

## 研究成果報告書

|         |                                |
|---------|--------------------------------|
| 研究開発課題名 | ため池底泥土の再資源化技術の開発～ネオ・イーキューブ工法～  |
| 研究総括者   | 飛島建設株式会社 技術研究所 技術企画グループ 筒井雅行   |
| 研究開発組合  | 飛島建設株式会社<br>株式会社アイコ            |
| 試験研究機関  | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構） |

## 1 事業の実施内容

## 1. 1 事業の背景及び目的

## 1. 1. 1 事業の背景

ため池は、降水量が少なく、付近に取水できる大きな河川がない地域において、農業用水を確保するために人工的に造られた貯水施設である。ため池は灌漑のほか、洪水調節や土砂流出防止、生物の生息・育成の場、親水空間として地域住民の憩いの場の提供など、多面的な機能を有している。1950年代後半には全国におよそ28万箇所のため池があったが、その後、灌漑設備の近代化や、高齢化に伴う離農・農地転用等に伴う需要低下などからため池の数は減少し、2019年5月現在では16.7万箇所まで減少している。数が減少したとはいえ、残存しているため池は農業用貯水施設として重要な役割を担っている中で、近年、流水によって運ばれた土砂、生活排水や不法投棄による廃棄物、繁茂した植物が枯れた残渣物等がため池底泥土・堆砂となって堆積した結果、貯水量の低下を引き起こすだけでなく、底樋操作に支障を来し、緊急放流ができないことによる二次災害のリスクといった安全面の障害に加え、水質悪化やそれに伴う悪臭など、生活環境への影響が顕在化してきている。

以前は、稲作が終わった晩秋から早春にかけての農閑期に、施設の点検・補修、底泥土除去による有効貯水容量の確保と水質改善、捕獲した魚類を冬場の食料とすることなどを目的として掻い掘りが行われ、除去した底泥土は、農耕地の豊饒化のため客土として利用されていた。しかし、近年では農業従事者の高齢化などによりほとんど実施されることがなくなった。底泥土による機能低下が顕著なため池においては、掻い掘りに代わり浚渫が利活用保全整備工事として行われるようになったが、浚渫土砂の取扱いについて、自治体間で判断が分かれている。

厚生省の通知によれば、「港湾、河川等のしゅんせつに伴って生ずる土砂その他これに類するものは廃棄物処理法の対象となる廃棄物ではない」とされている。しかし、地方自治法に規定された自主解釈権により「ため池底泥土は事業活動に伴って生じた廃棄物であるから、廃棄物処理法の対象となる廃棄物（汚泥）である」と判断する地方自治体が出てきた。

その結果、こうした自治体においてため池底泥土を処理する場合には、産業廃棄物として取扱い、最終処分する場合には管理型処分場で処分しなければならない。しかし、管理型処分場はその数や残余容量が少なく、さらに処理費が高いために事業費を圧迫することから、ため池底泥土を有効利用することが求められている。

一方、経年劣化や、度重なる地震や豪雨等の自然災害により堤体が損傷を受けて安全性

が低下したり，新しい耐震基準に適合しないなどの課題が浮き彫りになり，改修や補強が必要な堤体が増加している．これらに対応するには，ため池の水を落したり，仮締切を行ってドライワークを確保して工事を行う必要がある．その際にため池に堆積している底泥土を除去して処分しなければならないが，事業費を圧迫することからため池底泥土を有効利用することが求められている．

表 1. 1－1 は，ため池の問題と課題について整理したものである．

表 1. 1－1 ため池の問題と課題

| 問 題                 | 細 目                                                                                                                                    | 課 題                              |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| ・堆砂による機能低下          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・農業水利施設としてのため池の貯水機能低下</li> <li>・防災施設としてのため池の洪水調節機能の低下</li> <li>・豪雨時の越水・越流による洗掘，崩壊リスク</li> </ul> | ・浚渫または落水掘削により堆砂（底泥土）を除去して貯水容量を確保 |
| ・老朽化に伴う安全性低下        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・堤体の浸透抵抗，侵食抵抗，スベリ抵抗の低下</li> <li>・堤体の耐震強度不足</li> </ul>                                           | ・落水または仮締切により堤体の改修，補強             |
| ・需要低下に伴う管理・監視体制の弱体化 | ・都市化，混住化に伴う事故発生リスクの増加                                                                                                                  | ・ため池の潰廃（人工的に埋め立てる）               |

### 1. 1. 2 事業の目的

本事業は，ため池底泥土（事業に供した底泥土は，令和 2 年度は山口県のため池から，令和 3 年度は新潟県の貯水池からそれぞれ採取した．実験結果について述べる場合についてはため池底泥土と貯水池底泥土を使い分けるが，一般名詞としては貯水池底泥土も含めてため池底泥土と称する．）を農業分野に有効利用する新技術を開発することで，農業農村整備事業の効率的実施に資するとともに，コスト縮減並びに環境負荷軽減に寄与することを目的としている．具体的には，ため池底泥土を，農業分野（農業土木資材，農地土壌）に適した性状に改質するための改質材及び処理システムを開発することを目標としている．

### 1. 2 事業の内容及び実施方法

本事業は，表 1. 2－1 に示すように

- ①室内試験
- ②実証試験
- ③機能監視

から構成される。

表 1. 2-1 事業の内容と実施方法

| 事業の内容 | 実施方法                                                                                         |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 室内試験  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・土質試験（配合試験）</li> <li>・土壌理化学分析</li> </ul>              |
| 実証試験  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・実機による室内配合試験結果の検証</li> <li>・処理システムの検証</li> </ul>      |
| 機能監視  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・改質土特性経時変化のモニタリング</li> <li>・改質土を用いた発芽・育成試験</li> </ul> |

本事業のベースとなるイーキューブシステム（以下、E<sup>3</sup>システムと称す。）は、建設汚泥等を地盤材料として再資源化することを目的に本事業実施主体により開発されたもので、2005 年に特許登録（登録番号：特許 3725120）し、2007 年に建設技術審査証明（第 0702 号）を取得する一方、各種機関に技術登録（NETIS, NNTD 等）を行っている。

E<sup>3</sup>システムは、移動翼と攪拌翼を兼ね備えた特殊連続ミキサーにより、高含水比泥土と高分子凝集剤及び固化材を 30 秒程度連続混合することで、泥土を粒状に処理する技術である。図 1. 2-1 に E<sup>3</sup>システムによる泥土の処理フローを示す。

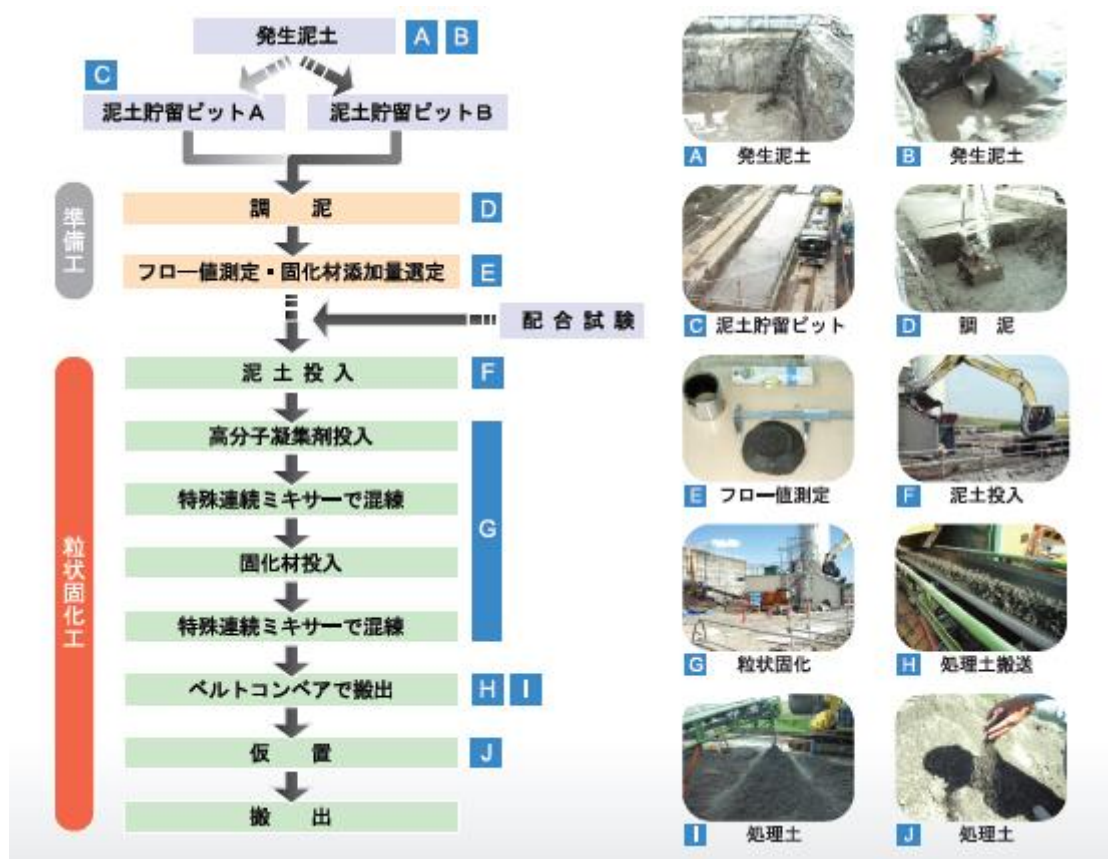


図 1. 2-1 E<sup>3</sup>システムによる高含水比泥土の処理フロー

室内試験は、ため池底泥土を再生利用するための改質材を開発し、適正配合を決定することを目的として土質試験と分析を行った。なお、改質材に関して、E<sup>3</sup> システムにおいては固化を念頭に、セメント、石灰及びそれらを主材とした複合系の固化材を主に使用しているが、本事業においては農地利用ということに鑑みて、pH が中性域にある石膏を主材とした改質材を開発することとし、使用する石膏はリサイクル促進の観点から、廃石膏ボードを再資源化した再生石膏粉を用いた。

