

地盤改良効果に対する直接試験の試み

Trial of Direct Test for Ground Improvement Effect

(株)砂子組	○正員	田尻 太郎	(Taro Tajiri)
(株)砂子組	非会員	戸井田真之介	(Shinnosuke Toida)
(株)砂子組	正員	好川 敏	(Satoshi Yoshikawa)
(株)砂子組	正員	幌村 瑛奈	(Ena Horomura)
(株)砂子組	正員	佐藤 欣治	(Kinji Sato)
(株)砂子組	正員	佐藤 昌志	(Masashi Sato)

1. はじめに

地盤改良効果に対する直接試験は、現在のところないと思われる。

例えば、中圧噴射攪拌工法といわれる地盤固結工法では、施工後にコア抜きを行い、コアの一軸圧縮強度で固結度を確認する。改良深さは、埋設した杭の長さで管理される。また強度試験値に改良面積の面積率をかけ、低減した強度値が目標値を上回れば良いとされる。しかしこれらはいずれも施工管理上の品質管理項目であって、地盤全体の改良効果に対する試験ではない。

一方盛土や路盤の締固め管理においては、衝撃加速度法¹⁾やローラ加速度応答法^{2) 3)}など、地盤の力学的性状に基づいた直接試験が存在する。

前者は標準では、質量 4.5 kg の重錘を高さ 40 cm から落下させ、重錘と地盤との衝突加速度を測定し、衝突加速度と地盤乾燥密度との相関を利用する。後者は、路盤に入力される振動ローラーの振動の反射波を車体バネで増幅し、締固め度と相関のある波形特性を利用する方法と考えられる。これらは地盤表面から数 10 cm の撒き厚を対象とするので、数 m の深さで行われる地盤改良工に、すぐに適用できるものではない。

しかしながらローラーには 1 tf 程度の重量があるので、ローラー自体の走行振動と地盤との動的相互作用には、数 m の深度での、改良効果による地盤の力学的性状を反映する情報が含まれる可能性がある、と考えた。

2. 試験概要

当該現場の杭長は最大 6 m、 $\phi 1400$ 、最大改良深さは 5 m で、改良率は 50% の中圧噴射攪拌工法である。ローラー自体の走行振動と地盤との動的相互作用を測定し、改良効果判定に有用と考えられる振動特性を特定するためにローラーは無振動で走行させた。走行速度は「亀の Max」である。

測定は加速度計で行い、ローラー側面で治具とした 50×500 mm の板をスパン 450 mm で単純支持し、加速度計を支点から 25, 125, 225 mm (中央) に設置した。

加速度計容量は 200 G、サンプリングは 5000 Hz である。ローラーエンジン振動によるバックノイズは、静止した状態でアイドル時と走行時の回転数で測定したが、周波数特性に大きな違いはみられなかった(図-4)。

ローラー走行と地盤との動的相互作用は、かなり小さ

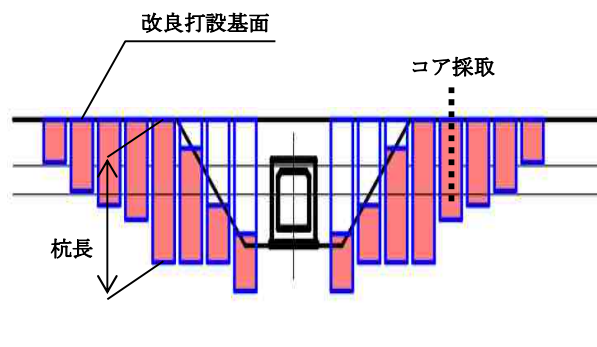


図-1 中圧噴射攪拌工法

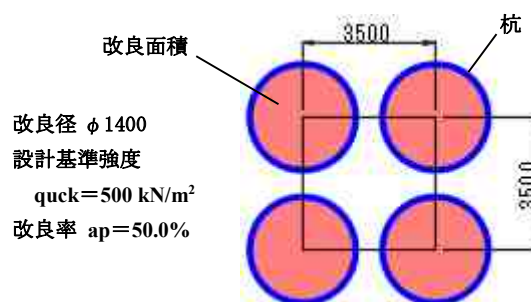


図-2 設計基準強度と改良率



図-3 ローラー側面 加速度計の設置状況

く、低い周波数であるとも考えられる。走行中の治具の固有振動のために、それがかき消される可能性もあるため、治具の材質と厚さを数種類用意し、それぞれ走行試験を行った。表-1 に治具の材質等を、表-2 に表-1 に基づいた、線密度と断面 2 次モーメントおよび 1 次の固有

