

様々な傾斜角の控え杭に対する 地盤反力係数分布に関する実験的研究

小田 隼也¹・長尾 毅²

¹学生会員 神戸大学 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
中央復建コンサルタンツ (〒533-0033 大阪府大阪市東淀川区東中島 4-11-10)
E-mail: oda_t@cfk.co.jp

²正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

杭基礎の耐震設計では、水平荷重作用時の杭の変位量に比例して生じる地盤反力を適切に評価する必要がある。地盤反力と杭の変位量の比は地盤反力係数(SRM)と定義される。SRMの深度分布は深度方向に一定もしくは単調増加とする考え方がある。杭基礎には、杭の傾斜角の違い(直杭と斜杭)、根入れ地盤の違い(支持杭と摩擦杭)等により様々な種類があるが、設計実務ではSRMは杭の種類によらず同じとして取り扱われる。本研究では、水平荷重の支持を主目的とした岸壁等の控え杭に着目して、水平載荷模型実験を行い、SRMの深度分布を評価した。特定の条件では、設計実務で考慮される分布とは異なり、SRMは地中の特定の深さで極大値を示し、その深さで深では減少することが明らかとなった。更に、SRMが極大値を示す位置は、杭の回転中心位置に依存することが示された。

Key Words: *subgrade reaction modulus, anchor pile, horizontal loading experiment, seismic resistance*

1. はじめに

構造物の自重等の鉛直荷重を支持するために、杭基礎が適用されることが多い。杭基礎は地震荷重などの水平荷重に対しても十分な抵抗を発揮することが求められる。鉛直荷重の支持を主目的とする杭は、基盤まで根入れされることが一般的である。岸壁などでは土圧や地震荷重などの水平荷重に抵抗するために控え杭が用いられることがあるが、この場合、控え杭には鉛直荷重に対する支持性能は期待されないため、控え杭が基盤に根入れされることは少ない。杭には打設角度の違いにより直杭と斜杭が存在し、鉛直荷重支持が主目的である場合は直杭が採用されることが多いが、水平荷重への抵抗性能としては斜杭が優れていることが指摘されている。例えば、栈橋の基礎杭に関して、Rothら¹⁾、Schlechterら²⁾、Razaviら³⁾、Lietalら^{4,5)}などの実験的および解析的研究が斜杭の有利性を明らかにしている。

杭基礎が地震荷重の作用を受ける場合、杭基礎には水平変位が生じ、杭の変位量に比例して地盤反力が生じて地震荷重に抵抗する。直杭に水平荷重が作用する時の杭の耐震抵抗は、杭の曲げ抵抗と水平地盤反力の組み合わせ

により発揮され、杭の軸方向支持力は杭の耐震抵抗にほとんど寄与しない。一方、斜杭に水平荷重が作用する場合は、水平荷重の一部が軸方向力となり、杭軸直角方向の荷重のみが杭の曲げ抵抗と水平地盤反力によって支えられる。このように、直杭と斜杭で水平荷重に対する抵抗メカニズムは異なるが、いずれの場合も、杭基礎の耐震設計において、水平地盤反力を正確に評価することが必要である。地盤反力と杭の変位量の比は地盤反力係数(SRM)と定義される。既往の研究や各種基準類において示されているSRMの算定方法としては、地盤の相対密度をもとにする方法^{6,7)}と地盤の変形係数をもとにする方法^{8,9)}に大別される。また、SRMの深度分布については、深度方向に一定とする場合⁹⁾と、単調に増加すると考える場合^{10,11)}がある。設計実務では、その取扱いの容易さから、深度分布を一定とする方法が採用されることが多いが、深度方向に単調に増加すると考える方が、実際の地盤反力を正確に評価できると指摘されている⁹⁾。このように、SRMの算定に用いる地盤パラメータとその深度分布には様々な考え方があるが、SRMの深度分布は上述した杭の種類によって変化しないと考えられている。

土槽に設置した杭基礎を対象として、水平載荷実験や振動実験が数多く行われてきた。杭基礎下端の条件として、下端を土槽に固定したもの^{12,13,14,15}、下端を地盤中に設置したもの^{10,16,17}がある。前者は実験を行うことは比較的容易であるものの、水平載荷や加振によって杭に生じる変形は曲げ変形のみである。一方、後者の条件では杭の曲げ変形のみならず、水平載荷や加振によって並進や回転が生じる。上述のように水平荷重支持を主目的とする控え杭は一般的に基盤に根入れされないため、水平載荷によって杭の下端には変位が生じるが、杭下端を土槽に固定してしまうと、実際の杭の挙動とは異なる応答が得られてしまう。また、杭の設置角度については、既往の研究は直杭を対象にしたものがほとんどであり、組杭を対象にした研究事例も存在するが¹⁷、単一の斜杭を対象にしたものは皆無である。

本研究では、水平荷重に対する抵抗を主目的とした控え杭に着目し、杭の傾斜角の違いがSRMの深度分布に及ぼす影響を評価するために水平載荷模型実験を行った。杭の傾斜角は0度から30度まで10度刻みで変化させた。鉛直荷重の支持を目的としないため、杭下端は土槽に固定しない条件とした。杭は支持杭/摩擦杭、直杭/斜杭の区分のほかに、杭の曲げ剛性と根入れ長に応じて長杭と短杭に分類される。上述の既往実験^{10,17}は長杭を対象としているが、本実験では短杭を対象とした。なお、既往の実験は、杭に取り付けたひずみゲージによる計測値から曲げモーメントを求め、それを2階微分して地盤反力を算出したものがほとんどである^{12,13,14,15,16}。このうち、地盤反力の深度分布を評価した事例もあるが¹⁵、地中深くでは杭に生じるひずみが小さく、計測値および算出した地盤反力の信頼度は低い。一方で、杭に土圧計を取り付けて地盤反力を計測した事例もあるが¹⁸、土圧計の計測値をもとに地盤反力やSRMの深度分布を評価した事例は皆無である。そこで、本研究では杭に土圧計を取り付け、地盤反力を直接計測した。そして、載荷に伴う杭の変位と地盤反力の計測値をもとに、SRMの深度分布を評価し、既往研究や設計指針類で示されているSRMの深度分布との違いについて議論した。

