

(58) 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

飛島建設(株) 正会員 ○森 伸一郎
 飛島建設(株) 正会員 三輪 滋
 飛島建設(株) 正会員 沼田 淳紀
 飛島建設(株) 関 宝琪

1. はじめに

1995年1月17日の兵庫県南部地震においては、神戸港の埋立地や人工島の多くで大規模な液状化が発生し、港湾施設や建物、ライフラインに大きな被害をもたらした。当初より、液状化しにくいとされていたまさ土の液状化と大きな上下動の影響が注目された。したがって、本格復旧に先立ち、①埋立に使われたまさ土地盤の液状化特性、②液状化特性や被害程度に及ぼす上下動の影響、③埋立まさ土地盤の地震動増幅特性、を明らかにすることが必要と考えた。そこで、神戸ポートアイランドで液状化により噴出したまさ土を用いて、模型地盤を振動台で加振するという液状化実験(14供試体,53加振)を行った。

2. 実験方法

2.1 実験機器と計測 縦50cm横50cm高さ40cmのせん断土槽に模型飽和地盤を作成し、3次元振動台を用いて水平1方向と上下方向に同時加振する実験を実施した。計測器は、基盤の入力と表層地盤の応答を測定する水平・上下の加速度計4台と地盤最下部と中央部の液状化状態を測定する間隙水圧計4台である。用いたせん断土槽と計器配置を図-1に示す。

2.2 模型地盤 地盤材料には、ポートアイランドの中公園などで液状化により噴出したまさ土(約300kgf)を用いた。このまさ土の粒径加積曲線を図-2に示す。図中には、埋め立てに用いられた代表的なまさ土の粒径加積曲線も併記した。模型地盤は、湿潤状態のまさ土と脱気水を用いた水中落下法により作成した。試料は、湿潤状態のまま回収・保管し、繰り返し使用した。供試体の数は14であり、作成方法を統一した。14の供試体の初期乾燥密度(g/cm^3)は、平均値が1.4005、標準偏差が0.0179である。

2.3 相似則 井合の相似則²⁾に、加速度に関する相似比を1とし、剛性が拘束圧の1/2乗に比例するという条件を与えて求められる相似則を適用した。これによれば、実物に対する模型の相似比は、長さに関する相似比を λ_l とすると、時間に関する相似比 λ_t が $\lambda_l^{3/4}$ となる。時間軸を1/10に圧縮したので、 $\lambda_t=0.1$ としたとき、 $\lambda_l=1/21.5=0.0465$ となる。約8mの土層を想定していることになる。

2.4 入力地震動 加振に用いた入力地震動は、神戸海洋気象台(JMA)で記録されたNS成分とUD成分である³⁾。図-3に原記録を示す。使用に当たっては時間軸を1/10に圧縮し、振幅を調整し種々の加振を行った。水平動と上下動の大きさの比は一定である。加振履歴の影響が無視できるような段階加振を行った。加振の前には、地盤高さを測定し沈下量を求めた。供試体によって、水平動(NS)と上下動(UD)の2方向同

