兵庫県南部地震での地震波入射エネルギーの算出と距離減衰

中央大学3	理工学部者	邻市環境	竟学科	正会員	國生	剛治
	非会員	鈴木	拓	学生会員	○堀江	智子

1. はじめに

地震に対する構造物設計は、従来から慣性力に直結した静的震度や加速 度を用いる力の釣り合いによる設計法が使われてきた.しかし,地震によ る構造物の被害が必ずしも加速度で決まらず,速度のようにエネルギーに 関連した指標のほうが被害に密接に結びついているとの認識がある.著者 らは,主要動の SH 波を対象として,表層地盤での地震波動エネルギーの 流れを分析し,構造物や斜面の設計に反映させることを目指した研究を行 っている¹⁾.今回は,1995年に発生した兵庫県南部地震の4つの鉛直アレ ー観測点を対象とし,その地震記録から SH 波の1次元重複反射理論に基 づき地震波動エネルギーを計算し,地盤中のエネルギーの流れと入射エネ ルギーの距離減衰について調べた.

2. 波動エネルギーの算定法

微小時間 Δt 内にある深度を通過する波動エネルギーの増分 ΔE と時間 $t = t_1 \sim t_2$ でのエネルギー累積値 Eは、運動エネルギーとひずみエネルギー により 50% ずつ受け持たれ、その合計は粒子速度 i とインピーダンス ρV_s に よりそれぞれ次式のように表される.

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_e = \rho V_s \dot{u}^2 \Delta t (1) \qquad E = E_k + E_e = \rho V_s \int_{t_1}^{t_2} \dot{u}^2 dt \quad (2)$$

ここで注意すべきは、*i*はあくまで進行波の速度波形であり、観測波から 計算するためには、まず上昇波と下降波の成分に分解する必要がある.地 盤モデルが既知で地盤物性が線形と仮定できる場合には、地表記録を用い て重複反射理論により任意の深度での上昇波・下降波が計算できる.しか し、軟質な地盤が強い地震動を受けると、地盤物性の非線形性によって波 形が変化するため、地表記録から深部地盤でのエネルギーの流れを計算す ると誤差が大きくなる.その場合、鉛直アレー記録があれば深部の地震波 の情報を使用できるためエネルギーの信頼度が高められる¹⁾.鉛直アレー の2深度の観測波を、重複反射理論に基づいてその観測深度における上昇 波と下降波に分解する方法については文献1)に述べられている.

3. 波動エネルギーの算定

図-1 は今回解析対象とした兵庫県南部地震の4つの観測点の位置を示したものである.4 つの観測点は震源断層から近い順に,神戸のポートアイランド(PI),尼崎市の関西電力総合技術研究所(SGK),高砂市の関西電力高



図-1 兵庫県南部地震における4地

点の鉛直アレーの位置





砂火力発電所(TKS),和歌山市の関西電力海南港変電所(KNK)であり,以下ではカッコ内の略称により表記する. ここでは波動エネルギー算定の一例として PI の主軸方向(NS から反時計回りに 46 度)・主軸直角方向の解析結果 を示す. 表-1 は鉛直アレー設置地盤概要で,地震計は地表付近を含めた 4 深度に設置されている.

key word: 鉛直アレー 波動エネルギー 重複反射理論 兵庫県南部地震 連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-271-13-27 中央大学理工学部都市環境学科 TEL03-3817-1799 FAX 03-3817-1803 図-2 には、最深部の地震計が設置してある GL-83.4mと地表での上 昇・下降速度波形と、それらから計算された上昇・下降エネルギーEu, Edと損失エネルギーEu-Ed が示されている.エネルギーを計算するに 当たり式(2)で用いるインピーダンスは表-1 に示す値を用いた.また、 ここでの Vs は逆解析で同定した値²⁾³⁾である.図-3 は、地盤層境界の 上端・下端について図-2 と同様に波動エネルギーを算出し、深度に対 してプロットしたものである.ここで地表エネルギーには地表記録、1 層目下端から 5 層目上端までのエネルギーには GL-32.4mでの観測記 録を使用し、その以深では GL-34.2mと GL-83.4m の記録より算出した ものであり、各計算区間の境界付近では多少の計算誤差が表れている.



