

土のう（ソイルバッグ）

Soilbag

松岡 元（まつおか はじめ）

名古屋工業大学名誉教授

1. 土のう（Soilbag）のもつ種々の面白い特性

インカ帝国の神殿の基礎から、石を革で編んだネット状の袋で包んだものが多数発見された。これが地盤補強資材として用いられた最古の「土のう」と言えるかもしれない。土のうとは、土を詰めた袋のことであるが、中に詰めた土の性質とは全く異なる種々の面白い特性を有する（図-1参照）。ここでは、土のうの主要な機能として、次の三つの点を取り上げる。

1) 中詰め土を袋で拘束補強することによって、驚異的な耐荷力を生じさせる。このことを以下に説明する。図-2に示すように、例えば $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の正方形の袋が荷重や外力（敵の力）を受けて平たくなり $4\text{cm} \times 1\text{cm}$ の長方形の袋になったとすると、面積は同じ 4cm^2 であるが、周長は 8cm から 10cm に 2cm 延びることになる。袋の周長が延びるということは、袋に張力が発生することを意味する。ここでは、面積が一定の場合でも平たくなれば、袋に張力が発生することを説明したが、もしダイレイタンシーが起こって体積が膨張すれば袋はもっと引っ張られて張力が大きくなるのは当然である。

図-3より、袋に発生した張力 T を単位奥行きの断面積 $B \times 1$ や $H \times 1$ で割り応力 $2T/B$ や $2T/H$ に置き換えて、中詰め材の破壊条件式を立てるとき次式を得る ($K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$, ϕ : 内部摩擦角)^{1),2)}。

$$\sigma_{1f} + 2T/B = K_p(\sigma_{3f} + 2T/H) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 σ_{1f} , σ_{3f} は中詰め材破壊時の最大主応力と最小主応力、 T は袋の破断張力、 B , H は土のう幅、高さである。

式(1)より、

$$\sigma_{1f} = K_p \sigma_{3f} + (2T/B) \{(B/H)K_p - 1\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

一方、いわゆる c , ϕ 材料の破壊条件式は次式で表される。

$$\sigma_{1f} = K_p \sigma_{3f} + 2c\sqrt{K_p} \quad \dots \dots \dots (3)$$

式(2)と式(3)の右辺第2項を等値すれば次式を得る。

$$c = \{T/(B\sqrt{K_p})\} \{(B/H)K_p - 1\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、興味深いのは、袋で包めば接着剤（セメント）を入れなくても粘着力 c が得られることである。しかも、荷重や外力などの敵の力によって発生した袋の張力 T が粘着力 c の源であることである（敵の力を利用している！）。粘着力 c が発生することを直感的に説明すると、袋の張力 T によって中詰め土は互いに押し付けられ粒

何をいまさら『土のう』か？

- バラバラの土粒子（摩擦性材料）を包むことは、理にかなっている
- 建物の支持力が飛躍的に増大する
- 安価である（PE, PP: 日光（紫外線）さえ遮断すれば半永久的にもつ）
- 環境にやさしい
- 杭打ち工法などに比べて、施工時に静かである
- 特殊な建設機械を必要とせず、人力だけでも施工可能である
- 重量が土とほぼ同じである（軽い）
- コンクリート廃材、アスファルト廃材、タイル廃材、瓦廃材などの建設廃材やゴミの溶融後の最終処理粒状物（スラグ）も中詰め材として再利用できる
- 土のう自体が信じられない耐荷力をもつ（200～400kN（コンクリート強度の約1/10～1/5！））
- 交通振動低減効果、地震動を減ずる効果（減震効果）
- 粗粒の粒状体入り「土のう」の凍上防止効果
- 水浸ヘドロ地盤でも土のうの「局所圧密・強化作用」によっておさめる

図-1 土のうのもつ種々の面白い特性

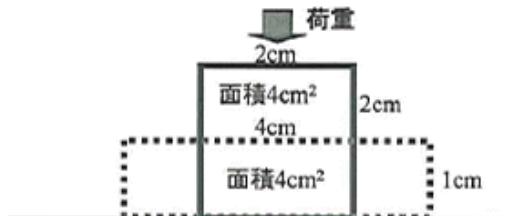


図-2 土のうが荷重（敵の力）を受けて平たくなると袋に張力が発生するのはなぜか

子間力が増加して粒子間摩擦力も大きくなる。粒子間摩擦力が大きくなつて粒子間がズレにくくといふことは接着剤（セメント）を入れたのと同じである！と理解される。ここでは、2次元土のうの式を示したが、3次元土のうの場合も解かれている³⁾。この粘着力 c が土のうの驚異的な耐荷力の源となるのである。40 cm × 40 cm × 高さ 8～10 cm の土のう（中詰め材：碎石）の耐荷力は 200～400 kN となり、単位面積当たりに換算すると 1 250～2 500 kN/m² となる。これは、土のう自体は 60～120 階建てのビルの荷重に耐えることを意味している。2) 碎石入りの土のうの場合、水は通すが土粒子はごく微細なもの（コロイド分を含む）を除いて通さない。この結果、水浸ヘドロ状態の粘性土地盤であっても、過

