

様式第 11 別紙 2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：既設宅地のスマート液状化対策工法の開発
- (2) 研 究 期 間：平成 28～29 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：八嶋 厚（岐阜大学・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：八嶋 厚（岐阜大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：沢田 和秀（岐阜大学・教授）
余川 弘至（中部大学・助教）
村田 芳信（地盤防災ネットワーク・理事長）
苅谷 敬三（岐阜大学・客員教授）
- (6) 補 助 金 交 付 総 額：37,617,000 円

(7) 技術研究開発の目的

本研究開発は、狭隘なスペースで建物周辺ならびに基礎下に高性能排水材(ドレーン)を回転圧入することが可能な低振動低騒音型小型回転貫入装置の開発と、既存宅地における液状化対策の効果判定が可能な数値解析手法の開発により、調査・設計から施工までを経済的に実現できるスマート液状化工法を確立し、その普及と社会実装による地域防災力ならびに生産性の向上を図ることにある。以下に、開発目標を述べる。

1) 狭隘な場所において施工が可能となる低振動低騒音型小型回転貫入装置を開発する。既存の貫入装置を改良することによって、①～④の数値目標を満足する生産性が向上したシステムを構築する。①振動レベルを 75 dBまで低下させる。②騒音レベルを 85 dBまで低下させる。③貫入速度を 1.0m/分以上を達成する。④鉛直および斜め打ちの貫入精度を $\pm 3^\circ$ とする。以上により、住宅が密集する現場においても振動騒音の特定建設工事における環境基準内で高速施工が可能となる。また、通常の 11m \times 16m (176 m²、53.3 坪) の宅地の場合、施工期間は準備工を含めて 5 日以内、施工費用は 150 万円以内を達成する。

2) 液状化地盤上の小規模建築物(4号建物について)について、複雑な数値解析を実施することなく、通常の液状化判定チャートにより、対策前および対策後の沈下および傾斜を予測できる簡易法を開発する。①従来の液状化判定チャートでは、定性的評価のみ可能であった建物被害について、沈下量と傾斜量のある程度の精度で予測することができるものとする。②高精度予測を達成するために用いられていた FEM 解析等では、詳細な地盤調査を必要としたが、本システムでは小型動的コーン貫入試験を用いた液状化判定調査で十分なものとする。これにより、4号建物について、傾斜量を 6/1,000 以下に抑えるための液状化対策が、簡易設計法によって瞬時に決定される。

(8) 技術研究開発の内容と成果

1. 低振動低騒音型小型回転貫入装置の改良

これまでに、既存宅地において、間伐材と固化材を地中に打設する液状化対策工法を提案し、実現するための施工機械の開発を行ってきた。その結果、N 値 20 前後の地盤への貫入や 1 日当たり 50m の貫入能力があることを確認してきた。しかし、この施工機械は油圧パーカッション方式を採用しており、隣接する住宅がある場合には、騒音や振動の問題で工法を採用することが難しい。また、反力不足を補うためには、施工機械を大きくする必要があり、狭隘地での施工が難しくなるという問題があった。

そこで、まず騒音振動対策として、これまでのパーカッション方式による地盤への貫入から「回転圧入方式」に変更した。この場合、これまで以上に反力が必要となることから、あらかじめスクリュウアンカーにより反力架台(H型鋼)を設置することとし、この架台上を貫入装置が移動することで作業の効率化を図るものとした。さらに、施工機械は狭隘地での施工を考えて、分解した各部品が大きなもので 30kg 程度になるように可搬性を高めた。

図 1.1 ならびに表 1.1 に、試作した軽量小型の回転貫入装置と仕様を示す。この装置は、ケーシング(80A ガス管)を鉛直のほか最大傾斜角 45°の貫入が可能である。圧入及び回転は三相 0.74KW モーターを使用し、最大 320Nm の回転トルクを発揮する。また、リーダー及び架台は H 型鋼 100 \times 100mm を使用して軽量化し、架台の設置は太陽光発電設備用グラウンドスクリュウアンカー(長さ 1000~1600mm)を使用した。

地中に打設する高性能排水材(ドレーン)は、写真 1.1 に示すように、立体網目状の構造をもった円筒形に加工されたポロプロピレン製の排水パイプで、これまで盛土の排水工や山留擁壁裏面排水に用いられてきており、強度面での問題がない。また、工場で管理・製造されているため品質にばらつきが少なく、劣化等の心配がない。さらに、軽量で扱いやすく、地盤の粒径に応じて巻き付ける PE メッシュフィルターの網目を選定できるなどの利点を有する。

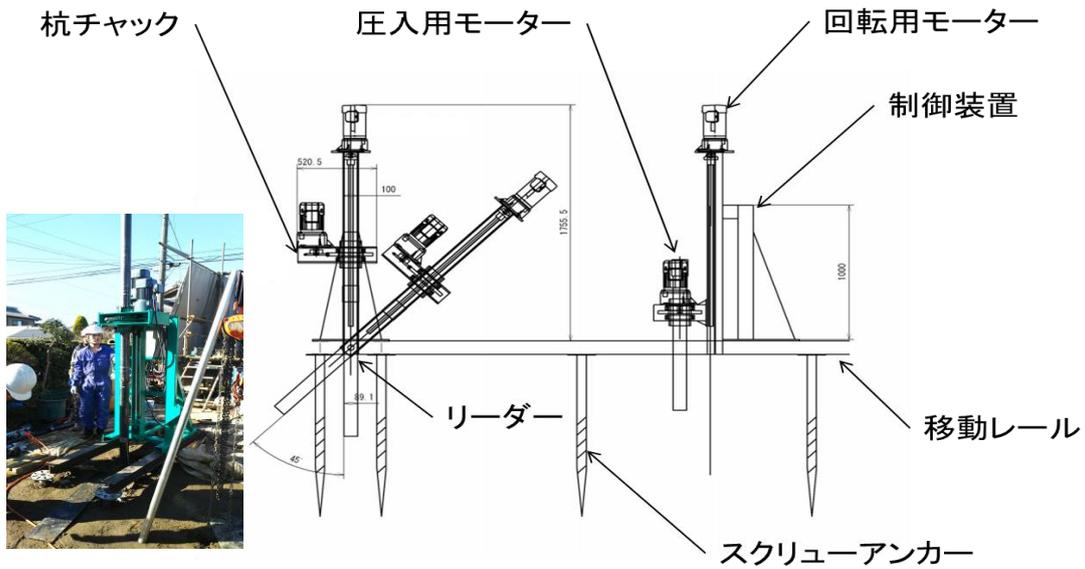


図 1.1 改良試作した施工機械の概要図（左：正面図、右：側面図）

表1.1 試作機の仕様一覧

装置	使用器具および仕様
ケーシング	80Aガス管、外径89.1mm
圧入用モーター	三相0.74KWモーター
回転用モーター	三相0.74KWモーター
リーダー	H型鋼100×100, 45度まで傾斜可能
杭チャック	摩擦締付け型, 溝はめあい式
移動レール (架台)	H型鋼100×100, 全長2000mm
スクリュウアンカー	太陽光発電設備用GSA, 径65mm×長さ1000~1600mm
制御装置	回転, 圧入ともにインバーターによる速度制御



表12 高性能排水材(ドレーン)の動水勾配別の透水係数

品番	直径	有効通水断面積	流速(cm/sec) 75kPa载荷時				
			動水勾配				
P-73	70 mm	38.5 cm ²	3/1,000	1/200	1/100	3/100	1/10
			3.35	4.33	6.12	10.61	19.37

写真 1.1 高性能排水材

ドレーンの地中への打設方法は、図 1.2 に示すように、7つの工程からなる。①回転貫入装置のヘッドに、鋼管ならびに捨てビットを取付ける。②回転圧入により、所定の深さまで鋼管を足しながら貫入する。③ヘッドを外して鋼棒（Φ9mm）を挿入し、鋼棒先端（ねじ加工）を捨てビットにねじ込み固定する。④ドレーン中心の中空スペースに鋼棒を通しながら挿入し、ドレーン地表端をストッパーで鋼棒に固定する。⑤引抜用のヘッドを鋼管地表端に取付け、少し鋼管を引上げて捨てビットとの切離しを確認する。⑥切離しを確認できたら、鋼管をすべて引抜く。⑦ストッパーを外し、鋼棒ならびにドレーンの余長を切断する。

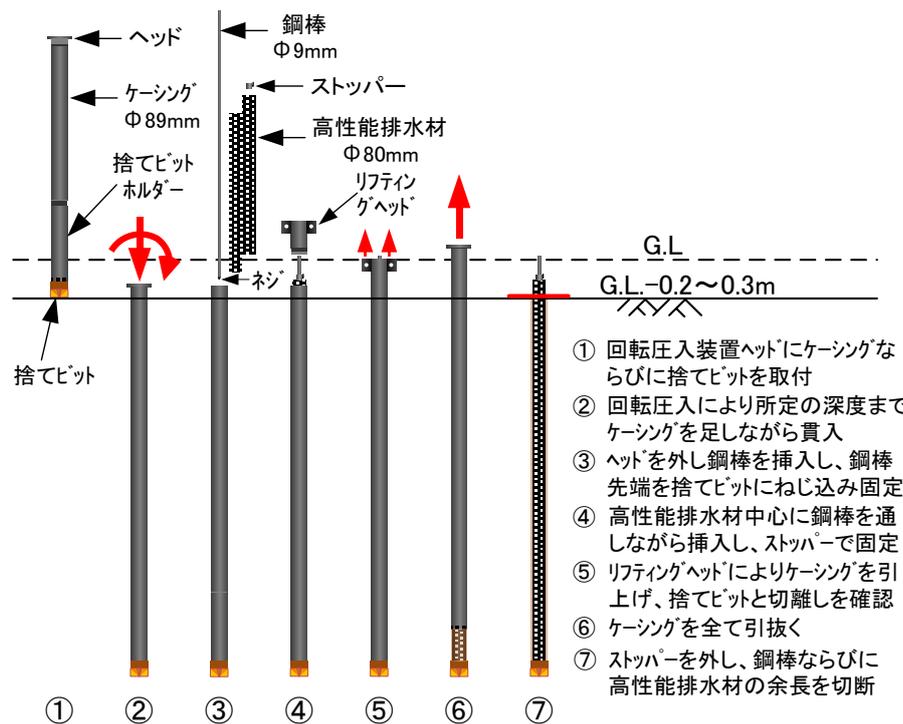


図 1.2 高性能排水材の打設手順

捨てビットは、図 1.3 に示すように、量産性とコスト面から材質をプラスチック（ABS 樹脂）とし、圧入貫入に適した「スクリュー型」と回転貫入に適した「十字型」を試作した。さらに、これらを試験貫入した結果、十字型の刃の根元を厚くして耐久性を増した「改良十字型」が最も回転圧入に適することを確認した。

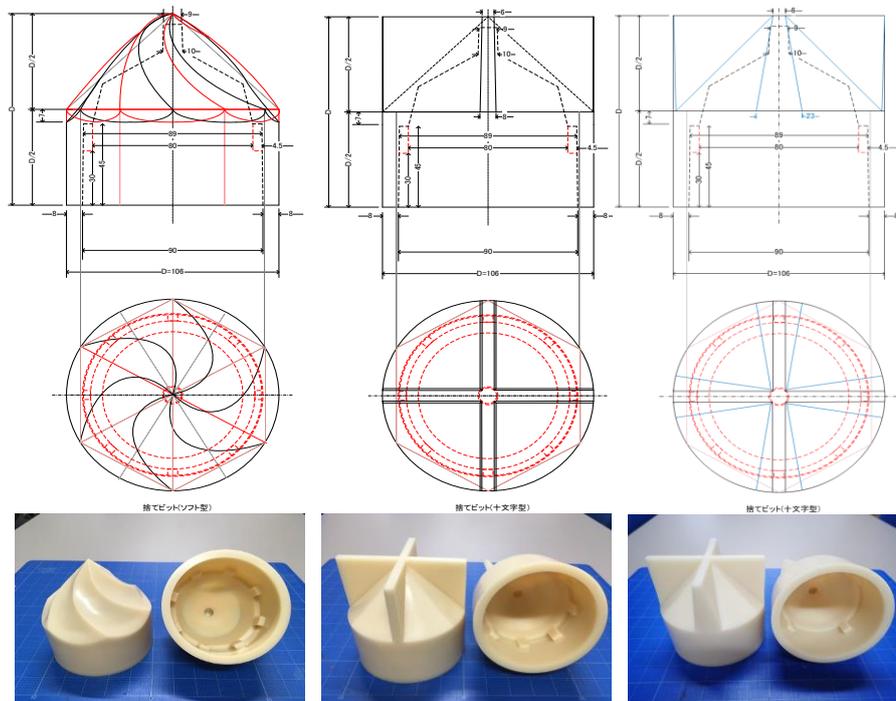


図 1.3 開発した捨てビット（左：スクリュー型、中央；十字型、右；改良十字型）

試作した軽量小型の回転貫入装置による試験打設を、愛知県あま市の宅地で行った。試験地は、蟹江川の氾濫原に発達した自然堤防の一面に当たり、海拔 0m 地帯の軟弱な沖積低地で、地震時には液状化の発生が懸念されている土地である。

試験地の宅地において実施した小型動的コーン貫入試験ならびにボーリング調査による標準貫入試験結果を図 1.4 に示す。小型動的コーン貫入試験は、標準貫入試験の N 値と等価な N_d 値を求める試験で、建物周りの 4 か所 (No.1~No.4) と今回の試験地 (No.5) の 5 か所で実施した。ボーリング調査は、試験地 (No.5) の近傍で実施した。

液状化対象層は、ボーリング調査による N 値から深さ 3m 付近までの N 値 10 以下の砂層と判断され、試験 (No.5) では N_d 値 10 以下の深さ 4m 付近までの貫入施工が目安となる。

試験打設では、①目標深度の 4.0m 付近までスムーズ (貫入速度 1.0 m/min) に回転圧入が可能であるか、②貫入の鉛直精度 ($\pm 3^\circ$) が保てるか、③貫入後、捨てビットへの鋼棒のねじ込みならびに捨てビットのケーシングとの切離しが可能か、④ドレーンの敷設後、ケーシングの引抜き時にドレーンが共上がりしないか、⑤市街地で施工可能な騒音振動レベル (敷地境界での騒音 85 デシベル以下、同振動 75 デシベル以下) 内での施工が可能であるかの 5 点について確認した。

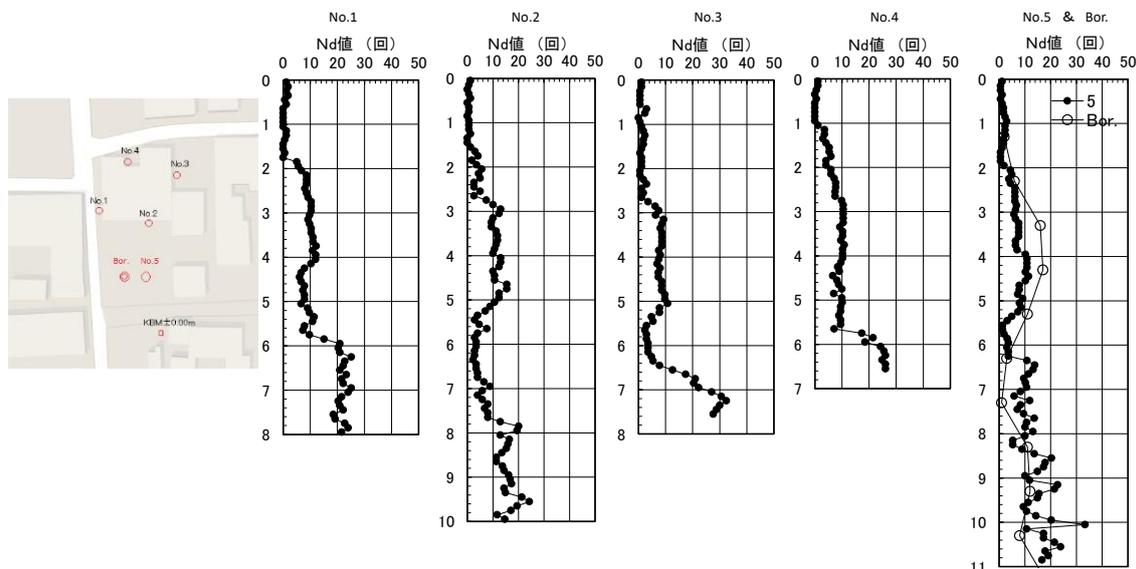


図 1.4 試験施工地の地盤調査結果 (小型動的コーン貫入試験と標準貫入試験)

試験打設の結果、以下のことが明らかとなった。

- ①目標深度 4m まで、0.67m/min の速度で回転圧入による貫入ができた。これは、試作機の電気モーター (0.75kw) のパワー不足と反力不足による機械の持ち上がりが原因で、貫入速度が目標の 1.0m/min に及ばないばかりか、隣接するドレーンの設置では深度 2m 付近から貫入が少しずつ困難になった。
- ②架台と機械のとの接続のクリアランス (反力の不足も原因) により、1.7%ほどの傾斜が生じたが、反力を確実にすることと架台と機械をバイス等でしっかり固定することで解消できる。
- ③捨てビットへの鋼棒のねじ込みならびに捨てビットのケーシングとの切離しは良好であった。
- ④ケーシングの引抜き時にドレーンの共上がりは確認されなかった。
- ⑤リオン社製の振動騒音測定装置を用いて、施工機械ならびに発電機から 1.0m、2.5m、5m の地点で計測した振動騒音レベルを図 1.5 に示す。発生する騒音振動はは振動規制法な

