

地中埋設ライフラインを検討するための 不整形な表層地盤の地震動特性の解析

1. 序論
2. 本研究の意義・目的
3. 方法および解析条件
4. 解析結果
5. むすび

国井 隆 弘*

要 約

台地をきざむ河川が形成する沖積低地を有する都市の地形を考えている。この複雑な地盤の中に浅く埋設されるガス、水道管等のライフラインの過去の地震被害は表層地盤の複雑性によると考えられている。本論文はこの事象を解明するための手法を提案して、都市の被害予測のために役立つようとするものである。手法はFEMプログラムFLUSHに基づくが、この方法を用いる論拠を明らかにし十分に有用性を持つ意義を説明する。次に解析結果の1例として、2種類の不整形な表層地盤モデルを取り上げ応答計算を加速度について行ない、表層地盤の複雑性にはかなり注目すべきことを立証している。

1. 序論

都市は特別な場合を除けば平低地あるいは山地周辺の低地に形成される。このような地形では、地表面下にもっとも軟かい地層が堆積し、深くなるにしたがって次第に硬くなるパターンが多い。地震波はその伝播特性から、この軟らかい表層地盤に強い地震動を発生させることがよく知られている。いわゆる表層地盤の増幅特性である。

強い地震動をもたらす1つの要因であるせん断波が鉛直下方から入力する場合を想定するときには、古くから平面波としての重複反射理論によって増幅特性が解析されてきている。この理論は1次元の波動理論であり、前述の深くなるに従って硬くなる形態が均一にかなり広い範囲に広がっている地域に有効とされる。しかながら都市の地盤

には、一般に主として河川によって形成される複雑な地層構成が存在する。平低地では基盤、中間地層の緩傾斜あるいは旧河道等である。台地あるいは盆地等では谷底低地、扇状地等である。このような地盤においては重複反射理論がそのまま簡単には適用できないと考えられている。

本研究はこの様な不整形な表層地盤を有する地域での表層地盤の増幅性を検討する。すなわち水平な地表面に対して平行でない基盤面および地層面を対象とする。解法は1980年頃から各専門分野で精力的に検討されてきている(国井, 1989)。たとえばAL法, FEM等である。本研究はこれに対してすでに開発され市販されている解析プログラムFLUSHを利用する。その利点は演算時間の短縮とこれに伴って可能となる非線形解析にある。

FLUSHはFEMに依存するがもともと地盤の

*東京都立大学都市研究センター・工学部

中に一部埋設した基礎構造物等の地盤を含めた地震応答解析用のプログラムである。複雑な地盤および構造物の耐震設計のため広範に用いられている。その特徴は有限の周波数領域でのフーリエ変換に基づくことにある。また解析は2次元であるが、3次元の挙動を近似的に配慮した疑似3次元解析にある。本研究は、一般に周辺地盤よりも剛性の大きい構造物を、逆に剛性の小さい表層地盤の置きかえる。さらに長方形のFEMメッシュの1つ1つの歪レベルに応じた剛性の低下および減衰能力の増加を配慮した等価線形解析を行なう。本来、地盤の非線形解析は地盤が示す非線形特性に従った剛性および減衰特性に基づいた微分方程式を解く必要がある。方程式を何らかの積分手法で時刻歴で解を求めるのが望ましい。しかしながら不整形な表層地盤の解析では、どの解法を用いても演算時間がかかり必要であり、望ましい解法を実行するのは困難である。特にマイクロゾーニングの目的で検討したい場合には、地域ごとの問題を検討する必要があるので多大の計算を要する上で実用的でない。本研究では等価線形解析における収斂演算により非線形を取り扱う。

2. 本研究の意義・目的

地震被害が地盤の悪い所に集中するとよく言われる。これは表層地盤の地震動の増幅性の特性から説明できる。一方で、平低地と山際とでは後者の方が被害が多いとの報告も多い。その理由についての議論は多岐にわたるが、筆者は2つ考えている。1つは異種地盤の境界によって発生する諸問題である。比較的長い構造物、たとえば学校建築、水道、ガス、電話線等である。異種地盤ではそれぞれの地盤の動きが異なるため、その境界に大きな変位の差が生じる。この差は強制的な力を引き起こし、通常地震応答解析では算定できないものとなる。

他の1つは、地面の揺れにある。被害をもたらす「揺れ」の定義はむずかしいが、前述の変位の差を除けば加速度および速度であろう。この両者がどの様に被害に結び付くかは今後の研究による

