

傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ

EFFECT OF LATERAL INHOMOGENEITY ON SEISMIC WAVES AND GROUND STRAINS

大槻 明*・田蔵 隆**・清水勝美***

By Akira OHTSUKI, Takashi TAZOH and Katsumi SHIMIZU

Observation is conducted at a soft surface layer with sloping base to clarify the effects of lateral inhomogeneity on seismic waves. It is found from the observed and computed seismograms that the scattering Rayleigh wave is strongly produced in the surface ground near the sloping base. Thus, the amplitude of the ground strain is large and the effects of the Rayleigh wave caused by lateral inhomogeneity should be considered on design for underground structures with large horizontal dimension.

1. ま え が き

近年、わが国の国土事情を反映して、海岸埋立地などの重要構造物の建設が余儀なくされている。このような地盤の多くは、いわゆる不整形地盤で、水平方向に大きく変化した地層構成を有しており、このことが構造物にどのような影響を及ぼすかが議論されている。

不整形地盤の地震時挙動に関する研究は、過去の震害例をもとにこれまでもかなり行われているが、そのほとんどが解析面からの研究である^{1)~5)}。

しかし、最近になって実測面からの研究も行われ始め、貴重なデータが集積されつつある。入倉⁶⁾は、傾斜基盤を有する地盤上の地震観測から、地形の効果による周波数伝達特性の変化を調べた。Boore⁷⁾は、San Fernando地震の際のPacoimaダムにおける大加速度記録をもとに、不整形地盤の効果について検討した。福森⁸⁾らは、基盤の深さが水平方向に変化した地盤でアレー観測を実施し、地震波の伝播速度を求めた。また、後藤⁹⁾、浅野¹⁰⁾らは、不整形地盤における埋設管の耐震性を検討するた

め、模型実験や地震観測を行い、地盤構造の急変部におけるひずみを調べた。しかし、これらの実記録を用いた研究は、これまでの解析的研究成果を実証するには、その記録の数からしてまだ今後多くの研究課題を残しているといえる。

本研究は、基盤の深さが水平方向に急変する地盤で行った地震観測記録に基づき、このような地盤では、成層地盤と比較してどのような振動特性を示すかを検討したものである。また、著者らの解析的考察¹¹⁾で示した不整形地盤近傍より発生する表面波について、その実証的検討を試みた。さらに、これらの検討結果を踏まえ、基盤の深さが急変する地盤に発生するひずみの大きさおよびその分布について解析的検討を加え、不整形地盤が地中構造物、特に埋設管に与える影響を調べた。

2. 地震観測地点の地盤概要と地震計配置

地震観測¹²⁾を実施している地盤概要ならびに地震計配置をFig.1に示す。当該地盤は、海岸砂洲によるおぼれ谷閉塞の典型的な軟弱地盤で、基盤の深さが水平方向に大きく変化している。表層は腐植土およびシルトの互層で、層厚約20m、せん断波速度55m/s程度の沖積層である。基盤層は粘土および細砂からなる洪積層で、せん断波速度は400m/s以上となっている。

* 正会員 清水建設(株)大崎研究室研究員
(〒100 千代田区内幸町2-2-2)

** 正会員 工修 清水建設(株)土木設計部

*** 正会員 清水建設(株)技術研究所

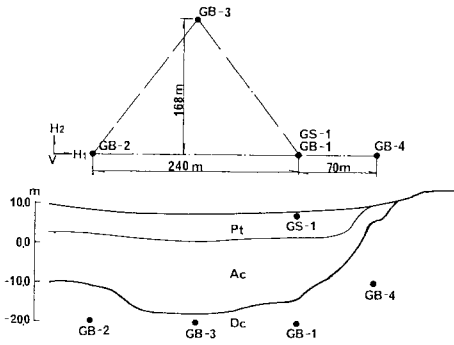


Fig. 1 Cross-section of observation site and location of seismometers.

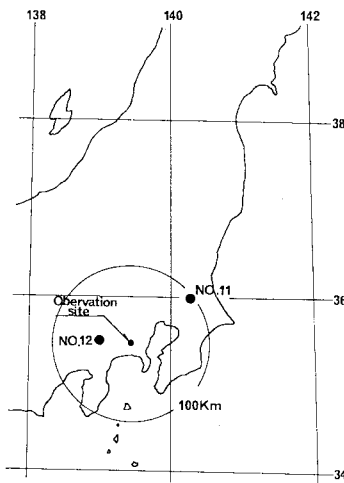


Fig. 2 Distribution of earthquake epicenters.

設置した地震計はサーボ型加速度計で、地表1台 (GS-1)、基盤に4台(GB-1~GB-4)配置している。Fig. 1に示してあるH1(振動方向)とは、基盤が傾斜している方向をさし、H2方向はそれに直交する方向である。なお、当該地盤はH2方向にはほぼ成層である。地震観測開始以来これまでに12個の地震記録が得られている。今回解析に用いる地震記録は、1983年2月27日に発生した茨城県南部地震(No.11)で、マグニチュード6.3、震央距離90km、震源深さ40km、および1983年8月8日に起こった神奈川県西部地震(No.12)、マグニチュード6.0、震央距離42km、震源深さ20kmである。No.11地震は、地表で31.3gal、No.12地震は、地表で113.5galの最大加速度を記録した。

3. 傾斜基盤近傍における卓越周期

当該地盤の卓越周期を¹³⁾、①2次元有限要素法モデルによる固有値解析および周波数伝達関数、②常時微動観測による地表でのパワースペクトル、③地震観測記録に

基づく基盤(GB-1)に対する地表(GS-1)の周波数伝達関数および地表でのパワースペクトルから検討した。

有限要素法における解析で得られた当該地盤の固有周

Table 1 Natural periods.

