

# 地震危険度解析グラフィックシステム<ERISA-G>の適用例

## Application of <ERISA-G>—Earthquake Risk Analysis Graphic System

戸松 征夫\*      齊藤 正忠\*\*  
Yukio Tomatsu      Masatada Saitō

### 要 約

本論文では、地震危険度解析グラフィックシステム<ERISA-G>の適用例—東北電力㈱ 能代火力発電所第一号機土木工事の共同研究—を紹介している。

適用対象は本館基礎の動的応答解析のための入力加速度を解析したものであり、能代港周辺の地震発生状況、基盤面における加速度期待値を解析し、設計最大加速度を決定している。

解析の結果、基盤面の設計加速度を、日本海中部地震の実測データも参考にして86galとした。また、解析条件を種々変化させ着目地点の地震危険度を比較検討した結果、<ERISA-G>システムの有用性を確認した。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. <ERISA-G>の概要
- §3. 解析条件 (入力条件)
- §4. 地震発生状況
- §5. 基盤面における期待値
- §6. 設計最大加速度
- §7. おわりに

### §1. はじめに

「着目地点に、どの程度の強さの地震動が、どれくらいの頻度で来襲するか」という地震危険度を解析するために、<ERISA-G>システム<sup>1)</sup>を使用した例を紹介する。<ERISA-G>とは着目地点周辺に発生した過去の地震データを統計分析し、地震危険度に関して必要な情報を対話型式で取り出し、結果をグラフに表示するプログラム・システムである。このシステムは筆者の一人(戸松)が東京大学生産技術研究所に受託研究員として滞在した間に、片山伸雄教授の発案と指導のもとで開発されたものであり、現在、公表されている地震危険度解析システムのうちで、最も機能の高いものの一つであろう<sup>2)</sup>。

これは過去の地震発生データをもとに日本国内の着目地点に関する地震危険度を詳しく解析するための道具であり、一定の処理ルーチンによって唯一の解を得るために作られたものではない。ここでは、本システムの内容については簡単な説明にとどめ、適用例を通して総合的な判断に至る経緯について詳細に述べる。

構造物の耐震設計の手法として、動的応答解析を行うには地盤をモデル化し、基盤層(N値50以上)<sup>14)</sup>とみなせる層の上面に適当地震動(加速度)を作用させるが、作用させるべき加速度の強さは設計基準や指針で明確には定められていない。そこで、<ERISA-G>を用いて入力加速度の条件を設定した例を示す。着目地点は秋田県能代港である。ここは1983年日本海中部地震のとき、津波や地盤の液状化により多大の被害を受けており、記憶に生々しい<sup>たとえは3),4)</sup>。解析の結果、基盤面の加速度が得られたが、この値は動的応答解析の入力データとなり、地盤の液状化や基礎の地震時安定性の検討の設計条件に用いられた(「石炭火力発電所本館建屋基礎の検討例(その1)」P.42参照)。

### §2. <ERISA-G>の概要

<ERISA-G>システムはソースプログラムとデータ

\* 土木設計部設計課副課長  
\*\* 土木設計部副部長

ファイルからできている。<ERISA-G>によって種々の解析を行うには、まず、①着目地点周辺に発生した地震をデータファイルとして内蔵されている地震カタログから選択し、これを地図上に表示する。次に、②対象となった地震の発生状況を分析する。つづいて、③着目地点における地震動強さ（加速度、速度、変位）を距離減衰式により計算してその頻度分布を求め、これにもとずいて④再現期間と期待値の関係や構造物の耐用期間内に予想される最大地震動強さなど設計にかかわる諸量を算出する。さらに、⑤対象地震による構造物の応答スペクトル曲線を計算することもできる。以下に、各項にかかわる<ERISA-G>の概要を適用例の検討順に従って説明する。

①地震カタログはいままで地震がいつ、どこに、どのくらいの規模で起こったかを一覧にしたものである。日本の地震カタログの代表的なものには宇佐美<sup>5)</sup>、宇津<sup>6)</sup>、気象庁<sup>7)</sup>によるものがある。宇佐美カタログは697年から今日までと年代範囲が広いが、欠落した地震も多く、その利用には注意を要する<sup>8)</sup>。気象庁カタログは地震数が多いが、年代範囲が1926年以降と狭いため、大きな地震をあまり数多く含んでいない。宇津カタログは両者の中間の性質を持ち、1885年から1980年の地震発生データが再調査されて質も向上している。そこで、宇津カタログを基本にして、宇佐美カタログから1884年以前の部分および気象庁カタログから1981年以降の部分をつなぎ合わせ、深発地震を除いたファイルを作っておくと、地震危険度解析の種々のケースに対応できて実用性が高いものとなる<sup>9)</sup>。

