

丸太杭を利用した道路交通振動の軽減対策 に関する現場実験

吉田 雅穂¹・油屋 敏行²・油屋 昌宏³・伊内 是成⁴・梅田 祐一⁵
 久保 光⁶・西川 隼人⁷・野村 吉範⁸・林 泰正⁹・三田村 文寛¹⁰
 渡辺 仁一¹¹

¹ 正会員 福井工業高等専門学校教授 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

² 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

³ 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

⁴ 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

⁵ 正会員 デルタコンサルタント (〒910-0017 福井県福井市文京 7 丁目 8-17)
 E-mail: umeda@deltacon.co.jp

⁶ 正会員 福井県奥越土木事務所笛生川・浄土寺川ダム統合管理事務所 (〒912-0021 福井県大野市中野
 28-36-1)
 E-mail: h-kubo-1v@pref.fukui.lg.jp

⁷ 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 丁目 6 番 1 号)
 E-mail: nishikawa@fukui-ut.ac.jp

⁸ 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

⁹ 正会員 福井県工業技術センター (〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稻田 10)
 E-mail: y-hayashi@fklab.fukui.fukui.jp

¹⁰ 正会員 福井県工業技術センター (〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稻田 10)
 E-mail: f-mitamura@fklab.fukui.fukui.jp

¹¹ 楠技研 (〒910-3645 福井県福井市笛谷 7-158)
 E-mail: nagisa@nagisa-giken.com

軟弱地盤が広く分布する我が国では、道路の路床や路体の軟弱性に起因して路面の平坦性が低下したり交通振動が発生する場合があるため、基礎地盤の恒久的な対策を行うことが生活環境の保全やライフサイクルコストの低減につながる。著者らは、我が国の豊富な木材資源を有効利用するため、丸太杭を用いた軟弱地盤対策の技術開発を行っており、本研究ではこれを道路路体の軟弱地盤対策に適用し、その付加効果として交通振動の軽減効果を明らかにすることを目的としている。福井県小浜市における丸太杭工法による軟弱地盤対策の現場、ならびに、福井工業高等専門学校に整備した実験サイトにおいて道路交通振動の軽減効果に着目した現場実験を行った結果、丸太杭打設による地盤剛性の向上を確認し、地盤振動の周辺への伝搬が軽減される効果を明らかにした。

Key Words: road, traffic vibration, mitigation countermeasure, soil improvement, log, field experiment



図-1 対象地区



図-2 工事前の道路



図-3 工事中の道路



図-4 工事後の道路

1. はじめに

地球温暖化の緩和、土砂災害の防止、水源の涵養、生物多様性の保存、木材生産など、国土面積の3分の2を占める森林は、我が国の環境保全に極めて大きい役割を果たしている。一方、戦後、大量に造成された人工林は伐採時期を迎えており、「伐採→利用→植林→育成→伐採」というサイクルで森林を適切に管理することで環境保全が発揮されるため、様々な分野において木材の利用拡大を図ることが求められている。

土木分野における新たな木材利用法においては、軟弱地盤対策として丸太を地中に打設する丸太杭工法が提案されている¹⁾²⁾³⁾。いわゆる、古くからの技術として利用されてきた木杭である。主に小規模構造物を対象として、粘性土地盤では丸太を支持杭または摩擦杭として利用し、また、砂質土地盤では丸太を改良材として地盤に圧入することで、密度増大を原理とした地震時の液状化対策⁴⁾として利用されている。本研究では、この丸太杭工法を道路路体の軟弱地盤対策に適用するとともに、その付加効果として交通振動の軽減効果の有無を明らかにすることを目的としている。

道路交通振動の発生原因として、路面の平坦性の低下、路床の支持力不足、交通荷重の超過などが考えられる。その対策として、表層の舗装打ち替えによって平坦性を回復させることが一般的であるが、効果の持続性に課題

がある。一方、路床の強化は恒久的な対策となるが大規模な工事が必要であるため困難な場合が多い。しかし、軟弱地盤が広く分布する我が国では路面の平坦性の低下が、その基礎となる路床や路体の軟弱性に起因することが多いため、丸太杭工法による恒久的な対策を行うことでライフサイクルコストの低減を図ることが期待される。