Mode number	Natural frequency (Hz)	Natural period (sec)	Participation factor (α)	Participation factor (β)
1	0.719	1.391	37.192	0.676
2	0.870	1.149	7.402	1.749
3	1.236	0.809	3.910	0.397
4	1.615	0.619	2.153	0.909
5	1.814	0.551	12.889	0.304

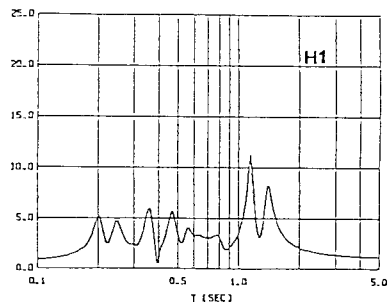


Fig. 3 Theoretical transfer function between GB-1 and GS-1 calculated by FEM.

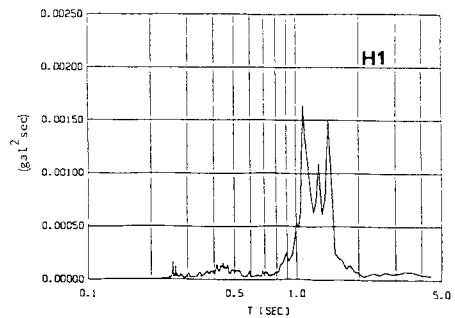


Fig. 4 Power spectrum computed from the H1-direction component of microseisms.

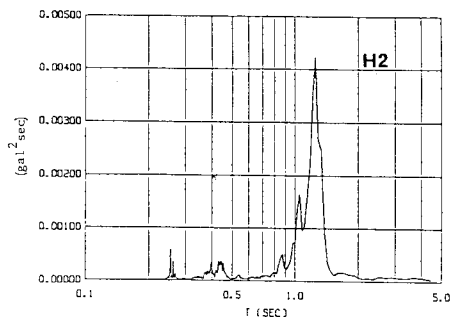


Fig. 5 Power spectrum computed from the H2-direction component of microseisms.

期を Table 1 に示す。当地盤の 1 次固有周期は、1.39 秒、2 次は 1.15 秒である。有限要素法によって計算した基盤と地表間の周波数伝達関数を Fig. 3 に示す。Fig. 3 で最大のピークを与えている周期 1.15 秒は、前述した固有値 2 次に対応しており、そのときの振動モードは、GS-1 付近の地表が水平方向に大きく振動するモードで、傾斜基盤が存在することによって生じたモードである。一方、1.39 秒付近のピークは、傾斜基盤よりある程度離れた成層地盤がせん断 1 次モードに類似した振

動モードで、水平方向に大きく振動するモードに対応している。

Fig. 4 および Fig. 5 は、常時微動観測による地表 GS-1 での水平 2 方向(H1, H2)のパワースペクトルである。Fig. 4 の H1 方向のパワースペクトルと Fig. 3 の有限要素法による周波数伝達関数を比較すると、両者はきわめてよい対応関係にある。

No. 11 地震を用いて、基盤 GB-1 と地表 GS-1 間の周波数伝達関数および地表のパワースペクトルを計算した。Fig. 6 から Fig. 8 には水平 2 方向および、鉛直方向の伝達関数を、また、Fig. 9 から Fig. 11 には、パワー

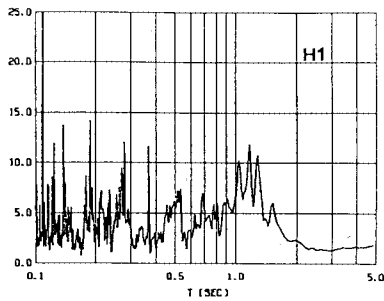


Fig. 6 Transfer function between GB-1 and GS-1 computed from the H1-direction component of the No. 11 earthquake.

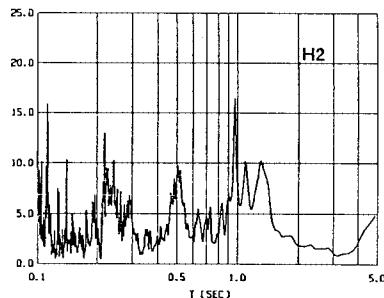


Fig. 7 Transfer function between GB-1 and GS-1 computed from the H2-direction component of the No. 11 earthquake.

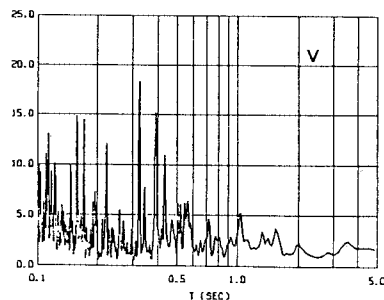


Fig. 8 Transfer function between GB-1 and GS-1 computed from the vertical component of the No. 11 earthquake.

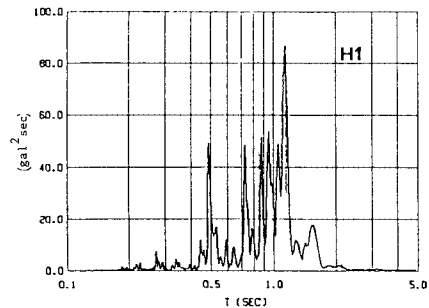


Fig. 9 Power spectrum computed from the H1-direction component of the No. 11 earthquake.

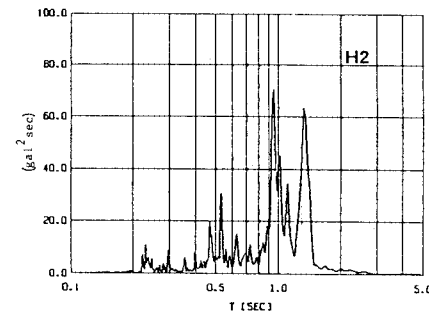


Fig. 10 Power spectrum computed from the H2-direction component of the No. 11 earthquake.

