

# 第 8 回空港技術発表会

## 人工液状化実験における CPG 施工による液状化対策について

独立法人 港湾空港技術研究所

菅野 高弘 中澤 博志

静的圧入締固め工法 (CPG 工法) 研究会

足立 雅樹 原田 良信

### 1. はじめに

静的圧入締固め工法 (略称: CPG 工法) は、流動性の極めて低い注入材を、振動や衝撃を加えずに地盤中に圧入することにより、周辺地盤の密度を増大させる工法である。この工法は、周辺環境への影響が少なく、機械設備もコンパクトであることから、供用中の空港に対する液状化対策工法としても適用されている。

平成 19 年 10 月に、石狩湾新港において大規模な人工液状化実験が行なわれた。この実験は、発破による衝撃力で液状化現象を再現したもので、周辺構造物や地盤の挙動を確認することにより、液状化対策の効果を把握することができるものである。今回の実験では、「コスト削減」を検討課題のひとつとして行われており、設計で必要とされる改良幅の見直しと、固結体配置の設計基準 (最低改良率および配置間隔の範囲) の見直しを行った。

本報告は、CPG 工法の概要、空港での施工事例、および人工液状化実験の速報を示すものである。

### 2. CPG 工法の概要

CPG 工法は、一般に土木で用いられる注入工法の 1 つであるが、地盤改良の原理が全く異なるメカニズムになっている。図 1 は注入形態の比較を示している。セメント系注入では地盤にセメントグラウトが脈状に固結し、薬液注入では土粒子間へ注入材が浸透固結する。ジェットグラウトでは固化材と土粒子を高圧噴射により強制的に攪拌混合しソイルモルタル状の固結体を形成する。これに対して CPG 工法は極めて流動性の低い注入材 (スランプ値 5cm 以下) を地盤中に注入して固結体を造成し、この固結体による締固め効果で周辺の地盤を圧縮強化する。従って、同じ注入工法による地盤改良ではあるが、その改良原理が他の注入工法は「固化」なのに対し、CPG 工法は「密度増大」であり全く異なっていることがわかる。図 2.2 は、CPG 工法により形成された固結体が周辺地盤を圧縮強化する様子を模式図で示したものである。図 2.3 は、CPG 工法による地盤

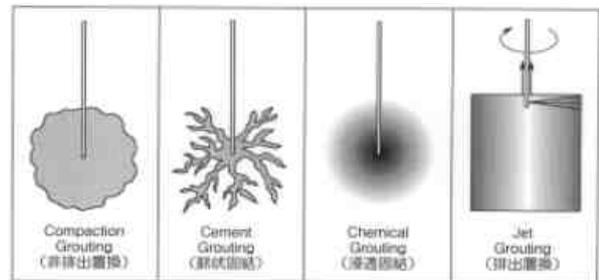


図 2.1 注入形態比較

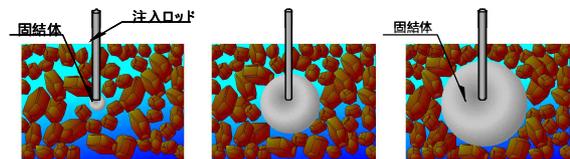
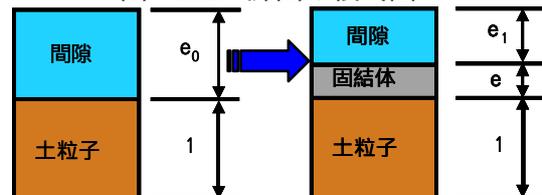


図 2.2 締固め模式図



体積 (  $1 + e_0$  ) の地盤に  $e$  に相当する固結体を注入し密度を増大

図 2.3 改良原理

改良の基本的な考え方を示している。原地盤の間隙比を  $e_0$  としたとき、 $(1 + e_0)$  の体積の地盤に  $e$  に相当する固結体を注入して密度を増大させる。

図 2.4 に CPG 工法の施工概要図を示す。主な施工機械は、発電機、CPG プラント、CPG ポンプ、流量圧力監視装置、注入管リフト装置、ボーリングマシンである。

