

# 土のう(soil bag)による地盤環境振動対策工法

名古屋工業大学名誉教授 松岡 元

## 1. はじめに

道路や鉄道による交通振動や建物振動、工場の機械振動などの全ての振動を地盤中で低減させる効果的で安価な決定的方法は、いまだに見出されていないと言っても過言ではない。1990年頃から、最も確実な地盤の補強法を模索した結果、「土を完全に包み込んでしまうこと」に到達し、「土のう(soil bag)」というものが先人の知恵として昔からあることに気付いて、土のうを活用した地盤の補強法を多くの現場で実施して来た(1,500事例以上)<sup>1)</sup>。その間、付加的な効果として、「建物基礎下に土のうを入れた結果、建て替える前に感じていた交通振動を感じなくなった」との喜びの声をあちこちの現場で聞いた(50件以上)。そこで、振動計測を行ってみると、確かに人体が感じやすい10Hz以下の周波数域での振動加速度も含めて著しく低減していた<sup>1), 2)</sup>。この計測結果に励まされて、土のう積層体の振動低減特性に関する研究を始めた。土を単に薄い袋で包んだだけの土のうが、どうして土の振動特性と著しく異なる特異な振動低減特性を示すのであろうか。土のうがその微小な伸縮性や個性性(バラバラの土のうの集合体であること)などによって、一種の高減衰の防振(免震)装置のような振動低減特性を有することを実証すると共に、それを利用した振動対策工事の事例を紹介する。ここでは、道路交通振動、鉄道振動、建物振動の対策事例および最近のD・BOX工法による対策方法・事例について説明する。

## 2. 土のう(soil bag)による振動低減特性

### (1) 土のう積層体の鉛直方向の振動低減特性<sup>2)</sup>

#### a) 土のう積層体の振動実験

図-1(a)に示すように高さ8cm、幅と奥行約40cmに転圧した土のうを5段に積み上げて、起振機を土のう積層体上に設置した。振動の計測には、ひずみゲージ変換式の加速度センサーを用い、各土のう間に挟み込んで鉛直方向の振動加速度を計測した。起振機(質量28kg)は、モーター両端にある偏心おもりを回転させる機構のものであるが、変速機により6Hzの一定周波数で定常振動を与えるものとした。なお、土のうはポリエチレン製(破断張力12~13kN/m)を使用し、中詰め材には通称白銀珪砂3号(最大粒径

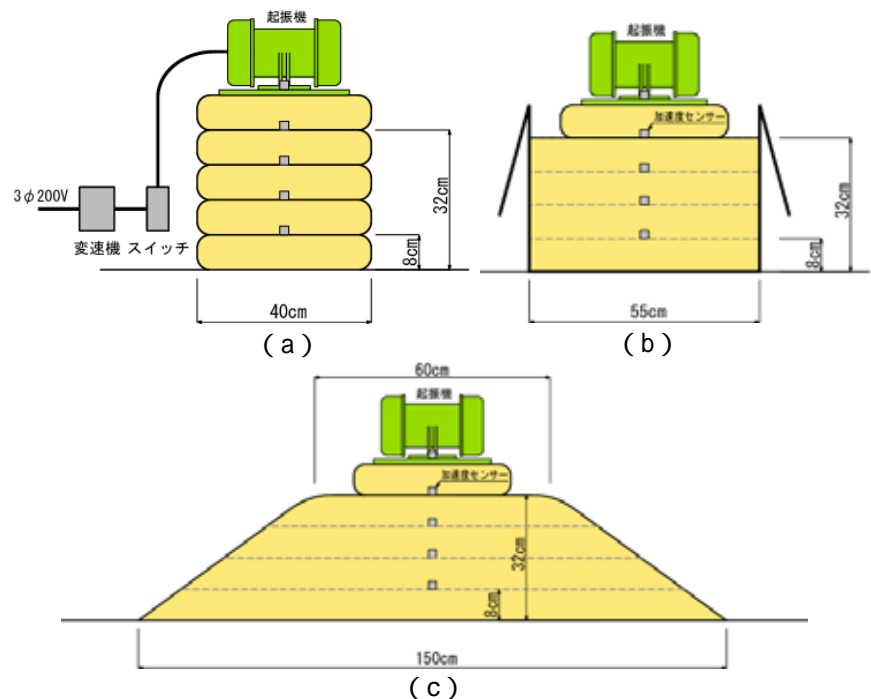


図-1 土のう積層体(a)の鉛直方向の振動低減効果(一様地盤(b),(c)との比較)

3.4mm、平均粒径 1.2mm、最小粒径 0.3mm、  
 相対密度 約 60%) を使用した。

**b) ダンボールに砂を入れた一様地盤モデルでの振動実験**

袋によって拘束されていない様な地盤との比較を行うため、高さ 40cm、幅・奥行き 55cm のダンボール箱に、土のうの中詰め材と同じ白銀珪砂 3 号を満たし、**図-1(b)** に示すように、土のう 1 段の高さに対応するよう床面から高さ 8cm 毎に加速度センサーを設置した。起振機の場合は土のう積層体の場合と同じであるが、振動を発生させた際起振機が沈下しないように、土のうを 1 段設置した上に起振機を置き計測を行った。

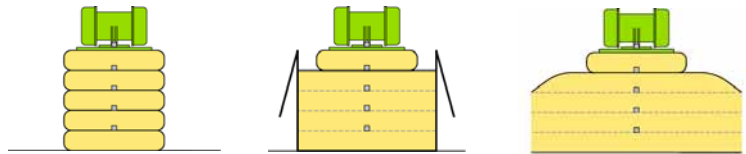
**c) 砂山のような一様地盤モデルでの振動実験**

さらに境界条件の拘束を自由にするため、土のうの中詰め材と同じ白銀珪砂 3 号を用いて、**図-1(c)** に示すような高さ 32cm の砂山を作った。ダンボール箱を用いた場合と同様に高さ 8cm 毎に加速度センサーを設置し、振動を発生させる際起振機が沈下しないように、土のうを 1 段設置した上に起振機を置き振動計測を行った。

**a) ~ c)** の 3 ケースの実験結果をまとめた表を**図-2** に示す。4 段目のセンサーから 1 段目のセンサー (24cm の間) における振動加速度の伝達率 (%) を比較すると、土のう積層体は、ダンボール箱の中の一様地盤と比べて 4 倍以上、砂山のような一様地盤と比べても 3 倍、振動を低減することがわかる。この理由としては、土のうの短軸方向に直接上下振動が作用した場合には、土のう自体がわずかに拡幅したり縮小したりして、振動エネルギーを中詰め材の砂粒子間 (あるいは土のう袋間) の摩擦熱エネルギーとして減衰させるためと思われる。このように土のうの持つしなやかさは、極めて有効な振動減衰効果を発揮するということが実証された。

