

M. V. C. P. 工法と施工例

——ネジリ振動締固めを利用した砂地盤の改良——

木村 薫 平間 邦興
菱河 恭一 八戸 裕
(本社 機械部) (本社 技術本部 土木技術部)
羽生田 吉也 松本 伸

M.V.C.P. Method and Example of Construction

——Improvement of Sandy Ground Making Use of Torsional Vibrated Compaction——

Kaoru Kimura Kunioki Hirama
Kyoichi Hishikawa Yutaka Hachinohe
Yoshinari Hanyuda Shin Matsumoto

Abstract

Thick, loose sand deposits and fills of sand are distributed widely along the seacoasts of Japan. Moreover, various kinds of important structures have been constructed on such ground. The M.V.C.P. Method is a new soil improvement method which has been developed with the objective of serving as a countermeasure for liquefaction of loose sandy ground. The vibration mode of the sand compaction pile method used as a liquefaction countermeasure in the past provides compaction by vertical vibration only, but this method is capable of transmitting both vertical and horizontal (torsional) vibrations, and compound vibrations of the above two through wings on casings.

In this report the authors give an outline of the thinking behind the method, its features and examples of construction, mainly concerning the results of examinations compared with the conventional method.

概 要

我が国の海岸沿いには層厚が大きく緩い推積砂層や埋立て砂層の地盤が広域に分布しており、しかも、このような地盤に種々の重要構造物が建設されるようになってきている。M.V.C.P 工法とは、主に、緩い砂質地盤の液状化対策を目的として開発された新しい地盤改良工法である。従来から液状化対策工法に使われているサンドコンパクションパイル工法の振動方式が鉛直振動のみによる締固めであるのに対して、本工法では鉛直振動に加えて水平振動（ネジリ振動）およびこれらの複合した振動をケーシングのウィングを通じて地盤に伝えることが可能となっている。

この報文では、工法の考え方、特徴をはじめとしてこれまでの施工例から、主に、改良効果について従来工法と比較しながら検討した結果についての概要を示す。

1. 工法の考え方

飽和した緩い砂質地盤の液状化対策工法として、砂杭を強制的に地盤に造成して締固め、密度の増大を図るサンドコンパクションパイル工法（略して、S.C.P. 工法）が、従来から多く用いられている。この S.C.P. 工法の振動方式が鉛直振動のみであるのに対して、M.V.C.P.

工法（マルチ・バイブロ・コンパクション・パイル工法）では、図—1 に模式的に示すように鉛直振動に加えて水平振動（ネジリ振動）および鉛直と水平とを合成した複合振動の組合わせによって砂杭を締固めながら造成し、かつ砂を強制的に側方へ押し拡げることにより、砂杭と砂杭との杭間を効果的に締固めて、均質な地盤改良が行なえることを意図した工法である。

地盤の締固めにあたって水平振動（ネジリ振動）を与えることは、杭間の密度を意識的に増加させるばかりでなく副次的に次に示す効果が期待できる。その一つは、土の加工硬化特性と呼ばれる。ここで、加工硬化とは、いったん先

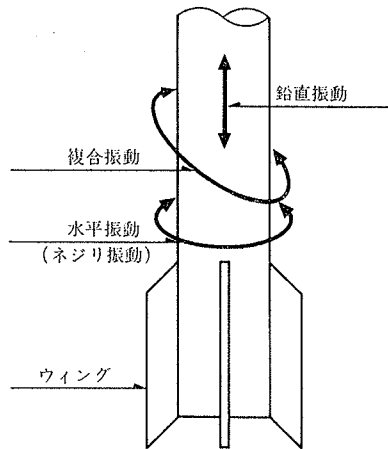


図-1 ケーシング先端部の振動方式

行荷重によって土に塑性ひずみ（永久ひずみ）が生じると、この荷重以下の応力において土は近似的に弾性的な挙動を示すようになる性質を言う。しかし、龍岡¹⁾によれば、この性質もせん断方向が変わると、その方向に、また新たに大きな塑性ひずみが生じるといわれている。したがって、この性質は、せん断方向が変わると保存されないと考えるべきであろう。このような土の加工硬化特性を利用して締固めを行なうためには、将来加わると予想されるせん断方向に近い方向で土に加工硬化を与えておかねばならない。すなわち、水平方向の外力に対しては水平方向の力をもって応力履歴を与えておくことが望ましい。