図 2.5 に CPG 工法の施工手順を示す。ボーリングマシンにより注入ロッドを用いて所定深度まで削孔後、ボーリングマシンから注入管リフト装置にセットしなおして下から上へ注入するボトムアップ方式により注入を行う。削孔工程と注入工程が別々に行えるため、先行して削孔を行うことができる。注入ステップは 1 ステップ 33 cm を標準とする。

CPG プラント 1 台で 2 台のポンプが運用可能である。比較的コンパクトな設備であり、無振動、低騒音であるため、構造物直近、直下、狭い場所での施工が可能である。小口径ロッド（内径 50mm）により削孔を行うため、硬質な地盤が存在しても施工が可能である。土層に応じた注入量や、施工ピッチを設定できる。

CPG プラントはトレーラー車上に搭載可能である。CPG ポンプは、敷地内において、けん引による移動が可能である。この点を利用して、空港滑走路下の液状対策による改良実績がある。次にその実施例を示す。

### 3. 空港での施工事例

東京国際空港 CPG 工法施工状況を写真 3.1 に示す。東京国際空港新 B 滑走路では、大規模地震に備えて耐震強化施設と位置づけてサンドコンパクションパイル（SCP）工法による地盤の液状化対策を実施している。新 B 滑走路の中で、供用中の新 A 滑走路との交差部は、航空機を運用しない間の夜間工事となるため、大きな削孔を伴う SCP 工法では翌朝の復旧が困難であり、現実的に用いることができなかった。これに対し、CPG 工法は、先に記した通り、比較的コンパクトな設備であり、車上に載せ移動が可能であった。そのため、夜間工事であってもすば

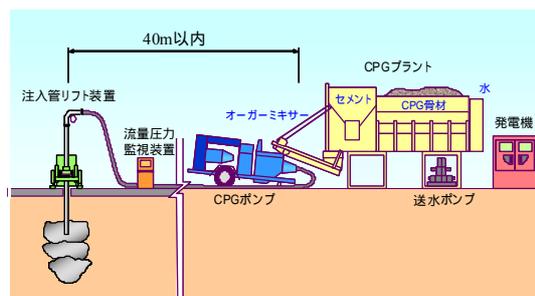


図 2.4 施工概要図

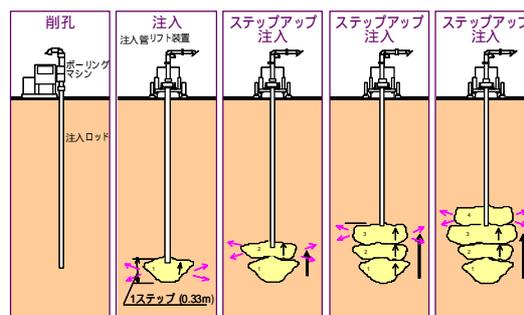


図 2.5 施工手順



写真 3.1 東京国際空港施工状況



写真 3.2 舗装防護キャップ

やい搬入、撤去ができた。また、CPG 工法は、小口径ロッドを用いて削孔工程と注入工程が別々に行えるため、先行して削孔を行うことができた。この点から、あらかじめ舗装に注入のための孔を設け、防護キャップ(写真 3.2)により養生することで、施工後直ぐに飛行機の離発着が可能となった。これらの点で供用中の滑走路で CPG 工法が採用された。

図 3.1<sup>1)</sup>に東京国際空港での改良前後の N 値の一例を示す。改良後 N 値は改良前 N 値よりも増加し改良効果が確認された。

図 3.2<sup>2)</sup>加筆修正に東京国際空港での改良前・後の N 値と孔内水平載荷試験(セルフボーリングタイプ)により得られた K 値(=  $h' / v'$ 、 $h'$ : 有効水平応力、 $v'$ : 有効鉛直応力)の関係を示す。改良前 K 値は 0.5 程度であったが、改良により 1.0 以上に増加し、1.5 年、さらに 3 年経過後も K 値は 1.0 以上を維持している。

