

平成１７年度（財）港湾空港建設技術サービスセンター
研究開発助成報告書

助成番号　：平成１８年１月１６日付第０５—４号

研究開発項目：（６）建設副産物のリサイクルに関するもの

浚渫泥土を活用した人工藻場造成技術に関する研究

平成１９年４月３０日

広島大学大学院工学研究科

土田　孝

目 次

1 . 研究の背景と目的 -----	1
2 . アマモ場の造成に関する既往の研究 -----	2
2.1 藻場の機能とアマモの性質 -----	2
2.2 藻場の造成と強波浪による被災事例 -----	4
2.3 波浪による海底地盤の液状化 -----	6
2.4 波による水圧変動に対する造粒石炭灰の安定性 -----	12
2.5 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究 -----	13
3 . 細粒分を含んだ地盤の浪による液状化に対する安定性 -----	17
3.1 概要 -----	17
3.2 実験装置および実験方法 -----	17
3.3 実験結果と考察 -----	21
3.4 3章のまとめ -----	30
4 . 一次元水圧変動下でのアマモ場の安定性 -----	31
4.1 概要 -----	31
4.2 実験装置および実験方法 -----	31
4.3 細粒分を含む砂質土地盤におけるアマモ模型の引き抜き抵抗 -----	36
4.4 粘土を含む砂質土地盤におけるアマモ模型の引き抜き抵抗 -----	40
4.5 波圧変動と引き抜き抵抗の関係 -----	45
4.6 波浪条件の違いによる実際のアマモの引き抜き抵抗の変化 -----	49
4.7 地盤強度に基づく引き抜き抵抗の推定式 -----	53
4.8 4章のまとめ -----	56
5 . 波浪による水圧変動をうける 砂質土地盤からの細粒分の流出に関する研究 -----	57
5.1 はじめに -----	57
5.2 一次元水圧変動下における地盤内細粒分の上方移動と抜け出し -----	57
5.3 地盤内飽和度が細粒分流出に与える影響 -----	61
5.4 振動による液状化が細粒分流出に与える影響 -----	63
5.5 5章のまとめ -----	65
6 . 結論 -----	66
参考文献 -----	68

1．研究の背景と目的

海水中で海藻や海草が繁茂している藻場は、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。アマモは水深 1 ～ 4 m の浅海における砂泥層に生息し種子と地下茎で増加する海藻である。アマモが生息する場（アマモ場）は水産生物の産卵・生息の場としての機能や、海域の浄化機能などの機能を有するため、沿岸域の環境再生や水産資源の回復の観点から、各地でアマモ場の造成が試みられている。一方、港湾整備では地盤改良や航路維持のため定常的に浚渫土が発生しており、その多くは廃棄物処分場に埋立処分されている。近年、多くの港湾で処分場残容量の不足が問題となっており、特に埋立が制約される瀬戸内海沿岸では浚渫泥土の有効利用が強く求められている。

一般にアマモの生息に適した地盤は細粒分が混合した砂質地盤（細粒分含有率 30% 以下）とされており、浚渫土を活用してアマモ場を造成する場合は、砂と浚渫土を混合した砂質層で覆土する必要がある。これまで人工的に造成したアマモ場の例をみると、一時的に藻場が回復するものの永続的に維持できず、さらに台風などの強い波浪によって底質が洗掘され地下茎が流失するケースが多く報告されている。

海底の砂地盤に大きな波浪が作用すると波による液状化が発生し、表層地盤が不安定化して漂砂や洗掘、消波ブロックの沈下が発生することが知られており、アマモ場が強波浪時に洗掘され流出する現象も同様のメカニズムが起こっている可能性がある。そこで、本研究は、本研究では一次元水圧変動を載荷して、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、細粒分を含む砂質土地盤にアマモの模型および実際のアマモを植え、波を載荷しながら引き抜きを行い、引き抜き抵抗を測定、波浪時のアマモ場における海底地盤の安定性について検討した。これらの結果より、細粒分を含む砂質地盤の波浪時の安定性を明らかにし、砂と浚渫土との配合、覆砂厚さなど地盤工学の観点から藻場造成時の対策について検討を行った。

2．アマモ場の造成に関する既往の研究

2.1 藻場の機能とアマモの性質⁴⁾

(1)藻場の機能

沿岸の浅海域において太陽光が届く範囲の砂泥質の海底にはアマモ類の海草が濃密に育成している場所がある．このような群落を一般的にアマモ藻場と呼ぶ．沿岸域のアマモ藻場の機能として以下のものがある．

基礎生産

浅海域の生物の基礎生産者としての藻場は重要な役割を果たしている．特に，アマモなどの海草類は一年を通して生長し，植物体の生育速度も速いためアマモ場では，温帯の広葉樹林以上，熱帯性海草藻場では熱帯雨林に匹敵する生物生産速度を持つといわれている．

食物連鎖による消費者の維持

藻場における枯れた植物体が細菌等によって最終的に無機物にまで分解され，より高次の消費者の餌料として利用される．

産卵場および保育場

藻場内は海水の流動や波浪の影響を受けにくい静穏域であるため，魚介類の保育場や産卵場となり利用されることが多い．

摂餌場および隠れ場

魚介類は，藻場を摂餌場所や隠れ場として利用するため，藻場内や周辺海域が良い漁場となる場合がある．

環境の安定化

アマモなどの海草類は海底地盤の表面に地下茎を張り巡らすため，漂砂を防ぎ海底地盤のを安定化させることに寄与する．特に，熱帯性海草藻場では台風等による波浪によって砂地盤の攪乱を大規模に抑止する効果もあると考えられている．

(2)アマモの性質とアマモの生育条件

アマモは，北半球の温帯域の内湾や沿岸部の水深 1 ～ 数メートルの砂泥域に分布している海草であり，日本各地に分布している。多年生の顕花植物でイネ科と同じ単子葉類の草本であり，節のある長い地下茎とひげ上の根，イネに似た細長い葉を持つ．葉は緑色で，先端はわずかに尖り，葉の長さは 20 ～ 100cm，幅は 3 ～ 5mm である．繁殖方法には 2 通りあり，種子によって増える方法のほか，地下茎を分枝・伸長して新芽を出す方法がある．

アマモの生育条件として以下のものが挙げられる．

海底地盤の水深と光量，勾配



Fig.2.1.1 アマモ場の様子

アマモ場の低潮時に干出しない場所に分布しており、海草群落の基盤の造成（地盤高さの調整）を行う場合には低潮時に干出しない場所が適しているとされている。また、海草の生育にとって十分な水中光量が必要であり、各地のアマモ場で光量の実測されている。また、必要な光量は水温や入射する太陽光も季節によって変動する。

海草群落は海域の水深に応じて帯状に分布しているので、群落の適正な分布範囲を確保するには海底勾配が緩やかである必要がある。天然のアマモ場が分布している場所の勾配条件は、概ね 1/50 程度以下であるとされている⁵⁾。

底質に関する条件

既存の調査結果によると、アマモの生育によい粒度組成はシルト(細粒分)以下が 30%以下、細砂以下が 80～100%の場所であるとされている⁶⁾。また、底質の化学成分として、有機物量(COD)は通常 10mg/ℓ以下、濃生・密生域で 4～8mg/ℓ、強熱減量が通常 5%以下、濃生・密生域で 4.4%以下とされている⁶⁾。

流れに関する条件

形成される底質が波浪や潮流によって移動すると安定した海草群落を形成しにくい。底面の砂面変化が 3cm/月以内の場所がアマモの生育適地であるとされている⁷⁾。また、アマモの種子が発芽するためには底質が適度に移動し種子が埋没する必要があるため、適度な堆積傾向が必要である。一方、成長したアマモの場合、地下茎や芽が露出しない程度までの砂移動（＝海水流動）は生育可能条件であると推定されている⁷⁾。

底質の移動状況を評価する指数としてシールズ数がよく用いられる。シールズ数 Ψ は、波浪や潮流による底面せん断力と、底質粒子の摩擦抵抗との比より計算される無次元指標であり次式で表される。

$$\Psi = \frac{1}{2} \times \frac{\rho_w f u_w^2}{(\rho_s - \rho_w) g d} \quad (1)$$

ここで、 ρ_w ：海水の密度、 ρ_s ：底質の土粒子の密度、 g ：重力加速度、 d ：底質の土粒子の平均粒径、 u_w ：軌道流速振幅、 f ：摩擦係数である。

シールズ数と底質の砂の移動形態を概略的に述べると^{8) 9)}、 $\Psi < 0.1$ 程度では移動せず、 $0.2 < \Psi < 0.5$ 程度で砂レンが形成され、 $\Psi > 0.5 \sim 0.6$ で底質が層状に移動するシートフロー状態になるとされている。海草群落の生育に適した流速は十分に明らかにされていないが、アマモ場が分布する場所における実測値として、山口県柳井湾で 0～13cm/s（平均 0～6cm/s）、岡山県牛窓地先で 3.5～6.5cm/s が示されている⁶⁾。

□水温に関する条件

アマモの地理的分布を決定している要因としては、水温が最も重要とされている。国内のアマモ場の水温は 2 月で 2～16℃、8 月で 16～28℃ であるとの報告がある⁵⁾。また、室内での水槽実験や現地での水温観測結果から、アマモが生育可能な水温として夏季(8 月)の平均水温が 28℃ 以下である必要があり^{7), 10)}、夏季の水温の高い場所ではアマモが越夏することができないとされている。

(3)人工的に造成したアマモ場の移植方法

人工的にアマモ場を造成するさいに、アマモを移植する移植する場合がある。移植方法には主に以下の三種類がある。

栄養株移植⁶⁾

栄養株（植物の栄養生殖を行う株の一つであり、地下茎や葉の一部から次代の幼苗になるもとをつくりだす）の移植には、基質を付けない土なし法と、基質ごと移植する土付き方がある。移植場所の底質に問題が無く、近傍に海草採取可能な藻場が形成されている場合には土なし方を用いる。本手法では、人の手で丁寧に移植するため栄養株の活着が良好になることが特徴である。移植場所の底質に問題があり、かつ移植規模が大きい場合に適しており、作業船や水中機械を用いて実施する。海草の地下茎を乱さずに移植でき、底質や地盤層厚の改良も併せて実施できる。

苗移植⁶⁾

採取したアマモの花枝から種子を取り出し、種苗の生産までを陸上水槽で人工的に行う。ポット等で人工種苗を海底に移植する。

播種¹¹⁾

天然アマモ場から花枝を採取し、種子の採取・管理を陸上の水槽で行い、冬季に直接造成現場で種子を播く。

2.2 藻場の造成と強波浪による被災事例

近年、浅海域におけるアマモ場を人工的に造成あるいは再生することが試みられているが、人工的に造成されたアマモ場のアマモが台風時の強波浪の激しい攪乱により根から大量に抜けるという被害が報告されている。その事例として、山口県岩国市や広島県呉市蒲刈町のアマモ場がある。以下、アマモ場再生の成功例と強波浪時の消失事例を示す。

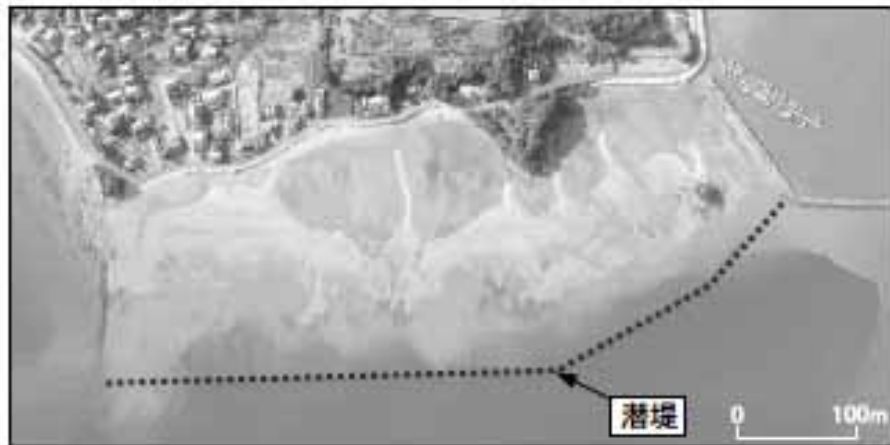
(1)尾道系崎港における干潟・藻場の造成

国土交通省広島港湾工事事務所では、広島県尾道系崎港の航路泊地整備に伴う浚渫土の利用と、アサリ漁場としての干潟の造成を目的として、昭和 59 年から平成 8 年にかけて百島地区、海老地区、灘地区の 3 地区での干潟・藻場造成を行った¹²⁾。

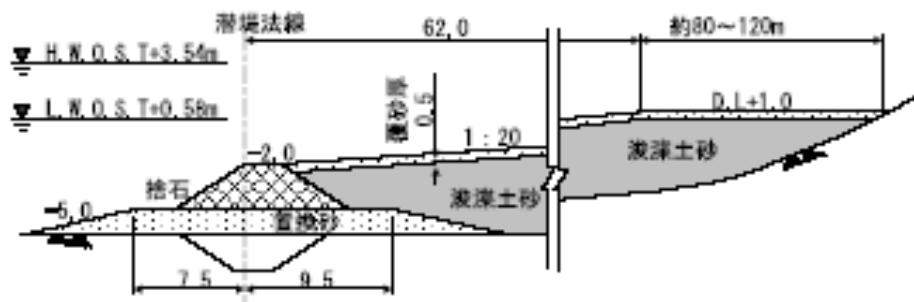
造成された場所は 1 年確率波が 30cm 程度の静穏な海域で、河川からの砂の供給は無い。海岸沿いは急深の砂浜で、その沖合の底質はシルト質であり、水産的には未利用の場所であった。そこに沖合 200m に雑石で潜堤を築造し、浚渫土を投入した後に、50cm の厚さで覆砂を行った。また、造成前には周辺にアマモ場があったため、干潟造成後の 1～3 年後にアマモを移植した。

造成後のモニタリング調査によると、造成した干潟で自然干潟とほぼ同様の生物の多様性がみられている。移植したアマモは、当初、造成地盤の圧密沈下や波浪による侵食等の影響を受けてこともありほとんど定着しなかった。しかし、沈下や侵食などの地形変化が終息し、底質や勾配が安定化した頃から、急速に自然のアマモ植生が広がり、平成 14 年度には海老地区と百島地区を合わせて 8ha を超えるアマモ場が確認された。このように、造成した干潟においても、地形が安定化するなどの条件が整うことにより、アマモが定着

拡大し、藻場が再生されている。



(a) 平面形状



(b) 断面形状

Fig.2.2.1 尾道系崎港海老地区人工干潟・藻場の平面形状と断面形状¹³⁾

(2)山口県岩国飛行場周辺における人工アマモ場の消失事例¹⁵⁾

山口県岩国飛行場では滑走路移転工事にともなう藻場・干潟の回復事業を実施しており、継続的に藻場の監視が実施されてきた。この間、平成 16 年 9 月 7 日に襲来した台風 18 号によりアマモが大量に消失するという被害が報告されている。Fig.2.2.2 はその地点の地図と藻場の監視測線である。

平成 9 年 6 月のアマモの分布幅を 1 として、Fig.2.2.3 にアマモ分布の変化を示す。対照側線 Z-1 におけるアマモ分布幅は、平成 16 年 8 月までは 0.8~1.4 の範囲で変動しており、また監視側線 Z-2~3 の分布幅についても概ね 1 前後で推移していた。しかしながら、平成 16 年 9 月 7 日の台風 18 号の襲来以降、いずれの測線においてもアマモが確認できなかった。なお、平成 16 年 12 月以降は、種子から発芽して生長したアマモが出現することによる回復を示している。



Fig.2.2.2 藻場監視側線（岩国飛行場）

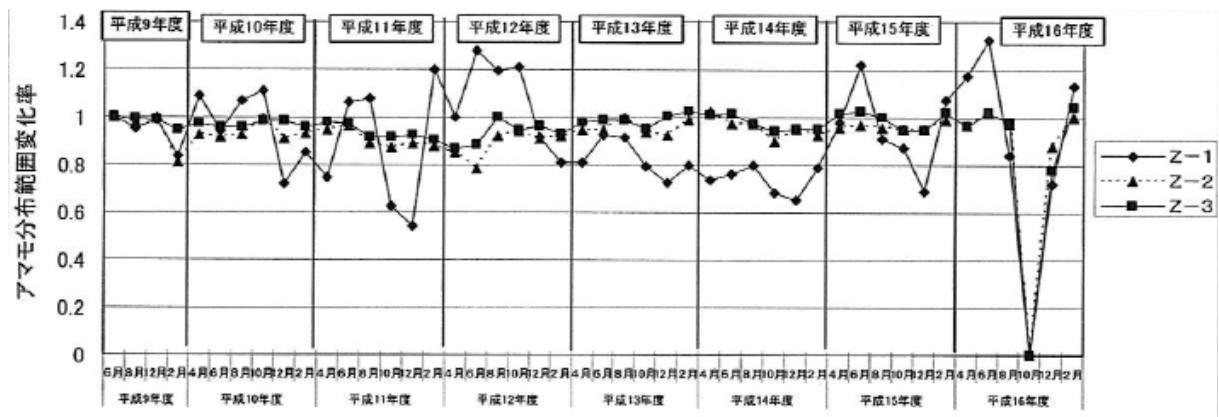


Fig.2.2.3 アマモの分布幅の変化

2.3 波浪による海底地盤の液状化¹⁶⁾

本研究では台風などの強波浪時にアマモが消失する原因のひとつとして、流れによる引き抜き力に対してアマモを支える地盤の支持力に着目する。地盤は地下茎を通じてアマモを支えているが、台風などの強波浪時には地盤面に大きな水圧変動が作用する。善らは、強い波浪が作用する海底地盤においては、表層部分で一元的な水圧変動に起因した液状化が起こり不安定化することを明らかにしている¹⁰⁾。このことから、強い波浪が作用する場合は地盤面の水圧変動に起因する液状化により、アマモ場の海底地盤が不安定化し、アマモが抜けやすくなった可能性がある。

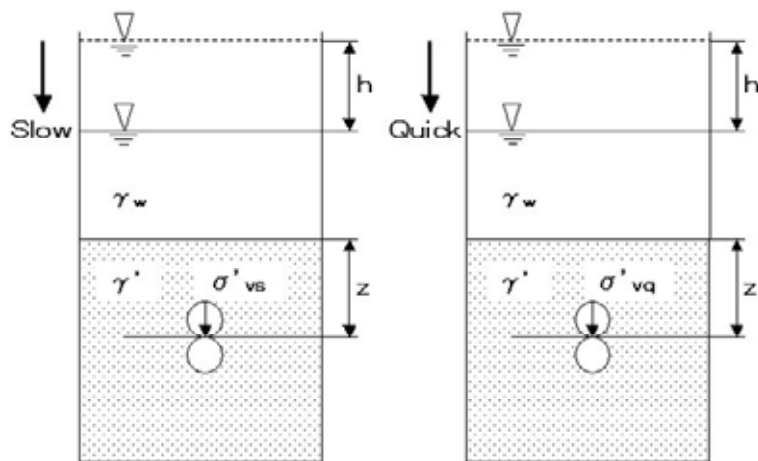
しかしながら、アマモの地下茎の深さは地盤面から数センチのオーダーであり、このようにきわめて浅い深度における地盤表層の支持力機構を地盤工学的に検討した例はないと考えられる。本研究は、以上の観点から、一次元的な水圧変動下でのアマモの引き抜き

抵抗について検討し，強波浪時におけるアマモ場の海底地盤の安定性について検討した．本項では善らの研究に基づいて波浪によって液状化が発生するメカニズムについて説明する．

(1) 波浪による一次元水圧変動による液状化のメカニズム

海面の水位変動に伴い海底地盤の表面に作用する水圧は変動する．実際の地盤では波圧は変動は波浪の形状により二次元的に地盤に作用するが，ここでは簡単のため水圧変動ならびに地盤を一次元空間において取り扱うことにする．

周期の長い水圧変動に対しては地盤中の間隙水圧は静水圧的に変動するため，地盤表面に作用する水圧の変化が時間遅れなしに地盤内に伝達され，このときは地盤の有効応力の变化はない．しかし，周期の短い水圧変動の場合，すなわち水位変動速度が速い場合には，水圧変動が地盤内に直ちには伝達されない．特に，土の間隙中に空気が存在している場合には圧力変動に応じた間隙空気の体積変化が生じ，そのため間隙流体の移動が生じるが，間隙流体の移動は瞬時には起こらず，結果的に圧力の伝達遅れが生じることとなる．



(a) 水圧変動がゆっくりのとき

(b) 水圧変動が急速とき

Fig.2.3.1 水位変動と有効応力

Fig.2.3.1 に示すように，破線で示す水位（初期状態）が実線の位置まで急速に変化したときの状態を考える．初期状態における深さ z における有効鉛直応力 σ'_{v0} は，全応力で表した鉛直応力 σ_{v0} から，初期間隙水圧 u_0 を引いた値で， $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$ と表わされる．(a)は水位低下速度が遅く，水位低下に伴う水圧変動が瞬間的に伝達される場合である．水位低下後の有効鉛直応力 σ'_{vs} は，水位低下量を h_d ，水の単位体積重量を γ_w とすると，

$$\sigma'_{vs} = (\sigma_{v0} - \gamma_w \cdot h_d) - (u_0 - \gamma_w \cdot h_d) = \sigma'_{v0} \quad (2)$$

となる．一方，(b)は水位低下速度が速く，水圧変化が瞬間的に伝達されない場合である．

水位低下後の有効鉛直応力 σ'_{vq} は伝達される水圧の遅れ分を $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ とすると，

$$\sigma'_{vq} = (\sigma_{v0} - \gamma_w \cdot h_d) - \{u_0 - \gamma_w \cdot (h_d - \Delta h_d)\} = \sigma'_{v0} - \gamma_w \cdot \Delta h_d \quad (3)$$

と表される．ここで， σ'_{vs} と σ'_{vq} を比較すると，

$$\sigma'_{vq} < \sigma'_{vs} = \sigma'_{v0} \quad (4)$$

となる．式(2)における $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ は，見かけ上は，過剰間隙水圧と同じ働きをしており，理論上は， $\gamma_w \cdot \Delta h_d$ が σ'_{v0} よりも大きい場合には，その位置における有効鉛直応力が負となる．実際には，有効鉛直応力は負とはなりえないが，この場合，地盤の骨格構造を有効に拘束する力（有効応力）は全く働いていない状態になっており，地盤が粘着力を持たない場合はいわゆる液状化が発生すると考えられる．

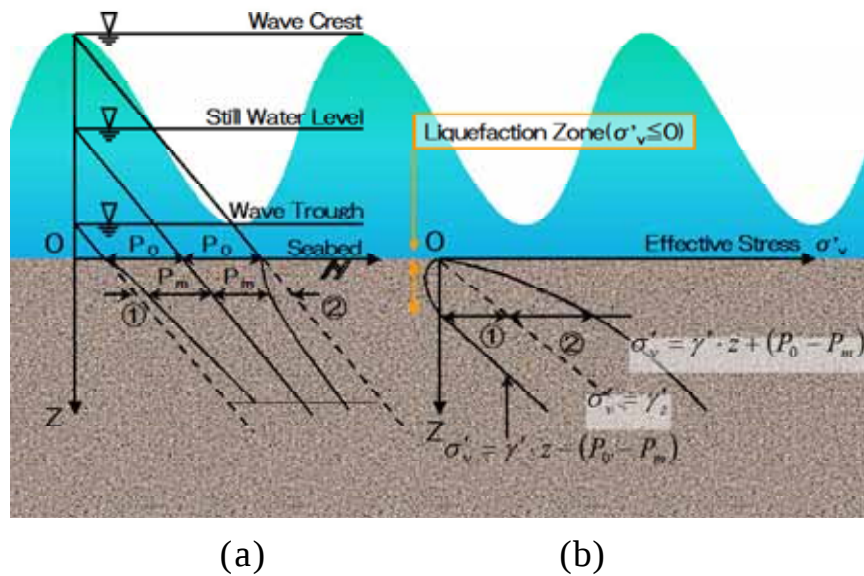


Fig.2.3.2 波の変動による海底地盤の液状化概念図

以上の概念を海底地盤に適用する．Fig.2.3.2(a)は，波の谷と峰の状態を想定し，静水圧状態からの地盤中の水圧の変化を深度分布として表したものである．ここで p_0 は，海底面上の水圧変動振幅を表し， p_m は地盤中の水圧の静水圧状態からの変化量（変動間隙水圧）を表す．この p_0 と p_m は，

$$p_0 - p_m = \gamma_w \cdot \Delta h_d \quad (5)$$

の関係があり，水圧伝達の時間的遅れを表している．前述したように，水圧が瞬間的に伝達される場合には地盤中の水圧の変化量はどの深さにおいても同じであり，位相も等しい

ため $p_0 = p_m$ となり，地盤中の有効応力の変化は生じない．しかし，水圧が瞬間的に伝達されない場合， p_0 が減少する局面では $p_0 > p_m$ となり， $p_0 - p_m$ の分は過剰間隙水圧となって地盤中の有効応力は減少する．このような考え方から，地盤中の有効応力 σ'_v は，

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0} - (p_0 - p_m) \quad (6)$$

