

液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究

STUDY ON LIQUEFACTION-INDUCED PERMANENT GROUND DISPLACEMENTS AND EARTHQUAKE DAMAGE

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

By using the measured data of liquefaction-induced permanent ground displacement due to the 1969 Niigata, the 1971 San-Fernando and the 1983 Nihonkai-Chubu earthquakes, the primary factors governing the magnitude of the ground displacement were quantitatively discussed. It was clarified that the thickness of the liquefied layers and the gradient of the ground surface and/or the liquefied layer were most influential on the displacement magnitude, and an experimental formula was proposed for the estimation of the permanent ground displacement. Also, quantitative correlations of the magnitude of the permanent ground displacement with the degree of damage to structures such as houses and buried pipelines were analysed. Furthermore, permanent ground strain was calculated from the observed displacements, and the correlation with earthquake damage such as ground failure was discussed.

Keywords : liquefaction, permanent ground displacement, earthquake damage, buried pipe

1. ま え が き

著者らは、昭和58年日本海中部地震の能代市および昭和39年新潟地震の新潟市において、航空写真測量による地盤の永久変位の測定を行い、地盤の永久変位が砂質土層の液状化に起因すること、および橋梁、護岸等の被害状況が測定された地盤の永久変位と定量的、定性的によく一致することなどを明らかにし、これをすでに報告している¹⁾。本論文はこれらの永久変位の測定結果、および家屋、埋設管等の地震被害の調査研究結果をもとに、

(1) 地盤の永久変位量に影響を与える主要な要因を定量的に分析し、永久変位を簡略に求めるための推定式を提案する

(2) 永久変位と家屋、埋設管等の被害の関係を定量的に考察する

ことを目的としている。

2. 永久変位の要因に関する考察

日本海中部地震において能代市では、ゆるやかな砂丘斜面に沿って最大5mもの永久変位が発生した。斜面に沿って帯状に分布する液状化層が永久変位の原因と推定された。さらに新潟地震における信濃川沿岸地域では8mを超える永久変位が測定され、液状化層の傾きや護岸の存在が永久変位の大きさに強い影響を与えていることが示された¹⁾。

本論文では、上述の定性的な分析を踏まえ、より広い範囲で地盤・地形に関する要因を定量化し、永久変位量との相関性を調べる。さらに抽出された相関性の高い要因を用いて永久変位量を簡略に求める推定式を作成する。なお、要因分析においては、上述の能代、新潟の測定結果に加えて、1971年サンフェルナンド地震において発生した液状化による永久変位(Juvenile Hall付近の地すべり)も対象とした。この永久変位の概要を主に文献2), 3), 4) から引用して付録にまとめる。

(1) 要因分析の方法

地盤の永久変位に影響をもつ要因として、地表面の勾配、液状化層の厚さ、液状化層の深さ(上面と下面の深さ)、液状化層の勾配(上面と下面の勾配)、液状化に対する抵抗率 F_L 値の最小値および液状化指数 P_L 値²⁾を考

* 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 海洋学部海洋土木工学科
(〒424 清水市折戸3-20-1)

え、それぞれ永久変位との相関性を検討した。

a) 要因の定量化

図—1, 2 に、定量的な相関分析を行うために設定した能代市および新潟市の土層断面の位置を示す。いずれの断面も変位ベクトルにはほぼ平行に設定されている。能代市では北部、南部合わせて 27 の断面を設定した。また新潟市では信濃川をほぼ直角に横断する方向に 4 断面および新潟駅付近で 1 断面を設定した。次にそれぞれの断面に沿って既存の土質資料の収集および新たな土質調査を行い、土層断面図を作成して岩崎、龍岡⁶⁾らの簡易式により、液状化に対する抵抗率 F_L 値が 1.0 以下になった土層を液状化層とみなした^(注1)。

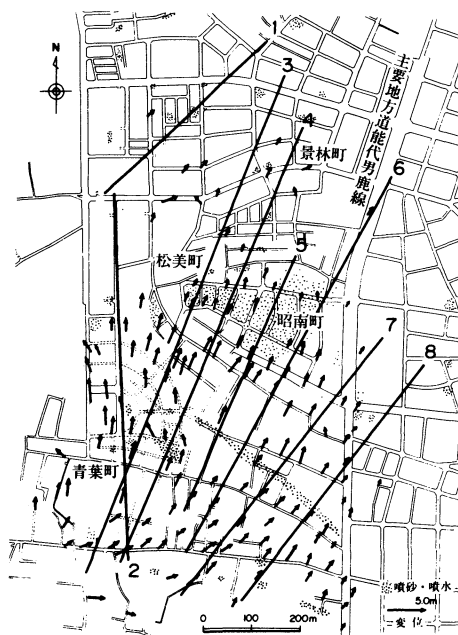
- ① 各土層断面を、永久変位の分布、局所的な地表面の傾きおよび液状化層の分布状況を勘案して、図—3 (a) に模式的に示すようにいくつかの部分に分割する。これを“部分斜面”とよぶ。部分斜面は地盤のすべりが 1 つのブロックとみなせる領域を表わす。能代市では 1 つの断面に長さ 50~100 m の部分斜面を 3~6 個設定している。新潟市の信濃川沿岸地域では図—3 (b) に示すように液状化層の下端が河岸と河心ではほぼ水平となると推定される 2 点間を部分斜面とする。
- ② 前述した各種の要因および地盤の永久変位はすべて部分斜面の平均値とする。
- ③ 液状化層が 2 層以上に分かれる場合はその中間層の厚さも液状化層の厚さに加えた。ただし、対象としたデータで液状化層が 3 層以上になるものおよび中間層が 3 m を超えるものはなかった。
- ④ 信濃川沿岸地域の地盤変位は護岸の存在に大きく影響されていると考えられるため、護岸の影響すなわち川の存在を要因として考える必要がある。そこでこの場合の部分斜面の勾配を（地表から河底までの深さ）／（部分斜面の水平距離）としてその影響を考慮した。