図 3.3<sup>3)</sup>に等価加速度と等価 N 値による液状化判定を示す。これにより 74 箇所中 4 箇所を除いての領域(液状化しない)であることが確認された。そこで、以下の領域と判定された結果についてのみ繰返し三軸試験による液状化判定を行った。 $F_L$  は以下の式を用いた。

$$F_L = R_{max} / L_{max}$$

$$R_{max} = (0.9/C_K) \times (1 + 2K_0) / 3 \times R_{L20}$$

$$L_{max} = d_{max} / c'$$

- ここで、 $R_{max}$  : 液状化強度比  
 $L_{max}$  : 地震時最大せん断応力比  
 $C_K$  : 換算係数 (= 0.55)  
 $K_0$  : 静止土圧係数  
 $R_{L20}$  : 液状化強度  
 $d_{max}$  : 地震時最大せん断応力  
 $c'$  : 有効拘束圧

現場で得られた  $K_0$  はおおむね  $K_0 = 1.0$  であったことから、 $K_0 = 1.0$  の場合の液状化安全率と深度の関係を図 3.4<sup>3)</sup>に示す。これより、改良前は地盤全体で液状化する ( $F_L < 1.0$ ) 結果となった。改良後は地

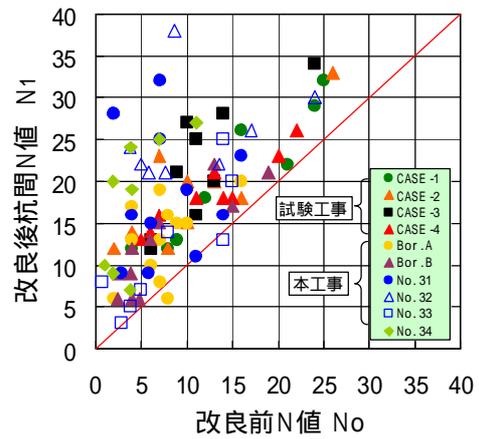


図 3.1 改良前後 N 値<sup>1)</sup>

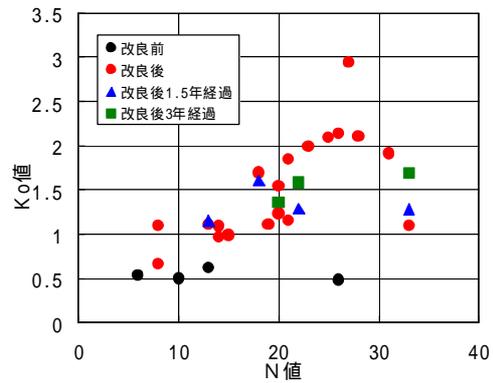


図 3.2 K 値と改良 N 値<sup>2)</sup>加筆修正

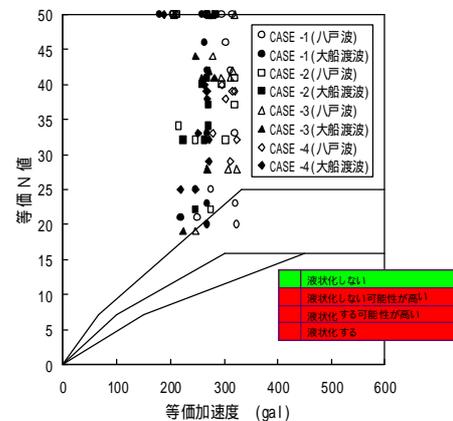


図 3.3 等価加速度と等価 N 値による判定<sup>3)</sup>

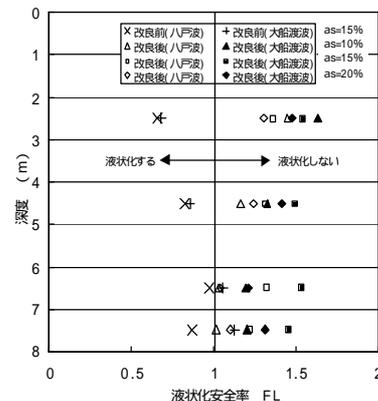


図 3.4 改良前・後の液状化安全率( $K_0=1.0$ )<sup>3)</sup>

盤全体で液状化しない結果となった。

