

(53) 緩い飽和砂地盤の地震時過剰間隙水圧の発生・上昇の特性

飛島建設(株) 正会員 ○森 伸一郎
正会員 池田 隆明

1. はじめに

これまで、著者らは有効応力液化解析の実用化を目標として、3つの有効応力解析手法の適用性を振動台実験との比較により調べてきた。^{1)~5)} その結果、要素試験を実施して土質パラメータを設定³⁾ したいずれの解析モデルにおいても、解析による過剰間隙水圧は、①実験に比べてかなり早い時期から発生すること、②実験では急激に上昇するのに対しなだらかに上昇すること、の2点で実験と異なること、しかし、③初期有効上載圧に達する時期については実験と概ねよく一致すること、等が明らかにされた^{1)~5)}。

本論文では、振動台実験における相対密度50%程度の緩い砂模型地盤での間隙水圧発生と上昇の特性について、実験と解析の差が顕著に現れる秋田波加振の場合に絞って、入力加速度とせん断応力の観点から考察し^{6)~7)}、間隙水圧発生・上昇の閾値(いきち)について議論する。ここでは3つの解析手法の内、間隙水圧の発生・上昇特性を考察するために理解のしやすい石原・東畑(1980)⁸⁾の有効応力経路モデルによる解析方法について取り上げ、解析モデルと実験の差異を考察し、解析モデルの改善すべき方向性について議論する。なお、ここでは、過剰間隙水圧を単に間隙水圧と言うこととし、間隙水圧比0.97で液状化を定義している。

2. 振動台実験の概要⁹⁾と計測精度⁷⁾

振動台実験を行った模型地盤は、せん断土槽の中に豊浦標準砂を空中落下法で作成した後、CO₂を通気し、脱気水で飽和させた。加振は、飽和後24~72時間後に行った。ここでは、1983年日本海中部地震の際に秋田港で観測された加速度記録⁹⁾を調整した地震波(以降、秋田波と言う)による処女加振^{1)~5)}の加振結果(LS12試験体:加振前Dr=44.6%)について議論する。実験に適用した相似則²⁾に基づき、加振に利用した地震波は時間軸を1/8に縮めている。また、振動台の最大加速度は155cm/s²であった。測定は、時間間隔0.02/8=0.0025秒で、総時間16384x0.0025=40.96秒間行った。

図-1に計器配置図と解析モデルを示す。加速度計の精度は約5cm/s²、分解能は約1.7cm/s²であり、間隙水圧計の精度は2.5gf/cm²、分解能は0.5gf/cm²である。⁷⁾実験でのせん断応力は、土の質量密度に加速度を乗じたものを地表から鉛直下方に積分して算定した。せん断ひずみの算定法は文献⁷⁾に示す。

3. 有効応力経路モデルの概要と解析に用いたパラメータ

用いた有効応力経路モデル⁸⁾は、 $\tau - \sigma_v'$ 面内で①処女載荷の状態、②除荷または再載荷の状態、③変相線を越えた状態($\theta > \theta_s$)の3つ状態に対して間隙水圧の発生を規定するものである。それぞれ①ではBp、②ではBuがパラメータであり、BpやBuが大きいかほど間隙水圧が発生しやすい。

間隙水圧パラメータBp、Buは石原・東畑⁸⁾に従い設定した。すなわち、Bpは繰返し非排水三軸試験のせん断による間隙水圧上昇量から設定した。次に、Buは液状化曲線が20回で液状化する応力比R20'を満足するようにして設定した。⁶⁾これをケース1とする。表-1に解析のパラメータを示す。初期せん断剛性は、S波検層によるVsを用いて、 $G_0 = \rho Vs^2$ よ

