

## 浅層地盤の土質特性と液状化発生に関する総合調査

—日本海中部地震で被災した秋田県能代市の例—

微動研究グループ

毎熊輝記\*・阿部司\*\*・斎藤徳美\*<sup>3</sup>・小林直太\*<sup>4</sup>  
中島直吉\*<sup>5</sup>・中村 操\*<sup>6</sup>・野越三雄\*<sup>7</sup>

**Comprehensive Investigations of Soil Characters and Liquefaction Occurrence in the Shallow Ground—The Case of Noshiro City, Akita Pref., damaged during the 1983 Japan Sea Earthquake—  
By Teruki MAIGUMA, Mamoru ABE, Tokumi SAITOH, Naota KOBAYASHI, Naoyoshi NAKAJIMA,  
Misao NAKAMURA, and Mitsuo NOGOSHI**

The 1983 Japan Sea Earthquake ( $M=7.7$ ) caused heavy damage associated with remarkable liquefaction to many houses and the ground soils at certain areas ( $2\text{ km} \times 6\text{ km}$ ) in the Noshiro City region, Akita Pref. The geomechanical character of the ground there has been investigated through use of shear wave velocities from in-situ measurements, results of grain-size analyses, geotechnical information from many drill holes and data for groundwater depths. Almost all of the sites investigated in many places are underlain by loosely-packed sandy soils of fine- to medium-grained sediments ( $0.3\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ ), with low shear wave velocities less than  $120\text{ m/s}$  and small values of uniformity coefficients between 1.6 and 2.3. Seismic microzonation maps showing areas where local soil conditions would be favorable for liquefaction have been compiled for assessing future earthquake hazards in certain areas. In the Noshiro City areas investigated, all sites with shear wave velocities less than about  $120\text{ m/s}$  and with groundwater depths less than 2 meters would be much likely to liquefy except for sites underlain mainly by silty and clayey soils. Sites with shear velocities greater than  $150\text{ m/s}$  would not have susceptibility to liquefaction.

### 1. ま え が き

秋田県は1983年5月26日の日本海中部地震 ( $M=7.7$ ) によって県内各地で甚大な被害を受けた。そのうち能代市は震央まで約 $100\text{ km}$  と他の市町村に較べて最も近くに位置していたために、沿岸部と内陸部で共に受けたその被害は激甚であったことが報告されている (秋田県, 1984)。そして沿岸部での津波による多くの尊い人命の喪失と農林水産業の膨大な財産の損害とともに、内陸部

での激しい砂地盤の液状化に伴う大量の住家や生活施設の破損のほか、広範囲にわたる地盤の破壊現象は特に社会の注目を集めた。さらに内陸部の地震被害の特徴のひとつは、それが能代市の広い地域におよんだのではなく、ある限られた地域に集中して顕著に発生したことであった。筆者等はそのような地震被害と能代の地盤の特性との関係を総合的に調査研究するために、1984年と1985年の8月に2回にわたって市内で協同実験を行った。それは現地調査の他に、関連する地形や地質及び地盤調査資料の可能な限り多くの収集と解析、深度 $20\text{ m}$  の3本のボーリング調査とPS検層の実施、約200地点での微動測定、56地点での地表S波速度測定、22地点での砂質土試料の採取と粒度分析、及び32地点での地下水位の調査などである。ここでは多くの地盤資料の解析や

昭和62年7月1日原稿受付, 昭和62年9月4日受理

\* 埼玉大学工学部, \*\* 東北大学工学部,

\*<sup>3</sup> 岩手大学工学部, \*<sup>4</sup> 中央大学理工学部

\*<sup>5</sup> (株)東京ソイルリサーチ, \*<sup>6</sup> 日本物理探査(株)

\*<sup>7</sup> 秋田大学教育学部 (毎熊以外は50音順)

各種の現地調査の結果と地震被害との関連性について述べる。なお、微動測定に関しては別の報告が行われる予定である(斉藤・他, 1987a; 1987b)。

## 2. 能代の地形・地質と対象地域

能代市域は東西、南北方向にいずれも10数kmと広いが、このうち全体のうちの大部分を占める北部、東部、南西部は山地となっており、今回地震被害はほとんどなかった。被害が集中発生した能代の市街地の中心部分は米代川の河口域に広く発達している能代平野の海側に位置している。この地域の地形、地質は大きく分けると、Fig. 1において北部と南部に見られる更新世の段丘部分、中央部のうち海側の砂丘部分、それにその東側に広がる平野部分の3つに分類され、その平野部の微地形は大変複雑に変化している。そしてここで調査研究の対象としている地震被害が顕著に集中発生した地域は、米代川の河口流域に発達した沖積平野の中央部から海側にかけて広がっている領域で、北部の能代公園付近から南の浅内までの南北に約6km、東西に2km位の地域となる。能代平野の海側の海岸線に沿った部分には大規模な砂丘が発達しており、また山側の平地部分も平坦な地形ではなく、標高が20cmを超す砂丘の所もあれば、自然堤防やポイントバーから出来た微高地や湿地のところもある。また平野部には標高が数mの旧河道跡や窪地などの低平地が複雑に分布している。なお地震被害が出た液状化発生が見られた場所は、秋田県の報告書(1984)より引用したものが後のFig. 8, Fig. 13などに示してある。

## 3. 地盤調査資料の解析と現地実験

### 3.1 浅層地盤の構成

日本海中部地震による能代市の地震被害は内陸部では大部分が地盤の液状化と関係すると見なされるもので、噴砂、噴水、陥没、隆起あるいは亀裂、地割れ、滑落などの地盤の破壊現象を伴うものであった(秋田県, 1984)。このような地震による地盤の液状化に伴う災害ではその要因は地下の浅層部に求められよう。能代平野の地盤構成を詳しく調べるために能代市から提供を受けた約100本のボーリング調査資料の解析を行った。Fig. 2は能代平野の西部域の地盤構造を把握するために画いた同地域の南北方向の推定土質断面図の例である。この位置はFig. 1に示されている。他の方向、他の地域についても同様の断面図が多数得られたが一部の地域を除いてこれとよく類似する地盤構成を示すものであった。

前述の地形と地質の性質からも推察されるように、能

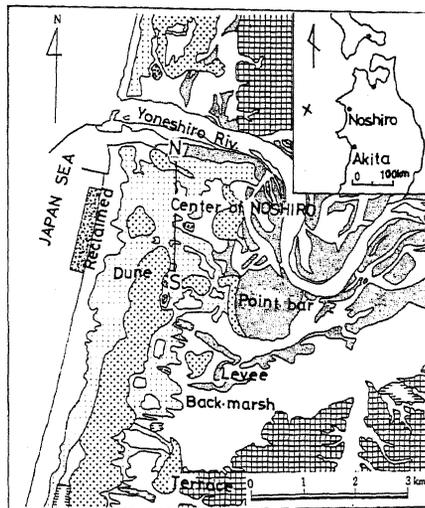


Fig. 1 Map showing location of Noshiro City, Akita Pref. and topography of its central region. The letters N-S indicate location of the soil cross-section to be shown in Fig. 2.

代の市街地の海側の大部分は砂丘性の地盤と考えられる。その地下浅部は大部分が砂質土層から成っており、シルト層、粘土層、礫層などがその中に混在する状態で構成されている。そして特に激しい地震被害が集中発生した地域の砂質土層の中にはシルトや粘土などの粘性土層が部分的に混入している所がきわ立って多いことが注目される。

つぎに能代平野の浅層地盤の大部分を構成する要素である砂質土層の硬さについてN値を用いて調べた。Fig. 3(A)は深度1~10mの間の砂質土層の出現頻度を被害地域と無被害地域に分けてN値の大きさによって分類している。これから被害域ではN値8~13位の比較的に軟い砂質土層が多く、無被害域ではN値26以上の締った砂質土層が卓越している。この図でN値が7以下の軟い砂質土層については無被害域の方が多くなっている。これはN値だけで能代の地震被害あるいは液状化発生の問題を考えることが十分でないことを示していると言えよう。能代の場合N値が7以下の砂質土層の多くがシルト質砂層である事実を考え合わせると、このような砂層はN値は小さくても液状化発生に対して抵抗力が大きいことを示していると考えられる。

次に深さ10~20mの砂層について同様な分類を行ったのがFig. 3(B)である。これを見ると全体の頻度数に違いはあるが、10mより深い所の砂層では、被害域と無被害域で硬さを表すN値の差はあまりない。これは能代の地盤の液状化現象が10mないし15mより浅い部分

