

(10) 二方向同時入力による液状化実験のシミュレーション解析

清水建設(株) 藤川智 福武毅芳 大槻明

1. はじめに

従来、地震時の地盤の非線形性や液状化現象を実験的に調べることを目的に、せん断土槽を用いた振動台実験が盛んに行われてきた。しかし、これらの実験はある特定の方向のみに加振を行なう一方向加振であり、実際の地震動が水平方向だけでも二成分(NS成分とEW成分)含むことを考慮すれば、一方向加振実験から得られる結果は必ずしも実現象を的確に模擬したものとは言えない。また、従来の要素試験(繰返し単純せん断試験)結果によれば、一方向せん断より多方向せん断の方がダイレイタンスが多く発生¹⁾し、液状化強度が小さくなる²⁾ことも指摘されている。著者らは既に文献3)に示したように、飽和砂に対する水平二方向同時加振の振動台実験を行ない、加速度・過剰間隙水圧・残留沈下等について、一方向加振の場合との比較・検討を行なった。本研究ではこれらの液状化実験に対するシミュレーション解析を行ない、実験値との比較および一方向入力と二方向入力の比較を行なった。また、解析結果から得られる各要素のせん断ひずみより、地表面の沈下量を簡便な手法⁶⁾を用いて算定し、実験結果との比較を行なった。

2. 実験概要

実験結果に関する詳細は文献3)に示すので、ここでは概要のみ述べる。実験に用いた土槽は、内りて高さ90cm、直径120cmの円柱形のせん断土槽である。模型地盤は、相対密度70%程度の豊浦標準砂($D_{50}=0.198\text{mm}$)の地盤とした。測定計器に関しては、ひずみゲージ式加速度計、および間隙水圧計を所定の位置に設置した。また、地表面の鉛直変位の時刻歴を測定できるように、インダクタンス式変位計を土槽中央に設置した。加振入力波は、1983年日本海中部地震秋田港記録のNS成分(X方向)およびEW成分(Y方向)を時間縮尺1/4としたものである。入力レベル大きさにより加振レベル1(基盤入力50Gal程度)、加振レベル2(基盤入力80Gal程度)という順で加振を実施し、各加振レベルで二方向加振およびその次に同じ振幅で一方向加振を行なった。なお、加振レベル1の二方向加振をケース50XY、一方向加振をケース50Xと呼び、同様に加振レベル2ではケース80XY、ケース80Xと呼ぶこととする。

3. 解析手法および条件

用いた解析コードは3次元の液状化解析が可能なHIPER^{4),5)}である。土の構成式には、せん断応力・せん断ひずみ関係として修正Ramberg-Osgoodモデルを用い、せん断ひずみ・ダイレイタンス関係についてはおわんモデル¹⁾を用いた。本研究では陽解法による非線形解析を行っており、地盤は8節点アイソパラメトリック要素でモデル化している。解析モデルは図-1に示すように56節点、13要素で構成し、出力節点および要素位置をあわせて示した。底面の境界は固定とし、側方は水平ローラとした。積分時間間隔は0.0002秒、解析時間は加振開始から7秒間とした。地盤のせん断剛性 G_0 は、実験において行なった常時微動測定から得られた地盤の一次固有振動数18Hzに合うように固有値解析から求めた。

4. 解析結果と考察

図-2には、ケース80XYと80Xの基盤と地表面近くの節点25における加速度時刻歴を示す。節点25では、最大値は実験値に比べ大きくなっているが、全体的な波形の形状や位相はよく対応していると思われる。解析の一方向と二方向入力のX方向の加速度を比較すると、