実証試験は、室内配合試験結果の検証を含め、ため池底泥土処理システムの開発を目的として、実機を用いて実際に処理を行った。

機能監視は、実機を用いて処理したため池底泥改質土の特性が、経時的にどう変化するかモニタリングと、実機処理土を用いて、作物の発芽・育成状況を観察した。

### 1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

表 1. 3 - 1 は、事業着手時に想定した技術的問題点とその対応を示す。

表 1. 3 - 1 事業着手時に想定した技術的問題点とその対応

| 技術的問題点                         | 対 応                                                                                                     |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ・農地土壌用改質土の要求品質と改質効果の評価指標       | ・“土づくり”に関する資料調査，農業従事者からのヒアリングに加え，試験研究機関である農研機構の指導・助言を仰ぎながら設定（⇒「土性」，「コンシステンシー」，「三相分布」を農地土壌改質土の一次判定指標に設定） |
| ・ため池底泥土が不均質であることに伴う改質土の品質のバラツキ | ・採取したため池底泥土を貯泥（水槽またはピットに一時的に貯めておくこと）し，調泥（貯泥した底泥土をバックホウで混合攪拌して均質にすること）したのち処理をする                          |
| ・改質土のアルカリ化                     | ・改質材の主材として中性域の再生石膏を使用し，改質土の品質及び性能を安定並びに向上させる安定材と助材は極力添加量を抑える<br>・農地土壌用改質土の安定材には，アルカリ分の公定規格が低い消石灰を選定     |
| ・改質土からの重金属等（ふっ素）の溶出            | ・改質土から再生石膏に起因するふっ素の溶出量を抑制するために安定材（土木用改質土；高炉セメント B 種，土壌用改質土；消石灰）を添加                                      |

### 1. 4 事業の実施体制

本事業の実施主体は民間企業からなる「新技術研究開発組合」で、農業農村整備に関す

る試験研究を行っている国立研究開発法人（「試験研究機関」）との共同研究である。これに研究協力者が加わり、4つの組織により事業を進めた。

表 1. 4－1 は、本事業の実施体制を示す。

表 1. 4－1 本事業の実施体制

| 区 分       | 名 称                            | 役割分担                                                                                                                    |
|-----------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 新技術研究開発組合 | 飛島建設株式会社                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ため池底泥土を処理するための技術開発</li> <li>・実証試験における施工管理手法の確立</li> <li>・機能監視</li> </ul>        |
|           | 株式会社アイコ                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・改質材の開発</li> <li>・品質管理手法の確立</li> <li>・機能監視</li> </ul>                            |
| 試験研究機関    | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構） | <ul style="list-style-type: none"> <li>・利用先を確保するための課題提起</li> <li>・農地利用における要求品質の助言</li> <li>・農地利用における環境安全性の助言</li> </ul> |
| 研究協力者     | 一般社団法人泥土リサイクル協会                | <ul style="list-style-type: none"> <li>・泥土リサイクル全般</li> <li>・循環資源（再生石膏粉）リサイクル</li> </ul>                                 |

## 1. 5 事業の年度計画と実績

本事業は令和2年度から3年度にかけての2ヵ年にわたるもので、その計画及び実績は表 1. 5－1 の工程表に示すとおりである。

表 1. 5－1 予実績工程表

| 項 目   | 令和2年度<br>(2020) |     | 令和3年度<br>(2021) |     |
|-------|-----------------|-----|-----------------|-----|
|       | 上 期             | 下 期 | 上 期             | 下 期 |
| 研究準備  |                 |     |                 |     |
| 室内試験  |                 |     |                 |     |
| 実証試験  |                 |     |                 |     |
| 機能監視  |                 |     |                 |     |
| とりまとめ |                 |     |                 |     |

注) は計画, は実績。

## 1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

### 1. 6. 1 研究開発の概要

#### (1) 改質土の要求品質

##### 1) 土木用改質土

ため池底泥改質土を農業土木用資材（以下、「土木用資材」と称する.）として使用する  
場合、その主な利用用途としては以下が考えられる.

- ①路体・路床材
- ②盛土材
- ③埋戻材
- ④裏込材
- ⑤築堤材

なお、各利用用途別の要求品質は、強度、変形、支持力、透水性等様々である.

ため池底泥土は、建設汚泥と比べると動植物由来の有機物や窒素・リン酸などの栄養塩類が多いほか、採取場所により粒度分布に偏りがあるなどの特徴があるが、基本的には“含水比が高く粒子が微細な土砂”である.

従って、ため池底泥土を土木用資材として再生する際には、建設汚泥の再生利用に関するガイドライン等の一つである「建設汚泥処理土利用技術基準」が参考となる. これによれば、「建設汚泥処理土（建設汚泥に焼成、脱水、乾燥またはセメント・石灰等による安定処理等を行い、その性状を改良したもの）を土質材料として利用する場合の品質区分は、原則としてコーン指数を指標とし、表 1. 6－1 に示す品質区分とする」ことが規定されている.

表 1. 6－1 建設汚泥処理土の土質材料としての品質区分と品質基準値

| 区分       | 基準値<br>コーン指数※ <sup>1, 2</sup><br>$q_c$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 備 考               |
|----------|-------------------------------------------------------------|-------------------|
| 第 1 種処理土 | —                                                           | 固結強度が高く礫、砂状を呈するもの |
| 第 2 種処理土 | 800 以上                                                      |                   |
| 第 3 種処理土 | 400 以上                                                      |                   |
| 第 4 種処理土 | 200 以上                                                      |                   |

※ 1 所定の方法でモールドに突き固めた試料に対し、コーンペネトロメーターで測定したコーン指数

※ 2 スラリー化安定処理土の指標は、7 日後の一軸圧縮強さとする

また、農業土木分野のうち、改質土を利用できると思われるパイプライン、農道、水路工においては、

- ①管体の基礎及び埋戻し材料は、原則として砂、砂礫または良質な地盤材料とする
- ②路床材料は、75  $\mu$ m ふるい通過分が 35% 以下、設計 CBR3 以上が望ましい
- ③盛土材料は、経済的に可能な範囲で良質な材料を選択する必要がある

ことが農水基準（土地改良事業計画設計基準）に規定されている。

高含水比泥土の改質工法として、細粒分の多い泥土に粒度組成の異なる粒状材料を混合して粒度分布を変え、含水比を低下させることにより締固め特性等を改善する「粒度調整工法」というものがあるが、ネオ・イーキューブ工法によるため池底泥土の改質は、積極的に改質土の粒度組成を変えるものではないため、改質土の粒度はため池底泥土の粒度に依存し、農水基準②を満足しないことが考えられる。また、“良質な地盤材料”というのは明確な定義はないが、一般的には「特に土質改良を行わなくとも、そのまま地盤材料として使用可能なもの」とされ、具体的には

- ①締固めが容易で締固め後の密度・強度が大きいこと
- ②圧縮性が少ないこと
- ③雨水などによる浸食及びスレーキングに対して耐力があること
- ④吸水による膨潤性が低いこと
- ⑤敷均し等の施工性が容易なこと

などを満足することが求められる。

前述の土の各種特性は、それぞれ相関性があり、一般的には所定の材料特性を満足すれば、施工仕様をコントロールすることで所定の品質を満たすことができる。したがって、農業土木用改質土の要求品質の一次判定指標はコーン指数とし、その基準値は利用に際して制約がほとんどない  $q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$  の第 2 種処理土とした。

なお、判定材齢は、石膏の膨張を考慮して 7 日とした。

## 2) 土壌用改質土

表 1. 6-2 は、ほ場各部に用いる農地土壌に対する物理的要求品質を示す。

ため池底泥改質土を農地土壌として使用する場合、その利用用途としては、田畑を嵩上げするために、ほ場の基盤層（心土層、耕盤層）に用いるケースと、作土層に単体または現地土壌と混合して使用するケースが考えられる。この場合、改質土を基盤層に用いる場合でも、深耕により作土層と混じったり、毛管現象により含有物質が作土層に浸透する可能性がある。したがって、農地土壌に用いる改質土の品質は、畑の作土層を対象として考えた。なお、水田に用いる場合はため池底泥土の物理的性質を改善する必要はないと判断して改質目標から除外した。

表 1. 6-2 農地土壌の物理的要求品質

|     | 畑                                                                                                                                        | 水田                                                                                    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 作土層 | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆保水性が良い（⇒団粒構造）</li> <li>◆排水性が良い（⇒団粒構造）</li> <li>◆通気性が良い（⇒団粒構造）</li> <li>◆保肥性が高い（⇒団粒構造）</li> </ul> | ◆ 泥状（⇒単粒構造）                                                                           |
| 基盤層 | ◆耕耘機地耐力がある                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆耕耘機地耐力がある</li> <li>◆湛水透水性（減水深）が小さい</li> </ul> |

畑の作土層に求められる品質は多岐にわたるため、土木用資材のように一つの指標で網羅することは難しいが、いずれも土壤が団粒化して、膨軟であることと大きく関連する。土壤構造<sup>1)</sup>は2つに大別され、図1. 6-1に示すように、土粒子がバラバラの状態である単粒構造に対し、粘土や砂などの粒子、有機物由来の腐植などが集まって固まって小粒の集合体（団粒）を形成している構造のことを団粒構造といい、畑の作土層に求められる物理的要求品質は、土壤が団粒化して膨軟になることで得られるものである。

