

土留め掘削底部地盤におけるリバウンドの力学挙動解析

MECHANICAL BEHAVIOR OF GROUND BOTTOM HEAVE DUE TO EXCAVATION

玉野 富雄*・福井 聡**・村上 仁***・門田 俊一****

By Tomio TAMANO, Satoshi FUKUI, Hitosi MURAKAMI and Shunichi KADOTA

This paper discusses the mechanical behavior of ground bottom heave due to excavation. First, the heave fluctuation actually measured at 3 large-scale excavations are discussed. Then, the heave mechanism is examined by comparing the measured values with theoretical values obtained from coupled stress-flow finite element analysis. Furthermore, elastic moduli under load removal conditions (E_r), for layers composed of sand and clay, are estimated by back analysis. The local iterated extended Kalman filter of control theory combined with finite element method is applied to the back analysis in order to consider probabilistic features of measured values.

Keywords : ground bottom heave, excavation, coupled stress-flow analysis, extended Kalman filter, back analysis

1. はじめに

大規模な地下掘削工事においては、掘削排土などによる地中応力の減少により、リバウンドとよばれる掘削底部地盤の浮き上がり現象が生ずる。近年、市街地での建設工事は大規模になっており、工事の安全性、工期の短縮、経済性、作業空間の確保などから、逆打ち工法を採用することが多くある。この場合、基礎杭、構真柱（はり、床版を支える構造用の柱を本論文では構真柱とよぶ）を先行施工し、その後、はり、床版等の躯体を構築しながら掘削を進めるために、基礎杭の支持地盤が不均等にリバウンドした場合には、柱等に大きな不静定力が生じることになる。したがって、逆打ち工法を採用する場合には、リバウンドを事前予測しこれらを設計・施工に反映させることは重要な検討課題である。

リバウンドの力学挙動を定量化する試みは、TerzaghiとPeck¹⁾に始まり、その後種々の研究が植下ら²⁾、笹尾ら^{3),4)}、寺田ら⁵⁾、水野ら⁶⁾、高幣⁷⁾、著者ら⁸⁾によって行わ

れている。これらの既往の研究成果から、リバウンドは、地盤材料における弾性範囲内の挙動であるとしてよいようである。これは、既往の実測データによるリバウンドの最大ひずみレベルが粘性土で0.5%、砂質土で0.1%程度であること、リバウンドは地盤材料の応力-ひずみ関係における除荷側の挙動であること、などによるためである⁷⁾。また、リバウンドの予測計算法には、圧密膨張時の膨張指数を圧密沈下式に適用する方法、除荷時弾性定数を弾性論に従うSteinbrenner式⁹⁾等の沈下式に適用する方法などがある。なお、最近の電子計算機技術や数値解析技術の発達に伴い、多層地盤に対する適用が可能であり、また、土留め形状の影響による地中応力分布や構真柱荷重をよりの確に考慮し得ることにより、有限要素法がリバウンド解析に多用されている。

上述した理由により、一般的にリバウンドは地盤材料の弾性範囲内の挙動とみなすことができるため、その予測精度を向上させるためには、地盤内有効応力の変化に関与する荷重や除荷弾性係数等の地盤定数を精度よく評価することが重要な研究課題となる。既往の研究においてもこれらの課題を扱った事例が多く、作用荷重については、従来、排土荷重、構真柱荷重（構真柱に加わる躯体荷重）、掘削に際して行われる地下水位低下の影響等を考慮すべきとされているものの、地下水位低下による影響に対しては、定量的に扱った詳細な研究事例はない。しかし、わが国の大都市近傍の大規模掘削工事では、高

* 正会員 工博 大阪市下水道局建設部処理場課設計係係長（〒530 大阪市北区梅田1-2-2）

** 正会員 日本下水道事業団大阪支社設計第二課主査（〒541 大阪市中央区淡路町3-3-7）

*** 正会員 工博 日本下水道事業団常任参与（〒355 戸田市下笹目514-1）

**** 正会員 工修 フジタ工業㈱技術研究所第1研究部岩盤研究室室長（〒223 横浜市港北区大柵町74）

い位置の地下水位に対処し工事中はドライワークで掘削を実施するために、ディープウェル工法等を採用して地下水位を低下させたくえで掘削を進めることが多く、この場合には地下水位低下の影響を考慮することはきわめて重要となる。また、地盤定数の評価については、従来、土質調査・試験結果から求める方法、実測データの逆解析から評価する方法等の研究がなされているものの、リバウンド時の底部地盤の力学状態やリバウンドに関係する底部各層での除荷時弾性係数の決定法などの点で、不明な点が多く残されている。これは、リバウンドに伴う掘削底部地盤の土圧や間隙水圧に関する実測データがきわめて少なく力学状態が不明確であること、および、粘性土や砂質土の多層地盤問題として扱うべきところを、均質地盤における Steinbrenner 式等の理論を用いて検討されてきたためであると考えられる。

以上に述べた大規模地下掘削工事におけるリバウンド挙動の現状の問題点や既往の研究成果を踏まえ、本論文では、掘削底部地盤におけるリバウンドの詳細な力学機構の検討、および、リバウンド予測計算に必要な地盤物性値、特に除荷時の弾性係数を同定することで、その予測精度の向上を目的として、以下について述べる。

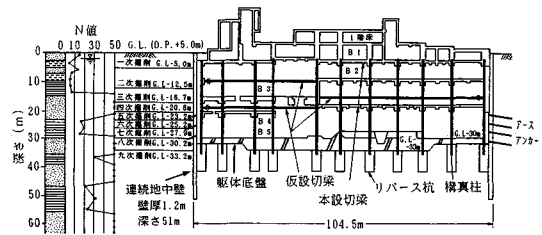
1) 大阪市内に下水道施設として施工された千島ポンプ場、海老江ポンプ場、弁天ポンプ場でのリバウンドの詳細な実測データを示し考察する。

2) 掘削排土荷重や構真柱荷重のほかに、地下水位低下を考慮した応力変形および非常常浸透流に関する連成解析を有限要素法を用いて実施し、実測値との比較・検討からリバウンドの力学機構を考察する。

