

地盤構造にもとづくサイスミック・マイクロゾーニング について

—東京都大田区を例として—

松田 馨余* 望月 利男* 小泉 敏一**

要 約

この報告は、地盤、特に表層地盤構造の諸特性にもとづく地域の地震危険度を可能な限りミクロな観点から検討し、それを細区分しようとするものである。方法は、多数のボーリング資料の収集とその上に立つ地質学的検討とそれにもとづくマップ化、地盤の周波数応答計算結果を加味した地域地盤区分、それぞれの地盤型の応答特性の諸構造物の地震危険度におよぼす影響、砂質系地盤の液化危険度の種々の方法にもとづく検討並びにそれらのマップ化から成る。

1 マイクロゾーニング・マップの概念と作製手順

筆者のひとり松田は、かつて中野ら(1969)とともに地震地盤図という考え方を示した。当時、地震地盤図についての考え方は、十分には固まっていなかったが、地震時における地盤の動的性質の地域解析を行なって、災害対策や防災計画、あるいは、都市再開発に資するデータを地図のかたちで提示しようとした。具体的には、

①地震の規模、震源など、地震について仮定条件を設定し、期待される最高震度ないし最大加速度、卓越周期などの地震工学的物理量の分布図をつくり、これに基づいて地域区分を行なう、

②地震危険地域の表示は、構造物や施設の種別ごとに5～7段階ぐらいに分けて行なう、

③図のスケールは、2万5千分の1とし、対象別用途別に分けたものと、総合表示のものを考える。

④被害想定 の計量モデルを設定するためのベースになるものを考える、

⑤避難計画や救助計画などの応急計画はもとより、都市防災計画や都市再開発計画に対しても有用なものを見る、などの諸点を検討していた。また、実際の図化にあたっては、地震工学的特性が同質とみなし得る地盤単元を設定し、その地域的広がりを把握し、かつ、その上に分布する各種構造物との関係を検討しようとした。したがっ

て、従来行なわれてきた土質工学的な地盤調査から得られる地盤条件を、どのようにしたら地震工学的に評価できるのかが常に問題であった。

この当時、マイクロゾーニング・マップという術語は日本では使用されていなかったが、同様な考え方で研究を進めていたグループがあった。たとえば、北海道大学の研究者のグループは、北海道内の低地帯についての一連の調査を進めた(例えば酒井, 1969など)。その調査では、人工地震を利用したP波やS波の測定を含めて、基礎的な資料が作製され、地形や地質を利用した地域区分が進められた。また、嶋(1969)は、地震基盤という概念を提唱し、それより上部に分布する地盤の振動性状から、地震危険度の地域差を定量的に解析しようとしていた。

日本で、サイスミック・マイクロゾーネーション、もしくは、マイクロゾーニング・マップという術語が使用され始めたのは、1972年にアメリカで開かれた国際マイクロゾーネーション会議以降のことであろう。

この会議を主宰した Gaus, M. P. と Sherif, M. A. (1972) は、地震による影響についてのゾーニングが世界各地で認容されてきているが、ゾーニングを行なう縮尺については、ゾーニングに従事したグループによってまちまちであることを指摘している。そのため、何故ゾーニングを行なうのか、どのようにしたらうまくゾーニングができるのか、その結果の利用者として誰を意図しているのか、ということを検討する必要があるとのべて

* 東京都立大学都市研究センター

** 東京都立大学工学部

いる。また、各国で行なわれているゾーニングは、縮尺が小さいため、実際の地震被害の分布とは一致しないことを指摘している。したがって、より詳細で、より安全な土地利用や構造物の建設に利用できるようにゾーニングが必要であり、それがマイクロゾーニングである、と考えている。

このようなゾーニングについては、地震被害のポテンシャル (Earthquake Damage Potential) が、

$$E. D. P. = F\{St, Ss, ht, G, Sr\} \quad (1)$$

で表現できるという観点から、各要素についての検討が必要であるとしている。Stは、表層の地盤のタイプで、液状化現象、細粒物質からなる地盤では強度の低下、および、粗粒物質からなる地盤では圧縮、の問題と関係している。Ssはサイズシシティで、地震の規模と発生頻度、断層の分布、最近の地震活動の傾向、に関係している。htは地下水位である。Gは、地盤(地質)条件で、構造盆地の形態、基盤岩のタイプ、基盤岩上の堆積物の固結度に関係し、地盤の振動の増幅特性を表わそうとしている。Srは、各種構造物である。

国際マイクロゾーニング会議開催の目的のひとつは、このような関数で表わされる地震被害ポテンシャルを、いかにして大縮尺の地図に表現するかにあったのであろうが、関数を解くための基本的研究や、サイズシシティに基づくマイクロゾーニングについての論文が多かった。その後、各地で、事例研究が多く行なわれているのであろうが、水準はなかなか変わらないらしい。

1977年に、インドのニューデリーで、第6回地震工学会議が開催された。この会議で、Udwadia, F. E. と Trifunae, M. D. (1977) によってマイクロゾーニング・マップの作業に関して、その手順に共通のフィロソフィがないことが指摘されている。したがって、マイクロゾーニング・マップの作製についての状況は、1972年当時と大差がないものと推定される。また、彼等は、マイクロゾーニングの目的は、被害危険度の相対的なスケールにあるとし、強振動による被害を対象としたときのマイクロゾーニング・マップの作製法を提案している。

彼等によると、地盤破壊をとまわず、強振動のみによる被害の程度は、発震機構、地震動伝播経路の性質、局地的な地盤の影響の3要素で決まるとし、図化のための指標としては、地震応答スペクトルと振動継続時間をとれば充分な指標になるという。具体的な図化の手順はまず、[地域のサイズシシティを調べて、震源と地震規模を想定し、実際の地震加速度記録をもとに、入力する地震加速度記録を設定する。つぎに、図化する地域を格子状に分割し、格子の交点毎に、ある周波数の地震応答スペクトルにみられる振幅と、振動継続時間がある値を同時に越えない確率を求める。その際、振幅と振動継続

時間は、震央距離、各地点の地盤条件、地動の方向、および、減衰定数の関数で求めようとしている。各格子点毎に、周波数毎の同時確率を求め、それを基本図にする。最後に、その基本図を組合せて、何枚かに図化するという。

マイクロゾーニング・マップについての考え方を、いくつかその概略を紹介した。筆者らの考え方も、大局的には、ここに示したものと似ている。すなわち、比較的遠くで発生した大地震による構造物の一次被害は、地震の性質、震源から被害地域までの地質構造、被害地域の地盤の性質、被害主体である構造物の条件、の関数で表現でき、これらの要素を結びつけているのが地震動というパラメータである、と考えている。したがって、マイクロゾーニング・マップを作製する手順は

①震源位置と発震機構の検討——震源断層を設定し、断層の諸元(走向、傾斜、長さ、幅など)と、破壊面の形成のされ方(断層形成の方向、速度、速度の時間変化)から、発生する地震動を求める。

②地震動伝播経路の地質構造の検討——とくに伝播途中での減衰、弾性波速度、密度などによって定まる伝達関数を検討する。

③マイクロゾーニングを行なう地域の地盤の検討——地震動の増幅に影響する地盤の密度や剛性率ならびに減衰性を検討し、これらの性質が均一な層に地盤を分類し、地盤単元を設定する。ついで、地盤単元の分布を把握し、その組合せから地盤型を設定し、それに基づいて、地域区分をする。地盤を構成する地層の分布は、地形地質の形成史と深く結びついている。したがって、地形地質の形成史を手掛りとして、地域区分を行ない、格子状に分割するような機械的な区分はなるべく避ける。

④区分された地域についての地震工学的評価——地震応答計算等により各地域の振動性状を明らかにする。

⑥区分された地域に分布する構造物に予想される被害を、④の結果に基づいて評価する。

論理的には以上のような作業手順になるが、実際問題としては、非合理的であったり、作業に困難を伴うことが少なくない。たとえば、マイクロゾーニング・マップは、仮定されたある特定の地震に対して作製される。しかし、その地震は決定論的には導きにくく、そのうえ震源断層の動きも明確にしにくい、したがって、発生する地震動は、仮定の上に仮定を重ねて、求めることになる。そのうえ、ひとつの地域について、図化する場合でも、いろいろの地震について、個別に図化しなければならず、被害予測には利用できる可能性があるが、土地利用計画や建築計画には、どれを採用するかなどの問題が生じ、非常に使用しにくい。

そこで、比較的遠くの大地震についてのマイクロゾーニング・マップは、そのような地震には、どれにも共通

に使用できるものを考えねばならない。一般に考えられるのは、地盤についてのみ評価する方法で、筆者らは地盤危険度という表現を使用している。とりあげられる項目は、地盤の振動特性、液状化現象の可能性、それに斜面崩壊の可能性である。

地盤の振動特性については、周波数応答計算による評価が一般にとられる。これをさらに、被害程度の評価へと高めるためには、地震基盤への入力大きさを、震央距離や地震規模に基づいて決定するという方法がとられている。このような方法に対しては、震源近くでは、ホワイト・ノイズに近い振動が発生していることを仮定している、という批判がある。しかし、いろいろの地震について、地図上に表現されている振動特性が、具現しなげなければならないということを考えると、周波数応答計算による地震の振動特性の表現は、100%完全に一致するとはいいがたいが、どの地震に対しても、ある程度共通した特性を示すと考えられる。

