

実効性の高い地盤振動対策工の設計・施工手法の開発



中出 千博*



渡邊 明之*

地盤振動対策は、振動遮断工や高架橋高剛性化などが、スポット対策として講じられた事例がある。しかし、地盤振動対策は、構造物や地盤条件によりその効果が一定でないことが実状である。

そこで、実効性の高い地盤振動対策工の合理的な設計施工法の確立を目的とした開発を進めた。ここでは、構造物からの加振と周辺地盤についての簡便なモデルによる解析手法の開発を進めたので、その成果を報告する。また、解析手法を検証するため、振動対策工の試験施工も行った。

●キーワード：地盤振動対策、合理的な設計施工法、解析手法の確立、振動対策工

1. はじめに

列車が高速で走行すると、高架橋から橋脚に振動が伝わり、橋脚を加振源として地盤に振動を伝播する。その結果、付近の家屋の窓や戸が揺れたりすることがある。

また、高速列車のさらなる速度向上の実現に際して、地盤振動対策が最も重大な課題の一つとなる。地盤振動対策は、振動遮断工や高架橋高剛性化など、スポット対策として講じられた事例があるが、構造物や地盤条件によりその効果が一定でないことが実状である。

以上のような背景から筆者らは、実効性の高い地盤振動対策工の設計施工法の確立を目的とした開発を進めた。ここでは、開発成果と試験施工の概要を報告する。

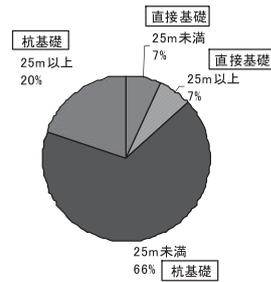


図3 桁式の場合のスパン

図1～図3の結果より、構造物の種類として、橋梁（高架橋、線路橋を含む）が多く、上部構造に関してはラーメン高架橋より桁式の方が多かった。また基礎構造物に関しては直接基礎に比べて杭基礎が多いことが分かった。これより、「桁式で杭基礎の橋梁構造物」を主な研究対象とすることにした。

2. 地盤振動と構造形式の関係

一般的に地盤振動について指摘が多い箇所と、その構造物の構造形式を調査した。図1～図3に調査結果を示す。

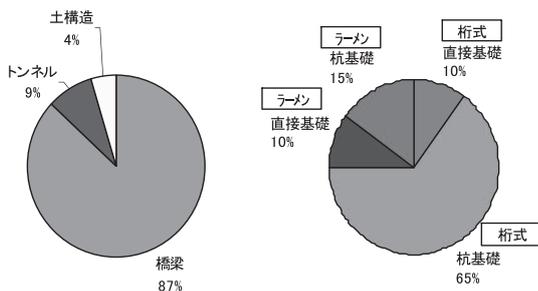


図1 構造物の種類

図2 上部・基礎の構造形式

3. 研究対象箇所の概要

研究対象の構造形式として、桁式高架橋で支持層が深い杭基礎 (L=30m) とした。また中間地盤はN値が10以下といったN値が非常に低い軟弱地盤である。図4に現状写真を、図5に断面図および地質柱状図を示す。当該箇所は、橋脚の近くに道路があり、自社の用地が非常に狭い箇所である。ここで、現状の振動と、振動対策、対策工後の振動計測を行った。



図4 現地現状図

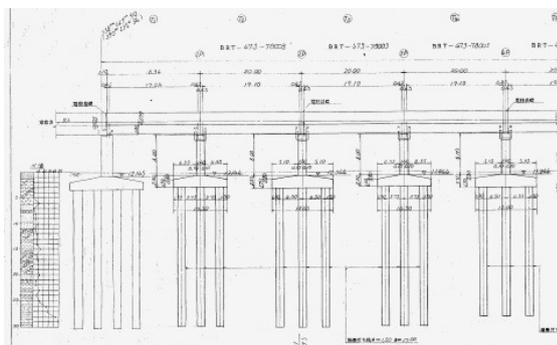


図5 断面図および地質柱状図

4. 地盤振動計測 (対策工前)