が、本研究では加速度に注目して問題の提起をしたい。

都市の代表としての東京都には多くの中小河川があり、これらが山の手台地を複雑にきざんでいる。この間に多くの揺れの違いが発生する。硬い地盤と軟らかい地盤との間に発生すると予想される大きな歪は当然ながら、同時に地震動にも周辺より大きいことが予想される。その理由はいくつか考えられるが、やはり両地盤の境界における振動数の変遷およびそれに伴う加速度の増加が1つの要因と思われる。この様なたかだか数百mの位置の違いにより、地震動に差異が生じることは地震時の被害を予測する時には問題がある。大地震のときの都市災害は、各種の問題が起こり得ると考えているが、少なくともどこにどんな被害が予想されるかは明かにしておきたい。そのための基礎的な資料として、地震動の大きさの地域的な差異は明確にするべきと考える。特にマイクロゾーニングを考慮する場合にはかなり重要であることを断言したい。

3. 方法および解析条件

前述した河川によってきざまれた平低地の代表の1つとして、幅300m程度の軟弱な表層地盤を有する地形を設定する。その下にはかなり硬い地盤が直接ある場合、およびやや硬い地盤が含まれる場合の両者を設定する。これらの層の境界は複雑であると予想されるが、ここではいくつかの層境界を想定し解析を行なった中での1つを取りまとめる。計算が早いとされるFLUSHでも、試行錯誤を繰り返すため、演算時間は膨大なものとなる。

FLUSHでは疑似3次元解析のため周知の如くフリーフィールドを設定する。Fig. 1はこの概念図を説明するものである。軟弱な部分である地盤Ⅰは、無限に拡がると設定した、地盤Ⅱによって囲まれている。とうぜんながら有限なモデルであるから、地盤Ⅱは両側側面に伝達境界を設けてある。同時にFLUSHの特徴であるもう一方の側面1-2にも境界の特性が配慮されている。また地

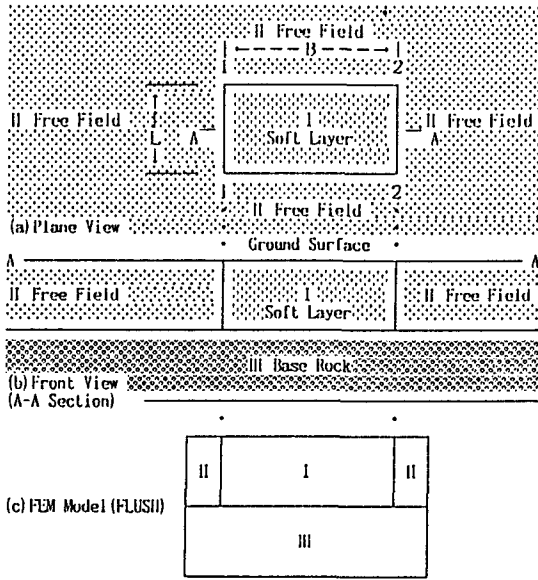


Fig. 1 Ground Image and Model

震波の伝播を十分に伝達するためのメッシュが用意されていることは言うまでもない。地盤Ⅲは基盤のつもりである。その厚さをどう決めるかはいろいろ問題があるが、試行錯誤の上で適当と思われる値を見出した。

今回の解析では、河川の造りだす細長い地形を考え側面1-2での拘束を解く。地盤Ⅰおよび地盤Ⅱの厚さを15mとし、地盤Ⅲもまた15mとする。各地盤の密度を東京での代表的な値に仮定した上で、地盤Ⅰをせん断波速度が150m/sの沖積地盤と仮定し、地盤Ⅱを300m/sの山の手台地、地盤Ⅲを1km/sの基盤とする。沖積表層地盤Ⅰの地表面での紙面に示した横幅は約300mとする。

Fig. 2には本解析で対象とする2種類のモデルを示した。Model-Aはかなり極端な例であるが、地形が急で不整形性の強い表層地盤の形態の代表例である。Model-Bは河川でよく見られる形態の1つである。この他にも各種のよく見られる形態について検討を進めたが、ここでは割愛する。

地盤は地震時に主としてせん断歪をうけると考えられているが、この歪があるレベルを上回るとせん断剛性が低下することが知られている。またこれに伴う減衰能力増加が考慮できる。すなわ

