

## 改良体壁による地盤振動遮断効果の現場実験

The Field Test of Isolation of Ground Vibration by use of Columnar Inclusions

古賀 勝喜 (こが かつき)

佐賀大学講師 理工学部都市工学科

三浦 哲彦 (みうら のりひこ)

佐賀大学教授 理工学部都市工学科

中村 六史 (なかむら りくじ)

(株)新和テクノ 技術顧問

西田 耕一 (にしだ こういち)

松尾建設(株) 技術開発室

## 1. はじめに

社会生活の発達と共に交通振動や工場振動，建設工事に伴う振動などの問題が発生している。特に軟弱な地盤を有する地域では環境振動問題となりやすく，多くの研究が行われている。木村ら<sup>1)</sup>は8種類の遮断壁を考え起振機実験を行い，各壁の特性を明らかにしている。竹宮ら<sup>2)</sup>は地盤内の波動伝播理論に基づき，波動遮断ブロック(WIB)理論と実験結果を発表している。そのほか多数の振動遮断についての研究がなされている<sup>3),4)</sup>。軟弱地盤での構造物基礎の改良工法としてDJM工法，CCP工法，CDM工法などの地盤改良工法がある<sup>5)</sup>。これらの工法は構造物の支持力や沈下抑制，あるいはすべり破壊防止が主として考えられていた。最近では地盤振動の分野においても，基礎地盤の振動軽減や発生振動の振動抑制に利用されている。橋詰<sup>6)</sup>や長瀧<sup>7)</sup>は工場振動による防止対策として地中連壁による効果の計算と施工後の実測結果を発表している。また，軟弱地盤において，堤防基礎の改良工事や堤体の補強工事を実施するときに建設機械などによる周辺家屋への振動問題があり，その防止対策が求められていた。

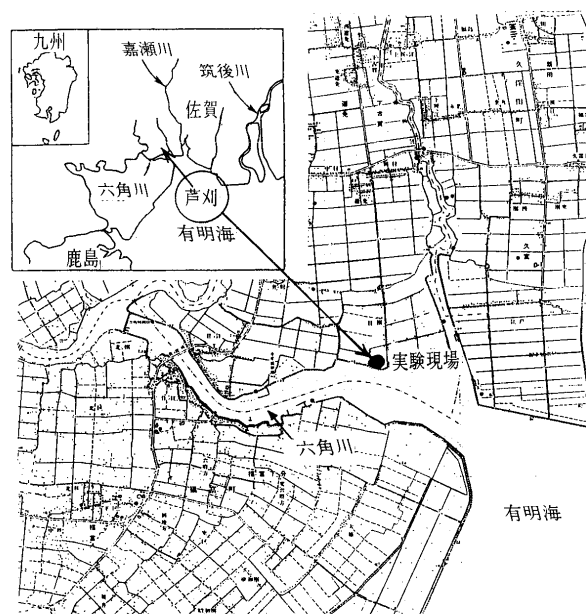
今回，深層混合処理を行う新しい施工機械が開発され，その施工機械の性能，施工性などを知る目的で現場施工実験が実現された<sup>8)</sup>。この工法はスラリダブルミキシング(SDM)工法と称され，低圧でのスラリー噴出，攪拌翼挿入時でのスラリー添加，上翼・下翼の2枚翼による攪拌能力の向上，直径1.4 mまでの改良体の施工が可能，などの特徴がある。口絵写真—5，6参照。

本実験は，前述のような目的で試験施工された改良体の2次的な実験として，軟弱地盤中に構築された改良体の建設重機により発生する振動の遮断効果を知るために，重機走行実験を行い，その遮断効果を明らかにしたものである。

## 2. 地中壁の施工

## 2.1 実験現場の土質特性

実験現場は図—1に示すように佐賀平野の南西部に位置する六角川河口の有明海の側である。現場の不攪乱試料を試験施工に先立ち，2箇所でシンウォールサンプリ



図—1 実験現場の位置

ングにより採取した。その試料に基づいた地盤の土質特性を図—2に示す。地層は約0.70 mの表層があり，その下13.5 m程度までは有明粘土で，その下に1.5 mの砂層が堆積している。粒度組成は大部分が粘土でその他はシルト分を有する。深さ3~5 mで砂礫分が多い。含水比は100%~120%の高い値を示している。一軸圧縮強さは20 kPaから深さが増すほどに大きくなり，深さ13 mでは2倍の40 kPaに至っている。鋭敏性は深さ方向にそれほど変化はなく，15程度である。変形係数は深さ方向にばらつきを示しており，0.68 MPaから1.86 MPaとなっている。深さ3~5 mで1.3 MPa程度の値となっているが，この位置には砂礫分が多いことによると考えられる。