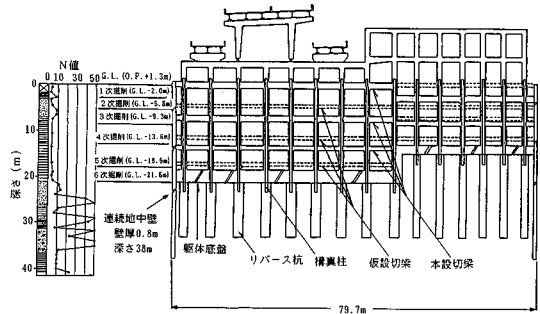
3) 拡張カルマンフィルターと有限要素法を組み合わせた手法を用い、多層地盤におけるひずみレベルに依存した非線形な除荷時弾性係数を逆解析し、特に、有限要素法によるリバウンド予測計算に必要な地盤物性値の評価を行う。

2. 実測データによるリバウンド特性の把握

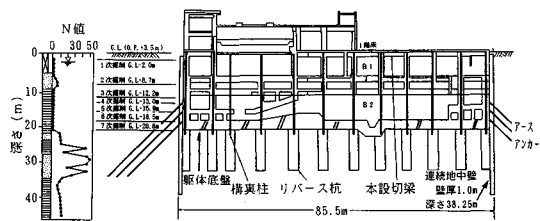
大阪市域の地盤は、大別して洪積砂質土地盤が主体となる市域中央部での上町大地と沖積粘性土地盤に二分できる。そこで、ここでは、異種地盤における大規模地下掘削工事の事例として、上町台地に建設された弁天ポンプ場、沖積粘性土地盤に建設された海老江ポンプ場、千島ポンプ場の実測データを取り上げる。以下では、種々実測されたデータのうち、地盤各層の深度別リバウンド、構真柱基礎杭支持地盤と構真柱リバウンドとの関係に関する実測データを示し、リバウンド特性について考察を加える。なお、3ポンプ場ともに地表面付近および帯水層に存在する地下水位に対処するために、掘削部直下の帯水層にディープウェルを設置し、地下水位を掘削の各



図一 弁天ポンプ場施工断面図と土質柱状図



図二 海老江ポンプ場施工断面図と土質柱状図



図三 千島ポンプ場施工断面図と土質柱状図

段階に応じて低下させ掘削した事例である。特に、千島ポンプ場では、掘削中央部 G.L. -40 m および 45 m における掘削底部地盤の間隙水圧や土圧を計測しており、その詳細については次章で触れることとする。3ポンプ場での施工断面図と土質柱状図を図一～3に示す。3ポンプ場で採用された掘削工法はいずれも逆打ち工法であり、連続地中壁構築後、リバース杭による基礎杭、構真柱を先行施工し、その後、はり、床版等の躯体を構築しながら掘削を進めている。また、3ポンプ場での地盤概要について、弁天ポンプ場では上部沖積層の下部に洪積層で密な砂層と固い粘土層（一軸圧縮強度 4～6 kgf/cm²）の互層よりなり、海老江・千島ポンプ場では、ほぼ正規圧密とみなされる軟弱な沖積粘土層の下部に、大阪市域で基礎杭支持地盤として用いられる洪積天満砂礫層、および、洪積天満粘土層（一軸圧縮強度 0.6～1.6 kgf/cm²）よりなっている。なお、地盤状態等の詳細については文献 10) を参照されたい。

(1) 地盤各層におけるリバンド

図4～9は、3か所での事例における土留め平面形状とリバンド計測位置、および、掘削段階別リバンドの深度別分布状況を示したものである。これらのリバンドは、いずれも層別沈下計で計測されたものであり、計測値は最深部に基準点として設置された沈下計からの相対変位量である。

図5、7、9で、掘削初期の1次、2次段階において、弁天ポンプ場ではリバンドが生じているが、海老江ポンプ場や千島ポンプ場ではリバンドではなく、逆に沈下傾向がみられる。また、千島ポンプ場では最終掘削に近づくにつれて増大する傾向にある。これは、掘削

初期においては、支持地盤に対する排土荷重の影響度が小さいことや、地下水位低下の影響による地盤沈下が発生していることによるものと推測される。また、掘削最終時にリバンドが急激に増大する理由は、排土荷重の影響度が大きくなることや、地盤の弾性係数がひずみ依存の非線形性によりリバンドの増加に伴い減少することによると考えられる。また、各ポンプ場の洪積粘土層におけるリバンドの全リバンドに占める比率は、掘削中央部で千島ポンプ場のG.L.-33.97～50.7mで27%、海老江ポンプ場でG.L.-35.5～43.0mで70%、弁天ポンプ場のG.L.-43.0～54.5mで51%程度であり、この層でのリバンドが比較的大きいといえる。

