

波浪による一次元水圧変動下のアマモ場海底地盤の安定性

土田 孝¹・浅海綾一²・一井康二³

アマモ場は水産・環境保全の観点から重要な資源である。しかし、人工的に造成したアマモ場において、アマモが台風時に根ごとそっくり抜ける被災例が報告されている。この原因として、波浪による水圧変動で地盤が液状化した可能性が考えられるが、アマモが生育するような細粒分を含む地盤における波浪による液状化の影響を検討した事例は少ない。本研究では、アマモ場を想定した模型地盤を作成し、細粒分を含んだ地盤の水圧変動下での液状化に対する安定性と水圧変動下でのアマモの引き抜き抵抗を調べた。その結果、一次元水圧変動下において、表層地盤の液状化が起こること、アマモ模型の引き抜き抵抗が減少することを実験により明らかにした。

1. はじめに

海藻や海草が繁茂している場所を一般的に藻場と呼ぶ。藻場には、様々な機能があり、生物生産・水質浄化・底質の安定化などに重要な役割を果たしている。藻場の中でもアマモは浅海砂泥域に生息し、種子と地下茎で増える海草である。その群集であるアマモ場は、水産生物の産卵場や幼稚仔の保護育成の場であり、成体の摂餌や生育場としての機能、あるいは海域の浄化機能を有するなど、水産面ばかりでなく環境保全の観点から重要な資源とされている(国土交通省港湾局, 2003)。アマモ場は沿岸の開発やそれによる海洋環境の変化によって消失が著しく、各地でアマモ場の再生が試みられている。しかし、自然環境の中で安定したアマモ場を造成するための技術はまだ十分確立していないと考えられ、造成したアマモ場の台風による被害が報告されている(平岡, 2000)。

平成 16 年 9 月の台風 18 号では、岩国港内に人工的に造成したアマモ場のアマモが大量に消失した。藻場が消失した場所を見ると、根ごとそっくり無くなっている場所と地下茎と根を残して無くなっている場所があった。アマモの地下茎は海底地盤の深さ 5 cm 程度に位置しており、アマモ場が根ごとそっくり移動した現象には、地盤の不安定が原因となった可能性が考えられる。

善ら(1987)は、台風等の強波浪により地盤に作用する一次元的な水圧変動によって砂地盤が周期的に液状化(不安定化)と高密度化を繰り返すことを室内実験と現地観測で明らかにしている。ただし、この現象は細粒分を含まない砂地盤について調べたものであり、アマモが生育するような細粒分を含む砂質土地盤の波による液状

化に対する安定性はあまり研究されていない。

強波浪時によりアマモが根から抜けるという被害は、波浪により地盤が液状化(不安定化)し、支持力を失ったことが原因の一つである可能性がある。本研究では、一次元水圧変動を载荷して、細粒分を含む砂質土地盤の波による液状化に対する安定性を検討した。さらに、地盤にアマモの模型および実際のアマモを植え、水圧変動を加えながら引き抜きを行い、引き抜き抵抗力を測定した。

2. 細粒分を含む砂地盤の一次元水圧変動作用下での安定性

図-1 に示すような水圧変動型液状化装置を用いて、水深 5 m を想定した模型地盤に一次元水圧変動を与え、地盤内の水圧変動を測定し、細粒分を含む海底地盤の波による液状化に対する安定性を検討した。本装置は、①試料を詰めるアクリル円筒部、②変動水圧载荷・制御部、③間隙水圧計測部から構成され、アクリル円筒部は、内径 210 mm、外径 230 mm、高さ 100 および 200 mm のものを積み上げている。間隙水圧の計測は、各アクリル円筒リングの中央側壁に設けられている間隙水圧計により行った。

試料は、五号珪砂に碎石粉を混ぜ、細粒分含有率 0, 5, 10, 20 % に調整したものの 4 ケースを用いた。表-1

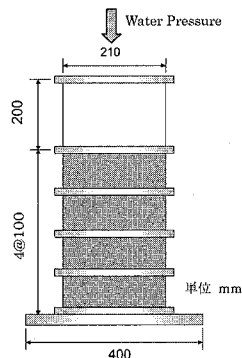


図-1 水圧変動型液状化装置

- | | | |
|---------|--------|------------------------|
| 1 正 会 員 | 工学博士 | 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 2 学生会員 | | 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 3 正 会 員 | 博士(工学) | 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 |

