

尾道系崎港と宇部港における航路および泊地に堆積した底泥の土質特性

Soil Properties of Mud Accumulated in Waterways and Anchorage Areas
at Onomichi-Itozaki Port and Ube Port

土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)
 奥名孝行 Takayuki OKUMYO (中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所)
 森 晴夫 Haruo MORI ((一財)沿岸技術研究センター)
 水野博史 Hirofumi MIZUNO (いであ(株))

航路や泊地の埋没は、港湾機能の維持・管理上の大きな問題である。広島県の尾道系崎港と山口県の宇部港においても、航路や泊地の埋没の発生が確認され対策を検討するための調査が行われてきた。本論文では、両港において航路に堆積した底泥の採取試料の土質特性をまとめたものである。尾道系崎港松永港区は非常に静穏な海域であるが、航路・泊地に堆積した底泥の正規化含水比は1.5~1.8の範囲にあり水深とともに増加する傾向がみられた。宇部港では底泥の正規化含水比はほぼ1.5~2.0の範囲にあり、水深との関係は明らかでなかった。宇部港の原海底地盤は砂分含有率が約50%であり、航路には海底から巻き上がった細粒分を多く含む粘土が堆積していると考えられる。

キーワード：浚渫、海底地盤、液性限界、含水比、航路、シルテーション (IGC : D03, H07)

1. はじめに

海底の粘土地盤は、河川から運搬された土の細粒分や海底から巻き上がった浮泥が、波浪や潮流のもとで沈降・堆積と攪乱・運搬を繰り返しながら最終的にある箇所に落ち着いて形成されると考えられる。ここで「落ち着く」とは、高含水比状態の浮泥が、圧密によって含水比が低下し、波浪や潮流の外力によって移動しないだけの強度を有する状態である。Skempton¹⁾は海域において堆積した地盤と干潟で堆積した地盤の自然含水比を調べ、海底面に堆積した場合は液性限界の1.2倍、干潟の場合は液性限界の1.0倍程度であり、この違いは堆積時の環境の違いによるとした。土田ら²⁾は、波浪作用を受ける高含水比の底泥の安定について、実験と検討を行い、回転粘度計で求めた底泥の降伏値を強度とし、波浪の形状を正弦波と仮定した円弧すべり安定解析の安全率が、波浪作用に対する海底地盤の挙動と密接に関連することを示した。さらに、円弧すべり解析結果から、外力としての波高を30cmと仮定したときの海底地盤表層の含水比の範囲が、液性限界の1.1倍(水深1m)から2.1倍(水深20m)となるとしている。

わが国の多くの港では、浚渫した航路や泊地において時間とともに底泥が堆積し埋没が起こっている。これは、シルトや粘土等の浮泥が波や流れによって巻き上げられ移動する現象(シルテーション)によるもので、埋没メカニズムや埋没対策の調査研究が行われてきた³⁾。広島県の尾道系崎港と山口県の宇部港でも、航路や泊地の埋没が発生していることがわかっており、対策を検討するため現地調査が実施されてきた。本論文は、両港において航路に堆積した底泥の採取試料の土質特性をまとめたものである。航

