

円形ドレーン材を用いた柱列式地中防振壁工法の開発

小野田 浩二* 長沢 洋一*
大島 貴充** 田村 保**

要 旨

近年、都市部の鉄道や道路の沿線施設に対する環境振動問題が増加している。鉄道の列車走行による地盤振動や道路交通振動を低減する方法として、振動源である車両から、伝播経路である軌道、地盤、そして受振部である沿線構造物まで広範囲にわたり、多くの手法が提案・実施されている。本研究では、伝播経路における振動低減法として地中防振壁に着目し、液状化対策等に一般的に用いられる円形ドレーン材を用いた柱列式地中防振壁工法を提案した。

ここでは、鉄道の営業線での振動低減を目的とした地中防振壁の実証実験を行い、その施工性および振動低減効果の確認を行った。また、これらの実証実験結果を有限要素法による振動低減効果の再現計算を行い、同手法による定量的な予測が可能であることを示した。

1. はじめに

わが国では都市部への人口集中が進み、鉄道や幹線道路が住宅地に隣接している事例が少なくない。これらの鉄道や幹線道路の沿線では振動・騒音が周辺住民の生活環境に及ぼす影響が大きいと、何らかの振動・騒音対策を求められるケースが多い。そのため、振動・騒音の低減対策は都市の住環境にかかわる種々の問題の中でも、重要性の高い課題となっている。鉄道沿線での振動低減のための対策に限ってみると、車両の軽量化、軌道の高剛性化、低バネ化などの振動源での対策、振動を受ける構造物の側の対策、防振壁などを設ける地盤の対策などが挙げられる¹⁾。特に、列車の軽量化やレールの平滑化等の振動源の振動レベル低減の対策の効果は高く、鉄道沿線の振動公害の低減に一定の効果を見せている。しかしながら、住宅密集地を通過する鉄道沿線などでは、さらなる振動低減対策のニーズも少なくないのが現状である。

上述の振動低減対策の中で、防振壁などの振動伝播経路における地盤対策も一定の効果があることが知られている。その中では、振動源と民家等との間に適切な深さの空溝を設けることが最も直接的で有効な振動低減対策として知られている。しかしながら、このような空溝を恒久構造物として構築することはコストの面で現実的でなく、これまでに採用された事例の報告例は無い。そのため、空溝に代わる地中防振壁がいくつか提案されている。

一つの方法としては、連続地中壁などの比較的剛性の高い壁状の構造物を地中に設け振動を遮断するものであり、実物試験例²⁻⁵⁾などを通して振動低減効果も確認されている。また、最近の事例では壁内部に中空部を設ける事例の報告

も見られる。これらの工法は一般的には高コストが課題となることが多い。一方、EPS ブロック壁に代表されるような比較的剛性が小さく軽量の材料で地中壁を構築する工法もいくつか提案⁶⁾されている。これらの工法では軽量化や低剛性化を図ることで振動の遮断・減衰を高めるものである。ただし、EPS ブロックのような軽量材を採用する場合には、地下水位以下での施工性が悪いなどの施工上の課題が残っている。そのため、施工上の工夫が施された形で工法提案がなされている。これらの振動低減対策の有効性は、試験施工や数値解析により確認されている。

これらの工法を営業線の鉄道沿線に採用する場合には、狭隘な場所での極めて短時間での施工が要求される。上述の工法の多くは、大型の施工機械による施工を前提としたものが多い。また、地中防振壁構築の施工サイクルが比較的長く、鉄道の営業を前提とする場合に、地盤掘削に伴う周辺地盤への沈下・水平変位等の悪影響が懸念される。このように上述の各工法には解決すべき課題が多いため、これまでに鉄道沿線の防振対策として実際に適用された事例の報告例は無いのが現状である。

本報告は、これらの問題を解決するために、一定の間隔を設けて円形ドレーン材を地盤に連続的に打設し柱列式地中防振壁工法を提案するものである。柱列式地中防振壁とは、地盤とドレーン材の複合地盤を壁状に構築することで、振動低減のための防振地中壁とするもので、従来の地中防振壁工法が抱えるコスト、施工性、地盤変位などの施工課題の解決手段を提供するものである。すでに、基礎的な小型模型実験および現場での人工振動源を利用した現場実験を実施し、地盤振動の低減に効果があることを検証している⁷⁾。

