

地震記録から地盤の非線形特性を検出する方法

鈴木 崇伸¹

¹正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail:tsuzuki@toyo.jp

本研究は水平2成分の地震波形を非線形特性を判読できるグラフに変換する方法を提案している。地震動の卓越周期と加速度振幅の時間変化を計算し、相対変位振幅に変換する。加速度振幅は外力を表し、相対変位振幅は応答を表すことになるので、両者の時間変化は地盤の応答特性となる。この方法によれば、液状化が見られた地点の振幅特性図は横に広がった図形となり、図形から非線形特性を判読できる。

Key Words : *strong ground motion, non-linear characteristics of surface layer, diagram of motion, liquefaction,*

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、日本では強震観測網の拡充が進められ多くの地震記録が蓄積されている。高精度な機器によって計測された地震記録は地震現象の解明とともに防災目的の利用方法の確立が望まれている。2011年の東北地方太平洋沖地震では数多くの強震データが得られているが、特に人々が多く生活する平野部の記録の分析は防災上重要であり、分析を進める必要がある。

平野部では軟弱な堆積層が地表付近を覆っており、揺れを増幅させることが知られている。また軟弱な堆積層は揺れが小さいときには弾性的性質をもつが、強い揺れが起きた時には非線形挙動を示すことが知られている。特に軟弱な砂層が堆積した地盤では液状化が起これ、大きな地盤変形によって構造物に大きな影響を及ぼす。河川周辺や沿岸域に開発を進めた都市では、液状化の発生が地震被害を左右する要因ともなっている。

軟弱な土層に強いせん断力が加わると剛性が低下して、長周期化し揺れが大きくなることが知られている。とりわけ軟弱な砂層では間隙水圧が急激に上昇して剛性を失い液体状に変化する液状化現象が発生する。液状化現象は住宅や地下構造物の被害を大きくするため適切な対応が求められる。液状化が起きると地表の揺れの加速度が減衰し、長周期化する。このような特徴に注目して液状化発生の有無を検知する研究が行われてきた。液状化の発生を地震記録から判定することにより、即時の判断が可能となり、地震直後の対応に役立てられる。

本研究は地盤の非線形化をグラフから読み取る方法を検討している。観測地震動から特徴的な性質を抽出し、

グラフ化することにより、地盤の非線形化の程度を判別できるようにする方法を考案している。液状化が確認された地点の地震動は特徴的なかたちを持つことが判明し、観測サイトの揺れの特性の時間変化を直観的に理解することができる。さらにグラフ分析結果にいくつかの条件を追加すれば、液状化強度、剛性の低下度合いなどを推定することが可能であり、液状化した地盤の特性分析に応用できる。

2. 液状化した地盤での揺れの特徴

観測点の近傍で液状化が確認された強震記録の異質性には多くの研究者が注目しており、波形から液状化が発生したことを検知する判定方法もいくつか提案されている。これらの研究で共通しているのは、程度の差はあれ、いずれも振動途中から長周期成分が卓越する特徴、もしくは加速度振幅が減少する特徴を表現できる指標を考案し、統計的に閾値を決定している点である。

宮島他²⁾は、加速度振幅の上下/水平比が増加することと、ランニングスペクトルの卓越振動数が小さくなることで液状化地盤の加速度記録を特徴づけている。多くの観測記録を分析した結果から、判断基準に幅をもたせられることも提案しており、振幅の上下/水平比が4倍を超える場合や、前述の1Hz以下の条件に加えて、最大加速度の前後で振動数が1/2以下になっている場合には、液状化と判断できる信頼度が高くなることを指摘している。

清野他³⁾は上下動と水平動の周期の比率から判別でき

ることを提案している。加速度記録からある時刻の卓越周期を計算し、水平動と上下動の卓越周期の比率を計算する。表面波においては、上下動、水平動ともに長周期化するために、その比率は大きくならないのに対して、液状化時には水平動のみが長周期化するために、卓越振動数の比率は大きくなる。卓越周期の比率が一定の率を超える時間を計算して、累積時間で判定する方法を提案している。

高田、尾崎⁴⁾は振動子に吸収されるエネルギーを表す Arias Intensity を用いる方法を提案している。1Hz のローパスフィルターをかけた波形と原波形との Intensity 比が 0.5 以上であれば液状化と判断できるとしている。

