

木質コラムを用いた液状化対策工法の 過剰間隙水圧消散効果の定性的評価

Qualitative Evaluation of Excess Pore Water Pressure Dissipation Effect in a Liquefaction Mitigation Method using Timber Column

古田 空翔^{※1}
Tsubasa Furuta

村田 拓海^{※1}
Takumi Murata

渦岡 良介^{※2}
Ryousuke Uzuoka

【要旨】

筆者らは、これまでに低品質な丸太（B材・C材）を薪状に加工して束ねた柱状体（以下、「木質コラム」）を地盤に打設することの液状化対策への有効性を1G場小型模型振動実験により示している。木質コラムの打設により地盤密度が増大し、液状化抑制効果が確認されているが、薪状木材間の間隙による過剰間隙水圧消散効果については明らかになっていない。そこで、過剰間隙水圧消散効果を定性的に確認することを目的とし、新たに木質コラムと同寸法・同材料の丸太を用いた柱状体を用いて1G場小型模型振動実験を実施し、比較検討した。その結果、丸太模型の木質コラム模型に対する剛性比は約1.15倍あり、木質コラム模型内の間隙による過剰間隙水圧消散効果によって沈下が低減される効果はその剛性の違いによる沈下低減効果と同等の効果が示唆された。

【キーワード】 液状化 木材 振動台実験 気候変動

1. はじめに

筆者らは、再造林促進による気候変動緩和への更なる貢献を目的として、通直でない低品質な丸太（B材・C材）を活用するために、これらの丸太を薪状の木材に加工して束ねた柱状体（以下、「木質コラム」と記す。）を鉛直方向に複数重ねて地盤に打設する液状化対策を提案している（図－1）。

本工法の主な対策原理は密度増大を想定しており、これまで、1G場での小型模型振動台実験により、木質コラムを地盤に打設することで地盤の密度が増大することを明らかにしている。また、木質コラムを打設した地盤の液状化抑制効果は、単純な密度増大効果以上となることが確認されている。この要因の一つとして、木質コラムを構成する薪状の木材同士の間に形成される間隙による

過剰間隙水圧消散効果が考えられるが、この影響は明らかになっていない。

そこで本研究では、木質コラムによる過剰間隙水圧消散効果を定性的に確認することを目的として、木質コラムと間隙量が異なる柱状体を打設した地盤に対して1G場小型模型振動実験を実施し、既往の研究¹⁾と比較検討する。なお、木質コラムと間隙量が異なる柱状体としては、木質コラムと同じ寸法・材料の丸太を用いる。

2. 実験の概要

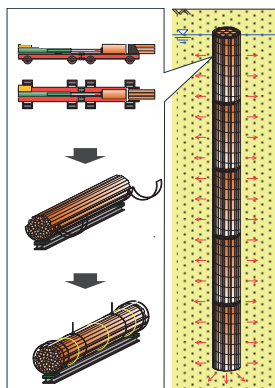
2.1 小型模型振動台実験方法

本研究では、既往の研究¹⁾と同様に、小型土槽内に作製した模型地盤上に構造物模型を設置し、加振後の構造物模型の沈下量を比較する。表－1に実験概要を示す。実験縮尺や使用した砂、地盤作製方法などの各種実験条件は既往の研究¹⁾と同じである。

表－2に実験ケース、図－2に丸太模型を打設したケースL-P5Dの実験装置の概要を示す。なお、実験ケース一覧には比較に用いた既往の研究¹⁾のケースも示している。

2.2 丸太模型の概要

実験で用いた丸太模型を写真－1に示す。丸太模型は、直径27mm、長さ80mm、のテーパのない円柱で、樹種はスギである。なお、丸太模型は実験実施前に水浸さ



図－1 木質コラムを用いた液状化対策の概要

表一 1 實驗概要

実験縮尺	1/25
砂	豊浦砂 (土粒子密度 2.645g/cm ³ , 最大間隙比 0.972, 最小間隙比 0.616, 50%粒径 0.18mm, 均等係数 1.6)
土槽	アクリル製土槽 (内寸: 幅 780mm, 奥行 278mm, 高さ 400mm)
構造物模型	木造 2~3 階建てを想定した接地圧の構造物模型 (幅 150mm, 奥行 150mm, 高さ 64mm, 質量 2.3kg, 接地圧 1kN/m ²)
地盤作製方法	所定の相対密度になるように計量した砂と水道水を土槽内に投入し, 先端から水が噴射するノズルを挿入して砂を十分攪拌させた後に自然堆積させる
入力波	正弦波 (周波数 5Hz, 20 波, 主要動前後に 5 波のテーパ)
加振方法	25gal 程度毎段階的に増加させるステップ加振