②対象地震群のマグニチュードや震央距離に関する分析を行い、分布図や回帰式図などをプロットする。これらの結果は、着目地点周辺で発生した最大の地震の特徴や地震の襲来回数など、地震発生状況を定量的に把握するのに使われる。

③「ある規模の地震が、着目地点からある距離のところに発生したときに、その着目地点にどんな地震動を生じさせるか」を計算するには距離減衰式を用いる。<ERISA-G>には、地震動の最大値（たとえば最大加速度）に関する各種の経験式のうち、一般に使用されるものを組み込んでいる。着目地点の地震動は、その地点の地盤条件により異なるので、経験式は地盤種別ごとに提案されている。しかしながら、局所的な地形や地下構造の不整形性については勘案されていない。なお、このうち岩盤を対象とした経験式を、沖積層や洪積層の着目地点に用いた場合、求められた加速度を地表面のものではなく、その地点の基盤面の加速度とする考え方が最近行われて

いる。

そこで、対象地震による地盤の加速度を計算し、頻度分布さらに累積頻度分布を求める。累積頻度分布を両対数グラフ上で直線回帰し、回帰係数を計算する。この結果は、加速度の頻度分布図や加速度別頻度の回帰式図などとしてプロットされ、②と同じようにして地震環境を定量的に把握するのに使われる。

④累積頻度分布より、加速度 $a$ 以上の地震動がある年代範囲 $B$ 年間に来襲する回数 $N_a$ を推定し、1年間に来襲する回数 $N_a/B$ および再現期間 $T_R = B/N_a$ を求める。このときの加速度 $a$ を $T_R$ 年期期待値という。 $T_R$ 年期期待値 $a$ より強い地震動が、構造物の耐用年数 $t$ 年間に来襲しない確率（非超過確率） $Q$ を、次の関係式により表し、 $t, a, Q$ の関係を求める。

$$Q = \exp(-t/T_R) \dots\dots\dots(1)$$

この関係は再現期間と加速度の期待値図や耐用年数と加速度の最大値図などとしてプロットされ、たとえば、設計用の地震動強さが、構造物の耐用年数に対して非超過確率がいくらに当たるかを知ることができる。

以上は地震動の最大振幅が加速度の場合の説明であるが、<ERISA-G>では同様に速度や変位の場合にも解析できる。また、これらの他に、⑤片山<sup>10)</sup>や大崎<sup>11)</sup>による応答スペクトルに関する解析もできる。その内容については文献(1)、(2)を参照していただきたい。

### § 3. 解析条件（入力条件）

着目地点の能代港は、北緯40.21度、東経140.0度にある。地震危険度解析で対象とする過去の地震（対象地震）データを次の条件により選らぶ。

①地震カタログは以下による

- a) 1884年以前は宇佐美カタログ<sup>5)</sup>
- b) 1885～1980年は宇津カタログ<sup>6)</sup>
- c) 1981年以降は気象庁カタログ<sup>7)</sup>

②年代範囲：西暦1600～1984年

③マグニチュード範囲：6.0以上

④震央距離範囲：150km以内

この他に距離減衰式を加速度算定のために用いるので、その選択条件について5-1に述べる。また、上の②～④の条件を変化させて、5-3に解析結果を比較する。

### § 4. 地震発生状況

#### 4-1 発生地震の地域別特徴

§3の条件により対象となった地震は33個あり、それらの震央分布をFig.1に示す。着目地点(×印)に影響の大きかった地震は、その発生地域から次の4つのグループに分けられる。

