

東日本大震災における津波堆積物の調査報告

Test Survey of Tsunami-related deposited sand in the Great East Japan Earthquake

今村 眞一郎*

西田 秀紀**

Shinichiro Imamura

Hidenori Nishida

佐藤 靖彦***

Yasuhiko Sato

要 約

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震における被災調査の一環として、津波堆積物について現地調査試験を実施した。今回の地震津波により沿岸地域において大量の災害廃棄物と津波堆積土砂が発生し、その処理・処分と有効利用が大きな課題となっており、臭気対策など周辺環境への配慮が必要な場所もある。本報告では宮城県名取市と石巻市で現地採取した津波堆積物（土砂、汚泥）について実施した土質試験、臭気分析試験をもとに、津波堆積物の有効利用上の課題および臭気対策について検討した。

目 次

§ 1. はじめに

§ 2. 現地調査概要および津波堆積物の土質特性

§ 3. 津波堆積有機汚泥の臭気特性と臭気対策の検討

§ 4. おわりに

§ 1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、大量の災害廃棄物と津波堆積物が発生し、これらを速やかに適切な処理と有効利用を図り、復旧・復興につなげる必要がある。地震により発生した災害廃棄物のうち環境に影響のないものや、津波堆積物の中でも砂分を主体とするものは有効利用しやすい性状であることから、収集・仮置きの段階で分別・分級するなどして地盤工学的材料として再生し、有効利用することが望まれる。津波堆積物は嵩上げ土や盛土等の土質材料への利用が想定されるが、その有効利用にあたっては津波堆積物の物理化学特性、締固め特性や盛土後の特性を事前に把握の上、適切な利用計画を立てる必要がある。

本報告では、宮城県名取市と石巻市で現地採取した津波堆積物（土砂）の物理化学性状、締固め特性および強度・圧縮特性について分析調査を行い、選別処理における分級サイズが土質特性に及ぼす影響や地盤工学的材料として有効利用を図るための課題について考察した。

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所環境技術グループ

*** 技術研究所

また、強い臭気のある有機汚泥の臭気分析を踏まえ、効果的な消臭・脱臭剤について検討した。

§ 2. 現地調査概要および津波堆積物の土質特性

2-1 現地調査概要

現地調査は、地震が発生してから2.5カ月後の2011年5月下旬に行った。名取市では①北釜地区、②小塚原地区田園、③一次仮置場の3箇所において調査した。

北釜地区は仙台空港東側の沿岸に位置し、海岸からの直線距離150～850mの範囲（5地点）で各場所の堆積厚さ調査と試料採取を行った。同地区の津波堆積物は海岸からの距離に関係なく砂分のみが広く分布し、堆積物の厚さは10～15cm程度であった（写真-1）。一方、小塚原地区（海岸から約2km）の田園の表面は厚さ約4cmの粘土質の板状の津波堆積物が堆積し、調査時には乾いてひび割れた状態にあった。この津波堆積物の表面には白い部分が認められ（写真-2 右上）、海水塩分が析出したものとみられる。写真-2 右下に示すように津波堆積物の断面は黒色を呈し、有機物などを含む水底泥土と考えられる。また、同地区の田園で集積された仮置土には稲わらの混入が多数認められた（写真-3）。

写真-4に示す一次仮置場では、回転篩機械トロンメルによって混合廃棄物を20mmアンダーの土砂に分別されていたが、この分別土には細かい木屑などが多少混入している状況であった。

石巻市では埋立処分場に搬入された津波堆積物から試料を採取した。



写真一-1 ①海岸付近の地区の津波堆積物 (砂)



写真一-2 ②小塚原 田圃土壤に堆積した津波表土



写真一-3 ②田圃の仮置き土



写真一-4 ③一次仮置場の分別土

2-2 物理化学試験結果および考察

津波堆積物の物理化学的性状について分析調査を行った。表一-1 に試験結果一覧を示す。津波堆積物には災害廃棄物の混入が認められることから、選別処理時の分級サイズが諸特性に及ぼす影響を把握するため、分級サイズを 40 mm, 20 mm, 5 mm アンダーとして各物性を比較した。

