

情報化施工の現状と課題

The Present State and tasks of Observational Construction System

東急建設(株) 〇馬場 一秋 *
前田建設工業 (株) 比留間 敏員 **
鹿島 藤野 敦 ***

By Kazuaki BABA, Toshikazu HIRUMA, Atsushi FUJINO

コンピュータ技術、通信技術などの進歩に伴い情報化施工はこの20年間に大きな進歩を遂げ施工技術として定着したものとなった。5年分以上の大量のデータの解析、現場と管理部門や発注者との間のデータの共有、遠隔地からのリモート計測、3次元のリアルな結果の表示なども簡単に行えるようになってきている。また適用工種も広がり、従来から行われていた土留やNATM以外に、最近では超軟弱地盤や地下空洞あるいは海洋や河川など新しい分野で活用されるようになった。

しかし、一方では旧態依然のまま課題となっている点も少なくない。本論文は情報化施工の現状を幅広く調査し利用されている各要素技術の評価を行い、さらに課題と解決策を示し情報化施工の将来象を検討したものである。

【キーワード】 情報化施工、通信技術、可視化、逆解析

1. はじめに

最近、建設関係の雑誌や学会誌に数億円の費用を要する情報化施工の事例がいくつか紹介されている¹⁾。これは情報化施工の必要性、有効性がますます認識されて来た事を示す物と考えてよいであろう。このような大規模な工事や難工事であってもmm単位の管理が要求される市街地での工事や、山岳トンネル工事などでは情報化施工が必須となっており、この工法は完全に定着したという事ができるであろう。

情報化施工が普及、定着した原動力としては以下

の技術が大きく発展した事が挙げられよう。

①ハード、ソフトのコンピュータ技術
処理速度、ディスク容量、表示機能、
コンピュータ・グラフィックスなど

②通信技術
モデムの高速化、通信ソフトの充実など

③データ解析技術
逆解析、予測解析など

しかしながら、一部には過去のものと比較してもあまり目立った進歩のない技術もある。

筆者らは、情報化施工に利用されている技術の発達の様子や利用状況を調査し、その結果をベースに情報化施工がより有効な施工方法となるには今後どのような技術が必要となるか、将来における情報化施工について展望を行ってみた。

*技術本部土木技術部	0 3 - 5 4 6 6 - 5 2 7 5
**工事本部土木部	0 3 - 5 2 7 6 - 9 4 4 5
***情報システム部	0 3 - 5 5 6 1 - 2 4 0 4

2. 情報化施工の現状

最近における情報化施工の工種、規模などについて計測会社数社にアンケートを調査した。なお、計測会社にはそれぞれ得意分野があるため、偏りがないように留意した。対象は前年度からの継続も含め、平成8年度に行なっている工事とし、土木工事だけでなく建築工事も含め総数は153件であった。

(1) 工種

土留が最も多く全体の69件で全体の45%をしめる。ついでNATMが40件となっている。NATMは情報化施工が工法の基本となっているため、件数では土留を上回る可能性もあると考えていたが、工事量の差がこの結果となったと考えられる。斜面工事、ダム、軟弱地盤はほぼ同数であった(図-1)。

(2) 計測項目、チャネル数

土留では傾斜計を総てのケースで採用している。2番目は切梁軸力であり、この2項目が土留計測の基本である事は変わっていない。この2項目のみの計測というケースも多い。ついで間隙水圧、地下水位の順となり、地下水の問題が多いという我国の状況がよく現れている(図-2)。

チャネル数は、50個以下の規模の小さい物件が全体の56%を占めている。しかし、200個以上のケースも21件(13.7%)あった(図-3)。

他の工種についての図は省略するがNATMでは、A、B計測で定められた項目がほぼ同数あり、A計測のみというケースは少ないという結果となった。

(3) 計測期間および費用

計測期間は1年～3年が79件(51.6%)と最も多いが1年以内で終了する物も56件(36.6%)あり、小規模な工事でも情報化施工を採用している様子がわかる。当然ダム工事の計測期は長くなる(図-4)。費用は3000万円以上のものが27件(17.6%)あり、昨年度も大規模な計測が少なくないことがわかる。計測期間と費用は大体比例しているが中には期間は半年以内だが費用は5000万円以上というケースもあった(図-5)。計測会社へのアンケートであったため、工事金額に

対する割合は詳しいデータが得られなかったが、1%以下から10%以上まで幅があった。これには工事金額の大小、計測の重要度、利用技術など様々な要因が影響している。今回は検討できなかったが興味深いテーマであり、今後の課題としたい。