計測位置として、下り線の直下、12.5m地点、25m地点で計測した。また、対策工施工後の効果を明らかにするため、計測は、法線方向で対策工の施工を行った測線（V測線）と、施工を行わなかった測線（G測線）の2測線で計測を行った。地盤振動計測を行った概要図を図6に示す。図中に示す対策工は、施工予定位置である。計測は、地表面での地盤振動と構造物の振動の計測をした。計測時の対象列車は、高速試験用列車ファステック（以下、試験用列車とする。）、営業用列車とした。列車速度はスピードガンを用いて、通過時の計測を行った。

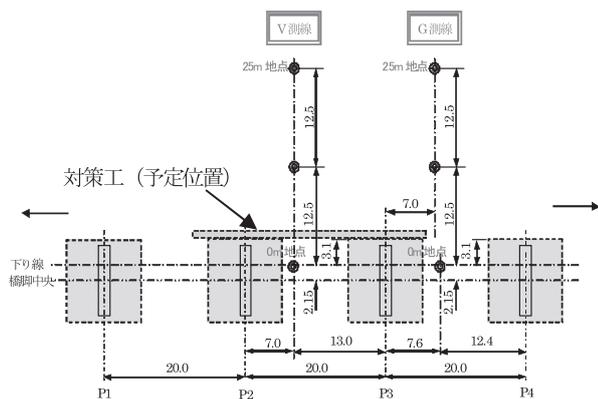


図6 振動計測平面図 (対策工前)

5. 地盤振動計測結果 (対策工前)

振動レベルと列車速度との関係で分析を行った。対策工前の計測結果を図7に示す。ここで、振動レベルは低速走行列車（J+R編成）の振動レベルを1とした相対評価で示している。分析の結果、振動レベルは列車の編成、および走行速度で分類できることが分かった。

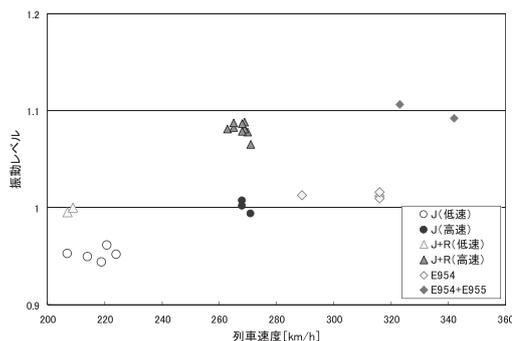


図7 振動レベルと列車速度の関係

6. 解析手法の提案

6.1 解析手法の概要

地盤や構造物の平面と深度方向の特性を模擬するためには、3次元解析を用いられる場合も多い。しかし、一般的な3次元解析手法では、解析モデルが煩雑になり、解析精度に比べて解析時間と費用が大きくなる。そこで、3次元モデルによる解析と同等な精度を得られるような簡便な解析手法の提案を目指して検討を行った。

提案した解析手法は、橋脚1基分とその周辺地盤を3次元軸対称FEMでモデル化した振動解析を行い、計算によって得られた伝達関数を用いて4基分の橋脚が振動源と考えた周辺地盤の振動レベルを数値計算によって求める。ここで、4基分の橋脚には、列車による移動速度を勘案して、時間差を考慮して入力する。また、解析パラメータを基礎のモデル形状や地盤の減衰定数とし、複数の組み合わせによる計算結果と地盤振動測定結果を比較することで現状検討における適切なモデル化手法の選定をするものである。解析手法の手順を図8に示す。

表1 解析パラメータの組み合わせ

解析パラメータ	設定条件・設置値
フーチングサイズ	内接円、下り線のみ
杭モデル化	有り、無し
表層地盤の減衰定数 h(%)	2.5、5、7.5、10、12.5

6.2 解析手法の検討

解析パラメータとして、フーチングのモデル化サイズ、基礎杭のモデル化の有無、地盤の減衰定数をパラメータとした。フーチングのモデル化サイズは、加振源をフーチング全体と考えたときのフーチングを内接円化した大きさ、下り軌道からの加振力のみを考慮した下り線を中心円化した大きさの2パターンとした。FEM解析ケースの組み合わせを、表1に示す。また、フーチングのモデル化のイメージ図を図9に示す。