もう一つの効果として、地盤の液状化強度に及ぼす微小ひずみ履歴の影響がある。微小ひずみ履歴効果とは、過去に微小ひずみを砂質土に与えておくと、密度増加はほとんど生じないにもかかわらず、かなりの液状化強度の増加が生じるという性質である。Seedら²⁾は、この履歴による強度の増加率が45%にも及ぶ例を示している。また、石原ら³⁾も、この微小ひずみ履歴に関して次のような結論を示している。(1) 微小ひずみのせん断履歴を受けた供試体は、処女供試体に比べて硬化する。その場合、せん断履歴の影響は、圧縮・伸張側で互いに独立である。(2) 砂が液状化すると、それ以前に受けた微小ひずみ履歴の影響は消滅する。このような微小ひずみ履歴に関する研究は他にも数多くあり、いずれも強度の増大を指摘している。こうした見解は、過去に液状化を起こさない程度の地震を経験した地盤は、より大きな地震に対しても安定性が大きいという根強い意見の根拠となっている。

以上の経緯から、砂質地盤の締固めにはこれらの効果を十分に利用した締固め方法が望ましく、そのためには地震時のせん断波に近い方向で微小なせん断ひずみを地盤に与えるのが最も適切である。また、地震時のせん断

波の特徴は、土粉子を水平に振動させるものであることを考慮すれば、土粒子を水平方向に振動させて締固める方法が望ましいことになる。

以上の意図のもとに、これまで著者らは、水平振動を発生させることのできる模型を製作して数多くの締固め実験を重ね、良好な結果を得てきている^{4),5)}。また、動的試験によっても、これらの効果を確認してきた経過がある⁶⁾。

2. 工法の概要

前掲の図-1に示すように M. V. C. P. 工法は、特殊な起振機により発生する鉛直振動、水平振動（ネジリ振動）およびそれらを合成した複合振動をケーシングに付したウィングを通じて任意に地盤に伝え、鉛直振動のみによる従来からの工法に比べて効果的に地盤を改良することのできる工法といえる。鉛直・水平・複合振動を任意に加振できる特殊な起振機（マルチパイプロハンマー）は日平産業(株)との共同開発によって製作に成功している。工法の特徴を列挙すれば、次のようになる。

(1) 従来工法によれば、砂杭自体は十分に締固まるが杭間では所定の締固め度が得られないことがあり、これがしばしば問題点として指摘されてきた。しかし M. V. C. P. 工法によれば、水平振動（ネジリ振動）および複合振動により砂杭のみを過度に締固めるのではなく（杭芯のN値は従来工法に比べて小さくてもよく）、それよりも砂杭と砂杭との杭間の砂層を従来工法に比べて効果的に締固め、地盤改良の均質化を図ることができる。

(2) 地震時のせん断波に近い水平振動履歴を地盤に与えておくことにより、液状化強度の増大をはじめとして耐震性のある地盤に改良することができる。

(3) ウィングを利用した鉛直、複合および水平振動の締固め機構により、砂圧入率の増大が可能である。

(4) 複合振動によるせん断貫入・締固めによって施工速度の向上が図れる。

M. V. C. P. 工法に必要な砂杭打設装置の概要を図-2に示す。杭打ちやぐらは、クローラ本体に角型リーダーを取付けたもので、従来のサンドコンパクションパイル工法に使用されてきたものと同じである。起振機およびその他の周辺装置の詳細については、前報⁷⁾を参照されたい。

3. 横浜市金沢区における埋立地盤での施工例

3.1. 工事の概要

横浜市金沢区において試験工事を実施した。地盤改良区域を従来工法（S. C. P. 工法）ヤードと開発工法（M. V. C. P. 工法）ヤードに2分し、正方形1.7mピッチで