## 2.2 地中連壁

## (1) 改良体の施工

SDM工法を用いて現場実験で施工された改良体の種類は，改良材の区分からセメント系と石灰系に区分できる。振動実験に用いたのは直径1.14 mの外縁部を約20 cm オーバーラップさせて造成した長さ15 m，深さ7 m，2列の地中連壁である(写真—1および図—4参照)。用いたのはセメント系固化材と高炉セメントおよ

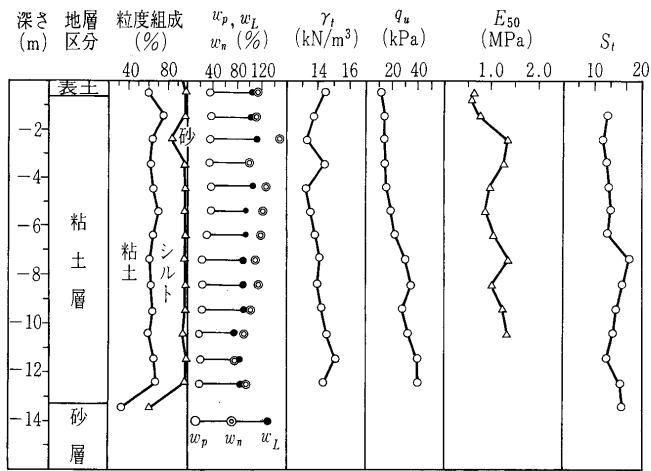


図-2 地盤の土性図

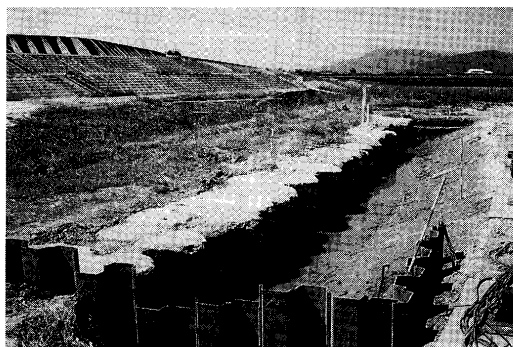


写真-1 施工された改良体

び消石灰である。写真-1はすべての予定されていた実験を終了した後、形状の確認を行うために掘削を行って改良杭を露出させたものである。写真から見られるように改良体の施工は精度よく実施されたことが分かる。

(2) 改良体の土質特性

現場で施工された改良体は施工後28日目にチェックボーリングを行い、シンウォールサンプリングを行った。得られた試料を用いて1mごとに、一軸圧縮試験を行い、同時に山中式硬度計を用いて強度を測定した。図-3は水セメント比100%、材齢28日の改良体の一軸圧縮強さの分布である。高炉セメントを使用した結果をみると、少しのばらつきはあるが、品質としては比較的良好に一定の改良が行われていると考えられる。計測された一軸圧縮強さは平均で1.6 MPaである。固化材が消石灰の場合では改良体の表面近くで2倍程度の強度を示すが、それ以下の深さにおいてはセメント固化材の場合と同じ分布を示している。また、値の大きさについても、ほぼ同じ結果となった。表面近くにおいて大きな強度を示したのは固化材の噴射量が多かったことによるものと考えられる。表-1に改良体の物性値を示す。湿潤密度は改良体の上部から下部まで、ほぼ一定であると判断できる。変形係数は5~6mの深さで約100 MPaの値を得ているが、改良体全体を見ると約70 MPa程度の均質な値である。

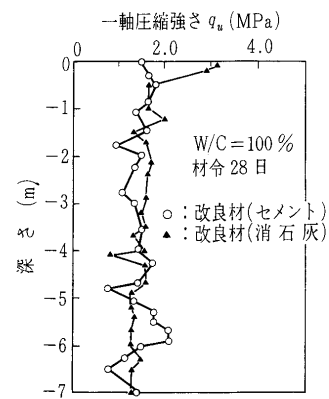


図-3 改良体の一軸圧縮強さの深さ方向分布図

表-1 改良体の物性値

深さ (m)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数 (MPa)
1	1.466	62.6
2	1.398	75.9
3	1.447	73.5
4	1.397	71.1
5	1.418	106.6
6	1.416	110.2
7	1.407	87.8

