

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580221

研究課題名(和文) 南海地震による液状化被害低減と森林資源活用化技術の開発

研究課題名(英文) Development of liquefaction damage reduction and forest resource utilization technologies for the Nankai Earthquake

研究代表者

原 忠 (Hara, Tadashi)

高知大学・自然科学系・教授

研究者番号：80407874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、森林資源を活用した液状化対策技術を開発し、液状化災害を低減することである。南海地震による被害が想定される高知県をモデルに、丸太を活用した液状化被害軽減策と地球温暖化対策対策工法を両立する新しい対策技術を開発し、現地調査、室内試験、アンケート調査などから有用性を評価した。具体的には、丸太打設による地盤の締固め効果に関して、複数の現地実験や室内試験により検証し、打設前後の結果の比較から提案工法の妥当性を評価した。さらに、丸太の活用によるCO₂排出削減効果、地域産業への波及効果をアンケート調査などから分析し、丸太打設に伴う炭素貯蔵効果を定量的に示した。

研究成果の概要(英文)：We present a new liquefaction countermeasure technology that uses wood to mitigate ground liquefaction. Because the use of wood effectively contributes toward mitigating global warming, we have proposed new applications for its in-ground use. Japan currently has wealthy forestry resources but is in need of environmentally friendly, economically sound measures for ground liquefaction mitigation.

To model the Kochi Prefecture damage is assumed by the Nankai earthquake, we have developed a new liquefaction countermeasure technology for both liquefaction damage mitigation and global warming countermeasures method utilizing log piles. Specifically, the liquefaction measures effect due logs press and verified by a number of in site tests and laboratory tests, CO₂ emissions reduction effect by the use of the log, and to verify the ripple effect on the local industry, and the usefulness of the development method It revealed.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 木材利用 三軸試験 地球温暖化対策

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、津波や液状化により多くの人的・物的被害が生じた。震源地近傍の北上川や気仙川では、液状化した地盤に津波が来襲し、堤防が決壊したことで、住宅地や耕作地が広範囲に浸水した。さらに、震央から遠く離れた千葉県浦安市では液状化が生じ、木造住宅の多くやライフライン施設などが被災した。一方、液状化対策を事前に施した地点では、被害が軽微でその有効性が実証された。

来るべき南海地震では、震源域に近い高知県で大きな被害が想定され、津波や液状化被害が県内全域で予測されている。中でも、地盤の脆弱な平野部に人口が密集していることもあり、液状化被害を未然に抑制することが防災戦略上の大きな課題となっている。とりわけ、高知市内は、全人口(約76万人)の約45%が軟弱な沖積低地上に居住しており、液状化と津波の流入という東日本大震災に類似した被害が想定されている。

東日本大震災の復興や今後の大地震に向けたハード対策は、環境負荷型の従来工事に頼らず地球温暖化対策にも十分配慮された、持続可能な方法によってなされるべきである。国土の約7割が山間地である我が国において、森林資源を積極的に利活用することは現実的な解決策である。しかしながら、木材の活用先は限定的である。例えば、高知県は県土の84%を林野が占めるにもかかわらず、県内主要産業に占める木材製品の出荷割合は4.9%と小さい。とりわけ、土木分野への利用実績は乏しいが、耐震性向上技術として木材の有用性が明らかになれば、大量の森林資源の利活用を促進するきっかけになり、地場産業に与えるインパクトは大きい。

研究代表者らは、現在までに地下水水位以深での木材の耐久性や、砂地盤に打設された木杭基礎の機能性、丸太打設工事による温室効果ガス削減効果を取り纏め、土木分野への木材利用の有効性を明らかにしたが、地盤工学への利用技術は多くはない。一方、液状化対策工への木材利用は、打設による地盤改良効果のみならず、CO₂排出削減効果、地域産業への波及効果も期待されるが、それらを体系化した研究例はほとんどない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、森林資源を活用した地盤の液状化対策技術を開発し、液状化災害を低減することである。南海地震で多くの被害が想定され、森林資源の豊富な高知県をモデル地域に設定し、具体的な被害予測地域に対して現地調査や室内実験などから丸太打設による液状化対策工法の妥当性を検証する。また、林業関係者等へのヒアリング調査を行い、経済性、CO₂排出削減効果、地域産業への波及効果の観点から、木材を利用した液状化対策工の有効性を明らかにする。

