

(59) 不整形地盤における地震応答スペクトルの検討

建設省北陸地方建設局 常田賢一
 建設省道路局 田村敬一
 建設省土木研究所 金子正洋
 ○応用地質株式会社 山本明夫

1. はじめに 地震動の面的な評価のためには、軟弱地盤の層厚が変化するような不整形地盤における地震応答特性を検討しておくことが重要な課題である。ここでは、モデル的な地盤に対して二次元応答計算と一次元応答計算を行い、算出された加速度波形から地震応答スペクトルを求め、地盤の地震応答特性が不整形性によりどの程度変化するかを把握するための検討を行った。

2. 地盤モデルおよび入力地震動 二次元応答計算に用いた地盤モデルは、基本的には図-1に示す4パターンであり、傾斜部の長さ(L_s)および中央水平部の長さ(L_a)を変化させて、18種類の有限要素法による解析モデルを作成した。この地盤モデルは、東京下町低地の江戸川層を工学的地震基盤とする地質断面を想定しており、この江戸川層上で軟弱な沖積粘土層が硬質な洪積砂層上に分布するものとしている。またS波速度および密度などの地盤の物性値は、同地域の平均的な値¹⁾を用いている。二次元および一次元応答計算は等価線形法を用いており、その際使用した動的変形特性曲線は、岩崎ほか^{2), 3)}によるものを用いた。表-1に解析で用いた地盤の物性値を一覧表として示した。

今回の応答計算で使用したプログラムは、二次元では『FLUSH』、一次元では『SHAKE』である。二次元応答計算の境界条件は、解析モデル底面下方境界で粘性境界を用い、解析モデル側方境界は水平ローラーとした。また有限要素法による解析モデルのメッシュ分割は、物性値、周期特性を考慮して軟弱な沖積粘土層で深度方向5m、水平方向5mを最小とした。18種類の解析モデルの中で最大のものの節点数は1094、要素数は990である。一次元応答計算の解析モデルの層区分は、二次元応答計算の有限要素法による解析モデルの要素区分に一致するようにした。

入力地震動については、表-2に示す4種類のものを用いた。この表の中で土木研究所の記録は、洪積砂礫層中で観測された地中地震計の記録であり、他の3記録はすべて地表岩盤上で観測されたものである。この波形の最大加速度を100galに基準化して図-2に示した。これらの入力地震動は、0.2秒~1秒のやや広い卓越周期範囲を持つ強震記録である。また入力加速度については、二次元解析および一次元解析のモデル底面で、100galおよび150galの2種類とした。

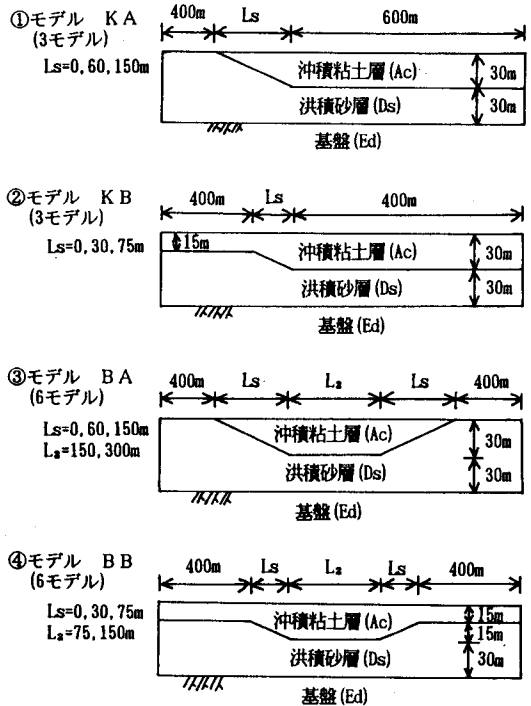


図-1 地盤モデル

表-1 地盤の物性値一覧表

土質名	定数	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/cm^3)	動的変形曲線
沖積粘土層 (Ac)		150	1.6	岩崎, 常田, 吉田 (1978)
洪積砂層 (Ds)		270	1.85	岩崎, 龍岡, 高木 (1977)
基盤 (Ed)		500	2.1	線形