本研究では、まず、丸太杭工法を道路路体の軟弱地盤対策に適用した福井県小浜市における現場施工実験の概要を示す。つぎに、同現場で実施した常時微動計測と車両走行実験の結果を示す。そして、独立行政法人国立高等専門学校機構福井工業高等専門学校（以下、福井高専と称す。）の陸上競技場内に整備した、丸太杭工法に関する車両走行実験、振動伝播実験、耐朽性実験を実施するための実験サイトの概要を述べ、同現場で実施した実験結果を示す。

2. 福井県小浜市における現場実験

(1) 現場施工実験

2011年7月に福井県小浜市栗田の県道220号羽賀東小浜停車場線の道路拡幅工事において、不同沈下防止とボックスカルバートとの段差解消を目的として丸太杭を用いた軟弱地盤対策の試験施工が行われた⁵⁾⁶⁾。図-1の黄色丸印が対象地区であり、図-2は工事前、図-3は丸太

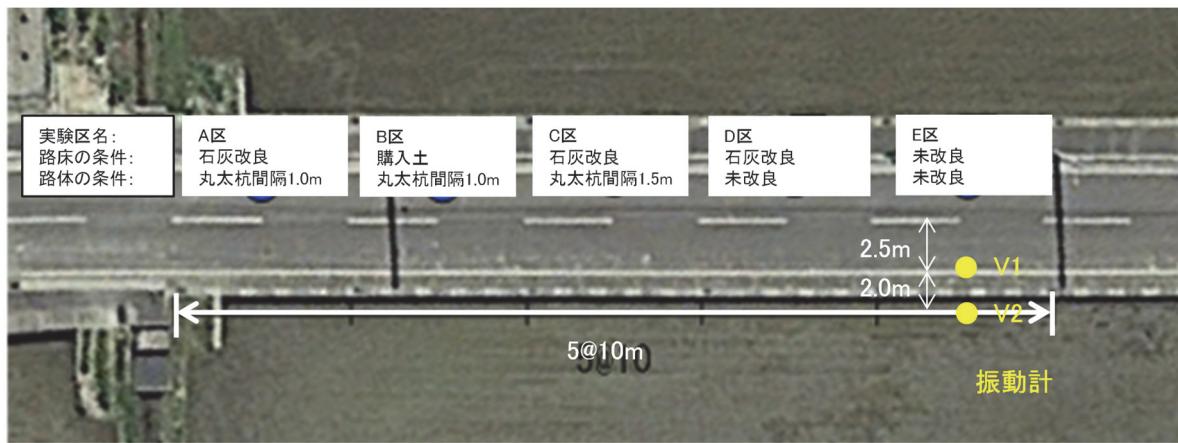


図-5 地盤改良条件と地盤振動の測定位置

表-1 各実験区の卓越周期

実験区	地盤改良条件		卓越周期 (s)
	路床	路体	
A区	石灰改良	丸太杭間隔1.0m	0.38
B区	購入土	丸太杭間隔1.0m	0.38
C区	石灰改良	丸太杭間隔1.5m	0.36
D区	石灰改良	未改良	0.43
E区	未改良	未改良	0.45

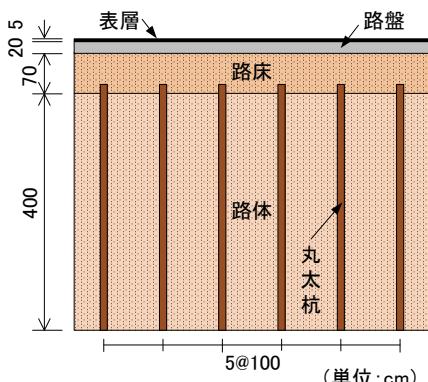


図-6 道路構造の概要 (A区, B区)

杭を打設した工事中、図4は工事後の道路の状況である。丸太は末口直径 0.12m で長さ 4m の福井県産スギの間伐丸太を用い、路体に打設する丸太杭の打設間隔や路床の地盤改良の種類を変えた図5に示す A 区から E 区の 5 通りの実験区（1 区 10m で計 50m）を設け、丸太杭打設前後の地盤特性を調査した。各区の地盤改良条件を表-1、道路構造の概要を図6に示す。なお、施工後約 8 年経過した 2019 年 5 月時点において道路の路面性状に問題は確認されていない。

