

地盤の不均質さが地震応答に与える影響に関するケーススタディ
 A CASE STUDY ON THE EFFECT OF INHOMOGENEOUSITY OF GROUND
 ON THE DYNAMIC RESPONSE OF GROUND

吉田望*、安田進**、増田民夫***

Nozomu Yoshida, Susumu Yasuda, and Tamio Masuda

ABSTRACT

A case study is conducted to investigate the effect of inhomogeneity of the ground on the estimation of dynamic response analysis. Detailed field tests and laboratory tests were conducted to obtain dynamic properties of the site; PS logging is conducted by both downhole and suspension method, and cyclic torsional simple shear tests were conducted every 10 cm along the depth. Both equivalent and nonlinear dynamic response analyses are conducted by using ordinary model and very much detailed models. It is shown that the responses by equivalent linear and nonlinear method by ordinary model do not differ to each other, but they are fairly different with the one by very fine model.

1 はじめに

地盤は本来不均質な材料で構成されているが、地盤の地震応答解析を行う場合には地盤をいくつかの均質な層にモデル化する。それぞれの層の厚さは柱状図などから地層の分かれ目やN値の急変部などを見つけ、これらを層の境とすることで決められる。これらの層の厚さは、空間を離散化する解析手法を用いた場合には地震動の波長などを考慮してさらに細分されることはあるが、そのそれぞれに対して異なる材料特性を設定することは普通は行われない。一方、材料特性は、地震応答解析を行うようなサイトではPS検層のような詳細な地盤調査が行われることも多く、その場合には弾性定数はこの結果に基づいて決められる。詳細な地盤調査が行われない場合には、例えばN値より経験式を用いて弾性定数の値を決めるが、N値のばらつきを考慮して層分割を小さくするようなモデル化は普通には行われず、平均的なN値が用いられる。

このような弾性定数の決定方法に対する問題点はいくつか指摘されている。例えば、東畑らはN値から推定されるせん断は速度のばらつきが正規分布するとし、最大加速度の距離減衰式のばらつきを同時に考慮したパラメトリックスタディを行い、ばらつきが、特に軟弱な地盤では最大応答加速度に与える影響は非常に大きいことを示している¹⁾。また、薄井らは弾性定数の拘束圧依存性を考慮しないモデル化による応答計算の誤差をケーススタディによる示している²⁾。

国生は、PS検層としてこれまでもっとの普通に行われてきたダウンホール法による結果と、1mの間の波動伝播時間よりその区間の弾性波速度を求めるのでより詳細な弾性波速度の計測が可能なサスペンション法の結果を比べ、ダウンホール法では平均的な弾性波速度が得られるが、地盤の局所的な不整形性が求められていないことを指摘している³⁾。このような結果に基づけば、当然弾性定数のみならず非線形特性も不均質性はあるはずである。しかし、動的応答解析が要求されるようなケースでも非線形特性を細かく求めることはほとんど行われず、むしろ代表的な地層についての実験結果を他の層に適用したり、実験式を用いたりすることが多い。この意味では、非

* Head of research, Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co., Ltd.

** Professor, Department of civil engineering, Tokyo Denki University

*** Chief of Section, Tokyo Electric Power Co., Ltd.

線形特性の把握は弾性定数の把握より精度的に劣っているといえる。

このような状況を考え、筆者らは、地震震動予測の高精度化をめざし、色々な角度から地盤材料特性の把握と地震応答解析の向上をめざした研究を行うこととし、非常に詳細な地盤調査を実施し、また、その結果が反映できるような解析方法を考案してきた。本報では、ケーススタディをとおして非常に詳細な地盤のモデル化を行った場合の応答解析結果への影響について検討する。

2 検討したサイトと地盤調査、室内試験

地盤調査を実施したのは、東京湾に面する埋立地である。Fig.1に地盤柱状図を示す。ここでは、1m程度の間隔で4つのボーリングを行い、地盤構成を調べるとともに、標準貫入試験、PS検層、不攪乱試料採取など、各種の調査を行った。PS検層はダウンホール法とサスペンション法の二つを行った。サスペンション法では、通常の方法では1m間の波動の伝播時間からその区間の平均的なせん断波速度を求めるものであるが、ここではより詳細な不均質性を求めるため、20cm毎に計測を行い、それらの結果を最適に説明するせん断波速度を求めた。両PS検層の結果はFig.1に示されている。次に採取した不攪乱試料は10cm単位で切断し、供試体を作成し、動的変形試験を行った。ただし、採取した試料の端部の部分については乱れている可能性もあるので、試験は行っていない。Fig.1に示した G_{max} と h はこれらの試験から得られたものである。Fig.2には動的変形特性試験の結果をまとめて示す。

