

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 887 Dec. 1997

建設発生土を活用した静的締固め
杭工法に関する現地実験

山	崎	浩	之
高	橋	邦	夫
善	功		企
田	居	高	繁
中	里		密

運輸省港湾技術研究所



目次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 既存の締固め工法および建設発生土	4
2.1 既存の締固め工法およびその騒音・振動	4
2.2 建設発生土	5
3. 工法の概要	7
3.1 特徴と改良原理	7
3.2 打設機械と施工手順	8
3.3 使用する建設発生土	10
4. 現地実験の概要	10
4.1 地盤条件と使用した材料	10
4.2 実験ケース	11
5. 実験結果と考察	13
5.1 施工状況と施工出来形	13
5.2 締固め効果（実験ケース1）	13
5.3 騒音・振動（実験ケース2）	16
5.4 地盤変形（実験ケース3）	18
6. 結論	19
7. あとがき	19
参考文献	20

Field Experiments of Static Densification Pile Method by Use of Construction By-product

Hiroyuki YAMAZAKI*

Kunio TAKAHASHI**

Kouki ZEN***

Shigeru TAI****

Takamitsu NAKAZATO*****

Synopsis

A new type of measures against liquefaction is being developed, which densifies ground by installing soil piles with static compaction. The by-product from construction, which is added with a small amount of cement for stabilization, is used for the soil piles. This report describes field experiment results of, 1) the new method on the densification of ground, 2) the noise and vibration generated during work, and 3) the lateral displacements of the surrounding soil.

The main findings are:

1) The effectiveness of the new method on the densification was validated with the Standard Penetration Test (SPT). The increments of the SPT-N value were larger inside of piles and smaller between piles than those of SCP method which dynamically compacted ground.

2) The densification of the ground depended on the amount of cement added to the by-product prior to the construction of piles.

3) The vibration during the densification work was smaller than the vibration criterion of 75dB. The noise was, however, larger than the noise criterion of 85dB, but it will be able to decrease below the criterion by the minor improvement of the structure of machine.

4) The maximum lateral displacement of 4cm was measured at 1.8m from the center of a pile.

Key Words: Construction By-product, Solidification, Field Experiment, Anti-liquefaction Measure, Static Densification

* Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

** Chief of Soil Dynamics Laboratory, Ditto

*** Director of Geotechnical Engineering Division

**** Trainee, Ditto

***** Taikei Kogyo Corporation

Port & Harbour Research Institute

3-1-1, Ngase, Yokosuka, Knagawa, Japan

Tel.:(0468)44-5022

Fax.:(0468)44-0618

建設発生土を活用した静的締固め杭工法に関する現地実験

山崎浩之*
高橋邦夫**
善功企***
田居繁****
中里高密*****

要 旨

液状化対策工法として、静的に地盤を締固め、かつ、補給材として固化材を添加した建設発生土を用いる新しい工法の開発を行っている。本資料では、現地実験を行い、締固め効果、施工中の騒音・振動、地盤変位の調査結果について報告している。得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1)静的な機構により地盤を締固めることができることをN値の増加により確認できた。既存の工法であるサンドコンパクション工法と比較すると、杭芯では本工法の方が大きな改良効果が得られたが杭間では劣っていた。しかし、杭間については、本実験では杭の打設規模が2本×2列と小さかったため効果が小さかったと考えられ、実際の施工のように打設規模を大きくすれば、杭間でもSPC工法と同程度の効果が得られる可能性がある。
- (2)締固め効果は、補給材に添加する固化材の量に依存しており、固化材添加率の大きなものほど、締固め効果は大きくなった。
- (3)施工中の騒音・振動については、振動レベルは振動の基準値75dB以下となり、既存の動的な締固め工法と比較して大幅に低減できた。騒音については、瞬間的に大きな騒音が発生したが、施工機械の改良により対応可能で、騒音の規準値85dB以下とすることが将来的に可能である。
- (4)締固めによる地盤変位は、打設パイル中心から水平に1.8m離れている地点で最大3～4cmの側方変位が計測された。

キーワード：建設発生土、固化、現地実験、液状化対策、静的締固め

*土質部主任研究官
**土質部動土質研究室長
***土質部長
****土質部研修生（大恵工業株式会社）
*****大恵工業株式会社

〒239神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
運輸省港湾技術研究所
Tel.:(0468)44-5022
Fax.:(0468)44-0618

1. まえがき

地震時の地盤の液状化現象は、1995年兵庫県南部地震での大規模な液状化現象で見られるように¹⁾、地震時における土木構造物の被害の大きな要因と認識され、設計段階での重要な検討項目となっている。液状化による被害を防止するため、既にいくつかの液状化対策工法が開発され、実際に建設工事で用いられてきた。1993年釧路沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震において、地震前に液状化対策を施しておいた施設では地震による液状化現象を防止でき、施設は無被害あるいは軽微な被害にとどまっていた^{2)、3)、4)、5)}。しかし、無対策の施設では液状化が発生し、施設は大きな被害を被り、対策を行った施設と大きな違いが見られ、液状化対策の有効性、重要性が認められた。

現在までに開発されている液状化対策工法は、以下の5つの方法に基づいたものが多い^{6)、7)、8)}。

- ①密度を増加させ液状化抵抗を増加させる。
- ②過剰間隙水圧の消散を速め液状化を防止する。
- ③砂質土をセメント等の安定材で固結させ液状化しない材料に変える。
- ④地盤を礫材等の液状化しない材料に置換える。
- ⑤地盤が液状化しても構造物本体には悪影響が生じないように、杭等で補強する。

以上の方法により、以下の5種類の工法がある。

- ①締固め（密度増大）工法、②間隙水圧消散工法、③固結工法、④置換工法、⑤構造的対策。

上記5種類の対策工法で、液状化対策として最も実績が豊富なものは、①の締固め工法である。平成2年度に実施された土質工学会（現：地盤工学会）のアンケート調査結果では⁹⁾、昭和60年～平成2年7月までに実施された液状化対策事例を改良体積で整理すると、約75%が締固め工法に分類されるものである。締固め工法の適用率が高い理由は、②の間隙水圧消散工法、⑤構造的対策は、原地盤の液状化抵抗を直接大きくするものではないので、締固め工法と比較してやや信頼性が低く、またパラメータが多くなり設計が煩雑となる。③の固結工法は締固め工法と比較して経済的に高くなる。④の置換工法は、原地盤から発生する土砂の処分が必要なこと。以上が、締固め工法と比べて他工法の採用率が低い理由であると考えられる。しかし、締固め工法についても問題点があり、締固め工法の多くは衝撃あるいは振動といった動的荷重を用いるので、間隙水圧消散工法などと比較して、施工

中の騒音・振動が大きく、市街地や既存施設の近くでの適用が難しい面がある。前述の調査結果によると、環境条件に制約がない場合には、工事件数の約90%は締固め工法が採用されているが、既設構造物が近傍にある場合には採用率は約55%と小さくなり、施工場所が市街地になると採用率は約10%と極端に小さくなっている。

このように、締固め工法は特別な事情がない限り、液状化対策工法として実務的に最も有用性が認められた工法である。したがって、さらに締固め工法の改良、すなわち、騒音・振動問題を伴わない締固め工法の開発を行うことは重要な課題といえる。

次に、建設工事に伴い発生する建設副産物、とりわけ、建設発生土の有効利用は社会の大きな要請で、地盤工学の分野でも重要な研究テーマとなっている。平成5年度に実施された調査によると、建設発生土の平成4年度の排出量は43700万 m^3 となっているが、これに対する再利用量は24400万 m^3 で、残りの19300万 m^3 は最終処分され有効に利用されておらず⁹⁾、さらに多くの建設発生土の利用が望まれているところである。

以上のような2つの背景から、騒音・振動防止のため締固めを動的ではなく静的に行い、また、建設発生土の有効利用のため補給材として建設発生土を用いる、新しい液状化対策工法の研究・開発を行っている。なお、建設発生土には安定材として固化材を添加することを基本としている。本資料は、本工法の締固め効果、騒音・振動の低減効果に関する現地実験結果について取りまとめたものである¹⁰⁾。

2. 既存の締固め工法および建設発生土

2.1 既存の締固め工法およびその騒音・振動

液状化対策としての既存の締固め工法は、表-1に示すように、サンドコンパクションパイル工法（以下SCP工法）、振動棒工法、パイプロフローテーション工法、重錘落下締固め工法などの動的な機構に基づくものがある^{6)、7)、8)}。また、表-1には記載されていないが、動的な機構ではない締固め工法として静的な締固め砂杭工法が、新しく開発されている。これらの工法を概説し、その締固め効果、騒音・振動に関して説明する。

SCP工法は、鋼管ケーシングを先端閉塞の状態で地盤内に動的に貫入させ、ケーシングが目標深度に達した後、ケーシング内に補給材を入れケーシングを上下に振動させ引抜き圧入しながら砂杭を造成するもので、砂杭造成時に周辺地盤を側方に圧縮させ、かつ振動により締

表-1 各種締固め工法の特徴

工法名	概要	環境への影響
サンドコンパクションバイル工法	鋼管ケーシングを地中に貫入させ、引抜き時に砂を圧入して締固めた砂杭を打設し、同時に周辺地盤を締固める。	騒音・振動が大きい、その程度は施工機械に応じて異なる。
振動棒工法	ロッドの振動圧入と、地表面からの補給材の充填により地盤を締固める。	サンドコンパクションバイル工法より、騒音・振動はやや少ない。
バイプロフローテーション工法	振動体による水平振動と先端ノズルからの射水によって周辺の地盤を締固め、同時に補給材を充填する。	他の締固めによる工法と比較して騒音・振動が少ない。
重錘落下締固め工法	10～30tの重錘を自由落下させ衝撃荷重で地盤を締固める。	振動・衝撃が大きい。

固めるものである。SCP工法を用いた場合、細粒分含有率が20%以下でN値が10以下の原地盤に対して、置換え率20%の改良を行うと、杭間でN値が30程度にまで増加することが実績で示されている。

振動棒工法は、各種の工夫されたロッドを地盤内に振動させながら貫入させ、地盤が締固まった分だけ地表から補給材を投入し、地盤を締固めていくものである。振動棒工法の施工事例では、改良ピッチは不明であるが、細粒分含有率が10%、N値が10以下の原地盤が、N値が10～30程度にまで増加することが示されている。

