

新潟空港での滑走路液状化対策工事における地盤改良仕様の検討

合田和弘*・白井博己**・高野政広***・伊藤克浩****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 前 国土交通省 北陸地方整備局 新潟港湾・空港整備事務所 工務課長

**** 前 国土交通省 北陸地方整備局 新潟港湾・空港整備事務所 第二工務係長

新潟空港では大規模地震時の防災拠点空港としての機能を確保するため、「静的圧入締固め (CPG : Compaction Grouting) 工法, 以下 CPG 工法という」による滑走路液状化対策が行われてきた。本検討では, 新潟空港で平成 21 年度及び平成 22 年度に行われた液状化対策工事の実績から地盤改良効果, 施工上の課題及び対応策について検討し, それらの結果を基に新潟空港における CPG 工法の基本改良仕様及び, 管理目標値の見直しを行った。

キーワード: 地盤改良, 静的圧入締固め, CPG 工法, 液状化対策

1. はじめに

新潟空港では大規模地震時の防災拠点空港としての機能を確保するため, 滑走路液状化対策が行われている。平成 21 年度及び平成 22 年度に行われた工事では, 施工中の地盤変位等, 施工上の課題が生じた。このため, 過年度までの施工実績から地盤改良効果, 施工上の課題及び対応策について整理・検討し, その結果を基に新潟空港における CPG 工法の基本改良仕様及び, 管理目標値の見直しを行った。

2. 地盤改良効果の整理及び評価

新潟空港において平成 21 年度及び平成 22 年度に実施された滑走路液状化対策工事 (CPG 工法) での各種データに基づき, 新潟空港の土質条件における地盤改良効果を整理し評価を行った。

2.1 土質データの再整理

新潟空港滑走路部において, 地盤改良対象層は細砂が主体であり, 当該 Asd 層は, Asd1~Asd3 の 3 層に区分できることが分かる (図-1 参照)。Asd1 は T.P. ±0.0~2.0m で N 値 10 程度以下, Asd2 は T.P. -2.0m~-5.0m で N 値 10~20 程度, Asd3 は T.P. -5.0m~-13.5m で N 値 20~30 程度である。

平成 21 年度, 平成 22 年度工事の際に実施された土質試験結果から, 地盤改良対象層の土質の特徴を整理した。特に, 図-2 の土粒子の密度に着目すると, 浅部 (Asd1, Asd2) と深部 (Asd3) との間で, N 値と同様に土粒子の密度に差が見られる。地盤改良前後の N 値の増加をみると, 深部 (Asd3) は浅部と比べて, 小さい改良率 a_s で大きな N 値の増加を示す傾向があり, 浅部と深部で改良効果の現れ方の違いが見られる。このことは, CPG 工法によ

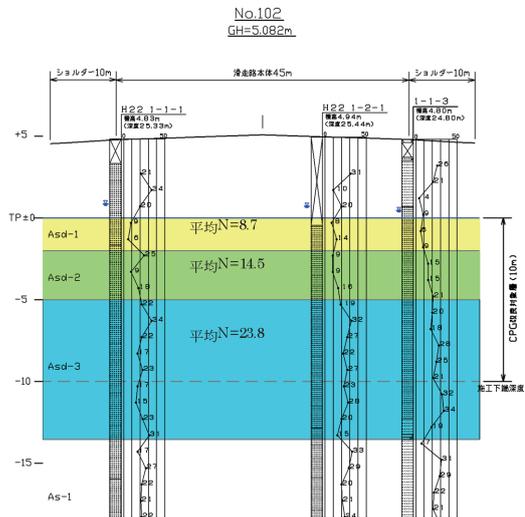


図-1 滑走路横断方向土質断面

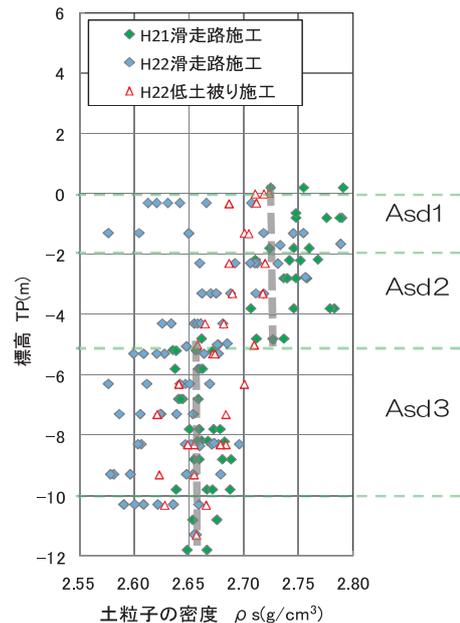


図-2 土質試験結果深度分布 (土粒子)

