

論文の内容の要旨

氏名：竹之内 寛至

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：強制変位を与える圧入による地盤の変形過程及びその応用に関する研究

第1章 序論

土木分野における液状化対策の一つに、モルタルを圧入して地盤内に強制変位を与え、地盤を密実化させる静的圧入締固め工法（CPG 工法）がある（図-1）。本工法は、圧入に伴い発生する地表面の隆起が、地盤の密実化を低減させるため、隆起量の予測およびその抑制が課題である。東日本大震災以降、地震の外力の想定が高くなり、液状化のリスクが増大するなか、重要インフラに対する液状化対策として、これまで以上に地盤内の圧入量を増やし、必要な液状化強度を得る対策が求められるようになってきている。このような対策によって、隆起量が許容値を超える問題が発生してくる可能性がある。このため、これまで以上に地盤の締固め効果が高く、隆起抑制ができる対策の要請が高まっており、当該課題を克服した新たな圧入手法の開発が望まれている。

そこで本研究は、上記の背景に鑑み、小型の圧入装置（図-2）を用いた各種の室内の模型実験から、隆起を抑制して地盤の密実化を高めたアップダウン方式による圧入手法（U/D 方式）を提案し、その効果を検証した（図-3）。また、U/D 方式の隆起抑制および地盤の密実化のメカニズムを、透明地盤を用いた圧入試験の結果からした。さらに、密度増大工法の一つである静的圧入締固め工法（CPG 工法）に U/D 方式を適用させ、現場実証試験を実施し、開発した新工法の有効性の検証した。

第2章 地盤変形および隆起抑制に関する既往の研究

第2章では、物体の膨張に伴う地盤内および地表面の変形過程の理論に関する既往の研究を取りまとめた。次に、土木分野で用いられている地盤の締固めについての設計法の考えを示し、現在の締固めの設計法を応用させた地盤の隆起予測についてまとめた。最後に、地盤内圧入に伴う隆起抑制に関する既往の研究をまとめた。以下に要点を示す。

- 1) 地盤の変形理論に関する研究として、茂木モデルおよび *Vesic* の空洞膨張理論がある（図-4）。
- 2) 茂木モデルでは、地表面の変位を計算する際に均質で等方な半無限弾性体と球体や楕円体などの圧力源を仮定し、単純な媒質と圧力源に対して地表変形の解析解を示した。
- 3) *Vesic* の空洞膨張理論では、等方応力状態の半無限体内に、球状または円筒状の空洞を考え、この空洞が球状に拡張する場合の膨張圧を求め、空洞の体積の変化は、弾性域の体積の変化に塑性域の体積の変化を加えたものに等しくなることを示した。
- 4) 山崎らは、 κ 法および空洞膨張論での地盤が球状に拡張するという連続の式の考え方を利用し、地盤内に多数のモルタルが圧入された場合の地盤変位を予測する手法を提案した（図-5）。
- 5) 隆起抑制に関する既往の研究より、膨張圧の載荷・除荷による繰返し圧入や、注入管の貫入・引き上げを繰返す施工法が、地盤の締固め効果を高め、隆起を抑制することが分かった。

第3章 地表面の隆起抑制の実験

第3章では、まず第1節で、模型地盤内に改良率を等しくした条件（総圧入量が等しい）において、(1) モルタル改良体を圧入本数が異なるケースで圧入した場合の地盤の密実化の検討、(2) 地盤表面の拘束の有無によって、地盤隆起や締固め効果に影響がある否かについての検討、(3) κ 法による隆起予測を実施し、模型実験で発生した隆起量との比較をそれぞれ行った。次に第2節では、円筒形土槽、角型土槽およびせん断土槽の3種類の土槽を使用し、モルタルを地盤内に圧入する際に発生する隆起を大幅に抑制しつつ、改良効果および液状化対策効果が高いU/D方式による圧入手法の各種の実験結果をまとめた。最後に、第3節では、有効性が実証された前節のU/D方式による圧入手法において、注入管の大きさと先端形状に着目し、圧入能率よく隆起抑制できる方法を検討した。

第1節で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 改良率（総圧入量）が等しい条件下では、圧入本数が多いものほど、地点隆起量および平均隆起

量は小さくなることが分かった。

- 2) 圧入本数が多いものほど、地盤の締固め量（地盤の体積圧縮量）、相対密度の増分、壁面土圧の増分、動的コーン貫入試験による打撃回数および静的コーン貫入抵抗値がそれぞれ高いことが分かった。
- 3) 表面拘束がある場合の方が、隆起量が小さく、相対密度の増分が大きいことが分かった。
- 4) κ 法による隆起量の予測値と実測値を比較した結果、圧入本数が大きいものほど、予測値と近いものになることが分かった。