**(2) 土のう積層体の鉛直振動の水平方向への伝播特性<sup>2)</sup>**

次に、隣接する土のう間の水平方向の振動伝播を調べるため、鉛直に 4 段積んだ土のう積層体を**図-3** に示すように 2 列に並べて振動実験を行った。土のうの中詰め材には白銀珪砂 3 号を用いた。加速度センサーは、鉛直方向の振動計測の場合と同様に各土のう間に挟み込み、受感軸が鉛直方向になるように設置した。土のう積層体の最上部では、センサーの鉛直方向の受感軸が傾かないように、加速度センサーをタイル板 (9.5cm × 9.5cm × 厚さ 7mm) に貼って設置している。起振機は振動周波数が 6Hz (質量 28kg) のものと 60Hz (質量 25kg) のものの 2 種類を使用した。また、床面を伝わる振動の影響を評価するため、隣接する土のうを接触させない場合の実験も行った。



	土のう積層体		一様地盤(その1)		一様地盤(その2)				
4段目	355		173		290				
3段目	55%	195	85%	147	69%	199			
2段目	13%	64%	124	57%	80%	119	39%	68%	136
1段目	37%	46	84%	99	83%	113			

単位: gal (p-p値)

図-2 土のう積層体と一様地盤との振動伝播の比較

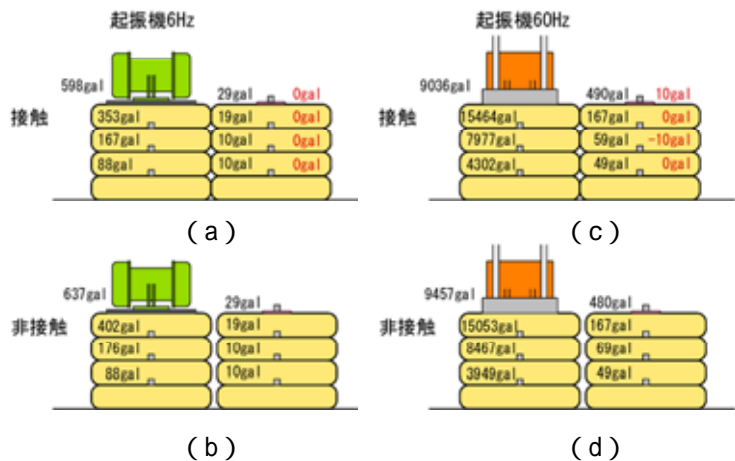


図-3 隣接する土のう間の水平方向の振動低減効果

実験結果を図-3中に示す。図-3(a),(b)は6Hzの起振機の場合、図-3(c),(d)は60Hzの起振機の場合の実験結果を示している。図-3(b)より土のうどうしを接触させなくても隣の列の土のうに振動が計測されたが、これはコンクリートの床面を通して振動が伝わっていることを意味している。そこで、図-3(b)の床面から伝わった振動加速度を図-3(a)の横の列の土のうの振動加速度から差し引くと、ほとんど0galとなるのが見られる。同様の整理を図-3(c),(d)に示す。60Hzの起振機を用いた場合についても、加速度センサーの感度の誤差(±10gal)の範囲でほぼ0galとなっていることが分かる(センサーの応答の非直線性が定格容量の±1%であることから、定格容量1G(980gal)の加速度センサーの誤差(±1%)は±10gal程度)。

以上の結果より、起振機の載っている土のうから横の土のうへは、たとえ接触していても、直接的には振動がほとんど伝わらないことが分かる。図-3(c)の起振機の載っている土のう上に水を入れたコップを置くと、水がコップから飛び出しそうになる程激しく揺れるのに対して、横の土のうの上では水面にわずかに水紋が生じる程度であった。これらの結果は、土のうの個別性(一袋一袋がバラバラであること)により横方向に振動が伝わりにくいということを示している。

### (3)土のう積層体の繰返しせん断特性と等価減衰定数<sup>3)</sup>

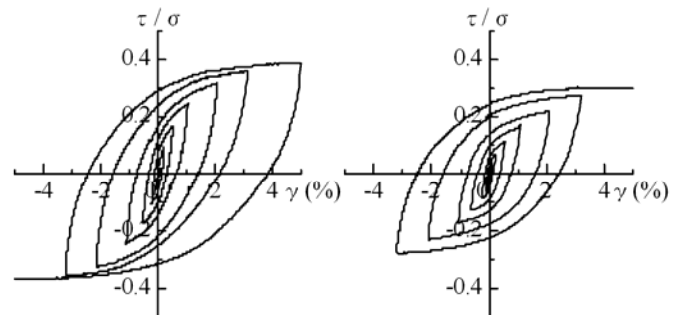
大型繰返しせん断試験機を用いて、実物土のう積層体の繰返しせん断試験を行った。写真-1に示すように、垂直荷重と水平荷重を独立に載荷できる機構になっており、載荷板がねじれたり回転したりしないようにひし形のフレームが取り付けられている。試験はひずみ制御で行い、せん断ひずみ(%)を0.2、0.5、1、2、3と徐々に大きくして繰返し、垂直応力=130kPaと310kPaで行った。中詰め材は日光珪砂6号(平均粒径0.25mm)と白銀珪砂3号(平均粒径1.2mm)を用いた。積層段数は、2段と6段で行なった。日光珪砂6号入り土のうの積層段数6段の試験結果を図-4(a),(b)に、白銀珪砂3号入り土のうの積層段数2段の試験結果を図-5に示す(写真-2参照)。以上の繰返しせん断試験結果から等価減衰定数 $h_{eq}$ を計算して比較した。等価減衰定数 $h_{eq}$ は次のように定義される。



写真-1 実物土のう積層体の大型繰返しせん断試験機



写真-2 土のう積層体6段の繰返しせん断試験の状況



(a) 6段、 $\sigma=130\text{kPa}$

(b) 6段、 $\sigma=310\text{kPa}$

図-4 日光珪砂6号入り土のう繰返しせん断試験結果

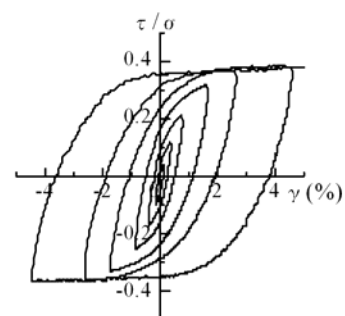


図-5 白銀珪砂3号入り土のうの繰返しせん断試験結果(2段、 $\sigma=130\text{kPa}$ )