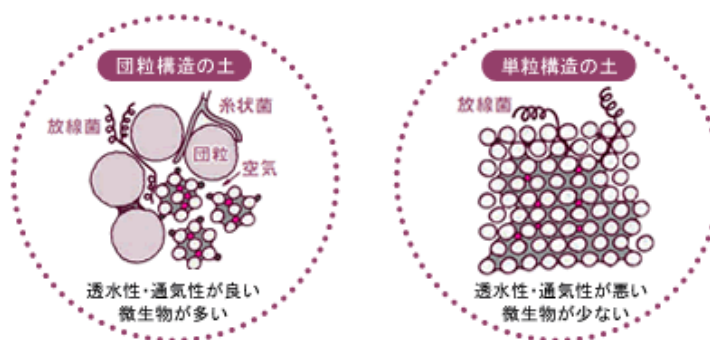


図1. 6-1 団粒構造と単粒構造<sup>1)</sup>

畑の土壤は団粒構造を形成することで、保水性、排水性、通気性、保肥性等が良好になることから、ある程度の割合の気相を有する膨軟な性状が求められ、これは土の三相分布や密度を測定することで把握することが可能である。

農地土壤の特性を表す指標の一つに土性がある。土壤粒子は細かい粒（粘土）から粗い粒（礫）まで様々であり、土壤の性質はその粒子の大きさと組成割合によって異なる。粒径を所定の大きさに区分し、その組成を示したものが土性であり、国際土壤学会（現、国際土壤科学連合）法（通称、国際法）による土性の決定は、砂（粗砂+細砂）、シルト、粘土の3成分の百分率を定量し、粒径区分に基づいた土壤三角図表に当てはめ、12の土性に区分している。

国際法による粒径区分及び土性区分<sup>2)</sup>は、表1. 6-3及び表1. 6-4に示すとおりである。

表1. 6-3 国際法による土壤の粒径区分<sup>2)</sup>

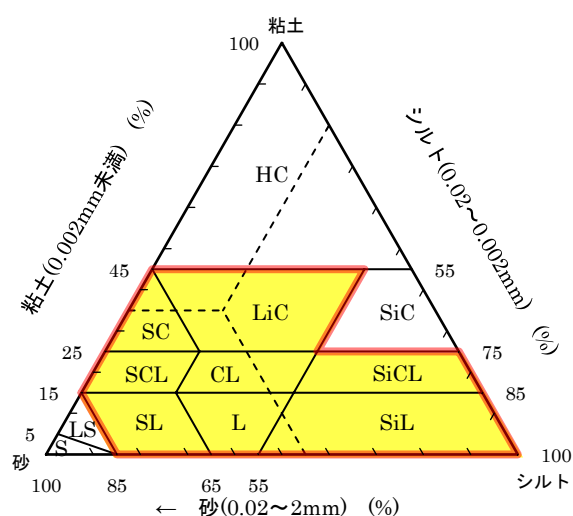
| 粒径区分 |    | 粒径 (mm)    | 区分の根拠        |
|------|----|------------|--------------|
| 礫    |    | 2 以上       | 水をほとんど保持しない  |
| 砂    | 粗砂 | 2~0.2      | 毛管孔隙に水が保持される |
|      | 細砂 | 0.2~0.02   | 同上+肉眼で見える限界  |
| シルト  |    | 0.02~0.002 | 凝集して土塊を形成する  |
| 粘土   |    | 0.002 未満   | コロイド的性格を持つ   |



表 1. 6-4 土性区分<sup>2)</sup>

| 粘土<br>含量       | 土性区分                    | 記号   | 組成 (%) |        |        |
|----------------|-------------------------|------|--------|--------|--------|
|                |                         |      | 粘土     | シルト    | 砂      |
| 15%<br>以下      | 砂 質 土 Sand              | S    | 0～5    | 0～15   | 85～100 |
|                | 壤 質 砂 土 Loamy Sand      | LS   | 0～15   | 0～15   | 85～95  |
|                | 砂 壤 土 Sandy Loam        | SL   | 0～15   | 0～35   | 65～85  |
|                | 壤 土 Loam                | L    | 0～15   | 20～45  | 40～65  |
|                | シルト質壤土 Silt Loam        | SiL  | 0～15   | 45～100 | 0～55   |
| 15<br>～<br>25% | 砂質埴壤土 Sandy Clay Loam   | SCL  | 15～25  | 0～20   | 55～85  |
|                | 埴 壤 土 Clay Loam         | CL   | 15～25  | 20～45  | 30～65  |
|                | シルト質埴壤土 Silty Clay Loam | SiCL | 15～25  | 45～85  | 0～40   |
| 25<br>～<br>45% | 砂 質 壤 土 Sandy Clay      | SC   | 25～45  | 0～20   | 55～75  |
|                | 軽 埴 土 Light Clay        | LiC  | 25～45  | 0～45   | 10～55  |
|                | シルト質埴土 Silty Clay       | SiC  | 25～45  | 45～75  | 0～30   |
| 45%<br>以上      | 重 埴 土 Heavy Clay        | HC   | 45～100 | 0～55   | 0～55   |

普通畑について、土性に関する改良目標値<sup>3)</sup>は、SL（砂壤土）～LiC（軽埴土）とされており、土性三角図表で示すと図 1. 6-2 の赤枠の範囲となる。

図 1. 6-2 土性改良目標値<sup>3)</sup>

土性を知ること

- ①水分の透過性
- ②水分の保持機能
- ③土壌肥沃度
- ④都市建造物を支える地耐力

等に関する情報が得られ、土壌の彫塑性による判断と理化学的な特徴の関係は表 1. 6-5 に示すとおりである。

表 1. 6-5 土性の区分と特徴

| 区分  | 記号               | 粘土細工の彫塑性で判断    | 指の感触               | 耕耘性 | 通気性 | 排水性 | 保水性 | 保肥力 |
|-----|------------------|----------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 砂質  | S, LS            | こねても固まらない      | ザラザラで砂だけ           | 易   | 大   | 大   | 小   | 小   |
| 壤質  | SL, L, SiL       | 鉛筆程度の太さに彫塑できる  | 砂が多いか、粘土と砂が半々くらい   | 易   | 中   | 中   | 中   | 中   |
| 粘質  | SCL, CL, SiCL    | マッチ棒程度の細さまで繋がる | 粘土が大半で、砂もわずかに感じる   | やや難 | やや小 | 小   | 大   | やや大 |
| 強粘質 | SC, SiC, LiC, HC | こより程度に細長く作れる   | ネルヌルした粘土で、砂は感じられない | 難   | 小   | 極小  | 小   | 大   |

一般に、ため池底泥土は水が貯まった状態では流動性を帯びたドロドロな状態であり、水切りした状態ではベタベタ、乾燥するとカチカチに固まるという特徴を有している。ため池底泥土を農地土壌に用いる場合、その取扱い性を考慮すると、含水比が高く、いわゆる“ドロドロ”、“ベタベタ”な泥を“パラパラ”の状態にすることが重要となる。これは図 1. 6-3 に示すように、液状または塑性状態にあるため池底泥土を半固体状にすることで、具体的には写真 1. 6-1 の b. と c. の間の状態にあるため池底泥土を d. と e. の間の状態に改質することである。

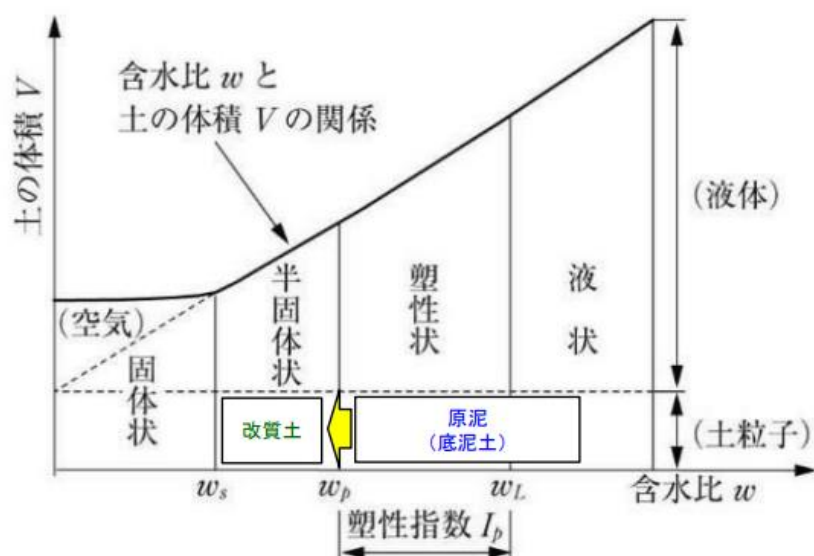


図 1. 6-3 土のコンシステンシーと底泥土及び改質土の関係

|        |                                                                                     |                                 |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| a. 泥水状 |    | 懸濁状ないしは過飽和となり、余剰水が表面に浮き出している状態。 |
| b. 泥土状 |    | 固液分離は生じないが、骨格構造はなく流動する状態。       |
| c. 塊 状 |   | 土粒子間の孔隙が小さく、こぶし程度の塊が形成される状態。    |
| d. 団粒状 |  | 架橋作用により土粒子が団粒形成することで、孔隙が大となる状態。 |
| e. 粒 状 |  | 団粒化が進行し、団粒間が結合し粒状物が生成された状態。     |