バイプロフローテーション工法は、バイプロフロットと呼ばれる棒状の振動体とウォータージェットを併用し、バイプロフロットを目標の深さにまで貫入させ、貫入後、補給材を投入し、補給材を介して周辺地盤を振動締固めるものである。施工事例では、細粒分含有率、改良ピッチは不明であるが、N値が10以下の原地盤が、N値が10～30程度にまで増加することが示されている。

重錘落下締固め工法は、重さ10～50tfの重錘を、高さ20～30mの位置から地表面に落下させ、その衝撃により地盤を締固めるものである。重錘の落下により、地盤にクレータができ、クレータに補給材を投入する。実績では、打撃エネルギーの大きさによるが、N値の増加量は5～20程度あることが示されている。

これらの既存工法は、その施工が振動、衝撃を伴うことから騒音・振動を発生させ、周辺環境に対して騒音・振動問題を引き起こすことがある。また、設計図書等によると、締固め効果は対象地盤の細粒分含有率の影響を受け、細粒分含有率が20～30%以上になると締固めが困難になるようである。

次に、静的な機構による締固め工法が新しく開発されている^{11)・12)}。この工法では、ラック・ピニオン式昇降装置とオーガモーターを装備した回転貫入式施工機械により、ケーシングを強制的に昇降させる機構となっており、SCP工法のように振動によりケーシングを貫入させないところに特徴がある。現地実験、実施工によ

ると、締固め後、SCP工法とほぼ同程度のN値が得られ、振動・騒音のレベルはSCP工法よりもかなり低減されていることが報告されている。

既存工法の騒音・振動に関しては、図-1のように騒音・振動レベルがまとめられている¹³⁾。また、図-1には、前述の静的な締固め工法によるものを加筆した。図-1によると、振動、騒音それぞれに規準値があり、振動については規準値75dBを上回るのが、重錘落下工法、SCP工法、バイプロフローテーション工法でそれぞれ振源から70m、50m、10mの範囲となっているが、静的な機構を用いる非振動式締固め砂杭工法の場合には、規準値以下となっている。騒音については、規準値85dBを上回るのは、重錘落下工法、SCP工法で音源から30m弱、バイプロフローテーション工法で5m弱の範囲となっているが、静的な締固め工法の場合にはすべての範囲で規準値以下となっている。このように、動的な機構を用いた締固め工法では、騒音・振動の各レベルが規準値を上回り、周囲の状況によっては適用が規制される場合があるが、静的な機構によるものは、騒音・振動は規準値以下となることがわかる。

以上から、締固めに静的な機構を用いた場合、締固め効果は、動的なものと同程度のものが期待でき、かつ騒音・振動問題という従来からの動的な方法によるものが持っていた施工環境的な問題を解決できるといえる。

2.2 建設発生土

掘削等の建設工事に伴い発生する建設副産物には、建設発生土、コンクリート塊、アスファルト塊、建設発生木材、建設汚泥、建設混合廃棄物がある。これら建設副産物のうちでは建設発生土が一番多くの割合をしめていて、平成5年度の建設発生土再利用の調査によると、建設発生土はそのかなり多くが最終処分され、無駄となっている状況である⁹⁾。現在、廃棄物の最終処分場が不足している状況であることから、建設発生土の再利用は急務の課題といえる。

建設発生土を再利用するにあたり、建設省は表-2に示す建設発生土の土質区分基準を示している¹⁴⁾。表-2によると建設発生土は第1種から第4種建設発生土および泥土の5種類に分類されており、この分類はコーン指数と日本統一土質分類を指標としている。これら5種類の建設発生土の内、第1種、第2種建設発生土が砂質土、礫に対応するもので、第3種、第4種発生土と泥土が粘性土に対応するものとなっている。

建設発生土の有効利用先は、表-2の第1種、第2種建設発生土については、需要があれば、砂質土系であるこ

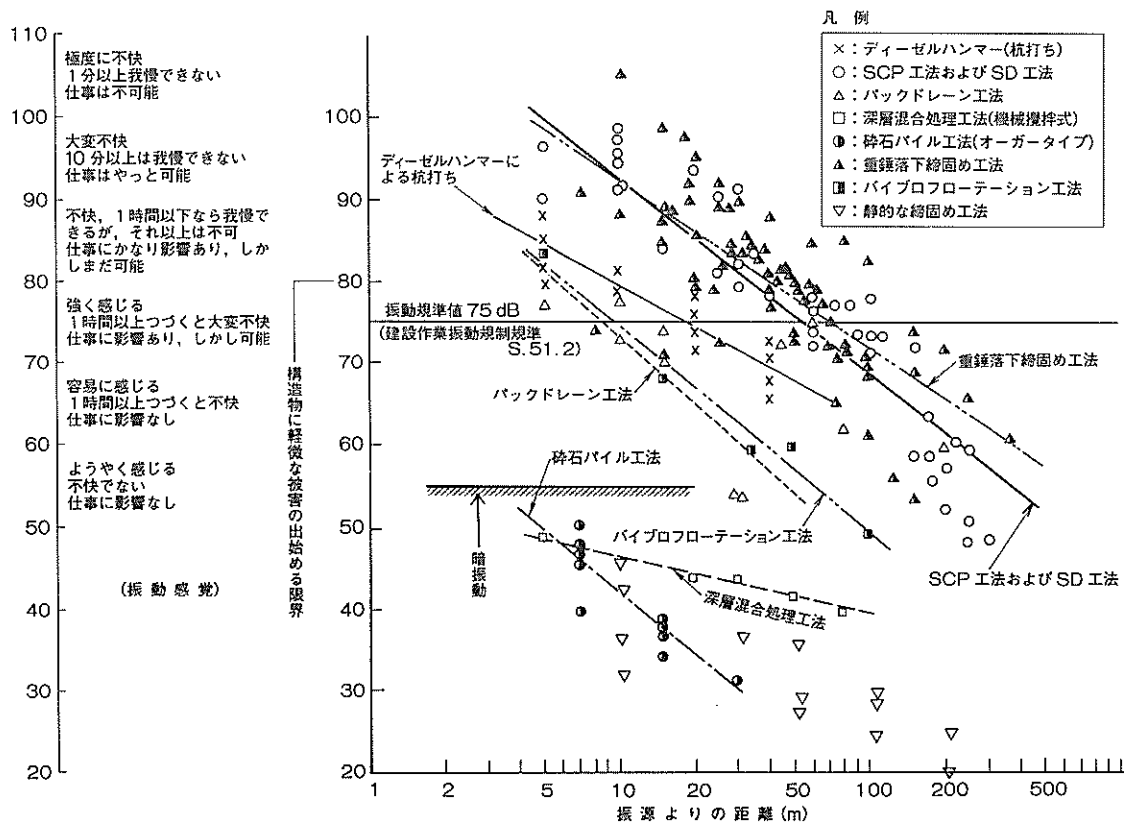


図-1(a) 各種工法の振動(文献13に加筆)

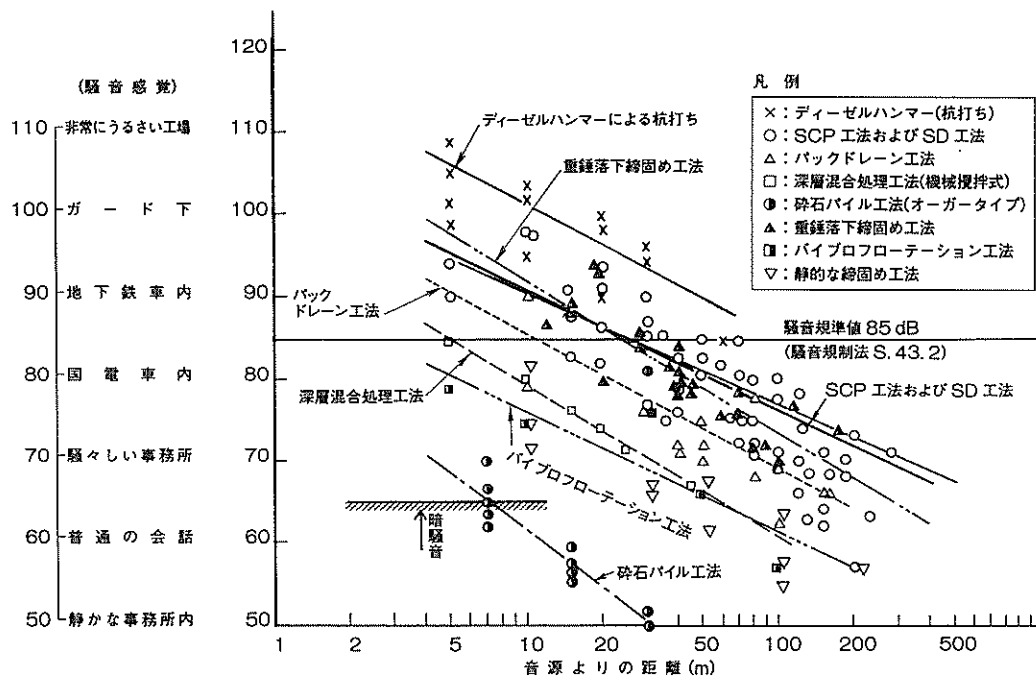


図-1(b) 各種工法の騒音(文献13に加筆)

表-2 建設発生土の分類

区分 (建設省令)	土質区分	コン 指数 qc	日本統一土質分類		備 考	
			中分類	土 質	含水比 (地山) Wn(%)	掘削方法
第1種建設発生土 砂、礫及びこれ らに準ずるもの	第1種発生土	-	[G] [S]	礫 砂	-	排水に考慮する が、降水、浸出 地下水等により 含水比が増加す ると予想される 場合は、建設省 令の1ランク下 の区分とする
	第1種改良土		(改良土)	-		
第2種建設発生土 砂質土、礫質土 及びこれらに準 ずるもの	第2a種発生土	8以上	[GF]	礫質土	-	
	第2b種発生土		[SF]	砂質土(Fc=15~25%)	-	
	第2c種発生土			砂質土(Fc=25~50%)	30%程度以下	
第3種建設発生土 通常の施工性が 確保される粘性 土及びこれに準 ずるもの	第3a種発生土	4以上	[SF]	砂質土(Fc=25~50%)	30~50%程度	
	第3b種発生土		[M], [C]	シルト、粘性土	40%程度以下	
	第3種改良土		[V]	火山灰質粘性土 (改良土)	-	
第4種建設発生土 粘性土及びこれ に準ずるもの (第3種発生土 を除く)	第4a種発生土	おおむね 2以上	[SF]	砂質土(Fc=25~50%)	-	
	第4b種発生土		[M], [C]	シルト、粘性土	40~80%程度	
			[V]	火山灰質粘性土	-	
	第4種改良土		[O]	有機質土 (改良土)	40~80%程度	
粘土 液状土のうち おおむねqc2以 下のもの及び建 設汚泥	粘土a	おおむね 2以下	[SF]	砂質土(Fc=25~50%)	-	
	粘土b		[M], [C]	シルト、粘性土	80%程度以上	
			[V]	火山灰質粘性土	-	
	粘土c		[O]	有機質土	80%程度以上	
			[Pt]	有機質土	-	

