

マイクロコンピュータ利用による 埋設とう性管の有限要素法解析

東 山 勇
(農業造構学研究室)
(昭和56年9月1日受理)

Finite Element Analysis of Buried Flexible Pipe and its Computer
Techniques used with a Micro Computer System

Isamu HIGASHIYAMA

Laboratory of Soil Mechanics, Department of Agricultural Engineering,
Faculty of Agriculture, Yamagata University
Tsuruoka, Yamagata, Japan
(Received September 1, 1981)

1. はじめに

山形県庄内地方は、4万haの水田をかかえる我が国でも屈指の米作地帯である。しかし、沖積低平地のため一般に地下水位は高く、表層50cm以内にグライ層が出現する面積は全体の2/3を越えるといわれ、これまで排水など土地改良事業に力が注がれてきた。現在、圃場整備が進められているが、低位泥炭を下層に介在する地区など軟弱な地盤が多く、施工上の色々な問題を惹起している。

農業用水をパイプラインシステムで取りこむ方法は、個別的な水管理ができるという長所はもとより、このような勾配のとりにくい低平地で利用できる大きな特徴をそなえている。しかしながら、パイプラインシステムにはもともと米国のように、我が国とは比べようもない恵まれた地盤条件で主に石油輸送などで開発され、発達してきた方法だけに、農業用水への適用に当っては色々な問題があろう。農業用パイプラインが最初で大規模にとりあげられたのは愛知・豊川両用水、特に豊川用水における支線および、畑地かんがい事業からと思われるが、その後、樹園地なども含む畑かんシステムなど全国各地にめざましい普及を示し、設計基準も昭和52年に改訂された。

しかしながら第三紀グリーンタフ変動を受けた東北地方、特に日本海側では、それらを起源とするヘドロ化した軟弱な粘土層を下層にもつものや、泥炭を介在するものなど前述の地盤条件のために、設計基準の解釈と適用には苦慮する問題も多い。こうした沖積水田にパイプラインによる配水が採用された場合、これら農業用パイプラインの構造的な安全性および経済性を追究するために、パイプに働く土中応力が、とう性管におよぼす影響を解析する必要がある。

2. 泥炭地盤での受働抵抗係数

現実の問題として、泥炭層にパイプを施工するとき、基礎の状態や締固めの条件によっ

て、土の受働抵抗係数 e' はどのような値として設計すべきかがまず問題となる。泥炭地盤に V_u 250 ミリのパイプを、土カブリ 90 cm の埋設深で施工するとき、そのまま泥炭中に埋設するか、それとも設計支持角 120 度のサンドベッドを用いるか、あるいは、さらにもっと砂をいれて設計支持角 180 度にするかといった問題は、現場でのフルスケールテストにより、パイプのタワミを測定し、spangler 式により受働抵抗係数 e' を求め、判断するといったことが、一般に行なわれている。

現場での測定は、なんといっても大がかりなため、室内実験のように色々な条件での測定を行なうというわけにはいかない。さらにまた大口径とちがって 250 ミリとなると、パイプのタワミを測定する方法にも工夫を必要とする。ストレインゲージ式のダイヤルゲージを装備した小さな台車を、パイプの中を走らせ、タワミを測定して e' を求めたという報告¹⁾がある。それによれば、図-3 に示すような条件 (単位は m) で 11 ton バックホー (UH 04-5型, シュー幅 710 mm, 接地圧 0.33kg/cm^2) を載荷した場合のパイプのタワミ量, タワミ率は表-2 のように得られている。

こうした実測による方法に対し、全く別の方法として、有限要素法による計算により変形を推定することが考えられる。本研究は有限要素法により、こうした問題を解くことを試みたものである。

3. 有限要素法の利用と問題点

有限要素法 (Finite Element Method) は、複雑な形の連続体を有限個の要素に分割して、応力、変形の解析を行なうもので、はじめ航空機分野で開発された²⁾。その後、1969年以降、工学の各分野に急速にひろまり、現在では土質工学の分野にもとり入れられるようになってきている³⁾⁴⁾⁵⁾。

この方法は、色々な条件を想定した場合の比較にも便利であり、また応力や変位を特にくわしく知りたい部分については、要素分割を細かくすれば精度が上るといった利点を有する。しかし反面、要素を増大すれば、計算に必要な記憶容量が増大し、計算時間もそれだけ長くなる。記憶容量の関係から、一般に、有限要素法といえ、大型電算機が用いられるのが普通である。

当学部には、東北大学の大型電算機の端末があり、当初はこれを利用して、例えば、前述のパイプの問題について信頼性の高い値を得るには、少なくとも40以上の要素分割は必要と考えられる。しかしながら、例えば、節点数44、要素数58の問題をとくに、リモート・バッチを利用するのでなければ1時間32分 (プログラムはフォートラン使用) を要し、前後の操作を考えれば2時間近くも機械を占有することになる。このように長時間にわたって端末機を独占することの遠慮と、きびしいメモリー制限から、扱える節点数もせいぜい50程度が限度であった。そこで、これに代る方法としてマイクロコンピュータによる有限要素法解析を試みてみた。しかしRAMを多く必要とするフォートランでは問題にならず、BASICプログラムにしたとしても、当初は30以下の要素しか扱えなかった。

4. マイコン用プログラムの開発

有限要素法については、プログラムを掲載したすぐれた著書²⁾⁶⁾⁷⁾は多い。しかしそれらのプログラムは、いずれも大型電算機を前提としたもので、マイコン用には独自に開発す

るしかないようである。こうした中で戸川の著書⁹⁾にはミニコンクラスでも可能なように、かなり工夫されたプログラムが記載されている。これはフォートランなので BASIC 言語でマイコン用書きなおしてみた。しかし残念ながら節点数が 33 を越えるものは無理であることがわかった。

FEM 解析の計算の流れは図-1 に示す通りであるが、上述の問題点は、5 番の剛性方程式をどのようにして解くかにかかっていると見える。これには色々な方法⁹⁾が工夫されている。

