

電力中央研究所 正会員 ○ 佐藤 清 隆
 同 上 正会員 澤田 義 博
 同 上 矢 島 浩

1. 目 的

原子炉建屋基礎程度の平面的広がりにおいては、地震波の入力特性や地層の微細構造により、地震波の特に高周波成分に振幅のバラツキや位相特性が現れ、剛かつ均一な基礎がこれらの不均一な動きを規制するため、基礎への実質の入力はこうした高周波成分でかなり低下することが期待される。そこで本研究は、基礎岩盤の試掘横坑内で高密度平面アレイの地震観測を実施し、地震波の伝播特性、振幅・位相の不均一性を明らかにして、「実効入力」に関する基礎資料を得ること、および斜め入射の応答解析による基礎の制震効果の検討を行うことを目的とする。

2. 方 法

基礎岩盤の試掘横坑内にて高密度地震観測を実施した。当該地点の岩盤の V_p は5 km/sec程度、観測点は坑敷レベルにおいて十字形に合計9点（観測間隔は20~30m、測線長80m角程度）を展開した（図1参照）。また、半無限地盤上に巾80mのブロック基礎を設置した場合の斜め入射応答解析を有限要素法により行った。解析ケースおよび地盤の物性を図4に示す。

3. 結 果

(i) 観測データと各観測点間のコヒーレンス

観測期間中（1985.8~11）に9個の地震の記録が得られた。観測地震の多くは震源距離50~180kmのM3~4クラスの小地震であり、気象庁による標準走時を用いた場合の当該地点におけるP波のみかけの入射角は震源と観測点の相対位置により異なるが、概ね $12^\circ \sim 42^\circ$ の間に分布する。

各測点で得られた波形間の統計的性質を調べるため、測点（ P_5 ）と他の測点の間のコヒーレンシ（ Coh ）を求めた。図2より、5 Hz以下の振動数域では、コヒーレンシはほぼ1に近いが、高振動数域になるに従い値が低下する傾向が認められる。また、測点間の距離とコヒーレンシとの関係は今回の観測点間の距離の範囲ではあまり差がないということ、また、地震による顕著な差はない等が指摘ができる。

(ii) 観測波の振幅のバラツキと位相差の特性

振幅のバラツキと振動数の関係を求めるため、観測波を中心周波数1, 3, 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20 Hzのバンドパスフィルター

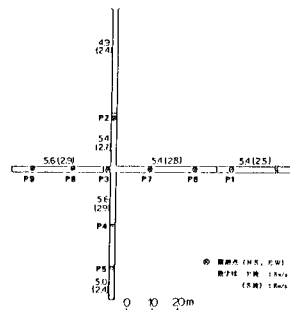


図1 観測点位置図

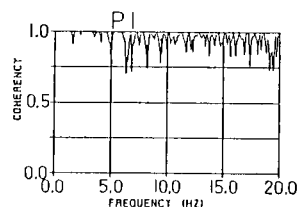


図2 測点P5, P1間のコヒーレンシ

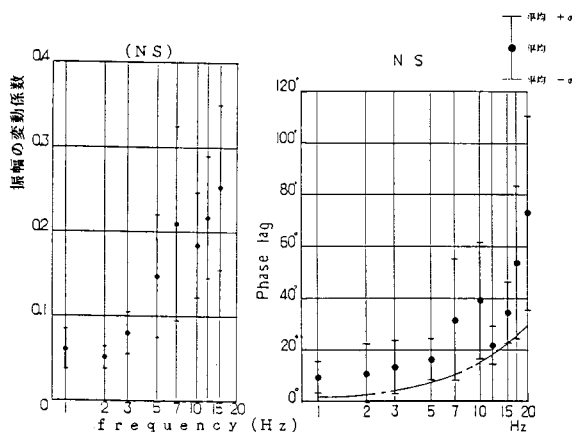


図3 振幅のバラツキと位相差の振動数特性

（チェビシェフ型）に通し、各振動数毎に最大振幅を求めた。また、位相差と振動数の関係は、測点（ P_s ）と他の測点間とのフーリエ・スペクトル比より前述の各振動数に対する位相差を求めた。これらから、すべての観測波について、振幅の変動係数と位相差の平均および標準偏差を求め、これらと振動数との関係を示した（図3）。図より3 Hz以下では振幅の変動係数の平均が0.1以下を示し、5 Hzで0.15、10 Hzで0.2と増加しており5 Hz以上では標準偏差が0.5以上を示しバラツキも大きくなる。位相差の平均も5 Hz以下では 20° 以下の値を示し、10 Hzで 40° に増加しており、さらに標準偏差も 10° 以上の大きな値を示す。したがって、観測値点の地盤振動は高振動数域程、振幅のバラツキおよび位相差が大きくなり、その変動の中も増加する。このことから本観測点程度の平面内においても、高振動数域での波の反射・屈折に伴う複雑な波動現象により、振幅のバラツキや位相差が大きくなることがわかる。また、このような位相特性は、気象庁の標準走時から求められる入射角により正弦波が斜めに入射するとした時の位相差特性で概略を推定できることがわかった。