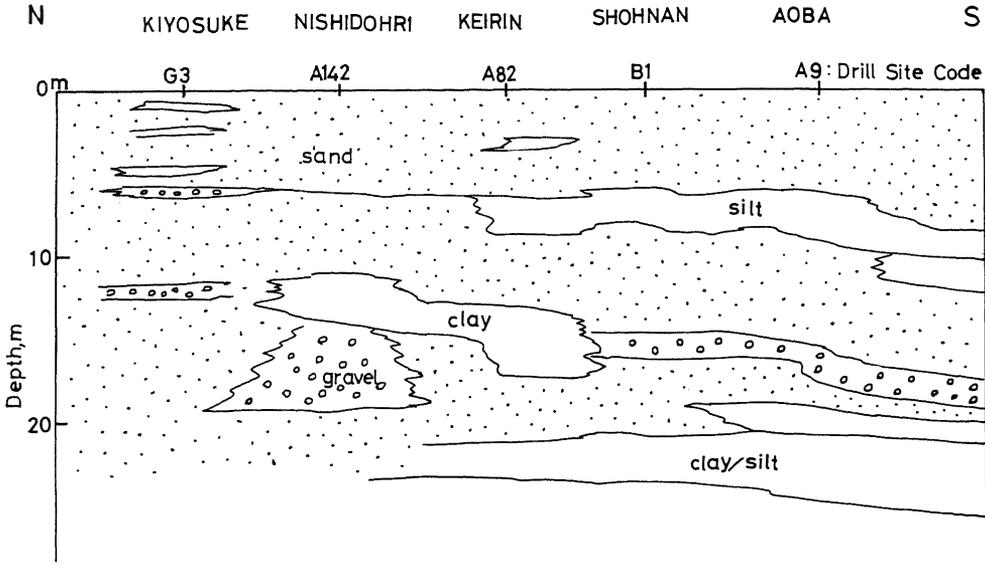


Fig. 2 Typical soil profile of the central zone of a heavily-damaged area in Noshiro City. The location of this section is shown on Fig. 1.

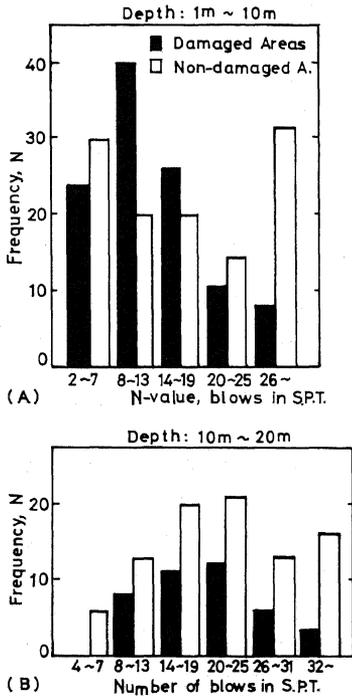


Fig. 3 Histograms showing occurrence frequency of sands with relation to their average N-values (number of blows in standard penetration test) and earthquake damage intensity.

(A): case for sands of 1 m to 10 m depth.  
 (B): case for sands of 10 m to 20 m depth.

の所で発生していることを推論する根拠となるだろう。

次に Fig. 3(A)の特徴をさらに詳しく調べるために深さ 1~10 m の砂質土層の N 値による出現頻度分布を示したものが Fig. 4 である。これから液状化による被害地域では N 値が 10~12 の砂質土層の部分が特に多いことがわかる。また N 値 25 以上のところが無被害域で目立って多い。これはこの程度の硬い砂地盤は液状化しないことを表わしているものと考えられ、これは従来の研究で一般に知られていることと調和的である。また N 値が 8 以下の軟い砂層については被害域と無被害域で頻度に差が見られないのは、この部分の N 値を持つ砂層の中には前述のようにシルト質砂層が含まれるためである。

次に能代平野の浅層地盤の性状の地域的分布を見るために地盤の硬軟を平均 N 値で表わし、平面的広がり調べて示したのが Fig. 5 である。ここでは深度 1 m から 10 m までの平均 N 値を求め、N 値が 2~14 は比較的軟かい所、15~19 は中位の硬さの所、20 以上はさらに硬い所と分けてその分布を示している。これを見ると大きな被害地域である昭南町から青葉町にわたる部分、大須賀から前山にいたる多くの所で N 値が 14 以下と小さくなっている。また能代駅周辺は無被害域であるが、この付近は N 値が 20 以上で硬い地盤であることがわかる。河戸川周辺は N 値は小さいにもかかわらず液状化発生は少なく、地震被害も軽微であった。この地域は大部分の地盤がシルトや粘土及びシルト質砂層から構成されている能

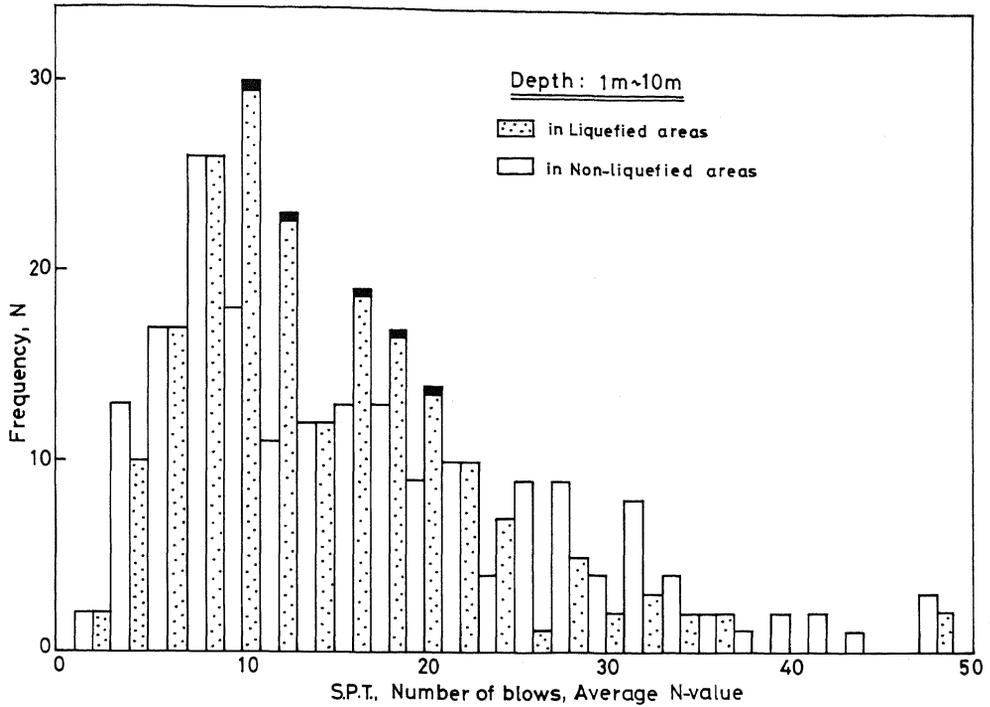


Fig. 4 Detailed classification histograms of occurrence frequency of sands of 1 m to 10 m depth with reference to their average N-values and earthquake damage intensity.

代平野では稀な性質のところである。

次に前述のように能代平野の浅層地盤は大部分が砂質土層であるが、注目されるのはその中にシルト層や粘土

層が薄層の状態に混在している所が多いことである。

深度 1 m から 15 m までの地盤構成の中に占める粘性土層の部分の割合について、Fig. 6 には被害域と無被害

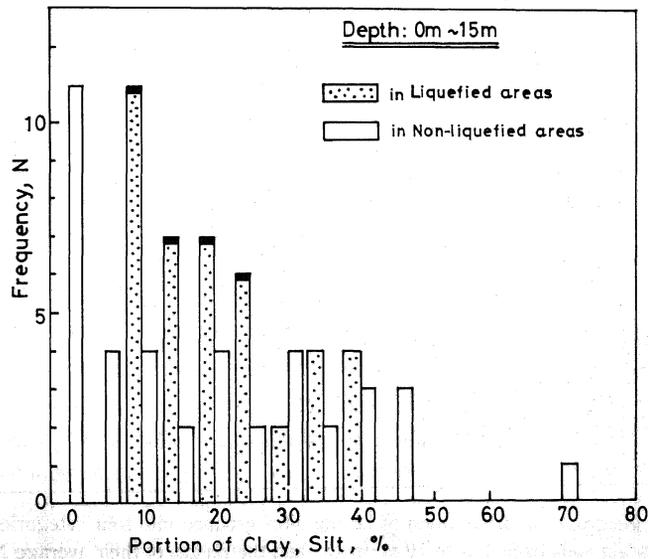


Fig. 6 Variation of occurrence frequency of drill sites divided according to the total amount percentage of silt and clay included on the soil cross-section from the surface to 15 m depth.

