

土留め工事の計測管理手法に関する アンケート調査結果について

Questionnaire Survey on Monitoring System for Braced Excavations

土木学会 建設マネジメント委員会 計測情報分科会

計測管理研究グループ リーダー ○岩田 誠（前田建設工業㈱）

By Makoto IWATA

本報文は、「計測管理研究グループ」が『土留め工事の計測管理手法』に関して実施したアンケートの調査報告である。

アンケートの内容は、土留め工事に関して、現場計測で得られたデータの活用方法の1つである「現状把握と予測」について、ゼネコン各社で現在利用されている手法や考え方を調査したものである。

具体的には、①計測管理フロー、②逆解析～予測解析に至る情報化施工システム、③目視項目などの非数値データの処理方法、④情報化施工による効果、⑤現場計測における問題点と課題、に関する各社の現状を調査した結果について、若干の考察を加えて報告するものである。

尚、アンケート調査結果については別途、調査報告書を編集する予定であり、本報文はそのダイジェスト版である。

【キーワード】土留め、情報化施工、非数値データ、アンケート調査

1.はじめに

現在、「土木学会 建設マネジメント委員会 計測情報分科会」では、現場計測と建設マネジメントを結びつけるハードウェア、ソフトウェア全般について、5つの研究グループでワーキング活動を行なっている。

当「計測管理研究グループ」においては、建設マネジメントにおける現場計測の役割を考えながら、現場計測によって得られたデータの活用方法などについて、研究を行なっている。

本報文は、これらの研究の一環として、現場計測で得られたデータの活用方法の一つである『土留め工事の計測管理手法』に関して実施したアンケート調査の結果を報告するものである。

近年、土木工事の大規模化、市街地での近接施工の増加などの理由により、情報化施工は不可欠なものとなっている。

情報化施工は、現場計測結果に基づいて、現状の安全管理のみならず、現場条件に合った入力定数を把握して今後の挙動を予測するものであり、土留め工事においても、ゼネコン各社で独自の情報化施工システムを開発し、運用しているところが多い。

本アンケートは、現在ゼネコン各社で用いられている土留め工事の情報化施工システムや、管理基準値の設定しにくい目視項目などの非数値データの処理方法に関して、具体的な内容や問題点、今後の課題などを調査する目的で実施したものである。

本アンケート調査によって多くの情報が収集できたが、本報文では紙面の都合上、その概要を報告することとし、詳細な内容については別途、調査報告書を編集する予定である。

2. アンケート調査概要

アンケート調査の概要は以下に示す通りである。

(1) 調査対象

調査対象は、当委員会参画のゼネコン、コンサル31社、及び非参画のゼネコン、鉄鋼メーカ4社の計35社とした。

(2) 調査期間

調査期間は、平成元年4月～6月である。

(3) 調査項目

アンケートの調査項目は、以下の通りである。

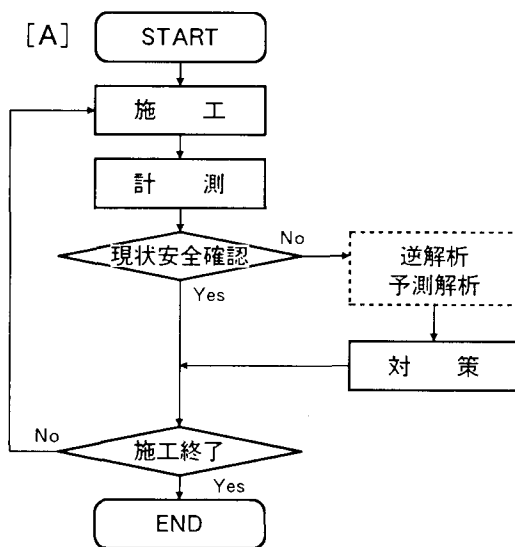
1. 計測管理フロー及び主な利用者
2. 逆解析（ねらい、計算モデル、問題点、他）
3. 予測解析（ねらい、予測項目、問題点、他）
4. 非数値データの処理（ねらい、問題点、他）
5. 逆解析及び予測解析を用いた実際の効果
6. 現場計測における問題点及び課題

3. アンケート調査結果

アンケートは35社を対象に実施したが、以下の調査結果は、逆解析、予測解析のうち少なくとも一方のシステムを保有している会社（29社）の回答について報告するものである。

(1) 計測管理フロー及び主な利用者

a) 計測管理フロー



本設問に対して解答のあった28社のフローを見ると、用語の定義やフローの範囲が各社まちまちであるため厳密な分類は難しいが、フロー全体の基本的な流れを見ると、以下のA、B、2種類に分類できる。尚、その数はAグループが14社、Bグループが14社であり、半々である。

