

最新の地盤振動対策工法 「WIB 工法」

岡山大学名誉教授
E&D テクノデザイン(株)
竹宮 宏和

1. はじめに

日本では、国土の制約上、やむを得ず狭い地域に様々な構造物が混在している。今日の交通網整備においては、利便性・経済性が要求されるため、必然的に人口密集地や宅地周辺に交通網を整備、充実させる必要がある。交通路と住宅との距離は**写真-1, 2**に見るように近接せざるを得ない。その結果交通に起因する振動問題が環境振動問題として、近年、増加の傾向にある。環境重視の 21 世紀においては、それは工学的解決を迫られている重要課題の一つである。

交通車両が発生する振動源の特性、つまり列車走向では列車の輪重配置と走向速度の比、道路車両では舗装構成及び舗装面の凹凸に起因して発生する振動が挙げられる。発生された車両振動は軌道・道路構造を介して地盤内に放射される。高架構造を採っていると、同構造の固有振動が大きく誘発され、それは一般には低周波振動となって現れ、地盤内の波動伝播において表面波（レーリー波）を卓越して伝播させる。そのため軟弱地盤内では低周波振動が伝播し、家屋の固有振動数（約 3Hz）と共振し易い。

交通などの人工振動源に対処するために、様々な振動低減工法が開発されている。従来から溝工法、連続地中壁工法、柱列工法などがある。いずれも 1 次元波動伝播理論に基づく振動遮断原理をとっているため、現実の状況とのずれがあり、遮断効果は高振動数帯域に限られている。一方、筆者らが開発してきた WIB 工法（Wave Impeding Barrier）は、地盤の表層内を伝播する波動に注目して非伝播状況を創出するために地盤内への人工構造体を導入する。また伝播する入射波の波長を硬いセル壁構造により散乱現象を起こさせて短波長化し、その上で高振動数化した波動を高減衰材で吸収させるイノベティブな複合体ハニカムセル WIB 工法を提案している。

上記の WIB 工法は、基礎の耐震補強工としても効果的である。現在、構造物の耐震設計が性能設計法へ移行している中で、強震時の地盤と構造物の動的相互作用の観点から地震入力の低減と慣性力の発生抑制に寄与することが合理的な基礎の耐震性能工法として強調される。



写真-1 高架鉄道沿線住家



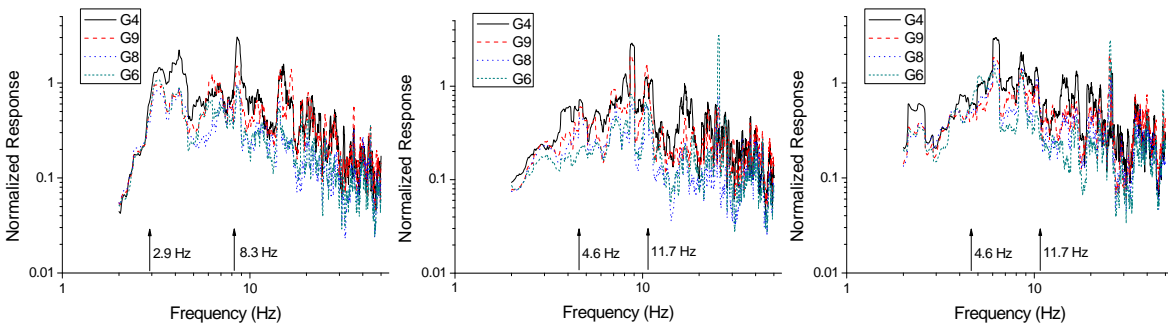
写真-2 高架道路周辺住家

2. 交通沿線振動の現状¹⁻⁴⁾

交通振動を始め、環境振動に関して法的には環境振動規制法がある。そこでは計測法の仔細が記述され、人体感覚から規制閾値が決められている。しかし、低周波振動問題での曖昧さがある。