とからそのままの状態、埋戻し、道路盛土、裏込め・裏埋め等の材料として利用されている。第3種、第4種建設発生土、粘土については、粘性土系であることから、安定処理等がなされ再利用されている。

粘性土系については、単なる地盤材料としてではなく付加的価値を付け、有効利用を図ることが行われようとしている。例えば、焼成・溶融などの処理を粘土に施し、砂材料として付加価値を付けドレーン材等に利用することが考えられている¹⁵⁾。港湾では、粘土あるいは第4種建設発生土に相当する液状粘土に、セメント、気泡等を混合させ、軽量化という付加価値を付け、軽量混合土として裏埋めに利用されている¹⁶⁾。

本資料で報告する締固め工法は、締固め機構が静的なものになっており騒音・振動問題を低減させることができ、かつ、砂質土系の建設発生土に付加価値をつけ有効利用を図るというもので、締固め工法として新しいタイプの工法である。

3. 工法の概要

3.1 特徴と改良原理

本工法は建設発生土に固化材を添加した補給材を、地盤内に静的に圧入し、固化パイルを造成していくものである。なお、以降では、このように造成されるパイルを固化パイルと呼ぶこととする。本工法は、静的に固化パイルを造成することから、動的な締固め工法と比較して騒音・振動が小さくなる。このような方法による液状化対策の原理は、以下の4点である。

①補給材を地盤内に供給するので、周辺地盤が側方流動的な変形を起こさなければ、補給材の供給分に相当する分だけ周辺地盤は締固まることになる。

②補給材により形成されるパイルは固化材が添加されているため、形成後固化する。したがって、図-2に示すように最初に改良範囲の周囲に固化パイルを造成し、その後、内部にパイルを打設すれば、周囲の固化パイルの拘束効果により原地盤の土が側方に逃げにくくなり、地盤はより締め固まりやすくなる。

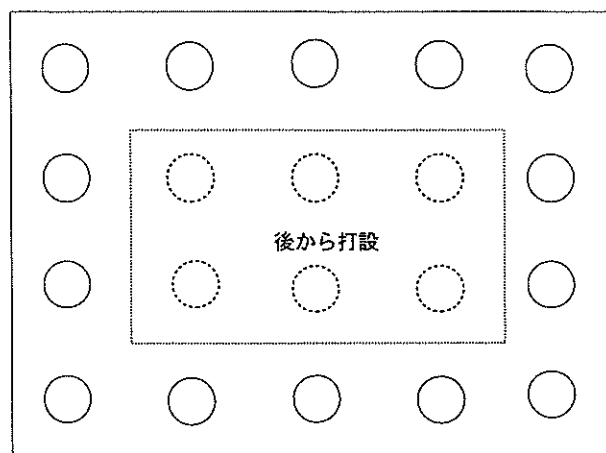


図-2 固化パイルの効果的な打設手順

③補給材圧入時の圧力により、側方土圧（静止土圧）が増加し、地盤の拘束圧が大きくなり、液状化抵抗が増大する。また、圧入時の圧力が施工後減少したとしても地盤は過圧密状態となるので、液状化抵抗は正規圧密状態のものよりも大きくなる¹⁷⁾。

④パイル造成後、パイルは固化し強度が大きくなる。そ

のため、地盤全体としてみた場合、パイルの強度分だけ地盤全体の強度が大きくなる。

3.2 打設機械と施工手順

(1) 打設機械の構成

使用する打設機械の一例として、今回の現地実験で使用した打設機械の概要図と主要な仕様を図-3と表-3にそれぞれ示す。打設機全体の高さは約30mあり、長さ16mのケーシング、補給材をケーシング内に投入するためのホッパー、バケット等を有している。ケーシングは回転可能なφ812の外ケーシングと静的な上下運動が可能なφ760の内ケーシングからなる2重管構造となっており、この2重管構造が本工法の特徴となるところである。打設機には、外ケーシングを回転させるための回転貫入

表-3 打設機械の仕様

名称	形式	規格・寸法	数量	摘要
ベースマシン	住友SP-110T	クロー式打設機 65t	1台	
リーダー・笠木	三点支持式	丸型 φ760mm	1式	
回転貫入装置	D-150WP	55kw×2=110kw	1台	操作盤・キャブタイヤ
ケーシング上下装置	油圧シリンダー	11t×2本	1式	
ホッパー・空気弁等			#	
外ケーシング押込装置	油圧シリンダー	5t×4本	#	
外ケーシング(回転)		φ812.8mm	#	スライダル無し
内ケーシング(上下)	上下運動	φ760.0mm	#	
昇降バケット	A-24型	2.4m ³	1台	
施行管理計		深度計・砂面計	1式	
発動発電機		500 KVA	1台	防音型
空気圧縮機		吐出量18m ³ /min		防音型
トラクタショベル	小松WA-100	1.2m ³ 改造型		
その他、付属機器	電気溶接機、分電盤、キャブタイヤエアホース、パイプロット、水設備		1式	

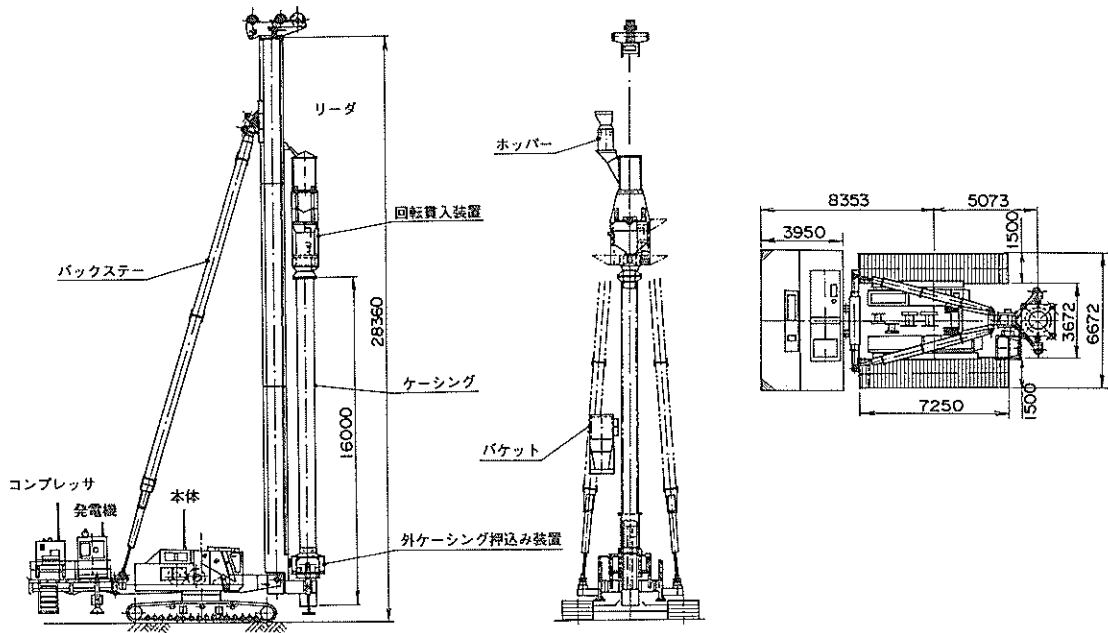


図-3 打設機械の概要図

装置が打設機上部に、押し込むための押し込み装置が打設機下部に装着されている。外ケーシングを押し込むための油圧シリンダーは公称で1本当たり最大5tの押し込み容量があり、4本搭載されている。内ケーシングを静的に上下動させるためのケーシング上下装置が、回転貫入装置と同じ位置に装着されている。内ケーシングを上下させるための油圧シリンダーは公称で1本当たり最大11tの押し込み容量があり、2本搭載されている。また、内ケーシング内を圧気するために補給材投入口に空気弁が設けられている。圧気するための空気圧縮機は、内ケーシング内を圧力5~7kgf/cm²程度に保ち、吐出し量18m³/minの能力を持っている。その他、施工を管理するための施工管理計として、ケーシングの到達深度を計

測する深度計と補給材の補給量を確認（内ケーシング内の補給材の表面の位置を確認）するための砂面計が装備されている。

この他、図-4に示されるように、打設機以外に建設発生土に固化材を添加混合するために、ツインヘッダー付きのバックホウ、固化材が混合された補給材をホッパーに投入するためのトラクタショベル等が必要である。

(2) 施工手順

施工手順を図-5に従い以下に説明する。

- ① 所定の打設位置にケーシング、打設機をセットする。
- ② ケーシングのセット後、内管ケーシング内に補給材を投入する。補給材には事前に固化材が添加されている。
- ③ 投入口に設けられている空気弁を閉じ、内管ケーシ

