

自然および人工干潟における地盤の安定性に関する現地調査

姜 関 求\*・高橋重雄\*\*・奥平敦彦\*\*\*・黒田豊和\*\*\*\*

1. ま え が き

干潟の優れた環境機能が認識されるにつれて、人工干潟の造成は今後ますます増えると予想されている。ただし、これまでの干潟に関する研究は生物・水質関連のものが主であり、その地形変化や地盤安定性に関する研究は数少ない(古川ら, 2000)。したがって、人工干潟の設計法はまだ十分確立されてはいなく、人工ビーチの設計手法を準用しているのが現状である。

著者らは人工干潟の設計法の確立を目的として干潟の耐波安定性に関する種々の検討を行っている(姜ら, 2000)。本報告は、最近実施した自然および人工干潟における地形や地盤の安定性に関する現地調査結果を報告するものである。なお、人工干潟設計に関する新たな観点についても検討を加えている。

2. 現 地 調 査

現地調査は2000年6月から2001年4月まで主に大潮時に行った。図-1と表-1は、調査対象地の位置とその概要を示したものである。調査対象の干潟は、東京湾近傍から博多湾まで広域にわたり、自然干潟5ヶ所と人工干潟7ヶ所を対象にしている。また、干潟との比較のため砂浜1ヶ所と人工海浜3ヶ所も含んでいる。調査対象の人工干潟・海浜は全てが内湾に造成されている。表中の「潜堤や離岸堤」等は、干潟および海浜の沖に設けられている構造物の形状を表しており、とくに潜堤はすべてが砂留め用である。埋立の欄における「二層」とは、粘土性の浚渫土層を覆砂した場合を表す。「人工干潟および海浜の状態」は、目視観察による生物の分布状況より、人工干潟および海浜を3つに分類したものである；自然干潟に比較的近い場合は人工①、砂浜に近い場合は人工③にしており、その中間の場合を人工②にした。

調査では、深浅測量、コーン貫入試験および柱状採泥を行った。深浅測量では、各調査地域で代表的な測線1ヶ

所を選んで、レーザー測距儀を用いて干潮位汀線の沖から満潮位汀線付近まで測った。地盤の高さは、基本的には潮位基準(C.D.L.)にしている。深浅測量結果に基づいて、前浜の勾配と幅等を求めている。前浜は、干潮(L.W.L.)汀線から満潮(H.W.L.)汀線までとしている。コーン貫入試験は、深浅測量の測線上の4~9地点で行った。試験は、断面積3.23cm<sup>2</sup>、円錐角度30°のコーンを取り付けたコーンペネトロメータを貫入させて、最大深さ5m