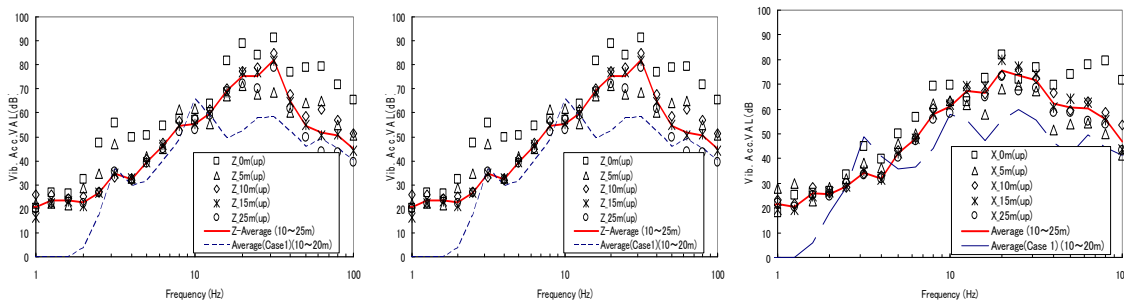
いま、特定の高架道路交通振動に注目して、周辺地盤の振動性状を評価した内容を説明する。**写真-2**の橋梁は三径間連続橋で、軟弱地盤に立地している。地盤内の振動の伝播を詳細に調べるために、地盤の各距離における計測波形のフーリエ振幅を橋脚下端との比で絶対値で**図-1**に描いた。同図において波動の伝播性を応答振幅比から判断すると、SV波とP波からなる面内波動場では約5~7 Hz, 13~16 Hzに、SH面外波では約3Hzと8 Hzに限界振動数が認められる。これらの振動数は固有波動モードからのエアリー相(後述)の振動数(矢印で指示)に対応している。

地盤振動の方向性に関しては、現行の環境振動規制法は鉛直成分のみを対象にしているが、現実には水平成分の低周波域の重要性が強調される。それは振動数的に一般住家と共振する可能性が高い。そのことが、計測地は規制値を下回っているが、住民の振動苦情が出てくる原因になっているかもしれない。



(a) 橋軸方向変位応答(面外波動) (b) 橋軸直角方向変位応答(面内波動) (c) 鉛直方向変位応答(面内波動)
 図-1 試験車の上り走行時の加速度フーリエスペクトル比

一方、新幹線列車の走行による沿線振動に対して、計測波形の振動レベルを1/3オクターブ加速度スペクトルで**図-2**に示した。高架軌道の動的な応答に惹起された低周波振動が放射されるが、軟弱地盤上の場合、遠くまで伝わり易い。それは同図に破線で平均値を描いているが、4 Hzと10 Hz程度に応答の卓越ピークが存在する。ところが表層厚が薄い別の場所の計測では、ほぼ同一の軌道を同一列車が同一高速度で走向するときでも、高振動数の短い波長の波がよく伝わり、低振動の長い波長の波は遮断されていることが分かる。10 Hzを越える振動帯域では、後者は振動レベル値は高いものの、生理的・心理的に振動障害を与える低周波帯域の値が低い。以上、表層地盤の厚さによる応答の差異が低振動数帯域において顕著に見られる。水平成分も鉛直成分に同様な応答を呈している。



(a) 軌道直角方向の水平応答 (b) 軌道方向の水平応答 (c) 鉛直応答
 図-2 新幹線列車の走行時の加速度フーリエスペクトル

3. 基礎となる研究⁵⁻⁸⁾

列車走向により発生する振動には、列車の輪重配置 vs. 走行速度、および軌道の剛性が関係する。図-3 は、列車の走向速度によって、軌道と近傍地盤の応答が輪重の移動と共に順次応答するか、それとも地盤内に加速度場をつくって動的応答と化するかを説明したものである。前者はキネマチックな下方向のみのたわみであり、後者は上下方向への大きなたわみを呈し、走行安全にも関わってくる。

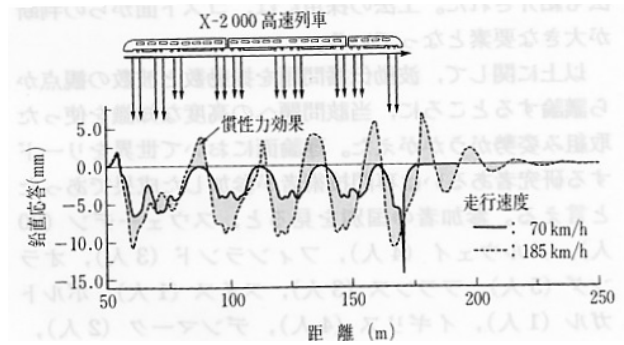


図-3 スウェーデン国鉄の軌道応答

従来、交通振動など地表面あるいはその近傍の振動源に起因して発生する波動を半無弾性限体の表面波（レーリ波）として扱ってきている。しかし、現実の地盤では、硬い基盤の上に軟らかい表層地盤が堆積しているのが通常である。そのため、表層内の波動伝播は分散性特性を示す。つまり、伝播する波動は振動数に依存した位相速度を持つ。このような波動場では代表速度として波動のエネルギーに関係して群速度を評価すると、群速度の極小値はいわゆるエアリー相を定義し、エネルギー中心振動数を予測できる。