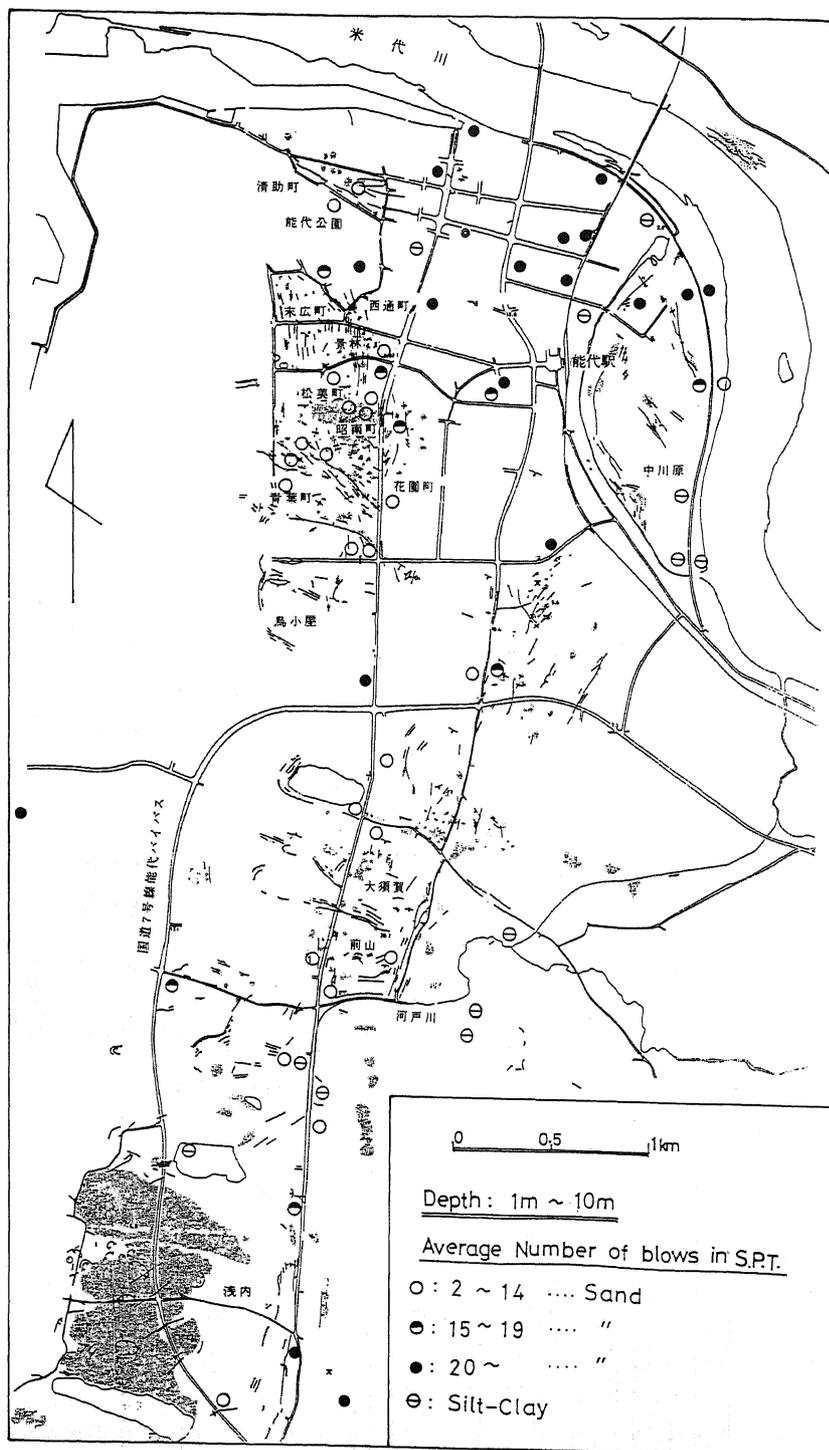


Fig. 5 Map showing geographical distribution of boring sites grouped into four categories depending on the types of underlain soils from 1 m to 10 m depths and the ranges of their average N-values.

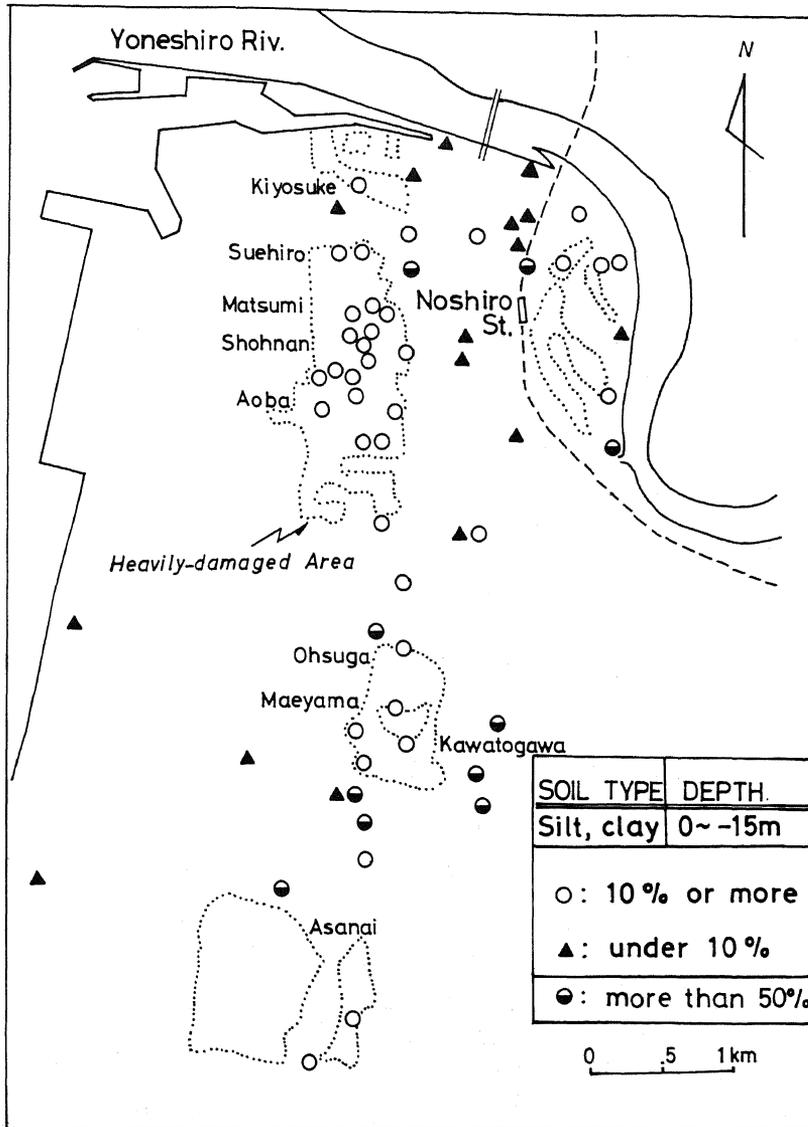


Fig. 7 Geographical distribution of boring sites classified into three groups according to the total percentage of silt and clay portion contained on the soil profile within 15 m depth of the surface.

域に分けて出現頻度の分布を示している。これから粘性土層の混在の割合が10%~25%位の所が被害域に目立って多くなっていることがわかる。これは液状化現象が地震動による間隙水圧の上昇に起因すると考えられていることから、砂層の中の粘性土層が間隙水圧の上昇を助長するように関与している可能性が高いことを示していると考えられる(吉見, 1980; 渡辺・他, 1984)。またこの図では、無被害域では深さ15m位までの所に粘性土層が混在していない所が多いことを示しているが、その理由はこれらの場所では代りに礫層が混入したり砂質土

層だけで地盤が構成されているからである。

前述のように能代平野の浅層地盤は大部分が砂質土層から構成されていて、その中に2m前後の薄い粘性土層が混在していることがわかった。Fig. 7は深度15mまでの地盤構成の中に含まれるシルト層と粘土層の部分の全体に対する割合を地盤調査資料から求めて、その分布を示している。この図から被害域の大部分の場所が地盤構成の中に10%以上の粘性土層を含んでいることがわかる。しかし河戸川周辺は例外的な所で大部分が粘性土層より成る地盤であり、液状化の発生も少ない地域であ