2. 方法

(1) 実験概要

本実験では、図-1に示す土槽を使用した。土槽の各寸法は、幅880mm、奥行500mm、高さ500mmである。表-1のように杭の初期傾斜角が異なる4ケースを対象とし、それぞれメガトルクモーターを使用して杭頭部に水平に載荷した。杭への載荷中に、載荷直角方向へ杭が傾斜することを防ぐための横ずれ防止ガイドを取り付けた。

杭下端を実験装置に固定しない条件とするために、土

槽下端から100mmの高さまで砂を投入した後に、杭を設置した。Case 3を例に、杭の設置状況を図-2に示す。杭の水平地盤反力に対する土槽の影響を小さくするために、杭頭が変位する方向の土槽壁から730mmの位置に杭を設置した。杭設置後、土層下端から450mmの高さまで砂を投入した。地盤には、乾燥した東北珪砂6号を使用し、密な砂地盤中の杭の水平荷重に対する挙動を評価するために、相対密度 D_r が約75%となるように空中落下法により作成した。

杭の諸元は表-2に示すとおりである。実物の杭高さは、控え杭として一般的に適用される範囲内の18mを想定し、実験用土槽の大きさを考慮して、長さの縮尺比(実物/模型)を40に設定した。実物杭は外径2400mm、板厚8.0mmを想定し、模型杭の外径は長さの相似則より60mmとし、板厚は実物と模型の曲げ剛性が一致するように設定した。1g場における地盤・構造物系の模型振動実験の相似則¹⁹を適用した。杭にはアルミを使用した。

実験での載荷速度は0.5mm/s、杭頭部の最大水平変位は20mm以上とした。速度の縮尺比(実物/模型)は15.9、変位の縮尺比(実物/模型)は253であるため、実スケールでの載荷速度は7.95cm/s、杭頭部の最大水平変位は5m以上となる。

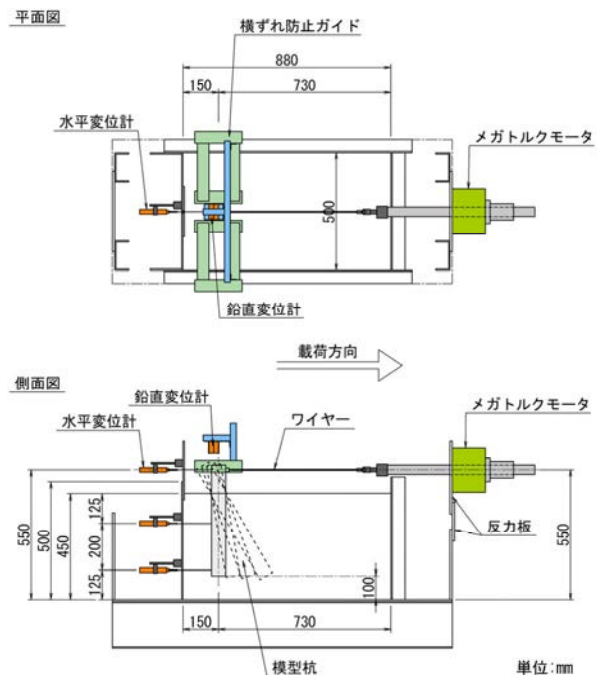


図-1 実験装置概略図

表-1 検討ケース

	初期傾斜角
Case 1	0°
Case 2	10°
Case 3	20°
Case 4	30°

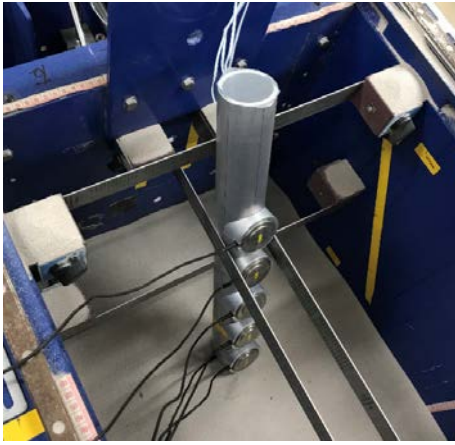


図-2 杭設置状況(Case 3)

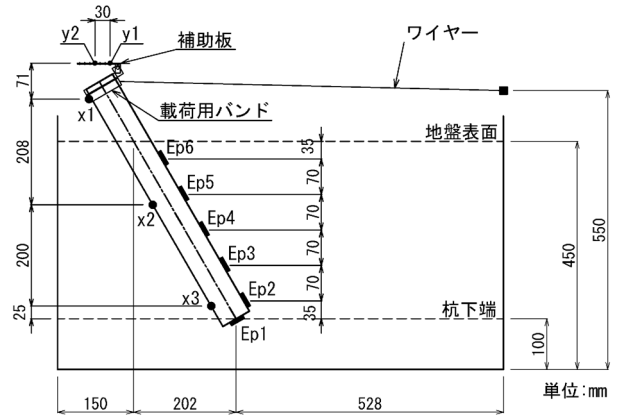


図-3 計測機器の取付位置(Case 4)

表-2 杭諸元

外径(mm)	60.0
肉厚(mm)	5.0
ヤング係数(kN/m ²)	7.00×10 ⁷
断面積(m ²)	8.64×10 ⁻⁴
断面二次モーメント(m ⁴)	3.29×10 ⁻⁷
曲げ剛性(kNm ²)	2.31×10

(2) 計測項目

本実験で計測した項目は、①荷重、②水平変位、③鉛直変位、④杭前面の土圧であり、データロガーを用いて全項目の時刻歴データを記録した。これ以降は、杭頭が変位する方向の面を杭前面、その反対の面を杭背面とする。

Case 4 を例に、各計測機器の取付位置を図-3 に示す。水平変位の値を x 、鉛直変位の値を y 、土圧の値を Ep と定義し、同図に示すように番号を振り分けた。荷重計は載荷装置本体に取り付けた。杭上部、中部、下部の3箇所を対象として、杭背面側の土槽壁に固定した変位計と杭背面をワイヤーで接続することで水平変位を計測した。ワイヤーをスリーブに通すことで、地盤とワイヤーの間の摩擦を除去した。杭中部および下部の水平変位計測位置は、杭下端からそれぞれ 225 mm、25 mm の高さである。一方、杭上部の水平変位計測位置は、杭の初期傾斜角によって異なる。鉛直変位は、土槽に固定したレーザータイプの変位計により、杭頭に取り付けた補助板との距離を計測した。計測は2箇所とし、水平方向に 30 mm の隔離を設けた。土圧は、直径 50 mm の土圧計を用いて、杭下端に1箇所と杭下端から 35, 105, 175, 245, 315 mm の高さの5箇所で計測した。なお、杭表面は曲面であるため、図-2 のように杭形状に合わせた治具を用いて設置した。