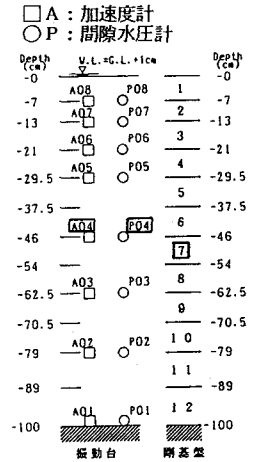


図-1 計測センサー配置と解析モデル

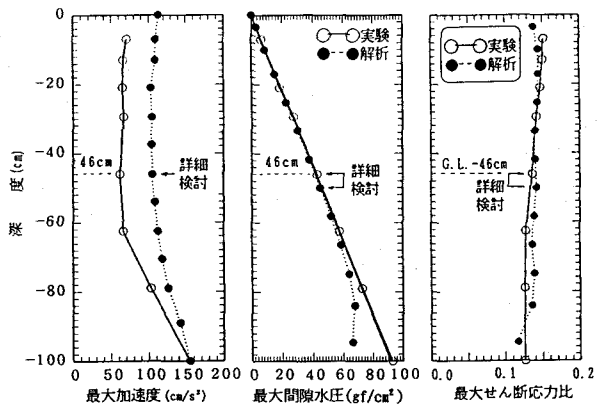


図-2 秋田波加震での最大加速度分布、最大間隙水圧分布および最大せん断応力比分布

り求めた。液状化解析においては、測定開始から4096x0.0025=10.24秒間の振動台加速度を剛基盤入力波として入力し、0.0025秒の時間間隔で、積分はNewmark-β法によった。減衰は、Rayleigh減衰で $\alpha=0$ 、 $\beta=0.003$ とした。間隙水は排水条件とし、透水を考慮した。

4. 加速度およびせん断応力比と間隙水圧の最大値分布

図-2に加速度と間隙水圧とせん断応力比の最大値分布を解析結果と併せて示す。実験でも解析でもほぼ全層が液状化しているが、間隙水圧とせん断応力比について、実験値と解析値は良く一致している。加速度分布の違いは、間隙水圧上昇量の差と拘束圧に対する剛性と減衰の依存性の違いによると考えられる。

5. 加速度とせん断応力に対する間隙水圧の発生・上昇の特性

図-3に入力地震波となる振動台加速度と地盤のほぼ中央の深さでのせん断応力と発生した間隙水圧の時刻歴について、実験と解析とを併せて示す。また、図-4に同じく有効応力経路を示す。

間隙水圧は、実験では初動部後半で発生し、発生後まもなく主要動部の最初の一波で急激に上昇しているのに対し、解析では実験に比べて初動部のかなり早い時期から発生し、その後なだらかに上昇した後、同じく主要動部の最初の一波で液状化状態に達している。表-2に、間隙水圧とせん断応力とせん断ひずみの時刻歴の特徴的な時刻の応答値を一覧にして示す。

間隙水圧の発生開始は、解析で約0.3秒後(t1)実験で約0.95秒後(t2)であり、そのときの入力加速度は各々18cm/s²、35cm/s²である。土要素にとっての直接的な外力とみなせるせん断応力比は、

実験で0.052、解析で0.059である。実験ではt1からt2までの0.65秒間に0.05程度のせん断応力パルスが10回以上も作用しているにも拘らず間隙水圧が発生せず、t2の0.052に達したときにはじめて発生している。加速度についても同様に、18cm/s²程度では間隙水圧が発生せず、35cm/s²に達してはじめて発生している。

このことは、実験では上記のt2に対応するせん断応力比0.052を間隙水圧が発生するせん断応力比の閾値

表-1 有効応力解析のパラメータ：目標相対密度Dr=50%

パラメータ	記号	パラメータの値	設定根拠	
解析に必要なパラメータ				
せん断剛性	G _o	上部	309 tf/m ²	ρt・Vs ² より
		下部	1180 tf/m ²	
拘束圧依存指数	m	0.5	一般経験値	
間隙率	n	0.440	e/(1+e)	
土の質量密度	ρt	1.92/9.8 t/m ³	γt/g	
内部摩擦角	φ'	37 deg	三軸CD試験	
静止土圧係数	K _o	0.40	1-sin φ'	
透水係数	k	1.0x10 ⁻⁴ m/s	透水試験	
間隙水圧h'の増大	Bp	13.22	Bp'・φ'・K _o	
間隙水圧h'の減少	Bu	3.66	R'・φ'・K _o	
K _o 補正・摩擦角	φ	24.3 deg	φ', K _o	
K _o 補正・変相角	θs	21.4 deg	φ	
体積圧縮係数	mv	6.398xσ'v ^{-0.579}	圧密除荷試験	
応力比の閾値	κ	0.06	経験値・文献7	
最小有効応力比	σ'mn/σ'o	0.03	工学的判断	
地盤のパラメータ				
S波速度	Vs	上部	39.7 m/s	模型地盤の S波検層
		下部	77.6 m/s	
間隙比	e	0.787	定義より	
単位体積重量	γt	1.92 tf/m ³	定義より	
間隙水圧h'の増大	Bp'	4.76	繰返し非排	
間隙水圧h'の減少	R20'	0.095	水三軸試験	

