

## (52) 模型砂地盤の液状化振動台実験

東京都土木技術研究所 ○阿部博、 草野郁

**1. はじめに** 著者らは1987年に“東京低地の液状化予測”<sup>1)</sup>を公表したが、成果の1つとして関東地震(1923年)では現・旧河川沿いの地域や東京湾岸の埋立地・干拓地で液状化が発生したことを指摘した<sup>2)</sup>。さらに、河川沿いでは安政江戸地震(1855年)と明治東京地震(1894年)で液状化が発生した地域は関東地震でも液状化が発生しており<sup>3)</sup>、今後もその発生が危惧される。一方、東京では直下型地震発生切迫性があると判断されており、液状化しやすい地域にある施設の耐震性の検討と対策は、都市災害を考える上での重要な行政課題となっている。この課題に対処するため、液状化を考慮した土構造物の耐震性評価システムを構築し、都が管理する既設の施設を対象にした耐震性の検討と液状化対策の研究を進めている。このシステムでは①液状化解析プログラムの開発②振動台実験でのプログラム機能検証③他地域の被害事例の解析的検討を基に、東京の地域特性に見合った液状化対策の提案を考えている。本報告は、有効応力解析プログラムの機能検証を目的とした模型盛土地盤の振動台実験から得られた応答加速度や過剰間隙水圧等の計測値と解析値との比較・検討結果を述べたものである。

**2. 模型振動台実験概要** 振動台実験は地盤層厚を70cmに共通させたⅠ飽和水平地盤(実験CASE1)とⅡ飽和水平地盤+盛土(実験CASE2)、Ⅲ碎石ドレーンを含む飽和水平地盤+盛土(実験CASE3)の3ケースについて行った。ここではⅡ実験CASE2の飽和水平地盤+盛土の実験概要を述べる。模型盛土地盤の断面図と計測器配置を図-1に示す。土槽には加振方向の内幅が200cm、奥行150cm、高さ100cmのせん断土槽を用いた。やや緩い地盤を想定して、水平地盤の目標相対密度 $D_r$ を60%とし、乾燥状態の豊浦標準砂( $D_{50}=0.198\text{mm}$ )を空中落下させ各計測器を設置しながら厚さ70cmの模型地盤を作製した( $D_r=61\%$ )。飽和地盤とするために、地盤中の空気を $\text{CO}_2$ で置換し、土槽下部から水を注入した。その後、防水用のビニールシートを盛土予定位置に敷き、不飽和状態の豊浦標準砂( $W=11.6\%$ )を盛り立て、高さ29cm、天端幅10cm、法勾配1:2の盛土を作製した(試験終了時 $D_r=-31\%$ )。実験手順を表-1に示すが、加振は土槽長手方向の一方向とし、入力波形は1968年十勝沖地震で記録された八戸EWをClough-Pirtzの相似則<sup>4)</sup>を使い時間軸のみを1/4とした。CASE2-1の微小加振の計測結果から、(地表/基盤)と(盛土/基盤)の周波数伝達関数の一次固有振動数が約23~24Hzを示し、盛土が殆ど応答ないことが分かった。CASE2-2の液状化加振にはCASE2-1と同一の波形を用い最大加速度振幅163galを入力した。さらに、再液状化時の過剰間隙水圧の挙動を知る目的でCASE2-4では平均片振幅100galで振動数4Hzの正弦波を約10秒間入力した。

**3. 振動台実験結果** 液状化加振で計測された応答加速度の数例を図-2に示す。また、基礎地盤で計測した過剰間隙水圧の一部を図-3に示す。図-2の加速度応答波形から、盛土直下の地盤では主動部の加速度の最大振幅に若干の低減があり、盛土内では天端近くでやや増加する傾向を示す。Ⅰ飽和水平地盤の液状化加振実験(最大入力加速度振幅171gal)<sup>5)</sup>で見られた液状化に伴う振幅の急激な低減はない。盛土法面下と法尻近傍の地盤の波形は、両計測値ともに主動部の加速度は若干低減するが、液状化に伴う急激な低減はない。盛土中央部の過剰間隙水圧は、盛土直下の浅い層(GL-19.3cm)を除くと、加振時間3秒~4秒の入力の主動部で水圧は急激に上昇し4秒前後でピークに達し、その後、深い層では水圧が消散する。浅い層では下層からの水流で水圧の上昇が継続する傾向がある。盛土法面下と法尻近傍の過剰間隙水圧では、盛土法面下は加振開始約3秒後に水圧が上昇を始めるが、急激にピークに達することがなく鋸歯状の波形が生じる。これは、盛土法面下に初期せん断応力が作用しているためと考えられる。一方、法尻近傍の水平地盤では鋸歯状の波形がみられず、また、浅い層では計測水圧が有効上載圧に $\sigma_v'$ 達している。液状化・再液状化加振の実験結果から、盛土中央部と法面下の地盤、法尻近傍の水平地盤の最大過剰間隙水圧分布を図-4に示す。地震波加振では盛土中央部直下の地盤は過剰間隙水圧が有効平均主応力 $\sigma_v'$ 程度しか上昇せず液状化に至って