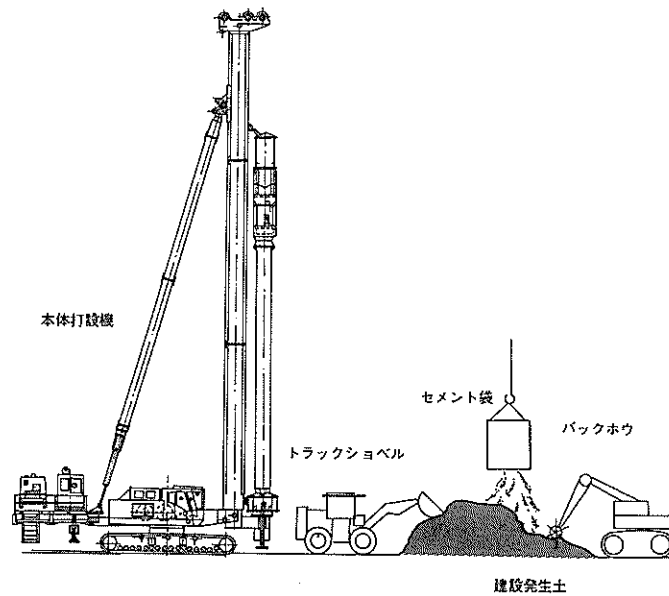


図-4 施工状況図

グ内を圧気し、外管ケーシングを正転で回転させながらケーシングを貫入させる。

④所定の位置までケーシングが貫入したら、回転を停止させる。

⑤外管ケーシングを逆転させ引抜き、また内管ケーシングを内部の圧力を一定に保ち、所定の位置まで引抜き、

補給材を排出する。

⑥内管を内部の圧力を一定に保ちながら、鉛直方向に静的に上げ下げし排出した補給材の締固めを行う。

⑦補給材締固め後、投入口の空気弁を開け、補給材を内管内に補給する。

⑤～⑦の工程をケーシング下端が地表面まで達するま

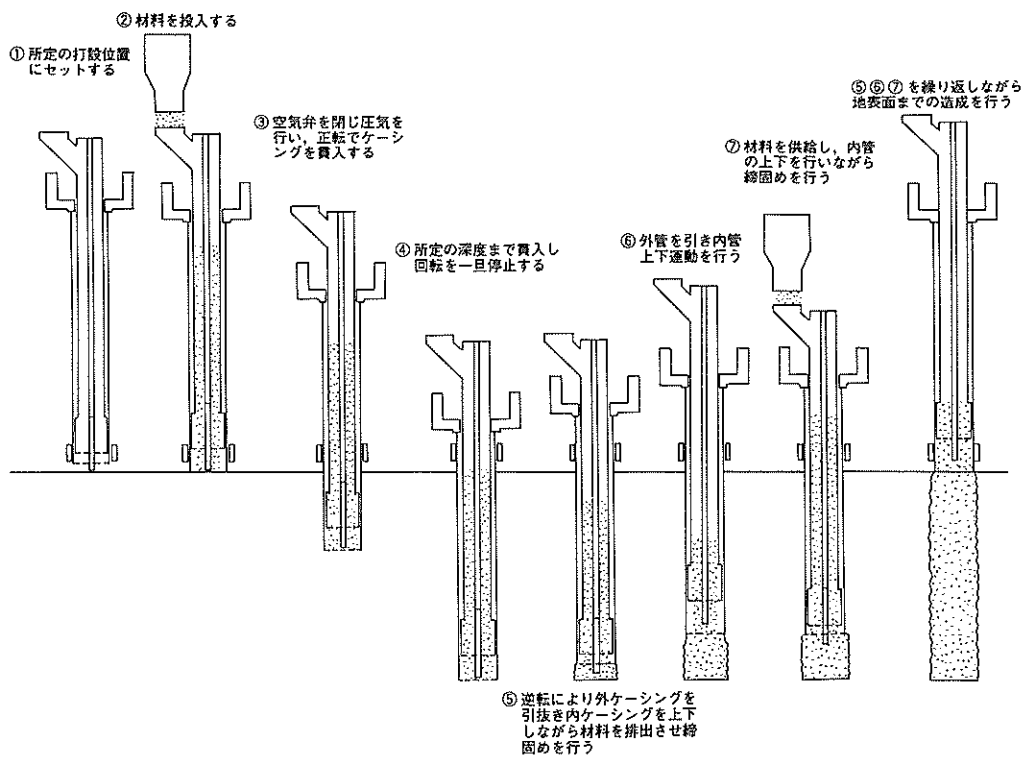


図-5 固化パイル造成手順

で繰返し、パイルを形成する。

以上のような手順でパイルを地盤内に造成し締固めを行う。

3.3 使用する建設発生土

固化パイルに使用する発生土は、表-2に示される第2種建設発生土で、砂質土、礫質土系のものである。この材料は、所定の試験法でコーン貫入試験を行って、コーン指数が8以上得られることが規定されたものである。第2c種発生土と規定されるもの以外は、粒度調整は不要な材料である。

4. 現地実験の概要

実験は、兵庫県尼崎市内の工場敷地内で行われた。実験ヤードは、図-6の全体平面図をに示すように、幅約30m、長さ約80mの更地である。現地実験は、本工法による地盤の締固め効果、施工中の騒音・振動、地盤内の変位を調べることを目的として行った。

4.1 地盤条件と使用した材料

(1)地盤条件

実験ヤードでは、図-6に示す箇所で、現地実験前にボーリング調査が行われている。図-7が事前のボーリング調査から得られた土層断面図で、G.L.-4mまでが埋立土層、G.L.-4mからG.L.-9m~-10mまでが沖積砂層、沖積砂層下部に沖積粘土層が堆積している。ボーリング孔No.Bの地点では、埋立土層と沖積砂層の間に層厚1m弱の沖積粘土層が堆積している。地下水位は、G.L.-4mの位置にあり、埋立土層の底面とほぼ一致している。今回の現地実験での締固め対象となった土層は、G.L.-4mからG.L.-9m~-10mまでに堆積している沖積砂層である。

実験前の地盤のN値は、図-8に示す通りで、砂層のN値は一部20を超えるところがあるが、概ね10程度の値となっている。砂層の粒度分布は図-9に示す通りで、細粒分含有率が20%程度となっている。なお、図-9は、実験後に行った土質調査試験結果である。また、ボーリングNo.Bの土質調査では、上部のG.L.-4m付近の沖積粘土と下部のG.L.-9m以深の沖積粘土について物理試験が行われており、塑性指数が上部のものについては $I_p=28.2$ 、下部のものについては $I_p=21.4$ という値が得られている。またその粒度分布については図-10に示す粒径加積曲線の通りである。

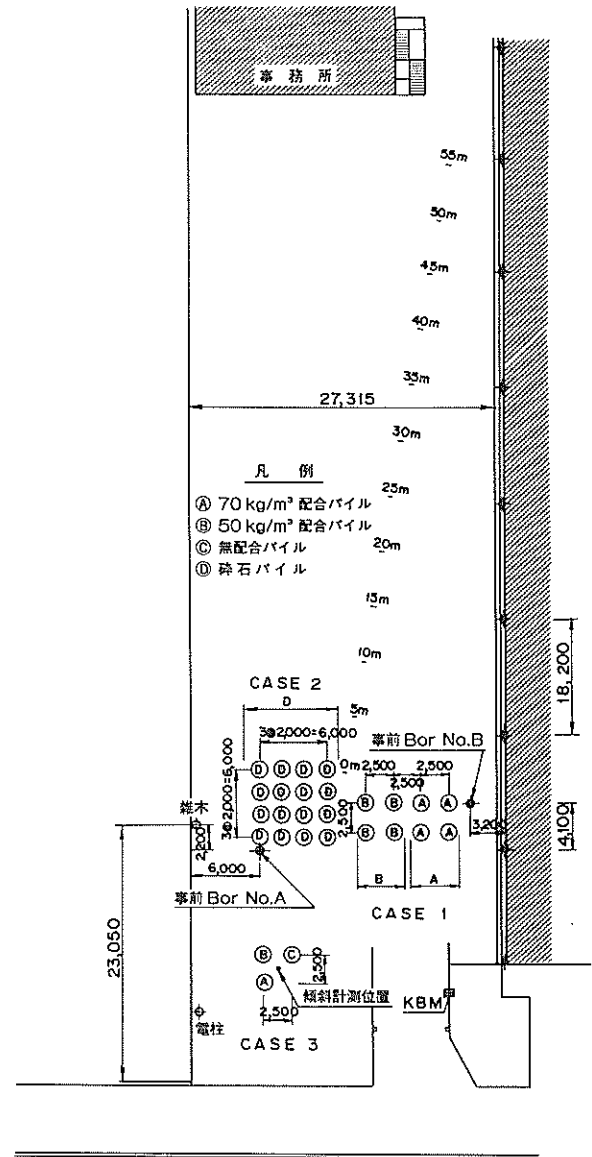


図-6 全体平面図

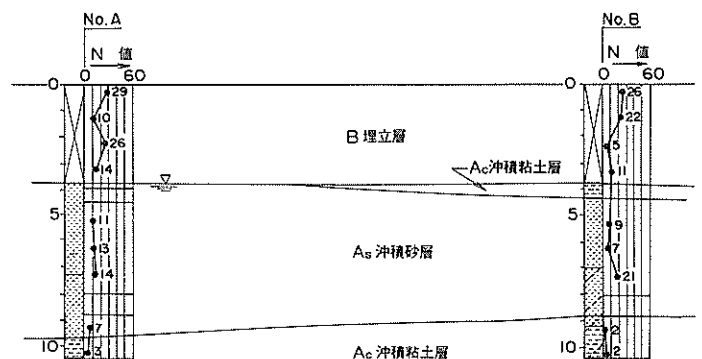


図-7 土層断面図

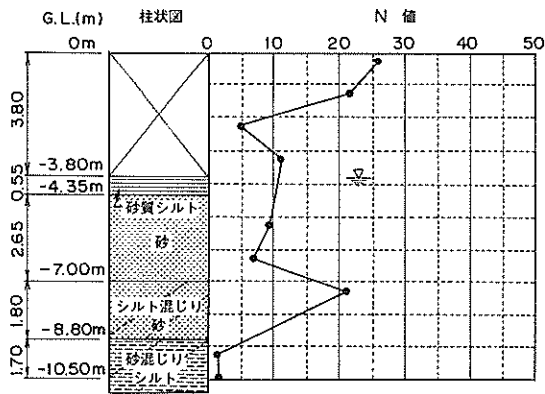


図-8 土質柱状図

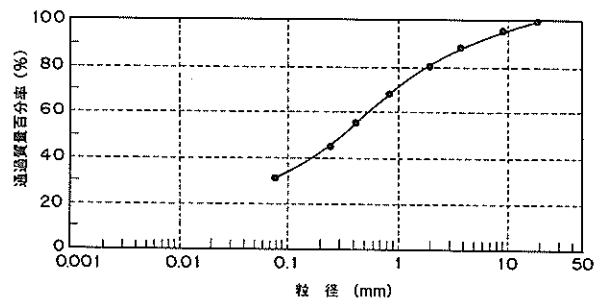


図-11 使用した建設発生土の粒径加積曲線

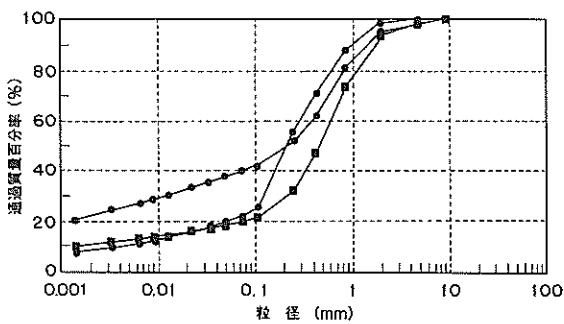


図-9 砂層の粒径加積曲線

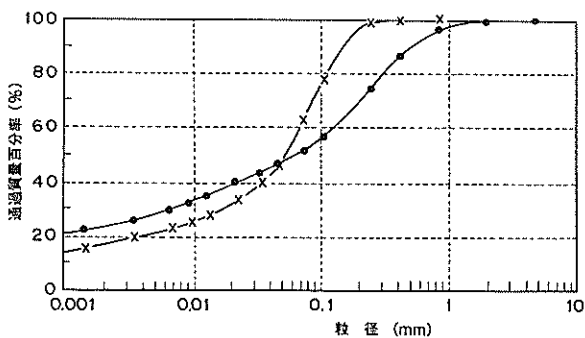


図-10 粘土層の粒径加積曲線

(2)使用した材料

固化パイル造成のための補給材として使用した建設発生土は、図-11の粒径加積曲線に示すように、最大粒径が20mm、細粒含有率が30%程度のものである。また、自然含水比は約17%であった。したがって、これは、表-2に示された第2種建設発生土の内の第2c種発生土であることがわかる。第2c種発生土は、建設発生土利用技術マニュアルによると、埋め戻しを行う場合に粒度調整・安定処理を行う付帯条件がついているものである。この付帯条件については、本工法では建設発生土に固化材を添加することを前提条件としているので、自動的に

