

気泡モルタルを使用した護岸用軽量裏込め材の力学特性

Dynamics Characteristics of a Light Weight Backfill Material

栗原 安男*・山本 陽一**・戸村 豪治**

Yasuo. Kurihara, Youichi. Yamamoto and Goji. Tomura

A granular air-mortar is a light weight backfill material and it's unit weight and strength can be control. Therefor it is estimated to reduce earth pressure acting on the revetment and the retaining wall. In the case of using this light weight material at a revetment, liquefaction and seismic earth pressure of backfill are difficult planning problems. And so static and cyclic triaxial tests and shaking table tests were performed on a granular air-mortar. This report deals with the shear characteristics and the seismic earth pressure acting on the retaining wall.

Keywords:(angle of internal friction, backfill, earth pressure, liquefaction)

1. はじめに

気泡モルタルは施工目的に応じた配合により、単位体積重量と強度が任意にコントロールできる。これを護岸用裏込め材として使用する場合、その単位体積重量を水より若干重くすることにより、水中下でも浮き上がることなく護岸背後の土圧を軽減できると考えられる。したがって、気泡モルタルは発泡スチロール板と違い、港湾岸壁・護岸など土留め壁背後の残留水位の高い場所、あるいは地下水位の高い沖積低地や軟弱地盤での施工が容易である。

本研究は、砕いて碎石状にした気泡モルタルを岸壁や擁壁背後の土圧の軽減を図る裏込め材として使用するに必要な基本特性を把握することを目的とした。そこで、まず常時の強度定数、せん断特性を明らかにするために、排水及び非排水静的三軸圧縮試験を行った。また、護岸に適用するには、地震、波浪等の繰返し外力に対する安定性の評価が不可欠であると考えられるため、非排水繰返し三軸試験を実施し、粒状体気泡モルタルの非排水繰返しせん断特性を明らかにすることを試みた。さらに、振動台実験を行い、地震時に擁壁に作用する土圧の低減効果の検討を行った。

2. 試料及び試験方法

2-1. 三軸試験方法

試料は、表-1に示す配合により作成された気泡モルタルを砕いて、最大粒径4.76mmとなるようあらかじめ粒度調整された粒状体気泡モルタル($U_c=1.3, G_s=2.564, e_{max}=4.161, e_{min}=3.273$)である。供試体は、初期間隙比が最大空隙比に等しくなるよう、スプーンを用いて直径10cm、高さ20cmのモールド内に静かに充填し、最も緩い状態に作成された。用いた試験機はひずみ制御式三軸試験機と空圧制御式繰返し三軸試験機である。静的試験は、供試体を有効拘束圧 $p_c=0.3, 0.5, 0.7, 0.9\text{kgf/cm}^2$ の4種類でそれぞれ等方圧密した後、所定の排水条件でひずみ速度0.2%/minのもと圧縮せん断することにより行った。繰返し三軸試験は、有効拘束圧 $p_c=0.3, 0.5\text{kgf/cm}^2$ の2種類で等方圧密された供試体に対し、非排水状態で周波数 $f=0.1\text{Hz}$ の正弦波荷重を側圧一定、荷重振幅一定のもとで繰返し載荷することにより行った。

表-1 気泡モルタルの配合及び物性値

セメント (kg)	水 (kg)	フライアッシュ (kg)	気泡材 (l)	フロー値 (mm)	気泡率 (%)	練り上がり時比重	一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)
241	362	483	1.4	311	34.4	1.15	28.0

2-2. 振動台実験方法

表-2に試験に用いた試料及び加速度条件を示し、図-1に用いた試験装置¹⁾を示す。この土槽は長手方向の一端が土圧計測用の可動壁となっており、3個の荷重計により土圧合力の垂直成分、水平成分、土圧合力の着力点の高さを求めることが出来る。試験は、まず可動壁内面を鉛直に調整した後、土槽内に試料を水中落下させて

* 正会員 三井建設(株)技術開発推進部(101 千代田区岩本町3-10-1)