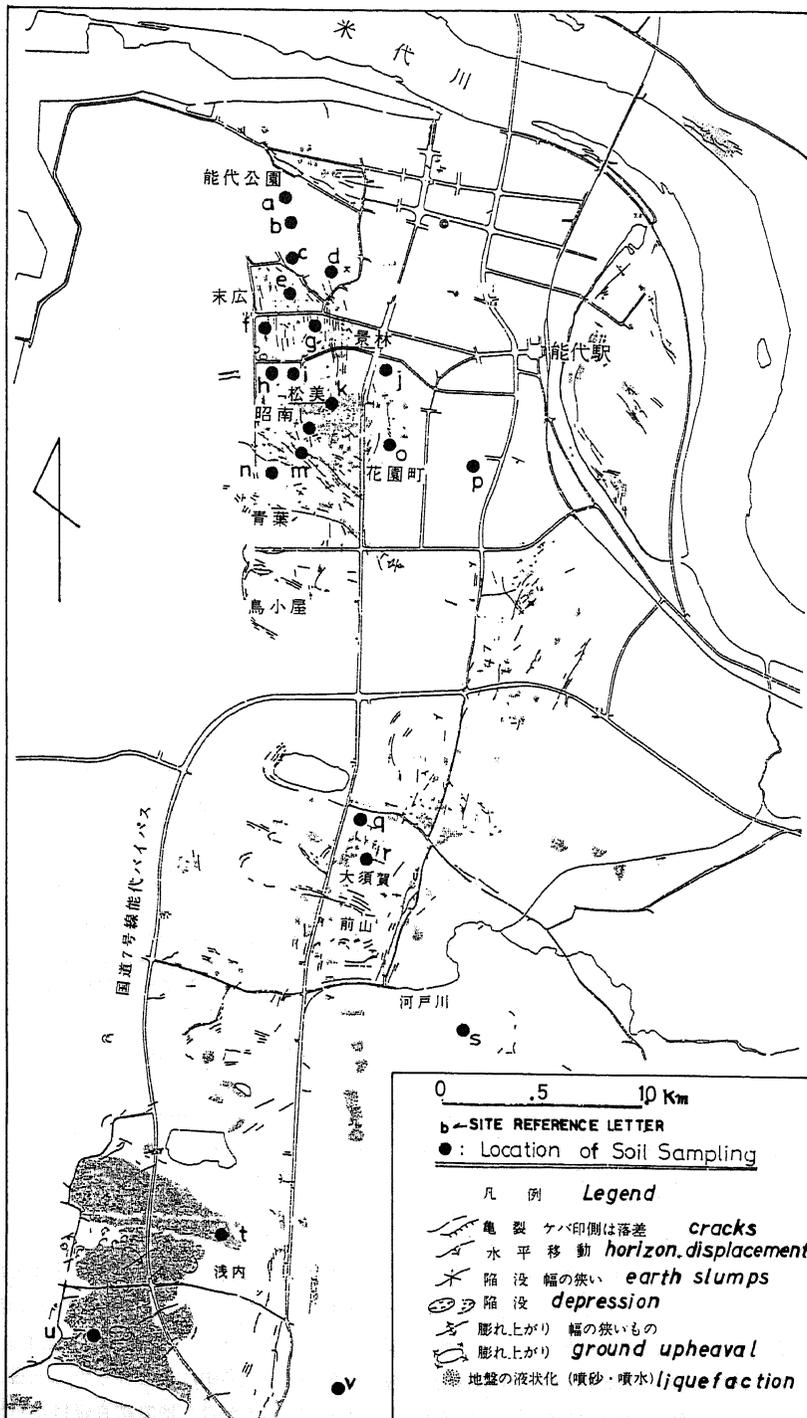


Fig. 8 Map showing location of all sites investigated by means of analysis of grain-size distribution and survey of groundwater depth. The letters attached indicate reference marks to site names.

る。

### 3.2 砂質土の粒度試験

ある場所の地盤が液状化を発生し易いかどうかはその砂質土の粒度分布特性、粒径などが大きく関係することが知られている（石原，1976；吉見，1980；Sherif and Ishibashi, 1978）。能代平野の浅層地盤を構成する砂質土の粒度特性と地震被害との関係を調べるために、市内の被害地域と無被害地域で22地点を選び、砂質土試料を採取し粒度分析を行った。そして粒径加積曲線、平均粒径、均等係数、細粒子含有率などを各調査地点について求めた。Fig. 8には調査地点の位置を認識記号と共に示してある。また Table 1 にはこれらの調査を実施した地点の記録がのせられている。

粒度試験は深度20mの3本のボーリングのコアの砂質土の部分を利用した他は、手掘りのオーガーにより採取した試料である。深さは各調査地点で1m～7mまでの所で採取した3個から7個の試料を用い、合計で90個について分析が行われた。

まず粒度分布特性を調べるために求めた粒径加積曲線のいくつかの例が Fig. 9 に示してある。他の地点の同

種の曲線もほとんどすべてこれらの例と大きな差異は認められない。これらの粒径加積曲線を一般に知られている液状化を起し易いと考えられている砂の粒度分布曲線の範囲と Fig. 9 の上で比較してみると、今回調査した能代の砂質土についてはすべての粒径加積曲線がきわめて液状化を起し易いとされる範囲の中央部にある。これから能代平野の砂質土は粒度組成と粒径の両面からきわめて液状化を起し易い性質を持っていることがわかる（J. S. C. E., 1973）。

次に各調査地点をその周辺の地震被害の程度によって等級分類し、それらと粒度試験結果との関係を調べた。ところが能代の場合、各調査地点周辺の地震被害を定量的にそして同等に評価し表示することは可成りの難題であることがわかった。それは各調査地点周辺は住家等の建物の分布状況が場所ごとに大きく異なっているだけでなく、各地点が公園や運動場であったり、畑や水田、空地や墓地である場合もあり、地表近くの物理的条件が大きく違っていることから、地震被害の形態が種々様々であることによる。したがってここでは地震による被害程度を次のように大きくA, B, Cの3つの等級に分けるこ

Table 1 Site names and the groundwater depths of the sites surveyed through grain-size analysis of soils

ID Mark 記号	Site Name 調査地点名	Groundwater Depth, m 地下水位深度	Damage Grade 地震被害等級	Surface Conditions 地表条件
a	能代公園	13m	C	砂丘上
b	能代中学	6.2	C	運動場
c	能代工高	2.2	C	"
d	湊城小学	2.5	B	"
e	末広空地	1.7	A	工場跡地
f	光久寺北	6.4	B	テニスコート
g	大正公園	2.2	A	広場
h	営林署前	2.3	B	宅地・畑
i	西福寺東	2.0	A	"
j	栄町公園	2.2	C	広場
k	昭南公園	1.5	A	"
l	秋元工務店	1.0	A	住宅跡地
m	出戸沼公園	1.0	A	広場
n	墓地公園南	2.8	B	空地
o	花園公園	1.3	B	広場
p	中和公園	1.5	C	"
q	大須賀公園	0.8	A	"
r	大須賀広場	0.6	A	運動場
s	南中学	1.2	C	河川敷
t	浅内休耕田	0.4	A	水田
u	浜浅内畑	0.9	A	畑
v	浅内小学	10	C	建物跡地

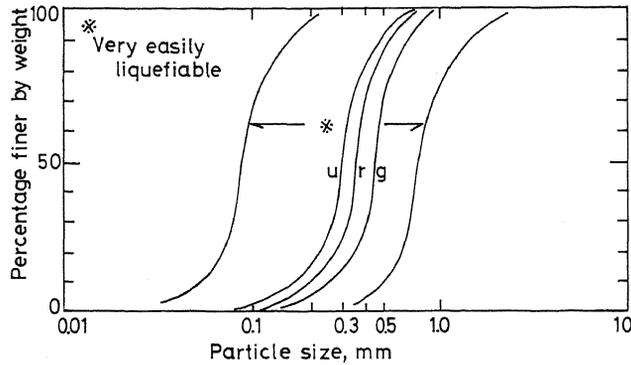


Fig. 9 Typical examples of particle-size distribution curves of sandy soils in the Noshiro City area and also showing the proposed range of grain-size distribution curves of sands which would have high possibility of liquefaction (J. S. C. E., 1973).

とにした。すなわち、

A等級：大きな地震被害があった所，即ち半径100 m 以内の範囲に30%以上の家屋に破損があったか，5個所以上の噴水，噴砂，地割れ，陥没などの地盤の破壊現象の観察された場合を表わす。

B等級：中位の程度地震被害があった所；半径100 m 以内の領域に5%以上で30%未満の建物の破損があった所か，2個所以上で5未満の所で噴砂，地割れ，陥没などの地盤の破壊現象が見られた場合をいう。

C等級：軽微な地震被害の所と無被害の所；半径100

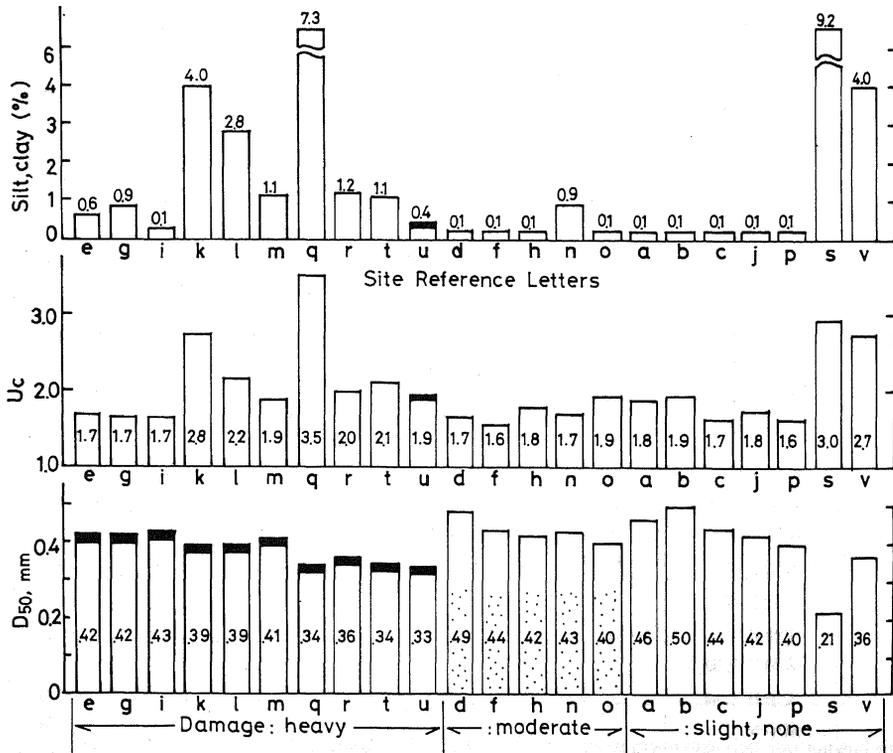


Fig. 10 Results of grain-size analyses of sandy soils at 22 sites in the Noshiro City area : the upper row shows the amount of silty and clayey material content in percentage ; the second row indicates the values of coefficients of uniformity  $U_c$  ; the bottom row the values of mean particle-size  $D_{50}$  (mm).

