

# 側方流動が発生する地盤条件の検討

若松 加寿江<sup>1</sup> 濱田 政則<sup>2</sup> 野勢 辰也<sup>3</sup> 犬塚 真一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京大学研究員 生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

<sup>2</sup>フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>3</sup>学生員 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>4</sup>早稲田大学理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

液状化による流動量を予測する式はいくつか提案されているが、地表面勾配など専門家による測定が必要なパラメータが導入されており、予測式の適用は必ずしも容易ではない。そこで、本研究では1m以上の水平地盤変位を伴う側方流動が発生するか否かを簡便に判定するクライテリアを作成することを目的として、1964年新潟地震の際の液状化発生地域における地盤条件の分析を行った。その結果、1m以上の地盤変位は液状化層厚や液状化層の換算N値との相関が高く、従来、液状化発生の簡易判定に適用されてきたN値と深度(有効上載圧)の関係や、液状化層厚とその上部に存在する非液状化層厚の関係に基づく限界曲線のみから、1m以上の地盤変位発生の有無を判別することは困難であることなどがわかった。

**Key Words:** Liquefaction, Liquefaction-induced ground displacement, Case history, Niigata earthquake

## 1. はじめに

筆者らの研究グループは、既往地震による側方流動の事例分析、液状化土を非線形粘性流体とみなした場合の相似則および模型地盤の流動実験などに基き、傾斜地盤の地表面変位の半経験・半理論予測式を提案している<sup>1)</sup>。この予測式を用いて地表面の水平変位量を予測するには、検討対象地点を通る全長100~200mの領域の地表面勾配、液状化層厚および液状化層の換算N値 $N_1$ の平均値が必要である。液状化層の推定は $F_L$ 法により比較的簡便に行えるが、構造物が密集した市街地などにおいて地表面勾配を正確に測定することは容易ではない。また、道路橋示方書等で液状化の判定対象となる「現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層」が一部でも液状化した場合、全ての緩傾斜地盤で側方流動が発生するか否かの検証はこれまでに行われていない。

そこで、本研究では1m以上の地盤変位を伴う側方流動が発生するか否かを簡便に判定するクライテリアを作成することを目的として、1964年新潟地震の液状化発生地域における地盤条件の分析を行った。

## 2. 検討対象地域と液状化層の推定

検討対象地域は、新潟地震で液状化が発生した信濃川下流域のうち、これまでに地盤変位の測定が行われている地域全域<sup>2)</sup>および今回新たに地盤変位の測定を行った地域である(図-1)。護岸移動の影響で

側方流動が発生したと推定される護岸から200m以内の地域は除外した。また、信濃川河口より東方の通船川流域については、地盤変位の測定精度が $\pm 99\text{cm}$ と、信濃川流域の測定精度( $\pm 76\text{cm}$ )に比べてやや低い<sup>3)</sup>ため、今回の検討対象から除外した。この地域における既存のボーリング約100地点(地震前と後の両方のデータを含む)を、新潟地震の際の地盤災害図<sup>3)</sup>と地盤変位ベクトル図を参照して以下の5タイプに分類した。①噴砂が発生し、かつ地表面の水平変位量が1m以上であった地点、②噴砂は発生しなかったが、変位量が1m以上の地点、③噴砂