## 4.人工液状化実験

### 4.1 改良仕様及び施工状況

本実験は発破による人工液状化の抑制効果を確認することを目的とし、コストを削減させること、必要とされる改良率を確認すること、液状化を緩和する余改良域の範囲について検証することに着目した。コスト削減は、従来設計施工ピッチ 1.7m の正三角形配置を 2.0m とした。必要とされる改良率の確認は、最低改良率 8% を 5% とした。余改良域の範囲は、改良深度から 30° 勾配の範囲と設定した。施工ピッチ 2.0m で改良率 5% を換算改良径にすると約 41cm の改良体が形成されることとなる。

図 4.1 に人工液状化実験施工位置図を示す。施工は の舗装内部の CPG(B-1) エリア(写真 4.1) と、のエプロン・進入灯部(写真 4.2)で行った。施工能率上ラフテレーンクレーンを常駐させた。通常の空港滑走路下部の施工では、ユニック車でボーリングマシンや圧入管引き上げ装置を移動させる。CPG 注入材は、スランプ値 5cm 以下で管理した(写真 4.3)。図 4.2 に CPG(B-1) エリア施工図面を示す。図 4.2 の実改良範囲は、塗潰し青丸、余改良範囲は白抜き赤丸の部分である。図

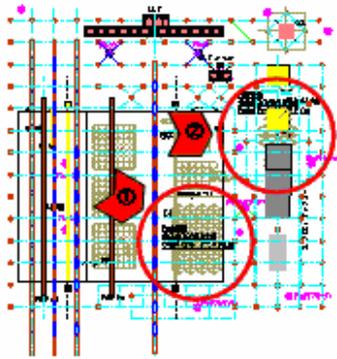


図 4.1 人工液状化実験施工位置



写真 4.1 CPG(B-1) エリア施工状況



写真 4.2 エプロン・進入灯部施工状況



写真 4.3 CPG 注入材練りあがり状況

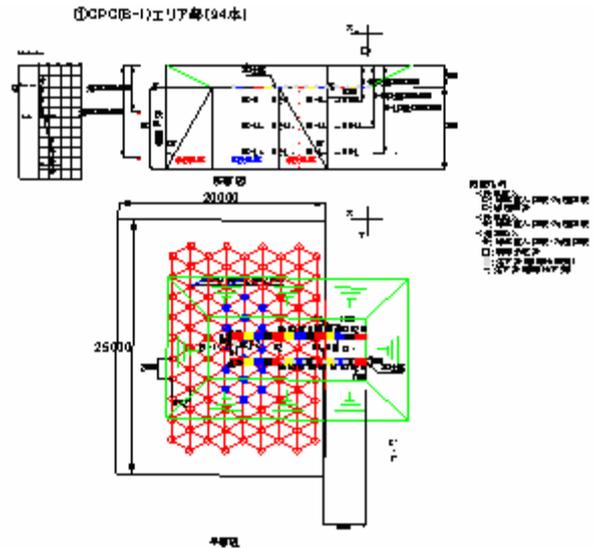


図 4.2 CPG(B-1) エリア施工図面

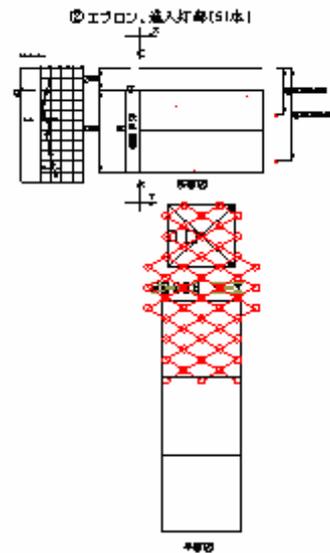


図 4.3 エプロン・進入灯部施工図面

4.3 に エプロン・進入灯部施工図面を示す。

### 4.2 圧入状況

CPG 工法により発生した代表断面の圧入圧力深度マップを図 4.4 に示す。数値の単位は MPa である。

圧入圧力深度マップでは、おおよそ、GL -6.0m より浅い部分は 1.5MPa 未満(白塗り)、GL -6.0m ~ -8.0m までは 3.0MPa 未満(黄色塗り)、GL -8.0 ~ -10.0m では 4.5MPa 未満(水色塗り)となり、事前 N 値の大きさや改良深度が深くなる毎に圧入圧力が上昇する傾向がみられた。

