

新潟市中央部の液状化判定

鈴木正喜*・青木克樹*・山本 毅*・古俣 薫*

1. はじめに

新潟県内では、今年7月16日に発生した中越沖地震を初め、平成16年10月23日の中越地震、昭和39年の新潟地震では、液状化が発生し、構造物に対して甚大な損害を及ぼした。

液状化は、一般に地下水以下の緩い締まり具合の砂質土で発生する。新潟地区では、地下水位が浅層部にあり、緩い締まり具合の砂質土が堆積している地域があることが既存資料等で知られている。

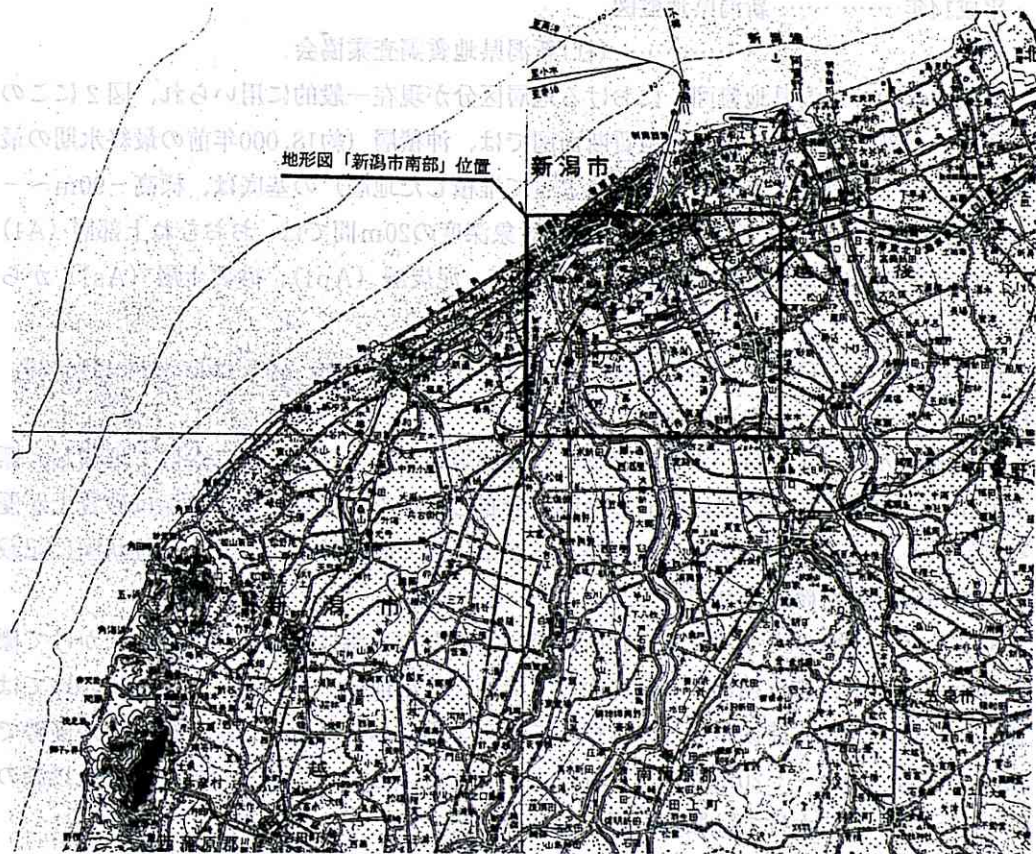


図1 液状化判定位置図

ここでは、『25,000分の1地形図、新潟南部』で、南北にA～Oの15段、東西に1～20の20列に区分し、この300ブロック毎に任意に抽出したボーリング既存資料(1ブロック1資料)を基に幾つかの仮定条件を与えて検討した(図に示す区分は、ブロック内の1資料の結果であり、ブロック全体を表しているものでない)。

*株式会社新研基礎コンサルタント

2. 新潟地区の地盤状況

新潟地区の地盤については、これまでに種々な機関でとりまとめられている。

- ・ 昭和42年……………都市地盤調査報告書第16巻、新潟地区の地盤
……………建設省計画局、新潟県編
- ・ 昭和49年……………新潟県建築地盤図集
……………(社)新潟県建築士会(社)日本建築学会北陸支部
- ・ 昭和56年……………新潟県平野部の地盤図集
……………建設省北陸地方建設局北陸技術事務所
……………(社)北陸建設弘済会
- ・ 平成12年……………新潟県地質図(2,000年版)
……………新潟県
- ・ 平成14年……………新潟県地盤図
……………(社)新潟県地質調査業協会

平成14年の「新潟県地盤図」における地層区分が現在一般的に用いられ、図2にこの一段面の一部を添付する。図2地質断面図では、沖積層(約18,000年前の最終氷期の最大海水準低下時以降、海水準の上昇によって堆積した地層)の基底は、標高-90m~-140mで西側に向かって深くなる。液状化対象深度の20m間では、おおむね上部層(A1)(5,000年前以降の堆積物)で粘性土層(Ac1)、泥炭層(Ap1)、砂質土層(As1)からなる。

図3はA-4~O-4、図4はA-16~O-16の南北断面、図5はD-1~D-20、図6はL-1~K-20の東西断面である。

南北断面のA-4~O-4断面では、砂丘砂層はA-4~C-4にかけて堆積し、標高0m~-10mを波打つ様に軟弱な地盤が分布している。標高-10m以深は砂質土が優勢で、A-4~E-4にかけては、標高-20m以深で微細砂とボーリング柱状図に記載された海成砂層が確認されている。

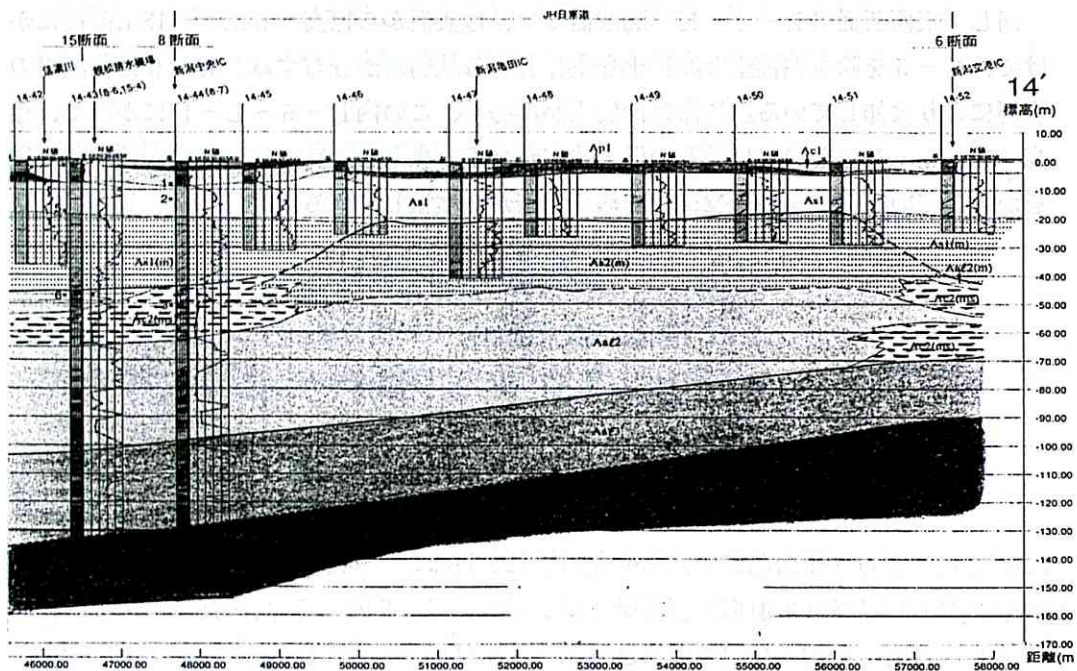
同じく南北断面のA-16~O-16断面では、軟弱な地盤はA-16~F-16にかけて標高0m~-2m、G-16~J-16にかけて標高-5m前後、L-16~O-16にかけては標高-10m~-13m前後の3段に堆積しているようにみられる。以深は砂質土が優勢である。標高-10m~-20m間では、細礫、浮石を混入している。また標高-20m以深のA-16~J-16にかけては微細砂層が確認されている。