与えられた地盤物性値、たとえばせん断波速度、密度、ポアソン比から表面波の伝播を理論的に予測することができる。表面波スペクトル（SASW）解析法により計測点間の波形の位相差から位相速度（波速度）を算出して、表面波としての位相速度と振動数の関係を求め、分散曲線を位相速度 vs. 波数として描くことができる。図-4 は、写真-1 の軟弱地盤上の新幹線軌道からの波動伝播を捉えたものである。地盤の固有波動モードと計測結果との対応から卓越して伝播する振動を推測することができる。

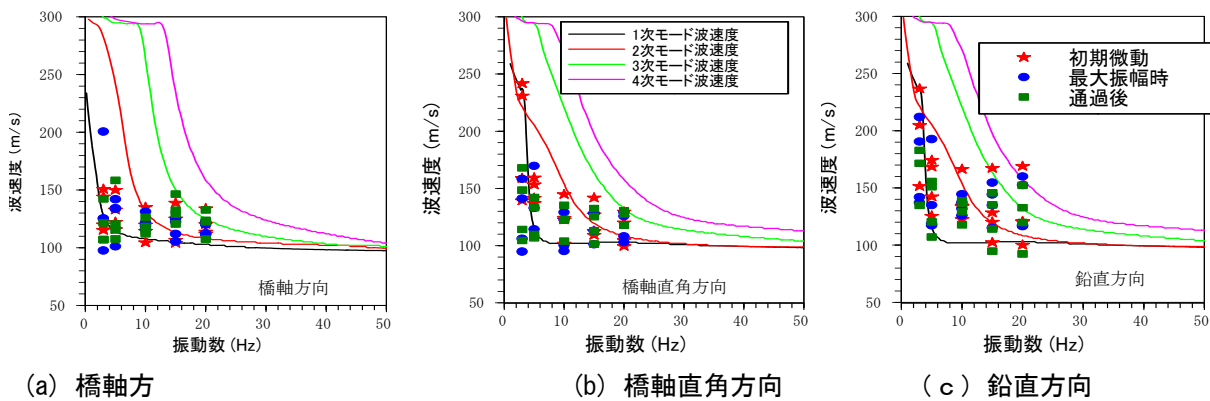


図-4 波動分散特性

以上の知識に基づいて、筆者が開発しているWIB工法の波動遮断原理は、図-5に説明するように伝播波の遮断振動数を高振動化することにある。そのための具体的な工夫は、一つには表層厚を入射波波長に対して人為的に小さくすることである。

根入れ基礎の場合、振動源位置は地中にも分布しており、入射波長の短波長化を図り、高振動数化することである。図-6 は各ハニカム WIB セルを渡っての波動の逸散減衰とセル内部での消失減衰の様相を説明したものである。ハニカム WIB の中詰め材に高減衰材を使用することで振動エネルギーの吸収が大きくなる。この複合効果は 従来の工法には見られない大きな減振効果を発揮する。

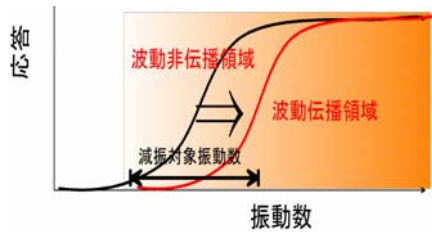


図-5 波動の遮断原理

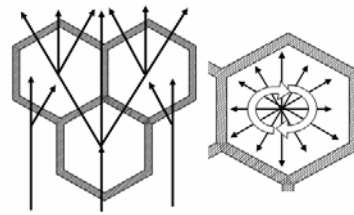
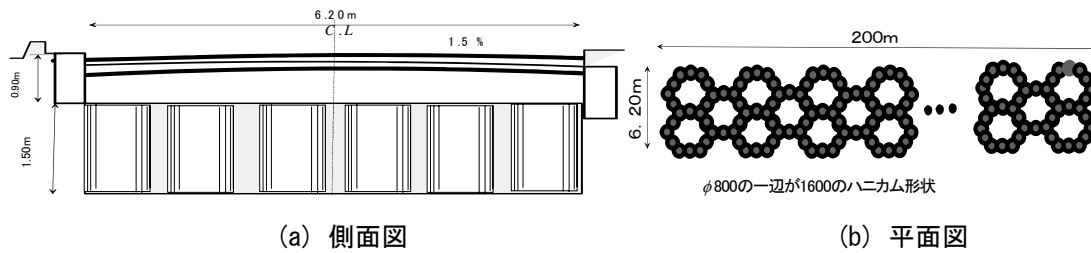


