

(23) 観測記録に基づく不整形地盤中の表面波成分に関する検討

清水建設(株)大崎研究室	正員	大槻	明
清水建設(株)土木設計部	正員	田蔵	隆
清水建設(株)土木設計部	正員	清水	勝美

1. はじめに 1923年の関東地震では、軟弱地盤地域よりも洪積層から沖積層に移行する中間層において、水道管等の埋設物にかなりの被害が発生した。また、1968年の十勝沖地震では、八戸市内の崖地の建造物に大きな被害が見られた。このように地形地質の急変する地盤、すなわち不整形地盤で、地震による被害が集中する傾向がみられる。これまで不整形地盤の震動特性を扱った論文は比較的多く発表されており、中でもM.D.Trifunac¹⁾ D.M.Boor²⁾ W.D.Smith³⁾らの研究は代表的である。著者らもSV波及びレーリー波入射に対する不整形地盤の震動挙動について検討⁴⁾⁵⁾⁶⁾を行ってきたが、不整形地盤近傍より表面波が発生し、さらにその量も工学上無視できない場合のあることを指摘してきた。本研究は、これまでの解析的考察から、基盤の深さが急変する地盤において得られた地震観測記録に対して、その実証的検討を試みようとしたものである。

2. 地震観測地点の地盤概要と地震計配置

地震観測⁷⁾を実施している地盤概要ならびに地震計配置を図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。表層は腐植土及びシルトの互層で、層厚約22m、せん断波速度55m/sec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/sec以上となっている。設置した地震計はサーボ型加速度計で、地表に1台(GS1)、基盤に4台(GB1~GB4)配置している。今回の解析に用いた地震記録は、1983年2月27日の茨城県南部地震($M=6.3, D=40\text{Km}, \Delta=90\text{Km}$)による記録で、地表(GS1)での最大加速度は水平方向(H1方向)で31.3gal、鉛直方向(V方向)で16.7galであった。

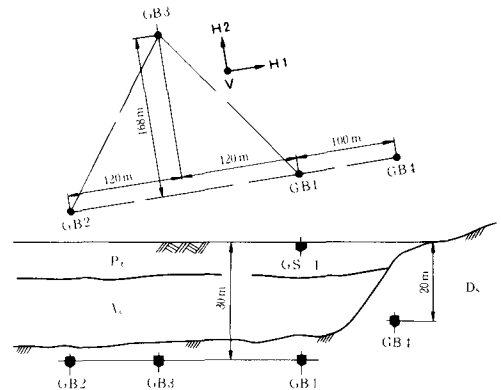


図1 地震観測地点の地盤概要と地震計配置

3. 当該地盤の卓越周期に関する検討

当該地盤の卓越周期を、(1)2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)観測記録に基づく基盤(GB1)に対する地表(GS1)の周波数伝達関数から検討した。有限要素法モデルによる解析で得られた当該地盤の固有周期は⑧ せん断型の振動モードだけに注目すると、1次は1.40sec、2次は0.55secである。図2に、有限要素法モデルによって計算した基盤に対する地表の周波数伝達関数を示した。図中で最大のピークを与えている周期1.15secに対応する振動モードは、GS1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。図3および図4は、常時微動観測による地表(GS1に対応する地点)での水平2方向(H1、H2方向)のパワースペクトル図である。図3のH1方向のパワースペクトル図と、図2の有限要素法モデル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ことがわかる。図5~図7は、観測記録から計算したGB1に対するGS1の水平2方向(H1、H2方向)および鉛直方向(V方向)の周波数伝達関数である。図5および図6を、それぞれ図2、図3および図4と対比すると、H1方向に関しては、1.40sec、1.15sec、0.55secの各ピークは三者ともよい一致を示している。H2方向についても同様な考察が可能であるが、H1、H2両方向の観測記録の結果においてみられる0.7sec付近のピークは、有限要素法および常時微動観測のいずれの解析結果にも発生していないことがわかる。さらに、図7に示したV方向の周波数伝達関数と、図5のH1方向の周波数伝達関数を比較すると、0.7secのピークも含めて周期0.5sec~2.0sec間のピークはよく対応

