

第1章 総説

1.1 はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震（M_w 9.0）により地盤の液状化により深刻な被害が発生した地域は東北から関東地方まで広い範囲に及び、特に河川堤防や比較的新しい時代に造成された地域の宅地、道路、ライフラインなどに著しい被害が生じた。

地盤の液状化のメカニズムおよびその対策工に関する検討は、1964年新潟地震以降、国内外の多くの技術者・研究者らにより行われてきた。2011年東北地方太平洋沖地震では、大きな地震動が長時間継続したことから顕著な液状化が発生したが、半世紀前の新潟地震で生じたような橋梁などの公共構造物や中・高層ビルの液状化による被害は限定的であった。これは、大型社会基盤施設に対しては、液状化に関する調査技術や対策技術が時代とともに発展し社会に適用されてきたためである。一方、私的財産である戸建て住宅や宅地に対しては、最新の技術が適用されず被害が数多く発生した。国土交通省によると、同地震の液状化による宅地被害件数は2万6914件（2011年9月27日）に達し、地震から1年半が経過した現在でも復旧・対策の目処が立っていない地域が多く存在している。

このように、多くの戸建て住宅や宅地の復旧が遅れている主な理由は、地盤の液状化による建物の沈下・傾斜を修正しただけでは、余震や近い将来に発生が予想される大地震により液状化被害を再び受ける可能性があるからである。沈下・傾斜の修正と同時に液状化対策も施す復旧が望ましいが、戸建て住宅のような小規模な建築物に適用できる経済的な調査技術や対策技術が確立されていないため、現状の建築基礎構造設計指針等で規定されている設計概念に基づく対策では非常に高いコストとなる。適用の可能性のある静的締固め工法や薬液注入工法を施工した場合、例えば、液状化層の厚さが10mの場合に、その全てを改良すると1戸あたりの施工費が1000万円以上となり、住民負担の限度を超えている。

本研究は、このような震災後の社会的背景を踏まえ、平成23年度補正予算建設技術研究助成制度（国土交通省）の支援を受け行われた。戸建て住宅の性能を適切に評価し、その性能に支障のない変形量为目标とした液状化対策の範囲を検討し、宅地の合理的な液状化対策の設計方法の検討を行った。特に、明確な支持層の無い埋立て地の宅地では改良の範囲を浅部に限定した浅層盤状の地盤改良が現実的であることから、その改良範囲を明確にすることを目的とした。被災事例の調査、遠心振動台模型実験および数値解析を実施し、地盤改良範囲と住宅のめり込み沈下量の関係を明らかにし、設計に有用な成果を得た。

なお、本研究では、公益社団法人地盤工学会内に産官学からなる委員会（浅層盤状改良による宅地の液状化対策研究委員会）を設置し、研究推進に対する有益な情報と適切な助言を幅広く収集した。また、2011年東北地方太平洋沖地震により深刻な液状化被害を受けた千葉県香取市と茨城県神栖市において、本研究の成果を紹介する講演会を開催した。

1.2 浅層盤状改良による液状化対策の有効性

本研究では、浅層盤状改良を一般住宅地における実現可能な液状化対策工法として提案しているが、この改良方法が対策工として有効であることは、過去の地震の調査結果からも示唆されている。

図 1.2.1 は 1983 年日本海中部地震における液状化被害調査と地盤調査結果を基に、地下水位より上位の非液状化層厚 H_1 と地下水位以深に分布する液状化層厚 H_2 の関係を示したものである。地表面に被害が確認されたケースを黒丸で、無被害のケースを白丸で表しているが、図中のラインを境界に地表面被害の有無を明確に分けることが可能である。この事例では、地表面から 3 m 程度まで非液状化層が分布すれば地表面に被害は生じないことを示している。本研究で検討する浅層盤状改良は地下水低下工法ではないが、表層の改良体を図 1.2.1 における非液状化層とみなすことにより、液状化による地表面の被害を軽減できる可能性を示している。

また、1995 年兵庫県南部地震による液状化発生地域のうち、サンドコンパクションパイリング工法で締め固めた地盤では、その改良深度が液状化対象層下端に達していなくても構造物への被害が大幅に低減されたとの報告²⁾もあり、本研究で検討する浅層盤状改良の有効性を示唆している。

浅層盤状改良の手法には様々なものが考えられるが、本研究の目的とする住宅の地盤への要求性能（例えば建物の沈下量や傾斜角）から設定される液状化対策範囲、液状化対策地盤の性能（剛性など）の提示により、既存の液状化対策工法によってもコストを低減した対策が可能となる。さらに、これらの関係を施工状態（施工環境など）に分類して整理した経済性の評価手法を加えることにより、東日本大震災による被災住宅の復旧工事への速やかな適用が可能となると考える。