Kostadinov and Yamazaki⁵⁾の研究においても振動数の条件だけを用いている。地震記録の中のある時刻の瞬間パワースペクトルを計算して、スペクトルの重心位置から卓越振動数 (MIF) を計算する。時間変化する卓越振動数を上下動、水平動について計算して、上下動の振動数が 3Hz 以上、水平動の振動数が 0.67Hz 以下 (1.5 秒以上) となる累積時間が 0.1 秒以上あれば液状化と判定できるとしている。

筆者も統計的な閾値を用いて液状化を検知する方法⁶⁾を提案している。ゼロクロス時間の最大値が 1 秒以上、加速度と SI 値から推定する最大変位が 10cm の条件を満たせば液状化が発生したとみなせることを提案している。

これまでの統計的に決めた閾値による方法は液状化の有無の2値判定であり、わかりやすい点は利点であるが、液状化の程度までは判定対象にできない。高精度な記録が多く得られた現時点において、揺れの経時変化から地盤の非線形特性を分析する手法は防災上有用であると考ええる。

3. 地盤震動の相対変位の推定

(1) 表層地盤の応答

地表近くにはせん断波速度の小さな層がある場合が多い。特に都市圏では基盤が露出していることはほとんどなく、軟弱層上に都市施設が建設されている。この地表層は地盤固有周期と呼ばれる一定の周期で振動しやすい性質をもっている。地盤固有周期が短いほど硬い地盤であり、逆に長い地盤ほど軟弱とされる。軟弱地盤では地震動の増幅が大きくなり、被害も多く発生することから設計時に大きな地震動を見込んで設計が行われている。特定の振動数で揺れやすいということは1自由度の振動系で近似できるということであり、観測波形の分析にも1自由度系の振動理論が応用できる。

表層地盤の地表に地震計が置かれているモデルを考える。図-1 にモデル図を示す。基盤の上に厚さ H 、せん

断波速度 V_s の層がある。地盤固有周期は $T_g=4H/V_s$ により計算できる。連続体の波動が基本式となるがモード解析によれば、地表面を腹、基盤面を節とする正弦波 1/4 波長の基本モードが求まり、固有振動数は地盤固有周期の逆数に一致する。

地盤の振動を 1 自由度系の振動方程式により定式化する。基盤入力を \ddot{u}_g 、表層地盤の応答を u 、観測地震動 (絶対加速度) を $\ddot{u}_a = \ddot{u}_g + \ddot{u}$ 、固有振動数を n 、減衰定数を h とする。振動方程式の加速度項を移項すると次式となる。

$$2h n \dot{u} + n^2 u = -(\ddot{u}_g + \ddot{u}) \quad (1)$$

左辺は減衰力と復元力の合計であり、右辺は慣性力である。減衰力と復元力は同時に大きくなることはなく、復元力が大きくなる変位の最大値付近では速度は小さくなり、逆に復元力が小さいときには速度による減衰力が支配的となっている。

1 自由度の応答計算をした例を図-2 に示す。入力は図-2(a)に示した神戸海洋気象台の NS 成分であり、 $T_s=1$ [s] ($\omega=2\pi$ [rad/s]) の線形応答としている。図-2(b)は相対変位 u を横軸、絶対加速度を逆符号にした値を縦軸にとり、時間をパラメータにして連続プロットしている。固有周期が傾きに影響し、絶対加速度と相対変位が比例関係にあるのがわかる。振動現象では減衰力は復元力に比べて小さくなるため、慣性力と復元力の比例関係が基本となるが、減衰力が関係することによって楕円形の変化が生じる。図-3 に 1 自由度系に周期外力として加速度が作用するときの応答の模式図を示している。楕円の大きさは振動形にはたらく力の大きさと変形を表している。楕円の長軸の傾きは固有角振動数 n の 2 乗となる。また楕円の短軸は減衰が大きいほど長くなる。減衰が 0 ならば楕円ではなく直線となる。

(2) 相対変位の推定

1 自由度系の振動は特定の振動数を増幅することから、観測された加速度のフーリエ変換等により固有振動数を決めることができる。すなわちスペクトルのピーク周波数として計算できる。角振動数 n が決まれば楕円の傾きが決まり、加速度から相対変位を計算できる。ある繰り返し運動の加速度振幅 (絶対加速度) を a とすると相対変位の振幅 U は

$$U = \frac{a}{n^2} \quad (2)$$

として求められる。

振動中に固有振動数が変化する場合には、適当な時間で加速度記録を分割してスペクトルのピーク周波数を計算し、繋げることにより振動中の固有振動数の変化を追跡することができる。ある時刻における加速度振幅が決

