

液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響

3. 地盤の流動の発生のメカニズムと解析法 (その2)

吉田 望 (よした のぞむ)
佐藤工業(株)中央技術研究所

永瀬 英生 (ながせ ひでお)
九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科

三浦 均也 (みうら きんや)
北海道大学助教授 工学科土木工学科

3.5 流動を考慮した解析法

この節では、これまでに示した流動のメカニズムに沿って、流動時の地盤の挙動を予測する方法を示す。予測法には、過去の被害事例等より求められた経験的な式を用いる方法とコンピューターを用いる解析がある。後者では、主として有限要素法が用いられる。

解析を行うには、材料特性を把握し、モデル化する必要がある。流動には、緩傾斜タイプと、護岸の移動に伴って生じる側方解放タイプの二つがあるが、両者は境界条件などが異なるための分類である。つまり、流動する砂の材料特性に差があるわけではない。

材料特性のモデルを考える。図-3.12に流動時の応力-ひずみ関係を地震前の応力-ひずみ関係と比較して模式的に示す。固体としてとらえると、流動時の応力-ひずみ関係は、非常に剛性が小さい部分と剛性が急激に回復する部分に分けられる。これに対して、液体としてとらえる考え方では、図-3.12に一点鎖線で示したように、剛性が0の部分と剛性が回復する部分に分けられる(3.3.3項参照)。図-3.12は、模式図なので流動時の応力-ひずみ関係の最初の部分はかなり大きい剛性を持つように図示されているが、図-3.4に見られるように実際の値は非常に小さく、応力-ひずみ関係として見れば、両者の違いはほとんどない。

前項で、流動は土の骨格構造が崩れて液体状に挙動する現象と骨格が再構築され固体状に挙動する現象が繰り返されて変形が進むと考えればわかりやすいと述べた。すると変形が進む間は、粘性の大きい液体のように見える。液体としてのモデル化はこの変形の進む状態に着目する方法である。ところが、流動が止まると地盤はせん

断抵抗を示すようになる。固体としてとらえる考え方では、変形が止まる状態に着目し、残留変形を求めようとする考え方である。

本講座では、地表の勾配が非常に緩やかなど、地震前に地盤に作用しているせん断応力が非常に小さい場合に生じる大きな流動変形を扱っている。したがって、図-3.12に示されるように変形が大きくなり、剛性が回復する領域に至ると変形は止まる。この状態に至れば、明らかに固体として挙動するので、二つのとらえ方の違いは、剛性が回復する前の間だけである。それぞれのとらえ方に基づく解析には、以下に示すようにそれぞれ、長所と短所があるので、解析で何を求めたいかによって使い分けることも必要であろう。

なお、図-3.12に示すように、地震前と流動時では応力-ひずみ関係が大きく異なっているが、本講座ではいつ、どのように応力-ひずみ関係が変わっていくかについては論じていない。文献33)などを参照すれば、変化は载荷に伴い徐々に起こっていると考えられる。このほか、有効拘束圧が0の所で大きなひずみが生じるという報告もある³⁴⁾が、有効応力が0になるまでに非常に多くの繰返し载荷を要しており、本講座で対象とする流動の問題とは異なると考えられる。

3.5.1 固体としてとらえる考え方に対する解法

ここでは、固体としてとらえたときの応力-ひずみ関係のモデル化と、それを用いた有限要素法解析を述べる。

(1) 流動時の応力-ひずみ関係モデル

流動時には、数十%以上のひずみが発生する。また、緩傾斜タイプに対する実験で示されたように、流動方向と直交する方向に加振しても流動が発生する。液状化解析に用いられる既往の構成則で、このような特性を表現することは簡単ではない。また、仮にそのような構成則があったとしても、それを使うためには、地震前の状態から、液状化、流動に至る過程を順番に解析しないと最終変形状態を得ることができない。流動は非常に広範囲で生じるので、解析のためには広範囲な領域のモデル化が必要である。さらに、液状化解析では応力-ひずみ関係のパラメーターの決定や、計算量が膨大であるなどの困難もある。したがって、現行ではこのような方法は実用的とはいえない。流動時の応力-ひずみ関係に着目して残留変位を求めの方が実用的である。