*東京支店土木技術部 **本社土木設計部

ここでは、本提案工法の振動低減効果を鉄道営業線に隣接する地盤で、通過する列車振動による実証試験を行い、その地盤振動低減効果を確認・検証するとともに、2次元有限要素法による振動低減効果の再現計算を行い、地中防振壁の設計方法について検討を行った結果について報告する。

2. 提案する柱列式地中防振壁の概要

営業線の鉄道沿線に地中防振壁を構築する場合には、夜間の限られた時間を利用して施工せざるを得ない。特に、振動対策を必要とするような都市域の鉄道においては早朝から深夜にかけて営業用列車が走行するため、作業基地からの移動時間と施工準備および跡片付け工の時間等を考慮すると、実質2～3時間程度しか施工可能な時間が無い場合が多い。この限られた時間内に地中防振壁の施工を行い、その後の列車走行に支障を及ぼすことが無いことが、施工法として求められる。

本提案の柱列式地中防振壁工法では、液状化対策工の排水ドレーン材などとして使用実績の多い写真-1に示すドレーン材を土中に柱列状に打設して、地盤とドレーン材の複合地盤を構築するものである。ドレーン材の周囲には土砂流入を防止するために不織布を巻くのが一般的である。本工法で採用したドレーン材はポリプロピレンを立体網状体とし、その相互接点を溶着成型した構造となっており、空隙率が大きい。外径165mmの材料の場合には、重さが1.2kg/mであり、軽量かつ構造的に非常に丈夫な材料である。地中にあるのは長期的にも安定した材料である。

一般的にこのような排水用のドレーン材の打設にあたっては、あらかじめ地盤削孔を行い、ドレーン材を挿入したのち、ドレーン材と地盤との隙間を充填材で間詰めすることで、1本のドレーンの打設が完了する。ドレーン材の打設深度や地盤条件との兼ね合いもあるが、一般的にはこれらの施工サイクルは短く、数時間の限られた施工時間の中でも、複数本のドレーンの打設が可能である。また、充填材の材質・充填方法に注意すれば、その後の列車の走行に際しても問題となる地盤変形を抑制することも可能である。本提案の柱列式地中防振壁の構築にあたっては、上述のような一般的なドレーン材の打設を行うことを想定し、充填材としては充填性の高いセメントベントナイトを用いることとしている。

ドレーン材は適当な間隔の千鳥格子状に打設するが、打設列数を増減させることで必要な防振性能の確保を行うものである。ドレーン材の打設直後に列車が走行するために、地盤とドレーン材の間隙の充填を確実に施工する必要がある。本工法ではセメントベントナイトを削孔下部から注入・充填することで確実な充填を行う。写真-2は不織布を巻いたドレーン材の外観と先端に設けたセメントベントナイト注入用の治具

を取り付けた状況を示したものである。

従来の地中防振壁の多くは、均質な物性を持つ壁を地中に挿入するか、原地盤と均質に混合することで均質な壁を構築するものとなっている。一方、本提案の柱列式地中防振壁工法では地盤とドレーン材の複合地盤構造とすることで、地中防振壁に求められる防振性能を確保する点が特徴である。ドレーン材の挿入と間隙充填までを比較的小型の施工機械で施工できるため、都市部鉄道沿線の狭隘施工空間への対応も比較的容易となる。また、削孔後に直ちにドレーン材の挿入と間隙充填を行うため周辺地盤の変形を抑制できる。さらに、施工サイクルが短いため、限られた施工時間内での対応が可能である。