[A] 日常の「現状安全確認」と「逆解析・予測解析」を並列にしたフロー

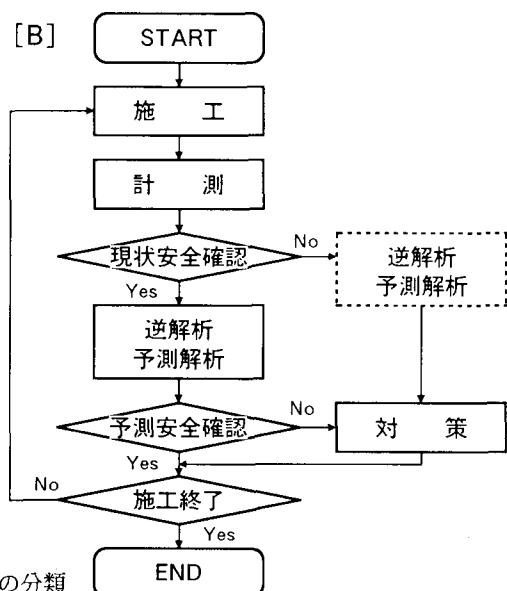
[B] 「逆解析・予測解析」を主体としたフロー

これら2つのグループのフローを概略的に表現すると、図－1のようになる。

つまり、Aグループは、計測結果を規準値などと比較して現状の安全性の確認を行ない、その結果安全であることが確認された場合には、逆解析や予測解析を実施せずに次のステップに進むものである。これに対してBグループは、計測結果を規準値などと比較して現状の安全性の確認を行ない、その結果安全であることが確認された場合にも、更に逆解析や予測解析を実施して、将来の安全性を確認するものである。

尚、両者とも、現状の安全性の確認の結果安全ではないと判断した場合には、直ちに対策を施すか、あるいは逆解析や予測解析を実施して、その結果に基づいて対策を施すとしている。

また、これら2つのグループの相違をアンケートの「逆解析のねらい」の回答内容で見てみると、



図－1 計測管理フローの分類

図-2に示すようにグループ毎で若干の相違が認められる。尚、図中の値は、「逆解析のねらい」で各項目を回答した会社数を、グループ毎の会社数で除したものである。これによると「逆解析のねらい」は、AグループはBグループに比べて「安全性の確認」よりも「真の入力定数の把握」の方が割合が多く、両者のフローの基本的な流れの相違と対応しているものと考えられる。

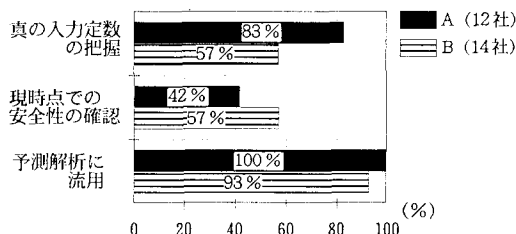


図-2 グループ毎の「逆解析のねらい」の相違

この他、各社のフローに見られる特徴的な点を以下に示す。

- ・ある段階で安全性の確認を行ない、その結果安全性が確認できなかった場合の対処の仕方は、「直ちに対策を施す(21社)」、「解析を行ない、その後に対策を施す(7社)」の2通りに分かれる。
- ・規準値(許容値)と比較する場合、一次、二次というように2段階に分けて行なう(10社)。
- ・目視観察による安全性の確認の項目をフローの中で位置付けている(1社)。
- ・安全性の確認の結果、十分安全であると判断された場合に、支保工を減らすことをフローの中で考慮している(1社)。

b) 主な利用者

計測管理手法の主な利用者は「研究・開発担当者」として回答されているのが15社、「設計担当者」が14社、「施工担当者」が13社であった。

尚、全社的に利用(上記3つを全て選択)している会社は4社であった。

(2) 逆解析

a) 逆解析手法保有の現状

アンケート調査に対して回答のあった29社のうち、逆解析システムを保有しているのは26社(90%)である。3社に複数システムの回答があり、最終的に集まった回答は31システムとなった。

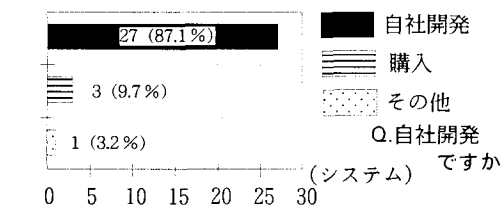
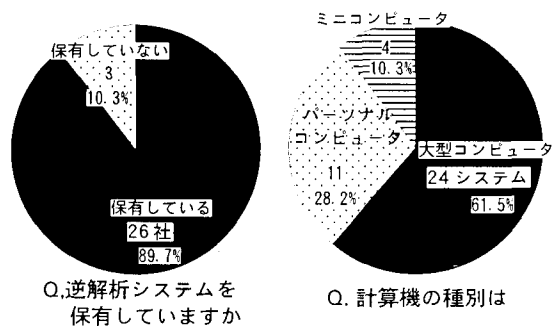


