

(19) 地盤の相対変位・平均ひずみの推定結果に及ぼす地震波形の変形の影響

埼玉大学工学部 正員 川上 英二  
 埼玉大学大学院 学生員 ○佐藤 靖彦

1. まえがき

長大地中埋設構造物の耐震性は2地点間の地盤の相対変位・平均ひずみに大きく影響されるため、これらの値の正しい評価が必要である。従来、地盤のひずみ振幅は地震波を変形せずに伝播するものと仮定して推定されている。しかし、地表面に沿った多地点での地震波を考える場合、波動は変形しながら伝播していると解釈した方がより現実的である。本研究は地震波が伝播する場合に波形変形が生ずるという実測結果に基づいて、この波形変形を考慮した場合、2地点間の相対変位・平均ひずみはこの影響を考慮しない場合と比較してどのような違いが生ずるかを解析的に検討したものである。ここで波形が変形しながら伝播する原因には大別して、(1)地盤構造の水平方向の不均一性等の理由により各観測点でのパワースペクトルが変化する場合<sup>1)</sup>(2)各観測点でのパワースペクトルは一定であるが波形の独立性が増加し相関が減少する場合<sup>2)</sup>(3)各観測点でのパワースペクトルは一定であるが表面波のように位相速度が周期によって異なるという分散現象の場合<sup>3)</sup>とが考えられる。本報告は、(2)(3)のそれぞれの要因を考慮した波動について相対変位・平均ひずみの特性を検討したものである。

2. 変形しながら伝播する波動の定義とその相互相関関数

(1) 各観測点での波形の独立性が増加する波動

この波動は、各地点でのパワースペクトルは一定  $S_T(\omega)$  であるが波形の相関の程度が減少しながら伝播する波動である。実際の地震波において離れた2地点間で観測された波形を比較すると、2地点間の距離  $|x_0|$  が大きいほど、また長周期の波より短周期の波ほど2地点での波形が異り相関が小さくなるものと考えられる。そこで、波動の伝播時間  $|x_0|/c$  ( $x_0$ : 2地点間の距離,  $c$ : 地表面に沿う波動の位相速度) と角振動数  $\omega$  との積の関数  $A(|\omega||x_0|/c)$  を用いて変形しながら伝播する波動のクロススペクトル  $S_{XT}(x_0, \omega)$  を次式のように仮定した。

$$S_{XT}(x_0, \omega) = S_T(\omega) \exp(-i \omega x_0/c) A(|\omega||x_0|/c) \quad \text{----- (1)}$$

ただし、関数  $A(\ )$  はコヒーレンシーであり、石井<sup>4)</sup>の研究に基づきこの関数を

$$A(|\omega||x_0|/c) = \exp(-\alpha |\omega||x_0|/(2\pi c)) \quad \text{----- (2)}$$

と仮定した。ここで、 $\alpha$  は波動の変形しやすさの程度を表すパラメータである。 $\alpha = 0$  は波形変形の無い場合を表しており、 $\alpha$  が大きい程クロススペクトルの相関は減少する。石井は地震記録を解析した結果、 $\alpha = (2\pi \times (0.2 \sim 0.4)) = 1.3 \sim 2.5$  の値を示している。

図-1にはパワースペクトル  $S_T(\omega)$  および位相速度 ( $c = 1,000 \text{ m/s}$ ) を仮定して算定した相互相関関数  $R_{XT}(x_0, \tau)$  を示す。(a)は波形の変形が無い場合 ( $\alpha = 0$ ) であり、(b)(c)は波形が変形して伝播する場合 ( $\alpha = 1, 2$ ) である。波形変形が無い場合(a)では、相互相関関数の最大値が自己相関関数の最大値に等しいのに対し、波形が変形する場合 ( $\alpha = 1, 2$ ) には相互相関関数の最大値は自己相関関数の最大値

