

二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデルとパラメータ設定の検討

Modeling and Parameter Determination of Pile Shaft Friction for Two-Dimensional Effective Stress Analysis

兵頭順一	Junichi HYODO	(東電設計(株)土木本部 技術開発部)
森安俊介	Shunsuke MORIYASU	(新日鐵住金(株)技術開発本部 鋼構造研究部)
宮下健一朗	Kenichiro MIYASHITA	(パシフィックコンサルタンツ(株)港湾部)
宇野州彦	Kunihiko UNO	(五洋建設(株)技術研究所)
小堤治	Osamu OZUTSUMI	((株)明窓社)
一井康二	Koji ICHII	(関西大学 社会安全学部)

本研究ではジョイント要素を用いた二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化を検討する。杭の周面摩擦力は杭貫入時の地盤の物性の変化などの影響を受けることが想定され、提案するジョイント要素の解析パラメータを適切に設定することは難しい。そこで、杭の押込み試験・引抜き試験の再現解析を行い、杭の周面摩擦力を適切に表現できるジョイント要素のパラメータ設定法を検討した。

キーワード：杭，杭の周面摩擦力，有効応力解析

(IGC : E04, E12)

1. はじめに

港湾構造物の設計では、ケーソン式係船岸、矢板式係船岸や棧橋を対象に有効応力解析による耐震性能照査が実務的に行われるようになってきた¹⁾²⁾。矢板式係船岸や棧橋においては、控え工や本体構造において杭が用いられており、それらの杭を対象として、杭と地盤の相互作用を考慮した動的解析が行われている。

例えば、港湾構造物の設計でよく用いられる液状化による構造物被害予測プログラム FLIP ROSE³⁾では杭と地盤の相互作用を考慮することのできる杭-地盤相互作用ばね要素⁴⁾を実装しており、この要素を用いることで、液状化時も含めた地盤と杭の動的相互作用を表現している。

しかし、この杭-地盤相互作用ばね要素は杭の軸直角方向の挙動を対象としており、杭の周面摩擦力の影響が無視できない構造の場合には構造物の挙動を正しく評価することができない。具体的な構造としては矢板式係船岸の控え組杭(斜杭)や控え杭の根入れは基盤まで届いていないこともあり、適切な周面摩擦力のモデル化が構造物の挙動を評価するうえで重要となる。

杭の周面摩擦力に着目した既往の研究としては、既にいくつかの実測や実験データがある。富永ら⁵⁾は砂と粘土の多層系地盤を対象として、周面摩擦測定機を用いて杭の周面摩擦力の測定を行っている。田村ら⁶⁾は杭の押込み試験を対象とした杭の遠心力モデル実験を実施して、杭の周面摩擦力が杭の材料の表面粗さによって異なることを示している。伊藤ら⁷⁾は同一地盤における打撃工法の引抜き抵抗力は埋込み工法の約2倍であるとしており、杭の周面摩擦力が施工の影響を受けることを報告している。また、White et al.⁸⁾は砂質土の場合、杭の打設過程に

おいて杭の近傍で粒子破砕や体積変化が生じ、地盤状態が打設前後で異なることを報告している。

本研究では、ジョイント要素を用いた二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化を検討する。しかし、既往の研究に見られるように、施工の影響等で杭周辺の地盤の物性が変化することが想定され、周面摩擦力を正しく評価することは難しいと考えられる。そこで、杭の押込み試験・引抜き試験の計測結果から、提案手法における適切なジョイント要素のパラメータの設定法を検討する。

2. 二次元解析における杭のモデル化

2.1 杭と地盤の相互作用のモデル化

既往の有効応力解析²⁾では、図-1(a)に示すように杭の軸直角方向を杭-地盤相互作用ばね要素⁴⁾でモデル化し、杭の軸方向を杭先端と地盤の節点において水平及び鉛直方向の変位を同一とする方法(以下、「方法A」という。)が多い。ここで、杭-地盤相互作用ばね要素は、杭と地盤の同一平面内の相対変位に基づく反力のみを与えるばねであり、杭の軸方向の押込みや引抜きに応じて発生する杭の挙動は考慮対象としていない。実際には、杭先端と地盤の節点が同一挙動をするとモデル化した場合、杭先端が基盤(先端支持力が十分に大きな地盤)に根入されている場合はよいが、杭先端部の地盤の強度が不十分な場合は杭先端部分周辺の地盤要素に大きな変形が生じて解析が不安定になる恐れがある。また、杭の沈下量は杭先端部の地盤要素のメッシュサイズ等の影響を受け、押込み荷重による杭の沈下挙動を適切に評価することが難しい。

そこで、著者らは、杭先端部と地盤の間に先端支持力を表現する非線形ばね要素を追加すると同時に、杭要素と地盤要素間の周面摩擦力をジョイント要素でモデル化する方法（以下、「方法B」という。）を提案する。方法Bのモデルの概要図を図-1 (b)に示す。そして、本論文では、周面摩擦力をジョイント要素でモデル化する部分に着目して検討を行った結果を示す。

杭の先端支持力についての非線形ばね要素等によるモデル化は本論文の対象とはしない。

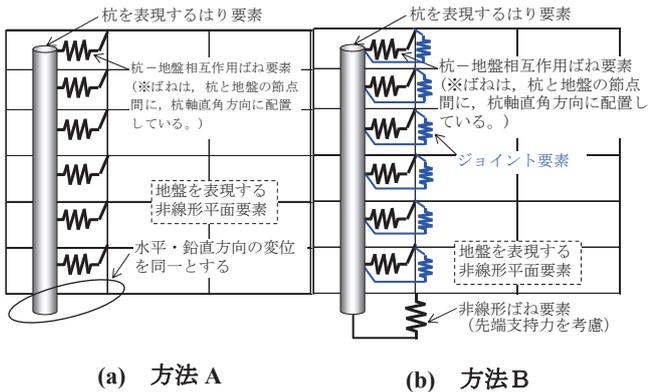


図-1 杭と地盤の相互作用のモデル化¹⁾²⁾

2.2 杭の周面摩擦力のモデル化の定式化

剥離やすべりを表現するジョイント要素にはいくつかの定式化があり得るが、例えばせん断強度（滑り強度）を式(1)で定式化することができる。このときの、ジョイント要素の応力ひずみ関係の例を図-2に示す。この定式化は、例えばケーソン岸壁背面のモデル化などに用いられている¹⁾。

$$\tau_f = c + \sigma_n' \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 τ_f :せん断強度、 c :粘着力、 σ_n' :近傍地盤におけるせん断面に垂直方向の有効拘束圧、 ϕ :摩擦角である。

