

京都大学工学部 正員 赤井 浩一

東電原子力研究所 正員 大槻 英夫

1. まえがき 載荷をうける地盤の破壊形式としては、一般に全般せん断破壊と局部せん断破壊の両者が考えられる。この相違はおもに地盤を構成する土の応力-ひずみ関係に依存していると考えられるが、普通硬い粘土やよく締まった砂では全般せん断破壊を示し、柔らかい粘土やゆるい砂では局部せん断破壊を示すといわれている。

従来から剛塑性理論にもとづく支持力論は、おもに全般せん断破壊を取り扱っているものが多いが、これは破壊にいたるまでの変位量が比較的小さく、突然破壊を起こすことからある程度妥当であると考えられる。一方、局部せん断破壊について剛塑性理論を適用することは、その破壊の機構からみて無理があり、この場合にはむしろ弾塑性理論にもとづく支持力論が適用される。

本研究では、比較的大規模な模型土槽と静的・動的載荷装置を用い、地盤内応力分布と極限支持力に関して実験的に考察し、さらに載荷による地盤内塑性域の発達の様子も有限要素法を用いて調べた。

2. 実験装置と方法

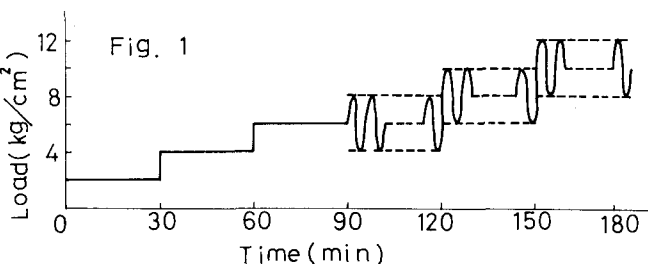
(1) 実験装置 地盤材料としては既報¹⁾²⁾の砂質ロームと砂の2種類を用い、これらを最適含水比付近で締固めて地盤を作成した。使用した大型土槽は縦横2 m、高さ1.2 mの鋼製で、土槽内には底から1.05 mまで土を入れた。載荷装置は2種類あって、容量2.5 tのものは静的および動的荷重を載荷できる電子油圧式負荷機構を有している。一方、容量50 tのものは油圧ジャッキによる静的載荷を与える。載荷板は直径10 cm、20 cmおよび30 cmの3種類を用い、最初のものを除いて接地圧分布の測定も行なった。荷重の測定にはロードセルを、また載荷板の沈下量およびその側方の地盤の表面変位の測定にはダイヤルゲージと差動トランスを用いた。一方、地盤内応力の測定には直径2 cm、厚さ3 mmの土中土圧計を4個、また載荷板の接地圧の測定にははめ込み型の土圧計を4個用いた。これらの土圧計はいずれも半導体圧力変換器であって、バランスユニットを通じて記録計に直結した。

(2) 実験方法 実験は地盤内応力分布を求めるための載荷試験と、極限支持力を得るための載荷試験とに分けられる。

応力分布を求めるための試験では、砂質ロームに対して直径 $2R=10\text{ cm}$ および20 cmの2種類の載荷板を用い、前者の

載荷板では深さ $z=0.5R$ 、 R および $2R$ で載荷板中心 $r=0$ 、 $0.6R$ および R の位置で土圧分布を測定し、後者の載荷板でははめ込み型の土圧計により接地圧分布をも測定した。また砂では $z=1\text{ cm}$ 、 $0.5R$ 、 R 、 $2R$ および $3R$ の位置で土圧分布を測定し、さらに接地圧分布の測定も行なった。

極限支持力を得るための試験では、まず静的載荷試験として砂質ロームでは一段階の荷重を 2 kg/cm^2 とし、30分間ずつ段階的に載荷した。一方、砂では一段階の荷重を 0.5 kg/cm^2 とした。次に動的載荷試験では、Fig. 1 に示すような載荷方式を採用した。



