

広域地盤沈下地帯における杭基礎の地震時危険度評価

Earthquake-induced hazard evaluation for piled foundations on land subsidence area

安原一哉*, 村上哲**, 井上涼介***, 福田裕子****

Kazuya Yasuhara, Satoshi Murakami, Ryosuke Inoue, and Yuko Fukuda

*工博, 茨城大学教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢 1 丁目 4-12)

**工修, 茨城大学助手, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢 1 丁目 4-12)

***工博, 茨城大学助教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢 1 丁目 4-12)

****工学, 富貴沢建設コンサルタント, (〒321-0934 栃木県宇都宮市築瀬 2 丁目-13-26)

Piled foundations in the land subsidence area during earthquakes are exposed under the hazardous situation due to increased bending moment and occurrence of negative friction. To estimate the degree of earthquake-induced hazards in the land subsidence area and to visualize the results in the vast area such as the Northern Kanto Plain, the Geographical Information System (GIS) was applied. At the beginning, an index was formulated to estimate the earthquake-induced risk using the Chang's method which had been conventionally used for the pile design. Subsequently, the index considers both the amount of land subsidence and the earthquake-induced acceleration. The former was determined by extrapolating the actual data of ground surface movement which has been measured for the last two or three decades at the nearly 1,200 locations in five prefectures in the Northern Kanto Plain. On the other hand, the distribution of acceleration was determined through analysis of the earthquake-induced hazard based on the previously proposed probability model. Those results were incorporated into the formulated index for earthquake-induced risk of piled foundations, and then were demonstrated in the hazard map using GIS.

Key Words: piled foundation, land subsidence, earthquake-induced hazard evaluation, geographic information system

キーワード: 杭基礎, 地盤沈下, 地震時危険度評価, 地理情報システム

1. はじめに

兵庫県南部地震以来, 都市の地震に対する被害状況を把握するための検討が各方面で行われている。その中では, 活断層による直下型地震を想定し, 周辺地域に存在する活断層を考慮に入れた詳細な検討がなされるようになってきた¹⁾。しかしながら, 地域において考慮しなければならない項目は活断層以外にも存在する。例えば, 地盤沈下地帯においては, 建設後に生じた地下水の揚水による地盤沈下によって, 建物構造物の杭基礎の水平耐力が低下していることが懸念される。そこで, 本研究では, 地盤沈下地域である関東平野北部地域における杭基礎の地震による危険度を把握することを目的とした。とくに, 地盤沈下がもたらす杭基礎の地震時危険度を定量的に評価するための方法と適用性について検討した結果を紹介したい。なお, 本研究での対象域は図-1 に示すように関東平野北部というわが国でも屈指の地盤沈下地帯であるが²⁾, 対象とする地域が広域なとき多くの場合新たな情報を取得することは時間と労力を要する。そこで, このような状況を克服するためのツールとして, いくつかの既

存の数値情報や文書情報などからそれらの処理に有効な地理情報システム (GIS) を用いた。この方法では, 取得したい情報を算出することが出来れば, これを多層的に重ね合わせて種々の予測に利用できる。そこで, ここでは, 既存情報を地震時危険度評価に適用できるような形で定式化することを試みた。

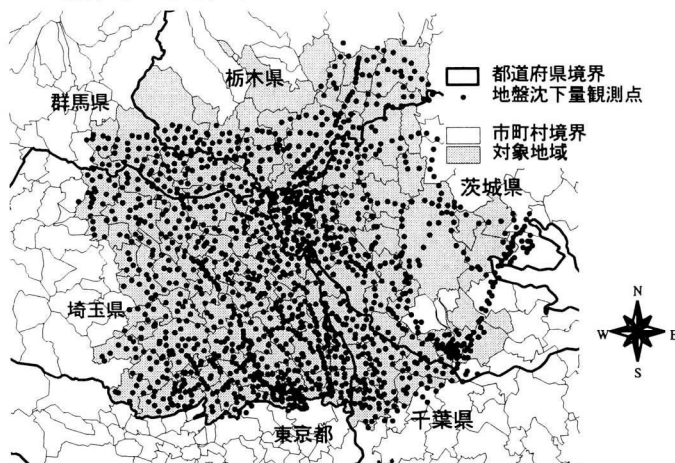


図-1 対象地域と地盤沈下観測点

2. 地盤沈下がもたらす杭基礎の地震時危険度評価法

2.1 地盤沈下がもたらす杭基礎の地震時危険度評価式

著しい地盤沈下が生じている地域における支持杭を有する構造物の基礎は、地震時には設計時における当初に比べて、①水平力による曲げモーメントが大きくなっている（図-2）、②杭に負の摩擦力が作用しているなどの理由から、より危険な状態にあると予想される。そこで、地震時における危険度を定量的に表すためにその評価式を誘導する。ここで対象とする杭は図-2 に示したように、単一の支持杭で杭と上部構造物との接合は固定（回転拘束）とする。また、杭が全長にわたって回転あるいは横移動するような地盤の破壊や液状化に伴う地盤の側方流動は生じないような場合を想定し、杭材に作用する曲げモーメントに着目する。また、設計加速度とある地点で将来生じるであろう加速度とを区別して考える。