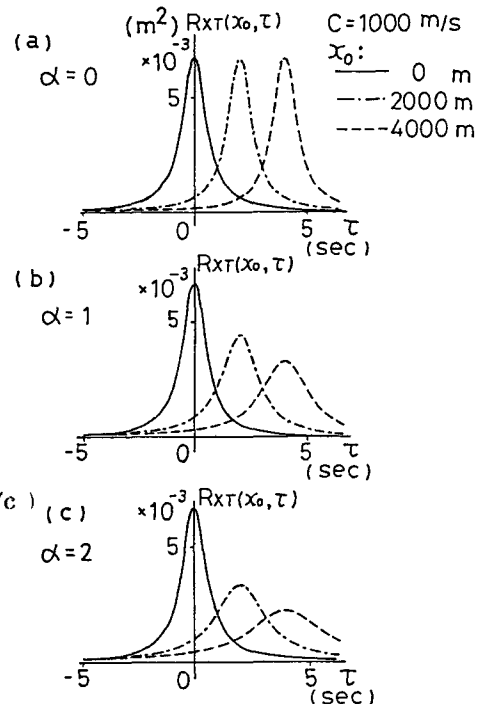


図-1 変位の相互相関関数  
 (波形の独立性が増す波動)

に比べ低下している。

(2) 分散性を有する波動

表面波の場合には各周期成分波の位相速度が異なるために波形変形が生ずる場合がある。ここでは、表層厚を  $H = 0, 100, 200, \infty$  m, 基盤・表面層のせん断波速度をそれぞれ  $\beta = 1000$  m/s,  $\beta_1 = 250$  m/s とし、密度が等しい ( $\rho = \rho_1$ ) 二層地盤を考えた。この地盤に対するLove 波 ( $H = 0, \infty$  m ではSH 波) の基本モードの分散曲線は図-2 に示すように求められる。分散性をもつ波動の2地点間のクロススペクトルは各地点での波動のパワースペクトル  $S_T(\omega)$  を用いて次式のように表わされる。

$$S_{XT}(x_0, \omega) = S_T(\omega) \exp(-i \omega x_0 / c(\omega)) \quad \text{----- (3)}$$

ただし、位相速度  $c(\omega)$  は角振動数の関数である。図-3 (a) ~ (d) にはそれぞれ表層厚が  $H = 0, 100, 200, \infty$  m である場合の相互相関関数  $R_{XT}(x_0, \tau)$  を示す。図-3 (a) (d) は位相速度が振動数によらず一定の場合であり、相互相関関数の最大値は自己相関関数の最大値と等しい。一方、図-3 (b) (c) は位相速度が振動数により変化する場合であり、分散により相互相関関数の最大値が自己相関関数の最大値より見かけ上小さくなっており、波形の独立性が増す図-1 の場合と類似した形を示している。

3. 波形の独立性が増す波動による2地点間の相対変位・平均ひずみの特性

距離  $x_0$  離れた時刻  $t$  での変位が  $u(x, t), u(x+x_0, t)$  である場合、2地点間の相対変位・平均ひずみはそれぞれ

$$u_R(x, x_0, t) = u(x+x_0, t) - u(x, t) \quad \text{----- (4)}$$

$$s(x, x_0, t) = (u(x+x_0, t) - u(x, t)) / x_0 \quad \text{----- (5)}$$

で定義をする。図-4 には2地点間距離  $x_0$  が 25, 50, 100, 200, 400, 1000 m の各場合の平均ひずみスペクトル  $S_{XT}(x_0, \omega)$  を示している。波形変形の無い場合 ( $\alpha = 0$ ) には2地点間の距離が増大する程スペクトルの卓越振動数は減少していることが認められる。また、2地点間距離の減少に伴いスペクトルはやや大きくなっている。これに対し、波形変形を仮定した場合 ( $\alpha = 1, 2$ ) には  $x_0 = 25, 50$  m と短距離になるに従い平均ひずみスペクトルが特に長周期成分で大きくなるのがわかる。しかし、波形変形が有る場合の方が無い場合より常に相対変位・平均ひずみが大きいわけではなく、例えば  $x_0 = 1000$  m では  $\omega = 1.6 \sim 4.7$  rad/s の範囲で波形変形がある方が逆にスペクトル値が小さくなっていることが認められる。