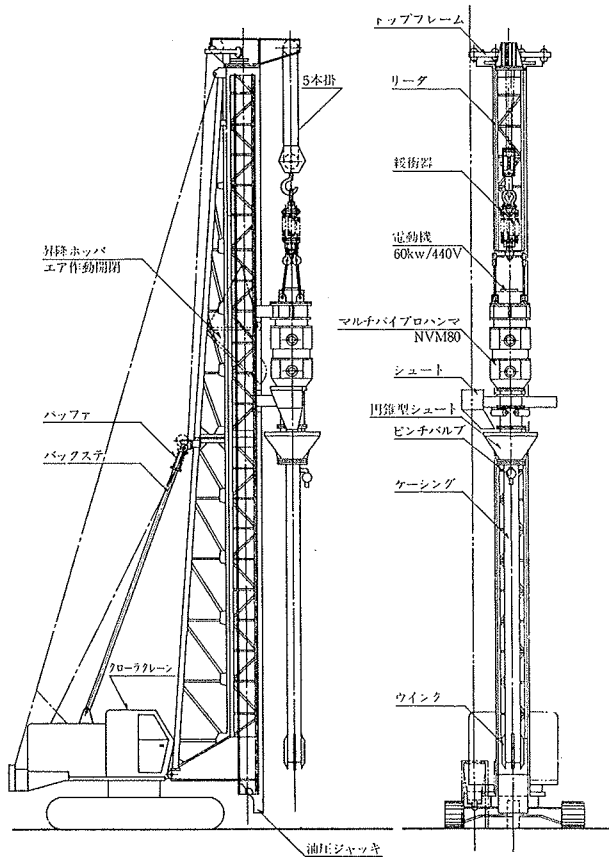


図-2 打設装置の概要

砂杭を同じ打設条件で施工した。改良深度は7m、仕上り砂杭径 $\phi 700$ mm、砂圧入率 (F_v) は、0.133である。

該当地盤は図-3に示すように、極めて液状化し易い範囲の粒度分布特性を有する砂層からなり、後掲するようにN値も3~10の範囲を示し、緩い状態で推積している。

また、両工法の改良効果を詳細に把握し、比較するため、試験工事前後に表-1に示すような種々の調査・測定を実施した。

3.2. 改良効果の比較検討

浅い層では上載圧が小さく、しかも該当工事では表層締固めを実施しなかったため、従来工法と開発工法による改良効果の比較にあたっては、G. L. -2.5m以深を検討対象とし、また砂杭の打設深度が7mのためG. L. -6.5m以浅を検討対象とした。以下に2, 3の代表的な検討結果を示す。

まずN値について従来工法と開発工法を比較したのが図-4である。同図には併せて原地盤のN値も示してある。図から明らかなように、開発工法は従来工法に比べて杭芯では小さな値を示すが、杭間では大きな値を示す、前述のように開発工法については杭芯で過大なN値を得ることを目的としておらず杭間のN値を効果的に増大さ

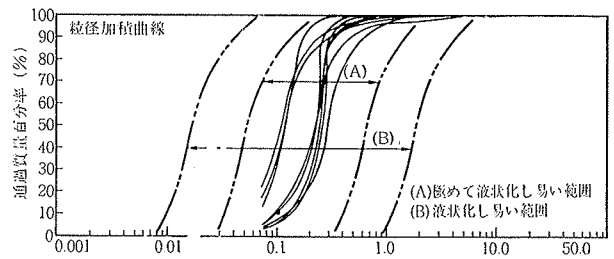


図-3 原地盤の粒度分布特性

せることを意識的に期待するものであり、杭芯と杭間の改良効果の均質化の傾向が確かめられる。

次に、耐震設計にあたって、一般に供用されるせん断弾性係数(剛性率)について比較したのが図-5である。剛性率は土の密度とS波速度より求まるが、ダウンホール法による

1	標準貫入試験
2	オレンジ式コーン貫入試験
3	プレシオメータ試験
4	PS検層(ダウンホール法)
5	PS検層(クロスホール法)
6	静止土圧測定(ジオセル)
7	加速度測定(地表面、地中)
8	地盤内の間隙水圧測定
9	公害振動、騒音測定
10	サンドサンプリング
11	各種の室内動的土質試験

表-1 調査・測定一覧

ものとクロスホール法⁹⁾により求まるS波速度の両方法によって検討した。改良後の地盤については、いずれも開発工法の方が良好な結果が得られており、クロスホール法により求めた結果について比較すれば300(kgf/cm²)程度の差が認められ、耐震性の大幅な改善がうかがえる。

また、杭基礎などの設計に用いられるプレオメータ試験結果について示したのが図-6である。降伏応力、破壊応力および変形係数のいずれについても、開発工法の方が、一般に良好な値を示している状況が明らかである。しかも、N値についての結果と同様に杭間の改良効果が卓越している。その他、杭間における静止土圧の測定結果、間隙水圧測定結果などについても、良好な傾向が明らかであり、開発工法の有用性を裏づける結果が得られている。

