

# 静的圧入締固め工法（CPG 工法）における隆起量予測法に関する検討

池内章雄\*・大里睦男\*・平 義章\*\*

\* (財) 沿岸技術研究センター 調査役

\*\* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

静的圧入締固め工法は既設構造物の液状化対策工法として採用されているが、施工に伴い生じる地盤隆起を適切に推定する必要がある。港湾空港技術研究所により提唱された新たな予測法により、これまで困難とされていた地盤隆起量の推定が施工前に可能となった。本研究では近年実施された施工事例を対象として新予測法を適用し、地盤隆起量の予測精度向上について検討した。

キーワード：液状化対策, 静的圧入締固め工法 (CPG 工法), 地盤隆起, 予測法

## 1. はじめに

静的圧入締固め工法（以下、CPG 工法）は、低流動性モルタルを高圧で地盤に圧入し地盤を締固める密度増大による液状化対策工法の一つである。CPG 工法は、無振動・低騒音で、施工機械がコンパクトであること、硬質地盤が存在しても容易に貫通し改良を必要とする層だけを改良できることから、既設構造物の直近、直下の施工が可能である。この特徴を活かして、近年では供用中の滑走路や誘導路直下地盤の液状化対策工法として適用実績が増えている。

一方で、CPG 工法はその特性として施工時の地盤隆起が問題となることがあり、既設構造物への影響を考慮する上で、事前に隆起量を把握することが求められるようになった。

これまで、地盤隆起については、施工の経験から影響深度を 5m 程度とした上で、注入したモルタルと同体積の円錐状の隆起が地表面に生じるとしていたが、実際の現象をうまく説明することができなかった。

近年、港湾空港技術研究所により、締固め工法の地盤改良設計法の一つである  $\kappa$  法を応用した地盤隆起量予測

法が提唱された。この予測法は、圧入変位が球状に伝播するという仮定に、累積せん断ひずみの概念から誘導された相対密度と圧入率の関係から、N 値および細粒分含有率等を地盤条件として考慮した地盤隆起量を算出するものである。本研究では、近年実施された新潟空港、東京国際空港、福岡空港での CPG 工法の施工事例（福岡空港は未舗装部の試験施工）を対象に、上記予測法を用いた地盤隆起量の検討を行い、その特性を把握することで、今後の予測精度向上のための課題を整理した。

## 2. 隆起予測法の概要

港湾空港技術研究所により提唱された地盤隆起予測法では、以下の 3 段階の過程に従って、施工による地盤隆起量を算出する。

### ① モルタル圧入による地盤変位の算出

改良率および杭配置間隔から、注入ステップ毎のモルタル量を算出し、同体積の球体半径を求める。この球体半径を圧入による変位の基準とし、隆起算出地点（地表面）までの距離に応じて地盤変位を算出する。

