

## (87) 足柄強震加速度記録による表層のS波速度の地震動強度依存性

(財) 大阪土質試験所 岩崎好規

**まえかき**；地震動における地盤の非線形性の問題は，土質工学においては，すでに常識化してはいるが強震動実記録に基づく議論は少ない。地震学では，最近認知されだしたが，いまだに議論が続いていることも事実である。本論文は，足柄地域のESG委員会によって配布された弱震と強震の記録に基づき，強震動時のS波速度の変化に関して，周波数領域及び時間領域において検討したものである。

**地震動記録**；ESGの組織委員会から送付されてきた地震記録の内，KS2地点の地表面地点とGL-30m地点の記録波形（図-1，2）を用いて解析する。

表-1 弱震および強震

日時	規模	緯度	経度	深度	震央距離
Aug.5, 1990	2.9(前震)	35度12.4分	139度05.7分	13.6km	8.4 km
Aug.5, 1990	5.1(本震)	35度13.0分	139度04.4分	15.1	9.0 km

弱震記録の最大加速度値等は，表-2に示したが，弱震記録では，地表面最大加速度は2.5galであるのに対して，強震記録では，100-220galという記録が得られている。

表-2 弱震および強震動記録の最大記録加速度

方位成分	弱震記録(Mg.2.9, D=9.0km)		強震記録Mag.5.1, D=8.4km	
	EW	NS	EW	NS
地表面	2.0gal	4.9gal	105.1gal	219.9gal
GL-30m	0.7gal	1.9gal	37.9gal	119.3gal



図-1 足柄サイトKS2地点弱震記録 (M2.9)

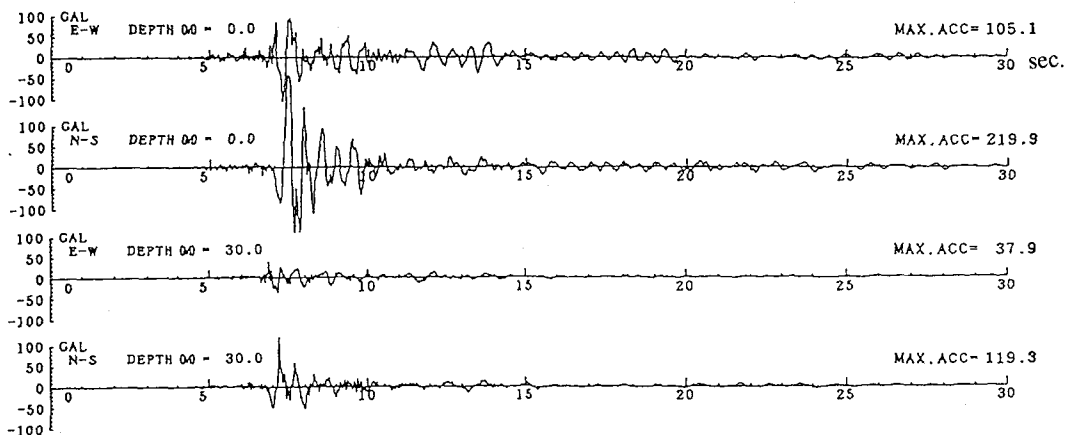


図-2 足柄サイトKS2地点強震記録 (M5.1)

スペクトル比特性の比較：地表面とGL-30mでの鉛直入射の増幅度特性を，PS検層によるS波速度構造モデル（表-4）による理論振幅比を図-3に，弱震および強震記録の加速度応答スペクトルのスペクトル比を計算して，一部を図-4～5に示した。スペクトル比の卓越周期 $T_p$ は，弱震強震ともに2つ見られるが，弱震に比べて強震時の卓越周期が伸びている。

表-3 スペクトル比の卓越周期( $T_p$ )

	E W		N S	
	$T_{p1}$	$T_{p2}$	$T_{p1}$	$T_{p2}$
地盤モデル	0.46sec	0.15		
弱震	0.50sec.	0.18 sec.	0.50 sec.	0.20 sec.
強震	0.64sec.	0.21sec.	0.64sec.	0.21sec.
周期の伸び; $dT_p$	0.14sec	0.03sec	0.14sec	0.01sec
伸び率( $dT_p/T_p$ )	28%	16%	28%	5%

