

東京大学生産技術研究所 正員 久保慶三郎

同上

* 〇片山恒雄

同上

* 佐藤暢彦

1. ま え が き

過去の震害調査報告を検討してみると、埋設管被害の様相や程度を地盤条件と対比させて考察している場合が多い。特に、新潟地震における新潟市内のように地盤の液状化が大規模に生じた場合や、1968年十勝沖地震の函館市や室蘭市のように被害が軟弱な沖積層地や盛土・埋立からなる地域に集中的に発生した場合については、少なくとも定性的には被害と地盤との相関関係が明らかである。また、関東地震の際の東京市内の水道管被害の分布から、地盤が全体的に軟弱な地域よりも、地形・地層の分布が錯綜していて地動が不均一な地域に入きな震害が生じているという指摘もある。しかし、従来の検討は一般に定性的な論議に終始しており、既往の資料を最大限に利用して、定性的に妥当と思われる傾向が実際に定量的な差として求めるかについては十分な検討がなされてきたとは言えない。本報文では、比較的資料が豊富な関東地震による東京市内の水道管の被害統計を用い、地盤と埋設管震害の関係をできるだけ定量的に検討することを試みた。

2. 関東地震による東京市内の水道管被害

関東地震の東京市内における上水道関係の被害資料は「大正12年関東地震震害調査報告(オ2巻)」(土木学会, 1927)に記載されているものを用いた。この報告書には、東京市15区内の水道管被害に関して、調査時長の異なる4種類の統計がある。被害と地盤との相関を検討するためには、被害の地域分布が必要であり、このための資料としては同報告書中の付図39と付図50がある。前者は大正13年5月末日までに調査された鉄管破壊被害箇所図であり、合計382箇所の管体および管路付属設備の被害箇所が地図上に与えられている。後者は大正13年3月末日現在の水道管被害の修繕調査図であり、漏水箇所の地域分布を詳細に示す唯一の資料であり、漏水・かしめ等直し箇所5個を1つの点でプロットしてあるが、図上から算上げた漏水箇所の総数は60925個である。基本的な被害統計としては、これらの破壊および漏水を「東京都地盤地図」(東京都土木技術研究所)に引かれている1km毎の網目内の各区画に対応させた。このようにして得られた1km²の各区画の被害をそのまま地盤条件に対応させて検討することはできない。被害の個数は区画内の配水管の密度に比例しているであろうし、区画の中には海・河・公園などの面積が大きな割合を占めるものもある。また、付図50による漏水被害の分布と東京市内の焼失地域の分布を検討してみると、大正13年3月末日の段階では焼失地域内の漏水被害が未調査であることが明らかである。そこで、各区画の被害特性を求めるための基礎資料として、上述の破壊個数(m)、漏水個数(n)の他に、配水管が布設されていると考えられる有効面積(A_e)、当時の東京市の平均人口密度を1としたときの人口密度比(p)および有効面積内における焼失面積の割合(r)を調査し、以下の検討に用いることにした。

3. 地盤特性に関する資料

一般に耐震工学的に地盤特性と総称するものの中には、地表層の厚さ、地表層地盤の硬軟、構成土質の種類、成層状態、地形上の特質などの多くの要素が含まれる。ここでは、これらの特性の一つ一つには立入らずに、地盤の地震動に対するレスポンス特性および地盤・地形によって分類した地盤種類の2つの総合的指標を取りあげて被害との相関を検討した。

3.1 振動レスポンスによる分類 河角らは東京都23区内の1km毎の網目格子点およびいくつかの中間点816点における地盤のレスポンスを求めている(「東京都(23区)地盤の振動に対するレスポンス」, 東京都防災会議, 1970年3月)。レスポンス曲線は0.1 Hzから5.0 Hzまでの周波数域で計算されているが、複数のピークのあるものや5 Hzまでの範囲にはピークが無いものなど多様である。1つの格子点に1つのレスポンス特性値を対応させるため次のように考えた。ある格子点のレスポンス曲線に*n*個のピーク値 α_i があり、それらの各々が周波数 f_i に生じていたとすると、

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^n f_i (\alpha_i - 2) / \sum_{i=1}^n (\alpha_i - 2) \quad \dots\dots (1)$$

