

丸太によって補強された地盤における 4m×4mの平板載荷試験

沼田 淳紀¹・村田 拓海²・佐々木 修平³・藤野 一⁴
川崎 淳志⁵・杉山 耕平⁶

1 正会員 飛島建設(株) 木材・地盤ソリューション G (〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15)

E-mail: atsunori_numata@tobishima.co.jp

2 正会員 飛島建設(株) 技術研究所(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

E-mail: takumi_murata@tobishima.co.jp

3 非会員 住友林業(株) 技術商品開発部 (〒100-8270 東京都千代田区大手町 1-3-2 経団連会館)

SASAKI_shuuhei@star.sfc.co.jp

4 非会員 住友林業(株) 技術商品開発部 (〒100-8270 東京都千代田区大手町 1-3-2 経団連会館)

FUJINO_hajime@star.sfc.co.jp

5 非会員 ミサワホーム(株) 技術部 (〒163-0833 東京都新宿区西新宿 2-4-1)

atsushi_kawasaki@home.misawa.co.jp

6 非会員 ミサワホーム(株) 技術部 (〒163-0833 東京都新宿区西新宿 2-4-1)

Kouhei_Sugiyama@home.misawa.co.jp

軟弱地盤に丸太を打設し、地盤と丸太で補強した複合地盤と無対策地盤において4m×4mの平板載荷試験を実施した。合わせて、別途実施された丸太単体に対する押し込み試験結果を参考に、地盤と丸太の複合地盤の極限支持力は、地盤から丸太部の面積を引いた部分の極限支持力と、丸太の極限鉛直支持力に本数を乗じた丸太部の支持力の和として求められることを明らかにした。

Key Words: composite ground, large-scale, log, plate load test, soft ground

1. はじめに

杭と言えばかつては洋の東西を問わず木杭であった。しかし、国内では1950年頃より、森林資源が枯渇する一方で化石燃料への依存度が高まり、木杭はコンクリート杭や鋼管杭へと替わり¹⁾、各種基準類からも姿を消した²⁾。この間、経済は大きく発展し寿命も延びたものの³⁾、人類は地球の共進化に逆行する存在となり⁴⁾、特に、気候変動は地球規模の深刻な問題となった。

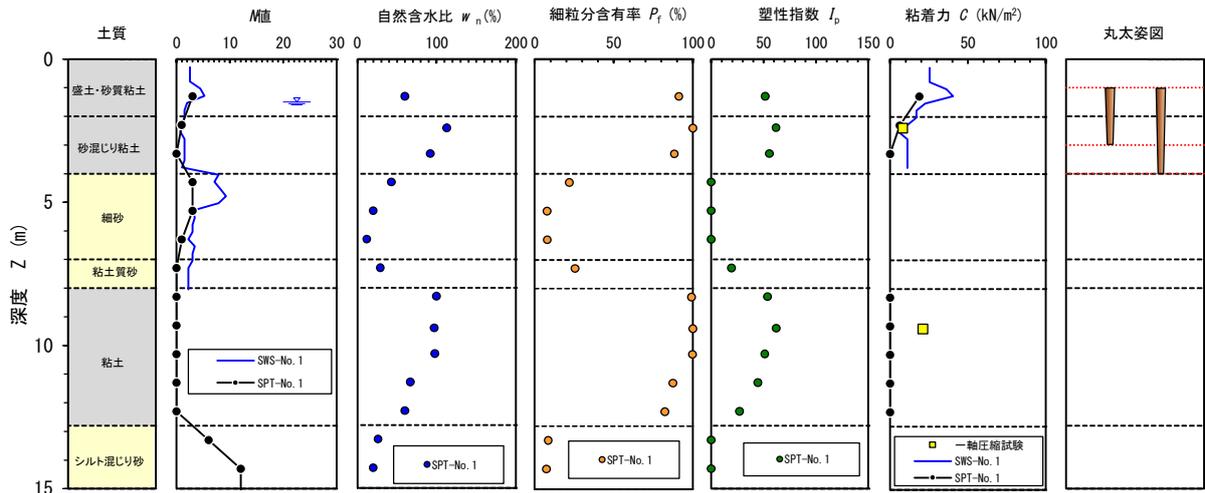
このような中、持続可能な材料である木材の利用が再認識されている。既に、政策的誘導もあり、住宅分野での2018年の木造率は、新設住宅全体で57%、戸建て住宅で90%であり、木材の活用が進みつつある。一方、土木分野における木材利用は、年間400万m³のポテンシャルがある⁶⁾と言われながら、利用の拡大が実感できない。土木分野の木材利用方法の一つとして、液状化しやすい地盤や粘性土を主体とする軟弱地盤に丸太を打設し、液状化対策や軟弱地盤対策とする工法が近年開発され実用化されている⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。これらは、丸太を長期間、

