

地中に大きなせん断ひずみを生じさせる 基盤入力地震動の波形特性についての考察

志波 由紀夫¹・坂下 克之²・畑 明仁³

¹フェロー会員 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: shiba@ce.aisei.co.jp

²正会員 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: katsuyuki.sakashita@sakura.aisei.co.jp

³正会員 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: hata@ce.aisei.co.jp

地中構造物にとって、地震時に周囲地盤が大きく変形する(ひずむ)ことは、耐震上、非常に厳しい条件になる。本論文は、どのような基盤入力地震動波形が地中(地中構造物の周囲地盤)に大きなひずみを生じさせるのかについて考察した前報の成果に、新たな知見を加えるものである。ここでは、基盤の運動速度が孤立三角波となる、1サイクル矩形波を基盤入力加速度波形として取り上げ、これによる加振で軟らかい表層に生じるせん断ひずみを解析的に求めた。そして、この加振条件での表層内のひずみの生起メカニズムを解き明かすとともに、基盤の運動速度の大きさとその立ち上がり時間が生起ひずみの大きさを支配することを示した。また、実地震動のように不規則な基盤入力加速度波形に対する表層のひずみ応答においても、そうしたミクロなメカニズムが発現することが強く推定された。

Key Words: subsurface, earthquake response, shear strain, base-rock motion, analytical study

1. はじめに

地中構造物の地震時挙動は、周囲の地盤と一体にして見た構造系の、地震応答加速度と変形状態(応答変位の空間分布)、そして地中構造物・周囲地盤の間の相互作用でまざる。こうした基本認識に基づいて、地中構造物の横断面方向の耐震計算法の代表例である応答変位法では、周囲地盤を含めた地中構造物の力学モデルとして、外周に「地盤ばね」をはりめぐらせた骨組みモデルを考え、それへの地震外力として、地震応答加速度に対応した「躯体慣性力」、周囲地盤の変形にともなう「地震時周面せん断力」、および周囲地盤との相互作用の効果をとり入れるための「地震時地盤変位(自然地盤の変位)」を考慮している(例えば^{1)~2)}。これら地震外力の中では、周囲地盤に対して見かけの比重が小さい地中構造物は「躯体慣性力」の影響は一般的に小さく、ほかの2つ、すなわち、周囲地盤の変形に関わる外力の影響が支配的である。したがって、地中構造物にとって、地震時に周囲地盤が大きく変形する(ひずむ)ことが、耐震上、非常に厳しい条件になる。言い換えると、地中構造物にとって

厳しい地震動とは、地表面その他の位置で大きな加速度をもつものではなく、地中構造物が位置する深さの地盤に大きなせん断ひずみを生じさせる地震動である。

そこで、「地中に大きな応答ひずみを生じさせる地震動とはどういうものか」という視点から、著者らはこれまでに、地震応答計算に用いる基盤入力地震動波形に関していくつか検討を行ってきた。一つは、基盤入力地震動波形(加速度波形)が与えられたとき、それが1次元の均質な表層地盤のどの深度にどれだけの大きさのせん断ひずみを生じさせるかを、表層の固有周期ごとに表示するグラフの提案であり、これを「地盤応答スペクトル」と称した³⁾。もう一つは、基盤入力地震動波形の中のどのような因子がせん断ひずみの生起に働くのか、についての考察である⁴⁾。そこでは、基盤入力地震動波形を形作る要素波として、インパルス波と1サイクル正弦波の2種類で抽象化して考え、それぞれの波によって表層に生じるせん断ひずみの特性について解析的に検討した。そして、それら要素波の運動速度と生起ひずみの大きさとの関係を明らかにするとともに、基盤が運動して表層内にひずみが生起するまでの一連のメカニズムを整理した。

しかし、きわめて単純な基盤入力波形に対する表層内のひずみの生起については、いくらか解明できたが、一般の不規則な加速度波形については、「どのような波形が地中に大きな応答ひずみを生じさせるのか」というそもそもの問題に対して満足な答えが出せなかった。

そこで本論文では、前述の第二の研究を一步進めて、この基本問題に対して新たな知見を加えたいと思う。前の研究の重要な成果として、地中に大きなひずみを生じさせる基盤加振波の条件に、大振幅の速度位相をもつこと、その速度位相がシャープに立ち上がること、などがあることが判明している。これを受けて本論文では、基盤入力加速度波形として、1サイクル矩形波を取り上げる。この要素波の場合、基盤の運動速度波形は孤立三角波となり、最大速度とその立ち上がり時間の2つの影響をパラメトリックに検討できるからである。そして、1サイクル矩形波による加振で表層内に生じるせん断ひずみの大きさとともに、その生起メカニズムを解き明かす。また、不規則な基盤入力加速度波形に対する表層のひずみ応答についても、こうした要素波において成り立つメカニズムが発現するかどうか検証する。

2. ここでの論点および前報で得た知見

(1) 検討の対象と設定条件

ここで議論するのは、図-1 に示すように、基盤と表層とで構成された地盤構造の一次元震動（SV 波の鉛直入射によるせん断震動）の問題である。基盤層を加振した（加速度運動させた）ときに表層内に生じるせん断ひずみの生成について議論するものである。ここで設定した条件等は、以下のとおりである。

- i) 表層は、均一な単層とする。
- ii) 表層は、Voight型の線形粘弾性体とする。
- iii) 基盤層は剛である。

- iv) 基盤入力地震動は、基盤層そのものの運動としてとらえる。
- v) 解析的検討では、以下の記号を使用する。
 z : 地表面から測った深さ
 t : 時間
 $y(t)$: 基盤面の変位（入力地震動の変位）
 $u(t, z)$: 表層の深さ z での絶対変位
 $x(t, z)$: 表層の深さ z での相対変位 ($x = u - y$)
 $\tau(t, z)$: 表層の深さ z でのせん断応力
 $\gamma(t, z)$: 表層の深さ z でのせん断ひずみ
 H : 表層の厚さ
 ρ : 表層の質量密度
 G : 表層のせん断弾性係数
 V_s : 表層を伝わるせん断波の速度 ($V_s = \sqrt{G/\rho}$)
 η : 表層の粘性係数
 ω : 振動の円振動数（角周波数）
 h : 表層の減衰定数で、粘性係数 η が ω に逆比例すると考え、 $h \equiv \eta \cdot \omega / 2G$ で定義する。すなわち、履歴減衰型の減衰機構³⁾⁶⁾であるとする。
 T : 表層の固有周期
 $\dot{}, \ddot{}$: 時間に関する1階微分, 2階微分 (ex. $\ddot{u}$ は表層の絶対加速度)
 m : 表層の固有振動モードの次数 (ω, T 等の添え字としても使う)

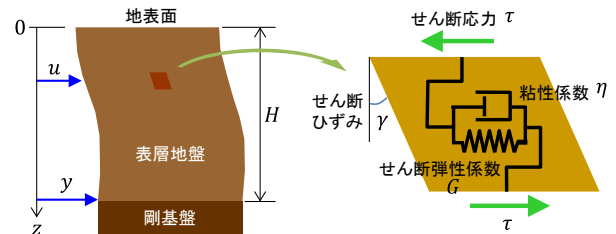


図-1 地盤モデル

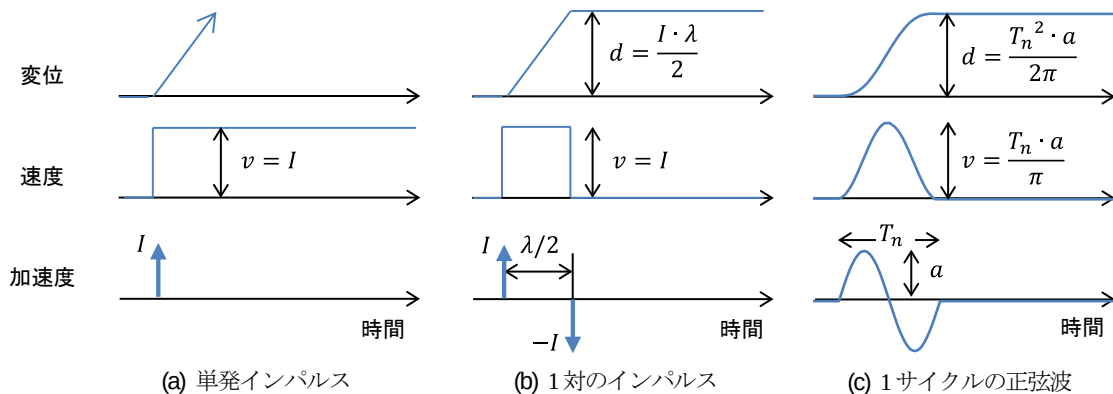


図-2 前報で検討した基盤入力要素波

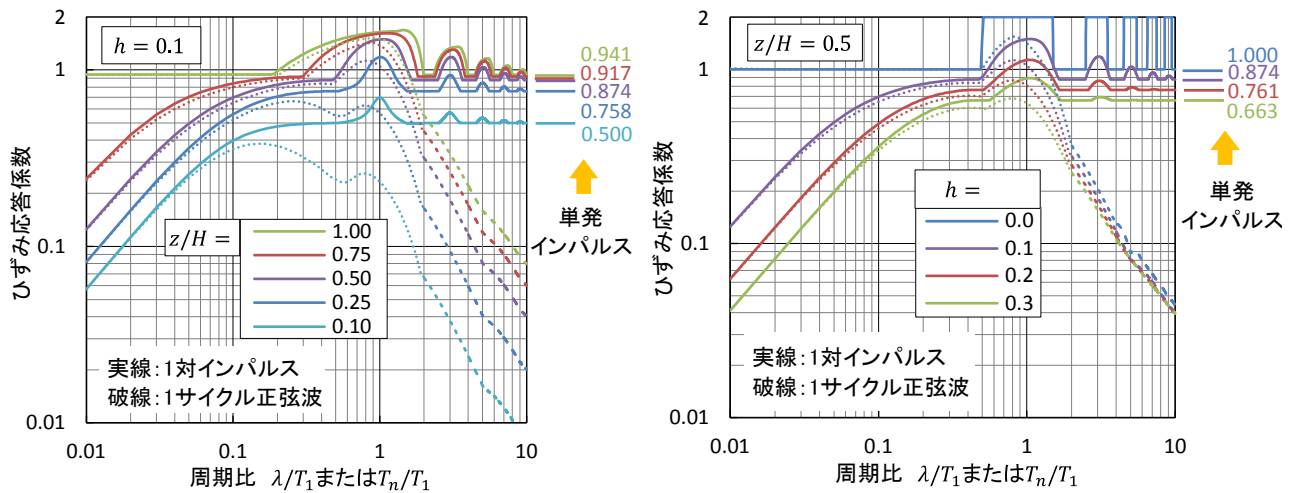


図-3 各種要素波入力に対するひずみ応答係数⁴⁾ (左図：減衰定数一定，深度変化 右図：深度一定，減衰定数変化)