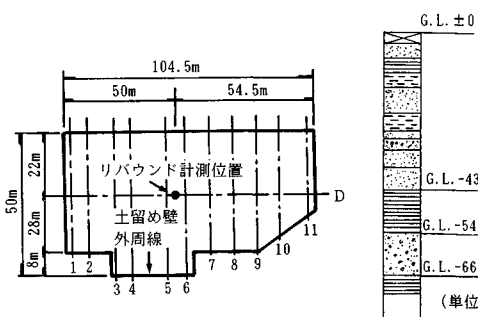


図-4 弁天ポンプ場土留め平面形状と計測位置

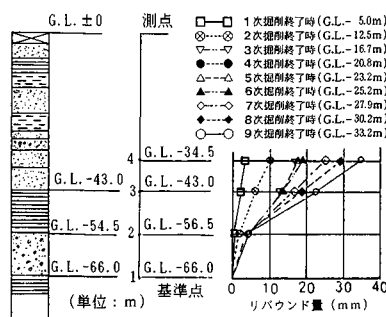


図-5 弁天ポンプ場リバンド分布図

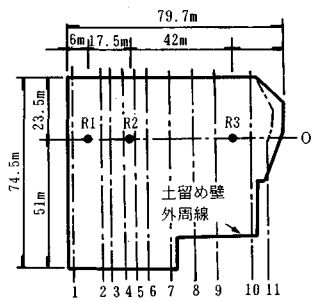


図-6 海老江ポンプ場土留め平面形状と計測位置

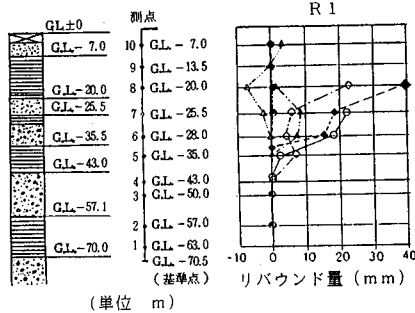


図-7 海老江ポンプ場リバンド分布図

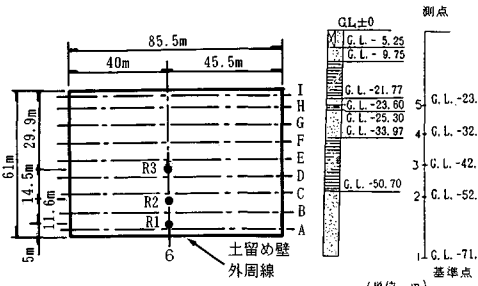
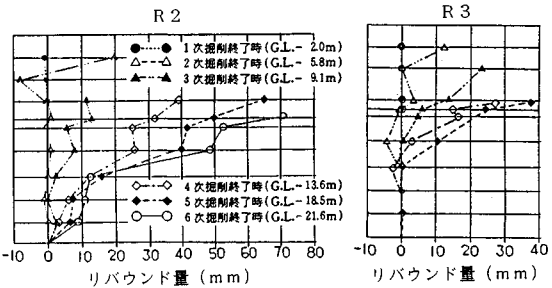


図-8 千島ポンプ場土留め平面形状と計測位置

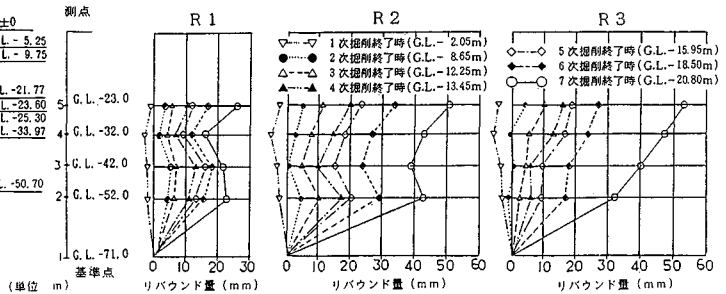


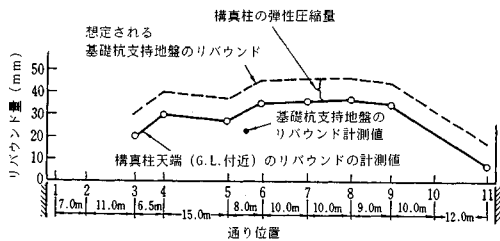
図-9 千島ポンプ場リバンド分布図

(2) 構真柱基礎杭支持地盤と構真柱リバウンドの関係

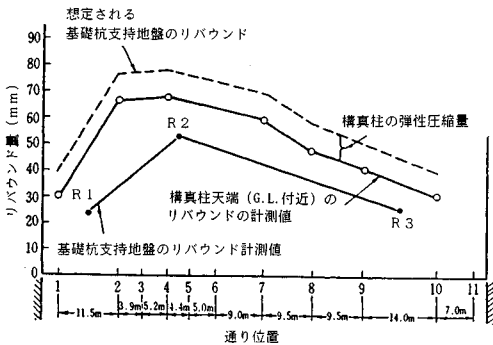
図一10～12は、最終掘削時の3か所での事例における構真柱基礎杭支持地盤および構真柱天端付近（地表面付近）のリバウンド分布状況を示したものである。構真柱天端のリバウンド計測には、掘削の影響を受けない既設の構造物を基準点とし水盛式沈下計を用いた。なお広域的な地盤沈下は本現場付近では生じていない。

通常、構真柱のリバウンドは、基礎杭を介して生じるために構真柱基礎杭支持地盤（リバース杭先端下の地盤）のリバウンドと同程度もしくは、構真柱の上載荷重による弾性圧縮量（3現場での構真柱に設置したひずみ計よ

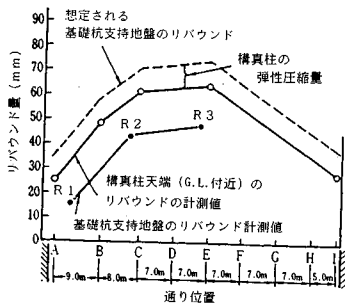
り計算できる実測値は約10mm）だけ小さくなるはずであるが、計測結果は、逆に構真柱天端で計測されたリバウンドが10～15mm程度いずれも大きくなっている。これは、基礎杭支持地盤のリバウンドの計測値は、G.L. - 66.0～70.5mに設置している層別沈下計の基準点からの相対変位として計測されており、基礎杭支持地盤そのもののリバウンドについては計測されていないこと、構真柱天端付近の計測値は、リバウンド絶対量が計測されているものの、上述した上載荷重による弾性圧縮量（約10mm）分だけ小さな値を示していること、等によるものと考えられる。したがって、基礎杭支持地盤の実際のリバウンドは、図中破線で示すように、構真柱天端のリバウンド計測値に構真柱の上載荷重による弾性圧縮量を加えた値として想定される。また、これらの事実は、層別沈下計の基準点において、構真柱の弾性圧縮量に構真柱天端と構真柱基礎杭のリバウンドの差である10～15mmを加えた20～25mm程度のリバウンドが生じていることを示している。このため、層別沈下計基準点におけるリバウンドは、構真柱基礎杭支持地盤で実際に生じているリバウンドの30～40%になり、地下深部からのリバウンドは無視し得ない値である。そのため、リバウンドの絶対量を測定するためには、本測定のように構真柱の弾性圧縮量の測定をあわせて実施する必要がある。さらに、リバウンドの予測計算においては、これらを十分に考慮した計算モデルを構築する必要がある。