と表すことができ， σ'_v は変動間隙水圧 p_m に依存する事になる．

Fig.2.3.2(b)は地盤中の水圧が Fig.2.3.2(a)に示した と の分布をなすときの σ'_v を， $\sigma'_{v0} = \gamma'z$ として概念的に示したものである．ここで， γ' は土の水中単位体積重量である．Fig.2.3.2(b)によると の分布に対応する σ'_v は，ある深さで負となっており，その深さで浅の地盤は有効応力を失って液状化が発生していることを意味する．一方， に対応する σ'_v は，静水状態の σ'_{v0} よりも大きくなっており， $\sigma'_v - \sigma'_{v0}$ の分だけ有効鉛直応力が増加しているので，地盤はこの増加応力によって高密度化している．

このように，波浪の変動に対して地盤中の水圧の応答が地盤表面の水圧よりも時間遅れ(位相差)をもって伝達され，さらに深さ方向にも水圧の変動の振幅が小さくなる(減衰する)場合を考えると， $\sigma'_v - \sigma'_{v0} (= p_0 - p_m)$ の大きさによって，地盤は有効応力を失う液状化と有効応力が波浪前の状態よりも大きくなることによる高密度化を繰り返し起こしていることになる．善らは，実際の海底地盤において，波浪時の地盤内の間隙水圧を測定し，液状化と高密度化が起きていることを確認した．

(2) 変動水圧の地盤内伝達に関する理論¹²⁾

変動水圧 p_m を解析的に求めるための理論について述べる．Fig.2.3.3 に示される深さ z で面積 A ，長さ Δz の土要素を想定し，一次元の浸透流を考える．地盤の透水係数を k ，水の単位体積重量を γ_w とし，微小時間 Δt における土要素への水の流入量 Δq_w において Darcy の法則が成り立つと仮定すると，

$$\Delta q_w = \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} \cdot A \cdot \Delta z \cdot \Delta t \quad (7)$$

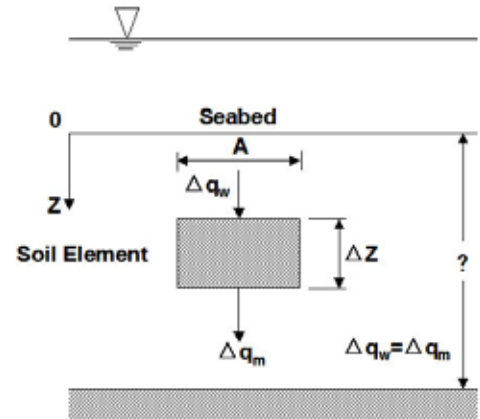


Fig.2.3.3 土要素内の水の流れ

となる．また， Δt 時間における土要素の間隙水の流入量 Δq_m が，変動過剰間隙水圧 $(p_m - p_0)$ に起因する有効鉛直応力 σ'_v の変化による土粒子骨格の圧縮(間隙水の流出)成分と，変動間隙水圧 p_m の変化による間隙水の圧縮成分からなるとすると，間隙率を n ，土の体積圧縮係数を m_v ，間隙水の圧縮率を m_w として，間隙水の流入量 Δq_m は，

$$\Delta q_m = \left(-m_v \cdot \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} + n \cdot m_w \cdot \frac{\partial p_m}{\partial t} \right) \cdot A \cdot \Delta z \cdot \Delta t \quad (8)$$

で表される．ここで，質量保存則が成り立つとすると， $\Delta q_w = \Delta q_m$ となる．また，海底面の水圧を p_b とすると有効鉛直応力 σ'_v は $\sigma'_v = \sigma'_{v0} + (p_b - p_m)$ で表される．このことを考慮すると，

$$\frac{\partial \sigma'_{v0}}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = \frac{\partial (p_b - p_m)}{\partial t} \quad (9)$$

となり，変動間隙水圧に関する基礎方程式

$$\frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \left(1 + \frac{n \cdot m_w}{m_v} \right) \cdot \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad (10)$$

を得る．ここで， $C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v}$ ， $\alpha = 1 + \frac{n \cdot m_w}{m_v}$ とおくと，

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad (11)$$

を得る．ここに， C_v は圧密係数であり， α を伝達係数と呼ぶことにする。

初期条件については，静水圧状態における変動間隙水圧が 0 であることを考えると，

$$t = 0 \text{ で } p_m = 0 \quad (12)$$

となる．境界条件については以下のように考える。

微小振幅波理論に基づくと，海底地盤表面に作用する水圧を以下のように設定することができる．

図 2.3.4 のように x, z 座標をとり， t ：時間， p_0 ：海底面の水圧変動振幅， H ：波高， γ_w ：水の単位体積重量， h ：水深， L ：波長， T ：周期， λ ：波数($2\pi/L$)， ω ：角振動数($2\pi/T$)とすると，海底面の変動水圧 p_b は，

$$p_b = p_0 \cdot \sin(\lambda x - \omega t) \quad (13)$$

となる．

ここに，海底面の水圧変動振幅 p_0 は，

$$p_0 = \frac{\gamma_w \cdot H}{2 \cos(\lambda h)} \quad (14)$$

で表される．ここで，一次元問題として取り扱うとすると，(13)式は，

$$p_b = p_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (15)$$

となる．

式(15)から得られる p_b を海底地盤表面の水圧とすると，海底面での境界条件は，

$$z = 0 \text{ で } p_m = p_b \quad (16)$$

となる．

一方，不透水面の境界条件は，不透水層までの距離を l とすれば，そこでの浸透水圧が 0 であるから，

$$z = l \text{ で } \frac{\partial p_m}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

となる．

次に式(11)の基礎方程式の差分解を求めるため，無次元化を行う．

$$C = \frac{C_v \cdot T}{l^2} \quad (C \text{ を排水係数と呼ぶ}) \quad (18)$$

$$\bar{Z} = \frac{z}{l}, \bar{T} = \frac{t}{T} \quad (19)$$

$$\bar{P} = \frac{p_m}{p_0} \quad (20)$$

とおき，式(15)を用いると，式(11)は次式のように無次元化される．

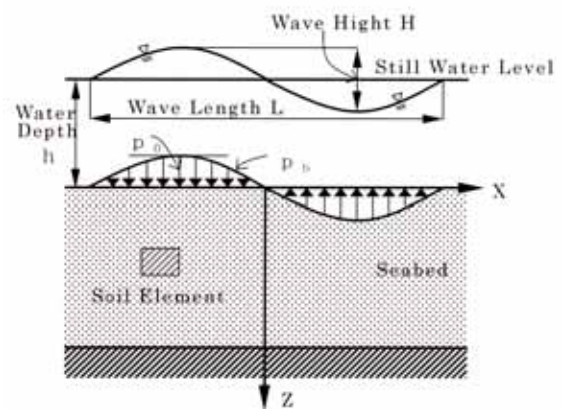


Fig.2.3.4 海底面の水圧変動¹²⁾

$$C \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{Z}^2} = \alpha \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{T}} + 2\pi \cos(2\pi \bar{T}) \quad (21)$$

深度および時間の差分間隔をそれぞれ $\Delta \bar{Z}$, $\Delta \bar{T}$ とすると , 式(20)の差分解は ,

$$\bar{P}(\bar{Z}, \bar{T} + \Delta \bar{T}) = \left[\left(\frac{\Delta \bar{T}}{(\Delta \bar{Z})^2} \right) \cdot \left(\frac{C}{\alpha} \right) \right] \cdot [\bar{P}(\bar{Z} + \Delta \bar{Z}, \bar{T}) - 2\bar{P}(\bar{Z}, \bar{T}) + \bar{P}(\bar{Z} - \Delta \bar{Z}, \bar{T})] - \left(\frac{2\pi \Delta \bar{T}}{\alpha} \right) \cos(2\pi \bar{T}) + \bar{P}(\bar{Z}, \bar{T}) \quad (22)$$

となる .

また , 境界条件および初期条件は , 式(12) , (16) , (17)より ,

$$\bar{P}(0, \bar{T}) = \sin(2\pi \bar{T}) \quad (23)$$

$$\bar{P}(1, \bar{T}) = \bar{P}(1 + \bar{Z}, \bar{T}) \quad (24)$$

$$\bar{P}(\bar{Z}, 0) = 0 \quad (25)$$

となるので , 任意の時間 $\bar{T} + \Delta \bar{T}$, 任意の深度 $\bar{Z}$ における $\bar{P}(\bar{Z}, \bar{T} + \Delta \bar{T})$ が計算される .

善らはこれらの液状化理論を用いて , 実際に解析結果を示し , また地盤内への水圧の伝達し難さを示す定数 α , 地盤の排水のしやすさを示す排水係数 C に関して検討している .

以上が , 善らが明らかにした海底地盤に波浪による一次元水圧変動が载荷されたときの地盤の液状化メカニズムである . これらの理論は透水性が良く , 土粒子間の粘着力の低い砂質土地盤に適用される . 善らは強波浪を受ける海底地盤において地盤中の間隙水圧を観測し , 波浪による液状化が発生し , 上記の理論により , 発生した間隙水圧を説明できることを報告している。

2.4 波による水圧変動に対する造粒石炭灰の安定性¹⁴⁾

波と地盤の関係に関する研究として , 中川・土田・吉牟田は波による水圧変動に対する造粒石炭灰の安定性を明らかにすることを目的とし , 水圧変動型液状化実験装置を用いて造粒石炭灰地盤の波による液状化に対する安定性 , 波浪による細粒分の抜け出し特性について検討している¹⁷⁾ .

造粒石炭灰とは石炭を燃焼することで必然的に産出される石炭灰の有効利用方法の一つである . これを人工干潟の造成のための覆砂材料として用いる場合 , 波浪に対する安定性を検討する必要がある . 中川らは水中の造粒石炭灰模型地盤に一次的に水圧変動を加え , 波浪による液状化特性を調べ , 以下の結果を報告している .

- ・ 一次元水圧変動かにおいて造粒石炭灰の地盤では表層に液状化層が発生する . 豊浦砂 (標準砂) の地盤と比較すると , 造粒石炭灰地盤の場合は水中重量が小さいため液状化範囲が広い .

- ・ 造粒石炭灰を用いて海底地盤を造成する場合は，透水性がよく液状化しにくい大きな粒径の材料を用いるなど，波浪による液状化への対策が必要である．
- ・ 液状化が発生するときに，造粒石炭灰地盤の細粒分が分離し，表層に抜け出す現象が起こる．この細粒分の抜け出し現象は波浪および地盤条件と密接な関係があり，周期が短く，波の振幅が大きい場合，また，地盤の透水性が良い場合に細粒分の抜け出し現象が顕著に現れる．
- ・ 造粒石炭灰に細粒分として海成粘土を混合すると透水性が低下し，間隙内の水圧伝達が大きく低下して液状化が発生しにくくなり，細粒分の抜け出しも大幅に減少する．従って，造粒石炭灰を干潟の覆砂に用いる場合は粘土と混合する方法が考えられる．

2.5 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究

土田・吉牟田・浅海(2006)は，人工造成干潟表層の細粒分の維持を目的として，一次元水圧変動下において細粒分を含む砂層中の細粒分が上部に移動し，最終的に表面に流出する現象を実験的に調べ報告した．特に，細粒分の上方移動と表面流出が波浪による液状化と密接な関連を有していることを示唆している点で，本研究と密接な関連があり，試験装置も共通している．

2.2 で述べたように，干潟が良好な生態系を維持するためには表層土が 10～20％程度の細粒分を含むことが望ましい．しかし，人工的に造成した干潟では細粒分を含有する覆土が時間の経過とともに徐々に抜け出してしまい，造成直後から覆砂層の粒度が大幅に変化している事例が報告されている．従来，干潟覆土からの細粒分の抜け出しは，地盤の表層部の流れによるせん断力による微細粒子の移動として検討されることが多いが，土田らは波浪による地盤の液状化に着目し，海底地盤に作用する鉛直方向の変動水圧によって地盤内の細粒分が表層から抜け出す挙動を Fig.2.5.1 に示す変動水圧実験装置を用いて明らかにした．

変動水圧载荷試験は地盤に一元的に水圧変動を加えるもので，水圧は広島港五日市人工干潟の設計波高を参考に決定し，5 号珪砂（平均粒径 0.338mm）に細粒分 10％（乾燥重量比）を混合した

試料を用いてい Table 2.5.1 実験に用いた細粒分の混合割合と液性限界
る。

試料名	砂	細粒分		液性限界 (%)
		海成粘土	碎石粉	
C0 - SF10	90%	0%	10%	N.P.
C1 - SF9	90%	1%	9%	N.P.
C3 - SF7	90%	3%	7%	40.1
C5 - SF5	90%	5%	5%	52.0

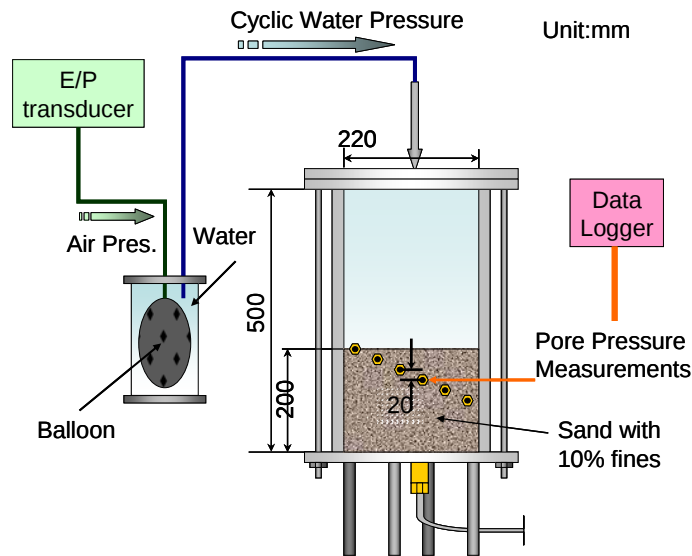


Fig.2.5.1 変動水圧载荷装置

細粒分としては、粘着力が一次元変動水圧による細粒分の抜け出しの抵抗性に及ぼす影響を評価するため、Table2.5.1 に示すように、広島港出島粘土と碎石粉、また出島粘土と碎石粉を混合した試料を用いた。Fig.2.5.2 にそれぞれの粒径加積曲線を示すが、碎石粉は粘土と同程度の粒度分布であるが粘土のような粘着力を全く有さない材料である。碎石粉と高塑性の広島港粘土を混合することにより、細粒分の塑性（液性限界）を調整し細粒分の移動特性に及ぼす塑性の影響を検討した。Table2.5.2 に示すに示す変動水圧を 24 時間地盤に载荷し、载荷後の細粒分の移動を調べた。

Fig.2.5.3 は変動水圧载荷後の細粒分と深度の関係である。図のように粘土と碎石粉の比率が 3 : 7, 5:5 である試料では細粒分の粒度分布は深度方向に変化が見られず、波浪による影響をほとんど受けなかった。一方、1 : 9, 0:100（碎石粉 100%）の試料では明らかに細粒分が深層から表層に移動した。以上の結果より、海底地盤表層からの細粒分の抜けだしは細粒分の持つ粘性の有無が大きく影響していること、細粒分の移動がみられるケースでは、波高 H と周期 T から得られる波高変動速度 H/T が大きいほど移動が顕著

Table 2.5.2 変動水圧の载荷条件

試験番号	変動水圧（波高）	周期（sec）
Test No.1	11.76kN/m ² ($H^*=1.2\text{m}$)	3
Test No.2	11.76kN/m ² ($H^*=1.2\text{m}$)	3
Test No.3	11.76kN/m ² ($H^*=1.2\text{m}$)	3

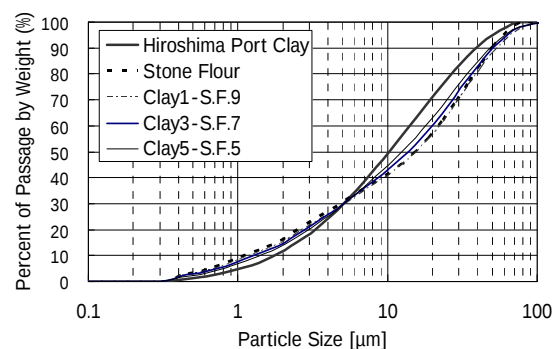


Fig.2.5.2 実験に用いた細粒分の粒度分布

であることがわかった。また，粒度分析の結果，このとき移動した細粒分の主な成分はシルト分であり，粘土分はほとんど移動しなかった。

Fig.2.5.4(a),(b)は各位相における地盤内の有効応力比（各深度における有効土被り圧力と地盤内の過剰間隙水圧の比）である。Fig.2.5.4 (a)に示すように，液状化が激しく起きている場合に細粒分の移動が起こり，細粒分の移動が顕著でなかった Fig.2.5.4(b)の試料の場合は，ごく一部の深度で応力比が1を上回っていた。このことから，変動水圧による液状化の有無が細粒分の移動と関連していることが考えられる。

本研究では，変動水圧载荷中，地盤面が水圧の変動にあわせて上下に運動している現象が確認されている。Fig.2.5.5 は水圧変動があるときの地盤面の振動を示している．図のように地盤面は振幅 1.0～1.5mm で振動しており，水圧が上昇するときに下がり，水圧が低下するときに上がっている．このような地盤の振動は，地盤骨格に作用する有効応力の変化によって説明できる．水圧が増加するときは地盤内の間隙水圧応答が遅れるため有効応力が増加するので地盤の骨格が圧縮し，地盤面は下がる．水圧が増加する場合は反対に地盤内に間隙水圧が残り有効応力が低下するため地盤は膨張する．観察によると表面からの細粒分の抜けだしは水圧が減少によって地盤面が上昇（膨張）する過程で発生した。質量保存則を考えると，抜けだしは地盤面の一部の減少であり，他の部分では吸い込みが起きていると考えられる。

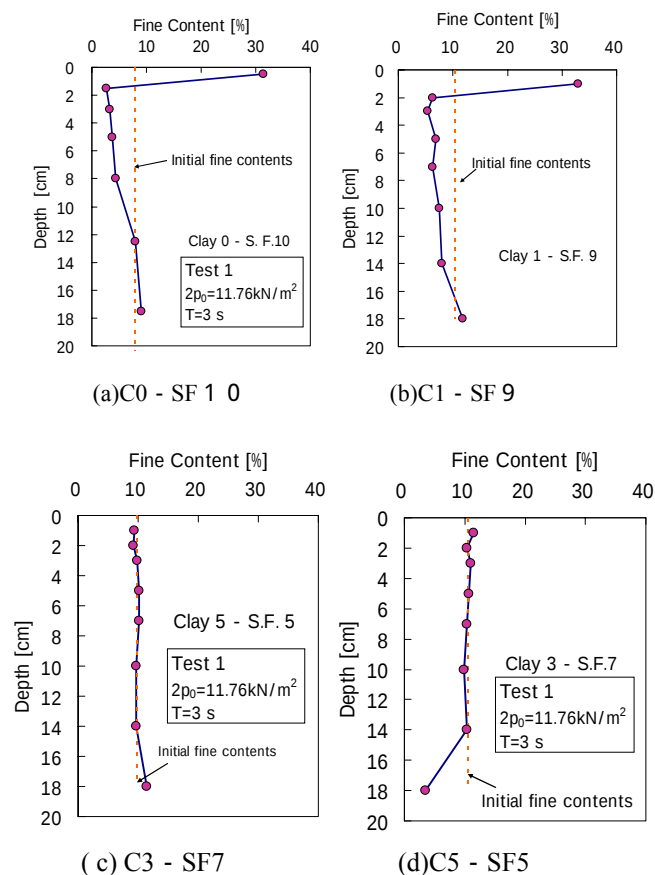


Fig.2.5.3 一次元水圧载荷後における地盤内の細粒分含有率と深度

以上，土田らの研究をまとめると，以下ようになる。

- (1) 細粒分 10%を含む飽和した砂層上に一次元的に変動水压を载荷すると，地盤内の細粒分が上昇し表層に抜け出す現象が起こることを確認した．また，移動したのは主にシルト分であった．この現象は細粒分の塑性が大きく影響し，細粒分の液性限界が 40%以上の場合は移動が起きなかった．
- (2) 水压が下降する過程において，砂層の表層付近では有効土被り圧を上回る間隙水压が発生した．このことが細粒分の上方への移動の原因の一つと考えられる．
- (3) 水压が下降するとき，砂層の砂粒子の間隙において細粒分を巻き込んだ流れがあり，地盤面が上昇する速度よりも早く細粒分が上方へ移動する様子が観察された．
- (4) 粘土分を細粒分として一次元変動水压を加えた場合，円筒土層の壁面で局所的に細粒分が上方に移動する現象が観察された．(1)細粒分の粘性が高いほど，一次元変動水压による細粒分の移動は少ない．(2)地盤中の間隙水压変動によって起こる細粒分の移動の主な成分はシルト分であった．細粒分の液性限界データをもとに，現地地盤の値との比較を行うことで一次元水压変動による細粒分の抜け出しに対する抵抗性を評価できる可能性がある．(3)水压変動により，地盤内に液状化が発生することが細粒分の移動の原因であると考えられる．(4)細粒分の抜けだしは水压が減少し地盤面が上昇（膨張）する過程で発生している。

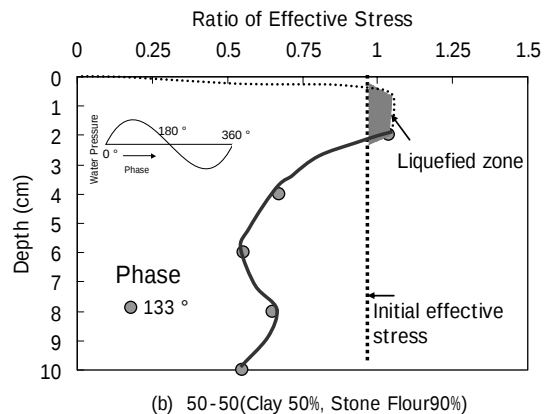


Fig.2.5.4(a) 一次元水压変動過程において地盤中に発生する過剰間隙水压(C1 - SF9, Test No.1)

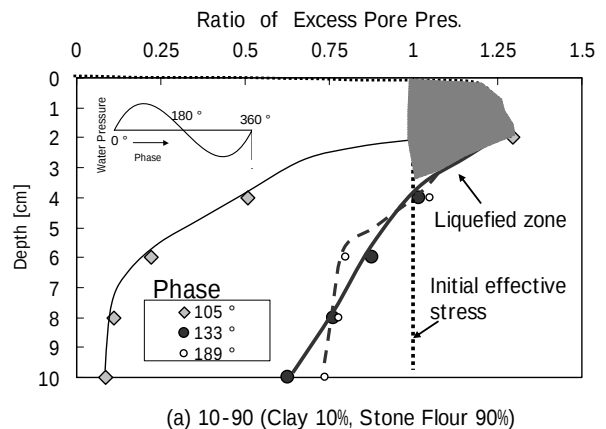


Fig.2.5.4(b) 一次元水压変動過程において地盤中に発生する過剰間隙水压(C5 - SF5, Test No.1)

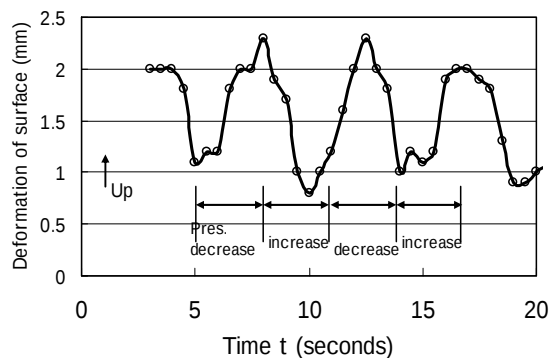


Fig.2.5.5 水压変動下における地盤面の運動 (C0—SF10, Test No.3)

3. 細粒分を含んだ地盤の波による液状化に対する安定性

3.1 概要

2章で述べたように、細粒分のないきれいな砂地盤において、海底面の水圧が海底地盤に伝達するときの遅れによって、水圧下降局面では地盤内の過剰間隙水圧が有効応力を上回って地盤で液状化が発生することが明らかになっている。一方、アマモ場はきれいな砂地盤ではなく細粒分を10%程度含む地盤として造成される。このような細粒分を含む地盤を対象として海底面の水圧変動が安定性に及ぼす影響は調べられていない。本章ではアマモの生育する地盤として代表的な細粒分を含む砂質地盤に一次元的な繰り返し水圧を載荷し、一次元的な水圧変動下での液状化に対する安定性を検討した。

3.2 実験装置および実験方法

(1) 試料の物理特性

細粒とは粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の土粒子であるシルト、粘土を総称している。細粒分の性質としては粒度とともに塑性が重要となるが、本実験では粒度の影響に着目するため、塑性を持たない碎石粉を使用した。また砂質土としては5号珪砂を用いた。この二つの試料を混ぜ合わせ、細粒分含有率を5, 10, 20%に調整して4ケースの試料を作成した。以下のTable.3.2.1に試料の物理特性を示す。

