

## 地震時における表層地盤内のひずみの3成分

京都大学 防災研究所 正会員 ○土岐憲三  
京都大学 大学院 学生員 久保田勝

### 1. まえがき

地盤内における地震時のひずみを考える際には、地震波は基盤から表層地盤に向かって鉛直方向に入射するという仮定のもとに解析が行われることが多い。この場合に対象となるひずみ成分は縦波による軸ひずみ、もしくはSH波によるせん断ひずみであるが、解析のほとんどはこの後者に対するものであった。しかしながら、強震加速度記録中にも表面波成分の卓越する部分の認められる場合もあり、このような場合には地震波は地表面に沿って伝播することを考慮して解析しなければならない。地盤内のひずみは波動の伝播速度により左右されるが、実体波の鉛直入射の場合にはひずみを算定しようとする深さまでの地盤の伝播速度だけが関係するのに対して、表面波の場合にはその伝播速度は基礎にまで達する地盤構成から定まることから、より深い領域を解析の対象としなければならない。したがって、表面波の伝播速度は一般には表層地盤内での横波速度よりは大きくなるが、表面波の卓越する部分ではその周期が実体波のそれより長いことから、速度振幅が大きく、したがって表面波によるひずみ振幅は実体波の鉛直入射によるものに比較して必ずしも小さいとは限らない。そこで、本研究ではサンフェルナンド地震による加速度記録に基づいて、実体波と表面波によるひずみ振幅の相異について検討した。

### 2. 強震記録と地盤構成

解析の対象とした地震記録はサンフェルナンド地震(1971)の際にロサンゼルス一帯で得られた加速度記録波形<sup>1)</sup>のうちから選定した4点での合計12成分であり、それらの地点を図・1に示した。また図・2、3にはHW地点とV $\bar{O}$ 地点の地盤構成を示した。VT地点の地盤構成はVO地点のそれとほぼ同様であり、WS地点では地表面近くだけしかその構成が得られていない。VTとV $\bar{O}$ 地点は約4.5 km離れていて、両地点を結ぶ直線はほぼ震央を通り、V $\bar{O}$ 地点から震央までは約24 kmである。また、WSとHW地点は約3.2 km離れていて、両地点ともほぼ震央を通る一直線上に位置しており、震央からHW地点までの距離は約35 kmである。各地点での記録の水平成分から、震央方向成分(LNGT)とそれに直行する方向成分(TRNS)とを合成した。各地点とも記録はRC建物の地下室で得られたものであるが、ここで問題となる振動数領域では建物との相互作用の影響は地下での記録にはほとんど無いと考えてよい<sup>2)</sup>

### 3. 位相速度の検出とひずみの算定

震央を通る一直線上にある2つの地点間における波動の位相速度を算定するためには、両地点での記録における時間軸上での同時性が確保されていなければならない。ここで用いた記録においては各記録地点間でのこのような同時性は保証されていないが、周期が4~5秒程度の波動の伝播速度が基盤岩での横波速度に近いと考えられることから、これを基準値として用いることにより、時間軸上の対応をつけることができる。

このような考え方の下にHWとWS地点、VTとV $\bar{O}$ 地点のそれぞれにおいて、TRNS成分、LNGT成分の位相速度の検出を試みた<sup>3)</sup>その際には約2 Hz以下の振動数成分を対象としたが、本研究ではそれ以上の振動数についても位相速度が必要であることから、2 Hz以上に対しては3種の曲線を規定した。図・4、5は一例としてHW地点でのLNGT成分とTRNS成分の位相速度曲線を示してある。

表面波もしくは水平方向に伝播する実体波による地盤内のひずみはその地点での速度振幅に比例し、位相速度に逆比例するから、各種のひずみ成分の時刻歴を求めるために次のような方法を用いた。まず、対象とする成分の加速度波形をフーリエ変換した後にその振幅を図・4、5の位相速度で除し、さらに振動数で除

してこれを逆フーリエ変換することにより、ひずみの時間曲線を算定した。

次に対象とするひずみ成分について考える。TRNS成分については表面波の場合にはLove波に相当し、その伝播方向に直角な鉛直面内における水平なせん断ひずみである。以下にはこれを $r_{zy}$ と表わす。LNGT成分では、まず伝播方向の軸ひずみが考えられ、これを $\epsilon_{xx}$ と表わす。この成分を表面波と考えればRayleigh波に相当し、せん断ひずみが存在するが、これを定めるためには伝播波中におけるモード組成を明らかにする必要があり、これを一義的に確定することができないことから、ここではこのひずみ成分は取り扱わない。

