

## 汚泥の処理処分に関する研究（第6報）\*

——浚渫底泥および建設工事排泥のトラック運搬における固化処理の適用——

喜田大三  
久保博

### Studies on Treatment and Disposal of Mud (Part 6)

——Application of Solidification Treatment to Transportation  
by Dump Truck of Dredged Bottom Sediment and Discharged Mud in Public Works——

Daizo Kita  
Hiroshi Kubo

#### Abstract

In transporting mud to a distant dumping ground by dump truck it is necessary to treat the mud to prevent it from falling from the truck on the way. Accordingly, it was tested how much solidified strength would be required to safely transport the mud. Three kinds of mud and solidifiers of cement type and lime type were used for testing. The results were as follows:

- (1) The method of the falling cone test (Fc) was the most appropriate for measuring strength of remolded mud.
- (2) The degree of difficulty of transporting by dump truck was indicated by Fc of mud.
  - ① When  $F_c \leq 4$  mm, transportation can be done safely.
  - ② In case of  $4 \text{ mm} < F_c < 8$  mm, the safety of transportation depends on the properties of the solidified mud and transportation conditions.
  - ③ At  $F_c \geq 8$  mm, transportation is very difficult.

#### 概 要

浚渫底泥、建設工事排泥、その他泥状廃棄物の汚泥を処分する際に、近辺に適切な処分地がない場合、遠方の処分地までダンプトラックで運搬しなければならず、このような事例が最近増えている。汚泥をトラック運搬する際に、運搬が容易に行なえるようにするための固化処理の適用について試験を行ない、有益な知見を得た。なお、試験には、3種類の汚泥とセメント系および石灰系固化剤を用いた。(1)固化汚泥の練返しによる強度低下を検討する際の強度表示には、フォールコーン試験によるコーン沈下量(Fc)が適切である。Fcは一軸圧縮強度(qu)等と一定の関係を示す。(2)トラック運搬の可否は鋭敏比では判定し難く、Fcを指標とした次のような有用な判定基準を作成することができた。① $F_c \leq 4$  mm ( $qu \geq 約0.3 \text{ kg/cm}^2$ ) の場合、支障はない。② $4 \text{ mm} < F_c < 8$  mm ( $約0.05 \text{ kg/cm}^2 < qu < 約0.3 \text{ kg/cm}^2$ ) の場合、可否は固化汚泥性状・運搬条件等によって異なる。③ $F_c \geq 8$  mm ( $qu \leq 約0.05 \text{ kg/cm}^2$ ) の場合、極めて困難である。

#### 1. まえがき

近年、各地で汚泥の処理処分が大きな問題になっている。例えば、河川・湖沼・港湾等の底泥処理、工場から排出される泥状廃棄物の処理はもちろんのこと、基礎掘削工事、地下鉄工事、トンネル工事等において発生する建設工事排泥の処理処分が問題になることもすくなくない。これらの汚泥は以前には、その大部分が特に処理さ

れることもなく、近辺地の土捨場あるいは海洋に投棄されていた。しかし、そのような方法は近年、近辺に処分地を得難くなくなり適用できなくなったばかりでなく、環境保全の面からも好ましくない。そこで、人口の密集している都市部、臨海地の工事では、汚泥を遠方の処分地までダンプトラックで運搬しなければならない場合が増えている。

ところで、汚泥をトラック運搬する際、そのままの流動状態では処分地で受け入れない場合があるだけでなく、

\* 汚泥の固化処理に関する研究（第5報）に続く。

運搬中に落泥・落水を誘発し工事公害を発生するので、適切な処理を行なう必要がある。そのための汚泥の処理方法には、土木的圧密脱水、機械的脱水、化学的固化等が考えられるが、短時間でしかも比較的簡易に処理できる方法としては、化学的固化が有効な場合が多い<sup>1)</sup>。