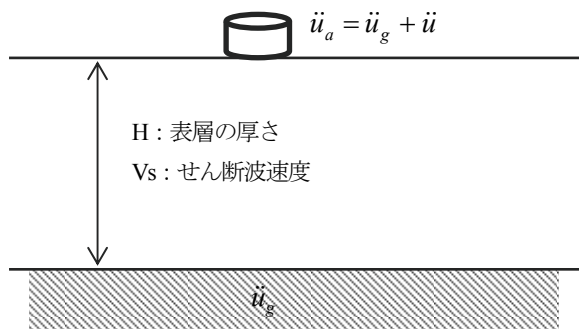
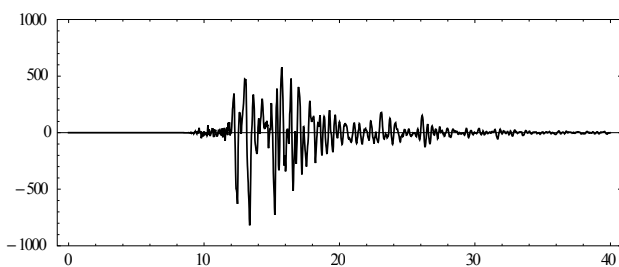
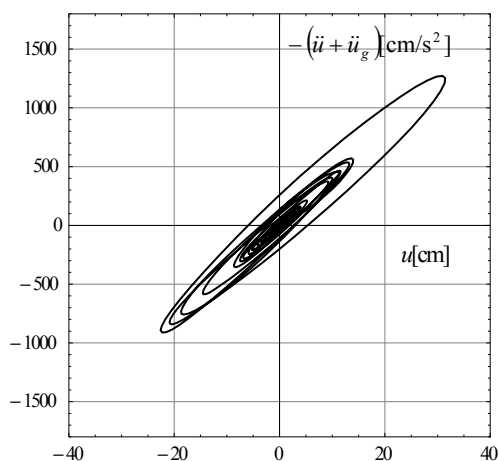


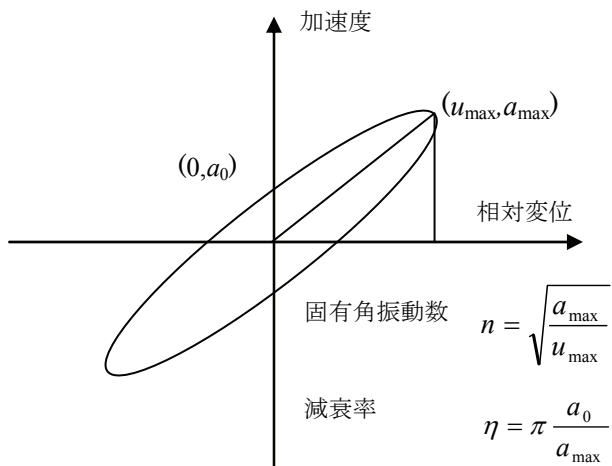
図-1 表層地盤に置かれた地震計のモデル図



(a) 入力地震動 (神戸海洋気象台 NS 成分(1995))



(b) 応答計算結果 ($\nu=2\pi$ [rad/s]($T_s=1$ [s]), $\nu=0.1$)



(c) 応答計算グラフの意味

図-2 1 自由度系の応答計算例

まれば、式 (2) により相対変位振幅に換算することができる。刻々と変化する加速度振幅と変位振幅は、1 自由度系で近似した地盤の振動特性変化を表している。

4. 非線形な特性を持つ地盤の振動

(1) 1層モデルの場合

次に表層地盤を構成する土が非線形な変形特性を持つ場合を考える。図-3(a)にせん断変形特性を示す。降伏応力を τ_y とし、それ以上の力が加わる際には剛性が低下するバイリニアモデルとする。土の場合 τ_y は鉛直荷重の大きさによって変化するようになるが、単純化して全層一様な特性として考える。

図-3(b)に地盤モデルを示す。厚さ H の表層に一様な慣性力 a を作用させ、せん断変形する土柱の変位の計算を行う。底面から h の高さまでが軟化した状態を考える。つり合い式は

$$\begin{aligned} G_1 u_1'' &= -\rho a & (H_2 < z < H) \\ G_2 u_2'' &= -\rho a & (0 < z < H_2) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここに u_1, u_2 は 2 層の相対変位、 G_1, G_2 はせん断剛性率であり、 ρ は単位体積質量である。境界条件は $z=0$ において変位が拘束され、 $z=H$ において自由境界となり、せん断力が 0 となる。 $z=H_2$ は降伏条件に相当し、応力と変位が連続する条件となる。未知数は 4 個の未定係数と H_2 の 5 個であり、5 個の条件式からせん断変位分布を決めることができる。境界条件を式で表すと以下となる。

$$\begin{aligned} G_1 u_1'(H) &= 0 \\ G_1 u_1'(H_2) &= \tau_y \\ u_1(H_2) &= u_2(H_2) \\ G_2 u_2'(H_2) &= \tau_y \\ u_2(0) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