図-3 逆解析手法保有の現状

また、これらのシステムのうち、87%が自社開発によるものであり、使用計算機は大型62%、現場で使い易いパソコン28%であった。

大型で稼動するシステムのうち、施工担当者にも利用されているのは42%に過ぎないのに対してパソコンで稼動するシステムは64%であり、現場の施工担当者が直接利用するためには、パソコンで稼動するシステムとすることが望ましいことを示していると考えられる。

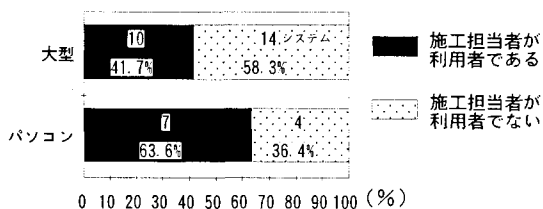


図-4 機種と施工担当者利用状況

b) 逆解析のねらい

逆解析のねらいとしては、「予測解析に流用」を挙げるところが最も多く、逆解析を、予測解析のための前段階として位置付けていることが分かる。

次に多い回答は「真の入力定数を把握」であり、予測解析の精度向上のために入力定数の見直しが行なわれていることが示されている(図-5参照)。しかし、「次段階の予測には利用可能であるが真の

物性値とは考えない」とする意見もあった。

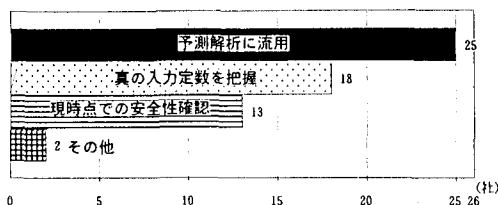


図-5 逆解析のねらい

c) 逆解析手法

①逆解析モデル

逆解析モデルは、「弾塑性 (B) モデル」が77%、「弾塑性 (C) モデル」が10%、「有限要素モデル」が13%である。予測解析システムが比較的多種のモデルを使用しているのと対照的である (「(3) 予測解析」参照)。

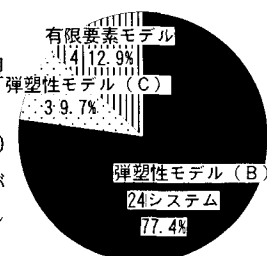


図-6 逆解析モデル

②実測値

逆解析の入力値となる実測値として最も多く使われているのは、土留め架構のマクロ的な挙動を表わす「壁体変位」であり、29システム (94%) で回答されている。残りの2システムも、「壁体のたわみ角」を入力値の一つとしている。また、「切梁軸力」もほとんどのシステムで採用されている。

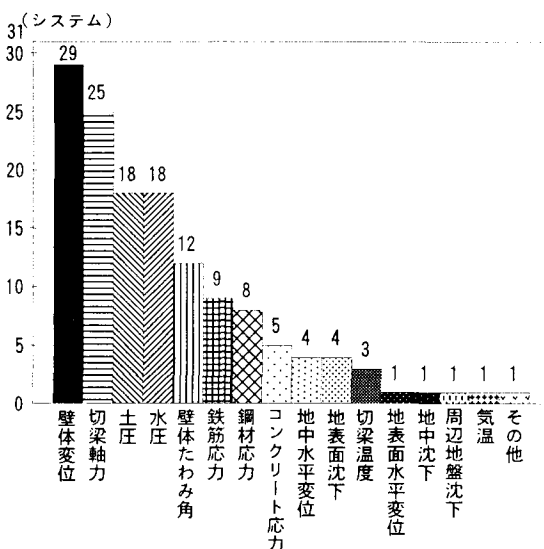


図-7 逆解析において利用される実測値

③未知量

未知量の設定にあたり、弾塑性 (B) モデルでは、予測解析の精度に大きく影響するパラメータである「主働側圧係数」と「地盤反力係数」としたものが多く。受働側の塑性域の決定に関しては、「地盤反力係数」の逆解析結果をもとに土質工学的判断を下しているところもあるようである。それ以外は「地盤反力係数」のみを未知数とし、側圧として理論土圧・水圧、もしくは計測土圧・水圧を使用している。