る地盤改良の設計において、土質に依存する設計パラメータ κ を浅部、深部それぞれに設定する必要があることを示している。

なお、ここで改良率 a_s とは改良対象域に対する固結体面積の割合である。また、注入率は設計改良率に基づく固結体の体積に対する実施注入量の割合である。

2.2 N値増加と改良率の関係

設計パラメータ κ は、CPG 工法の設計において改良率と累積せん断ひずみ（最終的にはN値増加）を関連づける係数である。新潟空港における施工実績を基に設計パラメータ κ を設定するに当たっては、標準貫入試験箇所の周囲12地点の改良率の平均値とN値増加の相関から設計パラメータ κ を設定した。設計パラメータ κ の算出方法¹⁾を以下に示す。なお本検討で用いる間隙比はそれぞれ $e_{max}=1.151$, $e_{min}=0.683$ とした。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1)\gamma_i^* (1 - \sqrt{N_1/C_M}) - \sqrt{N_1/C_M}}{(c_2/c_1)a_s(\sqrt{N_1/C_M} - 1)}$$

$$\gamma_i^* = \frac{\sqrt{N_0/C_M}}{(c_2/c_1)(1 - \sqrt{N_0/C_M})}$$

$$c_1 = e_{max} - e_{min} \quad c_2 = 1 + e_{max} \quad C_M = (1/0.16)^2$$

ここに、 γ_i^* は N_0 の時の累積せん断ひずみの初期値、 N_0 は N_1 は圧入前後の換算N値であり、計測されたN値を N 、計測された位置での有効上載圧を σ_v' (kN/m²) とした時の換算N値 (N_{98}) は次式で表される。

$$N_{98} = \frac{167}{69 + \sigma_v'} N$$

2.3 設計パラメータ κ の見直し

設計パラメータ κ を前項に示した算出式を用いて逆算した結果を図-3 に示す。また、設計で用いる値を浅部 (Asd1, Asd2) と深部 (Asd3) に分けて設定した。

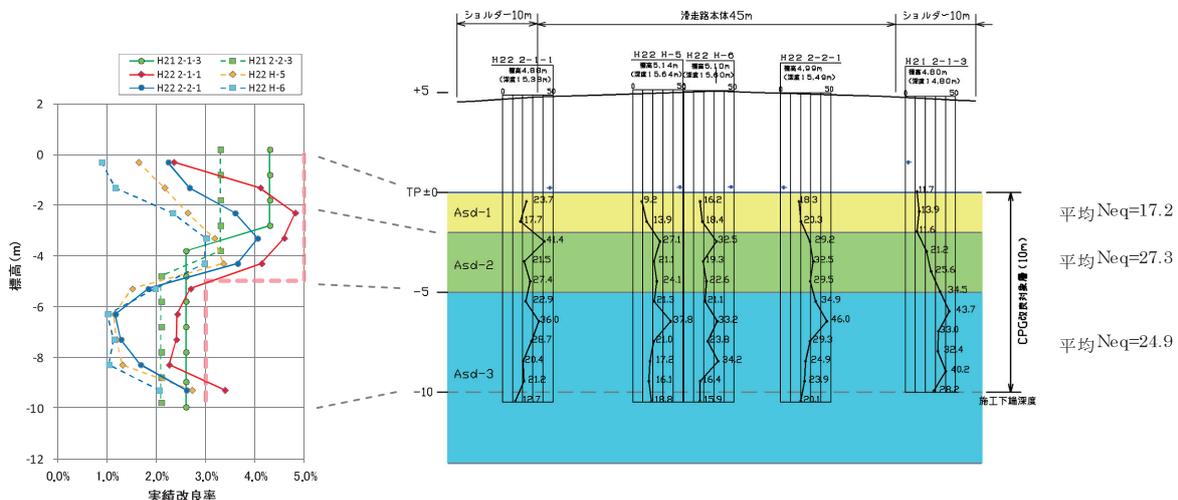


図-4 新潟空港滑走路における実績改良率と施工後の等価N値 (N_{eq})

・浅部：平成21年度の施工実績を基に算定した結果と比べてやや大きめの算定値を含むものの、安全側となるよう設定値 $\kappa=6$ を提案値とした。

・深部：算定値は大きくばらつくが、平成22年度施工データによる算定値は $\kappa=12 \sim 20$ 付近に集中することから、安全側となるよう $\kappa=12$ を提案値とした。

