

## 飽和砂の間隙水圧発生に及ぼす上下地震動の影響

金沢大学 翟 恩地\*  
 金沢大学 宮島昌克\*  
 金沢大学 北浦 勝\*\*  
 金沢大学 金本昌也\*\*\*

兵庫県南部地震のような直下型地震においては、上下動成分が大きい。上下動成分が飽和砂地盤の間隙水圧に及ぼす影響を明らかにするために、水平・上下同時加振試験機を利用して、飽和砂液状化実験を行った。あるレベル以上の水平加振を与えると、当然、飽和砂の過剰間隙水圧比が1に至って、液状化現象が発生する。水平加振に加えて上下加振が作用すると飽和砂の間隙水圧はさらに上昇しやすくなった。さらに、位相差が間隙水圧の上昇に影響を及ぼすことも明らかになった。そこで、上下動が飽和砂の間隙水圧上昇に及ぼす影響のメカニズムについて考察した。上下地震動を加えると砂粒子が間隙に押し込まれやすくなり、液状化しやすいものと考えられるが、それを砂粒子を非連続粒状円筒要素として、実験を行い、検証した。

### 1. はじめに

現行の耐震設計において、地震の上下動成分による影響は一般には考慮しなくてもよいとされていることからわかるように、これまでは地震の上下動成分に対する関心が薄く、したがってその認識も浅かった。飽和砂地盤の液状化についての研究は、1950年代までは、最上や旧ソ連のFlorinらによって砂槽振動実験が行われた以外、さしたる研究はなかったようである。地震時の砂地盤の液状化に関する研究が活発になったのは、1964年新潟地震以来のことである。Seed、Idriss、石原、Finnらは先駆者として液状化に関する多数の論文、報告、資料を残している。しかし、それらの研究では、考慮した繰り返し荷重はほとんど水平せん断S波のみである。飽和砂の間隙水圧発生に及ぼす上下動P波の影響に関する研究では、円筒水槽を用いて自由落下による鉛直方向の衝撃力を受ける飽和砂内の間隙水圧の変化を実験的に求めた河上らの研究が<sup>1)</sup>、先駆的である。われわれのグループは上下地震動が飽和砂地盤の液状化に影響するという実験結果を既に発表した<sup>2)</sup>。それに対して、神戸人工島で噴出したまさ土の振動台による液状化実験を通して、森らは上下地震動が飽和砂地盤の液状化に影響しないという結果を発表している<sup>3)</sup>。したがって、上下地震動が飽和砂地盤の液状化に影響するか否かについて、そのメカニズムを明らかにすることが待たれている。

そこで本研究では、水平と上下の両方向を同時に加振できる振動台に正弦波を入力して飽和砂地盤の振動

実験を行い、特に、上下動が加わることにより生じる飽和砂中の間隙水圧上昇現象とそれに伴う地盤沈下について考察した。さらに、非連続粒状体理論に基づいて、円筒要素に上下動を加える正弦波加振実験を行って、そのメカニズムを明らかにしようとした。

### 2. 上下動と間隙水圧の関係についての従来の説明

石原は連続体理論により上下動が飽和砂液状化に及ぼす影響を論じた<sup>4)</sup>。縦波が伝播する時には、鉛直方向に垂直応力 $\sigma_v$ と同時に水平方向にも垂直応力 $\sigma_h$ が誘起される。飽和土のポワソン比はほぼ0.5であるので、縦波の伝播に伴って生じる応力はほぼ純粋な圧縮応力である。圧縮応力は間隙水と土粒子骨格の両方で力を受けとめることになるが、この分担割合は、間隙圧係数Bによって決まる。飽和砂のBはほぼ1.0であるから、間隙水の方が力を伝えることになる。すなわち、縦波伝播中の有効応力の変化はほとんどない。結局、上下動が飽和砂液状化に及ぼす影響はない。一方、Fragaszyら<sup>5)</sup>によると、高拘束圧下の密実な砂に対して、爆破載荷による縦波が伝播する時には、土粒子骨格は非弾性