第2節で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 提案するU/D方式により圧入時に発生する地盤隆起量を8割以上低減できることを明らかにした。
- 2) 改良効果の面では、通常のボトムアップ方式以上の密度増加が認められ、 K_0 値については同等であった。
- 3) 液状化対策効果は、ボトムアップ方式と比較し、1.6倍以上の液状化強度が得られ、液状化による沈下被害の抑制の面でも効果を有することが分かった。
- 4) U/D方式の隆起抑制のメカニズムは、注入管の進退動によるモルタルの脈動に伴う地盤の繰返し収縮によるものと考えられる。

第3節で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) U/D方式は、任意の繰返し体積を地盤に与える場合、注入管の外径を大きくすることで、注入管の総移動距離を削減できるため、能率を向上できる。
- 2) 大きな外径の注入管を使用したU/D方式の注入管の進退動により、圧入したモルタル改良体の中に周辺地盤を取り込み、改良体が拡張することを明らかにした。
- 3) U/D方式は、注入管の外径の大きさによらず、隆起抑制効果は、少ない注入管の進退動によって速やかに発現することを明らかにした。
- 4) U/D方式による改良後の地盤の平均的な相対密度の増大を定量的に示し、密度増大効果が発現することを明らかにした。

第4章 隆起抑制メカニズムの考察

第4章では、まず第1節で、透明地盤を用いた実験（図-6）により、モルタル圧入時のモルタルの挙動および周辺地盤の挙動を直接観察および画像解析をした。次に、第2節では、模型地盤に使用する東北7号硅砂および圧入用のモルタルを使用して供試体をそれぞれ作製し、定ひずみ速度載荷による圧縮試験（図-7）を行った。それぞれの結果から、地盤内圧入のアップダウン方式による隆起抑制のメカニズムを考察した。

第1節で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) ボトムアップ方式による圧入の周辺地盤の挙動は、圧入深度から離れた土層上部ほど、移動量は小さく、モルタル圧入による隆起量の事前予測に用いられている空洞拡張理論を応用した κ 法を用いた隆起量の予測法と整合的であることが明らかとなった。
- 2) 注入管のU/D時の改良体の周辺地盤の挙動は、改良体の拡張する方向への移動が見られた。また、改良体より上の地盤には水平方向への移動はほとんどみられず、圧入時は鉛直方向に隆起しが、U/D時は沈下を示し土層上部ほど沈下量は大きいことが分かった。
- 3) U/D方式によるモルタルの圧入実験により、注入管の上下運動によるモルタル改良体の拡張が明らかとなり、前章の研究で想定した隆起抑制メカニズムを裏付けるものとなった。

第2節で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 7号硅砂は、圧縮速度にはほぼ関係なく、同じような供試体高さ（間隙比）になるのに対し、モルタルの場合は、圧縮速度が速いと、圧縮されにくい傾向になった。
- 2) モルタルは、圧縮速度が速いケースを除くと、圧密応力の増加とともに緩やかに軸ひずみが発生し、最終的に15~17%程度の軸ひずみとなった。圧縮速度が速いモルタルのケースの挙動は、7号硅砂のそれに近く、軸ひずみは小さくなった。

第5章 応用—現場実証実験—

隆起抑制効果と液状化対策効果が向上した新たな CPG 工法：U/D 方式について、実機種および各種パラメータを変化させて現場実証実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 開発した U/D 方式は、実大規模での施工が可能。
- 2) 開発した U/D 方式は、室内模型実験と同様の高い隆起抑制効果を有することが実証された。
- 3) 等価改良率による施工の定量化法を用いることで、U/D 方式による地盤の隆起量および密度増加量を予測することができ、従来の CPG 工法と同様の設計が可能であることを示した。

第6章 総括

第6章では、各章で得られた成果をまとめた。

本研究で開発した U/D 方式による圧入手法は、従来からの課題であった隆起抑制および液状化対策効果増大（密度増加）の双方を、実現できる圧入手法である。それゆえ、従来の圧入手法と同様の効果を対象とした場合には、コスト縮減が実現でき、また今後増大する液状化リスクの低減ならびに安全性の向上に大きく資することができる。さらに、隆起の大幅な抑制によって、従来適用が困難であった許容変位量がシビアな施設にも適用範囲が拡大したといえる。

