

セルダンパーによる工事振動対策

Countermeasure for ground vibration of the construction work by Cell Damper Vibration Isolation Mat

小林 真人^{*1} 坂崎 友美^{*1} 小林 薫^{*2}

Masahito Kobayashi Tomomi Sakazaki Kaoru Kobayashi

金子 伸^{*3} 嶋 長 真人^{*4} 藁 科 昌 之^{*5} 永 住 亮^{*6}

Shin Kaneko Masato Shimanaga Masayuki Warashina Ryo Nagazumi

【要旨】

建設工事振動に伴う地盤振動の低減対策は、発生源・伝搬経路・受振部で実施できるが発生源対策が最も効果的である。しかしながら、発生源対策が困難な場合や発生源対策では不十分な場合には、伝搬経路対策を検討する必要がある。伝搬経路対策には防振溝や防振壁などが古くから適用されているが、工法が大規模であるため簡易な対策が望まれている。この様な背景から、仮設が容易で長期耐久性に優れた材料として特殊ポリウレタン発泡体（セルダンパー）を用いた防振工法を開発した。

本報では、セルダンパーの組成、耐久性や防振性能など防振材料としての基本的特性、および施工現場における重機振動に対する防振効果の検証結果について報告する。

【キーワード】 建設工事振動 防振工法 セルダンパーマット

1. はじめに

建設工事に伴う地盤振動の低減対策は発生源・伝搬経路・受振部で実施することができ、発生源対策が最も効果的である。しかしながら、発生源対策が困難な場合や発生源対策では不十分な場合には伝搬経路対策を検討する必要がある。伝搬経路対策として防振溝や防振壁の適用が古くから検討されているが、振動低減効果を得るには十分な施工深さが必要となることや、工事終了後にこれらを撤去する必要が生じることなど、大規模な施工現場でないと適用しにくいという課題がある。また、防振溝や防振壁を設置できたとしても、これらに近接した範囲では振動低減効果を得ることができるが、遠方では地盤を伝搬する波動の廻り込みによって振動低減効果が低下することがある。

一方でポリエチレン発泡体などを防振材料として地盤上に配置し、その上に敷鉄板を敷設した防振工法がある。この工法は、仮設が比較的容易であるため施工現場へ適用しやすいこと、および発生源から地盤へ伝達する振動を低減させることから、発生源からの距離によらず安定した振動低減効果を得るなどのメリットがある。ただし、ポリエチレン発泡体は繰返し荷重への耐久性が劣るため長期使用時の防振性能の低下が懸念される。この様な背景から、仮設が容易で長期耐久性に優れた材料とし

て特殊ポリウレタン発泡体（以下、セルダンパー）を用いた防振工法を開発した。

本報では、セルダンパーの組成、防振材料としての基本特性、および施工現場における重機振動に対する防振効果の検証結果について報告する。

2. セルダンパーの組成

一般にポリウレタン樹脂は図-1に示すように、水素結合によって強い凝集力を持つウレタン基やウレア基で構成された結晶性のハードセグメント部と、ガラス転移点が高いポリオール成分から構成された非結晶性のソフトセグメント部とから構成される。

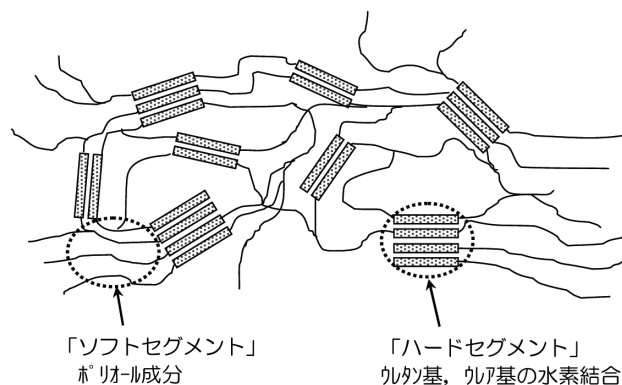


図-1 ポリウレタン構造の概念

1. 建設事業本部 技術研究所 第二研究室 2. 建設事業本部 技術研究所 3. 首都圏土木支店 笠森トンネル作業所
4. 東北支店 新幹線六枚橋作業所 5. 大阪支店 関電淀川作業所 6. (株)イノアックコーポレーション