さて、汚泥を固化処理しても、その強度が不足していると、運搬中に練返されて流動化する場合があり、それを防止するための所要強度がどれ位であるか問題になっている。しかし、この点に関する見解は未だ明確にされていない。そこで、本報告では、汚泥をトラックで運搬する際の所要強度に関して、予備的試験を行なった結果、極めて有益な結果が得られたので、以下にその一部を報告する。

## 2. 練返しによる強度低下および強度測定法

### 2.1. 供試汚泥と固化剤

表一に示す3種類の汚泥を供試した。田子の浦港へドロ(以下、田子の浦と略す)は有機物が非常に多い高含水底泥であり、大手町粘土(以下、大手町と略す)は構築物の基礎掘削工事の排泥で有機物の少ない還元性土であり、また荒木田土(以下、荒木田と略す)は有機物が少なく粘土分も大手町に比べて少ない酸化性土である。

固化剤はセメント系として当社の汚泥固化剤マッドフィクサー、また石灰系として生石灰を用いた。

試料土	調製含水比	粘土 (<5 $\mu$ )	シルト	砂	LL	PL	PI	Gs	lg. loss	土質分類
田子の浦港へドロ	350%	77%	12%	11%	236%	58%	178	2.34	43.3%	粘土(CH)
大手町粘土	163%	50%	49%	1%	114%	52%	62	2.61	9.6%	粘土(MH)
荒木田土	57%	38%	55%	7%	44%	21%	23	2.61	5.5%	シルト質粘土(CL)

表一 供試土の性状

### 2.2. 固化汚泥の練返しによる強度低下

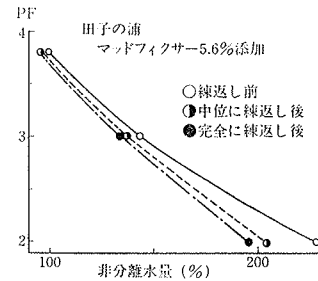
練返しに伴う強度低下には、鋭敏比が一般に用いられる。そこで、固化汚泥の鋭敏比を測定した結果、表二に示すように、田子の浦は特に鋭敏比が高く、練返し前一軸圧縮強度( $q_{ui}$ )が0.49 kg/cm<sup>2</sup>である場合でも、練返すとドロドロになり、練返し後一軸圧縮強度( $q_{ur}$ )は測定できなかった。また、大手町も田子の浦ほどではないが、 $q_{ui}$  0.17~0.34 kg/cm<sup>2</sup>で鋭敏比は約3~6と大きな値を示した。

試料土	マッドフィクサー添加量(%)	含水比 (%)	一軸圧縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )		鋭敏比
			練返し前	練返し後	
田子の浦	5.6	256.5	0.15	測定不能	超鋭敏
	15	173.9	0.49	"	"
大手町	2.5	151.5	0.17	0.03	5.7
	3	142.9	0.34	0.10	3.4
九州灰土 <sup>2)</sup>	—	58	0.6	測定不能	超鋭敏
立川ローム <sup>2)</sup>	—	131	0.5	0.06	8.1

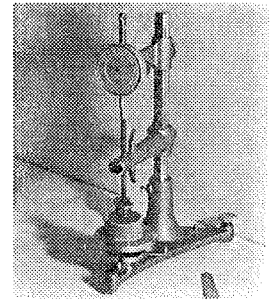
表二 固化汚泥、火山灰土の鋭敏比

ところで、表二に併記するように、火山灰土の鋭敏比は一般に非常に高く、

とりわけ九州灰土の一部は超鋭敏である。その理由として、筆者ら<sup>2)</sup>はpF試験、その土質化学的手法を用いて、double T構造のハロイサイト粒子結合が練返しによって切断され、間げき水が放出されるためと推察している。固化汚泥の場合にもこれと類似のことが考えられる。すなわち、固化汚泥は通常の処理の場合、多量の自由水を含んでおり<sup>2)</sup>、これが練返しによって骨格が破壊され放出される結果、軟弱化すると考えられる。なお、図一に固化汚泥を練返した際のpF試験結果を例示する。