b) 要因分析の結果と考察

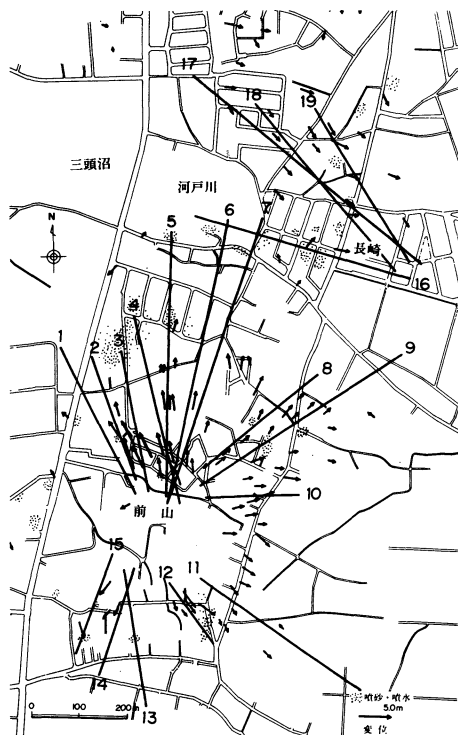
上記のようにして得られた定量的データを用い、永久変位と各種要因の間の相関性を調べた。ここでは主として、比較的強い相関性が認められた要因に関する結果を示す。

部分斜面の地表面勾配と永久変位の関係を図—4 に示す。能代、新潟およびサンフェルナンドのデータ全体で

はかなりばらつくものの、勾配が増加するに従って永久変位が増大する傾向にある。新潟で勾配の大きいデータは護岸を含む部分斜面のもので、前述した方法で勾配を



(a) 北部地域



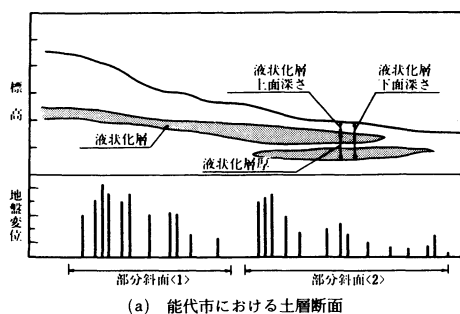
(b) 南部地域

図—1 能代市の土層断面の位置と永久変位の概略

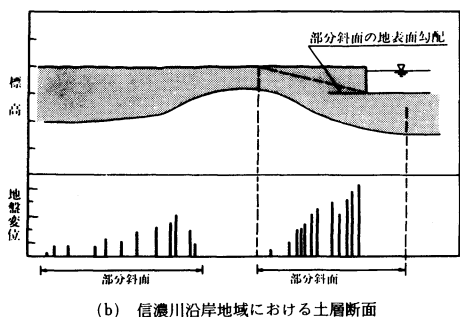
注1) 液状化に対する抵抗率 F_L 値を算定するために必要な地表面加速度は、能代市で 250 gal、新潟市で 159 gal とした。能代市では地震記録は得られていないが、能代市より約 20 km ほど震央から遠い秋田市で 205 gal (EW 成分) が観測されているため、250 gal を仮定した。また新潟市では、川岸町の県営アパートで観測された最大加速度 159 gal を用いた。



図—2 新潟市の土層断面の位置と永久変位の概略



(a) 能代市における土層断面



(b) 信濃川沿岸地域における土層断面

図—3 要因分析に用いるデータの定量化の模式図

算定している。これらの地点での永久変位は全体的な傾向からみるとやや大きめの値を与えており、部分斜面の算定方法に考慮の余地があるものと考えられる。

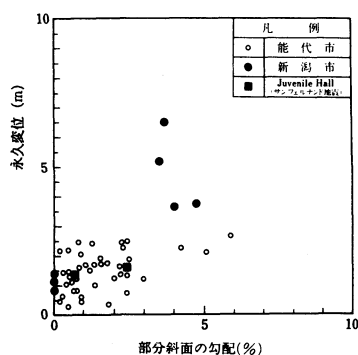
図—5に液状化層下面の勾配と永久変位の関係を示す。新潟のデータは比較的良好な相関性を示すが、能代のデータのみでは明瞭な相関性は認められない。これは能代では液状化層下面がほぼ水平な場合が多く、永久変位が液状化層下面の勾配よりも地表面の勾配に支配されているためと考えられる。