路に堆積した底泥は、波や流れのある海域の環境の下で形成された直後の海底地盤であり、その土質特性は地盤の形成過程を検討する上で重要なデータであると考えられる。

2. 尾道系崎港松永港区における航路等埋没実態と底泥調査

2.1 尾道系崎港松永港区における航路埋没問題

重要港湾尾道系崎港は、広島県尾道市、三原市系崎町、福山市松永地区にある港湾で、尾道港区、系崎港区、松永港区からなる。図-1に松永港区の平面図と航路および泊

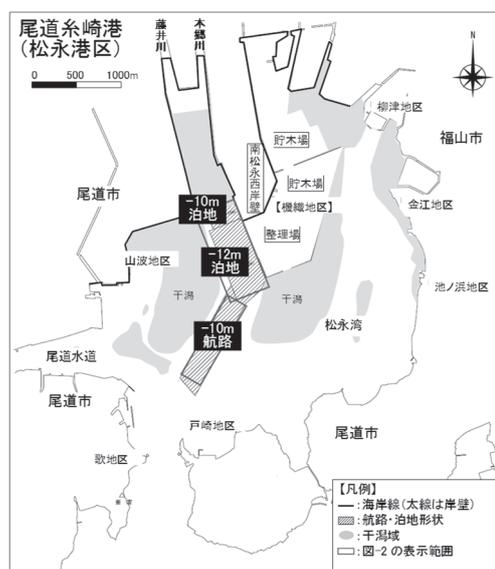


図-1 尾道系崎港松永港区の航路と泊地

地を示すが港区は松永湾の中央に位置している。図中の機織地区は木材を取り扱う埠頭であり貯木場と木材の整理場が設置されている。貯木場と整理場の東側は水深1~3mの干潟である。航路・泊地は、現在暫定-10mで運用しており、-12mまで増深されている部分があるが平成29年度から31年度にすべてが-12mまで増深される予定である。泊地の北側は、二級河川の藤井川と本郷川の河口であり、干潟となっている。

航路・泊地の埋没状況を調査するため、深淺測量(マルチビーム測量)、浮泥流動観測、底質調査、水質調査が2005年以降断続的に実施されている。図-2(a)は、深淺測量の結果から作成した泊地における2008年から2015年の水深変化である。図のように河川側および泊地西側の堆積が顕著であり、年間5~10cmの埋没が認められる。また、泊地の沖側航路寄りにおいても堆積が顕著な部分がある。図-2(b)は航路における2008年から2014年の水深変化を示すが、航路の東側約50mの区間で顕著な埋没(年間5~10cm)が認められる。

2.2 底質調査とその結果

2015年7月に不攪乱柱状採泥器(HR型)を船上から投下して柱状採泥を行い、採取試料の全長を目視観察・写真撮影した上で、表層5cm程度を分取した。その際、平均的な採泥試料を取得するため、各調査地点において3回の採取を行い、採取された底質を混合して分析試料とした。

図-3は試料を採取した9地点の位置である。各調査地点の粒度・自然含水比・有機物量・強熱減量・液性限界を表-1に示す。表のように、航路・泊地および東西原地盤上の粒度はほとんどがシルト・粘土の細粒分であり、細粒分含有率は概ね90%以上であった。河口に近い地点ほど砂分の含有率が高くなり、-4.5m泊地のSt.Fで細砂が10%強、河口部のSt.Gで細砂が50%弱、河口奥のSt.Hで細砂・中砂合わせて60%強であった。

自然含水比は航路・泊地内で115~200%であり、航路中央のSt.Bから-12m泊地のSt.Dまでが高く、-4.5m泊地に向けて低くなっている。航路内のSt.BとSt.Cの底泥の液性限界はそれぞれ112.7%、107.5%であり、航路西側の原地盤であるSt.Jと航路東側のSt.Oの液性限界はそれぞれ

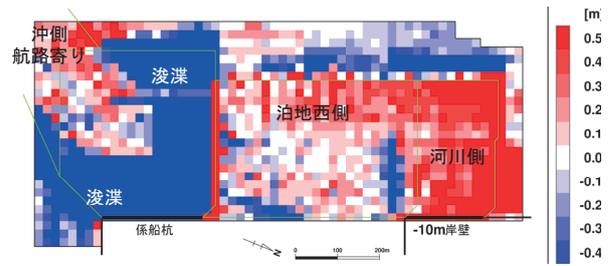


図-2(a) 尾道糸崎港 泊地の水深変化(2008年~2015年)

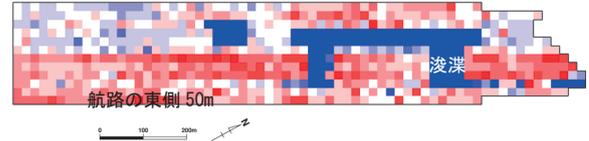


図-2(b) 尾道糸崎港 航路の水深変化(2008年~2014年)

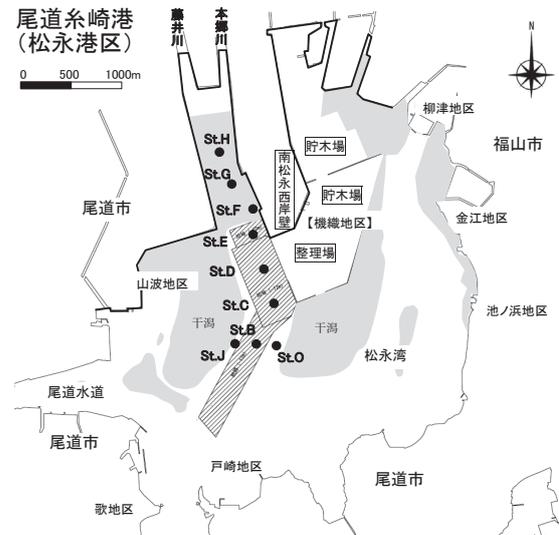


図-3 尾道糸崎港の底質調査地点 (●)

