

## 液状化による地盤の永久変位の測定と考察

OBSERVATION OF PERMANENT GROUND DISPLACEMENTS  
INDUCED BY SOIL LIQUEFACTION

浜田政則\*・安田 進\*\*・磯山龍二\*\*\*・恵本克利\*\*\*\*

By Masanori HAMADA, Susumu YASUDA, Ryoji ISOYAMA and Katsutoshi EMOTO

Permanent ground displacements, caused by the 1964 Niigata earthquake and the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, were measured by pre- and post earthquake aerial surveys. The maximum detected permanent ground displacement was more than 8 m along the Shinano River in Niigata City and more than 5 m in Noshiro City. The damage caused to bridges, riverbanks, etc., during these two earthquakes was re-examined and it was clarified that such damage was a direct result of these permanent displacements. Furthermore, the mechanism of permanent ground displacements was discussed by inspecting the geological and topographical conditions and it was concluded that the permanent ground displacements were induced by the liquefaction of inclined sandy layers.

*Keywords*: liquefaction, permanent ground displacement, earthquake damage

## 1. はじめに

昭和39年新潟地震をはじめとして、多くの既往の大地震では砂質地盤の液状化により各種の構造物が甚大な被害を受けてきた。液状化による構造物の被害は主として、①地盤の支持力低下による構造物の傾斜・沈下、②過剰間隙水圧の発生による軽い地中構造物の浮上、③土圧の増加による護岸・岸壁のはらみ出し、④過大な変位振幅の発生による構造物基礎の破損、⑤土の強度低下による土構造物の崩壊などである。

これらの被害は、構造物の基礎あるいは近傍の地盤が液状化した場合に生ずる被害であるが、このほかに、広範囲な地盤の液状化により地盤全体がすべり、その変位によって構造物が甚大な被害を受けた事例も報告されている。

新潟地震では、信濃川沿岸地域の構造物の被害状況から、地盤が河心に向かって数mの大きさですべったの

ではないかとの観察が行われている<sup>1)</sup>。また、アラスカ地震(1964年)ではバルデーズ(Valdez)市の沿岸が広い面積にわたって崩れたり<sup>2)</sup>、サンフェルナンド地震(1971年)では傾き1~2%のゆるやかな斜面が液状化に起因してすべった<sup>3)</sup>ことが報告されている。このような地盤全体のすべりが発生すると、地表や地中にある構造物は多大な被害を受けることは明らかであるが、まだ液状化に関する研究は20年余りと浅く、地盤全体のすべり量の定量的な把握や、それが構造物の被害に与える影響についてほとんど明らかになっていないのが現状である。

新潟地震から約20年後に発生した日本海中部地震により、能代市で広範囲な地盤に液状化が生じ、家屋やライフラインが大きな被害を受けた。地表面の亀裂等の状況から地盤がすべりを生じたものと推定されていたが、その変位量については定量的な調査が行われていなかった。そこで著者らは能代市について地震前後に撮られた航空写真をもとに測量を行い、地震による永久変位を測定した。この結果、最大で5mもの水平方向の永久変位が生じていることが示された。さらに地盤調査を行い液状化層の分布を推定した結果、液状化層厚および斜面の傾きと変位量の間に相関性があることが明らかにされた。同じく航空写真測量によって測定された新潟市信濃

\* 正会員 工博 東海大学海洋学部海洋土木工学科  
(〒424 清水市折戸3-20-1)

\*\* 正会員 工博 九州工業大学工学部開発土木工学科  
(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*\*\* 正会員 工博 日本技術開発(株)地震防災室  
(〒160 新宿区大久保2-2-6)

\*\*\*\* 正会員 工修 東海大学海洋学部土木工学科(同上)

川沿岸地域の水平方向変位は、8 m 余りにも達し、地盤全体が河心に向かってすべっていることが明らかにされた。

## 2. 日本海中部地震における地盤の永久変位

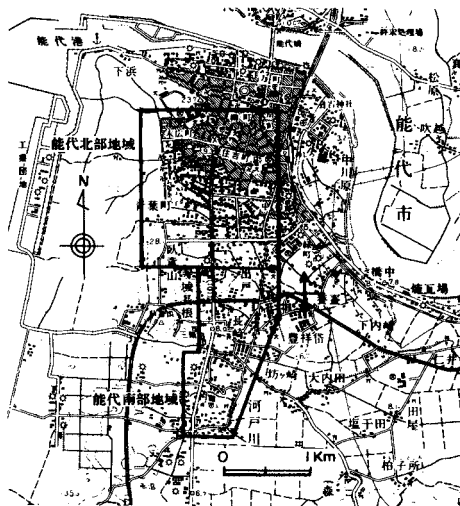
昭和58年5月26日、青森県の西方約90 kmの日本海で発生した日本海中部地震（マグニチュード7.7）は、東北地方の日本海沿岸に甚大な被害をもたらした。比較的震源域に近く、また市街地の大きな部分が新砂丘後背地に形成されている能代市では、市街地を中心として建築物、公共土木施設、ライフライン施設などに多くの被害が発生した。被害の集中した地域では、多数の噴砂・噴水の跡がみられ、広範囲の地盤が液状化したことを示していた。またこれらの地域では、地盤の亀裂、陥没、隆起などが数多く発生した<sup>4)</sup>。