勾配に関する要因については、上記の部分斜面の地表面勾配と液状化層下面の勾配のほか、液状化層上面の勾配および能代市では図—1で設定した土層断面全体の勾配についても検討したが、永久変位との間にはほとんど相関性が認められなかった。

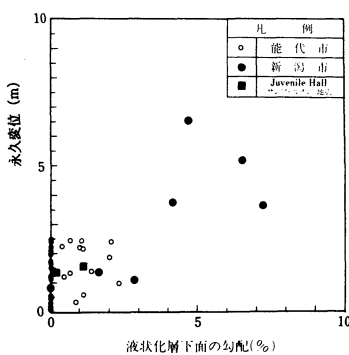
以上述べたように、勾配に関する要因については1つの要因だけで能代と新潟を共通して説明し得るものは見出せない。これは能代と新潟ですべりの形態が異なっているためと考えられる。地表面が傾斜している場合も、液状化層下面が傾斜している場合も、“斜面”という概念でくくられるとすれば、その勾配は、両者の大きいもので代表されると考えられる。そこで比較的良好な相関性が認められた地表面の勾配と液状化層の勾配の大きいものと永久変位の相関性を検討した。これを図—6に示す。能代、新潟のデータとともに最大勾配が大きくなると変位が大きくなる傾向を示し、2つの地震による地盤の永久変位を共通して比較的良好に説明していることがわかる。

図—7に液状化層の厚さと永久変位の関係を示す。能代のデータは液状化層厚3m以下、変位3m以下に集中しているが、新潟、サンフェルナンド地震のデータを加えると、全体としてかなり良好な相関性を示し、液状化の厚さが永久変位の支配的な要因であることがわかる。

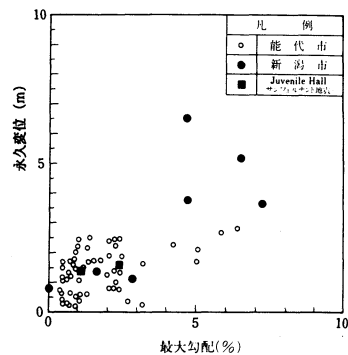
図—8に岩崎、龍岡⁶⁾らによる液状化の度合を示す指数 P_L 値と平均変位の関係を示す。ただし、サンフェルナンド地震のデータについては、 N 値、粒度特性などに関する十分な土質資料が報告されていないため、ここでは省略した。 P_L 値は各土層の液状化に対する抵抗率 F_L 値を深さ方向にある重みをつけて積分した値で、液状化層の厚さに依存した指標である。このため、図—7



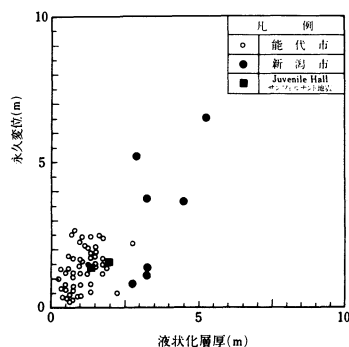
図—4 部分斜面の地表面勾配と永久変位の関係



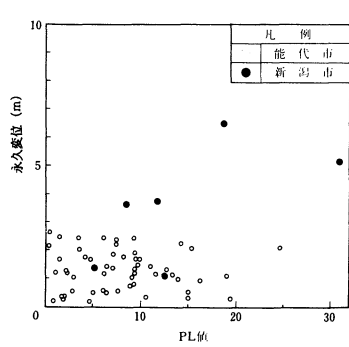
図—5 液状化層下面の勾配と永久変位の関係



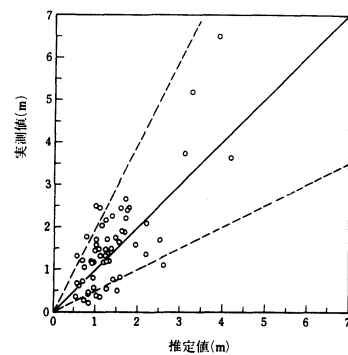
図—6 部分斜面の地表面勾配と液状化層下面の勾配の最大値と永久変位の関係



図—7 液状化層厚と永久変位の関係



図—8 液状化指数 P_L 値と永久変位の関係



図—9 回帰式による値と実測値の対応

に示した液状化層厚の場合と同様に、ある程度の相関性が期待されるはずである。しかし能代のデータでは P_L 値が 0~25 の範囲にばらついており、永久変位との相関性はほとんど認められない。一方、新潟データでは数はある程度の相関性は認められる。これは、新潟では液状化層の分布が比較的単純であり、液状化層厚と P_L 値がある程度対応しているが、能代では液状化層の分布が複雑で、かつ液状化層が 2 層になった場合中間層も液状化層と考えるなどの工学的な判断を加えているためと考えられる。また P_L 値は液状化の程度をおおむね示すために考え出された指標であり、今回対象としている“すべり”のメカニズムに特に対応した力学的な根拠を有した指標ではないことも理由の 1 つと考えられる。

