

地盤ひずみと地盤粒子速度との関連についての 地震記録に基づく一考察

森地重暉¹・嶋原良典²・今村芳徳³・梅田裕介⁴

¹フェロー 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²学生員 工修 東北大学大学院附属災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

³正会員 工博 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁴学生員 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

地震時に生ずる地表面での地盤ひずみと地盤粒子速度との関連について実測記録を基に調査した。ひずみ振幅と速度振幅の関係を見出すには、観測資料の蓄積を必要とする。双方の時刻歴の関連について調べるために、2ヶのひずみ不変量の各々と3成分合成速度の時間変動を1/100秒毎に比較検討した。ひずみ不変量の絶対値が時刻歴で極大のとき、地盤の正弦振動状態では合成速度は極小となり、また正弦波動伝播状態では極大を示す。本解析では、継続時間内で約半数の時刻で振動状態を、残りの時刻で波動状態を示すこととなり、双方の時刻歴間の明瞭な関係は得られなかった。

Key Words : earthquake observation, ground strain, ground velocity

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)で生じた地下鉄構築被害の著しさを見ても、地中構造物の耐震性についての研究はより重要性を帯びてきたといえる。地上構造物が地盤加速度の影響を受けるのに対して、地中構造物は周辺地盤の変形の影響を受ける。それ故、地盤ひずみについての究明は、地中構造物の耐震性の検討に基礎的資料を与えるものと考えられる。

このような究明を目的として、著者等¹⁾は地表面に生ずる3方向の軸ひずみの強震観測を行い、結果を解析して次の結論を得た。①主ひずみ方向には卓越したものがある、②ひずみの状態は純せん断状態に近いこと等である。地震時に生ずる地盤ひずみについて調べることは、地中構造物の耐震性を究明するための基礎的資料を与えるだけでなく、地震時の地盤動の動力学的な性状を究明するための手がかりを与えるものと思われる。

通常、地盤動の強震観測では、地盤粒子加速度や速度(以下、地盤速度と称する)を観測対象にしている。地盤ひずみの観測は、それらの観測に比べて実施例が著しく少ない。本文では、次の理由から地盤速度と地盤ひず

みの関連について調査した。速度とひずみの関連が幾分でもわかれば地盤速度の観測資料の蓄積が多いので、資料を活用して種々の地盤条件下での地盤ひずみの見込みが可能になると考えた。

関連する過去の研究では、次のような報告がある。佐藤等²⁾は、東京大学生産技術研究所の千葉実験場において高密度観測を行いその結果を解析して、長野県西部地震(1984)での管体に生ずるひずみ記録と地盤速度とが似た波形になっていることを指摘している。また、亀田等³⁾は、ロマプリエータ地震(1989)で生じたパークフィールドでの観測結果における管体ひずみと地盤速度との対比を示している。しかし、それらの研究では、地盤ひずみの直接的な値ではなく、管体のひずみを用いている。本文では、地盤ひずみを観測した同じ位置で地盤速度を観測し、両者の関連を究明している。