m 以内の領域に 5% 未満の建物被害があった所や、2 箇所未満の噴砂、地割れなどの地変が見られた場合を示す。

次に粒度試験によって得られた結果のうち Fig. 10 には、上段から細粒分含有率 (%), 均等係数  $U_c$ , 平均粒径  $D_{50}$  (mm) の順に、地震被害の程度に対応して等級分類し、各調査地点の試験結果を列挙してある。

粒径加積曲線の通過重量百分率が 50% に相当する有効径で示されるものは平均粒径と呼ばれる。Fig. 10 の下段に見られるように能代の砂質土の場合、s. 南中学を除いてすべての調査地点の平均粒径は 0.33 mm から 0.5 mm の間にあり、これは細砂ないし中砂に相当する。このように能代の砂質土は平均粒径に関してはほとんどすべての調査地点の間でその差異は非常に小さく、これから地震被害の程度と平均粒径との関係は認められない。

また均等係数は粒径加積曲線の通過重量百分率の 60% と 10% に相当する  $D_{60}$  と  $D_{10}$  の比  $D_{60}/D_{10}$  で定義される。これは砂の粒度分布特性を数値的に表わす指数であり、その値から粒度組成の性質を知ることができるとされる。その値  $U_c$  が大きくなると粒度分布が広いことを表わし、それが小さくなり 1 に近づくことと粒径がそろってより均等に近づくことを表わす。能代の砂質土の  $U_c$  は Fig. 10 の中段からわかるように被害地域でも無被害地域の調査地点のものでも 1.6 から 2.3 の間にありその差異は大変に小さい。このように能代平野のほとんどすべての場所の砂は粒度分布は悪く、非常によく粒径のそろった均等な大きさのものであることがわかる。

次に粒径加積曲線の粒径  $74\mu$  に相当するところの通過重量百分率で示されたものは細粒分含有率 (%) と呼ばれるが、Fig. 10 の上段にあるように、能代の砂は大部分の所で細粒分が 2% 以下と非常に小さいことが注目される。他の地点と比べて大きな値となっている k. 昭南公園 (4.0%) はボーリング調査を実施した所で、調査地点を中心にして周辺で顕著な液状化が発生し、それに伴って多くの家屋が破損した所である。また q. 大須賀公園 (7.3%) でもボーリング調査をしており、調査地点の周辺でも地盤の液状化に伴って多くの民家に被害があった所である。s. 南中学 (9.2%) の場合は周辺に建物は少なく、液状化現象もあまり見られない地域であって、この地域は能代平野の調査領域内では稀な大部分が粘性土層より構成されている地盤のところである。v. 浅内小学 (4.0%) は更新世の段丘上にあって  $N$  値も 25 以上で固く締まっている地盤の所で、地震被害も全くない地域にある。このように南中学と浅内小学は他の地点とは異質の地盤であると考えられる。

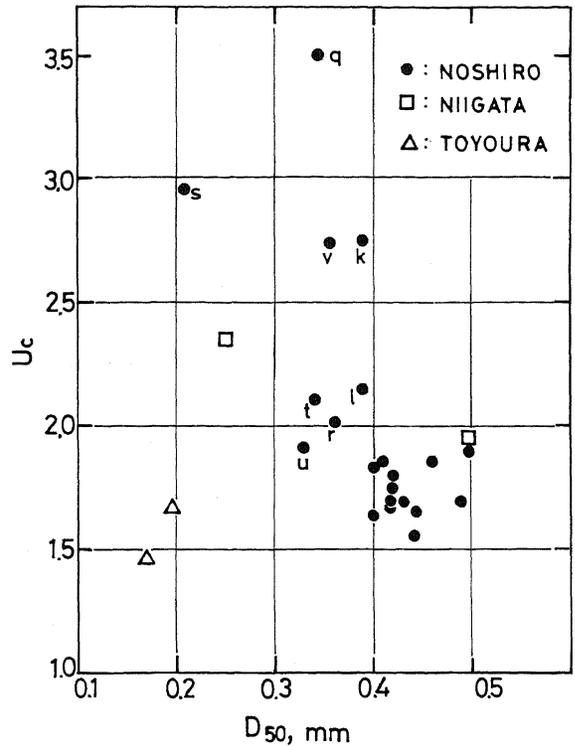


Fig. 11 Plots of the coefficients of uniformity versus the mean particle-size of sandy soils sampled at 22 sites in the Noshiro urbanized areas.

つぎに Fig. 11 は砂の基本的性質を表わす指標である平均粒径  $D_{50}$  と均等係数  $U_c$  の組合せを能代の砂について示している。これを見ると s. 南中学, q. 大須賀公園など少しはなれているものもあるが、大部分はほぼ同じ狭い範囲の中にあり、能代の砂の  $D_{50}$  と  $U_c$  には地震被害の程度による調査地点の間の差異はほとんど見いだされない。この図では k, q, s, v 等の値が他の地点と大差があるように見えるが、均等係数にしても実際はそれらも 2.7~3.5 の間にあり他地点の平均値 1.8 とはその差は大きくない。またこの図には豊浦の標準砂と過去に液状化発生があった新潟の砂の例も示してあるが、これらと均等係数を比較してみても能代の砂が非常に均等な粒ぞろいが良いことがわかる。

### 3.3 地下水位の調査

地震時における砂地盤の液状化の発生が間隙水圧の上昇に起因するとされることから、液状化に伴う地震被害について考える場合に地下水の存在状態はきわめて重要と思われる。それは地下水位が浅いほど砂地盤の液状化の発生の可能性は大きくなると考えられるからである

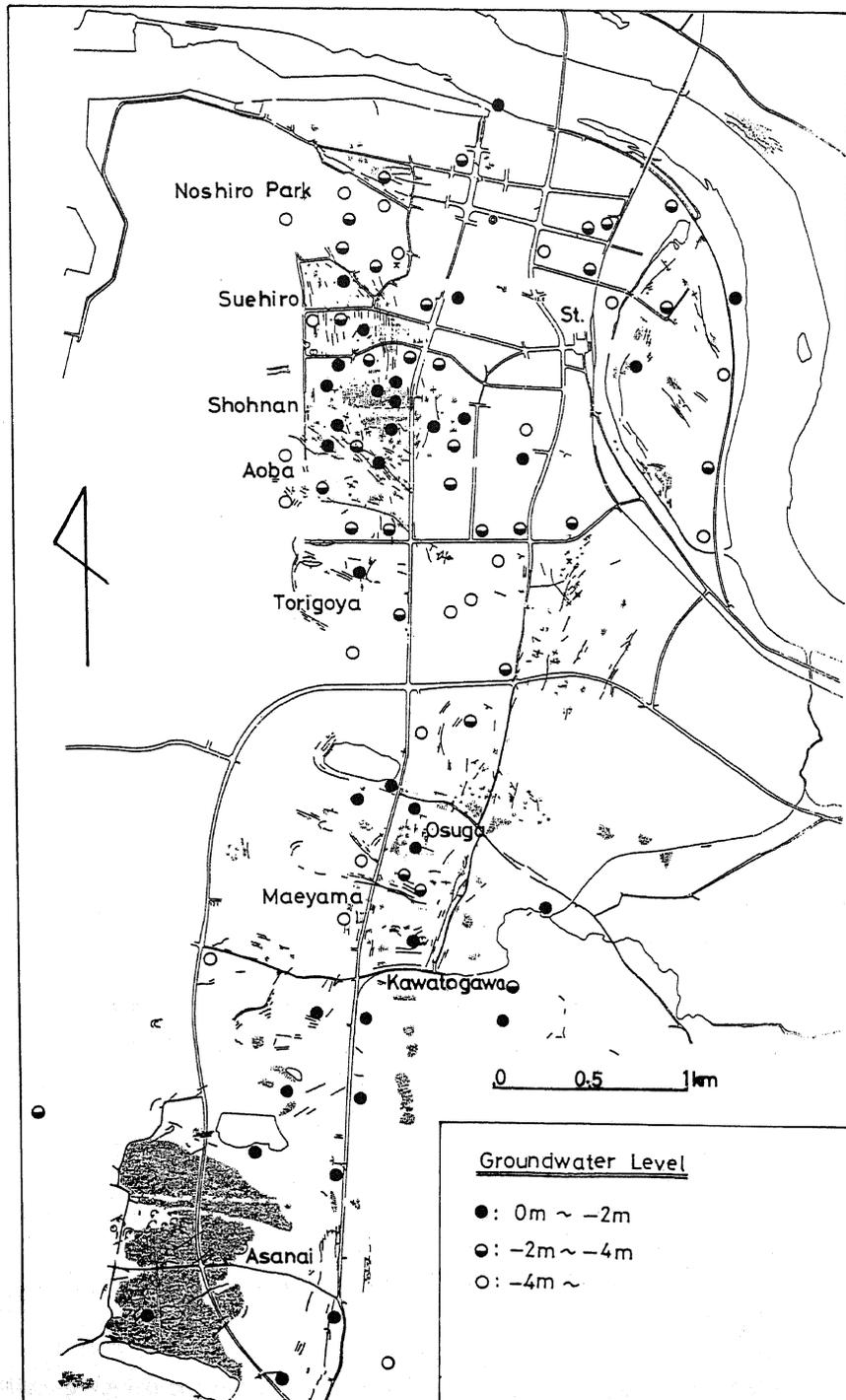


Fig. 12 Geographical distribution of groundwater depths surveyed through use of machine borings, auger borings and electrical prospecting method.