3. 実験結果と考察

(1) 接地圧分布 載荷板にはめ込んだ土圧計によって得られた砂質ロームの接地圧分布の一例をFig. 2に示す。これより荷重が大きくなるにつれて接地圧が等分布化する傾向がみられる。さうに処女載荷の場合には、荷重を増すにつれて載荷板周縁部での応力が増加し、Bous-sinesqの弾性解に近い分布を示す。しかし繰返し載荷の場合には、低い荷重レベルでも周縁部での応力は減少して放物線形となる。

砂地盤では荷重レベルが低いところで接地圧は等分布状であるが、粘着力がないので極限荷重付近になると載荷板周縁部での応力が急速に減少し、載荷板の中心直下に応力が集中する傾向がことに強い(Fig. 3 参照)。

(2) 地盤内応力分布 砂質ロームでは $z=0.5R$ 程度の深さまで、載荷板周縁部での降伏の影響で荷重強度によって地盤内応力分布が変化するが、 $z=R$ より深いところでは荷重強度による応力分布の変化はみられず、等分布化が進む。一方、砂では $z=0.5R$ についてFig. 4に示すように、どの深さでも放物線分布を示す。すなわち極限荷重の近くになると載荷板周縁部で応力が減少し、荷重直下への応力集中が顕著にみられ、特に $z < R$ の部分では破壊時には中心部の応力が上載荷重強度の2倍も超過する。これらの分布特性より、砂質ロームでは部分的に地盤破壊を生ずる程度であるが、砂では $z \leq R$ の深さまで全般的に破壊することが推定され、地盤構成土の粘着力の有無による破壊のパターンの相違が顕著である。

(3) 載荷板の沈下特性

沈下-時間曲線の一例として、動的載荷を与えたときの砂地盤の挙動をFig. 5に示す。これは直径20cmの載荷板を用い、荷重強度 3 kg/cm^2 から振動数5 cpsで振動荷重をかけたものである。これに

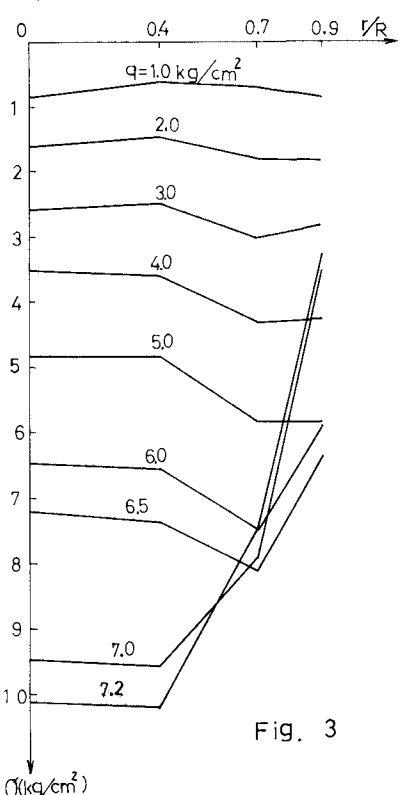
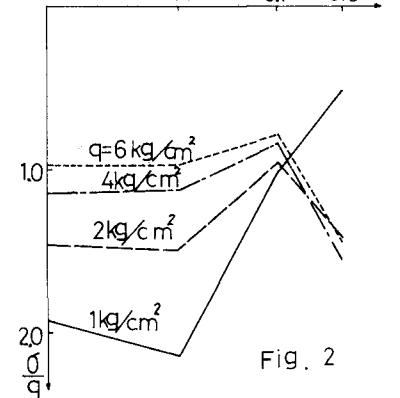
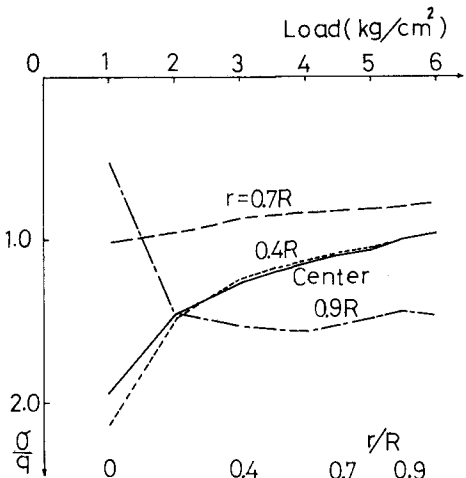