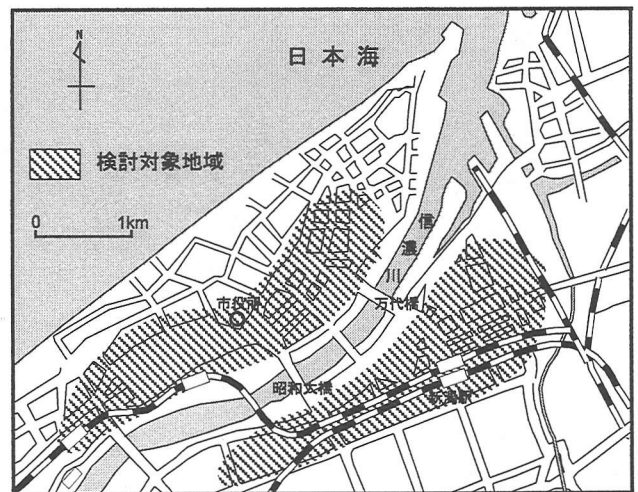


図-1 検討対象地域

が発生したが、変位量が1m未満の地点、④噴砂は発生せず、変位量が1m未満の地点(周辺では噴砂が発生)、⑤噴砂は発生せず、水平変位量が1m未満の地点(周辺でも噴砂などは発生せず)。全地点について、道路橋示方書1996年度版により水平震度 0.17, 0.2, 0.25, 0.3の4ケース(タイプ I 地震動)の液状化に対する抵抗率 $F_L$ を算定した。その結果、水平震度が0.2の時に $F_L \leq 1$ となる砂質土層を液状化層とすると、全地点の噴砂発生の有無を最もよく説明できたため、本研究では水平震度が0.2の時に $F_L \leq 1$ となる砂質土層を液状化層とみなした。

図-2に、各地点の液状化層の推定結果を、前述の①～⑤の地盤変位のタイプ別に示す。①の噴砂と1m以上の地盤変位の両方が発生した地点では、推定液状化層厚が10m前後と大きく、その上部の非液状化層厚は大部分が2m程度以下と小さい。②の噴砂はなかったにもかかわらず1m以上の変位が観測された地点では、液状化層厚は①と同様大きい、その上部の非液状化層厚が①に比べて大きくなっている。③と④の変位量が1m未満の地点では、液状化層厚が①②に比べて小さく、複数層に分かれている(非液状化層との互層)地点が多くなっている。しかしながら、表層の非液状化層厚については、噴砂が発生した③と、発生しなかった④の間には明瞭な差は認められない。⑤の噴砂と1m以上の地盤変位が共に発生せず、周辺でも噴砂など液状化の影響が認められなかった地点では、液状化層厚が2～3m以下か、もしくは5m以上の液状化層が存在するが液状化層上部の非液状化層も5m以上と大きい、のいずれかである。

表-1 変位発生タイプごとの地盤変位量の範囲、液状化層の厚さ $H$ 、換算N値 $N_1$ 、液状化抵抗率 $F_L$ の平均値

タイプ	データ数	地盤変位(m)	$H$ (m)	$N_1$ 値	$\sqrt{H/N_1}$	$F_L$
①	38	1.0～3.3	12.29	10.85	0.33	0.73
②	15	1.0～2.5	10.22	9.89	0.33	0.76
③	12	1m未満	7.46	11.71	0.26	0.75
④	19	1m未満	6.85	11.76	0.22	0.78
⑤	18	1m未満	5.86	11.60	0.20	0.80

### 3. N値と有効上載圧の関係

図-3に前述の①～⑤タイプにおける飽和砂質土層のN値と有効上載圧の関係を示す。1m以上の地盤変位が発生した①,②の地点におけるN値は全般に小さいのに対して、変位が1m未満の③,④の地点におけるN値は①,②よりやや大きくなっている。⑤のN値は、③,④よりさらに大きくなっている。また図-3には、石原<sup>9)</sup>が既往地震による事例等を基に導いた流動が発生するための限界N値(細粒分30%以下の砂質土)を併せて示す。1m以上の地盤変位が発生した①,②の地点におけるN値は、この限界N値を越えているデータが多数ある。以上より、N値と有効上載圧の関係を用いて1m以上の地盤変位発生の有無をある程度は判別することはできるものの、明確なクライテリアとは言えないようである。

表-1は、前述の5タイプの地点における地盤変位量、液状化層厚の平均値 $H$ 、有効上載圧 $1\text{kgf/cm}^2$ ( $98.1\text{kPa}$ )相当に換算した液状化層のN値の平均値 $N_1$ 、液状化層の $F_L$ の平均値を示す。 $H$ は、1m以上の地盤変位が発生したタイプ①②では10m前後と、変位が1m未満の③～⑤に比べて大きくなっている。 $N_1$ と $F_L$ については、①②の方が③～⑤に比べて幾分か小さめとなっているが顕著な違いは認められない。