### (1) 測定の方法と精度

地震による地盤の永久変位は、地震の前後において、同一の座標系で測られた2通りの測量結果を比較することによりベクトル量として求めることができる。地震前後で撮影条件の判明している2枚の航空写真があれば、おのおのの空中三角測量を実施することにより、地盤の永久変位を広い範囲で、しかも、均質の精度で測定することが可能である。

図一1に能代市における地盤永久変位の測定領域を示す。この領域は、家屋、埋設管等の被害および亀裂、噴砂などの地盤変状が集中した地域を中心に、かつ無被害地域も含めて設定されている。

永久変位測定に用いた地震前の航空写真は、地震発生の2年前、昭和56年に能代市によって撮影されたものである。地震後の航空写真は、地震発生1週間後に被害



図一1 能代市の地盤永久変位測定領域

状況の調査のために撮影されたもので、地震前後の写真とも縮尺は1/8 000である。

地震前後の航空写真によって地盤の永久変位を測定するためには、地震前後を通じて不動と考えられる基準点の設定が必要である。基準点は原則として測定対象領域周辺の三角点から選定した。いずれの三角点も丘陵あるいは砂丘の頂部に位置し、液状化を含む地盤変状は認められず安定した地点と考えられる。

地盤の永久変位を測定する地点を、ここでは比較測定点とよぶことにする。比較測定点は地震前後の写真において共通して確認される点で、なるべく地表面に固定されたものでなければならない。マンホール、地籍境界の標石、電柱の足、さらに側溝などを優先的に選んだが、比較測定点を十分密に発見できない地域では、被害が報告されていない家屋の屋根の角などが二次的に選定された。写真一1に代表的な地域として南部地域の前山北側（図一3、参照）における比較測定点の選定例を示す。

写真測量の精度は、写真の撮影縮尺、座標の読み取り誤差<sup>6)</sup>などによって支配される。本測定では、前述の基準点の座標値を、光波測距儀およびトランシットを用いた地上測量により測定し、これと写真測量による座標値との差の標準偏差を精度とした。地震前後の写真測量による座標値の差すなわち地震による変位量の精度は、地震前後の精度の2乗和の平方根として表わされる。この結果、図一1に示した能代市の北部地域での精度は水平方向 $\pm 16$  cm、鉛直方向 $\pm 20$  cm、南部地域では水平方向 $\pm 17$  cm、鉛直方向 $\pm 28$  cmと算定されている<sup>7)</sup>。

### (2) 測定結果

地盤の永久変位の測定結果を能代北部と南部地域の2つに分けて図一2、3に示す。図中の矢印は比較測定点での水平方向の永久変位ベクトルを表わしている。また地盤の亀裂等の発生と永久変位の関係を比較するため、秋田大学が調査した地盤変状の分布図を重ねて示す。図一2、3の結果とも砂丘の緩やかな斜面に沿って大きな



写真一1 能代市における比較測定点の選定例  
(南部地域前山北側、○印が比較測定点)