地盤の液状化現象発生の可能性については、液状化しやすい砂が分布する地域の地盤の構成を検討し、いくつかのタイプに分類して、それぞれについて可能性を評価するという方法がとられよう。その方法を大別すれば大体次の4つが考えられる。①過去の震害の経験にもとづく方法（数量化、多変量解析方法によるものも含む）②Florinら（1961）によるいわゆる standard blasting テストによる方法、③仮定された地震動に対する地層のレスポンスによって生ずるせん断応力と土の動的実験による液状化を引き起すせん断応力を比較検討する方法、④仮定された地震の地表最大加速度（設計用入力加速度）レベルと土の動的実験から、その加速度レベルにおける液状化ポテンシャルを評価する手法である。いずれの方法を用いるにしろ少なからぬ問題点はあるが、上記の幾つかを組み合わせるこの問題の予測がなされよう。

斜面の崩壊については、斜面の人工による変形が著しい影響を持つことが明らかである。したがって、振動特性よりも、改変のされ方による分類を考えることが、まず行なわれなければならない。この点については、最近発生したいくつかの地震による被害例から、凶化のための基準を考える必要がある。この報告では、除外して扱うことにし、後日検討したい。

以下の章では、東京都大田区を例にして、検討することにする。ただ、現段階では、このようにマイクロなゾーニングの場合、特に方法に対するコンセンサス、資料密度と方法の間のギャップなど幾つかの問題点があり、方法の概説のみで止まる部分（特に地表最大加速度、液状化の予測）が残される。

2 マイクロゾーニング・マップのための地盤分類

2-1 地盤分類の考え方

地震動の媒体として地盤を扱うには、地域全体に共通する地震基盤を設定し、ついで、その上部の地盤構成を、密度とS波速度に基づいて分類することになる。

地震基盤としては、S波速度がほぼ500m/secを越える泥岩をとることにする（田治米ほか、1977）。この泥岩は、第三紀末から第四紀前期にかけて形成された三浦層群からなり、ボーリング柱状図では、土丹と表現されることが多い。

木造家屋など、深い基礎を持たない施設の地震被害が表層の地盤の性質に関係していることは良く知られている。表層の地盤を構成している物質は、そこにみられる地形を形成している堆積物そのものである。また、地形はそれが形成してきた地史をよく反映し、各地形に対応した堆積物の存在が知られる。したがって、地盤による地域区分をするには、まず、地形によって地域を大区分するのが、合理的である。

地形により大区分を行なった後には、地震基盤上の地盤に基づいて細区分が行なわれる。地盤は密度とS波速度が均一な地盤単元に分類される。筆者らは地盤単元を岩相と形成年代から求め、各単元について密度とS波速度を与えるという方法をとった。それは、実測されたS波速度に基づいて、地盤を分類できるほどには、S波速度の測定値が得られていないことによる。そのため、都内で得られたS波の測定値を利用して、岩相と形成年代から分類された地盤単元ごとに、そのN値と分布する深度からS波速度を関数化している（田治米ほか、1977）。また、密度は、過去の地盤調査資料から得られる。

地域区分するには、地盤単元のひとつひとつの分布を把握し、それを重ねあわせることによって、境界を求めるのが理想的である。しかし、このような方法をとると、境界は非常に複雑になるし、そのうえ、地域的な広がりも非常に狭いものになるし、境界を引きにくいという問題も発生する。そこで、地震動の増幅に最も影響を与える沖積層に着目して、地域区分を行なうことにした。さらに、N値30、および、50の層に達するまでの深さ、ならびに、地震基盤までの深さによって、細分することを考えた。これは、ある層のS波速度が、その層のN値と分布する深さによって決められるので、沖積層よりも下位にある洪積層の影響が、これにより把握できると考えたことによる。また、N値30に達するまでの深さが、望月ら（1979）が示したように、十勝沖地震（1968年）の際にみられたコンクリート建造物の被害と関係深いことにもよる。

このようにして得られた各単位地域内に存在するボー

リング資料に基づいて、周波数応答計算を行ない、その結果に基づいて、さらに地域を細区分したり、もしくは似かよった結果が得られた地域を統合することとした。

2-2 地形分類

大田区内の地形は、台地(A)、台地斜面(人工改変地を含む)、台地を刻む谷の谷底低地(B)、沖積低地(C)、埋立地(D)に分類される。これらの地形のうち台地斜面については、今回は扱わず、台地内に含めて考えている。

台地はその発達史に基づき、下末吉面と武蔵野面に分けられる。それぞれの形成史を反映して、特有な地盤構造を示している。

2-3 沖積層厚

多摩川下流部の沖積層とそれが埋積している地形について、松田(1973)がかつて解析している。その結果、古多摩川が形成した深い谷は、鶴見川沿いにみられること、現在の多摩川沿いには、河岸段丘が埋積されていること、4段以上の埋没波食台が、台地の前縁に分布していることなどを明らかにした。今回の調査では、大田区役所内に集積されていた多数のボーリング資料を加えてあらためて沖積層の層厚の分布図を作製した(図1)。

多摩川の左岸沿いに、層厚10mから20mを越えて、層厚が次第に厚くなっていく地域がある。この部分は、立川段丘が地下に埋積されているところである。大田区東部では、層厚5m、10m、20mを示す線で示されるように、沖積層の層厚は、しだいに東に行くにしたがって厚くなっている。このパターンを崩すように、層厚の厚い地域が谷状にのびているのがみとめられる。層厚がゆるやかに変化している部分は、波食台が埋積されているところである。層厚5m以下、5~10m、10~20m、20m以上のところは、それぞれ別の時代に形成された波食台に対応し、その上部に分布する沖積層の岩相も多少異なっている(松田,1973)。谷状に層厚の厚いところは、埋没谷の存在するところである。台地を刻む呑川の谷をはじめ、いくつかの谷をあわせて、その延長部が埋没河岸段丘上に続く埋没谷と、東京国際空港の東端をかすめて北上し、多くの支谷が西にのびている埋没谷の存在が明瞭に現われている。

2-4 N値30を示す層までの層厚

N値30に達する層までの層厚を台地上も含めて求めた(図2)。台地上では層厚に変化がほとんどないので省略してある。

沖積低地や埋立地でのパターンは、沖積層厚の分布の

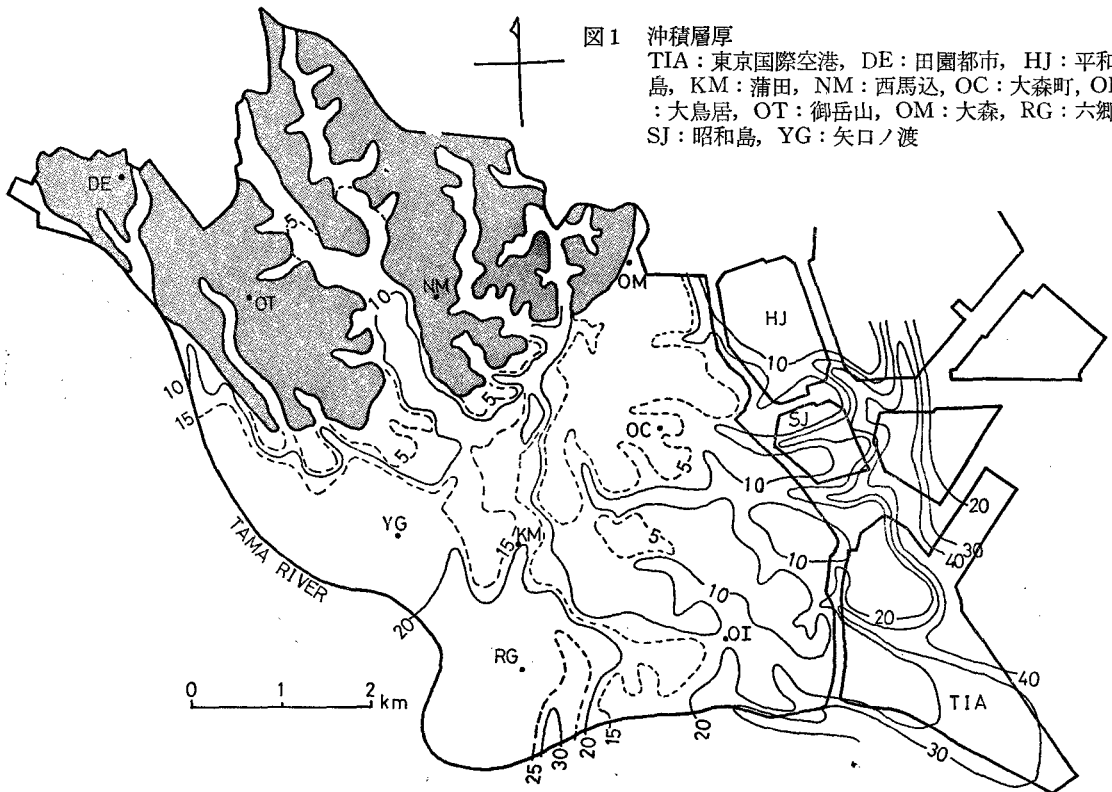


図1 沖積層厚
TIA:東京国際空港, DE:田園都市, HJ:平和島, KM:蒲田, NM:西馬込, OC:大森町, OI:大鳥居, OT:御岳山, OM:大森, RG:六郷, SJ:昭和島, YG:矢口ノ渡