3.3. 施工性の検討

施工性の調査については、各砂杭ごとに、ケーシングの地盤初期貫入速度、引き抜き速度、砂杭の打設速度および1本当たりの砂杭造成時間の測定を行なった。

まず、ケーシング貫入速度の頻度分布を示したのが図-7である。バラツキはあるものの平均値でいえば、開発工法の方が速い値を示す。これは、砂層中に狭在する固結薄層を打ち抜くのに、開発工法の複合振動によるせ

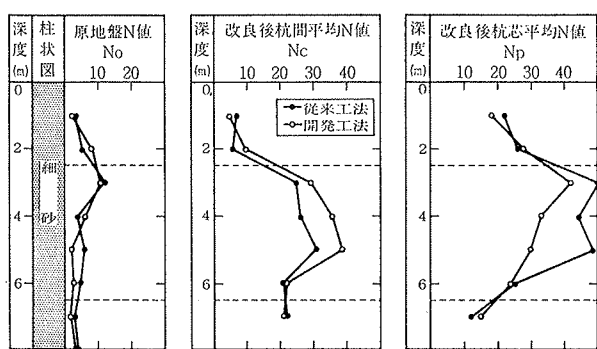
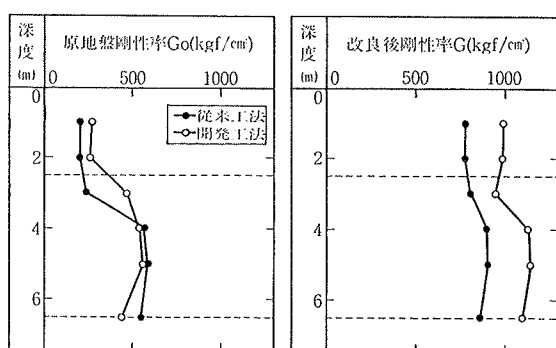
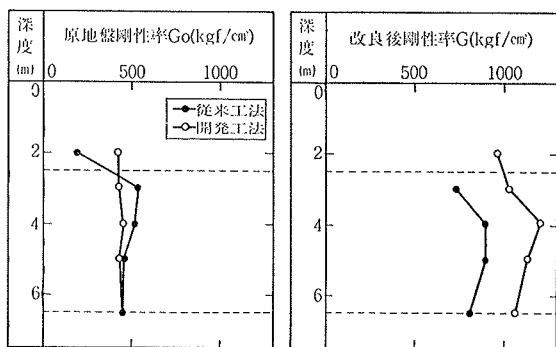


図-4 N値による改良効果の比較



ダウンホール法による



クロスホール法による

図-5 剛性率による比較

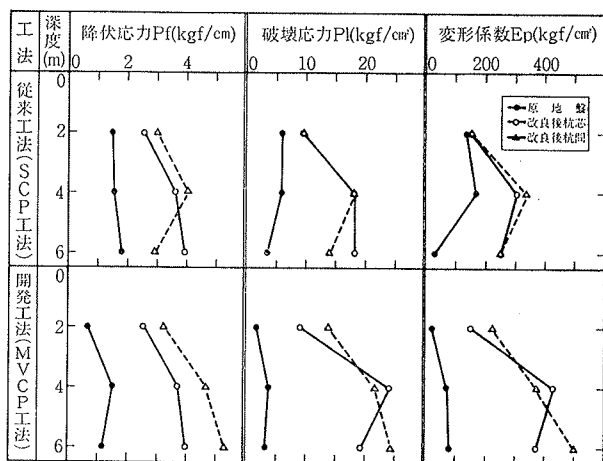


図-6 プレシオメータ試験による比較

ん断貫入の効果があったと考えられる。通常、サンドコンパクションパイル工法の施工能率は、最初のケーシング貫入速度に大きく依存するため、この特徴を大いに生かすことが、今後の課題となる。

また、ケーシングの引抜き速度および砂杭の打設速度については、両工法とも同程度の値が得られている。

以上をまとめて、砂杭1本当たりの造成時間を示したのが図-8である。図からも明らかなように、単純に平均値で比べれば従来の工法の方がやや速い値を示している。この理由としては、開発工法において鉛直・複合および水平振動を砂杭造成中に変換するときのオペレーターの不慣れによるものと考えられ、現在は施工システムの自動化によって解消済みである。

