

## 既設構造物直下への静的圧入締固め工法の適用

善 功 企・大 沢 一 実・足 立 雅 樹

静的圧入締固め工法（CPG工法）は、流動性の極めて低い注入材を地盤中に静的に圧入して、固結体を連続的に造成することによる締固め効果で周辺地盤を圧縮強化する工法である。主として地盤の液状化対策、沈下修正および空洞の充填として用いられる。本工法は、以下の特長を有している。

- ① 無振動・低騒音である
- ② 小型機械のため既設構造物周辺や内部などの狭い場所でも施工が可能である
- ③ 車載化が可能であり機動性が良い

本報文では、さまざまな既設構造物直下に、上記特長を有する施工機械を用いてCPG工法を適用した施工事例について示す。

キーワード：既設構造物，静的圧入締固め，液状化対策，沈下修正，空洞充填

### 1. はじめに

静的圧入締固め工法（以下、CPG工法と略す）は、米国で開発され、当初は、舗装版の沈下修正に使われていた。

近年、流動性の低い材料を注入する機械設備や施工技術が改善されたことにより施工の適用範囲が拡大され、不同沈下した建築構造物の沈下修正や空洞の充填に利用されている。

さらに、最近では周辺地盤を静的に圧縮強化する特長を生かして既設構造物の液状化対策の実施例が増加している。

本報文は、既設構造物直下にCPG工法を用いた液状化対策、沈下修正および空洞の充填事例について述べる。

### 2. 工法の概要

#### （1）CPG工法<sup>1)</sup>

CPG工法は、流動性の極めて低い注入材を地盤中に静的に圧入して、固結体を連続的に造成することによる締固め効果で、周辺地盤を圧縮強化する工法である。その特長は、以下の通りである。

- ① スランプの極めて小さい低流動性材料を使用するため地盤に浸透することなく、ほぼ計画通りの

場所に固結体を形成できる。つまり、砂と粘土のような互層からなる複雑な地盤では改良が必要な砂層のみを改良（中抜き施工）することが可能である。

- ② 計画位置に注入された注入材は、周辺地盤を静的に圧縮し、密度を高めて、地盤を強化する。
- ③ 小型機械のため、既設構造物周辺、構築物内部等の狭い作業場所でも、現状維持のままで施工が可能である。
- ④ 施工機械の車載化が可能であることから機動性が良い。
- ⑤ 無振動、低騒音のため市街地、住宅地でも作業が可能である。

#### （2）主な使用機械

主な使用機械は、以下に示す通りである。

削孔について、外径φ73mmのロッドによるボーリングマシン（写真—1）を使用する（アスファルト舗装の削孔が必要な場合は、φ100mmのコアドリルを使用）。

注入については、注入管リフト装置（写真—2）、注入ロッド、ロッド引抜き用ジャッキ、特殊注入ポンプ（写真—3）および特殊注入プラント（写真—4）を使用する。



写真一1 ボーリングマシン



写真一3 特殊注入ポンプ



写真一2 注入管リフト装置



写真一4 特殊注入プラント

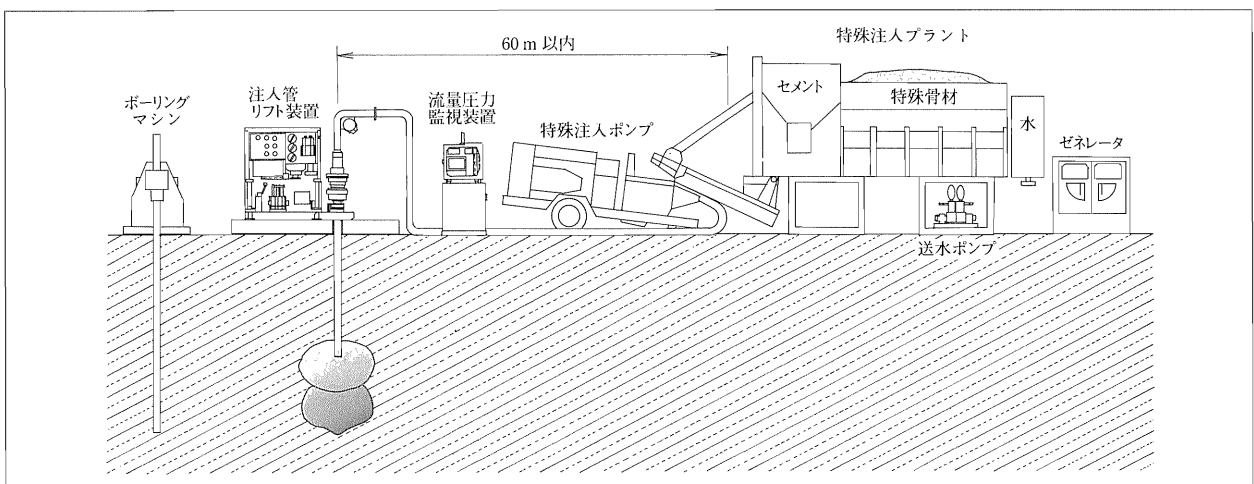
(3) 施工方法 (注入方法)

