

技術報文

D・Box を用いた軟弱地盤対策工

メトリー技術研究（株）代表取締役 野本 太

1. はじめに

土はバラバラの粒子の集合体であり、その主たる強度要因は粒子間の摩擦力となる。ある条件下では見かけ上の粘着力Cが存在するが、土はあくまで ϕ 材料である。このため土の強度を上げるためには土を締め固め、粒子間の摩擦力を増大させる事が基本的となる。ただし、一般的な地盤では、この土粒子だけでは無く、粒子間には水や空気と言った間隙が含まれるため、実際の施工となるとそう単純な話では無い。特に水を大量に含んだ地盤では、過圧により間隙水圧が上昇するため、一般的には締め固めが困難なものとなる。本編ではD・Boxを使いこうした地盤、特に軟弱な地盤における施工例を通してD・Boxの特性を紹介する。

2. D・BOXの概要¹⁾

D・Boxとは区画分割された箱状の単位（Divided Box）を意味し、土の区画拘束効果を最大限に生かすよう工夫された箱状の袋である。袋の内部にはガイドゲージ（D・Box-SSタイプ）やトラスバンド（D・Box-LSタイプ）と言う袋内部の土粒子を1次拘束するための内部拘束具を持ち、これにより地盤強度に関係なくD・Boxは強度を発現し、また形状を維持する事が出来る。

(1) D・Box-SS

袋内部にガイドゲージというプラスチック製の連結ジグを設けた小型D・Boxで、重機の搬入が困難な現場などでも使用できる機動性を持ち、ガイドゲージにより構造物に合った正確な寸法で設置できる。またジョイントにより水平2方向に完全接続できるため、高い連続性と大きな荷重分散効果が得られる（写真-1）。

種類：SS45（寸法：45cm×45cm×高さ10cm）とSS90（寸法：90cm×90cm×高さ10cm）。

(2) D・Box-LS

袋内部にトラスバンドという補強バンドを有する吊り上げ設置式の大型D・Boxで、中央のリフトバンドを吊り上げることによって、内部の土を強固に拘束し直方体形状を維持したまま吊り上げ移動ができる。このため設置作業の大幅な効率化が図れる（写真-2）。

種類：LS100（寸法：100cm×100cm×高さ25cm）



①使用されるパーツ ② 設置例

写真-1：D・Box-SS と設置状況



①上面を開けた状態 ②設置状況

写真-2：開封時のD・Box-LS と設置状況

と LS150（寸法：150cm×150cm×高さ 45cm）。

3. D・Box の構造的特徴

(1) 土を包み込み締固める²⁾

土の粒子間摩擦を増大させる方法として、簡単でかつ最も効果的な方法としては、古来より知られる土のうがある。近年名古屋工業大学名誉教授の松岡元（はじめ）先生の研究と実践により土のうの持つ構造体としての特性が明らかになった（興味のある方は「地盤の新しいアプローチ」：京都大学出版を参照）。基本原理は、**図-1**の土の

う断面図の通り、土を袋に包み込んだ状態で袋を上から圧縮して扁平させる。すると袋は扁平する事により周長が伸びる（2 cm×2 cmの正方形を 4 cm×1 cmまで扁平させたとすると、断面積に変化はないが、扁平した長方形の周長は正方形の 8 cmに対して 2 cm長くなる）ため、袋に張力が発生して元に戻ろうとする。この時の張力が、袋内部にある土粒子同士を押しつける力として作用（付加応力）するため、粒子間摩擦を大きく増大させる事が出来る。

この時の土のうの素晴らしいところは、荷重の増減に対応して土のう自身の強度を変化させる事にある。例えば静荷重に対し地震動などにより生じた回転力により、一時的に基礎端部等で荷重が増加した場合、土のうは直ぐさま反応し極めて微量な変形により土のう自身の強度を増大させる事が出来るのである。ちなみに一般的に販売されている国産の良質な土のうを使い砕石を投入した場合、土のう 1 袋の耐荷重力は 400 kN/袋にもなる。また強度増加だけでなく、振動低減の効果も確認され今後更なる発展が期待される研究分野である。