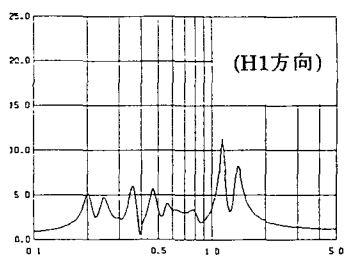


図2 FEMによる周波数
伝達関数(GS1/GB1)

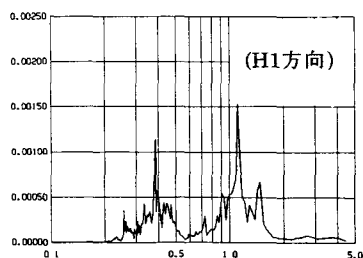


図3 常時微動観測による
パワースペクトル(GS1)

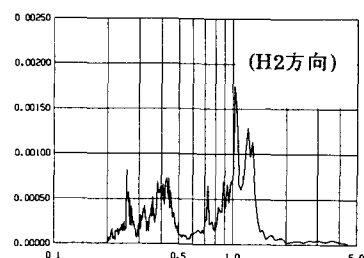


図4 常時微動観測による
パワースペクトル(GS1)

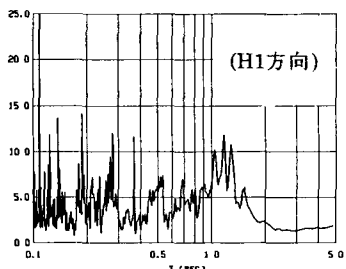


図5 地震観測による周波数
伝達関数(GS1/GB1)

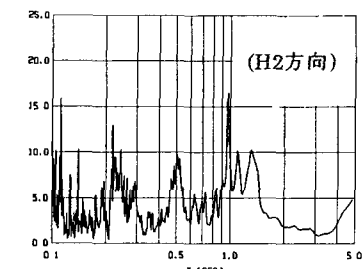


図6 地震観測による周波数
伝達関数(GS1/GB1)

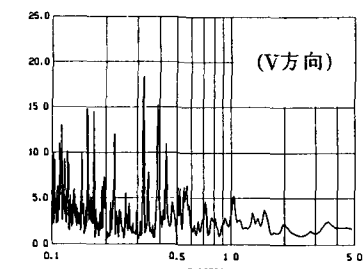


図7 地震観測による周波数
伝達関数(GS1/GB1)

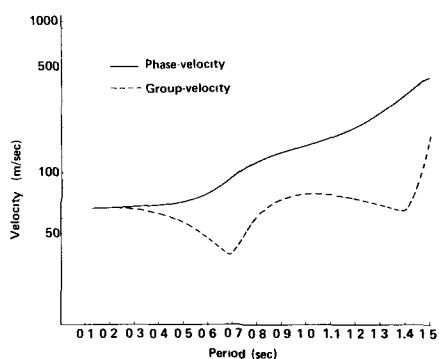


図8 2層成層地盤における
レーリー波の分散曲線

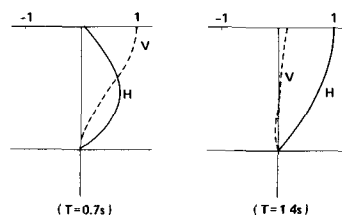


図9 レーリー波の振動モード

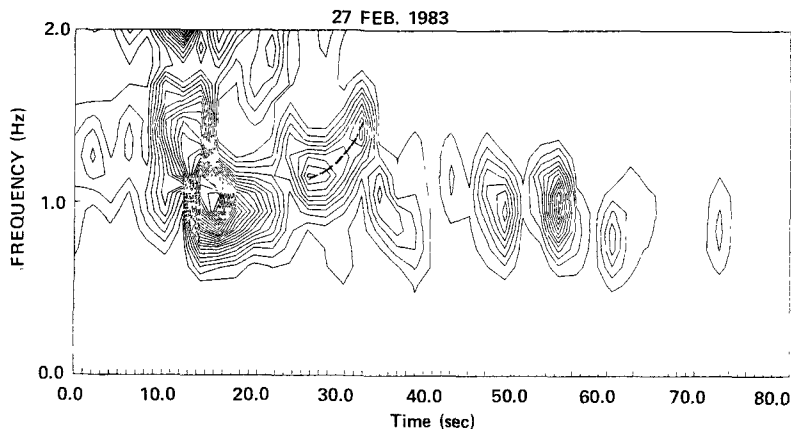


図10 地表GS1の記録のランニングスペクトル(H1方向)

