

強震記録を利用した地震波動の伝播特性に関する基礎的考察

京都大学 工学部 正員 後藤尚男
 京都大学 工学部 正員 ○家村浩和

1. まえがき

従来耐震工学の分野では、不規則な地動加速度を比較的単純な確率過程としてとらえる傾向にあった。しかし最近における強震記録の増大と解析手法の開発は、その強度特性のみならず周波数特性の非定常性をも指摘している。地震の発震機構や波動の伝播特性などとの関係において究明されることが必要である。本研究では、サンフェルナンド地震(1971.2)時に得られた異なる地実での同時強震記録の解析より、地震波動の水平方向の伝播特性についての考察を試みた。まず各地実における強震記録の周波数分析、上下・水平両成分の積の時間曲線、軌跡曲線などから波動の種類を推定し、しかる後2地実における記録の同時性を利用して相互相関々数あるいは応答包絡線より、振動数の異なる波動の伝播特性を検討した。

2. 同時強震記録

カリフォルニア工科大学では早くより異なる地実における同時記録の重要性を認識し、電話線ケーブルを利用して同大学構内のミリオン記念図書館(Fig.1 Seismograph Location 以後ML地実)の屋上と地下、ジェットエンジン研究所(以後JPL地実)、地震研究所の地下の計4か所に設置された強震計を同時に始動させ、さらにそれらに共通の時刻信号を刻む観測システムをサンフェルナンド地震の前年に完成させた²⁾。このシステムは同地震中完全に作動し、貴重な同時強震記録をもたらした。Fig.1には強震計の設置位置と周辺の簡単な地盤条件を示した。震源はJPL地実の北東約50Km、地下約10Kmであり、震央・JPL地実・ML地実とはほぼ一直線上に位置している。Fig.2,3には2地実の上下(以後V)方向、震央より観測地実(以後R)方向およびR方向と直角(以後T)方向の3成分の加速度同時記録を示した。RおよびT成分は解析の便宜を考え両地実のNS, EW記録よりベクトル的に合成したが、これにより最大値は約20%の範囲で増減した。2地実のV成分を比較すると、JPL地実の記録は4~5秒付近に最大値126 galの鋭い強震部分を有しているのに、ML地実では7~8秒付近に移動し包絡線形状も若干ゆるやかとなって、最大値は91 galに減少している。RとT成分では最大加速度の減衰はほとんど見られないが、その生起時刻には約2~3秒の差が認められ、包絡線形状も幾分ゆるやかとなって来てさるに14秒以後にはそれより低周波数の波動が卓越して来ている。以上のような差は波動の種類とその伝播特性の差により、も

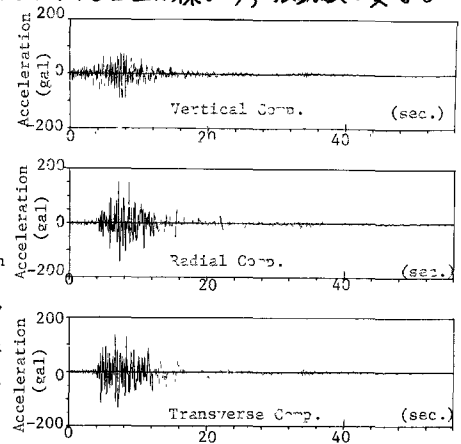
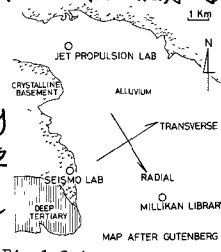


Fig.2 Acceleration Records at Millikan

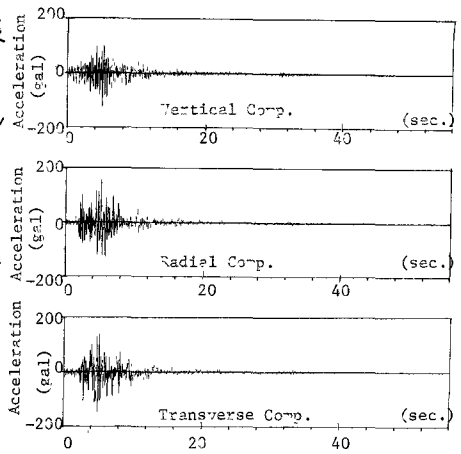


Fig.3 Acceleration Records at J.P.L.

