

大規模工場が立地する不整形地盤の震動特性

Dynamic characteristics of non-uniform ground under large-scale factories

不整形地盤 大規模工場 表層地盤
切盛土 地盤震動特性 1次元解析

正会員 ○杉山 拓真*	SUGIYAMA Takuma
正会員 吉田 圭佑*	YOSHIDA Keisuke
正会員 護 雅史**	Mori Masafumi
正会員 飛田 潤***	TOBITA Jun
正会員 福和 伸夫****	FUKUWA Nobuo

1. はじめに

南海トラフの巨大地震に備え、工場の地震被害予測の必要性が増している。一辺数百メートル以上にもなる大規模工場では、同じ敷地内でも表層地盤の震動特性が場所により大きく異なる場合がある。特に丘陵地、台地の縁などの傾斜した地形を持つ場所に施設が立地する際、大規模な造成などの地形改変が行われるため、表層の地盤構造は不整形となり、同じ敷地内で予測される地震動も場所により大きく異なると考えられる。

本研究では地盤の不整形性が地震時応答に及ぼす影響を解明するために、浅層レーリー波探査や常時微動計測により表層地盤の場所による振動特性の違いを明らかにし、さらに地盤の1次元の地震応答解析により、場所による応答の違いを明らかにすることを目的としている。

2. 対象サイト概要

本研究では3工場を対象としている。工場敷地はいずれも一辺が数100m以上の規模であり、場所により数m～20mの厚さで切盛が行われている。そのうち、本報告で示す工場は、1960年代後半に起伏のある丘陵を地盤造成して建設された。図1に配置図、1890年の等高線を重ねて示す。現在の敷地内の標高は33m程度であるため、旧版地図との比較により、盛土厚は最大で20m程度と推測される。

計測範囲は図1の(X)、(Y)で、図2の(a)～(j)は単点微動計測地点、(S)、(T)は浅層レーリー波探査の測線である。

3. 計測結果に基づく地盤震動特性の把握

3.1 浅層レーリー波探査に基づく地盤震動特性の把握

図3に浅層レーリー波探査により求めた測線(S)、(T)の分散曲線を地点ごとに示す。測線(S)では振動数の最小値が7Hzで位相速度400m/s程度で、19m程度の深度までS波速度の推定が可能である。同様にして、測線(T)でも深度18m程度までのS波速度の推定が可能である。

図4は分散曲線から推定したS波速度構造である。測線(S)では、測線方向に向けて地表から10m付近までのS波速度が小さくなり、盛土と推測され、旧版地図と対応している。また、深度20m付近には工学的基盤となるS波速度400m/s以上の層が確認できる。

測線(T)では、測線方向での大きなS波速度の変化はなく、旧版地図の標高線との対応が見られる。旧版地図ではこの付近の盛土厚さは15～20mであるが、土質柱状図に旧地形の地表付近が風化していたという表記もあることから、工学的基盤相当の層は見られない。

図4の測線(T)に示す地点で、ボーリングデータのN値から(1)式¹⁾によりS波速度を簡易的に換算したS波速度との比較を行う。図5にS波速度構造を示す。深度15m付近でボーリングデータから求めたS波速度が小さくなっているが、レーリー波探査から推定されるS波速度は大きくなっている。レーリー波探査では逆転層をとらえにくいためであると考えられる。一方、他の深度では傾向は対応していることが確認できる。

$$Vs = 112.73 \times N^{0.256} \times \begin{cases} \text{沖積層} 1.000 \\ \text{砂層} 0.885 \end{cases} \quad (1)$$

3.2 常時微動計測に基づく地盤震動特性の把握

得られた微動記録をもとに、速度フーリエスペクトル、H/Vスペクトルを求め、切盛の違いによる地盤震動特性を把握する。H/Vスペクトルは、水平成分のフーリエスペクトルのベクトル和と上下成分の比とする。

図6は単点微動計測地点(d)の速度フーリエスペクトルであり、7～10Hzに機械振動によるノイズが確認できる。これは、本工場内の他の記録だけでなく他工場の記録からも同様のノイズが見られるため、工場特有の振動であると考え、本研究ではこの付近の卓越振動数は検討対象としない。また、北側が法面であるため、EW方向、