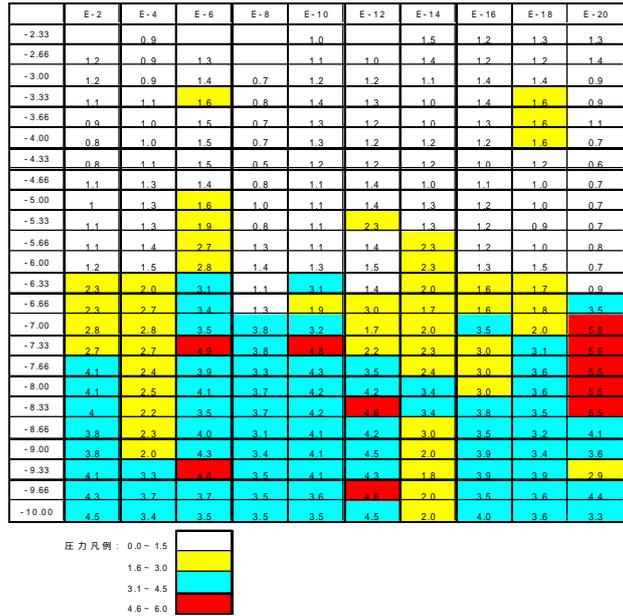


図 4.4 圧入圧力深度マップ (単位 MPa)

### 4.3 標準貫入試験

改良前・後の標準貫入試験を舗装部

CPG (B-1) エリアで行っている。標準貫入試験位置を図 4.5 に示す。黒丸の塗潰し箇所が試験位置である。改良後の標準貫入試験は、固結体間で行った。調査位置は、改良前後近郊した場所で行っている。設計 N 値と改良前後の標準貫入試験結果を図 4.6 に示す。赤線のプロットは、改良前のボーリングデータにより、N 値、細粒分含有率、から施工ピッチ 2.0m 改良率 5% と設定した時の設計 N 値である。CPG 改良範囲では、GL-4.0 ~ -5.0m を除き、改良後の N 値は設計 N 値同等以上であった。改良後の N 値は改良前の N 値の約 2 倍近く大きくなり、改良効果が確認された。GL-4.0 ~ 5.0m に関しては、粒径が細かったことが確認されているため、N 値の増加が思わしくなかったと思われる。

