丸太打設による戸建住宅の軟弱地盤対策に 関する実験と数値解析による有効性の検討

千田 知弘¹·沼田 淳紀²·村田 拓海³·松井 友希⁴·村上 海翔⁵

¹正会員 東北学院大学准教授 工学部環境建設工学科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1) E-mail: tchida@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

²正会員 飛島建設株式会社 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

³正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ケ瀬 5472) E-mail: Takumi_Murata@tobishima.co.jp

⁴ 東北学院大学大学院 1 年 工学研究科環境建設工学専攻(〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1) E-mail: s2094408@g.tohoku-gakuin.ac.jp

⁵ 東北学院大学4年 工学部環境建設工学科(〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1) E-mail: s1744212@g.tohoku-gakuin.ac.jp

深刻化する気候変動の影響もあり,近年木材利用について再認識され始め,筆者らは戸建住宅の軟弱地 盤対策に丸太を用いる研究を進めている.本研究では,実大載荷試験と数値解析によって,丸太打設によ る戸建住宅の軟弱地盤対策効果を比較評価した.実大載荷試験は,無対策の地盤と 1.2m 間隔で丸太を 49 本打設した地盤を対象として実施し,沈下量の比較によって丸太打設の効果を確認した.数値解析は,実 験の再現解析を行い,地盤内部の応力状態の比較によって丸太打設の効果を確認した.加えて,丸太の打 設本数の差による軟弱地盤対策効果を比較し,外周にも丸太を打設することでより高い効果が得られるこ とを示した.また,腐朽防止として丸太上部に充填する充填材に関し,異なる充填長さとヤング率の組み 合わせが沈下量に与える影響を明らかにした.

Key Words: detached house, soft ground measures, log, LP-SoC method, FEM

1. はじめに

我が国の沖積地盤の面積は、国土面積の僅か10%程度 であるが、そこには人口の約半分、資産の75%が集中し ている.沖積地盤の多くは埋立地も含め、いわゆる軟弱 地盤で、そこに戸建住宅をはじめとする構造物を構築す る場合には、沈下や傾斜に対する対策が必要となるのが 一般的である.一方で、気候変動は深刻化¹⁾し、これか らは無関係のように思える軟弱地盤対策においても持続 可能性を考える必要がある.そのような背景のもと、著 者らは戸建住宅を対象とし、丸太打設によって軟弱地盤 対策を行っていく研究²⁵⁵を行っている.

気候変動の要因として、大気中の温室効果ガスの影響 が大きいことは周知の事実であるが、その主要因である 二酸化炭素を減少させ、さらに炭素固定を長年可能とす る方法として、地盤への丸太打設が効果的であることが これまで示されている²⁾⁻¹²⁾.丸太打設に使用する丸太は 中径木から可能であるが、これは間伐材の有効利用の可 能性の拡大を示している.間伐によって45年後の丸太の 断面積が約4倍になるとの報告¹⁾もあり、森林の二酸化 炭素吸収量を増加させることに効果的であるとともに、 間伐材に経済的な価値を付けることが可能であり、林業 の活性化にもつながる.打設後の丸太が長期間炭素固定 に貢献することも加えると、丸太打設は持続可能な技術 として大いに期待が持てるといえる.

本研究では、新設の戸建住宅を対象とし、丸太打設に よる軟弱地盤対策効果を実大載荷試験と数値解析(以後, FEM 解析)との両面で検討した.

本研究全体の研究フローとしては、以下の[1]~[4]の手順となる.

[1]無対策の地盤と丸太打設した地盤に対して実大載荷 試験を行い,沈下量を比較することによって,丸太打設 による軟弱地盤対策効果を確認する.

[2]FEM 解析で実大載荷試験をシミュレートし,FEM 解

析手法の精度を確認するとともに、地盤内部の応力状態 を比較することによって丸太打設による軟弱地盤対策効 果を確認する.

[3]上記結果を基に, FEM 解析で丸太の打設本数をパラメ ータとした複数のモデルに対しての性能評価を行う.

[4]丸太打設後に充填材として用いる砕石のヤング率や 充填長さが沈下量にどのような影響を与えるかを検討す る.

なお、本研究での沈下量は、即時沈下に近い鉛直変位 を主に取り扱い、時間経過に伴い沈下が進行するいわゆ る圧密沈下量は対象としない.

2. 実大載荷試験方法および FEM 解析モデル

(1) 実大載荷試験体

本研究では、秋田県大潟村の軟弱地盤で実施した実大 載荷試験⁵を対象とする.