に試料の物理特性を示す。

表-2 に示すように模型地盤の初期相対密度は 80 % とし、試料の細粒分含有率、波浪条件、海底地盤の層厚をパラメタとし、各パラメタが波による液状化に及ぼす影響を検討した。水圧の条件としては、水深 5 m にある地盤を想定して静水圧として地盤表面に 49.0 kN/m^2 の水圧を加え、変動水圧として波高 1 m (両振幅 9.8 kN/m^2)、2 m (19.6 kN/m^2) の正弦波形を用いた。

表-1 試料の物理特性

	試料の細粒分含有率			
	0 % (5 号洗砂)	5 %	10 %	20 %
比重	2.674	2.682	2.661	2.686
最大間隙比	1.115	1.030	0.987	0.997
最小間隙比	0.713	0.594	0.518	0.416

表-2 実験条件性

地盤層厚	両振幅 (kN/m^2)	周期	相対密度	備考
20 cm	9.8 kN/m^2	2.4, 6 s	80 %	$H/L \approx 0.07$
	19.6 kN/m^2	4, 6 s		
40 cm	9.8 kN/m^2	2.4, 6 s	80 %	$H/L \approx 0.07$
	19.6 kN/m^2	4, 6 s		
60 cm	9.8 kN/m^2	2.4, 6 s	80 %	$H/L \approx 0.07$
	19.6 kN/m^2	4, 6 s		

実験の開始とともに地盤中の水圧は地盤表面の水圧変動から少し遅れて伝達され変動する。ここでは、水圧変動が安定した時点の 1 波分の記録から分析を行った。

図-2 は試料による透水性が液状化に及ぼす影響を見るため、波高 2 m、周期 4 s、地盤高 20 cm の時を例にして、周期的な水圧変動が安定した状態における地盤内過剰間隙水圧分布を位相ごとに表したものである。図のように、位相が 180° から 300° の付近、すなわち、波が谷に向かって水圧が減少する過程において過剰間隙水圧が有効土被り圧 σ' に近づき部分的にはそれを上回って液状化が発生していることがわかる。

細粒分含有率が液状化に及ぼす影響を見るため、波高 2 m、周期 6 s、地盤高 20 cm の条件において、最大の過剰間隙水圧が発生する位相での間隙水圧分布を図-3 に示した。図では有効土被り圧よりも右側の範囲で液状化が生じていることになるが、細粒分含有率の増加によって液状化しやすくなっていることが分かる。これは透水性の低下により、間隙水圧変動の深さ方向の減衰と位相差が大きくなったためだと考えられる。

図-4 は波高、地盤層厚の違いが液状化に及ぼす影響を見るため、細粒分含有率 10 %、周期 6 s の条件において、有効土被り圧 σ' に対する最大過剰間隙水圧の比を、深度方向に比較した。この比が 1 を超えた領域において

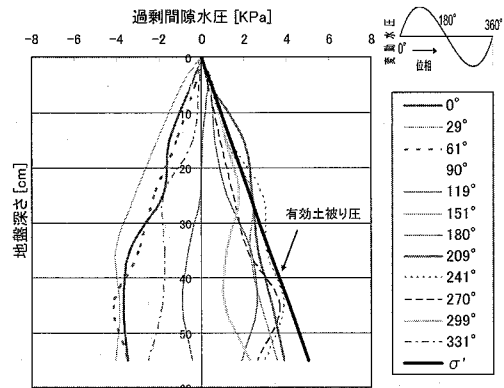


図-2 水圧変動の各位相における地盤内の過剰間隙水圧分布の例 (細粒分含有率 20%, 地盤層厚 60 cm, 波高 1 m, 周期 4 sec)