今後、人工液状化後の標準貫入試験を行い、N 値の変化を確認する。

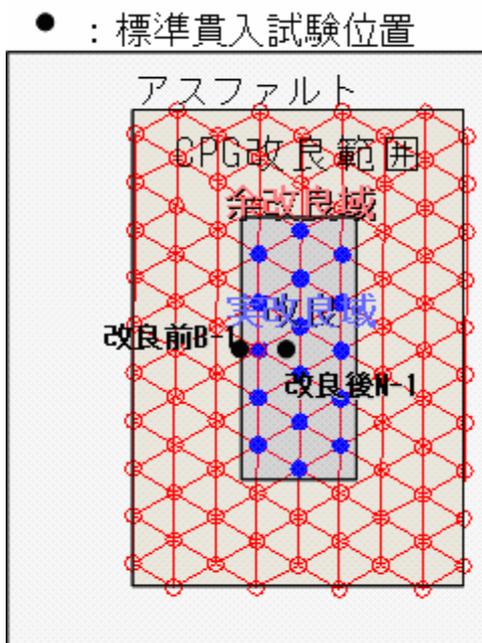


図 4.5 標準貫入試験位置図

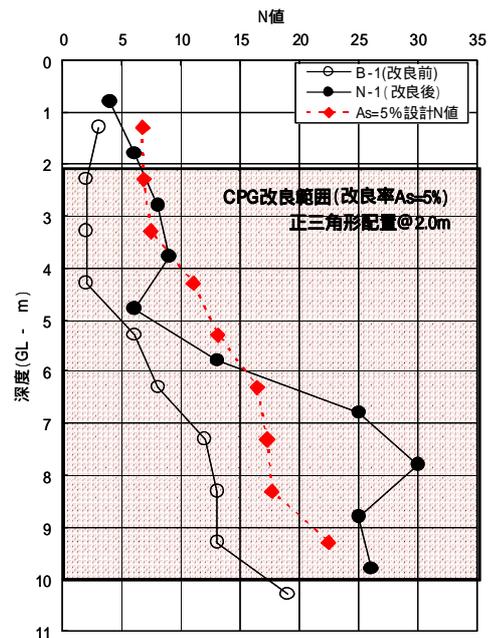


図 4.6 設計 N 値と標準貫入試験結果

#### 4.4 地表面変位

舗装部については、5メートルピッチでメッシュ状に、人工液状化後の事前、発破直後、1日後、3日後、7日後の地表面沈下量を計測している。図 4.7 に地表面沈下計測位置を示す。図 4.8 に舗装上の代表断面として、8行目断面の5メートルピッチでの計測結果を示す。図 4.9 はCPG改良中心部、実改良端部、余改良端部の計測結果を示す。また、比較のため図 4.10 に未改良部の計測結果を示す。

未改良部、CPG改良部共に、3日程度で沈下が収まっていることがわかる。未改良部は、200～300mmの沈下が発生していることがわかる。CPG改良範囲は、改良中心、実改良端部で20mm以下の沈下量、余改良端部で約60mmの沈下量となった。未改良部と比べて実改良部では、約1/10、余改良端部では約1/5の沈下量の差が確認され、改良部と未改良部では、明らかな沈下量の差が確認された。