Fig. 4

Fig. 3

よると、動的载荷の直後に急激な沈下を生じ、この傾斜は振動数が高いほど顕著である。これは地盤が降伏して塑性域が発達していたとしても、静的荷重のもとで土の流動が十分行われず不安定な状態にあったものが、振動も与えることによって粒子の移動が容易となり、側方流動を生じたものと考えられる。この種の载荷試験に対する荷重-沈下曲線は Fig. 6 のようである。

(4) 極限支持力

先述したように、一般的に破壊の形式として砂質ロームでは局部せん断破壊、砂では全般せん断破壊を示すので、極限支持力に対する考え方もおのずから異なってくるを得ない。

Fig. 7 は砂地盤に対して行った実験から、载荷の速さと極限支持力との関係をプロットしたものである。また Fig. 8 は地表面に現われた破壊域の大きさと载荷の速さとの関係である。これらの図から、载荷の速さとともに極限支持力はいく分上昇し、破壊域が減少する傾向がみられる。

4. 有限要素法による弾塑性学的解析

有限要素法を軸対称の载荷試験の問題に適用し、地盤構成土の応力-ひずみの非線形な関係と Mohr-Coulomb の破壊規準を用いて弾塑性解析を試みた。载荷板の大きさは直径 20 cm とし、電子計算機 (FACOM 230-60) の容量から、深さ方向、半径方向ともに载荷板中心より 60 cm のところで変位がないものと仮定した。要素の分割は要素数 153、節点数 91、境界条件として载荷板のところで強制変位を与え、修正弾性係数を用いる荷重増分法による。

