

# 地盤の地震応答解析の歴史概観

## Historical View of Seismic Response Analysis of Ground

吉 田 望 (よした のぞむ)

東北学院大学 教授



### 1. はじめに

地盤の地震時の挙動は色々な方法で求められる。例えば、構造物との相互作用を考えるとときには、グラウンドコンプライアンス、格子モデル、ペンゼンモデルなど、地盤の力学特性を簡単にした解析が行われてきた。ここでは、これらを除き、特に地盤の非線形の扱いに着目して地盤の地震応答解析の歴史を概観する。

### 2. 等価線形解析とその発展

#### 2.1 SHAKE の開発

地盤の地震応答解析の歴史は、1970年頃に始まった。最初の実用的なプログラムは SHAKE<sup>1)</sup>である。このプログラムは現在でも一般的に使われ、SHAKE という名称はあたかも普通名詞のように使われている。SHAKE が作られた頃はコンピュータの能力も低く、そのため、最大加速度でさえ出力する層を指定したし、変位を求める機能はなかった。

SHAKE は波動方程式 (運動方程式) を周波数領域で解き、周波数ごとに解かれた解を重ね合わせる手法を用いている。重ね合わせは、線形の応力-ひずみ関係でのみ可能であるが、それでは、応力-ひずみ関係の非線形性及び履歴減衰を考慮することができない。この問題を二つの手法で解決したのが SHAKE の特徴である。

一つは、応力-ひずみ関係を  $\tau = \bar{G}\gamma$  のように複素表示することである ( $\tau, \gamma$  は複素数のせん断応力とせん断ひずみ)。すると、 $\tau$  と  $\gamma$  の実部で表される応力-ひずみ関係は非線形となる。係数  $\bar{G}$  も複素数で、せん断剛性  $G$  と減衰定数  $h$  から次式で表され、複素剛性と呼ばれる。

$$\bar{G} = G(1 + 2ih) \dots\dots\dots (1)$$

この減衰はフォークト型のダッシュポットとばねを結合するモデルから得られるが、単純に計算すると、履歴減衰は周波数に依存するようになる。そこで、ダッシュポットの粘性係数を周波数依存とし、周波数に依存しない履歴特性を実現している。なお、この方法で作った履歴曲線は楕円形をしているので、例えば 1 質点系の速度比例減衰モデルとの比較で増幅比が異なるので、式(1)に代わり、式(2)の複素剛性が提案され<sup>2)</sup>、オリジナルの SHAKE に対しても減衰をこのように変更するように呼びかけが行われた。

$$\bar{G} = G(1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1 - h^2}) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、筆者の経験では結果にはほとんど影響しない。

もう一つは、非線形の挙動を線形で表現するために、線形解析で用いる剛性と減衰を有効ひずみ  $\gamma_{\text{eff}}$  に対する値とし、最大ひずみ  $\gamma_{\text{max}}$  より式(3)で求めることである。

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\text{max}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\alpha$  は 0.65 がよく用いられる。この手法は等価線形化法 (equivalent linear method) と呼ばれた。ただし、等価という用語は、例えば表現が異なっても実質的に同じものであるとき使われるが、この手法はそうではないので、本来線形化近似法と呼ぶべきものであろう。筆者は等価という名前を見る度に違和感を覚えている。

この定式化を用いると、必要なのはひずみに対応した剛性 (割線剛性) と減衰定数である。これを求める方法は SHAKE に先立ち研究されてきた<sup>3),4)</sup>。すなわち、一定応力振幅の载荷を行い、特定の回数の履歴曲線から除荷点を結ぶ剛性  $G$  とヒステリシス曲線の面積 (塑性化によるエネルギー吸収量) を減衰定数表示した  $h$  をひずみ振幅の関数として表現するもので、現在も基本的にはこれと同様な方法で試験が行われている。