2.4 最小改良率の見直し

これまで、新潟空港のCPG 工法による地盤改良における最小改良率は、石狩湾新港において港湾空港技術研究所が実施した実大実験で示された実績に基づき、 $a_s=5\%$ としている。一方で、新潟空港では、実績改良率が5%を下回ったものの、目標とする性能を満足する改良効果が得られている。

平成22年度工事において問題となった「施工時の隆起」、「注入ロッドの食い締め (昇降困難)」の原因が、地盤に過剰な負荷がかかったためと考えられることから、今後の施工において地盤への負荷を軽減するための対応のひとつとして、過剰な注入をしないことが挙げられる。新潟空港におけるCPG 工法による地盤改良の設計改良率は、L1地震動で液状化しないための必要改良率とCPG 工法に

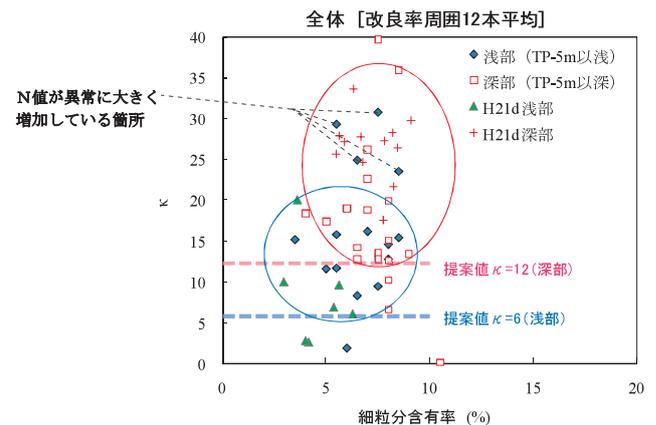


図-3 施工データから算定された設計パラメータ κ と細粒分含有率の関係

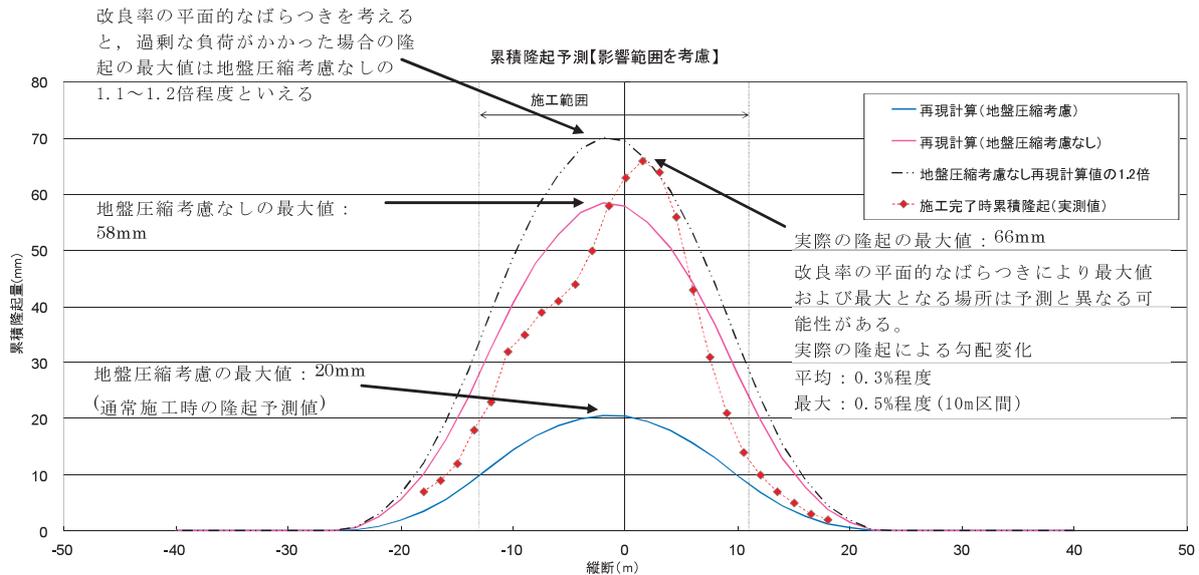


図-5 滑走路縦断方向の再現計算結果および施工時に生じた隆起量

よる地盤改良において効果発現が得られるための最小改良率に基づいて決められており、必要改良率<最小改良率(5%)であることから、地盤改良対象層の設計改良率は5%に設定されている。

