

土木
技術

vol.70 No.10

2015
10

Civil Engineering for Life

特集・縮める

古くて新しい土の締固め
石川高専 環境都市工学科
「道の駅」による地域活性化の促進





製品（上面部開封時）



施設下部の地盤補強

土を拘束して締固める方法

口絵②

[本文 32 頁参照]



道路の地盤補強と振動対策



液状対策工事（擁壁下部）



擁壁補強



擁壁補強

特集 締める 先端技術研究 3

土を拘束して締固める方法



のもと ふとし
野本 太*

はじめに

土に対する一般的なイメージは、大よそ漠然としたものである。これはそれだけ土が身近でかつ、土（地盤）が無い状態など考える事が出来ない程当たり前の存在だからかもしれない。通常では意識すらされない土ではあるが、立場が変わると真剣に取り組まざるを得なくなる。例えば農作物を作るのであれば、土は作物を生産するための重要な土台的要因として研究、管理され、陶芸家や彫刻家にとっては自身を表現するためには無視する事の出来ない創造的制約事項を伴う素材（材料の持つ特性や限界範囲内での表現が必要と言う意味）として対峙しなければならない存在となる。その他美容の世界等広く土に関わる分野はある。

勿論土木技術の分野、取り分け地盤補強に関する研究において、間違いなく土は重要な第一要素となっているが、先に挙げた他分野の観点とは、中心となるアプローチがいささか異なるように思える。

土や石はその特徴の一つとして、自然が作り出したものであり、人為的な生産物では無い。つまり土自体をコントロールするには限界がある。このため土を扱う分野においての選択肢は、①土の特徴を理解しその限界範囲内において土を利用する、②土の持つ要因に人為的な何かをプラスして利用する、③土

を無視して人為的な何かに置き換える、の概ね3点となる。

農業等の先に挙げた分野においては、①寄りの②が中心的なアプローチであるのに対し、土木技術の分野においては、③寄りの②であり、それもかなり③寄りのアプローチが主流となっている。つまり大げさに言えば自然との対峙を選択しているのかもしれない。恐らく土の強さを工学的観点から見れば、過度な期待はできない材料に思えるが、実際自然界においては、大規模な自然構造物はいくらでもある。例えば一昨年世界遺産となった富士山であるが、駒澤正雄氏の論文によれば、富士山の総重量は1兆1千500億トン*1ある。富士山頂を中心として約10kmを直径とすれば、平均しても146,500kN/m²と言うとてつもない重量構造物となる。勿論実際の技術者が抱える一切の制約事項を無視した論点ではあるが、もう一度地盤に携わる者が回帰すべき原点の象徴とも思える。上記の観点より、土を締固める方法の一つとして開発したD・Boxを題材に土の締固めについて考える。

1. 土を締固める（袋内部での締固め）

土はバラバラの粒子の集合であるため、主たる強度要因は粒子間の摩擦力でしかない（ある条件下では見かけ上の粘着力が存在するが、土の本質はφ材料）。このため土の締固めとは、言い変えると「土粒子間の摩擦力

*メトリー技術研究株式会社 代表取締役

を増大させる」と言う事になる。子供が砂山を作る際、経験的に手で砂を叩くのも、砂の間隙を潰し砂の粒子を密着させる事により粒子間摩擦を増大させている。

1-1 土を包み込み締固める

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の土のうの断面図の通り、土を袋に包み込んだ状態で袋を上から圧縮して偏平させる。すると袋は偏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まで偏平させたとすると、面積に変化はないが、偏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等、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。ちなみに一般的に売られている国産の良質な土のうを使い碎石を投入した場合、土のう1袋の耐荷重力は400kN/袋にもなる。ま

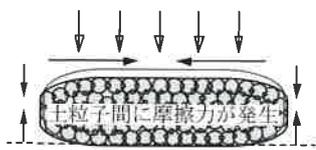


図-1 土のうの強度発生原理

た強度増加だけでなく、大きな振動低減の効果も確認され*2今後更なる発展が期待される研究分野である。

1-2 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偏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、土のう本来の強度を上手く発揮する事が出来ないと言う問題があった（写真-1）。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。



写真-1 軟弱地盤での土のうの様子

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）。

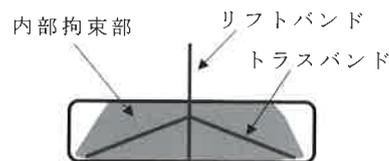


図-2 トラスバンドによる内部拘束

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、転圧により加圧された状態に近い状況を袋内部に作り出す。内部の土を強固に拘束するので、袋は直方体形状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-2と写真-3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れば、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かる。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の袋が、10,000kNの荷重でも破壊する事は無かった。これは4,440kN/m²相当の荷重に耐えた事になる。