また、土圧計によって得られた地盤反力の計測値は、載荷中に砂粒子が土圧計に接触と移動を繰り返すために値が大きく変動し、高周波成分が多く含まれた。このた

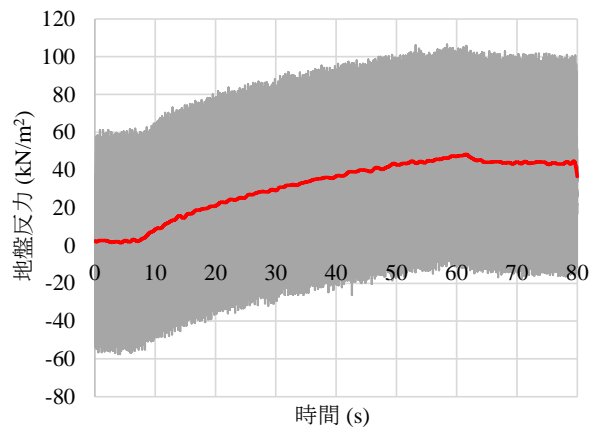


図-4 フィルター処理の例(Case 1 Ep4)

め、計測データを高速フーリエ変換し、0.8 Hz でローパスフィルタリングを行った後、逆高速フーリエ変換を行い、時刻歴データを取得した^{20),21)}。図-4 に Case 1 の Ep4 を例に、土圧計の計測値とフィルター処理後の値の時刻歴を示す。グレー線は計測値、赤線はフィルター処理後の値を示す。

3. 結果

(1) 水平変位

Case 1 における杭の水平変位の時刻歴を図-5 に示す。載荷方向への変位を正とする。x1 は 23 mm までの範囲で、0.5 mm/s の速度で変位が増加している。これに対して、x3 は載荷方向と反対側に変位している。ここで、x1 は載荷途中の 56 s から一定値を示している。これは、その時刻において、水平変位が変位計の計測限界値に達したためである。

杭頭の水平変位が 6 mm となる時刻における杭の水平変位分布を図-6 に示す。上述のように、x1 の計測高さはケースごとに異なるため、これ以降は杭下端から 450

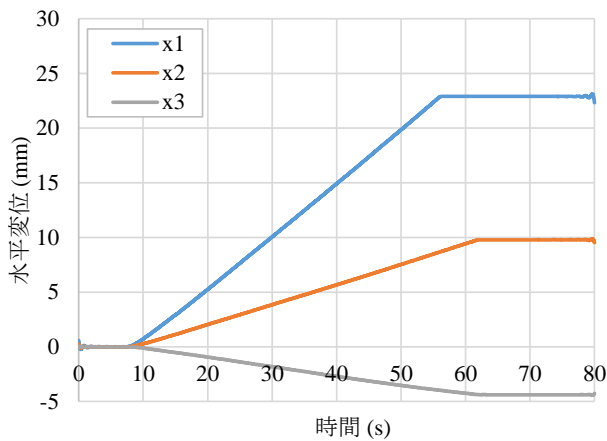


図-5 杭の水平変位時刻歴(Case 1)

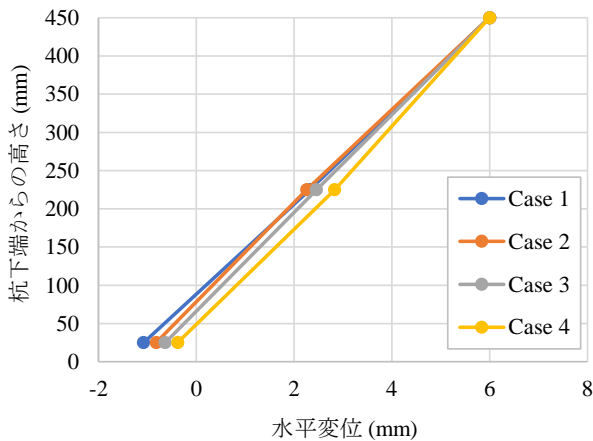


図-6 杭の水平変位分布図(杭頭 6mm 変位時点)

mmの高さを杭頭とする。 荷終了時点においても全てのケースで杭は直線形状を保っており、杭に曲げ変形が生じていない。 杭下端は荷と反対方向へ変位し、杭の曲げ変形が生じていないことは、ある深さを中心に杭が回転し、これが支配的な変形モードであることを示している。これは短杭の水平荷時の特徴的な応答である。

(2) 回転中心高さ

杭は剛体として回転していることから、x1とx3を用いて杭の回転中心高さを求めた。杭の初期傾斜角と回転中心高さの関係を図-7に示す。凡例の数値は杭頭の水平変位量を示す。杭の初期傾斜角が大きくなるにつれて、回転中心は低くなるという明瞭な関係がある。また、回転中心の高さは杭頭の変位量に依存しない。

(3) SRM

Case 1を例に、杭頭水平変位と地盤反力の関係を図-8に示す。Ep1は杭頭変位が小さい範囲で大幅に減少し、変位が3mmの時点で0となる。荷前は杭自重によって10.6kN/m²の地盤反力が生じていたが、荷とともに杭が回転し、杭下端が地盤と接触しなくなったため、地盤反力が計測されなくなった。Ep2は杭の回転中心より