トセグメント部が結合した共重合体である¹⁾。ハードセグメント部とソフトセグメント部は相溶性が低いため、セグメント間に界面が生じた相分離構造となることで、柔軟かつ弾性を有する強じんなポリマーとなり長期耐久性が期待できる。

この様なポリマーの性質を利用し、ソフトセグメント部に不飽和度の低いポリオールを使用することで3次元構造を強固に形成させ、より優れた耐久性を得た。このようにして得た特殊ポリウレタン発泡体をセルダンパーと呼ぶ(写真-1)。

セルダンパーはポリール分子量をコントロールしてバネ定数を決定し、架橋度や結晶性を添加剤の長さや濃度で調整することで減衰特性をコントロールしている。

建設重機の荷重に対応したセルダンパーの選定は、セルダンパーの密度によりおおよそ以下のように設定している。

- 密度150kg/m³ → 20ton以下
- 密度300kg/m³ → 20～40ton以下
- 密度500kg/m³ → 40～50ton以下

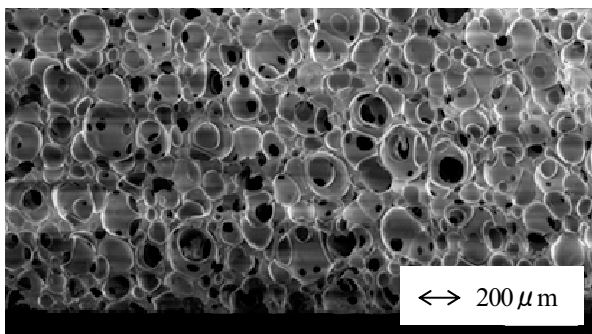


写真-1 セルダンパーの走査型電子顕微鏡写真

3. 防振材料としての基本的特性

3.1 耐久性

建設重機振動を対象とした場合、発泡系防振材料の性能低下に最も影響を与える要因は、長期荷重によるつぶれに伴う材料の硬化である。そこで、セルダンパーとポリエチレン発泡体をサンプルとして重機荷重を想定した圧縮残留歪と繰返し圧縮歪を測定した。ここで、セルダンパーは材料の初期厚みの15%ほどをたわませることで優れた防振効果を発揮すること、およびポリエチレン発泡体の許容面圧が2.7N/cm²であることから、試験体に与える面圧を2.7N/cm²として以下の測定を行った。このとき、それぞれの材料の圧縮後の厚さは、セルダンパーが初期厚み50mmに対して42.5mm、ポリエチレン発泡体は初期厚み150mmに対して129mmである。

圧縮残留歪は「JIS K 6400 軟質発泡材料—物理特性の求め方」に基づき、試験温度25℃で22時間放置した後

に求めた。試験状況を写真-2に示す。

繰返し圧縮歪の測定方法はJIS規格がないため、1日あたり重機によって500回圧縮されると想定して、20日(10,000回)、40日(20,000回)、および60日(30,000回)に相当する繰返し圧縮を行い歪を求めた。この際、1回の圧縮における振幅は2.0mm、加振周波数を5.0Hzとした。試験状況を写真-3に示す。

表-1に圧縮残留歪の測定結果を示す。ポリエチレン発泡体の圧縮残留歪が16.5mmであるのに対して、セルダンパーは0.5mmであり、セルダンパーの長時間荷重に対する復元性が優れていることが判る。

図-2に繰返し圧縮歪の測定結果を示す。ポリエチレン発泡体は圧縮回数の増加に伴い歪が大きくなり、つぶれが発生していることが判るが、セルダンパーの歪は大きく増大しておらず、長期的な荷重の繰返しにも防