(2) 土を内部から拘束して締固める

各種の優れた特性を持つ土のうではあるが、土のうの基本強度を発生させるには、転圧等により土のう自体を扁平させ締固める必要がある。このため仮に沼地などの超軟弱地盤や液状化の際、下層地盤部の有効応力が失われた時など、軟弱な地盤部に土のうが追従変形を起こし、袋が側方に広がる事が出来ないため、土のうは強度を発現できないという問題がある（**写真-3**）。これは一般的なシート工法等にも共通して起こる問題である。

そこで考案したのは、地盤反力に関係なく袋の内側から土粒子を拘束して締固める内部拘束と言う方法である（**図-2**）。これは袋内部にトラスバンドという補強バンドを有する吊り上げ設置式の大型の袋で、中央部に垂直に伸びるリフトバンドを吊り上げると、これに連動して対角に配置されたトラスバンドが上部に押し上げられる。その結果、袋内部に投入された土粒子は、袋とトラスバンドの間で締め付けられ、転圧により加

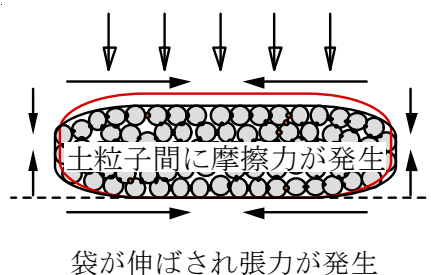


図-1：土のうの強度発生原理



写真-3：軟弱地盤での土のうの様子

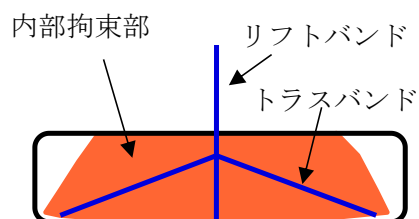


図-2：トラスバンドによる内部拘束

圧された状態に近い状況を袋内部に作りだす。これを維持したままでの移動、設置ができる。また設置後も吊り上げ時の内部拘束効果は持続し、一度吊り上げてしまえば、袋を開けない限り強度が維持される。

写真-4 と写真-5 は内部拘束の有無による各状態を再現したモデル試験の様子である。内部拘束の無い袋を吊り上げると、内部の粒状体材料の重みにより下層部に变形が生じているのが分る。

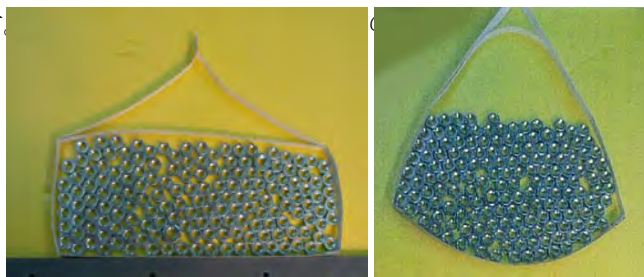


写真-4：内部拘束の無い袋の吊上げ状況³⁾

一方内部拘束具を配置した袋は、形状を維持したまま吊り上がっている。吊り上げた状態では下面部の反力は全くないため、極端な例ではあるが軟弱地盤上に設置した際の袋の挙動と同様である事を示す。また内部拘束の効果は、単なる形状維持に留まらず、内部拘束具の張力により得られる付加応力の増加により、実物大の載荷試験において、幅方向 1.5m×1.5m×高さ 50cm 袋が、10,000 kN の荷重でも破壊する事は無かった。これは 4,440 kN/m² 当の荷重に耐えた事になる。

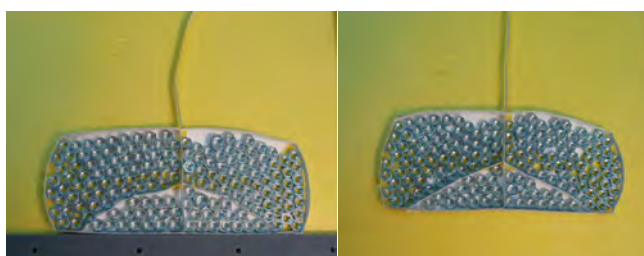


写真-5：内部拘束のある袋の吊上げ状況⁴⁾

4. D・Box による施工例

D・Box の特性を利用した主用途としては、①軟弱地盤の補強、②液状化対策、③振動低減の 3 種があり、土木、建築、鉄道、災害対策等事例は多岐に渡るが、以下に①と②の施工事例を示す。