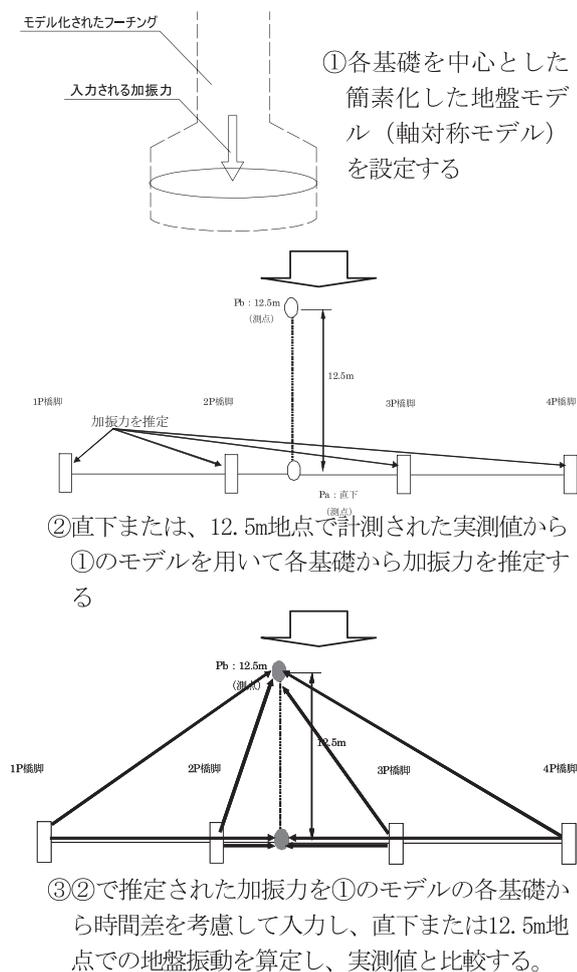


図8 解析手法の提案手順図

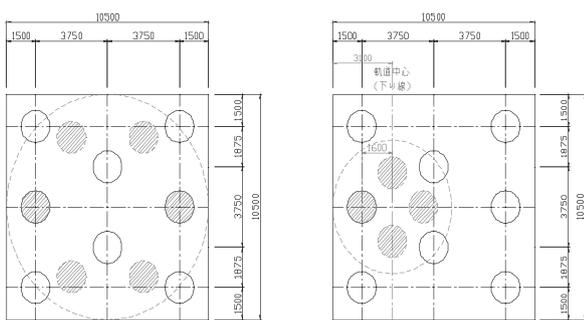


図9 フーチングのモデル化イメージ図

6.3 解析手法の検討結果

対象とした地盤と構造物の条件における解析手法の精度を実測値と計算値の比較により検証した。解析を行った結果を図10～図13に示す。評価手法は、測定値の平均を1とした相対評価で示している。ここでX方向、Z方向はそれぞれ線路並行方向、鉛直方向の振動レベルを示している。線路方向の振動レベル図10、図11は減衰定数をパラメータとして比較した結果である。ここで、検討結果より、減衰定数を2.5%としたケースが比較的よく一致することが分かった。図12、図13は減衰定数を2.5%とした時の基礎のモデルをパラメータにした時の検討結果を示している。これでは、基礎のモデルをパラメータとした時の解析結果で明確な傾向を見ることができなかった。実務作業における地盤のモデル化を考えると、一定の精度で簡便なモデル化が望まれる。これより今回のような地盤、構造物の条件の場合は、フーチング形状を内接円とするモデル、杭を考慮しないモデルとし、表層地盤の減衰定数を、 $h=2.5\%$ とすることとした。

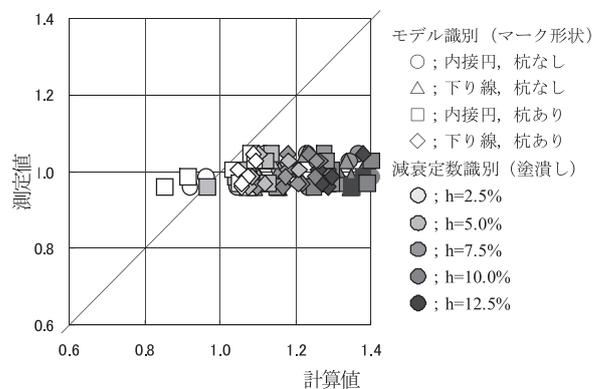


図10 計算値と実測値の比較 (X方向・パラメータ：減衰定数)