れ85.6%と83.3%であった。粒度分布についてSt.B, St.CとSt.J, St.Oを比較するとほとんど変化はみられないが、航路内に堆積している粘土の液性限界は原地盤の約1.3倍となっている。

2.3 航路・泊地・原海底地盤の表層における正規化含水比と水深の関係

図-4は9地点における自然含水比と液性限界の関係である。図のように、河口部の干潟であるG地点とH地点

表-1 各調査地点の粒度・自然含水比・有機物量・強熱減量・液性限界

試料番号	土粒子密度(g/cm ³)	礫分(%)	砂分(%)	シルト分(%)	粘土分(%)	自然含水比(%)	有機物含有量(%)	強熱減量(%)	液性限界(%)
St.H (河口奥)	2.638	0.8	61.1	26.4	11.7	34.0	0.5	2.8	29.1
St.G (河口+0.5m)	2.638	0	49.6	35.8	14.6	55.0	1	4	36.4
St.F (-4.5m 泊地)	2.608	0	13.1	56.1	30.8	115.0	2.2	7.2	64.7
St.E (-10m 泊地)	2.602	0	2.8	62.1	35.1	144.0	2.9	11.4	87.8
St.D (-12m 泊地)	2.61	0	0.6	61.6	37.8	190.0	2.2	8.3	107.7
St.C (航路・泊地境界)	2.608	0	1.4	60.7	37.9	180.0	1.9	8.1	107.5
St.B (航路中央)	2.598	0	0.8	60.6	38.6	203.0	2.2	9.5	112.7
St.O (航路東原地盤-3.7m)	2.613	0	4.7	60.1	35.2	135.0	1.7	7	83.3
St.J (航路西原地盤-0.8m)	2.650	0	1.7	61.6	36.7	132.0	1.8	7.7	85.6

の自然含水比は液性限界の 1.51 倍, 1.17 倍であったが, その他の地点はいずれも液性限界の 1.5 倍~1.8 倍の範囲に入っていた。

土田らは, 波浪作用を受ける海底地盤表層の安定条件を, 回転粘度計で求めた底泥の降伏値を強度とし, 波浪の形状を正弦波と仮定した円弧すべり安定解析の安全率によって評価する手法を提案している。図-5 は, 土田ら²⁾が計算した限界正規化含水比 (安全率が 1 のときの含水比を液性限界で正規化した値) である。外力である波浪は正弦波とし, 波高 30cm と 50cm に対してすべり面の深さを 30cm と仮定している。また, 粘土の降伏値は土田ら²⁾が実施した 4 種類の高成粘土の平均値を用いている。図のように, 限界の正規化含水比は深度とともに増加し, 波高が高いほど低下している。

図-6 は図-4 のデータから正規化含水比を求め, 試料採取時の水深に対してプロットした結果である。なお, 試料採取時の水深から約 2.2m を減じた値が地盤の標高となっている。図をみると, 9 地点において図-5 と同様に水深とともに正規化含水比が増加する傾向がみられる。しかし, 図-5 の波高 30cm の値と比較しても 9 点の正規化含水比の値は高めとなっている。この一因として松永湾内の波高が小さいことが考えられる。松永湾内の有義波高を風速と吹送距離から推算すると年間平均有義波高は 4.0cm と計算された。これは松永湾のスケールにより波が発達するために必要な吹送距離が小さいためであり, 実際には湾内の浅水効果や, 湾の南側の水道から伝達する波によって高くなる可能性があるが, 東京港の 32cm, 神戸港の 31cm などわが国の他の港湾に比べると非常に小さい。これらを考慮すると本港の海底地盤の正規化含水比は 1.8 以上であってもよいと思われるが, 水深 10m 以深でも 1.6~1.8 の範囲に留まっており, この原因についてはさらに検討が必要と考えられる。