また、施工中の騒音あるいは振動については、従来工

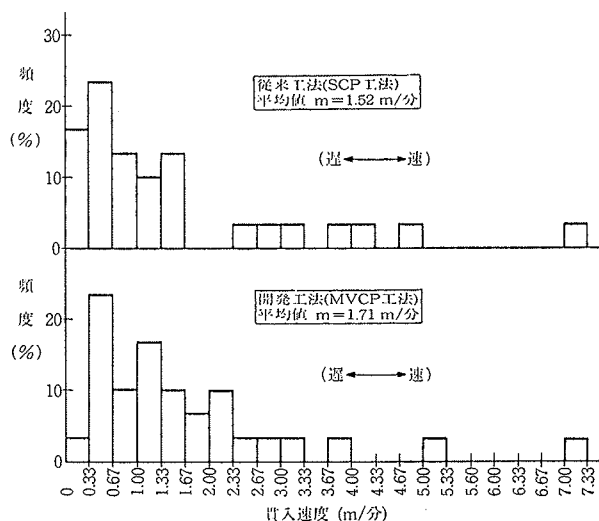


図-7 ケーシングの貫入速度

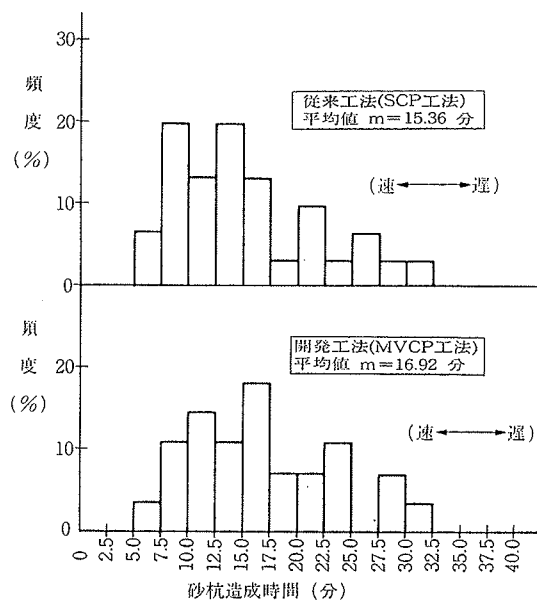


図-8 砂杭1本当たりの造成時間

法と同じか、それを少し下廻る程度であった。

4. 姫路市大津区における沖積地盤での施工例

4.1. 工事の概要

姫路市大津区における橋梁架設工事に伴い、橋台部周辺および取付け盛土部周辺の地盤を従来工法および開発工法によって改良した。該当地盤は、自然推積した極めて緩いシルト質砂層が約 G. L. -6.5 m まで分布し、その下位には軟弱なシルト層が約 G. L. -10 m 程度まで連続し、それ以深は砂礫層となる。地盤改良の目的は、盛土部の沈下対策、橋台部の横抵抗の増大および地震時における砂質地盤の液状化対策である。工事の施工概要を図-9、表-2に示す。なお、仕上り砂杭径は、すべて $\phi 700$ mm である。

ここで、施工範囲を A~F の 6 ヤードに分割したのは表-2に示すように、従来工法と開発工法の施工方法を明確にして比較検討する意味があり、これらの各ヤードはそれぞれピッチ、使用打設機、工法のいずれかが異なっている。また、B' ヤードは、B ヤードを施工中に地盤性状が局部的に急変することが判明したため急ぎ設定したものである。

4.2. 改良効果の比較検討

従来工法と開発工法による改良効果を比較するため、代表的な調査結果として、N 値およびダウンホール法の S 波速度から求まる剛性率について以下に示す。

まず、砂杭ピッチが正方形 1.8 m の A ヤード（従来工法）と C ヤード（開発工法）についての測定結果を示したのが図-10である。N 値については、前述のように開発工法の方が従来工法に比べて、杭芯では小さな値を示すものの、杭間では大きな値を示す。また、杭芯および