地表面沈下量が s だけ生じた時の杭頭および地中部最大曲げモーメント(M_H および M_G)は、図-2 を参照して Chang の方法（線形弾性地盤反力法）を適用すれば、

$$M_H = \frac{H}{2\beta} (1 + \beta s) \quad (1)$$

$$M_G = -H \frac{\sqrt{1 + (\beta s)^2}}{2\beta} \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{\beta s}\right) \quad (2)$$

と表すことができる³⁾。ここで、定式における $\square$ と H は次式で与えられるものである。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}} \quad (3)$$

$$H = \alpha W \quad (4)$$

なお、これらの式中の k_h は水平地盤反力係数、 B は杭幅、 EI は杭の曲げ剛性、 H は水平力、 α は想定される加速度、 W は上部構造物の質量である。

一方、地盤沈下を受けていない設計時の杭頭および地中部最大曲げモーメント M_{Hi} および M_{Gi} は、上式において $s = 0$ と置けば求められる。したがって、設計加速度を α_i とすると、これら M_{Hi} および M_{Gi} は、次のように表される。

$$M_{Hi} = \frac{H_i}{2\beta} \quad (5)$$

$$M_{Gi} = -\frac{H_i}{2\beta} \exp\left(-\frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

ここで、 H_i は式(4)と同様に、次式で定義される。

$$H_i = \alpha_i W \quad (7)$$

したがって、上述の式から次の関係式が導かれる。

$$M_H = M_{Hi} \cdot R_\alpha \cdot R_H \quad (8)$$

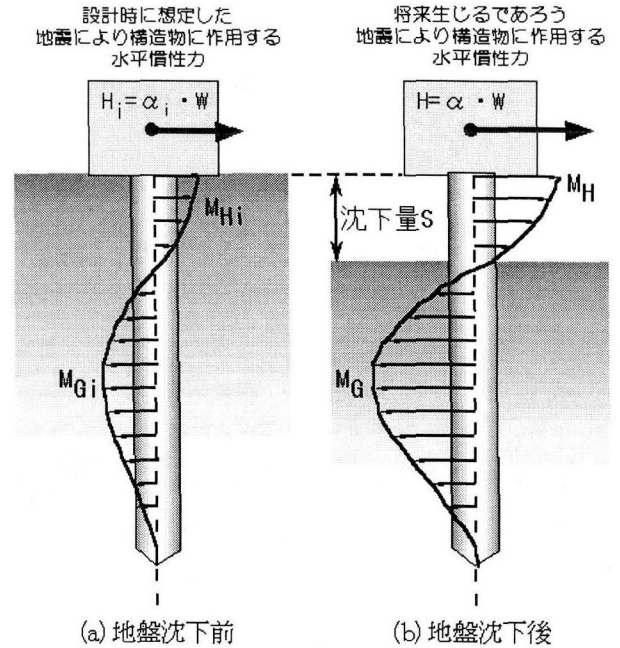


図-2 地震時において杭に作用する曲げモーメント分布

$$M_G = M_{Gi} \cdot R_\alpha \cdot R_G \quad (9)$$

ここに、 R_α 、 R_H 、 R_G は次式のように表されるものである。

$$R_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_i} \quad (10)$$

$$R_H = 1 + \beta s \quad (11)$$

$$R_G = \sqrt{1 + (\beta s)^2} \exp\left\{\tan^{-1}(\beta s)\right\} \quad (12)$$

これらをそれぞれ地震加速度による、沈下による杭頭、地中部曲げモーメントの増加率と呼ぶことにする。設計時において各曲げモーメントの値 M_i は、杭材の許容値 M_c に対し等しいかそれ以下に設定されることが多い⁴⁾。すなわち、ある係数 n （；実数）で M_c を除した値以下が M_i である。すなわち、

$$M_i \leq M_c / n \quad (13)$$

上式において等号の場合を考えると、式(8)と式(9)は次のように表すことができる。

$$M_H = \frac{1}{n} \cdot M_c \cdot R_\alpha \cdot R_H \quad (14)$$

$$M_G = \frac{1}{n} \cdot M_c \cdot R_\alpha \cdot R_G \quad (15)$$

各曲げモーメントに関する杭の危険度として、1 より大きくなると危険となるような次のようなパラメータを定義する。

$$d_H = \frac{M_H}{M_c} = \frac{1}{n} \cdot R_\alpha \cdot R_H \quad (16)$$

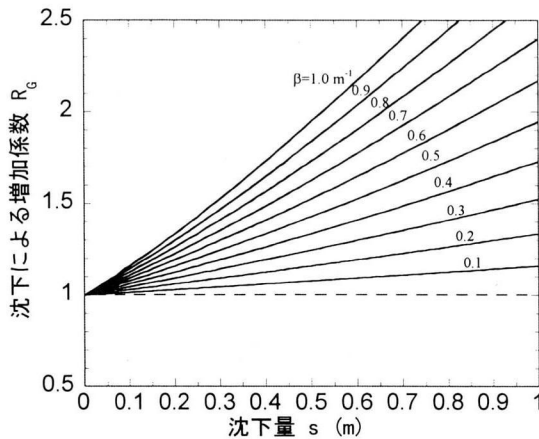


図-3 R_G と沈下量の関係

$$d_G = \frac{M_G}{M_c} = \frac{1}{n} \cdot R_\alpha \cdot R_G \quad (17)$$

したがって、地盤沈下に伴う杭基礎の地震時危険度 D は d_H と d_G の最大値と定義される。 R_H と R_G の大きさが、 d_H と d_G の大きさを決定するが、式(11)と式(12)を比べると、 $s > 0$ の範囲で $R_H < R_G$ となるので、 D は結局次式

