes, R.G. and De Bussy, B.R.: Pressuremeter and Laboratory Test Correlations for Clays, Journal of the Geotechnical Division, ASCE. Vol.102, No.GT9, pp.945-962, 1976.
- 28) Chang, H.L.: Discussion on " Lateral pile Loading Tests" by L. b. Feagin, Trans. ASCE, No.102, pp.272-278, 1937.
- 29) 土質工学会: 杭基礎の設計法とその解説, pp.435-439, 1985.

(1999.10.4 受付)

## ANALYSIS ON LATERAL RESISTANCE OF PILE IN CLAY SLOPE

Zhenglin WU, Yasushi SASAKI and Osamu KUSAKABE

Lateral resistance, failure mechanism, plastic processes, and horizontal subgrade reaction etc. were investigated through a laboratory experiment on a laterally loaded single pile in clayey slope. On the basis of the observed results, a 3D plastic analysis model was proposed to calculate the horizontal subgrade reaction force in a sloped ground. Using this model, the relation between lateral displacement of pile and horizontal force was examined, and it was shown that the calculated relation was in well agreement with the experimental result.