

新潟空港滑走路液状化対策工事について

小笠原 昭¹・木原 寿明¹

¹新潟港湾・空港整備事務所 新潟空港出張所（〒950-0001 新潟市東区松浜町1-1038）

新潟空港では液状化対策について平成19年度より空港基本施設の検討を行い、平成21年度には地盤改良工の静的圧入締固め工法（以下、「CPG工法」という。）を実施して改良効果を確認した。平成22年度は、平成21年度施工成果を基に、同工法により本格的に滑走路本体範囲で施工を実施した。

本稿は、施工区域が供用中の滑走路であることから運用面より夜間施工の制約を受ける特異な施工条件下のもと、同工法の適用にあたっての施工管理方法・改良効果及び施工上の課題・対応について検証した結果を報告する。

キーワード 液状化対策、CPG工法、空港基本施設、砂質土、改良効果

1. はじめに

近年、地震・津波等による災害が各地で多発しており、地震対策や防災・減災体制の強化などその対応が強く求められている。新潟空港は大規模地震時において緊急物資輸送や人員輸送基地としての役割を担っており、防災拠点空港に位置づけされている。この機能を確保するため、空港基本施設の耐震性の向上に向け、当事務所ではこれまでに関係行政機関及び学識経験者で構成する技術検討委員会を設け検討を進めた。この結果、新潟空港が主として砂質土層からなる埋立地であることから、液状化対策の対象となる施設・範囲としてB滑走路の西側800mを設定した。

耐震整備範囲を図-1に示す。

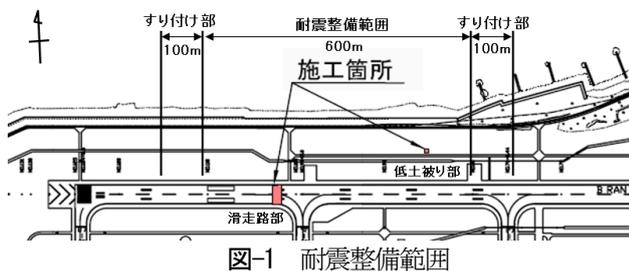


図-1 耐震整備範囲

液状化対策として、滑走路を供用している現状を踏まえた上で直下の地盤を改良する必要があり、適用実績が増えているCPG工法を導入することにした。

CPG工法は、流動性の低いモルタルを地盤に圧入し地盤を締固め「密度増大」することで、原地盤を圧縮強化する工法である。締固め模式図を図-2に示す。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いても容易に貫通し改良を必要とする層だ

けを改良することが出来る。

一方で、CPG工法は現地盤へ固結体を造成するため、地表面に鉛直変位が生じやすい特性があり、滑走路部の隆起に伴って、地表面が変状することが懸念されたため、平成21年度に計測管理を実施しながら、同工法での試験施工を行い、施工手順、改良効果、隆起等について確認した。

本報告は、CPG工法の本格的な適用にあたって、平成21年度に得られた成果を検証するとともに、平成22年度に実施した施工管理方法、改良効果及び施工上の課題・対応について検証した結果を報告する。

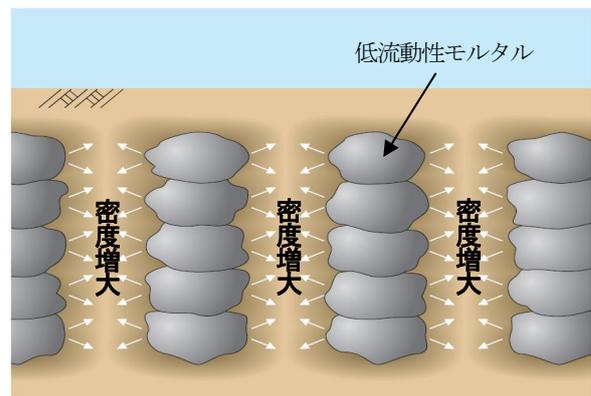


図-2 締固め模式図

2. 新潟空港滑走路液状化対策工事の概要

(1) 平成21年度の施工概要

平成21年度のCPG工法による地盤改良工事の施工概要を表-1に示す。また、地盤改良効果を確認するため、

施工前・施工中・施工後の時期に、目的別に①～③の調査・計測を実施した。

- ① CPG工法による地盤改良効果の確認として、ボーリング・原位置試験、サンプリング、土質試験、動的コーン貫入試験、高密度表面波探査。
- ② 滑走路等施設に与える影響の把握として、地盤の鉛直変位、平坦性、地中変位。
- ③ 周辺地盤に与える影響の把握として地下水水質観測。