弾塑性 (C) モデルでは、モデルの性質を反映して、主働側圧、受働側圧のみならず、静止側圧係数も逆解析によって求めるシステムとなっている。

有限要素モデルでは、未知数としては変形係数のみが採用され、ポアソン比は採用されていない。これは、モデルの大きさや計算時間、費用、精度などの問題から、未知数を絞った方が安定性が良く、また、ポアソン比は土質条件からでもある程度正確に推定できる、との判断によるものと考えられる。

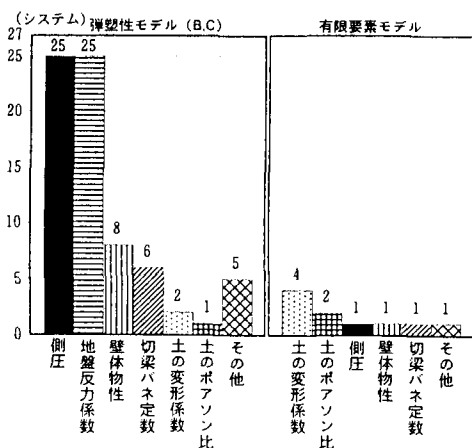


図-8 逆解析で求める未知量

④仮定条件及び設定値

逆解析においては、未知数の数が少ないほど精度は向上するが、あまり少なくすると現象を把握できなくなるため、例えば弾塑性モデルにおいては、荷重系の入力値について「側圧は各土層で直線分布する」、「地盤反力係数は土層毎に一定とする」などの仮定条件により未知数を制限するという解

答が多い。

また、構造系の設定値としては、「切梁バネ定数」、「壁体剛性」を特別に考慮するものが多い。

⑤未知量の求め方

今回解答のあった未知量の求め方を数学的に分類すると「最小自乗解法」、「拘束条件付き解法」、「試行錯誤法」の3種類となる。

「最小自乗解法」とは、求めた解を順解析ルーチンに通したときの、出力と計測値の自乗誤差を最小にする方法である。「拘束条件付き解法」とは、何通りも解が存在するときの問題において、解に、ある条件を付けることによって安定な解を求める方法である。「試行錯誤法」とは、求めたいパラメータを順次変化させながら順解析を繰返し、残差平方和が最小となるパラメータを求める方法である。

アンケート結果を分類してみると、弾塑性モデルにおいては「試行錯誤法」が67%と圧倒的に多く、「拘束条件付き解法」が30%、「最小自乗解法」が4%と続いている。

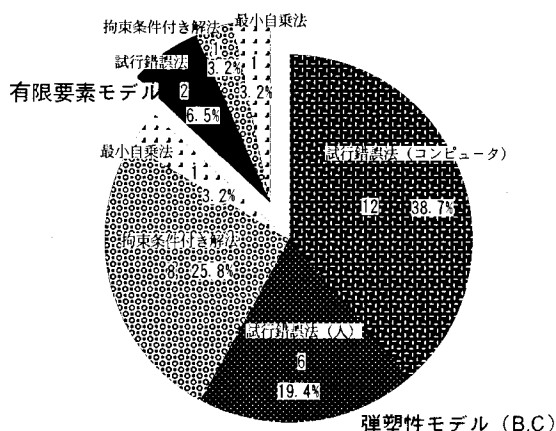


図-9 逆解析手法

「試行錯誤法」には、コンピュータにより入力定数を自動的に変化させるもの(12件)と、担当者が結果を見ながら変化させるもの(6件)がある。ここで、前者のほとんど(11件)は、総当たりで順解析を行なって、残差平方和が最小となる入力値を逆解析値とするものであり、残り1件は、シミュレーション回帰法を用いるものである。いずれにせよ、「試行錯誤法」は計算量が膨大となるが、必ず適当な解を求めることができる。また、解析

精度及び信頼性は、計算回数を追う毎に向上するものと考えられる。

「拘束条件付き解法」に属する逆解析システムは30%を占めている。大別すると、数理計画法の最適化手法と、確率論に基づく最適推定手法に分類される。前者のシステムでは、線形計画法の代表的手法である「シンプレックス法」、重み付き最小自乗解法の一つである非線形最適化手法である「DSC法」、パラメータ探索手法の「最急降下法」が、各々2件となっている。一方後者には、近代制御理論の一つで、逐次型最小自乗法ともいうべき確率論的最適推定手法である「拡張カルマン・フィルタ」が用いられている。

以上に述べた「拘束条件付き解法」は、かなり専門的知識が必要であるが、計算時間、精度、共に非常に優れた手法である。反面、非常に感度の良いデリケートな手法であり、解析結果が計測データに含まれる誤差に大きく左右されるため、計測データの誤差をあらかじめ除去しておくことが望ましい。

