

「せん断強度低減法」を用いた場所打ち杭の孔壁挙動解析手法の開発



太田 正彦*



渡邊 康夫*



清水 満*

軌道や既設構造物基礎近傍へ場所打ち杭を設置する場合においては、施工時の列車走行安定性や軌道の変状予測など安全性の評価手法が未確立であるため、一般に作業時間を線路閉鎖間合いに限定するとともに入念な変状対策工を実施することが求められる。これは工期と工事費の膨張をまねき、最終的に事業の全体工期・費用の増大に帰結する。そのため杭施工時の安全性確認を可能とし、作業時間拡大と対策工を真に必要なものみに適正化することが喫緊の課題である。

本研究では、施工時安全性の定量的な評価を可能とすることを目的として「せん断強度低減法」を組込んだ三次元弾塑性有限要素法解析 (SSR-FEM) による解析手法の検討整備を行い、その有効性を確認するとともに解析ソフトウェアの整備を完了した。以下にその概要を報告する。

●キーワード：場所打ち杭 孔壁安定 有限要素法解析

1. はじめに

線路上空に構造物を建設する場合、場所打ち杭など新たな基礎構造物を既設軌道や高架橋・建築物などの基礎構造物に近接して建設することが少なくない。しかしながら施工中の杭孔壁の安定性や周辺地盤・近接基礎構造物への影響に対する検討手法は未整備であり、適正な対策工の計画は困難である。そのためこのような施工は夜間など線路閉鎖時間帯のみに限定するとともに過剰とも思える対策工を施すこととなるが、工事費・工期の増大につながることも、対策工事による地盤変状など悪影響を引き起こす場合すらある。

これらの問題に対処するためには杭施工時の削孔による影響を適切に評価して対策工事の適正化を図ることを要するが、その影響評価手法は充分整備されているとは言えず、「新設杭と同径程度の離隔を確保すれば影響は小さい¹⁾」という実験結果がある程度である。そのため設計施工計画の実務に適用可能な検討手法の確立が急務である。

そこで計画段階での簡易な影響解析手法として「せん断強度低減法」を組み込んだFEM解析ソフトウェアの整備を行い、その有効性を確認した。以下に開発概要・考察などについて記す。

2. 解析手法の検討

2.1 概要

前記のような営業線に近接した現場における場所打ち杭の施工においては近接軌道・路盤および下部地盤の安定確保が必要である。また削孔中は安定液（泥水）により孔壁の崩壊を防止しなければならない。しかし、これまで孔壁崩

壊のメカニズムや境界条件などに関する知見は乏しく、経験的に安定液水位を一定程度高くとることで対応しているのが現状である。

そこで地下連続壁建設時の溝壁安定検討で実績を有する「せん断強度低減法を組込んだ三次元弾塑性有限要素解析」(SSR-FEM法)を用いて孔壁の安定と崩壊挙動を解明する方法の整備を行った。SSR-FEM法は従来のFEM解析とは異なり、すべり面の予測・仮定を行うことなくその形状と全体安全率（検討する「系」が全体として保有する最小の安全率）を自動的に算定可能^{2) 3)}な解析手法である。この手法は、当社においても「地下連続壁の溝壁安定の設計施工マニュアル」において導入済みである。

2.2 ソフトウェアの概要

「地下連続壁の溝壁安定の設計施工マニュアル」で整備されたSSR-FEM解析ソフトウェア「泥水溝壁@FE」は検討断面を溝断面を含む二次元断面を模したFEMメッシュを使用する。「泥水溝壁@FE」はSSR-FEM法の特長により想定すべり面形状（コンター図表示）と全体系の持つ安全率とを自動的に算定することができるが、二次元モデルに対する解析機能のみを有するため、杭孔の円形など三次元メッシュへの対応が不可能である。

そこで計算エンジンはほぼ同一のまま活用する一方、三次元メッシュに対応した杭孔用プリポストプロセッサを新たに整備し、円筒形の孔に対する周辺地山の挙動を立体的に解析可能とすることとした。図1にソフトウェア画面イメージ、図2に外部アプリケーションを用いた結果表示例（想定すべり面を追記）を示す。