方程式を解いて式の整理をすると

$$H_2 = H - \frac{\tau_y}{\rho a} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} u_1(z) = \frac{\rho a H^2}{G_1} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 + \frac{z}{H} + \frac{1}{2} \left(\frac{H_2}{H} \right)^2 - \frac{H_2}{H} \right\} \\ + \frac{\rho a H^2}{G_2} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{H_2}{H} \right)^2 + \frac{H_2}{H} \right\} \end{aligned} \quad (5b)$$

$$u_2(z) = \frac{\rho a H^2}{G_2} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 + \frac{z}{H} \right\} \quad (5c)$$

となる。 $H_2=0$ として線形応答となる加速度の上限を求めると

$$a = A_y = \frac{\tau_y}{\rho H} \quad (6)$$

となり、これよりも小さな加速度の場合にはせん断剛性率が G_2 となる領域は存在せず、

$$u_1(z) = \frac{\rho \alpha H^2}{G_1} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 + \frac{z}{H} \right\} \quad (7)$$

が変位分布となる。注目するのは地表の変位であり、結果を整理すると

$$u_1(H) = U = \begin{cases} \frac{\rho \alpha H^2}{2G_1} & \left(a < \frac{\tau_y}{\rho H} \right) \\ \rho \alpha \left\{ \frac{h(2H - H_2)}{2G_2} + \frac{(H - H_2)^2}{2G_1} \right\} & \left(a > \frac{\tau_y}{\rho H} \right) \end{cases} \quad (8)$$

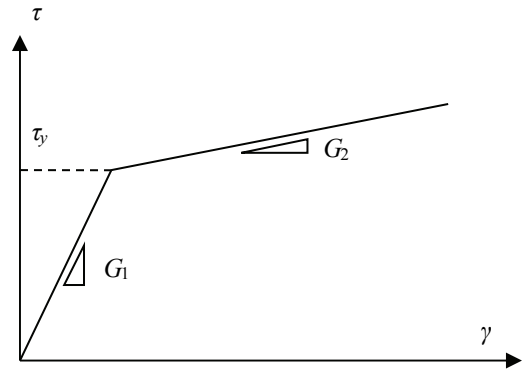
図-4に加速度 a と変位 U の関係を示す。バイリニアで仮定した変形特性に比例した応答が、加速度と変位の関係になって現れる。加速度振幅と変位振幅が比例関係にあるならば一定の地盤固有周期で振動を繰り返したことになる。ある加速度以上で変位が急速に大きくなる地震応答になっているならば、地盤内の一部が降伏したことによると判断できる。この変化が生じる加速度の大きさは、せん断強度とその深さに関連する。降伏が起きる層がわかっているならば、式(6)を用いて加速度の大きさからせん断強度を計算できる。逆にせん断強度と深さがわかっていれば降伏するときの加速度の大きさを決めることができる。

(2) 中間層の降伏

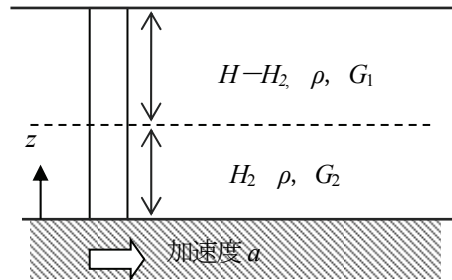
ここまでの分析から、表層地盤に一定以上の加速度が作用したときに非線形化する現象を相対変位と加速度の振幅の変化で追跡すると図-5のような変化をすることが予想される。加速度 A_y 以上で層の一部が降伏し始め、相対変位が急に大きくなる。最大加速度 A_{max} 付近で相対変位も最大となり、その後加速度振幅の減少につれて相対変位も小さくなることを模式的に示している。地表の地震動からこのグラフが作成できれば地盤の非線形化を追跡できる。このグラフを振幅特性図と呼ぶこととする。