図-2, **図-3**より, GL-83.4mでの面積1 m³当たりの上昇エネルギーは主軸・主軸直角方向合わせて 308kJ/m², 地表の上昇エネルギーは 50kJ/m²と算定され,地表に近づくほど減少する傾向にある.また,GL-83.4m での下降 エネルギーは 110kJ/m²と算定されるため,この深度より上の地盤で 198kJ/m²のエネルギーが内部減衰などにより 失われたことになる.さらに,GL-83.4m に入射したエネルギーのうち 16%しか地表に到達していないことも分

かる.また,図-3を見ると深度が浅くなるに従い,一度減少したエネルギーが再び増加する場所があるが実際に は層に捉えられた地震波が境界面で重複反射を繰り返すため、見かけ上このような結果になったと考えられる.

4. 入射エネルギーと震源距離

上記のような方法で今回解析対象とした兵庫県南部地震の4つの観測点について算定した入射エネルギーを両 対数上で震源距離 R と対比したのが図-4 である.基盤(深度 83.4m~100m)と地表への単位面積当たりの入射 エネルギーEu/A と Es/A を比べるといずれも地表より基盤の方が大きな値を示しており、また、両者共に震源か ら遠ざかるほど急速に減少する傾向がある.そして、図中に直線で示す実体波の球面波エネルギー拡散理論によ る式(3)が基盤での上昇エネルギーの上限を与えることも分かる⁴⁾.こ

こに, E_0 は Gutenberg⁵⁾の式(4)によるマグニチュード M の地震の震源から放出される波動エネルギーである.

 $E_u / A = E_0 / (4\pi R^2)$ (3) $\log E_0 = 1.5M + 11.8$ (4)

TKS, KNK の 2 地点では特に理論線より小さい値となっているが,式
 (3),(4)では考慮されていない断層面の広がりや Directivity など震源メカニズムの影響によるものと考えられる.



5. まとめ

- SH 波の重複反射理論に基づいて鉛直アレー記録から基盤と地表での波動エネルギーを計算したところ、基盤に比べて、地表まで上昇するエネルギーは多くの地点で大幅に減少することが分った。
- 2) GL-83.4m~-100m での入射エネルギーは,震源距離 R と共に減少する傾向がある.また, R とマグニチュードを用いた簡易評価式は各地点での計算値のほぼ上限となっており,それを大幅に下まわる地点は Directivity などの影響を受けていると思われる.

<謝辞>本研究に当たり,貴重な地震記録を提供してくださった関西電力(株)土木建築室,(株)ニュージック,関西地震観 測研究協議会の関係各位に深謝の意を表します.

《参考文献》 1) 國生剛治,本山隆一,万谷昌吾,本山 寛:表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計,日本地震工学会論文集,第4巻,第4号,2004.9.
 2) Kokusho, T., Matsumoto, M. and Sato, K.: Nonlinear seismic properties back-calculated from strong motions during Hyogoken-Nanbu EQ, Proc. World Conference on earthquake
 Engineering(Acapulco), 1996, CD-publication.3) Sato, K, Kokusho, T., Matsumoto, M. and Yamada, E.: Nonlinear seismic response and soil property during strong motion,
 Soils and Foundations Special Issue for the 1995 Hyogoken Nambu earthquake, 1996, pp.41-52. 4) 石澤友浩, 國生剛治:エネルギー法こよる地震時斜面変形量評価法の開発,
 土木学会論文集C Vol.62No.4, 2006. 5) Gutenberg, B. The energy of earthquakes, Quarterly Journal of the Geological Society of London, Vol.CXII, No.455, 1-14, 1955