** 正会員 三井建設(株)技術研究所

深さ52cmまで充填した。気泡モルタルを用いた場合は、この状態で24時間放置した。また、非水浸条件の場合は直前まで水浸させていた試料を静かに深さ52cmまで充填した。その後、振動数3Hzで一定の加速度振幅の正弦振動を1分間与えた状態を初期状態とした。この初期状態における荷重計の値を測定した後、土槽を再び3Hzで振動させ所定の加速度振幅を有する定常振動状態で可動壁に強制変位を与え、この時の荷重計の値から地震時の主働土圧を測定した。

表-2 試験条件 (振動台実験)

裏込め条件	使用材料	土槽内の γ_s (tf/m ³)	加速度 (gal)
砕石水浸	5号砕石 $U_c=1.3$ $\gamma=1.8\text{tf/m}^3$	1.99~2.03	0, 40, 160, 200
気泡モルタル水浸	$U_c=1.3$ $\gamma=0.80\text{tf/m}^3$	1.26~1.38	0, 30, 50, 80, 100
気泡モルタル非水浸	$U_c=1.3$ $\gamma=0.80\text{tf/m}^3$	0.80~0.85	0, 120, 350, 500

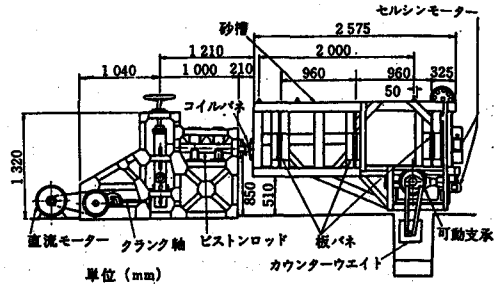


図-1 振動土槽の側面図

3. 静的非排水三軸圧縮試験結果

図-2 (a), (b) はそれぞれ非排水、排水条件で行われた三軸圧縮試験から得られた軸差応力 q を有効拘束圧 p_c で正規化した軸差応力比 q/p_c と軸ひずみ ϵ_a の関係を示したものである。排水、非排水試験結果とも軸差応力比 q/p_c は拘束圧の増加にともない減少する傾向にあり、顕著な拘束圧依存性の挙動を示している。また、排水条件における軸差応力比は、非排水条件のそれに比べ2倍以上の強度を示している。図-3 (a), (b) には、

それぞれ非排水及び排水条件における有効応力比 η と軸ひずみ ϵ_a の関係を示した。非排水条件の場合 $p_c=0.3\text{kgf/cm}^2$ の値に実験誤差が感じられるが、有効応力比 η と軸ひずみ ϵ_a の間に拘束圧の違いによらない一義的な関係が存在することが認められる。これに対し排水試験結果は、有効応力比 η が拘束圧の増加に伴い減少する傾向を示しており、非排水試験の場合と異なる結果となっている。表-3に、モールの応力円から求めた強度定数をまとめた。表より非排水及び排水試験から得られた強度定数を比較すると、粘着力は排水試験では生じているものの非排水試験では生じていない。内部摩擦角は、非排水試験の方が排水試験のそれに比べ 10° 程度高めの値になっている。一般に、 $C'=C_0$ 、 $\phi'=\phi_0$ と考えられているが、本試験結果はこれに矛盾した傾向を示している。これは、先に示した有効応力比 η と軸ひずみ ϵ_a の関係から明らかのように、非排水試験の $\eta \sim \epsilon_a$ 関係は拘束圧に依らず一義的な関係となっているのに対し、排水試験結果は前者のような拘束圧に依らない一義的な関係とはなっていないために、見かけ上粘着力が生じる形となり強度定数を求める際に、それを過大評価してしまい内部摩擦角を過小評価しているためではないかと考えられる。また、本試験材料のように粒径が比較的大きく透水性の高い材料では、静的なせん断は非排水より排水状態で生じる可能性が高いと考えられるので、このような材料に対しては排水試験から得られた強度定数の取扱いが非常に重要であると思われる。そこで、次式を用いて排水試験から得られた各試験の最大の有効応力比 η_{max} より、粘着力を0と