(2) 前報で得た知見

前報⁴⁾では，図-1 に示した地盤について，剛基盤を単発インパルス，1 対のインパルス，および 1 サイクルの正弦波（図-2 参照）という要素波で，それぞれ加速度運動させたときに表層内に生じるせん断ひずみの解析解を求めた．そして，それら解析解から基盤の運動の強度と表層の応答ひずみの大きさとの関係を考察して，大略，以下のような知見を得た．

- i) これら要素波により表層内に生じるせん断ひずみの大きさ（応答ひずみ波形の最大値） γ_{max} は，

$$\gamma_{max} = \text{「ひずみ応答係数」} \times \text{「基底値」} \quad (1)$$

の形式で表すことができる．ここに「基底値」とは，基盤面で生まれるひずみ波動の振幅として全体に共通する量で，

$$\text{基底値} = \frac{\text{基盤の運動速度}}{\text{表層のせん断波速度} V_s} \quad (2)$$

という大きさである．また，「ひずみ応答係数」とは，ひずみ波動の多重干渉の条件が反映された応答倍率であり，図-3に示すように，表層の減衰定数 (h)，表層内の深度 (z/H)，表層の1次固有周期 T_1 に対する要素波の周期の比 (λ/T_1 または T_n/T_1) によって異なる値をとる．なお，表層に減衰がなく，地表面での波動の反射がないという場合には，「ひずみ応答係数」は1で， $\gamma_{max} = \text{基底値}$ となる．

- ii) 表層内にひずみが生成されるメカニズムは，図-4のように説明できる．すなわち，基盤層の運動により基盤面においてひずみ波動が生まれる．それが表層内に送出され，波動伝播に則って地表面と基盤面との間で反射を繰り返す．その上昇波・下降波が多重

干渉した結果として，深度ごとに異なる大きさのひずみが生じる．「ひずみ応答係数」は，それが反映されたものである．

- iii) 表層内に大きなひずみを生じさせる基盤加振波の条件（速度波形にして見た条件）として挙げられるのは，① 大振幅の速度位相をもつこと，② シャープな立ち上がり／立ち下がりの位相をもつこと，③ 表層の固有周期に近接した周期をもつこと，である．

3. 1 サイクル矩形波加振による表層内のひずみ

(1) 検討の目的

先述のとおり，前報では3種類の要素波を取り上げ，それらによる解析的検討から，表層内に大きなひずみを

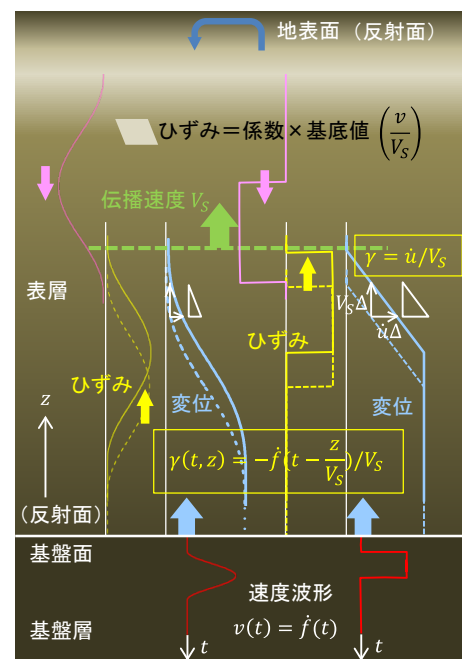


図-4 ひずみ生起のメカニズムの説明⁴⁾

生じさせる基盤加振波の条件に関していくつかの知見を得た。しかし、特に、シャープな立ち上がり／立ち下がりを見せる大速度の位相が大きなひずみを生起させるということについては、そのシャープさの程度と生起ひずみとの関係にまで踏み込めていなかった。

そこで本論文では、この課題について明確な答えを出し、どのような基盤入力加速度波形（あるいは速度波形）が表層に大きな応答ひずみを生じさせるのかという問題に、知見を付け加えたいと思う。そのために、基盤入力加速度波形として、図-5に示す振幅 a 、周期 ξ の矩形波を1サイクルだけ入力する場合を取り上げる。この加振条件では、基盤の運動速度波形は孤立三角波となり、速度のピーク値 c とその立ち上がりの時間（シャープさ） ξ の2要素をもつ最も単純な要素波となるからである。

次節でこの1サイクル矩形波による加振で表層に生じるせん断ひずみを定式化した後、生起するひずみの大きさやその生成メカニズムなどを調べる。

(2) 表層に生じるせん断ひずみの定式化

図-1に示した地盤の動的挙動を規定する運動方程式は、次のとおりである（以下の地盤震動の定式化については、文献3)と4)も参照されたい）。

$$\ddot{x} - V_s^2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\eta}{G} \cdot \dot{x} + x \right) = -\ddot{y} \quad (3)$$

基盤加速度 $\ddot{y}$ を図-5の1サイクル矩形波とし、その加振開始時を $t = 0$ とすると、 $0 \leq t \leq \xi/2$ の時間帯では、式(3)における $\ddot{y}$ は、 $\ddot{y} = a (= 2c/\xi)$ となる。そしてその一般解は、 A_m 、 B_m を任意定数として、

$$x(t, z) = \left[\sum_{m=1}^{\infty} e^{-h\omega_m t} \cdot \left(A_m \cdot \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m \cdot t + B_m \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m \cdot t \right) \cdot \cos \left(\frac{\omega_m \cdot z}{V_s} \right) \right]$$

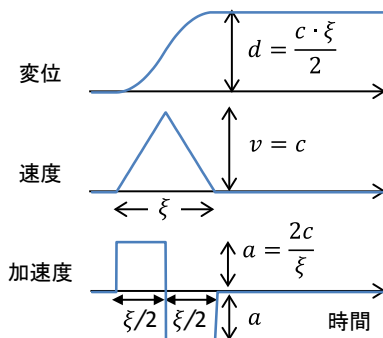


図-5 1サイクル矩形波（加速度）と基盤の運動速度・変位

$$-\frac{\rho \cdot a}{2G} \cdot (H^2 - z^2) \quad (4)$$

となる。ただし、

$$\omega_m = \frac{2m-1}{2} \cdot \pi \cdot \frac{V_s}{H} \quad (5)$$

$$h = \frac{\eta \cdot \omega_m}{2G} \quad (6)$$

である。式(4)の第2項は

$$\frac{\rho \cdot a}{2G} \cdot (H^2 - z^2) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1} \cdot 4}{(2m-1) \cdot \pi} \cdot \frac{a}{\omega_m^2} \cdot \cos \left(\frac{\omega_m \cdot z}{V_s} \right) \quad (7)$$

と書けるので、式(3)の運動方程式の一般解は、式(8)のように書き表すことができる。

$$x(t, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ e^{-h\omega_m t} \cdot \left(A_m \cdot \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m \cdot t + B_m \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m \cdot t \right) - \frac{(-1)^{m-1} \cdot 4}{(2m-1) \cdot \pi} \cdot \frac{a}{\omega_m^2} \cdot \cos \left(\frac{\omega_m \cdot z}{V_s} \right) \right\} \quad (8)$$

式(8)は表層の応答変位を記述したものであるが、これを時間で微分すれば応答速度の式が得られる。そして、 $t = 0$ において地盤全体が静止していたという条件、すなわち $x(0, z) = 0$ かつ $\dot{x}(0, z) = 0$ を満足させる条件から、任意定数 A_m 、 B_m が次のように決まる。

$$A_m = \frac{(-1)^{m-1} \cdot 4}{(2m-1) \cdot \pi} \cdot \frac{a}{\omega_m^2} \quad B_m = \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot A_m \quad (9)$$

これにより、 $0 \leq t \leq \xi/2$ の時間帯における表層の応答変位は、

$$x(t, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1} \cdot 4}{(2m-1) \cdot \pi} \cdot \frac{a}{\omega_m^2} \cdot \left\{ e^{-h\omega_m t} \cdot \left(\cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m \cdot t + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m \cdot t \right) - 1 \right\} \cdot \cos \left(\frac{\omega_m \cdot z}{V_s} \right) \quad (10)$$

と定式化される。また、式(10)の時間微分により速度および加速度の応答が、 z による微分 $\partial x / \partial z$ によりせん断ひずみの応答が、それぞれ定式化される。

次に、 $\xi/2 \leq t \leq \xi$ の時間帯では、運動方程式(3)における $\ddot{y}$ は $\ddot{y} = -a (= -2c/\xi)$ となり、その一般解は、式