(2) 常時微動計測

2017 年に同現場において常時微動計測を行った。振動計 ((株)東京測振、VSE-15D-6) を 3 台用い、水平 2

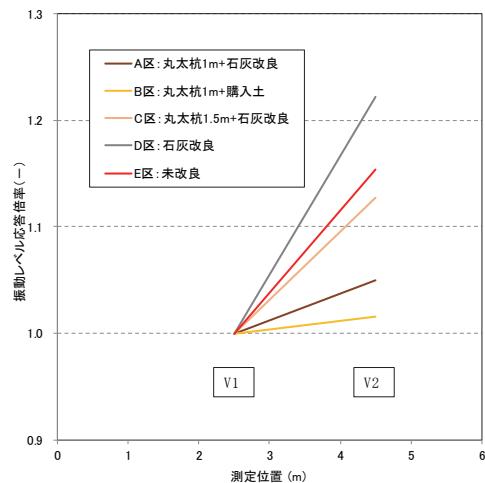


図-7 地盤振動の測定結果

成分と上下 1 成分の速度を測定機 ((株)東京測振、SPC-52) で記録した。測定時間は 10 分、サンプリング振動数は 100Hz である。表-1 に H/V スペクトルより求めた各改良区の卓越周期を示す。同表より未改良区と比較して丸太杭を打設した改良区の周期が小さく、地盤剛性の向上が確認できる。

(3) 車両走行実験

2017 年 12 月に同現場において車両走行実験を行った。走行車両は普通自動車（日産自動車(株)、TC-VHNY11、車両重量 1260kg）であり、車両が時速 40km で通過した時の地盤振動を前述の振動計で計測した。図5に示す車道中心より 2.5m (V1) と 4.5m (V2) 離れた 2 地点の走行時の鉛直速度の最大値を測定し、振動レベル (dB) に変換した。V1 は道路のアスファルト舗装上、V2 は V1 より約 1m 低い位置にある稻刈り後の田圃の土の上に設置した。

図-7 に測定結果を示す。同結果は振動源の入力レベ



図-8 福井高専の実験サイト

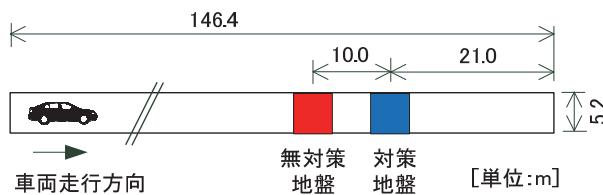


図-9 サイトA

ルのばらつきを除去するため、V2 の値を振動源に近い V1 の値で除して基準化した結果であり往復測定の平均値である。同図よりすべての改良区において 4.5m 地点では応答倍率が 1.0 を超えており、道路振動が増幅して周辺地盤に到達していることがわかる。しかし、丸太を 1m 間隔で打設した場合は応答倍率が小さくなっている。丸太を密に打設することで地盤振動の周辺への伝播が軽減されている効果が確認できる。

道路交通振動の伝播経路対策には、地盤改良で道路の剛性を高める方法と、経路となる地中に防振壁を設置する主に 2 種類が提案されている。同現場で想定される防振効果は、前者に関しては丸太杭を液状化対策に利用した先行研究⁴⁾で明らかにしている、軟弱地盤をより剛性の高い丸太杭に置換する効果や丸太杭打設により杭間地盤が密度増大する効果が考えられる。一方、後者に関しては波動インピーダンスが相対的に大きい丸太杭で振動を遮断する効果が考えられる。したがって、同図の丸太杭打設地盤の結果は、両効果が各々または相乗して作用した影響と考えられる。

一方、路床の違いに着目すると、未改良 (E 区) より石灰改良のみの場合 (D 区) が、また、丸太杭 1m で路床が購入土 (B 区) より石灰改良 (A 区) の場合の方が応答倍率が大きい傾向が確認でき、路床材料も道路振動に影響を与えることを示唆している。

3. 福井高専に整備した実験サイト

(1) 実験サイトの概要

前章において丸太杭工法施工地盤における道路交通振

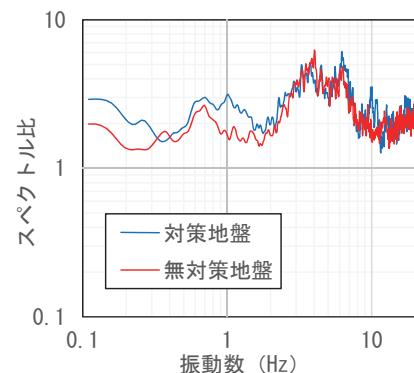


図-10 H/V スペクトル比

動に関する現場実験の結果を示し、地盤改良によって地盤剛性が向上し、丸太杭によって交通振動の周辺への伝搬が軽減される効果を示した。しかし、同現場は公道であるため定期的な実験の実施が困難である。