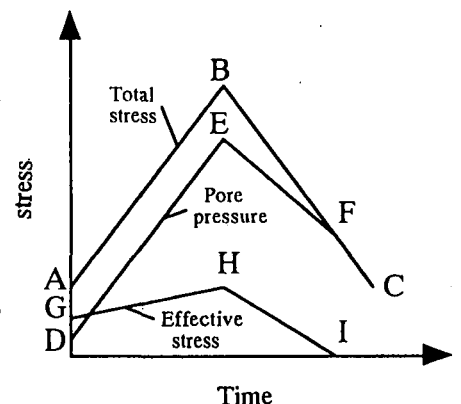


Fig. 5.1 Liquefaction mechanism under blast vertical loading<sup>5)</sup>

キーワード：上下地震動、液状化

\* 金沢大学大学院自然科学研究科、0762-34-4656

\*\* 金沢大学工学部、0762-34-4654

\*\*\* 金沢大学大学院工学研究科、0762-34-4656

的に挙動するので、B値は1.0より少ない。したがって、Fig.1のように、全応力が増加するとともに、有効応力も増加する。全応力が元に戻る時、有効応力がゼロになる。つまり、液状化になる。

飽和砂地盤は本質的に連続体ではない。勿論、通常の問題では、大変形が生じるわけではないので、連続体としての解析で何ら支障はないのであるが、地震波伝播による飽和砂の液状化に対して、小変形連続体理論で説明するには無理がある。従来、液状化のメカニズムは、Fig.2のように、せん断によって体積収縮を起こす性質を具備しているゆる詰め粒状体が排水を阻