(8)において a を $-a$ に、 t を $t - \xi/2$ に、それぞれ置き換えた形となる。また、任意定数は、 $t = \xi/2$ において、前の時間帯で定式化された変位・速度とこの時間帯で定式化される変位・速度とが連続する条件から決定される。

最後に $\xi \leq t$ の時間帯については、式(8)の a をゼロに、 t を $t - \xi$ に、それぞれ置き換えたものが変位の一般解となり、 $t = \xi$ における変位・速度の連続条件から、任意定数が決まる。

以上のようにして、1サイクル矩形波加振による表層の応答が定式化されるが、ここで、式(10)等におけるパラメータの視察に基づき、いくつかの無次元化パラメータを導入して、表層の応答を正規化して示すことにする。こうすると、後のデータ整理や考察がしやすくなるからである。導入する無次元化パラメータは、次のとおりである。

$$t^* = \frac{t}{T_1} \quad \xi^* = \frac{\xi}{T_1} \quad z^* = \frac{z}{H} \quad \omega_m^* = (2m-1) \cdot 2\pi$$

ここに $T_1 = \frac{4H}{V_s}$ (表層の1次固有周期) (11)

正規化した応答のうち、せん断ひずみの式を示すと、以下ようになる。

① $0 \leq t \leq \xi/2$ の時間帯：

$$\frac{\gamma(\xi^*, z^*, h, t^*)}{c/V_s} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot 16}{\omega_m^* \cdot (\omega_m^* \cdot \xi^*)} \cdot \left\{ e^{-h \cdot \omega_m^* \cdot t^*} \cdot \left(\cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot t^* \right. \right.$$

$$\left. + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot t^* \right) - 1 \left\} \cdot \sin \left(\frac{\omega_m^*}{4} \cdot z^* \right) \quad (12a)$$

② $\xi/2 \leq t \leq \xi$ の時間帯：

$$\frac{\gamma(\xi^*, z^*, h, t^*)}{c/V_s} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot 16}{\omega_m^* \cdot (\omega_m^* \cdot \xi^*)} \cdot \left[1 - 2e^{-h \cdot \omega_m^* \cdot (t^* - \frac{\xi^*}{2})} \cdot \left\{ \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot \left(t^* - \frac{\xi^*}{2} \right) + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot \left(t^* - \frac{\xi^*}{2} \right) \right\} + e^{-h \cdot \omega_m^* \cdot t^*} \cdot \left\{ \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot t^* + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot t^* \right\} \right] \cdot \sin \left(\frac{\omega_m^*}{4} \cdot z^* \right) \quad (12b)$$

③ $\xi \leq t$ の時間帯

$$\frac{\gamma(\xi^*, z^*, h, t^*)}{c/V_s} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot 16}{\omega_m^* \cdot (\omega_m^* \cdot \xi^*)} \cdot \left[e^{-h \cdot \omega_m^* \cdot (t^* - \xi^*)} \cdot \left\{ \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot (t^* - \xi^*) + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot (t^* - \xi^*) \right\} - 2e^{-h \cdot \omega_m^* \cdot (t^* - \frac{\xi^*}{2})} \cdot \left\{ \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot \left(t^* - \frac{\xi^*}{2} \right) + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot \left(t^* - \frac{\xi^*}{2} \right) \right\} + e^{-h \cdot \omega_m^* \cdot t^*} \cdot \left\{ \cos \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot t^* + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \sin \sqrt{1-h^2} \cdot \omega_m^* \cdot t^* \right\} \right]$$

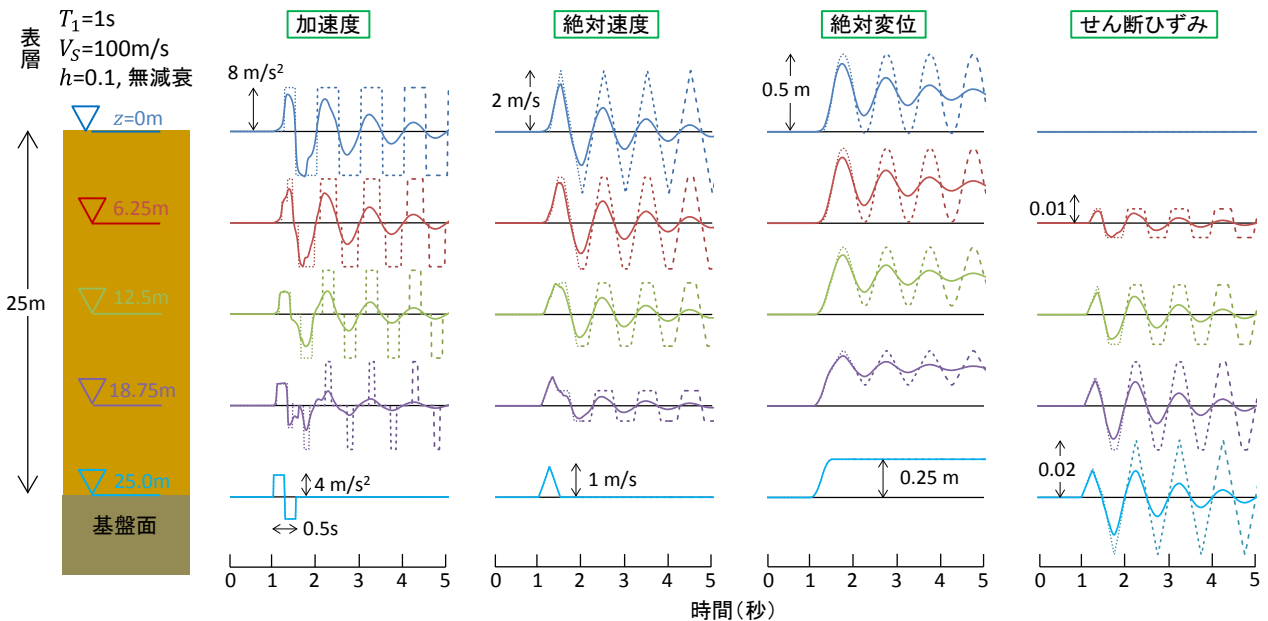


図-6 1サイクル矩形波入力に対する表層の応答の計算例
(実線は減衰定数が0.1の地盤の場合、破線は減衰のない地盤の場合)

$$\cdot \sin\left(\frac{\omega_m^*}{4} \cdot z^*\right) \quad (12c)$$

実際に応答波形を計算した例を図-6に示す。層厚 H が25m、せん断波速度 V_s が100m/s、1次固有周期 T_1 が1sの地盤を、加速度振幅 4m/s^2 、周期 $\xi = 0.5\text{s}$ の1サイクル矩形波で加振したものである。この場合、基盤の運動速度（孤立三角波）のピーク値は 1m/s となる。本計算例では、表層の減衰定数 h を0.1とした場合と無減衰の場合とで比較している。減衰がある地盤の応答は、加振開始直後は、そして基盤面に近いところでは、基盤面での波形に近い形をしているが、時間の経過とともにその波動の層内伝播が進むにしたがって形が崩れていく。また、 T_1 の周期で振動しつつ減衰していく。一方、無減衰の地盤では、加振中は過渡応答の状態では応答波形が不定形であるが、基盤の地震動入力終了したときから、周期 T_1 の幾何学的な応答波形となり、これが形を変えずに定常化する。

(3) ひずみ応答係数

上に定式化した結果から分かるが、表層のせん断ひずみの応答最大値は、式(12)を計算することにより得られ

る時刻歴波形の最大値として、

$$\gamma_{\max}(\xi^*, z^*, h) = \text{定数} \times \frac{c}{V_s} \quad (13)$$

の形式で表すことができる。これは式(1)、(2)との対比により、「定数」が「ひずみ応答係数」に、 c/V_s が「基底値」に、それぞれ対応するものである。したがって、1サイクル矩形波加振でのひずみ応答係数を μ_γ^R と表記することになると、

$$\gamma_{\max} = \mu_\gamma^R\left(\frac{\xi}{T_1}, \frac{z}{H}, h\right) \times \frac{c}{V_s} \quad (14)$$

となる。 μ_γ^R には、表層の1次固有周期に対する矩形波周期の比である ξ/T_1 、表層厚に対する着目深さの比である z/H 、および表層の減衰定数 h の3つのパラメータが関与する。

実際に図-3と同じパラメータ範囲で μ_γ^R を算出した結果を図-7に示す。図-7と図-3とを見比べると、1サイクル矩形波加振のひずみ応答係数は1サイクル正弦波加振のそれと全体的によく似ている。1サイクル正弦波の場合のひずみ応答係数の特徴については前報に示したが、ここでも改めて図-7に見られる特徴を整理してみる。

i) 表層の深部ほど、係数の値が大きい。すなわち、深

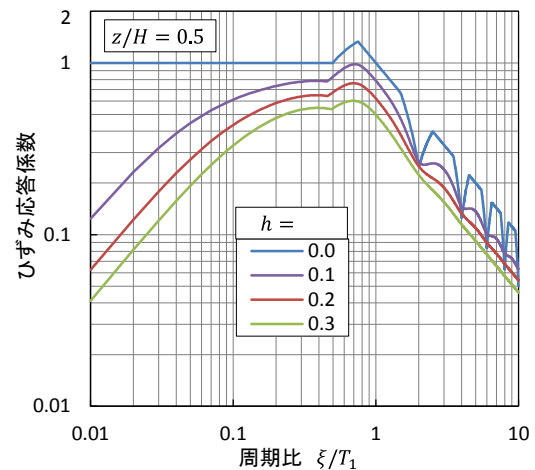
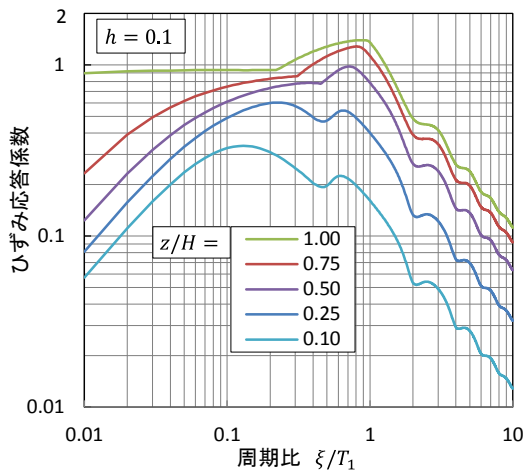


