

(97) 木造家屋被害に与える地盤の液状化の影響

応用地質株式会社 正員 ○山本明夫
同 金子史夫
同 殿内啓司

1. はじめに

地盤の液状化は、地震時の被害形態の1つであり、また構造物被害の大きな要因となっている。従来、地盤の液状化については、FL法をはじめ、各種の評価手法が提唱され、利用されている。しかしながら、これらは、液状化が発生するか否かについての評価方法であり、液状化が各種構造物の被害程度にどのように影響しているかという問題は、現状ではあまり手をつけられていない。

本報では、構造物として木造家屋を対象とし、地盤の液状化が、木造家屋被害率に与える影響を定量的に検討した。また検討を行う地区として、1983年日本海中部地震で大きな被害のみられた、能代市を選定した。

検討方法については、能代市における、地盤・地震動および被害に関するデータを収集・整理した。その後、液状化に関係すると思われる地下水位他の地盤条件および地震力として、地表加速度を抽出し、これらと木造家屋被害率との関係を、重回帰分析により解析し、統計的に最も適切な、関係式を求める方法をとった。

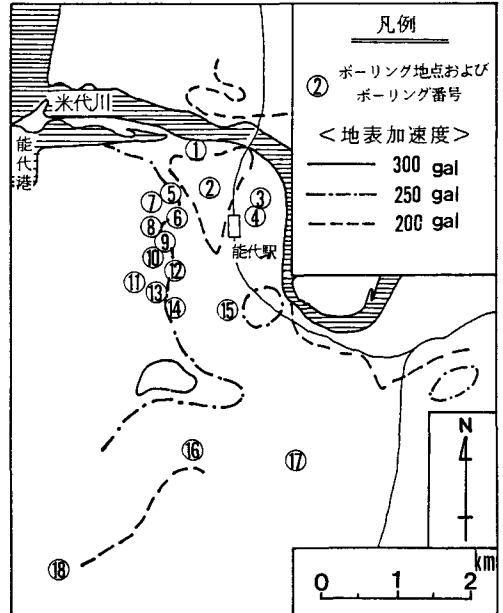


図-1 ポーリング地点および地表加速度分布図

2 データの収集・整理

まず、ポーリング柱状図、N値、地下水位、粒度分布等の地盤に関するデータは、参考文献1)、2)によった。また、能代市の被害状況、噴砂の状況については、参考文献4)、5)を用いた。次に、地表加速度については、文献3)により、日本海中部地震の際、測定された秋田港の強震記録を入射波とし、重複反射法を用いて計算された値を用いた。図-1に、18ヶ所のポーリング地点および地表加速度分布を併せて示した。

一方、木造家屋被害程度については、文献5)により、縮尺1/10000の詳細な、木造家屋被害分布図が作成されている。今回は、この資料を用いて、ポーリング地点と同じ地形区分で、かつポーリング地点を中心として、半径100m以内の家屋被害を調査し、以下の(1)式によって木造家屋被害率を算出した。また、表-1にこれらの地点での地形区分、噴砂の有無、木造家屋被害率のデータを示した。

表-1 各地点の木造家屋被害率

No.	ポーリング地点	ポーリング地点の地形区分	噴砂の有無	木造家屋被害		
				全壊率(%)	半壊率(%)	被害率(%)
1	万町	後背低地	×	0.0	1.43	7.1
2	島町	低位砂丘	×	0.0	3.1	1.6
3	中川原	自然堤防	○	0.0	25.0	12.5
4	中川原	自然堤防	○	0.0	5.3	2.6
5	大手町	低位砂丘	×	1.6	4.9	4.1
6	柳町	砂丘間低地	×	0.0	16.3	8.1
7	盤若町	高位砂丘	×	0.0	2.6	1.3
8	景林町	砂丘間低地	○	11.2	21.5	22.0
9	通町	低位砂丘	○	8.9	24.4	21.1
10	昭雨町	砂丘間低地	○	1.1	50.6	26.4
11	青葉町	低位砂丘	○	0.0	37.9	19.0
12	花園町	砂丘間低地	○	3.2	35.5	21.0
13	青葉町	低位砂丘	○	4.7	9.4	9.4
14	出戸本町	砂丘間低地	○	5.9	17.6	14.7
15	寿城長根	砂丘間低地	○	0.0	10.7	5.4
16	海門川(龍山)	低位砂丘	○	39.5	5.3	42.1
17	塩千田	段丘、台地	×	0.0	6.7	3.3
18	浜浅内	低位砂丘	○	18.9	24.3	31.1

