

仙台市縄文の森広場野外展示の復元住居柱木材の強度測定と修繕について

佐藤祐輔・大塚亜希子

1. はじめに

2022年3月16日に発生した福島県沖を震源とする地震（仙台市太白区：震度5強）の影響によって、野外展示の復元住居の柱木材と床に隙間が生じるなどの被害が確認された（第1図）。

2022年度、地震被害への災害復旧措置として、復元住居床面修繕の予算が配当され、年度内の修繕が計画された。

2006年の開館の際に建設した復元住居の柱木材の可視部分は健全な状態に見えるが、床に埋もれている部分について劣化状態が不明であった。地震によって生じた隙間も、木材の劣化が影響している可能性もあることから、床のタタキを全て掘削して、柱木材の状態を確認することとした。

それに伴い、柱木材の状態確認および維持管理について助言を受ける場として、有識者を招聘し、2022年12月3日および9日に現場の確認、指導を受けた（第2図）。招聘した有識者は以下のとおりである。

浅川滋男氏（県立鳥取環境大学） 12月3日

大塚亜希子氏（秋田県立大学） 12月3日

岡本一秀氏（兵庫県立考古博物館） 12月3日

小黒智久氏（富山市民俗民芸村） 12月9日

また、大塚亜希子氏に依頼し、同日に木材の強度測定を行い、見えない部分の劣化状況の確認を行った。その状況を踏まえ、2023年2月2日に最も劣化が進んでいる9号住居の柱2本の修繕を行った。本稿は、床面掘削、柱木材の強度測定、柱の修繕について報告を行う。文責は各章の末尾に記す。

（佐藤）

2. 復元住居の床面掘削について

2-1. 床面の構造

床下に埋もれている木材の劣化状況を確認するために、復元住居3棟すべてのタタキをすべて掘削した。掘

削は委託した業者（阿部建設株式会社および株式会社植耕）が行った。

第3図は、復元住居の設計図面であるが、タタキの構造等について記載がないため、その工法を確認するという意味でも行った。設計上は深さが20cmほどで、コンクリートを基礎としている。また、床材は「三和土」のみとされている。

第4図は、掘削した際の写真である。15～20cmほどの厚さで、タタキ・碎石・タタキの構造になっていることがわかる。

柱材は、設計図通りにコンクリート基礎の上に乗り、アンカーボルトで固定されている。

2-2. 柱木材の劣化状況（目視）

劣化状況の詳細は次章で述べるが、各住居の柱木材の主な状況は第5図の写真のとおりである。

最も劣化が進んでいたのは第9号住居の9-1である。建物入口付近の1本であるが、基礎コンクリートから遊離している状態であり、かろうじてアンカーボルトで保っている状態であった。9-2も劣化が著しく、支柱としての強度を保っていなかった。

次に劣化が進んでいる柱材は、竪穴の壁面に接しているものであった。10・14号住居の柱材10-6、10-7、10-8（第5図）、14-3、14-6（第5図）、14-8である。壁面に接していない部分は比較的健全な状態を保つものの、壁面との接地面側は大きく腐食しており、材の半分程度が劣化している状態であった。

それに対して、住居中央などに独立して設置されている柱木材はほとんど腐食しておらず、健全な状態を保っていた（第5図の10-5、14-7など）。

（佐藤）

3. 木材の強度測定について

3-1. 調査対象

配置図に示す野外広場復元住居3棟に対して、第6図

の調査フローにおける二次診断（非・微破壊試験）を行った。非・微破壊試験では表面含水率・超音波伝播速度測定・穿孔抵抗値測定を行った。

3-2. 調査箇所

各棟の柱の配置を第7図に示す。調査カ所は第9号柱4本・第10号柱8本・第14号柱8本の計20本の柱の調査を行った。調査箇所については、一つの柱に対して地表付近（地面から5cm）とその上部（地面から30cm）の二カ所で調査を行った。ただし、9号棟はコンクリート基礎からの高さとするが、10号棟・14号棟についてはたたきの土からの高さとする。

また、柱に使用されている部材の樹種はすべてクリである。

3-3. 調査方法

（1）表面含水率測定

木材中の水分は各測定値に大きく影響することから、電気抵抗式と高周波容量式との2種類の測定器を使用して測定を行った。測定の様子を第8図1・2に示す。表面含水率はデータの精度向上のために、一つの調査カ所につき三回測定を行い、その平均を求めた。

（2）超音波伝播速度測定

超音波測定器を用いて各試験体の超音波伝播速度測定を行った（第8図3）。本検討における対象は、円柱の部材が多かったため、54kHzの尖頭型の測定器を使用し測定を行った。超音波伝播速度測定については、表面含水率測定同様データの精度向上のために、一つの調査カ所につき三回測定を行い、その平均を求めた。

（3）穿孔抵抗値測定

穿孔抵抗値測定は、第8図4に示すように、レジストグラフを用いて測定を行った。部材に対して細いキリを挿入した際に、抵抗が大きければ、試験体は健全となる。しかし、抵抗が弱いあるいはほとんど抵抗がない場合には、腐朽もしくは空洞化している危険性がある。そのため、微破壊試験で内部の健全性を確認するためには有効な試験方法である。測定条件を貫入速度：100cm/min、回転速度：2500r/minと設定して測定を行なった。

3-4. 調査結果

（1）含水率について

含水率は伐木直後が最も高く、乾燥に伴い徐々に低下していくが、最終的には木材の置かれている周囲の気象

条件（相対湿度）に応じて、一定の含水率に落ち着いていく。この落ち着いた時の含水率を平衡含水率と呼び、自然大気中に放置した時の平衡含水率は、全国平均で約15%と言われている。また、製材の日本農林規格（JAS）において、未仕上げ材、SD15仕上げ材については平均含水率の基準が15%以下、構造材については平均含水率の基準が20%以下の含水率区分に相当する（三重県林業研究所2015）。例として、建築に多く用いられるスギについての単位重量と含水率の関係を第9図に示す。

（2）表面含水率測定結果

①表面含水率測定（静電容量法）結果

表面含水率測定（静電容量法）の測定結果を第10図に示す。図には構造材の平均含水率の基準である20%に対して、使用した計測機器の誤差範囲である±2%の場所に網掛けをする。静電容量法による計測結果より、すべての柱材は構造材の平均含水率の範囲内であった。

②表面含水率測定（電気抵抗法）結果

表面含水率測定（電気抵抗法）の測定結果を第11図に示す。図には構造材の平均含水率の基準である20%に対して、使用した計測機器の誤差範囲である±0.2%の場所に網掛けをする。電気抵抗法による計測結果より、10号棟は全ての柱材の表面含水率は構造材の平均含水率の基準の範囲内であった。9号棟は部材2の50mm付近のみ20%を超えており、14号棟については柱材9-3、柱材9-4、柱材9-5、柱材9-8のそれぞれ300mm付近で表面含水率が20%を超えていた。超過の範囲が5%未満であり、また測定結果は前後の天候状態等に影響を受けて変化することから、含水率は正常の範囲内であると言える。