図-6 WIB 壁による波動の散乱とセル内エネルギー減衰



(a) 側面図

(b) 平面図

図-7 道路直下の WIB の構築

図-7は道路直下の WIB の構築したときの道路横断面図であり、WIB工は路盤直下の路床部分に位置する。WIBセルのインピーダンス減衰を大きく期待するためには、壁材の剛性と密度を大きくすることが効果的である。そのため現場施工としては地盤改良、あるいは工場生産プレキャストコンクリート製として耐久性のある使用する。中詰め高減衰材には減衰性の高い廃タイヤシュレッドを使用する。

4. コンピュータ・シミュレーション⁹⁻¹¹⁾

高架道路橋から発生し、周辺地盤へ伝播する交通振動障害への対策に関したもので、同構造の固有振動を反映した低周波振動が周辺地盤へ伝播するのを遮断するために、基礎の周辺に WIB 工を図-8 の設で想定した。ハニカム・セル WIB とリング WIB のシミュレーションに図-9 の FEM モデルを採用した。

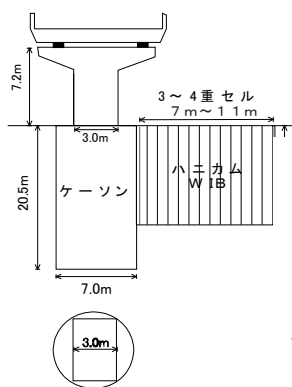
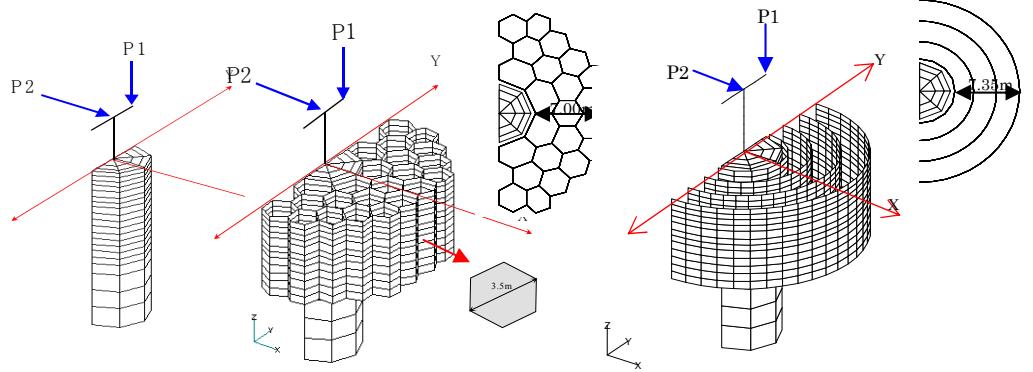


図-8 WIB 工



(a) 対策前モデル

(b) ハニカム WIB モデル

(c) リング対策モデル

図-9 FEM モデル

ハニカム WIB の導入は基礎の卓越振動数を 3Hz 付近から 4Hz 付近へ高め、橋脚のスウェイとロックインの連成振動を大幅に拘束し、基礎から放出される振動エネルギーが低下する。リング WIB の場合、卓越振動数のシフト効果が現れているが、桁部、基礎天端で応答がそれほど小さくならないのは、ハニカム WIB 程、基礎を拘束されていないことが原因である。