(1) 津波堆積物の物理特性

図一-1 に地点別の粒経加積曲線を、表一-1 には粒度組成を示した。北釜地区の津波堆積物は礫分 0~5%, 砂分 93~98% であり、中砂~細砂を主体とし比較的粒径が揃った砂である。粒度分布からも海岸からの距離による有位な差異はない。田圃の堆積表土は、砂分 43%, 細粒分 57% の砂質シルトであり、自然含水比は 62.7% と比較的高い。一方、田圃の仮置き土 (40 mm アンダー) は、砂分

62%, 細粒分 35% の礫混じりシルト質砂であり、細粒分が比較的多く含まれ、均等係数も大きい。仮置場分別土 (20 mm アンダー) は、礫分 15%, 砂分 57%, 細粒分 27% で粘土、礫まじりシルト質砂であり、自然含水比は 33% と田圃堆積表土以外のものと比較して高い。石巻処分搬入土は細粒分混じり砂であった。

以上のように、宮城県南部の津波堆積物の特徴としては、田圃仮置土や分別土では細粒分がやや多くなるが、調査対象地では全般的には砂が主体である。なお、図一-1 から、分級サイズによる粒度分布に有位な差は認められなかった。

(2) 津波堆積物の化学特性

図一-2 は、津波堆積物の強熱減量、塩化物含有量、pH および廃棄物混入率について、各試料を比較したものである。強熱減量は、田圃堆積表土が 13% と最も大きく、有機物混入による影響が考えられ、次いで仮置場分別土が高い傾向にある。塩化物含有量に関しても、田圃の堆積表土で 28 mg/g と高い値を示し、次いで仮置場分別土がやや高い。田圃堆積表土では海水塩分が濃縮したことが原因と推察される。pH は調査地点に因らず、ほぼ中性範囲にあった。

津波堆積物中の 2 mm 以上の廃棄物混入率 (乾燥重量比率) を調べた。北釜地区の砂状堆積物の場合は、分級しなくても廃棄物混入率は 0.01~0.6% と少ない。一方、田圃仮置土の 40 mm アンダーの廃棄物混入率は 0.9%, 5 mm で 0.14%, 仮置場分別土 20 mm で 2.4%, 5 mm では 1.1% となり、分級サイズを小さくするほど混入率が低下する傾向が窺える。混合廃棄物から分級した分別土は、廃棄物混入率が高い傾向にあった。なお、強熱減量と廃棄物混入量との間には相関が認められなかった。

2-3 力学試験結果および考察

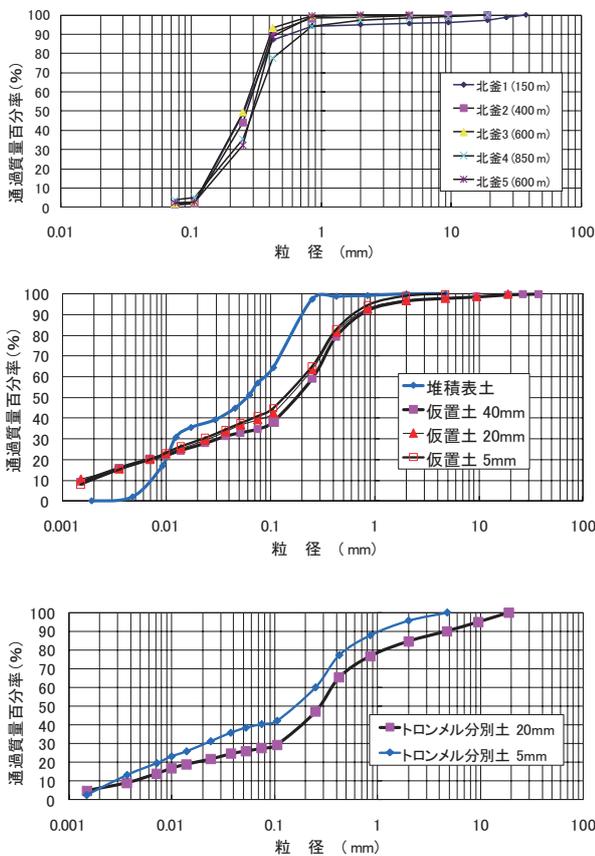
津波堆積物を用いた盛土の締固め・強度圧縮特性を把握するために、表一-2 に示す条件で締固め試験等の試験を実施した。圧密試験は嵩上げ土に用いた場合の圧縮特性把握を目的として実施した。この試験では、津波堆積物中には 10~20 mm 程度の大きさの廃棄物が多少混入していたことから、大型供試体 (φ 15 cm) による圧密試験を採用した。圧密試験の供試体は締固め度 95% の密度で作製した。安定処理試験は高含水の津波堆積物の場合を想定して、含水比を田圃仮置土は 34% に、分別土は 40% に加水調整して、コーン指数 200 kN/m² 程度にした試料についてセメント配合試験を行った。配合試験に関しても津波堆積物中の廃棄物混在の影響を考慮して、供試体の寸法を φ 10 cm × 20 cm とした。

