

既設宅地のスマート液状化対策工法の開発

吉原孝保・八嶋 厚・村田 芳信

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（以下、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、既設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対策工法を確立し、その普及と社会実装によって地域防災力ならびに生産性の向上を図ることにある。ここでは、これまでの施工方法と施工機械（以下、工法）の開発ならびにその特徴、さらに開発した工法を用いた実証実験ならびに実験施工の結果と、それに基づいたプロト機の開発について報告する。

キーワード：防災、液状化、既設宅地、間隙水圧消散工法

1. はじめに

これまで、狭隘なスペースで建物周辺ならびに基礎下の地盤に液状化対策を施すことが可能な工法を研究開発してきた。当初、油圧パーカッション方式により地中に間伐材を打設し、地下水位より上位には透水性の固化材を敷設して地盤を補強する工法を開発した¹⁾。その施工機械では、 N 値 20 前後の地盤への貫入や 1 日当たり 50 m の施工能力があることを確認できたが、隣接する住宅がある場合には、騒音や振動の問題で工法の採用が難しいという問題に直面した。

そこで、騒音振動対策として、静的な回転圧入方式に変更するとともに、これにより低下した杭の打設能力を補うためにドレーンを敷設する間隙水圧消散工法を新しく採用した。間隙水圧消散工法では、浅い液状化対象層の過剰間隙水圧を消散することで、下位の砂層の液状化抵抗の喪失を遅らせることが可能となる。しかし、貫入深さを軽減しても静的な貫入では装置の強力化と十分な反力が必要となる。この研究開発では、小型化に相反するこれらの問題を解決し、施工性を高めて経済性を図る必要がある。

開発した工法を愛知県あま市の住宅において、実証実験により効果検証し、次いで実験施工により施工性を確認した。これらの結果に基づいて、更なる作業効率の向上のための改良によりプロト機を開発・製作することで実用化を図った。

2. 高性能排水材を用いた間隙水圧消散工法の開発

地中に高い排水性能を持ったドレーンを打設することで、砂層の透水性を高め液状化による過剰間隙水圧を消散し、地盤の変形を抑制することが可能である。今回適用したドレーン材は、写真—1 および表—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、高い排水性能を有する。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他、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もない。さらに、軽量で扱いやすく、



写真—1 高性能排水材

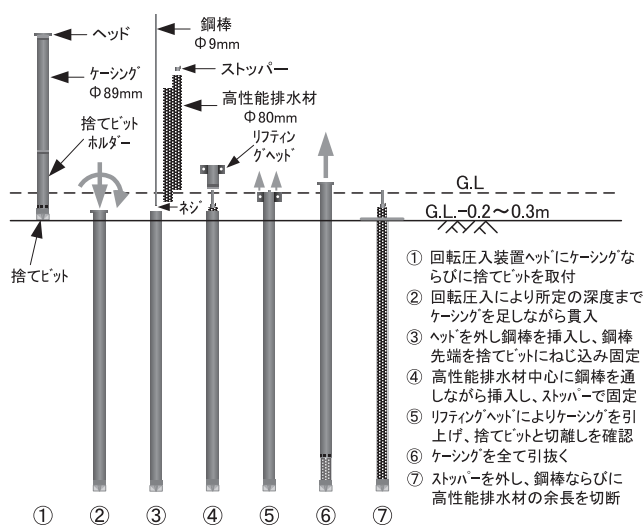
表—1 高性能排水材の動水勾配別の流速（透水性）

品番	直径	有効通水 断面積	動水勾配				
			流速 (cm/sec)		75 kPa 載荷時		
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