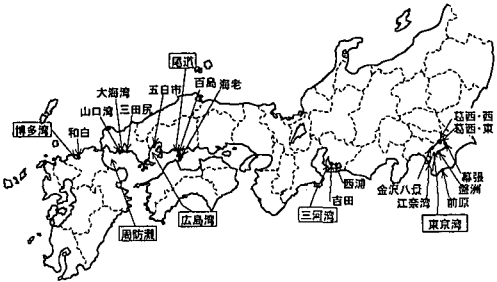


図-1 調査対象の位置

表-1 調査対象地とその概要の一覧

| 区分   | 名称   | 所在地                | 生物の分布状態 | 構造物      | 埋立形式 | 造成年度 | 調査日                     |
|------|------|--------------------|---------|----------|------|------|-------------------------|
| 自然干潟 | 鹽洲   | 千葉県泉北郡市原市鹽洲干潟      | 自然干潟    | 隠岸       | —    | —    | 2000.6.15<br>2000.8.29  |
|      | 江奈湾  | 神奈川県三浦市江奈          | 自然干潟    | なし       | —    | —    | 2000.9.13               |
|      | 吉田   | 愛知県西尾市吉良町吉田海浜      | 自然干潟    | 隠岸       | —    | —    | 2000.10.18<br>2001.3.28 |
|      | 和臼   | 福岡市博多区和臼干潟         | 自然干潟    | 沖、人工島    | —    | —    | 2000.8.10               |
|      | 山口湾  | 山口市山口湾の長浜先の干潟      | 自然干潟    | 隠岸       | —    | —    | 2000.8.9                |
| 自然砂浜 | 前原   | 千葉県葛飾区前原           | 自然砂浜    | 隠岸堤      | —    | —    | 2000.8.31               |
| 人工干潟 | 葛西・東 | 東京都江戸川区葛西海浜公園の東なぎさ | 自然干潟に近い | 導流堤      | 単層   | 1983 | 2001.4.26<br>2000.6.5   |
|      | 西浦   | 愛知県蒲郡市西浦町西浦人工干潟    | 中間      | 隠岸       | 単層   | 1999 | 2000.10.17              |
|      | 百島   | 広島県尾道市百島地区         | 自然干潟に近い | 潜堤       | 二層   | 1987 | 2000.11.9               |
|      | 海老   | 広島県尾道市浦崎海老地区       | 自然干潟に近い | 潜堤       | 二層   | 1989 | 2000.11.10              |
|      | 五日市  | 広島市佐伯区五日市地区        | 砂浜に近い   | 潜堤       | 二層   | 1990 | 2000.8.8                |
|      | 三田尻  | 防府市三田尻港三田尻人工干潟     | 中間      | なし       | 単層   | 1999 | 2000.8.9                |
|      | 大海湾  | 山口県防府市西浦干拓地先の人工干潟  | 自然干潟に近い | 離岸堤に近い   | 単層   | 1982 | 2000.8.9                |
| 人工海浜 | 葛西・西 | 東京都江戸川区葛西海浜公園の西なぎさ | 中間      | 導流堤      | 単層   | 1989 | 2000.8.28<br>2000.9.27  |
|      | 幕張   | 千葉県市川区幕張の浜         | 砂浜に近い   | 突堤<br>潜堤 | 単層   | 1978 | 2000.9.26               |
|      | 金沢八景 | 横浜市中区金沢区海の公園       | 中間      | なし       | 単層   | 1979 | 2000.9.1                |

\* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部  
\*\* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部長  
\*\*\* 工修 シバク工業(株)技術開発本部(元、(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部)  
\*\*\*\* (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部

まで10 cm 間隔のコーンの抵抗値を求めている。コーン貫入試験結果より、地盤固さの鉛直構造と岸沖分布を調べている。柱状採泥では、コーン貫入試験と同地点で、径5 cmの透明アクリルパイプを用いて深さ70 cmまでを採泥し、表層(0~10 cm)、中層(25~35 cm)および下層(60~70 cm)について粒径を調べている。

### 3. 調査結果および考察

#### 3.1 断面地形と地盤状況

##### a) 自然干潟の断面地形(盤洲干潟)

図-2は、盤洲干潟における岸沖断面の地盤高(C.D.L.基準)を示したものである。干潟の前浜は、満潮位汀線側の直立護岸部、干潮位汀線側の勾配1/80ほどの斜面と、その間の非常になだらかな部分(テラスと呼ぶ)からなっている。テラスは、幅1450 m、勾配1/1200程度であり、沖側の多段のバー・トラフ部とその岸側の平坦部に分かれているのが特徴的である。多段のバー・トラフ部は、干潮位汀線から320 mほど岸まで平均勾配1/500で、長さ50~70 m、高低差50~70 cmでバーとトラフが繰り返す構造になっている。平坦部は、勾配が1/1500程度の非常になだらかな地形になっている。平坦部のNo. 9で地盤高が1.6 m(H.W.L.: 2.03 m)と比較的高く、干出時間は1潮汐周期の70~80%になるが、地盤内の地下水の低下が小さく数多くの生物がみられた。こうした形状の地形や地下水の状況は典型的な自然干潟の特徴の一つであり、他の4つの自然干潟においても認められている。

一般的に干潟の中でも、テラスの平坦部は生物の重要な生息場になるため、これまでの干潟に関する調査では平坦部が主な調査対象となる場合が多い。一方、多段のバー・トラフ部は、来襲波を受け止め(碎波させ)、干潟の平坦部を守る先端部となるため、干潟地盤の耐波安定性の観点から重要な場であることに留意する必要がある。

