

## 遠心脱水装置による細粒土の脱水効果

Dehydration Performance of Decanter Centrifuge for Soft Mud

熊本 直樹\* (Naoki Kumamoto)

尾川 正行\*\* (Masayuki Ogawa)

建設現場から出る泥水やヘドロの処理に適用することを狙いとして、連続式遠心脱水機による細粒土の脱水効果を調査した。液性限界が50~160%程度の3種類の土を用い、その含水比は、500%以下で、しかも液性限界値の1.5倍から4倍程度に調整して試験に供した。試験に用いた連続式遠心脱水機は標準処理量は1.2m<sup>3</sup>/hの比較的小型のものであり、その遠心加速度、液深さ、差速、供試土供給量、凝集剤添加率などを変えて試験を行った。その結果、①脱水泥の含水比は供試土の液性限界値にほぼ等しいこと、②分離水の清澄度は、凝集剤を適切に用いれば極めて良好であり、浮遊物質濃度を150ppm以下にすることが十分可能であること、③与える遠心加速度は2000G程度で十分であること、④固形分量が多いスラリーでは、遠心脱水機の公称能力よりもスラリー供給量を少なくする必要があることなどが判明した。

キーワード：含水比、コンシステンシー限界、スラリー、土中水、粘土 D2/K10

## 1. まえがき

この試験は、建設現場から出る泥水やヘドロの処理に適用することを狙いとして、デカントセトリフュージと称されている連続式遠心脱水機による細粒土の脱水効果を調査することを目的として実施した。

この種の遠心脱水機は機械メーカー各社が生産し、下水汚泥の濃縮・脱水、ビルジ排水脱水、鉱物油・動植物油清澄などを連続的に行う目的で、既に実用されている。しかし、細粒土（いわゆるヘドロ）の脱水性能についてはデータが少なく、稀に実験データがあっても土質との対応が不明であり、ヘドロ・泥水等の処理システムを計画する際に、性能予測および所要容量の推定を行うことが困難であった。

これまで連続式遠心脱水機で脱水あるいは濃縮していた流体と比較的含水比が高い細粒土の大きな違いのひとつは、高含水細粒土中に占める固形分の割合がこれまで適用していた流体よりもはるかに大きいことである。例えば、遠心脱水機の公称処理能力は、流体中の固形分量が1.5%程度の極めて少ない量のときの標準処理量で表示されている。これに対し、含水比200%の細粒土を考えると、固形分量は33.3%と標準流体の約20倍にも達する。

第2の相違点は、これまでの遠心脱水機の使用例では供給する流体（例えばビルジ排水）の性質がほぼ一定であるのに対し、細粒土の場合はそのコンシステンシー特性が土により大きく異なり、比較的含水比が高い細粒土の流動性を、単に固形分量あるいは含水比のみで論じ得ないことである。例えば、土の種類により液性限界値は千差万別であり、含水比100%といっても、液性限界が50%の土の場合は非常に流動性に富み、液性限界が150%の土の場合は塑性状である。

また、細粒土は脱水すると大きな降伏値を持ち、容易には流動しないことも特徴の一つである。

そこでこの実験は、

- 1) 固形分量が多い高含水細粒土への遠心脱水機の適用性
- 2) 土質と脱水性能の関係
- 3) 遠心加速度等の脱水条件と脱水性能の関係

\* 三菱重工業(株)広島研究所鉄構・土木研究室 主務, \*\*三菱重工業(株)神戸造船所船舶・海洋部 設計主務

などを把握することを主目的として実施した。

## 2. 遠心脱水機の概要

一般にデカンタセントリフュージと称している遠心脱水機の基本構造を、図1に示す。この遠心脱水機の最も基本的な構成部品は、ボウルとスクリーコンベアである。ボウル、スクリーコンベアともに高速で回転されるが、両者の回転数はわずかに異なっており、これを差速と言う。機種によってはスクリーコンベアの回転数を調整することができ、この機構をバックドライブ機構と言う。