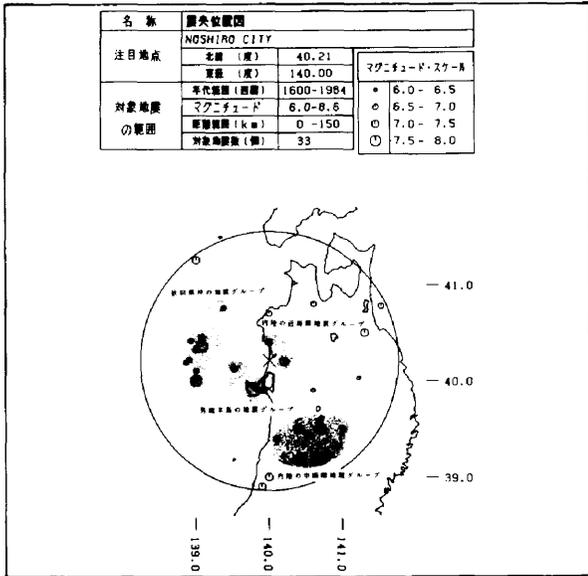


Fig.1 能代港周辺の歴史地震の震央位置

① 秋田県沖の地震グループ：このグループの地震の発生地域には、マグニチュード7前後の大きな地震が度々起こっており、その主なものに、1897年(M7.5)、1964年(M6.9)、1983年(M7.7, M7.1)の地震がある。これらは、震央距離が70~90kmと離れているため着目地点にさほど強い地震動(加速度)を発生させていない。しかし、マグニチュードが大きいので、1回の地震による地震動のくり返し回数が増える傾向にあり、液状化に対して注意すべき地震グループである。ただし、1897年の地震はマグニチュードが大きい割りに被害を生じておらず、その性質はよく分かっていない。

② 男鹿半島の地震グループ：このグループの地震は1939年に発生した男鹿地震(M6.8)とその余震などである。1810年にもM6.6の地震が起こっており、再発生のある地震発生地域と考えられている。震央距離が30~50kmと比較近いため、加速度が①のグループより大きくなる傾向にある。

③ 内陸の近距離地震グループ：このグループには震央距離が20km前後の近距離地震2つ(M7.0, 6.9)が含まれている。これらは、いわゆる直下型地震であり、一度発生すると被害が大きくなる。このグループに②のグループを含めた地震を北由利断層系のものとし、1000年オーダーの周期をもつ一連の活動をすると思える考えもある<sup>11)</sup>。その他にマグニチュード6.0以下の秋田県北部地震(1906年, M5.6)や二ツ井地震(1955年, M5.9)などがある。この2つの地震に対して、能代市は無被害であった<sup>5)</sup>。

④ 内陸の中距離地震グループ：陸羽地震(1896年, M7.1)や秋田県仙北地震(1914年, M7.2)を始めとする地震のグループである。M7クラスの地震を発生することがあるが、震央距離が90km以上あり、能代市への影響は①のグループより小さい。

したがって、能代市での地震動の強さは③, ②, ①, ④のグループの順になるが、液状化の危険性は①のグループによるものが大きいと思われる。ただし、上の説明のうち、地震動(加速度)に関しては、5-2で再度述べている。

4-2 マグニチュードの頻度分布

4-2 マグニチュードの頻度分布

Fig.2にマグニチュードの頻度分布を示す。M7.0以上の大地震は9個起こっているが、最大のマグニチュードは1983年日本海中部地震のM7.7である。日本海中部地震は過去の地震発生データからみて、この地域では経験したことのない最大級のものであった。統計解析によると、日本海中部地震クラス(M7.7)の地震は発生率が低く、今後、数百年において再発しないと考えるのが妥当であろう。しかし、M7.5クラスの地震に約200年に1回程度の平均発生率を考えてもよいだろう。もちろん、統計解析では過去にない大きな地震の発生を予測するには限界があるが、非超過確率を導入することで、ある程度対処することができる。

