

柱列工法による地盤振動の低減に関する研究

森下 真行・吉田 隆治・山下 俊英・藤嶋 泰輔・斉藤 芳人*1

Study on the Reduction of Ground Vibration by Open Columns Method

Tadayuki MORISHITA, Takaharu YOSHIDA, Toshihide YAMASHITA, Taisuke FUJISHIMA, Yoshihito SAITO

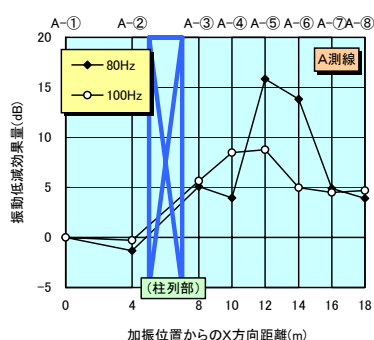
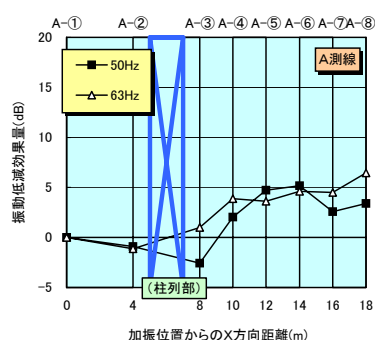


図 柱列工法による振動低減の効果
(3列空孔掘削時)

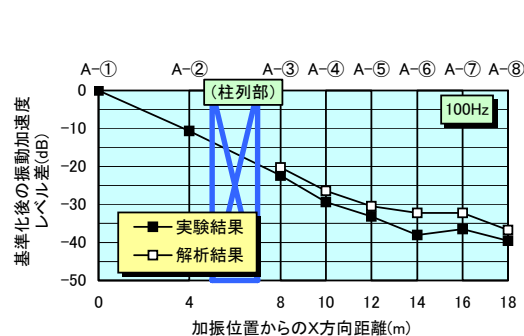


図 実験結果と3次元解析結果の比較
(3列空孔掘削時)

研究の目的

近年、過密化した都市部では、工事振動や交通振動などにより発生する地盤振動が問題となる場合が多い。これらの振動対策方法として、「防振溝」や「防振壁」が挙げられるが、施工性および経済性が問題となる場合が多々見られる。

一方、より簡易的な対策として、柱列による振動低減工法が提案されている。柱列とは地盤に円柱形状の空孔もしくは空孔を弾性材で充填した孔で孔群を施工するものであり、比較的小規模の施工で済ませる事が可能であるため、振動低減効果が期待できれば、施工性および経済的に優れた対策工法となる可能性がある。

そこで、柱列による振動低減工法の振動低減効果量を把握する目的で、実大実験および解析的検討を実施した。

技術の説明

実地盤において実施した実大実験の中から、更地時、3列空孔掘削時（各空孔は、径 450mm、掘削深さ 4.0m とし、千鳥配置となるように施工している。）の各ケースについて、インパルスハンマ加振実験結果および起振機による定常正弦波加振実験結果より、地盤の振動伝搬状況を把握した。また、更地時に対する3列空孔掘削時の測定結果の差から振動低減効果量を把握するとともに、実験結果と3次元解析結果を比較し、解析精度の把握を行った。

主な結論

3列空孔掘削時は、更地時に対して、50Hz 以上の周波数領域で概ね 5dB 以上の振動低減効果が見込まれることがわかった。

3次元解析結果は、実験結果と同じ傾向を示し、十分実用的であることがわかった。

* 1 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構に出向中

柱列工法による地盤振動の低減に関する研究

森 下 真 行 吉 田 隆 治
 山 下 俊 英 藤 嶋 泰 輔
 斉 藤 芳 人^{*1}

要 旨

近年、過密化した都市部では、工事振動や交通振動などにより発生する地盤振動が問題となる場合が多い。これらの振動対策方法として、「防振溝」や「防振壁」が挙げられるが、施工性および経済性が問題となる場合が多々見られる。一方、より簡易的な対策として、柱列による振動低減工法が提案されている。柱列とは地盤に円柱形状の空孔もしくは空孔を弾性材で充填した孔で孔群を施工するものであり、比較的小規模の施工で済ませる事が可能であるため、振動低減効果が期待できれば、施工性および経済的に優れた対策工法となる可能性がある。