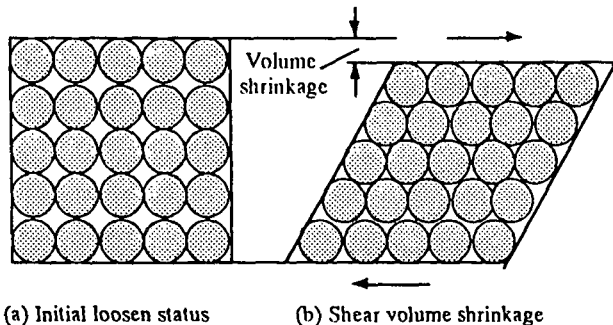


Fig.2 Sand volume change due to shear vibration

止されたため、等体積変形を余儀なくされ、その結果、有効拘束圧の減少すなわち間隙水圧の上昇を伴って液状化が発生する、とされている<sup>4)</sup>。

しかし、これらの説明では、文献<sup>2)</sup>の上下動は液状化に影響するという実験結果と合わない。

そこで、以下では、文献<sup>2)</sup>の実験をさらに進めると共に、上下動が間隙水圧上昇に及ぼす影響の説明を試みる。

### 3. 上下地震動が液状化に及ぼす影響に関する実験

#### 1) 実験に用いた材料および実験装置

実験に用いた砂の粒径加積曲線をFig.3に示す。この図より、この砂は比較的液状化しやすい粒径範囲に

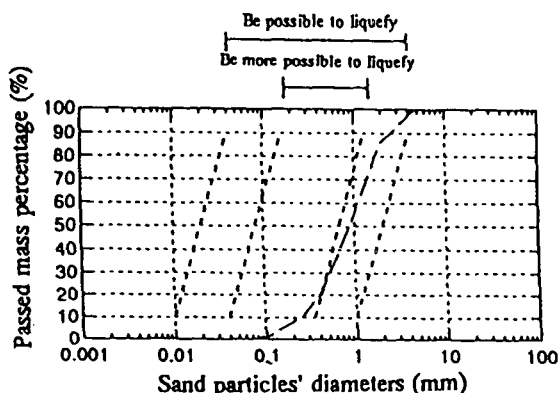


Fig.3 Accumulated curve of sand particles' diameters used in experiment

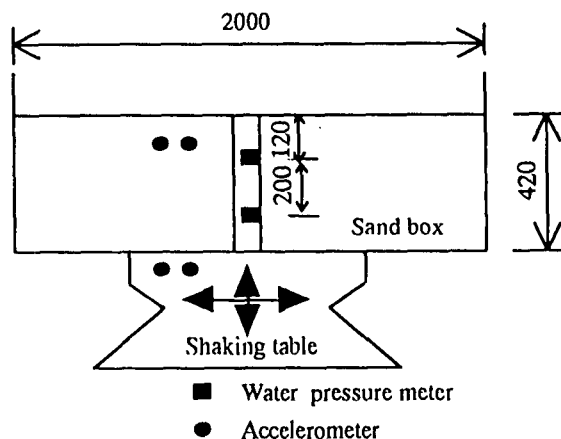


Fig.4 Experimental equipment

あることがわかる。次に実験装置の概要をFig.4に示す。振動台は水平1方向と上下方向に加振することが可能である。この振動台の上に砂箱を固定し、その中にボイリング法によって層厚42cmのゆる詰めの飽和砂地盤を作成した。地表面から12cmの地点と33cmの地点にそれぞれ水圧計を設置した。振動台の水平動および上下動の加速度を測定するために、2つの加速度計を振動台に設置した。また地盤の応答を求めるために地表面から12cmの地点に水平および上下方向用に加速度計を2つ設置した。

#### 2) 実験方法および実験条件

加振方向と入力加速度をパラメータとして飽和砂地盤を振動させ、特に上下動が液状化の発生とそれに伴う地盤の沈下に及ぼす影響について考察する。さらに、液状化地盤の上下動と水平動の応答の違いについて考察する。

加振方向については、水平方向、上下方向、並びに水平および上下両方向同時加振の3ケースで実験を行った。入力波は正弦波とし、水平動、上下動ともに振動数を10Hzとした。水平、上下両動の位相差を0°、30°、60°、90°の4ケースとした。加振時間は、水平動、上下動ともに4秒間である。本論文ではそれぞれの実験において以下の項目を測定した。

- 振動台による水平動入力加速度
- 振動台による上下動入力加速度
- 地盤の水平方向の応答加速度
- 地盤の上下方向の応答加速度
- 過剰間隙水圧（地表面から12cmの地点）
- 過剰間隙水圧（地表面から32cmの地点）
- 地盤の沈下量

#### 3) 実験結果および考察

Figs.5~8に入力加速度、応答加速度、過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。Fig.5は入力加速度が水平60galで