そこで、図-8 に示す福井高専内に実験サイトを整備した。同校は日野川と吉野瀬川に挟まれた氾濫原性低地に立地しており、敷地内の陸上競技場内に A, B, C の 3 つの現場実験サイトを 2018 年 9 月から 12 月に整備した。サイト A は車両走行実験用であり既存のアスファルト舗装道路を利用した。また、400m トラック内のサイト B は丸太杭打設地盤の振動伝播特性と支持力特性の調査用、舗装道路東側のサイト C は丸太杭の健全性の経年変化の調査用である。

丸太杭は福井県産スギの間伐丸太を利用し、末口直径 0.12m、長さ 2m、先端先付け有りの条件で 50 本発注した。そのうち 40 本は ACQ 加圧注入で防腐処理した丸太、10 本は無処理で皮を剥いた丸太であり、納品時の直径の平均値は、前者が末口直径 129mm と元口直径 156mm、後者は末口直径 127mm と元口直径 151mm であった。

a) サイト A の概要

サイト A では陸上競技場内の既存のアスファルト舗装道路 (幅 5.2m、長さ 146.4m) を利用し、図-9 に示す車両走行実験用の道路を整備した。まず、道路内に 5m 四方の対策地盤と無対策地盤の中心間隔が 10m となるよう位置決めした。ここで、両地盤の工事前に行った常時微動計測の結果より求めた H/V スペクトル比を図-10 に示す。同図より、両地点のスペクトル比に細かな違いがあるものの、ピークの位置や全体的な形状に大きな差異がないことから、両地盤の構造に大きな違いはないと考えられる。以下、工事の手順を示す。まず、両地盤の舗装を剥ぎ取り (図-11)、対策地盤には防腐処理したスギの丸太杭 (図-12) を 1m 間隔の正方形配置で計 25 本を打設した (図-13)。ここで、対策地盤近傍で事前に実験を行ったスウェーデン式サウンディング試験 (図-14)



図-11 補装剥ぎ取り後の様子
(手前：無対策，奥：対策)



図-12 丸太杭

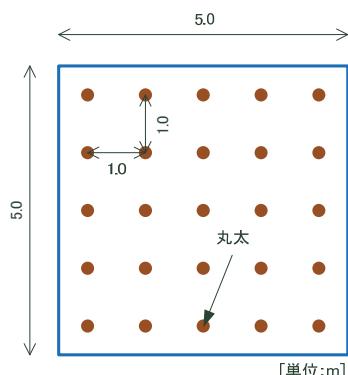


図-13 丸太杭の打設位置（サイト A）

と試掘（図-15）の結果によれば、深度 0.5m～2.5m に軟弱な粘性土が存在していたため、この部分に長さ 2m の丸太を打設（図-16）することに決定した。また、打設間隔は前章の現場実験に準拠し 1m とした。設計マニュアル¹⁴⁾に基づき算出した丸太杭上部の改良層厚は 0.37m であり、最低厚 0.5m を下回っていたが、常時の自動車交通がないため計算値の 0.37m を採用し、打設後に現場発生土を充填した。その後、対策と無対策の両地盤に粒度調整碎石 M-30 で厚さ 0.1m の路盤を構築し、その上に厚さ 0.05m のアスファルト舗装を行った。その結果、丸太頭部の位置は地表面から 0.56m の位置となった。