振幅特性図から2つの周期を決めることができる。地盤の降伏を示す (U_y, A_y) から

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{U_y}{A_y}} \quad (9)$$



(a) 表層のせん断変形特性



(b) 剛性が変化する2層地盤のモデル

図-3 震度法の計算モデル

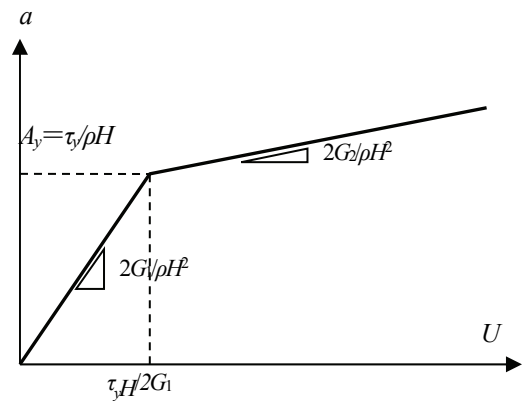


図-4 剛性が変化する2層地盤における地表の応答

を定義する。地盤全体が弾性応答するときの固有周期である。次に最大値である (U_{max}, A_{max}) から

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{U_{max}}{A_{max}}} \quad (10)$$

を定義する。地盤が軟化したときの固有周期となる。層厚の情報や単位体積重量の情報と合わせれば、2つの周期からS波速度やせん断剛性を決めることができる。

ここで表層地盤の一部が液状化し剛性低下するモデルを考える。図-6にモデル図を示す。網掛けをした h_1 から h_2 の深さで液状化が起きるとする。液状化しない状態のせん断波速度を V_1 、液状化層のせん断波速度を V_2 とする。

液状化が起きる前の地盤固有周期は

$$T_1 = \frac{4H}{V_1} \quad (11)$$

となり、 H が既知ならば T_1 から V_1 を決められる。次に液状化後の地盤固有周期はせん断波の通過時間を用いると

$$T_2 = \frac{4(H - (h_2 - h_1))}{V_1} + \frac{4(h_2 - h_1)}{V_2} \quad (12)$$

となる。両者の差を計算すると

$$T_2 - T_1 = 4(h_2 - h_1) \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) \quad (13)$$

が得られ、 $V_1 \gg V_2$ を仮定すれば

$$V_2 = \frac{4(h_2 - h_1)}{T_2 - T_1} \quad (14)$$

となる。層厚と固有周期の差から剛性が低下した層のせん断波速度が計算できる。

観測された地震動を図-5に示した振幅特性図に変換し、地盤条件を加味することで、地中の剛性の変化を分析することができる。

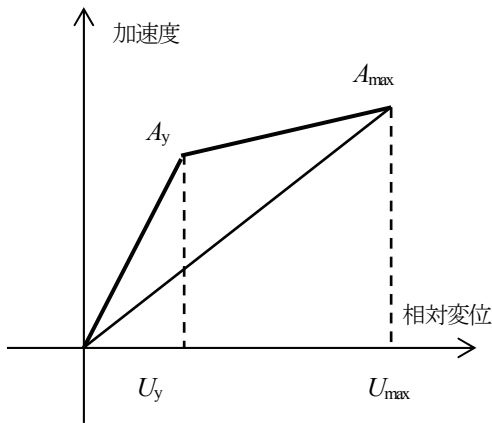


図-5 地震動の振幅特性図

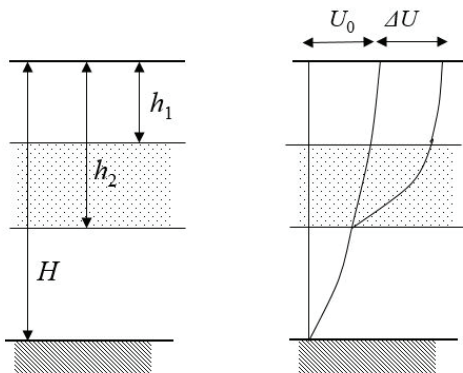


図-6 中間層が液状化する地盤モデル

5. 振幅特性の分析方法

(1) 地震記録の分析手順

以上の分析結果に基づいて観測記録から地盤の非線形特性を分析する手順を説明する。水平2方向の波形を1秒刻みで16秒を取り出して、フーリエ変換を行い、卓越周期 (T)と加速度振幅 (A)を検出する。16秒間の記録を用いることにより振動数の分解能は $1/16=0.0625[\text{Hz}]$ となる。16秒間の中心付近の特性が強調されるように、正弦波半波長のフィルターをかけて両サイドの振幅を小さくした波形を解析する。フーリエ変換にはFFTを用い、 $0.4[\text{Hz}]$ 幅の移動平均処理を施し、平滑化したスペクトルからピーク位置を計算する。タイムウィンドウを1秒間だけ移動して同様の計算を繰り返し、ピーク周期の時間変化を計算する。水平2方向の計算を独立に行うが、卓越周期は地盤特性であり、方向性がないとして2方向の平均をとる。タイムウィンドウ内で卓越周期とともに最大加速度を計算する。正弦波半波長をかけて振幅調整をするので、およそ加速度振幅の包絡線が計算できる。最大加速度は、タイムウィンドウ内で振幅補正した波形の2方向の最大値を採用する。