(4) 計測、送信方法

手動計測(手入力)が42.5%で最も多い。常時モニターする必要のない沈下計測などの場合には、経費面から今後も手動計測の採用は続くであろう。

自動計測におけるデータの送信方法では現場の計測小屋にデータロガーを置き、事務所までオンラインするという形が47件(30.3%)で最も多いが、NTT回線を使用する形も多くなっている(21件13.5%)。ケーブル敷設が難しい市街地での計測ではこの方法が標準となりつつある。またデータロガーに一旦蓄積し、FD(フロッピーディスク)でパソコンに入力する半自動の形がほぼ同数であった(図-6)。

3. 要素技術の現状と課題

(1) コンピュータ関連技術

ハードウェアの発展については今更言うまでもない。CPU速度、メインメモリー、HD(ハードディスク)の容量、どれをとっても10年前とは比較するのが無理な程向上している。

HDの容量の増大によりデータ管理は極めて楽になった。以前は数十枚のFDで管理したり、HDを使うにしても途中でバックアップをとり、初期化し直してから次ステップの進むということが必要だった。しかし現在はギガ単位の容量のHDを利用し5年以上の長期にわたる計測でも十分対応可能である。

またソフトウェアでは計測結果を可視化する技術の大幅な進歩を第一に取り上げたい。傾斜計も土圧計もすべて単純な折れ線グラフで結果を表現するというのが、初期のころの計測データ処理プログラムのアウトプットであった。すべてが似たような図面であり、計測断面や計測項目がわかりにくかった。その後、CAD機能を持たせることにより、任意の作図が可能なプログラムが開発された²⁾。1つの計

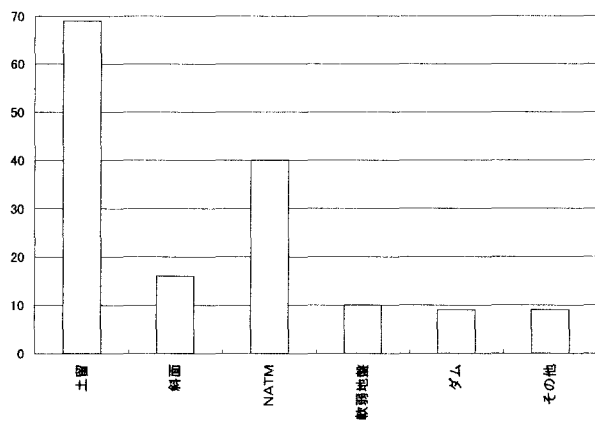


図-1 工種

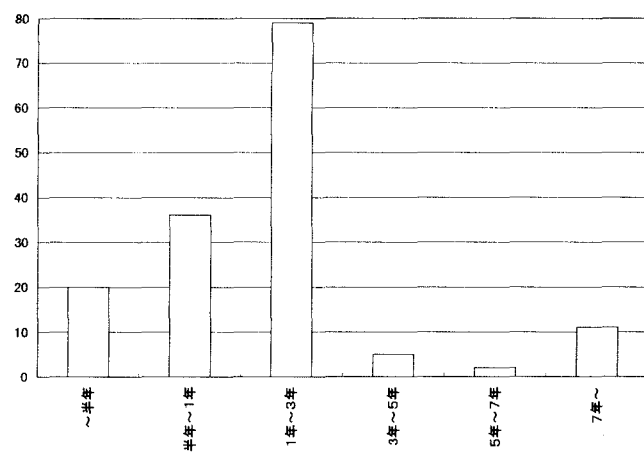


図-4 計測期間

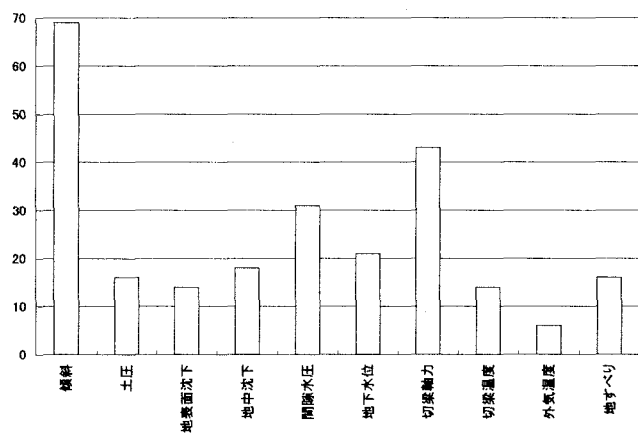


図-2 計測項目 (土留)