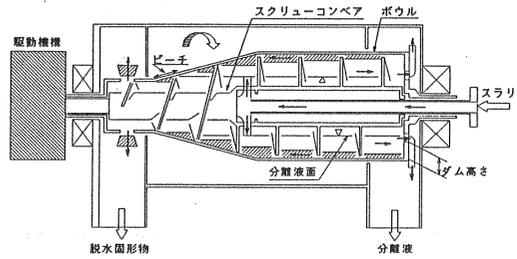


図1 遠心脱水機の基本構造

給液管から供給されたスラリーは、スクリーコンベアの中央付近でボウル内に吐出される。ボウルは高速で回転しているので、供給された液体は遠心力により固形分と液分とに分離される。スラリーは連続的に供給されるので、分離液面は上昇するが、分離液排出口の高さまで達するとそこからオーバーフローして脱水機外へ排出される。ボウルの周面から分離液排出口までの距離をダム高さと言う。一方、ボウル内で分離された固形分は、ボウルとスクリーコンベアにわずかに差速が与えられているので、スクリーコンベアで搬送されて、最終的には固形物排出口から脱水機外へ排出される。ボウルとスクリーコンベアの差速を変えることによって、固形分の搬送速度を調整できる。固形分の搬送速度は、ボウル内に固形分が滞留する時間を規定するものであり、脱水性能に影響を与える因子のひとつである。ボウルは固形物排出方向へ向かって、ある位置から傾斜しており（これをコーンと言う）、スクリーコンベアによって搬送される固形分は途中から分離液面より上、すなわち気中に出る。コーンの中で固形分が気中に出る部分をビーチと言う。このビーチは脱水性能に影響を与えるが、ビーチの長さはダム高さを変えることによって調整できる。万一固形分がボウル内に充満して閉塞すると脱水機が破損するので、スクリーコンベア軸の負荷がある値以上になると安全装置が作動するようになっているものもある。システムとしては、この安全装置が作動する前にスラリーの供給を停止するようにするのが普通である。

遠心脱水機の処理能力は、スラリー供給量と固形分供給量に左右される。スラリー中に占める固形分が少ない場合はスラリー供給量で処理能力が定まる。遠心脱水機のカタログ等に記載してある処理能力は、この固形分が少ないスラリーに対するものである。一方、建設現場から出る泥水やヘドロのようにスラリー中に占める固形分の割合が大きい場合は、ボウルの容量、固形分の搬送能力などの観点から、固形分の供給量で処理能力が定まる。この場合のスラリー供給量は、カタログ等に記載してある公称処理量よりも少なくなるが、具体的にどの程度まで供給量を減らすべきかを知ることがこの試験の目的のひとつである。

## 3. 供試土

遠心脱水機による脱水性能と土のコンシステンシー特性の間に密接な関係があるのではないかと考えて、供試土としては、①液性限界 $w_L$ が80%程度から120%程度のもの、②低塑性土の代表として液性限界 $w_L$ が50%程度のもの、③高塑性土の代表として、液性限界 $w_L$ が150%程度のもの3種類を調泥して作製することにし、通常よく遭遇する液性限界の範囲をカバーするようにした。

土質は前記の3種類であるが、最も代表的な液性限界 $w_L$ が100%程度の土については水分量も3種類としたので、試料（供試土）としては合計5種類である。作製した供試土の含水比は、含水比500%以下で、しかも液性限界値の1.5倍から4倍程度とした。実際に取り扱う泥水あるいは処理すべきヘドロ等では、この含水比よりも水分が多くなることもあるが、このような固形分が少ないスラリーは今回の実験目的からははずれる上に、遠心脱水機による脱水が容易になる方向にあるので、実験から除外した。