a) 改良率及び注入実績

改良率の設定にあたっては、CPG工法のマニュアルでは、8%の改良率が最低改良率と位置づけられているが、マニュアルで設定している地盤条件は、細粒分含有率が10%以上の比較的細粒分が多い地盤の施工事例に基づいて設定されている。

新潟空港の地盤条件は、細粒分含有率が10%以下の細粒分が少ない砂地盤であり、マニュアルの最低改良率8%で設定した場合、過大な改良率となり隆起を誘発する原因となる。

新潟空港と同様の砂地盤である石狩湾新港において改良率5%で試験施工を実施した結果、十分な改良効果が確認された事例を参考にし、暫定的に改良率5%、改良ピッチ2m（正三角形配置）と設定した。また、低改良率に設定することでコスト削減を同時に図ることができる。注入実績は、設計注入量の約64%程度であった。

b) 地盤改良効果

標準貫入試験、動的コーン貫入試験では、N値が事後において約1.8倍増加した。レベル1地震動（供用期間中に発生する可能性の高い地震動）に対する等価加速度—等価N値の関係による液状化判定では、改良後の地盤全てにおいて「液状化しない」と判定された。また、二次元有効応力解析（以下、「FLIP」という。）の結果、レベル1地震動においては、現況地盤で7cm程度の沈下が改良後1.4cm程度に抑制され、改良率5%で液状化対策として十分な効果が確認された。

c) 地盤隆起

改良体が注入されることにより地盤中の圧密が高まり、改良効果が発現する。しかし、注入による改良効果が、原地盤を隆起させるという形で現れることも想定される。

施工箇所が供用中の滑走路であり、限られた時間の中で対策を講じ、翌日の運航に支障がないことを求められる。このため、施工計画の策定にあたっては、隆起管理を目的とした管理目標値（鉛直変位・勾配・平坦性）を定め、リアルタイムで計測を行い管理するものとした。

管理目標値を表-2に示す。

施工の結果、累積の垂直変位は最大1mmであり、また縦断・横断勾配及び平坦性についても基準値内であった。

CPG工法による大きな変状は生じなかった。

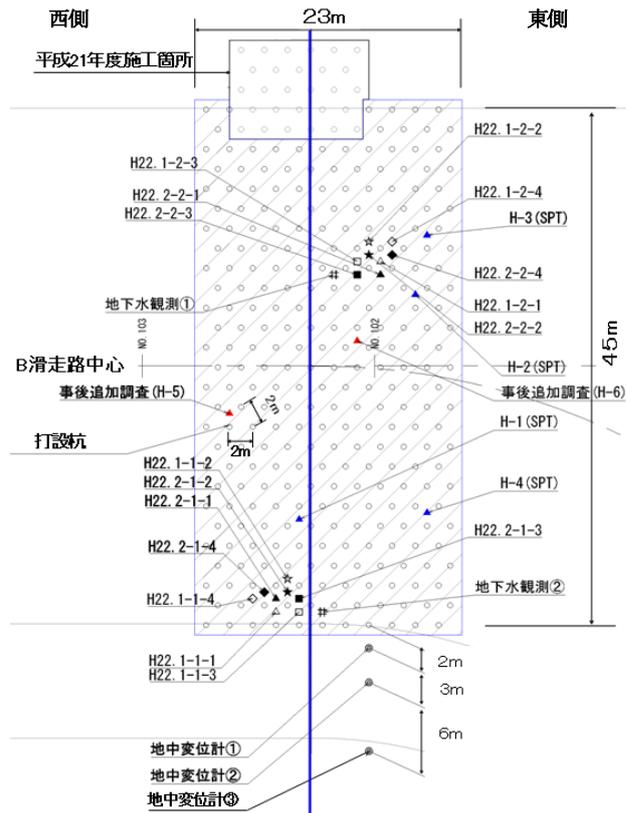
表-1 工事概要

施工年度	平成 21 年度	平成 22 年度
工事場所	新潟市東区松浜町新潟空港内	
施工範囲	12m×約9m	23m×45m
打設本数	28本	286本
地盤高	T.P.約5m	
設計改良率	5%	
改良ピッチ	2m（正三角形配置）	
改良範囲	T.P. ±0.0m～-10.0m	

