

瑕疵を防ぎ住宅の質を向上する情報誌

ジオ楽間

J I O R A M A

特集

これからの 木造住宅

2016年熊本地震の調査研究から

豪家の住処

柳家三三 師匠

住宅文化財探訪

西江邸 (岡山県高梁市)

地盤の奥義：杭の支持力が同じでも不同沈下する！

雨仕舞のはなし：雨に強い家造りを目指す

住まいのNEXTトピックス：大工・職人の育成 ～将来の人材確保に向けて～

これからの木造住宅

2016年熊本地震の調査研究から

熊本地震発生から間もなく1年。調査研究結果とともに、その被害要因や状況から、今後どのような対策が求められていくかについて考えます。

寄稿／国立研究開発法人
建築研究所 材料研究グループ 上席研究員
植本敬大

熊本地震前震の発生と木造の被害

後から思えば前震であった2016年4月14日夜の震度7の地震発生とともに、木造建築物の被害情報の収集と被災地の交通情報の収集を開始した。紆余曲折の末、15日早朝に茨城県つくば市を発生して昼前には被災地入りしてきた。前震は熊本県益城町で震度7を記録した以外は震度6強を観



【写真1.1】前震で倒壊した比較的古い構法の木造家屋

測した市町村はなく、熊本市東区、同西区、同南区、玉名市、宇城市、西原村などで6弱を観測したに過ぎず、木造建築物の被害も益城町で比較的古い構法によるものが選ばれているかのように倒壊（写真1.1）などの甚大な被害を受けていた。また、町役場の屋上から被害を受けていた（写真1.2）。ブルーシートが行き渡っていないので、必ずしも青色が多くないが、ふき土があらわになっている瓦屋根がほとんどであった。



【写真1.2】町役場屋上から見た瓦屋根の被害（4月15日撮影）

本震の発生と木造の被害

2

1 本震の特徴と益城町の被害

これに対して本震は、4月16日未明に発生し、被害が拡大した。震央（地図上の震源位置）は前震のそれとかなり近いものの、前震は日奈久断層帯が原因となつて発生し、本震は布田川断層帯が原因とされ（図2.1.1）、異なる断層帯が連鎖的に断層地震を引き起こしたと考えられている。

今回の本震は、過去の地震と比較してもかなり大きな揺れを記録した。木造建築物に大きな被害を与えると考えられる周期1〜2秒に卓越周期（*1）がある（図2.1.2）。ことも被害を大きくした要因であるが、益城町宮園の役場の地震計で観測された疑似速度応答スペクトル（建物に作用する地震動の特徴を示す指標の一つ）は04年新潟県中越地震において川口町で観測された波形や、1995年兵庫県南部地震においてJR鷹取駅で観測された波形を上回っている。言わずもがなであるが、建築基準

法で想定している極めて稀に発生する地震（図2.1.2における細い黒点線BSSL(Gs(2)*Z1.0)を大きく上回っているが、建築基準法は第1条にあるように「建築物の敷地、構造、設備及び用途に関する最低の基準」を定めているに過ぎず、いかなる地震に対しても安全を保証するものではない。

この本震により、町役場周辺などでは明らかに被害は拡大していた。特に益城町寺迫は、秋津川へ流れる支流などもあり、地盤が軟弱であったと考えられ、視界に入る建築物の半数以上が倒壊しているように見受けられた。周囲では、路盤が波打つように破壊され、アスファルト舗装は大きく割れていった。さらに噴砂の跡が複数見受けられ、地盤の液化化が発生したものと見られた。

- 本震による被害をまとめると以下のようになる。
- ① 益城町役場周辺、県道28号沿い、県道の南側の地域に木造住宅の被害が比較的多かった。
 - ② 前震で被害が軽微であった木造住宅が本震で倒壊した例が多数確認された（3節P7参照）。
 - ③ 新耐震基準以前の建築確認の木造住宅、店舗併用の2階建て木造住宅が多数確認された。
 - ④ 新耐震基準以降の建築確認の木

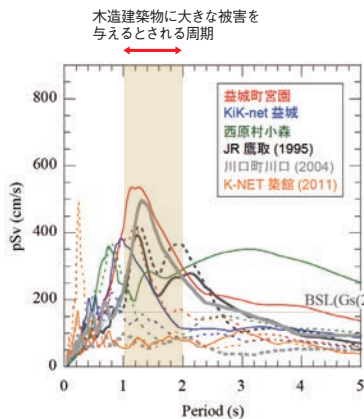
- 造の倒壊が102棟（16年9月8日現在）確認された。筋かい端部が込み栓打ちやくぎ打ち程度の軽微な接合方法であったものが多く確認された（写真2.1.1〜3）。
- ⑤ 00年の建築基準法改正以降の建築確認の木造の倒壊が7棟（16年9月8日現在）確認された。筋かい端部、柱脚・柱頭接合部に金物が施工されているものがあつた（4節P7参照）。
- ⑥ 悉皆調査（*2）エリア内に住宅性能表示制度を活用した木造住宅は19棟あり、このうち構造躯体の耐震等級（構造躯体の倒壊など防止）が等級3の16棟のうち14棟が無被害、2棟が被害軽微または小破、等級2の2棟のうち1棟が無被害、1棟が被害軽微、等級1の1棟は被害軽微であった。
- ⑦ 木造の被害が多いエリアや最近開発されたと推測される新興住宅地において、比較的築年数が浅いと見受けられる木造住宅が確認された。