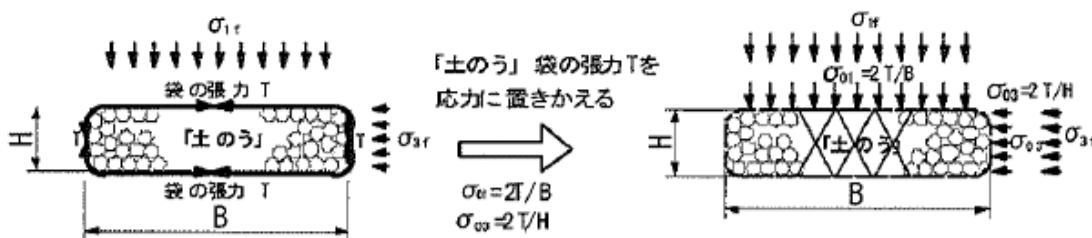


図-3 土のう自体の信じられない耐荷力の源である粘着力cの算定方法

剥離隙水圧の消散を促がし、土のう直下から圧力球根状に局所的に圧密させて周辺地盤を強化し、地盤の支持力を増大させ沈下量を減少させる。このことは最近明らかにされたもので、土のうのもつ「局所圧密・強化作用」と呼ばれている⁴⁾（口絵写真-5、6参照）。

3) 土のうはわずかなしなやかさを有するので、交通振動や地震動のエネルギーを、目には見えない微小な袋の伸縮によって中詰め土の粒子間の摩擦熱エネルギーとして消散させる。この結果、土のう積層体は高減衰の防振（免震）装置（減衰定数 0.15～0.30（免震ゴムとほぼ同じ値）、固有振動数 30～40 Hz）としての機能を果たす⁵⁾。

2. 土のう（Soilbag）を用いた施工事例

現時点で、海外も含め1500件程度の施工事例がある。まず、田んぼや沼地のような軟弱地盤対策工として用いられる。具体的には、建物の基礎補強、擁壁などの基礎・背面補強、道路の路床補強、鉄道の路盤補強（噴泥対策を含む）、杭代わりに掘削された穴に多数の土のう積層体か大型土のう積層体を設置する「土のう杭」工法、連結された土のう積み擁壁などがある。次に、道路や鉄道、建物、プレス機械や精密機械、エレベーターなどの振動・地震動対策工としても用いられている。土のうを用いた振動対策事例としては50件ばかりあり、建物下などに土のうを3～5段入れた場合（受振側での対応、地震・液状化対策にもなる）、道路や鉄道下に土のうを4段程度入れた場合（発振側での対応）、および振動伝搬経路の地盤中に土のう積層体の壁を作る場合（中間遮断による対応）がある。通常、3～15 dBの振動低減効果がみられ、費用対効果は他の振動対策工法と比べて抜群に優秀である。⁶⁾

3. 今後の展開

今後の土のう工法の展開については、次の三つの項目が面白く有望であろう。

1) 土のうによる「局所圧密・強化」工法：口絵写真-5、6に示すように、深さ約3 mの腰まで沈む沼地に、足場用の碎石入り土のう9個1段と互いに連結された3個×3個の土のう2段、その上に2個×2個の土のう1段を設置し、その上にコンクリートブロック4枚、30段（総質量 約27 kN）を3回に分けて積み上げることができた。総沈下量はわずかに6.7 cmであった。このことが可能になった理由としては、口絵写真-6の左図に示すように、土のう直下から圧力球根状に局所圧

密され、沼地が強化されたためと考えられる。このことは、スウェーデン式サウンディング試験によって確かめられている。周囲の軟弱地盤をも強化するとは、新工法として有望である。

2) 「大型土のう」の活用：口絵写真-7、8に示すように、1.5 m×1.5 m×高さ0.45 m（体積1 m³）の大型土のうを形状を保持したまま1本吊りできるように工夫したものが開発されている。口絵写真-8に示すように、人が立つと膝まで沈む軟弱地盤であっても数cmの沈下でおさまっている。これは、大型土のうの質量（約20 kN）によって発生した過剰隙水圧を瞬時に土のう内の碎石へ吸収するためと考えられる（同じ底面積、同じ質量のコンクリート板なら同時に沈下して消えてしまうであろう）。このような大型土のうは、施工効率を高め、人件費を抑制し、振動低減効果もあるので、今後の展開が楽しみである。

3) 途上国援助での活用：口絵写真-9～12に示すように、アフリカ・ケニヤのマサイマラ国立保護区内に碎石入り土のう3～4段を芯に入れ、現地発生路盤材で覆って転圧した土のう積み道路を建設中である（施工効率を上げるために大型土のうも用いる予定である）。動物たちもなぜか憩う自然に溶けこんだ道路になっている。なお、地盤はケニヤ国土の約1/3を覆う「ブラックコットンソイル」と呼ばれる吸水膨張性の軟弱粘性土である。昨年の大洪水（3ヶ月間水没）にも流されずに道路としての機能を維持したので、現地の人からも高い評価を得ている。このように、途上国援助には、軟弱地盤対策・地震対策・水害対策・雇用対策も含めてもってこいの工法である。自然にやさしい工法として今後広く展開されるであろう。