写真-1 丸太模型

せ、飽水状態のものを実験に用いた.

2.3 丸太模型の打設方法

丸太模型の打設は、既往の研究¹⁾と同様の方法で行った。写真-2に、打設に用いた装置を示す。

丸太の打設は、①真鍮管内に丸太模型を投入、②丸太模型が入った状態の真鍮管を回転させながら地中に圧入、③所定の深度に到達後、丸太模型を空圧で押さえながら真鍮管のみを引き抜くの手順で行った。なお、丸太模型の打設は、図-2(a)に示す番号の順序に行った。

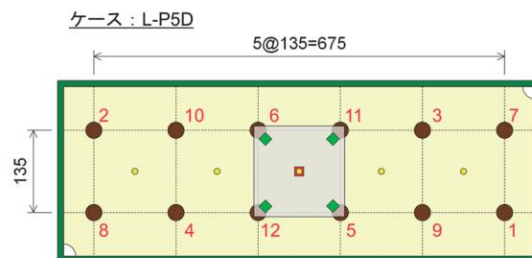
2.4 針貫入試験方法

針貫入試験についても、既往の研究¹⁾と同様の方法で、前述した打設装置を利用して、直径 3mm のステンレス棒を地盤に対して 5mm/s の一定速度で貫入させた。貫入抵抗は荷重計、貫入量は巻き取り式変位計を用いて計測した。試験位置は図-2 (a) に示す位置で行った。ただし、丸太模型打設前の試験位置は未改良のケースと同じ位置とした。

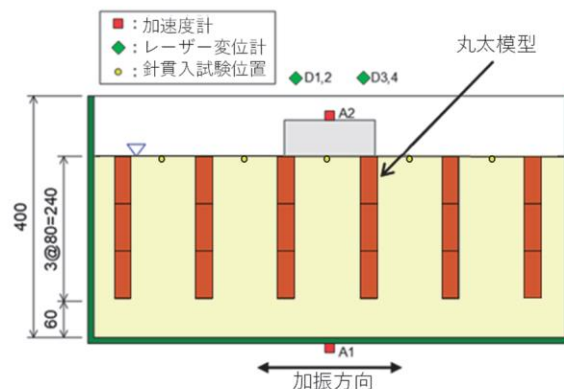
表-2 実験ケース

ケース	改良体	相対密度 D_r (%)	打設間隔 B (mm)	打設箇所数 (箇所)
NI40	—	39.3	—	—
NI60	—	61.2	—	—
NI70	—	68.6	—	—
NI80	—	77.9	—	—
B-P5D	木質コラム	37.9→60.7	135	12
L-P5D	丸太	39.7→59.6	135	12

B:木質コラム, L:丸太



(a) 平面図(L-P5D)



(b) 断面図(L-P5D)

図-2 実験装置の概要



(a) 全景

(b) 近景

写真-2 木質コラム模型の打設装置

3. 実験結果

3.1 針貫入試験結果

図-3に各ケースの貫入抵抗力の深度分布を示す。ここで、ケース B-P5D, L-P5Dにおける改良体打設前の結果については、地盤の相対密度、および、貫入抵抗の深度分布が、ケース NI40 とほぼ同じであったため、同図からは省略している。

ケースL-P5Dの貫入抵抗力は、いずれの深度でもケースNI40よりも大きくなっており、丸太模型を打設することで密度が増加していることがわかる。また、ケースB-P5DとL-P5Dを比較すると、両者は概ね同じ傾向を示しているが、B-P5Dの貫入抵抗力がやや大きい。これは、木質コラム内部の間隙がドレーンとして機能し、針貫入試験時の微振動によって一時的に上昇した間隙水圧が早期消散されたことで、有効応力が早期回復した影響によるものと示唆される。