b) サイト B の概要

サイト B では陸上競技場の 400m トラック内に図-17 に示す 5m 四方の地盤を位置決めし、丸太杭を 1m 間隔

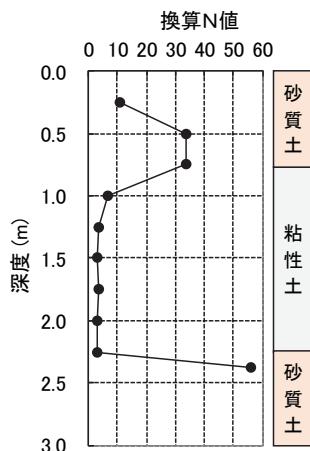


図-14 サウンディング試験結果



図-15 地盤の試掘



図-16 丸太杭の打設

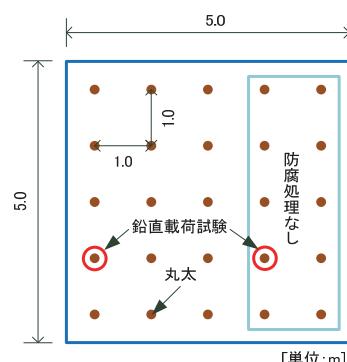


図-17 丸太杭の打設位置（サイト B）



図-18 サイトBと丸太杭



図-20 車両走行実験の様子



図-19 サイトCの丸太杭

の正方形配置で杭頭が地表面から 0.3m の位置となるよう計 25 本打設した。同サイトでは車両走行とは異なる様々な振動源に対する伝播特性を調査する。なお、15 本の丸太は防腐処理あり、他の 10 本は無処理であり（図-18），数年後に丸太を掘り出して両者の健全性を調査する。また、2 本の丸太杭には打設後に鉛直載荷試験を行っており、数年後に同試験を行って鉛直支持力の経年変化を調査する。

c) サイトCの概要

図-19 に示す防腐処理丸太と無処理丸太（末口直径 0.12m, 長さ 1m, 先端先付けなし）を各 6 本用意し、目視評価とピロディン試験による健全性調査⁷⁾を行った後に、サイト A 東側地盤に 0.5m が地中で 0.5m が気中となるように打設し、数年後に掘り出して同調査を行い、丸太杭の健全性の経年変化を調査する。

(2) 車両走行実験

2019 年 3 月にサイト A において車両走行実験を行った。走行車両はユニック車（いすゞ自動車（株）、UFTR32L1、車両重量 6370kg）であり、コンクリートブロックを荷台に積んで後軸荷重 90kN に調整した車両が、対策地盤および無対策地盤を時速 40km で通過した時の地盤振動を計測した。また、路面に人工段差（直径 15mm の電線）を設けて、強制振動を発生させる走行実験も行った。さらに、両地盤の中心位置で小型 FWD 試験機（（株）東京測器研究所、KFD-100A）の重錐を落下させた場合（荷重約 16kN）の地盤振動も計測し、車両走行実験の結果と比較検討した。

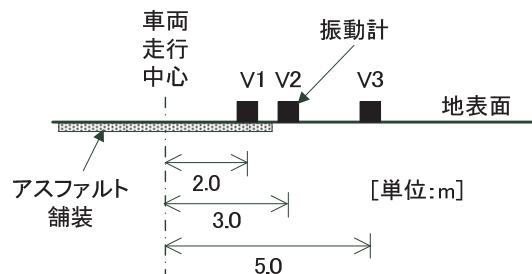


図-21 測定概要

図-20 に車両走行実験の様子、図-21 に地盤振動の測定概要を示す。車両走行中心より 2m (V1), 3m (V2), 5m (V3) 離れた 3 地点に振動計（リオン（株）、VM-83, LS-10C）を設置し、走行時の鉛直加速度の最大値を測定し、振動レベル (dB) に変換した。V1 はアスファルト舗装上であり、V2 と V3 は陸上競技場の土の上である。また、小型 FWD 試験機の場合は車両走行中心の舗装面上に重錐を落下させて、同様に 3 地点の振動を測定した。

図-22 に測定結果を示す。同結果は同一条件の 3 回の測定の平均値である。振動源に近い V1 の結果より、小型 FWD、段差ありの車両走行、段差なしの車両走行の順に振動レベルが大きいことがわかる。環境庁の振動規制法によれば、道路交通振動の規制基準は第 2 種区域の昼間で 70dB 以下であり、全ての条件でその値を上回る振動レベルであるため振動外力としては充分である。V2 では全ての条件において対策地盤の振動が無対策地盤を下回っており、V1 に対する V2 の減衰値は対策地盤で約 5dB、無対策地盤で約 2dB と対策地盤の方が減衰効果が大きい。しかし、離れた V3 ではそれが約 10dB と 9dB となり差が小さくなっている。

つぎに、振動源の入力レベルのばらつきを排除するため、V2 と V3 の値を振動源に近い V1 の値で除して基準化した結果を図-23 に示す。同図より、全ての条件において対策地盤の振動レベルが無対策地盤を下回っていることがわかる。また、小型 FWD 試験機を用いた実験でも車両走行実験と同様の結果が得られることが明らかとなつた。