ボーリング調査から得られた軟弱地盤の土質と各変形 係数および密度を表-1に、柱状図を図-1に示す.表-1中 の地盤のせん断弾性係数とポアソン比、丸太とコンクリ ートスラブの各材料定数はFEM解析で用いた値であり、 次節で詳述する.表-1と図-1において、粘土質シルト層 の数が異なっているが、本研究では土質試験を粘土質シ ルト層内で2深度分行っており、それらの値が異なった ため、解析では異なる層としてモデル化したためである. 地下水位は、地表面から1.00mであった.

丸太打設配置の平面図を図-2に、側面図及び土質分布 を図-3に、図-3において四角枠で示した箇所の拡大図を 図-4に示す.図-3の側面図においては、全断面で表示し た場合、深さ方向の数値が視認しづらいため、中央から 左側の1/2 断面のみ示した.この1/2 断面の場合、図-2 と比較すると、地盤の横方向の長さは 5.00m となるが、 後述する FEM 解析において、境界条件の都合上、15.00m まで拡大して考慮したため、図-3 では 15.00m で示して いる.

実大載荷試験においては、図-2に示すように、10.00m ×10.00mの試験区画に、1.20m間隔の正方形配置で7列 ×7列=49本の丸太を打設した.使用した丸太は、長さ 6.00m、末口径0.15m~0.19m、元口径0.20m~0.25mのテ ーパーのついた現地調達のスギ材を用いた.打設深さに 関しては、丸太の腐朽対策として、地下水位以深となる 盛土表面よりも1.00m深く打設し、空いた空洞を砕石で 充填した.本打設方法は、丸太の腐朽対策として、すで に液状化対策工法に用いられている工法^{例えば8)}であり、本 研究ではそれに準じた.

丸太打設後,戸建住宅の基礎を模した 3.60m×3.60m× 0.21m のコンクリートスラブを現場打ちで作製した.こ

表-1 ボーリング調査で得られた軟弱地盤の土質と

土質名および 部材	変形係数	せん断弾性係数	ポアソン比	密度
	E	G	ν	ρ_t
	(MPa)	(MPa)		(t/m ³)
盛土	2.0	0. 77	0.300	1. 520
砂礫混り粘土	2.7	0.90	0.499	1.405
粘土混り砂	2.7	0. 90	0. 499	1. 405
粘土質シルト1	2.7	0.90	0.499	1.330
粘土質シルト2	2.4	0.80	0.499	1. 281
粘土質 シルト3	2.4	0.80	0.499	1. 303
粘土質砂	5.0	1. 92	0.300	1.517
シルト質粘土	6.6	2. 20	0.499	1. 472
砂混り粘土	6.6	2.20	0.499	1. 472
細砂	19.6	7.54	0.300	1.850
基盤層	100.0	40.00	0. 250	1. 880
砕石	12.0	4.62	0.300	2. 100
丸太	<i>Ez</i> =6000 <i>Ex=Ey=Ez</i> /25	<i>Gxy=Gyz=Gzx=</i> <i>Ez</i> /15 =400	v xy = v xz = $v yz$ = v yx =0.016 v zx = v zy =0.4	0. 39
コンクリートスラブ	25000	10000	0.2	2.5



□ 10.0
□ 盛土
□ コンクリートスラブ
● 丸太
● ボーリング調査位置
図-2 丸太打設配置の平面図(単位:m)

の時,丸太打設モデルは、コンクリートスラブの外周に 2列配置されるようになるため(図-1),以後本モデルを 外周2列モデルと呼称する.丸太打設の効果を評価する ために、無対策の試験区画にもコンクリートスラブを同







図-4 図-3 において四角枠で示した箇所の拡大図(単位:m)

様に打設した.本モデルは外周2列モデルに対して,無 対策モデルと以後呼称する.

載荷は、コンクリートスラブの上に1.50m×6.00m,厚 さ22mm、15.68kNの敷き鉄板を、重機を用いて順次積 み上げていく方法で行った.実際の試験時の状況を写真 -1に示す.実大載荷試験においては、敷き鉄板を重ねる につれ、コンクリートスラブが沈下していくが、敷き鉄 板はコンクリートスラブからはみ出しているため(写真 -1)、コンクリートスラブの厚さ0.21m以上の沈下が生じ ると、敷き鉄板が地盤表面に触れてしまい、コンクリー トスラブ以外に荷重が分散してしまう.よって、0.21m 以上の沈下が生じた時点で実大載荷試験を終了とした.

(2) FEM 解析モデル

本研究のFEM解析は,

[1]実大載荷試験を FEM 解析でシミュレートし、FEM 解析の精度を確認する.

[2]実大載荷試験を行わなかったスラブ下にのみ丸太が打設されたモデル (3列×3列=9本、以後、スラブ下モデル) と、スラブの外周に1列のみ打設されたモデル (5列×5列=25本、以



写真-1 載荷時の状況

後,外周1列モデル)の性能を確認する.

