## 微動アレイ観測による丸太打設地盤のS波速度 評価と地震動,建物被害への影響

西川 隼人<sup>1</sup>・吉田 雅穂<sup>2</sup>・油屋 敏行<sup>3</sup>・油屋 昌宏<sup>4</sup>・伊内 是成<sup>5</sup> 梅田 祐一<sup>6</sup>・野村 吉範<sup>7</sup>

<sup>1</sup>正会員 福井工業大学 工学部建築土木工学科 (〒910-8505 福井県福井市学園 3-6-1) E-mail: nishikawa@fukui-ut.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 福井工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町) E-mail: masaho@fukui-nct.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 株式会社 AB コーポレーション (〒910-0043 福井県福井市四十谷町 5-16) E-mail: t-abu@ab-c.jp

<sup>4</sup>非会員 株式会社 AB コーポレーション (〒910-0043 福井県福井市四十谷町 5-16) E-mail: m-abu@ab-c.jp

<sup>5</sup>非会員 美山町森林組合 (〒910-2351 福井県福井市美山町 6-25-1) E-mail: mi-kakou@kore.mitene.or.jp

<sup>6</sup>正会員 株式会社デルタコンサルタント (〒910-0017 福井県福井市文京 7-8-17) E-mail: umeda@deltacon.co.jp

> <sup>7</sup>正会員 福井市 都市戦略部 (〒910-8511 福井県福井市大手 3-10-1) E-mail: y.nomura-cd@ma.city.fukui.lg.jp

本研究では丸太打設による改良を行った地盤と未改良の地盤を対象に常時微動のアレイ観測を行うこと により、丸太を用いた地盤改良のS波速度増大効果を検証するとともに、地盤改良に伴うS波速度の変化 が地震動や地震時の建物被害に及ぼす影響を調べた.

まず、微動アレイ観測により位相速度を評価した結果、地盤改良を行った地盤で位相速度が大きくなる 傾向が見られた.得られた位相速度から表層地盤のS波速度を推定した結果、改良地盤のS波速度の増大 が確認された.次に推定S波速度構造をもとに、経験式によって想定地震に対する地震動と建物被害を評 価したところ、改良地盤では未改良地盤に比べて地震動強さと建物被害率が小さくなった.

Key Words: log, S-wave velocity, microtremor array, earthquake ground motion, building damage

#### 1. 序論

既往の複数の研究において丸太打設による地盤改良が 液状化や道路交通振動の軽減に有効であることが報告さ れている<sup>1)~3)</sup>.一方,丸太の打設による地盤の締固め効 果や土に比べてせん断剛性の高い丸太の敷設により,地 盤のS波速度の増大が見込まれる.表層地盤のS波速度 が地震動強さに大きな影響を及ぼすことが示唆されてい る<sup>4</sup>ことから,丸太打設によって表層地盤のS波速度が 増大すれば,地震動が軽減されるだけでなく,地震動に よる建物被害の軽減に対しても効果があると考えられる.

本研究では丸太打設による地盤改良を行った地盤と未 改良の地盤を対象に常時微動のアレイ観測結果に基づき, S波速度構造を推定し、丸太を用いた地盤改良のS波速 度増大効果を検証するとともに、地盤改良に伴う表層地 盤のS波速度の変化が地震動や地震時の建物被害に及ぼ す影響を考察した.

#### 2. 地盤改良地点の概要

本研究で対象とした地盤改良地点は福井工業高等専 門学校(以降,福井高専)敷地内の幅 5.2mのアスファ ルト舗装道路直下の地盤であり,丸太による地盤改良の 道路交通振動の軽減効果を調査した地点<sup>1)</sup>である. **図-1** に地盤改良地点を含む本研究の対象地点を示す.地盤改 良を行った地点(対策地盤)と行わなかった地点(無対 策地盤)が隣接しており,両地点の舗装条件は同じとな っている.同図には後述するボーリング地点<sup>5</sup>も示して



図-1 地盤改良地点(対策地盤)と無対策地盤 (文献5の図に加筆)



図-4 サウンディング試験結果<sup>1)</sup>による換算N値と土質区分



図-5 微動アレイ観測における速度計の配置

いる. 図-2 に対策地盤の断面図,図-3 に平面図を示す. 対策地盤では末口直径 0.12m,長さ 2m の丸太が 1m 間隔 で計 25 本打設されている. 地盤改良の詳細は文献 1 を参 照されたい. 地盤改良を行う前に,丸太による地盤改良 を行った 1 地点と地盤改良を行っていない 3 地点の計 4 地点でサウンディング試験を行っている<sup>1)</sup>. ここでは地 盤改良の有無による S 波速度構造の違いを把握するため に,地盤改良を行った地点とサウンディングの調査結果 に大きな違いがない 1 地点を対象に S 波速度評価を行っ た.図-4 に地盤改良前の対策地盤と無対策地盤で行った サウンディング試験結果から求めた換算 N 値と土質区分 を示す.同図を見ると地表から 0.5~1m で N 値が 20 以 上だが,1~2.3m では N 値が 10 未満で軟弱なことが分 かる.