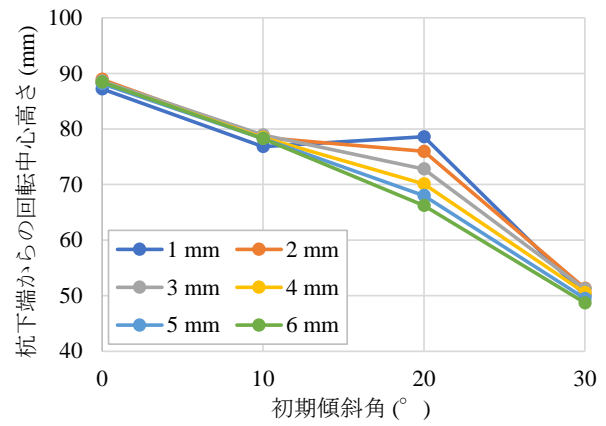


図-7 杭の初期傾斜角と回転中心高さの関係

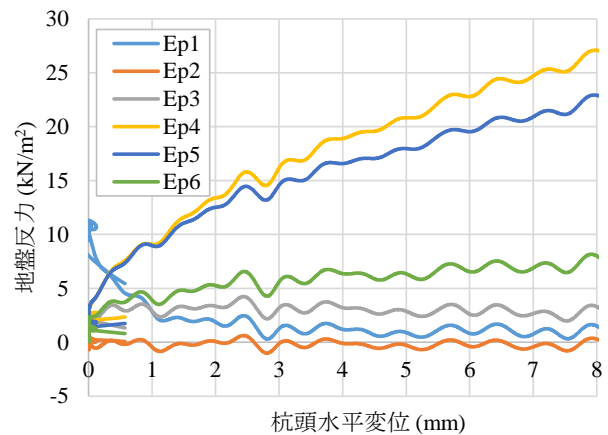


図-8 杭頭水平変位と地盤反力の関係(Case 1)

も低い位置にあり、この位置では杭は荷方向とは反対に変位するため、杭前面に地盤反力は生じない。Ep3は杭の回転中心に近く変位が小さいため、地盤反力はほとんど変動しない。これに対して、Ep4~6は杭の回転中心から離れており、荷方向に大きく変位するため、杭頭水平変位の増加に伴い地盤反力も大きくなる。ただし、Ep6は地表面付近に設置されており、地盤の拘束圧が非常に小さいため、杭頭水平変位の増加に伴って杭前面の地盤が盛り上がることで地盤の圧縮が生じにくく、地盤反力の増加が小さい。

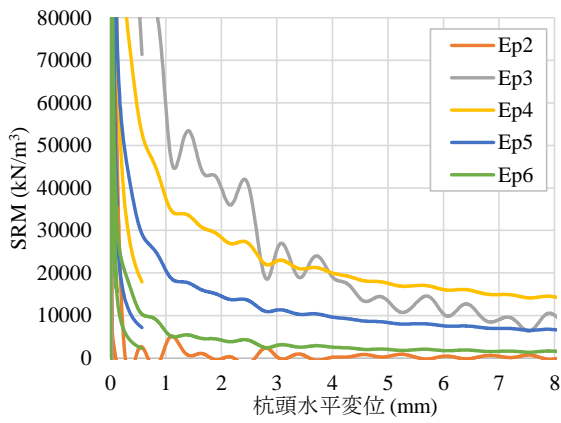
ある深さにおける杭前面の地盤反力と杭の水平変位は、一般に(1)式の関係で表すことができる。

$$p=ky \quad (1)$$

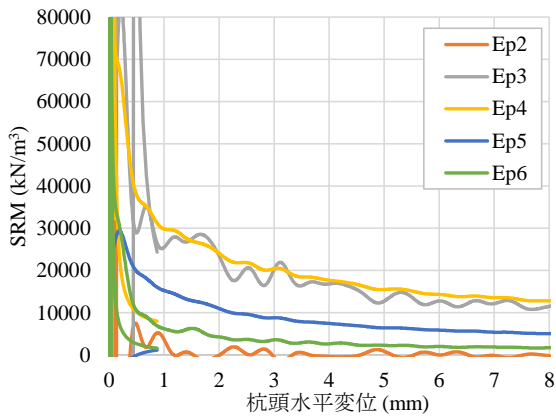
ここに、

- p : 杭前面の地盤反力 (kN/m²)
- y : 杭の水平変位 (m)
- k : SRM (kN/m³)

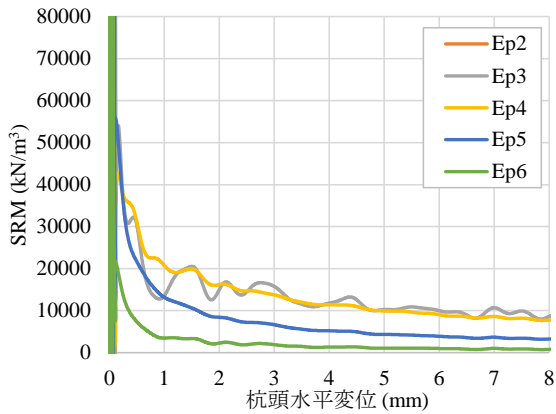
(1)式をもとに、本実験にて計測した地盤反力および水平変位から、各土圧計の設置深さにおけるSRMを算



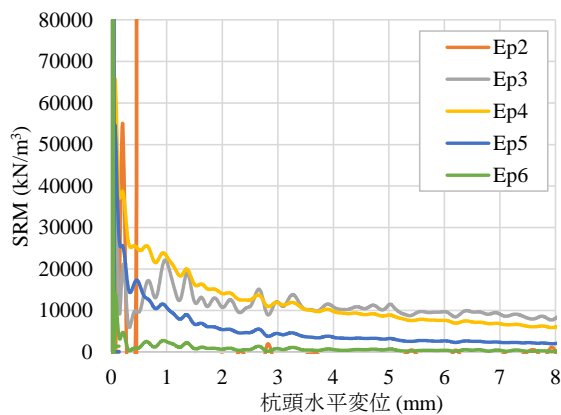
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

図-9 杭頭水平変位と SRM の関係

出した。杭頭水平変位と SRM の関係を図-9 に示す。杭の初期傾斜角や深度によらず、地盤の非線形特性および地盤が杭と土槽壁の間をすり抜ける影響により、水平変位の増加とともに SRM は小さくなる。杭頭水平変位が 1 mm (実スケールで 25 cm) までは急激に SRM が低下し、2 mm (実スケールで 50 cm) を超えると SRM は大きく変化しない。同様の現象は、幅の広い基礎の底面に作用する鉛直 SRM でも指摘されている²⁾。