満足される。なお、実際の実験では、40cm~50cm程度のコンクリート塊や鉄片等が含まれていたもので、これらは極力取除いている。固化材は、普通ポルトランドセメントを所定の混合率で建設発生土に混合した。混合は、写真-1に示すようにツインヘッダー付きのバックホウで機械的に行っている。

ただし、後述するように、施工時の騒音・振動レベルを調べるための実験では、無配合の砕石（クラッシャーラン）を使用している。



写真-1 固化材の混合状況

4.2 実験ケース

現地実験では、ケース1からケース3の3ケースの実験が行われた。各ケースの実験位置は、図-5の現場平面図に示した通りである。また、使用した打設機は3.で説明したものと同一のものである。

(1)実験ケース1

実験ケース1は、地盤内に固化パイルを造成し、パイル造成による地盤の締固め効果を調べることを目的としたものである。また、固化材添加率が 50kg/m^3 と 70kg/m^3 の2種類の補給材を用意し、添加率の違いによる、締固め効果の違いも調べている。

パイルは、図-12に示すように、2.5mピッチの正方形の配置で、地表面から10mの深さまで、50kg/m³固化材添加率のもの、70kg/m³固化材添加率のものをそれぞれ4本ずつ造成している。図-12中の固化パイルの径1.0mという値は、実験後に地表面付近を掘起こして計測された値、および、補給材の地盤中への圧入量から算出した

値の両者で確認されたもので、ケース2、ケース3の場合もパイル径は1.0mとなっている。また、併記してある柱状図は、実験前に得られたものである。

実験終了後、パイルの養生期間を1週間おき、杭芯と杭間で標準貫入試験および採取試料の物理試験を行っている。

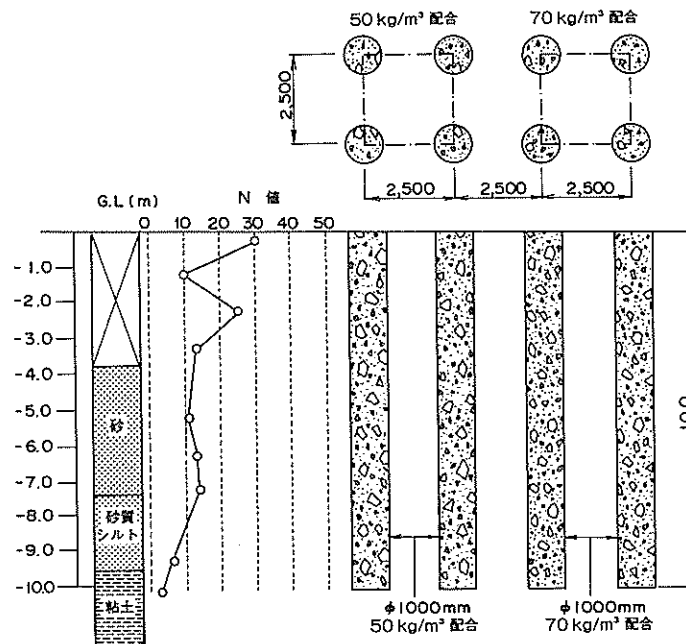


図-12 実験ケース1のパイル打設仕様

(2)実験ケース2

実験ケース2は、当工法を用いた場合の騒音・振動のレベルを調べることを目的とした実験である。図-5の平面図に示すように、ケース2では2mピッチの正方形配置で16本のパイルを深さ10mまで造成している。なお、ここで用いた補給材は碎石を使用しており、また、固化材は添加していない。騒音・振動の計測は、図-5のように、正方形配置の右端上部から55mの距離までを5m間隔で計11点の位置で行った。

(3)実験ケース3

実験ケース3は、パイル打設時の地盤の側方の変形状態を調べるのが目的のものである。パイルの打設は、図-13に示すとおりで、2.5mピッチの正方形配置ではあるが、実際に打設を行ったのは3点だけである。また、打設されるパイルは、固化材を70kg/m³添加混合したもの、固化材を50kg/m³添加混合したもの、固化材を全く添加しないものの3種類である。

地盤の側方変位の計測は、図-13の正方形配置の中心に傾斜計を打ち込み、傾斜計により計測している。傾斜

計による側方変位計測の方法については、まず、傾斜計測定用のパイプを深さ18mまで埋め込んでおき、パイル打設によるパイプの各点の傾斜量を計測する。そして、パイプ下端は不動点と仮定し、パイプ各点の傾斜量から深度方向の側方変位を求めている。

各パイルの打設と傾斜計による計測は、以下に示すように行った。

- ①最初に、傾斜計の初期値を確認し、70kg/m³固化材添加率による固化パイルの打設を行い、打設直後に傾斜計を計測し、1週間後にも傾斜計を計測する。
- ②①終了後、傾斜計の値を確認し、50kg/m³固化材添加率による固化パイルの打設を行い、打設直後に傾斜計を計測し、1週間後にも傾斜計を計測する。
- ③②終了後、傾斜計の値を確認し、無配合によるパイルの打設を行い、打設直後に傾斜計を計測し、1週間後にも傾斜計を計測する。

以上、(1)~(3)で述べた各ケースの計測項目の一覧を表-4に示す。

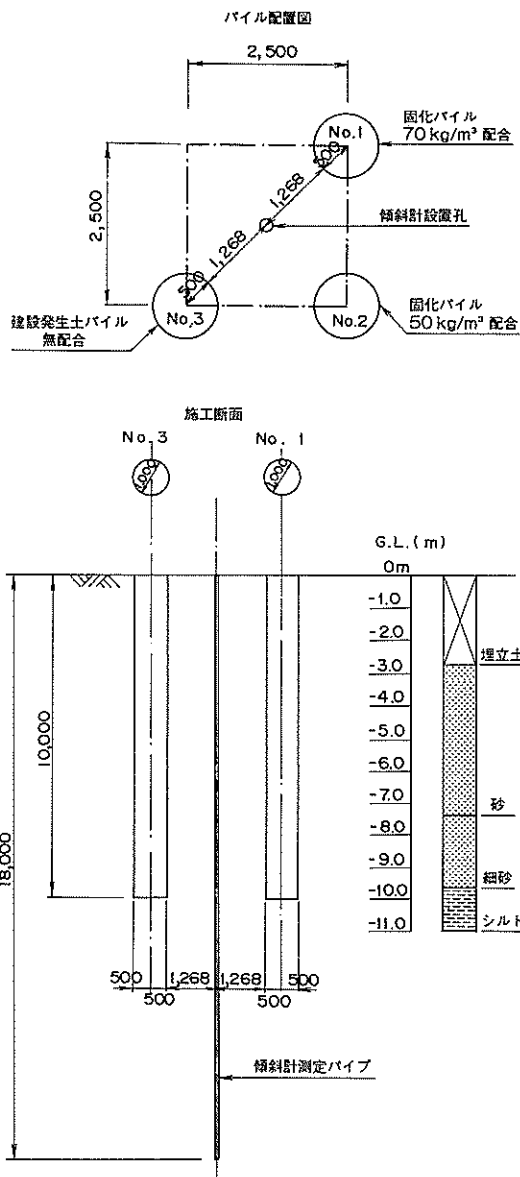


図-13 傾斜計による側方変位の測定図

表-4 各ケースの計測項目

実験ケース	パイル補給材	調査項目
1	50 kg/m ³ 配合 70 kg/m ³ 配合	締固め効果 N値
2	碎石	騒音・振動
3	50 kg/m ³ 配合 70 kg/m ³ 配合 無配合	地盤内の側方変位

5. 実験結果と考察

5.1 施工状況と施工出来形

施工中の状況を写真-2に示す。



写真-2 打設機械と施工状況

パイルの造成時間は、ばらつきはあるが、ケーシングを貫入し始めてから、20分～40分程度かかっており、パイルの長さが10mであるから、0.25m/分～0.5m/分の施工速度である。

パイルの出来形については、パイル打設後の掘起こし調査から、約1mの円形の断面で出来上がっていることが確認されている。なお、掘起こし調査は地表面から約1.5mの深さまで行っている。さらに、補給材の投入量とパイル長10m、および断面を円形と仮定し、式(1)によりパイル径を算出すると、パイル径は1.0～1.1mが得られた。なお、補給材の投入量は、固化材混合後の緩んだ状態の土量の体積が、地盤内への打設後も変化しないと仮定している。

$$D = (4 \times V / \pi)^{0.5} \quad (1)$$

ここで、Dはパイル径、Vは補給材の投入体積である。

5.2 締固め効果(実験ケース1)¹⁰⁾

実験ケース1では、固化パイルの造成によりパイル周辺地盤が、どの程度締め固まるかの確認を、固化材添加率が、50kg/m³と70kg/m³の2種類の補給材を用いて行った。

(1)標準貫入試験結果

図-14は、杭間、杭芯での打設1週間後の標準貫入試験結果を深度方向にプロットしたもので、打設前の原地盤N値と合わせて示してある。図-14から、杭芯では明らかに、打設後のN値の方が打設前の原地盤N値よりも

大きく、また、固化材添加率が 70kg/m^3 の補給材を用いた方が、 50kg/m^3 のものより N 値が大きくなっていることがわかる。杭間の N 値については、杭芯の場合と比較すると、 N 値の増加は少ないが、パイル打設後の方が N 値は大きくなっている。