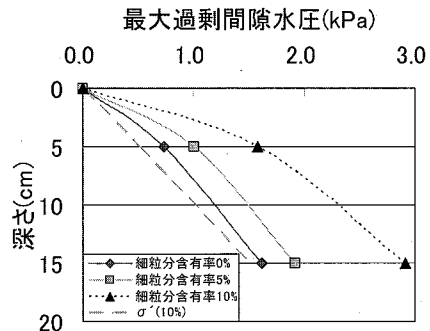


図-3 最大過剰間隙水圧の分布

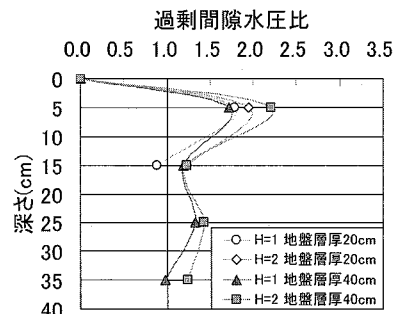


図-4 最大過剰間隙水圧の分布

液状化が発生していることになる。この図から、波高および地盤層厚が大きいほど液状化が発生しやすく、液状化範囲が広いという結果が得られた。

3. 一次元水圧変動下のアマモ場の安定性

一次元水圧変動下で海底地盤表層に液状化が発生すれば、表層付近の浅い根で支持されているアマモが不安定化する可能性がある。そこで、図-5 に示す水圧変動型液状化装置を用いて、一次元水圧変動作用下でのアマモ

の引き抜き実験を行い、水圧変動の有無による引き抜き抵抗の変化を検討した。

実際のアマモには個体差があるため、アマモを模擬した模型（図-6）を作成し、地盤に埋めこんだ後一定速度で引き抜き、引き抜き抵抗のピークを計測した。図-7 に変動水圧の有無による引き抜き抵抗の差を示す。連続して実験を行うためアマモ模型は表層地盤を掘り起こして埋め込んでおり、実験の繰返しの影響で結果がばらついているが、いずれの地盤条件でも変動水圧の有無により引き抜き抵抗に約 1.96 N (200 gf) の差が生じている。

図-8 は、水圧変動の有無による実アマモの引き抜き抵抗を比較した結果である。ただし、模型地盤の土試料としては珪砂と粘土を混ぜて細粒分含有率 20% に調整したものを用いた。図のように実アマモの引き抜き抵抗は模型アマモと同程度であるが、個体差があることや、植えてからの養生条件にも影響されるため、水圧変動の影響を明確に評価することができなかった。

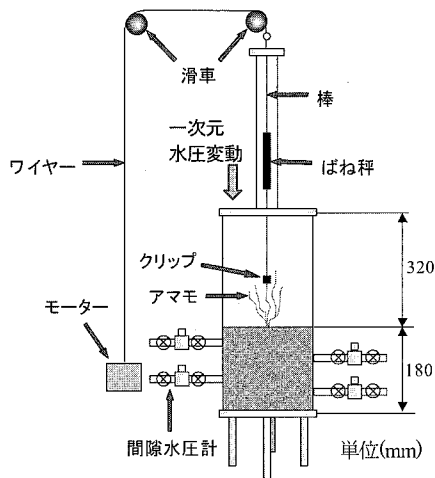
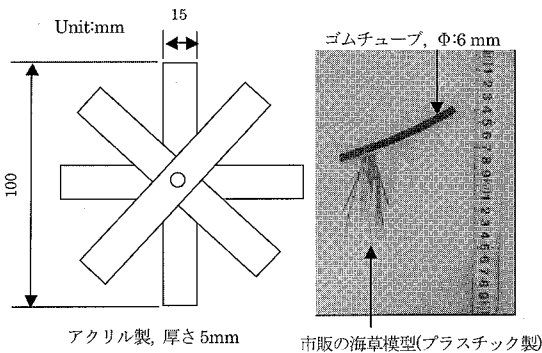