東西断面のD-1~D-20断面では、砂丘砂層が標高0m前後にD-1~D-2にかけて堆積している。D-3~D-20の地表面から標高-3mないし-5m付近までは、D-4、D-11、D-17、D-18を除き、粘性土と腐植土を堆積している。D-4は信濃川、D-11、D-17、D-18は内陸砂丘帯により欠如し、これ以深は砂質土が優勢である。標高-10m~-20m前後ではD-9~D-18で浮石の混入、挟在があり、D-15~D-20で粗砂、細礫の混入がある。また標高-20m前後以深では微細砂層が確認され

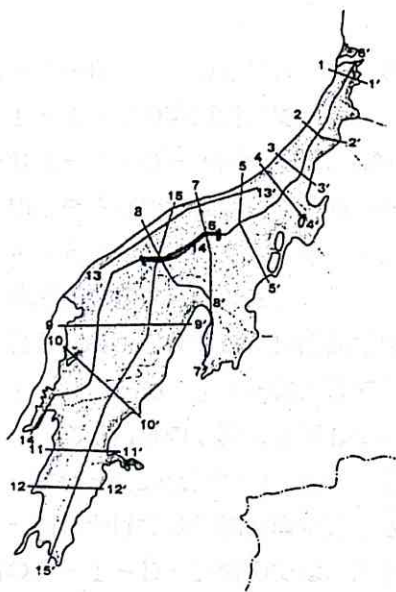
ている。

同じく東西断面のL-1～K-20断面では、地表面から標高-5m～-15m前後にかけて、L-5を除き粘性土と腐植土を主体とする軟弱層が分布する。L-5は信濃川の影響により欠如している。以深は砂質土が優勢で、この内L-5～L-16にかけて、標高-10m～-20m前後では浮石の混入挟在がある。またL-16～K-20にかけては細礫を混入している。微細砂層は、標高約-23mから堆積している。

14-14' 断面 (和島一分水一巻一阿賀野川)



凡 例



地質断面線位置図

図 2 地質断面図

新潟県地盤図編集委員会編、
2002：新潟県地盤図より引用

地質年代	地層区分	記号			
第 四 世 紀	完 新 世	沖 積 層	堆積堆積物	di	
		上 部 層 A1	底質(△F層)	Ac0	
			砂丘砂層	Asd	
			粘性土層	Ac1	
		中 部 層 A2	泥炭層	Ap1	
			砂質土層	As1	
			海成砂層	AsF(m)	
			砂質土層の互層	AaF1	
			砂礫層	As2	
			海成シルト層	Ac2(m)	
	海成粘土層		Ac2(mc)		
	下 部 層 A3	泥炭層	Ap2		
		砂質土層	As2		
		海成砂層	As2(m)		
	更 新 世	更 新 統	砂質土層の互層	AaF2	
			砂礫層	As2	
			砂礫層	As2	
		新 統	(最終更新期)	粘性土層	Ac3
				砂質土層	As3
				砂質土層の互層	AaF3
砂礫層				As3	
礫層				Pg1	
粘性土層				Bc1	
泥炭層				Ap1	
新 統	(中部更新期)	砂質土層	As1		
		砂質土層の互層	AaF1		
		古砂丘砂層	Asd		
		泥岩	Pr4		
更 新 統	下 部 更 新 統	礫岩・砂岩	Pg2		
		泥岩	Pr3		
新 第三 紀	鮮新統 ~ 中新統	礫岩・砂岩	Pg3		
		砂岩、泥岩、火砕岩等	P		

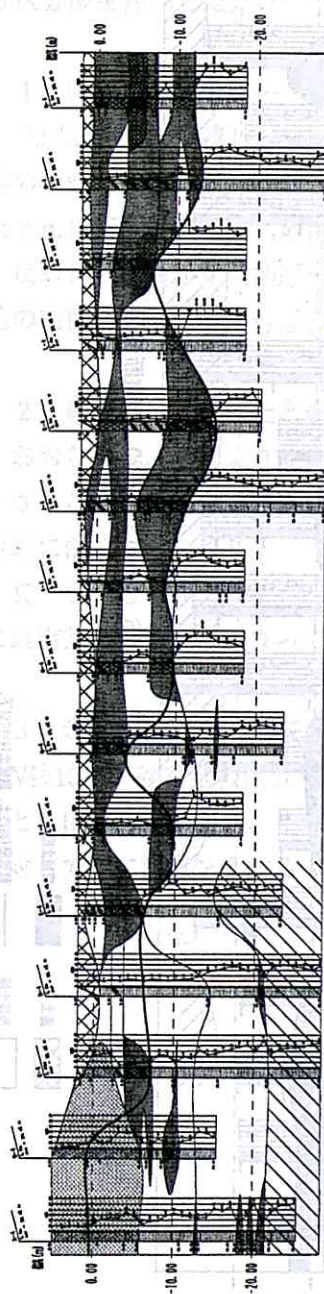


図3 A-4~O-4 地盤断面図

- 盛土
- 砂丘砂層
- 砂質土層
- 粘性土層
- 腐植土層
- 軟弱層 (粘性土、礫質土N≦4以下、
砂質土N≦10以下のライン)
- ボーリング孔で微細砂層としている砂層