これらの卓越周期及びその強震時の伸びを表-3に示した。主卓越周期においては約30%の周期の伸びが見られている。これらと比較すれば，弱震の $T_{p1}=0.5\text{sec}$ に対応する理論増幅特性は，ほぼそれに等しい0.46secに現われており，これはGL-7.5mまでの表層第1層の重複反射に基づく基本周期に等しい。 $T_{p2}$ は，その高次モードではないかと思われる。

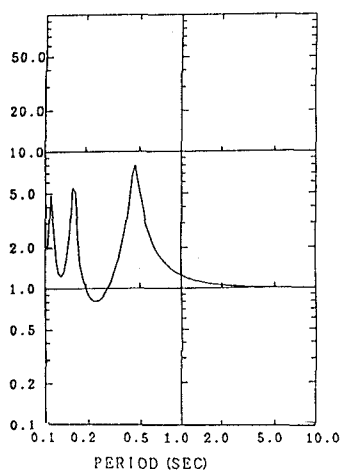


図-3 理論増幅スペクトル  
(地表/GL-30m；表4モデル)

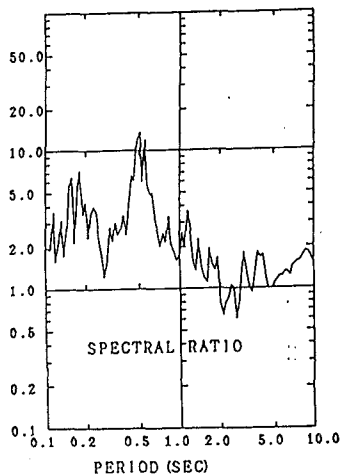


図-4 応答加速度スペクトル比  
(地表/GL-30m；弱震時ES成分)

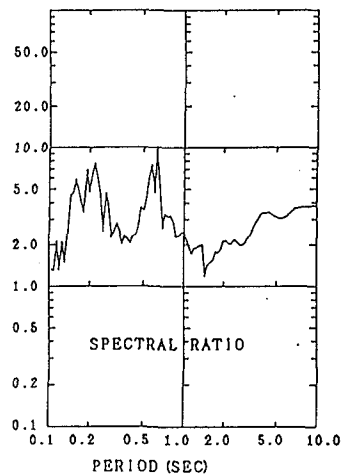


図-5 応答加速度スペクトル比  
(地表/GL-30m；強震時ES成分)

表-4 S波構造モデル  
(PS検層結果による)

Thickness (m)	Density ( $\text{t/m}^3$ )	$V_s$ (m/sec)
7.5	1.50	65.0
5.0	1.60	170.0
16.0	2.10	690.0
48.0	1.70	400.0
6.0	2.20	750.0
12.0	1.80	400.0
infinite	2.30	700.0

時間領域における波形；地表面の記録波形から，種々の地表面の速度値を仮定してGL-30m深度での波形を計算し，この計算波形と記録波形とを比較することによって最も波形が合致している表層速度値を求めようとするものである。波形の適合度は，両波形の相互相関関数を計算して，その最大値を与える速度を最適速度値とした。

本観測地点での軟弱層は，表層から7.5mまでの盛土およびシルト層と7.5-12.5mまでのシルト層の2つがある。それぞれを第1層，第2層と呼ぶ。PS検層の結果によれば，これらの層は，65.0および170.0m/secを示し，室内試験結果からどちらの層も歪み依存性を示すことが判明している。

まず第1, 第2層の各層の一つは速度を固定して評価した。弱震の場合, 第1層だけを変化させたが, 相互相関係数は低く0.3-0.4程度の値を示し, EW成分はPS検層の値に近いが, NS成分は低い値を示している。強震の場合の結果は, 第1層で40-50m/sec, 第2層は70-90m/secという速度が得られた(表-4)。強震動のEW成分の場合を図-6に示す。