「地球温暖化防止対策」と「地場産業の活性

化」に貢献しながら、来るべき「南海地震」に備える具体策を提示することが本研究の特徴である。

3. 研究の方法

本研究の主な課題と研究方法は下記の4項目である。

- (1) 高知県における森林経営と木材生産に関する実態調査(アンケート及びヒアリング調査による木材供給に関するデータ分析)
- (2) 千葉県浦安市における液状化被害調査と高知県への成果の反映(現地調査などに基づく地盤の液状化発生要因の分析と高知県の液状化要対策箇所への反映)
- (3) 液状化対策工への木材利用の適用性検討(高知県高知市仁井田地区埋立地盤の実証施工を対象とした現地調査と乱さない試料の採取、室内三軸試験の実施)
- (4) 高知市実証施工箇所をケーススタディとした温室効果ガス削減効果(丸太打設によるカーボンストック効果の検証)

4. 研究成果

- (1) 高知県における森林経営と木材生産に関する実態調査

高知県森林組合連合会の協力を得て、高知県の森林経営と木材生産に関する実態調査をアンケート形式で行った。高知県の蓄積量は、平成24年時点で国有林・民有林合計で1億7410万m³であり、約84%を林野が占める。特に民有林は面積、蓄積とも約8割を占め豊富な資源を有することが分かる。需要の多くは県内で賅われ、製材用や木材チップがほとんどであるが、樹種や形状の違いによらず、末口径15cm以上の丸太需要が半数を占めることが明らかになった(図1)。

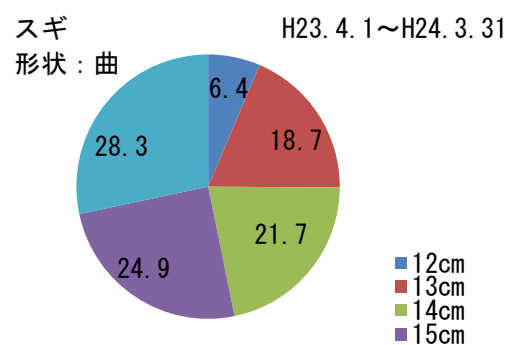


図1 末口径ごとの供給率
(スギ、曲材の例)

一方、高知県における林業就業者は、平成18年度から僅かに増加傾向にあるものの半数は60歳以上である。平均年齢は50歳と高く、年度毎の20、30歳代の割合は全体の約1/3~1/5である(図-2)。

以上の調査結果から、高知県では森林資源

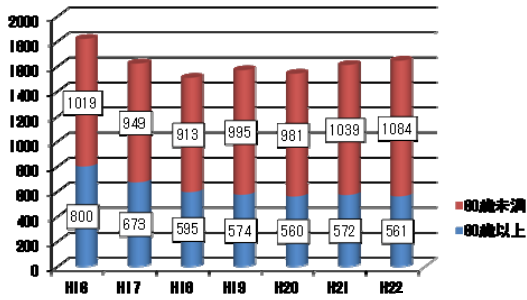


図2 高知県における林業就業者の推移

が豊富で、液状化対策として用いられるような、直径 16cm 未満の末口径を有する丸太や間伐材は比較的確保は容易ではあることが分かった。

県内主要産業に占める木材製品の出荷割合は約 5%と小さく、本工法のような森林資源を土木資材として積極的に活用する技術は現実的な提案である。その反面、林業就業者の高齢化と若い世代の担い手が不足しており、木材の供給が滞る可能性が示唆された。工法の普及を念頭に、今後は全国的な森林経営と木材生産に関する実態調査を進め、液状化対策工法に資する木材の資源と供給に関する調査・分析が望まれる。

(2) 千葉県浦安市における液状化被害調査と高知県への成果の反映

2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化被害が生じた千葉県浦安市を対象に、液状化対策の効果を現地踏査とサウンディング試験に基づき評価した。

写真 1 は、締固めに伴うグラベルドレーン工法により地盤改良された集合住宅 (S 住宅) の地震後の様相を示している。未改良地盤では液状化で生じた噴砂が敷地一帯に広がり、周辺道路では 30cm を超える不同沈下やマンホールの浮上が生じていたが、地盤改良された敷地はほぼ無被害であった。