よって、ピークの高さを重みとする格子点の卓越周波数を求めた。式(1)中の定数2はレスポンス曲線の平坦部の高さであり、5 Hzまでにピークの存在しない格子点では6 Hzに唯一のピークがあると仮定した。破壊や漏水の被害は各網目区画に対して与えられている。そこで、各区画を構成する4個の格子点における $\bar{f}_i$ から次の2つの量を計算した。

$$f_0 = \sum_{i=1}^4 \bar{f}_i / 4 \quad \dots\dots (2) \quad G_f = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\bar{f}_i - f_0)^2} / 4 \quad \dots\dots (3)$$

f_0 は区画の平均卓越周波数を表わす1つの指標であり、 G_f は4隅の格子点の卓越周波数のばらつきの程度を示す量である。これらの量を求める際には、式(1)～(3)からわかるように2回の平均化が行われており、 f_0 と G_f がどの程度に各区画のレスポンス特性を表わす量となっているかには疑問が残る。実際に計算された f_0 を各区画に対応させてみたところ、隅田川以東の地区では一般に1.5～2.5 Hz(0.4秒～0.67秒)、山の多い地区では3.5 Hz以上(0.29秒以下)となり、予想した以上に東京市内の大局的な地盤構成をよく反映した量となっていた。

3.2 浅層地盤構成による分類 東京都の広域的な地盤構成に関して、次のような6種類の分類が考えられている(河角広, 岡本幹三:「東京における土不施設, 地下埋設物及び電気ガス施設等に関する現況報告書」, 東京都防災会議, 1970年6月)。

(A) 下町低地地盤

- A-I: 沖積層(有楽町層)の厚さが10～20 mで、主としてゆるい砂よりなる。
- A-II: 沖積層と七号地層の厚さが30～40 mで、ゆるい砂(厚さ10 m)の下に軟かい粘土層がくる。
- A-III: 沖積層と七号地層の厚さが40 m以上で、軟かい粘土層の下にやや締、た粘土と砂の互層がくる。

(B) 山の多い台地地盤

- B-I: ローム層とローム質粘土層(厚さ10～15 m)の下位に締、た砂層がくる。
- B-II: ローム層(厚さ7～10 m)の下位に砂礫層がくる。
- B-III: 河谷底の地盤で、5～10 mの軟かい腐植土、腐植質粘土、泥炭よりなる。

上記の種別を基にして、表-1の4種の分類を考え、係数 C_i を用いて地盤・地形特性を数値化した。すなわち、東京市内の各区画に対して、1区画内においてそれぞれの地盤種別が占める割合 A_i ($i=1\sim4$, $\sum_{i=1}^4 A_i = 1.0$)を図上から読みとり、各区画について次の2つの量を算出した。

$$C_0 = \sum_{i=1}^4 C_i A_i \quad \dots\dots (4)$$

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^4 (C_i - C_0)^2 A_i / 2.25 \quad \dots\dots (5)$$

i	地盤分類	係数 C_i
1	B-I, B-II	1.0
2	B-III	2.0
3	A-I	3.0
4	A-II, A-III	4.0

C_0 は1つの区画の平均的な地盤種別を数値で表わしたもので平均地盤種別と呼ぶことにする。 σ_c^2 は1つの区画内での地盤および地形の不均質性を表わす数値と考えられ、異質度と呼ぶことにする。異質度は考えうる最も不均質な状態で1.0となるように定めてある。実際に求められた C_0 を各区画に対応させてみると、東京都内の広域的な浅層地盤特性と良い対応を示していることがわかった。

4. 配水管の破壊被害と地盤特性の關係

破壊被害および漏水被害の各々について、地盤特性との關係を検討したが、ここでは破壊被害に関する結果だけを報告する。ここでいう破壊の中には、鉄管破裂・折損・脱出および消火栓・消火栓兼用区画量水器・止水弁破壊が含まれている。地盤特性としては前述の4つのパラメータを用い、次のような量と被害との相関を考察した。

- (i) 平均卓越周波数 (f_0) (ii) 平均卓越周波数 (f_0) とばらつき (δf) の組合せ
- (iii) 平均地盤種別 (C_0) (iv) 平均地盤種別 (C_0) と異質度 (δC^2) の組合せ