図一10 構真柱基礎杭支持地盤と構真柱リバウンドの関係（弁天ポンプ場D通り）



図一11 構真柱基礎杭支持地盤と構真柱リバウンドの関係（海老江ポンプ場O通り）



図一12 構真柱基礎杭支持地盤と構真柱リバウンドの関係（千島ポンプ場6通り）

3. 連成解析によるリバウンド特性の把握

本章では、掘削に伴う地盤の応力-変形挙動および地下水の挙動変化の相互作用を把握するために有限要素法による連成解析を実施し、千島ポンプ場の掘削底部地盤で実測されたリバウンド・土圧・間隙水圧と比較することにより、地下水位低下を考慮したリバウンドの力学機構について検討する。連成解析は、応力変形および非定常浸透問題の基礎方程式を連立させて解くことにより実施されるが、ここで採用する解析方法は、大西¹¹⁾らによって提案されている方法であり、飽和域のみならず不飽和域における連成挙動を考慮できる方法である。すなわち、この方法は、従来飽和地盤の連成解析に適用されてきたBiot¹²⁾の方法を不飽和域に拡張したものである。なお、解析手法の詳細については、文献11)を参照されたい。

(1) 連成解析モデルと解析方法

連成解析モデルおよび解析方法は以下のように設定したが、解析断面は図一8に示す千島ポンプ場における6通りの鉛直二次元断面とした。

a) 解析モデル

図一13に要素分割図と解析モデルを示したが、ここでは、解析を単純化するために対称な問題設定とした。土

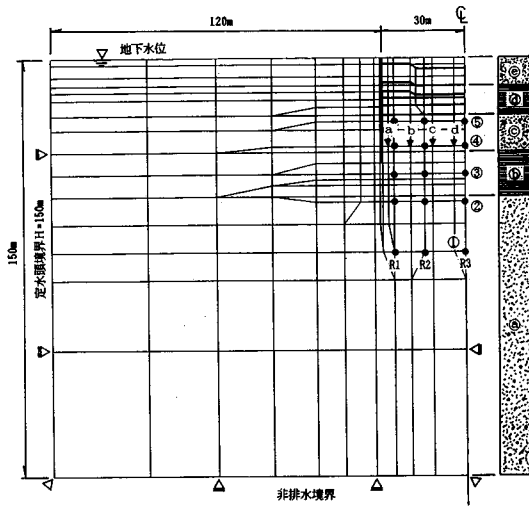


図-13 千島ポンプ場連成解析モデル

留め架構について、連続地中壁は平面要素を使用しコンクリートの物性を与えてモデル化した。切ばり、構真柱については、構造要素としてモデル化することなく、等価な効果を期待するために以下のように表現した。まず、切ばりの剛性による連続地中壁への拘束効果は、各掘削段階における連続地中壁実測値を強制変位量として与えることによって表現した。また、構真柱に作用する躯体荷重は、作用する荷重を等価な線荷重に置き換え該当節点に集中荷重として図-13のa~dに与えた。

b) 境界条件および初期条件

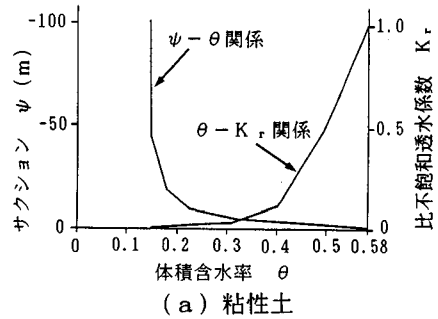
変位境界条件は、掘削部中央部より側方150m地点を水平方向固定、鉛直下方150m地点を鉛直方向固定とした。なお、解析領域については、事前にパラメトリック解析を実施し、実用上リバンドへの影響が無視できる範囲として決定した。浸透流解析に対する境界条件は、初期地下水面を地表面と仮定したうえで、領域側部を解析中に地下水位が変化しない定水位境界（水頭値 $H = 150\text{ m}$ ）、下端部を非排水境界とした。なお、掘削部内の境界条件については、後述する解析手順で示す。初期条件は、解析領域全域に初期全水頭 $H_0 = 150\text{ m}$ を与えた。

c) 地盤構成および地盤定数

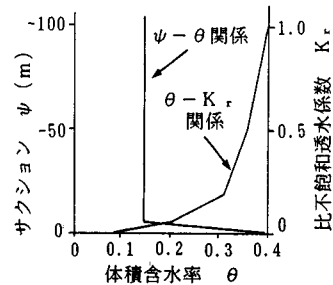
地盤構成は、事前ボーリング調査結果から図-13に示すように②~⑤の5層とし、各層の地盤定数は、表-1に示すように事前の土質調査・試験結果および過去のデータを参考にし、砂質土、粘性土の弾性係数は、 N 値や粘着力 C_u から経験的な値としてそれぞれ $28 N^{1/3}$ 、 $210 C_u^{1/4}$ などを参考に決定した。なお、砂質土、粘性土の弾性係数はひずみレベルに応じた非線形性を有することが指摘されているが、本章で実施する連成解析にこれらの非線形性を考慮することは、計算をより複雑にするば

表-1 地盤物性値

土層記号	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (t/m ³)	透水係数 (cm/sec)	備考
②	2500	0.3	1.8	1.0×10^{-2}	洪積砂礫層 D_{s2}
③	500	0.45	1.8	1.0×10^{-4}	天満粘土層 D_c
④	2000	0.35	1.8	1.0×10^{-2}	天満砂礫層 D_{s1}
⑤	300	0.45	1.8	1.0×10^{-4}	沖積粘土層 A_{c1}
⑥	500	0.35	1.8	1.0×10^{-2}	沖積砂層 A_{s1}