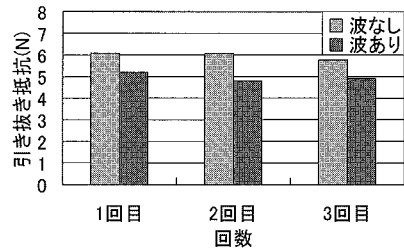
図-5 一次元変動水圧化でのアマモの引き抜き実験装置



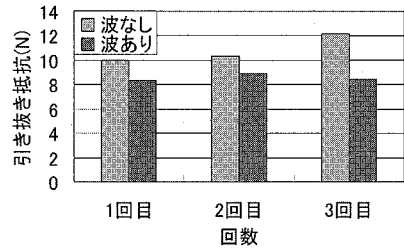
(a) 模型 A

(b) 模型 B

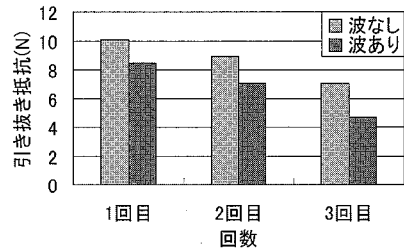
図-6 実験に用いたアマモ模型



(a) 模型 A : 細粒分 5%



(b) 模型 A : 細粒分 10%



(c) 模型 B : 細粒分 20%

図-7 水圧変動の有無によるアマモの引き抜き抵抗の変化

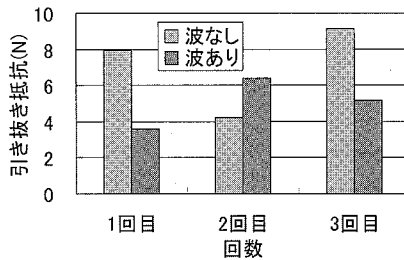
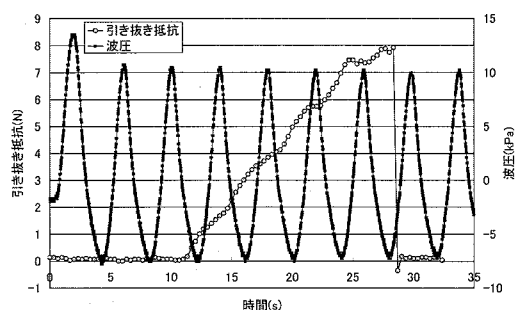


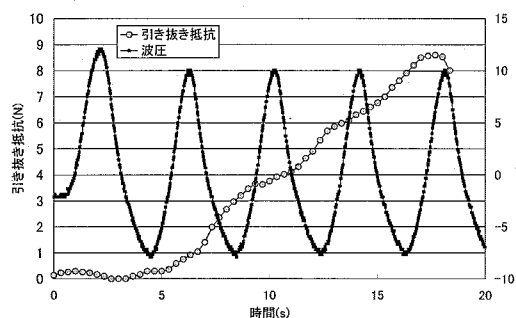
図-8 実アマモの引き抜き抵抗の変化

図-9 は、引き抜き試験中の引き抜き抵抗と地盤表面に作用する波圧変動を示している。図をみると、一定の速度で引き抜きを行っているため引き抜き抵抗は時間とともに増加しているが、波圧の周期とほぼ等しい周期で変動が見られる。図-10 は地盤をバネと考え、各時間に測定した変位と引き抜き抵抗からバネ定数を計算してその変化を示している。図をみると (a) と (b) のアマモ模型では水圧上昇過程でバネ定数が低下し、水圧下降過程でバネ定数が増加する傾向がある。実アマモの場合であ

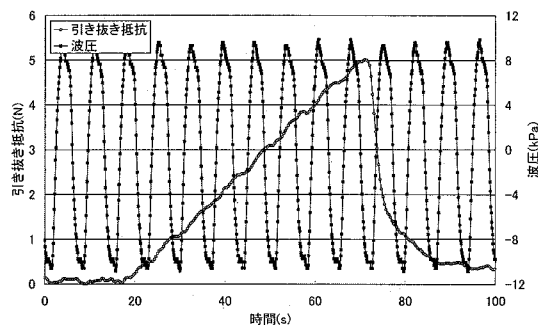
る(c)の場合は、水圧の上昇と下降にやや遅れてバネ定数の上昇と下降が起こっている。引き抜き抵抗の変化が、水圧変動による地盤表層の液状化であるとすると、液状化は水圧下降過程(位相 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$)で顕著に発生し、水圧上昇過程では地盤の有効応力は増加する。したがって、(c)のようなバネ定数の変化がこれに対応している。しかし、今回の実験結果を分析すると、(a)や(b)はこのパターンに当てはまらず、十分説明ができないケースが見られた。このような結果の一因として、今回の実験ではバネばかりを用いて引き抜き抵抗を測定したため、バネの変形によって応答に時間遅れがでたことが考えられる。