図-7 1サイクル矩形波入力に対するひずみ応答係数（左図：減衰定数一定、深度変化 右図：深度一定、減衰定数変化）

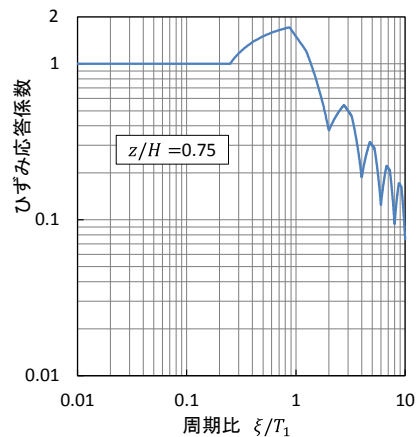
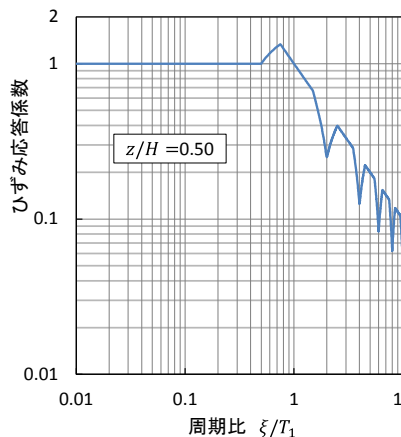
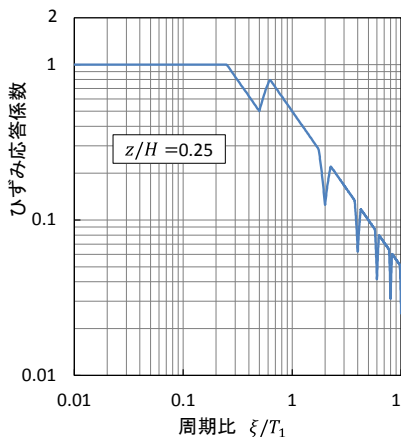


図-8 無減衰地盤の1サイクル矩形波入力に対するひずみ応答係数

部ほどひずみが大きく生じる。

- ii) 深部においては，入力波周期が表層の 1 次固有周期に近いとき ($\xi/T_1 = 1$ の近傍で)，値が特に大きくなる。
- iii) z/H が概ね 0.25 以下の浅部においては，1 次固有周期に近い周期の入力波よりも，短周期の入力波の方が値が大きい。

(4) 無減衰地盤でのひずみ応答係数の特性

ひずみ応答係数 μ_y^R のグラフ図-7 は複雑な曲線群になっていることから，表層に生じるせん断ひずみの生成メカニズムは，かなり複雑であるように見える。そこで，3 つある条件パラメータのうちから減衰の項目を取り去った，無減衰地盤の場合について見てみることにする。

無減衰地盤 ($h = 0$) のひずみ応答係数を図-8 に示す。これは z/H として 0.25, 0.50, 0.75 の 3 つの深度について μ_y^R を計算したものである。なお， $z/H = 0.50$ については，図-7 の右図にも表示がある。これらを見て，以下の特徴を挙げることができる。

- i) 周期比 ξ/T_1 がある値を下回ると， μ_y^R が 1 で不変になる。 μ_y^R が 1 ということは，発生するせん断ひずみの最大値が，基底値（基盤面で生まれたひずみの大きさ）そのものであるということである。そのようになる ξ/T_1 領域の境界値は深度によって異なっている。ただし，深度が大きいほど ξ/T_1 の境界値が大きい／小さい，というような単調なものにはなっていない。
- ii) 一方，その境界よりも大きい周期比の領域での μ_y^R の様子は，振動の減衰性を考慮していないにも関わらず，かなり複雑である。大きな傾向としては， ξ/T_1 に反比例して値が低下する。しかし， z/H が 0.50 の場合と 0.75 の場合には $\xi/T_1 = 1$ の近傍で 1 を超える（ひずみが基底値よりも増幅される）が， z/H が 0.25 の場合にはそれがない。また， ξ/T_1 がちょうど偶数の整数値となるところを底点として， μ_y^R は谷形

に落ち込んでいる。

- iii) 図-7 の右図によれば，減衰がある場合は無減衰の場合よりも μ_y^R は小さくなる。それは h が大きくなるほど小さくなる。また， ξ/T_1 が小さい（入力波の周期が短い）ほど，減衰によるひずみ低下が激しくなる。

(5) ひずみ生成のメカニズム

このように，無減衰地盤の場合であっても，ひずみ応答係数の特性は単純ではなく，ひずみ生成のメカニズムは複雑そうに見える，確かに図-8 にはいくつかの顕著な法則性が認められるが，それらを式(12)の数式の解釈によって解き明かすのは，難かしいと思われるし，地震動の現象として具体的な像をつかめるとはかぎらない。そこで以下では，図-8 のような結果が得られる理由を，式(12)から離れて，図-4 を前提にしつつ，減衰がない地盤では波動が形を変えずに伝播するという性質（図-6 参照）に基づいて説明しようと思う。

図-9 は，図-4 を基盤層の加速度運動によって発生したひずみ波動の表層内伝播という視点から書き改めたものである。弾性波動は，自由境界である地表面で反射するときは，位相が反転する。一方，固定境界である基盤面で反射するときは，位相は反転しないでそのまま帰っ

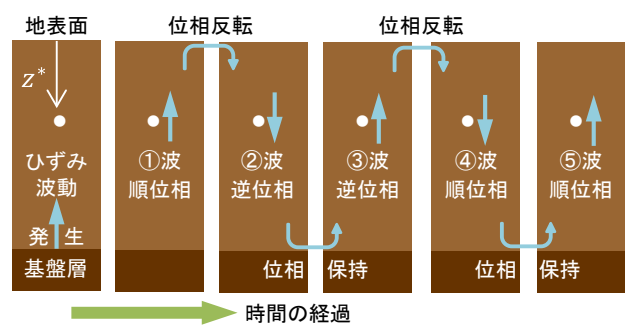


図-9 ひずみ波動の表層内伝播

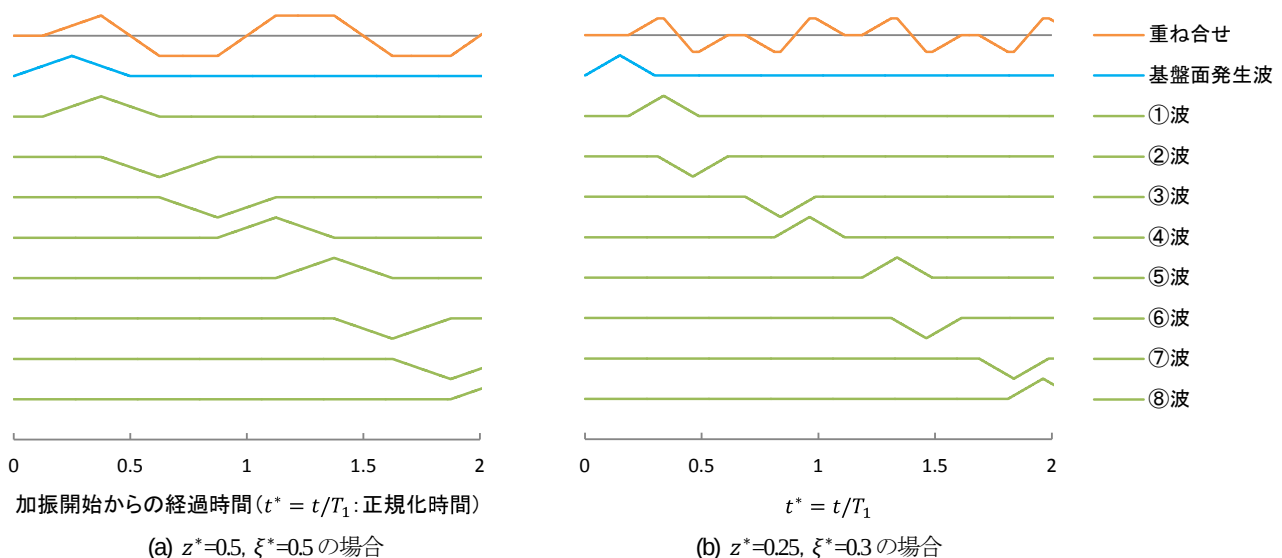


図-10 ひずみ波動の表層内伝播を説明した図-9 の具体的な例

て行く。そこで、任意の深度 z^* ($= z/H$) に着目すると、まず、基盤面で発生したひずみ波動が上昇してきて順位相の形でこの地点を通過する (①波)。波動は地表面に当たり位相が反転して下降する。それが z^* 地点を通過するとき (②波) は逆位相の形になっている。その下降波は基盤面に当たって反転して再び上昇波となるが、このときは位相は保持されたままであり、②と同じ極性、つまり元とは逆位相の形で z^* 地点を通過する (③波)。以下、④波、⑤波、・・・が、同様の様態で通過していく。ここで、せん断ひずみの波動は、基盤運動の速度波形と同形であるので⁴⁾ (図-4 参照)、1 サイクル矩形波で基盤を加振した場合には、孤立三角波となる。また、既述のとおり、無減衰地盤では (反射面で位相反転は別として) この形が変わらない。そして、 z^* 地点に生じるせん断ひずみは、これらの①波、②波、③波・・・が全て重なったものになる。このとき、前の孤立三角波の終端が通過した後に次の孤立三角波の始端が到達するときは、ひずみの干渉は起こらない。しかし、先行と後行の波が一部でもラップする場合は、ひずみの干渉が起こる。