Talel 3.2.1 試料の物理特性

	試料の細粒分含有率			
	0%(5号珪砂)	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

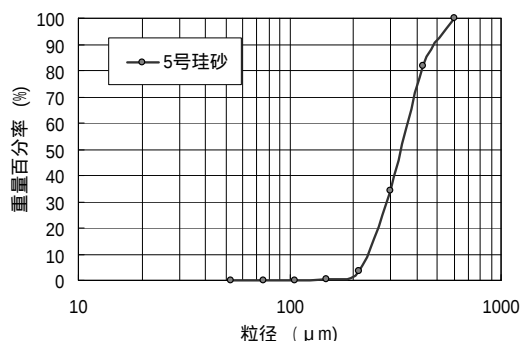


Fig.3.2.1 5号珪砂の粒度分布

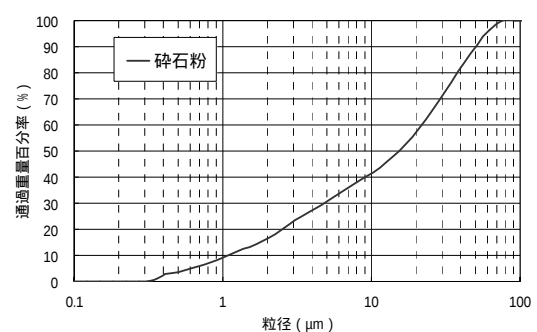


Fig.3.2.2 碎石粉の粒度分布

(2)実験装置

実験に用いた水圧変動型の液状化実験装置を Fig.3.2.3 に示す。実験装置の模式を Fig.3.2.4 に示す。本装置は、試料を詰めるアクリル円筒部、変動間隙水圧载荷・制御部、間隙水圧計測部、から構成されている。アクリル円筒部は、内径 210mm、外径 230mm、高さ 100 および 200mm のものを積み上げている。

アクリル円筒部は下端から一個ずつ試料を詰めながら積み上げるが、このとき各アクリル円筒間に O リングをセットし、ボルトで周囲の 8 箇所を固定して一体化するように積み上げる。

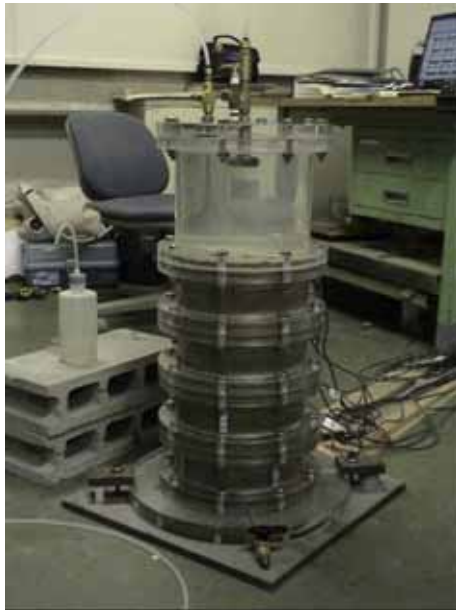


Fig.3.2.3 水圧変動型液状化実験装置

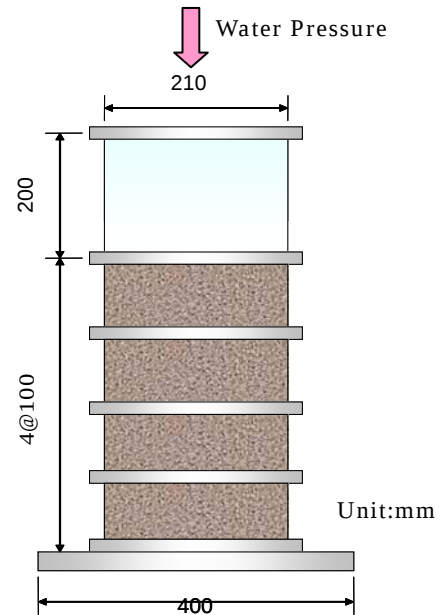


Fig.3.2.4 実験装置模式図

Fig.3.2.5 は変動水圧载荷装置を示す。変動水圧载荷・制御部は、静的な空気圧および周期的な空気圧の発生を制御する部分と、制御した空気圧を水圧に変化させる圧力タンクからなる。

圧力タンクを Fig.3.2.6 に示す。圧力タンクの模式図を Fig.3.2.7 に示す。圧力タンクは水圧変動载荷装置の裏側に取り付けられており、内部には、水と空気を分離するゴム製のチューブがある。チューブ内の空気圧はチューブの膨張により水圧に変換され、水圧に変換された圧力はアクリル円筒部に伝達される。



Fig.-3.2.5 変動水圧载荷装置

水圧計測は、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。間隙水圧の値はデータロガーでサンプリングする。Fig.3.2.8 に本実験で使用したデータロガーを示す。Table.3.2.2 に示すように一台で同時に 4 台チャンネルの測定を行うことができる小型軽量の動ひずみ測定器を 2 台用いて計測を行った。サンプリング周期は最大 20Hz で、最大で約 3.5 時間の連続計測が可能である。



Fig.3.2.6 圧力タンク

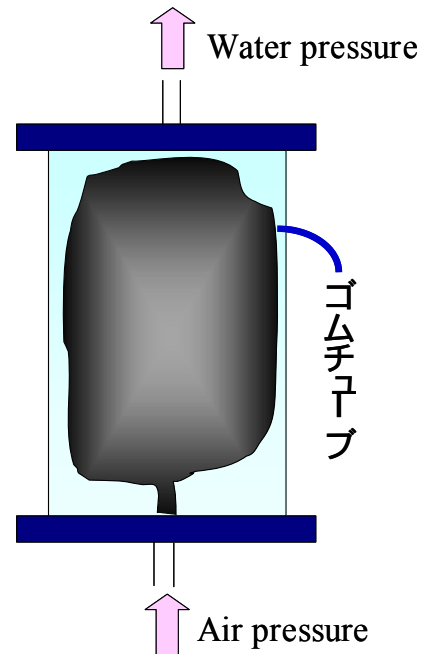


Fig.3.2.7 圧力タンク模式図



Fig.3.2.8 データロガー

Table.3.2.2 データロガーの主な仕様

応答周波数	1kHz
入力チャンネル	4チャンネル
サンプリング周波数	最大20kHz
記録時間長	最大3.5時間

(3) 実験方法

模型地盤の作成は以下のように行った。

実験装置の最下端にポーラスストーンをはめ、リングの内径に合わせた紙を敷く。試料の含水比を求め、相対密度を 80%とするための質量を求める。

最下端のリングから順に組み立てながら，試料を詰めていく．試料はタンピングにより，所定の相対密度になるように調整する．

地盤層厚が所定の厚さになった所で，さらに高さ 200mm のアクリル円筒リングを積み重ね，蓋をする．

各アクリル円筒リングの中央側壁に間隙水圧計を直接取り付け，データロガー，パーソナルコンピュータ，実験装置を接続する．

模型地盤の下端から水をゆっくりと注入する．試料が砕石粉を含む場合は，砕石粉により水が濁るのを防ぐため地盤層厚に水位が達するまでは模型地盤の下端から注入するが，その後は地盤表面にろ紙を敷き，地盤上端から試料を乱さないように水を注入する．

水圧変動载荷装置によって徐々に水圧を上げていき，最終的に地盤表面においてアマモの生育範囲内の水圧である 49.0kN/m^2 （水深 5m 相当）となるようにする．

次に，模型地盤に一次元的に水圧変動を以下の手順で加え，計測をおこなった．

静水圧を確認後，水圧変動载荷装置により所定の変動水圧を加える．

変動水圧の波形は正弦波を用いる．振幅，周期，地盤層厚については各実験ケースによって変化させる．

実験中は，模型内の所定の深度での間隙水圧の測定を行う．

(4)実験条件

本実験における実験ケース一覧を Table.3.2.3 に示す．試料は 5 号珪砂および 5 号珪砂と砕石粉を混ぜ合わせ細粒分含有率を 5,10,20% に調整した試料の 4 種類を用いた．模型地盤の初期相対密度は 80% である．ここでは，水深が 5m である地盤を想定し，静水圧として，地盤表面で 49.0kN/m^2 の水圧を加えた．波浪条件としての水圧変動は，波を微小振幅波と仮定し，正弦波形を用いている．水圧変動の振幅および周期については次の式を用いて決定した．

極浅海波（長波）の条件¹⁴⁾

$$L = \sqrt{ghT} \quad (3.2.1)$$

$$\text{波形勾配} = \frac{H}{L} \quad (3.2.2)$$

ここで， L ：波長（m）， g ：重力加速度（m/s²）， h ：水深（m）， T ：周期（s）， H ：波高（m）を示す．

不透水面からの地盤層厚を 20，40，60cm と変化させた 3 ケースに種々の波高，周期に相当する水圧変動を加えたケースの実験を行った．ここで，式(3.2.1)では波高 1m のときに周期は 2sec，波高 2m のときに周期は 4sec となるが，種々の条件下での差異を見ることが主眼のため，Table3.2.3 に示すケースを設定した．変動水圧载荷装置の性能上，速い水

圧変動を起こすには機械が追従しきれないため、波高 2m，周期 2s の変動水压を加える実験は行っていない．なお，本実験では，実験を行う際に機械の精度により，両振幅，周期は Table3.2.3 に表している数値と若干異なる場合がある．

Table3.2.3 実験条件

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

3.3 実験結果と考察

(1)一次元水压変動による液状化の発生

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

例として，細粒分含有率 20%，地盤層厚 60cm 時の波高 1m，周期 4sec の波を整理する．まず，横軸に地盤中の変動間隙水压（その深さにおける静水压からの間隙水压の変動量） p_m から地盤表面の変動水压 p_0 を差し引いた変動過剰間隙水压 $p_m - p_0$ を，縦軸に深さを取り，各位相で整理した(Fig.3.3.1 に示す)．

2.2 で述べたように，液状化の条件はその深度での鉛直方向有効応力 $\sigma_v' \leq 0$ であり， σ_v' は次式で与えられる．

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' + p_0 - p_m$$

液状化が発生するのは $\sigma_{v0}' \leq p_m - p_0$ の時であるから，変動過剰間隙水压 $p_m - p_0$ が σ_{v0}' よりも等しいか大きい箇所が存在すれば，その深さで液状化が発生している．このとき液状化した深さより浅い部分では上向きの浸透水压が発生するので土粒子間に働く有効応力が失われ，地盤は懸濁状態となるはずである．Fig.3.3.1 の場合を例にとると，加える水压

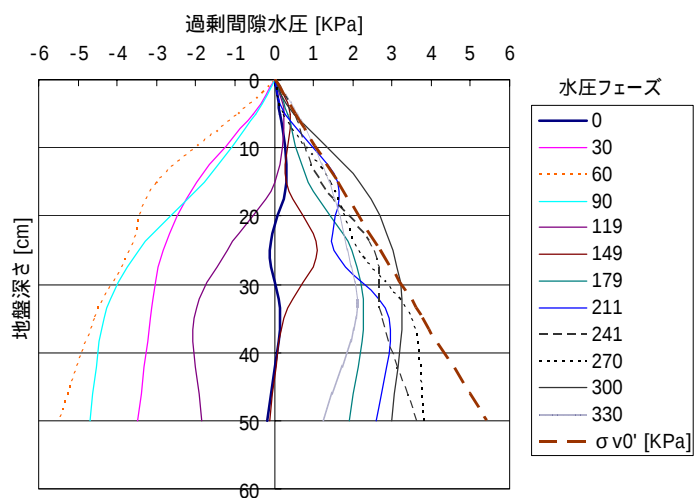


Fig.3.3.1 変動過剰間隙水压の深度分布
(細粒分含有率 20%, 層厚 60cm，波高 1m，周期 4s)

の各位相ごとに地盤内の水圧分布は図のように変化し、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変動過剰間隙水圧が最大となり、初期有効応力を上回る箇所では液状化が起きている。

Fig.3.3.1 のように、水圧の位相ごとに地盤内の変動過剰間隙水圧の分布は異なるため、液状化の程度の評価が難しい。そこで、各深さにおける最大の変動過剰間隙水圧に着目し、この形状により液状化の程度を判断することとした。Fig.3.3.2 はFig.3.3.1 において各深度の最大変動過剰間隙水圧を求め深さ方向に示した値と初期有効応力を比較して示している。さらに、液状化の程度や範囲をより明瞭にするため、それぞれの深度で初期有効上載圧 σ'_{v0} に対する最大過剰間隙水圧の比を求めFig.3.3.3 のように深さ方向に示すこととした。この図では、有効上載圧 σ' に対する最大過剰間隙水圧の比が 1 を超えた領域（深度 0 ～ 32cm）において液状化が発生している。

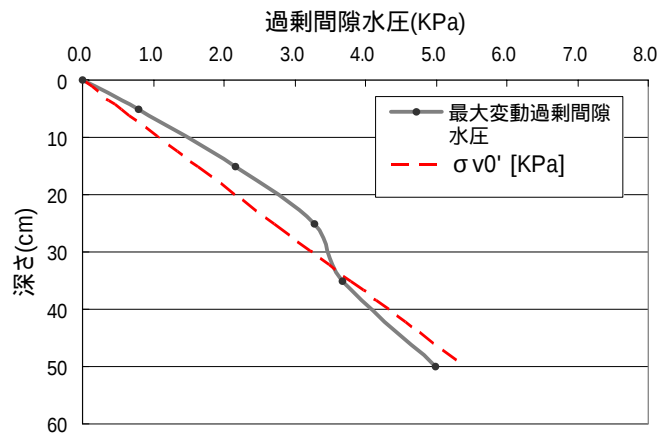


Fig.3.3.2 最大変動過剰間隙水圧と深度

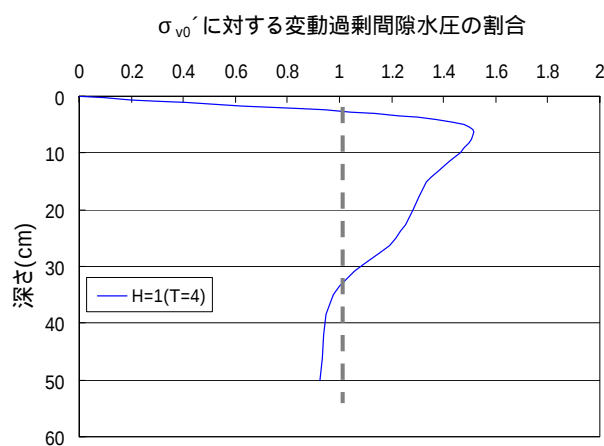
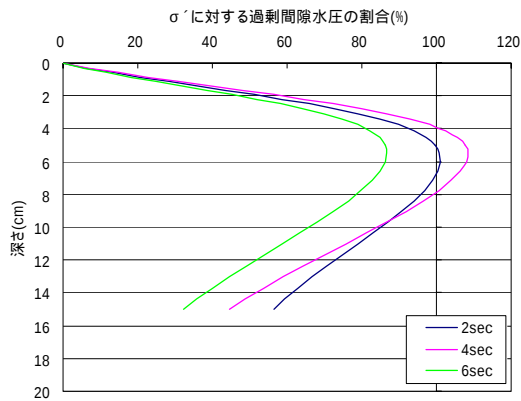


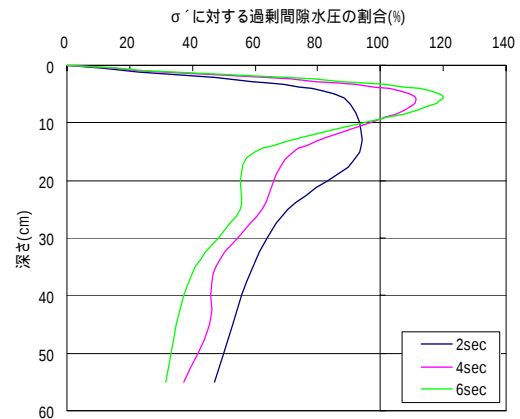
Fig.3.3.3 初期有効上載圧 σ'_{v0} に対する変動過剰間隙水圧比

(2)周期が液状化に及ぼす影響

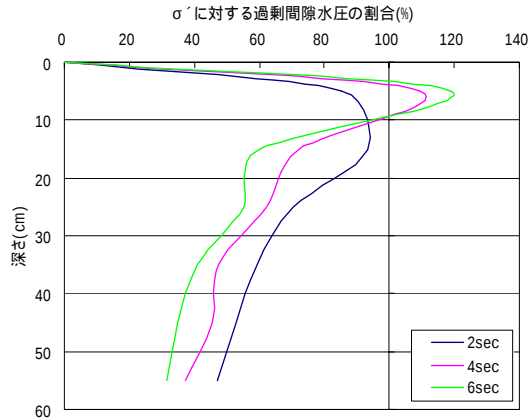
Fig.3.3.4(a)～(k)は5号珪砂，細粒分 10%，細粒分 20%の地盤に対し，地盤波高 1 mの条件下で周期 2，4，6 秒としたときの初期有効上載圧 σ'_{v0} に対する最大変動過剰間隙水圧比と深度の関係を示している．これらの図から，どの周期でもある深度において液状化が見られるが周期の違いによる影響は一貫しておらず，本実験の範囲である周期 2～6secは波の周期が液状化の発生に大きな影響を及ぼしているとは言えない．



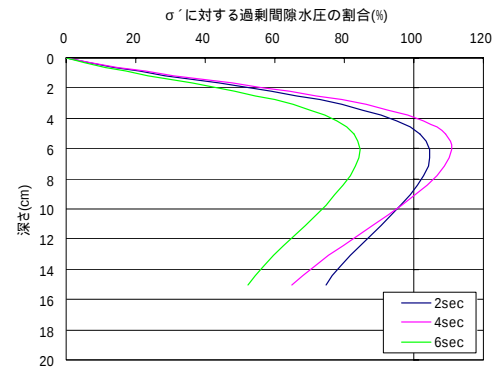
(a) 5号珪砂 地盤層厚 20cm



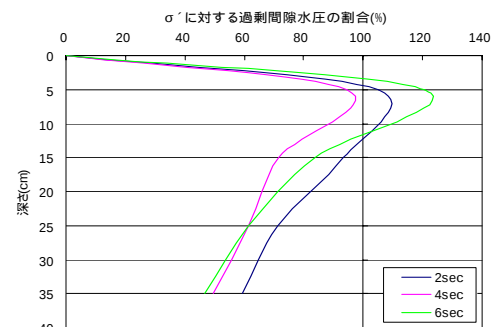
(b) 5号珪砂 地盤層厚 40cm



(c) 5号珪砂 地盤層厚 60cm

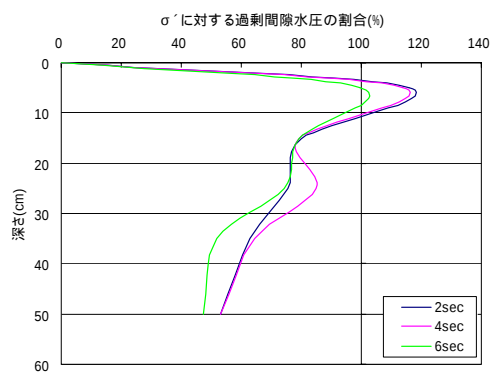


(d) 細粒分含有率 5% 地盤層厚 20cm

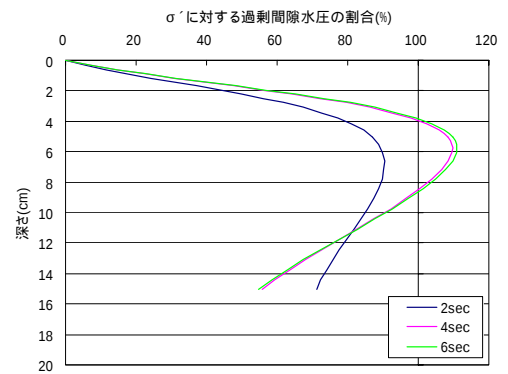


(e) 細粒分含有率 5% 地盤層厚 40cm

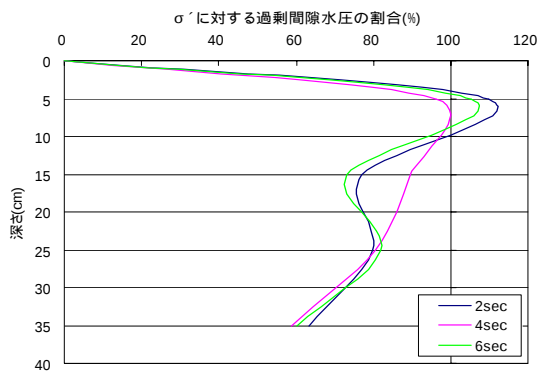
Fig.3.3.4(a)～(e) 初期有効上載圧 σ'_{v0} に対する過剰間隙水圧比の分布



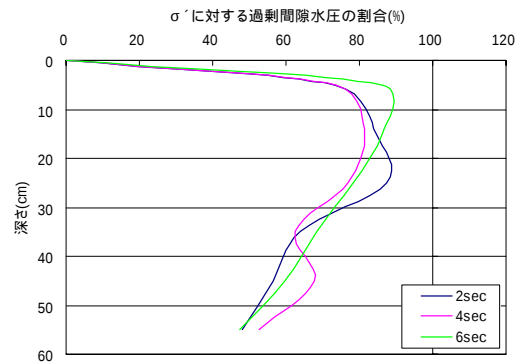
(f) 細粒分含有率 5% 地盤層厚 60cm



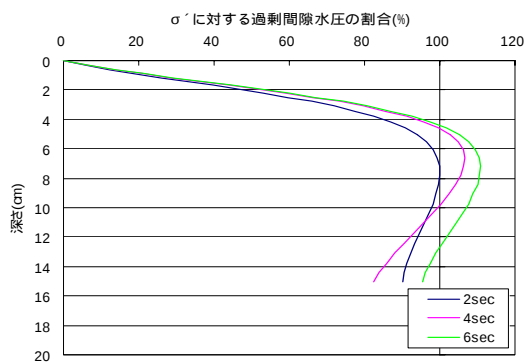
(g) 細粒分含有率 10% 地盤層厚 20cm



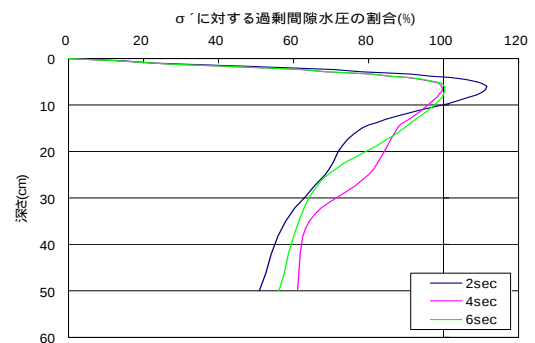
(h) 細粒分含有率 10% 地盤層厚 40cm



(i) 細粒分含有率 10% 地盤層厚 60cm



(j) 細粒分含有率 20% 地盤層厚 20cm



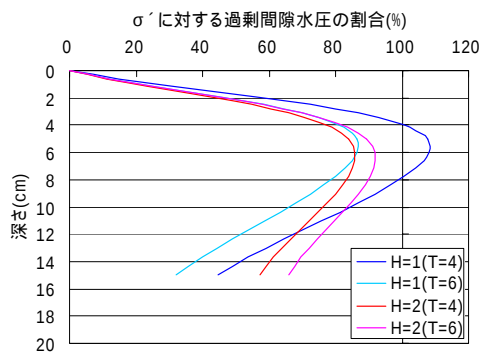
(k) 細粒分含有率 20% 地盤層厚 60cm

Fig.3.3.4(f) ~ (k) 初期有効上載圧 σ'_{v0} に対する過剰間隙水圧比の分布

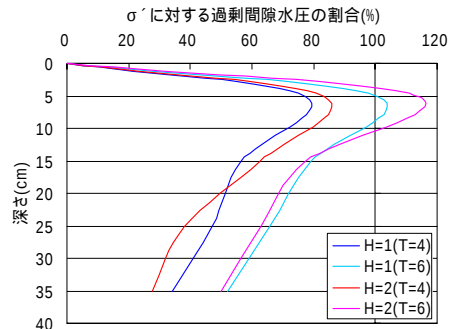
(3)波高が液状化に及ぼす影響

Fig.3.3.5(a)～(k)は、各地盤における最大変動過剰間隙水圧の割合の深さ方向の分布を、波高の違いに着目して示したものである。

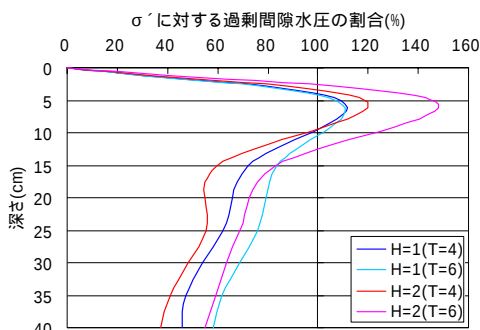
5号珪砂および細粒分 5%の地盤に対する Fig.3.3.5(a)～(f)の図を見ると、波高が大きい時に液状化範囲が広いとは必ずしも言えない。しかし、細粒分 10%、20%である Fig.3.3.5(g)～(k)を見ると、波高 2m の時の方が最大変動過剰間隙水圧が大きく液状化範囲も広がっている。このことから、地盤の細粒分が多いときには波高が高いほど波による液状化が生じやすく、液状化範囲も広いと考えられる。