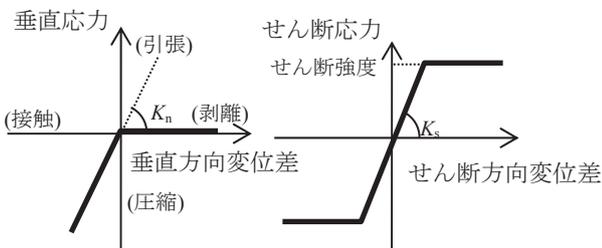


図-2 ジョイント要素の応力ひずみ関係²⁾

杭の周面摩擦力は、このジョイント要素の定式化を援用してモデル化する。まず、ジョイント要素のせん断方向初期剛性 K_s は、せん断強度に達するまでは地盤と杭が完全に一体となって挙動するために、実務設計でよく用

いられる大きな値 ($1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2/\text{m}$)¹⁾とした。また、杭軸直交方向の杭と地盤の相互作用は前述の杭-地盤相互作用ばねで考慮されているため、ジョイント要素の接触・剥離という滑り方向と直交する方向の挙動は考慮しない。

ここで、本提案を実務的に用いられる2次元の有効応力解析に適用することを考えると、杭の周面摩擦力は2次元の平面ひずみ状態でモデル化される必要がある。そこで、杭の単位深さあたりの接触長さ $width$ を杭の周長 ($width = \pi D$, D :杭径)とし、原則として杭間隔の奥行き方向幅を持つ地盤モデルと1本分の剛性を持つ杭のモデルを用意する。奥行き方向1m当たりの解析に換算すると、地盤幅は1m、杭の剛性は1mあたりにし、杭と地盤の接触長さ $width$ も単位幅当たりの値 ($width = \pi D/B$, B :地盤の奥行き方向幅)となる。

伊藤ら⁷⁾が示したように、杭の周面摩擦力は、杭の施工による影響も大きく受ける。そこで、本研究では式(1)に調整係数 J_α 及び J_β を導入して式(2)に示すジョイント要素を用いることとする。 J_α は粘着力 c の増減作用を調整する係数、 J_β は周辺地盤の σ_n' の増減や ϕ の変化によるせん断強度の増減作用を調整する係数で、施工影響で地盤が締め固められる場合では、周面摩擦力が増加し、 J_α や J_β が1を超えることもある。

$$\tau_f = J_\alpha c + J_\beta \sigma_n' \tan \phi \quad (2)$$

ここで、 τ_f :せん断強度、 c :粘着力、 J_α : c に乗ずる調整係数、 σ_n' :近傍地盤における垂直方向の有効拘束圧、 ϕ :摩擦角、 J_β : σ_n' 及び ϕ に乗ずる調整係数である。

しかし、本提案を実際の解析に適用するに当たっては、施工の影響などによる現実の周面摩擦の増減を正確に評価し、適切な調整係数を設定する必要がある。そこで、既往の杭の押込み試験と引抜き試験について提案手法を用いた再現解析を行い、実測結果の再現性の検討と、実測結果から推定される調整係数の評価を行った。

3. 杭の押込み試験の再現解析

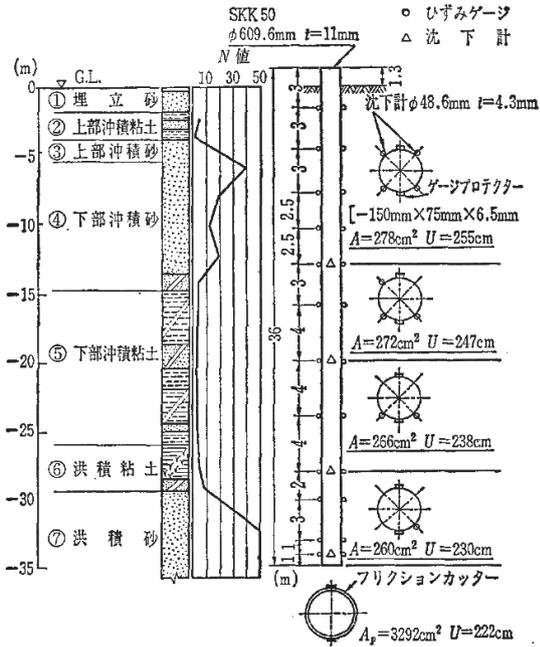
3.1 押込み試験の概要

杭の押込み試験⁵⁾を対象として、ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦力の検討を行った。対象実験の土質条件及び载荷試験杭の仕様や最大周面摩擦力度の予測値と実測値の比較を図-3に示す。

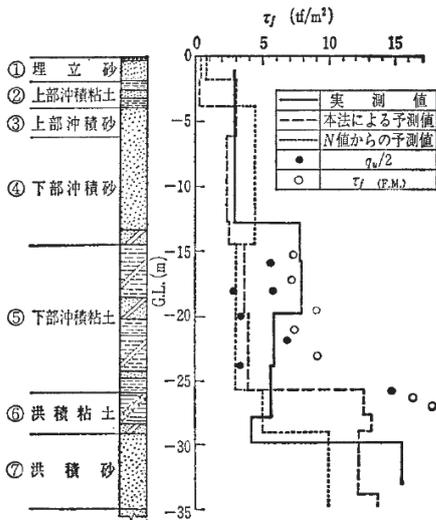
地層構成は①埋立砂から⑦洪積砂までの7層に分けられる。試験杭は外径 $\phi = 609.6 \text{ mm}$ 、肉厚 $t = 11 \text{ mm}$ 、全長 $L = 36 \text{ m}$ の鋼管杭であり、地盤上部の突出長が1.3mで杭先端は⑦洪積砂に達している。