杭頭水平変位の増加に伴い地盤反力が増加した Ep4~Ep6 を対象に、杭頭の水平変位 6 mm 時点における杭の初期傾斜角と SRM 比の関係を図-10 に示す。同図では、SRM 比をプロットし、2次関数により求めた近似曲線を実線で示した。ここでは、Case 1 の SRM に対する各ケースの SRM の比率を SRM 比とする。Ep4,5 では、初期傾斜角の増加に伴い、SRM 比は概ね線形で減少する。一方で、地盤の拘束圧が小さい Ep6 の SRM 比は、初期傾斜角が 0~10° の範囲では一定であり、初期傾斜角が 20~30° の範囲では急激に減少する。

杭頭の水平変位 6 mm 時点为例に、地盤反力分布および SRM 分布をそれぞれ図-11、図-12 に示す。上述のように Ep2 の地盤反力は得られていないため、Ep3~6 の値のみを対象とした。回転中心位置では杭に変位が生じないため地盤反力も作用しないと考え、地盤反力は回転中心高さで 0 とした。各ケースで SRM 分布の形状は異なる。

4. 考察

(1) SRM に関する各種設計指針との比較

各種の設計指針では様々な SRM の評価方法が示されており、地盤の相対密度をもとにする方法^{6,7)}と地盤の変形係数をもとにする方法^{8,9)}に大別される。また、SRM の深度分布については、深度方向に一定とする場合⁹⁾と、単調に増加すると考える場合^{10,11)}がある。本研究では、それぞれの手法を表-3 のように定義する。

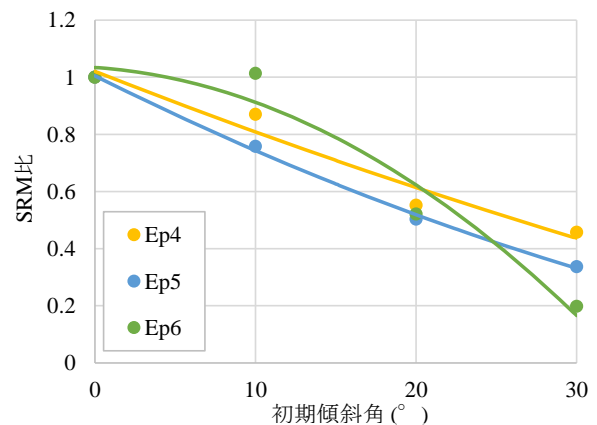


図-10 初期傾斜角と各深度の SRM 比の関係
(杭頭 6 mm 変位時点)

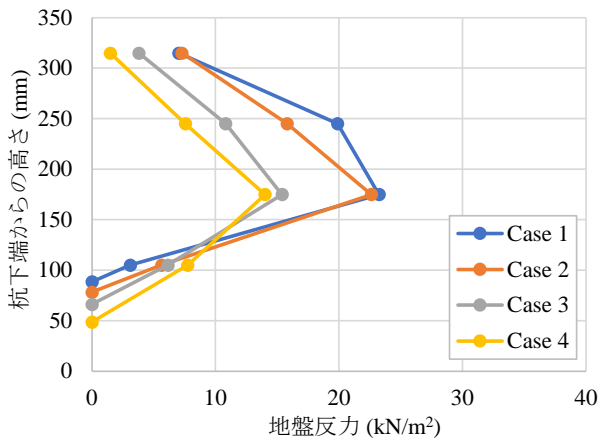


図-11 地盤反力分布図(杭頭 6mm 変位時点)

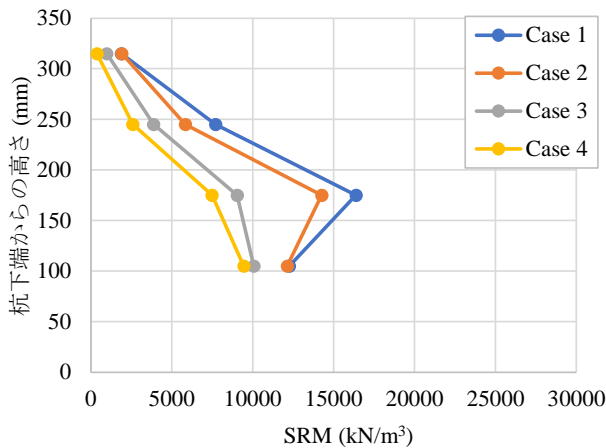


図-12 SRM 分布図(杭頭 6mm 変位時点)

表-3 SRMに関する手法の定義

地盤パラメータ	深度方向の変化	
	一定 (C)	増加 (I)
相対密度 (RD)	RD-C	RD-I
変形係数 (DM)	DM-C	DM-I

表-4 SRMの増加率 n_h (単位: kN/m^3)

砂の相対密度	緩い	中位	密な
乾砂または湿砂	2200	6600	17600
水中の砂	1300	4400	10800

RD-Iとしては(2)式により SRMを求める手法がある⁷⁾. SRMの増加率 n_h は相対密度に応じた表-4の値が示されている.

$$k = n_h x / B \quad (2)$$

ここに,

- k : SRM (kN/m^3)
- n_h : SRMの増加率で, 表-4に示す値 (kN/m^3)
- x : 深さ (m)
- B : 杭幅 (m)

DMとしては(3)式により SRMを求める方法がある⁸⁾.

$$k = \lambda k_0 (B' / 0.3)^{3/4} \quad (3)$$

ここに,

- λ : 基礎の施工方法の影響を考慮する係数
- k_0 : 直径 0.3mの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する SRM (kN/m^3)
- $k_0 = \alpha E / 0.3$
- E : 地盤の変形係数 (kN/m^2)
- α : SRMの換算係数
- B' : SRMの推定に用いる基礎の換算載荷幅 (m)

(3)式については, SRMの基礎幅依存性を過大評価しているという指摘がある²³⁾が, 本研究では杭の幅は変化させておらず, SRMの深度分布に焦点をあてた議論を行うため, (3)式をそのまま用いる. 本実験とは別に, 同じ空中落下法により相対密度 75%, 高さ 250 mmの地盤を作成し, 地盤の圧縮試験を実施した結果, 平均的な変形係数は 2000 kN/m^2 であった. よって, DM-Cタイプの SRM算出にはその値を用いる. 一方, DM-Iタイプについては, 地盤のせん断弾性係数は平均有効応力の 0.5 乗に比例し²⁴⁾, 地盤の変形係数とせん断弾性係数は(4)式のような比例関係にあることから, 本研究では地盤の変形係数も平均有効応力の 0.5 乗に比例すると考える. よって, 高さ 250 mmの地盤の中央における変形係数が 2000 kN/m^2 と考えると, (4)式の関係を用いることで特定の深度に対する変形係数を算出する.