そこで、著者らは、柱列による振動低減工法の振動低減効果を把握する目的で、実大実験および解析的検討を実施した。振動実験の結果、3列空孔掘削時は、更地時に対して50Hz以上の周波数領域で概ね5dB以上の振動低減効果が期待できることがわかった。また、3次元解析と実験結果を比較検討したところ、解析結果は実験結果を概ね模擬でき、十分実用的であることがわかった。

キーワード 地盤振動／振動実験／振動低減／防振工法／3次元解析

目 次

- | | |
|---------|------------|
| 1. はじめに | 4. 解析による検討 |
| 2. 実験概要 | 5. まとめ |
| 3. 測定結果 | 6. おわりに |

STUDY ON THE REDUCTION OF GROUND VIBRATION BY OPEN COLUMNS METHOD

Tadayuki MORISHITA Takaharu YOSHIDA
Toshihide YAMASHITA Taisuke FUJISHIMA
Yoshihito SAITO

Synopsis:

In late years, there are environmental issues caused by the ground vibration by traffic or under construction in congested cities. In such case, "Underground Wall Barrier" or "Underground Vibration-proof Trench" is often used as the countermeasure. In this paper, "Open Columns" is taken up as the more simple and low cost method as compared with them.

This report shows the effect of the reduction of ground vibration using the open columns through the field measurements and three-dimensional analysis. As a result, it became clear the amplitude-frequency characteristics of ground vibration using the open columns.

* 1 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構へ出向中

1. はじめに

近年、過密化した都市部では、工事振動や交通振動などにより発生する地盤振動が問題となる場合が多い。これらの対策として、「振動源での対策」、「伝搬経路での対策」、「受振側での対策」があり、それぞれ様々な対策が試みられている。本報では、これらのうち「伝搬経路での対策」について検討した。伝搬経路での対策として「防振溝」や「防振壁」が挙げられ、その具体的な工法として、ソイルセメント壁やコンクリート壁等がある。これらの工法は近年積極的な実用化が図られているが、大規模な施工機械が必要である、地盤振動対策としては高価であるなど、施工性および経済性等で問題となる場合が多々見られる。一方、より簡易的な対策として、柱列による振動低減工法¹⁾が提案されている。柱列とは地盤に円柱形状の空孔もしくは空孔を弾性材で充填した孔で孔群を施工するものであり、比較的小規模の施工で済ませる事も可能である。よって、振動低減効果が期待できれば、優れた対策工法となる可能性がある。

そこで著者ら^{2)~4)}は、柱列による振動低減工法の振動低減効果を把握する目的で、実大実験および解析的検討を実施した。本報では、柱列振動実験の概要およびその結果の一部について、解析的検討を含めて報告する。

2. 実験概要

図-1 に柱列施工位置、加振位置および測定位置を、表-1 に実験因子一覧を示す。柱列を成す各円柱孔は径 450mm、掘削深さ 4.0m とし、2m 間隔の空孔柱列を 3 列まで 1 列毎に順次配置していった（空孔は千鳥配置となるよう施工した）。実験は、更地時（柱列施工前）、1 列空孔掘削時、

2 列空孔掘削時、3 列空孔掘削時、全孔碎石にて充填時の計 5 ケースについて実施した。加振点は柱列中心から 9m（加振点 P と呼ぶ）、6m（加振点 Q と呼ぶ）および 3m（加振点 R と呼ぶ）の 3 地点とし、加振方法は、インパルスハンマによる衝撃加振および起振機（100kg の可動マス）による上下方向の定常正弦波加振（加振周波数は 12.5Hz~100Hz 範囲の 1/3 オクターブバンド中心周波数）の 2 種類とした。各加振点を通り柱列に直角方向の測線（A 測線）の測定点は、各加振点近傍（加振点から A 測線直交方向に 50cm：A 測線と①測線の交点近傍、以下 A-①測定点と呼ぶ）、柱列中心から加振点方向に 2m（A-②測定点）および柱列中心から加振点と反対側に 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m（それぞれ A-③, A-④, A-⑤, A-⑥, A-⑦, A-⑧測定点）とした。なお、③~⑧測線では B および C 測線でも測定を実施している。

測定は、インパルスハンマ加振実験ではサンプリング周波数 10kHz で各測定点での加速度応答およびインパルスハンマ加振力を、起振機定常加振実験ではサンプリング周波数 2kHz で各測定点での加速度応答を計測対象として実施した。インパルスハンマ加振実験は加振回数を 5 回とし、測定結果 5 回の平均値を算出して評価を行った。起振機定常加振実験から得られた加速度応答に対しては、その定常応答値を $A_0=10^{-5}(\text{m/s}^2)$ （＝加速度基準値）を用いた振動加速度レベルに換算して評価を行った。