$$\begin{aligned} \text{木造家屋被害率} &= \frac{\text{全壊率} + \frac{\text{半壊率}}{2}}{2} \quad (\%) \\ &= \left(\frac{\text{全壊棟数} + \frac{\text{半壊棟数}}{2}}{\text{総棟数}} \right) \times 100 \quad (\%) \end{aligned} \quad \dots \dots (1)$$

3 解析・検討

解析では、木造家屋被害率と、液状化に関係すると思われる地盤条件および地震力との関係を求めることとした。この地盤条件については、一般的に液状化に影響すると考えられ、かつ通常のボーリング柱状図から求められるという条件を考慮して、地下水位、砂質土層の厚さ、砂質土層の分布深さ、砂質土層のN値分布を選んだ。また、地震力としては、前述の推定地表加速度を用いた。

解析方法としては、木造家屋被害率(Y)が、基本的には以下に示す(2)式のような、上記各条件(x_i)の一次結合で表わされるとし、重回帰分析を用いて、統計的に最も適切なY~x_iの関係式を求めたこととした。

$$Y = a + \sum_{i=1}^8 b_i x_i \quad \dots \dots (2)$$

しかし、地表加速度(x₁)の項については、x₁=0のときY=0となるように(2)式を変形し、またその他の説明変数(x₂~x₈)については、一次結合と考え、以下の表現とした。

$$\log Y = a + b_1 \log x_1 + \sum_{i=2}^8 b_i x_i \quad \dots \dots (3)$$

次に、x₂~x₈の説明変数については、地下水位(x₂)、深度10m以浅でのN値0~10回の層の厚さ(x₃)、深度10m以浅でのN値11~20回の層の厚さ(x₄)、深度10m以浅でのN値20~50回の層の厚さ(x₅)、N値0~10回の層が出現する深度(x₆)、N値11回~20回が出現する深度(x₇)、液状化の有無(x₈)とした。解析に用いた式は結局以下のようになる。

$$\log Y = a + b_1 \log x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_8 x_8 \quad \dots \dots (4)$$

つまり、

$$Y = 10^a \cdot (x_1)^{b_1} \cdot (10^{b_2})^{x_2} \cdot (10^{b_3})^{x_3} \cdot (10^{b_4})^{x_4} \cdot (10^{b_5})^{x_5} \cdot (10^{b_6})^{x_6} \cdot (10^{b_7})^{x_7} \cdot (10^{b_8})^{x_8} \quad \dots \dots (5)$$