いないが、盛土の影響の少ない法尻では過剰間隙水圧は有効上載圧 $\sigma_v'$ に達し液状化している。正弦波入力加振の再液状化実験においても、盛土中央部直下の地盤では間隙水圧が $\sigma_v'$ までは至らない。これは、側方への変形が拘束されていないため、水平地盤の液状化に見られるような側方付加圧の増加割合が少ないためと考えられる。法面下の地盤の過剰間隙水圧は、地震波では $\sigma_m'$ より若干大きくなるが $\sigma_v'$ には至らない。正弦波では $\sigma_v'$ に達するかあるいは若干大きくなる。法尻近傍の水平地盤では、過剰間隙水圧は地震波、正弦波ともに $\sigma_v'$ より大きくなる。法面下と法尻近傍の地盤で過剰間隙水圧が $\sigma_v'$ に近い、あるいは大きくなるのは、盛土下の過剰間隙水圧の消散に伴う下位層と側方からの水の流れによる影響の他に、側方に変形しようとする動きを土槽側壁が拘束するために過大な応力が働いたためと考えられる。図-5に示す過剰間隙水圧波形の一例から、5~10回の繰返しせん断応力で水圧はピーク値あるいはその近くまで上昇する。正弦波入力振幅は基礎地盤を液状化させるのに十分な大きさであるが液状化加振と同様に間隙水圧波形が鋸歯状を示すことから、せん断応力載荷時に間隙水圧は低下し地盤の剛性が回復するためと考えられる。

4. 振動台実験の二次元有効応力解析シミュレーション 解析手法には当所が開発した"EFFCTD"<sup>6)</sup>とよぶ有効応力解析プログラムを使用した。応力~ひずみ関係に修正 R-0モデルと呼ばれている関数型履歴曲線を用い、微小時刻ごとの接線剛性とせん断強度を有効応力法から求め、中央差分法で直接積分して応答を得る。過剰間隙水圧変化はSeedら<sup>7)</sup>の間隙水圧上昇実験式を、不規則波に適用した国生ら<sup>8)</sup>の方法に従った。二次元化では、①一次元での $\sigma_v'$ を平面ひずみ条件下の $\sigma_m'$ で表し、②二次元平面ひずみ弾性マトリックスでのせん断剛性率 $G$ は一次元の応力~ひずみ関係から得られる接線剛性率 $G_t$ で置き換え、動解では $G_t$ だけを変化させ体積弾性係数 $K$ を一定とする応力~ひずみマトリックスとした。過剰間隙水圧の発生は一次元での水平面上のせん断応力 $\tau_x$ に対応させて②から得られるせん断応力 $\tau_{xy}$ のみで生じるとした。 $D_r=60\%$ の飽和豊浦砂の異方圧密平面ひずみ条件下の非排水中空ねじり試験から初期せん断応力の大小が過剰間隙水圧発生に及ぼす影響を求め、これをプログラムに組込んだ<sup>9)</sup>。解析モデルと出力節点・要素および計測器位置を図-6に示す。解析モデルの初期応力は、地下水位をGL±0.0mに設定して線形自重解析法から求めた。モデル底面の境界は固定、側方の境界は左右境界の変位を等しくするタイピングを用いた。安定解析を目的としてレーレー減衰係数を $\alpha=0.0$ 、 $\beta=0.0005$ とした。解析入力波形は図-2に示した土槽底盤(A-G8)での計測値を用い、直接積分間隔を $\Delta t=0.000125$ 秒として、実験開始から5秒間解析した。解析に用いた土質パラメータを表-2に示す。各要素の初期せん断剛性率 $G_0$ は、I飽和水平地盤の一次固有振動数 $f_0=23\text{Hz}$ に合うように固有値解析からせん断剛性率を求め、 $1\text{ gf/cm}^2$ 当りの値に換算し、要素ごとの $\sigma_m'$ の平方根に比例させた。動的変形試験から $h_{m,x}$ を求め、修正R-0モデルの非線形パラメータ $\beta$ と $\alpha'$ <sup>9)</sup>を決めた。規準せん断ひずみを $\tau f/G_0$ で表すため、CD条件の三軸圧縮試験から内部摩擦角 $\phi'$ を決め、変相角 $\phi_{cm}$ を、今回行った中空ねじり液状化強度試験結果の応力経路から決めた。水圧上昇に関するパラメータには、液状化強度応力比 $R_{L20}$ 、繰返し回数 $N_c=5$ 回と20回での液状化強度応力比 $R_L$ の両対数グラフ上の勾配 $\eta$ 、Seedらの提案した過剰間隙水圧比と繰返し回数比の関係を示す実験式での水圧の立上りを決めるパラメータ $\xi$ が必要である。