(1) 軟弱地盤に敷設した D・Box の効果

D・Box は基本的に締め固め工法である。これは D・Box の特性を利用し、軟弱地盤上に設置した D・Box を転圧する事により、D・Box 直下の地盤を局部的に締め固めると言うものである。また沼地のようなドロドロ状態の粘性地盤であっても、この局所的な敷設（施工に必要な箇所のみを補強する）が可能となるのは、前章での形状保持に加え、D・Box のフィルター効果（水のみを吸水し、土粒子はせき止める）と D・Box 下面部に形成される円錐形状部による形状特性（貫入に対する抵抗を増大させる他、円錐形状部に入り込んだ軟弱な粘性土等を抱え込む事により、D・Box 直下のせん断抵抗を増す（図-3））による。またこの特性は、液状化の軽減にも共通する効果である。

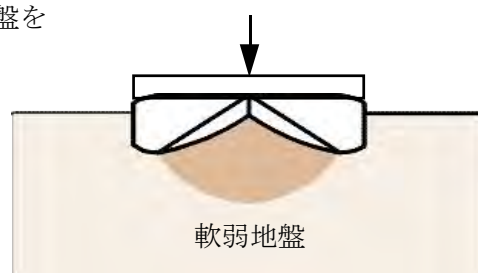


図-3：軟弱地盤に D・Box を敷設した際の、下部形状と土粒子の様子を示したイメージ図

(2) 超軟弱な粘性地盤での施工例⁵⁾

現場は、S 県にあるダムの修繕工事であり、老朽化した水門を改修する工事であるが、数十年の利用でダムの湖底に腐葉土が 3m 以上堆積し、人も歩けない程の軟弱地盤である（写真-6）。工事は

水門の対面より約 200m の仮設道を設置した後、水門前に 120 t のラクタークレーンの作業ヤードを構築するといった内容である（写真-8）。

D・Box の敷設は図-4 の通り計画した。施工の主な手順は、①軟弱な地盤面に D・Box を直接設置した後、重機（0.8 のバックホウ）のバケットで D・Box を出来るだけ地盤に圧入。②これを長さ 6m の敷鉄板に合わせ、鉄板の両端部と中央部に計 3 袋の D・Box を配置。③D・Box の設置後、上部に透水性のある土木用シートを敷設。④上面部に敷鉄板を敷設。敷設後重機が乗入れて①～④の作業を反復しながら施工を進めた（写真-7）。

今回のように極めて含水比が高い地盤における施工上の注意は、特に D・Box 敷設直後の管理にある。通常仮設の場合は、工事を出来るだけ速やかに進めるために D・Box を連続的に施工するのが望ましいが、元々は人も立てない軟弱な地盤状態である。ここに 2 t 近い D・Box を敷設し、更にその上を 20 t 以上の重機がすぐに載り入れるのであるが、明らかにそれを支えるだけの地盤強度（有効応力）が得られていない状態である。しかし D・Box の場合は、下面部に出来る円錐形状部に軟弱な土粒子を区画する事により、土中で上昇した間隙水圧を一時的な反力として利用する事が出来る。これはちょうど、風呂桶を逆さにして水面に押し付けると抵抗するのに似ている。いくら軟弱な腐葉土であっても、圧縮条件下では破壊し難い状態を形成する。つまり間隙水圧が初期の反力に大きく影響しているのである。ただしこれは見かけ上の反力であり、この段階では信頼に足るものではない、極めて含水比の高い軟弱な地盤で D・Box を施工する際、施工者は D・Box 初期の反力が有効応力出ない事を理解する必要がある。これは D・Box の局所圧密効果により、D・Box 直下の間隙水圧が消散するまでの間の話であるが、この間は敷鉄板等を利用し、上部の荷重が D・Box 全体に面的に掛かるよう施工管理する必要がある。偏芯がかかれば D・Box は簡単に傾いてしまう。これは小舟の端に体を預ければ船が傾くのと同一状態である。また有効応力が発現し地盤が安定するのに必要な時間であるが、通常粘性土であれば 3～5 日程度、腐葉土の場合は 1～3 日程度が目安となる（腐葉土は見かけ上は軟弱な土であるが、純粋な粘土に比べると排水性が高いため、沈下収束までの時間も短い）。しかしこれは荷重条件、周辺状態他、現場状況により異なるので、必ず現場で確認する必要がある。その判断基準の一つは、重機等が走行した際の D・Box の動きに注目する。重機等が通過の際、D・Box が