らびに騒音規制法に示される基準値（騒音 85db 以下、同振動 75db 以下）を大きく下回ることが確認できた。（目標達成度 100%）

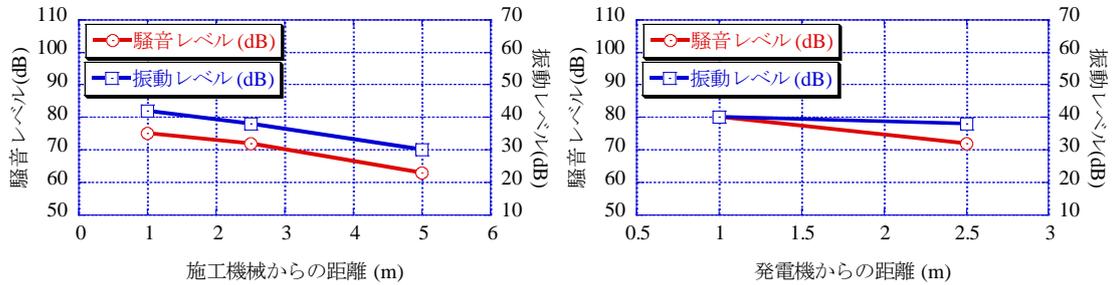


図 1.5 施工機械と発電機の騒音振動レベル

試験打設の結果を受けて、平成 29 年度予定の試験施工に向け、低振動低騒音型回転貫入装置のパワーアップを含めた改良・開発を実施した。

改良設計した低振動低騒音型回転貫入装置のプロト機の全体図を図 1.6 に示す他、その仕様を表 1.3 に示す。

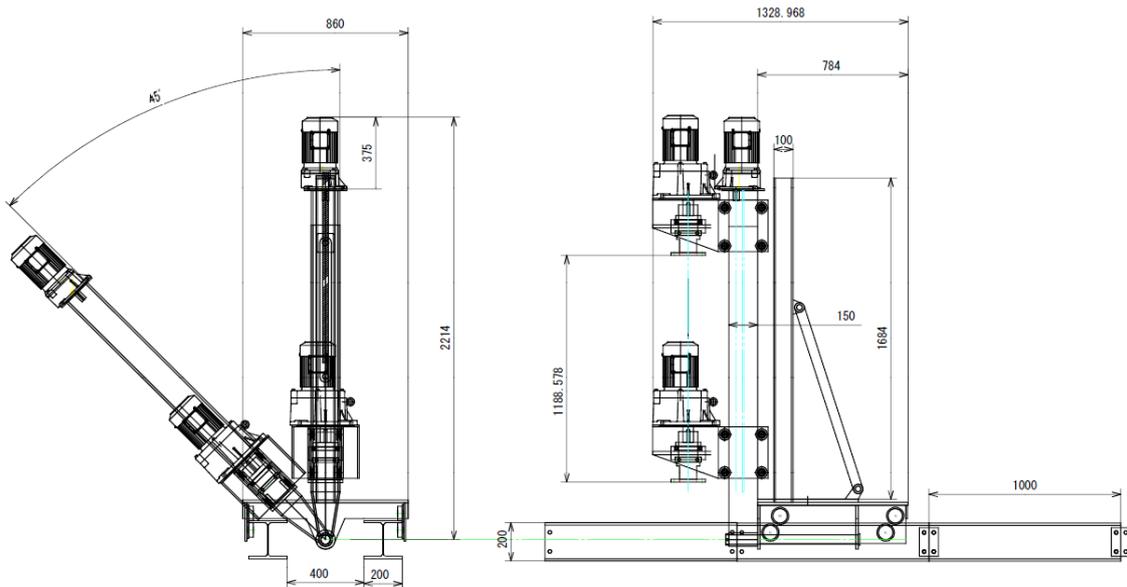


図 1.6 新しく開発した低振動低騒音型小型回転貫入装置

表 13 開発した低振動低騒音小型回転貫入装置の仕様

装置	使用器具および仕様
ケーシング	80A ガス管, 外径89.1mm, 全長1,000mm
圧入用モーター	三相1.5KWモーター, 1/10減速機付(148rpm/43.6Nm)
回転用モーター	三相1.5KWモーター, 1/80減速機付(19.2rpm/320Nm)
リーダー	H型鋼200×200, 45度まで傾斜可能
杭チャック	摩擦締付け型, 溝はめあい式
移動レール (架台)	H型鋼200×200, 全長1,000mm
スクリューアンカー	太陽光発電設備用GSA, 径65mm×長さ1000~1600mm
制御装置	スイッチング (on/off)制御

図 1.7 には、愛知県あま市の住宅において実施したボーリング調査結果から液状化判定を実施した結果を示す。液状化判定は、建築基礎構造設計指針に準拠し、モーメントマグニチュード $M=7.5$ 、地表最大加速度 $a_{max}=220$ gal とした。また、ボーリング調査において、乱れの少ない試料採取方法 (GS サンプラー) により採取した試料を用いた行った土の繰り返し非排水三軸圧縮試験ならびに動的変形特性試験結果は、表 1.4 に示すとおりである。さらに、図 1.8 には小型動的コーン貫入試験結果から、ボーリング調査による細粒分含有率 FC を用いて液状化評価した場合、 $N_1 < 5$ 以下を $FC=50\%$ として液状化評価 (提案簡便法) した場合を示す。

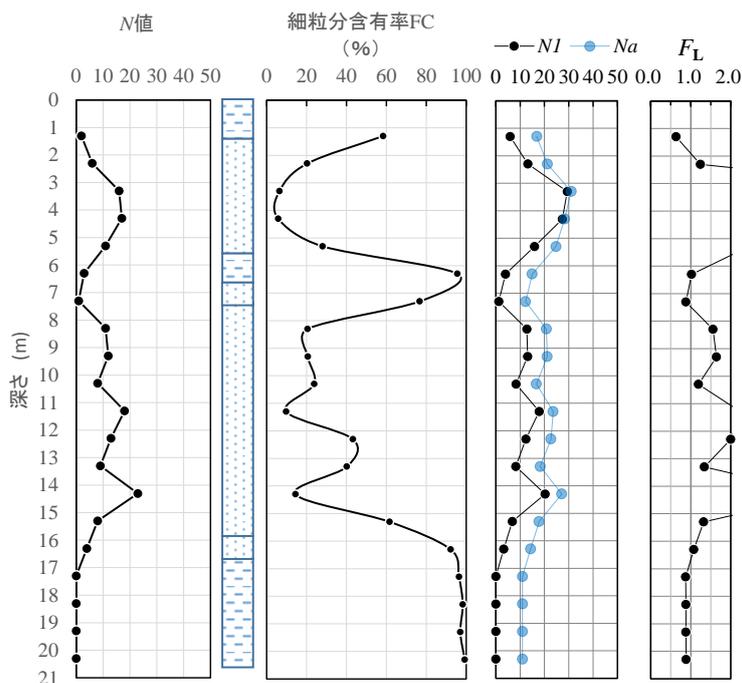


図 1.7 ボーリング調査結果と液状化判定

表 14 室内土質試験結果 (繰り返し比排水三軸圧縮試験、土の動的変形特性試験)

試料の深さ m	N 値	湿潤密度 ρ_t g/cm ³	自然含水比 W_n %	細粒分含有率 FC %	液状化強度比 RL_{20}	初期せん断剛性率 G_0 MN/m ²
2.00~2.95	6	1.93	22.2	28.7	0.360	24.6
4.00~5.00	17	1.98	22.1	10.2	0.221	25.4
8.00~9.00	11	1.96	21.4	10.4	0.251	28.7

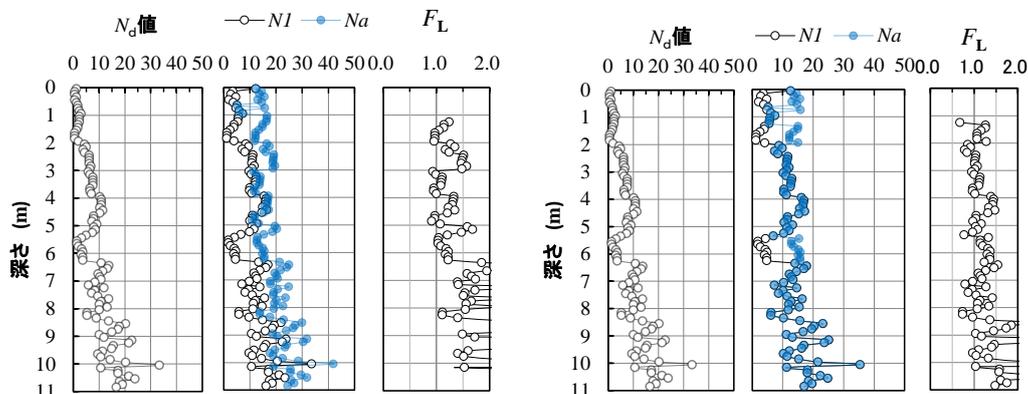


図 1.8 小型動的コーン貫入試験結果と液状化判定 (左; 細粒分含有率、右; $N_1 < 5 \Rightarrow FC=50\%$)

2. 模型実験による対策効果の確認

2.1 模型振動台実験概要

液状化時の住宅沈下および地盤の変形を確認するために、水平一方向に加振可能な電気油圧サーボ方式の加振装置と前面をアクリル板とした剛土槽(内寸：幅 1,000mm×奥行き 200mm×高さ 800mm)を組み合わせた振動台実験装置を使用し、1/40 スケールの模型振動台実験を行った(写真 2.1 参照)。実験では、液状化時の住宅沈下や地盤変形を確認することができるよう土槽に小型のカメラを設置した。模型地盤は、相対密度 30%を目標に、三河珪砂 6 号を地盤高さ 400mm となるように水中落下法で作製した。住宅模型は、塩ビ製の箱とアルミ板(重量物)によりモデル化した。アルミ板は、接地圧が一般の木造住宅と等価になるように重量を調整した。模型振動台実験の振動台に入力した地震動は、中地震を想定した周波数 5Hz、最大加速度 200gal、入力時間 16 秒の正弦波である。実験は無対策およびドレーンの配置箇所を変えた 3 ケースの計 4 ケースを実施した。実験の状況を写真 2.1 に、模型振動台実験中に振動台の上で計測された加速度の時刻歴を図 2.1 に、ドレーンおよび計測器の設置位置の概要図を図 2.2 に示す。

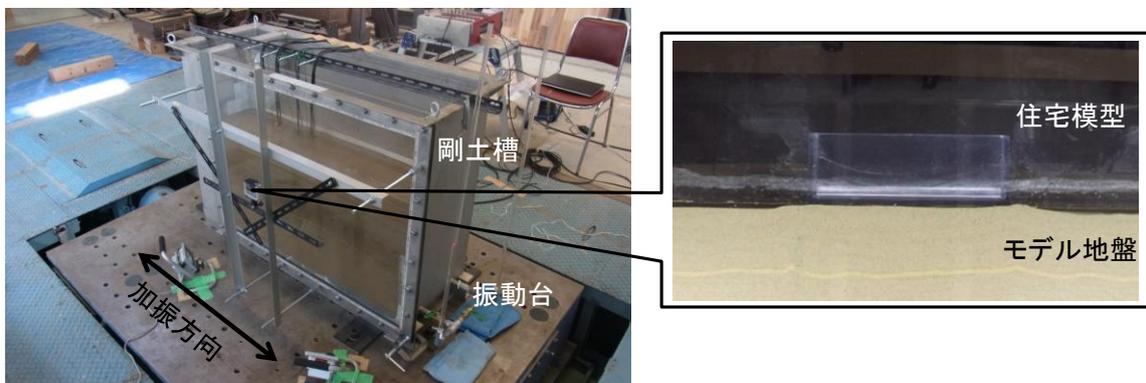


写真 2.1 模型振動台実験の状況

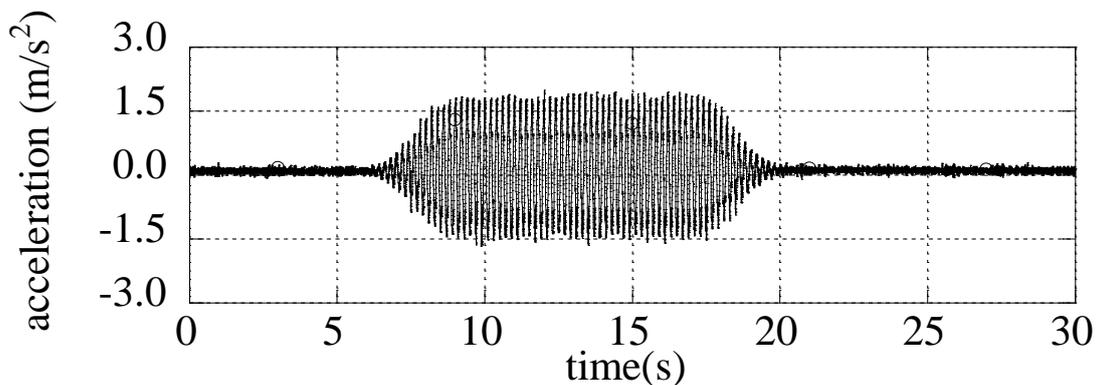


図 2.1 加速度の時刻歴

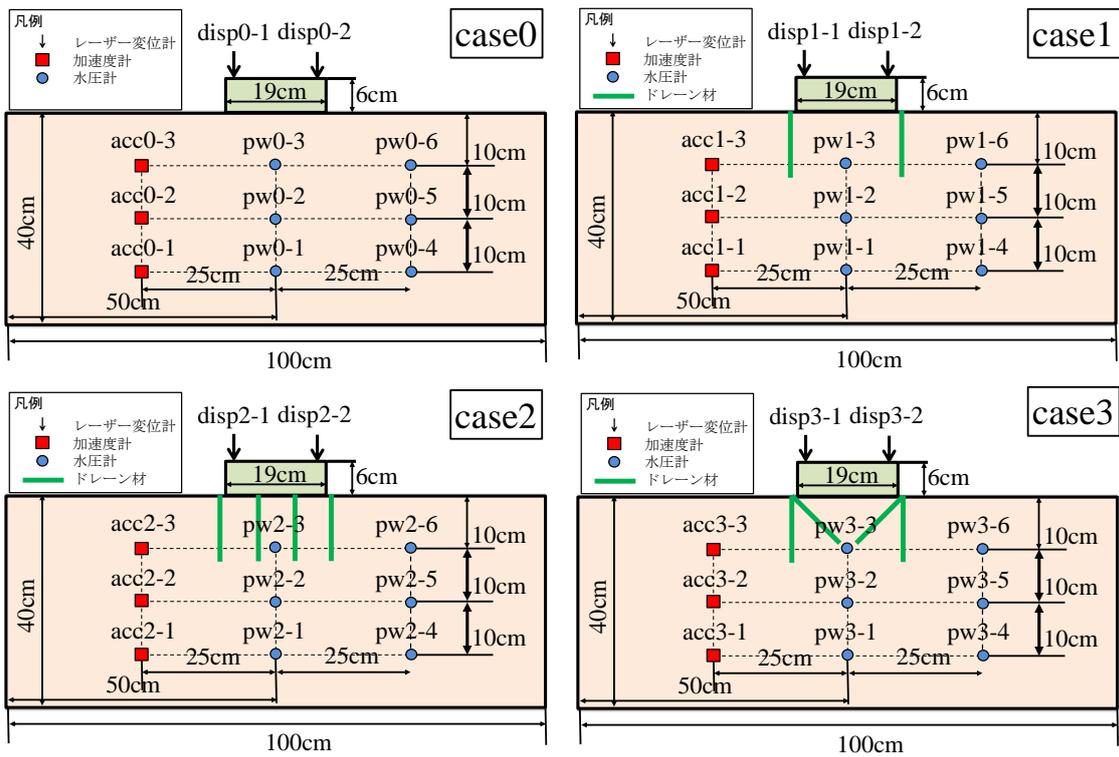


図 2.2 ドレインおよび計測器の設置位置の概要図

2.2 実験結果

各実験で得られた過剰間隙水圧の時刻歴を図 2.3 に、住宅沈下量の時刻歴を図 2.4 に示す。なお、図 2.3 中の赤の破線は、有効上載圧を示す。また図 2.3 および図 2.4 中の凡例は、図 2.2 の凡例と対応している。

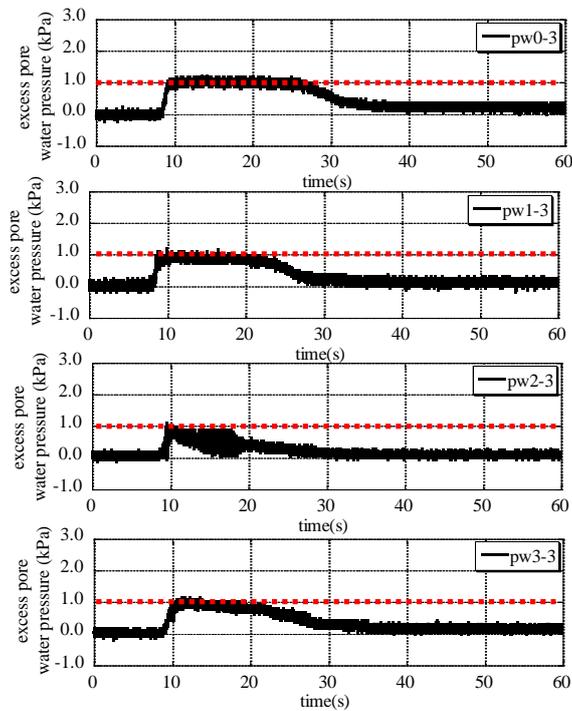


図 2.3 過剰間隙水圧の時刻歴 (上から case0~case3)