施工ヤード	改良深度	砂杭ピッチ	圧入率 (Fv)	使用打設機(馬力)	工法
A	10m	正方形 1.8m	0.119	従来機KMII-12000(120)	従来工法 (SCP)
B,B'	6.5m	正方形 1.8m	0.119	開発機NVM-80 (80)	従来工法 (SCP)
C	6.5m	正方形 1.8m	0.119	開発機NVM-80 (80)	開発工法 (MVCP)
D	6.5m	正方形 2.5m	0.062	開発機NVM-80 (80)	開発工法 (MVCP)
E	6.5m	正方形 2.5m	0.062	開発機NVM-80 (80)	従来工法 (SCP)
F	6.5m	正方形 2.5m	0.062	従来機KMII-12000(120)	従来工法 (SCP)

表-2 工事の施工概要

杭間N値を面積あるいは体積平均した換算N値で比べると、杭間N値が大きく影響して開発工法の方が大きな値を示すことがわかる。地盤の剛性率については、杭間で測定しており、明らかに、開発工法の方が大きな値を示している。

次に、砂杭ピッチが正方形 2.5 m の D ヤード（開発工法）と F ヤード（従来工法）について同様の調査結果を示したのが図-11である。N 値についていえば、杭芯および杭間N値のいずれについても開発工法の方が大きくまた、剛性率についても、やや開発工法の方が大きな値を示している。砂杭ピッチがかなり大きいことを考慮すれば、杭芯N値についても開発工法に良好な結果が得られたのは、地盤条件や調査結果のバラツキと考えるのが至当であろう。

施工性については、ほとんど同程度の速度であり、工法の違いによる差はみられなかった。

5. おわりに

新しく開発した液状化対策工法である M. V. C. P. 工

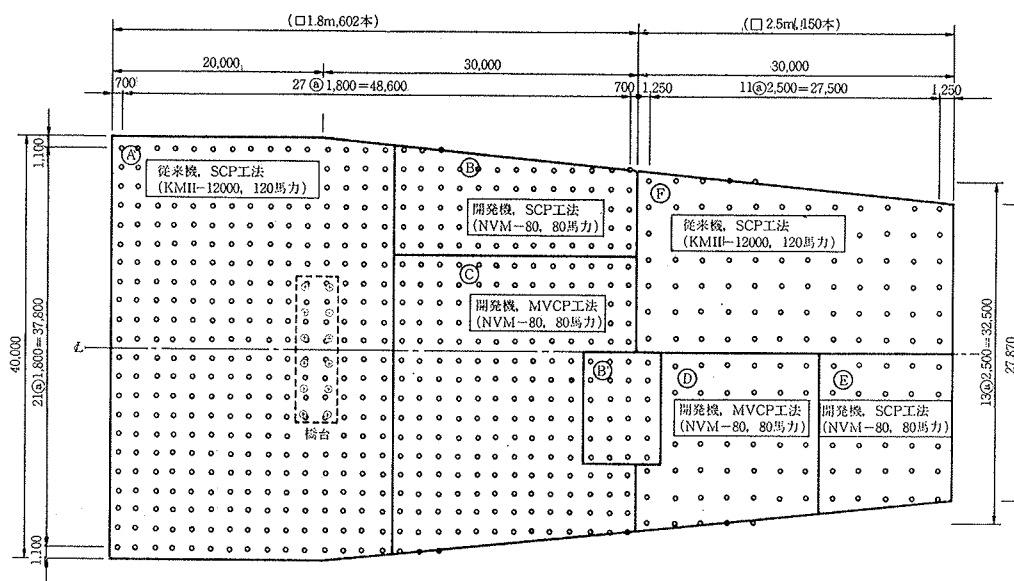
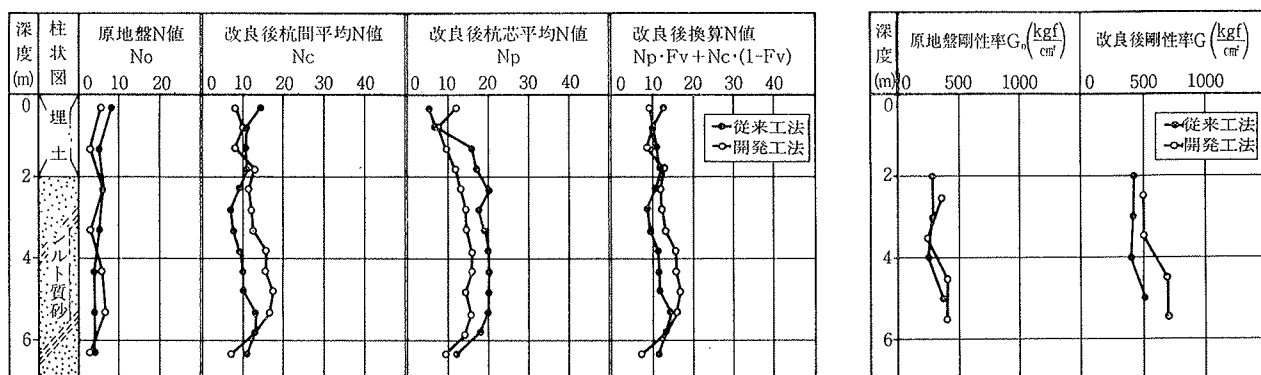
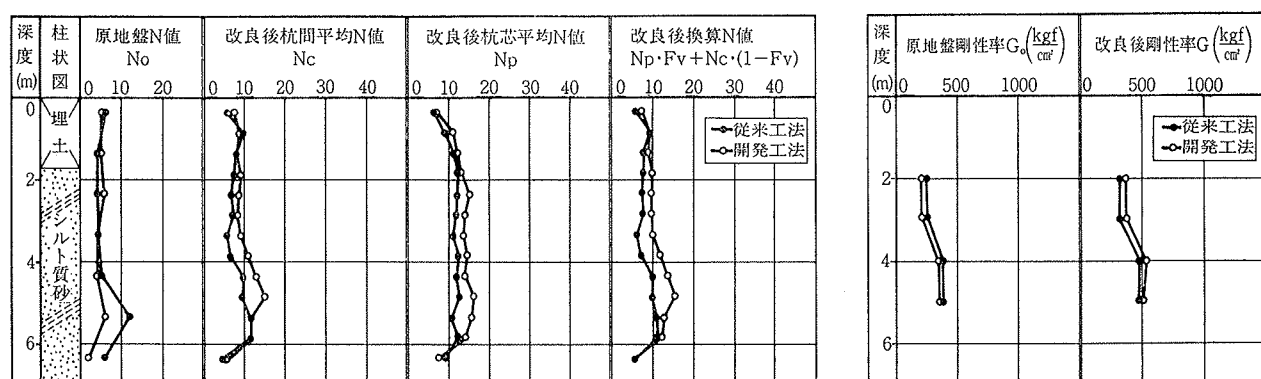