「最小自乗解法」によるものは1件のみで、これは、本解法の様々な制約によるものと考えられる。

有限要素モデルの場合には「試行錯誤法」は2件であり、コンピュータによる「格子探索法」と、人力によるものとなっている。残り2件は、「拘束条件付き解法」のうち「シンプレックス法 (Fletcher-Revis法)」を用いるものである。

いずれにせよ、地盤をFEMでモデル化することによる誤差や計算の難しさなどの理由から、FEMによる逆解析システムが少ないものと考えられる。

⑥目的関数

弾塑性モデルにおける目的関数は、土留め壁の変位が多く用いられている。たわみ角を採用したシステムもあるが、変位とほぼ同等と考えられる。

目的関数は、計測値と計算変位の残差平方和で設定しているものがほとんどである。しかし、変位・たわみ角と、曲げモーメント・せん断力は次元が異なり、両者の間には「土留め壁の剛性」といった不確定要素が介在するため、土留め壁の変位のみならず応力も計測する事も重要で、応力を用いて逆解析するシステムもみられる。

また、変位のみならず、他の計測項目も含めて

総合的に目的関数を設定しているシステムもある。

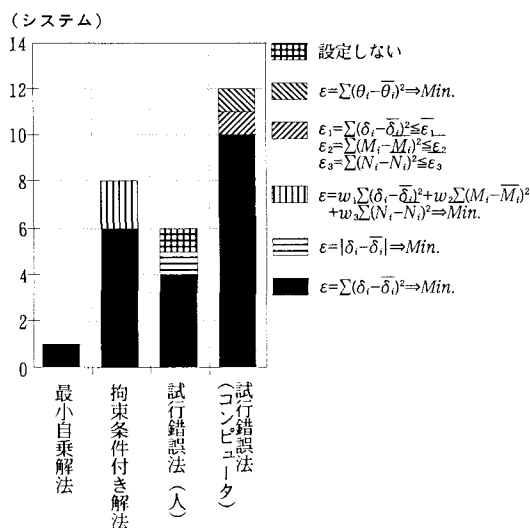


図-10 弾塑性法における目的関数

有限要素モデルにおける目的関数は、観測節点における計測変位（地中応力，地表面変位，土留め壁変位）と計算変位の残差平方和を最小にするよう設定されている。

いずれにせよ，担当者の判断に委ねられている部分が多く豊富な経験を要するため，数値的に全ての判断を行なうのは非常に困難である。

言い換えれば，土留めの計測管理は判断に苦しむことが多く，素人が安易に判断することは危険であることを示唆しているものと考えられる。

d) 逆解析における問題点

逆解析における問題点として最も多いものは「未知数の設定法」である。

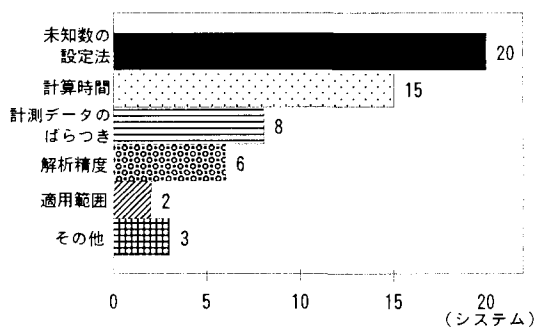


図-11 逆解析における問題点

これは，逆解析システムの開発における最も重要な課題で，多数回答されているのは当然といえ

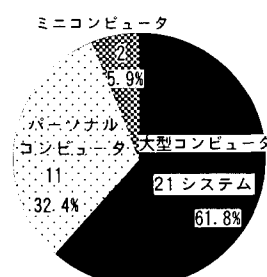
る。次いで，「計算時間」を問題点とする回答が多い。その他，「計測値（変位）が小さい場合に解析精度が落ちる」「計測データの重みづけ」など，計測データの含む誤差の取り扱いに関するものが目立つ。

(3) 予測解析

a) 予測解析手法保有の現状

逆解析手法を保有している会社はすべて予測解析手法を保有している。逆解析手法を保有していないが，予測解析手法を保有している会社は3社である。これは，逆解析によらなくても各種のパラメータが決定できれば，設計プログラムの転用が可能のためと考えられる。

また，その開発状況は，自社開発82%，購入15%であり，使用計算機は，大型62%，パソコン32%，ミニコン6%であった。



Q. 計算機の種類は

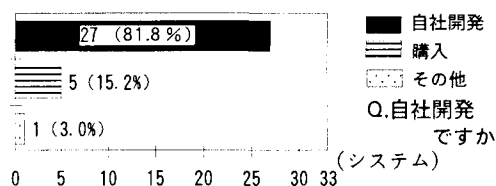


図-12 予測解析手法保有の現状

b) 予測解析のねらい

予測解析のねらいとしては，29社中28社が「次段階の安全性の確認」，24社が「設計変更」を挙げている。ここで，設計変更の内容としては，「切梁段数の変更」，「部材の変更」，「掘削深度の変更」，「施工順序の変更」などが挙げられている。