なお、ここで示したモデルは対称性を考慮して杭中心を基

準に検討範囲の1/4（中心角90度）を切り出したもので、工学的に問題を生じない範囲で節点・要素数を削減し、解析計算の効率化を図ったものである³⁾。

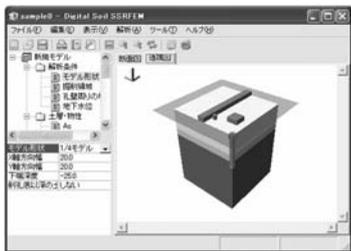


図1 ソフトウェア画面（イメージ）

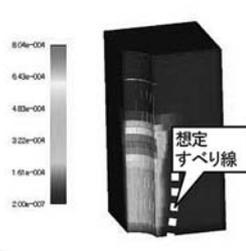


図2 結果表示例

3. パラメータスタディ

3.1 概要

「地盤条件」「孔内水位と地下水位との水頭差」「泥水（安定液）比重」の各要素が全体安全率にどの程度寄与するかの確認のため、下記のとおりパラメータスタディを実施した。解析モデルは図3を基本とし、表1～表4に示すとおりとした。解析条件を以下に示す。

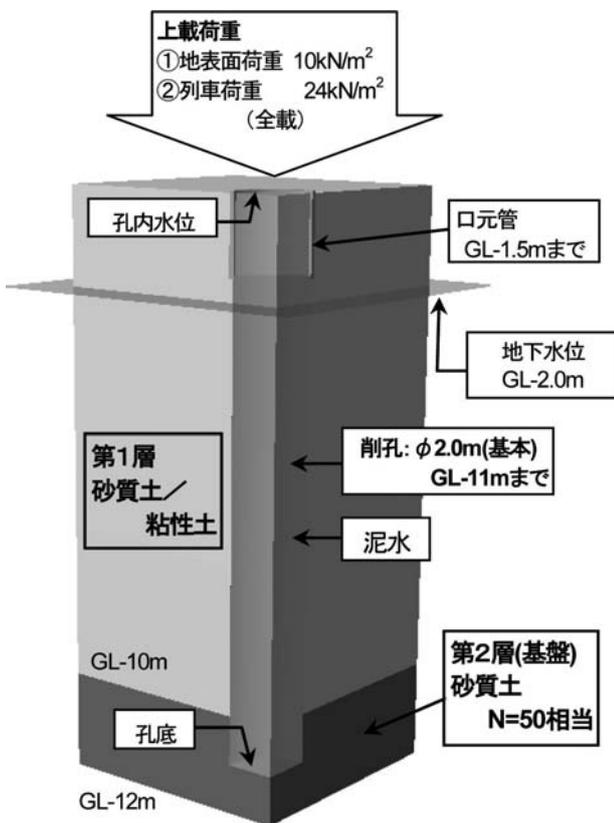


図3 パラメータスタディで用いた解析モデル（1/4）

①解析モデル

削孔半径を1.0m（杭径2.0m）とし、解析対象は杭周囲の90°の範囲を取り出した「1/4モデル」とした。解析範囲は杭中心から平面方向各5m、深さ方向12mを対象とした。削孔深さは11mとし、杭先端部に1mの地山を残した。

なお杭径をパラメータとする検討ケースにおいては地盤条件は一意に固定して、杭径を0.6mから4.0mまで変化させた。

②地盤条件

地盤条件は砂質土・粘性土のいずれか単一層が地表面からGL-10mまで存在する（図3の“第1層”）こととし、それぞれN値を変化させた数パターンの地層構成を表1～表4のとおり設定した。またGL-10m以深は杭の支持層（基盤層）とし、N=50の砂質土とみなした。

各土層の土質定数は設計基準類にもとづき算定するとともに、杭頭部には口元管（L=1.5m）を配置した。

③安定液（泥水）比重

安定液の比重は安全側となるよう低めの1.02（単位体積重量≒10kN/m³）とし、地下水面高さを基準として水頭差を最大2.0mまで0.5m刻みで設定した。また安定液比重をパラメータとする検討ケースでは地盤条件を固定とし、比重を1.0から1.14まで変化させた。