[3]砕石のヤング率、充填長さが沈下量〜与える影響を調べる. の3段階のフローに沿って行うこととした.理由を以下に示す.

[1]に関しては、既報の解析手法¹¹⁾を用いて、実大載荷試験を シミュレートし、荷重:沈下量関係から、モデル化手法の妥当性 と精度を確認した後、実大載荷試験では確認できない、地盤内 部の応力状態を確認するために行った。

[2]に関しては、実大載荷試験前の検許段階において、軟弱地 盤は側方への変形も懸念されるため、スラブ外周にも丸太を配 置することによって横方向への変位を拘束し沈下量を抑制でき ると推察し、より安全側に外周2列モデルを対象とすることに した.しかし、コスト面や、敷地面積の制約がある場合を想定 し、外周1列モデルを対象とした解析を行うとともに、上記推 察が正しいかを検証するために、スラブ下モデルを解析対象と した解析を行うこととした.

[3]に関しては、砕石の締固め不足を想定した砕石のヤング 率が小さい場合もしくは充填長さが長い場合、丸太頭頂 部より上部に位置する地盤がより多くの力を受け持つこ とによって丸太への力の伝達が弱くなり、沈下量が増加 すると推察された.一方で、砕石を過度に締固めた砕石 のヤング率が大きい場合もしくは充填長さが短い場合、 丸太により多くの力が伝達されるが、地盤の荷重負担が 減少するため、設計に地盤の抵抗力を期待できなくなる 可能性がある.よって、丸太と地盤が効率的に荷重を負 担するよう、砕石のヤング率と充填長さのバランスを明 らかにする必要がある.

a) 全モデル共通の解析条件

本解析では,汎用有限要素解析ツール ANSYS (ANSYS.inc, ver.19.1)を用いて行った.本研究では,木 造2~3階建ての戸建住宅を想定しており,この場合,荷 重は30kN/m²以下となり,最大でも50kN/m²以下を想定 した.実大載荷試験においては,無対策モデルであって も50kN/m²程度まではほぼ弾性とみなせる荷重-沈下量 関係を示したことから,本研究の解析は全て弾性解析と



図-5 FEM 解析モデル (要素分割図)

した.

解析に用いた FEM 解析モデル(要素分割図)を図-5 に示す.図-1に示すように、本研究の対象は、平面方向 に見て、上下左右に対称であることから、1/4 断面で解 析を行った.ただし、境界条件を地盤側面に与えた場合、 丸太と拘束面との距離が1.4m しかなく(図-2)、拘束の 影響が応力分布等に無視できないほどの影響を与えるこ とが予備解析で示されたため、図-3に示すように、実大 載荷試験の試験区画よりも10.0m ずつ大きい断面を有す るモデルとした.

原点 O は盛土の表面中央位置,図-5 では各横断面の交 点位置に取り,高さ方向に y 軸,対称面に平行となる方 向に x 軸, z 軸を取った.解析には10 節点 30 自由度のソリ ッド要素を用い,丸太は直交異方性材料,その他は等方性材料 とした.他のモデル化に際しては,前節で示した通り,実大載 荷ぱ類に用いられた丸太には末口径と元口径が異なるテーパー が付いているが,本研究では末口径の代表的な値を用い,外接 円半径007mの正22角形でモデル化した.境界条件は、xy対称 面・側面上の全ての節点の z 方向変位を拘束,yz 対称面・側面 上の全ての節点の x 方向変位を拘束,地盤底面の x 平面上の全 ての節点の全方向変位を拘束した.

荷重は、実大載荷実験で、無対策モデルと外周2列モデルの 両方で荷重データが存在する荷重とし、コンクリートスラブ上 面に10kN/m², 40kN/m², 60kN/m²の3種類の荷重を分布荷重で 与えるとともに、要素全体のy軸方向に重力加速度を与えて自 重を考慮した。

b) [1], [2]の解析条件

実大載荷試験の再現解析および FEM 解析のみのスラブ下モ デル,外周1列モデルの解析においては、各種材料定数は表1 の値を用いた。表1中のコンクリートの値は公称値¹³,丸太の 値は文献¹⁴の値を参照した。各種土質に関しては、変形係数と 密度はボーリング調査で得られた値であるが、粘土層、シルト 層に関しては、ポアソン比を水に近い 0.499¹¹にし、軟弱地盤の 横方向の大きな変形を評価できるようにした. 各種土質のせん 断単性係数は、次式で表わされる等方性材料のせん断弾性係数 とヤング率の関係から算出した.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{1}$$

ここに、Gはせん断弾性系数、Eはヤング率、vはポアソン比である.

c) [3]の解析条件

[3]の解析では、砕石のヤング率、充填長さが沈下量へ与える 影響を調べるため、砕石の充填長さを 0.5m, 1.0m, 1.9m, 2.5mの4種類,砕石のヤング率を5MPa, 12MPa, 50MPa, 100MPaの4種類とし、それぞれを組み合わせた計16種 類のモデルを作成し、FEM 解析を行った.砕石以外の材 料定数は**表-1**と同じとした.