CPG 工法の施工システムを、図一1 に示す。

まず、ボーリングマシンにより削孔を行う。その後、注入は、特殊注入プラントで作られた流動性の極めて小さい注入材料を特殊注入ポンプにより圧送し、ロッド先端より注入材料を地盤中に圧入する。注入方法は、

ボトムアップ方式 (以下、BU 方式) と変位抑制型のトップダウン・ボトムアップ併用方式 (以下、TD・BU 方式) の2種類である。

BU 方式は、所定深度まで削孔後、下から上へ1ステップ (=33 cm) ごとにステップアップ注入する方法である(図一2)。



図一1 CPG 工法の施工システム

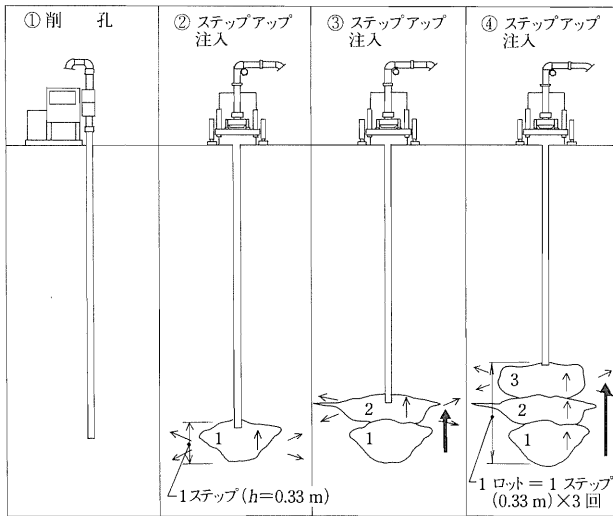


図-2 ボトムアップ方式

#### (4) 注入材料

注入材料は、セメントに特殊骨材（再生骨材＋砂＋細粒分）を一定量配合したものをを用いる。近年、粒径のそろった礫や川砂の入手が難しく、コストも高くなってきていることから、再生骨材を用いている。また、最近では、海産生物等への影響を配慮する場合には、セメントの代わりにマグネシウム系の固化材を使用する場合もある。

#### (5) 施工管理

##### (a) 注入材料管理

注入材料の品質管理は、使用する注入材料についてスランプ試験を行う。スランプ値は5 cmを標準として、管理値を0~7 cmとしている。結果的には、すべて管理値を満足している。

##### (b) 注入管理

注入管理は、主に注入量により行う。改良率に相当する量を地盤に注入する。 $N$  値が大きくなると圧力が上昇し、所定量を注入できない場合がある。

### 3. 施工機械の特徴

CPG工法で用いる機械には、以下に挙げる専用の機械がある。

- ・特殊注入プラント
- ・特殊注入ポンプ
- ・流量圧力監視装置
- ・注入管リフト装置

#### (a) 特殊注入プラント

セメントサイロ、特殊骨材サイロ、水タンクを一体型にまとめ、オーガ式のミキシング装置により連続的

に注入材を供給することができる。製造能力は、 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ で特殊注入ポンプ2セット分の供給能力がある。また、20tクラスのトレーラに搭載することが可能で、毎日機材を撤去する必要がある現場でも施工が可能である。

