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に関する検討

兵頭 順一¹・森安 俊介²・宮下 健一朗³ 宇野 州彦⁴・小堤 治⁵・一井 康二⁶

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)

E-mail:hyoudou@tepsco.co.jp

2正会員 新日鐵住金株式会社(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

E-mail:moriyasu.45e.shunsuke@jp.nssmc.com

3 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒206-8550 東京都多摩市関戸 1-7-5)

E-mail:kenichirou.miyashita@os.pacific.co.jp

4正会員 五洋建設株式会社 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail:Kunihiko.Uno@mail.penta-ocean.co.jp

⁵ 正会員 株式会社明窓社(〒170-0014 東京都豊島区池袋 1-8-7 サン池袋 I -308)

E-mail: ozutsumi@meisosha.co.jp

6正会員 広島大学大学院(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

本論文では二次元有効応力解析による杭の周面摩擦力のモデル化に関する検討を行った. 杭と地盤の相互作用のモデル化は、杭の軸直角方向を杭ー地盤相互作用ばね要素で、杭の軸方向のうち周面摩擦力をジョイント要素で、先端支持力を非線形ばね要素でモデル化する方法を想定する. 杭の周面摩擦力は地盤の液状化や施工影響による摩擦力等の変化を考慮したモデル化を提案し、液状化地盤における杭の引抜き試験や非液状化地盤における杭の押込み試験・引抜き試験のシミュレーションを行い、本方法の妥当性を確認した.

Key Words: effective stress analysis, pile, shaft friction

1. はじめに

港湾構造物の設計では、ケーソン式係船岸、矢板式係船岸や桟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¹²⁾. 矢板式係船岸 や桟橋においては、控え工や本体構造において杭が用い られているが、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 FLIP³⁾(以下、「FLIP」という.)では杭と地盤の相互作用を考慮することのできる杭一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地盤の液状化状態における動的相互作用を表現している.しかし、この杭一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適切な挙動を評価することができない.

一方, 既往の研究では杭の周面摩擦力に着目した知見 が得られている.

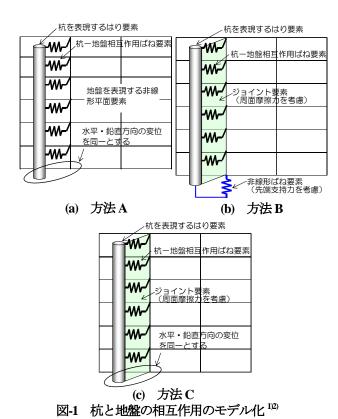
富永ら⁵は砂と粘土の多層系地盤を対象として、周面

摩擦測定機を用いて杭の周面摩擦力の測定を行い、提案する測定方法により精度良く周面摩擦力を測定できると報告している。特に杭の周面摩擦力は、周面摩擦力度と沈下量の関係を定式化することで、予測値は絶対値としては差があるものの、支持力機構の変化を良く表していると報告している。

田村ら⁹は杭の押込み試験を対象とした杭の遠心力模型実験を実施して、杭の周面摩擦力が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.al⁸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。

西谷ら⁹は過剰間隙水圧の存在下で杭の引抜き試験を 行っている. 杭の引抜き抵抗力は過剰間隙水圧比の上昇 と反比例関係にあり, 摩擦係数は過剰間隙水圧比にかか わらずほぼ一定である, と報告している.



既往の有効応力解析²⁾では、図-1(a)に示すように杭の 軸直角方向を杭ー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. 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 であるので、杭軸方向に押込みや引抜きに応じて発生す る杭の周面摩擦力は考慮していない. したがって, 支持 地盤に根入れされている杭の先端支持力が支配的となる 構造物であれば問題ないが、杭先端の地盤に変位が発生 し、引抜きや押込みの影響が卓越する構造物では実現象 を適切に評価できない.