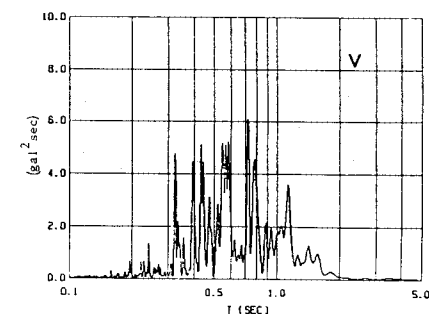


Fig. 11 Power spectrum computed from the vertical component of the No. 11 earthquake.

スペクトルをそれぞれ示す。No.11地震による伝達関数およびパワースペクトルをそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 および Fig. 5 と対比すると H1 方向に関しては、1.4 秒および 1.1 秒付近の各ピークはよい一致を示している。また、H2 方向の 1.3 秒付近のピークについても同様によく一致している。当地盤において特徴的なことは、Fig. 4, Fig. 5 のパワースペクトルが示すように、周期 1 秒から 2 秒間で H1 方向と H2 方向の周期特性に大きな違いがみられることである。H1 方向に関しては、1.4 秒と 1.1 秒付近に大きなピークがみられる。しかし、H2 方向に関しては、1.3 秒付近に単一のピークが現われる結果になっている。このことは、No.11 地震に対する伝達関数やパワースペクトルにも傾向として認められるが、常時微動のパワースペクトルよりもその卓越周期周辺に複数のピークが現われており、より複雑な振動となっている。当該地盤は H2 方向には、ほぼ成層地盤であることから、H1 方向の基盤の傾斜の影響が、H1 と H2 方向の動特性の違いとして現われたものと思われる。

ところで、当地盤のように傾斜基盤を有する地盤では、基盤が傾斜する近傍より比較的周期の短い表面波が発生することを解析面から指摘した¹¹⁾。本観測記録の中にもこのような表面波成分が含まれている可能性が考えられる。そこで、このような観点から地震記録をながめてみることにする¹⁴⁾。Fig. 6, Fig. 9 に示す H1 方向の伝達関数およびパワースペクトルをみると、周期 0.5 秒から 1.0 秒にピークが認められる。0.5 秒付近のピークは Table 1 に示す固有値 5 次（成層地盤と仮定したときの 2 次）に対応している。0.6 秒付近から 1.0 秒付近に認められるピークは、FEM による伝達関数および常時微動のパワースペクトルには認められないこと、また、このピークは Fig. 8, 11 に示す V 方向のピークと比較的よい対応関係にあることから、周期 0.6 秒から 1.0 秒付近にかけての成分は、レーリー波によって生じたピークの可能性が高いと考えられる。そこで、この点についてさらに検討を加えることにする。

4. 理論分散曲線

当地盤を表層厚 20 m の 2 層成層地盤と仮定し、Haskell¹⁵⁾の方法によってレーリー波の理論分散曲線を計算した。Fig. 12 はその結果で、基本モードに対する群速度は、0.7 秒および 1.4 秒付近に 2 つの極値を有している。Fig. 13 は、0.7 秒および 1.4 秒におけるレーリー波の振動モードを示したものである。周期 0.7 秒のモードは、鉛直モードが卓越しており、1.4 秒のモードは水平モードが卓越している。いずれの振動モードも基盤で振幅が小さくなっていることがわかる。ラブ波についても同様な解析を試みた。Fig. 14 には、ラブ波の分散曲

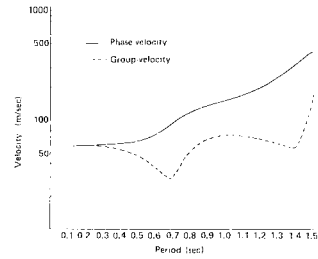


Fig. 12 Phase-velocity and group-velocity curves for fundamental Rayleigh mode.

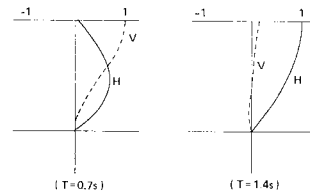


Fig. 13 Fundamental Rayleigh modes of periods 0.7 s and 1.4 s.

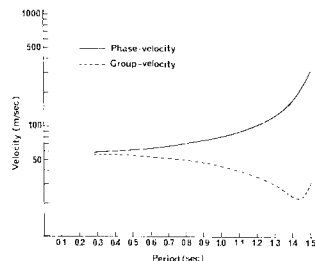


Fig. 14 Phase-velocity and group-velocity curves for fundamental Love mode.

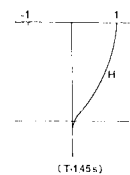


Fig. 15 Fundamental Love mode of period 1.45 s.

線を示す。基本モードに対する群速度は、1.45 秒付近に極値をもっており、そのときの振動モードは、Fig. 15 に示すように表層地盤で振幅が卓越している。

5. ランニングスペクトルと粒子軌跡

Fig. 16 および Fig. 17 は、地表で得られた水平方向 (H1) および鉛直方向の No. 11 地震記録に対するランニングスペクトルを示したものである。H1 方向のランニングスペクトルには、周期 0.6 秒から 1.0 秒付近にかけて (Fig. 16 A 点) 分散性が認められる。また、このときの鉛直方向のランニングスペクトルにも同時刻の同じ周期に (Fig. 17 A' 点) 分散性が認められる。この 0.6 秒から 1.0 秒にかけての周期は、地盤を 2 層成層地盤と仮定して求めたレーリー波の群速度の極値に対応する周期 0.7 秒に非常に近い。さらに、分散性が認められる A

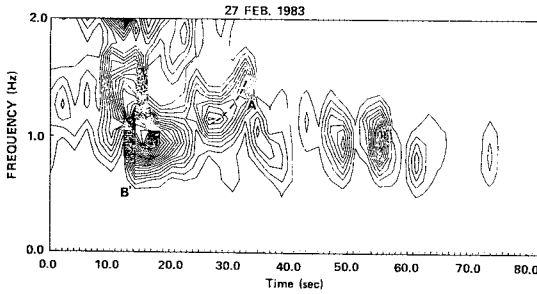


Fig. 16 Running spectrum computed from the horizontal component (H1) of the No. 11 earthquake at GS-1.