写真-1 ドレーン材の外観

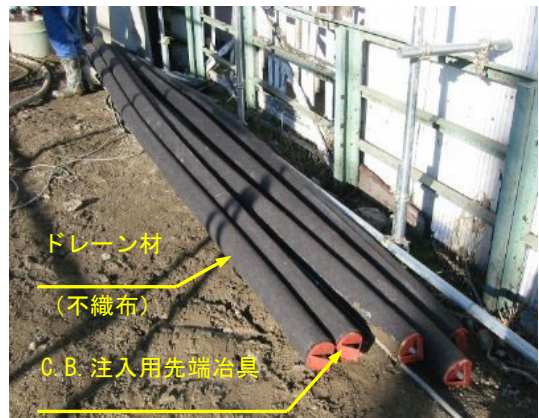


写真-2 不織布を巻いたドレーン材の外観

3. 現場実証実験による防振効果の検証

本報告で提案する地中防振壁工法の防振効果を検証するために、鉄道営業線に隣接して地中防振壁を施工して、通



図-1 地盤概要とドレーン打設深度

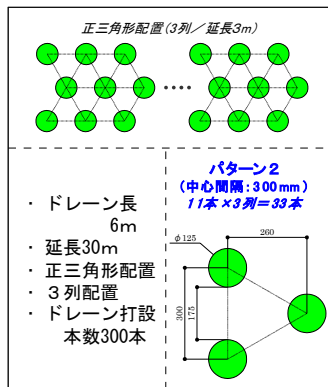


図-2 ドレーン材の平面配置

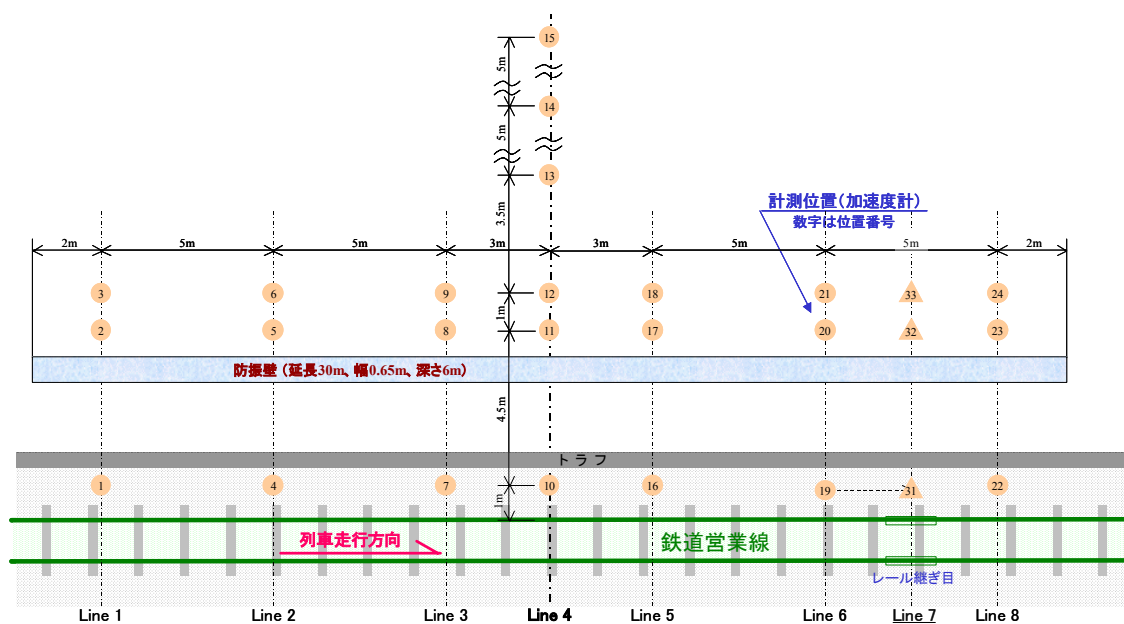


図-3 地中防振壁の配置概要

過列車による振動を利用した実証実験を実施した。実験場所は神奈川県のみ鉄沿線の2箇所であり、いずれの地点も表層には軟質なシルトが厚く堆積した地盤条件である。地中防振壁の施工前と施工後の加速度を計測しその比較から地中防振壁の防振効果を確認した。

図-1は地盤概要とドレーン材の打設深度を示したものであるが、表層部の2mが埋土層であり、その下部はG.L.-22mまでN値10以下のシルト質の軟質地盤である。地中防振壁の施工延長は30mである。図-2にはドレーン材の打設配置を示しているが、300mmの正三角形の配置として、ドレーン材を3列に配置した。ドレーン材の配置されている幅を見かけ上の地中防振壁の厚さとする、約650mmの防振壁厚となっている。なお、振動低減効果の確認にあたっては、上記の3列のドレーン材の打設を完了した時点で振動計測を実施したが、地中防振壁の幅の違いによる振動低減効果の確認のためにドレーン材を2列打設した段階においても振動計測を行った。