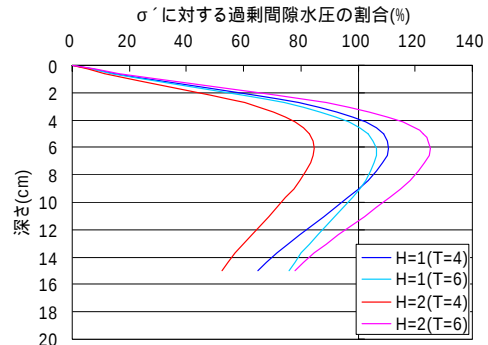
(a) 5号珪砂 地盤層厚 20cm



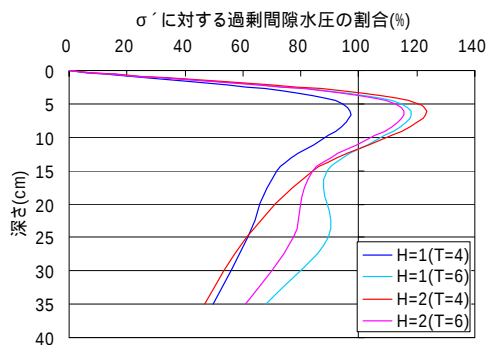
(b) 5号珪砂 地盤層厚 40cm



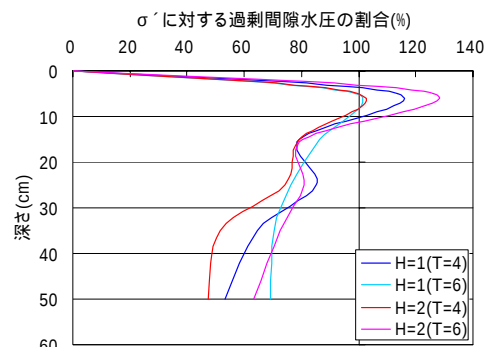
(c) 5号珪砂 地盤層厚 60cm



(d) 細粒分含有率 5% 地盤層厚 20cm

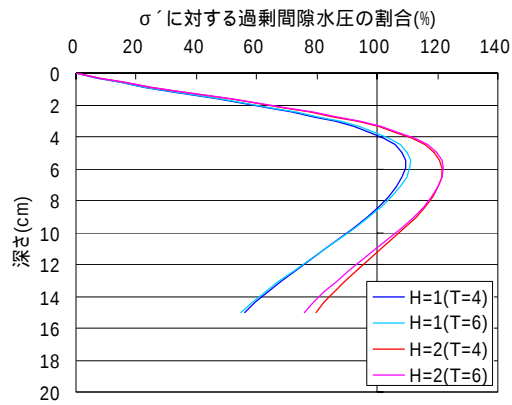


(e) 細粒分含有率 5% 地盤層厚 40cm

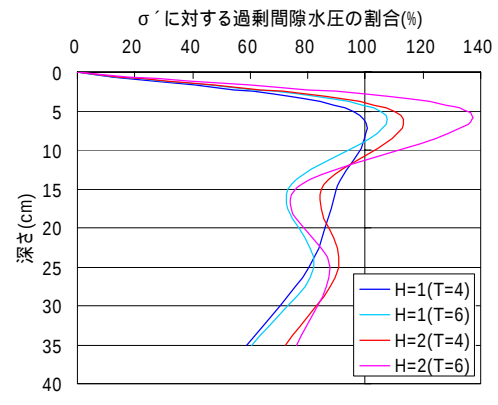


(f) 細粒分含有率 5% 地盤層厚 60cm

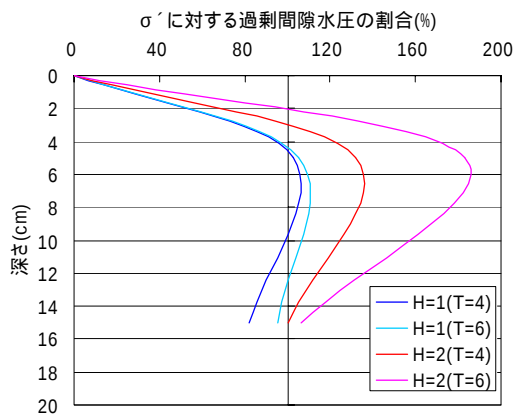
Fig.3.3.5(a)～(f) 有効上載圧 σ' に対する過剰間隙水圧比の分布



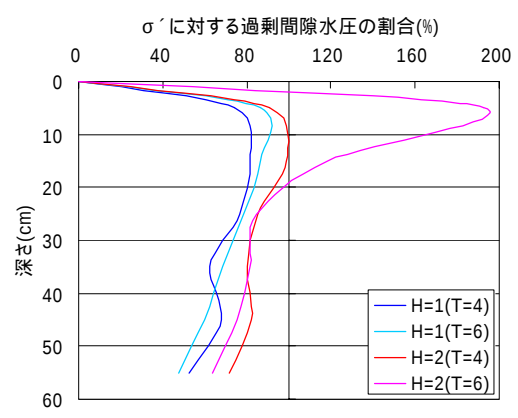
(g) 細粒分含有率 10% 地盤層厚 20cm



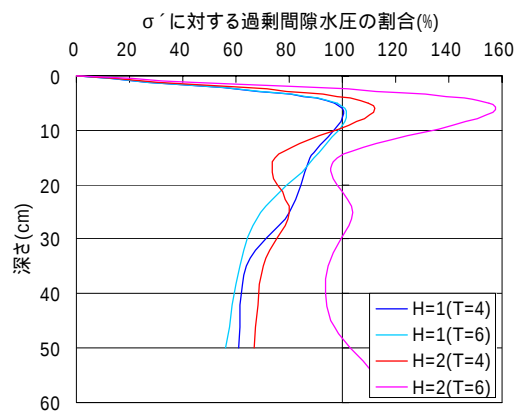
(h) 細粒分含有率 10% 地盤層厚 40cm



(j) 細粒分含有率 20% 地盤層厚 20cm



(i) 細粒分含有率 10% 地盤層厚 60cm



(k) 細粒分含有率 20% 地盤層厚 60cm

Fig.3.3.5 (g) ~ (i) 有効上載圧 σ' に対する過剰間隙水圧比の分布

(4) 地盤の厚さが液状化に及ぼす影響

Fig.3.3.6 に波高 2m，周期 6sec の条件下で，地盤層厚を変化させた各試料における最大過剰間隙水圧の深さ方向の分布を示す．(a) 5 号珪砂，(c) 細粒分含有率 10% の時に，地盤層が厚い時に液状化範囲が広がっていることが分かる．しかし，(b) 細粒分含有率 5%，(d) 細粒分含有率 20% の時には明瞭でない．

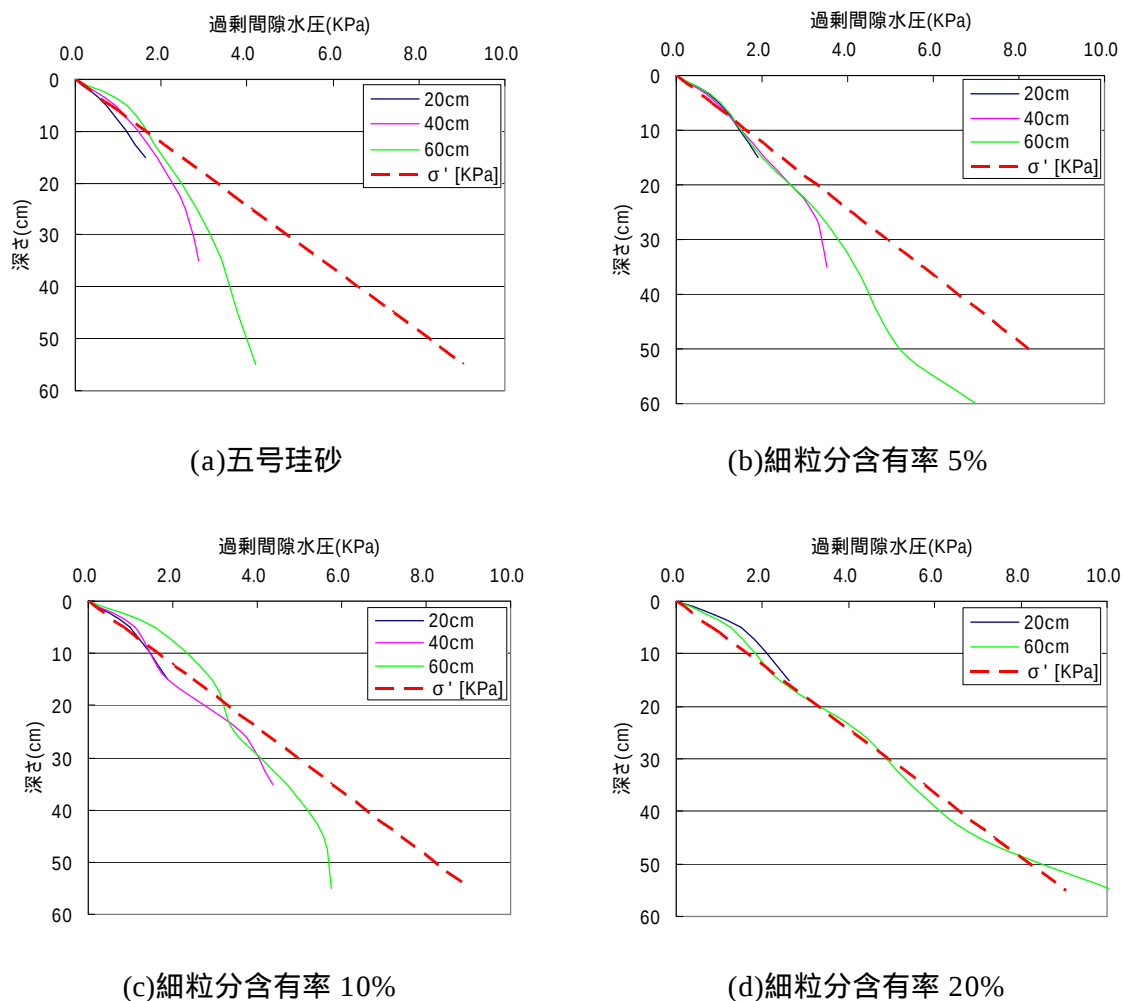
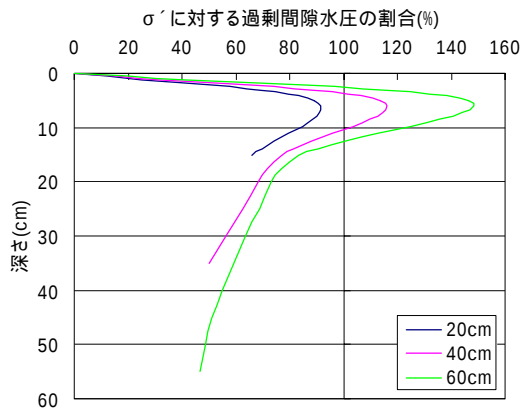
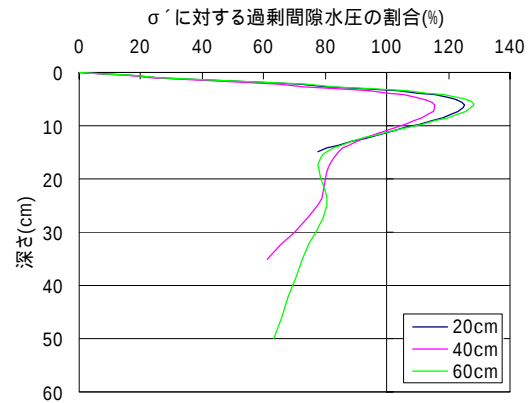


Fig.3.3.6 最大変動過剰間隙水圧分布

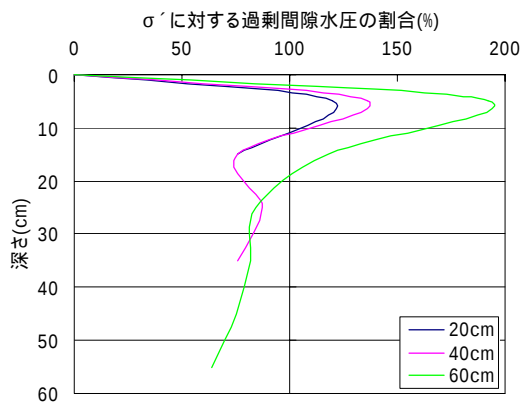
Fig.3.3.7(a)～(d)は，4つの地盤の種類ごとに，最大変動過剰間隙水圧比を深さ方向にまとめたものである．これらの図から，細粒分含有率 20%の時を除けば地盤層が厚いほど最大過剰間隙水圧が大きく，液状化範囲も広い．このように，今回の実験の範囲では，不透水面からの地盤層厚が厚いほど波による液状化が生じやすく，液状化範囲も広いという結果が得られた．



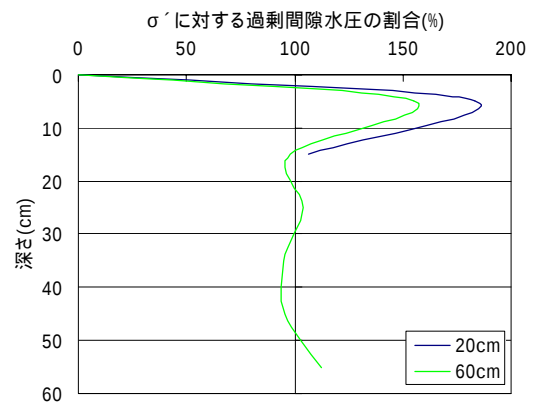
(a) 5号珪砂



(b) 細粒分含有率 5%



(c) 細粒分含有率 10%



(d) 細粒分含有率 20%

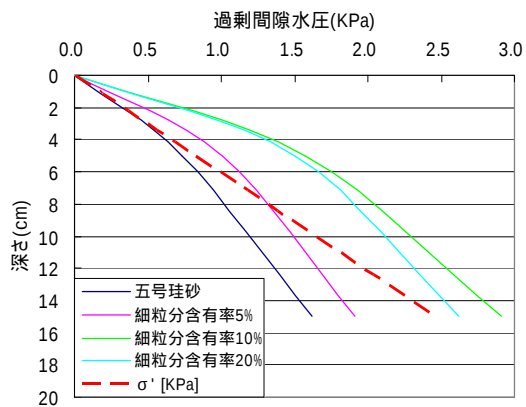
Fig.3.3.7 深度と変動過剰間隙水圧比の関係

(5) 試料の透水性が液状化に及ぼす影響

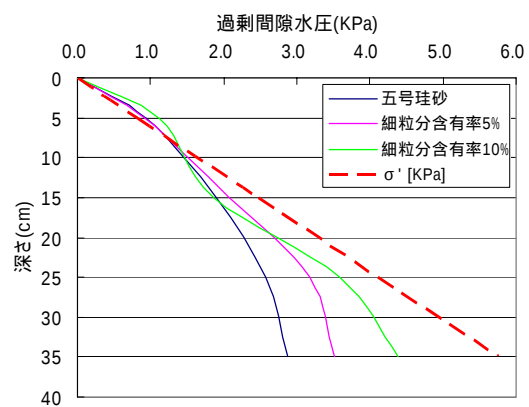
ここで、試料の透水性の違いによる影響を考察する。

Fig.3.3.8(a),(b),(c)は波高 2m ,周期 6sec の一次元水圧変動を載荷したときの最大過剰間隙水圧と深度の関係である。これらの図から細粒分含有率が多くなるほど、液状化範囲が広がる傾向が見られる。

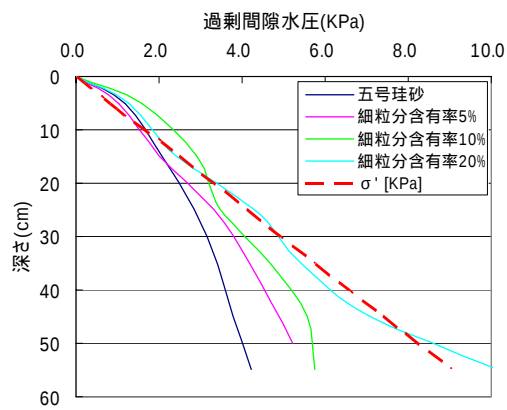
Fig.3.3.9 に細粒分含有率と透水係数の関係を示す。ここでは、4 章で使用する 5 号珪砂に広島出島港粘土を混ぜ細粒分含有率 20%に調整した試料のデータも比較のため示している。粘土を混ぜ合わせたものは碎石粉を混ぜたものに比べて粘着力が大きく、透水係数も小さい。この図から、細粒分含有率が増加すると透水係数が小さくなっていることがわかる。透水係数が小さい場合には水が動きにくく水圧が伝達しにくいと考えられるが、このことから細粒分を含む地盤では水圧の減衰と時間遅れが大きくなり、液状化が発生しやすくなったと考えられる。



(a)地盤層厚 20cm



(b)地盤層厚 40cm



(c)地盤層厚 60cm

Fig.3.3.8 最大変動過剰間隙水圧分布

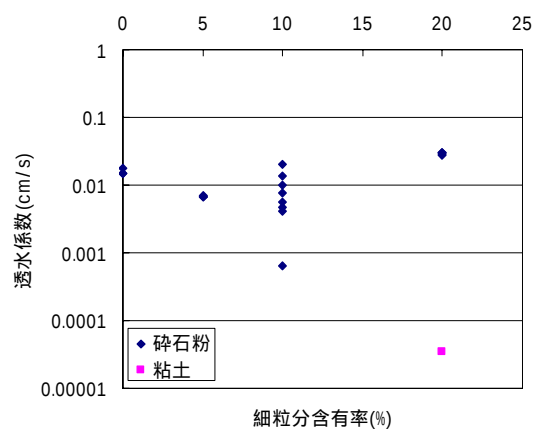


Fig.3.3.9 細粒分含有率と透水係数の関係

3.4 3章のまとめ

細粒分を 10%含む砂地盤について、一次元水圧変動による液状化発生に関する実験的検討を行った。結果をまとめると以下のようになる。

- 1)細粒分を 10%含む砂地盤においても一次元水圧変動下で地盤内に液状化が発生する。
波高（変動水圧幅）が大きい方が、液状化が発生しやすく液状化範囲も広い。
- 2)細粒分 20%の地盤を除くと、不透水面からの地盤層が厚い方が、液状化が発生しやすく液状化範囲も広い。
- 3)細粒分の増加すると液状化が発生しやすくなり液状化範囲も広くなる傾向にある。

以上の結果から、人工的なアマモ場の造成時に、地盤表面から基盤部までの深さが深く、細粒分を含んでいて透水性の悪い砂を用いている場合には、波による液状化は発生しやすく、この場合にはアマモが抜けやすくなっている可能性があると考えられる。

4．一次元水圧変動下でのアマモ場の安定性

4.1 概要

第3章で、アマモが生育するような細粒分の多い地盤においても、一次元水圧変動が加わると地盤中には変動過剰間隙水圧が発生し、その結果、有効応力が減少し地盤が液状化することが明らかになった。また、細粒分による粘着力の効果を無視すれば、細粒分の透水性の低下により、液状化の程度や範囲はむしろ大きくなることが実験的に明らかになった。

台風時の強い波浪によってアマモが大量に抜けるという被害が発生する原因の一つとして、波浪により海底地盤に液状化が生じるため、地盤表層 5cm 程度において根で支持されたアマモが抜けやすくなったことが原因の一つとして考えられる。そこで、本章では、波により海底地盤が不安定化した場合のアマモの引き抜き抵抗を比較することにより、一次元水圧変動下でのアマモ場の安定性について検討した。

4.2 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験に用いた水圧変動型液状化実験装置を Fig.4.2.1 に、実験装置模式図を Fig.4.2.2 に示す。本装置は、前章で述べた実験装置を水圧変動载荷中に引き抜き試験ができるように改良したものである。上部の亚克力円筒部は、内径 50mm、高さ 500mm で内部には上下に動かすことのできる棒が入っており、ばね秤を引っ掛けることができる。アマモとばね秤、



Fig.4.2.1 水圧変動型液状化装置

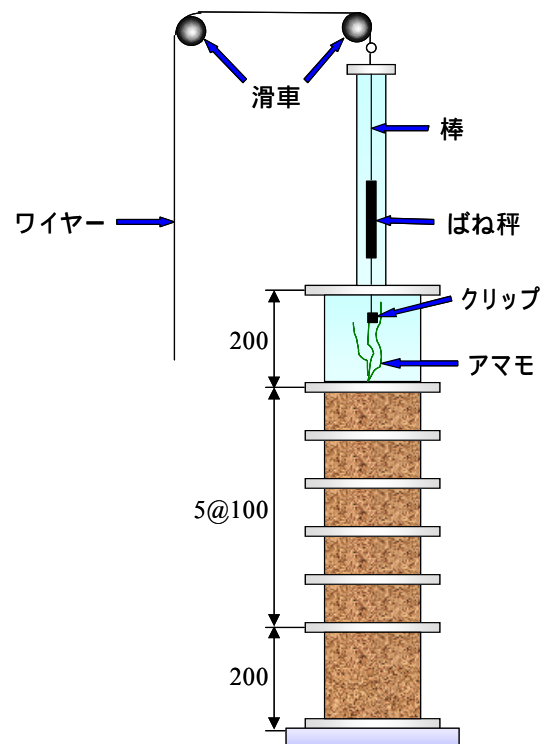


Fig.4.2.2 実験装置模式図

棒を繋げ引っ張ることによってアマモの引き抜き抵抗をばね秤で測定できるようになっている。この実験装置では、棒にワイヤーを取り付けワイヤーを滑車に通すことにより、棒を引っ張りやすくしている。

(2) アマモの模型及び実アマモの培養

実際のアマモには個体差があるため引き抜き抵抗にアマモの個体差による影響がでることを避けられず、水圧変動による液状化の影響を評価し難い。そこで現象を簡単に評価しやすくするため模型を用いて引き抜き実験を行った。ここでは、実験条件により模型 A と模型 B、及び培養した実アマモを使い分けている。

模型 A



Fig.4.2.3 アマモ模型 A

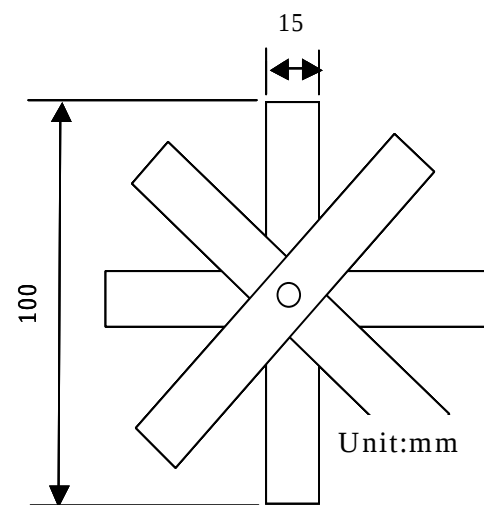


Fig.4.2.4 アマモ模型 A 模式図

後述する 4.3 節で用いたアマモの模型 A を Fig.4.2.3 に、模式図を Fig.4.2.4 に示す。この模型は縦 100mm、横 15mm、厚さ 5mm の四つのアクリル棒を米印になるようにねじとナットで固定したものである。高さは 20mm で、模型上端には引き抜きができるように長さ 100mm の麻ヒモを取り付けている。実際のアマモの引き抜き抵抗に起因するものとして根や地下茎が考えられるが、これらを粘着力の小さい砂質土地盤でアマモと同程度の引き抜き抵抗が得られるような模型を作成することは困難であったので、このような簡単な模型を用いた。

模型 B

後述する 4.4 節で用いたアマモの模型 B を Fig.4.2.5 に、模式図を Fig.4.2.6 に示す。粘土を含む試料で模型 A を用いて引き抜き実験を行うと、粘土の粘着力の影響から引き抜き抵抗が大きく出てしまい、ばね秤では測定が困難となるため、違う模型を用いた。



Fig.4.2.5 アマモ模型 B

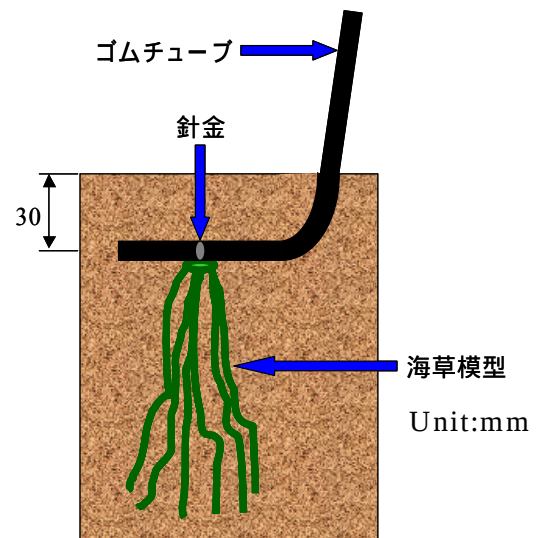


Fig.4.2.6 アマモ模型 B 模式図

模型 B は ,アマモの引き抜き抵抗に起因すると考えられる根と地下茎の影響をなるべく再現できるように形状・大きさの近いものを用いて作成した . 比較のため , 実際のアマモを Fig.4.2.7 に示す . 地下茎は市販のゴム製のチューブを , 根は市販の熱帯魚観賞用のプラスチック製の海草模型を用い , 海草模型はゴムチューブの端から 20mm のところで針金でしっかりと固定した . ゴムチューブの直径は 5mm , 長さは 100mm である . 海草模型は長さ 20 ~ 80mm 程度の根が 25 本ついている . 地盤に模型を植える際には , ゴムチューブと海草模型を固定した部分が地盤表面から深さ 3cm のところにくるようにした .

アマモの培養方法

試験用のアマモは Fig.4.2.8 (竹原市吉名) に示す自然の干潟で採取した . その様子を Fig.4.2.9 に示すが , アマモは地下茎を傷つけないように根元の周辺を丁寧に掘って採取した .