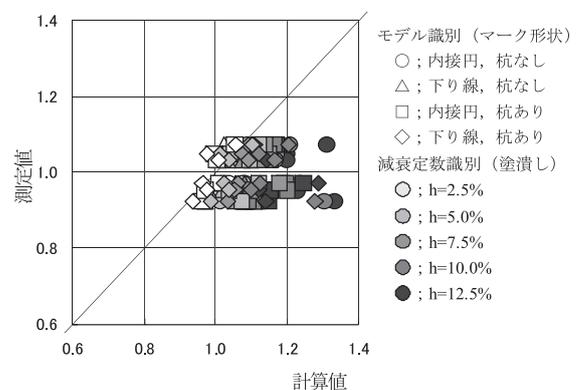


図11 計算値と実測値の比較 (Z方向・パラメータ：減衰定数)

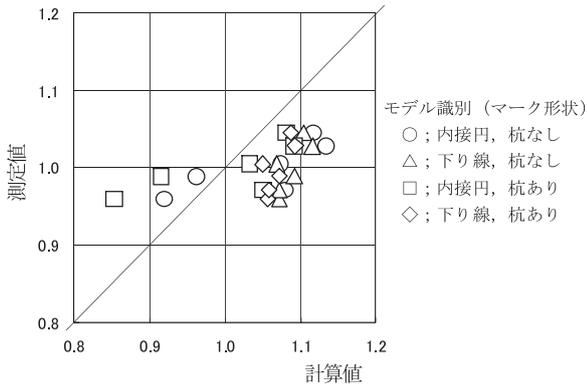


図12 計算値と実測値の比較 (X方向・減衰定数2.5%)

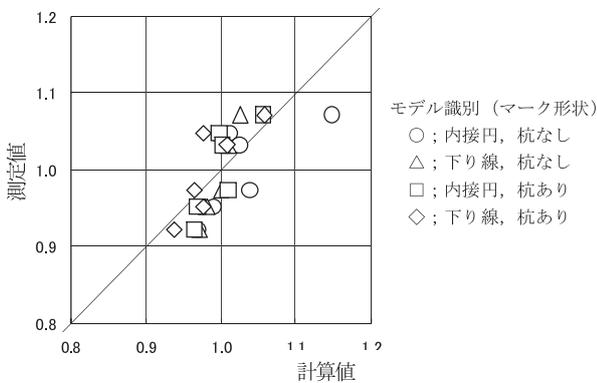


図13 計算値と実測値の比較 (Z方向・減衰定数2.5%)

7. 地盤振動対策工の試験施工

解析手法の提案で得られた解析モデルによる対策工の検討を行った。対策工の形状は、壁幅50cm、延長40m、

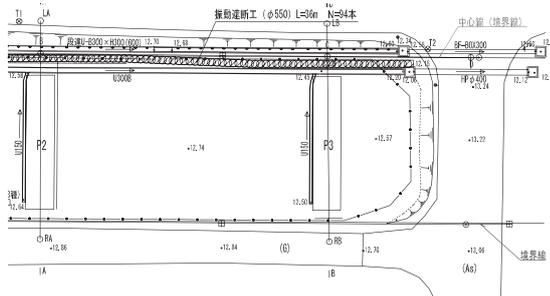


図14 地盤振動対策工概要図

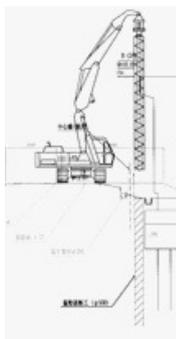


図15 エスパイラー工法概要図

深さ15mが最適であると判断した。このデータを基に実際に地盤振動対策工の施工を行った。施工概要図を図14に示す。対策工の施工手法は、自社用地内に計画することから、狭隘な箇所での施工となる。施工手法の検討から、エスパイラー工法にて施工を行うこととした。エスパイラー工法は、高架橋下の低空頭下での施工が可能で、掘削と充填を同時に行う置換工法で、孔内が常に満たされており、周辺地盤への影響が少ない工法と考えた。エスパイラー工法概要を図15に示す。エスパイラー工法とは、バックホウをベースとしたオーガー装着型の施工機械でオーガーを回転貫入しながら、セメントミルクを液状で噴射しながら原土を排土し、土中にセメントミルク抗体を造成する工法である。

