

第7章 まとめ

7.1 本研究の成果

本研究は、既設および新設の戸建て住宅の液状化対策方法として、浅層盤状改良工法の効果と経済性の評価を行った。各検討項目の主な結論は以下のとおりである。

(1) 液状化に対する戸建て住宅の性能評価（第2章）

宅地の合理的な液状化対策の設計法を確立するために、戸建て住宅の性能を法制度、既往研究および東日本大震災における被災調査結果を基に評価した。住宅の沈下と傾斜が住宅躯体に支障をもたらさない変形量（又は変形角）の許容値を明らかにし、戸建て住宅の液状化対策の適切なクライテリアを抽出した。

建築基準法が要求している性能は、有害な沈下変形がないことであるが、その明確な数値は示されていない。一方、日本建築学会の基準では傾斜角の限界値を6~8/1000としている。また、居住者の健康障害に関する調査では、10/1000でめまいや頭痛を生じ、水平修復を余儀なくされている。この結果を裏付けるように、東日本大震災の液状化による被災家屋の調査では、平均傾斜角が6~8/1000を超えると水平修復工事を実施したケースが多かった。

罹災証明上の被災度判定および地震保険における損壊基準においては、いずれも10/1000程度を超えると半壊、半損として認定している。また、16.7/1000程度を超えると大規模半壊、全損と判断され、部分的な補修では対応が困難になる。

これらの結果から、戸建て住宅の液状化対策のクライテリアは、以下の値が妥当であると判断した。

中地震動に対しては、有害な沈下変形を許容しない基礎構造とし、最大傾斜角では10/1000を超えないものとする

大地震動に対しては、ある程度の損傷は許容し、修復を容易にする基礎構造とし、最大傾斜角は16.7/1000を超えないものとする

(2) 戸建て住宅の液状化被災調査（第3章）

東日本大震災を含む過去の液状化で被災した戸建て住宅において、液状化対策を行った箇所の文献調査、現場調査、およびアンケート調査を行った。また、航空レーザ測量による道路の変状調査も実施した。これにより、地下水位が液状化の程度に及ぼす影響は非常に重要であること、対策工が液状化被害軽減に寄与したケースが多数あること等が示された。特に、アンケート調査や航空レーザ測量による道路の調査では、浅層盤状改良工法が液状化被害軽減に有効であることが示された。

また、上記(1)により設定された戸建て住宅の最大傾斜角の基準値に対応するめり込み沈下量の値を、東日本大震災の液状化により被災した戸建て住宅の調査結果から以下のように

に設定した。

中地震動に対しては、最大傾斜角の基準値 10/1000 に対し、めり込み沈下量は 10cm

大地震動に対しては、最大傾斜角の基準値 16.7/1000 に対し、めり込み沈下量は 15cm

(3) 振動台実験による浅層盤状改良工法の効果検証（第4章）

戸建て住宅に対する浅層盤用改良工法の効果の確認と、具体的評価を行う数値解析の検証に供することを目的として、遠心模型振動実験を実施した。実験モデルとしては 10m の砂層（地下水位 GL-1.0m、液状化層厚は 9m）を想定し、建屋直下の盤状地盤改良の厚さを変えた 4 ケースについて実施した。また、2 種類の入力地震動について検討した

地震動 1（最大入力加速度 150 Gal 程度、浦安市で観測された地震動に相当）では、無改良地盤と比較して、改良を行ったケースでは総沈下量が大きく低減されることが分かった。一方、地盤改良層厚が家屋の沈下量に及ぼす影響はあまり小さくなく、層厚 1.5m の改良体であっても、沈下量低減に非常に効果的であることが示された。

地震動 2（最大入力加速度 350 Gal 程度、地震動 1 の加速度を 2 倍とした地震動）による実験は、地震動 1 の実験終了後に同じ模型をそのまま用いて実施した。地震動 2 により、すべてのケースの地盤で再度液状化が発生し、家屋の総沈下量も更に増加したが、沈下量に及ぼす地盤改良の有無や地盤改良厚の影響は顕著ではなかった。

(4) 数値解析による浅層盤状改良工法の効果検証（第5章）

2 種類の数値解析手法を用いて浅層盤状改良による改良効果を検証し、かつ上記(1), (2) で得られた戸建て住宅の液状化対策の基準値を満足する改良層厚を検討した。なお、本研究で検討した地盤モデルは模型実験と同様、10m の砂層（液状化層厚は 9m）である。