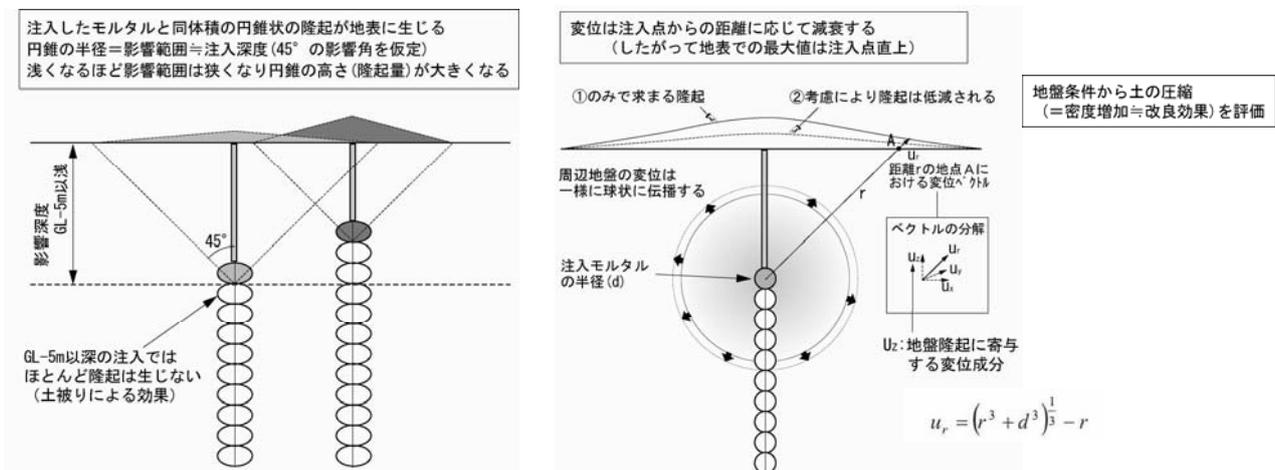


図-1 従来の地盤隆起の考え方(左)と  $\kappa$  法を応用した地盤隆起量予測法(右)の比較

② 地盤条件 (地盤の圧縮) の評価

地盤条件により、杭間土の密度増加が異なるため、土質に応じて変位の低減を行う必要がある。この変位の低減を表す係数は圧縮補正係数  $c_{HC}$  と呼ばれ、N 値および細粒分含有率  $F_c$ 、土被り (有効上載圧:  $\sigma_v'$ ) を条件とし、改良率との関係式により求められる。一般的に、圧縮補正係数  $c_{HC}$  は N 値が小さいほど、または細粒分含有率が低い地盤ほど小さく、隆起が生じにくくなる傾向がある。

なお、改良率と杭間土の密度増加の関係は、パラメータ  $\kappa$  によって関係づけられ、過去の施工実績からパラメータ  $\kappa = 2 \times 10^{-0.008 \cdot F_c}$  を一般値としている。

③ 地表面隆起量の算出

①で求めた地盤変位に②で求めた圧縮補正係数  $c_{HC}$  を乗じて、地盤条件による変位の低減を考慮した地表面隆起量を算出する。

3. パラメータ  $\kappa$  に関する検討

予測に用いるパラメータ  $\kappa$  の一般値 ( $\kappa = 2 \times 10^{-0.008 \cdot F_c}$ ) は、細粒分含有率  $F_c$  が 10% 以上の比較的細粒分の多い地盤の施工事例に基づいて設定されている。このため、 $F_c$  が 10% 以下の砂地盤で用いるために十分なデータがそろっていないかった。

本検討で施工事例の一つとした平成 21 年度新潟空港地盤改良工事では、対象地盤が  $F_c = \text{数}\% \sim 10\%$  の砂地盤からなるため、施工データからパラメータ  $\kappa$  を逆算し、細粒分含有率  $F_c$  が 10% 以下における値の妥当性を検証した。パラメータ  $\kappa$  の算定は、締固めによる土圧係数 K 値 ( $K = \sigma_h' / \sigma_v'$ ) の増加を考慮し、山崎ほか(2003)<sup>3)</sup>の方法により行った。

(1) パラメータ  $\kappa$  の算定結果

施工時の実施改良率と施工前後の N 値 (図-2 左) を条件とし、パラメータ  $\kappa$  を算定した結果、GL-8m 付近を境に、浅部では  $\kappa = 2.5$  程度、深部では  $\kappa = 10$  程度となった。

(図-2 右)

(2) 算定されたパラメータ  $\kappa$  の検証

平成 21 年度新潟空港地盤改良工事では、地表面の隆起はほとんど発生しなかったため、地中変位計で計測された水平変位と比較することで、設定したパラメータ  $\kappa$  から予測される地盤水平変位の妥当性を検証した。

本予測法により求めた水平地盤変位は、実測値とほぼ一致しており、パラメータ  $\kappa$  の妥当性が示される (図-3)。

ここで施工データから算定されたパラメータ  $\kappa$  は、浅部で一般的な  $\kappa$  ( $\kappa = 2 \times 10^{-0.008 \cdot F_c}$ ) と比べて若干大きな値となるが、ばらつきの範囲内にあるとみることができ。GL-8m 付近を境として、深部では一般値と比べて非常に大きな  $\kappa$  値を示しているが、事前の N 値、事後の N