8. 対策工施工に伴う影響解析

対策工は自社用地内で施工をする必要があるため、既設構造物に対して、近接施工となる。そこで、対策工施工時に伴う周辺地盤の挙動予測と実施工時の管理値の設定を目的として、影響解析を実施した。実施内容は、実際の施工手法で既設構造物に発生する変位・変形もしくは増加荷重を予測し、変位・変形の許容値と、既設構造物の耐力上の許容値を比較し、その比較結果から実施工時の管理値を設定した。図16に既設構造物に対する影響解析の検討フローを示す。

施工時の管理値は、既設構造物の変位・変形もしくは増加荷重により決まる構造物に対する計測管理値と、軌道の変位・変形に対する計測管理値の比較より、軌道の管理値で決まった。

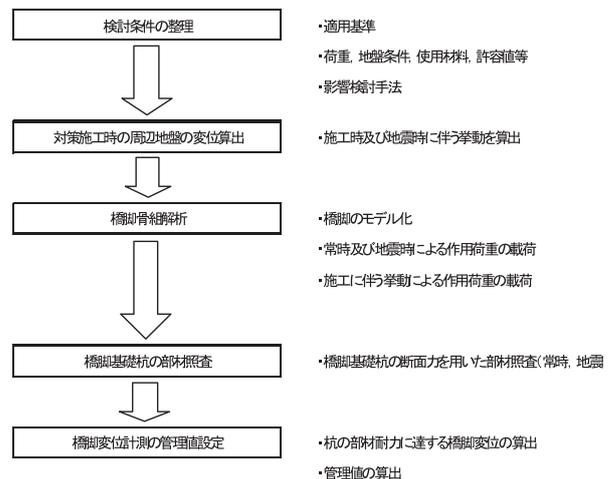


図16 影響解析の検討フロー

9. 対策工施工に伴う地中変位測定ほか

近接施工に伴う既設構造物、および周辺地盤の挙動を計測するために地中変位測定を実施した。地中変位測定概要図を図17に示す。地中変位は、振動対策工付近に多段式傾斜計を取り付けて計測を行った。計測期間は、対策施工中とした。また、施工に伴う周辺地盤の間隙水圧の変動の測定を目的として、間隙水圧計も取り付けて、計測を行った。図18～図21に地中変位の計測結果を示す。対策工施工中に地震が発生したため、地震の影響や杭施工以外の要因により発生した変位を除去するため、地震前、地震後で初期値を取り直した。図18、図19は地震発生前の計測状況であり、図20、図21は地震発生後の計測状況である。それぞれ、浅部、深部に分けて計測状況を示している。計測結果より、地震後の浅部において明らかに変位が生じていることが分かった。この期間は、地中変位計付近を杭施工しており、重機の作用荷重による影響が大きいことが想定される。次に、地中変位計付近の杭施工時の地中変位分布と、「8. 対策工施工に伴う影響解析」でFEM解析により算出した変位量を比較した。比較結果を図22に示す。この結果でも、解析結果と比較して浅い範囲で地中変位量が大きく生じていることが分かる。これより、構造物近傍で重機の影響が大きく、重機による地中応力を側圧として考慮する必要があると考えられる。