改良上端部、下端部の沈下量については、解体掘削時に計測する。

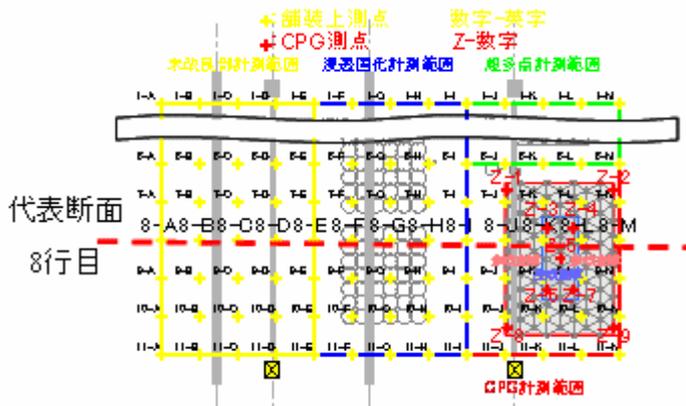


図 4.7 舗装部地表面計測位置

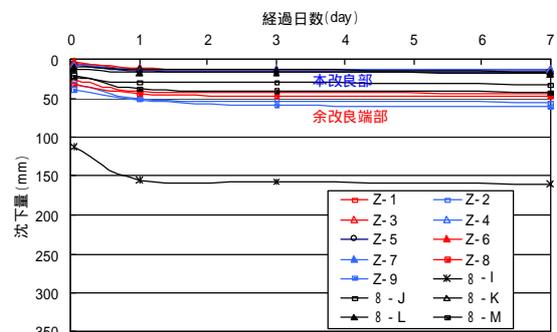


図 4.9 CPG改良部計測結果

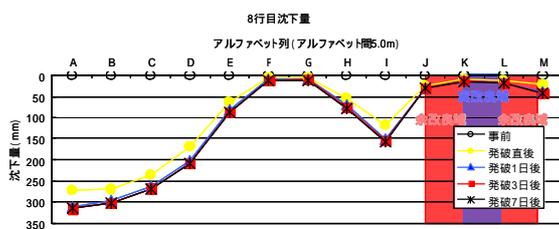


図 4.8 8行目断面計測結果

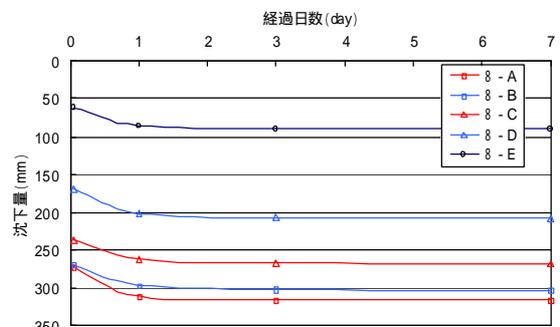


図 4.10 未改良部計測結果

#### 4.5 計測器による計測

写真 4.4 に計器設置状況を示す。計器類は、GL -2.0mまで掘削して設置した。

3成分加速度計、間隙水圧計の他に、改良下端部用沈下杭、色砂を設置した。これらは、人工液状化後に再度掘削を行い計測及び確認を行う予定である。色砂は、色別に等間隔に配置することで、人工液状化による沈下や、側方移動の確認を行う。



写真 4.4 計測器設置状況

舗装部は、CPG(B-1)エリアに計測器を設置している。図 4.11(a)(b)に計測器設置位置概略図を示す。

人工液状化発生時に発生する加速度を計測するため、GL-2.0mの深度に3成分加速度計を設置した。配置は、改良範囲内上端部、未改良部に設置した。また、人工液状化時に発生する水圧を計測するために、GL-3.5m、GL-6.0m、GL-8.5mの3深度に間隙水圧計を設置した。実改良域、余改良域、舗装との境界部、未改良部に設置した。データは過剰間隙水圧値を有効上載圧で除した過剰間隙水圧比に換算し、液状化現象の発生状況を確認した。

加速度は、X方向、Y方向は、加速度の変化は確認できなかったが、Z方向で、未改良部最大約22.0G、改良部最大約5.0Gを確認した。

図 4.12(a)(b)に過剰間隙水圧値を有効上載圧で除した過剰間隙水圧比グラフを示す。

図 4.12(a)に着目すると、未改良部は、GL 3.5m、GL 6.0m、GL 8.5mのいずれの深度で急激に過剰間隙水圧比が1.0付近に達したことが確認できた。これに比べ実改良部では、未改良部に比べ急激な過剰間隙水圧比の上昇は確認されなかった。GL 3.5mでは最大約0.7、GL 6.0mでは最大約0.9、GL 8.5mでは最大約0.8となった。過剰間隙水圧比が0に収束する時間は未改良部、改良部共にほぼ同時であった。

図 4.12(b)に着目すると、余改良部においても未改良部に比べ急激な過剰間隙水圧比の上昇は確認されなかった。余改良部でもGL-3.5mについては、最大0.8付近、GL 6.0mでは最大約0.9、GL 8.5mでは最大約0.8まで上昇した。

GL-3.5mのみ、実改良部(青)と余改良部(緑)で過剰間隙水圧比の最大値に差が生じた。深度方向から30度が液状化を緩和する範囲を考えると(図 4.11(b))このGL-3.5mの余改良(緑)の影響範囲はこのライン付近であることがわかる。余改良の範囲については、今後の調査や計測データを分析して検証する必要がある。