筆者らは、引抜きや押込みの影響が卓越する杭の挙動 を適切に表現するためには図-1(b)に示すように、杭の軸 直角方向の杭と地盤の相互作用を杭ー地盤相互作用ばね 要素で、杭の軸方向の相互作用のうち周面摩擦力を「土 と構造物の接触面上におき、すべり・剥離を表現する要 素 $|^{2}$ (以下、「ジョイント要素」という。) で、先端 支持力を非線形ばね要素でモデル化する方法(以下,

「方法B」という.) が適切であると考えている.しか し、本論文では、杭の周面摩擦力のモデル化に着目する ため、方法Aに杭の周面摩擦力(ジョイント要素)の機 能を加えた方法(以下、「方法C」という。)を対象と する. 方法Cのモデルの概要図を図-1(c)に示す. つまり, 本研究では、有効応力解析としてFLIPを用い、杭の周面 摩擦力のモデル化(方法C)に関する以下の検討を行う.

- ① 液状化状態における杭の周面摩擦力の評価に対する ジョイント要素の適用性
- ② 杭の施工影響による杭と地盤の周面摩擦力や粘着力 の変化を考慮可能な改良型ジョイント要素の適用性

2. 杭の周面摩擦力のモデル化の提案

(1) 杭の周面摩擦力のモデル化の定式化

従来用いられてきたジョイント要素(以下,「従来型 ジョイント要素」という。)のせん断強度(滑り強度) は(1)式で示すように定式化される. また、従来型ジョ イント要素の応力ひずみ関係を図-2に示す.

$$\tau_i = c + \sigma_n \tan \phi_j$$
 (1)

ここで、 τ_f : せん断強度、c: 粘着力、 σ_n ': 近傍地盤 における垂直方向の有効拘束圧, φ_i: 摩擦角

杭の周面摩擦力はジョイント要素のせん断強度が周辺 地盤の拘束圧に依存するという特性を利用してモデル化 する. ジョイント要素のせん断方向初期剛性 K。は十分 に大きな値(例えば $1.0 \times 10^6 \, \text{kN/m}^2/\text{m}$)とし、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、何の作用もしないように設定しておく. また、杭 の周面摩擦力を二次元平面ひずみ状態でモデル化するた め、杭と地盤の接触長は杭の周長(width-nD)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 lm 当たりの解析を行う場合は、地盤幅は 1m, 杭の剛性は 1m 当たりにし、杭と地盤の接触長も単位幅当たり

(width=πD/B) とする.

杭の周面摩擦力は施工の影響も大きく受けるが、施工 による影響は、模型実験8や現場計測10で得られている ように、地盤物性値の変化領域は杭の近傍に限られてい る. そこで、本論文では(1)式に調整係数 Ja 及び Ja を導 入して(2)式に示す改良型ジョイント要素を用いること とする. 調整係数は杭の施工影響を考慮するものであり, J_{a} は粘着力 cの増減作用、 J_{b} は施工による周辺地盤の σ_{n} の増減やφ;の変化を表している.

$$\tau_{i} = J_{o}c + J_{b}\sigma_{n} \cdot \tan \phi_{i} \tag{2}$$

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': 垂直方向の拘束圧, φ_i: 摩擦角, $J_{\rm B}: \sigma_{\rm n}$ 及び $\Phi_{\rm I}$ に乗ずる調整係数

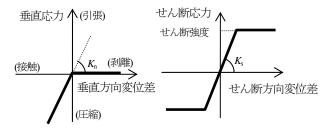


図-2 ジョイント要素の応力ひずみ関係 2)

(2) 解析条件

検討モデル ¹¹⁾を図-3 に示す. 杭-地盤間に改良型ジョイント要素を設定し、周面摩擦力のみが作用するように 杭先端は自由端とする. 解析ケースを表-1 に示す. 地盤 種別は砂質土と粘性土の 2種類を取扱い、粘性土については、 MPC 拘束(杭の節点と同一座標の地盤節点を結合)も解析する. なお、地盤物性値は表-2 に、ジョイント要素の物性値は表-3 に示す通りである.

解析は排水条件で実施し、地盤の奥行き方向幅は 5m としている.