かつ、大量に使用可能であることから、木材の利用拡大、それによる林業再生および気候変動緩和への貢献の期待が高まりつつある。

軟弱地盤では地下水位が浅く、このような地盤への丸太打設は、地下水位以深では酸素が不足するので丸太は腐朽や蟻害を起こすことなく長期的に安定なため、コンクリートや鉄に劣ることなく、むしろ有効な使用方法だといえる。一方で、これらは、実施例がまだ少なく、設計方法や施工方法に対して、より信頼性や合理性を高める必要がある。

軟弱地盤に丸太を打設した場合、コンクリート杭や鋼管杭よりも支持力が大きくなることが知られている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。このような力学的な意味でも、軟弱地盤に丸太を打設し地盤を補強することは意義がある。これをべた基礎構造物に対して実施した場合、構造物の荷重は丸太と地盤が支えることが明らかなので、地盤と丸太の複合地盤としての支持力を考えるべきである。

そこで、地盤と打設した丸太の複合地盤の極限支持力について検討を行った。このような複合地盤の極限支持力を求めるには、大型の載荷板を用



※SWS：スウェーデン式サウンディング試験，SPT：標準貫入試験

図-1 試験地点における地盤調査結果の深度分布

いた平板載荷試験が必要になる。そこで、4m×4mのスラブを用いて平板載荷試験を実施した。本論文では、その結果を示すとともに、複合地盤の極限支持力を、地盤と丸太の支持力により求めることを試みる。

2. 地盤概要

試験は、筑紫平野の佐賀低平地に位置する佐賀県佐賀市で実施した。図-1に、試験地点における地盤調査結果の深度分布を示す。表層から深度約2mの砂質粘土の盛土の下位には、N値=0~3の軟弱層がGL-12.8mまで存在し、途中GL-4.0~7.0mに厚さ約3mのN値=1~3の軟弱な細砂層を挟む。GL-12.8mの下位には、N値=6~12のシルト混り砂層が存在する。軟弱な粘性土中に挟まれた細砂層は、含水比や細粒分含有率が低く非塑性である。これに対し、細砂層上位の砂混り粘土層や細砂層下位の粘土層は自然含水比や細粒分含有率が高く高塑性である。図中には、スウェーデン式サウンディング試験(SWS)結果とシンウォールチューブサンプリング(TS)によって採取した地盤の状態から乱れの少ない土試料の一軸圧縮試験結果より求めた粘着力も示した。なお、SWS結果からのN値への換算、SWSやN値から粘着力cへの換算は、(1)式¹⁵⁾、(2)式¹⁵⁾、(3)式¹⁶⁾、(4)式¹⁵⁾を用いた。

$$\text{砂質地盤： } N=2W_{sw}+0.067N_{sw} \quad (1)$$

$$\text{粘土質地盤： } N=3W_{sw}+0.050N_{sw} \quad (2)$$

$$c = \frac{12.5N}{2} \quad (3)$$

$$c = \frac{1}{2}(45W_{sw} + 0.75N_{sw}) \quad (4)$$

ここで、 W_{sw} ：SWSの荷重の大きさ (kN)

N_{sw} ：SWSの貫入量1m当たりの反回転数 (回)

N ：SPTにより求められたN値 (回)

なお、当該地点では、地表面付近に改良剤により固化したと考えられる硬い層が存在し、試験に影響を与えると考えられたため、表層約2mをバックホウで掘削・攪拌し、その後掘削した土で埋戻した。

3. 実験概要

試験は、図-1に示した地盤に丸太を打設し、4m×4mの大型の鉄筋コンクリート製のスラブ(以下、単に「スラブ」と呼ぶ)を作製し、平板載荷試験を実施した。表-1に、試験ケースを示す。

使用した丸太は、呼び径末口0.18mで長さが2mと3mの佐賀県産材のスギで、皮を剥ぎ両端面が平坦な生材を用いた。丸太の先端部は、厚さ3mの細砂層に届くものと、届かないケースを設定した。

図-2に、試験地点の平面図を示す。現地のスペースの都合上、スラブとスラブの距離は2m程度である。図中には、実施したSWS、標準貫入試験(SPT)、TSの位置も併記した。スラブ間の距離2mは、決して十分な距離とは言えないが、現場の制限の範囲内で、可能な限り広くとった。