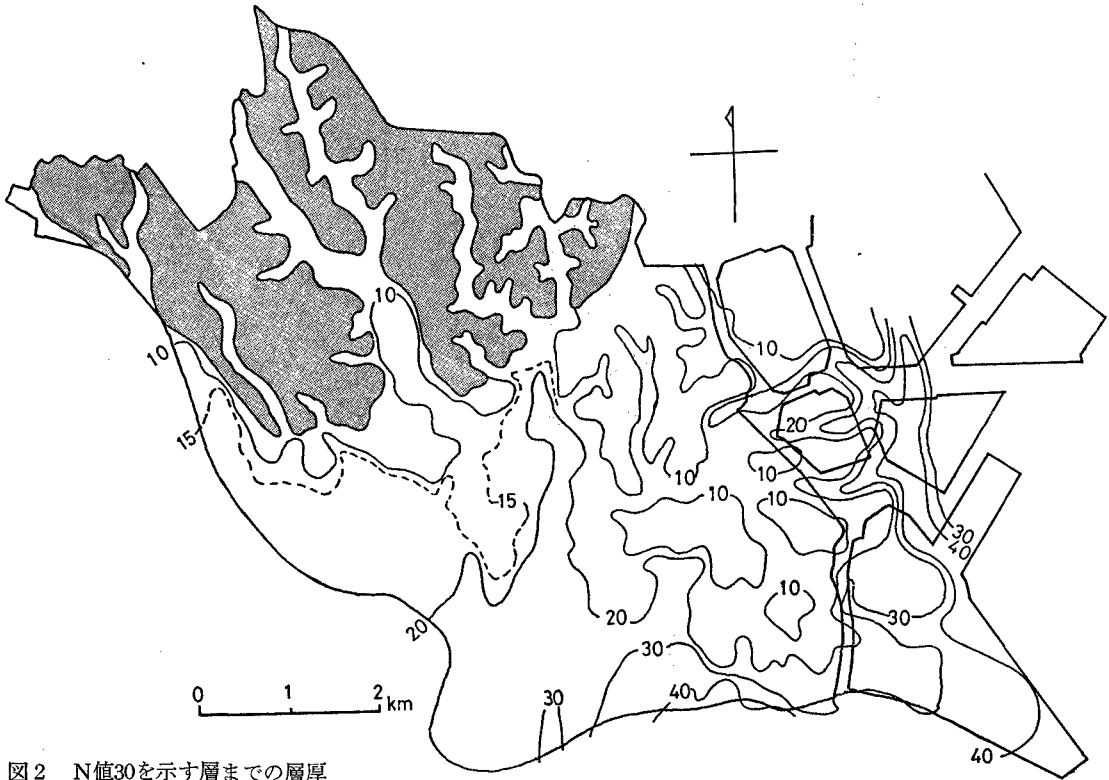


図2 N値30を示す層までの層厚

パターンと似ている。それは、沖積層の基底が、N値30を越える洪積層上に存在することを示している。両者が大幅に異なるのは、多摩川下流部の左岸付近である。沖積層厚は10~20mであるが、N値30に達する層までは、30~40mある。さらに、この厚い部分は北にのび、そのうちのひとつは、台地を刻む谷へと続くように見える。

2-5 N値50を示す層までの層厚

N値30を示す層の場合と同様に、台地上は省略してある。東部の等厚線が複雑な様相を示し、古い谷を示すと思われるのに対して、西部では、単純な形態を示している。図1の沖積層の層厚と比較すれば、西部では、沖積層の基底のごく近くにN値50を越す層が存在しており、地盤の密度や剛性率が急変することが読みとれる。一方西部では、沖積層とN値50に達する層の間に、N値がそれほど大きくない層が存在していることが読みとれる。

第4紀には、氷河の消長にともなう海面変化が存在したことが知られている。氷期には海面が低下し、谷が形成され、間氷期には、海面が上昇し、海成堆積物が谷を埋めたり、波食台が形成された。このような出来事がくり返された結果が、西部の複雑な等厚線の分布に反映されていると思われる。たとえば、東京国際空港の西端を通る谷は、沖積層の基底をなす谷であるし、その他の谷

はより古い時代に形成された谷とみなされる。

2-6 三浦層群までの深さ

図4には地震基盤となる三浦層群までの深さが示してある。台地上については省略してある。図の中央付近より西部では、地震基盤までが浅く、図化しえたが、東部では40mを越えるため、地震基盤まで達している資料がなく図化できない。

2-7 地盤地域区分

図1, 2, 3, 4を重ねあわせて、地域区分を試みた。基本方針としては、地震動の増幅に最も働くと考えられる沖積層の層厚に注目した。Matsuda (1974) は、沖積層の基底の地形が沖積層の層厚と岩相によく対応することを東京低地について明らかにしている。したがって、ここでも、沖積層に埋められている地形に注目して、まず区分することにした。さらに、区分された地区内で、N値30に達する層までの厚さや、N値50に達する層までの厚さに差がみられれば、さらに細区分することにした。台地は、前述したように下末吉面と武蔵野面に分類できるので、それに基づいて分類し、下末吉面については4地区、武蔵野面については1地区の計5地区に細分した。