③2つの表面含水率測定結果の関係

今回測定した表面含水率測定（静電容量法）と表面含水率測定（電気抵抗法）表面含水率測定の結果を第12図に示す。 $R^2=0.85$ と強い相関関係があり、今回の測定結果は概ね安定した精度で行われ、材料の含水率は安定していることがわかった。

（3）超音波伝播速度測定結果

超音波伝播速度測定結果を第13図に示す。10号棟柱材9-4のみ超音波伝播速度測定値が突出しているが、そのほかの部材は800m/s付近、500m/s付近に大別さ

れる結果となった。

今回は既存部材に対し非破壊試験および微破壊試験での測定のみ実施した。部材を切り出して行う材料強度試験の実施ができないため、材料強度の測定は難しい。そこで、報告者の既往の調査とデータ比較を行うこととする。クリ材に対する既往の調査の超音波伝播速度と圧縮強度の関係を第 14 図に示す。

既往研究（岩田ほか 2007）では、シロアリによる喫食の針葉樹と広葉樹別での傾向について、広葉樹は不規則に分散して喫食されるケースが多いと報告されている。つまり喫食がランダムな広葉樹は柂目・板目によらない。第 14 図に柂目・板目両方からの測定結果を示している。第 13 図で示した測定結果同様に、第 14 図にも 800m/s 付近、500m/s 付近にラインを設定した。800m/s 付近においては測定結果に対し、縦圧縮強度はばつぎが大きかった。サンプル数も少なく、本検討の範囲で、超音波伝播速度を推定することが難しい。

今後、補修時のタイミングでサンプルを取り出す機会があれば、材料強度について実験を行うことが望ましい。

（4）穿孔抵抗値測定結果

調査結果を第 16・18・20 図に示す。横軸は測定長さを示しており、そのままそれぞれの柱長となる。針葉樹は細胞形成が規則的であり、早材・晩材の硬さの変化を drill 値は検出しやすいといえる。一方で、広葉樹は細胞形成が複雑であり、ドリルの回転抵抗出る drill 値の変化は読み取りにくい、貫入速度に対する抵抗である feed 値の変化は読み取りやすいため、本検討においては、feed 値とする。

オレンジ色の線が GL より 50mm の高さの場所、青い線が 300mm の高さの場所、黄色い線が 450mm の高さの場所、緑の線が 600mm の高さの場所、紫の線が 800mm の高さの場所とする。

本検討においては、穿孔抵抗値（feed 値）が 15 より大きい場合位は 15 より小さい場合は材料強度との相関が急激に低下する傾向があるため、今回は、穿孔抵抗値が 15 以下の場合は材料強度に不安ありと判断する。

なお、第 16・18・20 図すべてのグラフに共通して、数ミリ単位でギザギザに見えるところについては、早材と晩材など細胞の境界であるため、抵抗が上下することについては問題ない。

9 号住居の柱材の様子を第 15 図に示す。補修対象の柱材 9-1 は部屋側から 10～11cm 付近、柱材 9-1 は部屋側から 5～7cm 付近に空隙もしくは劣化が確認されており、5cm の高さで材料強度に不安ありと判断される。一方で、30cm 付近になると 15 を下回る場所はほとんどなく、一定の材料強度は保たれていることが推察される。ただし、9-2 の 80-120mm（アンカー付近）では下回ってはいないものの、かなりばらついているので、アンカーを増設されることに賛成する。

今回は取り替え対象とはならない柱材 9-3、柱材 9-4 については、計測結果が示すように、穿孔抵抗値が 15 以下の場所はほとんどなかった。ただし、80-100mm 付近では下回ってはいないものの、低い位置でデータがばらついているので、既存アンカー付近については、今後も定期的に確認が必要である。

10 号住居の柱材の様子を第 17 図に示す。柱材 10-2、柱材 10-4、柱材 10-5 の測定値は安定しており、部材に損傷もしくは空洞は検出されなかった。部材 10-6 の測定値については、現段階では損傷は確認されていないが、計測結果より、部屋側から 7～11cm 付近は今後も確認が必要である。

柱材 10-7 については、高さ 300mm 付近の高さのみ、部屋側から 40-70mm 付近において損傷もしくは空洞が確認された。

柱材 10-1、柱材 10-3 については、50-600mm のどの高さにおいても部屋側から 80-170mm 付近において不安定な測定結果となった。

柱材 10-8 については、高さ 50mm 付近では部屋側から 80-170mm 付近、高さ 300mm 付近では部屋側から 80-140mm 付近、高さ 600mm 付近では部屋側から 80-120mm 付近、高さ 800mm 付近では部屋側から 80-100mm 付近において損傷もしくは空洞が検出された。高さ 50-600mm の高さ 450mm 付近を除いたどの高さにおいても部屋側から 80-170mm 付近において不安定な測定結果となった。材料診断を再度行うことを推奨する。

14 号住居の柱材の様子を第 19 図に示す。柱材 14-1、柱材 14-2、柱材 14-3、柱材 14-4、柱材 14-5、柱材 14-7、柱材 14-8 の測定値は安定しており、柱材に損傷もしくは空洞は検出されなかった。柱材

14-6 の測定値については、高さ 50-300mm 付近については、部材全体に損傷もしくは空洞が確認された。

3-5. 考察

今回劣化が著しく進行していた部材は 10 号住居柱材 10-3、柱材 10-8、14 号住居柱材 14-6 であった。該当箇所を第 21 図に赤丸で示す。今回劣化が進行していた部材は、第 22・23 図に柱材と土留柱の様子を示す。第 23 図に示すように、すべて盛土が土留柱で堰き止められなくなり、柱材に対して土留柱がピッタリ密着し、その周りを盛り上がった土で覆われている状態になっていた。今回目視で虫害による被害が確認された。詳細については調査が必要となるが、例えばシロアリであった場合は、土留め柱が餌場となり漏れ出した盛土が蟻道づくりを助けることとなり、柱への食害を容易にする原因となるため、早急にこちらの対処が必要である。土を取り除いた上で、柱と土留柱を遮断することを推奨する。

また、青丸で示した 10 号住居柱材 10-6、14 号住居柱材 14-3、柱材 14-8 については、現時点では大きな損傷は考えにくい、今後劣化が進行する可能性があるため、今後も定期的な点検が必要である。

(大塚)

4. 柱の修繕

柱木材の劣化状況を把握したうえで、9 号住居の 2 本(9-1、9-2)は、緊急性が高いことから、優先的に修繕することとした。

修繕は当館の復元住居の修繕を委託している阿部建設株式会社に委託して行った。修繕方法については、2022 年 12 月に専門家による現地指導の際に提案の

あった方法を基本とした。

修繕に先立って、壁面側板および柱木材の根元部分の劣化を遅らせるために、防腐・防カビ・防虫塗料キシラデコール（色：ウォルナット、大阪ガスケミカル製）を塗布した。

柱木材の腐食部分は、エポキシ樹脂で充填する方法を採用し、「ボンド E206」（株式会社コニシ製）を使用した。

腐食部分はノミで削り落とし（第 24 図 1）、柱の健全な部分のみを凸状に加工し、アンカーボルトを 4 本新たに設置した（第 24 図 2）。その周りを鉄板で囲い（第 24 図 3）、上記エポキシ樹脂を注入した。樹脂が固まった様子が第 24 図 4 である。

