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¹・吉田 雅穂²・油屋 敏行³・油屋 昌宏⁴・伊内 是成⁵ 梅田 祐一⁶・野村 吉範⁷

¹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

²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

³ 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

⁴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

5 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

⁶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

⁷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 1)~3). 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 4)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 ¹⁾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 ⁵⁾も示して

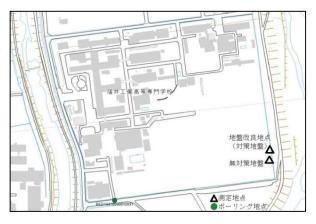


図-1 地盤改良地点(対策地盤)と無対策地盤 (文献5の図に加筆)

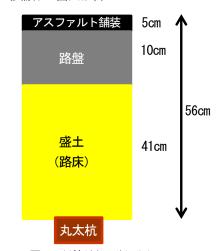


図-2 対策地盤の断面図

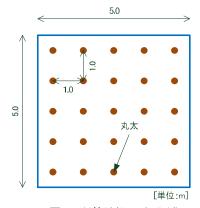


図-3 対策地盤の平面図 1)

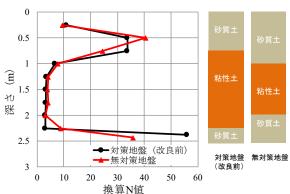


図-4 サウンディング試験結果 1)による換算 N 値と土質区分

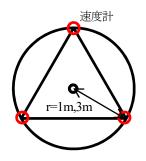


図-5 微動アレイ観測における速度計の配置

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 ¹⁾. 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 があるが、本研究では交通振動の計測 い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 2.0⁷⁾を用い、CCA 法 ⁸⁾ (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 ⁹⁾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 ¹⁰⁾.

BIDO Version 2.0⁷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-Station⁵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¹¹の式からS波速度を計算した。

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

 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 ρ (t/m³) が必要なことから, 以下の S 波速度との関係式 $^{12\lambda13}$ より値を求めた.

$$\rho = 0.67\sqrt{V_s} + 1.4\tag{2}$$

$$V_p = 1.11V_s + 1290 \tag{3}$$

式 (2) の V_s 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 Hisada¹⁴⁾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-Station⁵⁾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 11 をもとに地表から深さ 22 2.3m まで 32 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 12 5層目、 12 6層目と 12 7層目は既往研究 13 76参考に 13 86を参考に 12 87度 13 86を参考に 13 87度 14 87度 15 97度 15 97

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.

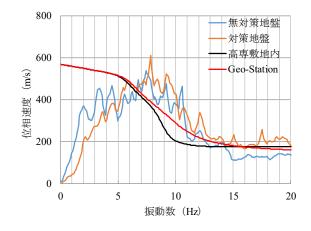


図-7 位相速度の観測値とボーリング柱状図に基づく理論値

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)	$\rho(t/m^3)$	$V_p(\text{m/s})$	V_s (m/s)
推定地盤	1	0.3	式(2)		推定対象 208 306
	2	1.0		式(3)	
	3	1.0		14(3)	
	4	1.0~3.0			
共通地盤	5	2.0	1.71	1521	208
	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

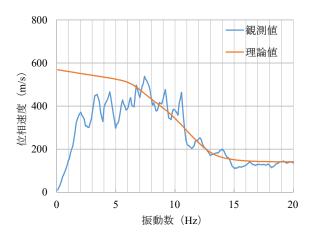
まず、地震ハザードステーション(J-SHIS) 16 において対象地点で予想されている最大の地震動を調べた結果、柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北部(M_w =7.0、ケース 1)の地震による地震動が対象地点で最も大きく、工学的基盤(S波速度=600m/s)における最大地動速度 PGV_b (両成分の最大値)は50cm/s であった。図-10 に断層モデルと工学的基盤の最大地動速度分布、図-11 に工学的基盤の速度波形を示す。

次に表層 30m の平均 S 波速度 V_{s30} 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_s に乗じることで、地表面の最大地動速度 PGV_s を求めた、地盤増幅度評価式 17 を以下に示す.

