

既成グイ打ち込みによる地盤改良

齋藤 二郎 李 相一
内藤 和章 北村 仁
(本社技術本部土木技術部)

Ground Stabilization by the Compaction Pile Method

Jiro Saito Soichi Lee
Kazuaki Naito Hitoshi Kitamura

Abstract

It is a well-known fact since the Niigata Earthquake that a loosely deposited sandy layer is liquefied during an earthquake and loses its bearing capacity. Many investigations have been made since that time concerning this phenomenon. There are various countermeasures being considered among which there is the so-called Compaction Pile Method frequently adopted for such ground. The particulars of this method are that slender prefabricated piles are driven densely into the ground which is compacted against liquefaction by the pushing-in effect of the piles while a pile foundation is simultaneously produced. This report describes the extent to which the ground is stabilized by this method referring to two cases. As a result it is clarified that, except for the extreme surface, the ground becomes more stable against liquefaction the closer the spacing of the piles.

概 要

ゆるく堆積した砂質系地盤が地震動により液状化して支持力を失うという事実は、新潟地震以来、認められ研究されてきた。これに対する対策工法は種々考えられているが、小径の既成グイを地震動に対して安定な地盤まで密に打ち込んで、その押し込み効果により地盤を締め固めて対液状化に備えるべく地盤改良するとともに、同時にクイ基礎として使用される場合が多い。本報告は、このような方式によりどの程度の地盤改良効果が得られるかを、2つの実施例につき調べたものである。結果として、クイの打設ピッチを密にすればするほど、ごく表層を除いて、液状化に対して安定な地盤となりうることを示した。

1. まえがき

地震による災害、中でも地盤災害のうち、ゆるく堆積した砂質地盤とか埋め立て地などは、地震動により液状化して支持力を失なうことが、1964年新潟地震や1968年十勝沖地震などにおいて認められた¹⁾。その後、これに関する研究が進められ、この現象の解釈、地盤の液状化判定規準、対策工法などが検討され、上記のような地盤に構造物を構築する場合、液状化に対する検討が必須のものとなっており、各機関においても設計基準がつくられつつあるのが現状である。

現在行われている対液状化工法は上部構造物の重要度によって使い分けられており、比較的安定なものか

ら列挙していくと、ケーソンならびにクイによる基礎工法、良質土への置換工法、締め固めその他による地盤改良工法、盛土工法などである。このうち、クイ基礎がかなり用いられている。

新潟地震の震害報告¹⁾によっても、地震動に対して安定なる支持層まで打設されたクイにより支持された構造物は、不同沈下その他による被害が小さいとのことである。

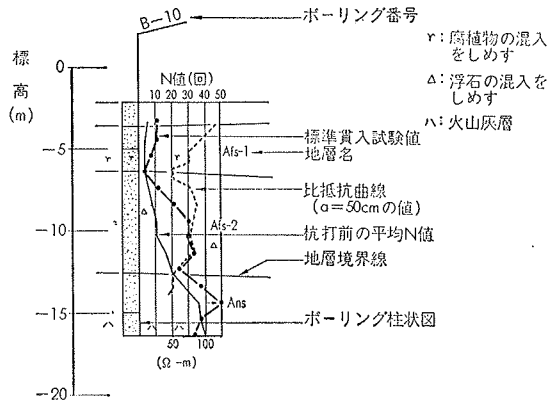
クイそのものは、構造物の荷重を良質地盤に伝えるだけのものであり、その周辺の軟弱地盤が液状化した場合、横抵抗を失なうものである。ところが打ち込みグイの場合に、実際に液状化した被害が少ないところから判断して、その押し込み効果により周辺土の空隙

