

擁壁，橋台，渠壁，杭基礎の設計

清水建設（株） 宮崎徳次郎

和田孝史

○ 堂本清次

1. まえがき *1

土木構造物を設計する場合、その過程は3つの作業に大別されるであろう。すなわち、第一段階は、その構造物に要求される機能を満足するような、具体的な形を想定することである。このとき、設計者は、形状の妥当性、施工性、経済性などについて配慮しつつ、機能、性能（応力度・安全性など）、その他の必要条件を、満足するように、それを決定しなければならない。設計者の創意と、土木技術に関する全般的な知識が要求されることになる。

つぎの段階は、具体的に形の定まった構造物に対して、その性能の十分性を評価することである。構造解析、応力度計算などの数値計算を、機械的に行なうもので、いわゆる設計計算と呼ばれる一連の行為である。

第三段階は、性能の十分性が確認された後、構造物の製作に必要な諸情報を補って、設計図書を作成することである。

このような設計作業を電子計算機を用いて処理しようという試みが、各方面でなされている。その結果、設計計算においては、多くの解析プログラムが作成され、大量の設計計算や手計算では解き得ないような機械的な計算は、いまや電子計算機で処理することができるようになった。そして、現在の電子計算機利用はさらに進んだ形で設計作業に寄与しており、今までの部分的な設計計算の分野から、一貫設計、自動設計へと発展している。

入手を介することなく論理的判断によって設計を行なう自動設計は、従来の手計算による設計に比べて、迅速かつ正確であり、設計範囲を拡張して豊富な検討を可能にし、より適切な設計ができるようにする。すなわち、自動設計は、設計作業の省力化を推進し、生産性を高めるばかりではなく、経済的・合理的な設計を可能にするものである。

筆者らは、土木構造物の自動設計システムの開発を行なってきた。ここに、その一環として擁壁、橋台、渠壁、杭基礎を対象とした設計プログラムの概要を紹介させていただくと同時に、自動設計における最適化について若干の考察を加える。なお、これらのプログラムは、設計作業における第二段階、すなわち設計計算を行なうものである。

2. プログラム作成の基本方針

プログラムは、使い易さと広い適用範囲を旨として作られている。すなわち

- 1) 入力データは重複をなくし、できるだけ簡単である。形状データは構造諸元による入力と任意形状の平面多角形による入力と両用できる。
- 2) 出力は、そのまま設計計算書として利用できる。手計算による設計計算書と同様に、計算の途中結果を示し、その紙面サイズは、A4版である。
- 3) 設計者の主観を十分に反映できる。
 - 構造物の形状は、任意の形を扱える。
 - 設計規準は、各発注機関に対して適用できる。
 - 設計方法が、複数考えられる場合は、その全てを準備しているので利用者が自由に選択できる。
- 4) 自動修正機能がある。

*1 設計条件が決定した後の設計ということで、狭義の意味の設計行為（単位設計）をいう。

- 初期の入力データによる設計計算の結果が、条件を満足しない場合には、一回目の設計計算による設計計算書作成後、プログラムが自動的に、構造諸元を修正して、再び設計計算を行なう。
- 自動修正機能の作動は、利用者の選択である。

3. プログラム構成

ここで紹介する擁壁、橋台、渠壁、杭基礎のプログラムは図-1におけるサブシステムに位置するものであり、下位のモジュールは、それぞれのサブシステムにおいて、共通に使われる機能や、サブシステム独自の機能の単体である。

下位のモジュールは、現在約200作られていて、それぞれのサブシステムの必要に応じて、組み合わせられている。1つのサブシステムで使われているモジュールは、約50～130個である。

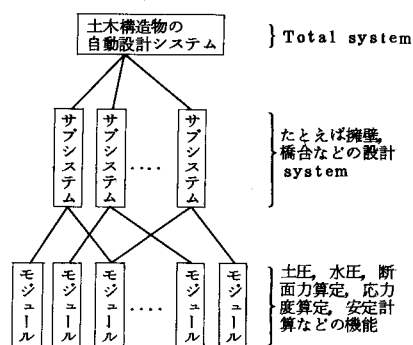


図-1

(岩松,工藤:設計の自動化;土木施工Vol.11No.11より)

4. 各々のサブシステムの適用範囲

4-1 擁壁の設計

逆T型と扶壁式の鉄筋コンクリート擁壁を対象とし、基礎は直接基礎と杭基礎とが可能である。杭種は、鋼管杭、PC杭、遠心鉄筋コンクリート杭、PIP杭とその他の場所打ち杭が扱える。土圧の算定方法や背面の地形および過載荷重の作用位置などの、さまざまな変化を満足できる。適用規準は、道路橋下部構造設計指針(日本道路協会)、設計要領第2集(日本道路協会)、道路技術基準(建設省)基礎構造物設計基準(首都高速道路公団)のいずれかを準拠できる。