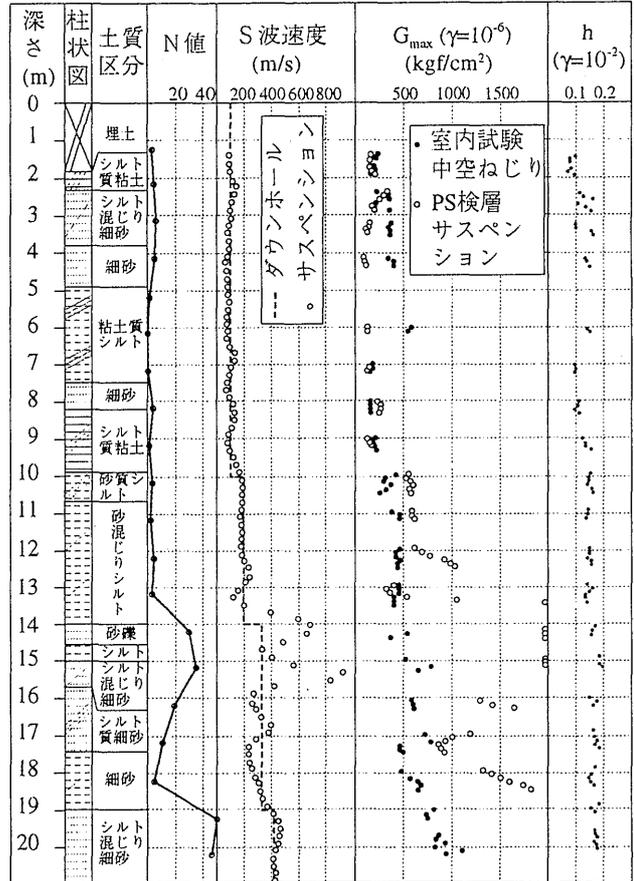


Fig. 1 Soil profile and summary of tests

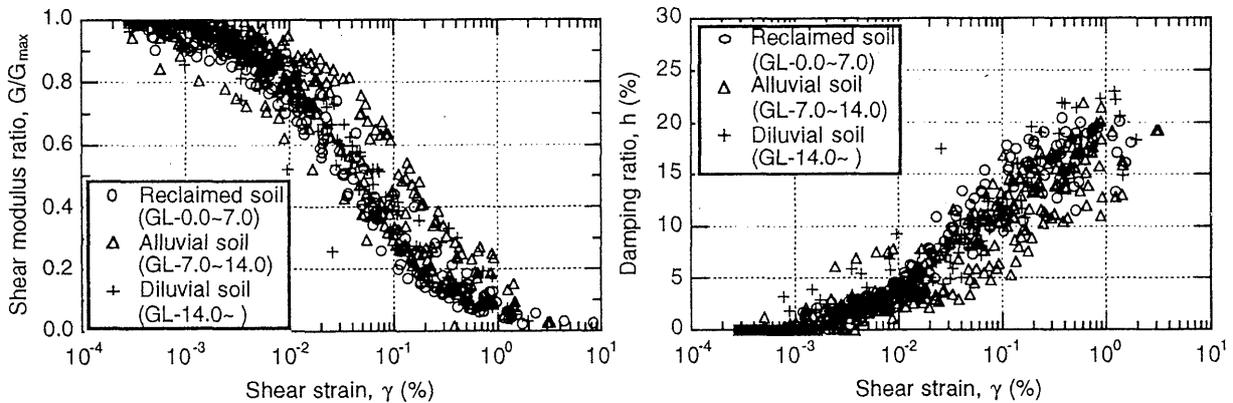


Fig.2 Strain dependent characteristics obtained by cyclic torsional test (totally 82 specimens)

ダウンホール法とサスペンション法とはほぼ同様のせん断波速度を示しているが、GL-14~16mのN値の高いところでその差が非常に大きくなっている。サスペンション法の結果はN値の変化と

よく対応している。また、サスペンション法の結果によればGL-13.5m付近から材料が変化しているようにみえるが、柱状図からは判定できない。次に、不攪乱試料を用いたにも関わらず室内試験とPS検層（サスペンション計測値）より求めたせん断剛性 G_{max} には差があるが、これはサンプリングや輸送時の乱れによるものと考えられる⁴⁵⁾。