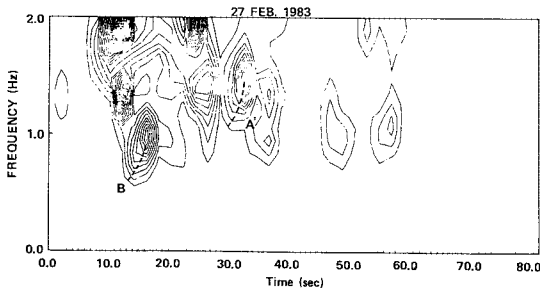


Fig. 17 Running spectrum computed from the vertical component of the No. 11 earthquake.

点付近の記録についてその粒子軌跡を調べてみると、Fig. 18の結果が得られた。この粒子軌跡は、地震波が山側から谷側に伝播したと考えた場合、伝播方向に対し逆回転の動きになっている。一方、GS-1におけるH2方向、すなわち傾斜基盤に直交する方向のランニングスペクトルを調べてみると、H1方向や鉛直方向に認められる分散性はない。基盤GB-1からGB-4での観測記録においても、GB-1にみられる顕著な分散性は認められない。このほかに、周期1.5秒から2秒にかけて分散性らしきものが鉛直方向のランニングスペクトル (Fig. 17 B点) に認められる。この分散性は水平方向のランニングスペクトルにも現われているものと思われるが (Fig. 16 B'点)、基盤から入射したせん断波の主要動が卓越しているため明確な分散性は確認できなかった。No. 12地震についても、同様の解析を試みた。地表GS-1のH1方向のランニングスペクトルを求め Fig. 19に示した。No. 11地震の場合と同様な分散性が周期0.6秒から1.0秒および1.5から2.0秒付近に認められる。

いままでの観測記録を用いた議論から、本研究において対象とした地盤の場合、基盤が傾斜していることによって、周期1.15秒と0.6秒から1.0秒付近の波が励起されることがわかった。1.15秒の成分は、傾斜基盤が存在することによって傾斜基盤近傍 (GS-1)の地表が水平に大きく振動するモードに対応している。0.6秒か

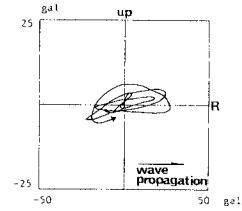


Fig. 18 Particle motion at GS-1.

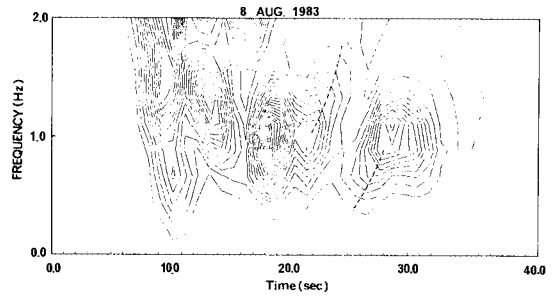


Fig. 19 Running spectrum computed from the horizontal component (H1) of the No. 12 earthquake at GS-1.

ら1.0秒付近の成分は基盤が傾斜している付近の表層地盤から発生したレーリー波成分である可能性が高いと考えられる。また、Fig. 17およびFig. 19のランニングスペクトルから1.5秒から2.0秒付近にかけての周期成分にもレーリー波が含まれている可能性が高いと推測される。

6. レーリー波発生メカニズム

GS-1で観測された地震波には、傾斜基盤近傍より発生したレーリー波成分が含まれている可能性が高いと考えたわけであるが、ここではこのことを確認する意味で、当該地盤について解析的検討を試みた。

過去に不整形地盤から発生する表面波について解析的研究が行われている^{16)~19)}。著者らもすでに述べたように不整形地盤中のレーリー波発生メカニズムおよび不整形地盤の動特性を調べた¹¹⁾。ここではこの手法を当地盤に適用する。Fig. 20に示すように、複雑な地形地質の部分に有限要素法を適用し、その他の規則的な部分

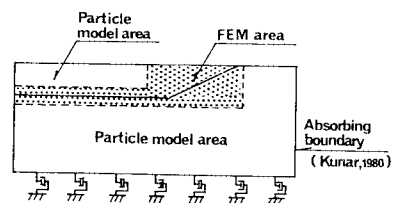


Fig. 20 Analytical model combining FEM with particle model.

には質点系モデルを用いたハイブリットモデルである^{20)~21)}。本解析では、表層は1層地盤とし $V_s=55$ m/s, $\gamma=1.13$ t/m³ を用い、基盤は $V_s=400$ m/s, $\gamma=1.8$ t/m³ とした。なお、ポアソン比は表層については0.45、基盤は0.40とした。不整形地盤中の波動伝播メカニズムを調べるうから、入力波として単位振幅で1.0 HzのSine波を半波長入力した。また、傾斜基盤面からの反射波を明らかにするため、無減衰で応答解析を行った。

Fig. 21には、不整形地盤中の波動伝播の様子を変位ベクトルを用いて示してある。鉛直入射されたSV波(SV)は、表層地盤と基盤との境界で2つの波に分かれ、1つは表層地盤中を伝播する波(SV1)に、もう1つは

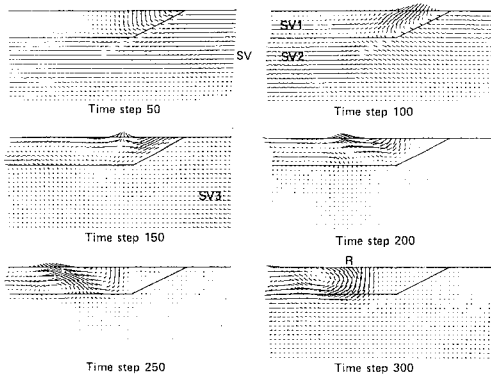


Fig. 21 Wave propagation due to SV vertical incident wave of 1Hz.