(1) 津波堆積物の締固め特性

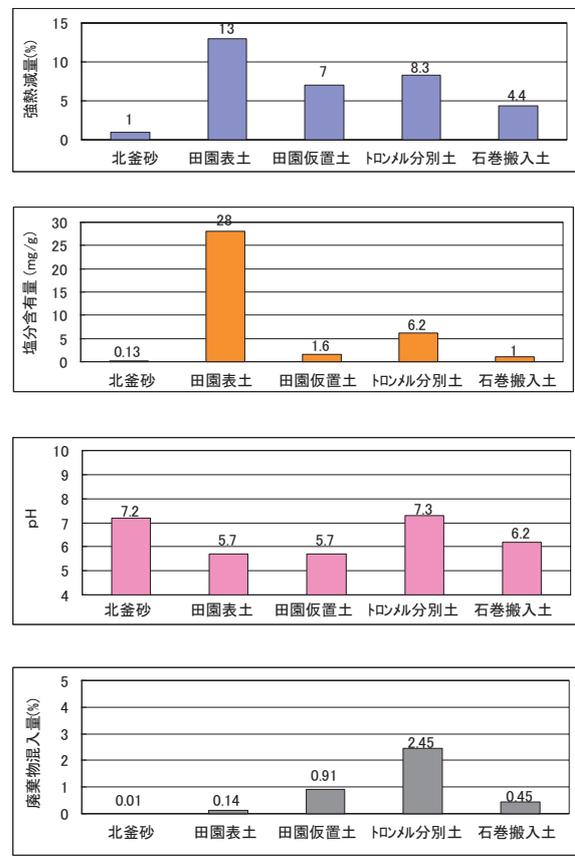
図一-3 に田圃仮置土およびトロンメル分別土の締固め曲線を示す。両者はほぼ同じ砂質土の粒度構成をしているものの、田圃仮置土の場合、ピークの明確な締固め曲線を示したのに対し、トロンメル分別土はピークの小さ