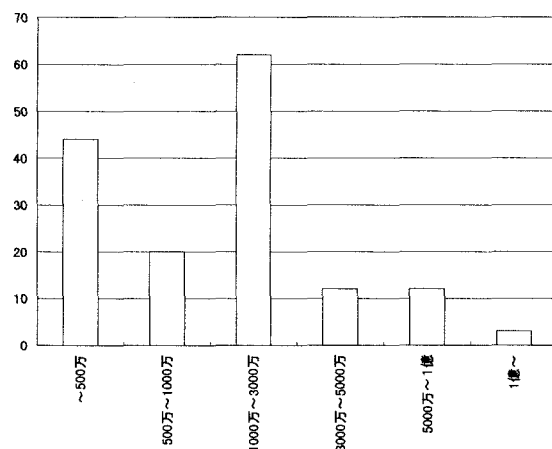


図-5 計測費用

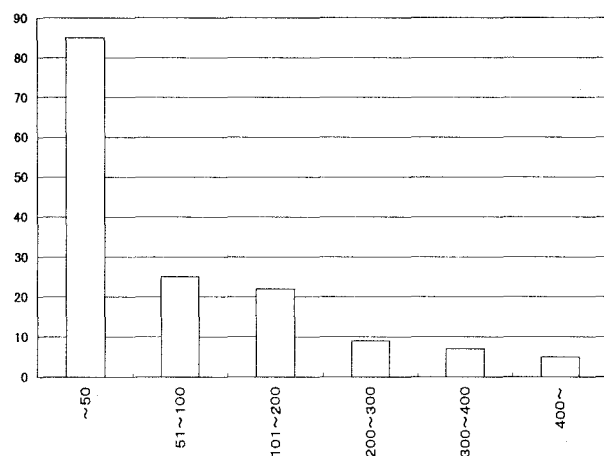


図-3 チャネル数

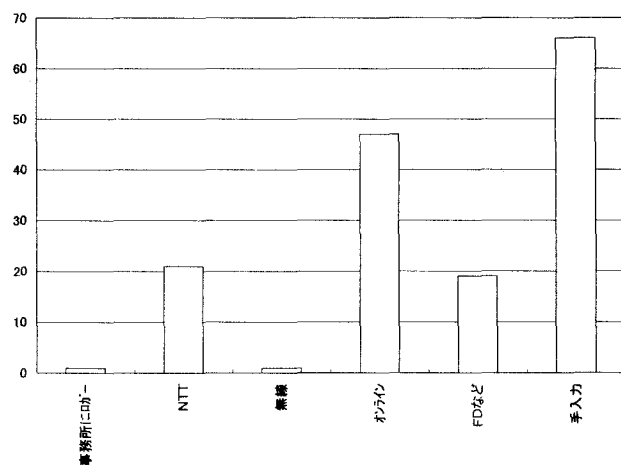


図-6 計測および送信方法

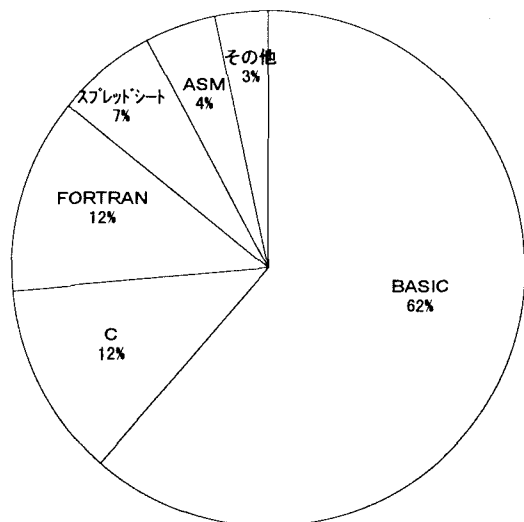


図-7 データ処理プログラムの使用言語

測断面で行っている計測結果をすべて1枚の図面(画面)に表示する事ができるため、計測結果の全体的な把握や変形と土圧の相互関係などが一目で理解できるものとなった。但し、これも線画による表示であり、今一つ不十分な面があった事は否めない。現在では、CG(コンピュータ・グラフィック)ソフトを利用した、3次元のカラーによるリアルな表示が可能となっている。これにより、本社・支店の管理部門で実際の現場を見ているように計測結果を把握する事が可能となった。

コンピュータ関連技術に関して若干懸念されるのはOS(基本システム)の移行に対し、データ処理プログラムをどのようにするかという問題であろう。現在データ処理プログラムはMS-DOSで稼働するものがほとんどである。開発言語は $\text{N}_{88}\text{BASIC}$ を利用したものが62%と圧倒的に多く、C言語を利用したものがこれに続く(図-7)。

しかし現在、OSは事実上の標準がWindowsに変わりつつある状況である。スプレッドシートやワードプロセッサはすでにWindowsが主流となっているが、計測関係のプログラムは相変わらずMS-DOS上でしか稼働しないものが多い。Windows上で動くVB(ビジュアルベーシック)やC++で書かれたプログラムもいくつか出てきているが数は少ない。