##### b) 地盤の固さと粒径(盤洲干潟)

図-3は、図-2で示したNo. 1~No. 8における(a)地盤固さと(b)中央粒径の鉛直分布を示している。ここで、地盤固さは、深さ30, 50および100 cmまでのコーン貫入抵抗値の平均値である。図-3(a)より、盤洲干潟の地盤固さは、地表面下100 cmまでの平均値がNo. 1を除いて $0.6 \times 10^6$  Pa以下であり、深いほど固くなっている。しかし、図にはないが、この干潟では深さ120~200 cmの層で $4 \times 10^6$  Paまで急激に大きくなる傾向がよくみられた。特に、生物の生息活動と密接な関係のある深さといわれる50 cmまでの平均値をみると、最先端のバーであるNo. 2(-30 m地点)で $0.5 \times 10^6$  Pa程度と最

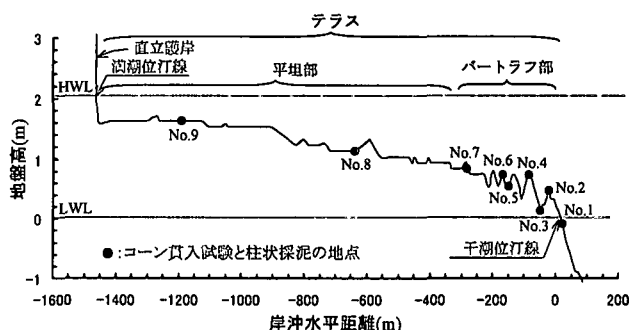


図-2 自然干潟の岸沖断面地形(盤洲干潟)

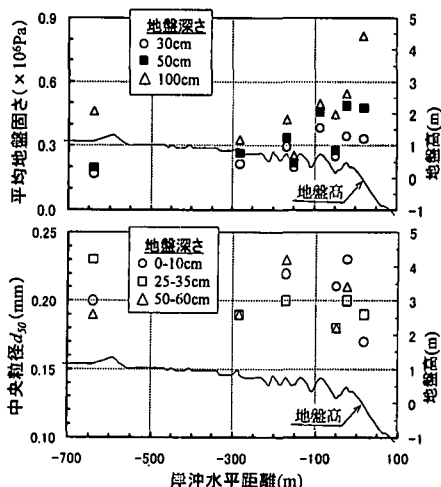


図-3 (a) 地盤固さと (b) 中央粒径の岸沖分布(盤洲干潟)

も固くなっており、それから岸ほど柔らかくなって、平坦部のNo. 8(-650 m地点)ではNo. 2の40%の $0.2 \times 10^6$  Pa程度になっている。ただし、トラフよりもバーで固くなっている傾向がある。

図-3(b)より、底質の粒径は、全体的な傾向として最先端のバーで最も大きく、平坦部のNo. 1で最も小さくなっている。それ以外ではそれほど差がない。特に表層の0~10 cm層では、最先端のバーNo. 2で0.23 mmと最も大きく、それから沖また岸ほど小さくなっているが、バーとトラフにおける粒径の差は地盤固さほど顕著ではない。

このように地盤固さや粒径の分布からも、最先端のバーは波作用を最も厳しく受ける場になり、なお岸側の平坦部を守っていることが十分推測できる。

一方、図には示していないが、自然砂浜である前原海岸では、二人の大人の力では50 cmほどしか貫入できず、平均潮位となる地点で50 cmまでの平均抵抗値も $2 \times 10^6$  Paと盤洲干潟の4倍も大きかった。

##### c) 人工干潟の断面地形(葛西・西と葛西・東)

図-4は、人工干潟の断面地形の一例として、(a) 葛

西・西と (b) 葛西・東を示したものである。葛西・東は、バー・トラフ部のある遠浅瀬にポケット型の導流堤内に埋め立てて造成されており、図中の水平距離-600 mより岸側が人工部になる。一方、葛西・西の場合は同じ形式で造成されたが、沖側が浚渫によって深くなっている。生物の分布状況からみると、葛西・東は自然干潟に近くなっているが、葛西・西は自然干潟と砂浜の中間程度になっている。