上部：0~30 cm 下部：30~100 cm

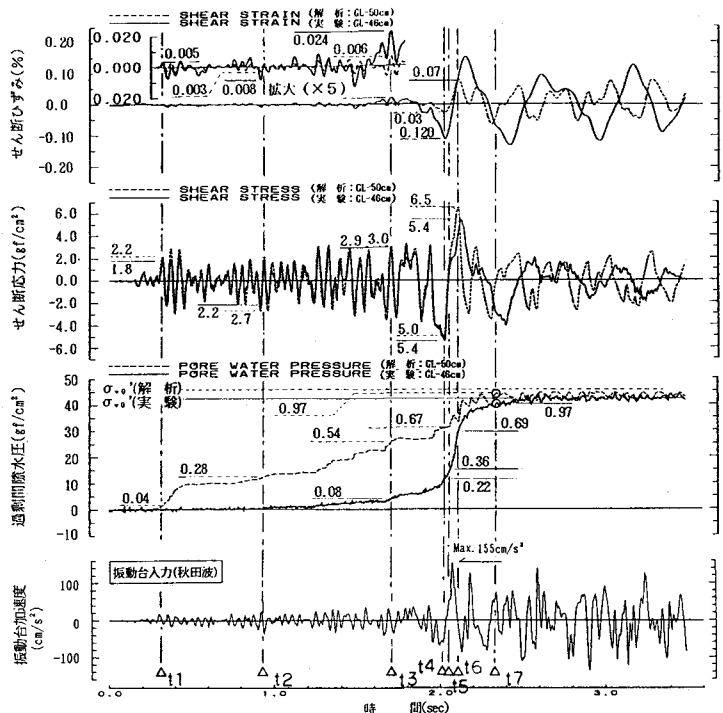


図-3 振動台加速度および地盤の間隙水圧とせん断応力の時刻歴 (実験と解析：秋田波加震)

(いきち)として捉えることができる。⁷⁾この概念は重要であり、実験で間隙水圧が発生し始めるときに、解析では既に初期有効上載圧の約30%まで上昇しており、続く間隙水圧上昇量や地盤挙動の予測に大きく関係する。

一方、間隙水圧の発生・上昇の特性が、実験と解析で大きく異なっているのに対して、せん断応力の時刻歴を見ると、約2.1秒(t5)までは実験と解析は位相・振幅共に極めて良く一致しているのが特徴的である。

さて、t2からt3までは、解析でも実験でも同じく0.05~0.07程度の比のせん断応力パルスが10数回作用する。その間に両者とも間隙水圧はなだらかに上昇するが、図-4の有効応力経路を見ると、その程度に著しい差が認められる。すなわち、0.05~0.07程度のせん断応力比に対しては、模型地盤に比べて解析モデルは間隙水圧の発生がしやすいと考えられる。

また、それまでに約3倍の差があったものが、最大のせん断応力が作用するときには、間隙水圧比は実験と解析はほぼ一致して約70%になっている。また、液状化に達するのはほぼ同時刻である。この比較的大きなせん断応力に対する間隙水圧挙動の違いは、有効応力経路に顕著に現れている。このことから0.10~0.13程度のせん断応力比に対しては、模型地盤に比べて解析モデルは間隙水圧の発生がしにくいと考えられる。

6. 液状化強度特性から見た解析パラメータの再検討と追加解析

そこで、設定したパラメータを用いて要素試験(単純せん断)のシミュレーションを行い、求められたせん断応力比-繰返し回数について試験結果と比較したものを図-5に示す。ケース1で設定したパラメータでは、繰返し回数20回では解析は実験と一致するが、それより小さい応力比では実験より液状化しやすく、それより大きい応力比では実験より液状化しにくいものと解釈した。⁷⁾

そこで次に、繰返し回数が3回から30回程程度の範囲で液状化強度曲線が実験と一致するようなパラメータBp, Buを設定して解析を行った。これをケース2(Bp=33.89, Bu=0.99)とする。さらに、前半で上昇しにくい実験の間隙水圧時刻歴とよく合うように試行的に設定して解析を行った。これをケース3(Bp=5.00, Bu=0.20)とする。この2ケースの液状化強度曲線も図-5に併せて示した。