#### (b) 特殊注入ポンプ

電動モータにより油圧ポンプを作動させる2連式のピストンポンプで、常用最大圧力 $8 \text{ MN}/\text{m}^2$ 、吐出量 $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$ の能力を有している。操作系統がコンパクトにまとめられ、遠隔操作も可能である。また、トラックなどの車両により牽引できる構造となっていて、特殊注入プラントと同様、毎日機材を撤去する必要がある現場に対応できる。

#### (c) 流量圧力監視装置

注入量（単位吐出量、積算量）、注入圧力を連続的に計測しデータファイルとして記録する。専用のソフトにより図表化でき、綿密な施工管理が可能である。また、特殊注入ポンプの遠隔操作はこの流量圧力監視装置でできるように工夫され、施工位置における状況にすばやく対処できる配慮がなされている。

#### (d) 注入管リフト装置

注入ロッドをステップアップするためのジャッキで、ストロークは標準ステップ長に合わせて33 cmとしている。

以上の専用機械は、CPG工法の特長に合わせて、小型、機動性を重視した設計で、既設構造物直下への対応を意識した構造となっている。

## 4. 施工例

### (1) 液状化対策<sup>2),3)</sup>

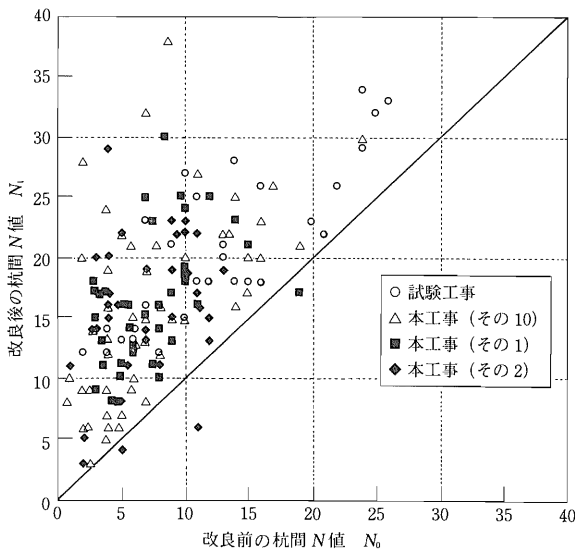
まず、CPG工法の既設構造物直下の液状化対策事例について紹介する。

施工地点における各改良対象層の $N$ 値の平均値、細粒分含有率の平均値および標準偏差を表-1に示す。これより、改良により各層の平均 $N$ 値が全体的に増加していることが分かる。細粒分含有率については、標準貫入試験の実施箇所により改良前・改良後でばらつきのある大きい層がある。着色したものは5%以上の差異があるもので、Bs層とAs2層で顕著である。また、各工事の改良対象層について同一深度ごとに改良前の杭間 $N$ 値 $N_0$ と改良後の杭間 $N$ 値 $N_1$ との関係<sup>2)</sup>を示したのが図-3である。改良前より改良後でほぼ $N$ 値の上昇を確認することができた。

CPG工法の設計法は、SCP工法の設計法（C法）に準じて行われている<sup>3)</sup>。これは、締固めによる地盤

表一 層毎の  $N$  値, 細粒含有率 (改良前・改良後)