3. 地震応答スペクトル比の算出 二次元応答計算より算出された地表の節点の加速度時刻歴波形から減衰定数 $h=5\%$ の地震応答スペクトル(S_a, S_v, S_d)を求めた。また一次元応答計算においても同じ様に地震応答スペクトルを求めた。基本的な地震応答特性を見るために、一次元応答計算結果から求めた加速度応答スペクトル($S_a, h=5\%$)を図-3に示した。図-4には、二次元応答計算と一次元応答計算解析モデルの対応を示した。二次元応答計算の解析モデルの傾斜部(Ls)の部分、図の棒線の様に7つの一次元解析モデルで対応させている。例えば図中のModel 2は、沖積粘土層(Ac)の厚さが5m、洪積砂層(Ds)の厚さが55mのモデルとなっている。図-3の計算の解析モデルは、図-4に示すModel 7の一次元モデルである。図-5に一次元応答計算による応答倍率(地表最大加速度/基盤最大加速度)と沖積粘土層(Ac)の厚さの関係を示した。沖積層厚の異なる7つの計算結果の解析モデルは、図-4のModel 1~Model 7に対応している。応答倍率が最も大きいのは、沖積層厚(d)が最も厚いModel 7ではなく、 $d=15m\sim 20m$ の解析モデルである。この傾向は、入力加速度150galのケースでも同様であるが、150galのケースでは、地盤の非線形性の影響から応答倍率が100gal入力時と比較して小さくなっている。

表-2 入力地震動一覧表

No.	波形名 (観測地点名)	地震名	マグニチュード (M)	入力 加速度
1	土木研究所	次城県南部(1983. 2.27)	6.0	100gal
2	開北橋	宮城県沖(1978. 6.12)	7.4	
3	観音崎	千葉県東方沖(1987.12.17)	6.7	および 150gal
4	リソカーン・ヒル	ロマ・ブリータ(1989.10.17)	7.1	

次に二次元応答計算と一次元応答計算の地震応答スペクトルの比を算出した。二次元応答計算による地表の節点の地震応答スペクトルを、4種類の波形および固有周期($T:0.1$ 秒~ 5.0 秒で106点)ごとに、対応する一次元応答計算による地震応答スペクトルで除して地震応答スペクトル比を算出した。二次元解析モデルが一次元解析モデルと対応しない節点については、一次元の地震応答スペクトルを補間して比を算出した。図-6に二次元と一次元の加速度応答スペクトル比の一例を示した。この図の計算結果は、図-1のモデルBA, $L_s=150m, L_2=300m$ のモデル(BA150300)で、左端からの位置 $X_0=500m$ (傾斜部)の節点のもので、加速度応答スペクトル倍率の形で比を求めている。

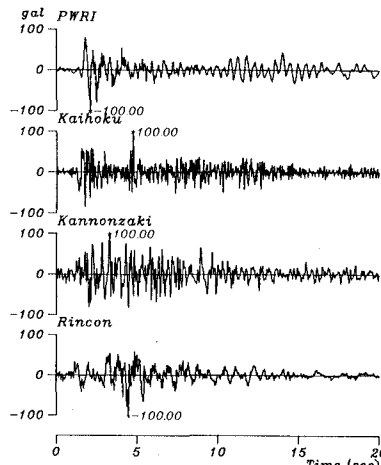


図-2 入力波形

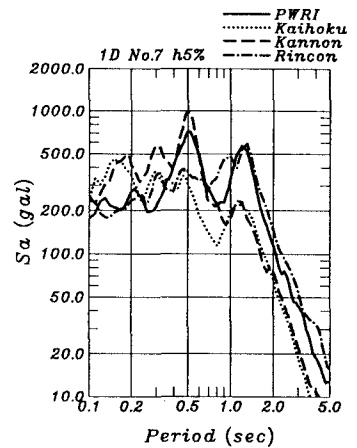


図-3 一次元応答計算による加速度応答スペクトル

4. 解析結果の考察 地震応答スペクトル比の4種類の波形の平均値を、固有周期(T)ごとに算出し、その平均地震応答スペクトル比の固有周期 $T=0.1$ 秒~ 5.0 秒の間での最大値($R_{max}, R_{vmax}, R_{dmax}$)および最大値に対応する固有周期($T_{max}, T_{vmax}, T_{dmax}$)を18種類の二次元解析モデルのすべての地表節点で算出した。図-7に、 R_{max} が1.0以上のものを二次元解析モデルの