この2~3年の間は既存のプログラムが利用されるであろうが、その後Windows上でどのようなプログラムを構築するか。VBのような開発言語

ですべてを開発するか、スプレッドシートやデータベース管理システムを利用していか岐路に立たされることになる。筆者らは両者を併用していく方法が適当と考えるが、使用アプリケーションについては現時点での選定は難しい。

(2) 通信技術

コンピュータ技術と同様に発達した技術として通信技術があげられる。モデムは高速で廉価となり、多くの使いやすい通信ソフトが登場した。今まで現場計測室のみで管理していた情報も、本社・支店と共有し、円滑なコミュニケーションの下、容易に利用することが可能となってきた。

最近では、NTT回線を利用し計測データをリアルタイムで発注者に送付する事も行われている。現在CALS(生産・調達・運用支援統合情報システム)が話題となっているが、その情報化施工への適用のプロトタイプという事ができるかも知れない。但し施工者と発注者との計測データ共有は、機密保持や計測データに発生するノイズの対処などいくつかの課題があることも否めない事実ではある。

現在計測システムに应用されている通信技術を整理すると以下のようになる(図-8)。

① NTT設備を利用した伝送

計測箇所周辺の公衆回線、あるいは専用回線設備を用い、最大28.8kbps程度の伝送速度でデータの送受信が可能である。モデムがこの数年で非常に安価になったため現在では利用頻度の高い一般的な方式である。公衆回線が利用できない状況でも、メタルケーブルや交換機の設置を行い、施工現場の施設、保安回線等をそのまま利用できる場合もある。

② 簡易無線設備を利用した伝送

計測箇所周辺に計測データ転送専用のアンテナ機器を用意し、搬送波に50GHz帯域の無線を用いる。現在、4.8kbps程度の伝送速度でデータの送受信が可能であるが搬送波の特性から見通しのよい一定距離の空間が必要である。

③ 衛星移動通信設備を利用した伝送

試行段階ではあるが高度36,000kmの静止衛星を用い、4.8kbps程度の伝送速度でデータの送受信が行えるようになった。この方式は日本全土で利用できるが、性能面、信頼性の評価は今後の課題である。

④ 通信ソフトウェア

通信ソフトウェアは現状では、計測個所、接続形態毎に個々に開発したものを扱い、データの送受信を行っている。誤り検出、訂正といった信頼性確保に関わる方式、処理も、独自にレベルを決め対応している。

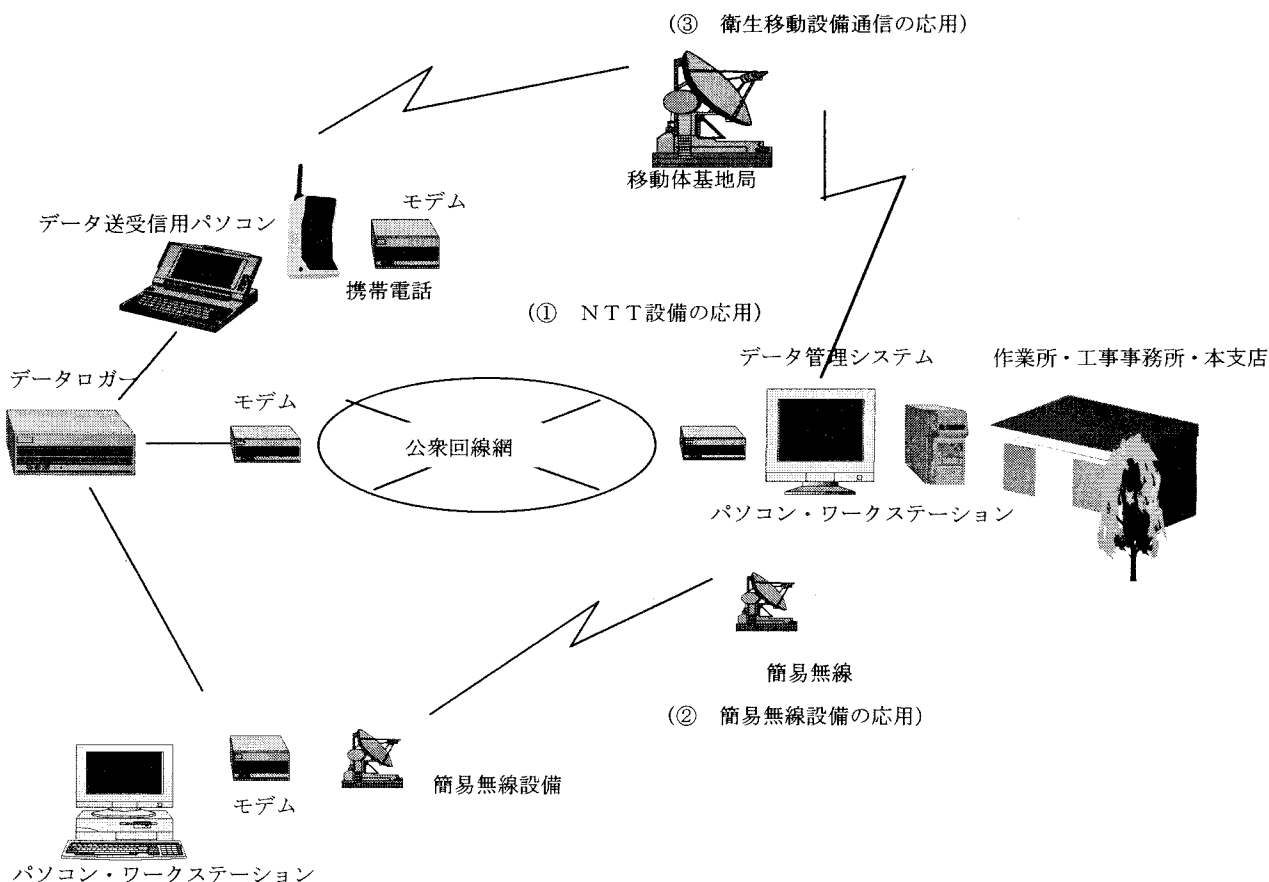
しかしながら、上記のシステムは基本的に計測小屋～現場事務所、現場事務所～本社間等、2点間を結んでのデータ転送を前提に構築されている。異なる組織間で情報化の共有化を行おうとする発想ではない。多地点間の情報化共有、データコミュニケーションを行うには、現在ISO（国際標準化機構）を通じて制定されているOSI（開放型システム相互接続）基本参照モデルの事実上の標準であるTCP / IP（Transmission Control Protocol / Internet Protocol）を用いた物へ変えていく必要がある。これにより、既存の情報通信インフラを積極的に利用することが可能となり、分散データベ-