* 名古屋大学環境学研究科・大学院生
** 名古屋大学減災連携研究センター准教授
*** 名古屋大学災害対策室教授
**** 名古屋大学減災連携研究センター教授

Grad.Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Assoc. Prof. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Professor, Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Prof. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

NS 方向の卓越振動数が異なると考えられるが、今回の結果からは差異は認められず、H/V スペクトルから地盤の卓越振動数を推定してもよいと考えられる。

図 7 は(h)～(j)の EW 方向の速度フーリエスペクトルであり、盛土から切土になるにつれて振幅が小さくなっていることが確認できる。

図 8 に全地点の H/V スペクトルを示す。図 7 の計測範囲(Y)をみると、(4)では 3 Hz、(5)では 3~5 Hz、(6)では 4~5 Hz となっており、盛土から切土に移るにつれてピークが高振動数側に移動している。一方、図 7 の (1)と (4)では盛土厚差が 10m 以上あるにも関わらず、卓越振動数は近い位置にある。ただし、振幅は大きく異なる。

図 9 に(c)に対する(d)の伝達関数を示す。EW 方向では 4Hz 付近で卓越が見られ、位相差も 90 度となるため、卓越振動数と考えられる。法面の平均 S 波速度は 250~300 m/s 程度で 4 分の 1 波長則から求められる振動数は 3.2~4 Hz となり、伝達関数のピークと対応が見られる。一方、NS 方向では明瞭なピークが見られない。

4. 重複反射解析を用いた実測の比較

浅層レーリー波探査から得られた 3 地点の S 波速度を用いて 1 次元重複反射理論に基づく地震応答解析を行った。対象とする 3 地点を図 3 に(A1)～(A3)で示す。表 1 に(A1)～(A3)の地盤条件を示す。また、図 10 に 18.2 m に対する地表の伝達関数を示す。図 10 より(A1)～(A3)では卓越振動数が順に 4.2 Hz, 5.7 Hz, 6.8 Hz となっているが、図 8 より(h)～(j)の H/V スペクトルは順に 3 Hz, 3~5 Hz, 4~5 Hz にピークが見られ、伝達関数のピークより低い振動数を表しているが、卓越振動数の移動には対応が見られる。

5. 1 次元地震応答解析に基づく地盤震動特性の把握

5.1 解析条件及び解析対象地点

地盤の 1 次元の地震応答解析を行い、地点ごとの応答の違いを把握する。

解析手法には等価線形解析、逐次非線形解析を用いた。本報告で示す対象地点は 4 章同様、図 4 に示す(A1)～(A3)の 3 地点である。土質区分はボーリングデータを参照し、単位体積重量は土質区分に限らず 17.6 kN/m³とした。S 波速度は浅層レーリー波探査により得られた値を用いた。

両解析の基準せん断ひずみ、最大減衰定数について、砂質土では層ごとに拘束圧の違いを考慮した。各パラメータの詳細な値を表 2²⁾ に示す。粘性土では塑性指数の違いを考慮せず、基準せん断ひずみ 0.18 %、最大減衰定数 17 %²⁾ とした。さらに、動的変形特性は等価線形解析では H-D モデル、逐次非線形解析では修正 RO モデルを用い、液状化は考慮していない。

また、入力地震波には、告示波(神戸位相、八戸位相、

乱数位相)の振幅レベルを変えて使用した。加速度波形を図 11 に示す。

5.2 解析結果

本報告では告示波(神戸位相、Level2)に対する逐次非線形解析による解析結果について示す。

図 11 は地点ごとの加速度、速度、変位波形である。各地点の速度、変位波形を比較すると、位相も振幅も同様に見受けられる。加速度波形では、地点ごとの位相は同様に見受けられるが、振幅は(A1)から(A3)と移行するにつれて若干小さくなっていることがわかる。図 12 に(A3)に対する(A1),(A2)の伝達関数を示す。振幅倍率をみると(A1)/(A3)では 4 Hz 付近で 1.2~1.5 倍程度の倍率の違いが確認できる。また位相差を見ると、高振動数側に移行するにつれて位相のずれが大きくなっていることがわかる。