図-9 地盤改良工事の概要



図一10 N値および剛性率による改良効果の比較 (正方形1.8mピッチ, $F_v=0.119$)



図一11 N値および剛性率による改良効果の比較 (正方形2.5mピッチ, $F_v=0.062$)

法について、その考え方、特徴および施工例から本工法の有用性を示してきた。特に、改良効果については、当初から意図していた通り杭間でかなり満足のいく結果が得られたと解釈している。今後、種々の地盤条件に対して実績を積重ね、この工法に適した設計・施工法の確立が究極の課題と考えている。

本工法の開発には、当社内に設けられている技術開発委員会・第二専門委員会の内、液状化対策工小委員会が当たっている。

なお、本工法の開発および工事の遂行にあたって、多大なる尽力を受けた関係各位に深甚なる謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 龍岡文夫：三軸セン断装置による砂の変形特性に関する基礎的研究，東京大学学位論文，(1972.12)
- 2) Seed, 他：Influence of Seismic History on Liquefaction of Sand, GEOTECH, (1977.4), pp. 257

～270

- 3) 石原，他：砂の変形特性に及ぼす応力履歴の影響について，第12回土質工学研究発表会講演集，(昭和52.5)，pp. 291～294
- 4) 斎藤，木村，岩本，北村：ネジリ振動による砂質地盤の締固め試験（その1），大林組技術研究所報，No. 15，(1977)，pp. 68～73
- 5) 斎藤，木村，平間，北村：ネジリ振動による砂質地盤の締固め試験（その2），大林組技術研究所報，No. 17，(1978)，pp. 39～44
- 6) 木村，平間，北村：砂質土の液状化に関する研究，大林組技術研究所報，No. 19，(1979)，pp. 89～94
- 7) 木村，平間，菱河，羽生田：M. V. C. P. 工法のためのマルチバイブロハンマの開発について，大林組技術研究所報，No. 27，(1983)，pp. 59～64
- 8) 西亀，伊藤，加藤：クロスホール法の地盤改良効果判定への応用，第14回土質工学研究発表会講演集，(昭和54.6)，pp. 541～544