3 解析方法

一次元の地震応答解析として最も一般的なのはSHAKEに代表される、等価線形法である。ここでも、既往の方法の代表としてこの手法を取り上げる。これと比較する詳細な解析方法として、非線形法に基づく方法を用いる。ところで、通常非線形法では応力-ひずみ関係を数学モデルで表す必要があるが、その過程でここで行ったような詳細な実験値の精度が失われてしまう。筆者らは実験で得られた応力-ひずみ関係をそのままモデルの入力と出来る多次元モデルを開発してきた⁶⁾。

筆者らのモデルはダイラタンシーを含むものであるが、本解析では、動的変形試験が、ステージテストで行われ、各ステージでは非排水条件下で行われていることから、ダイラタンシーの効果は実験結果に含まれていると考え、モデルではダイラタンシーを考慮しないとする。この条件下ではモデルの概要は次のようになる。

σ_e を相当応力、 e を相当ひずみとし、微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_{max} とせん断強度 τ_{max} を用い、応力とひずみに対して次の無次元量を定義する。

$$\eta = \frac{\sigma_e}{\tau_{max}}, \quad \xi = \frac{e \cdot G_{max}}{\tau_{max}} \quad (1)$$

式(1)の様に無次元化された応力とひずみに対し応力-ひずみ関係が $\eta = \eta(\xi)$ の様に表せ、式中に平均応力が陽な形で入っていなければ平均拘束圧に関わらず成立する式となり、扱いが簡単になる。偏差ひずみ増分の無次元量（ ξ の成分）を

$$d\xi_{ij} = \frac{de_{ij} \cdot G_{max}}{\tau_{max}} \quad (2)$$

と表し、 $g = d\eta / d\xi = g(\eta)$ を無次元化接線剛性とするれば、偏差応力増分 ds_{ij} は次式となる。

$$ds_{ij} = g d\xi_{ij} \cdot \tau_{max} \quad (3)$$

繰り返し载荷に対しても無次元化接線剛性 g が計算できるなら同じ式が使える。そこで、図-3に模式的に示すような応力平面上での、応力点の動きに対するメモリー円を考え、その半径 r と応力比との関係を次のように定義する。

$$\eta = c \cdot r \quad (4)$$

係数 c の値を1とすればよく用いられるMasing則で比例定数を2とした場合に相当する。

実験値をモデル化する方法として吉田・石原らの方法⁷⁾を多次元問題に應用する。すなわち、処女载荷に対しては、実験で得られた点を結ぶ部分線形関数を用いる。添字 i を実験値を表すとすれば、次式となる。なお、計算では実験の最大ひずみを越えると完全塑性挙動を仮定している。

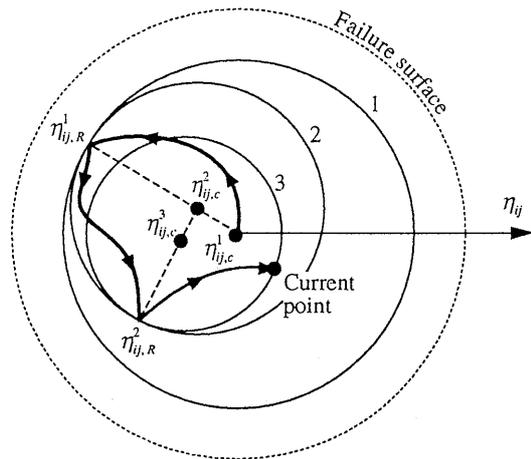


Fig.3 Memory surface under cyclic loading

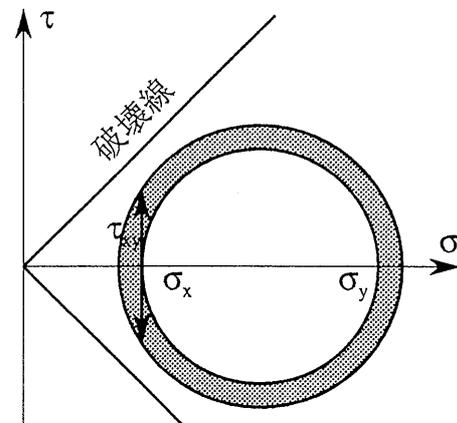


Fig.4 Schematic figure showing the initial stress state under anisotropic consolidation

$$\eta = \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\xi_{i+1} - \xi_i} (\xi - \xi_i) + \eta_i \quad (5)$$

