

地盤の地震時挙動における動的解析手法の適用に関する研究

研究予算：基盤研究

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：地質・地盤研究グループ土質・振動チーム

研究担当者：佐々木哲也，谷本俊輔

【要旨】

地震動特性は表層地盤の非線形増幅特性の影響を強く受けるため、各種構造物の耐震性評価を行う上では、個々のサイトの特性を適切に考慮することで、合理化を図ることができる可能性がある。また、深い基礎や地中構造物の耐震性を評価する上でも、表層地盤の動的応答特性を適切に評価することが必要となる。近年では、こうした様々な目的の下に、地盤の動的解析が行われる場面が増えてきている。本研究では、こうした目的の下で行われる地盤の動的解析手法を検討対象とし、ひずみレベルを指標とした調査・試験法、解析手法の選定に関する考え方を示すとともに、パラメータ設定方法について提案を行った。

キーワード：非線形増幅特性，動的解析，全応力解析，有効応力解析，繰返し変形特性試験，液状化試験

1. はじめに

地震動特性は表層地盤の非線形増幅特性の影響を強く受けるため、各種構造物の耐震性評価を行うにあたり、個々のサイトの特性を適切に考慮することで、合理化を図ることができる可能性がある。また、深い基礎や地中構造物の耐震性を評価する上でも、表層地盤の動的応答特性を適切に評価することが必要となる。近年では、こうした様々な目的の下に、地盤の動的解析が行われる場面が増えてきている。特に、既設構造物の耐震性評価においても、個々の条件の違いを適切に反映した慎重な評価が求められるため、その上でも地盤の動的応答特性を適切に評価することは常に工学的関心の一つであり、今後もますます動的解析のニーズが増していくものと考えられる。

一方で、表層地盤を構成する土の力学特性は著しく非線形であることから、その度合いが強くなるほど動的応答特性の評価は難しくなり、解析手法やパラメータの選定、さらにはそのための基礎情報を与える地盤調査・室内試験の結果のわずかな違いによっても、大きく異なる解を与えることがある。このため、動的解析によって地盤の動的応答特性を評価するために、どのような調査・試験を行う必要があるか、どのようなモデルを選定すべきか、調査・試験結果の何に注目してモデル化を行うべきかが重要となるが、こうした点は個々の技術者の裁量に委ねられているのが現状である。

本研究では、表層地盤の動的応答特性を評価するための動的解析手法について、地盤のひずみレベルを指標として各種調査・試験方法、解析手法の選定に関する考え

方を整理して示すとともに、パラメータ設定方法を提案した。

2. 地盤の動的解析の目的

地盤の動的解析の実施目的は多様であり、地盤の動的挙動の何に注目するかについても、目的に応じて異なる。この点について最初に整理する。

(a) サイト特性を考慮した入力地震動の設定

東海・東南海・南海地震など、ある特定の震源で発生する地震による地震動波形が工学的基盤面で推定されている場合がある。このような特定の地震に対する構造物の耐震性評価を行う際には、個々の地点における表層地盤のサイト増幅特性を考慮し、地表位置での入力地震動を評価するために、地盤の動的解析が行われる。この場合、地表面における加速度とその周波数特性の適切な評価に主眼が置かれる。ただし、構造物の固有振動特性が個々に異なることから、着目される周波数帯は場合によって異なる。

(b) 地中構造物や深い基礎の耐震性評価

地中構造物や深い基礎（杭基礎、柱状体基礎など）の地震時挙動には、地震動によって生じる地盤の動的な変形量が影響を及ぼす。これを構造物の耐震性評価に取り込むことを目的として、地盤の動的解析が行われることがある。この場合、地盤振動変位とその深さ方向分布（各地層のせん断ひずみ）の適切な評価に主眼が置かれる。

(c) 液状化判定

実務的に行われる簡易な液状化判定法では、地震時

に発生する地中せん断応力比と繰返しせん断強度比の比較によって、液状化の発生有無の判定がなされる。地震時の地中せん断応力については、地表の水平震度 k_{hg} と深さ方向の低減係数 r_d により簡易に算出される場合がほとんどであるが、地震動特性やサイト特性を踏まえてこれらをより慎重に評価することを目的として、地盤の動的解析が行われる場合がある。この場合、各層に生じるせん断応力の適切な評価に主眼が置かれる。

上記のように解析結果の着目点に違いがあるものの、いずれの場合においても、表層地盤を水平成層状とみなした次元モデルに対する動的解析が行われる。本研究では、次元地震応答解析手法を検討対象とする。

その他、地震時における地盤や土構造物の残留変形量を評価するために多次元モデルを用いた動的解析が行われることもあるが、これについては本研究では対象とされていない。

3. 土の力学挙動と計算モデル、調査・試験法の適用性

3.1. ひずみレベルごとの土の力学挙動

土の材料非線形性はひずみレベルによって異なる様相を呈するため、これに応じて解析手法を選定する必要がある。

ある。また、地盤調査・室内試験は、適切な解析の実施のために必要な情報を提供することを目的として実施するものであるため、その手法の選定においても、ひずみレベルに応じた力学挙動の違いを念頭に置く必要がある。

一例として、豊浦砂に対して実施した繰返し中空ねじりせん断試験の結果を図-1に示す。これは、1ステージあたり5サイクルずつの繰返しせん断をひずみ制御（ひずみ振幅を一定として繰返し与える载荷方法）で与えたものであり、排水条件あるいは非排水条件下（ステージ間排水なし）で繰返しせん断を与えた全サイクルの試験結果をプロットしている。

せん断ひずみ $\gamma = 2 \times 10^{-5}$ までの間はせん断剛性比 $G/G_0 \approx 1.0$ であり、土は概ね線形弾性体に近い挙動を示す。しかし、 $G/G_0 \approx 1.0$ を示すひずみの範囲は非常に狭いため、いわゆるレベル1地震動のように中小規模の地震動に対しても、土の力学挙動は線形弾性と見なせる範囲を超える。したがって、工学的な関心がこの領域にとどまることはない。

この範囲を超えると、土の力学挙動に非線形性が顕在化し始め、 G/G_0 が低下し始めるとともに、せん断応力 τ ・せん断ひずみ γ 関係が紡錘型のループ形状を示すようになる。ただし、排水条件や繰返し回数によるループ形状の違いは小さく、挙動の非定常性は強くない。図-1では

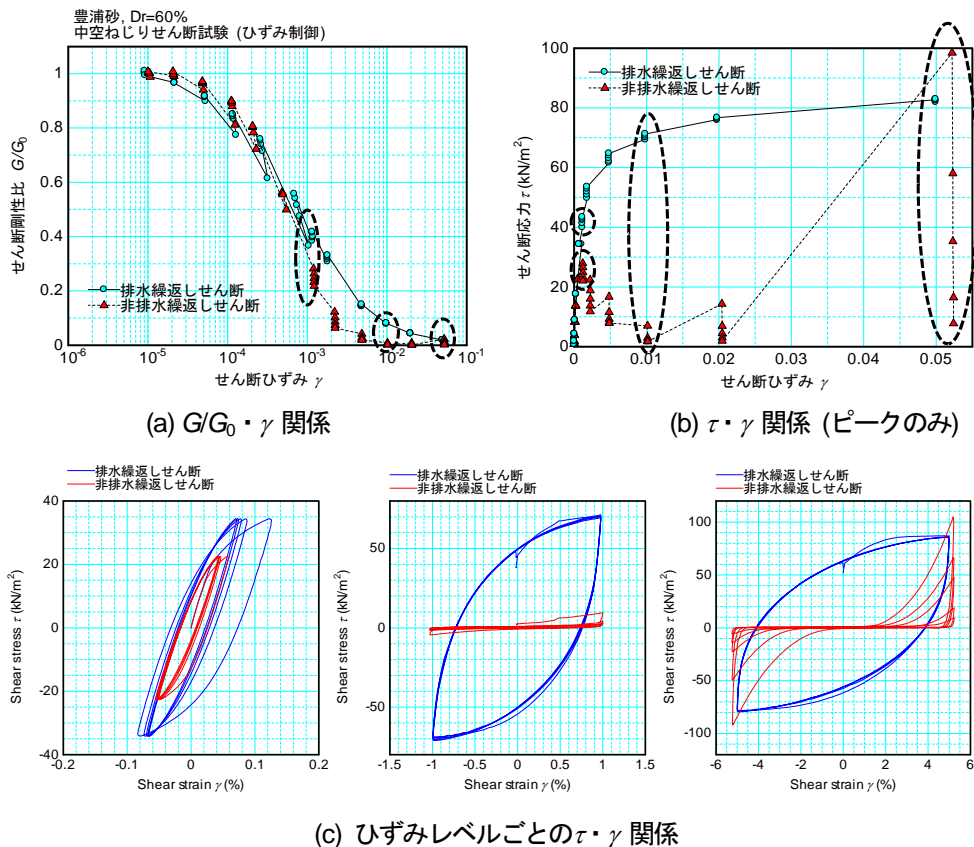


図-1 砂の典型的な繰返しせん断挙動

$\gamma=0.1\%$ のデータがその典型である。

さらに大きなひずみレベルに至ると、排水条件による挙動の違いが顕著となり、特に非排水条件の場合は繰返しせん断回数によって剛性低下の度合いが大きく変化するとともに、 τ ・ γ 関係は逆S字型の複雑なループ形状を示す。つまり、この領域における土の力学挙動は極めて強い非線形性、非定常性を示す。地震中の短時間では、多くの場合、上昇した過剰間隙水圧が消散することができないため、非排水条件に近い挙動を示すと考えられている。