図-3は線路と地中防振壁の位置関係および振動計測を実施した地点を示したものである。振動計測は前述のように、地中防振壁の施工前後で同じ地点で実施することで、前後の振動計測結果の比較が可能となるようにした。加振源は営業用の通過列車としたが、列車編成や通過速度がほぼ同程度と考えられる列車(快速特急列車)に限定して振動計測を行った。加速度計の台数が限られているため、1列車で計測可能な振動計測地点は限られている。そのため、全計測点

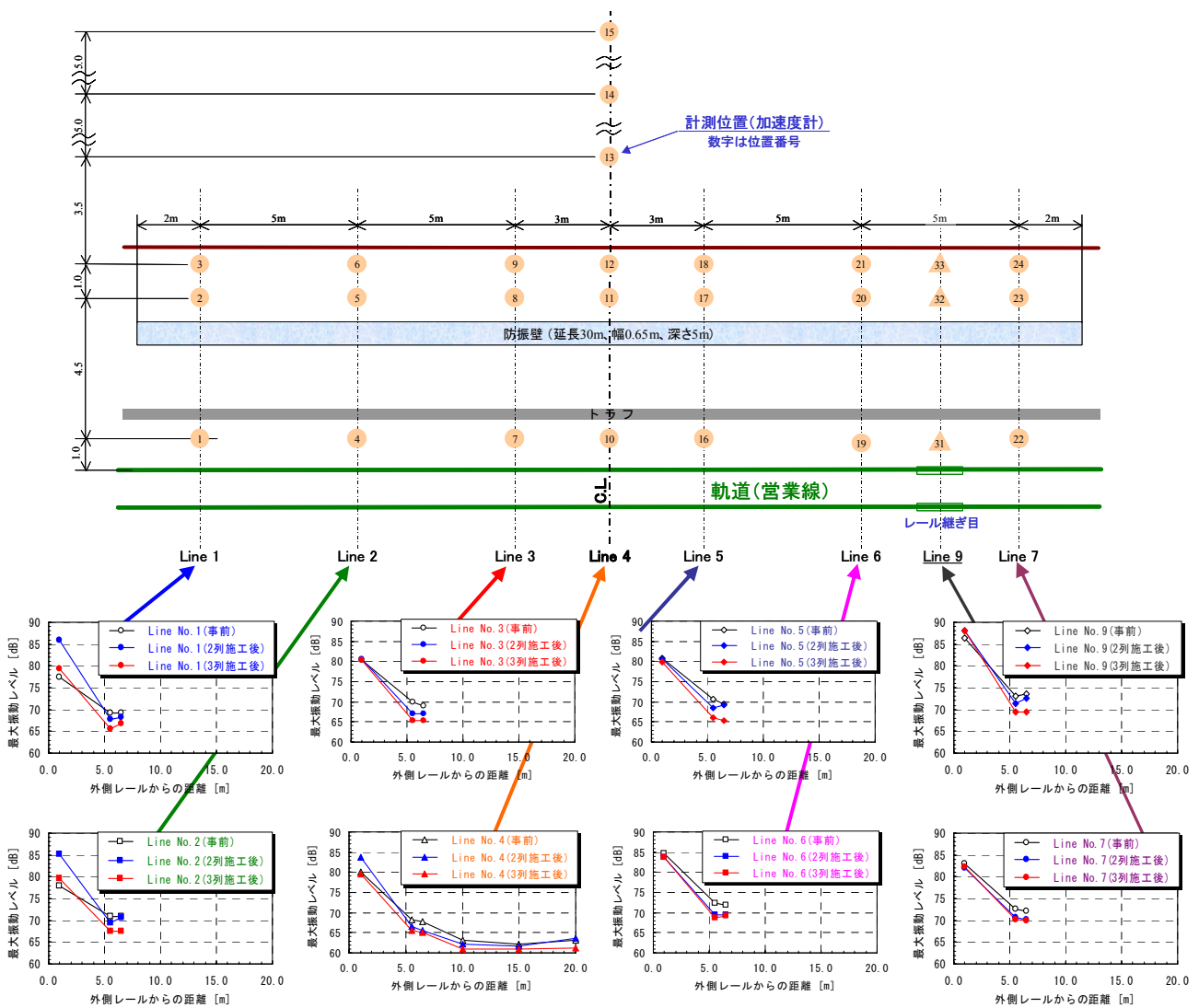


図-4 平均最大振動レベルの計測結果(平面分布)