写真-6：現場状況

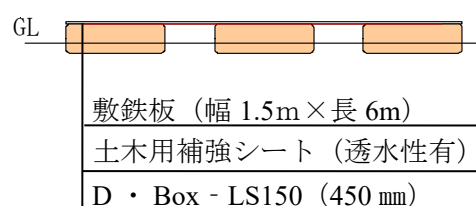


図-4：D・Box の基本敷設断面図

しかし D・Box の場合は、下面部に出来る円錐形状部に軟弱な土粒子を区画する事により、土中で上昇した間隙水圧を一時的な反力



写真-7：①～④の作業状況



写真-8：仮設道路と作業ヤードの状況

また有効応力が発現し地盤が安定するのに必要な時間であるが、通常粘性土であれば 3～5 日程度、腐葉土の場合は 1～3 日程度が目安となる（腐葉土は見かけ上は軟弱な土であるが、純粋な粘土に比べると排水性が高いため、沈下収束までの時間も短い）。しかしこれは荷重条件、周辺状態他、現場状況により異なるので、必ず現場で確認する必要がある。その判断基準の一つは、重機等が走行した際の D・Box の動きに注目する。重機等が通過の際、D・Box が

上下動を起こすようであればまだ下部の反力に間隙水圧が影響していると言える。土は弾性体では無いので、有効応力により支えられた D・Box が自ら浮き上がるような現象は起きない。

(3) 液状化対策での施工例

現場は A 県にある用水池の工事で、河川に隣接した敷地に、高さ 7 m の L 型のコンクリート擁壁を設置し、用水池を建設するという工事である (図-5)。しかし擁壁の設置面が河川水位以下となるため、掘削時の重機振動等により敷設底面部の砂質地盤が液状化した現場であった (写真-9)。

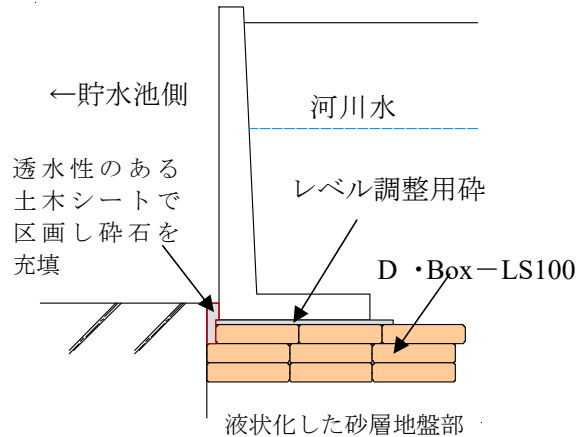


図-5 : D・Box 敷設の概要断面図

施工は液状化した地盤面に D・Box を直接設置していった。設置はパイピングが起こっているシートパイル側から敷設し、シートパイルの壁面と平行になるよう、列ごとに 3 段ずつ積層していった。施工開始後、シートパイル側に平行に 1 列、3 段を積層したところで、下から噴き出していたパイピングは収束した (写真-10)。

現場では、作業振動等によりひとつ間違えば危険な状況を招く可能性もあったが、D・BOX により施工が安全に完了できた要因を考えてみる。

図-6 は以前行った室内試験結果で、正弦波 300gal での沈下量を示し、D・Box 基礎が 1.15cm であるのに比べ、コンクリート基礎は、4.60cm と 4 倍であり、原地盤の沈下量と D・Box とほぼ同様の値であった。コンクリート基礎は、液状化により基礎底面の有効応力が失われることで偏心し、沈下しているのに対し、D・Box 基礎は基礎底面の有効応力が失われても偏心せずに沈下を最小限度に留めている。

今回の現場においても、下層部の地盤反力は極めて弱い状態であった。こうした地盤に例えばコンクリート盤などを設置すると、設置圧により間隙水圧が上昇し、不等沈下が起きる可能性が高い。また透水性のあるシートや土のう等を設置しても、下部の地盤反力が小さいため、砕石あるいは土のうを大量に投入しなければならず、今回のような施工エリアが限定されて資材搬入も難しい現場では、現実的には施工が困難である。これに対して D・BOX は、内部にある拘束具によって袋単体で砕石を締め固め、地盤反力に関係なく基本的な強度を発現することができるため、接地圧が均等に作用し、地盤支持力との釣り合い状態を維持しているためと考えられる。また透水性を有しながら、同時に細粒分の進入は許さないフィルター効果を持っているので、D・BOX 直下の地盤を効果的に締め固めることができたのだろう。実際本現場では設置後 5 分程度で D・