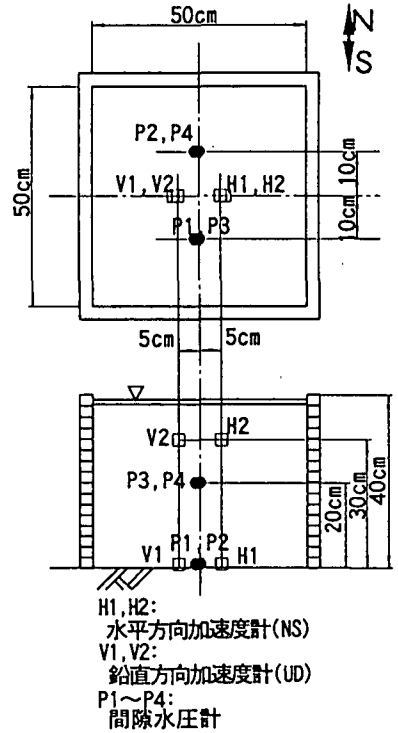


図-1 せん断土槽と計測器の配置

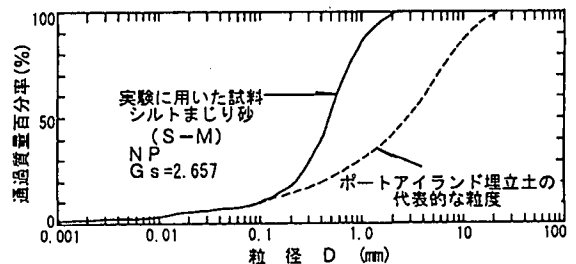


図-2 実験に用いたまさ土の粒径加積曲線

時加振するものと、水平動(NS)の1方向加振するものに分けて実験を行い、同様の状態にある供試体の結果の比較により、液状化に対する上下動の影響について検討した。

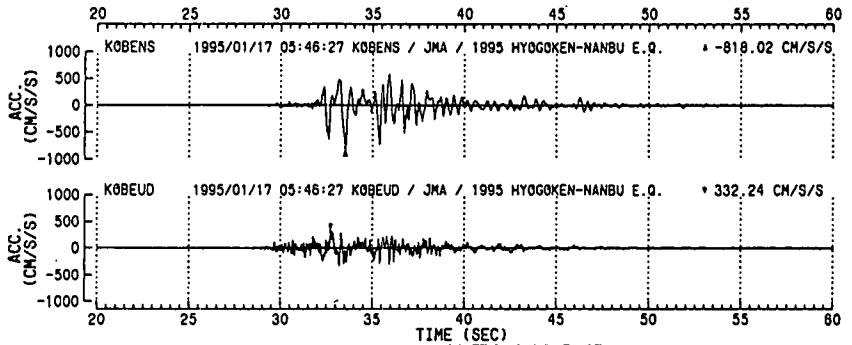


図-3 入力に用いた地震観測原記録
(1995年兵庫県南部地震：神戸海洋気象台の記録)

3. 液状化特性に及ぼす上下動の影響

3.1 過剰間隙水圧発生特性

上下動が鉛直上方に入射する平面波P波と仮定する。P波は圧縮波であるのでせん断は生じない。有効応力原理に立てば、次のように考えられる。非排水状態にある飽和した土要素における圧縮波による全応力の変化は間隙水圧の変化に現れるのみであって、有効応力に変化は生じない。有効応力に変化がなければ液状化には影響しない。したがって、上下動は液状化には影響がない。しかし、諸々の仮定下の土要素として自明であっても、地盤の挙動として確認された例はない。

図-4に、地盤下部の過剰間隙水圧時刻歴の一例を入力加速度時刻歴とともに示す。2つの入力水平動の差は3%であり、図-4の過剰間隙水圧の時刻歴に現れる違いは上下動の影響である。両者の有効上載圧は 34.3 gf/cm^2 であるので、振動成分を除いた過剰間隙水圧(残留過剰間隙水圧と呼ぶ)の比が両者ともに0.9以上となり、地盤はほぼ完全に液状化している。ここで、水平上下同時加振の際に顕著に現れる振動成分は入力上下動の位相とよく対応しており、前述の有効応力原理で説明できる。入力上下動などによって考えられる振動成分を取り除いた蓄積され残留している過剰間隙水圧成分には、上下動の有無による差は見られない。したがって液状化発生特性には上下動は関与していないと言える。

図-5に、地盤下部(2点の平均値)における、入力最大水平加速度と最大残留過剰間隙水圧との関係を示す。液状化に至るまでは、約 30 cm/s^2 をしきい値とし、入力加速度にほぼ比例