表1 解析条件と全体安全率（砂質土地盤/N値を変数）

	N	孔内水位	全体安全率
【砂質土】 杭径 φ 2.0 地下水位 GL-2.0 泥水比重 1.02	2	+0.0	0.22
		+0.5	0.77
		+1.0	1.17
		+1.5	1.49
	4	+2.0	1.77
		+0.0	0.23
		+0.5	0.83
		+1.0	1.25
	7	+1.5	1.58
		+2.0	1.87
		+0.0	0.27
		+0.5	0.89
10	+1.0	1.33	
	+1.5	1.69	
	+2.0	2.00	
	+0.0	0.26	
15	+0.5	0.88	
	+1.0	1.34	
	+1.5	1.71	
	+2.0	2.01	
20	+0.0	0.28	
	+0.5	0.97	
	+1.0	1.44	
	+1.5	1.83	
	+2.0	2.16	
	+0.0	0.30	
	+0.5	1.04	
	+1.0	1.54	
	+1.5	1.95	
	+2.0	2.29	

④荷重

荷重は軌道構造物を含む地表面荷重 (10kN/m²) および杭孔に隣接する軌道上の列車荷重 (24kN/m²) を地表面全面に載荷した。平面モデル範囲幅が5mであるので、この列車荷重は概ね軌道1線分となる。

表2 解析条件と全体安全率 (粘性土地盤/N値を変数)

	N	孔内水位	全体安全率
【粘性土】 杭径 φ 2.0 地下水位 GL-2.0 泥水比重 1.02	1	+0.0	0.32
		+0.5	0.34
		+1.0	0.36
		+1.5	0.39
		+2.0	0.42
	2	+0.0	0.64
		+0.5	0.68
		+1.0	0.73
		+1.5	0.78
		+2.0	0.84
	3	+0.0	0.95
		+0.5	1.02
		+1.0	1.09
		+1.5	1.17
		+2.0	1.26
	4	+0.0	1.22
		+0.5	1.26
		+1.0	1.44
		+1.5	1.49
		+2.0	1.68
5	+0.0	0.89	
	+0.5	1.31	
	+1.0	1.39	
	+1.5	1.79	
	+2.0	2.06	
7	+0.0	0.83	
	+0.5	1.21	
	+1.0	1.48	
	+1.5	1.93	
	+2.0	2.26	

表3 解析条件と全体安全率 (杭径を変数)

	N	杭径 (m)	全体安全率
【砂質土】 地下水位 GL-2.0 泥水比重 1.02	10	0.6	1.72
		0.8	1.62
		1.0	1.57
		1.2	1.51
		1.5	1.45
		2.0	1.34
		2.5	1.26
		3.0	1.20
		3.5	1.13
		4.0	1.08
【粘性土】 地下水位 GL-2.0 泥水比重 1.02	3	0.6	1.59
		0.8	1.48
		1.0	1.39
		1.2	1.31
		1.5	1.22
		2.0	1.09
		2.5	0.99
		3.0	0.91
3.5	0.84		
4.0	0.78		

表4 解析条件と全体安全率 (泥水比重を変数)

	N	泥水比重	全体安全率
【砂質土】 杭径 φ 2.0 地下水位 GL-2.0	10	1.00	1.22
		1.02	1.34
		1.04	1.44
		1.06	1.53
		1.08	1.61
		1.10	1.68
		1.12	1.74
【粘性土】 杭径 φ 2.0 地下水位 GL-2.0	3	1.00	1.07
		1.02	1.09
		1.04	1.12
		1.06	1.14
		1.08	1.16
		1.10	1.18
		1.12	1.21
1.14	1.23		

3.2 解析結果

表1~表4に示した全体安全率と変数との関係を図4~図7に示す。

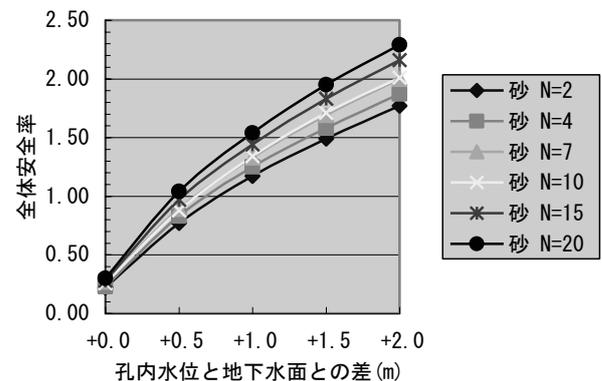


図4 全体安全率分布 (孔内水位/砂質土)