CASE2-2の液状化加振の解析結果から、応答加速度(上:計測値、下:解析値)の数例を図-7に、盛土中央部の最大加速度深度分布を図-8に示す。図-7の加速度波形の比較から、主動部に至るまでの挙動は一致している。また、主動部付近の加速度振幅の比較から、最大振幅の発生時刻は解析値の方がやや早い。また、計測値が波形の喪失を示さないのに対して、解析値ではその喪失が現れており、液状化しやすい結果となった。図-8の深度分布から解析最大振幅が計測値に一致していることがわかる。過剰間隙水圧の時刻歴(上:計測値、下:解析値)の一部を図-9に示す。計測された水圧が盛土直下や法面下、水平地盤等で変化する様子を概ね解析値は表現している。加振5秒後の水圧比分布図と変形図を図-10に示す。水圧分布図から、大半の要素で液状化が起きているが、盛土直下から法尻にかけて水圧比の低い領域が認められる。変形図から、単純せん断変形が卓越していることがわかる。最後になりますが、大崎総合研究所の大槻 明氏、福武毅芳氏、清水建設技術研究所の佐藤正義氏、社本康広氏にご協力戴いたことに謝意を表します。

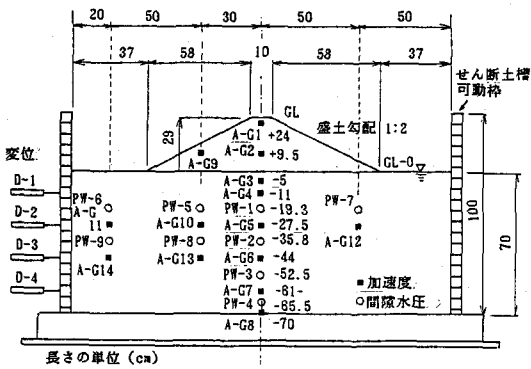


図-1 模型盛土地盤の断面図と計測器配置

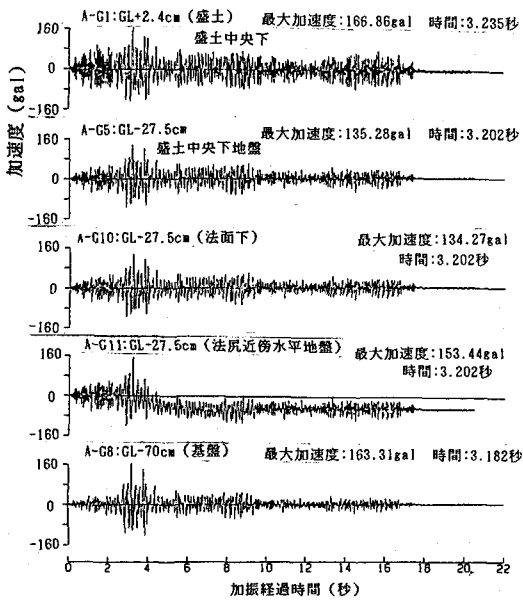


図-2 計測された応答加速度時刻歴

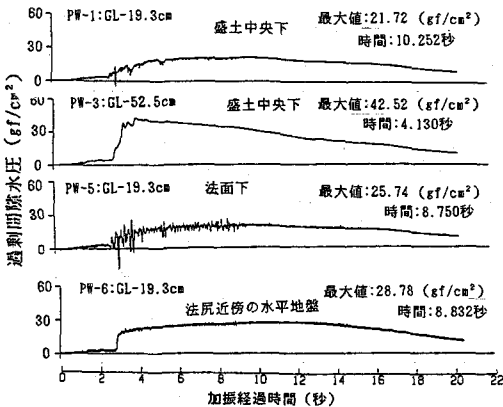


図-3 計測された過剰間隙水圧時刻歴

表-1 加振実験一覧表

実験ケース	加振種別	基盤入力最大加速度
CASE2-1	微小加振	地震波: 10 gal
CASE2-2	液状化加振	地震波: 163 gal
CASE2-3	微小加振	地震波: 10 gal
CASE2-4	再液状化加振	正弦波: 121 gal

