

ファゴット・シート工法の基本的原理と効果

齋藤 二郎

福住 隆二
(土木本部技術課長)

西林 清茂

岡田 純二

概 要

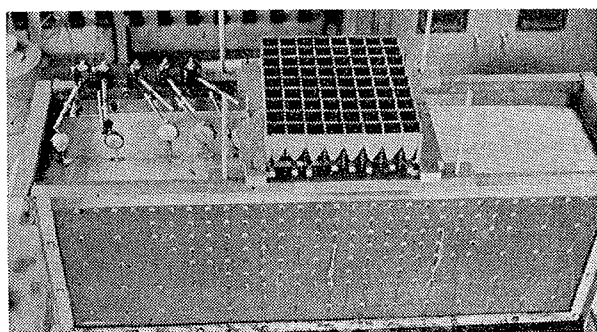
先の研究所報 (No.1) に引きついで、軟弱地盤表層処理工法の一つであるファゴット・シート工法に関する報告を行なう。この工法は軟弱地盤上に高い引張力をもつビニロン・シートをヘドロ上に一面に布設し、その上に良質土のまき出しを行なって土砂の陥入をふせぎ、適当な均一厚さの盛土を造成して人車や施工機械の搬入を可能にするものである。

1. まえがき

前回の報告では簡単な室内実験によってこの工法の基本的原理と効果について考察したが、今回はそれをいっそうくわしく調べるために、実験槽内に高含水比の粘土地盤を作成し、散弾を用いた載荷実験を行なったものである。この原理と効果を解明するためには、粒状載荷体に対する地盤内応力、地盤の支持力、および地盤の挙動について解析する必要がある。今回の一連の実験検討はシートの布設有無の両者について、粒状載荷体が形成された場合の地盤の挙動を調べ、その比較検討および実験結果と理論解との比較などによって解析するとともに、粒状載荷体の持つタワミ性および伸びが地盤にどのような影響をおよぼすかを検討することにある。

2. 実験装置と測定

2.1. 実験槽



図一 実験槽および載荷装置

実験槽は長さ160cm、幅40cm、高さ60cmの鉄製であり、前後側壁には厚さ15mmの透明アクリル板を使用しているため地盤の挙動状態を観察、測定できる。また、左右側壁の頭部にはシートの両端を拘束するためシートに内部応力を与えるために端止め装置および引張装置をとりつけている。

2.2. 載荷装置

載荷は図一に示すように50×50mmのます(落下口は10×10mm)を数多く組合わせた形(400×450mm)の装置を用いた。

載荷方法は、まず、落下口にフタをあてて各ますの中にφ1mm程度の鉛の散弾を入れておき、つぎに各列のフタを横にずらせば、それぞれ1列分の散弾が粘土地盤上に落下して最終的に等分布載荷体を形成する仕組みである。このとき載荷幅全体に均一荷重の載荷体が形成されるように、まえもってますの各列の落下順序、散弾量の調整をしておく。なお一般に散弾を盛上げると法面はゆるい勾配となるので形成された法面が約1:1の勾配となるように各荷重段階ごとにブリキ製のアングルを用いた。

2.3. 粘土試料

粘土試料はGs=2.71、LL=69.1%、PL=26%の福山埋立地のもので、これをW=90%の均一試料に調整した。

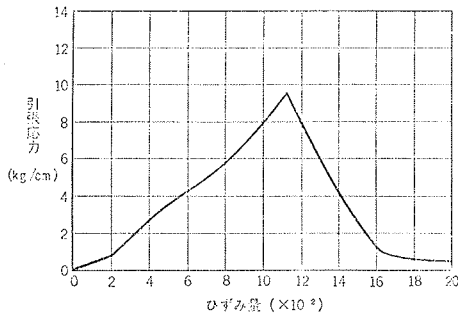
この程度の高含水比の粘土になると、通常の力学試験によって強度を求めることはきわめて困難である。そこで参考までに粘土試料の中に鉄板をさし込んで24時間放置したあと引抜き、そのときの抵抗力を鉄板の