次ページ図2.2に示す。筆者が宿泊していたペンションの施設は、南阿蘇村河陽地区の小高い丘の上であり、中央の鉄筋コンクリート造の食堂棟とその東側の木造2階建ての宿泊棟、ならびに西側のログハウス（丸太組構法）の別棟およびそれらをつなぐ木造建屋で構成されている。食堂棟は構造的には無被害であったが、内部は物が散乱しており、歩くのがやっとであった。これに対して木造の宿泊棟も上部構造に目立った被害は看取されなかったものの、内部の物が散乱していることに加えて、無筋コンクリートによる基礎はところどころでひび割れ、隅角部で破壊していたため、相当なレベルの揺れがあつたものと推測された。実際に発生当初は、停電したこともあり、何が起きているのか分からず、声を出して初めて地震であることが認識できた。さらに、地震と認識しても2階床上に居ると体を制止していることができず、部屋の内部を転がったり、滑ったりしていた状況であった。この程度の強い揺れに襲われた状況では、地震発生後に屋外に避難したり、シエルターへ移動するなどの行為は到底無理であるように思える。食堂棟との接続部も大きく損傷し、これに接する宿泊

【図2.1.1】前震と本震の震央と被災地の位置関係(国土地理院地図を活用)



【図2.1.2】2016年熊本地震と建築物に被害を与えた主な地震の疑似速度応答スペクトル(出典:建築研究所)



【写真2.1.1】新耐震以降の住宅の倒壊



【写真2.1.2】写真2.1.1の住宅の筋かい端部の接合



【写真2.1.3】写真2.1.1の住宅の柱脚の込み栓接合

2 本震を体験した宿泊施設(南阿蘇村)の被害

*2 悉皆調査…全数調査

報道などで知られている通り、南阿蘇村でも本震による被害は甚大であった。調査地の位置関係を

図2.1.1参照) 南阿蘇村河陽地区の小高い丘の上であり、中央の鉄筋コンクリート造の食堂棟とその東側の木造2階建ての宿泊棟、ならびに西側のログハウス（丸太組構法）の別棟およびそれらをつなぐ木造建屋で構成されている。食堂棟は構造的には無被害であったが、内部は物が散乱しており、歩くのがやっとであった。これに対して木造の宿泊棟も上部構造に目立った被害は看取されなかったものの、内部の物が散乱していることに加えて、無筋コンクリートによる基礎はところどころでひび割れ、隅角部で破壊していたため、相当なレベルの揺れがあつたものと推測された。実際に発生当初は、停電したこともあり、何が起きているのか分からず、声を出して初めて地震であることが認識できた。さらに、地震と認識しても2階床上に居ると体を制止していることができず、部屋の内部を転がったり、滑ったりしていた状況であった。この程度の強い揺れに襲われた状況では、地震発生後に屋外に避難したり、シエルターへ移動するなどの行為は到底無理であるように思える。食堂棟との接続部も大きく損傷し、これに接する宿泊



【写真2.4.6】
写真2.4.5の箱型筋かい金物



【写真2.4.1】
倒壊した共同住宅



【写真2.4.7】
写真2.4.5の座屈した筋かい



【写真2.4.2】
写真2.4.1の筋かい端部のくぎ打ち



【写真2.4.8】
倒壊した比較的新しい戸建て住宅



【写真2.4.3】
写真2.4.1の柱脚部のかすがい



【写真2.4.9】写真2.4.8の箱型筋かい金物と古材(桁)



【写真2.4.4】
倒壊した共同住宅



【写真2.4.10】
写真2.4.8の梁に使用された鉄骨



【写真2.4.5】
倒壊を免れた比較的新しい共同住宅

しており、壁量が足りていたとすれば、接合の不備が倒壊した原因と考えられた。
倒壊した写真2.4.4の共同住宅においては、柱脚部にはかど金物があるものの、筋かいはくぎ打ち程度であった。この共同住宅は壁量が不足しがちな界壁と直交方向に倒壊しており、被害の原因としては壁量不足と接合の不備と双方である可能性が考えられる。
写真2.4.5の共同住宅は比

較的築年数が浅く、柱頭柱脚の接合仕様は込み栓打ち程度であったが、筋かい端部に箱型金物(写真2.4.6)が使用されており、一部の筋かいが座屈(写真2.4.7)したものの、倒壊を免れていた。
南阿蘇村黒川地区では倒壊、大破した共同住宅は数棟あり、それらのほとんどに筋かい端部や柱頭柱脚の接合部の不備が見られるだけでなく、躯体を見た感じでは外

観より築年数が古く、リフォーム歴があるものが多かった。
また、一般的な戸建て住宅も複数倒壊していた。比較的築年数が浅いと見受けられる住宅(写真2.4.8)の柱頭柱脚接合部の仕様は不明であるが、筋かい端部には箱型金物(写真2.4.9)が施工されている一方で、梁(桁)に鉄骨(写真2.4.10)や古材を使用するなどしており、鋼材の重量が影響した可能性も考えられた。

前震と本震では被害の様相が明らかに異なるが、前震で多少の被害を受けた建築物が、本震で被害が拡大している状況が確認できた。益城町において確認された事例を示すと、前震で残留変形が大きな住宅は、本震で倒壊に至り、

3 本震による被害の拡大

前震で壁が外れた平屋の木造住宅も本震で倒壊に至った。建具が外れた程度の被害で済んだ平屋の住宅は、大変形が生じた。

前震では屋根瓦の損傷で済んだものは部分崩壊に至り、前震で被害が軽微であった伝統的構法による家屋が、本震で2階が崩落した例も確認された。

4 益城町中心部の比較的築年数が浅い木造住宅の被害と各建築年代の被害率

1 比較的築年数が浅い木造住宅の被害

前述のように今回の地震では、比較的古い構法による建築物に加え、築年数が浅い建築物の倒壊を含む大きな被害が発生した。日本建築学会による悉皆調査結果と国総研・建築研究所による築年数を特定した結果(引用※1)によれば、00年以降に建築されたことが確認された323棟の木造建築物のうち7棟が倒壊し、12棟が大破している。たとえば、次ページ写真4.1の00年以降に建築された平屋建ての木造住宅が倒壊していたが、筋かいの接合部はくぎ打ち