$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

ここに、 $W$  は 1 サイクルの損失エネルギー、 $W$  は弾性ひずみエネルギーであるので、等価減衰定数  $h_{eq}$  は弾性ひずみエネルギーに対する損失エネルギーの比を意味する。つまり、ループの面積が大きいほど減衰定数  $h_{eq}$  は大きくなる。図-6 は各せん断ひずみごとに式(1)で計算した減衰定数  $h_{eq}$  を示したものである。図-6(a), (b)より、土のう積層体の減衰定数  $h_{eq}$  (黒印) は、せん断ひずみ が 1(%)以上の範囲では、中詰め材だけの場合(白印)とほぼ同じかやや大きくなるのがわかる。また、せん断ひずみ が 1(%)以下の範囲でも、中詰め材だけの場合(白印)のように減衰定数  $h_{eq}$  が小さくなることなく大きな減衰性能を保つのも見られる。また、図-6(b)より、土のう積層段数 2 段と 6 段がほぼ同じ減衰定数  $h_{eq}$  であることがわかる。このことは、高く積み上げられた土のう積み基礎も高い減衰性能を持つことを示している。これらの試験結果、およびマス・バネ・ダッシュポットからなる防振装置モデルと土のう積層体上に起振機を載せた振動実験結果との比較<sup>4)</sup>より、土のう積層体の等価減衰定数は  $h_{eq}=0.15\sim 0.30$  程度と考えられる。

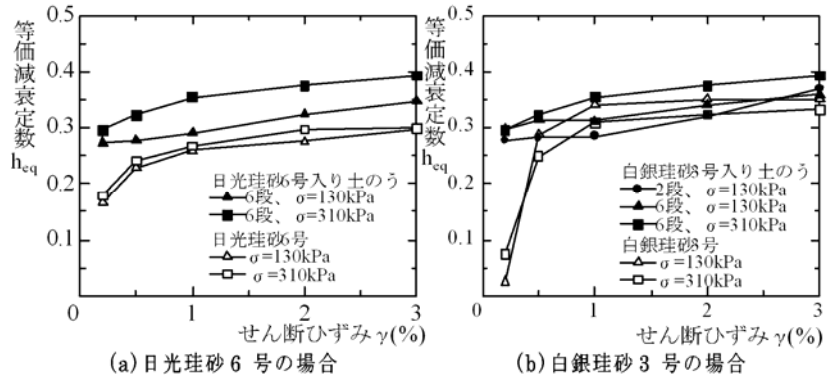


図-6 土のうと中詰め材の減衰定数の比較



写真-3 名古屋市赤塚交差点付近での土のう積層体を用いた防振工の施工状況

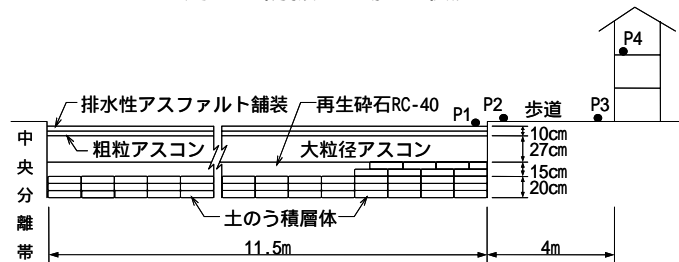


図-7 名古屋市赤塚交差点付近での土のう積層体を用いた防振工の施工概要

表-1 対策工前後の振動レベルの比較

測定位置	P1	P2	P3	P4
施工前	67dB	66dB	57dB	65dB
施工直後	55dB	54dB	46dB	50dB
1年3ヶ月後	54dB	55dB	48dB	50dB

### 3. 土のう (soilbag) による振動対策工事の事例

#### (1) 道路交通振動の対策工事例<sup>5)</sup>

名古屋市の赤塚交差点(アスファルト舗装)は、片側の道路幅約 12m の交差点で、交通量が非常に多く、それに加えて基礎地盤の軟弱さのため、沿道の住民からの交通振動に対する苦情が出る場所であった。対策工として、路床部の上層に土のう 3 段(総高さ: 約 20cm)を施工するとともに(写真-3 参照)、振動伝播を極力防ぐために歩道寄りのコンクリート製側溝との接点に土のうを 2 段多く配置した(図-7 参照)。施工延長は 22m で約 5,000 袋の土のうを使用した。なお、路床面(土のう積層体 3 段の上面)から下 30cm はシルトまじり砂、30cm~100cm は砂質礫であった。

表-1 は、施工前、施工直後、施工後 1 年 3 ヶ月における各測点での振動レベルの計測値の比較を示し

たものである<sup>5)</sup>。計測は道路端 P1、歩道の道路寄りの点 P2、官民境界点 P3 および苦情の出ている鉄骨 3 階建て民家の 3 階フロア上の点 P4 の 4 点でほぼ同一時刻に行ない、10 分間計測したものの最大値を示した。防振工施工前後で振動レベルが 11 ~ 15dB も低減し、施工後 1 年 3 ヶ月経過しても振動レベルの値が施工直後とほとんど変化していないのが見られた。

この他に、鳥取県環状道路において、路床上部に土のう（中詰め材：砕石）3 ~ 4 段を設置した区間と通常路床の区間との振動レベルを比較したところ、土のう区間の方が官民境界において 8 ~ 11dB も低減しているのが見られた<sup>6)</sup>。

さらに、釧路道路事務所の国道 38 号線においても、砕石入り土のうで湧水処理を行なった後に路床上部に土のう（中詰め材：砕石）4 段を設置したところ、振動レベルが施工前の 66dB から 63dB に 3dB 低下し、周辺の苦情のない箇所 の 62dB と同程度となった。また計測時間内の 65dB 以上の振動の発生割合も施工前の 71% から 16% に大幅に減少した<sup>7)</sup>。