振動数を示す。固有振動数は次式で計算している。

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left(\frac{n}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{式.1})$$

なお表-2の線密度には、2 g/50 mmの加速度計の質量も考慮した。f_n, L, EI, ρは表-1, 2を参照。

3. 改良地盤上での走行試験結果

図-4は、治具が木材の場合のエンジンノイズの特性である。表-2に示すように木材治具の1次の固有振動数は31 Hzであり、(式.1)によれば2次以上の倍振動はその4倍以上で100 Hz以上になるので、図-4に木材治具の固有振動数と一致するピークはない。従ってエンジンノイズは21, 42, 63, 84 Hzが卓越すると考えられる。

図-5~8に、改良地盤走行時の測定値の周波数特性を、治具の材質ごとに示す。ピーク周波数の振幅の大きさは、1にそろえて比較する。

- (1) どの治具の場合もノイズのピーク付近に大きな立ち上がりはなく、エンジンノイズの影響は少ないと考えられる。
- (2) また密度の大きさの順に、ピーク周波数の振幅とバックノイズが優勢と思われる部分の差が相対的に大きく、密度の大きい治具ほどノイズの影響を受けにくいと思われる。
- (3) (式.1)による1次固有振動数の理論値は、ステンレスで11 Hz、アルミで9 Hz、アクリルで8 Hz、木材で31 Hzであるが、表-2の実測(Hz)の欄に示したように、測定で得られた1次の固有振動数は、ステンレスで10 Hz、アルミで8 Hz、アクリルで7 Hzとなり、いずれも理論値の方が実測よりも1 Hz程度高いものの、大きな相違はない。ただし木材では図-8に示すように、理論値の近傍に明確なピークが現れなかった。

次にステンレス、アルミ、アクリルの固有振動数は、7~10 Hzと比較的近く、もしこれらの近傍にローラーと地盤の動的相互作用に特徴的な振動があった場合には、治具の固有振動に由来する振動なのか地盤の影響なのかは、判断しがたい事になる。

- (4) その観点で図-5~8を見ると、相対的に密度の低い治具の方が、小さな振動をより明確に測定できる可能性のある事がわかる。
- (5) 特に材質の密度が最も小さい木治具による測定値の周波数特性を示す図-8では、固有振動の影響はほとんどみられず、20 Hz以下の範囲に治具の固有振動の影響ではないと考えられるピーク帯が明確に表れている。

表-1 治具の材質、形状、弾性係数、密度

	弾性係数 E(N/mm ²)	スパン L(mm)	幅 (mm)	厚 (mm)	密度 (kg/m ³)
ステンレス	193000	450	50	1	7930
アルミ	60000	450	50	1	3000
アクリル	4000	450	50	2	1200
木	11500	450	50	3	400

表-2 線密度、断面2次モーメント、1次固有振動数

	線密度 ρ(Kg/m)	断面2次モーメント I(mm ⁴)	1次固有振動数 f ₁ (Hz)	実測 (Hz)
ステンレス	0.417	4.167	10.779	9.937
アルミ	0.170	4.167	9.407	8.411
アクリル	0.140	33.333	7.570	7.420
木	0.080	112.500	31.194	