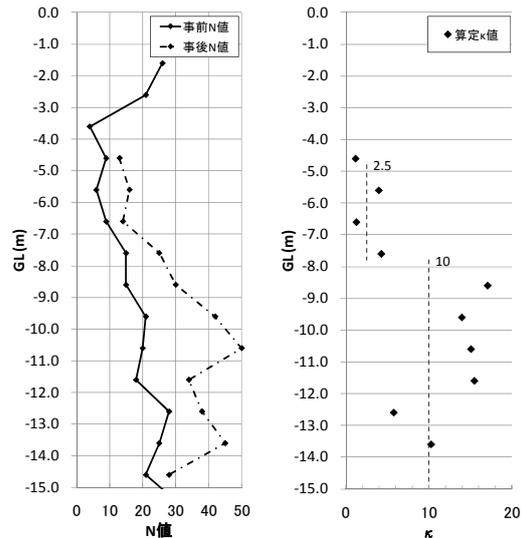


図-2 平成 21 年度新潟空港地盤改良工事における事前事後 N 値と算定された  $\kappa$  の深度分布

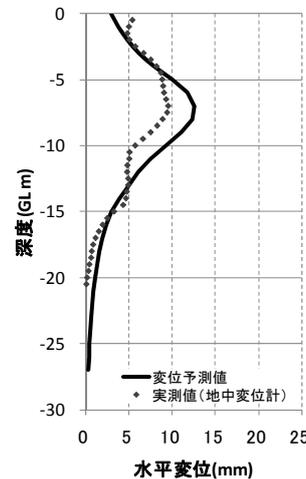


図-3 予測法により求めた地盤水平変位と地中変位計で計測された水平変位との比較

値増加とともに非常に大きいことから、圧入に対して浅部とは異なる地盤挙動を示している可能性があると考えられる。(図-2)

以上の結果より、 $\kappa$  を小さく設定した方が隆起量を大きくなり、安全側の検討となることから、本予測法の適用における  $\kappa$  は、一般値 ( $\kappa = 2 \times 10^{-0.008 \cdot F_c}$ ) を適用して問題ないとする。ただし、施工にあたっては、隆起計測管理を行い、予測値との比較検証を実施することが必要である。

4. 地盤条件と圧縮補正係数  $c_{HC}$  の関係

改良域で体積圧縮が生じるとした場合の体積変化の比を表す圧縮補正係数  $c_{HC}$  は、改良率、細粒分含有率、原地盤 N 値に依存し、特に、改良率・原地盤 N 値・細粒分含有率が小さい時、各要因の変化に対して敏感に変化する。各項目と圧縮補正係数の関係を表-1 に示す。

表-1 地盤条件と圧縮補正係数  $c_{HC}$  の関係

地盤条件	圧縮補正係数 $c_{HC}$
	小 ————— 大
改良率 $a_s$	小 ————— 大 N 値, $F_c$ が小さいほど敏感に反応
細粒分含有率 $F_c$	小 ————— 大 N 値, $a_s$ が小さいほど敏感に反応
原地盤 N 値	小 ————— 大 改良率 $a_s$ が小さいほど敏感に反応

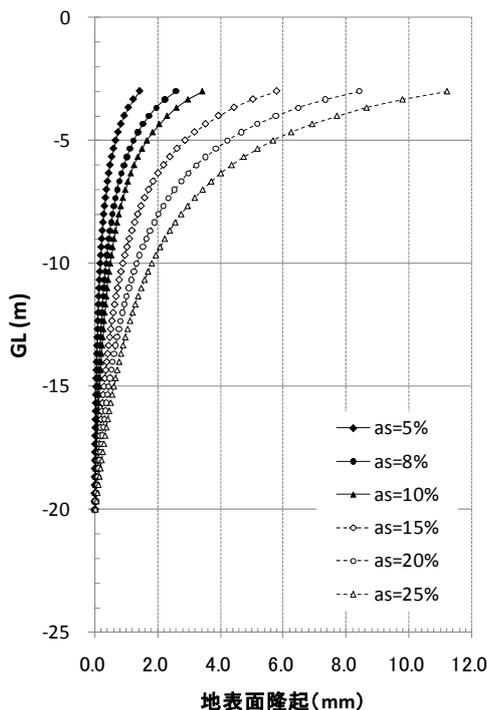


図-4 同地盤条件での改良率  $a_s$  の値の差による地表面隆起量の違い

改良率による地表面隆起の違いについて検討した事例の一つとして、杭配置 1.7m 間隔(正三角形配置), 改良深度 GL-3m~GL-20m (注入ピッチ 0.333m), N 値=5, 細粒分含有率  $F_c=10\%$  とし, 改良率を  $a_s=5\%, 8\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$  に変えて計算した地表面隆起(地点別隆起に対応)を深度分布図として図-4 に示す. 注入深度が深いところでは地表面隆起はあまり生じておらず, GL-5m 付近で隆起量が急激に大きくなる. また, 改良率の変化に対して隆起量は敏感に大きくなる事が分かる.

## 5. 地表の地盤隆起を抑制する要因

この  $\kappa$  法を応用した予測法は, N 値, 細粒分含有率で表される地盤の違いを考慮することができるものの, 実

際に施工によって生じた地表面隆起量と予測値との間には差が生じることが多い.