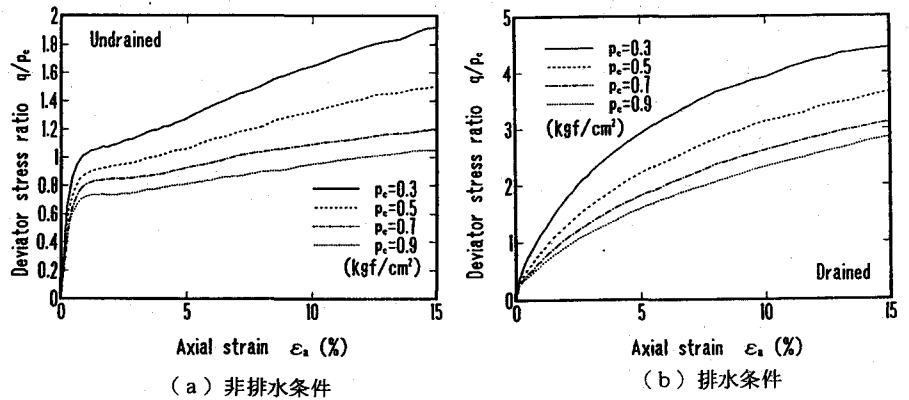


図-2 軸差応力比 q/p_c と軸ひずみ ϵ_a の関係

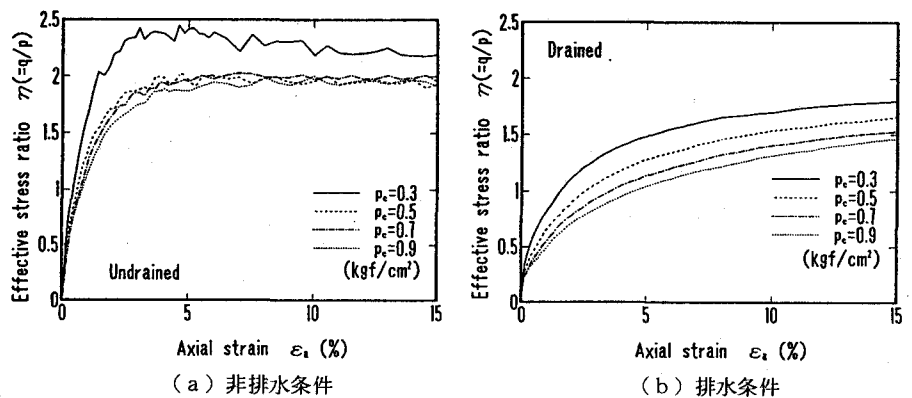


図-3 有効応力比 η と軸ひずみ ϵ_a の関係

と考える。そこで、次式を用いて排水試験から得られた各試験の最大の有効応力比 η_{max} より、粘着力を0と

して内部摩擦角を計算した。その結果を図-4に示す。

$$\phi = \sin^{-1} \frac{3\eta_{max}}{6 + \eta_{max}} \quad (1)$$

表より明らかのように、内部摩擦角は拘束圧の増大とともに減少しており、モール・クーロンの破壊基準で表される破壊線が直線ではなく放物線的な形になるようである。従って、拘束圧の増加によりせん断強度比は減少し、高拘束圧下では危険な状態になる可能性が指摘される。また、式より求めた内部摩擦角はモールの応力円より求めた内部摩擦角より、いずれも高い値を示していることから、この材料に関して適切な設計を行うには、その強度定数の拘束圧依存性を十分考慮する必要があると思われる。このように、粒状体気泡モルタルの静的せん断特性は、比較的低い拘束圧から顕著な拘束圧依存性を示すことが特徴である。これは、粒子自体が多くの気泡を有していることによる、粒子破碎の影響と考えられる^{21, 22)}。

表-3 強度定数一覧

試験名	非排水三軸		排水三軸	
	C'	ϕ'	C _d	ϕ_d
	kgf/cm ²	度	kgf/cm ²	度
Loose	0.07	40.4	0.22	30.2