供試土の物性を表1に示す。表1から分かるように、供試土は細粒分が最も少ないものでも64%以上あり、しかも塑性図においてB線（ $w_L = 50$ の線）より右側で、A線（ $I_p = 0.73(w_L - 20)$ の線）よりもわずかに上にあるので、統一土質分類ではいずれも（CH）に属する。なお、供試土の飽和度を100%と仮定すると、各供試土の

濃度および密度は表2のようになる。

表1 供試土の物性

| 供試土<br>No | 土質<br>No | 土粒子真比重<br>G <sub>s</sub> | 液性限界<br>w <sub>L</sub> (%) | 塑性限界<br>w <sub>P</sub> (%) | 塑性指数<br>I <sub>P</sub> | 粒度塑性 (%) |      |     | 含水比<br>w (%) | w/w <sub>L</sub> |
|-----------|----------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|----------|------|-----|--------------|------------------|
|           |          |                          |                            |                            |                        | 砂分       | シルト分 | 粘土分 |              |                  |
| 1         | S 1      | 2.632                    | 50.3                       | 24.5                       | 25.8                   | 36       | 46   | 18  | 202.4        | 4.02             |
| 2         | S 2      | 2.600                    | 110.2                      | 35.5                       | 74.7                   | 23       | 41   | 36  | 194.1        | 1.76             |
| 3         |          |                          |                            |                            |                        |          |      |     | 298.6        | 2.71             |
| 4         |          |                          |                            |                            |                        |          |      |     | 447.8        | 4.06             |
| 5         | S 3      | 2.566                    | 158.3                      | 47.7                       | 110.6                  | 5        | 28   | 67  | 367.2        | 2.32             |

表2 供試土の濃度、密度

| 供試土<br>No | 含水比<br>w (%) | 重量濃度<br>C <sub>w</sub> (%) | 体積濃度<br>C <sub>v</sub> (%) | 密度   |
|-----------|--------------|----------------------------|----------------------------|------|
| 1         | 202.4        | 33.1                       | 15.8                       | 1.26 |
| 2         | 194.1        | 34.0                       | 16.5                       | 1.26 |
| 3         | 298.6        | 25.1                       | 11.4                       | 1.18 |
| 4         | 447.8        | 18.3                       | 7.91                       | 1.13 |
| 5         | 367.2        | 21.4                       | 9.59                       | 1.15 |

表3 実施した試験とその目的

| 実験名        | 主たる目的                             |
|------------|-----------------------------------|
| ジャーテスト     | 供試土に最適な凝集剤を選定。                    |
| ボトルテスト     | 遠心脱水実験機の運転条件（回転数、供給量、葉注量）の目安をつける。 |
| 遠心脱水機実機テスト | 本来の実験。遠心脱水機の脱水性能、運転条件を求める。        |

#### 4. 実験方法および実験ケース

##### 4.1 実施した実験

実施した実験とその目的を表3に示す。

最初にジャーテストを行い、供試土に最適な凝集剤を選定した。これは、脱水処理を行う場合、脱水効果を向上させるため、あるいは分離水の清澄度を向上させるために、通常は凝集剤を使用しているので、あらかじめ今回の供試土に適するものを選定するために実施したものである。すなわち、ジャーテストでは各供試土に対して、アニオン系、ノニオン系、カチオン系の高分子凝集剤の適用性を調査した。その結果、いずれの供試土に対してもアニオン系凝集剤が有効であることが判明したので、次に18種類の銘柄のアニオン系高分子凝集剤を用いて凝集試験を行い、いずれの供試土に対しても最も有効に作用する銘柄を選定した（商品名：MK707236K）。