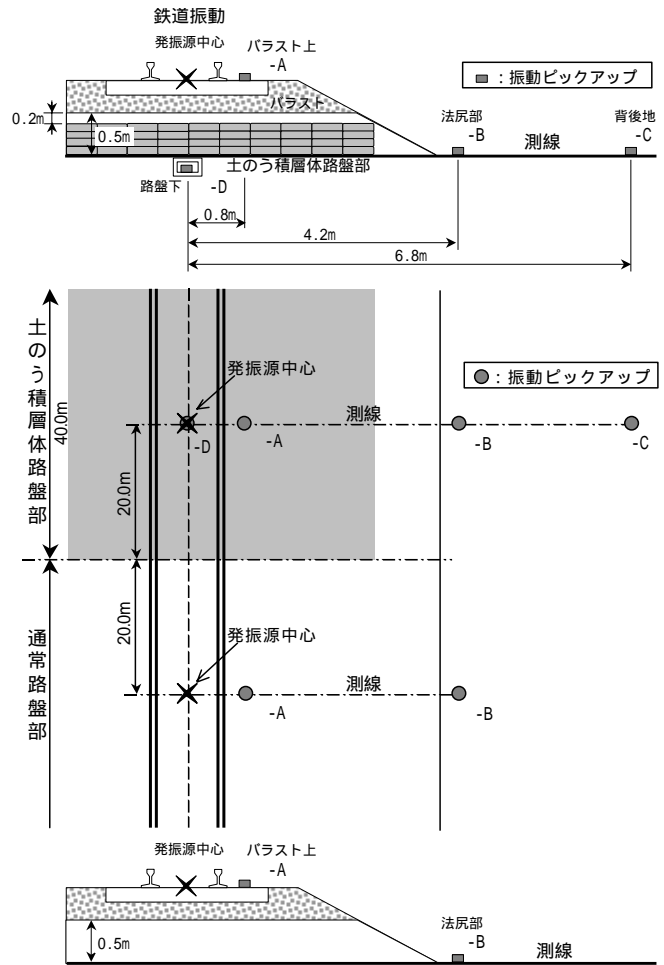


図-8 施工概要および測点位置

## (2) 鉄道振動の対策工事例<sup>8)</sup>

鉄道路路盤部に土のう積層体を設置し、土のう積層体の路盤部と隣接する通常の路盤部において、供用後の鉄道振動を対象に伝播状況を調査した。図-8 に土のう積層体の敷設状況を示す。路盤部に砕石（粒径 40mm 以下）を中詰め材とした土のう（40cm × 40cm × 高さ 8cm）を 4 段、延長約 40m 敷設した。調査地

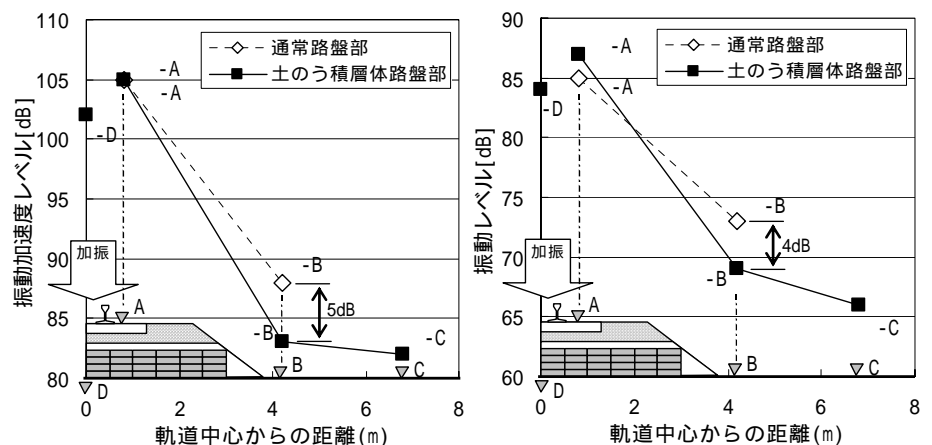


図-9 振動加速度レベルと振動レベルの計測結果（距離減衰）

点は、土のう積層体路盤部および通常路盤部の測線について、現地の状況を勘察し、バラスト上（測点 -A、測点 -A：軌道中心から 0.8m）、法尻部（測点 -B、測点 -B：軌道中心から 4.2m）、その後地（測点 -C：軌道中心から 6.8m、土のう積層体路盤部のみ）の計 5 測点とした。

列車の走行による振動発生時に各測点で測定した振動加速度レベルと振動レベルの最大値（測定した列車 32 本の上位半数の平均値）を図-9 に示す。土のう積層体路盤部は通常路盤部と比べて、法尻部（測

点 B：軌道中心から 4.2m) で、振動加速度レベルが 5dB、振動レベルが 4dB 低い結果が得られた。また、軌道中心から 0.8m (測点 A：バラスト上) では、土のう積層体路盤部の振動レベルが大きくなっているが、これはバラスト層と土のう積層体層の性状の違いによる反射波の影響と考えられる。したがって、今回のように土のう積層体は路盤部全幅に敷設して、バラスト部の反射波や表面波が法尻側へ伝わらないようにすることが大切である。

軌道中心から 0.8m (測点 A:バラスト上) 4.2m (測点 B:法尻部) および軌道中心の土のう積層体路盤下(測点 D)における FFT 分析結果を図-10 に示す。軌道中心から 0.8m (測点 A:バラスト上) では、土のう積層体路盤部と通常路盤部の周波数特性は同様の傾向を示し、60Hz 以上の高周波数帯域で卓越しているが、軌道中心の土のう積層体路盤下(測点 -D)では、50Hz 以上の周波数帯域で -A より低下している。また、軌道中心から 4.2m (測点 B:法尻部) では、通常路盤部の周波数特性

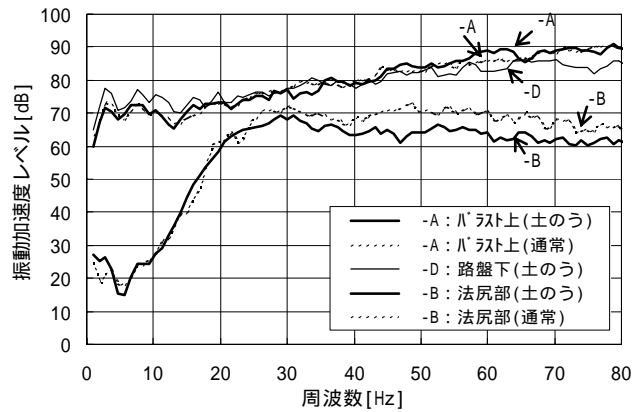


図-10 振動加速度レベルの周波数特性

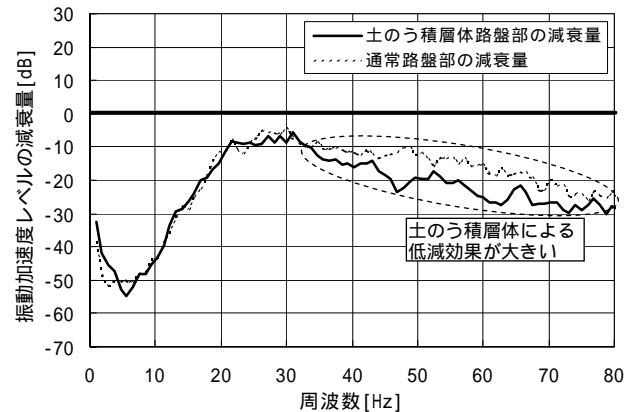


図-11 振動加速度レベルの減衰量の周波数特性

は 25 ~ 60Hz の周波数帯域で卓越しているのに対し、土のう積層体路盤部は 30Hz 付近の周波数で卓越している。図-11 は両路盤の振動加速度レベルの減衰量 (各測線における地点 A から B の振動加速度レベルの低減量) を示したものである。図-11 より 30Hz 以下はほぼ同程度あるが、30Hz 以上の周波数帯域で土のう積層体路盤部の方が大きく低減 (最大 10dB) しているのが見られる。これらのことから、土のう積層体の振動低減特性は、発生した振動が土のう積層体路盤部を通過するとき、土のう積層体の固有振動数 (载荷重によって変化する) と考えられる 30Hz 付近で卓越する振動に変化し、そこで良く揺れて振動エネルギーをロスすることによって、その後の振動が低く抑えられると考えられる。すなわち、土のう積層体がしなやかな特性を活かして防振装置として働き、その卓越振動が相対的に大きくなることによって、振動エネルギーを中詰め材の土粒子間 (あるいは土のう袋間) の摩擦熱エネルギーとして減衰させ、その後の振動を低減させると考えられる。