「任意仮設においては経済性を追及する」という意見もあり，任意仮設と指定仮設に対する考え方の相違がうかがえる。しかし，最近では指定仮設においても，このように経済性を追及する傾向が徐々に現われているようである。

また，今後の大深度施工に備え，予測の精度を向上させるためのデータの蓄積を目的としているという意見もあった。

c) 予測解析手法

予測解析モデルは、「弾塑性モデル」が79%と最も多く、「有限要素モデル」9%、他と続いている。

予測解析に用いる入力データは「横方向地盤反力係数」と「背面側側圧（土圧+水圧）」の2つが圧倒的に多く、かつ両者共に用いる場合が多い。

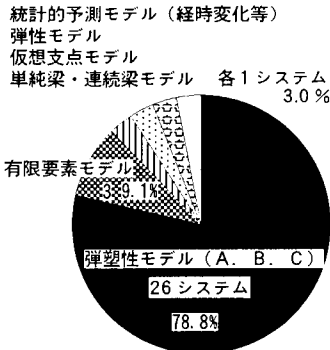


図-13 予測解析モデル

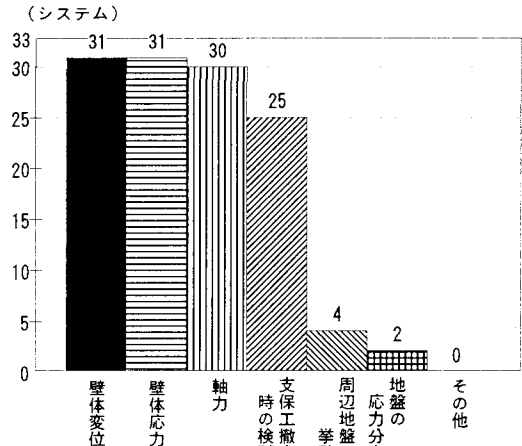


図-15 予測項目

d) 予測解析における問題点

予測解析における問題点として最も多いものは、「入力データの取扱い」である。

特に側圧分布等の荷重系の値や、横方向地盤反力係数、壁体の剛性等の物性値は外挿によって設定する場合が多く、更に掘削に伴って分布形状などが変わるので、これらの不確定要素の決定が困難であるとする解答が多い。

次に多い問題点としては「解析精度」が挙げられる。例えば、掘削段階の初期においては得られた情報量が少なく、数ステップ先の掘削段階まで正確に予測することは困難であり、ある程度掘削が進まなければ十分な精度は得られないとする意見があった。「適用範囲」に対する問題点としては、大深度掘削への適用の可能性が挙げられている。

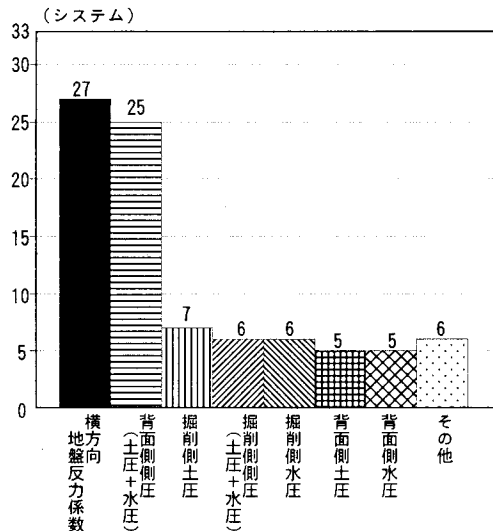


図-14 予測解析に用いる入力データ

ここで、その設定方法は、「横方向地盤反力係数」については逆解析結果から設定する場合が最も多く、過去の実測例から作成した独自の指針を用いるところもあった。また、「背面側側圧（土圧+水圧）」についても、逆解析結果から設定する場合が最も多く、次いで、側圧や切梁軸力などの実測値から設定する場合が多い。

予測する項目としては、「壁体変位」、「壁体応力」、「軸力」、「支保工撤去時の検討」の4項目、つまり土留め架構に関する項目が圧倒的に多く、「周辺地盤の挙動」や「地盤の応力分布」を挙げたところは、現状ではかなり少ない。