(吉見, 1980 ; Sherif and Ishibashi, 1978 ; Youd et al, 1978)。

この調査では手掘りオーガー、ボーリング調査、電気探査法などを併用して、市内各地の32地点で地下水位の調査を行った。他に既存のボーリング調査資料から約70地点、消火栓の設置の削孔記録から約30地点、合計約130地点で地下水位のデータが得られた。Fig. 12はそれらを用いて地表からの地下水位の深度の平面的な分布状況を示している。前述のように能代平野は地表の地形は場所ごとに複雑に変化しているために図からわかるよう

に地下水位の場所あるいは地域による変化は複雑で大きい。

全体として見た場合調査時期や調査方法が異なっていることから、能代平野の現在の地下水位の分布をこれらの数値がどれほど正確に示しているかという点では注意する必要があるが、この図から地下水位分布の大局的な動向は把握できるものと考えてもよいだろう。

この図で北部では末広町から南へ景林町、松美町、昭和南町、青葉町あたりまでが地下水位はほぼ-2mより浅くなっている。またこの図の中央部から南へ大須賀、

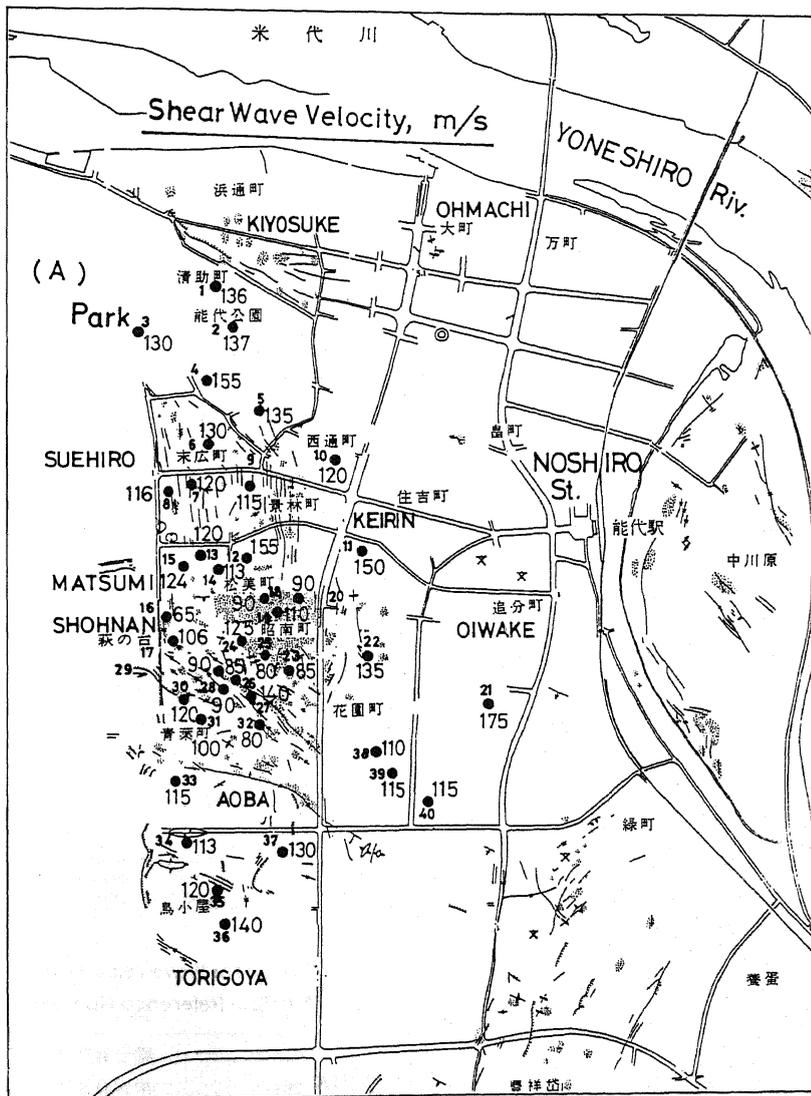


Fig. 13(A) Maps showing geographical distribution of investigated sites and the values of average shear-wave velocity of the subsols around 1 m to 10 m depths.



Table 2 Site names and local conditions of the sites investigated through shear wave measurements

Site No. 番号	Site Name 測定地点名	Shaer Velocity S波速度, m/s	Damage Grade 被害等級	Surface Conditions 地表条件	Remarks 備考
1	能代公園	136	C	砂丘の上	a, 13m
2	能代中学	137	C	運動場	b, 6.2m
3	競技場横	130	C	土堤	12m
4	能代工高	155	C	運動場	c, 2.2m
5	浄城小学	135	B	〃	d, 2.5m
6	末広空地	130	A	工場跡地	e, 1.7m
7	萩の台公園	120	A	広場	2.1m
8	光久寺北	116	B	テニスコート	f, 6.4m
9	大正公園	115	A	広場	g, 2.2m
10	西通公園	120	C	広場, 盛土	3.2m
11	栄町公園	150	C	広場	j, 2.2m
12	松美遊園地	155	B	〃	
13	営林署前	120	B	宅地, 畑	h, 2.3m
14	西福寺東	113	A	宅地	i, 2.0m
15	西福寺前	124	A	空地	
16	願勝寺南	65	A	〃	
17	墓地公園北	106	A	〃	
18	昭南保育園	90	A	園庭	1.4m
19	昭南公園	110	A	広場	k, 1.5m
20	昭南空地	90	A	空地	1.7m
21	中和公園	175	C	広場	p, 1.5m
22	花園公園	135	B	〃	o, 1.3m
23	土地改良東	85	A	空地, 畑	
24	秋元工務店	125	A	住宅跡地	l, 1.0m
25	土地改良北	80	A	空地, 畑	地盤改良
26	出戸沼公園	95	A	広場	m, 1.0m
27	土地改良所	140	A	〃	
28	自治会館東	92	A	空地	
29	出戸沼会館	90	B	広場	
30	墓地公園横	120	B	空地	
31	墓地公園南	100	B	〃	n, 2.8m
32	土地改良南	80	A	〃	
33	能代分教北	115	A	〃	
34	能代分教南	113	A	〃	
35	東北電気西	120	A	〃	
36	鳥小屋工高	140	C	〃	
37	鳥小屋日産	130	C	〃	
38	出戸公園北	110	C	広場	
39	出戸公園	115	C	〃	
40	南出戸公園	115	C	〃	2.2m
41	大須賀公園	110	A	〃	q, 0.8m
42	大須賀広場	150	A	運動場	r, 0.6m
43	十州崎東	95	A	空地, 畑	
44	前山空地北	110	A	空地	2.6m

Table 2 (つづき)

Site No. 番号	Site Name 測定地点名	Shaer Velocity S波速度, m/s	Damage Grade 被害等級	Surface Conditions 地表条件	Remarks 備考
45	前山空地中	110	A	〃	
46	前山空地南	110	A	〃	
47	熊野神社東	95	A	〃	
48	熊野神社前	85	A	〃	
49	安宗寺南	100	B	〃	
50	河戸川改良	115	C	〃	
51	南中学	117	C	河川敷	s, 1.2m
52	浅内休耕田	120	A	水田	t, 0.4m
53	浜浅内墓地	110	A	空地	
54	中浅内畑	106	A	畑	
55	浜浅内畑	115	A	畑	u, 0.9m
56	浅内小学	275	C	段丘上, 建物跡	v, 10m

法が知られている。しかし、相対密度の測定を現位置で地盤に一般的に適用するのは相当に困難であると思われる(石原, 1976)。またN値はボーリング調査を実施しなければならず簡単にはいかない面がある。