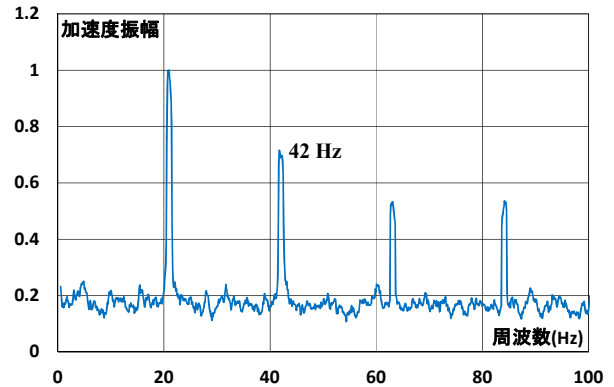


図-4 エンジンノイズの周波数特性 (ステンレス)

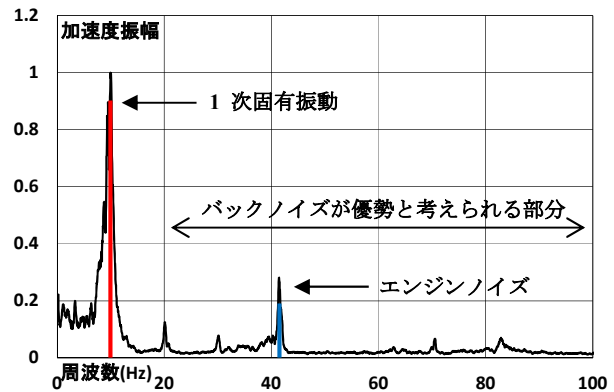


図-5 測定値の周波数特性 (ステンレス, 改良地盤)

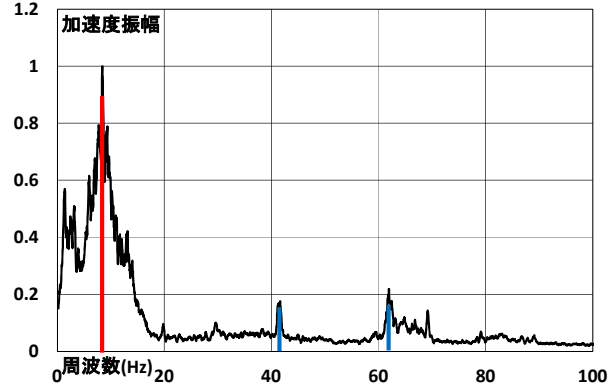


図-6 測定値の周波数特性 (アルミ, 改良地盤)

(6) 図-8 の 20 Hz 以下の振動の範囲が、ローラー走行と地盤との動的相互作用による振動である可能性は否定できない。ステンレス、アルミ、アクリルでは 1 次の固有振動がこの範囲で上記振動と共振して励起されたため、マスクされる結果になったと思われる。

3. 未改良地盤上での走行試験結果

現場では、改良地盤での走行試験の後、比較対象のため未改良地盤上での走行試験も行った。この時、図-5の結果から、最もノイズの影響を受けないと思われた、ステンレスの治具を用いた。また改良地盤ではローラー側面のタイヤ後輪直上に加速度計を設置したが（図-3），より地盤からの振動を直接的に捉えるために、ローラー前面の鋼製ドラムの直上に加速度計を設置替えしたケースも試みた（図-9）。

図-10 に、未改良地盤上でローラー側面（タイヤ後輪直上）で測定した加速度の周波数特性を示す。

(7) 1 次の固有振動は励起されず、固有振動の影響ではないと考えられるピーク帯が、20 Hz 以下に現れている。

なお 42 Hz の卓越周波数は、図-4 にも数値で示したエンジンノイズで、ステンレス治具の 2 次の固有振動と共振を起こしたと考えられる。2 次の固有振動数は理論値で $10.779 \times 4 = 43.1$ Hz、実測で $9.937 \times 4 = 39.7$ Hz、平均で 41.4 Hz となり 42 Hz にきわめて近い。

図-11 は、改良地盤上の走行をローラー前面で加速度測定した結果である（鋼製ドラムの直上）。

(8) 1 次固有振動が励起されるほか、図-5 ではあまり目立たなかった 42 Hz のエンジンノイズとの共振が卓越し、他の振動数のエンジンノイズも明瞭に現れている。これはタイヤ後輪よりも剛な鋼製ドラム上に加速度計があったため、より直接的に振動が伝わったものと考えられる。