今回の供試土は通常の処理スラリーよりも固形分が多く、いきなり遠心脱水機で試験を行うには不明な事項が多かったので、ジャーテストの次にボトルテストを行って遠心脱水機の運転条件の目安を把握した。このボトルテストは遠心沈降管試験とも呼ばれるもので、各々の供試土に対し1000Gの加速度で30、60、180、300秒の回転時間を与えて、沈降物の体積及び水分、上澄液清澄度などを調査した。その結果、沈降物の体積が全体積の50%前後と大きく、公称能力よりも汚泥供給量を少なくするか、ボウルとスクリュウの差速を増して固形分搬送能力を向上させるなどの対策が必要であることが判明した。また、回転時間を増すと圧密が進行するようではあるが、大局的には30秒以内でほぼ沈降すること、全体的に透明度の良い分離水が得られること等が判明した。

##### 4.2 遠心脱水機実機テストの概要

###### (1) 試験に用いた連続式遠心脱水機

試験に用いた連続式遠心脱水機の標準処理量は1.2m<sup>3</sup>/h（1200ℓ/h）で、比較的小型のものである。なお、この標準処理量は下水の余剰活性汚泥（濃度1.5%）での代表値であり、今回の供試土のように固形分が多いスラリーに対するものではない。ボウルの直径は200mmで、最高回転数及び最大遠心効果は5600rpm、3500Gである。装備している電動機は、ボウル駆動用5.5kW、スクリュウ駆動用2.2kWである。

###### (2) 試験装置の概要

試験装置の概要を図2に示す。汚泥サービスタンクには供試土を入れ、凝集剤溶解貯蔵タンクには高分子凝集

剤を所定の濃度に溶解しておく。汚泥供給ポンプ及び薬注ポンプで供試土及び凝集剤を遠心脱水機に送り込み、それらの供給量はそれぞれ電磁流量計で計測した。遠心脱水機で分離された清澄水と脱水泥はそれぞれ別に採取し、浮遊物質濃度（以下ではSSという）、水分量などを計測した。

(3) 試験ケース

試験のパラメータは、供試土、遠心加速度、液深さ（ダム高さ）、差速（ボウルとスクリュウの回転差）、供試土供給量、凝集剤添加率である。

すなわち、供試土は第3章記載の5種類、遠心効果はボウルの回転数を変化させて2000Gと3000Gの2種類、液深さ（ダム高さ）は25.5mmと23.0mmの2種類、差速は20, 30, 40rpmの3種類、供試土供給量は300, 450,

600, 900ℓ/hの4種類変化させて試験を実施した。また、

凝集剤添加率は、凝集剤を使用しないケースの他に、供試土の固形分重量に対して0.019%~0.095%の範囲で変化させた。試験条件は上記のように変化させ、合計45ケースの試験を実施した。

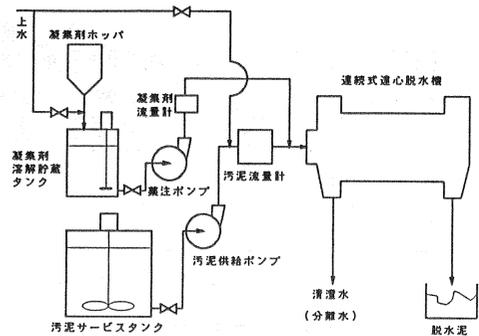


図2 実験装置の概要

5. 遠心脱水機実機テスト結果

5.1 凝集剤の効果

最初に、凝集剤の効果について考察する。全く同じ条件（遠心加速度2000G、液深さ25.5mm、差速40rpm、供試土供給量300ℓ/h）で、高分子凝集剤を供試土の固形分に対して0.053~0.057%使用したときと使用しないときの脱水泥の含水比及び分離水のSSを比較すると表4のようになる。表4で（）内に示している数値は高分子凝集剤の他に、ポリ塩化アルミニウム（PAC）を供試土の固形分に対して0.031%併用したときの数値である。表4から以下の事項が言える。