写真 1. 6－1 水分の多寡による土壌の状態

ため池底泥改質土を農地土壌に用いる場合、改質の適否を一つの指標だけで評価することは難しいことから、土性（粒度組成による土壌の分類）、コンシステンシー、三相分布

の 3 つを一次判定指標とした。

## (2) ため池底泥土

技術の汎用性を持たせるため、各年度で異なる底泥土を対象とした。

**写真 1. 6-2** は令和 2 年度の事業に用いた底泥土で、ため池改修工事に伴い、落水陸干している山口県の農業用ため池（阿東篠原第 2 ため池）からバックホウで採取した。



(a) 落水陸干したため池



(b) 室内試験用試料採取

**写真 1. 6-2** 底泥土を採取したため池と室内試験用試料採取状況（山口）

**写真 1. 6-3** は令和 3 年度の事業に用いた底泥土で、施設維持管理のために水位を低下させた新潟県の貯水池（笹ヶ峰ダム、乙見湖）から泥上掘削機で採取した。



(a) 泥上掘削機による底泥土掘削



(b) 室内試験用採取試料

**写真 1. 6-3** 底泥土を採取した貯水池と室内試験用試料採取状況（新潟）

各年度とも、底泥土については物理試験、化学試験、安定化試験、土壌理化学特性試験、及び環境安全特性試験を行った。



## 1) 物理試験

物理試験は、ため池底泥土の物理特性として、土に固有な性質や状態を把握することを目的とするもので、表 1. 6-6 に示す項目について実施した。

表 1. 6-6 ため池底泥土の物理試験項目

| 試験項目        | 規格         | 摘 要                                                         |
|-------------|------------|-------------------------------------------------------------|
| 土粒子の密度試験    | JIS A 1202 |                                                             |
| 土の含水比試験     | JIS A 1203 |                                                             |
| 土の粒度試験      | JIS A 1204 |                                                             |
| 土の液性・塑性限界試験 | JIS A 1205 |                                                             |
| 土の保水性試験     | JGS 0151   | pF1.5( $-\phi=3.1$ ): 吸引法 (水頭法)<br>pF3.0( $-\phi=98$ ): 遠心法 |
| 土の透水性試験     | JIS A 1218 | 変水位透水試験                                                     |

以下、各試験項目の意義と目的について述べる。

### (a) 土粒子の密度試験

土は固体 (Solid)・液体 (Liquid)・気体 (Air) の三相から構成され、土の固体部分は無機物と有機物とからなるが、土粒子の密度試験は土の固体部分、すなわち ( $110 \pm 5$ ) °C の炉乾燥による残留部分を構成する鉱物及び有機物の単位体積当たりの平均質量を求める試験である。したがって、土を構成している土粒子個々の密度を表すものではなく、土粒子内に閉鎖空隙がある場合には、それを含む密度であるから、破碎して空隙をなくした物とは値が異なる。

試験の主な内容は、土粒子の質量とその体積を測ることであり、質量測定は比較的容易であるが、体積測定は土粒子間に含まれる空隙の影響を受けるため、正確さを期するためには脱気などの工夫が必要となる。

土粒子の密度は土の構成鉱物や含まれる有機物の量によって異なり、一般的に、密度の高い鉱物を含む土ほどその値は大きく、有機物含有量が多くなると逆に小さくなる。土粒子の密度は間隙比・間隙率や飽和度の算出、沈降分析等に使用されるとともに、その土の主な鉱物組成や有機物含有量を推定する手掛かりとなる。

### (b) 土の含水比試験

土の含水比とは、土を構成している土粒子質量に対する水の質量比を百分率で表したものである。土粒子質量は、固相のうち ( $110 \pm 5$ ) °C の乾燥炉や電子レンジで乾燥したときに残留する質量で、水の質量は、液相のうち同手法により失われる質量である。

含水比試験の主な操作は、試料を乾燥させることと、乾燥前後の質量を測ることである。含水比は間隙比・間隙率、飽和度や土の乾燥密度の計算などに使用される。含水比はその土の性状に大きく関わることから、土質や土性の説明でよく使われ、説明の中で「含水比が高い」とか「含水比が低い」といわれるが、このときの“高い”、“低い”は絶対値としての値ではなく、その土としては“高い”“或いは”低い“という具合に、相対的な状態を示すものである。例えば、“含水比 15%の土”“といっても、粘性土の場合はかなり乾いた状態であろうが、砂質土の場合、飽和に近い湿潤な状態であり、同じ含水比でも土質によ

って性状は大きく異なる。土の自然状態の含水比は、工学的な性質や施工の難易を推定する有力な手掛かりとなる。

### (c) 土の粒度試験

地盤を構成する土粒子径の分布状態を全質量に対する百分率で表し、各種粒径の土粒子がどんな状態で混じりあっているかを示したものが粒度である。地盤材料の粒度特性を表す方法としては、土粒子の組成やコンシステンシーに基づいた地盤材料の分類名、細・粗粒分含有率、均等係数、曲率係数等、様々な指標が使われている。粒度試験の結果は主として土の分類に使用されるが、粘土やシルトなどの細粒土は粒度試験結果より液性限界・塑性限界試験結果が優先される。粒度試験は土の粒度分布状態を把握できるだけでなく、透水性の判断、液状化強度の推定、一軸圧縮強さの補正などにも使用される。

### (d) 土の液性・塑性限界試験

土の液性限界・塑性限界試験は、土が塑性状態から液状になるときの含水比である液性限界 ( $w_L$ ) と、土が塑性状態から半固体に移るときの含水比である塑性限界 ( $w_P$ ) を求める試験である。

粘土やシルト分を多く含む細粒土は、含水比が変化するとその土の性状も変化する。非常に乾いているときは固体的にふるまい、含水比が少し上昇すると半固体的に、塑性限界を超えると塑性的に、さらに含水比が上昇して液性限界を超えると液体と同様な性状を示す。このような硬さや変形に対する抵抗性の大小や状態変化を総称して「コンシステンシー」という。

液性限界と塑性限界から導かれる指標として、塑性指数 ( $I_P$ )、コンシステンシー指数 ( $I_C$ )、液性指数 ( $I_L$ ) があり、それぞれ 1 - (1) 式～1 - (3) 式で表される。

$$I_P = w_L - w_P \quad 1 - (1) \text{ 式}$$

$$I_C = (w_L - w) / (w_L - w_P) = (w_L - w) / I_P \quad 1 - (2) \text{ 式}$$

$$I_L = (w - w_P) / (w_L - w_P) = (w - w_P) / I_P \quad 1 - (3) \text{ 式}$$

ここに、 $w$ ：自然含水比若しくは与えられた含水比

塑性指数は、練り返した細粒分が塑性を示す含水比の範囲を表す。粘土分含有率にほぼ比例し、塑性指数が大きくなるほど粘性が増加する。一般に、高いほど吸水による強度低下が著しいといわれる。

コンシステンシー指数は、細粒土の自然含水状態における相対的な硬さを表す。ゼロに近いほど自然含水比が液性限界に近く、土が軟らかい状態であることを示す。また、1 に近いほど土は相対的に硬いことを示す。

液性指数は、自然状態の土が練り返されるとどうなるかを示す指標で、ゼロに近いほど土は安定しており、大きくなるほど圧縮性が大きく鋭敏（練り返しによる強度低下が大）である。

### (e) 土の保水性試験

土中の水分<sup>4)</sup>は、図 1. 6 - 4 に示すように、土中での位置及び土粒子との結合強さによって吸着水（吸湿水・膨潤水）、毛管水、重力水に分類される。

吸着水は、土粒子と水分子の間の分子間力や、土粒子荷電による電場の影響を受けて土粒子表面に強く吸着されている水であるため、植物にはほとんど利用されない。毛管水は、吸着水の外側に表面張力により重力に逆らって保持されている水であり、土壤に長く留ま

り、植物が最も吸水利用する水である。重力水は、土壌の間隙を重力によって流れる水であることから植物にはあまり利用されず、通気性を阻害することがある。

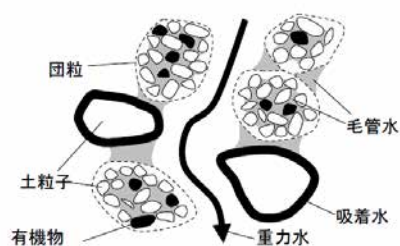


図 1. 6-4 土中の水分<sup>4)</sup>

図 1. 6-5 は、土壌水分の分類と水ポテンシャル及び水分恒数<sup>5)</sup>を示す。

| 吸引圧 (pF)        | 0           | 1.5    | 1.8    | 2.7          | 3.8            | 4.2               | 4.5             | 5.5              | 7.0               |
|-----------------|-------------|--------|--------|--------------|----------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 水ポテンシャル (—kPa)  | 0.1         | 3      | 6      | 49           | 619            | $1.5 \times 10^3$ | $3 \times 10^3$ | $31 \times 10^3$ | $961 \times 10^3$ |
| 水ポテンシャル (水頭—cm) | $10^0$      | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$       | $10^4$         | $10^5$            | $10^6$          | $10^7$           | $10^8$            |
| 土壌水の区分          | 懸濁水         | 重力水    | 毛管水    |              |                | 膨潤水・吸着水           |                 | 化合水              |                   |
| 土壌水分恒数          | 重力流去水 (過剰水) | 最大容水量  | 圃場容水量  | 有効水 (易効性有効水) | 毛管連絡切断点 (水分当量) | 初期しおれ点            | 永久しおれ点          | 無効水 (非有効水) (死蔵水) | 105℃乾土            |
| 水移動の難易          | 容易          | 容易     | 容易     | 中            | 困難             | 困難                | 困難              | 移動不能             | 移動不能              |

図 1. 6-5 土壌水分の分類と水ポテンシャル及び水分恒数<sup>5)</sup>

毛管水の中でも、作物が生育に使うことのできる土中水分<sup>6)</sup>は、ほ場容水量 (pF1.5~1.8) と毛管連絡切断点 (pF2.7~3.0) といわれている。この間の水分量は、「易効性有効水 (易効水)」といわれ、pF1.5~3.0 の力で土に付着している水分である。そこで、図 1. 6-6 に示すように、pF1.5 のときの水分量と pF3.0 のときの水分量を求め、両者の差から「易効性有効水 (易効水)」を求めた。