の測定を終了するために複数の列車による振動を計測している。また、同一地点で複数回の計測を実施してその平均値で結果を評価するために、ほぼ終日の計測をそれぞれの地中防振壁の状況毎(地中防振壁無し、2列施工後、3列施工後)に実施した。同じ快速特急列車による振動を計測したが、重量に影響を及ぼす乗客数に変動があることや使用車両にも違いが見られることなどから、厳密には加振源の振動レベルにも差がある。振動計測は上下方向の加速度計を用いて行っており、適切なフィルタリング⁸⁾を行うことで、振動規制法における振動レベルに変換している。なお、一部の計測点では水平動の加速度の計測も実施している。以下では上下動の振動計測結果から得られた最大振動レベルで議論を行う。

図-4は各計測点で複数回計測されている振動計測結果

のうち、振動レベル(オーバーオール値⁸⁾)の最大値を平均したものの平面的な分布を示したものである。また、図-5は防振壁中央の軌道に直交する側線について、振動レベル(オーバーオール値)の最大値の平均をグラフ化したものである。これらの結果によると、防振壁近傍の2測点(軌道外側レールから5.5mおよび6.5m離れた点)において最も振動低減効果が高く、2列施工の場合に2-3dBの振動低減効果が、また、3列施工の場合には3-5dBの振動低減効果が認められる。一方、地中防振壁から離れるにつれてその振動低減効果は少なくなる傾向にあるが、3列施工の場合には1-2dBの振動低減効果が認められる。図-6は防振壁中央の側線上で振動源から5.5m離れた地点での1/3オクターブバンド振動レベル⁸⁾分布の比較結果を示したものであるが、2列および3列共に10-20Hzと約40-60Hzの周波数帯で有意な振動低

減効果が認められる。

地中防振壁の施工延長が30mと比較的短いために、地中防振壁が無い区間を列車が通過する際の振動の影響が、特に遠方の地点では無視できない。地中防振壁からある程度離れた地点では防振効果が低下していることの原因の一つと考えられる。

4. 2次元有限要素法による解析

2次元 FEM 解析コード「SuperFLUSH/2D」⁹⁾(以下、FLUSHと略す)を用いて上記の現場実証実験結果の再現計算を行った。FLUSHは、2次元有限要素法により地盤と構造物の動的相互作用解析を行うプログラムで、複素剛性を用いて振動数領域で応答解析を行うのが特徴である。同プログラムでは任意の点を加振点とした解析が可能である。検討対象断面としたのは、地中防振壁の中央を通る軌道直交方向の断面である。本来は軌道レール上を加振点とするべきであるが、同地点での直接的な振動計測を行っていないため、今回の解析では、地中防振壁の軌道側に設けた振動計測点を加振点と見立てて、同地点での加速度の計測記録から入力条件を設定することとした。

地盤概要は図-1に示した通りであるが、解析に必要なパラメータはボーリング調査から得られている土質区分およびN値から必要に応じて適当な換算式を用いて設定した。地中防振壁は地盤とドレーン材の複合地盤となっているが、このような複合地盤の動的物性を適切に与える一般的な方法は無い。そのためここでは、地中防振壁の質量と剛性については、地盤とドレーン材の個々の物性を、その平面積の比率に応じた単純平均を採用することとした。地中防振壁の減衰比を与える必要があるが、ここではこの減衰比を未知パラメータとすることで、計測結果を最もよく再現する減衰比を試行錯誤的に求めた。

図-7は地盤調査結果をもとに作成した解析モデルを示している。解析モデルの下方は、設計上の基盤層と考えられるN値50以上の層までをモデル化した。また、水平方向は振動計測を実施した距離の2倍の領域をモデル化した。下方の境界条件は粘性境界を、側方の境界条件としてはエネルギー伝達境界を用いた。最小メッシュ間隔は解析上の上限周波数が50Hzとなるように設定した。