図-6 微動アレイ観測から評価した位相速度

#### 3. 微動アレイ観測によるS波速度評価

丸太打設による液状化対策の実施地点のS波速度評価 に表面波探査を利用した例のがあるが、本研究では交通 振動の計測 <sup>1)</sup>でも利用している振動計を用いた常時微動 アレイ観測によりS波速度構造を評価した.常時微動の 観測は2018年11月と2019年3月に行い、測定には(株) 東京測振製の携帯用振動計 VSE-15D6を3台用いた.常 時微動の測定は上下動を対象とし、測定時間は10分間前 後,サンプリング振動数は100Hz とした. 図-5 のように 円周上に速度計を3 台設置し,アレイ半径を1m と3m に変えて測定を行った.また,アレイの中心点は5m四 方の対策地盤,無対策地盤の中心付近とした.

測定した常時微動波形を対象に微動解析ソフト BIDO Version 2.0<sup>7)</sup>を用い, CCA法<sup>8)</sup>(Centerless Circular Array 法)により,レイリー波の位相速度(以降,位相速度) を評価した.CCA法は位相速度の評価手法として一般的 な空間自己相関法<sup>9</sup>と比較して,長い波長までの解析に 有効であることから,半径数 10cm のアレイ観測結果か ら,数 10m~100m 以上の波長に対する位相速度を評価 できることが報告されている<sup>10</sup>.

BIDO Version 2.0<sup>7</sup>を用いて位相速度を評価する際に, まず,常時微動波形にバンド幅 0.2~30Hz のバンドパス フィルターをかけ,次にセグメント長を 5.12 秒として, 常時微動波形から複数のセグメントを取り出して計算に 用いるとともに,計算過程で求めるスペクトルをバンド 幅 0.3Hz の Parzen window により平滑化した.

図-6 に常時微動のアレイ観測から評価した位相速度 を示す.同図を見ると、14Hz以上では対策地盤の位相速 度が無対策地盤よりも 50m/s ほど大きく、8~14Hz でも 対策地盤の方が位相速度が大きい傾向が見られることか ら、地盤改良によるS波速度増大の効果が表れているも のと考えられる.

#### 4. S 波速度構造の推定

無対策地盤,対策地盤を対象に行った微動アレイ観測 結果をもとにS波速度構造を推定する.まず,大まかな S波速度構造を把握するために,福井高専敷地内と Geo-Station<sup>5)</sup>で公開されている周辺のボーリング柱状図

(図-1の左下の緑色の円)をもとに以下の太田,後藤<sup>11)</sup>の式からS波速度を計算した.

$$V_s = 62.48 N^{0.218} H^{0.228} F \tag{1}$$

 $V_s$ はS波速度(m/s), NはN値, Hは深度(m), Fは土 質区分に関する係数であり, 砂の場合は1.073, 粘性土は 1, 礫は1.199である. 位相速度の計算にはS波速度の他 にP波速度 $V_p$ (m/s), 密度 $\rho$ (t/m<sup>3</sup>)が必要なことから, 以下のS波速度との関係式<sup>12,13</sup>より値を求めた.

$$\rho = 0.67\sqrt{V_s} + 1.4$$
(2)  
$$V_p = 1.11V_s + 1290$$
(3)

式 (2) のVsの単位は km/s である.

ボーリング柱状図から計算した S 波速度などから Hisada<sup>14)</sup>の手法で位相速度の理論値を計算し、微動アレ イ観測から求めた位相速度(観測値)と比較することに より、ボーリングデータがS波速度推定に利用できるか どうか調べた.位相速度の理論値は基本モードが卓越す るものと仮定して計算を行った.ボーリング柱状図をも とに計算した位相速度理論値は観測値に比べて、高振動 数の値が小さかったことから、図-6の微動アレイから評 価した位相速度に適合するように、高振動数の位相速度 に影響する地表から深さ 2.15m までのS波速度を 1.5 倍 した.このS波速度の調整は長さ 2mの丸太打設による S波速度の変化が位相速度に及ぼす影響を調べることも 目的としている.