表面積で除して求めた結果、強度は 6.7 g/cm^2 であった。

2.4. シート

現在、実際に使用されているシートは引張強度 $50\sim 150\text{ kg/巾}3\text{ cm}$ の6種類である。しかし模型実験であるので強度の低い 10 kg/cm のものを用いた。

使用したシートの一部を切り取って試験した引張強度—ひずみの関係を図—2に示す。



図—2 使用シート引張応力ひずみ

2.5. 土粒子変位測定

地盤内粒子の変位の量を測定するにはポリウレタンを加工した径 10 m/m 、厚さ 5 m/m の測定片をアクリル板内壁の各点に設置した。この点には直径 3 m/m 程度の穴が開けてあるので、測定片を設置するとき、まず測定片の片面に少量の水溶性ノリをつけて各点に接着させ、つぎにこの穴の外側からクギをさし込んで一時的に固定する。ついで粘土試料を充填し、24時間経過したあと測定片をわずかだけアクリル面から離すように抜きとればアクリル面と測定片の間隙が土中水によって満たされるので、測定片は力が加われば自由に動き得るようになる。なお実験中は上記の穴に栓をしておいた。

2.6. 側方地盤沈下、浮上がりの測定

塑性流動に伴なう側方地盤の隆起および沈下の測定はダイヤルゲージを使用した。

この他、シートを布設した載荷実験の場合には、シートの伸びの測定、粘土表面へ直接載荷する場合にはアクリル板側壁に接する部分の粘土表面に $5 \times 5\text{ cm}$ 程度の布切れを連続的に設置し、載荷体の拡がり程度を測定した。

3. 実験の種類と実験

実験の目的はファゴット・シート工法の原理とその効果を解明することにある。したがってシートの有無、載荷方法の異なる4ケースの載荷実験を実施し、比較検討を行なうことにした。

(イ) 粘土表面直接載荷の場合

(ロ) シートを布設し、その両端を拘束しておいて載荷する場合。

(ハ) 粘土表面に直接、不均等な載荷をする場合。

(ニ) シートを布設し、シートの内部引張力を与え載荷する場合。

(イ)(ロ)の地盤の挙動状態、支持力の差からシート介在の効果を検討することができる。

(ハ)は実際の撒き出し先端部分に発生する現象を想定したもので、他の場合と同一載荷幅に2回に分けて載荷する。

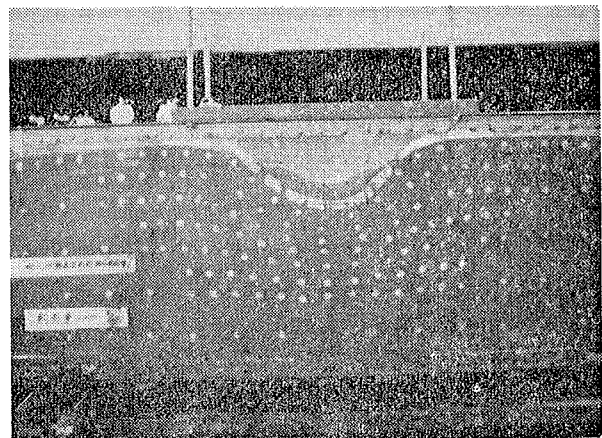
(ニ)は(ロ)と同様、粘土表面上にシートを布設し、そのシートに 2.5 kg/cm^2 の内部引張応力を与えて載荷するもので、シート引張力の効果がさらに明確にされると思われる。

実験の方法は実験槽に高さ 50 cm まで粘土試料を詰めて地盤とし、中央部の 40 cm を載荷面とする1段階の載荷重は 15 g/cm^2 で $P=15, 30, 45, 60, 70\text{ kg/cm}^2$ と段階的に荷重を増やしてゆく。