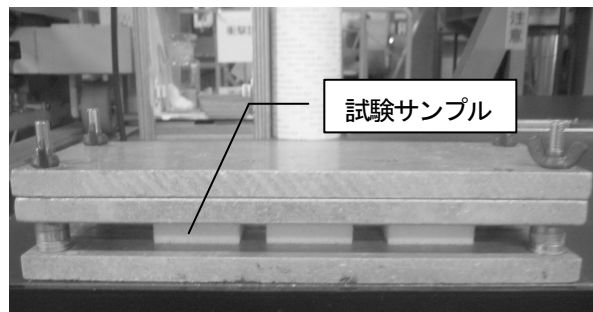


写真-2 JIS K 6400に基づくサンプルの圧縮状況

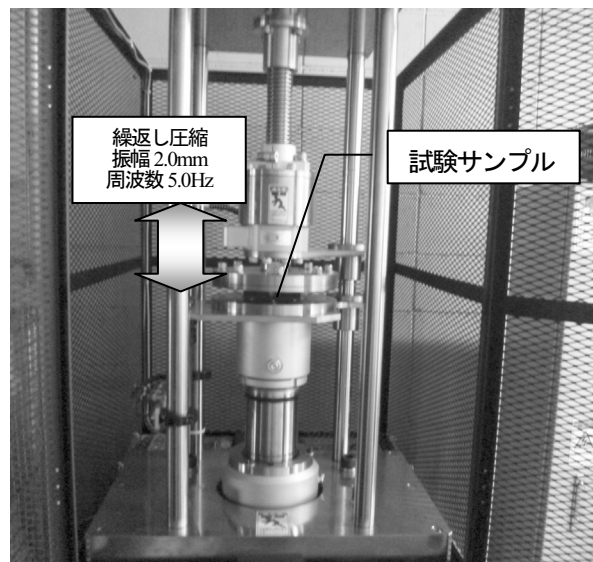


写真-3 サンプルの繰返し圧縮の状況

表-1 圧縮残留歪の比較

素材	初期厚み (mm)	圧縮後厚み (mm)	圧縮残留歪 (mm)
セルダンパー	50	42.5	0.5
ポリエチレン発泡体	150	129	16.5

振材料としての耐久性に優れていることが判る。

以上のようにセルダンパーは長期荷重への耐久性が優れていることを確認した。これは、ソフトセグメント部に不飽和度の低いポリオールを使用し3次元構造を強固に形成させたことの効果である。

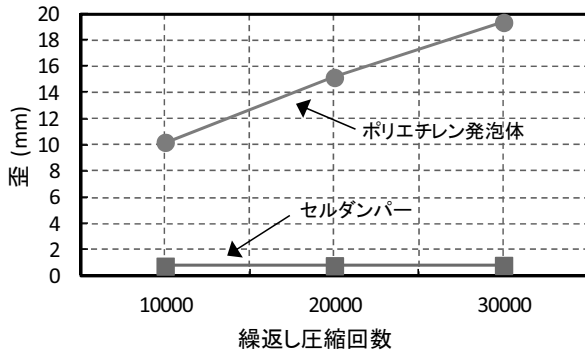


図-2 繰返し圧縮歪の比較

3.2 防振性能

セルダンパーの圧縮後の防振性能を評価するために、繰返し圧縮前と30,000回圧縮後のサンプルを用いた振動伝達レベルの測定を行った。振動伝達レベルの測定方法はJIS規格がないため、加振振幅0.1mmで周波数範囲5Hzから45Hzを周波数間隔1Hzで正弦波掃引加振した。試験状況を写真-4に示す。

図-3にポリエチレン発泡体、図-4にセルダンパーの振動伝達レベルの測定結果を示す。図中にはバネ定数 k 、減衰比 ζ を併せて示す。ポリエチレン発泡体は繰返し圧縮に伴う材料の硬化により、圧縮後では圧縮前に比べバネ定数が大きくなり減衰比が小さくなっている。これにより共振周波数が圧縮前10Hzに対し圧縮後では12Hzに上昇し、共振点の振動伝達レベルが10dB増大している。そのため、防振効果が得られ始める周波数が14Hzから18Hzへシフトすることで防振性能が低下している。一方で、セルダンパーは繰返し圧縮後もバネ定数と減衰比が変化していないことから、材料の硬化が発生していないと考えられ、圧縮前後で防振性能が変化していないことが確認できる。