有効応力解析 **GEOASIA** による検討では、(3)の遠心模型実験を適切にシミュレートできることを確認し、実物大のケーススタディにより液状化による家屋のめり込み沈下に及ぼす地盤改良厚、改良幅、改良手法や隣接建屋（隣家）の有無の影響を調べた。これにより、浅層盤状改良の改良厚の増大に応じて沈下量が低減されることが示された。液状化層厚が 9m、改良厚 3m、隣接家屋がない条件で改良方法として固化工法を用いた場合、めり込み沈下量は地震動 1（中地震相当）で 10cm 程度以下、地震動 2（大地震相当）で 14cm 程度となった。これらの値は、戸建て住宅の液状化対策の基準値を満足する。

GEOASIA および静的有限要素解析 **ALID** による検討により、上記の固化工法だけでなく、締固め工法、排水工法でも家屋のめり込み沈下低減効果が確認された。ただし、改良層厚 3m の条件では、締固め工法、排水工法を施工した場合のめり込み沈下量は、地震動 1 で 10cm 程度以上となり、固化改良と比べ低減効果は小さいことが分かった。また、浅層盤状改良工法の効果については、改良層厚だけでなく改良幅や隣接家屋の影響、液状化層厚の影響も大きいことに留意すべきである。

(5) 戸建て住宅を対象とした浅層盤状改良工法の経済性評価（第6章）

浅層盤状改良による対策の経済性を明らかにするために、新設及び既設の戸建て住宅及び宅地について、国内で実施されている液状化対策工法のうち実績が多く設計手法が確立している「締固め」「固化」「排水」の3工法を抽出し、それぞれの経済性を比較した。その結果、従来設計法による液状化全層を対象とした対策に比べ、浅層盤状改良工法を用いた場合は30～50%のコスト低減が可能となることが明らかになった。

既設家屋を対象とした場合、工法選択の自由度が減ることや様々な制約条件により、新設を対象とする場合と比較してコストアップに繋がることが明らかになった（本研究の仮定条件内では、締固め工法で約2倍、固化工法では約6～8倍）。また、全体コストに占める固定費比率が大きい工法ほど施工面積の影響を受けるが、既設戸建て住宅に適用可能な工法では、施工面積の影響は小さいことが示された。

工法別の検討では、新設の場合には施工面積によって最適となる工法の選択肢が変動する傾向がある。一方、既設の場合には施工面積によらず、概ね一様な傾向を示した。

7.2 今後の課題

本研究では、文献・現場調査に基づき、戸建て住宅の液状化対策工に求められる性能を設定し、その性能を満足する浅層盤状改良の改良層厚について検討した。また、同工法の経済性の評価も実施した。しかし、液状化による戸建て住宅の変状の程度に影響を及ぼす要因は多く挙げられるが、本研究における検討条件は限定的であるため、様々な課題が残されている。以下に主な課題を記す。

本研究では、10mの水平砂地盤（地下水位GL-1.0m、液状化層厚は9m）上にある1軒の住宅をモデルとして採用しているが、浅層盤状改良の効果や変状パターンは住宅の周辺環境や液状化層厚等の影響を受けることが、現場調査やシミュレーションで明らかになっている。この影響を整理する必要がある。

適切な改良層厚を判断するめり込み沈下量の基準値は、現場調査によって得られた傾斜角との関係から抽出しているが、この関係は非常にばらついている。液状化による戸建て住宅のめり込み沈下と傾斜角の関係は、住宅の構造や地盤条件、周辺環境などを考慮してより詳細に整理することで、変動する可能性がある。

本研究の実験・解析・コスト評価では、浅層盤状改良工法として国内で一般的に用いられている手法を中心に議論したが、これは他の工法の使用を妨げるものではない。新設や既設の戸建て住宅を対象とした液状化対策工法の技術開発は、民間を中心に精力的に進められている。その中には、単一の工法原理によるものだけでなく、複数の工法原理を融

合したものなど多岐にわたっており、今後の技術開発の動向を見極めた補足が必要となる。ただしその際には、科学的根拠に基づいた設計法によってその対策仕様が決定されているかを十分に吟味し、確実な液状化防止効果を得られているのかを実証、検証されていることを確認する必要がある。

本研究におけるコストの評価で設定した直接費には、搬入路の確保や施工のし易さなどの個別の要因は考慮されていない。一方、これらが直接費に及ぼす影響は非常に大きいことから、比較対象の現場におけるこれらの条件の洗い出しを十分に実施する必要がある。