（一財）ベターリビング技術評定より

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多くの利点を有する。

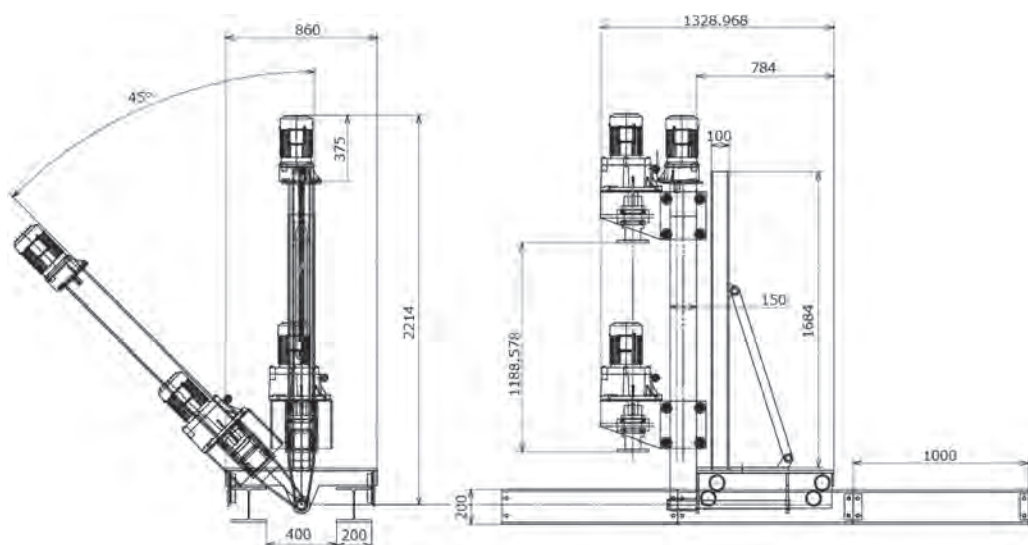
ドレーンの地中への設置方法は、図一1に示すように、7つの工程からなる。①回転貫入装置のヘッドに、ケーシングならびに捨てビットを取付ける。②回転圧入により、所定の深さまで鋼管を足しながら貫入する。③ヘッドを外して鋼棒（Φ9mm）を挿入し、鋼棒先端（ねじ加工）を捨てビットにねじ込み固定する。④ドレーン中心の中空スペースに鋼棒を通しながら挿入し、ドレーン地表端をストッパーで鋼棒に固定



図一1 高性能排水材の設置手順



写真一2 開発した捨てビット（左：スクリュウ型、中央：十字型、右：改良十字型）



図一2 開発した低振動低騒音小型回転貫入装置

する。⑤引拔用のヘッドをケーシング地表端に取付け、少しケーシング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、ケーシングをすべて引抜く。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。

捨てビットは、写真一2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「スクリュウ型」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」が最も適することを確認した。

ドレーンを所定の深さまで敷設するための低振動低騒音小型回転貫入装置の全体図を図一2に示す他、その仕様を表一2に示す。この装置は、ケーシング（80 A 黒ガス管）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 1.5 kW モーターを使用し、最大圧入 43.6 Nm、回転トルク 320 Nm を発揮する。また、リーダーは H 型鋼 200×200 mm を使用しており、この重量級の装置を現場で組立・分解するためのホイストクレーン（電動 10 kN）を別途製作した。装置ならびにホイストクレーンは H 型鋼 200×200 mm の架台上に据付け、圧入のための反力は架台の自重とスクリュウアンカー（太陽光発電設備用グラウンドスクリュウアンカー L=1,000～1,600 mm）による。

表—2 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	80 A ガス管, 外径 89.1 mm, 全長 1,000 mm
圧入用モーター	三相 1.5 kW モーター, 1/10 減速機付 (148 rpm/43.6 Nm)
回転用モーター	三相 1.5 kW モーター, 1/80 減速機付 (19.2 rpm/320 Nm)
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 1,000 mm
スクリュウアンカー	太陽光発電設備用 GSA, 径 65 mm × 長さ 1,000 ~ 1,600 mm
制御装置	スイッチング (on/off) 制御