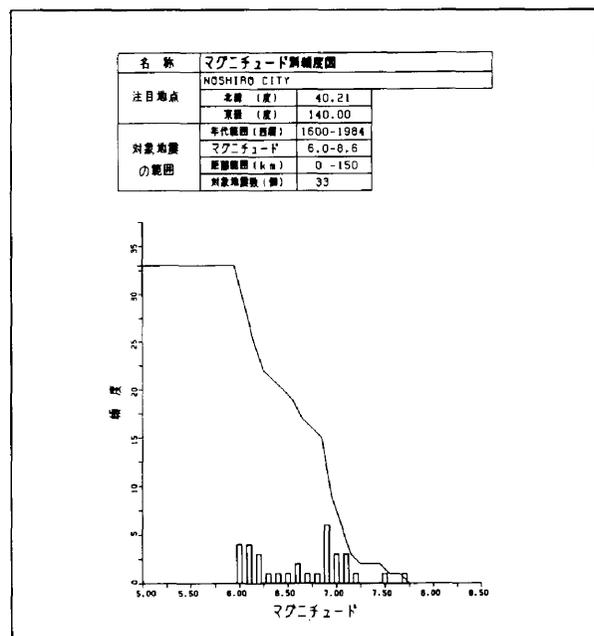


Fig.2 能代港周辺の地震マグニチュードの頻度分布

### § 5. 基盤における期待値

#### 5-1 距離減衰式の比較

地震動の距離減衰を示す経験式には種々のものがあり、いっばんに、どの式を使うのが妥当かを判断することは難しい。ここでは、経験式選択の判断に日本海中部地震のデータを参考にする。日本海中部地震のときに能代港では実測値が得られていないが、近い場所では秋田港で実測値が得られており、その地表面での加速度は南北方向が191gal (=cm/s<sup>2</sup>)、東西方向が205galであった<sup>12)</sup>。そこで、まず、秋田港の基盤面の加速度を、地盤条件が岩盤の経験式を用いて計算する。4種類の距離減衰式により、日本海中部地震の時に秋田港の基盤面において出たであろう加速度を計算してTable 1に示す。なお、Table 1には参考までに能代港の計算結果も示してある。

Table 1 日本海中部地震による  
基盤面の最大加速度の計算値

距離減衰式名	距離減衰式の型	秋田港 Δ=113.6	能代港 Δ=79.8
日本道路協会(1980)	$A=46.0 \times 10^{0.208M} \times (\Delta+10)^{-0.686}$	67.5gal	84.0gal
金井(1958), T=0.5sec	$\log A=0.61M-(1.66+3.60 \cdot X) \log X + (0.468-1.83 \cdot X)$	47.0	76.2
大崎・渡部(1982)	$\log A=0.472M-(1.97-1.8 \cdot X) \log X + (2.2-11.1 \cdot X)$	39.0	63.6
篠・片山(1982)	$A=6.85 \times 10^{0.178M} \times \Delta^{-0.666}$	83.2	113.0

ただし、A：加速度(gal)      Δ：震央距離(km)  
M：マグニチュード      X：震源距離(km)

次に、日本海中部地震の波形の最大値をTable 1の値になるように振幅補正し、これを秋田港の地盤モデルの基盤面に作用させ、プログラムSHAKE<sup>13)</sup>を用いて地表面の加速度を計算する。計算値の中から実測値に最も近いものを選び、その減衰式をこの地区で最も妥当な式とする。このような関係は秋田港についていえることであるが、マクロ的に能代港にも適用可能と判断する。計算の結果、道路協会<sup>14)</sup>の式による基盤面の値67.5galを用いると地表面で190galとなり、この計算値が実測値191~205galに近いことがわかる。

#### 5-2 基盤面における最大加速度の期待値

Fig.3は、道路協会の距離減衰式を使い、能代港の基盤面における加速度を震央距離に対してプロットしたものである。図から4-1に述べた4つのグループ分けが確認される。グループのうち、内陸の近距離地震2つが突出

して大きい。これ以外はすべて90gal以下である。

Fig.4に加速度発生頻度とその回帰線を示している。この図は、加速度の50年期待値(発生頻度0.02回/年)が65gal、100年期待値(発生頻度0.01回/年)が86galであることを示している。

#### 5-3 解析条件の違いによる期待値への影響

対象地震を選ぶ条件を変えれば、当然ながら加速度期待値は異なる。対象地震を選ぶ条件のうち、(1)年代範囲、(2)マグニチュード範囲、および(3)震央距離半径を変え、加速度期待値の変化傾向を調べる。