【写真2.2.1】宿泊施設のログハウスの別棟



【図2.2】南阿蘇村の被害調査箇所(国土地理院地図を活用)



【写真2.2.5】
コンクリート基礎の軽微な損傷



【写真2.2.4】
丸太の締め付けボルトの緩み



【写真2.2.3】
脱した独立柱脚部の腐朽



【写真2.2.2】
ログハウスの内部



【写真2.3.1】敷地の西側がえぐり取られた建築物



【写真2.3.2】崖下へ傾斜した木造宿泊施設



【写真2.3.3】写真2.3.2の建築物の躯体の腐朽

棟の外壁のサイディングも大きく損傷していた。宿泊棟の北側に増築された浴室も大きく損傷しており、一部の木部は腐朽していた。RC造食堂棟の西側に付属する建屋も大破し、FRP製の貯水タンクも転倒して破壊していた。
一方、食堂棟に隣接するログハウス(写真2.2.1)の南側地盤には大きな亀裂が確認されたが、ログハウスの被害としては、入り口付近右側の独立柱の脱落以外構造躯体の損傷は認められなかった(写真2.2.2)。入り口付近左側の独立柱は無被害である。右側の独立柱の脱落は脚部の腐朽(写真2.2.3)の影響と想像された。組積された丸太を鉛直方向に締め付ける長軸ボルトはほぼすべてに緩みが見られた(写真2.2.4)。有筋と思われる基礎コンクリートが表面的に刻

落(写真2.2.5)していたものの、基礎は構造的にほぼ無被害と見られた。周辺地盤の亀裂から地盤がある程度変位したと考えられるが、上部構造がほぼ無被害であったのは、基礎の仕様が優れていたことなどひとつの要因であった可能性があると考えられる。
3 南阿蘇村河陽地区の被害
南阿蘇村河陽地区のペンションで構成される小さな集落は、周辺より標高の高い丘の上に位置する。集落への進入路は路盤ごと崩落しており、本震後は小型の自動車1台がやっと通行できる裏道が唯一の進入路という状態であった。また、崩落した土砂が県道299号線を閉塞しており、孤立に近い状態となっていた。同地区

4 南阿蘇村黒川地区の被害

河陽地区から西南西の黒川地区では木造2階建ての集合住宅の倒壊が複数確認されている。このうち、写真2.4.1の共同住宅では筋かい端部の接合はくぎ打ち2本程度(写真2.4.2)、柱脚の接合部もかすがい打ち程度(写真2.4.3)であることが確認された。一般的な共同住宅では壁量が多いとされる界壁方向に倒壊

内の道路には至るところで亀裂が確認された。給水塔のタンクは落下し、電柱は根元から折損していた。
集落北西部の駐車場には大きな亀裂が生じ、その北側の木造建築物の敷地は西側部分の地盤がえぐり取られるように崩壊(写真2.3.1)しており、塀や屋外用のチエアすべてが土砂に埋もれながら散乱していた。

写真2.3.1の建築物の南側に隣接する宿泊施設(写真2.3.2)も西側の崖に向かって傾き、木造躯体の一部には腐朽なども確認された(写真2.3.3)。

そのほか、下屋が崩壊した建築物や壁が外れた建築物なども確認された。

程度（写真4.2）、柱脚の接合部はかすがい程度（写真4.3）であることが確認されており、壁量が足りていれば筋かい接合部の耐力不足である可能性が高い。また、写真4.4の2階建ての木造住宅も倒壊しているが、箱型筋かい金物（写真4.5）やホールダウン金物（写真4.6）などの柱脚金物が確認されているが、外壁材の重量が比較的重そうなことが、倒壊の原因ではないかと考え



【写真4.1】比較的年数が浅い平屋建ての倒壊



【写真4.4】比較的年数が浅い2階建ての倒壊



【写真4.2】写真4.1の筋かい端部のくぎ打ち接合



【写真4.5】写真4.4の箱型筋かい金物



【写真4.3】写真4.1の柱脚部のかすがい



【写真4.6】写真4.4のホールダウン金物

2 益城町中心部における各建築年代の被害率

日本建築学会九州支部熊本地震

られている。

そのほか、00年以降ではないが、81年以降の建築で2階床の衝撃音対策を考慮してコンクリートスラブを施工した共同住宅が倒壊しており、過大な床の固定荷重が被害原因の一つとして考えられた。

5 まとめ

16年熊本地震による木造建築物の被害の状況、ならびに被害を受けた木造建築物の特徴を述べると、以下のようにまとめられる（一部引用※4より）。

- ・4月14日に発生した前震では、比較的古い構法による木造建築物が選ばれているかのように被害を受けており、これまでの地震被害（95年兵庫県南部地震と11年東北地方太平洋沖地震を除く）の様相と大きな差は感じられなかった。
- ・4月16日に発生した本震により、益城町をはじめとする複数の市町村で木造建築物の倒壊を含む甚大な被害が発生した。このなかでも、比較的年数の浅い00年以降に建築された建築物の倒壊、大破が複数確認された。
- ・倒壊を含む甚大な被害を受けた建築物のうち、過大な固定荷重が起因しているのではないかと考えられる物件が複数見受けられた。
- ・益城町中心部における悉皆調査によれば、81年新耐震基準導入前後の被害率が大きく異なる。81年以降の倒壊率約6.9%に対し、