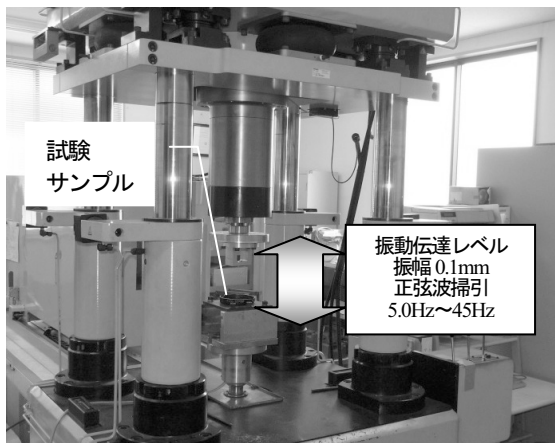


写真-4 振動伝達レベルの試験状況

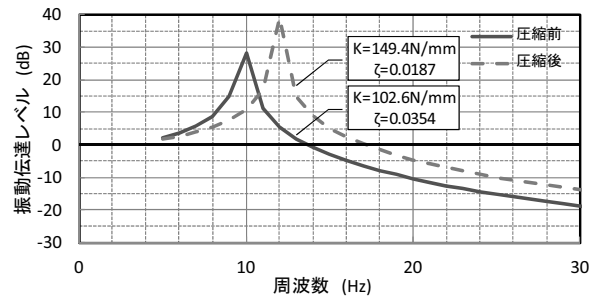


図-3 圧縮前後の振動伝達レベルの比較 (ポリエチレン発泡体)

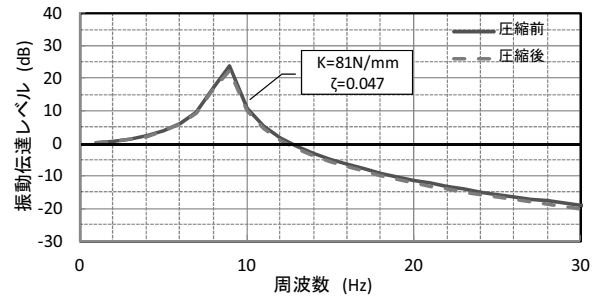


図-4 圧縮前後の振動伝達レベルの比較 (セルダンパー)

4. 重機振動に対する防振効果の検証

セルダンパーによる防振効果を施工現場で検証した。検証対象は、ツインヘッダーによる地山切削作業、生コン車・バックホウの走行、およびバックホウのあおりである。以下に検証結果を示す。

4.1 地山切削時の防振効果

(1) 試験方法

ツインヘッダー (ベースマシン1.4m³級) による地山切削作業を対象に防振効果の検証を行った。図-5に試験配置を示す。

ベースマシンの重量が約35tonであることから、前述の密度と耐荷重の関係からセルダンパー密度300kg/m³を敷鉄板下全面に配置した。また、材料厚さに対する防振効果を確認するためセルダンパーの厚さは50mm、75mm、100mmとして、セルダンパーの無い敷鉄板のみの場合と比較することで防振効果を確認した。振動の測定点は敷鉄板から1m離れた地盤上の測点No.1、および測点No.2とした。切削作業は20分連続して行い、工所用道路等を走行する車両等の影響を受けていない振動応答を対象として、「JIS Z 8731 振動レベルの測定方法」に従い、5秒間隔で100個のデータを読み取り時間率振動レベルL₁₀を求めた。

(2) 防振効果

表-2に振動レベルの測定結果、および防振効果(敷鉄板のみの振動レベル) - (セルダンパー使用時の振動レベル)を示す。敷鉄板のみの振動レベルに比べ、セルダンパー50mm+敷鉄板の場合は5dBの防振効果、同様に75mm、100mmの場合は8~9dBの防振効果を確認した。

セルダンパーの厚さに対する防振効果を確認したが75mmで防振効果は頭打ちになった。セルダンパーは平面的に大きさをもったシート状の材料であるが、その防振効果はバネマス系のばねと減衰機構が主に働いて得られるものであるから、プラスアルファとしてインピーダンスの異なる層間の伝達特性による、特性インピーダンス比と層厚からなる防振効果³⁾は大きく期待できないものと考えられる。