SHAKE のもう一つの特徴は、波動方程式を空間に關し解析的に解いていることで、そのため、入射波と反射波の分離、任意地点の地震動の入力などが可能である。

#### 2.2 SHAKE の欠点と改良

SHAKE の精度に関する比較が Finn らにより行われ<sup>5)</sup>、二つの非線形解析 (DESRA<sup>6)</sup>, CHARSOIL<sup>7)</sup>) と SHAKE の解析を比較すると、SHAKE の最大せん断応力が非常に大きくなった。応答スペクトルでは、ある周波数領域で SHAKE の応答が大きいことから、線形解析なので共振が起こった可能性が示唆された。これに対して、筆者は図-1 のメカニズムを考えた<sup>8)</sup>。図の実線 OBA が設定した応力 ( $\tau$ )-ひずみ ( $\gamma$ ) 関係とする。計算に用いられるのは B 点 (ひずみ  $\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\text{max}}$ ) を通る直線 OBC であるので、最大ひずみ時の応力は設定した  $\tau$ - $\gamma$  関係上の点 A ではなく、直線 OB 上の点 C となる。すなわち、最大応力-ひずみ関係は図の破線のようになり、せん断応力が過大評価される。この結果、大ひずみ時には最大加速度も過大評価される。

こんな簡単なところが見落とされてきたのは、オリジナルの SHAKE では応力-ひずみ関係は直線で出力されたので、面白みがないこと、力学特性を  $G$ - $\gamma$  関係で設定していたので  $G$  しか見なかったことであると考え

## 総説

ている。

SHAKE のもう一つの欠点は、文献9)により指摘された。SHAKE が岩盤のような剛性が大きく減衰が小さい地盤ではよく観測値と合うのに、軟弱地盤では必ずしも合わない現象に対し、最大ひずみに対応した画一的な  $G$  と  $h$  を用いることが原因であると考え、振動モードごとに有効ひずみを変える方法を提案した。この手法はモード解析によるもので、周波数領域の解析と異なることもあり、ほとんど普及しなかった。杉戸らは同じ手法を SHAKE と同じ解法を用いて解いた<sup>10)</sup>。すなわち、有効ひずみを周波数  $f$  の関数として次のように表した。

$$\gamma_{\text{eff}}(f) = \alpha \frac{F(f)}{F_{\text{max}}} \gamma_{\text{max}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで  $F(f)$  はひずみのフーリエスペクトル、 $F_{\text{max}}$  はその最大値である。 $F(f)$  は  $f$  が大きくなると小さくなるので、高振動数で剛性が大きく、減衰が小さくなるので、SHAKE の欠点が改善される。

SHAKE のように周波数にかかわらず一定の剛性と減衰を用いると、高振動数成分で増幅が小さくなる。図-2 はその例<sup>11)</sup> で数 Hz から SHAKE の増幅比が急激に小さくなる。このような高い振動数は多くの構造物の卓越周期からは外れているので、構造物の挙動に対する影響は小さい。ただし、増幅比が1より小さいということは地表より地下の方で地震動が大きくなるということで、地表の観測波形を入力として基盤に入射する波を求めようような逆増幅計算を行うとひどい結果となることがある。

剛性が周波数ごとに変われば、分散性という波動の伝播速度が周波数に依存して変化する、S波が持っていない性質を示す。減衰の周波数依存であれば、受け入れられやすいのであるが、文献10)の方法(FDEL)を減衰のみに適用した結果(FDEL-G)も図-2に示されているが、剛性の周波数依存が必要であることが分かる。

筆者は、この二つの欠点を同時に解決する方法として、有効ひずみを次のように与える方法を提案した<sup>12)</sup>。

$$\begin{cases} \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{max}} & f_p > f \\ \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{max}} - \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{\text{eff}} = 0 & f > f_e \end{cases} \quad \dots \dots \dots (5)$$

すなわち、有効ひずみの最大値を最大ひずみとし、高振動数成分は弾性とした。また、分散性については、例えば高振動数の揺れは小さいひずみしか発生させないので剛性が大きく減衰が小さい、低振動数の揺れはその逆であるとして、その非線形挙動の特性を周波数領域にマッピングした結果分散性の性質が現れるので波動伝播速度の問題ではないと説明することでこの問題の解決とした。