(a) 粘性土



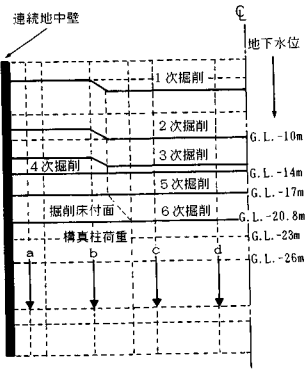
(b) 砂質土

図-14 不飽和域透水特性

かりでなく種々のパラメーターの相違による影響の差異を考察しにくくするものといえる。そこで、ここでは、連成解析の目的が地下水位の低下を考慮したリバンド挙動の定性的把握であることを考慮し、地盤の弾性定数はひずみに依存せず表-1の値で一定と仮定するものとする。不飽和域の浸透特性については、文献15)を参考に図-14に示すように決定した。また、土留め壁コンクリートの透水係数（コンクリートをマスとしてとらえた便宜上の値）、弾性係数、ポアソン比は、それぞれ $1.0 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 、 $2.8 \times 10^5\text{ kgf/cm}^2$ 、0.20とした。

d) 解析手順

図-15、表-2に解析手順詳細を示した。図-15は、図-13の掘削部周辺の要素分割図を詳細に示したものである。解析手順は、各施工過程のリバンドに与える影響を明確に把握できるように、各施工過程を独立させて扱った。したがって、ステップ8~9、13~14では、実際の工事においては同時に施工されたため、この点で実際の施工手順とは一致していない。また、実際の4、



図一五 解析ステップ説明図

表一 二 解析ステップ

ステップ	解析内容
1	初期応力解析
2	地下水位G.L.-10m
3	第1次掘削終了時
4	1F 構真柱荷重載荷
5	地下水位G.L.-14m
6	地下水位G.L.-17m
7	第2次掘削終了時
8	B1F 構真柱荷重載荷
9	地下水位G.L.-20.8m
10	第3次掘削終了時
11	B2F 構真柱荷重載荷
12	地下水位G.L.-23m
13	第4次掘削終了時
14	地下水位G.L.-26m
15	第5次掘削終了時
16	第6次掘削終了時

5次掘削を解析では4次掘削とし、実際の全掘削次数は7であるところを解析では6としている。各ステップの解析時間は、ほぼ実際に近い値として30日とした。なお、ステップ1の初期応力解析では、物体力による自重解析を実施している。次に、掘削部における地下水位に対する境界条件は、ディープウェル水位を参考に定め、図表に示した標高において、土留め壁で囲まれた範囲内の水位を水平様に圧力水頭ゼロの自由水面として与えた。このため、図示したディープウェル標高以上は不飽和域となる。

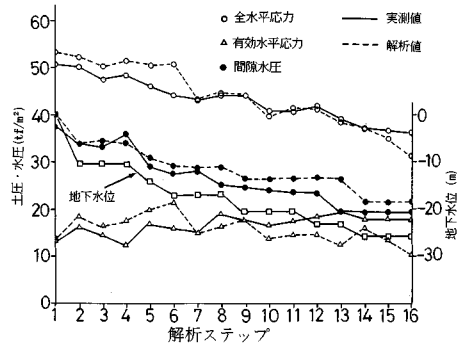
(2) 解析結果および考察

解析結果として、図一16, 17には掘削中央部 G.L.-40 m および G.L.-45 m における水圧、土圧(レデュサータイプの地中土圧計による計測)の解析値と実測値の比較を示した。図中、全土圧とは全応力の水平成分であり、有効水平応力とは、全応力の水平成分から等方的な間隙水圧を減じた値である。なお、実測された土圧は、全応力の水平成分である。図一18には基準点からの相対変位による深度別リバウンドの実測値と解析値の比較を示し、図一19には、R3列におけるリバウンド絶対量の解析値を各計測深度ごとに示した。

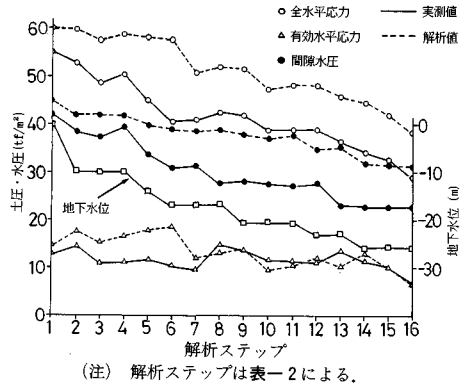
これらの解析結果と実測データの比較から以下のことが考察できる。

a) 間隙水圧

実測値と解析結果両者について、間隙水圧の低下量は、地下水位低下量と良い対応を示す。しかし、実測値の間隙水圧低下量はほぼ地下水位の低下量に等しいのに対して、解析値の間隙水圧低下量は実測データに比較して小である。これは、数値解析においては、ディープウェルによる水位低下を表現するのに、ディープウェルの設定水位を圧力水頭ゼロの自由水面として表現するのに対し、実際には設置されるポンプ(φ600 mm, 4本の



図一16 土圧・水圧の実測値と解析値の比較 (G.L.-40 m)



図一17 土圧・水圧の実測値と解析値の比較 (G.L.-45 m)

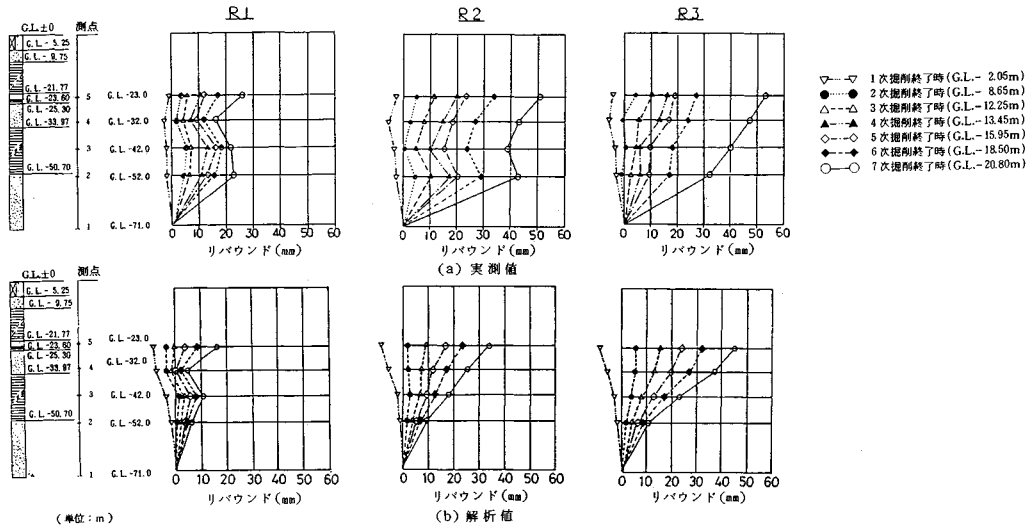
ディープウェルで4インチの揚水ポンプを設置)によってかなりの負圧が作用していることが原因であると考えられる。