载荷試験は6本の反力杭にわたした梁と杭頭の間には300tf油圧ジャッキ4台を設置し、载荷試験実施時(1987年)の規準である「クイの鉛直载荷試験基準・解説(土

質工学会編) 9) の多サイクル A 載荷法によって実施された。なお、載荷試験は杭打設から 23 日後に行われた。



(a) 土質条件及び載荷試験杭の仕様⁵⁾



(b) 最大周面摩擦力度の予測値と実測値の比較⁵⁾

図-3 再現対象事例⁵⁾

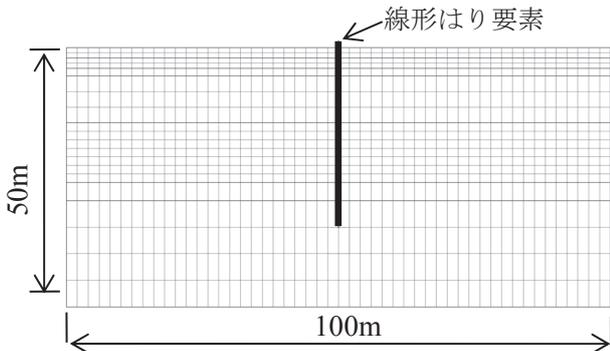


図-4 要素分割図

3.2 モデル化と解析条件

地盤は FLIP ROSE³⁾ のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、杭は線形はり要素でモデル化した。また、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。地下水位は埋立砂の下端に設定した。要素分割図を図-4 に示す。地盤の物性値は N 値に基づき、簡易設定法 (改訂版) ¹⁾ から設定した。地盤の物性値を表-1 に、杭の物性値を表-2 に示す。

表-1 地盤の物性値

	質量密度 ρ (t/m^3)	初期せん断剛性 G_{ma} (kN/m^2)	基準平均有効応力 σ_{ma}' (kN/m^2)	拘束圧依存係数 m_c, m_k	内部摩擦角 ϕ, ϕ^{*2} ($^\circ$)	粘着力 c', c^{*2} (kN/m^2)
埋立砂	1.84	6.63×10^4	98.0	0.5	39.3	0.0
上部沖積粘土	1.51	6.38×10^5	30.8	0.5	0.0	15.4
上部沖積砂	2.02	1.47×10^5	98.0	0.5	42.3	0.0
下部沖積砂	2.02	1.25×10^5	98.0	0.5	41.5	0.0
下部沖積粘土	1.71	1.48×10^4	143.4	0.5	0.0	71.7
洪積粘土	1.71	5.00×10^4	182.8	0.5	0.0	147.0
洪積砂	2.02	1.32×10^5	98.0	0.5	41.7	0.0

*1 地盤のポアソン比は全層 0.33 とした。

*2 砂地盤は c', ϕ 、粘土地盤は c, ϕ で表現しているが、本解析では水圧の上昇を考慮していないので、せん断強度は結果的に同等である。

表-2 杭の物性値

杭径 (m)	0.6096
杭の厚さ (m)	0.011
ヤング係数 (kPa)	7.7×10^7
ポアソン比	0.3
断面積 (m^2)	2.07×10^{-2}
(断面二次モーメント (m^4))*	$(9.27 \times 10^{-4})^*$

*本解析の条件では曲げは作用せず、結果に影響しない。

解析は、側面と底面の境界だけでなく各要素が十分に排水される条件 (間隙水の移動が完全に自由な条件) の自重解析後に、杭頭に変位制御で 1 ステップあたり 2.0×10^{-4} (m) で、杭頭の変位が 0.2m になるまで押込み力を載荷した。地盤の奥行き方向幅は杭径の 10 倍の範囲としている。また、解析は杭の周面摩擦力に着目しているため、杭先端は自由端としている。

解析ケースとして、摩擦力の実測値をジョイント要素のせん断強度にしたケース (ケース 1)、地盤の物性値からジョイント要素のせん断強度を与えたケース (ケース 2) の 2 ケースを考えた。なお、同一層には同じせん断強度が同時に発揮されるように仮定している。設定したジョイント要素の物性値を表-3~表-5 に示す。ここで、ケース 1 は摩擦力の実測値をジョイント要素の粘着力で与えている。ケース 2 では、砂層はジョイント要素の摩擦角で、粘土層はジョイント要素の粘着力で与えるものと

した。なお、沖積粘土は、正規圧密粘土に対する物性値設定としてよく用いられる方法^{10,11)}に基づき、内部摩擦角 30 度相当の強度を粘着力として与えた。また、洪積粘土の物性は実験時に行われた一軸圧縮強さから設定した。

表-3 ジョイント要素の剛性の設定

	垂直方向の接線剛性 K_n (kN/m ² /m)	滑り方向の接線剛性 K_t (kN/m ² /m)
自重解析	0.0	0.0
押し込み解析	0.0	1.0×10^6

表-4 ジョイント要素のせん断強度：ケース1
(摩擦力の実測値をせん断強度にしたケース)

地層	調整係数 J_a	粘着力 c (kN/m ²)	調整係数 J_β	摩擦角 ϕ (°)
埋立砂	1.0	30.0	0.0	0.0
上部 沖積粘土	1.0	30.0	0.0	0.0
上部沖積砂	1.0	30.0	0.0	0.0
下部沖積砂	1.0	30.0	0.0	0.0
下部 沖積粘土	1.0	78.0	0.0	0.0
洪積粘土	1.0	55.0	0.0	0.0
洪積砂	1.0	152.0	0.0	0.0

表-5 ジョイント要素のせん断強度：ケース2
(地盤の物性値からせん断強度を与えるケース)

地層	調整係数 J_a	粘着力 c (kN/m ²)	調整係数 J_β	摩擦角 ϕ (°)
埋立砂	0.0	0.0	1.0	39.3
上部 沖積粘土	1.0	15.4	0.0	0.0
上部沖積砂	0.0	0.0	1.0	42.3
下部沖積砂	0.0	0.0	1.0	41.5
下部 沖積粘土	1.0	71.7	0.0	0.0
洪積粘土	1.0	147.0	0.0	0.0
洪積砂	0.0	0.0	1.0	41.7

3.3 解析結果

杭の周面摩擦力の深さ方向の分布を図-5 と図-6 に示す。解析結果は、杭頭の変位が 0.1m における各ジョイント要素の中心位置における値を示しており、図-5 は設定したせん断強度（初期拘束圧を仮定）と解析で実際に発揮された摩擦力を、図-6 は実測値と解析で実際に発揮された摩擦力を比較している。また、杭の全体周面摩擦力と変位の関係を図-7 に示す。