図一 固化汚泥の練返しに伴う pF 水分の変化

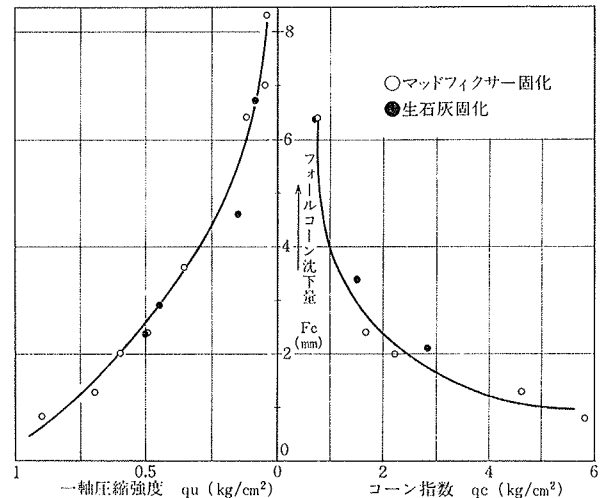


写真一 フォールコーン試験機

### 2.3. 強度測定法

土の強度測定において、比較的簡易かつ一般的なものは一軸圧縮試験とコーンペネトロメータ貫入試験である。しかし、前者は成形や測定に時間を要し、また後者は迅速に測定できるけれども、練返しによる影響を問題にするような強度範囲では精度が十分でない。そこで、試験法を種々検討した結果、液性限界の測定に用いられることがあるフォールコーン試験(写真一)が適切であった。このフォールコーン沈下量(以下、Fcと略す)と $q_u$ 、コーン指数( $q_c$ )の間には、図二のような関係が認められた。

なお、Fcは不飽和土の場合、その試料容器への詰め



図二 フォールコーン沈下量 Fc と  $q_u$ ,  $q_c$  の関係

具合によって影響を受ける。今回行なった試験によると、ヘラで十分に抑えたかた詰めの場合の Fc はゆる詰めの場合の Fc に比べて約80~90%小さくなった。本研究では、以下すべてかた詰め条件で試験した。

### 3. トラック運搬による所要強度の検討

#### 3.1. はじめに

2.2. で述べたように、固化汚泥の鋭敏比は一般に、非常に大きい。このことは、固化汚泥がトラック運搬の際に練返されて軟弱化する恐れがあることを示唆している。しかし、鋭敏比は試料をビニール袋に入れて、手で十分にこね返して測定するものであるため、その際のエネルギーはトラック運搬の際に加えらるエネルギーに比べて、非常に大きいと予測される。したがって、トラック運搬の可否を検討するためには、実際にトラック運搬による試験が必要となる。以下にその試験を述べる。

#### 3.2. 供試汚泥と固化剤

供試した汚泥および固化剤は2.1. と同じである。

#### 3.3. 試験方法

汚泥をそれぞれ Fc が約 25 mm になるように含水比を調整し(表-1)、所定量のマッドフィクサーおよび生石灰をそれぞれ粉状のまま混合し、20°Cで、前者は2日間、後者は1日間養生した。このように短期間養生と

したのは、トラック運搬する場合、短時間で処理することが多いことを考慮したためである。

そして、各固化汚泥約 5 kg を数 cm の塊状に砕いて、10 l 容のポリバケツに入れ、2 t トラックの荷台にゴムひもで固定して、平均速度約 30 km/hr で、舗装および未舗装道路が 8 : 2 くらいの割合になるようなコースを運搬した。そして、運搬時間 0.5, 1, 1.5, 2 および 3 時間後に運搬可否に関する性状調査およびフォールコン試験等を行なった。

