



所属名：広島大学大学院 国際協力研究科  
発表者：山本春行

### 1. はじめに

従来、災害時対応の仮設資材としてのみ用いられていた「土のう」材料の性能をグレードアップし、性能評価した地盤補強工法（ソルパック工法）は、軟弱な地盤材料ならびに建設残土やコンクリート解体廃棄物等を完全に包み込むことにより支持耐力を驚異的に増大させ、安価で環境に配慮した本設の建設資材として活用できる<sup>1)</sup>。ソルパックとはこのように性能評価された「土のう」のことであり、本開発研究は構造物基礎下の地盤補強に適用していくことを目指している。また、中詰め材を完全に包み込むことにより、「土のう」長辺の直交方向からの載荷力に対して、拘束効果を最大限発揮する。したがって、軟弱地盤の基礎・地盤補強にソルパックを敷込むことは、上部構造物からの荷重により押さえ込まれ拘束されるため、ソルパックの能力を最大限発揮させる一番効果的な利用法であるといえる。

### 2. 補強原理

図-1 に示す二次元モデル化した「土のう」に鉛直外力  $\sigma_v$ 、ならびに水平外力  $\sigma_h$  が作用する状態を考える ( $\sigma_v > \sigma_h$ )。このとき、「土のう」材に張力  $T$  が発生し、中詰め材が拘束されることにより、耐荷力は式(1)で表される。

$$\sigma_v = \sigma_h K_p + \frac{2T}{B}(mK_p - 1) \dots (1)$$

ここに、 $K_p$  は中詰め材の受働土圧係数であり、 $m$  は「土のう」の幅厚比  $B/H$  である。次に、これを三次元「土のう」の耐荷力予測式に拡張することを考える。式(1)は、簡便さから二次元「土のう」として扱

い、「土のう」長軸に平行な面に最大主応力  $\sigma_{1f}$  ( $= \sigma_v$ )、短軸に最小主応力  $\sigma_{3f}$  ( $= \sigma_h$ ) を作用させた状態を考え、二次元「土のう」が破壊する時の極限耐荷力の予測式を導いている。ここでも同様の考えに従うが、図-2 に示すように「土のう」の長・短辺両側面に発生する張力を考慮して導く。まず、「土のう」を理想的な直方体と考えれば（実際には隅角の部分は、「土のう」材の張力により滑らかな曲面を形成する）、破壊が始まる極限状態下での、「土のう」の中詰め材に作用する主応力は式(2)～(4)のように表せる。

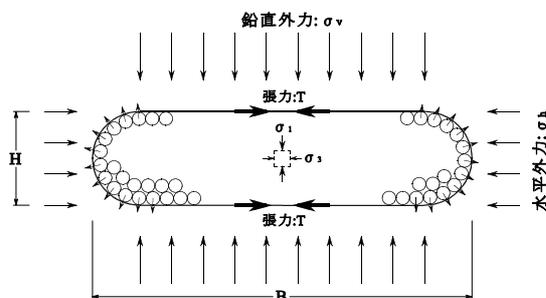


図-1 袋状繊維「土のう」による中詰め材の補強効果

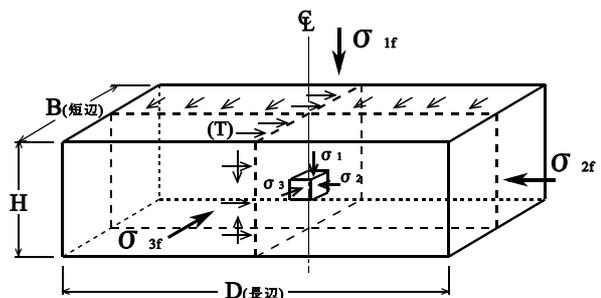


図-2 三次元「土のう」の中詰め材に作用する応力

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{1f} \cdot BD + T(2B+2D)}{BD} = \sigma_{1f} + \frac{2T}{D} + \frac{2T}{B} \dots (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{2f} \cdot BH + T(2B+2H)}{BH} = \sigma_{2f} + \frac{2T}{H} + \frac{2T}{B} \dots (3)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{3f} \cdot DH + T(2D+2H)}{DH} = \sigma_{3f} + \frac{2T}{H} + \frac{2T}{D} \dots (4)$$

$$\sigma_1 = K_p \cdot \sigma_3 \dots (5) \quad K_p = (1 + \sin \alpha) / (1 - \sin \alpha)$$