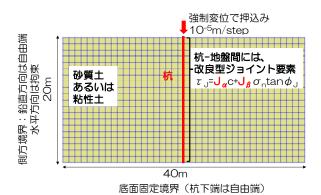


図-3 検討モデル 表-1 解析ケース

<i>1-</i> ¬	16 65 至日日	ジョイント要	素の調整係数		
ケース	地盤種別	J_{lpha}	J_{eta}		
1		0	1		
2		0	2		
3	砂質土	0	3		
4		0	4		
5		0	5		
6		1	0		
7		2	0		
8	粘性土	5	0		
9		10	0		
10		MPC拘束(杭の節点と			
		同一座標の地	盤節点を結合)		

表-2 地盤物性値

		質量密度	初期せん断 剛性	体積 弾性係数	平均 有効応力	拘束圧 依存係数	間隙率	内部 摩擦角	粘着力
		ρ	G_{ma}	K_{ma}	σ_{ma}	m_G,m_K	n	φ	C
L		(t/m3)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	-	-	۰	(kN/m^2)
	砂質土	2.09	54620	142400	48.75	0.5	0.46	36.7	0
	粘性土	1.60	34000	88670	1.00	0.0	0.55	0	100

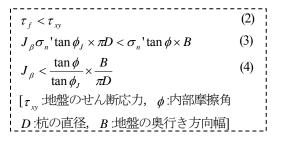
表-3 改良型ジョイント要素の物性値

		杭径	垂直方向 接線剛性		粘着力	摩擦角	奥行き 方向幅
			Kn	Ks	c	ϕ_j	
L		m	$(kN/m^2/m)$	$(kN/m^2/m)$	(kN/m^2)		m
ſ	砂質土	1	0	1.0E+06	0	15	3.1416
	粘性土	1	0	1.0E+06	100	0	3.1416

(3) 解析結果

a) 砂質土における改良型ジョイント要素の挙動 調整係数 J_B と周面摩擦力の関係を図4 に示す. J_Bが大

きいほど周面摩擦力は大きくなり、 $J_{\mathbb{F}}$ 5 で発散している. このとき、杭に隣接する表層の地盤要素が破綻していた. この要素のせん断応力とせん断ひずみの関係は図-5に示 すように、J₆=5 で破綻を生じている. ここで、地盤のせ ん断破壊が生じる前に、周面摩擦力が上限に達する条件 は(2)式で表され、単位高さ当たりの力に換算すると(3) 式のように展開されて最終的に(4)式が得られる。(4)式 を満たす調整係数が、改良型ジョイント要素の適用範囲 である. (4)式に本検討のパラメータを代入すると J₈< 4.4 となり、J=5 は範囲外なので破綻を生じたと考えら れる. なお図4に示すように、 /5=3,4 でひずみ軟化のよ うな挙動がみられる. この原因は特定できていないが、 杭と地盤間の滑りに伴う地盤要素のせん断変形や圧縮の 緩和や、地盤応力の再配分によって、有効拘束圧が低下 し、せん断剛性やせん断応力も減少した可能性が推定さ れる.



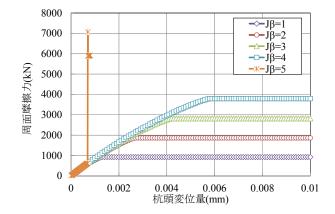


図4 砂質土の調整係数と周面摩擦力の関係

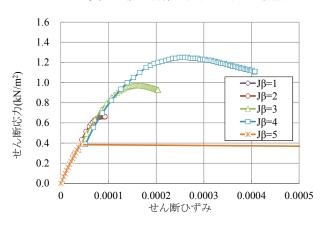


図-5 杭に隣接する表層地盤のせん断応力-ひずみ関係

b) 粘性土における改良型ジョイント要素の挙動

図-6 に示すように、 J_{α} が大きいほど周面摩擦力は大きくなるが、砂質土と異なり発散することなく、 J_{α} =10 では杭径の 20%に相当する 0.2m の変位量でも周面摩擦力は上限に達しなかった。 J_{α} =10 における杭の軸力は図-7に示すように杭頭から杭先端方向に減少している。 しかし、粘着力に J_{α} =10 を乗じた杭-地盤間のせん断強度 1000kN/m² を上回ることはなく、改良型ジョイント要素のプログラムは正しく機能していることが確認される.