摩擦力の実測値をジョイント要素のせん断強度にしたケース 1 では、深さ方向全体にわたり設定したせん断強度の摩擦力が発揮されている。その結果、実測値と解析の摩擦力はよい一致を示している。また解析は、図-7 に示される杭頭荷重から先端抵抗を引いた全体の周面摩擦力も実測値とよくあう結果となった。よって、杭の周面摩擦力の実測値が得られていれば、解析で正しく表現で

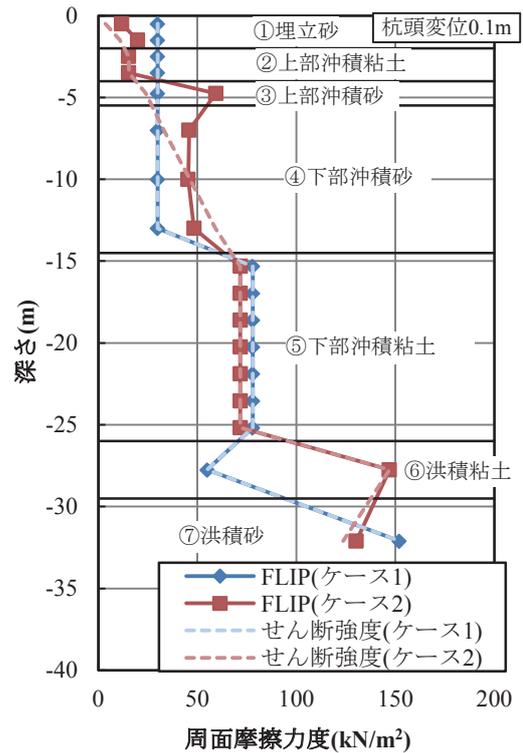


図-5 杭の周面摩擦力の深さ方向分布
(設定したせん断強度と解析結果の比較)

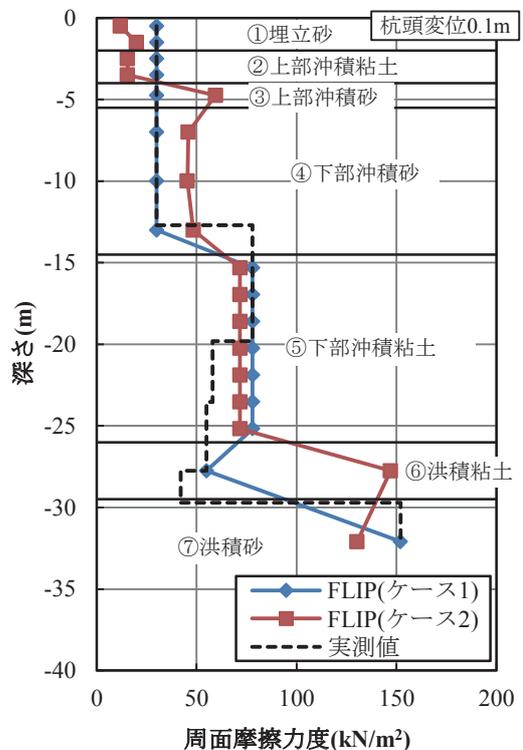


図-6 杭の周面摩擦力の深さ方向分布
(実測値と解析結果の比較)

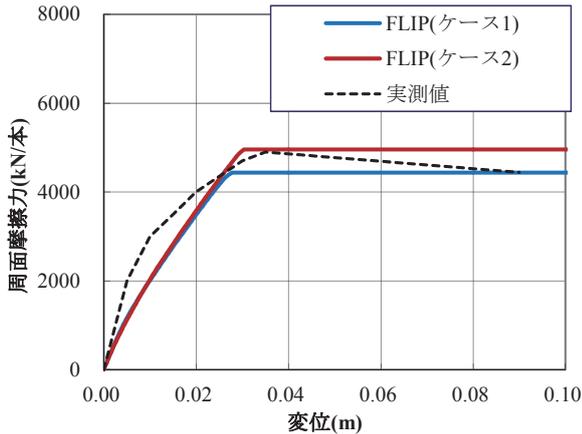


図-7 杭の全体周面摩擦力-変位関係

きると考えられる。しかし、杭の周面摩擦力の実測値が得られていることは多くない。

地盤の物性からジョイント要素のせん断強度を与えたケース2でも、深さ方向全体にわたり設定したせん断強度相当の摩擦力が発揮されている。なお、図-5に示すように地表付近では、解析における摩擦力がN値から設定したせん断強度より大きいが、これは押込みによる拘束圧の増加でせん断強度が増加したためである。図-6に示すように、解析での摩擦力の分布は多少実測値の分布と異なる。具体的には、地表に近い①埋立砂、②上部沖積粘土の周面摩擦力は実測値より小さく、③上部沖積砂、④下部沖積砂の周面摩擦力は、実測値よりやや大きい結果となった。上層は施工の影響で杭と地盤の密着度が増加し、下層は杭と地盤の密着度が乱れている可能性などが考えられるが、実際のところはよくわからない。また、図-7に示すように杭の全体周面摩擦力は、ケース1と同様に実測値とよくあう結果となった。なお、⑥洪積粘土は、ケース1とケース2で異なる結果となった。この要因として、⑥洪積粘土におけるジョイント要素のせん断強度が、ケース1は周面摩擦力の実測値から求めたもの、ケース2は地盤の物性値から求めたものを用いたためである。

3.4 調整係数 J_α , J_β の推定

摩擦力の実測値をジョイント要素のせん断強度にしたケース1と地盤の物性からジョイント要素のせん断強度を与えたケース2の解析結果を用いて、調整係数 J_α , J_β の推定を行った。ケース1の周面摩擦力度をケース2の周面摩擦力度で正規化した値を調整係数とした。調整係数の推定結果を図-8に示す。粘土は調整係数 J_α を、砂層は調整係数 J_β を表す。つまり、実測値と解析値が適合するように調整係数を逆算している。地表付近の調整係数はやや大きく2程度となるが、地中(③上部沖積砂～⑦洪積砂)の調整係数は上部沖積砂と洪積粘土で0.5程度、下部沖積粘土と洪積砂で1程度である。