である。

表-2に解析を用いた各変数のデータを一覧表として示した。また表-3、図-2に各説明変数(x_i)と

表-2 重回帰分析に用いたデータ一覧表

No.	加速度 (g&L)	地下水位 (GL-m)	N値0~10 回の層の厚さ (m)	N値11~ 20回の層の厚さ (m)	N値21~ 30回の層の厚さ (m)	N値30~ 40回の層の厚さ (m)	N値41~ 50回の層の厚さ (m)	液状化の有無	木造家屋被害率(%)	log Y	
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	Y	log Y	
1	200	2301	3.2	1.0	3.0	3.5	2.5	3.5	0	7.1	0.851
2	190	2279	3.5	2.5	5.0	2.5	0.0	2.5	0	1.6	0.204
3	230	2362	1.7	3.0	1.0	3.0	6.5	4.5	1	12.5	1.097
4	230	2362	2.8	0.0	3.5	5.0	10.0	0.0	1	2.8	0.415
5	200	2301	3.5	3.5	0.0	0.5	0.0	10.0	0	4.1	0.613
6	290	2462	3.5	0.0	0.0	5.0	10.0	10.0	0	8.1	0.908
7	250	2398	4.0	1.0	2.0	5.5	1.5	2.5	0	1.3	0.114
8	250	2398	2.2	1.0	3.0	1.5	3.5	1.5	1	2.0	1.342
9	250	2398	2.2	2.5	2.0	5.5	0.0	4.5	1	2.1	1.324
10	250	2398	1.0	2.5	1.5	2.0	0.0	2.5	1	2.64	1.422
11	260	2415	2.8	5.5	3.0	1.5	0.0	3.5	1	19.0	1.279
12	230	2362	2.0	1.5	2.0	3.5	0.0	1.5	1	2.10	1.322
13	230	2362	2.8	5.0	3.0	0.0	0.0	1.5	1	94	0.973
14	230	2362	2.5	4.5	5.0	0.0	0.0	4.5	1	14.7	1.167
15	220	2342	2.5	4.5	5.5	0.0	0.0	3.5	1	54	0.732
16	200	2301	1.0	3.5	2.0	2.0	0.0	2.5	1	42.1	1.624
17	200	2301	1.7	0.0	0.5	0.0	10.0	9.5	0	3.3	0.519
18	190	2279	2.7	3.5	6.0	0.5	0.0	1.5	1	31.1	1.493

表-3 各変数の単相関係数(R)

単相関係数	log Y	log x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈
	0.157	-0.661	0.365	0.035	-0.203	-0.335	-0.207	0.695	

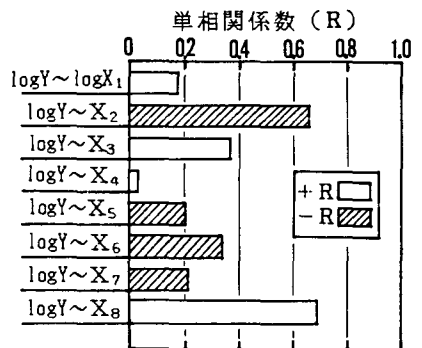


図-2 各変数の単相関係数(R)

木造家屋被害率 ($\log Y$) との単相関係数を示した。これによると、単相関係数は、 $\log Y \sim x_2$ (地下水位) $\log Y \sim x_8$ (液状化の有無) の関係が高く、共に単相関係数(R)が 0.6 以上である。

重回帰分析については、まず(4)式により、説明変数 (x_i) を 8 変数にとって回帰係数 ($a, b_1 \sim b_8$) を求める。また、重相関係数、分散比等を計算し、F-分布と分散比を比較することにより、その重回帰式の有意性の検討を行う。その後、偏相関係数の値が小さいもの、またその符号(プラス、マイナス)が予想される傾向と一致していない説明変数を取り除いて、再解析していく方法をとった。

表-4(1)に、説明変数 (x_i) が 8 変数の場合の結果を示した。この場合、検定を行うと、5%水準でこの重回帰式は有意ではない。また、 $\log Y \sim x_4$ の偏相関係数が小さく、かつ符号が逆であるため、この変数を除いて、7 変数でさらに重回帰分析を行なった。表-4(2)に、7 変数で行なった結果を示した。

同様に、 x_3, x_5, x_7 の説明変数を取り除いて、最適な関係式を求め表-4(3)にその結果を示した。この回帰式を F-分布により検定を行うと、高度に (1%水準で) 有意となり、重相関係数(R)は、0.803 となった。以下に求められた関係式を示す。

$$\log Y = 2.28 + 1.63 \log x_1 - 0.265 x_2 - 0.0331 x_6 + 0.257 x_8 \quad \dots (6)$$

つまり

$$Y = (1.81)^{x_8} \cdot 0.00522 \cdot x_1^{1.63} \cdot (0.543)^{x_2} \cdot (0.927)^{x_6} \quad \dots (7)$$

- ここで Y : 木造家屋被害率 (%)
 x_1 : 地表面加速度 ($g a \ell$)
 x_2 : 地下水位 (m)
 x_6 : N 値 0 ~ 10 回の層の出現深度 (m)
 x_8 : 液状化の有無