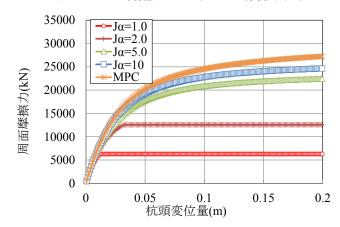
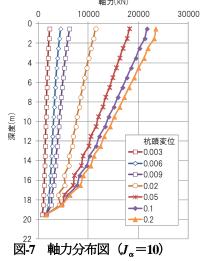


図-6 粘性土の調整係数と周面摩擦力の関係



3. 事例解析

(1) 杭の押込み試験

(a) 解析条件

杭の押込み試験 ⁵を対象として、改良型ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦力の検討を行う。対象実験の土層条件及び周面摩擦力を図-8 に示す。地盤は FLIP のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。また、解析用地盤物性値は N 値に基づき、簡易設定法(改訂版) ¹⁾から設定した。解析用物性値を表-4、表-5 に示す。解析は排水条件で実施し、地盤の奥行き方向幅は 1m 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. なお,本検討では改良型 ジョイント要素を用い, J₂は1.0で固定とする.

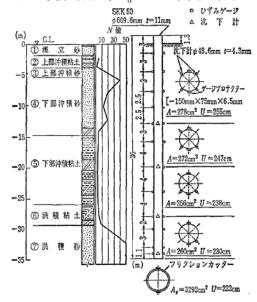


図-5 土質条件および載荷試験杭の仕様

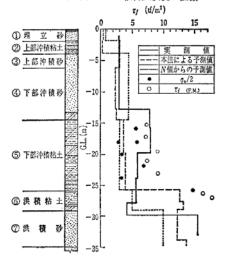


図-16 最大周面摩擦力度の予測値と実測値の比較 図-8 再現対象事例⁵

(b) 解析結果

杭の周面摩擦力度の比較を図-9 に示す. J_{β} の値が大きくなるほど周面摩擦力度の値が大きくなっていることが分かる. 沖積砂は実測値と同程度, 上部沖積粘性土, 洪積粘性土は実測値よりやや大きめ, 埋立砂, 下部沖積粘性土, 洪積砂は実測値より小さめという結果となっている. また, 洪積砂で極端に周面摩擦力度が大きくなるという分布形状は再現できていない. 図-10 に杭の荷重と変位の関係を示す. 全てのケースにおいて実測値に比べて最大荷重が小さい結果となっている. これは, 下部沖積粘性土, 洪積砂において周面摩擦力を小さめに評価しているためと考えられる. また, 最大に達する変位については実測値に比べてかなり大きく, 鉛直抵抗を小さめに評価している.

表4 解析用物性值

	質量 密度 ρ (t/m³)	初期せん断 剛性 G _{ma} (kN/m ²)	体積 弾性係数 K _{ma} (kN/m ²)	平均 有効拘束圧 σ _{ma} (kN/m ²)	拘束圧 依存係数 m _G ,m _k	間隙率n	内部 摩擦角 φ (°)	粘着力 C (kN/m²)
埋立砂	1.8	66298	172894	98	0.5	0.45	39.3	-
上部沖積粘性土	1.5	6375	16625	30.8	0.5	0.55	30.0	-
上部沖積砂	2.0	140988	367674	98	0.5	0.45	42.1	-
下部沖積砂	2.0	119778	312364	98	0.5	0.45	41.3	-
下部沖積粘性土	1.7	14772	38523	143.4	0.5	0.55	30.0	-
洪積粘土	1.7	49980	130340	182.8	0.5	0.55	0.0	147.0
洪積砂	2.0	122354	319080	98	0.5	0.45	41.4	

表-5 改良型ジョイント要素の解析用物性値

		垂直方向 接線剛性		粘着力	摩擦角	奥行き 方向幅
		K_n	K_s	c_j	$\phi_{\rm j}$	width
l		$(kN/m^2/m)$	$(kN/m^2/m)$	(kN/m^2)	(°)	(m)
I	自重解析	0	0	0	15	1.913
ſ	押込み解析	0	1.00E+06	0	15	1.913

(c) 改良型ジョイント要素の適用性

本検討では、FLIP において杭の押込み試験における 周面摩擦力を再現する方法について検討した. 得られた 主な結論は以下のとおりである.