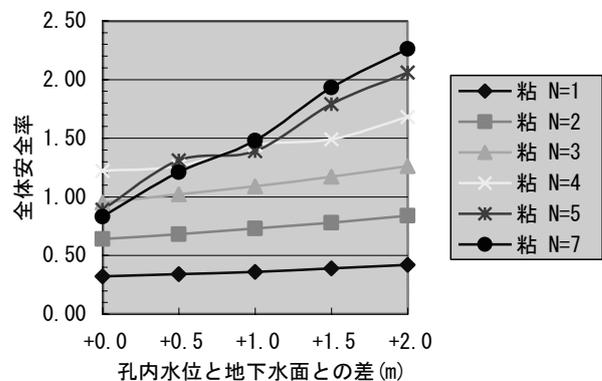


図5 全体安全率分布 (安定液水位差/粘性土)

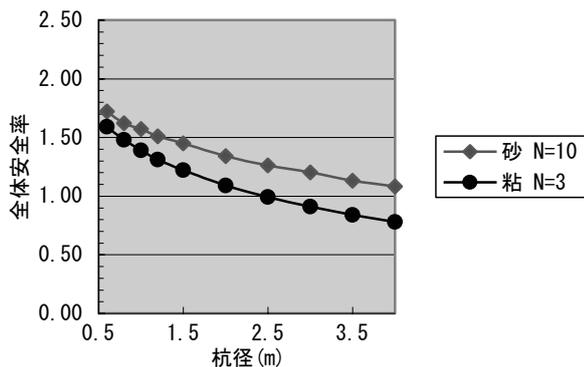


図6 全体安全率分布 (杭径)

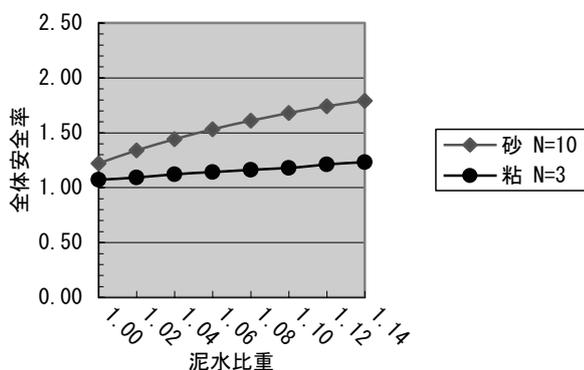


図7 全体安全率分布 (泥水比重)

また代表的な解析ケースにおける八面体せん断ひずみ(無次元)の増分分布図(コンター図)を図8~図11に示す。これより、下記のような傾向が確認できる。

- ①緩い砂質土モデル(図8)では孔壁の不安定性が広範囲に分布し、地山内のすべり面の形成に先行して系全体の安定性が損なわれている。そのため系全体の安全率は0.22と極めて小さい。
- ②中位の砂質土モデル(図9)では緩い砂質土の場合に比べて孔壁の安定性が向上し、砂質土層内のすべり面形成と孔壁の不安定性、支持層内の孔壁面の不安定性とが複雑に並進している。しかし系全体の安全率は1.54と高い。
- ③軟弱な粘性土モデル(図10)では孔壁の不安定性はみられるものの粘性土の持つ粘着力の効果により安定を損なうほどではなく、結果として地山内のすべり面形成がやや先行している。系全体の安全率は0.77と緩い砂質土モデルに比べて大幅に高いが、孔壁面の変形が相当程度進んでいるため安全率の値以外で極限条件が決定する可能性もあり注意を要する。
- ④中位の粘性土モデル(図11)では粘性土の持つ粘着力が大きく貢献するため層内の孔壁や地山に影響は見られず、支持層(砂質土扱い)内における孔壁面の不安定性が先行している。系全体の安全率は1.40と高い。

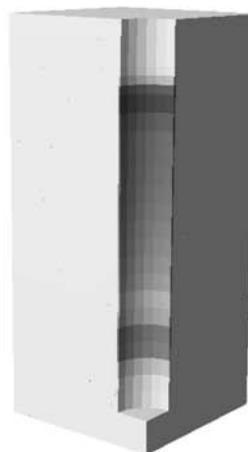


図8 緩い砂質土 (N=2)

