

# 深層混合処理改良地盤の掘削を目的とした 低強度調整改良法に関する研究（その2）

細谷 芳巳 松尾 龍之  
西林 清茂

## Studies on Soil Improvement Controlled at Low Strength for Excavation of Ground Treated by the Deep Mixing Method (Part 2)

Yoshimi Hosoya Tatsuyuki Matsuo  
Kiyoshige Nishibayashi

### Abstract

The deep mixing method has been studied for strictly adjusting strength in a range low enough not to impede excavation after treatment while still securing the strength level required for soil stabilization.

A number of themes to be dealt with for practicalization are as follows:

- ① Design of strength suitable for excavation work
- ② Securing of quality of cement-lime base hardener
- ③ Selection of addition rate of hardener
- ④ Selection of conditions of work sequence
- ⑤ Method of ascertaining quality of improved soil

The information gained through application in a pneumatic caisson project considering these themes is described in this report.

### 概 要

地盤改良に要求される必要強度を確保し、しかも改良後の掘削に支障とならない程度の低い強度に厳密に調整するための深層混合処理工法の開発を進めてきた。

実用化のための課題として ① 掘削性の評価、② 低強度調整用固化材の品質保証法、③ 現場施工仕様の選定法、④ 施工管理法、⑤ 固結土の品質確認法 を取上げ、ニューマチックケーソン沈設工事に伴い必要となった低強度調整の地盤改良工事をもとに調査・検討した結果、低強度調整法の適切な指針を明らかにすることができた。

## 1. まえがき

セメントスラリーを軟弱な地盤中に注入し、攪拌翼で機械的に混合攪拌する深層混合処理工法で品質の優れた固結体を造成するためには、スラリーの濃度や注入率、吐出圧、また攪拌翼の回転数や昇降速度などの施工仕様をある範囲内で適用しなければならないことは良く知られた事実である<sup>1)</sup>。

従来、深層混合処理工法に関する研究は、“いかに品質の優れた高強度な固結体を造成するか”に主眼が置かれ、混合に適した攪拌翼の開発、施工方法（注入条件、攪拌条件）に関する研究が行われて来た。

しかし、土留め掘削、ケーソンや深礎などの沈設、あるいはシールド掘進などで、地盤を改良した後に掘削を行う工事においては、掘削時の安定に要求される必要強度を確保し、しかも改良後の掘削に支障とならない程度の低い強度に厳密に調整することが求められる。

このような低強度調整が簡単に、しかも長期的に安定した品質が得られる安定材の開発と、施工法に関する基礎研究を室内配合試験およびモデル混合実験によって進めた結果、通常の施工方法により均質でかつ低強度の改良固結体が得られる低強度調整用固化材を開発したことを既報で報告した<sup>2)</sup>。

この報文は、ニューマチックケーソン沈設工事に伴い必要となった低強度調整の地盤改良工事にこの固化材を適用し、改良効果の評価のために実施した種々の調査、試験の結果について報告するものである。

なお、この工事に際して取り上げた検討課題は表-1に示すとおりであるが、調査の過程で明らかとなった低強度調整法に対する留意点についてもまとめている。

## 2. 低強度調整用固化材の基本的性質

深層混合処理工法において、低強度調整用固化材に要求される性能はおおよそ以下のとおりである。

表-1 実用化のための検討課題

| 検討課題           | 説明                                                                                                   |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 掘削性の評価         | 固結土の掘削性は、改良体の強度だけでなく、対象土の種類や掘削機械の種類によって変化する。選定する機械に応じた改良強度の調整、あるいは強度に見合った機械の選定が重要となる。                |
| 低強度調整用固化材の品質保証 | 低強度調整用固化材は、セメントに石灰系材料を必要に応じて混合されたものを使用する。混合のむらは、固結土の品質に敏感に反映するため、出荷段階での均一な混合性が保証される必要がある。            |
| 現場配合、施工仕様の選定   | 低強度調整用固化材も基本的にはセメント系固化材であり、固結土の品質は混合の施工法や掘削時までの材令の影響を受けるため、これらの要因を考慮した現場配合、施工仕様の決定法が要求される。           |
| 施工管理           | 低強度調整法は厳密な強度調整が求められるため、施工中の注入量管理が従来以上に要求される。                                                         |
| 固結土の品質確認       | 低強度に調整改良される深層混合処理改良土は、低強度ゆえに一般の深層混合処理改良土に比べて微妙な強度変化を受けやすく、サンプリング法、サンプリング時期、試験法など品質評価のための適切な管理が求められる。 |