表-2 管理目標値

管理項目	隆起の管理値			摘要
	管理目標値	一次管理値	二次管理値	
固結体1本当たりの隆起量	5mm	3mm	4mm	
累積隆起量	40mm	20mm	30mm	
勾配	縦断	1.0%	0.9%	測定範囲内1.5mの地点間
	横断	1.5%	1.4%	
平坦性	施工中	3.64mm未満	-	路面の凹凸の標準偏差
	施工後	-	-	

一次管理値: 密な測定頻度による計測管理の強化
 二次管理値: 監督職員への速やかな報告
 管理目標値: 工事中断



凡例

○: 地盤改良工打設杭 (CPG工法)	◇: 動的コーン貫入試験 (PDC) (事前)
△: 標準貫入試験 (事前)	◆: 動的コーン貫入試験 (PDC) (事後)
▲: 標準貫入試験 (事後)	#: 地下水水質観測 (事前、施工中、事後)
☆: サンプリング及び室内試験 (事前)	○: 地中変位計 (施工中)
★: サンプリング及び室内試験 (事後)	—: 表面波探査 (事後)
○: 孔内水平載荷試験 (SBP) (事前)	▲: 標準貫入試験 (施工中確認調査)
■: 孔内水平載荷試験 (SBP) (事後)	▲: 標準貫入試験 (事後追加調査)

図-3 地盤改良工 (CPG工法) 施工箇所及び調査工平面図

(2) 平成22年度の施工概要

平成21年度改良率5%で施工した結果、地盤の鉛直変位がほとんど発生せず、液状化対策として十分な効果が確認できた。しかし、施工本数が28本とデータ数が少なく、十分な検証には至らなかった。このため平成22年度は、本格的に滑走路路上において、前年と同じ施工方法・管理目標値で、施工数量を増やし施工を行った。

また、平成21年度と同様に施工前、施工中、施工後に調査・計測を行い、前頁a)~c)の3項目等について検証を行い、今後の設計・施工管理に反映するべき確認された課題・対応について整理した。

3. 平成22年度地盤改良工(CPG工法)について

(1) 施工方法

工事概要を表-1、施工箇所を図-3に示す。

本工事は、滑走路部直下の10m(TP.±0.0~-10.0m)をCPG工法により地盤改良を行うものである。

改良範囲としては、延長23m、幅45mである。

施工手順について以下に、改良状況概念図を図-4に示す。はじめにボーリングマシンを打設位置にセットし、TP.-10mまで先行削孔を行う。注入当日は、TP.-10mからTP.±0mまで、ロッドを段階的に引き上げながら低流動性モルタルの注入を行い、高さ10mの改良杭を造成していく。なお、施工箇所が供用中の滑走路であるため、先行削孔後及び注入完了後は地盤面に防護キャップの取付けを行う。

施工にあたっては、対象範囲をA~Eの5つのブロックに分割し、各ブロックを滑走路縦断方向に西側、東側に2分割した。滑走路施工範囲のブロック割り、打設順序を図-5に示す。打設順序は、西側、東側それぞれの区画で東→西(図-5の①→②)へと順次施工を進める分散・ローテーションとした。これは、施工範囲が狭いこと、同時打設時の杭間の離隔距離をとる必要があるといった制約条件下で、最も効率的となる打設順序を検討し設定したものである。

