

建築技術

平成16年11月1日発行(毎月1回1日発行)
No.658 ISSN0022-9911

The Kenchiku Gijutsu
<http://www.k-gijutsu.co.jp>
2004 November No.658

11

特集

環境 振動を 考える

特別記事

これからの病院・福祉施設
室内環境の快適性
住宅における床暖房のあり方
ISOの現状と対応
architectural design
不二女子高等学校

地盤伝搬過程での対策事例—WIB工法

竹宮宏和 岡山大学環境理工学部教授

VI.

WIBの概要

竹宮が提案しているWIB (Wave Impeding Barrier) 工法は、地盤内に人工的に剛性の高いものを構築し、原地盤の特性との相対比の下で波動の伝播に阻止機構を創出するものである。WIBの原理は、振動源が地表面にあるケース¹⁾と、杭基礎のように振動源が地中にあるケース²⁾とを分けて考えなければならない。平坦道路上の交通振動を対象としたWIBの設計については、WIBの構築により原地盤の表層部を波動遮断原理に基づいて非伝播波動場するもので¹⁾、発信源あるいは周辺の受振点をアイソレーター化するものである。そのため、WIB自体には対象波動の伝播を拘束する剛性と設置位置が決め手となる。著者らの経験から、WIB施工には地盤改良工法によるソイル杭からなるコラムWIBが合理的でしかも経済的である。もちろん、コラムWIBの構造形とサイズは対象波動に対して効果的に決定されるものでなければならない。さらに、平面形においてハニカム・セル構造をとることで、入射波動の波長を変調させて散乱現象を起こさせ、エネルギーの消散を加速させる機構を付与させることができる。

以下、道路下にWIBを施工した場合³⁾と、建物直下に施工した場合⁴⁾のケーススタディについて述べる。

道路側対策事例1

軟弱地盤上での国道311号バイパスの実施工にあたり、民家が接近していることから、工事中および供用後の沿線振動の発生を抑えるため、振動対策工事が実施された。

1) WIB設計

【地盤概要】

地盤は、地表よりGL-20m程度まではN値が1~4の粘性土が主体で、その下はN>50の硬い支持層である。

【WIBの仕様】

地盤振動対策は、深層混合処理工法により新設道路直下にコストと制振効果を考慮し改良率40%として計画した。全体の連結性を高め、剛性を高めるためハニカム形状に配置(図1)し、改良長は1.5mで1/15の割合で4.0m改良とした。

【WIBによる対策目標値】

WIB工法の設計において、FEM解析を行った。対象周波数帯域は地盤の卓越周波数より8~16Hzとした。改良体の弾性波速度は $V_s=1,000$ m/secと設定し、改良率を考慮した複合地盤としてWIB導入地盤の弾性波速度を500m/secとした。WIBの埋設深さ、および改良幅の検討に対して水平と鉛直変位の平均低減率は、埋設深さ0.9m、幅17mを改良範囲とした場合の平均低減率は69.9%振動レベル-3.1dBと予測された。

2) 現場計測と結果

計測位置は、図1に示すように2測線(4地点/測線)を設け、WIB施工前後に同じ条件のもとで効果確認の計測を実施した。加振方法は、ガイドハンマー(質量78kg)による衝撃载荷と建設重機(バックホー0.7m³級)の走行による方法で実施した。振動測定はサーボ型速度計で行った。振動源として工事車両(キャタピラ式パワーショベル)の走行を用いた。速度 c (m/s)、各キャタ

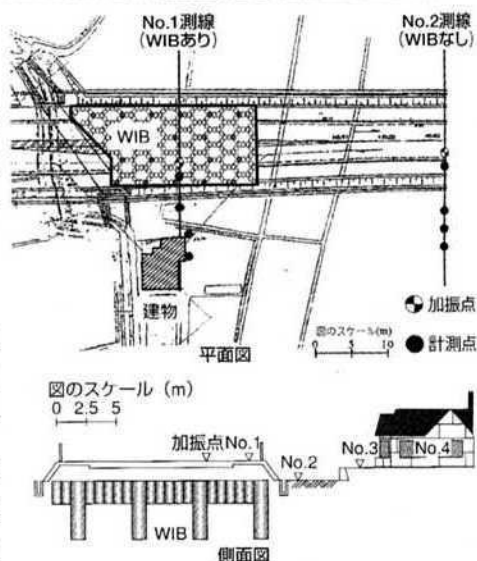


図1 道路一般図

ピラ板幅 a (m)からの地盤への载荷が車両の走行とともに順次なされる状況である。これを N 個の移動荷重列と捉えれば、载荷は、

$$P(\omega) = P_0 \left\{ 1 + \sum_{k=1}^N e^{ik(a/c)\omega} \right\} \dots (1)$$