大別すると、概ね線形挙動を示す範囲、非線形ではあるものの定常的な挙動を示す範囲、著しい非線形性とともに非定常な挙動を示す範囲が存在する。本研究では便宜的に、これらをそれぞれ小ひずみ域、中ひずみ域、大ひずみ域と呼ぶこととする。ただし、あくまでも概念的・定性的な区分であり、各々の領域の境界となるひずみの大きさは土の物理特性や応力状態等によって異なる。

ひずみレベルに応じた材料挙動の違いは、解析モデルや地盤調査・室内試験方法を適切に選定する上で重要となる。

3.2. 土の力学挙動と構成モデル

次に、ひずみレベルに応じた構成モデルの適用性について考察する。

小ひずみ域については、材料定数が適切に把握されていれば、それをモデル化すること自体は容易であることから、中ひずみ域、大ひずみ域について述べる。

3.2.1. 中ひずみ域

中ひずみ域では、 τ 、 γ のピークが排水条件や繰返し回数とは無関係に概ね一意的な関係を有することから、 τ 、 γ の最大応答値が一对一に対応すると仮定することができ、いわゆる全応力モデルにおける骨格曲線ではこれを近似することが行われる。また、除荷、再載荷のように、過去の最大応答値よりも小さな応力、ひずみの範囲における履歴曲線も、骨格曲線との相似性を仮定する Masing 則等によって表現できることが知られている。

ただし、全応力モデルでは原理的に、サイクリックモビリティ（正のダイレイタンスによる有効応力の回復とそれに伴う大きなせん断応力の発揮）や繰返しせん断による挙動の非定常性を表現することができない。したがって、必然的にひずみレベルに応じた適用限界が存在すると考えられる。

3.2.2. 大ひずみ域

大ひずみ域については、 τ 、 γ の最大応答値は繰返し回数によって変化するため、全応力モデルにおける骨格曲

線の概念を導入することが難しくなる。したがって、計算モデルにおいても、繰返し回数による挙動の変化を計算モデルで表現することが必要となり、有効応力に基づく構成モデルの適用が必要となる。ただし、図-1 に示すような複雑な挙動をモデル化することとなるため、構成モデルは全応力モデルのように単純なものとはなり得ない。

有効応力モデルにおける材料パラメータの設定では、一般に、液状化試験結果を数値計算で再現し、一定の再現性が得られるようにパラメータ群を調整して設定することが行われる。しかし、液状化試験では複数パターンの応力振幅に対して、繰返しせん断回数に応じた過剰間隙水圧の累積、ひずみの発展の状況が測定・記録されるが、その全てを再現できるような材料パラメータの組合せを見出すことが困難な場合が多い。このため、ひずみの発達速度は再現できなくても幅広い応力振幅の範囲に対する液状化強度曲線の再現性を重視する、あるいは、液状化強度曲線の勾配は再現できなくても着目する応力振幅、繰返し回数（例えば、地殻内地震の場合は大振幅・小サイクル域）でのひずみの発達速度を重視するなど、個々の技術者が様々な判断を加えてパラメータを設定することが行われる。このため、有効応力モデルを用いた解析に結果に個人差が生じることは避けがたい。この点は、今後解決していくべき課題である。

3.2.3. 構成モデルの選定

このように、土の力学挙動は着目するひずみレベルが大きくなるほど複雑となるため、材料応答を表現する構成モデルには多様な表現能力が必要となる。一方で、構成モデルの表現能力が高くなるほど材料定数の種類が多くなるため、その設定方法に一意性がなくなり計算結果に個人差が生じやすくなることや、計算結果の解釈、検証が難しくなるという問題が生じる。このため、着目するひずみレベルに応じて構成モデルを使い分けるといった実務運用がなされている。

しかし、構成モデルをどのように使い分けべきであるかが不明確となっている現状があり、明確化していくべき課題として挙げることができる。

3.3. 地盤調査・室内試験方法

3.3.1. 小ひずみ域

小ひずみ域の力学特性であるせん断弾性係数 G_0 は、中ひずみ域、大ひずみ域のモデル化を行う上での基本となる重要な材料定数である。 G_0 の評価手法には、ボーリング孔内で行われる原位置速度検層と、原位置からの採取試料に対して室内土質試験（三軸試験等）がある。

しかし、せん断弾性係数 G を室内試験で評価する場合、試料採取時の乱れの影響や、供試体端面と載荷装置（キャップ、ペダスタル）の接触状態の不完全性（ベディングエラー）を受けやすいことから、精度の高い値を得ることが難しい。図-2 は土木研究所にて収集した幅広い粒度、密度を有する 349 試料の土について、PS 検層と室内試験による G_0 を比較したものである¹⁾。ここで、沿え字の F, L はそれぞれ原位置試験、室内試験を意味する。本来は両者が一致すべきであるが、 G_{0F}/G_{0L} の平均値は 1.417 であり、原位置試験の方が大きな値を示す傾向が認められる。また、変動係数 36.6%、最大値 3.630、最小値 0.571 とばらつきが大きい。室内試験には上記のようなばらつきの要因が存在することから、原位置試験による測定精度の方が高いと考えられている。

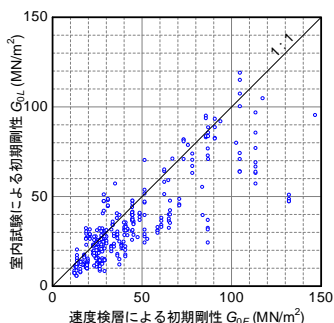


図-2 原位置速度検層、室内試験による初期せん断剛性 G_0 の違い

表-1 速度検層の種類と適用性

	ダウンホール方式	孔内起振受振方式
不飽和層への適用性	可	不可
ケーシング区間への適用性	可	不可
孔壁の乱れの影響	受けにくい	受けやすい
波動伝播距離の誤差	適切な深度管理により回避できる	なし
地震計の方位誤差	補正が必要	なし
走時の連続性(読み取りやすさ)	連続的	不連続
深さによる適用限界	地表からの打撃エネルギーが伝達する範囲まで	なし
硬質層への適用性	不適	可

原位置で行われる速度検層には、主な方法としてダウンホール方式、孔内起振受振方式（サスペンション方式）がある。これらの適用性について表-1 に整理する。

ダウンホール方式による速度検層では、受振器をボーリング孔の所定の深度に密着して測定を行う。問題点としては、①地表からの打撃エネルギーの伝達範囲に限界

があり、特に岩盤等の硬質な地層への適用が困難であること、②受振器の測定深度を変更する際に受振器が平面的に回転するため、受振器の設置方位が不明であること、③測定深度の厳密な管理が困難であることが挙げられる。①は原理的な問題であるため避けたいが、沖積層では一般に 30~50m 程度の範囲までは測定することができる。②については、一般的な受振器では水平 2 成分の加速度の測定がなされるため、測定データの平面軌跡から方位誤差の補正を行うことによって対処することが可能である。また、③についても受振器の設置深度を注意深く確認しながら設置することで、誤差を軽減することができる。むしろ、受振器をボーリング孔に密着させた状態で測定を行うため、孔内水位が浅くても測定可能であること、孔壁の乱れの影響を受けにくいこと、保孔のために設けられたケーシング内であっても測定可能であるなど、利点も多い。また、ダウンホール方式による速度検層の結果は地層ごとの区間速度として整理されるのが一般的であるが、図-3 のように 1m ごとの区間速度を得ることも可能である。この例では、 V_s の増減傾向が地層や N 値の深さ方向分布とよく対応しており、かつ、上記②に関する補正を行うことで、GL-3~4m における V_s 分布の極端な凹凸が解消されていることが分かる。

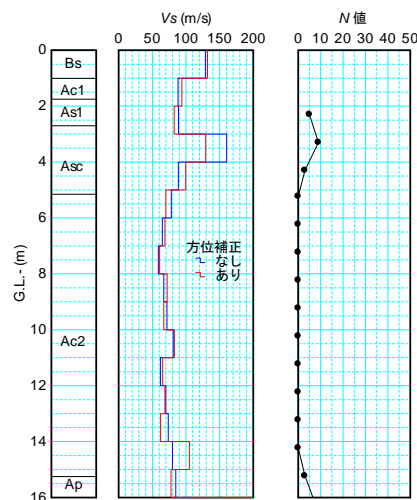


図-3 ダウンホール方式の速度検層により得られた 1m 間隔での区間 S 波速度

孔内起振受振方式による速度検層では、受振器がボーリング孔内に浮遊した状態で、孔内水を介して孔壁沿いの波動伝播速度を測定する方法である。ゾンデに発振器と 2 つの受振器が設置され、それらの間の距離が固定されているため、測定可能な深度に限界がないこと、測定方位と測定区間長に関する誤差が混入し得ないことが利点として挙げられる。一方で、測定原理より、孔内水位