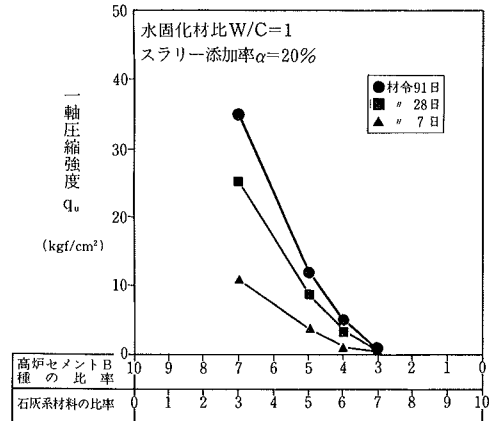


図-1 低強度調整用固化材の配合比と  $q_u$  の関係例

表-2 低強度調整用固化材の配合比と化学的性質

(単位: %)

| 高炉セメント:石灰系材料 | Ig-loss | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | SO <sub>3</sub> |
|--------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|
| 7 : 3        | 13.3    | 18.8             | 6.2                            | 1.5                            | 54.3 | 1.4             |
| 5 : 5        | 22.2    | 13.6             | 4.4                            | 1.0                            | 54.4 | 1.0             |
| 3 : 7        | 30.8    | 8.2              | 2.8                            | 0.7                            | 54.3 | 0.5             |

① 工法の制約で決められるスラリー濃度、注入率を大幅に変えることなく、固化材自体の配合成分によって自由に強度調整ができること、

② その際、セメントに添加混合する材料は、土質の性状やセメントの反応に対して安定なものであること。

これらの性能を満たす固化材として、セメントに石灰系材料を必要に応じて各種割合で混合する低強度調整用固化材を開発した。

図-1は、ある河川堆積粘性土を対象として実施した室内配合試験の結果であり、高炉セメント B 種に石灰系材料を種々の割合で混合した場合の配合比と一軸圧縮強度の関係である。混合したセメントの水和反応により材令に伴う強度は増加しているが、石灰系材料の添加は確実に強度調整に寄与していることがわかる。

なお表-2は、高炉セメント B 種と石灰系材料を 7 : 3, 5 : 5, 3 : 7 (重量比) で配合した場合の化学的性質を示したものである。

### 3. 改良強度と掘削性の評価に関する実験的検討

狭い閉鎖空間で人力か小型機械でしか掘削ができない場合、能率よく掘削するためには改良強度は一軸圧縮強度で  $q_u \approx 5 \text{ kgf/cm}^2$  程度以内に改良する必要があると経験的に言われているが、具体的なデータや検証実験例は見当たらない。そこで、次のような簡単な掘削モデル実験を行って事前検討した。

(1) 実験概要 5種類の一軸圧縮強度  $q_u = 1, 4, 6, 14, 35 \text{ kgf/cm}^2$  の改良地盤を  $\Phi 80 \text{ cm} \times L 50 \text{ cm}$  の土槽内に作成し、同一作業者がスコップ、ツルハシ、小型ピック (重量 7.5 kgf) を順次用いて、5分間当たりの掘削量を測定した。