砕石の充填長さに関しては、パラメータは無数に存在 するため、本論文では、各土質の境界=地下水位と仮定 し、表-1、図-1に示す土質の境界の深さに合わせた.こ の際、丸太の長さを 6m のままにすると、丸太の先端部 位置が下方にずれ、土質がそれぞれ異なってしまうため、 得られる結果が充填長さの効果か土質の種類の違いなの かの判断が難しくなる.そこで本論文では、実大載荷試 験の丸太の先端位置を共通とし、丸太の長さを変化させ ることとした.充填長さが 0.5m の場合、丸太長は 6.5m となり、充填長 2.5m の場合、丸太長は 4.5m となる.

砕石のヤング率に関しては、12MPa は実大載荷試験で用いた 砕石のヤング率であるが、その比較対象として、大きい値かつ 分かり易い値として 100MPa を設定し、その半分の値として 50MPa を解析対象とした。また、12MPa よりも低い値として、 50MPa、100MPaのモデルとも比較しやすい5MPaを設定した。

3. 実験・解析結果および考察

(1) 実大載荷試験結果および FEM 解析シミュレーション

無対策モデルの実大載荷試験結果および FEM 解析結果から 得られた荷重沈下量関係を図らに、外周2列モデルの実大載荷 試験結果および FEM 解析から得られた荷重沈下量関係を図-7 に示す.

剛性が低下する直前の荷重を試験結果どうしで比較すると、 無対策モデルで47.30kN/m²、外周2列モデルで71.56kN/m²であ り、それまでの挙動はほぼ線形挙動を示す.線形挙動を示す範 囲においては、外周2列モデルの変位が無対策モデルよりも30% 程度小さく、丸太打設による軟弱地盤対策効果が確認された. また、2(2).a)で示したように、戸建住宅の重量を 30.0kN/m² ~ 50.0kN/m² と想定しており、その範囲であれば、剛性低下を生じ させず地盤を補強することがほぼ可能であることが示された.



図-6 無対策モデルの実大載荷試験とFEM解析から得られた 荷重-沈下量関係



図-7 外周2列モデルの実大載荷試験とFEM解析から得られた 荷重-沈下量関係

なお、試験の終了条件が、敷き鉄板が地盤に接した時としているため、厳密な終局荷重とはならないが、各モデルの最大荷重は、無対策モデルで75kN/m²、外周2列モデルで130kN/m²であった。

実大載荷試験結果とFEM解析結果を比較すると、無対策モデル、外周2列モデルともに、精度よくモデル化できていることが確認された.また、前述の通り、戸建住宅の重量の想定範囲内では線形挙動を示しており、弾性解析で十分であることが示された.よって、実大載荷試験では確認することができない、地盤内部に生じる変位、応力をFEM解析で検証していく.

無対策モデルの鉛直方向変位分布を図8に、外周2列モデルの鉛直方向変位分布を図9に、無対策モデルの水平方向変位分布を図9に、無対策モデルの水平方向変位分布を図11に示 布を図10に、外周2列モデルの水平方向変位分布を図11に示 す.

図8と図9とで鉛直方向変位分布を比較すると、丸太打設効 果によって、鉛直変位の値が大きく減少することが見て取れる.

無対策モデルの場合,スラブ下だけではなく,スラブ周辺の 地盤も広範囲で沈下する挙動が見られるが,外周2列モデルで は、スラブの外側の1列目の丸太を境に、鉛直変位の分布が著 しく減少することが分かる.

図・10 と図・11 とで水平方向変位分布を比較すると、図・10 中 のスラブの斜め下に、赤色のコンターで表示されている大きな 水平方向変位分布が生じているが、図・11 では黄色~赤のコンタ ーが見られず水平方向変位が著しく減少していることが分かる。 無対策モデルで大きな水平方向変位が生じる箇所に丸太が2 列 挿入されているため、より効果的に水平変位を減少させたと推 察される. なお、図・11 で、丸太が存在するにもかかわらず水平 変位が円弧状に分布する理由は、丸太が打設されていない周辺 の地盤の変位の影響を受けるためである。