以浅への適用が不可能であること、測定データが孔壁の乱れの影響を受けやすいこと、保孔のためのケーシング内で測定することが不可能なことが難点として挙げられる。

一般的には、孔内起振受振方式による精度が高いと理解されていると考えられるが、表層地盤の増幅特性の評価対象は数十 m 以浅で比較的軟弱な地盤が多いことから、ダウンホール方式の適用性が高い場合が多い。

3.3.2. 中ひずみ域

中～大ひずみ域の力学挙動については、原位置で直接的に評価することが容易でないため、室内土質試験によって評価される。

中ひずみ域の力学挙動については、剛性低下率 G/G_0 、履歴減衰 h とせん断ひずみ γ の関係を調べるための試験法として、土の繰返し変形特性試験が行われる。この試験はほとんどの場合、非排水条件で 11 回の繰返しせん断を与え、排水によって過剰間隙水圧を消散させた上で次の载荷ステージに進む、という手順で行われる。このうち、この試験で载荷ステージ間に排水を行う手順については、地震中に土が概ね非排水条件に近い条件で繰返しせん断を受けるといった境界条件と対応しないため、妥当性について多くの議論がある。

また、土の繰返し変形特性試験は応力制御（応力振幅を一定として与える载荷方法）で行われる場合がほとんどである。図4は、応力制御およびひずみ制御で行った繰返し変形特性試験による $G \cdot \gamma$ 関係を $\tau \cdot \gamma$ 関係に換算（ $\tau = G\gamma$ ）したものである。応力制御の場合、全サイクルにわたって測定データを概ね近似する骨格曲線を設定することもできそうに見える。しかし、これは人為的に設定した τ を一定とする試験条件が原因となってそのように見えているにすぎない。ひずみ制御の場合はひずみレベルが大きくなるほど 1 サイクルごとのせん断応力の差異が顕著であるため、全サイクルのデータを通過するように全応力モデルの骨格曲線を設定することは困難である。このように、応力制御による試験結果のみからは、見かけ上、全応力モデルにおける骨格曲線の形状に比較的近いデータが得られているだけである可能性があり、注意が必要である。

採取した原位置試料に対して、想定する不規則な地震動波形を繰返し与える試験を行えば、適切な τ , γ の最大値を得ることができるかもしれないが、想定する地震動に応じた数量の試験を行う必要が生じるため、容易でない。このような状況に鑑みると、土の繰返し変形特性試験方法の適用範囲は、力学特性が排水条件や繰返し回数に強く依存しない範囲、つまり、中ひずみ域に限定すべ

きであると考えられる。ただし、それに対応するひずみレベルの目安を明確化することが課題の一つとして挙げられる。

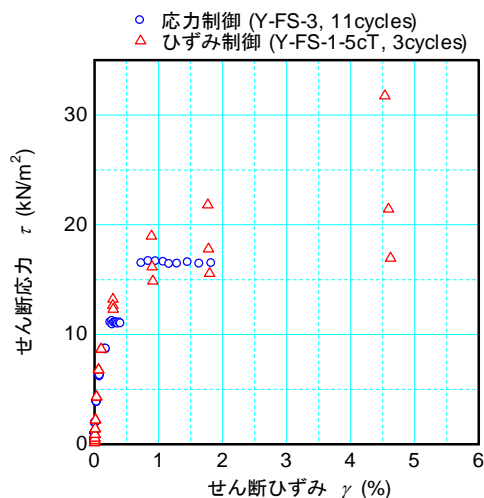
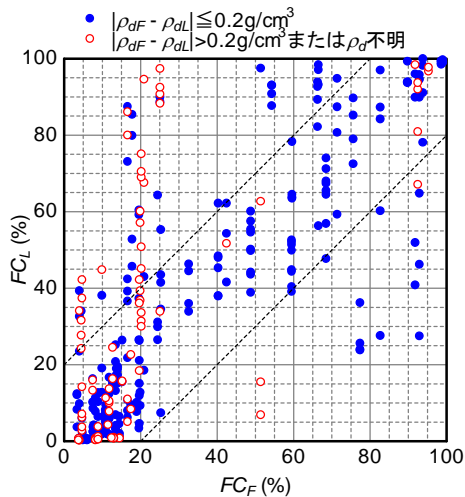


図4 応力制御、ひずみ制御による繰返し変形特性試験で得られた $\tau \cdot \gamma$ 関係

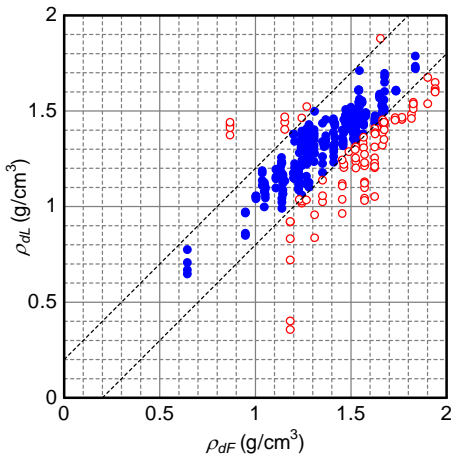
3.3.3. 大ひずみ域

大ひずみ域の力学挙動については、非排水条件下で一定振幅の繰返しせん断応力の作用に対する過剰間隙水圧、ひずみの進展を把握するための試験法として、いわゆる液状化試験が適用される。ただし、この試験の結果については、試料採取時の乱れが大きな影響を与えること、1 試料の試験に必要な 4 供試体が地盤材料の空間的ばらつきによって必ずしも同一でないことを念頭に置き、慎重に評価することが必要となる。

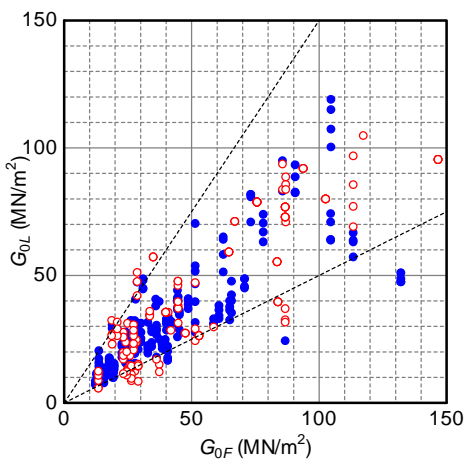
図5に、原位置と室内液状化試験による細粒分含有率 FC 、乾燥密度 ρ_b 、初期せん断剛性 G_0 を比較する。液状化試験については、1 試料あたり 4 供試体全てについて試験を実施した結果である。採取された試料の中から粒度組成が比較的類似していると考えられる 4 供試体を選定したが、それでもなお 4 供試体の FC が著しく異なる場合がある。また、 ρ_b , G_0 の差異には試料採取時の乱れの影響が関与しているものと考えられる。原位置採取試料に対する試験を行う上では、こうした観点から異常値を除外し、適切なデータのみを選別して使用することが重要である。また、液状化試験に供した 1 試料 4 供試体の全てについて粒度試験が行われることは少ないが、データの品質に関する判断材料を得るためにも、全供試体について物理試験を行うのが望ましい。



(a) 細粒分含有率 FC



(b) 乾燥密度



(c) 初期せん断剛性 G_0

図5 原位と液状化試験供試体での物理・力学特性の差異

また、一定の応力振幅で繰返しせん断を行ったつもりでも、ひずみレベルが大きくなるにつれて応力振幅が

徐々に小さくなることがある。これは、 荷重装置の制御精度に起因するものであるが、 所定の繰返しせん断履歴が作用していない試験データから液状化強度曲線の評価するのは適切でないことから、 異常値として除外することが必要となる。 こうした観点からも、 試験データを十分に吟味する必要がある。

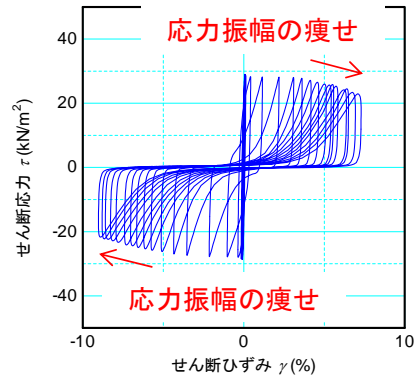


図6 液状化試験における応力振幅の痩せ

4. 解析対象とした強震記録

2011年東北地方太平洋沖地震では、軟弱粘性土地盤における鉛直アレー観測地点において、貴重な記録が得られた。その観測地点は、宮城県北部に位置する山崎震動観測所²⁾である。本研究では、この記録を対象として動的応答特性を評価するとともに、動的解析手法の検証を行った。