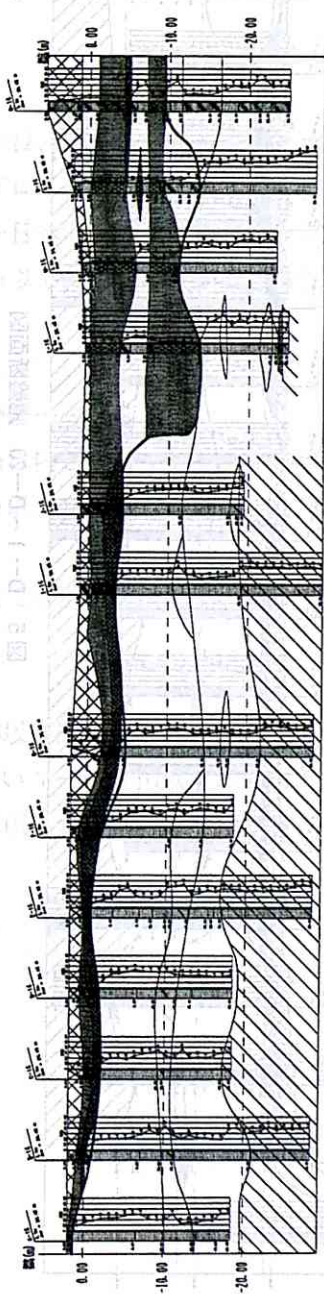


図4 A-16~O-16 地盤断面図

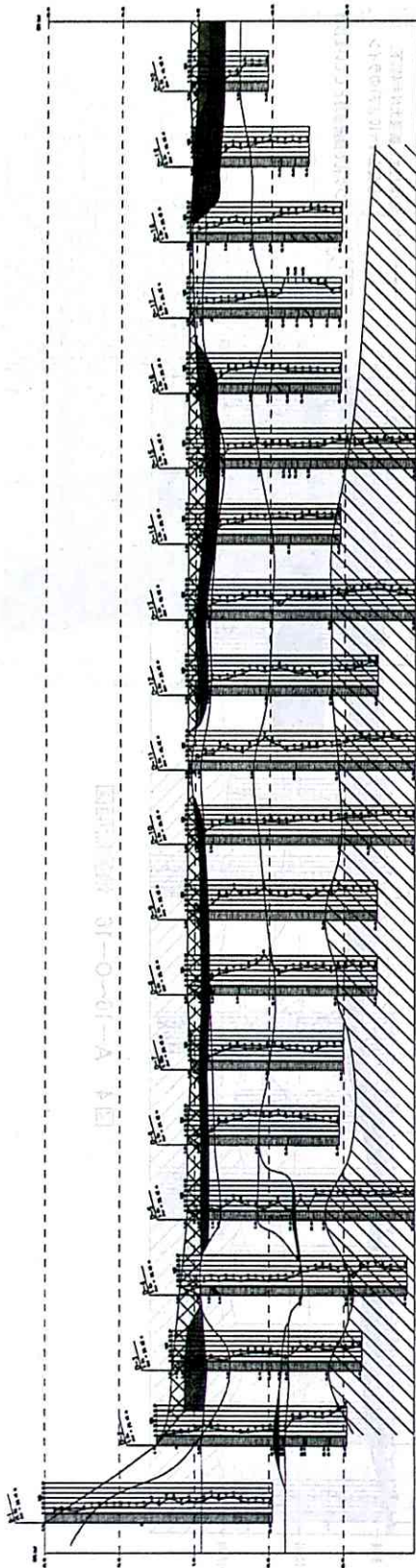


図5 D-1～D-20 地盤断面図

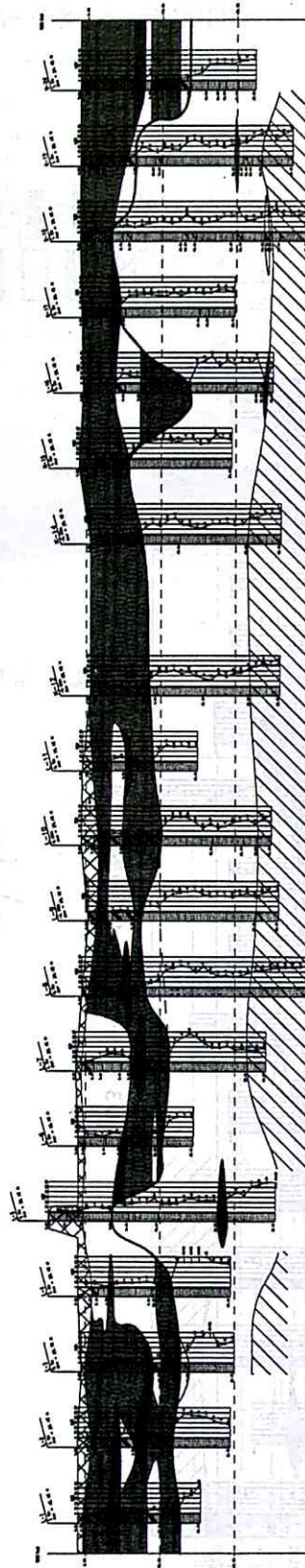


図6 L-1～K-20 地盤断面図

- | | | | |
|--|------|--|------------------------------------|
| | 盛土 | | 硬地土層 |
| | 砂質土層 | | 軟弱層(粘性土、礫土N=4以下、
砂質土N=10以下のライン) |
| | 粘性土層 | | ポーリング孔で微細砂層としている砂層 |

3. 軟弱層の分布

軟弱層にはいくつかの定義の仕方があるが、ここでは土質と N 値との関係より、粘性土と腐植土で N 値が4以下、砂質土で N 値が10以下とした。また液状化の危険性が高いといわれている深度20m以浅の飽和土で N 値が15以下の砂質土についてとりあげ、

- ・軟弱層厚区分図……………図7
- ・軟弱層の内粘性土と腐植土の層厚区分図……………図8
- ・深度20m以浅で地下水位下の N 値が15以下砂質土の回数区分図 ……図9

の3区分図を作成した。

3. 1 軟弱層厚区分図……………図7

軟弱層が全く堆積していない箇所は、A-17、B-2、C-3の3ブロックで、全体の1%、2m以下の比較的薄い箇所も16ブロックと、全体の約5%に過ぎない。また4m以下では、信濃川の南側と鳥屋野渦～日本海東北道に囲まれた範囲に集中する。

反対に軟弱層が比較的厚い8～10mと10m以上の箇所は、信濃川の両岸と亀田市街地の南側、小阿賀野川付近に集中している。

3. 2 軟弱層の内粘性土と腐植土の層厚区分図……………図8

おおむねD、E列より北側では層厚が2m以内と薄いブロックが多い。A-5、A-6とこの周辺部では、軟弱層の厚さは8m以上であるが、粘性土、腐植土の層厚は極端に薄くなる。

H-8～G-8、H-13～K-20より南側では層厚5m以上のブロックが多く、特に最南部のO列では際立っている。

3. 3 深度20m以浅で地下水位下の N 値が15以下砂質土の回数区分図……………図9

N 値15以下砂質土の区分図では、回数の多い6～9、10以上の分布は、信濃川の両岸と亀田市街地の南側、小阿賀野川の周辺に限られる。これらのブロックは、液状化に対して特に注意を要する。