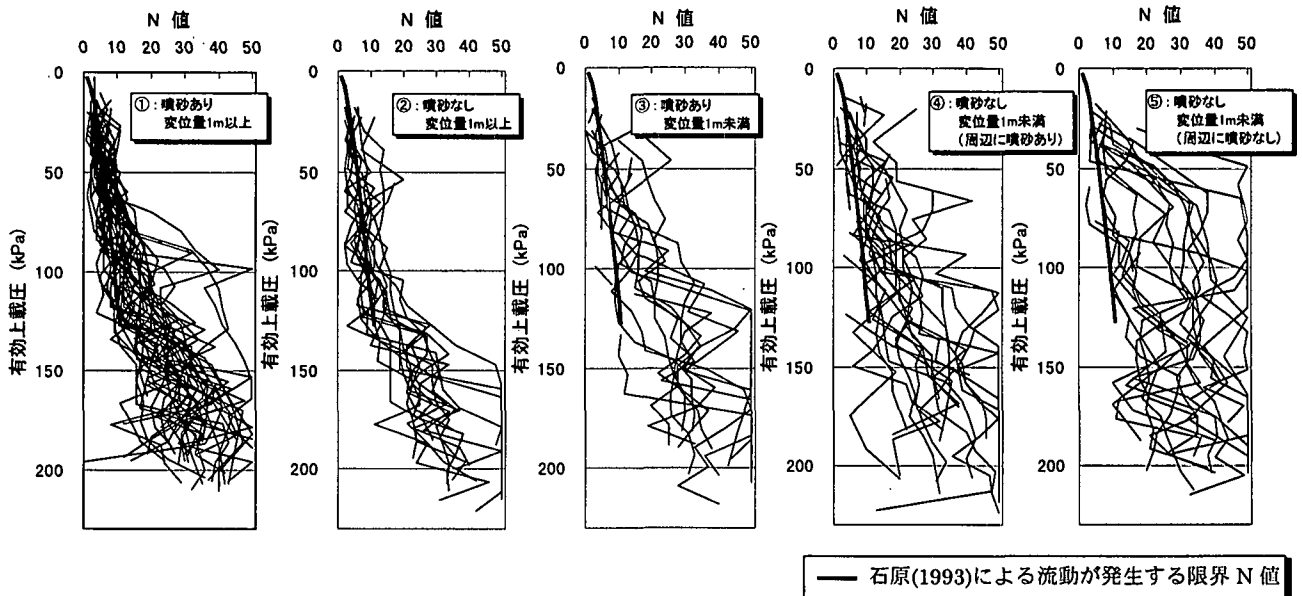


図-3 N値と有効上載圧の関係

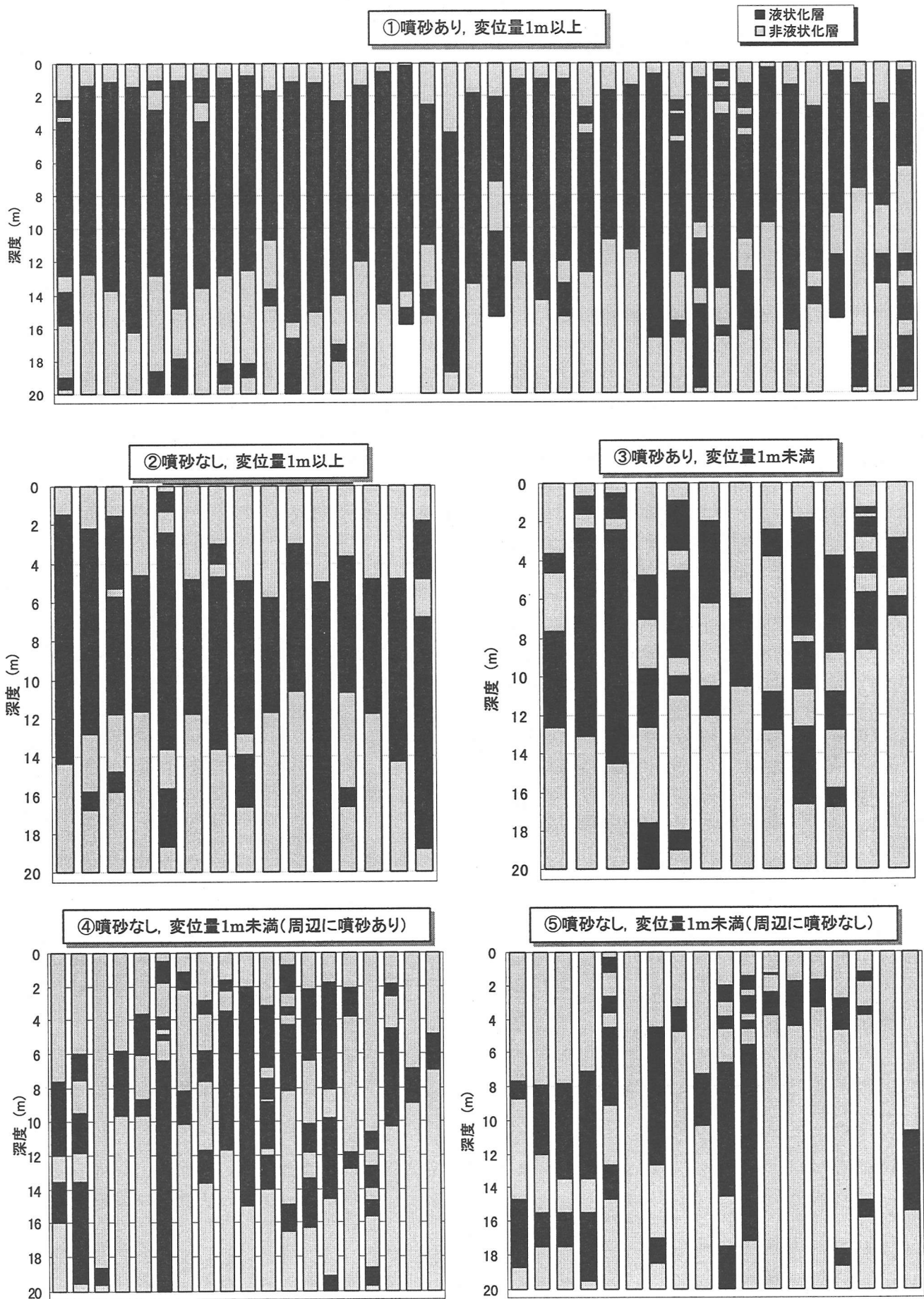
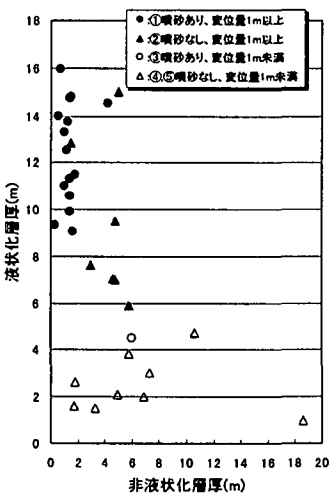


図-2 液状化層と非液状化層の深度分布

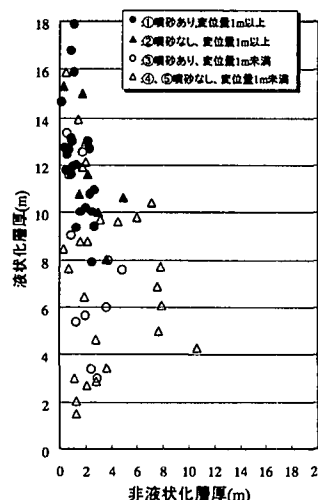
筆者らによるこれまでの研究)によれば、傾斜地盤の地表面の水平変位量は地表面勾配、液状化層厚  $H$  の1/2乗に比例し、液状化層の平均換算  $N$  値  $N_1$  (相対密度) に反比例するという結論が得られている。そこで、検討対象地点における地表面勾配は概ね 0.5% 程度と推定されることから勾配の違いは無視し、①~⑤について  $\sqrt{H}/N_1$  の平均値を算定した。この結果も併せて表-1に示すが、1m以上の地盤変位が発生したタイプ①②の地点と③~⑤の地点では、 $\sqrt{H}/N_1$  に差異が認められる。