b) 全応力および有効応力

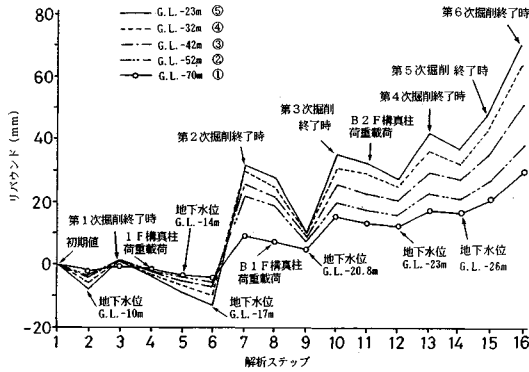
図一16, 17より、地盤内有効応力は、掘削排土により減少し、地下水位の低下や構真柱荷重の載荷によって増加することが理解でき、特に、掘削排土荷重のほかに地下水位低下の影響が大きいことがわかる。次に、実測値と解析値との比較について、解析値の全土圧(全水平応力)が実測値に比較してやや大きめに評価され、また、解析手順と施工手順が完全に一致していないことから、ステップ8, 13などで地下水位低下と有効水平応力との対応が一部一致していないものの、変動状況は定性的にほぼ一致した傾向を示している。

c) 地盤変位

図一19の解析値より、地盤変位の推移は、掘削による上載荷重の除荷によりリバウンドし、地下水位の低下による有効応力の増加や構真柱荷重により沈下している。特に、地下水位低下に伴う沈下が顕著である。図一18に示す深度別リバウンドの実測値と解析値の比較については、各計測ポイントすなわち R1, R2, R3 において、解



図一18 深度別リバウンドの実測値と解析値の比較 (千島ポンプ場)



図一19 R3 リバウンド経時変化 (解析値)

析値は実測値に比較して小さめに評価されている。また、R1の G.L.-32 m における沈下傾向は両者とも良い一致を示している。これは、地下水位低下により底部地盤は一樣に沈下するのに対して、掘削に伴うリバウンドは、端部に比較して中央部で卓越するためであるといえる。さらに、図一18中、第一次掘削時において実測値、解析値同様に沈下傾向にあるが、このことは初期の地下水位低下の影響によるものである。

なお、図一18の深度別リバウンドの比較で、2.の実測データの整理において指摘した掘削後半部のリバウンドの増加については連成解析結果からはその影響は示されていない。このことから、リバウンドの増加は弾性係数の非線形性によるものであると推測される。

4. 多層地盤における除荷時弾性係数の評価

本章では、千島および海老江両ポンプ場での実測デー

タに基づき、拡張カルマンフィルターと有限要素法を組み合わせた逆解析手法¹⁶⁾を適用し、多層地盤の各層における除荷時弾性係数の推定を試み、事前調査・試験結果、ならびに、既往の研究成果との比較から一般的な除荷時弾性係数の評価法について検討した。

(1) リバウンドにおける弾性係数の一般的性質

一般に応力変化に従う地盤の変形量を正しく求めるためには、地盤の変形に関与する地盤定数を正しく評価する必要があるが、これらのパラメーターは応力経路に強く依存することが知られている。通常、粘性土や砂質土の変形特性は図一20のように模式的に示され、弾性係数は、同図中①~②、④~⑤の処女載荷時、②~③の除荷時、③~④の再載荷時で異なる値が定義されている。しかし、工学的には除荷時と再載荷時の弾性係数には同様な値が用いられることが多い。ところで、掘削によるリバウンドは、ほぼ鉛直方向の荷重変化による変位が卓越すると考えてよい。そこで、リバウンドの応力経路による弾性係数の性質を調べる目的で、連成解析結果からR3列における各解析ステップの鉛直ひずみ履歴を図一21に示した。この図より、掘削初期の主として地下水位低下に伴う荷重挙動を除き、その他の掘削段階では除荷、再載荷挙動が支配的であり、しかも、再載荷によるひずみレベルは、除荷時のひずみレベルを越えることはない。したがって、工学的には、解析全体の弾性係数として、除荷時挙動の物性値である除荷時弾性係数 E_r を採用してよいと判断できる。