- ① 表層の砂層(①埋立砂,③上部沖積砂,④下部沖積砂)に着目すると,調整係数 J_{α} , J_{β} を考慮することで解析は実測値を再現できる可能性がある.
- ② 同一の J_{β} では深部の剛性が大きい土層で極端に周面摩擦力が大きくなるといった現象を再現できないため、剛性の大きい土層では J_{β} の値を変更する必要がある.
- ③ 本提案モデルでは、施工影響による影響を強度増加 のみで考慮し、剛性は初期値のまま一定としている ので、荷重の最大値に至る変位は大きめの値となる。 なお、実験は杭先端抵抗を受けるが、解析は杭先 端をフリーとしている。杭先端の境界条件の違いが、 荷重や変位に影響している可能性がある。

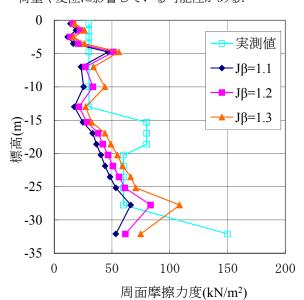


図-9 周面摩擦力の比較

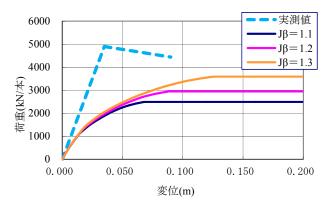


図-10 杭の荷重-変位関係

(2) 杭の引抜き試験

(a) 解析条件

杭の引抜き試験 ¹²⁾を対象として、改良型ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦力の検討を行う. 対象実験の土質柱状図を図-11 に示す. なお、杭に関しては、直径508mm、肉厚 9mm、杭長 12m の鋼管打込み杭としてモデル化した.

地盤は FLIP のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした. なお、杭先端は自由端とする. また、解析用地盤物性値は N 値に基づき、簡易設定法(改訂版) から設定した. 解析は排水条件で実施し、地盤の奥行き方向幅は 0.508m としている. 解析用物性値を表-7、表-8 に示す. 改良型ジョイント要素の J_{β} は、1.1、1.2、1.3 と変化させた. なお、 J_{α} は 1.0 とした. これらのケースに対して、ジョイント要素の摩擦角 ϕ_j を 15° 、 30° 、 45° と変化させて検討した.

表-7 地盤物性値

	質量密度	初期せん断剛性	体積 弾性係数	平均 有効拘束圧	拘束圧 依存係数		内部 摩擦角	粘着力
	ρ	Gma	Kma	σ _{ma}	m _G , m _K	間隙率n	φ	С
	(t/m ³)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	(kPa)			(°)	(kN/m^2)
ローム	1.41	44276	115466	4.20	0.5	0.55	-	40.0
粘性土1	1.61	29719	77502	15.38	0.5	0.55		25.0
砂質土1	2.02	134899	351794	98.00	0.5	0.45	42.0	-
粘性土2	1.61	48624	126803	53.40	0.5	0.55		25.0
砂質土2	2.02	129288	337163	98.00	0.5	0.45	41.0	-
粘性土3	1.61	56875	148321	82.73	0.5	0.55	-	25.0
砂質土3	2.02	174173	454215	98.00	0.5	0.45	43.0	-

表-8 改良型ジョイント要素の物性値

	垂直方向 接線剛性		粘着力	摩擦角	奥行き 方向幅
	K_n	K_s	c_{j}	ϕ_j	width
	$(kN/m^2/m)$	$(kN/m^2/m)$	(kN/m^2)	(°)	(m)
自重解析	0	0	0	15, 30, 45	3.1416
引抜き解析	0	1.00E+06	0	15, 30, 45	3.1416