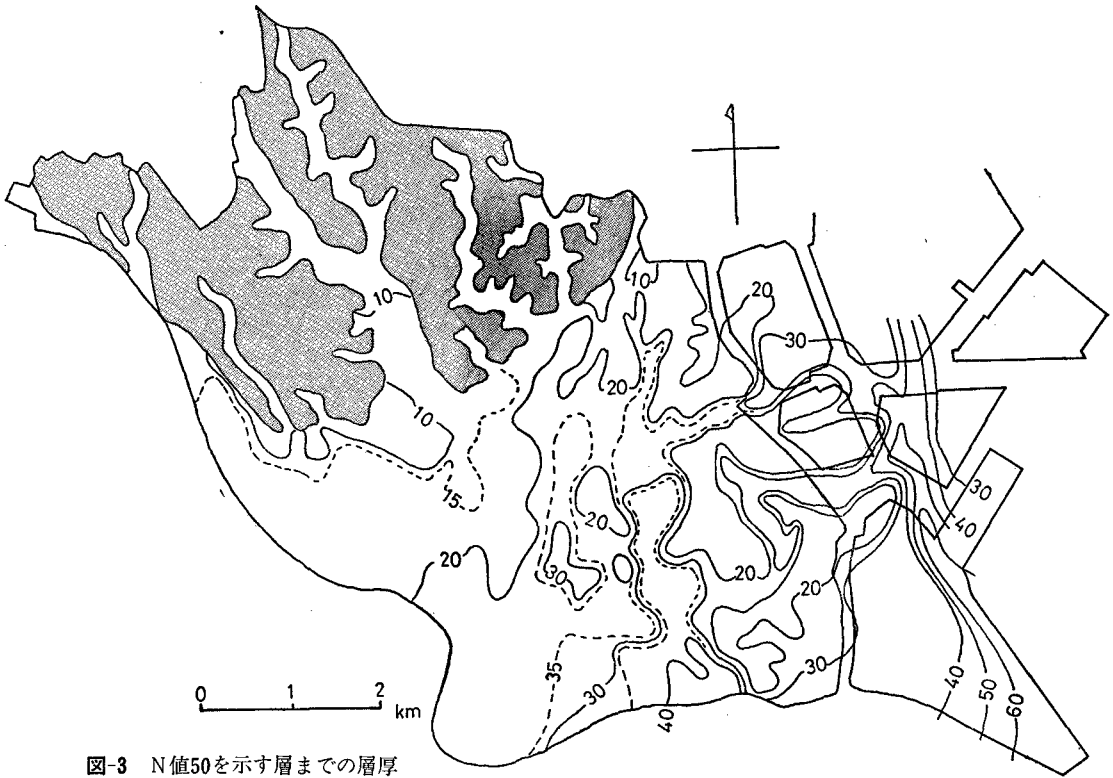


図-3 N値50を示す層までの層厚

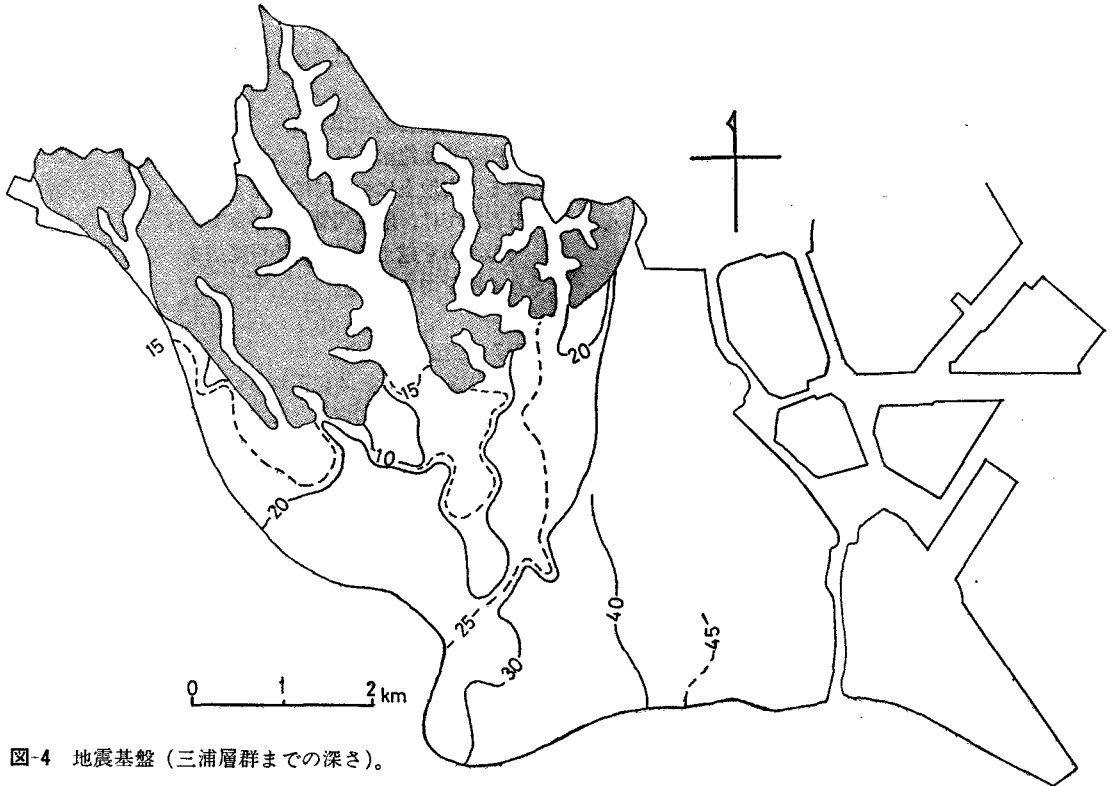


図-4 地震基盤（三浦層群までの深さ）。

谷底低地は、沖積層の層厚が5m以上と5m以下とに分類し、計13地区に細分された。

沖積低地では、埋没波食台、埋没谷底、埋没河岸段丘の地域に別け、さらに、沖積層の厚さで細分した。埋没波食台の地域では、沖積層の厚さが、5m以下、5~10m、10~20mに3区分した。埋没谷底の地域では、沖積層厚が、10m以下、10~20m、20m以上に3分した。また、埋没河岸段丘の地域も同様に3分した。さらに、N値30や50に達する層までの深さと基盤までの深さにもとづいて、細分した。

埋立地も、沖積低地と同様な考え方をとった。埋没波食台の地域は、沖積層厚が5~10m、10m、20m以上に3分し、埋没谷底の地域は、沖積層厚が10~20m、20~30m、30m以上と同じく3分した。

なお、図5に示した地域区分のもとになった地盤区分図は、大田区内が多数の地区に細分され、繁雑になっているため、ここには示していない。

2-8 周波数応答計算の結果

周波数応答計算から得られた最大応答倍率を示す周期と最大応答倍率を図5、6にそれぞれ示した。計算地点に偏りがみられるのは、地盤のタイプに重点を置いて柱状図を選定しているためである。

図5、6を、図1~4までと対照しながら、似たような値を示す地域をくくることを試みた。最大応答倍率の値の分布には、台地を刻む谷底低地が高い値を示す以外には特徴がみられない。そのため、周期に注目した地域区分を試みた。結果は、図5の中に示してある。

最大応答倍率を示す周期は、台地以外の地域では沖積積の層厚とN値50を示す層までの層厚と関係している。とくに、N値を示す層が深い地域は、厚い粘土層が谷状の地形を埋めるように分布している。この谷状の地形は沖積層の基底をなしている埋没谷底と同様に、第四紀末の海面変化に対応して形成されていると思われるし(図3)粘土層には多量の貝化石が含まれ、海面上昇期(間氷期)の堆積物と考えられる。しかし、地形・地質の発達史についての検討は、今後の問題として残しておく。台地地域は、最大応答倍率を示す周期は、関東ローム層の厚さと、その下位に分布する砂泥質な堆積物の厚さに関係している。

地域区分された各地区毎の諸特性を表1にまとめた。

台地は、下末吉面(A2)と武蔵野面(A3)とで、特性が異なり、下吉面の方が周期が長くなっている。また、田園調布付近(A1)は、下末吉面であるが、未固結な砂泥質堆積物が薄く、武蔵野面と似た値の周期を示している。