3. 宇部港における航路埋没の実態と底泥調査

3.1 宇部港における浚渫と埋没問題

宇部港は, 山口県宇部市に位置する重要港湾である。図-7 に平面図を示すが, 宇部港は国内最大級の貯炭場である沖の山コールセンターが立地し, 宇部興産㈱の宇部セメント工場, 宇部ケミカル工場などがあり, 石炭, 石灰石関連製品, 化学製品, 石油関連製品の出入荷拠点となっている。同港は, 水深 13m の芝中西 1 号岸壁及び水深 12m の芝中西 2 号岸壁という大型係留施設を有しているが, 航路と泊地の計画水深が確保されていないため, 対象船型となる 3 万トンから 4 万トン級の大型船舶が入港できず, 利用者は非効率な輸送を余儀なくされている。このため航路及び泊地の水深 13m への増深が進められている。また, 宇部港では 1999 年から 2006 年に行われた調査によって, 航路および泊地の一部に顕著な埋没が観測されており, 航路の増深とともに航路・泊地の安定した維持管理のために埋

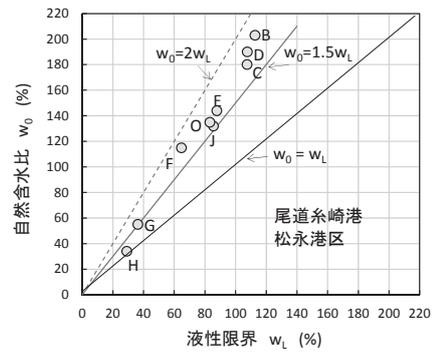


図-4 海底面表層の粘土の含水比と液性限界の関係 (尾道糸崎港松永港区)

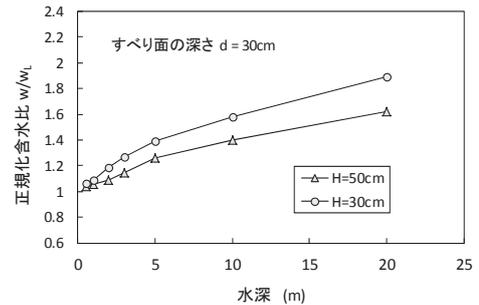


図-5 円弧すべり解析で求めた水深と海底地盤表層の正規化含水比の関係 (土田ら²⁾)

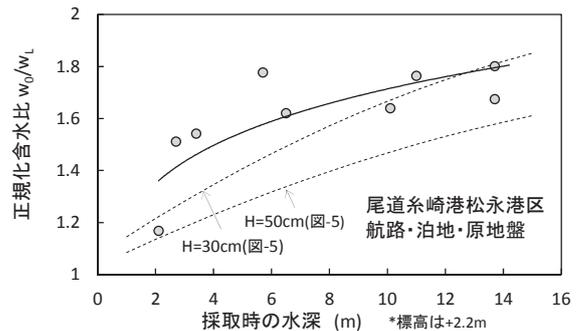


図-6 試料採取時の水深と正規化含水比の関係 (尾道糸崎港松永港区の航路・泊地・原地盤)

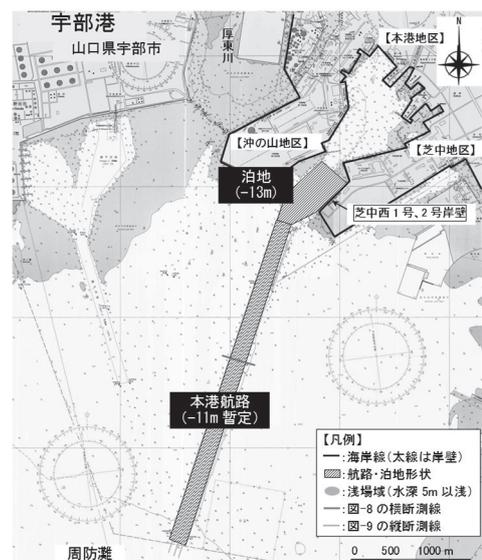


図-7 宇部港の航路と泊地

没状況の調査が実施されてきた。

図-8 は 2004 年から 2012 年の間における航路横断方向

の水深変化を示している。図のように、8年間で最大1.5mの水深変化（埋没）が観測されている。図-9は2004年から2015年までの航路縦断方向の水深変化を示すが、図のように水深変化は航路の西部と東部で顕著であり、航路中央における変化は小さい。これは、多くの船舶が航路の中央を航行することと関係していると考えられる。また、航路東部では沖側よりも泊地に近い岸側で顕著にみられるなど、航路内でも埋没状況は場所によっても大きな差がみられている。