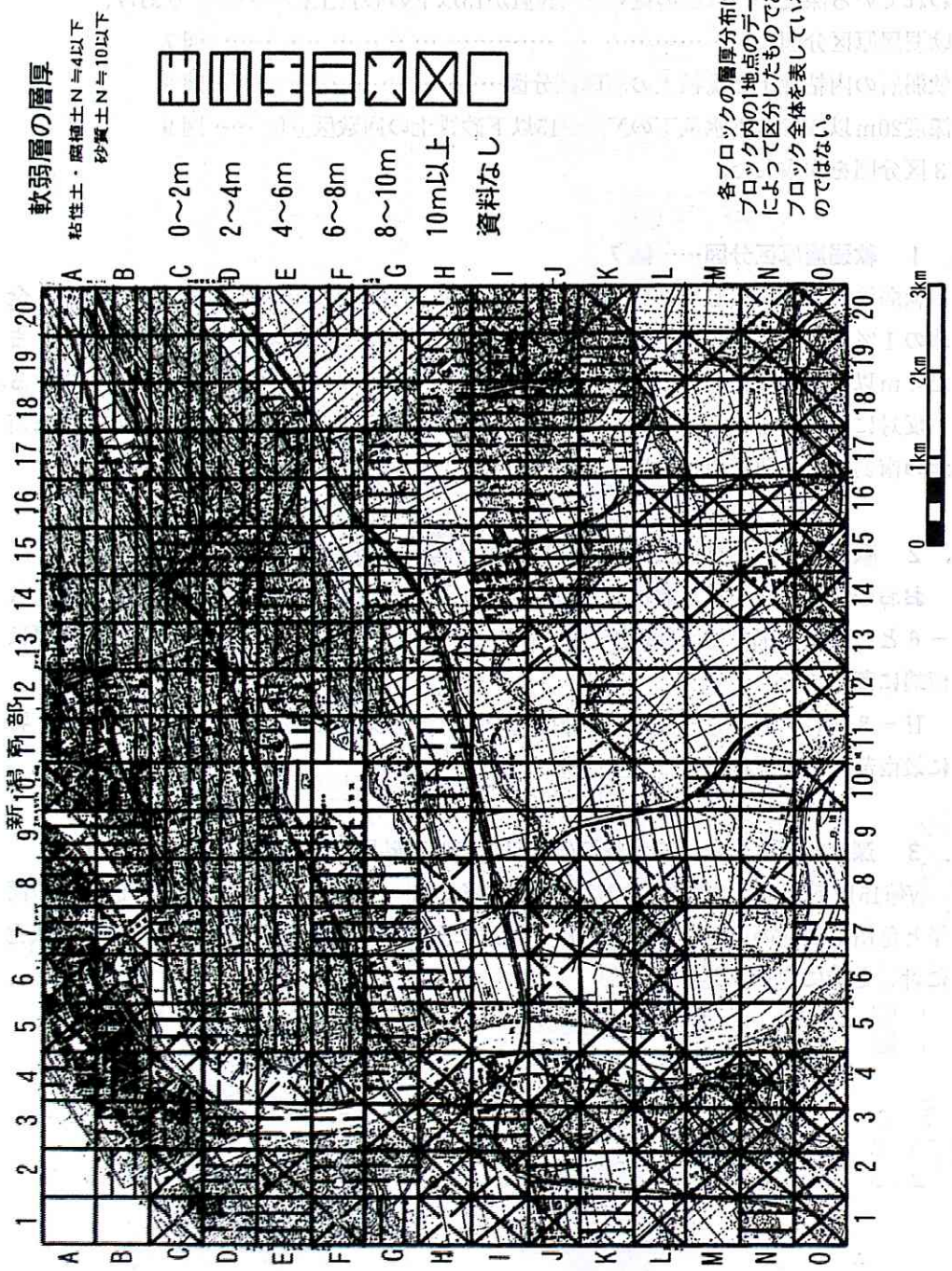


図7 软弱層の分布図

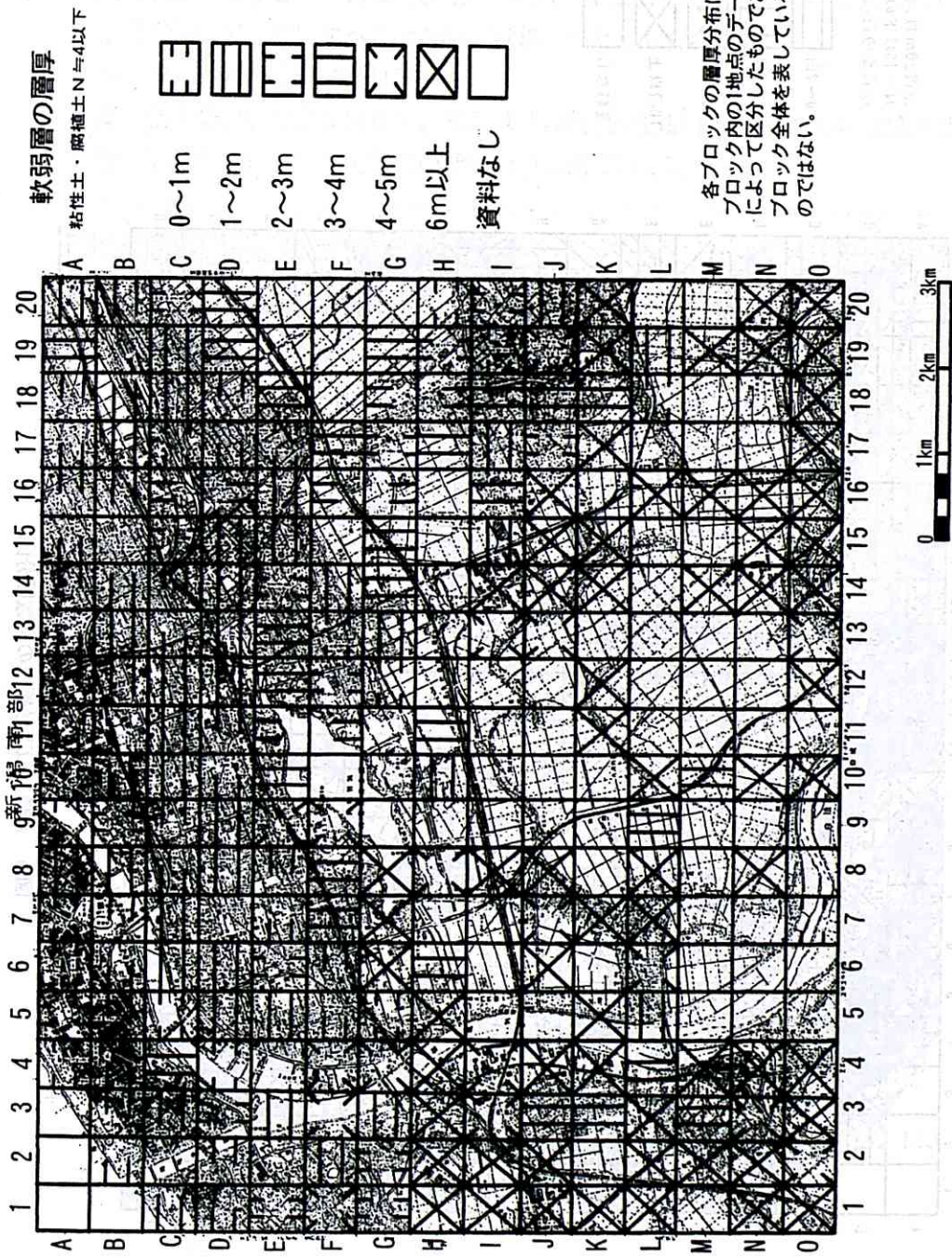


図8 軟弱層の内腐植土・粘性土の分布図

新潟 南部

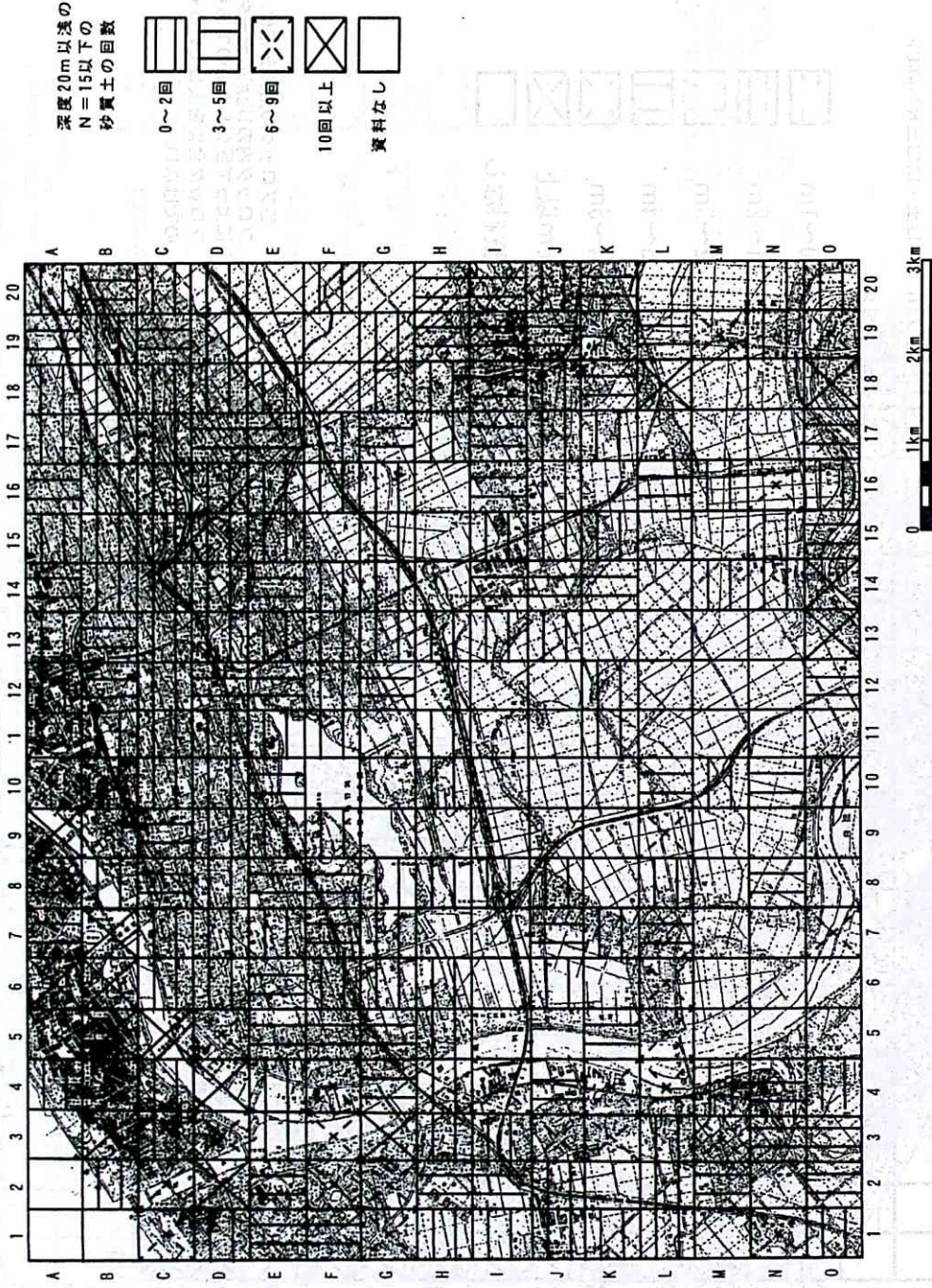


図9 N値15以下砂質土の回数区分図

4. 液状化の判定

4.1 液状化を考慮すべき土の種類

地盤が液状化すると、構造物の崩壊、沈下、傾斜等を引き起こす可能性がある。液状化の判定を行う必要がある飽和土層（地下水位以下の土層）は、一般に地表面から20m程度以浅で、考慮すべき土の種類は以下のとおりである。

- ① 細粒土含有率が35%以下の土
- ② 粘土分含有率が10%以下、または塑性指数が15以下の埋立あるいは盛土地盤
- ③ 細粒土を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫

〈土質名と塑性指数〉

土質名は、土粒子の径によって区分されている。

	粘土	シルト	砂	礫	(石)
径(mm)	0.005	0.075	2.0	(75.0)	

粘土、シルトを合わせて細粒土、砂、礫を合わせて粗粒土と呼んでいる。

塑性指数 (I_p) は液状化限界 (w_L) から塑性限界 (w_P) を引いた値、塑性状態を示す指数。

土は含水比の違いにより状態が異なる。含水比が十分に高いと流動化し、液体と同様な性質を示す液性状態となり、含水比が低下すると力を加えた後の変形が残留する塑性状態に変わる。さらに含水比が低下するとろい半固体の状態を経て含水比が減少しても体積が変化しない固体の状態になる。

固体	半固体	塑性体	液体
	収縮限界	塑性限界	液性限界
	(w_s)	(w_P)	(w_L)

試験方法
JIS A 1205

4.2 各地点各深さにおける安全率 F_L の算定

各深さにおける液状化発生に対する安全率 F_L を次式により算定する。これは、日本建築学会：建築基礎構造設計指針；2001改訂による。

