

被災確率モデルを用いた液状化による被害予測

中部大学工学部 正会員 山田 公夫
中部大学工学部 ○正会員 杉井 俊夫
中部大学大学院 学生員 久野 芳房

1. まえがき

近年、液状化地盤中の構造物の挙動に関する研究の必要性が指摘されており、本研究は広域を対象とした液状化と構造物の被害との関係の究明を目的としている。著者らは、これまでにこれらの関係を調べるために、宇野ら^{1, 2)}が堤防評価に提案した被災確率モデルを用い、被害の程度を評価するため複数の判別肢をもつ多項ロジットモデルによる評価法について検討を行った³⁾。しかし、被害の有無と被害の程度を同種の判別肢として評価することの問題を考え、今回は被害の有無と被害の程度にレベル分けした被災確率モデル(2項ロジットモデル⁴⁾)を用いている。新潟地震(1964, M=7.5)時の液状化発生地域である新潟市域を対象として数種の地盤要因をとり挙げ、液状化発生時の構造物の被害規模の評価を試みたのでここに報告する。

2. 被災確率モデルの適用

いま、被害事象*i*の惹起しやすさを表すものとして地盤メッシュ*n*の被害ポテンシャル関数 U_n を仮定する。 $U_n > 0$ のとき被害をうけ、 $U_n < 0$ のとき被害をうけないとする関数である。

$$U_n = V_n (\text{確定項}) + \varepsilon_n (\text{確率項}) \quad (1)$$

ここで、 V_n は得られている地盤情報で説明される被害ポテンシャル関数の確定項を、 ε_n は明らかにされていない要因やデータのばらつきによる誤差を含んだ確率項で、 n 地盤が被害をうける確率 P_n は、

$$P_n = \text{Probability}(U_n > 0) = \text{Prob}(V_n + \varepsilon_n > 0) = \text{Prob}(-\varepsilon_n < V_n) \quad (2)$$

となり、確率項 $-\varepsilon_n$ に Gumbel 分布を仮定すると、次式のロジットモデルが導かれる。

$$P_n = \frac{1}{1 + \exp(-V_n)} \quad (3)$$

確定項 V_n は、様々な形が考えられるが、操作性を勘案して次に示す線形式と仮定している。

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 X_{n1} + \theta_2 X_{n2} + \dots + \theta_k X_{nk} \quad (4)$$

X_{n1} , X_{n2} , ... は地盤メッシュ n の特性要因 (N 値, 地下水位, 震度など) であり、 θ_0 , θ_1 , ... は最尤推定法により決定される未知のパラメータである。なお、モデルの検定には、次の2つの値が用いられる。

- 1) 的中率 (%right または Hit Ratio) 被災確率 50% を基準に的中したデータ数の割合。
- 2) 尤度比 $\rho^2 \dots 1$ に近いほどモデルの適合度がよいが、0.2 ~ 0.4 でも十分高い適合度を持つ。

要因の影響度(感度)を測るには要因の次元の違いにより次の弾性値分析が必要となる。弾性値とは「説明変数の元の値に対する比率とそれがもたらす被説明変数の変化量の比率の比」であり、その絶対値が大きいほど影響度が強いと解釈できる。いま要因 X_{nk} , 被害確率 P_n とする。

$$P_n = f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}, \dots, X_{nk}) \quad (5)$$

また、 X_{ik} が ΔX_{ik} だけ変化したときの P_n の変化量を ΔP_n とすると

$$\Delta P_n = f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk} + \Delta X_{nk}, \dots, X_{nk}) - f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}, \dots, X_{nk}) \quad (6)$$