表一 試験結果一覧

項目	①北釜地区					②小塚原田圃			③一次仮置場		④石巻市処分場			
	堆積土 1150 m	堆積土 2400 m	堆積土 3600 m	堆積土 4850 m	堆積土 5600 m(畑)	堆積 表土	仮置土 40 mm	仮置土 20 mm	仮置土 5 mm	分別土 20 mm	分別土 5 mm	搬入土 40 mm	搬入土 20 mm	
一般	土粒子密度 (g/cm ³)	2.969	-	-	-	-	2.563	2.605	-	-	2.557	-	2.795	
	自然含水比 (%)	5.4	5.6	7.1	12.3	26.9	62.7	14.7	17.8	17.3	33.3	34.5	21.2	
粒度	礫分 (%)	5.1	1.1	0.1	2.6	0.1	0.1	3.4	3.2	1.0	15.4	4.3	11	
	砂分 (%)	93.6	97.4	98	93.5	97.7	43	61.8	57.6	58.0	57.2	55.2	71.4	
	シルト (%)	1.3	1.5	1.9	3.9	2.2	54.7	16.3	21.4	23.5	16.3	24	9.4	
	粘土分 (%)						2.2	18.5	17.8	17.5	11.1	16.5	8.2	9.5
		最大粒径 (mm)	37.5	19	4.75	19	4.75	4.75	37.5	19	4.75	19	4.75	37.5
		均等係数	1.85	1.7	1.88	2.25	1.66	11.3	151	188	106	84.1	89	27.5
締固め	最大乾燥密度 (g/cm ³)	-	-	-	-	-	-	1.448	-	-	1.354	-	1.662	
	最適含水比 (%)	-	-	-	-	-	-	24.5	-	-	26.4	-	21.3	
	コーン指数 (kN/m ²)	781	-	-	-	-	-	4748	4830	4943	642	462	3679	
化学性	強熱減量 (%)	1.0	-	-	-	-	13	7.0	6.8	6.2	8.3	8.2	4.4	
	塩化物含有量 (mg/g)	0.13	-	-	-	-	28	1.6	-	-	6.2	-	1	
	ph	7.2	-	-	-	-	5.7	5.7	-	-	7.3	-	6.2	
その他	廃棄物混入量 (%)	0.01	0.23	0.07	0.6	0.1	0.14	0.91	0.95	0.14	2.45	1.11	0.45	



図一 津波堆積物の粒径加積曲線



図二 津波堆積物の化学特性

い締固め曲線を示し最大乾燥密度が小さくなる点で傾向が異なる。トロンメル分別土は粘性土に似た締固め曲線を示しており、混入する碎片木質廃棄物（混入率2.4%）が影響した可能性が推察される。

(2) 津波堆積物の強度特性（コーン指数）

津波堆積物の盛土等への利用の可否を判定するためにコーン指数試験を行った。図一4は、津波堆積物試料を含水調整して各含水比におけるコーン指数を測定した結果である。田圃仮置土とトロンメル分別土ともに含水比の増加とともにコーン指数 q_c が低下し、同様な特性を示

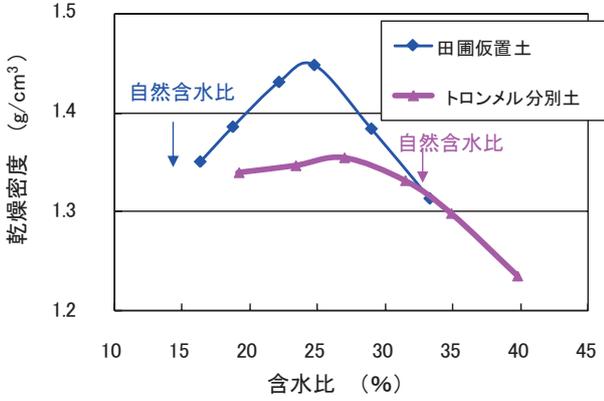
した。自然含水比の状態では、田圃仮置土 q_c は4,700 kN/m²、トロンメル分別土 q_c は640 kN/m²を示し、建設発生土土質区分基準¹⁾と照らし合みると、表一に示す通り全ての試料で第3種建設発生土 ($q_c \geq 400$ kN/m²)以上となり、強度面では道路路体や土地造成等に利用可能な性状である。

(3) 津波堆積物の圧縮特性

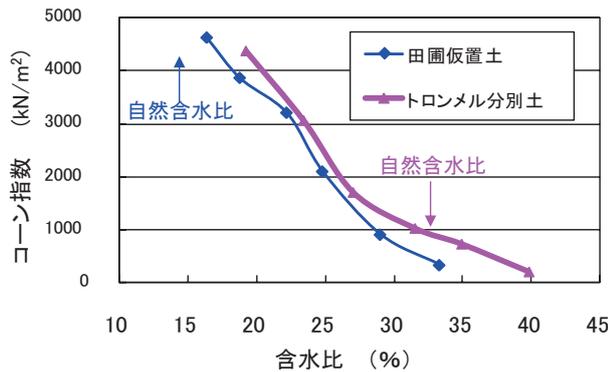
図一5に津波堆積物の大型圧密試験の e-log p 曲線を示す。田圃仮置土とトロンメル分別土で同じような圧密曲線となり、圧密圧力 600 kN/m² 以上ではほぼ直線を示