したがって、過年度施工実績に基づき効果発現が得られるための最小改良率を引き下げることができれば、設計改良率を引き下げ、地盤への負荷を軽減することにつながる。

過年度工事では、図-4に示す実績改良率で、目標とする改良効果が得られた。したがって、今後もこの実績改良率と同程度の施工を行うことで、目標とする改良効果は得られると考えられる。

T.P. -5m以深(Asd3)において3%程度の改良率 a_s で効果が得られており、最小改良率を引き下げることができると考えられる。そこで、本検討では、実績に基づき、新潟空港におけるCPG工法による地盤改良の最小改良率を浅部(Asd1, Asd2):5%、深部(Asd3):3%と設定した。

3. 施工上の課題への対応策の検討

平成22年度、新潟空港で実施された滑走路液状化対策工事(CPG工法)では、所定の改良効果が得られたものの、以下に示すいくつかの施工上の課題が挙げられた。

- ①CPG工法による地表面(滑走路面)の隆起。
- ②CPG注入ロッドの食い締め。
- ③浅部の低い注入量。
- ④施工範囲で均等に締め固め効果を得るための効率的・効果的な分散施工(施工順序)の考え方
- ⑤低土被り部における口元リーク

ここでは、紙面の都合により①~③の課題に対する対応策について記述する。

表-1 今後適用するCPG施工時の隆起予測方法

CPG施工時の隆起予測式	地盤改良設計法[κ法]を応用した予測法 ¹⁾
隆起予測式で用いるパラメータ	K_{k0} 浅部(Asd1, Asd2):2.5 深部(Asd3):10 最大間隙比(e_{max}):1.151 最小間隙比(e_{min}):0.683 地盤変位の影響範囲:13m
隆起予測の適用方法	
通常施工により生じる隆起	「地盤の圧縮考慮の」隆起予測により推定
施工により生じる最大隆起	「地盤圧縮考慮無し」の隆起予測により推定
土被り(上載圧)や舗装の効果による隆起の低減	見込まずに施工時の隆起予測を行う

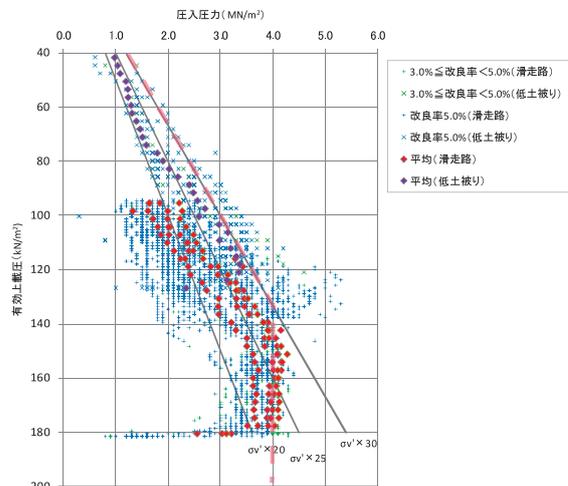


図-6 過年度施工における圧入圧力と有効上載圧の関係

3.1 CPG施工時の隆起予測方法

実績注入量および実績隆起量から地盤の圧縮性を考慮する又は、考慮しないなどにより、再現計算を行い新潟空港におけるCPG施工時の隆起予測法を表-1のように設定した。図-5は滑走路縦断方向における累積隆起量の再現計算結果及び施工時に生じた隆起量を示す。なお、「地盤圧縮」とは地盤条件による締め固め効果を表す。

表-2 新潟空港におけるCPG施工時の管理目標値

3.2 CPG 施工時の圧入圧力管理値の設定

新潟空港のCPG工法による地盤改良における圧入圧力上限値は、当初6MN/m² (MPa) を管理目標値として施工が開始されたが、注入ロッドの食い締めや隆起が施工の障害となった。圧入圧力管理目標値と有効上載圧の関係を図-6に示す。同図より以下のことが理解される。

- ・滑走路液状化対策施工および低土被り再現施工における圧入圧力と有効上載圧の関係から、実績改良率が3.0%以上（注入率60%以上）の時の圧入圧力をもとに圧入圧力上限を設定した（図-6の点線を参照）。
- ・圧入圧力は4MN/m²程度を上限に頭打ちとなっており施工後の等価N値（N_{eq}）が大きくなっても圧入圧力は一定である。