除荷以降は、除荷点で定義される応力振幅に対し履歴曲線の吸収するエネルギーが実験で得られたものと等しくなると言う条件を満たす数学モデルを用いる。ここでは、二つのパラメータ a 、 b で定義される双曲線モデルを用いる。

$$\eta = \frac{a\xi}{b + \xi} \quad (6)$$

パラメータの値は、実験で得られた減衰特性から決められる。このような操作により得られるモデルは、応力-ひずみ関係を決定するために、与えられた実験値を全部使っており、見かけ上、実験値を完全に満たすものである。

このような多次元の構成則を一次元のモデルに使う場合、初期状態との関係で問題が生じる。つまり水平成層でも初期状態は等方圧密状態ではなく、Fig.4に模式図を示すように異方圧密状態にある。したがって、载荷の初期の剛性は初期剛性より小さく、この点でSHAKEのような解析とは挙動に大きな差がある。この例では現在の応力状態まで単調に圧密されたとしたが、過去に地震等により载荷を受けていれば初期挙動は異なったものとなる。このような状況を考慮し、ここでは、等方圧密状態状態を初期応力状態とする。ダイラタンシーを考慮しないことと合わせ、せん断変形のみを考慮した一次元解析と等価な解析をすることとなる。

4 解析モデルと解析ケース

対象地盤を次に示す4つの方法でモデル化する。モデル①：柱状図とPS検層（ダウンホール）を用いる。動的変形特性も各ブロックの一つの試験結果で代表させる。層厚1m。モデル②：モデル①と同じ層分割だが、サスペンションPS検層の結果を用い平均 V_s を補正する。モデル③：層厚を10cmとし、各層毎に実験で得られた特性を用いる最も詳細なモデル。なお、動的特性試験を行っていない部分については、柱状図を参照し、

Table 1 Analyzed model

下端深さ (m)	単位体積重量 (t/m^3)	ポアソン比	モデル①		モデル②		モデル③		モデル④	
			層数	V_s (m/s)	層数	V_s (m/s)	層数	V_s (m/s)	層数	V_s (m/s)
2	1.7	0.446	2	100	2	93.9	20	20 cm 毎	20	100
10	1.7	0.498	8	100	8	93.9	80		80	100
14	1.9	0.493	4	190	4	177.7	40		40	190
16	1.75	0.483	2	320	2	537.0	20		20	320
19	1.75	0.483	3	320	3	285.7	30		30	320
基盤	1.8	0.471		410		410		410		410
備考			標準		サスペンションの平均		動的特性も層毎に与える。		①と同じ特性	

上下の最も近い材料の値を流用する。また、せん断波速度は20cm毎に計測値を使う。モデル④：モデル③と同じ層分割だが、モデル①と同じ材料特性を用いる。このモデルは層分割の影響を調べるために用いられる。Table 1にこれらをまとめて示す。

現地では、地震観測も実施されていたが、非線形性の大きな地震記録は得られていない。小さな加速度の場合にはここで特に注目しているひずみによる非線形性以外の要因、例えば散乱による減衰などが応答結果に影響するため、大地震時の挙動とは異なることが考えられる。そこで、ここではEl-Centro 1940 N-S成分を解析基盤への入射波とする。この地震波は振幅の大きな波が最初に現れるので、このような比較には都合がよいと考えられる。実験値が最大ひずみ1%程度までしか行われていない場合もあることを考え、最大ひずみがこの範囲内で留まるよう予備計算を行い、記録波の半分が解放基盤複合波となるよう入力レベルを決めた。解析は最初の10秒について行った。

5 解析結果と考察

Fig.5は通常の層分割にしたがう二つのモデル(①、②)の最大応答値を比較したものである。両モデルの違いは、①がダウンホール法によるせん断波速度、②がサスペンション法によるせん断波速度の相互の平均値を用いている事である。Table 1およびFig.1に示されるように、両者の差は大きくなく、したがって同じ等価線形手法を用いた実線と点線の結果には加速度(α)、変位(δ)とも大きな差はない(地表加速度、変位で4%)。最大せん断応力(τ_{max})ではその差は少し大きくなるが、それでもその差は最大で11%程度である。