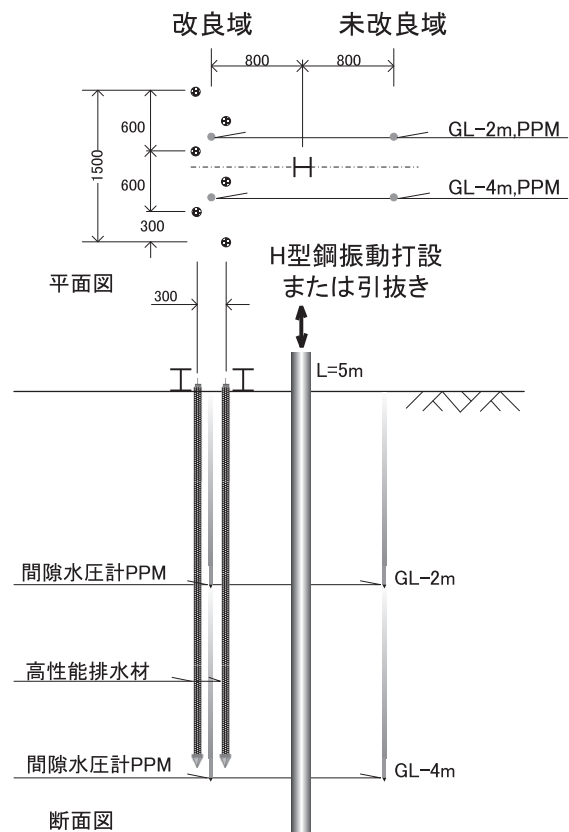
3. 実証試験と実験施工

開発した工法の実証試験と実験施工を、愛知県あま市の宅地で行った。宅地は、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 0 m 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。

現場実証試験は、既設宅地の庭先において、図—3 に示すように、改良域と未改良域のそれぞれ深さ 2 m と 4 m 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（写真—3 参照）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した。また、改良域のドレーン配置は、30 cm 間隔で 2 列を 60 cm 間隔の千鳥配置とした。これは、隣接するドレーンへの影響を含めて、回転貫入が可能な最小間隔である。

H 型鋼打設時における間隙水圧の時刻歴挙動の一例を図—4 に示す。図より、間隙水圧の発生ピーク時間は、深さ 2 m 地点では改良域は未改良域よりも 33 秒早く、深さ 4 m 地点ではほぼ同時であった。一方、間隙水圧の最大値は、深さ 2 m 地点では改良域が 2.1 kPa に対して未改良域が 3.0 kPa であり、深さ 4 m 地点では改良域が 0.9 kPa に対して未改良域が 1.0 kPa であった。この結果より、地表面付近の液状化対象層では間隙水圧の発生時間を半減し、その発生量を 3 割減少させていることがわかる。同様に、間隙水圧の消散時間においても半減することが確認できた。

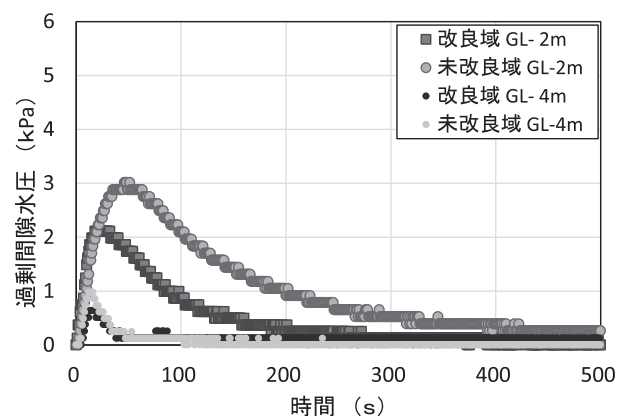
このように、ドレーン材を用いた改良域は未改良域と比べ、過剰間隙水圧を抑制し、素早く消散させることが可能であり、宅地の沈下を抑制させる効果があることが確認できた。この実験では、H 型鋼打設・引抜による全応力の変化に伴い発生した初期状態からの水圧変動を過剰間隙水圧として取扱ったが、地震時に発