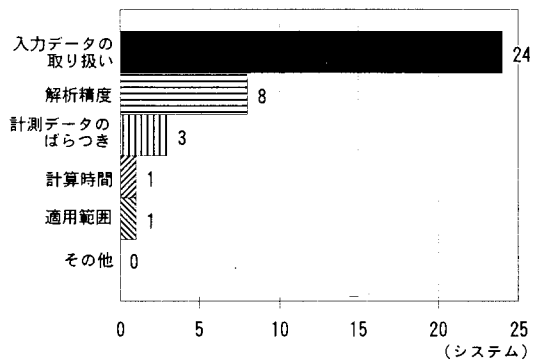


図-16 予測解析における問題点

(4) 非数値データの処理

a) 非数値データの処理のねらい

非数値データの処理のねらいとしては「危険度現状評価」と「危険度予知」が大半の意見である。

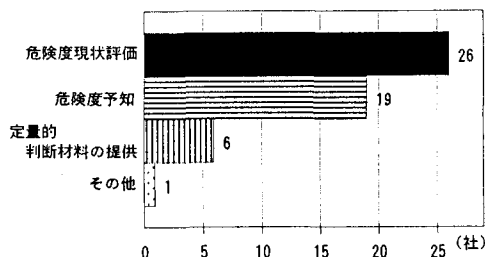


図-17 非数値データの処理のねらい

回答者に記入して頂いた具体的内容をまとめると、以下ようになる。

・数値計測では足りない土留め管理の有効な手段である。

・計測は点または線の管理であり、土留め全体を総合的に満遍なく管理できないとの理由から、目視観察による日常管理を行なっている。

・目視観察を行なっている項目としては、「支保工の設置状況」「掘削面の出水状況」「土留め壁面の亀裂・漏水」「周辺地盤の局部沈下」などが挙げられる。

このように、非数値計測としての目視観察の重要性をほとんどが認めており、かつ土留め管理において、数値計測と同等レベルの評価を与えている。

b) 非数値データの処理方法

非数値データの処理方法は、「個人的経験判断」が54%、「社内マニュアル、指針等」の既存の判断基準が41%で、この両者で全体の約95%を占めている。残りの5%は「人工知能」「数量化理論」によるものである。

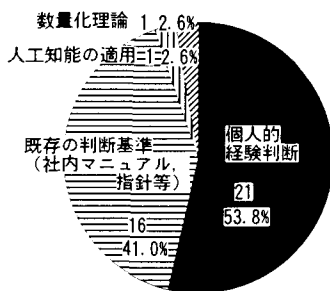


図-18 非数値データの処理方法

ここで、「社内マニュアル、指針等」については、以下のような方法により、作成されている。

- ・過去の施工事例をまとめた資料集を作成する。
- ・「原因～兆候～事故」のマトリックス図、連関図を作成する。
- ・重点現場では、管理実施計画に盛り込む。
- ・専門家からのヒアリング結果を、キーワードにより整理する。

尚、今後の方向としては、これらの方法で集められたデータをもとに人工知能によるエキスパートシステム化、データベース化が、回答者から指摘されている。

c) 非数値データの処理に関する問題点

非数値データの処理に関しては、「カテゴリーの設定基準」に問題点が多いことが指摘されている。これに関しては、ほとんどの回答者から、「非数値データを得るための方法は目視観察を行なった個人の判断に頼っており、その判断基準が各自で異なることに起因している」と、指摘されている。

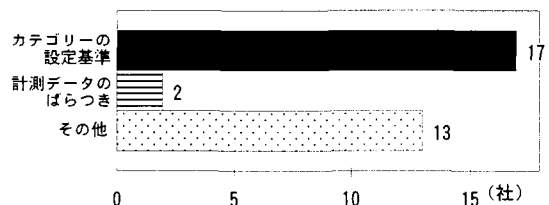


図-19 非数値データの処理に関する問題点

d) 非数値データの処理の理想像

非数値データの処理の理想像についての意見をまとめると、以下ようになる。

・エキスパートシステムを利用して、個人的な判断の差異を無くす。

・上記システムのための知識ベースは、過去の事故例の収集、経験者からのヒアリング結果などを収集して構築する。

しかし、エキスパートシステム導入以前に、非数値データについての一般化された判断基準作りの作業が重要であることが指摘されている。

そのために、過去の事故例や経験者からのヒアリング結果に関して数多くのデータを必要としており、整備されたデータベース化がなされることが必要であると考えられる。

(5) 逆解析及び予測解析を用いた実際の効果

逆解析及び予測解析を用いた実際の効果は、77%が「効果が大」とであると回答している。

具体的な内容としては、土留め工事においては、危険な状態になった時点で対策を施すことは極めて困難であるので、事前に「危険状態の察知」と「対策の検討」が可能な逆解析及び予測解析は、