### (3) 建物振動の対策工事例<sup>5),9)</sup>

建物の基礎部に土のう積層体を配置した場合の振動低減効果を検討するために、特別に建てられたほぼ同じ 2 棟の建物(土のう有り無し)に対して、建物外の振源から同じ振動を与えて建物内で振動計測を行ない比較検討した。

対象地盤が硬かったので、長さ 1774cm × 幅 746cm × 深さ 100cm の範囲を一度掘り起こし



写真-4 改悪された地盤上に建設された 2 棟の建物 (土のう有り無し) と土のう積層体の配置図

て、転圧せずに埋め戻す地盤改悪工事を行ない、その上にほぼ同じ建物を2棟建てた(写真-4参照)。その片方の建物(外断熱材棟)の基礎部に、外周3段・内部3段の土のうを敷き詰め、土のうの間隙には砂を入れて各段毎に転圧した。なお、土のうの中詰め材には砕石(粒径40mm以下)を使用した。また、もう一方の建物(内断熱材棟)の基礎部は、割栗石を敷き詰めた。

この2棟の建物で、種々の振源の周波数(10, 15, 20, 30, 40, 50, 60Hz)に対して振動レベルと振動加速度の計測実験を行った。ここで、起振機は特定の周波数で振動を発生させることができる、周波数可変式導電型垂直起振機(TYPE500L, ビック(株))を使用し、2棟の建物間の端から4m離れた位置に配置した(図-12参照)。そして、振動レベル計を2棟の建物内の中央に、加速度センサーをそれぞれの建物内の中央点と、起振機の上部、起振機の地盤と接する円盤部(起振機の底部)に配置し、2棟の建物内の上下方向の振動レベルと振動加速度を計測した。

以上の計測より求めた、それぞれの振源の周波数に対する振動レベルの比較結果を図-13に、振動加速度振幅の比較結果を図-14に示す。これより、振源の周波数10, 15, 30, 50, 60Hzについては、土のうを基礎部に配置した建物の方が振動レベル・振動加速度振幅の値が共に小さくなっており、土のう積層体の振動低減効果が認められた。なお、振源の周波数40Hzは土のう積層体の固有振動数に対応すると考えられ、振動が低減しにくくなっているのが見られる。

#### 4. D・BOXによる振動低減特性

##### (1) D・BOXの概要

D・BOXとは区画分割された箱状の単位(Divided Box)を意味し、もはや「土のう」と呼べないほど進化しているので新たにこのように名付けた。D・BOXは土の区画拘束原理を、最大限に生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の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

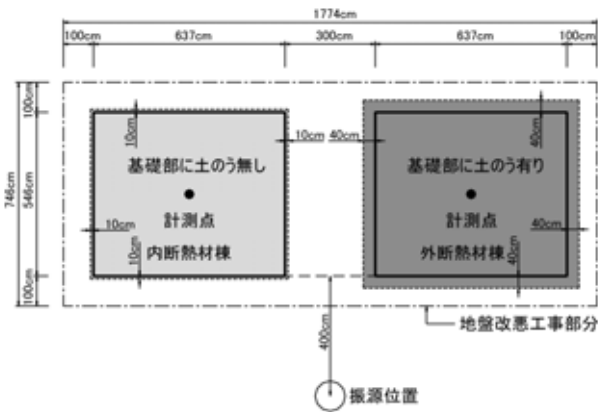


図-12 基礎部に土のう積層体を配置した場合と配置しない場合の2棟の平面図

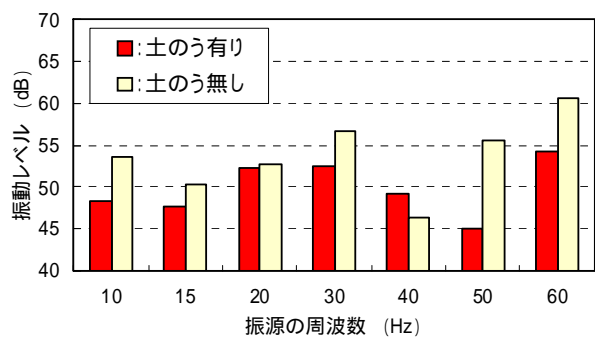


図-13 基礎部に土のう積層体を配置した場合と配置しない場合の振動レベルの比較

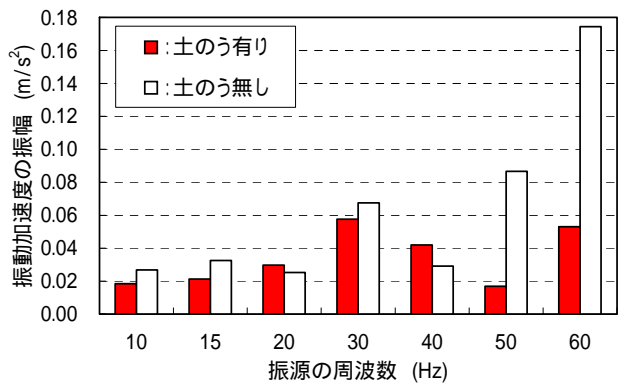


図-14 基礎部に土のう積層体を配置した場合と配置しない場合の振動加速度の振幅の比較



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ほか、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-5参照）

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



1)使用されるパーツ 2)上部より資材投入し袋を閉口 3)転圧 4)設置完了

写真-5 D・BOX - S S 45 とその設置状況

### 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、内部の土を固化させ直方体形状を維持したままで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-6参照）

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



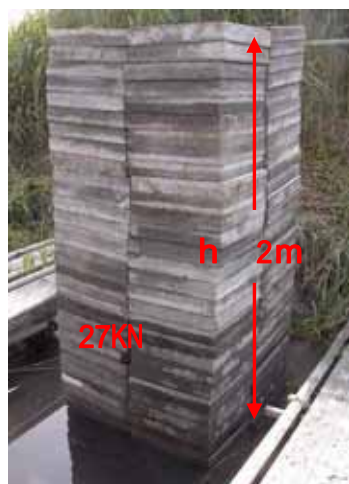
1)重機を使い上部より資材を投入し上面を閉口 2)LSを吊上げ移動し所定位置に設置 3)敷設後十分転圧を行い設置完了