となり、弾性値 E_{Xk} は次式で定義され、その絶対値が大きい要因ほど影響度が高いことがわかる。

$$E_{Xk} = \frac{\Delta P_n / P_n}{\Delta X_{nk} / X_{nk}} \quad (7)$$

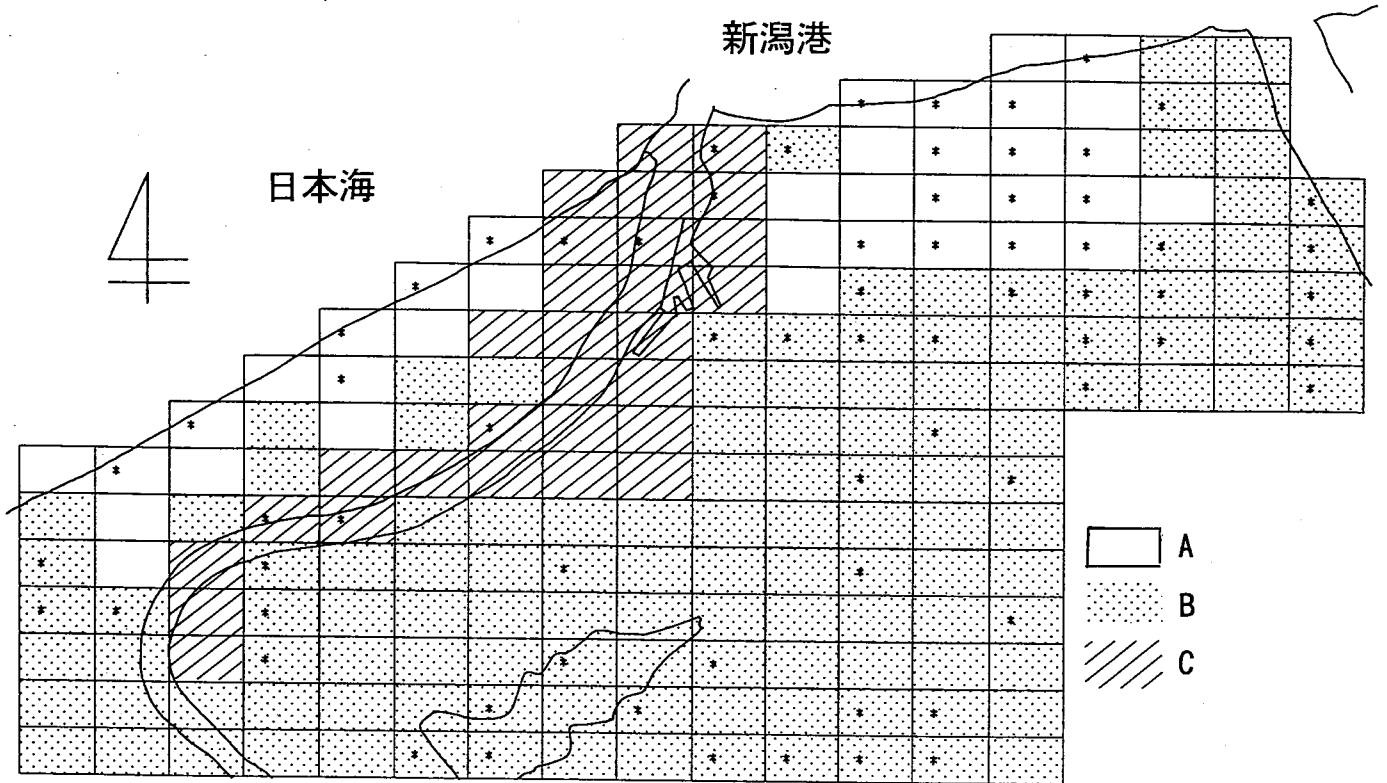


図-1 構造物の傾斜角による被害規模と分割メッシュ⁵⁾

3. 液状化による構造物の被害

新潟地震による新潟市域一帯の液状化発生、非発生地域を記した資料は幾つか見受けられるが、大崎⁵⁾は地盤の液状化によって傾斜した鉄筋コンクリート建造物の傾斜角に基づいて被害規模を次のように整理している。傾斜角が 1° を超える建物が全くなかった地域を「A」、 1° 以上 2.5° 未満の傾斜が生じた地域を「B」、 2.5° 以上傾斜した建物が多数認められた信濃川沿岸一帯を「C」として図-1のように表している。これを基に、図-1に示すメッシュ(600×700m)に分割整理したものを個々の地盤として取扱い、各メッシュごとに地盤データの収集⁶⁾を行った。図-1で*印のないメッシュはボーリングデータが存在していることを示しており、また資料収集上、ボーリングデータが存在しないメッシュ(*印)については、周辺メッシュと縦断面図をもとに仮想断面を作成している。表-1の地盤データは沖積層の上部砂層の基底面までを対象とし、ボーリングデータを有するメッシュのみを用いてモデルの構築を行った。なお、被害「A」を被害がないとみなし第2レベルの評価とし、被害「C」と被害「B」を第1のレベルの判別として図-2のようなツリー構造を設計した。用いた要因データは次の6つである。

【①地下水位】；GLからの深さ(今回全データに地下水が存在している。)

表-1 地盤メッシュ数

	B. D. あり	仮想断面
被害A メッシュ	16	20
被害B メッシュ	86	43
被害C メッシュ	22	7
計	124	70

*B. D. ...ボーリングデータ

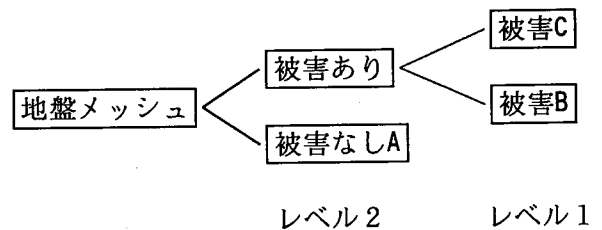


図-2 被害予測のためのツリー構造