2. 観測方法

観測場所として、千葉県野田市にある東京理科大学理工学部構内の土木工学科野外実験場を選んだ。観測地点

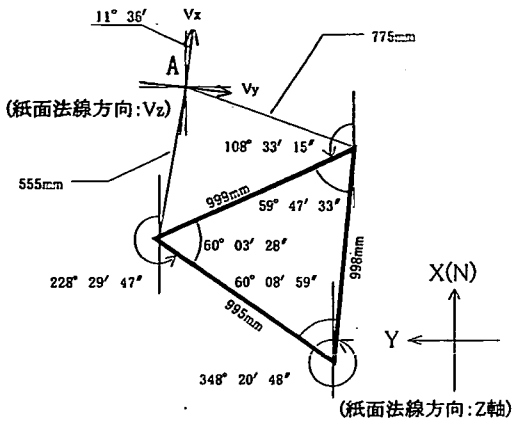


図-1 ひずみ、速度の観測状況

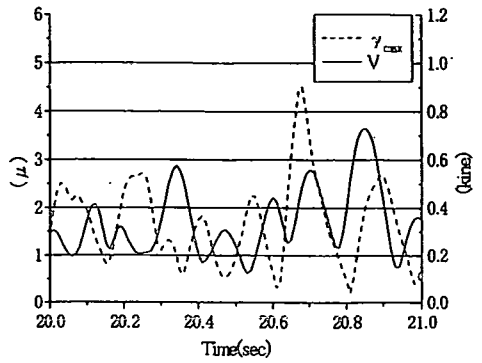
は北緯 $35^{\circ} 55' 03''$, 東経 $139^{\circ} 54' 57''$ に位置している。当地付近の地質は第四紀堆積層の関東ローム層や成田層から成り立ち、地表面が東に向かい約 1° 傾斜している。本観測は 1988 年 4 月より開始した。幾つの変遷を経て 2000 年現在では地盤ひずみを 4 箇所、また、2 箇所で地盤速度、地盤加速度の観測を継続している。

地盤ひずみの観測方法は前報¹⁾に示したものと全く同様であり、地表面での 3 方向の軸ひずみの観測を目的としている。地表面に一辺 1m の正三角形を想定し、各頂点の位置に直径 75mm、肉厚 4mm の円筒断面をもつ鉄杭を約 70 cm 打ちこんでいる。杭間の相対変位を測定するために、棒状の高感度変位計 (DS-100, 東京測振 (株)) を装着し、その地震時での観測値を杭間長で割った値を軸ひずみとしている。地盤速度の測定のためにはサーボ型速度計 (VSE-355JE:東京測振 (株)) を地表面近くに埋設し、水平 2 成分と鉛直成分の 3 成分の地盤速度を観測した。図-1 にひずみ測定装置並びに速度計の埋設位置 (図中の A 点) を示す。 V_x , V_y 及び V_z は速度計自体の正符号の x , y 及び z 方向を意味する。解析には図中の右下に示す座標系を用いた。正符号の z 方向は紙面の法線方向であり、また、N は真北を意味する。データの収録には、SAMTAC-600 (東京測振 (株)) を用い、データのサンプリング間隔は 1/100 秒とした。

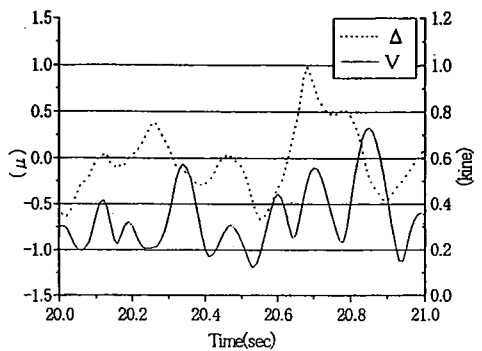
3. 観測記録の解析方法と結果についての考察

(1) 一つの地震記録について

地盤ひずみと地盤速度との関連を調べるに当って、各々の不変量を用いた。ひずみについては地表面の xy 面での 2 つの不変量、即ち、最大せん断ひずみ γ_{max} と主ひずみ (面積ひずみ) Δ を用い、また、地盤速度は