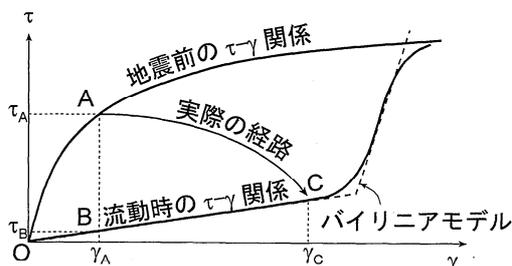


図-3.12 地震前と流動時の応力-ひずみ関係

図-3.4に示した応力-ひずみ関係を見れば、図-3.12に示すようにバイリニアモデルで表すのは、一つの自然な方法であろう³⁵⁾。バイリニアモデルでは、限界ひずみの大きさと二つの直線の勾配を与えればモデルが決定できるが、剛性が急に大きくなると、変形は止まるので、第二の勾配は変位の予測にはあまり重要ではない。

ここでは、安田らの考え³⁶⁾に従ってせん断剛性の求め方を示す。図-3.12のバイリニアモデルの第一勾配は材料によって、また、载荷の程度によって異なる。図-3.13は、これを初期剛性に対する比(剛性低下率)として整理している。剛性低下率は、 F_L が小さくなると急激に小さくなる。また、細粒分が多くなると剛性低下率も大きくなる。

図-3.13では比しか与えられていないが、実際に計算結果で用いるのは第一勾配の値である。したがって、図-3.13を使って流動時のせん断剛性を求める際には、図-3.13を求めたのと同じ初期剛性を使ってせん断剛性を求める必要がある。初期剛性の求め方にはいろいろな考えもあるが、勝手にとってはいけないということである。図では動的変形特性試験におけるひずみ振幅 $\gamma=10^{-3}$ に対応するせん断剛性 $G_{0,i}$ を用いた場合と、 $E=28N(kgf/cm^2)(=2744N\text{ kN/cm}^2)$ の関係を用いた N 値から計算したヤング係数 E に基づいて決めたせん断剛性 G_N を用いた曲線が示されている。

応力-ひずみ関係を一つの式で表す試みもある。吉田ら³⁷⁾は、図-3.5に示した体積変化特性を

$$\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} = \frac{e^{\varepsilon_v/c} - 1}{e^{\varepsilon_{v0}/c} - 1} \dots\dots\dots (2)$$

で表しせん断剛性を求め図-3.4の結果を表している。ここで、 ε_{v0} は過剰間隙水圧が消散したときの体積ひずみで、例えば文献38)の提案で用いられているように F_L の関数として決めることができる。また、 σ'_m は有効拘束圧、 σ'_{m0} は初期有効拘束圧、 C はパラメーターである。

せん断剛性を0とする考えもある³⁹⁾。しかし、完全に0にすると、通常の有限要素法解析は使うことができなくなるので、特別な方法を考える必要が出てくる。

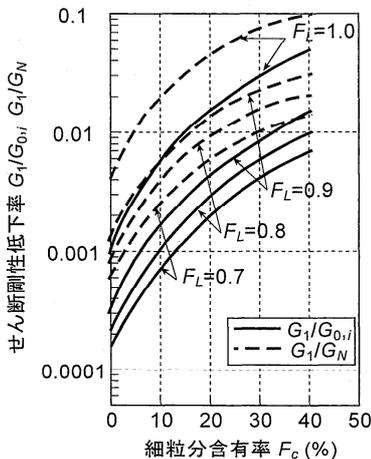


図-3.13 せん断剛性低下率と F_L の関係

(2) 有限要素法解法

応力-ひずみ関係をモデル化し、外力を与えれば、有限要素法を用いて変形を求めることができる。メカニズムのところで説明したように、外力は自重であるが、側方解放タイプの流動では、ケーソンの慣性力を考慮することもある。自重を外力とする、いわゆる自重解析は、地震応答解析に先立ち地盤の初期応力を求める目的ではよく行われる。この場合には変形は興味の対象ではない。一方、流動の問題では、地震前には地盤にせん断応力が作用しており、応力-ひずみ関係の変化によって変形がどれだけ増加するかということに着目しているため、考え方として区別する必要がある。

図-3.12で、ある要素は地震前には図のA点の状態にあるとし、これが応力-ひずみ関係の変化に伴い、図のC点に移行する際の変形を求めるのが流動の問題である。Aの状態はいわゆる自重解析で求めることができる。その後、流動解析に移行する。図に見られるように地震前後の応力-ひずみ関係は全く異なっているので、流動解析では少し工夫が必要である。ここでは、二つの方法を示す。