表一 試験方法

試験項目	供試体寸法	試験条件
突固め試験	φ 10×H 12.7 cm	A-c 法
コーン指数試験	φ 10×H 12.7 cm	A-c 法
大型圧密試験	φ 15×H 5 cm	Dc = 95%
安定処理試験	φ 10×H 20 cm φ 5×H 10 cm	原土 qc = 200 kN/m ²



図一 締り曲線



図二 含水比とコーン指数の関係

した。この直線部分から圧縮指数 C_c を算定した。

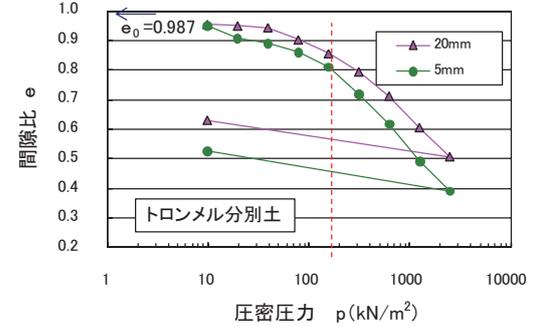
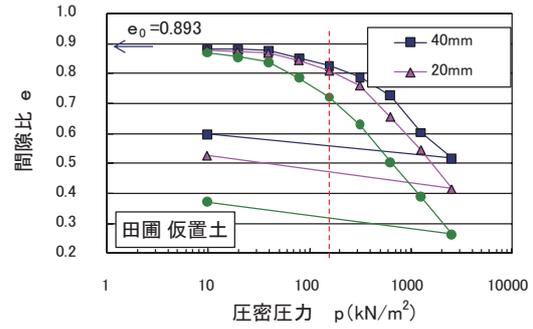
表一に圧縮指数 C_c の値を示す。圧縮指数 C_c は 0.35~0.43 と算定され、分級サイズによる差異はなかった。

また、圧密圧力 $p = 170 \text{ kN/m}^2$ (盛土高 10 m 相当) に対する圧縮ひずみは 4~9% の範囲であった。

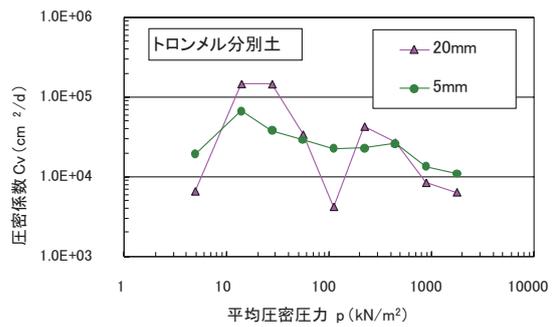
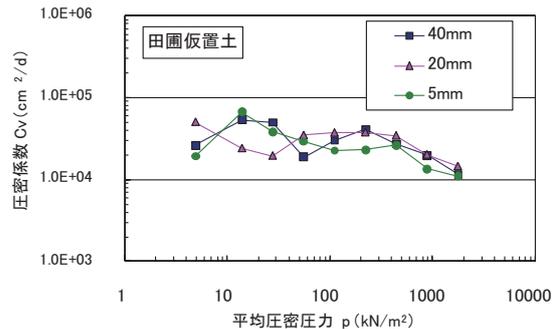
一方、図六に示すように、圧密係数 C_v は $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{d}$ の範囲にあり、一般軟弱土に比べて十分大きく、上載荷重に対する圧縮量は即日に収束するものと推察される。また、圧密係数 C_v はトロンメル分別土でややばらつきがあるものの、分級サイズによる差異はあまりない。このことから、津波堆積物中に若干混入する木片等の有機物が、盛土時の中期的な圧縮性に影響を及ぼす可能性は少ないものと考えられる。

(4) 安定処理試験

高含水比に含水調整した津波堆積物試料に対して、セメント系安定処理 (ジオセツト 200) の配合試験を行った。図七に材令 7 日後の一軸圧縮強結果を、図八に



図三 圧密試験結果 (e-log p 関係)