4.1. 観測点の概要

山崎震動観測所は、鳴瀬川水系吉田川の河口から16.1kmの右岸(宮城県大郷町山崎地先)に設置された観測点であり、品井沼干拓地の縁端部に位置する。実地震による河川堤防の動的応答特性を明らかにすることを目的として設置されているため、後述のように、地震計は1断面の堤防の天端、小段、小段-22m(地中)の3点に設置されている。なお、「小段」と「小段-22m」は計測箇所に付された正式な名称であるが、実際の計測箇所は堤防のそれぞれ裏のり尻の地表部とその地中部である。

本地点では、地中地震計を設置した際のボーリング(H10B-1)の他、東北地方太平洋沖地震の後に、物理・力学特性の把握を目的としたボーリングが天端(H25-No.1)、裏のり尻(H25-No.3)にて実施され、標準貫入試験、乱れた試料の採取および物理試験、速度検層が行われている。これらの柱状図を図7に示す。図中の $SPT-N$ 、 V_s 、 w_n 、 FC 、 SC 、 GC はそれぞれ標準貫入試験 N 値、 S 波速度、自然含水比、細粒分含有率、砂分含有率、礫分含有率を表している。

表層地盤は、れきを混入する砂による盛土 (Bs), 所々に有機物を混入するシルト (Ac1), 所々にシルト質細砂を挟みや不均質でゆるい砂 (As1), 細礫, 有機物, 木片等を混入し, 不均質性の高いシルト~砂の互層 (Asc), 軟弱で比較的均質なシルト (Ac2), 所々に細砂を挟む有機質シルト (Ap), 半固結状の細砂~砂岩 (BR) から成る。なお, Ac2 層については, 所々に貝殻片の混入が認められること, 自然含水比 w_n が 100% 以上と大きな値を示していることから, 海成粘土であると見られる。S 波速度 V_s に着目すると, 最下部の細砂~砂岩で概ね 400m/s を超えるのに対し, 表層地盤の主体を成す軟弱粘性土層 Ac2 で 100m/s 前後と小さな値を示し, これらが著しい速度コントラストを有しているのが特徴的である。また, 軟弱粘性土層 Ac2 から, その上位で複雑な互層状を呈す

る Ac1~Asc や盛土 Bs に向かって V_s が逆転する速度構造を有している。

周辺で実施されたボーリング調査等から推定した地質断面図とあわせて地震計配置を図-8 に示す。

4.2 解析対象とした記録

東北地方太平洋沖地震の記録を図-9, 図-10 に示す。実際には 655 秒間にわたる記録が得られているが, ここには記録開始から 200 秒間を拡大したものを示している。水平・鉛直成分ともに, 小段-22m から小段まで伝播する際に, 加速度が著しく増幅しており, 軟弱粘性土地盤であるにもかかわらず, 1G に近い PGA が観測されている。加速度応答スペクトルからは, 天端および小段の記録がレベル2地震動 (タイプI) に匹敵する強度を有している

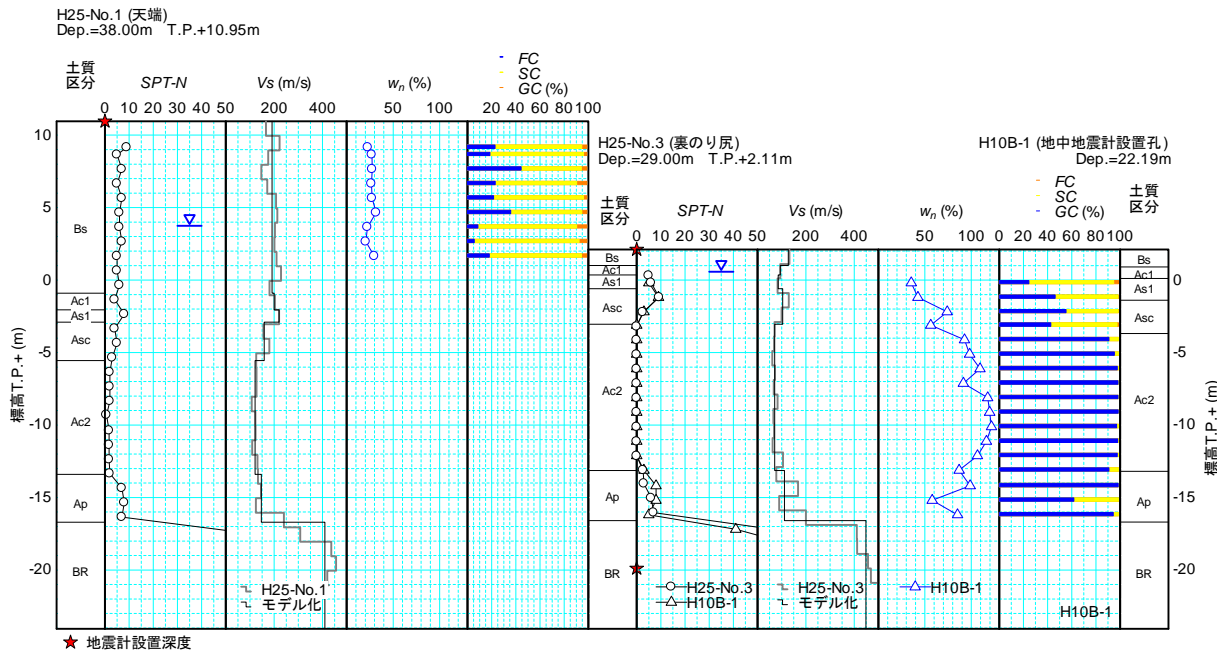


図-7 土質柱状図

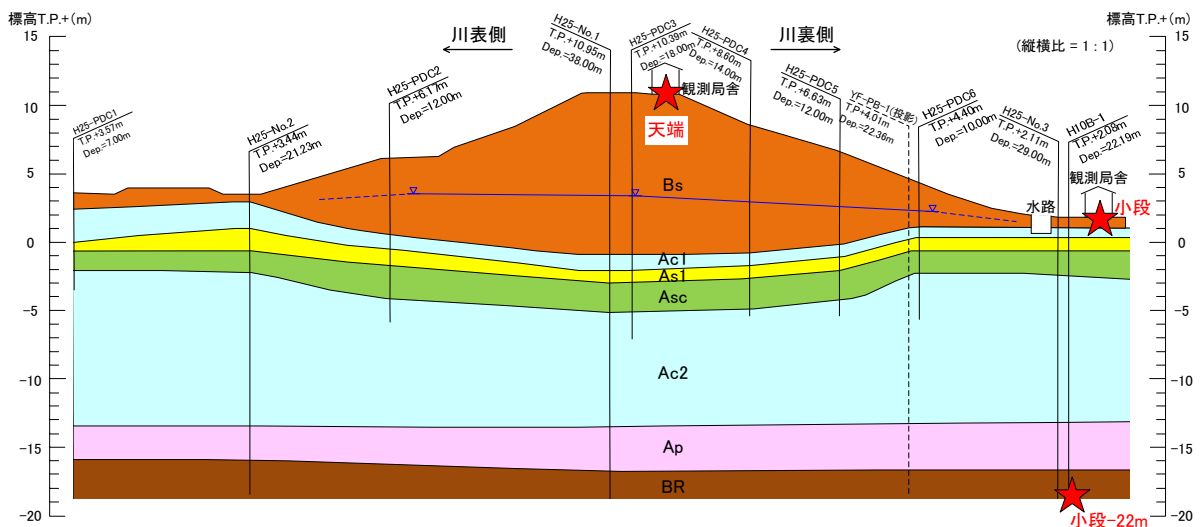


図-8 地質断面図および地震計配置

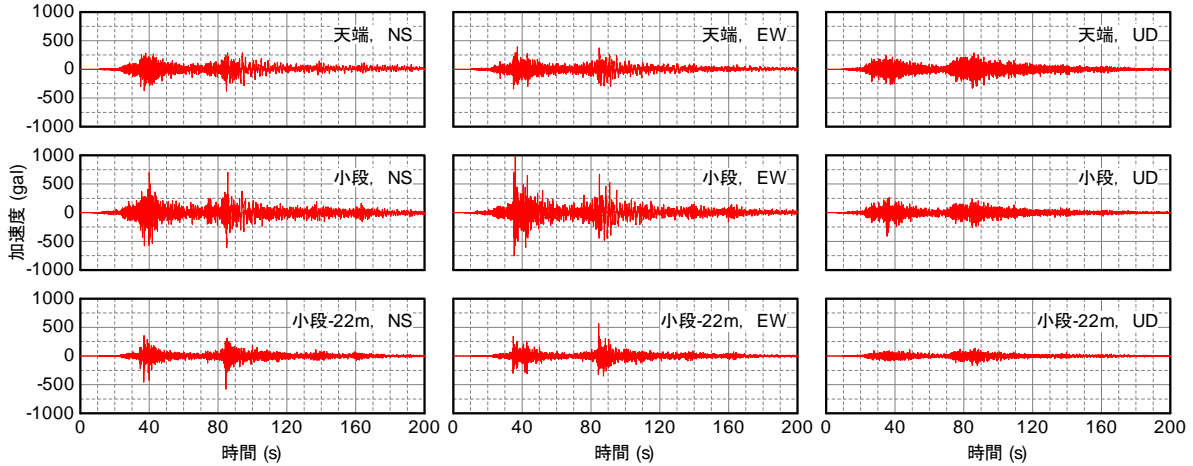


図-9 山崎震動観測所で得られた東北地方太平洋沖地震の記録 (小段-22m は設置方位誤差を補正)