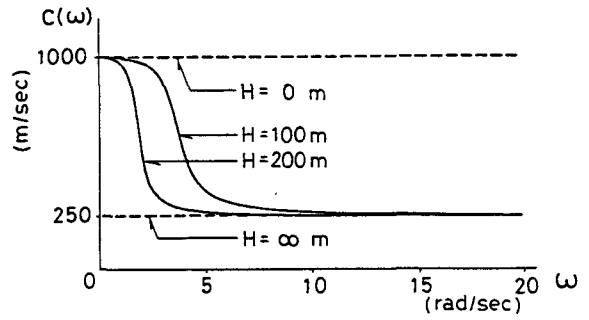


図-2 Love 波の基本モードの分散曲線

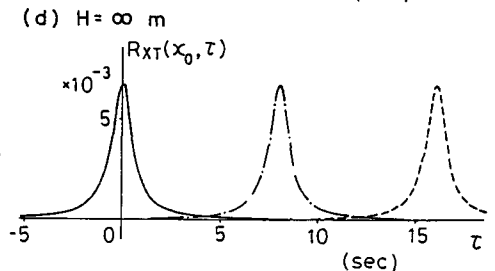
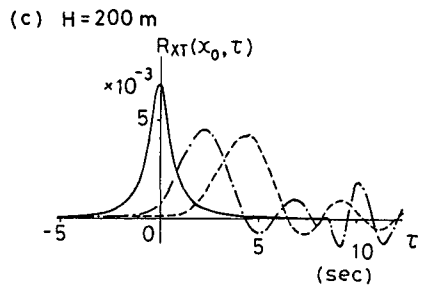
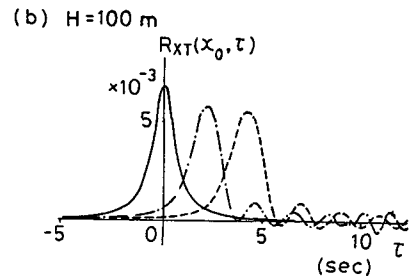
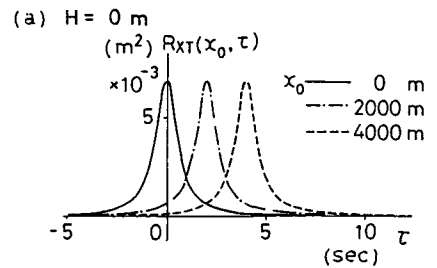


図-3 変位の相互相関関数 (分散性を有する波動)

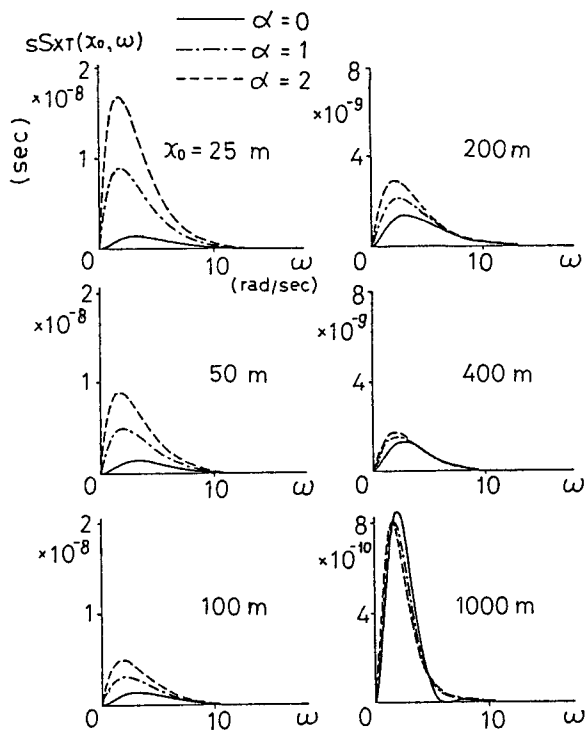


図-4 平均ひずみのスペクトル密度関数 (波形の独立性が増す波動)