特定の時刻の特性値として地盤の相対変位の振幅を計算する。前掲の式であるが、変数を変えて表記する。

$$U = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 A \quad (15)$$

時刻を順次シフトして加速度振幅 A と卓越周期 T から時間変化を計算できる。

最後に (U, A) の連続プロットが地盤の非線形特性を表すグラフであり、地盤が降伏して変位が増大しているならば横に広がったグラフとなる。降伏が無ければ、一定の卓越周期が検出され、直線状の変化となる。

(2) K-NET 記録を用いた計算⁷⁾

2011年の東北地方太平洋沖地震では東日本全体で大きな揺れが観測された。ここでは防災科学技術研究所のK-NETの記録を用いた計算結果により計算手順を説明する。K-NET 稲毛の記録を用いて説明をする。K-NET 稲毛では観測点の周囲で噴砂が生じており液状化があった地盤での記録となっている。図-7に水平2成分の加速度波形を示す。最大加速度は 200cm/s^2 程度であり、120秒あたりからひげ状のパルスが入り、その後加速度振幅が小さくなっている。NS方向は200秒過ぎからゼロ線がわずかにずれており、地震計の傾斜があったと推定される。

図-8に(1)の手順で計算した結果を示している。同図(a)は卓越周期の変化を示している。16秒間のタイムウィンドウで波形を切り出し、中央を強調するフィルター処理を行った2方向のFFTを平滑化して平均をとる。平均計算をしたスペクトルのピーク振動数を周期に換算して当該タイムウィンドウの周期としている。タイムウィ

ンドウを1秒単位でシフトして同様の計算を行い、周期変化をグラフにしている。110秒あたりから徐々に周期が長くなり、波形の後半では3秒から4秒の揺れとなっている。

同図(b)はタイムウィンドウ内の最大加速度の計算結果であり、2方向の最大値を採用して連続プロットした結果である。120秒あたりでピークとなる単峰型の変化となっている。同図(c)は(a)と(b)の計算結果をもとに式(15)により変位振幅に換算したプロットである。長周期化に伴って変位振幅が大きくなるため、後半部でも大きな振幅となっている。

図-6(b)に示した最大加速度を縦軸に、同図(c)に示した相対変位を横軸にとって連続プロットとしたのが図-7である。加速度振幅が小さくなる過程でも変位が大きくなるために、横に広がった図形が得られる。加速度が170cm/s以上になると地盤の剛性が低下して長周期化し、変位振幅が大きくなるのが理解できる。その後も長周期化した揺れが継続するが加速度振幅が小さくても変位振幅が大きい状態が続くため、横に広がったグラフとなる。

台地の観測点の例として K-NET 新宿の計算結果を図-10に示す。加速度波形は省略しているが、最大200cm/s程度であり稲毛と同等である。加速度が70cm/sのときに変位が大きくなるが一瞬であり、縦軸側に寄った図形となっている。140秒以降において周期2秒から3秒の揺れが継続するが、このことは横軸に沿った図形から判読できる。

K-NETの公開データの分析を進めている途中であるが、稲毛と同様のグラフとなった土浦と仙台の計算結果を図-11と図-12に示している。加速度が最大値になるあたりで長周期化した揺れになって相対変位が急に大きくなっている。液状化の有無の報告はされていないが、地盤の非線形化の特徴をもつグラフであり詳細に分析する必要がある。