まず、(a) 葛西・西の場合、干潮位汀線から満潮位汀線までの幅 250 m が多段のバー・トラフ状になっており、その形状も盤洲干潟の場合と似ている。ただし、その岸側には平坦部が形成されておらず、生物も少なかった。一方、(b) 葛西・東は、テラス幅が 1250 m 程度と盤洲干潟に匹敵するほど広がっている。多段のバー・トラフ部が干潮位汀線から 350 m 岸まで形成されており、その岸側が平坦部であり、生物も多く見られた。

すなわち、自然干潟に近い人工干潟とするためには、多段のバー・トラフ部の幅が十分あって、その背後に平坦部が形成されるようにする必要があると思われる。

### 3.2 前浜の勾配と岸沖方向の幅

図-5 は、横軸に無次元量  $D_h (= H_B/g^{0.5}d_{50}^{0.5}T)$  を取り、全ての調査対象地の前浜勾配を表したものである。ここで、 $H_B$  は 50 年確率有義波沖波の碎波波高、 $T$  は周期、 $d_{50}$  は中央粒径である。ここに適用した中央粒径  $d_{50}$  は、テラス上における表層 (0~10 cm) の中央粒径の平均値を用いた。なお、図中に Sunamura (1984) によって定式化された砂浜の前浜勾配の平均値と下限値を同時に表わしている。

まず、自然砂浜とそれに近い人工干潟・海浜 (人工③) の前浜勾配は Sunamura の結果にほぼ近くなっている。しかし、自然干潟の前浜勾配は 0.006 以下と、自然砂浜に比べて非常に小さい。人工①の前浜勾配は、波高が小さく、覆砂構造にした百島と海老の場合を除けば、自然干潟とほぼ近くなる。また、自然干潟と人工①の前浜勾配は、Sunamura の下限値に近いほうに分布している。

一方、人工②の場合は前浜勾配が 0.005~0.025 程度と、自然干潟に比べて 4 倍ほど大きくなっており、Sunamura による平均値と下限値の間に分布している。Sunamura による式はもともと砂浜に適用されるものであり、干潟への適用には問題が多い。

図-6 は、横軸に 50 年確率有義波の沖波波高  $H$  をとり、テラス幅と多段のバー・トラフ部の幅を示したものである。なお、図中でテラス幅とバー・トラフ部の幅を結ぶ線の長さが生物の生息地として重要な平坦部の幅で

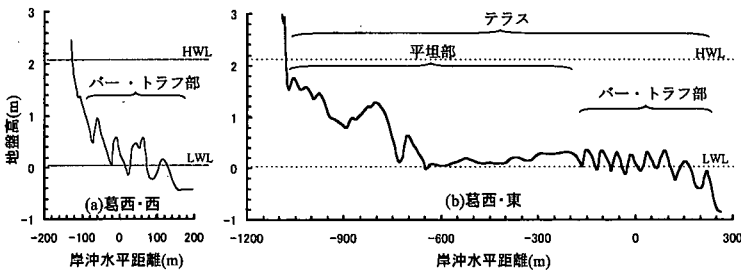


図-4 岸沖断面地形 ((a) 葛西・西と (b) 葛西・東)