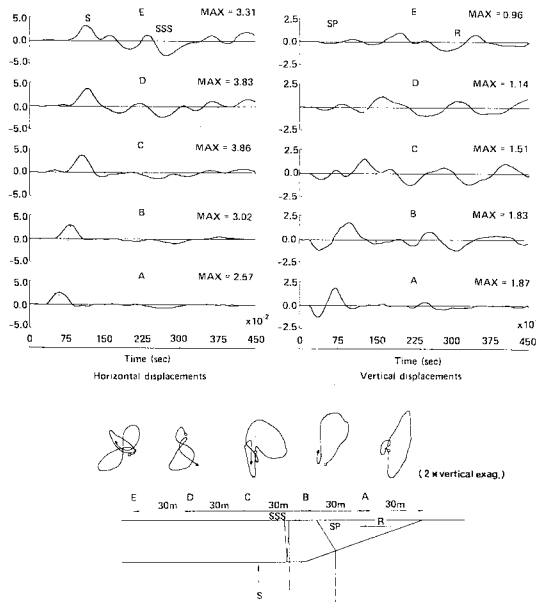


Fig. 22 Horizontal and vertical displacements and particle motions for points over a soft surface layer.

下方に伝播する反射波(SV2)となっている。反射波(SV3)はモデル右側の地表から反射してきた波である。時間ステップ100から150では、傾斜基盤面に対し平行な振動が生じ地表では鉛直動が卓越している。一方、傾斜基盤付近からはレーリー波(R)が発生し、表層地盤中を山側から谷側に向かって伝播している様子が視覚的に認められる。Fig. 22には、解析によって得られた地表各点の変位波形および粒子軌跡を示す。Fig. 22に示す変位波形から、鉛直入射されたSV波が表層地盤中で反射(SSS)を繰り返している様子や、傾斜地盤からの屈折波(SP)が表層を伝播しているのがわかる。また、レーリー波(R)が60 m/s前後の群速度で伝わっているのが認められる。粒子軌跡をみると、全点ほぼ回転動の状態にあるが、運動の主要動部はSV波によるものと考えられ、後半分の動きは基盤の傾斜面から発生してレーリー波成分であると判断される。このレーリー波は谷側に移行するにつれ成長する傾向があり、傾斜基盤から離れた点での運動は波の伝播方向に対し逆回転の動きになっている。解析によって求められた逆回転運動の定性的傾向は観測結果と対応している。以上の考察より、本手法によって得られた解析結果は地震観測記録にみられるレーリー波成分の発生メカニズムを定性的に明らかにしているものと考えられる。

7. 地震応答解析

実測記録を用いて当地盤の地震時挙動をシミュレーションした。解析に用いる地震波は、地表で113.5 galの加速度を記録したNo.12地震である。この地震波はFig. 23に示すように継続時間が40秒間であるが、このうち時刻6.5秒から26.5秒までの20秒間を取り出し解析に用いた。解析モデルは前節の場合と同様でFig. 24に示すように観測点GB-1の位置にLysmerダンパーを設け、側方にはKunar²²⁾の方法による無反射境界を考慮した。入力波はGB-1で観測された加速度波形を積分した速度波形とした。地盤の減衰は、減衰定数 ($h=0.15$)

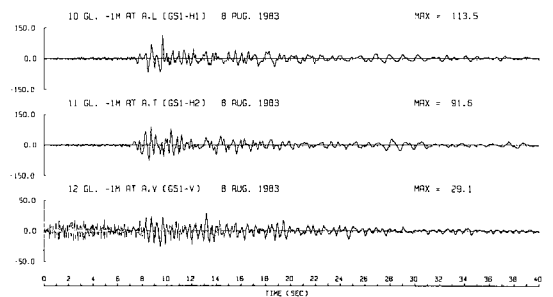


Fig. 23 Horizontal and vertical acceleration records of the No. 12 earthquake observed at GS-1.

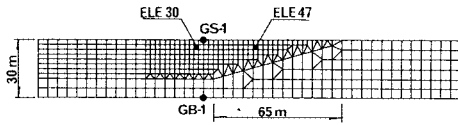


Fig. 24 Analytical mode for a surface layer with sloping basement.

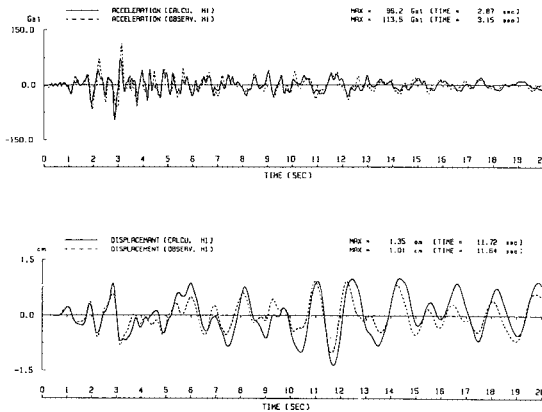


Fig. 25 Comparison of observed and calculated accelerations and displacements at GS-1.

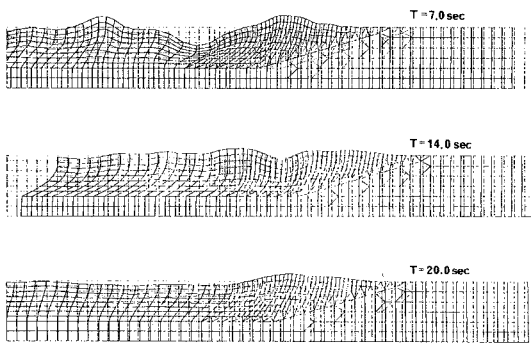


Fig. 26 Mode shapes of the ground motion.