#### 3.4. 結果と考察

##### 3.4.1. トラック運搬に伴うフォールコン沈下量の変化

トラック運搬前と運搬3時間後における固化剤添加量と Fc の関係を図-3に示す。まず、運搬前の Fc は当然のことながら、添加量とともに減少している。しかし、その傾向には汚泥および固化剤によって差異があり、Fc は荒木田、大手町、田子の浦の順に小さく、またマッドフィクサーが生石灰よりも小さい。

さて、3時間運搬後の Fc は図-3に示すように、運搬前の Fc が大きい場合にはさらに増大し、小さい場合には減少する。このことは、図-4に例示する運搬時間と Fc の関係においても明瞭である。以上の現象はつぎのように考えられる。トラック運搬によって強度が減少する要因には、運搬時の振動による練返し、また強度が

増大する要因には、養生時間の増大、乾燥、締固め等が挙げられる。運搬前の強度が小さい試料では前者要因の影響が後者要因の影響を上回り、また強度が大きい試料では

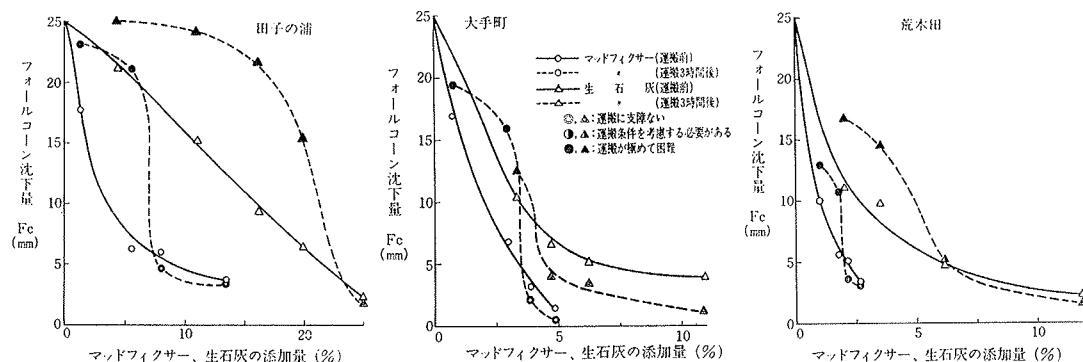


図-3 トラック運搬前および3時間後における固化剤添加量とフォールコン沈下量 Fc との関係

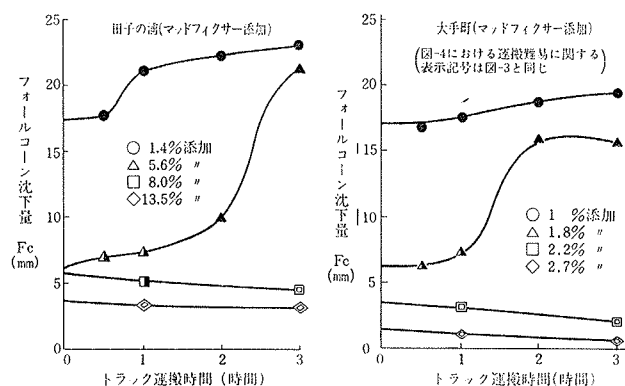


図-4 トラック運搬に伴うフォールコン沈下量 Fc の変化

それと逆の現象が起り、上述の結果になったと推察される。

##### 3.4.2. フォールコン沈下量によるトラック運搬可否の判定

運搬中の固化汚泥の圧潰、軟弱化等の観察によって、固化汚泥のトラック運搬の難易度は(1)支障ない、(2)やや困難、(3)極めて困難、の3段階に分類できた。その結果の一部は図-2および3に示している。運搬中の運搬難易度とそのときの Fc の関係をまとめると図-5(左半分)のようになる。図示するように、運搬の難易度は Fc と明瞭な対応を示し、(1)の場合、4 mm 以下、(2)の場合、4~11 mm、(3)の場合、7 mm 以上である。しかし、実際上有用なデータはこのような運搬中の両者の