10kN/m²載荷時の,無対策モデルの鉛直方向応力分布を図-12 に、外周2列モデルの鉛直方向応力分布を図13に示す、各図に おいては、応力分布の視認性を向上させることを目的とし、コ ンターの範囲を-0.008~0.001MPa とした. グレーで表示されて いる部分は、コンクリートスラブのエッジ付近の地盤に生じる 局所的な応力集中を除き-0.008~-0.01MPaの範囲の値となる. 無 対策モデルにおいては、スラブ下から広範囲かつ円弧状に圧縮 応力が分布し、深さが深くなる程徐々に小さくなっていく挙動 を示す (図-12). 一方、外周2列モデルにおいては、丸太が打 設されていない深さ1.0mまでの範囲に高い応力が地盤に生じて いるが、丸太上部付近から急激に応力が減少し、地表面から2.5m ~4.3mの範囲では、地盤に生じる応力は極めて小さくなる。し かし、地表面から43mより深く部分になると、丸太の先端的か ら円弧状の大きい応力が再び地盤に生じ、細砂、基盤層といっ た深い層にも大きい応力が分布する挙動を示す (図-13). これ は、丸太が荷重を大きく負担し、地盤の深部に力を伝達してい ることを示しており、丸太の打設効果が視認できる.

外周2列モデルに打設された丸太に生じる軸方向応力分布を 図14に示す. スラブ下に打設された2列の丸太には、ほぼ同じ ような応力が分布するが、スラブの外側1列目の丸太には、そ の半分以下の応力しか生じておらず、スラブの外側2列目の丸 太にはさらに小さい応力しか生じていない. この結果から改め て図13を詳しく見て行くと、スラブ下からスラブの外側の1列 目の丸太までの地盤には、同じような応力の分布が生じている のに対し、スラブの外側の1列目の丸太から2列目の丸太の間 の地盤には、丸太の先端部を除き大きい応力は生じていない、 よって、スラブの外側の2列目の丸太の軟弱地盤対策効果が低 い可能性が示唆される. そこで次節では、丸太の打設本数が沈 下量にどれほどの差を生じさせるのかを検討していく、なお、 本研究で対象としている戸建住宅の重量を 50.0kN/m² と想定し た場合の外周2列モデルの丸太に生じる最大王縮芯力は3.0MPa 以下であり、スギ材の圧縮許容応力度 6.0MPa¹⁵⁾よりも低く、十 分な耐力を有することが示された.

(2) 打設本数の違いによる軟弱地盤対策効果の比較

10kNm² 載荷時のスラブ下モデルの鉛直方向変位分布を図 -15 に、外周1列モデルの鉛直方向変位分布を図-16 に、全ての モデルの沈下量の比較を示した図を図-17 に示す.図-17を見る



図-8 無対策モデルの鉛直方向変位分布(単位:mm)



図-10 無対策モデルの水平方向変位分布(単位:mm)



図-12 無対策モデルの鉛直方向応力分布(単位:MPa)



図-9 外周2列モデルの鉛直方向変位分布(単位:mm)







図-13 外周2列モデルの鉛直方向応力分布(単位:MPa)











図-16 外周1列モデルの鉛直方向変位分布(単位:mm)

と、いずれの丸太打設モデルの沈下量も減少しているが、スラ ブ下モデルの減少量は外周1列モデル、外周2列モデルよりも 減少量は小さく、スラブの外側に丸太を打設すると沈下量を抑 制することが示された.ただし、各モデルの沈下量の差は小さ く、スラブ下にのみ丸太を打設するだけで十分な軟弱地盤対策 効果が得られる可能性が示された.スラブ下モデル(図-15)と 外周1列モデル(図-16)の鉛直方向変位分布を比較すると、外 周1列モデルの方が、x方向、y方向ともに沈下範囲が減少して いることが分かる.図-15、図-16を図-8(無対策モデル)、図-7 (外周2列モデル)とも比較すると、丸太打設の列が増えるほ どx方向、y方向ともに沈下範囲、沈下量ともに減少していくが、 外周1列モデルと外周2列モデルとに大きな差が見られない、

10kN/m²載荷時のスラブ下モデルの水平方向変位分布を図-18 に、外周1列モデルの水平方向変位分布を図-19に示す.丸太打 設の列防増えるとx方向、y方向ともに水平変位範囲が減少して いることが分かる.図-18、図-19を図-10(無対策モデル)、図-11 (外周2列モデル)とも比較すると、鉛直変位分布同様、丸太 打設の列防増えるほどx方向、y方向ともに水平変位範囲が減少 していくが、外周1列モデルと外周2列モデルとに大きな差が 見られない.