#### (f) 土の透水性試験

土中における自由水の移動のしやすさを土の透水性といい、この透水性を定量的に評価するための指標である透水係数  $k$  [m/sec] を求めるため

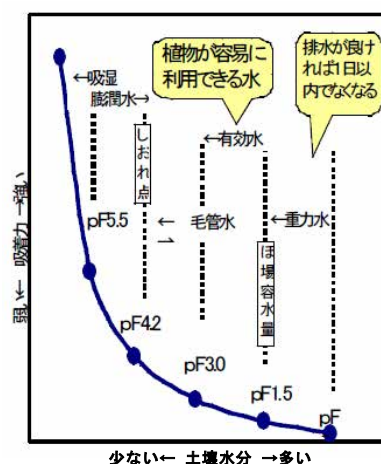


図 1. 6-6 土壌の保水特性<sup>6)</sup>  
(一部加筆)

の試験である。

土の透水性は土の構造、粒度、密度及び施工仕様等によって変化するが、地盤工学の分野では、土の透水性により土構造物の安定性や施工性が左右される一方、農学の分野では、透水性が低いことによる畑土壌の排水不良や、透水性が高いことによる水田の漏水が問題になることがある。

## 2) 化学試験

化学試験は、ため池底泥土の基本的な化学的特性を把握するとともに、ため池底泥改質土を農地土壌として用いる場合に、底泥土にどの程度農地土壌としての適性があり、改質によってそれがどう変化するかを評価するための基礎データを得るために行った。また、底泥改質土を土木分野に適用する場合に、構造物や埋設物に対する影響を検討することも目的として、表 1. 6-7 に示す項目について行った。

表 1. 6-7 ため池底泥土の化学試験項目

| 試験項目         | 規 格        | 摘 要         |
|--------------|------------|-------------|
| 土懸濁液の pH 試験  | JGS 0211   |             |
| 土懸濁液の電気伝導率試験 | JGS 0212   |             |
| 土の水溶性成分試験    | JGS 0241   |             |
| 土の強熱減量試験     | JIS A 1226 |             |
| 土の有機炭素含有量試験  | JGS 0231   |             |
| 土の陽イオン交換容量試験 | JGS 0261   |             |
| 酸化還元電位       | ORP 計      | HORIBA D-74 |

以下、各試験項目の意義と目的について述べる。

### (a) 土懸濁液の pH 試験

pH とは土の酸性・アルカリの度合いを示す尺度で、pH=7 が中性、pH<7 は酸性、pH>7 はアルカリ性を示す。土の pH が土の工学的特性に及ぼす影響としては、コンクリート構造物の劣化や鋼材の腐食、地盤改良効果への影響などがある。一方、農地土壌においては、作物の生育に大きく関与する。

我が国では降雨と共に石灰質が溶脱して土壌の酸性化が進む傾向にあるが、pH4 以下の強酸性ではアルミニウムイオンが活性化して根に障害が発生する。また、酸性化が進行すれば窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウム、ホウ素、モリブデンの吸収低下による欠乏症、鉄、マンガン、亜鉛の可溶化による過剰症を引き起こす要因となる。逆にアルカリ化になるとマンガン、鉄、亜鉛等は吸収低下して欠乏症の要因となる。一般的には普通畑では pH6.0 (5.5) ~6.5 が適正域とされているが、表 1. 6-8 に示すように作物の種別ごとに好適 pH<sup>7)</sup> が示されている。



表 1. 6-8 作物別の好適 pH<sup>7)</sup>

| pH      | 普通作物               | 果菜・豆類                                                | 葉根菜類                                                           | 果樹・花き等              |
|---------|--------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|
| 6.5～7.0 | 大麦                 |                                                      | ホウレンソウ                                                         | イチジク                |
| 6.0～7.0 | 小麦                 | エンドウ、トマト                                             | ダイコン、キャベツ、アスパラガス                                               | ブドウ、アンス、カーネーション     |
| 6.0～6.5 | サトイモ、大豆            | インゲン、エダマメ、カボチャ、キュウリ、スイートコーン、スイカ、ソラマメ、ナス、ピーマン、メロン、アズキ | ウド、カリフラワー、コマツナ、シュンギク、ショウガ、セロリ、チンゲンサイ、ニラ、ネギ、ハクサイ、ブロッコリー、ミツバ、レタス | ナシ、カキ、キウイフルーツ、ユズ、キク |
| 5.5～6.5 | イネ、エンバク、ライムギ       | イチゴ、ラッカセイ                                            | カブ、ゴボウ、タマネギ、ニンジン                                               | ウメ、リンゴ              |
| 5.5～6.0 | サツマイモ、ソバ、ヤマノイモ、オカボ |                                                      |                                                                | モモ、オウトウ、ミカン         |
| 5.0～6.5 | パレイショ              |                                                      |                                                                |                     |
| 5.0～5.5 |                    |                                                      |                                                                | クリ                  |
| 4.5～5.5 |                    |                                                      |                                                                | ブルーベリー、チャ、ツツジ、シャクナゲ |

### (b) 土懸濁液の電気伝導率 (EC) 試験

電気伝導率 (EC : Electro Conductivity) は電気の通しやすさの指標で、溶液中ではイオンが電気を運ぶ役割を担うので、そこに含まれる電解質 (水溶性塩類) の濃度が高くなると、必然的に電気伝導率も大きくなる。土中の電解質は、海水や化学物質の混入、雨水による希釈などによって変化する。

土は、EC が 200mS/m (ミリジーメンス／メートル) より大きくなると、土中コンクリート構造物の劣化や埋設された鋼材の腐食、土の透水性や強度などにも影響を及ぼすといわれている。また、電解質は土壌中の養分量と密接な関係にあるため植生に影響し、EC が高すぎると作物の根が塩漬けにされたような形になって養分を吸収しにくくなり、低すぎる場合は土壌中の肥料成分が少ないことを示す。

### (c) 土の水溶性成分試験

水溶性成分試験は、土の間隙水中に溶解している成分と、水で比較的簡単に溶解する土粒子中の成分を一括して分析する試験である。土の主な水溶性成分にはナトリウム、カリウム、カルシウム及びマグネシウムの塩化物と硫酸塩がある。

水溶性成分のうち、塩化物が多量に存在すると鋼材の腐食を促進し、硫酸塩は土中のコンクリートを侵食するとともに、ソイルセメントの耐久性を低下させることが知られており、土の塩化物含有量が 1mg/g より大きい、或いは土の硫化物含有量が 0.5mg/g より大きい場合には、電気伝導率が増加して電気が流れやすくなり、鋼材の腐食を生じやすくなるといわれている。

### (d) 土の強熱減量試験

土の強熱減量試験は、(750±50)℃で加熱することで損失した質量の減少量から、土に含まれている有機物量を知るための試験であるが、(750±50)℃で消失する結合水や結晶水、揮発性物質も併せて定量される。

高含水比泥土をセメント系固化材等によって改良する場合、有機物の種類や含有量によっては強度発現に影響を及ぼすことが知られており、ため池底泥土の改質に先立ち、底泥土中の有機物含有量の目安を把握するために実施した。また、ため池底泥改質土を農地土壌に用いる場合、改質土中の有機物は土壌の団粒構造の形成に寄与する一方で、改質材に

再生石膏粉を用いた場合に多量の硫化水素ガスを発生させる条件の一つとなることから、ため池底泥改質土の硫化水素ガス発生試験のバックデータ取得を目的として実施した。

#### (e) 土の有機炭素含有量試験

自然の土には、無機質粒子及び無機塩類などの無機物と、動植物・微生物とその遺骸及び腐植物などの有機物が含まれている。また、人間の経済活動により、コンクリート塊や焼却灰などの無機物や、厨芥や有機肥料のような有機物が混入してくる場合がある。

廃石膏ボードは条件が揃うと多量の硫化水素ガスを発生することが報告されているが、その条件の一つが有機物の存在である。

再生石膏粉を用いて改質した底泥土には、自然由来或いは人為的な行為によって混入する有機物以外に、石膏ボードの粘結材やボード紙の増強材として使用されているデンプンやボード紙のセルロースといった廃石膏ボード由来の有機物が混入することがある。強熱減量試験 (JIS A 1226) により土に含まれている有機物量の定量を行うが、強熱減量は結合水や結晶水といった水分のほか、750℃で消散する揮発性物質も定量することから、クロスチェックとして有機炭素含有量を定量することで有機物量を把握した。

有機炭素含有量試験 (加熱燃焼法) は、試料を 900~950℃の高温で燃焼することによって発生する二酸化炭素量を測定し、これを炭素含有量に換算する方法で、燃焼によって発生する二酸化炭素の量は酸化分解された試料中の有機物に含まれている炭素の量に比例することを利用したものである。この方法で得られた炭素量は全炭素 (TC : Total Carbon) で、有機炭素 (OC : Organic Carbon) と無機炭素 (IC : Inorganic Carbon) を含んでおり、炭酸塩などの無機炭素を除外しなければならないが、今回は前処理で予め無機炭素を除去してから全炭素を求める直接測定法で求めた。

#### (f) 土の陽イオン交換容量試験

土粒子の表面はほとんど例外なく負電荷を帯びており、その負電荷は陽イオンを吸着することによって中和され、粒子の電気的な中性が保たれている。土粒子とこれらの陽イオンとの結合力は、主としてクーロン力による弱い結合であることが多い。このため、イオン組成の異なる水が浸透してくると、その組成に応じ、吸着陽イオンの一部は浸透水中の陽イオンと交換される。したがって、土の置かれている環境の変化によって吸着イオンの組成は変化する。他の陽イオンと交換可能な形で吸着されている陽イオンは交換性陽イオンと呼ばれ、交換性陽イオンの吸着容量が陽イオン交換容量 (Cation Exchange Capacity) である。通常は乾土 100g 当たりのミリグラム当量 ([meq/100g], SI 単位では [cmol(+)/kg]) で表す。