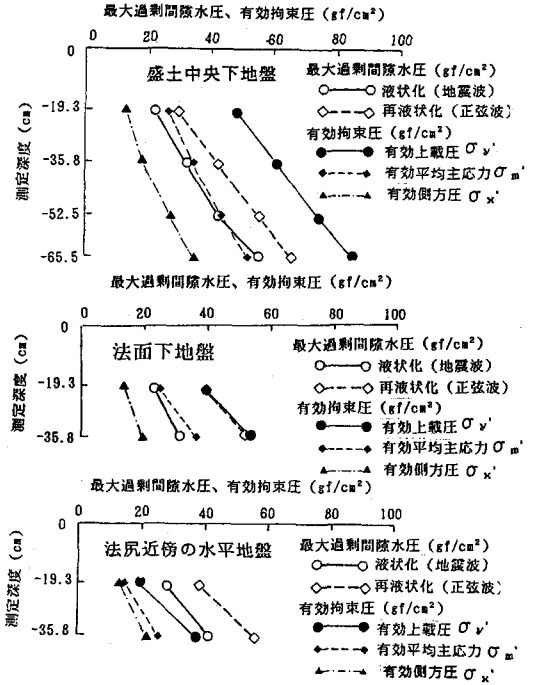


図-4 最大過剰間隙水圧分布

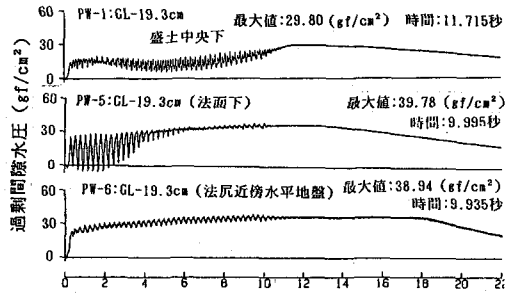


図-5 計測された過剰間隙水圧時刻歴

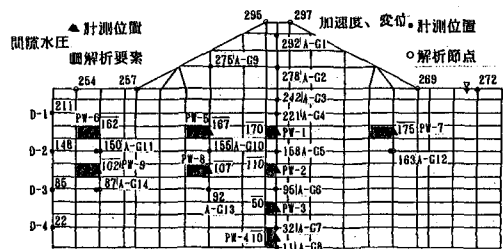


図-6 解析モデル

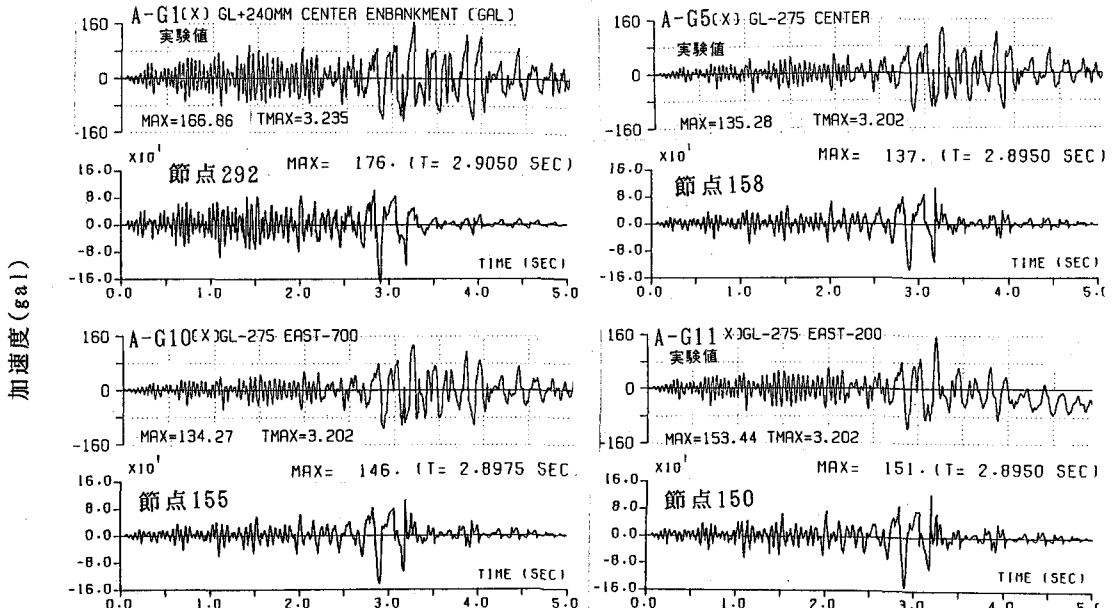


図-7 応答加速度時刻歴の比較(上:計測値、下:解析値)