一つは、実際の挙動をなるべく追いかけるように、A点からA→B→Cの経路で解析を行う方法である。この方法では、まず、応力-ひずみ関係を流動時の関係に変える際に、変位(ひずみ)が発生しないように拘束する(A→Bの過程)。次に、変位(ひずみ)を拘束していた力(応力)を解放する(B→Cの過程)のもので、応力解放法と呼ぶ。A→Bの過程でひずみが変わらないように拘束している節点力は次のように表される。

$$F = \int_V B^T [\sigma_A - \sigma_B(\varepsilon_A)] dV \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 B はひずみ-変位マトリックス、 σ_A は地震前の応力、 σ_B は地震前のひずみ ε_A に対する地震後の応力-ひずみ関係による応力で、 V は要素の体積である。

もう一つは、流動時についても原点Oから出発した自重解析を行い、得られた変位(図-3.12の γ_C に対応)から地震前の応力-ひずみ関係を用いた自重解析で得られた変位(図-3.12の γ_A に対応)を引いたものを流動時の変位とする方法である。この方法を自重法と呼ぶ。原理的には応力解放法の方が少し厳密であるが、計算結果はほとんど変わらない。

これまで、せん断剛性についてのみ話をしてきたが、有限要素法による解析では、もう一つの定数が必要である。土質力学では体積弾性係数が用いられることが多い。解析では、地震前の有効応力に基づく体積弾性係数を用いる考えと、流動が非排水状態で起こるとして、水の剛性も考えた見かけの体積弾性係数を用いる考えがあるが、結果にはそれほど影響しない。

実際に流動を解析しようとするとき、液状化した層以外にもモデル化する必要がある。例えば液状化層上部の非液状化層を見ると、流動が起こると多くの亀裂が入っている。この層をモデル化するのに、地震前の材料特性モデルが妥当とは考えにくい。安田らは、流動する部分以

外のモデル化や実務計算について、次のような目安を示している。

- 液状化層上部の非液状化層：事例の逆解析から、せん断剛性は液状化層の10倍とする⁴⁰⁾。
- ケーソン直下の支持地盤：有効応力地震応答解析例によれば、発生する過剰間隙水圧比は0.7~0.8で⁴¹⁾、パラメータスタディ⁴⁰⁾から、せん断剛性は液状化層の10倍とする。
- ケーソンと背後地盤の境界はジョイント要素などを使うことが勧められる。
- ケーソンの滑動と慣性力は場合によっては考慮する。
- 背後地盤の影響範囲は十分広く取る。

有限要素法による解析でもう一つの注意事項は、変形のロッキングという現象である。流動層はせん断剛性が非常に小さく、ポアソン比は0.5に近くなる。この場合、多くの有限要素解析で用いられる(4節点アイソパラメトリック要素に対する)2点ガウス積分を行うと、せん断剛性が大きな要素剛性マトリックスが得られ、変位を極度に過小評価するという問題がある。これを避けるには、次数低減積分(1点ガウス積分)と抗砂時計剛性を用いた要素剛性マトリックスの使用⁴²⁾が最も好ましい。このような機能を持っていないプログラムでは、次数低減積分のみを行い砂時計変形の発生を許容するか、三角形要素を用いることを勧める⁴³⁾。砂時計変形が発生すると、個々の要素形状はかなり異常に見えるが、全体的な変形は抗砂時計剛性を用いたときとほとんど同じである。

東畑ら⁴⁴⁾は、流動化した砂はせん断剛性が0であると考えた解析法を提案している。この場合、通常の有限要素法は用いることはできない。そこで、地盤の水平方向の変位は、深さ方向には正弦1/4波で表せるという仮定と、体積変化は起こらないという仮定を導入した。すると、ポテンシャルエネルギー最小の原理を用いることで支配方程式を作ることができる。深さ方向の変位分布を仮定したので、未知数は地表面変位のみとなり、支配方程式は非常に簡単になっている。せん断剛性は0であるが、これも固体としてとらえた有限要素法の定式化である。さらに、後に述べる液体としての扱いと異なり、液状化層上部の非液状化層を考慮することも可能である。この方法は、剛性を0としていることから、サイトで発生する最大の変位を予測していることになる。東畑らは、時間の経過に従って変形が進んでいくモデルも提案している⁴⁵⁾。