図 13 は減衰定数 5 % の地表面での加速度応答スペクトルである。(A3)では明瞭なピークは見られず、(A2)では 4 Hz 付近、(A1)では 3~4 Hz 付近にピーク振動数が見られ、切土から盛土に移行するにつれて、ピーク振動数が低振動数側に移動しており、振幅も大きくなっていることが確認できる。図 14 は地表面での加速度応答スペクトルを入力波の加速度応答スペクトルで除したものである。図 9 の伝達関数と比較すると、逐次非線形時の卓越振動数は線形解析時の卓越振動数より小さくなっていること、非線形化が進行していることが確認できる。

図 14 は深度ごとの最大加速度、最大せん断ひずみ、最大せん断応力、相対変位である。どのグラフからも(A3)～(A1)に移行するにつれて大きな値を示している。

以上の事から、本検討の範囲内では、地表面変位に大きな違いは認められなかったが、加速度レベルでの応答に違いが見られたことから、工場建屋が捩れ挙動やさらに複雑な挙動となる可能性があると考えられる。

6. まとめ

3 工場の敷地に対して浅層レーリー波探査、常時微動計測を行った。さらに、得られたデータを用いて 1 次元の地震応答解析を行い、結果について考察を行った。

実計測から切盛土での卓越振動数、振幅、S 波速度構造は異なるということがわかった。また、1 次元地震応答解析により、地震時の地盤の応答が切盛土の有無により異なることがわかった。しかし、1 次元の地震応答解析では地盤を平行成層であると仮定しており、地盤の傾斜や傾斜幅の影響を考慮できていない。今後は 2,3 次元 FEM 解析により詳細に応答を評価していく必要がある。

参考文献

- 1) 内閣府：東南海、南海地震等に関する専門調査会(第 16 回)-地盤構造に関する資料-、pp81、2003.12
2) 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、pp56、2009.4