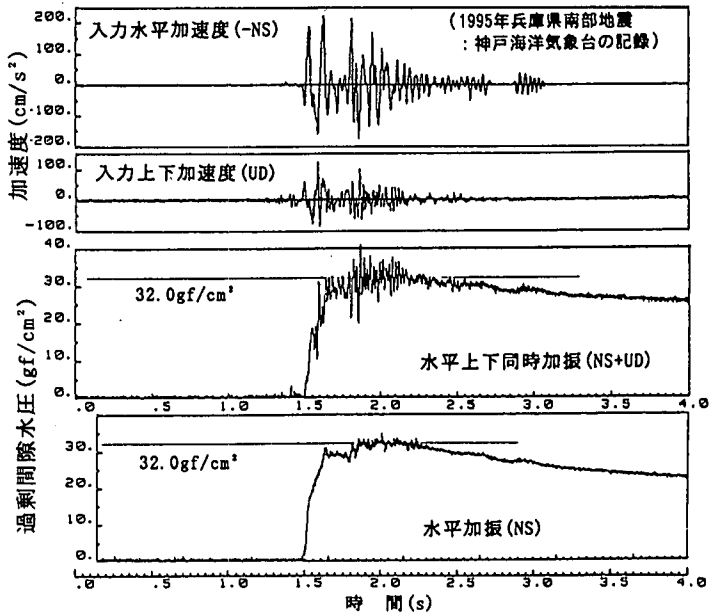


図-4 過剰間隙水圧時刻歴(地盤下部)に見られる上下動の影響

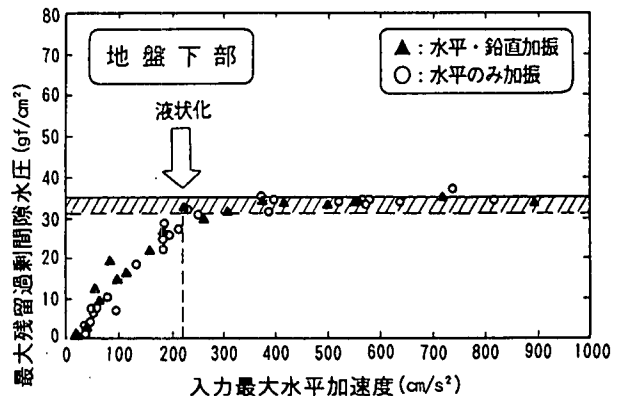


図-5 入力最大水平加速度と最大残留過剰間隙水圧の関係

して過剰間隙水圧が大きくなっている。図中には、水平・上下同時加振と水平加振のみの場合を記号を変えて示したが、両者に差は見られず、入力レベルが違ってても上下動は液状化発生特性に影響を及ぼさないことがわかる。

3.2 液状化特性 図-5のような整理から、乾燥密度が 1.4g/cm^3 程度のまき土埋立地盤では、入力最大水平加速度が 150cm/s^2 程度で埋立土層の上半分が、さらに、 220cm/s^2 程度で埋立土層の全層が液状化に至ることがわかる。ポートアイランドでは、埋立土層下部で 500cm/s^2 以上の加速度が観測されており、この実験結果によれば、埋立土層の全層が液状化したと推定できる。また、既往の研究⁸⁾を参考におおざっぱに比較して、実験に使用したまき土は材質的に液状化しにくいものとは言い難い。

3.3 沈下特性 図-6に、入力最大水平加速度と一度の加振によって生じた平均地表面沈下量の関係を示す。入力加速度が大きくなるとともに沈下量は増加するとともに、 300cm/s^2 までは入力加速度に対する沈下量の増加率も増大する。液状化領域の進展とともに地表面沈下が増大することがわかる。一方、 $300\sim 400\text{cm/s}^2$ 以上になると、入力加速度の大きさにかかわらず1回の加振によって生じる沈下量はほぼ一定となることがわかる。図中には、水平・上下同時加振と水平加振のみの場合を記号を変えて示した。両者に差は見られず、上下動は沈下特性にも影響が認められない。