$$D = d_G = \frac{1}{n} \cdot R_\alpha \cdot R_G \quad (18)$$

によって判断すれば良いということになる。

2.2 地盤沈下をもたらす杭基礎の地震時危険性

上述した杭の危険度評価式における係数 R_α と R_G についてその特性を数値的に調べる。例として、地盤条件として $\beta = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$ 、設計加速度を $\alpha_f = 196 \text{ gal}$ を想定し、沈下量 s と加速度 α を変化させた計算を行った。こうして得られた計算結果を図-3、4 に示している。なお、 $k_h = 1.0 \text{ kgf/cm}^3$ (N 値でおよそ 5 に相当)⁵⁾、 $B = 100 \text{ cm}$ 、 $EI = 10^{10} \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ の場合、 β の値はおよそ 0.7 m^{-1} である。図-3 より沈下量の増大に伴いまた β の値の増大に伴い、 R_G の値が大きくなることが分かる。例えば、 $\beta = 0.7 \text{ m}^{-1}$ の時、沈下が 0.5 m 生じたときは、沈下による杭の危険度増加率がおよそ 1.5 倍増加する。このことからわかるように、著しい地盤沈下を生じている地域においては、杭構造物の地震時における安定性が低下していると予想されるので、現在生じている沈下量の把握と将来の沈下量を予測することが重要であることがわかる。

また、地震による杭の危険度増加率は図-4 より加速度が大きくなるほど線形的に大きくなる。そして、その増加量は沈下量のそれに比べ大きい。すなわち、広域地盤沈下地帯においては、杭基礎の地震時危険性を予測するためには、将来生じるであろう地震による加速度を推定する必要がある。

3. 広域地盤沈下地帯における杭基礎の地震時危険度評価のための GIS の利用

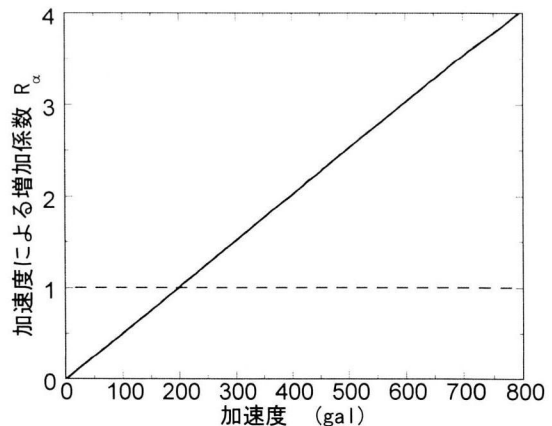


図-4 R_α と沈下量の関係

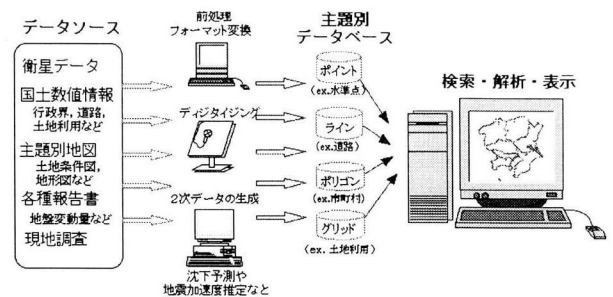


図-5 地理情報システム (GIS) の構成

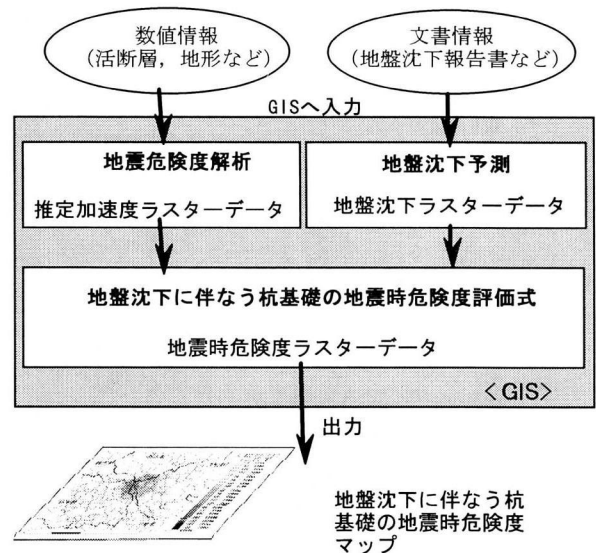


図-6 地盤沈下に伴う杭基礎の地震危険度マップ作成の流れ

本研究は関東平野北部地域における広域な地盤沈下地帯における杭基礎の地震時危険度を把握することを目的としている。対象地域が広域であるため、危険度を評価するためには地域特性を表したいくつかの地理情報を扱うこととなる。そこで、それらの情報管理と情報間の演算、可視化による全体把握に有効な地理情報システム (GIS) を用いて、危険度把握を試みた。GIS とは空間的な計量や位相に関する地理情報を検索・解析・表示できるシステムであり、データ形式の異なる情報を包括的に