3.2 宇部港における底質調査の方法とその結果

海底表層からの採泥は、以下の3種類の方法で行った。採取地点を図-10に示す。

採泥Ⅰ（試料番号 T-2-No.）: 船上からGrab式採泥器(手操作式採泥器)により表層泥を1地点から3回採泥した。船上で混合し、試料の外観(泥質色調、夾雑物)、臭気の有無等を観察した後、粒度組成と含水比の測定を行った。23地点で実施した。

採泥Ⅱ（試料番号 T-4-No.）: 採泥Ⅰと同様の方法であるが、粒度組成と含水比に加え、有機物量および強熱減量の測定を行った。16地点で実施した。

柱状採泥: 5地点(T-5-1~5)において、アクリルパイプ(内径φ10cm×長さ150cm×肉厚5mm)を用いて、潜水士により海底から約1.2mの柱状試料を採泥した。採取した柱状試料は、全長について目視観察・写真撮影を行い、上層(最上部の約10cm)、中層(最上部から35~45cm層)、下層(最下部の約10cm)の3層のコアにカットし、それぞれについて土粒子密度、粒度組成、自然含水比、液性限界、塑性限界、有機物含有量の測定を行った。柱状採泥により採取した試料の外観を図-11に、採取試料の土質特性を表-2に示す。

図-12(a),(b)は、T-5地点の柱状採泥試料について、航路横断方向の採取位置と試料上・中・下層の土質特性との関係を示している。図のT-5-3のように、航路中央の試料は上層ほど含水比や液性限界が高く細粒分含有率が高い。上層における細粒分率は93.5%である。一方、航路の外にある原海底地盤から採取したT-5-1とT-5-5は上層でも細粒分率が67.3%、80.5%であり、航路中央に堆積した底質と明らかに粒度が異なっている。T-5-1とT-5-5の中層と下層の粒度をみると、いずれも深くなるとともに細粒分含有率が低下(砂分が増加)し、液性限界も低下している。したがって、原地盤は下層のデータが示すように砂分含有率が約50%の砂混じり粘土であると考えられる。

熊谷らは波浪作用下における砂混じり粘土の底泥の安定を実験によって調べている⁴⁾。これによると、波浪の作用によって、底泥が不安定化すると底泥は液状化し、細粒分が巻き上がる。その結果、底泥から細粒分が抜け出して低塑性化し、巻き上がった細粒分は再堆積するとされている。宇部港の航路付近の海底地盤においても、波浪によって細粒分が底泥化して、それらが航路に堆積して埋没が発生していると考え、T-5-3とT-5-1およびT-5-5にお