図-3に平板載荷試験の平面図と断面図を示す。丸太打設は、リーダー付き装置を用いて、地表面より直接圧入し、丸太頭部が地表面より深さ1mの位置で止めた。その後、丸太頭部に丸太が生物劣化を生じないように、空気の遮断を目的として、土質系材料の被覆土を約3kg投入し、丸太頭部を十分被

表- 1 試験ケース

ケース番号	樹種	丸太						スラブ下丸太		地盤種別*		備考
		長さ L(実測値) (m)		末口直径 D _T (実測値) (m)		元口直径 D _B (実測値) (m)		本数 n (本)	打設間隔 B (m)	丸太先端	丸太周面	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差					
L00B00	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	原地盤
L02B18	スギ	2.00	0.011	0.178	0.0103	0.198	0.0248	9	1.8	C	C	充填材(1m)+ 補覆土+丸太
L03B18	スギ	3.01	0.008	0.183	0.0053	0.207	0.0092	9	1.8	S	C	充填材(1m)+ 補覆土+丸太

※S：砂質地盤，C：粘土質地盤

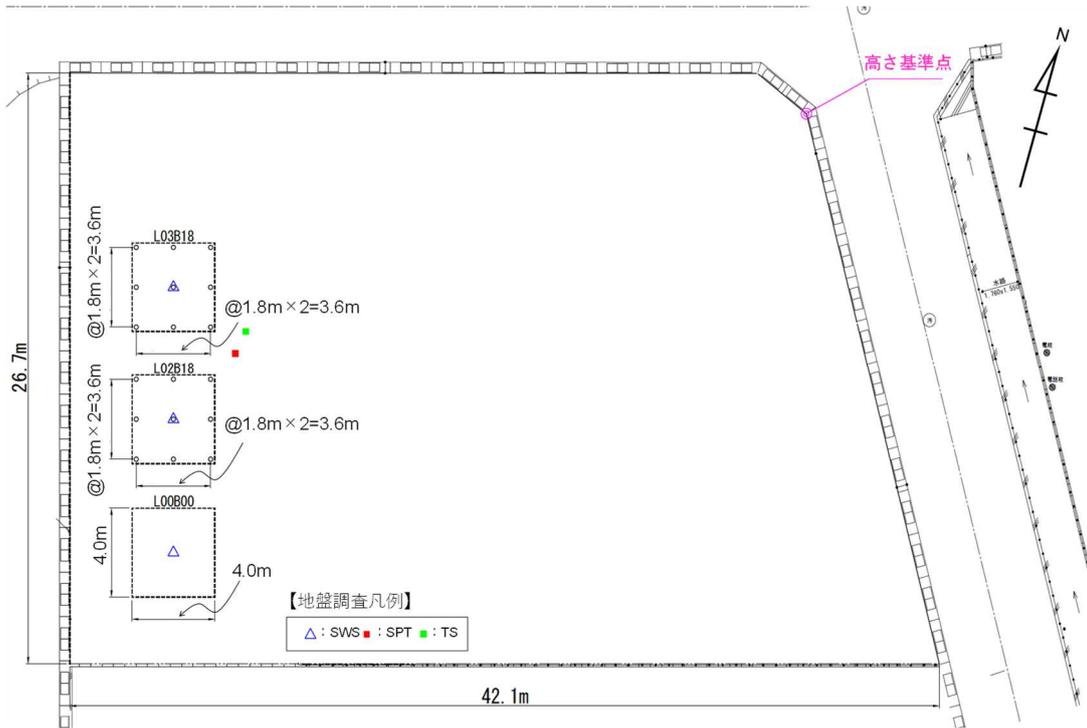


図- 2 試験地点平面図

覆できるように満遍なく突固め、丸太頭部をキャッピングした。さらに、頭部にできた孔には碎石を充填し、パイプレータで締固めた。

スラブの下には、一般戸建て住宅基礎における地盤補強で比較的長めの補強間隔として一間を想定し、9本の丸太を1.8m間隔で配置した。丸太打設後、地盤表面に厚さ80mmの碎石を敷き、型枠を組みシングル配筋で鉄筋を配置した後、生コンを打設し、縦4m×横4m×厚さ0.21mの鉄筋コンクリート製のスラブを作製した。スラブには、四隅、各辺の中央、スラブの中央部に鉤を取り付け、この鉤をレベル計測することで平板の沈下量を計測した。図- 2に、レベル計測を行った高さ基準点の位置を併記した。スラブからは凡そ40m程度離れている。丸太打設後、約1ヶ月養生し平板載荷試験を実施した。