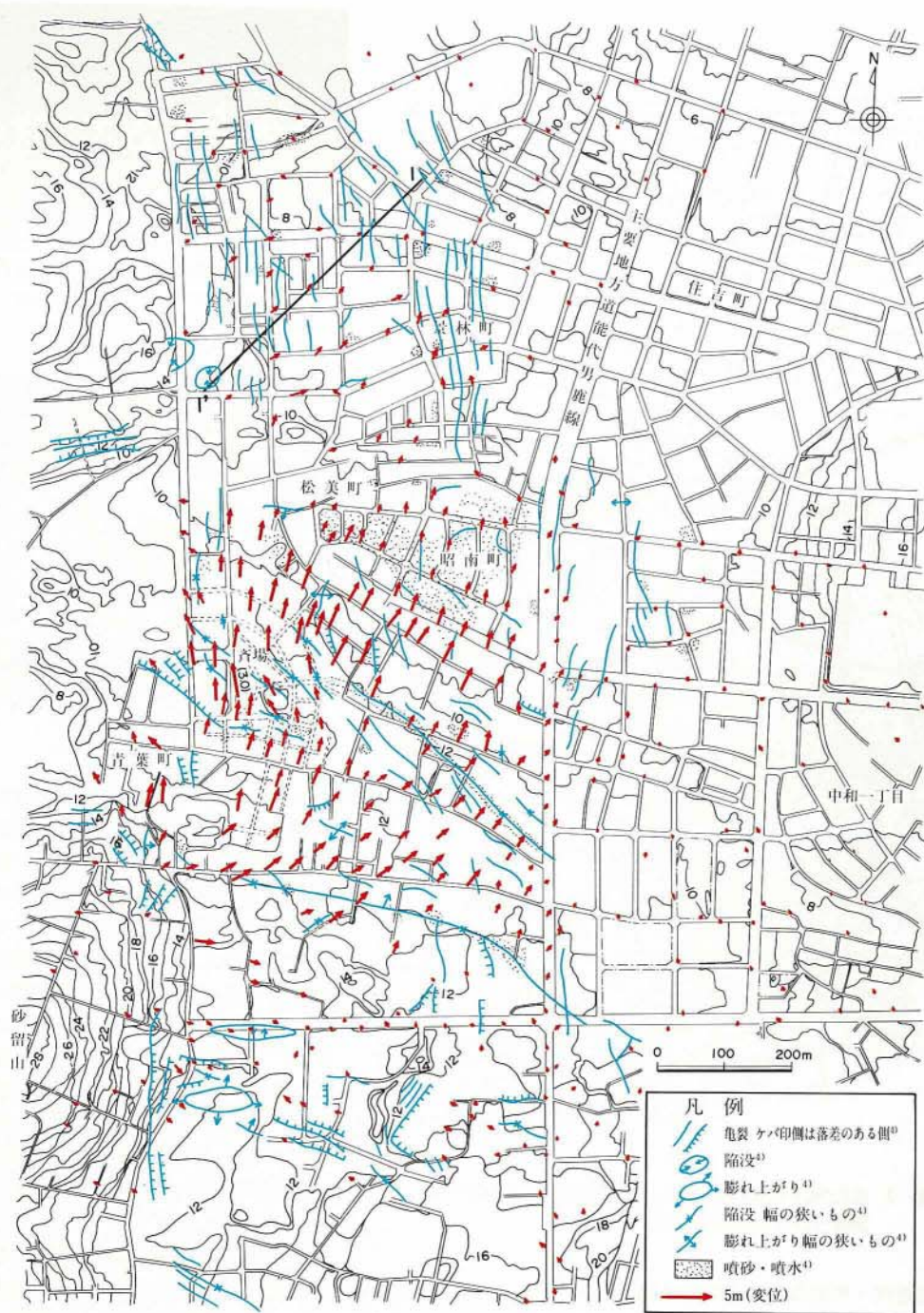
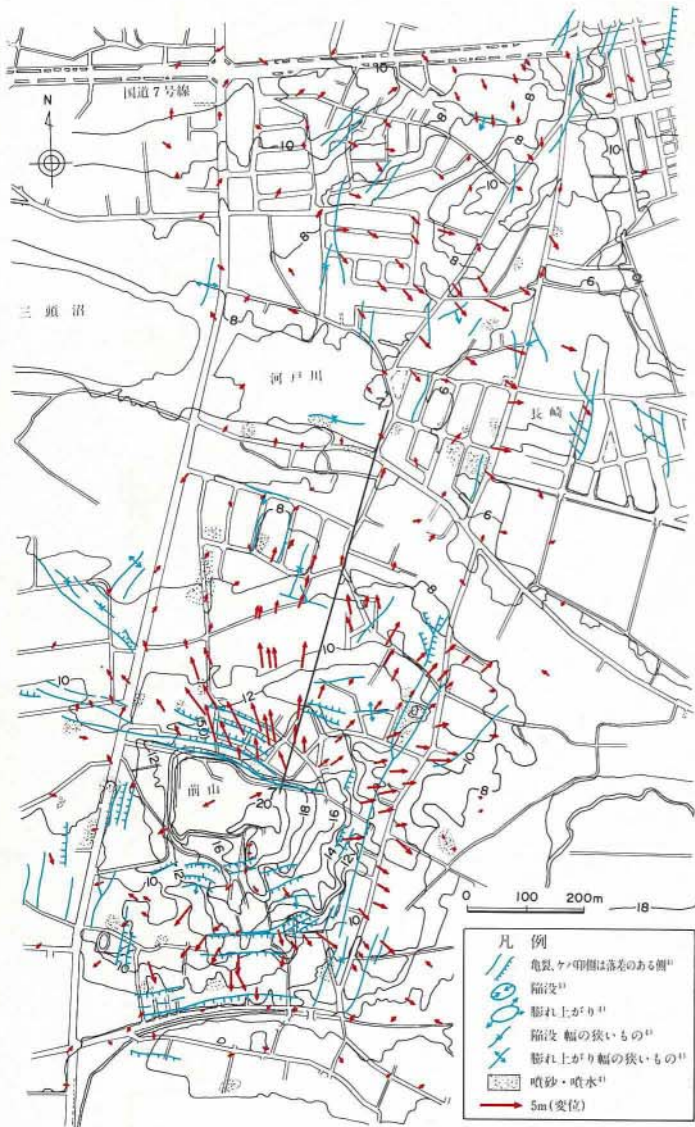


図-2 能代市北部地域の地盤永久変位測定結果および秋田大学調査<sup>4)</sup>による地盤変状の分布

すべりが生じていることがわかる。図-2に示した南西側の標高28mの砂留山の中腹から北あるいは北東方向に向かって長さ約1kmにわたってすべりが生じてお

り、青葉町付近では最大3mの水平変位が発生している。この付近は砂丘の端部に位置し東西あるいは北東～南西方向に緩やかな傾斜を有している。これに対して、





図—3 能代市南部地域の地盤永久変位測定結果および秋田大学調査<sup>4)</sup>による地盤変状の分布

主要地方道能代・男鹿線の東側における変位は1 m以下と小さい。この地域の大部分は砂丘間の低地でほぼ平坦な地形をなしている。

図—3の南部地域で特徴的なことは、図中の南側に位置する前山を中心としたすべりである。標高20 mの前山の頂上を中心としてほぼ放射状にすべりが生じている。特に北側の斜面では最大5 mもの水平変位が発生して



写真—2 能代市斎場(北部地域)における地盤変状の様子(森 芳信氏提供)



写真—3 前山北側(南部地域)の住宅地における地盤変状の様子(北東から撮影したもの。写真左が前山。森 芳信氏提供)