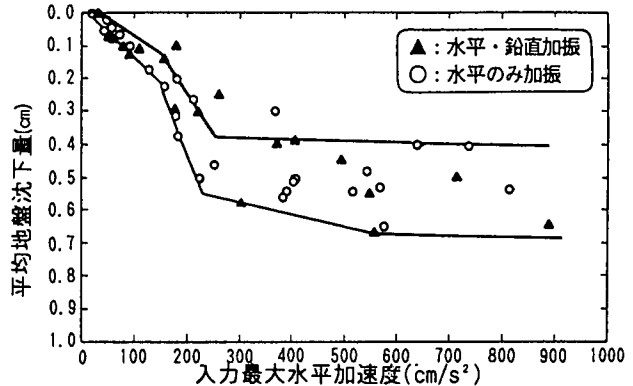


図-6 入力最大水平加速度と平均地盤沈下量の関係

4. 地盤の加速度応答特性

4.1 水平動の応答特性 図-7に水平方向の入力加速度の最大値と地盤内の水平加速度の最大値の関係を示す。入力加速度が 50cm/s^2 程度までは、ほぼ線形的な応答を示す。過剰間隙水圧の上昇量は小さくその影響は少ない。それ以上では地盤の応答は非線形的に変化する。入力が 150cm/s^2 以上では、応答は $150\sim 400\text{cm/s}^2$ にばらつくこと、入力が大きくなって最大でも 400cm/s^2 程度で頭打ちの状態となることが特徴的である。これは、土層の半分以上が液状化しており、不安定で再現性に乏しい状態にあるためと解釈できる。このような応答の不規則変化は、解析的な検討^{5)~7)}でも現れる。

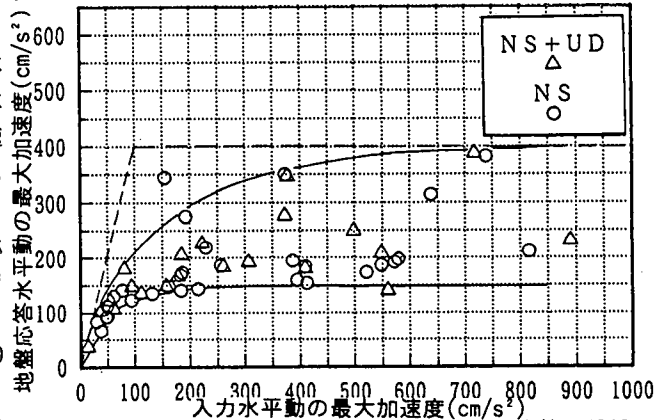


図-7 水平動の最大加速度の入力と地盤応答の関係

図-8に加速度応答倍率の結果を示す。入力が大きくなるにつれて応答倍率が低下するという水平動の非線形増幅特性が顕著に現れている。 150cm/s^2 以下では応答倍率は1以上であり、最大加速度は増幅するが、 250cm/s^2 以上で応答倍率は1以下となる。入力が 500cm/s^2 以上では $0.3\sim 0.5$ まで低下

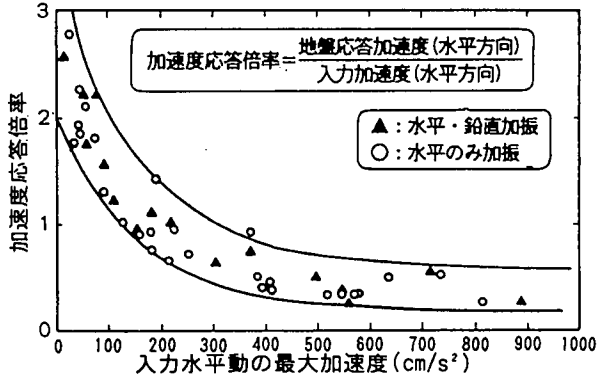


図-8 入力水平動の最大加速度と加速度応答倍率

する。また、水平動加振と水平上下同時加振の結果に差異は見られず、水平動の応答特性に上下動の影響はない。

4. 2 上下動の応答特性 図-9に上下動加速度の入力の最大値と地盤の応答の最大値の関係を示す。20~350cm/s²の入力の範囲で上下動は1から2倍程度の増幅を示している。ばらつきはあるが入力の大きさに依存していない。