(2) 地盤永久変位の重回帰分析

前節において、液状化層の厚さおよび地表面の勾配と液状化層下面の勾配の最大値が、永久変位との相関性も高く、現象を説明するのに適切な要因であることが明らかにされた。

そこで、本節においては上記 2 つの要因と地盤の永久変位の重回帰分析を行った。回帰式の形としては、2 つの要因の和をとる形式および積をとる形式を考えたが、

ここでは永久変位との相関性が比較的良好であった積の形式の結果について述べる。重回帰分析解析より算定された回帰係数の数値をまとめ、次に示す式を得た。

$$D = 0.75 \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\theta}$$

ここで、 D ：地盤の永久変位 (m)

H ：液状化層の厚さ (m)

θ ：地表面勾配および液状化層下面勾配のうち最大の勾配 (%)

図—9 に実測値と上式による推定値の対応関係を示す。図中の点線は推定値が実測値の 2 倍および 1/2 倍の範囲におさまる領域を示したもので、回帰式はほぼ倍半分の範囲で実測値を説明していることがわかる。

上記の永久変位の回帰式は、能代、新潟、サンフェルナンド地震における限られたデータに基づいて作成されたものである。変位の小さい領域 (3 m 以下程度) は能代のデータの影響が強く、数%以下の比較的ゆるやかな勾配で斜面に沿って地盤がすべっていく場合によく適合し、変位の大きい領域では、新潟の信濃河沿岸でみられたような護岸沿いのすべりのデータに基づいている。回帰式は、上記の形態の異なる永久変位のデータをあわせて合わせて作成されたものであり、今後のデータの蓄積

により、改善されるべきものである。なお、この回帰式は、盛土や斜面の崩壊に対しては当然適用し得ない。また、能代や新潟の地盤は比較的粒度のそろった砂からなっており、細粒分を含む砂に回帰式を適用するに際しては注意を要する。

3. 地盤の永久変位およびひずみと地震被害の相関性に関する考察

日本海中部地震における地盤の永久変位およびひずみと家屋、埋設管等の被害率との定量的な相関性について考察する。

(1) 地盤の永久変位と地震被害の相関性

能代市の北部、南部2地域の1900余りの測点で観測された地盤の水平方向の永久変位を次の手順で整理し地震被害との相関性の分析に用いた。

- ① 図-10に示すように能代市のほぼ全域を100 mのメッシュに分割し、メッシュ内の測点の永久変位の平均値を求める。平均値はベクトルの方向を考慮せず絶対値の平均とした。
- ② 100 mメッシュを基本単位としたが、隣接するメッシュで永久変位の大きさ、方向がほぼ同様とみなされる場合は、これらを併せて1つのブロックとした。これは、家屋や埋設管と永久変位との相関解析で、ブロックをなるべく広くとりそこに含まれる被害件数を増やして解析結果の信頼性を上げるためである。
- ③ 家屋、埋設管の被害をメッシュあるいはブロック内で集計して被害率を求め、これと永久変位との相関性を分析した。

図-11に各ブロックで求められた地盤の永久変位の分布を示す。なお図中白地の部分は永久変位の測定を行っていない領域である。

家屋の被害率と永久変位との関係を、図-12に示す。被害率は、能代市による家屋被害分布図により、各ブロックごとの全・半壊戸数を集計し次式より求めた。

$$\text{被害率(\%)} = \frac{\text{全壊戸数} + 0.5 \times \text{半壊戸数}}{\text{ブロック内総戸数}} \times 100$$

なおブロック内の総家屋数が75戸以下の点はデータの精度を上げるために図より除外している。家屋の被害率と永久変位の間には比較的高い相関性があることがわかる。しかし永久変位が小さい割には家屋の被害率が高い地点もある。たとえば図中*印で示した点は北部地域の景林町のブロックで、図-1(a)および図-16(後出)で示すようにこの付近では噴砂、亀裂などにより、液状化の発生が確認されているが、永久変位は小さかった地域である(詳しくは文献1)参照)。このことから、家屋の被害については、地盤の永久変位のみならず、液状化