表-2 に地盤概要を示す。地盤は、表層（0.7m 以浅）は締め固められた碎石、深度 0.7~3.0m はローム層、深度 3.0~4.5m は粘土層、深度 4.5~11.0m は粘土質砂礫層である。

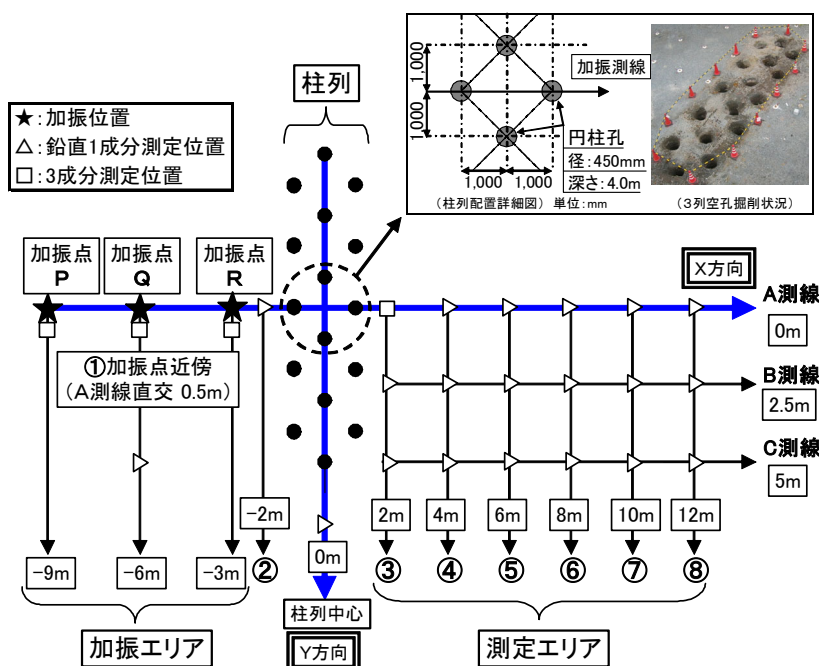


図-1 柱列施工位置、加振位置および測定位置

表-1 実験因子一覧

因子	柱列状況	加振位置	加振方法
1	更地	P	ハンマ
2	1列空孔掘削	Q	起振機
3	2列空孔掘削	R	
4	3列空孔掘削		
5	碎石充填		

表-2 地盤概要

深度(m)	土質区分	N値
0.0~0.7	碎石	—
0.7~3.0	ローム	3
3.0~3.8	凝灰質粘土	4
3.8~4.5	粘土	6
4.5~11.0	粘土質砂礫層	35
11.0~	泥岩	50以上

地下水位: 2.4m

3. 測定結果

ここでは、更地時および3列空孔掘削時の結果を示す。柱列の列数による違い（1列，2列，3列）ならびに孔の碎石充填の有無による振動伝搬特性および振動低減効果については、機会を改めて報告する予定である。

3.1 地盤の振動特性

図-2 に更地時の起振機実験で得られた各測定点（A-②～⑧測点）の単位加振力に対する変位応答を示す。ここで、変位応答は、測定された加速度を周波数領域で積分して算出した。16Hz の変位応答が各測点ともに大きく、地盤の固有振動数はこの付近にある事がわかる。各測点の変位応答が大きな16Hz に対して、20Hz および 25Hz では距離の増加とともに徐々に変位応答が減衰していく傾向を示す。また、12.5Hz および 40Hz 以上では A-③測定点（加振点より 8m）までに速やかに変位応答が減衰している様子がわかる。