4. 実験結果

4.1. 地盤内土粒子挙動状態

地盤内土粒子の変位はいずれの場合も全体的には共通した性状を示している。載荷面中央附近では鉛直下方向へ、載荷体の端付近では円弧を描き、地表面に近づくにしたがって水平と 45° に近い角度で斜め上方へ変位する。しかし、それらの変位方向および変位量は実験条件、荷重の大きさによって異なり、特に載荷面に近い部分や側方地盤の地表面に近い部分の差異が目立つ。そこで土粒子の変位方向および変位量の測定結果から各実験の土粒子の変位特性について以下比較検討してみる。



図—3 土粒子変位状態 (粘土表面直接載荷 $P45\text{ g/cm}^2$)

4.2. シート布設有無による比較

図—3は $P=15, 30, 45\text{ g/cm}^2$ を粘土地盤上に直接

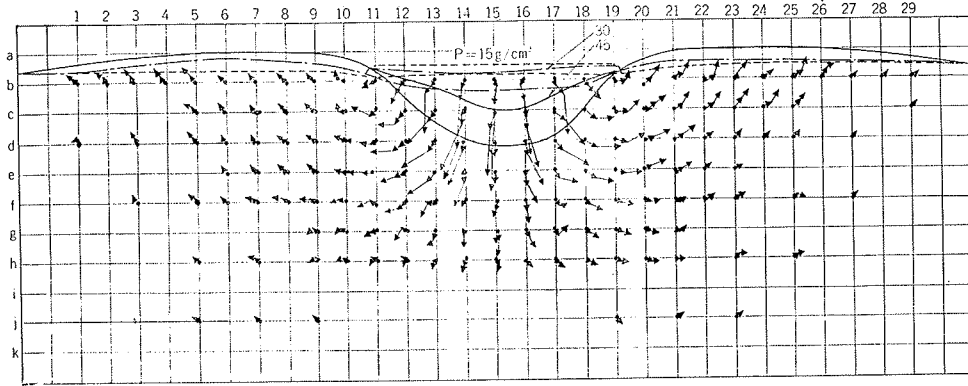


図-4 粘土地盤表面直接載荷時の土粒子変位状態

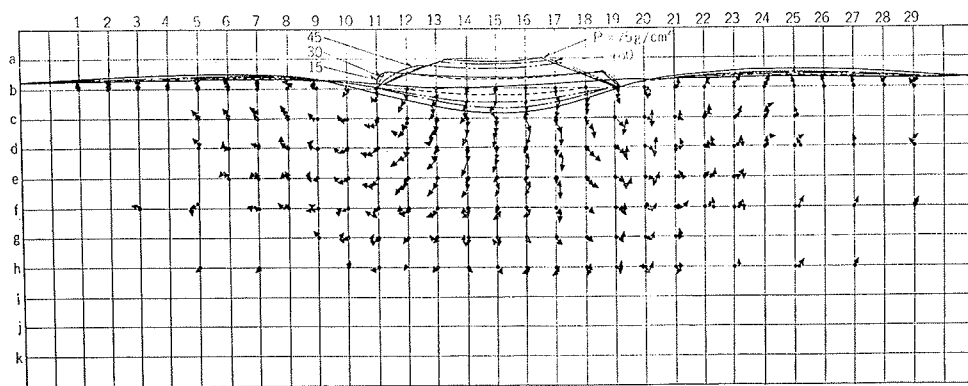


図-5 シート布設時の土粒子変位状態

載荷したときの土粒子の変位状態を示したものである。P=15.30 g/cm² までは側方地盤内の変位もわずかで載荷体の沈下も小さく、その形状を保っているが、P=45 g/cm² になると地盤内にせん断破壊が発生して土粒子の変位量が大きくなり、載荷体は沈下してその形状を保持し得ない状態に沈下、崩壊する。このときの土粒子の変位曲線を描くと、載荷面の中央附近のごく一部を除けば大部分が斜め下方向へ円弧状になっており、地盤は、もはや荷重を支持し得ない状態にあることを示している。特に載荷体の端の付近では地表面にクラックが発生しているが、変位曲線が載荷体側へ巻きこまれるような円弧になっていることから、地盤の表面に引張力が働いたものと判断される。なお荷重を P=60 g/cm² に増加すると載荷体は一塊まりとなって完全に陥没してしまった。一方、シートを布設したときの土粒子の変位状態を図-5 に示す。この場合も土粒子は荷重の増加につれて変位しているが、その変位量および側方地盤で斜め上方へ変位する角度（変位方向の水平となす角度）はいずれも小さい。しかも載荷面下の土粒子の変位方向は、ほとんど鉛直であるので、まだ載荷体を支持し得る状態にあるといえる。このような両者の違いは図-6 に示す載荷体中央部の荷重、沈下の関係、および図-7 の側方地盤隆起状態を見て明らかである。粘土表面に直接載荷した場合には、