図一3, 4から判断できることは、図一2のようなまばらなクイ打設によっても、かなりの地盤改良効果があることである。

3. 実施例一2

| 深度(m) | 地質時代 | 柱状図 | 地層名 | 土質名 | 記 事 | ※ N値 | 記 号 |
|-------|------|-------|--------|--------------------------|--|---------|-------|
| 5 | 第四紀 | [柱状図] | 河成堆積層 | 中砂・細砂 | 細砂に近い中砂および細砂よりなる。細粒分(細砂-シルト)を混入し不均一である。風々に粘性土を挟みAfs-2と境界によくみられる。 | 3~9 | Afs-1 |
| 10 | | | 中砂 | 均質な中砂よりなり細砂分の混入僅んどみられない。 | 5~22 | Afs-2 | |
| 15 | 沖積世 | [柱状図] | 沿岸流堆積層 | 中砂・細砂 | (不整合) 主に中砂よりなり細砂を挟んだり混入する。不均一な層および粒子である。標高-15.5m附近に火山灰を挟む。 | 26~47 | Ans |
| 20 | | | 海成堆積層 | 細砂 | 均質な細砂層よりなる。層相上安定した層である。 | 32~50以上 | Ams |

※) N値は杭打設前のN値をしめす。



図一5 当該地盤の地質構成

当該地盤のボーリング結果を図一5に示す。河成堆積層は自然地盤より-13m、掘削底面より-10.5mの深さまでであり、上部河成砂層(Afs-1)と下部河成砂層(Afs-2)に分けられる。前者は細砂に近い中砂および細砂よりなり、層相上の変化に富み、N値は3~9と小さく深度による増加も認められない。後者との境界部には0.3m~0.4m厚さの粘性土層および腐植土層をはさんでいることがサンプリングならびに電気検層から分る。この存在は、両層の生成時期の間に堆積過程における休止時期ならびに海進があったものと見なされる。下部河成砂層は中砂よりなり、肉眼的には細砂分の混入がほとんど見られない均等な粒子よりなっている。

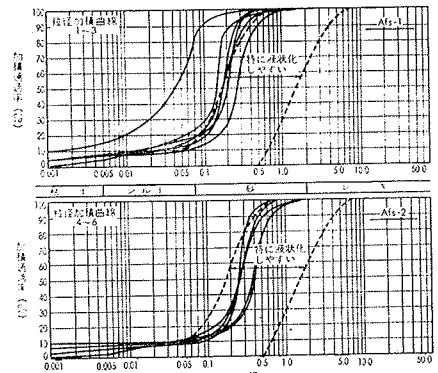
当該地盤が液状化すると考えられるのは以下の理由による。

図一6に河成堆積層の粒径加積曲線を示すが、これ

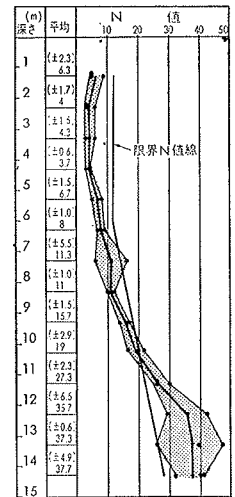
によると Afs-1と2の両層ともに特に液状化しやすい粒径範囲に含まれる。

図一7に自然状態でのN値と液状化に対する限界N値線との関係を示すが、これ

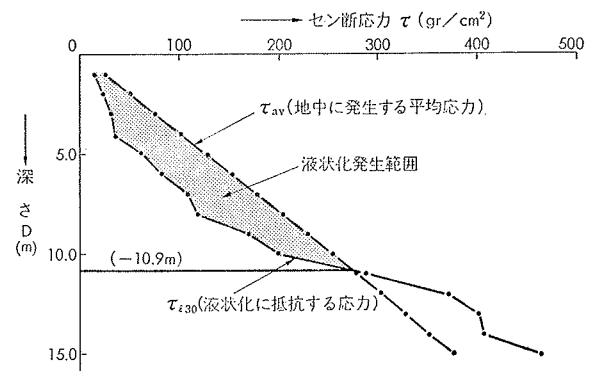
によると掘削底面から-10.5mの深さまでが液状化することになる。また、前述の如く、Seedによる判定法を行った。その過程で、この地盤が実施例一1と違うのは、地下水面の位置が掘削底面と同じであること、この地盤では $\sigma_d/2\sigma_3=0.23$ であることである。その結果によると図一8に示す如く、掘削底面から-10.9mまでが液状化することになる。



図一6 河成砂層(Afs-1と2)の粒径加積曲線



図一7 当該地盤のN値と限界N値線



図一8 Seedの方法により求めた液状化発生範囲(クイ打ち前)