関係ではなく、運搬前 Fc と運搬可否の関係である。

そこで、運搬前 Fc と運搬難易度の関係を検討した結果を図-5 (右半分) に示す。図示するように、運搬前 Fc と運搬3時間後 Fc との関係によって、運搬3時間の場合における運搬難易度を運搬前に判定できる。そして、Fc と qu, qc との間には図-2 のような関係があるので、これらのことから運搬前強度条件をもとに運搬難易度を総括すると、以下ようになる。

- (1)  $F_c \leq 4 \text{ mm}$  ( $q_u \geq \text{約 } 0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $q_c \geq \text{約 } 1 \text{ kg/cm}^2$ ) の場合……運搬に支障ない。
- (2)  $4 \text{ mm} < F_c < 8 \text{ mm}$  (約  $0.05 \text{ kg/cm}^2 < q_u \leq \text{約 } 0.3 \text{ kg/cm}^2$ ) の場合……固化汚泥の性状、運搬時間等によって、Fc が(1)に移行する場合、そのままの場合、(3)に移行する場合があるので、運搬難易度もこれら要因の影響によって一概に論じ得ない。
- (3)  $F_c \geq 8 \text{ mm}$  ( $q_u \leq \text{約 } 0.05 \text{ kg/cm}^2$ ) の場合……運搬が極めて困難である。

以上の結果は本試験で供試したいずれの汚泥、固化剤にも共通している。なお、上述の結論は運搬時間が3時間と長く、実際では稀なケースである。しかし、運搬の際の土量が実際に比べて非常に少ないことなどのため、実際工事にそのまま適用し難い点を考慮して安全側の3時間を用いた。また運搬時間が異なる場合の所要強度の検討も行なったが、統一的把握は困難であったので、省略する。

ところで、図-5において、運搬前 Fc が 4 mm 以下の場合、運搬によって Fc が減少 (強度が増大) し、また 8 mm 以上の場合、運搬によって Fc が増大 (強度が減少) した。このことは、3.4.1. で述べたような理由によると考えられ、これらの Fc 範囲においては、トラック運搬に伴う強度の増減に運搬前強度が支配的である。一方、運搬前 Fc が 4~8 mm の場合、運搬に伴う強度増減は運搬前強度のみでは決定されない。このことは、運搬前強度が同程度であれば、運搬によってうける固化汚泥骨格の破壊も当然、同程度であるが、その際に間げき中から放出される水分の量などによって、軟弱化する場合とむしろ硬化する場合とに分れるものと推察される。

また、上述の結論と2.2.で述べた固化汚泥の鋭敏比を対比すると、当初予測したように、トラック運搬の際の練返しエネルギーは鋭敏比測定の際の手によるそれに比べて、非常に小さいことがわかる。例えば、田子の浦・マッドフィクサー固化で