平板載荷試験は、スラブの上に1.5m×6.0m×厚さ22mmで質量1.6tの敷き鉄板を積み上げ、スラ

ブを載荷した。この方法にしたのは、スラブに局所的な荷重がかからず、地盤に様な載荷を可能にするためである。写真- 1に、敷鉄板による載荷状況を示す。載荷は、目標とする荷重を8段階以上に分割し、敷き鉄板を積み上げた。各段階は、敷き鉄板の積み上げと放置時間で30分から1時間を基本とし、4段階目付近では2時間、8段階目付近で一晩放置し翌日載荷を再開した。各段階では、敷き鉄板を積み上げた後に、少なくとも5、10、20、30分後にスラブのレベル計測を行った。

4. 平板載荷試験結果

図- 4に、平板載荷試験結果の一例(L03B18)を示す。載荷圧力には、スラブの自重も加えた。沈下量は、載荷圧力が大きくなると収束せず、一晩で約40mmの沈下が生じた。これより、沈下量の中

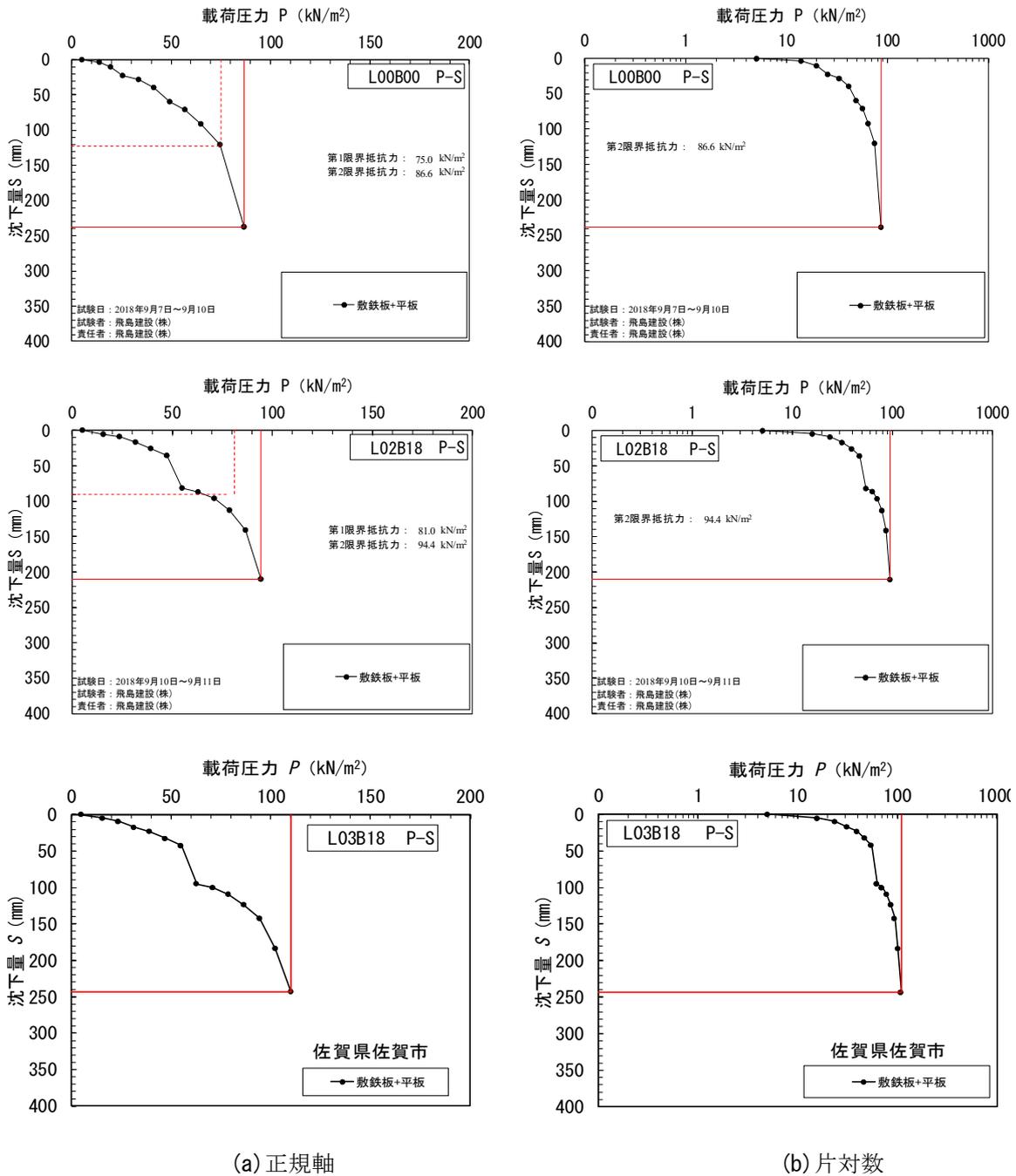


図-5 平板載荷試験による載荷圧力と沈下量の関係

いるケース (L03B18) は位置せず、このケースの場合の方がより大きな支持力となることがわかる。

砂の締固め杭¹⁷⁾にならぬ検討した。

地盤と丸太の複合地盤における極限支持力 q_u は、(5)式より求めた。

5. 地盤と丸太の複合地盤における極限支持力

L00B00 のケースで得られた結果は、原地盤の極限支持力なので、丸太を打設したケースの極限支持力との差分は、丸太を打設して地盤が補強された効果だと言える。そこで、別途単体丸太について同じ地点で実施された押し込み結果¹⁴⁾を用いて、地盤と丸太の複合地盤における極限支持力について、

$$q_u = q_{Gu}(1 - a_s) + nR_{wu}/A \quad (5)$$

ここで、 q_{Gu} : 地盤の極限支持力(kN/m²)