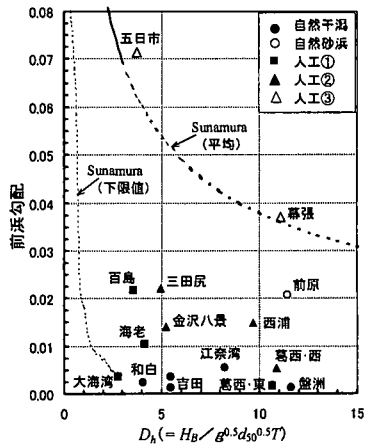


図-5 前浜勾配

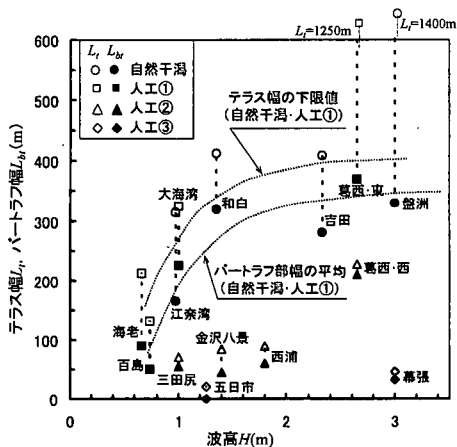


図-6 テラス幅とバー・トラフ部の幅

ある。ここで、バー・トラフ部が明瞭ではない場合は、干潮位汀線付近から比較的に平坦な部分までの距離にした。

まず、調査対象になった自然干潟と人工①のテラス幅は 300 m から 1450 m まで分布している。なお、テラス幅は、波高  $H$  が大きいほど大きくなるが、幅が 300 m 以上になると波高にあまり関係がなくなるようである。バー・トラフ部の幅は波高が大きいほど大きくなってお

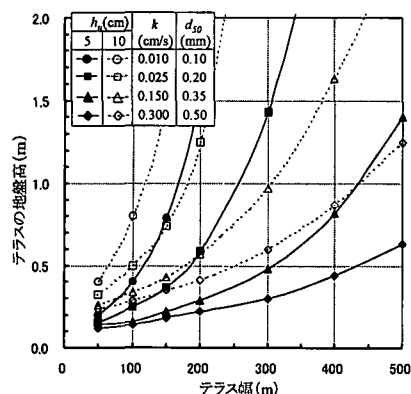
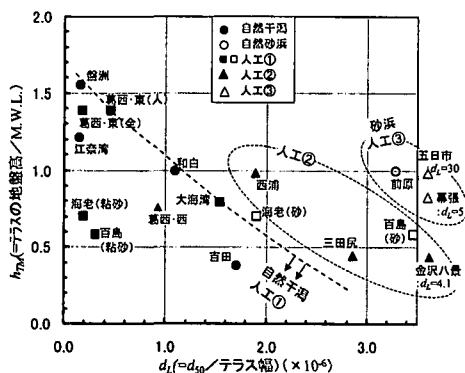
図-7 透水係数  $k$  と必要となるテラス幅と地盤高

図-8 中央粒径とテラスの幅および地盤高の関係

り、波高が2 m以上ではその幅が300~350 mとほぼ一定になっている。したがって、平坦部の幅は100~1100 m程度とテラス幅が大きいほど大きくなっている。

自然砂浜とそれに近い人工③の場合、テラス幅は50 m以下と非常に小さくなっており、生物の生息地となる平坦部ほぼ形成されていない。一方、自然干潟と砂浜の間である人工②の場合、テラス幅が250 m程度である葛西・西を除けば、テラス幅は150 m以下と自然干潟に比べて小さい。また、テラスの中で幅0~80 m程度のパー・トラフ部が形成されているため、平坦部の幅が数十 m以下と小さくなっている。

以上の結果より、自然干潟に近い人工干潟を造成するためには、テラス幅を広くするほど良く、通常の内湾の海域では200 m以上のテラス幅が必要になると思われる。

### 3.3 粒径とテラスの幅および地盤高の関係

人工干潟が生物の豊かな干潟になるためには、干潮時の地下水の低下を抑制する必要がある。李ら(1997)は、干潮時における干潟のテラス内の地下水位を計測し、自然干潟とそれに近い人工干潟の場合は干潮時の地下水低下が数 cm 程度と小さいが、砂浜に近い人工干潟の場合は数十 cm にもなると報告している。著者らの現地調査