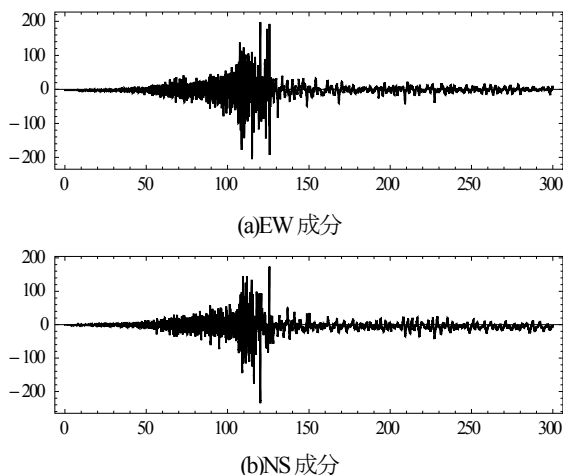
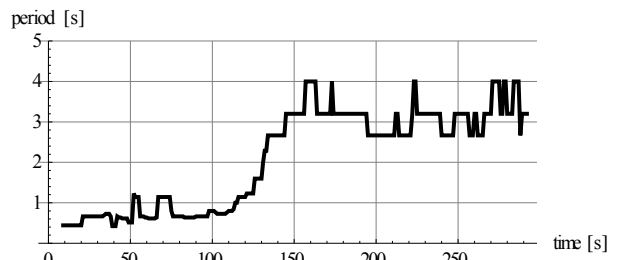
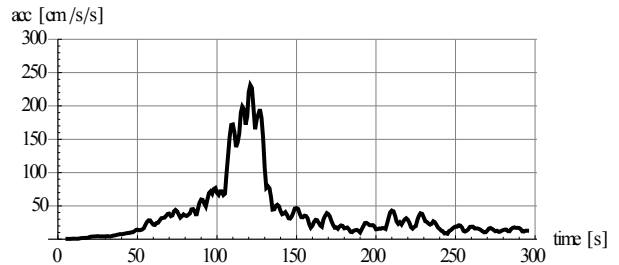


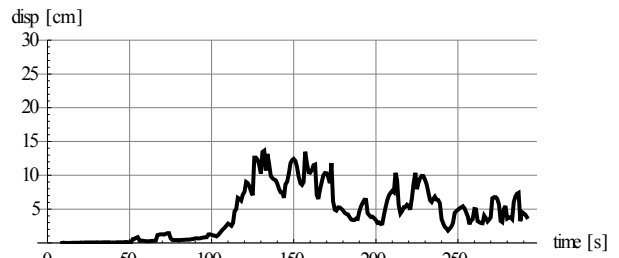
図-7 K-NET 稲毛の観測波形 (2011. 3. 11)



(a) 卓越周期の時間変化



(b) 加速度振幅の時間変化



(c) 相対変位振幅の時間変化

図-8 K-NET 稲毛の計算結果

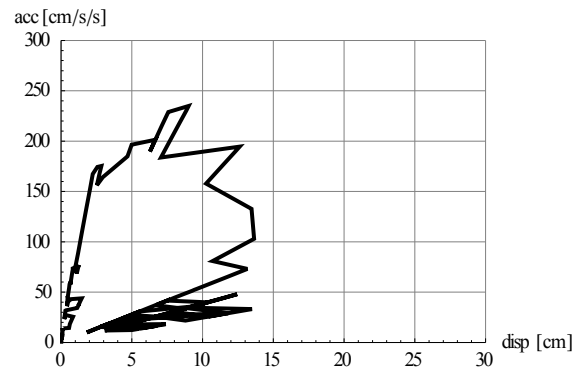


図-9 K-NET 稲毛の振幅特性図



図-10 K-NET 新宿の振幅特性図

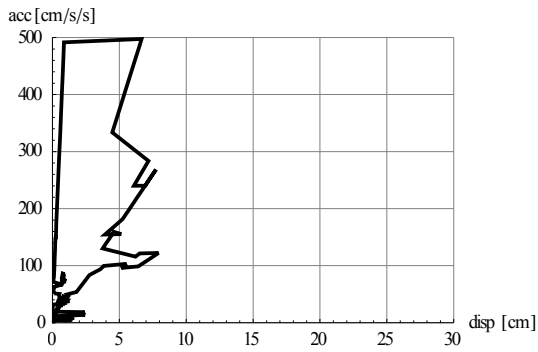


図-11 K-NET土浦の振幅特性図

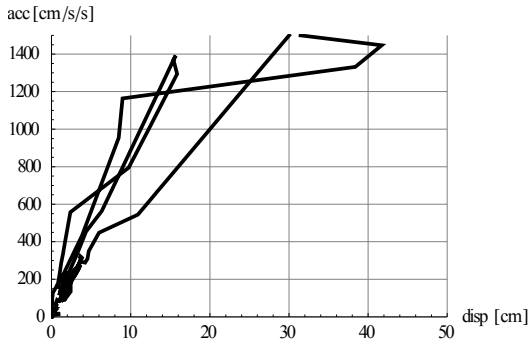


図-12 K-NET仙台の振幅特性図

(3) 地盤の変化の分析

前掲したK-NET稲毛は深さ20mまでのボーリングデータが公開されている⁷⁾。それによると地表付近は埋土であり、その下は20mまで砂層となっている。特に地下4mまでの砂層はN値が小さく液状化しやすい条件となっている。この層が液状化したと仮定して簡単な分析を行ってみる。