いる。南側斜面のすべりは、頂上より水平距離で約300 m続き、斜面下端を東西に走る道路付近で止まっている。東側斜面のすべりも斜面下端を南北に走る道路を越した付近で収束する傾向をみせている。また北側斜面のすべりは、緩やかな斜面に沿って約400 m以上も続き、河戸川や長崎の手前付近で止まっている。これに対し、図—3のうち最も北側に位置する国道7号線付近からも南東方向へすべりが発生しており、やはり長崎付近で収束している。これらのすべりの方向は斜面の向きとおおむね一致している。

図—2および図—3には、秋田大学によって調査された亀裂、陥没、膨れ上がり等の地盤変状も示している<sup>4)</sup>。図に示した北部地域では、主要地方道能代・男鹿線の西側の青葉町～景林町に至る地域で亀裂、段差が著しいが、この付近では本研究によって測定された永久変位も大きい。この付近の地盤の亀裂・段差の状況を示すものとして、青葉町に近い能代市斎場の地盤変状の状況を写真—2に示す。これに対して能代・男

鹿線の東側では、一部を除いて地盤変状はほとんどみられず、地盤の永久変位も小さい。

図-3に示した南部地域では、頂上直下の北側の崖(高さ5~6m)の下付近で亀裂、段差が著しい。ここでは前述したように変位も大きい。この付近の地震直後の状況を写真-3に示す。これは北東の方向から前山を望んだもので、大きな地盤変状のために地盤が波うったようになっている。このため、この周辺の家屋の大部分が居住不能となる大被害をこうむっている。以上述べたように、亀裂や段差等の地盤変状が著しい地域と永久変位の大きい地域はおおむね一致している。

また、図-2に示した青葉町から昭南町にかけての地域では、地盤の亀裂の方向と永久変位の方向がほぼ直交している。図-3の前山北側斜面では、永久変位の方向が亀裂の方向に対してやや傾いているが、南側、東側の斜面ではおおむね直交していることがわかる。

(3) 液状化層と地盤永久変位の関係についての考察

図-2および図-3で地盤の永久変位の顕著であった地域ではいたる所で噴砂・噴水が認められた<sup>4)</sup>。したがって、地盤の液状化が永久変位発生 の主要因と推定される。このため、永久変位の測定対象領域において、ボーリング(12地点)およびスウェーデン式サウンディング(134地点)による地盤調査を行い、液状化層の存在と永久変位との関係を検討した。地盤調査では既往のボーリング資料も併せて収集し、上記の調査を補間した。

北部、南部の総計27の断面<sup>(注1)</sup>について土層図を作成し、液状化層の推定を行った。紙面の都合上このうち代表的な2断面のみでの土質調査結果と液状化層の推定結果を示す。液状化層の推定は岩崎、龍岡<sup>8)</sup>らが提案した

簡易式により、液状化に対する抵抗率  $F_L$  値が1.0以下となった土層を液状化層とみなした。液状化層の推定に用いた地表面最大加速度は250 gal<sup>(注2)</sup>と仮定した。

図-4に示した2断面から地表面がなだらかに傾斜していることおよび斜面に沿って厚さ1~5mの液状化層が存在することがわかる。ただし、図-4(b)に示したように、南部の断面では、液状化層の上面が地表面下2~3mの比較的浅い位置に存在するのに対して、図-4(a)の北部では、地下水位が深いため、地表面下3~5mのやや深い所に存在している。

図-4には、断面に沿った地盤の永久変位量も示している。ただし、この変位量は断面方向へ変位ベクトルを投影した値である。2つの断面における変位量は、北部で最大1.3m、南部で最大2.4mと南部の方がやや大きい。両断面の斜面全体の平均勾配は、北部で0.9%、南部で1.3%と若干南部の方が大きく、この場合は主に勾配の差が両断面の変位量の相違となったものと考えられる。また断面に沿った変位量の分布をみると両断面とも斜面上部で大きく、斜面を下るにつれて徐々に減少する傾向にある。斜面の終点近くでは、地表面の傾斜が小さくなってゆくとともに液状化層も薄くなっており、変位も収束している。

以上述べたように、能代市における地盤の永久変位は、比較的ゆるやかな斜面に沿って帯状に分布する液状化層の存在に起因するものと考えられる。

3. 新潟地震における地盤の永久変位

昭和39年6月16日に粟島付近を震央とする新潟地震(マグニチュード7.5)が発生した。この地震により新

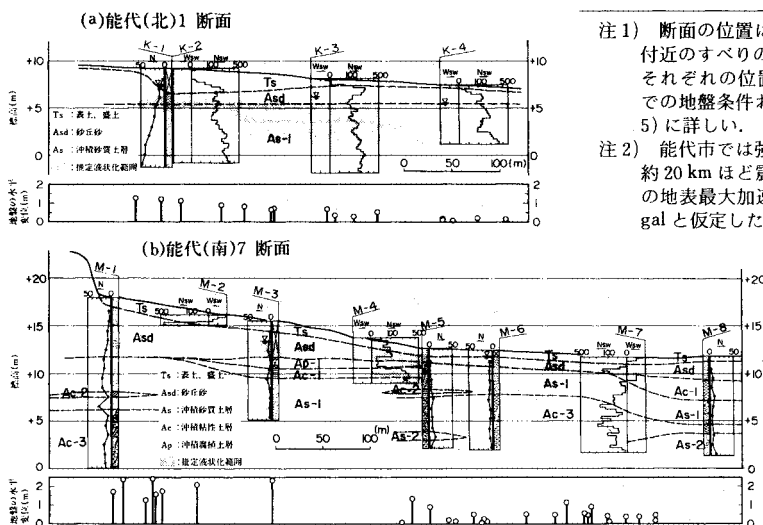


図-4 能代市の代表的な土層断面と液状化層の分布  
(断面の位置は図-2, 3に示す)