P=30 g/cm² 程度で沈下が急激に増加していることから判断して、地盤は塑性状態に入ったものと思われる。一方、シートを布設した場合には、沈下量はかなり小さく、しかも荷重と比例的に増大しているので、地盤の沈下がシートの伸び、いかえれば、シートの引張強さに制御されているものと判断される。

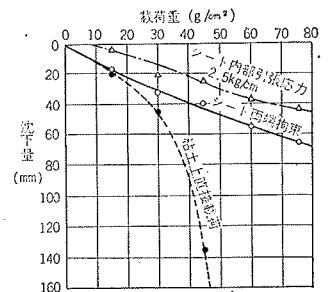


図-6 載荷体中央部の荷重と沈下

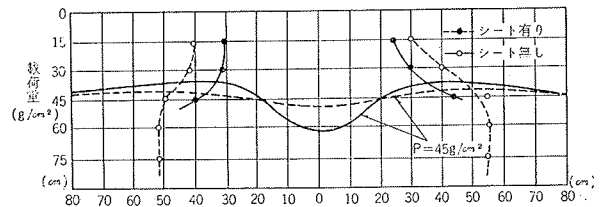


図-7 側方地盤の隆起状態

4.3. シート引張力による比較

前もってシートに内部引張応力 2.5kg/1cm を与えて同様の実験を行なった結果を図-8 に示す。図からわかるように単にシートの端を拘束した場合と比較して、土粒子の変位量および地盤の沈下は全体的に小さくなっており、シート引張力の効果が一層明確にあらわれている。

ただし土粒子の変位曲線は両者とも似かよった性状である。

4.4. 粘土表面直接載荷方法による比較

粘土地盤表面の同一載荷幅に一度に載荷した場合と数回に分けて載荷した場合とでは地盤内土粒子の変位状態に差異が生じる。(図-9)