図-4に各深度における貫入抵抗力と相対密度の関係を示す。対象とした深度は、図-3に示した破線の位置であり、木質コラム模型・丸太模型が打設されている4深度(60mm, 120mm, 180mm, 240mm)と木質コラム・丸太模型が打設されていない1深度(260mm)である。なお、ケースB-P5D, L-P5Dにおいて、木質コラム模型・丸太模型を打設する前の地盤は、図-3と同様の理由で省略している。図中の白抜き破線は、改良体を打設していないケースを結んだグラフであり、実験に使用した豊浦砂の相対密度と貫入抵抗力の関係である。ケースB-P5DとL-P5Dを比較すると、木質コラム模型を打設した場合の方が丸太模型を打設した場合より、白抜き破線のグラフとの差がやや大きくなっていることがわかる。こ

の要因として前述した木質コラムの間隙の影響が考えられる。

3.2 振動実験結果

図-5に、小型模型振動実験において、入力した加速度と構造物模型の累積沈下量の関係を示す。なお、累積沈下量は各ステップ加振終了後に沈下が一定状態に安定したときの値である。ケース L-P5D は、相対密度がほぼ同じであるケース NI60 や、相対密度がより大きいケース NI70 よりも構造物の沈下が抑制されていることがわ

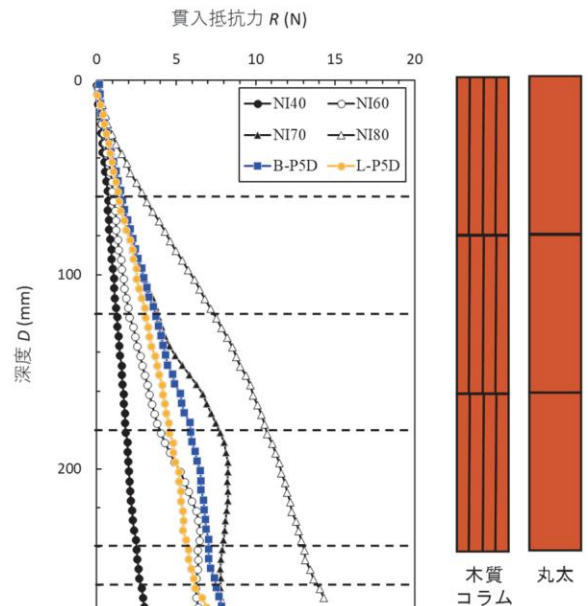


図-3 貫入抵抗力の深度分布

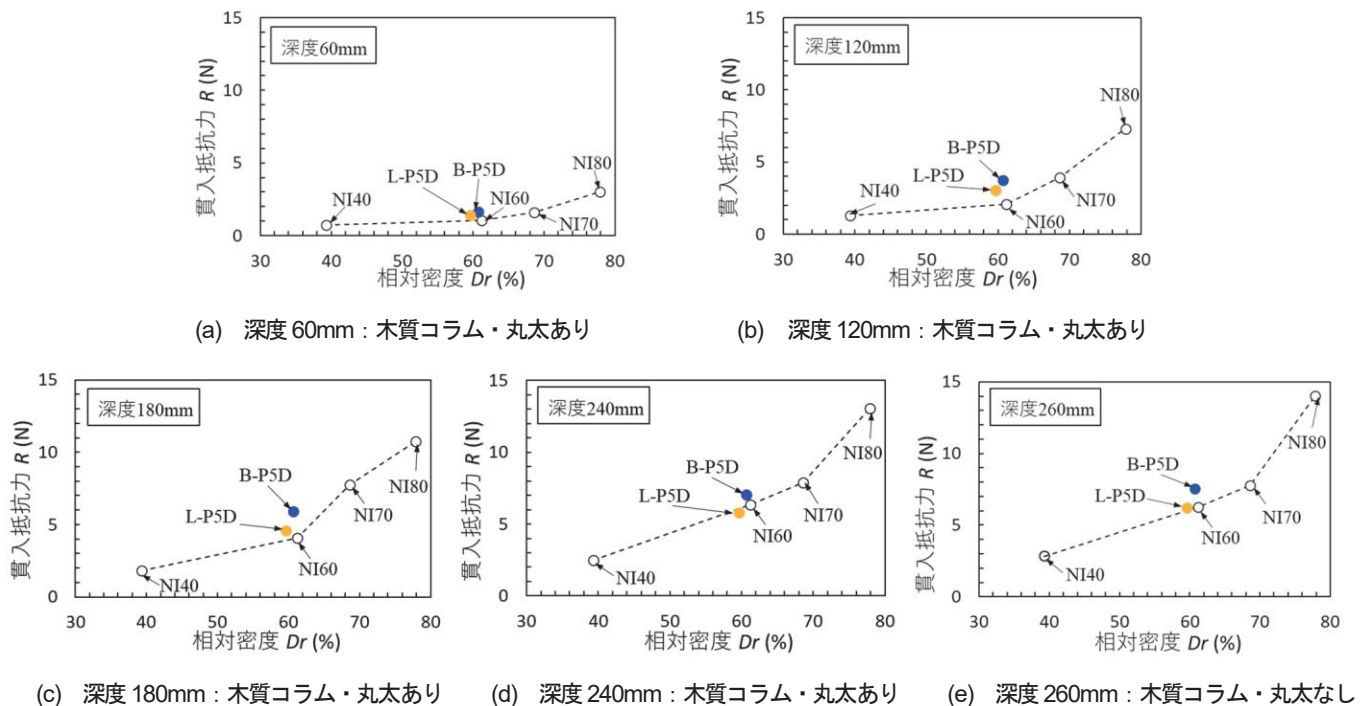


図-4 各深度の貫入抵抗力と相対密度の関係

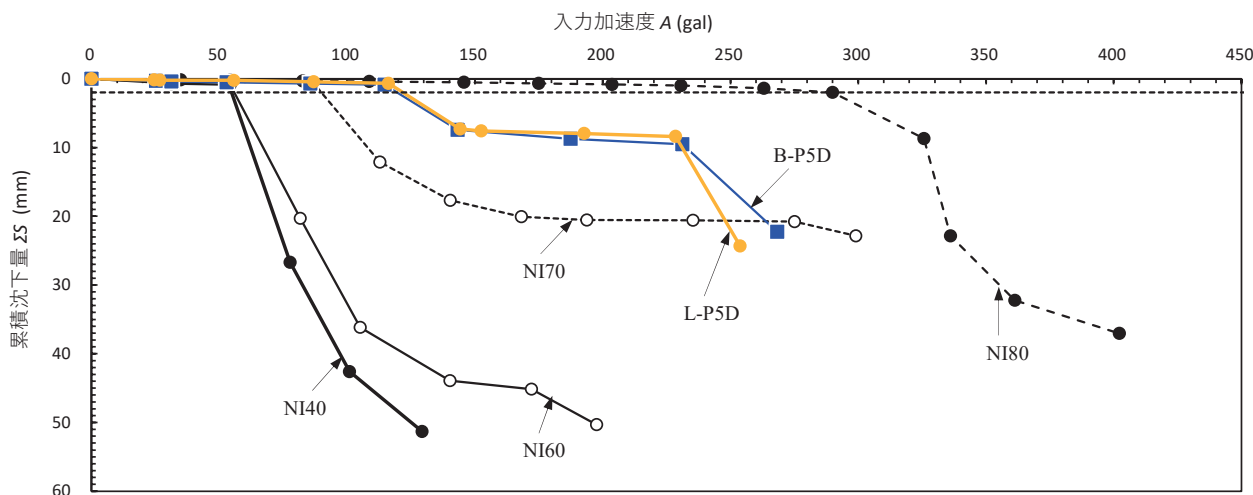


図-5 入力加速度と累積沈下量の関係

かる。また、ケース L-P5D と B-P5D は、ほぼ同じ傾向を示している。

図-6 に、累積沈下量が 2mm を超えた時点での入力加速度と相対密度の関係を示す。図中の白抜き破線は、図-4 と同様に、改良体を打設していないケースを結んだグラフである。ケース L-P5D、および、B-P5D は、いずれも白抜き破線のグラフより上側に位置しており、木質コラム模型や丸太模型などの改良体を打設した地盤における構造物沈下開始加速度は、純粋な密度増大効果によるものより大きくなることがわかる。また、ケース L-P5D、B-P5D はほぼ同じ結果を示している。