4-2 橋台の設計

逆T型と扶壁式の鉄筋コンクリート橋台を対象とし、基礎は直接基礎と杭基礎とが可能である。杭種は、鋼管杭、PC杭、遠心鉄筋コンクリート杭、PIP杭とその他の場所打ち杭が扱える。土圧の算定方法、波力や動水圧の考慮、パラベットの断面力算定方法、および直接基礎の変位量の算定などについて、つぎの規準が自由に適用できる。適用規準は、道路橋下部構造設計指針(日本道路協会)、設計要領第2集(日本道路公団)、構造物設計図集(日本道路公団)、基礎構造物設計基準(首都高速道路公団)である。

4-3 渠壁の設計

扶壁式の鉄筋コンクリート渠壁を対象とし、基礎は直接基礎と杭基礎とが可能である。杭種は、鋼管杭、PC杭、遠心鉄筋コンクリート杭、PIP杭とその他の場所打ち杭が扱える。設計規準としては、港湾構造物設計基準(日本港湾協会)に準拠している。扶壁の稜線は、(一つの直線でない)折れ線でも可能であり、扶壁の厚さに一様な変化(テーパ)を付けることも可能である。荷重は任意の位置に集中荷重や分布荷重を作用させることができ、各検討ケースについてそれら荷重の組み合わせが可能である。また、渠壁としての特異性から、止水壁を考慮した揚水圧分布の算定や、基礎の水平変位を固定することが可能である。

4-4 杭基礎の設計

一般の構造物の杭基礎部分を対象とし、杭種は鋼管杭、PC杭、遠心鉄筋コンクリート杭、PIP杭とその他の場所打ち杭が扱える。計算方法は、道路橋下部構造設計指針(日本道路協会、昭和39年版)の全ての内容について適用できる。〔但し、当指針は今年8月に改訂されている。その結果、新しく設計法として追加された 1) 特殊な条件における杭の設計 2) フーチングの剛性と杭の荷重分担の検討 が不足する機能となった。しかし 1) 2) のような検討を要する杭基礎は、あまり一般的ではないから、現在のプログラムでも充分使用に耐えうると考える。〕

5. 自動修正

*1

前記の如く、設計行為は3つの作業に大別されるわけであるが、実際には第2段階における性能評価において、過不足が生じて再び第1段階の初期値設定に戻ることの方が多い。このとき従来の手計算では、設計者の設計経験にもとづく勘によって、現設計に適当な修正が加えられ、再度設計計算をくり返す。すなわち試行錯誤する。

当システムでは、全てのサブシステムにおいて、力学的安全性を評価項目とした自動修正機能を持たせている。これは、力学的安全を得るための部分的な構造修正であって、その方向は材料増加となる一方向であり、製品規格や施工性の関係上、変数は連続的ではなく段階的である。すなわち、従来の修正手順と同様の方法であり、具体的には設計者の経験をもとにして一定の規則を見つけ出し、標準化することによって解決した。

5-1 直接基礎の安定

転倒、支持の安全および合力の作用位置のいずれかが満足されない場合は、底版幅を拡げる。底版幅の拡幅は、初期形状データの前趾と後踵の割合（プロポーション）が著しく変化しないようにした。滑動の抵抗が不足する場合は、突起を設けるようにした。既に突起がある場合は、最適な位置に移動する。

5-2 杭基礎の安定

杭の支持力が不足する場合は、①杭の配列を変更する。外力に対してすべての杭の反力が等しくなるように再配列する。②底版幅を拡げて、杭を再配列する。③杭を増加して再配列する。という優先順位で修正を行なう。また、杭の横抵抗が不足する場合は、①杭を増加して再配列する。②底版幅を拡げて杭を増加して再配列する。という順に修正を行なう。

5-3 躯体各部の応力

決定された断面について、必要鉄筋量を満足する最小の配筋を試みる。しかし、その部材断面で空間的に配筋できる最大限の配筋を施しても、鉄筋量が不足する場合、もしくは、せん断抵抗が著しく小さい場合は、部材断面を段階的に増加する。

配筋作業は、つぎのように行なう。配筋間隔は、100 mm、125 mm、150 mm、175 mm、200 mm、250 mm、300 mm、鉄筋径はD13、D16、D19、D22、D25、D29、D32が考慮されているが、その決定は自動的に行なわれる。ただし、利用者は下記の3項目を指示できる。①配筋間隔 125 mm、175 mmは使用しない。②経済的に配筋するために、径の異なる鉄筋を互い違いに配筋することを許す。③折曲鉄筋にして、正負の鉄筋を両用させる。一般に配筋は一段配筋であるが、扶壁は三段配筋まで考慮される。また場所打ち杭の配筋は、二重配筋まで考慮される。