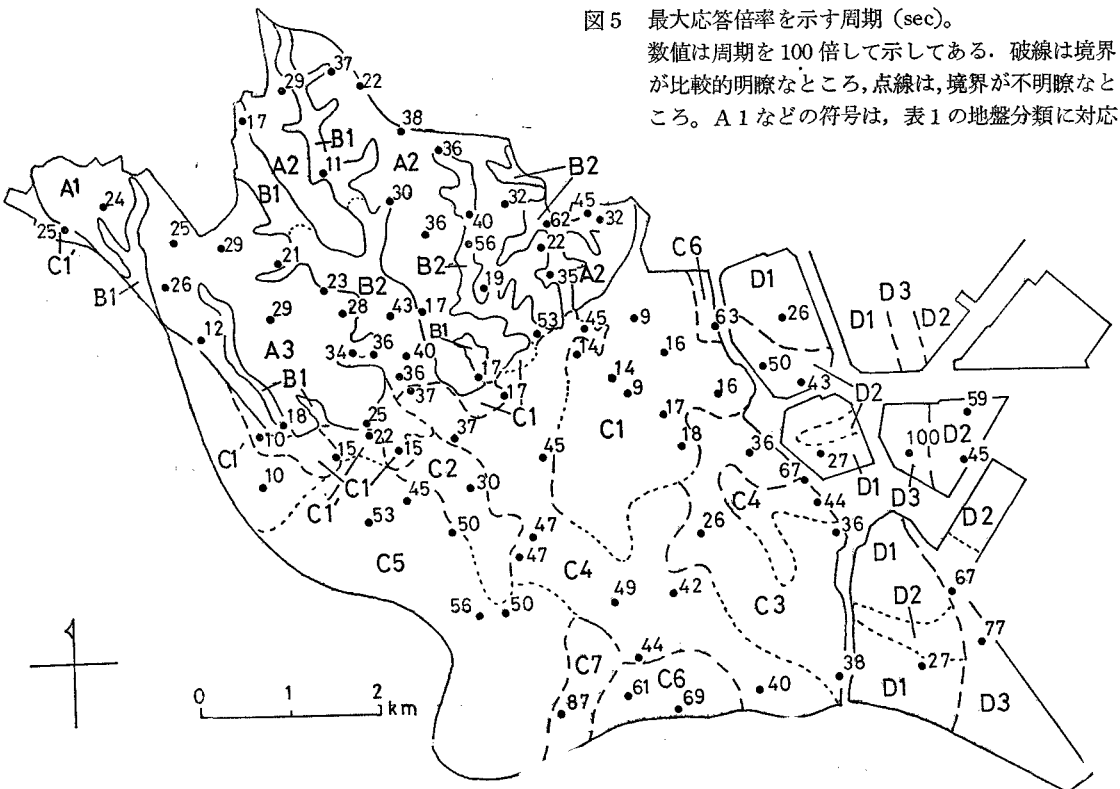


図5 最大応答倍率を示す周期(sec)。

数値は周期を100倍して示してある。破線は境界が比較的明瞭なところ、点線は、境界が不明瞭なところ。A1などの符号は、表1の地盤分類に対応

表1 大田区の地盤地域区分

地盤分類	最大応答倍率を示す周期 (sec)		最大応答倍率 (倍)		計算事例数	地 形	地 盤 構 成 の 特 徴		
	最短	最長	最小	最大			沖積層の層厚	N値50の層に達するまでの層厚	そ の 他
A 1	0.24		8.6		1	台 地 (下未吉面)	なし	10~20m	関東ローム層の下位に 厚い砂泥層が分布
A 2	0.22 ~ 0.38 (0.17)*1		4.6 ~ 8.3		13	台 地 (下未吉面)	なし	20~30m	関東ローム層の下位に 厚い砂泥層が分布
A 3	0.21 ~ 0.29 (0.12)*2		6.8 ~ 8.6		9	台 地 (武蔵野面)	なし	10~20m	関東ローム層の下位は 段丘礫層
B 1	0.11 ~ 0.17		9.5 ~ 10.0		2	谷底低地	5m以下	10m以下	沖積層はおもに、泥質 堆積物もしくは腐植土
B 2	0.34 ~ 0.62		8.4 ~ 11.4		11	谷底低地	5~15m	10~15m	沖積層はおもに泥質堆 積物もしくは腐植土
C 1	0.09 ~ 0.18		4.3 ~ 8.6		11	沖積低地	5m前後	ほぼ25m以下	浅い埋没波食台が分布 する地域
C 1'	0.10 ~ 0.25		8.3 ~ 9.0		3	沖積低地	5m前後 10~15m	ほぼ15m以下 ほぼ15m以下	沖積層が厚いところは 砂礫質堆積物
C 2	0.30		6.8		1	沖積低地	10~15m	10~20m	C 1 に続く浅い波食台 が分布する地域
C 3	0.26 ~ 0.36		5.8 ~ 7.3		3	沖積低地	10~20m	20m前後	C 2 よりも、沖積層が 厚く、かつ、より泥質 である
C 4	0.37 ~ 0.47 (0.67)*3		4.2 ~ 8.4		12	沖積低地	15~20m 10~15m	15~25m 25~35m	呑川の谷につづく埋没 谷底 C 3 のうち泥質な洪積 層が厚いところ
C 5	0.45 ~ 0.56		6.5 ~ 7.5		5	沖積低地	15~25m	25~30m	埋没立川段丘が分布す る地域
C 6	0.61 ~ 0.69		6.1 ~ 7.1		3	沖積低地	15~25m	30~40m	-20m川付近に波食台 が泥質な洪積層上に形 成されている
C 7	0.87		7.4		1	沖積低地	25~30m	25~30m	埋没河岸段丘上を刻み こんでいる埋没谷が分 布
D 1	0.26 ~ 0.27		6.3 ~ 8.3		3	埋立地	10~20m	20~40m	埋没波食台が分布
D 2	0.43 ~ 0.59		5.5 ~ 7.5		4	埋立地	20~30m	20~30m	深い埋没波食台が分布
D 3	0.67 ~ 0.77 (1.00)*4		5.1 ~ 6.3		3	埋立地	20~30m 30m以上	40~60m 30m以上	D 2 のうち、泥質な洪 積層が厚く分布する ところ 深い埋没谷底のところ

*1, *2, 台地縁辺の斜面上のため、未固結な堆積物が薄い

*3 分布範囲が狭いので、C 4 に含めてある。

*4 沖積層厚が40mを越える埋没谷底上である。

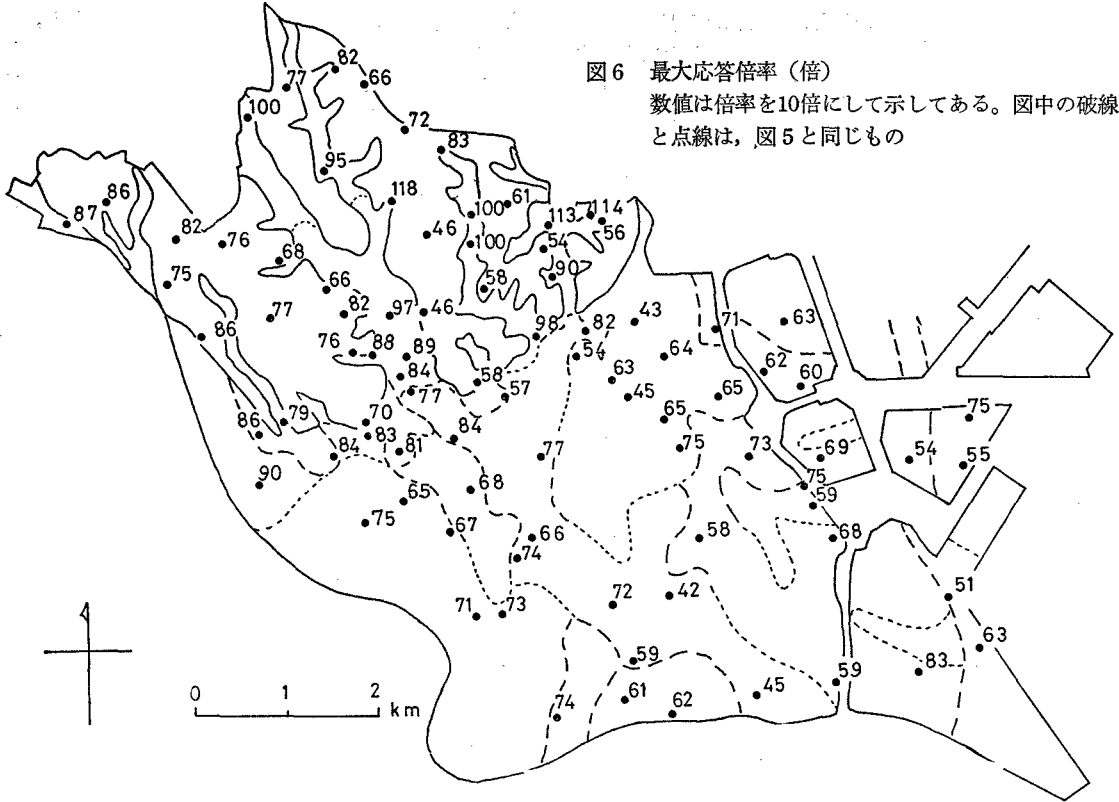


図6 最大応答倍率(倍)
 数値は倍率を10倍にして示してある。図中の破線と点線は、図5と同じもの

谷底低地は、前述したように、最大応答倍率が10倍前後の値をとるといふ特徴がある。沖積層はおもに泥質堆積物もしくは腐植土からなるし、その下位には、すぐに洪積砂礫層が分布し、かつ基盤岩の深さが浅く(図4)地盤の構成は、単純である。したがって、最大応答倍率を示す周期は、沖積層の厚さに比例して長くなる傾向にある。

沖積低地では、沖積層の厚さ、言いかえれば、沖積層が埋積している地形に制約されて、最大応答倍率を示す周期の分布がまとられる。したがって、周期の分布は、図1の等厚線の分布と良い対応を示す。対応がくずれているところ(C4の一部とC6)は、沖積層の下位に、未固結な泥質堆積物が厚く分布するところである。

埋立地も沖積低地と同様に区分できる。沖積層厚が、台地よりの沖積低地よりも厚くなっているため、周期の長い地域の占める割合が高い。

なお、図5には、境界線を破線もしくは点線で示してある。これは、ボーリング地点の密度が異なることや、堆積物の岩相が水平方向に泥質から砂質へと変化しているような場合には、その境界を明確に示し得ないこと、などによる。

3 構造物の被害危険度の立場からの地盤分類図の解釈

3-1 概要

地盤と構造物の震害の間に深い関係があることは、かなり古くから知られていた。マイクロゾーニング・マップ作成手順の第1段階である地形分類に対応させる形で、望月ほか(1978)は、関東大地震におまる地形・震央距離と木造建物(住家)全壊率・震度の関係などを示した。したがって、この段階でややマクロではあるが、木造建物の大体の地震時地域危険度並びに震度を知ることができる。同様な構造物の上記地震に対するややミクロな地盤危険度が例えば河角(1973)によって、沖積層厚と全壊率・震度の関係といった形で東京旧市内に対して与えられている。すなわち、沖積層の厚さが被害危険度・震度の尺度として使えることが知られているわけである。

ところで筆者らはその1(望月ほか, 1978)で最大加速度のみでいえば、関東大地震では山の手の台地上の方が、低地より大きかった可能性もあることを指摘した。したがって河角の震度、つまり物部(1925)以来の木造建物の全壊率と震度の関係における(墓石など単体の転倒から推定される震度)は、有効加速度的なものと解釈

される必要がある。すなわち、ここにいう有効加速度は、通常構造物の直接被害に関する影響をおよぼす周波数（周期）範囲の地動の加速度であり、比較的長周期側の波の成分の加速度である（望月ほか、1976）。

このように考えれば、金井（1966）の震央距離・マグニチュードとサイトの地盤の第1次卓越周期から地表最大加速度を推定する実験式で、卓越周期が短いほど加速度が大きくなることと矛盾は生じていないといえる。また、地震加速度のみがかなり大きくてもそれが被害に直結していない事実から有効加速度（例えば渡部、1978）、地震動の強さの評価手法に関する研究が少なからず行われている。

次にこの報告では、平均N値30、50を示す地層までの深さをマップで示している。N値30は沖積低地では沖積層の下底に近いものとなる。また台地では関東ローム、粘土などの下底と大体一致する。そしてこの深さがRCぐい、PCぐいなどをくい体を痛めることなく打ち込める、およその限界深さであり、通常のRC造建物などの支持地盤（構造物へ地震動が入力するときの下底）となっている。