図-3 に、(7)式で予測した予測値と観測値 (表-2 のデータ) の比較を示した。これによると、木造家

表-4(1) 重回帰分析による解析結果 (8 変数の場合)

重回帰式	$\log Y = a + b_1 \log x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_8 x_8$								
重相関係数 他	重相関係数	寄与率			分散比	F(8, 9; 0.05)	F(8, 9; 0.01)	5%水準 で有意で ない	
	R=0.836	R ² =0.699			F ₀ =2.61	3.23	5.47		
回帰係数	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈
	-0.2338	0.5158	-0.1597	-0.0726	-0.0019	0.0031	-0.0562	0.0622	0.7007
偏相関係数	$\log Y \sim \log x_1$	$\log Y \sim x_2$	$\log Y \sim x_3$	$\log Y \sim x_4$	$\log Y \sim x_5$	$\log Y \sim x_6$	$\log Y \sim x_7$	$\log Y \sim x_8$	
	0.0716	-0.2683	-0.2155	-0.0074	0.0147	-0.4514	0.3538	0.4444	

表-4(2) 重回帰分析による解析結果 (7 変数の場合)

重回帰式	$\log Y = a + b_1 \log x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_8 x_8$								
重相関係数 他	重相関係数	寄与率			分散比	F(7, 10; 0.05)	F(7, 10; 0.01)	5%水準 で有意で ある	
	R=0.836	R ² =0.699			F ₀ =3.32	3.14	5.20		
回帰係数	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	-
	-0.2805	0.5351	-0.1620	-0.0724	0.0037	-0.0562	0.0628	0.6973	-
偏相関係数	$\log Y \sim \log x_1$	$\log Y \sim x_2$	$\log Y \sim x_3$	$\log Y \sim x_5$	$\log Y \sim x_6$	$\log Y \sim x_7$	$\log Y \sim x_8$	-	-
	0.0798	-0.3210	-0.2156	0.0185	-0.4514	0.3860	0.4629	-	-

表-4(3) 重回帰分析による解析結果 (4 変数の場合)

重回帰式	$\log Y = a + b_1 \log x_1 + b_2 x_2 + b_6 x_6 + b_8 x_8$							
重相関係数 他	重相関係数	寄与率			分散比	F(4, 13; 0.05)	F(4, 13; 0.01)	高度に 有意で ある
	R=0.803	R ² =0.645			F ₀ =5.910	3.18	5.21	
回帰係数	a	b ₁	b ₂	b ₆	b ₈	-	-	-
	-2.2822	1.6270	-0.2654	-0.0331	0.2569	-	-	-
偏相関係数	$\log Y \sim \log x_1$	$\log Y \sim x_2$	$\log Y \sim x_6$	$\log Y \sim x_8$	-	-	-	-
	0.2713	-0.5313	-0.3857	0.3038	-	-	-	-

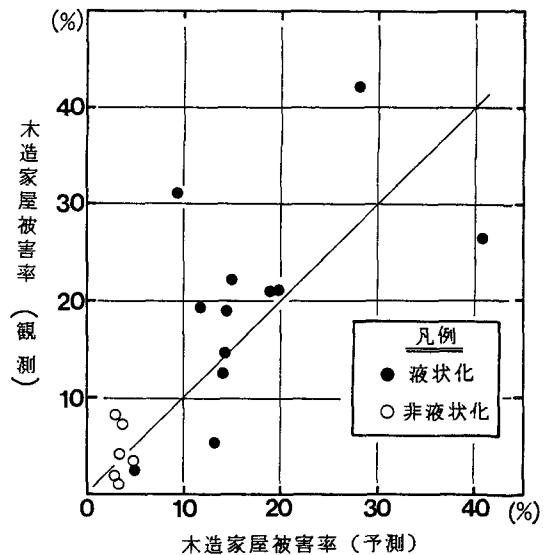


図-3 予測値と観測値の比較

屋被害率が約20%までは、比較的良好な対応を示している。

4. 考察

従来、液状化による木造家屋被害は、過去いろいろな地震で起っているが、液状化と木造家屋被害率との関係を論じた研究は少ない。しかし、数少ない中で、液状化発生の可能性の指標であるPL値と、木造家屋被害率の関係を検討しているものがみられる。