多少の気泡はあるものの、柱木材とコンクリート基礎とを繋ぐ意味で充填はうまくいったため、経過観察後に床面を埋め戻した。

(佐藤)

5. おわりに

以上、地震被害を契機に行った柱木材の劣化診断、修繕の報告を行った。今回の診断および修繕は柱木材を対象にしたが、屋根材や壁材については行っていない。また、劣化が進んだ他の柱木材についても経過観察を行い、状況にあわせ修繕が必要になるであろう。

公開している復元建物の維持管理として最も重要なことは、安全に利用者に見学してもらうことである。建築から 17 年以上経過していることもあり、今後も継続して調査する必要がある。

(佐藤)

参考文献

三重県林業研究所 2015 <https://www.pref.mie.lg.jp/ringi/hp/000237699.htm> 最終アクセス日:2023.1.13

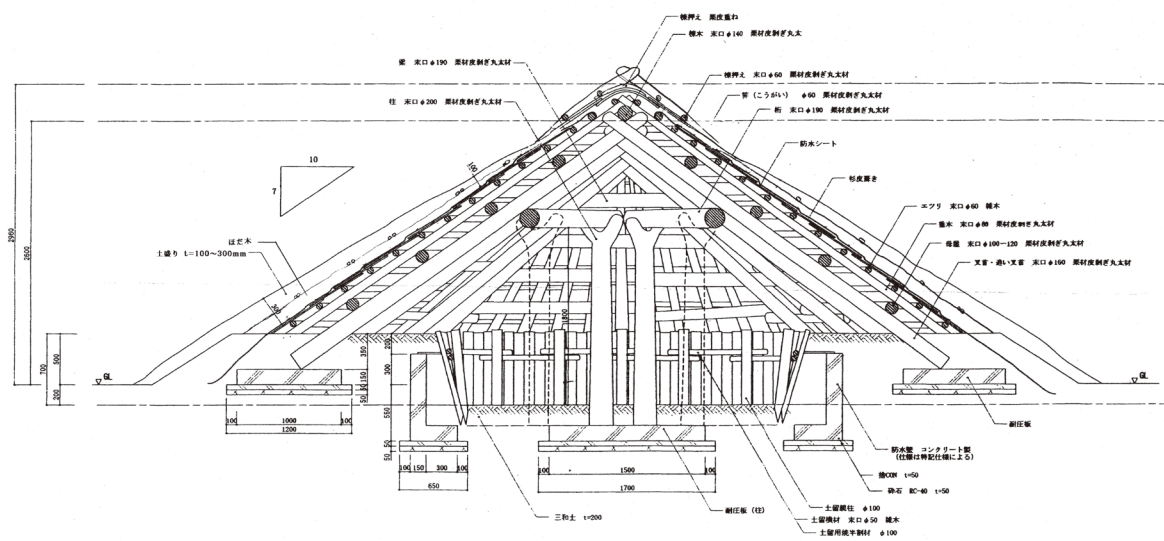
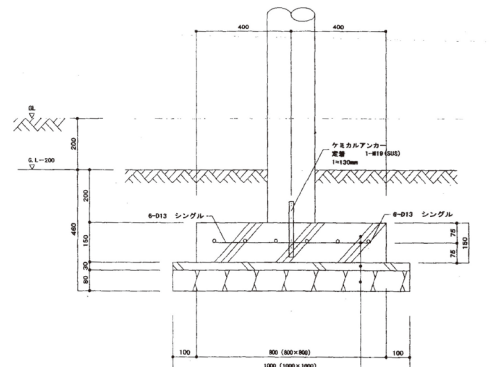
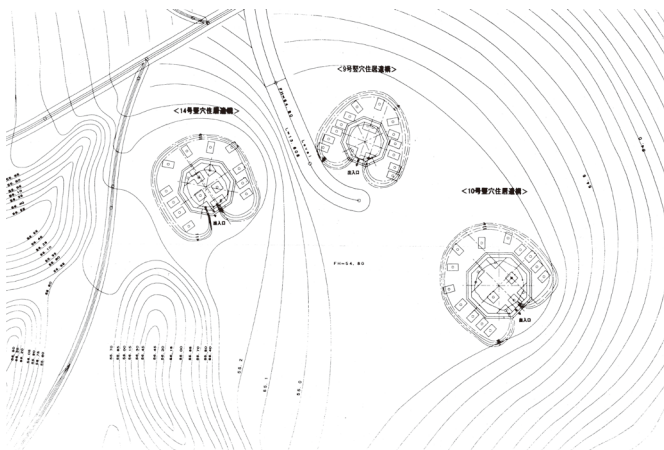
岩田隆太郎ほか 2007 「シロアリによる樹木の被害」『日本環境動物昆虫学会』18-2 環動 pp.55-66.