においても李らとほぼ同様の傾向が認められている。

図-7は、干潮時における地盤内の地下水位の許容低下量  $h_u$  を一定値にし、地盤の透水係数  $k$  と必要となるテラスの幅および地盤高の関係について、ダルシー法則を用いて計算した結果である。図中で粒径  $d_{50}$  は透水係数に想定する粒径にしており、計算で潮位変動は2 mにした。計算結果では、透水係数  $k$  が大きいほど、また地下水の許容低下量が小さいほどテラス幅を大きく、あるいはテラスの地盤高を低くしなければならない。これは、これまでの砂浜における粒径(透水係数)と勾配(テラス幅)の関係とは逆になる結果である。干潟の生物の種類や目的によって干潟地盤内の地下水の低下をどの程度まで許容すればよいのかについてはまだ明らかになっていないが、自然干潟ではこうした条件が満たされており、人工干潟の設計でも地下水の低下を考慮したテラスの幅と地盤高の決め方が重要である。

図-8は、こうした考え方に基づいて、横軸に粒径/テラス幅をとり、テラスの地盤高/平均潮位(M.W.L.)を示したものである。図中の葛西・東の括弧中の'全'と'人'はそれぞれ、図-4で示した干潟全体と人工部のみを表わす。なお、百島と海老の括弧中の'砂'と'粘砂'は、地盤の透水係数と係わる粒径の適用について、それぞれ覆砂層のみの場合と、覆砂層と浚渫土層の粒径を平均的に考慮した場合を表わす。

図中の直線の破線は、自然干潟およびそれに近い人工干潟・海浜(人工①)に対して求められたテラスの地盤高の上限値になる。現地干潟の結果からも図-7で示した地下水を考慮した計算と同様の傾向が得られている。すなわち、粒径あるいはテラス幅が大きくなるとテラスの地盤が低くなっている。例えば、人工②の干潟である西浦、三田尻および金沢八景を自然干潟に近くするには、粒径  $d_{50}$ /テラス幅を小さくするか、あるいはテラスの地盤を低くする必要がある。ただし、図-6の結果を考慮すれば、テラス幅を大きくするのがより効果的となる。

### 3.4 覆砂した場合

#### a) 地盤の固さと断面地形

粘土性の浚渫土を覆砂した二層構造の人工干潟では、コーン貫入試験より、その二層構造が区分できる。図-9は、浚渫土地盤に50 cmほど覆砂して造成した海老地区人工干潟において、(a)コーン貫入抵抗値の鉛直分布と(b)二層の断面地形を示したものである。図(a)中のNo. 1~No. 4は、図(b)に示してあるコーン貫入地点である。

図(a)より、No. 3とNo. 4では、コーン貫入抵抗値が通常の干潟地盤の場合と同様に徐々に大きくなっていくが、深さ60~100 cm付近から極端に小さくなって、再び大きくなっていく二層構造になっている。しかし、No. 1ではこうした二層構造は見えず、一層構造になってい

る。これは、No.1では粘土層が露出してしまったためである。なお、No.4の深さ350 cmでコーン抵抗値が急に大きくなるのは原地盤に至ったためである。図(b)は、こうした結果に基づいて判別した二層の断面地形である。覆砂層が最も堆積しているNo.3で粘土層が最も大きく沈下しており、No.1とNo.2の間から沖側で粘土層が露出している。調査当時、この周辺は波作用によって濁っていた。

この他、海老と同様の手法で造成された百島地区では、粘土層が露出されているところは見えなかったが、粘土層の地盤高は、覆砂層の変化に連動した変化が見られた。こうした結果は、姜ら(2000)による実験結果でも認められており、覆砂する人工干潟の場合、覆砂層の砂の動き、そして下層の強度について十分な検討が必要であると指摘しておきたい。