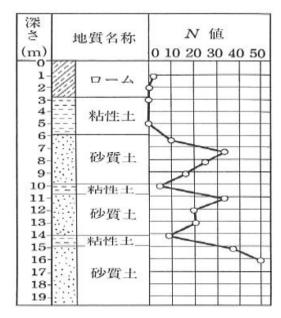
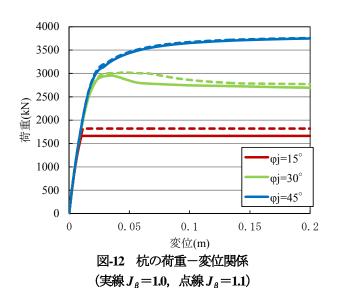


図-11 地質柱状図 12)

(b) 解析結果

図-12に杭頭軸力と変位量の関係を示す.ここでは、6ケースを示す.



次に図-13 に各ケースにおける周面摩擦力分布を示す. J_{β} =を 1.1 から 1.3 にする場合, ϕ_j =30°において,実測値に近い結果を示した.

(c) モデル化の妥当性

実際に改良型ジョイント要素を設定で用いるためには、地盤種別、剛性等により適切な調整係数 J_{β} を設定する必要があるため、種々の条件を設定した実験とその再現解析を行い、実用的なものとする必要がある.

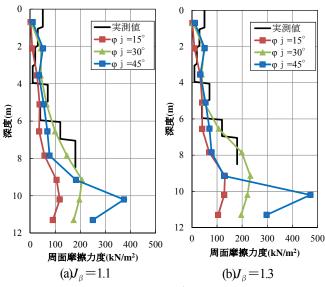


図-13 杭の周面摩擦力分布

(3) 液状化地盤中の杭の引抜き試験

(a) 解析条件

西谷ら ⁹ の実験を対象として、液状化地盤中の杭における引抜き試験の再現解析を行った。実験結果を図14 に示す。地盤は FLIP のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。なお、杭先端は自由端とする。また、解析用地盤物性値は N 値に基づき、簡易設定法(改訂版) ¹から設定した。杭と地盤間のモデル化は方法 C に従っているが。解析モデルの奥行き方向幅は土槽幅の0.688m とした。なお、ここでは施工影響は考慮せず、従来型のジョイント要素の適用性を検討した。

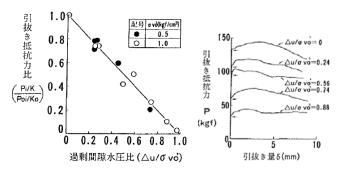


図-14 実験結果 9

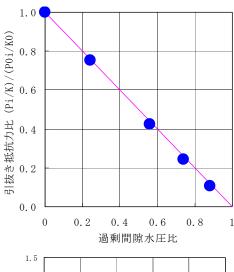
(b) 解析結果

解析結果を図-15 に示す. 過剰間隙水圧比が大きくなるほど,解析による杭の引抜き抵抗力は,実験と同様に小さくなった. また,過剰間隙水圧比と引抜き抵抗力比の関係は,実験と同様に,過剰間隙水圧の上昇に伴い引抜き抵抗力比が低下する線形関係となる.

(c) モデル化の妥当性

液状化地盤における杭の引抜き試験のシミュレーション

を行い、解析結果が実験結果とほぼ同様な結果が得られることを確認した.



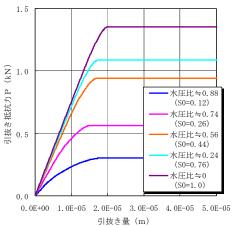


図-15 解析結果

4. まとめ

本検討では、①液状化状態において杭の周面摩擦力を 従来型のジョイント要素でモデル化する方法、②杭の施 工影響による杭と地盤の周面摩擦力や粘着力の変化を考 慮する方法に着目して、検討を行った.

液状化状態の杭の周面摩擦力のモデル化については, 従来型のジョイント要素を用いることで,地盤の有効応力の低下に応じて杭の周面摩擦力が変化し,適切に挙動 を表現できることがわかった.