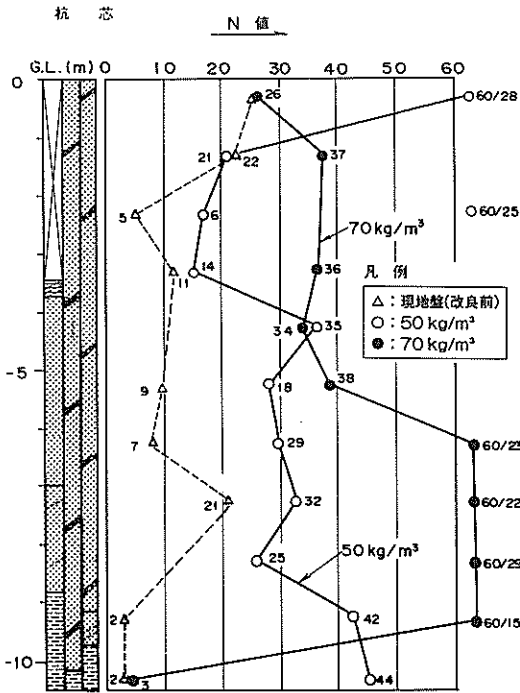


図-14(a) 杭芯での N 値

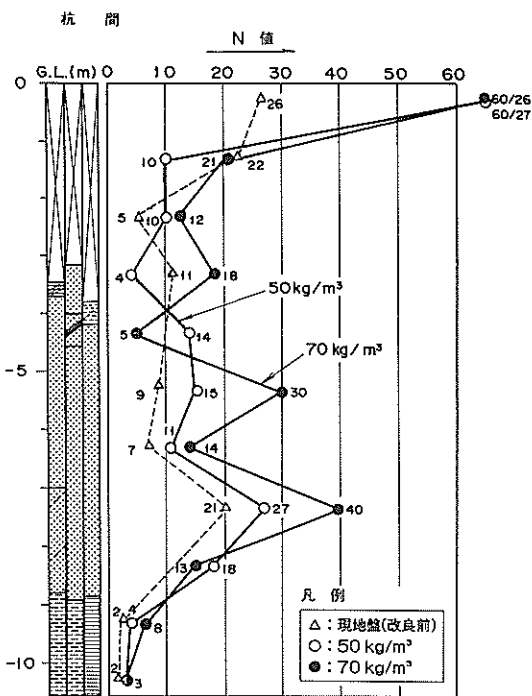


図-14(b) 杭間での N 値

図-15は、図-14で示したパイル打設前の原地盤 N 値と打設後 N 値を締め固め対象としている砂質土層内のものについて比較したものである。図-15から、図-14で述べたと同じように、杭芯、杭間のいずれでも N 値が打設により増加しており、打設前に5~20の N 値であったものが、打設後には、杭芯で20~60以上、杭間で10~40の N 値まで改良されていることがわかる。また、固化材の添加率の大きなものほど、 N 値が大きくなっていることも示されている。

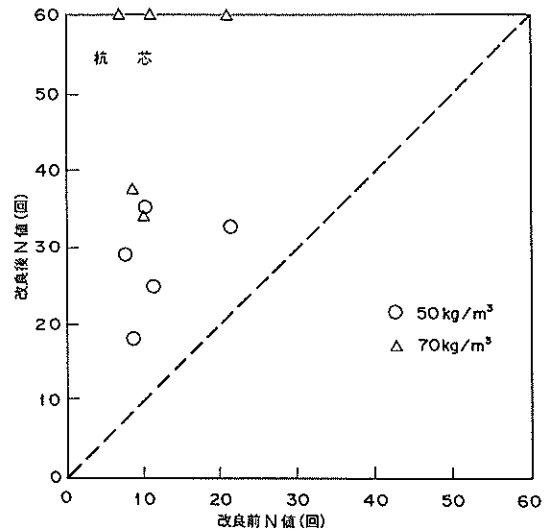


図-15(a) 杭芯での改良前と改良後の N 値の比較

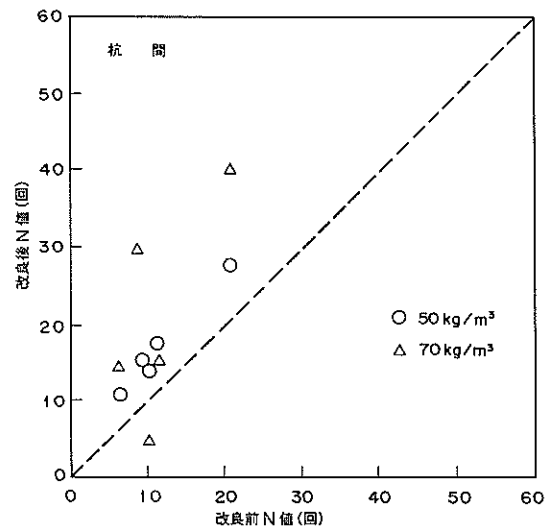


図-15(b) 杭間での改良前と改良後の N 値の比較

(2)動的締め固め工法との比較

動的締め固め工法との締め固め効果の比較として、SCP工法との比較を N 値について行う。図-16の曲線は、SCP工法の実績を整理したもので¹⁸⁾、改良前と改良後

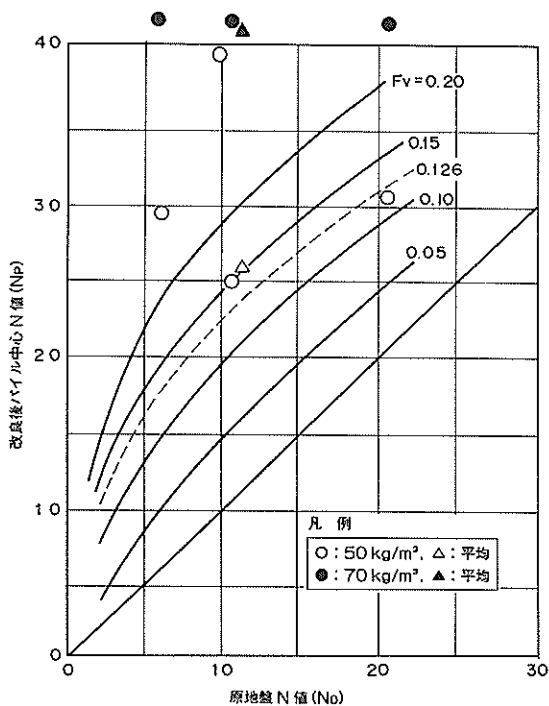


図-16(a) 杭芯でのSCPとのN値の比較(文献18に加筆)

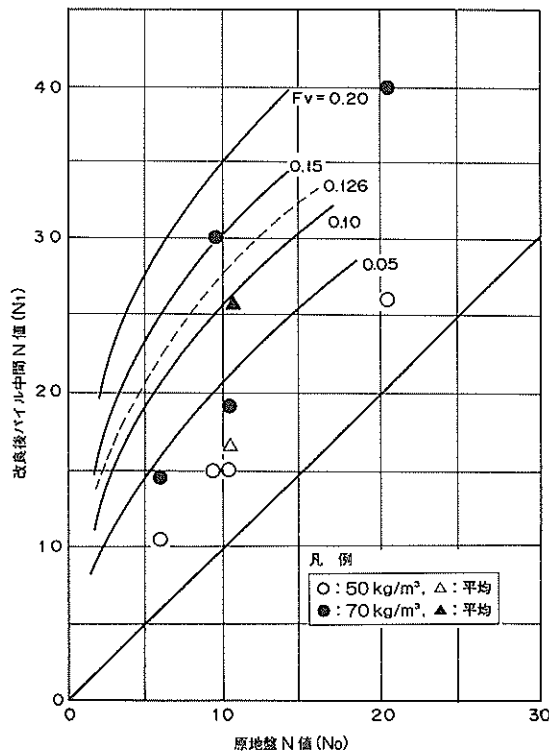


図-16(b) 杭間でのSCPとのN値の比較(文献18に加筆)

のN値の関係を、圧入率をパラメータとして、杭芯と杭間について示したものである。パイル配置が正方形の場合の圧入率は、式(2)で与えられる。

$$Fv = ((\pi/4) \times D^2) / d^2$$

(2)

ここで、Fvは圧入率、Dはパイル直径、dはパイル中心間の距離である。実験ケース1の場合は、パイル中心間の距離が2.5mで、パイル直径を1.0mとすると、圧入率は0.126が得られる。

本実験結果を、70kg/m³の固化材添加率のものを●、50kg/m³の固化材添加率のものを○プロット、それぞれの平均値を▲、△で図-16に示す。また、図-16には、圧入率が0.126の場合のSCP工法の原地盤N値と改良後N値関係を、他の曲線から内挿して求めたものを破線で示す。図-16で、今回の実験結果をSCP工法のFv=0.126の場合と比較すると、杭芯では明らかに本実験結果の方がSCP工法のものより改良後N値が大きくなっており、大きな締固め効果もしくはセメントの効果が得られていることがわかる。杭間については、50kg/m³の固化材添加率の場合には、SCP工法の圧入率が0.126の場合より改良後のN値はかなり小さくなっており、SCP工法ほどの改良効果は得られていない。固化材添加率が70kg/m³の場合には、改良後のN値はSCP工法の圧入率がFv=0.05~0.15の範囲でばらつき、Fv=0.126の改良後N値をやや下回っているが、平均的にはFv=0.10と同程度の改良後N値となっている。

以上から、限られた1ケースの現地実験ではあるが、本工法により、地盤を締固めることが可能であることが確認できた。また、締固め効果は補給材の固化材添加率の影響を受け、固化材添加率の大きなものほど改良後N値は大きくなり締固め効果が高くなることがわかった。固化材添加率が大きな方が、改良後N値が大きくなる理由は、杭芯では固化材添加率による補給材そのものの強度の差が表れているものとして説明できる。杭間については明確な説明はできないが、固化材添加率の大きなものほど、パイルの強度が大きくなり、周辺地盤の施工後の緩みを防止できたことが理由として考えられる。このようなことは、後述の実験ケース3で観察されている。また、実際の施工においては、図-2に示したように、最初に改良範囲の外周を施工し、その後内部を順次施工するというような施工手順にすれば、パイルの固化による地盤の拘束効果が表れ、後から打設されるパイルによる締固め効果が向上することが期待される。このような場合には、固化材添加率が大きなものほど、パイルの剛性が大きくなり、締固め効果は大きくなる。次に、動的な締固め工法と比較した場合には、固化材添加率が