#### b) 覆砂した場合の地盤の透水性の評価

図-9で示した海老の場合、水平距離0 mより岸側では、干潮時においても水溜まり場が広く、生物も数多くみられるほど自然干潟に近かった。百島も海老とほぼ同様の傾向が見られた。これは、透水層となる覆砂層の厚が50 cm程度と小さいため、水溜まり場での水抜きが小さいため、生物の生息に適合な環境になったことから考えられる。一方、砂浜に近い五日市では、造成後数年間は鳥の渡来が年々増え、干潟としての機能を十分に果たすことができた(エコポート(海域)技術推進会議, 1999)。しかし、調査当時は、原地盤と浚渫土層の沈下が大きく、細粒成分の流失が多く、テラスもほとんど形成されていなかった。さらに、覆砂の層厚が2 mもあって地盤内の地下水が数十 cm まで低下し、干潟としての機能が不十分な状況になっていた。なお、図-8で覆砂した百島と海老の場合の粒径の適用が、覆砂層の粒径だけ(図中の□)よりも浚渫土層まで考慮した粒径(図中の■)にした場合が人工①の領域に入る。すなわち、図-8で、覆砂した場合の粒径(透水係数)の算定には、覆砂層と浚渫土層の両方を考慮するほうがより正しい。

#### 4. あとがき

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 自然干潟の前浜のテラスは、干潮位汀線から200~350 mまでの多段バー・トラフ部とその岸側の平坦部からなっている。平坦部は生物の生息場として、多段バー・トラフ部は耐波安定性の観点から非常に重要である。
- 2) 人工干潟の場合も、多段のバー・トラフ部がまず形成される。また、自然干潟に近い人工干潟を造成する

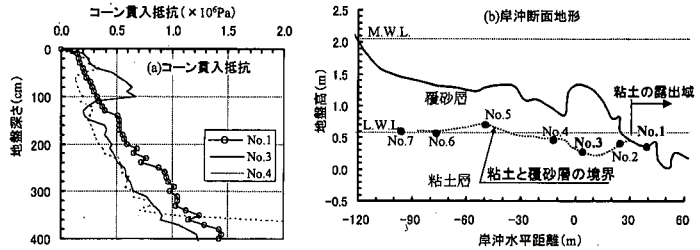


図-9 (a) コーン貫入抵抗値の鉛直分布と断面地形(海老地区)

ためには、十分なバー・トラフ部が形成できるように、テラス幅を広くするほど良いが、200 m以上のテラス幅が必要になる。

3) 干潟地盤内の地下水の低下を考慮した設計が必要であり、粒径とテラスの幅及び地盤高の関係より自然及びそれに近い人工干潟の分布範囲を示した。地盤の粒径(透水係数)が大きいほどテラス幅を大きくするか、あるいはテラスの地盤を低くする必要がある。

4) 粘土性の浚渫土を覆砂した人工干潟では、粘土層が覆砂層の変化に連動して変化すること、また粘土層が露出している場合がある。そのため、覆砂形式にした場合、覆砂層における砂の動き、そして下層の強度について十分な検討が必要である。

今後、自然干潟のさらなるデータの取得を予定している。なお、本研究の遂行にあたり国土交通省中部地方整備局三河港湾工事事務所、中国地方整備局広島港湾空港工事事務所、宇部港湾工事事務所、九州地方整備局博多港湾空港工事事務所、財)東京港埠頭公社東部公園管理事務所、広島港湾振興局、財)横浜市臨海環境保全事業団の多大なご協力を得ている。また、独立行政法人港湾空港技術研究所沿岸生態研究室の中村由行室長と桑江朝比呂研究官、漂砂研究室 栗山善昭室長、耐波研究室 下迫健一郎室長に貴重な御助言を頂いている。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- エコポート(海域)技術推進会議(1999): 自然と生物にやさしい海域創造事例集, 財)港湾空間高度化センター, pp. 1-9.
- 姜 関求・高橋重雄・野々村 治・高野忠志・黒田豊和(2000): 人工干潟地盤の耐波安定性に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 526-530.
- 古川恵太・藤野野亮・三好英一・桑江朝比呂・野村宗弘・萩本幸将・細川恭史(2000): 干潟の地形変化に関する現地観測—盤州干潟と西浦造成干潟—, 港研技研資料, No. 965, 30 p.
- 李 正奎, 西嶋 涉, 向井徹雄, 滝本和人, 清水 徹, 平岡喜代典, 岡田光正(1997): 自然及び人工干潟における構造と有機物分解能の比較—広島湾におけるケーススタディー, 水環境学会誌, 第20巻, pp. 175-184.
- Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slopes, Geo. Soc. of Ame. Bul., Vol. 95, pp. 242-245.