なお、被害「A」を被害がないとみなし第2レベルの評価とし、被害「C」と被害「B」を第1のレベルの判別として図-2のようなツリー構造を設計した。用いた要因データは次の6つである。

【②N値】；深さによるN値の影響を考え、式(8)に示すように深さによる重みづけした換算N値を用いた。

$$\text{重みつき換算N値} = \frac{\sum (N_j / L_j)}{\sum (1 / L_j)} \quad (8)$$

ここに L_j はGLからj点の深さ、 N_j は深さj点でのN値である。

【③実効震度】；山田⁷⁾の地盤の周期特性を考慮した実効震度を用い、沖積層に対する提案式を次式に示す。

$$k_e = 0.0115 (\alpha_{\max} / f)^{0.488} \quad (9a)$$

$$k_e = 0.0579 (\alpha_{\max} / f^2)^{0.200} \quad (9b)$$

ここで、 α_{\max} は地表最大加速度、 f は地盤の卓越振動数である。液状化、非液状化地域の震度をメッシュ単位で推定し、これらの式による k_e の大きい方を実効震度とする。

【④地形】；旧河道・河川周辺、埋立地、その他の3パターンに分類した定性データである。

【⑤飽和砂層厚】；基底面までに存在する飽和砂層の合計の厚さ

【⑥地下水の種類】；被圧地下水ならば1、不圧地下水のとき0としたダミー型入力要因。

表-2に示すように6つの要因間には高い相関性は見られず、要因の棄却順位への影響はないといえる。

4. モデルの構築結果と再現性

表-3(a)、(b)にモデルの構築結果であるパラメータ推定値と弾性値を示す。まず、レベル2の構造物の被害の発生について地下水位が深いほど、被害が起きにくく、逆に埋立地の場合、被害を受けやすいことがわかる。一方、飽和砂層厚が大きいほど液状化し易いと考えられるが、被害は発生しにくくなる結果が得られており、飽和砂層厚の定義や被害を構造物の傾斜に限定したことによるものと考えられる。次に、レベル1の被害の大きさとの関係についてみると、実効震度、埋立地、飽和砂層厚はいずれも被害拡大要因であることがいえ、なかでも実効震度が最も影響度の大きいことがわかる。