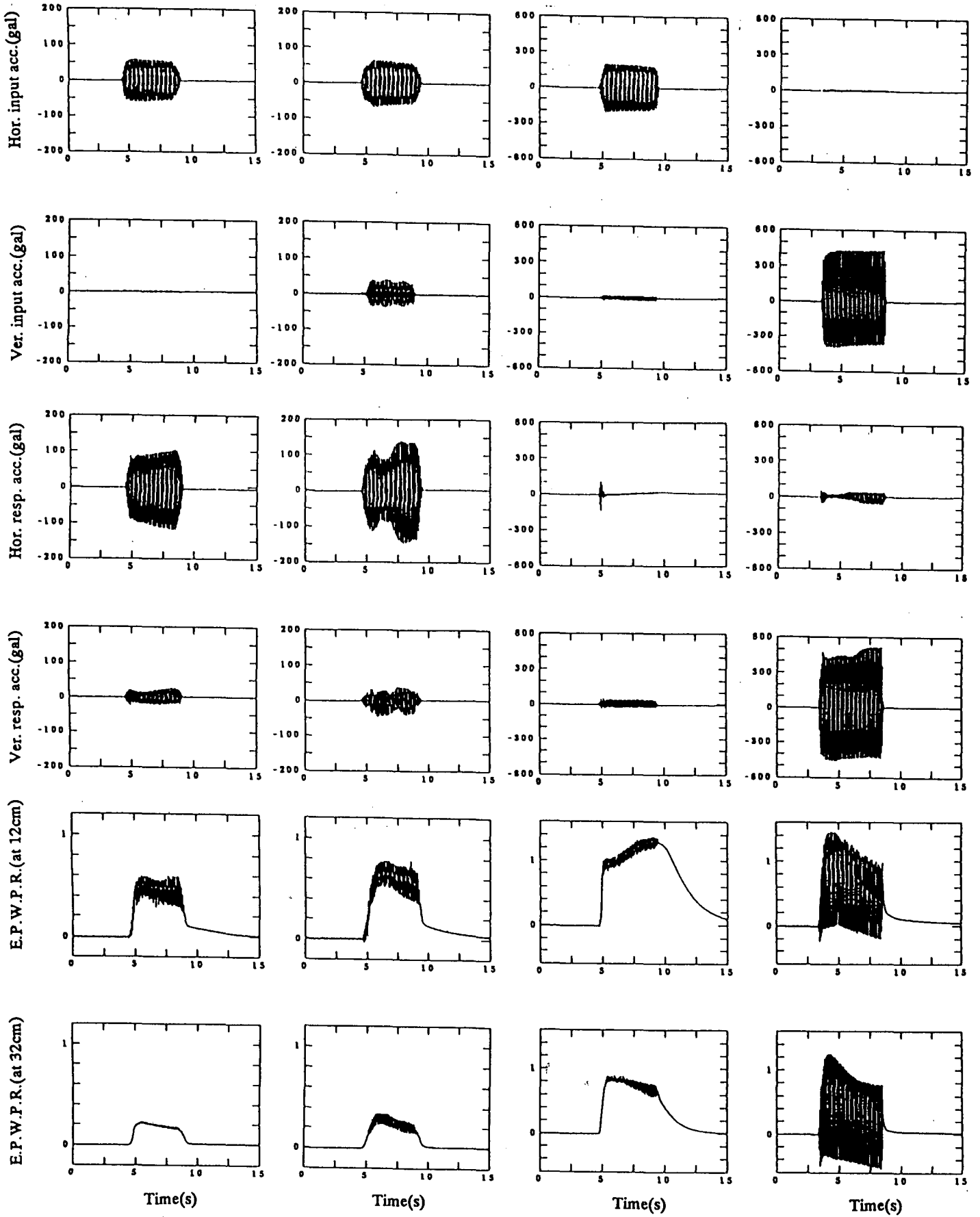


Fig.5 Input acc. is 60gal,  
horizontal only

Fig.6 Input acc. are hori-  
zontal 60gal, ver-  
tical 40gal

Fig.7 Input acc. is 200gal,  
horizontal only

Fig.8 Input acc. is 400gal,  
vertical only

ある。このケースでは、過剰間隙水圧と応答加速度から判断すると完全液状化したとは言えない。Fig.7は入力加速度を水平200galとしたケースであるが、このように入力加速度を大きくしていくにつれて過剰間隙水圧比が上昇し、完全液状化が発生する。Fig.6はFig.5のケース（水平60gal）に上下40galを加えたものであるが、過剰間隙水圧比はFig.5のケースより大きく、また応答加速度も過剰間隙水圧の上昇に伴って減小し、液状化の程度が激しくなる方向へ変化している。Fig.8は上下動のみの400galで加振したケースである。液状化進行時に圧力が加わったり、減少したりすることを示す。また、これらの図に示すように、完全液状化時において、水平動は水平方向加振時、水平及び上下両方向加振時ともに地盤中をほとんど伝播されず、応答倍率が小さくなっている。一方、上下動は完全液状化時においても伝播されることがわかる。