$$E = 2(1+\nu)G \quad (4)$$

ここに,

- G : 地盤のせん断弾性係数 (kN/m^2)
- ν : 地盤のポアソン比

既往の算出法に基づいて算出した SRMと, 本実験で得られた SRMの比較を行った. 杭頭の水平変位 6mm時点を例に, SRM分布の比較結果を図-13に示す. 各手法に基づく SRMは, 直杭を想定して算出した値である. 一般的に, 杭が傾斜している場合の SRMは, その初期傾斜角に応じて変化する. 特に, 本実験のように, 杭が直立する方向に荷重が作用する場合には, 初期傾斜角が大きいくほど SRMは小さくなる⁹⁾. しかし, 傾斜角に応じた SRMの低減の度合いに関する包括的な知見はこれまでに得られておらず, かつ, ここでは SRMの値そのものではなく, 深度分布に着目していることから, 杭が傾斜している Case 2~4についても SRMの低減を考慮していない.

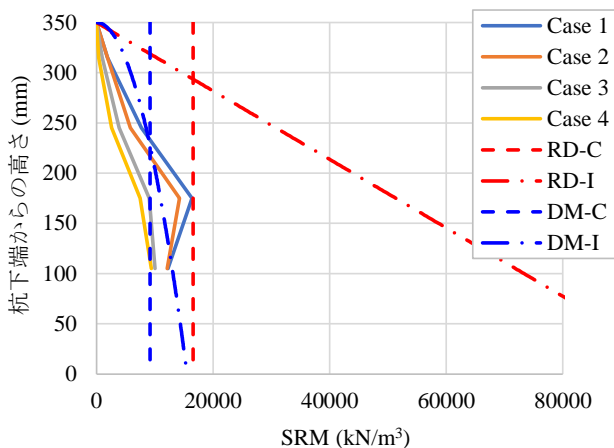
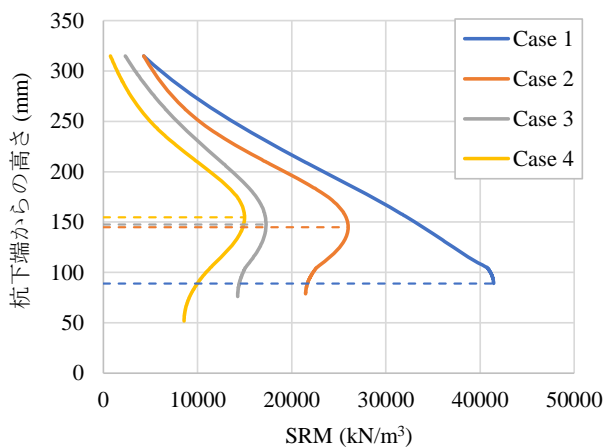


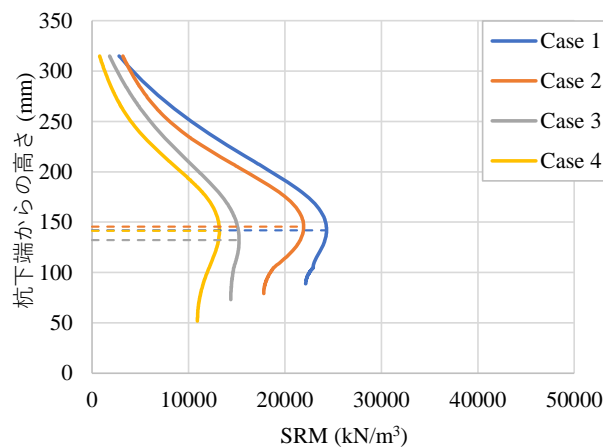
図-13 SRM分布の比較図(杭頭6mm変位時点)

いずれの既往算出法も、ある深さで SRM の極大値を示すことはない。一方で、本実験の結果では、ある特定の深度まで SRM が概ね線形で増加し、極大値を示した後に、その深さより深では減少する。SRM がある深度まで増加することは、既往の算出法の一部と調和的な結果である。しかし、回転中心より下方では杭が背面側に変位するため、杭前面と地盤の間に空隙が生じ、その周辺や上部の地盤がこの空隙を埋めるように移動する。このために回転中心の直上では杭前面の砂に緩みが生じる。したがって、杭が変位しても地盤反力はほとんど生じなくなり、回転中心より上方のある深度を境に、SRM は減少傾向を示す。

図-13は、土圧計設置位置で評価された SRM を直線で繋いだものであるため、SRM 極大点の高さが明確ではない。そこで、スプライン補間により地盤反力分布の近似曲線を求め、それを各深度における水平変位で除して SRM 分布を求めた。杭頭の水平変位 2, 3 mm 時点为例に、上記の手法で求めた SRM 分布を図-14 に示す。同図において、各ケースの SRM 極大点の高さを破線で示した。Case 1 の杭頭変位が 1~2 mm と小さい範囲では、深度方向に SRM が線形に増加した。一方で、Case 1 の杭頭変位が 3 mm 以上の範囲や Case 2~4 では、SRM は地中の特定の深さで極大値を示し、その深さより深では減少した。ここで、設計実務では、直杭を対象に、杭頭変位 20 cm 程度までの範囲を考慮している。相似則を考慮すると、実験スケールでは 1 mm 程度の変位に相当する。つまり、設計実務で考慮される条件を含む杭頭変位 2 mm (実スケールで 50 cm) 以下の範囲では、SRM 分布は既往の考え方と同じである。一方で、斜杭や直杭で杭頭変位が 3 mm (実スケールで 75 cm) 以上の範囲では、設計実務で考慮される SRM 分布とは異なる。