$$F_L = \frac{\frac{\tau_d}{\sigma_z'}}{\frac{\tau_d}{\tau_d}} = \frac{\tau_d}{\tau_d}$$

F_L 値が1より大きくなる土層については、液状化の可能性はないものと判断し、逆に1以下となる場合は、その可能性があり、値が小さくなるほどその土層の液状化発生危険度は高いと判定する。

(1) 繰返しせん断応力比

$$\frac{\tau_d}{\sigma_z'} = \gamma_n \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_z'} \cdot \gamma_d$$

τ_d : 水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (N/m²)

σ_z' : 検討深さにおける有効土被り圧 (鉛直有効応力) (N/m²)

γ_n : 等価な繰返し回数に関する補正係数

($\gamma_n = 0.1(M - 1)$ ただし、 M は地震のマグニチュードを示す)

a_{max} : 地表面における設計用水平加速度 (m/s²)

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

σ_z : 検討深さにおける全土被り圧 (鉛直全応力) (N/m²)

γ_d : 地盤が剛体でないことによる低減係数

($\gamma_d = 1 - 0.015Z$ ただし Z は地表面からの検討深さ (m) を示す)

$$\sigma_z = \gamma \times Z$$

γ : 土の単位体積重量 (N/m³)

σ_z' は地下水位以下は ($\gamma - 1.0$) として考える。

(2) 液状化抵抗比

τ_d / σ_z' は補正 N 値と液状化抵抗、動的せん断ひずみの関係のせん断ひずみ振幅5%曲線を用いて、補正 N 値 (N_d) に対応する飽和土層の液状化抵抗比を求める。