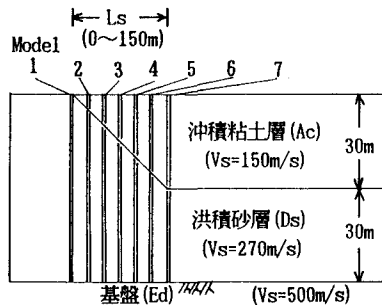


図-4 二次元応答計算と一次元応答計算解析モデルの対応

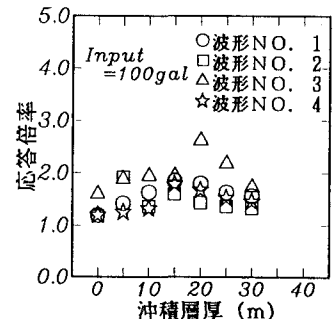


図-5 一次元応答計算による応答倍率

各節点の位置でプロットしたものを丸印で示した。この図の二次元解析モデルは、図-6と同じモデルBA150300であり、丸印の値を包絡するように破線を描いた。この破線は、加速度応答スペクトルの二次元解析と一次元解析の比を表しており、地盤の不整形性の影響程度を示すものと考えた。

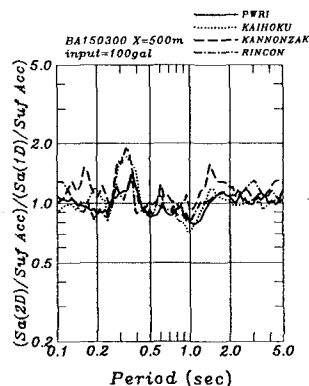


図-6 加速度応答スペクトル
二次元計算と一次元計算の比

図-8にTamaxと二次元解析モデル位置の関係を示した。この図ではTamaxと併せて、各節点の位置でRamaxが1.0以上の固有周期範囲を棒線で示し、地盤の特性値 ($T_c=4 \sum H_i / V_{s_i}$, H_i : 地層の厚さ, V_{s_i} : S波速度) を二次元解析モデル各位置で算出し、一点鎖線で示している。図-9にRamaxとTamaxの関係を示した。このRamaxとTamaxはそれぞれ図-7と図-8の縦軸の値であり、図-9にはRamaxが1.0以上の固有周期範囲も棒線で示している。図-9は、二次元解析モデルで不整形性の影響がどのような固有周期範囲で現れるかを示している。

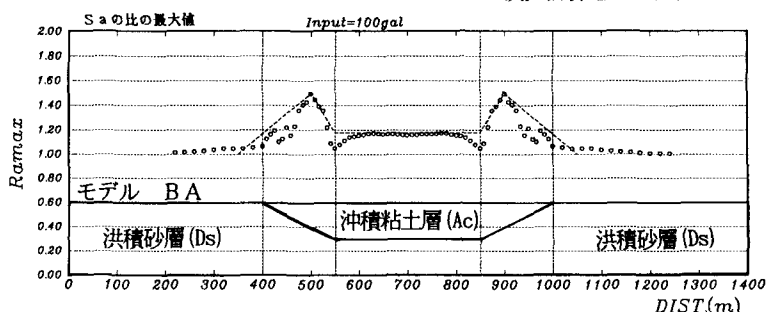


図-7 Ramaxと二次元解析モデル位置の関係

このような図面をすべての解析ケースで作成し、それらをまとめて結果を図-10、図-11に示した。図-10は、図-7のRamaxの値を包絡する破線を、二次元解析モデルKA, BA, KB, BBごとに全ケース集約したものである。また図-11は、図-9と同じようにRamaxが1.1以上の固有周期範囲を、二次元解析モデルKA, BA, KB, BBごとに集約したものである。これらから以下のようなことがわかる。