図-8は地中防振壁の無い場合および地中防振壁として3列のドレーン材を打設した場合について解析結果と計測結果とを合わせて示したものである。ここで示した解析結果は、前述のように計測結果を最もよく再現すると考えられる地中防振壁の減衰比を試行錯誤的に求めた結果から得られたものである。地中防振壁としてドレーン材を3列設けた場合の解析結果と計測結果は必ずしもすべての計測点で一致した答えが得られなかった。そこで、最も大きな減衰効果が認め

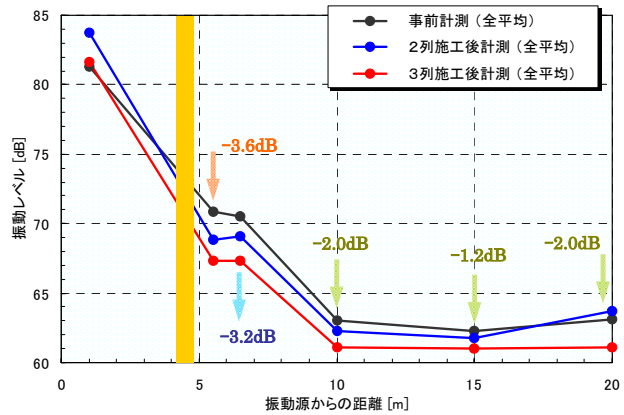


図-5 平均最大振動レベルの計測結果 (防振壁中央の軌道直交断面)