本研究で事例として取り上げた施工のうち, 新潟空港, 東京国際空港では 予測値>実測値, 福岡空港では 予測値<実測値となった. この差の要因として, 対象地盤の土質のばらつきが考えられるが, 予測の性質上, 土質のばらつきに起因する誤差を取り除くことは困難であることから, 地盤条件の設定において安全側の予測となるよう配慮することで対応せざるを得ない.

一方で, 施工条件に着目した場合, 予測値>実測値となった事例(新潟空港, 東京国際空港)は舗装直下での施工であり, 予測値<実測値となった事例(福岡空港)は, 舗装のない地点での施工であったという違いがある. このことから, 地盤変位を抑制する要因として舗装による地表面の拘束効果がある程度働いていると考えられる.

仮に予測値と実測値の差をすべて舗装による地表面の拘束効果として見込むと, 新潟空港では(予測値: 7mm) - (実測値: 1mm) = 6mm (比率にして, 6mm/7mm=約 85%), 東京国際空港では(予測値: 52mm) - (実測値: 27mm) = 25mm (比率にして, 25mm/52mm=約 50%) の低減効果があったことになる(図-5).

しかし, この低減率は一様ではなく, また(予測値) - (実測値)のすべてが舗装による拘束を示すかどうかは, 現段階では不明である. したがって, 今後, 施工データを蓄積した上で再検討を実施し, 舗装による地表面変位の拘束効果を定量的に評価する方法を検討する必要がある.

## 6. 施工時の隆起低減のためのその他の課題

### 6.1 最小改良率の見直し

地盤変位を最低限に収めるためには, 目標とする地盤改良性能を満たす範囲内で, 必要な最小改良率の注入を実施するようしなければならない. このためには, 必要最小限の改良率と設計最小改良率との差を極力小さくする必要がある. 最小改良率を引き下げることにより, 不要な注入を減らすことになり, 結果として地盤隆起の抑制につながると考えられる.

これまで, CPG 工法の設計最小改良率は実績にもとづき  $a_s = 8\%$  程度とされてきた. しかし, 平成 18 年度に石狩湾新港西地区で実施された実物大の空港施設を用いた液状化実験や, 本研究で対象事例とした新潟空港および東京国際空港の施工では, 改良率を  $a_s = 5\%$  とした施工が行われ, 十分な改良効果が得られている. これらの施工実績から, CPG 工法の最小改良率を  $a_s = 5\%$  にまで引き下げることが可能と考えられる.

今後, 技術マニュアル改訂や補足技術資料などを通して, 設計最小改良率の見直しを行う必要がある.

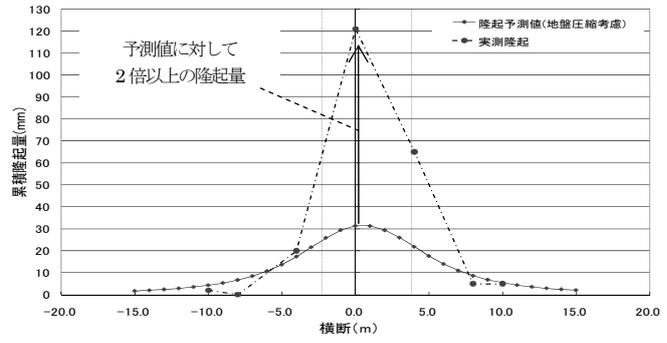
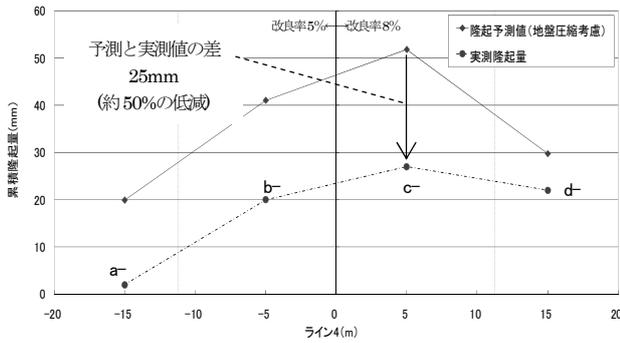


図-5 地盤隆起の予測値と実測値の比較 (左：東京国際空港の例，右：福岡空港の例)

## 6.2 施工時の注入圧力管理

地盤隆起を抑制するためには、地盤条件に応じた適切な注入圧力を設定し管理することが必要となる。特に、施工深度が浅く、土被りが小さい場合には、必要以上の注入圧力をかけて注入を行うと地盤隆起を引き起こす可能性が高い。土被りに応じた圧力管理値を設定できれば、過大な注入を防止し地盤隆起を抑制する上で有効である。