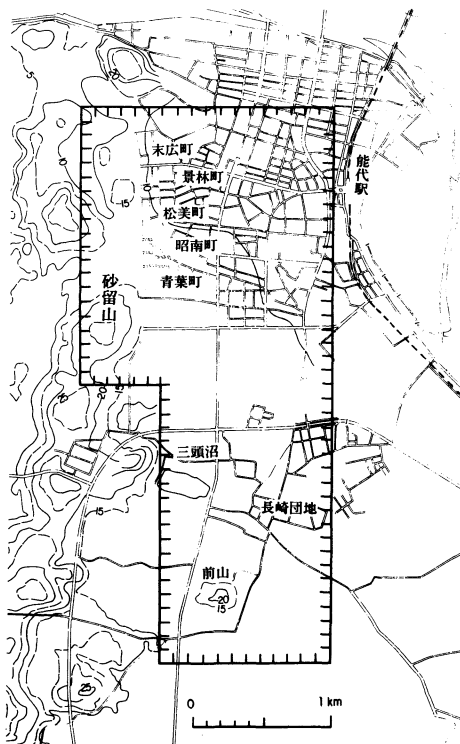


図-10 能代市街地とメッシュ分割

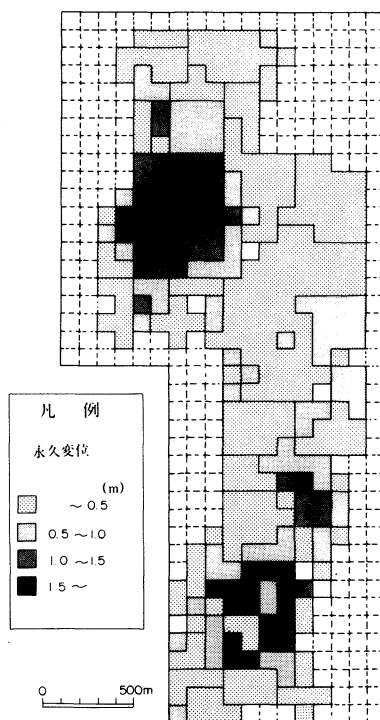
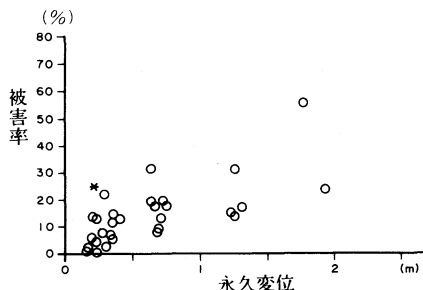
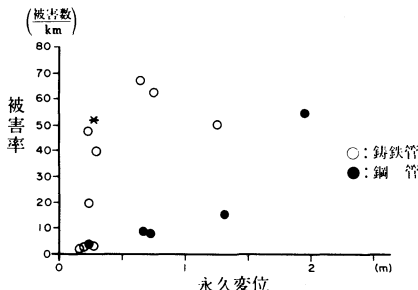
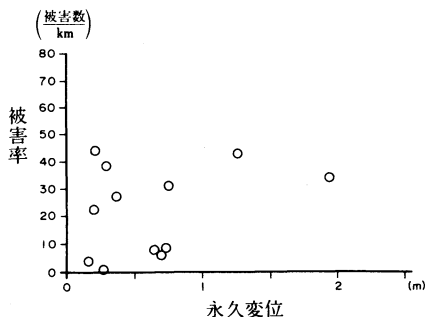
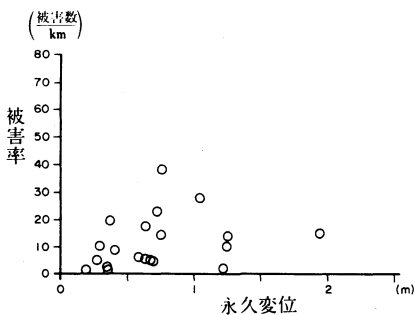


図-11 ブロックごとの永久変位の分布



図一12 家屋の被害率と永久変位の関係

図一13 低圧ガス導管の被害率と永久変位の関係
(管径 75~150 mm, 铸铁管・鋼管)図一14 低圧ガス導管の被害率と永久変位の関係
(管径 32~50 mm 鋼管)図一15 水道管の被害率と永久変位の関係
(管径 100~200 mm, 石綿セメント管)

による地盤支持力の低下や不等沈下も寄与していることがうかがわれる。

次に、低圧ガス導管（供給管を含む）および水道管被害と地盤の永久変位の相関性について考察する。能代市ガス・水道局の被害調査資料により、変位ブロックごとの敷設延長距離と被害箇所数を調べ、単位敷設延長距離（1 km）当たりの被害箇所数を求めた。

管径 75~150 mm の低圧ガス導管の被害率と永久変位の関係を図一13に示す。プロットの点数が少なく断定的な結論は得られないが、铸铁管（CIP）、鋼管（SP）とも永久変位と比較的良好な相関性をもつことがわかる。しかし、铸铁管の場合は地盤の永久変位が小さくても被害率が高い地点もある。たとえば図中*印は北部の末広町のブロックでの値で、永久変位が 25 cm 以下であるにもかかわらず 1 km 当たり約 50 か所の被害が発生している。前述した景林町と同様にこの付近は、液状化が発生したが永久変位の小さかった地域である（図一1, 16）。铸铁管の強度が一般的に低いため家屋の場合と同様、液状化による局所的な地盤変状あるいは地震波動の伝播だけで被害を受けたと考えることもできる。

