

土質工学におけるコンピュータの利用

伊勢田 哲也*

最近、コンピュータの発達に伴って、土質工学の分野においても、コンピュータが盛んに利用されるようになった。

土はそれが地盤の中にあるときはきわめて不均一な存在であり、またそれを取り出し荷重を加えると粘弾性・塑性といった変形挙動を示し、しかも異方性の性質があり、破壊に至るまでは体積変化を伴ったりするなど、きわめて複雑で取り扱いにくい材料である。

そして、強度的にはきわめてせん断力に弱いという性質から、盛土のり面の安定計算には従来から周知のような円弧滑りつり合い計算が行われ、手計算のわずらわしさからコンピュータが用いられてきた¹⁾。また、地中応力の計算にも、プーシネスクの式をコンピュータで求めた例もある²⁾。また、調査資料や実験資料などのデータ整理などで重宝に用いられている。これとは別に、圧密計算、弾性支点上のり計算（応用面では舗装盤、軟弱地盤中に設けられる矢板や杭、軟弱地盤中の道路地下埋設管、暗きょ、土留壁など）、地震時地盤の挙動などでは微分方程式の解を差分式などから数値解や数値積分法を用いて求める方法がある³⁾。簡単な場合は手計算でも求めることができるが、少し精度を上げたい場合や土質の複雑な条件を満足させたい場合には、どうしても多元の連立方程式が成立し、これをマトリックス表示にしてコンピュータで求めると至極便利である。しかしながら、何といたってもコンピュータの高度利用といえ、有限要素法の土質工学への活用であろう。

そして、有限要素法という解析手段の出現で、いままで試みられなかった土質工学の諸問題について、その解決の緒を開いてくれた点は数多く、またこれからも発展してゆくものと考えられる。

この有限要素法 (Finit Element Method) の計算内容の本質は、さきに述べた多元連立方程式を立てて解くマトリックス解析法となら変わらない。

有限要素法は、対象物をいくつかの有限個からなる要素（平面形の場合には、三角形、矩形、立体形の場合には、三角錐、直方形など）に分割し、各要素は節点によって連続的に結合され、力のつり合い式が適合条件式の一方向と変形の関係式を満足させ、仮想変位の原理を

適合させる。

そこで、外力 $\{R\}$ と変位 $\{v\}$ との間に $\{R\} = [K_m]\{v\}$ といった多元連立方程式を成立させる。

ここに、 $[K_m]$ は、集積剛性マトリックスと呼ばれるもので、節点の座標値と等方弾性体の場合、弾性率 (E) とポアソン比 (ν) で求められる値である。これを求めるには手数がかかりかかるが、要素が三角形の場合や矩形の場合には求められている²⁾。

弾性体、すなわち E が一定の場合、それが要素ごとに異なるような場合（例えば、地盤の剛さが変化して分布したり、盛土の締固めの程度にばらつきがあるような場合³⁾）は線形計算であり、演算時間は1回だけなので短くてすむ。しかし、非線形の場合（塑性変形）は、反復法²⁾により応力-ひずみ曲線に近接させて解を求める関係からかなり手間どる。粘性、すなわち時間の要素を加えたいときはさらに面倒になるが、応力-ひずみ-時間曲線を求められれば、時間差間の変形問題はそれぞれの時間における変形量の差引きから求めることができる³⁾。

ただ、境界条件として節点は固定支点か可動支点という制約がある。土質の場合、摩擦力が作用し滑りや、はく離が生じることが考えられ、これを考慮した例⁴⁾がある。次に、有限要素法を適用した例について多少述べることにする。

有限要素法が、わが国に紹介された最初の計算例としては Clough や、Zienkiewicz らが行ったダムやトンネルなどの例であった。したがって、早くから岩盤やロックフィルダムの施工に伴う変形挙動で数多くの成果の発表がある⁵⁾。

また、岩石の三軸試験から得られた σ - ϵ 曲線、 σ - ϵ - t 曲線とせん断破壊包絡線を用いて、トンネル掘削当時の応力と変形の関係、覆工施工後に作用する応力と変形などが紹介している。さらに、岩盤関係では岩盤の応力と変形で、とくに体積変化を重視し、さらに直交異方性を取り扱ったものに文献 6) がある。

フィルダムでは、コア部とランダム部すなわちゾーン境界部の変位が大きいとダムの機能に支障をきたす。そこで、その量の予測を求めるため、6種類に材料の変形特性値 (E, ν) を変じて行っている⁷⁾ (弾性計算)。

文献 3) は、盛土の締固めの程度と沈下の関係を求め

* 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科

ている。すなわち、土の圧縮特性値を締固め機械で締め固めた試料から直接求め、締固めの程度と土の粘弾性・塑性の関係を表示するような $\sigma-\epsilon-t$ 曲線を求め、さきに述べた非線形計算を行って結論づけている。なお、同様な手順で構造物取付盛土部の沈下についても適用し、防止対策を立て実績と比較している⁸⁾。