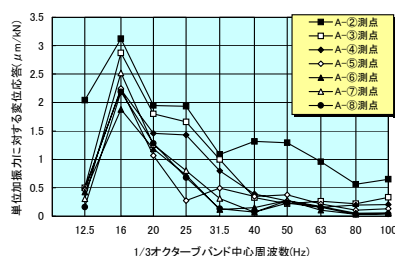


図-2 変位応答曲線

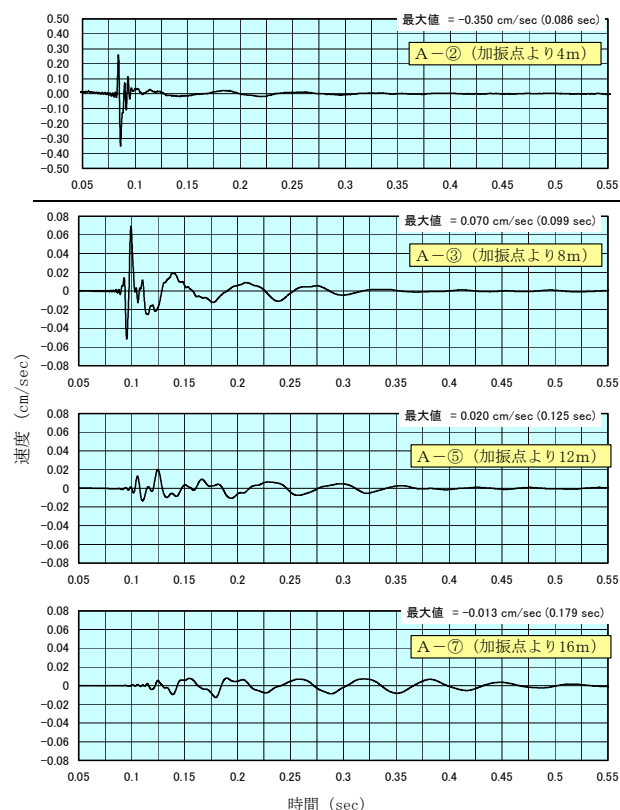


図-3 インパルスハンマによるQ点加振時の各測点の速度波形（更地時）

3.2 インパルスハンマ加振実験結果

図-3 および図-4 に更地時および3列空孔掘削時のインパルスハンマによるQ点加振時の A-②，③，⑤，⑦測定点（加振点から 4m, 8m, 12m, 16m）の速度波形を示す。更地時の測定結果より、加振点から離れるにつれ時間遅れを伴って振動が伝わっていく様子、加振直後に加振点近傍測定点で卓越していた比較的高周波数成分が距離とともに小さくなる様子、それに対して比較的低周波数成分（約 16Hz）の距離減衰が小さい様子が見て取れる。この現象は先に示した変位応答曲線の特徴と符合する。

3列空孔掘削時も更地時と同じ傾向を示すが、速度波形前半に見られる衝撃的波形が柱列部の通過により減衰している様子がわかる。すなわち、更地時の A-③測定点では A-②測定点に対して最大値は約 20%に低下しているが、3列空孔掘削時（空孔は A-②と③測定点間に設置）は約 8%に低下している。速度波形後半部の約 16Hz の周波数成分は、更地時とほとんど変わらない挙動を示している。

図-5 にインパルスハンマによるP点，Q点，R点加振時の測定点 A-③（柱列近傍点）および A-⑧（柱列最遠点）における更地時および3列空孔掘削時のアクセラランス（各測定点での加速度応答値とインパルスハンマ加振力との周波数毎の比：単位加振力に対する加速度応答），ならびに更地時に対する3列空孔掘削時のアクセラランスの比（振動低減効果）を示す。3列空孔掘削時