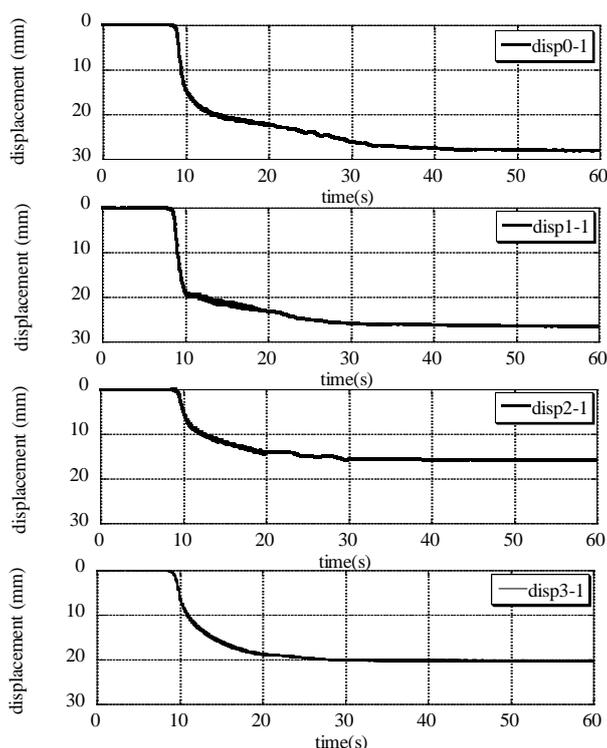


図 2.4 住宅沈下量の時刻歴(上から case0~case3)

図 2.3 で、各ケースの過剰間隙水圧の時刻歴を比較すると、どのケースも加振開始と同時に過剰間隙水圧が上昇しており、液状化の発生を防止するほどの対策の効果は見られなかった。一方、過剰間隙水圧の消散過程においては、対策によりその効果の違いがみられた。無対策の case0 は、加振終了後も過剰間隙水圧比が 1.0 をしばらく保持しているが、対策を施した case1~case3 については、加振終了後もしくは加振中に過剰間隙水圧が消散し始めている。過剰間隙水圧の消散終了時刻については、住宅下にドレーンを鉛直方向に設置した case2 が最も早く、速やかに過剰間隙水圧を消散させていることが確認できる。

次に、図 2.4 の住宅沈下量を比較すると、どのケースも加振開始直後に大きく沈下し、その後は、過剰間隙水圧が消散されるまで緩やかに沈下している。加振開始直後の住宅沈下量を比較すると、住宅直下にドレーンを設置していない case0 および case1 は、住宅直下にドレーンを設置した case2 および case3 に比べて沈下量が大きくなった。この結果から、住宅の沈下量を抑制するためには、住宅直下に対策を施すことが重要であることが分かった。住宅周囲のみに対策を施した case1 については、大きく沈下量を抑えることはできなかったものの、無対策に比べれば、ある程度の住宅沈下の抑制効果が得られることも分かった。

2.3 まとめ

本研究では、人工ドレーン材の液状化対策効果を明らかにするために、模型振動台実験を実施し、人工ドレーン材による液状化対策効果を確認した。その結果、ドレーン材だけでは、完全に液状化の発生を抑制することは困難なケースがあることが分かった。しかし、対策を施すことで、無対策の状態に比べて、住宅の沈下量を抑制することができた。また、住宅の沈下量を抑制するためには、住宅直下にドレーン材を設置することが重要であることも分かった。

3. 簡易的な要求性能設計法の開発

液状化地盤上の小規模建築物（4号建物について）について、複雑な数値解析を実施することなく、通常の液状化判定チャートにより、対策前および対策後の沈下および傾斜を予測できる簡易法を開発した。続いて、申請工法による液状化対策効果を確認するために模型振動台実験を実施し、その効果を確認した。

3.1 簡易法の概要

液状化対策工法は、被害を完全に防止する工法と被害を抑制・低減する工法の2つに分けることができる。前者は、基礎の構造に杭基礎を採用することや、完全に地盤の液状化を防止する工法であり、対策費が高額になる傾向があるが、建築基準法(以下、法と呼ぶ)や各種指針類を参考に設計されるため、ある程度の安全性が確保できる。一方、後者については、対策の効果を住宅の沈下量や傾斜量などにより定量的に示す必要がある。しかし、住宅の沈下や傾斜を予測するためには、高度な数値解析手法を用いる必要があり、加えてその解析を実施するためには、複数の室内土質実験を行う必要がある。また、高度な解析を取り扱うことのできる技術者が限られるなど、戸建て住宅において採用する場合にはこれらの問題点を解決する必要がある。沈下量や傾斜量という定量的な情報を住宅所有者に提供することで、液状化対策の重要性を把握でき、液状化対策を広く普及させることができると考えられる。

そこで本研究では、Smoothed Particle Hydrodynamics 法(以下、SPH 法)による2次元静的液状化解析プログラムを用い、無対策時の液状化による住宅の被害程度(沈下量や傾斜量)を予測することを目的とする。検討の対象は、建築基準法で構造計算の建築主事による確認の義務付けがない木造2階建てで、延べ面積が500m²以下の戸建て住宅(4号建物)およびその住宅が立地している液状化地盤である。

はじめに、4号建物における液状化地盤の検討方法について整理し、本解析プログラムの特徴を示す。その後、プログラムの適用性を検討するために、①重力場模型振動台実験の再現解析、②既往の高精度解析手法の解析結果との比較、③浦安市における東日本大震災時の再現解析を行った。最後に、④国土技術政策総合研究所が公開している「宅地の液状化被害可能性判定計算シート（以下、液状化シート）」を用いた架空モデル地盤での予測解析を行った。

3.2 地盤の調査方法と液状化判定による検討

戸建て住宅向けの地盤調査として、一般的にSWS試験が行われている。SWS試験は、他の地盤調査方法に比べ安価で実施でき、試験によって得られる W_{sw} (載荷荷重(N))や $[N_{sw}]$ から N 値を推定することも可能である。SWS試験には、標準貫入試験と異なり地下水位や地質を調査することができないなどの欠点があったものの、最近では、SWS試験でできた掘削孔を利用した地下水位調査やサンプリングなどが実施可能となっている。推定した N 値や地下水位、土質情報を用いれば、液状化安全率 FL 値、液状化指数 PL 値による液状化判定や、地表面変位 D_{cy} により地盤の沈下量を推定することができると考えられる。

また、国土技術政策総合研究所では、液状化シートを公開し、 D_{cy} 、 PL 値および非液状化層厚 HI の組み合わせで液状化による被害度を判定し、住民に周知することに努めている。液状化シートでも定性的な被害度を示すことができるが、住宅の「沈下量および傾斜量」などの被害度を定量的に住民に示すことができれば、液状化対策のさらなる普及につながると考えられる。

3.3 数値解析による検討

地盤が液状化した場合の構造物およびその周辺地盤の変形予測手法は、数多く提案されており、精度よく予測が可能となっている。例えば、高度な構成式の導入された有効応力解析を用いた再現解析では、変形を数cm単位で予測できるほどの精度を有している。しかし、

高度な構成式を用いる場合には、数々のパラメータが必要となるため、ボーリングや数多くの土質実験が必要となるだけでなく、地震動の設定やメッシュの作成など費用や時間がかかり、戸建て住宅の設計での利用は難しいと考えられる。

3.4 SPH 法による 2 次元静的液状化プログラム

以上のことから、液状化時の戸建て住宅の沈下量や傾斜量を予測するための解析プログラムは、比較的安価に実施でき、実務者であれば誰でも簡単に利用できることが求められる。そのため、以下の点に留意した解析プログラムとした。

- (1) SWS 試験など簡易調査結果で利用できること
- (2) 室内試験の実施を求められないこと
- (3) 実務者であれば誰でも利用できること
- (4) 既存の液状化判定結果を利用できること
- (5) 液状化した土の応力-ひずみ関係を再現できること
- (6) 地盤の大変形と局所的変形を表現できること

(1)～(5)の条件を満足するプログラムとして、安田らにより、ALID(Analysis for Liquefaction-induced Deformation)が提案されている。安田らは、地震中の複雑な液状化挙動ではなく、地震後の流動特性に着目して、液状化に伴うせん断剛性の低下に関する種々の室内試験を行ってきた。その室内試験結果から求められた構成式(以下、ALID モデル)を導入した有限要素解析による自重解析を用いることで、液状化後に生じる残留変形量を実用的に使える精度で求められることができると報告している。つまり、一般的な動的解析プログラムとは異なり、時々刻々と変化する動的な応答を求めることはできないが、ALID モデルを用いれば、液状化後に生じる残留変形を予測することができる。一方、(6)の条件は、大変形問題を解くための解析手法の 1 つである SPH 法を用いることで対応できる。SPH 法を用いた単純せん断試験のシミュレーションでは、せん断ひずみが 100%を超えるような大変形に対しても精度よく解析できることが明らかとなっている。

本研究では、液状化による大変形を表現できる SPH 法に、液状化後に生じる流動変形を予測することのできる ALID モデルを導入した 2 次元静的液状化解析プログラムを開発し、検討を行った。この解析プログラムを用いることで、液状化時の戸建て住宅の沈下・傾斜量のある程度の精度で把握することが可能になると考えられる。以下に SPH 法の概要と構成式および検討手順を示す。

3.4.1 SPH 法の概要

SPH 法は、連続体を多数の粒子(計算点)で離散化する解析手法であり、物理量の空間勾配を平滑化関数の空間勾配を用いて求める。宇宙物理学の分野で大きな密度差や密度変化が生じる場の圧縮性流体解析に適用されており、現在では非圧縮性流体解析や固体解析など様々な問題に適用され、近年では、地盤工学の分野への適用も行われている。本研究では、SPH 法の理論に基づいて離散化された運動方程式と質量保存則を相互に段階的に計算をしている。地盤の変形を表現するために、3-4-2 で示す構成式を新たに導入している。なお、本論文では間隙水の影響は考慮していないため、一相系の解析となっている。

3.4.2 構成式

構成式には、ALID モデルを用いた。図 1(a)は、実験から想定される地震前と流動時のせん断応力-せん断ひずみ関係の解法模式図であり、それをバイリニアで近似したものが図 1(b)である。液状化した土のせん断応力-せん断ひずみ関係は、図 1 中 Flow の経路で示され、非排水状態で一定振幅の繰返しせん断応力を加えて液状化させたのち、単調荷重を行う特殊な室内試験法により求められる。安田らによれば、液状化前のせん断剛性 G_0 と液状化した状態から行った単調荷重時のせん断剛性 G_1 の比は、液状化安全率 F_L および細粒分含有率 F_c のみで決定できるとしている。また、ある一定のせん断ひずみ γ_L より大きなせん断ひずみが生じた場合は、せん断剛性 G_2 が液状化前の初期せん断剛性 G_0 まで回復することも明らかにしている。

図 3.1 おいて、実際のせん断応力-せん断ひずみ関係は、有効応力の変化に伴い変化し、これに伴って状態点は地震前の状態 A から流動後の状態 C に移動する。しかし安田らは、簡易的な解析方法として、A→B→C の経路で検討する応力解放法と 0→B→C の経路で検討する自重法の 2 つを提案している。さらに 2 つの解法による再現解析の結果と実際の被害結果を比較し大きな差異が無いことを報告している。本研究では、より簡便に解析することのできる経路 0→B→C を用いる自重法により検討を行った。なお、ALID モデルで必要となるパラメータは、初期ヤング率 E_0 、細粒分含有率 F_c 、ポアソン比 ν 、単位体積重量 γ および液状化安全率 F_L のみである。

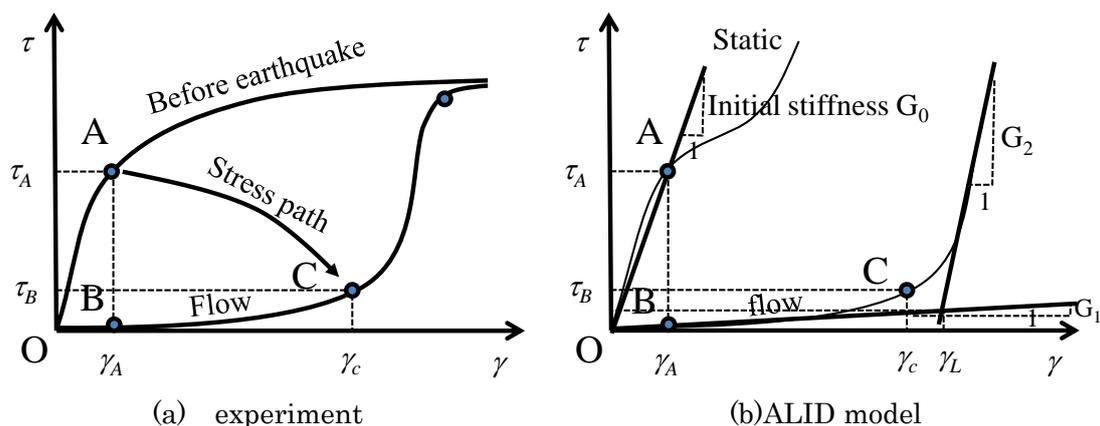


図 3.1 Schematic diagrams of relationship between shear stress and shear strain

3.4.3 検討手順

液状化時の戸建て住宅の沈下量、傾斜量を本解析プログラムで検討するために必要な手順は、以下のとおりである。

- (1) 「液状化シート」に用いる地盤パラメータの決定
- (2) 地下水位の決定
- (3) 入力地震動の決定
- (4) 液状化安全率 F_L 値の算定
- (5) 初期ヤング率 E_0 の算定
- (6) 住宅重量および基礎幅の決定
- (7) 粒子配置の決定
- (8) 自重法による静的液状化解析の実施
- (9) 戸建て住宅の沈下量、傾斜量の把握

なお、(1)に必要なパラメータは、標準貫入試験で得られた N 値もしくは SWS 試験で得られた $[N_{sw}]$ 値を換算した N 値、細粒分含有率 F_c (%)、密度 ρ (t/m^3) である。(3)で必要となるパラメータは、液状化判定に用いる設計用最大加速度 α_{max} (gal) および地震マグニチュード M (M) である。例えば、(5)の初期ヤング率 E_0 は、(1)で入力した N 値および換算 N 値から推定することで決定する。(6)は、構造計算書や建築物荷重指針により決定できるが、本論文では一般的な木造 2 階建て住宅を想定して、基礎幅を 7.5m、接地圧を $15kN/m^2$ とした。

3.5 模型振動台実験、既往の解析手法および提案手法との比較

3.5.1 模型振動台実験

液状化時の住宅沈下および地盤の変形を確認するために、水平一方向に加振可能な電気油圧サーボ方式の加振装置と前面をアクリル板とした剛土槽(内寸：幅 1,000mm×奥行き 200mm×高さ 800mm)を組み合わせた振動台実験装置を使用し、1/50 スケールの模型振動台実験を行った。実験では、液状化時の住宅沈下や地盤変形を確認することができるよう土槽に小型のカメラを設置した。模型地盤は、相対密度 50%を目標に、三河珪砂 6 号を地盤高さ 450mm となるように水中落下法で作製した。住宅模型は、アクリル製の箱とアルミ板(重量物)によりモデル化した。アルミ板は、接地圧が一般の木造住宅と等価になるように重量を調整した。模型振動台実験の振動台に入力した地震動は、周波数 2.0Hz、最大加速度 350gal、入力時間 15 秒の正弦波である。実験の状況を写真 3.1 に、模型振動台実験のテーブル上で計測された加速度の時刻歴を図 3.2 にそれぞれ示す。なお、実験で得られた結果と、2次元数値解析(既往の解析手法および提案手法)の結果を直接比較するために、平面ひずみ状態で実施した。

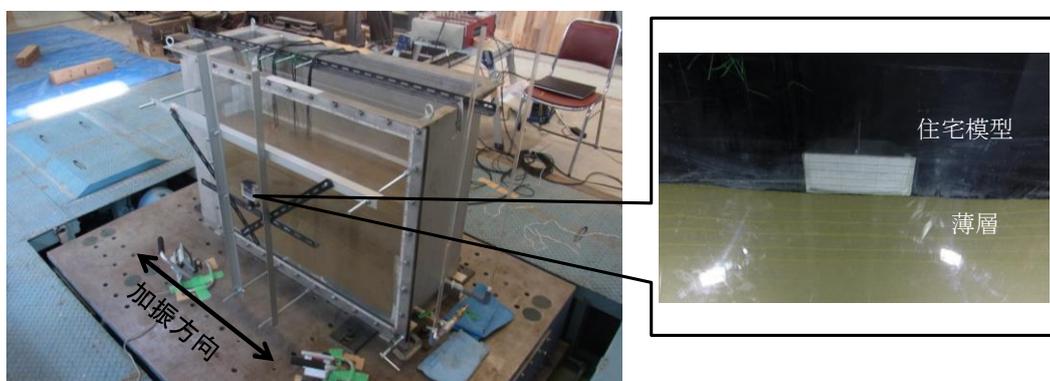


写真 3.1 Setting of experiment

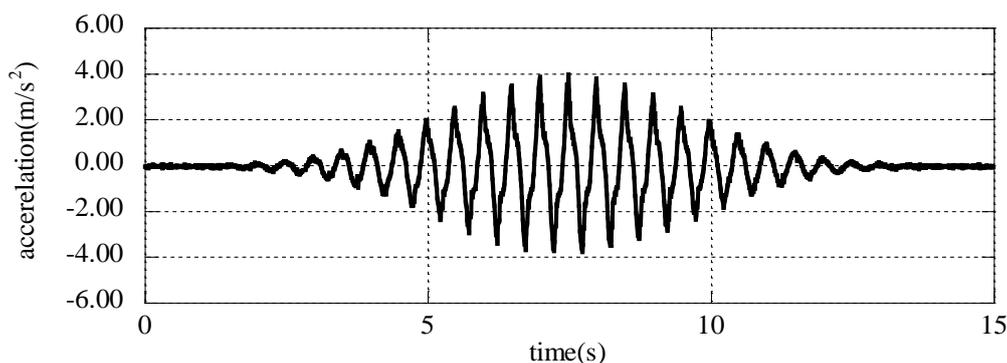


図 3.2 Input motion

3.5.2 有限要素法による 2次元有効応力解析

土の相と水の相に関する力のつり合いを考慮して定式化された 2次元有効応力解析プログラム LIQCA2D14 により、前述した模型振動台実験の再現を試みた。

図 3.3 に再現解析に用いた有限要素メッシュを示す。節点数および要素数は、それぞれ 1,125 および 1,040 である。解析領域は、模型振動台実験と同じ大きさとした。変位の境界条件として、底面は、水平方向(x)、鉛直方向(y)とし、側方の境界は、水平方向(x)固定とした。水理境界条件として、地下水面の位置を排水境界とし、その他の境界面はすべて非排水