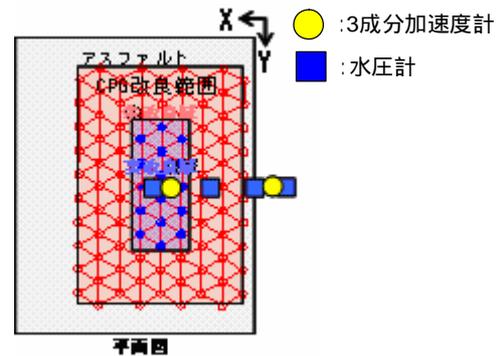


図 4.11(a) 計測器設置位置概要図

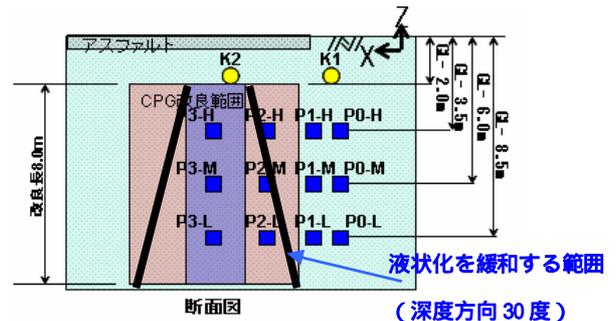


図 4.11(b) 計測器設置位置概要図

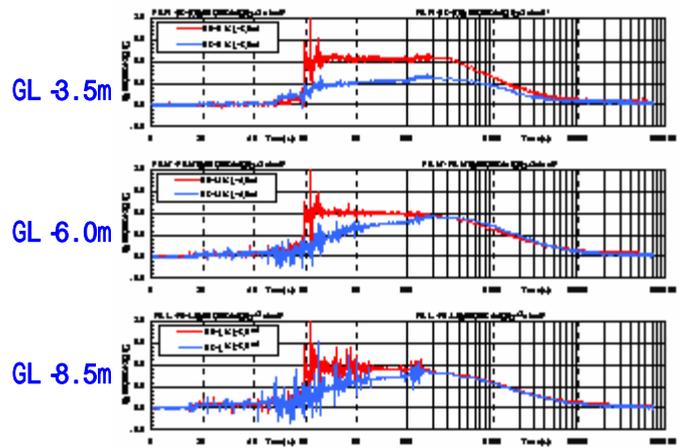


図 4.12(a) 過剰間隙水圧比 未改良(赤)実改良(青)

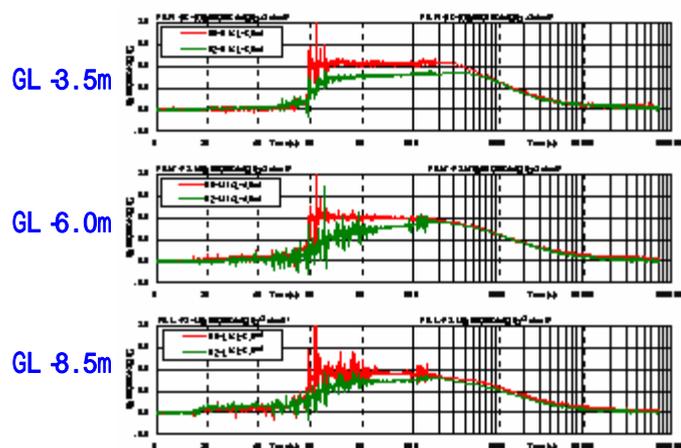


図 4.12(b) 過剰間隙水圧比 未改良(赤)余改良(緑)

## 5.まとめ

人工液状化実験における CPG 工法の効果確認により、以下の結果が得られた。

- 1) 改良前の N 値は改良後の N 値の約 2 倍近く大きくなり、改良効果が確認できた。
- 2) 舗装上の地表面沈下は、未改良部に比べ実改良範囲で 1/10、余改良範囲で 1/5 となり、液状化による沈下を抑制した。
- 3) 改良部では、未改良部に比べ急激な間隙水圧比の上昇はなく、値も小さかった。

今後は、人工液状化発生後の地盤調査を行う。また、改良上端部まで掘削を行い、埋設した色砂、沈下杭の変位状況を確認する。これらの調査結果や計測器データを解析することで、改良効果や、余改良範囲の検証を行う。

### 参考文献

- 1) 足立・善・加藤・宮間・大沢：コンパクショングラウチングの液状化対策効果（第 2 報）,第 35 回地盤工学研究発表会, pp.2223 ~ 2224, 2001.6.
- 2) 佐藤・善・山崎・八木橋・小西・菅野：コンパクショングラウチングの液状化対策効果（第 3 報）,土木学会 57 回年次学術講演会, pp.159 ~ 160, 2002.9.
- 3) 足立・八木橋・松下・山本・菅野・井上・小西・大沢：液状化対策としてのコンパクショングラウチングの施工事例,第 4 回地盤改良シンポジウム, pp.149 ~ 154, 2000.11.