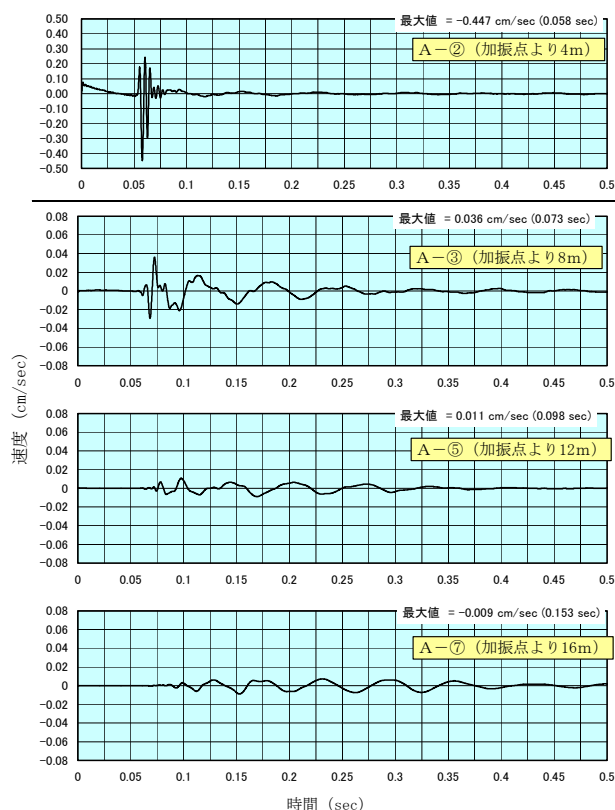


図-4 インパルスハンマによるQ点加振時の各測点の速度波形（3列空孔掘削時）

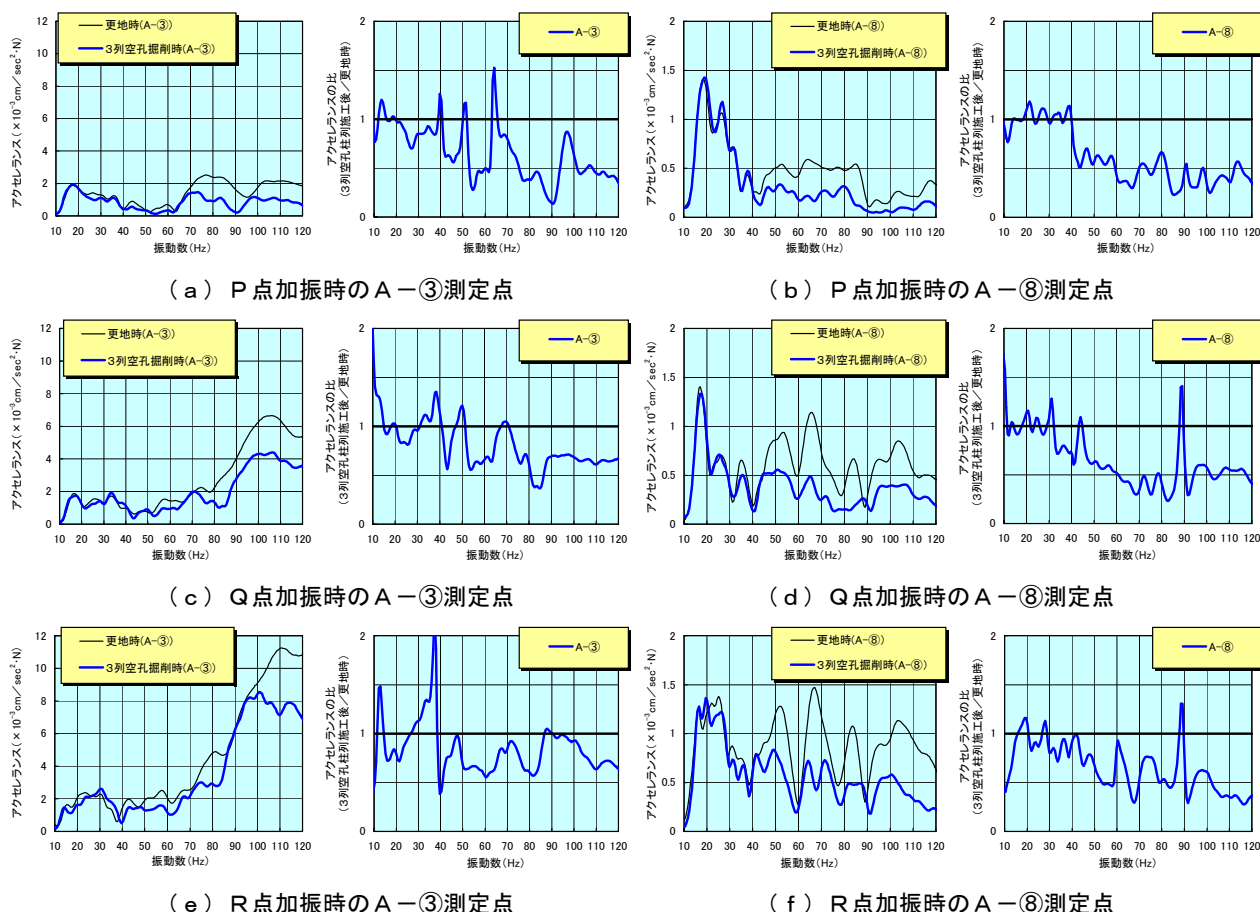


図-5 インパルスハンマ加振実験結果（左：アクセラランス，右：更地時に対する3列空孔掘削時のアクセラランスの比）

のアクセラランスは、更地時に比べ高周波数領域で小さい。アクセラランスの比を見ると概ね 40Hz 以上で 1.0 以下となり、A-③測定点 A-⑧測定点ともに振動低減量はP点加振時が最も大きく、Q点加振時、R点加振時の順に小さくなる。すなわち、加振点が柱列から離れるほど振動低減量大きい傾向を示す。また、40Hz 以下では振動低減効果はほとんど見られない。