注1) 断面の位置は、地盤の永久変位の方向に沿って、その付近のすべりの“ブロック”を代表するように設定した。それぞれの位置は文献7)を参照されたい。また各断面での地盤条件および液状化層の推定結果については文献5)に詳しい。

注2) 能代市では強震観測は行われていないが、能代市より約20kmほど震央から遠い秋田港で205 gal (EW成分)の地表最大加速度が記録されているため、ここでは250 galと仮定した。

(注) ・K-1~K-4, M-1~M-4は土質調査の位置を示す。  
・Nは標準貫入試験によるN値を示す。  
・ $W_{sw}$ ,  $N_{sw}$ はスウェーデン式サウンディングにおける荷重、半回転数を示す。

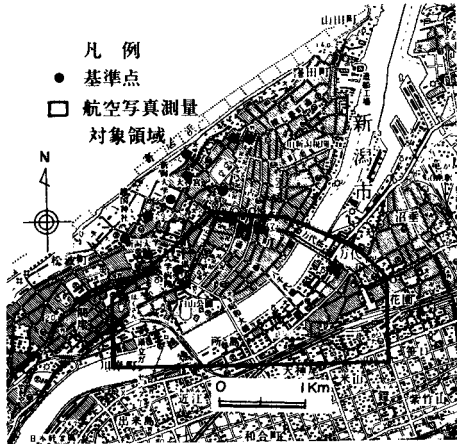


図-5 新潟市の地盤永久変位測定領域

潟県から山形，秋田県にかけての日本海沿岸で多くの構造物が被害を受けた。特に，震央から約 50 km に位置する新潟市では，広い地域で液状化が発生し，建築物，橋梁，石油タンク，ライフライン等多くの構造物が被害を蒙った。市内川岸町の県営アパート地階に設けられていた強震計による最大加速度は 159 gal (EW 成分) で，地震動そのものはそれほど大きくない。被害のほとんどは地震動そのものによるよりは，地盤の液状化に起因したものであった。新潟市内でも液状化の発生しなかった砂丘上の高台などでは，構造物もほとんど被害を受けていない。

### (1) 永久変位の測定範囲

液状化による被害の激しかった信濃川沿いを中心に航空写真測量による永久変位の測定を行った。測定範囲を図-5 に示す。測定の方法は日本海中部地震の場合と同様である。地震前の写真は地震発生前の 2 年前(昭和 37 年)に，また地震後の写真は地震発生後の 4 時間後に撮影されたもので，撮影縮尺はそれぞれ 1/11 000，1/12 500 である。測定のための基準点は，図-5 に示すように北西部の安定した砂丘上に選定した。これらの点は地震によって移動していないと考えられる。

測定精度の算定方法の考え方は能代の場合と同様であるが，新潟市では地上測量を行わず，1/25 000 の地形図より基準点の座標値を求めた。撮影縮尺が能代市の場合より大きいこと，また地上測量を実施していないことから，永久変位の測定精度は能代の場合より低く，水平方向で  $\pm 72$  cm，鉛直方向で  $\pm 66$  cm と見積られている<sup>7)</sup>。

### (2) 測定結果

図-6 に測定結果を示す。永久変位との関連を考察するため図には新潟大学<sup>9)</sup>や国土地理院<sup>10)</sup>の調査による地盤の亀裂や噴砂などの地盤変状の位置も併せて示す。

昭和大桥より川岸町にかけての左岸，万代橋から八千

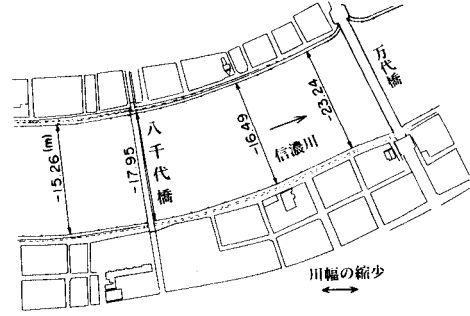


図-7 信濃川川幅の変動に関する補足測量

代橋にかけての兩岸および新潟駅付近で変位が大きいが，これらの地域では図示したように亀裂，噴砂が広範囲に認められる。

特に万代橋の上流側の兩岸および国鉄越後線信濃川橋梁の上流側左岸では，最大 8 m 以上に達する永久変位が河心に向かって生じている。これらの永久変位が測定された測定点は護岸より十分離れた位置に設けられており，護岸の崩壊等による局所的な変位の影響はなく，実際に地盤がこれだけ変位したことになる。すなわち，地震によって信濃川の川幅が大幅に減少したことになるが，これを確認するため，地震前後の川幅の変動のみに着目した航空写真測量を行った。地震前の航空写真より測定される川幅から，地震後護岸の復旧が完全に終わっていた昭和 50 年の航空写真による川幅を差し引き，変動幅を求めた。この一部を図-7 に示す。これによると，たとえば八千代橋～万代橋間で 16～23 m も川幅が縮まっている。これは図-6 に示した兩岸の変位の和より少し大きな値を示しているが，護岸の復旧にあたって崩壊した旧護岸の前面に矢板が打ち込まれており，これを考慮すると両者の結果はほぼ一致しているといえよう。