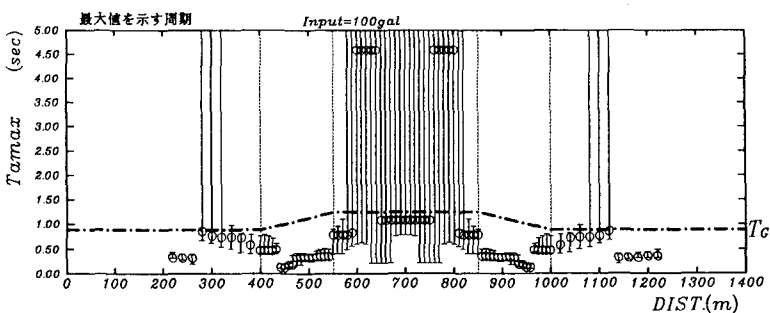


図-8 Tamaxと二次元解析モデル位置の関係

①図-10の破線の分布からすべての二次元解析モデルのRamaxの最大値は、1.5程度である。これは、4種類の入力地震動の平均値の議論であるが、一次元応答計算を基準とした二次元の地盤の不整形性の影響を表すと考えられる加速度応答スペクトルの比の最大値が、1.5倍程度であることを意味する。

②図-10から、各二次元解析モデルで、Ramaxの最大値の現れる一層地盤と二層地盤の境界(Dist=400m)からの位置は、そのモデルの傾斜部の長さ(Ls)よりも短くなっている。つまりRamaxの最大値は、解析モデルの傾斜部に現れることがわかる。

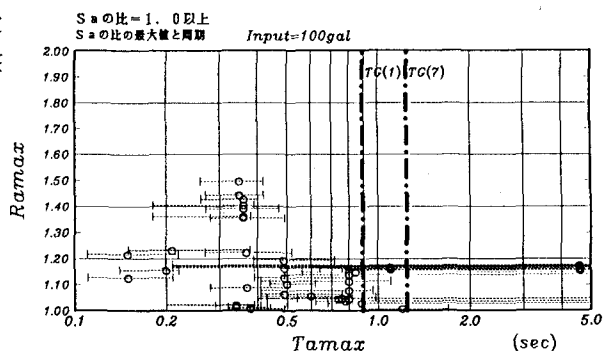


図-9 RamaxとTamaxの関係

③ 図-11から、Ramaxが1.1倍を越える固有周期の範囲は、0.2秒～2秒程度である。

①, ②の結果を一般化するために、指数包絡関数⁴⁾でRamaxを表現することを試みた。以下に解析モデルBAについて、図-12のように変数を取り、Ramaxと一層地盤と二層地盤の境界からの位置(X)の関係を示した。

④ $0 \leq X \leq 0.5Lw$
 $Ramax = K \cdot X/L \cdot \exp(1-X/L) + 1.0$

⑤ $0.5Lw < X \leq Lw$
 $Ramax = K \cdot (Lw - X)/L \cdot \exp(1-(Lw - X)/L) + 1.0$

K: 係数で各モデルでのRamaxの最大値-1.0
 X: 図-12参照
 L: Ramaxの最大値を示す距離 (モデルごとにLとLsとの関係を作り、LsからLを導出する)

図-13にモデルBAの包絡曲線を示した。位置(X)でのRamaxの値を、上記の式でL(つまりLs)、Lwを代入することによりほぼうまく表現できると考えられる。

5. まとめ ここでは一部の結果のみ示したが、他の地震応答スペクトル比(Rvmax, Rdmax)なども同様な傾向を示した。今後これらの結果をさらに一般化し検討したい。