そこで、今回の解析データを用い、平均粒径(D50)として能代市での実測値の平均値を採用し、道路橋示方書のFL値を計算し、それを深度方向に積分することによりPL値を算出した。そのPL値と木造家屋被害率の関係を求めてみると図-4のようになる。これから考えると、日本海中部地震の能代市については、木造家屋被害率とPL値の相関は低いと考えられる。

一方、木造家屋被害率(全壊率)と地震力(合震度)については、物部(1926)が、1923年関東大地震のデータを用いて、その関係を求めているが、地盤の液状化は考慮されていない。このため、今回求められた関係式(7)を用いて、木造家屋被害率と地表加速度の関係を、地盤が液状化した場合と、しなかった場合について算出すると、図-5のようになる。なお、この場合、地下水位(x_2)とN値0~10回の層の出現深度(x_6)については、今回の解析データの平均値を与えた。この図から考えると、液状化が起った場合と、起らなかった場合とは、木造家屋被害率に明らかな差があり、その比は、5~6倍になっている。

今後、今回求めた関係式を、日本海中部地震で被害のあった他の地域、またその他の地震に適用しそれを検証していく事が考えられる。また今回求めた関係式を考えると、地表加速度(x_1)の偏相関係数が、式(6)の説明変数の中では一番小さく、有効応力解析のような液状化を考慮した地表加速度値を用いる必要があると思われる。最終的には、地震の種類、地域差等を考慮できる形で、木造家屋被害程度と地盤の液状化の程度との関係式を作成し、利用していきたい。

(参考文献)

- 1) 山本ほか:木造家屋被害と地盤の液状化の関係について、土木学会 第40回年次学術講演会概要集(1985)
- 2) 榎応用地質調査事務所:1983年5月26日 日本海中部地震被害調査報告
- 3) 今井ほか:日本海中部地震による被害と地盤・地震動との関係、土と基礎、Vol.32、No.9(1984)
- 4) 能代市:日本海中部地震 能代市の災害記録、能代市総務部(1984)
- 5) 建設省国土地理院:1983年日本海中部地震調査図、国土地理院技術資料、D-1、No.255(1984)
- 6) 浅田ほか:日本海中部地震による秋田県男鹿市および能代市における住宅被害と地盤との関係、第19回土質工学研究発表会(1984)
- 7) 物部:土木工事震害調査報告、震災予防調査会報告、第百号丁(1926)

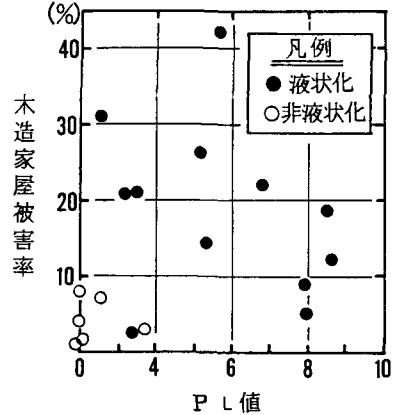


図-4 木造家屋被害率とPL値の関係

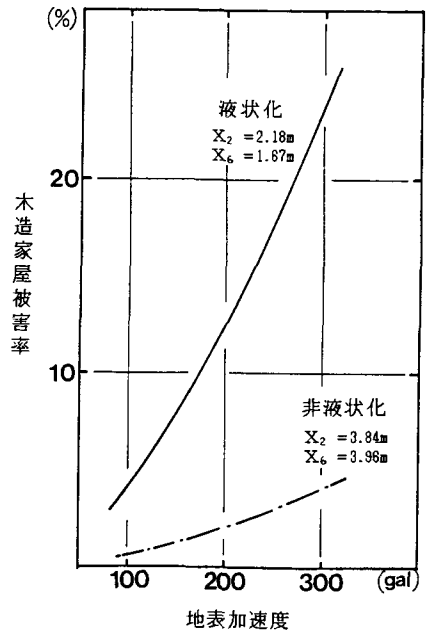


図-5 液状化を考慮した木造家屋被害率と地表加速度の関係