(2) 実験結果 掘削能力の結果を図-2に示すが、観察状況も加えて以下のことがわかった。

① スコップで容易に掘削できるのは改良強度が  $q_u < 1 \text{ kgf/cm}^2$  である。

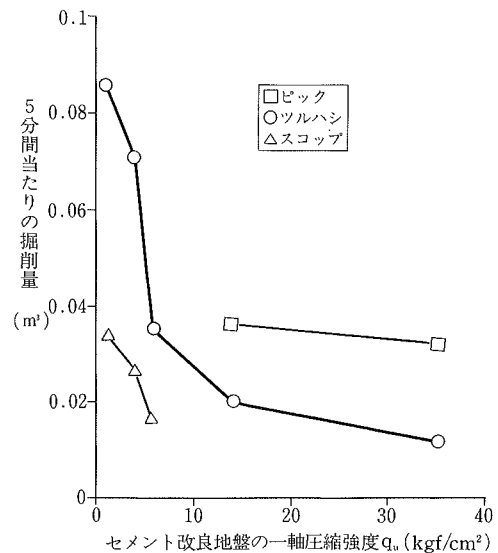
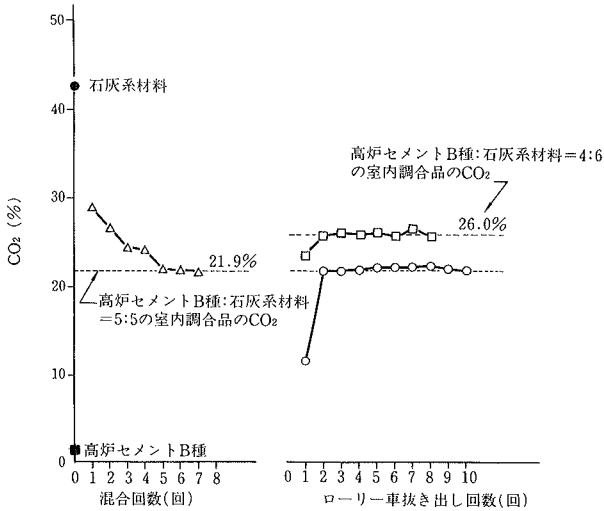


図-2 改良土の強度と掘削能力の関係

② ツルハシはスコップより掘削能力が大きいが、改良強度が  $q_u > 10 \text{ kgf/cm}^2$  になるとツルハシの刃が深く食い込まず、周囲に破片が飛び散り、能率が低下する。また、改良強度の増加とともに掘削能率が急激に低下するが、容易に掘削できるのは  $q_u < 5 \text{ kgf/cm}^2$  程度である。

③ ピックの掘削能力は3種類の掘削具のうちでは最も大きいが、改良強度が  $q_u = 14 \text{ kgf/cm}^2$  から  $q_u = 35 \text{ kgf/cm}^2$  に増加しても余り低下しない。

以上の結果より、改良地盤を掘削する場合、ピックやブレーカーを使用せずに人力で能率よく掘削するためには、改良強度が  $q_u \approx 5 \text{ kgf/cm}^2$  程度以下が望ましいという経験的な事実が裏付けられた。



(a)エアパルスによる混合状況の確認 (b)混合完了品のローリー積込時の混合性確認

図-3 エアパルスによる混合状況およびローリー積込み時の混合性の確認

#### 4. 混合材料の品質確認

低強度調整用固化材はセメントを主材とし、これに石灰系材料を目的に応じて適宜配合割合を変えて混合作製したものであるが、比重の若干異なる数種類の粉体材料を混合するため、混合性の良否が造成される固結体の品質に敏感に影響する。そのため、工場の製造段階で、予めその品質を検証しておく必要がある。

ところで、低強度調整用固化材は、焼成時に配合に応じた炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) を発生する特徴を有するため、この量を定量することにより、混合材料の混合性を確認することが可能である。

図-3(a)は、高炉セメントB種と石灰系材料を5：5で混合した時の混合回数とCO<sub>2</sub>の関係である。(混合タンクの容量は60 m<sup>3</sup>/基)これによると、エアパルスによる混合は5回程度の混合回数により均一になることが判明し、以後の出荷に対しての混合回数は5回と定めた。

また、図-3(b)は、高炉セメントB種と石灰系材料を5：5および4：6で混合した場合の低強度調整用固化材について、室内で検定用に調査された固化材と現場出荷時に各ロット毎に抜き取り調査した固化材の両者について試験したCO<sub>2</sub>の値であるが、いずれもほぼ均質な固化材が出荷時に提供されていることが確認された。

#### 5. ニューマチックケーソン沈設工事における低強度調整深層地盤改良工事の概要

##### 5.1 地盤状態

ケーソン沈設地盤は河川内にあり、図-4に示すようにGL-6m付近まではN値10以下の緩い細砂層が存在し、その下部にはN値0～2、含水比60～70%、湿潤密度1.5～1.6 t/m<sup>3</sup>の軟弱なシルト層が10m程度分布している。地盤改良はこの軟弱なシルト層が対象である。