分析対象の102棟のうち、接合部仕様以外の被害を大きくした要因（隣壁の衝突、立面・平面不整形など）に該当するものは31棟であった。

災害調査委員会（委員長・福岡大学 高山肇大教授）で強震記録が得られている益城町役場周辺、KiKiNet益城（KiBanKyoshinNet・基盤強震観測網）周辺、および県道28号の南側の秋津川までのエリア（益城町大字安永、大字宮園、大字木山、大字辻の城）のおおむねすべての建築物の2652棟で調査がされた。これらのうち、用途が倉庫、神社などのものを除いた2340棟について集計を行った。日本建築学会悉皆調査にて判断されているDamage Grade（引用※2）を参考に、建築物の被害レベルを設定した。

九州支部熊本地震災害調査委員会、および日本建築学会木質構造災害WG（主査・楢本）と協力し、悉皆調査結果と熊本県から国土交通省に提供された建築確認台帳や各年代の国土地理院による航空写真すべての情報を用い、構造別・建築時期別の建築物被害状況を整理した。建築時期については、新耐震基準が施行された81年6月と木造の構造関係の基準が改正された00年6月を境に区分し、①81年5月以前、②81年6月～00年5月、③00年6月以降の3つの建築年代に分類し、集計した。なお、航空写真による年代区分で

旧耐震基準の倒壊率は約28.2%。00年の接合部・壁配置の基準の明確化以降の木造住宅の被害率はそれ以前の被害率より小さい（00年基準の倒壊率・約2.2%、81～00年の倒壊率・約8.7%）。

南阿蘇村では、河陽・黒川地区に2階建て木造アパートが多く存在し、少なくとも7棟の倒壊を確認。これらのうちの多くは、柱頭柱脚、筋かい端部の接合方法、くぎ打ち程度であった。

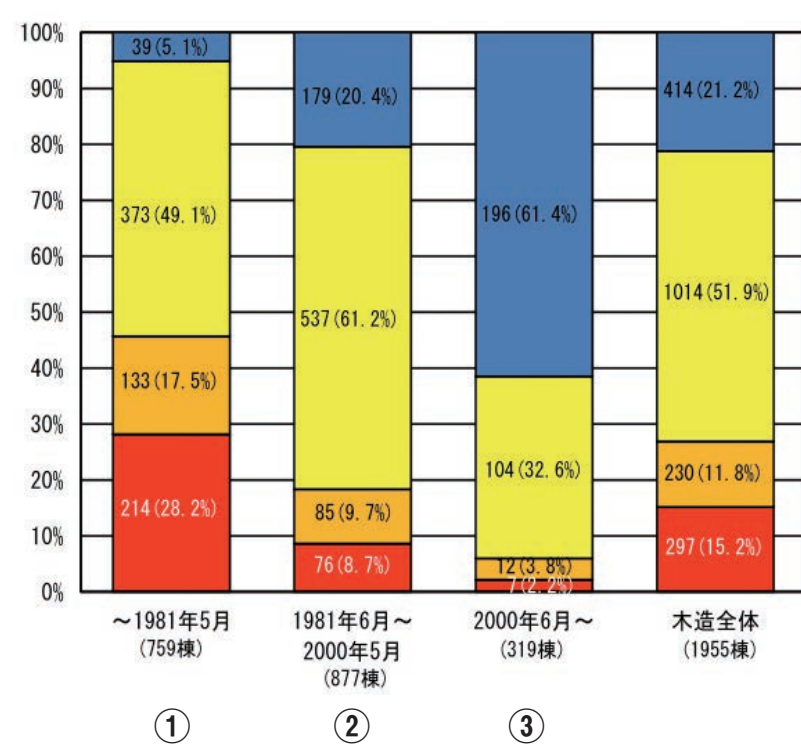
益城町中心部において81年の新耐震基準導入以降の木造住宅で倒壊・崩壊が確認された102棟のうち、筋かい端部または柱頭柱脚の接合部の仕様が確認できた木造住宅のすべてにおいて何らかの接合仕様が不十分と考えられた。

前震で倒壊・崩壊したと考えられる木造住宅は、悉皆調査エリア内で35棟確認された。これには00年以降の木造住宅は含まれず、81年新耐震基準00年の木造住宅は5棟含まれる。この5棟のすべてについて、不十分な接合部の仕様、隣接建築物の倒壊など原因が推定された。

なお、悉皆調査エリアでは、00年基準の木造住宅319棟のうち7棟（約2.2%）の倒壊が確認され、すべてについて図面を収集して時刻歴応答解析（※3）などに

は、82年の航空写真にあるものは旧耐震基準とするなど、年代区分の境界付近で正確に建築年代を特定できないものは古い年代に分類している。集計結果を図4.1に示す。木造全体では15.2%が倒壊し、大

破を含めると27.0%が致命的な被害を受けていた。このうち、81年以前に建築された建築物は、28.2%が倒壊し、これとは別に大破も17.5%あった。一方、81年の新耐震基準施行後に建築された建築物はこれより被害が圧倒的



【図4.1】 悉皆調査結果と建築確認台帳から得られる建築年と被害の程度との関係（引用※3）
[注]小数第二位以下の数値概算により、合計が100%にならない項目がある。

よる原因分析も行われているが、詳細は「建研報告書（引用※4）を参照されたい。

*3 建築物のモデルに数十～数百分の1秒ごとに地動加速度を与え、逐次的に建築物の応答を最も精緻にシミュレーションする方法の一つ。主に超高層建築の安全確認に用いられている。