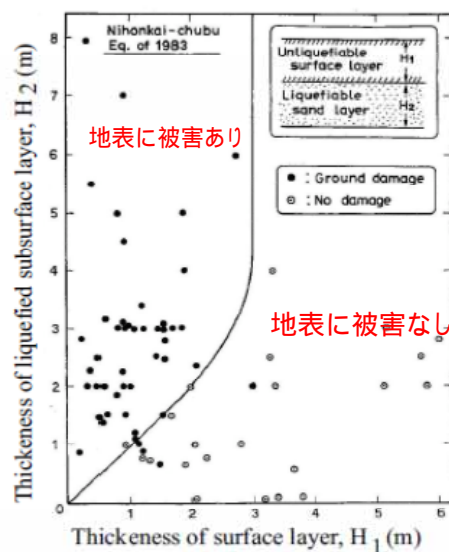


図 1.2.1 液状化層厚と表層の非液状化層の厚さと被害の関係¹⁾

1.3 研究の目的と方針

1.3.1 目的

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、浅層盤状改良の技術についてその効果と経済性の評価を行い、合理的な設計方法を提案することを目的とした。具体的な研究の目標は以下の3点である。

戸建て住宅の地盤への要求性能（例えば傾斜や沈下量など）を明確にし、液状化対策を施した地盤の性能を明確する。

浅層盤状改良による液状化対策のメカニズム及びその効果を明確にする。

既設および新設の戸建て住宅に浅層盤状改良による液状化対策を適用した場合の経済性を明らかにする。

1.3.2 方針

前述の目的達成のため、本研究では5つのグループに分かれて研究を行った。本研究の全体の概要を図1.3.1に示すとともに、各グループの研究方針を以下に概説する。

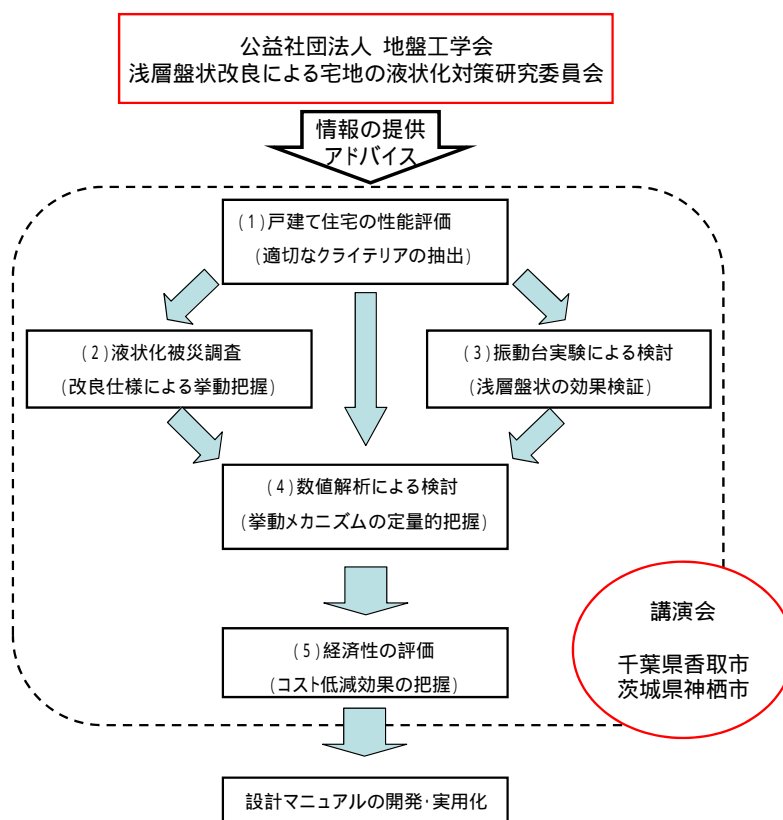


図 1.3.1 本研究の全体概要図（破線枠内が本研究の対象）

(1) 液状化に対する戸建て住宅の性能評価

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適切に評価した。具体的には、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（最大傾斜角の基準値）を抽出した。