一方、モデル①に対して非線形法と等価線形法では、本解析では最大変位についてはほとんど差がなかった(地表で2%)。しかし、最大加速度では両者の差は大きく、地表で25%、最も差の大きいGL-8mでは37%もあり、等価線形法による応答値が大きくなっている。

このような傾向はある意味では当然といえる。すなわち、等価線形法では最大せん断ひずみに係数(この計算では0.65)を書いた有効ひずみを用いて計算に用いる剛性を計算するため、非線形法と等価線形法でひずみが同じなら等価線形法のせん断応力は大きくなり、したがって最大加速度も大きくなるからである。

この地盤ではGL-10m以浅が軟弱な地盤であるので、このような手法に起因する誤差はこの部分で最も大きくなる。しかし、このような性状の差は応答特性にも影響を与えている。このため、GL-10m以深でも応答値に差が生じているのは着目に値する。

次に、Fig.6では不均質性の影響を比較している。ここでは、動的試験と対応させるよう、層厚を10cmとし、計190の層にモデル化した地盤を解析している。図の実線で示したのはFig.5の非線形解析の結果で、地盤のモデルは通常の方法によっている。これに対して、波線(モデル④)は細分化したモデルであるが、材料特性はモデル①と同じものを用いている。両者の結果は図上では判別できないぐらい一致しており、層分割の解析結果への影響はないことを示している。

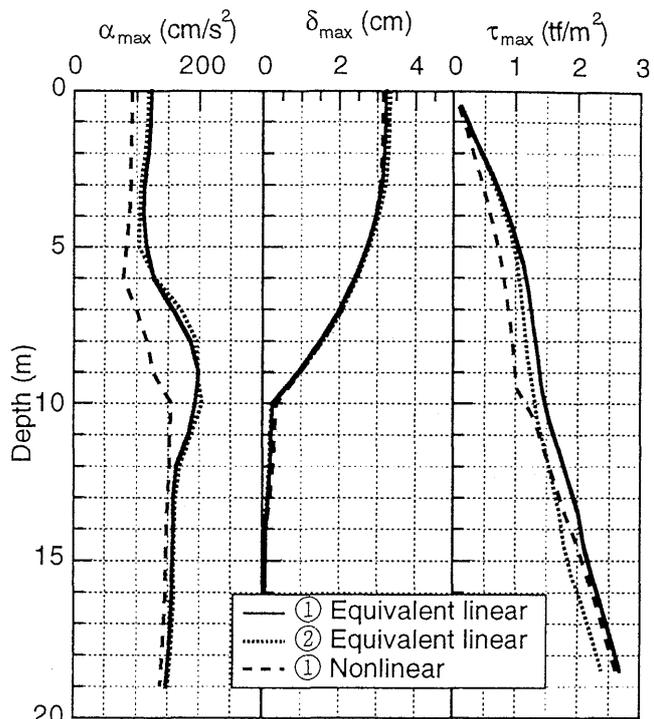


Fig.5 Comparison between nonlinear method

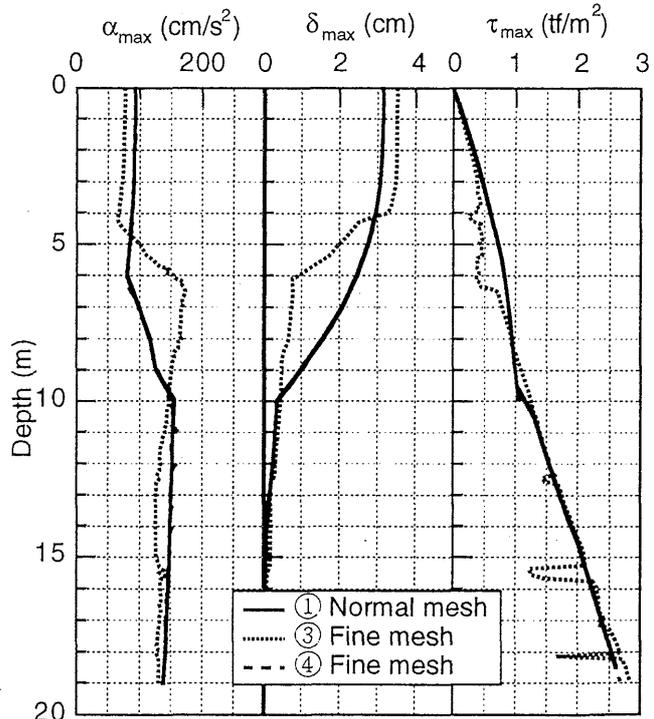


Fig.6 Comparison with detailed analysis

これに対し図の点線（モデル③）は動的変形特性は、サスペンションPS検層と動的変形実験の結果を反映させ、各層毎に異なる材料特性を与えたものである。応答値はモデル①と比べて大きな差がある。