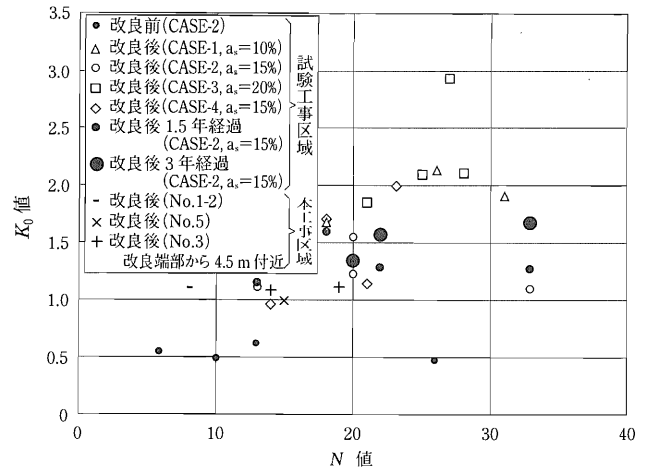
	$N$ 値								
	試験工事		その10工事		その1工事		その2工事		
	改良前	改良後	改良前	改良後	改良前	改良後	改良前	改良後	
Bs	平均値	—	—	5	11	8	15	6	39
	標準偏差	—	—	3	7	5	9	4	5
As0	平均値	14	21	10	26	9	22	9	20
	標準偏差	6	6	5	13	2	3	3	13
As1	平均値	—	—	8	18	—	—	5	18
	標準偏差	—	—	6	8	—	—	3	5
As2	平均値	—	—	11	22	10	19	10	19
	標準偏差	—	—	5	8	2	6	2	3
細粒含有率									
Bs	平均値	—	—	29	41	27	33	39	39
	標準偏差	—	—	9	6	9	7	3	5
As0	平均値	21	22	21	22	17	19	15	15
	標準偏差	13	12	10	10	11	12	10	10
As1	平均値	—	—	20	25	—	—	26	26
	標準偏差	—	—	10	16	—	—	16	13
As2	平均値	—	—	25	30	19	23	31	19
	標準偏差	—	—	14	16	8	11	15	10



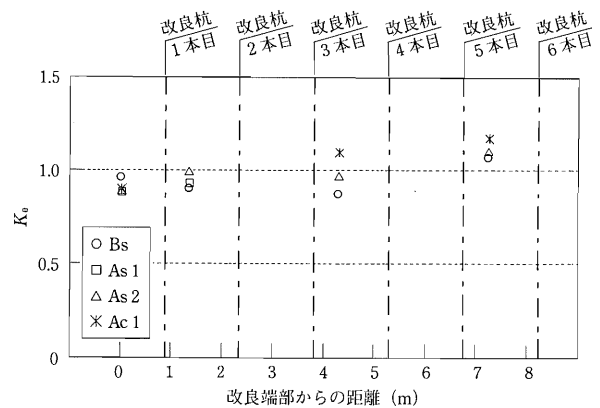
図一三 改良前と改良後の  $N$  値の関係

の密度増大による  $N$  値の増加を図り液状化を防止するというもので、改良後の目標  $N$  値をいかに達成するか主眼が置かれている。しかしながら、CPG 工法では図一四の改良前・改良後の  $N$  値と孔内水平載荷試験の関係から得られた  $K_0$  値 ( $=\sigma'_h/\sigma'_v$ ; ここで、 $\sigma'_h$ : 有効水平応力,  $\sigma'_v$ : 有効鉛直応力) の関係に示すように、改良前 0.5 程度であった  $K_0$  値が改良により 1.0 以上に増加し、1.5 年、さらに 3 年経過後も 1.0 以上を維持していることが確認されている。

また、図一五には、改良端部からの距離と  $K_0$  値との関係を示す。 $K_0$  値は、改良端部から中央部に向けて増加する傾向が見られる。さらに、改良端部にお



図一四  $N$  値と  $K_0$  値の関係



図一五 改良端部からの距離と  $K_0$  値の関係

ても 0.8 以上の  $K_0$  値があることが確認された。この理由としては、CPG 工法が 2 m 程度以下のピッチで固結体が地盤の中に打設されていることから、この固結体による地盤の応力増加による拘束効果により液状化抵抗が増加したためとも考えられる<sup>4)</sup>。このように CPG 工法に拘束効果を期待するためには、今後、長期的な応力緩和の問題、大小の地震履歴による拘束効果の低下の有無や程度についての検討が必要である。

## (2) 沈下修正<sup>5)</sup>

CPG 工法を有効上載圧の小さい地表面付近に施工すると、注入量に応じた地盤隆起が発生する。この現象を利用して沈下した建造物の計画的な沈下修正に用いている。以下に代表的な沈下修正の例として、平成 7 年の阪神・淡路大震災により不同沈下を引起こした建物の沈下修正事例について紹介する。

建物は兵庫県西宮市にある浜甲子園団地の RC 5 階建の集合住宅で、基礎はフーチングによる直接基礎で建設している。当該地域の地層構成は 10 m 程度まで  $N$  値 = 5~10 程度の緩い砂層が堆積している。地震に