現地盤の隆起等の変状を把握するため、平成21年度と同じ管理目標値を設定し、リアルタイムで計測を行った。

万が一、舗装面に変状が生じ、補修等が必要となった場合には、直ちに注入をやめ、周辺の鉛直変位を確認し、復旧作業に着手することとした。

当日の復旧作業としては、簡便な機材で可能な限りの復旧を行うこととし、翌日に本格的な復旧をすることで急遽の復旧対応も実施できるよう対応した。

(2) 改良率・注入圧力の設定

平成21年度の設定と同じ改良率5%、改良ピッチ2m(正三角形配置)と設定した。

注入圧力上限値は、CPGポンプの最大圧力が8MPa

であることを考慮し、平成21年度と同じく6MPaと設定したが、隆起等への対処のため施工途中で変更を行った。

(3) 調査工の概要

調査工平面図を図-3に示す。調査の目的、調査・測定項目は2(1)①~③に示した平成21年度の内容と同様である。

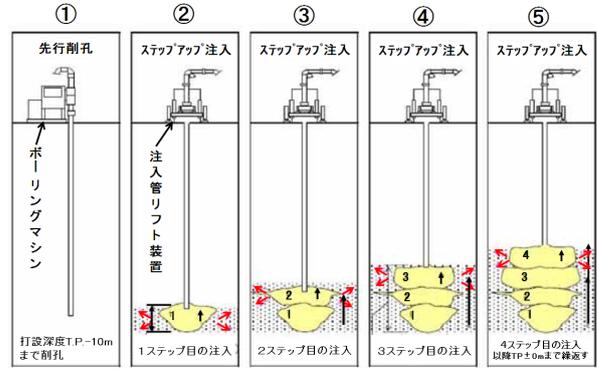


図-4 改良状況概念図

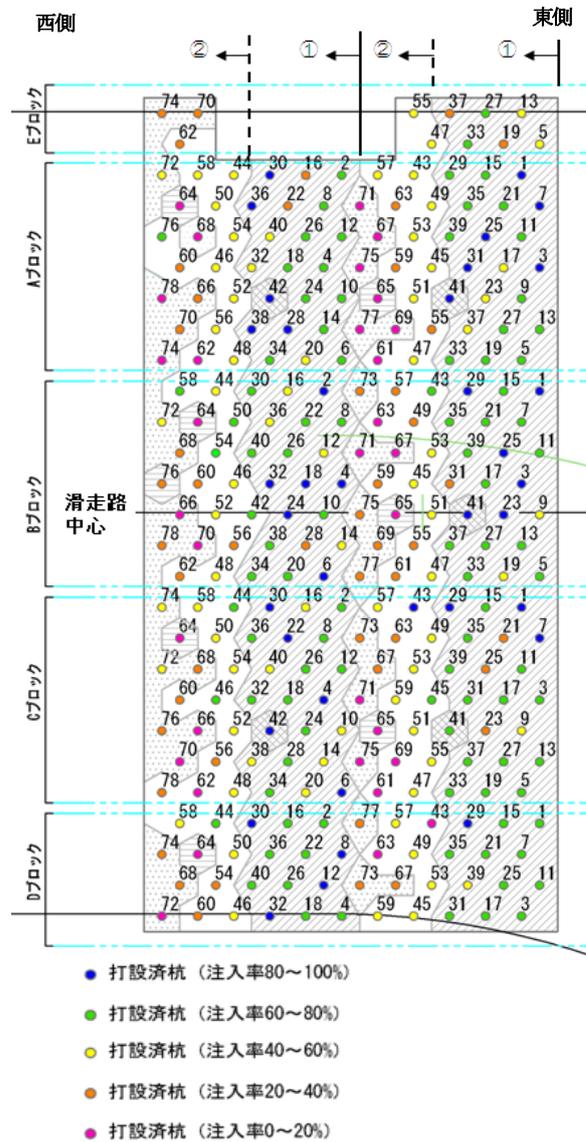


図-5 ブロック割り、打設順序、各地点の平均注入率

(4) 地盤改良効果

a) 原位置試験による検証

標準貫入試験及び動的コーン貫入試験結果を図-6に示す。全ての地点・深度でN値増加が見られた。また、動的コーン貫入試験のNd値も施工後は明確に増加が見られた。

b) 高密度表面波探査による検証

高密度表面波探査の結果を図-7に示す。平成21年度の施工前に行われた探査結果(図-7上図)と平成22年度の施工後の探査結果(図-7下図)より、施工範囲(滑走路部)のS波速度が全体的に大きくなったことが見てとれる。地盤改良により地盤が締め固められたことが示唆される。