ことが分かる。

本研究では、小段-22m から小段の間における表層地盤の非線形増幅特性に着目して解析を行った。

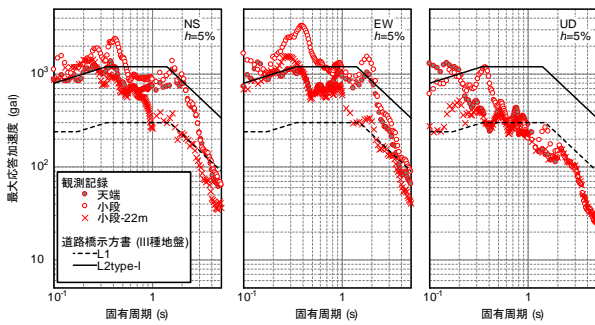


図-10 加速度応答スペクトル

5. 観測記録に基づく動的応答特性の評価

動的解析に先立ち、観測記録の波形処理解析を行うことで、本サイトの動的応答特性を評価した。

5.1. 小ひずみ域における固有振動特性

まず、本サイトの基本的な増幅特性を調べるため、小段における $PGA = 5 \sim 30 \text{ gal}$ 程度の 13 記録 (以下、小地震記録という) を対象に、小段 / 小段-22m に関する振幅比と位相差を求めた。小段-22m、小段で 1 回の地震により得られた加速度時刻歴 $\ddot{x}(t)$ 、 $\ddot{y}(t)$ のフーリエスペクトルをそれぞれ $\ddot{X}(\omega)$ 、 $\ddot{Y}(\omega)$ とすると、振幅比 $|Y/X|$ および位相差 $\phi_{Y/X}$ を式(1)、(2)により算出した。

$$|Y/X| = \sqrt{\{E[\text{Re}(\ddot{Y}/\ddot{X})]\}^2 + \{E[\text{Im}(\ddot{Y}/\ddot{X})]\}^2} \quad (1)$$

$$\phi_{Y/X} = -\tan^{-1} \frac{E[\text{Im}(\ddot{Y}/\ddot{X})]}{E[\text{Re}(\ddot{Y}/\ddot{X})]} \quad (2)$$

ここに、 Re 、 Im はそれぞれフーリエスペクトル比の実数部、虚数部を表し、 $E[\]$ は計算対象とした 13 記録のアンサンブル平均を表す。あわせて、速度検層から得られた S 波速度構造に基づき、小段～小段-22m の地盤の増幅特性を求めた。ここでは簡単のため、盛土の幾何形状の影響を無視して両地点の地盤を水平成層状とみなし、各層の減衰定数 $h=3\%$ として計算を行った。これらの結果を図-11 に示す。以降、堤防縦断方向を LG、堤防横断方向を TR と略記する。

盛土の幾何形状を無視して求めた増幅関数は、1～3 次固有振動数までの範囲で地震記録と概ね一致している。小地震記録から求めた縦横断方向の増幅特性を比較しても、方向による差異は小さい。

これらの低次モードに着目点を絞れば、本地点の盛土・地盤系の応答特性は水平成層地盤のそれに近いと考えられる。また、速度検層により得られた S 波速度構造は、概ね妥当であったと評価される。

5.2. 東北地方太平洋沖地震で発揮された材料非線形性

次に、地盤の材料非線形性に関する情報として、地盤の剛性とせん断ひずみの経時変化を観測記録から導き出すことを試みた。具体的には、堤防の裏のり尻 (小段) とその地中部 (小段-22m) の地震記録に着目し、2 点間を鉛直方向に伝播する水平動の位相速度 c 、平均せん断ひずみ γ の経時変化を求めた。位相速度 c は、大町・田原³⁾の方法により 2.56s 間隔ごとに算出した。平均せん断ひずみ γ は、地表・地中の地震計間の 2 回積分によって算出した。また、2.56s 間隔で得られた位相速度 c と対比するため、平均せ

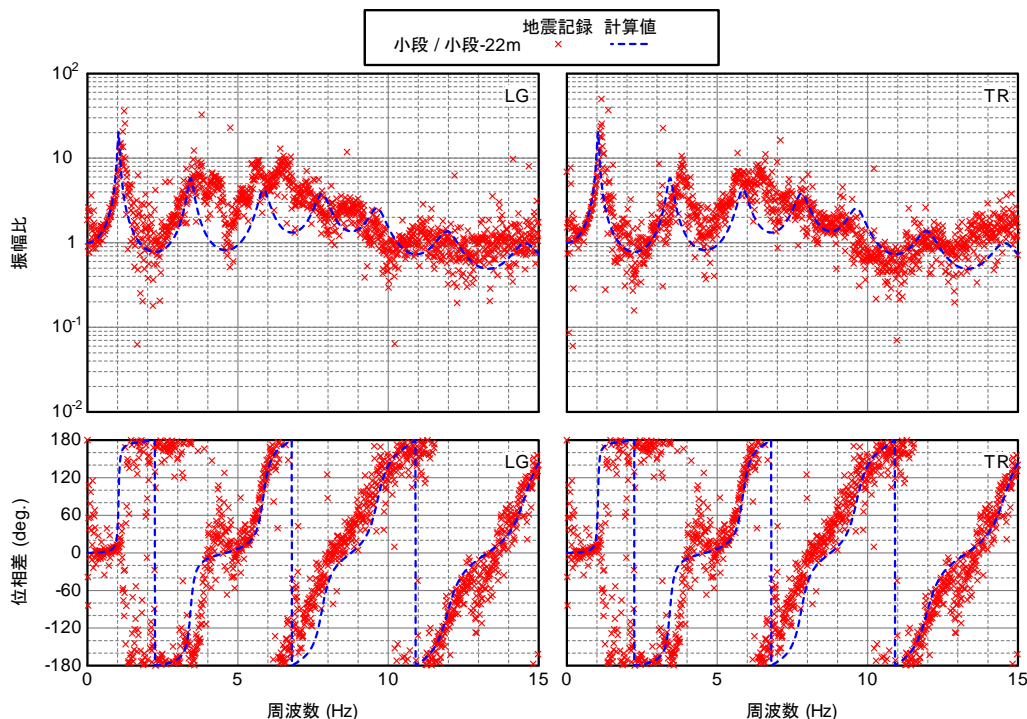


図-11 小地震記録における小段 / 小段-22m の振幅比および位相差

せん断ひずみ γ の時刻歴のComplex envelope を求め、その振幅成分の2.56s間隔での最大値を求めた。

位相速度、平均せん断ひずみの計算結果を図-12に示す。同図の位相速度 c に併記しているAVSは、速度検層から得られた小段・小段-22m間の平均S波速度である。また、東北地方太平洋沖地震における $c_v^2 \cdot \gamma$ 関係と近傍で採取された試料の繰返し変形特性試験による $G/G_0 \cdot \gamma$ 関係を図-13に示す。

地震開始直後の c が速度検層によるAVSと概ね一致し

ていること、1度目の主要動(約30~60s)と2度目の主要動(約80~120s)に対応して c が低下していること、 c 、 γ の増減傾向がよく対応していることが分かる。 $c_v^2 \cdot \gamma$ 関係は、 γ が最大値を示した98sの前後に分けてプロットしているが、これで見ると、98sまでの挙動は表層地盤の主体を成すAc2層の繰返し変形特性試験による $G/G_0 \cdot \gamma$ 関係とよく一致している。これらより、小段~小段-22m間の地盤の大局的な動的挙動は、鉛直下方からの強いSH波に対して材料非線形性を発揮しながら応答する水平成