10kNm² 載荷時の、スラブ下モデルの鉛直方向応力分布を図 -20に、外周1列モデルの鉛直方向応力分布を図-21に示す.図 -20と図-21を比較すると、丸太が打設されていない深さ 1.0m までの範囲に大きい応力が地盤に生じている点、丸太上部付近 から急激に応力が減少し、地表面から 2.5m~4.3m の範囲では、 地盤に生じる応力は極めて小さくなる点、地表面から 4.3m より 深い部分になると、丸太の先端部から円弧状の大きい応力が再 び地盤に生じ、細砂、基盤層といった深い層にも大きい応力が 分布する点で外周2列モデル(図-13)と同じ傾向の挙動を示す. また、地盤に生じる応力に関しても、丸太打設の歹防増えるほ ど大きい応力が生じる範囲、応力の大きさが減少していくが、 外周2列モデル(図-13)と外周1列モデル(図-21)とに大き な差が見られない.

10kN/m²載荷時の、スラブ下モデルの丸太周辺の地盤に生じる せん断応力 ϵ_x 分布を図-22に、外周1列モデルのせん断応力



図-17 10kN/m²載荷時の全てのモデルの沈下量の比較

 ϵ_x 分布を図23に、外周2列モデルのせん断応力 ϵ_x 分布を図24 に示す.

各図を見ると、全てのモデルで、丸太周辺にせん断応力が生 じており、丸太打設による軟弱地盤対策効果には、丸太と地盤 の接触部の挙動も大きく寄与している可能性が示された。せん 断応力の値で各モデルを比較すると、打設の本数に関わらず、 地盤に生じるせん断応力の値に差が生じていない、一方、せん 断応力の分布で各モデルを比較すると、スラブ下モデル(図-22) には、スラブのエッジ部から応力球根が見られるが、外周1列 目の丸太の打設によって、応力球根が消えることが示される(図 -23、図-24) とともに、外周1列モデルと外周2列モデルとで は、鉛直方向応力分布同様、せん断応力分布に大きな差が生じ ないことが示された。また、スラブ下の丸太周辺の地盤のせん 断応力に関しては、丸太の高さ方向の中間辺りから、せん断応 力の正負が入れ替わる挙動が見られる。図-20、図-21 に代表さ



図-18 スラブ下モデルの水平方向変位分布(単位:mm)



図-19 外周1列モデルの鉛直方向変位分布(単位:mm)

れるように、丸太の先端部周辺の地盤には高い応力集中が生じ るなど、応力分布は複雑となるため、せん断応力の分布にも影 響が出ると推察される。丸太と地盤との摩擦によって地盤に同 様のせん断応力が生じるとすれば、この挙動によって、丸太周 辺の摩擦が下がると考えられ、設計時に摩擦を考慮する際は留 意が必要である可能性がある。

本論文における丸太と地盤の接触面におけるモデル化は、摩擦係数を用いた接触解析では無いため、厳密な値とは言えないが、丸太問辺の地盤に生じる挙動は一定の評価は可能であると考えられる。今後、丸太打設による周辺摩擦の効果を、FEMと部材試験等で明らかにしていく予定ある。

以上より,前節と本節を取りまとめると,無対策モデルの場合,スラブ直下の範囲は元より,スラブの外周の範囲にも沈下 と水平変位,鉛直応力が広範囲で生じるため,スラブの外周に も丸太を打設することにより,スラブの外周の範囲の沈下等







図-21 外周1列モデルの鉛直方向応力分布(単位:MPa)







図-23 外周1列モデルの丸太周辺の地盤のせん断ひずみ分布 (単位: μ)





を減少させる効果が確認された。しかし、外周1列モデルと外 周2列モデルとで、性能に大きな差は認められなかったため、 スラブの外周2列目まで丸太を打設する必要性が無いことが示 された。また、スラブ下に丸太を打設するだけでも十分な軟弱 地盤対策効果が期待できることが示されたことから、今後の施 工においては、コストや要求性能、施工可能な宅地条件によっ て、スラブ下モデル、外周1列モデルのいずれかを選択するこ とが可能となってくる可能性が示された。

(3) 充填材のヤング率と充填長さの違いが軟弱地盤対 策効果に与える影響の検討

本項では、外周2列モデル対象として、砕石の充填長 さとヤング率が、沈下量に与える影響を確認していく.

砕石の充填長さを 0.5m, 1.0m, 1.9m, 2.5m の 4 種類, 砕石のヤング率を 5MPa, 12MPa, 50MPa, 100MPa の 4 種類に設定し, それぞれを組み合わせた計 16 種類のモデ ルに対し 10kN/m² 載荷した時の,各モデルの充填長さ-沈下量関係を図-25 に示す.

同じ充填長さのモデルどうしを比較すると、ヤング率 が小さいほど沈下量が増加する傾向が見られる.同様に、 同じヤング率のモデルどうしを比較すると、充填長さが 増加するほど沈下量が増加する傾向が見て取れる.つま り、砕石のヤング率が大きいほど、充填長さが短いほど 沈下量は減少する.