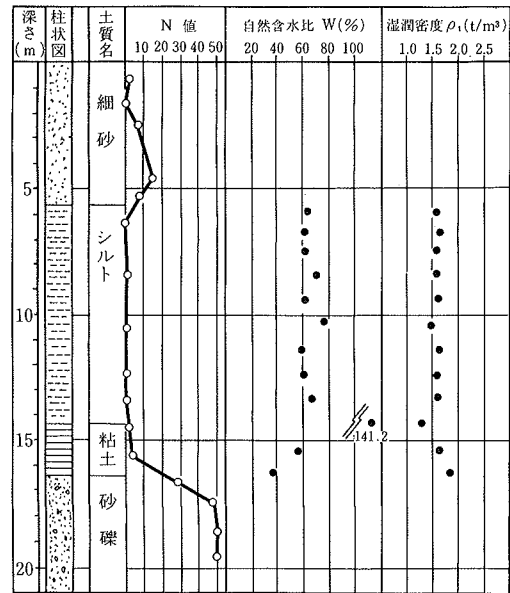


図-4 地盤状態

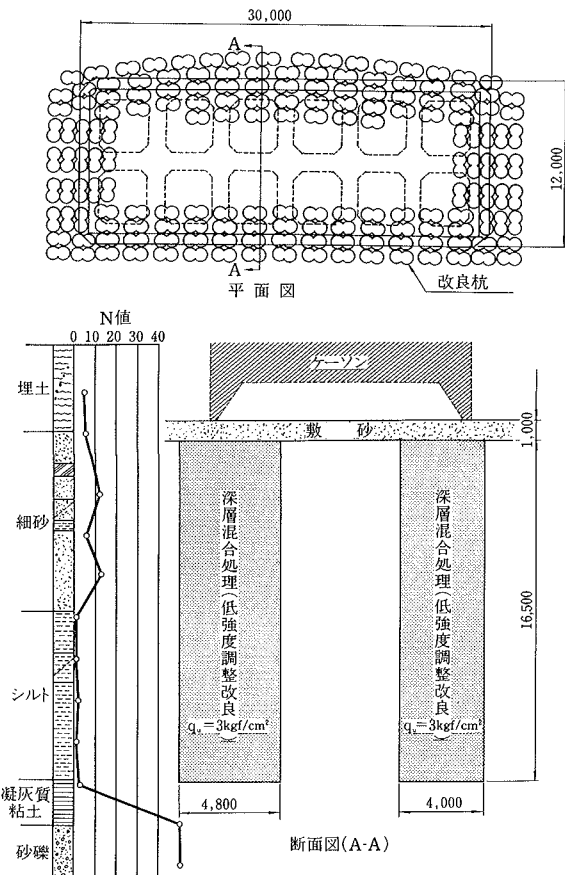


図-5 ケーソン沈設工事に伴う深層混合処理地盤改良工事の平面図と断面図

##### 5.2 設計概要—掘削を考慮した設計強度の設定—

地盤の掘削能力は、対象とする地盤の土質や強度、使用する掘削機械、掘削方法、など種々の影響要因があるが、地盤改良土を能率よく掘削するためには改良強度を5 kgf/cm<sup>2</sup>程度以下に設定する必要があると判断し、さらにケーソン沈設時の所要支持力とのバランスから設計強度を q<sub>u</sub> = 3 kgf/cm<sup>2</sup> に設定した。ここでは設計の詳細

は割愛するが、本工事の杭施工配置図、および断面図を図-5に示す。

### 5.3 深層混合処理工法

本工事で使用した深層混合処理工法は、当社の2軸攪拌Oval-DM工法であり、施工機械、施工仕様、施工管理法、品質管理法などは、通常の施工法と全く同じである<sup>1)</sup>。