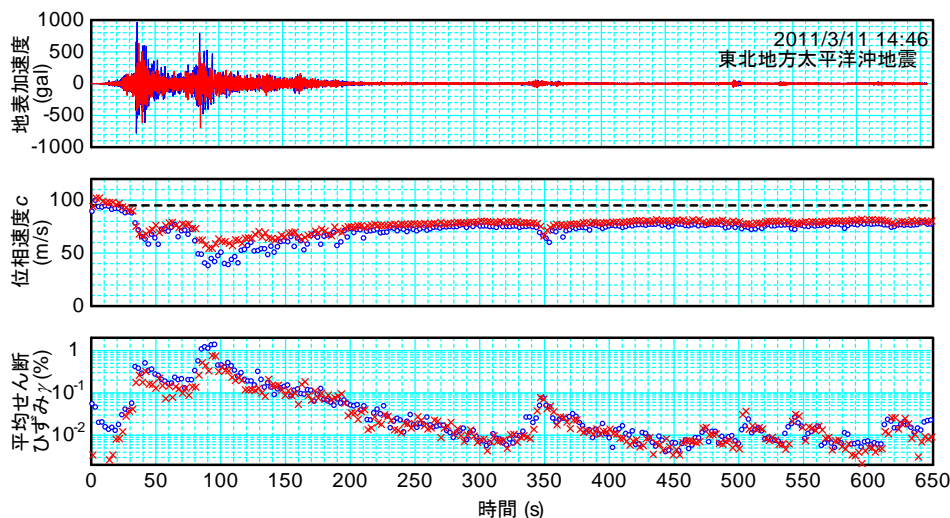


図-12 東北地方太平洋沖地震における裏のり尻位置の地盤の位相速度 c 、平均せん断ひずみ γ

層地盤の挙動に近いと見ることができ、本手法により算出された c が土のひずみ依存性を反映したものであると考えることができる。特に、表層地盤の材料非線形性の影響はLG 方向に強く見られ、 c_v の最小値は0.41 ($c_v^2 \equiv G/G_0$ の最小値は0.17)、 γ のピークは1.3%であり、同地震により極めて強い材料非線形性が発揮されたことが分かる。

また、2度目の主要動によって低下した c がその後に緩やかに増加するものの、計測終了時点においても地震前の状態に回復していない点に着目したい。 $c_v^2 \cdot \gamma$ 関係で見ても、98s 以降の挙動はそれまでのカーブと概ね相似性を保持するような形で c_v^2 が低下している状況が見取れる。このように、地震後に地盤の剛性が低下した状態が継続する現象は、地震記録の波形処理に基づく同様の分析から、兵庫県南部地震におけるポートアイランド⁴⁵⁾や、能登半島地震におけるK-NET穴水、JMA輪島⁶⁾などでも確認されており、いずれも過剰間隙水圧の上昇が原因であったと考察されている。また、350s、510s、540s 付近に見られる小さな余震に対して c 、 γ が敏感に変化している。例えば、350s付近の余震では $PGA = 54gal$ 、 $PGV = 9.5kine$ であったのに対して、 c は直前の時間帯における値から0.8倍程度に低下している。以上の状況は、東北地方太平洋沖地震における強震動によっていずれかの地層内の過剰間隙水圧が上昇したことを示唆している。

また、本報では割愛するが、同地震の5~10日後まで徐々に増加し続け、収束する傾向が認められた。各地層の土質から想定される透水性に鑑みると、海成粘土から成るAc2の過剰間隙水圧が本震で上昇したとしても、その後5~10日間で回復するとは考えにくい。したがって、As1あるいはAscの過剰間隙水圧が著しく上昇し、それが5~10日間で概ね消散したものと考えられる。

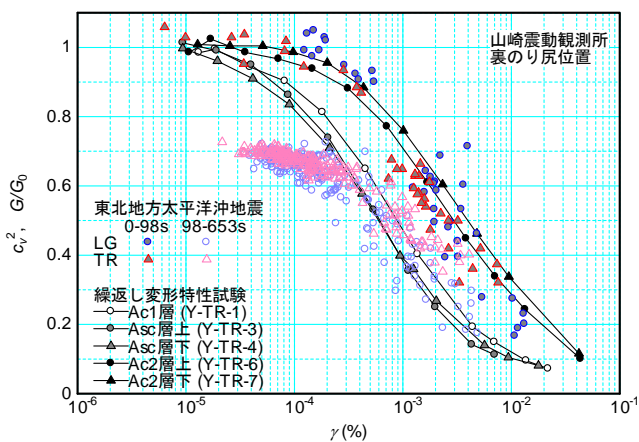


図-13 東北地方太平洋沖地震における $c_v^2 \cdot \gamma$ 関係と室内試験による $G/G_0 \cdot \gamma$ 関係

6. 動的解析

6.1. 解析手法 (基本ケース)

解析は、非線形時刻歴解析手法により行った。様々なモデル化手法が解析結果に与える影響を把握するため、最初に詳細なモデル化を行った解析を行い、これを基本としてモデルを単純化、あるいはパラメータ設定方法を変更する手順で一連の解析を行った。

前章の検討結果より、東北地方太平洋沖地震では、山崎震動観測所のAs1あるいはAsc層に液状化が生じた可能性が高いことが明らかとなっている。そこで、基本ケースでは、これら2層に有効応力モデルを適用し、その他の地層については全応力モデルを適用した。有効応力モデルとしては様々なものが提案されているが、取扱いが比較的容易で、かつ、標準的なパラメータ設定手順が示されている井合ら⁷⁸⁾のモデルを適用した。全応力モデルとしては、Hardin-Drnevichモデル、Ramberg-Osgoodモデルが代表的であるが、ここでは、多種多様な土の動的変形特性をよく近似することのできる⁹⁾前者を用いることとした。材料パラメータの設定については後述する。

地層の細分にあたっては、着目する最大周波数 f_{max} とS波速度 V_s から決まる最小波長 $\lambda_{min} (=V_s/f_{max})$ が各層の層厚の1/5以上となるように行った。ここで、 f_{max} は10Hzとした。また、このときの V_s には材料非線形性の影響を考慮し、速度検層で得られた小ひずみレベルにおける V_s に対して、液状化層では1/10、非液状化層では1/3を乗じた値を用いた。これは、剛性低下率 G/G_0 にするとそれぞれ1/100、1/9に相当する。

本地点では工学的基盤面における地中記録が得られているため、底面境界を剛基盤 (E+F) とし、観測された地中記録を入力した。

時間積分はNewmark- β 法により行い、 $\beta = 1/4$ 、 $\gamma = 1/2$

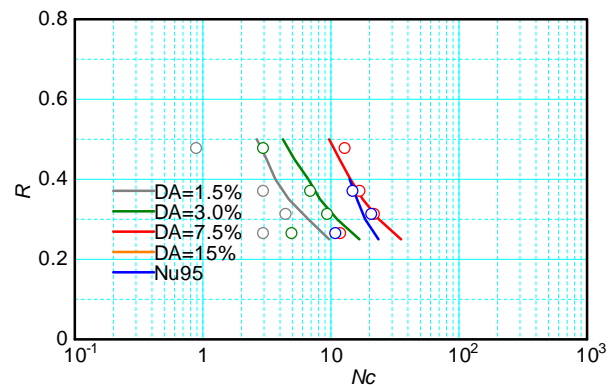


図-14 要素シミュレーションの結果 (As1 層)

とした。Rayleigh 減衰は剛性比例型とし、1 次固有振動数に対するモード減衰を 1% とした。

6.2. 材料パラメータの設定方法

非液状化層に適用する HD モデルでは、せん断弾性係数 G_0 、せん断強度 τ および最大減衰定数 h_{max} を設定する必要がある。

G_0 については、速度検層の結果に基づいて設定した。ただし、拘束圧依存性として、いずれの地層についても G_0 が有効上載圧の 1/2 乗に比例するものとして、細分した要素に G_0 を割り当てた。このとき、各層の V_s が地層の中間深度で測定値と一致するものとして扱った。なお、地下水位が浅い不飽和層 (Bs) ではサクシジョンの影響により見かけ上は拘束圧依存性が小さくなるものと考え、深さ方向に G_0 を一様 (拘束圧の 0 乗) として与えた。

$G \cdot \gamma$ 関係をモデル化の際の一般的な手順は、①原位速度検層で得られた初期せん断剛性 G_{0F} を G_0 として使用し、②室内試験で得られた各ひずみレベルの G_L

を、小ひずみ域におけるせん断剛性 G_{0L} によって正規化して G_L/G_{0L} を求め、③ $G_L/G_{0L} \cdot \gamma$ 関係を再現するように τ (あるいは規準ひずみ γ_0) 等のパラメータを設定する、というものである。したがって、結果的には G_{0F} (G_L/G_{0L}) $\cdot \gamma$ 関係を近似するようなモデルとなっている。その結果として、小ひずみ域では G_{0F} が採用されているが、大きなひずみレベルでは試験で得られた G_L に G_{0F}/G_{0L} を乗じたものが採用されている。この比率 G_{0F}/G_{0L} を全ひずみレベルでの G に乗じることは、試験で得られた全ひずみレベルでのせん断応力 τ に G_{0F}/G_{0L} を乗ずることと同義であり、特に大きなひずみレベルでは得られた室内試験データを歪める可能性が高い。したがって、 G_{0F}/G_{0L} による補正を行わないこととした。