### 2.3 多次元の等価線形化法

多次元で等価線形化法を用いた実用的なプログラムも、SHAKEを開発したカリフォルニア大学の研究者により作られた。最初に LUSH<sup>13)</sup>、引き続いて FLUSH<sup>14)</sup> が作られた。ここで LUSH は作者4名の頭文字、F は fast の略で、高速フーリエ変換(FFT)を用いたという意味である。論文タイトルには三次元とついているが、基本的には二次元解析で、側面(加振面と平行面)に粘

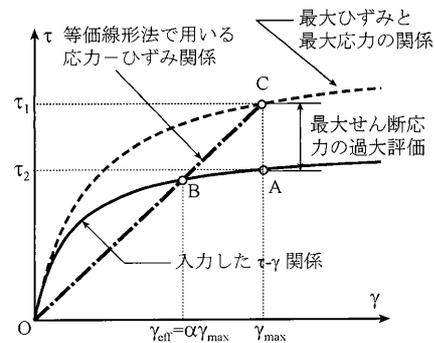


図-1 SHAKE の応力過大評価のメカニズム

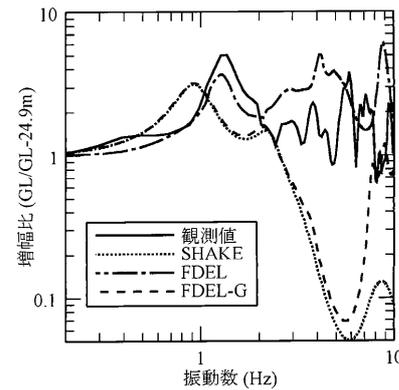


図-2 増幅比の比較<sup>11)</sup>

性境界(ダッシュポット)をつけ周辺地盤と構造物周辺地盤の相互作用を考えるもので、加振は1方向である。側方にはエネルギー伝達境界を設けて側方地盤との相互作用を考えている。基盤は剛基盤であり、基盤の振動をそのまま入力する仕様である。

地盤は半無限であり、解析領域の境界に明瞭な境界をもうけることは困難である。その中で、領域内の振動を粘性境界が吸収することが Lysmer (ライスマー) らにより定式化された<sup>15)</sup>。側面のダッシュポットはその応用である。また、Joyner (ジョイナー) は、底面に取り付けたダッシュポットの反対側を解放基盤の振動(入射波の倍)で加振することにより構造物に入射波が入力することを示し<sup>16)</sup>、これにより入射波入力ができるようになった。

FLUSH はその後、底面にダッシュポットをつけた入射波入力を可能にした SuperFLUSH へと改良された。さらに、表面波を扱う、SuperFLUSH/Rayleigh, SuperFLUSH/Love、構造物との相互作用に重点を置いた SASSHI、軸対象の構造物をターゲットにした ALUSH など、いくつもの異なる機能のプログラムが作られた。

## 3. 非線形解析

非線形解析とは、非線形の応力-ひずみ関係を逐次追跡する手法である。前述した等価線形化法も非線形解析であるが、これとは区別して用いる。英語でも、truly nonlinear method と呼び区別されることもある。

### 3.1 全応力非線形解析

非線形解析は、SHAKE から数年遅れて開発された。

初期のプログラムには, DESRA, CHARSOIL, MASH<sup>17)</sup>などがある。これらは, 双曲線モデル, ランパグ・オスグットモデル, ダビデンコフモデルと, 応力-ひずみ関係モデルが異なる。その後の非線形解析は, ほとんどが液状化を含むものであるので, 次節に示す。

### 3.2 有効応力解析

土の力学特性が有効応力の原理に支配されていることはよく知られており, それを考慮するためには土の挙動を土骨格と間隙水に分離する必要がある。しかし, 有効応力解析と呼ぶ場合には, さらに, 土のダイレイタンシーを考慮したものをいう。