戸川の方法⁸⁾は、ガウスの消去法によるもので同書ではサブルーチン LEQ の名称になっている。これに代る方法として、全体剛性マトリクスを上三角、下三角に分解するいわゆる LU 分解、それをさらに進めた修正コレスキー法、あるいはまたバンドマトリクス法¹⁰⁾などが考えられる。これらを比較検討した結果、最終的に到達した著者の方法は、バンドマトリクス法に基礎を置く方法であるが、これらの諸法をメモリーオーバーをしない最大節点数 32 までの範囲で比較すると表-1 のようになる。

表-1 は標準的な方法であるガウスの消去法と、対称マトリクスの特徴を生かした修正コレスキー法と、著者の方法の計算時間を比較したものである。ガウスの消去法に比べて後の二者は、計算時間がかなり短くなっていることがわかる。特に修正コレスキー法が一番短くなっている。

しかしながらマイクロコンピュータの場合、時間はあまり問題とならない。大型電算機のように勤務時間による使用時間制限がないため、いかなる時間帯でも利用可能である。それよりも、メモリーの制限こそが重要である。単に時間だけの問題であれば、サブルーチンをアセンブラーや機械語にすることも考えられるが、むしろ機械語のためにメモリー

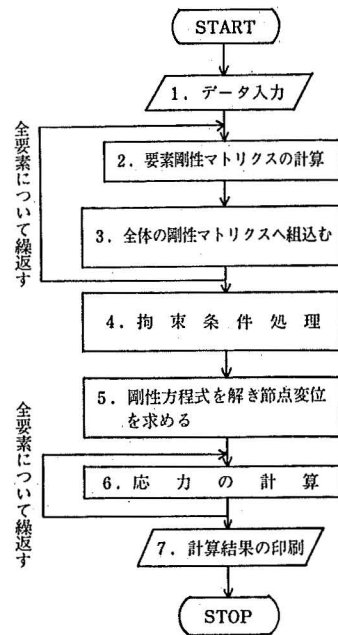


図-1 有限要素法解析のフローチャート

表-1 三つの方法の計算時間の比較

	節点 11 要素 10	節点 32 要素 40
戸川の方法 ガウス消去法	8分42秒	1時間46分16秒
修正コレスキー法	7分21秒	1時間8分23秒
著者の方法 バンドマトリクス法	8分18秒	1時間27分16秒

```

5 'PROG, FEM13Q                                BY I.HIGASHIYAMA                                04/01/81
6 CLEAR 100:Z1#=TIME#:PRINT
7 INPUT"FILE NAME":A#
8 LPRINTTAB(22)A#:TAB(54)Z1#:LPRINT:LPRINT:LPRINT
10 LPRINT"***** FLANE STRAIN ***** ":LPRINT
15 M=60:M1=2*M
20 READ NP,NE,NB,NF:LPRINT"NP="NP,"NE="NE,"NB="NB,"NF="NF:LPRINT
30 N=2*NP:P1=3,141593:POKE 16561,229:POKE 16562,253
40 DIM XX(M),YY(M),B(3,6),D(3,3),DB(3,6),LL(6),EK(6,6),TK(M1,M),TF(M1),FW(M1)
60 LPRINT" I, "XX(I) ", "YY(I) ":FOR L=1 TO NP:READ I,XX(I),YY(I):LPRINTI,XX(I),YY(I)
:NEXT L:LPRINT
95 LPRINTTAB(0)"NO.":TAB(7)"I":TAB(17)"J":TAB(27)"K":TAB(39)"E":TAB(51)"P"
100 FOR L=1 TO NE:READ NO,II,JJ,KK,E,P:LPRINTTAB(0)NO:TAB(7)II:TAB(17)JJ:TAB(27)
KK:TAB(39)E:TAB(51)P
160 XI=XX(II):YI=YY(II):XJ=XX(JJ):YJ=YY(JJ):XK=XX(KK):YK=YY(KK)
170 S=(XJ-XI)*(YK-YI)-(YJ-YI)*(XK-XI)
180 IF S<=0 THEN PRINT"***** DATA MISS NO="NO:STOP
190 B(1,1)=(YJ-YK)/S:B(1,3)=(YK-YI)/S:B(1,5)=(YI-YJ)/S:B(2,2)=(XK-XJ)/S:B(2,4)=(
XI-XK)/S:B(2,6)=(XJ-XI)/S
200 FOR JB=1 TO 5 STEP 2:B(3,JB)=B(2,JB+1):B(3,JB+1)=B(1,JB):NEXT JB
210 P0=1:P1=1-P:P2=1-P:P1=D1=E*P1/(F0+P2):D2=E*P/(F0+P2):D3=E*O.5/P0
220 D(1,1)=D1:D(1,2)=D2:D(2,1)=D2:D(2,2)=D1:D(3,3)=D3
230 ALPHA=0.5*ABS(S):GOSUB 2000:GOSUB 2500:GOSUB 3000
240 LL(1)=2*I-1:LL(2)=2*I:LL(3)=2*J-1:LL(4)=2*J:LL(5)=2*KK-1:LL(6)=2*KK
290 GOSUB 6000
620 PRINT:PRINT"NO="NO:PRINT
650 FORI=1TO6:FORJ=1TO6:PRINT EK(I,J):NEXTJ:PRINT:NEXTI:PRINT:NEXTL
710 LPRINT:LPRINT"IA","IX","IY":FORL=1TONB:READ IA,IX,IY:LPRINT IA,IX,IY
720 IF IX=1 THEN TK(2*IA-1,1)=10C20
730 IF IY=1 THEN TK(2*IA,1)=10C20
740 NEXT L
750 FORI=1TON:FORJ=1TONP:PRINTTK(I,J):NEXTJ:PRINT:NEXTI:PRINT:PRINT
760 LPRINT:LPRINT"IB","TF(X)","TF(Y)":FORL=1TONF:READ IB,TF(2*IB-1),TF(2*IB):LPR
INT IB,TF(2*IB-1),TF(2*IB):NEXTL
800 GOSUB 6400
810 CLS:PRINT:PRINT:LPRINT:LPRINT
820 PRINT "NODE NO.," U"," V":PRINT:LPRINT"NODE NO.," U"," V":LPRINT
830 FORI=1TONP:PRINT I,TF(2*I-1),TF(2*I):LPRINT I,TF(2*I-1),TF(2*I):NEXTI
840 PRINT:PRINT:LPRINT:LPRINT
850 LPRINT:LPRINT:LPRINT TIME#:LPRINT Z1#
1450 END
2000 REM *** SUBROUTINE MULT1 ***
2010 FORI=1TO3:FORJ=1TO6:DB(I,J)=0
2040 FORK=1TO3:DB(I,J)=DB(I,J)+D(I,K)*B(K,J):NEXTK,J,I:RETURN
2500 REM *** SUBROUTINE MULT1 ***
2510 FORI=1TO6:FORJ=1TO6:EK(I,J)=0
2540 FORK=1TO3:EK(I,J)=EK(I,J)+B(K,I)*DB(K,J):NEXTK,J,I:RETURN
3000 REM *** SUBROUTINE SULT ***
3030 FORI=1TO6:FORJ=1TO6:EK(I,J)=ALPHA*EK(I,J):NEXTJ,I:RETURN
6000 FORI=1TO6:II=LL(I)
6030 IF II<=0 THEN GOTO 6270 ELSE GOTO 6100
6100 FORJ=1TO6:JJ=LL(J)
6120 IF JJ<=0 THEN GOTO 6250 ELSE GOTO 6150
6150 IF (JJ-II)<0 THEN GOTO 6250 ELSE GOTO 6170
6170 IJ=JJ-II+1
6180 TK(II,IJ)=TK(II,IJ)+EK(I,J)
6250 NEXT J
6270 NEXT I:RETURN
6400 REM *** BAND MATRIX ***
6404 CLS:PRINTCHR$(23):PRINT@256,"DON'T TOUCH !":PRINT @390,"PLEASE WAIT A MOMEN
T."
6410 KB=NP-1:FORN1=1TON:AI=TK(N1,1):AV=1/AI:FW(N1)=TF(N1)
6510 IF (N1-N)<0 THEN GOTO 6520 ELSE GOTO 6820
6520 TK(N1,1)=AV
6530 IF (N1+KB-N)<=0 THEN GOTO 6550 ELSE GOTO 6570
6550 KT=KB
6560 GOTO 6580
6570 KT=KT-1
6580 FORI=1TOKT:BT=TK(N1,I+1):WS=BT*AV
6610 II=N1+I
6620 FORJ=1TOKB:B=TK(N1,J+1):W=WS*B
6645 IF J=I THEN 6670
6650 JJ=J-I+1
6660 TK(II,JJ)=TK(II,JJ)-W
6670 NEXT J
6690 TF(II)=TF(II)-WS*FW(N1):WT=WS:TK(N1,I+1)=WT
6730 NEXT I
6750 TF(N1)=AV*FW(N1)
6770 NEXT N1
6820 TF(N)=AV*FW(N1)
6840 KR=N-1:FORN2=1TOKR
6860 N1=N-N2
6900 FORI=1TOKB:II=N1+I
6920 IF (II-N)<=0 THEN GOTO 6930 ELSE GOTO 6980
6930 WF=TF(N1)
6940 TF(N1)=WF-TK(N1,I+1)*TF(II)
6960 NEXT I
6980 NEXT N2:RETURN