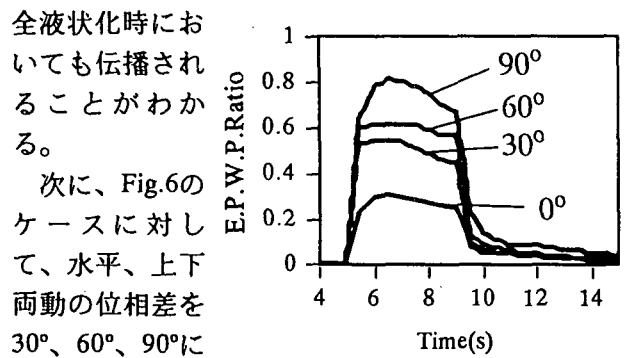


Fig.9 Excess pore water pressure ratio and phase difference

次に、Fig.6のケースに対して、水平、上下両動の位相差を30°、60°、90°にして実験を行った。Fig.9に位相差が過剰間隙水圧比に及ぼす影響を示す。位相差が90°の場合に、間隙水圧の上昇が一番大きい。このことに関する考察は4章で行う。

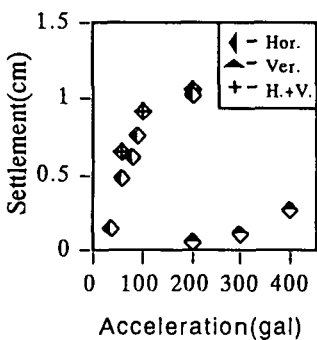


Fig.10 Ground settlements under hor., ver., hor.+ver. accs.

Fig.10は、横軸に入力加速度の大きさ、縦軸に地盤の沈下量を取り、水平、上下および水平・上下同時加振の結果についてプロットした図である。この図より、どのケースにおいても入力加速度の増加に伴い地盤の沈下量がほぼ直線的に増加していることが読みとれる。水平動と上下動を比較すると、同じ加速度では、水平動の方が

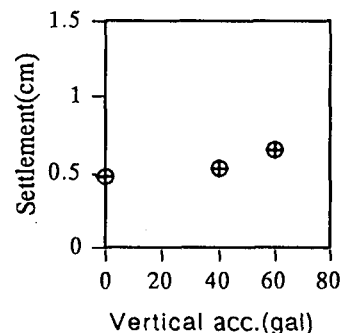


Fig.11 Ground settlement when hor. acc. is 60gal

沈下量が多いことがわかる。また、この水平動に同程度の上下動を加えるとさらに沈下量が増加することがわかる。

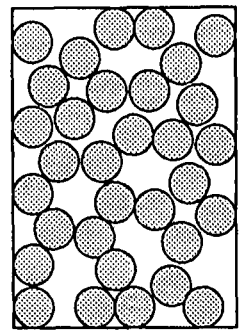


Fig.12 Sand particles before liquefaction

Fig.11は、水平動60galの入力加速度に対して、上下動の入力加速度を0gal、40gal、60galと変化させて、同時加振したときの各ケースの地盤の沈下量を示した図である。こ

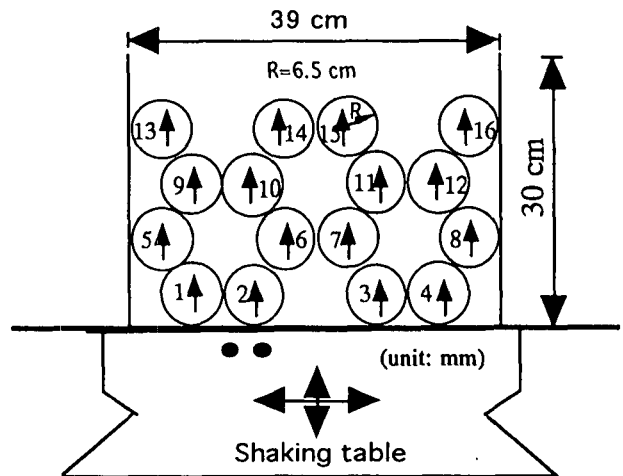


Fig.13 Model sand ground under 2-D shaking

の図より、水平加速度一定のもとでは、上下加速度が大きくなるとともに、地盤の沈下量が大きくなることがわかる。

#### 4. 上下動による飽和砂の間隙水圧上昇メカニズム

上下動の作用で、現に液状化が促進されていることを説明するために、次の実験を実施した。このとき飽和砂地盤の中砂の詰まり方は、全部Fig.2のようなランダムな詰まりの方を対象とした。