土と水を分離して考慮する手法は, Biot (ビオ) が圧密解析について示したのが最初である<sup>18)</sup>。その有限要素化, 地震応答解析への適用は多くの人により研究され, いくつかの解析手法がある。これら解析法の詳細については文献<sup>19)</sup>でまとめたので興味のある方は参照されたい。

液状化解析を最初に実用化したのは DESRA-2 というプログラムである<sup>6)</sup>。その後, 日本でも YUSAYUSA が開発された<sup>20)</sup>。前者は乾燥砂の体積変化に膨潤係数を乗じて過剰間隙水圧を求めるもの, 後者は有効応力経路を数式で表すものであった。

多次元の解析で最初に実用化されたプログラムは, TARA である<sup>21)</sup>。これ以後, 多くのプログラムが作られるようになった。これらは, 土の挙動に限れば, 構成モデル (応力-ひずみ関係) が異なるのみである。しかし, 応力-ひずみ関係モデルを論じることは本論の目的ではない。そこで, 次章では, プログラムの精度に着目して, これまでの研究をまとめることにする。

## 4. プログラムの精度と比較

解析プログラムの精度は, 観測結果や実験結果と比較することで実証される。しかし, 個別の論文であれば, いわゆる結果を合わせるという操作が行われることもあるし, 良い結果のものしか報告されないということもある。より客観的に精度を見ることができるとは, ブラインドテストや一斉解析であろう。ここで, ブラインドテストとは結果を知らせず予測させるもの, 一斉解析とは同じ条件で解析するもので, 結果が分かっていることもあるし, 他の結果を見ながら結果の修正もできたりする。

全応力解析のブラインドテストでは, 1982年に足柄サイトターゲットに行われたものがある。軟弱地盤の地震応答を近くの岩盤サイトで得られた記録から予測させるものであった。図-3に最大応答値の比較の例を示す<sup>22)</sup>。地表では観測値は多くの計算値の下方にあり, ほとんどの解析が最大加速度の予測もできていない。また, 増幅スペクトルにも大きな差があること, さらに, 解析の中には SHAKE を使ったと考えられるものが多くあったが, それらの間にも多くの差があることなどが報告されており<sup>23)</sup>, 予測精度は単にプログラムによるのではなく, 解析者の技量にも依存することが分かる。また, 企画側から示された標準断面が適切なものではな

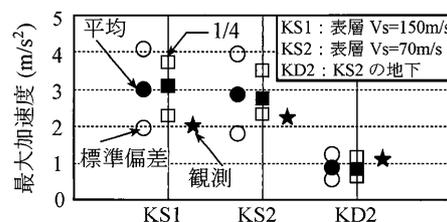


図-3 強震時の最大応答値の比較

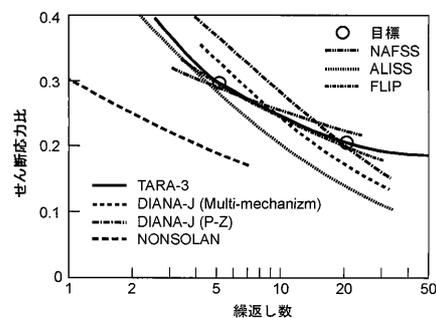


図-4 液状化強度曲線の比較

いなどの問題もあった。

1987年に行われた砂の構成モデルに関するブラインドテスト<sup>24)</sup>では, 体積ひずみの予測が難しい (したがって, 液状化の解析が難しい) ことが指摘されている<sup>25)</sup>。