スの活用も進むと考えられる。

更にグローバルな視点から考えると現在、情報スーパーハイウェイ、G I I 構想（Global Information Infrastructure）など、地球規模での社会情報基盤の整備が急速に進んでいる。今後の計測データの送信では、インターネット、商用パソコン通信などオープンなネットワークがますます利用がされるであろう。機密性（Confidentiality）、完全性（Integrity）、可用性（Availability）など、計測に関わる技術を情報システム構築という観点から見直し、何が最も有効に利用できるかを見極める必要がある。

（3） センサー技術

センサー技術についてはそれ程大きな変革が無いのが現状といえる。強て挙げれば測量におけるGPS（Global Positioning System）の利用が、地形測量に大きな省力化と土工事などのリアル・タイムでの出来高把握に大きく貢献していることである。セン



図ー8 計測システムにおける通信技術の応用

サー類には特に新しい製品の出現が無いばかりか、十数年前の製品がいまだにまかり通っている。GPS利用の地形計測に代表されるように現場計測データは飛躍的に増大しているが、通信技術及び環境の高度化で対応が可能になっている。データ処理用のコンピュータも高速化が著しく、パソコンでは数年前の大型コンピュータを上回る性能を持つようになりWindowsの普及は、回線や各種表計算プログラムへのアクセスを容易にし、回線でのデータ収集や、図化をはじめ簡単に多彩な表現が可能になってきている。

このような環境の中、現在のセンサー・変換器類の設計・製作段階ではリニアリティ（直線性）の重視が基本になっていて、大半のメーカーではいまだに手作り行程が多く量産設計がなされていない。リニアリティの重視主体の手作り設計は手計算でデータ処理を行った頃の発想と受注生産製品の遺物であり、製品の均一化やロー・コスト化は望めない。

量産設計で自動化すれば製品の均一性やコストの低減が可能となり、リニアリティは均一なセンサーさえ製造されれば現在のパソコンの性能ではその補正は容易なことである。さらに専用のLSIを使用してハードで補正すればもっと効率的である。

現場計測のセンサー設置は多くの場合遠隔地で、施工時には仮設置が多く長い路線の現場では盛り換えや順次増設などを行う場合も多い。そこで測定データをセンサーから収集する為の配線が必要となり、これがトラブルや費用の大半を占めることになる。故にこれからの現場計測システムは有線でないことが望ましいが、これらのセンサーや変換機の多くが歪みゲージや差動トランス等に依存していて、大量の電力が必要であったり、専用電源が必要であるためコード・レス制御が難しい。将来はたとえばピエゾ効果*などを利用したり、変換器の低消費電力化により、一定規格の電源、定格出力の変換器を使用し、配線不要またはマイクロ波などの信号によって測定して出力する（既に受信電波エネルギーで起動しデータを送信するタグ・プレート等は現在車両などの認識に使用されている）ようなシステムが望まれる。