境界とした。模型振動実験では、地下水位を GL-20mm に設定したが、毛管上昇の影響で地表面までほぼ飽和状態であったと想定される。そのためここでは、地表面を地下水面と仮定して、解析を実施した。入力地震動は、有限要素メッシュの底面から入力することとし、模型実験で計測された図 3.2 の加速度波形を用いた。

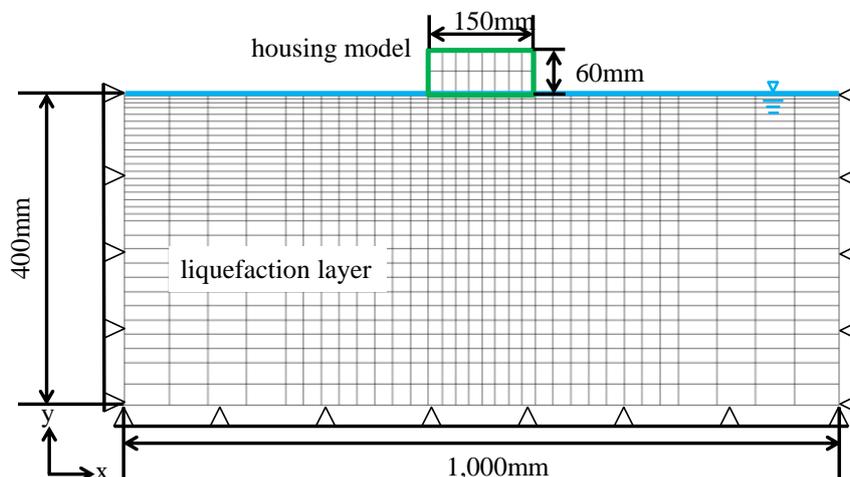


図 3.3 FE mesh and boundary condition

計算時間増分は 0.0005 秒、時間積分に用いた Newmark- β 法の係数は $\beta=0.3025$ 、 $\gamma=0.6$ とした。Rayleigh 減衰として、初期剛性比例型を用いた。繰り返し弾塑性構成式の材料パラメータを表 3.1 に示し、図 3.4 に要素シミュレーションおよび繰り返し三軸試験の液状化強度曲線を示す。

表 3.1 Material parameter

Initial void Ratio	e_0	0.802
Compression index	λ	0.050
Swelling index	κ	0.006
Quasi-Overconsolidation ratio	OCR^*	1.7
Initial shear modulus ratio	G_0/σ'_m	687.5
Failure stress ratio	M_f^*	1.222
Phase transformation stress ratio	M_m^*	0.682
Hardening Function parameters	B_0^*	1,300
	B_1^*	70
Referential strain parameters	$\gamma_r^{P^*}$	0.010
	$\gamma_r^{E^*}$	0.03
		0
Dilatancy coefficient parameters	D_0^*	5.0
	n	3.7

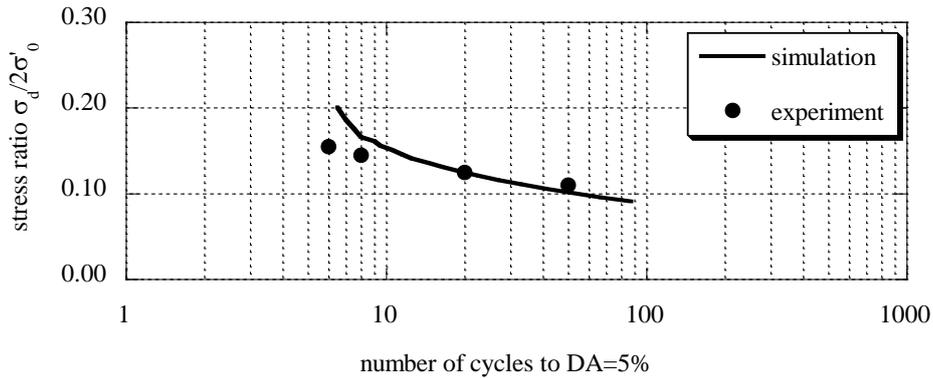


図 3.4 Result of element simulation

3.5.3 SPH 法による 2 次元静的液状化解析

ここでは、3-5-1 で実施した模型振動台実験を SPH 法による 2 次元静的液状化プログラムを用いて再現解析を実施した。はじめに模型振動台実験の条件を考慮して「液状化シート」による液状化判定を行い、それらによって得られた液状化安全率 F_L 等を入力パラメータとし、自重法による静的液状化解析を実施した。図 5 に模型振動台実験の再現解析に用いた解析モデルを示し、表 3.2 に材料パラメータを示す。なお、表 3.2 中の E_0 は、道路橋示方書に示される標準貫入試験における N 値から推定される弾性定数を示し、ここでは、表 3.1 中の G_0 から式(4)および式(5)を用いて N 値を逆算し、初期ヤング率 E_0 を式(6)により求めた。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$$V_s = 80 \cdot N^{1/3} \quad (5)$$

$$E_0 = 2,800 \cdot N \quad (6)$$

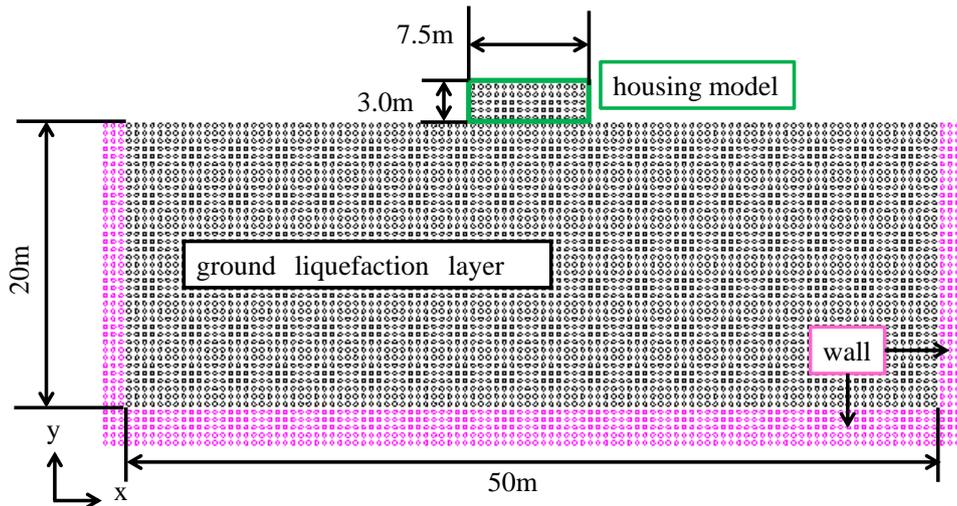


図 3.5 Analysis condition (particle arrangement)

解析は実物スケールで行い、地盤を ALID モデルで、住宅および壁を弾性モデル(剛体)でモデル化した。粒子数は、地盤、住宅、底面および側面の壁を合わせて 26,760 個である。

粒子間距離は 0.25m とし、境界条件は、底面の壁を水平方向(x)、鉛直方向(y)固定、側面の壁を水平方向(x)固定とした。解析条件として、重力加速度が 9.8m/s²になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が概ね収束するまで計算を実施した。

表 3.2 Input parameters

parameter		Ground ALID	House Elastic	Wall Elastic
Initial Young's Modulus (kN/m ²)	E_0	11,200	800,000	800,000
Poisson's ratio	ν	0.333	0.333	0.333
Fine content	F_c	0.0	-	-
Density (t/m ³)	ρ	1.86	0.51	-
Factor of safety for liquefaction	F_L	0.55	-	-

3.5.4 比較結果

図 3.6 に、模型振動台実験、LIQCA2D14 を用いた有効応力解析および SPH 法による 2 次元静的液状化解析の地震動終了後の変形状況を示す。各検討における住宅の沈下量は、実物スケールで表現すると、模型実験で 1.00m、有効応力解析で 1.35m、SPH 法で 1.37m となり、有効応力解析および SPH 法ともにやや沈下量を大きく見積もる結果となった。SPH 法の沈下量が模型実験や有効応力解析に比べて過大に評価された原因として、既往の研究でも指摘されているとおり、液状化安全率 F_L が実際よりも危険側に（小さく）評価されたことが要因の 1 つとして考えられる。一方、住宅周辺の地盤変形に着目すると、SPH 法では住宅近傍地盤のみが大きく変形し、住宅がめり込み沈下している様子が分かる。両解析とも地表面で盛り上がりの変形がみられるが、これは住宅の沈下に伴い、住宅直下地盤が圧力の小さい方向に移動しようとするためであり、側方さらには地表面に向かって移動したためである。空間離散化の方法の違いにより、SPH 法では住宅近傍で大きく地表面が盛り上がり、有効応力解析では、住宅近傍から側方の境界に向けて緩やかに地表面が盛り上がる結果となった。SPH 法では、沈下量を実際よりもやや大きく算定する可能性があるが、液状化後の構造物の沈下によって生じる地表面の変形挙動(めり込み沈下)を表現できることが確認できた。

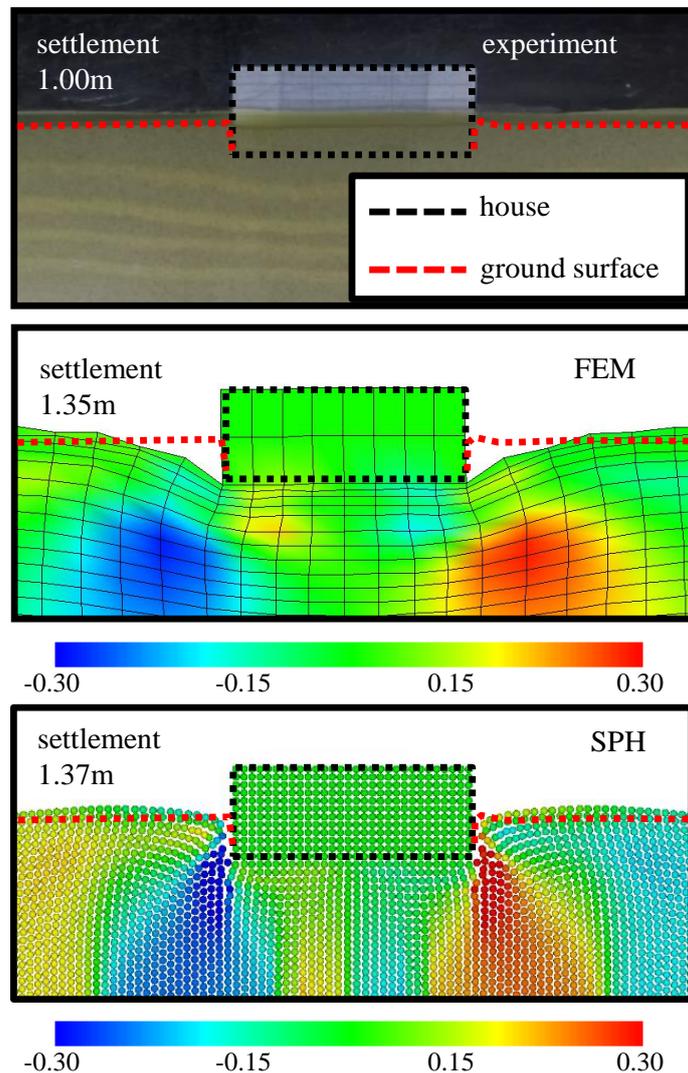


図 3.6 Comparison between experiment and simulation results (deformation and distribution of shear strain)

3.6 浦安市の液状化被害の再現解析

ここでは、東日本大震災で液状化被害を受けた住宅を対象に再現解析を試みた。再現解析は、住宅被災状況および液状化の発生の有無が調査されており、かつ周辺でボーリング調査が行われている地点を対象とした。解析対象とした地点の被害度と解析から得られた結果を比較することで、解析の適用性を確認した。

3.6.1 対象地点概要

再現解析の対象地点は、浦安市内で住宅の被災状況が調査され、かつ周辺でボーリング調査が実施されている4地点とした。図 3.7 に対象地点の位置および液状化による被災状況(内閣府災害に係る住家の被害認定)を、表 3.3 に各地点の N 値および FL 値の深度分布を図 3.8 に各地点における液状化判定の結果の一例($D_{cy} \sim HD$)を、表 3.4 に各対象地点の被災概要をそれぞれ示す。図 3.8 中の A、B1、B2、B3 および C は、液状化シートによる判定で、それぞれ「C(顕著な被害の可能性が高い)」、「B3(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B2(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B1(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「A(顕著な被害の可能性が低い)」を示している。A 地点の場合は、「B2」となり顕著な被害の可能性が比較的低いという結果となったことを示している。表 3.3 中の赤色で着色したセルは、 FL

値が 1.0 より小さくなり液状化の発生が懸念される層を、青色で着色したセルは F_L 値が 1.0 より大きくなった層を示している。また、表中に地下水位を赤線で示した。なお、液状化判定には、近傍のボーリングデータを利用し、地震動の条件として最大加速度には 200gal、マグニチュードは 9.0 を用いた。

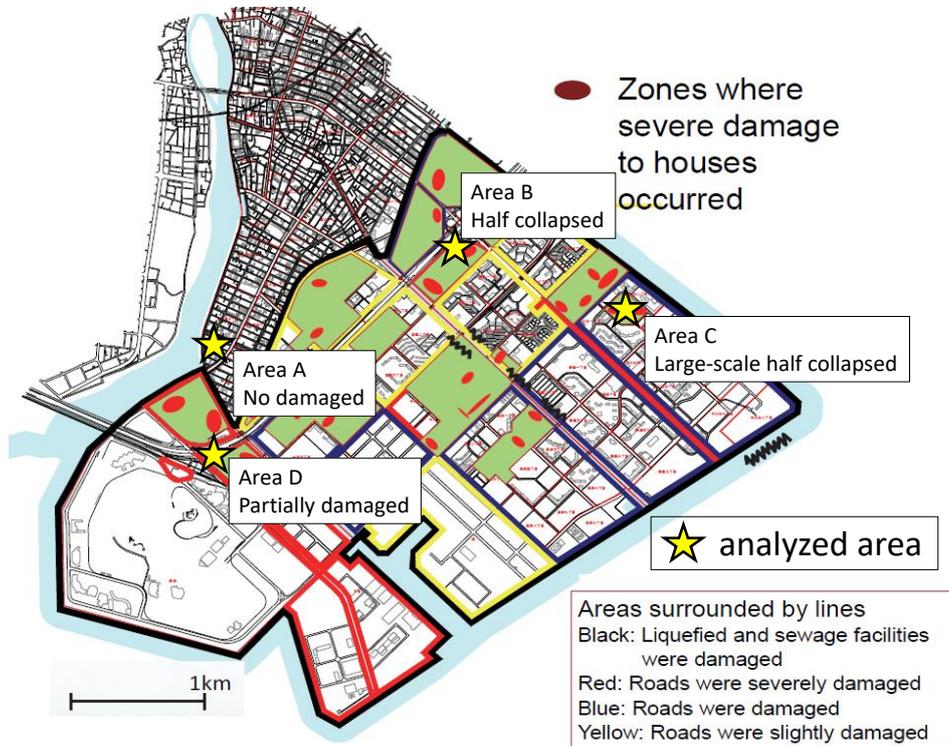


図 3.7 Zones of Urayasu City where roads, sewage pipes and houses were severely damaged