##### (1) 年代範囲

§3の条件の中で、年代範囲の始めを670年、1000年、

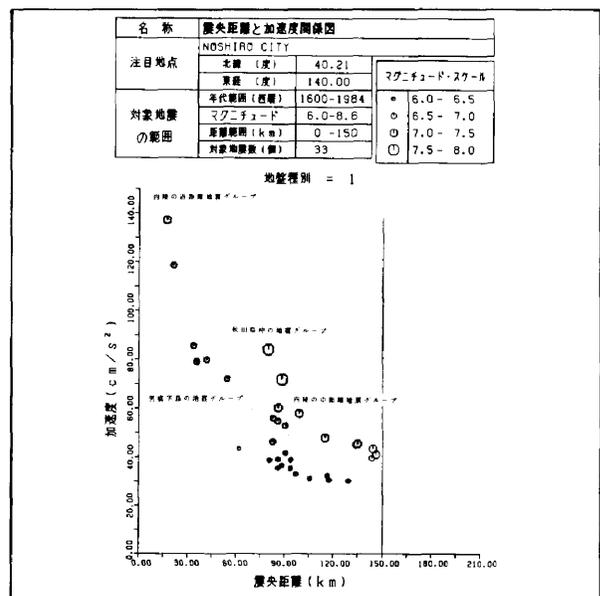


Fig.3 震央距離と加速度の関係

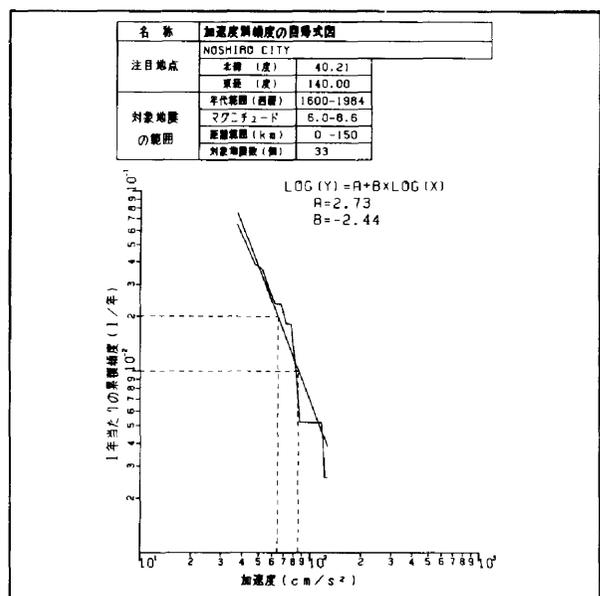


Fig.4 基盤における加速度とその年間発生率の関係

1600年、1885年、1926年の5種類に変え、他の条件は同じにして加速度期待値を比較する。計算の結果、年代範囲を短くする程、期待値が増加する傾向が顕著であり、その比率は約3倍およぶ。これは、周辺での発生地震の総数が少ないことと、最近100年間のデータに対しそれ以前のデータが少ないために生じる。年代範囲が短すぎたり長すぎたりするとデータの偏りが結果に反映するので、解析地点のデータの傾向をつかんだ上で、年代範囲を設定することが重要である。

(2) マグニチュード範囲

§3の条件の中で、マグニチュードの下限値を5.0、5.5、5.8、6.0、6.5の5種類に変えて加速度期待値を比較する。計算の結果、下限値を大きくすると加速度期待値が減少する傾向がみられ、逆に、小さくすると増大する傾向がみられる。下限値を小さくした場合には、回帰式を求めると加速度の小さい方にウェイトがかかり、回帰式の勾配が小さく求まるのが原因している。しかし、その違いはせいぜい数galである。

(3) 震央距離半径

震央距離半径を500、300、200、150、100kmの5種類に変え、他の条件は§3と同じにして加速度期待値を比較する。計算の結果、対象地震の震央距離半径を変化させても、加速度期待値はほとんど変わらない。その変化量は2gal以内であり、これには震央分布の地域的な特徴が反映している<sup>15)</sup>。

実際には、これらの変化傾向を考慮して、工学的な判断により§3の解析条件が定められている。

§6. 設計最大加速度

6-1 耐用年数と非超過確率

耐用年数の長い構造物は当然強い地震動に襲われる確率が高くなる。また、今後襲われる地震動は、過去のデータから求めた期待値を上回ることが予想される。例えば、過去の50年間に1回の割合で起こっている地震動強さを、将来の50年間にあてはめ、地震発生をポアソン過程と仮定すると、65%の確率で期待値を超える(超えない確率は35%)。したがって、構造物の耐用年数と超過確率(あるいは非超過確率)を設定すると、設計に必要な最大加速度が決められる。しかし、これらの値の求め方について、はっきり定まった方法はない。