こういう地盤に対して、既成グイを地盤中に密に打ち込んで地盤改良を行うことが計画され、試験工事が実施された。この方法そのものは昔から行われており³⁾、新しいものではないが、対液状化という目的を意識して行われたのは珍らしいケースであった。

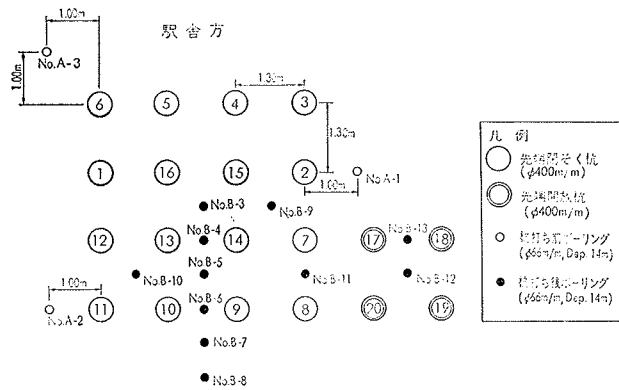


図-9 クイ打設ならびにボーリング位置図

試験工事の概要は図-9 に示す。小口径($\phi=400\text{mm}$)で長さ13mの先端閉塞グイ(クイNo. 1~16)ならびに先端開放グイ(クイNo. 17~20)をクイNo.の順序で回し込みで、ディーゼルハンマーK-32により打ちこんだ。地盤密度の変化は、打ち込み前のはボーリング孔No. A-1~3において標準貫入試験N値ならびにRI密度計・水分計により測定し、打ち込み後のものはボーリング孔No. B-3~13で同様のことを行った。

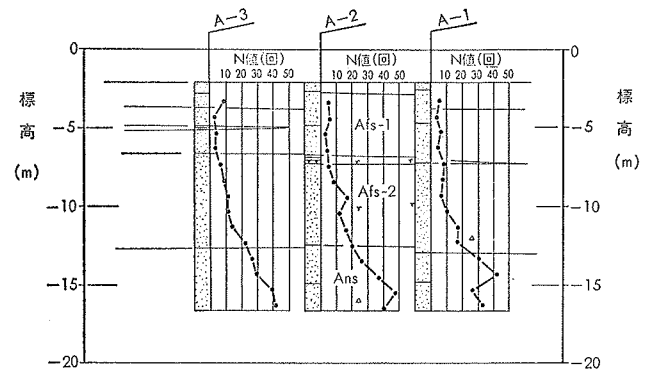


図-12 クイ打ち前の当該地盤のN値(図-9参照)

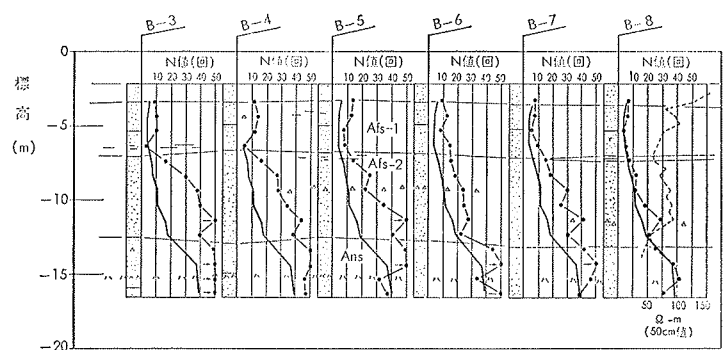


図-13-1(1) クイ打ち後の当該地盤のN値(図-9参照)