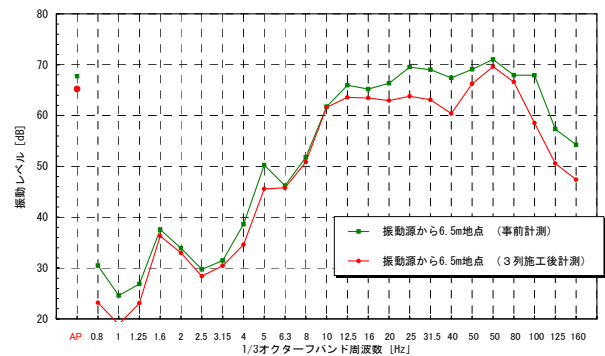


図-6 1/3オクターブバンド振動レベル分布

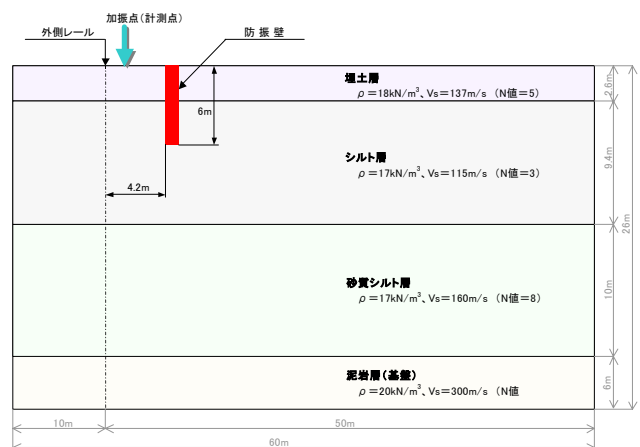


図-7 2次元有限要素法による解析レベル

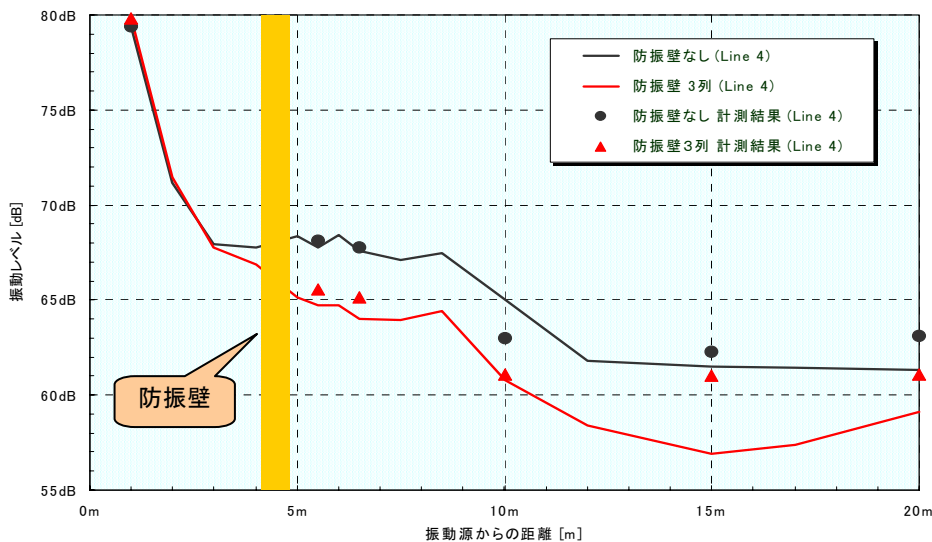


図-8 解析結果と計測結果の比較

られる地中防振壁の背後での実測結果の再現性を優先して、地中防振壁の最適な減衰比を求めた。この場合に、地中防振壁の減衰比は 40%となった。防振壁が無い場合は、振動計測を実施した全域で計測結果を比較的好く再現している。一方、地中防振壁を施工した場合の解析結果では、地中防振壁の見かけ上の質量および剛性の評価方法を前述のように固定して、減衰のみを可変パラメータとして振動計測結果の再現を試みたが、すべての計測結果を平均的に再現する計算結果は得られなかった。そのため、振動低減の効果が顕著であった地中防振壁の背後の振動計測点での再現性を優先した結果、地中防振壁から遠方の計測点で、解析値は振動計測結果を下回る結果となった。

3 節の現場実証実験での防振効果のところでも示したように、地中防振壁の直背後を除いた遠方の振動計測点では、地中防振壁の無い地点を列車が通過する際の発生した振動の影響を強く受けている可能性が高い。この影響はここで採用した 2 次元の解析モデルではその影響を見込むことができず、結果的に解析結果が実測結果より下回る結果となることが予想される。一方、地中防振壁の背後に隣接する計測点では、上述の影響は比較的小さく、2 次元にモデル化することによる現象の再現誤差は小さいと考えられる。以上のことから、2 次元の解析モデルによる再現計算は、地中防振壁から離れた遠方の地点で実測結果を若干下回る解析結果となるものの、振動低減が最も求められる地中防振壁の背後に隣接した領域での振動計測結果を比較的精度よく再現できると考えられる。実際の地中防振壁の施工を考えると、今回のような数十mの限定された施工条件となることは稀で、振

動低減を必要とする領域を十分にカバーする範囲で施工することを考えると、今回採用している 2 次元の解析モデルの適用性はさらに増すことが想定できる。

なお、今回の解析結果の精度に言及する場合に、そのモデル化にあたっての種々の仮定条件の妥当性についての検証が本来必要である。しかしながら、今回の解析では種々の未知の要因を厳密に評価することは避け、地盤と地中防振壁の減衰比を調整することで計測結果の再現性を調整した。結果的には両者の減衰比を比較的大きな値とすることで、解析結果の再現性が向上する結果となった。これらの数値の物理的な意味での妥当性には問題もあるが、列車振動を対象として今回の実証実験と同様の地中防振壁を施工するケースであれば、今回採用した解析モデルを用いて振動低減効果を予測を行う限り妥当な予測結果が得られるものと考えられる。一方、建設作業所や工場振動などのような、今回の条件とは異なる加振源、周辺の状況の場合には、今回採用した解析手法をそのまま用いる場合には妥当性は保証されているとは言いがたい。改めて今回と同様の現場計測結果を踏まえて種々の解析検討を行い、モデル化が困難な種々の要因を適切に評価することが必要である。

上述の要因以外にも、モデル化にあたって考慮が必要な種々の要因がある。例えば、高速で移動する列車からの移動振動源の効果は無視している。また、振動低減の効果の評価では、絶対的な振動レベルの評価が求められることが多い。今回の解析では現地での振動源近傍での計測結果を基にして点加振源の入力条件を設定しているが、加振源の振動レベルの評価が解析を行う上で不可欠である。