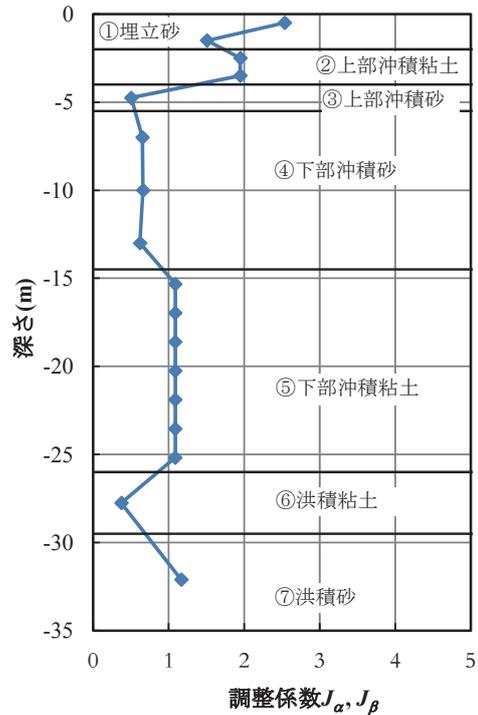


図-8 調整係数 J_α , J_β の推定結果

4. 杭の引抜き試験の再現解析

4.1 引抜き試験の概要

杭の引抜き試験⁷⁾を対象として、ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦力の検討を行った。対象実験の地質柱状図を図-9に、杭の周面摩擦力の深さ方向分布を図-10に示す。なお、杭は、直径508mm、肉厚9mm、杭長12mの鋼管杭を打込み工法、中掘り工法及びプレボーリング工法の3工法で施工されている。引抜き载荷の荷重速度は増加時98kN/分、減圧時196kN/分とされている。载荷装置は各試験杭周辺の4本のH鋼を反力杭として使用した。

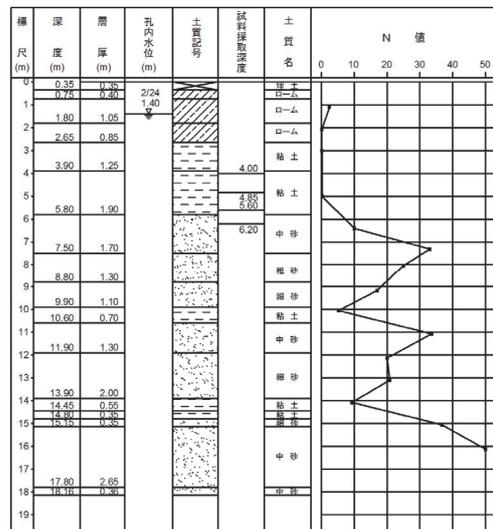


図-9 土質条件⁷⁾を加筆・修正

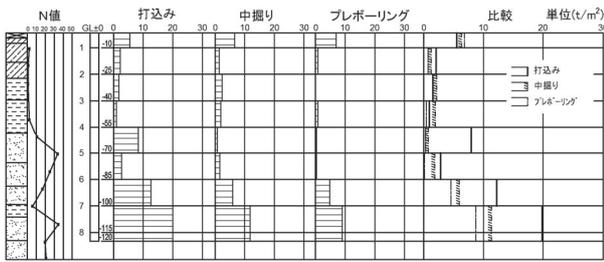


図-10 杭の周面摩擦力の深さ方向分布 7)を加筆・修正

4.2 モデル化と解析条件

地盤は FLIP ROSE³⁾のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、杭は線形はり要素でモデル化した。また、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。地下水位は粘性土の下端に設定した。要素分割図を図-11に示す。地盤の物性値はN値に基づき、簡易設定法（改訂版）¹⁾から設定した。地盤の物性値を表-6に、杭の物性値を表-7に示す。なお、表-6では、各対象土層の初期せん断剛性などを、有効拘束圧 98kPa（基準平均有効応力）における値として示している。

解析は、側面と底面の境界だけでなく各要素が十分に排水される条件（間隙水の移動が完全に自由な条件）の自重解析後に、杭頭に変位制御で1ステップあたり 4.0×10^{-5} (m)で、杭頭の変位が 0.2m になるまで引抜き力を載荷した。解析は、地盤の水中密度を用いた自重解析後に、杭頭に引抜き力を載荷した。地盤の奥行き方向幅は杭径の 10 倍の範囲としている。また、解析は杭の周面摩擦력에着目しているため、杭先端は自由端としている。

解析ケースとして、摩擦力の実測値をジョイント要素のせん断強度にしたケース（打込み杭：ケース 1、中掘り杭：ケース 2、プレボーリング杭：ケース 3）、地盤の物性値からジョイント要素のせん断強度を与えたケース（ケース 4）の 4 ケースを考えた。なお、同一層には同じせん断強度が同時に発揮されるように仮定している。設定したジョイント要素の物性値を表-8～表-12に示す。

ここで、ケース 1～3 は摩擦力の実測値をジョイント要素の粘着力で与えている。ケース 4 では、砂層はジョイント要素の摩擦角で、粘性土はジョイント要素の粘着力で与えるものとした。なお、粘性土は前章の設定と同様に、内部摩擦角 30 度相当の強度を粘着力として与えた。

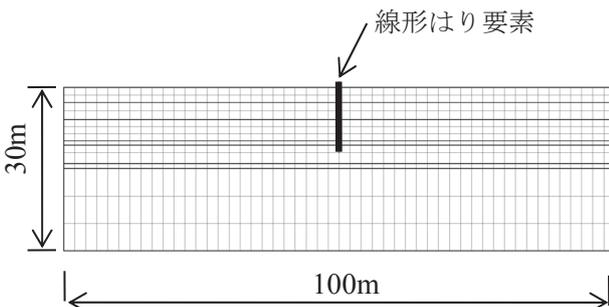


図-11 要素分割図

表-6 地盤の物性値

	質量密度 ρ (t/m ³)	初期せん断剛性 G_{ma} (kN/m ²)	基準平均有効応力 σ_{ma}' (kN/m ²)	拘束圧依存係数 m_G, m_k	内部摩擦角 ϕ', ϕ^{*2} (°)	粘着力 c', c^{*2} (kN/m ²)
ローム	1.41	3.98×10^4	98.0	0.5	0.0	7.3
粘性土 1	1.61	2.21×10^4	98.0	0.5	0.0	18.0
砂質土 1	2.02	1.23×10^5	98.0	0.5	42.0	0.0
粘性土 2	1.61	4.21×10^4	98.0	0.5	0.0	37.0
砂質土 2	2.02	1.19×10^5	98.0	0.5	41.0	0.0
粘性土 3	1.61	5.09×10^4	98.0	0.5	0.0	51.7
砂質土 3	2.02	1.65×10^5	98.0	0.5	43.0	0.0