既往の解析事例を見ると、緩傾斜タイプの流動の解析では、これまでに示したような流動時のみに着目した解析が使われ、通常の有効応力に基づく地震応答解析は行われていない。これに対して、側面解放タイプの流動では、特に1995年兵庫県南部地震でケーソンタイプの護岸の移動とそれに伴う背後地盤の移動により多くの被害を受けたのを契機として、多くの液状化解析が行われるようになった。その適用性に関しては、まだ、評価が固まっているわけではない。例えば、地震時の地盤・土構

造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム⁴⁶⁾では、ケーソンタイプと矢板タイプについて、一斉解析の結果が紹介されているが、これらは、解析手法の精度を見るための良い参考となる。

多くの解析結果を見ると、次のような特徴がある。

- ① ケーソンや護岸の移動量は、ある程度精度良く予測できる。
- ② 護岸が動いたときの背後地盤の影響範囲は、護岸から50~70 m程度である。一方、地震被害からは100~200 m程度が観測され、解析値はこれより小さい。
- ③ 置換砂の部分は液状化しないが、大きくせん断変形し、ケーソンが前面に動く大きな要因となっている。
- ④ ケーソンの慣性力は、ケーソンの上部が下部より大きく変位する(すなわち前面に向いて転倒する)ように作用する。
- ⑤ 大きな揺れの後に小さな揺れが続いても変位は進行する。また、過剰間隙水圧の排水を考慮すると、非排水条件の解析より大きな変位が得られる⁴⁷⁾。

3.5.2 液体ととらえる考え方に対する解法

流動する地盤を液体としたモデル化では、応力-ひずみ関係の代わりに応力-ひずみ速度関係を用いる。固体で弾性に相当するのはNewton(ニュートン)流体で粘性係数は一定である。これに対して、非線形に相当するのはBingham(ビンガム)流体で、せん断応力 τ はひずみ速度の関数として次のように表される。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_f \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 η は降伏後の粘性係数、 τ_f は降伏強度である。

図-3.7を見ると、液体としてとらえる場合にはBingham流体の方が現象とよくあっているように見える。

液体としてとらえる考え方の問題は、粘性係数の値を一意的に決める式が提案されていないことである。3.3節で示したメカニズムに従うとすれば、不安定さのポテンシャルをどのように消散しながら流動が進んでいるかにより粘性係数の値は異なる。振動台実験のように大きな加速度を続けて作用させ液状化状態を維持させるような実験では粘性係数の値は小さい。反対に、地震動の主要動の後の小さな振動や、地震終了後の過剰間隙水圧の消散に伴う浸透力の作用下における粘性係数はもっと大きい。つまり、流動が起こっている時期や外乱の種類によっても粘性係数の値が異なることが考えられる。

このように、液体としてとらえる考え方に基づく場合、最も基本となる粘性係数の値の設定にも困難があるが、さらに、有限要素法などを用いて解析しようとする、これ以外にも、次に述べるような、いくつかの困難な事がある。

液体としてとらえる考え方で解析する際の最初の困難は、解析コードである。既存の流体解析に関するコードでは、Newton流体は扱うことができるが、Bingham流体を考慮できるコードはほとんどない。

境界条件や解析領域についての問題もある。流動の間

題では、地表面は変化するが、このような境界条件が変化することが扱えないこともある。また、通常液状化層の上には固体である非液状化層が存在するが、このような変形する固体を扱うことはもっと困難である。ケーソン式護岸で、下部の置換砂が変形し、これに伴いケーソンが移動し、その結果背後地盤で流動が起きるという一連の過程を流体解析に関する汎用の解析コードで解くことはとてもできそうにない。

液体としてとらえる考えに基づく解析事例がないわけではない。渦岡ら⁴⁸⁾は、自由水面を表現することが可能な汎用の流体解析コードを用いて Bingham 流体を考慮する手法を示した。すなわち、汎用コードでは、