参考文献

- 1) 松岡 元：地盤工学の新しいアプローチ～構成式・試験法・補強法～、京都大学学術出版会、pp. 228～311, 2003.
- 2) Matsuoka, H. and Liu, S.: A New Earth Reinforcement Method using Soilbags, Taylor & Francis, pp. 1～111, 2006.
- 3) 山本春行・松岡 元：ソルバック工法における中詰め材の3次元拘束効果について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 451～452, 2003.
- 4) 松岡 元・野本 太：土のうによる超軟弱地盤の「局所圧密・強化」工法、第43回地盤工学研究発表会講演集、pp. 601～602, 2008.
- 5) 松岡 元：土のう（soilbag）による地盤環境振動対策工法、地盤環境振動対策工法講習会、地盤工学会、pp. 43～50, 2008.

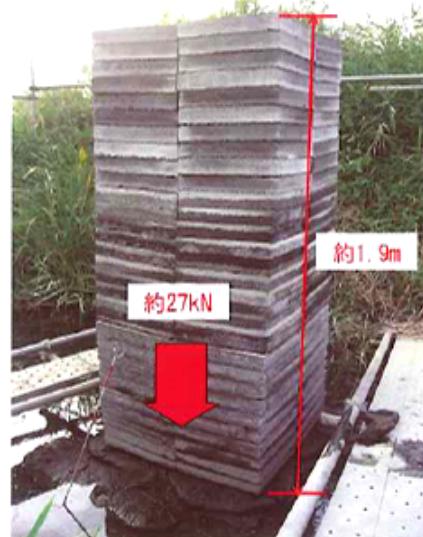
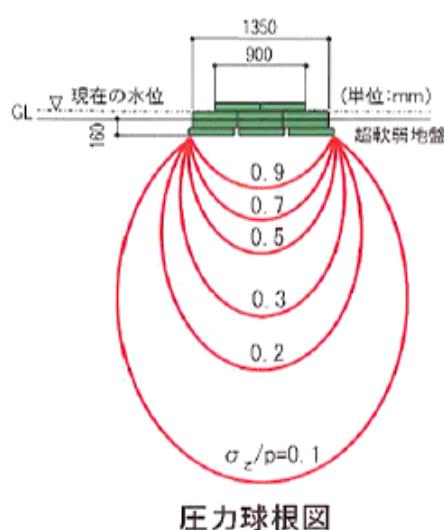
（原稿受理 2008.6.16）

技術手帳「土のう(ソイルバッグ)」
(本文47~48ページ参照)

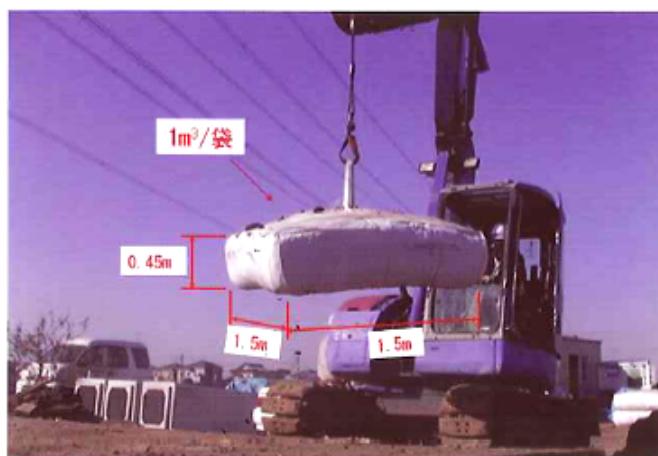


口絵写真—5 腰まで沈む深さ約3mの沼地

土のうの「局所圧密・強化作用」



口絵写真—6 土のう直下から沼地を圧力球根状に局所的に圧密・強化させる土のうの「局所圧密・強化作用」



口絵写真—7 真四角形に1本吊りできるよう工夫された
1.5m×1.5m×高さ0.45m(体積1m³)の大型土のう

口絵写真—8 膝まで沈む軟弱土上にほとんど沈下することなく設置される大型土のう
(1.5m×1.5m×高さ0.45m, 質量約20kN)



口絵写真-9 ケニヤ現地での大型土のうへの中詰め材の投入状況(重機による吊り上げを必要としない施工方法を考えた)

口絵写真-10 砕石入り土のう3段による土のう積み道路の建設状況（後姿が筆者）



口絵写真-11 土のう3段の上を現地発生路盤材「マラム」で覆って転圧した上のう積み道路上に寝そべる動物たち(トビ)



口絵写真-12 アフリカ象が乗ってもびくともしない土のう積み道路