図一14に示すように、管径 32~50 mm の小口径のガス導管と永久変位の間には明瞭な相関性は認められない。小口径のガス導管の被害のほとんどは、ねじ継手や

異形管の接合部で生じている。これらの被害箇所は、もともと強度の小さい部分であり、図示した結果は必ずしも永久変位だけが小口径管の被害の支配的な要因でないことを示している。

図一15は管径 100~200 mm の石綿セメント水道管（AP）の被害率と地盤の永久変位の関係を示す。図一13に示したガス管の被害率に比較し一般に小さいが、これは水道管の被害箇所のカウントの仕方がガス管に比べて厳密でないことによるものと考えられる。図示したように、水道管の被害率と地盤の永久変位の間には明瞭な相関性は認められない。この場合も管自体の強度が低く、地盤の永久変位以外の要因でも被害を受ける可能性が高いことが、相関性がみられないことの理由の1つと考えられる。

（2）地盤の永久ひずみと地震被害の相関性

地震による構造物の被害のうち埋設管等の被害は地盤の絶対変位よりも相対変位すなわち地盤のひずみに支配されると考えられる。そこで次の手順により地盤の永久変位より水平面内のひずみを算定し、亀裂、段差などの地盤変状の分布と比較するとともに、埋設管被害率との定量的な相関性を調べた。

- ① メッシュ内の地盤変位の関数を次式のように線形と仮定する。すなわちメッシュ内においてひずみを

一定としている。

$$u = \alpha_1 x + \beta_1 y + \gamma_1$$

$$v = \alpha_2 x + \beta_2 y + \gamma_2$$

上式で x, y は東西および南北方向にとった座標軸および u, v はそれぞれの方向の地盤の変位を表わす。

② 6 個の係数 $\alpha_1 \sim \gamma_2$ はメッシュ内で測定された地盤の永久変位の値から最小 2 乗法により求め、変位関数を微分することにより地盤の水平面内のひずみを算定する。メッシュ内の測点数が多いほどひずみの算定精度が上がると考えられる。このため能代市でのひずみの算定では一辺 200 m のメッシュを用いた。

図-16 に以上の手順で求めた能代市における地盤の永久ひずみを地盤の変状⁷⁾と併せて示す。地盤のひずみの大きい所は、南部の前山周辺と北部の青葉町付近で、最大値は 1.5 % に達している。砂留山の北東斜面の上部ではほぼ斜面方向に沿って引張りひずみが、また斜面下部の昭南町、松美町付近では圧縮ひずみが卓越している。前山南側の斜面でも上部では引張りひずみが、下部では圧縮ひずみが卓越しており、同様な傾向が認められる。当然のことながら地盤のひずみの大きい地域で亀裂、陥没などの地盤変状も多い。また前山の南北および東側の斜面と北部の青葉町から昭南町にやや下った地域等では、主ひずみの方向が地盤の亀裂の方向とほぼ直交していることが注目される。

図-17 に、同様な方法によって算定した信濃川沿岸地域での地盤の永久ひずみの一例を地盤変位および地盤変状^{8), 9)}と併せて示す。地盤のひずみは図中四角で囲った領域の変位ベクトルを用いて算定された。永久変位については、文献 1) に詳しい。最大 8 m 余りに達する大変位を発生した川岸町付近での最大ひずみは 4 % を超えており、河岸に対してはほぼ直交方向の引張りひずみとなっている。また引張りひずみの方向は河岸に発生した地盤の亀裂ともほぼ直交している。

図-18 は、能代市および新潟市の信濃川沿岸地域について、地盤の永久ひずみと 1 ヘクタール当たりの地盤亀裂の総延長との関係を示したものである。亀裂の長さ、分布は文献 7), 9) によったが、亀裂の幅が不明であるため、ここではすべての亀裂を同等として単純に加算している。図-18 によれば、ばらつきはあるものの、地盤亀裂の総延長と永久ひずみの間には相関性が認められる。図示した結果から、地盤の永久ひずみが 0.1

～0.2 % 以上になると、何らかの地盤亀裂が発生すると考えることができよう。

図-19 は前述した能代市における管径 75～150 mm の低圧ガス導管の被害率と地盤の永久ひずみの関係を示す。地盤のひずみは主ひずみの絶対値の最大を示している。また 200 m のメッシュのうち敷設延長距離が 50 m 以下のものは除外した。低圧ガス導管の被害率は地盤の