また、大規模地震動に対する地盤の挙動を評価するため、なるべく大きなひずみレベルにおける $G \cdot \gamma$ 関係を再現するのが望ましい一方で、前述のように、力学挙動の非定常性が顕在化する大ひずみ域では、全応力モデルの適用性が不明確となる問題がある。そこで、繰返し変

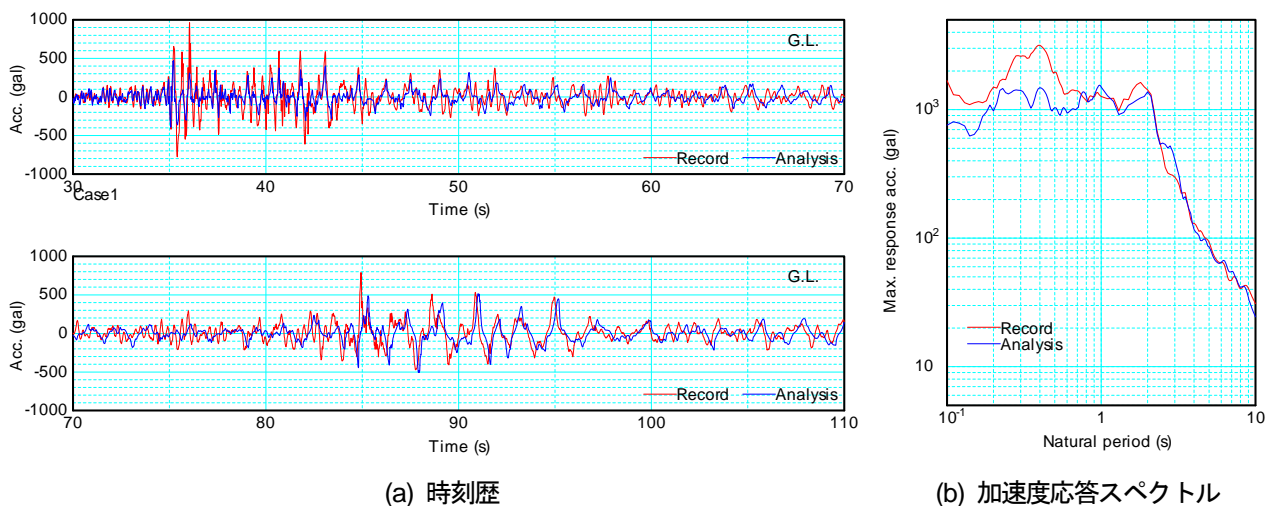


図-15 地表加速度 (基本ケース)

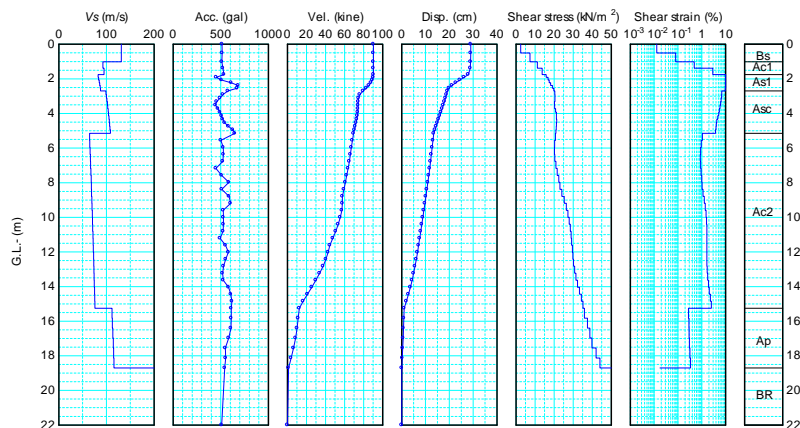


図-16 最大応答値分布 (基本ケース)

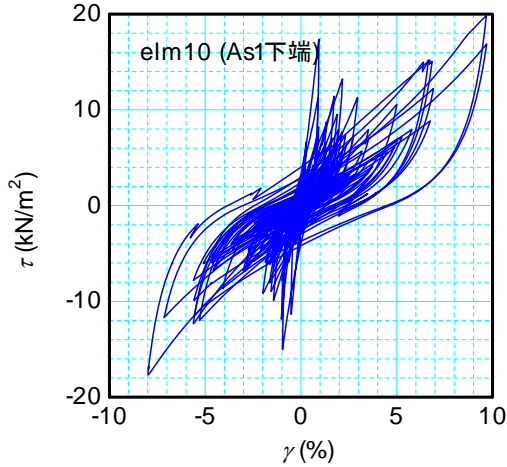


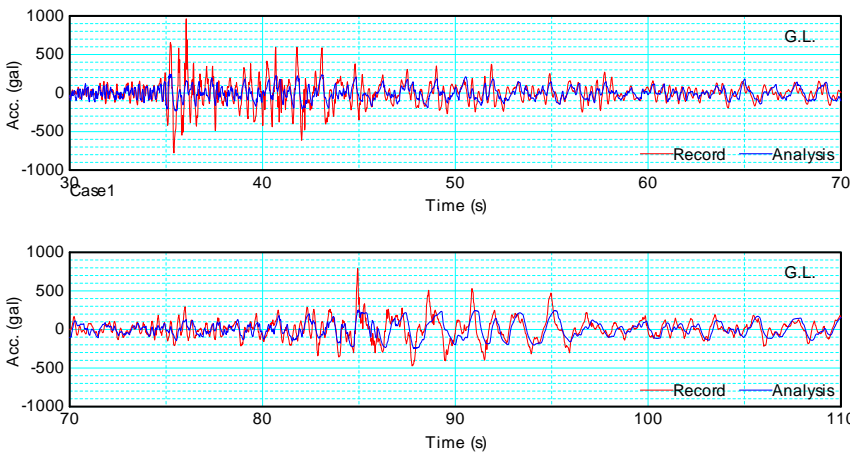
図-17 応力・ひずみ関係 (基本ケース, As1 下端)

形特性試験結果の適用限界, つまり, 中ひずみ域と大ひずみ域の境界となるひずみレベル (以下, 限界ひずみと呼ぶ) を仮定し, そのひずみレベルにおける $G \cdot \gamma$ 関係

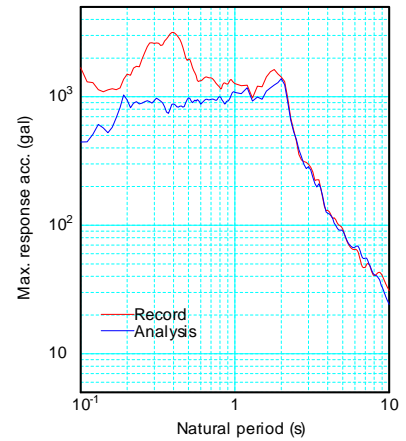
を再現するようにモデル化することとした. ここで, 限界ひずみは, $h \cdot \gamma$ 関係が低下し始める前のひずみレベルとした. 土の繰返し変形特性試験における履歴減衰 h の低下は, 履歴ループが逆 S 字型となり始めたことと対応し, ダイレイタンスの影響が顕著になり始めたことを意味するためである. $h \cdot \gamma$ 関係を近似するにあっても, 限界ひずみにおける $h \cdot \gamma$ 関係を再現するように h_{max} を設定することとした.

液状化が生じたと見られる As1, Asc 層については, 井合らのモデルを適用した. その主な特徴は次のとおりである.

- せん断応力比・せん断ひずみ関係に Hardin-Drevecich モデルを適用している.
- せん断応力比が大きな領域で生じる有効応力の回復傾向 (サイクリックモビリティ) を表現するため, 応力空間上に液状化フロントと呼ばれる経路を規定している. この経路を決定づけるパラメータは破壊角 ϕ , 変相角 ϕ の 2 つである.