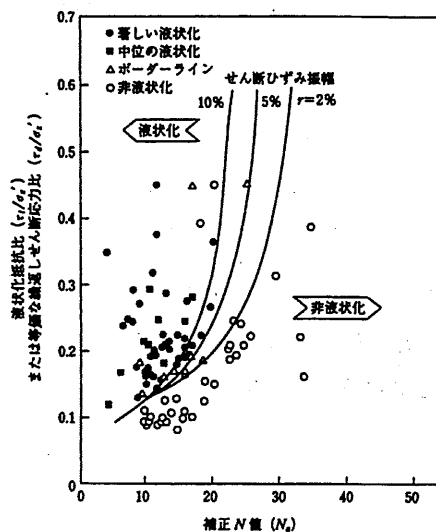


図10 補正 N 値と液状化抵抗、動的せん断ひずみの関係

(3) 補正N値 (N_e) の算定

各深さにおける補正N値 (N_e) を、次式により算定する。

$$N_e = N_1 + \Delta N_f$$

$$N_1 = C_N \cdot N$$

$$C_N = \sqrt{98 / \sigma_z'}$$

N_e : 補正N値

N_1 : 換算N値

ΔN_f : 細粒土含有率に応じた補正N値増分

C_N : 換算N値係数

N : 標準貫入試験のN値

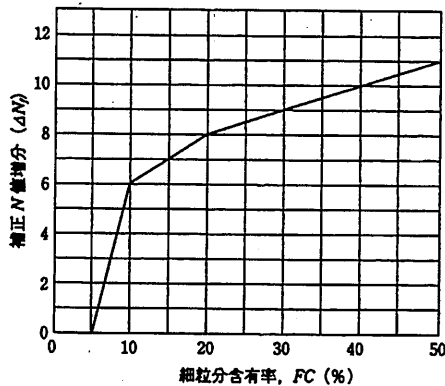


図11 細粒分含有率とN値の補正係数

4. 3 各地点での液状化の危険度 (P_L 値)

各々の深度で求めた安全率 F_L に深さの重み関係をかけることによって、その地点での液状化の危険度 P_L 値を求める。

$$P_L = \sum_{i=1}^n F \cdot W(z) \cdot \Delta Z$$

$$F = 1.0 - F_L \quad (\geq 0.0)$$

$$W(z) = 10.0 - 0.5 \times z$$

ここで、 F_L : F_L 値

$W(z)$: 深さ方向の重み関数

Z : 地表面からの深さ (m)

ΔZ : ある深度の F_L の分布すると想定される土層厚

ΔZ 算定のための境界は下のように定める。

- { 隣接する F_L が同一な土層のとき…両 F_L の深度の中間深度
- { 隣接する F_L が異なる土層のとき…土層の境界深度

液状化の危険度を下記のような P_L の範囲で表している。

■ : 液状化危険度はかなり低い。

0.0 < P_L ≤ 5.0 : 液状化危険度は低い。

5.0 < P_L ≤ 15.0 : 液状化危険度が高い。

■ : 液状化危険度がかなり高い。

4. 4 土質の仮定

各ブロック毎に無作為に抽出したボーリング柱状図（1ヶ所）による（したがって判断結果は、ブロック全体を表しているものでなく、1ヶ所での値を示している）。

以下のように推定する。

土質名	単位体積重量(kN/m ³)	細粒分含有率(%)
粘土～シルト	16	35以上
砂質シルト	16～17	35以上
シルト質砂	17～18	10～30
シルト混じり砂	17～18	5～20
砂	19	0
礫混じり砂	20	0
砂礫	20	0
腐植土	13	35以上
腐植物混じり粘土	13～15	35以上

粘土、シルト、砂質シルト、腐植土、腐植物混じり粘土は細粒分含有率が35%以上と考えられるので、液状化対象除外層とする。単位体積重量、細粒分含有率で幅を持たせているのは、ボーリング柱状図、記載記事、 N 値等より推察した。

〈 N 値〉

一般的にボーリング中に深度1 m毎に実施する標準貫入試験（JIS A 1219）から求まる値。

標準貫入試験は、質量63.5kgの重錘（円筒状）を高さ76cm ± 1.0cmの高さから、自由落下させた時、所定の深さまで達している標準貫入試験用サンプラーを地中に30cm打ち込む試験で、この時の打撃回数を N 値という。

4. 5 水平加速度 α

水平加速度は、その地点の地盤特性、震源からの地盤特性に大きく影響を受ける。日本建築学会：建築基礎構造設計指針では、損傷限界検討用として $150\sim 200\text{cm/s}^2$ 、終局限界検討用として 350cm/s^2 程度を推奨している。そこでここでは、 $\alpha = 150, 200, 350\text{cm/s}^2$ の3段階で判定する。

M6.8の中越地震では、十日町、小千谷、川口では 1000cm/s^2 以上、その他の観測地も 350cm/s^2 を超える記録が観測され、この度の中越沖地震でも500を超える記録が観測されている。

4. 6 液状化判定結果

4. 6. 1 水平加速度 150cm/s^2 時…………… (図12参照)

【 $P_L = 0$ ：液状化危険度はかなり低い】と【 $P_L = \sim 5.0$ ：液状化危険度は低い】が大部分を占めている。この中でB-6とL-18が【 $P_L = 15\sim$ ：液状化危険度がかなり高い】である。B-6の周辺部の信濃川最下流部では【 $P_L = 5\sim 15$ ：液状化危険度が高い】が帯状に分布している。この他「高い」の分布域は連続性がなく、点在している。

「かなり低い」の範囲は、紫竹～中島地区に集中し、日本海東北自動車道～鳥屋野渦～北陸自動車道より北西側でより多く分布している。南西側の茅野山IC、亀田体育館周辺のブロックは、非常に軟弱な粘性土、腐植土が地表面の5～10m前後まで堆積し、以深は N 値の大きい砂質土となり、「液状化の危険性がかなり低い」と判定される。

L-18は地表面の1mが粘性土の他、液状化対象範囲の深度20m以浅では、 $N=20$ 程度以下の砂質土で、この内半数は10以下の緩い締まり具合の砂質土からなっている。この周辺部では、未調査ブロック（資料なし）があり、この分布範囲は不明瞭である。

B-6は深度20m以浅は全て砂質土からなる。この内深度10m以浅は N 値が10以下である。この周辺部（信濃川最下流部）では「高い」のブロックが広がりを見せ、この地域では液状化の危険性が高いことを示している。

4. 6. 2 水平加速度 200cm/s^2 時…………… (図13参照)

水平加速度 200cm/s^2 を与えると「低い」が主体となり、「高い」、「かなり高い」のブロックがそれぞれ多くなる。

日本海東北自動車道～鳥屋野渦～北陸自動車道から北西側で多く分布した「かなり低い」ブロックも、この多数で「低い」に変わった。

信濃川沿いでは、「高い」が目立ち「かなり高い」も数ブロック確認できるようになる。特に最下流部では「かなり高い」が顕著になる。

また亀田市街地の中央部から南側（新津側）では、「かなり高い」、「高い」のブロックが面的に広がっている。

4. 6. 3 水平加速度 350cm/s^2 時…………… (図14参照)

