

「宅地の液状化対策技術に関する研究」（令和4年度～令和7年度）評価書（年度）

令和6年2月15日（木）
建築研究所研究評価委員会
構造分科会長 田才 晃

1. 研究課題の概要

（1）背景及び目的・必要性

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震では、宅地液状化の被害が社会で大きく注目され、行政や学協会が対策に動いてきたが、未だ顕著な成果に至ったとは言い難い。一方で、大地震時に宅地の液状化を全く許容しない直接基礎の設計は過度に不経済であり、また、宅地の液状化対策工の効果を適切に評価できる方法も現時点では見あたらない。このため、宅地耐震化の実現に向けて、液状化対策に関する技術的諸問題の解消が切望されている。

以上の背景から、本研究は、直接基礎の住宅設計が可能な宅地の液状化クライテリアの明確化および宅地の液状化対策工の効果を実証する地盤試験システムの構築に係る検討・提案を行い、これらの妥当性と有効性を示すことで、宅地の液状化対策技術の開発を推進することを目的とする。

（2）研究開発の概要

震災事例のデータ収集と分析、建築研究所が所有する遠心載荷装置と液状化対策地盤試験装置を最大限に利活用した室内実験と現場実験、観測事実と実験結果の再現解析など客観的かつ合理的な手法に基づいて、次のサブテーマ（1）（2）の検討を実施する。

サブテーマ（1）直接基礎の住宅設計が可能な宅地の液状化クライテリアの提案

令和4年度

液状化地盤における直接基礎の挙動に関する遠心場振動実験および実用的な沈下予測法に関する既往文献調査を行う。次年度以降の宅地（戸建住宅—直接基礎—地盤連成系）の縮小模型を用いた遠心場振動実験の計画を立案する。なお、令和4年4月に建築研究所の遠心載荷試験装置が故障して使用不能となり、令和4年度末の時点で修理目処が立たないことから、今後の遠心場振動実験計画は装置の実状に応じて柔軟に検討したい。

令和5年度

宅地の縮小模型を用いた遠心場振動実験を行い、地盤の相対密度や戸建住宅の接地圧が液状化地盤における沈下・傾斜に与える影響を把握する。この際、住宅と液状化地盤の動的相互作用（SSI）の寄与を評価できる実験内容とする。なお、遠心実験は、竹中工務店の遠心載荷試験装置を使用する。

令和6年度

前年度の計画を継続し、戸建住宅の重量・振動特性や基礎形状をパラメタとして液状化地盤における沈下・傾斜を評価するための遠心実験データを蓄積する。なお、遠心実験は、令和5年9月の時点で復旧の目処が立ったことから、建築研究所の遠心載荷試験装置を使用する。

令和7年度

前年度の計画を継続し、遠心実験データを蓄積・整理するとともに、これらの実験データに対して、多次元FEM有効応力解析による数値シミュレーションを行い、SSIを含む沈下・傾斜メカニズムの解明を目指す。また、過去の震災における液状化地盤の戸建住宅の沈下・傾斜被害データに照らして、直接基礎の住宅設計が可能な宅地の液状化クライテリアを提案する。

サブテーマ（2）宅地の液状化対策工の効果を実証する地盤試験システムの提案

令和4年度

液状化対策工の効果を実証する地盤試験システム（以下、液状化対策効果試験システム）について、

建築研究所の敷地内で試運転を行う。また、次年度以降の現場実験サイトを選定する。

令和5年度

地盤の密度増大による液状化対策工法を対象に、茨城県神栖市の敷地において、対策の行われた場所と行われていない場所で、提案する液状化対策効果試験システムを用いて地中加振による地盤の間隙水圧上昇・消散を計測し、その時間変化の様子が対策の有無により異なることを確認する。

令和6年度

前年度と異なるドレーン（排水）による液状化対策工法を対象に、愛知県あま市の敷地において、同様の現場実験を行う。地盤の間隙水圧上昇・消散データを取得し、その時間変化の様子が対策の有無により異なることを確認する。