ただし、これにより振動源としての周期性が $\omega = k2\pi (c/a)$, $k=1, 2, \dots, N$, として付与される。

工事車両を $c=1.5$ (km/h)で走行させたときの振動計測結果のフーリエ変換を図2に示す。同図からは卓越している振動数帯域が数Hzから10数Hzまでとわかる。図3は速度最大値、RMS応答値を求めたもので、ハニカムWIBの施工の効果として、道路直下から対象建物までの全域での周辺地盤振動が30%程度、またはそれ以上低減されていることがわかる。

実際の交通振動に対応させた研究のため、ここでは衝撃応答計測結果からのシミュレーションを試みる。つまり一つ一つの衝撃が荷重列の载荷に相当する。したがって、全载荷

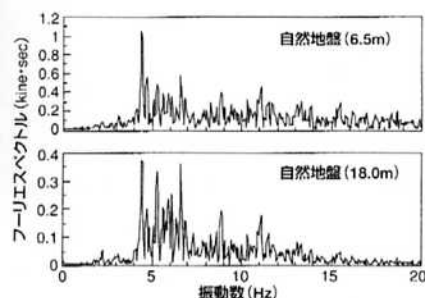


図2 工事車走行による地盤応答のフーリエスペクトル

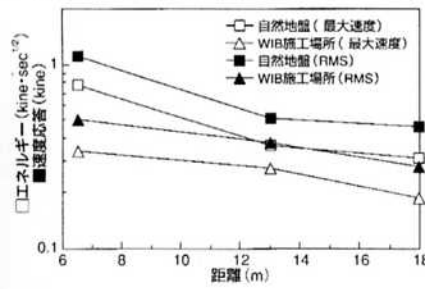


図3 工事車走行による地盤の最大応答値(速度)、RMS応答値(速度)の距離減衰性

は載荷時間の差をシフトさせて重ね合わせると、

$$P(t) \doteq \sum_{k=1}^N P(t-k\Delta t) \dots\dots (2)$$

この状況下での応答をフーリエスペクトルにおいて描いたのが図4である。図2と同様の振動数帯域で卓越がみられる。

道路側対策事例2

埼玉県大里村村道2号の道路改修工事において、現状の道路交通が周辺家屋および住民生活に与えていることから、道路振動対策を講じたものである。対象地の地盤特性は、地表から約10mまでの表層は、N値10以下の粘土質シルトであり、その下に中砂、砂礫層が広がり、支持層は10数mに存在する。

1) WIBの設計

改良体の一軸圧縮強度は $q_u=0.25$ kN/m²で、せん断波速度890m/sである。改良域での平均せん断波速度は、設計上400m/sec程度を想定することができる。地盤改良部の施工深度は表面波の振幅の卓越する深度を対象にして決定するが、ここではWIBの深さ方向の剛性を期待できる1.5mとした(図5)。

図6に示すようにWIBの構造体と

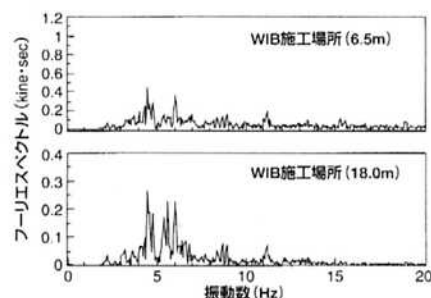


図4 衝撃载荷応答の重ね合わせによる振動予測

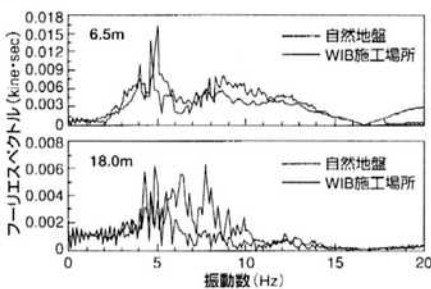


図5 衝撃载荷応答の重ね合わせによる振動予測

しての剛性を高めるため、隣り合うソイル杭を連結させるハニカム形状に作成した。そのサイズは、当地のレーリ波長が8mであることから、1/4波長の2m程度を目処とした。