(a)アマモ模型 A (細粒分 10%, 周期 4秒)

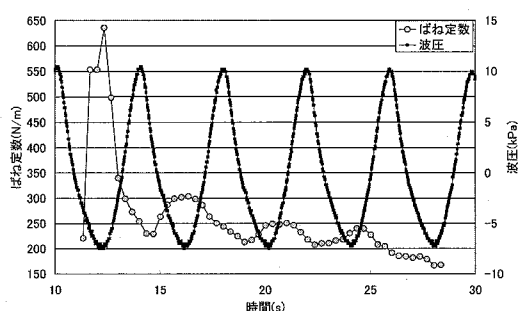


(b)アマモ模型 A (細粒分 10%, 周期 6秒)

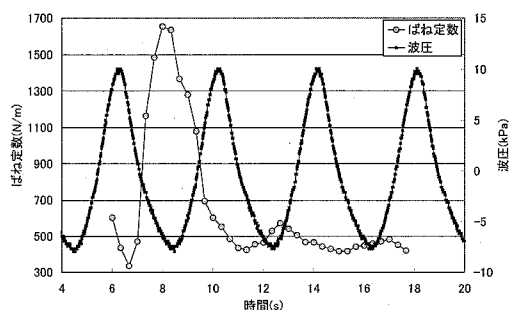


(c)実アマモ (細粒分 20%, 周期 7秒)

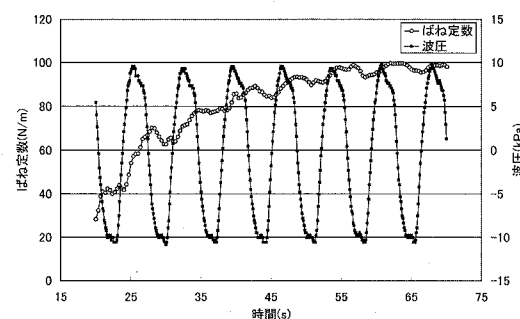
図-9 引き抜き中の波圧変動と引き抜き抵抗



(a)アマモ模型 A (細粒分 10%, 周期 4秒)



(b)アマモ模型 A (細粒分 10%, 周期 6秒)



(c)実アマモ (細粒分 20%, 周期 7秒)

図-10 引き抜き中の波圧変動とばね定数

4. アマモの引き抜き抵抗予測式

アマモの引き抜き抵抗の予測式を検討するため、模型 A を用い、地盤の細粒分含有率を変えて変動水圧下における同様の引き抜き試験を行った。ベーンせん断試験により求めた地盤のせん断抵抗から引き抜き抵抗を予測し、アマモ模型の引き抜き抵抗と比較した。

図-12に示すように、ばらつきが大きいものの細粒分含有率が増加するほど地盤のせん断強度が増加し、アマモの引き抜き抵抗が増加している。これは、細粒分による粘着力の影響が考えられる。また、変動水圧の有無による引き抜き抵抗の変化は概ね 1.96 N (200 gf)であった。

引き抜き抵抗に起因するものとして、図-11 に示すように模型に上載している試料の水中重量 W 、試料のせん断抵抗 τ が考えられる。水圧は等方的にかかっているとして無視すると、引き抜き抵抗 F は、

$$F = W + \tau \dots\dots\dots (1)$$

で表される。

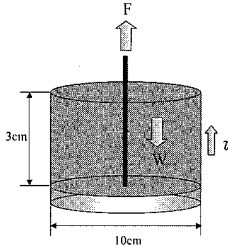


図-11 引き抜き抵抗の考え方

ここで、せん断抵抗について考える。地盤表面でのせん断強度が 0 g/cm^2 で深さ 5 cm まで直線的にせん断強度が増加すると仮定する。すると、深さ z でのせん断強度 $[\text{g/cm}^2]$ は、深さ 5 cm でのせん断強度を $\tau_b [\text{g/cm}^2]$ とすると、次式で表される。

$$\tau_z = \frac{\tau_b}{5} \cdot z \dots\dots\dots (2)$$

よって、模型に上載している厚さ 3 cm の土塊の側面にかかるせん断抵抗は、

$$\tau = \int_0^3 2\pi r \cdot \tau_z dz \quad (r: \text{円盤の半径}) \dots\dots\dots (3)$$