#### 4. 液状化層厚と表層の非液状化層厚の関係

液状化の影響が地表に現れるか否かを簡便に判定する方法として、液状化の可能性のある土の層厚(以下、液状化層厚と略記する)とその上部にある液状化しない土の層厚(以下、非液状化層厚と略記する)の関係に基づく限界曲線が石原により提案されている<sup>6)</sup>。この限界曲線が側方流動による地盤変位発生 の判定にも適用可能であるか否かを調べるために、前述の102地点を液状化層厚と非液状化層厚の関係を用いて整理した。その結果を図-4に示す。全102地点のうち液状化層が1層の場合は34地点のみで、残りは液状化層が2~4層に分かれているため、図-4では(a)液状化層が1層の場合と(b)液状化層が複数ある場合に分けて整理し、後者の液状化層厚は複数の層厚の合計を用いた。図-4(a)を見ると、噴砂発生の有無に関しては非液状化層厚の影響が認められるが、1m以上の地盤変位発生の有無は、液状化層厚が6mを境に分かれ、非液状化層厚の影響は不明確である。図-4(b)の液状化層が複数の場合は(a)の場合と異なり、液状化層の合計が8m以上にならないと1m以上の地盤変位が発生していない。しかも8m以上であっても変位量が1m未満の地点も多数認められる。



(a) 液状化層が1層



(b) 液状化層が複数

図-4 液状化層厚と表層の非液状化層厚の関係

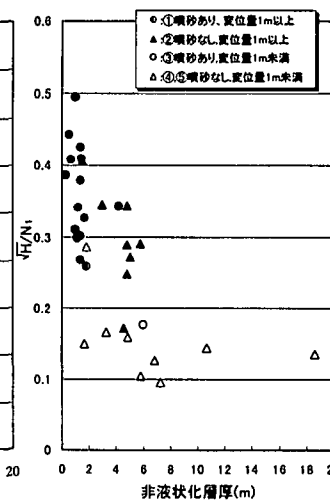
次に、前述の  $\sqrt{H}/N_1$  を用いて整理してみた結果を図-5(a)(b)に示す。  $\sqrt{H}/N_1$  を用いた場合は、液状化層が1層、複数に関わらず  $\sqrt{H}/N_1$  が0.25程度を境にして、1m以上の地盤変位発生の有無が概ね区別される。しかしながら、この場合も  $\sqrt{H}/N_1$  が0.25以上であっても変位が1m未満の地点が多くあり、液状化層が複数ある場合は、1層の場合と区別して取り扱う必要があることを示唆している。

#### 5. まとめ

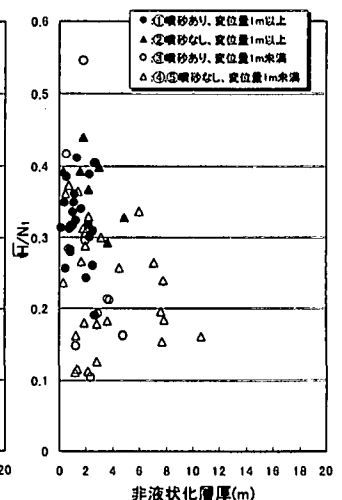
新潟地震の際に1m以上の地盤変位が発生した地盤条件について、既存のボーリング資料を用いて分析を行った。その結果、1m以上の地盤変位発生の有無は、液状化層厚や  $\sqrt{H}/N_1$  に強く依存し、 $N$  値と有効上載圧の関係や、液状化層とその上部の非液状化層の関係のみから判別することは困難であることがわかった。今後は、1983年日本海中部地震等による側方流動の事例についても、本研究と同様な分析を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 濱田・若松：液状化による地盤の水平変位の研究，土木学会論文集 No.596/III-43, pp.189-208, 1998.6)
- 2) Hamada, M. and O'Rourke, T.D. (Eds.): *Case study of liquefaction and lifeline performance during past earthquake, Vol. 1 Japanese case studies*, Technical Report NCEER-92-001, 1992.
- 3) 新潟大学理学部地質鉱物学教室：新潟地震地盤災害図, 1964.
- 4) 建設省国土地理院：新潟地震一被災状況と土地条件一, 1965.
- 5) Ishihara, K.: Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique* 43, No. 3, pp.349-415, 1993.
- 6) Ishihara, K.: Stability of natural deposits during earthquake, Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp.321-376, 1985.



(a) 液状化層が1層



(b) 液状化層が複数

図-5  $\sqrt{H}/N_1$  と液状化層上部の非液状化層厚の関係