2) WIBの施工

地盤改良は、道路幅6mの片側一車線の対面道路で片側通行を実施しながら施工した。本施工では、改良40%として機械攪拌方式による直径φ800の柱状地盤改良杭(コラム)とした。施工延長は200mであるので、施工本数は1,040本となる。

3) 振動計測と結果

本WIB施工前後において、試験車両走行による振動計測を実施した。試験車には10tトラックを用いた。計測システムには、(株)東京測振製のSPC-35を使用して、図7に示す配置で加速度を測った。

図8、図9に測定地点Cの施工前後で比較できる振動記録波形とフーリエスペクトルを示した。また、図10に水平および鉛直の振動レベルをすべての計測地点で比較した。

事前計測により、特に建物に影響しているのは鉛直振動であった。その振動レベルは、道路から6m入ったところで60dB以上であった。振

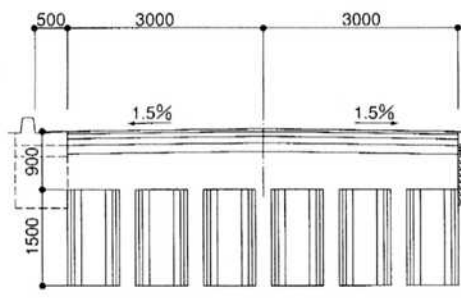


図5 道路断面図とWIB工法

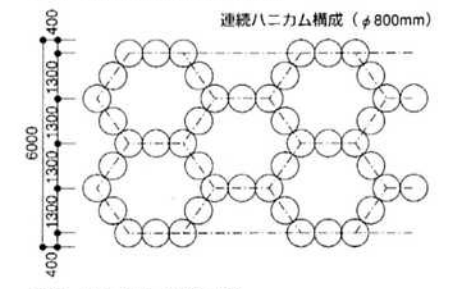


図6 ハニカム形状WIB

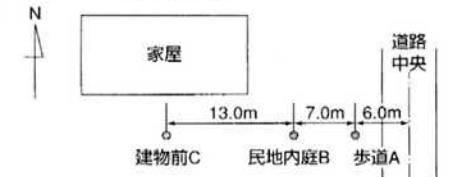


図7 計測点

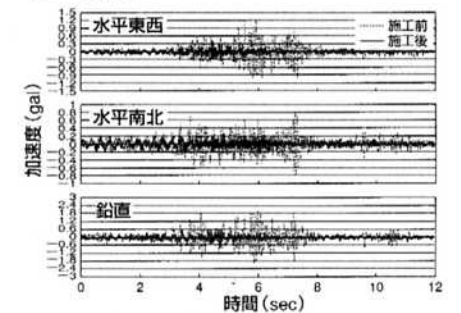


図8 振動加速度波形

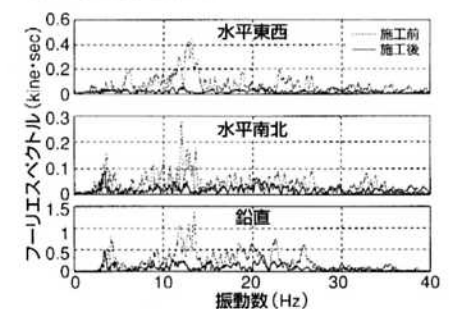


図9 フーリエスペクトル

動対策後は53dB以下となった。一方、水平振動は、建物全体の振動に関係してくる。道路中央から13m離れた場所で、一般車両による振動は52dB程度が計測されていたが、対策後は44dBとなった。