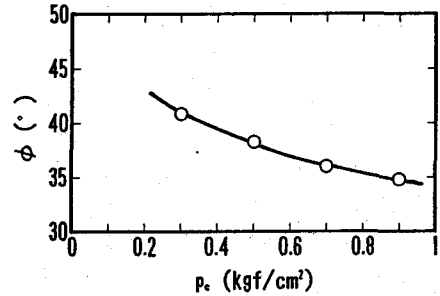


図-4 式(1)による内部摩擦角と拘束圧の関係

4. 非排水繰返し三軸試験結果

等方圧密された、粒状体気泡モルタルに対して行われた非排水繰返し三軸試験から得られた典型的な軸ひずみ、軸差応力、間隙水圧の時刻歴を図-5に示す。図の時刻歴より、対称両振りの繰返しせん断を受けた粒状体気泡モルタルの変形が液状化の発生直前より急激に増大することが分かる。ただし、図-6の応力~ひずみ関係からも明らかのように、供試体は最も緩い状態にあるにも関わらず、緩い砂質土に見られるような流動化現象を生じるまでには至っておらず、土質材料と比較すれば剛性の高いものであると考えられる。図-7には、有効応力径路を掲げた。また、図中には静的な非排水三軸圧縮試験より得られた破壊線を合わせて示した。図の有効

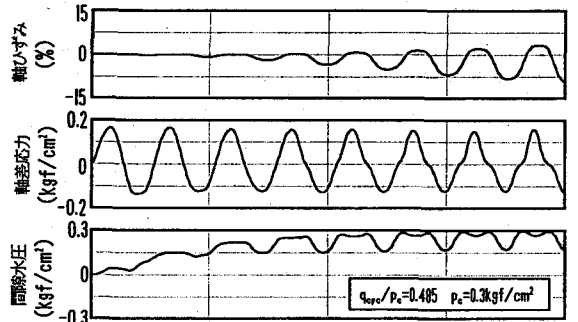


図-5 典型的な軸ひずみ、軸差応力、間隙水圧の時刻歴

応力径路は伸張側の破壊線に達した後、最終的にその上端を破壊線と交差する形で定常な曲線をたどりサイクリックモビリティ的挙動を示している。図-8は、各サイクルにおける軸ひずみ両振幅DAと繰返し応力圧縮側ピーク時の有効応力比 η_s との関係を示したものである。図中のプロットにいくらかのばらつきは見

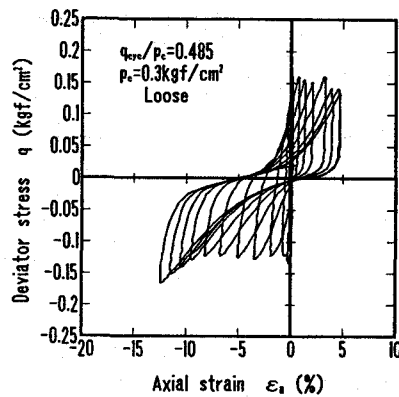


図-6 応力~ひずみ関係

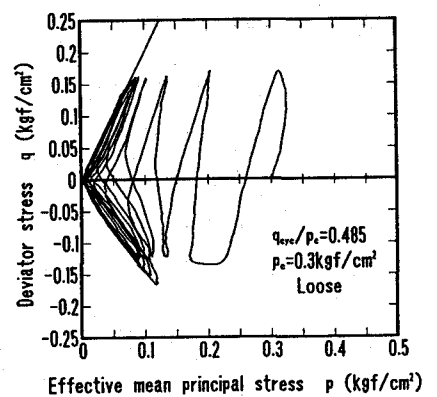


図-7 有効応力径路

受けられるが、異なる繰返し応力振幅や繰返し回数の実験結果が含まれているにも関わらず、両者の間には一義的な双曲線関係が存在していることが明かである。また、同図には異なる拘束圧の結果が含まれているが、両者の関係に及ぼす拘束圧の影響はないようである。静的非排水三軸圧縮試験においても軸ひずみと有効応力比の関係は拘束圧の大きさに関わらず一義的であったことを考えれば、静的試験結果と繰返し試験結果は良好な対応関係にあると考えられる。図-9は、有効拘束圧 $p_c = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合について軸ひずみ両振幅 $DA = 2, 5, 10\%$ 及び初期液状化($u_v/p_c = 1.0$)に至るに必要な繰返し応力比 q_{max}/p_c と繰返し回数 N の関係を示したものである。繰返し回数が約20回以下の領域において、強度線は立ち上がりの傾向を示しており、規定した軸ひずみ両振幅が $DA = 2, 5,$

10%と大きくなるのに従い、より大きな繰返し応力比 $q_{v,c}/p_c$ を必要としているが、それ以上の繰返し回数では規定した軸ひずみ両振幅の大きさが強度に与える影響は小さい。また、初期液化化で規定した強度線は、 $DA=10\%$ で規定された強度と同様である。このように、必ずしも液化化により大変形に至っている訳ではないので破壊強度の規定は、目的に応じて決定されるべきであろう。図-10に初期液化化に至るに必要な繰返し応力比 $q_{v,c}/p_c$ と繰返し回数 N の関係を示す。図には比較のため、豊浦砂相対密度 $D_r=70\%$ の結果⁴⁾も併せて示した。粒状体気泡モルタルの強度は、比較的密な豊浦砂の強度よりいずれも高い値を示しており、同程度の拘束圧状態下においては、気泡モルタルの方が耐震的に優れていると言えよう。また、粒状体気泡モルタルの強度を拘束圧で比較した場合、 $N=10$ 回までは $p_c=0.5\text{kgf/cm}^2$ の強度の方が $p_c=0.3\text{kgf/cm}^2$ の強度より高い値を示しているが、それ以降の繰返し回数では拘束圧の違いによらず同様の強度を有しているのが分かる。静的な試験において、軸差応力比 q/p_c は拘束圧の増加に伴い減少することを考えると上述の結果はこれに矛盾した結果であると言えよう。しかし、本試験で行われた静的試験は圧縮側でしか行われておらず、仮に伸張せん断を行えば圧縮せん断において見られたような拘束圧依存性は生じない可能性がある。また、砂質土をはじめとする粒状体の強度は伸張せん断に圧倒的に弱いため、等方応力状態で対称両振りの繰返しせん断を受ける試料の挙動は伸張側に支配されるものと考えられる。本非排水繰返し試験結果においても、その有効応力径路は伸張側の破壊線に達した後、最終的にその上端を破壊線と交差する形で定常な曲線をたどる挙動を示しているように、伸張側にその挙動が支配されている。また、一般的な知見から考え合わせると拘束圧の増加とともに強度比が増加するとは考え難い。従って、等方応力状態における粒状体気泡モルタルの強度特性は、拘束圧の違いによらないと考えるのが妥当であろう。また、静的試験結果から明らかになったように圧縮せん断強度は顕著な拘束圧依存性を示しているの、異方圧密状態下の粒状体気泡モルタルの非排水繰返しせん断強度は、拘束圧の影響を強く受ける可能性が考えられる。

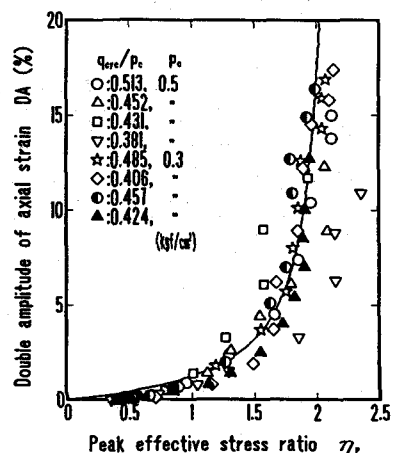


図-8 軸ひずみ両振幅 DA と有効応力比 η との関係

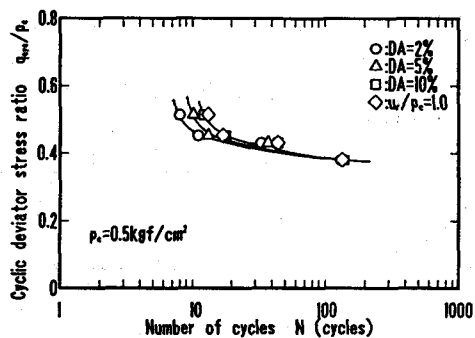


図-9 $DA=2, 5, 10\%$ 及び初期液化化に至るに必要な繰返し応力比 $q_{v,c}/p_c$ と繰返し回数 N の関係

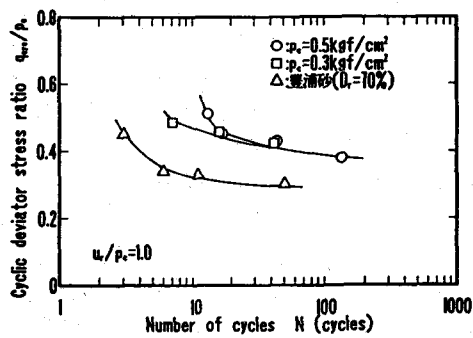


図-10 初期液化化に至るに必要な繰返し応力比 $q_{v,c}/p_c$ と繰返し回数 N の関係

5. 振動台実験結果

5-1. 動水圧分布

水浸条件での試験時に測定した動水圧分布を図-11に示す。図中の実験値は測定値を100galあたりに換算した数値であり、それぞれ砕石による実験及び気泡モルタルによる実験の平均値を示している。

また、図にはWestergaardの動水圧分布の厳密解および、G. W. Housnerの有限長の水槽の鉛直な側壁内面に作用する動水圧分布の解を示した。2種類の理論解は今回用いた土層寸法においてはほぼ同様の分布となった。実験により得られた動水圧分布は、砕石を用いた実験に比べて気泡モルタルを用いた実験でやや大きい値を示しているが、これは後者において土槽内部の加速度が入力加速度に比べて大きくなっていったためと思われ、これを考慮すれば

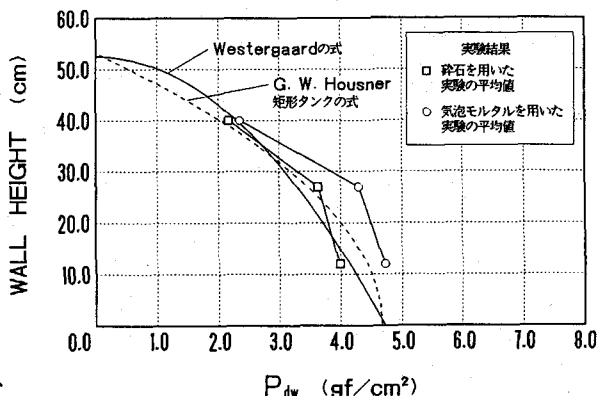


図-11 土槽内の動水圧分布

小さくなっていったことによると思われる、これを考慮すれば両者とも理論値とほぼ一致していると言える。一般に碎石のような非常に透水性のよい材料を裏込め材として用いる場合は、水面下の地震時主働土圧を震度法によって求める際に土粒子と間隙水の挙動を別々に考える方法が使われる⁶⁾。この時の動水圧はWestergaardの式が用いられることが多いが、今回の実験結果をみると粒状気泡モルタルを裏込め材として用いた場合の動水圧についてもWestergaardの式を適用するのが妥当と言える。

5-2. 地震時主働土圧

物部の土圧式による地震時主働土圧は壁面に沿って三角形分布を示すが、振動台実験により主働土圧を求める際には裏込め材が土圧論でいう塑性平行状態を示した時の土圧を測定しなければならない。実験では壁に強制変位を与えることによりこの状態を作り出しているが、主働土圧の認定については図-12に示す方法を用いた。これは図中の曲線でABおよびCD両区間がそれぞれ裏込め材の破壊前後の特性を示していると考えて、便宜的に両区間の延長線の交点Eに対応する壁変位の位置 d_y における土圧を主働土圧と考える方法である¹⁾。

図-13に、実験から得られた最大慣性力作用時における主働土圧合力 $P_A \cos \delta$ を示す。図中には物部地震時主働土圧式を用いて計算した $P_A \cos \delta$ も併せて示している。本実験では裏込め材として透水性の非常に良い碎石、あるいは碎石状の粒状体を使っているので、理論値の計算には土粒子部分と間隙水の挙動を別々に考える方法を用いた。この時土粒子の水中みかけ震度 k' は次式で表せる。

$$k' = \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \right\} k \quad (2)$$

γ_s : 土粒子の単位体積重量 (粒状体気泡モルタルの場合は一つの粒状体の単位体積重量)

上式によって得られる水中みかけ震度 k' を用いて求めた地震時主働土圧係数 K_A は土粒子部分のみを対象としているので、間隙水に働く慣性力についてはこれを別に考慮しなければならない。結局、間隙水も含めた地震時主働土圧の全合力 $P_A \cos \delta$ は次式のようになる。

$$P_A \cos \delta = K_A \frac{1}{2} (\gamma - \gamma_w) h^2 \cos \delta + \frac{1}{2} \gamma_w h^2 + P_{wd} \quad (3)$$