c) FLIP及び液状化判定による検証

施工後の結果を用いてFLIPにより地表面の変形解析を行った結果を図-8, 9に示す。

レベル1地震動(供用期間中に発生する可能性の高い地震動)では、現況地盤で7cm程度の沈下を生じていたものが、改良後の地盤では、沈下は1.2cm程度に抑制される結果となった。これは、レベル1地震動において目標とする性能(地震時の沈下5cm以内)を満足する結果であり、平成21年度設計時に想定したシミュレーション解析の結果と同程度であった。

レベル2地震動(想定される地震動のうち、最大規模のもの)では、40cm程度の沈下が生じていたものが、28cm程度に抑制される解析結果となり、設計時の想定と同等の効果が得られた。既設滑走路でも、著しい不等

沈下は生じておらず、解析結果からレベル2地震動においても、極端な勾配の変状は生じないことから、性能規定を大きく逸脱することはないと考えられる。

また、レベル1地震動に対する等価加速度—等価N値の関係による液状化判定では、改良前において「液状化する可能性がある」もしくは「液状化しない可能性が大きい」と判定された土層では、改良後の地盤では全て「液状化しない」と判定された。

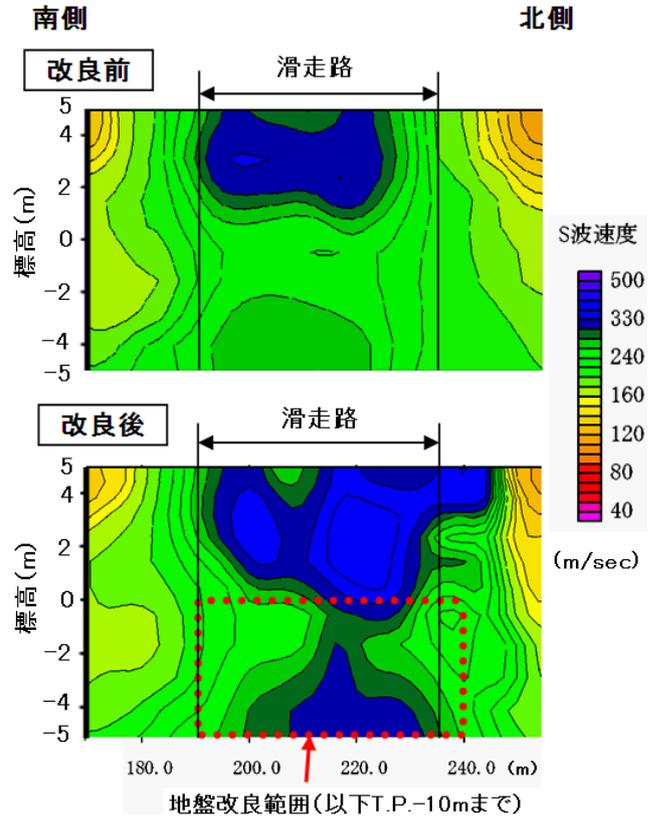


図-7 高密度表面波探査結果(上;施工前, 下;施工後)