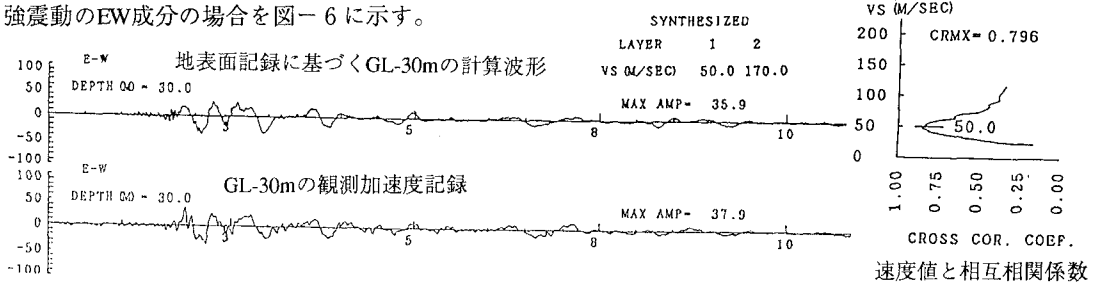


図-6 第1層のS波速度を変化させて求めた最適速度時のGL-30mでの計算波形と実測波形の比較 (E-W成分)

表-5 強震動時の最適速度(各層単独評価)

深度	PS検層	弱震		強震	
		EW	NS	EW	NS
第1層 GL0.0~7.0m	65.0m/sec	66.7(0.34)	41.2(0.43)	50.0(0.80)	43.7(0.77)
第2層 GL7.0~12.0m	170.0m/sec	170(fixed)		90.9(0.79)	71.4(0.76)

( ) 内は, 相互相関係数

**時間区分による経時変化の評価;** 強震記録については, 初動付近から約1-2秒の間を1秒の長さのtime windowで0.5秒間隔毎に時間区分を行ない, 2-3区間についてそれぞれの相互相関係数を求めて, 最適S波速度の経時変化を求めた。この結果の典型例 (NS成分) を図-6に示す。この計算では, 第1層と第2層の速度を同時に変化させている。第1層と第2層の層境界の変位を計算して, 層間の相対変位を層厚で除することで各層せん断歪みを評価したところ, ほぼ第2層のひずみは第1層の約30%程度であった。室内試験の結果から, 第1層, 第2層とも良く似た歪み依存特性を示しているので, 第1層の仮定された速度に連動させて, その速度の低下がひずみレベルで約30%の速度減少に相当するような減少率を第2層に与えたのである。初動付近では, 60m/sec程度であったものが, 最大振幅(歪みレベル;  $3.0 \times 10^{-3}$ ) に近づくにつれて次第に減少して25.0m/secとなり, その後増大, 減少を経ていくことが示されている。

**歪み経路に伴う剛性比の変化;** 室内試験によって求められた表層地盤の剛性率の歪み依存性が, ESG委員会から示されているが, これから剛性比と歪みの関係を図-7に示し, さらに, 剛性率比とその区間における最大歪みの時間経緯による変化をも示した。剛性比は, 地盤内に生じたせん断歪みの増大と共に低下し, その歪みと剛性比との関係は室内試験から得られたものに近い。最大歪みを受けた後の回復には遅れがあり, 歪み経路依存性が見られる。

**結論;** 足柄サイトの地震動記録に関する検討結果から, 次のような結論を得た。

- 1) 弱震および強震地震動の地表と地中加速度記録のスペクトル比から得られる卓越周期は異なっている。
- 2) 弱震における卓越周期(0.50sec)は, 地表の軟弱層がP-S検層から得られるS波速度(65/sec)で伝播するときの重複反射による共鳴周期(0.48sec)とほぼ一致する。強震時には, この卓越周期(0.64sec)となり, 約30%長周期化している。
- 3) 強震時における時間領域の検討結果からは, S波の伝播速度は, 地震動の大きさによって変化していることが示された。従来から指摘されているせん断歪みとの対応で見ると, せん断歪みの増大と共にS波速度は減少するが, 歪みと減少比とは, 1対1には, 対応せず, せん断ひずみ履歴特性をしめしていることが分かった。

参考文献) 1) Japanese National Working Group on ESG(1991), "Ashigara Valley Blind Prediction Test", p2-42