(2) 戸建て住宅の液状化被災調査

2011 年東北地方太平洋沖地震における戸建て住宅の被災事例の調査から、表層改良・中層改良対策あるいは柱状改良などの地盤改良等の戸建て住宅に対する液状化被害の軽減効果の分析と評価を行った。また、この地震の発生前後に行われた航空レーザ測量から求められた液状化地盤の沈下分布図を使用し、道路の舗装厚と液状化被害の関係から、液状化に対する浅層盤状改良の有効性について分析を行った。また、被災家屋の調査に基づき、(1) で設定した最大傾斜角の基準値に対応するめり込み沈下量の値を抽出した。

(3) 振動台実験による浅層盤状改良工法の効果検証

2011 年東北地方太平洋沖地震による宅地の液状化被害の調査結果を基に、代表的な戸建て住宅と宅地をモデル化し、遠心載荷模型実験装置を用いた振動台実験を実施した。実験では、無対策地盤、及び浅層盤状改良の厚さを変化させた実験を、最大加速度の異なる 2 種類の地震動に対して行い、地盤改良の厚さと沈下量の関係を定量的に求めた。これらの成果は、数値解析によるシミュレーション解析の妥当性の検証に用いた。

(4) 数値解析による浅層盤状改良工法の効果検証

2 種類の有効応力解析を用いて改良範囲と住宅のめり込み沈下量の関係等を検討し、浅層盤状改良による改良効果のメカニズムを明らかにすると共に設計に有用な資料を得た。

解析には、静的有限要素解析コード *ALID* と、弾塑性構成式 SYS Cam-Clay model を搭載した水～土骨格連成有限変形コード *GEOASIA* を用いた。最初に振動台実験のシミュレーションを実施し、解析モデルの作成、変形量の照査と浅層盤状改良の効果のメカニズムを考察した。次に実験を補完するため、改良手法、改良厚、改良幅等をパラメータにしたケーススタディを実施し、効率的かつ効果的な改良仕様の決定に資するデータを得た。

(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

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、各種の液状化対策工の経済性を比較した。費用は様々な条件（地盤、施工環境等）によって大きく変動するため、金額ベースでの具体的な提示は困難である。本研究では、代表的な設計条件を設定して各種工法間のコストの比率として結果を提示した。

1.3.3 想定する地震動

従来の耐震設計法は、考慮すべき地震動として過去に経験した地震被害を基に設定され、発展してきた。当該分野における大きな節目は、1995年兵庫県南部地震において直下型の大きな地震動を受け、それまでの想定地震動（レベル1：中規模地震相当）に加えて、レベル2地震（大規模地震動）を考慮するようになったことである。現在では多くの構造物においてこの二段階設計が採用されていることから、本研究で想定する地震動もこれに倣い、以下のように定義する。

中地震動：戸建て住宅の供用期間中に1～2回程度発生する確率を持つ一般的な地震動レベル。

大地震動：発生確率は中地震動より低い、直下型または海溝型巨大地震による非常に高いレベルの地震動。

一方、2011年東北地方太平洋沖地震により深刻な液状化被害を受けた東京湾沿岸地域では、最大加速度の観点では中地震動レベルでも、地震動の継続時間の観点ではそのレベルを上回るものであった。参考までに、地震動のイメージを図1.3.2に示す。

以上を考慮し、本研究では以下に示す二つの地震動を独自に想定し、実験および数値解析に用いることとした。

地震動1：2011年東北地方太平洋沖地震で宅地の液状化被害が多く発生した千葉県浦安市で観測された地震動と同レベルの地震動とする。加速度の観点では、戸建て住宅の供用期間中に1～2回程度発生する地震動レベルであるが、地震動の継続時間を考慮すると上記の中地震動よりもエネルギーは大きい。