6. 自動設計における最適化

設計における電子計算機利用は、設計計算の一部の複雑で面倒な部分のみを扱う利用形態から、それらを連結して情報を加工してゆく一連の作業を、人手を介することなく遂行する一貫設計へと発展してきた。一貫設計は、基準化された一連の設計手順を実行するだけのものであり、作業量の違いはあるが、依然として設計者の判断材料を提供するにとどまり、結果の評価は利用者に委ねられている。すなわち、設計計算の結果を評価・判断する行為が、一貫設計の取り扱い範囲を限定しているのである。ここで、電子計算機で行なう設計作業の範囲をさらに拡張して、一貫設計から自動設計へと進むためには、必然的にプログラム自身が状態を評価し、それに対して善処すべき行動を決定する能力を備えなければならなくなる。すなわち、自動設計は、最適設計を第一義的な目的としていたわけではないにもかかわらず、最適化が不可欠な機能となるのである。

土木構造物の設計における最適化という行為は、実際手作業の場合あまり意識されずに、各人各様に個人の設計経験にもとづく勘によってなされている。しかし、自動設計を具体的に推進するには、この点を明確にしなければならない。すなわち、最適な構造物に対する明確な評価基準と、最適化の具体的な手法が確立

されなければならない。

最適な構造物に対する評価は、力学的安全性や経済性、施工性、機能性、審美性など、非常に多くの互に関連した要素から構成されている。これらの中の1つ1つはさらに、多数の側面を持っている。たとえば、安全性とトレードオフの関係にあると考えられる経済性について考えてみても、材料費、施工費、保守費など多くの要素からなり、構造物全体について総合的な判断のもとに、その評価を定式化することは非常に困難である。また、経済性を問題にする場合は、コストについて最小化を施さなければ有効ではない。たとえば、fully stressed designにより、材料を最小にすることができても、経済的とは限らない。最小材料設計は最小重量設計に通じる最適設計の一つの考え方ではあるが、鉄筋コンクリート構造物においては適用できない。それは、実際のほとんどの部材が、つまり鉄筋になっていない事実から明らかであろう。すなわち、現実の設計においては、材料の価格における検討がなされ、最小材料ではなく最小材料費についての最適化が暗黙のうちになされているのである。さらに施工費や工程との関係における費用などの評価は、非常に複雑なものとなる。また、何らかの形で経済性の評価が可能であるとしても、それを構造物の各部分における最適評価ではなく、構造物全体として評価することは、各部分が構造物に固有の状態で相互に関連し合っているので、一層困難なものとなる。そのうえ、施工性、機能性、審美性などについても、具体的な評価規準を設定することは、まず不可能なことではないだろうか。

最適化の方法は、よく知られているように、数理計画法によるものと試行法によるものがあるが、そのいずれを用いるにせよ、以上のように極めて複雑な最適評価作業を、あえて実行しようとする、相当の大型計算機を必要とし、多額の費用を要することになるだろう。

本来、最適化は強烈な目的意識のあるものについてなされるべきものであり、その目的の対象は互にトレードオフの関係にあるものである。しかし、自動設計における最適化は、その発生から見てもわかるように最適化を強烈に目的としているものでなく、仮にその目的を経済性(コスト)に限定しても、目的関数の定義が複雑であったり、安全性とのトレードオフの関係が明確でない場合もある。また、厳密な意味での最適化が有効なものとなるのは、最適化の対象が多量に造られることによって、最適化の費用が十分採算のとれる場合や、最適化の結果が普遍性をもつもので、他で応用ができるものなどである。

したがって、一般に量産化されることのない土木構造物に、厳密な最適化を施すプログラムを作ることにはあまり実用的でなく、それぞれに適した簡便な方法が選択されるべきであろう。

筆者らは、最適性の評価項目として(不十分ではあるが)材料最小を用い、構造物全体の最適化は、一部の試みを除いて行なわなかった。また最適化の方法は、段階的逐次増加による試行法を用いている。したがって、簡易なるがゆえに多くの問題点を含んでいる。すなわち、目的としての最適の定義が不十分であること、最適化の方法は手さぐりの組織性がないこと、試行法であるため収束するまでの計算量が見積れないこと、などである。しかし、実用に際して特に支障があるということはないのが現状である。学問的興味は別として、厳密な最適設計を満足しなくても実用上さしかえないうのである。利用者は、システムの最適化機能を利用している場合もあり、しない場合もある。また、数回の試設計を行ない、その中から最適な設計を選択している場合もある。

一方、設計者の創造力や総合的判断力による最適化を、直接反映させる方法として、人間と機械との対話による設計システムがある。電子計算機による処理がbatch処理と異なるため、設計の途中で設計者の意志を直ちに具体化でき、設計者の自由な方針で最適化ができ、充実した設計を可能にする。すなわち、自動設計における最適化の有力な方法として大いに期待できよう。

以上、自動設計における最適化について述べてきたが、いかに設計作業の多くの部分を電子計算機が代行できても、いかに最適化が発達しても、電子計算機は設計者を完全に代行することはできないであろう。たとえ、完全な全自動最適設計が実現しても、それにすべてを任せることはできない。最終的に設計を評価するのは、独創的で、かつ総合的な判断のできる設計技術者であらねばならないと考える。