第1図 地震による被害（9号住居）



第2図 現地指導の様子



第3図 復元住居の配置と設計図（下断面図：9号住居）



第4図 床面の掘削と断面



柱材 9-1



柱材 9-2



柱材 10-5



柱材 10-8

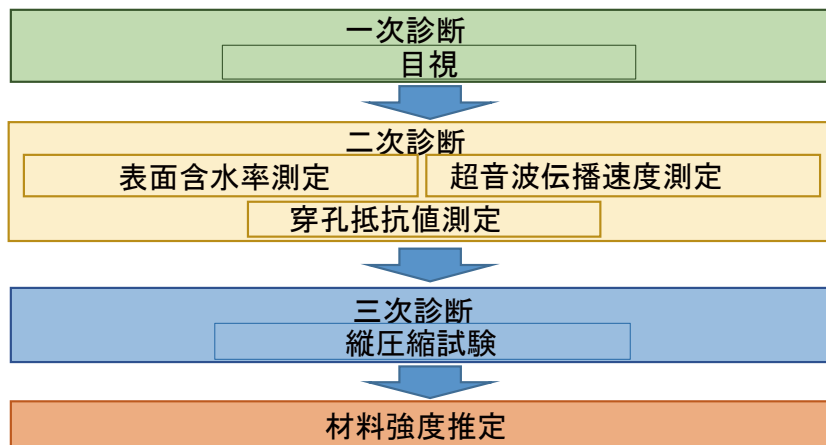


柱材 14-6

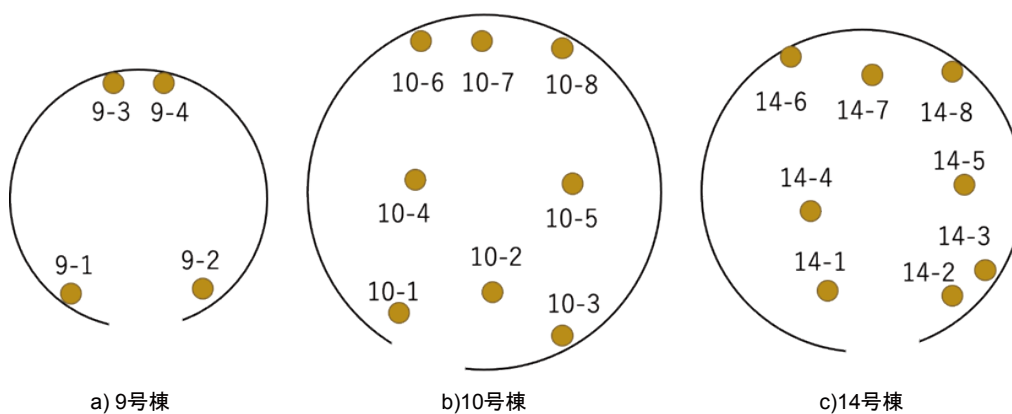


柱材 14-7

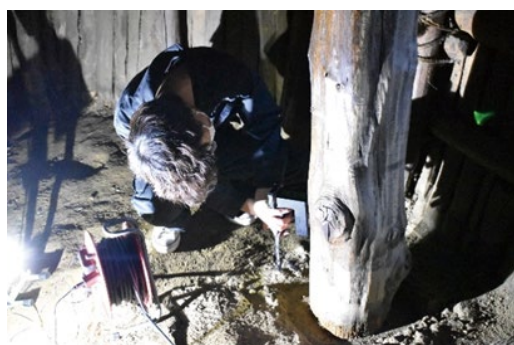
第5図 柱木材の劣化状況



第6図 調査フロー



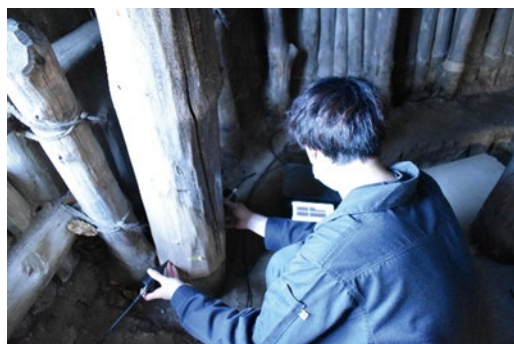
第7図 柱木材の配置図



1. 表面含水率 静電容量法



2. 表面含水率 電気抵抗法

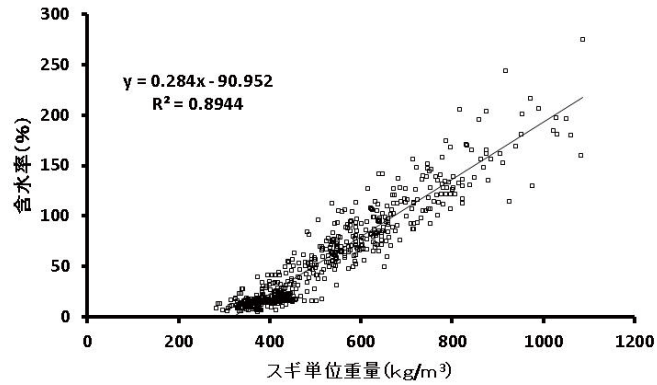


3. 超音波伝播速度測定

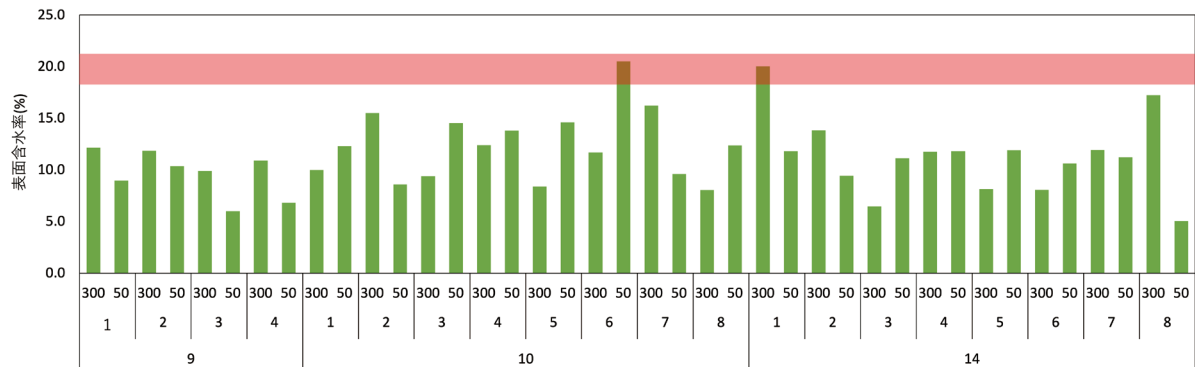


4. 穿孔抵抗値測定