令和7年度

前年度までに行った現場実験で得られた間隙水圧データを再現する数値シミュレーション解析を行い、その結果に基づいて大地震時の液状化対策効果を外挿的な解析により推測することを試みる。以上の現場実験・数値解析の結果を整理することで、提案する液状化対策効果試験システムの有効性と適用限界を総括する。

(3) 達成すべき目標

- 1) 直接基礎の住宅設計が可能な宅地の液状化クライテリアの提案
- 2) 液状化対策効果試験システムの提案

(4) 令和5年度の進捗・達成状況

サブテーマ（1）直接基礎の住宅設計が可能な宅地の液状化クライテリアの提案

戸建住宅の液状化被害は非液状化層厚が3m以上あれば小さいと言われている。しかし、2次設計レベルの地震動（大地震動）に当てはまるか、液状化層の相対密度の大小に依存しないか、近年の大きな接地圧の住宅に当てはまるか、不明である。そこで、本年度は、地下水位3mに着目し、大地震動に対して、液状化層の相対密度と住宅の接地圧をパラメータとした遠心振動実験を行い、これらが住宅被害に与える影響を整理した。実験は、竹中工務店技術研究所の遠心載荷試験装置を用いて行った。入力地震動は最大加速度 400cm/s^2 の臨海波とした。実験結果より、次の知見を得た。

- ・液状化層の相対密度が大きい程、住宅の沈下・傾斜が小さい。沈下の増大とともに傾斜が増大する場
合が多いが、必ずしもそうとは限らない。
- ・非液状化層厚が3mあっても、液状化層の相対密度が大きくなり、住宅の接地圧が大きい場合には、
大地震動時の液状化によって住宅に機能的不具合等の生じる可能性が高い。

ただし、得られた被災程度は、想定よりやや小さい感がある。地盤作成時の作業誤差（例えば、飽和時の浸透不足の可能性）など含めて、整理する必要がある。

サブテーマ（2）宅地の液状化対策工の効果を実証する地盤試験システムの提案

密度増大による液状化対策工法（TS-improver : BL 評定取得）を対象に、神栖市の敷地において、無改良エリア、改良率10%エリア、改良率20%エリアそれぞれで、提案システムの実証試験を行った。各エリアとも最も液状化しやすいと考えられた深さ2.5mにおいて、水平方向の起振を実施し、起振源（バイブレーター）から50cm離れた観測孔で水圧と加速度の経時変化を計測した。また、バイブレーターの沈下量を計測した。実験結果より、次の知見を得た。

- ・無改良エリアでは、地中起振源（バイブレーター）によって、過剰間隙水圧が最大1.2kPa発生し、
加振後は10分を過ぎても完全には消散しない傾向が計測された。一方で、改良率20%エリアでは、
過剰間隙水圧は最大0.4kPaに止まり、加振後10分以内に完全に消散した。また、改良率10%エ
リアでは、過剰間隙水圧は最大0.1kPaに止まった。改良地盤において、改良率の大小と発生した過剰
間隙水圧の大小との関係が逆転しているように見えるが、これは、深さ2.5m付近における地盤改良前

後の標準貫入試験 N 値の変化が、改良率エリア 20%では 10 → 20 程度だが、改良率エリア 10%では 8 → 26 であり、すなわち、改良率エリア 10%の深さ 2.5m 付近で局所的に地盤が締め固まって改良効果が増大したためと考えられる。

- ・起振源（バイブレーター）には起振孔底地盤の液状化によると思われる沈下が発生し、その最大値は、無改良エリアで 52cm、改良率 10%エリアで 15cm、改良率 20%エリアで 8cm だった。改良率の増加とともに沈下量が低下する傾向が見られた。