載荷幅30cmに P=15, 30, 45 g/cm² を順次載荷したときの地盤の挙動を載荷幅 40cm の場合と同一載荷重の条件のもとに比較すれば、

(1)載荷面下および側方地盤とも土粒子の移動する範囲

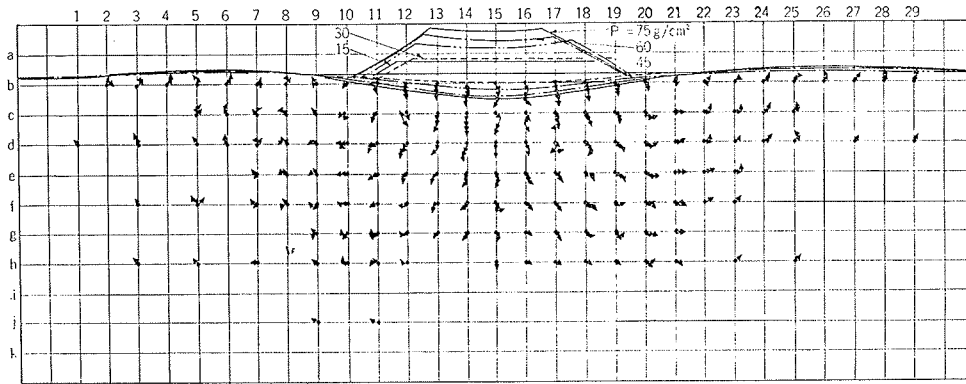


図-8 シートに内部応力(2.5kg/1cm)を与えた場合の土粒子変位状態

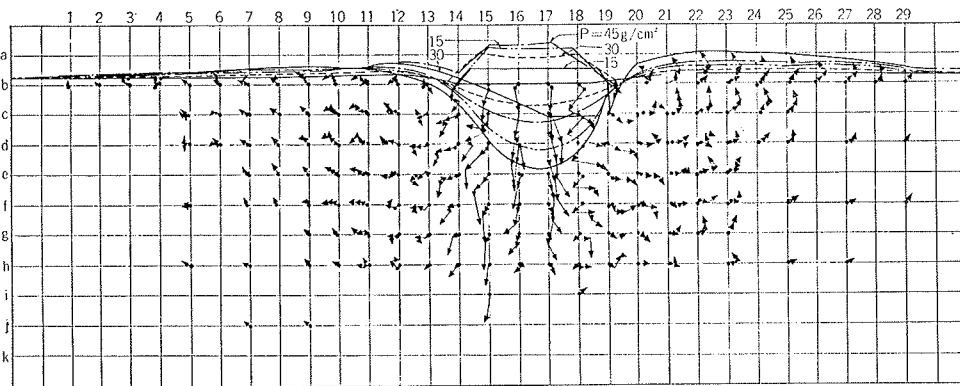


図-9 不均等載荷時の土粒子変位状態

は小さいが、その変位量は大きい。

(ロ) 載荷体の端附近の土粒子変位曲線は他のいずれの実験の場合よりい小さな曲率半径の円弧を描いて載荷体側へ急激に巻きこまれている。

(イ) その結果、載荷体は中央部の沈下が大きくなり、より不安定となっている。

4.5. 実験値と理論解との比較検討

理論解は解析の都合上、台形荷重を等分布帯状荷重に変換して行なった。

最大主応力 σ_1 の作用方向は鉛直方向とのなす角を Δ とすれば常に $\tan \Delta = \frac{2\tau_{x,z}}{(\sigma_z - \sigma_x)}$ で表わされる。また最大せん断応力 τ_{max} の作用方向は σ_1 の作用方向と常に 45° の傾きをもつ。ただし、上式によって得られる σ_1, τ_{max} の作用方向は半無限弾性体上に剛性の帯状荷重が載荷されたときの解であって、塑性変形を生じる粘土等の軟弱地盤上の粒状台形荷重が載荷された場合とは異なるわけであるので、定性的にその性状を検討するにとどめることにする。

たとえば、シート布設、 $P=45 \text{ g/cm}^2$ の場合について検討してみよう。図-10, 11はそれぞれ σ_1, τ_{max} の作用方向と比較したものである。実験で求めた土粒子の変位は載荷面の下附近では σ_1 の作用方向とほぼ同傾向を示し、特に載荷面の中央附近での一致が目立

つ。しかしながら、側方地盤では σ_1 の作用方向とはまったく一致しておらず、 τ_{max} の作用方向とはかなり一致している。また、載荷体端の下では σ_1, τ_{max} の両作用方向とも異った両者の中間方向に変位している。

以上の比較検討結果から、せん断破壊が発生し、地盤が塑性状態になった場合、土粒子は載荷面の近くでは σ_1 の影響、側方地盤では τ_{max} の影響を強く受けてそれらの作用方向に変位していることが判明する。