*1 地盤のポアソン比は全層 0.33 とした。

*2 砂地盤は c', ϕ' 、粘土地盤は c, ϕ で表現しているが、本解析では水圧の上昇を考慮していないので、せん断強度は結果的に同等である。

表-7 杭の物性値

杭径 (m)	0.508
杭の厚さ (m)	0.009
ヤング係数 (kPa)	7.7×10^7
ポアソン比	0.3
断面積 (m ²)	1.41×10^{-2}
(断面二次モーメント (m ⁴))*	$(4.39 \times 10^{-4})^*$

*本解析の条件では曲げは作用せず、結果に影響しない。

表-8 ジョイント要素の剛性の設定

	垂直方向の接線剛性 K_a (kN/m ² /m)	滑り方向の接線剛性 K_s (kN/m ² /m)
自重解析	0.0	0.0
押し込み解析	0.0	1.0×10^6

表-9 ジョイント要素のせん断強度：ケース1

(打込み杭の摩擦力の実測値をせん断強度にしたケース)

地層	調整係数 J_a	粘着力 c (kN/m ²)	調整係数 J_β	摩擦角 ϕ (°)
ローム	1.0	63.0	0.0	0.0
粘性土 1	1.0	18.0	0.0	0.0
砂質土 1	1.0	93.0	0.0	0.0
粘性土 2	1.0	230.0	0.0	0.0
砂質土 2	1.0	230.0	0.0	0.0

表-10 ジョイント要素のせん断強度：ケース2

(中掘り杭の摩擦力の実測値をせん断強度にしたケース)

地層	調整係数 J_a	粘着力 c (kN/m ²)	調整係数 J_β	摩擦角 ϕ (°)
ローム	1.0	74.0	0.0	0.0
粘性土 1	1.0	25.0	0.0	0.0
砂質土 1	1.0	21.0	0.0	0.0
粘性土 2	1.0	133.0	0.0	0.0
砂質土 2	1.0	133.0	0.0	0.0

表-11 ジョイント要素のせん断強度：ケース3
(プレボーリング杭の摩擦力の実測値をせん断強度にしたケース)

地層	調整係数 J_α	粘着力 c (kN/m ²)	調整係数 J_β	摩擦角 ϕ (°)
ローム	1.0	80.0	0.0	0.0
粘性土1	1.0	6.0	0.0	0.0
砂質土1	1.0	2.0	0.0	0.0
粘性土2	1.0	103.0	0.0	0.0
砂質土2	1.0	103.0	0.0	0.0

表-12 ジョイント要素のせん断強度：ケース4
(地盤の物性値からせん断強度を与えるケース)

地層	調整係数 J_α	粘着力 c (kN/m ²)	調整係数 J_β	摩擦角 ϕ (°)
ローム	1.0	7.3	0.0	0.0
粘性土1	1.0	18.0	0.0	0.0
砂質土1	0.0	0.0	1.0	42.0
粘性土2	1.0	37.0	0.0	0.0
砂質土2	0.0	0.0	1.0	41.0

4.3 解析結果

各杭の周面摩擦力の深さ方向分布を図-12～図-15に示す。解析結果は、杭頭の変位が0.2mにおける各ジョイント要素の中心位置における値を示しており、図-12は設定したせん断強度と解析で実際に発揮された摩擦力を、図-13～図-15は実測値と解析で実際に発揮された摩擦力を比較している。また、杭の全体周面摩擦力と変位の関係を図-16に示す。

摩擦力の実測値をジョイント要素のせん断強度にしたケース1～3では、設定したせん断強度の摩擦力となり、周面摩擦力が十分に発揮されていることがわかる。また、図-16からわかるように、実験では杭頭荷重から先端抵抗を引いて得られた全体の周面摩擦力の実測値と解析で得られた周面摩擦力の実測値も概ね整合する結果となった。ただし、周面摩擦力の最大値に達するまでの変位量が実験と解析では異なっている。これはジョイント要素の剛性（現在は非常に大きな値に設定）を今後調整していくことで、さらに一致度を向上させることができると考えられる。なお、本ケースではジョイント要素の剛性を小さくすれば、実験と解析がほぼ同程度になると考えられる。実際に杭を引抜く際にも、地盤の有効拘束圧が小さくなる効果や杭周辺地盤の粒子構造の向き等の影響等、解析では直接考慮できない現象があると考えられ、この効果がジョイント要素の剛性の低下と同様であると解釈できる。

このように、杭の周面摩擦力の実測値が得られていれば、押し込み試験の再現解析と同様に、杭の引抜き挙動も解析である程度正しく表現できると考えられる。

地盤の物性からジョイント要素のせん断強度を与えたケース4では、有効拘束圧の増加に伴い、深さ方向に周

面摩擦力が増加する傾向が見られた。一方で、表層と基盤層で実測値と一致していない。また、中間部に関しては、実測では施工方法の違いにより摩擦力が異なるものの、解析ではその違いを再現できていない。打込み杭に対しては過小評価、プレボーリング杭に対しては過大評価になっているといえる。したがって、中間部については、設定値は中掘り杭相当の摩擦力となっているが、地表面や支持層付近で摩擦力が過小評価されているため、図-16に示す全体の摩擦力ではプレボーリング相当となっている。

4.4 調整係数 J_α , J_β の推定

摩擦力の実測値をジョイント要素のせん断強度にしたケース1～3と地盤の物性からジョイント要素のせん断強度を与えたケース4の解析結果を用いて、調整係数 J_α , J_β の推定を行った。ケース1～3の周面摩擦力度をケース4の周面摩擦力度で正規化した値を調整係数とした。推定結果を図-17に示す。粘土は調整係数 J_α を、砂層は調整係数 J_β を表す。つまり、実測値と解析値が適合するように調整係数を逆算している。

地表付近の調整係数はやや大きく、8～10程度となったが、ローム層という特殊な土層のため、一般的な傾向であるかどうかはよくわからない。また、下層の粘性土2や砂質土2でも2～6程度と大きな値となった。これに対し、中間の粘性土1や砂質土1では、プレボーリング杭に対して1以下となり、中掘り杭に対して1程度、打込み杭に対して1～3程度である。