CEC は、それが土ごとに固有の定数というわけではなく、CEC の測定時に土をどのような組成の溶液と平衡させるのか、吸着イオンをどのようなイオンで抽出するのかなどの条件によって異なる値が得られる。同じ鉱物組成で同一の粒度分布を持つ粘性土でも、その化学的特性は CEC によって異なり、塩水浸入に伴う地下水の水質変化や、金属イオン等の汚染物質の吸着保持を評価する際には不可欠なものとなる。また、水溶性の交換性塩基類は、植物にとって栄養分として利用されることから、CEC の把握は重要である。

#### (g) 酸化還元電位

酸化還元電位とは、酸化させる力と還元させる力の差を電位差で表した数値のことである。酸化とは電子を失う化学反応のことで、具体的には物質に酸素が化合する反応、或いは物質から水素を奪われる反応をいう。一方、還元とは電子を受け取る化学反応のことで、具体的には物質から酸素が奪われる反応、或いは物質が水素と結合する反応をいう。

酸性・アルカリ性の尺度が pH（Potential of Hydrogen）であるのに対し、酸化力・還元力の尺度が ORP（Oxidation Reduction Potential）であり、記号 Eh、単位 [mV] で表す。

酸化還元電位は ORP 計で測定するが、物質内の酸化・還元に関係する全てのイオンを測定して電圧で表示したのが ORP 計であるのに対し、水素イオン濃度を測定して濃度指数で表示したのが pH 計である。ORP はプラスの数値が大きいほど酸化されている水であり、マイナスの数値が大きいほど還元力が強い水であると同時に、水質が汚染されているほどプラスの高い数値を示すので、汚濁度の判定指標にもなる。

ORP は土壌からの重金属等の溶出に影響を及ぼし、還元環境下（ORP が低下）では水酸化鉄に吸着されていたひ素が溶出する一方、練混ぜ水の ORP の低下（還元状態）に伴い、セメントから溶出する六価クロムの濃度が減少することが報告されている。

また、農地においては、図 1. 6-7 に示すように、土壌が酸化状態なのか還元状態なのかによって作物の根の伸びる環境が変化する<sup>8)</sup>といわれている。

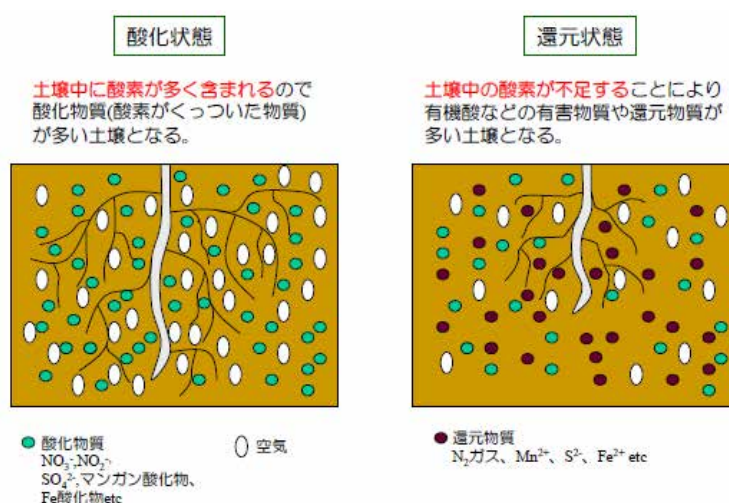


図 1. 6-7 酸化還元電位（ORP）と植物の根の関係<sup>8)</sup>

### 3) 安定化試験

底泥改質土を土木用資材として用いる場合の改質効果を評価するため、比較対象として、表 1. 6-9 に示す改質前の底泥土の安定化特性を調べた。

表 1. 6-9 ため池底泥土の安定化試験項目

| 試験項目          | 規格                                                   | 摘要             |
|---------------|------------------------------------------------------|----------------|
| 突固めによる土の締固め試験 | JIS A 1210                                           | A-a 法          |
| 締固めた土のコーン指数試験 | 建設汚泥処理土利用技術基準                                        | JIS A 1228 に準拠 |
| CBR 試験        | JIS-A-1211                                           | 設計 CBR         |
| 土の一軸圧縮試験      | 供試体作製：JCASL-01:2006 <sup>注)</sup><br>圧縮試験：JIS A 1216 | 試験材齢 7 日       |

注) セメント系固化材による改良体の強さ試験方法、(一社)セメント協会、2006.03

以下、各試験項目の意義と目的について述べる

#### (a) 突固めによる土の締固め試験

土は十分締め固めることで変形特性や強度特性を改善し、工学的に安定した地盤を得ることができる。土は、粒度分布、含水比及び締固めエネルギーによってその締まり具合が変化するため、締固め特性（含水比と締固め密度の関係）を把握することは、材料特性を把握し、施工仕様を検討するうえで重要である。

そこで、底泥土とその改質土の締固め特性を比較することで、土の締固め特性に対する改質効果を評価した。

#### (b) 締固めた土のコーン指数試験

締固めた土のコーン指数試験とは、ロッド先端に先端角  $30^\circ$ 、底断面積  $3.24\text{cm}^2$  のコーンを装着し、押込みハンドルのついた貫入棒を  $1\text{cm/sec}$  の速さで人力により締固め供試体に貫入させ、そのときの貫入抵抗から単位面積当たりの貫入抵抗値を求めてコーン指数  $q_c$  を算出する試験である。

元々は火山灰質粘性土の繰返し強度特性の良否を判定するための試験法として考案されたが、トラフィカビリティーの判定や、建設汚泥処理土の土質材料としての品質区分、建設発生土の分類の指標として使われている。元来軟弱地盤を対象とした試験方法であったが、安定処理土にも適用可能とされており、この場合の適用限界は  $1\sim 1.5\text{MN/m}^2$  ( $P=324\text{N}$  ( $33.06\text{kgf}$ )  $\sim 486\text{N}$  ( $49.59\text{kgf}$ )) 程度以下とされているが、貫入試験機を用いて  $10\text{MN/m}^2$  ( $P=3.24\text{kN}$  ( $331\text{kgf}$ )) 程度まで試験を行う場合もある。

#### (c) CBR 試験

道路の路床の良否を支持力特性から判定する目的で考案された試験方法が CBR で、California Bearing Ratio の略から CBR 試験と命名された。クラッシャーランを用いた基準となる貫入強さに対し、相対的な強度を求めたのが CBR であり、100%に近づくほど碎石に近い良質な材料、0%に近くなるほど支持力に劣る材料であることが単純に評価できる。

アスファルト舗装の厚さを決定する基礎となる路床土の CBR を設計 CBR といい、農水基準では、路床土の設計 CBR は 3 以上が望ましいとされている。

#### (d) 土の一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、室内で土のせん断強さを求める試験方法で、拘束圧の作用しない状態で自立する供試体を長軸方向に圧縮し、圧縮応力の最大値を求める試験である。

地盤から採取した乱れが少ない供試体で試験を行えば、その土が原位置にあった状態での非排水強さが推定でき、改良土や現場での締固め仕様と同一条件で作製した供試体を用いて試験を行えば、改良効果や施工の妥当性を評価することができる。

### 4) 土壌理化学特性試験

土壌理化学特性試験は土壌診断ともいわれ、分析を行うことで土壌の理化学的状态を把握することができる。土壌診断を行うと、分析機関より診断結果とともに施肥に関する処方箋が届くので、これを活用することにより、土壌が作物栽培に適しているか、或いはどのような対策をするべきかを知ることができる。

ネオ・イーキューブ工法は、底泥土を農業分野に適用できるように物理的に改質することを目指した技術であり、土壌理化学特性を改善するものではないが、農地土壌として必要な性質をどの程度満足しているかを明らかにするために実施した。

土壌理化学試験項目を表 1. 6-10 に示す。

表 1. 6-10 ため池底泥土の土壤理化学試験項目

| 区分                         | 分析項目                                    | 分析方法                                     | 摘 要 |
|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----|
| 土<br>壌<br>理<br>化<br>学<br>性 | pH (H <sub>2</sub> O)                   | 1:5 水振とう抽出, ガラス電極法                       |     |
|                            | 電気伝導率 (EC)                              | 1:5 水振とう抽出, 電気伝導率計                       |     |
|                            | 交換性カルシウム (CaO)                          | 振とう抽出法 (1M/L 酢酸アンモニウム抽出), 吸光度法または原子吸光光度法 |     |
|                            | 交換性マグネシウム (MgO)                         |                                          |     |
|                            | 交換性カリウム (K <sub>2</sub> O)              |                                          |     |
|                            | Ca/Mg 比                                 | (計算値)                                    |     |
|                            | Mg/K 比                                  |                                          |     |
|                            | Ca/K 比                                  |                                          |     |
|                            | 陽イオン交換容量 (CEC)                          | 振とう抽出法 (10% 塩化カリウム抽出), 吸光光度法             |     |
|                            | 塩基飽和度                                   | (計算値)                                    |     |
|                            | 可給態リン酸 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | トルオーグ法, 吸光光度法                            |     |
|                            | アンモニア態窒素 (NH <sub>4</sub> -N)           | 1:10 1M/L 塩化カリウム抽出, 吸光光度法                |     |
|                            | 硝酸態窒素 (NO <sub>3</sub> -N)              |                                          |     |
|                            | リン酸吸収係数                                 | オルトリン酸法, 吸光光度法                           |     |
|                            | 腐植                                      | 全農法 (熊田式簡便法), 吸光光度法                      |     |
| 微<br>量<br>要<br>素           | 可給態鉄 (Fe)                               | DTPA 抽出法, 原子吸光光度法                        |     |
|                            | 可給態マンガン (Mn)                            |                                          |     |
|                            | 可給態亜鉛 (Zn)                              |                                          |     |
|                            | 可給態銅 (Cu)                               |                                          |     |

以下, 各試験項目の意義と目的について述べる

#### (a) pH

pH は, 水溶液の酸性-アルカリ性を示す尺度で, pH7.0 が中性で, それより大きい場合はアルカリ性, 小さい場合は酸性を示す. pH によって各種養分の溶解度が変化するため, 作物の養分吸収の難易が変化する. 国の地力増進基本方針の土壤改良の目標値は, 水田・普通畑で 6.0~6.5, 果樹地で 5.5~6.5 (但し, 茶園では 4.0~5.5) となっている. この値よりも高くても低くても, 土壤中の有効成分が作物に吸収されにくくなる. 特に, 6.5~7.0 以上になると, 作物の生育に必要なホウ素, 鉄, マンガン等の微量元素が土壤中で溶解しにくくなる. 作物によってそれぞれ適した土壌 pH の範囲があり, 水稻では 6.0 程度, 大豆・大麦では 6.5 程度が適している.