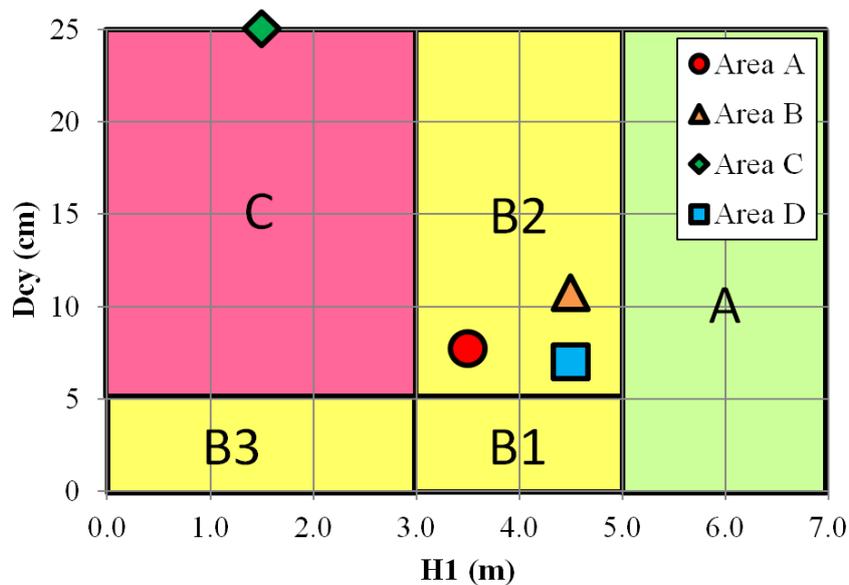


図 3.8 Results of liquefaction judgment

表 3.3 Distribution of N -value and FL -value

Dept h(m)	Area A		Area B		Area C		Area D	
	N	FL	N	FL	N	FL	N	FL
0.5	5	-	5	-	5	-	5	-
1.0	5	-	5	-	5	-	5	-
1.5	22	-	2	-	1	-	5	-
2.0	1	-	1	-	1	0.41	7	-
2.5	1	-	1	-	1	0.37	7	1.10
3.0	1	-	1	-	9	0.78	11	2<
3.5	1	-	1	-	12	0.93	11	1.93
4.0	10	0.96	1	-	1	0.60	4	0.83
4.5	10	0.88	1	-	1	0.58	4	0.79
5.0	11	0.93	5	0.75	1	-	8	0.93
5.5	11	0.87	5	0.73	1	-	8	0.89
6.0	18	1.79	5	0.50	3	0.34	4	0.69
6.5	18	1.55	5	0.49	3	0.34	4	0.67
7.0	4	0.59	3	0.53	6	0.52	1	0.55
7.5	4	0.58	3	0.53	6	0.51	1	0.54
8.0	6	0.56	10	0.58	2	0.37	1	-
8.5	6	0.56	13	0.69	2	0.37	1	-
9.0	23	2<	15	1.17	5	0.59	2	-
9.5	23	2<	15	1.11	5	0.59	2	-
10.0	20	2<	25	2<	6	-	1	-
10.5	20	1.95	25	2<	6	-	1	-
11.0	22	1.48	6	0.60	6	0.60	2	-
11.5	2	1.39	6	0.60	6	0.60	2	-
12.0	11	0.85	8	-	4	-	2	-
12.5	11	0.84	8	-	4	-	2	-
13.0	2	-	8	-	9	-	1	-
13.5	2	-	8	-	9	-	-	-
14.0	8	0.79	4	-	21	-	-	-
14.5	8	0.79	4	-	21	-	-	-
15.0	1	-	2	-	12	-	-	-
15.5	1	-	2	-	12	-	-	-
16.0	1	-	2	-	8	-	-	-
16.5	1	-	2	-	8	-	-	-
17.0	1	-	2	-	1	-	-	-
17.5	1	-	2	-	1	-	-	-
18.0	1	-	1	-	1	-	-	-
18.5	1	-	1	-	1	-	-	-

表 3.4 Outline of damage

area	Investigation result	
	Ground condition	Grade of house damage
A (Fujimi)	Non Liquefied	No damaged
B (Irifune)	Liquefied	Half collapsed
C (Hinode)	Liquefied	Large-scale half collapsed
D (Maihama)	Liquefied	No damaged

3.6.2 解析条件

解析では、住宅および壁を弾性モデルで、地盤を ALID モデルでモデル化した。解析に用いる地盤の入力パラメータは、ボーリング調査結果および液状化シートを利用して 3-5 節と同様の方法で設定し、住宅および壁については、表 3.2 の値を用いた。住宅は、幅 7.5m、高さ 6.5m、接地圧 15kN/m² の木造 2 階建てを想定した。図 3.9 に解析モデルの一例を示す。

図中の z は解析対象深度を示しており、case1～case3 は 18.5m、case4 では 13.0m である。粒子間距離は 0.50m とし、粒子数は、地盤、構造物、底面および側面の壁粒子を合わせて 4,863 個である。変位の境界条件として、底面および側面の壁粒子は、水平方向(x)、鉛直方向(y)固定とした。解析は、重力加速度が 9.8m/s^2 になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が収束するまで計算を実施した。

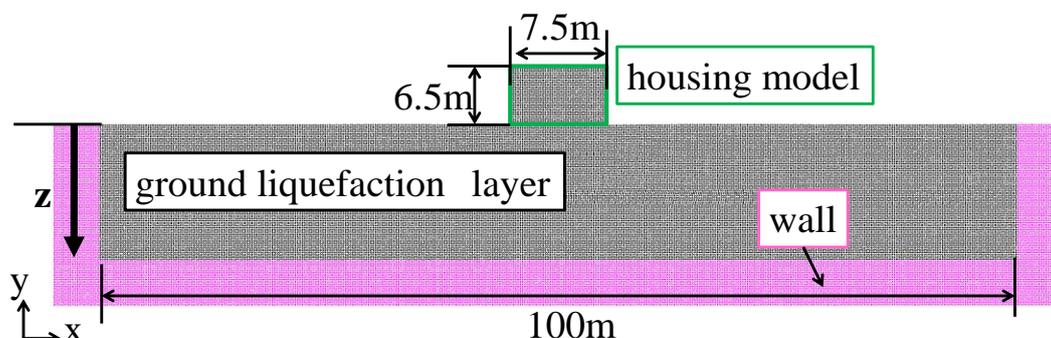


図 3.9 An example of analysis condition (particle arrangement)

3.6.3 解析結果

表 3.5 に住宅の沈下量、傾斜量および被害度を示し、図 3.10 に、各地点の深度 10m までの最終変形図(コンターはせん断ひずみ)を示す。解析では、偏心していない建物をモデル化しているため傾斜は表現できない。そのため、表 3.5 中の傾斜量は、金らの東日本大震災における調査により算定されたべた基礎の住宅の沈下量と傾斜量との関係を用いて、数値解析で得られた沈下量を傾斜量に換算し、その傾斜量から被災度を推定した。表 3.5 中に示される SPH 法によって求められた住宅の被災度と実際に調査された被災度の結果を比較すると、概ね被災状況を再現できることが分かる。次に、図 3.10 の変形図と液状化判定結果を比較すると、液状化判定で F_L 値が 1.0 を下回った深度でせん断ひずみが大きくなり、住宅の沈下量が大きくなっていることが分かる。

表 3.5 Comparison between simulation result and real damage

Area	Simulation result			Investigation result
	Settlement (mm)	Tilt angle	Grade of house damage	Grade of house damage
A	30.0	3.0/1,000	No damaged	No damaged
B	120.0	11.5/1,000	Half collapsed	Half collapsed
C	340.0	32.0/1,000	Large-scale half collapsed	Large-scale half collapsed
D	1.0	1.0/1,000	No damaged	No damaged

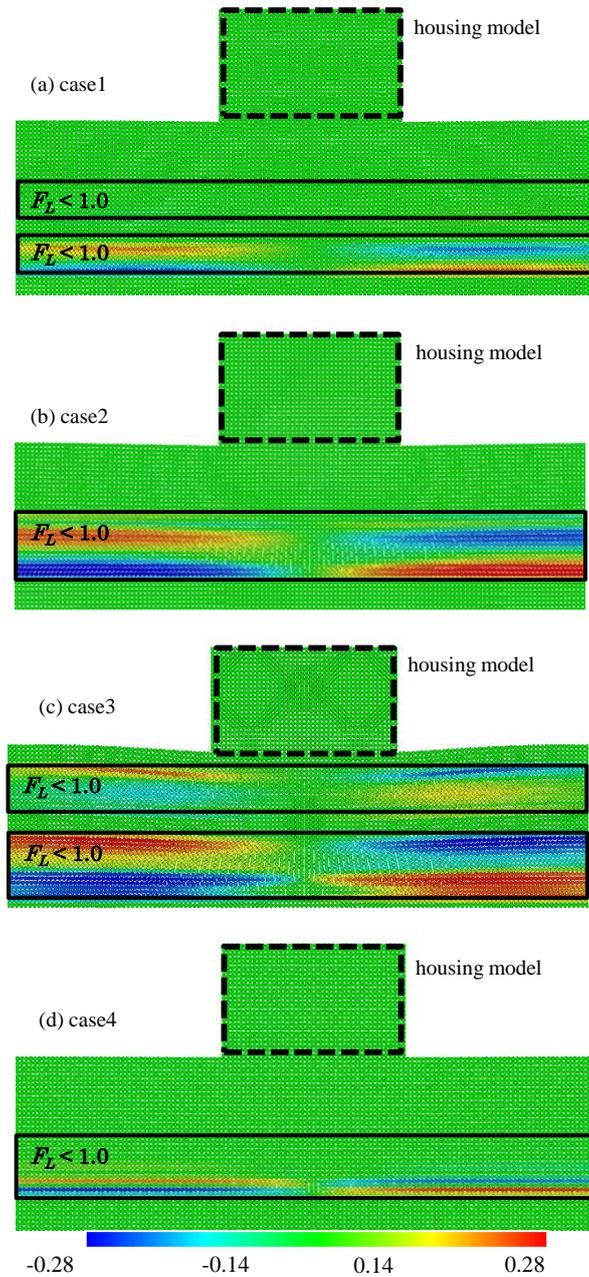


図 3.10 Deformation and distribution of shear strain

本解析では、住宅 1 棟のみを対象に 2 次元 SPH 法により検討を行ったが、実際の被害には奥行方向にも沈下することが考えられる、さらに住宅が 2 棟隣接している場合には、住宅がお辞儀するように沈下することが指摘されている。予測の精度を高めるためには、これらの点について、今後の検討を進める必要がある。

3.7 液状化判定シートと解析結果の関係

3.7.1 検討条件

液状化シートによる判定で、「C(顕著な被害の可能性が高い)」、「B3(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B2(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B1(顕著な被害の可能性が比較的低い)」となる架空のモデル地盤を作成し、木造 2 階建て住宅(接地圧 15kN/m²)の液状化

時の沈下量を検討した。モデル地盤は、細粒分を含まない砂地盤を前提に 7 ケース、住宅は 1 棟のみとし検討を行った。図 3.11 に各ケースの地盤条件と液状化シートの判定結果の関係について示し、表 3.6 に各ケースの N 値の深度分布および地下水位を示す。表 3.6 中の橙色で着色したセルは、地盤が飽和していることを示す。図 3.11 中の $H1(m)$ は非液状化層厚を示し、本研究では、地表面から連続して、地下水より浅い層、 F_L 値が 1.0 より大きい層、もしくは N 値が 2 より大きい粘性土層を非液状化層と定義した。 $Dey(cm)$ は、地表面沈下量(変位量)を示す。

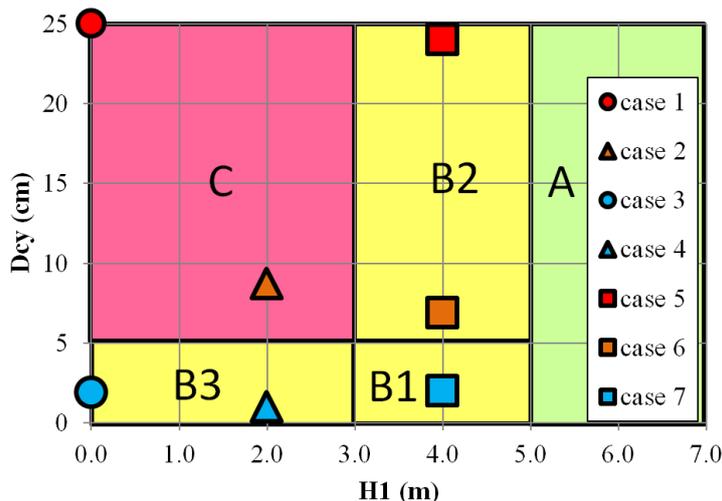


図 3.11 Ground condition and results of liquefaction judgment

表 3.6 Depth distribution of N value and ground water level

Depth (m)	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7
	N-value						
0.5	4	12	4	12	4	12	12
1.0	4	12	4	12	4	12	12
1.5	4	12	50	12	4	12	12
2.0	4	12	50	12	4	12	12
2.5	4	12	50	12	4	12	12
3.0	4	12	50	12	4	12	12
3.5	4	12	50	50	4	12	12
4.0	4	12	50	50	4	12	12
4.5	4	12	50	50	4	12	12
5.0	4	12	50	50	4	12	12
5.5	4	12	50	50	4	12	50
6.0	4	12	50	50	4	12	50
6.5	4	12	50	50	4	12	50
7.0	4	12	50	50	4	12	50
7.5	50	50	50	50	50	50	50
8.0	50	50	50	50	50	50	50
8.5	50	50	50	50	50	50	50
9.0	50	50	50	50	50	50	50
9.5	50	50	50	50	50	50	50
10.0	50	50	50	50	50	50	50

3.7.2 解析条件

図 3.12 に解析に用いた解析モデルを示す。粒子間距離は 0.25m とし、地盤は ALID モデル、構造物、底面および側面の壁は弾性モデルでモデル化した。変位の境界条件として、底

面および側面の壁は、水平方向(x)、鉛直方向(y)固定とした。重力加速度が 9.8m/s^2 になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が収束するまで計算を実施した。ALID モデルの入力パラメータは、層厚 0.5m ごとに、表 6 および液状化シートの結果に基づき入力した。なお、住宅および壁については、表 3.2 の値を用いた。

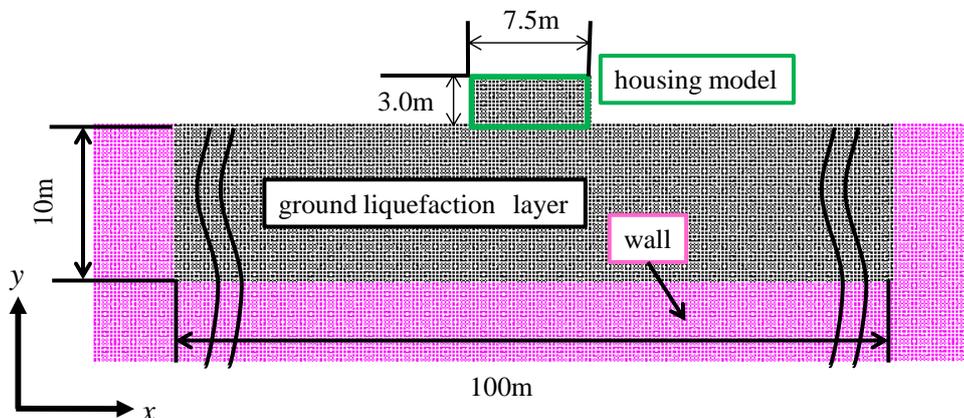


図 3.12 An example of analysis condition (particle arrangement)

3.7.3 解析結果

表 3.7 に SPH 法より得られた沈下量および傾斜量を示す。図 3.13 には、各ケースの最終変形図とせん断ひずみのコンターを示す。なお、傾斜量は前章と同様に金らのべた基礎の住宅の沈下量と傾斜量との関係を用いて換算したものである。解析結果を以下にまとめる。

(1) D_{cy} の大きさが異なり、非液状化層厚が等しい case5、case6、case7 の住宅沈下量を比較すると、 D_{cy} が大きなケースほど住宅沈下量が大きくなる傾向がわかる。

(2) 非液状化層厚が異なり、 D_{cy} がほぼ同等な case3、case4、case7 の住宅沈下量を比較すると、非液状化層厚が小さいケースほど住宅沈下量が大きくなる傾向がわかる。

(3) 地表面が液状化層となる case1 および case3 では、住宅基礎周辺地盤にせん断ひずみが蓄積する。したがって、地表面の N 値を大きくすることで、住宅の沈下量を大幅に小さくすることができる。

(4) case1 と case2 や case5 と case6 のように、液状化シートで「同じ被害レベル」と評価された場合であっても、沈下量が大きく異なる可能性がある。これは、液状化シートで左上ほど被害が大きくなる可能性が高く、右下に行くほど被害が小さくなる可能性が高いという定性的な結果を反映したものと推察される。

一方で、顕著な被害の可能性が高い「C」と顕著な被害の可能性が比較的低い「B(B1、B2、B3)」を比較すると、相対的に「C」は「B」に比べて、沈下量が大きくなることが分かった。

表 3.7 List of average settlement and tilting

	liquefaction damage Level	Average settlement (cm)	Tilt angle
case1	C	79.7	80/1,000
case2	C	7.2	7/1,000
case3	B3	1.4	1/1,000
case4	B3	0.2	0/1,000
case5	B2	4.4	4/1,000
case6	B2	1.6	2/1,000
case7	B1	0.1	0/1,000