一方、物質のS波速度  $V_s$  は次式で与えられる。すなわち、

$$V_s = \sqrt{G/\rho}$$

ここでGは剛性率あるいはせん断弾性係数、 $\rho$ は密度である。このように  $V_s$  は物質の剛性に関する物理量であるから、現位置でS波速度を測定することによって砂地盤の硬さを推定する手がかりが得られる可能性が大きい(狐崎, 1985)。ここでは能代平野の浅層地盤の特性と地震被害との関係を調べるために、市内の各地に56地点の測定地点を設けS波速度測定を行った。測定は1983年6月と1984年8月に被害が集中した地域で44地点、1985年8月に軽被害地域を中心に12地点で実施した。測定地点は公園や空地、田畑地などに選ばれたので測線長は制約があり30~60m位である。受振点間隔は2mか2.5mであり、振源としては砂地盤であることから板叩き法を改良して用いた。Fig. 13には測定地点の位置と参照番号および測定結果である浅層地盤の平均S波速度を示している。

一般的に地盤の表面層は踏み固められたり乾燥してたりして硬くなっている場合が多く、その場合S波速度も大きい。したがって、ここでいう浅層地盤のS波速度とは、深さ1m位から10m位までの間の、多くの場合深度数mの位置の平均速度を意味しており、最上層は除外している。各測定地点名と得られた速度値と共に地震被害の程度を等級分類してTable 2に示してある。こ

こで用いる被害等級A, B, Cとは粒度分析の場合と同じ分類方法によるものである。

Fig. 13を見ると北部の末広町周辺から南へ景林町、松美町、昭南町、青葉町へとS波速度が約90m/sから120m/sの間と小さい。また大須賀、前山、河戸川、浅内地区でも90m/sから110m/s位で小さい値となっている。これらの地区は河戸川周辺を除いていずれも顕著な液状化現象とそれに伴う被害が大量に発生したところである。一方北部の能代公園から南東方向へかけてはS波速度は130m/sから175m/s位と大きくなっており、これらの地域は地震被害が軽微であるか無被害の所でありよく対応している。

次にFig. 14(a)には測定を行った56地点のS波速度値の出現頻度分布を示す。これから大部分が120m/sより小さく、通常の完新世の砂質土層のS波速度に比べて能代の浅層地盤のそれらは著しく小さい値であることが注目される。

例えばS波速度を土質調査資料から推定する式としては最もよく検討されていると思われる太田・後藤(1976)の式、すなわち

$$V_s = 68.79 N^{0.171} H^{0.199} \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} 1.0 \\ 1.086 \\ 1.066 \\ 1.135 \\ 1.153 \\ 1.448 \end{matrix} \right]^F \\ \left[ \begin{matrix} 1.0 \\ 1.303 \end{matrix} \right]^E \end{matrix}$$

を用いて能代平野の完新世の砂層のS波速度を計算してみると150m/sとなる。この場合N値=10、深度H=5m、時代E=1.0(沖積世)、地質F=1.066(中砂)と

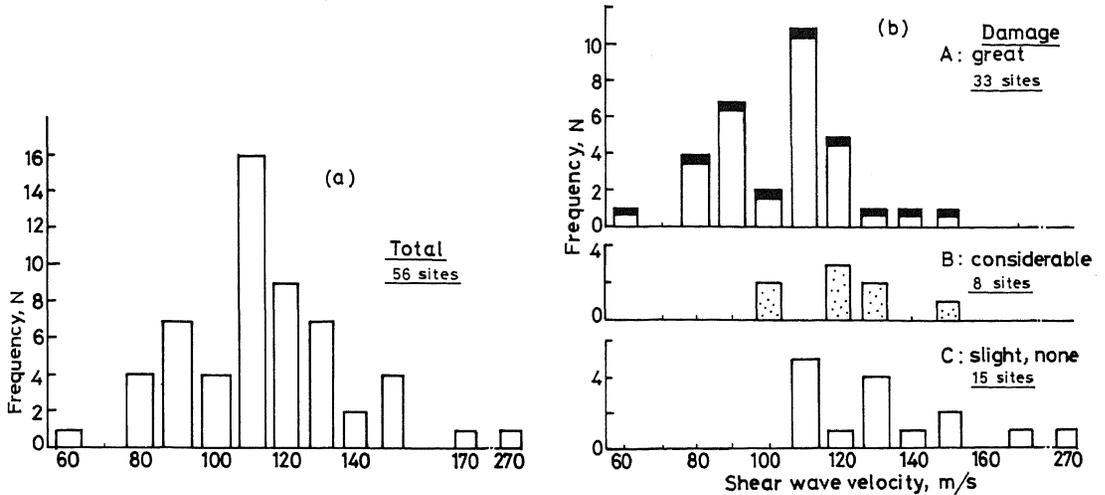


Fig. 14 Histograms showing variation of site numbers divided with relation to the average values of shear velocities measured on the ground and the degree of earthquake damage intensity in the Noshiro City areas.

(a): case for all sites.

(b): case for sites classified depending on the earthquake damage intensity of their surrounding places.

して計算している。また、例えば埼玉県浦和市や川口市で測定される深度数  $m$  の所の沖積世の細～中砂層の S 波速度は 160～180 m/s 位である。このように能代の浅層砂地盤の S 波速度は他の例に比べて 30% から 50% も小さい。能代の砂質土層が粘土やシルト分などの細粒分含有率が小さいことも考え合わせて、このように S 波が小さいということは、能代の砂地盤がかなりゆるく締っていないことを表わしていると考えられる。また Fig. 14 (b) には測定地点周辺の地震被害程度を A, B, C の等級で求め、S 波速度値による測定点数の度数分布との関係を示してある。これを見ると A 等級の測点の大部分の S 波速度が 120 m/s 以下となっている。しかしこのところには例外として大きな値の 25. 土地改良 (140 m/s) と 42. 大須賀広場 (150 m/s) が含まれている。25. については地震後復旧工事として地盤改良が行われたことのために大きな値になったと考えられる。測点 42. の場合は、ここも以前に地盤改良が行われた運動場であるために周辺の測定地点と違って大きな速度になったと考えられる。

次に B 等級のところには分類された測点の中で 31. 墓地公園南と 49. 安宗寺南はいずれも速度が 100 m/s と小さい。測点 31. は墓地内であり周辺に家屋等がないために被害等級の評価が他に比べて少し低くなっているようである。また測点 49. は南中学に近く、この地域は粘性土を主体とする地盤構成であることから B 等級になってい

ると説明される。

また、軽被害の C 等級のところには S 波速度が 110 m/s と小さい測点が 5 地点も入っている。このうち 50. 河戸川改良と 51. 南中学は前述のように粘性土層を主体とする地盤である。さらに 38. 出戸公園北, 39. 出戸公園, 40. 南出戸公園については、これらの測点の近くにボーリング調査資料がないので残念ながら詳しい考察はできない。

#### 4. 考 察

粒度試験の結果から能代平野の砂質土は一部の例外を除いてすべての地域のもが液状化を生じ易い粒径、粒度分布特性を持つことが示された。また S 波速度測定の結果から、日本海中部地震の際に液状化を起した能代平野の浅層砂地盤は約 120 m/s 以下という小さな S 波速度を持つことがわかった。しかし S 波速度が小さいゆるい砂であっても地下水が十分に存在しなければ地盤の液状化は発生しないであろうということを考えると、地盤の S 波速度は地下水位深度と一対にしてはじめて液状化の発生の問題を有効に議論できることになろう。Fig. 15 は測定地点の浅層地盤の S 波速度と地下水位深度と対応させ、地震被害等級との関係を示している。この図で地下水位が -2 m より浅くて S 波速度が 125 m/s より小さい所はほとんど大被害地の A 等級である。例外の s. 南中学は 15 m までを見た場合大部分が粘性土層より構

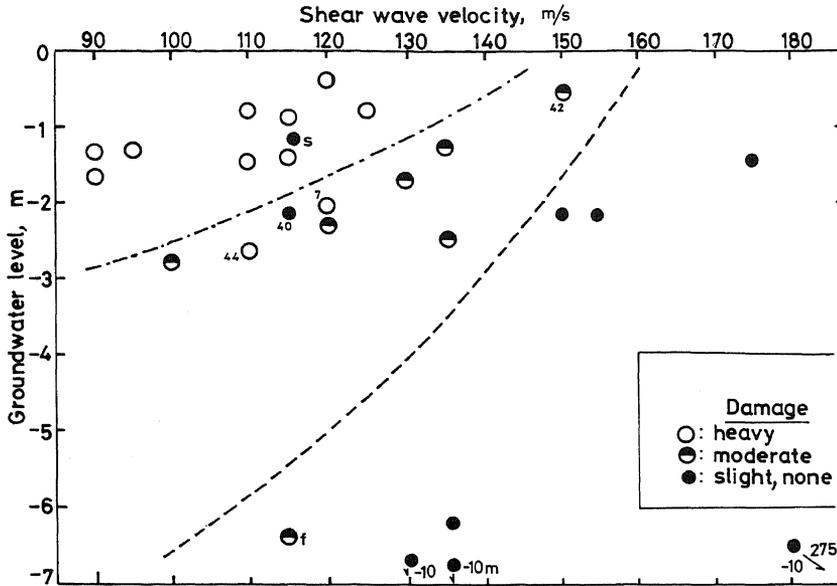


Fig. 15 Classification of investigated sites according to the average values of shear wave velocities measured in situ versus the depths of groundwater level, with regard to the earthquake damage intensity in Noshiro City during the 1983 Japan Sea Earthquake.