4.2 生コン車・バックホウ走行時の防振効果

(1) 試験方法

生コン車とバックホウ(0.7m³級)の走行を対象に防振効果の検証を行った。図-6に試験配置を示す。

生コン車(実車)の重量が約10ton、バックホウ(0.7m³級)の重量が約20tonであることから、前述の密度と耐荷重の関係によりセルダンパー密度150kg/m³を敷鉄板下全面に配置(以下、全面使い)した。また、セルダンパーの使用面積を減らすことでコストダウンを図れる可能性があることから、セルダンパー密度500kg/m³を部分的に配置したタイプ(以下、部分使い)についても防振効果を検証した。ここで、部分使いの面積は全面使いの16%とし、セルダンパー以外の部分は防振効果の無い、一般的なウレタンマットを敷きつめた。

振動レベルは、図-6に示した走行方向(図中の右から左)に生コン車とバックホウを個々におおむね速度10km/hで走行させ、部分使い脇の測点No.3、全面使い脇の測点No.2、および敷鉄板脇の測点No.1の順で測定した。

この時、各測点で計測された振動レベルの最大値を評価量とした。

(2) 防振効果

表-3に振動レベルの測定結果と防振効果の比較を示す。生コン車走行時は敷鉄板の上を走行した場合に比べ、セルダンパー全面使いの防振効果は約10dB、部分使いでは約13dBであることが確認できた。一方で、バックホウ走行時はセルダンパー全面使いの防振効果は約

10dB、部分使いでは約9dBであることが確認できた。

全面使い(密度150kg/m³)、部分使い(密度500kg/m³)のどちらでも、おおむね10dBの防振効果を確認できた。このことから、重機の荷重に対してセルダンパー密度を適切に選定することで、セルダンパーの面積を少なくしても防振効果を得られることが明らかとなった。

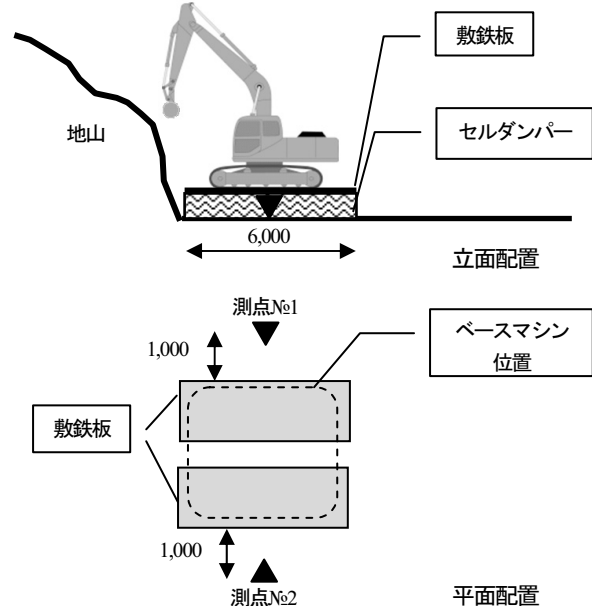


図-5 試験配置(地山切削)

表-2 振動レベルの測定結果と防振効果の比較

測点	振動レベル (dB)						防振効果 (dB)		
	敷鉄板	セルダンパー			セルダンパー				
		50mm	75mm	100mm	50mm	75mm	100mm		
No.1	60	55	52	51	5	8	9		
No.2	50	54	50	51	5	9	8		

表-3 振動レベルの測定結果と防振効果の比較

振動源	振動レベル (dB)		防振効果 (dB)		
	敷鉄板	セルダンパー		セルダンパー	
		全面	部分	全面	部分
生コン車	72	62	59	10	13
バックホウ	80	70	71	10	9