より粘性減衰係数 ($c=2hwp$) を定め使用した。

(1) 実測波形と計算波形の比較

地表 GS-1 における水平方向(H1)の実測波形とその点における計算波形を比較してみた。Fig. 25 に示すように、本手法によって求められた加速度波形の最大値は、実測波形のそれよりも小さめであるが、全体的には両者の波形は振幅、周期ともによく一致しているのがわかる。変位波形についてみると、時刻 10 秒以後の波形は、実測波形よりも計算波形の方がやや大きめであるが、全体的には両者の波形はよく類似している。このことより、本手法によって求められた結果は、観測結果をよく表現できることが確かめられた。Fig. 25 の加速度波形と変位波形を比較してみると、加速度の最大値が生じる時刻

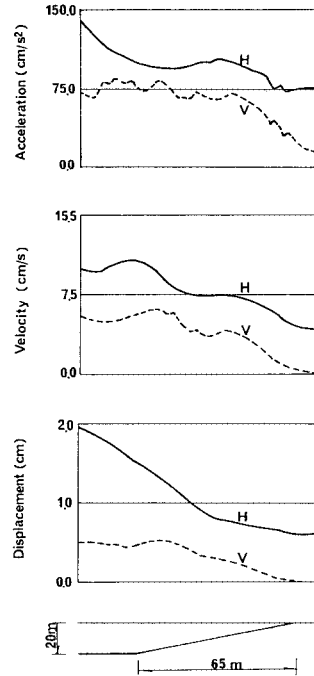


Fig. 27 Distributions of the maximum accelerations, velocities and displacements on the surface.

付近の変位振幅よりも、主要動後すなわち時刻 10 秒以後の変位振幅の方が大きいことがわかる。これは、傾斜基盤近傍より発生したレーリー波による影響が大きいと考えられる。Fig. 26 は、時刻 7 秒、14 秒、20 秒のときの変位分布である。傾斜基盤近傍の表層地盤が大きく上下および水平方向に複雑な振動を示している様子が認められる。時刻 14 秒では、傾斜基盤よりも少し離れた表層地盤が水平方向に大きく振動しているモードとなっている。一方、時刻 20 秒では傾斜基盤上の表層が水平方向に大きく振動している。

Fig. 27 には、地表各点の変位、速度、加速度の最大値をプロットした。

(2) 傾斜基盤近傍の地盤ひずみ

本手法により求められた地盤ひずみについて検討を加えた。Fig. 24 に示した要素番号 30 および要素番号 47 におけるひずみ γ_x , γ_y , γ_{xy} の波形を Fig. 28 および Fig. 29 にそれぞれ示す。傾斜基盤より少し離れた要素 30 では、せん断ひずみ γ_{xy} は、軸ひずみ γ_x , γ_y に比べ 5 程度大きくくなっている。最大加速度が生じた時刻 3 秒では、せん断ひずみは最大値 9×10^{-4} を示しているが、その波形の後半分においても 5×10^{-4} 程度のひずみが生じている。軸ひずみ γ_x , γ_y は、時刻 3 秒および 11 秒付近で 2×10^{-4} 程度の値が生じている。一方、傾斜基盤上の表層地盤の要素 47 におけるひずみについて調べてみる

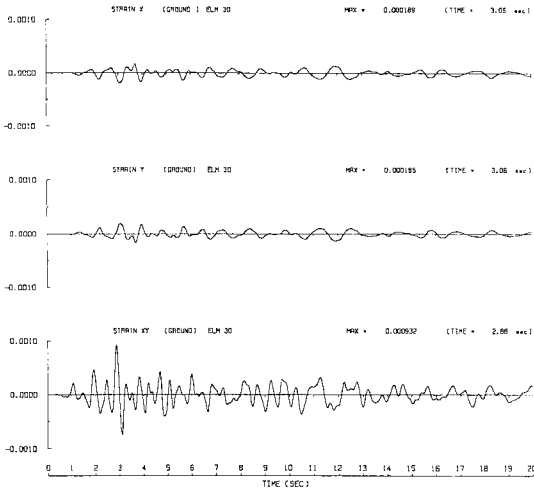


Fig. 28 Time histories of the ground strains at some distance from the sloping basement.

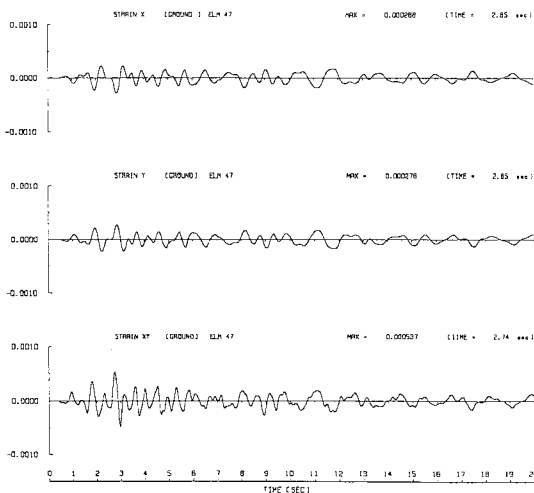


Fig. 29 Time histories of the ground strains above the sloping basement.