振動の特徴を把握するため、周波数分析を行った。その結果、対策前では8~16Hzの帯域において振動が

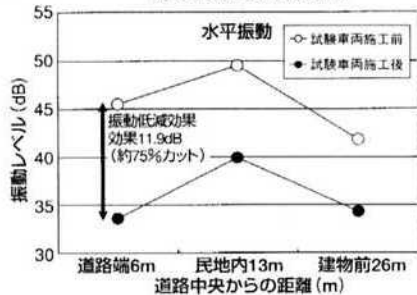
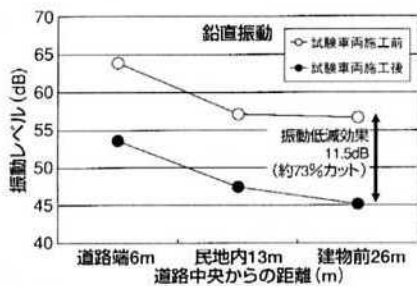


図10 振動レベル計測結果

卓越している。この帯域は建物内で伝わりやすいとともに、人体で感じやすい振動である。一方、対策後は、同帯域ではほぼ40dBに低減した。良好な効果が得られた要因としてハニカム形状による剛性の効果、施工延長の長さの効果などが考えられる。

道路側対策事例3

大阪府の諸福一中垣線の拡幅工事に伴い既設家屋に対して道路が近接することとなり、軟弱地盤、さらに深夜の重交通の往来が多いなどの条件が重なり、交通振動問題が発生した。

対象の地盤は深さ15.5mまで軟弱な沖積粘土層で構成されている。対象地での交通振動調査（公害振動計測器による）からは最大振動レベル L_{max} が振動規制法による規制値の60dB（夜間）を上まわる状況であった。

振動加速度波形およびフーリエスペクトル図（図13）からは、道路から沿線民家まで3Hzの卓越波がほぼ減衰することなく伝播していることが確認できる。これは大型車両のばね上の卓越振動数と一致するため、大きな振動増幅の可能性が懸念される。また、民家の揺れとの共振現象を起こすことも十分に考えられた。

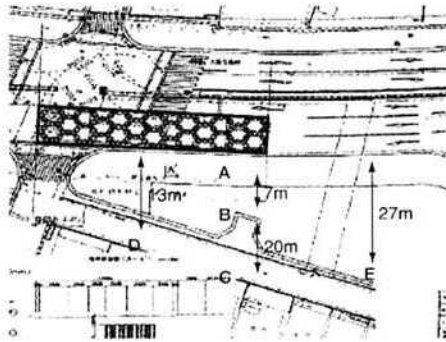


図11 計測地点図

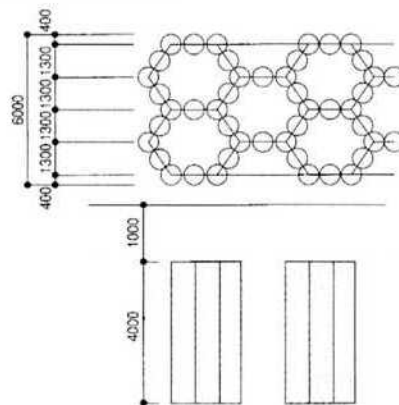


図12 WIB構成図

1) WIBの設計と施工

まず、対象地盤の振動伝播特性を把握するために多成層地盤のモデル化を試みた。振動数-群速度の関係を与える分散特性図を描き、鉛直および道路直交方向の水平振動に対して3Hzにエアリー相が認められる。このため、交通振動が3Hz以上で卓越していることが説明できる。したがって、これを遮断振動数とした対策がなされなければならない。

振動対策としては、道路の一部にWIBが埋設された（図11）。振動対策WIB工法のハニカムWIBを道路路面下を実施するに際して遮断振動数に注目して、卓越伝播波長が決定されるので、WIBのセル構造の設計を図12とした。ハニカムセル構成要素のソイルセメント改良杭の施工は、地盤改良工法の深層混合処理工法を採用した。改良率は4090で、ソイルセメントの一軸圧縮強度は $q_u = 1,500\text{kN/m}^2$ が期待できる。改良杭は4mで、地表面下の1mの範囲は改良度を低下させた。当該地盤は、この自然地盤構成と沿線民家の揺れから