 n : スラブ直下の丸太本数(本)
 A : スラブの底面積(m²)
 a_s : 改良率(= A_w/B^2)
 A_w : 丸太末口断面積(m²)
 B : 丸太打設間隔(m)
 R_{wu} : 丸太の極限鉛直支持力(kN)

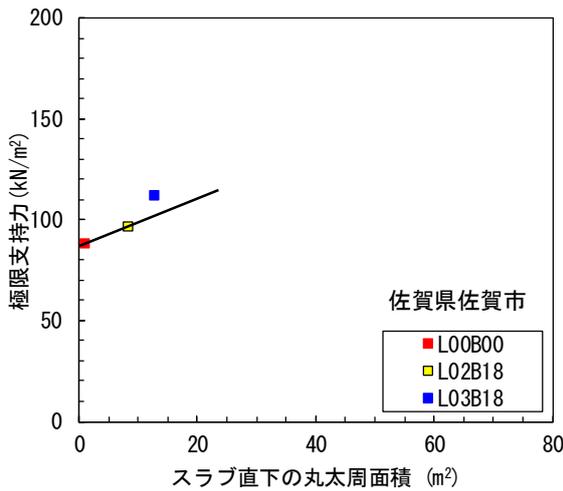


図- 6 スラブ直下の丸太の周面積と極限支持力の関係

図- 7 に、(1)式より求めた極限支持力と平板載荷試験より求めた極限支持力の比較を示す。 q_{Gu} は、原地盤で実施した L00B00 より求めた地盤の極限支持力、 R_{wu} は、別途求めた丸太単体の押し込み試験より求められた丸太の極限鉛直支持力である。

L02L18 も L03B18 の両ケースともほぼ図中の 45 度の線の近傍に分布し、地盤と丸太の複合地盤における極限支持力は、地盤から丸太部の面積を引いた部分の極限支持力と、丸太の極限鉛直支持力に本数を乗じた和として求められることがわかる。

スラブを剛な杭で直接支えた場合には、荷重は杭のみで支えることになる。一方、今回の実験のように丸太頭部とスラブに距離がある場合、丸太の鉛直支持力が寄与しなければ、地盤のみの支持力に支配されることになる。しかしながら、地盤と丸太の複合地盤による平板載荷試験の結果は、どちらでもなく、地盤の支持力と、丸太の深さ方向から得られる抵抗値の合計値である鉛直支持力との和として求められることが明らかになった。

6. まとめ

- (1) 地盤と丸太の複合地盤の極限支持力は、スラブ直下の丸太の周面積の合計値が大きいほど大きくなるが、丸太先端部が砂層に届いている場合はより大きな極限支持力が得られる。
- (2) 地盤と丸太の複合地盤の極限支持力は、地盤から丸太部の面積を引いた部分の極限支持力と、丸太の極限鉛直支持力に本数を乗じた和として求めることができる。