培養器と培養条件

培養器は Fig.4.2.10 のものを使用した . 養生状況を Fig.4.2.11 に示すが , 容量 100ℓ でプラスチック製の容器である . この中に人工海水を 100ℓ 入れ , 海水を循環するために外部に循環ポンプを設置している . 培養器の培養条件は以下の通りである .



Fig.4.2.7 実際のアマモ



Fig.4.2.8 試験用アマモ採取場所



Fig.4.2.9 アマモ場の様子

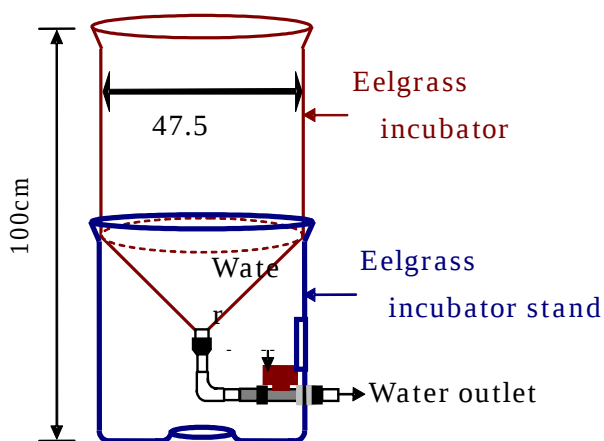


Fig.4.2.10 培養器概略図



Fig.4.2.11 アマモ養生の様子

〔水温〕

恒温槽の温度を制御することで調節する．通常は 20 ± 0.5 ，冬季（現場海水温が 15 を下回るとき）に入ると，10 まで温度を下げる．

〔明暗〕

12 時間ごとに蛍光灯（水草用）を on-off することによって制御する．

〔塩分濃度〕

市販の人工海水を用いて，30‰に調整する．

移植方法

まず，採取したアマモの葉，地下茎，根に付着した泥を洗浄し，葉の長さ，地下茎の長さを調節する．次に，園芸用のプランターにアマモ場の土壌を入れて，そこに移植する．そして，一週間程度アマモ土壌で培養を行い，培養器の環境に慣れさせる（馴養）．この

馴養期間を終えたら、試験用の土壤に再び移植する。本実験では上部の内径 120mm、下部の内径 100mm、高さ 97mm の園芸用のポットに実験で用いる試料を入れ、アマモを移植した。使用したポットを Fig.4.2.12 に示す。実験には採取してからアマモ土壤で一週間、実験で用いる試料で二週間、計三週間培養したアマモを使用した。



Fig.4.2.12 ポット

(3) 実験方法

〔実験準備〕

前章の実験の模型地盤作成と同様の方法で、地盤層厚が 70cm になるまで試料を詰め、さらに高さ 200mm のアクリル円筒リングを積み重ねる。

作成した地盤を掘削しアマモ（模型もしくは実物）を植える。このとき、地盤表面から模型の上端までの距離が 3cm になるようにし、地盤表面は十分に締め固める。

模型地盤の下端から水をゆっくりと注入する。試料が砕石粉を含む場合は、地盤層厚に水位が達するまでは模型地盤の下端から注入するが、水が濁ることを防ぐため、達した後は地盤表面に紙を敷き、地盤上端から試料を乱さないように水をゆっくりと注入する。

水がアクリル円筒部内を満たしてきたら、引き抜き装置を模型、ばね秤と繋げ、アクリル円筒の上端に置き、U 字クランプでしっかりと固定する。

引き抜き装置内にも水を満たす。

引っ張り棒にワイヤーを取り付け、滑車を通す。

データロガー、パーソナルコンピュータ、実験装置を接続する。

水圧変動载荷装置によって徐々に水圧を上げていき、最終的に地盤の表面において 49.0kN/m^2 （水深 5m 相当）となるようにする。

〔実験開始〕

静水圧確認後、変動水圧を加える場合は水圧変動载荷装置により波高 2m、周期 4sec の変動水圧を加える。

引き抜き速度 0.5cm/sec でワイヤーを手で引っ張り、模型の引き抜きを行う。

引き抜き中は、デジタルビデオカメラでばね秤を撮影する。

試験途中、間隙水圧の計測を行う。

〔実験終了後〕

デジタルビデオカメラで引き抜き抵抗のピーク値を確認する。

(4) 実験条件

実験で用いた試料は 3 章で用いたものと同じである。すなわち、5 号珪砂、5 号珪砂と

碎石粉を混ぜ合わせ，細粒分含有率 5，10，20%に調整したものの 4 種類である．模型地盤の初期相対密度は 80%である．波浪条件としての水圧変動は，水圧変動载荷の有無による引き抜き抵抗の差異を比較できるように，両振幅 19.6kN/m^2 ，周期 4s の 1 ケースに設定した．なお，引き抜きは変動水圧载荷の有無について，それぞれ三回ずつ行った．ただし，同じ地盤で表層のみ植え替えて実験しており，変動水圧の有無について交互に実験している．実験の流れについて Fig.4.2.13 に示す．

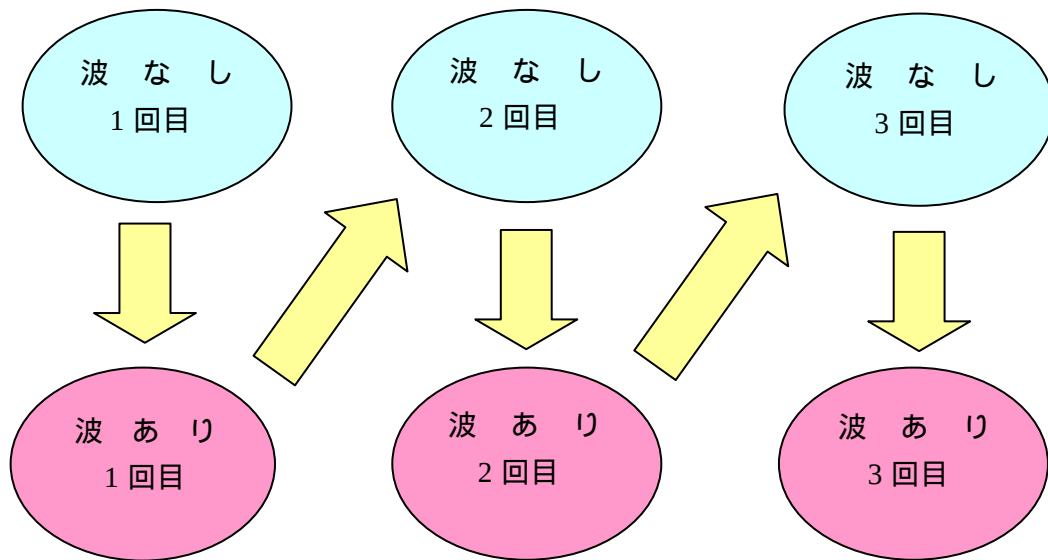


Fig.4.2.13 実験の流れ

4.3 細粒分を含む砂質土地盤におけるアマモ模型の引き抜き抵抗

(1) 5号珪砂地盤における引き抜き抵抗

まず，液状化の影響を見るため，引き抜き抵抗値がピークに達したときに模型地盤に载荷されていた 1 波について分析する．その 1 波での最大過剰間隙水圧の深さ方向の分布を示したものを Fig.4.3.1 に示す．Fig.4.3.1 から深さ 5cm 程度の表層部分で液状化している．

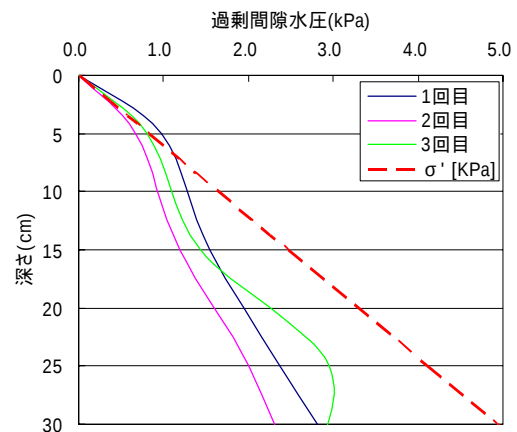


Fig.4.3.1 最大変動過剰間隙水圧分布

Fig.4.3.2，4.3.3 に一次元水圧変動载荷の有無での模型の引き抜き抵抗とその差を示す．これによると，波があるときの 3 回目の引き抜き抵抗値は他のものより小さいが，1 回目，2 回目ではほとんど差がみられないので，水圧変動の有無で引き抜き抵抗値はほぼ同じであるといえる．すなわち，模型地盤の表層

部分で波による液状化は見られるものの引き抜き抵抗値に違いが見られないことから、深さ 5cm 程度の表層部分で液状化が発生してもアマモが抜けやすくなるとは言えないと考えられる。

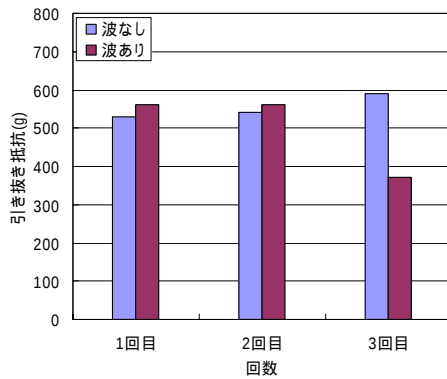


Fig.4.3.2 引き抜き抵抗

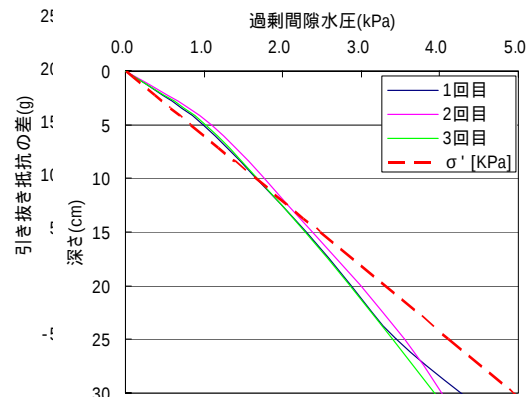


Fig.4.3.4 最大変動過剰間隙水圧分布

(2)細粒分含有率 5% (5号珪砂+碎石粉) における引き抜き抵抗

Fig.4.3.4 は Fig.4.3.1 と同様に最大過剰間隙水圧の深さ方向の分布を示したものである。Fig.4.3.5, Fig.4.3.6 は一次元水圧変動载荷の有無について、引き抜き抵抗とその差を示したものである。引き抜き抵抗値は一次元水圧変動载荷の有無で約 100g の違いが出ている。Fig.4.3.4 を見ると、この試料では深さ 10~15cm の部分で液状化が確認できており、このことから、液状化範囲が深くなれば引き

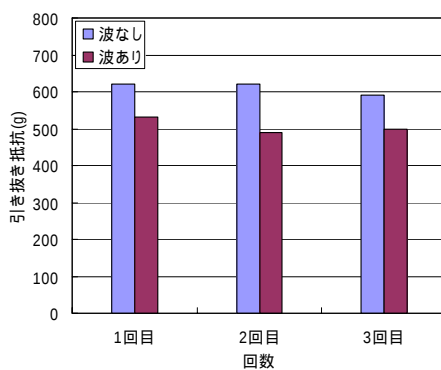


Fig.4.3.5 引き抜き抵抗

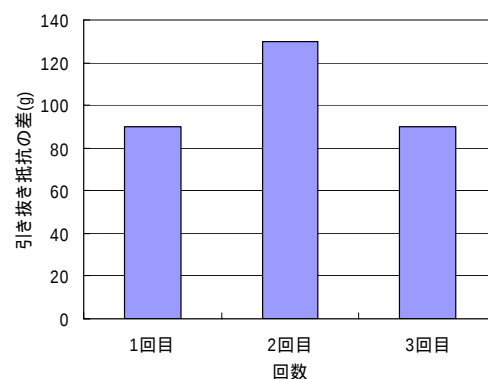


Fig.4.3.6 引き抜き抵抗の差

抜き抵抗値が小さくなる可能性が考えられる。

(3) 細粒分含有率 10% (5号珪砂+碎石粉)

Fig.4.3.7 に最大過剰間隙水圧の深さ方向の分布を, Fig.4.3.8, Fig.4.3.9 に一次元水圧変動载荷の有無について, 引き抜き抵抗とその差を示したものである。

Fig.4.3.7 から, この試料では深さ 20cm 以浅で波による液状化が発生していることが分かる。また Fig.4.3.8, Fig.4.3.9 から引き抜き抵抗は変動水圧の有無で約 200 g の差が出ている。このことから, 細

粒分含有率 5% のケースと同様に波による液状化により模型の引き抜き抵抗値が小さくなったと考えられる。また, この試料の液状化範囲は細粒分含有率 5% のものより広いことから, 変動水圧载荷の有無で引き抜き抵抗の差が大きくなったと考えられる。

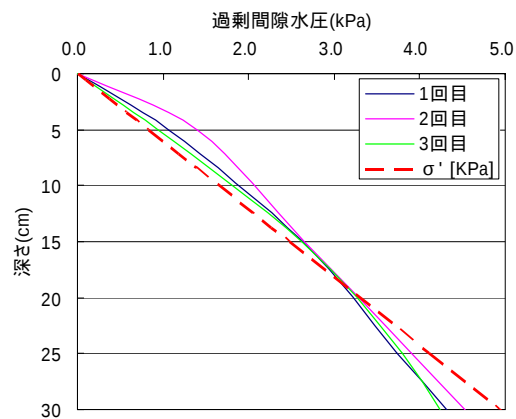


Fig.4.3.7 最大変動過剰間隙水圧分布

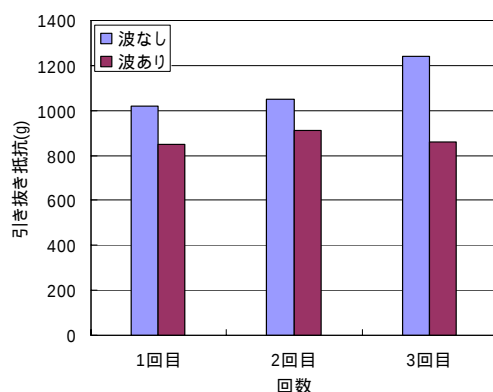


Fig.4.3.8 引き抜き抵抗

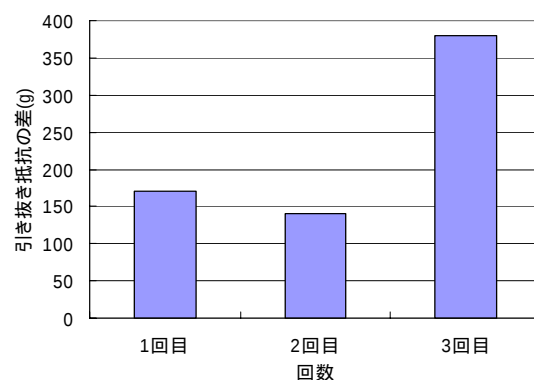


Fig.4.3.9 引き抜き抵抗の差

(4) 細粒分含有率 20% (5号珪砂+碎石粉)

Fig.4.3.10 に最大過剰間隙水圧の深さ方向の分布を, Fig.4.3.11, Fig.4.3.12 に一次元水圧変動载荷の有無について, 引き抜き抵抗とその差を示したものである。なお, 1,2 回目では間隙水圧計の値が異常値であったので含めていない。この試料では引き抜き 3 回から変動水圧の有無による引き抜き抵抗値の差が評価できなかったもので, 5 回引き抜きを行った。

Fig.4.3.10 を見ると, 地盤内には 5cm 付近まで液状化が発生している。また, Fig.4.3.12 を

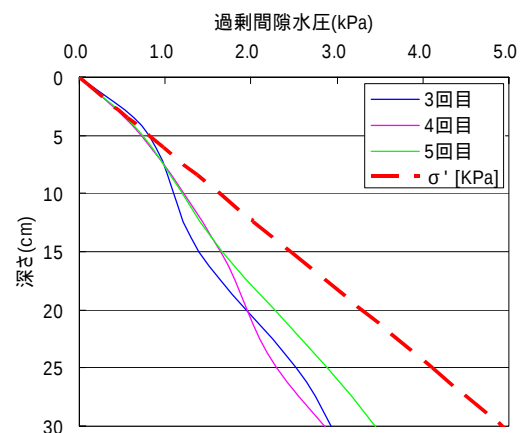


Fig.4.3.10 最大過剰間隙水圧分布

みると，変動水圧载荷によって引き抜き抵抗が減少していることがうかがえるが，結果は不安定でありはっきりしたことがいえない．

本実験では引き抜き試験を行った後，いったん水を排水して次回の試験用の模型用に穴を掘り，模型を所定の深さに設置した．その際に，締め固め用円盤で地盤表面を十分締め固めるたが，細粒分を 20% 含む本試料ではオーバーコンパクションが起きていた．この場合での透水試験を求めたところ 2.89×10^{-2} (cm/s) であり，細粒分含有率 10% よりも大きな値を示した．このように，実験の各回数ごとの地盤の均質性が十分確保できていなかったことが考えられる．

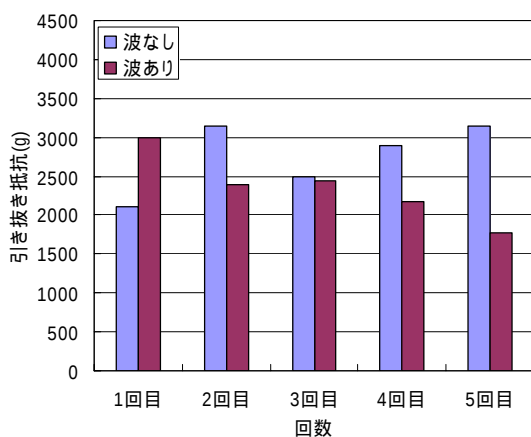


Fig.4.3.11 引き抜き抵抗

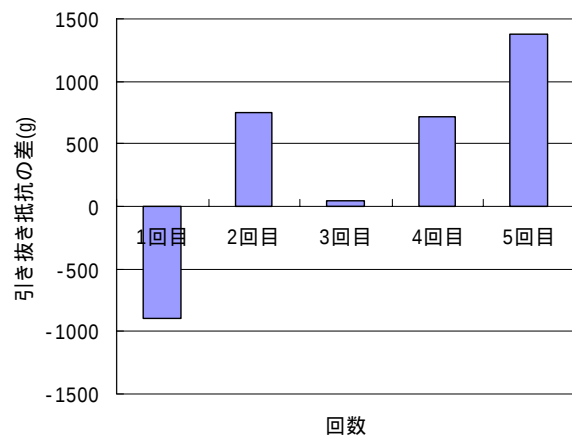


Fig.4.3.12 引き抜き抵抗の差

(5)まとめ

Fig.4.3.13 に液状化の範囲と引き抜き抵抗値の差(波がないときの引き抜き抵抗値に対する減少量)をまとめて示した。図のように，液状化範囲が広ければ引き抜き抵抗値の差が大きくなっている．すなわち，細粒分を含み透水性が低いような地盤であれば波による液状化が発生し，アマモが抜けやすくなっている可能性があるといえる．

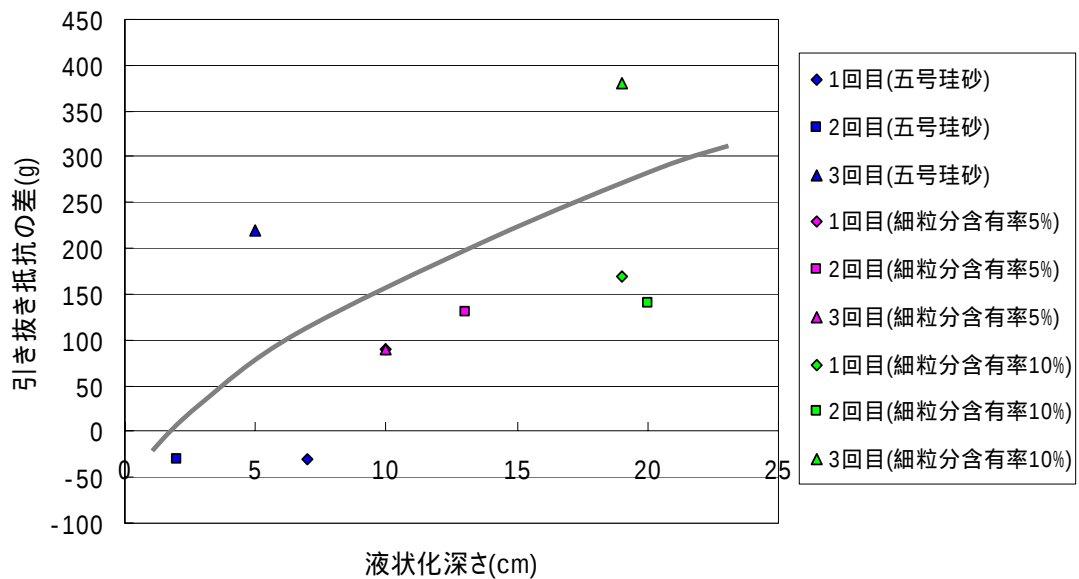


Fig.4.3.13 液状化深さと引き抜き抵抗の差の関係

4.4 粘土を含む砂質土地盤におけるアマモ模型の引き抜き抵抗

(1) 試料の物理特性

この実験では、本物のアマモの生育条件に近い試料を用いた。試料は 5 号珪砂と広島港出島粘土を混ぜ合わせ、細粒分含有率 20% に調整したものである。以下に、試料の物理特性を示す。

Table.4.4.1 試料の物理特性

比重Gs	2.676
透水係数k(cm/s)	3.39E-05

(2) アマモの模型 B の引き抜き抵抗

Fig.4.4.1 , Fig.4.4.2 に一次元水圧変動载荷の有無について、アマモ模型 B の引き抜き抵抗値とその差を示す。引き抜きをするたびに、引き抜き抵抗値が減少しているが、これは引き抜きを行った後、試料を掘り返して、再び模型を植えて実験を行うことによる試料の乱れが原因の一つとして考えられる。

しかし、その影響を考慮しても変動载荷の有無による引き抜き抵抗値の差が確認できる。



(3) アマモの引き抜き抵抗

実際のアマモの引き抜き実験を行った結果を Fig.4.4.3 , Fig.4.4.4 に示す . 実際のアマモには個体差があるので , 波による液状化によって引き抜き抵抗が小さくなったと判断することが困難であった .

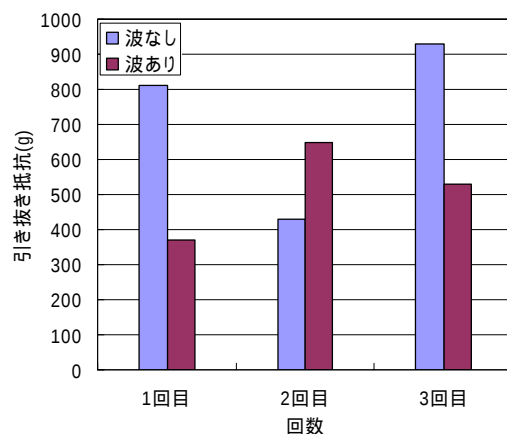


Fig.4.4.3 引き抜き抵抗

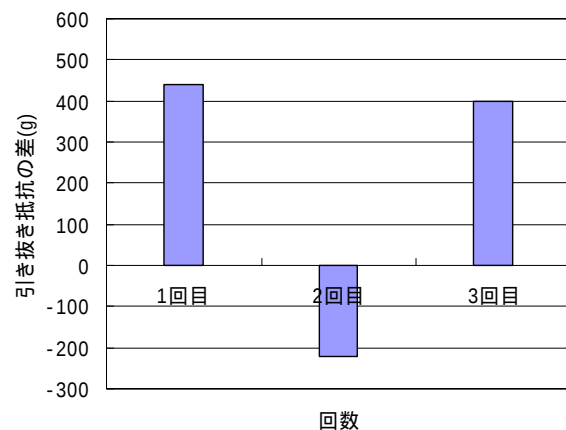


Fig.4.4.4 引き抜き抵抗の差

(4) アマモの引き抜き抵抗の個体差についての考察

アマモの引き抜き抵抗について , 個体差を発生させると考えられる要因として (a) 地下茎の長さ , (b) 地下茎の最大径 , (c) 節の数 , (d) 根の最長長さ , (e) 根の本数等が挙げられる . Fig.4.4.5 (a) ~ (e) にこれらの要因とアマモの引き抜き抵抗との関係を示す .