#### 4. 解析結果とその考察

図・6はHW地点でのTRNS成分によるせん断ひずみ $r_{zy}$ の時間応答を示したものである。T1, T2, T3のパラメーターは図・4に示した分散曲線に対応しており、ひずみ振幅に及ぼす分散曲線の高振動数領域の特性の影響を表わしている。図・7は同じ地点でのLNGT成分による軸ひずみ $\epsilon_{xx}$ に及ぼす分散曲線の影響を示したものである。これらの図はいずれも分散曲線の2Hz以上に対してそれぞれ3種類の特性を仮定したものであるが、結果における差違はほとんど無いことを示しており、これはひずみ波形を求める場合に重要な要因となるのは分散曲線の低振動数領域の特性であることを意味している。このような結果は、対象とした加速度波形では約2Hz以上の振動数のスペクトル振幅が小さいことによるものと考えられる。位相速度が振動数に対して不変であるとするれば、ひずみ曲線は速度波形と相似になるが、それは図・6, 7のひずみ曲線とは明らかに差違が認められることから、これらのひずみ成分を求めるにはその卓越振動数領域における分散曲線が最も重要な要因であることを示しているものと考えてよい。

次に、これらのひずみ曲線における表面波成分の存否に関する検討を行う。図・8において、a)とb)はそれぞれHW地点におけるLNGT成分と上下動成分(VERT)の原波形であり、c)はその両者の積の曲線である。これはSuttonら<sup>4)</sup>の方法を適用したものであり、原波形が実体波によるものであればc)の曲線は同符号となり、原波形がRayleigh波であれば時間軸のまわりで振動する。同図中のd)以下の曲線はc)に対してフィルターをかけて波形を見易くしたものであるが、いずれも最初から5~6秒前後までは実体波が、それ以下ではRayleigh波の卓越していることを示している。このようなRayleigh波の卓越する時間領域における軸ひずみの振幅は図・7によればほぼ $1 \times 10^{-4}$ 程度であることがわかる。TRNS成分に関してはその波動の種類を直接識別することはこれらのデータからはできないが、その分散曲線が当該地点の地盤構成から理論的に算出されるLove波の分散曲線に近いことから、図・6において数秒以上の周期を伴う波動成分はLove波によるものと考えられる。この場合のひずみ振幅は図・6によれば $1.5 \times 10^{-4}$ 程度に達しており、このようなせん断ひずみはRayleigh波による軸ひずみの1.5倍であることになる。

SH波の鉛直入射を考えた場合のせん断ひずみは重複反射理論により求められるが、HW地点でのTRNS成分に対してこれを適用した結果が図・9である。地表からの深さが10m地点で最も振幅が大きい、その場合の最大振幅は $4 \times 10^{-4}$ 程度である。せん断ひずみが大きいのは上の検討結果によれば実体波の卓越している部分であり、波形全体に関しても先に示した図6の結果とは明らかに差違がある。これは、SH波の鉛直入射では地表面における反射の現象があり、これが一種の微分効果を持つために、地表面近くでのひずみ曲線は速度波形よりはむしろ加速度波形に近くなるためである。

上述のような手法をここで対象としたすべての地点での記録に適用して得られたひずみ振幅の最大値を一括表示したのが表・1である。この表からも明らかなように、表面波によると考えられるひずみ振幅は実体波の鉛直入射によるひずみとほぼ同じ程度に達しているが、この解析ではSH波の鉛直入射の場合に対する表面波の場合の位相速度は10倍近く大きいにもかかわらずこのような結果となっており、表面波の速度がさらに遅い場合にはそのひずみ振幅は一層増大する可能性がある。また、実体波の鉛直入射では地表面では

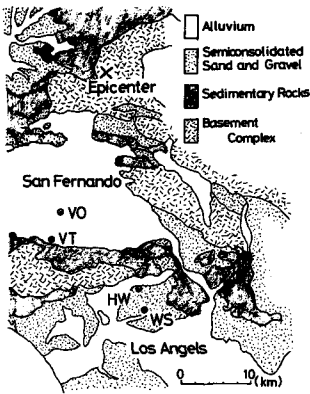
ひずみは生じえないが、表面波においては地表面においても各種のひずみ成分が存在しうることを勘案すれば、地盤やそれに支持された構造物の地震時挙動を考える際において重要な要因となる場合もあることが明らかであろう。