凝集剤は分離液中の固形分量（SS濃度）に大きく影響し、凝集剤を使用しないときは分離液のSS濃度が極端に大きい。また、凝集剤は脱水泥の水分量にはあまり影響しない。表4を見ると脱水泥の含水比は凝集剤の有無で大きな違いはないが、どちらかと言えば凝集剤を使用しない方が僅かに含水比が小さい。これは、凝集剤を使用すると強固な泥骨格が形成され、圧密変形量が減少するためと考えられる。なお、表4に示すように、泥の性状によっては高分子凝集剤のみで、分離水のSS濃度を小さくすることができないことがある。この場合、PAC（ポリ塩化アルミニウム）などの、他の凝集剤を併用すると清澄度の高い分離水を得ることができる。

以下に示す実験データは全て高分子凝集剤を使用したものである。

5.2 差速及び液深さの影響

供試土No4を使用し、遠心加速度2000G、液深さ25.5mm、供試土供給量450ℓ/hで運転し、ボウルとスクリュウの回転差、すなわち差速のみを20, 30, 40rpmと変えたときの脱水泥の含水比と分離水のSSを表5に示す。なお、差速が20rpmのときの固形分のボウル内滞留時間は16~20秒程度であり、40rpmのときの滞留時間は8~10秒程度である。

すなわち、供試土供給量が同一であるときは、20rpmのときの固形分のボウル内高さは40rpmのときの約2倍に

表4 凝集剤の有無と効果

| 供試土<br>No | 脱水泥の含水比(%) |      | 分離液のSS濃度(ppm) |       |
|-----------|------------|------|---------------|-------|
|           | 凝集剤有       | 凝集剤無 | 凝集剤有          | 凝集剤無  |
| 1         | 62.9(58.5) | 41.4 | 293(46)       | 16290 |
| 3         | 124        | 114  | 55            | 28890 |
| 4         | 131        | 122  | 87            | 1224  |
| 5         | 195        | 148  | 79            | 29170 |

遠心加速度2000G、液深さ25.5mm、差速40rpm、供給量300ℓ/h  
( )内の数値はPACを併用したときのもの

表5 差速の影響

| 差速     | 脱水泥含水比(%) | 分離水SS(ppm) |
|--------|-----------|------------|
| 20 rpm | 117       | 95         |
| 30 rpm | 118       | 76         |
| 40 rpm | 126       | 59         |

供試土No4、遠心加速度2000G、液深さ25.5mm、  
供試土供給量450ℓ/h

なっている。このとき、液深さが同一であれば、分離水のボウル内高さは逆に低くなる。

さて、一般には、差速を大きくすると、液が攪乱されて分離液の清澄度が低下するとともに、固形物の滞留時間が短くなって脱水泥の水分量が増加する。ところが、今回の実験では、表5に示すように、差速を大きくした方が分離水の清澄度が良好であった。これは供試土の固形分量が多いことと、固形分の沈降特性が良好であるために、差速を大きくして固形分の排出速度を上げた方が、分離水の清澄度が良好になったものと思われる。すなわち、固形分の排出速度を上げるとボウル内の分離水容積が増え、分離水の流速が低下する、つまり分離水の滞留時間が増加するなどの効果が出たものと思われる。なお、脱水泥の水分量については20rpmと30rpmでは殆ど差がなく、40rpmでは水分量がわずかに増加している。したがって、今回の供試土については、12秒～15秒程度の滞留時間をとれば十分なようである。

次に、液深さ、すなわちダム高さの影響について、考察する。供試土No3を用いて、遠心加速度2000G、差速40rpmの条件で試験した結果を表6に示す。

表6 液深さ23.0mmと25.5mmの比較

| 供試土供給量<br>(ℓ/h) | 脱水泥の含水比 (%) |        | 分離水のSS (ppm) |        |
|-----------------|-------------|--------|--------------|--------|
|                 | 23.0mm      | 25.5mm | 23.0mm       | 25.5mm |
| 300             | 129         | 129    | 64           | 36     |
| 450             | 120         | 116    | 63           | 60     |
| 600             | 121         | 117    | 69           | 66     |