50kg/m³の補給材を用いたものでは同じ圧入率のSCP工法のものより改良後N値はかなり小さく、固化材添加率が70kg/m³ではやや下回るという結果がでている。このようなことから、従来の動的な締固め工法と同程度の改良を行うためには、補給材に添加する固化材の添加率は重要なパラメータであるといえる。なお、山田らは静的な機構を用いた締固め工法の実験工事を行い、SCP工法との比較を行っている。この実験工事では、補給材に固化材が添加されていないが、杭間においてもSCP工法と同一の圧入率で同程度の改良後N値を得ることができたと報告されている¹⁾。これは、本現地実験結果とは異なった結果で、この差異は、山田らの実験では砂杭の打設が13本×95列と本実験の2本×2列よりかなり

大規模であったことが原因であると考えられる。打設本数が多くなるほど、打設中の地盤の拘束効果は大きくなり、杭間も締固まりやすくなるので、当工法の場合も大規模に打設すれば、杭間の改良効果はSCP工法と同程度になる可能性があるといえる。

5.3 騒音・振動（実験ケース2）

実験ケース2では、本工法の施工により発生する騒音・振動レベルを調べた。なお、ここでは、補給材として建設発生土は使用せず、砕石を使用した。また、固化材も使用していない。

図-17に騒音・振動の測定例を示す。また、図-18には騒音・振動レベルと打設パイルからの距離関係を示す。

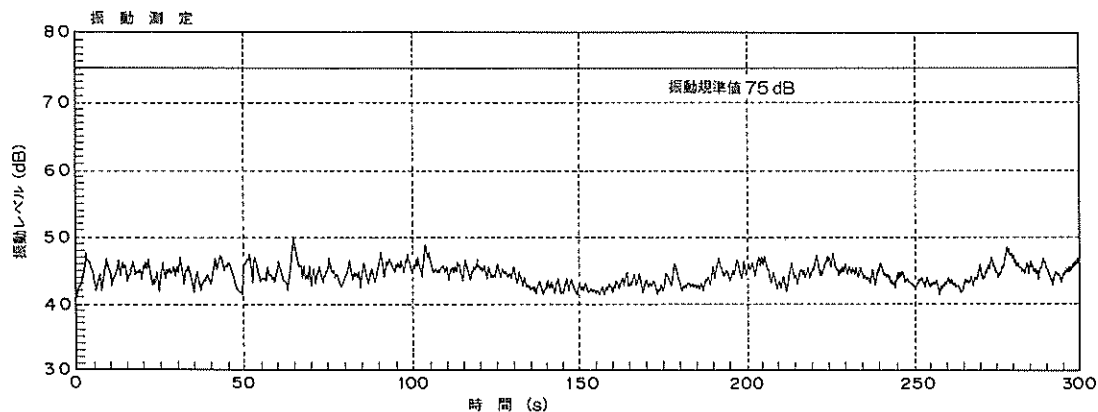


図-17(a) 振動の測定例

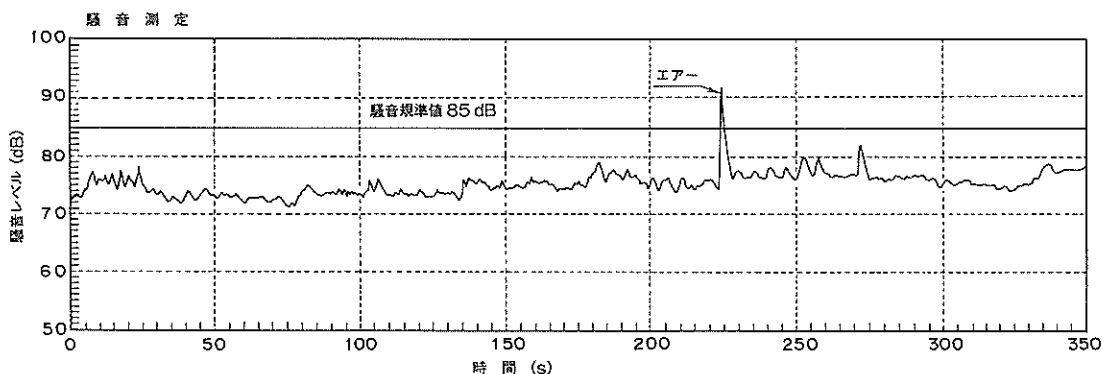


図-17(b) 騒音の測定例

図-18には今回の実験結果の●プロットとともに、他工法のものも示してある。今回の実験の各プロットは、パイル打設中に観測した騒音・振動の最大値と最小値をプロットしたものである。図-18から、打設パイル位置から離れるにしたがい、騒音・振動の大きさは小さくなるのがわかる。既存の動的な締固め工法と比較すると、振動レベルは、他のすべての締固め工法よりかなり低いレベルとなっている。また、振動規準値75dBを下回っており、振動については、十分低減されている。騒音レベルについては、パイプフローテーション工法の結果

を一部下回るプロットはあるが、多くのプロットは他の締固め工法とほぼ同程度の騒音レベルで、騒音については低減されていない結果となっている。しかし、これは、図-17(b)に示すように内ケーシング内の圧気を解除する時などの瞬間的なもので、打設中に継続的に起こるものではない。この瞬間的な騒音については、施工機械の改良で低減可能で、図-17(b)で瞬間的な大きな騒音を除くところでは騒音の規準値85dB以下となっているので、将来的には騒音についても十分改善されると考えている。

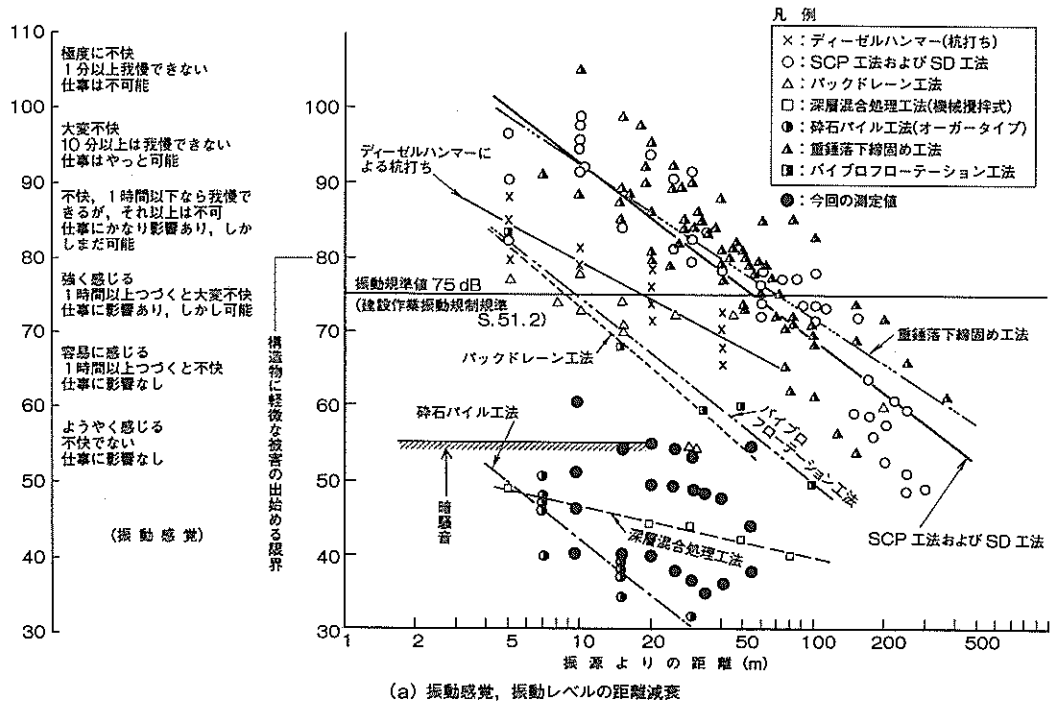


図-18(a) 他工法との振動レベルの比較(文献13に加筆)

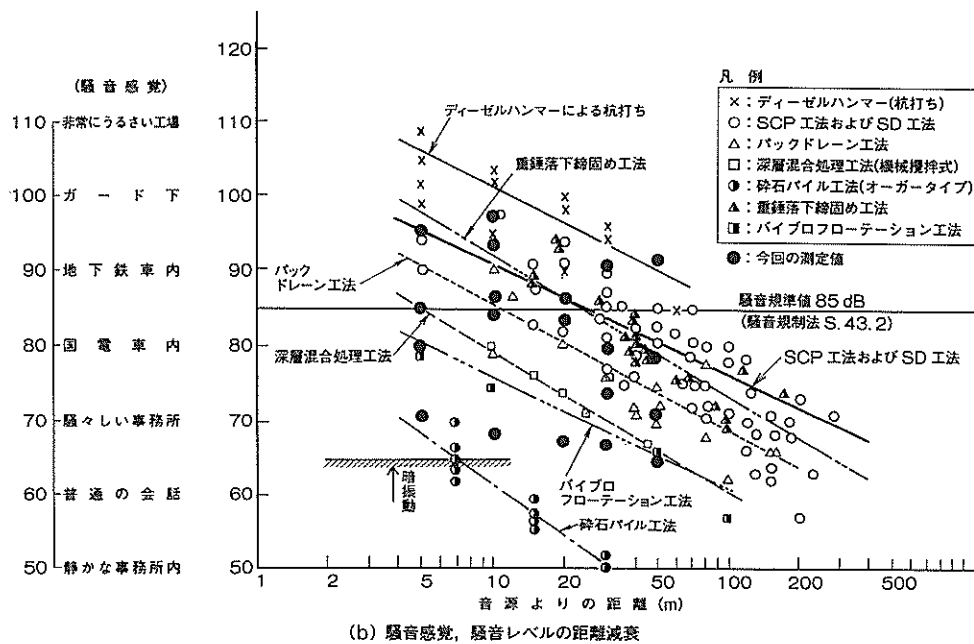


図-18(b) 他工法との騒音騒音レベルの比較(文献13に加筆)

5.4 地盤変形（実験ケース3）

実験ケース3では、長さ10mの固化パイル造成による周辺地盤の側方変位について調査した。

図-19が地中の側方変位の測定結果を深度方向に示したもので、ケーシング貫入直後、パイル打設直後、パイル打設1週間後のものを、70kg/m³固化材添加率、

50kg/m³固化材添加率、固化材なしの3つについて示してある。なお、この変位の計測位置は、図-13に示したようにパイル側面から約1.3m(中心から1.8m)離れた位置で、変位の符号は地盤がパイルから離れる場合を負と定義している。