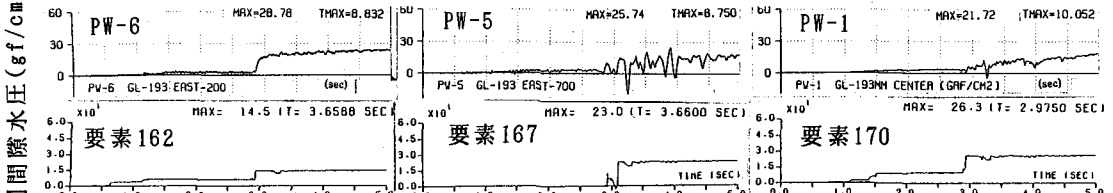


図-9 過剰間隙水圧時刻歴の比較

表-2 EFFCTDに用いる解析パラメータ

CASE	修正R-0モデル				水圧A'ラダー			
	$h_{max}$	$\alpha'$	$\beta$	$\phi'$ 度	$\phi'_{cm}$	$R_{L20}$	$\eta$	$\xi$
CASE2-2	29	3.18	1.67	39	28	.165	-8.8	0.5
I 飽和地盤	32	4.05	2.02	39	28			
II 盛土材料								

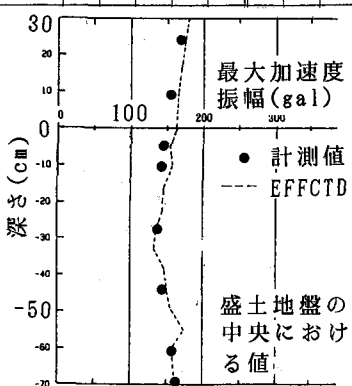


図-8 最大加速度深度分布

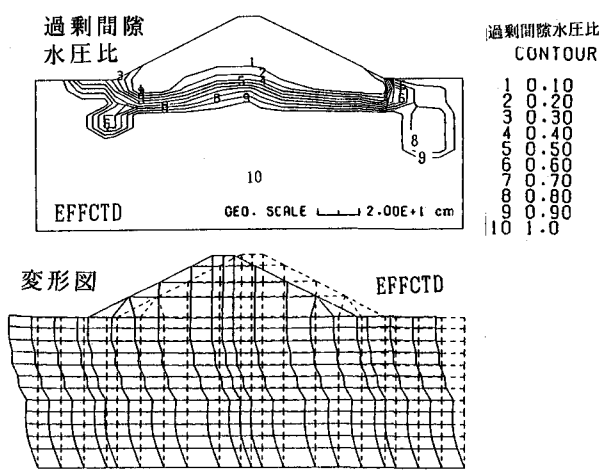


図-10 加振 5秒後の挙動

参考文献 1) 東京都土木技術研究所(1988):東京低地の液状化予測  
 2) 草野 郁(1989):関東地震における東京低地の液状化履歴、土木学会論文集、第406号/Ⅲ-11、PP.213~222  
 3) 草野 郁、阿部 博(1990):東京低地の再液状化現象、第25回土質工学研究発表会、PP.871~874  
 4) Clough, R.W. and Pirtz, D.(1958): Earthquake Resistance of Rock-Fill Dams, Transaction of ASCE, Vol.123, pp.782~810  
 5) 阿部 博、草野 郁(1991):水平地盤の一次元液状化解析、第25回土質工学研究発表会投稿中  
 6) 阿部 博、草野 郁(1990):水平地盤の液状化解析、平 2. 都土木技研年報、293-306  
 7) Seed, H.B et al(1976): Pore-water Pressure changes during Soil Liquefaction, Proc. ASCE, vol.102, GT4  
 8) 国生剛治、江刺晴行、桜井彰雄(1982):砂層の液状化現象についての数値シミュレーション、電中研報告、No. 381023  
 9) 阿部 博、草野 郁(1991):盛土の二次元液状化解析、土木学会第46回年次学術講演会投稿中