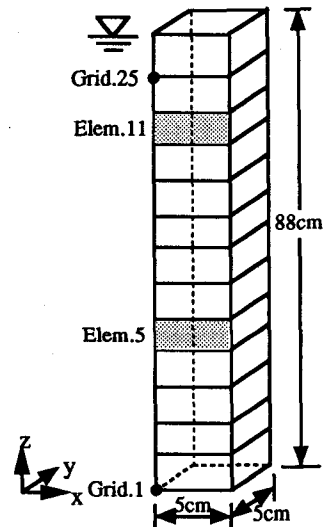


図-1 有限要素メッシュと出力位置

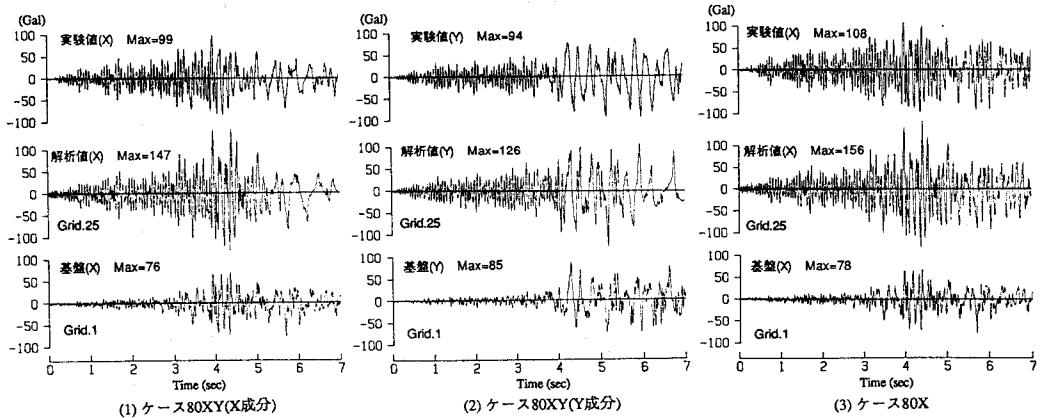


図-2 加速度時刻歴

二方向入力のケース80XYの方が最大値はやや小さく、5秒位から地盤の非線形性が増し高振動数成分が小さくなっている。これに関しては、実験どうしの比較でも同様の傾向が見られる。図-3には、ケース80XY,80Xにおける基盤および地表面付近の加速度のパワーベクトルを示す。両ケース共に5から10Hzの成分が実験値に比べ大きくなっている。時刻歴でも分かるように、二方向入力により地盤の非線形性が増したために、ケース80Xに比べケース80XYの方が10から20Hzの成分が小さくなっていることがわかる。

図-4には、実験および解析の各ケースにおける過剰間隙水圧の時刻歴を示す。実験では、ケース80XY以外は4.5秒付近から水圧の消散が見られるが、解析では非排水条件を課しているために消散は見られない。このため、最大値は解析値の方が大きくなる傾向があるが、水圧の立ち上がりは実験値とよく対応している。図-5には、過剰間隙水圧の最大値の深さ方向の分布を示す。一方向入力と二方向入力の過剰間隙水圧を比較すると、実験では一方向入力は二方向入力の30から50%であり、解析ではこれが20から70%となっている。実験では、ケース50XYとケース80Xの水圧上昇量がほぼ同程度であるが、解析ではケース80Xの方が2倍から4倍程度まで大きくなっている。これは、解析では各ケースともに同じ地盤条件を課しているが、実験では同じ地盤を繰り返し加振したために、加振ケースが後になるに従い地盤がより締固まり水圧が出にくくなったと考えられる。その結果、加振ケースが一番最後のケース80Xの水圧上昇量がやや小さくなったものと考えられる。なお、解析により追加検討した結果、二方向入力のケース50XYと65Galの一方向入力の過剰間隙水圧上昇量がほぼ一致した。このことより、一方向入力により二方向入力の影響を考慮しようとするならば、少なくとも水圧の上昇量に関しては、入力振幅を1.3倍する必要があると考えられる。

次に、簡便な予測式を用いて求めた沈下量と、振動台実験で得られた沈下量の比較を行なう。沈下量の推定は、繰り返し三軸試験結果に基づき社本・佐藤⁹⁾により提案された方法を用いる。この方法は一方向入力に対する予測式であり、両振幅せん断ひずみの最大値 γ_{DA} に基づいて、加振終了時の沈下量を求めるものである。計算方法はまず、地盤内に生じる両振幅せん断ひずみ γ_{DA} から余裕間隙比の変化率を求める。これは、図-6に示す繰り返し三軸試験結果から得られた両振幅せん断ひずみ γ_{DA} と余裕間隙比の変化率の関係から求められる。この余裕間隙比の変化率を各要素に対して求め、次式から地盤の沈下量 d を求める。