と、せん断ひずみは要素 30 のひずみほど大きくないが、 5×10^{-4} 程度の値が生じている。軸ひずみ γ_x , γ_y は要素 30 のそれよりも大きく、 2×10^{-4} のひずみが生じている。本解析を通し、傾斜基盤近傍の表層地盤では、せん断ひずみばかりでなく軸ひずみもかなり生じていることがわかった。ひずみ波形をみると、加速度の主要動付近で大きなひずみが生じており、さらに、軸ひずみは主要動後の後半分においてもかなりのひずみが生じる傾向が認められる。これらの地盤ひずみの結果は、傾斜基盤より発生したレーリー波成分が大きく寄与しているものと考えられる。

地盤各点の最大ひずみの分布を Fig. 30 に示す。最大

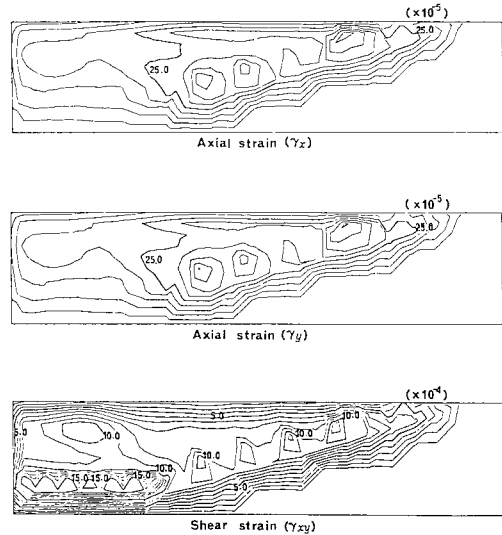


Fig. 30 Distributions of the maximum ground strains.

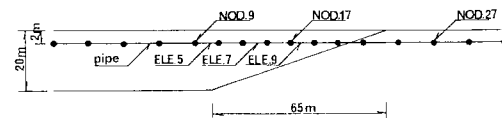


Fig. 31 Analytical model for buried pipeline in the surface layer with sloping basement.

Table 2

Cross-sectional area of pipe	$A = 0.0194 \text{ m}^2$
Young's modulus of pipe	$E = 2.1 \times 10^7 \text{ t.f./m}^2$
Second moment of pipe	$I = 8.7090 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
Soil stiffness constant	$k = 0.6 \times 10^3 \text{ t.f./m}^3$

ひずみの特徴的な点は、軸ひずみ γ_x , γ_y は基盤が傾斜している付近の表層地盤、特に傾斜基盤と表層地盤との境界近傍で大きなひずみが生じている点である。せん断ひずみ γ_{xy} については、軸ひずみの場合と同様に基盤が傾斜している付近の表層地盤および基盤が水平となっている近傍の表層地盤に大きなひずみが生じている。

以上の考察より、地盤構造が急変する地盤では、大きなひずみが集中して生じる傾向が認められる。また、このような地盤ではせん断ひずみばかりでなく軸ひずみもかなり大きくなることがわかった。地盤の引張力に対する弱さを考えると、大地震の際の地盤の破壊、不等沈下、それに伴う地上あるいは地中構造物の破壊の起こる可能性が高いと考えられる。

(3) 不整形地盤の埋設管への影響

不整形地盤中の地中構造物への影響を調べる目的で、

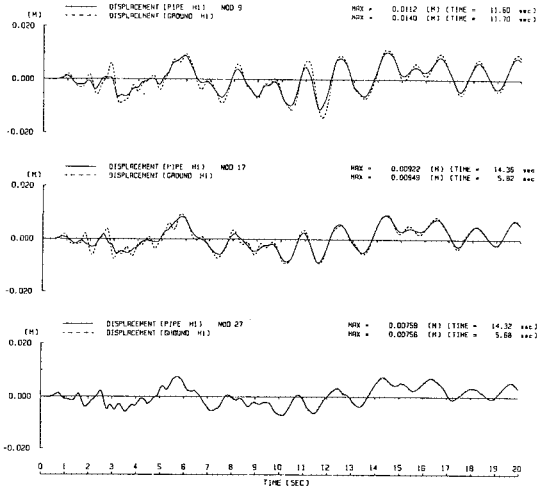


Fig. 32 Comparison of the displacements of the pipe and the surrounding ground.

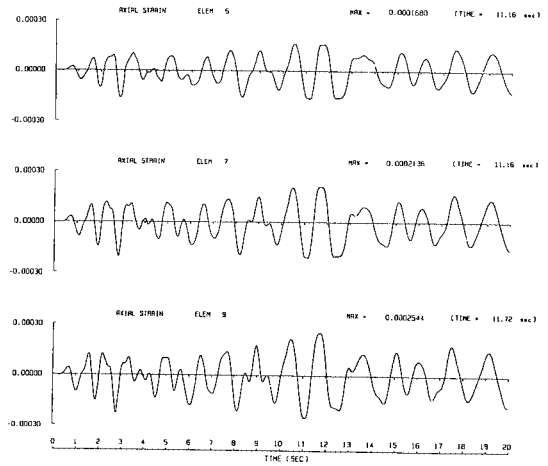


Fig. 34 Time histories of the axial strain of the pipe.

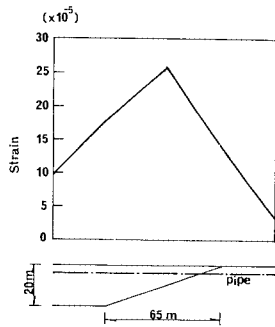


Fig. 33 Distribution of the maximum axial strain of the pipe.