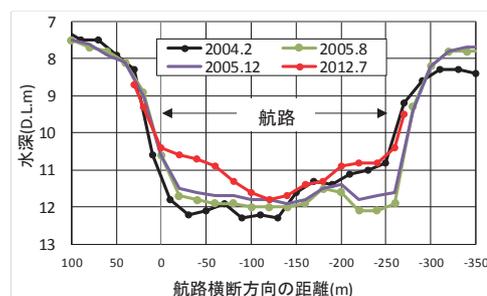


図-8 宇部港の航路横断方向の水深変化の例

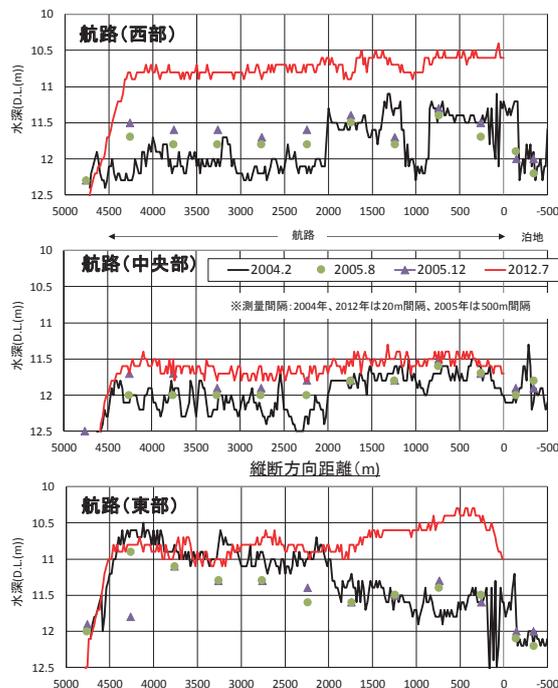


図-9 宇部港の航路縦断方向の水深変化

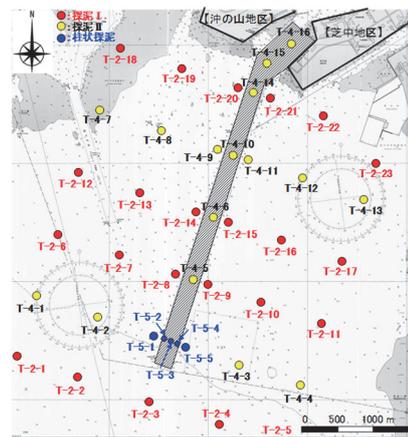


図-10 試料の採取箇所

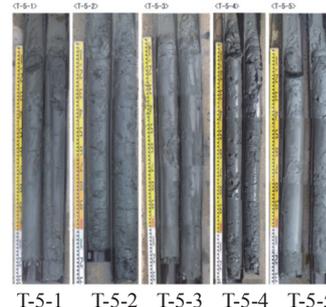


図-11 柱状採取試料の外観

表-2 宇部港柱状採泥試料の土質特性

試料番号		土粒子密度 (g/cm ³)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	平均粒径 D_{50} (mm)	自然含水比 w_0 (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	有機物含有量 (%)	正規化含水比 w_0/w_L
T-5-1 (原海底)	T-5-1 上	2.619	32.7	45	22.3	0.0321	108.8	62.3	22.3	1.8	1.75
	T-5-1 中	2.626	39.8	40.3	19.9	0.049	77.1	54.9	22	1.4	1.40
	T-5-1 下	2.623	50.1	34.2	15.7	0.0752	53.2	42.4	23.7	1.1	1.25
T-5-2 (航路西側)	T-5-2 上	2.606	9.5	60.8	29.7	0.0172	137.5	79.9	24.5	2.3	1.72
	T-5-2 中	2.602	10.6	60	29.4	0.0169	128.2	79	24.8	2.0	1.62
	T-5-2 下	2.576	2.9	65	32.1	0.0115	171.3	129.2	30.9	2.9	1.33
T-5-3 (航路中央)	T-5-3 上	2.592	6.5	61.8	31.7	0.0137	159.4	83.4	26.1	2.2	1.91
	T-5-3 中	2.610	7.7	61.9	30.4	0.0154	148.5	88.1	25.6	2.5	1.69
	T-5-3 下	2.625	37.1	41.9	21	0.0418	66.3	56.2	21.8	1.2	1.18
T-5-4 (航路東側)	T-5-4 上	2.592	9.2	60.1	30.7	0.0147	148.5	79.8	24.7	2.2	1.86
	T-5-4 中	2.597	12.1	59.7	28.2	0.0184	125.2	78.8	25.0	2.2	1.59
	T-5-4 下	2.589	7.4	61.3	31.3	0.0146	134.9	101.3	27.0	2.3	1.33
T-5-5 (原海底)	T-5-5 上	2.596	19.5	54	26.5	0.0218	130.1	74.9	23.7	2.1	1.74
	T-5-5 中	2.624	35.1	44.1	20.8	0.0396	80.7	56.5	21.3	1.4	1.43
	T-5-5 下	2.626	48.2	33.9	17.9	0.0696	54.9	42.2	25.1	1.0	1.30