図-12 は、図-11 と同じ条件で、未改良地盤を走行した結果である。

(9) 1 次固有振動は励起されず、2 次の固有振動とエンジンノイズの共振が見られる。他の振動数のエンジンノイズも明瞭に現れる。

(10) その他のピークは、剛な鋼製ドラム上で測定したことから、不陸による車体の揺れなどが現れたものと解釈できる。図-13 に示すように、走行した地盤には、最大で 9 cm 程度の不陸があった。

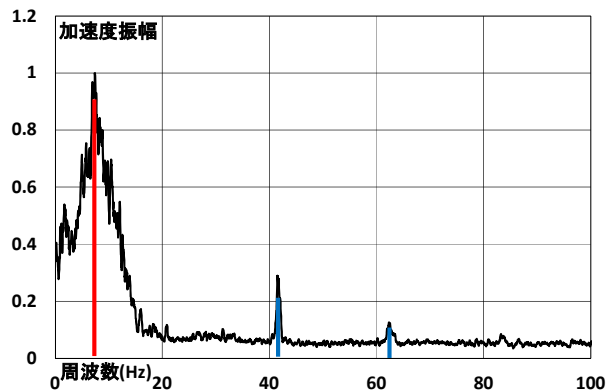


図-7 測定値の周波数特性（アクリル，改良地盤）

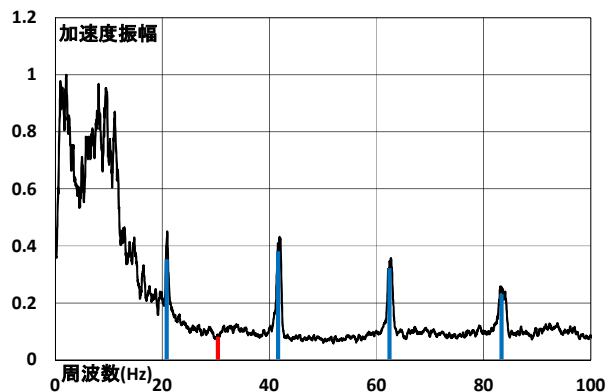


図-8 測定値の周波数特性（木材，改良地盤）



図-9 ローラー前面 加速度計の設置状況

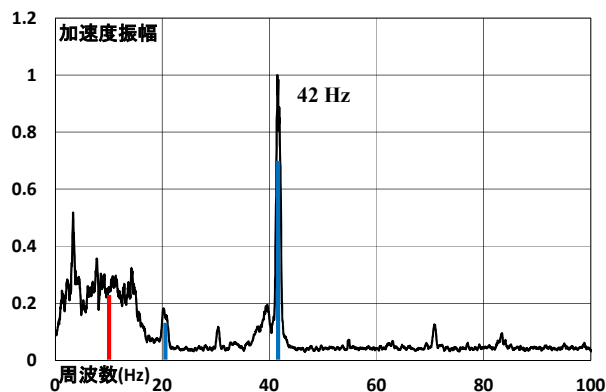


図-10 周波数特性（未改良，ステンレス，側面）

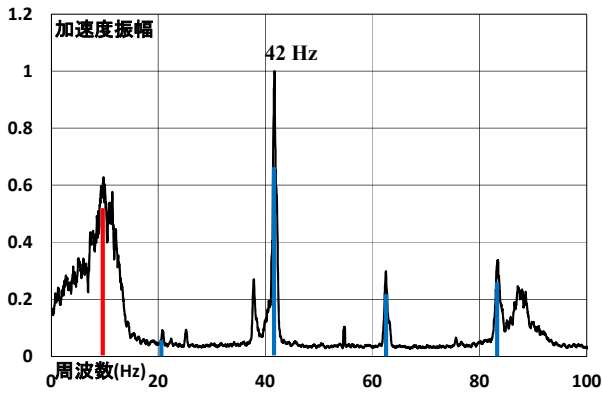


図-11 周波数特性 (改良, ステンレス, 前面)