以上のひずみ生成のプロセスを可視化するのは容易である。波動位相の順・逆と z^* 地点を通過する位相遅れ時間とを反映させた孤立三角波の時刻歴を①波、②波、③波・・・と用意し、これらを単純に足し合わせればよい。これを実際にシミュレートしてみた結果を図-10 に示す。(a)は、図-6における 12.5m の深さでのひずみを再現しようとしたもので、深度 z^* が 0.5、加振周期比 $\xi^* = \xi/T_1$ が 0.5 という条件になっている。図示した時間帯 (正規化時間 $t^* = t/T_1$ が 0 から 2 まで) については、①波から⑧波までが z^* 地点を通過する計算になる。ここでは①波と②波、②波と③波、③波と④波、などで一部重なりが見られ、ひずみ波動の干渉が生じる。そして、これらを全て重ね合わせた結果は、図-6 のひずみ波形と完全に一致する。(b)の例は、 $z^*=0.25$ 、 $\xi^*=0.3$ という条件の場合である。こちらでは、①波と②波、③波と④波、などで一部重なりがあるが、①+②波と③+④波での重なりはない。全ての上昇波・下降波を重ね合わせた結果のひずみ波形は、(a)のものと大きく異なっている。

このようなシミュレーションを z^* と ξ^* の組合せをいろいろに変えて行くと、ひずみ波動の時刻歴波形とともに、その最大値 (ひずみ応答係数 μ_y^R) も理論的に算出される。これは式(12)とは別に、①②③・・・の孤立三角波の重ね合わせの幾何学的計算から求まるものである。その結果を、チャート図にして図-11 に示す。この図では横軸に z^* を、縦軸に ξ^* を取り、(z^* , ξ^*) の組合せの位置に、その組合せ条件に対する μ_y^R の理論式を表示した。図面が三角形のモザイク状に多数色分けされているのは、各領域で理論式が異なるからである。そのために、領域境界の線分の式も表示してある。ちなみに、こうした境目ができるのは、波動の干渉の仕方 (三角波のピークが減殺されるか、されないかなど) が、 z^* と ξ^* のある組合せの条件以上と以下とで変化するためである。

図-11 によれば、例えば図-10(a)のケース ($z^*=0.5$ 、 $\xi^*=0.5$) は、3 つの小領域の境目に当たり、 $\mu_y^R=1$ となる。また、同図 (b) のケース ($z^*=0.25$ 、 $\xi^*=0.3$) は、 $\mu_y^R=z^*/\xi^*$ で算定される領域にあり、ひずみ応答係数は

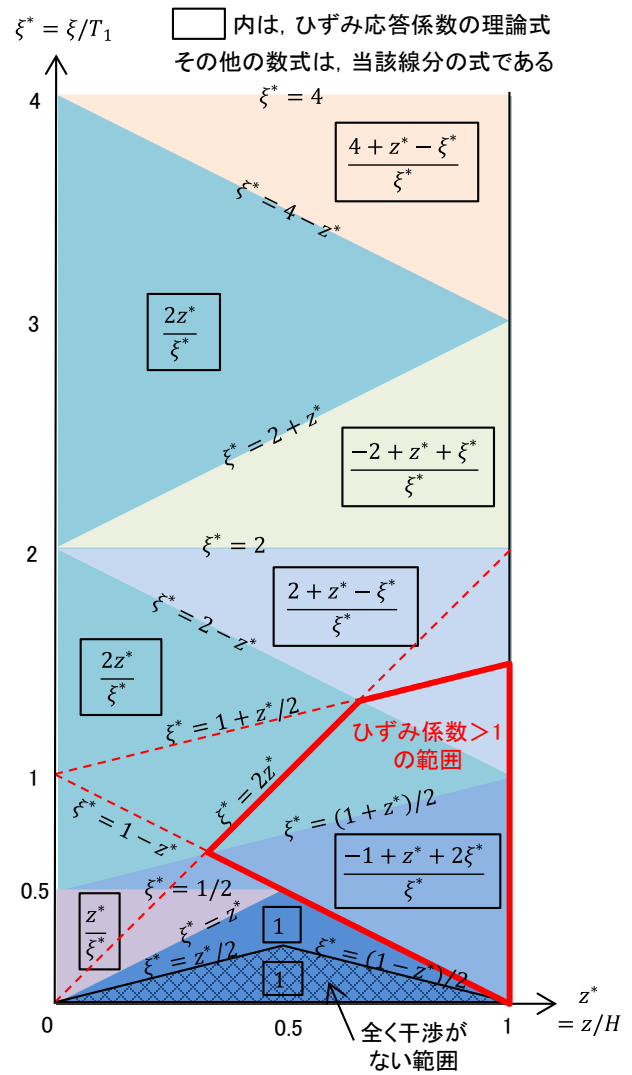


図-11 図-9の考え方によって導かれたひずみ応答係数 (無減衰地盤の場合)

0.833 となる。なお、赤線枠で囲まれた範囲は、 μ_y^R が 1 を超える (z^* , ξ^*) の組合せ領域である。これ以外の (z^* , ξ^*) の組合せでは、 μ_y^R は 1 よりも小さい。

このようにして図-11 を見ていくと、このチャートが図-8 を説明するものであることが分かる。すなわち、図-11において z^* を 0.25, 0.50, 0.75 に固定し、 ξ^* を 0 から上方に向かって辿りながら μ_y^R の理論値を描いていくと、図-8 の 3 つのグラフが得られる。つまり、図-8 は図-11 の、 z^* を一定とした断面図になっているのである。 z^* が 0.75 の場合について見ると、 μ_y^R は次のように推移する。まず、 $\xi^*=0$ においては μ_y^R は 1 である。 $\mu_y^R=1$ は ξ^* が 0.25 になるまで続く。ここから赤枠の中に入り、 μ_y^R は 1 を超える。 μ_y^R が再び 1 を下回るのは、 ξ^* が 1.375 を超えるときである。赤枠内の $\xi^*=0.875$ の点から先では、 μ_y^R は基本的に $2z^*/\xi^*$ という算式で ξ^* に反比例して低下していくが、途中、 ξ^* が 2, 4, ... の偶数値になるところで、それぞれ 0.375, 0.1875 という谷底をもつ窪みをつくる。このように、図-8 の一見複雑な曲線が、完璧に説明される。

(6) 1 サイクル矩形波加振により生起するせん断ひずみのまとめ

本章では、前報の成果に新たな知見を加えるべく、基盤層を1サイクル矩形波で加速度運動させたときに表層内に生じるせん断ひずみの特性を調べた。その結果として、以下の知見を得た。

- i) 表層の運動方程式を解いて、生起するひずみの時刻歴波形を定式化した。これは、着目深度 z^* 、周期比 ξ^* 、および減衰定数 h の3つのパラメータの組合せで決まる波形になる。また、その時刻歴波形の中の最大値としてのひずみ応答係数 μ_Y^R を算出した。 μ_Y^R は、前報で得た1サイクル正弦波加振のひずみ応答係数 μ_Y^S と全体的によく似ている。
- ii) μ_Y^R の特性がすなわち、せん断ひずみの大きさの特性であるが、これは、
 - ① z^* が大きい深部で値が大きい。
 - ②深部においては ξ^* が1に近いときに値が大きい。
 - ③ z^* が概ね0.25以下の浅部においては、比較的短周期の入力波に対する値が大きい。
- iii) 生起するひずみの大きさを決める一つの因子は基盤の運動速度（孤立三角波のピーク速度 c ）であり、ひずみは c に比例する。もう一つの因子である三角波の立ち上がりの時間（シャープさ） ξ については、

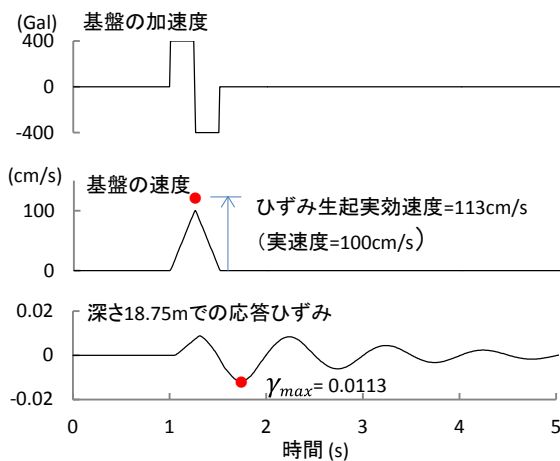
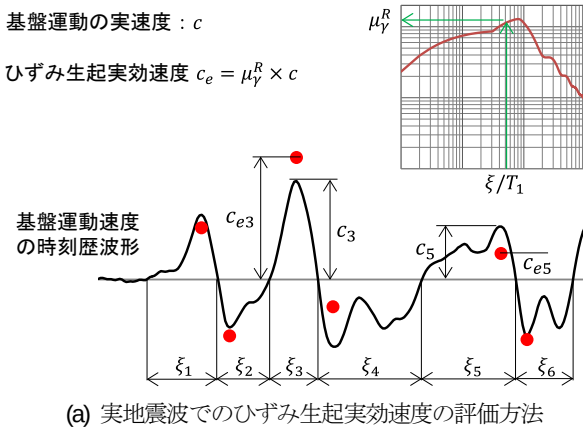


図-12 ひずみ生起実効速度と応答ひずみとの関係

前項に述べた結果が適用され、深部においては ξ が表層の固有周期 T_1 の前後の場合に、浅部においては T_1 よりも短い場合に、それぞれ大きなひずみを生じさせる。ただし、表層に減衰がある場合には、 ξ があまり短くなってしまうと、発生ひずみは大きさを減じる。また、 ξ が T_1 より長くなるほど、発生するひずみは小さくなっていく。