### 5.4 低強度調整用固化材の配合選定に関する検討

5.4.1 室内配合試験 図-6は、改良対象となる粘性土に対する低強度調整用固化材の効果を把握し、配合の目安を得るために実施した室内配合試験結果の一部である。

低強度調整用固化材を使用すれば、セメント単独の場合に比べて十分目的とする低い強度に調整することが可能になることがわかる。

なお、掘削が数カ月に及ぶため試験材令は91日までとしたが、実際工事では材令28日までの結果をもとに強度の伸びを推定した上、さらに現場施工時の強度低下特性やばらつきを考慮して、配合条件は水セメント比  $w/c=1$ 、スラリー添加率  $\alpha=20\%$ 、低強度調整用固化材2種類（A材、C材：仮称）を選定した。

5.4.2 現場試験工事 室内配合試験によって選定した低強度調整用固化材2種類について、実際規模での改良効果を把握して本工事での配合仕様を決定するために現場試験工事（造成改良杭2本）を実施した。

図-7は、材令85日目にダブルコア方式でサンプリングした固結土試料の室内試験結果である。低強度調整用固化材Cは材令91日でも  $q_u < 2 \text{ kgf/cm}^2$  であるが、固化材Aは  $q_u \approx 4.4 \text{ kgf/cm}^2$ （粘性土層の平均）と設計強度  $q_u = 3 \text{ kgf/cm}^2$  を満足する結果となっている。

しかし、実際の工事では掘削開始から終了まで数カ月を要すること、上部細砂層は強度発現性が下部シルト層より大きいこと、固化材Aは設計強度よりまだ若干余裕があることなどから、より厳密な強度調整を要求される本工事においては固化材AとCの間である固化材B、すなわち高炉セメントB種と石灰系材料が4：6の配合を選定することとした。

### 5.5 深層混合処理工法のスラリーの性状

施工中にチェックしたスラリー比重は  $G = 1.485 \sim 1.500$ （計算比重1.487）であり計画通りの固化材と水が供給されていること、また注入量は改良杭1本当たり  $3,900 \sim 4,000 \text{ l}$ （設計注入量  $3,750 \text{ l}$ ）で5%前後の割増率になっているものの、ほぼ計画通りの固化材添加率であることが確認された。

### 5.6 改良土の品質

#### 5.6.1 各種サンプリング手法の相違と固化強度の評価

現場改良土の品質は、①施工初期において塩ビパイプで採取した2本の試料、②施工終了後にダブルコアボーリングで採取した試料、および③ケーソン掘削時にブロックサンプリングした試料の3種類の試料について一軸圧縮強度試験を行い、強度の大きさとばらつきを中

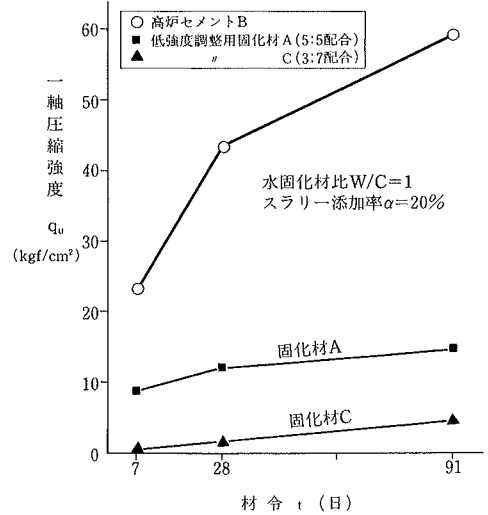


図-6 室内配合試験による低強度調整用固化材の効果 ( $q_u \sim t$  の関係)

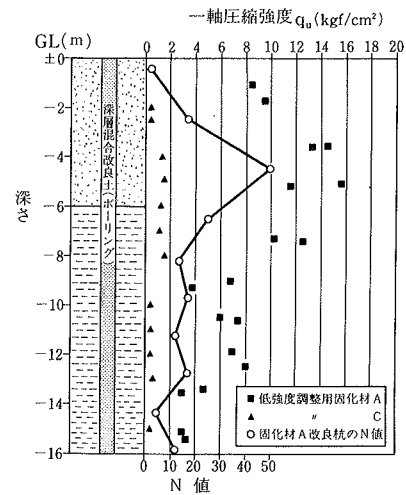


図-7 現場試験工事による造成杭の  $q_u$  分布

心に調べた。ただし、ブロックサンプリングは砂質土層のGL-6m付近、粘性土層上部のGL-13m付近、および下部のGL-16m付近の3深度である。

図-8は各サンプリング法によって採取した試料の一軸圧縮強度試験の結果を比較したものである。

全体的に見ると、ダブルコアボーリング試料の一軸圧縮強度は塩ビパイプ採取試料のそれと比較して上層で若干大きい、下層では同程度であり、ばらつきもほぼ似通っている。しかし、ブロックサンプリング試料の改良強度は、試験材令が他より大であることを割引いても全体的に大きな値を示しており、ばらつきも大きい。

