

# 液状化挙動を追跡する

Fusao OKA  
**岡二三生**

工博 正会員 岐阜大学工学部土木工学科教授

工博 正会員 岐阜大学工学部土木工学科助教授

**八嶋 厚**  
Atsushi YASHIMA

Three-dimensional effective stress based liquefaction analysis

## 3次元液状化解析の研究の背景

すでに30年以上が経過した1964年のアラスカ地震、新潟地震以来、地盤工学の分野で「液状化」は精力的に研究が進められてきた。絶え間ない努力の結果多くの知見が得られ、設計時に液状化を考慮した対策を行うよう指針に取り入れるなど、その成果は着実にフィードバックされている。

液状化に関するこれまでの研究を分類すると(図-1)、1つは三軸試験機、ねじりせん断試験機などを用いた要素レベルの繰返しせん断試験である。液状化に至る繰返し回数とせん断応力比との関係をプロットした、いわゆる液状化強度曲線をベースに、液状化に影響を与える要因が調べられ、整理された。

2つめの研究では、原位置で過去の

地震において液状化が発生した地盤、あるいは発生しなかった地盤に対してN値、せん断波速度Vs、土質、粒度分布等が調べられ、地盤の液状化強度との相関が調べられている。道路橋示方書をはじめ多くの指針で液状化判定に用いられている。

さらに3つめの研究の流れとしては、主として構造物を考慮した振動台実験がある。液状化のメカニズムの確認、液状化時の構造物の挙動、液状化対策工の効果の確認等が振動台実験に基づいて検討される例が多い。

研究の流れの4つめとして、液状化現象の数値解析による再現を試みる研究が挙げられる。解析手法は多くの研究者によって提案され、初期は1次元モデルが中心であったが、2次元モデ

ルや3次元モデルによる実務的な検討が行われ始めている。

本報文の目的は、土と水の運動を連成させた3次元有効応力液状化解析手法の現状を紹介することにある。液状化時の構造物の挙動、対策工の効果を精度よく再現するためには、図-2に示す以下の各項目について適切に対応することが必要である。

### 1—精度の高い構成モデル

材料の構成モデルは、解析結果に大きな影響を与える。液状化を扱う場合、不規則な繰返し載荷とその時の変形のみならず、過剰間隙水圧の蓄積等のモデル化も必要である。また構造物周辺では初期応力としてせん断応力が作用していたり、地震時に単純せん断応力のみならず等方的な応力が作用したり、主応力が回転するような荷重がかかったりする。したがって、液状化解析には、さまざまな応力状態に対応する精度よい構成モデルが必要である。

### 2—地盤の排水性を考慮した解析 (水と土の連成解析)

土は土粒子骨格と間隙、すなわち液体と気体の三相の混合体である。特に液状化が問題となる地盤は飽和した砂地盤であり、土粒子骨格(固相)と間隙流体(液相)の二相混合体と捉えることができる。液状化解析においては、地盤中の間隙水の移動、つまり地盤の透水性が間隙水圧の上昇・消散に大きく影響する。特にドレーン系の対策工法の評価には水と土を連成させた二相系の解析が必要である。