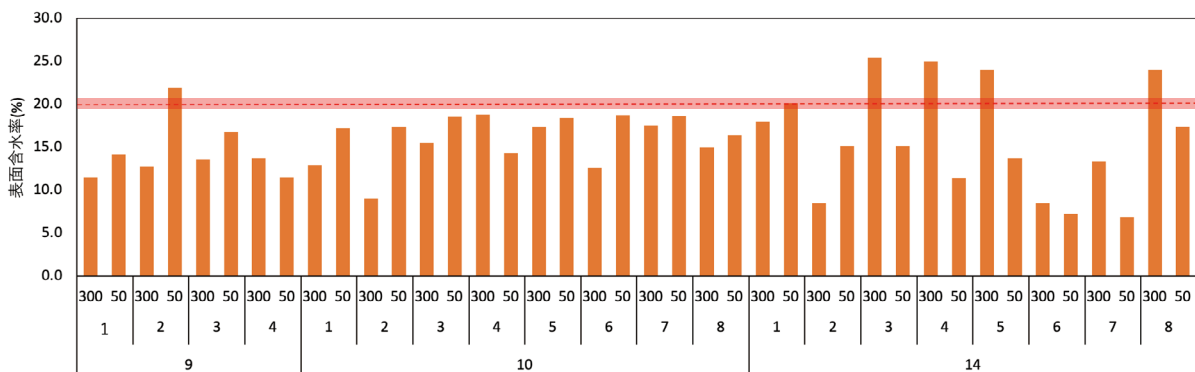
第8図 各種調査の様子



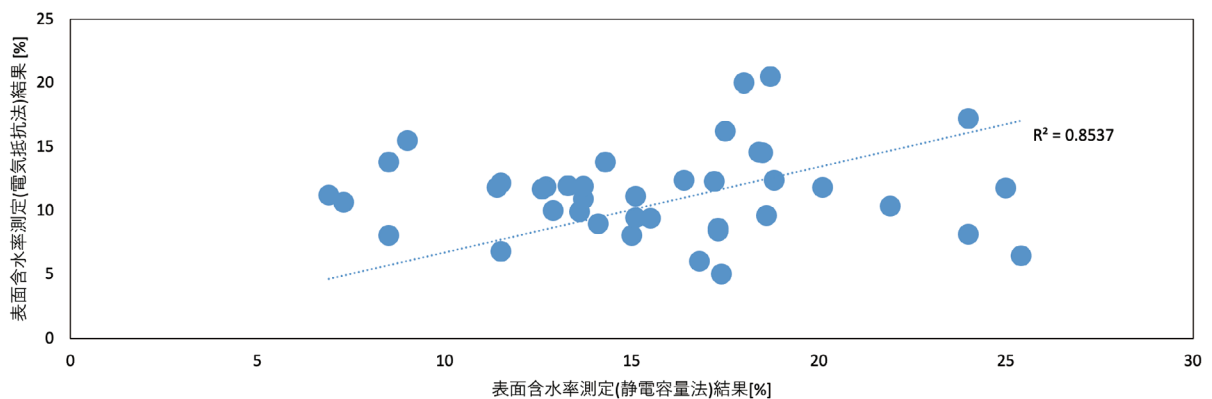
第9図 三重県産のスギの単位重量 (kg/m³) と含水率の関係



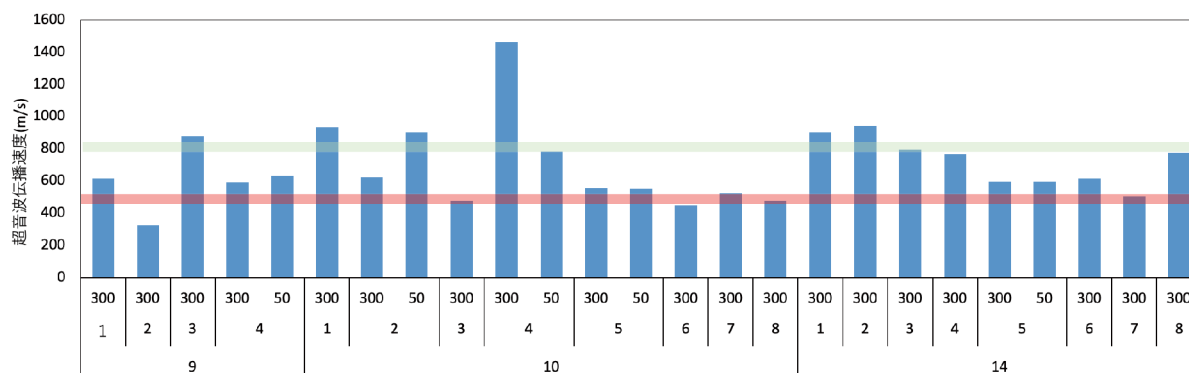
第 10 図 表面含水率測定（静電容量法）結果一覧



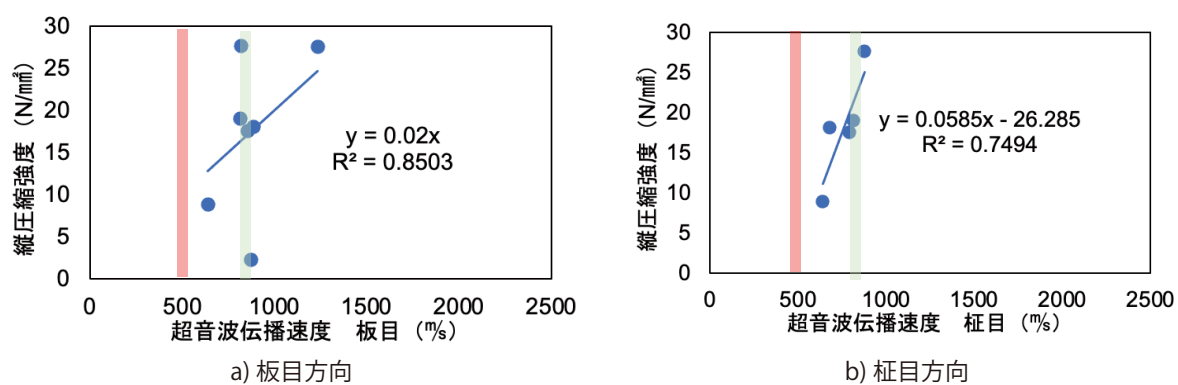
第 11 図 表面含水率測定 (電氣抵抗法) 結果一覽



第 12 図 表面含水率測定の関係（静電容量法—電気抵抗法）



第 13 図 超音波伝播速度測定結果一覧



第 14 図 超音波伝播速度—縦圧縮強度関係（報告者の既往の調査より）



柱材 9-1

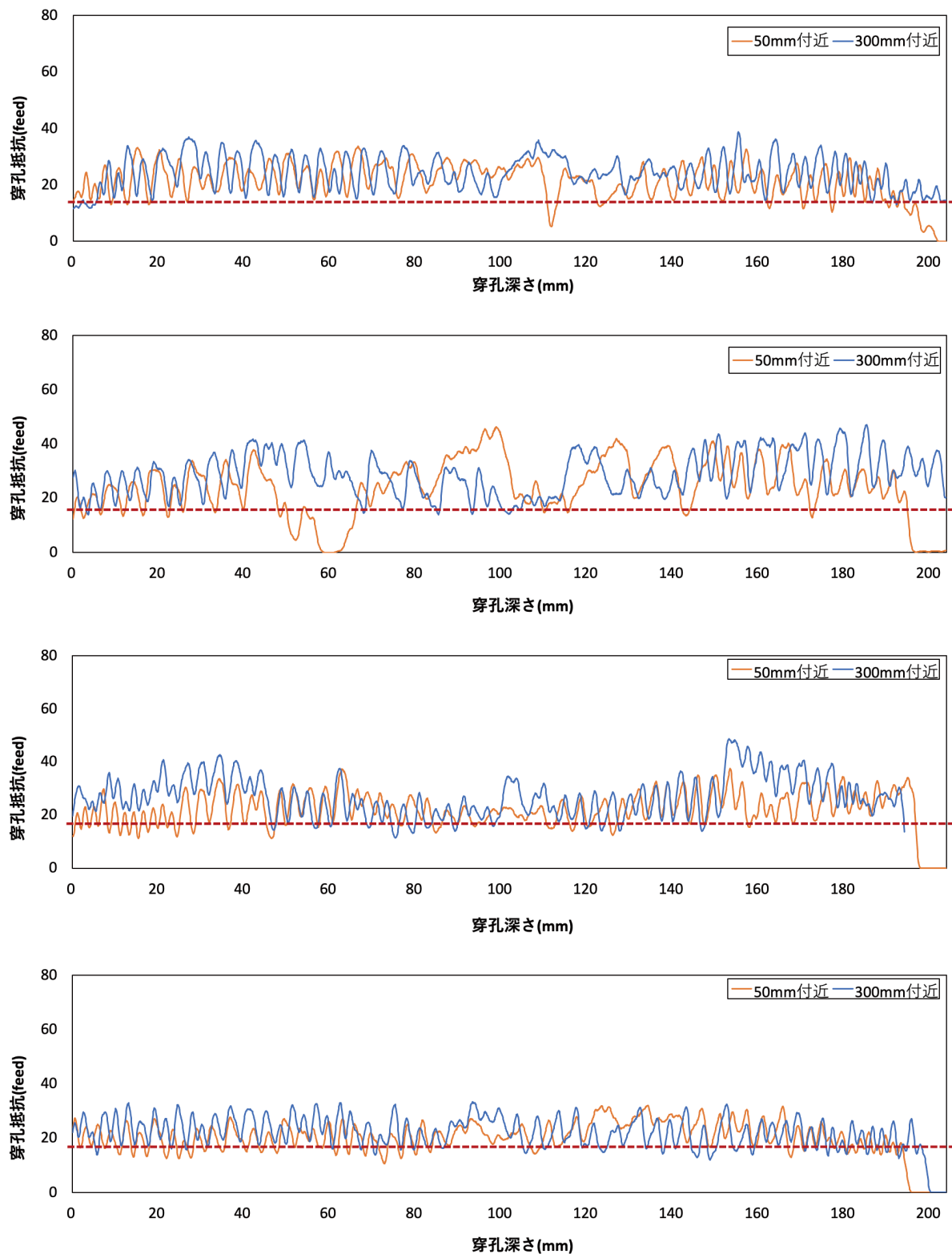


柱材 9-2



柱材 9-3

第 15 図 9 号住居の部材の様子



第 16 図 穿孔抵抗値測定結果 (9号住居)