図—3 実証試験での間隙水圧計 PPM の配置



写真—3 パイロによる起振状況



図—4 代表的な過剰間隙水圧の計測結果

生する過剰間隙水圧でも同様の効果が期待できると推察される。

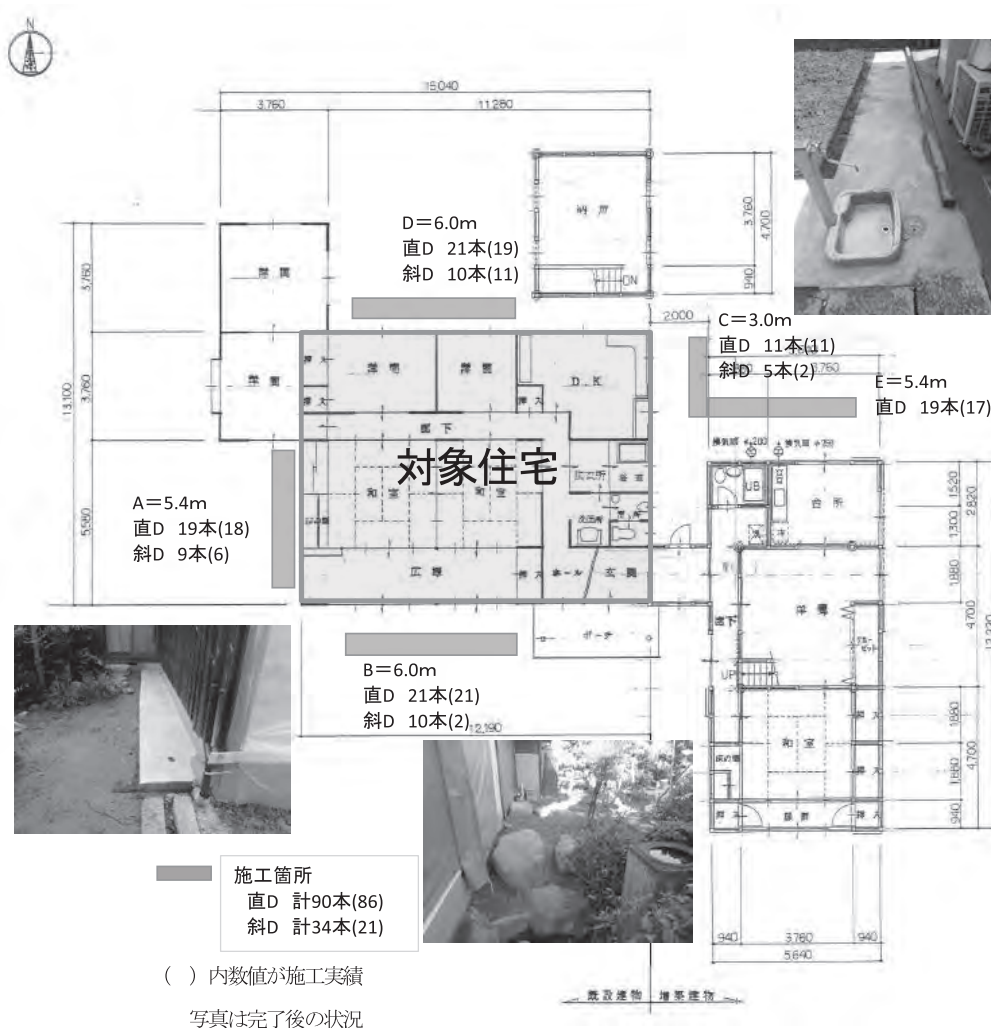
実証試験の結果を受けて、既設宅地における実験施工を実施した。対象住宅は、昭和56年以前の建物であることから、あま市の助成により木造住宅耐震診断を受けて建物の耐震補強を実施する。これに併せて、地盤調査ならびに基礎構造調査を実施して、地盤ならびに基礎補強の必要性を調査した結果、表層の深さ3～4mに分布する液状化対象層をドレーンの打設による改良範囲と判断した。

対象建物周辺は、図—5に示すように、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。図中には、施工可能な改良範囲（赤枠）とドレーンの計画打設本数、さらには実施数量を弊示する。図中の「直D」は鉛直ドレーンを、「斜D」は斜め45度ドレーンを示す。施工可能な範囲に、図—6の標準施工図に示すように、鉛直ドレーンは建物壁面と並行に30cm間隔で2