地盤工学会, 土木学会でもいくつかの試みが行われている。最初は1989年に行われた, 新潟川岸町地盤のシミュレーションとケンブリッジ大学で行われた盛土の遠心力載荷一斉解析である<sup>26)</sup>。解析に際し, 材料のパラメータを決めるのに図-4のように液状化強度曲線のシミュレーションを用いたのは初めての試みである。それ以前は, ある振幅の応力-ひずみ関係や応力経路の比較が示されることが一般的であったが, いろいろな振幅の波が混在する地震応答解析では最低限液状化強度曲線の一致が必要というものである。また, 過剰間隙水圧の発生量を表すのに, 過剰間隙水圧比  $u/\sigma'_{v0}$  ( $u$ : 過剰間隙水圧,  $\sigma'_{v0}$ : 初期有効上載圧) を用いるのが一般的であったが, 多次元解析では全応力も変化するので,  $1 - \sigma'_m/\sigma'_{m0}$  ( $\sigma'_m, \sigma'_{m0}$  は現在と初期の有効拘束圧) を用いるというのも新しい試みと考える。図-4から分かるように液状化強度曲線を合わせるのも難しいモデルが多い。また, 弾塑性論に基づく構成モデルでは変相後履歴曲線が定常化し, 有効応力が0近くにならないし, ひずみも大きくならないことが分かった。その後の構成モデルはこれらの欠点を改良する方向に進んだと考えている。

1991年には川岸町アパートを対象とした一斉解析が行われた<sup>27)</sup>。地震終了時の沈下量は0.2~15.4 cm, 水平変位は0.7~18.1 cm までばらつき, 変位の予測の難しいことが認識された。

アメリカでは NSF がスポンサーとなり, VELACS という, 合計9種のモデルの遠心力載荷試験の挙動を予測するブラインドテストが行われた<sup>28)</sup>。アメリカがスポンサーということで, 日本からの参加は少なかった。すべてのモデルに良い結果を示したプログラムはなかつ

## 総 説

たし、すべてのプログラムが良い結果を示したモデルもなかったというのが結論の一つで、液状化の問題の難しさを示唆している。

その後も、地盤改良の効果<sup>29)</sup>、地中構造物の浮き上がり<sup>30)</sup>、堤防<sup>31)</sup>などで一斉解析やブライントテストが行われた。いずれのケースでも変形量はプログラムによって相当にばらついており、変位量予測が難しいことが分かる。

なお、ブライントテストは精度を評価する良い方法のように見えるが、問題もある。

一つは結果の善し悪しがプログラムの善し悪しと評価されることである。前述の足柄のブライントテストでSHAKEを使った結果に大きな差があったことから分かるように、使用者の判断によって結果が異なる。つまり、結果が良かったのは、そのプログラムに能力があった以外に、使用者の判断が良かった、たまたま運が良かったなどの要因もあるわけである。

二つ目は与えられた条件が守られているかということである。例えば液状化試験で相対密度60%と書いてあっても、実際には80%になっていたとしたら、結果が変わるのは当然である。筆者は文献<sup>30)</sup>の際これを経験している。このときは工学的判断ということで試験条件を見ただけで浮き上がり量を予測し、実験とずいぶん違ったが、実は相対密度が予定より大きく異なっていた。

三つ目には、このようなことに対し、計算者から反論を述べる場がほとんど提供されないことである。

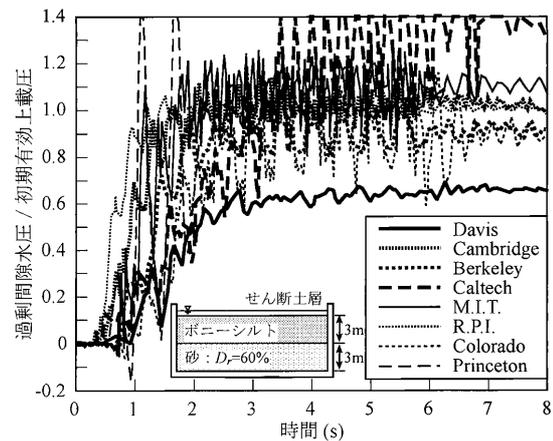
最後にもっと大きな問題がある。二番目の問題と似ているが、試験結果は本当に正しいのかという問題である。図一五は先に挙げたVELACSに先立ち行われた試験の結果であり、同じせん断土槽、同じ入力地震動、同じ砂を用いた実験を8つの機関で行ったものである<sup>32)</sup>。過剰間隙水圧の発生量はとも同じモデルの結果とは思えないほどばらついていて、また、VELACSでは提供された土質データに整合性がないという印象も持っている。