以上の結果は、当該工法に液状化対策効果が実際に存在することを本提案システムを用いた現場実験により確認できることを示唆するものと考えられる。

2. 研究評価委員会（分科会）の所見

- (1) 背景（目的・必要性）及び目標とする成果、成果の活用方法が国の方針や社会のニーズに適合しているか。研究開発の計画が具体的に立案されているか。

- ①宅地の液状化は能登半島地震の例を出すまでもなく、その重要性が高まっていることは間違いない。国が目指す国民の安全安心には欠かすことのできない一つのテーマで社会のニーズに適合しているという点では間違いない。クライテリアの提案と対策効果試験システムの提案の二つのテーマの設定も的確であり、その具体の研究計画である遠心振動台実験なども周到に具体の計画が練られている印象である。
- ②宅地の液状化クライテリアの提案および液状化対策の効果試験システムの提案は社会のニーズに合致していると判断する。また、竹中工務店技術研究所の遠心載荷試験装置の使用など具体的な計画が立案されている。
- ③本研究開発は、直接基礎の住宅設計が可能な宅地の液状化クライテリアを明確にするとともに、宅地の液状化対策工法の効果を実証するための地盤試験システムの構築を目指すものである。近年の東北地方太平洋沖地震や熊本地震などで、広範囲の住宅群に液状化による深刻な地盤変状が大きな被害をもたらし、その復旧の困難さが認識されたことは、記憶に新しいところであり、安心・安全な社会を構築するための喫緊で重要なテーマである。実用性、経済性を意識した成果を得るための計画の立案となっている。
- ④研究の背景にも記載されている通り、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震、2018 年北海道胆振東部地震による宅地液状化の課題は、今年の初めに発生した能登半島沖地震でも大きな課題と認識されている。宅地の液状化クライテリアの明確化と液状化対策工の実証は、国土強靱化対策や社会ニーズにも適合している。研究開発計画も具体的に立案されている。

- (2) 他機関との関係等、効果的かつ効率的な研究のために必要な体制が取られているか。技術的支援や普及のための活動等、成果の最大化のための取組がなされているか。

- ⑤地盤については所内の限られたメンバーでの実施となるが、若手の客員研究員をはじめとして多くのエフォートを割いていただき人員不足を補えるような体制が組んでいる。民間企業や評価機関との連携によって、さらに効率化が図られている。住宅の供給者の目に留まり、普及できるよう配慮いただきたい。（所見 1）
- ⑥千葉工大、竹中工務店、ベターリビング、大成建設、東京ソイルリサーチなど関係他機関との連携ならびに協力体制が構築されている。
- ⑦専属研究員 1 名の他、他機関所属の客員研究員 5 名の研究体制であり、エフォート率は適切である。令和 5 年度は遠心振動実験装置が故障のため使用不能であったが、研究チームの客員研究員が所属する機関所有の同種の装置により実験を遂行した。また、液状化対策工法の効果を実証するシステムの現場実験を、建設会社、大学等他機関と連携協働して実施し、他機関との効果的かつ効率的な体制で研究を進めている。
- ⑧実験実施における千葉工大の協力や、遠心実験の施設不調を補うために竹中工務店の実験施設を活用

等、必要な体制が取られている。また、成果の活用普及のための日本建築学会各種委員会での情報発信もなされていると評価する。

(3) 研究開発が目標に向けて順調に進捗しているか。

- ⑨試験装置のトラブルなどもあったようであるが、順調に研究開発は進んでいる。
- ⑩建築研究所の遠心載荷試験装置の故障などの影響はあるが、試験装置の借用などで概ね順調に進んでいる。
- ⑪第1のサブテーマである「宅地の液状化クライテリアの提案」に関して、遠心振動実験により、非液状化層厚が3mあっても、液状化層の相対密度が大きくなり、住宅の接地圧が大きい場合には、大地震動時の液状化によって機能的不具合等の生じる可能性が高いなど、クライテリア提案に資する知見を得ている。第2のサブテーマである「液状化対策効果試験システム」に関して、密度増大による液状化対策工法を対象に提案システムの実証試験を行い、対策の効果を捉える結果を得て、提案システムの有用性を示した。
- ⑫建築研究所保有の遠心実験施設の不調はあったが、それを補う対策を取り、研究開発は順調に進捗していると判断される。