写真 1 ほぼ無被害な地盤改良済集合住宅

図 3 は敷地内がサンドコンパクションパイプ (SCP) 工法で地盤改良された、浦安市 I 団地の簡易動的コーン貫入試験結果 (PDCP) を示したものである。液状化対策工法の原理

は、丸太打設工法と同様、締固めによっている。無対策な団地周辺部では、 N 値換算値はおおむね 5 以下と低く、夥しい噴砂とともに最大約 50cm の地盤沈下が確認されたが、団地中央部の地盤改良箇所の N 値換算値は概ね 10 程度まで増加し、噴砂や地盤沈下も軽微であった。

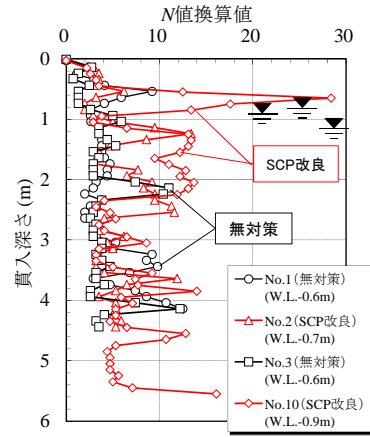


図3 地盤改良効果の検証 (浦安市 I 団地)

以上の被災状況の分析から、過去の地震災害を教訓に恒久的な対策を講じることで、埋立地や旧河道など、高知県の平野部に多く分布する液状化発生予測地域の被害を最小化する効果が得られることが明らかになった。

(3) 液状化対策工への木材利用の適用性検討 (高知市海岸埋立地実証施工を例に)

高知市海岸埋立地の実証施工地点を対象に、丸太打設液状化対策工法の適用性を現地試験、室内三軸試験結果から検討した。

施工地点は高知市仁井田木材団地内であり、1961 年以降浚渫により埋立てられ、旧海底面は G. L. -7m 付近である。現地は図 4 に示す N 値が 10 以下の軟弱が G. L. -10m 程度まで堆積している。丸太の打設間隔は、事前調査で得られた地盤の N 値と土質、地下水位などから地盤の液状化に対する安全率を求め、丸太末口径 (0.14m)、丸太打設間隔 (0.45m)、改良深さ (G. L. -10m) を決定した。丸太の末口断面積より求めた改良率 a_s は 0.076 と計算される。用いた丸太は直径 15cm の県産スギ材である。

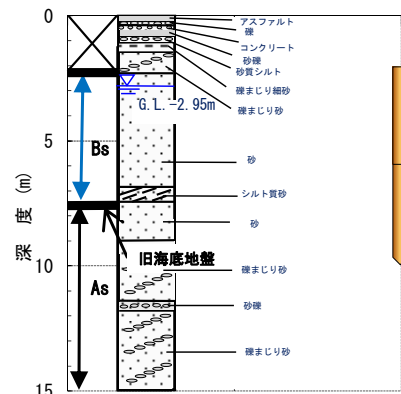


図4 実証施工地点の N 値の深度分布

図5は、標準貫入試験（SPT）により得られた N 値を深度との関係で示したものである。図中のハッチングは、液状化の可能性のある地層を示している。丸太打設後の N 値は G.L. -6.50m 付近の細粒分の卓越するシルト層を除き、打設前のそれに比べ大幅に増加している。図6は SPT から得られた補正 N 値（道路橋示方書に基づき、拘束圧と細粒分含有率で補正された N 値）と丸太打設後の N 値の関係を示したものである。図中には締固め工法の一例として、サンドコンパクションパイル工法（SCP）の設計法で示された $a_s=0.05, 0.10, 0.15$ での関係を併記している。図5に示した G.L. -6.5m 近傍のシルト層の結果を除けば、打設後の N 値は打設前のそれより大きく増加し、SCP 工法の関係式上かそれ以上にプロットされる。

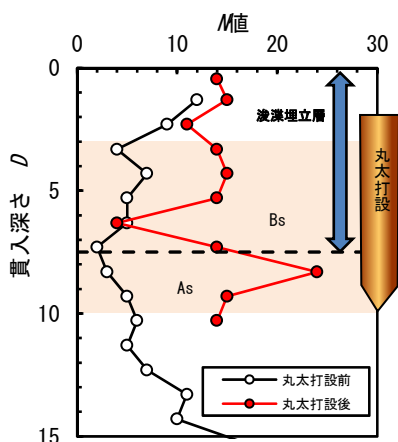


図5 N 値を深度との関係 (SPT)