処理し、視覚的に表示できる特長がある(図-5 参照)。
先に誘導された評価式を用いた危険度把握に必要な情報は、対象地域の地震による地表面最大加速度分布と累積地盤沈下量の分布である。各分布の算定には、後述するように、前者には地震危険度解析を、後者には地盤沈下予測法を用いた。これらの計算には、既存の数値情報と文書情報を用いており、GISを用いた地盤沈下に伴う杭基礎の危険度分布図の作成の流れは、図-6 に示すようである。

4. 地震危険度解析による地表面最大加速度の推定

4.1 基本的な考え方

本研究では対象地域において将来発生するであろう地震による地表面最大加速度分布図を作成するために確率モデルに基づく地震危険度解析を行う。地震危険度解析の基本的な考え方は以下のとおりである。対象領域内のある地震域 S_i に対し、注目地点で将来 t 年間のうち加速度 α を超える地震が発生する確率を v_i 、その比率を q_i としたとき、注目地点での α を超える地震が発生する確率 v_0 は次式で与えられる。

$$v_0(\alpha) = \sum_{i=1}^n v_i q_i(\alpha) \quad (19)$$

上式によりある加速度 α に対してそれが発生する確率

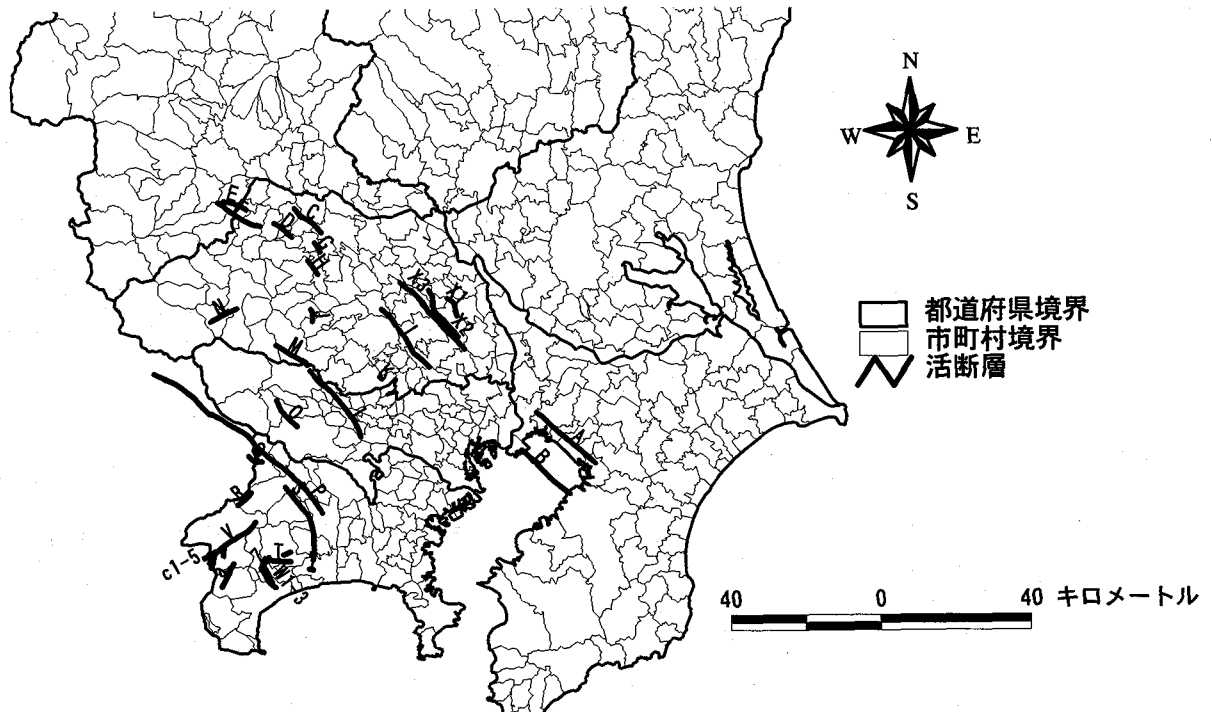
$v_0(\alpha)$ 、もしくはその逆数で定義される再現期間 $T_R(\alpha)$ が得られることになる。いくつかの加速度に対する $v_0(\alpha)$ と $T_R(\alpha)$ の値が求められれば、逆に、ある発生率 $v_0(\alpha)$ もしくは再現期間 $T_R(\alpha)$ における加速度が算出可能となる。すなわち、任意の地点において生じる地震加速度を推定することができる⁹⁾。上述の計算を行うためにはある地震域 S_i に対する v_i と q_i を決定する必要がある。そこで、地震域を特定の活断層による地震域とそれ以外の地震域とに分けて考える。

まず、個々の活断層に対しては、 q_i を決定するための地震規模の相対頻度モデルとして、各活断層から発生する主要な地震はその断層が全面破壊する地震のみであるとの考え方に基づくキャラクタースティックモデルにおいて地震の発生が時間軸上で一様ランダムかつ独立という仮定を付け加えたモデルを用いた。また、地震加速度に関するアテニュエーション式として、福島・田中⁷⁾の距離減衰式を用いる。福島・田中の式は次式。

$$\log \alpha = a \cdot M_S - \log(R + d \cdot 10^{aM_S}) - b \cdot R + c \quad (20)$$