$$\tau = \eta' \dot{\gamma} \dots\dots\dots (5)$$

を基礎式としているので、等価粘性係数 η' を

$$\eta' = \eta + \frac{R_r \cdot p}{\dot{\gamma}} \dots\dots\dots (6)$$

と置き、その値を逐次更新することで、近似的に Bingham 流体を表現できる。ここで、 R_r は残留強度比、 p は水圧である。

この方法を、振動台で、土槽を加振し液状化させた後傾斜させ流動を起こさせた実験をシミュレートし、傾斜開始後に流動速度が急激に大きくなり、その後収束する傾向が表現できたこと、地盤が水平にならずに流動が止まること等の結果が得られた⁴⁸⁾。時間的な経緯が考察できるのは液体にモデル化した成果の一つである。また、Newton 流体と比べてみると流動の継続時間が実験に近い、Newton 流体では地表が水平になるが Bingham 流体では傾斜して流動が止まるなどの優位点があることもわかった。しかし、一方では、残留傾斜角は実験とは差があるし、実験に見られるような、流動の始点と終点で地表面が水平になる部分があるという現象も表現できていない。これは、ひずみがある程度大きくなると固体に戻るという現象が考慮できないためと考えられる。

このように、液体としてとらえる考え方に基づく解析は、現状では実用的とはいえない。しかし、固体としてとらえる方法が、最終状態の地盤の変位を求めることを目的としているのに対し、液体としてとらえる方法では、流動の過程を含めてとらえることができることから、今後の研究が待たれる分野といえる。

3.5.3 経験的手法

濱田らは、緩傾斜タイプの流動に関する事例のうち、流動の始点と終点が明りょうで、構造物の影響を受けていなくて、均質な砂層を選び直し、次式を提案した¹³⁾。

$$D = \frac{1500\theta\sqrt{H}}{\bar{N}} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 θ は地表面勾配、 \bar{N} は液状化層の平均補正 N 値である。

このほか、Bartlet と Youd⁴⁹⁾ (パートレット・ヤウド) は、緩傾斜タイプと側方解放タイプの二つについて経験式を提案した。この式は、地震のマグニチュード、震央距離、液状化層厚、地表面勾配、護岸からの距離、細粒分含有率、平均粒径など非常に多くのパラメーター

を用いて、重相関関係を仮定して求めたものである。しかし、各パラメーターの独立性についての議論は行われていない。

これらの経験式は、地表の変位を与えるもので、地中の変位分布は分からない。また、多くの事例に対して倍・半分の範囲でばらついている^{13),50)}。

井合ら⁵¹⁾は、過去の被害を基に、護岸の構造形式、地盤条件ごとに護岸の移動量をまとめた。これに、護岸の動きに伴う背後地盤の影響範囲、護岸からの距離減衰に関する経験則を組み合わせれば、背後地盤の移動量を求めることができる。この方法については、5章で示す。

3.5.4 構造物への影響

流動が発生すると、地中構造物は大きな変形を受ける。また、地表の構造物も表層地盤の変状に伴い被害を受けることがある。個々の地表構造物に影響を与えるような表層地盤の変状は、流動のみならず、液状化そのもの、地盤の非線形挙動と破壊など、いろいろな要因が影響し、それらの定量的な予測、また、予測に必要な地盤構成や地盤物性の評価も困難である。ここでは、地中構造物に限定して、構造物への影響を考える。例えば、ケーソン護岸も構造物ではあるが、その変位は流動の結果生じる被害ではないので、ここでは考えない。

地中構造物には、杭のように鉛直に長い構造物、埋設管のような地中線状構造物、地下室などがある。これまで、流動時地盤の変位を求める方法をいろいろ示したが、これらと同じ考え方によって、構造物を含む系を解くことができれば、特に構造物のための解析の必要はない。しかし、これまでも述べてきたように、それぞれの解析手法は、構造物を考慮した解析を行えるほど完成しているとはいえない。例えば、固体としての考え方では、杭の間を土がすり抜れたりする現象は表現できない。現在提案されている方法は、地盤の変位を求めるという目的で提案されているもので、地中構造物の挙動まで考慮できるわけではない。液体としての考え方では、最も基本となる粘性係数の値の決め方も確立していない。さらに、非液状化層や構造物の存在を考慮することも困難である。したがって、現状では、まず、構造物のない地盤の挙動を求め、これを基に、構造物に作用する外力を求めるという方法が合理的と考えられる。

杭に作用する外力を評価する際には、流動が地震時に発生しているのか、地震後(主要動後)に発生しているのかというのは重要な要因である。つまり、地震時に流動が起こるとすれば、両方の要因を同時に考慮しなければならないからである。これに対して、地震後に発生するとすれば、上部構造の慣性力により杭に作用する力は考慮しなくても良いからである。設計指針では主に後者の立場をとり、上部構造物の慣性力による影響とは別に杭に作用する力を求めているものが多い。