ここで、木質コラム模型と丸太模型の違いは、改良体内の間隙量である。間隙量が多くなることで過剰間隙消散効果が大きくなると考えられる一方で、断面積が少なくなるため剛性は低下する。特に、丸太の剛性に着目した液状化抑制効果を検討した数値解析²⁾では、丸太の剛性が高いほど液状化時の構造物の沈下量が低減されることが明らかになっている。

これらのことから、今回の結果は間隙量の違いによる過剰間隙水圧消散効果と剛性の効果がほぼ同じ程度発揮したと考えられる。

4. 木質コラム模型と丸太模型の剛性比

丸太模型と木質コラム模型の剛性の違いについて検討し、それに基づいて過剰間隙水圧消散効果について考察する。まず初めに、丸太模型と木質コラム模型の剛性比について調べる。剛性 k は以下の式により算出する。

$$k = EA/L$$

ここで、 E はヤング係数、 A は断面積、 L は長さである。丸太模型と木質コラム模型はともにスギ材を用いており、

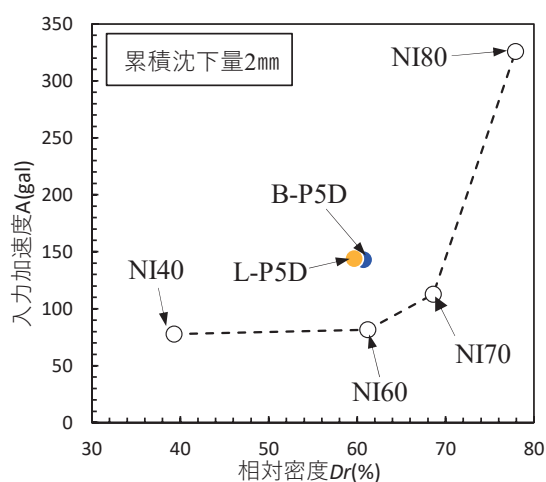


図-6 入力加速度と相対密度の関係

また長さも 8cm で共通であるため、剛性の違いは断面積の差に起因する。木質コラム模型の断面積は、木質コラム模型の見かけの体積より間隙の体積を差し引き、それを長さで除すことで求められる。

図-7 に木質コラム模型の間隙体積を測定する装置を示す。装置の構成としては、アクリル板 (1 辺 50mm, 厚さ 4.5mm) の上に塩ビ管 (外径 38mm, 内径 31mm, 厚さ 3.5mm, 高さ 83mm) をシリコンで接着し、ふたとしてアクリル板 (直径 50mm, 厚さ 4.5mm) をかぶせ、最後におもりとしてナット (M20, 対辺寸法 32mm, 重さ 73g) を載せたものである。この装置を用い、測定装置のみの重量、水で測定装置を満たした時の重量、木質コラム模型を空の測定装置に入れた時の重量、木質コラム模型を測定装置に入れた後に水で満たした時の重量をそれぞれ測定した。

図-8 に、これらの測定結果から算出した木質コラム模型の間隙率の度数分布を示す。間隙率の平均値は 13.2%, 標準偏差は 1.3 であった。この結果から、丸太と

木質コラムの断面積の比は 100 : 86.8 となり、剛性比も同様に 100 : 86.8 となる。したがって、丸太模型の剛性は木質コラム模型の約 1.15 倍であると評価できる。以上のことより、木質コラム模型内の間隙による過剰間隙水圧消散効果によって沈下が低減される効果は改良体の剛性が 1.15 倍になる効果と同等の効果があると考えられる。

