

人工干潟地盤の耐波安定性に関する基礎実験

姜 閔 求* ・ 高 橋 重 雄** ・ 野々村 治***
高 野 忠 志**** ・ 黒 田 豊 和****

1. ま え が き

近年, 干潟の保全が重要な環境問題となっており, 新たに干潟を創出する人工干潟も数多く造られるようになってきている。特に港湾の分野では, 浚渫土の有効利用の一つとして, 今後ますます増えることが予想される。ただし, 人工干潟の造成技術は, 十分確立されたものではなく, 干潟が大きく沈下した事例等も報告されている(エコポート(海域)技術推進会議, 1999)。たとえば, 前浜干潟の場合, 浚渫土を覆砂して安定性を高めていることが多く, その設計は通常の砂に対する人工ビーチの設計法を準用しているが, 覆砂された下層の浚渫土が波作用により液状化して破壊することも考えられる。著者は, 浚渫土による安定な人工干潟の創造を目的として, その耐波安定性に関する種々の検討を始めているが, 本報告は, 実際の浚渫土を用いて行った造波水路での基礎的な実験結果を報告するものである。特に, 港内の浚渫土は粒径の細かいシルトや粘土成分を多量に含んでいる場合が多く, 波に対してかなり複雑に応答すると考えられ, その基本的な特性を把握することがまず重要である。

2. 水 理 実 験

実験は, 長さ 36 m, 幅 0.48 m, 高さ 1 m の片面ガラス張りの 2 次元造波水路に潜堤と浚渫土地盤をつくり実施している。実験断面は, 図-1 に示しているように, ①水平床(底泥厚さ 24 cm, 長さ 8 m)と②斜面床(勾配 1/30, 長さ 11 m)の二種類を対象にして行っており, またそれぞれの地盤に対して③覆砂した場合(砂中央粒径 0.2 mm, 厚さ 5 cm)についても行っている。

用いた地盤は, 名古屋港の浚渫土で, 実験に先立って目の大きさが 5 mm の金網に通して貝殻やごみなどを取り除いており, 中央粒径は 0.013 mm(粘土分 36%, シルト分 49%, 砂分 15%)である。含水比は 75%から 83%でやや固めにしており, 液性限界と塑性限界はそれぞれ 60%と 29%となっている。なお, 地盤の固さを調節する

ため, 1 日から 5 日間ほど静置して圧密させている。

実験では, 波作用に伴う地形変化と剪断強度, 粒度組成, 含水比, 地盤の動き等の変化を測定している。地形変化はガラス面より目視で計測しており, 剪断強度はハンドペンをを用い, 波作用前と波作用後一定間隔で測定している。なお, 含水比と粒度試験用のサンプルは, できるだけ地盤に影響を及ぼさないよう, 波作用の前後と, その間で 1 回ずつ取得している。

表-1 は実験ケースを示すものである。波は, 主として周期 1.5 s の規則波であり, 波高は 4.5~24 cm で, 最初の波(表中の波 I)によって地盤が安定となった場合は, さらに波高の大きい波(波 II~波 VII)を続けて作用させている。実験波の作用時間は, 液状化がすぐ発生したものは短くしているが, 数時間から数十時間にしている。さらに, 自然干潟は様々な波作用の履歴を受けながら安定な地形になることに着目し, 1 週間ほど作用させ, 履歴効果についても検討している。

本研究でいう液状化とは, 波作用により地盤のひずみが大きくなって軟化した液体状態を表すが, 不安定な状態あるいは乱れた状態も表す。なお, 水中の地盤状況が見にくいことや, 用いた浚渫土地盤の液状化がゆっくり変化していくため, その発生時間の特定は難しいが, 表-1 に各ケースでの液状化の発生時間も記している。

3. 水平床の実験結果

(1) 波作用による地盤運動と溶け出し

浚渫土地盤は, 比較的小さい波の作用によっても動き, 粘土成分の溶け出しが生じる。写真-1 は, 波高を 6.4 cm から 13.4 cm まで 3 種類の波を連続に作用させたケース(A-V)で波作用終了時の様子である。写真の左側に筋状に溶け出している粘土成分が見えており, この溶け出しにより地盤の上層部が変色している。その結果, まるでシルトや砂で被覆したような地盤に変化しており, 粘土地盤では見られない砂連も形成されている。