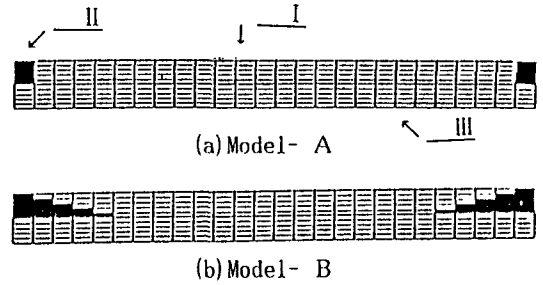


Fig. 2 Two Models for Analysis

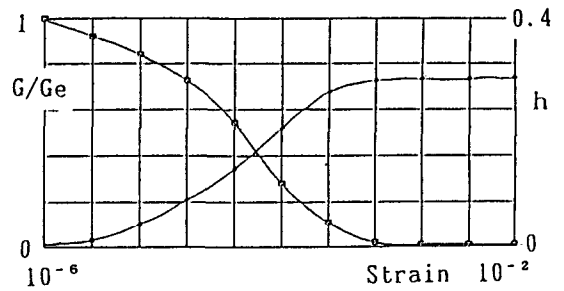


Fig. 3 Relation of Stiffness, Damping and Shear Strain
G: Plastic Stiffness on Shear
Ge: Plastic Stiffness on Shear
h: Damping ratio

ち歪レベルに応じた剛性の低下および減衰定数の増加を配慮した非線形振動解析が必要となる。そこで前述した等価線形解析を用いた非線形解析を行なう。非線形性は各要素に導入され、全ての要素において収斂の対象となる。したがって最大に至るまでの時刻歴の経過が振動応答におよぼす影響は明かでない。この欠点については今後検討したい。

Fig. 3に今回用いた剛性および減衰定数とせん断歪との関係の1例を示す。これは地盤Ⅰの場合であるが、地盤Ⅱでも考慮している。なお地盤Ⅲでは考慮しない。これらは東京での代表的な1例を採用したものである。

入力地震動は鉛直に下方から伝播するSH波である。Fig. 2の紙面左右方向に振幅を有する波である。今後は傾斜入力あるいは表面波を念頭においた側方からの入力も検討したい。入力地盤Ⅲの下面に作用させるが、その波形は地盤Ⅱ（前述

した山の手台地を想定)において100gal程度の最大加速度となる模擬地震動である。すなわち気象庁の震度階で震度Vの下側であろう。今回の解析によると、後述するが、この程度の地震動でも表層地盤にはかなりの大きな歪が生じる。波形は周波数範囲が約0.2~10Hzのピンクノイズと乱数からなり、これに包絡関数を適用したもので形成されている。

4. 解析結果

4.1 解析対象

解析は Fig. 2 のモデルで実施したが、モデルが示す応答はほぼ左右対称の結果を示したので、以後の解析結果の説明には左半分の結果を用いることとする。また結果は全て地表面のもので、それも最大加速度に限定する。さらに応答はFEM要素の各節点の値を求め、これを結んだ形で折れ線グラフで表示する。

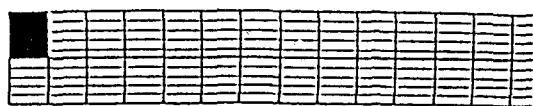
応答には、速度、変位のみならず歪があり、これらについても十分に検討すべきであるが、この検討は次回の報告に譲りたい。解析は、前述したFLUSHを用いるが、入力の一フーリエスペクトルを周波数応答関数に適用して応答の一フーリエスペクトルを求め、これを逆変換するルーチンで時刻歴波形を算定する形がとられる。この波形の中で最大加速度に注目する。したがって解析自体は線形解析であるが、前述の剛性および減衰定数を変化させながら収斂計算を行なうこととなる。

4.2 加速度の分布特性

Fig. 4 は線形および非線形解析の結果を示したものである。これらの結果から以下のことが言える。

(1) 表層地盤でも不整形の影響が少ないと考えられる中央部では、重複反射理論による算定結果とほぼ同様の値を示す。

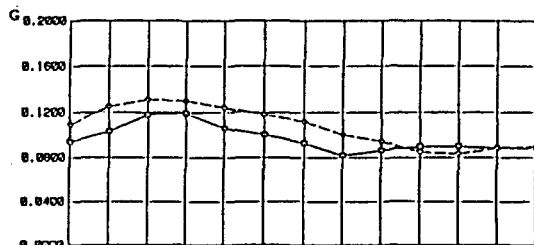
(2) しかしながら、より影響を強く受けると思われる境界部では、中央部よりも明かに大きな値を示し、この傾向は線形よりも非線形応答において顕著である。