（iii）斜め入射による基礎—地盤系の応答解析

各地盤モデルにおける基礎の応答スペクトルを入射角 15° 、 30° 、 60° について求め、入力地震動の応答スペクトルと比較した（図5）。図より入力地震波に対する基礎の応答は高振動数域低下し、その低下率は入射角が大きいほど増大する。また、地盤と基礎のインピーダンス比が大きくなる程低下率が大きくなる。但し、この時の地表面における波動は斜め入射による表面での反射、屈折のため解放基礎での波より振幅が低下する。したがって、実際の基礎の制震効果を明らかにするため、自由地盤表面に対する基礎の伝播関数を求めたところ、無次元振動数 γ （ $=L \cdot \omega / V$ 、 L ：基礎の幅80m、 ω ：円振動数、 V ：見かけ伝播速度）に強く依存することがわかった

（図6）。図より、鉛直動の影響により少し差はあるが、どの入射角においても伝達関数はほぼ同様な特性を示している。これは、地盤震動に対する基礎の拘束効果は、波の入射角と地盤のS波速度により生じる見かけの伝播波長と基礎幅の寸法との比という幾何学的な関係から生じるためと考えられる。入射角 $15^\circ \sim 60^\circ$ では、無次元振動数が $2\pi/5 \sim \pi/2$ 以上で基礎の応答倍率が1.0以下になり、基礎の制震効果による入力損失を生じる。例えば、入射角 15° 、 $V_s=1000\text{m/s}$ では9.5 Hz以上、入射角 30° 、 $V_s=1000\text{m/s}$ では5 Hz以上において基礎の制震効果による入力損失を期待できる。ちなみに、（ii）の観測データによると平均の入射角は 21° 程度であるが、この場合、位相差のみが期待できる基礎の制震効果は V_s が 1000m/s では約9 Hz以上である。

基礎ブロック弾性定数

$$\begin{aligned} f &= 2.37 \text{ } \frac{\text{gcm}^3}{\text{cm}^3} \\ E &= 3.4 \times 10^5 \text{ } \frac{\text{kgcm}^2}{\text{cm}^2} \\ G &= 1.4 \times 10^5 \text{ } \frac{\text{kgcm}^2}{\text{cm}^2} \\ \nu &= 0.22 \\ V_s &= 2.4 \text{ } \frac{\text{m}}{\text{sec}} \\ V_p &= 4.0 \text{ } \frac{\text{m}}{\text{sec}} \\ \beta &= 5\% \end{aligned}$$

解析ケース

入射角、 15° 、 30° 、 60°
地盤のS波速度
500 m/s
1000 m/s
2000 m/s

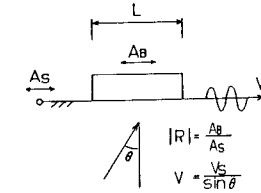


図4 解析モデル

EQNO. 2-340GAL 入力波
標準設計用地震波 $\theta = 15^\circ$
 $\theta = 30^\circ$
 $\theta = 60^\circ$

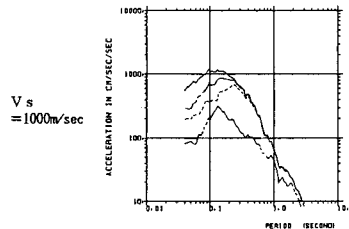


図5 基礎上の応答スペクトル

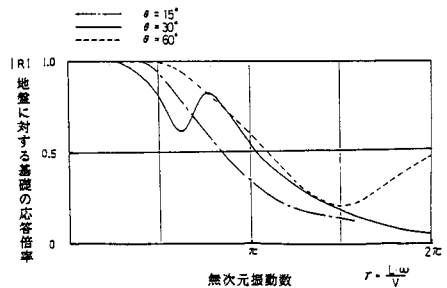


図6 地盤に対する基礎の伝達関数