で表されるここで、 α は加速度(gal)、 M_S は表面波マグニチュード、 R は距離(m)、 a, b, c, d は定数でそれぞれ $a=0.41$ 、 $b=0.0034$ 、 $c=1.30$ 、 $d=0.032$ である。なお、 M_S とほぼ等しい気象庁マグニチュード M_J はある活断層の長さ L (km) が既知であれば、次の経験式から求めることができる。

$$M_S \approx M_J = \frac{\log L + 2.9}{0.6} \quad (21)$$



A 東京湾北縁, B 東京湾北部断層, C 深谷断層, D 櫛挽断層, E 神川断層, F 平井断層, G 江南断層
H 今市-菅谷断層, I 荒川断層, J 越生断層, K 所沢聖地霊園断層, L 立川断層, M 名栗断層
N 浦山口断層, O 五日市断層, P 鶴川断層, Q 鶴島断層, R 長倉断層, S 伊勢原断層, T 渋沢断層
U 泰野断層, V 玄倉断層, W 国府津・松田断層, X 元荒川構造帯, Y 日向岡断層, Z 川音川断層
a 平山断層, b P3断層, c 塩沢断層

図-7 計算に用いた活断層

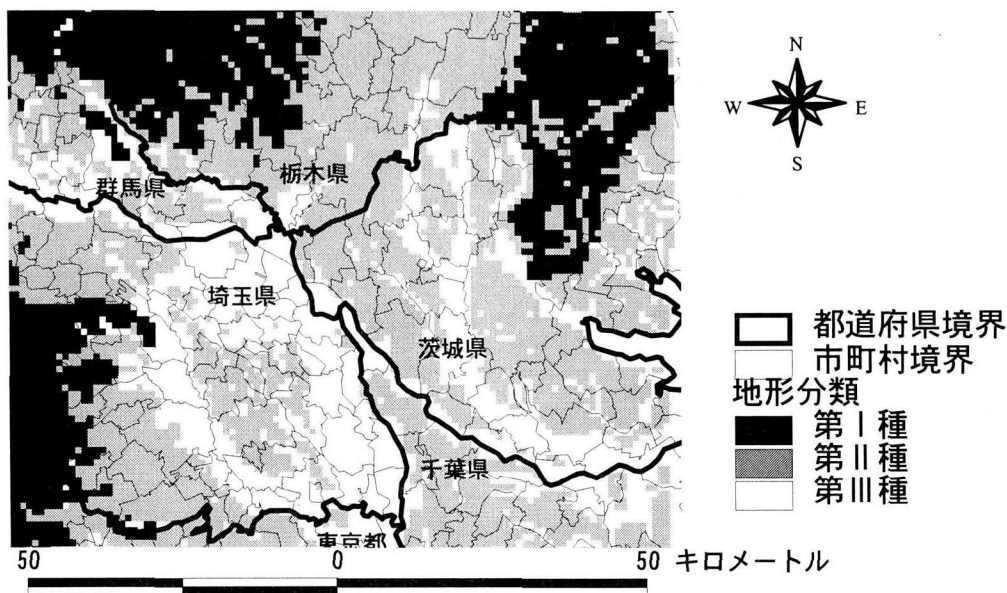


図-8 地形区分図

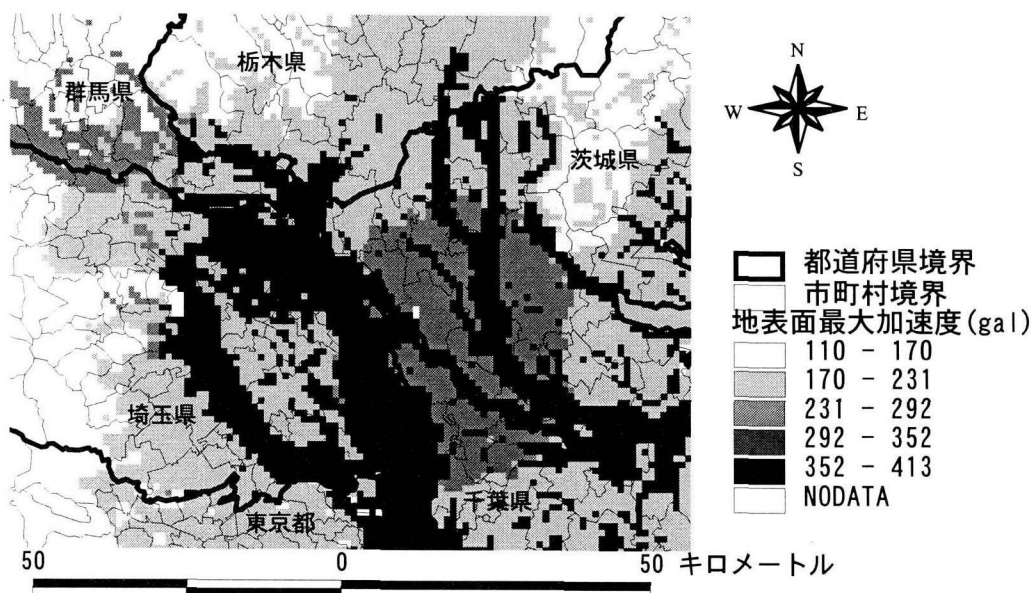


図-9 再現期間 50 年加速度分布図

また、 v_i は活断層の平均変位速度が $s(\text{mm/年})$ 、長さ $L(\text{km})$ の場合、発生率 $v(\alpha)$ は、次式で与えられる。

