

大阪大学工学部 正員 松井 保
同 同 阿部 信晴
同 大学院 学生員 ○山 本 武 史

1. まえがき

部分載荷をうける地盤の変形解析に、有限要素法が多く適用されている。これは、有限要素法が土の材料的非線形性・クリープ特性・降伏条件などを導入でき、いままで取り扱い得なかった問題を解析可能ならしめたためと思われる。しかるに、今日軟弱地盤上にも大型基礎構造物や高層工が施工されるようになり、このような場合の地盤には局部破壊や破壊に近い応力が作用し、地盤の変形が大きくなる。このような大きな変形を取り扱うには、材料的非線形性のみならず幾何学的非線形性の影響も考慮する必要があると思われる。そこで、本報告は、土の構成式としてメンブリッジ学説のエネルギー理論式を用い、有限変形理論にもとづく有限要素法を開発し、微小変形理論解析との比較において、有限変形理論解析の有用性を検討し若干の考察を加えるものである。

2. 有限変形理論にもとづく有限要素解析法

ここでは、非排水状態における飽和粘土地盤のせん断変形のみを取り扱う。その際、Christianによって提案された有効応力の概念にもとづく手法を、弾塑性解析に拡張した解析法を用いた。有限変形理論における幾何学的非線形性の取り扱いについて若干の説明を加える。

有限変形理論においては、ひすみ・変位関係式は、

$$2e_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j} \quad (1)$$

となり、変位の導関数の2次の項が入ってくる。ここではもはや荷重と変位の間の線形関係は成り立っていない。

いま、M番目の平衡状態(M番目の荷重段階)からNewton-Raphsonによる反復法を用いて、次の平衡状態(M+1)を求めるにあたり、状態Mにおける1回反復後の変形状態Iから変形状態(I+1)を推定する時には、次式を用いる。

$$\Delta F_I = K_I \Delta U_I \quad (2)$$

次に変形状態Iにおいて、式(2)によって計算した変位増分 ΔU_I を

もとに変形状態(I+1)におけるつり合いを考えると、式(2)で考慮しなかった非線形項が不釣り合い力として生じてくる。この不釣り合い力は、剛体変形を除去した正味の变形から真の節点力 F_{I+1} を求め算定する。つまり、真の節点力 F_{I+1} と載荷荷重 F_{M+1} との差が不釣り合い力 ΔF_I となり、この不釣り合い力を消去するために

$$\Delta F_I = K_{I+1} \Delta U_{I+1} \quad (3)$$

で節点変位 ΔU_{I+1} を求め、十分な精度をもつ平衡状態が満足されるまで反復計算し次の荷重段階に移行する。

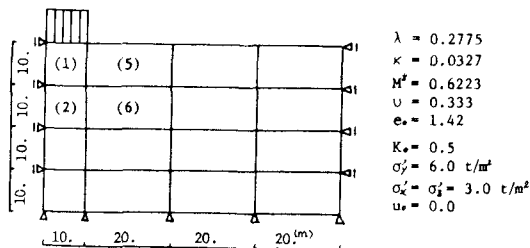


図 - 1

$\lambda = 0.2775$
 $\kappa = 0.0327$
 $M^2 = 0.6223$
 $u = 0.333$
 $e_0 = 1.42$
 $K_0 = 0.5$
 $\sigma'_v = 6.0 \text{ t/m}^2$
 $\sigma'_h = \sigma'_v = 3.0 \text{ t/m}^2$
 $u_0 = 0.0$

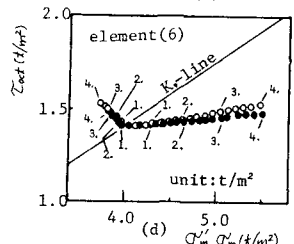
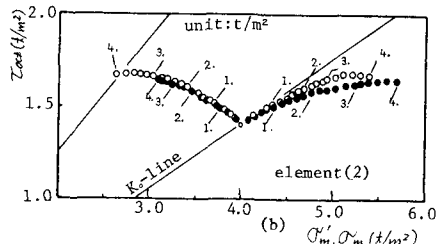
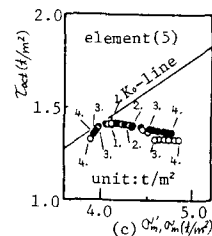
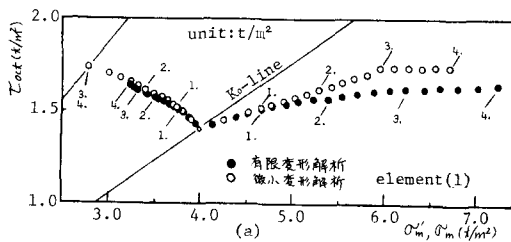