次の問題は精度の評価方法である。残念ながら地盤の地震応答に関しては共通的なものではなく、論文であれば都合の良い指標を取り出して評価しているものも多い。多様な評価があり、例えばレーダーチャートのようなもの<sup>33)</sup>で複数の指標で論じる必要があると考えている。

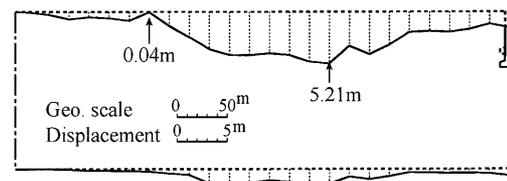
筆者はここで紹介したプロジェクトの多くに参加している。最近でも関係の委員会で同じような試みが話題になることがあるが、抑える側である。結果が違うことをあまり強調しすぎると、解析に対する信頼性が失われ、使われなくなる可能性があるからである。仮にそうとしても、例えばいくつかの対策法の比較をするような問題に対しては非常に有効である。また、多くのプログラムでは結果を合わそうと思えば可能であるので、類似の問題で良い結果が出るように調整された手法を用いれば結果はかなり信頼できるものとなる。

## 5. おわりに

地盤の地震応答解析の歴史を概観した。ただ、歴史の



図一五 異なる機関の結果の比較 (VELACS 予備試験)



図一六 護岸の変位分布

話なので、調査が漏れているところがあるかもしれないがその際はご容赦いただきたい。

現状では、単にプログラムを作るだけであれば、博士課程の学生でも作れ、実際、そのようなものと考えられるプログラムも論文にしばしば現れている。ただ、そのようなプログラムは汎用性に乏しいことやバグの心配もある。有償、無償は問わないが公開されているプログラムであればその心配は少ない。筆者も先に挙げたYUSAYUSAを改良したもの、一次元、多次元の等価線形、非線形のプログラムを無償で公開している<sup>34)</sup>。うまく利用していただけるとありがたいと思っている。

地盤の地震応答解析は地盤の挙動をとらえる以外に構造物への入力を求めるためにも用いられる。加速度応答が重要なのは言うまでもないが、最近では液状化関連では変位も重要な要因になっている。しかし、前章でも見たように変位の予測は難しいというのが筆者の感想である。ただし、前述したように、合わせようと思えば合わせることができるようになったことも事実である。

地盤調査方法も重要と考える。例えば、よく知られている川岸町アパート (1964年新潟地震で転倒、傾斜) は8棟あり、それぞれ変位量が異なっている。また、図一六は1993年北海道南西沖地震の際の函館のふ頭の変位であるが、同じ面で0.04~5.21mの変位が発生している<sup>35)</sup>。これらのすべてをきちんと予測するには相当詳細な地盤調査が必要であろう。また、原子力の分野では将来的には50 Hzまでの挙動に対するニーズがあるが<sup>36)</sup>、これも詳細な地盤調査なしでは解析できそうにない。