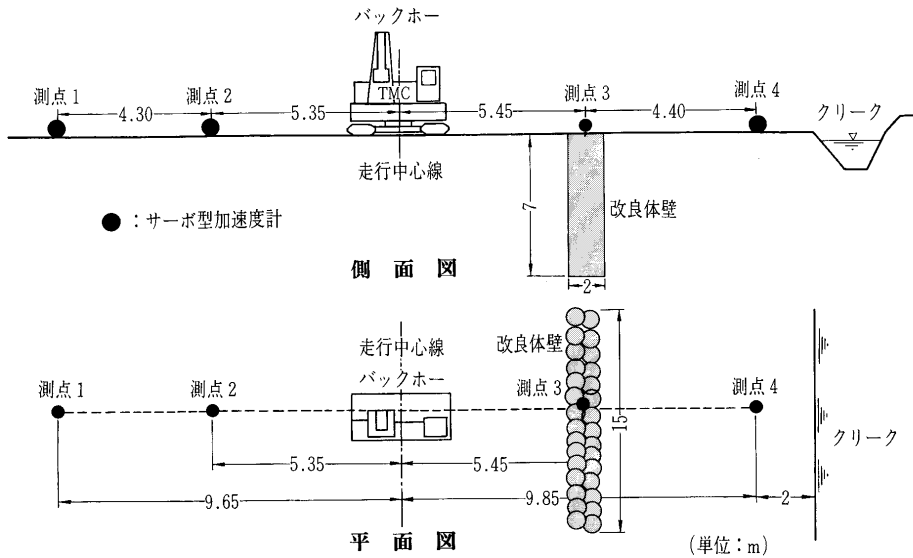
3. 振動実験

改良体地中壁を有する軟弱地盤において、工事用の重機(重量11tf)を走行させて振動測定を行った<sup>9)</sup>。図-4に実験場所の平面図・縦断図を示す。図に示すように重機走行中心線から改良地中壁が有る側と無い側にはほぼ等距離に振動ピックアップを配置し、計測を行った。計測した波形は上下方向の加速度波形である。実験は10mの走行区間において走行速度を6種類変化させて実施した。重機のキャタピラーの位置は重機中心より1.35mである。

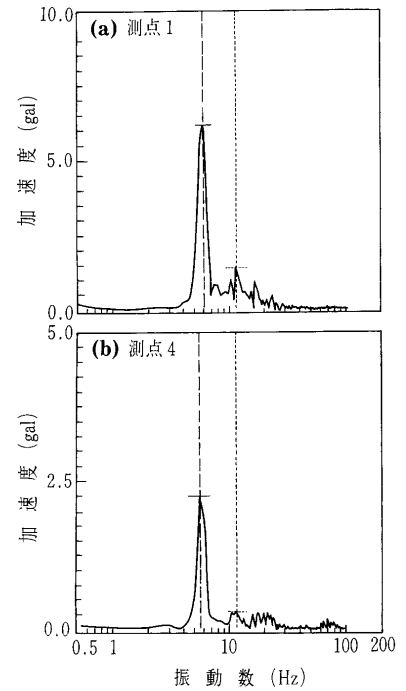
4. 測定結果と考察

4.1 測定結果

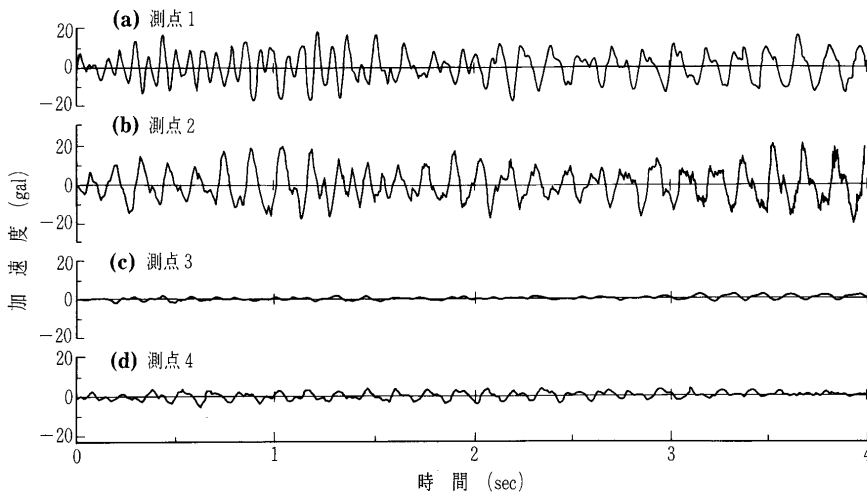
振動測定で得られた振動加速度波形の一つを図-5に示す。図は重機の走行速度が4km/hの時の波形である。図の上の方から測点1, 2, 3, 4である。走行位置に近い測点2が最も大きい振幅を示す。測点3は測点2とほぼ同じ距離の位置にあるが改良体の上であるため、最も小さい振幅を示している。測点1は測点2に比較して若干の減衰を示しているが、これは距離減衰によるものと考えられる。測点4は改良体の影響を受け、ほぼ同じ位置にある測点1に比較して、かなりの振幅の減少を示している。これは、改良体が防振壁としての効果を発揮したことによると、考えられる。各実験における発生加速度の値は計測波形が不規則であったので、記録波形で比較的同じような振幅を示している部分を選び求めている。図-5の測定振動加速度波形のリニアスペクトルを求めたのが図-6である。図には測点1, 4を示してい