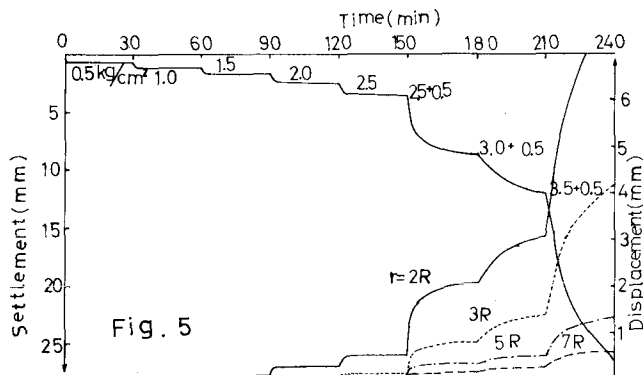


Fig. 5

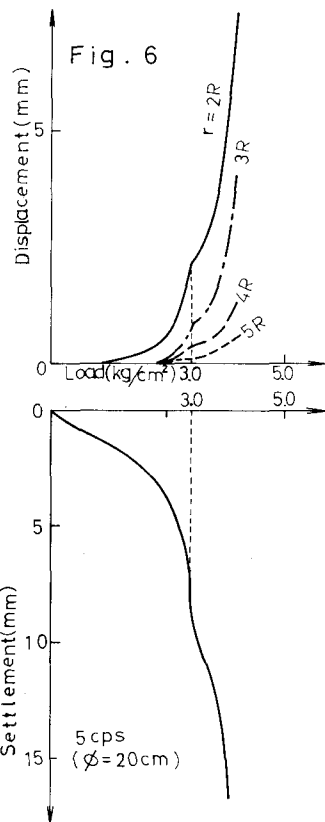


Fig. 6

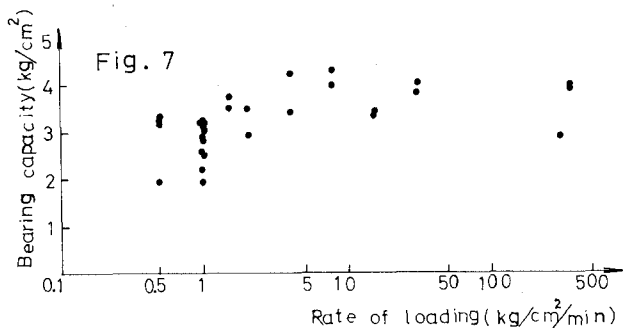


Fig. 7

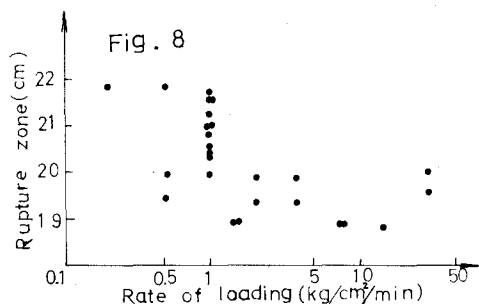


Fig. 8

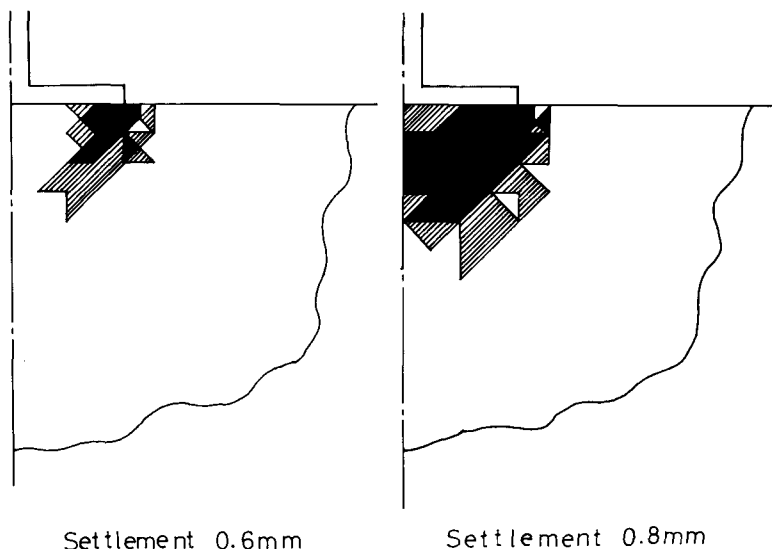


Fig. 9

石が真ローム地盤に対する計算では、沈下量 $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ ごとに計算したが、結果の一例をFig. 9に示す。この図で黒く塗りつぶした部分が塑性域であり、斜線部分はゆるみ度 0.7 以上の非弾性域を示す。塑性域の発達方向はFrölichの理論が教えるように、荷重端から中心部へ向かう。ある塑性荷重において塑性域は対称軸上で交わり、載荷板の底面近傍では非線形を示す領域がわずかに存在するだけとなる。この点での荷重は星型による降伏荷重と一致するが、荷重-沈下曲線ではかなり非線形部分に入った点に相当する。さらに変位を増加させてゆくと、この塑性域は徐々に拡大してゆく。

Fig. 10は $\delta = 0.04R$ に対する地盤内応力分布をプロットしたものであり、曲線は半無限体に対する弾性解を示す。第1段階での荷重強度 0.20 kg/cm^2 での計算も線形弾性論にもとづくものであるから、これによって有限要素法の精度を知ることもできる。一般に $\delta \approx 2R$ なる大きい深さのところでは両者による計算結果は互によく一致する。

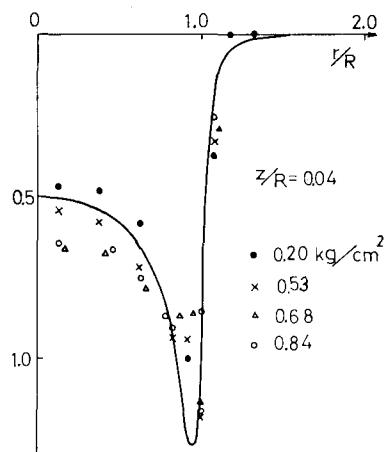


Fig. 10

この実験には江口潔・小川次郎両君の助力を得たことに付記して感謝の意を表す。

- 1) 赤井浩一・塩見哲：路床・路盤構造内の応力分布に関する実験的研究，土木学会第24回年次学術講演会講演集Ⅲ-34，1969，pp.103-106.
- 2) 赤井浩一・塩見哲・木内勉：Model Studies on the Stress Distribution in Layered Soil Systems，土木学会論文報告集185号，1971，pp.83-94.