上記(i)～(iv)のそれぞれについて、東京市内の地盤特性をいくつかの段階に区分した。例えば、平均卓越周波数の範囲により、東京市内の地盤を $1.5 < f_0$ (H_z) ≤ 2.5 , $2.5 < f_0$ (H_z) ≤ 3.5 , $3.5 < f_0$ (H_z) ≤ 4.5 , $4.5 < f_0$ (H_z) ≤ 5.5 の4種類に区分し、被害との關係を解析した。ある地盤区分に属する地域の破壊被害の程度は

破壊被害指数 = $\Sigma m / \Sigma PA_e$ (6)

によ、て評価した。式(6)は、配水管の布設密度が人口密度に正比例しているという仮定のもとに、 Σm なる被害個数が報告されている領域の総人口にほぼ比例する量 ΣPA_e を用いて正規化していることを意味する。

(A) 平均卓越周波数 (f_0) 解析結果の一例を図-1に示すが、平均卓越周波数が $4.5 H_z$ 以上 (0.22 秒以下) の区域では総体的に破壊被害指数が低くなっている。

(B) 平均卓越周波数 (f_0) とばらつき (δf) の組合せ 図-2(a) は f_0 と δf による6種類の地盤分類を示し、それぞれの分類での被害指数を図-2(b)に示す。 f_0 が $3.5 H_z$ 以下 (0.29 秒以上) の区域の被害は δf にあまり関係しないが、 f_0 が $3.5 H_z$ 以上の主として山の沖台地では、 δf のばらつき(すなわち、卓越周期の錯綜度)が大きい程破壊被害指数が高くなっている。

(C) 平均地盤種別 (C_0) 図-3によれば、破壊被害指数が最も大きい地域は、 C_0 が $2.5 \sim 3.5$ の地域であり、これは山の沖台地および河谷低地が沖積層地盤へ移行する境界以東の主として厚さ $10 \sim 20 m$ のゆるい砂質沖積地盤に対応する。次いで、 C_0 が $1.5 \sim 2.5$ で主として山の沖台地と河谷低地の混在する領域での被害が高く、全体が台地または厚い沖積層の区画での被害は全市平均の被害指数よりも低くなっている。

(D) 平均地盤種別 (C_0) と異質度 (δC^2) の組合せ 図-4(a), (b)によると、 C_0 が 1.5 以下および 3 以上の全体的に硬い或軟かい地盤では、被害は異質度にあまり依存しないが、 C_0 が $1.5 \sim 3$ で硬軟地盤の混在する地域の被害は地盤・地形構成の錯綜度がかなりの影響を及ぼしていることがわかる。

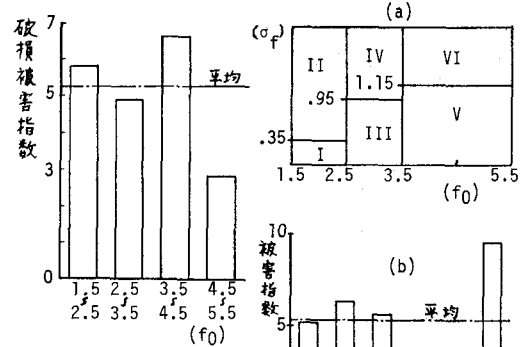


図-1(↑) f_0 と破壊被害

図-2a, b(→)

f_0 と δf の組合せによる地盤分類と破壊被害

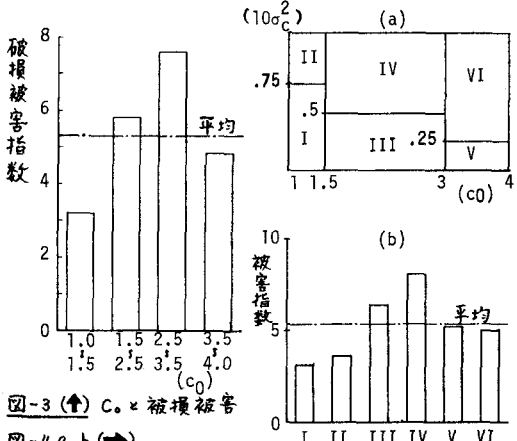


図-4a, b(→)
 C_0 と δC^2 の組合せによる地盤分類と破壊被害