まず , 地下茎の長さと引き抜き抵抗との関係であるが , 地下茎はアマモを現地から採取し , 馴養させる際に地下茎はある程度の長さになるように切り落としているので , 個体差は小さい . しかし , Fig.4.4.5 (a) を見ると , 地下茎の長さとアマモの引き抜き抵抗の増減の仕方は似通っており , 地下茎の長さはアマモの引き抜き抵抗に大きな影響を与えているの

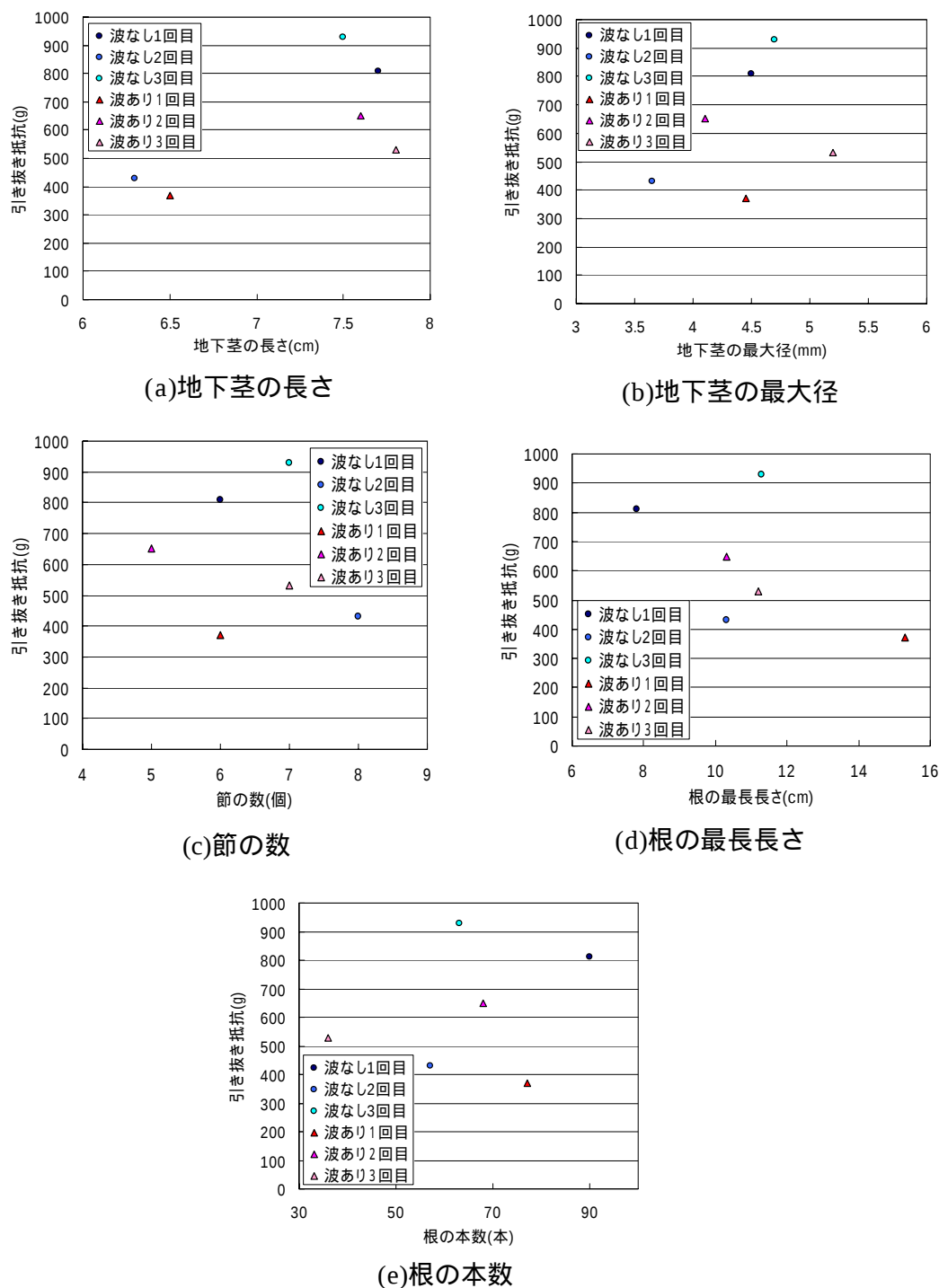


Fig.4.4.5 個体差を生む要因と引き抜き抵抗の関係

ではないかと考えられる。

Fig.4.4.5 (b)は地下茎の最大径と引き抜き抵抗との関係である。地下茎の最大径は3~5mm程度で個体差はあるもののスケールを考えると、引き抜き抵抗に大きな個体差を生じさせるほどの影響はないのではないと思われる。

地下茎にある節の数とアマモの引き抜き抵抗の関係を Fig.4.4.5 (c)に示す。節は地下茎に約 1cm 間隔で並んでおり、アマモの根は 1 つの節から 10～20 本程度生えている。前述したとおり、馴養する際に地下茎の長さがある程度揃えているので節の数に大きな個体差はないが、節の数が多ければ根の数や根の生える範囲が広くなると考えられるため引き抜き抵抗が大きくなる可能性がある。しかし、Fig.4.4.5 (c)を見ると、節の数がアマモの引き抜き抵抗に大きな影響を与えているとは判断できない。

根の最長長さとアマモの引き抜き抵抗の関係を Fig.4.4.5 (d)に示す。アマモを引き抜いた後で長さを測定したため、正確に根の最長長さを表しているとは言えないが、根が長ければ地盤の中深くまで根付き、引き抜き抵抗が大きくなると考えられる。しかし、図を見ると根の最長長さは引き抜き抵抗には大きな影響を及ぼさないと推測できる。

根の本数とアマモの引き抜き抵抗の関係を Fig.4.4.5 (e)に示す。これもアマモの引き抜き後に根の本数を数えているため、引き抜き途中で根が抜けている可能性が考えられ正確な本数を表しているとは言えない。しかし、根の本数が多ければ引き抜きに抵抗する力が大きくなると考えられる。Fig.4.4.5 (e)を見ると、波なし 3 回目と波あり 1 回目を除けば、根の本数とアマモの引き抜き抵抗には関連性が見られ、アマモの引き抜き抵抗は根の本数に起因していると考えられる。

個体差に起因するものを結論付けるには、データ数が少ないが、今回の実験では地下茎の長さ、根の数が引き抜き抵抗に個体差を生じさせる主な要因の一部だと考えられる。

(5)アマモの引き抜きの状況

ここで、実際のアマモの引き抜きの連続写真を Fig.4.4.6 に示す。(a)は引き抜く前の状態である。(b)→(c)→(d)→(e)と引き抜きが進むにしたがって地盤が盛り上がり、(f)で完全に引き抜かれている。引き抜かれた後のアマモの根には、Fig.4.4.7 に示すように土が付着している。

したがって、アマモの引き抜き抵抗に起因するものとして、4)で挙げたものの他にアマモの根の上載圧、根に付着している土の重量、引き抜く際の地盤のせん断抵抗等が考えられる。地下茎や根の大きさ・形状によってこれらの値が変わるため、引き抜き抵抗に個体差が生まれるのだと考えられる。

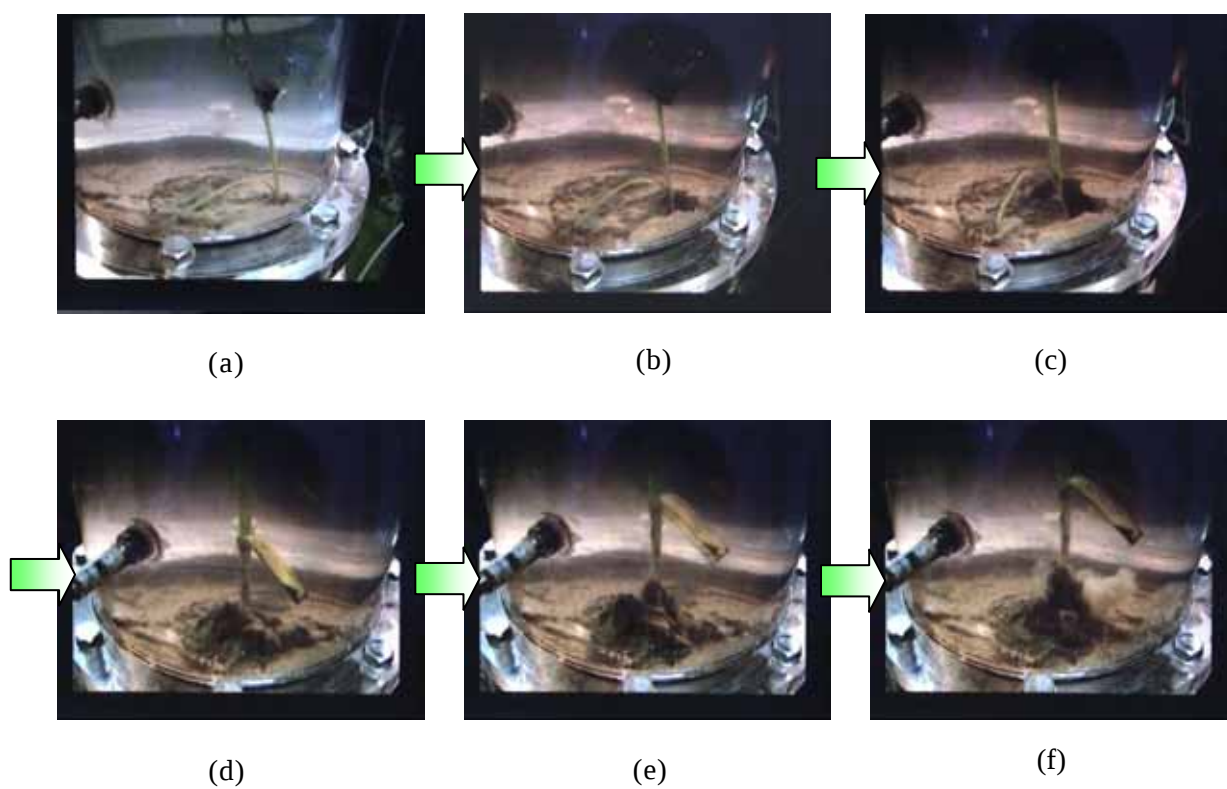


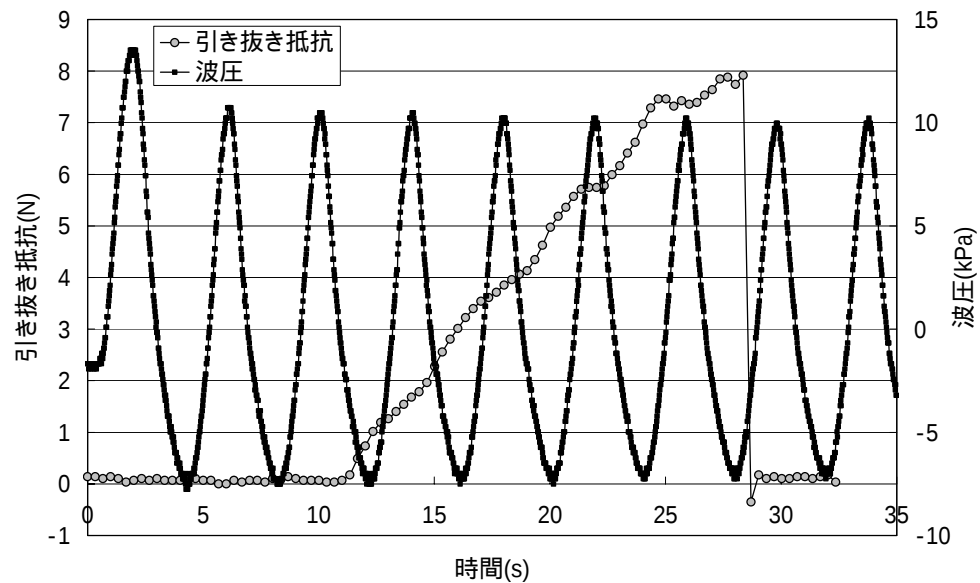
Fig.4.4.6 アマモの引き抜きの様子



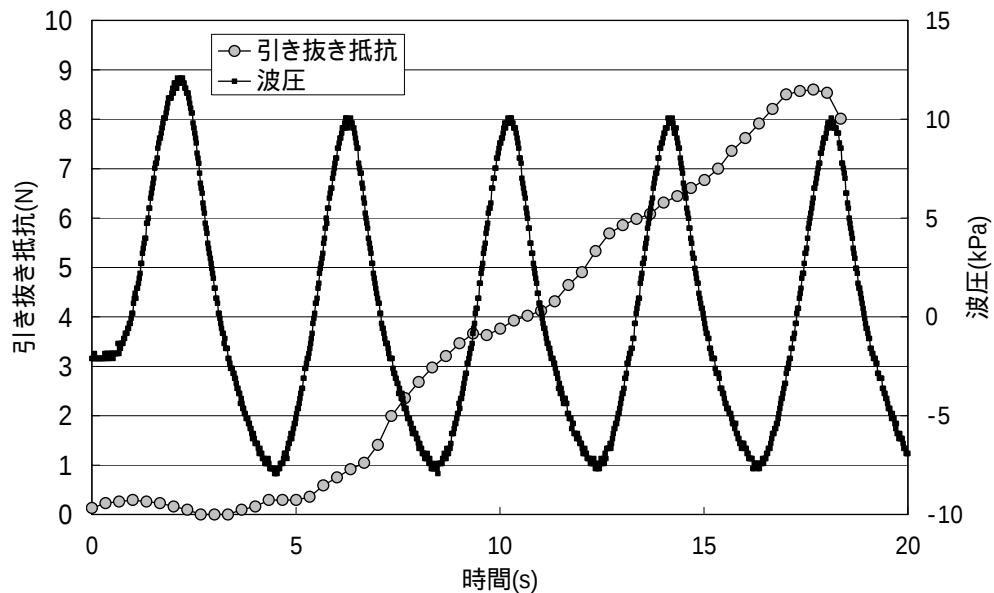
Fig.4.4.7 引き抜き後のアマモの根

4.5 波圧変動と引き抜き抵抗の関係

Fig.4.5.1 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。図を見ると、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。

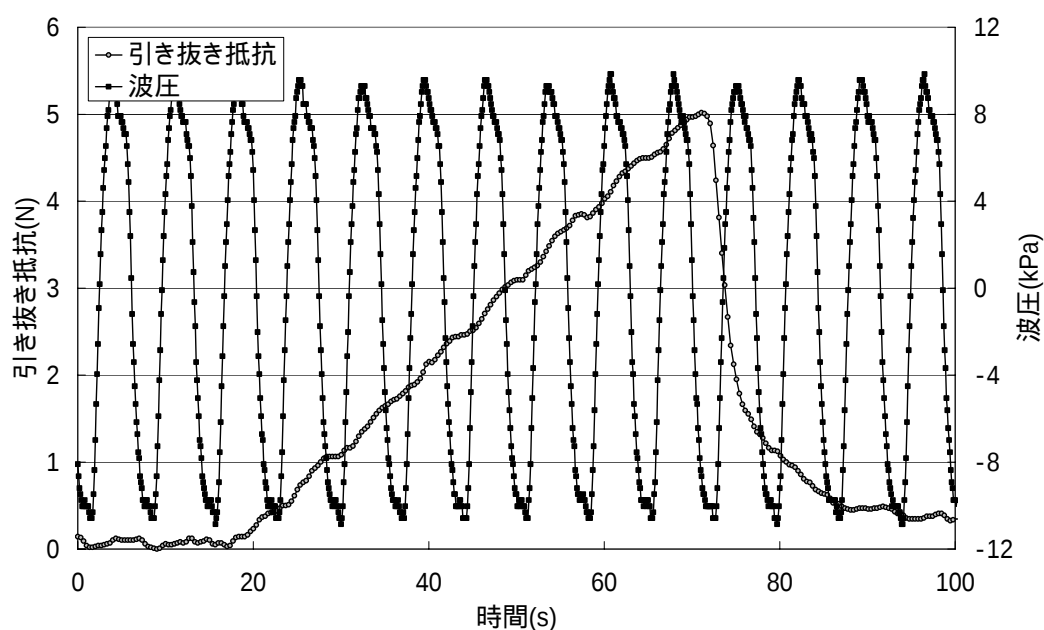


(a)アマモ模型 A (細粒分 10 % , 周期 4 秒)



(b)アマモ模型 A (細粒分 10 % , 周期 6 秒)

Fig.4.5.1 引き抜き中の波圧変動と引き抜き抵抗

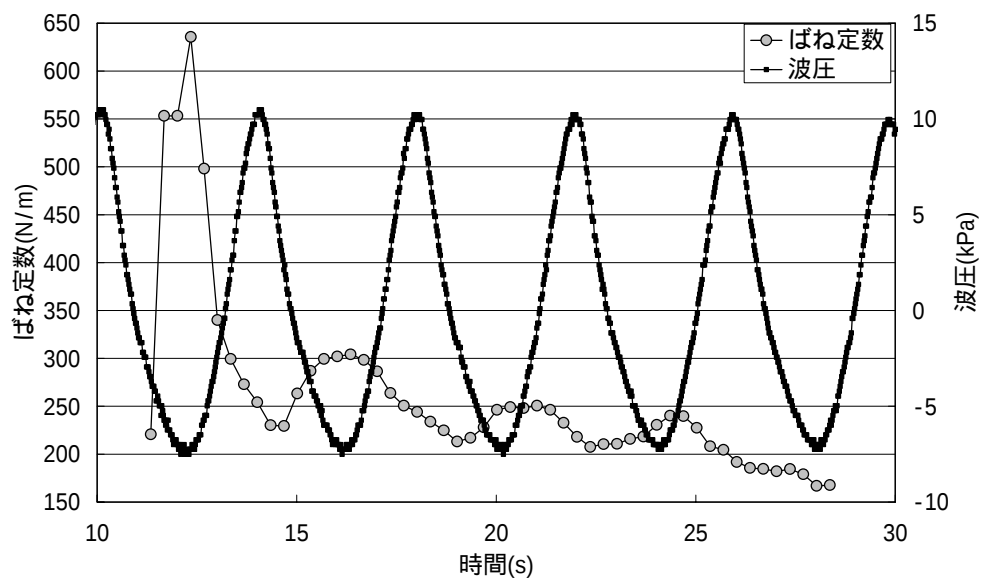


(c)実アマモ（細粒分 20 %，周期 7 秒）

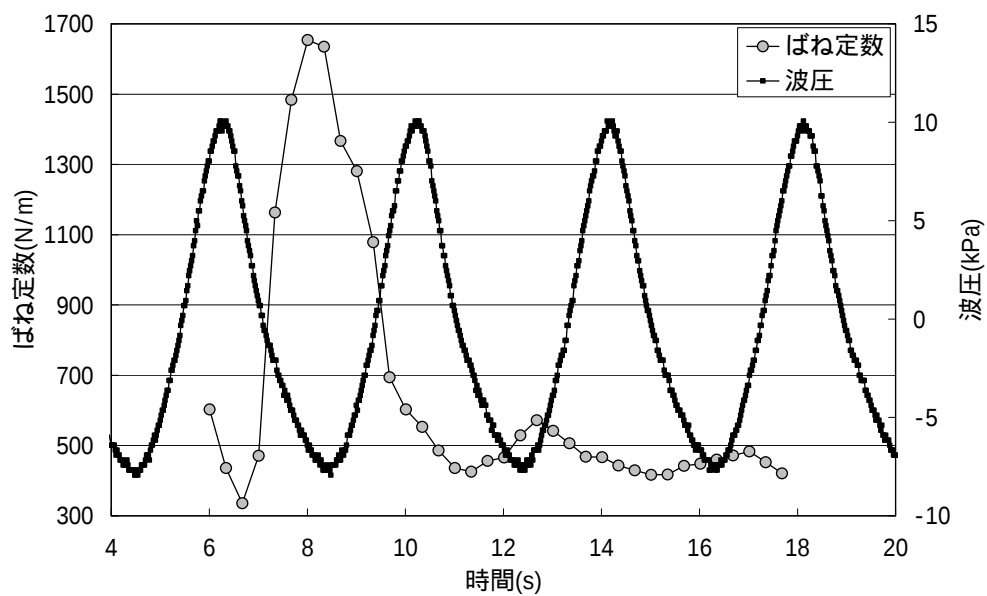
Fig.4.5.1 引き抜き中の波圧変動と引き抜き抵抗(つづき)

Fig.4.5.2 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，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，水圧下降過程でバネ定数が上昇するなど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．

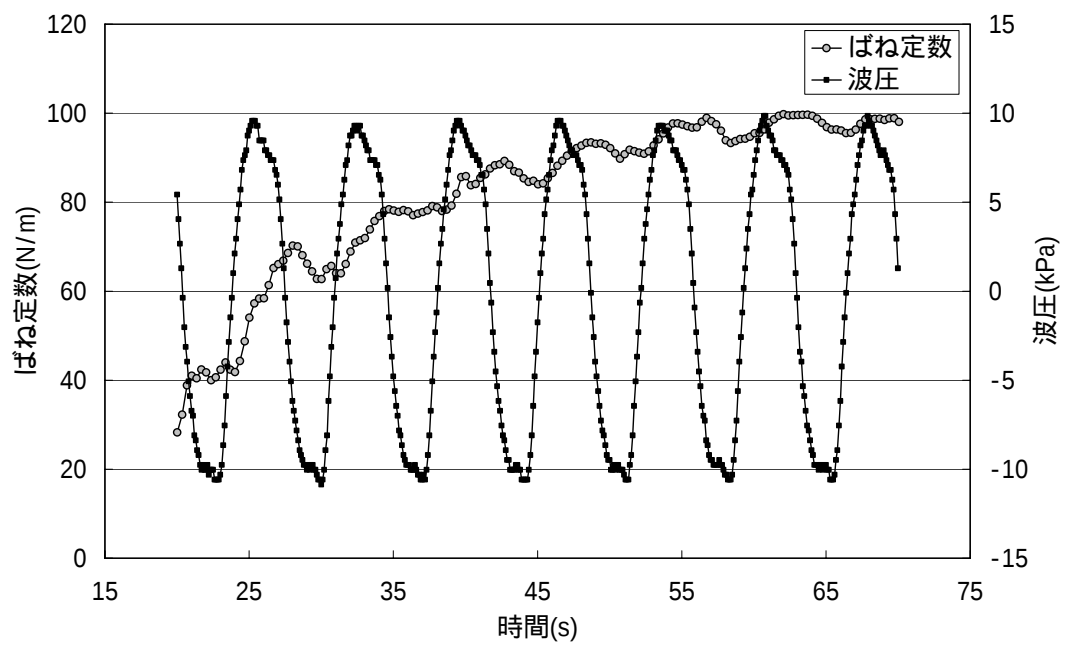


(a)アマモ模型 A (細粒分 10 % , 周期 4 秒)



(b)アマモ模型 A (細粒分 10 % , 周期 6 秒)

Fig.4.5.2 引き抜き中の波圧変動とばね定数



(c)実アマモ (細粒分 20 %, 周期 7 秒)

Fig.4.5.2 引き抜き中の波圧変動とばね定数 (つづき)

4.6 波浪条件の違いによる実際のアマモの引き抜き抵抗の変化

ここでは、様々な種類の変動水压を載荷し、実際のアマモの引き抜き抵抗がどのように変化するのかを見て、波の条件が実際のアマモの引き抜き抵抗に及ぼす影響を検討する。ただし、種々の実験準備上の問題から地盤層厚は 18cm と浅い。

(1)実験装置

実験に用いた水压変動型液状化実験装置を Fig.4.6.1 に、実験装置模式図を Fig.4.6.2 に示す。本装置は 4.2.1 の実験装置の亚克力円筒部が高さ 500mm、内径 220mm、外径 250mm の一つの亚克力円筒部が変わったものである。この亚克力円筒部の側面には間隙水压計を計測するための穴が 12 箇所らせん状に開いており、同時計測は最大 6 箇所まで可能で、深さ 1cm 単位で間隙水压を計測することができる。また、引き抜きはモーターを用いることにより定速で行った。



Fig.4.6.1 水压変動型液状化装置

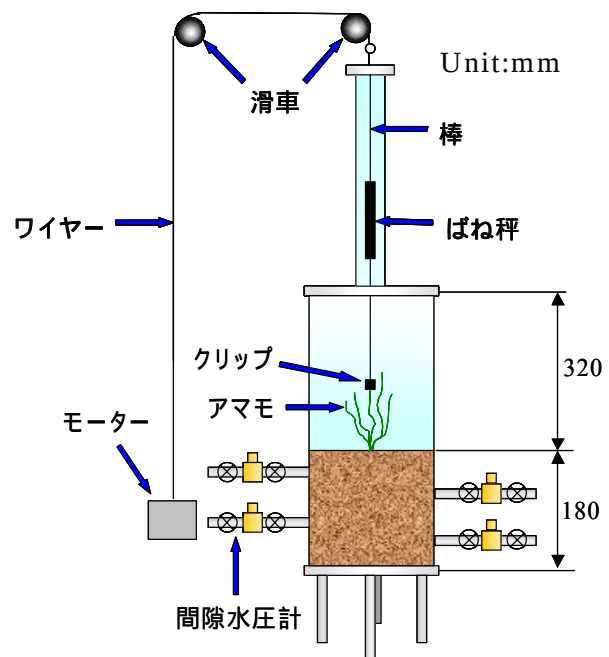


Fig.4.6.2 実験装置模式図

(2)実験方法

〔実験準備〕

実験装置の最下端にポーラスストーンをはめ、リングの内径に合わせたろ紙を敷く。地盤層厚が 18cm になるまで試料を詰める。

二週間養生したアマモをポットから取り出し、試料を乱さないように植えつける。

模型地盤表面から深さ 2cm ごとに間隙水压計を地盤中に差し込む。

試料を乱さないように上からゆっくりと水を注入する。

アマモの葉をクリップで挟み、ばね秤、棒と繋げ、蓋をして容器内を水で満たす。

棒とワイヤーを繋げ、ワイヤーは滑車を通してモーターと固定する。

データロガー、パーソナルコンピュータ、実験装置を接続する。

水圧変動载荷装置によって徐々に水圧を上げていき、最終的に地盤の表面において 49.0kN/m^2 (水深 5m 相当) となるようにする。

〔実験開始〕

静水圧確認後、水圧変動载荷装置により変動水圧を加える。

引き抜き速度 2mm/min でモーターにより模型の引き抜きを行う。

引き抜き中は、デジタルビデオカメラでばね秤を撮影する。

試験途中、間隙水圧の計測を行う。

実験終了後

デジタルビデオカメラで引き抜き抵抗のピーク値を確認する。

(3)実験条件

実験に用いた試料、水深として与える静水圧は前述した実験と同様である。ここでは、波浪条件としての水圧変動は、微小振幅波理論の深海波(沖波)の条件から決定した。

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2$$

$$\text{波形勾配} = \frac{H_0}{L_0}$$

ここで、 L_0 ：沖波の波長(m)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 T ：周期(s)、 H_0 ：沖波の波高(m)を示す。Table.4.6.1 に本実験における実験パターンを示す。波形勾配がほぼ一定となるように両振幅と周期の関係を变えて実験を行った。