- iv) 無減衰の地盤について求めたひずみ応答係数の特性も ii)と同様で複雑であるが、これは、図-9に示したひずみ波動の表層内伝播という視点から考えられる幾何学的性質によって、完全に説明できる。すなわち、基盤面で生まれたひずみ波動が表層内に送出された後、波動伝播の法則にしたがって地表面と基盤面との間で反射を繰り返す過程で、上昇波・下降波が多重干渉した結果として、深度ごとに異なる大きさのひずみが生じるのである。これにより、前報で予想したひずみ生成のメカニズムが確認された。なお、前報では、浅部においては比較的短周期の入力波に対してひずみ応答係数が大きくなっている理由を、「高次の振動モードが影響するため」と考えていたが、今回得た知見によれば、浅部は地表面で位相が反転して戻ってきた反射波の干渉を受けやすい中、短周期（短波長）の波動はその干渉の影響がより小さいため、というのが正確な説明になる。
- v) 以上、要するに、地中に大きなせん断ひずみを生じさせる基盤地震動の要素波形の条件としては、大雑把には、大速度の位相をもち、その位相の周期（立ち上がりの速さ）が着目する深度ごとに定まる一定範囲内にあるもの、と言える。

4. 不規則波の問題への適用性の検証

(1) 検証方法

第4章で得た知見はいずれも、加速度波形が1サイクルの矩形波、速度波形が孤立した三角波という、極めて単純で理想的な要素波形を対象にして検討した結果として得たものである。実際の基盤地震動波形では、そのような要素波に近い位相もあるには違いないが、速度波形が整形な二等辺三角形ではないことの方が多いし、いくつもの要素波が連続するときの表層の応答には共振現象などの影響も入るので、この知見がよく当てはまるかどうかは分からない。そこで本章では、前章末にまとめた「速度波形において大振幅、かつ、着目する深度ごとに定まる一定範囲内の周期をもつ位相」という条件が、不規則波形である実地震波の場合でも確かに表層に大きなひずみを生じさせるかどうかを検証する。

この検証は、以下のような方法で行った。まず、図-12に示すように、不規則な基盤地震動加速度波形を積分した速度の時刻歴波形がゼロ・クロスするところから次のゼロ・クロス点までの区分時間 ξ 内にある波形を、一つの孤立三角波とみなす。図-12において、 ξ_3 の部分

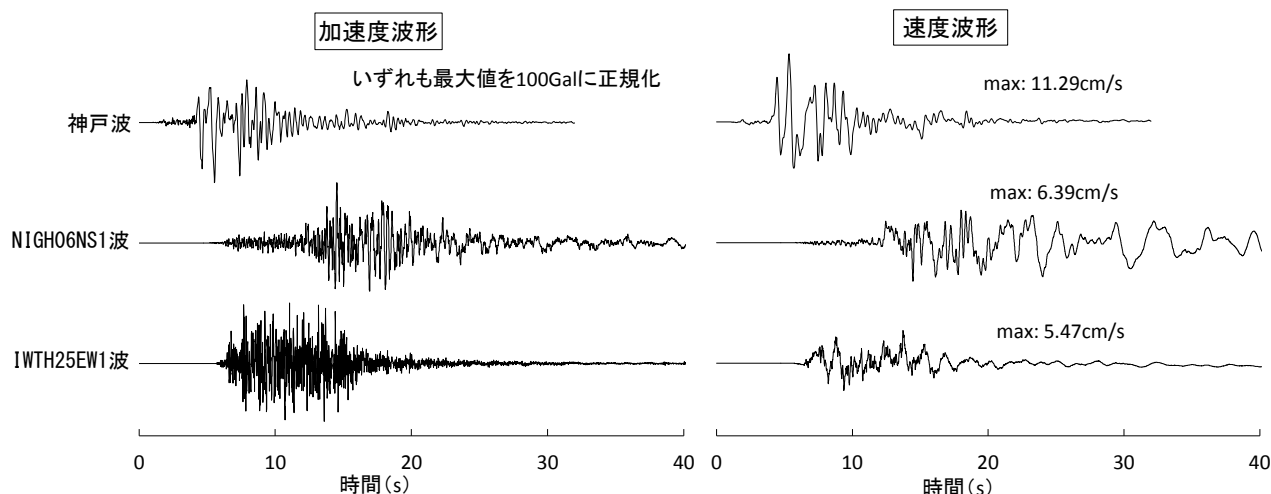


図-13 検証に用いた地震動波形

などはほぼ整形な二等辺三角形と言えよう。一方、 ξ_5 の部分などはかなり形が崩れているが、これもやはり二等辺三角形の孤立三角波とみなす。いずれの区分時間帯も速度のピークをもち、これを c とする。 ξ_4 や ξ_6 の部分など2つ以上のピークをもつところでは、その中の最大のピーク値を c とする。 c は基盤運動の実速度であるが、前章にみたように、これがそのまません断ひずみの大きさに結び付くわけではない。実際に発生するひずみの大きさには、深度 z^* 、孤立三角波の周期比 ξ^* 、および減衰定数 h によって決まるひずみ応答係数 μ_y^R が介在する。そこで、実速度 c に μ_y^R を乗じた速度値を c_e とし、これを「ひずみ生起実効速度」と呼ぶことにする。 μ_y^R の値は、同じ減衰特性、同じ深度でも ξ/T_1 によって異なるので、区分時間帯ごとに図-7から読み取って適用する。こうして基盤運動速度の時刻歴波形のピークごとに c_e が評価されるが、それらは区分時間帯の長さ等に応じて、実速度よりも大きくなったり小さくなったりする。

一例として、図-6で検討した1サイクル矩形波（本例では $\xi/T_1=0.5$ ）による加振の問題について、入力波の c_e を評価してみる。基盤の速度波形は孤立三角波で、そのピークの実速度は100cm/sである。減衰定数が0.1の地盤で、深さ18.75m ($z^*=0.75$)でのひずみ生成を考えると、この条件での μ_y^R は図-7から1.13である。したがって、この孤立三角波の c_e は113cm/sと評価される。そして、 c_e を V_s で除した値が、生起するせん断ひずみの大きさに対応するのであるが、それには、ひずみの応答波形の最大値 $\gamma_{max}=0.0113$ が対応している（実際には、ひずみの応答計算を行って γ_{max} を算出し、そこから μ_y^R を評価して図-7を得ている）。

一方、当該地震動加速度波形で表層を加振することにより、せん断ひずみの応答の時刻歴を得る（計算方法については文献3）を参照されたい。それにより、せん

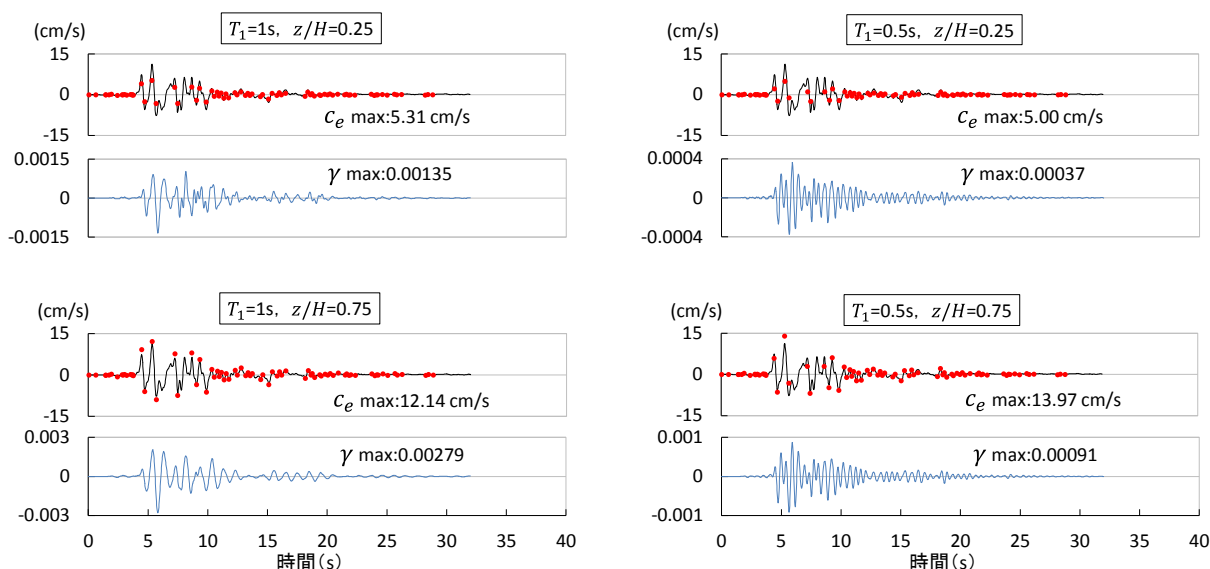
断ひずみの時刻歴波形に現れる多くのピーク位相の出方が分かる。これら、ひずみのピーク位相の一つ一つと、 c_e とを対比して見ることにより、1サイクル矩形波の検討で得た知見が実地震波でも成り立つかどうかを調べるものである。

不規則波として取り上げたのは、図-13に示す3つの強震動観測記録である。神戸波は、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での観測記録であるが、速度波形にして見ると、波の数は少ないが大速度で強いパルス性の特徴的な位相をもつという理由から選定したものである。NIGH06NS1波は、2004年新潟県中越地震で防災科学技術研究所の基盤強震観測網Kik-netがとらえた地中観測波の一つであり、速度波形に数秒の周期の成分も顕著に見られることから選んだ。Iwth25EW1波は、Kik-netにより観測された2008年岩手・宮城内陸地震の地中強震動の一つである。神戸波とNIGH06NS1波との中間的な速度波形として選定したものである。これら3波は、最大加速度値が100Galになるように、それぞれ振幅を調整して用いた。最大加速度値を100Galに合わせた結果、速度波形の最大値は、神戸波が11.29cm/sで圧倒的に大きく、他の2波はその1/2程度である。