このような溶け出しは, 波作用によって地盤が運動し, そのため地盤内の間隙水圧が上昇して間隙水が排水されることに起因する。実際, 波高 6.4 cm の波作用時には, 地盤表層での横幅が 0.6 mm, 縦振幅が 0.2 mm 程度で,

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所特別研究官
*** シバタ工業(株)技術開発本部
**** 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

深さ 12 cm でも表層の半分程度の動きがあり、ひずみは 10^{-4} ～ 10^{-3} 程度 (中ひずみの弾塑性体相当) となる。こうした粘土成分の溶け出しによって後述するように、粒度組成が変化し、地盤の耐波安定性が向上する。

(2) 液状化の発生による地形と組成等の変化

浚渫土地盤は、比較的小さい波によっても液状化が発生し、地形が大きく変化する。図-2 は、水平床地盤で液状化が発生した場合に現われる地形変化の代表的な 2 つの例を示している。

(a) は、液状化が小さな波高で比較的真く発生した場合 (ケース A-II) で、波高 5 cm の波を作用し始めて 30 分後に発生している。液状化の発生した区間では液状化発生後 2.5 時間と短い時間内に 0.5～1 cm ほど掘れて、それがそのまま後方に移動している。このような比較的真早い液状化の発生は、初期地盤の剪断強度が波高に比して小さいために現われており、広い範囲にわたって地形が変化するのが特徴であり、柔らかい粘土地盤での実験でもよく現われている (沈ら, 1993)。

一方、(b) はある程度の波作用の履歴を受けてから液状化が発生したケース A-V である。このケースでは、最初の波高 6.4 cm とそれに続く 9 cm の波の作用によっても地盤が液状化せず、ある程度締め固まって安定になった上、次のさらに大きい波 (波高 13.4 cm) の作用中 (開始後 5 時間) に液状化が発生している。この場合、非

液状化区間では、地盤の沈下はわずか数 mm 程度と小さい。液状化の発生した区間では、液状化の発生前は非液状化区間の変化傾向とほぼ同様であるが、一度液状化が発生するとその区間だけで地形変化が急に進行し、13.4 cm の波が 44 時間作用した後は地盤高が 3 割も大きく下がり、地形が釜状に掘れている。

最初の波高 5 cm の波によって液状化が発生しなく、2 番目の波高 10.5 cm の波で液状化したケース A-I の場合も同図 (b) とほぼ同様の地形となっている。

図-3 は、図-2(b) のケース (A-V) について、長時間の波作用終了後の地盤状況と含水比および粘土成分の分布を示したものである。液状化の発生した区間では、表層はまだ液状化状態にあるが、その下の厚さ 4 cm ほどはかなり固い層に変わっている。波作用前の含水比と粘土成分 (0.005 mm 以下) はそれぞれ 80.4% と 36% であったが、液状化状態にある表層でも含水比が 51% 程度となっており、その下の固い層では含水比と粘土成分がそれぞれ 41% と 11% 程度とかなり低くなっている。ただし、その下の層では変化が小さい。このように液状化の発生区間で固い層が形成されるのは、波作用によって粘土成分が多量に流失し、シルトや砂質に変わった地盤が、継続的な波作用によって締め固まるためである。

非液状化区間では、含水比が初期に比べて 1～4% 低く、粘土成分も表層付近で 8% も減っており、その変化は地盤表層ほど大きくなっている。

カオリナイトを用いた沈ら (1993) の実験では、液状化発生後に 100 時間以上波を作用させても、表層では含水比が初期値より高く、下層に行くほど減衰しており、固い層の形成傾向は見られなかった。一方、現地浚渫土を用いた土田・五明 (1999) の結果では、本研究と同様に固い層が形成されている。このように、現地浚渫土地盤では、シルトや細砂が含まれている場合が多いため、液状化が発生すると固い層が形成される傾向がある。