埋設管を例にとり解析を行った。地表より 2 m の位置に埋設管が埋設されていると仮定し、No.12 地震によりどの程度のひずみが管に生じるか検討した。地盤と埋設管を弾性床土ばりとしてモデル化し、本手法によって求められた水平および鉛直変位を強制変位として管に与え、埋設管の応答を求めた。Table 2 に埋設管および地盤の諸定数を示す。

埋設管およびその周辺地盤の変位波形を Fig. 32 に示す。当図をみると地盤と埋設管は一体となって振動しているのがわかる。管軸に沿って発生した軸ひずみの最大値を Fig. 33 に示す。当図をみると地盤構造が急変する近傍で管のひずみが大きくなっており、前述した地盤のひずみ分布を反映している。Fig. 33 の解析結果は、従来からいわれているように地盤構造が急変する近傍で管に大きなひずみが発生することを定性的に裏づけている。Fig. 34 は、管軸に沿って発生した軸ひずみ波形で、各波形とも時刻 10 秒以後に大きなひずみが発生している

のが認められる。このように加速度の主要動後に比較的大きなひずみが管に発生するのは、地盤の場合と同様、レーリー波成分が大きく寄与しているものと考えられる。

8. 結 論

基盤が傾斜していることによって、周期 1.15 秒および 0.6 秒から 1.0 秒付近の波が特に励起されることがわかった。周期 1.15 秒の成分は、基盤が傾斜している付近の表層地盤が水平方向に大きく振動するモードに対応している。また、0.6 秒から 1.0 秒付近の周期成分は、基盤が傾斜している付近の表層地盤より発生したレーリー波である可能性が高いという結論となった。このレーリー波成分は、工学上無視できない大きさである。

当地盤のように地盤構造が急変する地盤では、その急変部に大きなひずみが集中して生じる傾向があり、また、せん断ひずみばかりでなく軸ひずみもかなり大きくなることがわかった。このような地盤では、地盤の引張力に対する弱さを考えると、大地震時の際の地盤の破壊、不等沈下、それに伴う地上あるいは地中建造物の破壊の起こる可能性が考えられる。

傾斜基盤を有する地盤に埋設されている管の地震時のひずみは、地盤構造が急変する近傍で大きなひずみが発生しやすく、周辺地盤のひずみ分布を強く反映していることが解析的に確認された。

当地盤では、基盤が傾斜していることによって発生するレーリー波成分の影響を受け、加速度の主要動後に大きなひずみが発生する傾向がある。

傾斜基盤を有する地盤では、大地震時の際に下方より伝播してくるせん断波のほかに傾斜基盤近傍より発生する表面波によって、大きな地盤ひずみが生じることが予

想される。したがって、このような地盤に建設される構造物、特に水平方向に広がりをもつ構造物の耐震性を検討する際には、不整形地盤であることに對する十分な配慮が必要となろう。

最後に、本研究を進めるにあたり多大な協力をいただいた藤沢市建設局 西野康雄氏をはじめ関係各位に感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) Trifunac, M. D. : Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 1, pp. 267~281, 1973.
- 2) Smith, W. D. : The application of finite element analysis to body wave propagation problems, *Geophys. J. R. Astro. Soc.* Vol. 42, pp. 747 ~ 768, 1975.
- 3) Wong, H. L. : Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 1167 ~ 1183, 1982.
- 4) 小堀鐸二・篠崎祐三・三田 彰：P波及びSV波入射による不整形地盤・構造物系の振動特性，日本建築学会近畿支部研究報告，pp. 133 ~ 136, 1981.
- 5) 丹羽義次・廣瀬壯一：傾斜層を有する地盤における理論的地震動解析，土木学会論文報告集，No. 337, pp. 57 ~ 66, 1983.
- 6) 入倉孝次郎：地盤の震動特性評価の際の地形の影響，京大防災研究所年報，第20号B-1, pp. 1 ~ 11, 1977.
- 7) Boore, D. M. : A note on the effect of simple topography on seismic SH-waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 62, pp. 275~284, 1972.
- 8) 福森康文・佐古光聡・菊田 隆・中西利之：アレー観測記録による見かけ速度の周期特性，第6回日本地震工学シンポジウム，pp. 249 ~ 256, 1983.
- 9) 後藤尚男・柴田 徹・土岐憲三・高田至郎・角南 進：地盤構造の急変部に埋設された管状構造物の振動特性，京大防災研究所年報，第16号B, pp. 631 ~ 655, 1973.
- 10) 浅野照雄・西尾宣明・塚本克良：大規模宅地造成地盤に埋設された導管の地震時挙動観測，土木学会第37回年次講演会，第1部門，pp. 601 ~ 602, 1982.
- 11) Ohtsuki, A. and Harumi, K. : Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 11, pp. 441 ~ 462, 1983.
- 12) 西野康雄・大平 彰・斉藤一郎・勝沢勝栄：軟弱地盤における杭基礎の設計，土木学会誌，9月号，pp. 16 ~ 22, 1982.
- 13) 田蔵 隆・清水勝美・嶋田 稷・木全宏之：基盤の深さが大きく変化する地盤の震動特性について，第18回土質工学研究発表会，pp. 657 ~ 660, 1983.
- 14) 大槻 明・田蔵 隆・清水勝美：地震観測に基づく不整形地盤中の表面波成分の一検討，第17回地震工学研究発表会，pp. 87 ~ 90, 1983.
- 15) Haskell, N. A. : The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 43, pp. 17 ~ 34, 1953.
- 16) Hudson, J. A. and Knopoff, L. : Statistical properties of Rayleigh waves due to scattering by topography, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 57, pp. 83 ~ 90, 1967.
- 17) Bard, P. Y. and Bouchon, M. : The seismic response of sediment-filled valleys, Part 2, The case of incident P and SV waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 70, pp. 1921 ~ 1941, 1980.
- 18) Boore, D. M., Harmsen, S. C. and Harding, S. T. : Wave scattering from a step change in surface topography, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, pp. 117 ~ 125, 1981.
- 19) Harmsen, S. C. and Harding, S. T. : Surface motion over a sedimentary valley for incident plane P and SV waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, pp. 655 ~ 670, 1981.
- 20) 大槻 明・山原 浩・春海佳三郎：レーラー波による不整形地盤の挙動，土木学会論文報告集，第337号，pp. 27 ~ 36, 1983.
- 21) Ohtsuki, A., Yamahara, H. and Harumi, K. : Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic Rayleigh waves, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 12, pp. 37~58, 1984.
- 22) Kunar, R. R. and Rodriguez-Ovejero, L. : A model with non-reflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analyses, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 8, pp. 361 ~ 374, 1980.

(1984. 2. 15・受付)