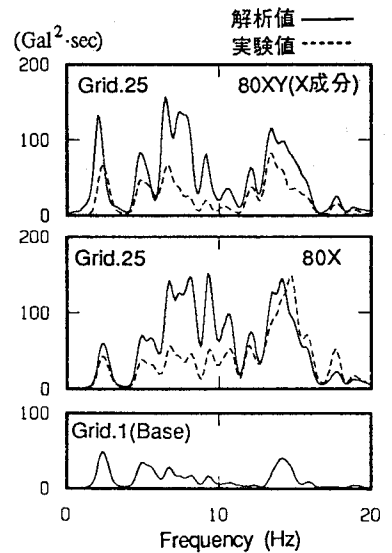


図-3 加速度パワースペクトル

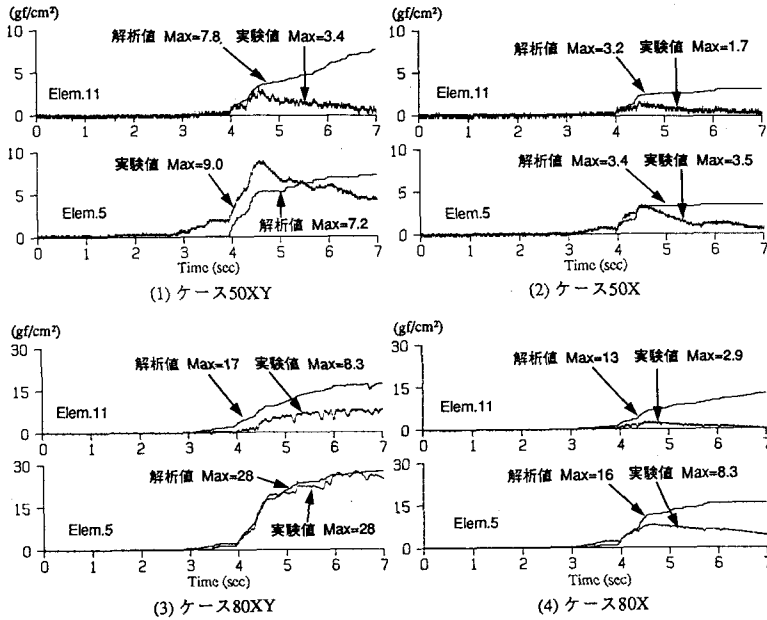


図-4 過剰間隙水圧時刻歴

$$d_s = \sum \frac{\Delta e_i}{e_i - e_{i\min}} \times (e_i - e_{i\min}^*) \times \frac{z_i}{1 + e_i} \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 $e_{i\min}$: 最小間隙比 (相対密度130%の時の間隙比), e_i : 各層の初期間隙比, z_i : 層厚を表す。本研究では二方向入力に適用するにあたり、 γ_{DA} のかわりに $2\Gamma_{\max}$ を用いる⁷⁾。 Γ_{\max} は次式で示される合せん断ひずみ Γ の最大値である。

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{xx}^2 + \gamma_{yy}^2} \quad \text{--- (2)}$$

解析におけるせん断ひずみのオービットの例を図-7に示す。

図-8には式(1)から求めた沈下量と実験による地表面の沈下の時刻歴を示した。ただし、実験の時刻歴は16秒まで示しているが、解析時間は7秒間であるので、式(1)による計算値は7秒の位置にプロットした。実験で一番最初に加振したケース50XYでのみ計算値より大きくなっているが、他のケースでは計算値の方が大きい。実験では加振を繰り返すに従い徐々に地盤が締まるために、密な地盤条件になっていくものと考えられる。このため、加振順序が後のケースでは計算値の方が大きくなりやすいと考えられる。また、解析では非排水条件を課しているためにせん断ひずみが大きくなり、実験値に比べ計算値はやや大きめに算定されると考えられる。しかし、各ケースともにオーダー的にはよく対応している。

沈下量の計算値どうしを比較すると、50Gal入力では一方向と二方向入力はほぼ同程度の値であるが、80Gal入力では二方向入力は一方向の4倍程度の値を示している。今回の実験および解析では80Gal入力でも完全には液状化に至っていないが、ケース80XYでは地盤の軟化の程度が大きく、生じたせん断ひずみが大きいためケース80Xとの差が大きくなったものと考えられる。ケース50XYと50Xにおいて、沈下量の計算値は両ケースでほぼ同