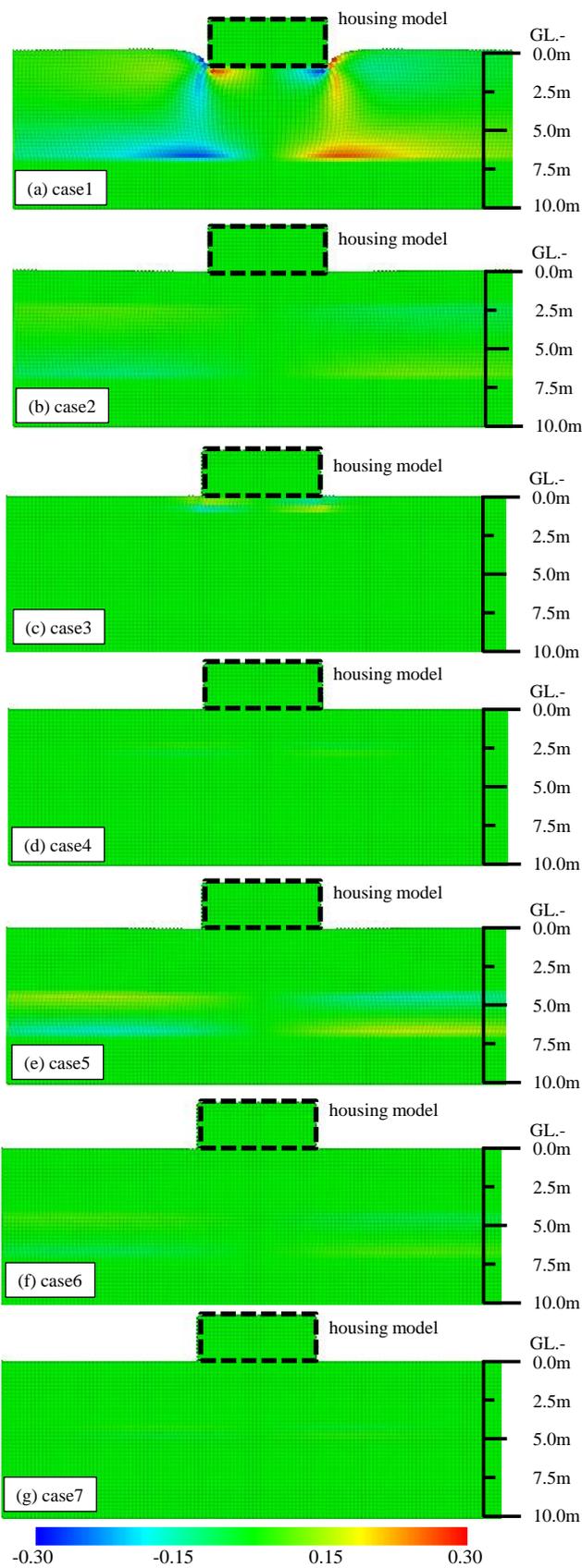


图 3.13 变形和分布 of shear strain

3.8 まとめ

本研究では、4号建物向けに、液状化による建物の沈下および傾斜を予測するため、SPH法による①重力場模型振動台実験の再現解析、②既往の高精度 FEM 解析手法の解析結果との比較、③浦安市における東日本大震災時の再現解析および④液状化シートを利用した架空モデル地盤における予測解析を行った。その結果を以下にまとめる。

- 重力場模型振動台実験の再現解析および既往の高精度 FEM 解析手法の解析結果との比較から、SPH法を用いた場合は、それらの結果に比べて沈下量をやや過大評価する可能性がある。
- 実験で生じた住宅周辺の地盤の大変形現象(めり込み沈下)に対して、高精度 FEM 解析手法では再現が難しかったが、SPH法では再現することができた。
- 浦安市における東日本大震災時の再現解析を行った結果、実際の被災度を SPH法でも概ね再現できた。
- 液状化シートを利用した架空モデル地盤における予測解析により、同じ被害度レベルであっても、住宅の沈下量に差が出ることを示すことができた。
- また、地表面の液状化層の影響や、*Dcy* が与える住宅沈下量への影響を明らかにすることができた。

現時点での SPH法による液状化解析で得られる結果の精度については、実用的に使える範囲にとどまると考えられるが、液状化時に生じると考えられる被害度を「住宅の沈下量(傾斜量)」という定量的な値で表現することができた。

4. 現場試験施工

開発した低振動低騒音型回転貫入装置（プロト機）を用いて、現場実証試験ならびに現場試験施工を実施した。現場実証試験は、愛知県あま市の宅地において、図 4.1 に示すように、改良域と未改良域にそれぞれ深さ 2m と 4m に地中間隙水圧計を設置し、その中間点で H 型鋼を加振打設した際に発生する過剰間隙水圧の変化を捉えて、改良域と未改良域の違い、すなわち効果を確認するものである。

まず、間隙水圧計をボーリング孔の孔底から 50cm ほど押し込み所定の深さに設置する（写真 4.1 間隙水圧計と押し込み用ロッド）。間隙水圧計は、バケツ内のきれいな水中で、ハウジング内部に空気が残らないように組立、ゴムメンブレンでポーラスメタルが空気に触れないようにして設置する（写真 4.2）。間隙水圧計を設置した後、スクリーウアンカーを打設してこれに新しく用意した H 型鋼 200×200 を架台として水平に据える（写真 4.3）。これに、プロト機を据えて鉛直ドレーンを打設する（写真 4.4）。

鉛直ドレーンは、30 cm 間隔で 2 列、それぞれ 60 cm 間隔で千鳥配置（60 cm 間隔 2 列千鳥配置）するもので、合計 6 本を打設した。ドレーン配置は、当初 60cm 間隔の間にさらにもう 1 本の打設（30 cm 間隔 2 列正方形配置）の可能性を考えたが、ドレーンの打設により周辺地盤が締固まるため、その間の打設が困難であることが確認された。すなわち、この現場では、この配置が施工可能な最小間隔の配置であることを確認した。

また、実証試験における鉛直ドレーン施工において、捨てビットの耐久性ならびに機能を確認するため、スクリーウ型および十字型を使用して比較検討した。写真 4.5 に示すように、スクリーウ型を長時間回転圧入すると、摩耗により先端が破壊することを確認した。また、十字型ビットにおいて、内側のケーシングの爪とのかみ合わせが 4 か所の場合には、締まった砂層の貫入において樹脂側が破壊することを確認した。さらに、十字のウイングが折れて破壊することで、貫入速度が急速に低下する状況が生じた。したがって、先の図 1.3 で示したように、十字型捨てビットのウイングの根元部分を厚くする改良を行った他、内側のケーシングとのかみ合わせは 8 か所とした。（目標達成 100%）

次いで、現場実証試験は、敷地外の道路より 10t ラフタークレーンによって起振機を吊り下げ、H 型鋼に振動を与え打設・引抜することで、地震発生時の地盤内の様子を擬似的に再現し間隙水圧を測定した。なお、H 型鋼を打設する地点はそれぞれの間隙水圧計測地点から

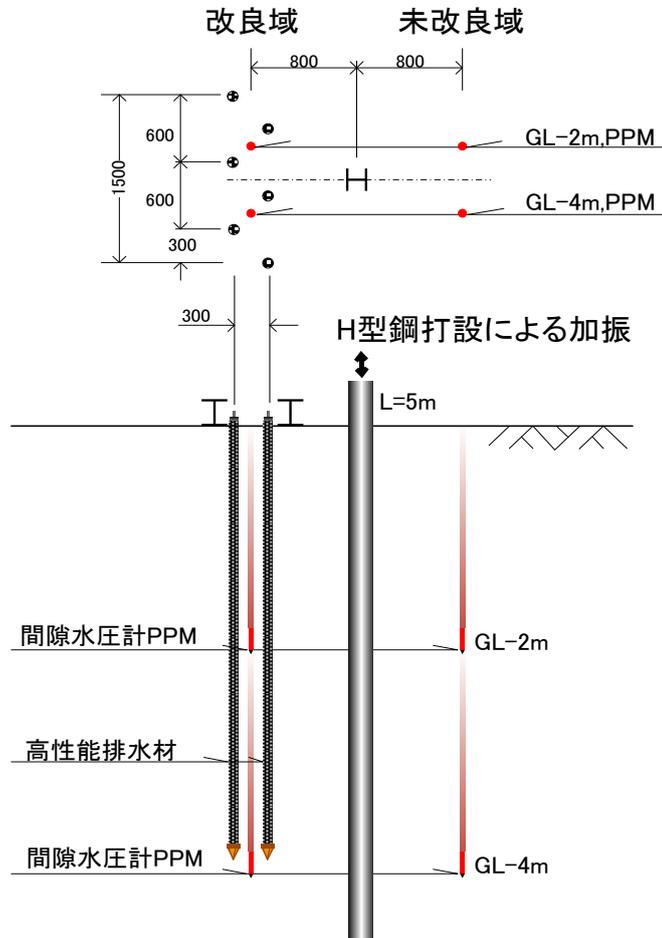


図 4.1 実証試験における間隙水圧計配置
（上；平面図、下；断面図）



写真 4.1 地中間隙水圧計



写真 4.2 同左設置作業



写真 4.3 架台設置 200H型鋼



写真 4.4 鉛直ドレーン施工



写真 4.5 捨てビット損傷（左；スクリュウ型、右；十字型）



写真 4.6 10t ラフタークレーンによる H 型鋼打設状況



写真 4.7 バイブロによる起振状況（H 型鋼部分改良）



写真 4.8 計測状況（H 型鋼部分改良）

800mm 離れた地点にて行った。写真 4.6 に 10t ラフタークレーンによる H 型鋼打設状況を、写真 4.7 にバイブロによる起振状況および写真 4.8 に計測状況（H 鋼架台部分改良）を示す。

実験結果について述べる。図 4.2 に各地点の間隙水圧の時刻歴を、図 4.3 には図 4.2 中の破線で囲んだ部分を拡大した間隙水圧の時刻歴を示す。間隙水圧の挙動については、図 4.2 からわかるように、H 型鋼打設時は正の間隙水圧が、引抜時は負の間隙水圧が発生している。

図 4.3 より、間隙水圧の発生ピーク時間は、地下 2m 地点では改良域は未改良域よりも 33 秒早く、4m 地点では改良域は未改良域とほぼ同時であった。この結果より、地表面付近の液状化に大きく影響を与える範囲ではドレーン材によって排水が促進されていることがわかる。間隙水圧の最大値は、地下 2m 地点で改良域では 2.1kPa、未改良域では 3.0kPa であり、地下 4m 地点で改良域では 0.9kPa、未改良域では 1.0kPa であった。この結果より、地表面付近の液状化層では間隙水圧の発生を 3 割減少させていることがわかる。間隙水圧の消散時間は、間隙水圧のピーク時間から間隙水圧が 0.2kPa 未満となるまでの時間を消散時間とすると、地下 2m 地点の改良域では 3 分 48 秒、未改良域では 8 分 27 秒という結果となった。これより、間隙水圧の消散時間が 4 分以上も短くなることわかる。

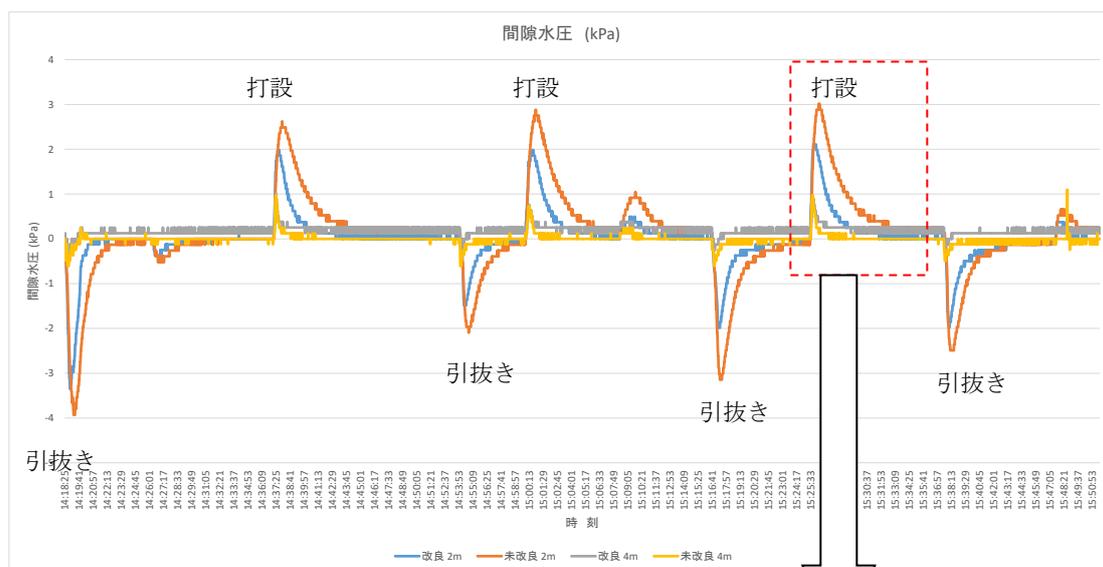


図 4.2 各地点の間隙水圧の時刻歴

ドレーン材を用いた改良域は未改良域と比べ、過剰間隙水圧を抑制し、素早く消散させることが可能であり、間隙水圧の蓄積の継続による宅地の沈下を抑制させる効果があると考えられる。

ドレーン材を用いた改良域は未改良域と比べ、過剰間隙水圧を抑制し、素早く消散させることが可能であり、間隙水圧の蓄積の継続による宅地の沈下を抑制させる効果があると考えられる。また、地下 4m 地点における間隙水圧の挙動が地下 2m 地点と比較して小さいのは、H 型鋼打設に伴い間隙水圧は若干上昇するが、無視できる程度のものであったためである。なお、本研究では、H 型鋼打設・引抜による全応力の変化に伴い発生した初期状態からの水圧変動を過剰間隙水圧として取り扱ったが、地震時に発生する過剰間隙水圧でも同様の効果が期待できるものと推察される。

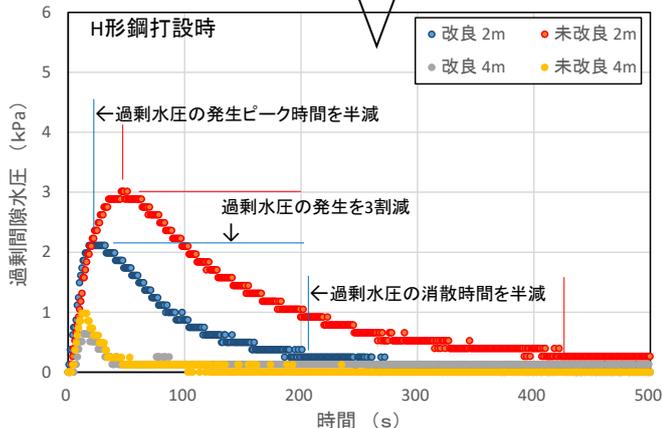


図 4.3 代表地点の間隙水圧の時刻

現場実証試験の結果を受けて、愛知県あま市の既存宅地における現場試験施工を実施した。図 4.4 に住宅の平面図を示すように、対象住宅 (赤色) はその後新しく建設された別棟と繋がり、また離れや納戸が周辺に付帯する。昭和 56 年以前の建物であることから、あま市

の助成により木造住宅耐震診断を受け、建物の耐震補強を実施する。これに併せて、地盤調査ならびに基礎構造調査を実施し、地盤ならびに基礎補強の必要性を調査した。先の実証試験場所との地盤状況を2次元表面波探査により比較すると、図4.4中にS波速度断面図を示すように、液状化対象層は北側にわずかに浅くなることがわかる。建物周辺の地盤調査では、図4.5に示すように、 N_d 値<10の赤色部分が有害な不同沈下を生じる改良対象範囲と判断した。

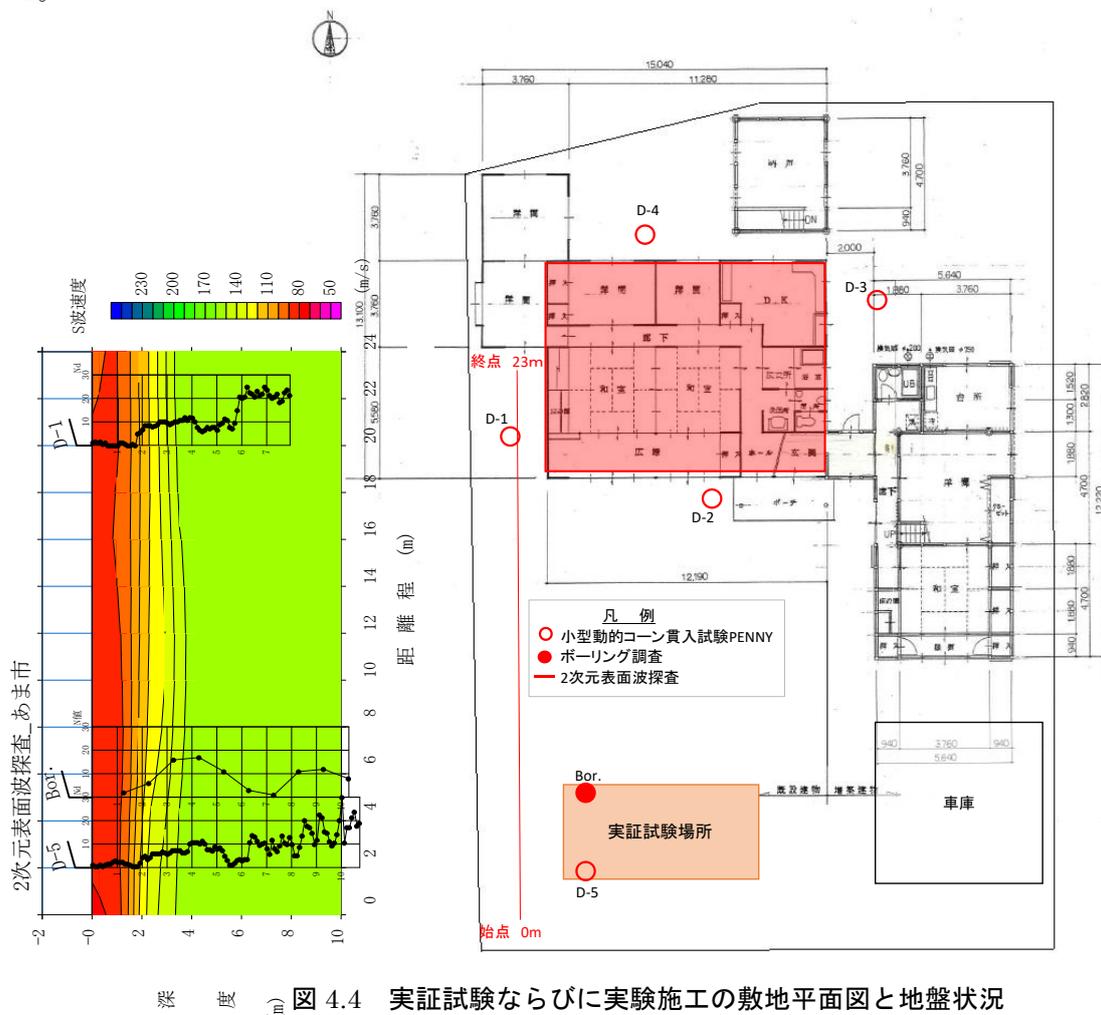


図 4.4 実証試験ならびに実験施工の敷地平面図と地盤状況

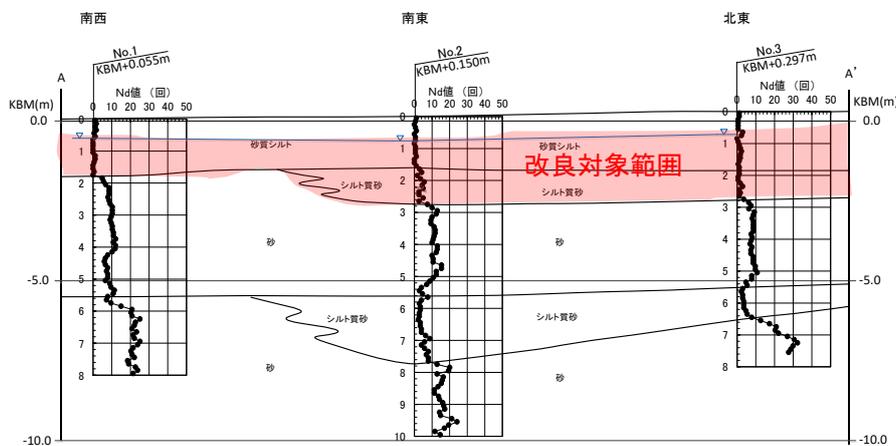


図 4.5 建物の西-南-東地質断面図と改良対象範囲

対象建物周辺は、新屋との渡り廊下や離れが付帯し、また納戸や玄関さらに縁石など簡単には動かすことのできない構築物があり、建物周辺での対策工は限定的なものとなる。このため、施工可能な範囲に最小打設間隔で、建物の東西ならびに南北に等価な対策を実施することとした。図 4.6 に、最小打設間隔における標準施工図を示す。また、図 4.7 には、改良範囲とドレーンの計画打設本数と実施数量を弊示する。