当該地点の基盤面における最大加速度と耐用年数および非超過確率の関係を Fig.5 に示す。たとえば、耐用年数  $t = 50$  年、非超過確率  $Q = 0.6$  とすれば、(1)式により再現期間  $T_R = 100$  年となるが、このとき能代港の基盤面で

最大加速度は Fig.5 より 86 gal となる。この値は、日本海中部地震のときに基盤面で計算された地震動 84 gal (Table 1 の道路協会の式による値) とほぼ同じ強さに相当する。これらの点から総合的に判断し、基盤面での設計最大加速度を 86 gal とする。

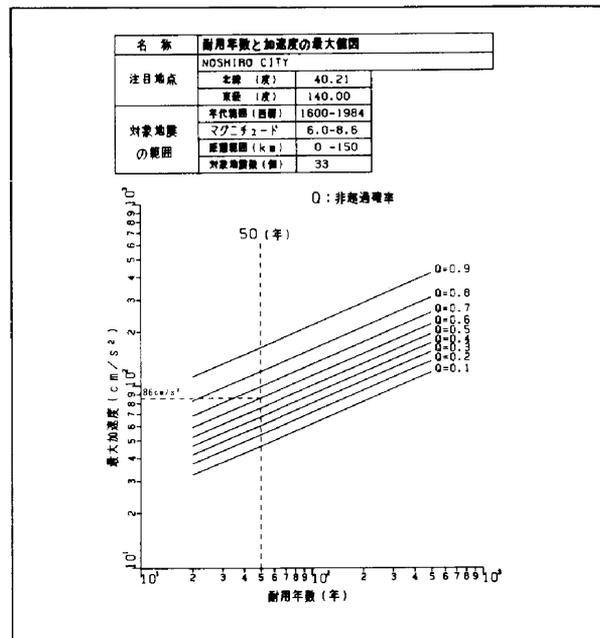


Fig.5 耐用年数と基盤での最大加速度との関係

6-2 動的応答解析による地表面の最大加速度

能代港の地盤を成層地盤にモデル化して動的応答解析を行う。地盤条件は深さ10mまでがN値10以下の軟弱な砂質地盤であり、深さ67mでN値50以上の基盤面に達する。基盤面に5種類の地震波形を入力するが、その振幅を前節で求めた86galとし、プログラムSHAKEにより地表面の応答加速度を計算する。設計にはこれらの地震波形による応答加速度のうち、最も大きな値を用いる方針とする。

計算結果を Fig.6 に示す。地表面の応答倍率は、地震波形により大きく違い、入力値の2倍から3倍に達する。このうち、最も強い地震動は秋田502EW波により生じ、その最大加速度は256galである。秋田502EW波による応答倍率が他の地震波形に比べて大きいのは、地盤の固有振動数が0.76Hzと計算されるのに対し、波の卓越振動数が1.1Hzと比較的近いためとみられる。