(4) 総合所見

- ⑬限られた予算の中で、的確に研究対象を絞り込み、さらに人員の不足を補いながら社会的に極めて重要な課題に取り組んでいる。継続して研究に取り組みさらに成果の高度化を図るためにまだまだすべきことがあると考える向きもあるが、多少不十分な点があるとも是非ともひとつの考え方として、早期に成果を世に公表してほしい。（所見2）
また、普及のための活動は、住宅、そして宅地が対象となると、個人の負担が増えることもあり、とても難しく、すんなりとは普及に進まないとも考えられる。ただ、将来、法令等に組み込む時期が来た時に速やかに制度化できるよう、制度設計の試行を住宅メーカーと連携しつつ考えていきたい。（所見3）
- ⑭液状化問題は地盤状況、地震外力レベル、継続時間などパラメータも複雑で難しい問題である。また、液状化対策に要する費用も大きく合理的な液状化判断、液状化対策が望まれている。社会のニーズに適合した重要なテーマと考える。
- ⑮本指定課題は、安心・安全な社会を構築するための喫緊で重要なテーマである。実用性、経済性を意識した成果を得るため、他機関との連携等、効率的な研究のために必要な体制を取りながら研究を推進しており、令和5年度は、遠心載荷装置の故障による障害があったにもかかわらず、適切な対応により目標達成に向けた進捗があったものと判断する。なお、令和6年度は二つのサブテーマとも実験が計画されており、年度計画を遺漏なく遂行できるよう、十分な予算の配分、外部資金の活用などが望まれます。（所見4）
- ⑯宅地液状化に対する、地盤の液状化対策の必要性評価や、液状化対策工の効果確認、直接基礎住宅の合理的基礎の設計法は、社会ニーズにも適合した重要な課題である。
液状化対策の必要性評価においては、非液状化層3m以上あれば液状化被害が小さいことの妥当性検証に主眼が置かれている。簡易的評価の観点からは有用と推測されるが、従来の液状化判定のFL値やPL値との関連についての検証も必要であろう。（所見5）
液状化対策効果を実証する方法は有用であり、地中起振源による方法は期待されるが、地震による振動レベルに比べて起振源による振動は微小であるため、解析等を通して地中起振源による結果を、地震レベルの評価に繋げる合理的な評価法が必要である。（所見6）
液状化評価や液状化対策は、既存住宅においても重要であり、本成果がローコストで妥当な液状化対策に繋がることを期待したい。（所見7）

(参考) 建築研究所としての対応内容

・ 所見 1・3 への対応

ハウスメーカー（住団連）や消費者まで含めて、情報収集や意見交換の場を拡大することに努めて参りたい。また、成果を社会に普及させる前段階の準備として、制度設計の試行を彼らと連携して検討することに努めて参りたい。

・ 所見 2 への対応

学会大会等の場を利用して、成果を早期に公表していくことに努めて参りたい。

・ 所見 4 への対応

十分な予算の配分については、管理部門に働きかけて参りたい。

・ 所見 5 への対応

従来の液状化判定の FL 値や PL 値との関連についての検証は、次年度以降に進めて参りたい。

・ 所見 6 への対応

地中起振源（微小加振）による水圧変動の再現解析をとおして、これが大地震時の液状化対策効果の担保となるような合理的な評価法の開発を、次年度以降に進めて参りたい。

・ 所見 7 への対応

サブテーマ（1）とサブテーマ（2）の相互の関連性や流れ（ストーリー性）について、改めて整理し直し、液状化に対する宅地耐震化に向けて成果が最大となるよう検討を進めて参りたい。また、性能とコストの両方を評価しながら研究開発を進行することに努め、社会のニーズや制約に対して無理なく成果を普及させられる枠組み構築へと繋がるよう検討を進めて参りたい。

3. 評価結果

- A 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができる。
- B 研究開発課題として、目標の達成を概ね見込むことができる。
- C 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができない。