

振動により流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力

つち
土だ
田はじめ
肇*

1. はじめに

ゆるく詰まった砂層が振動を受けることにより流動化することは以前から指摘されていた。著者が行なった飽和砂層の振動時の土圧と間ゲキ水圧についての実験においても、この流動化の現象が見られた¹⁾。また、他の機関においても、地震や爆破などの振動に起因する砂層の流動化の研究が行なわれていた²⁾³⁾。しかし、実際の地震による砂地盤の流動化については、噴砂現象などにより間接的にその存在が示された程度で、地盤の流動化による震害についてはあまり認識されていなかった。ところが新潟地震で、砂質地盤の流動化による大規模な被害が発生し、流動化現象は構造物の耐震設計における重要問題として広く認められるようになった。その結果各方面で活発に研究が進められている^{4)~10)}。

地震による砂地盤の流動化について、構造物を設計施工する際に問題となるのは次のような点であろう。

(i) 構造物が計画されている地点の地盤が、設計において考慮すべき最大の地震（現在ではこれは設計震度として与えられている）があったときに、流動化するかどうかを予測すること。

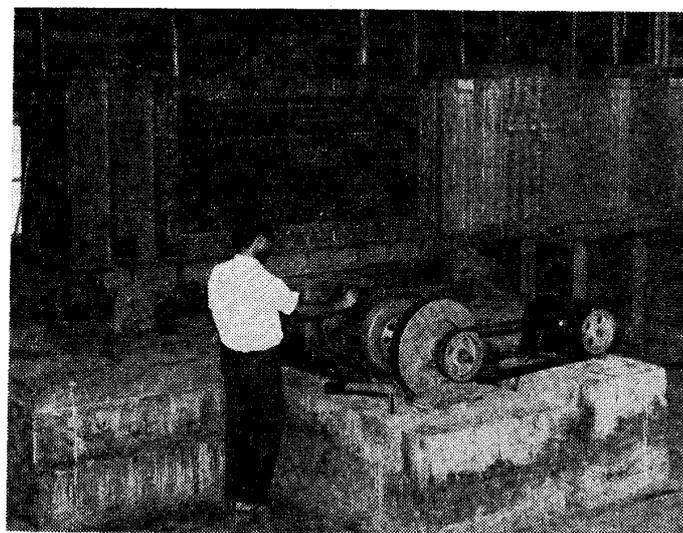
(ii) 流動化が予測された時に、流動化が生じないように地盤を改良できないか。

(iii) 流動化しても構造物に安定を保たせる方法（たとえば、流動化の及ばない深さまで基礎ゲイを打ち込んでおく）がないか。

著者もこれらの問題を解決するべく、振動台を用いた実験的手法により研究を進めている。本文ではその結果の一部を報告する。

構造物の計画地点の地盤が、その構造物が安定を保つべき最大の地震において流動化が予測されるときには、構造物の計画地点を他の流動化のおそれのない地点へ移すのが最も望ましい。しかし、いろいろな事情でどうしても当初の計画地点へ構造物を建設しなければならないことも多い。この場合、ある程度地盤が流動化しても構造物が安定を保ち得るようにするか、流動化が生じないように地盤を改良しなければならない。前者の

* 運輸省港湾技術研究所耐震構造研究室長



写真—1 振動台全景（消波水路完成後）

手段を選ぶとすれば、流動化した砂層が構造物に及ぼす圧力や流動化の及ぶ深さなどがわからねばならない。本報告では、これらの問題に手がかりを与えるべく、振動台を用いて行なった実験のうちから、砂層内で流動化した部分が下方へ広がる速さと流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力について報告する。

ここに報告するものの一部は、新潟地震後に港湾関係の被害状況をまとめた報告書¹¹⁾でもふれたが、ここではその後行なった実験の結果も含めて報告する。

2. 実験の概要

2.1 実験に用いた砂

実験に用いた砂は小名浜砂、高萩砂、万代島砂、高相砂の4種である。これらの砂の諸常数を表—1に示す。また、粒径加積曲線を図—1に示す。表—1に示した最大間ゲキ比は、内径73mm、深さ50mmの容器に静か

表—1 実験に使用した砂の諸常数

	小名浜砂	高萩砂	万代島砂	高相砂
産地	福島県小名浜海岸	茨城県高萩海岸の砂をふるい分けて作ったもの	新潟港万代島	茨城県高萩の砂と相模湾の砂を混合したもの
粒子比重	2.673	2.649	2.671	2.689
D_{10}	0.13 mm	0.90 mm	0.17 mm	0.14 mm
D_{60}	0.17 mm	1.38 mm	0.38 mm	0.55 mm
均等係数	1.3	1.5	2.2	3.9
e_{max}	1.06	0.91	0.86	0.74
e_{min}	0.70	0.69	0.59	0.55
透水係数	2.2×10^{-2} cm/sec ($e=0.96$ において)	1 cm/sec ($e=0.91$ において)	2.6×10^{-2} cm/sec ($e=0.943$ において)	3.2×10^{-2} cm/sec ($e=0.790$ において)

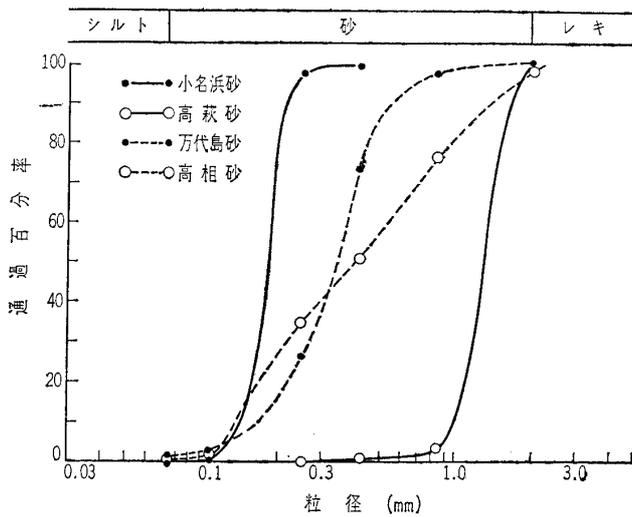


図-1 実験に用いた砂の粒径加積曲線

に乾燥砂を詰めて間ゲキ比を求め、これを数回繰返してその最大値をとったものである。最小間ゲキ比は振動実験の結果得られた間ゲキ比の最小のものを用いた。最小間ゲキ比も最大間ゲキ比を求めるのに用いた容器に突固めながら砂を詰めて求めようとしたが、そうして得た間ゲキ比はいずれも振動実験により得た間ゲキ比よりも大きかった。透水係数は「JIS-A 1218 定水位透水試験」にもとづいて行なった試験により得た値である。試験は試料中の動水コウ配を約 0.8 にして行なった。「土質試験法」¹²⁾によれば、ゆるい砂では動水コウ配が 0.2~0.3 以下で、密な砂では動水コウ配が 0.3~0.5 以下で層流が得られるとなっている。したがって、ここで示した透水係数は、測定時に層流となっていないおそれもある。一応の参考値として示す。

2.2 振動台

振動台は図-2 に示すように、内側の寸法で長さ 262 cm、幅 50 cm、深さ 100 cm の振動箱を水平方向に正弦的に振動させるもので、完全に機械的機構によって駆動

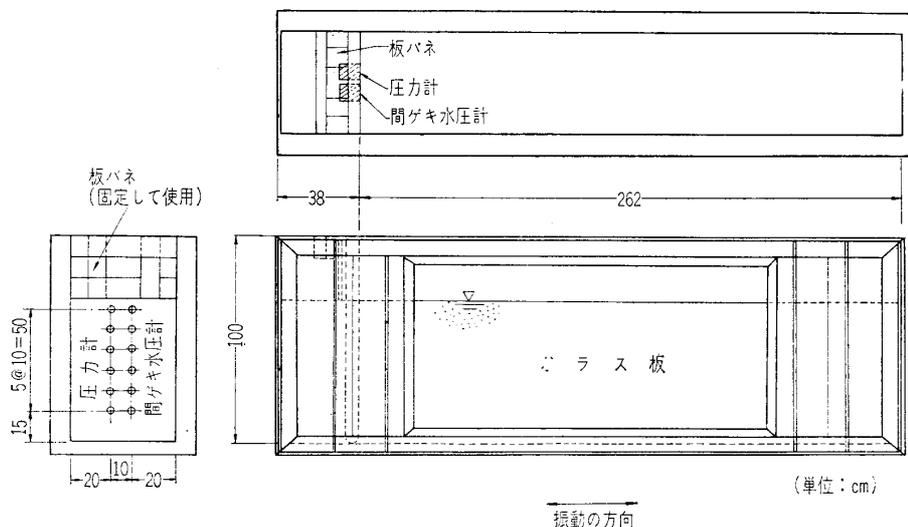


図-2 振動箱 (消波水路取付け前)

される。振動数の範囲は 1.3~15 c/s、最大加速度 1,000 gal (ただし、最大変位全振幅は 40 mm) である。振動箱の振動方向に平行な面のひとつには強化ガラス板がはめられてあり、実験中内部を観察できる。また振動方向に垂直な壁のひとつには圧力計を取付けるための穴があけてある。振動台の全景を写真-1 に示す。小名浜砂、高萩砂の実験後に振動台を改造し、消波水路を取付けた。したがって、消波水路を用いない実験では隔壁を取付けて使用する。この場合、振動箱の長さは改造前より短く、253 cm となるが、改造前との差はわずかで、実験結果には影響しないと思われる。したがって、結果の整理においては改造前後の区別はしていない。

2.3 測定項目および測定器

(1) 端壁に作用する圧力

振動時に振動方向と垂直な壁面 (端壁) で、壁に作用する圧力 (土圧と間ゲキ水圧の一体となったもの) を測定した。これに用いた圧力計は、圧縮磁ワイ効果を応用したもので、受圧面直径 30 mm、測定できる最大圧は 200 gr/cm² である。測定時における受圧面変位は十分小さくなるよう留意してあり、100 gr/cm² の圧力を受けたときの受圧面変位と受圧面直径の比は 0.03×10^{-3} 程度と推定される。また、受圧板およびそれを支える磁ワイ管などを含めた部分は非常に剛なので、その固有振動数は非常に高く、この実験での振動数範囲では感度は一定である。この圧力計の詳細については別報¹³⁾を参照されたい。

(2) 端壁における間ゲキ水圧

圧力計の横に間ゲキ水圧計を取付け、端壁の位置での間ゲキ水圧を測定した。使用した間ゲキ水圧計は前記圧力計の前面にフィルターを取付け、水圧のみが受圧面に伝わるようにしたものである。このフィルターにより、振動時の動的な間ゲキ水圧が実際よりも小さくなって受

圧面に伝わることを考えられた。そこで、圧力計と間ゲキ水圧計を振動台端壁の同じ高さを取付け、振動箱に水を入れて振動させ動水圧を測定したところ、圧力計と間ゲキ水圧計はほとんど同じ値を示したので、フィルターの影響は実用上問題とならないことが確かめられた。

(3) 台変位、台加速度

振動台の変位振幅は、台に固定したアームでスタイラスペーパーにキズをつけて記録する直描式変位計で測定した。台加速度は非接着抵抗線ヒズミ計式の加速度計と

電磁オシログラフを用いて測定した。この記録によると、時間に対する振動台変位の波形は完全な正弦波ではなく、わずかなヒズミがあるらしく、加速度波形は正弦波よりくずれている。このため、加速度振幅を加速度記録のピークからピークまでとして読取ると、変位記録から正弦振動として計算した加速度とは若干異なった値となる。今回の実験では、結果の整理には直描式変位計で得られた変位振幅から正弦波として計算した加速度を台加速度として用いた。

(4) その他

振動箱に詰められた砂層の単位体積重量や、間ゲキ比は、振動箱に入れた砂の総重量を求め、これと砂層が占める体積とから算出した。したがって全層に対する平均的なものである。

2.4 実験方法

振動箱に砂を詰めるには次のような方法によった。まず試験詰めを行ない、振動箱内に 70 cm 厚に砂を詰めた場合、間ゲキ比がどの程度になるかを推定しておく。実験のときには、先に推定した間ゲキ比をもとに、厚さ 70 cm の砂層を飽和させ、しかも砂層表面と水面とをちょうど一致させるに必要な水量を算出し、その量の水を振動箱に入れておく。次に、乾燥した砂をバケツに入れ、これから砂を少しずつゴムホースを通して自由落下させ、振動箱内に厚さ 10 cm の層ごとに詰める。バケツは水面上約 1~1.5 m のところにつけておく。砂層表面が 70 cm に達したとき、水面と砂層表面が一致していればそれでよく、もし一致していなければ水を徐々に加えたり、減らしたりして両者を一致させる。水を加えるか減らすときは砂層を乱さないように注意する。

与えた振動は周期 0.31 秒の正弦振動である(加速度波形では多少ひずんでいることは、先に説明したとおり)。振動の加速度はだいたい 50 gal, 100 gal, 150 gal, 200 gal, 300 gal, 400 gal, 500 gal と段階的に増加させた。一段階の振動は、次のようにした。振幅を徐々に増加させ、所定の振幅に達したらその振幅で小名浜砂の場合 2 分間、他の砂では 1 分間振動を継続する。所定の時間に達したときに砂層が流動化していなければ振幅を徐々に減少させ、停止する。所定時間に達したときに砂層が流動化していれば、砂層が安定な状態となるまでそのまま振動を続け、その後振幅を減少させて停止させる。砂層が流動化しているか否かは、後で説明するように振動箱の側壁にあるガラス板を通して肉眼で確かめることができる。各段階の振動の間には 10~20 分間の静止状態を置いた。ここで注意すべき点は、砂詰りを完了した状態の砂層に振動を与えるのは、50 gal の振動の場合のみで、100 gal 以上の振動で

は振動開始時の砂層はそれ以前の振動である程度締固められていることである。

砂層は完全に飽和させることを目標としたが、前記の方法で詰めた砂層には若干空気が混入していた。空気量がどの程度かを知るために、コンクリート中の空気量を測定するエアメーターに実験の場合と同じようにして砂を詰め、その空気量を測定したところ約 4% であった。

3. 実験結果とその考察

3.1 流動化したことの判定

砂層が流動化したことは二つの方法で判定することができる。第一の方法は振動箱側壁のガラス面から内部を観察する方法である。砂層が流動化していなければ、砂粒子は振動台とほとんど同じ動きをする。砂層が流動化しているときは、砂粒子の動きは振動台の動きとは同じでなく、どろどろしたものが振動を受けているという感じである。同時に流動化した砂層内では、小さな気ホウ(泡)が集まって大きな気ホウとなるらしく、親指大の気ホウが徐々に砂層中を上昇していくのが観察される。文字では表現しにくい、実際にガラス板から砂層を見ていけば、砂層が流動化しているか否か、あるいはどの部分まで流動化が及んでいるかを判断することは容易である。

第二の方法は間ゲキ水圧の変化から判定する方法である。砂層が流動化していないときには、振動台端壁のところ測定した間ゲキ水圧は静水圧を中心に振動台の動きと対応して周期的に増減する。砂層が流動化しているときには、間ゲキ水圧計の指示値は静水圧よりも、大きな圧力を中心に周期的増減を繰返す。このことについては、後で詳しく説明する。このようにして、間ゲキ水圧計の指示値からも砂層が流動化しているか否かを判定できる。

実験では、振動をいつまで続けるかはガラス板を通した観察で決め、振動停止後間ゲキ水圧計の記録を調べて

表-2 台加速度および流動化の有無

使用砂	実験番号	台加速度 (gal)							
		太字は流動化のあったことを示す							
小名浜砂	8	60	107	172	226	298	417	525	
	13	64	99	144	185	298	401	502	
	16	76	94	144	194	286	402	500	
高萩砂	5	59	80	122	182	227	277	330	427 528
	14	62	101	135	204	256	304	413	466
	17	72	97	89	253	346	449	540	
	18	62	85	137	187	298	383	478	
	19	44	79	126	204	290	405		
万代島砂	51	61	101	145	210	291	396	533	
	52	65	141	215	262	303	384	489	
	53	61	101	145	210	291	396	533	
高相砂	671	108	152	207	230	370	409	519	
	672	55	86	155	245	341	428	535	
	673	45	86	124	140	190	368	472	

流動化のあったことを確認する方法をとった。

以上の方法で判定した砂層の流動化の有無をまとめたのが表-2である。表では横方向に各段階における台加速度を示してあり、太数字で示してあるのは、その加速度の振動で砂層が流動化したことを示す。

この表を見ると台加速度が小さいときに流動化が生じていて、台加速度の大きいときに流動化が生じていず、不思議に思われるかも知れない。今回の実験では、実験方法の項で説明したように、砂詰めを終わったばかりのゆる詰めの状態の砂層に振動を与えたのは、その実験における最小の台加速度の振動のときのみである。他の台加速度の振動では、それよりも台加速度の小さい振動ですでに砂層が締固められている。つまり、大きい台加速度による振動のときほど、振動前の砂層はよく締固められている。そのため、小さい加速度の振動で流動化が生じ、大きい加速度の振動で流動化が生じていないのである。したがって、表-2が加速度の小さい振動ほど流動化を起こしやすいことを意味するものではない。なお砂層の間ゲキ比、台加速度と、流動化の関係については、別に報告の予定である。

3.2 砂層が流動化したときの
間ゲキ水圧

砂層が流動化したときには、砂層は砂と水とが一体となった流体のような挙動を示す。したがって、そのような状態では、間ゲキ水圧と呼べるものが、存在するか否か疑問である。ここでは、砂層が流動化し再び安定な状態にもどる過程で間ゲキ水圧計の指示値がどのような変化を示したかを説明する。表現を簡単にするために、流動化したときの間ゲキ水圧計の指示値も、間ゲキ水圧と書く。

振動時には間ゲキ水圧は図-3の実線のように周期的増減を繰り返す。間ゲキ水圧の全体的変化を調べるため、図-3の点線のように上側のピークと下側のピークを連ねたものを描いてみる。図-4に実験時の観察によれば砂層が流動化しなかった場合のものを、図-5に砂層が流動化した場合のものを示す。図-4、図-5では時間軸を1周期を単位として示してあり、そのゼロは振動台の振幅が予定値に達した瞬間を示す。

また、記録の途中部分は省略してある。図-4に示された結果から、砂層が流動化していないときは、間ゲキ水圧は静水圧を中心として周期的な増減を繰り返していることがわかる。これに対し、図-5から砂層が流動化しているときには、間ゲキ水圧は静水圧よりも大きな値を中心に増減していることがわかる。

次に、砂層が流動化したとき、間ゲキ水圧の増減の中心が静水圧よりもどれだけ大きく、その深さ方向の分布がどうなっているかを調べる。流動化した砂層の間ゲキ水圧の変動の中心は一応上側のピークと下側のピークの平均と考える。すなわち、図-4あるいは図-6に示し

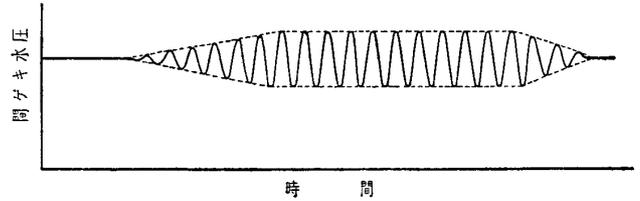


図-3 間ゲキ水圧の変化 (説明図)

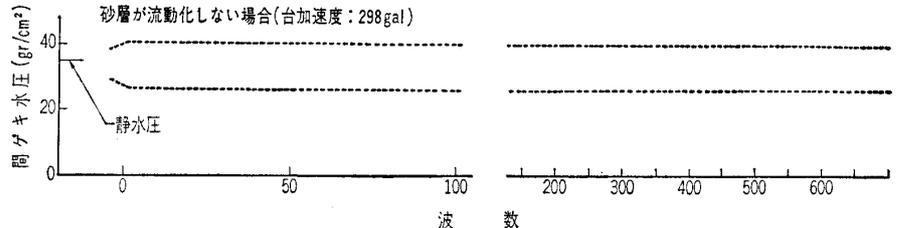


図-4 砂層が流動化しないときの
間ゲキ水圧の変化
(小名浜砂の実験、砂層表面から 35 cm の位置で測定)

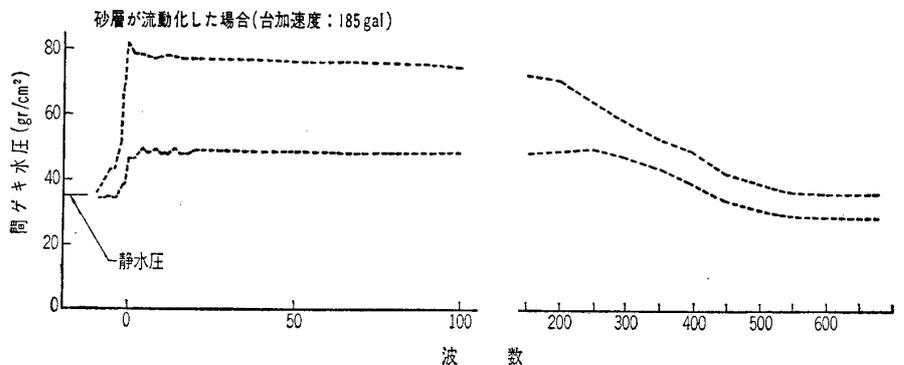


図-5 砂層が流動化したときの
間ゲキ水圧の変化
(小名浜砂の実験、砂層表面から 35 cm の位置で測定)

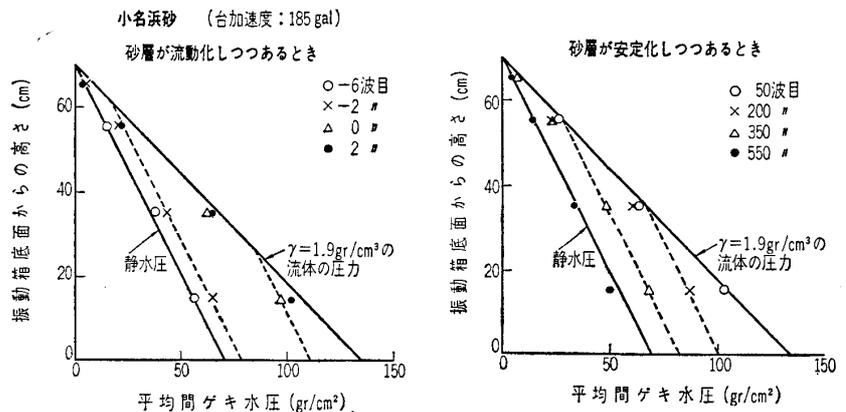


図-6 平均間ゲキ水圧分布の時間的変化 (小名浜砂)

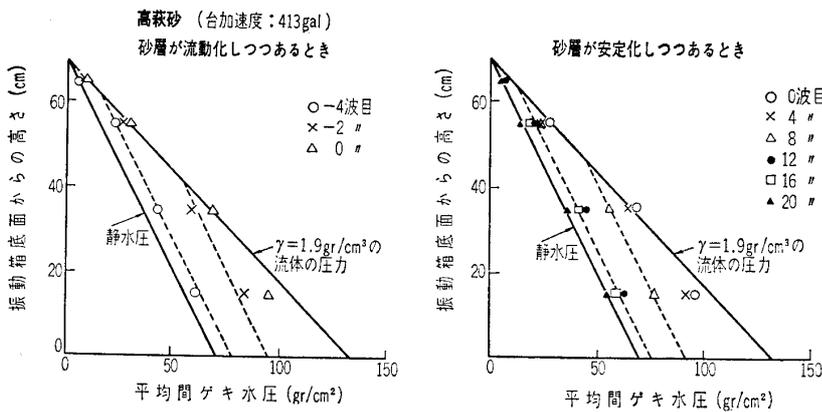


図-7 平均間ゲキ水圧分布の時間的変化(高萩砂)

た2本の点線の間を通る線の間ゲキ水圧の変動の中心とする。表現を簡単にするため、この変動の中心に相当する圧力をかりに平均間ゲキ水圧と書く。平均間ゲキ水圧の分布が時間とともにどのように変化するかを 図-6 および図-7 に示した。同図でも時間を台振動の振幅が一定となつてからの波数で示してある。波数にマイナスの符号がついているのは、台振幅が一定になる以前の状態を示し、波数ゼロから数えた波数である。ここに示された結果を見ると、平均間ゲキ水圧は最初は静水圧分布であり、しだいに増加するが、その増加量は深さに関係なく一定である。すなわち、平均間ゲキ水圧の分布を示す直線(図-6,7における点線)は静水圧の分布を示す直線と平行である。ただし、各点における平均間ゲキ水圧は単位体積重量約 1.9 gr/cm³ の流体圧よりは大きくならない。実験に用いた砂では飽和時の単位体積重量が約 1.9 gr/cm³ なので、このことは、飽和砂と同じ単位体積重量の流体の静圧と考えてよいであろう。したがって、最終的には平均間ゲキ水圧の分布は飽和砂と同じ単位体積重量の流体の静圧分布となる。次に静的間ゲキ水圧の分布は、前と全く逆の過程を経て静水圧分布にもどる。

平均間ゲキ水圧が飽和砂と同じ単位体積重量の流体の圧力と同じになっている部分では砂の粒子骨格が完全にこわれてしまい、砂と水とが一体となった液体の状態にあると考えられる。したがって、砂層が流動化していない部分では、上層の流動化した部分で増加した圧力が平均間ゲキ水圧の増分となって現われていると思われる。このように考えると、図-8 に示すように、平均間ゲキ水圧の分布を示す線が、飽和砂と同じ単位体積重量の流体圧を示す線から離れて、静水圧分布と平行な線に移る点より上方は砂層が流動化しており、その下方は流動化

していないことになる。このことは、砂層の流動化した部分が、上方から下方に広がり、次に下方から徐々に安定化した砂層が上方へ広がるという、ガラス板を通した観察結果と一致する。また、測定結果をこのように解釈することにより、流動化現象の発生機構をうまく説明することができる。したがって、上記の考え方は十分信頼できるであろう。

以上のことから、砂層が流動化する時の間ゲキ水圧の変化の様子とともに、平均間ゲキ水圧の分布を見ることにより、砂層のどの部分まで、流動化しているかを判定することができる。

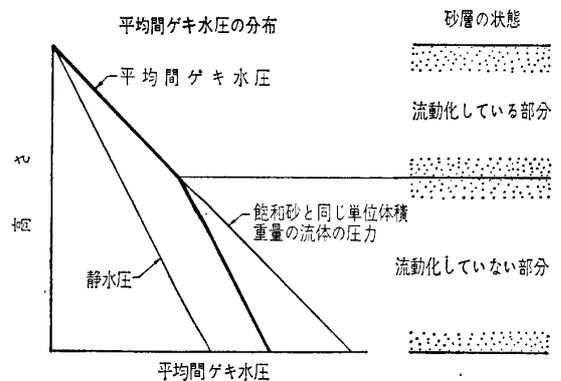


図-8 平均間ゲキ水圧と砂層流動化部分との対応

3.3 流動化した砂層が壁に及ぼす圧力

前項の説明に従い、砂層が完全に流動化している瞬間を探し、その時の圧力計の指示値を調べた。砂層が流動化したときに圧力計に示される値を、土圧と間ゲキ水圧に分離することはむずかしいが、流動化していないときには両者の和であるから、流動化しているときも含めてこれを全圧力と書く。図-9, 10, 11 に小名浜砂および高萩砂の流動化したときの平均間ゲキ水圧と全圧力を示した。ここに示されていない場合でも同じ結果が得られている。これらの図の(a)に示した平均間ゲキ水圧の分布を見ることにより、砂層がほぼ完全に流動化している

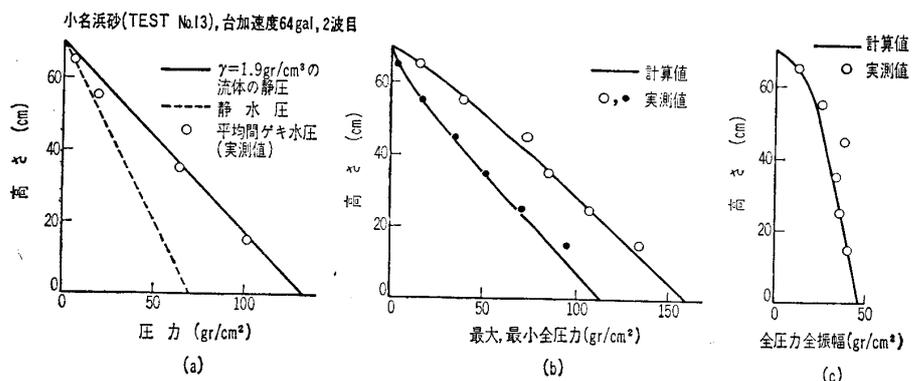


図-9 流動化時の全圧力(小名浜砂)

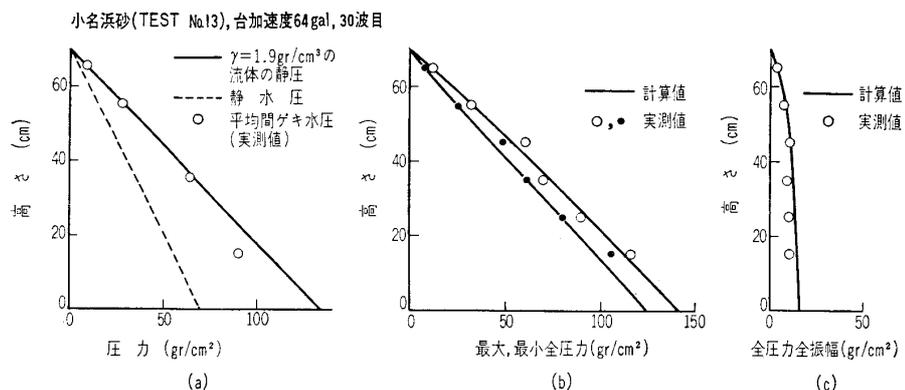


図-10 流動化時の全圧力 (小名浜砂)

である。実測値は間ゲキ水圧計の記録から先に説明した方法により求めたものである。計算値は流動化した砂層を飽和砂と同じ単位体積重量の流体と考え、その静圧を計算したものである。両者を比較することにより砂層が流動化していたか否かを判断することができる。計算値と測定値は完全には一致していないが、これは間ゲキ水圧の変動の中心を間ゲキ水圧計の記録の一周期の最大値と最小値の平均として近似的に求めていることなどによるものと思われる。

さて、これまで幾度か説明したように、流動化した砂層は流体と同じような挙動を示す。したがって、振動箱内で流動化した砂層が振動台端壁に及ぼす圧力は動水圧と同じようにして計算できそうに思える。そこで動水圧公式を用いて

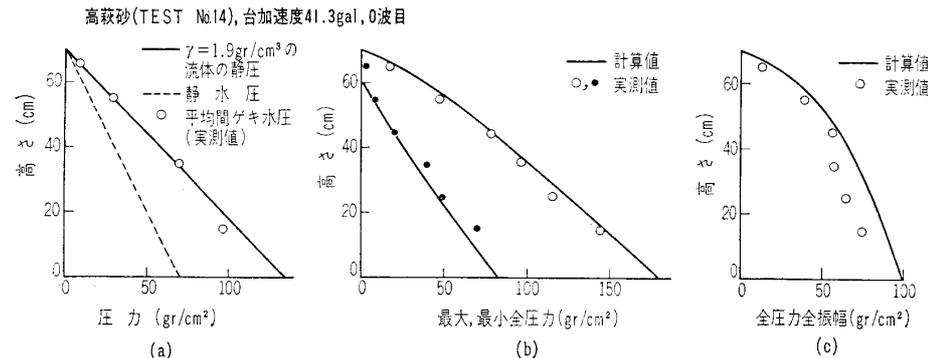


図-11 流動化時の全圧力 (高萩砂)

計算した値と砂層が流動化しているときの全圧力を比較してみる。動水圧の公式としては、ダムに作用する動水圧を計算するためのウェスターガード (Westergaard) の公式¹⁴⁾を考える。

同公式は次のとおりである。

$$\sigma = \frac{7}{8} k r_w \sqrt{Hy} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ : 動水圧
 k : 震度
 r_w : 水の単位体積重量
 H : 水深
 y : 動水圧を求めようとする点の水面からの深さ

表-3 流動化時の全圧力全振幅 (万代島砂, 高相砂)

使用砂	実験番号	台加速度 (gal)	時刻* (波数)	圧力計位置 (cm)	平均間ゲキ水圧 (gr/cm ²)		全圧力全振幅 (gr/cm ²)	
					測定値	計算値	測定値	計算値
万代島砂	51	145	20	35	62	67	24	25
				15	102	105	27	31
	291	35	35	62	64	49	51	
			15	107	104	54	63	
52	141	2	35	70	68	21	24	
			15	112	107	25	30	
303	45	35	77	64	46	51		
		15	120	104	51	64		
高相砂	671	207	20	15	104	108	41	45

* 振動台の振幅が予定した値となったときを起点として、振動の波数で示してある。
 ** 振動台底面から受圧面中心までの鉛直距離

ことが確かめられる。図-9 (b), 図-10 (b), 図-11 (b) で白丸印で示したのは一周期中の最大の全圧力であり、黒丸印で示したのは一周期中の最小の全圧力である。各深さにおける全圧力の周期的変化については、流動化の初期における数波を除けば位相差はほとんどない。したがって、前記最大全圧力、最小全圧力の各深さに対する値は、同一時刻のものと考えてよい。図中右側に示した全圧力全振幅は最大全圧力から最小全圧力を減じたものである。

万代島砂および高相砂の実験では圧力計、間ゲキ水圧計を必要な台数用意できず、したがって、小名浜砂、高萩砂のように全圧力の分布を示すことができない。測定を行なった点について得られた結果を表-3 に数値で示す。表-3 では平均間ゲキ水圧の実測値と計算値を示し

流動化した砂層を飽和砂と同じ単位体積重量の流体として上式を適用する。また (1) 式は動水圧のみを示し、静水圧を考慮していない。静水圧に対応する部分を加えて考えると、(1) 式にもとづいた流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力の式は次のようになる。

$$\sigma_T = r_s \cdot y \pm \frac{7}{8} k r_s \sqrt{Hy} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_T : 流動化した砂層が壁体に及ぼす全圧力
 r_s : 飽和砂の単位体積重量
 k : 震度
 H : 流動化した砂層の厚さ
 y : 全圧力を求めようとする点の深さ

(2) 式の第1項は静水圧に対応し、第2項は動水圧に対応する。第2項の前に複号がついているのは、動水圧は周期的に増減し、動水圧と静水圧の和が静水圧よりも

大きくなるときと小さくなるときがあることによる。全圧力の全振幅 σ_{TA} は

$$\sigma_{TA} = \frac{7}{4} k \gamma_s \sqrt{Hy} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

(2) 式に実験時の条件を代入して計算した全圧力を図9~11の(b)に実曲線で示した。 k としては台振幅が一定になったときの台加速度に対する値を用いた。曲線が2本はいつているのは(2)式で複号の+と-のそれぞれを用いたものである。複号の(-)を用いたとき、 y の小さい部分で σ_T が負となる。しかし、壁に負圧が作用するとは思われないので、この部分では σ_T はゼロとした。また、(3)式により求めた全圧力全振幅を図9~11の(c)に実曲線で、表3では全圧力全振幅計算値として示した。上記の計算では H として砂層表面から振動箱底面までの距離をとってある。図9~11および表3に示された全圧力やその全振幅の実測値と計算値を比較すると両者は相当により一致を示している。以上のことから、少なくとも今回の実験のような条件においては、流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力は(2)式で推定できると考えてよいであろう。

ウェスターガードの動水圧公式は貯水池内の水が上流方向へ半無限に続いているとして求めたものである。振動する箱内の水がその壁面に及ぼす動的圧力についてはウェルナー、サンドキスト(Werner-Sundquist)の解があるが¹³⁾、今回の実験のように箱の長さが水深の3倍以上あるときは両者の差はわずかなので、式が簡単なウェスターガード公式を用いた。また、流動化した砂層はウェスターガードが動水圧を求めるときに考えた完全流体とは異なるから、見かけの粘性などを考慮して全圧力を計算することも考えられる。しかし、すでに(2)式は現段階では満足できる精度をもっているし、他に不明な点の多い現在一部分のみを細かく議論しても、その工学的意義は小さいと考え、ウェスターガード公式を準用するにとどめた。

流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力の位相は、測定結果では次のとおりであった。振動台が圧力計を取付けてある壁の方へ最大に変位したとき、圧力計を取付けてある壁へ作用する圧力はほぼ1周期内の最大となり、その反対側へ変位したときに最小となった。

3.4 流動化した部分の広がる速さ

これまでに説明した実験結果とその検討から、今回の実験のような条件のもとでは、砂層は表層部より流動化が始まり、流動化している部分が下方へ広がっていくことが明らかになった。さらに、流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力はウェスターガード公式の水の単位体積重量の代わりに飽和砂の単位体積重量を、水深の代わりに流動化している砂層の深さを用いることにより、推定でき

ることが明らかになった。この場合、どの程度の速さで流動化した部分が下方へ広がっていくかが問題となる。なぜなら、流動化した部分の広がる速さが小さければ、地震の終わるまでに、表面付近の浅い部分しか流動化しないし、流動化した部分の広がる速が大きければ、短時間の地震でも相当の深さまで流動化してしまうからである。

流動化した部分の広がる速さを知るには、間ゲキ水圧の変化を調べればよい。すでに説明したように、平均間ゲキ水圧が静水圧よりも大きくなれば流動化の始まったことを示し、平均間ゲキ水圧が飽和砂と同じ単位体積重量の流体圧に等しくなれば、その間ゲキ水圧の取付けてある深さまで流動化している部分が広がってきたことを示す。このような考えにもとづいて、振動箱底面から、15 cmの位置にある間ゲキ水圧計の記録により、砂層表面から55 cmまでの部分が流動化するのに要した時間を調べてみた。結果を表4に示す。間ゲキ水圧は徐々に静水圧を中心とした振動から静水圧よりも大きな圧力を中心とした振動に移っていくので、流動化の始まった時を正確に定めることはむずかしい。したがって、表4に示した値は55 cmの砂層が流動化するのに要しただいたいの時間である。また、振動を開始するときは台の振幅をゼロから所定値まで徐々に増加させるが、これは運転員がハンドルを回転して行なう。したがって、いつでも同じ速度で振幅を増しているわけではない。このことも結果を見るときに留意すべきである。

表4に示された結果から、流動化の進行速度を推定する一般的な方法を導くことは不可能である。ここでは実験結果を参考値として示すにとどめる。

表4 砂層表面から55 cmまでの部分が流動化するのに要した時間

使用砂	実験番号	台加速度(gal)	流動化に要した時間(sec)
小名浜砂	8	60 226	5 7
	13	64 185	8 8
高萩砂	5	227	4
	14	413	2
	19	405	3
万代島砂	51	145 219	8 9
	52	141 303	6 9
高相砂	671	207	5

4. ま と め

これまで実験結果をもとに検討した結果をまとめてみると、次のとおりである。

(i) 振動箱内に飽和砂層を作り、正弦振動を与える

No. 526

と、砂層が流動化することがある。この場合、流動化はまず表層部で発生し、徐々に流動化している部分が下方に広がっていく。

(ii) 砂層が流動化していることは、砂粒子の運動を観察すること、間ゲキ水圧の変化を調べることにより、知ることができる。

(iii) 流動化した砂層は、液体と同じような性質を示す。したがって、流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力は動水圧を求めると同じようにして推定できる。

(iv) 流動化した部分が下方に広がっていく速さを推定する一般的な方法は、現在のところ明らかでない。

5. おわりに

構造物を支える砂地盤が多少くらい流動化しても、構造物に安定を保たせるということは、あまりにも大それた考えかも知れない。しかし、国土が狭く、人間が密集して活動しているわが国では、地震による地盤の流動化が予測されるからといって、構造物の建設予定地点を変更することは、多くの場合非常に困難である。ことに、海岸の埋立て地は粘性土で埋立てようものなら、地盤が圧密され十分な強度が得られるまでに長年月を心要とするので、砂で埋立てることが望ましい。この場合、地盤はゆる詰めの状態に近いと思われる。しかも、砂地盤は地震による流動化の問題を除けば良好な地盤といえる。このような事情から、流動化の防止対策やある程度の流動化が生じても構造物に安定を保たせることについて、技術者が解答を求められることは多い。そのような時に役立つことを念じつつ、実験結果をまとめた。

流動化の予測については、動的三軸試験の結果と電子計算機による地盤の地震応答計算を組合わせて予測を行なうシード (Seed) の研究がある。すぐれた予測方法と思われるが、現場で大まかな見当をつけるには、道具立てが大がかりでいささか不便のように思われる。別の機会に、今回の報告に用いた実験およびその後の実験を整理して、流動化予測の目安となるものを報告したいと考えている。

ここに報告されている小名浜砂、高萩砂の実験は古部

哲兵君 (元港湾技術研究所・現川崎市)、万代島砂の実験は荒田昌潔君 (港湾技術研究所)、高相砂の実験は、倉田栄一君 (港湾技術研究所) の力によるところが大きい。ここに感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 石井靖丸, 土田肇, 古部哲兵: 振動時の飽和砂の土圧と間ゲキ動水圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 2, No. 2, 1963, p. 37-41
- 2) V.A. Florin and P.L. Ivanov: Liquefaction of saturated sandy soils, Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (PARIS), 1961, p. 107-111
- 3) Huang Wen-Xi: Investigations on stability of saturated sand foundations and slopes against liquefaction, Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (PARIS) 1961, p. 629-631
- 4) 小泉安則: 新潟地震における砂の密度の変化, 土と基礎, Vol. 13, No. 2, p. 12-15
- 5) 山原 浩: 地震による砂質地盤の破壊に関する一考察, 土と基礎, Vol. 13, No. 2, p. 3-9
- 6) 陶浪貞彦: 不安定飽和砂の振動性状, 日本建築学会論文集, 第 114 号, 1965, p. 1-10
- 7) 吉見吉昭, 石井武則: 不透水境界をもつ被圧飽和砂の振動中における間ゲキ水圧変化, 第 1 回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, 1966 p. 49-53
- 8) H. Bolton Seed and Kenneth L. Lee: Liquefaction of saturated sand during cyclic loading, Proceedings of ASCE, Vol. 92, No. SM 6 1966 p. 105-134
- 9) Kenneth L. Lee and H. Bolton Seed: Cyclic stress conditions causing Liquefaction of sand, Proceedings of ASCE, Vol. 93, No. SM 1 1967 p. 47-70
- 10) H. Bolton Seed and I.M. Idriss: Analysis of soil liquefaction: Niigata, Earthquake, Proceedings of ASCE, Vol. 93 No. SM 3 1967 p. 83-108
- 11) 砂質土の流動化について, 新潟地震港湾被害報告, 運輸省港湾局, 港湾技術研究所, 第一港湾建設局, 1965, p. 203-215
- 12) 土質工学会: 土質試験法, 1965 p. 195
- 13) 前出論文 1) p. 29-33
- 14) H.M. Westergaard: Water Pressure on Dams Suring Earthquakes, Trans. of A.S.C.E. Vol. 98, 1933 p. 418-433
- 15) P. Wilh. Werner and K.J. Sundquist: On Hydrodynamic Earthquake Effects, Trans. of A.G.U. Vol. 30, No. 5, 1949 p. 636-657

(原稿受付, 1967.10.5)

※ ※ ※

※ ※