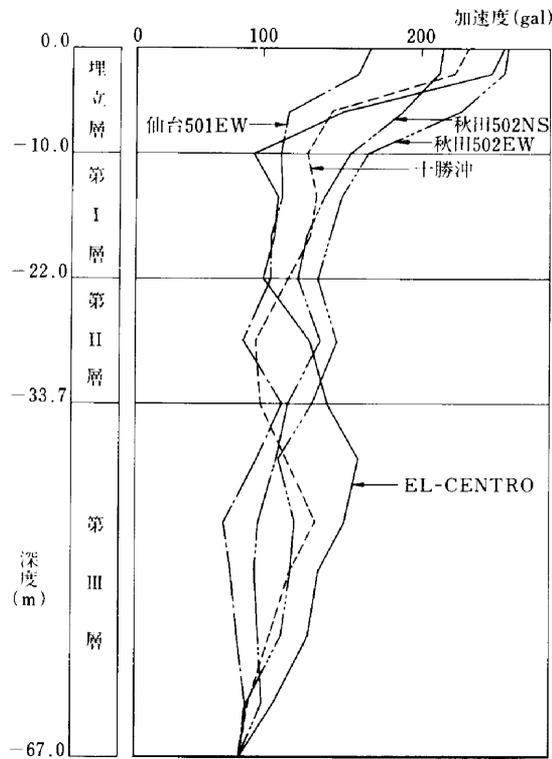


Fig.6 5種の地震波形による地表面の応答加速度

### 6-3 地表面の最大加速度の検討

前節までの解析で求めた最大加速度について、別に2つの方法により検討を加える。

1つは、日本海中部地震の被害や解析例と対比する方法である。能代市では、残念ながら日本海中部地震の観測記録がないが、文献(3)では能代市内の加速度分布を応答計算により求めており、加速度は各地点の地盤条件により違いはあるものの、200~250galと推定されている。また、堀田・後藤ら<sup>10)</sup>のアンケート調査により詳しい震度分布が求められている。これによると、能代市の地震動強さは気象庁震度で5.0から5.3と推定され、河角の式

$$A = 0.63 \times 10^{0.51(I)} \quad (I: \text{気象庁震度})$$

を用いて加速度に換算すると200~280galに相当する。なお、この式による計算値は秋田港と津軽大橋の実測値によく近似している。これらの点から、6-2で求めた地表面の最大加速度は日本海中部地震と比べ、同程度でかつ大きめの地震動を想定したものと結論される。

もう1つの検討法は、<ERISA-G>による解析であるが、前節までと違い、軟弱地盤の距離減衰式(道路協会<sup>14)</sup>の式による)を用い、地表面での加速度期待値を直接計算する方法である。解析結果として、地表面での加速度期待値をFig.7に示し、この図には5-2で計算した基盤面の加速度期待値も一点鎖線で示している。再現期

間100年のところを見ると、地表面の加速度は基盤面のほぼ2.0倍の強さに増幅されているが、この応答倍率は軟弱地盤における標準的な値に比べ、やや小さいと判断される。すなわち、地表面の加速度期待値を直接計算する方法は、地盤条件を大まかに分類して区別のみだからで、着目地点の地盤の特徴を十分考慮できない欠点がある。しかし、この方法によっても、それ程間違った結果を導くものではない。

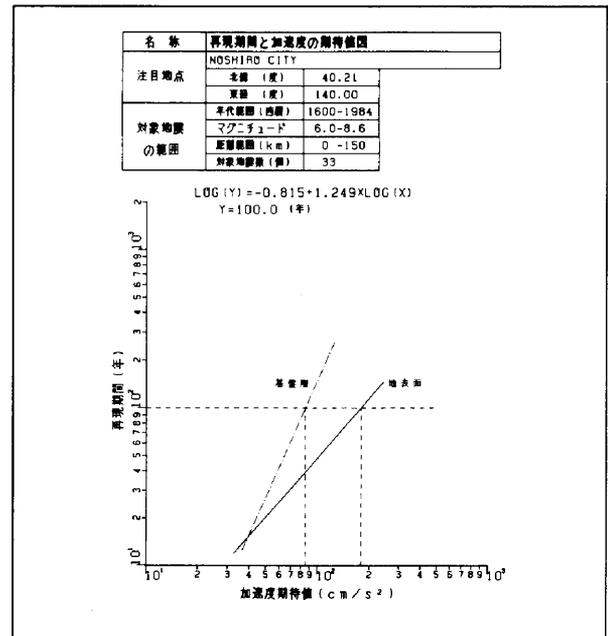


Fig.7 地表面と基盤面との加速度期待値の比較

## §7. おわりに

地震危険度解析グラフィックシステム<ERISA-G>の概要を説明し、その適用例を紹介した。適用例では能代港周辺の地震発生状況、基盤面における加速度期待値を解析した。日本海中部地震の実測データを判断材料にして検討した結果、基盤面での設計最大加速度を86galとした。また、適用例を通して、地震危険度解析に関する次の2点が明らかになった。

① <ERISA-G>は地震危険度の解析条件を種々に変えて比較検討することが容易にでき、その利用効果があった。

② 地震危険度を求める方法には、一旦基盤面で危険度を求めてから地盤の動的応答計算する方法と着目地点の地表面で直接求める方法がある。適用例で両者を比較した結果、前者の方法が着目地点の地盤条件を良く表現できる点で優れていることがわかった。しかし、後者の方法も地盤条件の区分を大まかにしている点を認識する