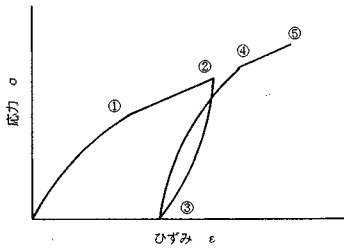


図-20 $\sigma \sim \epsilon$ 曲線の模式図

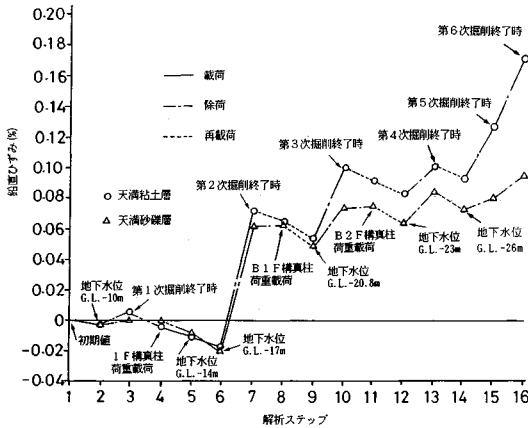


図-21 各解析ステップにおけるひずみ履歴

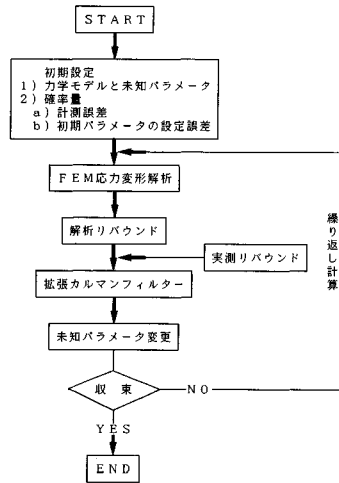


図-22 逆解析のフロー図

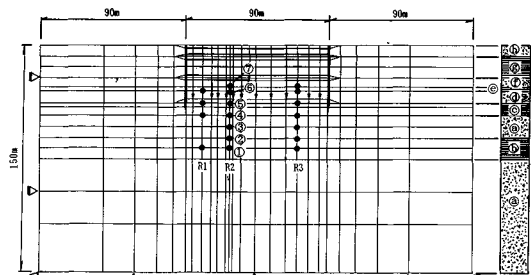


図-23 海老江ポンプ場解析モデル

(2) 拡張カルマンフィルターと有限要素法による多層地盤の除荷時弾性係数の逆解析

a) 逆解析手法の特徴

実測データから地盤物性値を逆解析する手法^{17)~19)}については種々提案されているが、ここでは、拡張カルマンフィルターと有限要素法を組み合わせた手法を用いることとした。図-22に逆解析手順のフロー図を示すが、本手法を用いることの意義は、本来、多層地盤の応力伝播・変形問題としてとらえるべき本問題を有限要素法によって処理すること、実測データに含まれる種々の計測誤差を拡張カルマンフィルターにより確率論的に処理し、繰り返し計算を実施することにより実測データに対する逆解析精度を良好にしたことである。なお、本論文では逆解析手法を示すことが主旨でないため、手法や逆解析精度については文献16)を参照されたい。

b) 逆解析結果とその評価

逆解析モデルについて、図-23に海老江ポンプ場でのモデルを示し、千島ポンプ場でのモデルは図-13に示すように連成解析で使用したものを使用した。なお、図-20に示す応力-ひずみの模式図において、除荷時の弾性係数についてはひずみレベルに依存する非線形性を有することが知られている⁷⁾。このため、ここでは、両ポンプ場の

各掘削段階の増分変位を観測データとし、各掘削段階中は線形弾性と仮定したうえで各層弾性係数の逆解析を行った。したがって、各掘削段階では異なる弾性係数が求められることになる。逆解析に用いた実測データは、海老江ポンプ場におけるR2列①~⑦(図-23参照)の3次掘削以後の増分リバウンド、および、千島ポンプ場におけるR3列①~⑤(図-13参照)の実際の掘削回数に従う6次掘削以後の増分リバウンドである。これらについて、特に初期の掘削段階におけるデータを使用しなかった理由は、観測データに地下水位低下の影響を含めず、掘削に伴う純粋な除荷時弾性係数 E_r を逆解析するためである。なお、連成解析では有効応力解析を採用したが、逆解析では便宜上全応力解析を採用した。これは、ディープウェルにより地下水位を低下させたうえで掘削を実施しているため、掘削面は常に不飽和域が卓越した状態であり、解放される鉛直応力は全応力で評価できると考えたからである。また、土留め壁はすべて水平方向を固定し、構真柱荷重は、平面ひずみ解析を実施することから連成解析モデルと同様な方法により等価線荷重でモデル化した。以上の逆解析では、図-22に示す確率量

表-3 海老江ポンプ場掘削段階別逆解析結果による除荷時弾性定数 (kgf/cm²)

土層記号	4~5 次掘削時	5~6 次掘削時	備考
Ⓐ	2800	2890	洪積砂礫層 D _g
Ⓑ	260	520	洪積粘土層 D _{c1}
Ⓒ	260	220	天満粘土層 D _{c2}
Ⓓ	1440	1310	天満砂礫層 D _{e2}
Ⓔ	280	130	沖積粘土層
Ⓕ	590		沖積砂層

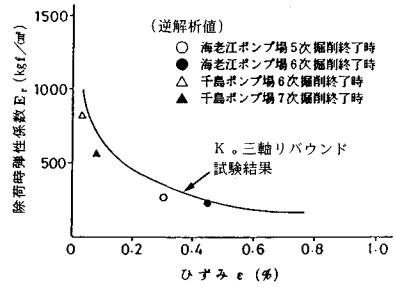
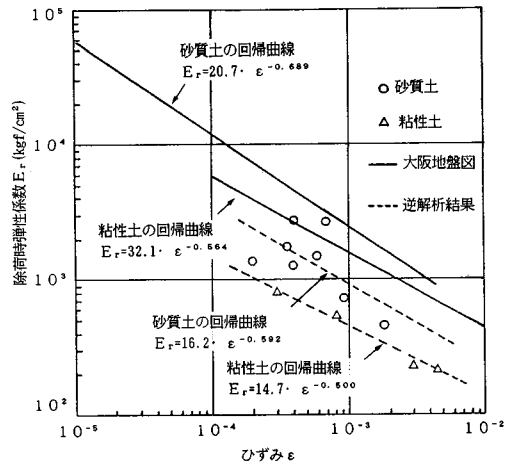
表-4 千島ポンプ場掘削段階別逆解析結果による除荷時弾性定数 (kgf/cm²)

土層記号	5~6 次掘削時	6~7 次掘削時	備考
Ⓐ	740	450	洪積砂礫層 D _{e2}
Ⓑ	820	550	天満粘土層 D _{c2}
Ⓒ	1780	1560	天満砂礫層 D _{s1}

として、計測データに含まれるノイズは最大変位に対して10%、未知パラメータの初期仮定値に対する設定誤差は50%を仮定した¹⁹⁾。これは、過去の本手法による逆解析事例から収束性の良い場合として経験的に設定している値である。

表-3、表-4には両ポンプ場の逆解析結果を示した。また、図-24には、天満粘土層において事前に実施した三軸試験結果による弾性係数と逆解析結果を示した。図に示されているひずみは、層間変位を層厚で除した平均ひずみである。なお、三軸試験はK₀リバウンド試験であり、この試験は、初期にK₀圧密した後、掘削による応力経路に従い軸圧、側圧を変化させるものである。図-25は、新編大阪地盤図²⁰⁾を引用し、Steinbrenner式により逆算された結果に基づく回帰曲線と、表-3、4に示した逆解析結果をプロットするとともにその回帰曲線を両対数紙上に示したものである。