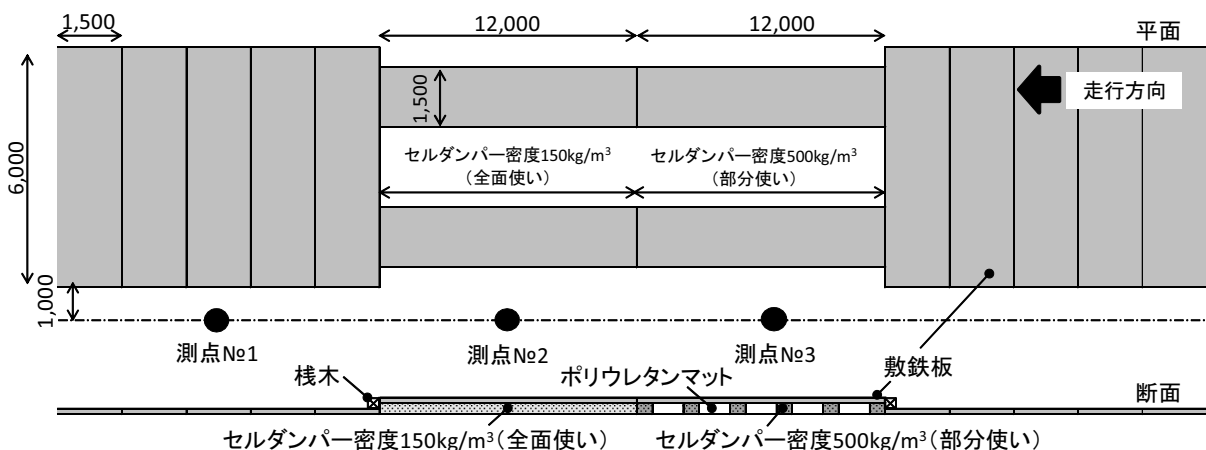


図-6 試験配置(生コン車・バックホウ走行)

4.3 バックホウあおり時の防振効果

4.1項、4.2項では敷鉄板下にセルダンパーを直接敷き込んで使用したが、セルダンパーの敷き込みに手間がかかること、および想定する荷重に応じてセルダンパー密度を選定することで敷鉄板下全面に敷く必要がないことから、セルダンパーにポリエステル帆布 (PVCコート)、 $t=1.2\text{mm}$ のカバーをつけたマット (以下、セルダンパー防振マット) を制作した。

図-7にセルダンパー防振マットの概要を示す。セルダンパー防振マットのサイズは $1,500\text{mm} \times 3,000\text{mm}$ (5-10敷鉄板サイズ) として、マットの両端部にマジックテープを取り付けることでセルダンパー防振マットを連結して使えるようにした。本項で示す試験では新たに制作したセルダンパー防振マットを用いた。

(1) 試験方法

バックホウ 1.4m^3 級のバケットのあおりを対象とした防振効果の検証を行った。図-8に試験配置を示す。

バックホウ重量が 35ton であることから、セルダンパー密度は $300\text{kg}/\text{m}^3$ ($t=50\text{mm}$) として図-7に示したセルダンパー防振マットを敷鉄板下に配置した。設置状況を写真-5に示す。

試験箇所は砂・礫混り砂・砂混りシルト・粘土混りシルトがGL -20mほどまで堆積した河川敷の軟弱地盤である。そこで、セルダンパー防振マットの防振効果と併せ、距離による振動減衰性状も確認するため図-8に示したNo.1からNo.5の測点を設置し、敷鉄板のみの条件とセルダンパー防振マット有の条件で振動レベルを計測した。あおり作業はセルダンパー有無の条件で各々10分間連続して行った。また、作業によるばらつきを回避するため、10分間連続の測定を3回行った。測点5においては近接する市道を走行する自動車による振動の影響が見られたため、10分間のデータから自動車の影響を受けていない振動応答を対象として、5秒間隔で100個のデータを読み取り時間率振動レベル L_{10} を求めた。

(2) 防振効果

表-4に振動レベル測定結果の一覧を示す。表中にはセルダンパー防振マットの効果 (無対策時の振動レベル平均値) - (セルダンパー使用時の振動レベル平均値) を併記した。各測点で 6dB から 7dB の振動低減効果が確認でき、発生源で振動を低減することで広範囲にわたって効果を発揮することがわかる。