図-6に追加解析により得られたせん断応力と間隙水圧に時刻歴を、実験結果と解析ケース1と併せて示す。また、図-7に同じく有効応力経路を示す。ケース2では、有効応力経路に処女載荷過程で発生しやすく除荷・再載荷過程で発生

表-2 秋田波加振(LS12)による特徴的な時刻の応答値

時刻 (秒)	着目した理由	過剰間隙水圧比		せん断応力		せん断応力比		せん断ひずみ	
		$\Delta u/\sigma_v'$	$\Delta u/\sigma_v'$	τ (gf/cm ²)	τ (gf/cm ²)	τ/σ_v'	τ/σ_v'	γ (×10 ⁻⁴)	γ (×10 ⁻⁴)
t1=0.32	過剰間隙水圧の発生開始: 解析	0.0	0.04	1.8	2.2	0.043	0.048	0.5	0.3
t2=0.92	過剰間隙水圧の発生開始: 実験	0.01	0.28	2.2	2.7	0.052	0.059	0.8	0.3
t3=1.72	せん断ひずみ増加開始: 実験	0.08	0.54	2.9	3.0	0.069	0.065	2.4	0.6
t4=2.04	実験で最大せん断応力作用	0.22	0.67	5.4	5.0	0.128	0.109	12	3
t5=2.10	実験と解析のせん断応力が離別する	0.38	0.69	---	---	---	---	---	---
t6=2.12	解析で最大せん断応力作用	0.69	0.73	5.4	6.53	0.128	0.142	15	7
t7=2.35	解析で液状化(間隙水圧比=0.97)	0.97	0.97	---	---	---	---	13	6

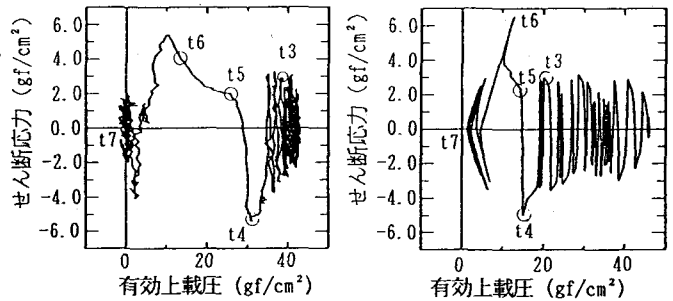


図-4 有効応力経路(秋田波加振): 実験と解析 解析ケース1

その程度に著しい差が認められる。すなわち、0.05~0.07程度のせん断応力比に対しては、模型地盤に比べて解析モデルは間隙水圧の発生がしやすいと考えられる。

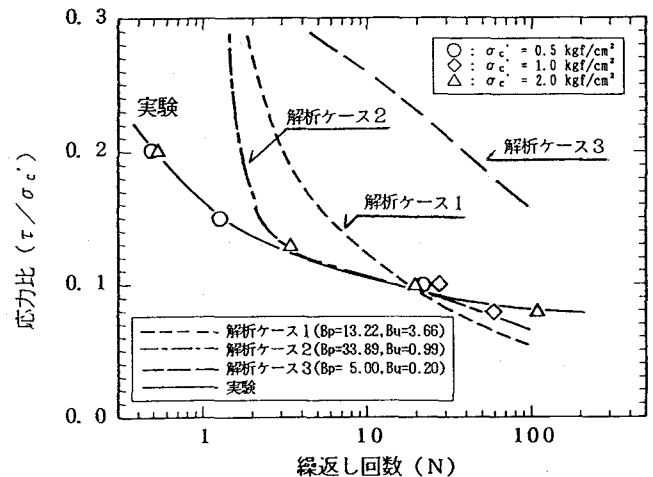


図-5 せん断応力比-繰返し回数の関係 (試験と解析)

しにくいというパラメータの特徴が反映されているが、排水の効果も加わり、間隙水圧の時刻歴にはケース1との差が現れず、その結果せん断応力の応答にも差はない。液状化強度曲線を合わせただけでは、実験結果を説明できないことがわかる。さらに、ケース3では実験で急上昇するまでは間隙水圧の時刻歴は実験と合わせられているが、せん断応力の大きさが合わない。

すなわち、このモデルは、小さい応力比で間隙水圧が発生しにくく、大きな応力比では間隙水圧が急上昇しやすいという模型地盤の振動台実験で見られた間隙水圧の発生・上昇特性を一般的に表現することが困難であると考えられる。このことは、単に液状化強度曲線の比較検討で説明できるものではなく、様々な要因によっていると考えられる。