周辺地盤応答に関して、特定距離の振動加速度レベル値 (VAL) と振動数との関係を図-10 に描いた。橋

軸方向応答に関して、低振動数 3Hz に対して両者とも 10 dB 以上の減振効果が得られ、鉛直応答に関しても、5dB 以上の減振効果が得られている。

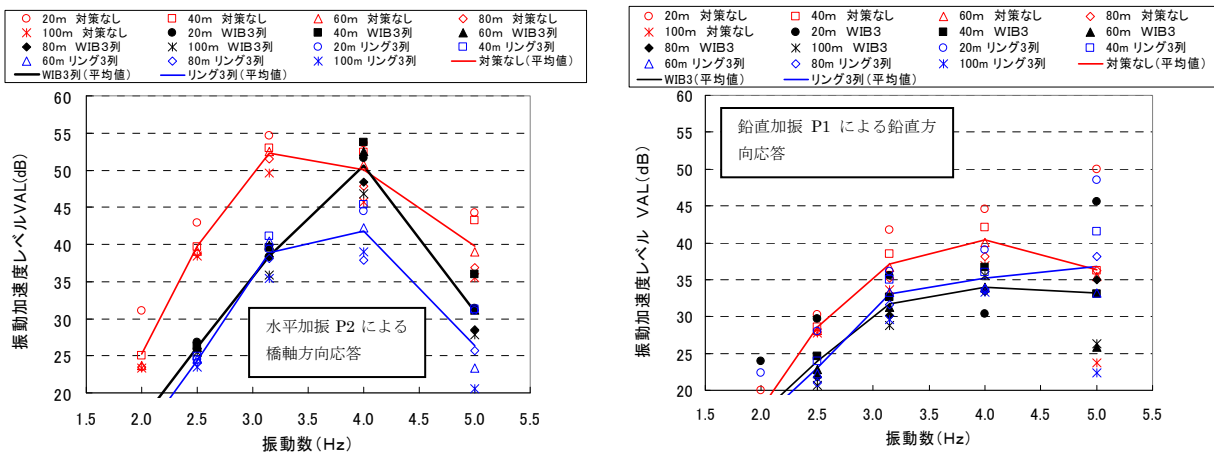


図-10 加速度応答レベル

つぎに高速列車による沿線振動を対象とした事例を示す。台湾新幹線の振動対策で著者らが提案したものである。対象構造物は高架軌道は3径間連続PC高架橋である。対策工は、この高架軌道の外側に限られるとの条件でハニカム WIB 工を図-12の配置とした。これは1基の基礎に注目したものである。したがってこれらの配置が軌道に平行に連続するものとする。

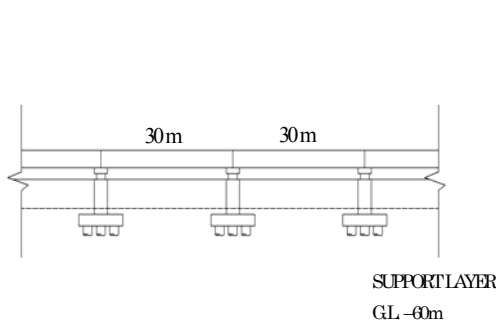


図-11 台湾新幹線高架軌道

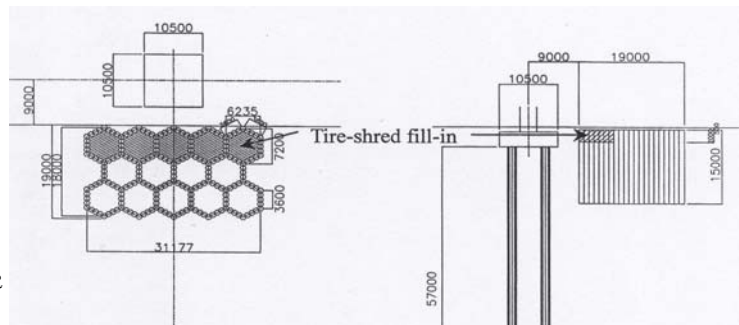
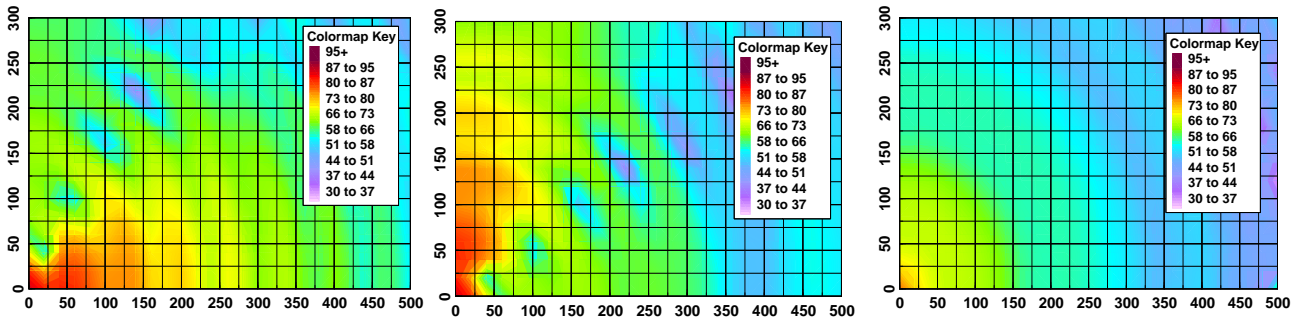