本項における試験条件では 6dB から 7dB の防振効果を確認したが、4.1項における試験では 5dB の防振効果であった。どちらの試験でも重機の重量は同等 (35ton) であるので同様の防振効果が得られるはずであるが、本項の試験ではセルダンパーの設置面積が4.1項の設置面積に比べて 34% ほど小さくなっている。そのため、本項における試験では面荷重が大きくなり、防振系の固有値が低

くなったものと考える。

(3) 距離による振動減衰性状

地盤振動の距離による減衰は地盤の幾何学的な広がりによる減衰と地盤の内部減衰によるBomitzの式 (1)で求められる。式(1)は建設工事などによる地盤振動の予測に一般的に用いられている。ここでは、本項での試験箇

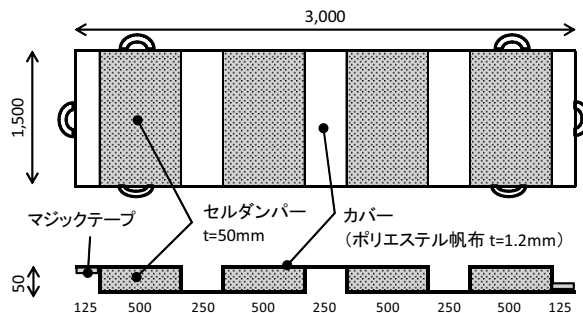


図-7 セルダンパー防振マットの概要

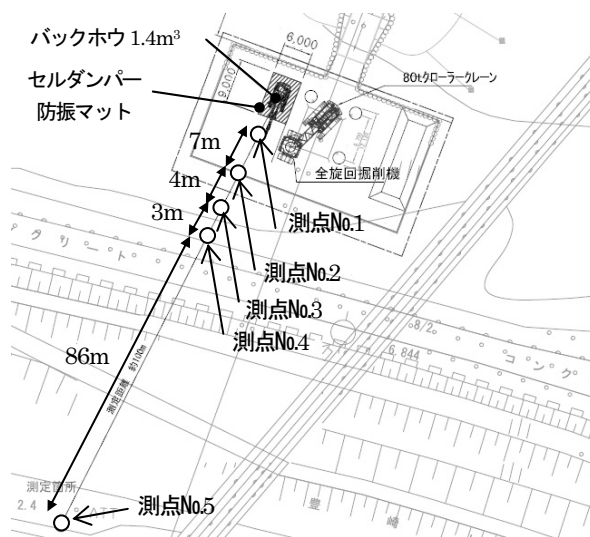


図-8 試験配置 (バケットあおり)



写真-5 セルダンパー防振マットの設置状況

表-4 振動レベルの測定結果と防振効果

パターン	振動レベル (dB)					試験項目
	測点No.1	測点No.2	測点No.3	測点No.4	測点No.5	
4	74	66	62	61	47	無対策 バケットあおり 1回目
5	73	65	61	60	47	無対策 バケットあおり 2回目
6	73	65	61	60	47	無対策 バケットあおり 3回目
平均値	74	65	61	60	47	
10	68	59	57	54	41	セルダンパ有り バケットあおり 1回目
11	67	57	55	53	40	セルダンパ有り バケットあおり 2回目
12	66	57	55	53	41	セルダンパ有り バケットあおり 3回目
平均値	67	58	55	53	41	
低減効果	7	7	6	7	6	対策無平均値-セルダンパ有平均値

所である河川敷の軟弱地盤に対して、幾何減衰定数 n と内部減衰定数 α がどの程度の値を取るか実測値と対比し、減衰性状について考察する。

$$L_r = L_0 - 20 \log_{10}(r/r_0)^n - 8.68\alpha(r-r_0) \quad (1)$$

ここで、 L_r ：振動源から $r(m)$ の距離における振動レベルの推定値(dB)、 L_0 ：振動源から r_0 の距離における振動レベル実測値(dB)、 n ：幾何減衰定数（表面波：0.5、複合波：0.75、実体波：1.0）、 α ：内部減衰定数（ローム：0.01、粘性土：0.01～0.02、シルト：0.02～0.03）