7. 結論と今後の課題

- (1) 緩い模型飽和砂地盤の振動台実験では、あるせん断応力比より大きくないと過剰間隙水圧が発生しないという現象、すなわち間隙水圧の発生に関するせん断応力比の閾値(いきち)の存在が見いだされた。その値は約0.05であった。入力加速度でも、閾値に対応する値は秋田波では約35cm/s²であった。
- (2) 過剰間隙水圧の応答が実験と解析で異なるのに対し、せん断応力の応答については、実験の間隙水圧比が0.3~0.4に達するまで、実験と解析はほぼ一致する。
- (3) 解析モデルは実験結果に比べて、小さいせん断応力比の作用下では過剰間隙水圧が発生しやすく、大きいせん断応力比の作用下では過剰間隙水圧が発生しにくい。せん断応力比の広い範囲で振動台実験での間隙水圧の発生・上昇特性と変形特性の両者をを表現するのは困難である。

したがって、低拘束圧下の強度特性、低拘束圧下の動的変形特性の拘束圧依存性、間隙水圧発生特性のモデル化、そのモデルへの閾値の概念の導入、模型地盤と実地盤との関連、等が今後の課題と考えている。

謝 辞

本論文で取り扱った実験と解析の一部は滝本幸夫、武藤正人、戸早孝幸の各氏と実施したものである。最後に記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 戸早孝幸, 池田隆明: 地盤-構造物連成系に対する有効応力液状化解析の適用性, 第8回日本地盤工学シンポジウム論文集, 1990.12., pp.801-806
- 2) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 戸早孝幸, 池田隆明: 液状化解析の適用性に関する研究(その1) 解析手法と実験手法, 第25回土質工学研究発表会講演集, 1990.6., pp.987-990
- 3) 堀野典夫, 森伸一郎, 武藤正人, 沼田健二, 太田直之: 液状化解析の適用性に関する研究(その2) 要素試験と土質パラメータの設定, 第25回土質工学研究発表会, 1990.6., pp.991-994
- 4) 武藤正人, 滝本幸夫, 森伸一郎, 戸早孝幸, 池田隆明: 液状化解析の適用性に関する研究(その3) 地盤の実験と解析, 第25回土質工学研究発表会講演集, 1990.6., pp.995-998
- 5) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 戸早孝幸, 池田隆明: 地盤の振動台実験と液状化解析, 土木学会第45回年次学術講演会講演要録Ⅲ, 1990.10.
- 6) 森伸一郎, 池田隆明: 緩い飽和砂地盤における過剰間隙水圧の応答に対する実験と解析の比較(その1: 加速度と過剰間隙水圧), 第26回土質工学研究発表会, 1991.7.
- 7) 森伸一郎, 池田隆明: 緩い飽和砂地盤における過剰間隙水圧の応答に対する実験と解析の比較(その2: せん断応力-せん断ひずりと過剰間隙水圧), 第26回土質工学研究発表会, 1991.7.
- 8) X. Ishihara, I. Towhata: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, J. of Fac. of Eng., Univ. of Tokyo, Vol. 35, No. 4, 1980
- 9) 倉田栄一, 福原哲夫, 野田勉男: 昭和58年(1983年) 日本海中部地盤の港湾地域における強度観測, 港湾技術資料, No. 458, 1983.9.

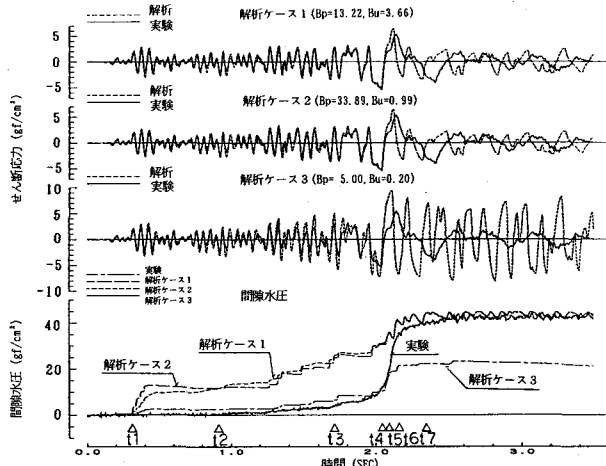


図-6 実験結果と各解析ケースに対するせん断応力と間隙水圧の比較

図-7 有効応力経路: 実験と各解析ケースの比較