写真-6 D・BOX L S 150 とその設置状況

D・BOXは、粘性土、砂質土、礫質土、有機質土などほとんど全ての地盤に適用でき、さらに、水浸状態の超軟弱地盤（沼地等）でも施工可能である（写真-7参照）。加えて、極めて高い振動低減効果（5～15dB低減）および地震動低減効果がある。次に、D・BOXの振動低減特性について述べよう。

### （2）D・BOXによる振動低減特性

ジョイントで連結された2個×2個=4個のSS45を3段積層したもの、1個のSS90を



足場用土のう3個×3個を1段、SS45 3個×3個を2段と2個×2個を1段敷設（合計32cm厚さ）  
最終沈下量6.7cm

写真-7 腰まで沈む沼地（深さ約3m）での沈下試験



3段積層したもの、1個のLS100の1段のもの、1個のLS150の1段のもの、それと比較のため、連結されていない2個×2個=4個の通常の土のうを3段積層したものを並べて、それらの上面中心部に振源を置いて振動実験を行なった(写真-8(a)(b)参照)。振動計測器は、上記のD・BOXおよび土のう積層体中心位置より1.5m離れた位置にセットした。振源は、質量60kgのプレートコンパクターをフルスロットルで稼働させた状態とし、10秒毎の最大振動レベル(dB; Z方向)を計測した。なお、振源を地盤上に直接置いた状態で、1.5m離れた位置での振動計測も行ない、比較した。

表-2は、5回の計測の平均値を示したものである。この表より、振源を地盤上に直接置いた場合と比べて、従来の土のうを3段積層したものが数dBしか低減しないのに対して、SS45、SS90を3段積層したものは約10dB、LS100、LS150については10dB以上低減しているのが見られる。SS45やSS90が、サイズがほぼ同じであるにもかかわらず、通常の土のうよりも大幅に振動低減する理由としては、内蔵されているプラスチック製のガイドゲージによる拘束効果と連結効果のためと考えられる(SS90の中には、45cm角のガイドゲージが4個連結して内蔵されている)。また、大型D・BOXのLS100やLS150が1段でも10dB以上も振動低減することは、袋の微少なしなやかさに基づく振動低減のメカニズム、すなわち振動エネルギーが振動時の袋のごく微少な伸縮によって生じる中詰め土粒子間のズレに基づく摩擦熱エネルギーとして消散されるというメカニズムが卓越していることを意味している。このようにD・BOXは、振動エネルギーの消散メカニズムを内蔵する高減衰の防振装置と考えることができる。



(a) 手前がSS45



(b) 手前よりLS100、SS90、土のう、LS150  
写真-8 D・BOXの振動実験

表-2 各種D・BOXおよび土のう積層体の振動レベルの比較 (単位:dB)

	地盤上直	土のう	SS45	SS90	LS100	LS150
計測平均値	72.0	69.8	61.3	62.2	59.8	60.7
振動低減量	-	2.2	10.7	9.8	12.1	11.3

次に、表-3は、通常の土のう1個を3段積層したもの、4段積層したもの、5段積層したもの、振源を地盤上に直接置いた状態のものとの振動レベル値を比較したものである。いずれも5回の計測の平均値を示している。この表より、通常の土のうを積層する場合は、振源にもよるが4~5段以上積層することが望ましいと言える。

表-3 通常の土のう1個の多段積層体の振動レベルの比較 (単位:dB)

	地盤上直	土のう3段	土のう4段	土のう5段
計測平均値	72.0	71.1	69.9	67.3
振動低減量	-	0.9	2.1	4.8

表-4は、SS45 1個を1~3段積層した状態でのガイドゲージの有無の影響を調べたものである(いずれも5回の計測の平均値を示している)。積層段数1段と2段においては、ガイドゲージ有りのほうがガイドゲージ無しと比べて2dB多く低減しており、袋の中に内蔵されているガイドゲージによる拘束効果が効いていると思われる。なお、SS45の袋の上面は4辺からの4枚のフタを折りたたんでマジックテープで止めるため、袋材が4重に重なった構造になっていて剛性が高いと考えられる。

表 - 4 SS45 1個を1～3段積層した状態でのガイドゲージの有無の影響 (単位: dB)

	地盤上直	ガイドゲージ 無			ガイドゲージ 有		
		SS45 1段	SS45 2段	SS45 3段	SS45 1段	SS45 2段	SS45 3段
計測平均値	72.0	70.2	68.0	66.0	68.2	66.0	65.8
振動減衰量	-	1.8	4.0	6.0	3.8	6.0	6.2

表-5は、LS150の振動低減特性に及ぼすトラスバンドの有無の影響を調べたものである(いずれも5回の計測の平均値を示している)。この場合、振源を地盤上に直接置いたときは約73dB、トラスバンド無しLS150の上に置いたときは約66dB、トラスバンド有りのLS150の上に置いたときは約58dBであった(写真-9参照)。トラスバンドの有無で約8dBも低減量が異なるのは興味深い。トラスバンド有りのほうが、土粒子の拘束効果が大きいため、土粒子間の摩擦力も大きくなり、土粒子間の摩擦熱エネルギーによる消散が大きくなると考えられる。



1) トラスバンド無の内部と中詰材投入後の形状 2) トラスバンド有の内部と中詰材投入後の形状

写真-9 トラスバンド有無のD・BOX - LS150の様子

表 - 5 LS150の振動低減特性に及ぼすトラスバンドの有無の影響 (単位: dB)

	地盤上直	トラスバンド無	トラスバンド有
計測平均値	73.0	66.3	58.2
振動低減量	-	6.7	14.8

表-6は、写真-10に示すようにジョイントで連結された2個×2個=4個のSS45を1～3段積層した場合の振動低減の様子を示したものである(いずれも5回の計測の平均値を示している)。この表より、2段以上積層すれば、振動低減効果が大きいのが見られる。

表 - 6 ジョイントで連結された2個×2個=4個のSS45を1～3段積層した場合の振動レベルの比較 (単位: dB)

	地盤上直	SS45 1段	SS45 2段	SS45 3段
計測平均値	72.0	68.2	62.7	61.3
振動低減量	-	3.8	9.3	10.7



写真-10

ジョイントで連結された2個×2個=4個のSS45を2段積層した場合の振動実験の様子

最後に、表-7は写真-11に示すようにLS150の上にSS90を2段積層した場合の振動低減量を調べたものである(5回の計測の平均値を示している)。この表よりわかるように、振動低減量は15.1dBであった。プレートコンパクターは片手で軽く支える程度で安定しており、振動をあまり感じない。このような簡単な方法で15dBも振動低減できるとは、驚きである。