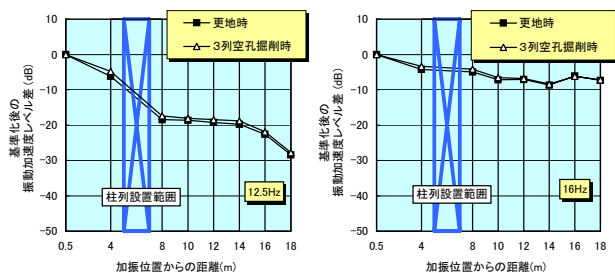
3.3 起振機定常加振実験結果

図-6 に起振機を用いてQ点を正弦波加振した時のA測線における更地時および3列空孔掘削時の振動加速度レベルの距離減衰を加振周波数別に示す。ただし、振動加速度レベルは、更地時の加振点近傍測定点（A-①）での測定結果との差で表示している。これより、振動の低減傾向は距離に対して一様に減衰していくのではなく、波打ち現象（高低を繰り返しながら減衰していく様子）が見て取れる。この傾向は既往の研究⁵⁾とも整合する結果であり、波動が地層境界で反射することによる影響と考えられる。加振周波数毎に距離減衰を見ると、地盤の固有振動数に近い 16Hz, 20Hz, 25Hz は距離減衰が小さく、比較的遠距離まで波動が伝搬する傾向がわかる。図-7 にQ点加振時のA測線、B測線、C測線における更地時と

3列空孔掘削時の振動加速度レベル差（以下、振動低減効果量と呼ぶ）を示す。先に示したインパルスハンマ加振実験結果より、Q点加振時は概ね 40Hz 以上で振動低減効果が確認されている。よって、ここでは加振周波数 50Hz～100Hz での振動低減効果量を示すこととする。

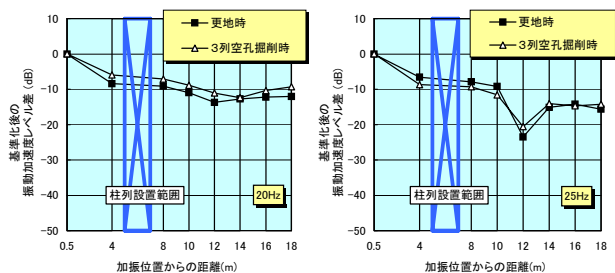
A測線の 50Hz および 63Hz ではA-④測定点（柱列中心から 4m）以遠で 5dB 程度の振動低減効果が認められる。同じく 80Hz および 100Hz でもA-③測定点（柱列中心から 2m）以遠で概ね 5dB 以上の振動低減効果が認められる。また、柱列より加振点側測定点 A-②では、周波数に関係なく、更地時に対して増幅する結果となった。これは、柱列により反射した波動の影響を受けているものと考えられる。

BおよびC測線の 50Hz および 63Hz では、A測線と同様に比較的柱列に近い測定点で低減効果が小さく、この傾向はC測線の方が強い。これは、柱列端からの波動の回り込みによる影響と考えられるが、今のところ詳細は不明である。80Hz および 100Hz ではB測線、C測線とも概ね 5dB 以上の振動低減効果を示すが、C-③測定点は 50Hz および 63Hz の場合と同様に振動低減効果があまり見られない。