杭には、支持杭と摩擦杭がある。支持杭では、杭先端が非液状化層に固定されている。また、杭頭は通常非液状化層にある。このように杭の上下が非液状化層中にある場合には、流動時の杭の変形の多くは、上下の非液状

化層の相対変位により発生し、流動層の特性の影響は相対的に小さい。杭頭が液状化層中にあるときでも杭頭が基礎と固定されていれば、非液状化層にあるのと同じように扱うことができる。これに対して、摩擦杭のように一方が支持されていないときには、流動層の特性が杭の変形に大きく反映される。

杭の解析には応答変位法が良く用いられる。例えば、首都高速道路公団⁵²⁾では地盤ばねの剛性を、流動層では1/100、上部の非液状化層では1/10として杭応力を求めている。この際、杭の根入れ部での剛性低下は考えない。この方法は、固体としてとらえる考え方と同じ考えである。

ほかの事例もある。簡易なものでは、流動化層の変位分布を正弦1/4波に仮定している⁵³⁾。このほかにも多くの事例があるが、ばね定数は、事例によりいろいろに設定され、統一されていない。

流動する地盤を液体と考えれば、流動圧が問題となる。液状化層中で物体を動かし、その抵抗から見かけの粘性係数を求める実験は既に示した(例えば図—3.7)。これに対して、液体を仮定して、地盤中の構造物に作用する流動圧を求めた事例もある⁵⁴⁾。

流動による地盤の変位は非常に大きい。したがって、地中構造物に作用する最大の外力を用い構造物を設計する事は可能であろう。非液状化層が固体として挙動することは疑いないので、その最大の外力は受働土圧となる。残りは流動化層で作用する外力である。道路橋示方書(1996)では、兵庫県南部地震で被害を受けた高速道路杭の被害の逆解析から、流動層に作用する外力を求め、これを流動力として常時の受働土圧の30%に液状化指数 P_L に対する補正係数を考慮する形で設定している。

埋設管でも、基本的な考え方は杭と同じであるが、杭と異なり、特定地点の変位ではなく、平面的な変位分布が必要である。これについては、5章を参照されたい。

3.5.5 まとめ

この節では、流動に伴う現象の解析法を紹介した。固体、液体のそれぞれのとらえ方に対して異なる解析法がある。固体ととらえた場合の簡易な解析法では、既往の有限要素法プログラムを用いて、ないしは少し改良を加えるだけで使えるものもある。これに対して液体としてのメカニズムでは基本的な定数設定、解析プログラムの問題などもあり、現状では実用レベルには至っていない。

現在の手法では、地盤と杭などの構造物を同時に解析することは難しい事もある。地盤の変位を算出し、それを基に杭に作用する外力を算定するのが実用的といえる。

地盤の流動変位は、これまで設計に用いられてきた地盤の変位と比べれば格段に大きい。このような大きな変位をどの程度の精度で予測すれば良いのかという設計的な問題は今後の課題として残っている。現状では、解析の精度はおおよそ倍・半分の範囲と考えられる。例えば、地盤が1m動くのと、2m動くのと、設計上どの程度の違いが発生するのかといった実務からの議論や検討も、今後必要と考えられる。