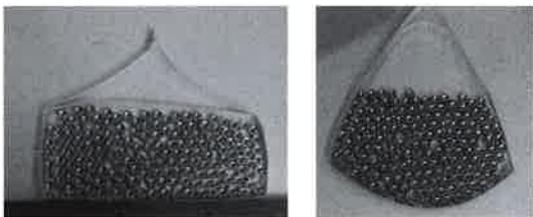


写真-2 内部拘束の無い袋の吊上げ状況

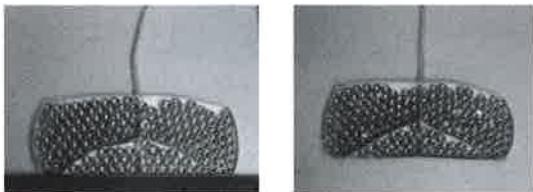


写真-3 内部拘束のある袋の吊上げ状況

上記の袋は現在、D・Boxと言う製品にて実用化している。道路、住宅、擁壁他で使用

され、実績も増えている。D・Boxには設置施工式の小型タイプと、吊り上設置式の大型タイプの2種類がある。

2. D・Boxの概要^{*3}

D・Boxとは区画分割された箱状の単位“Divided Box”を意味し、土の区画拘束原理を最大限に活かすよう工夫された箱状の袋である。袋の上面は完全に開口するので現場で中詰め材の投入が容易に行なえ、袋の閉口はマジックテープによりワンタッチで行なえる。D・Boxには下記a), b)の2系統がある。

a) 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。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-4)。

種類：SS45(寸法：45cm×45cm×高さ8cm)とSS90(寸法：90cm×90cm×高さ8cm)



(a)使用されるパーツ

(b)設置例

写真-4 D・Box - SSと設置状況

b) 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-5)。

種類：LS100（寸法：100cm×100cm×高さ25cm）とLS150（寸法：150cm×150cm×高さ45cm）



(a) 上面を開けた状態 (b) 設置状況
写真-5 開封時のD・Box-LSと設置状況

3. 土を締め固める(下層部の地盤の締め固め)

袋の張力や、内部拘束効果により締め固められた土の強度が増すと言う事を説明してきたが、今度はD・Boxの施工事例を通して、D・Box直下の地盤自体の締め固めについて考えてみたい。通常、D・Boxを使用する現場は沼地などの超軟弱地盤も珍しくないが、仮にN値=1以下の軟弱層が10m堆積していたとしても、荷重条件が200kN/m²以下の構造物であれば、改良するのは通常50cm～1m程度の表層部である（構造物の条件により改良厚は変わるが）。こうした施工を可能とするには、D・Boxの持つ幾つかの特性と、施工プロセスが関係する。

土は一般的に土粒子、水、空気からなる3相混合体であるが、土の強度(有効応力)を基準に考えれば水と空気は土粒子同士の接触を妨げる言わばマイナス要因とみなされる。通常締め固めとは、これらの土粒子間に存在する間隙を何らかの方法により減少させ、より土粒子の密度を上げて強度を増加させる事を意味する。この事は砂礫系の地盤であれば一部の液化地盤を除いて、比較的多くの方法が選択できる。これは砂礫系地盤を構成する土粒子間の隙間が大きく、上部からの過圧により圧縮された隙間から速やかに水が排水される事による。つまり有効応力にとっての天敵である間隙水圧の影響を受けにくいのである。

しかし地盤が粘性地盤や腐葉土となると話は違って来る。特に粘性地盤は、土粒子が極めて小さく（粒径が0.005mm以下）また間隙も多い粘性土は、通常の砂などに比べ間隙比で3倍程度大きいと言う特徴を持つ。一見すると砂よりも圧倒的に密であるように見える粘土であるが、実は全く正反対の状態なのである。このため上部より荷重を受けると、すぐさま粒子間の隙間が押しつぶされるが、粘土粒子間の隙間が小さいため、水が簡単に隙間から抜け出ることが出来ない（図-3）。よって、構造物の直下では間隙水圧が過剰間隙水圧となり、時間をかけ、ゆっくりと排水し、有効応力を出現させる（圧密）。言い換えれば地盤を安定させるためには沈下を伴うのである。