```

図-2 マイコン用有限要素法解析プログラム

領域を割愛することの方が重大である。著者の方法は、全体の剛性マトリクスを作るとき、バンドマトリクスのため、他の方法の剛性マトリクスのメモリ使用の半分になること。さらに荷重項（連立方程式の右辺）をよみこんだメモリ領域に、連立方程式の解を順次いれていく操作により、変位用のメモリは全く不要となる。そのほかメモリ節約に心がけたため、その結果、節点数60、要素数80でも楽にとおようになっている。プログラムを図-2に示す。

5. プログラムの説明

使用した記号は、全節点数 NP, 全要素数 NE, 拘束点数 NB, 荷重点数 NF, 節点番号 I の X, Y 座標はそれぞれ, XX(I), YY(I), 各要素 (番号は NO) の節点は, II, JJ, KK, ヤング率は E, ポアソン比は P である。

拘束節点番号と拘束状況は、ラインナンバー 710 番でよみこむ。X, Y それぞれについて、その方向が拘束されれば 1, 自由は 0 を入れる。

バンドマトリクスのための剛性方程式の組立てのサブルーチンは6000番からで、前進消去が6400番から、後退代入が6820番からである。ここではメモリ節約と再利用を大幅にとりいれているため、入力用の荷重項 TF には、最後には出力用の変位の解がはいっている。

ここで使用するマイコンは TRS-80 とほぼ同機種の、TEAC 製 PS-80 である。TRS-80 は著者が数年前、米国滞在中、大学や研究所で非常に広く使われているのを見聞いた経緯もあって、この機種をえらんだ。CPU は Z-80, RAM は、標準 16K に増設 RAM 32K を加えて 48K バイトである。従って RAM 48K の最終番地は10進で 65535 番地、メモリ保護を求める番地を一応 65000 番地としたが、それを16進表示で MEMORY SIZE 格納番地 (16561~16562) にそれぞれ上位、下位で教えたのが、ラインナンバー30番である。従ってまだ 535 バイトの余裕をとっていることになる。8 番, 850 番は計算時間、日付を記録させるが、こうした文字配列のために、ラインナンバー6で、100バイト、ストリングを用意している。要素数64程度では、まだ余裕があるので、80くらいまではディスクを使用しているが、要素数が増えてくると、こうした無駄は全部とりのぞき、ディスクもやめてプログラムの供給も最終的にはカセットテープで供給するつもりでいる。こうしたことができるのが、この機械の特徴であるが、他の機種では一般にできないことをおことわりして