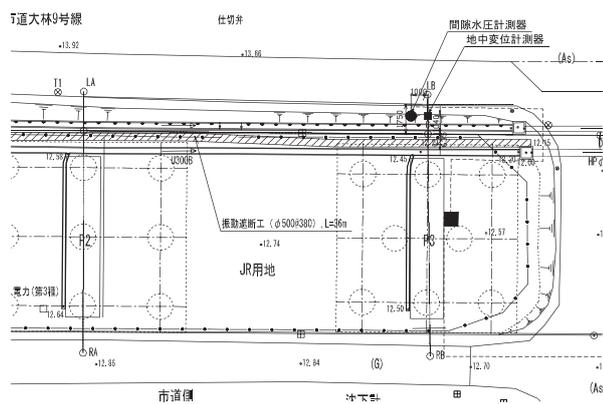


図17 地中変位測定概要図

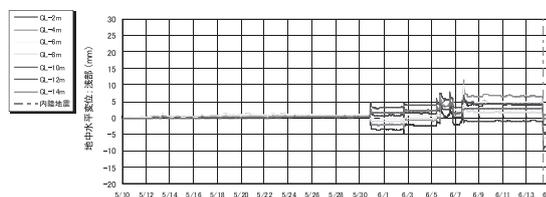


図18 地中変位測定状況 (浅部・地震前)

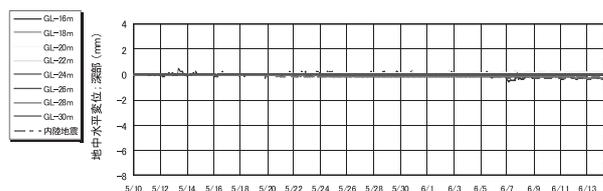


図19 地中変位測定状況 (深部・地震前)

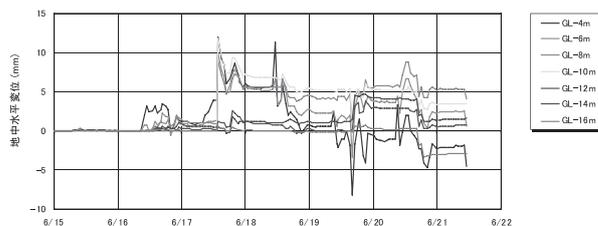


図20 地中変位測定状況 (浅部・地震後)

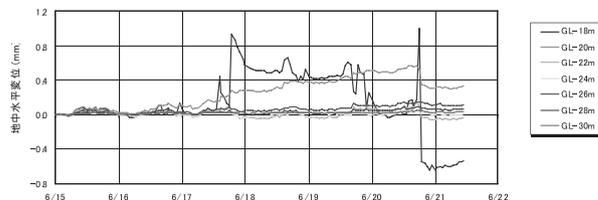


図21 地中変位測定状況 (深部・地震後)

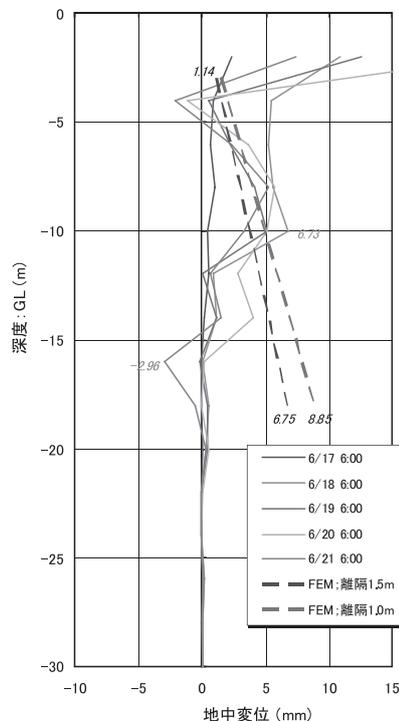


図22 地中変位分布とFEM解析結果による地中変位量

10. 計測結果と解析結果との評価(対策工後)

「6. 解析手法の提案」で示した解析手法を用いて、対策工後の解析結果と振動計測結果の評価を行った。図23に対策工後の振動計測概要図を示す。対策工の効果を確認するために、測線は法線方向で対策工がある箇所と対策工がない箇所の2測線で計測を行った。

対策工後の解析モデルのイメージ図を図24に示す。フーチングおよび実際の遮断工をフーチングを中心とした軸対称モデル化し、解析手法の提案で示した地盤モデル、加振力を用いて12.5m地点での振動レベルを算定して、振動計測結果と比較評価をした。比較検討結果を図25～図27に示す。評価手法として、G測線における振動レベルの測定平均値を1とした相対評価で示している。X方向、Y方向、Z方向はそれぞれ線路方向、線路直角方向、鉛直方向の振動レベルを示している。