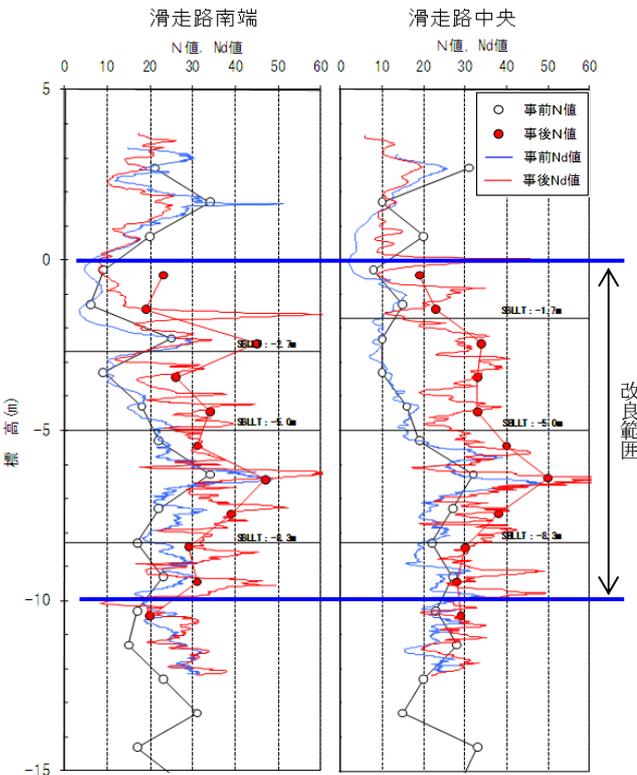


図-6 標準貫入試験・動的コーン貫入試験結果

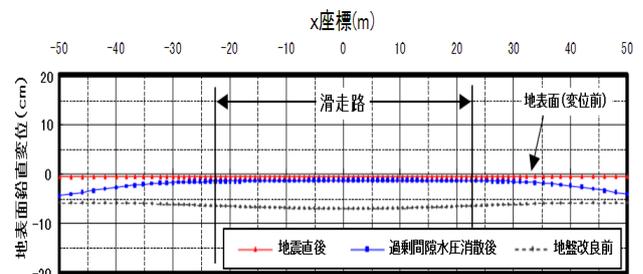


図-8 FLIP解析結果(レベル1)

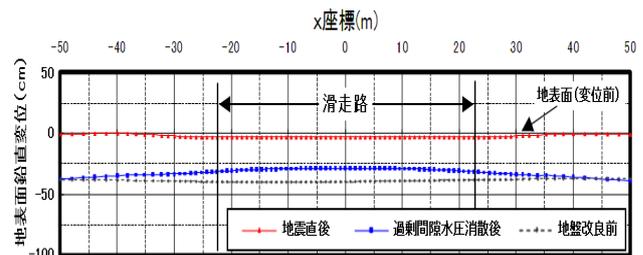


図-9 FLIP解析結果(レベル2)

4.施工上の課題・対応

(1) 地盤の隆起への対応

施工9日目(31地点)までは隆起はみられなかったが、10日目(32地点目)以降の施工から、施工時の隆起が観測された。このうち、施工時に地点隆起が5mmに達した地点は64地点(286地点中)であった。これは、常時観測により地点隆起が施工管理値に達した時点で注入を中止したことによる。なお、地点隆起とはC P G工法による注入により、注入地点の現地盤に生じた隆起を示す。

図-10に全286地点の地点隆起毎の発生頻度を示す。

平成22年度の地点隆起の最大値5mmは、予測される隆起量最大2mm程度に比べ非常に大きい。ただし、全地点による平均地点隆起量は2.4mmと、予測隆起量を若干上回る程度であった。

隆起発生深度と地点隆起量の関係を図-11に示す。

施工中の隆起発生深度は、平均T.P.-3m付近で、最も深いものはT.P.-6mであった。最初の隆起が深い場所で発生するほど、地点隆起の総量は大きくなる傾向が見られた。

施工の進捗との関係を見ると以下の傾向が示される。施工前半では地点隆起の上限に達した地点は150地点中23地点であり、それほど顕著な隆起は発生していない。施工中盤では82地点中57地点で地点隆起の上限に達しており、施工のほとんどで大きな地点隆起が見られた。

この要因として、施工進捗による周辺拘束等が考えられる。

(2) 注入率・注入圧力

深度別の平均注入率及び平均注入圧力を表-3に示す。

全286地点の注入率は平均約55%であった。施工の進捗に従い注入率は低下し、特に施工後半ではT.P.-5m以深での注入圧力が上限値に達したため、注入率が20%を下回る地点が多数見られた。