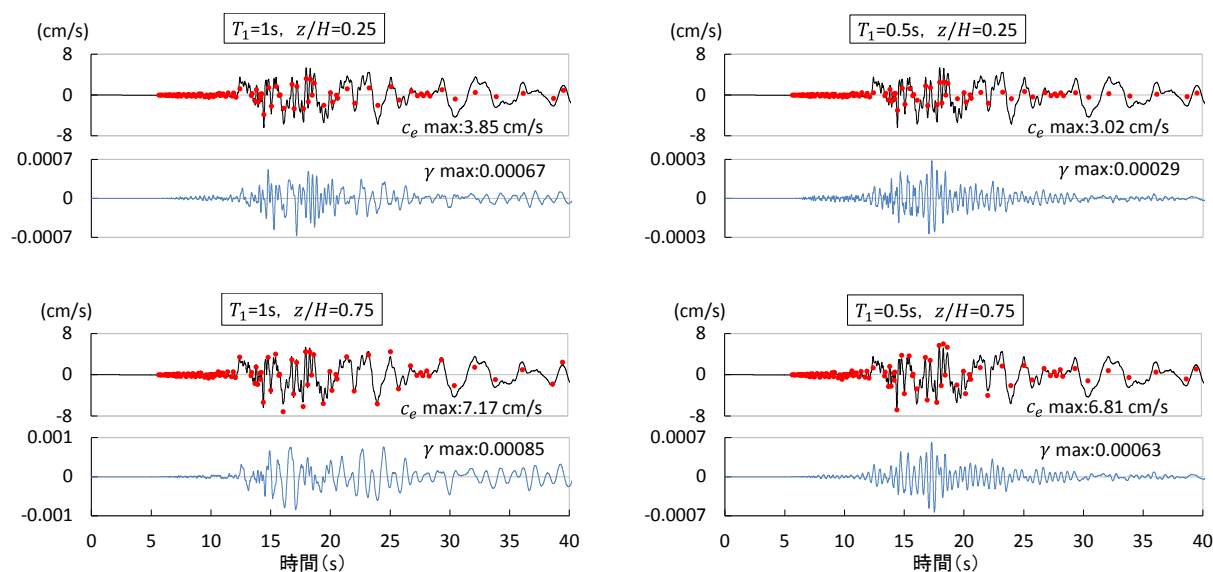
地震応答計算をした地盤は、層厚 H が25m、減衰定数 h が0.1、基本固有周期 T_1 が1s（せん断波速度 V_s が100m/s）という、図-6と同じ条件の地盤と、 T_1 を0.5s（ $V_s=200$ m/s）とした地盤の2ケースである。両地盤とも、深度 z/H が0.25の深さと0.75の深さに着目してせん断ひずみを計算した。

(2) 検証結果

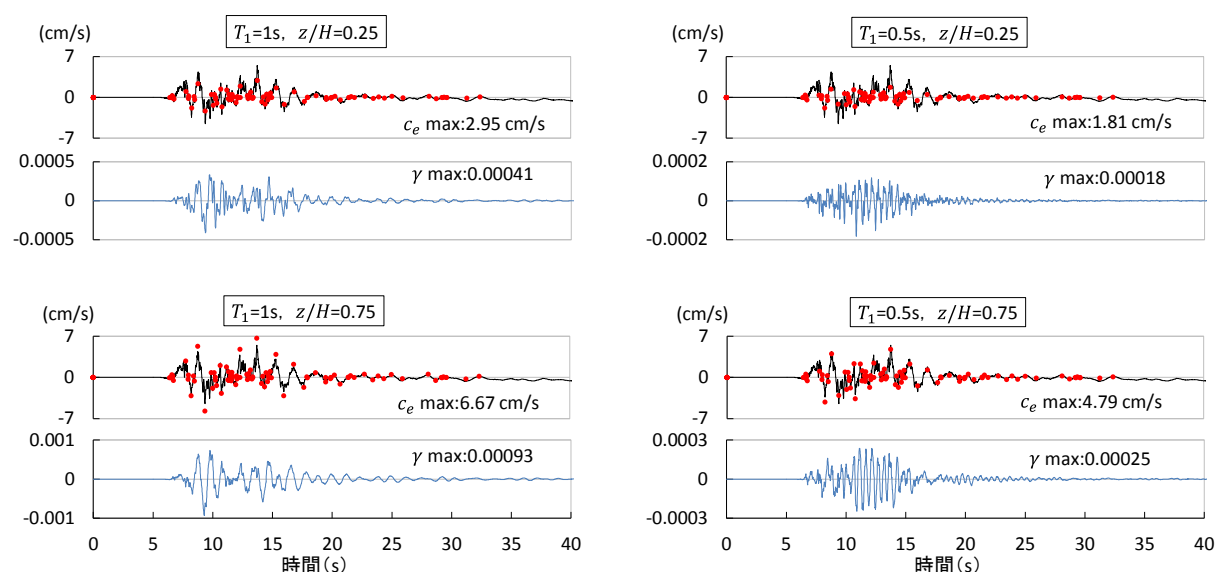
以上の方法で計算を行った結果を図-14にまとめた。左列に並ぶのが T_1 が1s（ V_s が100m/s）の場合であり、右列に並ぶのが T_1 が0.5s（ V_s が200m/s）の場合である。ま



(a) 神戸波



(b) NIGH06NS1波



(c) IWIH25EW1波

図-14 3波の基盤入力地震動のひずみ生起実効速度ならびに実際のひずみ応答
(地震応答計算をした地盤は、層厚 25m, 減衰定数 0.1, せん断波速度 100m/s (左列) と 200m/s (右列))

た、各計算結果とも、上段に基盤運動の実速度の時刻歴波形（黒線）と「ひずみ生起実効速度」（赤プロット）とを重ね描きした図を、下段に実際の応答ひずみの時刻歴波形（青線）を、セットにして示してある。

この計算結果から、以下のことが言える。

- i) 神戸波では、基盤の実速度の時刻歴の約 5 秒のところに、 $c=11.29\text{cm/s}$ のずば抜けて大きいパルス状のピークがある。この位相は、ひずみ生起実効速度としても、この時刻歴波形のピーク群の中で、また、今回取り上げた 3 波の中でも、最大値と評価された。そして応答ひずみの波形においても、この位相によって生成されたと考えられるピーク位相が直後に生じており、それが応答ひずみの最大値になっている（基盤速度のピーク位相とそれによる応答ひずみの極大位相との時間的關係については、図-12(b)が一つの参考になる）。 c_e が大きく評価された他のピークに関しても、概ね、それらに対応したひずみが生じているように見える。それは、 c_e が大きい波群（赤プロットを包絡して見たときの主要動部分）と応答ひずみの主要動部分とが概ね対応していることでも確認できる。
- ii) NIGH06NS1 波は、加速度波形では 14 秒から 20 秒くらいまでが主要動であるが、速度波形で見たときには、13 秒から 34 秒あたりまでの比較的長いあいだ、短周期から長周期までの広範囲の周期成分によって、 4cm/s 前後のピーク位相が並んでいる。しかし、この速度波形についてひずみ生起実効速度を評価すると、長周期成分で構成されているピークは軒並み評価が低い。特に z/H が 0.25 の地盤浅部では、こうした速度位相の部分の c_e は非常に小さく、これらのピークは大きなひずみを生じさせないことが推測される。実際、応答ひずみの波形で、そのような傾向が見て取れる。大きいひずみを生成するのは、基盤の速度の大きさだけではなく、その立ち上がりの速さ（その位相の周期）が大きく関与していることが分かる。
- iii) IWTH25EW1 波についても、特に $T_1=1\text{s}$, $z/H=0.75$ のケースで、 c_e が大きく評価されたピーク位相に対応して大きなひずみが生成されている様子が見られる。

以上は、図-14 を視察しての定性的な結果記述であるが、 c_e と $\gamma_{\max}$ との定量的な関係も見必要がある。前述のとおり、基盤運動の速度波形が孤立三角波である場合は、 c_e を V_S で除した値が $\gamma_{\max}$ に対応する。そこで、ここで行った 12 の計算結果について、各速度波形の c_e 群の中の最大値（図-14 中に示した $c_{e\max}$ ）を V_S で除した値を横軸にとり、実際のひずみ応答計算で得られたひずみ最大値 $\gamma_{\max}$ を縦軸にとったグラフを図-15 に示す。横軸は、1 サイクル矩形波加振の検討から導かれる「予測値」であり、縦軸がその正解値ということになる。た

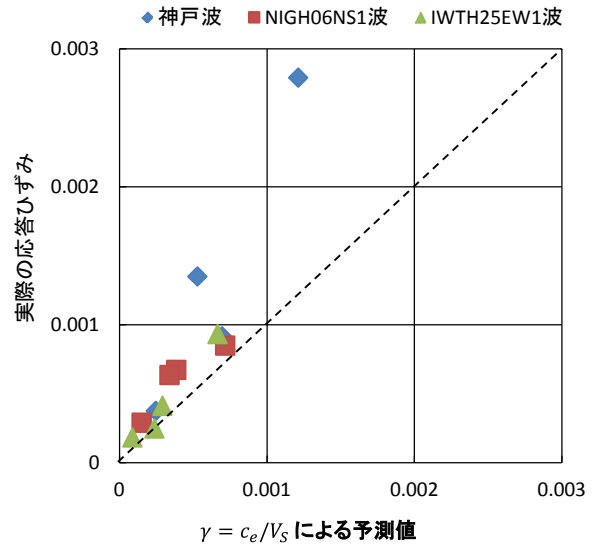


図-15 ひずみ生起実効速度によるひずみ生成の予測値

だし、 $c_{e\max}$ と評価されたピーク位相と、応答ひずみ波形で最大値となる位相が、必ずしも対応しているわけではない。しかし、ここでは大局的な対応関係を見ることにしたい。