(a) 最大せん断ひずみと合成速度



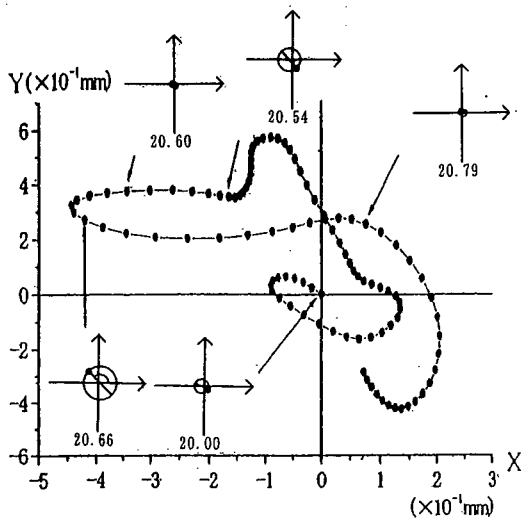
(b) 主ひずみと合成速度

図-2 ひずみ不変量と合成速度の時刻歴

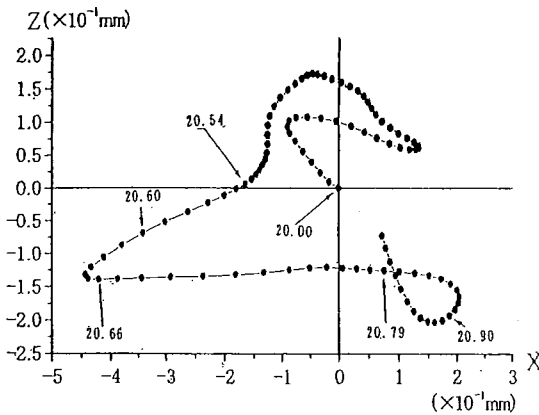
各成分の自乗和の平方根、すなわち合成値 V を用いた。結果の一例を図-2 に示す。この地震は、1998 年 8 月 29 日に発生したもので、マグニチュードが 5.4、震央距離 35km、震源深さ 70km. であり、地盤速度を観測し始めてから最大の揺れを示した。

速度記録を積分して、地表面の粒子軌跡を得ることができる。図-3 には、この観測記録より算定した 20.00 から 21.00 秒での粒子軌跡が示されている。軌跡上の黒丸は 1/100 秒の座標値を示す。同図中にひずみ記録から求めたモールひずみ円が併記されている。モール円上の黒丸の横座標は X 方向の軸ひずみ ϵ_x 、また縦座標はせん断ひずみ γ の 1/2 を示す。

図-3 を観察すると次のことがわかる。黒丸の間隔の短い時は速度が遅く、その際には平面的には粒子の運動方向が変動している。また、速度が遅い時の方が早い時よりもモール円の直径が大きくなっていて、それ故、 γ_{max} の値が大きくなっていることが分かる。その折には、上下の粒子軌跡が急変している。大まかにいって、地盤速度の大小に伴い、モール円の直径が長くなったり短くな



(a) XY平面

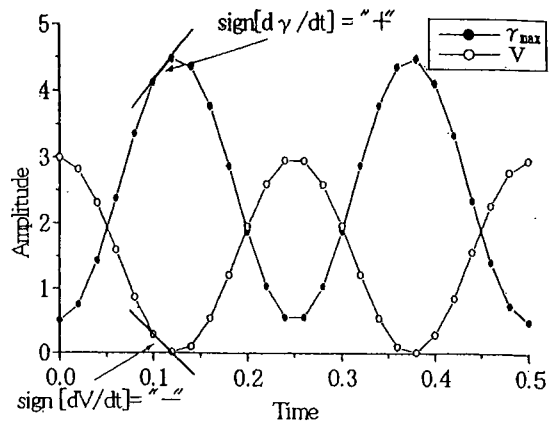


(b) XZ平面

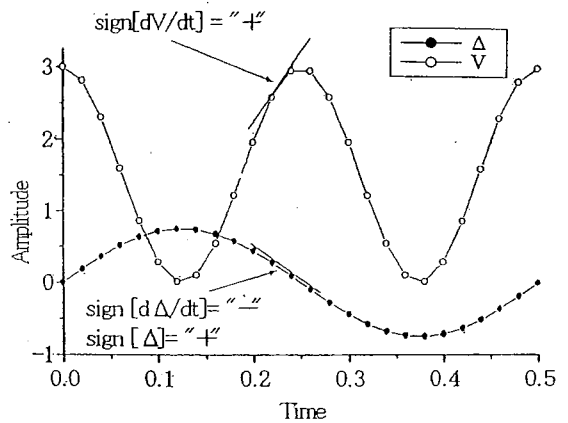
図-3 地盤の粒子軌跡とモールひずみ円の関係

ったりする。但し、この傾向は、図-3に示す時間帯についてであって、逆に、速度が早い時の方が遅い時よりも γ_{\max} の値が大きくなることもある。なお、地盤速度が小から大へ、再び、小に変わると、最大主ひずみ方向が90度変動することになる。

ひずみの不変量が大きい時、粒子速度が遅くなることは定常振動状態で表われる。すなわち、構造要素の弾性エネルギーが小さい時は、運動エネルギーが大きくなる。これと逆に、波動伝播の状態では、ひずみの不変量が大きい時、粒子速度が早くなる。本文では、これら各々の状態が収録時間内にどれだけの割合で生じるかを視点にし、 γ_{\max} 及び Δ の時刻歴と速度合成値 V の時刻歴との関連を調べた。