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} \cdot K_p + 2T \left\{ \left( \frac{1}{H} + \frac{1}{D} \right) \cdot K_p - \left( \frac{1}{D} + \frac{1}{B} \right) \right\} \dots (6)$$

ここに、T は「土のう」材の単位幅あたりの引張り破断耐荷力である。そして、 $D > B$ 、 $\alpha = \alpha_r$  とおけば、 $\sigma_2 > \sigma_3$  より、 $\sigma_1$  と  $\sigma_3$  の間の塑性平衡条件式(5)を介して、直方体「土のう」の極限耐荷力は式(6)のように導かれる。ただし、 $\alpha$  : 内部摩擦角、式(6)において、 $D = D_r$ 、 $\alpha = \alpha_r = \alpha_v$ 、 $\alpha = \alpha_h$  とおけば、式(1)の二次元「土のう」の耐荷力予測式に帰着することは、明らかである。

### 3. 長方形型(角型)「土のう」製造機の製作と耐圧試験

前述のように、災害時対応の仮設資材としてのみ用いられていた「土のう」は、耐荷力や積層法などについて合理的な性能評価を行うことによって本設資材として活用できるようになった。さらに、軟弱な地盤材料ならびに建設残土やコンクリート解体廃棄物等を中詰め材として利用できるため、安価で環境に配慮した建設資材となる。ただし、個々の土のう詰めは、依然として人力に頼る場合がほとんどであり短時間で大量に作製できない。したがって、作製行程を自動化するために、「土のう」製造機を試作・製品化(矢野鉄工所・製作)した<sup>2)</sup>。本「土のう」製造機では、前処理機により様々な中詰め材の粒度選別の後、計量袋詰めして、さらに「土のう」袋の投入口を現場でマシン掛けして閉じる機構が設置してある。中詰め材の投入口を人手によって紐で締結する従来のホームベース型のものに対して、本製造機による「土のう」は、長方形型(角型)「土のう」であり敷設時にも有利である。ただし、現場での縫製部があるため、その部分の強度を確認する必要がある。

写真-1に示すように、本「土のう」製造機は、一体化されており(幅2.0m x 長さ4.5m x 高さ2.5m) 4tonトラックで現場まで移送可能である。さらに、コンパクト化して、2tonトラック車載タイプものも開発している。したがって、「土のう」敷設現場の直近で「土のう」の製造が可能である。また、粒度選別装置により、異物や大粒の礫を排除するため、敷設時に転圧し易く、破袋し難くなっていること、1袋当たりの最適な土砂投入量を自動計量装置に制御していること、ならびに、土砂投入口を紐で締結する従来法とマシンがけする方法の2通りの中の1つを選択できることなど、かなりの工夫がなされている。全ての行程を人力にたよる従来の製法では、1袋当たり、2~3人で数分要するが、本機では、1袋当たり12秒という驚異的な作業効率を実現した。

耐荷実験を行うにあたって、マサ土(以下、試料Aと称す)と海砂(以下、試料Bと称す)の2種類の中詰め材を用意し、中詰め材のせん断強度特性を調べるために、簡易一面せん断試験を行った。試験方法は、コンテナに中詰め材を「土のう」と同じ密度に詰め、せん断枠内の試料に垂直荷重を作