差の最も大きい部分はGL-6～10mの部分で、モデル①、④では加速度が低減し、変形が大きくなっている部分である。これに対し、詳細モデル③では加速度は増幅し、変位もあまり大きくなっていない。この原因は、材料特性のモデル化に起因している。

標準モデルで（モデル①）では、せん断波速度がGL-10mまで100m/sと一定であることから、非線形特性も同じとし、GL-3m程度の層の実験値を用いている。現位置の状況、実験結果より判断すると、この地盤ではGL-7mを境に埋土と原地盤（沖積層）に分かれているようである。Fig.7にFig.2の結果のうち表層の10mについて1mごとに代表的な試験結果を選び示したものであるが、GL-7mを境に動的変形特性にかなり大きな差があり、深い部分の方が剛性が高い、すなわち劣化しにくいことが分かる。標準モデルではこのような特性が捉えられていなかったことが両者の差を生じさせた原因である。このような大きな差以外に、詳細モデルでは局所的に応答値にかなりばらつきがある部分があり、かなりの部分を均質としたモデルが非常になめらかな応答をしているのと対照的である。

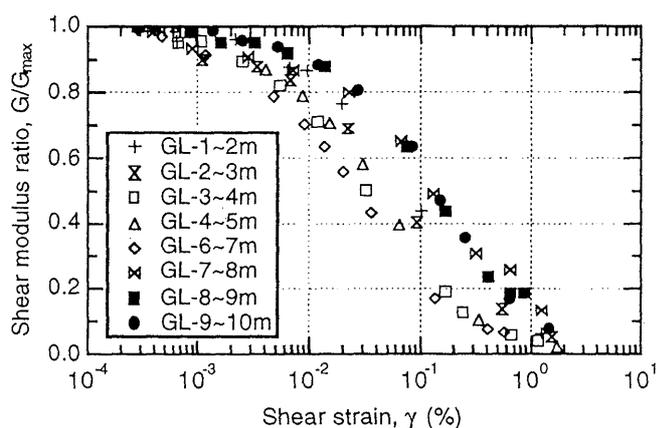


Fig.7 Shear modulus ratio at soft soil

6 結論

非常に詳細な地盤調査、室内試験を行い、地盤の動的変形特性を求め、またこのような詳細な実験結果が反映できるような解析方法を開発し、地盤の不均質性が地震応答解析に与える影響を検討した。一例の計算のみではあるが、次のような結論が得られた。

- ①等価線形法と非線形法では応答値が異なり、等価線形法では最大加速度、最大せん断応力を大きめに評価する。
- ②材料特性を同じにするのであれば、層分割の程度にはよらず同様の結果が得られる。
- ③弾性特性、非線形特性の評価の違いが地震応答解析結果に大きく反映される。非線形特性のモデル化は特に慎重に行う必要がある。

本研究は、（財）地震予知総合研究振興会「地盤震動解析法の高精度化に関する研究」の一貫として行ったものである。

- 参考文献
- 1) 東畑郁生, Ronteix, S.: N値から推定したVSの誤差が地震応答解析結果に及ぼす影響、第23回土質工学研究発表会講演集、昭和63年、pp.825-826
 - 2) 薄井治利, 風間基樹, 稲富隆昌: 初期せん断剛性の拘束依存性が等価線形地震応答解析結果に及ぼす影響について、地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム、土質工学会、平成元年、pp.219-224
 - 3) 国生剛治、地盤の動的特性、講座・地盤と構造物の動的相互作用の解析法、土と基礎、Vol.40, No.4, pp.76-84, 1992
 - 4) Kokusho, T.: In-situ dynamic soil properties and their evaluation, Proc., 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto, Vol. II, pp.215-240, 1987
 - 5) Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, 生産技術研究所報告、東京大学、第37巻、第1号、pp.1-136, 1992
 - 6) 吉田望, 辻野修一: 多次元解析に用いる簡易な構成則、第28回土質工学研究発表会平成5年度発表講演集、1993、pp.1221-1224
 - 7) 吉田望, 辻野修一, 石原研而: 地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp.1639-1640, 1990