地山の掘削切土に関しては、掘削前の応力状態から掘削が進行してゆくに伴って、部分的には拘束力が減少し、せん断力が増加してゆく。それにつれて、変形も弾性変形から塑性変形に、そして破壊へ進展してゆく。文献としては9) などがある。

のり面安定に有限要素法を適用した例もかなりあるが地滑り関係では滑りに伴って斜面が弾塑性挙動をへて破壊に進展してゆく状態、それも部分的なものからの広がりとなってゆく状態を追跡している¹⁰⁾。また、対策工法として杭の効果を東大の福岡教授が確かめられている。

橋梁など、基礎工関係に適用されている例もかなり多い。文献11)は、海底地盤上に設置された大型ケーソンに振度法による地震力を作用させた場合の地盤とケーソンの応力・変形を求めている。とくに地盤について、圧縮力に対しては耐力を受け持つが、引張力に対しては抵抗しないという異方性の性質を考慮している点異なる(弾性繰返し計算)。また、文献12)は基礎地盤の滑り破壊を求めるため、地盤材料の破壊基準を三軸試験から求め、これを適用することで数本の滑り線を引き、安定性を検討している(弾性計算)。

軟弱地盤上の土構造物の変形挙動問題では、従来からテルツァギーの圧密理論による沈下予測が行われているが、その半数ぐらいははずれる状況にある。また、安定についても問題は残されており、模型実験や有限要素解でも、それらの点が指摘される¹⁴⁾(非線形弾塑性計算)。筆者らも似たことを行ったが、せん断変形の重要性を感じた¹⁵⁾(非線形、弾塑性計算)。また、文献16)はBiotの圧密理論の支配方程式と等価の変分原理を導き、一、二、三次元の不均一異方性問題を取り扱っている。地中構造物(シールド)の建設に伴う近接構造物に及ぼす影響と、防護対策としての薬液注入の効果判定に適用したものが文献17)である(弾性計算)。

土質関係の有限要素法適用でもう一つの分野は、浸透流の問題への活用である。

これは、応力・変位の代わりに水頭を考え、同様変分原理とダルシー則を用いて浸潤線などを求めるわけで、定常と非定常の浸透流の計算が行われている^{18)~21)}。

さらに、地震時の応答解析にはかなり用いられるようになった。周知のとおり、X-Y平面において有限要素モデルの地震時運動方程式は次式で表わされる。

$$[M]\{\ddot{r}\} + [c]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = -\{R(t)\}$$

ここに、 $[M]$:質量マトリックス、 $[c]$:粘性減衰マトリックス、 $[K]$:剛性マトリックス、 $\{r\}$:節点変位ベクトル、 $\{R(t)\}$:地震荷重スペクトル。

一般には上記の式を直接、数値積分することによって求められるが、有限要素法を適用して求めることが可能である。ただし、この際には固有振動解析に基づくモーダルアナリシス法を適用させる。ここではこれ以上述べる余白がないので、文献22)、23)を参照されたい。

地震時砂地盤の流動化破壊を有限要素法を用いて巧みに解析した例にSeedらの研究がある。

以上は土質工学においてコンピューターを活用している例のほんの一部であり、筆者が浅学なためと紙面の関係ですべてについて述べるができなかった。なお、有限要素法関係の内外文献集録のとりまとめについては成岡名大教授が行われていると聞く。

終わりに、コンピューターの容量について少し述べてみたい。

有限要素法で解析する場合64KW(キロ・ワード)程度の計算機を用いると、線形計算で巧みにプログラムをつくれれば700節点ぐらいは楽であるが、非線形問題になると、繰返し演算時間にかかなり手間どる。したがって、500~350節点ぐらいに落として行う場合が多くなる。ただ、手もとに35KW程度の中型の計算機しかなく、そのうえ時間に糸目をつけず、大規模の計算を行いたい場合にはユニット分割法を適用するとよい。軸対称、二次元問題を取り扱う場合はさほどでないが、三次元立体構造や地震応答問題になるとだんだん心細くなってくる。ただし、これも時間に糸目をつけられないという条件になると話は別である。

参 考 文 献

- 1) 大地羊三監修: コンピューターによる土工学演習, 森北出版。
- 2) O.C. ツィエンキーヴィッツ・Y.K. チューン著, 吉識雅夫監訳: マトリックス有限要素法, 培風館。
- 3) 伊勢田哲也ほか2名: 盛土の締固めと圧縮沈下に関する研究, 土木研究所報告, 第144号, 1973。
- 4) 多田浩彦ほか2名: ケーソン基礎周辺地盤の力学的挙動, 第6回土質工学研究発表会, 昭和46年。
- 5) 例えば, 林正夫: 岩盤と岩石粗粒材の力学的物性挙動解析・実測などの関連, 土と基礎, Vol. 21, No. 3, 1973。
- 6) 飯田隆一: 体積変化をともなう直交異方性弾塑性理論とその適用, 土木研究所報告, 第135号の1, 1968。
- 7) 松井家孝ほか2名: ロックフィルダム境界部のせん断変位のダムへの安定に及ぼす影響, 第7回土質工学研究発表会, 1972。
- 8) 伊勢田哲也ほか2名: 構造物との取付け盛土の沈下防止に関する研究, 土木学会論文報告集, 第198号, 1972。
- 9) 石原研而ほか1名: 切土にともなう地盤の挙動の変化, 第4回土質工学研究発表会, 1969。
- 10) 伊勢田哲也・棚橋由彦: 弱面を含む自然斜面の逐次破壊現象の有限要素解析, 長崎大学工学部研究報告, 第4号, 1971。