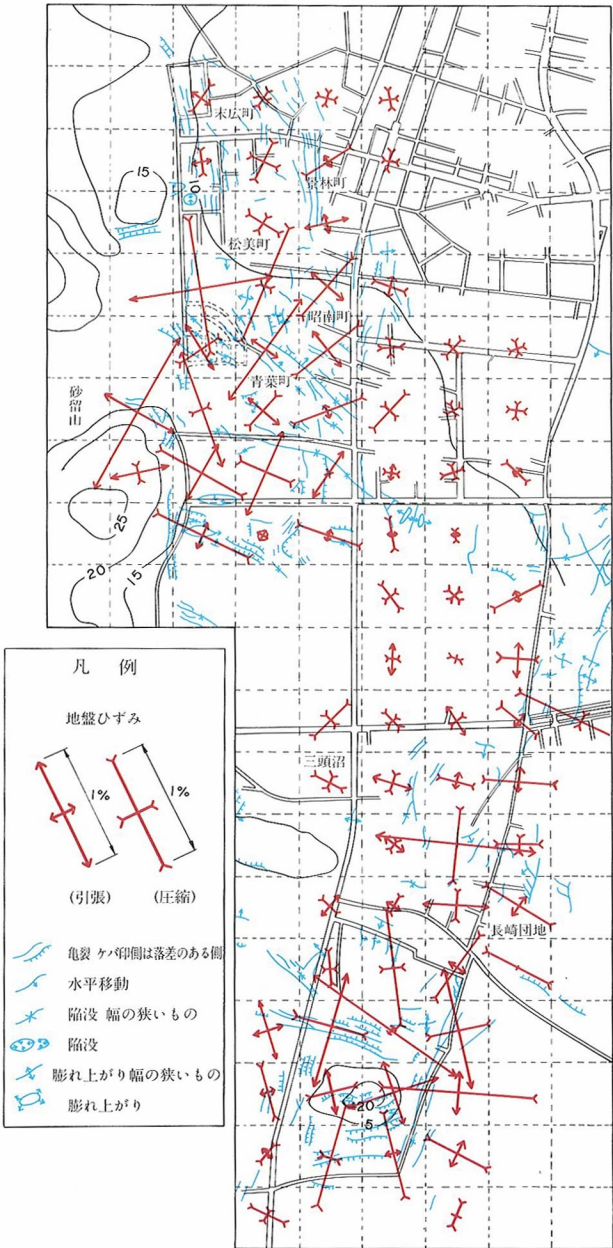
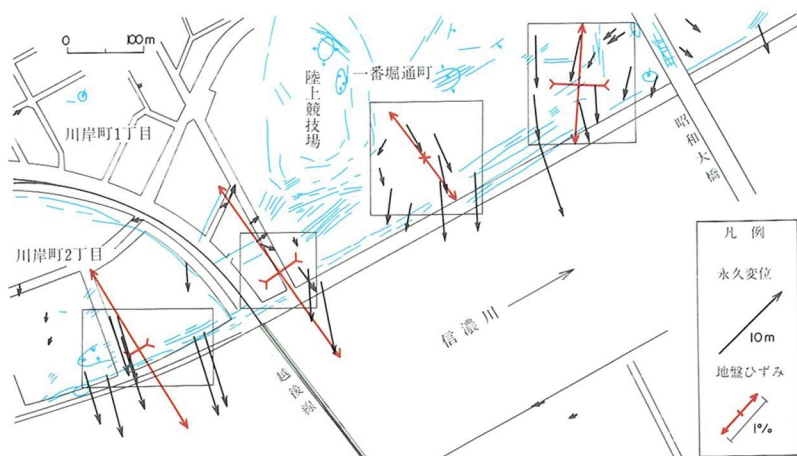
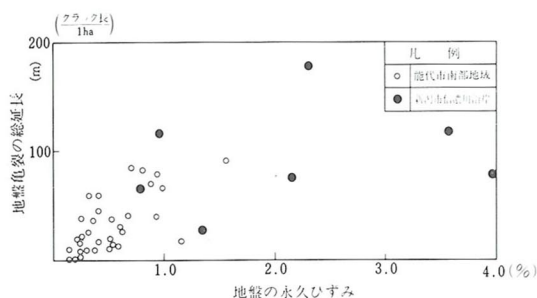


図-16 能代市における地盤の永久ひずみと地盤変状



図—17 信濃川沿岸地域における地盤の永久ひずみと地盤変状



図—18 地盤の永久ひずみと亀裂延長との関係

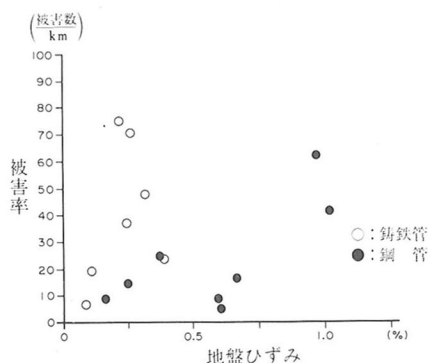
永久ひずみに対してある程度の相関性を示しているといえるが、図—13に示した永久変位量との相関性に比較すると、特に相関性が上がっているともいえない。永久ひずみの算定の精度の問題や、前述したように地盤の永久変位以外にもガス導管の被害要因が考えられることなどがこの理由として挙げられる。

4. 結 論

本論文では、液状化による地盤の永久変位に影響を及ぼす諸要因の分析および家屋、埋設管等の被害率と永久変位量との定量的相関性の分析を行った。さらに地盤の永久変位より地盤のひずみを算定し、埋設管被害率および地盤亀裂との関係を調査した。以下に主要な結果をまとめる。