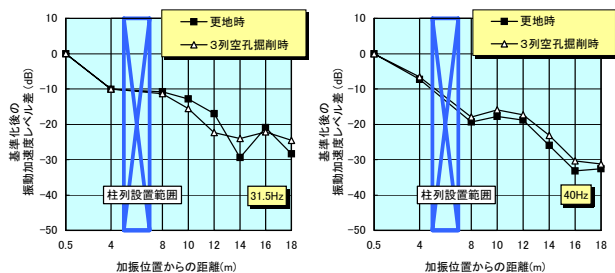
(a) 12.5 Hz

(b) 16 Hz



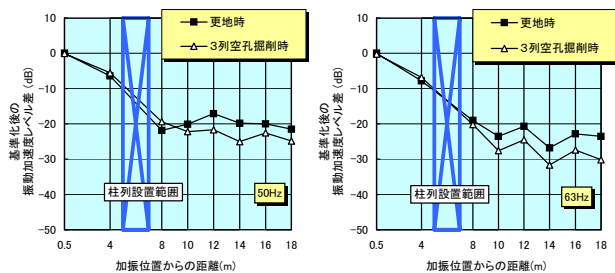
(c) 20 Hz

(d) 25 Hz



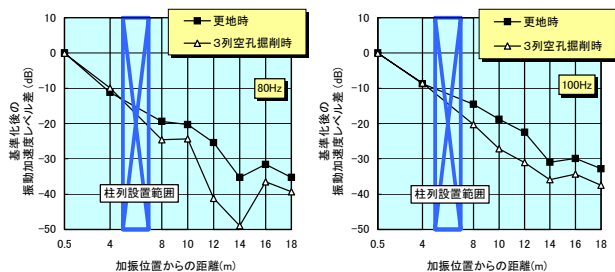
(e) 31.5 Hz

(f) 40 Hz



(g) 50 Hz

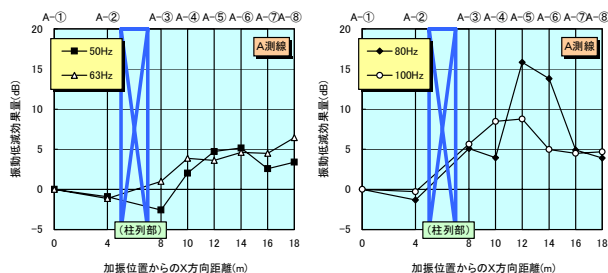
(h) 63 Hz



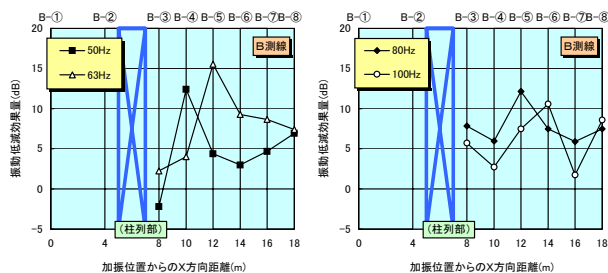
(i) 80 Hz

(j) 100 Hz

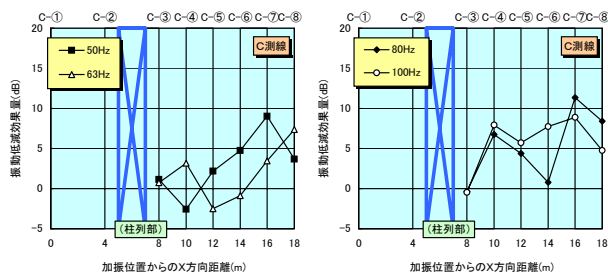
図-6 各周波数における距離減衰
(Q点加振時のA測線)



(a) A測線



(b) B測線



(c) C測線

図-7 Q点加振時の振動低減効果量

4. 解析による検討

4.1 解析手法および解析モデル

解析手法は、有限要素法と薄層要素法とを用いたサブストラクチャー法（3次元解析プログラム SuperFLUSH/3D⁶⁾）とした。すなわち、地盤は薄層要素を用いて層分割し、柱列はソリッド要素でモデル化し、両者の力と変位の連続性や振動源に対する地盤応答を薄層要素法による点加振解を用いて評価した。柱列を考慮した3次元解析モデルを図-8に示す。地盤のモデル化は、A測線に対する対象性を考慮した1/2モデルとし、地盤のS波速度およびP波速度は、表-2に示した地盤情報をもとにN値から推定⁷⁾した。ここで、地下水位以下の地盤のP波速度は水の水速度（1500m/s）を用い、地盤の減衰は一律2%とした。空孔柱列部は各定数に便宜的に微少な値を設定する事により、空孔を表現している。以上の条件により、更地時および3列空孔掘削時の2ケースについて、100Hzまでの定常正弦波加振解析を実施し、実験結果との比較検討を試みた。