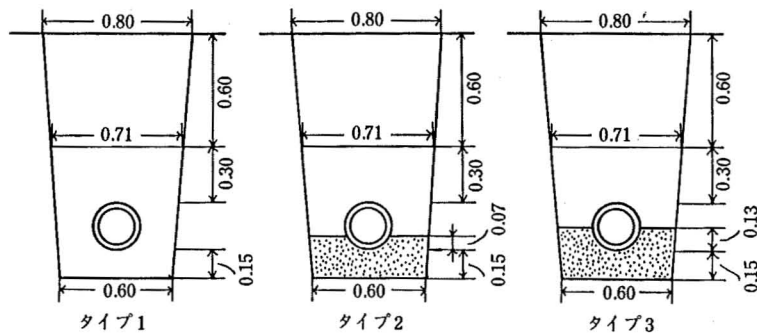


図-3 パイプ支持のタイプ

おきたい。そのさい30番の POKE 命令や10番以下を除くことはもちろん、その機種の使用説明にしたがってコマンドなど変更していただきたい。

ラインナンバー40番では節点の x 座標, y 座標のために配列 XX, YY をとっている。全体の剛性マトリクス TK(I, J) は, 節点数 NP に対し, $I=2NP$, $J=NP$ の数を用意しておかなければならない。前述の他の方法, すなわち戸川⁸⁾ のガウスの LEQ や, 修正コレスキーの場合はこの J も, $2NP$ になる。なお, EK は要素剛性マトリクス, LL は, 要素剛性マトリクスから全体剛性マトリクスへ組みこむさいの対応表である。

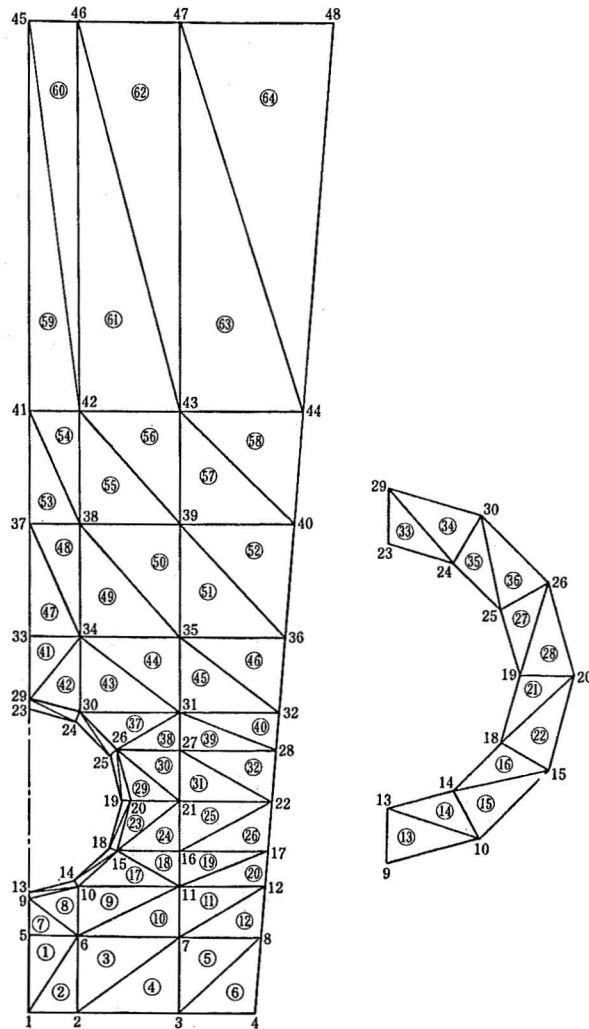


図-4 要素分割

6. 有限要素法による埋設とう性管のタワミ，タワミ率の推定

泥炭地盤内に図-3に示すように Vu 250 ミリのパイプを埋戻し，土カブリが 90cm になるように埋設する。埋戻しタイプはサンドベッドのないもの（タイプ1）と，設計支持角 120度（タイプ2），180度（タイプ3）の三種類である。要素分割はサンドベッドの位置を考慮して，図-4のように分割した。節点数は48，要素数は64である。図-2で示したプログラムは，二次元弾性平面ひずみ問題として解いている。前述の現場での報告例¹⁾は図-3の条件でなされたもので，その結果は表-2のように得られている。これと図-4の要素分割による計算結果と照合しようというわけである。

データ入力はプログラムで1000番～1400番の場所をあてている。タイプ1からタイプ3まで，変化した要素の弾性率，ポアソン比が異なるだけで，座標条件や，荷重条件などは

表-2 タワミ量の実測値と e' (鎌田ら¹⁾)