より団地内の道路、公園では液状化による噴砂現象が観測されている。建物は短辺 6.5 m、長辺 43 m の細長い形状で、最大の不同沈下量は約 15 cm、傾斜は短辺方向で最大 1/60 程度、長辺方向で最大 1/200 程度となっていた。

布基礎間に鉄筋コンクリートで耐圧版を構築しベタ基礎形式にすることにより、持上げ効果を高める対策を施した。施工にあたっては A 孔→B 孔→C 孔の順に施工し、A、B 孔は BU 方式（下から上へステップアップ注入）とし、C 孔は TD 方式（上から下へステップダウン注入）を行った。A、B 孔は定量的に注入し、C 孔は修正量合わせて注入を行った。沈下の大きい方により多くの注入量を充当している。

図-6 に沈下量の計測結果を示す。最大傾斜が 1/450 程度まで修正されている。

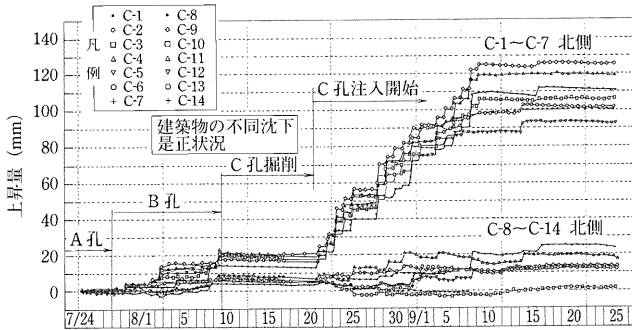
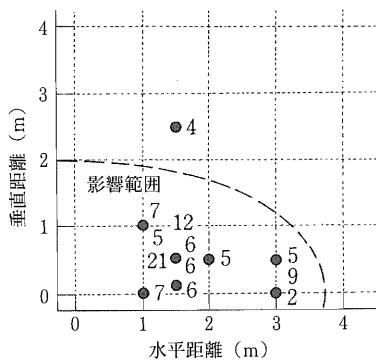


図-6 沈下量の計測結果

図-7 は、耐圧版に設置した土圧計による鉛直土圧の計測結果で、鉛直土圧の影響範囲が 3 m 程度であることがわかる。

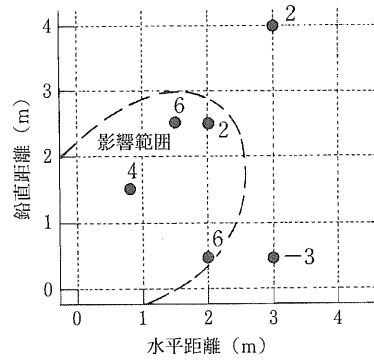


注) 図中の数字は最大注入圧力に対する百分率。

図-7 鉛直土圧の計測結果

図-8 は、水平土圧の計測結果で、水平土圧の影響範囲は 4 m 程度であった。

図-9 は、施工前と施工後の N 値を比較したものである。CPG 工法の施工による N 値の上昇が認められている。No.1 と No.2 の N 値の上昇が異なるのは、



注) 図中の数字は最大注入圧力に対する百分率。

図-8 水平土圧の計測結果

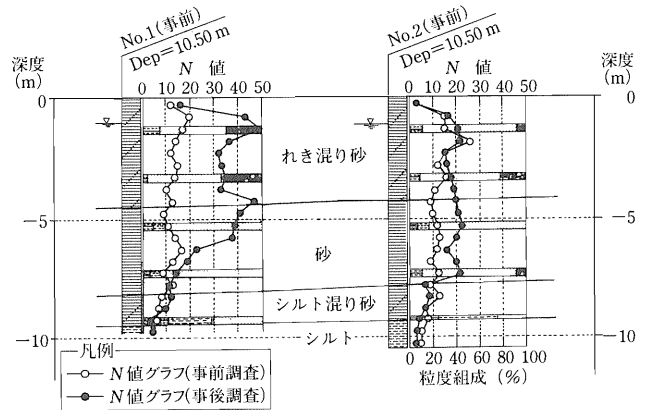


図-9 施工前と施工後の N 値の比較

持上げ量の差、すなわち注入量の差が影響しているもので、注入量の多い方が地盤改良効果の大きいことがわかる。

(3) 空洞充填<sup>6)</sup>

CPG 工法では極めて流動性の小さい注入材（特殊モルタル）を用いている。この性質を利用して水中の空洞充填にも利用している。以下に CPG 工法による空洞充填で、水門の機能回復を行った事例について紹介する（写真-5）。