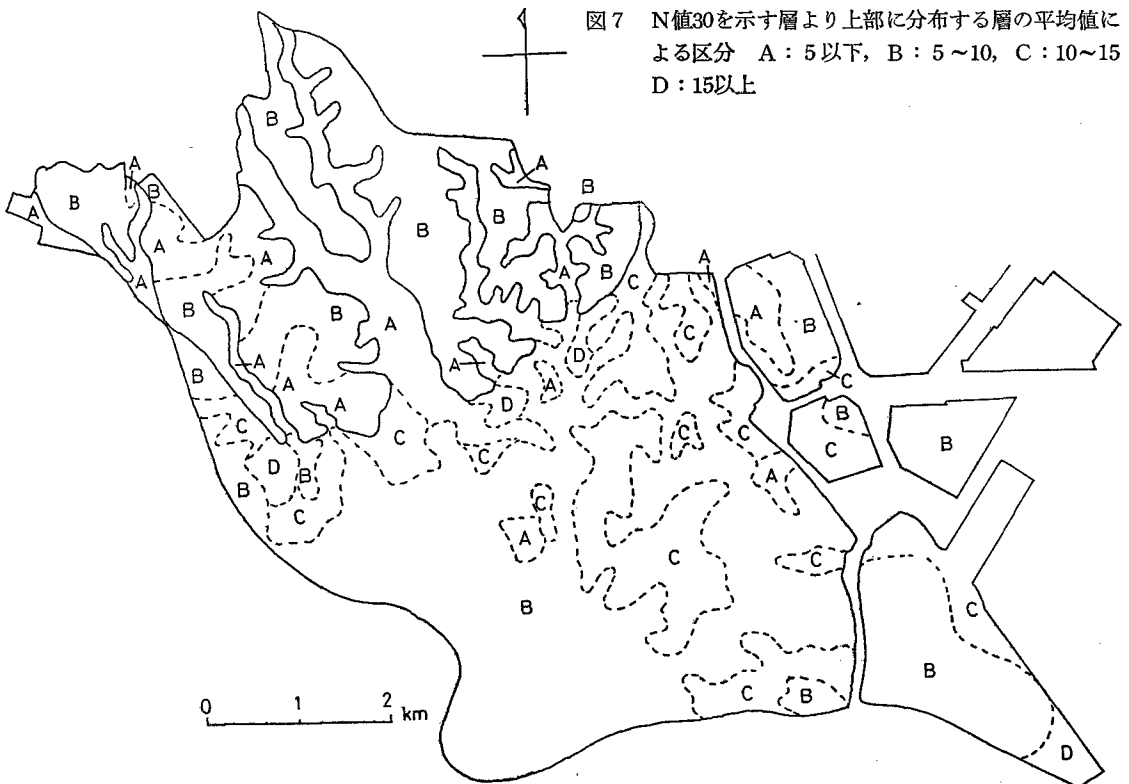
N値50は大体貫入試験が実施しうる限界の深さと考えられる。また、中高層建物など重量構造物の支持地盤の目安を与える。したがって、これらの等深線を示すマップ

は、都市計画、同再開発に際して活用されるし、後の図7（N値30までの深さとそれ以浅の深さの平均N値の重ね合わせ）は、望月ほか（1979）の1968年の十勝沖地震のRC造建物の被害と地盤の関係の調査結果と直接比較検討が可能であり、危険地域をピックアップすることができる。

ところで、このようなゾーニングの研究において、地震（周波数）応答計算用基盤をどこに設定するかは重要な課題である。可能ならば、地震断層が活動した岩盤と同一程度の剛性をもつところを採用することが望しい。

しかし、現状ではマイクロゾーニングの作業に使用しうるほど、そこまでの深さの地層の特性はわかっていない。それで、前記周波数応答計算では三浦層群ないしそれに相当する地層（ $V_s \approx 500\text{m/sec}$ ）を基盤と仮定している。このような仮定で問題になるのは、主としてより長周期の応答倍率を過少評価する結果として表われる。しかし、そのよう長周期地動が影響をおよぼすのは、長周期構造物、タンク内液のスロッシングの問題に大体限られるから、一般の都市施設の被害危険度を考える場合の第1次近似としては、ここで採用した基盤でもほぼ十分と考えられる。

以下、この地震基盤の設定にもとづく周波数応答計算結果について若干考察する。



3-2 地盤の周波数応答などからみた構造物の地盤危険度

前述したように周波数応答計算で用いている土の常数特にVsは統計的に定めたものであり、十分それぞれのサイトの特性を反映していないことも考えられるが、あくまでも第一近似として結果について若干の考察を加える。

まず全体的な観察からは、木造建物など柔構造化しやすい構造物（非線形化の進行による）並びに柔構造物は図5で卓越周期が長い地盤型ほど振動被害の面からみて不利といえる。しかし、一般にRC造建物のように剛な構造物の場合でも（それ自身の固有周期に近い）極く短周期の地盤よりもむしろ図5、表1の卓越周期でいってT=0.3secないし、それ以上の卓越周期の地盤と推定されるところで大きな被害を生じていることがわかった（望月ほか、1979、十勝沖地震の調査結果から）。このことは、図6、表1の最大応答倍率についてもいえ、かなり応答倍率の高い地盤でも、それが比較的短周期（T=0.25sec内外ないしそれ未満）に限られるなら、通常の構造物にとって、振動的に比較的安全性の高い地盤といえそうでありそれは有効加速度としては他の地盤型に比べて大きくなることはなさそうだからである。これらの地盤型は図2、図7でいえばN≧30の地盤までの深さが10m内外ないしそれ以上、かつその地層（N≧30）に到るまでの平均N値が10程度内外ないしそれ未満までの地盤を除く地盤ということになる。

一方卓越周期が0.5~0.6secないしそれ以上の地盤型では、より木造建物、柔構造物の地盤危険度は増大すると考えられるが、通常のRC造建物のように剛な構造物の危険度は減少するとも考えられる。それは望月ほか（1979）の十勝沖地震の調査でRC造建物の震害率あるいはその程度がより長周期地盤では減少化する傾向がみられること並びに梅村（1971）の図8で軟弱層の強震観測記録における建物内の応答倍率が著しく小さいことがあげられる。

ところで、このような地盤周波数応答計算のマップはいわば構造物における1質点系レスポンススペクトルの結果を抽出したようなものであり、詳細なことをこれで全て検討することは不可能である。したがって、地震時の各地の地盤のおおまかな増幅、周波数特性（地震波のそれに相当する成分が刺激されることによる）をこれから把握することにより、その上に建つ構造物の地域危険度の判定の基礎に供するものである。

実際の設計あるいは被害予測においては、それぞれ構造物をモデル化し、かつ入力地震波を仮定し、その応答計算と過去の震災体験なども加味して危険度あるいは安全性を確認する必要がある。

さらにまた、すでに観測されている種々の地形(地盤)上での強震観測記録を収集・整理（この場合、建物最下

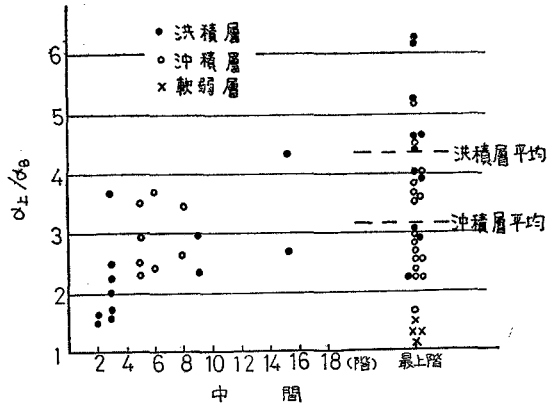


図8 RC(SRC) 造建物の上階、最下階加速度比梅村（1971）—1968年7月1日埼玉県中部の地震の例一

階などの記録は、建物それ自身の効果を除去した自由地盤の記録に補正することを考えなければならない）すること、並びに上記観測点の偏在に対する補足観測を充実する（観測点の拡大）ことが切望される。筆者らも、それらの両者のことについて、若干の試みを開始しておりさらにその対象地形・地域を広げていく所存である。

3-3 地盤の液状化危険度の判定

3-3-1 基本的な考え方

主として1964年新潟地震以来、地震時の液状化現象の調査・実験および理論研究から、多くの設計指針類（例えば、日本建築学会、1974：日本道路協会、1972：日本港湾協会、1971など）が、液状化危険度を検討項目としてとり上げており、また各地の防災会議などでも地震時を対象とした被害予測における主要対象項目として検討を行っている。

ところで、このような現象予測において、最も参考になるのは、過去の地震の事例であろう。新潟地震以来、過去の地震における液状化現象は各方面で少なからず調査され、その成果が得られつつあり上記指針、被害予測等にも活用されているが、構造物の被害から考えて大きな問題になるのは主として深部から地表へ進行する（1次液状化から2次液状化）厚い砂層の全面的液状化である。新潟地震における新潟市の大被害地域、1944年東南海地震における名古屋市南部などでは、このような大規模液状化が発生したと考えられる。

栗林ほか（1974）は、液状化が生ずる平均的な限界震央距離R（km）と、マグニチュードMの関係として次式を提案した。

$$\log_{10} R = 0.87M - 4.5 \quad (2)$$

この式で、M≧8とすれば震央距離240 km程度までの地域が液状化の発生の可能性をもっていることを示す。ただ、(2)式によるRは、局所的な小規模液状化をも含めた可能性を示すものと解釈される。

マイクロゾーニング・マップの作成において特に問題となるのは、前記、大規模液状化危険地域を知ることであり、かつ、それが可能性をもつそれぞれの地域でどの程度の最大加速で生ずるかを予測することが重要な課題となる。すなわち、液状化危険度からみたゾーニングにおいては、液状化が生ずる可能性があるか否かだけではなく、可能性がある場合、それがどの程度の地動加速度で、さらに深さ方向におけるどの程度の範囲まで危険となるかまでを予測し、マップ化することが望まれる。何故なら、前記1944年東南海地震では、極めて広い地域にわたって噴砂・噴水のあったことの記述があり、(2)式作成においても使われているが、その多くの地域では砂層の発達が悪いため、大規模な液状化には至っていない。それ故、ここでは1で4つに大別した判定手法のうち、そのような目的に使用しうる幾つかを示し、その適用法を考えてみる。