- 11) 多田浩彦ほか3名：ケーソン基礎周辺地盤の応力状態および変形挙動，土木学会論文報告集，第188号，1971。
 12) 大橋昭光ほか1名：関門橋の橋梁基礎地盤調査と設計，土と基礎，Vol. 21, No. 3, 1973。
 13) 土質工学会編：土質調査試験結果の解釈と適用例，第1章。
 14) 網干寿夫ほか1名：深い基礎の先端地盤の変形と破壊に関する基礎的研究，第8回土質工学研究発表会，1973。
 15) 伊勢田哲也・柳橋由彦：軟弱地盤上盛土の沈下変形，土木学会西部支部研究発表会，1974。
 16) Y. Yokoo, K. Yamagata and H. Nagaoka : Finite Element Method Applied to Biot's Consolidation, Soil & Foundation, JSSMFE, Vol. 11, No. 1, March 1971。
 17) 新井実ほか2名：シールド外周地盤に対する有限要素法の活用例について，土と基礎，Vol. 19, No. 6, 1971。
 18) 川本眺万ほか1名：堤体および基礎における浸透法の有限要素解析について，土と基礎，Vol. 18, No. 12, 1970。
 19) 例えば，川本眺万ほか1名：有限要素法による浸透解析の2,3の適用例，土と基礎，Vol. 19, No. 1, 1971。
 20) 河野伊一郎：有限要素法による堤体浸透問題の解析，土と基礎，Vol. 21, No. 8, 1973。
 21) 飯田隆一ほか1名：非定常浸透流の有限要素法による解析，土木研究所報告，1971。
 22) 栗林栄一：振動問題における応用例（土木構造物の新しい設計法），土木学会関東支部講習会資料，昭和45年12月。
 23) 土木学会編：地震応答解析と実例，1973年2月。

土木工学ハンドブック編集委員会編

土木工学ハンドブック

B5判・上中下3分冊

3000ページ・特上製

全巻 36 000円（分冊価格未定）

発行・技報堂

土木学会創立60周年記念出版

1. 総論 2. 応用数学 3. 材料力学 4. 構造力学
 5. 土質力学 6. 岩盤力学 7. 耐震工学 8. 水理学・水文学 9. 地質・気象 10. 土木計画学 11. 構造設計法 12. 土木製図 13. 測量 14. 土木計測
 15. 電子計算機 16. 土木材料 17. コンクリート 18. 鉄筋コンクリート構造 19. 鋼構造 20. 基礎構造・土構造 21. 橋梁 22. トンネル 23. ダム 24. 各種構造物 25. 契約・積算 26. 土木工事管理 27. 施工技术 28. 地域計画 29. 都市計画 30. 交通 31. 道路 32. 鉄道 33. パイプライン 34. 空港 35. 河川 36. 海岸 37. 港湾 38. 海岸工学 39. 発電 40. 衛生工学 41. 砂防 42. 農業土木 43. 建築・造園
 付録（太字は前回に比べ再編成もしくは新設された編）

土木雑誌 施工技術

6月号 5月20日発売 定価480円(〒40円)

特集：海外技術協力の現状と問題点

- 総論 海外技術協力の諸問題……………東洋大学 赤木俊充
 ■海外技術協力の問題点
 ・アジア銀行体験を中心に……………運輸省 広田孝夫
 ・世界銀行体験を中心に……………運輸省 赤塚雄三
 ■契約書 鹿島建設 吉越盛次 電源開発 佐藤光春
 ■コンサルティング
 ・海外での日本人コンサルタント 基礎地盤コンサルタント 森 博
 ・海外コンサルティング—その困難性の克服にむけて—バシフィック
 コンサルタント 千葉英夫
 ■望ましい国際協力にむけて……………建設省 笹沼充弘
 ターチャーン橋建設工事を終えて／ボスポラス橋と海外工事獲得の
 むずかしさ／開発途上国と日本の海外「進出」／海外「進出」企業
 への提言

テクノロジー・アセスメントの進め方

通産省工業技術院 石本幹郎 著
 猿橋 皓

A5判 160ページ 定価1400円

本書は、通産省内におけるテクノロジー・アセスメントの手法開発および実施の推進に当たってきた著者たちが、テクノロジー・アセスメントの進め方について、各種の具体的テーマの分析例を豊富に挿入しながら詳細に説明したもので、これまでの単なる入門解説書と異なり、手法の解明に重点をおいたわが国初めてのテクノロジー・アセスメント手法の解説書

日刊工業新聞社出版局 東京都千代田区九段北1-8-10 ☎03(263)2811 (代表)