### 5. 結 論

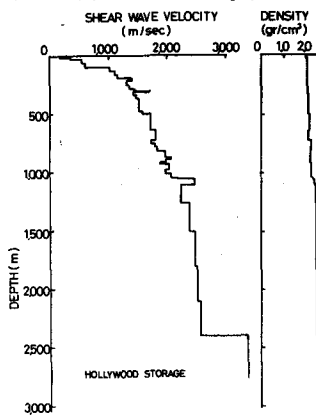
強震加速度記録に数秒から1秒程度の周期成分が見られ、かつそれが表面波によるものである場合には、そのような波動の伝播に伴う各種のひずみ振幅は、鉛直下方から入射する実体波によるせん断ひずみ振幅とほぼ同程度に達していることが、サンフェルナンド地震記録において確かめられた。土の非線形性を考慮すればこの振幅はさらに増大するであろうことと、これらの各種ひずみ振幅が地盤中で合成されることを考えれば、地震時の地盤内のひずみはこれまで考えられていたよりさらに大きいものである可能性が高い。

#### 参考文献

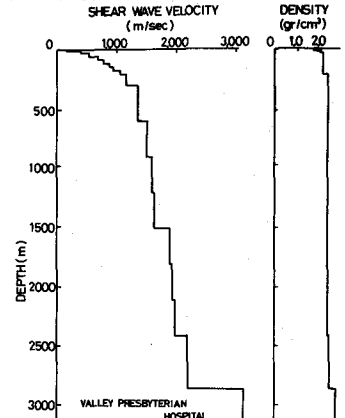
- 1) Hudson, D.E., A.G. Brady, and M.D. Trifunac : Earthq. Eng. Res. Lab., EEPL72-52, 73-50, 74-51, 74-52, Calif. Inst. of Tech.
- 2) Crouse, C.B. and P.C. Jennings : Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, pp. 13-36.
- 3) 土岐憲三 : 強震加速度記録による位相速度の検出, 第4回日本地震工学シンポジウム, 1975, pp. 265-272.
- 4) Sutton, G.H. and P.W. Pomeroy (1963), Journ. Geophys. Res., 68, pp. 2791-2815.