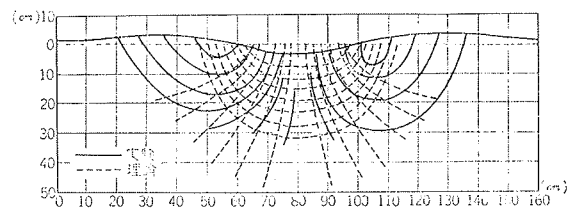


図-10 主応力 σ_1 の作用方向と土粒子変位方向

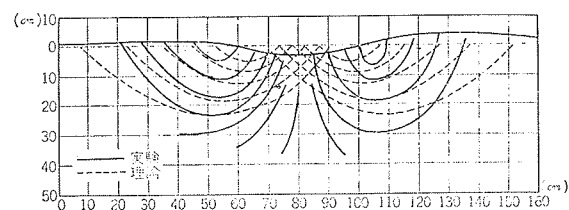


図-11 最大せん断応力 τ_{max} の作用方向と土粒子変位方向

5. ファゴットシート工法の原理と効果

以上の実験結果にもとづいて本工法の原理と効果を盛土安定効果と支持力効果のつの観点から考察する。

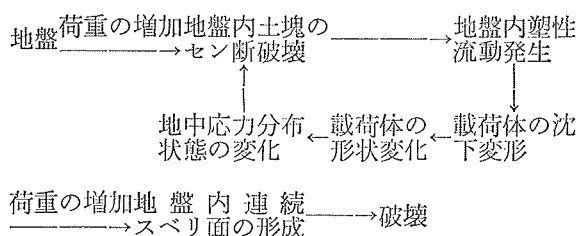
5.1. シートによる盛土安定効果

まず、載荷体にタワミ性がある場合、そのタワミ性が地盤の破壊におよぼす影響と、タワミ性と拡がりの両性質を兼ね備えた載荷体が地盤におよぼす影響を検討する。

5.1.1. 載荷体のタワミ性が地盤におよぼす影響

検討する問題はタワミ性をもった載荷体に共通したものである。

実験の結果、土粒子の変位方向は載荷面の直下では主応力 σ_1 の方向、側方地盤では最大せん断応力 τ_{max} の方向であることが明らかにされた。ここに σ_1 は載荷面から垂直下方向に作用することを考えあわせれば載荷体の底面が中央部の沈下を大とする弦状に変化した場合、 σ_1 の作用方向も変化する (τ_{max} の作用方向も当然 σ_1 と同様変化する)、図-12のごとくすべり面群は変形前にくらべて測定地盤内にひろがり、すべり端の位置も載荷体側へ近寄ってくることになる。すなわち「地中応力分布は載荷体の沈下形状によって変化する」ことがわかる。いかえれば載荷体がタワミ性を有している場合の地盤の破壊現象は次のように説明できる。



すなわち、タワミ性によって載荷体が沈下変形するにしたがって地中応力分布の影響範囲が側方地盤内に

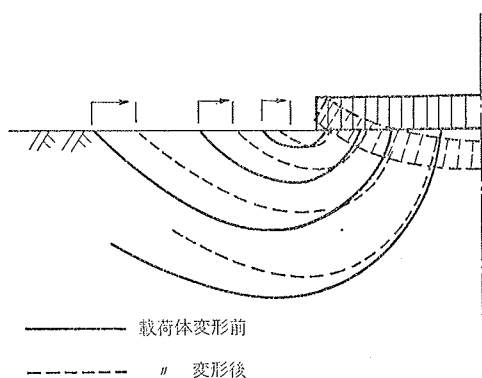


図-12 載荷体変形前後のすべり面の変化

拡大され、地盤の破壊が促進されるものと考えられる。

5.1.2. 載荷体の拡がりが地盤の破壊におよぼす影響

載荷体の持つ拡がりの性質が地盤の破壊におよぼす影響は図-13に見られるように載荷体と地盤との接触面の部分で、載荷体が引張力を受けた場合、容易に拡がって沈下変形しやすくなり、その結果、5.1.1で述べたように地盤の破壊が早められることである。

実際の場合には、載荷幅の大きい粒状載荷体を軟弱地盤上に直接形成することはきわめてむずかしく、載荷幅の小さい不規則な集中荷重を組合わせた状態でまき出さざるを得ないので、今まで以上に複雑な地盤状態となり、さらにその上にまき出しが行なわれれば盛土荷重は地盤中に陥没してしまうことになる。また、たとえ載荷体が地盤上に形成されたとしても拡がりの性質によっていくつにも分断されて一体性を保つことができなくなり、個々の端部で小さいすべり破壊を生じて陥没することになる。