### (3) D・BOX 工法による道路交通振動の対策工事例 1

Y 県のダム工事の進入路の地盤改良・振動低減工法として D・BOX 工法が採用され、振動計測も行ったので報告する。写真-12 は D・BOX 工法の施工中の写真を示したものである。

振動計測は、10 t トラックに土砂を満載した計 20 t の車輦を時速 5km で走行させ、測定箇所通過時の最大振動レベル (dB ; Z 方向) を計測した。

1 回目の計測は施工前の現状地盤で行ない、2 回目の計測は D・BOX - LS150 を 1 段敷設し、その上に厚さ 20cm の上層路盤 (砕石 C - 40) を施工した状態で行ない、3 回目の計測はさらにその上に厚さ 4 cm のアスファルト舗装を施工した状態で行なった。振動計測ポイントと道路断面図を図-15 に示す。計測ポイントは、発振源(車輦)中心より、P1 : 1.5m、P2 : 3.1m、P3 : 6.2m、P4 : 8.4 m 離れた点である。また、1~3 回目の計測時の道路面の状態を写真-13 に示す。

表-8 は、1~3 回目の各計測ポイントにおける最大振動レベルの測定値 (6 回の計測の平均値) を示したものである。なお、2 回目の計測時には、トラックの走行距離が十分とれなくて測定箇所通過後すぐにブレーキをかけなければならない状況であったため、ブレーキ時の最大 dB を測定したかもしれない。しかし、最終的な舗装状態 (3 回目) では現状地盤状態 (1 回目) と比べて、20dB 以上も振動低減しており十分有効な振動低減工法であることが実証された。

ところで、3 回目の計測は、舗装後供用されて 4 ヶ月近く経った時点のものであり、ダンプカーが一日に 100 回以上往復するという過酷な荷重状態を経験した後のものである。舗装厚さがわずかに 4 cm でも、このような重量ダンプカーの頻繁な往来に十分耐えて、道路端部の破壊や道路面の亀裂が全く生じなかったことは特筆に値する。



写真-11 LS150 の上に SS90 を 2 段積層した場合の振動実験の様子

表-7 LS150 の上に SS90 を 2 段積層した場合の振動低減量 (単位: dB)

	地盤上直	LS150 + SS90 2段
計測平均値	72.0	56.9
振動低減量	-	15.1



写真-12 D・BOX 工法 (LS150) の施工状況

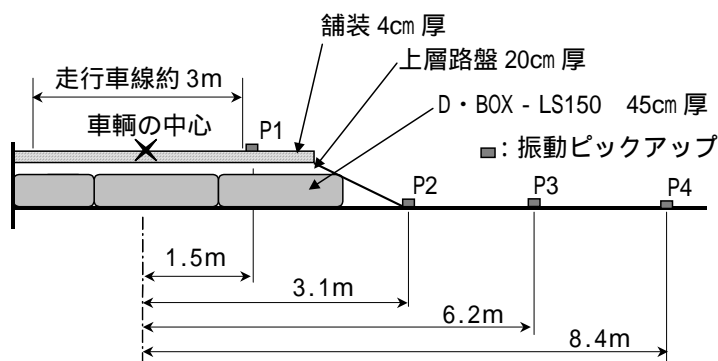


図-15 振動計測ポイントと道路断面図





1) 1回目計測時の状況



2) 2回目計測時の状況



3) 3回目計測時の状況

写真-13 1～3回目の振動計測時の道路面の状態

路床・下層路盤部の補強材としてのLS150の偉力がいかんなく発揮されたと考えられる。なお、路床はトラックが一度走ると、深い轍ができるような軟弱地盤であった。

表-8 各計測ポイントにおける振動レベルの比較(単位: dB)

1回目	現状地盤			
	P1	P2	P3	P4
計測平均値	63.3	57.5	53.6	53.3
振動低減量	-	-	-	-
2回目	LS150+上層路盤(20cm厚)			
	P1	P2	P3	P4
計測平均値	62.0	52.8	44.2	43.7
振動低減量	1.3	4.7	9.4	9.6
3回目	舗装(4cm厚)後			
	P1	P2	P3	P4
計測平均値	38.8	37.7	32.8	31.0
振動低減量	24.5	19.8	20.8	22.3

#### (4) D・BOX 工法による道路交通振動の対策工事例2

S県H市においてセメントによる路床改良を行ったにもかかわらず、住民による交通振動の強い苦情が出た区間で、地盤改良・振動低減工法としてD・BOX工法が採用され、事前事後の振動計測も行ったので報告する。写真-14はD・BOX工法施工前の道路状況を、写真-15はアスファルト舗装を剥がした後の水浸地盤の軟弱さを、写真-16はその水浸軟弱地盤上にD・BOX-LS100(寸法:100cm×100cm×高さ25cm)を原則1段敷設している状況を、写真-17はほぼD・BOXの敷設が終わってジャンピングランマーとローラーで転圧している状況を、写真-18はその上に上層路盤材(厚さ150mm)を撒きだして転圧したところを、最後に写真-19は舗装(厚さ100mm)終了後の道路完成時の状況を示したものである。