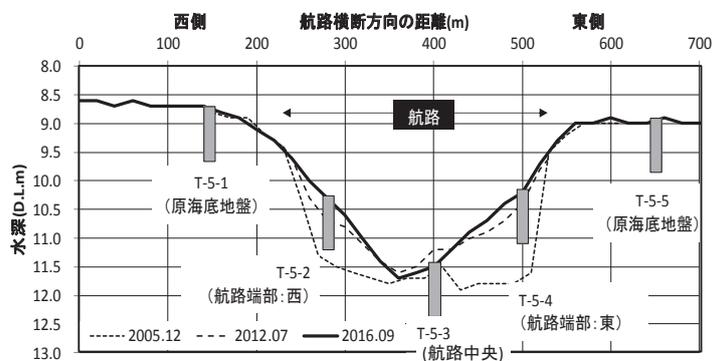


図-12(a) 航路横断方向 (T-5 地点柱状採泥試料) における堆積土の採取位置

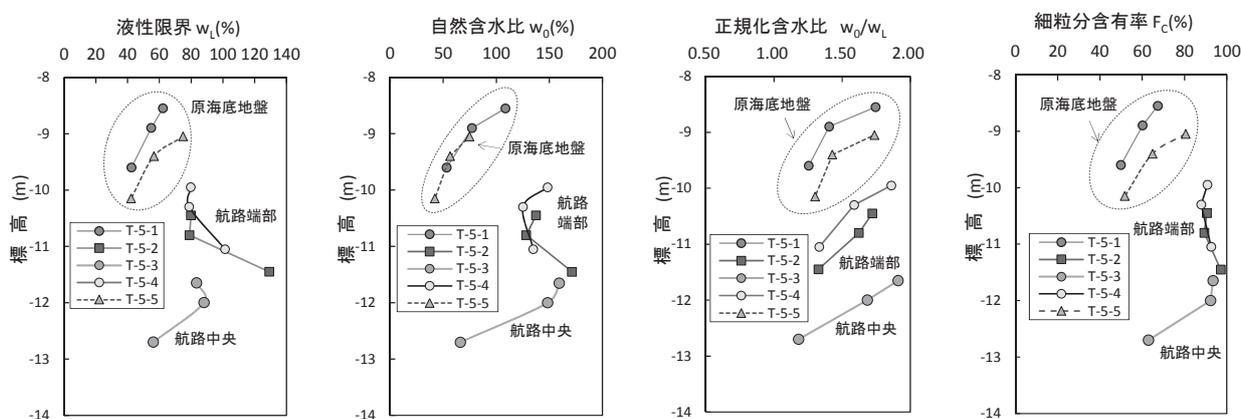


図-12(b) 航路堆積土の深度方向の液性限界, 自然含水比, 正規化含水比, 細粒分含有率

る粒度と深度の関係が説明できると考えられる。

図-13 は, 柱状採取試料における平均粒径 D_{50} と液性限界 w_L の関係である。両者の関係は決定係数 $R^2=0.915$ で次式のように求められた。

$$w_L = 12.23(D_{50})^{-0.475} \quad (1)$$

図-14 は柱状採泥した試料の液性限界と自然含水比の関係である。図中には各採取地点の上層, 中層, 下層のデータをすべてプロットしており, すべての採取地点で上層, 中層, 下層の順で含水比は大きくなっている。図中のプロ

ットと原点を結んだ勾配が正規化含水比である。図-14 と表-2 より, 上層では航路中央(T-5-3)がもっとも正規化含水比が高く 1.91 であり, 航路内の両側では 1.72, 1.86, 海底地盤では 1.75, 1.74 であり, 航路中央では海底地盤よりも正規化含水比が大きかった。

採泥(I)と採泥(II)を行った 39 か所では液性限界の測定を行わなかった。そこで, これらのデータについて式(1)を用いて D_{50} から液性限界の推定値を計算した(ただし計算された液性限界が 30%以下の場合を除いた)。自然含水比と推定液性限界の関係を求め, 柱状採泥試料の上層のデ

ータと一緒にプロットすると図-15 のようになった。図のように、自然含水比の値はほとんどが $1.5w_L$ と $2.0w_L$ の間となっている。図-16 は試料採取箇所の水深と正規化含水比の関係である。図のように、宇部港の海底表層に関しては、正規化含水比と水深の間に明確な関係がみられなかった。宇部港の年平均有義波高は 10cm 程度であり、東京港の 32cm, 神戸港の 31cm に比べるとかなり小さい。図-5 より波高 30cm, 水深 10m に相当する正規化含水比は約 1.6 であるが、宇部港の平均は 1.72 であり波浪が小さい影響がみられるともいえるが、データのばらつきも大きいので、海底地盤表層の正規化含水比と海洋環境との関係についてはさらに分析が必要と考えられる。

4. 結論

本論文は、尾道糸崎港と宇部港において航路に堆積した底泥の採取試料の土質特性をまとめたものである。主要な結論は以下ようになる。

- (1) 尾道糸崎港松永港区の航路・泊地は、推算平均有義波高が 4cm である静穏な海域であり、堆積した底泥の正規化含水比は 1.5~1.7 であり、水深とともに増加する傾向がみられた。
- (2) 観測平均有義波高が 10cm である宇部港の航路・泊地に堆積した底泥の正規化含水比はほぼ 1.5~2.0 の範囲にあり、水深との関係は明らかでなかった。宇部港の原海底地盤は砂分含有率が約 50% であり、航路には海底から巻き上がった細粒分を多く含む粘土が堆積していると考えられる。