表-2 要因間の相関係数

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		—	—	—	—	—	—	—
2			-0.150	0.089	0.282	0.057	0.047	-0.038
3				0.074	-0.278	-0.005	-0.252	-0.347
4					-0.011	-0.068	-0.138	-0.062
5						0.115	0.291	0.505
6							-0.147	0.028
7								0.364
8								

解析要因

1. 固有ダミー変数
2. 地下水位
3. 被圧地下水
4. 深さの重み付けをしたN値
5. 実効震度
6. 地形が旧河道
7. 地形が埋立地
8. 飽和砂層厚

Symmetry

図-3は、両モデルの再現結果を示す。

縦軸には被害A、B、Cの確率を横軸には、地盤

表-3(a) モデルの構築結果 (レベル2)

要因	パラメータ θ_k	弾性値 E_{xk}
定数項	4.2510 (4.9640)	—
地下水位	-0.8881 (3.3840)	-1.1961
換算N値	—	—
実効震度	—	—
地形(旧河道)	—	—
地形(埋立地)	1.2797 (1.6428)	0.0832
飽和砂層厚	-0.1810 (2.3260)	-0.8766
地下水の種類 (被圧地下水)	—	—
的中率	87.1%	尤度比 0.57764

()内はt値を示し、—はt検定により棄却

表-3(b) モデルの構築結果 (レベル1)

要因	パラメータ θ_k	弾性値 E_{xk}
定数項	-25.0500 (3.2049)	—
地下水位	—	—
換算N値	—	—
実効震度	129.054 (2.7112)	1.1819
地形(旧河道)	—	—
地形(埋立地)	2.6565 (3.3922)	0.9077
飽和砂層厚	0.2255 (2.5175)	0.0670
地下水の種類 (被圧地下水)	—	—
的中率	88.9%	尤度比 0.66082

()内はt値を示し、—はt検定により棄却

メッシュの番号を左より実際に生じた被害のC, B, Aのグループ順に示してある。なお先の図-2よりわかるようにレベル1のモデルにより算出される確率は条件付き確率であるため、 P_{Bn} , P_{Cn} の確率はレベル1のモデルで算出される確率とレベル2で得られる確率との積で算出している。また、被害Aはレベル1のモデル構築には使用されないため、 P_{Bn} , P_{Cn} は再現確率がない。表-3(a), (b)の的中率や図-3より両モデルは各グループ(判別枝群)の被害状況をうまく再現しているといえよう。

5. モデルによる予測

次に構築された被害評価モデルの適用を試みる。適用した先は、表-2に示した同じ新潟市域であるが、メッシュ内にボーリングデータ(B. D.)がなく、地層縦断図や周辺ボーリングデータを用い仮想地盤断面を作成したメッシュ箇所である。図-4には仮想断面地盤メッシュNo.と被害状況の確率の関係を示している。周辺情報から地盤断面を仮定していることや点データであるボーリングデータで1メッシュ内の情報を与えていることが精度に関して影響していることが考えられるが、被害C群で85.7%, 被害B群で95.3%, 被害A群で25.0%の的中率となり、被害Aで若干の的中率が下がるが、全体として74.3%の高い的中率で被害状況を予測することができた。

6. あとがき

被災確率モデル(2項ロジットモデル)を用いた液化化による被害の予測を試みた結果、被害の発生と被害の程度をレベルを変えて構築したモデルより、被害の発生には地下水位が、被害の程度には実効震度が大きく関与することなど被害の特性を示す要因抽出ができた。また仮想断面への予測の適用では、かなり高い精度で予測が可能であることを示し、両結果から、被害の発生と被害の程度の2つのレベルの評価の有効性を示した。