	上載荷重によるタワミ量 (cm)	受働抵抗係数 e' (kg/cm ²)
タイプ1	0.06	73
タイプ2	0.03	142
タイプ3	0.15	18

```

1000 DATA 48,64,13,4
1010 DATA 1,0,0,2,6,6,0,3,20,0,4,30,0,5,0,10,6,6,6,10,7,20,10,8,30,7,10,9,0,15,1
0,6,6,16,8,11,20,16,8,12,31,3,16,8,13,0,15,8,14,6,2,17,5,15,11,5,21,6,16,20,21,6
,17,31,7,21,6,18,10,8,22
1020 DATA 19,12,4,28,4,20,13,2,28,4,21,20,28,4,22,32,2,28,4,23,0,40,8,24,6,2,39,
1,25,10,7,34,6,26,11,4,35,27,20,35,28,32,7,35,29,0,41,6,30,6,6,39,8,31,20,39,8,3
2,33,39,8,33,0,50
1030 DATA 34,6,6,50,35,20,50,36,33,7,50,37,0,65,38,6,6,65,39,20,65,40,34,8,65,41
,0,80,42,6,6,80,43,20,80,44,36,80,45,0,131,7,46,6,6,131,7,47,20,131,7,48,40,131,
7
1040 DATA 1,1,6,5,3000,0.25,2,1,2,6,3000,0.25,3,2,7,6,3000,0.25,4,2,3,7,3000,0.2
5,5,3,8,7,3000,0.25,6,3,4,8,3000,0.25,7,5,6,9,3000,0.25,8,6,10,9,3000,0.25,9,6,1
1,10,3000,0.25,10,6,7,11,3000,0.25,11,7,12,11,3000,0.25
1050 DATA 12,7,8,12,3000,0.25,13,9,10,13,3000,0.25,14,13,10,14,3000,0.25,15,14
,15,18,3000,0.25,16,14,10,15,3000,0.25,17,10,11,15,3000,0.25,18,11,16,15,3000,
0.25,19,11,17,16,3000,0.25,20,11,12,17,3000,0.25
1060 DATA 21,18,20,19,3000,0.25,22,15,20,18,3000,0.25
1070 DATA 23,15,21,20,3000,0.25,24,15,16,21,3000,0.25,25,16,22,21,3000,0.25,26,1
6,17,22,3000,0.25,27,19,26,25,3000,0.25,28,19,20,26,3000,0.25,29,20,21,26,3,0.
45,30,21,27,26,3,0.45,31,21,22,27,3,0.45,32,22,28,27,3,0.45
1080 DATA 33,23,24,29,3000,0.25,34,24,30,29,3000,0.25,35,24,25,30,3000,0.25,3
6,25,26,30,3000,0.25,37,26,31,30,3,0.45,38,26,27,31,3,0.45,39,27,28,31,3,0.45,4
0,28,32,31,3,0.45,41,29,34,33,3,0.45,42,29,30,34,3,0.45
1090 DATA 43,30,31,34,3,0.45,44,31,35,34,3,0.45,45,31,32,35,3,0.45,46,32,36,35,3
,0.45,47,33,34,37,3,0.45,48,34,38,37,3,0.45,49,34,35,38,3,0.45,50,35,39,38,3,0.4
5
1100 DATA 51,35,36,39,3,0.45,52,36,40,39,3,0.45,53,37,38,41,3,0.45,54,38,42,41,3
,0.45,55,38,39,42,3,0.45,56,39,43,42,3,0.45,57,39,40,43,3,0.45,58,40,44,43,3,0.4
5
1110 DATA 59,41,42,45,3,0.45,60,42,46,45,3,0.45,61,42,43,46,3,0.45,62,43,47,46,3,
0.45,63,43,44,47,3,0.45,64,44,48,47,3,0.45
1120 DATA 1,1,1,2,0,1,3,0,1,4,0,1,5,1,0,9,1,0,13,1,0,23,1,0,29,1,0,33,1,0,37,1,0
,41,1,0,45,1,0
1400 DATA 45,0,-1,46,0,-3,47,0,-5,48,0,-3
    
```

図-5 データ入力例 (パイプ3の場合)

同じである。タイプ3の入力条件を例として図-5にかかげる。ここで単位は重さを kg, 長さを cm としている。ヤング率, ポアソン比は, Vu 管については 30000kg/cm^2 , 0.35, 砂は 3000kg/cm^2 , 0.25, そして泥炭は, 3kg/cm^2 , 0.45 という風に現場条件を想定⁵⁾¹¹⁾して, ここでは与えてある。締固め状態すなわち含水比, 乾燥密度を勘案して, シミュレーションさせるときは, ヤング率, ポアソン比を変化させることになる。

NODE NO.	TYPE 1		TYPE 2		TYPE 3	
	U	V	U	V	U	V
9	-3.93712E-19	-1.77935	-5.3408E-20	-1.00854E-03	-5.16002E-20	-4.04846E-04
10	9.20182E-04	-1.78595	3.61342E-04	-1.91575E-03	6.15601E-04	-1.2771E-03
11	.874059	-1.09993	1.75259E-03	-2.10964E-03	1.78132E-03	-2.49384E-03
12	1.57077	-1.18146	2.61052E-03	-3.55187E-03	2.55819E-03	-4.21691E-03
13	3.9549E-19	-1.77945	6.93409E-20	-1.03604E-03	8.30392E-20	-4.473E-04
14	1.93447E-03	-1.78545	4.92611E-04	-1.85304E-03	7.63983E-04	-1.2291E-03
15	9.84933E-03	-1.79659	1.53857E-03	-3.47529E-03	2.09328E-03	-2.62706E-03
16	.51724	-1.4518	2.0948E-03	-2.56753E-03	2.6879E-03	-3.16674E-03
17	1.30642	-1.57436	3.83178E-03	-4.44568E-03	3.60593E-03	-5.30739E-03
18	.0103346	-1.79548	1.67782E-03	-3.2186E-03	2.18007E-03	-2.46022E-03
19	.015951	-1.79876	5.4482E-03	-5.84732E-03	3.79209E-03	-3.61135E-03
20	.0161815	-1.79877	5.59588E-03	-6.03241E-03	3.88074E-03	-3.61235E-03
21	.13864	-1.9288	.039881	-.212027	4.06412E-03	-4.13065E-03
22	.939493	-2.19346	.461018	-.306836	5.73324E-03	-6.62116E-03
23	3.79365E-19	-1.81612	1.92366E-19	-.0156775	1.33883E-19	-.0117984
24	2.11453E-03	-1.81108	8.71861E-04	-.0128729	4.20223E-04	-9.61381E-03
25	9.82079E-03	-1.80218	4.23944E-03	-7.86828E-03	2.80103E-03	-5.37441E-03
26	9.39881E-03	-1.80113	4.14119E-03	-7.41078E-03	2.72703E-03	-4.98638E-03
27	.520788	-2.39478	.398437	-.545207	.304006	-.249092
28	1.3811	-2.8022	1.20049	-.918326	1.06956	-.629093
29	-3.75396E-19	-1.81632	-2.13063E-19	-.0157694	-1.62817E-19	-.0118524
30	1.19343E-03	-1.8106	4.39838E-04	-.0126108	1.02417E-04	-9.40056E-03