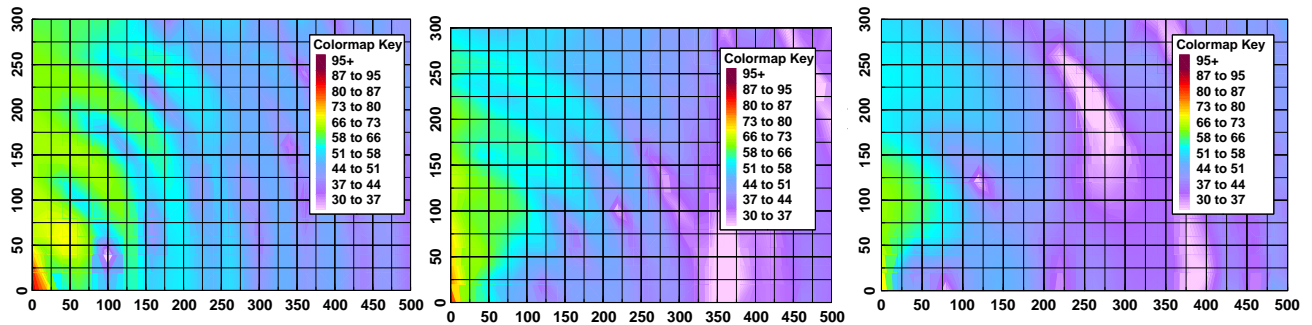
図-12 ハニカム WIB 防振工

基礎天端加振による調和応答状態を想定した3次元シミュレーションを行った。10kN 振状態を想定した。これは新幹線列車走行の載荷力と同等である。紙面の都合上、ここでは5 Hz 加振状態の地表面振動を図-13にコンターマップで描いた。同図からは、ハニカム WIB の存在により、各加振方向に対して振動の伝播が遮断されていることが明瞭に見て取れる。シミュレーション精度の検証のため、対策を施していない状況で実大基礎への起振機実験の結果の一例を図-14にシンボルで記入した。両者の一致は非常によい。よってハニカム WIB による減振効果の信頼性が強調される。

低振動数帯域に注目して振動レベルの低限度を評価したものを図-15に示す。ここでは、WIB の配置で、図-11の軌道並行の配置と共に図-9(c)のように基礎を取り囲む配置の結果も併せ記入した。今回、提案したハニカム WIB のサイズでは、10Hz 以下の低周波帯域において 10 dB もの振動低減をもたらすことが軌道から 500m の距離範囲において予測される。



(a) 対策前



(b) WIB 対策後

図 - 13-1 水平軌道方向加振 (5Hz) 図 - 13-2 水平軌道直角方向加振 (5Hz) 図 - 13-3 鉛直加振 (5Hz)