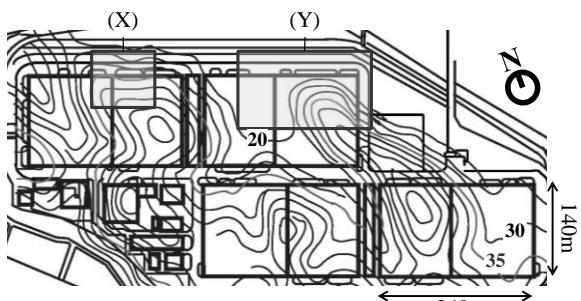


図 1 工場配置図と旧版地形図標高

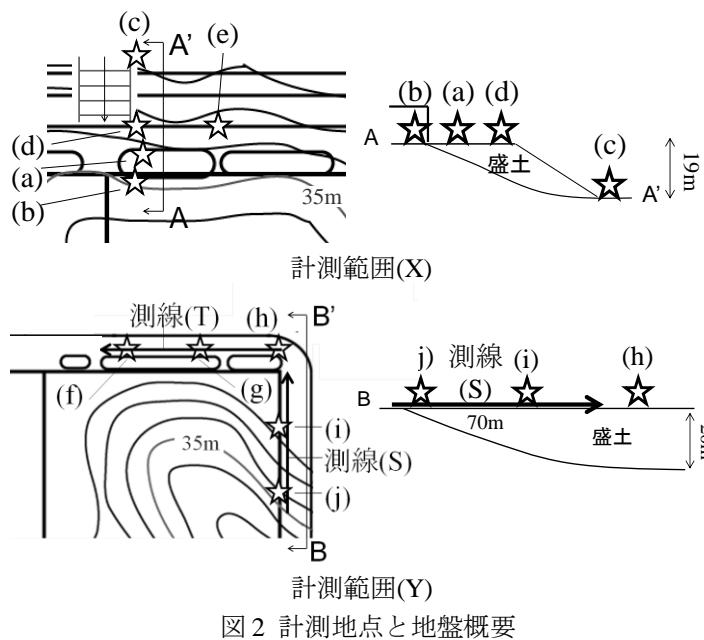


図 2 計測地点と地盤概要

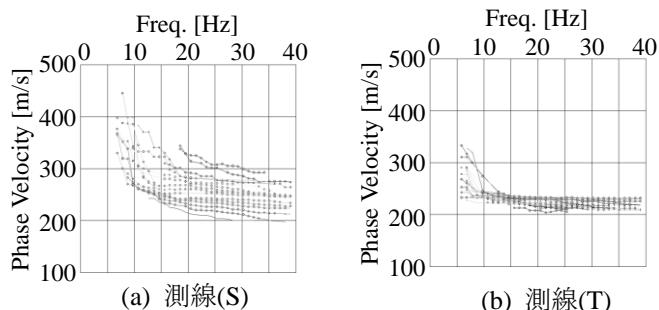


図 3 分散曲線

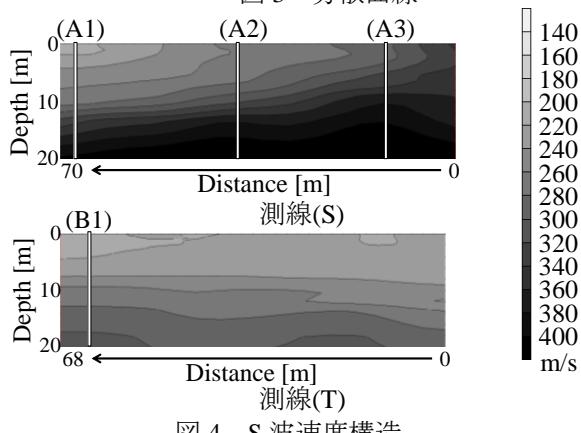


図 4 S 波速度構造

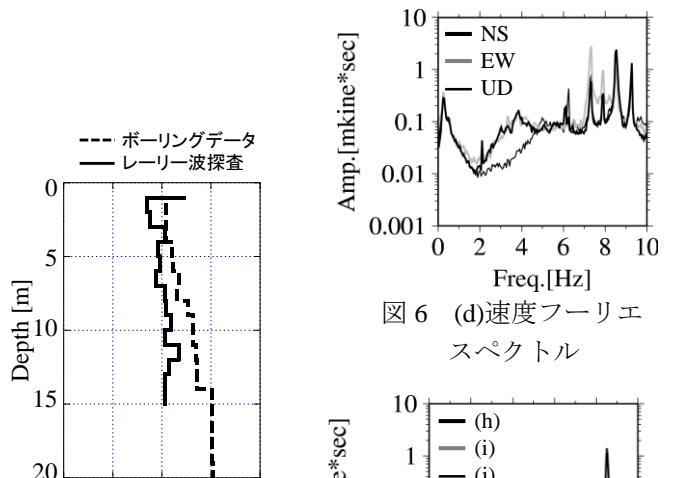


図 5 (B1) の S 波速度構造

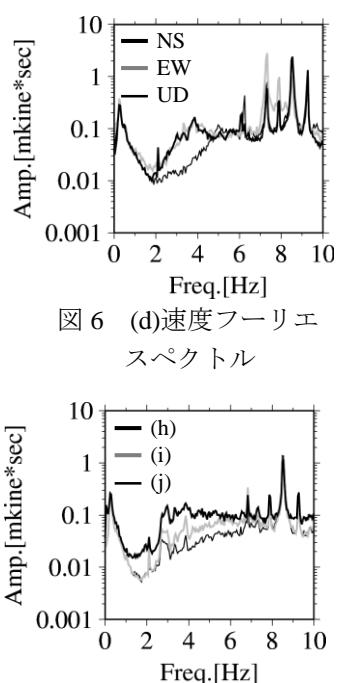


図 6 (d)速度フーリエスペクトル

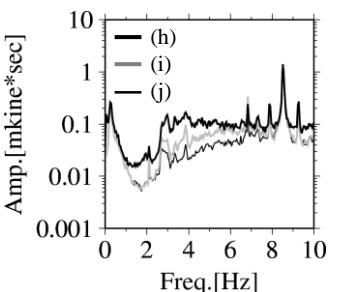
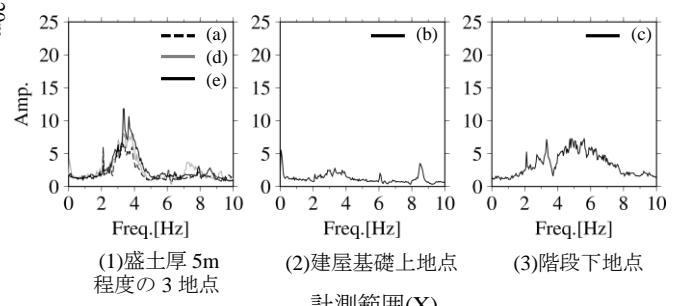