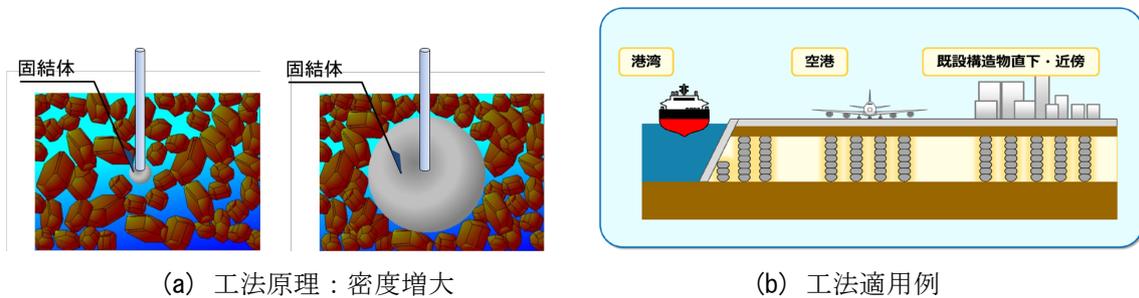


図-1 静的圧入締固め工法（CPG 工法）

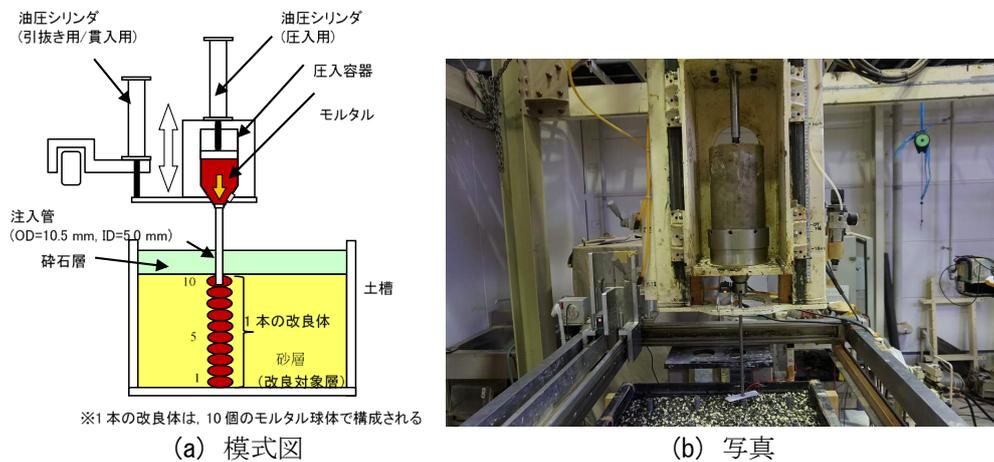


図-2 圧入装置（模型実験）

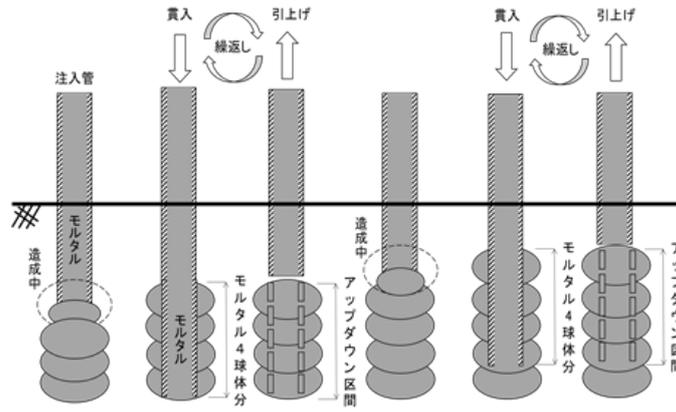


図-3 U/D方式の概念図

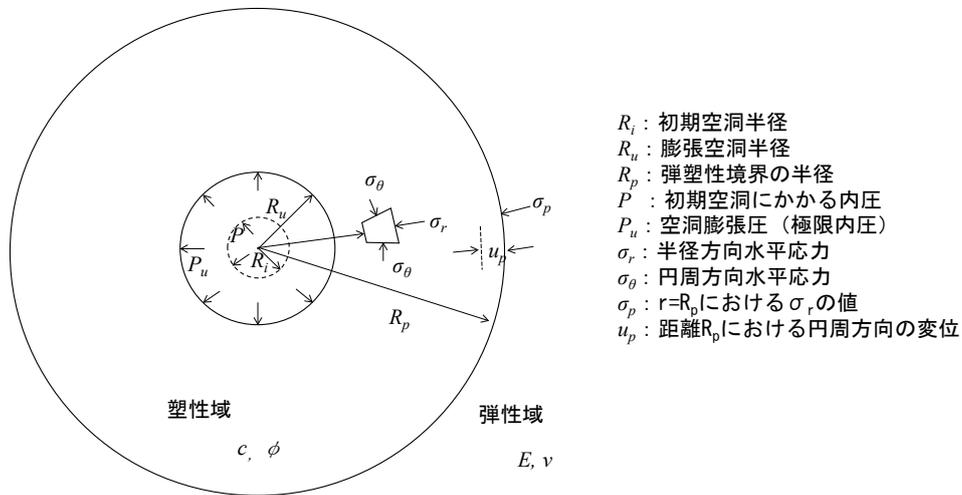
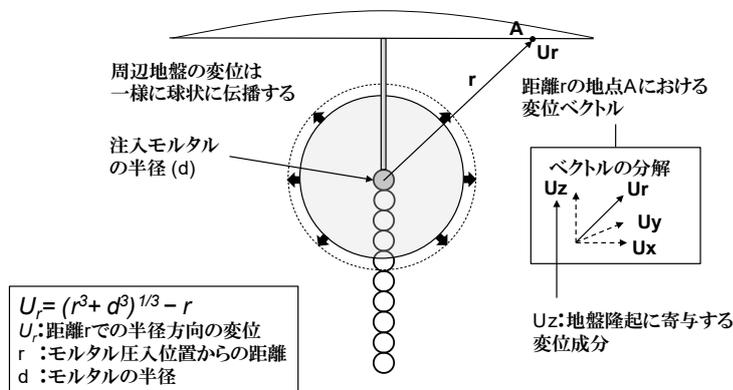


図-4 Vesicの空洞膨張理論の概念図 (Vesic, A.S., 1972. に加筆)

変位は注入点からの距離に応じて減衰する
(したがって地表での最大値は注入点の直上)