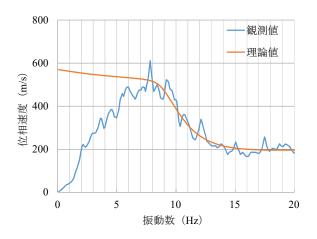
$$F_{\nu} = 2.367 - 0.852 \log V_{c30} \tag{4}$$

F、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 V_{s30}, PGV_b,



(1) 無対策地盤



(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)
	1	0.3	1.58	1368	70
推定	2	1.0	1.60	1390	90
地盤	3	1.0	1.77	1623	300
	4	2.0	1.62	1412	110
共通地盤	5	2.0	1.71	1521	208
	6	7.0	1.77	1630	306
	7	1	1.92	1956	600

(2) 対策地盤

	No.	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p(\text{m/s})$	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
共通 地盤	5	2.0	1.71	1521	208
	6	7.0	1.77	1630	306
	7	-	1.92	1956	600

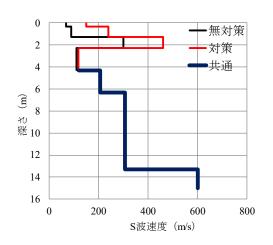


図-9 推定した S 波速度構造

PGV。を示す. 地表面の最大地動速度 PGV。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 *PGV*₅ を用いて,式 (5) の経験式 ¹⁸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.

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

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。

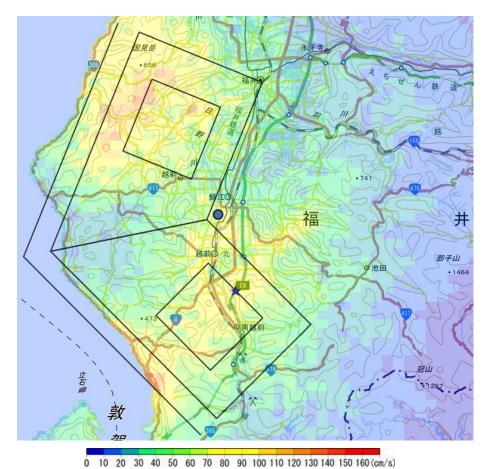
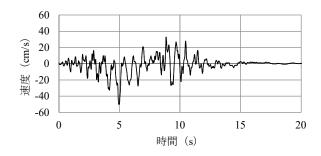
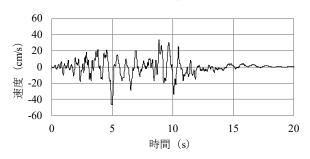


図-10 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北部の断層モデルと工学的基盤の最大地動速度分布(●:対象地点,★:断層の破壊開始点)16)







(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

	V _{S30} (m/s)	F_{ν}	PGV _b (cm/s)	PGV _s (cm/s)
無対策	309	1.76	50	88.1
対策	352	1.58	50	78.8

表-4 式(5)による全壊率と全半壊率

(1) 全壊率

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

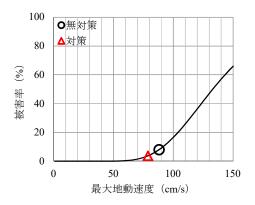
(2) 全半壊率

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

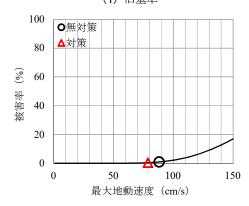
6. 結論

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、

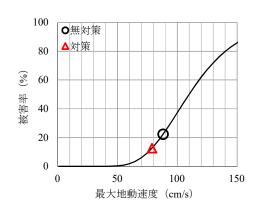


(1) 旧基準

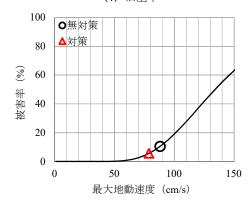


(2) 新基準

図-12 最大地動速度と全壊率の関係



(1) 旧基準



(2) 新基準

図-13 最大地動速度と全半壊率の関係

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

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, Vol.4, 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.
- 8) 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.
- 9) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthg. Res. Inst.*, 35, pp.415-456, 1957.
- 10) 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.
- 16) 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.