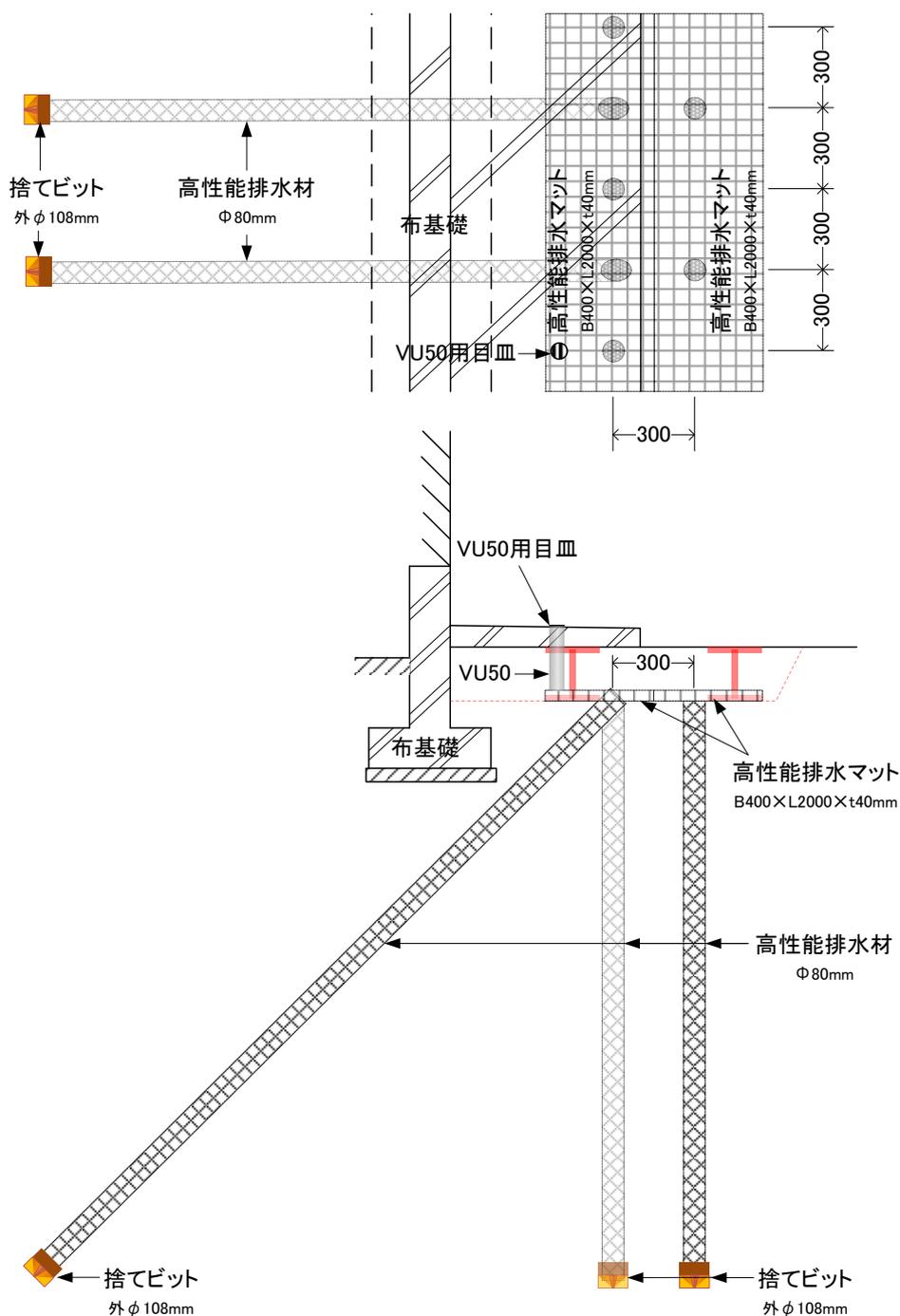


図 4.6 あま市住宅液状化対策工標準施工図

図 4.7 中の、「直 D」は鉛直打設を、「斜 D」は斜め 45 度打設を示す。これらのドレーンは建物壁面と並行に 30cm 間隔で 2 列を配置し、鉛直ドレーンは 60cm 間隔を千鳥で施工し、

斜めドレーンは建物側の垂直ドレーンの間 60 cm 間隔に配置する。

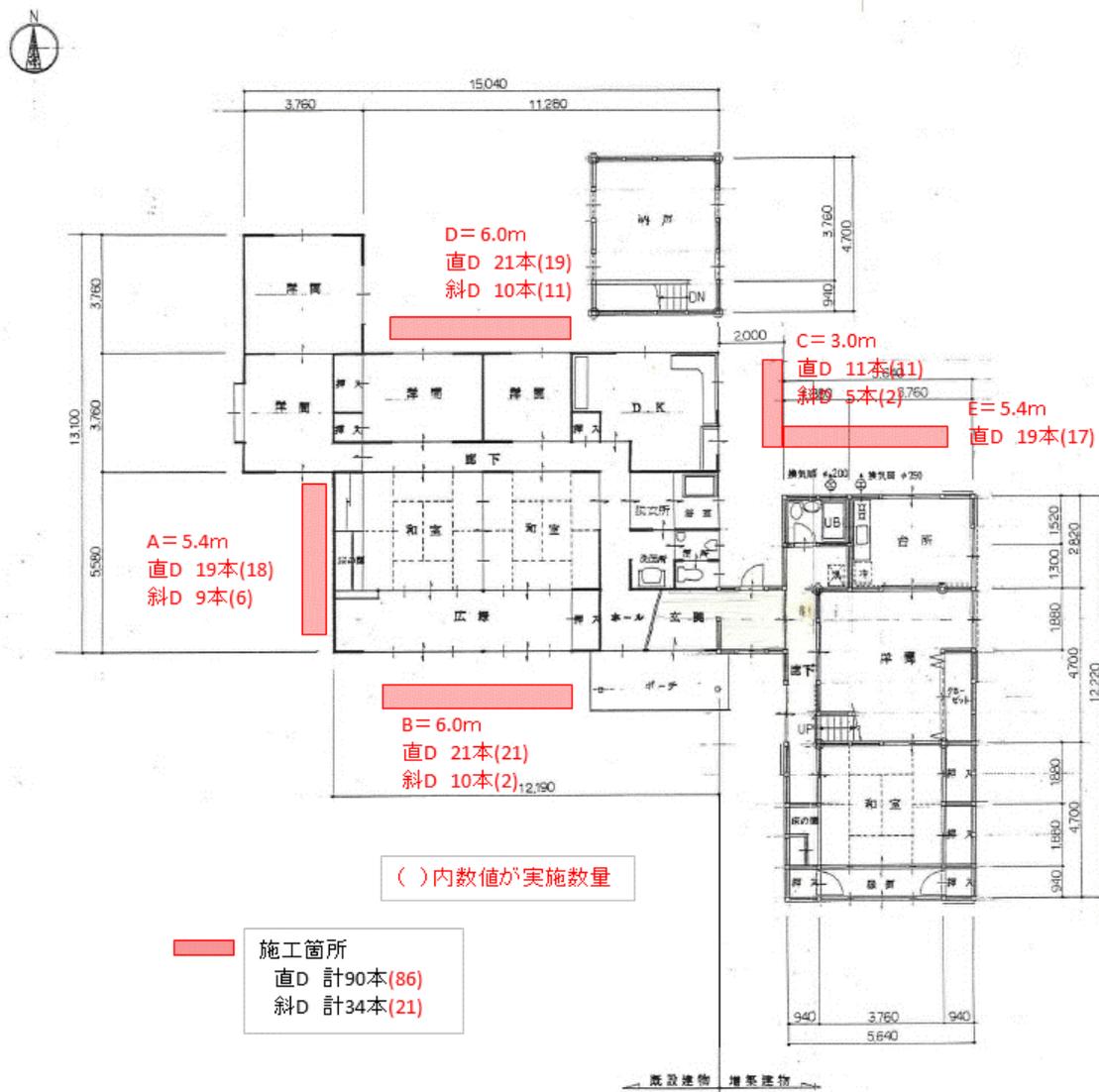


図 4.7 あま市住宅改良範囲とドレーンの計画打設本数と実施数量

図 4.8 には、ドレーンの敷設までの作業手順を実際の施工状況とともに示す。まず、ドレーンの設置に先立ち、回転圧入装置の反力となる架台設置のために、ドレーン設置場所を 0.2~0.3m ほど掘削する。この際に、基礎の深さや地下埋設物の確認を行って、安全にドレーンが施工できることを確認する。新しく改良した回転貫入装置は、図 4.9 に示すように、スクリーアーカーにねじ止めされた H 型鋼 200×200 をレールにして前後に移動が可能で、首振りによる 2 列鉛直貫入施工、ベースのピンを回転軸にした最大 45° の傾斜貫入施工が可能である。回転ならびに圧入は、それぞれ電気モーター 1.5 kw を減速機により制御（回転 1/120、圧入 1/10）し、N 値 10 程度の砂層に貫入できるものとしている。このプロト機は、パワーアップに伴い重量化しており、組立や方向変換にはクレーンによる補助が必要である。このため、軒下での作業が可能ないように架台上で使用可能な簡易クレーンを製作した。

この簡易クレーンは、プロト機によるケーシング回転貫入作業とクレーンによるケーシング引抜きならびにドレーン設置作業を分業して実施することで作業効率を改善することも可能である。（目標達成 100%）



図 4.8 ドレーン敷設の作業手順と施工状況

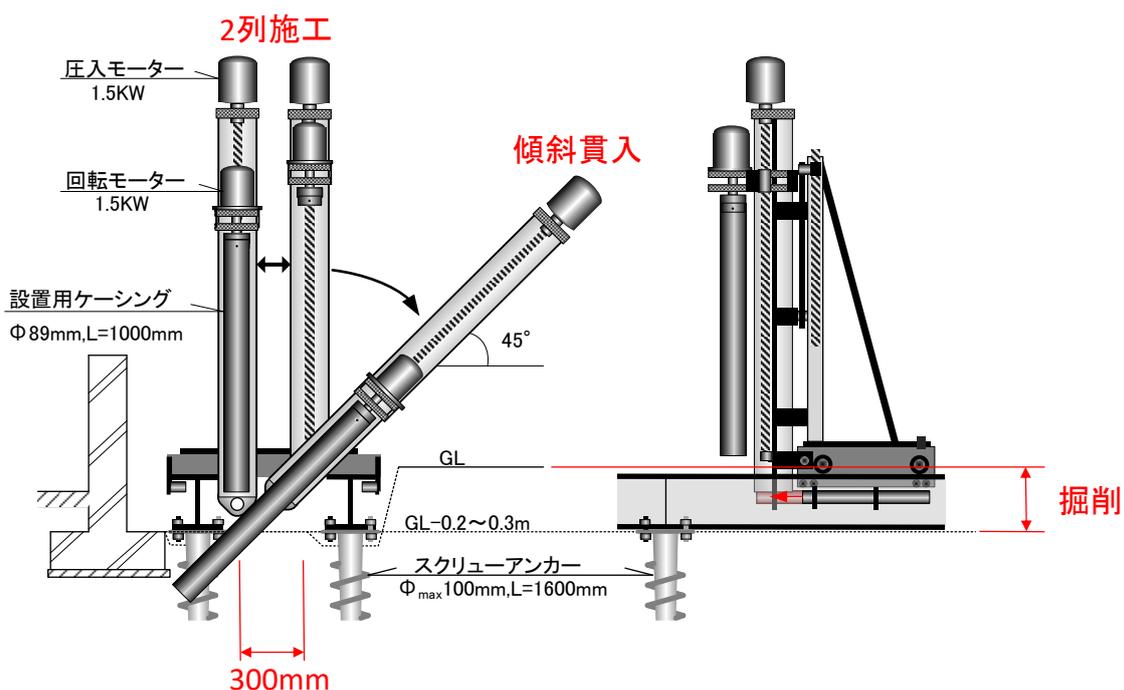


図 4.9 新しく開発した回転貫入装置の概要

ドレーンの設置手順は、先の図 1.2 に示すように、ケーシングネジ加工された鋼管 SGP80A の先端に捨てビットを差込み、回転圧入装置により所定の深さまで貫入し、その中に鋼棒(9mm)ならびに高性能排水材(76mm)を挿入して捨てビットと連結したうえで、ケーシングを引抜き余長を処理して、次に移る。

当初、ドレーン 1 本当たり(平均長さ 3m)の設置時間を 15~20 分と想定し、移設を含めて日当たり 20 本の打設を目標とした。計画では、鉛直ドレーン 90 本、斜めドレーン 34 本の合計 124 本の施工期間を 6 日間とした。

実験施工は、表 4.1 に示すように、途中台風の襲来もある中、実施工日数は 9 日間で延べ 53.5 時間を要し、日当たりドレーン施工本数は 12 本と目標の 20 本を大きく下回った。また、基礎直下に杭基礎が施工されていて斜めドレーンの貫入が不可能な個所が見つかるなど、実際の施工本数は鉛直ドレーン 86 本、斜めドレーン 21 本の合計 107 本と減少した。

ドレーンの設置に時間を要した主な原因は、ドレーン貫入用の鋼管の強度不足により、継ぎ手ネジのかじりやヘッドとの取付け部の膨らみが生じたことにある。このため、鋼管の途中交換や損傷を回避するために貫入速度を慎重にコントロールするなど、回転圧入装置の性能を十分に生かした施工が困難であった。また、建物外周を連続的に施工することが不可能であったことから、狭い場所で回転圧入装置の分解組立作業を繰り返すことになり、機械の移設に手間を要した。さらに、打設区間の両端が限られている場合には、回転圧入装置を反転してそれぞれの端部を施工する必要があり、その都度吊上げ用の専用装置を再設置して行ったことも、施工期間の延伸の原因である。これらの問題を解決するためには、ケーシングの改良、構造設計の最適化による機械の軽量化もしくは油圧モーター駆動への切替え、貫入・引抜きの効率化のためのチェーンドライブの採用、ならびに反力架台の軽量化が必要と考えられる。

表4.1 施工実績概要

施工日	施工エリア 直D・斜D別本数	施工長	施工時間	備考
8月1日	掘削・基礎調査		終日	準備工
8月2日	Aエリア：直D 6本 Aエリア：斜D 1本	14.5m	4.0時間	機械設置
8月3日	Aエリア：直D 7本 Aエリア：斜D 3本	20.0m	6.5時間	機械反転
8月4日	Aエリア：直D 5本 Aエリア：斜D 2本 Bエリア：直D 3本	20.0m	6.5時間	機械移設
8月5日	Bエリア：直D 13本 Bエリア：斜D 2本	37.0m	6.5時間	
8月6日				休工
8月7日				休工
8月8日	Bエリア：直D 5本 Cエリア：直D 7本	27.0m	7.0時間	機械移設
8月9日	Cエリア：直D 12本 Cエリア：斜D 5本			
8月10日	Cエリア：斜D 6本 Dエリア：直D 5本 Dエリア：直D 6本	37.0m	6.5時間	機械移設
8月11日	Dエリア：斜D 2本 Eエリア：直E 6本	38.0m	6.0時間	機械移設
8月12日	Eエリア：直D 11本	30.0m	4.0時間	機械撤去