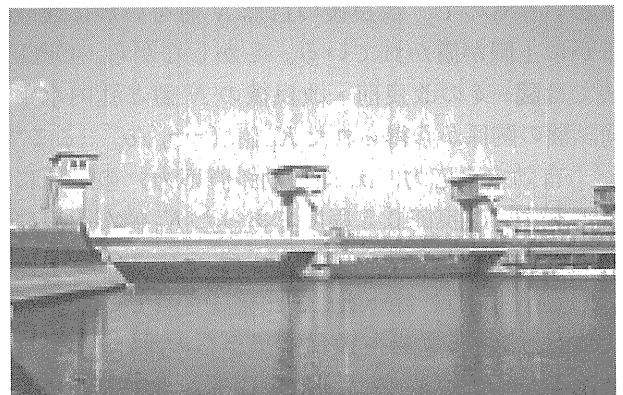


写真-5 充填を実施した水門

常陸川と利根川の合流地点にある常陸川水門は1963年に完成した水門で、洪水調整や塩害対策の役割を担っている。しかしながら長年にわたる軟弱地盤の圧密沈下により水門の床版下部に隙間が発生し、海水が逆流するようになっていた。隙間は最大15cm程度におよび、潮流の影響がある中で水に流されることなく、確実な充填効果を発揮することが求められた。

CPG工法の実施に際しては、流水中の充填状況を観察できる装置による実験を行い、最適な注入材配合を選定した。注入孔は先行孔と後行孔を設定し、後行孔は先行孔より若干流動性の大きい注入材を用いた定圧注入とし充填性の向上を図った。注入圧力の上限は0.7MPaとした。その結果、施工後はコアボーリング及びビデオスコープにより良好な充填状況を確認している。

## 5. おわりに

本報文は、既設構造物直下にCPG工法を用いた液状化対策、沈下修正および空洞の充填事例について述べた。その結果、いずれの施工においても確実な効果が認められた。

リニューアルにより既存設備の耐久性向上をはかる事例は、昨今の経済環境を反映して急増している。本報文がこうしたケースの参考となれば幸いである。



### 《参考文献》

- 1) 八木橋 貢, 松下信夫, 山本 良, 菅野雄一, 井上哲夫, 小西 武,

足立雅樹, 大沢一実: 液状化対策としてのコンパクトシロ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.

- 2) 善 功企, 野上富治, 菅野秀樹, 滝 昌和, 菅野雄一: コンパクトシロウチングの液状化対策に関する設計法, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2413-2414, 2000.6.  
 3) 善 功企, 山崎浩之, 八木橋 貢・佐藤茂樹・小西 武・菅野雄一: コンパクトシロウチングの液状化対策効果(第3報), 第57回土木学会年次学術講演会, pp.159-160, 2002.9.  
 4) 未来地図2010「フレキシブルな液状化対策実現」, 建設通信新聞, p.9, 2003.3.  
 5) 田中幹夫, 秋山映雄, 村田直二: 集合住宅基礎の復旧・補強, 基礎工, Vol.24, No.11, pp.108-113, 1996.  
 6) 日経コンストラクション:ズームアップ 河川 常陸川水門補修工事(茨城県)“モルタル注入で止水機能を回復”, 日経BP, pp.68-72, No.2, 2002.

### 【筆者紹介】



善 功企(ぜん こうき)  
九州大学大学院  
工学研究院建設デザイン部門  
教授



大沢 一実(おおさわ かずみ)  
三信建設工業株式会社  
東京事業本部  
第一事業部  
部長



足立 雅樹(あだち まさき)  
みらい建設工業株式会社  
本社技術部  
技術開発課  
主任

# 建設機械図鑑

本書は、日本建設機械要覧のダイジェスト版として、写真・図版を主体に最近の建設機械をわかりやすく解説したものです。建設事業に携わる方々、建設施工法を学ばれる方々、そして建設事業に関心のある一般の方々のための参考書です。

A4判 102頁 オールカラー 本体価格2,500円 送料600円

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289