地震動2：地震動1の継続時間をそのままに、加速度を2倍とした地震動。発生確率は上記の大地震動よりも更に低い。

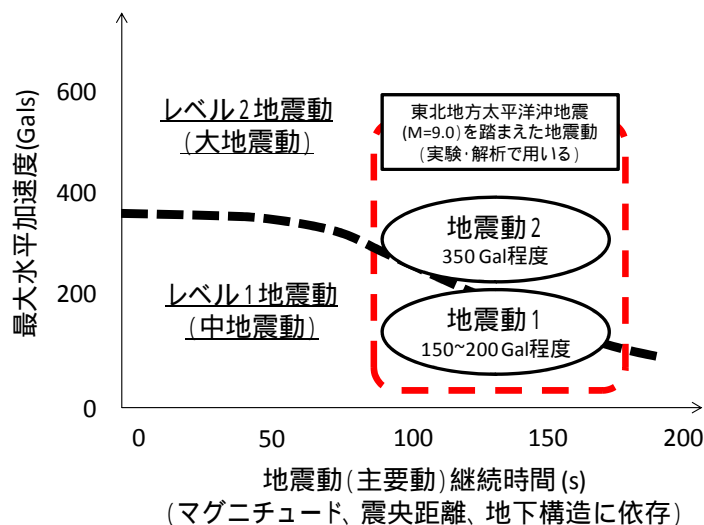


図 1.3.2 本研究における想定する地震動のイメージ図

1.3.4 本研究における沈下と傾斜の定義

本研究報告書で使用する戸建て住宅の沈下と傾斜に関する用語の定義を以下に示す。

建物のめり込み沈下量 S_p

液状化により建物が地盤にめり込んだ部分の沈下量（総沈下量との混同に注意）

建物がない場合の地盤の沈下量 S_g

液状化後に確認される地盤の沈下量であり、建物荷重の影響を受けないものをいう。

建物の総沈下量 S_t

建物がない場合の地盤の沈下量 S_g + 建物のめり込み沈下量 S_p

建物の平均総沈下量 $S_{t,av}$

建物がない場合の地盤の沈下量 S_g + 建物の平均めり込み沈下量 $S_{p,av}$

建物の不同沈下量 S_d

建物の最大総沈下量 $S_{t,max}$ - 建物の最小総沈下量 $S_{t,min}$ もしくは、

建物の最大めりこみ沈下量 $S_{p,max}$ - 建物の最小めりこみ沈下量 $S_{p,min}$

建物の最大傾斜角 θ_{max}

建物の不同沈下量 S_d / 不同沈下間の水平距離 B^*

建物の平均傾斜角 θ_{av}

(建物左端の総沈下量 $S_{t,l}$ - 建物右端の総沈下量 $S_{t,r}$) / 建物の幅 B

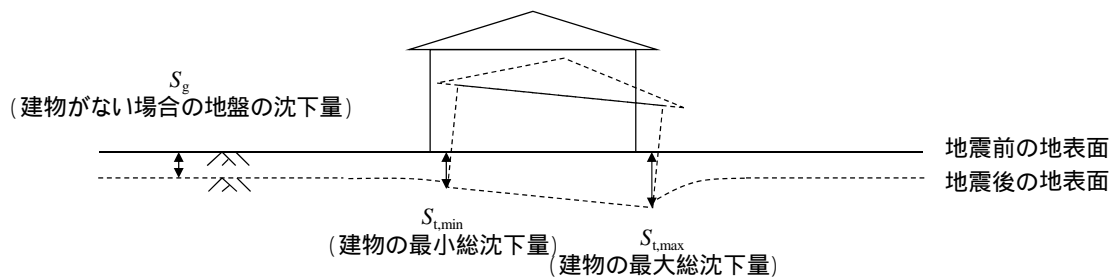


図 1.3.3 液状化による建物の変状例

1.4 研究メンバーと研究工程

本研究の実施メンバーと研究の工程を以下に示す。

表 1.4.1 研究メンバー一覧表

	氏名	所属（勤務先）	執筆担当
代表研究者	谷 和夫	防災科学技術研究所 減災実験研究領域 兵庫耐震工学研究センター	全体統括
共同研究者	清田 隆	東京大学 生産技術研究所	第1・3・7章
共同研究者	松下 克也	株式会社ミサワホーム総合研究所	第2章
共同研究者	橋本 隆雄	株式会社 千代田コンサルタント	第3章
共同研究者	山本 彰	株式会社 大林組	第4章
共同研究者	野田 利弘	名古屋大学 減災連携研究センター	第5章
共同研究者	竹内 秀克	株式会社 不動テトラ	第5章
共同研究者	規矩 大義	関東学院大学	第5章
共同研究者	大林 淳	株式会社 不動テトラ	第6章

表 1.4.2 本研究の工程表

項目	平成24年									
	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
(1) 戸建て住宅の性能評価	■									
(2) 液状化被災調査	■									
(3) 振動台実験による検討			■							
(4) 数値解析による検討				■						
(5) 経済性の評価						■				
報告書作成							■			
研究委員会	2/27		4/24			7/13		9/20		
住民説明会						7/22 香取市	8/11 神栖市			

【参考文献】

- 1) Ishihara, K. (1985): Stability of natural deposits during earthquakes, Proc. of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, 321-376.
- 2) 加倉井正昭, 青木雅路, 平井芳雄, 俣野博 (1996): 埋立て人工島における直接基礎の挙動, 土と基礎, 44-2, 64-66.