沿岸技術研究センター：液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル
—コンパクショングラウチング工法—, 2013(一部修正)。

図-5 κ 法を用いた地盤変位を予測する手法の概念図 (液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル—コンパクショングラウチング工法—, 2013.)

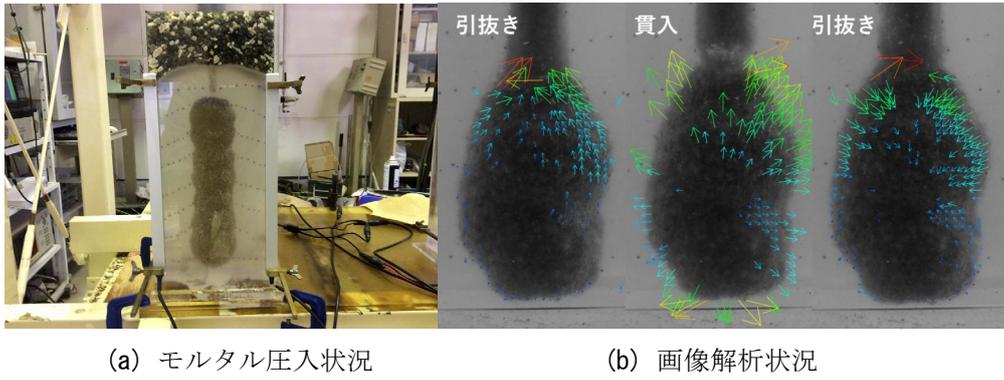


図-6 透明地盤を用いた実験

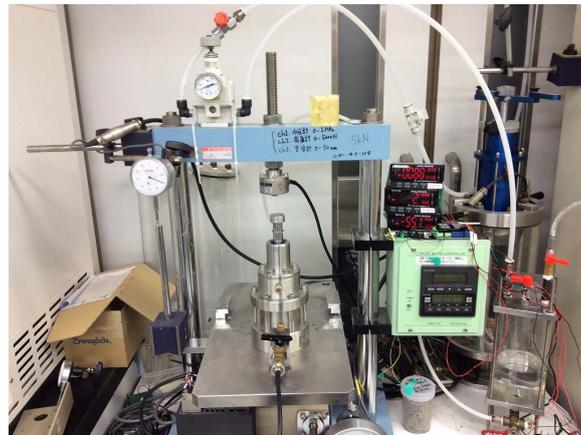


図-7 定ひずみ速度圧密試験機



図-7 U/D 方式の現場実証試験