図四 圧密試験結果 (圧密係数 C_v)

コーン指数試験結果を示す。

固化材添加量 50 kg/m^3 により、一軸圧縮強さ q_u は $80 \sim 100 \text{ kN/m}^2$ に、コーン指数 q_c は分別土で $1,360 \text{ kN/m}^2$ 、仮置土で $2,800 \text{ kN/m}^2$ となり、盛土等の利用に十分な強度を発現できた。なお、添加量 100 kg/m^3 の場合においては、供試体寸法 $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ の強度が供試体 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のものよりも 2~6 割程度大きくなった。津波堆積物中に混入する碎片廃棄物有無による影響とみられ、津波堆積物の配合試験の際には留意が必要である。

2-4 津波堆積土砂の有効利用上のとまとめと課題

宮城県名取市および石巻市において、津波堆積物に関する現地調査試験を実施した結果、既報²⁾で報告された仙台市内（蒲生・荒浜・井土地区）で行われた土質試験と同様に、以下の特徴が確認された。

- 1) 田圃仮置土や分別土では細粒分がやや多い傾向にあるが、調査対象地では全体的に砂質土が主体である。コーン指数は土砂の有効利用に十分な強度を有する。
- 2) 津波堆積物の化学特性として、場所によって強熱減量や塩分濃度が高いものもあり、利用にあたっては配慮が必要と考えられる。
- 3) 津波堆積物の力学試験および安定処理試験結果から津波堆積物は嵩上げ材や盛土材に利用できる性状であることが確認された。ただし、廃棄物の混入状況に応じて土質特性に多少の影響を及ぼす可能性があり、これに留意した分級サイズの選定と利用が必要である。

以上のような津波堆積物の物理化学性質、力学特性を踏まえると、嵩上げ、盛土等の土構造物への有効利用に際して、以下の課題が考えられる。

- 1) 廃棄物混入による影響：混入量が多いと有機物の圧縮・腐植による将来沈下などの懸念がある。対策としてはセメント処理などが想定される。
- 2) 有効利用先の検討：防潮堤、道路盛土、洗掘された港湾の埋め戻し材、嵩上げ材、公園・緑地、ケーソン中詰材等。
- 3) 塩分濃度の高い場合の配慮：例えば、構造物裏込め等への利用は避け、構造物に直接接触させない配慮が必要と考える。

§ 3. 津波堆積有機汚泥の臭気特性と臭気対策の検討

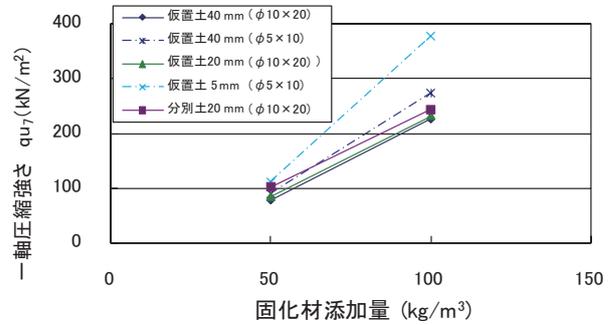
漁港や水産加工工場などの立地地域などでは、津波堆積物に有機性ヘドロが混在して、初夏から夏期にかけて有機物の腐敗により悪臭が発生する場合がある。平成 23 年 5 月下旬に石巻市を調査した際、市内の一部では腐敗臭が漂っている状況にあった。そこで、このような悪臭を伴う津波堆積物の臭気対策を目的として、現地採取した汚泥の臭気分析を行い、臭気成分に効果的な消臭・脱臭剤を比較検討した。