図-9に振動レベルの実測値と式(1)による減衰曲線を示す。幾何減衰が主体と考えられる振動源から10mほどまでは $n=0.5$ となり、表面波による影響が主体的であることが判る。一般に公害振動を問題とする場合の波動は実体波（ $n=0.75$ ）と考えられており⁴⁾、河川敷の軟弱地盤の特殊性が表れているものとする。10mより離れると内部減衰の影響が表れる。このとき α は0.01から0.02の範囲となり、一般的に用いられる粘性土相当の値となった。以上の結果から、表面波が主体で内部減衰も小さいことから、軟弱地盤では振動が伝搬しやすいことが明らかとなった。

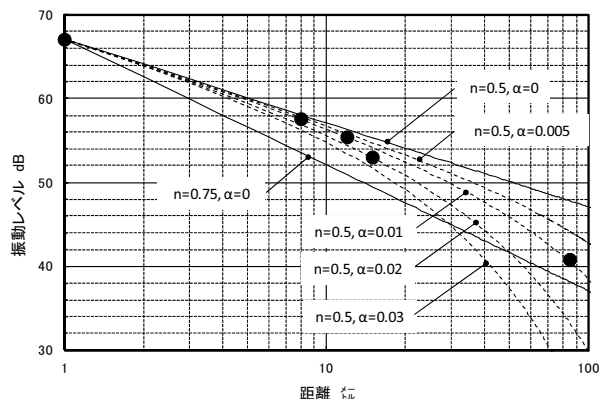


図-9 地盤振動の減衰性状

5. 結論

本報では建設重機による地盤振動対策として、特殊ポリウレタン発泡体であるセルダンパーの防振材料としての基本的特性と防振効果について下記の結論を示した。

Summary For reducing ground vibration induced by construction vibration, measures taken at the source that can be implemented at the source, along the propagation path or at the point of receipt are most effective. In cases in which measures at the source are difficult to take or are insufficient, however, measures along the propagation path should be considered. As such measures, vibration control trenches and walls have long been applied but they involve large-scale construction work. Then, simpler measures are required. Against the background, we developed a vibration control method using special polyurethane foam (cell damper) that facilitates temporary installation and is highly durable over a long period of time.

This paper describes the composition of cell dampers and their basic properties as vibration control materials such as durability and vibration control capacity, and reports the results of verification of their effectiveness for controlling vibrations caused by heavy machinery at construction sites.

Key Words : Construction Work Vibration, Vibration Isolating Method, Cell Damper Mat

1) 特殊ポリウレタン発泡体のソフトセグメント部に不飽和度の低いポリオールを使用したことで3次元構造を強固に形成させ、より優れた耐久性を得たことで、重機による長期荷重が負荷されても安定した防振効果を得ることができる。

2) ツインヘッダー（ベースマシン1.4m³級）による地山切削作業に対して、セルダンパー厚さ50mmで5dBの防振効果、セルダンパー厚さ75mmで8～9dBの防振効果を得ることができる。

3) バックホウ0.7m³級の走行、生コン車の走行に対して、セルダンパー厚さ50mmとした場合に10dBの防振効果を得ることができる。

4) バックホウ1.4m³級のバケットあおりに対して、セルダンパー厚さを50mmとした場合に6～7dBの防振効果を得ることができる。

5) 重機荷重に対してセルダンパーの密度を適切に選定することで、セルダンパーの面積を少なくしても防振効果を得ることができる。

謝辞：セルダンパーの防振効果検証試験にフィールドを提供いただいた、笠森トンネル作業所、および新幹線六枚橋作業所の関係各位に深く感謝致します。セルダンパー防振マットを実施工に初適用させていただいた関電淀川作業所の関係各位に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 横井和身：ウレタン樹脂用ポリール，三洋化成ニュース№464，pp. 1-4，2011。
- 2) 横井和身：合成皮革・人工皮革用ポリウレタン，三洋化成ニュース№471，pp. 1-4，2012。
- 3) 日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック，pp. 452-453，技報堂出版，1985。
- 4) 塩田正純：公害振動の予測手法，pp. 134-135，井上書院，1986。