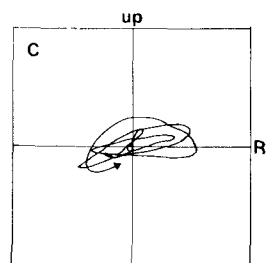


図11 地表GS1の記録に
基づく粒子軌跡

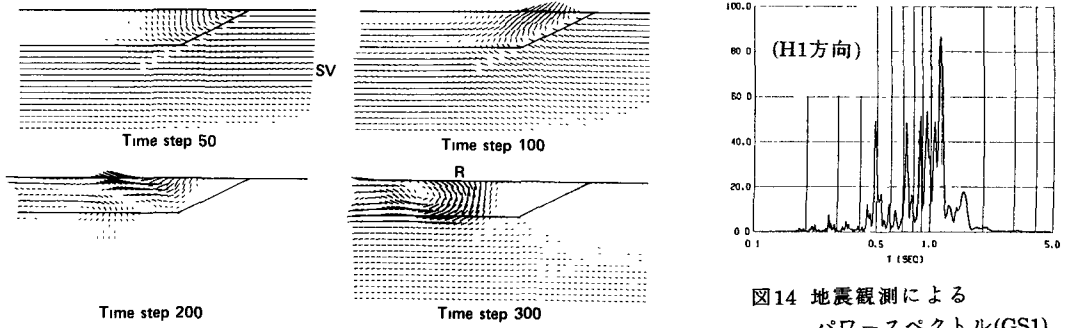


図12 波動シミュレーション解析結果(SV波入射)

図14 地震観測による
パワースペクトル(GS1)

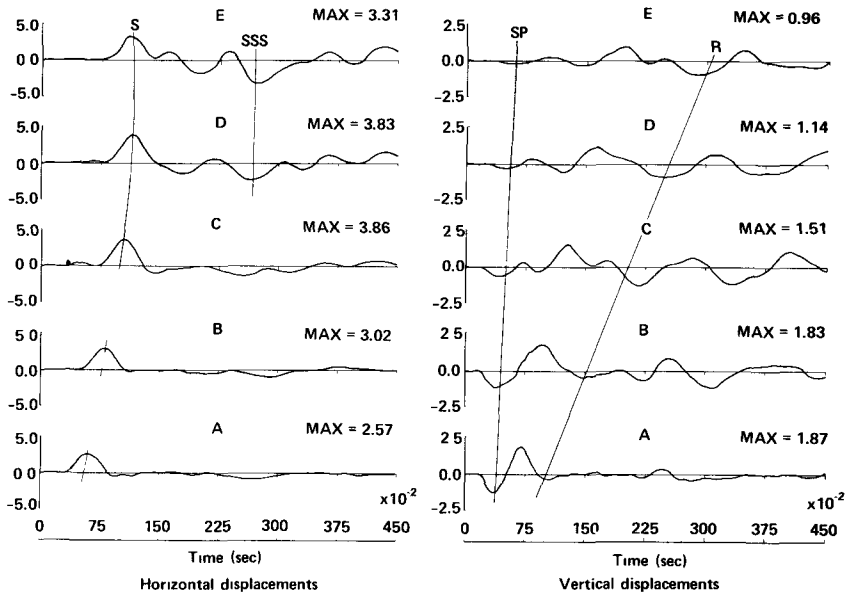


図13 地表の変位波形および粒子軌跡(入射波は単位振幅)

する結果になっている。以上の考察から、地震記録にみられる0.7sec付近のピークは、実体波以外の波、つまり表面波によって卓越した周期成分ではないかと推測される。

4.理論分散曲線 当該地盤を表層厚22mの2層成層地盤と仮定し、Haskellの方法によってレーリー波の理論分散曲線を計算した。図8はその結果で、基本モードに対する群速度は0.7sec及び1.4sec付近に極値を有している。図9は0.7sec及び1.4sec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0.7secのモードは鉛直モードが卓越しており、1.4secでのモードは水平モードが卓越している。また、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。