酸性化の要因としては, 降雨による塩基類の溶脱・流亡, 生理的酸性肥料の多量施用, 酸性硫酸塩土壌の影響などがあり, 土壌が酸性化すると, 石灰・苦土・カリ等の塩基類の欠乏, アルミニウム・マンガン・鉄・亜鉛・銅等の過剰害, 黒ボク土でのリン酸固定量の増大等が発生しやすくなる. また, アルカリ化の要因としては, アルカリ成分を含む土壌改良資材の過剰施用, pH の高い家畜ふん堆肥の過剰施用等影響などがあり, 土壌のアルカリ化は, 塩基類の過剰集積による塩類障害, マンガン・鉄・亜鉛・銅・ホウ素等の欠乏障害が発生しやすくなる.

### (b) 電気伝導率 (EC)

電気伝導率 (EC) は電気の通りやすさを表す数値で、土壌の塩基濃度を示す尺度である。高いほど養分量が多いことを示すが、低すぎたり高すぎる場合は、肥料不足や肥料蓄積による濃度障害の指標となる。土壌中の肥料養分濃度が高くなると、根が水分を吸収できなくなるなどの「塩類濃度障害 (肥焼け)」を起こすことがある。

### (c) 交換性塩基

塩基とは水に溶けると陽イオンになる物質のことであるが、土壌理化学性では特にカルシウム (石灰)、マグネシウム (苦土)、カリウム、ナトリウムの 4 つを指す。塩基類の多くは、土壌に吸着・保持されているが、溶け出しているもの (水溶性) もある。交換性塩基とは、水溶性ではないが、土粒子に弱く吸着しており、作物に吸収されやすい形になっている塩基をいう。

### (d) 陽イオン交換容量 (CEC)

陽イオン交換容量 (CEC) とは、塩基置換容量ともいい、土壌が肥料や養分を保持する能力、土壌の緩衝力を表し、数値が小さいほど肥料保持力が小さく、大きいほど肥料を土壌に貯めておく力が強く、肥沃度が高い。

土壌の粒子或いは腐植の表面はマイナスの電気を帯びている一方、アンモニウム態窒素、石灰、苦土、カリなどの養分は、土壌中の水に溶けてプラスの電荷をもつ陽イオンとして存在する。土壌のマイナス電荷は、これらの陽イオンとともに水素イオンを吸着して保持している。土壌のマイナス電荷の総量を表した値を陽イオン交換容量と呼び、CEC が高い土壌ほど多くの養分を保持することができる。

一般に、粘土及び腐植の多い土では CEC が大きくなるが、CEC は土壌に含まれる粘土鉱物の種類・量に支配されるため、その改善は容易ではないとされる。

### (e) 塩基飽和度

塩基飽和度は、陽イオン交換容量 (CEC) に対して何%が塩基 (交換性陽イオン：カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウム) で満たされているかを示したもので、適正範囲は CEC や作物の種類によって異なる。基準値は 60~80% であるが、80% を越えている場合には肥料の入れ過ぎに注意が必要となる。塩基飽和度と pH の間には相関関係があることが知られており、塩基飽和度が高いと pH が高くなる傾向を示す。

### (f) 可給態リン酸

可給態リン酸は有効態リン酸ともいう。土壌中には大量のリン酸が含まれるが、リン酸は土壌に吸収されやすいため、作物が吸収できる形態のものは 5~10% 程度である。土壌中に存在するリン化合物のうち、カルシウム等と結合していて吸収可能な形態のものを可給態リン酸という。含量は、土壌 (乾土) 100g あたりのリン酸量 (mg) で表す。

リン酸は、作物のエネルギー代謝やタンパク質合成に関与しており、根の発育や分げつ (植物の根元付近から新芽が伸びて株分かれること) の発生を促進する要素である。通常 10mg/100g 以上は必要であるが、火山性土壌ではこの値が低いことが多く、土壌改良資材としてのリン酸資材の投入が有効である。未耕地ではほとんど存在せず、開墾後に作物栽培を繰り返すことによって徐々に土中に蓄積されていく。

### (g) アンモニア態窒素・硝酸態窒素

アンモニア態窒素と硝酸態窒素は、土壌中の窒素の大部分を占める有機態窒素や、土壌に施用された有機物から微生物の無機化作用により生成する無機態窒素のことで、それぞれ湛水状態の水田及び酸化状態の畑土壌における主要な無機態窒素であり、窒素肥料とし

ての主要な化学形態でもある。

アンモニア態窒素は土壤に吸収されるので、水に流れにくいですが、硝酸態窒素は雨や湛水により土壤から溶脱しやすく、地下水汚染の原因にもなる。

#### (h) リン酸吸収係数

土壤が固定するリン酸量の指標で、リン酸吸収係数が 1,500 以上の土壤では、仮にリン酸を施用しても、その多くが土壤に吸着されてしまい、植物が吸収できない。火山灰土では数値が高く、砂質土では低い値を示す。

#### (i) 腐植

腐植とは、土壤中で動植物の遺体が腐敗分解して、黒色の膠質物に変化したものをいい、栄養腐植と耐久腐植に大別される。栄養腐植は養分（特に窒素とリン酸）の供給源としての効果があり、耐久腐植は土壤の物理的性質（通気性、保水性、通水性、等）改善に有効であるとされる。

水田土壤では3～5%を目標としており、沖積砂壤土・壤土地帯のように、元々腐植含量が少ないほ場でも3%以上を確保できるよう、有機物の施用を勧めている。

腐植は、微生物によって時間の経過とともに分解されていくとともに、耕耘作業等により土壤の構造が破壊されたり、酸素供給量が多くなるとさらに分解が進むため、堆肥などの有機物の施用により補給する必要がある。

#### (j) 微量元素

土壤中には極めて多くの元素が存在し、根から吸収したこれら元素のほとんどすべてが作物の体内には含まれている。それらのなかで、作物が生育に必要とし、欠けると生活環を形成できなくなる重要な 17 元素を必須元素という。

植物が生育するために比較的大量に必要とする 3 元素（N, P, K）を大量要素という（三大栄養素ともいう）。大量要素に次いで必要量の多い肥料成分という意味で、Ca, Mg, S を中量要素という（二次要素ともいう）。空気や水から得られる C, O, H を除いた 14 元素を植物の必須栄養素という。必須栄養素は、植物の要求量からさらに 6 種類（N, P, K, Ca, Mg, S）の多量要素（中量要素ということもある）と 8 種類（Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, Cl, Ni）の微量元素に分けられる。

微量元素は作物が吸収する量はごくわずかであるが、欠乏すると生育に影響が出る必須成分である。微量元素は、それ自体は構成成分にはならないが、作物の体内で主に代謝酵素の補酵素として働いている。

微量元素は作物収穫による持ち出しと、雨による流亡などで圃場から徐々に少なくなっていく、多量要素は通常、化成肥料などで補われるが、これらには微量元素が含まれていることが少なく、微量元素が十分に補われないままに栽培が続けられている。このため多くの連作圃場では微量元素の欠乏土壤が増えている。

なお、土中の養分のうち、作物に吸収されやすい簡単な化合物となっているものを可給態養分といい、複雑な化合物で吸収されにくいものを不可給態養分という。

### 5) 環境安全特性試験

令和 2 年度の事業に使用したため池底泥土の採取地である山口県は、底泥土を産業廃棄物（汚泥）と判断している。

産業廃棄物を使用した試験研究においては、環境省から各自治体の主管部局に対して通知（環産産発第 060331001 号、平成 18 年 3 月 31 日、「規制改革・民間開放推進 3 か年計画」（平成 17 年 3 月 25 日閣議決定）において平成 17 年度中に講ずることとされた措置



（廃棄物処理法の適用関係）について）がなされており、試験研究に該当する要件の一つに、生活環境保全上支障がないことが挙げられている。また、国土交通省のガイドライン等においても、建設汚泥処理土の利用に当たっては、生活環境保全上の基準を満たしていることを確認することとしており、「生活環境保全上の基準については、環境基本法に基づく土壤環境基準（溶出量基準）に加えて有害物質の含有量基準とする。ここで、含有量基準については、土壤汚染対策法に基づく特定有害物質含有量基準に準ずるものとする。」とされている。特に、今回の事業では、底泥土を農業分野に適用することを考えているため、改質土を適用した農地が「農用地土壤汚染対策地域」に指定されないことも確認した。

一方、令和3年度の事業に使用した貯水池底泥土の採取地である新潟県は、底泥土を土砂と判断している。

したがって、環境省から各自治体の主管部局に対して通知された「産業廃棄物を使用した試験研究」に関する計画書の提出は不要であるが、同通知及び国土交通省のガイドライン等に準じて環境安全特性を確認した。

以上を踏まえ、底泥土の環境安全性を把握するため、表 1. 6-11 に示す試験を行った。

表 1. 6-11 ため池底泥土の環境安全特性試験項目

| 試験項目            | 規 格              | 摘 要                |
|-----------------|------------------|--------------------|
| 土壤溶出量           | 平成3年環境庁告示第46号    | 土壤環境基準             |
| 土壤含有量           | 環水大水発第120725002号 | 底質調査法              |
| 農用地特定有害物質       | 農用地土壤汚染防止法       | 指定要件に係る検定の方法を定める省令 |
| 硫化水素ガスの発生ポテンシャル | NIES（国立環境研究所）法   |                    |