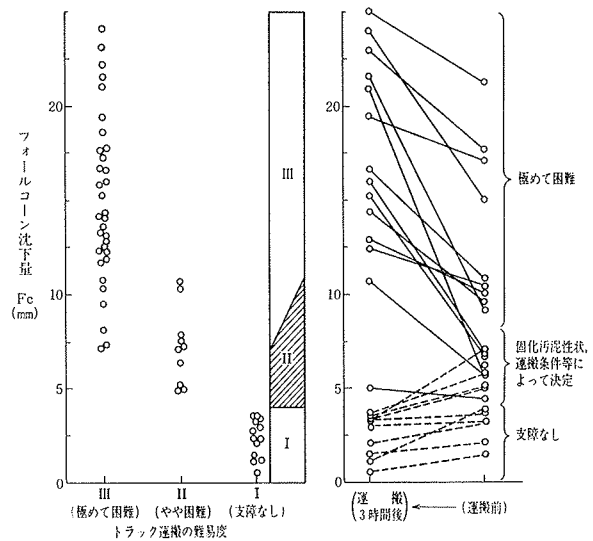


図-5 トラック運搬の難易度とフォールコーン沈下量 Fc との関係

は、15%添加で練返し前  $q_u$  が  $0.49 \text{ kg/cm}^2$  もあるにもかかわらず、鋭敏比の面からみると超鋭敏であり、トラック運搬に支障があると判断される。しかし、本試験で実際にトラック運搬を行なった結果、この試料は軟弱化せず、このような強度 ( $q_u \geq \text{約 } 0.3 \text{ kg/cm}^2$ ) の固化汚泥はすべて「運搬に支障なし」の範ちゅうに入ることが認められた。

したがって、トラック運搬の可否を判定する際に、鋭敏比による基準は不適切で、本試験で行なったようにフォールコーン試験の Fc を用いることは、簡易かつ極めて有用な方法である。そして、その際、Fc が測定されていない場合、 $q_u, q_c$  の値によっても大略の判定が可能であることが判明した。

#### 4. 建設工事排泥のトラック運搬のための固化処理例

##### 4.1. 工事概要と排泥処理フロー

某下水処理場建設において、地中連続壁工事で発生する排泥を固化処理したのち、ダンプトラック (11 ton 車) で約 35 km 離れた土捨場に運搬処分した。

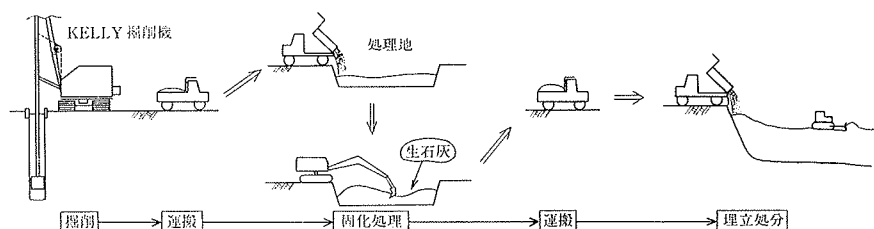


図-6 基礎掘削工事における排泥処理フロー例

図一六に処理フローを示すように、OWS ソレタン シュ工法で掘削された排泥（約 100 m<sup>3</sup>/日）を場内に仮設した処理地（125 m<sup>3</sup>, l 25 m × w 5 m × d 1 m）に運搬し、処理地でバックホウによって生石灰（ケミコライム）を混合し、1日放置後、ダンプトラックによって運搬処分した。

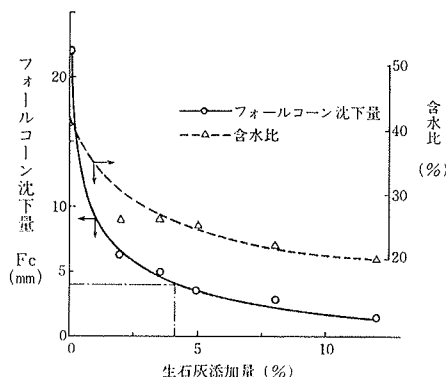
排泥の性状は掘削深度（最大 GL-38 m）によって、砂質に富む場合とシルト質に富む場合があった。このうち非常に脆弱な流動状排泥の原因となっていたのは、砂質の部分であった。これらの砂質部分は地山において硬いため、掘削の際に衝撃を与えて掘削し泥水と混るためである。また、生石灰添加量は上述のように、掘削深度によって排泥の性状が異なるために、1.5～2.4%、平均1.9%（32.5 kg/m<sup>3</sup>）の範囲で適宜変更した。

なお、参考までに当現場における処理処分費の目安として、その概略を示すと、以下のとおりであった。排泥 100 m<sup>3</sup> 当り材料費37,500円、混合費32,000円、運搬費 160,000円、土捨場費26,000円（2,000円/台）、その他人件費5,000円、経費78,200円で合計 338,700円（=3,390円/m<sup>3</sup>）であった。