図-7 に位相速度の観測値とボーリング柱状図をもと に計算した理論値を示す.同図から分かるように, Geo-Station<sup>5)</sup>のボーリング柱状図をもとに計算した位相 速度が福井高専敷地内を対象とした値に比べて,観測値 と似た傾向を示したため,Geo-Stationのボーリングデー タを基本に無対策地盤,対策地盤のS波速度構造を推定 した.

表-1にS波速度構造を推定するにあたり設定した地盤 モデルと推定対象とする地盤定数(表のグレーの網掛け 部分)を示す.まず,サウンディングの結果<sup>1)</sup>をもとに 地表から深さ 2.3m まで 3 つの層を仮定した.また, Geo-Stationのボーリングデータをもとに設定した無対策 地盤,対策地盤共通の5層目,6層目と1~3層の間には 中間層として第4層を設けた.最下層の7層目は既往研 究<sup>15)</sup>を参考にS波速度=600m/sの層を仮定した.

推定対象とした地盤定数は 1~4 層の S 波速度と 4 層 目の層厚である. S 波速度は 50~500m/s の範囲で 10m/s 刻みで変化させるとともに, 4 層目の層厚は 1~3m まで 0.5m 刻みで変化させて,位相速度の観測値と理論値の誤 差が最小になるように決定した.地盤定数は振動数 8~ 20Hz の位相速度の基本モードの理論値と観測値の誤差 二乗和が最小になるように決定した.解析の結果,無対 策地盤,対策地盤ともに 4 層目の層厚が 2m の場合に誤 差二乗和が最小となった.



図-7 位相速度の観測値とボーリング柱状図に基づく理論値

表-1 S 波速度構造推定の際に設定した地盤モデルと地盤定数

	No.	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p(m/s)$	$V_s$ (m/s)
	1	0.3		式(3)	推定対象
推定	2	1.0	=t $(2)$		
地盤	3	1.0	1.(2)		
	4	1.0~3.0			
11.57	5	2.0	1.71	1521	208
共通 地盤	6	7.0	1.77	1630	306
	7	-	1.92	1956	600

図-8 に推定地盤構造から求めた位相速度の理論値と 観測値,図-9に推定した無対策地盤,対策地盤のS波速 度構造,表-2に推定地盤構造のパラメータを示す.地盤 改良の対象層 1~3 層で対策地盤のS波速度が無対策地 盤の1.5~2.7 倍になっており,地盤改良の効果が明瞭に 表れている.一方,密度は1.05~1.08倍,P波速度は1.06 ~1.12倍の増加であり,S波速度に比べると大きな変化 は見られなかった.

#### 5. 地震動と建物被害の評価

丸太による地盤改良の対策の有無の地震動と建物被害 への影響を調べるために,対象地点で想定されている工 学的基盤の地震動(最大地動速度)と推定S波速度構造 から計算される地盤増幅度を用いて,無対策地盤,対策 地盤の地表面の最大地動速度を求めた.また,得られた 最大地動速度を用い,経験的な被害予測式によって木造 建物の全壊率と全半壊率を求め,地盤改良の有無が建物 被害に及ぼす影響を調べた.

#### (1) 地震動の評価

まず,地震ハザードステーション(J-SHIS)<sup>16</sup>におい て対象地点で予想されている最大の地震動を調べた結果, 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北部(*M*<sub>w</sub>=7.0,ケース1)の 地震による地震動が対象地点で最も大きく,工学的<u>基盤</u>

(S 波速度=600m/s) における最大地動速度 *PGV<sub>b</sub>*(両成分の最大値)は50cm/s であった.図-10 に断層モデルと工学的基盤の最大地動速度分布,図-11 に工学的基盤の速度波形を示す.

次に表層 30m の平均 S 波速度 V<sub>30</sub> をパラメータとする 地盤増幅度を求め、工学的基盤の最大地動速度 PGV<sub>b</sub> に 乗じることで、地表面の最大地動速度 PGV<sub>s</sub> を求めた. 地盤増幅度評価式<sup>17</sup>を以下に示す.

$$F_v = 2.367 - 0.852 \log V_{s30} \tag{4}$$

Fvは工学的基盤(S波速度=600m/s)を基準とした最大地動速度の地盤増幅度である.