写真-14 施工前の道路状況



写真-15 掘削後の水浸軟弱地盤



写真-16 D・BOXの敷設状況



写真-17 D・BOX敷設後の転圧状況



写真-18 上層路盤の施工状況



写真-19 完成時の道路状況

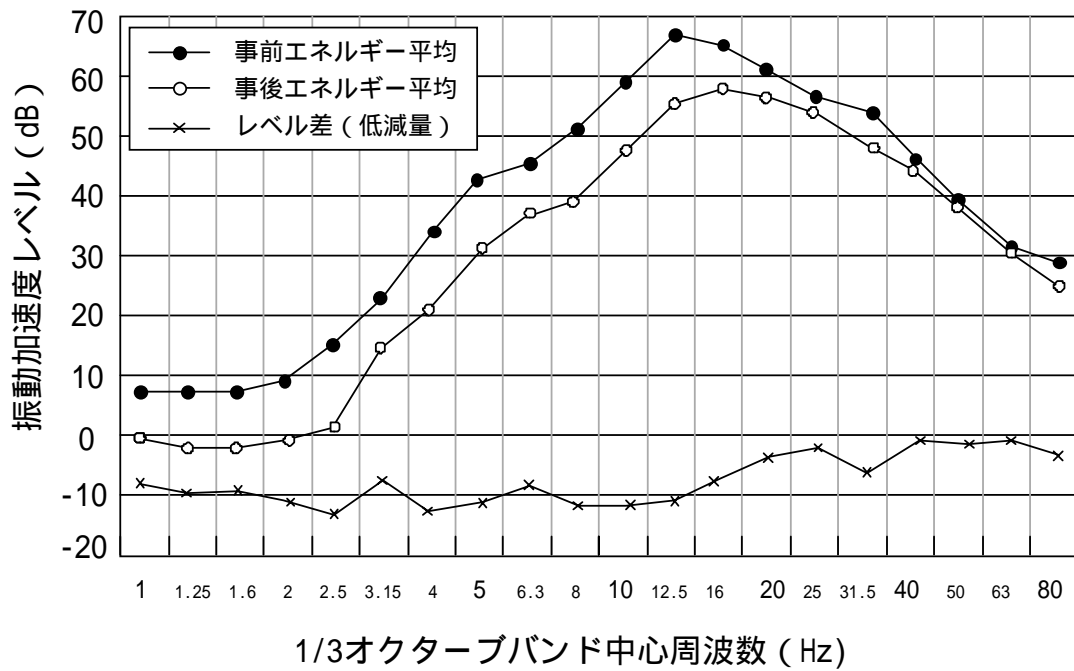


図-16 事前と事後における振動加速度レベルの周波数特性の比較

D・BOX - LS100 の敷設は原則 1 段としたが、セメントによる路床改良がほとんど効いていないような水浸軟弱箇所には、部分的に 2 段の敷設をした。D・BOX - LS100 の施工速度は極めて速く、1 日で約 580 袋敷設でき、延長約 100m の施工区間の道路を、掘削から舗装完了までわずか 3 日間で完成させた。

図-16 は、事前(写真-14 の状況)と事後(写真-19 の状況)における振動周波数特性の比較(鉛直方向：上位 5 ピークのエネルギー平均による振動加速度レベル)を示したものである。計測地点は、振動被害の最も大きかった民家のすぐ横の道路脇である。同図より、人体が特に感じやすい周波数(5 Hz 付近)を含む広い周波数帯(1 ~ 12.5Hz)で振動加速度レベルがほぼ 10dB 程度低減しているのが見られる。このような大幅な振動低減の理由としては、振動エネルギーが袋の微少な伸縮に伴う中詰め粒子間のズレに基づいた摩擦熱エネルギーとして消散されることが考えられる。最後に今回の施工における振動低減効果を示す逸話として、この D・BOX 内蔵道路の完成後、振動苦情を強く訴えていた住民より、発注機関に対して「振動をほとんど感じなくなって良く眠れるようになった」との喜びとお礼の電話があったことを紹介する。以上より、D・BOX 工法が軟弱地盤対策と振動対策の両方に有効な工法であることが検証されたが、このように一度の施工で複数の効果をもたらす同工法のコストパフォーマンスの高さは注目に値する。

## 5. まとめ

本土のう(soil bag)工法は粒状体の区画拘束原理に基づいた地盤補強法の一種であり、水浸ヘドロ状態の沼地のような超軟弱地盤でも土のうの中詰め材を透水性の高い砕石などにすると、土のう直下周辺の軟弱地盤に対する「局所圧密・強化作用」によって建物や道路の建設を可能にするという信じ難い底力を持っている<sup>10),11)</sup>。そのような土のう工法が、付加的な効果として、道路や鉄道による交通振動や建物振動、工場の機械振動などの振動低減効果、さらには地震動の減震効果を有するというのは極めて興味深い。道路や鉄道の路床・路盤に土のうを入れる発振側での振動低減法や建物の基礎地盤に土のうを入れる受振側での振動低減法の他に、地盤中に土のう積層体の壁を作る伝播経路での振動低減法も実用化されている<sup>12)</sup>。土のう積層体は、そのしなやかさや個別性(バラバラの土のうの集合体であること)などによって、一種の高減衰の防振(免震)装置(等価減衰定数：0.15 ~ 0.30、固有振動数：荷重によるが 30 ~ 40Hz)のような振動低減特性を有することがわかった。すなわち、振動エネルギーを土のうの中詰め粒子間(あるいは土のう袋間)の摩擦熱エネルギーとして減衰させるのである。今回新たに紹介した D・BOX 工法は、地盤補強・振動低減工法として極めて有望であり、10~15dB 以上という驚異的な振動低減の計測事例も得られた。特に、D・BOX - LS100 や LS150 が 1 段でも 10dB 以上も低減するという事は、上記の振動エネルギーを中詰め粒子間の摩擦熱エネルギーとして消散させるというメカニズムが卓越していることを示唆している。

## 謝辞

本研究に対して適切なご助言をいただいている立命館大学早川 清教授、振動計測や解析にご協力をいただいたパシフィックコンサルタンツ(株)門田浩一氏、芦刈義孝氏および(財)東海技術センター竹下 啓氏に謝意を表す。なお、4 はメトリー技術研究所(株)との共同研究の成果であり、原稿作成にもご協力いただいた野本 太氏に感謝の意を表す次第である。



## 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) 松岡 元，村松大輔，劉 斯宏，井上泰介：土のうを活用した地盤の環境振動低減法，土木学会論文集，No.764/ -67，pp.235-245，2004．
- 3) 山本春行，松岡 元，島尾 陸，長谷部智久，服部真人：土のう積層体の繰返しせん断特性と減衰定数，第 38 回地盤工学研究発表会講演集，1136，pp.2271-2272，2003．
- 4) 松岡 元，佐野欣吾，石橋敏久，八幡夏恵子：実地盤における土のう積層体の起振機加振実験 その 2：土のう積層体の防振装置としてのモデル化，第 41 回地盤工学研究発表会講演集，543，pp.1085-1086，2006．
- 5) 松岡 元，安藤友宏：土のう積層体による地盤振動の発振側・伝播経路・受振側での低減法，土木学会論文集 C，Vol.62，No.2，pp.379-389，2006．
- 6) 松岡 元，佐野欣吾，山本春行，柏崎隆志，井本哲文，石川雅之，矢野正典：土のう積層体を用いた道路振動低減の実測調査，第 41 回地盤工学研究発表会講演集，544，pp.1087-1088，2006．
- 7) 阿部 顕，阿部幸康，二ノ宮清志：海岸沿いの水位の高い道路における振動対策の施工について，第 51 回北海道開発局技術研究発表会，2008．
- 8) 松岡 元，門田浩一，芦刈義孝：土のう積層体を用いた鉄道路盤の振動低減特性，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，7-172，pp.343-344，2007.
- 9) 松岡 元，安藤友宏，中島信義，山口啓三郎，岩上 徹，柴田政彦，北脇典子：土のう積層体を建物基礎部に配置した受振側での振動低減法，日本建築学会学術講演梗概集，D1，40114，pp.241-242，2005.
- 10) 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，301，pp.601-602，2008．
- 11) 野本 太，松岡 元：高規格土のう工法による沼地上の道路建設事例，第 43 回地盤工学研究発表会講演集，302，pp.603-604，2008．
- 12) 芦刈義孝，門田浩一，船本恵一，松岡 元：土のう積層体を用いた道路交通振動の伝搬経路での低減対策について，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，7-180，pp.359-360，2005．