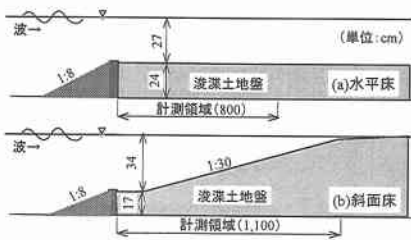


図-1 実験断面

表-1 実験ケースおよび液状化の発生

断面形状	ケース名	潜堤背後の浚渫土層厚（覆砂層厚）	潜堤背後の水深	波作用前地盤条件			作用波	液状化発生	備考
				剪断強度	含水比	周期			
水平床 （覆砂なし）	A-I	24 cm	27 cm	572 Pa	82.0%	1.89 s	波Ⅰ（5 cm, 5 時間）→波Ⅱ（10.5 cm, 4 時間）	波Ⅰ作用 3 時間後	波作用の履歴あり
	A-II			480 Pa	83.6%	1.13 s	波Ⅰ（5 cm, 2.5 時間）→波Ⅱ（9.6 cm, 20 時間）	波Ⅰ作用 30 分後	柔らかい地盤
	A-III			571 Pa	81.2%	1.5 s	波Ⅰ（4.5 cm, 27 時間）→波Ⅱ（7 cm, 25 時間） →波Ⅲ（9 cm, 10 時間）→波Ⅳ（10.5 cm, 6 時間） →波Ⅴ（13 cm, 6 時間）→波Ⅵ（17.5 cm, 4 時間） →波Ⅶ（19.5 cm, 6 時間）	無し	波作用の履歴効果
	A-IV	36 cm		456 Pa	79.1%	1.5 s	波Ⅰ（6.3 cm, 20 時間）	7 時間後	浚渫土層厚：+12 cm
	A-V	24 cm		380 Pa	80.4%	1.5 s	波Ⅰ（6.4 cm, 45 時間）→波Ⅱ（9 cm, 68 時間）	波Ⅲ作用 5 時間後	波作用の履歴効果 長時間波作用
斜面床 （覆砂なし）	B-I	17 cm	34 cm	600 Pa	77.0%	1.5 s	波Ⅰ（11.6 cm, 3.5 時間）	5 分後	
	B-II			600 Pa	77.0%	1.5 s	波Ⅰ（6.1 cm, 120 時間）→波Ⅱ（11 cm, 18 時間）	波Ⅰ作用 1.5 時間後 波Ⅱ作用 6 時間後	長時間波作用
水平床 （覆砂なし）	C-I	24 cm（5 cm）	22 cm 38 cm	420 Pa	81.0%	1.5 s 1.9 s	波Ⅰ（16 cm, 6 時間）→波Ⅱ（24.5 cm, 6 時間）	無し	波作用の履歴あり
	C-II	24 cm（5 cm）	38 cm	295 Pa	79.0%	1.5 s	波Ⅰ（22 cm, 20 分）	2, 3 分後	柔らかい地盤
	C-III	24 cm（10 cm）	22 cm	400 Pa	83.0%	1.5 s	波Ⅰ（15 cm, 6 時間）	無し	覆砂厚：+5 cm
	C-IV	34 cm（5 cm）		483 Pa	83.0%	1.5 s	波Ⅰ（17.5 cm, 10 分）	2, 3 分後	浚渫土層厚：+10 cm
斜面床 （覆砂あり）	D-I	17 cm（5 cm）	34 cm	330 Pa	76.5%	1.5 s	波Ⅰ（10.4 cm, 45 時間）	2, 3 分後	柔らかい地盤

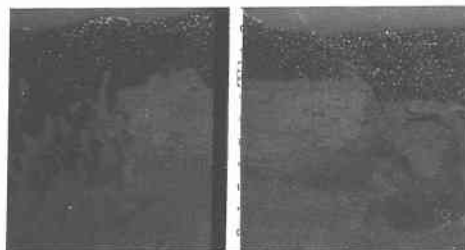


写真-1 溶け出しと変色している地盤模様

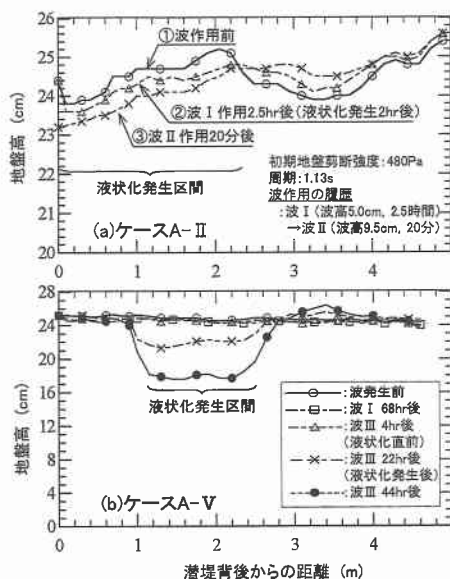


図-2 波作用による地形変化

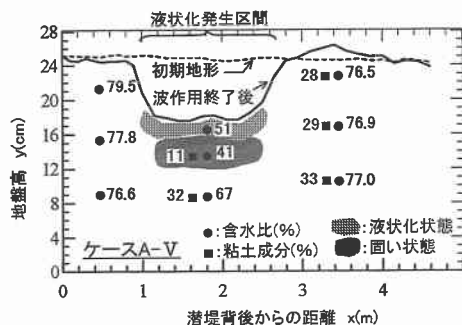


図-3 波作用終了後の地盤状況と含水比および粘土成分(波作用前:含水比80.4%,粘土成分36%)