表-3に対象地点の無対策地盤,対策地盤の Vs30, PGVb,







(2)対策地盤図-8 位相速度の観測値と推定地盤構造による理論値

#### 表-2 推定地盤構造

(1) 無対策地盤

	No.	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
推定 地盤	1	0.3	1.58	1368	70
	2	1.0	1.60	1390	90
	3	1.0	1.77	1623	300
	4	2.0	1.62	1412	110
11.) 7	5	2.0	1.71	1521	208
共囲 地盤	6	7.0	1.77	1630	306
	7	-	1.92	1956	600

(2) 対策地盤

	No.	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
推定 地盤	1	0.3	1.66	1457	150
	2	1.0	1.73	1556	240
	3	1.0	1.85	1801	460
	4	2.0	1.63	1423	120
ш.) <del>х</del>	5	2.0	1.71	1521	208
共囲 地盤	6	7.0	1.77	1630	306
	7	-	1.92	1956	600



図-9 推定したS波速度構造

*PGV*<sub>s</sub> を示す. 地表面の最大地動速度 *PGV*<sub>s</sub> は約 10cm/s 違いが生じている.

#### (2) 建物被害の評価

次に得られた地表面の最大地動速度 PGVs を用いて, 式(5)の経験式<sup>18</sup>により木造建物の全壊率と全半壊率 を求めた.全壊率と全半壊率は耐震基準が旧基準(1981 年以前),新基準(1982年以降)に対するものである.

$$P = \Phi[(I - \lambda)/\xi]$$
(5)

Pは被害率, Φは累積正規分布関数, Iは最大地動速度の 自然対数,λは平均値,ζは標準偏差である.表-4に式(5) を用いた計算の結果得られた,全壊率,全半壊率を示す.

また,図-12に最大地動速度と全壊率,図-13に最大地 動速度と全半壊率の関係を示す.図-12を見ると新基準 における全壊率は無対策地盤,対策地盤で大きな違いは ないが,旧基準の場合は対策地盤が無対策地盤に比べて 4.3%低くなっている.

図-13 を見ると全半壊率は全壊率に比べて全体的に値 が大きく,無対策地盤と対策地盤による違いも大きくな っている.対策地盤の全半壊率を無対策地盤と比較する と,旧基準の場合は約10%,新基準の場合は約5%小さ くなっており,全壊率と同じく旧基準の方が対策地盤と 無対策地盤の値の差が大きくなった.



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 (cm/s)

図-10 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北部の断層モデルと工学的基盤の最大地動速度分布(●:対象地点,★:断層の破壊開始点)<sup>16</sup>





(2) EW 成分 図-11 工学的基盤の速度波形

表-3	平均 S 波速度,	地盤増幅度と最大地動速度
-----	-----------	--------------

	<i>V</i> <sub>S30</sub> (m/s)	$F_{v}$	$PGV_b$ (cm/s)	PGV <sub>s</sub> (cm/s)
無対策	309	1.76	50	88.1
対策	352	1.58	30	78.8

	表-4 五	式 (5)	による	5全壊率	と全当	半壊率
--	-------	-------	-----	------	-----	-----

(1) 全壊率					
	無対策(%)	対策(%)			
旧基準 8.0 3.7					
新基準 0.9 0.4					

(2) 全半壊率

	無対策(%)	対策(%)
旧基準	22.4	12.6
新基準	10.5	5.6

#### 6. 結論

本研究では液状化や道路交通振動の軽減に効果のある 丸太打設工法の更なる有用性を探るために,丸太打設に よる地盤改良のS波速度増大効果,および,地震動と地 震時の建物被害への影響を調べた.

まず,福井高専敷地内で丸太打設による地盤改良が行われた地盤(対策地盤)と近接する地盤改良が行われていない地盤(無対策地盤)を対象に常時微動のアレイ観測を行い,表層地盤のS波速度構造を推定した.その結果,地盤改良を行った対策地盤では丸太を打設した層のS波速度が無対策地盤に比べて1.5~2.7倍の値となり,





対策地盤においてS波速度増大が見られた.

続いて,推定したS波速度構造を用い,経験式によっ て最大地動速度の地盤増幅度を求め,想定地震に対する 地表面の最大地動速度を評価した.その結果,対策地盤 と無対策地盤の地表面の最大地動速度には10%程度の違いが見られた.

次に求めた地表面の最大地動速度を用い,経験式によって木造建物の全壊率と全半壊率を評価した結果,全壊率,全半壊率ともに対策地盤の値が小さくなっており,耐震基準が旧基準の場合に対策地盤と無対策地盤の値の差が大きくなった.

今後は他の丸太打設地盤に対しても本研究と同様の 検討を行い、丸太の打設によるS波速度の増大と地震動 や木造建物被害への影響を調べるとともに、木造以外の 構造物を対象とした解析を行う予定である.