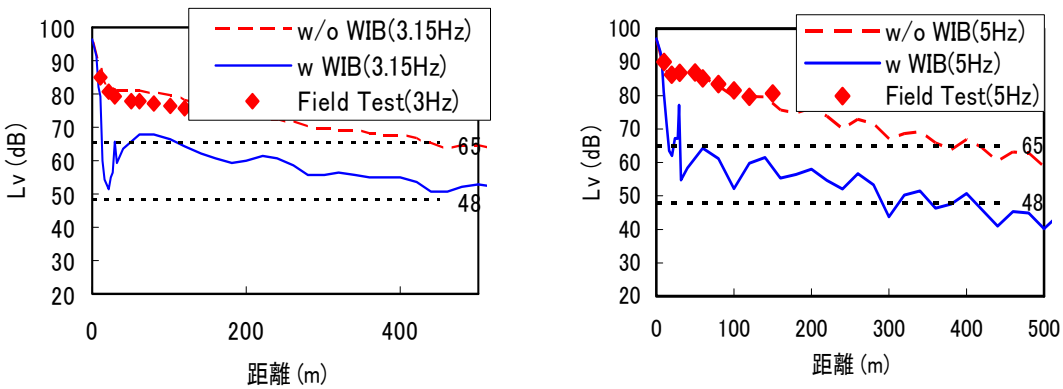


図 - 14 振動レベルの距離減衰特性

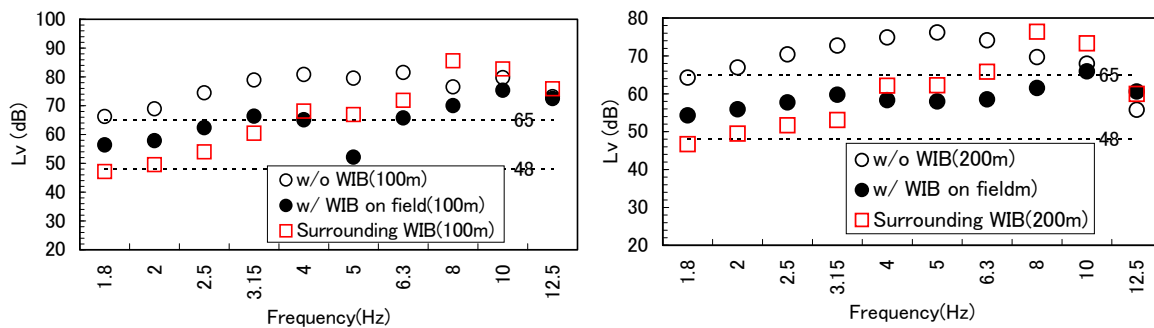


図 - 15 振動レベルの低限度

5. フィールド振動実験^{1,2)}

各種の WIB パターン対策工の実大モデルによる実証実験を実施し、それらの対策工を評価した一例を以下に示す。採用した WIB パターンは、**図-16**に示す①廃タイヤを 2, 4 インチサイズ裁断したシュレッドをトン袋詰め、それを並べて埋設、②コンクリートパネル 1 列配置し、その両側にタイヤシュレッドの袋詰めを埋設、③コンクリートパネルを六角形に組み、減衰材をタイヤシュレッド袋で中詰めして連続させた対策工である。実験では、WIB 対策工が振動の伝播経路上に配置される状況に対し、ガイドハンマーの衝撃载荷、キャタピラ車の走行、小型加振機の稼動によって振動場を作り出した。

図 17-1~**図 17-5** は、各防振工の減振効果を評価するのに加振源からの距離が 7m から 25m の範囲の計測応答の最大値の平均をとって無対策時と比較したものである。それぞれにおいて計測距離 25m の範囲で平均をとって評価した。評価値がマイナスになっているのは減振効果であり、プラスは却って増幅効果になっていることを意味する。ガイドハンマーは面外と面内方向の応答が誘発されるように打撃する方向を調節したが、起振機は鉛直成分応答が主体である。キャタピラ車走行は移動加振であるため、面内と面外共に対象となる。実験結果より対策工としてトレンチの場合には次元理論から期待される 3-4dB が得られ、タイヤシュレッド中詰め WIB は数 dB~10dB 以上でその優位性が強調される