(3) 波作用による剪断強度の変化

図-4は、図-2(b)と同じケース(A-V)について、波作用に伴う地盤の剪断強度の時間変化を示したものである。表層から4cm下の層を対象にしており、液状化が発生した区間の平均値である。連続して作用させた3種類の波によって、いずれも強度が一度低下してから再び

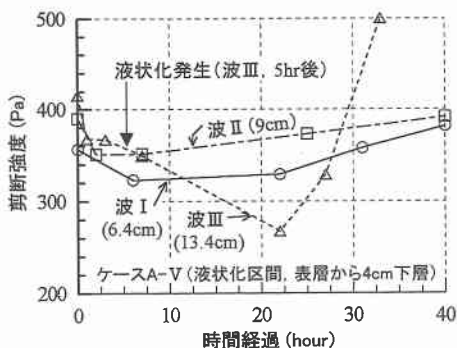
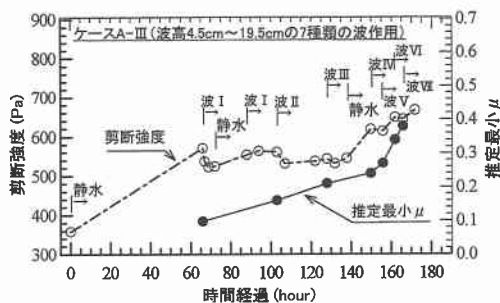


図-4 波作用の伴う地盤の剪断強度

図-5 波作用の履歴による剪断強度と推定最小 μ の変化(ケース A-III)

増加してほぼ一定になる傾向が認められる。波作用による強度の低下は、液状化発生前の2種類の波(波高6.4 cmと9 cm)では約1割程度であり、再び増加するまでの時間は波作用の履歴を受けた2番目の波の場合が短くなっている。3番目の波では、低下した強度が上がらず、剪断強度が大きく低下(260 Paまで、液状化)しており、その後締め固まる現象によって、波作用終了後は約3000 Pa程度まで大きく上昇した。1番目や2番目の波の場合のように、強度が一度増加した地盤は、これまで作用した波よりある程度大きくしない限り液状化は発生しなく、安定な地盤になる。こうした現象は、波作用による地盤の動きからも確認されている。

このような剪断強度の増加に大きく寄与するのは、前述したように、波作用による粘土成分の溶け出しと圧密であり、間隙水圧の上昇にともなう間隙水の排水によって生じる。土質力学的にも、繰り返す荷重による地盤強度の低下に対する研究が活発に行われている(山崎ら, 1991)が、主に非排水条件下で行われており、再び増加する強度に対する研究は数少ない(Matuiら, 1980)。人工干潟においては、地盤強度の特徴的な変化に着目する必要がある。

(4) 波作用の履歴効果と地盤の安定性

図-5は、剪断強度と推定最小 μ の時間変化を示した

のもので、波高を4.5 cmから19.5 cmまでの7種類に変えて波を作用させたケース(A-III)である。右軸の推定最小 μ については後述する。

粘土の固まる性質によって静水状態で大きくなった剪断強度は、波作用によって一度低下(1割ほど)するが、地盤が液状化しない範囲で波を徐々に大きくしていくと地盤強度が増加していく。初期剪断強度がほぼ同じケースA-Iでは波高10 cmの波によって液状化した地盤が、このケースでは波高20 cmでも液状化が発生していない。

土田・五明(1999)は、波作用による地盤の円弧すべりを想定し、底泥層にすべりが発生する限界剪断強度(動的強度)の試算式を誘導している。この動的強度の静的剪断強度(ペーン剪断試験などで測定した強度)に対する比 μ を適切に設定し、底泥の耐波安定性を評価しており、東京湾の底泥の場合 $\mu=0.1$ が適切としている。