列を配置し、60cm間隔千鳥で施工し、斜めドレーンは建物側の垂直ドレーンの間60cm間隔に配置した。

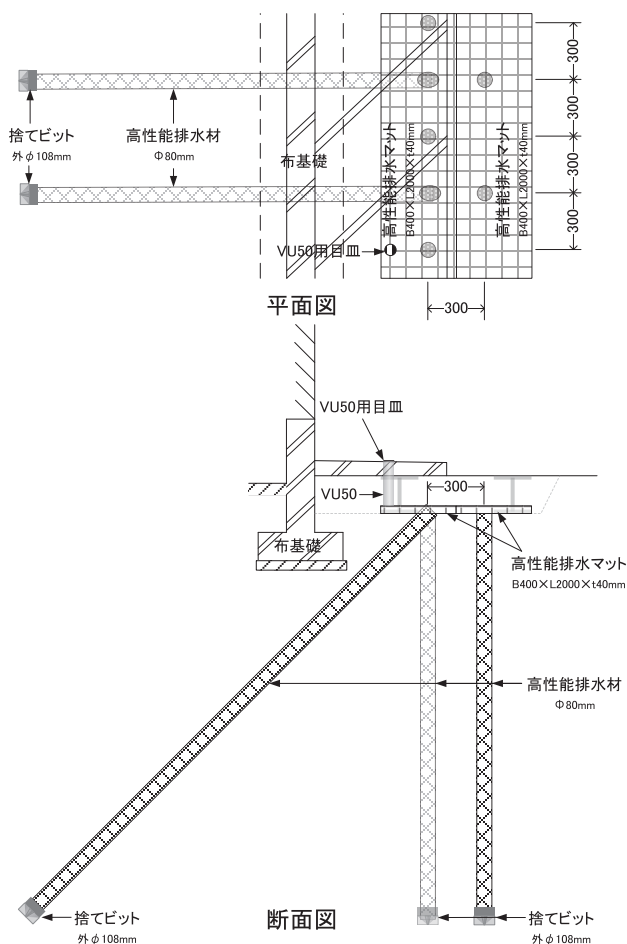
本工法の作業手順を実際の施工状況とともに写真—4に示す。まず、ドレーンの設置に先立ち、回転圧入装置の反力となる架台設置のために、ドレーン設置場所を0.2～0.3mほど掘削する。この際に、基礎の深さや地下埋設物の確認を行って、安全にドレーンが施工できることを確認する。新しく改良した回転貫入装置は、スクリュウアンカーにねじ止めされたH型鋼をレールにして前後に移動が可能で、首振りによる2列鉛直貫入施工ならびにベースのピンを回転軸にした最大45°の傾斜貫入施工が可能である。回転ならびに圧入は、それぞれ電気モーター1.5kWを制御し、N値10程度の砂層まで貫入した。この施工機械の現場内での回転や移動は、専用のホイストクレーンを用いた。また、このクレーンは連続施工が可能な場合にはケーシング引抜きならびにドレーン設置作業を分担することも可能である。

当初、ドレーン1本当たり（平均長さ3m）の設置



図—5 あま市住宅液状化対策工施工範囲計画と施工実績

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。



図—6 あま市住宅液状化対策工標準施工図

実験施工は、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、ドレーン貫入用のケーシングの強度不足により、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、施工機械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、狭い場所で施工機械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。

ドレーンの設置終了後、架台ならびにスクリュウアンカーを撤去して、厚さ5cmほどの敷砂により均し、高性能排水マット（厚さ4cm）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10cm）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50mm）を適宜設けた。



写真—4 作業手順と施工状況



写真—5 低振動低騒音小型回転圧入装置（左：検証実験状況，中央：首振り鉛直施工，右：斜め施工）

4. プロト機の製作

実験施工における課題を受けて、低振動低騒音小型回転貫入装置のプロトモデル機を再設計した。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（ $\phi 80$ SKD20 鋼管の採用による補強）
- ・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（リーダーを150 mmH 型鋼に変更）
- ・台車システムの軽量化改良（ターンテーブルの採用）
- ・架台の小型軽量化改良（軽量 H 型鋼 200×150 に変更）
- ・スクリュウアンカーの小径化改良（専用小型アンカーの製作）

改良設計に基づいて製作したプロト機を写真—5に示す。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。

5. おわりに

逼迫する地震災害への備えとして、個別宅地の液状化対策は喫緊の課題であり、経済的な負担の少ない効果的で再生可能な施工方法が求められている。また、甚大な液状化被害を被った地域では、再液状化対策に

向けて官民相互の液状化対策による災害に強いまちづくりの必要が模索されている²⁾。本研究開発が、これらの課題解決に役立つことを願って、一層の社会実装に向けた研究開発を推進したい。

謝 辞

本研究は、国土交通省建設技術研究開発費補助金の支援により実施した。ここに記して感謝いたします。

JCM/A

《参考文献》

- 1) 村田ら；地域資源を活用した既設宅地の地盤補強に関する実証試験，第19回調査設計施工技術報告会，地盤工学会中部支部，2010.6.11
- 2) 熊本市 HP，第2回熊本市液状化対策技術検討委員会，資料，2017年10月

〔筆者紹介〕

吉原 孝保（よしはら たかやす）
国立大学法人岐阜大学工学部



八嶋 厚（やしま あつし）
国立大学法人岐阜大学工学部



村田 芳信（むらた よしのぶ）
国立大学法人岐阜大学工学部