たされたものと考えられる。

3. 波動の種類と推定

3-1 フーリエスペクトル

加速度記録の周波数特性を抽出するため、2地実におけるフーリエスペクトルをFig.4,5に示した。JPL地実のスペクトルは3成分とも2.8 cps付近に高いピークを有している。V成分はピークよりも高周波数領域でも比較的大きいスペクトルを示している反面、T成分はピークよりも低周波数領域でも比較

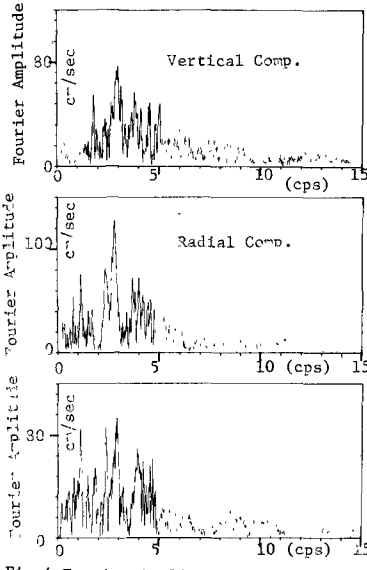


Fig.4 Fourier Amplitude Spectrum at JPL

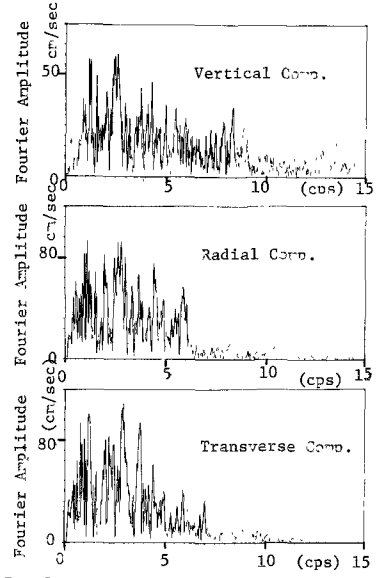


Fig.5 Fourier Amplitude Spectrum At Millikan

的が大きくなっている。またR成分は比較的狭帯域のスペクトル構造となっている。ML地実のスペクトルもまた3成分とも2.8 cps付近にピークを有しているが、全体の傾向はかなり異なっている。特に卓越振動数よりも低周波数領域でのスペクトルの増大が目立つ。両地実のスペクトルとも10 cps以上の高周波数成分はかなり小さくなっているが、これは強震計が建物の地下に設置されていたためのフィルター効果の結果であろうと考えられる。このように建造物の地下の振動を直ちに地盤のそれと見なすことには疑問もたれるが、Crouse博士は建造物の固有周期付近を除いた低周波数領域では、両者にさほどの差のないことを報告している。³⁾

3-2 R成分XT成分の時間曲線

加速度記録から地震波動の種類を抽出するため、嶋悦三教授らが提案したRとVの積曲線をFig.6,7に示す。地震波動が震源から、ある入射角で地表に到着しR方向に伝播するものとすれば、R×Vの符号はP波のときには正、SV波のときには負、Rayleigh波の時零線のまわりに振動する。SH波、Love波の時はT成分のみである。JPLでの積曲線から符号は2~4秒の間でほぼ正、その後5.5秒までは負の部分が多く、さらにその後は若干振動する傾向が見られる。ML地実のそれからは、符号が4秒前後に少し正、その後8秒まではほとんど負を取り、以後やや振動する傾向を読みとれる。これらの結果から、P波・SV波の存在をかなり明確に指摘できるが、Rayleigh波はさほど明瞭でない。なおSV波伝播時にFig.2,3のT成分が最大値を示していることは、SH波の存在を指摘している。またFig.6においては8秒以後、Fig.7においては12秒以後R×V値が非常に小さくなっているにもかかわらず、Fig.2,3のT成分が周期の長い比較的大きな振動を示している。これはLove波によるものではないかと考えられる。