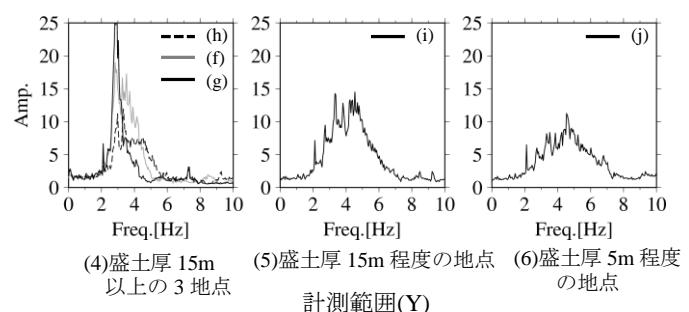
図 7 速度フーリエスペクトル(EW 方向)



(1) 盛土厚 5m 程度の 3 地点

(2) 建屋基礎上地点

計測範囲(X)



(4) 盛土厚 15m 以上の 3 地点

(5) 盛土厚 15m 程度の地点 (6) 盛土厚 5m 程度の地点

計測範囲(Y)

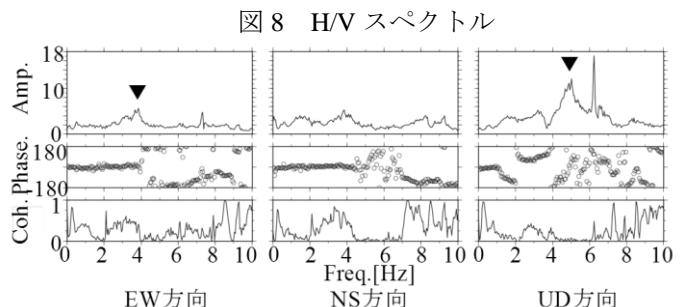


図 9 地点 (c)に対する地点(d)の伝達関数

表 1 対象地点の地盤条件

層番号	深度 [m]	層厚 [m]	土質区分			単位体積重量 [kN/m ³]	初期減衰定数 [%]	せん断波速度 [m/s]		
			(A1)	(A2)	(A3)			(A1)	(A2)	(A3)
1	0.5	0.5	砂	砂	砂	17.64	1	221	261	297
2	1.2	0.7	砂	砂	砂	17.64	1	220	258	298
3	1.9	0.7	砂	砂	砂	17.64	1	218	256	296
4	2.6	0.7	砂	砂	砂	17.64	1	222	257	294
5	3.5	0.9	砂	砂	砂	17.64	1	230	261	298
6	4.5	1	砂	砂	砂	17.64	1	238	262	309
7	5.5	1	砂	砂	砂	17.64	1	243	262	321
8	6.6	1.1	砂	砂	砂	17.64	1	250	264	337
9	7.8	1.2	砂	砂	砂	17.64	1	257	278	331
10	9.1	1.3	砂	砂	砂	17.64	1	260	292	353
11	10.4	1.3	砂	砂	砂	17.64	1	267	302	379
12	11.9	1.5	砂	砂	砂	17.64	1	276	325	381
13	13.4	1.5	砂	砂	砂	17.64	1	315	357	393
14	18.2	4.8	砂	砂	砂	17.64	1	329	393	402
15	20	1.8	砂	砂	砂	17.64	1	435	437	440