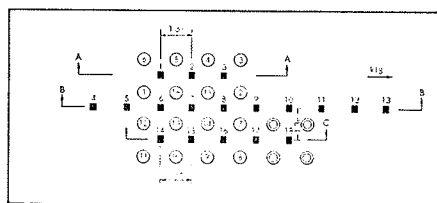


図-10 沈下板配置位置

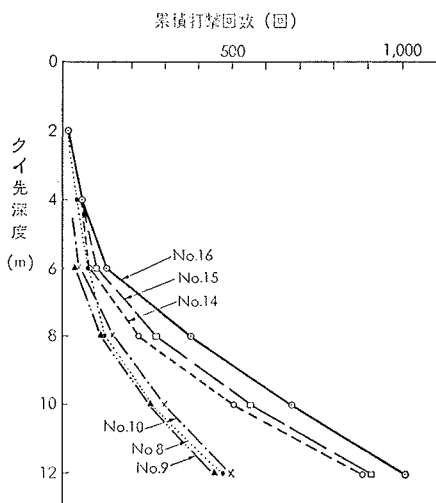


図-11 クイ先深度と累積打撃回数

全てのクイについてクイ頭に何らの破損も生じな

図-10に示す如く沈下板を設置し、各クイ打設後の地表面沈下量を測定した。工事計画通りに打ち込みが可能であ

かった。

図-11にクイ先深度と累積打撃回数の関係を示すが、深さ-6mを境にして打撃回数が増えている。これは下部河成砂層にやや入った位置である。また、外側のクイ(図-9のNo. 8, 9, 10)より中側のクイ(No. 14, 15, 16)の方がはるかに打撃回数が多い。これは回し込み打ちによる中側の地盤の密度の増加を示すものである。

図-12にクイ打ち前の、図-13にクイ打ち後のN値を示す。図-13では点を結んだものが実測値で、線だ

けのものは打ち込み前の平均N値、破線は電気検層の結果である。図-9におけるボーリングNo. B-3, 4, 5, 6, 7, 8の列では、内側のものほどN値が大きく、密に締まっていることが顕著である。

図-14ではクイ打ち後の基礎範囲の平均N値と限界N値線との関係を示す。これによると、液状化発生範囲は地表から-5.0mの深さまでに限られてきている。同じことが、先端開放グイでは-5.6mまでである。

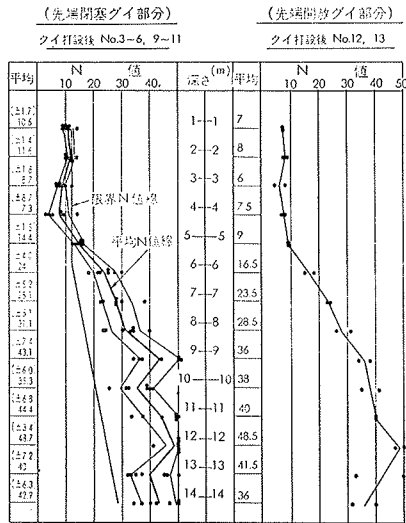


図-14 クイ打ち後のN値の平均値 (No. 3~6, 9~11, 12, 13)

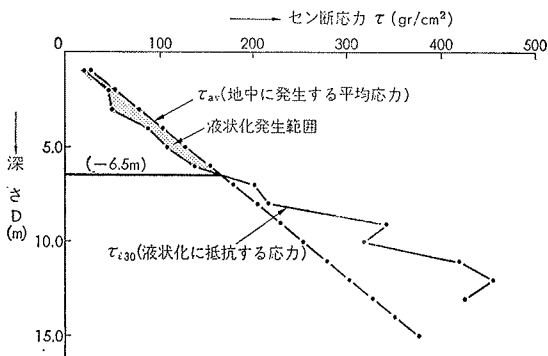


図-15 Seedの方法により求めた液状発生範囲 (ボーリングNo. B-6)

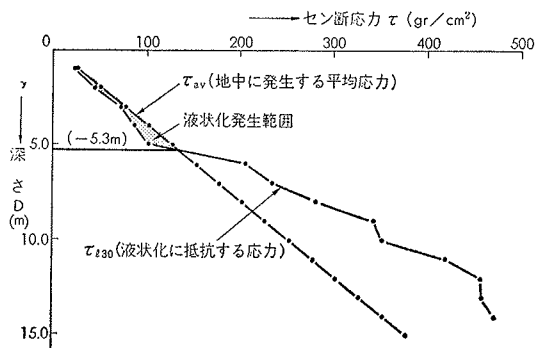


図-16 Seedの方法により求めた液状化発生範囲 (基礎範囲の平均値)