砕石の充填長さとヤング率の関係性を詳しく検討す るために、同じ充填長さの場合に最も沈下量が多いヤン グ率 5MPa のモデルと、最も沈下量が少ないヤング率 100MPa モデルを選び出し、充填長さ毎に相対誤差を求 めた. 相対誤差は、 {(ヤング率 5MPa のモデルの沈下量 - ヤング率100MPaのモデルの沈下量)/ヤング率100MPa のモデルの沈下量}で求めた.充填長さ毎の相対誤差を比 較すると、充填長さ0.5mで27.7%、1.0mで22.0%、1.9m で19.1%, 2.5m で18.2%と, 充填長さが長くなるほど相 対誤差は減少していく傾向が見られた. また, 充填長さ 0.5mと1.0mの相対誤差の差は充填長さの差0.5mに対し て 5.7% となる一方で、充填長さ 1.9m と 2.5m の相対誤差 の差は、充填長さの差0.6mに対してわずか0.9%となり、 充填長さが長くなる程、相対誤差の減少率が小さくなる ことが分かる、これは、充填長さが長くなるほど、砕石 のヤング率の違いが沈下量に与える影響が小さくなって いくことを示す. この点も含め, 鉛直方向応力分布で砕 石の充填長さとヤング率が軟弱地盤対策効果に与える影 響を見て行く.

10kN/m² 載荷時の各モデルに生じる鉛直方向応力分布 の代表例として,沈下量が最も大きい充填長さ2.5m,ヤ ング率5.0MPaのモデル(以後D2.5E5モデル)の鉛直方 向応力分布を図-26に,沈下量が最も小さい充填長さ 0.5m,砕石のヤング率100MPaのモデル(以後,D0.5E100



図-25 10kN/m²載荷時の充填深さ-沈下量関係



図-26 10kN/m²載荷時の D2.5E5 モデルの鉛直方向応力分布 (単位: MPa)



図-27 10kN/m²載荷時の D0.5E100 モデルの鉛直方向応力分布 (単位: MPa)

モデル)の鉛直方向応力分布を図-27に示す.

図-26と図-27を比較すると、各図中赤枠で記した箇所 と、青枠で示した箇所で応力分布に大きな差が生じてい ることが分かる.赤枠箇所の応力分布を比較すると、 D2.5E5モデルにおいては、スラブ下の地盤に大きな圧縮 応力が生じているのに対し、D0.5E100モデルにおいては、 半分以下の応力しか生じていない.一方、青枠箇所の応 力分布を比較すると、D0.5E100モデルにおいては丸太の 下端部から下部の地盤に広範囲に渡って大きい圧縮応力 分布が生じているのに対し、D2.5E5にはその半分程度の 値しか生じていない.つまり、沈下量の少ないモデルほ ど、丸太を介して、地盤の深部に力を伝えていることが 示された.なお、本稿では、他のモデルの応力分布は割 愛しているが、沈下量の大きいモデルほど赤枠箇所の地 盤の応力が大きくなり、逆に青枠位置の地盤の応力が小 さくなることを確認している.

実際の施工現場では、地下水位位置によって充填長さ は決まってくるが、コストと要求性能に応じて砕石の種 類の変更が可能であり、また、要求性能を満たさない場 合、丸太の本数の増減の検討が事前にできるなど、本結 果は施工前の検討に際して有用である.

4. まとめ

本研究では、新設の戸建住宅を対象とし、丸太打設に よる軟弱地盤対策効果を実大載荷試験と FEM 解析との 比較した後、得られた結果を基に、基礎外周の丸太の打 設の効果、砕石の充填長さとヤング率が沈下量に与える 影響を FEM 解析で検討した.以下に得られた知見を示 す.

・剛性が低下する直前の荷重は、無対策モデルで47kWm²、外周2列モデルで72kWm²であり、戸建住宅の重量を50.0kWm²と想定した場合、丸太打設による軟弱地盤対策効果が高いことが示された.また、線形学動を示す範囲においては、外周2列 モデルの変位が無対策モデルよりも30%程度小さいことが確認された.

・実大載荷試験結果とFEM解析結果を比較することでFEM解析の精度を比較したところ、無対策モデル、外周2列モデルともに、精度よくモデル化できていることが確認された.