謝辞

本論文は平成 2015 年度および 2016 年度に中国地方整備局が設置した管内航路・泊地埋没対策等委員会において検討された内容の中で、海底地盤の土質特性の調査結果に着目し、地盤工学的な観点からまとめたものである。本文をまとめるにあたっては委員会における討議内容を参考にさせていただいた。委員の方々に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Skempton A. W.: The Consolidation of Clays by Gravitational Compaction, *Quarterly Journal of Geological Society of London*, Vol.125, pp.373-412, 1970.
- 2) 土田 孝, 熊谷隆宏, 安部太紀: 海底に堆積する粘土の波浪作用下における安定条件と自然含水比, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.2, pp.149-162, 2016.
- 3) 入江功, 村上和男, 鶴谷広一: シルテーションによる航路・泊地埋没の水理機構に関する研究, 土木学会論文誌, No. 438/II-17, pp. 1-12, 1991.
- 4) 熊谷隆宏, 土田孝, 安部太紀, 菊原紀子, 布谷信貴: 砂分を含有する底泥の波浪応答特性に関する実験的

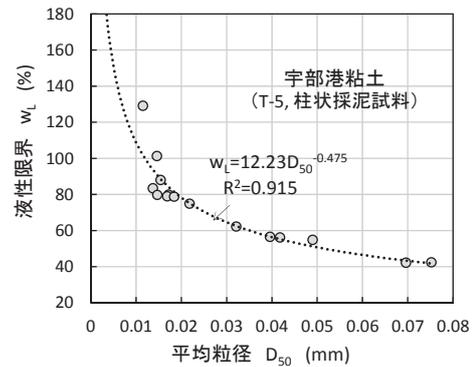


図-13 柱状採泥試料の D_{50} と液性限界の関係

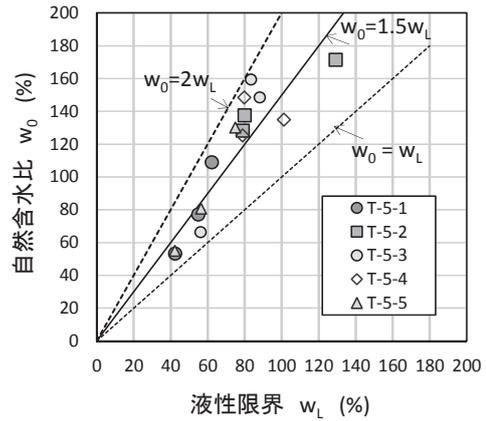


図-14 柱状採泥試料の液性限界と自然含水比の関係

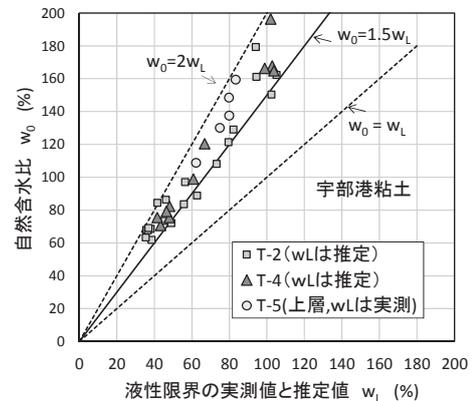


図-15 D_{50} から推定した液性限界と自然含水比の関係

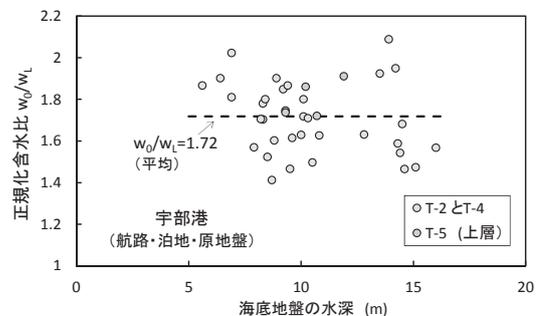


図-16 試料採取箇所の水深と正規化含水比の関係

研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, pp.I_546-I_550, 2012.

(2017年6月21日 受付)