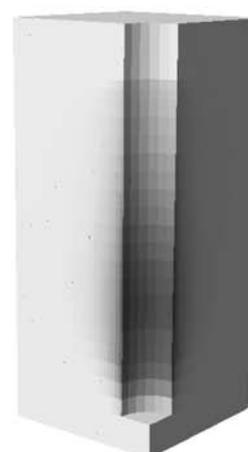


図9 中位の砂質土 (N=20)

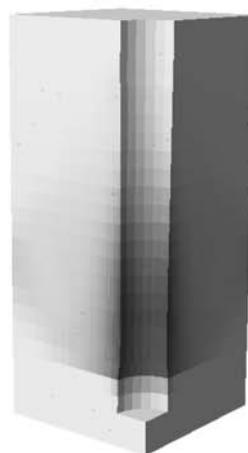


図10 軟弱な粘性土 (N=2)



図11 中位の粘性土 (N=15)

全体安全率や孔壁安定、地山すべり面の発生位置は地山物性や地層構成などが複雑に絡み合って決定するものであるが、今回整備したソフトウェアはそれを明瞭に解明することが出来ていると考えられる。したがって、この解析方法もちいたソフトウェアには十分な有効性があると考えられ、解析結果が実用上問題ない程度の信頼性を有することを確認したうえで検討ツールとして実用化を図ることが適当である。

そこで信頼性確認のため実地盤を対象とした検証試験を実施したので、次項にその概要を記す。

4. ソフトウェア検証のための実地盤削孔試験

4.1 概要

前項までに記したソフトウェアは今回検討実施にあたり整備したものであるため、実現象を正しく反映できているかの検証が必要となる。そこで実地盤に対する孔壁崩壊試験を実施して孔壁の挙動観測を行い、ソフトウェアによる解析結果と突合せ照合を行うこととした。

孔壁崩壊試験は実際の場所打ち杭と同様にして直径1000～2500mmの杭孔を削孔し、完了後に孔内安定液の水位を徐々に低下させて孔壁崩壊を惹起する方法で実施した。試験フローを図12に、試験ケースの内訳を表5に示す。

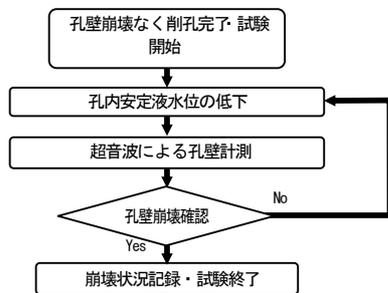


図12 孔壁崩壊試験フロー

表5 孔壁崩壊試験ケースおよび結果

(水位はGL高さを基準)		No.1	No.2	No.3	No.4
孔径(mm)		φ 1000	φ 1500	φ 2000	φ 2500
地下水位(m)		-0.50	-0.60	-0.60	-0.60
安定液水位(m)	(a)【解析】 Fs≒1.0時	-0.55	-0.60	-0.55	-0.50
	(b)【実験】 崩壊発生時	-1.10	-1.20	-1.30	-1.20
	(c)【実験】 崩壊予兆(推定)時	-0.90	-0.80	-0.60	-0.80
	(a)-(b)	0.55	0.60	0.75	0.70
(a)-(c)		0.35	0.20	0.05	0.30

現場の地盤条件は、表層部が人工改良体と思われる盛土、GL-1.5～3.5m程度が腐食土層を含む軟弱なシルト質粘土、GL-3.5m以深が緩いまたは中程度の細砂層となっている。また地下水位はGL-0.81mであった。土質柱状図を図13に示す。

4.2 ソフトウェアを用いた事前解析

孔壁崩壊試験における崩壊発生水位を予測するため、試験で適用する諸条件を用いて安定液水位をパラメータとして事前解析を実施し、求められた全体安全率の値をグラフ化(図14)して崩壊が発生する安定液水位を推定した。