・FEM解析で地盤内部に生じる鉛直方向応力分布を検討すると、 無対策モデルの場合、スラブ直下の範囲は元より、スラブの外 周の範囲にも沈下と水平変位、鉛直応力が広範囲で生じること が示された.一方で、丸太打設モデルの場合、丸太が打設され ていない、深さ10mまでの範囲に大きい応力が地盤に生じている が、丸太上部付近から丸太下端部まで地盤に生じる応力は極め て小さくなり、丸太の先端部から再び円弧状の大きい応力が地 盤に生じることが示され、丸太が荷重を大きく負担し、地盤の 深部に力を伝達していることが明らかとなった。

・スラブの外周にも丸太を打設することにより、スラブの外周 の範囲の沈下等を減少させる効果が確認された。しかし、外周1 列モデルと外周2列モデルとで、性能に大きな差は認められな かったため、スラブの外周2列目まで丸太を打設する必要性が 無いことが示された。

・砕石の充填長さとヤング率の違いが、沈下量に与える影響を 調べたところ、砕石のヤング率が大きいほど、充填長さが 短いほど沈下量は減少することが確認されたが、充填長 さが長くなるほど、砕石のヤング率の違いが沈下量に与 える影響が小さくなっていくことが示された.

参考文献

 IPCC 第5 次評価報告書 第1 作業部会報告書 概要 気 象庁訳,

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_es_j pn.pdf. (2020年7月6日閲覧)

- 沼田淳紀:地盤での木材利用による地球温暖化緩和策, 地盤工学会誌, 67-4(735), pp.24-27, 2019.
- 千田知弘,沼田淳紀,村田拓海,鈴木雅紀:丸太打設 軟弱地盤対策における丸太頭部の充填材に関する数値解 析的検討,令和二年度土木学会年次学術講演会講演概要 集,印刷中,2020.
- 鈴木雅紀,千田知弘,沼田淳紀,村田拓海:FEMを 用いた丸太打設による戸建住宅の軟弱地盤対策に関 する基礎的研究,土木学会東北支部技術研究発表会

(令和元年度), Ⅲ-39, CD-ROM, 2020.

- 5) 沼田淳紀,村田拓海,佐々木修平,藤野一,川崎淳志, 杉山耕平,林知行:丸太打設した軟弱地盤における大型 平板載荷試験,第 55 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.21-8-2-98, 2020.
- 沼田淳紀:建設事業での木材利用による地球温暖化緩和, 土地改良, Vol.56, No.2, pp.106-108, 2018.
- 油屋昌宏,沼田淳紀,三輪滋:丸太打設液状化対策工法の中規模農舎への適用,日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集,CD-ROM, 2017.
- 三輪滋,沼田淳紀,村田拓海,吉田雅穂:丸太打設による既設戸建住宅の液状化対策の数値解析による効果の検討,木材利用研究論文報告集,Vol.14, pp.94-99, 2015.
- 9) 村田拓海,沼田淳紀,川崎淳志,橋本佳大,佐々木修平, 佐々木貴信:粘性土地盤中にある丸太の早期における鉛 直支持力,平成30年度土木学会年次学術講演会講演概要 集,V-001,2018.
- 10) 三村佳織,水谷羊介,中村博,伊藤智栄,原忠:軟弱地 盤に打設したテーパー状木製地盤補強材の鉛直載荷試験, 木材利用研究論文報告集, Vol.17, pp.1-7, 2018.
- 11) 千田知弘, 沼田淳紀, 三輪滋, 村田拓海, 桐ヶ久保 龍都, 松井友希: 軟弱地盤上の盛土に対する 3D-FEM による丸太打設効果の基礎的研究, 木材利用研究発 表会講演概要集, Vol.18, pp.30-38, 2019.
- (公社)土木学会木材工学委員会:土木技術者のための木材 工学入門, p.166, 2017.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2012.
- 14) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 許容応 力度・許容耐力設計法 - , p.399, 2011.
- 15) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説-許容応力 度・許容耐力設計法-, p.395, 2011.

(Received October 16, 2020) (Accepted January 31, 2021)

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY FOR SOFT GROUND MEASURES OF DETACHED HOUSE BY LOG PILLING

Tomohiro CHIDA, Atsunori NUMATA, Takumi MURATA, Tomoki MATSUI and Kaito MURAKAMI

In recent years, damage to detached houses due to torrential rain has increased. One of the main reasons for this damage is ground subsidence in the soft ground, on which these houses are built. Since most research studies have shown that the log piling method is an effective way to explore soft ground measurements, it was used in this study to examine the foundations of detached houses. Full- scale loading tests were conducted and FEM analyses were used to confirm the results. The full-scale loading tests indicated that the log piling method decreased ground subsidence by 30%, a result that was supported by the FEM analyses. The results also confirmed that vertical stress to the ground was reduced by log piling. FEM analyses were also conducted for two different log piling arrangements, one with a single round of logs piled around a concrete slab, and the other with two rounds. Measurements of the two piling methods showed that a single round of logs was as effective in reducing foundation settlement as two rounds. The relationship between the filling length and Young's modulus of crushed stone was also investigated. The results showed that the amount of ground settlement decreased when Young's modulus was higher and the filling length was shorter.