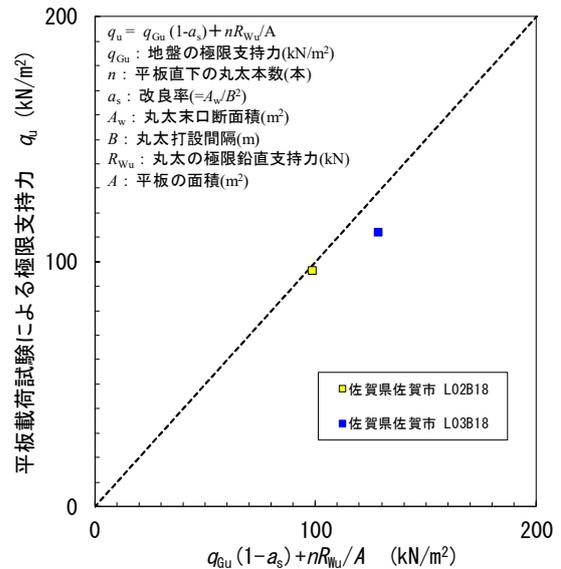


図- 7 $q_{Gu}(1-a_s) + nR_{wu}/A$ より求めた極限支持力と大型平板載荷試験より求めた極限支持力の比較

参考文献

- 1) 沼田淳紀, 上杉章雄: 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について, 第 14 回地球環境シンポジウム, 土木学会, pp.97-102, 2006.8.
- 2) 沼田淳紀, 吉田雅穂, 濱田政則: 木材による 1964 年新潟地震における液状化対策事例, 木材学会誌, Vol.55, No.5, pp.305-315, 2009.
- 3) 小宮山宏, 山田興一: 新ビジョン 2050, 日経 BP, 305p., 2016.10.
- 4) 太田猛彦: 森林飽和, NHK 出版, 252p., 2012.7.
- 5) 林野庁: 第 3 章第 2 節木材利用の動向, 令和元年度森林・林業白書, pp.177-189, 2020.6.
- 6) 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会, 土木学会木材工学委員会: 2009 年度土木における木材の利用拡大に関する横断的研究报告書, pp.63-74, 2010.3.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 杭網(パイルネット)工法設計・施工の手引き, 33p., 1987.9
- 8) 日本建築総合試験所: 環境パイル工法(改訂 2), 建築技術性能証明評価報告書, 122p., 2011.6.
- 9) 日本建築総合試験所: LP-LiC 工法, 建築技術性能証明評価報告書, 128p., 2013.12.
- 10) 先端建設技術センター: 丸太打設液状化対策&カーボンストック工法, 先端建設技術・技術審査証明報告書, 145p., 2014.3.
- 11) 日本建築総合試験所: QP パイル工法(キューピーパイル工法)(改訂), 建築技術性能証明評価報告書, 125p., 2015.11.
- 12) 沼上清, 福本直輔: 打設後 44 年を経過した松

- 杭の押し込み試験, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp.1227-1228, 2007.7.
- 13)村田拓海, 沼田淳紀, 古垣内靖, 張媛: 約 60 年経過した木杭の押し込み試験, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, V-297, 2019.9.
- 14)村田拓海, 沼田淳紀, 佐々木修平, 藤野一, 川崎淳志, 杉山耕平: 幾つかの地盤調査結果に基づく軟弱地盤中における丸太の鉛直支持力, 第 19 回木材工学研究発表会講演概要集, 土木学会, 2020.9. (投稿中)
- 15)稲田倍穂: スウェーデン式サウンディング試験結果の仕様について, 土と基礎, Vol.18, No.1, pp.15-18, 1960.
- 16)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説 p.308, 2013.
- 17)日本建築学会: 5.3 節鉛直支持力, 建築基礎のための地盤改良設計指針案, pp.348-352, 2006.11.
- (Received October 16, 2020)
(Accepted January 31, 2021)

4m×4m PLATE LOAD TEST ON GROUND REINFORCED WITH LOGS

Atsunori NUMATA, Takumi MURATA, Shuhei SASAKI, Hajime FUJINO,
Atsushi KAWASAKI and Kohei SUGIYAMA

To discuss a bearing capacity of ground-log composite, 4 m × 4 m plate load tests on the ground reinforced with logs and on original ground were performed. Bearing capacity tests for logs performed at the same site were referred to consider the ground-log composite ground. As a result, it could be found that the ultimate bearing capacity on the ground-log composite ground can be represented the sum of the bearing capacity of the original ground excepting log area and the total bearing capacity of logs.