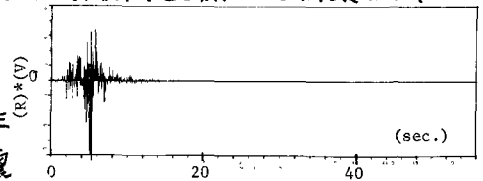


Fig.6 (vertical)*(Radial) Value at JPL

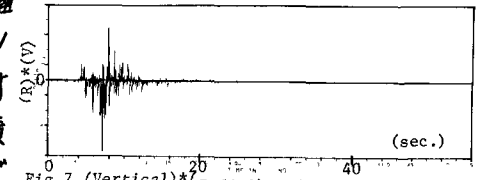


Fig.7 (Vertical)*(Radial) Value at Millikan

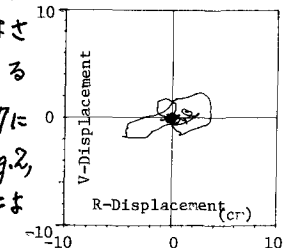


Fig.8 Ground Locus at JPL

3-3 観測点の軌跡曲線

地震波動による地盤の動きを変位でとらえるため、RとV方向で決定される平面内での観測点の軌跡曲線をFig. 8,9に示した。図示にあたっては適正な初期速度・初期変位のもとに加速度記録を積分して変位を算出した。また15秒以上の長周期成分は加速度記録自身の精度に疑問がもたれるので、フィルターを用いて除去した。両地実の軌跡曲線とも複雑な形状を示しており、これらの図から直ちに波動の種類を論ずることは困難である。しかしJPL地実における軌跡曲線の最大のループは波動の進行方向にやや上向いた大きな前後運動をしている。波動が震源からかなり大きな入射角で入射したものとすれば、P波の成分が大きく貢献しているものと考えられる。一方向成分とほぼ同程度のV成分を有したループも見られるが、SV波の存在を指摘している。Rayleigh 波的な反時計回りの軌跡ループはほとんど見当らない。ML地実の軌跡はさらに複雑な形状を示しているが、最大ループの傾きはほぼ水平に近くなって来ている。入射角がさらに大きくなった結果ではないかと考えられる。Rayleigh 波的な動きの軌跡も若干見い出せる。

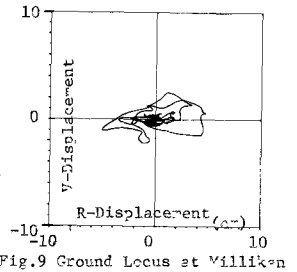


Fig.9 Ground Locus at Milliken

4. 波動の伝播速度の推定

4-1 相互相関関数

前述のようにFig. 2,3の加速度記録は共通の時刻信号を有した同時記録であり、2地実間の地震波動の伝播時間よりその速度を推定できる。しかし加速度波形はその変化が極めて不規則であるため、2地実における記録の対応するピークを見い出すことは困難で、位相速度・群速度を直接には測定できない。本項では両記録の相互相関関数を求めることにより、強震加速度群の走行時間の推定を試みる。Fig. 10,11および12にはV,RおよびT成分の各地実における標準偏差で無次元化した相互相関係数を示した。V方向の相関係数は遅延時間が約2秒付近で最大値を示している。これはFig. 2,3の加速度記録のV成分の最大値の生起時間差が約2秒程度であるのとよく対応している。しかし相関係数の値は0.2以下と小さく、遅延時間による変動もかなり激しい。RおよびT成分においても相関係数の値が小さく、地震波動群の走行時間を推定するのはかなり困難である。これは2地実における記録の周波数特性が相当異なっているための結果と考えられる。

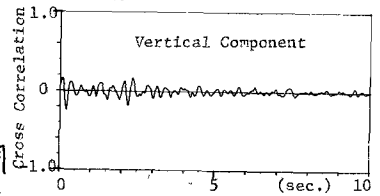


Fig.10 Cross Correlation of V-Comp.

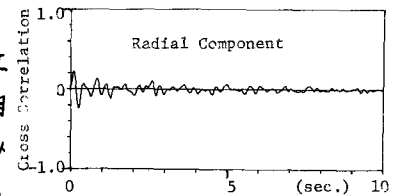


Fig.11 Cross Correlation of R-Comp.

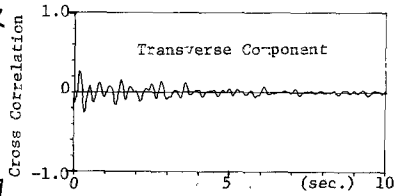


Fig.12 Cross Correlation of T-Comp.

4-2 応答包絡線による特定周波数成分の伝播速度

強震加速度記録は異なる周波数成分を有する数種類の波動の重なり合いと考えられ、それら波動群全体の伝播速度を測定することは、前項で示したようになりに困難である。個々の波動についてそれらの伝播特性を検討することが望ましい。本項ではTrifunac博士らにより提案され、亀田弘行博士らが検討を加えた応答包絡線E(t)を

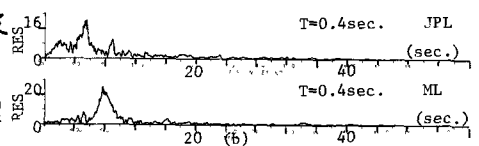
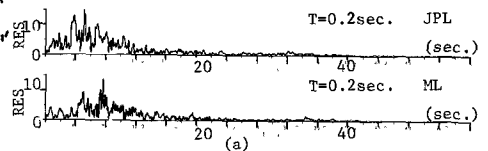