その結果、概ね杭径との比例関係をもちながら地下水位+0.2～0.4m程度で全体安全率が1を下回ることが判り、崩壊試験時にはこの付近で孔壁崩壊の発生が予想された。

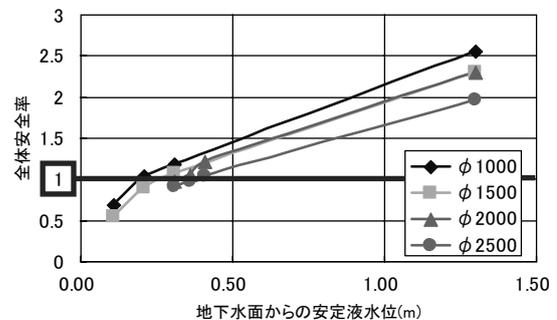


図14 事前解析による全体安全率分布状況

4.3 崩壊試験結果

崩壊試験において孔内安定液を低下させていったところ、杭径に拘らず全ケースとも安定液水位が地下水面高-0.6～-0.7m程度となった時点で粘性土層下部の細砂層に崩壊が生じた。崩壊形状は三角形ないし楔状で、水平方向の崩壊幅は概ね300～400mm程度と推定される。試験状況・崩壊発生状況の概念図を図15に、削孔ケースごとの孔壁崩壊時安定液水位を表5に、超音波測定記録の一例を図16に示す(No.4、直径2500mm)。

事前解析結果との比較では崩壊発生位置は概ね一致したものの、崩壊観測時の安定液水位は解析結果より0.5～1.0m程度低い結果となった。

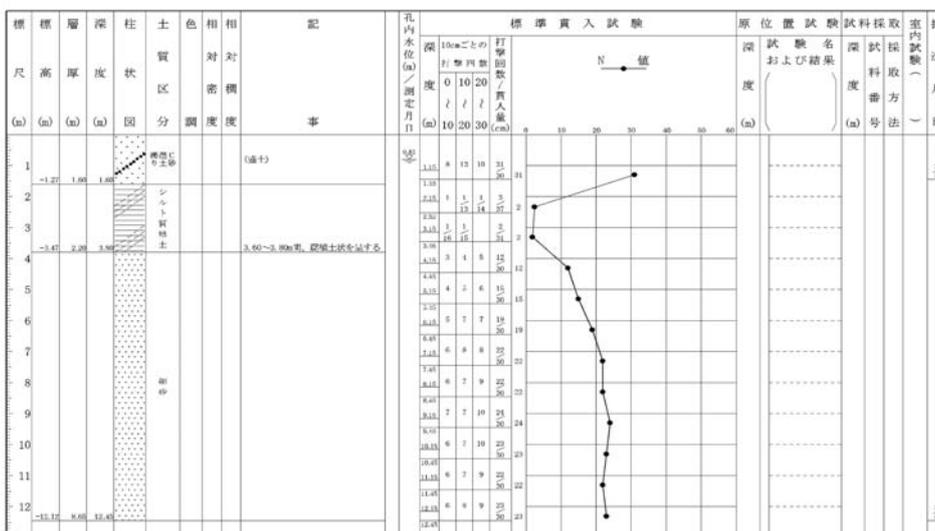


図13 試験位置における土質柱状図

4.4 結果の考察

杭孔内の安定液水位は、解析計算で全体安全率1となる水位と実験時の崩壊発生水位とで最大0.75m相違する結果となった(表5:「(a)-(b)」の項)。主要要因としては、解析計算で全体安全率が1となる時点

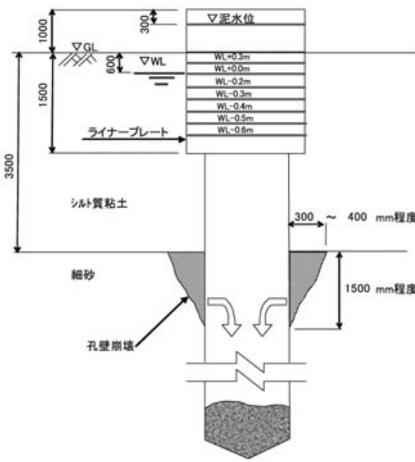


図15 孔壁崩壊発生状況(概念図)