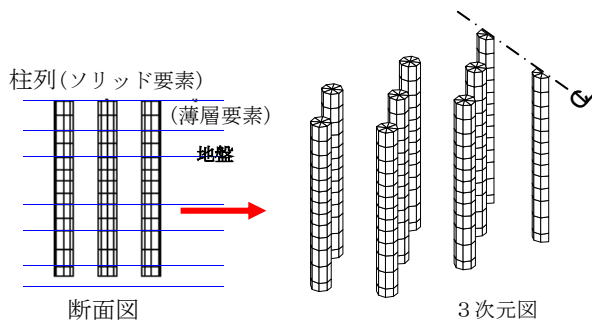
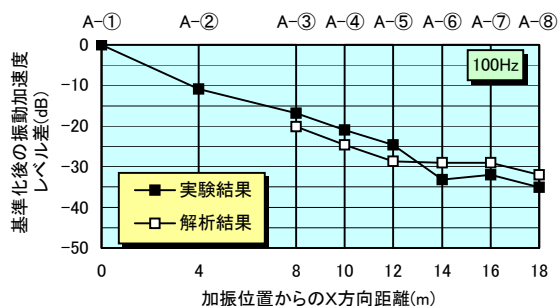


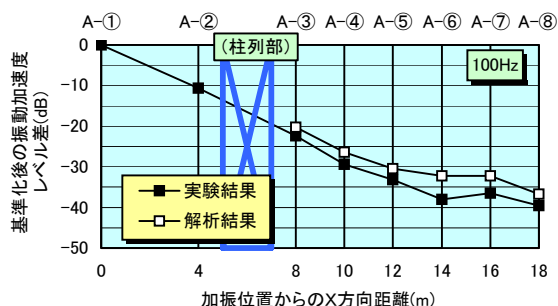
図-8 解析モデル

4.2 解析結果

地盤の振動加速度レベルに着目して実験結果と解析結果を比較検討した。図-9 にQ点加振時のA測線における更地時および3列空孔掘削時の振動加速度レベルの距離減衰を示す。ここでは、求めた振動加速度レベルに対して加振点近傍測定点(A-①)での測定結果との差で表示した。また、高振動数ほど振動低減効果が明確になることを考慮して、加振振動数 100Hz の場合について示している。図-9 より、更地時および3列空孔掘削時とも解析結果と実験結果は良い対応を示しており、3次元的に忠実なモデル化をすることにより、定量的評価が可能であると言えよう。



(a) 更地時



(b) 3列空孔掘削時

図-9 実験結果と解析結果の比較
(Q点加振時のA測線)

5. まとめ

地盤に円柱形状の空孔もしくは空孔を弾性材で充填した孔で孔群を施工する柱列工法に対して、振動低減効果を把握する目的で、実大実験および解析的検討を実施した。得られた結果を以下に示す。

- ① 加振実験を通じて、柱列による振動低減効果を把握した。その結果、今回検討を実施した3列空孔掘削時の場合、50Hz以上の領域において概ね5dB以上の振動低減効果が期待できることが分かった。
- ② 加振実験と解析結果を比較した結果、更地時および3列空孔掘削時ともに、解析結果は実験結果と良好な対応を示し、3次元的に忠実なモデル化をすることにより、振動低減効果の定量的評価が可能となることが分かった。

6. おわりに

本報告では、主に3列空孔掘削時の振動低減効果に関する検討を実施し、比較的高周波数領域についてはその有効性を確認することができた。また、解析結果との比較により、3次元解析の有効性も確認することができた。今後は、充填材の種類、振動低減効果領域の拡大および解析による予測技術の精度向上を通じて、実用化に向けた検討を引き続き実施していく予定である。

謝辞：本論文は、(株)銭高組との共同研究および(株)銭高組と(株)構造計画研究所との3社共同研究の中で実施したものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、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、2003.7.
- 2) 森下真行、斉藤芳人、水取和幸、布引英夫：柱列による地盤振動低減効果に関する研究 その1 振動実験、第40回地盤工学研究発表会、2005。(投稿中)
- 3) 島袋ホルヘ、庄司正弘、布引英夫、黒沢俊也、吉田隆治、藤嶋泰輔：柱列による地盤振動低減効果に関する研究 その2 解析との比較、第40回地盤工学研究発表会、2005。(投稿中)
- 4) 森下真行、吉田隆治、斉藤芳人、藤嶋泰輔、布引英夫、黒沢俊也、庄司正弘、島袋ホルヘ：柱列による地盤振動低減効果に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、2005。(投稿中)
- 5) 例えば、石井啓稔、吉岡修、船橋秀麿、川村淳一、平川泰行、伊藤康宏：起振機実験による地中壁施工前後の地盤振動伝播特性、第39回地盤工学研究発表会、pp.2057-2058、2004.7.
- 6) 構造計画研究所：SuperFLUSH/3D 使用説明書、1995.
- 7) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、p.335、1996.4.