3-3-2 過去の震害の経験にもとづく方法

ここでは、筆者のひとり望月が大崎順彦、田治米辰雄の指導もあって新潟地震時の新潟市における被害と地盤の関係の調査検討から導いた手法（田治米・望月・松田1977）¹⁴、並びに統計的手法によって液状化危険度を予測しようとする谷本・野田（1976）²⁰の方法を示す

- (1) 1964年新潟地震時の被害と地盤の関係の検討による方法

この方法は、深さZ（m）と液状化限界N値（ N_L ）の実験式(3)式と、図9にもとづくものである。

$$N_L = 1.35Z + 0.4 \quad (3)$$

図9は、いかなる深さに、どの程度の層厚の N_L 以下の締り方の砂層が存在した場合に、大規模な液状化、すなわち、大被害が生じたかを示す。図で45°の軸から各点（○または×）までの縦軸に平行な距離が、その地点の地層のN値が N_L を下まわる層厚を表わす。すなわち、説明図のハッチ部分の層厚である。図によれば、 $N < N_L$ の層の上限の深さ4~5mおよび下限の深さ8~9mの地域では、 $N < N_L$ の層厚が4m程度でも大被害が起っている。すなわち、大被害地域内のボーリング柱状図に対応する図中の×印の範囲内に含まれることを意味する。一方、地表面からGL-5~6m程度まで $N < N_L$ であっても大被害地域となっていないか、それらの柱状図を個々に検討してみると地下水位上の1~2mの層厚を差し引いた4m内外の地層のうち、通常分類法で砂層に属する部分は、2m程度の場合が多く、残りはシルトあるいは粘土の薄層より成る。

以上より、(3)式を砂層が主相となっている各地域のボーリング柱状図のN値-深さの実測図に対応させ、その地点の地層が図9の○印あるいは×印のいずれに属するかを調べることにより、大規模液状化の危険性の小、あ

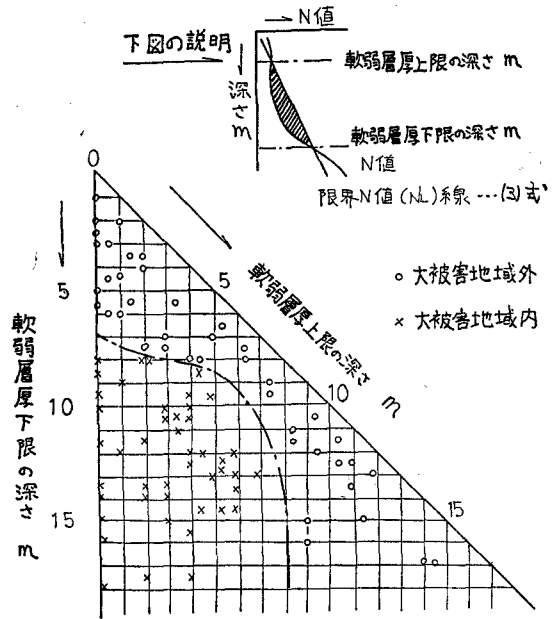


図9 (3)式とボーリング柱状図の対応で、ある深さZのN値が $N < N_L$ となる場合の、 $N < N_L$ のTotalの層厚とその存在深さ（砂層）の関係

るいは大のいずれかに判断することになる。但し、新潟市の事例によるわけであるから、地表最大加速度は150~160gal程度、かつ地下水位がGL-1~2mの砂層（主として細砂）を対象とした場合の危険度判定手法ということになる。

(2) 統計的手法

前記、谷本らの提案手法であり、判別解析と重相関解析法を後に述べる Seed, H. B. と Idriss, I. M. (1971) が液状化危険度の判定法を導く際に用いた地震と地盤のデータに適用して提示した実験式であり、液状化ポテンシャルをLとすれば、下式で示される。

$$L = x_1 - 0.28x_2 - 1.09x_3 + 0.37x_4 \quad (4)$$

ここに x_1 : 地表からの地下水位の深さ(m), x_2 : 液状化層の地表からの下限の深さ(m), x_3 : x_2 位置でのN値, x_4 : 地表最大加速度(g)を表わし、臨界値を $L_0 = -9.17$ (Lがこの値より大なるとき液状化)とした場合の適中率は78.5%となっている(データ数: 35)。

3-3-3 地層の応答計算と土の動的実験にもとづく方法

このような手法を液状化に対して適用したのは Seed, H. B. らである。Seed, H. B. と Lee, K. L. (1966) はくり返し三軸試験により砂の液状化のメカニズムを把握した。Lee, K. L. ら (1969) は図10に示すような液状

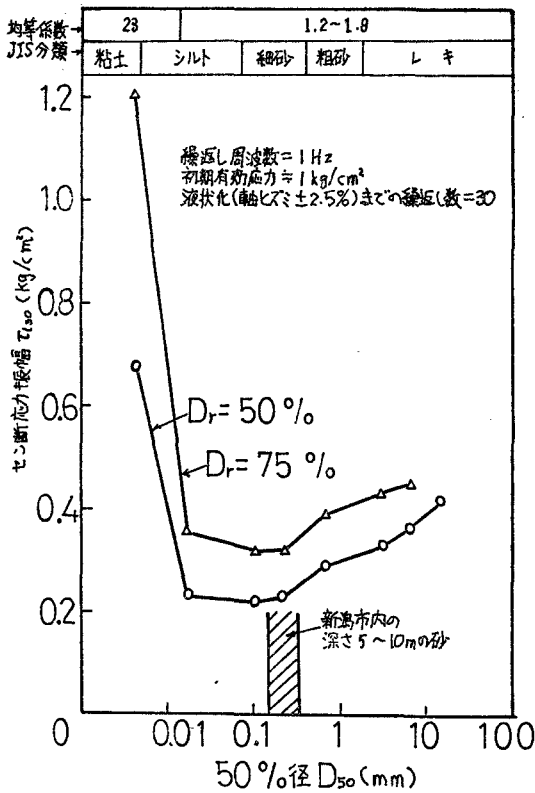


図10 液状化におよぼす土の粒径の効果 (Lee, K. L. ら, 1969の実験による)

くり返しによって液状化を起させるに必要なせん断応力振幅は Seed らにより、次式で与えられている。

$$\tau_{1n} = \left(\frac{\delta_d}{2\delta'_v} \right) / 50 \frac{C_r D_r}{50\%} \delta'_v \quad (5)$$

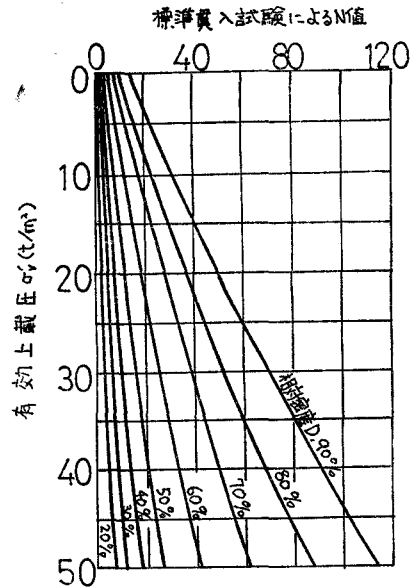


図11 有効上載圧, N値と相対密度D_rの関係 (Seed and Idriss, 1971)

化における土の粒径の効果を実験により明らかにした。ここでは、Seed, H. B. & Idriss, I. M. (1971) の手法にその基礎をおいた方法¹⁾ 並びに鏡味・岡田 (1979) の簡易判定手法²⁾ を示す。

(1) 地盤応答計算に土の動的実験結果を適用する方法
以下にその判定手順を概略する。

<1>地盤の地震応答計算：望月ほか (1979) のべき関数型履歴モデルによる地盤の非線形地震応答計算法により各時刻歴の各深さのせん断応力 τ を計算し、その最大値を τ_{max} とする。ところで、Seed らは地震のMと主要動のくり返し回数nの関係を次のように仮定している：
M=7, n=10; M=7.5, n=20; M=8, n=30。

したがって地震応答計算における主要動計算時間もnを参考にする必要がある。

<2>各深さの土の有効応力・相対密度の算定：地下水水位と土の単位体積重量から有効応力 δ'_v を定め、有効応力とN値から図11を用いて相対密度D_rを算定する(図11)。

<3>液状化を起させるに必要なせん断応力振幅：飽和砂試料に対するくり返しせん断試験にもとづく、n回の

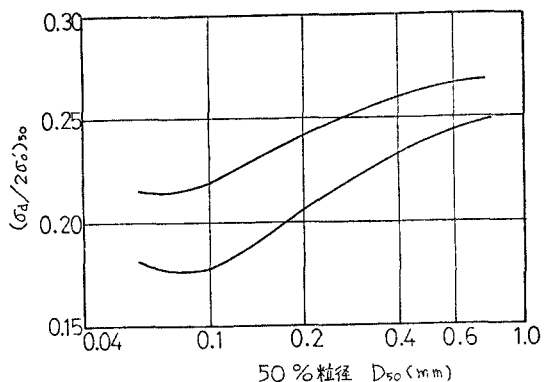


図12 くり返し三軸試験による液状化せん断応力比 $\{(\delta_a/2\delta'_v)_{50} : \text{相対密度50\%砂に対するくり返し三軸試験で、n回のくり返しで液状化を起させるせん断応力振幅 } \delta_a/2 (\delta_a \text{は軸差応力}) \text{ と初期有効応力 } \delta'_v \text{ の比}\}$ と粒径の関係 (Seed and Idriss, 1971)