以上の図表から、両現場で逆解析された各層の除荷時弾性係数は、K₀三軸リバウンド試験結果と良い一致を示し、また、ひずみレベルに依存した非線形性を有することが確認できた。さらに、図-25より、大阪地盤図中に記載されている逆解析結果に比較して、本逆解析結果は小さめの値を与えている。これは、3.(2)で述べたように、掘削時にはディープウェル地下水位低下の影響による沈下が発生しており、文献20)に従う実測データに基づく逆算弾性係数は、本逆解析結果に示すような純粋な除荷時弾性係数に比較して、大きめの値を与えるためであると推測できる。

図-24 天満粘土層のK₀三軸リバウンド試験結果と逆解析結果の比較 (G.L.-38.2~47.95 m)図-25 リバウンド実測値から逆解析したE_r~ε関係と大阪地盤図における逆解析値との比較

なお、先に示した連成解析で採用した弾性係数は、定性的な挙動把握を主目的としたため、ひずみレベルに依存せず一定と仮定した。しかしながら、本章で述べたような除荷時弾性係数の性質が明らかとなったことから、ひずみ依存の弾性係数を用いて連成解析を実施することにより、さらに実際に近いリバウンド予測が可能であるといえる。

5. 結 論

本論文で述べた要点をまとめると次のようである。

(1) 実測データの整理から、掘削段階別の地盤深度別のリバウンド特性は、掘削初期には沈下傾向にあり、掘削最終部に増加すること、洪積粘土層でのリバウンドが全リバウンド量に占める割合が大きいこと等を示した。さらに、構真柱のリバウンドと基礎地盤でのリバウンドの比較から、層別沈下計の基準点ですでに全リバウンドの30~40%のリバウンドが生じていることを示した。

(2) リバウンドの力学機構を解明するために、応力

変形および非定常浸透流による連成解析を実施し、千島ポンプ場の実測結果と比較した結果、連成解析結果と実測データは定性的に良い対応を示した。このことから、リバウンドは、通常の上載土荷重の除荷以外に、地下水水位低下による影響が大きいことを示した。

(3) リバウンド予測のための材料定数の一般的傾向を評価するために、実測データに基づき各土層の除荷時弾性定数を逆解析した。その結果、基礎杭の支持地盤に深の洪積粘土層、洪積砂礫層における除荷時弾性定数はひずみ依存の非線形性を示し、両対数紙上で良い相関を示すこと、さらに、これらの関係は K_0 三軸リバウンド試験を適用することにより評価できることを示した。

以上の検討から、掘削部内の地下水水位低下を考慮すべきリバウンド予測問題では、ひずみレベルに依存した除荷時弾性係数による連成解析を実施する必要がある。しかしながら、実務において本論文で示した連成解析を常時行うことは困難である。したがって、今後の課題の1つとして、連成解析を簡素化し、地下水水位低下の効果を容易に考慮できる掘削解析手法の開発が挙げられる。また、本論文では、物性値を評価するための一手法として逆解析を適用しているが、一般に行われる計測管理手法としても当然適用できる。すなわち、掘削初期段階の観測データから物性値を逆解析し、事前試験結果との比較を通じて物性値を再評価することで、事後のリバウンドをさらに精度よく予測できると考えられる。したがって、簡素化した連成解析手法により、工事中の計測管理のための逆解析法の適用を検討することも今後の課題であるといえよう。

参 考 文 献

- 1) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, 1965.
- 2) 植下 脇・松井克俊・大岡 武・永瀬信一: 地盤の挙動計測による建築基礎の合理化の例, 土質工学会論文報告集, Vol.13, No. 3, pp.87~95, 1973.
- 3) 笹尾 光・持田 悟: 根切りによる支持地盤の浮き上がりの実測, 第8回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.427~430, 1973.
- 4) 笹尾 光・持田 悟: 国際通信センターの工事中に実測された支持地盤の挙動, 第10回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.433~436, 1975.
- 5) 寺田邦雄: 掘削による地盤の浮き上がりに対する一考察, 第16回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.1477~1480, 1981.
- 6) 水野昭生ほか: 大規模掘削によるリバウンド, 第17回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.921~924, 1982.
- 7) 高幣喜文: 大阪地盤のリバウンド特性について, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第27号, pp.1~4, 1987.
- 8) 結城庸介・玉野富雄・平賀直樹: 大深度シールド立坑の設計・施工, 下水道協会誌, Vol.25, No.284, pp.72~83, 1988.
- 9) 赤井浩一: 土質力学特論, 森北出版, 1974.
- 10) 村上 仁・高柳枝直・玉野富雄・福井 聡: 関西の土質基礎一大規模土留め工, 土と基礎, Vol.36, No.11, pp.67~72, 1988.
- 11) 大西有三・村上 毅: 有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析, 土木学会論文報告集, 第298号, pp.87~96, 1980.
- 12) Biot, M.A.: Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, J. Appl. Phys., Vol.12, pp.155~164, 1941.
- 13) 日本道路協会: 道路橋示方書下部構造編・同解説, 1980.
- 14) 竹中準之介: 粘度のサンプリングとその信頼度, 土質材料の力学と試験法における最近の問題点, 日本材料試験協会関西支部, 1962.
- 15) 駒田広也・宮口友延: 潜水地山内浸透流に対する遮水および排水に関する考察, 電力中央研究所・研究報告: 380026, 1980.
- 16) 門田俊一・斎藤悦郎・和久昭正・後藤哲雄: 繰り返し拡張カルマンフィルターによる異方性岩盤物性の同定と地下空洞計測管理への適用, 土木学会論文報告集, No.406/III-11, pp.107~116, 1989.
- 17) Gioda, G. and Sakurai, S.: Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics, Int. J. of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 11, No. 6, pp.555~583, 1987.
- 18) Jazwinski, A.H.: Stochastic process and filtering theory, Academic Press, 1970.
- 19) William W-G. Yeh: Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology; The inverse problem, Water Resources Research, Vol. 22, No. 2, Feb. 1986.
- 20) 土質工学会関西支部, 関西調査業協会編: 新編大阪地盤図, pp.31~64, 1988.

(1989.11.9・受付)