##### 1) 実験に用いた円筒要素材料および実験方法

本実験では、円筒要素としてアルミ缶とスチール缶を用い、缶同士間の摩擦を増大させるため、缶の表面に両面テープを巻き付け、その

Table1 Element weight

Element	Weight(g)	Element	Weight(g)
1	74	9	69
2	67	10	69
3	69	11	76
4	73	12	75
5	69	13	69
6	34	14	65
7	44	15	46
8	44	16	76

上に砂を密に付着させた。円筒要素の詰め方をFig.13に示す。要素半径は6.5cmである。要素重量を表1に示す。入力波は正弦波とし、水平動、上下動ともに振動数を10Hzとした。加振手法は、水平動、上下動ともに徐々に増加させ、回転落下までの入力加速度と回転落下形態を記録した。1つのケースに、3回実験をして、その平均値をとった。

(2) 実験結果および考察

上下動としてそれぞれ0gal、150gal、300gal、500galを加えて、円筒要素が回転落下するまでに要する水平加速度は、それぞれ505gal、450gal、391gal、329galである。それに対して、水平動としてそれぞれ0gal、150gal、300gal、400galを加えて、円筒要素が回転落下するまでに要する上下加速度は、それぞれ786gal、719gal、630gal、524galである (Fig.14、Fig.15に示す)。円筒要素の回転落下形態をFig.16に示す。この図からわかるように両方向加振の方が一方向加振よりも、円筒要素を回転落下させやすい。この場合は間隙