5.ランニングスペクトルと粒子軌跡

図10は、地表GS1で得られたH1方向の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。これより0.7secから1.0secの周期付近にかけて地震波の分散性が認められる。ここでは示さなかったが、鉛直方向の記録にも同様な現象がみられた。この周期は、地盤を2層成層地盤と仮定して求めた群速度の極値に一致している。さらに、この記録についての粒子軌跡を調べてみると、図11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、伝播方向に対して逆回転の動きになっており、このことから、この周期成分の波は基盤の傾斜面近傍で発生したレーリー波成分であったと考えると理解しやすい。いま、上記の解釈に対して否定的な立場をとり、この表面波成分が他の場所で発生し、当該地盤に伝播してきたものと仮定してみる。この場合、地震波の伝播方向は、地震の震源の方向から考えると、山側からの伝播ということになる。周期0.7sec~1.0secのレーリー波が、 $V_S=400\text{m/sec}$ の地盤を伝播してくるのであるから、その波長は200m~400mとなり、もしこの仮定が正しければ、GB1、GB2、GB3、GB4での観測記録においても、GS1で得られたのと同様な分散性が認められなければならないことになる6)。しかし、基盤の各記録のいずれにおいても、今回そのような現象は認められなかった。

6.波動シミュレーションからの考察

観測記録の周期0.7sec付近の地震波成分は、基盤の傾斜面近傍で発生したレーリー波ではないかと考えたわけであるが、ここではそのことを確認する意味で、当該地盤モデルに対して波動シミュレーションを試みた。解析は簡単のために、1.0HzのSINE波を半波長入力することによって検討した。図12はその解析結果で、鉛直入射されたSV波は、基盤の傾斜面近傍で傾斜面に平行な振動となり(時間ステップ 100)、さらに地表面では鉛直動を伴う振動になっている。また、レーリー波が基盤傾斜面近傍より発生し、谷側に伝播していく様子が視覚的に認められる。図13は、本解析によって得られた地表(図中のA~E点)での変位波形及び粒子軌跡を示したものである。図13に示した変位波形から、垂直入射されたSV波が表層中で反射(SSS)を繰り返している様子や、傾斜基盤面からの屈折波が表層を伝播し(SP)、さらにその波が反射している様子、また、レーリー波(R)が65m/s前後の群速度で伝わっているのがわかる。地表各点の粒子軌跡を見ると、全点はほぼ回転動の状態にあるが、運動の主要動部分はSV波による動きと考えられ、後半部分の動きは基盤の傾斜面から発生した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にあり、傾斜面から離れた点での運動は、波の伝播方向に対して逆回転の動きになっている。この運動の定性的傾向は観測結果と対応しており、波動シミュレーションによる解析結果は、これまでの考察の正当性を裏付けるものとなった。

7.おわりに

不整形地盤は成層地盤の場合と比較して、その震動は一般に複雑になる。耐震工学的に重要なことは、このような場合新たにどのような周期の振動が励起され、さらにそれらがどれ程の振動強度になるかを知ることである。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、1.15secと0.7secの波が励起されることがわかった。特に、0.7sec付近の波は、基盤の傾斜面近傍から発生したレーリー波である可能性が高いという結論になった。この両周期の波の大きさは、図14に示した地表GS1の記録のパワースペクトルにみられるように、かなり強い勢力を有しており、工學上無視できないものになっている。このように、不整形地盤であることに対する十分な配慮が、各種土木構造物の耐震性を検討する場合には重要であると考えられる。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はじめ関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) M.D.Trifunace, 'Scattering of plane SH waves by a semi cylindrical canyon', Earthquake Eng. Struct. Dyn. vol 1 (1973)
- 2) D.M.Boor et al., 'Wave scattering from a step change in surface topography', B.S.S.A. vol 71 (1981)
- 3) W.D.Smith, 'The application of finite element analysis to body wave propagation problems', Geophys.J.R.Astro.Soc. vol 42 (1975)
- 4) A.Ohtsuki et al., 'Effect of topography and subsurface inhomogeneities on surface motion for SV waves', 6th Japan Earth.Eng.Sym. (1982)
- 5) A.Ohtsuki et al., 'Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SVwaves', Earth .Eng. Struct.Dyn.vol 11 (1983)
- 6) 大槻 明 他「レーリー波による不整形地盤の挙動」土木学会論文報告集 337号(掲載予定)(1983)
- 7) 西野康雄 他「軟弱地盤における杭基礎の設計」土木学会誌 9月号(1982)
- 8) 田蔵 隆 他「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(1983)