結論として、通常短時間で粘性土を締め固めるのは非常に困難な事なのだ。そのため一般的には、盛り土を施し時間をかけ排水を促進させるプレロード等の工法が多く用いられる。ある意味において非常に理にかなった方法ではあるが、大きな面積に荷重をかけるため、広域に及ぼす影響が懸念される事や、必要構造物の施工着手まで、数年の時間がかかると言ったマイナス面もある。

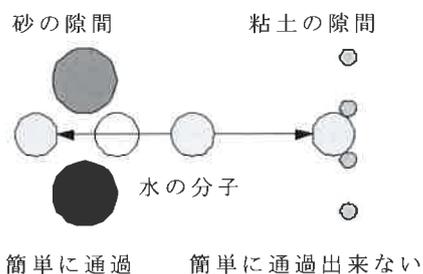


図-3 砂と粘土の間隙の違いによる排水のイメージ図

3-1 D・Boxによる仮設道路の施工例

対象となる現場は、ダムの修繕工事である。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。表層部付近に体積した土は液体に近い状態

で、幾つかの土粒子試験は実施出来ない程軟弱であった。

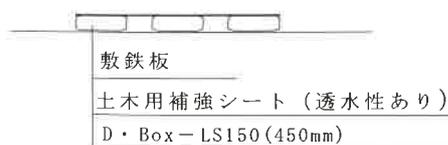
工事は接道のある水門の対面より約200m程の仮設道を設置した後、水門前に重量120 tのラクタークレーンの作業ヤードを構築するといった内容である（写真－6）。



写真－6 施工前の現場状況（手前が水門）

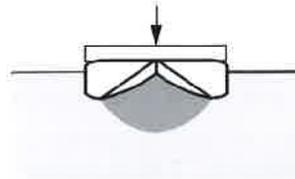
現地での調査の結果、表層部に体積する土粒子は、腐葉土分を多く含む高含水比の粘性地盤であるが、比較的排水性の高い地盤である事が直ぐに分かった。これは単純な方法ではあるが、タオル等に軟弱な土を包み、手でそのまま絞ってみれば判断できる。この時直ぐに排水が起こり、土が脱水して固くなるようであれば、D・Boxの設置後、比較的短時間で支持力が得られる（もし簡単に排水しないようであれば、間隙の小さな粘性地盤で、特に設置後直ぐに大きな荷重をかける際には注意が必要となる）。

D・Boxの敷設は図－4の通り計画した。施工の主なプロセスは、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する。これはD・Box直下の間隙水圧を強制的に上昇させるためであるが、D・Boxでは吊り上げた際D・Boxの下面部の中



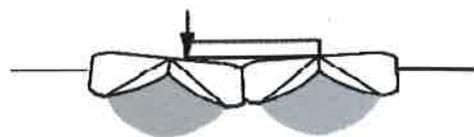
図－4 D・Boxの基本敷設断面図

心出来る大きな円錐形状部内で間隙水圧が上昇するため、これが一時的な反力として作用する（図－5）。ちょうど風呂桶を逆さにして湯船に沈めると浮力により反力を得るのと似ている現象である。土粒子、空気、水は、区画して逃げ道を無くせば圧縮だけでは破壊しないという共通な特徴を持つ。



図－5 D・Boxの下層部の円錐形状と設置時のイメージ図

②上記作業を繰り返し上部に設置される長さ6 mの敷鉄板に合わせて、両端と中央部にD・Boxをそれぞれ敷設する。本来D・Boxの長さが1.5mである事から、4袋を設置するのが理想的であるが、比較的排水性が良い地盤である事と（計算上でも確認）、仮設での経済性を考慮して3列とした。③D・Boxの設置後、上部に透水性のある土木用シートを敷設する。これはD・Box間が開いているため、敷設後の沈下によりヘドロが敷鉄板の上部に上がり、重機がスリップするのを防ぐためである。またD・Boxが下面部にて支持力を持つため、シート自体の張力による補強効果も期待できるので設置した。④最後に上面部に敷鉄板を敷設する。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。この時点で注意しなければならないのは、設置直後のD・Boxに図－6の様な偏芯荷重がかからない様にする事である。