Fig.13 Response Envelope of Vertical Component

用いて、強震加速度中の特定振動数成分の時間的变化を検出、さらに2地実における比較より伝播特性を検討する。

$$E(t) = \sqrt{h_y \omega_y^3 / \pi} \cdot \sqrt{d^2(t) + v^2(t) / \omega_y^2}$$

ここに $h_y \omega_y^3$ は1自由度フィルタの減衰定数と固有円振動数、 $d(t)$ 、 $v(t)$ は変位、速度応答である。

Fig. 13 (a), (b)には2地実におけるV成分の比較を示した。同図(a)は周期0.2秒の波動の消長を表わしているが、時間的な変動が激しいため、2地実の対応するピークを読みとることはおぼつかしい。平均的な強度は減衰がみで、形状もかなり変化しており、短周期成分の局所的変動傾向を示している。同図(b)には卓越周期に近い0.4秒の場合の結果を示したが2地実における明瞭なピークより、時間差約2.4秒を読み取れる。2地実間の距離は約8Kmであるから、この波動の伝播速度は約3.3 Km/sec. である。この結果や前節のRとVの積曲線よりも、S波の成分が主であろうと考えられる。包絡線の形状にさほどの差はないが、最大値はかなり増幅されており、観測地の地盤の影響が出ているものと考えられる。Fig. 14 (a), (b)にはR成分の比較を示した。

同図(a)は周期0.4秒の結果で、ピークの時間差は前図(b)とほぼ同様であるが、ピーク値はやや減衰傾向である。同図(b)には周期1.4秒の結果を示したが、3個の主たるピークの伝播が明確に現われている。最初のピークは3Km/sec. 程度であるが、後続のピークはそれより遅くなっている。Fig. 15 (a), (b), (c)にはT成分の結果を示したが、各ピークの伝播特性は前図(b)とほぼ同様である。基盤層のS波速度が約3Km/sec. と報告されているので、各成分の最初のピークは基盤を伝播したSV、SH波によるものであろう。伝播速度の違いは後続のピークは表面波が生じたことを推定させるが、地盤条件などの詳細な検討により最終判断すべきであろう。長周期成分がML地実でかなり増大しているのは、表層による増幅作用の結果であろうと考えられる。

おわりに 本研究は同時強震記録の分析より、地震波動の種類とその伝播特性の推定を実施したものである。加速度記録は耐震設計などの最も基礎的な資料であるから、工学の分野においても発震機構あるいは波動伝播の立場から検討されるべきであろう。なお同時観測記録は波動の伝播特性を論ずる上で不可欠なものと考えられ、最近注目されている地震予知システムとも関連し、強震計の連動システムを開発すべきであろう。最後に修正加速度記録を提供頂いたカリフォルニア工科大学教授D. E. Hudson博士、有益な御助言・討議を頂いた京都大学防災研究所 土岐憲三助教授、同大学工学部 亀田弘行助教授、計算プログラムを参照させて頂いた国鉄 山田裕一氏に深謝する次第である。

- 参考文献 1) D. E. Hudson他, EERL Report 73-52, Nov. 1973. 2) W. O. Keightly, EERL Report 70-05, Sept. 1970. 3) C. B. Crouse, EERL Report 73-04, March 1973. 4) 山島悦三, 第3回地震工学シンポジウム(1970)講演集 pp. 277~284. 5) 亀田弘行・山田裕一, 第13回地震工学研究発表会講演概要(投稿中)

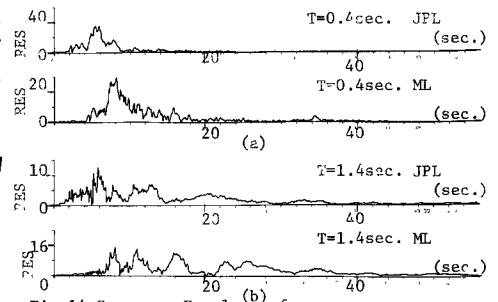


Fig. 14 Response Envelope of Radial Component

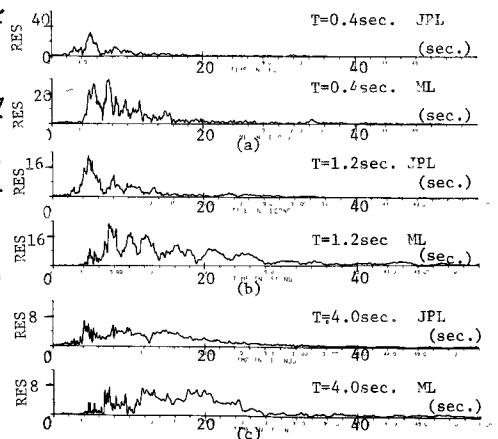


Fig. 15 Response Envelope of Transverse Component