$$v(\alpha) = \frac{s}{10^{1.9} \cdot L} \quad (22)$$

他方、それ以外の地震については、規模が大きい地震ほど発生頻度が低いという経験からの b 値モデルを用いた。このモデルに必要なパラメータは井上・神田⁹⁾によって求めた値をそのまま用いた。なお、地震加速度に関するアテニュエーション式として、活断層同様式(20)を用いる。なお、用いた地震危険度解析プログラムは McGuire⁹⁾のコードEQRISKを上述の内容に修正したものである。

4.2 解析条件および解析結果

本研究で対象とした地域は関東平野北部地域である。対象地域内およびその周辺に存在する活断層に対し国土庁数値データ活断層に収められ、かつ、その位置・平均変位速度（もしくは活動度）・長さが既知である活断層を計算対象とした。計算対象とした活断層の位置は図4に示す通りである。また、特定の活断層以外の地震域については先の井上・神田⁹⁾のパラメータを用いた。これらのパラメータを用い再現期間 50 年間に對する地震危険度解析を行った。

地表面加速度は、地盤の種別によって異なるので、本

研究では、推定された加速度に対し、地盤種別による補正をおこなった。地盤種別の分別には、国土庁数値データ自然地形メッシュの地形分類を用い、山地・丘陵地を第Ⅰ種、三角州性低地・自然堤防・砂州を第Ⅲ種、その他の地域を第Ⅱ種と定め、第Ⅰ種および第Ⅲ種地盤の場合補正係数を 0.6 および 1.39 とし算出された加速度に乘じた。計算地点は、茨城・栃木・群馬・埼玉・千葉の県境を中心とした東西方向に 114km、南北方向に 102km の領域を 1km 四方に分割した地点である。得られた結果を図-9 に示している。埼玉県東部を中心とした第Ⅲ種地盤で 350gal を超える地域が存在する。ほぼ全体的におよそ 200gal 以上の地域であり、例えば、地盤沈下のような付加的な危険要因が現れる杭基礎については注意が必要である。

5. 累積地盤沈下量の将来予測

5.1 累積地盤沈下量の予測手法

著者ら¹⁰⁾はこれまでに関東平野北部地域における地盤沈下地帯において観測された地盤沈下量データベースを作成するとともに、次式

$$\delta S_i = S_{p0} \{1 - \exp(-C_R \delta t_i)\} \quad (23)$$

を用いた地盤沈下将来予測による予測地盤沈下量データベースを作成した。式(23)において、 δS_i は累積沈下量、 δt_i は経過年数である。上式は、ある地盤沈下観測点において経年的な沈下量が測定されている場合、その観測データからパラメータ S_{p0} と C_R を決定し、将来予測を行うものである。式(23)の誘導の概要は以下の通りである。

地下水位の変動に伴う地盤沈下は、地下水位の低下に伴う有効応力の増加による粘土層の圧密沈下に起因すると仮定すると、この圧密沈下は次式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} \quad (24)$$

の一次元圧密理論式によって支配される。ここで、 u は過剰間隙水圧、 t は時間、 Z は深さ、 c_v は圧密係数である。式(24)の解は圧密度 U として次式で与えられる。

$$U = 1 - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a_n^2} \exp(-a_n^2 T_v) \quad (25)$$

ここで、 $a_n = (2n+1)/2$, $n=0, 1, 2, 3, \dots$ (整数), T_v は時間係数で、 $T_v = c_v(t/H^2)$ で与えられる。今図-10 に示すように地盤沈下における観測開始の時間係数を T_{v0} 、圧密度を U_0 とし、ある観測年度における時間係数と圧密度をそれぞれ T_{vi} 、 U_i とし、両者の圧密度の残差 δU_i をとると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \delta U_i &= U_i - U_0 \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2}{a_n^2} \exp(-a_n^2 T_{v0}) - \frac{2}{a_n^2} \exp(-a_n^2 T_{vi}) \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

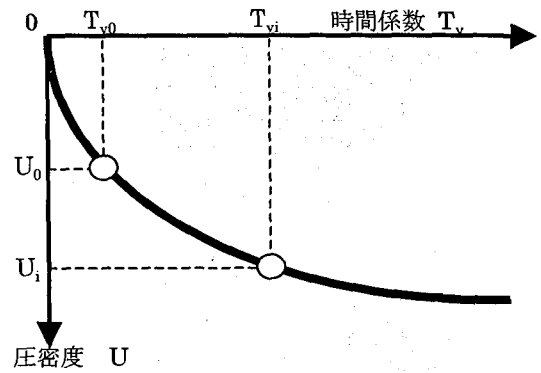


図-10 時間係数と圧密度の関係

ここで、 δU_i ：圧密度の残差、 U_i ：ある観測年度における圧密度、 U_0 ：観測開始の圧密度、 T_{v0} ：観測開始の時間係数、 T_{vi} ：ある観測年度における時間係数である。式(26)において、

$$\delta T_{vi} = T_{vi} - T_{v0} \quad (27)$$

とおき、圧密方程式の解で 2 次以降の固有値の残差を無視すると、式(26)は、

$$\delta U_i = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{T_{v0}}{4}\right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\delta T_{vi}}{4}\right) \right\} \quad (28)$$