図-15 で 12 個のプロットが破線上に乗れば、1 サイクル矩形波という要素波の検討により得られた知見が、不規則波にも適用できると言えるのであろうが、結果としては、大きくはずれているケースが 2 つほどある。そのいずれも神戸波である。また、比較的よい対応を示しているケースも、総じて、予測値は最大ひずみを過小評価する傾向がある。

この理由については、不規則波でのひずみ生成のメカニズムが複雑なために十分に解明できていないが、やはり、多様な位相が連続している不規則波では、少し前の位相の影響が後続位相のひずみ生成に影響を及ぼしていることが大きいのではないと思う。図-12(b)を見ても、表層の減衰性の程度にもよるが、1 つの速度ピークによって生じたひずみは、その位相の作用の終息と同時に消滅するのではなく、数周期分は「余波」が残る。したがって、 c_e の大きい位相が一定のタイミングで連続すると、「余波」が重なって、孤立波で生じる大きさよりも大きいひずみとなることが想定される。神戸波の場合は、そのような例ではないかと考えられる。そのほかに、不規則波の波形が整形な三角形ではないことも関係していると考えられる。

しかし、そうではあるが、不規則な地震動波形についても、1 サイクル矩形波という要素的波動の場合に働くひずみ生成メカニズムが同じように発現することは間違いなく、そうしたミクロな現象がたくさん重なり合い複雑になっていると理解できるのではないかと。

5. まとめ

1995年兵庫県南部地震で、神戸市内の地下鉄の大開駅その他の地中構造物に大きな被害が発生したが、これらは構造物周囲の地盤が大きくせん断変形したことが主な原因と考えられている⁷⁾。地盤が大きく揺れることによる大震度（大加速度）もさりながら、その地盤中に生じるひずみも、構造物を破壊させるだけの力をもっているのである。本論文のテーマは、地中構造物にとって厳しい地震動とはどういうものか、どのような基盤入力地震動波形、あるいはその中に潜在する因子、が地中に大きなせん断ひずみを生じさせるのか、という非常に基礎的な問いである。

この問題に対して、本論文では、前報での検討に加え、基盤入力地震動波形を構成する要素波として新たに1サイクル矩形波を採り上げて検討した。その結果、新たな知見を得るとともに、前報で認識したことがらのいくつかを補強することができた。以下に、その要点をまとめる。

- i) 基盤の運動加速度が1サイクル矩形波である場合、運動速度は孤立三角波となるが、この要素波で加振したときに表層内に生じるせん断ひずみを定式化した。また、要素波および表層の条件を規定するパラメータを網羅的に変化させてひずみの応答計算を行った。その結果、この要素波加振によって生じるせん断ひずみの大きさ（応答波形の中の最大値）は「ひずみ応答係数」×「基底値」の形式で表すことができる。ここに「基底値」とは、「基盤の運動速度／表層のせん断波速度」という値である。また、「ひずみ応答係数」は、基盤面で生まれたひずみ波動が表層内を多重反射する結果が反映された、「基底値」に対する応答倍率と解釈される。
- ii) 「ひずみ応答係数」は、グラフに描くと一見複雑な曲線になるが、表層内を伝播するひずみ波動の波形が基盤の運動速度の時刻歴波形と相似形であることと、その波動が地表面・基盤面間で多重反射する過程で自己干渉することを考慮することにより、完璧に説明することができる（表層に減衰がない場合）。それがすなわち、表層内のひずみ生成のメカニズムである。これは、前報で予想した図-4、あるいは図-9に説明されている。
- iii) 基盤入力加速度波形の要素波として、前報で1サイクル正弦波および1対インパルスを検討し、今回、1サイクル矩形波を検討した。加速度波形の違いは速度波形の違いでもあり、これら3種類の要素波で基盤を加振すると、基盤の運動速度の時刻歴波形は、それぞれ、孤立した三角波、山形波、矩形波となる。そして、これらの要素波に対する「ひずみ応答係数」

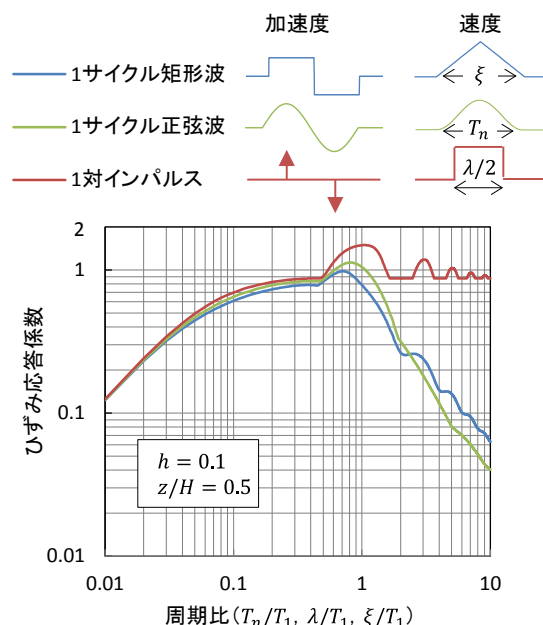


図-16 要素波の違いによるひずみ応答係数の特性の違い

（一部分）をまとめると図-16 のようになる。要素波が表層の固有周期に比して短周期である領域では、どれも「ひずみ応答係数」が小さくなっているが、表層に減衰がない場合はこうはならず、値が1という一定値になる。すなわち、係数の低下は表層の減衰性のためである。1サイクル正弦波と1サイクル矩形波とは、「ひずみ応答係数」の特性が全般によく似ている。そしてどちらも、長周期になると、やはり「ひずみ応答係数」が低下する。これは前述したひずみ波動の多重反射で生じる自己干渉によるものである。これに対して、基盤の運動速度が矩形波となる1対インパルスの場合、長周期であっても「ひずみ応答係数」が低下しない。それは、ひずみ波動（速度波形と相似形）の先端が切り立っていて、基盤面から送出されたひずみ波動が表層内を昇っていくときに、その先端が各深度でひずみを急激に立ち上がらせ、これが（自己干渉が始まる前に）最大ひずみとなるからである。

- iv) したがって、地中に大きなせん断ひずみを生じさせる基盤地震動の条件としては、大速度の位相をもち、その位相が、着目する深度ごとに定まる範囲内の周期をもつか、段波状の急速な立ち上がり／立ち下がりを見せるもの、と言える。“地盤ひずみは地盤震動の速度と関係が深い”と言われるが⁴⁾。この「速度」は着目地点の揺れの速度ではなく基盤の運動速度であること（前者の速度であると、表層の応答速度は一般に浅部ほど大きい、ひずみは浅部ほど小さいことと相容れない）、そして単に速度が大きい

だけではなく、その立上がり／立下りの形も大きく影響することが認識される必要がある。

- v) 以上は、ごく単純で理想的な要素波形についての検討結果から得た知見である。しかし、若干数の計算例ではあるが、実地震動のような不規則な加速度波形についても、1 サイクル矩形波の検討から導かれた知見を利用して、地中に生起するひずみの大きさがある程度予測できた。したがって、不規則波形においても、要素的波動において働くひずみ生成メカニズムが同じように発現すると考えてよいのではない。ただ、不規則ではそうしたミクロな現象が数多く重なり合う結果、現象が非常に複雑なことになる。

謝辞：第5章で用いた強震動加速度記録は、神戸海洋気象台による観測記録、ならびに（独）防災科学技術研究所の基盤強震観測網KiK-netによる観測記録を、それぞれ利用させていただいたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説, pp.155-186, 1992.
- 2) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書[開削工法]・同解説, pp.66-74, 2006.
- 3) 志波由紀夫：「地盤応答スペクトル」の提案と計算例, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) Vol.68 No.4 (地震工学論文集 第31-b巻), pp. I_365-I_382, 2012. エラータ, 同論文集, pp.I_1326-I_1327, 2014.
- 4) 志波由紀夫, 畑明仁：基盤入力地震動と表層地盤内に生じるせん断ひずみとの関係についての2,3の考察, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) Vol.70 No.4 (地震工学論文集 第33巻), pp.I_864-I_887, 2014.
- 5) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, 1972.
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, pp.168-173, 鹿島出版会, 1994.
- 7) 地盤工学会・土木学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編：阪神・淡路大震災調査報告 (土木・地盤2) 土木構造物の被害 トンネル・地下構造物 土構造物 基礎構造物, 土木学会, pp.23-30, 1998.

STUDIES ON THE WAVEFORM CHARACTERISTICS OF BASE MOTIONS THAT CAUSE LARGE SHEAR STRAINS IN SUBSURFACE GROUND

Yukio SHIBA, Katsuyuki SAKASHITA and Akihito HATA

It is very severe circumstance for underground public works structures that the surrounding soil is greatly distorted during an earthquake. This paper adds new knowledge to the previous paper which studied that what kind of base input-earthquake-motion waveform cause large shear strains in the subsurface ground.

In this paper, a single-cycle-rectangular-shape wave is taken up as base input acceleration motion which forms a single-triangular-shape wave in the velocity of the base movement, and the shear strain induced in the subsurface is analytically studied. Then the mechanism of the subsurface strain generation by this excitation condition is elucidated, and it is pointed out that the amplitude and the rise time of the base motion velocity govern the magnitude of the shear strains. It is strongly presumed that the microscopic mechanism of shear strain generation that has been studied about the elementary wave is revealed in response of the subsurface to a real base excitation with a random waveform.