コンピュータに測定点座標と測定時刻を入力しておくともマイクロ波の送受信器がスキャンして指定時

刻に指定箇所の測定を行う様なシステムは現在でも作成可能ではあるが、現状のセンサー類では汎用システムの製作は難しくまた非常に高価な専用システムとならざるを得ない。現在の計測機器メーカーは材料関連まで研究が及んでいないし、建設工事における計測に関する知識も充分とは言えず総合的な開発力はない。このため、新しい現場計測システムを構築するためには、現場に直接タッチするユーザー側がもっとセンサーも含めた計測システムの開発に積極的になり、共同開発などを考えていく必要があると思われる。

（４） データの保存と再利用

土木工学は「経験工学」であるという言い方をされていた。現在では科学的管理を理想とする事からあまり耳にしなくなった言葉であるが、現実はまだまだそれに近いものがあり、ある工事で得た経験や知識を他の工事に応用する事は非常に大切な事である。

計測データは貴重な技術資産である。適切に利用すれば営業、計画、設計、施工の各段階で有効な情報をもたらすことが可能なはずである。特に、最近では各施工会社は技術提案力（例えば施工方法など提案型入札など）を問われるようになってきており、類似の物件に対しては過去の計測データが大きな力を発揮する可能性がある。

しかしながら、計測データの再利用はあまり行われていない。調査の結果計測データはほとんどの組織で保存をしていることがわかった（図－９）。しかも60%以上の組織が保存についての選別基準を持ち、ただ漠然と保存している状態ではない。

利用状況に目を向けると、約80%が過去の計測データを何らかの形で利用している。しかし60%以上が数年に1度であり頻度は極めて低い（図－10）。このデータでは過去のデータを参照すること

*ピエゾ効果（圧電効果）

イオン結晶を持つ絶縁体や一部の半導体に外部応力を加えると電気分極を生じ電場が発生する現象。機械エネルギーから電気エネルギーへの変換（またその逆）に利用する。電源が不要となる利点がある。

の重要性や意義は不明であるが、保存はするがほとんど利用されていないというのが現状と言って良いであろう。

但し、利用分野は多岐にわたっており、複数の回答が多かった。また図には示していないが保存データの利用には業種により差があり、コンサルタントは維持管理が多く、ゼネコンでは研究目的の利用が比較的多かった。

今後、情報化施工の採用はますます増加することが予測される。当然計測データも増加する。すべての計測データを保存する必要はないであろうが、困難を乗り越えた事例や特殊な事例における生の計測

データは大変貴重である。そこで、自由にデータの検索、加工の可能な「計測データベースシステム」の構築が究極の目標となる。そのためには、データの標準化が前提となつてこよう。現在1つの会社内においても、データ処理プログラムのデータの保存書式は統一できていない場合がほとんどである。今更これを統一するのは大きな労力が必要となろう。そこで方法としては、CADデータにおけるIGES** (Initial Graphics Exchange Specification) やSTEP*** (Standard for Exchange of Product Model Data) のような交換規格の計測データ版を考えろというものが現実的と思われる。

ドキュメント部分やデータ・インデックスについて、何等かの標準化を設定することが計測データを有効利用、再利用することの重要な条件となる。

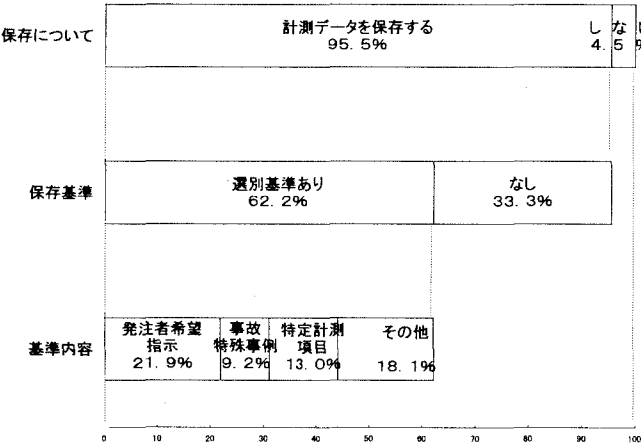
(5) 解析技術

ここでは事例の多い土留工事を中心に記述する³⁾。計測データを利用する解析には以下のように逆解析と予測解析がある。

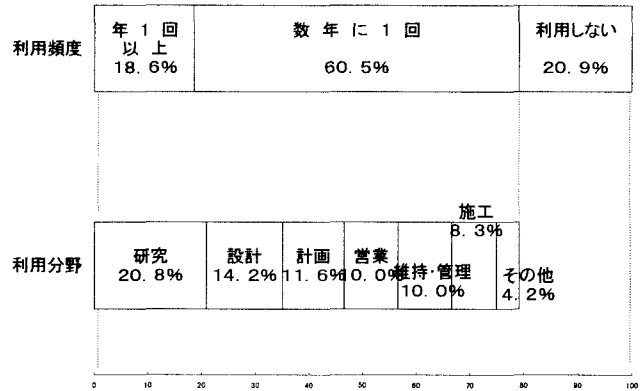
- ①逆解析 計測データから設計段階では充分に予測できないパラメータ（主に地盤定数）を決定する。
- ②予測解析 逆解析で推定したパラメータを利用し、次段階施工の予測を行う。