(a) V と γ_{\max} について



(b) V と Δ について

図-4 合成速度とひずみ不変量の時刻歴

定常振動状態でのひずみと速度の関係を模式図で示すと γ_{\max} と V との関係は図-4(a)に、また、 Δ と V との関係は図-4(b)のようになる。このような傾向の状態がどの程度生ずるかを調べるため、各時刻で以下の式 (1) の何れが成り立つか調べることにした。

$$\text{sign} \left[\frac{d\gamma_{\max}}{dt} \times \frac{dV}{dt} \right] = \begin{cases} (+) \\ (-) \end{cases} \quad (1)$$

また、 Δ と V との関係に対しては式 (2) の何れが成り立つか調べることにした。

$$\text{sign} \left[\frac{d\Delta}{dt} \times \frac{dV}{dt} \times \Delta \right] = \begin{cases} (+) \\ (-) \end{cases} \quad (2)$$

表-1
(a) 場合分けの分類

場合	I	II	III	IV
(1)式の左辺	-	-	+	+
(2)式の左辺	-	+	-	+

(b) 3成分速度に対する百分率

場合	I	II	III	IV
全集録時間	32.0	16.7	16.8	34.5%
主要動部	37.1	14.3	16.9	31.7%

(c) 2成分速度に対する百分率

場合	I	II	III	IV
全集録時間	32.2	17.0	16.5	34.3%
主要動部	36.9	14.1	17.0	32.0%

全ての1/100秒毎の時刻で式(1)と式(2)の右辺が共に(-)になれば図-4に示す状態が生ずることになる。逆に(+)になれば、波動伝播状態が生ずることになる。地震動が波動伝播のよるものか、表層地盤の固有振動の生成によるものか、または、それらの混在したものであるかは様々の条件に依存する。これらの式を用いた単純な解析でも、地震動の性質の一端を把握できるかと考えた。

γ_{max} と Δ について同時に調べると表-1(a)に示す4つの場合が生ずることになる。本記録について収録時間内で各場合が成り立つ時刻の百分率を計算した。また、主要動と思われる時間帯を選び同様な計算を行った。その結果を表-1(b)に示す。

この結果から、式(1)と式(2)が(+)並び(-)になる率は各々約50パーセントといえる。また、式(1)と式(2)が同時に、又は一方が(-)になる場合は、場合-I、II及びIIIを合計して65.5%になる。主要動部に限ると68.3%となり、若干増加していることがわかる。ところで、前報¹⁾でも示した通り、地震時において、 Δ よりも γ_{max} の値が数倍大きく純せん断に近いひずみ状態になっている。地表面での γ_{max} は水平動に支配される。表-1(b)に示される結果には3成分の速度を合成したものを利用したが、試みに水平2成分の合成値と γ_{max} と Δ との関連を調べてみた。その結果を表-1(c)に示す。結果を比較しても表-1(b)に示すものと大きな差異を認めることはできなかった。一方、式(1)と式(2)が同時に、又は一方が(+)になる場合は、場合-II、III及びIVを合計して68.0%になる。主要動部に限ると62.9%と

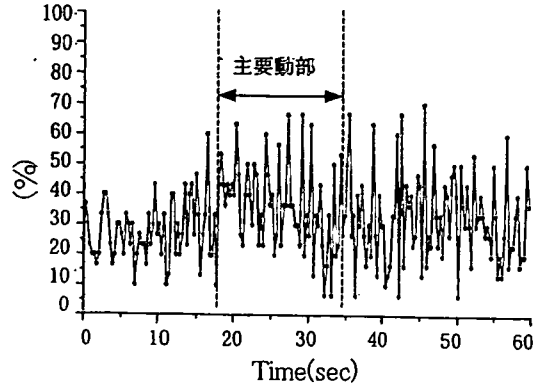


図-5 場合-I についての百分率の時間的変動

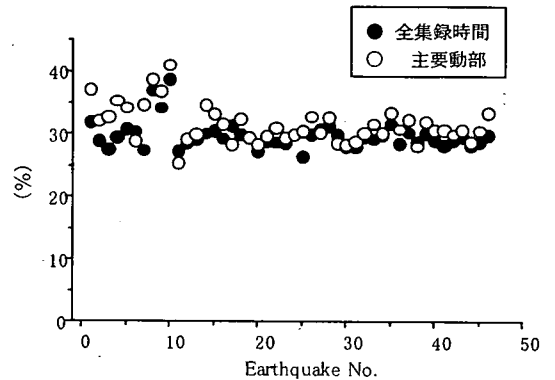


図-6 全集録時間、主要動部についての百分率 (場合-I)