図-15はボーリングNo. B-6 (基礎周辺)における液状化発生範囲である。その計算方法は既述のもの

と同じである。この結果によると掘削底面から-6.5mの深さまでが液状化することになる。

図-16は図-14の平均N値から求めた相対密度に対して同様のプロセスを行ったものである。これによると液状化発生範囲は掘削底面から-5.3mの深さままでである。

Seedの方法を逆算していくと、液状化を生じさせない限界の相対密度が定まる。この量は深さにほぼ無関係で、この地盤では $D_r > 83\%$ である。未改良地盤の相対密度を図-7のN値から、Gibbs & Holtz¹⁾の関係から導き計算すると、図-17となり、これによると-11.3mまでが液状化発生範囲となる。

図-17を応用すると、クイ打ち効果による相対密度の増加量が分かれば、 $D_r > 83\%$ の規準にてらして液状化発生範囲の判定が行える。この為

には、以下に述べる如く、3つの方法が行える。

一つはクイ貫入量と地表面沈下の計算からこれを行う。図-18で1本のクイが受けもつ範囲は $L=1.3m$ の正方形である。この範囲の地表面沈下量は図-19から $\delta \approx 2cm$ である。図-20に示す記号を用いて以下の計算を行う。

1本のクイが受けもつ体積Vのうち、図-20で、i番目の層の体積は、

$$V_{ii} = L^2 H_i \quad \text{表-1 河成砂層の最大・最小間隙比}$$

これがクイの押し込み

と地表面沈下により V_{i2} になったとすると、

$$V_{i2} = L^2 H_i - \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) H_i - L^2 \left(\frac{\delta}{H}\right) H_i$$

クイ打ち前後の地盤の間隙比を e_1, e_2 とすると、

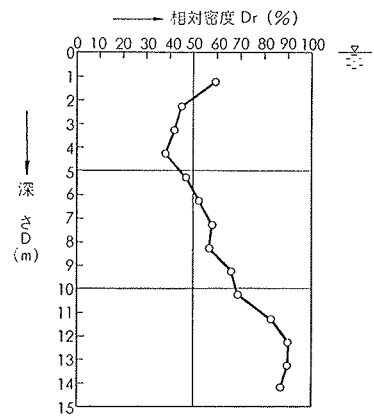


図-17 未改良地盤のN値から求めた相対密度

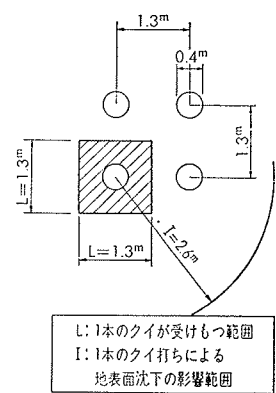


図-18 1本のクイが受けもつ範囲

| | e_{max} | e_{min} | $e_{max} - e_{min}$ |
|---------------|-----------|-----------|---------------------|
| 上部河成層 (Afs-1) | 1.17 | 0.71 | 0.46 |
| 下部河成層 (Afs-2) | 1.18 | 0.66 | 0.52 |

$$\frac{V_{g1}}{V_{11}} = 1 - \left(\frac{\delta}{H}\right) - \frac{\pi D^2}{4L^2} = \frac{1+e_2}{1+e_1}$$

$$e_2 = e_1 - \left(\frac{\delta}{H} + \left(\frac{\pi D^2}{4L^2}\right)\right)(1+e_1)$$

となる。

表-1 に河成砂層の最大・最小間隙比を示すが、これと図-17から求めた D_r から e_1 を求め、上式から e_2 を求め、 $e_1 - e_2$ から D_r の増加量を求めて図-17に加えたものが図-21である。これによると掘削底面下-7.0 mの深さまでが液状化発生範囲である。