柱材 10-1



柱材 10-2



柱材 10-3



柱材 10-4



柱材 10-5



柱材 10-6

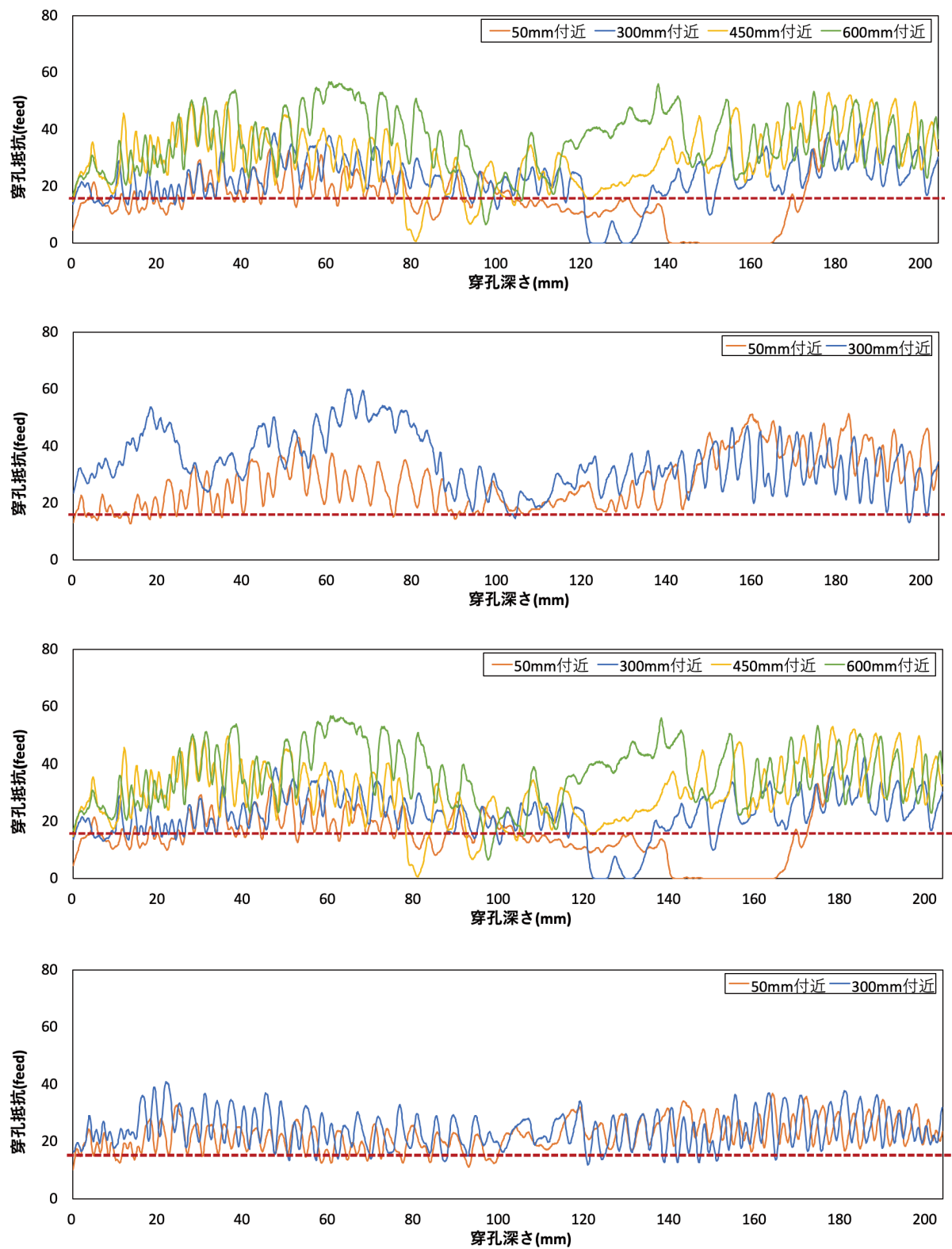


柱材 10-7

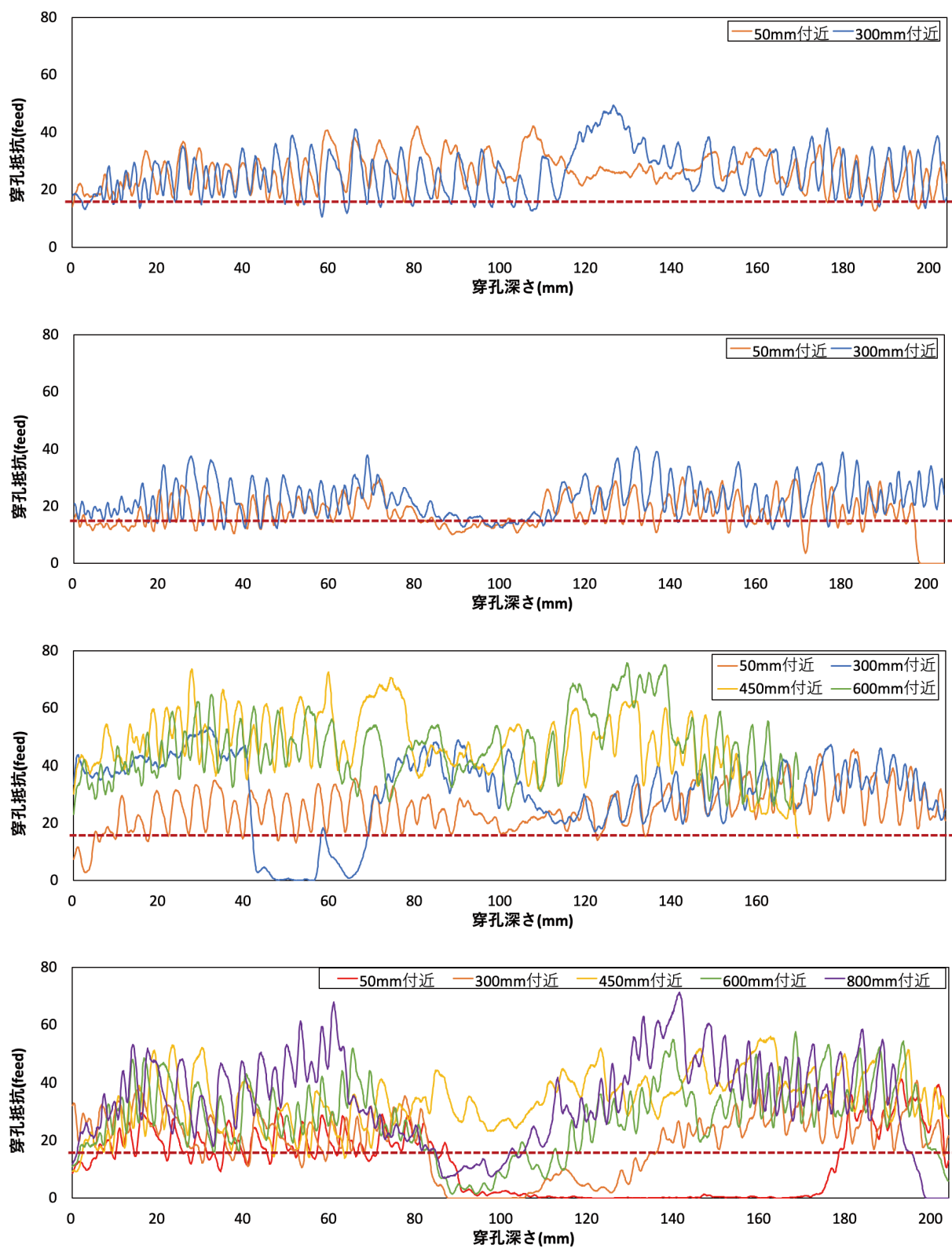


柱材 10-8

第 17 図 10 号住居の部材の様子



第 18 図 (1) 穿孔抵抗値測定結果 (10 号住居)



第 18 図 (2) 穿孔抵抗値測定結果 (10 号住居)