なり、若干減少している。(-)の場合が68.3%であるので、小さくなっているが、この差では定常振動とも波動伝播とも判別できない。

表-1(b)の結果は全収録時間、あるいは主要動部における各場合が生起する1/100秒毎の全合計個数の百分率を示している。次に、場合Iが成り立つ時間的変動を調べてみた。0.3秒毎に式(1)、(2)の右辺が(-)になる百分率を算出した。その結果が図-5に示されている。2つの点線の間は主要動部とした時間間隔である。ここで本文での主要動部の時間帯は図-5に示すように主要動の立ち上がる時刻から15秒間とした。図-5では最高では70%、最低では10%であり、主要動部では、最低が20%となっていて若干高めになっている。場合-II、III及びIVについても同様な解析を行った。場合-II、IIIでは、全集録時間で百分率が50から10%、場合-IVでは80から10%の間を変動し、場合-Iと似たような結果になった。

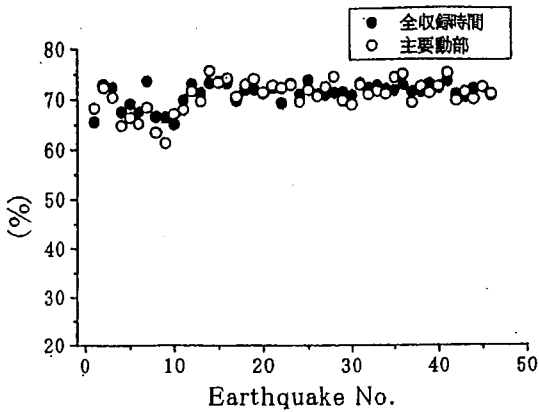


図-7 全収録時間、主要動部についての百分率
(場合-I, II, IIIの合計)

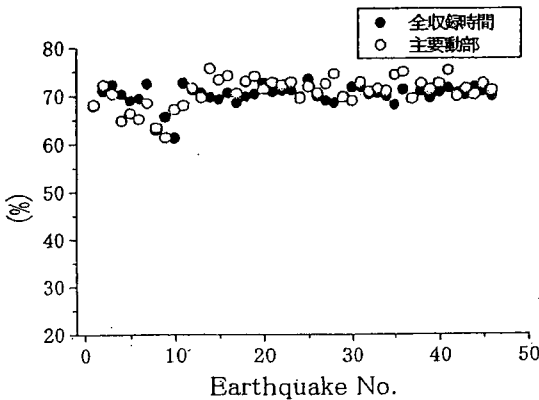


図-8 全収録時間、主要動部についての百分率
(場合-II, III, IVの合計)

(2) 得られた全地震記録について

観測期間内で記録された地震記録を用いて地盤速度と地盤ひずみについての関連を調べた。観測された地震記録について(1)で述べた性状がどの程度示されているか調査した。すなわち、 γ_{max} と Δ の時刻歴が V の時刻歴とどのような関連をもつか調べた。

前出の表-1に示す場合-Iが、全収録時間内並びに主要動部で占める百分率を各地震について調べた。図-6にその結果を示す。黒丸は全収録時間のものを、白丸は主要動部のものを意味している。約40%から25%の範囲になっているが、主要動部のものが全収録時間のものより大きい百分率になっている地震が多い。

図-7には、場合-I, II及びIIIの合計値の百分率を全収録時間と主要動部について示す。両者ともほぼ70%前後を示し、(1)の場合と異なり、必ずしも主要動部が全

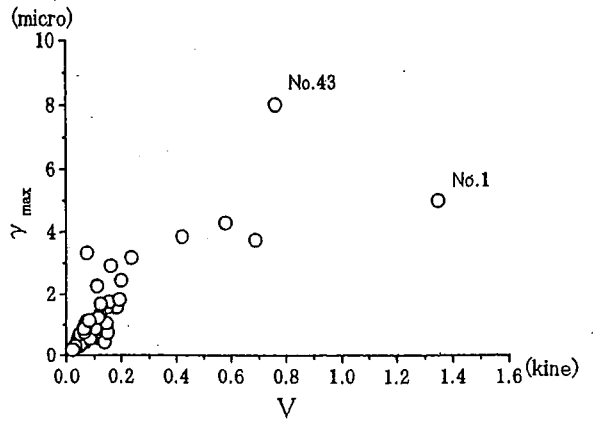


図-9 最大せん断ひずみ γ_{max} と合成速度 V の
最大値の関係

収録時間よりも高い百分率を示してはいない。図-7の場合とは逆の状態になる場合-II, III及びIVの合計値の百分率を図-8に示す。図-7の場合と似たような結果になっている。