ブロックサンプリング試料の強度がこのように大きく、しかもばらついているのは採取場所がまちまちであることに加えて、掘削までの養生環境の相違、採取時のブロック選別作業の特性（扱いやすい良い試料を採取する傾向）などが影響していると考えられる。

一方、塩ビパイプやダブルコアボーリングによるサ

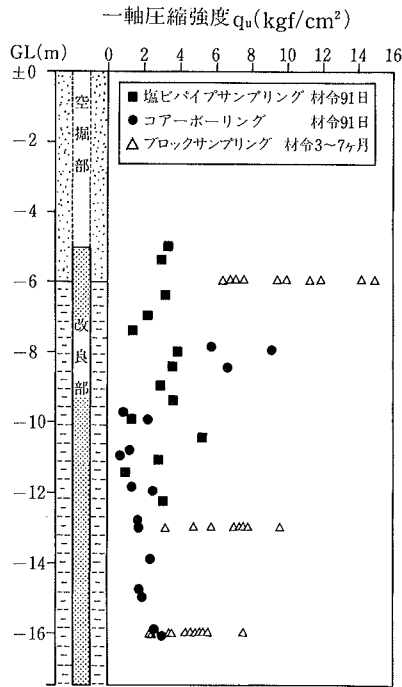


図-8 各サンプリング法による  $q_u$  分布の比較

ンプリング試料は、一般的に  $q_u=5 \text{ kgf/cm}^2$  以下では固結土の採取から試験に至る段階で試料を傷めることが多く、平均的に小さい強度になりやすい傾向がある。

以上の結果をまとめると、本工事で得られた改良土の強度は、砂質土層で  $q_u=5\sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ 、粘性土層で  $q_u=3\sim 5 \text{ kgf/cm}^2$  程度と推察できる。

**5.6.2 各種貫入試験の結果** 低強度に調整して改良された固結土は、強度が小さい上に深層混合処理工法特有のばらつきも加わってサンプリングが難しく、したがってサンプリング試料による一軸圧縮強度試験も苦勞し、評価も難しい。そこで、簡便に現地盤改良強度を評価する方法として、次に示す3種類の貫入試験方法について適用性を検討した。

(1) 針貫入試験 針貫入試験<sup>3)</sup>は一般に土丹や頁岩などの軟岩用ペネトロメーター試験として利用されており、図-9に示すような木綿針を10cm貫入させ、そのときの貫入抵抗値から一軸圧縮強度を推定するものである。

図-10は、室内配合のセメント改良土試料と現場ブロックサンプリング試料の2種類に対して各々求めた針貫入抵抗  $p$  (kgf) と一軸圧縮強度  $q_u$  (kgf/cm<sup>2</sup>) の関係であるが、およそ次の関係が認められる。

$$q_u = 3.2 \cdot p - 0.4 \quad \dots\dots\dots(1)$$

室内試験の校正係数に比べて、ブロックサンプリング試料で針貫入抵抗  $p$  が大きくなるに従い、一軸圧縮強度  $q_u$  のばらつきが拡大しているのは、混合固結土のばらつきを針貫入試験では鋭敏に捕らえすぎためである。