(a) 杭頭 2 mm 変位時点



(b) 杭頭 3 mm 変位時点

図-14 SRM分布の近似曲線

(2) SRM 比

杭頭の水平変位 2, 3 mm 時点为例に、杭の初期傾斜角と杭下端から 150 mm の高さにおける SRM より求めた SRM 比の関係を図-15 に示す。設計実務で考慮される条件を含む杭頭変位が 2 mm (実スケールで 50 cm) 以下の範囲では、初期傾斜角が 0~10° の範囲で SRM 比が急激に減少し、初期傾斜角が 20~30° の範囲ではほぼ一定となる。2 次関数を用いた近似により(5)式の関係が得られた。一方で、杭頭変位が 3 mm (実スケールで 75 cm) 以上の範囲では、初期傾斜角の増加に伴い、SRM 比は線形で減少する。線形近似により(6)式が得られた。

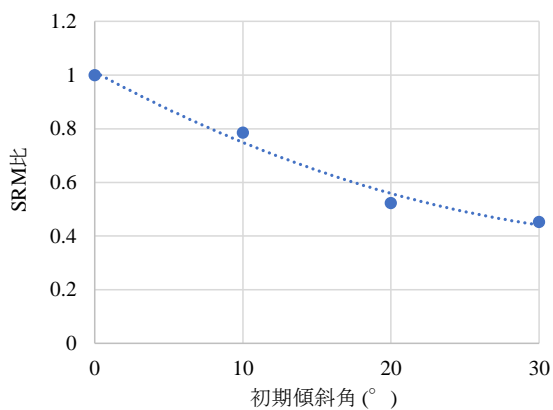
$$rSRM = 0.0004\theta^2 - 0.0299\theta + 1.0120 \quad (5)$$

$$rSRM = -0.0166\theta + 1.0152 \quad (6)$$

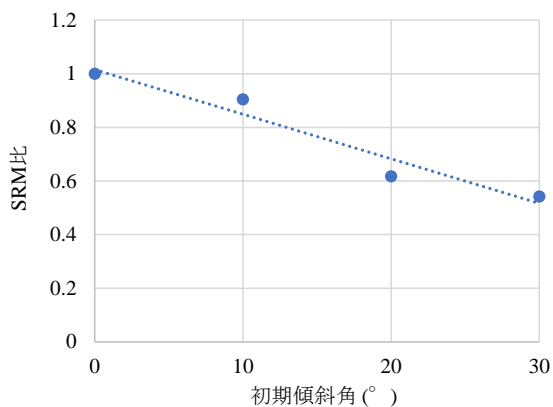
ここに、

rSRM : SRM 比

θ : 杭の初期傾斜角(°)



(a) 杭頭2mm変位時点



(b) 杭頭3mm変位時点

図-15 杭の初期傾斜角とSRM比の関係

(3) SRM 極大点の高さ

杭の初期傾斜角とSRM極大点の高さとの関係を図-16に示す。杭頭変位が小さい段階では、杭の初期傾斜角の違いによるSRM極大点高さの違いは小さいが、杭頭変位が大きい範囲では杭の初期傾斜角の違いによるSRM極大点高さの違いは顕著となり、初期傾斜角が大きいほどSRM極大点は低くなる。杭頭3mm変位時点におけるその差は13mmであるが、杭頭6mm変位時点におけるその差は53mmと大きい。

杭の回転中心高さ とSRM極大点高さの関係を図-17に示す。回転中心高さの増加に伴い、SRM極大点高さは線形に増加する。この増加の割合は、杭頭変位が大きいほど大きい。

5. 結論

本論文では、直杭と初期傾斜角の異なる斜杭の計4ケースを対象に、杭剛性に対して根入れ長の小さい短杭条件下における水平載荷模型実験を行った。そして、SRMの深度方向への変化について評価するとともに、杭の回転中心高さ とSRM極大点高さの関係を示した。本研究から導き出された結論は以下のとおりである。

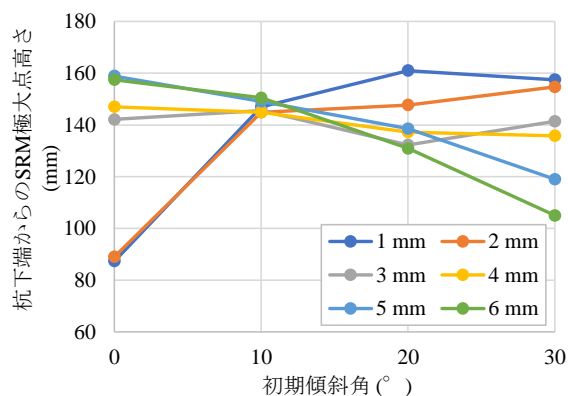


図-16 杭の初期傾斜角とSRM極大点高さの関係

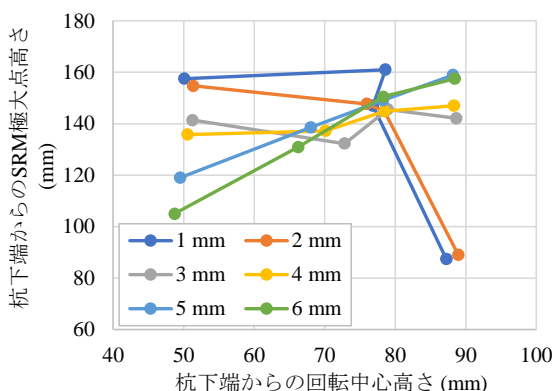


図-17 回転中心高さ とSRM極大点高さの関係

- (1) 初期傾斜角0°におけるSRMに対する各初期傾斜角のSRMの比率をSRM比とすると、初期傾斜角の増加に伴い、SRM比は概ね線形で減少する。ただし、地盤の拘束圧が小さい地表付近におけるSRM比は、初期傾斜角が0~10°の範囲では一定であり、初期傾斜角が20~30°の範囲では急激に減少する。
- (2) 短杭の条件下において、直杭の杭頭変位が設計実務で考慮される範囲内では、SRMは深度方向に線形で増加する。このようなSRM分布は、設計実務における考え方と同じである。一方で、斜杭や直杭で杭頭変位が実スケールで75cm以上の範囲では、ある特定の深度までSRMが概ね線形で増加し、極大値を示した後に、その深さで減少する。このような現象は、設計実務では考慮されていない。
- (3) 杭の初期傾斜角が大きいほど、回転中心高さは低くなる。SRM極大点高さも同様に、杭の初期傾斜角が大きいほど低くなり、その傾向は杭頭変位が大きいほど顕著となる。また、回転中心高さの増加に伴い、SRM極大点高さは線形に増加する。この増加の割合は、杭頭変位が大きいほど大きい。