### (3) 液状化層と地盤永久変位の関係についての考察

図-6 に示す 3 つの断面線に沿って既往の土質資料を収集し，液状化層の推定を行って，永久変位との関係を検討した。断面の方向はほぼ水平変位ベクトルの方向に平行に設定した。液状化層の推定は，前述した日本海中部地震の場合と同様，液状化に対する抵抗率  $F_L$  値による方法<sup>9)</sup>を用い， $F_L$  値が 1.0 以下の土層を液状化土層とみなした。 $F_L$  値の算定に用いる地表面最大加速度は，川岸町の県営アパートでの実測値 159 gal とした。図-8 は土層断面と断面に沿った永久変位を示す。後述するように各橋梁の橋台近傍の変位は，橋台により拘束されて小さな値となっていることが考えられるため，近傍の水平変位ベクトルを比較して，その影響を受けていないとみなされる変位量を示している。

図-8 に示す液状化層や地形をもとに，地盤に永久変位が生じた原因を断面ごとに以下に考察する。また，地





図一六 新潟市の地盤永久変位測定結果および新潟大学の調査<sup>7)</sup>による地盤変位の分布

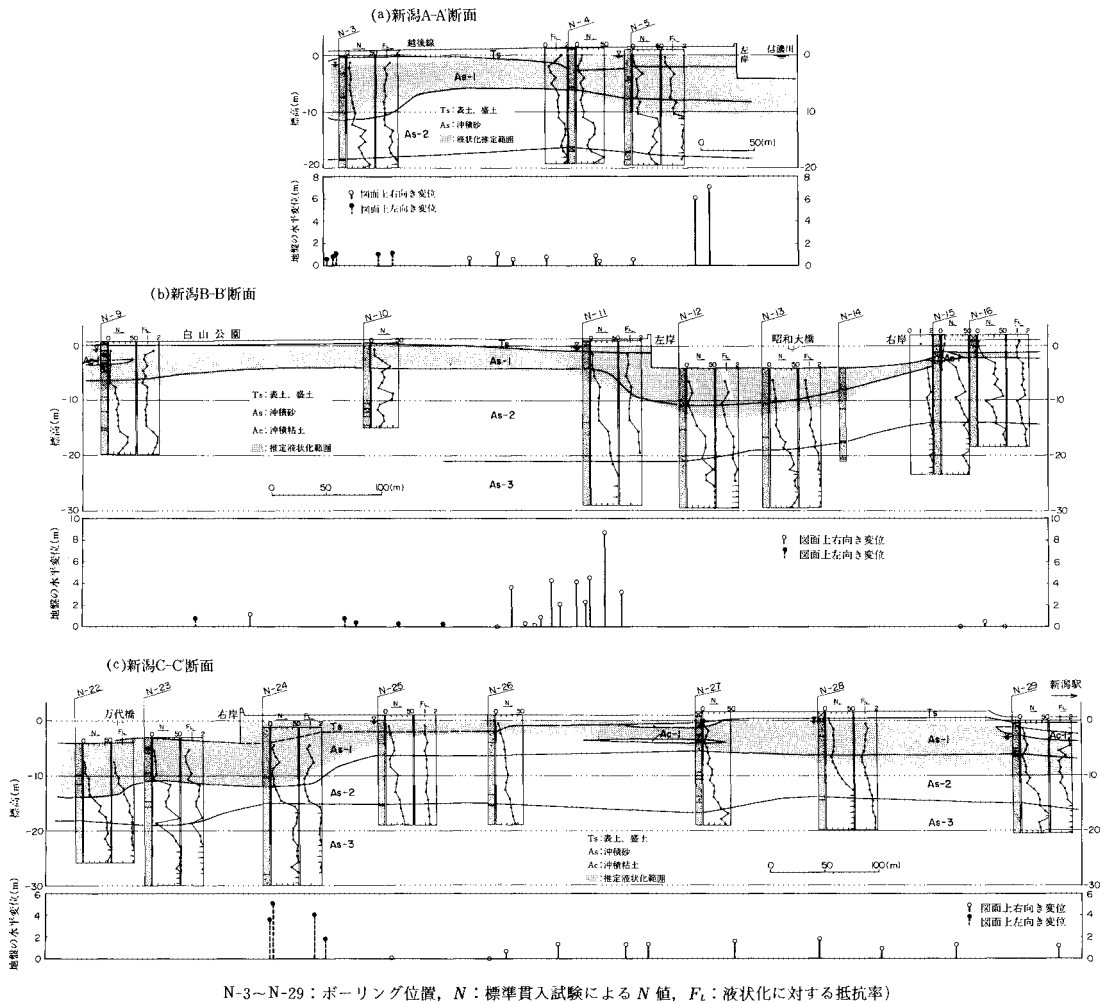


図-8 新潟市の代表的な土層断面と液状化層の分布 (断面の位置は図-6 に示す)

盤が移動したことを示唆している構造物の被害状況についても既往の地震調査報告書を調べ、測定結果と比較する。

A-A'断面に沿っては越後線のすぐ南側(図-8(a)では右側)付近から信濃川の手前まで川に向かって1m程度の変位が生じているが、河岸から約40mの所で急激に大きくなり7m以上に達している。この地域の地表面と液状化層の上面はほぼ平坦であるが、液状化層の下面は河心に向かってゆるやかに傾斜し、河岸付近では液状化層厚が10mを越えている。