図-6 パイプ周辺部分の変位

表-3 有限要素法によるタワミ量, タワミ率の推定

	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
管頂の垂直変位	-1.81632	-0.0157694	-0.0118524
管底の垂直変位	-1.77935	-1.00854×10^{-3}	-4.04846×10^{-4}
垂直タワミ量 (cm)	0.04	0.02	0.01
垂直タワミ率 (%)	0.14	0.06	0.04
水平タワミ量 (cm)	0.03	0.01	0.008
水平タワミ率 (%)	0.12	0.04	0.03

これら三つのタイプの変位の出力結果のうちパイプ周辺部分について図-6に示す。ここで No. は節点番号, U, V はそれぞれ水平, 垂直変位を表わす。単位は cm である。この図をもとにパイプのタワミ, タワミ率を求めると表-3のようになる。

表-3と表-2を比較してみると, 垂直タワミ, タワミ率のオーダーはあっていることがわかる。タイプ1は, 実測では当初心配されたパイプのタワミよりはるかに少なかったが, 有限要素法の計算結果もそのようになっている。しかし管頂の垂直変位(沈下)は非常に大きい。タワミ率はたとい小さくても, 施工上これはやはり問題があると考えられる¹²⁾。実測値に比べて全体に計算値が小さくでているのは弾性変形として計算しているからであろう。ところで, 有限要素法は注意深く数値をいれさえすれば, このように, 比較的よく

NO.	SX	SY	TX	S1	S2	THETA
1	.0480993	-.104054	-.0500744	.0631001	-.119055	-16.6766
2	-.0803428	-.234999	.0209865	-.0775456	-.237796	7.59201
3	.120467	-.168062	-.0542153	.130318	-.177913	-10.2982
4	-.0215453	-.484121	.039408	-.0182121	-.487454	4.83474
5	.0611534	-.456555	-.0800585	.073251	-.468652	-8.5929
6	.0121022	-.813783	.0113105	.012257	-.813938	.78447
7	.0860344	9.75132E-03	-.0500744	.110839	-.0150533	-26.3518
8	.161008	-.241114	-.0499382	.167116	-.247223	-6.97425
9	.202635	-.227239	-.0304573	.204782	-.229386	-4.03266
10	.0214781	-.46503	.0785985	.033861	-.477413	8.95315
11	.0704285	-.448713	-.0291807	.0720636	-.450348	-3.2071
12	-.0426118	-.767851	.0384849	-.0405754	-.769887	3.02907
13	3.11509	-.136925	-1.30762	3.57565	-.59749	-19.403
14	2.63159	1.31371	1.32073	3.44864	.496668	31.7422
15	1.20736	3.93677E-03	.327839	1.29087	-.079578	14.2917
16	1.42208	-1.18214	.296579	1.45543	-1.21549	6.41561
17	.0869204	-.574381	.153891	.120978	-.608439	12.4791
18	.083614	-.420727	.150455	.125088	-.462201	15.411
19	.114247	-.410516	7.09164E-03	.114342	-.410612	.774106
20	-9.87101E-03	-.689612	.0720788	-2.31193E-03	-.697171	5.98686
21	.680222	-5.7723	2.47701	1.52144	-6.61351	18.7579
22	-.830126	-2.999	-.265274	-.798152	-3.03097	-6.87285
23	-.0539256	-.420665	.215878	.0459501	-.52054	24.8275
24	.0817359	-.426362	.166672	.13153	-.476155	16.6337
25	.322423	-.346132	-2.1058E-03	.32243	-.346139	-.180467
26	.0667727	-.552938	.148929	.100705	-.586871	12.8354
27	-3.56509	-5.83209	5.07195	.498482	-9.89566	38.7012
28	-.0709343	-7.16729	-1.62032	.281531	-7.51976	-12.2722
29	-1.82495E-03	-2.35449E-03	-2.52074E-04	-1.72415E-03	-2.45529E-03	-21.7966
30	.0530881	-.096183	.0176497	.0551465	-.0982415	6.65238
31	-.343999	-.421073	.0468016	-.32191	-.443162	25.2659
32	-.171046	-.486205	.131067	-.123663	-.533589	19.876
33	1.51184	-1.49561	3.7092	4.01054	-3.9943	33.9661
34	-2.43974	1.41814	-.0797081	1.41979	-2.44139	91.1831
35	-1.55568	-5.92191	3.46748	.358691	-7.83628	28.9028
36	.307976	-7.78127	3.02152	1.31197	-8.78526	18.3807
37	.134508	-.0545434	4.38394E-03	.13461	-.054645	1.32769
38	-.249789	-.466366	.0426638	-.241687	-.474467	10.7518
39	.037511	-.231302	.0410738	.0436469	-.237438	8.49641
40	-.0581424	-.374578	.0500126	-.0504261	-.382294	8.77087
41	-.0744054	-.393027	3.94311E-03	-.0743566	-.393076	.708921
42	-.524188	-.694043	.0244671	-.520734	-.697497	8.03572
43	-.114392	-.358755	-3.42567E-04	-.114391	-.358755	-.0803214
44	4.05005E-03	-.298197	.0169384	4.99634E-03	-.299143	3.19759
45	4.96101E-03	-.297452	.0311493	8.13615E-03	-.300627	5.8202
46	-7.16134E-03	-.306522	.0296846	-4.24621E-03	-.309437	5.60867
47	-.0858434	-.407007	3.94311E-03	-.085795	-.407055	.703312
48	-2.61509E-03	-.361553	-4.63781E-03	-2.55518E-03	-.361613	-.740148
49	-.13926	-.473354	-.0463507	-.132949	-.479665	-7.7539
50	.0410046	-.280368	-.0268504	.0432325	-.282596	-4.74318
51	-.0399684	-.346619	-.0264617	-.0377017	-.348886	-4.89597
52	.0228325	-.275603	-.0193704	.0240845	-.276855	-3.69819
53	-.0121977	-.373265	-.0102085	-.0119093	-.373554	-1.61821
54	-.0343616	-.383202	-6.78355E-03	-.0342297	-.383334	-1.11361
55	-.0608926	-.404909	-.0396142	-.0563899	-.409412	-6.48465
56	.0320262	-.291182	-.0280401	.0344408	-.293597	-4.92172
57	-.0343435	-.345485	-.0333461	-.0308098	-.349018	-6.04906
58	.0248154	-.285407	-.0273775	.027213	-.287804	-5.00489
59	.018977	-.318011	-5.08547E-03	.0190538	-.318088	-.864385
60	.0274121	-.309663	-1.91259E-03	.0274229	-.309674	-.325088
61	-4.36914E-03	-.335666	-.0262536	-2.30158E-03	-.337733	-4.50295
62	.0203633	-.302185	-.0123899	.0208385	-.30266	-2.19656
63	-7.6952E-03	-.325142	-.028495	-5.15768E-03	-.327679	-5.08884
64	6.66654E-03	-.305394	-.0215415	8.14653E-03	-.306874	-3.93028