他の2つの方法は、RI 密度計ならびに水分計の結果によるものである。図-22に、これにより求めた湿潤密度 γ_t 、含水比 w の地盤改良前後の値を示す。地盤が飽和している場合、土粒子の真比重 $G_s (=2.66)$ に対して、地盤の間隙比 e と γ_t 、 w の間には下記の関係がある。

$$e = \frac{G_s - \gamma_t}{\gamma_t - 1}$$

$$= \frac{w}{1 - w}$$

RI 密度計から求めた地盤の改良前の間隙比はかなり大きく、同水分計から求めたそれはかなり小さく評価される。両者の平均をとると図-17から求めた自然間隙比に近い値と

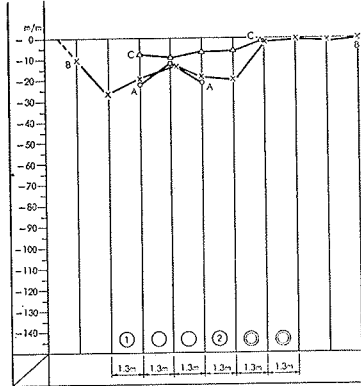


図-19 地表面沈下量 (No. 1, 2グイ打設後)

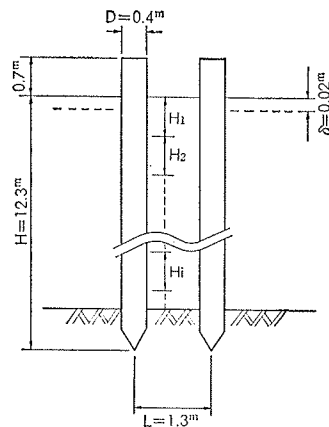


図-20 クイ貫入状態の模式図

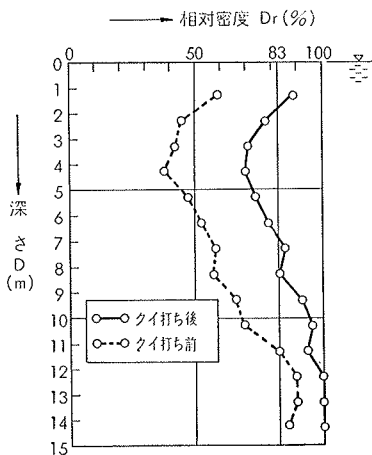


図-21 クイ貫入量と地表面沈下量より推定した液状化発生範囲

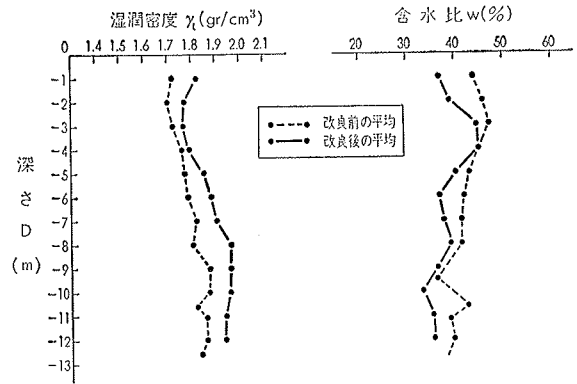


図-22 RIによる地盤の密度・含水比の測定結果(平均値)

なる。従って、改良前の相対密度として従来通り図-17の値を用い、 γ_t 、 w の地盤改良による変化のみに着目して、増加した D_r を評価すると図-23になる。これを $D_r > 83\%$ という規準に照らし合わせると、前者からは、-5.2 m までが、後者からは -5.6 mまでが液状化する層になる。

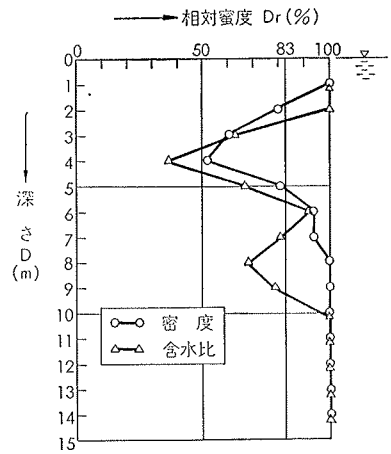


図-23 RIの結果より求めた液状化発生範囲

| 判定法 | 地盤改良前 | 地盤改良後 | | |
|----------|--------------|----------------------------|-----------------------|-----|
| | | 先端閉塞グイ ボーリング No. B-6 | 先端開放グイ 基礎域の 平均値 | |
| 限界 N 値線 | 10.5 | 4.0 | 5.0 | |
| Seed の方法 | 10.9 | 6.5 | 5.3 | |
| Dr=83% | N 値 | 11.3 | 7.0 | 5.9 |
| | クイ貫入量と地表面沈下量 | | | 7.0 |
| | RI密度計 | | | 5.2 |
| | RI水分計 | | | 5.6 |