ドレーンの設置終了後、架台ならびにスクリーアンカーを撤去して、厚さ 5 cm ほどの敷砂により均し、高性能排水マット（厚さ 4 cm）を敷設した。次いで、その上に覆土を埋戻し、必要に応じてコンクリート（厚さ 10 cm）を打設して原型復旧した。また、高性能排水マット内の空気を地表に逃がすための排気口（直径 50 mm）を適宜設けた。施工完了後の様子を写真 4.9 に示す。



西側



南側



北側



東側（南北）



東側（東西）

写真 4.9 施工完了後の様子

現場実験施工において明らかとなった課題を解決するため、図 4.10 に示す改良について検討した。

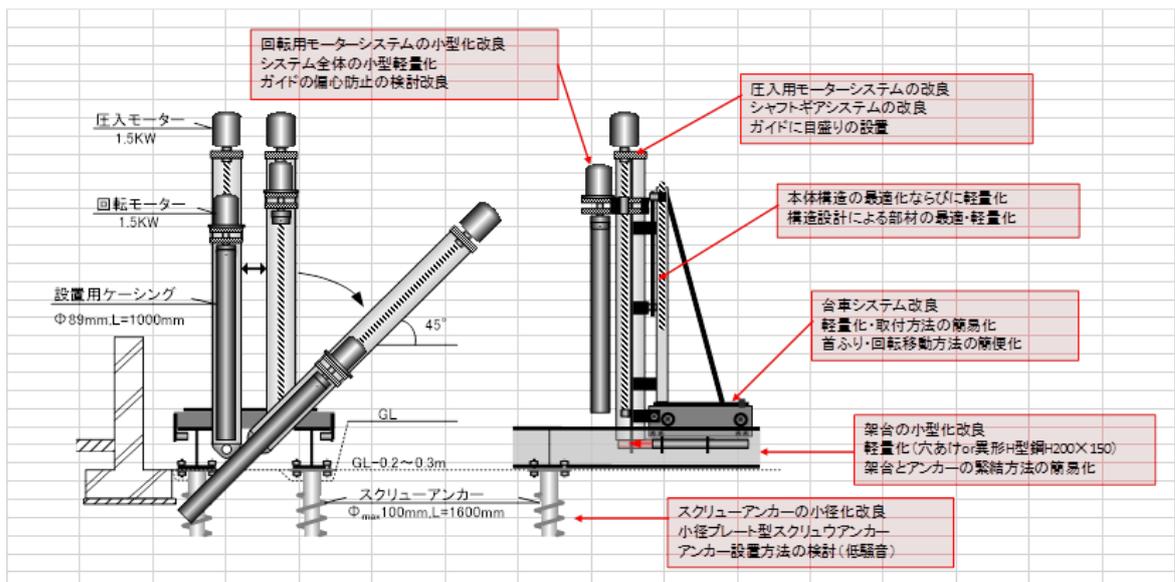


図 4.10 現場実験施工によるプロト機の改良ポイント

主な改良ポイントは、以下のとおりである。

- 専用ケーシングの製作（φ80SKD20 鋼管の採用）
- 回転用モーターシステムの小型化改良（油圧モーターの採用）
- 圧入用モーターシステムの改良（油圧モーターによるチェーンドライブ方式の採用）
- 本体構造の最適化及び軽量化改良
- 台車システムの軽量化改良
- 架台の小型軽量化改良
- スクリューアンカーの小径化改良
- その他付属機器 油圧ポンプ他

プロト機の改良計画に基づき、図 4.11 に示す改良設計を行った。また、改良設計に基づいて製作した改良プロト機を写真 4.10 に示す。

この改良機を、あま市の現場実証試験箇所において、写真 4.11 に示すように、試運転を実施し、良好な運転が可能であることを確認した。これにより、狭小な場所であっても建物に損傷を与えないで、その宅地の必要に応じた最低限の液状化対策を実現できる経済的な施工が可能となった。

以上の結果より、貫入装置の操作マニュアルならびに施工手順書を作成した。

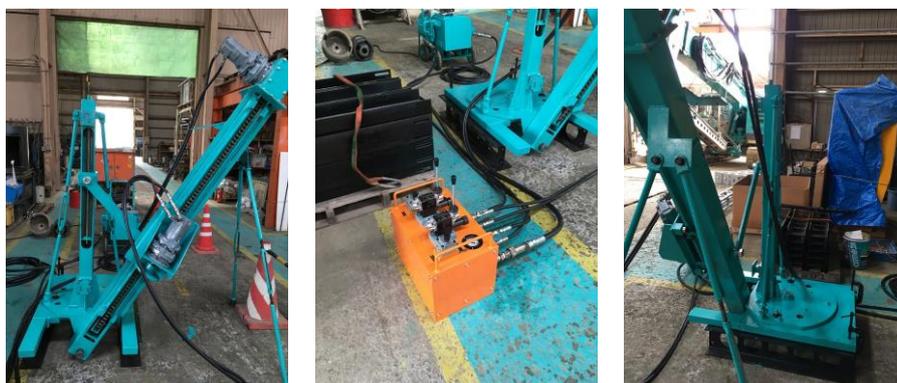


写真 4.10 製作された改良プロト機



操作状況

首ふり鉛直貫入

45度傾斜貫入

写真 4.11 改良プロト機の試運転状況

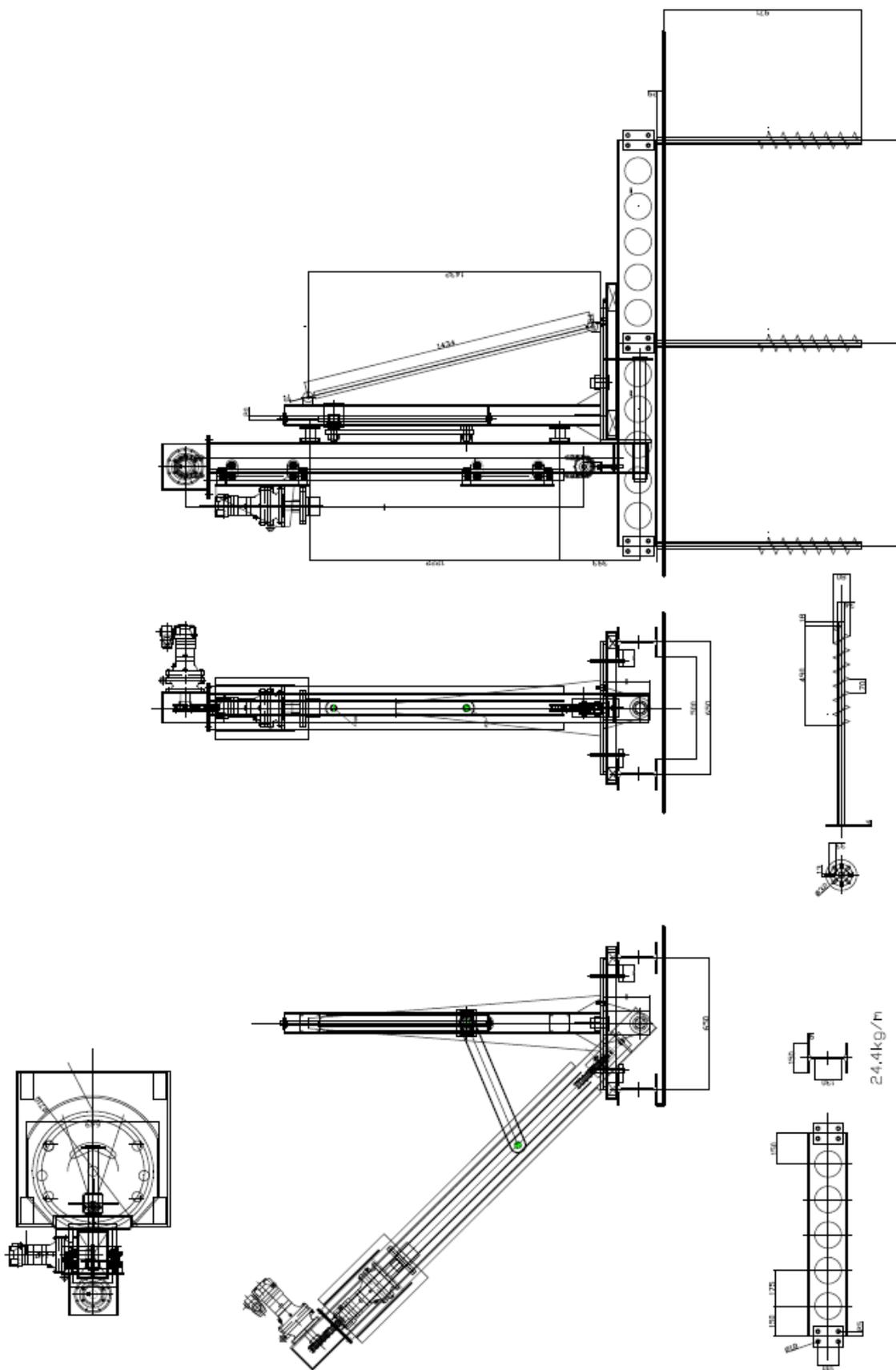


図 4.11 プロット機の改良設計

5. 作業手順書と対策工設計要領

5.1 作業手順書

研究成果に基づいてスマート液状化対策工法の作業手順書を作成した。手順書の目次を以下に示す。

作業手順書 目次	
1.1	はじめに
1.2	既存の施工との違い
2.1	施工概要
2.2	ドレーンの設置
2.3	施工機械
2.4	施工イメージ
3.1	施工手順
3.2	施工機械の設置
	①宅地周辺の埋設物の調査
	②整地と架台設置
	③小型回転圧入装置の搬入・組み立て
3.3	ドレーンの打設
	①ケーシングとビットの取り付け
	②回転圧入
	③捨てビットの切り離し
	④ドレーンの貫入
	⑤ケーシングの引き抜き
	⑥ドレーンの後処理
3.4	ドレーン設置後の処理
	①排水マットの敷設
	②空気抜き穴の設置とコンクリート被覆
4.1	施工実績と完了後の様子

5.2 設計要領

開発された工法が実用化されるためには、地盤調査から最適な対策の提案までを効率的に行う必要がある。本研究開発においては、数値解析に入力するデータ(粒子の配列や材料パラメータ)作成に多くの時間を要することは効率的でない。そこで、地盤調査結果および構造計算書から得られる建物の重量や大きさを入力することで、自動的に数値解析の入力データを作成し、解析を実行することのできるインターフェースを作成した。なお、既往の設計と同様に「地盤の許容応力度算定」から「液状化判定」を同時に算定できるシステムとした。

インターフェースは実用化を鑑み Microsoft Excel を利用して作成することとした。Excel に入力された地盤調査結果および建物情報から、数値解析の入力データを作成するとともに、入力ミスを削減するための可視化を行う。その後、自動的に解析が実施されるシステムを開発した。図 5.1 にシステムのイメージを示す。

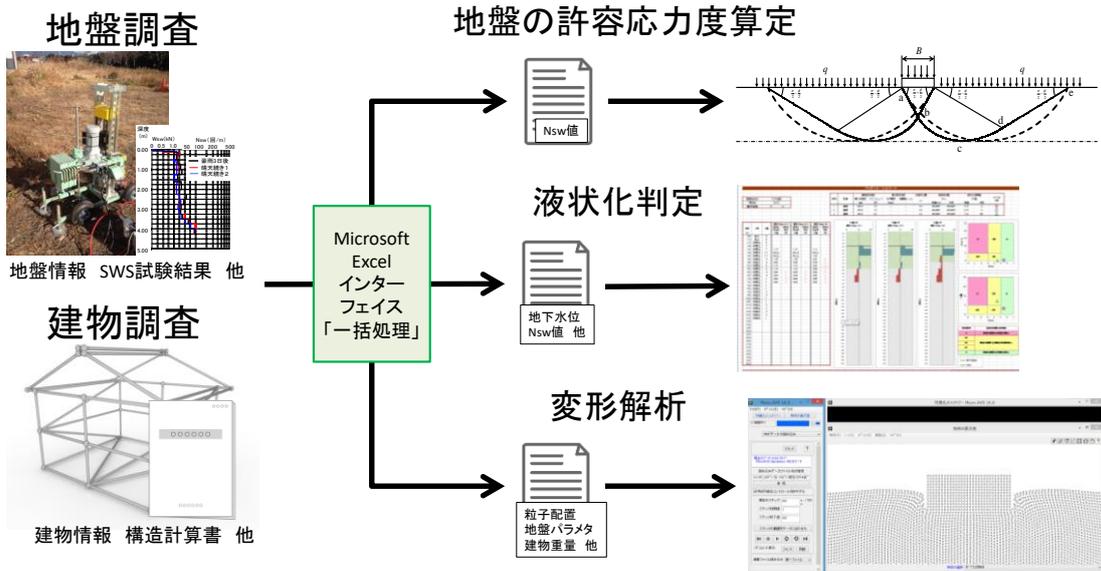


図 5.1 インターフェースによる効率的な設計システム

(9) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
第 60 回地盤工学シンポジウム論文集 簡易地盤調査を利用した戸建て住宅の 液状化被害の再現解析 (No. 6-3 P173-178)	H28. 12. 7	地盤工学会	余川、野々 山、八嶋、 村田、吉原
日本建築学会構造系論文集 液状化による戸建て住宅沈下を定量的 に予測するための簡易解析 (vol. 82 No. 733 P423-432)	H29. 3. 30	日本建築学会	余川、野々 山、八嶋、 吉原
Prediction of Detached House After Liquefaction Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method (No. 151022) 発表のみ	H28. 7. 27	WCCM XII & APCOM VI	余川、近藤、 杉井、野々 山、八嶋、 吉原
建築学会全国大会 (福岡) 梗概集 粒子法を用いた液状化時の戸建て住宅 の被害予測解析 (No. 20253 pp. 505-506.)	H28. 8. 25	日本建築学会	余川、野々 山、八嶋、 吉原、津田
土木学会中部支部講演概要集 人工ドレーン材を用いた液状化対策工 法の効果を確認するための模型振動台 実験 (No. III-013 P257-258)	H29. 3. 3	土木学会	余川、杉井、 山牟田、津 田、八嶋
土木学会中部支部講演概要集 排水材を用いた既設住宅液状化対策工 法の開発とその経済効果 (No. III-015 P261-262)	H29. 3. 3	土木学会	須田、八嶋、 村田、苅谷、 吉原、渡邊、 余川
第 52 回地盤工学研究発表会 人工ドレーン材を用いた液状化対策効 果に関する研究 (No. 0843 P1683-1684)	H29. 7. 12	地盤工学会	津田、余川、 山田、八嶋、 吉原、渡邊
第 52 回地盤工学研究発表会 地盤中に排水材を打設するための低振 動低騒音型小型回転圧入装置の開発 (No. 0847 P1691-1692)	H29. 7. 12	地盤工学会	渡邊、須田、 村田、八嶋、 吉原、余川、 津田、吉川
第 53 回地盤工学研究発表会 既設宅地の液状化対策における高性能 排水材を用いた間隙水圧消散工法の実 証試験	H30. 7. 24	地盤工学会	八嶋、村田、 苅谷、余川、 吉原
第 53 回地盤工学研究発表会 既設宅地の液状化対策における高性能 排水材を用いた間隙水圧消散工法の実 験施工	H30. 7. 24	地盤工学会	村田、八嶋、 苅谷、岩田、 吉原、余川
第 53 回地盤工学研究発表会 受動型直線微動アレイ計測および 2 次元 表面波探査を用いた地盤調査 クライストチャーチ市内の宅地におけ る調査事例ー	H30. 7. 24	地盤工学会	余川、八嶋、 村田、苅谷、 吉原、Misko

土木学会第73回年次学術講演会 高性能排水材を用いた既設宅地の液状化対策工法の開発	H30.8.29	土木学会	八嶋、荻谷、 村田、余川、 吉原、渡邊、 伊藤
建築学会全国大会(東北)梗概集 間隙水圧を考慮した簡易液状化解析による住宅の沈下予測	H30.9	建築学会	余川、野々 山、八嶋、 吉原

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(11) 成果の実用化^{*}の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

本開発工法は、①低振動低騒音型小型回転貫入装置の改良、②模型実験による対策効果の確認、③簡易的な要求性能設計法の開発、④現場試験施工、⑤作業手順書と対策工設計要領作成の5項目に基づいて開発した。平成29年度には改良した貫入装置によりドレーン効果を確認するための現場実験、ならびに実際の住宅において試験施工を実施した。またこの試験施工より明らかとなった課題を解決するために貫入装置をさらに改良した。

岐阜県周辺では、東海東南海地震の発生が危惧されており、特に岐阜県と愛知県に広く分布する濃尾平野は、非常に軟弱で液状化の発生確率が極めて高い地域であることから、既設宅地での液状化対策の要望は非常に高まっている。また、液状化対策効果が明らかに示されていないこれまでの既設宅地での液状化対策に対して、本研究における提案工法は、対策前後の効果も明らかにし、住民の費用に応じた対策メニューを提案できるという点で、非常に優れている。今後の事業化へ向けて、特定非営利活動法人地盤防災ネットワークを中心とした実施計画策定を進めている。また、本研究において産学官テーマ推進委員会の委員を務めて頂いた(一社)中部地域づくり協会では、一般市民向けに本工法を含む液状化対策工法の紹介リーフレットを作成いただいております。今後の広報活動において広く防災対策意識の向上を図っていく予定である。

(12) その他

なし