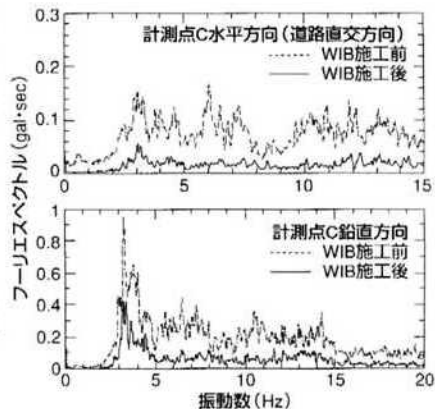


図13 WIB施工前後の応答フーリエスペクトルの比較

振動低減の振動数帯域3~5Hzを目標とする。

2) 計測結果と考察

計測は、図11に示す東行2車線、西行3車線の道路沿い、A、B、C、D、Eと記した箇所で行い、鉛直成分、水平面内（道路直交方向）および面外（道路方向）成分を速度応答で計測した。C、Dは民家の直前である。計測は深夜から次の日の早朝にかけて行い、主にトラック走行を対象に計測した。

東方向からの進入車に対して計測波形からのフーリエスペクトル図をWIB施工後とWIB施工前で比較した結果を図13に示す。鉛直、水平（道路直交）方向において、道路交通振動の卓越周波数である3~5Hz付近において低減効果が表れていることがわかる。図14に示す最大振動レベル L において深夜における振動の低減効果が認められる。深夜に多い大型車両の走行によって生じるばね上重量による低振動数帯域の振動が抑制されたと思われる。また、民家前のC地点においては、鉛直方向でWIB施工前には最大振動レベルが人体知覚レベルより上まわっていたのがWIB施工後には、ほぼ人体知覚ライン以下に収まっており、住民が感じる振動は少なくなった。

建物側振動対策事例

現地は丘陵地に造成盛土をした住宅分譲地で、地盤条件は地表より

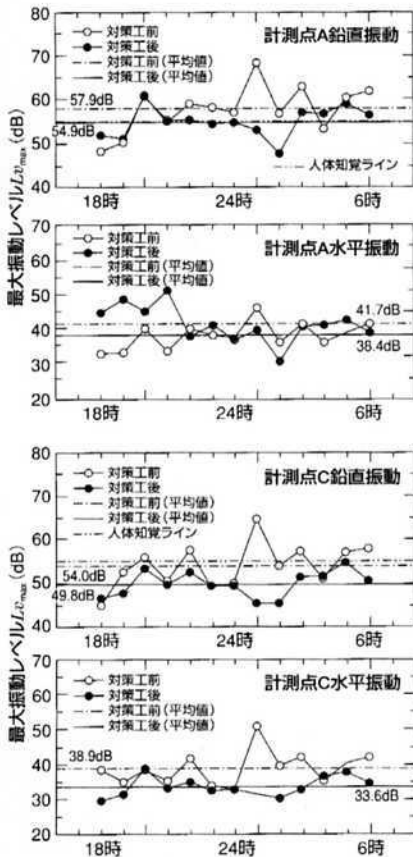


図14 最大振動レベルの比較

GL-5m程度までN値5程度が続く粘性土、それ以深はN値>10程以上の洪積層である。

1) WIBの設計と施工

深層混合処理工法を利用したハニカム構造の地盤改良により、建物配置内において振動対策WIB工法を検討した(図15)。施工条件は、地盤改良杭 ϕ 800mm、杭長1.5m、改良範囲は1/2波長以上を確保するように建物配置内全域を対象とし、地盤改良杭のせん断波速度は現地盤のその3~5倍程度以上になるように、事前配合により目標強度を決定した。

2) 計測結果と考察

【振動波形(速度成分)の計測】

サーボ型振動計測機による振動速度をWIB施工していない場所と、施工している場所の14, 16号地点にて計測した。振動波形を比較したものを図16に示す。それらのフーリエ振幅も図17において比較した。振動波形は主要帯域が10~20数Hzで、