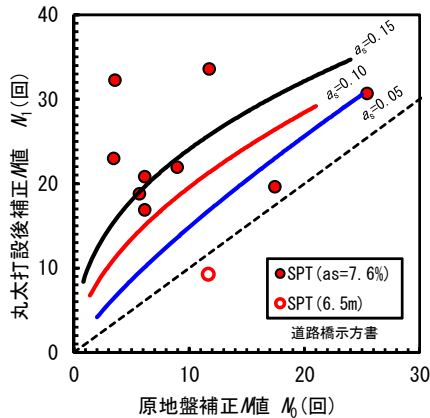


図6 丸太打設前後の補正 N 値の変化 (SPT)

図7は、丸太打設前後に採取した不攪乱試料の繰返し非排水三軸試験結果を、 $DA=5\%$ に到達した時点での繰返し載荷回数 N_c と繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_0'$ の関係で整理したものである。同図中には丸太打設前後に不攪乱採取した K 試料（採取深度 G.L. -1.0m, 細粒分質細砂）の結果を併せて示す。いずれの試料とも、打設後の $\sigma_d/2\sigma_0'$ は N_c の違いによらず大きく、打設前に比べ大きな $\sigma_d/2\sigma_0'$ を有する。図8は図7の結果を $N_c=20$ で定義される

液状化強度 R_{L20} ($DA=5\%$) と試料採取深度の関係で整理したものである。同図中には丸太打設前後の ρ_d も併記した。土質特性や採取地点、拘束圧が異なっているが、丸太打設後の R_{L20} は打設前のそれと比べ0.08以上増加する。丸太打設後の ρ_d が低下する場合であっても、 R_{L20} は増加している。

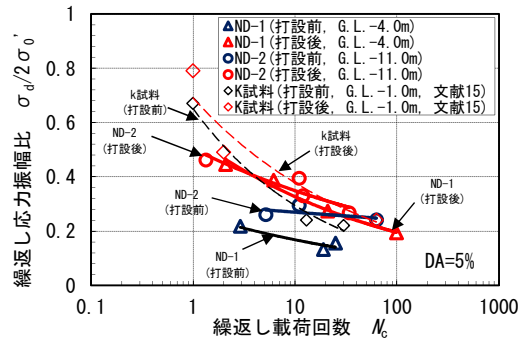


図7 繰返し非排水三軸試験結果

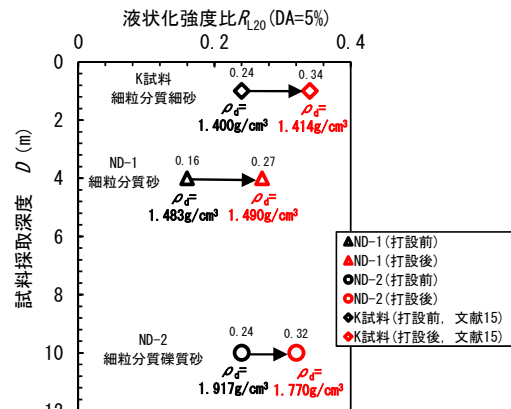


図8 液状化強度 R_{L20} と試料採取深度の関係

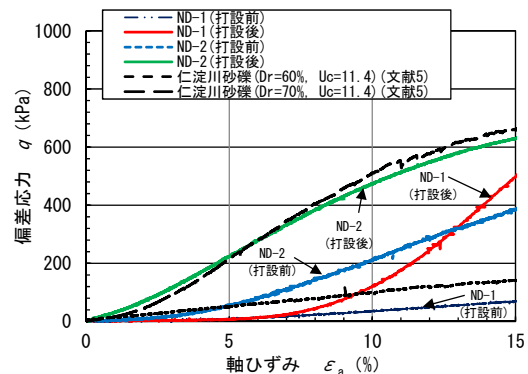


図9 丸太打設前後の液状化後の偏差応力～軸ひずみ関係の比較

図9は供試体の一部について行った繰返し非排水せん断後の非排水単調載荷試験結果を、偏差応力・過剰間隙水圧～軸ひずみ関係で示したものである。同図中には相対密度 $D_r=60, 70\%$ の場合の河床砂礫における同様の結果も示している。偏差応力～軸ひずみ関係においては、ND-1 の打設後の試験ケースは、軸ひずみ $\epsilon_s=0\sim6\%$ の小さい範囲では打設前