水平加速度が 350cm/s^2 を想定した時、このほとんどが「液状化危険度が高い」～「かなり高い」になる。

「かなり高い」を示すブロックは、信濃川の下流部、亀田市街地南側と小阿賀野川地域が明瞭である。「かなり低い」は点在する程度で、D-14、G-8、H-3、M-10、M-14とO-1の6ブロックにすぎない。

D-14は 地表面から3.70mまで $N=1$ の腐植土

G-8は 地表面から6.70mまで $N=0\sim 2$ の粘性土、腐植土

H-3は 地表面から13.75mまで $N=1\sim 2$ の粘性土

M-10は 地表面から6.40mまで $N=0\sim 3$ の粘性土、腐植土

M-14は 地表面から17.85mまで $N=1\sim 4$ の粘性土、腐植土

O-1は 地表面から13.70mまで $N=0\sim 4$ の粘性土、腐植土

がそれぞれ堆積し、以浅は N 値の大きい砂質土からなる。いずれのブロックも液状化はかなり低い、軟弱な粘性土が堆積しているブロックである。

新潟南部 新潟市周辺の地形図

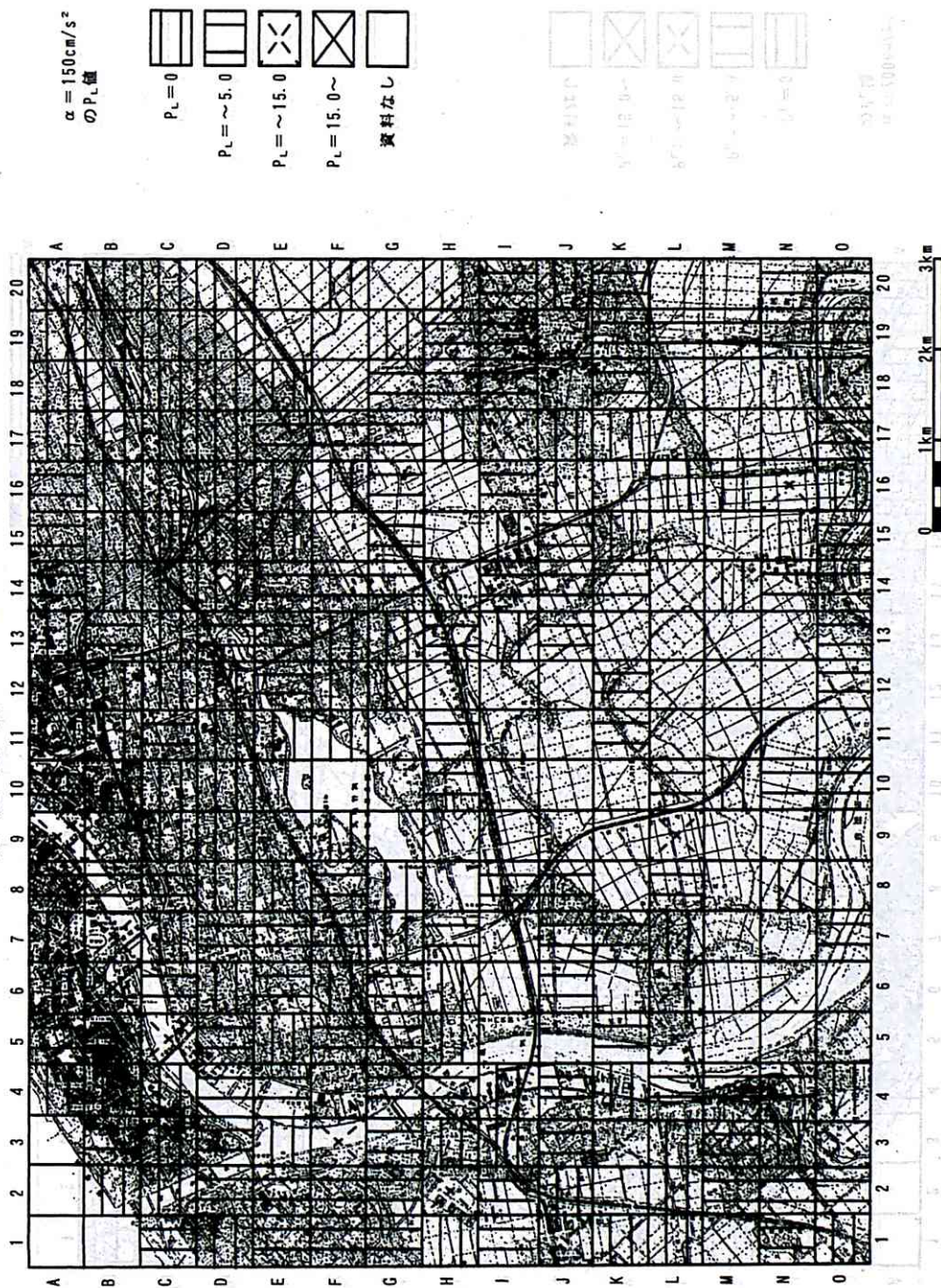


図12 水平速度150cm/s²作用時の危険度

新潟南部

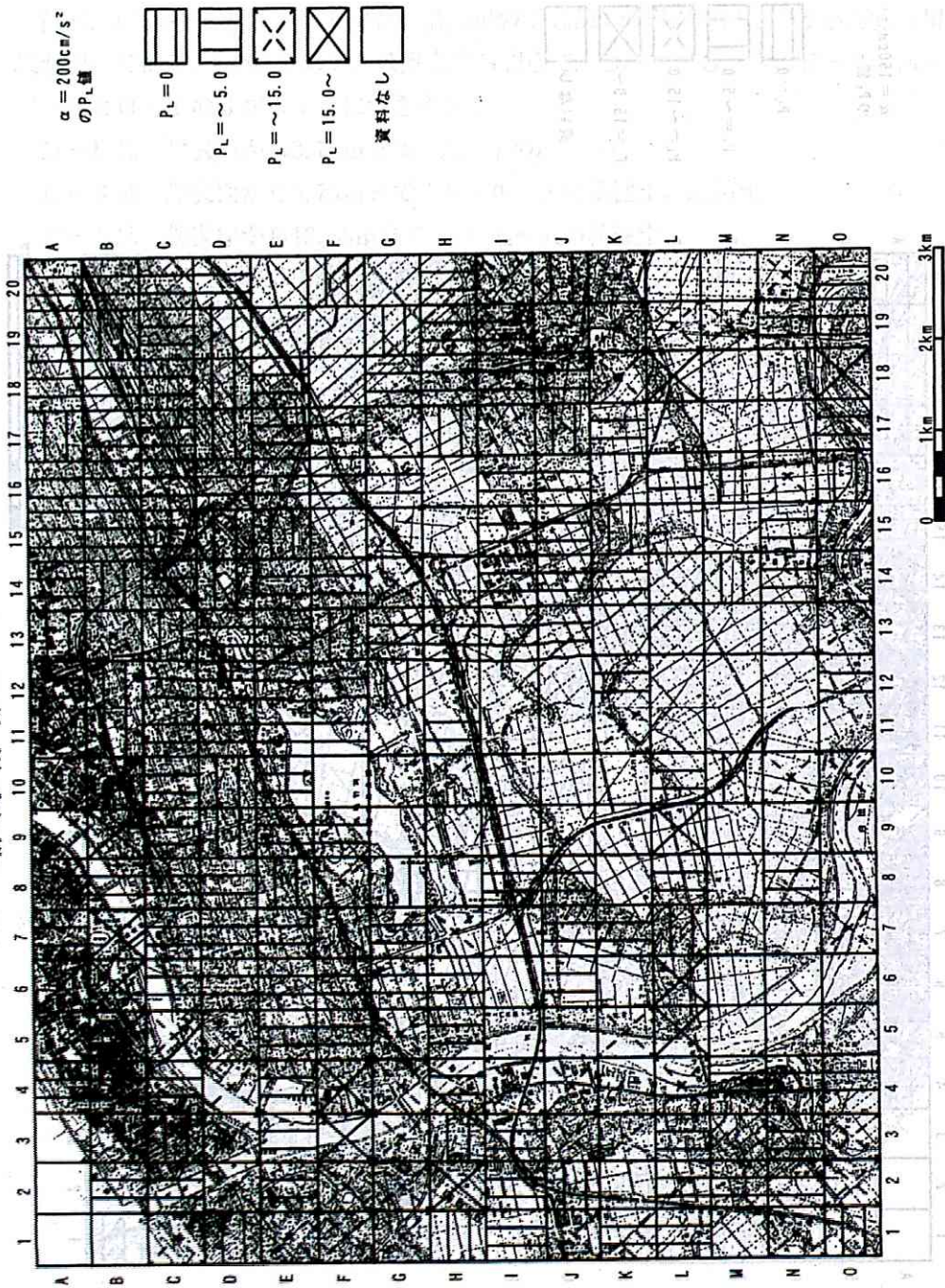


図13 水平速度200cm/s²作用時の危険度

新潟南部

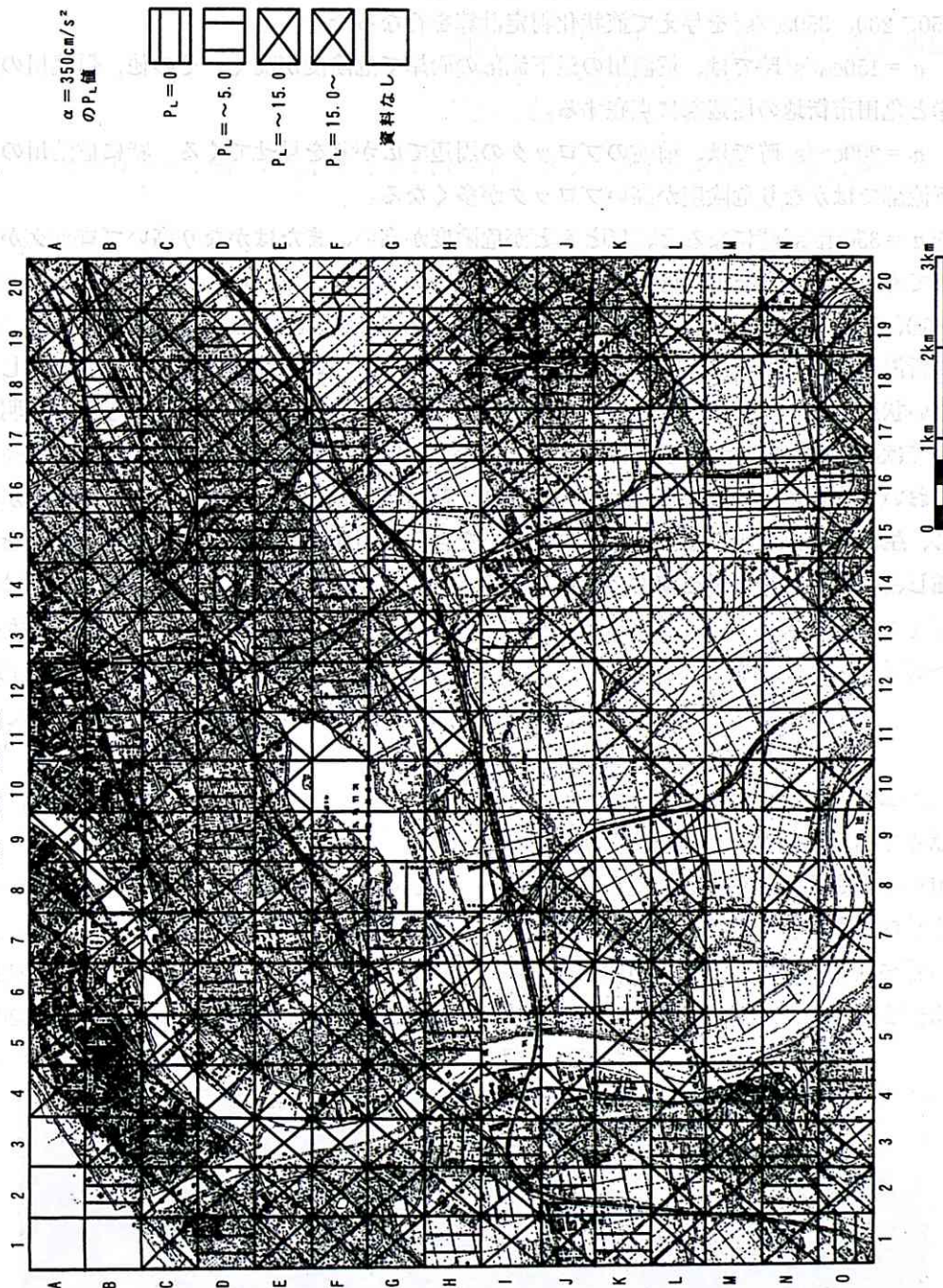