文献^{2),3)}に示される例のようにひずみ記録の時刻歴が速度記録の時刻歴と似ているのなら、式(1), (2)の右辺は(+)になる時刻が多くなると推察する。本地震記録では、(+)と(-)になる場合が半々であり、地震動が波動伝播か、或は固有振動の性状を有するのかが明瞭でなく、速度波形と地盤ひずみ波形との関連は見出せなかった。

地盤速度振幅から地盤ひずみ振幅を推測するには、それら最大振幅の相互の対応を調べればよい。相互の関係は地盤の力学的性状、震央距離、地震の規模、地震動のスペクトル特性等によって異なる。図-9に示すのは当該観測場所の結果の一例であって、大きな地震のものは観測されなかった。それ故、確かな対応関係を得るには多くの記録の蓄積を必要とする。 V の最大のもものと γ_{max} の最大のものについて述べる。各番号は図-7, 8に示された地震番号を意味する。No.1とNo.43の発生日時は、各々1998年8月29日と1999年9月13日、マグニチュードは5.4と5.1、震央距離は35kmと43km、震源深さは70kmと80kmであった。

4. 結び

中小地震に限るが、地盤ひずみと地盤速度の関連について実測記録を用いて考察した。ひずみ振幅と速度振幅について明らかにするには、多くの記録の蓄積を要する。時刻歴についての関連を調べるために、方向性の影響を

時刻歴についての関連を調べるために、方向性の影響を除去すべく、ひずみには不変量を、速度については3成分の合成値を用いた。

正弦振動状態の場合、速度合成値 V の極小(大)を示す時刻では地表面での最大せん断ひずみ γ_{max} 並びに主ひずみ和(面積ひずみ) Δ の絶対値は極大(小)を示す。このような状態では、 V 、 γ_{max} 及び Δ の時間変化率の関連を示した式(1)と式(2)との右辺が(-)になる。波動伝播の場合は、逆に(+)になる。地震記録を用いて、1/100秒毎の(+)と(-)の百分率を計算したが、両式とも各々約50パーセント近くで、また、両式とも同符号か、異符号になる時刻の百分率は7割程度であった。文献で示される速度波形とひずみ波形が似通っている例と異なり、時刻歴間の関連は見出せなかった。

参考文献

- 1) 森地重暉, 今村芳徳, 高野工, 小田幸平: 地震時に生ずる地盤ひずみの観測とその結果についての考察, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.259-275, 1997.7
- 2) 佐藤暢彦, 中村正博, 岩本利行, 大保直人: 地震動と埋設管のひずみに関する実証的検討, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.583-588, 1986.
- 3) Kameda, H., Sugito, M., Isenberg, J. and Richardson, E.: Analysis of Strong Motion Array Record at Parkfield pipeline Experiment Site in the 1989 Loma Prieta Earthquake, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.529-534, 1990.

(2001.3.13 受付)

AN EXAMINATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE GROUND STRAIN AND VELOCITY INDUCED BY EARTHQUAKE

Shigeaki MORICHI, Yoshinori SHIGIHARA, Yoshinori IMAMURA
and Yusuke UMEDA

The relationship between surface ground strain records and ground motion velocity records is examined. More records than observed in this study are needed to obtain a credible relationship between strain amplitude and velocity. As for the relationship between time history of strain and that of velocity, the time variation of two strain invariants and that of resultant velocity are compared at interval of 1/100 second. When the absolute value of strain invariant showed a peak value in time history, the resultant velocity showed a minimum during sinusoidal vibration and showed a peak value during wave propagation. According to the analysis, the state of sinusoidal vibration and wave propagation appeared respectively in about half of the measurement. Therefore, the relationship between time history of strain and that of velocity was not clarified.