5. 実験結果と実際の状況の比較

ポートアイランドでは、今回の地震で液状化により杭基礎構造物とその周辺地盤に30~50cmの段差が生じた。地下水位以下の埋立土層厚を12~20m程度とすると、この層の圧縮率は2.5%程度となる。

また、神戸市が既に公開しているポートアイランドの地震観測波形⁴⁾を図から読み取ると、埋立土層下端に相当するKP-12mと地表との水平動の応答倍率は約0.6、上下動の応答倍率は1~2である。

一方、模型実験では、実際に埋め立て土層下端で観測された最大水平加速度550cm/s²の入力に対して、一加振沈下量は0.4~0.7cm、累積沈下量は0.7cm~1.5cmであり、圧縮率にするとそれぞれ1~2%と2~4%である。沈下量は実際の被害状況と実験結果が良く一致している。地震動の表層での応答特性については、応答倍率が水平動では0.3~0.7倍、上下動においては1~2倍であり、観測結果と実験結果はほぼ一致している。

6. 結論

- (1) 液状化発生特性と液状化による沈下量の発生特性の両方に、上下動の影響は認められない。
- (2) 水平動は、地震動レベルの増加に伴って非線形性が顕著になり応答倍率が低下する。また、水平動の応答倍率には、上下動による影響が認められない。上下動は、1~2倍の増幅が見られ、地震動レベルの上昇に伴う応答倍率の低下は認められない。
- (3) 入力加速度が220cm/s²程度で埋立まさ土層全層が液状化に至る。400cm/s²以上になると、地表の応答も、地表面沈下量も、入力の増加による伸びは示さず、頭打ち状態になる。
- (4) 実験結果は、被害状況や地震観測の結果とよく整合しており、本実験は神戸人工島におけるまさ土埋め立て地盤の液状化現象を実験により検証することができた。

[謝 辞] 研究の実施と成果の公表にあたり御教示戴きました運輸省関係の方々にお礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 石原研而, 安田進: 臨海地域の地盤災害, 阪神大震災災害調査緊急報告会資料, 土木学会, pp.13~18, 1995.2
- 2) 井合進: IG場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について, 土木学会第19回地震工学研究発表会講演集, pp.341~344, 1987.7
- 3) 気象庁: 1995年兵庫県南部地震気象庁87型電磁式強震計記録, 1995.2
- 4) 関西地震観測研究協議会
- 5) 森伸一郎他: 地盤の非線形増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響, 第21回地震工学研究発表会講演概要, pp.93~96, 1991.7
- 6) 森伸一郎他: 地盤の地震動増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響(その1)~(その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造I), 1991~1993
- 7) 三輪滋, 森伸一郎: 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.211~216, 1994.12
- 8) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, p.274~279, 1976

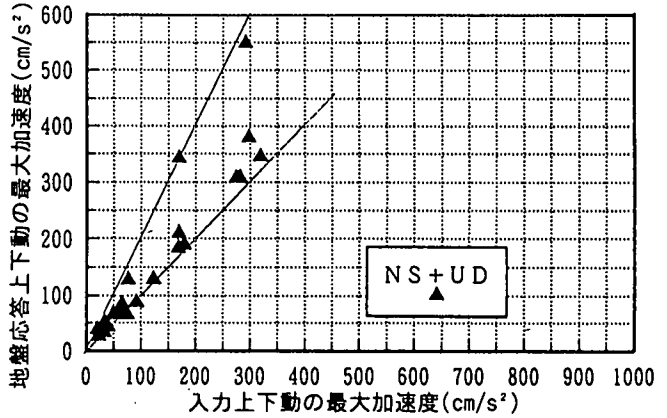


図-9 上下動の最大加速度の入力と地盤応答の関係