このうち、予測解析はほとんどの場合梁－バネモデルによる弾塑性法が用いられている（図－11）。FEMの利用例もあるが梁－バネモデルが「事実上の標準」と言うことができ、今後も当分の間この方法が利用されるであろう。予測する項目としては土留壁の変位、応力、切梁軸力、支保工撤去時の検討というところが一般的である。

解析手法も整備が進んでいる。従来から行われて



図－9 データの保存状況



図－10 保存データの利用状況

** IGES

米国ANSI（米国企画協会）が認めた標準。2次元データだけを対象とする。

***STEP

ISOのもとで標準化が進められている国際規格。2次元だけでなく3次元データが扱える。さらに製品の色や材質を交換できるよう整備中。

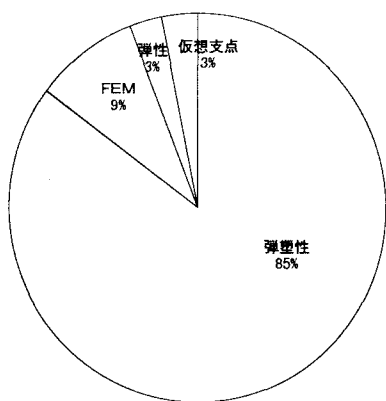


図-11 予測解析の方法

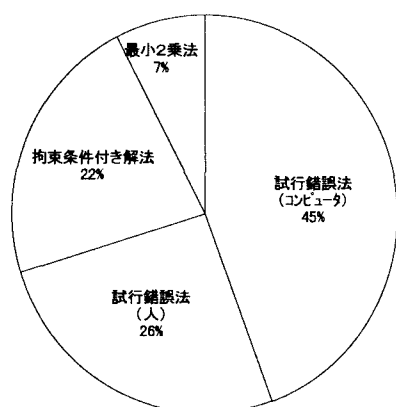


図-12 逆解析の方法

いた弾性解析、弾塑性解析以外に、最近では非線型解析もよく行われるようになったが、土留壁の変形に伴う地盤のバネの低減や背面側の土圧の変化などへの対応も可能となっている。

一方、逆解析は新しい技術であるためか「標準」と言える方法はまだ確立されていない。調査の結果では順解析を何度も行って解を求める「試行錯誤法」を利用しているところが多い。試行錯誤をコンピュータにより入力データを変化させながら行う方法が主流のようであるが、まだまだ人間が結果を確認しながら進めていく方法を用いているところも少なくない。また、中にはエキスパートシステムを利用したものもある。逆解析に使用する計測データとしては土留壁の変位と切梁軸力、推定するパラメータは

地盤反力係数と側圧という例が多い(図-12)。

「試行錯誤法」は、必ず解を求めることができる反面、計算量が膨大となるという欠点がある。そこで最近注目されているのが、拘束条件つき解法である。これは、何通りもの解が存在する問題において解にある条件を付けることによりノイズの増幅を抑え、安定した解を求める方法である。この方法を大別すると数理計画法の最適化手法と確立論に基づく最適推定手法に分類される。前者の例としては以下のものがある。

- シンプレックス法

ある制約条件に従う数多くの変数の相互作用を取り扱うための最適化手法。線形計画法の一つ。

- DSC法

非線型最適化手法のDavis、Swann、Campeyの方法で重みつき最小二乗法の一つ。シンプレックス法と比べて各々の未知数に関して移動幅を設定できるので解の安定性、信頼性が高くまた計算の繰り返し回数が少なくてすむといわれている。

後者の例には以下の物がある。

- 拡張カルマンフィルター

近代制御理論の一つで、対象モデルと雑音のパワースペクトル密度が事前に知られている時の二乗誤差の期待値を最小にする解を与える。計算に要する時間が非常に短く、未知数の設定も任意にできるが、初期値や計測データの分散の与え方などに難しい点があり、経験を要する。

- GA (遺伝的アルゴリズム)

ダーウィンの自然淘汰説を数理モデルに置き換え最適化手法として用いる手法。生物が淘汰および遺伝子レベルの突然変異、交差などにより進化を続けてきたように、いろいろな演算を加えて適応度を高めて行き、最適な解に到達する。理論的厳密さに欠けるという指摘もあるが、組み合わせ問題あるいは局所解の多い問題の最適化手法として適しているといわれている。