図 - 16 WIB 工の各種パターン

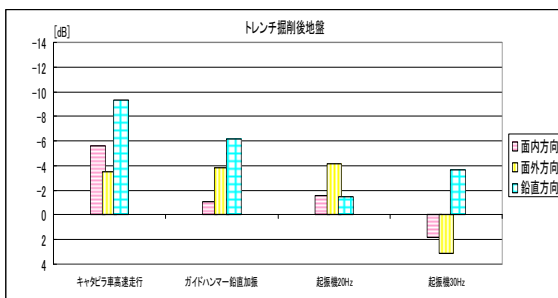


図 17-1 トレンチ

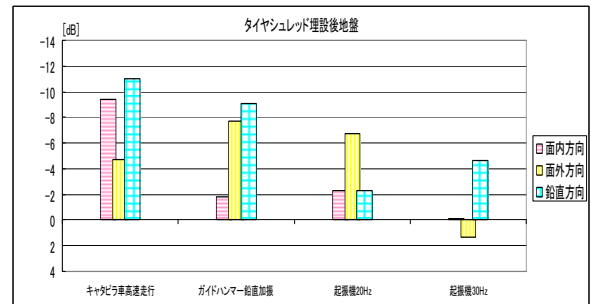


図 17-2 タイヤシュレッド埋設

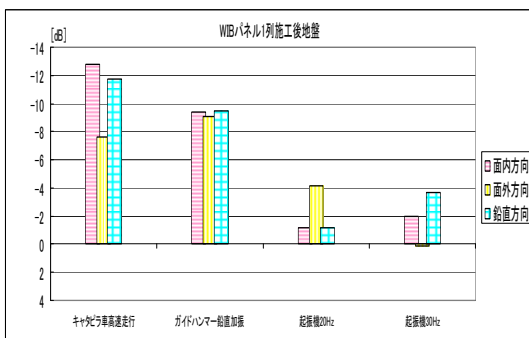


図 17-3 ハニカム WIB パネル 1 列

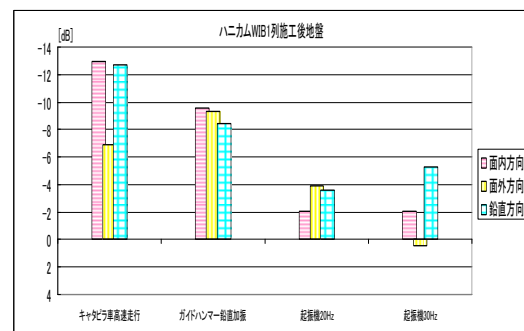


図 17-4 ハニカム WIB 1 列

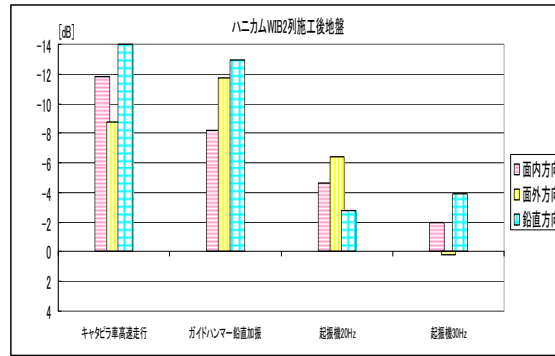


図 17-5 ハニカム WIB2 列

7. むすび

交通振動は、一般に低周波振動として環境振動問題の中で最近注目され、対応策の開発が緊急性のある重要課題として認識されている。振動対策工法は、従来からなされている工法に加えて、いくつかの提案がされてきた。しかし、それらは従来工法の延長線上で考えられたものであったため、効果的な対策工法とまでとなっていなかった。筆者は地盤内の伝播波動を究明した上での刷新的な対策工法「WIB 工」を開発してきた。本報文では、WIB 工の開発経緯を述べ、ハニカム WIB による減振効果に関してコンピュータ・シミュレーション結果からの減振現象の説明と実大実証フィールド実験からの検証を示した。

ハニカム WIB は、基礎の耐震補強工としても効果的である¹³⁾。現在、構造物の耐震設計が性能設計法へ移行している中で、地盤と構造物の動的相互作用の観点から地震入力の低減と慣性力の発生抑制に寄与する。それに加えてレベル 2 の強震時の一部損傷を許容して地震エネルギーの吸収を図る非線形設計を効果的に図ることができる。

参考文献

- 1) 環境省，環境振動規制法（1976）
- 2) 竹宮・陳・井田：高架道路で発生する交通振動と沿線地盤への伝播性状—計測と FEM 解析のハイブリッド手法による予測と対策—，土木学会論文集 A,62.2(2006), 204-214
- 3) Takemiya, H.: Analyses of wave field from high-speed train on viaduct at shallow/deep soft grounds, J. Sound and Vibration, 310(2008), 631-649.
- 4) Takemiya, H.: Simulation of Track-ground Vibrations due to a High-speed Train: The Case of X-2000 at Ledsgard. Journal of Sound and Vibration, March; 261(3), (2003), 503-526.
- 5) Takemiya, H. and X.C. Bian, Substructure simulation for train track/layered ground interaction dynamics through discrete sleepers. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 131(7), (2005) 699-711.
- 6) H.Takemiya, X.C. Bian, Shinkansen high-speed train Induced ground vibrations in view of viaduct-ground interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27(2007) 506-520.
- 7) Takemiya, H. and A. Fujiwara, Wave propagation/impediment in a stratum and wave impeding block (WIB) measured for SSI response reduction, Hirokazu, Soil Dynamics. & Earthquake Engineering, 13 (1994) 49-61.
- 8) 竹宮：列車交通に対する地盤振動最新動向—予測と対策のためのパラサイスミック工学—鉄道力学論文集，第 10 号(2006),61-68.
- 9) Takemiya, H.: Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24(2004), 69-87.
- 10) 竹宮・島袋：交通振動対策法「ハニカム WIB」の減振効果—高架橋基礎周辺配置ケース—，土木学会論文集 No.808/I-74(2006), 103-112.
- 11) 竹宮・辺：新幹線高架橋から発生する沿線環境振動の WIB による低減効果，鉄道力学論文集，第 9 号 (2005),37-42.
- 12) Takemiya, H. Pre-cast concrete WIB with tire shreds fill-in for a vibration mitigation measure, Workshop on scrap tire derived geomaterials, Yokosuka, 2007.
- 13) 竹宮：地震動に対する地盤や構造物の耐震技術，土と基礎 3 月号，地盤工学会，2003. 3, pp.1-3