【参考文献】

- 1) 宇野尚雄・森杉壽芳・杉井俊夫・中野雄治: 被災事例に基づく河川堤防の安定性評価, 土木学会論文集, No. 400/Ⅲ-10, pp. 161-170, 1988.
- 2) 杉井俊夫・宇野尚雄・吉崎: 河川堤防の被災規模の予測, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 365~366, 1994.
- 3) 山田公夫・杉井俊夫・久野芳房: 液化化による被害予測モデル, 土木学会年次学術講演会, 1994.
- 4) 森杉壽芳: 非集計行動モデルの推定と検定, 土木計画学会講習会テキスト, pp. 25-66, 1984.
- 5) Ohsaki, Y.: Niigata Earthquakes, 1964-Building Damage and Soil Condition, Soil Foundation, Vol. 6, No.2, pp. 14~37, 1966.
- 6) 建設省北陸地建・北陸技術事務所: 新潟県平野部の地盤図集, 1981.
- 7) 山田公夫: 想定地震による名古屋市沖積地盤の液化化予測, 土木学会論文集, No. 445/Ⅲ-18, pp. 37~45, 1992.

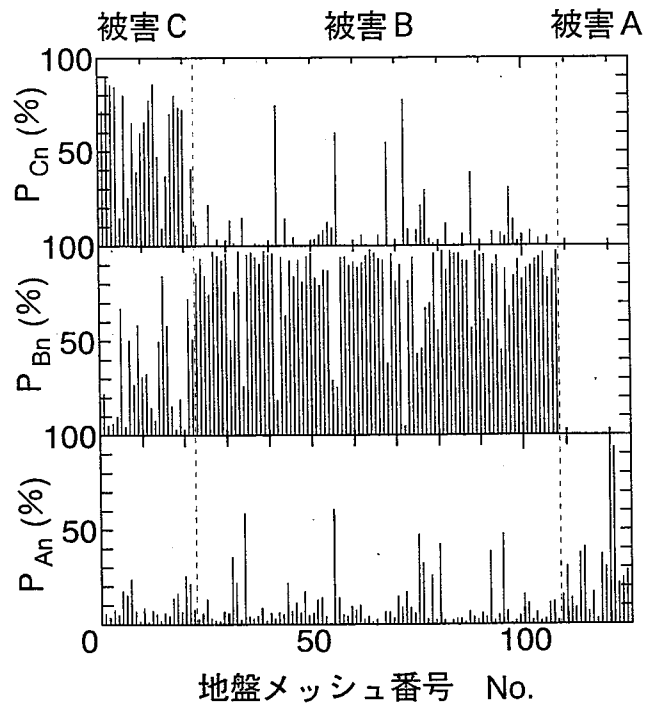


図-3 モデルの再現性

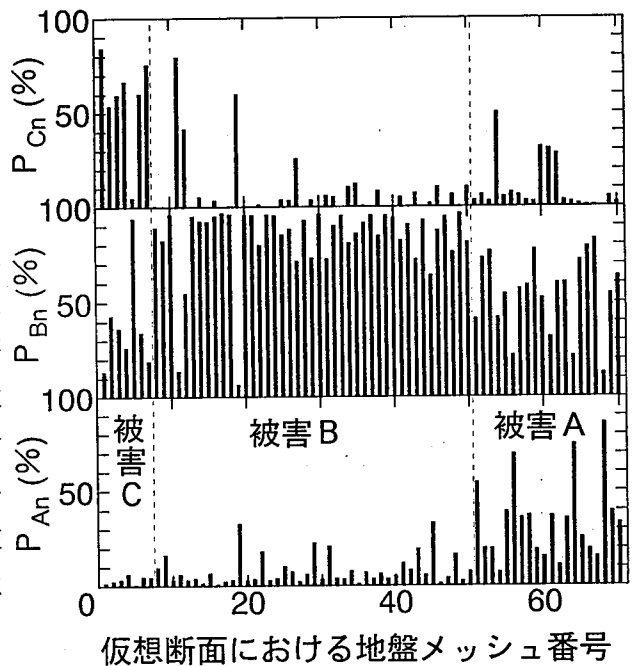


図-4 構築モデルによる予測