おわりに

本地震で亡くなられた方およびそのご遺族に対し、深く哀悼の意を表します。また、被災された方々に心からお見舞いを申し上げますとともに、一刻も早い復興を祈念いたします。

今回の熊本地震により、かくも甚大な被害が発生した木造建築物であるが、現行基準通り建てられたものの被害はごくわずかである。木造住宅の耐震化率の向上は新耐震基準施行以前の建築物を対象に行われてきたが、新耐震基準施行以降でも00年の改正基準に適合しない建築物は、旧耐震基準よりも圧倒的に被害率は低いものの、それなりに被害を受けている。よって、81～00年建築の木造建築物についても耐震補強が必要と考えられる。

一方で、わが国は地震活動期に入ったともいわれており、建築基準法で想定している極めて稀に発

生する地震を超える強い揺れが95年の阪神・淡路大震災以降何度も観測されている。この現状を踏まえると、最低基準である建築基準法を満足するだけでなく、住宅性能表示制度における耐震等級2または等級3を適用した住宅を建築・供給すべきである。さらに、耐震補強においても耐震指標1.0では到底耐震性能としては十分ではなく、耐震指標1.5以上を目指すべきであることを申し上げたい。

謝辞

本稿のうち、初動調査については国土交通省国土技術政策総合研究所（以下、国総研）柏尚稔主任研究官と共同して行った。また、益城町の比較的年数が浅い建築物や南阿蘇村の被害状況などの調査については国総研中川貴文主任研究官、建築研究所構造研究グループ荒木康弘主任研究員、および福波珠恵交流研究員、ならびに一般財団法人建材試験センター室生啓和氏、守屋嘉晃氏と共同して行った。また、調査に際して熊本県庁、ならびに益城町役場の関係諸氏に情報提供などご協力をいただいた。この場を借りて深謝する。

引用
※1 http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/yoshin.pdf
※2 岡田成幸、高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン、日本建築学会構造系論文集、第524号、pp.65-72、1999.10.
※3 「熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書」、<http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/0930/report.htm>、2016.9.
※4 平成28年（2016年）熊本地震建築物被害調査報告（速報）、国総研資料No.929号、建築研究資料No.173号、5.3-1～5.3-32、<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/173/index.html>、2016.9.



(左)郷藏 切妻造、棧瓦ぶきの2階建土蔵。かつては、凶作に備えて里人救済用の米や麦をここに備蓄していました。現在は資料館として公開されています。(右)床柱 主屋奥座敷の床柱には、杉の木を使用。柱の下部を削って、末広がりを表す数である八つの年輪を見せる粋な意匠が施されています。なお、奥座敷含め屋内は特別見学ならびに特別展で見学できます。



ローハベンガラには防虫・防腐効果もあることから構造材にも塗られ、今日までの建物の維持に効果を発揮してきました。西江家18代当主、西江晃治さんは、「江戸のナノテクノロジー『ローハベンガラ』の文化を受け継いできた家として、それをどう生かすかが、私の務めだと思っています」と語っています。



独特の色合いが印象に残る石州瓦は、屋敷全体で約5万枚が使われています。100年に1回、すべてをふき替えるそうで、前回は1928(昭和3)年に行われました。

江戸時代、民家には許されなかった総2階建の主屋。その堅固な造りは、西江家の格の高さも示しているかのようです。



威風堂々の館構え 人の住まう文化財

住宅文化財 探訪

〔岡山県高梁市〕
西江邸 (国登録有形文化財)

戦国時代、毛利輝元より200町歩の土地を与えられた西江家は、関ヶ原の戦い以降、武士の身分は捨てましたが、幕府天領地となつたこの地の郡中惣代庄屋を任せられました。そして、地域の行政官としての役割を担うだけでなく、幕府御用銅山の経営にもあたりました。その中で3代目治良右衛門は、1647年ごろ、「ローハベンガラ」と呼ばれる酸化鉄赤色顔料の製造に成功し、西江家に莫大な富をもたらします。

その莫大な富を背景に建てられたのが、敷地3000坪、部屋数44・161畳の西江邸です。隣国、出雲から石州宮大工が呼ばれ、1705年から約25年余をかけて建てたとされています。檜、松、黒柿、桜、栗、紅葉、秋田杉、北山

杉、黒壇、紫壇といった高級材を多用し、堅牢かつ重厚な普請の屋敷は、中世の山城を思わせる石垣と相まって、威風堂々たる姿を見せています。

西江家は地域の自主的行政機構の中心でもありましたから、屋敷は楼門、簡易白州、郷藏、駅馬舎、手習い場を備え、主屋は代官御用所だけに許された5間続きのしつらえになっています。

そして、西江邸が文化財としての価値を際立たせているのは、その極めて良好な保存状態です。代々の当主が受け継ぎ、現在も18代当主が住む西江邸は、そこに住み、使い続けることで、日本の木造建築が300年近い時の経過にも耐えられるということを今に伝える人の住まう文化財なのです。

岡山県高梁市 西江邸



住所／岡山県高梁市成羽町坂本1604
交通／JR伯備線備中高梁駅から車で約45分(観光タクシーあり)
休館日／年末年始、毎月日曜日(特別展入れ替えのための臨時休館あり)
入館料／一般500円、高校生以下250円
開館時間／9:00～17:00
お問い合わせ／0866-29-2805
非公開部分も含む「特別見学」、天然ローハベンガラを使った「ベンガラ染体験」を受け付けているほか、奥座敷を使った特別展を随時、開催している。

インドネシアの首都ジャカルタ:世界一??…の渋滞都市

人口は日本の約2倍、2億4千万人を擁するこの国の首都に地下鉄はない。そのため片側6車線あっても道路はいつも大渋滞、到着時間は読めない。急激な経済発展にもかかわらず交通インフラの整備が遅れ、アンバランスであった。わが国の住宅でもアンバランスな基礎は不同沈下する。



摩擦杭と支持杭の併用! 杭の支持力が同じでも不同沈下する!