06/30/81 23:49:18
06/30/81 19:02:18

図-7 各要素の応力及び主応力 (タイプ3)

タワミ量を推定できると期待してよいものであろうか。実はこの場合数値がよく合ったのは、バックホーが埋戻し、転圧の段階で、何度も载荷することにより、塑性変形による充テンが進行し⁵⁾、その結果、最終的な測定値の中で弾性変形の占める部分が大かった¹³⁾ことが幸いしていると考えられる。土の塑性変形は弾性変形に比べるとその量は非常に大きい。特に泥炭や軟弱な粘土では、問題にならないくらいにオーダーが大きい¹¹⁾から、もし塑性変形を含む現場データの解析であれば、当然、二次元弾性をさらに深めた弾塑性解析のプログラムが用意されるべきものと考えられる。なお各要素の応力については、出力例を図-7に示す。表中 S1, S2 は主応力, SX, SY, TXY, THETA は $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \theta$ をそれぞれ表わす。

7. 受働抵抗係数の考え方

図-6の結果をみるとパイプの頂点(節点29)は支持のしかたによりかなり変位(沈下)がちがうことがわかるが、垂直タワミ率に関する限り、これらをもとにして spangler 式

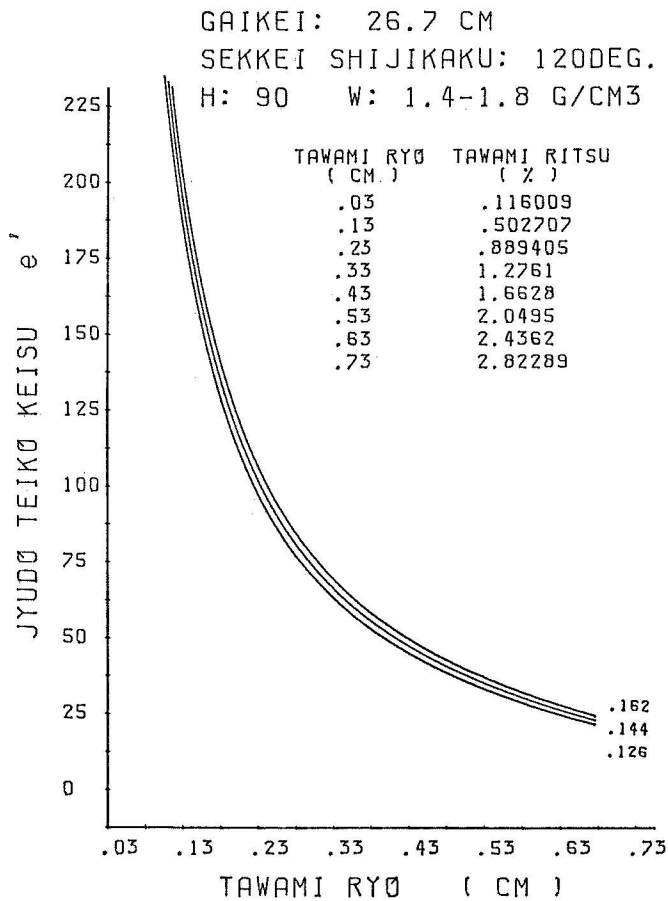


図-8 e' とタワミ量 (タイプ2)

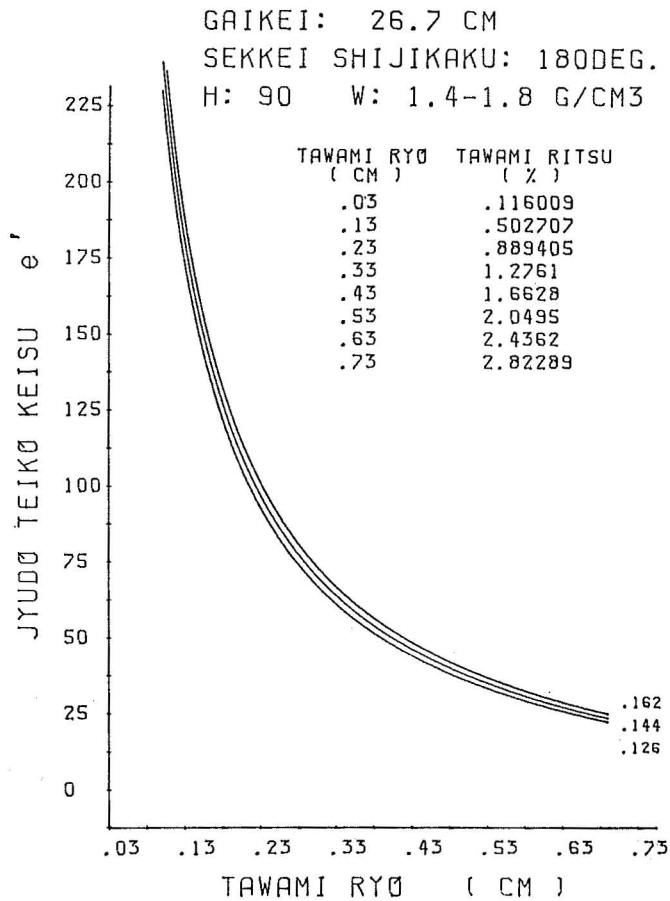


図-9 e' とタワミ量 (タイプ3)