写真-1 「土のう」製造機の全景

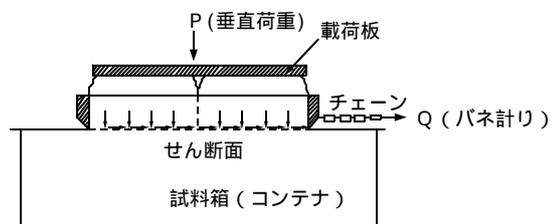


図-3 簡易一面せん断試験装置

表-1 中詰め材のせん断強度定数

	C(粘着力)(kpa)	(内部摩擦角)(°)
試料A	5.42	46
試料B	0.92	45

用させた状態で水平に引張り、せん断棒が動いた時の値（バネ計りの最大値）を計測するものである（図-3参照）。得られた中詰め材のせん断強度定数は表-1に示す。

つぎに、角型「土のう」の耐荷力を調べるために万能試験機を用いて耐荷試験を行った。そして、耐荷試験で得た実験値と理想的な3次元直方体「土のう」モデルから得た耐荷力の算定値を比較し、検討した。ただし、「土のう」形状は、耐荷力を算出するにあたって、非常に重要になってくる。つまり、算出する上で、厳密には、荷重による変形も考慮しなければならない。そこで、算定する際、予測範囲（最大値、最小値）を定める必要がある。ここでは、変形前の「土のう」のH（高さ）とB、D（幅）による算定値を最小予測値とし、高さHから変形後の最大圧縮量を引いた値による算定値を最大予測値としている。中詰め材の粘着力については、非常に小さいので無視しているが、図-4のように、耐荷力の実験値と計算値は良い対応を示している。さらに、角型「土のう」の耐圧試験から、現場での縫製部分は、最大荷重に至るまでにまったく損傷しておらず異常のないことを確認した。

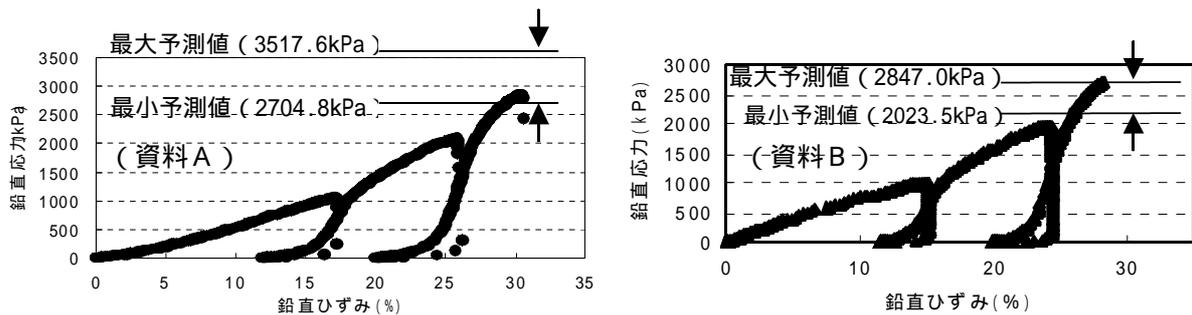


図-4 繰返し載荷試験と耐荷力の算定値

#### 4. 繰返し水平荷重を受ける「土のう」積層体の挙動

建造物の基礎に「土のう」をコラム状（柱状）に配置することにより建造物基礎地盤を補強する「土のう積みコラム」<sup>3)</sup>の繰返しせん断特性について実物大実験（写真-2）を行い考察した。「土のう」積層段数2断と6断の繰返しせん断試験結果（図-5）から「土のう」積層体の等価減衰定数  $h_{eq}$  が約0.3という大きな値であることが分かり（図-6）、「土のう」積層体が高減衰構造体であることを見出した。これより、土のう積層体による基礎補強は、地盤支持力を

増大させるだけでなく、免震効果も期待できるという利点があることも分かった。

この高減衰性能は「土のう」間の滑りが発生するという、せん断力～変位関係から類推でき、与えられたエネルギーが「土のう」間の「滑り」という塑性仕事として消費されていると思われる。



写真-2 実物「土のう」積層体の繰返しせん断試験機

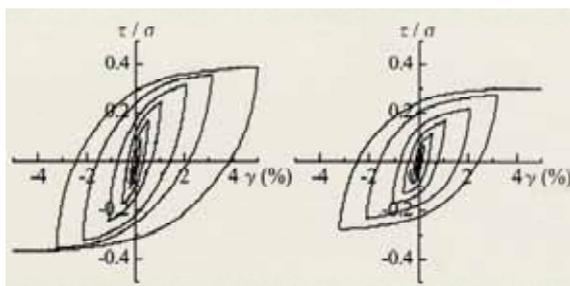


図-5 水平繰返し載荷試験における履歴ループの例

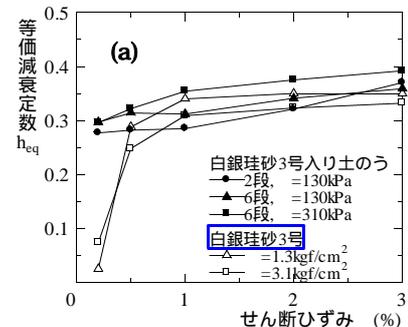
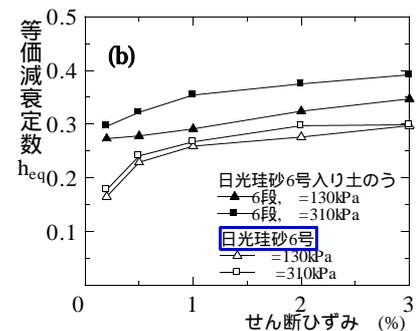