都市部の郊外には丘陵地や山地があり、この周辺には平坦な低地があります。住宅がこの丘陵地の山裾に建てられたとき、杭の支持力のみを考慮して建てると不同沈下することがあります。

地盤の奥義

大和 眞一 (やまと・しんいち)

JIO顧問
技術士(建設部門) 工学博士



1946年福岡県生まれ。71年九州工業大学工学部開発土木専攻修了。旭化成(建材部門)を経て、2005年JIO技師長。2017年より現職。1985年SC杭の発明で発明協会東京支部長賞受賞。2005年杭先端袋付杭の開発で地盤工学会技術開発賞受賞。趣味は音楽鑑賞、ゴルフ、(甘い)トマト作り。

都市部郊外には1に示すように、緑色で示す丘陵地が海に浮かぶ島々のように点在します。一方、図中の赤○印で示す茶色っぽい部分には平坦な低地があり、多くの場合これまで水田であったところ。このような低地部分は丘陵地に挟まれた谷地形ですから水はけが悪く、近年水田に利用されるまでは湿地帯でした。そのためここには超軟弱な腐植土が厚く堆積していることも少なくありません。

さらに、この腐植土層の下には丘陵地から続く古い良質な原地盤があり、多くの場合ここが杭の支持層となります。しかし、地下の原地盤は地表の丘陵地の傾斜がそのまま続いているので必ず傾いています。これがその後住宅基礎を設計するとき、難しい問題を提起します。

2は1を標高によって色分けしたものです。これを見ると丘陵地の傾斜具合から地下の傾斜も予測できます。以下、傾斜地盤

での不同沈下を具体例で紹介しします。

丘陵地は第三紀の良質地盤

本件住宅は5の地盤断面図に示すように、丘陵地の端に接する低地側に建てています。この住宅は低地側(5の右側)へ約150mm不同沈下しました。一方、丘陵地の地質は3に示すように岩山で硬く、自立しています。地質は4に示すように洪積層

1 丘陵地が点在する谷地形



都市部郊外には丘陵地(山地)が海に浮かぶ島のように点在する。

2 立体的色別標高図



丘陵地の高さが予想できる地形図が公開されている。

よりも古い第三紀の泥岩からなっています。では住宅の基礎地盤はどのようなものだったのでしょうか。

SWS試験結果から地盤の傾斜がわかる!

6にスウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS試験)結果を示します。丘陵地側のA点と谷地側のB点とでは、SWS試験結果がまったく違うことがわかります。A点は丘陵地に近いので深さ5m付近に比較的固い層が出ています。一方、丘陵地から遠いB点では、深さ10mくらいでもまだA

点で見られた固い層が出ないことがわかります。これらのことから支持地盤はA点からB点に向かって傾斜していることが容易に予想できます。

宅地は軟弱な腐植土地盤

次ページ7は5に示す住宅のA点とB点で実施した詳細な地盤調査結果です。A点ではSWS試験のトルク値が深さ4m付近から大きくなり、杭の支持層が存在することがわかります。

一方、B点ではトルク図を見ても深さ10m付近まで変化なく、A点とはまったく違

支持杭と摩擦杭の併用!

本件は杭基礎で設計され、6に示すSWS試験結果を用いて行っています。5に示す

A点では深さ5m付近に支持層があるので、杭長5.5mの支持杭としました。一方、B点では明確な支持層が出現しないので杭を長くし、杭長8mの摩擦杭としました。A、B両方の杭の許容鉛直支持力は計算上同じでしたから、特に問題はありません。しかし、本住宅はB点側へ大きく不同沈下してしまいました。杭の支持力がみな同じなのになぜこの住宅は不同沈下したのでしょうか。