## 参 考 文 献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A

- Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, UCB, 1972.
- 2) Lysmer, J.: Modal damping and complex stiffness, University of California Note, UCB, 1973.
  - 3) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report No. EERC70-10, UCB, 40 pp., 1970.
  - 4) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692, 1972.
  - 5) Finn, W. D. L., Martin, G. R. and Lee, M. K. W.: Comparison of dynamic analyses for saturated sands, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, GT Special Conference, Vol. 1, pp. 472-491, 1978.
  - 6) Finn, W. D. L., Byrne, P. L. and Martin, G. R.: Seismic response and liquefaction of sands, J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT8, pp. 841-856, 1976.
  - 7) Sreeter, V. L., Wylie, E. B. and Richart, F. E.: Soil motion computations by characteristics method, J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT3, pp. 247-267, 1974.
  - 8) 吉田 望：実用プログラム SHAKE の適用性，軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 14~31, 1994.
  - 9) 萩原庸嘉・清田芳治：地盤の歪依存性を考慮したモード別等価線形地震応答解析手法 その1 理論的背景と逆応答の計算例，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 487~488, 1992.
  - 10) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No. 493/III-27, pp. 49~58, 1994.
  - 11) 末富岩雄・吉田 望：一次元等価線形解析における減衰の周波数依存性の考慮に関する一検討，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1119~1120, 1996.
  - 12) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222, 2002.
  - 13) Lysmer, J., Udaka, T., Seed, H. and Hwang, R.: LUSH-a computer program for complex response analysis of soil-structure, Report No. EERC 74-4, UCB, 1974.
  - 14) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H. B.: FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No. EERC75-30, UCB, 1975.
  - 15) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L.: Finite Dynamic Model for Infinite Media, Journal of Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877, 1969.
  - 16) Joyner, W. B.: A Method for Calculating Nonlinear Response in Two Dimensions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No. 5, pp. 1337-1357, 1975.
  - 17) Martin, P. P. and Seed, H. B.: MASH, a computer program for the non-linear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits, Report No. UCB/EERC-78/23, UCB, 1978.
  - 18) Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164, 1941.
  - 19) 吉田 望：液状化解析の基礎方程式，液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 52~59, 1999.
  - 20) Ishihara, K. and Towhata, I.: One-dimensional soil response analysis during earthquake based on effective stress method, J. Faculty of Engineering, Vol. XXXV, No. 4, The University of Tokyo, pp. 656-700, 1980.
  - 21) Siddharthan, R. and Finn, W. D. L.: TARA-2, Two dimensional nonlinear static and dynamic response analysis, Soil Dynamics Group, University of British Columbia, 1984.
  - 22) Midorikawa, S.: A statistical analysis of submitted prediction for the Ashigara valley blind prediction test, International Symposium the Effects of Surface Geology, Vol. 2, pp. 65-77, 1992.
  - 23) 竹内吉弘：地震動に与える表層地質の影響に関する総合的研究，平成4年度文部省科学研究費補助金総合研究(A)研究成果報告書，1993.
  - 24) Saada, A. and Bianchini, G. S. ed.: Proc. Int. Workshop on constitutive equation for granular non-cohesive soils, Case Western Reserve University, Cleveland, 1987.
  - 25) Finn, W. D. L., Yogendrakumar, M., and Yoshida, N.: Comparative assessment of methods for dynamic effective stress analysis, Proc. 3rd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Niagara Fall, Canada, pp. 330-339, 1989.
  - 26) 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会：地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，1989.
  - 27) 土質工学会：地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集，1991.
  - 28) Arulanandan, K. and Scott, R. F. ed.: Proc. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, 1993.
  - 29) 土木学会地震工学委員会：レベル2地震動による液状化研究小委員会活動報告書，2003.
  - 30) 地盤工学会：液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究（その2）報告書（平成14年度），2003.
  - 31) 国土技術研究センター：河川堤防の地震時変形量の解析手法，2002.
  - 32) Arulanandan, K. and Scott, R. F.: Project VELACS-Control test results, J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 8, pp. 1276-1292, 1993.
  - 33) 大矢陽介・野津 厚・吉田 望・小濱英司・菅野高広：地盤の地震応答解析の精度評価ツールとしてのレーダーチャートの提案と各種解析手法の適用限界の検証，日本地震工学会論文集，第14巻，第1号，pp. 97~116, 2013.
  - 34) 吉田 望：地震応答解析コード，入手先〈<http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/computercodes/eqcode.html>〉〈参照2015.7.1〉
  - 35) Sugano, T. and Miyata, S.: Satisfaction and dissatisfaction of port facilities designer facing to the performance based design methodology, Proc., Performance-based design in earthquake geotechnical engineering, pp. 221-225, 2009.
  - 36) 日本地震工学会，原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会：原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ，2011.
- (省略形 UCB: University of California, Berkeley, ASCE: American Society of Civil Engineers)

(原稿受理 2015.6.9)