となる。ここで、図-10 を参照して、観測開始からある観測年の経過時間を δt_i 、その間の沈下量を δS_i とすると、式(28)は、式(23)に帰着する。ここで、 S_{p0} ：観測開始時における残りの沈下量(但し、一次固有値のみ)、 C_R ：地盤沈下の進行程度を表す定数であり、それぞれ、

$$C_R = \frac{c_v}{4H^2} \quad (29)$$

$$S_{p0} = S_f \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{T_{v0}}{4}\right) \quad (30)$$

と表すことができる。

これら C_R と S_{p0} の求め方は、N 年間の観測結果より、

$$F = \sum_{i=1}^N [\delta S_i - S_{p0} \{1 - \exp(-C_R \delta t_i)\}]^2 \quad (31)$$

式(31)の関数について F を最小化する C_R 、 S_{p0} を求める。つまり、式(31)における非線形最小二乗法によりパラメータ C_R 、 S_{p0} を決定している。

すなわち、式(31)の F が、 $t=t_0$ で極小値をとれば、

$$\left. \frac{\partial F}{\partial t} \right|_{t=t_0} = 0 \quad (32)$$

を満たす。これを満たす点は、 F の停留点(stationary point)と呼ばれ、停留点が極小点かどうかは、2 階以上の偏微分行列によって求まるが、連立非線形方程式(32)の解が求まれば、極小かどうかの判定は困難でない。式(32)によって得られる連立方程式を解くことによって C_R 、 S_{p0} を決めることが出来る。これより観測開始時からの経過年数と