4 丘陵地の地質



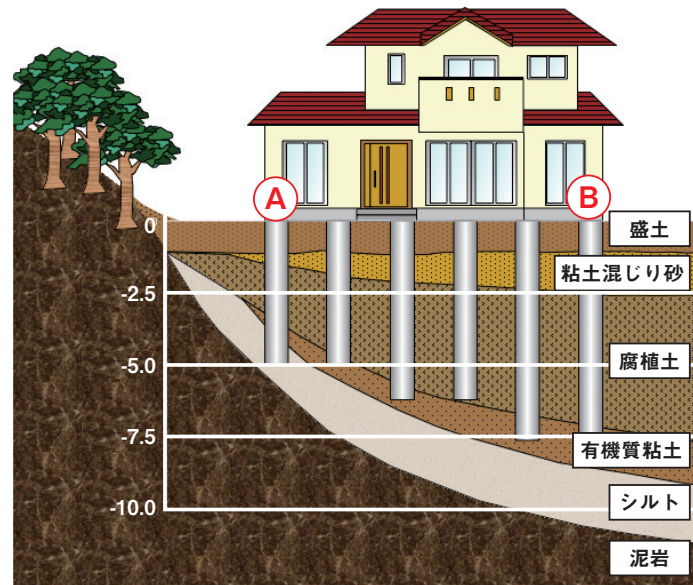
表層地質はロームではなく、白い泥岩からなっている。

3 丘陵地の露頭



丘陵地は洪積層よりも古い第三紀の固い地盤で構成されている。

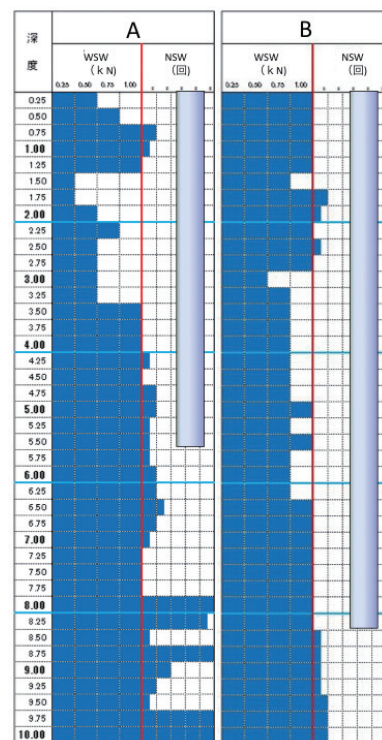
5 住宅の基礎と地盤断面図



支持層は傾斜し、腐植土が厚く堆積した地盤に長さ5.5~8mの杭が使用されている。

6 SWS試験結果

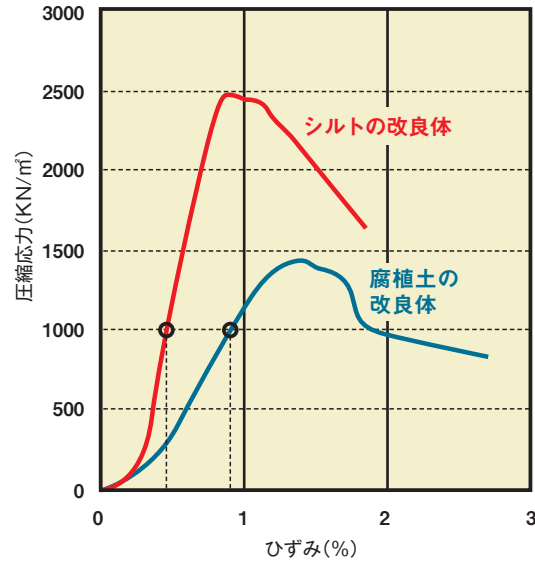
山側のA点はGL-3m付近から回転層となり良質。一方、谷側のB点はGL-8m付近まで自沈層。



10

柱状改良体の圧縮強度

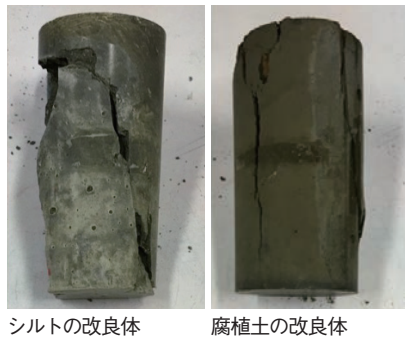
腐植土の圧縮強度は所定強度に達していない。さらにひずみ量(変形量)は2倍くらい大きい。柱状改良杭が『腐植土では固まらない...』といわれるゆえんである。



11

柱状改良体の圧縮試験後の写真

シルトはコンクリートのよう斜めせん断で破壊し、腐植土は押しつぶされて膨らんでいる。



12 腐植土地盤で使用できる杭種

『固まらない...』といわれる柱状改良杭を除いてすべて使用できる。

杭種	適用性	
既成杭	鋼管杭	○
	RC杭	○
	木杭	○
柱状改良杭	×	
場所打ち杭	○	

バランスの悪い食事！



イラスト: HIDEMI

好きなものはおいしいのでたくさん食べたい。カロリーは足りている。しかし、栄養バランスは大事。住宅基礎も支持力だけでなく沈下量とのバランスが必要。

有機質土用の特殊セメントが使用されます。では、この特殊セメントを用いれば安心なのでしょうか。

10はこの特殊セメントと腐植土を室内で混合してソイルセメント試験体を作り、通常の圧縮試験をした結果です。比較のため、通常の沖積のシルト(以下、シルトという)でも行いました。使用した土の含水比や特殊セメントの配合量などを9に示します。

10に示すようにシルトと腐植土の圧縮強度特性には大きな差が見られます。縦軸の圧縮強度をみると腐植土はかなり小さく、室内試験で望まれる1500KN/mに達して

「腐植土地盤では柱状改良は固まらない」可能性が大きいので、腐植土地盤には柱状改良杭は使用できない！

「腐植土地盤では柱状改良は固まらない」可能性が大きいので、腐植土地盤には柱状改良杭は使用できない！

「腐植土地盤では柱状改良は固まらない」可能性が大きいので、腐植土地盤には柱状改良杭は使用できない！

良を使用することは避けたいほうが賢明です。腐植土地盤では12に示すように鋼管杭、木杭、コンクリート杭などの既成杭や、現場で土とセメントと攪拌混合しない場所打ちのコンクリート杭を使用すればまったく問題ありません。