このように、針貫入試験は地盤表面のごく一部を調査するために値が大きく変動するので、現場混合土のマスとしての強度を正確に評価するための試験法としてはあ

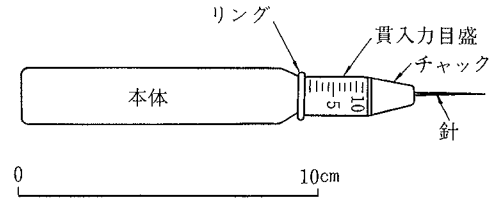


図-9 針貫入試験器具

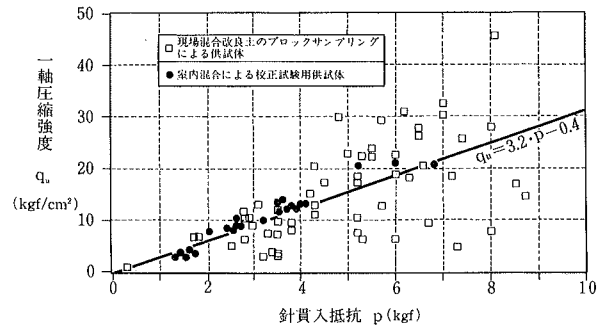


図-10 針貫入試験による針貫入抵抗  $p$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係

まり適切な試験法とはいえない。しかし、試験箇所、試験回数を数多くするなどにより概略の値を現地で簡単を知るための簡便な方法としては良いと思われる。

(2) 土研式円すい貫入試験 土研式円すい貫入試験<sup>4)</sup>は、標準貫入試験に比べて装置も軽装で、運搬・操作が簡単のため、機械の搬入が難しい今回のようなケーソン内部での現位置貫入試験として有効な試験法である。試験は、5 kgf のランマーを、高さ 50 cm から落下させて円すいコーンが 10 cm 貫入するのに要する打撃回数を  $N_d$  値として求めるものである。

図-11は、事前にセメント配合によって作成した模擬地盤を使って行った  $N_d$  値と  $q_u$  の関係である。両者は、 $q_u = 0.29 \cdot N_d - 2.58 \quad \dots\dots\dots(2)$  の関係が認められるが、 $q_u < 1 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲では相関性が悪くなるようである。しかし、低強度調整改良が目的とする  $q_u = 2\sim 5 \text{ kgf/cm}^2$  では実用的に十分使用できるものと考えられる。

写真-1は、掘削中のケーソン内 (GL-13 m) で実施中の土研式円すい貫入試験状況であり、表-3はこの時の結果を先の関係を用いて求めた地盤の推定強度である。改良地盤は、 $q_u = 2\sim 13 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲にばらついているが、平均的には  $q_u \approx 5 \text{ kgf/cm}^2$  前後と判断される。

(3) 標準貫入試験

標準貫入試験は、前述の針貫入試験、土研式円すい貫入試験に比較して打撃エネルギーが大きく、またコアサンプリングと異なり試料を傷めることなく、現位置混合土のマスとしての貫入抵抗を連続的に把握できるメリットがあるが、ケーソン内のような狭い場所での調査には不向きである。

前出の図-7には、固化材 A による改良杭の一軸圧縮強度  $q_u$  と同時に 1 m ピッチで実施した  $N$  値を併記しているが、両者は極めて良い対応を示している。

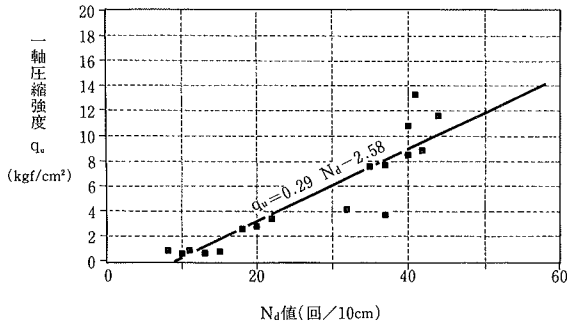


図-11 土研式円すい貫入試験による Nd 値と qu の関係

表-3 土研式円すい貫入試験による地盤強度の推定結果

|       | 測定番号 | Nd 値 (回/10cm) | 推定qu 値 (kgf/cm²) | 平均値 qu (kgf/cm²) |
|-------|------|---------------|------------------|------------------|
| 未改良地盤 | No.1 | 13            | 1.2              | 0.7kgf/cm²       |
|       | No.2 | 8             | 0                |                  |
|       | No.3 | 12            | 0.9              |                  |
| 改良地盤  | No.1 | 25            | 4.6              | 5.3kgf/cm²       |
|       | No.2 | 54            | 12.9             |                  |
|       | No.3 | 16            | 2.0              |                  |
|       | No.4 | 22            | 3.7              |                  |
|       | No.5 | 21            | 3.4              |                  |