図14 水平速度350cm/s²作用時の危険度

5. おわりに

1/25000地形図：新潟南部において、300のブロックに細分し、ブロック毎に無作為に抽出した1本のボーリング柱状図を基に地盤条件を設定し、地震時水平加速度(a)を150、200、350 cm/s^2 を与えて液状化判定計算を行なった。

$a = 150\text{cm/s}^2$ 時では、信濃川の最下流部の両岸で危険度が高く、その他、信濃川の両岸と亀田市街地の周辺部に点在する。

$a = 200\text{cm/s}^2$ 時では、前述のブロックの周辺で広がりを見せてくる。特に信濃川の最下流部ではかなり危険度が高いブロックが多くなる。

$a = 350\text{cm/s}^2$ 時になると、ほとんどが危険度が高い、またはかなり高いブロックが占めてくる。 $P_L = 0$ を示す危険度がかなり低いブロックは、D-14、G-8、H-3、M-10、M-14、O-1の6ブロックで全ブロックの2%に過ぎない。

新潟及びこの周辺部において、震源の空白域があるといわれ、いつ起きてもおかしくない状態が続いている。この地震が発生した時、水平加速度がどの程度になるか、明らかではないが、350 cm/s^2 以上になることも十分想定される。この場合、多数のブロックにおいて液状化の危険度が高いと判定され、甚だしい時には構造物の沈下、転倒等が生じ、生命財産に及ぶこともある。安全安心を自分に担保するとしたら、液状化調査を実施し、何らかの対策工を施す必要がある。