【参考文献】

- 1) 東京都総務局：東京における地震被害の想定に関する調査研究報告書, 1988
- 2) 岩崎ほか：砂のせん断変形係数と減衰の歪依存性について, 1977, 第12回土質工学研究発表会, pp. 417-420
- 3) 岩崎ほか：共振法・振動三軸両試験による沖積粘性土の動的変形係数, 1978, 第13回土質工学研究発表会, pp. 569-572
- 4) 江尻ほか：設計震度スペクトルへの不整形性の導入に関する検討, 1992, 土木学会第47回年次学術講演会, pp. 820-821

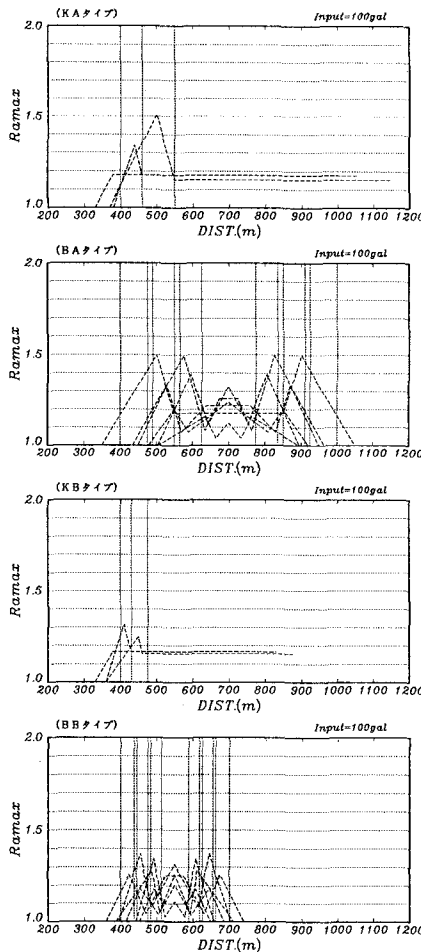


図-10 Ramaxの包絡線 (解析モデル位置との関係)

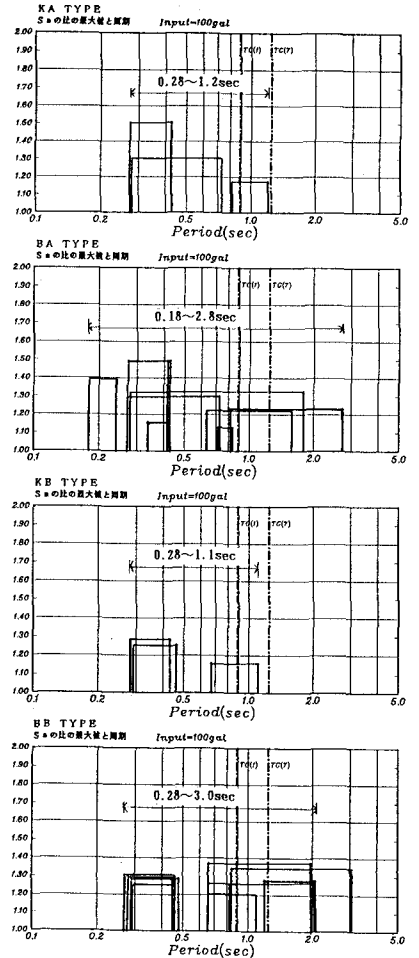


図-11 Tamaxの包絡線 (固有周期との関係)

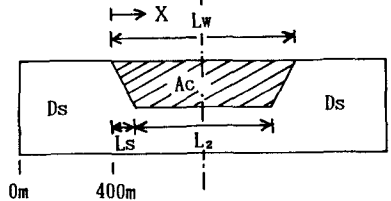


図-12 包絡関数各変数の説明図

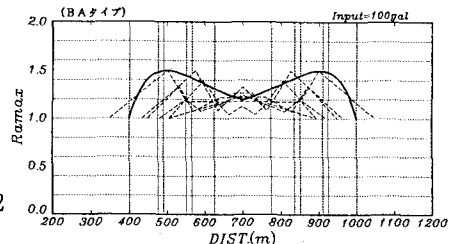


図-13 包絡関数の例示 (モデルBA)