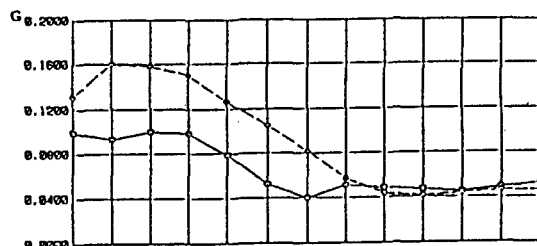
Model-A —○—



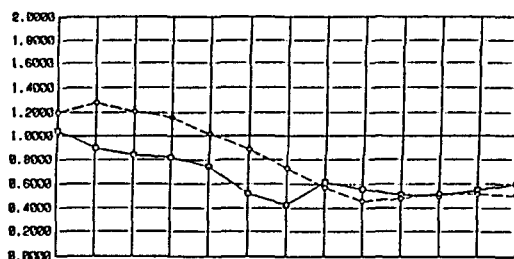
Model-B --○--



(a) Maximum Acceleration (Linear)



(b) Maximum Acceleration (Non-linear)



(c) Ratio of Non-linear to Linear

Fig. 4 Distribution of Maximum Acceleration

(3) Model-A よりは Model-B のほうが不整形の影響を強く受けている。これは前に述べた如く極端な地盤よりもよく見られる形のほうがそれだけ大きな揺れを受けることを示している。そしてこの傾向もまた線形よりも非線形のほうが顕著である。この理由は地盤内の歪の分布等を詳しく検討しなければ説明できないが、やや硬い地盤が表層地盤の低部に入り込んでいるためと思われる。このことはもし加速度の大きさにて被害の大小が議論される場合には、急傾斜面に接する沖積地盤よりは緩斜面に接する沖積地盤の方が問題となることを示している。

(4) 解析での入力地震動の大きさは、フリーフィールドの地表面での最大加速度がたかだか 100gal となるものである。したがって、この地盤では歪の大きさによる非線形性は生じていない。しかし不整形な表層地盤の影響のため、沖積地盤

I の 1 部には明かに非線形の影響が強く現われている。この点は解析モデルの形状および要素の形を含めて今後検討する必要がある。

5. むすび

本報告は目的と解法およびそれらの意義を中心に、1つの解析結果を述べた。今後に残された課題は多い。現在検討中である。

文 献 一 覧

国井隆弘

- 1989 「不整形な表層地盤が地震動に及ぼす影響に関するパラメータ解析」『「表層地質が地震動に及ぼす影響」シンポジウム（日本学術会議主催）論文集』。

Key Words (キー・ワード)

Life Line (ライフライン), Finite Element Method (有限要素法), Surface Layers Having Irregular Base Shape (不整形な表層地盤), Acceleration (加速度)

ANALYSIS ON CHARACTERISTICS OF SEISMIC WAVES HAVING IRREGULAR SHAPE SURFACE LAYERS FOR UNDERGROUND LIFE LINE

Takahiro Kunii*

*Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No.41, 1991, pp. 21-26

It is important to estimate the damage of underground Life Line to earthquakes. The method for estimation is discussed in this report. The surface layers having irregular shape are named the irregular surface layers. Seismic effects on waves in this region have been discussed recently in many works, and several methods for analysis have been proposed. The FEM computer program FLUSH is used in this paper.

This program is usually utilized to compute an approximate three dimensional soil-structure interaction. In this study, the structure is replaced into the surface soft layer consisting of an alluvial soil. The Free Field of this program is a moderate stiff soil. It is able to examine seismic waves in the next points.

- 1) The approximate three dimensional analysis is made.
- 2) The complex soil condition which is recognized as reduction of stiffness and increase of damping capacity derived from large strain level, is treated as a nonlinear response using equivalent linearization.

The ground image in program FLUSH is illustrated in Fig. 1. Two models for analysis are shown in Fig. 2. Model-A is treated as the most simple irregular ground. Model-B is one of standard examples in an urban average valley in the Tokyo region. Relations of shear strain to stiffness and damping of soft surface layer are considered in this paper, as shown in Fig. 3.

The result of an analysis is made concerning only the maximum values of distribution of accelerations on each mesh point. It is discussed in Fig. 4. An amplification in the boundary of surface layer is recognized. Discontinuity of the response characteristics is confirmed in this report.