図－6 超軟弱地盤上でD・Box敷設直後に偏芯荷重をかけた場合の図

D・Boxだけでも18kNの荷重をいきなりかけ、更に30 t近い重機が持ち上がるほど押し込んで耐えている状態ではあるが、そこは人も立てない軟弱地盤である。反力が有効応力であるとは考えにくい、恐らく間隙水圧で沈下を一時的に抑止しているのである。このため超軟弱地盤におかれたD・Boxは、ちょうど筏（イカダ）が水に浮いているのに近い状態のため、面的に載荷すれば反力を返すが、偏心させればD・Boxも沈下を起こす（D・Boxの構造上17°以上傾けると沈下する）。こうして設置されたD・Box及びD・Boxの下面部直下の地盤では、局所的な荷重により部分的に上昇した間隙水圧は、D・Boxの影響のない周辺地盤部に排水（静水圧状態の）する他、D・Box自体も、D・Boxの持つフィルター効果（水だけを吸水して土粒子はせき止める）により直下の間隙水圧を消散していく*4。



写真-7 D・Boxの施工状況

ここで重要なのは、先の袋内部に区画された土の締固めと違い、粘性地盤を含めた土そのものの締固めの対象が、必ずしも土粒子あるいは有効応力だけでは無いと言う事である。例えば飽和土に応力 σ を載せた時、土粒子骨格 σ' と間隙水圧 u がどのようにこれを受け持つかは $\sigma = \sigma' + u$ の式で表す事が出来る。また有効応力を直接測定するのが困難なため上記式を変換して $\sigma' = \sigma - u$ の形として理解されているのが一般的である。勿論、最終的には間隙水圧が減少して安定的な有効応力が得られる事は必要であるが、必ずしも

間隙水圧が敵と言う訳ではない。図-7に示すのは、先の飽和度に載荷した場合のバランス状態をグラフにしたものであるが、この形を見れば σ' と u の配分に関係なく、双方が反力として作用するなら、常に σ と釣り合う事が分る。また土粒子が殆ど無い状態を除くが、超軟弱地盤での施工状況を見ていると、D・Boxが間隙水圧（正確には過剰間隙水圧）を反力として利用している様子が確認できる。その後はフィルター効果により徐々に有効応力の比率を増しながら安定する。

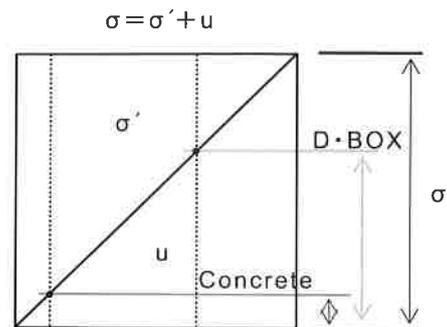


図-7 全応力 σ と $\sigma' + u$ のバランス状態

おわりに

今回「締固め」をテーマとする執筆であったが、製品及び施工過程の中で確認された実例を通し、出来るだけ視点が広がるよう意識した。辞書的な理解であれば単純なワードであるが、今後より広い視点での理論分野と実証分野との連動性ある研究位置における本質的な課題であると感じた。

参考文献

- *1 駒澤正夫：重力測定による富士山の重量と内部構造，地質ニュース590号，44-48，2003.
- *2, 3 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24，143-150，2009.
- *4 松岡元，山本春行，野本太：現代版土の工法としてのD・Box工法とその複合効果，ジオシンセティックス論文集25，19-26，2010.
- * 松岡元，土質力学，森北出版(株)，1999.

(口絵②参照)



調査件名

地点番号

測定深さ (m)	貫入量 (m)	打撃回数	Nd値	推定N値 (Nd/1.5)
0.10	0.10	0	0.0	0.0
0.20	0.10	0	0.0	0.0
0.30	0.10	0	0.0	0.0
0.40	0.10	0	0.0	0.0
0.50	0.10	0	0.0	0.0
0.60	0.10	0	0.0	0.0
0.70	0.10	0	0.0	0.0
0.80	0.10	0	0.0	0.0
0.90	0.10	0	0.0	0.0
1.00	0.10	2	2.0	1.3
1.10	0.10	0	0.0	0.0
1.20	0.10	0	0.0	0.0
1.30	0.10	1	1.0	0.7
1.40	0.10	1	1.0	0.7
1.50	0.10	0	0.0	0.0
1.60	0.10	0	0.0	0.0
1.70	0.10	1	1.0	0.7
1.80	0.10	1	1.0	0.7
1.90	0.10	2	2.0	1.3
2.00	0.10	2	2.0	1.3
2.10	0.10	1	1.0	0.7
2.20	0.10	6	6.0	4.0
2.30	0.10	3	3.0	2.0
2.40	0.10	2	2.0	1.3
2.50	0.10	2	2.0	1.3
2.60	0.10	2	2.0	1.3
2.70	0.10	2	2.0	1.3
2.80	0.10	6	6.0	4.0
2.90	0.10	9	9.0	6.0
3.00	0.10	8	8.0	5.3

備考