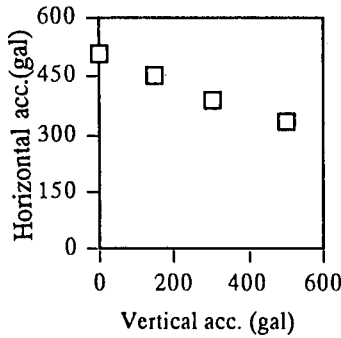


Fig.14 Hor. acc. needed to begin smashing model ground after ver. acc. added

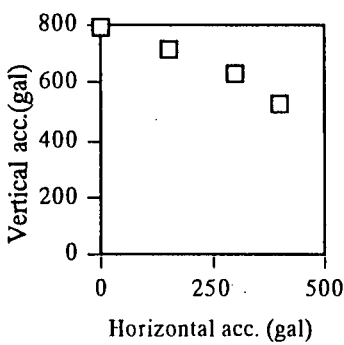


Fig.15 Ver. acc. needed to begin smashing model ground after hor. acc. added

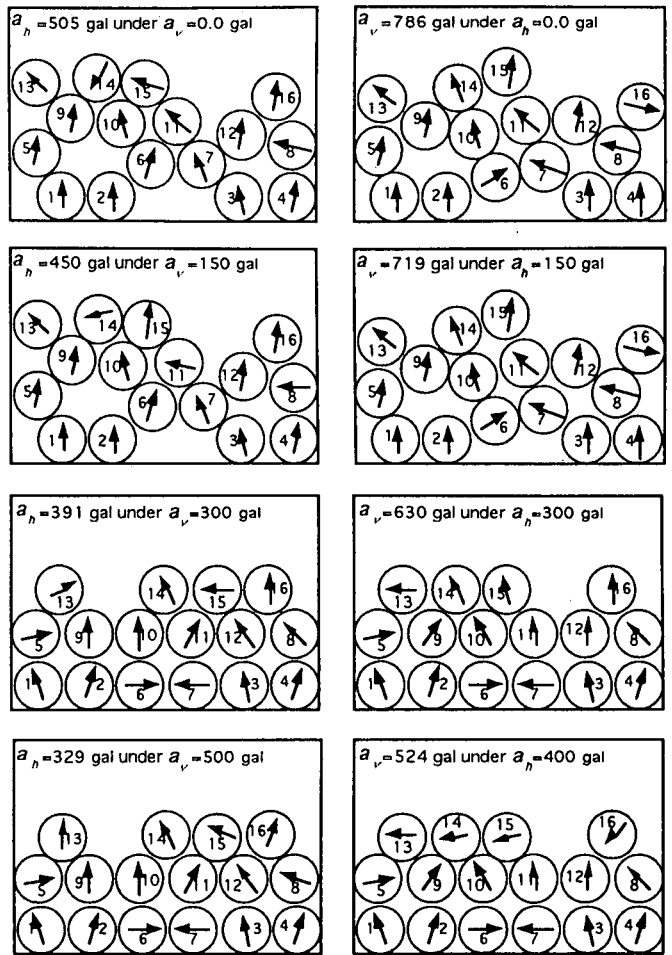


Fig.16 Smashed status of model sand ground after shaking

水圧を考慮していないが、飽和砂地盤においては粒子の回転落下が間隙水圧上昇に結び付くと考えられる。したがって、飽和砂地盤の液状化をさせやすい。なお本実験では、水平・上下の位相差をゼロとしているが、位相差がある場合も含めて、上下動の液状化に及ぼす影響を以下のように考えた。

水平・上下動の位相差と振動台の動きを示したのがFig.17である。位相差  $\theta = 0^\circ$  では振動台は斜め直線状に動く。 $\theta = 90^\circ$  では振動台の軌跡は楕円状になる。Fig.17(a)のように水平に振動台が動くとき、砂粒子は水平移動過程で、即ちせん断振動する過程で、現在位置より低い場所の間隙に落ち込もうとする。つぎの瞬間には、別の砂粒子がその間隙に落ち込もうとするので、間隙にある水には余分な圧力がつきつぎとかかり続け、これが液状化につながる。

一方、上下動のみが作用するときには、下向きの加速度によって砂粒子はすぐ近傍の低い位置の砂粒子と押し合いをするか、もしくはすぐ近傍の間隙に押し込まれようとする。しかし、つぎの瞬間には上向きの加速度が作用するので、間隙水圧はほとんど元に戻るぐらいまでに回復する。

従って、上下動によって砂粒子の配置が変形するま

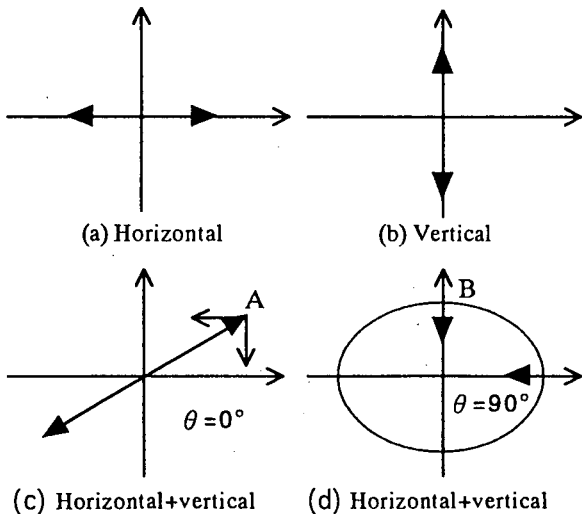


Fig.17 The tracks of shaking table movement

でに加振されれば、間隙水圧はさらに上昇し、液状化に至るものと予想される。

つぎに $\theta=0^\circ$ では下向きの加速度が最大となるのはFig.17(c)中のA点近くであり、このとき砂粒子は近傍のより低い位置の間隙に強く押し込まれようとする。しかしA点付近では水平方向の左に向かう速度が小さいことから、砂粒子の移動距離は小さく、従って間隙に押し込まれる力の大きい範囲では、間隙に押し込まれる回数は少ない。