5. 調整係数 J_α , J_β の考察

本来であれば、数多くの事例から各土層の特性に応じた調整係数の値を詳細に論じることが望ましい。しかし、実際の載荷試験のデータは限られており、一方で実務的な解析実施の要請もあることから、本事例を元に安全側にパラメータを設定するというポリシーの元、実務的に適用できるような調整係数の値の考察を行った。

- (1) 地表面の調整係数 J_α , J_β は、杭の載荷方向にかかわらず、1.0より大きな値を用いる方が実測値と整合する。しかし、設計上安全側の設定としては、 J_α , J_β は1.0で良いと考えられる。
- (2) 再現解析から、杭の押し込み時は、ジョイント要素のせん断強度に地盤の物性値を使うこととし、調整係数 J_α , J_β は1.0程度とすると良いと考えられる。

杭の引抜き試験の再現解析では、杭の施工の方法（打込み杭、中掘り杭、プレボーリング杭）によって、3種類の調整係数 J_α , J_β が算定された。特に中間部の粘性土1や砂質土1では、杭の施工方法の影響を受け、プレボーリング杭に対して1.0以下となり、中掘り杭に対して1程度、打込み杭に対して1～3程度である。よって、打込み杭や中掘り杭の調整係数 J_α , J_β は1.0程度であれば、

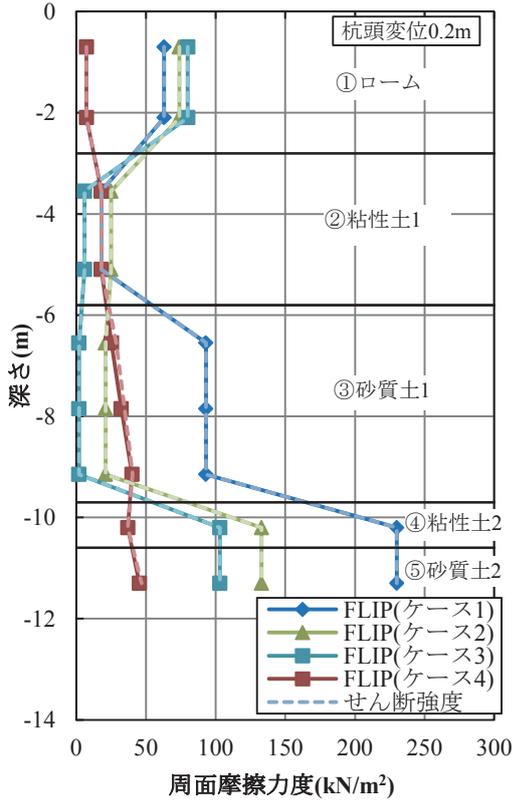


図-12 杭の周面摩擦力の深さ方向分布
(設定したせん断強度と解析結果の比較)

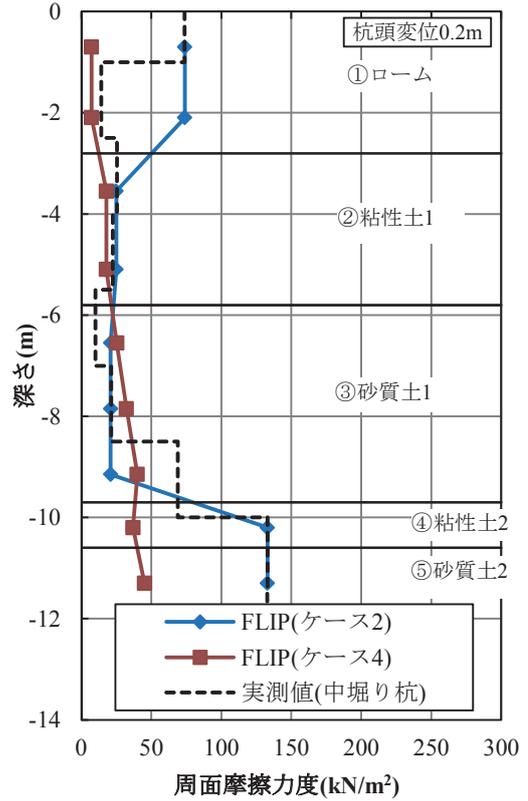


図-14 杭の周面摩擦力の深さ方向分布
(中掘り杭の実測値と解析結果の比較)

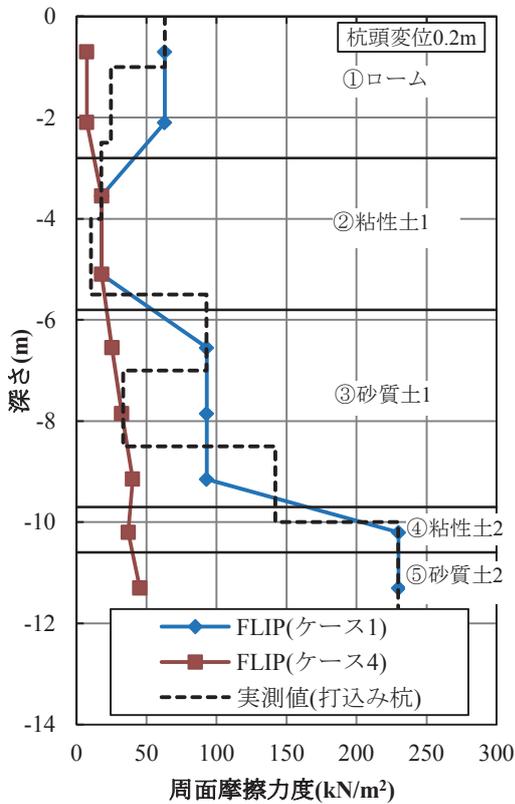


図-13 杭の周面摩擦力の深さ方向分布
(打込み杭の実測値と解析結果の比較)