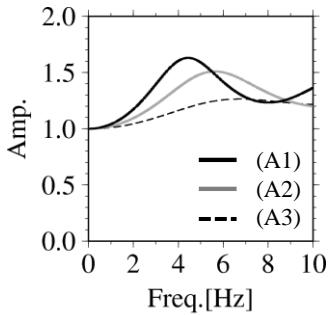


図 10 線形解析時の伝達関数

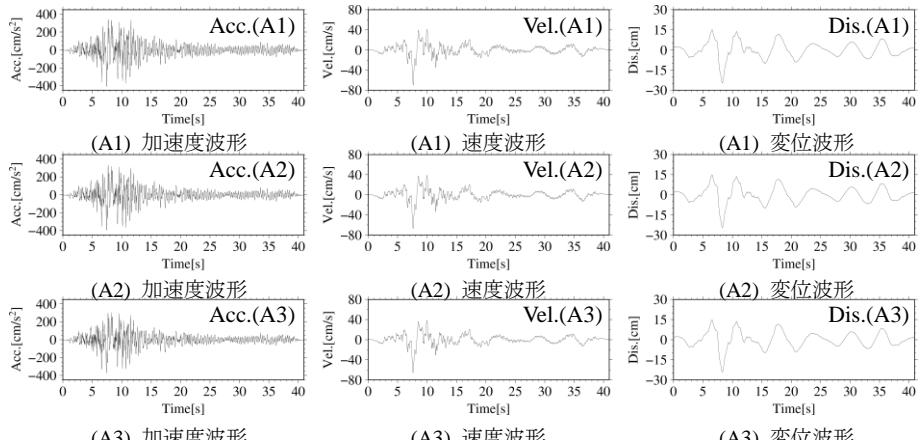


図 11 解析に用いた入力地震動

表 2 各拘束圧における

基準せん断歪と最大減衰定数

拘束圧 [kPa]	基準せん断歪 [%]	最大減衰定数 [%]
0 ~ 50	0.05	22
50 ~ 100	0.07	21
100 ~ 200	0.08	21
200 ~ 300	0.12	21
300 ~	0.16	19

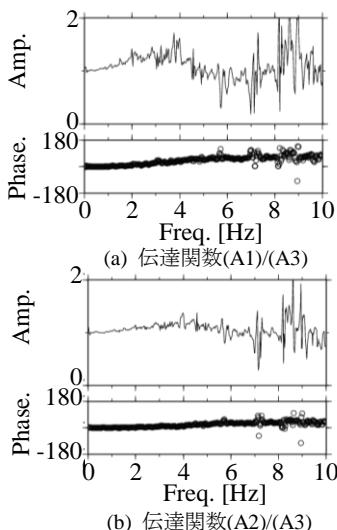


図 13 地点間の伝達関数

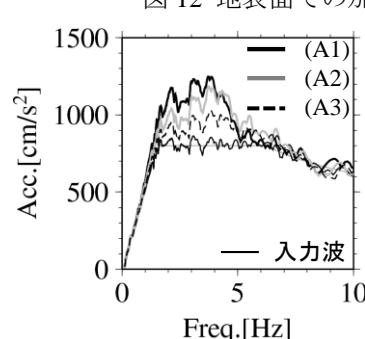


図 14 減衰定数 5% の加速度応答スペクトル

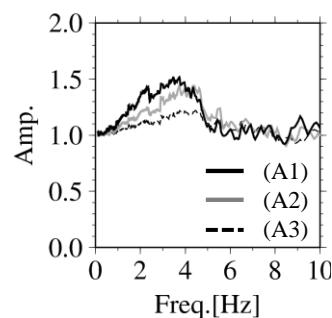


図 15 逐次非線形解析時の伝達関数

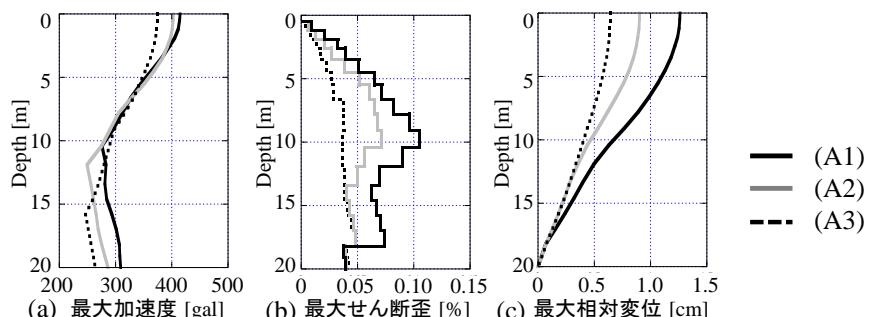


図 16 各層ごとの最大応答分布図