文献1)によると河岸に位置する白山変電所では、図-9に示されるように「変電所をほぼ中心として幅300m、奥行100mにわたる地域が地震時に信濃川に向かって7m程度地すべり移動した」と述べられている。また構内にある送電鉄塔も移動し、信濃川を横断する送電線がゆるみ、修復にあたり約4mの短縮を要したこと

も述べられている。これらの被害と航空写真による測定値はよく一致しているといえよう<sup>注3)</sup>。

同じA-A'断面でも国鉄越後線より北側(図-8(a)では左側)では変位の向きが信濃川と反対方向を向いている。断面図をみると液状化層の下面がここでは北側に向かって下がる傾向を示しており、このことが反対向きに変位が生じた原因と考えられる。

B-B'断面では白山公園付近の変位は1m程度と小さく方向も一定でないが、左岸の川岸から100mくらいの付近から川岸に向かって変位が急増し、最大8m余りに達している。逆に右岸側では変位量は1m以下と小さい。断面図によれば、白山公園付近では液状化層が

注3) 白山変電所の対岸(右岸)では地盤変状もなく、永久変位も生じていないと考えられる。送電線の河心軸に対する傾きを $45^\circ$ と仮定すれば、ケーブルのゆるみは $7.0\text{ m} \div \sqrt{2} \approx 5\text{ m}$ となる。



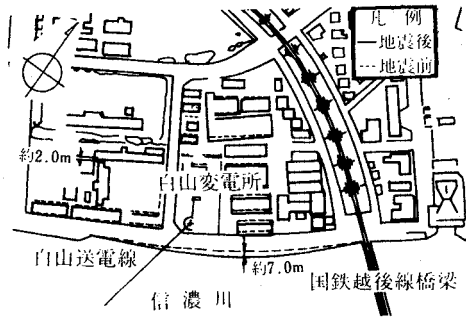


図-9 白山変電所でのすべり発生状況<sup>1)</sup>

4~5 m 程度ではほぼ水平である。これに対し、川岸から 100 m くらいの位置から急激に液状化層の厚さが増大し、護岸付近で 12~13 m になっている。このように層厚が厚いことや下面が傾いていること、また護岸が存在しすべりやすい地形となっていることが、大きな変位を生じさせた原因と考えられる。逆に右岸側では液状化層はほとんどなく永久変位も小さい。

既往の報告によれば、昭和大橋左岸側の取付道路盛土の側壁の目地が図-10 に示すように総計 118 cm 開いていた<sup>11), 12)</sup>。図-10 には取付道路付近の永久変位も併せて示すが、取付け始点付近のベクトルは橋軸とほぼ直角の方向を向いており、橋軸方向の変位はほとんど 0 とみなされる。また終点(橋台位置)での変位の橋軸方向成分は約 1.6 m で、取付盛土が橋軸方向へ伸びたことを示している。この値と前述の開きの測定量はほぼ合っている。また、橋台に近づくにつれて地盤の永久変位が減少しているのは、橋台の存在によって地盤のすべりを局部的にくい止めていたためと考えられる。同様に橋梁が

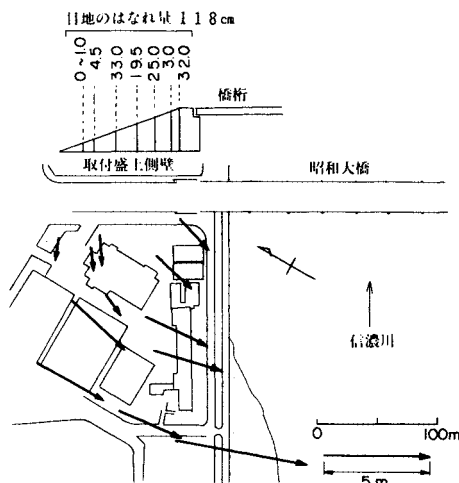


図-10 昭和大橋左岸の永久変位と取付道路側壁の目地のなれ(側壁の図は文献9), 10)による)

地盤のすべりをくい止めたと考えられる現象は万代橋や越後線信濃川橋梁でもみられ、復旧にあたっては図-7 の万代橋の左岸に示されるように、護岸の法線は橋台のところだけ入りこんだ形状で施工されている。

万代橋に沿った C-C' 断面では、両岸とも川に向かって大きな永久変位を生じている(図-6)。右岸では図-8(c) に示すように液状化層厚が河心に向かって急増し、かつ液状化層下面も傾斜している。しかし、新潟駅に向かって川から約 250 m 離れると、1~2 m 程度の変位が川と反対方向に生じている。この区間の地表面は平坦であるが、液状化層の下面が信濃川と反対向きに約 1% の勾配で傾斜している。このため逆向きの変位が生じたと考えられる。図-6 に示すように、新潟駅の南側でも信濃川と反対方向に永久変位が生じている。1600 年代の旧地形図<sup>12)</sup>によれば、新潟駅付近は信濃川の旧河道に位置しており、このことが液状化層が傾斜し、永久変位が信濃川と反対方向に生じたことの一因と推定される。