謝辞:微動記録の解析では国立研究開発法人 産業総合技 術研究所の長郁夫博士の開発した解析ソフト BIDO Version 2.0 を使用させて頂きました.計算の一部で工学 院大学の久田嘉章先生が公開されているプログラムを 使用させて頂きました.一部の図の作成において,国土 地理院の地理院タイル(標準地図)を利用させて頂きま した.3 名の査読者の方々から貴重なご意見を頂きまし た.本研究の一部は平成30年度一般社団法人 近畿建設 協会研究助成の補助を受けて実施しました.また,本研 究は平成30年度金井学園若手研究者育成研究費の補助 を受けて行いました.記して御礼申し上げます.

#### 参考文献

- 吉田雅穂他:丸太を利用した道路交通振動の軽減対 策に関する現場実験,土木学会第74回年次学術講演 会,V-294,2019.
- 吉田雅穂、山口謙太郎:木造建築物の解体角材を利用した液状化対策技術に関する模型振動実験、土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp. 361-366, 2016.
- 7) 芹川由布子,吉田雅穂,宮島昌克:既設戸建住宅を 対象とした丸太を用いた液状化対策工法に関する基 礎的研究,土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.489-495, 2016.
- 川瀬 博,松尾秀典:K-NET,KiK-net,JMA 震度計観 測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応,日本地震工学会論文集,Vol4, No.4, pp.126-145, 2004.

- 5) Geo-Station ホームページ: https://www.geo-stn.bosai.go.jp/, 2019/4/16 閲覧
- 6) 三輪 滋,原 忠,沼田淳紀,村田拓海,三村佳織, 坂部晃子:丸太打設液状化対策の実施工地点におけ る表面波探査と微動観測,第50回地盤工学研究発表会 発表講演集,pp.1821-1822,2015.
- 7) Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki : New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2169p, 2010.
- Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki : A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, Geophysics, 69, pp.1535-1551, 2004.
- Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, pp.415-456, 1957.
- 長 郁夫,多田 卓,篠崎祐三:極小アレイによる新し い微動探査法:浅部地盤平均S波速度の簡便推定,物理 探査,Vol.61,No.6,pp.457-468,2008.
- 11) 太田 裕,後藤典俊:横波速度を推定するための実験式 とその物理的背景,物理探鉱, Vol.31, No.1, pp.8-17, 1978.
- 12) 小林喜久二,阿部康彦,植竹富一,真下 貢,小林啓美: 地震動初期微動部の上下動・水平動スペクトル振幅比の 逆解析,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造 B-I, pp. 317-318, 1995.
- 13) 狐崎長琅,後藤典俊,小林芳正,井川 猛,堀家正則, 斉藤徳美,黒田 徹,山根一修,奥住宏一:地震予測の ための深層地盤 P・S 波速度の推定,自然災害科学, Vol. 9, No.3, pp.1-17, 1990.
- 14) Y. Hisada : An Efficient Method for Computing Green's Functions for a Layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths (Part 2), Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No.4, pp. 1080-1093, 1995.
- 15) 安井譲他: 鯖江盆地の微動アレイ観測, 土木学会第
  66回年次学術講演会, pp.909-910, 2011.
- 地震ハザードステーション J-SHIS ホームページ: http://www.j-shis.bosai.go.jp/, 2019/8/10 閲覧.
- 17) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係,日本 地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- 18) 翠川三郎, 伊東佑記, 三浦弘之:兵庫県南部地震以 降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討, 日本地震工学会論文集, Vol.11, No.4, pp.34-47, 2011.

(Received August 31, 2019) (Accepted November 11, 2019)

### EVALUATION OF S-WAVE VELOCITY OF GROUND IMPROVED BY LOGS BASED ON MICROTREMOR ARRAY OBSERVATION AND ITS EFFECT ON EARTHQUAKE GROUND MOTION AND BUILDING DAMAGE

# Hayato NISHIKAWA, Masaho YOSHIDA, Toshiyuki ABURAYA, Masahiro ABURAYA, Yoshinari IUCHI, Yuichi UMEDA and Yoshinori NOMURA

In this study, we carried out microtremor array observation in improved and unimproved ground in order to verify S-wave velocity change by installing logs. Influence of the S wave velocity change on earthquake ground motion and building damage was investigated.

Firstly, phase velocity was evaluated by microtremor array observation, it shows that the phase velocity tends to increase in the improved ground. S wave velocities of subsurface ground are evaluated from the obtained phase velocity, increment of the S wave velocity of the improved ground was confirmed. Next, earthquake ground motion occurred by scenario earthquake and building damage were evaluated using empirical formulas based on the estimated S wave velocity structure, the earthquake ground motion and the building damage rate of the improved ground were smaller than those of unimproved ground.