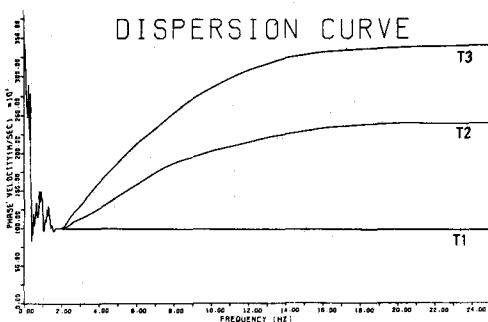
図・1 観測点位置図



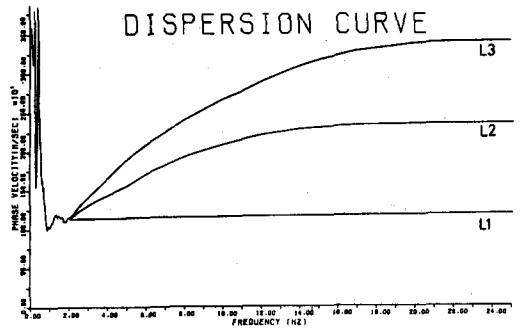
図・2 HW地点の地盤図



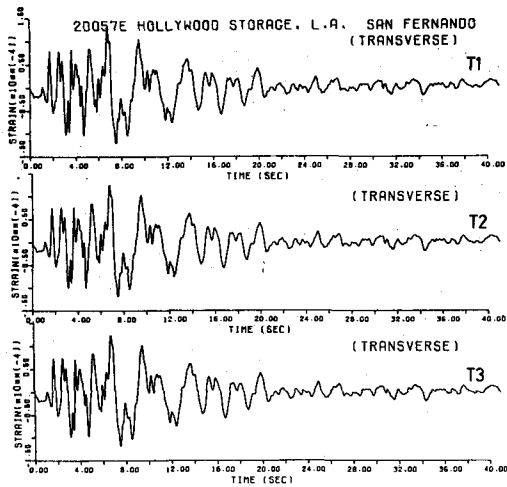
図・3 VO地点の地盤図



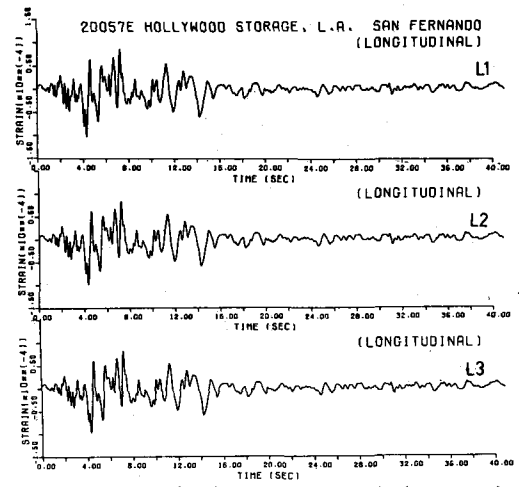
図・4 TRNS成分の分散曲線



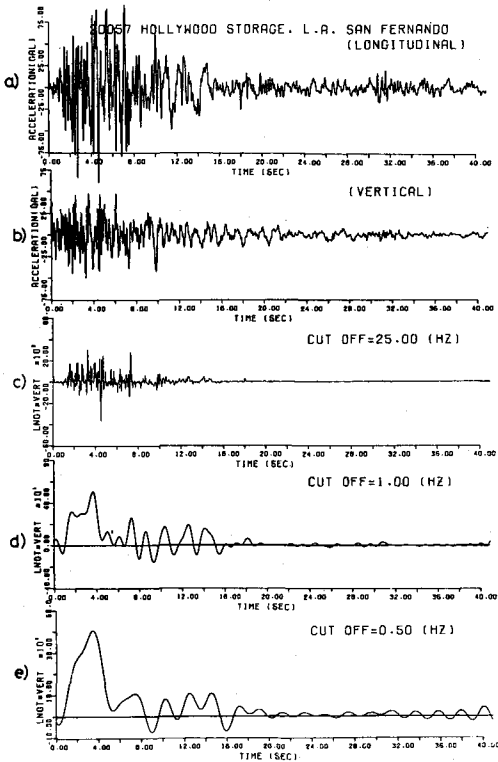
図・5 LNQT成分の分散曲線



図・6 TRNS成分によるひずみ曲線 (HW地点)



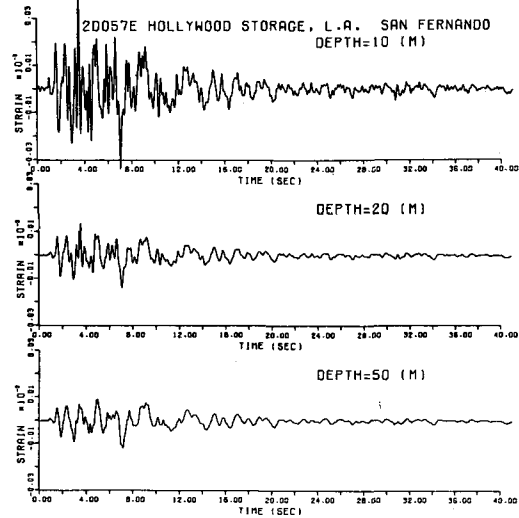
図・7 LNGT成分によるひずみ曲線 (HW地点)



図・8 Rayleigh波の検出

表・I 記録地点の概要

Station	Location	Geology	Ref.No.
HW	Basement of 14-story Bldg.	Alluvium	D057
WS	Basement of 7-story Bldg.	Alluvium	E072
VO	Basement of 7-story Bldg.	Alluvium	J145
VT	Basement of 17-story Bldg.	Alluvium	I137



図・9 鉛直入射によるひずみ (HW, TRNS成分)

表・2 各種ひずみ成分の比較

	( $\times 10^{-4}$ )		
	Surface Wave	Body Wave	
	TRNS	LNGT	SH (depth)
H W	1.2	1.0	3.9 (10m)
W S	1.4	0.9	—
V O	1.3	1.9	1.4 (60m)
V T	0.7	1.4	2.4 (10m)