3-1 現地採取試料

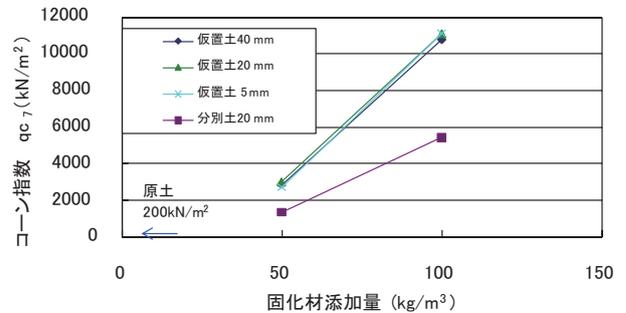
石巻市一般廃棄物埋立処分場において、搬入された津波堆積汚泥を採取した。汚泥の土質は砂質土であるが、黒色を呈し（写真一5）、強い臭気があった。搬入された汚泥は漁港および水産加工工場の立地場所で集積されたものであり、魚系有機物が砂とともに海底に堆積していたものと推察される。

表一3 圧密試験結果

試料	分級サイズ	圧縮指数 Cc	p = 170 kN/m ² 時 圧縮ひずみ
田圃仮置土	40 mm	0.415	3.8%
	20 mm	0.32	4.6%
	5 mm	0.415	9.8%
トロンメル分別土	20 mm	0.355	6.8%
	5 mm	0.415	9.4%



図一7 安定処理試験結果（一軸圧縮強さ）



図一8 安定処理試験結果（コーン指数）



写真一5 採取した臭気汚泥

表一4 津波堆積汚泥の臭気強さと測定結果

測定項目	測定結果
臭質	腐敗臭および尿様臭
臭気強度	4（強いにおい）
快・不快	-4 極端に不快
臭気濃度 ⁵⁾	32,000
臭気指数 ⁵⁾	45

3-2 津波堆積汚泥の臭気分析、消臭剤効果確認試験

(1) 臭気分析

採取した汚泥の臭気強さと臭気成分を調べるため、採取した有機汚泥の臭気分析⁵⁾を行った。

表一4に汚泥の臭気強さの測定結果を示す。汚泥の臭質は強い腐敗臭および尿様臭を示した。嗅覚官能試験の結果、臭気強度は4、臭気濃度は32,000、臭気指数は45と非常に高い値を示し、非常に不快に感ずる値であった。

表-5 堆積汚泥の臭気成分分析結果

測定項目		成分濃度 (ppm)	閾希積 倍数 ^{*1}	臭気濃度へ の寄与率 ^{*2}
硫黄系	メチルメルカプタン	0.044	370	1%
	硫化水素	0.97	1,900	6%
	硫化メチル	0.046	380	1%
	二硫化メチル	0.051	98	1%未満
アルデヒド系	アセトアルデヒド	0.07	47	1%未満
	プロピオンアルデヒド	<0.01	7未満	1%未満
	ノルマルブチルアルデヒド	<0.01	34未満	1%未満
	イソブチルアルデヒド	<0.01	11未満	1%未満
	ノルマルバレールアルデヒド	<0.01	14未満	1%未満
脂肪酸系	イソバレールアルデヒド	<0.01	53未満	1%未満
	プロピオン酸	0.38	220	1%未満
	ノルマル酪酸	0.52	5,400	17%
	イソ吉草酸	0.019	190	1%未満
	ノルマル吉草酸	0.063	1,200	4%

※1 閾希積倍数 = $\frac{\text{成分濃度の実測値}}{\text{各成分の嗅覚閾値濃度}}$ (1)

閾希積倍数：臭気成分が臭わなくなるまでの希積比率
嗅覚閾値濃度：臭いを感じる最低濃度

※2 臭気濃度への寄与率(%) = $\frac{\text{閾希積倍数}}{\text{臭気濃度}} \times 100$ (2)

石巻市の被災前の臭気指数の規制基準は15であり、採取汚泥の臭気はその3倍にあたる。

表-5にガスクロマトグラフを用いて各臭気成分の濃度を測定した分析結果を示す。汚泥試料は、硫黄および脂肪酸の成分による臭気が強くなり、特に硫化水素とノルマル酪酸が卓越していた。