HAKONE QUAKE 1990 AUG.8, 7:13:02, H=13.6KM, M=5.1, D=8.4KM

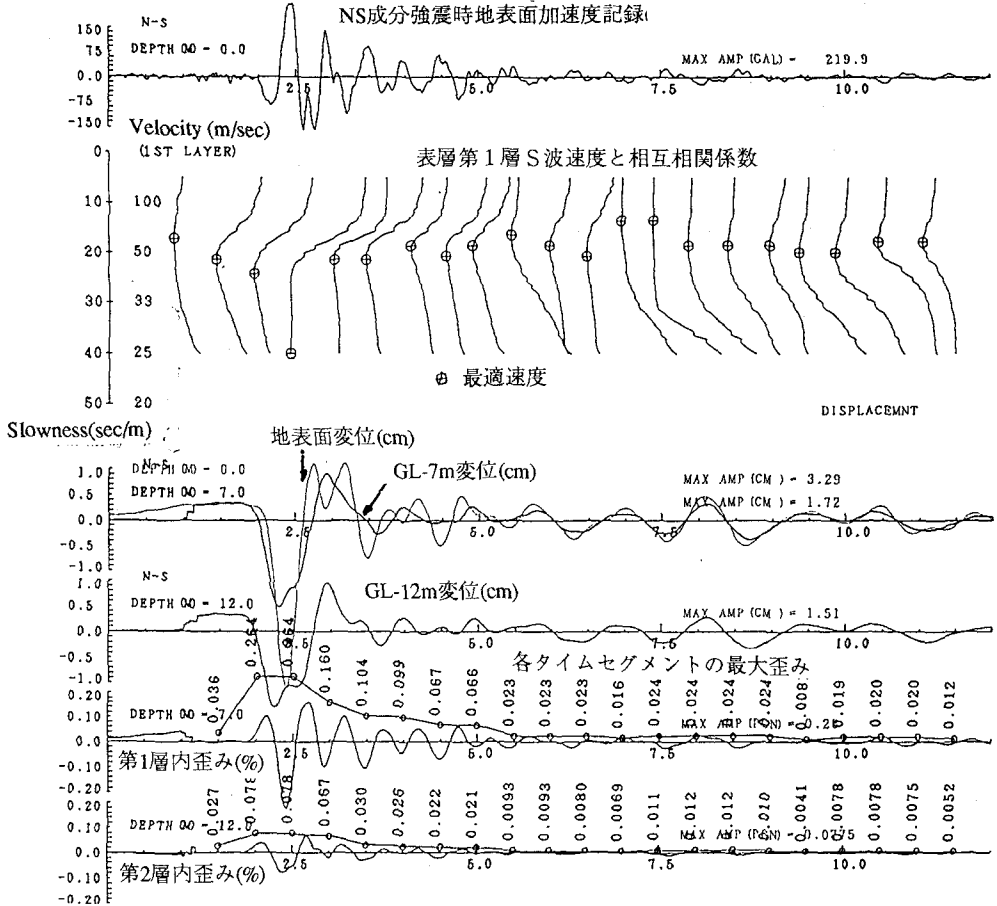


図-7 地震波形の経時変化に伴うS波速度の同定  
(NS成分; TIME SEGMENT (1秒の長さで0.5秒間隔))

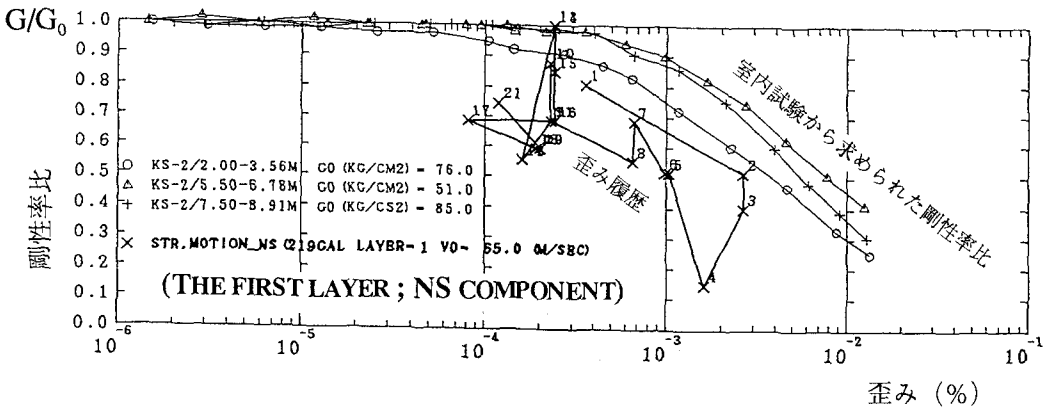


図-8 実測記録からの剛性率比と最大歪みの経時変化