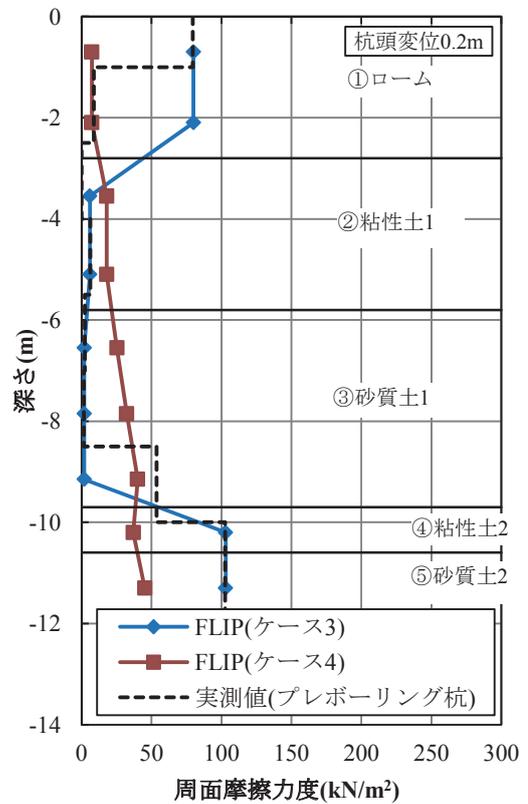


図-15 杭の周面摩擦力の深さ方向分布
(プレボーリング杭の実測値と解析結果の比較)

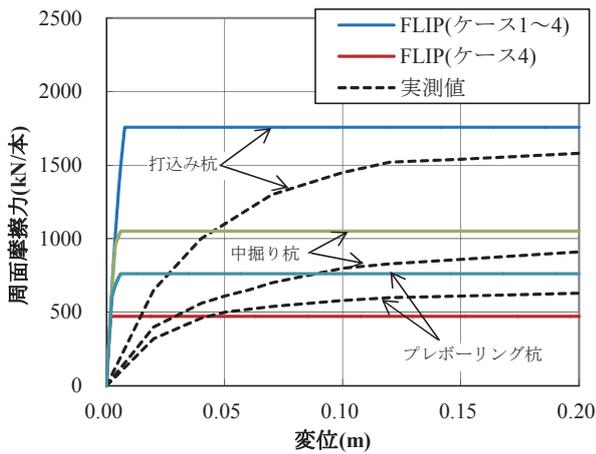


図-16 杭の全体周面摩擦力-変位関係

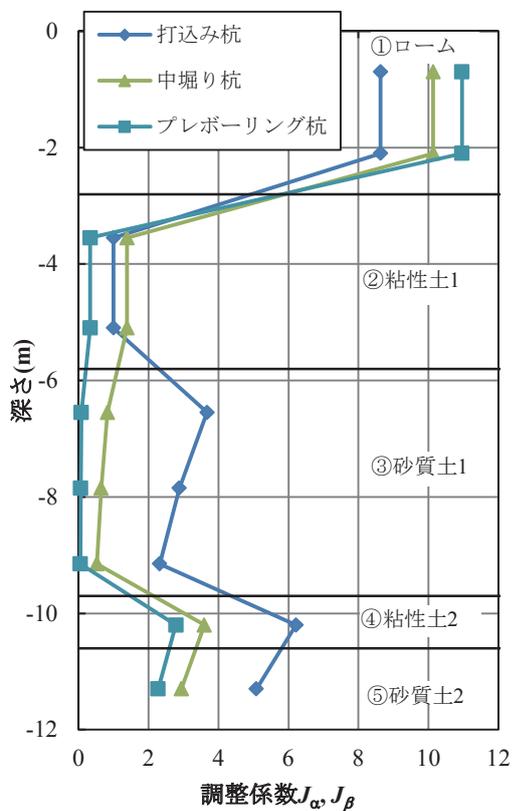


図-17 調整係数 J_α , J_β の推定結果

設計上安全側の設定値と考えられる。また、プレボーリング杭の引抜き抵抗はあまり期待できず、調整係数 J_α , J_β をともに 0 で与えることも安全側の設計としては合理的である。

6. まとめ

本研究ではジョイント要素を用いた二次元有効応力解析

における、杭の押し込み試験・引抜き試験の再現解析を行い、杭の周面摩擦力を適切に表現できるジョイント要素のパラメータ設定法を検討した。得られた結論を下記に示す。

- (1) 施工の影響等を考慮できる調整係数を導入したジョイント要素を提案し、そのジョイント要素を用いたモデル化で、杭の押し込みも引抜きも変位が小さい領域では誤差があるものの、全体としてほぼ良好に再現できた。
- (2) 調整係数の設定法として、限られたケースの再現解析の結果であるため暫定的な提案であるが、安全側の設定として以下を提案した。

(a) 押し込み時

$$J_\alpha = J_\beta = 1.0$$

(b) 引抜き時

$$J_\alpha = J_\beta = 1.0 \text{ (打込み杭, 中掘り杭)}$$

$$J_\alpha = J_\beta = 0.0 \text{ (プレボーリング杭)}$$

今回の事例解析は限られたケース数であるため、今後、多くの事例解析を行うことが必要と考えている。

謝辞

本検討は FLIP の改良・機能拡張と高度な利用技術に関する研究開発の推進を目的に設立された一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集 (平成 19 年改訂版)，2007。
- 2) (財)沿岸技術研究センター，第四期 FLIP 研究会 14 年間のまとめ WG：液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務～マルチスプリング要素の実務への適用における検討成果～FLIP 研究会の 14 年間の研究成果【理論編】【事例編】，2011。
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 4) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 梅木康之：2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1899-1900，2003。
- 5) 富永眞生, 木村保, 塩田啓介, 深谷建雄：周面摩擦測定試験による杭の挙動予測，土と基礎，pp.43-48，1987。
- 6) 田村修次, 樋口康仁, 足立圭佑, 林康裕, 山崎雅弘：遠心載荷実験における残置杭が新規杭の鉛直支持力に及ぼす影響—新規杭の表面が滑らかなケースと粗いケースの比較—，日本建築学会構造系論文集，Vol.74, No.645, pp.2039-2044，2009。
- 7) 伊藤圭典：打込み・埋込み・場所打ち杭の引抜き抵

抗力比較測定, 第 23 回 土質工学シンポジウム論文集, pp.1-8, 1978.

- 8) White, D. J. and Bolton, M. D. : Observing friction fatigue on a jacked pile, *Centrifuge and Constitutive Modeling* , pp.347-354, 2002.
- 9) 土質工学会編：クイの鉛直載荷試験基準・同解説, 1980.
- 10) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸

博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.

- 11) 土田孝：三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 港湾技研資料, No.688, p.183, 1990.

(2017年6月19日 受付)