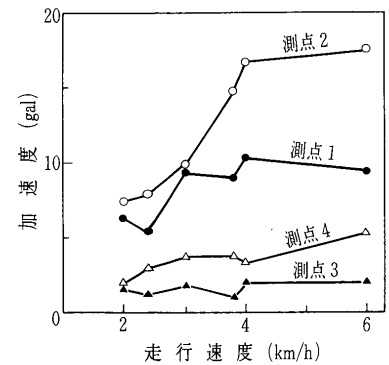
図—4 走行振動実験の平面図・側面図



図—6 実測波形のフーリエスペクトル

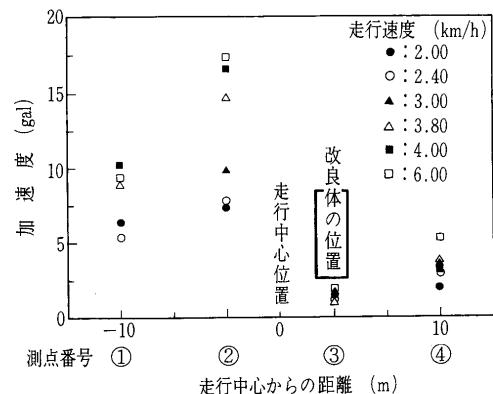


図—5 実測加速度波形



図—7 各測点ごとの走行速度と発生加速度の関係

るがほかの二つの測点でもピークが5.5 Hz と11.5 Hz の2箇所に見られている。これから発生振動の大部分は5.5 Hz の振動数の波であることが分かる。走行速度と発生加速度の関係を表したものが図—7である。この図から改良体が打設されている方と、そうでない方では傾向が異なることが分かる。すなわち、改良体がある方は改良体の上では走行速度による変化は小さく、ほぼ同じような値となっている。測点4でも走行速度による変化は小さく、傾きも小さい。これは改良体の影響が大きく現れている結果と考えられる。改良体がない測点1では走行速度による急激な伸びは見られないが漸増はしている。測点2では速度依存性が強く見られるが4 km/h で傾きが緩やかになっている。図—8は振動加速度距離減衰を示す。図からは、距離減衰のパターンが明確に現れていることが分かる。すなわち、改良体がある方が改良体の上(測点3)では発生加速度は小さくなる。これは改良体がマスとして対応し、揺れにくさの現れと考えられる。測点4においても小さくなった。



図—8 走行速度の違いによる加速度の減衰

この2点では走行速度の違いによる発生加速度の分布も小さくなっている。一方、改良体がない方の測点1では発生加速度も比較的大きいが、走行速度によるばらつきは大きくはない。測点2においては、発生加速度も大きく、ばらつきもかなり見られる。振動源に最も近

い測点であることから、振動源の影響を強く受けているためと考えられる。

#### 4.2 考察

発生振動の減衰は一般に距離減衰が採られる。距離減衰は地盤構造の影響が大きいが、本実験では表面波による振動と考え、式(1)を用いて、距離減衰を求めてみる。

$$\frac{u_x}{u_0} = \sqrt{\frac{x_0}{x}} \cdot \exp\{-\beta(x-x_0)\} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $u_x$ : 振動源から  $x$ (m) の振動加速度。 $u_0$ : 振動源に近い、振動源から  $x_0$ (m) の振動加速度。 $\beta$ : 減衰係数である。測点1と2間の距離減衰を式(1)で求めると、減衰比(測点1と2の加速度比)は0.71となる。実験による値も平均で約0.70となった。減衰係数  $\beta$  は地盤で異なり、粘土、シルトではおよそ0.01~0.05とされている。計算では0.01とした。

次に、地中壁による波の遮断効果について考える。透過波が減じられる考え方は次のようである<sup>3),4),10)</sup>。地盤中に密度が異なる物体があるとき、波の伝播はインピーダンスの違いにより一部が反射され、残りが透過するが障壁をでるとき再び反射される。ここで残りが伝播波となる。