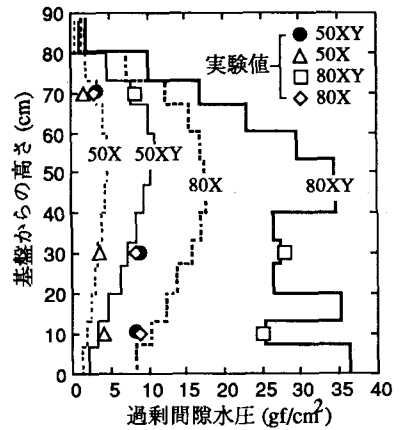


図-5 過剰間隙水圧分布

程度になっているが、水圧上昇量はケース50XYが50Xの2倍程度になっている。沈下量の計算値が同程度であったのは、地盤に生じたせん断ひずみの最大値が同程度であったためである。これに対し水圧に差が生じたのは、おわんモデルでは、水圧を合せん断ひずみと累加せん断ひずみから算定しているためであり、累加せん断ひずみの大きい二方向入力の方が水圧上昇量が大きくなったからである。これらのことから、解析結果のせん断ひずみから沈下量を算定する場合には、最大せん断ひずみだけではなくせん断ひずみの累積量も考慮する方が、より精度のよい結果が得られるものと考えられる。また、図-8にはケース50XYとケース80XYの二方向入力において最大せん断ひずみを γ_{xx}, γ_{yy} のそれぞれの最大値を用いて算定した沈下量も示した。ケース80XYの γ_{xx} で算定した沈下量は、合せん断ひずみで算定した場合の72%となっており、沈下量をやや過小評価することになる。

5. おわりに

二方向同時入力の土槽振動台実験に対するシミュレーション解析を行ない、実験結果との比較および一方向入力と二方向入力の比較を行なった。その結果、加速度波形の全体的傾向や、非排水条件を課していることを考慮すれば、過剰間隙水圧に関しても実験結果とよく対応した。解析結果どうしの比較では、一方向入力は二方向入力に比べ、過剰間隙水圧をかなり小さく評価することが解析的に示された。また、一方向入力に対する地表面の沈下量を算定する簡便な手法を二方向入力に適用したが、オーダー的には実験結果と対応することがわかった。

最後になりますが、データの御提供および有益な御助言を戴いた当社技術研究所の佐藤正義主任研究員・社本康広主任研究員に謝意を表します。

参考文献 1)福武毅芳・松岡元「任意方向単純せん断におけるダイラタンシーの統一的解釈」土木学会論文集, No.412/III-12, pp.240-248, 1989. 2)Ishihara, K. and Yamazaki, F.: Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading, Soils and Foundations, Vol.20, No.1, pp.45-59, 1980. 3)藤川智・佐藤正義・福武毅芳・大槻明「二方向同時加振による液状化実験」第28回土質工学研究発表会, 1993. 4)福武毅芳・大槻明「三次元液状化解析による部分改良地盤の効果の予測」地盤の液状化対策に関するシンポジウム, 土質工学学会編, pp.205-210, 1991. 5)大槻明・福武毅芳「地震時における超々高層建築物・地盤系の有効応力解析(その2)」日本建築学会大会学術講演概要集, 1993.9. 6)社本康広・佐藤正義「液状化時の沈下量の推定法」第26回土質工学研究発表会, pp.765, 762, 1991. 7)Nagase, H. and Ishihara, K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.65-76, 1988.

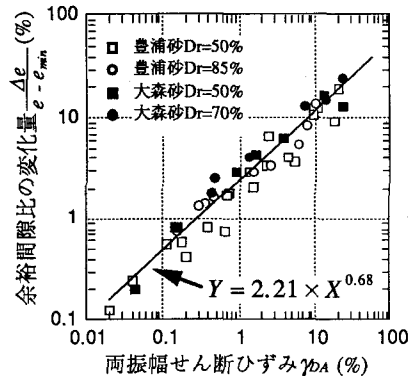


図-6 繰返しせん断時の種々の供試体の余剰間隙比の変化量⁶⁾

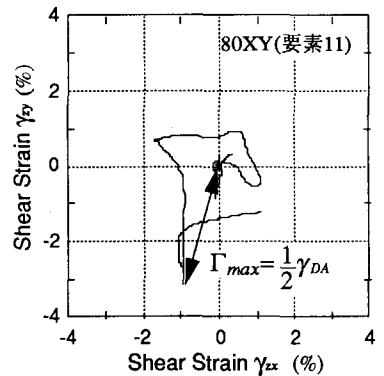


図-7 せん断ひずみオービット

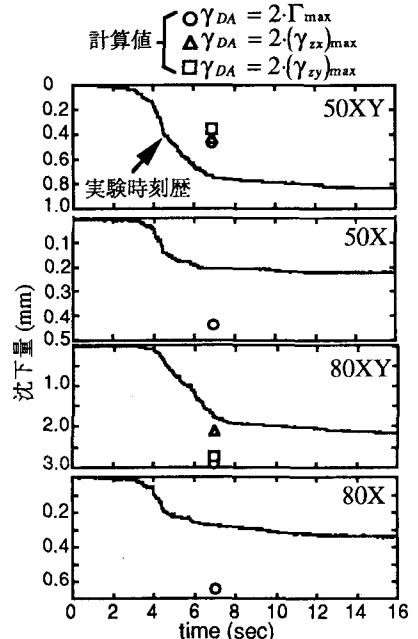


図-8 地表面沈下量