供試土No3、遠心加速度2000G、差速40rpm

一般に、液深さを浅くするとビーチ(第2章参照)部が長くなり、気中に出る固形分量が増加するために脱水泥の水分量が低下する。一方、分離水については、液深さが深い方が

分離水の流速が小さくなるために、清澄度が向上する。ところが今回の実験では表6に示すように、液深さ25.5mmと液深さ23.0mmで比較試験を行ったところ、分離水の清澄度は液深さ25.5mmの方がわずかに良好のようであるが、脱水泥の水分量については有意差が無く、強いて言えば液深さが深い方が脱水泥の水分量が小さい。供試土供給量300ℓ/hの分離水のSSのみが低いことから推測すると、分離水の清澄度を増すためにはダム高さを増して液深さを深くする方が良いが、供試土供給量もある値以下にしてボウル内の固形分量(固形分高さ)も低くする必要があるのである。

表7 遠心加速度の効果

| No | 供試土供給量 | 脱水泥の含水比 (%) |       | 分離水のSS (ppm) |       |
|----|--------|-------------|-------|--------------|-------|
|    |        | 2000G       | 3000G | 2000G        | 3000G |
| 2  | 300    | 111         | 108   | 40           | 30    |
|    | 450    | 112         | 102   | 42           | 30    |
| 5  | 300    | 164         | 152   | 26           | 72    |
|    | 450    | 160         | 146   | 41           | 55    |

供試土供給量の単位はℓ/h。液深さ25.5mm、差速40rpm

### 5.3 遠心加速度の影響

遠心加速度を増すと、当然のことながら、脱水性能は向上する。今回の実験では主として2000Gの加速度で脱水したが、一部では3000Gでも試験した。その結果を表7に示す。確かに加速度を増すと脱水泥の含水率は低下しているが、加速度を1.5倍にしたことに見合う程の低下ではなく、実際的には2000G程度で十分である。

表8 今回の供試土に対する処理能力

### 5.4 供試土供給量と脱水性能

連続式遠心脱水機の公称処理能力は、処理流体中の固形分量が1.5%程度の極めて少ない量のときの標準処理量で表示されている。ところが、今回の供試土の場合は固形分量が多いので、実際に処理できる量は公称処理量よりも少ないものと予想される。すなわち、連続式遠心脱水機の処理能力はスラリの供給量と固形分の供給量の2点で規定され、固形分量が少ないスラリの場合はスラリー供給量で処理量が定まり、この数値が公称能力になっている。これに対し、固形分量が多い場合はボウル内での固形分の搬送能力で処理量が規定され、今回はこのケースにあ

| No | 供試土含水比 (%) | 試験での最大処理量  |            | 備考              |
|----|------------|------------|------------|-----------------|
|    |            | スラリー (ℓ/h) | 固形分 (kg/h) |                 |
| 1  | 202.4      | 450        | 191        | 600ℓ/hではオーバーロード |
| 2  | 194.1      | 450        | 186        | 600ℓ/hではオーバーロード |
| 3  | 298.6      | 600        | 168        | 900ℓ/hでは試験していない |
| 4  | 447.8      | 900        | 196        |                 |
| 5  | 367.2      | 900        | 226        |                 |

テスト機の公称処理能力は固形分1.5%程度のスラリーに対して1200ℓ/h。

たる。今回の供試土に対するテスト機の処理能力は、表8のとおりであった。大雑把に言えば、今回のテスト機（公称処理能力 1200 l/h）では、固形分量で表示して 200~220 kg/h程度の処理能力と言えよう。

次に、供試土供給量と脱水泥含水比の関係を、図3に示す。どちらかと言えば、スラリー供給量が多い方が脱水泥の含水比が小さい傾向にある。これは、スラリー供給量が多いとボウル内で分離される固形分量が多くなり、自重圧密効果が大きくなるためと考えられる。