注入圧力は、浅部では1~2.5MPa、深部では3~4MPa程度であった。注入圧力は、土被り(有効上載圧)に応じて浅くなるほど小さくなる傾向を示した。

なお注入圧力は、施工の進捗に伴い発生した隆起等に対処するため、施工中盤(286地点中156地点目以降)から、圧力上限値の引き下げ(4MPa以下)を行った。

(3) 注入率のばらつき

打設地点の平均注入率の分布状況を図-5に示す。

施工の進捗に伴い徐々に地盤が締め固まるため、低い注入率が後半の施工範囲に多く分布する結果となった。

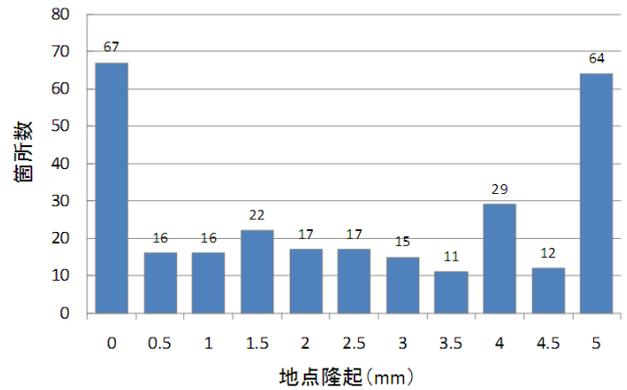


図-10 地点隆起の発生頻度

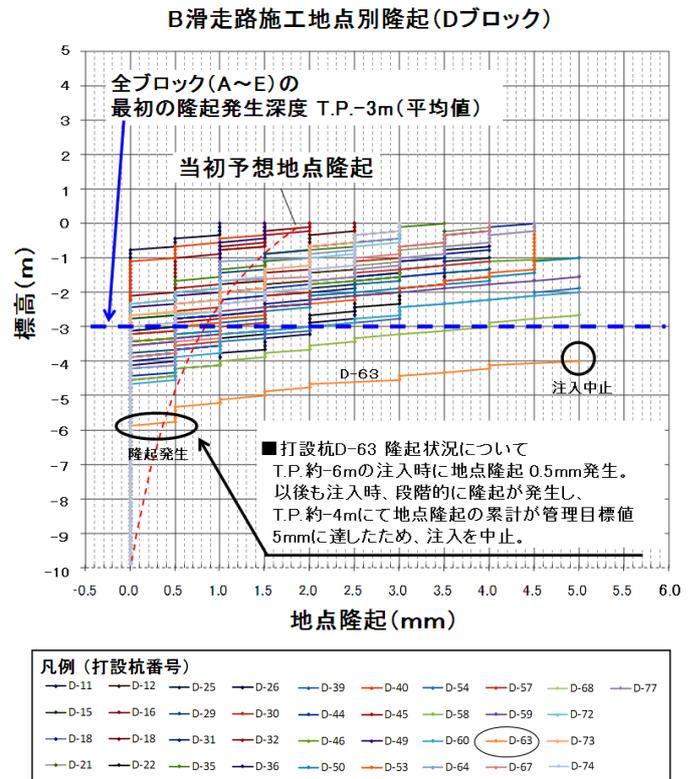


図-11 施工深度と隆起の関係

表-3 深度毎の平均注入率・平均圧力

標高 TP(m)	平均注入率 (%)	平均圧力 MPa
0~-1	49.9	2.0
-1~-2	63.6	2.3
-2~-3	74.9	2.6
-3~-4	74.1	3.0
-4~-5	66.7	3.2
-5~-6	39.5	3.5
-6~-7	33.5	3.7
-7~-8	39.2	3.8
-8~-9	42.1	3.7
-9~-10	65.1	3.3

5.考察及びまとめ

(1) 地盤改良効果について

改良効果として、標準貫入試験、動的コーン貫入試験でN値が増加し、レベル1地震動に対して全地盤で「液化化しない」と判定された。また、高密度表面波探査においても施工範囲の地盤が締め固められたことが確認出来た。なお、端部の探査結果は、無対策の周辺地盤の影響を受けて低めの結果となったものと考えられる。

地表面の変形解析においては、レベル1及びレベル2地震動ともに目標を満足する結果が得られた。

(2) 施工上の課題・対応について

a) 施工時の地盤の鉛直変位(隆起対策)

平成22年度施工時の平均注入率と施工前後のN値の深度分布を図-12に示す。

平成22年度の施工では、40%程度の少ない注入率(改良率換算2%)で5%改良時と同程度のN値増加が得られた。平成21年度の結果も同様の結果を示しており、T.P.-5m以深では注入率が低くても、ある程度のばらつきはあるが、N値増加が得られることが示された。