となる。

したがって、式 (1) は、以下のように変形できる。

$$F = W + 9\pi \cdot \tau \dots\dots\dots (4)$$

この式を用いて引き抜き抵抗を算出し、実際の引き抜き抵抗と比較したものを図-13 に示す。この図をみると、アマモの模型の引き抜き抵抗は上式の予測よりもかなり小さかった。

ここで、波がある場合の引き抜き抵抗の減少について考えてみる。引き抜き抵抗に差異が見られた細粒分含有率 $5, 10\%$ の場合を考えると、液状化が発生している場

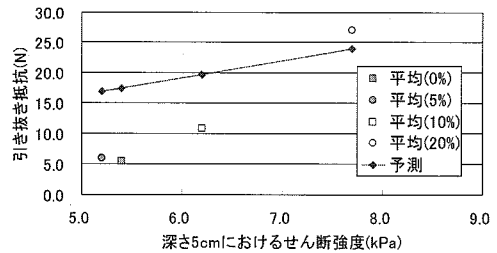


図-13 引き抜き抵抗の予測と実際

合の深さ 5 cm での最大過剰間隙水圧は、有効土被り圧を $0.1 \sim 0.3 \text{ kPa}$ 程度上回っている。この過剰間隙水圧が上向きの浸透水圧となっていると考え、直径 10 cm の円盤に加わる上向きの力は $0.78 \sim 2.35 \text{ N}$ ($80 \sim 240 \text{ gf}$) となる。変動水圧載荷の有無で引き抜き抵抗の差異は、 $0.98 \sim 1.96 \text{ N}$ ($100 \sim 200 \text{ gf}$) であることから、実験結果とほぼ一致している。引き抜き抵抗の予測式については今後さらに検討を行う必要がある。

5. 結 論

台風時にアマモ場が消失した原因として波による地盤の液状化を想定し、細粒分を含んだ砂地盤の一次元水圧変動下での液状化に対する安定性と水圧変動下でのアマモの引き抜き抵抗を調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 一次元水圧変動下で細粒分を含む砂地盤の表層（深さ 5 cm 付近）で液状化が発生する。また、この一次元水圧変動下では、模型アマモの引き抜き抵抗は変動水圧が無いときよりも小さい。
- (2) 一次元水圧変動下でアマモを引き抜く場合、地盤のバネ定数は水圧と同様の周期で変動する。しかし、水圧とバネ定数の変動の関係は実験条件によって変化し、関連づけるには今後さらに検討が必要である。
- (3) 海底地盤に含まれる細粒分は、液状化を起こしやすくするが、粘着力によりアマモの引き抜き抵抗を増加させる要因でもある。引き抜き抵抗の予測においては地盤の粘着力と地盤内間隙水圧を考慮する必要がある。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（課題番号：16760411）の助成によるものであり、ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 国土交通省港湾局 (2003)：海の自然再生ハンドブック—その計画・技術・実践—第三巻藻場編，pp. 1-110。
- 善功企・山崎浩之・渡辺篤 (1987)：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，港湾技術研究所報告 第26巻第4号，pp. 125-180。
- 平岡喜代典・高橋和徳・中原敏雄・寺脇利信・岡田光正 (2000)：移植実験によるアマモの生育制限要因の検討，環境科学会誌，13，pp. 391-396。

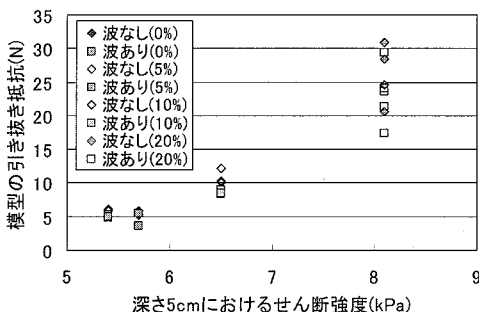


図-12 地盤のせん断強度とアマモの引き抜き抵抗