図-6 「土のう」積層体と中詰め材の等価減衰定数の比較

## 5. 「土のう」積層体の適用事例

前述したような補強原理を生かした「土のう」一体化工法の設計法はすでに提案されており、現場施工例も増えつつある。一部の例を示せば、「土のう」積み盛土工法、「土のう」積み擁壁工法、「土のう」積層体による建物の基礎・地盤補強工法などがある<sup>1)</sup>。軟弱地盤上の基礎・地盤補強に「土のう」積層体を用いる工法は、前述の補強原理から考えれば、「土のう」材による拘束効果を最も有効に利用できる工法の一つである。ただし、現在までの多くの適用例は木造建築構造物下の軟弱地盤における極く地表面近くの補強対策がほとんどである。今後、「さらに表層の軟弱層が厚い場合」や「さらに構造物の規模(重量)が大きいものへの適用」を目指す、これまでのベタ基礎状補強や布基礎下の補強工法と併せて、局所的により深くまで「土のう」を積層する「土のう」積みコラム基礎が考えられる。この基礎工法の考え方の基本は、軟弱表層中の適所に配置された「土のう」積層コラムと構造物直下にベタ基礎状に配置した「土のう」補強体により構造物を支持しようとするもので、言わば「土のう」工法によるパイルド・ラフト基礎である。こうすることにより、ある程度構造物が重い場合や軟弱表層が厚い場合にも沈下が制御できるものと考えられる。この基礎工法の利点は、土(地盤)とほぼ同じ重量であること、現地発生土を利用できたり、解体コンクリートガラ等も使えるリサイクル工法であることに加え、前述の補強原理から明らかなように、外部からの鉛直荷重が大きくなるほど「土のう」材料に作用する張力も大きくなり、中詰め材への拘束力が高まり強固になることにある。すなわち、敵の力(外力)をうまく利用するのである。

## 6. 「土のう」積み擁壁の試験施工

一般に擁壁はコンクリート製かあるいはコンクリートブロックや石積みのものであるが、本研究で対象にしている「土のう」でも、積み方を工夫し、「土のう」積み擁壁の滑動や回転に対する合理的な安全性の検討を行えば、既存のコンクリート製、あるいはコンクリートブロックや石積みのもより経済的に施工が可能である。このような観点から試験施工した「土のう」積み擁壁の例を紹介し、安全性の検討ならびに他の工法との経済性比較を行う。図-7は「土のう」積み工法による擁壁の施工断面詳細図を示している。500×400×80mmのソルパックを2連結し、高さ2m(25段)まで積み上げ、積み上げた表面はラスモルタルを吹きつけて表面処理を施している。後述するように「土のう」積みだけの擁壁でも、十分に安全性を確保することができるが、前面に水路が存在しているため、そこへの影響をできるだけ押えるために、500mm間隔で細径鋼管杭を擁壁の前面下部へ打設している。写真-3, 4は試験施工した「土のう」積み擁壁の施工記録である。写真-4に示すように、「土のう」袋の保護のため、ラスモルタル(厚さ 50mm 程度)で表面処理すれば、見かけ上はコンクリート製の擁壁と変わらない。つぎに、実際に試験施工した「土のう」積み擁壁が安全かどうか安定解析により検討した。安定解析では裏込め土の土圧による滑動と転倒について考えており、また、滑動と転倒のそれぞれで、常時と地震時についても考えている。

図-8は、滑動に対する安定性の検討結果を示している。同図より、「土のう」積み工法による擁壁でも滑動に対して高い安全性を持っていることが分かる。安全性のイメージがし易いように、例として、10ton(100kN)トラックの設計用輪荷重(55kPa)も図示しており、また、常時には、分布荷重が約30kPa未満の場合、粘着力Cにより、裏込め土が自立するため、擁壁の背面より土圧が作用しない結果となった。転倒に対する安定性についても十分な安全性を有していることを確認した。擁壁の安定解析において、一般に、転倒と共に擁壁底部と地盤面間の滑動が弱点となる場合が多く、その場合には、擁壁の基礎を十分に