最近では確立論に基づく方法が注目されており、多くの研究論文が発表されている。

しかし、様々な研究が行われているという事は、まだ決め手となるような方法が無い事の現れでもある。「論文までは行くがそれがなかなか実務に生きない」というのが、担当者の代表的な意見ではない

だろうか。一つの原因はまだ技術が熟していないことであるが、もう一つは我が国における工事の発注体系の問題であろう。情報化施工は安全管理が第一の目標であることは言うまでもないが、更に計測データを利用して工期の短縮や資材の節約に結び付ける事が可能である。しかし、現在の仕組みではこれを実施しても施工者側の利益となることはない。情報化施工の更なる発展のためには、古い体系からの一刻も早い脱却が必要であろう。

土留以外の分野に目を向けると、

- 岩盤掘削において、亀裂面と掘削面に囲まれて崩壊の危険のある岩盤ブロックを予測するキーブロック解析⁴⁾
- アンダーピニング工法の施工管理において、計測データを利用した3次元解析による沈下量の予測解析

など新しい方法の実用化が始まっている。これらの有効性、発展性は未知数の部分もあるが、今後大きな可能性を持つものと考えている。

4. 展望と期待

現在、情報化施工はそれが必要な工事においてはほとんど採用されており、今後もそれが続くことは明らかである。したがって量的にはピークに達しており、今後飛躍的に利用件数が増加する事はないと思われる。それでは、質的にはどうなっていくであろうか。前章までの分析、検討を元に今後の情報化施工を展望すると以下のようなだろう。

- ① パソコンのCPU性能は今まで通りの速度で発展していくであろう。それに伴いこれまでは本社のWS（ワークステーション）で行っていた逆解析や予測解析が現場のパソコンでも可能となる。但しこれを使いこなすにはかなりの経験と知識が必要なため、現場の担当者が行うのは無理かもしれない。②で述べるが通信技術を利用して、本社・支店から現場のパソコンにアクセスし、必要な計測データを検索して解析する形が多くなると思われる。
- ② 通信技術はCPU以上に発展しそうである。現場、本社・支店および発注者との間で緊密なネットワークが可能となり、データ共有が簡単に行えるよ

うになる。その結果、計測データベースの構築も進む可能性がある。また、データロガーとパソコンとの間などのデータ送信には無線の利用が多くなると思われる。

- ③ 可視化技術も進む。3次元の表現は更にリアルなものとなってくるだろう。ビデオカメラによる映像の上に計測結果を合成して表示するような方法も出てくるであろう。

これらは、かなり実現の可能性が高いものであるが、更に筆者らは計測データを利用した施工の自動化を究極の情報化施工と考えている。例としては、アンダーピニング工法におけるジャッキの自動制御、土留掘削工事における無人化施工などである。実現は不可能かもしれないが、最終的な目標として掲げて行きたいと考えている。

5. おわりに

情報化施工に使用する要素技術に関して現状を分析し、課題および将来へ向けての展望、期待について述べた。一部には大胆な意見もあると思われるが、一つの示唆として受けていただければ幸いである。

今回は技術的な側面のみからの検討であり、契約における情報化施工採用の明文化や、予算の明確化などについては触れなかった。これらも重要な課題であるが、別の機会に考える事にしたい。

最後に、ご多忙の中アンケートにご協力いただいた皆様に心より感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) たとえば日経BP社：日経コンストラクション、1996 5-24
- 2) 馬場一秋、古橋健治：汎用的計測管理システムの開発、第11回建設マネジメントに関する研究発表討論会、1993
- 3) 岩田ほか：計測管理の現状と課題、土木学会建設マネジメント委員会マネジメント技術小委員会、1991
- 4) 川本眺万、藤川富夫：岩盤掘削面におけるキーブロック安定解析のシステム化について、土木学会論文報告集、第346号、1984

The Present State and tasks of Observational Construction System

Recently, Observational Construction System (OCS) is thought to be one of the most important technologies in the construction field. And it is applied to many civil construction sites these days. Especially in the construction site, such as the braced excavation using an earth-retaining wall with a depth of 15 meters or the tunnel project by NATM could not have been complete it without OCS. And it is used in new construction sites, such as the sites of soft ground or the sites of underground excavation, and so on.

In these 20 years OCS was dramatically developed. That is mainly because of the great progress of computer hardware, software, information-technology, communication-technology, and so on. Such kind of technologies made it possible to use OCS easily and effectively. However, there are several tasks that have not been solved yet. This paper first reported how OCS is applied actually and evaluated some basic technologies used in OCS. Secondly represent some tasks and the solutions which OCS have on its own, and finally indicate desirable future of OCS.