から計算される受働抵抗係数 e' は、いずれも 100 を越える値で、全然、問題にならない¹²⁾。

ところで埋設溝の側壁を拘束して垂直方向の変位のみを許す条件にすると事情は一変する。特に泥炭を柔らかい状態とすると変位は大きくても変形は小さくなり、砂の支持の方が、逆に変形は大きくなる。このような側方拘束の条件によって e' を考えていくところに興味深い問題が内在するが、spangler 式そのものは e' とタワミ量が図-8、図-9 のような双曲線の関係になっていることを主張するにすぎない。ところで図-8 は spangler 式に現場設計条件をいれた場合の e' とタワミ量の間関係をマイコンによりプロッターに出力させたものである。作図のためのプログラムは別報¹⁴⁾ に掲載した。

側方拘束の問題は、埋設深の深い下水管などの場合、矢板引きぬきによるパイプ破損事故など、現実には重要な問題であるが、有限要素法では壁側節点を水平方向に固定、垂直方向を自由とすることにより解が得られる。但しこの場合は塑性変形を考慮しないと実測値に比べて計算値は非常に小さな値となろう。弾塑性解析か、或はヤング率のオーダーを

小さくするとといった便宜的方法も考えられるが、これらについては別の機会に報告したい。

8. 今後の問題

ここでは特にマイコン用に開発した有限要素法のプログラムと、それによる埋設パイプの解析結果と実測値の対比を行なった。なお室内実験の測定例とこのプログラムによる計算結果を比べると、塑性変形を考慮する限り、有限要素法による推定はかなり実用性のあることがわかったが、それらの報告は、ここでは割愛し別の機会にゆずりたい。

要素数をさらに増やして数百あるいは数千にするには、当然ディスクやカセットなど外部記憶装置を補助的に使用するユニット分割にたよらざるを得ない。ここでとりあげたバンドマトリクス法は、そのような目的にも都合がよいので、今後その方向へ発展させたいと考えている。

9. おわりに

現在利用している端末機の能力のためか、大型電算機のもつ特質と恩恵に充分浴していないことが、かえってマイクロコンピューターに有限要素法解析をなんとか、やらせようとする努力となった。しかし実際に使ってみると、マイコンにはマイコンとしての使い易さがある。そして少くとも、現在では端末よりは、はるかに大きな要素数をマイコンで扱っている。まもなく、ディスクやカセット利用による要素の拡大、計算結果をプロッターで直接描かせるなど、マイコン特有の小まわりのきく利用¹⁴⁾が可能になると考えている。

最後に、このような研究の機会の手筈を与えて頂き、色々の御便宜を頂いた山形県庁ならびに県赤川土地改良事務所の石堂昭三所長ほか関係各位、有益な示唆や助言を頂いた山形大学農学部、月館光三、吉田力の各氏、県村山平野土地改良事務所係長、鎌田隆二氏、修論及び卒論で御協力頂いた関口正則、柳瀬司郎の諸氏に深甚な謝意を表したい。

引用文献

- 1) 鎌田隆二, 志喜屋孝市, 青笹 要: 硬質塩化ビニル管の埋設挙動について——山形県庄内水田地帯における実験報告, 農土学会東北支部大会講演誌, 1981
- 2) Zienkiewicz O. C. (吉識, 山田監訳): マトリクス有限要素法, 培風館, 1975
- 3) 川本眺万, 林 正夫: 地盤工学における有限要素解析, 培風館, 1978
- 4) 土質工学会: 有限要素法特集号, 土と基礎, 23-1, pp 1-54, 1975
- 5) 東山 勇: レオロジーと塑性, 土の物理学 第7章, pp 147-198, 森北出版, 1979
- 6) 三本木茂夫, 吉村信敏: 有限要素法による構造解析プログラム, 培風館, 1970
- 7) 三好俊郎: 有限要素法入門, 培風館, 1978
- 8) 戸川隼人: FORTRANによる有限要素法入門, サイエンス社, 1974
- 9) 戸川隼人: マトリクスの数値計算, オーム社, 1971
- 10) 信原泰夫, 桜井達美, 吉村信敏: 有限要素法のプログラムデザイン, 培風館, 1972
- 11) HIGASHIYAMA I.: The Rheological Significance of Consistency Limits of Soil, Bulletin of the Yamagata Univ. vol. 8 No. 3, 1-18, 1980
- 12) 農林省構造改善局: 土地改良事業計画設計基準水路工(その2)パイプライン, pp 1-164, 1977
- 13) 宮内定基: 繰返し載荷による粘性土の挙動, 土壌の物理性, No. 40, pp 32-41, 1979

- 14) 東山 勇：実験室での身近なマイコン利用——グラフを書かせるには，TEAC Technical Report No. 4, pp 15-20, 1981

Summary

In the Shonai plane, the northern part of Japan, the peat soil layers lie under the paddy field of rice. The works of pipeline system for water feeding lately are performed with rearrangement and reclamation of such paddy fields.

Technical literature which deals with design of flexible buried pipelines can serve no information for predicting the deflection of one in peat soil layer.

The purpose of this study are to attempt to estimate the deflection in such a case by Finite Element Method analysis and to report its computer techniques used with a micro computer system.

New computer programs provide by Author, which are specially designed for a tiny micro computer with only 32K Expansion RAM. Attempts have been made, with success so far, to evaluate e' for design purposes as far as selecting carefully numerical factors of Young's modulus and Poisson's ratio in terms of soil properties such as texture, density, and moisture content.

However, programs will have to be improved and developed for the purpose to solve plastic or visco-elastic and plastic deformation.