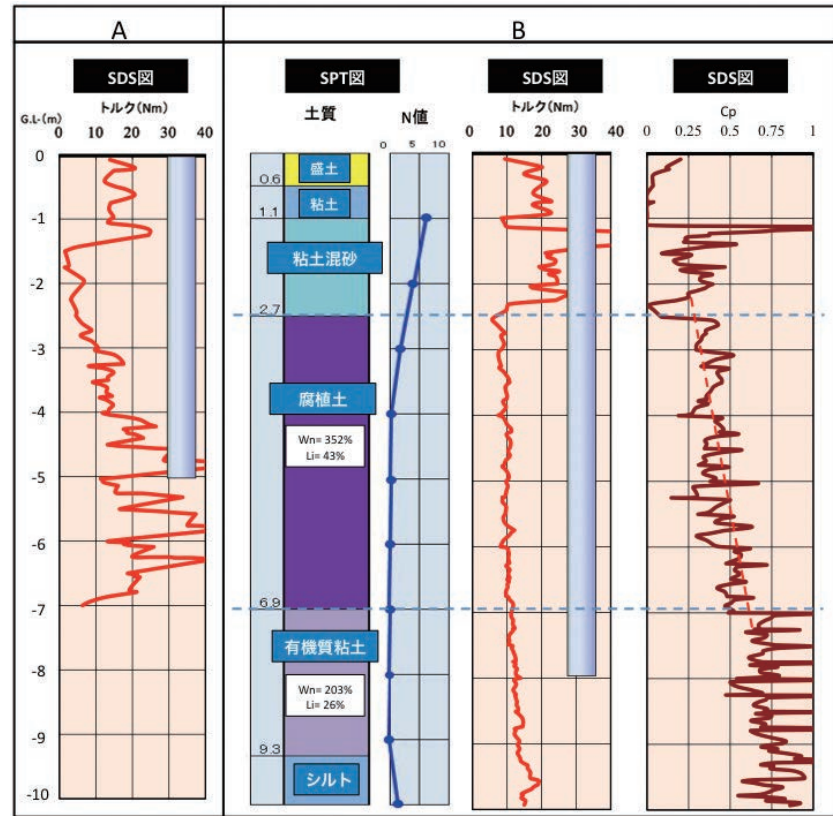
おわりに

丘陵地周辺の住宅地で地下の支持地盤が傾いているとき、山側は短い数m程度の支持杭とし、谷側は支持層がないので2倍くらい長い摩擦杭で対応する方法を採用したくなりますが、支持杭と摩擦杭は支持力が同じで

も沈下量は違うので、結果的に不同沈下につながります。

イラストのように、偏った食事であってもカロリーは十分足りています。しかし、ここでは栄養のバランスが悪いのでそのうち身体に問題を起こします。住宅基礎も強さと固さのバランスが重要です。

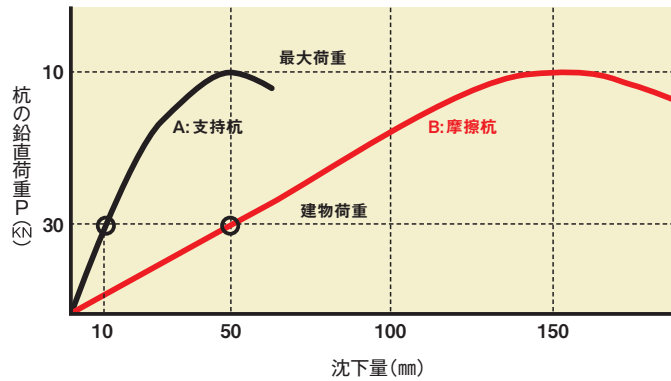
7 SDS試験、SPT試験結果



A点にはGL-4m付近から支持層となる砂層が出現する。B点にはGL-10mまでまったく見られない。B点の-3~-7m付近のCp値は小さく、ここが有機質土であることが予想できる。

8 短い支持杭と長い摩擦杭の支持力(イメージ図)

摩擦杭Bは杭を長くして支持力を稼ぐので支持杭Aと支持力(縦軸)は同じ。しかし、Bの沈下量(横軸)は大きく、まったく異なる。これが不同沈下の原因。



9 柱状改良体の配合試験

使用した土質は2種類。セメントは高有機質土用を使用した。

	腐植土	シルト(沖積層)
採取地	埼玉県さいたま市	
地盤特性	含水比 wn(%)	406.3
	強熱減量 Li(%)	46.7
使用セメント	高有機質土用セメント系固化材	
セメント使用量 (kg/m³)	300	
水セメント比 w/c (%)	60	

支持杭は硬い杭、摩擦杭は軟らか杭？

A点の短い支持杭、B点の長い摩擦杭、2種類の杭の杭頭に荷重をかけて鉛直載荷試験した時の荷重-沈下曲線のイメージ図が8です。縦軸が杭頭にかかる鉛直荷重の大きさ、横軸が杭頭の沈下量です。

A点の支持杭の場合、沈下量が50mmに達したとき最大荷重100KNに達しています。一方、B点の摩擦杭は杭頭沈下量が150mm

くらいになったとき同じ最大荷重100KNに達しています。従って両者の支持力は同じ100KNですから、長期の許容鉛直支持力は安全率3を考慮して同じ30KN程度といえます。しかし、問題は沈下量の差です。8より明らかのように、長期の建物荷重が作用する30KN付近でA点の支持杭は10mm程度沈下しています。これに対してB点の摩擦杭は50mmも沈下しています。この沈下量の差50-10=40mmがまず住宅の不同沈下になります。

さらに摩擦杭の場合、杭周接地盤の塑性変形で沈下量は日々増大し、数年後にはさらに大きい不同沈下量となって顕在化します。

以上のように、支持杭と摩擦杭の支持力に相当する『強さ』は同じであっても、杭の沈下量に対応する『硬さ』は異なります。不同沈下事故の原因の多くは地盤や杭の『強さ』ではなく、『硬さ』の差で生じています。

さらに杭周接地盤が腐植土の場合、次に示す別の不同沈下事故要因が加わります。

柱状改良は腐植土地盤では固まらない...？

『杭状地盤補強』と呼ばれる住宅用基礎杭のうち最も多く使用されているのは現場造成の柱状改良杭です。腐植土地盤で柱状改良杭を使用すると腐植土中に含まれる化学成分がセメントの硬化(水和反応)を阻害するので、『腐植土地盤では柱状改良は固まらない』といわれます。このような場所では、高