参考文献

- 1) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K.: Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacement, Association for the Development of Earthquake Prediction, Tokyo, 1986.
- 2) 吉田 望: 液状化に伴う流動のメカニズム, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 53~70, 1998.
- 3) Yasuda, S., Nagase, H., Kiku, H. and Uchida, Y.: The Mechanism and a Simplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, 土質工学会論文報告集, Vol. 32, No. 1, pp. 149~160, 1992.
- 4) Towhata, I., Toyota, H. and Vargas-Monge, W.: Dynamics in lateral flow of liquefied ground, Proc. 10th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Beijing, Vol. 1, pp. 497~500, 1995.
- 5) Yoshida, N.: Finite Displacement Analysis on Liquefaction-Induced Large Permanent Ground Displacements, Proc. 2nd Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, pp. 207~217, 1989.
- 6) Seed, H. B.: Design problems in soil liquefaction, J. GE, ASCE, Vol. 113, No. 8, pp. 827~845, 1987.
- 7) 規矩大義・安田 進・増田民夫・板藤 繁・峯 啓一郎: 液状化した砂の強度変形特性に関するねじりせん断試験, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol. 1, pp. 871~876, 1994.
- 8) 村松正重・龍岡文夫・佐々木勉・関 真一: 振動三軸および動的ねじり単純せん断による密な砂の液状化特性, 第16回土質工学研究発表会講演集, pp. 601~604, 1981.
- 9) 吉田 望・辻野修一・稲童丸征巳: 液状化に伴う地盤沈下予測に関する基礎的研究, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp. 859~860, 1994.
- 10) Hamada, M., Ohtomo, K., Sato, H., Iwatate, T.: Experimental Study of Effects of Liquefaction-induced Ground Displacement on In-ground Structures, Proc. 4th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, Vol. 1, pp. 481~492, 1992.
- 11) 土居賢彦・佐藤 博・浜田政則・湯浅 明: 液状化している砂の物性に関する実験的研究, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 1187~1190, 1993.
- 12) Orense, R., Towhata, I. and Yamashita, Y.: Response of Pipes Subjected to Ground Displacements Induced by Liquefaction, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 1175~1178, 1993.
- 13) 濱田政則・若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, Vol. III-43, No. 596, pp. 189~208, 1998.
- 14) 土木学会新潟震災調査委員会編: 新潟地震震害調査報告, 土木学会, 1966.
- 15) Hamada, M.: Large Ground Deformations and Their Effects on Lifelines: 1983 Nihonkai-chubu Earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance during Past Earthquakes, Volume 1 Japanese Case Studies, Technical Report NCEER-92-0001, pp. 4~11, 1992.
- 16) 田中 満・酒井達史・安田 進・東畑郁生・大友敬三: 送電鉄塔基礎の遠心模型震動実験—その1 基本物性と実験手法, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部A, pp. 280~281, 1996.
- 17) Scott, R. F.: Crane response in 1995 Hyogoken nanbu earthquake, 地盤工学会論文報告集, Vol. 37, No. 2, pp. 81~87, 1997.
- 18) 堀越研一・藤原斉都・田中 満・大津宏康: 非液状化層