(a) 時刻歴



(b) 加速度応答スペクトル

図-18 地表加速度 (As1, Asc に全応力モデルを適用)

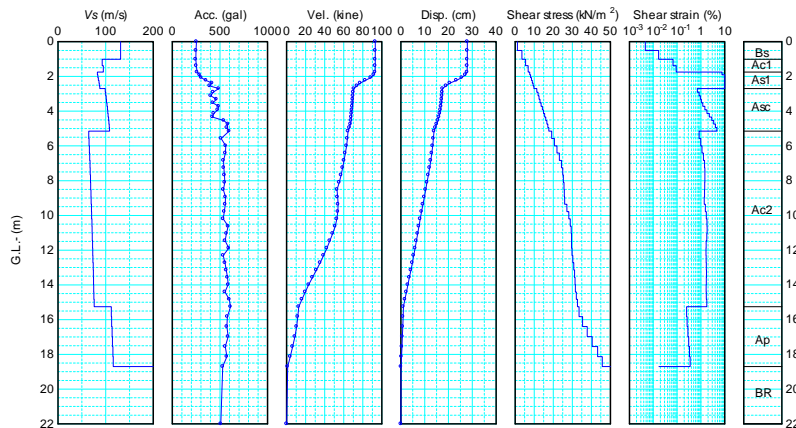


図-19 最大応答値分布 (As1, Asc に全応力モデルを適用)

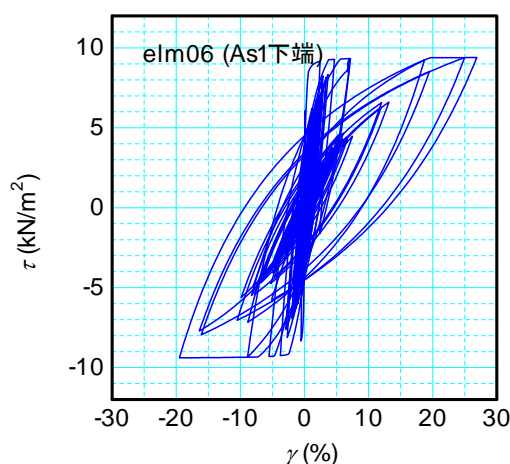


図-20 応力・ひずみ関係
(As1, Ascに全応力モデルを適用. As1 下端)

- せん断応力比が小さな範囲における有効応力比 σ'_m/σ'_{m0} に対応する状態変数として、液状化フロントパラメータ S_0 を定義し、これを累積塑性せん断仕事比 w に応じて低下させる。 $S_0 \cdot w$ 関係については、5つの材料パラメータ p_1, p_2, w_1, S_1, c_1 によって調整することができる。これにより、繰返しせん断履歴に伴う有効応力の低下（過剰間隙水圧の上昇）が表現される。

パラメータの設定手順は文献8)に従った。つまり、非排水繰返し三軸試験結果を参照し、①室内試験による有効応力経路から破壊角 ϕ を設定し、②試験データのうち応力振幅が最も大きな供試体を対象として繰返しせん断回数によるひずみの増加傾向を再現するように $S_0 \cdot w$ 関係を調整し、③さらに応力振幅が小さな供試体も含めた液状化強度曲線を近似するように $S_0 \cdot w$ 関係を調整した。その結果の一例を図-14に示す。

6.3. 解析結果（基本ケース）

基本ケースの解析結果を図-15～図-17に示す。全時刻にわたり、地表の観測記録には強い短周期成分が見られ、これを再現することができていない。最大値も観測記録の963galに対して、解析結果は514galと小さい。ただし、85～95s付近に見られる比較的周期の長い成分については、若干の位相遅れが見られるものの、地表記録の波形形状をよく再現することができている。この傾向は、加速度応答スペクトルにおいても同様である。

最大応答値分布からは、As1において10%を超える大きなひずみが生じていることが分かる。しかし、応力・ひずみ関係から分かるように、サイクリックモビリティ

ーによる逆S字型のループ形状を表現しているため、大きなひずみレベルにおいても大きなせん断応力を発揮する結果となっている。これにより、計算結果の過度な長周期化が抑制されているものと考えられる。

6.4. 全応力モデルを適用した場合の解析結果

大ひずみ域の挙動に対する全応力モデルの適用性を検討するため、As1, Ascについても全応力モデル（HDモデル）を適用した計算を行った。その結果を図-18～図-20に示す。

解析による地表加速度波形は、ピーク形状が丸くなり、その最大値は272galと小さくなっている。加速度応答スペクトルからは、表層地盤の1次固有周期が材料非線形性も含めた結果として2s程度であり、その周辺から長周期側では概ね再現できているものの、0.5s程度以下の短周期域では過小評価している。最大加速度の深さ方向分布は、Asc層で一度急激に減衰し、さらにAs1層で急激に減衰している。As1層下端の要素の応力・ひずみ関係を見ると、せん断応力がほぼ上限に達し、ひずみは20%と非常に大きな値に達している。有効応力モデルを適用したケースと比べると、全応力モデル（HDモデル）ではサイクリックモビリティを表現することができないため、これによってせん断応力が過小に評価され、結果として強い短周期成分の伝播を表現することができていないと解釈することができる。

6.5. 今後の課題

以上のように、全応力モデルを用いた解析では、地表加速度の短周期成分を過小評価する結果が得られた。解析の着目点が表層地盤の1次モード程度に限定される場合は必ずしも問題とはならないかもしれないが、着目点が高次モードに対応する周期帯に置かれる場合は全応力モデルの適用は困難であると考えられる。

全応力モデルによる地表加速度の過小評価の原因は、せん断応力に上限を与えることにある。特に砂質土の場合は、図-1に示すように、非排水繰返しせん断に対してせん断応力が単純な上限を示すことはなく、実際にはサイクリックモビリティによる大きなせん断応力を発揮することができるため、大規模地震動を入力する解析ではせん断応力あるいは加速度の最大応答値を過小評価することとなる。また、大規模地震動の入力に対してある要素のせん断応力が上限に近づくと、以浅に波動が伝播しにくくなる傾向は、土要素を直列に接続する一次元地震応答解析の特性であるとも言える。

解析対象とした地点は軟弱粘性土を主体とする地盤で

あるが、計算結果は地表付近に存在する砂質土層 As_1 , Asc の材料非線形性の影響を強く受けていると見られる。砂質土を主体とする地盤では、この傾向がより顕著になると考えられる。

このように、大規模地震動を考慮し、大ひずみ域に至る場合は、全応力モデルの適用性が低くなる。解析の着目点に依存する面もあるが、液状化の影響に主眼を置くか否かによらず、有効応力モデルを選定すること、それに必要な情報として原位置採取試料の液状化試験データを得ておくことが重要である。

また、前述のように、多くの有効応力モデルでは液状化試験データの全てを再現することが容易でなく、パラメータの設定が容易でない。今後の技術開発により、これらの点を改善していくことで、解析精度を大きく向上させることができる可能性があることを付記し、今後の課題としたい。

7. まとめ

本研究では、表層地盤の非線形増幅特性を考慮した地震動の設定や、深い基礎、地中構造物の耐震性の評価等を目的として行われる地盤の動的解析に着目し、地盤のひずみレベルを指標として各種調査・試験方法、解析手法の選定に関する考え方を示すとともに、パラメータ設定方法を提案した。

大規模地震動に対する土の力学挙動は強い非線形性、非定常性を示すことから、せん断応力、せん断ひずみの最大応答値に関する一意的な関係、つまり、全応力モデルにおける骨格曲線の設定に難しさがある。そして、大ひずみ域においても全応力モデルを適用した場合、サイクリックモビリティによる大きなせん断応力の発揮を表現できないため、地表加速度の短周期成分あるいは最大値を過小評価することがある。土の繰返し変形特性試験を適切に行い、全応力モデルの適用限界を見極めた上で、適用限界を超える場合は有効応力モデルを選定していくことが重要である。

また、有効応力モデルの改善に向けた研究開発も精力的に進められている状況ではあるが、実務者にとって使いやすいものとなっている状況であるとは必ずしも言えない。今後の技術開発によって有効応力モデルのパラメータ設定を容易なものとし、有効応力モデルを適用しやすい環境を整備していくことも重要な課題である。

参考文献

1) 谷本俊輔, 星隈順一, 佐々木哲也, 塚淳一, 西田秀明, 河野哲也: 遠心実験と室内試験における水平地盤の応力・ひ

ずみ関係の比較, 大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム論文集, 2013.5.

- 2) 国土交通省国土政策技術総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による強震記録, 国総研資料, No.726, 2013.2.
- 3) Ohmachi, T. & Tahara, T.: Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay core rockfill dam, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.2, pp.227-238, 2011.4.
- 4) 國生剛治, 佐藤青隆, 松本正毅: 1995 年兵庫県南部地震での地盤の非線形震動特性, 土と基礎, Vol.43, No.9, pp.39-43, 1995.9.
- 5) 風間基樹, 柳澤英司, 稲富隆昌, 菅野高弘, 稲垣紘史: アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.547/III-36, pp.171-182, 1996.
- 6) 鈴木比呂子, 時松孝次, 新井洋, 翠川三郎: 2007 年能登半島地震における K-NET 穴水・JMA 輪島の強震記録から推定した粘性土地盤の非線形形状, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.645, pp.2003-2010, 2009.11.
- 7) Iai, S., Matsunaga, Y. & Kameoka: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.6.
- 8) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.6.
- 9) 吉田望, 若松加寿江: 土の繰返しせん断特性のモデル化と地質年代・堆積環境の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.265-284, 2013.6.

A STUDY ON APPLICATION OF EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF GROUND

Abstract : Earthquake motion characteristics undergo influence of the nonlinear amplification characteristics of the surface ground. Therefore Evaluation of seismic performance of various structures has possibility to be rationalized by considering each site response characteristics. Recently, opportunities of conducting earthquake response analysis of ground at various purposes are increasing. In this study, selection methods of field investigation and laboratory test, analysis method of earthquake response analysis of ground were indicated, and method of setting parameters was proposed through index of strain level.

Key Words : Non-linear amplification characteristics, Dynamic analysis, Total stress analysis, Effective stress analysis, Cyclic deformation characteristics test, Liquefaction test