柱材 14-1



柱材 14-2



柱材 14-3



柱材 14-4



柱材 14-5



柱材 14-6

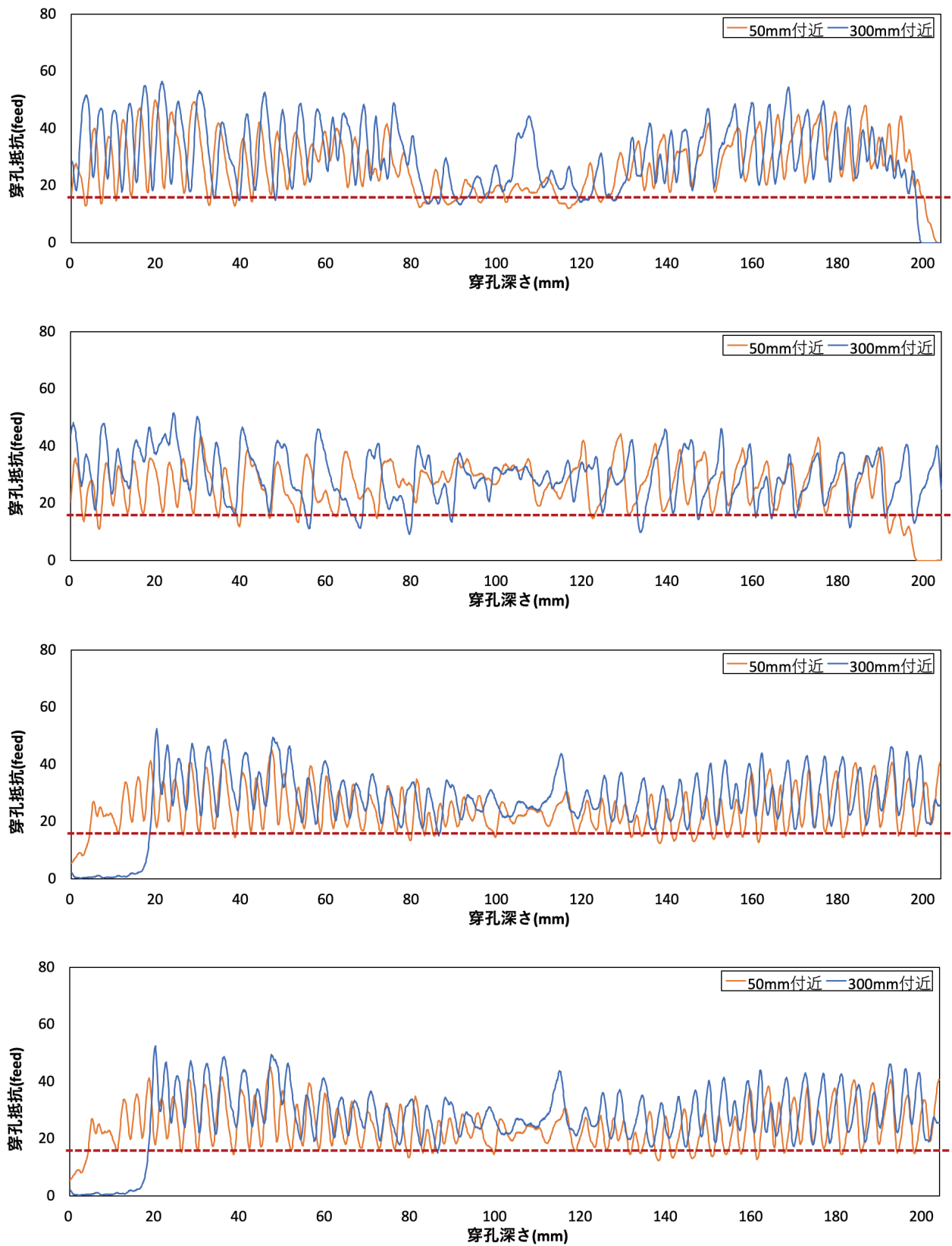


柱材 14-7

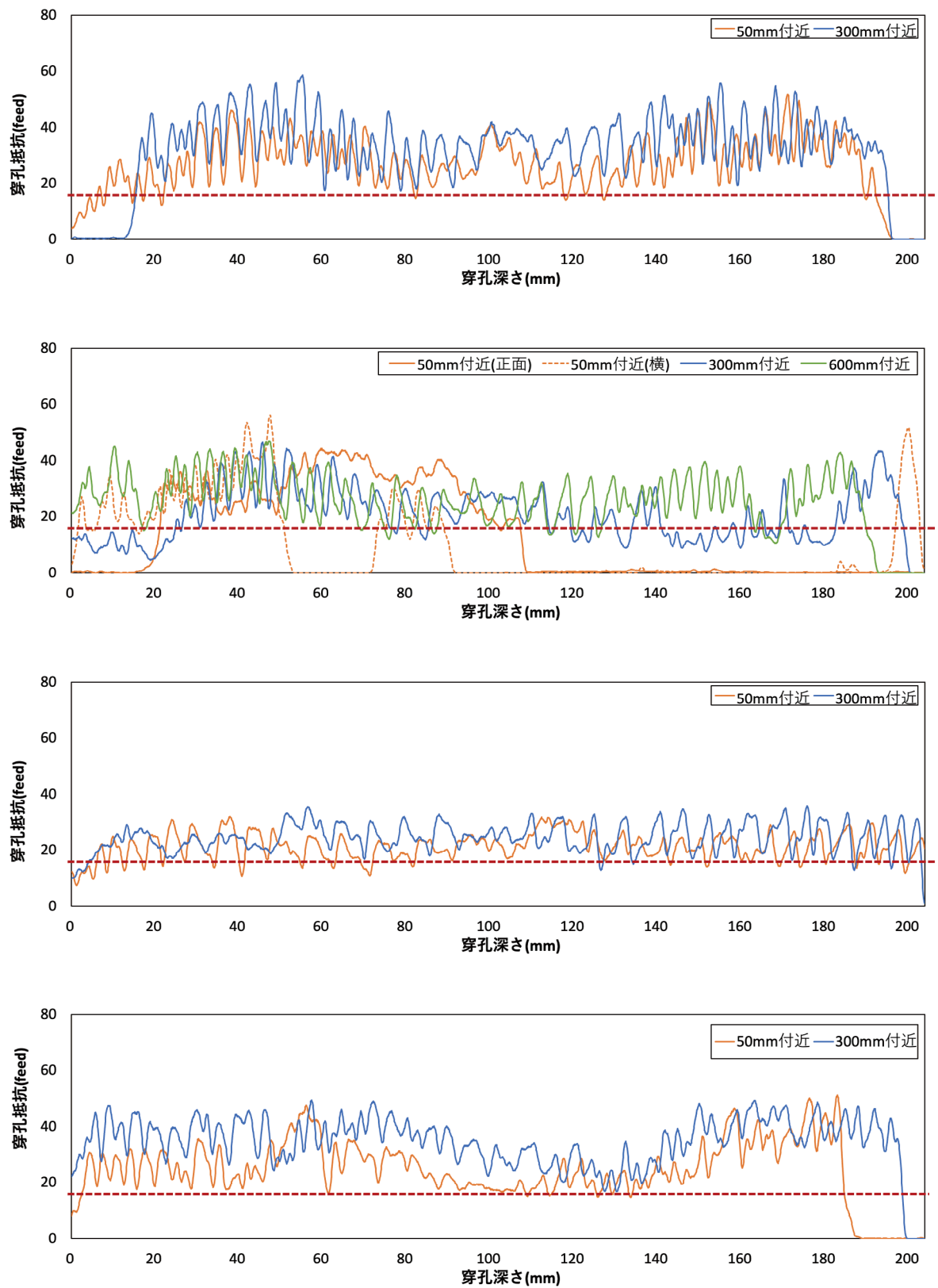


柱材 14-8

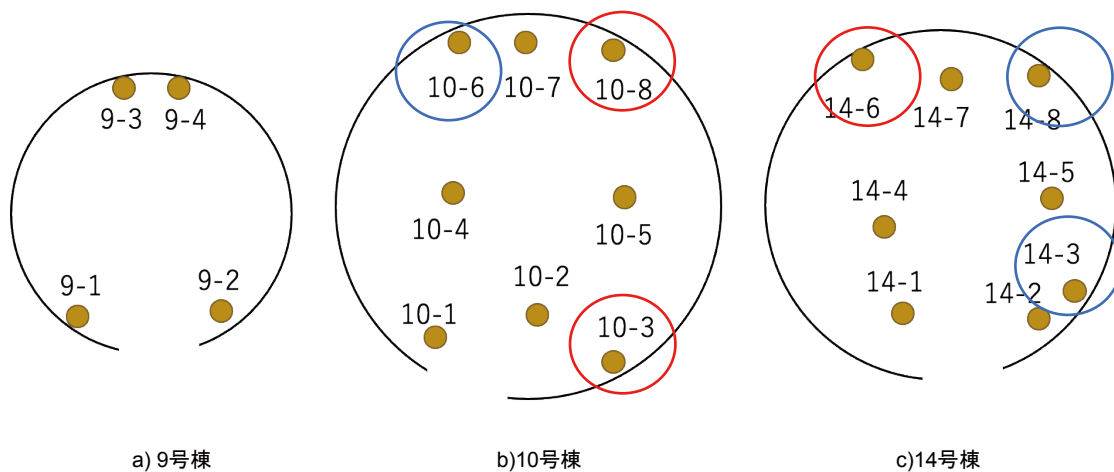
第 19 図 14 号住居の部材の様子