成された地盤の所である。このような地盤構造の所は周辺地域に類似する地盤の所があり、いずれも被害が軽微であったことから液状化現象は見られなかったことと符合している。

一方、S波速度が150 m/sより大きくなると地下水位が-2 m位より浅い場合でも液状化は発生していないこと、また速度が130 m/s位の所でも地下水位(G.W.L.)が-4 m~-6 mと深い場合は液状化は顕著には発生しなくなることを示している。

さて Fig. 15 には鎖線で地震被害がA等級の地点のS波速度と対応する地下水位の境界となるところが示されている。同様に破線で液状化発生の地下水位の下限となるところをS波速度との対応関係で与えられている。しかし、これらの2本の線は液状化発生のための外的要因である地震動の性質によって上下に動くものであろう。今回の日本海中部地震により能代で作用した地震動よりも大きな地震力の場合には、鎖線と破線の間のようなS波速度と地下水位の所でも液状化に伴う地震被害はさらに大きくなるものと考えられる。また地震動が今回の場合より小さい時には逆の地震被害は軽微になるであろう。しかしこれらはいずれも能代平野の浅層砂地盤のような非常に悪い地盤条件の場合であることも注意すべきことであろう。

さて、Fig. 15 ではいくつかの例外的な調査地点があ

るように見える。42. 大須賀広場 (150 m/s) は運動場で地盤改良されており、G.W.L. は-0.6 mと浅いにもかかわらず液状化は生じていない。しかし周辺地区は同じようにG.W.L. は浅く、しかもS波速度も110 m/s位と小さいためかなりの液状化に伴う被害が発生している。またf. 光久寺北はG.W.L. は-6.4 mと深いにも拘らず速度が115 m/sと小さいため周辺地域でもかなりの被害が見られた。しかしこの地点については被害を受けた建物の耐震性能なども考慮する必要があるように思われる。いずれはしてもこれらの例はS波速度と地下水位、それに砂質土の性質を総合的に活用して地盤の液状化発生を予測しようとする際に、それだけでは十分でない場合もあることを示している。

しかし能代平野の例のように、特定の地域の地形や地質の資料、地盤調査資料や砂質土の性質などの地盤条件も合わせて分析するならば、S波速度の測定と地下水位の調査を行って地盤の液状化発生の可能性を予測することは実際の問題として有意義であると考えられる。すなわち浅層地盤の硬軟の評価は板叩き法を用いてS波速度測定をすることにより可能である。地下水位の調査はオーガーによる手堀りや電気探査法の比抵抗法により実施すればよい。砂質土試料の採取は容易でない場合もあるが工夫と努力により解決出来ることであろう。このように各地の特定の地域の液状化発生のポテンシャルの評価

に関する調査研究は物理探査技術者に最もふさわしい重要な仕事のひとつと言えるだろう。

## 5. 結 論

各種の現位置測定データの多くは地盤調査資料を合わせて総合的に解析して次のようなことがわかった。

- 1) 米代川の河口域に広がる能代平野の深度約20 mまでの地盤は大部分が砂質土層から成っており、その中にシルト層や粘土層、礫層などが部分的に混在する状態で構成されている。
- 2) 能代で地盤の液状化に伴う被害が多発した地域の深度10 m位までの厚い砂層の中には、粘性土層が10～25%位の割合で薄層状に混入している所が非常に多い。これらが地震時の間隙水圧の上昇と液状化の発生に関与したものと考えられる。
- 3) 能代の砂地盤の液状化は15 mより浅い部分で、大部分は深さ10 m位までの砂層の中で生じていることがわかった。
- 4) 調査した能代の砂質土の大部分は平均粒径が0.3～0.5 mmの細砂または中砂であり、均等係数は1.6～2.2位で粒径のよくそろった粒度分布の悪い砂である。また、細粒分含有率が約2%以下と非常に少ないのも特徴的である。
- 5) 能代の地震被害地域のすべての場所の浅層部の砂質土層はその平均N値は10前後であり締りは悪い。また粒径、粒度分布特性、細粒分含有率などの条件と合わせて能代の砂質土は極めて液状化を発生しやすい性質を持っていることがわかった。
- 6) 地震被害が大きかった地域の浅層部分のS波速度は大部分が約120 m/sより小さく、また地下水位が約-2 mより浅いところである。一方地下水位が-4 m位より深い地域の地震被害は多くは軽微である。
- 7) 今回測定された能代の浅層砂質地盤のS波速度の平均が約110 m/sという値は、国内の一般的な完新世の砂層の速度値より30～50%も小さい。これらの砂質地盤の平均N値は10前後であることを考え合わせて、これらの事実は能代の砂質地盤が非常に締りのゆるい状態であることを示している。
- 8) 浅層地盤のS波速度が約110 m/sより小さい所でも、主としてシルト層や粘土層などの粘性土層から構成された地盤の所では、地下水位が-2 m位より浅い所でも液状化発生は少ない。能代平野の一部には河川周辺のようにそのような地域がある。
- 9) 浅層地盤のS波速度が約150 m/sより大きい所では地震被害は軽微であるか皆無である。また、S波速

度が130～150 m/s位の所では液状化の発生は少なく、地震被害も軽い所が多い。

- 10) 浅層地盤のS波速度測定、砂質土試料の採取と粒度分析、地下水位の調査と地盤調査資料などを合わせて総合的に解析することにより、ある特定の地域の液状化発生の可能性の評価ができることが示された。この場合物理探査の手法が十分有効である。

## 謝 辞

この調査研究を進めるに際しては、能代市（西村節雄市長）の当局と同市総務部の平川賢悦氏には多大の御支援と御協力を頂戴した。また、(株)日本地下探査の川原田宏副社長のほか高屋正氏、神馬幸夫氏からはボーリング調査をはじめ各種の現地計測を実施するときにいろいろな面で大きな御助力を戴いた。さらに、ビック(株)の佐藤長範社長、(株)東京ソイルリサーチの大槻朝雄社長、および日本物理探査(株)の吉田寿寿前社長の諸氏には現地実験を遂行する際に貴重な御援助を賜わった。最後に、査読者氏には有益な御教示を戴いた。ここに記して深く感謝の意を表わします。

## 文 献

- 1) 秋田県 (1984): 昭和58年 (1983年) 日本海中部地震の記録, 被災要因と実例
- 2) 石原研而 (1976): 土質動力学の基礎, 鹿島出版会
- 3) Japan Society of Civil Engineers (1973): Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures, Earth Structures and Foundations in Japan.
- 4) Kishida, Hideki (1969): Characteristics of Liquefied Sands during Mino-Owari, Tohankai and Fukui Earthquake, Soils and Foundations, Vol. IX, No. 1, pp. 75～92.
- 5) 狐崎長環 (1985): 秋田市砂丘縁辺域地盤の地震特性, 秋田大学鉱山学部研究報告, 第6号, pp. 43～60.
- 6) Ohsaki, Yorihiro (1970): Effects of Sand Compaction on Liquefaction during the Tokachioki Earthquake, Soils and Foundations, Vol. X, No. 2, pp. 113～128.
- 7) Ohsaki, Yorihiro (1966): Niigata Earthquake, 1964—Building Damage and Soil Conditions, Soils and Foundations, Vol. 6, No. 2, pp. 14～37.
- 8) 太田裕, 後藤典俊 (1976): S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み, 物理探査, Vol. 29, No. 4, pp. 31～41.
- 9) 斉藤徳美, 阿部司, 小林直太, 中島直吉, 中村操, 野越三雄, 毎熊輝記 (1987a): 秋田県能代市における地盤の振動特性 (1)—微地形・地質および日本海中部地震 (1983年) による地盤災害と微動特性との関係, 物理探

査, 投稿中

- 10) 齊藤徳美, 阿部司, 小林直太, 中島直吉, 中村操, 野越三雄, 毎熊輝記 (1987b): 秋田県能代市における地盤の振動特性 (2)—1983年日本海中部地震で液状化を生じた地盤の微動特性, 物理探査, 投稿中
- 11) Sherif, M. A. and I. Ishibashi (1978): Soil Dynamics Considerations for Microzonation, Proc. of 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, pp. 81~111.
- 12) 渡辺進, 羽竜忠男, 杏沢貞雄, 鍛治義和 (1984): 日本海中部地震における液状化現象と地盤特性, 土と基礎, Vol. 32, No. 9, pp. 35~40.
- 13) 吉見吉昭 (1980): 砂地盤の液状化, 技報堂
- 14) Youd, T. L., J. C. Tinsley, D. M. Perkins, E. J. King, and R. F. Preston (1978): Proc. of 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, pp. 268~278.