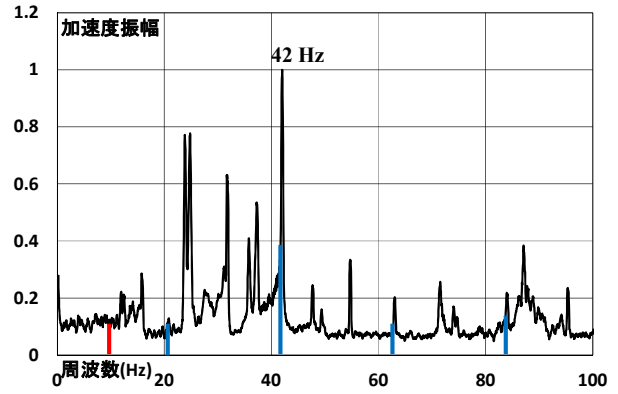


図-12 周波数特性 (未改良, ステンレス, 前面)

4. 考察

- 1) 1 次の固有振動数が 7~10 Hz の範囲にあるステンレス, アルミ, アクリルの治具では, 改良地盤走行時は 1 次の固有振動が励起された.
- 2) 未改良地盤も走行したステンレスにおいて, 固有振動は励起されなかったが, 20 Hz 以下に振動振幅のピーク帯が現れた.
- 3) 木治具では改良地盤走行時も, 固有振動は励起されず, 20 Hz 以下に振動振幅のピーク帯が現れた.
- 4) 以上より推測される事として, ローラーの走行と地盤との動的相互作用に由来する振動は, 20 Hz 以下である可能性は大きい.

次にそれを捉える方法として, 以下が考えられる.

- 5) 前述の 1), 2)より, 適切な固有振動数を持つ治具を用いた測定で, 固有振動が励起される/されないが, 改良/未改良の指標となりうる可能性がある. このような判定が可能であれば, 非常に簡単な試験法となりうる.
- 6) 密度の低い治具ほど小さな振動を, より明確に捉える結果となった. 特に木治具では改良地盤上でも固有振動が励起されず, 目的の振動をより詳細に解析できる可能性がある. 木治具を用いた未改良地盤上での測定を併せて行うべきである.
- 7) タイヤ後輪と鋼製ドラム前輪上の測定では全体としてドラム上の方が, よりノイズの影響を受けやすい結果となった. しかしながら図-14 は, 20 Hz 以下のスペクトルの相対比較ではあるが, この帯域については, ドラム上の方が静穏な測定になっている.
- 8) 同図において未改良と改良地盤を比較すると, 改良地盤では未改良にはみられない多数のピークが見られ, 先の推測を裏付けるものと思われる.



図-13 不陸の負荷さ

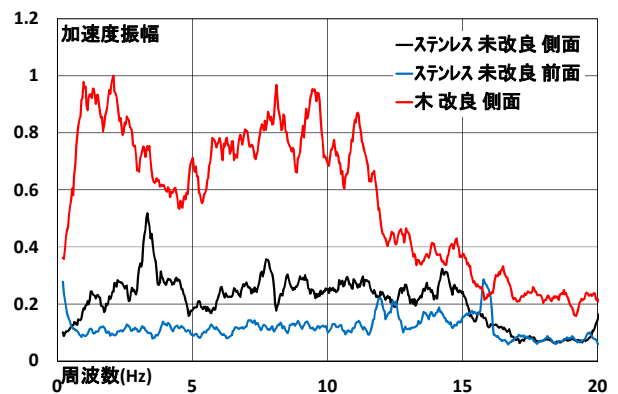


図-14 20 Hz 以下の比較

なお将来的には, 面的管理をめざす予定である.

[参考文献]

- 1) 衝撃加速度による盛土の品質管理方法, 建設マネジメント技術, 2014年4月.
- 2) NETIS 登録技術, KT-050054-V, V: 試行結果が評価された技術.
- 3) NEXCO 試験法, 123-2009, ローラー加速度法による剛性測定試験方法, JH 試験研究所他.