波の低減比(透過波と入射波の比)は波動透過理論式より

$$\tau_0 = 4\alpha / \{(1+\alpha)^4 + (1-\alpha)^4 - 2(1-\alpha^2)^2 \times \cos(4\pi ft/V')\}^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

となる。

ここで、

$\alpha = \rho'V'/\rho V$ ,  $\rho$  (Mg/m<sup>3</sup>): 地盤の密度,  $\rho'$  (Mg/m<sup>3</sup>): 遮断層の密度,  $V$  (m/sec): 地盤の波動伝播速度,  $V'$  (m/sec): 遮断層の波動伝播速度,  $t$  (m): 遮断層の厚さ,  $f$  (Hz): 波の振動数として与えられる。

本実験での諸物性値 ( $\rho=1.40$ ,  $\rho'=1.50$ ,  $V=40.0$ ,  $V'=850$ ,  $t=2.0$ ,  $f=6.0$ ) を代入して求めた改良体の低減比は0.705となった。実測値の低減比を求めてみる。走行速度によりばらつきはあるが、測点4までの距離減衰を考え、測点2における加速度を入力量とすると測点4での低減比は平均で約0.42が得られる。この値は理論式からの値に比べて約6割である。

#### 5. まとめ

新しく開発された深層混合処理機械の性能、施工精度などの検証のため実施された改良体地中連壁を利用して実施した改良体壁による振動遮断効果についてまとめる以下ようになる。

- 1) 軟弱地盤の地盤改良工法として開発されたSDM工法は交通振動や建設機械により発生する地盤振

動の振動低減工法としても有効な工法と考えられる。特に、有明粘土地盤のように超軟弱な地盤においてセメントあるいは石灰を用いた改良体防振壁は施工が容易である。

- 2) 今回の振動実験によると、施工された改良体壁は壁体自身の振動も小さく、遮蔽された地盤の振動も小さくなるので、防振壁として有効であると考えられる。実験値を測点1と測点4で比較すると振動源と計測点間に改良体がある測点4では走行速度によりばらつきはあるが、測点1に比べると約4.8 galの振動低減となった。
- 3) 施工された改良体の諸物性値を波動透過理論式に代入して求めた計算による改良体の振動遮断効果は低減比で約0.705となった。走行試験により得られた実測値から検討を行うと実験による改良体の遮断効果が理論計算の値よりも約1.7倍ほど大きくなった。

今後、改良体のより有効な遮断効果を知るためには実測値が距離減衰式と一次元波動透過理論より求めた値より小さくなっていることから判断して、計算方法として二次元あるいは三次元解析での検討が必要と考える。最後に本文の理論考察に当たり、ご指導いただきました佐賀大学理工学部荒牧教授に謝意を表すものであります。

#### 参考文献

- 1) 木村 薫・小出忠男: 地盤振動の遮断工法; 土と基礎, Vol. 27, No. 8, pp. 9~16, 1979.
- 2) 竹宮宏和・藤原章弘: 地盤一構造物系の制振法としての波動遮断ブロック(WIB)の導入, 土木学会論文集, No. 489/I-27, pp. 243~250, 1994.
- 3) 地盤振動小特集, 土と基礎, Vol. 27, No. 8, pp. 1~52, 1979.
- 4) 地盤内の振動伝播, 土と基礎, Vol. 44, No. 9, pp. 1~32, 1997.
- 5) 日本建設機械化協会編: 最近の軟弱地盤工法と施工例, pp. 309~602, 1991.
- 6) 橋詰尚慶・長瀧慶明・若命善雄: 地中壁による振動低減対策—その1 振動調査と対策法の立案—, 第28回土質工学研究発表会概要集, pp. 1245~1246, 1993.
- 7) 長瀧慶明・橋詰尚慶・若命善雄: 地中壁による振動低減対策—その2 対策工法の実施と効果の確認—, 第28回土質工学研究発表会概要集, pp. 1247~1248, 1993.
- 8) 中村六史・大塚泰孝・三浦哲彦・古賀勝喜・沈 水龍・西田耕一: ダブルミキシング法による地盤改良機の性能と改良土に関する現場調査, 佐賀大学理工学部集報, 第25号, 第2号, pp. 81~90, 1997.
- 9) 古賀勝喜・沈 水龍・中村六史・西田耕一: 軟弱地盤内に打設した改良体柱列の振動遮断効果について, 佐賀大学理工学部集報, 第25号, 第2号, pp. 65~70, 1997.
- 10) 中野有朋: 入門 公害振動工学, (株)技術院.  
(原稿受理 1998.3.18)