のそれとせん断剛性の回復傾向がほぼ等しいが、 ε_a が6%以上と増加するにつれ偏差応力が大きくなる。ND-2の打設後の試験ケースでは、 $\varepsilon_a=1\%$ と小さい範囲から偏差応力が大きく増加しており、丸太打設によりせん断剛性が早期に回復している。ND-2の打設後の試験ケースは $D_c=70\%$ の河床砂礫相当の耐流動性を有する結果となっている。

以上の高知市海岸埋立地の実証施工現場を対象とした現地調査結果から、丸太打設による液状化対策工の地盤改良効果が定量的に示された。すなわち、サウンディング試験より得られた液状化層の貫入抵抗値は、丸太打設により大幅に増加し、同程度の改良率で比較した場合は、サンドコンパクションパイル工法の設計チャート(A法)と同等以上の改良効果が得られることが明らかになった。さらに、室内三軸試験結果から、丸太打設後の供試体の液状化強度は土質、拘束圧が異なる場合であっても打設前のそれを大きく上回り、地盤の耐流動性も大きくなることが明らかになった。

(4) 高知市実証施工箇所をケーススタディとした温室効果ガス削減効果

前述の実証施工現場を対象に、丸太に貯蔵された炭素量と工事によって排出された二酸化炭素量を試算し、既往の研究結果との比較を行った。ここでCO₂貯蔵量は、打設した丸太の総量より求め、施工による二酸化炭素排出量は工事現場内で稼働した重機、現場内で使用した発電機、丸太の継ぎ材を対象とした。なお、育林から施工現場搬入、技術者通勤車両、その他前記以外で現場に持ち込まれた細かな資材などは、重機や資材の二酸化炭素排出量、通勤車両による二酸化炭素排出量を計算は、現場条件に大きく左右されること、山林から加工場までの運材距離が不明瞭なことなど計算が困難になると判断されたため、検討対象外とした。

図10は実証施工現場内に貯蔵されたCO₂を示したものである。同図中には既往の文献で示された千葉県浦安市舞浜地区施工現場のCO₂貯蔵量(仁井田地区と打設間隔が等しい4D間隔の結果)を併記している。2地点の施工に伴う二酸化炭素収支は、仁井田地区で約20t-CO₂、舞浜地区で約7.0t-CO₂と計算され、丸太が吸収したCO₂の8割程度が地中に貯蔵される結果となった。仁井田地区と舞浜地区では貯蔵量に有意な差が生じたが、これは、丸太の打設本数が仁井田地区では600本、舞浜地区では64本と大きく異なるためである。舞浜地区のような打設本数が少ない場合であっても、施工に伴うCO₂排出量が丸太のCO₂貯蔵量を上回らないが、丸太の打設本数が多いほど、丸太のCO₂貯蔵量が施工で排出されるそれを大きく上回り、炭素貯蔵効果がより大きいことが分かる。ちなみに、仁井田地区のCO₂貯蔵量は、1年間1日10分車に乗ることを控えた場合の二酸化炭素削減588