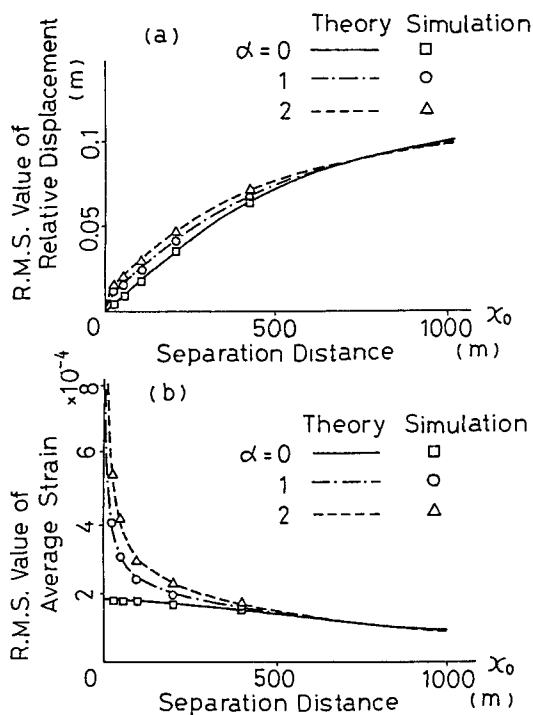


図-5 (a) 相対変位 (b) 平均ひずみの r.m.s. 値に及ぼす波形変形の影響 (波形の独立性が増す波動)

これは波の変形がある場合の2地点の波形が一对の独立波形に近づくものと考えることにより次節のような直観的な説明が可能である。次に、相対変位・平均ひずみの r.m.s. 値と2地点間距離  $x_0$  との関係を求め (図-5), 波形変形が r.m.s. 値に及ぼす影響を考えてみた。相対変位に及ぼす波形変形の影響は全体にそれ程著しくはないが、平均ひずみに及ぼす影響は2地点間距離が短い場合には顕著である。以上の結果より、波形変形が存在する場合平均ひずみのスペクトルは波形変形の影響を無視した場合よりも特に長周期成分で増大され、この傾向は2地点間の距離が短い程著しいことがわかった。

#### 4. 完全従属または完全独立な波形による相対変位・平均ひずみのスペクトル

前節で得られた結果の直観的な理解を助けるため、2地点の波形が全く独立である場合と波形変形が無く波動が伝播する全く従属の場合とを考え相対変位・平均ひずみのスペクトルまたは r.m.s. 値を比較した。ある地点  $x$  における変位波形  $u(x, t)$  が次式で表されるものとする。

$$u(x, t) = \sum_{\omega} 2\sqrt{S_T(\omega)} \Delta\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (6)$$

この地点より  $x_0$  離れた地点での変位波形は波形が全く独立、従属それぞれの場合について次式の様に表示する。

$$u^I(x+x_0, t) = \sum_{\omega} 2\sqrt{S_T(\omega)} \Delta\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (7)$$

$$u^D(x+x_0, t) = \sum_{\omega} 2\sqrt{S_T(\omega)} \Delta\omega \cos(\omega(t - x_0/c) + \phi) \quad (8)$$

ここで、 $\phi$ ,  $\phi_0$  は互いに独立な  $0 \sim 2\pi$  間で一様に分布する乱数である。そして、2地点間の相対変位・平均ひずみを独立・従属のそれぞれの場合に対して (4), (5) で求め、さらに相対変位・平均ひずみのスペクトルを定式化した。<sup>2)</sup> その結果をスペクトルの形状を表す  $\omega$  の関数とその係数である2地点間距離  $x_0$  の関数との積に分けて示したのが表-1である。この結果、次の事がわかる。

① 相対変位・平均ひずみのスペクトルは、波形が従属の場合には2地点間距離  $x_0 \approx 0$  で速度スペクトルに比例するが、 $x_0 \rightarrow L/2$  ( $L$ : 卓越波長 =  $2\pi c/\omega$ ) で変位スペクトルの形状に似る。一方、独立の場合には  $x_0$  の値にかかわらず変位スペクトルに比例する。従って、従属の場合には  $x_0$  が0から  $L/2$  まで増加するにつれ