#### 4.2. 固化処理効果の検討

現場で円滑にトラック運搬している固化汚泥の一部を採取して、フォールコーン試験を行ない Fc を調べた結果、Fc は 1.2～3.6 mm（測定数：20）であった。このことは 3.4.2 で述べた結果、すなわち Fc ≥ 4 mm は支障なく運搬できるという結果と一致しており、一部ではあるが前述の結論が妥当であったことが確認された。

また、未処理の流動状排泥（砂質、含水比40%、74 μふるい通過分22%、液性限界18%）を採取して、室内試験で生石灰添加量と Fc の関係を調べた。その結果を、図一七に示す。図示するように、Fc を 4 mm 以下にするためには、生石灰 4.2% が必要である。ところで、排泥には前述のように、流動状砂質土だけでなく、qu が約 0.5～1 kg/cm<sup>2</sup> もあり生石灰添加を必要としないシルト質土塊が含まれ、その比率は概ね半々であった。そして、



図一七 排泥(砂質部分)の生石灰添加量とフォールコーン沈下量 Fc の関係

添加した生石灰は大部分が砂質部分の改良に寄与したとみなすことができた。これらのことから、現場では室内試験の半分の石灰添加量、すなわち 2.1% が必要ということになり、現場で実施されている添加量 1.5～2.4% はほぼ妥当であると考えられる。

#### 5. まとめ

浚渫底泥、建設工事排泥、その他泥状廃棄物の処理処分において、これら汚泥を遠方の処分地までダンプトラックで運搬せざるを得ない場合が増えている。汚泥はトラック運搬の際、適切な処理を行わなければ、処分地で受け入れられない場合があるだけでなく、運搬中に落泥・落水を誘発する。そこで、その対策として有効な短期間でかつ比較的簡易に行なえる固化処理の適用に関して、運搬可能とするための所要固化強度等を検討した結果、極めて有益な知見が得られた。

(1) 固化汚泥の練返しによる強度低下を検討する際の強度表示にはフォールコーン試験によるコーン沈下量 (Fc) が適切であった。なお、Fc は一軸圧縮強度 (qu) およびコーン指数 (qc) と一定の関係が認められた。

(2) 性状の異なる 3 種類の汚泥およびセメント系、石灰系固化剤を用いて試験した結果、トラック運搬の可否は鋭敏比では判定し難く、鋭敏比の面からは超鋭敏なものでも運搬に支障がない場合があった。そこで、トラック運搬試験の結果を総合的に整理して、固化汚泥のトラック運搬の可否に関し、下記のような極めて実用的な判定基準を作成することができた。

- ① Fc ≤ 4 mm (qu ≥ 約 0.3 kg/cm<sup>2</sup>, qc ≥ 約 1 kg/cm<sup>2</sup>) の場合……支障なし。
- ② 4 mm < Fc < 8 mm (約 0.05 kg/cm<sup>2</sup> < qu < 約 1 kg/cm<sup>2</sup>) の場合……固化汚泥性状、運搬条件で異なる。
- ③ Fc ≥ 8 mm (qu ≤ 約 0.05 kg/cm<sup>2</sup>) の場合……極めて困難である。

そして、建設工事排泥の処理現場において、①の基準がほぼ妥当であることが確認された。

なお、本試験は予備的なものであったため、運搬条件等に関し十分に検討できなかった。今後、これらの点を考慮して、さらに試験を行なう計画である。

#### 参考文献

- 1) 喜田：ヘドロの浚渫・処理処分、土と基礎, Vol. 26, No. 1, (1978), p. 55
- 2) 喜田, 中田, 原田：大林組技術研究所報, No. 4, (1970), p. 61
- 3) 喜田, 久保, 炭田：大林組技術研究所報, No. 14, (1977), p. 104