5. まとめ

- (1) 木質コラム模型を打設した場合と丸太模型を打設した場合では、木質コラム模型を打設の方が貫入抵抗力は増加した。
- (2) 木質コラム模型を打設した場合と丸太模型を打設した場合では、構造物模型の累積沈下量が 2mm 以上となった時の入力加速度に違いはみられなかった。
- (3) 丸太模型の木質コラム模型に対する剛性比は約 1.15 倍あり、木質コラム模型内の間隙による過剰間隙水圧消散効果によって沈下が低減される効果はその剛性の違いによる沈下低減効果と同等の効果があることが示唆された。

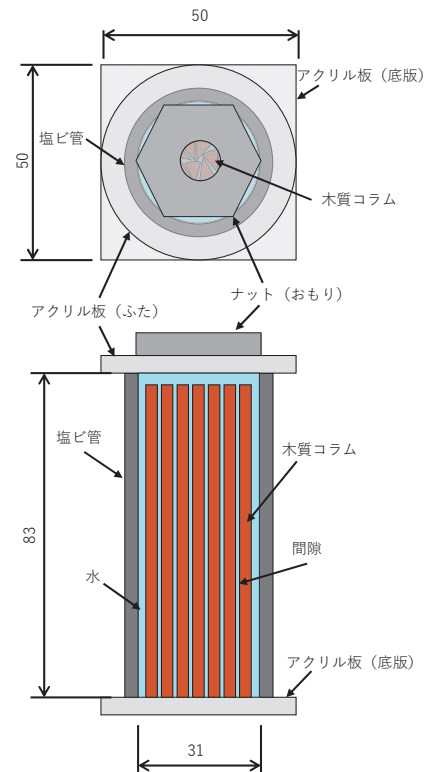
今後の研究では、遠心載荷試験を実施し、実際の地盤の深さを模擬した条件下で、木質コラム模型における過剰間隙水圧の消散効果を詳細に検討していく予定である。

【参考文献】

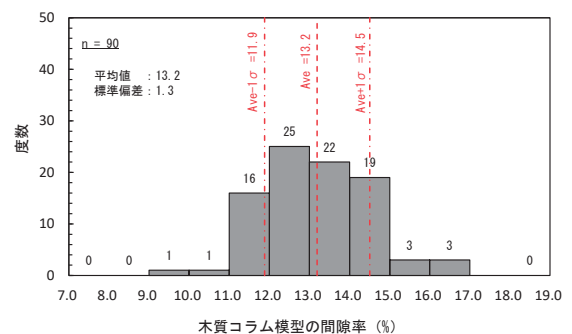
- 1) 古田空翔, 村田拓海, 渦岡良介 : 再造林促進を目的とした木材束による液状化対策工法の提案と小型模型振動実験による検証, 第 24 回木材工学研究発表会, pp.106-111, 2025.8.
- 2) 吉川達也, 余川弘至, 沼田淳紀, 三輪滋 : 丸太剛性の構造物沈下抑制効果を地盤の密度増大による効果として表現するための解析的研究, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1689-1690, 2017.7.

Summary We previously ran a series of 1 G small-scale shaking table tests, which demonstrated the effectiveness of the liquefaction mitigation measure of driving cylindrical specimens into the ground; each specimen consisted of a bundle of low-quality logs (B-grade and C-grade) processed into firewood shape (hereinafter referred to as "timber columns"). The test results confirmed that driving timber columns into the ground led to increased ground density, thereby producing a liquefaction mitigation effect. However, the excess pore water pressure dissipation effect of the gaps between firewood-shaped wood pieces remained unclear. To qualitatively verify the excess pore water pressure dissipation effect, we then conducted a comparative 1 G small-scale shaking table test using new cylindrical specimens, which were logs of the same size and material as the timber columns. The results revealed that the log model had a rigidity ratio of approximately 1.15 times compared to the timber column model. This fact suggested that the excess pore water pressure dissipation effect of the gaps in the latter model produced a subsidence mitigation effect comparable to that resulting from the differences in rigidity between the two models.

Key Words : *liquefaction, wood, shaking table test, climate change*



図－7 木質コラム模型の間隙測定装置概要



図－8 木質コラム模型の間隙率の度数分布