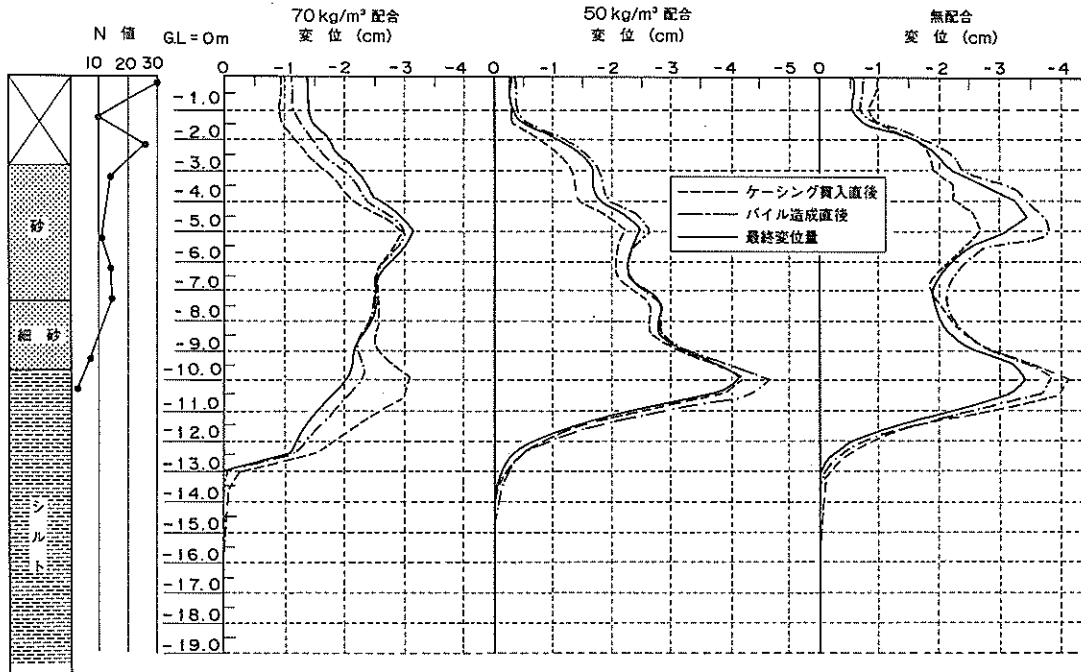


図-19 傾斜計による側方変位の測定結果

図-19より、ケーシングを貫入させることにより、パイル側面から1.3m離れた位置の地盤は最大4cm程度側方に移動することがわかる。施工では、約0.8mの直径のケーシングを地盤内に貫入させ、直径約1mのパイルを圧入打設している。したがって、パイル中心から0.4m離れた位置の土は側方へ10cm程度移動していることになるが、パイル中心から1.8m離れた位置では最大で約4cmの側方変位となり、パイル打設による周辺地盤の変形は、パイルから離れると徐々に小さくなるようである。また、鉛直方向の変位分布については、地表面付近では1cm程度と小さく、地表から深さ5~10m程度のところで変位は大きくなり、パイル先端より深くなると変位は小さくなっていく。菅沼らの静的な砂杭締固め工法の実験工事では、地表面で水平変位の最大値が得られており¹²⁾、当実験結果とやや異なる傾向となっている。これは、本実験と改良仕様、変位の計測位置等が異なっており、これが原因したものと考えられる。したがって、地盤内変位は、改良仕様等の影響を受けるといえる。

パイル打設後の時間的な変化でみると、70kg/m³固化

材添加率のものは、1週間後には打設直後よりさらに変位は進んでいるが、50kg/m³固化材添加率と無配合のものは変位が戻ってきている。図-20は、このことを詳細に調べたもので、パイル打設直後の地盤変位をゼロとし、1週間後の変位増分を周辺地盤がパイルから離れるものを正として深度方向に示したものである。図-20から、無配合と50kg/m³の固化材添加率のパイルの場合には、周辺地盤がパイル中心の方へ変位し、固化材添加率70kg/m³のものは、パイルから離れる方向に変位していることがわかる。これは、打設後、固化材添加率50kg/m³と無配合の周辺地盤は膨張し緩み、固化材添加率70kg/m³の周辺地盤は圧縮しさらに締固まったことを意味している。このような固化材添加率による周辺地盤の変位の違いは実験誤差であるか、あるいは本質的なものであるか今後さらに検討が必要であるが、これは、実験ケース1での固化材添加率の違いにより改良後の杭間N値が異なった、1つの原因と考えられる。

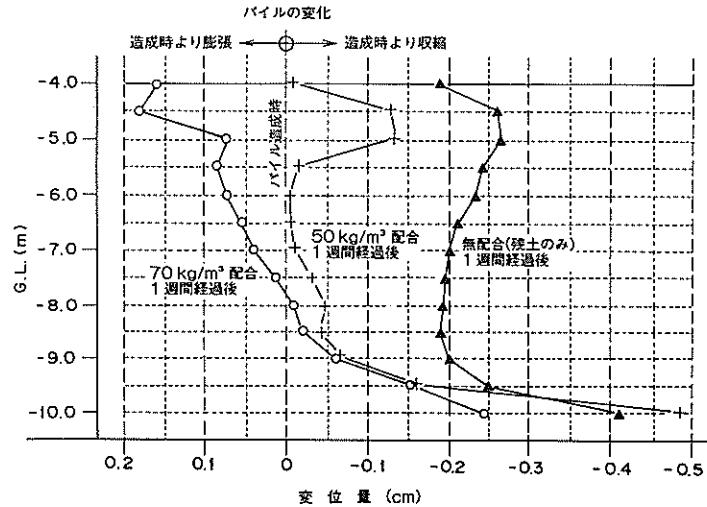


図-20 固化パイル打設後の側方変位

6. 結論

建設発生土に固化材を添加した補給材を地盤内に静的に圧入することにより、地盤を静的に締固める新しい液状化対策工法の現地実験を実施した。得られた主要な結果は以下の通りである。

(1)静的な方法で地盤内に補給材を圧入し、杭を造成することにより、周辺地盤のN値は原地盤のものより大きくなった。このことより、本工法による締固め効果が確認された。

(2)締固め効果は、補給材の固化材添加率に依存しており、固化材添加率の大きなものほど、杭芯、杭間におけるN値の増加量は大きかった。

(3)既存の動的な締固め工法である、SCP工法と、締固め効果の比較をN値を用いて行ったところ、杭芯では本工法の方が効果が大きく、杭間では本工法の方が効果が小さかった。しかし、杭間については、本実験では杭の打設規模が2本×2列と小さかったため効果が小さかったと考えられ、実際の施工のように打設規模を大きくすれば、杭間でもSCP工法と同程度の効果が得られる可能性がある。

(4)施工時の振動・騒音の測定結果は、振動については、既存の締固め工法より、かなり低減されており、振動レベルは振動の規準値75dBを下回った。騒音は、瞬間的に高いレベルのものが発生し、騒音の規準値85dBを上回っていた。しかし、これは、施工時の空圧の除荷に伴うもので、それ以外のところでは、規準値以下であった。この点については、施工機械の改良で対処できる。

(5)打設時の圧入にともなう、地盤内の側方変位は、固化パイル中心から1.8m離れた位置で最大約3~4cmで、地表面付近では1cm程度であった。

7. あとがき

新しい液状化対策工法について現地実験を行い、その有効性を明らかにした。しかし、設計法・施工法確立のために、締固め効果が得られるメカニズムを定量的に把握すること、施工中の騒音レベルを抑えることが今後の課題として残されている。1点目については、圧入率と周辺地盤の密度増加(N値の増加)、土圧の増加等の関係を定量的に把握するというものであり、室内で大型の土槽実験等を行い、検討を進める予定である。このことは、特に、本工法の設計法確立のためのキーポイントである。2点目については、施工機械の部分的な改良で比較的簡単に対処できると考えており、対処後には、従来からの締固め工法が持っていた問題点の1つである、騒音・振動問題の実務面での克服が可能となる。

最後に、現時点での実際問題への適用については、本工法により締固め効果が得られることを確認できたが、前述のようにその定量化が未だできていない。したがって、適用にあたっては、試験施工等を適宜行うことが必要であると考えている。

なお、本資料は港湾技術研究所と大恵工業株式会社との共同研究成果の一部である。

(1997年9月30日受付)

参考文献

- 1)港湾施設被害検討委員会編：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察，港湾技研資料，No.813，1995
- 2)上田茂，稲富隆昌，上部達夫，井合進，風間基樹，松永康男，藤本健幸，菊地喜昭，宮井真一郎，関口信一郎，藤本義則：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.766，1993
- 3)稲富隆昌，上部達夫，井合進，田中祐人，山崎浩之，宮井真一郎，野津厚，宮田正史，藤本義則：1994年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.856，1997
- 4)風間基樹，田中祐人，興石逸機：1994年三陸はるか沖地震における港湾・鉄道施設の被害，土と基礎，Vol.43，No.11，pp.21～26，1995
- 5)地盤工学会：阪神・淡路大震災調査報告書（解説編），pp.71～228，1996
- 6)地盤の液状化防止策に関する研究委員会：地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.15～40，1991
- 7)沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），pp.141～146，1997
- 8)土質工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，pp.187～242，1993
- 9)山田優，長坂勇二，檜垣貫司，川地武：発生土および廃棄物の現状と問題点，土と基礎，Vol.44，No.11，pp.59～63，1996
- 10)田居繁，中里高密，山崎浩之：建設発生土を利用した液状化対策工法の現地実験，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第3部(B)，pp.418～419，1997
- 11)山田隆，野津光夫：非振動式締固め砂杭工法による砂地盤の締固め効果，第31回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.49～50，1996
- 12)菅沼史典，深田久，中井則之：静的締固め砂杭工法の施工事例報告，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第3部(B)，pp.412～413，1997
- 13)土質工学会：軟弱地盤対策工法—調査・設計から施工まで—，pp.29～30，1988
- 14)土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル，1994
- 15)勝見武，山田優，小川伸吉，神谷光彦：発生土の地盤工学的有効利用，土と基礎，Vol.45，No.1，pp.55～60，1997
- 16)松永康男，安達崇，土田孝：軽量混合土を利用した岸壁の復旧，土木施工，Vol.37，No.7，pp.65～70，1996
- 17)山崎浩之，善功企，加賀屋宏基：過圧密砂の液状化特性，第27回土質工学研究発表会発表講演集，pp.845～846，1992
- 18)不動建設(株)研究室：コンポーザー・システムデザインマニュアル，pp.11～18，1971

港湾技研資料 No. 887

1997・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行人 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社ポートサイド

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1997) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。