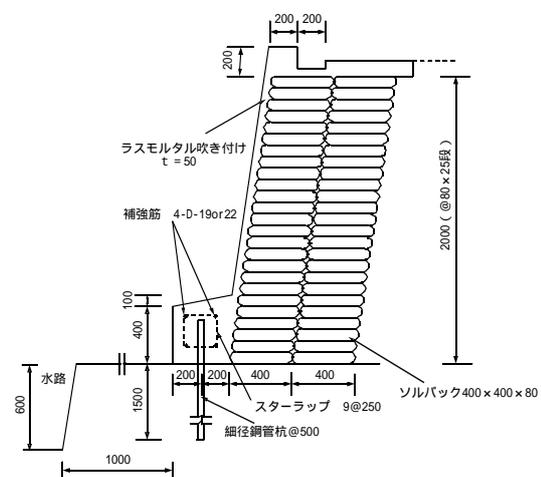


図-7 施工断面図



写真-3 「土のう」の積層終了



写真-4 表面ラスモルタル処理・完了

検討する必要がある。また、コンクリート製、あるいはコンクリートブロック・石積み擁壁の場合には、擁壁そのものの重量もかなりあるため軟弱な地盤上での構築では、基礎の検討がさらに重要となり、経費も嵩む。それに対して、本「土のう」積み工法による擁壁では、現地の地盤材料等の「土のう」中詰め材そのものの重量が主体で、擁壁の構築に伴う重量の増加がほとんど無く、一般に基礎を要しないため、非常に経済的である。そして、擁壁底部と地盤面間の滑動に対しては、細径鋼管杭を打設することにより効果的に対処できる方法も提示した。本「土のう」積み擁壁試験施工(幅25m x 高さ2.0m, 傾斜0.15)では、50列 x 27段 x 2層 = 2700袋(50cm x 40cm x 8cm)の「土のう」を用いて、5日 x 4人 = 約20人・日役で完成させた。ただし、施工現場の直近で、前述の「土のう」製造機を稼働させた。詳細な施工経費の内容については省略するが、「土のう」積み工法の場合には約150万円要したのに対して、従来のブロック積み工法では約270万円、コンクリート擁壁では約300万円であった。このような経費比較によって、非常に安価(従来工法の約半額)に構築できることも分かった。

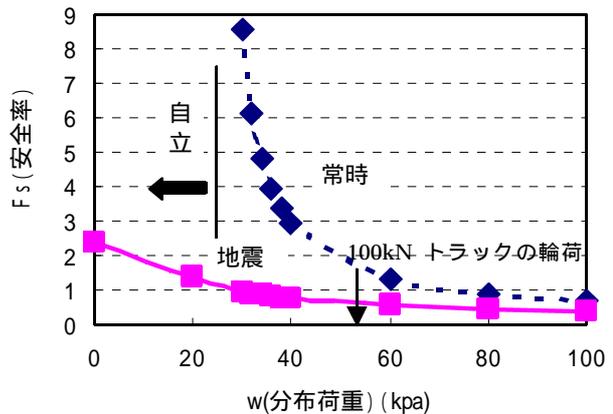


図-8 滑動に対する安定性の検討結果

## 7. おわりに

以上、「土のう」積み工法による地盤の補強原理、ならびに基礎・地盤補強法の適用事例を示した。人工材料を主体にせず、自然の「土」を土のう袋で完全拘束することによって成り立つ建設資材であり、それを補強原理により性能評価できたことに意義がある。また、中詰め材として現地発生土はもちろん、建設残土や解体コンクリートガラ等も使うことができるといった省資源ならびに環境への低負荷型の工法である。そして、構築に大規模な特殊重機等を必要とせず、状況によっては人力のみでも施工可能な極めてユニークな基礎・地盤補強工法となり得る。したがって、豊富な資源や高度の建設技術を持たない開発途上国の社会基盤整備のための基礎技術として発展できる可能性もある。

### <参考文献>

- 1) 松岡元:「地盤工学の新しいアプローチ(敵を味方につける地盤の補強法)」(京都大学学術出版会), pp.227-311,2003
- 2) 山本春行:「環境資材に適合した土嚢製造機の開発」,広島大学リエゾンフェア2003 in 呉
- 3) 山本春行(他):「土のう」積みコラム(パイル)基礎の施工例,第37回地盤工学研究発表会講演集 pp.1377-1378,2002.7