本研究で比較的波作用の履歴が少ない状態で液状化が発生した場合(ケースA-IとケースA-II)には、 $\mu=0.1$ に設定すると不安定(液状化)と判定される。しかしながら、波作用の履歴を十分受けて安定強度が大きくなったケース(A-III)について $\mu=0.1$ を設定すると全ての波に対して不安定となり、実際とは異なる判定となる。すなわち、静的剪断強度に同じ $\mu=0.1$ を乗じたのでは、履歴を受けた地盤の強度は判定できないと思われ、安定と判定できるよう μ 値を大きくする必要がある。図-5には、実験結果から推定最小の μ 値を計算して示しているが、 μ は初期値に比べて4倍も大きくなっており、波の作用によって次第に地盤強度が大きくなっていることが分かる。さらに言えば、単に剪断強度だけでは履歴を受けた浚渫土地盤の強度増加を表すことができない。

(5) 浚渫土層厚の効果

表-1に示しているように、地盤厚さを36 cmにしたケースA-IVでは、波高6.3 cmの波によって地盤が液状化しており、地盤厚さを24 cmにしたケースA-Vより小さい波高で液状化が発生している。これは、地盤が厚い

ほど波作用による地盤の動きが大きくなるためであり、ケースA-IVの場合の地盤動きがケースA-Vに比べて3割ほど大きいことが確認されている。覆砂した場合も、ケースC-IとケースC-IVの比較より、同様な現象が現われている。したがって、実験では現地の浚渫土を用いていることと、現地の方が比較的厚い地盤になることを考え合わせると、現地ではより液状化し易いと思われる。

4. 斜面床の実験結果

図-6は、斜面床の場合の波作用による地形変化を示したもので、波高6.1 cmと11 cmの波を作用させたケースB-IIである。このケースでは波高6.1 cmの波を1.5時間作用させたとき、砕波点(潜堤背後から7 m地点)を中心に液状化が発生した。その後、液状化した地盤による波高減衰によって砕波点が岸側に移動し、8 mから10 m間でさらに液状化が発生し、波高6.1 cmの波作用終了頃には液状化がほとんど終了し、表面付近が締め固まった状態となった。その後、波高11 cmの波によって、液状化の領域が沖側に広がり、図に示す地形となっている。こうした地形は、現地干潟によく似ている。

図中の数字は含水比であり、波作用前の含水比は77%であった。図-3に示した水平床の場合とほぼ同様に、その変化は液状化の発生区間で最も大きく、地形の変化が小さい前面斜面部(区間I)では1、2%とほとんど変化していない。液状化は発生していなかったバーでも含水比が10%程度下がっている。なお、バーでは意外と固くはならず、剪断強度は非液状化区間でほぼ同程度となり、さらに数10時間続けて波を作用させると、液状化区間の後方のバーが崩れて、さらに平坦になる。

図-7は、最初から比較的大きい波高(11.6 cm)の波が作用したケース(B-I)の地形である。このケースでは、図-2(a)の水平床の場合と同様に、液状化の発生が早く沖側に流動し長さ6 mに渡って平坦になっている。

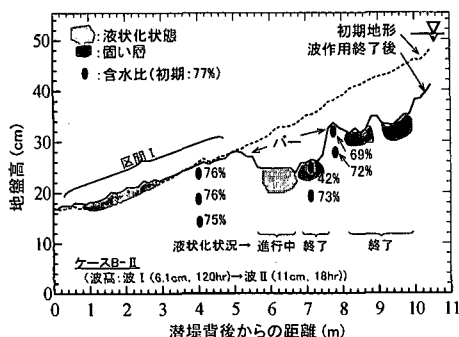


図-6 斜面床の場合の地形変化(ケースB-II)

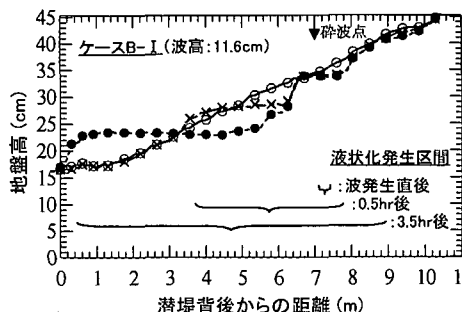


図-7 液状化発生による地形変化(ケースB-I)

5. 覆砂した場合の実験結果

写真-2は、浚渫土上に覆砂した場合の地盤の様子を示すものである。波作用によって浚渫土層が液状化し地盤が崩壊している。このケース(C-II)では、地盤強度が比較的弱い浚渫土層上に砂を厚さ5cmほど被覆しており、作用波の波高が22cmと大きくなっている。