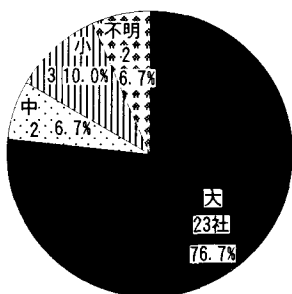


図-20 逆解析および予測解析の効果

非常に有効な手法であるという安全面での効果と、予測解析によって、設計時の掘削方法や支保工の部材を変更して工期短縮が可能となる場合もあるという、経済面での効果を挙げるところが多い。

しかし、このような意見がある一方、土木工事においては土留め工事が指定仮設であり、施工中の状況変化に対して臨機応変な対策が取り難いという指摘も出ている。

(6) 現場計測における問題点及び課題

アンケートの最後に、回答者に各自、土留め工事の現場計測における問題点及び課題について、自由なご意見を書いて頂いた。その内容を項目別にまとめると、以下になる。

①計測機器及びシステムについて

計測機器及びシステムについては、以下に示す回答があった。

- ・高精度、簡易、かつ安価な計測機器が少ない。
- ・既存のシステムでは汎用性に欠けるので、これを現場毎に適したシステムに改良するために、かなり費用がかかる。
- ・各計器（例えば、土圧計、鉄筋計）の初期値のとり方及び評価の仕方に問題がある。

- ・土留め壁の根入れ以深の全体的な安定（円弧滑りなど）の程度を簡単に計測する方法の確立。

②弾塑性解析モデルについて

弾塑性解析モデルについては、現状で満足できるレベルであるが、更に適応範囲を拡大したり、より現象に近付けるという面からいえば、例えば次

の問題点を解決する必要があるとの意見があった。

- ・小断面掘削（例えば、立坑）への適用性
- ・偏土圧に対する考え方
- ・受働側の抵抗側圧の評価のうち、例えば地盤反力係数の評価及び水圧変化の考慮方法

③弾塑性解析モデル以外に必要な土留め管理手法について

弾塑性解析モデル以外に必要な土留め管理手法については以下の管理手法の確立に対する要望があった。

- ・周辺地盤等、周辺への影響を把握する方法
- ・ボーリング、ヒービングを判断する方法

④計測データの利用について

現在までに計測されたデータを、今後の工事の設計に活かせるような仕組みが必要である。

⑤計器計測以外の土留め管理方法について

計器計測は、計器が点計測を行なうためのものであり、またコスト的に見ても土留め全体を観察するには限りがある。したがって、目視観察を併用した全体的な土留め管理が重要であり、計器計測と一体化した全体管理システムの構築を今後進めていく必要がある。その方法として、エキスパートシステムの利用に注目している。

⑥大深度掘削に向けての情報化施工について

今後増えるであろう大深度掘削に関しては、やはり計器計測を主体とした掘削管理が必要である。しかし、その規模から考えて、現在の計器設置頻度を踏襲していたのでは、多額の費用がかかる。そのため、もう少し費用のかからない計測方法を開発する必要がある。

また、制度面からは、情報化施工を指針の中に盛り込むとともに、費用面でのバックアップも必要であると考ええる。

4.おわりに

情報化施工の必要性が認識されて久しく、ゼネコン各社でシステムが開発され、運用されている。

今回は、土留め工事に関して現在のシステムの内容のみならず、目視観察も含めた計測管理全体の問題点や今後の課題などについて調査を行った。

その結果、計器計測に関しては、各社とも、それぞれ問題は残しているものの、ほぼ完成されたシステムで現状及び予測安全管理を行なっていることがわかった。

これに対し、目視観察については計器計測の不足を補うものとしてその重要性が認識されているが、個人レベルでの判断基準のバラツキに関して問題があり、過去の数多くの経験のデータベース化などに基づくエキスパートシステムの構築などが待たれるところである。

今回のアンケート結果が各社の計測管理システムの今後の目標設定の一つの目安となれば幸いである。

最後に、本アンケート調査を行なうにあたり、お忙しい中、貴重な時間を割いて下さった各社の担当者の方々、ならびに貴重なご意見をいただいたマネジメント技術小委員会の委員の皆様に、深甚の謝意を表します。

尚、先に述べたように、本アンケート調査結果の詳細な内容については別途、調査報告書を編集する予定です（平成2年3月発行予定）。また、現在追跡調査の途中であり、今後、本報文中のデータを多少変更する場合がありますので、この点について御了承ください。

《計測管理研究グループ構成メンバー》

平成元年11月30日現在

篠原 茂（㈱奥村組）

鍋谷雅司（佐藤工業㈱）

森田 徹（清水建設㈱）

大西雄二（清水建設㈱）

山田和男（㈱竹中土木）

酒井邦登（東急建設㈱）

清水憲吾（東急建設㈱）

手束芳洋（フジタ工業㈱）

○ 岩田 誠（前田建設工業㈱）

（○：グループリーダー）