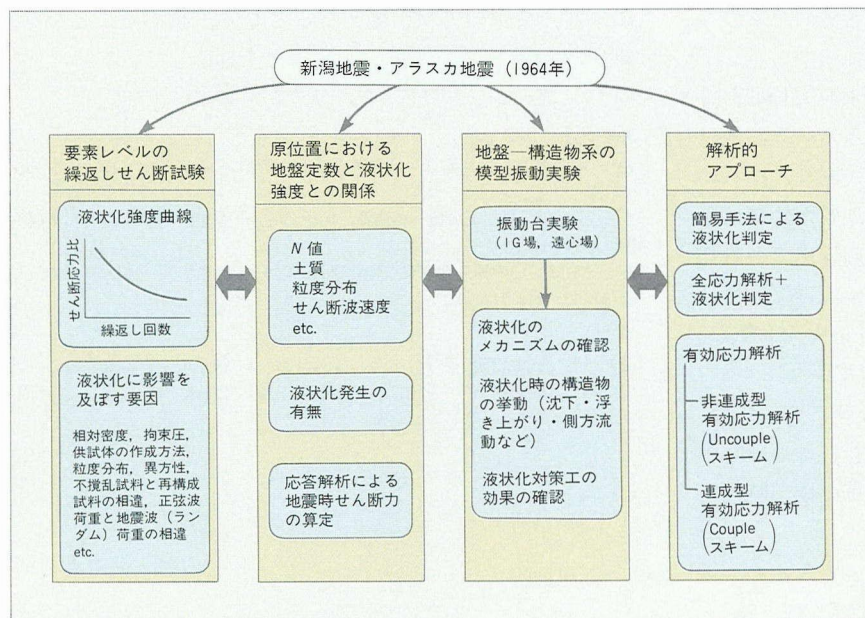


図-1 液状化に関する研究の分類

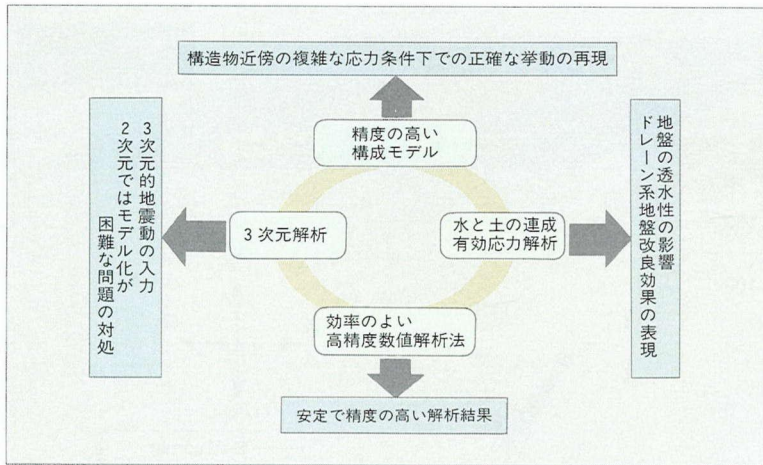


図-2 液状化解析のキーワード

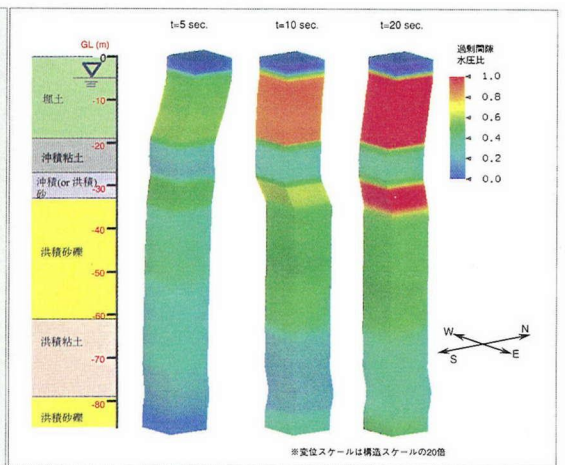


図-3 ポートアイランドアレー観測地点の過剰間隙水圧分布と変形

### 3—高精度数値解析法

個体と流体の二相系材料の動的解析を行うには、適切な支配方程式の離散化や数値積分などのアルゴリズムが必要である。有限要素法や差分法が解析法として用いられている。特に、3次元問題では有限要素法などの効率のよい離散化と安定な数値解が長いステップにおいて実現されなければならない。

### 4—3次元解析

液状化対策工の効果を検討する場合、ドレーン材の3次元的な排水効果、既設タンクの外周に矢板を打設した閉塞効果・変形抑制効果を見る場合などは2次元へのモデル化は非常に困難である。また地震動はどの方向成分を入力加速度に用いるかによって大きく結果が異なる場合があるため、平面的な多方向入力が可能であることが重要であり、そのためにも3次元解析手法が必要となる。

### 3次元有効応力液状化解析の実例

#### 1—人工島アレー観測記録の解析

アレー観測は、神戸市がポートアイランドにおいて鉛直方向4深度 (GL-83 m, -32 m, -16 m, 0 m) における3方向 (NS, EW, UD) 成分の観測を実施したものである。3次元解析の特徴は、観測された3成分すべてを基盤入力としてインプットできることにある。人工島地表面からGL-83 mまでを1次元土柱として細かく分割し、GL-83 mに兵庫

県南部地震において観測された地震波形を入力して解析した。解析に必要な材料定数は、原位置における地盤調査結果、要素試験結果、および既往の研究に基づいて決定された。解析結果の一例を図-3に示す。図には、過剰間隙水圧と初期鉛直有効応力の比として求まる過剰間隙水圧比がプロットされている。地盤が液状化に至れば、過剰間隙水圧比は1となる。この図より、地下水面以下の埋土が地震発生後液状化に至っている様子がよくわかる。また、沖積粘土層下部の砂地盤も液状化にかなり近い状況に至っていたと想像される。この解析においては、アレー観測が実施された各深度における加速度波形も計算されている。図には示していないが、液状化による水平動の減衰、および埋土における鉛直動の増幅が精度よく再現されている。