表-1に図-8から読み取った特性値を整理している。特性値を精度良く決めるには判断ルールが必要とされるが、図-5と対比して概略値を決めている。表-2に分析結果の数値をまとめている。基盤層の位置は確認できないため、30[m]と仮定している。液状化により固有周期が約1秒長くなる結果となっている。液状化層厚を4mと設定してせん断波速度を式(14)を用いて計算すると17[m/s]が得られる。およそ1/10倍になっており、剛性で見ると1/100倍になっていることがわかる。

次に液状化層の強度を推定する。4mの層厚として式(6)を用いて計算すると12[kPa]が得られる。4m以深のN値も小さく液状化の可能性はあるが、地表の観測情報から深さ方向の分析まではできない。砂の単位重量を17[kN/m³]、地下水が地表までであると仮定して4m位置の有効上載圧を計算すると28[kPa]となり、せん断角に換算すると $\phi=23$ [度]が得られる。緩い飽和砂層とすれば妥当な強度となっている。

地表の観測情報とボーリングデータを用いて液状化に関する情報を抽出する例を示したが、時間変化する地中の状態の概略を知ることができる。こうした知見の蓄積

は地震動から液状化程度を判定する手法の開発に発展できると考えている。

表-1 K-Net稲毛の特性値

項目	値
降伏変位 U_y	0.02[m]
降伏加速度 A_y	1.7[m/s/s]
最大変位 U_{max}	0.13[m]
最大加速度 A_{max}	2.0[m/s/s]

表-2 K-Net稲毛の分析結果

項目	値
降伏前の固有周期 T_1	0.68[s]
降伏後の固有周期 T_2	1.6[s]
表層厚 (仮定) H	30[m]
液状化範囲 h_1, h_2	0[m], 4[m]
液状化前のせん断波速度 V_1	180[m/s]
液状化層のせん断波速度 V_2	17[m/s]
液状化層の強度	12[kPa]

6. まとめ

軟弱な堆積層が強震を受けると非線形な震動が起こる。特にゆるい砂地盤では液状化現象が発生し、地震被害を大きくする。本研究は水平2成分の地震波形を非線形特性を判読できるグラフに変換する方法を提案している。地震動の卓越周期と加速度振幅の時間変化を計算し、相対変位振幅に変換する。加速度振幅は外力を表し、相対変位振幅は応答を表すことになるので、両者の時間変化は地盤の応答特性となる。この方法によれば、液状化が見られた地点の振幅特性図は横に広がった図形となり、図形から非線形特性を判読できる。

東北地方太平洋沖地震のデータを用いて計算例を示しているが、今後液状化の痕跡が見られた近傍の観測データの解析を進め、液状化程度により、図形がどのように変化するか検討する予定である。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所のK-Netデータを使用しました。データの公開に感謝します。

参考文献

- 1) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告書共通編 1 地震・地震動, 4.3 液状化地盤における地震動, 2014.
- 2) 宮島昌克, 野津智, 北浦勝, 山本真樹：強震記録を用いた液状化検知法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.

- 647, I -51, pp. 405-414, 2000.
- 3) 清野純史, 土岐憲三, 森下昌浩 : 地表面観測波形を用いた液状化発生の判別法, 地域安全学会論文集 No. 1, pp. 35-42, 1999.
 - 4) 高田至郎, 尾崎竜三 : 地表面強震記録にもとづくリアルタイム液状化判別手法, 土木学会論文集 No. 640, I -50, pp. 99-108, 2000.
 - 5) Kostadinov, M.V., Yamazaki, F. : Detection of soil liquefaction from strong motion records, Earthquake Engng Struct. Dyn. , 30, pp.173-193, 2001.
 - 6) T.Yanada,H.Furukawa,S.Ichida,K.Takubo,Y.Shimizu,K.Koganemaru, T.Suzuki : Earthquake Sensor, Sensors Update Vol.11, pp.161-217, 2003.
 - 7) 防災科学技術研究所 : 強震観測網 (K-NET,KiK-net) .

DETECTING METHOD FOR NON-LINEAR CHARACTERISTICS OF GROUND USING STRONG GROUND MOTION

Takanobu SUZUKI

This report proposes a simple detecting method for non-linear characteristics of surface layer of the ground. Calculating time variation of dominant period and acceleration amplitude from ground motion record, relative displacement is calculated. The change of acceleration and displacement can be expressed in the characteristic diagram, then non-linear characteristics is known from the shape of the diagram.