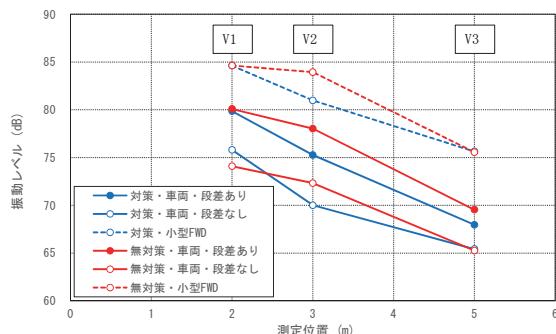


図-22 振動レベルの分布

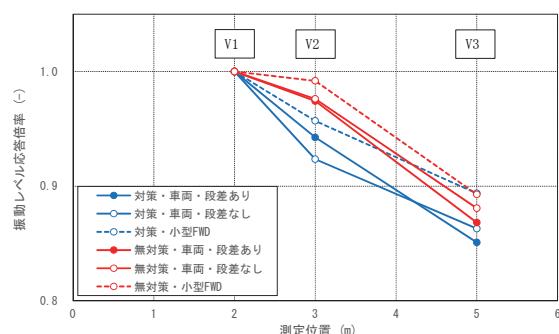


図-23 基準化した振動レベルの分布

4. おわりに

丸太杭工法による軟弱地盤対策を道路の路体に適用することを提案し、その付加効果として道路交通振動の軽減効果に着目した現場実験を、福井県小浜市の県道と福井高専に整備した実験サイトで行った。その結果、丸太杭打設による改良によって地盤剛性が向上し、交通振動の周辺への伝搬が軽減される効果を明らかにした。今後は、福井高専に整備した実験サイトを利用して、車両走行実験、振動伝播実験、耐朽性実験等を行い、振動軽減メカニズムを明らかにすると共に、丸太杭工法の高度化を目指した研究を実施していく。

謝辞：本研究は平成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、福井県木材利用研究会土木系分科会の協力により実施した。車両走行実験については土木研究所道路技術研究グループ舗装チームの寺田剛氏にご指導頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福井県木材利用研究会, 福井県雪対策・建設技術研究所：丸太杭工法を用いた軟弱地盤対策の設計・施
- 2) 佐賀県県土づくり本部, 佐賀県土づくりコンサルタント協会, 佐賀県土木建築技術協会：水路用ボックスカルバートの木杭一底盤系基礎～設計マニュアル（改訂版）～, 2009.
- 3) 長野県林務部, 長野県木材共同組合連合会：丸太基礎杭設計マニュアル, 24p., 2014.
- 4) 吉田雅穂, 沼田淳紀, 上杉章雄, 久保光, 宮島昌克：スギ丸太を用いた液状化対策工法の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, pp.43-44, 2008.
- 5) 久保光, 吉田雅穂, 本山寛, 沼田淳紀：軟弱粘性土地盤での丸太打設による丸太間強度増加の実測, 第 47 回地盤工学研究発表会平成 24 年度発表講演集, pp.995-996, 2012.
- 6) 久保光, 吉田雅穂, 沼田淳紀：丸太を用いた軟弱粘性土の地盤補強技術に関する現場実験, 第 48 回地盤工学研究発表会平成 25 年度発表講演集, pp.1163-1164, 2013.
- 7) 土木学会木材工学委員会地中使用の耐久性評価に関する研究小委員会：地中・水中使用木材の健全性調査の手引き, 12p., 2019.

(Received August 31, 2019)

(Accepted November 11, 2019)

FIELD EXPERIMENTS ON MITIGATION COUNTERMEASURES OF ROAD TRAFFIC VIBRATION BY USING LOG PILING

Masaho YOSHIDA, Toshiyuki ABURAYA, Masahiro ABURAYA, Yoshinari IUCHI,
Yuichi UMEDA, Hikaru KUBO, Hayato NISHIKAWA, Yoshinori NOMURA,
Yasumasa HAYASHI, Fumihiro MITAMURA and Hitokazu WATANABE

To keep a flatness of road surface by repaving the road is countermeasures commonly used to mitigate the road traffic vibration. However, an unevenness of road surface is usually caused by softness of filled-up ground under a roadbed. Therefore, the permanent countermeasures by improving its soil condition should be necessary to reduce the life cycle cost of road maintenance. An application of a log piling method to reinforce the soft ground was proposed to improvement of filled-up ground of road. An outline of experimental field which was constructed at the prefectoral road in Obama city and at National Institute of Technology, Fukui College to clarify effectiveness of this method was explained in this study. As a result, it was clarified that rigidity of ground improved by log piling was increased, and propagation of traffic vibration to the surroundings was reduced.