また、施工影響を考慮した改良型ジョイント要素を提案し、杭の周面摩擦力のモデル化に関する解析的検討を行った。事例解析を行ったところ、杭の押込み試験と引抜き試験の結果を表現可能であることが示唆され、杭の周面摩擦力を改良型ジョイント要素でモデル化することは適切であることがわかった。さらに、改良型ジョイント要素の調整係数 J_{β} の適用性について検証した。砂質土の場合、調整係数 J_{α} の適用範囲は下式となる。

$$J_{\beta} < \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{I}} \times \frac{B}{\pi D} \tag{5}$$

 $[\tau_{xy}:$ 地盤のせん断応力, $\phi:$ 地盤の内部摩擦角, ϕ_{i} ジョイン要素の摩擦角,D:杭の直径,B:地盤の奥行き方向幅

粘性土の場合,調整係数 J_{α} の適用範囲は明確ではない.なお,粘性土の周面摩擦力の設計値は,打撃工法で粘着力の 1.0 倍,埋込み杭で 0.8 倍となっており, J_{α} = 1.0 倍程度が目安である.

以上の結果を踏まえて、現在の知見で妥当と考えられる杭周辺部のモデル化の方法を表9に示す。現在、FLIPでは杭の軸直角方向及び軸方向のモデル化を一体とする新しい要素(杭一地盤相互作用ばね要素に、改良型ジョイント要素相当の摩擦を表す非線形ばねを組み込む要素)を開発中である。また、杭先端のモデル化については別途検討中である。

表-9 杭と地盤の相互作用のモデル化の方法

	方向	モデル化の方法
	杭の 軸直角 方向	杭ー地盤相互作用ばね要素でモデル化
杭周面のモデル化	杭の軸方向	ジョイント要素のせん断強度が周辺地盤の拘束 圧に依存する特性を用いてモデル化する ・摩擦角 15度(鋼材と土の間の場合の例) ・杭・地盤間のジョイント要素の接触長=杭の周 長(πD)/奥行き方向の杭のピッチ(B) ・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。
杭先端のモ	デル化	非線形ばね要素でモデル化(検討中) (押込み力のみ抵抗する)

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)
- 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】,平成23年8月3日
- Iai, Matsunaga, Kameoka: 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,山﨑雅弘:遠心模型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ー新規杭の表面が滑らかなケースと粗いケースの比較ー,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.
- D. J. White, M. D. Bolton: Observing friction fatigue on a jacked pile, Centrifuge and Constitutive Modeling, pp347-354, 2002.
- 9)西谷道暢,喜田浩,飯田毅:過剰間隙水圧下での杭の鉛直引

- き抜き抵抗力, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp230-231, 1991
- 10) 武居幸次郎,松本樹典:打設前後の鋼管杭近傍地盤の CPT 調査,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.587-588,1997.
- 11) 森安俊介,中山裕章,小堤治,飛田哲男:施工影響を考慮可能な杭の周面摩擦モデルの一提案,第 48 回地盤工学研究発表会,pp.1235-1236,2013.
- 12)社団法人土質工学会:土質工学会基準 杭に引抜き試験方法・同解説,pp.81-88,1992.

A STUDY ON THE MODELING OF THE SHAFT FRICTION OF THE PILE FOR THE TWO DIMENTIONAL EFFECTIVE STRESS ANALYSIS

Junichi HYODO, Shunsuke MORIYASU, Kenichirou MIYASHITA, Kunihiko UNO, Osamu OZUTSUMI and Koji ICHII

This paper describes the results of an effective stress analysis on shaft friction of pile. We propose that we model pile-soil interaction of the direction perpendicular to the axis of the pile with pile-soil interaction element, shaft friction of pile with joint element, end bearing capacity of pile with nonlinear spring element. In perticular we proposes modeling of influence of ground liquefaction and construction impact. We simulate pull-out test in liquefied ground and vertical loading test and pull-out test in non liquefied groung. We confirm the validity of the proposed method.