図25～図27の比較検討結果より、X、Y、Zの3方向全てにおいて対策工がない箇所と比較して対策工がある箇所の方が計算値、実測値ともに振動レベルが減少していることが分かる。また、測定値と計算値との比較では、ほぼ1:1のラインを中心にプロットされていることより、この軸対称モデルによる検証の妥当性も示されたと考えている。

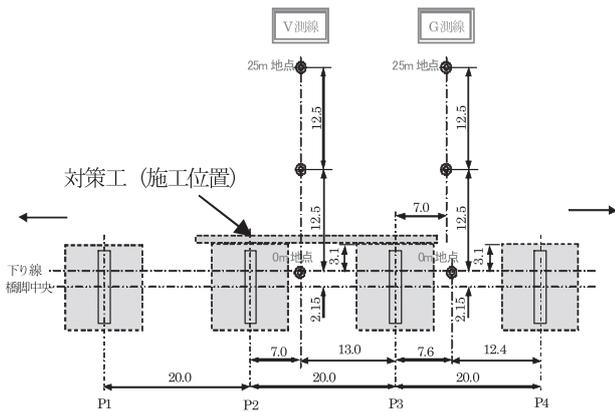


図23 振動計測概要図(対策工後)

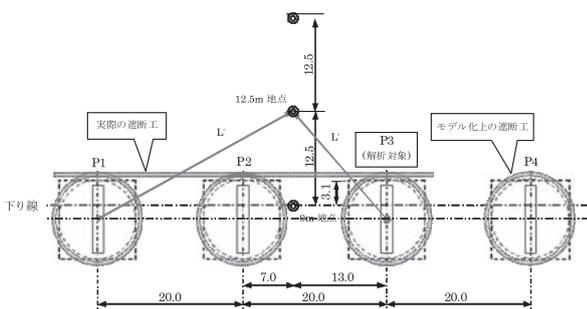


図24 解析モデルイメージ図(対策工後)

11. まとめ

今回の検証の結果、地盤振動対策のための設計施工手法として、簡便な軸対称モデルによる解析手法の提案を行うことができた。現在、精緻な3次元モデルによる解析を進めており、軸対称モデルとの整合性の評価・検討を引き続き進めているところである。

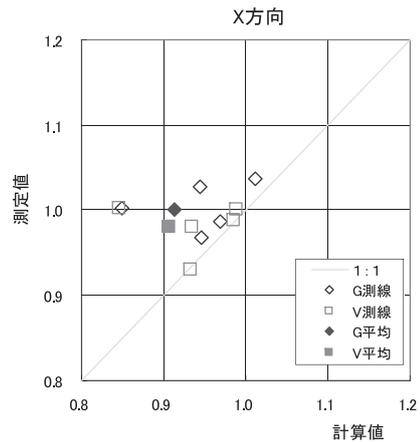


図25 計算値と実測値の比較(X方向)

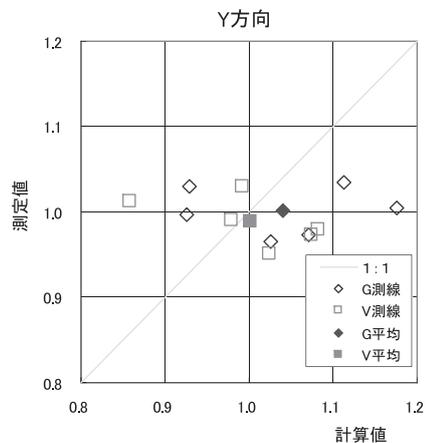


図26 計算値と実測値の比較(Y方向)

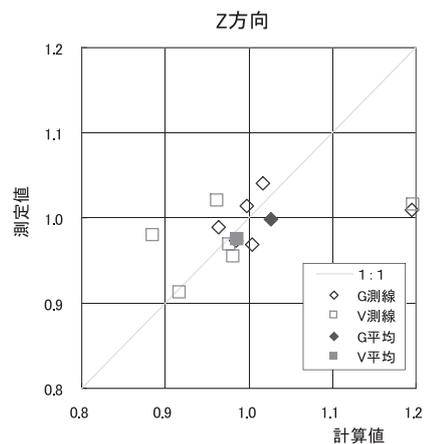


図27 計算値と実測値の比較(Z方向)