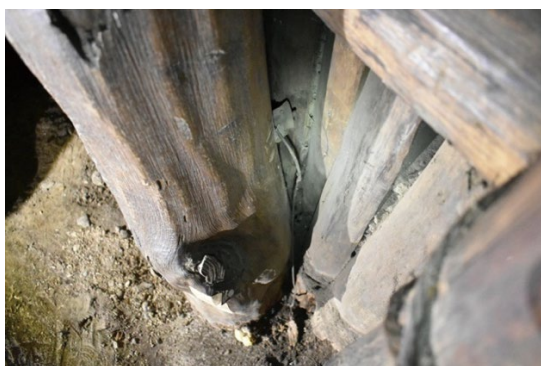
第 20 図 (1) 穿孔抵抗値測定結果 (14 号住居)



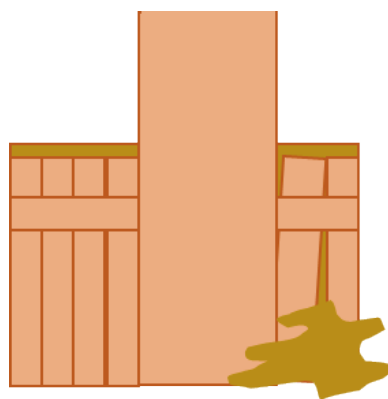
第 20 図 (2) 穿孔抵抗値測定結果 (14 号住居)



第 21 図 住居の模式図と劣化の顕著な柱材



第 22 図 柱材と土留柱の様子



第 23 図 柱付近の土留柱と土のイメージ



1



2



3



4

第 24 図 9号住居の柱木材の修繕