は、地山のある部分が破壊に至ったことを意味する半面、それは必ずしも大きな崩壊が発生する時点の意味しないということが考えられる。

そこで測定記録から小規模崩壊またはその兆候の読み取りを試みたところ、最終崩壊深さ手前で安定液の濁りまたは遊離砂分の存在が示唆されるものが複数ケースで見られた(例:図16(2))。このときの安定液水位は最終崩壊時より0.2~0.7m程度高く、全体安全率1を与える解析計算における水位との差は0.05m~0.35m程度となる(表11:「(a)-(c)」の項)。これは地盤の不均一性を考慮すると、概ね同等の値と考えてよいものと思われる。

一方、解析上の崩壊発生箇所は前述のとおり粘性土層直下の砂質土層付近となり、実際の崩壊発生位置(図15、16)とはほぼ一致した。

これらの内容を勘案すると、本ソフトウェアの解析結果は実現象に対して実用上十分な精度の再現性を持ち、かつ安全側の結果を与えるものと考えられる。

5. ソフトウェアの特性に関する考察

今回作成したソフトウェアでは、図9~11に示すように緩い砂質土の場合を除いて周面地盤の挙動を概ね良好に再現して系全体の安全率を算定可能と考えられる。

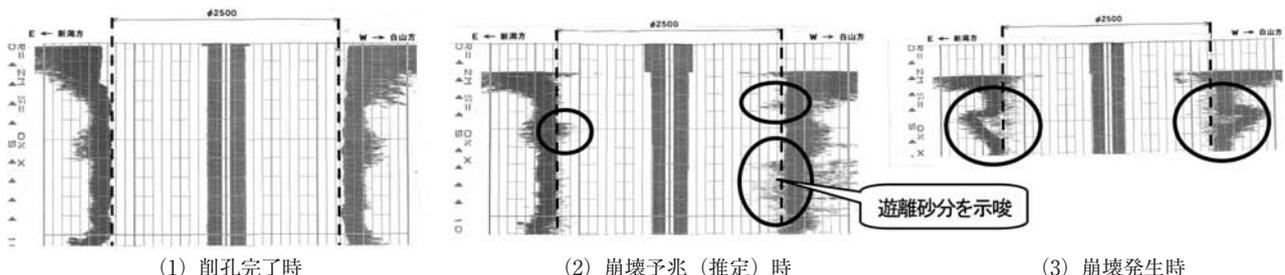


図16 超音波測定結果(杭No.4の例)

一方、図8のように緩い砂質土の場合では孔壁面剥離のような局部破壊で計算が停止し、計算上の全体安全率が実験より著しく低くなり、必ずしも実態を再現しない可能性がある。しかしながら、表5に示すように解析結果はすべて実験結果より安全側であって、かつ一定のばらつきはあるが極端に大きいものでもなく、実際の地盤が一般に持つばらつきの範囲を逸脱しない程度のものであると考えられる。

したがって、設計・安全性検討の実務においては本ソフトウェアによる解析結果を活用して差し支えないものと考えられる。

なお実地盤削孔試験結果をみると、崩壊発生箇所は概ね解析結果とよく一致している半面、明らかな崩壊発生時の孔内水位は解析結果より低い結果となっている。この理由は実験時において安定液中での超音波による孔壁計測方法に精度的な限界があり「崩壊開始」を精密には把握できていないためと考えられる。そのため前記のような「予兆」を正確に把握可能となれば、更に精度よくソフトウェアの検証が可能であるものと考えられる。

6. まとめ

線路に近接した現場における杭施工を安全に高速化することは、開発事業における工事費を低減するとともに早期の投資回収に資するものである。今回整備したソフトウェアを用いることで、このような現場における対策工の適正化を実現し、それに伴う工期短縮・工事費の適正化が図れるものと期待される。

このソフトウェアは「列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル」の制定にあわせて初版が「杭孔壁@FEver1.0」としてリリースされ、すでに実務利用が実施されている。

今後は実業務における設計施工実績をフィードバックして、ソフトウェアの精度向上や解析結果の評価方法について更なる改良と適正化を図ってゆく。

参考文献

- 1) 指定課題報告「2008年度 近接施工に伴う変形予測に関する研究」, (財)鉄道総合技術研究所, 2009
- 2) 地盤技術者のためのFEMシリーズ(2) 弾塑性有限要素法がわかる, (社)地盤工学会, 2003
- 3) 石井武司: 三次元弾塑性FEMによる泥水溝壁の安定性評価に関する研究, 群馬大学学位論文, 2003.12