(kg-CO₂)の約40年分に当たる。

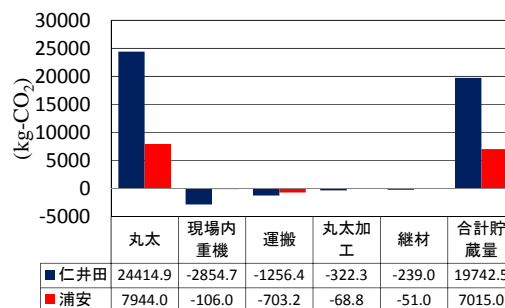


図10 丸太打設による炭素貯蔵効果の検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

- ① Numata, A., Miwa, S, Tsutsui, M., Hara, T., Mimura, K., and Ikeda, H.: Use of wood for countermeasures against liquefaction, World Conference of Timber Engineering, WICE, 査読有, pp.1-6, 2014.
- ② 沼田淳紀, 三村佳織, 村田拓海, 原忠, 池田浩明, Riaz Saima, 堀俊和: 模型地盤に丸太打設し液状化した地盤の特性, 木材利用研究論文報告集, Vol.12, 査読無, pp.109-116, 2013.
- ③ 三村佳織, 沼田淳紀, 村田拓海, 池田浩明, 原忠, Riaz Saima, 堀俊和: 丸太打設液状化対策の大型振動実験結果, 木材利用研究論文報告集, Vol.12, 査読無, pp.85-92, 2013.
- ④ 原忠, 坂部晃子, 沼田淳紀, 水谷羊介, 池田浩明: 丸太打設で補強した液状化地盤の原位置調査, 木材利用研究論文報告集, Vol.11, 査読有, pp.87-94, 2012.

〔学会発表〕(計 23件)

- ① 沼田淳紀, 村田拓海, 三輪滋, 原忠, 坂部晃子, 三村佳織: 丸太打設液状化対策の実施工事例の概要と設計, 第50回地盤工学研究発表会, 平成27年9月1日-9月3日, 北海道科学大学(北海道札幌市), (発表確定)
- ② 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計測, 第50回地盤工学研究発表会, 平成27年9月1日-9月3日, 北海道科学大学(北海道札幌市), (発表確定)
- ③ 村田拓海, 沼田淳紀, 三輪滋, 原忠, 坂部晃子, 三村佳織: 丸太打設液状化対策の実施工地点におけるサウンディング試験, 第50回地盤工学研究発表会, 平成27年9月1日-9月3日, 北海道科学大学(北海道札幌市), (発表確定)
- ④ 原忠, 坂部晃子, 三村佳織, 沼田淳紀, 村田拓海, 三輪滋: 丸太打設液状化対策の実施工地点における液状化試験, 第50回地盤工学研究発表会, 平成27年9月1日-9月3日, 北海道科学大学(北海道札幌市), (発表確定)
- ⑤ 三村佳織, 原忠, 坂部晃子, 石川諒, 沼田淳

- 紀：常時微動観測による丸太打設液状化対策工法の改良効果の検討，第50回地盤工学研究発表会，平成27年9月1日-9月3日，北海道科学大学（北海道札幌市），（発表確定）
- ⑥ 原 忠，岡田望，三村佳織，坂部晃子，沼田淳紀，三輪滋：丸太打設による海岸埋立地の地盤改良効果の検証 その1 調査地点の概要，地盤工学会四国支部平成26年度技術研究発表会，平成26年11月13日-11月14日，神山温泉（徳島県神山町）
- ⑦ 原 忠，三村佳織，坂部晃子，岡田望，三輪滋，沼田淳紀：丸太打設による海岸埋立地の地盤改良効果の検証 その2 サウンディング試験結果，地盤工学会四国支部平成26年度技術研究発表会，平成26年11月13日-11月14日，神山温泉（徳島県神山町）
- ⑧ 原 忠，坂部晃子，三村佳織，岡田望，沼田淳紀，三輪滋：丸太打設による海岸埋立地の地盤改良効果の検証 その3 三軸試験結果，地盤工学会四国支部平成26年度技術研究発表会，平成26年11月13日-11月14日，神山温泉（徳島県神山町）
- ⑨ 沼田淳紀，小川秀成，原 忠，池田浩明，三村佳織：丸太打設による丸太間地盤の締固め程度のはらつき，第49回地盤工学研究発表会，平成26年7月15日-7月17日，北九州国際会議場（福岡県北九州市）
- ⑩ 原 忠，坂部晃子，沼田淳紀，三村佳織：三軸試験による丸太打設後の浅層地盤の液状化検討，第49回地盤工学研究発表会，平成26年7月15日-7月17日，北九州国際会議場（福岡県北九州市）
- ⑪ 原 忠，坂部晃子，栗林健太郎，平口正雄：液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う変形特性に及ぼす影響因子の分析，平成26年度土木学会四国支部技術研究発表会，平成26年5月31日，徳島大学（徳島県徳島市）
- ⑫ 原 忠，坂部晃子，畑山諒人，沼田淳紀，三村佳織：東北地方太平洋沖地震で液状化した浦安埋立土の動的特性，地盤工学会四国支部平成25年度技術研究発表会，平成25年11月21日-11月22日，桂浜荘（高知県高知市）
- ⑬ 原 忠，坂部晃子，沼田淳紀，筒井雅行，水谷羊介，三村佳織，池田浩明，RIAZ Saima：丸太打設液状化対策実証実験における地盤概要，土木学会第68回年次学術講演会，平成25年9月4日-9月6日，日本大学（千葉県習志野市）
- ⑭ 三村佳織，水谷羊介，沼田淳紀，三輪滋，原 忠，坂部晃子，池田浩明，RIAZ Saima：丸太打設液状化対策実証実験に用いた丸太，土木学会第68回年次学術講演会，平成25年9月4日-9月6日，日本大学（千葉県習志野市）
- ⑮ 池田浩明，水谷羊介，三村佳織，沼田淳紀，三輪滋，RIAZ Saima，原 忠，坂部晃子：丸太打設液状化対策実証実験におけるCO₂貯蔵効果，土木学会第68回年次学術講演会，平成25年9月4日-6日，日本大学（千葉県習志野市）
- ⑯ 沼田淳紀，三輪滋，三村佳織，水谷羊介，村田拓海，吉田雅穂，堀俊和，池田浩明，RIAZ Saima，原 忠，坂部晃子：丸太打設液状化対策の大型