γ : 裏込め材の湿潤重量

γ_w : 水の単位体積重量

h : 裏込め材の高さ

P_{wd} : 壁体前面に作用する動水圧

上式の計算において γ 及び γ_s は実測値の平均を用いて、碎石水浸条件で $\gamma=2.0\text{t/m}^3$ 、 $\gamma_s=2.60\text{t/m}^3$ 、気泡モルタル水浸条件で $\gamma=1.3\text{t/m}^3$ 、 $\gamma_s=1.55\text{t/m}^3$ とした。また、気泡モルタル非水浸条件については $\gamma=0.84\text{t/m}^3$ として空中震度を用いて計算した。この時の間隙比 e は水浸条件、非水浸条件ともに碎石が0.61、粒状体気泡モルタルが0.85である。また動水圧 P_{wd} はWestergaardの式を採用している。図中に示すように気泡モルタル水浸条件での理論値は200~300gal以上で計算不能となるが、これは物部の土圧式が地震時土圧を震度法を用いて静的に扱っているためであり、特に気泡モルタルのような軽量材を水面下で用いる場合には、物部式の適用範囲は $\phi=35^\circ$ として180gal程度までと思われる。今回の気泡モルタルの水浸条件での実験は、実験装置の能力上の理由により100gal以下の加速度のみで実施したが、この範囲における実験値は物部地震時主働土圧式と非常によく一致した。今後、比較的大きい加速度領域における水面下の軽量裏込め材の地震時土圧を論じる場合、振動論等により地盤の挙動を動的に取り扱うことが必要になるとと思われる。

図-13で示した地震時主働土圧合力 $P_A \cos \delta$ は壁背面に作用する全土圧を表しているが、実際の港湾等の裏込め材の設計土圧は前面に水位があるので静水圧は残留水位の分だけ考慮すれば良く、また地震時においては裏込め材の地震時土圧の他に壁体前面に負の動水圧が作用することを考慮しなければならない。残留水位を0とし、壁体前面の負の動水圧を考慮した場合の碎石裏込め材と粒状体気泡モルタル裏込め材の水面下における設計土圧の比較を図-14に示す。加速度が大きくなるにつれてその効果は小さくなるが、物部の土圧式の適用可能範囲と思われる180gal程度までは軽量裏込め材による土圧の低減が認められる。本実験において使用した $\gamma=1.3\text{t/m}^3$ の軽量裏込め材の場合、設計土圧の低減効果は実験結果および計算値によると100galで4割程度であった。