5. まとめ

本論文では、円形ドレーン材を用いた柱列式地中防振壁の提案を行い、その振動低減効果を鉄道営業線沿線での現場実証実験を通して検証した。振動低減効果は2次元有限要素法による再現計算を行い、解析モデルの適用性について検討した。これらの検討を通して、以下のような知見を得た。

- (1) 施工延長が限定された条件ではあるが、本提案の柱列式地中防振壁を設けることにより、その背後地盤での振動を有意に低減することが可能であることが確認された。
- (2) 2次元有限要素法による解析により、柱列式地中防振壁の施工による振動低減効果の再現計算を行い、柱列式地中防振壁近傍においては精度よく再現できることが確認された。
- (3) 今回の現場実証実験では柱列式地中防振壁の施工延長が限定されているため、防振壁の無い場所からの振動の伝播の影響が無視できないが、2次元解析モデルではこれらの効果の再現ができないため、地中防振壁からはなれた地点での解析結果は計測結果に比べて小さめの値となる。

本工法は地中防振壁工法の分類上は、比較的剛性が小さく軽量の材料で地中壁を構築する工法にあたり、このような工法に関する既往開発事例のうち代表的なものとしてはEPS防振壁工法¹⁰⁾がある。文献10)で紹介されている本研究と同様の条件での実証試験例によれば、地中防振壁背後での振動低減効果として5~7dBとなった例が紹介されている。本研究で提案した地中防振壁は地盤を部分的にドレーン材で置き換えることで、地盤を全面的にEPSで置き換えるEPS防振壁と同様の効果を狙ったものであるが、3列施工時の地中防振壁背後での振動低減量の平均値として3.6dBが得られており、振動低減工法として有効であることがわかる。また、より大きな振動低減効果が必要とされる場合には、本提案工法では、ドレーン打設列数を増やすことでより大きな振動低減効果を実現することができる。

今回の検討では、軟弱な地盤条件下での鉄道振動の低減を目的として実証的に振動低減効果を検証したものである。今後は、様々な地盤条件や振動条件に対して、最適な防振壁の設計を可能にするため、柱列式地中防振壁の振動低減効果の予測精度をさらに向上させることが残された課題であると考えている。

謝辞

鉄道営業線での柱列式地中防振壁の現場実証実験は京浜急行(株)の試験工事として実施されたものです。振動計測およびその解析にあたって多大なご配慮をいただきました。記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 芦谷公稔、横山秀史:地盤振動対策の研究開発の現状、鉄道総研報告、第16巻 第12号、pp55-58、2002.12
- 2) 吉岡 修、熊谷兼雄:振動遮断工による低減効果の目安算定方法について、鉄道技術研究報告、No.1205、1982.
- 3) 吉岡 修、石崎昭義:空溝・地中壁による地盤振動低減効果に関する研究-東海道新幹線大草高架橋区間-、鉄道技術研究報告、No.1147、1980.
- 4) 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、2)、第28回土質工学研究発表会講演集、pp.1245-1248、1991.
- 5) 石井ほか:シートパイル工及びコンクリート壁の防振効果に関する一考察、土木学会第58回年次学術講演会概要集IV-095、pp.189-190、2003.
- 6) 神田政幸、村田 修、太田和義、平山勇治、伊藤和也、日下部 治:発泡スチロールビーズを混合したソイルセメント壁による交通振動遮断工の開発、地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシンポジウム、pp.209-214、2004.
- 7) 大島貴充、田村 保、小野田浩二:円形ドレーン材を用いた防振壁による地盤振動対策法の提案、第38回地盤工学研究発表会、pp.2389-2390、2003
- 8) 社団法人土木学会編:土木技術者のための振動便覧、社団法人土木学会、1985
- 9) John Lysmer、Takekazu Udaka、Chan-Feng Tsai、H. Bolton Seed: FLUSH A COMPUTER PROGRAM FOR APPROXIMATE 3-D ANALYSIS OF SOIL - STRUCTURE INTERACTION PROBLEMS、College of Engineering University of California Berkeley California、November 1975
- 10) 早川 清:EPS防振壁による地盤振動対策工の設計・施工事例、地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシンポジウム、pp.96-99、2004.