模型振動実験の概要，第48回地盤工学研究発表会，平成25年7月23日-7月25日，富山国際会議場（富山県富山市）

- ⑰ 三村佳織，水谷羊介，沼田淳紀，三輪滋，村田拓海，吉田雅穂，堀俊和，原 忠，坂部晃子，池田浩明，RIAZ Saima：丸太打設液状化対策大型模型振動実験における過剰間隙水圧と沈下量の関係，第48回地盤工学研究発表会，平成25年7月23日-7月25日，富山国際会議場（富山県富山市）
- ⑱ 村田拓海，吉田雅穂，三輪滋，沼田淳紀，三村佳織，水谷羊介，堀俊和，池田浩明，RIAZ Saima，原 忠，坂部晃子：丸太打設液状化対策大型模型振動実験における地盤内の応力ひずみ関係，第48回地盤工学研究発表会，平成25年7月23日-7月25日，富山国際会議場（富山県富山市）
- ⑲ 原 忠，坂部晃子，沼田淳紀，三輪滋，三村佳織，水谷羊介，村田拓海，吉田雅穂，堀俊和，池田浩明，RIAZ Saima：丸太打設液状化対策大型模型振動実験における地盤調査結果，第48回地盤工学研究発表会，平成25年7月23日-7月25日，富山国際会議場（富山県富山市）
- ⑳ 三輪滋，沼田淳紀，三村佳織，水谷羊介，村田拓海，吉田雅穂，堀俊和，原 忠，坂部晃子，池田浩明，RIAZ Saima：丸太打設液状化対策大型模型振動実験における液状化対策効果，第48回地盤工学研究発表会，平成25年7月23日-7月25日，富山国際会議場（富山県富山市）
- 21 原 忠，北村暢章，山田雅行，竹澤清一郎，羽田浩二，宮田稔久：常時微動観測による海岸平野に広がる堆積地盤の揺れやすさの推定，第48回地盤工学研究発表会，平成25年7月23日-7月25日，富山国際会議場（富山県富山市）
- 22 原 忠，坂部晃子，沼田淳紀，水谷羊介，池田浩明：丸太打設で補強した液状化地盤のスウェーデン式サウンディング試験，地盤工学会四国支部平成24年度技術研究発表会，平成24年11月16日-11月17日，内子自治会館（愛媛県内子町）
- 23 原 忠，北村暢章，山田雅行，竹澤清一郎，羽田浩二：埋立地における常時微動H/Vスペクトルの卓越周期とピーク振幅の特徴，地盤工学会四国支部平成24年度技術研究発表会，平成24年11月16日-11月17日，内子自治会館（愛媛県内子町）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 忠 (HARA, Tadashi)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号：80407874

(2) 研究分担者

沼田 淳紀 (NUMATA, Atsunori)
飛島建設株式会社技術研究所・上席研究員
研究者番号：10443649