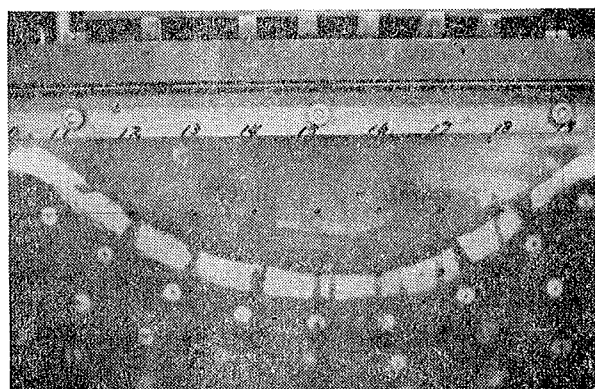


図-13 粒状載荷体の拡がり(粘土表面直接載荷)

5.1.3. シート引張力による支持力効果

以上の結果、シートを布設した場合の効果は(1)シートと土との間に摩擦が働くので、載荷体は拡がりを制御されて一体を保ち得ること、(2)載荷体は厳密にいえば、シートの伸び分だけしか沈下変形できないことになり、したがって地盤の沈下は少なく、載荷体変形による地盤の破壊促進が防止されることである。

5.2. シート引張力による支持力効果

軟弱地盤上に粒状載荷体が成形されたとき、その荷重が限界荷重より小さい間は地盤の圧縮によって沈下するので、シートに発生する引張力も小さく、地盤の支持力分が大である。しかし限界荷重以上になると地盤内に塑性流動が発生して載荷体は沈下変形(側辺では地盤の隆起)を大きくしようとする。この時点において始めてシートに引張力が発生し、シートはハンモック的支え効果と側辺の押え盛土的效果によって荷重を支持することになる。すなわち図-14に示すように荷重が限界荷重以上になれば、増加荷重分(塑性流動

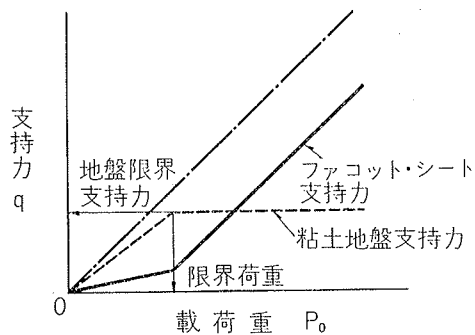


図-14 シートの支持力発生模式図

によって地盤の支持力が低下していれば、それ以上の荷重)は主にシート引張力によって支持される。そして荷重が大きくなればシートの引張力もある限界まで対応して増大する。したがってシートの引張力が大きいほど、その効果は著しいものとなる。ここにシートの引張力は地盤表面とシートとの摩擦力に起因しているので、載荷体の周辺部にシートと地盤が接触するある限界の面積が必要である。

6. 結論

以上の実験の結果、盛土のようにタワミ性と拡がりの性質を兼ね備えた粒状物が軟弱地盤上に直接載荷された場合。

①載荷体のタワミ性は載荷体自身を沈下変形さすばかりでなく、地中応力分布をも変化させて地盤の破壊を促進させることになる。

②載荷体のタワミ性に拡がりの性質が加われば、①の現象がさらに促進されるばかりでなく、たとえ軟弱地盤上に載荷体が形成されたとしても、いくつにも分断されて崩壊しやすくなることが明らかとなった。そこでこの事態を防止するためにシートを布設した場合には

①載荷体とシート間に働く、マサツ力によって拡がりの性質が制御され、載荷体は一体性を保つ。

②載荷体の沈下変形はシートの伸びに制御されるので地盤の破壊の促進が防止される。

③シート引張力による支え効果と側方地盤押え盛土的效果は、土砂まき出し時の集中荷重に対しきわめて大きく、それだけ余分の載荷が可能である。

上記、①②の盛土安定効果および③の支持力効果によって均一厚の盛土形成を可能にし、形成後は盛土の一体性を保たせることになる。