次に、ポートアイランド第1期埋立地盤と同規模の人工島 (2km×2km) について人工島全体の解析を行った。人工島下部の海底地盤については、6 km×6 kmを解析領域とした。GL-83 mで得られた観測波形を入力として解析した結果を図-4に示す。図には、アレー観測地点地表面および人工島コーナー部の平面変位軌跡が示されている。GL-83 mでの観測波形は、NW-SE方向に卓越しており、地表面各位置の変位もこの方向の振動を生じている。ただし、各コーナー部においては自由変位

境界となっているため、残留変位が海側に生じていることがわかる。このように、3次元解析においては、人工島内の場所の違いによる挙動の差異が表現できる。

### 2—円筒形構造物の液状化対策

杭基礎を有する既設または新設円筒形構造物について、液状化対策を検討した事例である。表層にまき土を有する地盤に建つ杭基礎で支持された円筒形構造物について、杭基礎や周辺地盤の地震時挙動が解析された。図-5に、①杭のみ、②杭+深層混合改良体を基礎のまわりに施工した場合 (DM-ringと仮称) の2ケースについて解析した結果を示す。杭のみが存在するケースについては、周辺地盤のみならず杭基礎近傍の地盤も液状化に至っていることがよくわかる。一方、杭のまわりにリング状に深層混合改良が施された場合には、構造物下部地盤の液状化はかなり抑止されることがわかる。このような複雑な構造の解析は2次元では不可能である。

### 3—既設石油タンク基礎の液状化対策

1994年に「危険物の規制に関する政令」の一部が改正され、旧基準に基づいて建設された1000 kl以上の特定屋外タンクに対し、液状化対策の実施が義務付けられたことから、現在、既設タンクの立地条件に適した液状化対策が求められている。

ここでは、液状化対策として鋼矢板

リング工法を取り上げて、最大加速度が200galの入力とした解析を行った。解析結果を図-6に示す。図からもわかるように、タンクから離れた地盤は完全に液状化に至っていることがわかる。一方、タンク直下では、別途実施した未改良地盤の解析結果と比較して、鋼矢板リングの存在により過剰間隙水圧は大きく低減しており、またタンク直下の沈下量も小さくなっていることがわかった。

### あとがき

ここで紹介した解析を可能にしたのは、急速なハードウェアの高速化・大容量化、およびポストプロセッサの高度化など、周辺環境の整備によることが多い。確かに、複雑な液状化問題の3次元現象は徐々にではあるが明らかにされつつある。しかしながら、現状の解析手法については、今後解決されなければならない問題を数多く残しているのも事実である。兵庫県南部地震以降、大きな地震動を設計入力として用いる機会が増えている。ここで用いられた解析手法はすべて微小変形理論に基づいており、大きな変形を追跡することができない。また、使われている構成式は、本来地盤の初期状態から液状化に至るまでの過程をモデル化しようとしたものであり、液状化後の挙動予測は苦手である。したがって、巨大入力地震動のもとで予想される、地盤の大変形、液状化による側方流動などについては、その予測精度はかな