Table.4.6.1 実験パターン

地盤高(cm)	両振幅(kN/m^2)	周期(s)	備考
20	9.8	4	H_0/L_0 0.03
	19.6	7	
	29.4	9	

(4)実験結果・考察

Fig.4.6.3 に、それぞれの波浪条件でのアマモの引き抜き抵抗値を示す。引き抜き抵抗値が小さいものから順に No.1~No.4 としている。

また、Fig.4.6.4 (a)に波高 1m、周期 4sec、(b)に波高 2m、周期 7sec、(c)に波高 3m、周期 9sec の変動水圧を载荷したときの最大過剰間隙水圧の深さ方向の分布を示す。

Fig.4.6.4(a)から、波高 1m では液状化範囲は最大で 5cm 以浅であり、4.3.1 項の結果を考

慮すると，波による液状化は地盤表層部分で発生しているが，引き抜き抵抗にほとんど違いは現れないと考えられる．つまり，この波浪条件ではアマモは抜けやすくなり，Fig.4.6.3 に見られる引き抜き抵抗の差は個体差であると推測できる．

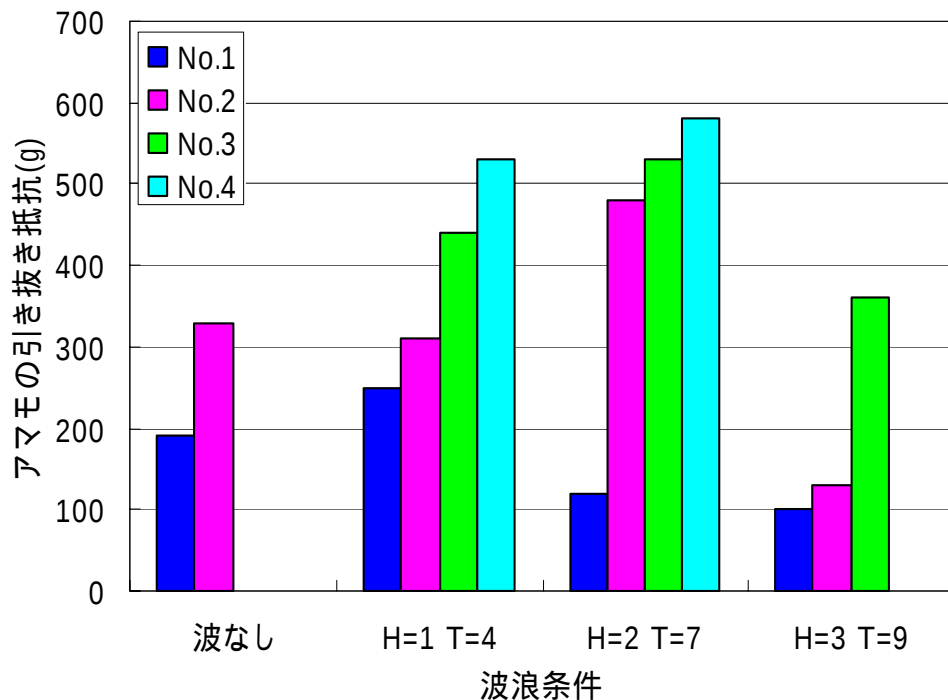
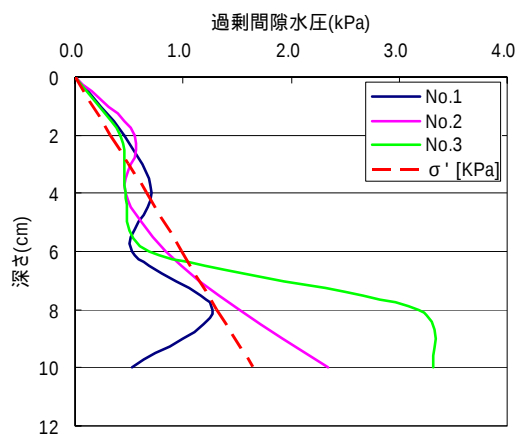


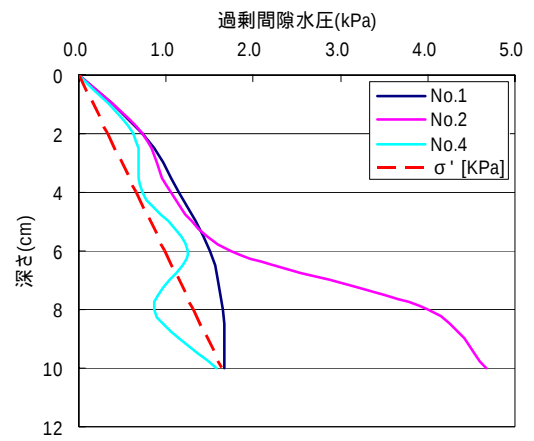
Fig.4.6.3 アマモの引き抜き抵抗

Fig.4.6.4 (b)，(c)から，波高 2m 以上では液状化範囲は深さ 10cm 程度まで広がっていることが分かる．同様に 4.3.1 項の結果を考慮すると，アマモが植えられている部分より深いところから波による液状化が見られているため，アマモが抜けやすくなっていた可能性があると考えられる．個体差が大きいため液状化による影響であると断定することは困難であるが，特に波高 3m においては引き抜き抵抗が液状化によって小さくなっていると思われる．

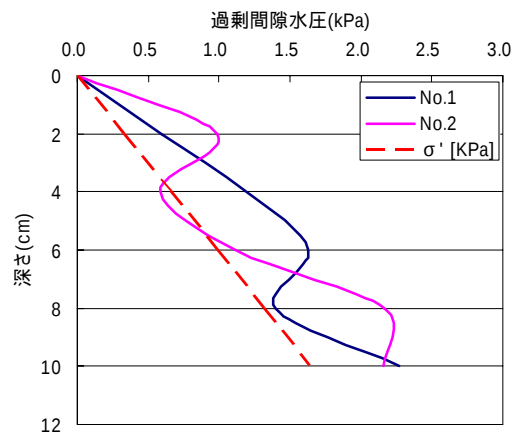
したがって，個体差があるため波による液状化の影響を定量的に評価することは困難であるが，波浪条件によって液状化範囲が広がっているとすると，アマモが抜けやすくなっている可能性が高い．



(a)H=1 T=4



(b)H=2 T=7



(c)H=3 T=9

Fig.4.6.4 最大変動過剰間隙水圧

4.7 地盤強度に基づく引き抜き抵抗の推定式

Fig.4.7.1 に細粒分含有率と引き抜き抵抗値の関係を示す．図のように、細粒分含有率が増加すると、引き抜き抵抗も増加する傾向が見られた．ここでは、試料の違いによる地盤強度の違いと液状化の影響が引き抜き抵抗にどのような影響を与えるのかを検討した．

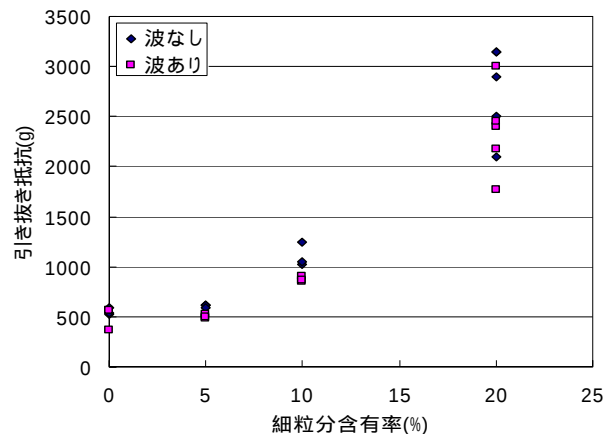


Fig.4.7.1 細粒分含有率と引き抜き抵抗

(1) ベーンせん断試験

アマモの模型の引き抜き抵抗に起因するものとして、模型に上載している試料の水中重量、試料のせん断抵抗、水圧等が考えられる．ここでは、試料の水中でのせん断抵抗を求めるために非排水強度を簡単に得ることができるベーンせん断試験を行った．Fig.4.7.2 にベーンせん断試験機の模式図を示す．手順は以下のとおりである．

〔手順〕

所定の深さまで試験機を地盤に挿す．

10 秒で 90° 回転するようにゆっくりと回す．

せん断強度が低下し始めるまで回転させ、低下したら回転を止め、その深さでのせん断強度を読む．

Fig.4.7.3(a)は、五号珪砂に碎石粉を混ぜた試料のベーンせん断試験の結果である．いずれの試料も深さが 10cm 以深になるとベーンせん断試験機の測定可能範囲(20kPa)を超えてしまった．Fig.4.7.3(b)は、五号珪砂に粘土を混ぜた試料のベーンせん断試験の結果である．深くなるにつれてせん断強度が増加していることがわかる．

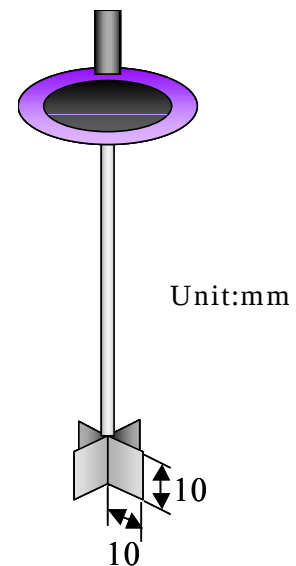


Fig.4.7.2 ベーンせん断試験機模式図

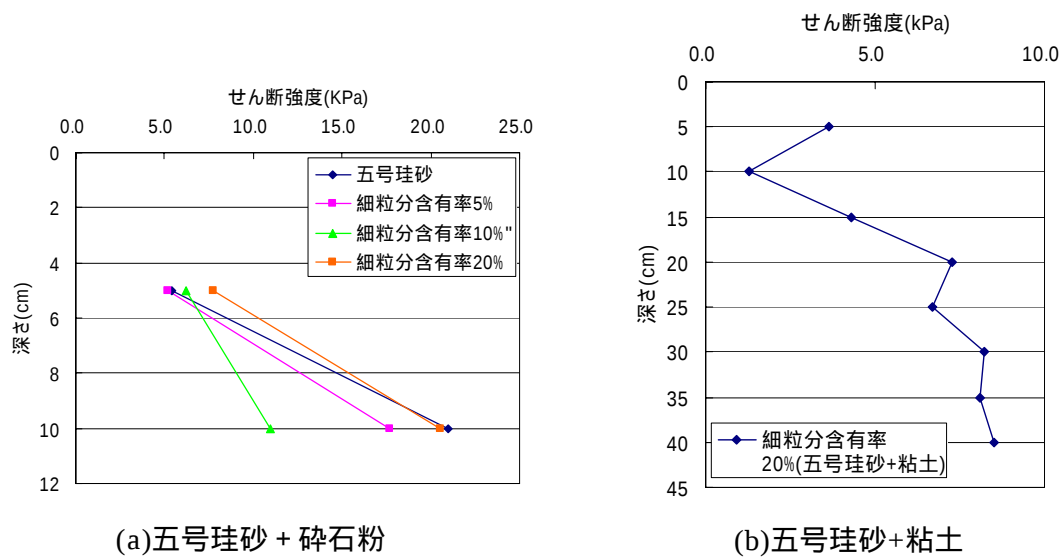


Fig.4.7.3 深さとせん断強度

(2)引き抜き抵抗の予測式

ここでは,(1)のベーンせん断試験の結果を用いて,アマモの模型 A の引き抜き抵抗の予測式を提案する.

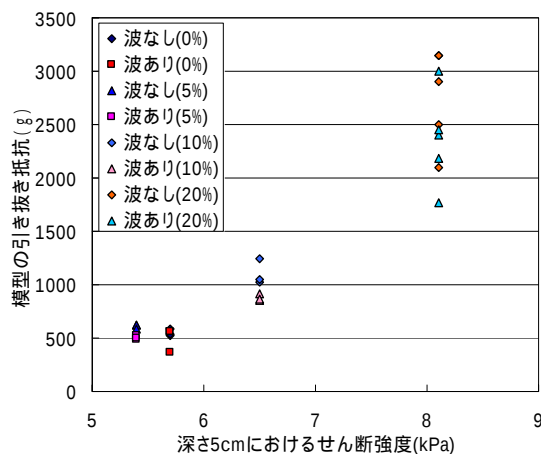


Fig.4.7.4 せん断強度と引き抜き抵抗

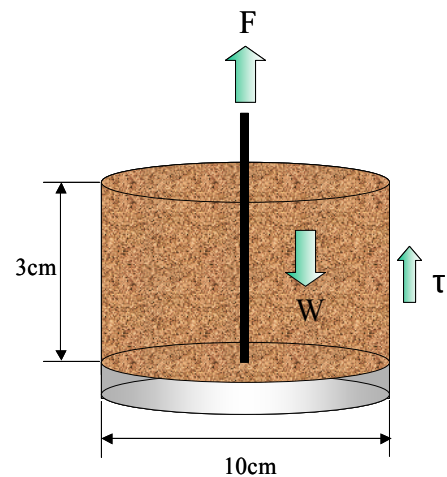


Fig.4.7.5 引き抜き抵抗の考え方

Fig.4.7.4 に各試料の深さ 5cm におけるせん断強度とアマモの模型 A の引き抜き抵抗の関係を示す. 地盤のせん断強度が増加すると引き抜き抵抗も増加する傾向が見られる.

ここで, 4.2.2 項で説明した模型 A を簡単のために, 直径 10cm の円盤に置き換えて考える. 引き抜き抵抗に起因するものとして, Fig4.7.5 に示すように模型に上載している試料の水中重量 W [g], 試料のせん断抵抗 τ [g] 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 [g]は，

$$F = W + \tau \quad (4.7.1)$$

で表される．

ここで，せん断抵抗 τ [g]について考える．地盤表面でのせん断強度が 0 [g/c m²]で深さ 5cm 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 τ_z [g/c m²] は，深さ 5cm でのせん断強度を τ_b [g/c m²]とすると，次式で表される．

$$\tau_z = \frac{\tau_b}{5} \cdot z \quad (4.7.2)$$

よって，模型に上載している厚さ 3cm の土塊の側面にかかるせん断抵抗 τ [g]は，

$$\tau = \int_0^3 2\pi r \cdot \tau_z dz \quad (r : \text{円盤の半径}) \quad (4.7.3)$$

となる．

したがって，式(4.7.1)は，以下のように変形できる．

$$F = W + 9\pi \cdot \tau \quad (4.7.4)$$

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 Table.4.7.1 に示す．この表から，アマモの模型の引き抜き抵抗は精度良く予測できていないことが分かる．その原因として，地盤の不均質性による引き抜き抵抗の誤差，ベーンせん断試験によるせん断強度の測定誤差，予測式が不適切である事等が考えられる．

Table.4.7.1 引き抜き抵抗の予測と実際

細粒分含有率(%)	非排水強度(kPa)	引き抜き抵抗予測(g)	引き抜き抵抗の平均(g)	予測との差(g)
0	5.4	1950	553	1397
5	5.2	1892	610	1282
10	6.2	2180	1103	1077
20	7.7	2613	2760	-147

ここで，波がある場合の引き抜き抵抗の減少について検討する．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．液状化が発生している場合の深さ 5cm での最大過剰間隙水圧は，Fig.4.3.4，Fig.4.3.7 を見ると， $0.1 \sim 0.3$ [kPa]程度である．この過剰間隙水圧は上向きの浸透水圧となっていると考えられる．この場合，直径 10cm の円盤に加わる上向きの力は $80 \sim 240$ [g]となる．変動水圧载荷の有無で引き抜き抵抗の差異は，細粒分含有率 5%のとき約 100g，細粒分含有率 10%のとき約 200 g であることから，実験結

果とほぼ一致している。したがって、引き抜き抵抗の減少は過剰間隙水圧の発生による浸透水圧によるものとして説明できる。

4.8 4章のまとめ

本章では、水圧変動型液状化実験装置を用いて、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) アマモ場の波浪時の被災原因として、波による液状化が考えられるが、アマモ模型を用いた実験の結果、一次元水圧変動に起因する液状化によりアマモの引き抜き抵抗が減少することが明らかになった。
- 2) 自然藻場から採取し、ポッドで2週間養生したアマモの引き抜き抵抗は個体差があり、変動水圧による影響の評価は困難であった。データ数が少なく断定はできないが、地下茎の長さ、根の数がアマモの引き抜き抵抗に個体差を生じさせる主な要因の一部と考えられる。
- 3) 一次元変動水圧化でアマモを引き抜く場合、地盤のバネ定数は水圧変動の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。
- 4) 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法については今後更に検討が必要である。

5．波浪による水圧変動をうける砂質土地盤からの細粒分の流出に関する研究

5.1 はじめに

浚渫土を用いた干潟や藻場の造成はこれまでも多くの事例があるが、自然の干潟・藻場と同程度の環境再生が達成された例もある一方、地盤の変形による干潟面積の縮小、表層からの細粒分の流失による砂浜化、生態系の形成不良などの問題が指摘されている。沿岸環境再生の目的を達するためには、藻場・干潟の再生に必要となる科学的な知見を増やし、それらに基づいた合理的な設計・施工・維持管理技術を確立することが不可欠である。

造成干潟・藻場の生物生息機能において地盤表層(覆砂部)における粒度分布は重要である。底生生物やアサリなど有用生物が生息する上では、表層部の土が10～20%程度の細粒分を保持していることが望ましいとされている。広島港五日市地区の人工干潟では、干潟表層部(浚渫粘土層の上に覆砂層として造成)に完成当初10%弱含まれていた細粒分の多くが3～4年後に消失していることが報告されている(広島県・復建調査設計, 2003)。一方、尾道糸崎港海老地区造成干潟は、五日市地区人工干潟と同様に、港湾整備で発生したシルト・粘土分主体の浚渫土で埋め立てた上に覆砂を行っているが、自然干潟と同程度の底生生物現存量及び貴重種の生息が報告されており(春日井ら, 2003)、自然に近い砂泥質の造成干潟として高く評価されている。篠崎らの調査によると、海老地区造成干潟では、造成後18年が経過しているにもかかわらず覆砂層全体に約10%の細粒分が含まれており、このことが底生生物の生息に良好な条件のひとつとなっていると考えられる(篠崎ら, 2006)。

細粒分が干潟・藻場の表層地盤中から抜け出す原因として、海水流動によるせん断力によって表層の微細粒子が移動するということが考えられるが(李ら, 1999)、表層内部からの抜け出しは説明されていない。

土田ら(2006)は、波浪による海底地盤の水圧変動に着目して室内実験を行い、地盤表層に一次元に水圧変動を加えることにより地盤の表面に液状化が発生する場合、地盤内の細粒分が上方に移動し、最終的に表層に表出する現象が起こることを報告した。本章では、一次元水圧载荷中の間隙水圧の発生と载荷後の地盤中の粒度分布を調べ、深度方向の粒度分布の変化、地盤の飽和度を示すB値の応答特性の影響、振動台により地盤を液状化させたときの細粒分移動現象との比較を行って、一次元水圧変動下での細粒分の移動に関する考察を行った。

5.2 一次元水圧変動下における地盤内細粒分の上方移動と抜け出し

Fig.5.2.1 に一次元水圧変動载荷装置を示す。本装置は、内径220 mm、高さ500 mmで、下部に間隙水圧計ニードル穴があり、24時間の载荷中の間隙水圧を測定した。この装置の上部に変動水圧载荷装置を接続し、各条件を満たすサイン波の水圧を载荷した。

実験には人工干潟の覆砂の粒度を参考にして、5号珪砂(平均粒径0.338mm)90%と細粒分10%を混合した試料を用いた。混合する細粒分は、非塑性の砕石粉と広島港粘土(液性限界118.8%)を混合調整したものをを用いた。Table5.2.1 に細粒分の混合比を示し、それぞれの粒

度分布を Fig.5.2.2 に示した．図のように砕石粉と広島港粘土の粒度特性は類似しているが塑性は大きく異なり，砕石粉だけの試料 C0-SF10，砕石粉 9%で粘土 1% C1-SF9，砕石粉 8%で粘土 2% C2-SF8 は液性限界が測定できなかった．

実験条件をTable5.2.2 に示すが，模型地盤の初期相対密度は 50%とし，波浪条件は水深 2mにある地盤を想定し静水圧として地盤表面に 19.6kN/m^2 の水圧を加え，変動水圧として波高 1.2m(両振幅 11.5 kN/m^2)の正弦波形を用いた．なお，波浪条件は五日市人工干潟の平衡勾配算出時に用いられた設計波浪を参考に決定した．

海底面の圧力変動が地盤内に伝わる時圧力伝達の遅れに起因して周期的に過剰間隙

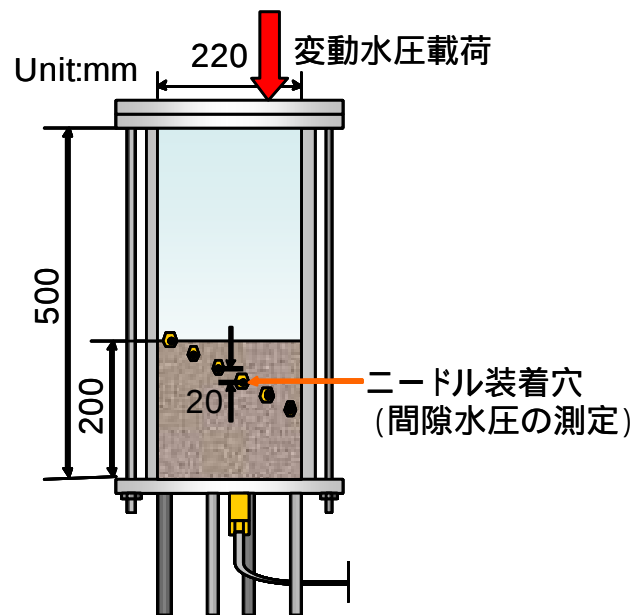


Fig.5.2.1 一次元水圧変動载荷装置

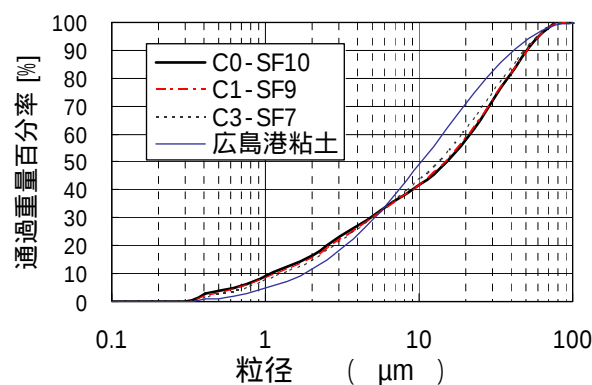


Fig.5.2.2 珪砂と混合した細粒分の粒度分布

水圧 Δu^* が発生する．今回の実験では， Δu^* は次式で求められる．

$$\Delta u^* = u_z - p_w - \gamma_w z \quad (1)$$

ここに u_z は深度 z における間隙水圧， γ_w は水の単位体積重量， p_w は地盤表面における変動水圧である．

Fig.5.2.3(a)，(b)に載荷 12 時間後の間隙水圧の深さ方向分布を示す．図の右側の数字はサイン関数で与える水圧のフェーズを表している． 0° の変動水圧 0 を基準に， 90° までが水圧増加過程， 90° から 180° がもとの静水圧に戻る過程， 180° から 270° はさらに減少する過程， 270° から 360° は増加してもとの静水圧に戻る過程を表す．Fig.5.2.3(a)をみると，C0-SF10 の場合、深さ約 3.0cm までの範囲において水圧下降フェーズのときに過剰間隙水圧が初期有効応力を上回り液状化が発生している．しかし水圧上昇フェーズでは負の過剰間隙水圧が発生して有効応力が増加しており，善ら(1987)がきれいな砂地盤について報告した液状化と高密度化が，地盤の表層で繰り返し起こっていることがわかる．一方，Fig.5.2.3(b)は C2-SF8 の試料の場合であるが，応力効果過程でも過剰間隙水圧は初期の有効応力よりも小さく，液状化は発生していない．

Fig.5.2.4 は 24 時間載荷後の各地盤深さにおける細粒分含有率である．図より C0-SF10 では深度 1.5～7cm の範囲で細粒分が減少し，その分は表層に表出している．C2-SF8 の倍は細粒分含有率の変化はみられず，地盤内で安定していたと考えられる．