図-12は我が国における沖積粘性土の qu と N 値の関係図に今回得られた結果をプロットしたものである。沖積粘性土の qu と N 値の関係とほぼ同様に、

$$q_u = (1/4 \sim 1/3) \cdot N \quad \dots\dots\dots(3)$$

の関係が求められる。

### 6. あとがき

地盤改良に要求される必要強度を確保し、しかも改良後の掘削に支障とならない程度の低い強度に厳密に調整するための深層混合処理工法の開発を進めてきた。

そして、ニューマチックケーソン沈設工事に伴い必要となった低強度調整の地盤改良工事について調査・検討した結果、次のような結論を得た。

(1) 改良後に掘削を必要とする地盤改良工事では、能率よく掘削するためには  $q_u \approx 5 \text{ kgf/cm}^2$  以下が望ましい。

(2) 事前の室内配合試験、できれば現位置試験によって低強度調整用固化材の効果を把握し、その配合を適切に選定することにより、従来に比べて品質の良い、低強度な改良地盤を造成することが可能となる。

(3) 改良土の品質評価手段として、サンプリング試料を用いた一軸圧縮強度で評価する場合、サンプリング方法の相違や養生条件の違いが強度に及ぼす影響を十分考慮する必要がある。

(4) 一方、サンプリング試料によらないで、現位置での貫入試験によって間接的に評価する場合も、その特性を十分考慮して適用することが重要である。

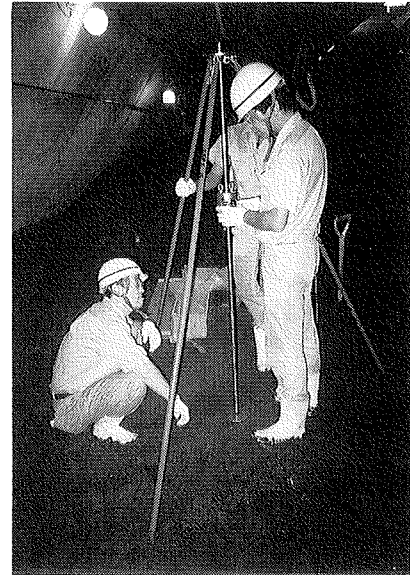


写真-1 ケーソン内で実施中の土研式円すい貫入試験状況

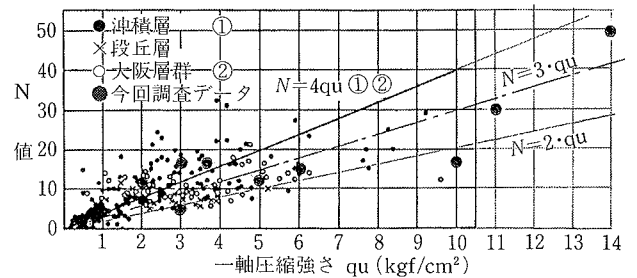


図-12 N 値と qu の関係 (応用地質調査事務所資料<sup>5)</sup> に加筆)

(5) 施工中の管理として深層混合処理工事で実施される通常の管理に加えて、出荷時の固化材の品質保証、注入時のスラリー濃度や注入量の管理を十分行う必要がある。

最後に、本実験研究を進めるに当たり、貴重なご助言・ご協力を頂いた首都高速道路公団の関係者ならびに本社小台 JV 工事事務所 鹿嶋所長、桑島所長代理、本社土木技術本部設計部 加藤課長、飯田課長、奥多摩工業 (株) の皆様にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) CDM 研究会：CDM 設計と施工マニュアル，p. 60～68，(1991)
- 2) 西林，松尾，細谷，小日向：深層混合処理改良地盤の掘削を目的とした低強度調整改良法に関する研究，大林組技術研究所報，No. 38，p. 12～16，(1989)
- 3) (社)土木学会：軟岩の調査・試験の指針 (案)，p. 56～60，(1991)
- 4) (社)日本道路協会：道路土工 土質調査指針，p. 154～156，(1986. 11)
- 5) 建設産業調査会：最新 軟弱地盤ハンドブック，p. 42，(1981)