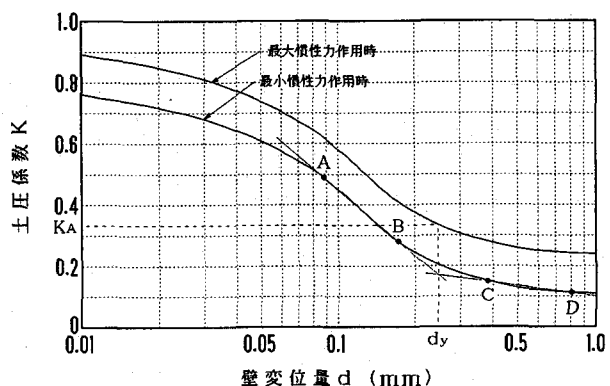


図-12 主働土圧の認定方法

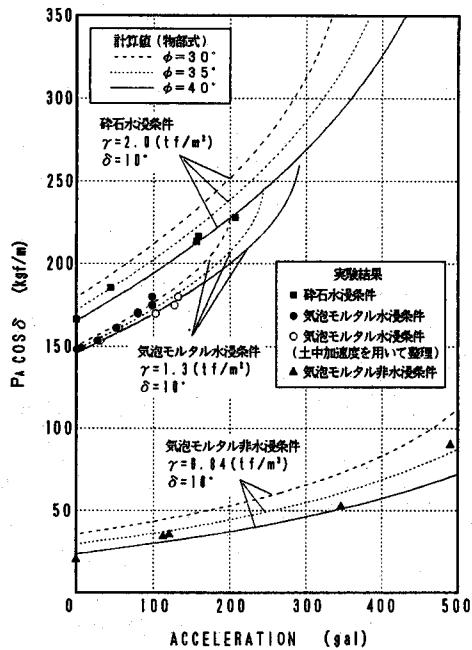


図-13 加速度に対する全土圧合力の変化

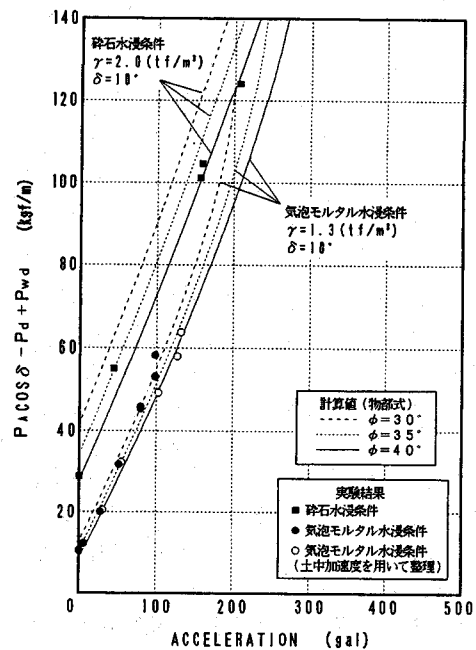


図-14 加速度に対する設計土圧の変化

6. まとめ

粒状体気泡モルタルを護岸用軽量裏込め材に適用することを目的とし、同材料の力学特性について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 排水三軸試験から得られた強度定数は、見かけ上粘着力を生じる形となるため、内部摩擦角を過小評価する恐れがある。
- (2) 粒状体気泡モルタルの静的せん断特性は、比較的低い拘束圧から顕著な拘束圧依存性を示すが、これは、粒子自体が多くの気泡を有していることによる、粒子破碎の影響と考えられる。
- (3) 粒状体気泡モルタルの繰返しせん断強度は、供試体が最も緩い状態にあるにも関わらず、同拘束圧下においては比較密な豊浦砂の強度より高いことが明らかになった。また、等方応力状態下における同材料の繰返しせん断強度は、拘束圧の影響を受けないものと考えられる。
- (4) 砕石状の気泡モルタルのように透水性の良い裏込め材の水面下の地震時土圧を求める際には、土粒子と間隙水の挙動を別に考える方法を用いることが適当であると思われる。またこの時使用するの動水圧についてはWestergaardの式が適用できる。
- (5) 粒状体気泡モルタルの水面下における地震時の土圧を物部の式から求める場合、その適用範囲は $\phi = 35^\circ$ として180gal程度までと推定されるが、本実験の範囲では、砕石を用いた場合と比べて地震時の土圧は明らかに低減され、その低減効果は加速度100galにおいて4割程度であった。

本研究は、運輸省港湾技術研究所の技術指導を受け行っているものであり、御指導を戴いた土質部基礎工学研究室 高橋邦夫室長、構造部構造振動研究室 稲富隆昌室長に深謝いたします。

【参考文献】

- 1) Matsuzawa, Sugimoto and Sugimura: Study on Reduction of Seismic Active Earth Pressure Against Retaining Structures by Stone-Backfill, Proc. of the 6th Japan Earthquake Eng. Symp., pp. 1689 ~ 1696, 1982.
- 2) 吉川・栗原・戸村・古谷: 護岸用軽量裏込め材に適用する粒状体気泡モルタルの基本特性, 第47回土木学会年次学術講演会概要集, VI, pp. 96~97, 1992.
- 3) 山本・栗原・戸村: 軽量裏込め材としての粒状体気泡モルタルのせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 第48回土木学会年次学術講演会概要集, 1993.
- 4) 兵動・村田・安福・藤井・谷水・長井: 液状化過程の残留間隙水圧に及ぼす初期せん断の影響, 第44回土木学会年次学術講演会概要集, III, pp. 564~565, 1989.
- 5) 松澤・石橋・河邑: 地震時主動土圧算定のための水中震度の一般式, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp. 1301~1304, 1985.