新潟駅の北側の鉄筋 3 階建てのビルで、地震後約 20 年経って改築のため基礎杭が引き抜かれたが、12 m の既製 RC 杭が破壊していることが観察された<sup>13)</sup>。図-11 に破壊状況を示すが、2 か所で破壊し約 1~1.2 m 水平にずれ、またそのずれの方向はすべての杭で共通し、南南東に向いていた。今回の測定によっても、この付近で

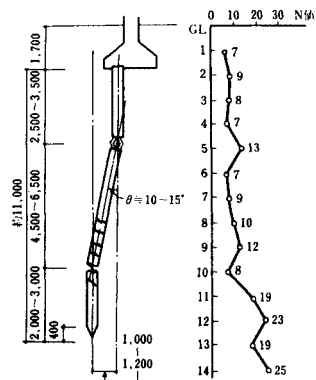


図-11 基礎杭の被害<sup>13)</sup>

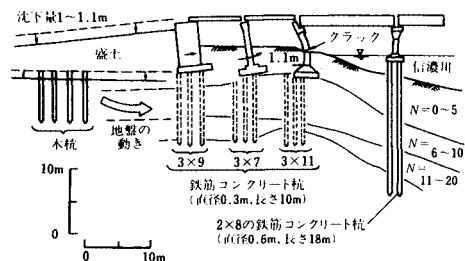


図-12 八千代橋の被害概念図(文献12)を簡略化して描いたもの)

は1~1.5mの南々東向きの変位が得られており、両者の結果はよい対応を示している。

図-12には文献<sup>14)</sup>に述べられている八千代橋の被害状況を示す。八千代橋では兩岸とも図示したように橋台が足もとからすくわれたような動きをしており、地盤がすべったことを示している。図-6の測定結果でもこの付近は兩岸とも数m河心に向かってすべっており、測定結果とよく一致しているといえよう。

#### 4. ま と め

能代市と新潟市を対象にし、それぞれ日本海中部地震、新潟地震によって生じた地盤の永久変位を、地震前後の航空写真測量により測定した。また、永久変位の測定領域について、ボーリング等による土質調査および既往土質資料の収集を行って、液状化層の推定を行った。さらに地表面の傾きや液状化層の厚さなど、地形、地盤条件と永久変位の関係について考察した。これらの結果、以下のことが明らかにされた。

(1) 能代市では地表面勾配6%以下のゆるやかな斜面に沿って、最大5mにも達する永久変位が生じていた。また新潟市の信濃川沿岸の地域では河心に向かって最大8m余りにも及ぶ永久変位が生じていた。

(2) 能代市ではゆるやかな斜面に沿って厚さ1~5mの液状化層が帯状に存在すること、また、新潟市の信濃川沿岸では厚さ約10mの液状化層が河心に向かって傾斜していることが示された。能代市、新潟市とも地盤の永久変位が生じている地域では噴砂やクラックが生じており、液状化が生じたことを裏づけている。以上のことから地盤の永久変位は液状化によって生じたものと推定された。また、永久変位と地形・地盤条件との関係の考察から、地表面の傾き、液状化層下面の傾きおよび護岸の存在が永久変位量に影響を与えていることが明らかにされた。

(3) 新潟地震による信濃川の川幅の変動状況および橋梁、送電鉄塔、建物基礎杭の被害状況は、航空写真による永久変位の測定結果と定性的かつ定量的によく一致しており、測定結果の妥当性が確認されるとともに、構造物被害の多くが地盤の永久変位に起因していることが示された。

なお、本研究の成果をもとに文献<sup>5)</sup>では地盤の永久変位に影響を及ぼす要因の分析および永久変位と地震被害

の定量的相関性が研究されている。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり絶大なご指導を頂いた埼玉大学の久保慶三郎教授をはじめとする関係者各位に感謝する。また、能代市の被害状況の写真は日本大学 森 芳信教授に提供していただいたものであり、お礼を申しあげる。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会新潟地震調査委員会編：昭和39年新潟地震震害調査報告，1966。
- 2) Seed, H. B. : Landslides During Earthquakes due to Soil Liquefaction, J. SMFD, ASCE, Vol. 94, No. SM 5, pp. 1055~1122, 1968.
- 3) Youd, T. L. : Landsliding in the Vicinity of the Van Norman Lakes, U.S. Department of the Interior, U.S. Department of Commerce; The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, Geological Survey Professional Paper 733, 1971.
- 4) 能代市：昭和58年(1983年)5月28日日本海中部地震、能代市の災害記録，1985。
- 5) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文報告集，第376号/Ⅲ-6，1986年12月。
- 6) 鈴木惣一：セールスエンジニアのための空中写真測量マニュアル，全通出版，1984。
- 7) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. : Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements, Association for the Development of Earthquake Prediction, 1986.
- 8) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，1978。
- 9) 新潟大学・深田地質研究所：新潟地震地盤災害図，1964。
- 10) 建設省国土地理院：新潟地震一被害状況と土地条件，1965。
- 11) 建設省土木研究所：新潟地震調査報告，土木研究所報告，第125号，1970。
- 12) Waseda University : Special Issue on Niigata Earthquake, Bulletin of Science and Engineering Research Laboratory, No. 34, March, 1966.
- 13) 河村壮一・西沢敏男・和田暉暎：20年後の発掘で分かった液状化による杭の被害，NIKKEI ARCHITECTURE, 1985年7月29日号，pp. 130~134, 1985。
- 14) 龍岡文夫：新体系土木工学18，土の力学(Ⅲ)，動的解析，技報堂，1981。

(1986.5.27・受付)