本研究で取り上げた施工のうち、新潟空港および福岡空港では土被り（有効上載圧： $\sigma_v'$ ）と注入圧力の間に比例関係が認められた。

新潟空港では、施工を行った  $\sigma_v' = 100 \sim 170 \text{ kN/m}^2$  の範囲で、注入圧力  $P = 40 \times \sigma_v'$  ( $\text{kN/m}^2$ ) の関係が認められた (図-6)。

福岡空港では、施工を行った  $\sigma_v' = 65 \sim 95 \text{ kN/m}^2$  の範囲で、注入圧力  $P = 155 \times \sigma_v' - 9000$  ( $\text{kN/m}^2$ ) の関係が認められた。しかし、この関係式では有効上載圧が約  $58 \text{ kN/m}^2$  の時に注入圧力  $P = 0 \text{ MPa}$  になってしまうため、今回の施工深度より浅い部分の注入圧力を推定するために適用することはできない。

今後、有効上載圧や  $N$  値などの地盤条件と注入圧力の関係に着目して施工データを蓄積し、適切な注入圧力管理の設定方法を確立する必要がある。

## 7. おわりに

本研究では、近年施工された事例を用いて CPG 工法の施工時隆起予測法の適用性を検証するとともに、その特性を把握することで、今後の予測精度向上のための課題を整理した。この結果、パラメータ  $\kappa$  は、一般値 ( $\kappa = 2 \times 10^{-0.008 \cdot F_c}$ ) を適用することで、安全側に配慮した施工時の地盤隆起量を推定可能であることが検証された。

予測の精度を向上させるための今後の課題として、

- ①舗装の拘束効果による隆起の低減の定量的な評価
- ②設計における最小改良率の見直し
- ③施工時の注入圧力と地盤条件との関係

に留意した検討を進める必要がある。

また、近年、隆起抑制に効果的な圧入方式として、繰返し圧入（リバース併用方式）を適用した施工事例が増

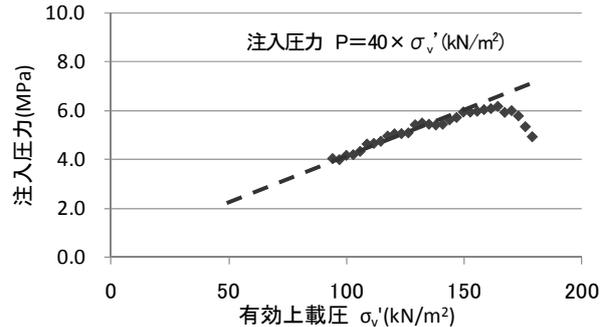


図-6 有効上載圧と注入圧力の関係(新潟空港の例)

えてきている。今後、標準的な施工方法となると予想されるリバース併用方式を適用する場合の設計パラメータや隆起予測パラメータ等の確認を行う必要がある。

これらの検討を進めることで、これまで施工時にしかできなかった地盤隆起への対応を、設計段階から実施することが可能になる。

## 参考文献

- 1) 「沿岸技術ライブラリーNo.25 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-」平成19年6月、(財)沿岸技術研究センター。
- 2) 山崎浩之・江本翔一・足立雅樹・原田良信・山田和弘・森河由紀弘：締固め工法施工時の地盤隆起量の予測法，土木学会論文集C, vol. 65, No. 4, 1039-1044, 2009.
- 3) 山崎浩之・森川嘉之・小池二三勝：締固め砂杭工法による圧入後  $N$  値の予測と  $K_0$  値の影響に関する考察. 土木学会論文集, No. 750/III-65, 231-236, 2003.
- 4) 山崎浩之・竹村淳一・大里睦男・池内章雄・平義章・藤井照久・高田圭太：細粒分の少ない砂地盤における静的圧入締固め工法の設計パラメータと地盤変位予測. 土木学会第65回年次学術講演会，投稿中，2010.
- 5) 遠藤敏雄・山崎浩之・大里睦男・藤井照久・山田和弘・高田圭太：繰返し圧入で実施した静的締固め工法の改良効果と地盤隆起. 土木学会第65回年次学術講演会，投稿中，2010.
- 6) 稲田雅裕・山崎浩之・大里睦男・池内章雄・藤井照久・高田圭太・新坂孝志：静的圧入締固め工法の隆起管理手法と変位予測. 土木学会第65回年次学術講演会，投稿中，2010.