なお、供試土No2~No4は、土質は同一で初期含水比のみが異なる。図3から初期含水比の影響を推察すると、初期含水比が低いものほど脱水泥の含水比も低くなるようである。これは初期含水比が低くなるとスラリー中に占める固形分量が多くなり、自重圧密効果が増すためと考えられる。

### 5.5 土質と脱水性能

図3から分かるように、脱水泥の含水比は土質によって大きく異なる。そこで、供試土の液性限界と脱水泥の含水比を比較すると、図4のようになる。供試土供給量、初期含水比などで多少異なるが、概略的には遠心脱水機では供給する土の液性限界程度までは容易に脱水できると言えそうである。したがって、遠心脱水機による細粒土の脱水を検討するときには、対象土の液性限界を把握すれば脱水泥の含水比の概略値を推定できる。

### 6. 結論

この報告の主要な結論をまとめると下記のとおりである。

- 1) 液性限界が50~160%程度の3種類の土について試験したところ、脱水泥の含水比は供試土の液性限界値にほぼ等しいことが判明した。
- 2) 分離水の清澄度は、凝集剤を適切に用いれば、極めて良好であり、浮遊物質濃度を150ppm以下にすることが十分可能である。
- 3) 与える遠心加速度は 2000 G 程度で十分であり、3000 G程度にしても脱水泥の水分量はあまり低下しない。
- 4) 今回の供試土のようにスラリー中の固形分量が多い場合は、遠心脱水機の公称能力よりもスラリー供給量を少なくする必要がある。これは、遠心脱水機の公称能力が固形分量数%程度の濃度が小さいスラリーに対して定められているのに対し、スラリー中の固形分量が多いときはスラリーの供給量ではなく、脱水機からの固形分の排出能力で処理能力が定まるためである。
- 5) 脱水機内での固形分搬送速度および分離水の脱水機からのオーバーフローレベルは、脱水性能にあまり影響しない。したがって、実機ではこれらは固定条件で良いものと判断される。

なお、この試験は三菱化工機株式会社三川崎製作所の遠心脱水機(KVZ 20 S 型)を使用して実施した。関係者に謝意を表する。

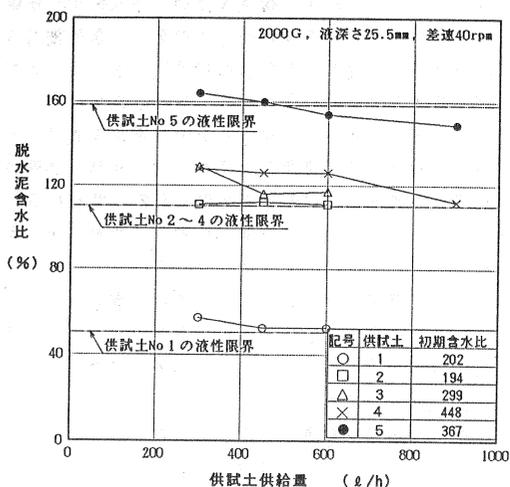


図3 供試土供給量と脱水泥含水比の関係

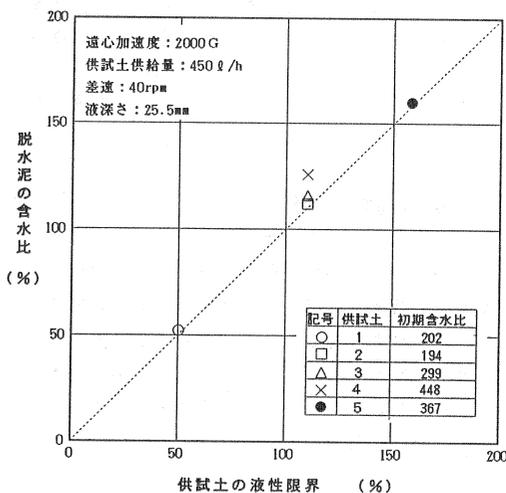


図4 供試土の液性限界と脱水泥の含水比