表-2 液状化発生層の掘削底からの深さ(単位:m)

以上の結果をまとめたのが表-2である。これを総合すると-5.7m~-10.9mの層が液状化に対して安定化したと言える。

Afs-1層とAfs-2層の間には粘性土がある。従って、この附近、-4.0m~-5.5mの層は液状化に対する懸念が少ない。故に、地表から-4.0mのごく表層部分を何らかの方法により処理すれば、当該地盤は液状化に対して安定である。

4. まとめ

以上の2つの例で明らかとなったように、ゆるい砂質地盤に既成グイを打ち込んで地盤改良を行うことは、参考文献1)に指摘されるように、有効である。これが有効なのは、バイブロ・コンポーザー・パイル工法が有効なのと同じ理由で自明のことかもしれない。しかし、対液状化対策としてこの工法を見ると、以上の解析から、いくつかの得るところがある。

一つは、大口径のクイを用いるより、小口径のクイを数多く打ち込んだ方がよいことである。これは、1本のクイが及ぼす締め固め効果は、クイの近傍ほど著しいからである。

他の一つは、いくらクイの本数を増やしても、地盤のごく表層は、液状化に対して安定なままには改良されないことである。これは、有効拘束圧が十分に作用しない範囲では、この工法にも限界があることを示している。これは、表層締め固めの技術、あるいはその他の技術に依らなければならない。

いずれにしろ、液状化に対する決定的な工法のない現在、このように、小径の既成グイを地盤に密に支持層まで打ち込み、これの地盤への押し込み効果により地盤密度を増して安定な基礎塊を造り、基礎工としての支持力を得るとともに液状化に対する安定化を同時に得ようとする工法、即ち、地盤改良とクイ打設工を一体化した工法は増加するものと思われる。

5. その他の検討

実施例—2により、クイ打込みの影響範囲に関して以下の検討を行う。クイ打設点より約1.1m離れた地点(図—9, ボーリングNo. B—8)ではN値がわずかながら上昇しており、一方、クイ打設地点から2mまでは地表にヒビ割れが生じたという状況を考える

と、影響範囲は半径で1.1m~2m(クイ径Dの2.8~5倍)である。地表面沈下量の測定からは2.6m(6.5D)である。

西田⁵⁾によるとクイ打設によるクイの締め固め効果はクイ周辺の地盤に限られており、ほぼクイ径の3~7倍の範囲になると計算しているが、本報告の結果はこの計算値と比較的一致している。もっとも、その影響範囲の中では、クイに近いほどよく締まっていると言える。

次に先端開放グイと先端閉塞グイの比較を行う。これには、図—13におけるボーリングNo. B—10と12, B—6とB—13の対応で考えたり、図—14が参考になる。—5.0mまでは開放グイの中へ土が入る為に、開放グイの方が締め固め効果は小さい。しかしそれ以深になると、クイ中に入った土による閉塞効果があらわれ、押し込み効果について両者に、差がなくなっている。このことは、逆に言えば、—5.0m以浅でも打込みグイによる締め固めが、ある程度は期待できるものである。

参考文献

- 1) 土質工学会：日本の特殊土・第6章・液状化しやすい砂，土質工学基礎ライブラリー—10，昭和48年
- 2) Seed, H. B. & Jdriss, I. M. : Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, ASCE Sep., 1971.
- 3) テルツァギ・ペック：土質力学(応用編)，丸善(株)，昭和42年
- 4) 岩崎敏男：構造物基礎及び地盤の耐震に関する研究，土木研究所資料第746号，昭和47年6月。
- 5) 西田義親：砂地盤に及ぼすクイの締め固め範囲の計算，土と基礎，vol. 13, No. 8, Aug., 1965.