て卓越振動数は減少する。一方、独立の場合に卓越振動数は不変であるため  $x_0$  が小さい間は波形変形を考慮することにより低振動数成分が卓越することになる。

② 2地点間距離  $x_0 \approx 0$  で従属の場合には、相対変位は零、平均ひずみは有限値になるのに対し、独立の場合には相対変位は有限値、平均ひずみは無限大となる。このことより、 $x_0 \approx 0$  での相対変位・平均ひずみは波形の独立性を

考慮することにより増加するものと考えられる。一方、 $x_0$  が増大するに伴いこの傾向は逆転し、 $x_0 \approx L/2$  では従属の場合の方が独立の場合より大きくなり、 $x_0 \approx L/2$  では2倍の値を示している。

以上の結果は図-4、5の結果と定性的に一致している。

#### 5. 分散性を有する波動の2地点間の相対変位・平均ひずみの特性

波動の分散性に伴う波形変形が相対変位・平均ひずみに与える影響を検討した。紙面の都合上、詳細は参考文献(3)に記してある。

#### 6. 結論

本研究では、地震波が伝播する場合に波形の変形が生ずるという実測結果に基づいて、この波形変形を考慮した場合、2地点間の相対変位・平均ひずみはこの影響を考慮しない場合と比較してどのような違いが生ずるかを解析的に検討し考察を加えた。その結果、

(1) 波形変形が生じない波動に伴う相対変位・平均ひずみのスペクトルは2地点間距離が短い場合には速度スペクトルに比例し、2地点間距離が卓越波長の半分程度ではむしろ変位スペクトルに比例するようになる。従って、2地点間距離の増大に伴い相対変位・平均ひずみの卓越周期が増大することになる。

(2) 波形の独立性が増す波動の場合には、相対変位の大きさに及ぼす波形変形の影響はそれ程大きくはない。しかし、平均ひずみに及ぼすこの影響は2地点間の距離が卓越波長の約  $1/4$  より短いところで著しく、波の変形を無視して推定したひずみでは過小評価されている。

(3) 相対変位・平均ひずみスペクトルの卓越振動数に及ぼす波形変形の影響に関して、波形の独立性が増す波動では波形変形が無い場合と比較して卓越振動数は減少するが、分散性を有する波動では卓越振動数は増大する。

あとがき 本報告をまとめるにあたり埼玉大学工学部 久保慶三郎先生・渡辺啓行先生に貴重な御助言を頂きました。記して深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Shinozuka, Kawakami : Underground pipe damages and ground characteristics, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, 1977.
- 2) 川上・佐藤：地盤の相対変位・ひずみの推定結果に及ぼす地震波形の変形の影響，土木学会論文報告集，1983，9。（掲載予定）
- 3) 佐藤・川上：土木学会第38回年次講演会概要集第1部，1983。
- 4) 石井：確率手法による地震波の入力損失の効果の検討，第16回地震工学研究発表会講演概要，1981。

表-1 波形の独立性と相対変位・平均ひずみのスペクトル密度関数との関係

		Separation Distance			
		$x_0 \approx 0$		$x_0 \approx \frac{L}{2}$	
		(Function of $x_0$ ) <sup>x</sup>	(Function of $\omega$ )	(Function of $x_0$ ) <sup>x</sup>	(Function of $\omega$ )
Dependent	Relative Displacement	$\frac{x_0^2}{c^2}$	$\omega^2 S_T(\omega) = v S_T(\omega)$	4	$S_T(\omega)$
	Average Strain	$\frac{1}{c^2}$	$\omega^2 S_T(\omega) = v S_T(\omega)$	$\frac{4}{x_0^2}$	$S_T(\omega)$
Independent	Relative Displacement	2	$S_T(\omega)$	2	$S_T(\omega)$
	Average Strain	$\frac{2}{x_0^2}$	$S_T(\omega)$	$\frac{2}{x_0^2}$	$S_T(\omega)$