地盤の鉛直変位については、予想を上回る地点隆起が生じた。詳細なメカニズムは明らかになってはいないが、締め固まった地盤に過度の注入量、注入圧力がかかったことで、地盤に対する負荷が大きくなったためと考えられる。また、最初の隆起が深い場所で発生するほど、地点隆起の総量は大きくなる傾向も示された。

T.P.-5m以深の地盤にこれ以上の改良率を付与することは、地盤に過剰な負担をかけることになり、隆起発生を引き金になり得る。今後、このような地盤への負荷を軽減するため、T.P.-5m以深の改良率の引き下げが可能か検討する必要があると思われる。

b) 注入率のばらつき(均等な改良の対策)

平成22年度の施工では片押し施工となった。施工後のチェックボーリングの結果、対象地盤全体でN値の増加が見られ、改良効果は一様に得られたと評価されたが、平面的には注入率が後半の施工エリアに偏在する結果となった。

地盤改良による液化化対策は、N値等で示される地盤の強度を増加させることが求められるが、平面的なばらつきを少なくし、施工範囲全体が一様に強くなることも重要である。施工エリア及び分散施工の設定にあたっては、同日施工箇所の離隔距離、箇所当りの施工サイクル、1プラント毎に理想的・効率的な施工が可能な施工エリアの確保など、詳細な施工方策の検討(シミュレーション)を行う必要がある。

また、施工時に発生した現象としてジャミング、ロ元リークがある。ジャミングとは、注入時に地中のロッドが上昇困難となる現象で、施工中の孔壁崩壊が原因と考えられる。ロ元リークは注入中に、改良材の一部が注入口から地上へ吐出する現象である。両現象とも改善のための対応を行ったが、完全な防止は図れず今後課題が残った。

6.おわりに

今回の施工を終えて、懸念された地盤の鉛直変位(隆起)は管理目標値に達するケースが多く、昨年の最大隆起1mmとは大きく異なる結果となった。鉛直変位が生じやすいC P G工法の特徴が表れた状況であるが、供用中の滑走路における施工であり、円滑に空港を供用するために、今後も鉛直変位等リアルタイムでの計測をはじめとした施工管理を徹底していきたい。

未施工箇所については今後、より低土被りでの施工箇所へ移行していく。このため、低土被りの地盤条件等を考慮した施工管理方法の検討も進めていきたい。

また、地盤改良効果は確認されたものの平成22年度の施工の結果、地盤の隆起対策、注入率の向上、均等な改良、ジャミング、ロ元リーク対策など残された課題については、今後の施工結果も踏まえ、対応策の実施及び検証を図り、新潟空港における適切な施工管理方法の確立に努めていきたい。

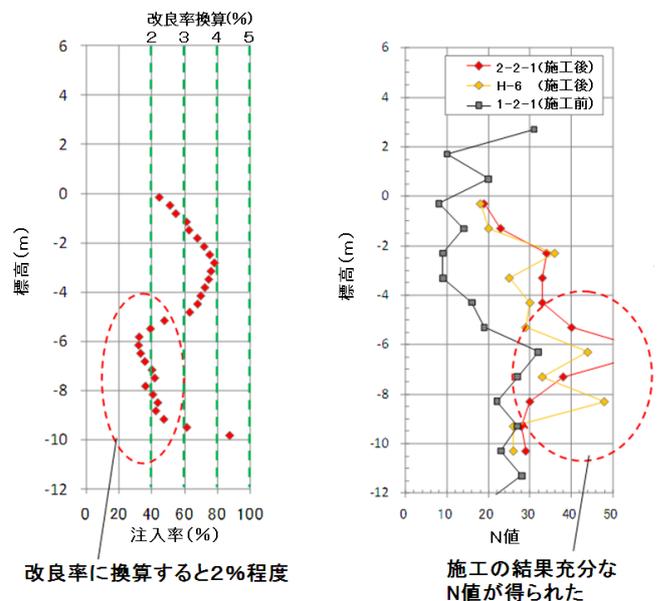


図-12 平成22年度平均注入率とN値の増加の深度分布