(2) 消臭剤の種類と概要

消臭剤は、一般的に化学的、物理的、生物学的および感覚的消臭の4つに分類される。その概要を表-6に示す。

(3) 消臭・脱臭剤の効果確認試験結果

津波堆積汚泥の臭気成分の特徴を踏まえ、表-6に示した薬剤の中から2種類の化学的消臭剤と物理的消臭剤を用いて、室内消臭・脱臭効果確認試験を行った。

表-7に消臭剤・脱臭剤の概要と試験結果を示す。散布量500 g/m²としたエアーケム188では、臭気濃度は1,600から500に、臭気強度は4から1.5に低下し、臭いが極めて弱い状態となった。一方、散布量20 kg/m²としたゼオライトは、アンモニアガス濃度が最大14 ppmであったものが、濃度が感知しない状態までとなった。

エアーケム188とゼオライトについて、各々高い消臭効果と脱臭効果を確認できた。エアーケムは津波堆積物に液体溶液を直接、散布して施工するため、津波堆積物の仮置き場等における対策に適すると考えられる。

§4. おわりに

宮城県名取市および石巻市において、津波堆積物に関する一連の土質試験を実施した。その結果、高上げ材や盛土材に利用できる性状であることが確認された。ただし、場所によって強熱減量や塩分濃度が高い値を示し、利用にあたっては配慮が必要な場合がある。なお、廃棄物

表-6 消臭剤の種類と概要

分類	概要	消臭剤(メーカー)
化学的消臭	悪臭成分と消臭剤成分を化学反応させ、無臭成分にする方法。中和反応、あるいは酸化反応によるものがある。	<中和剤> ・エアーケム(第一クリーンケミカル) ・エポリオン(新エポリオン)
物理的消臭	吸着作用などにより悪臭成分を抑え込む方法	・ゼオライト ・活性炭
生物的消臭	微生物等を用いてバクテリア繁殖による悪臭を消す方法	・微生物菌 ・抗菌剤
感覚的消臭	悪臭を芳香成分で包み込む方法。マスキングによるものと悪臭成分を取り込むベアリングによるものがある。	・芳香剤

表-7 消臭・脱臭剤の効果確認試験結果

①分類, ②薬剤名, ③メーカー	消臭・脱臭原理	試験結果概要
①化学的消臭 ②エアーケム188 ③第一クリーンケミカル(株)	液状植物性精油を用いて臭気を中和相殺し、臭いの感覚レベルを抑える中和脱臭。	散布量: 500 g/m ² <結果> ○効果あり 臭気濃度 1600 → 500 に低下 臭気強度 1.5 に低下 (強臭→臭いが極めて弱い)
①化学的消臭 ②エポリオン ③新エポリオン(株)	有機酸塩等により酸性臭とアルカリ臭を同時減少させる中和脱臭。	<結果> ×効果なし
①物理的脱臭 ②天然ゼオライト ③新東北化学工業(株)	粒状ゼオライトの微細空洞構造により臭気物質を吸着する。	散布量: 粒径1mm 20kg/m ² <結果> ○効果あり アンモニアガス濃度 最大14 ppm → ND 感知なし

の混入状況によっては、土質特性に多少の影響を及ぼす可能性があり、これに留意した分級サイズの選定と利用が必要である。

石巻市で採取した有臭汚泥に関しては、臭気成分と消臭剤・脱臭剤の効果を確認し、津波堆積物の仮置き場等の臭気対策に適した消臭・脱臭剤を提案することができた。

謝辞：津波堆積土砂の試料採取に際し、名取市クリーン対策課および石巻市役所生活環境部環境課をはじめ、ご協力を頂いた関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル 第3版, 2004.
- 2) 土木学会東日本大震災特別委員会：復興施工技術特定テーマ委員会報告書(7月1日東北支部報告会), 2011.
- 3) 今村眞一郎・佐藤靖彦・平野孝行：東日本大震災における宮城県南部の津波堆積物の物理化学特性, 第47回地盤工学研究発表会, 2012(投稿中).
- 4) 佐藤靖彦・今村眞一郎・松岡大介：東日本大震災における宮城県南部の津波堆積物の締固め・圧縮特性, 第47回地盤工学研究発表会, 2012(投稿中).
- 5) 環境庁：臭気指数及び臭気排出強度の算定の方法, 1995年9月13日環境庁告示第63号.