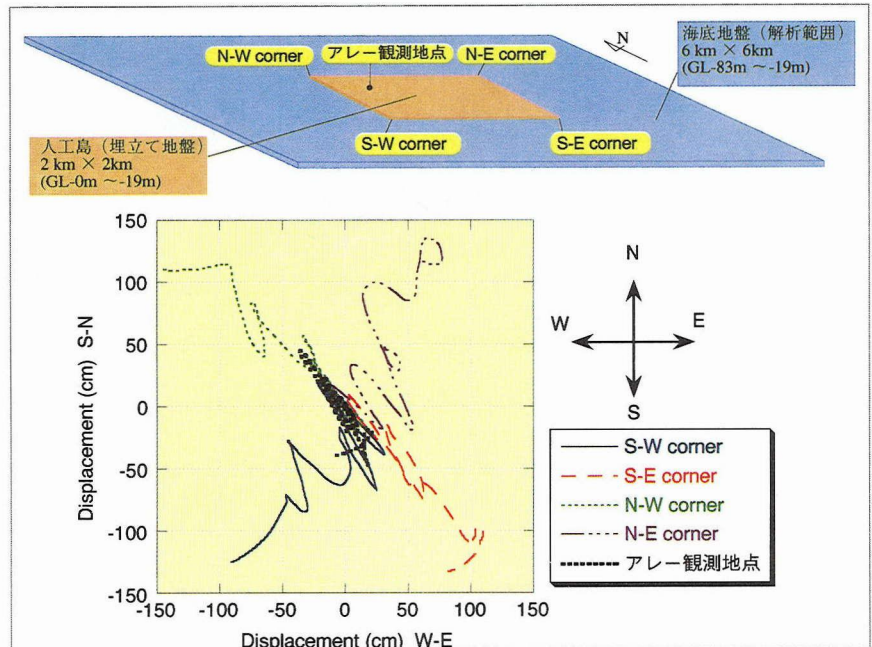


図-4 人工島コーナー部およびアレー観測地点地表面の平面変位軌跡

り低下することを認識しておかなければならない。

解析結果の信頼性は、用いられている構成モデルに大きく依存する。ここで紹介した解析例については、異なる3次元有限要素解析プログラムが用いられ、使われている構成式も異なっている。いずれの構成式もいまだ発展途上にあり、複雑な液状化のメカニズムをすべて表現できるものではない。今後も、液状化のメカニズムを忠実に追跡する構成モデル構築のための研究が必要である。

なお、人工島の解析についてはLIQCA<sup>1)</sup> (大成建設株の田口洋輔氏が協力)、円筒構造物基礎の液状化対策解

析についてはHiPER<sup>2)</sup> (清水建設株の福武毅芳氏が協力)、および既設タンク基礎の液状化対策解析についてはDYNFLOW<sup>3)</sup> (鹿島建設株の大保直人氏が協力)が用いられた。貴重な解析結果を提供された関係者に謝意を表します。

### 参考文献

- 1—Taguchi, Y., Tateishi, A., Oka, F. and Yashima, A.: Three-dimensional liquefaction analysis method and array record simulation in Great Hanshin Earthquake, Proc. 11th WCEE, Pergamon, No.1042, 1996.
- 2—大槻 明・福武毅芳・藤川 智・佐藤正義: 液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.101-110, 1994.
- 3—Zheng, J., Suzuki, K., Ohbo, N. and Prevost, J.H.: Evaluation of sheet pile-ring countermeasure against liquefaction for oil tank site, Int. J. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, Vol.15, pp.369-379, 1996.

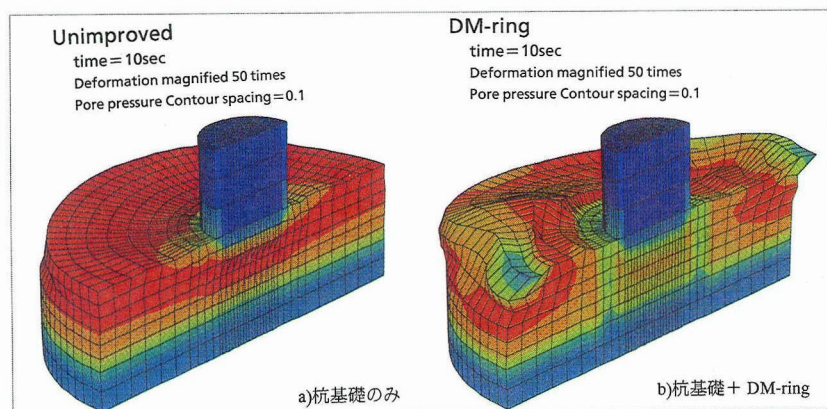


図-5 円筒形構造物基礎の地震時挙動

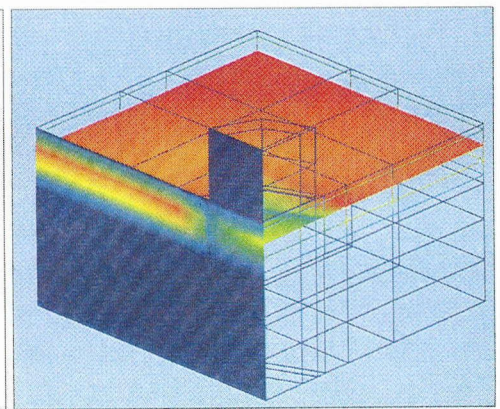


図-6 鋼矢板リング工法を用いた既設タンク基礎の液状化対策効果