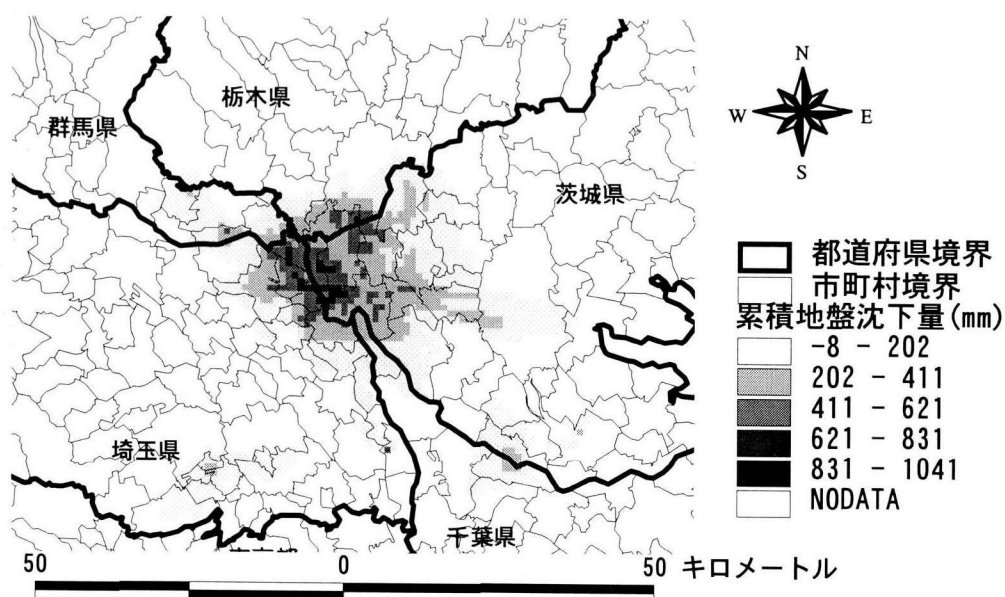


図-11 累積地盤沈下予測地図

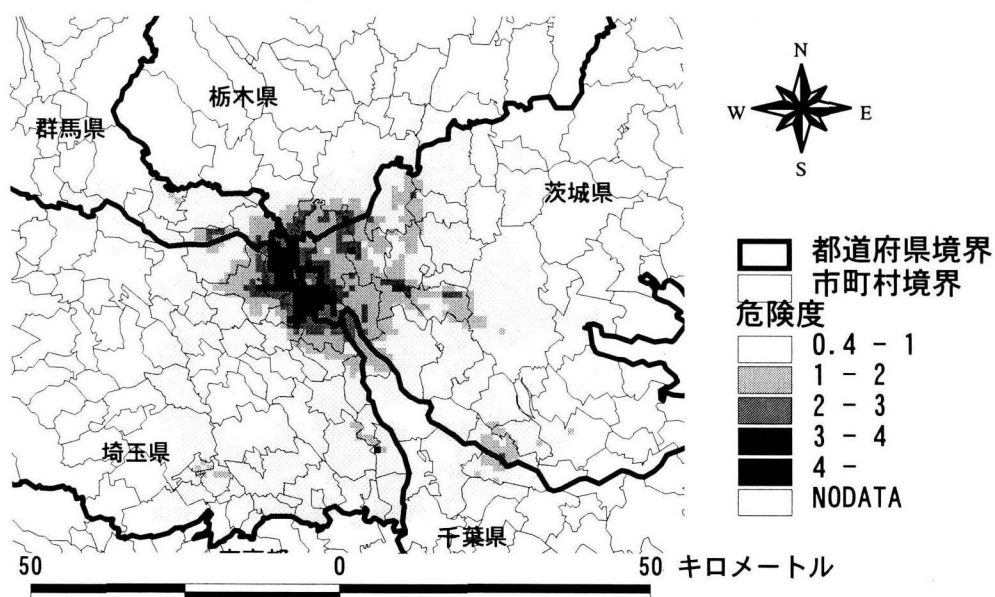


図-12 地盤沈下に伴う杭基礎の地震時危険度分布図

沈下量の 2 つのデータで、今後継続的に同様な地下水の汲み上げが行われた場合の将来的な沈下量を予測することが可能となる。

図-11 は、関東平野北部における約 1,200 地点（図-1 参照）における観測地盤沈下量および上述した沈下予測手法により推定した将来予測地盤沈下量をもとに、1981 年から 2010 年までの 30 年間で各年毎の地盤沈下データベース（1km 四方ラスターデータ）を作成し、それらを GIS を用いて重ね合わせることによって作成した 1981 年から 2010 年までに生じる累積地盤沈下量図である。これによれば、茨城・栃木・埼玉県境付近で多大な沈下が生じることが認められる。関東平野北部地域における地盤沈下

がもたらす杭基礎の危険度分布図を作成するにあたり、ここで算出した累積地盤沈下量を用いる。

5.2 地盤沈下による杭基礎の地震時危険度分布図の作成

上述した地盤沈下がもたらす杭基礎の地震時危険度評価方法を用いて関東平野北部地域における危険度分布図を作成する。評価式におけるパラメータには、 α_i は地震危険度解析により得られた再現期間 50 年間に対する地震加速度を、 s は上述した方法により求めた 1981 年から 2010 年までに生じる累積地盤沈下量を用いた。また、 α は 198gal、 β は比較的軟らかい地盤を想定して 0.2、 n は 2

と仮定して、危険度を算出した。得られた結果を図-12に示している。これより、地盤沈下が顕著に続いている茨城・栃木・埼玉県境付近で杭基礎の地震時危険度が大きくなっていることが分かる。このことから、地盤沈下地帯においては、その被害として建物の傾斜や道路の凹凸、排水不良など顕在的な被害だけでなく、地震を想定した場合には地盤沈下に伴う潜在的な被害が存在することを十分意識した対策が必要であることが分かる。

6. まとめ

本研究では、地盤沈下に伴う杭基礎の地震時危険度評価法を確立するとともに、評価法を関東平野北部地域の地盤沈下地帯に適用した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 地盤沈下をもたらす杭基礎の地震時危険度評価式を誘導した。その結果、定量的に評価する為には、①地震による加速度の推定、②地盤沈下の現状把握と将来予測が必要であることが分かった。
- 2) 関東平野北部地域において発生するであろう地震による加速度の推定を行った。その結果、ほぼ全体的に200gal以上の地域であり、例えば、地盤沈下のような付加的な影響が現れる杭基礎については更に地震時における危険性が増すものと思われる。
- 3) 関東平野北部地域の地盤沈下地帯を対象にGISを用いて地盤沈下をもたらす杭基礎の危険度分布図を作成した。その結果、地盤沈下が激しい地域で大きな危険度を示すことが分かった。

以上の知見から、今後、この地域では地震時危険性の観点から判断しても、個々の杭基礎に対する詳細な安定性の検討が必要であるとともに、このような観点からの地盤沈下防止対策が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり環境庁水質保全局企画課、茨城県公害対策課、消防防災課および企画課、埼玉大学工学部佐藤邦明教授のご協力を頂いた。また、活断層および地形分類、県境界線、市町村境界線の数値データは国土庁計画・調整局国土情報整備室に提供して頂いた。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、茨城県：茨城県地震被害想定調査報告書（概要版）（案），1998。
- 2) 環境庁：地盤沈下対策今後の展開，1996。
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針 6.4 節杭の水平耐力，pp.244-263，1991。
- 4) 土木学会編：地震動と動的特性，pp.41-47，1989。
- 5) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，pp.562-572，1999。

6) 土木学会編：動的解析と耐震設計，第1巻 地震動と動的特性，pp.41-47，1989。

7) Fukushima,Y. and T.Tanaka : A New Attenuation Relation for Peak Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.80, pp.757-783, 1990.

8) 井上超，神田順：プレート境界地震の地震域を考慮した地震危険度解析，日本建築学会構造系論文報告集 第443号，pp.35-43，1993。

9) McGuire,R.K. : Evaluation of Sites for Earthquake Risk(EQRISK) , A Computer Program Distributed by NISEE/Computer Applications, 1976.

10) Murakami, Yasuhara, and Murata: Land Subsidence Prediction Using a Geographical Information System(GIS), Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology, pp.507-512, 1998.

(1999年9月17日受付)