一方、 $\theta=90^\circ$ では下向きの加速度が最大となるのはFig.17(d)中のB点近くであり、このとき砂粒子の水平方向の速度は大きいから、強い加速度で何回も間隙に押し込まれることになる。即ち砂粒子は大きい力で、何回も間隙に押し込まれるので、間隙水圧の上昇が促進されることになる。

まとめると、上下動が加わると、砂粒子は間隙にそっと落ち込むのではなく、押し込まれることになり、間隙水圧はより大きく上昇する。位相差によって、その大きくなるなり方の異なることが説明できた。

## 6. おわりに

本研究では、加振方向、入力加速度と位相差をパラメータとして飽和砂地盤を振動させる実験を行い、液状化地盤の上下動と水平動の応答の違いについて考察した。特に上下動が、飽和砂中の間隙水圧発生とそれに伴う地盤の液状化に及ぼす影響について考察した。上下動が飽和砂の液状化を起こすメカニズムについて以下のように考えた。上下地震動を加えると砂が間隙に押し込まれやすくなり、液状化しやすいものと考えられる。従来の連続体小変形理論ではこれを解釈しにくい。そこで、本研究では離散体円筒要素を用いて実験を行い、上下動が砂粒子回転落下に及ぼす影響を検

討した。本研究の結論を以下に示す。

- (1) 上下動は完全液状化地盤でも伝播し、液状化発生前および発生後の地盤の応答に顕著な違いはみられない。
- (2) 地盤の沈下量は水平および上下両方向の加振時において最も大きくなり、1方向のみ加振では水平方向加振の方が上下方向加振よりも沈下量は大きい。
- (3) 上下動は飽和砂中の間隙水圧発生とそれに伴う地盤の液状化に影響する。水平動のみで加振しても過剰間隙水圧比が1に達しない場合に、上下動を加えると完全液状化する。
- (4) 水平動と上下動の位相差が飽和砂中の間隙水圧の上昇に影響を及ぼす。位相差が $90^\circ$ の場合に影響が最も大きい。

## 参考文献

- 1) 河上房義、小川正二、虎瀬允昭：衝撃を受けた飽和砂中に発生する間ゲキ水圧、土と基礎、1965、13-5、p.413.
- 2) 金本昌也、北浦勝、宮島昌克、翟恩地、柚村孝彦：上下地震動が液状化地盤の挙動に及ぼす影響に関する実験、第23回地震工学研究発表会講演集、1995、p.289.
- 3) 森伸一郎、三輪滋、沼田淳紀、関宝：神戸人工島で噴出したまさ土の振動台による液状化実験、第23回地震工学研究発表会講演集、1995、p.225.
- 4) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版社、1978.
- 5) Richard J. Fragaszy, Michael E. Voss: Undrained Compression Behavior of Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 3, March, 1986, p.334.

## THE EFFECT OF VERTICAL GROUND MOTION ON THE RISE OF PORE WATER PRESSURE IN SATURATED SAND

Endi ZHAI, Masakatsu Miyajima,  
Masaru Kitaura, Masaya Kanemoto

To observe the effect of vertical ground motions on liquefaction of saturated sand ground during earthquakes, a series of tests have been performed on saturated sand by means of 2-D shaking table. These tests show that horizontal vibration, needless to say, can result in liquefaction, even vertical vibration only can also result in liquefaction. Furthermore, the phase differences between horizontal and vertical motions affect the rise of excess pore water pressure. Another tests on model ground consisting of discrete cylindrical elements have been done to explain the mechanism why vertical motions can cause the rise of excess pore water pressure.