(1) 地盤の永久変位は、液状化層の厚さと勾配および地表面の勾配に強く支配されていると考えられる。

(2) 家屋および比較的口径の大きい鋼管 (75～150 mm) の被害率と永久変位量の間には良好な相関性が認められるが、口径の小さい鋼管あるいは铸铁管、石綿セメント管など強度が低い埋設管の被害率と永久変位量の間には明瞭な相関性はみられない。



図—19 低圧ガス導管の被害率と地盤ひずみの関係 (管径 75～150 mm, 铸铁管・鋼管)

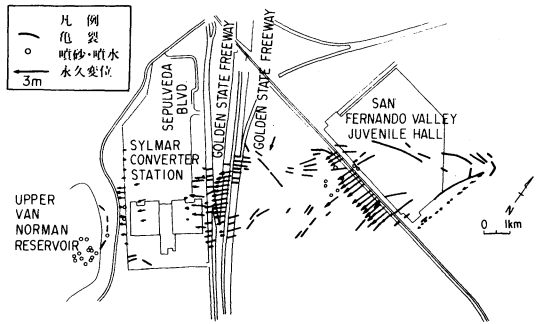
(3) 永久変位より算定された地盤のひずみの分布は、亀裂、段差などの地盤変状の分布とよく一致している。日本海中部地震の能代市では最大ひずみが1.5%、新潟地震の信濃川沿岸地域では4%にも達していた。

(4) 地盤の永久ひずみと地盤亀裂の総延長の間には相関性がある。地盤のひずみが、おおむね0.1～0.2%以上になると地盤に何らかの亀裂が発生すると考えることができる。

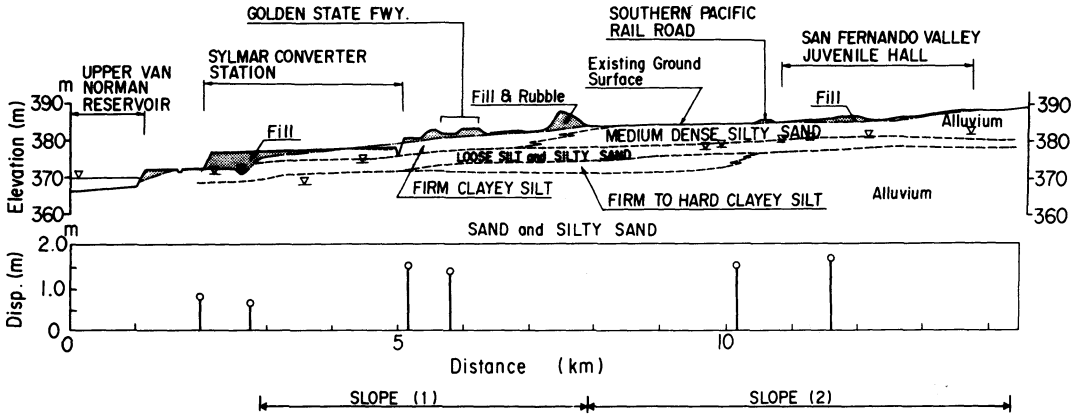
付録 サンフェルナンド地震による Juvenile Hall 付近の永久変位の概要^{2)～4)}

1971年サンフェルナンド地震 (マグニチュード6.9) により、シルマー地区の Juvenile Hall 付近で、幅300 m、長さ1300 mにわたる大規模な地すべりが発生した。この付近は上部 Van Norman 湖西岸に広がる、勾配1～2%のゆるやかな傾斜地である。図—A1に地表面のクラックの状況および地上測量によって得た永久変位の

ベクトルを示す。図—A2にすべりの方向に沿った土層断面を示す。ゆるいシルト質砂層が地表面下3～5 mに、3～4 mの厚さで帯状に分布しており、文献2)ではこの層が液状化し、すべりを生じたとしている。本文「2. 永久変位の要因に関する考察」では、図示したような2つの部分斜面を設定している。



図—A1 サンフェルナンド地震 Juvenile Hall の地すべりの概要2),3)



図—A2 土層断面図と推定液状化層

参考文献

- 1) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，1986年12月。
- 2) U. S. Department of Commerce (Youd, T. L.) : Ground Movements in Van Norman Lake Vicinity during San Fernando Earthquake, San Fernando, California Earthquake of February 9, 1971, Volume III.
- 3) Smith, J. L. and Fallgren, R. B. : Ground Displacement at San Fernando Valley Juvenile Hall and The Sylmar Converter Station, San Fernando Earthquake, Geology and Geophysics(Chapter 12), California Division of Mines and Geology, Bull. 196, 1974.
- 4) FUGRO Inc. : Geotechnical Investigation for Stabilization and Reconstruction at the San Fernando Valley

Juvenile Hall Site in Silmar, California, Project No. 71-082-EG, Jan. 24, 1975.

- 5) 足立紀尚・龍岡文夫：土の力学(Ⅲ)―圧密・せん断・動的解析，新体系土木工学18，技報堂出版，1981年8月。
- 6) 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。
- 7) 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年。
- 8) 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。
- 9) 新潟大学，深田地質研究所：新潟地震地盤災害図，1964年。

(1986.5.27・受付)