- (4) 設計実務で考慮される条件を含む杭頭変位が実スケールで 50 cm 以下の範囲では、初期傾斜角が 0～10° の範囲で SRM 比が急激に減少し、初期傾斜角が 20～30° の範囲ではほぼ一定となる。一方で、杭頭変位が実スケールで 75 cm 以上の範囲では、初期傾斜角の増加に伴い、SRM 比は線形で減少する。これらの結果をもとに、杭の初期傾斜角による SRM の低下程度を推定する近似式を求めた。
- 13) S. Ibrahim, M. Hatem, Behavior of Model Group Piles Subjected to Lateral Soil Movement in Sand, *International Journal of GEOMATE*, Vol.14, Issue 44, April 2018, pp. 33-38
- 14) H. Funahara, Components of Dynamic Subgrade Reaction on Pile in Saturated Sand, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress IV*, May 2008, DOI: 10.1061/40975(318)80
- 15) A. Kavand, S. Haeri, J. Raisianzadeh, A. Meibodi, S. Soltani, "Seismic behavior of a dolphin-type berth subjected to liquefaction induced lateral spreading: 1g large scale shake table testing and numerical simulations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 140 (2021) 106450

参考文献

- 1) W. H. Roth, H. Fong, C. Rubertis, Batter piles and the seismic performance of pile-supported wharves. *Proceedings of Ports'92*, ASCE, Seattle, WA, 1992, pp. 336-349.
- 2) S. M. Schlechter, S. E. Dickenson, N. J. McCullough, J. C. Boland, Influence of batter piles on the dynamic behavior of pile-supported wharf structures. *Ports Conference 2004*, ASCE 2004, pp. 1-10. DOI: 10.1061/40727(2004)12
- 3) S. A. Razavi, A. Fakher, S. R. Mirghaderi, An insight into the bad reputation of batter piles in seismic performance of wharves. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Paper No 1423, 2007, pp. 1-10.
- 4) J. Li, B. Song, J. Cui, Seismic dynamic damage characteristics of vertical and batter pile-supported wharf structure systems. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 8 (5) (2015) 180-189. DOI: 10.25103/jestr.085.23
- 5) J. Li, B. Song, P. Wu, Comparative study of seismic dynamic damage on vertical and batter pile-supported wharf structures. *Journal of Building Structures*. Vol. 37, No. 7, (2016) 151-157. DOI: 10.14006/j.zjgxb.2016.07.019
- 6) American Petroleum Institute. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms -Working Stress Design*; 2000.
- 7) Terzaghi, K. : *Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction, Geotechnique*, Vol.5 No.4, 1995
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV下部構造編，平成 29 年 11 月
- 9) 国土交通省港湾局監修，(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 30 年 5 月
- 10) 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，第 2 巻，3 号，1964 年 3 月
- 11) Reese, L. C. and Matlock, H.: Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth, *Proc. 8th Texas Conf. SMFE*, The Univ. of Texas, Austin, Paper No. 7, 1956.
- 12) S. Dash, S. Bhattacharya, Pore Water Pressure Generation and Dissipation near to Pile and Far-Field in Liquefiable Soils, *International Journal of GEOMATE*, Vol. 9, No. 2 (Sl. No. 18), Dec 2015, pp. 1454-1459
- 16) A. Pumama, N. Yasufuku, A. Rifa'i, Evaluation of Filler Material Behavior in Pre-Bored Pile Foundation System due to Slow Cyclic Lateral Loading in Sandy Soil, *International Journal of GEOMATE*, Vol.16, Issue 58, June 2019, pp. 90-96
- 17) K. Muthukumar, B. Aravind Kumar, Effect of Raker Piles in Lateral Load Capacity of Laterally Loaded Pile Group, *Geotechnical Special Publication*, Conference: Geo-Shanghai 2014, May 2014, DOI: 10.1061/9780784413388.081
- 18) J. Chiou, T. Huang, C. Chen, C. Chen, "Shaking table testing of two single piles of different stiffnesses subjected to liquefaction-induced lateral spreading" *Engineering Geology* 281 (2021) 105956
- 19) S. Iai, "Similitude for Shaking table test on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", *Soil and Foundations*, Vol. 29, No. 1, 1989, pp. 105-118
- 20) T. Nagao, D. Shibata, "Experimental study of the lateral spreading pressure acting on a pile foundation during earthquakes", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 9, No. 6, 2019, 5021-5028
- 21) T. Nagao, "An Experimental study on the way bottom widening of pier foundations affects seismic resistance", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 10, No. 3, 2020, 5713-5718
- 22) T. Nagao, R. Tsutaba, "Evaluation Methods of Vertical Subgrade Reaction Modulus and Rotational Resistance Moment for Seismic Design of Embedded Foundations", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 11, No. 4, 2021, 7386-7392
- 23) T. Nagao, "Effect of Foundation Width on Subgrade Reaction Modulus", *Engineering, Technology & Applied Science Research* Vol. 10, No. 5, 2020, 6253-6258
- 24) I. Suetomi and N. Yoshida, "Nonlinear Behavior of Surface Deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake," *Soils and Foundations*, vol. 38, Sep 1998, pp. 11-22

Experimental Study on Subgrade Reaction Modulus Distribution for Anchor Pile with Various Inclination Angles

Toshiya ODA and Takashi NAGAO

In the seismic design of pile foundations, it is necessary to appropriately evaluate the subgrade reaction that occurs in proportion to the pile displacement generated when horizontal load is applied. The ratio of subgrade reaction to pile displacement is defined as subgrade reaction modulus (SRM). There are two ways about the depth distribution of SRM, one is that it is constant in the direction of depth, and the other is that it monotonically increases in the direction of depth. There are various types of pile foundations, depending on the difference in inclination angle of piles (vertical piles and batter piles) and the difference in embedded ground (bearing piles and friction piles). However, in design practice, SRM is treated as the same regardless of the type of pile. In this study, a horizontal loading experiment was conducted focusing on an anchor pile whose main purpose is to resist horizontal load. The depth distribution of SRM was evaluated from the experimental results. Contrary to the distribution considered in design practice, it was found that the SRM shows a maximum value at a certain depth and decreases beyond that depth. Furthermore, it was shown that the height of the maximum value of SRM depends on the height of the rotation center of the pile.