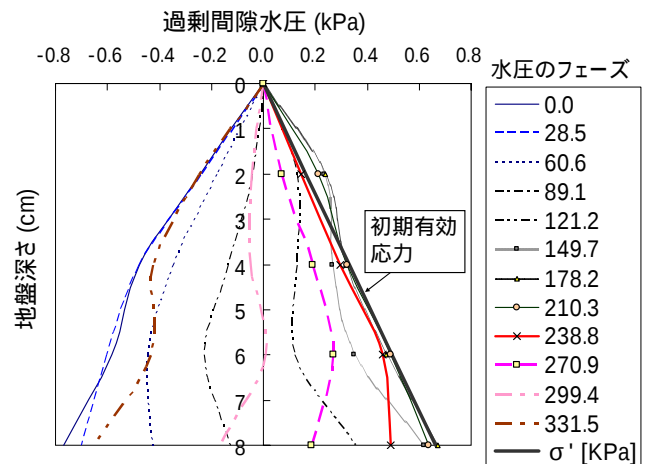
Fig.5.2.5 は，細粒分が地盤表面に大きく抜け出したときの，載荷後の各地盤深さにおける細粒分の粒度分布である(図中の数字は深度(cm))．図をみると，表層(深度 0.5cm)の細粒分は粒径が $10\mu\text{m}$ 以上で平均粒径が $35\mu\text{m}$ と，粒径の大き

Table5.2.1 細粒分中の粘土添加率

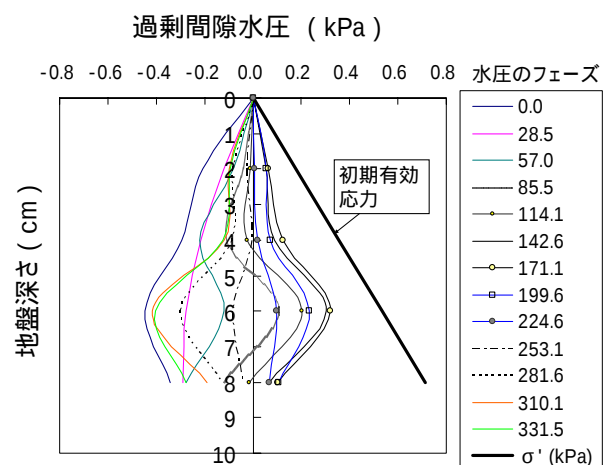
試料名	砂	細粒分		液性限界(%)
		海成粘土	砕石粉	
C0 - SF10	90%	0%	10%	N.P.
C1 - SF9	90%	1%	9%	N.P.
C2 - SF8	90%	2%	8%	N.P.
C3 - SF7	90%	3%	7%	40.1

Table5.2.2 実験条件

両振幅[kN/m ²]	11.5
周期 T[s]	5
相対密度[%]	50
想定深度[m]	2.0



(a) C0-SF10 載荷 12 時間後



(b) C2-SF8 載荷 12 時間後

Fig.5.2.3 過剰間隙水圧の深さ方向分布

い粒子が集中しており，細粒分の中でも粒子の大きいものが選択的に上方に移動していることがわかる．

このように特定の細粒分が上方に移動する原因を波による液状化と関連付けて考えてみる．波による液状化は水圧の伝達遅れが生じることにより地盤内に過剰間隙水圧が発生し，過剰間隙水圧が有効応力を超えたときに生じる．液状化時は通常の状態では拘束しあっていた土粒子がその拘束力を失う状態になる．波浪による液状化は水圧下降時に周期的に発生し，その後水圧上昇で有効応力が回復するので，土粒子は再配列し拘束される．このとき大きな粒子ほど先に沈むので粒子の再配列が起こり， $30\mu\text{m}$ 以上の細粒分は徐々に上方に移動していく．一方， $30\mu\text{m}$ 以下の粒子が移動しない理由はいきらかではないが，粘性があって大きな粒子に接触している場合は液状化の影響を受けにくいと推測される．

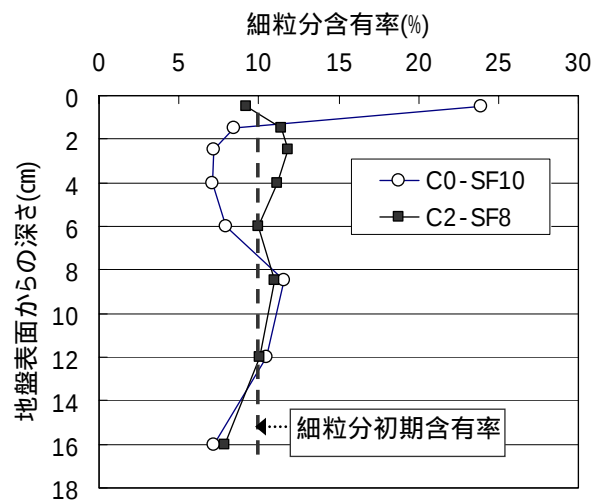
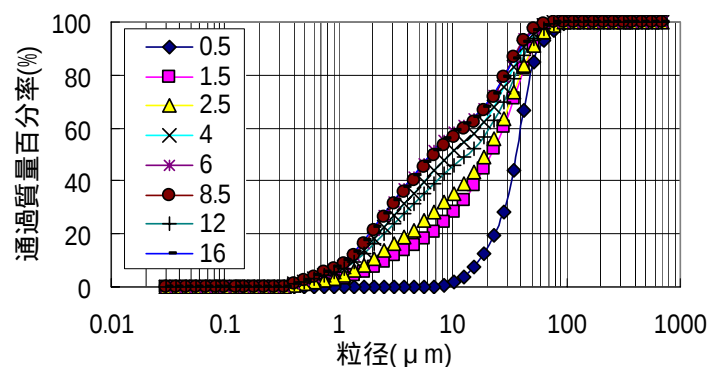


Fig.5.2.4 変動水圧载荷後の細粒分含有率



C0-SF10 セル境界部

Fig.5.2.5 一次元水圧変動载荷後の各深度における粒度分布

5.3. 地盤内飽和度が細粒分流出に与える影響

地盤内飽和度が波による液状化に影響を及ぼすことは知られているが，細粒分流出との関係を調べるために飽和と不飽和の場合で一次元水圧载荷実験を行った．この際，試料はすべて C0-SF10 を用いた．

Fig.5.3.1(a)，(b)は，地盤を飽和させる際に，間隙空気をいったん二酸化炭素に置き換えて水を通すことにより地盤を飽和させた場合と，二酸化炭素を通さないで水を通すことにより地盤を作成した場合の2つについて，地盤に加わる水圧を増加させた時の地盤内の間隙水圧の応答を間隙水圧係数 B で示している．

B 値は次式で算出され，間隙が水で完全に満たされていれば，通常の土ではほぼ B 値が 1.0 に等しくなり，一般に B 0.95 の場合には完全飽和状態をほぼ満足していると考えられる．

$$B = \Delta u / \Delta \sigma \quad (2)$$

Fig.5.3.1(a)では間隙水圧が 0.5 秒程度で応答する．一方，Fig.5.3.1(b)では一次元水圧変動

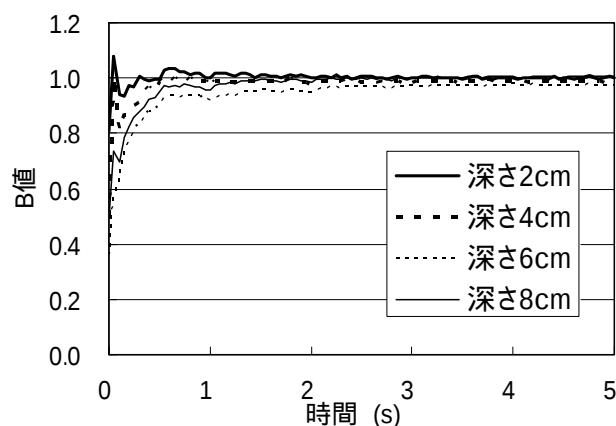


Fig.5.3.1(a) 飽和化にCO₂を使用したときのB値と時間の関係

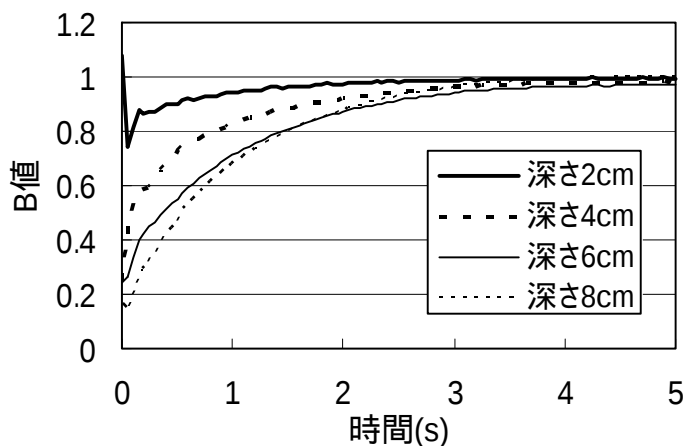


Fig.5.3.1(b) 飽和化にCO₂を使用しないときのB値と時間の関係

が地盤中に伝達するまでに 3 秒程度を要することから，地盤の間隙水圧の応答の遅れに起因する液状化が発生しやすくなっていると考えられる．

Fig.5.3.1(b)の条件で作成した地盤に一次元水圧変動を加えたときの間隙水圧特性が Fig.5.2.3(a)であり，細粒分含有率と深度の関係が Fig.5.2.4 であった．Fig.5.3.2 は，同様の地盤において Fig.5.3.1(a)のように二酸化炭素を用いて飽和化したときの一次元水圧変動下の間隙水圧応答である．図のように，過剰間隙水圧の発生量が非常に少ないが，これは間隙水圧応答が良いために，地盤内の水圧と地盤表面に加わる水圧の差が少ないことに起因する

Fig.5.3.3 は，一次元変動水圧を 24 時間載荷した後の細粒分含有率の深さ方向分布である．図のように，飽和度が高い場合細粒分の移動はほとんどみられなかった．

Fig.5.3.4 は載荷終了後の地盤表面の様子である．飽和度が低い場合はほとんどあらゆる

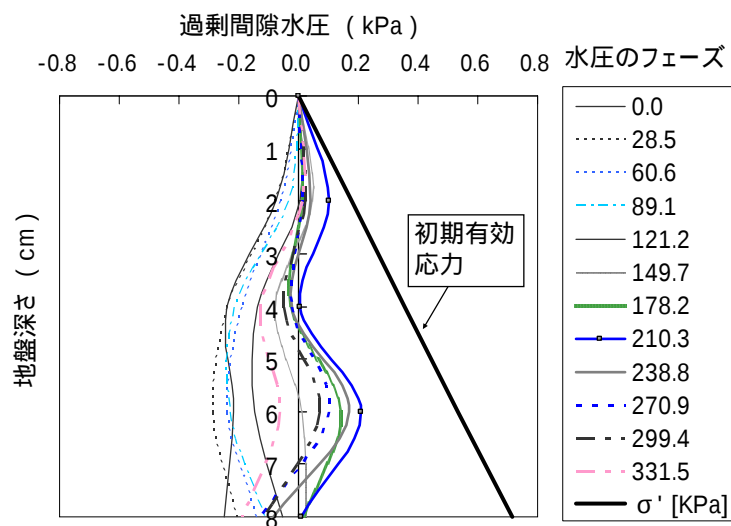


Fig.5.3.2 飽和度の違いによる過剰間隙水圧発生比較

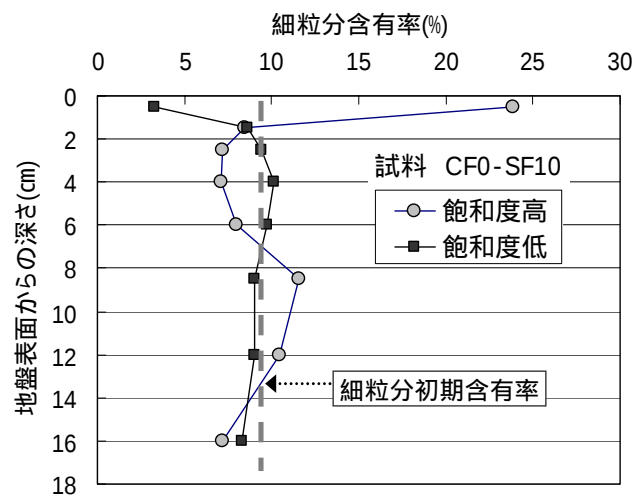


Fig.5.3.3 飽和度の違いと細粒分の移動の関係

場所で細粒分が表層から抜け出しており、細粒分(黒い部分)が表層に堆積している。また、変動水圧が载荷中に 2.5mm の振幅で表層は振動していた。一方、飽和度高の場合には载荷中の地盤の変動は視覚的に確認できなかった。以上の実験結果は、細粒分の移動が地盤内の液状化発生の有無に密接に関連していることを示している。

5.4. 振動による液状化が細粒分流出に与える影響

細粒分の抜け出しが液状化現象によるものなのかを実証するために、振動台を用いて繰り返しせん断による液状化と波浪による液状化を比較検討した。Table3 にそれぞれの実験条件を示す。振動台実験の試料は

Table5.2.1 のC0-SF10 を用い、Fig.5.2.1 に示す実験装置内に一次元変動水圧実験と全く同様に地盤を作成した。なお、このときにCO₂を用いた飽和化は行わなかった。その後装置をそのまま振動台の上に移動して固定し、ひずみ制御(ひずみ両振幅 4mm)、周波数 0.75Hzで振動を加えた。

振動台の機械的な制約のため、相対密度 50%の試料では液状化を発生させることができなかったが、相対密度 30%の試料では全体的に液状化が発生していることを観察した。

Fig.5.4.1 は相対密度 30%(液状化)、50%(液状化せず)における実験後の深度と細粒分の関係である。地盤の相対密度 $D_r=30\%$ のときに液状化が発生し細粒分が大きく抜け出したが $D_r=50\%$ では液状化が発生せず抜け出しも起こらなかった。図中には比較のため一次元水圧変動の载荷後の細粒分の分布を示しているが、振動により液状化した場合は深さ方向にほぼ均等に細粒分が低下しているのに対し、一次元水圧変動の場合は 2～7cm の深度で減少し、それ以降の深度では増加するなど、深さ方向の変化があ



(a) 飽和度高 (C0-SF10)



(b) 飽和度低 (C0-SF10)

Fig.5.3.4 24 時間载荷後の地盤表面

Table5.4.1 実験条件の比較

	両振幅	周波数	相対密度
振動台	4 mm	0.75 Hz	50%
振動台	4 mm	0.75 Hz	30%
一次元水圧変動	11.5 kN/m ²	0.2 Hz	50%

るという違いがある。

Fig.5.4.2 は振動により細粒分の粒径加積曲線である。細粒分が抜けだした $Dr=30\%$ における粒径加積曲線は Fig.5.2.5 と類似しており抜けだした細粒分の平均粒径約 $20\mu\text{m}$ であった。また、液状化にいたらなかった $Dr=50\%$ の場合も表層に近い範囲では細粒分の粒度分布の変化がみられた。

以上のように、一次元水圧変動、振動による繰返しせん断という全く異なるメカニズムで液状化が起こった場合のいずれにおいても、载荷後において粒径 $10 \sim 75\mu\text{m}$ の範囲の細粒分が上方に移動し表層に抜け出すという現象が起こることが確認された。なお、熊谷らは砂泥質の底質上の造波水路による移動床実験を実施し、波によるせん断力によっても砂泥内に液状化が発生し、分級が起きていることを報告している(熊谷ら, 2006)。細粒分の流出に関しては波によるせん断力の効果も考慮する必要があると考えられる。

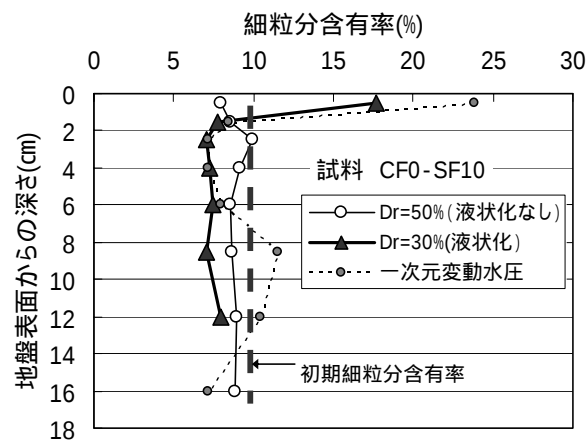
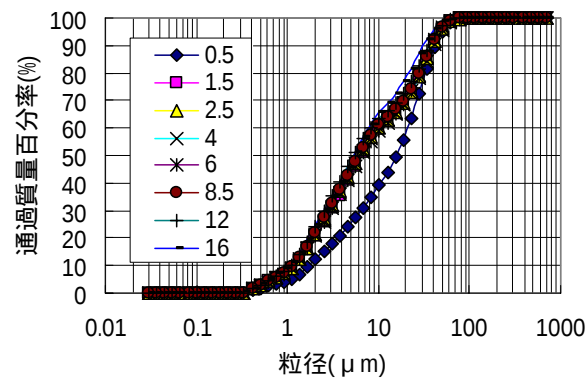
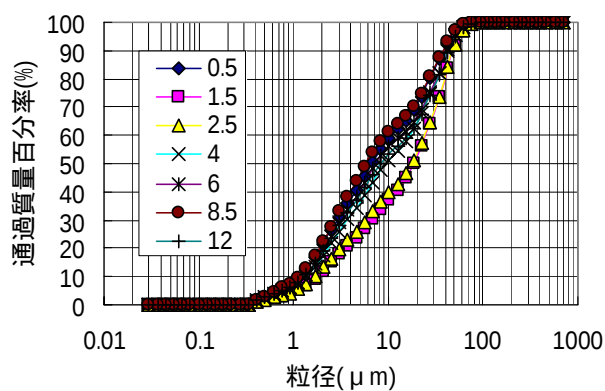


Fig.5.4.1 振動後の細粒分含有率の変化



(a) 振動台 $Dr=50\%$ (C0-SF10)



振動台 $Dr=30\%$ (C0-SF10)

(b)

Fig.5.4.2 振動後の各深度における細粒分の粒度分布

5.5 5章のまとめ

人工干潟・藻場の覆砂中の細粒分が干潟造成後の時間経過とともに流出する原因として波による地盤の液状化を想定し、実験的に検討を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 一次元水圧変動下で抜け出した細粒分は、主に $10\ \mu\text{m}$ 以上、平均 $30\ \mu\text{m}$ の粗い細粒分である。
- (2) 地盤の飽和度を高めて実験を行った結果、一次元水圧変動による液状化が発生せず細粒分の抜け出しは見られなかった。
- (3) 模型地盤に振動台を用いて液状化を発生させたところ、細粒分の抜け出しが起こり、移動した細粒分の粒度特性は一次元水圧変動下で抜け出した細粒分に非常に類似していた。以上のことから、細粒分の上部への抜け出しは地盤の液状化が原因であることを確認した。

6．結論

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、アマモが台風時に大量に根から抜ける事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水圧変動型液状化実験装置内に作成し、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。以下に本研究で得られた結論を示す。

アマモ場のような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について以下の結論が得られた。

- (1)本実験の周期 2～6sec の範囲では、周期は液状化に大きな影響を及ぼしていない。
- (2)不透水面からの地盤層が厚いほど、液状化が発生しやすく液状化範囲も広い。
- (3)波高が高いほど、液状化が発生しやすく液状化範囲も広い。
- (4)細粒分の増加によって透水性が悪くなると、液状化しやすくなり、液状化範囲も広くなる。この原因は透水性の低下により、地盤中の減衰と位相差が大きくなり、変動過剰間隙水圧が大きくなったことによると考えられる。

次に、一次元水圧変動下でのアマモの引き抜き抵抗に関して以下の結論が得られた。

- (1)砂質土地盤に植えられているアマモの模型の引き抜き抵抗は、変動水圧载荷の場合減少することを実験により確認した。特に、細粒分含有率が増加して地盤の透水性が悪くなると、液状化範囲が広くなるとともに減少量が大きくなる。
- (2)粘土系細粒分を含む砂質土地盤に植えられているアマモの模型の引き抜き抵抗も変動水圧载荷によって減少した。波浪による液状化による影響だと考えられる。
- (3)自然藻場から採取し、ポッドで 2 週間養生したアマモの引き抜き抵抗は個体差があり、変動水圧による影響の評価は困難であった。データ数が少なく断定はできないが、地下茎の長さ、根の数がアマモの引き抜き抵抗に個体差を生じさせる主要因の一部と考えられる。
- (4)一次元変動水圧化でアマモを引き抜く場合、地盤のバネ定数は水圧変動の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。
- (5)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。地盤強度から引き抜き抵抗値を推定する式を検討したが、実際の引き抜き抵抗の推定精度は十分でなかった。引き抜き抵抗の予測法については今後更に検討が必要である。
- (6)人工的にアマモ場を造成する場合には、波浪条件や地盤高、地盤の透水性を考慮し、地盤表面から基盤層までの深さをアマモが正常に生長できる範囲内でできるだけ浅くする

等，波浪による液状化への対策が必要である．

人工干潟・藻場の覆砂中の細粒分が干潟造成後の時間経過とともに流出する原因として波による地盤の液状化を想定し，実験的に検討を行った結果，以下のことがわかった．

(1)一次元水圧変動下で抜け出した細粒分は，主に $10\ \mu\text{m}$ 以上，平均 $30\ \mu\text{m}$ の粗い細粒分である．

(2)地盤の飽和度を高めて実験を行った結果，一次元水圧変動による液状化が発生せず細粒分の抜け出しは見られなかった．

(3)模型地盤に振動台を用いて液状化を発生させたところ，細粒分の抜け出しが起こり，移動した細粒分の粒度特性は一次元水圧変動下で抜け出した細粒分に非常に類似していた．以上のことから，細粒分の上部への抜け出しは地盤の液状化が原因であることを確認した．

参考文献

- 1)海の自然再生ワーキンググループ:海の自然再生ハンドブック,国土交通省港湾局監修,株式会社ぎょうせい発行,2003.
- 2)花輪伸一・古南幸弘(2002):人工干潟の問題点と課題,海洋開発論文集,第18巻,p.43-48
- 3)福田和国・小倉隆夫・井上年行・羽原浩史:ミティゲーションを目的とした人工干潟造成事業,ウォーターフロント開発シンポジウム,1992年1月,土木学会.
- 4)須藤俊造:海藻・海草相とその環境条件との関連をより詰めて求める試み,藻類 40, pp289-305, 1992
- 5)(社)日本水産資源保護協会:環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための『判断基準』と『事例』, pp38-47, 1992
- 6)川崎保夫,飯塚貞二,後藤弘,寺脇利信,渡辺康憲,菊池弘太郎:アマモ場造成法に関する研究,(財)電力中央研究所報告総合報告 U14, pp231, 1988
- 7)中瀬浩太,田中裕一,檜山博昭:海浜変形予測手法を用いたアマモ場成立条件に関する研究,海岸工学論文集 39, pp1006-1010, 1992
- 8)本間仁:海洋環境工学,東京大学出版社, pp147-301, 1985
- 9)清水琢三,近藤浩右,渡辺晃:局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究,海岸工学論文集 37, pp274-278, 1990
- 10)川崎保夫,飯塚貞二,後藤弘,寺脇利信,下茂繁:アマモへの温度の影響 栄養株の生長と有性生殖,(財)電力中央研究所報告研究報告 486019, p23, 1986
- 11)福田富男:播種によるアマモ場造成手法,岡山県水産試験場事業報告, 1987
- 12)春日井康夫:浚渫土を用いた干潟・藻場造成,(財)沿岸開発技術研究センター機関誌 No.10, pp18-19, 2003.
- 13)篠崎孝・羽原浩史・山本裕規・明瀬一行・竹口はや人・吉武理恵・土田孝:造成干潟における機能発揮要因に関する研究,海岸工学論文集,2006.
- 14)(社)瀬戸内海環境保全協会ホームページ:<http://www.seto.or.jp/seto/setonaikai/zousei-5.htm>
- 15)平岡喜代典,杉本憲司,三浦仁志,寺脇利信,岡田光正(2006):アマモ場再生事例と実証試験に基づくアマモ場再生の検討,環境科学会誌, 19(3),pp.241-248.
- 16)善功企,山崎浩之,渡辺篤: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, pp125-180, 1987.
- 17)中川晋太郎:波による水圧変動に対する造粒石炭灰の安定性,広島大学工学部卒業論文, pp1-50, 2005.
- 18)服部昌太郎:海岸工学,土木系大学講義シリーズ 13, コロナ社, pp20, 1987
- 19)大山洋志(2003):浚渫土を用いた干潟・藻場再生事業,土木施工 44 巻 7 号 pp. 38~43.
- 20)広島県(2001):広島港五日市地区人工干潟環境モニタリング記録.
- 21)細川恭史(2002):人工干潟・海浜の造成の可能性,沿岸海洋研究,第39巻,第2号, pp. 107-115.
- 22)春日井康夫・久本忠則・中山康二・松本英雄(2003):広島県尾道系崎港における干潟再

- 生事業，海洋開発論文集，Vol.19，pp.107-112.
- 23)熊谷隆宏・池野勝哉・土田孝(2006)：波浪作用下における砂泥質土の粗粒化および液状化特性について，海工論文集，第 53 巻，pp. 426-430.
- 25)土田孝・吉牟田卓・浅海綾一(2006)：一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究，海工論文集，第 53 巻，pp. 491-495.
- 26)広島県(2001)：広島港五日市地区人工干潟環境モニタリング記録
- 27)李正奎・鄭正朝・西嶋渉・岡田光正・馬場栄一(1999)：干潟の土壌構造に及ぼす海水の流動の影響，水環境学会誌，第 22 巻，第 8 号，pp. 677-682.