以上より新潟空港においては有効上載圧による圧入圧力上限値を下式の通り設定した。

$$P = 30 \times \text{有効上載圧} \quad (\text{kN/m}^2)$$

ただし、上式による算定値が4MN/m²以上となる場合は、4MN/m²に設定する。

4. 新潟空港における地盤改良仕様の検討

これまでの検討結果に基づき、新潟空港におけるCPG工法の最適な改良仕様について検討した。

2. において設定した設計パラメータκ及び新潟空港における目標N値の考え方に基づき、耐震整備範囲のCPG施工を行う場合の必要改良率を算定した。主な結果として、レベル1地震動とレベル2地震動の必要改良率を比較すると、レベル2地震動の必要改良率の方が大きく、Asd1、Asd2：5%程度、Asd3：1%程度となった。その算定結果及び2. で設定した最小改良率に基づき、新潟空港における液状化対策（CPG工法）の基本改良仕様を以下のように設定した。

杭間隔（平面配置）については、技術マニュアル²⁾では最大で1.7mとされている。一方、新潟空港の過年度施工実績および港湾空港技術研究所が石狩湾新港で行った実大実験により、杭間隔2.0mで改良効果を得られることが確認されているが、杭間隔を2.0mより大きくした場合に、改良効果が得られるかは未確認のため、新潟空港の施工では杭間隔を2.0mと設定した。

※基本改良仕様（改良深度、改良率）

- ・改良深度：T.P. ±0.0～10m（改良対象層厚：10m）
- ・改良率：Asd1、Asd2層：5% Asd3層：3%
- ・杭配置間隔：2.0m（正三角形配置）

5. 管理目標値の検討

CPG工法による地盤改良に伴う隆起に対して管理目標値を設定した。新潟空港B滑走路の縦断勾配が滑走路端部における上限値である0.8%であることを考慮し、管理目標値を以下の考えに基づき、表-2のように見直した。

	管理項目	管理目標値	適用	
施工中	1本あたりの隆起量	10mm	注入ポイント直近のレベル測量	
	累積隆起量	-	施工範囲の隆起予測計算結果に基づき設定	
	勾配	縦断方向	1.0%	境界部の10m区間勾配（既設舗装面を基準とする）
		横断方向 （滑走路中央）	1.5%	滑走路幅の2/3の範囲の平均勾配
		横断方向 （滑走路端部）	1/2勾配	滑走路端部・ショルダー部の平均勾配
平坦性（凹凸の標準偏差）	3.64mm未滿	縦断方向、測線長：施工範囲+15～20m		
施工後	平坦性（わだちぼれ）	38mm未滿	横断方向、施工後の滑走路改良の参考とする	

- ①1本あたりの隆起量：1本あたりの施工による隆起は、路面性状のうち段差（凹凸）にあたるものとして扱う。アスファルト舗装に関して段差の許容値を規定したものはないため、「空港舗装補修要領」（平成23年4月）におけるコンクリート舗装の路面性状評価項目より“段差”の補修要否判定目安から管理目標値を設定する。
- ②累積隆起量：累積隆起量の管理目標値は、施工範囲の隆起予測計算結果に基づき設定する。
- ③勾配：施工期間中の累積隆起により生じる勾配変化は、工事期間中における舗装面のすり付け及び地盤面の処理（「空港土木施設施工要領 第10制限区域内工事実施規定」）に基づき、施工範囲（隆起発生箇所）と未施工範囲との境界の措置（舗装面のすり付け）として扱う。
- ④平坦性：航空機の走行安全性を確保する上では、滑走路路面変状を生じた区間の平坦性は保たれる必要がある。「空港舗装補修要領」（平成23年4月）に従い、アスファルト舗装の路面性状（縦断方向の平坦性）の補修要否判定目安以内に保つことを目標にする。

6. おわりに

本検討では、液状化対策工事実績から基本改良仕様及び管理目標値の見直しを行なった。今後、管理目標値の実際の施工における運用においては、関係機関と調整する必要がある。

本検討にあたり、平成23年度新潟空港技術検討委員会（委員長：井合進・京都大学教授）の委員各位、新潟港湾・空港整備事務所の関係者には、貴重なご意見・ご指導をいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山崎 他：縮固め砂杭工法の杭間縮固め効果に及ぼす細粒分と非排水性の影響，土木学会論文集，No.722/III-61, 2002年。
- 2) (財)沿岸技術研究センター 液状化対策としての静的圧入縮固め工法技術マニュアル，平成19年6月。
- 3) 山崎 他：縮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, 2009。