図 - 2

3. 解析結果と考察

解析は図-1に示すような16要素に対して行う。この際、各要素毎の挙動を有効応力の立場から定性的に検討し、その傾向を把握するために要素数を少なくしている。解析に用いた定数、初期応力状態、境界条件も図-1に示されている。最大載荷重は4 t/m²であり、慣用の計算法で求めた極限支持力の約22%程度である。

図-2(a),(b),(c),(d)は、それぞれ図-1の要素(1),(2),(5),(6)について、全応力および有効応力経路である。要素(1),(2)では部分載荷重が大きくなるにつれて、有限変形解析と微小変形解析の差は顕著であるが、要素(5),(6)では両解析の差は比較的少なくなっている。これは、要素(1),(2)では応力比が比較的高く、とくに微小変形解析の有効応力経路が破壊線に達しているが、要素(5),(6)では応力比が比較的低いことに起因しているであろう。

図-3、図-4、図-5は、それぞれ部分載荷重1 t/m²、3 t/m²、4 t/m²における応力比分布である。これらの図において、(a)は有限変形解析、(b)は微小変形解析である。これらの図より、載荷重の小さい1 t/m²のときは、両解析の差はあまり認められないが、載荷重3 t/m²および4 t/m²では微小変形解析の載荷重直下で応力比が非常に高くなり、両解析の差が明確に表われていることがわかる。これらの傾向は、幾何学的非線形性を考慮していない微小変形解析では、載荷重3~4 t/m²程度で要素が破壊することによると思われる(図-2参照)。

図-6は、載荷中央部の沈下量である。この図より載荷重の小さい時には両解析ともほぼ同一の挙動を示しているが、載荷重約3 t/m²から両解析の差が表われる。すなわち、微小変形解析による沈下量が不連続的により大きくなる。これは、載荷重3 t/m²で微小変形解析の要素(1)が破壊に達することによると思われる。このときの両解析による沈下量の差は約7%程度である。

図-7(a),(b)は、載荷重4 t/m²での有限変形解析と微小変形解析の過剰間隙水圧分布である。微小変形解析では要素(1),(2)が破壊しているため、載荷重直下では微小変形解析の方が、有限変形解析より高い間隙水圧を示しているが、他の領域での差は比較的少ない。

以上の結果から、要素の応力比が高くなると、有限および微小の両解析の差異が表われ、また本解析例で極限支持力に近い荷重を加えた場合には、さらにその差が拡大するものと推察され、有限変形解析の有用性が示唆される。今後、要素数を多くし、載荷重を大きくして、さらに検討を加えたい。

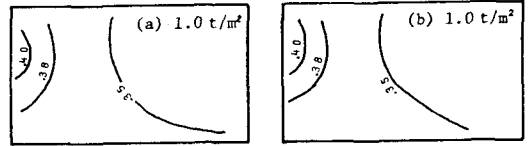


図-3

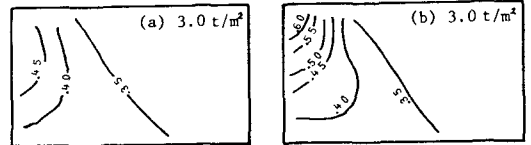


図-4

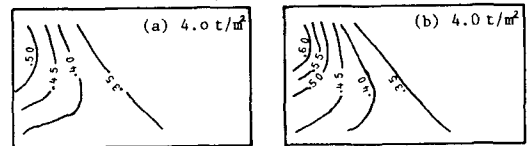


図-5

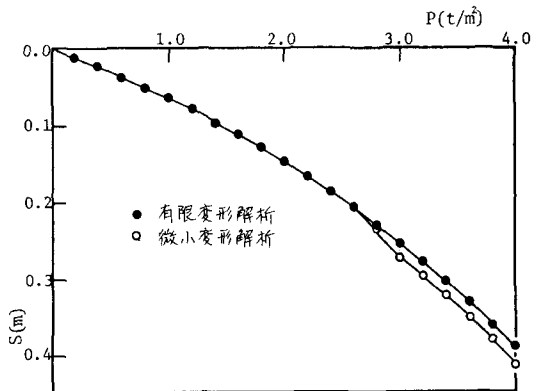


図-6

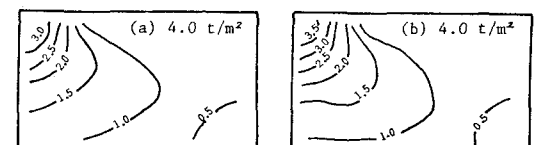


図-7

<参考文献>

- (1) 松井・阿部・山本「局部載荷における飽和粘土地盤の沈下と間隙水圧挙動について」第12回土質工学研究発表会、1977
- (2) 松井・阿部・藤原「有限変形理論に基づく飽和粘土地盤の有限要素解析」第11回土質工学研究発表会、1976