写真-9 : 液状化した地盤の状況



写真-10 : D・Box 敷設の状況



写真-11 : D・Box 敷設の状況

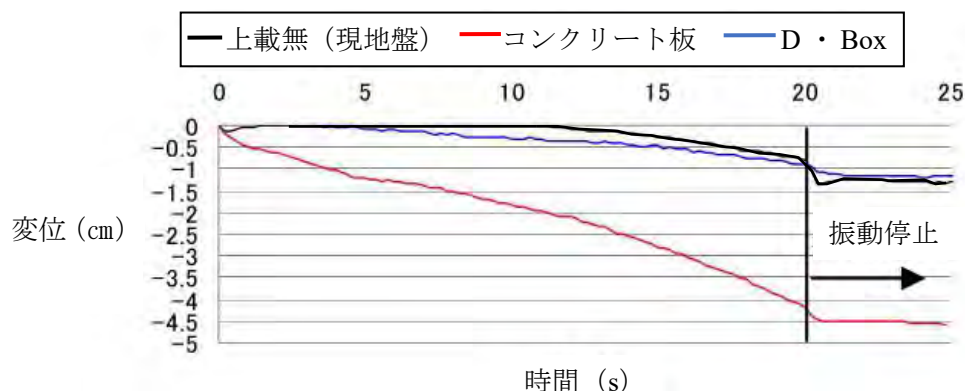


図-6：液状化の模型試験による沈下比較⁶⁾

BOXは安定し、3段積層した直後には、重機をD・BOX上に吊り下ろしても、ビクともしない状態であった。

5. まとめ

各優れた特性を持つ製品であるが、製品としては楽器などに近い性格を持つと感じる。D・Boxはマニュアルに沿った施工により、特定の効果を得る事ができるが、特に今回のような条件の悪い現場においては、これを扱う技術者の力量により、その効果に大きな差がでるからである。これはD・Box自体の強度のみで地盤強度を確保しているのではなく、D・Boxを通して下部の地盤を締め固める事により成立している工法のため、地盤状況に応じて、D・Boxをどう敷設し、どう施工するか、現場での状況判断が重要となる。勿論設計段階での検討の重要性はあるが、今回紹介したような状態の現場では、まず正確な地盤データが得られない。そもそも人が立てない程の軟弱な地盤では、ボーリング等の試験を行う事が出来ない。つまり調査しても、ギリギリ試験が出来る範囲での地盤調査となる。そのため特にD・Boxを敷設する浅層部(0~2m程度)の地盤については、データだけでは無く、直接現地を確認して判断する必要がある。例えばD・Boxの場合、直接敷設して目視で確認出来るため、試験敷設や、必要に応じて直接の载荷試験などにより、敷設~転圧時の初期貫入量を確認して掘削高を決定したり、主要沈下の収束時間を直接計測する等、地盤を確認、把握する手立てはある。また本設工事においては、D・Box敷設後の平板载荷試験により、目標強度が得られているか確認する事を推奨している。

今回はD・Boxの持つ効果の内、地盤補強を中心にその機能と施工例を紹介した。その他交通振動や、地震動の低減等、優れた減振効果もあり、また固化剤を使用しないため、環境にも優しい工法である。また機会があればこれらの事例も紹介したい。

参考文献

- 1) 松岡元、野本太：D・Boxによる軟弱地盤対策及び環境振動対策、ジオシンセティックス論文集 24、2009.
- 2)、5) 野本太：土を拘束して締め固める方法、土木技術、vol.70、No.10、2015.
- 3)、4) 藤井俊逸：写真提供
- 6) 門間俊之、嶋田宏、野本太、門田浩一、宮下健一郎、神波泰夫、岩井明彦、田中成季：小型振動模型による内部拘束型大型土のうの液状化被害の低減効果について、土木学会、海洋開発論文集 Vol.30、70巻2号、2014.