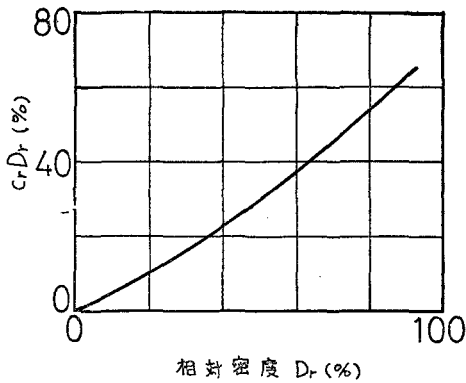


図13 式(5)の補正率CrDrとDrの関係 (Cr:三軸試験結果から現場におけるせん断応力を求めるための補正係数) (Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1971)

$(\delta_d/2\delta'_0)_{so}$ は、図12で、 $C_r D_r$ は図13で与えられる。
 <4>液状化の判定:各深さの土について τ_{max} と τ_{ln} を比較することにより、液状化が生ずるかどうかを判定することになる。但し、 τ_{max} については、そのままの値でなく、有効応力として、 $0.65 \tau_{max}$ を考える方が実状に合うことがわかっている。したがって、いずれかの深さで $0.65 \tau_{max} > \tau_{ln}$ となったとき、液状化が生ずると判定することになる。

(2) 簡易判定法 (数量化理論第II類の適用)

鏡らによる方法で、前記 τ_{ln} と τ_{max} の大小関係から液状化危険度を判定し、地表の最大加速度 a_{max} に対し、次のように危険度を区分している: $A=a_{max}$ が150galで液状化する部分、 $B=a_{max}$ が150galでは液状化しないが300galでは液状化する部分、 $C=300gal$ でも液状化しない部分。

この場合の判別式は、A、Bに対し、次のように示されている。なお、Cは、洪積層・粘土層がそのほとんどを占める。

$$\alpha = \begin{pmatrix} 1.51(0 \sim 2.49m) \\ 0.24(2.5 \sim 4.99) \\ -0.65(5.0 \sim 7.49) \\ -0.44(7.5 \sim) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.51(0 \sim 1) \\ -0.64(2 \sim 4) \\ -0.34(5 \sim 9) \\ -0.45(10 \sim 14) \\ 0.37(15 \sim 19) \\ 1.08(20 \sim 29) \\ 0.86(30 \sim) \end{pmatrix} \quad (1)$$

N 値

$$+ \begin{pmatrix} -0.67 \text{ (細砂)} \\ 0.04 \text{ (砂)} \\ 0.32 \text{ (砂礫)} \end{pmatrix}$$

土質区分

$\alpha < 0.4 : A \quad \alpha > 0.4 : B$

以上4つの手法を示したが、どのような方法を用いるにしろ現状では、それぞれの判別結果の間に少なからぬ

幅が生ずる。それ故、筆者らは上記の4種の手法の結果を組み合わせて(かさね合わせ)て危険度の判別、すなわち液状化危険度からみたゾーニングを行うことを考えている。

従来みられるある広がりをもった地域の液状化危険度の判定の多くは、液状化危険度を大、中、小などとランク分けしている。このランク区分にはいろいろな要因が組み込まれていると考えられるが、少なくとも、液状化危険度の判定に際しては、第1次液状化が如何なる深さで、まず起こるのか、次いで第2次液状化(通常より地表付近)に進行する可能性は、さらにそれが地表まで達する可能性はどうか、結果としてどの程度の層厚にわたって液状化が生ずるのか、そのときの地表最大加速度と主要動の継続時間は、といった議論が必要となる。この報告ではまだ結果を示せる段階に至っていないが、以上のような観点から液状化危険度予測を行なおうとしている。

末尾ながら、地盤資料を収集していただき、それを提供していただいた大田区役所建築部指導課市街地防災係並びに各種地盤区分の作業を共同しておられる万建築設計事務所(所長木村秀雄氏)に厚く御礼申し上げます。

文 献 一 覧

梅村 魁
 1971 『構造物の耐震設計』鋼材倶楽部。
 鏡味洋史・岡田成幸
 1979 「地震時液状化危険度の簡易判定式の構成」『日本建築学会大会学術講演梗概集』, pp. 519~520
 金井 清
 1966 「地震動の振動特性に関する実験式」『日本地震工学シンポジウム講演集』, pp. 1~10
 河角 広
 1973 『地震災害』, 防災科学技術シリーズ, 共立出版株式会社。
 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一
 1974 「明治以降の本邦の地盤液状化履歴」『土木研究所彙報』30号, pp. 1~181
 酒井良男
 1969 「北海道の地震対策に関する研究」『第6回災害科学総合シンポジウム講演論文集』 pp. 73~76
 嶋 悦三
 1969 「東京下町における地盤の振動性状」『東大地震研究所彙報』47号, pp. 145~163
 田治米辰雄・望月利男・松田馨余
 1977 『地盤と震害-地域防災研究からのアプローチ』槇書店。

- 谷本喜一・野田 耕
1976 「地震時における砂質地盤の液状化の統計的方法による予測」『土木学会論文報告集』No.256, pp. 79~90
- 中野尊正ほか
1969 「地震地盤図とその構成」『第6回災害科学総合シンポジウム』, pp. 77~80
- 日本建築学会
1974 『建築基礎構造設計基準・同解説』
- 日本道路協会
1972 『道路橋耐震設計指針・同解説』
- 日本港湾協会
1971 『港湾構造物設計基準』
- 松田磐余
1973 「多摩川低地の沖積層と埋没地形」『地理学評論』。Vol. 46, No. 5, pp. 339~356
1974 "Distribution of Recent Deposits and Buried Landforms in the Kanto Lowland, Central Japan." Geogr. Repts. Tokyo Metropolitan Univ. No. 9, pp. 1~36
- 望月利男・小林計代
1976 「単体の運動から地震加速度を推定するための研究—単体の動的挙動の解析—」『日本建築学会論文報告集』248号, pp. 63~70
- 望月利男・国井隆弘・松田磐余・宮野道雄
1979 「サイスミック・マイクロゾーニングにおける震動分布の評価手法について—その1. 墓石調査による震度と建物の被害の関係からのアプローチ」『総合都市研究』第2号, pp. 19~30
- 望月利男・大波正行・原 昭夫・山田隆夫
1979 「べき関数型履歴モデルによる地盤の非線形地震応答計算」『日本建築学会大会学術講演梗概集』, pp. 631~632
- 望月利男・宮野道雄・松田磐余・小泉敏一
1979 「サイスミック・マイクロゾーニングにおける震度分布の評価手法について—その2. 関東大地震の断層モデルによる実体波の Radiation pattern と被害分布の対応性」『総合都市研究』8号, pp. 165~176
- 望月利男・宮野道雄・田村俊和
1979 「1968年十勝沖地震におけるRC造建物の被害と地盤の関係について」『総合都市研究』第8号, pp. 145~163
- 物部長穂
1925 『震災予防調査報告』第100号, 丁。
- 渡部 丹
1978 「有効最大加速度値について」『日本建築学会大会学術講演梗概集』, pp. 605~606
- Florin, V. A. & Ivanov, P. V.
1961 "Liquefaction of Saturated Sandy Soils." Proc. 5th ICSMFE., I.
- Gaus, M. P. & Sherif, M. A.
1972 "Zonation and Microzonation." Proc. Intern Conf. Microzonation, Seattle, U. S. A.
- Seed, H. B. & Lee, K. L.
1966 "Liquefaction of saturated sand during cyclic loading" Jour. of the Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105~134
- Seed, H. B. & Idriss, I. M.
1971 "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential." Proc. of ASC.
- Udwadia, F. E. & Trifunac, M. D.
1977 "Problems in the Construction of Microzonation Maps." Preprints 6th WCEE. vol. 97, No. SM9.

SEISMIC MICROZONING BASED ON SUPERFICIAL GEOLOGICAL CONDITION

— A case study in Ota-ku, Tokyo —

Iware Matsuda *, Toshio Mochizuki * and Toshikazu Koizumi **

Comprehensive Urban Studies, No. 8, 1979, pp. 177~192

Taking Ota-ku(ward), Tokyo, as an example, a procedure leading to seismic microzoning, regional division of an urban area on the basis of relative risk evaluation prone to seismic shaking, has been studied.

The following topics have been discussed for the purpose of making microzonation maps in this paper;

- 1: Mapping superficial geological conditions,
- 2: Regional division based on a relationship between superficial geological conditions and the result of a frequency response calculation,
- 3: Examination on a relationship between dynamic characteristics of many types of structure and frequency response characteristics of soils beneath them,
- 4: Evaluation and mapping of sandy soils prone to liquefaction.

* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

** Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University