- の存在が側方流動地盤中の杭の挙動に与える影響について、第32回地盤工学研究発表会講演集, pp. 939~940, 1997.
- 19) 佐藤正義: 遠心力場におけるケーソン岸壁および杭基礎の液状化被害に関する再現実験, 土木学会論文集, Vol. III-41, No. 582, pp. 295~304, 1997.
 - 20) 吉田 望: 液状化にともなう地盤の側方流動—固体か液体か—, 応用力学フォーラム, 土木学会応用力学委員会, pp. 12~17, 1995.
 - 21) 小濱英司・三浦均也・吉田 望・大塚夏彦・栗田 悟: Instability of gravity type quay wall induced by liquefaction of backfill during earthquake, 地盤工学会論文報告集, Vol. 38, No. 5, pp. 71~83, 1998.
 - 22) Westergaard, H. M.: Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418~432, 1933.
 - 23) 安田 進・野村博之・寺内哲也・田中宏征・喜田 浩・龍田昌毅・原田典佳: 液状化による護岸背後地盤の流動とその対策工に関する振動台実験, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集, pp. 121~126, 1997.
 - 24) 地震予知総合研究振興会: 1990年フィリピンルソン島地震被害調査報告書, 1991.
 - 25) 渡辺啓行・安田 進・吉田 望: 1991年 Terile-Limon (コスタリカ) 地震被害調査報告書, 地震予知総合研究振興会, 1991.
 - 26) 土田 肇ほか: 1983年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技術資料, No. 511, 1985.
 - 27) 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No. 766, 運輸省港湾技術研究所.
 - 28) 一井康二・井合 進・森田年一: 有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集, 土木学会, pp. 397~404, 1996.
 - 29) 角南 進・雲田晃平・石原克治・岡 二三生: 液状化地盤における地震時土圧と有効応力解析, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部A, pp. 298~299, 1996.
 - 30) Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatomi, T.: Performance of caisson type quay walls at Kobe port, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, 地盤工学会論文報告集, pp. 119~136, 1996.
 - 31) 屋外貯蔵タンク地盤の安全性に関する調査研究報告書(平成6年度)タンク地盤の液状化に関する調査検討, 危険物保安技術協会.
 - 32) 安田 進・酒井達史・佐藤正行・吉田 望: 液状化に伴う鉄塔基礎の沈下量の簡易推定方法, 第52回土木学会年次講演概要集, 第3部A, pp. 246~247, 1997.
 - 33) Peiris, T. A. and Yoshida, N.: Modeling of Volume Change Characteristics of Sand under Cyclic Loading, Proc. 11WCEE, Acapulco, Paper No. 1087, 1996.
 - 34) Shamoto, Y., Zhang, J. and Goto, S.: Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand, 地盤工学会論文報告集, Vol. 37, No. 2, pp. 71~80, 1997.
 - 35) Yasuda, S., Nagase, H., Mine, K., Yoshida, N., Kiku, H. and Masuda, T.: Stress-strain relationships of liquefied sand, Proc. First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, pp. 811~816, 1995.
 - 36) 規矩大義・吉田 望・安田 進: 液状化に伴う側方流動の簡易解析法に関する幾つかの考察, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 1457~1462, 1998.
 - 37) Yoshida, N., Yasuda, S., Kiku, H., Masuda, T. and Finn, W. D. L.: Behavior of Sand After Liquefaction, Proc. 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Salt Lake City, pp. 181~198, 1994.
 - 38) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of Settlements in sand deposits following liquefaction during Earthquakes, 土質工学会論文報告集, Vol. 32, No. 1, pp. 173~188, 1992.
 - 39) Towhata, I., Toyota, H. and Vargas, W.: Dynamics in Lateral Flow of Liquefied Ground, Proc. 10th Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Eng., Beijing, Vol. 1, pp. 497~500, 1995.
 - 40) 森本弘光・安田 進・吉田 望・規矩大義・増田民夫: 護岸構造物の斉解析—残留変形解析の適用結果—, 地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 275~280, 1998.
 - 41) Iai, S., Sugano, T., Ichii, K., Morita, T., Inagaki, H. and Inatomi, T.: Performance of caisson type quay walls, The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan Society of Civil Engineers, pp. 181~207, 1996.
 - 42) Yoshida, N.: Finite Displacement Analysis on Liquefaction-Induced Large Permanent Ground Displacements, Proc. 2nd Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, pp. 207~217, 1989.
 - 43) 安田 進・吉田 望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫: 液状化に伴う地盤の大変形の簡易予測法, 土と基礎, Vol. 47, No. 6, 1999.
 - 44) Towhata, I., Sasaki, Y., Tokida, K., Matsumoto, H., Tamari, Y. and Yamada, K.: Prediction of Permanent Displacement of Liquefied Ground by means of Minimum Energy Principle, 土質工学会論文報告集, Vol. 32, No. 3, pp. 97~116, 1992.
 - 45) Towhata, I., Toyota, H. and Vargas, W.: Dynamics in Lateral Flow of Liquefied Ground, Proc. 10th Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Eng., Beijing, Vol. 1, pp. 497~500, 1995.
 - 46) 地盤工学会: 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp. 159~192, 1998.
 - 47) 王 均・佐藤正行・吉田 望: 昭和大橋サイト矢板護岸被害の有効応力解析, 地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 257~262, 1998.
 - 48) 渦岡良介・八嶋 厚・川上哲太郎: Bingham モデルを用いた液状化地盤の側方流動解析, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp. 893~894, 1997.
 - 49) Bartlett, S. F. and Youd, T. L.: Empirical prediction of lateral spread displacement, Proc. 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, Vol. 1, pp. 351~366, 1992.
 - 50) Hamada, M., O'Rourke, T. D. and Yoshida, N.: Liquefaction-induced Large Ground Displacement, Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes, 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, JSSMFE, pp. 93~108, 1993.
 - 51) 井合 進・一井康二・森田年一・佐藤幸博: 既往の地震事例に見られる液状化時の護岸変形量について, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集, pp. 259~264, 1997.
 - 52) 井合 進・佐藤 博・沢田俊一・松谷正憲・森崎 啓・平山光信: 地盤の流動を考慮した設計の考え方, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 87~131, 1998.
 - 53) 浅香美治・時松孝次・大岡 弘: 地盤変形を考慮した杭基礎の破壊・変形モード解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B, pp. 765~766, 1997.
 - 54) 渦岡良介・八嶋 厚・川上哲太郎: 側方流動により地中構造物に作用する流動圧の数値シミュレーション, 第24回地盤工学研究発表会講演論文集, pp. 749~752, 1997.