(a)は波作用5分後で、浚渫土が液状化して被覆砂層を通して水中に吸い出されており、(b)は波作用10分後で、浚渫土の吸出しが続くとともに、砂層の一部が落込んでいる。吸い出された浚渫土は砂層上を覆うが、波作用が続くとそのほとんどが流されてしまう。なお、波作用終了後、浚渫土層が砂層を通して噴出したような跡(亀裂)も確認されている。

図-8は、地盤が崩壊しなかったケース(C-I)における地形変化を示したものである。このケースでは初期地盤強度が写真-2のケース(C-II)より大きく、最初に作用させた波高も16cm(周期1.5s)と小さい。図には浚渫土層と砂層の地盤高を同時に示している。浚渫土層の地盤高を見ると、砂層が堆積している区間で沈下し、洗掘されている区間で上昇している。しかしながら、地盤の液状化による崩壊は発生していない。このケースでは、波高16cmの6時間作用後、さらに波高24cm(水深38.2cm, 周期1.9s)の波を作用させたが、波の履歴効果によって地盤強度が増加したためと考えられる。なお、被覆することによって地盤の安定性は大きく高まるが、浚渫土層が液状化しない場合でも、浚渫土層は砂層の変動に連動して変化する傾向があることが分かっている。

覆砂した斜面床(ケースD-I)では、覆砂しなかったケースと同様に、砕波帯を中心に浚渫土層が液状化する場合が多く、地盤の崩壊過程は覆砂した水平床の場合とほぼ同様である。

6. 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 比較的小さな波によっても地盤が動き、粘土成分の溶け出しが生じ、地盤の安定強度を高める。
- ② 地盤が液状化すると地盤が大きく動き、粘土や細粒成分が多量に流失し地形変化が大きくなり、地盤表面付近がかなり固い層に変わる。
- ③ 波作用の履歴を適切に与えることにより、地盤の安定強度が増加する。
- ④ 斜面床の場合は、砕波帯付近で液状化する場合が多く、液状化した場所は長時間の波作用によって地盤が釜状に掘れる。
- ⑤ 浚渫土層上に砂を被覆した場合、基本的に地盤の

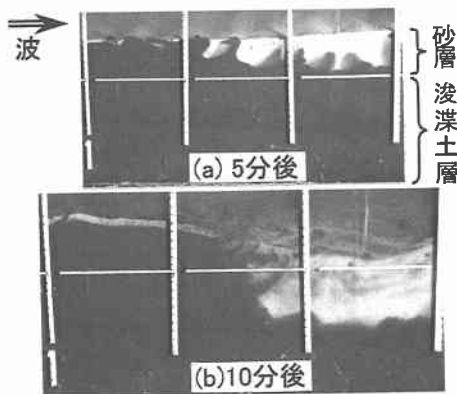


写真-2 液状化発生による覆砂地盤の崩壊

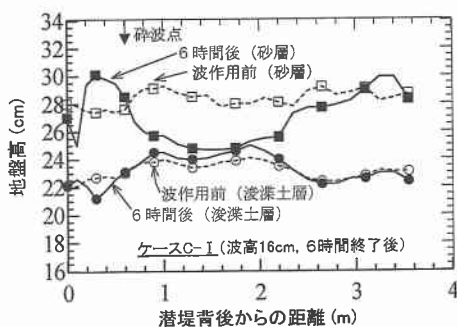


図-8 地盤崩壊が生じなかった場合の地形変化

安定性は大きく高まるが、浚渫土層に液状化が発生すると砂層が崩壊し地形が大きく変化することがある。

今後、浚渫土地盤の波作用による液状化のメカニズムや履歴効果による強度変化などについてさらに検討する予定である。なお、本研究の遂行にあたり運輸省第五港湾建設局名古屋港湾工事事務所の多大なご協力を得ており、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.
- 沈 道頭・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃(1993): 波による底泥の質量輸送および底泥の地形変化について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 356-360.
- 土田 孝・五明美智雄(1999): 波による水圧変動に対する底泥層の安定について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 596-600.
- 山崎浩之・善 功企・加賀谷宏基・館下 徹(1991): 繰り返し載荷を受ける粘土の強度・変形特性, 港研報告, 第30巻, 4号, pp. 65-83.
- Matui, T, H. Ohara and T. Ito (1980): Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. 3, pp. 1101-1120.