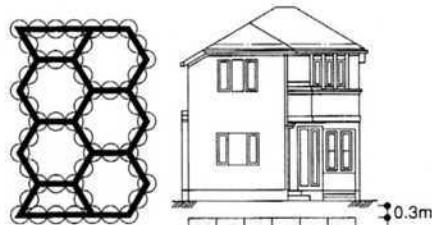


図15 建物敷地に敷設されたハニカムWIB

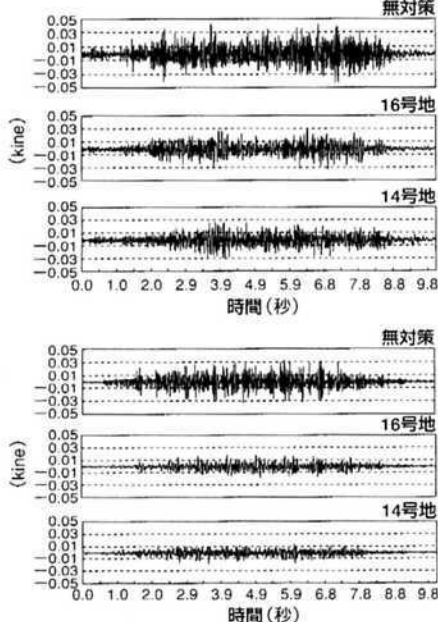


図16 WIB施工と無対策での振動波形の比較
約22Hzにピークを示している。

【減振効果】

WIB施工による減振効果を評価した。鉛直振動で5.5dB、水平振動で8.5dBの低減効果が得られた。それらの速度波形からの低減効果を図16に顕著に見ることができる。鉛直方向応答よりも、水平の南北方向がより大きな応答低減を示している。図17のフーリエ振幅からは、WIBの施工により、14号地、16号地において卓越振動数帯域の減振効果が見られる。

3) 振動対策効果の予測

WIBによる対策効果を予測する場合、FEMによるシミュレーション法のほか、簡易的にWIB幅 W と対象波長 λ の比、 W/λ と低減効果の関係が求められる。ちなみに、 $W/\lambda=1.0$ の場合の地表面最大変位は0.5であり、約5dBの低減効果が予測される。また、これまでの実績から

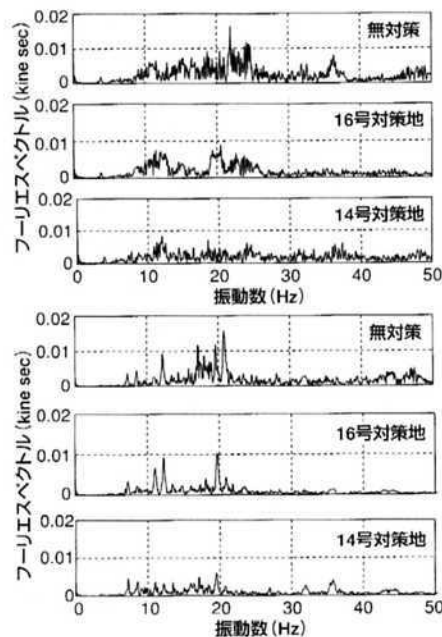


図17 振動波形フーリエ振幅無対策時と対策時の比較

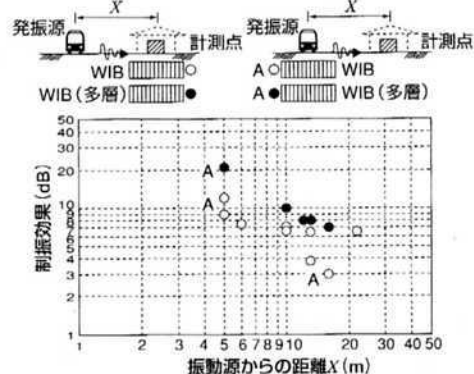


図18 WIB工法の振動対策効果

例えば、図18に示すように発信源から10m以内の距離に限れば、5dB以上の効果が期待できる。

ハニカムWIBの提案

同工法の特徴として、埋込み基礎からの低振動数帯域の地盤振動の低減に有効な画期的な対策工法である。その事例のコンピュータ・シミュレーションについて論文²⁾を参照されたい。(たけみや ひろかず)

【参考文献】

- 1) 竹宮, 合田, 佐藤: 波動遮断ブロック(WIB)の受動的制振効果, 土木学会論文集, No.549/1-37, p.p.221-230, 1999年6月
- 2) Takemiya: H. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2002) 69-87
- 3) 竹宮宏和: 事例2 WIBによる振動発生側(能動的)対策, 地震環境振動シンポジウム論文集, 地盤工学会, 2004年5月
- 4) 竹宮, 橋本: 事例6 WIBによる受振側構造物の振動対策, ibid.