以下、各試験項目の意義と目的について述べる

#### （a）土壤溶出量

土壤環境基準は、「人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持することが望ましい基準」を定めたもので、29物質（水銀は「総水銀」と「アルキル水銀」の2項目、銅を含む）の溶出量について規定されている。

ため池底泥改質土についても環境安全性の確認として土壤溶出量の分析を行うが、その結果が改質によるものなのか、ため池底泥土に由来するものなのかを判別するデータを取得するために行った。

#### （b）土壤含有量

土壤汚染対策法の規定により、土壤汚染の要措置区域指定の基準（指定基準）が土壤汚染対策法施行規則で定められており、土壤溶出量基準と土壤含有量基準が示されている。このうち、土壤含有量基準は、土壤中の重金属等の経口摂取によるリスクを評価するための手法で、塩酸等に溶出される重金属等を試料の乾燥体1kg当たりで算出するものである。

これに対して底質調査法は、底質（水域において水底を構成している表層）中の化学物質等の濃度を把握する際に活用されるもので、底質調査法における含有量は「全含有量」

といわれ、絶対的な濃度としての評価が可能になるとともに、土壤汚染対策法に基づいて定量した含有量より大きくなることから安全側に評価することができる。

### (c) 農用地の土壤に含まれる特定有害物質

農用地の土壤の汚染防止等に関する法律（略称：農用地汚染防止法）は、農用地の土壤に含まれる特定有害物質により、人の健康を損なう恐れがある農畜産物が生産され、または農作物等の生育が阻害されることを防止し、もって国民の健康の保護及び生活環境の保全に資することを目的として制定された。農用地土壤及び当該農用地に生育する農作物等に含まれる特定有害物質の量が一定の要件（指定要件）に該当する場合には、当該地域を「農用地土壤汚染対策地域」として指定したうえで、汚染農用地を復元するための対策を講じることを規定している。対策地域の指定要件は、「人の健康保護」（カドミウム）と「作物の生育阻害の防止」（銅・ひ素）の2つの観点で設定している。

本事業においては、ため池底泥改質土を農業分野に適用することを想定しているため、改質土について特定有害物質の分析を行うが、その結果が改質によるものなのか、底泥土に由来するものなのかを判別するデータを取得するために行った。

### (d) 硫化水素ガスの発生ポテンシャル

廃石膏ボードからの硫化水素ガスの発生は、石膏ボードから溶出してくる有機物と硫酸イオンが原因であるとされている。ただし、多量の硫化水素ガスの発生は

- ①pHが中性域であること
- ②無酸素状態であること
- ③温度が30℃前後の範囲であること
- ④水分が多いこと
- ⑤有機物があること
- ⑥硫黄分があること

の6条件“全て”が揃ったとき<sup>9)</sup>とされている。したがって、セメントや生石灰を用いた地盤改良ではpHがアルカリ性となって発生条件を満足しないことや、地表面の浅層改良の場合には無酸素とならないために発生条件を満足しないなど、一般的な利用方法の環境下では硫化水素ガスが発生しないことの方が多いが、数十ppmの硫化水素ガスであれば、一般的な土壤の培養試験を実施しても発生するといわれている。

事業の中で、改質土の硫化水素ガス発生ポテンシャル試験を実施したが、その結果が改質によるものなのか、底泥土に由来するものなのかを判断するデータを取得するために行った。

## (3) 改質材

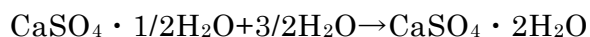
### 1) 主材

本研究開発においては、ため池底泥改質土を農業分野に適用することに鑑みて、改質主材には pH が中性域の石膏を用いた。

石膏は硫酸カルシウムを主成分とする無機鉱物で、その結晶水の存在形態から、二水石膏（G : Gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、半水石膏（B : Bassanite,  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）、無水石膏（A : Anhydrite,  $\text{CaSO}_4$ ）に分類される。二水石膏は軟石膏ともいわれ、自然界では非常に安定性が高く、化学的には水とほとんど反応しない。二水石膏は 150～185℃で加熱することで半水石膏に転化する。半水石膏は焼石膏ともいわれ、結晶構造の違いか

ら  $\alpha$  型と  $\beta$  型に分類される．  $\alpha$  型は緻密な構造で粒子密度が高く，硬化強度が  $\beta$  型よりも大きいことから医療用等に用いられている，一方，  $\beta$  型はポーラス状の空隙があることから粒子密度が  $\alpha$  型より小さく，石膏ボード等の建築資材として利用されている．これら半水石膏を  $180^{\circ}\text{C}$  以上で加熱処理すると，結晶水が消失した無水石膏が生成される．

半水石膏は，1－(4) 式に示すように，水と反応すると二水石膏に転化して硬化する．



1－(4) 式

ため池底泥改質土を農地土壌に用いる場合には特に強度は要求されないが，土木分野に適用する場合には，強度・変形特性が求められる．

コンクリートは，図 1． 6－8 に示すように，  $WC$  ( $W$ : Water,  $C$ : Cement) が小さいほど高濃度のセメントペーストとなり，圧縮強度が大きくなる<sup>10)</sup> が，石膏のペースト強度も図 1． 6－9 に示すように，  $WB$  ( $W$ : Water,  $B$ : Bassanite) が小さいほど強度が大きくなる．しかし，石膏のペースト強度<sup>11)</sup> はコンクリートに比べて  $1/20$  程度であることや，二水石膏の溶解度は  $0.2\text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$  前後 ( $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ ) と決して大きくはないが，水に濡れると徐々に溶けて改質土が再泥化する恐れがあるため，改質土の品質・性能を安定させるための安定材や，品質・性能を向上させる助材の併用を検討した．

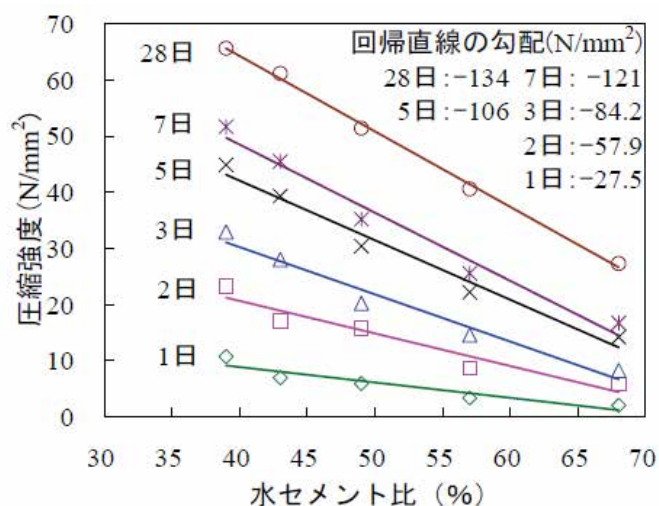


図 1． 6－8 コンクリートの水セメント比～圧縮強度<sup>10)</sup>

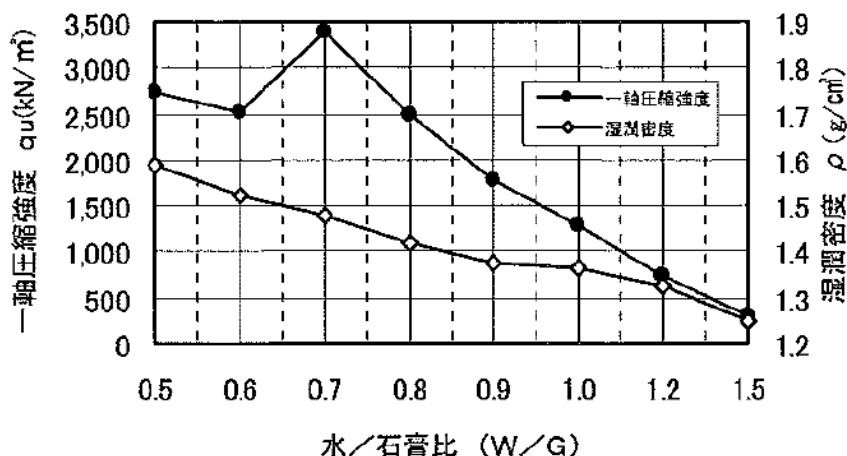


図 1. 6－9 水石膏比～一軸圧縮強度，湿潤密度関係（材齢 28 日）<sup>11)</sup>

## 2) 安定材と助材

安定材は，改質土の品質・性能を安定させることを目的として，助材は，改質土の品質・性能を向上させることを目的としてそれぞれ添加するものである。

ため池底泥土を改質して土木分野に適用する場合，用途に応じた強度と変形抵抗性が必要となる。二水石膏を焼成して得られた半水石膏は水と反応すると硬化するが，セメント系材料と比べると強度が小さい。石膏添加量を増加すればそれなりの強度が得られるが，多量の添加は置換（廃棄物の投棄）とみなされる恐れや，石膏の速硬性によりため池底泥土と十分混合される前に硬化（凝結）が始まったり，実機で処理する場合，供給能力との兼ね合いがある。また，半水石膏は水と反応して二水石膏に転化して硬化するが，水に濡れると溶け出すという性質を有している。

一方，ため池底泥土を改質して農地土壤に適用する場合，含水比を低下させてコンシステンシーを改善して扱いやすくするとともに，ため池底泥土の団粒化を促進して膨軟にすることが求められる。

こうしたことを踏まえ，以下の視点に基づいて安定材及び助材を選定した。

- ①硬化特性を有する（農業土木）
- ②吸水特性を有する（共通）
- ③重金属等の固定機能を有する（共通）
- ④粒度調整機能がある（農地土壤）

ため池底泥土の改質に使用する安定材及び助材の比較検討表を表 1. 6－12 に示す。