

東日本大震災における液状化の確率論的評価に関する基礎的研究

鈴木 壽¹

1 徳島大学・大学院・E-mail address suzuki@ce.tokushima-u.ac.jp

概 要

一般に土質定数はかなりばらつき、適切な強度定数を決めることは容易ではなく、液状化に対する地盤の抵抗値は確率変数であると考えるのが妥当である。一方、地震外力も発生自体、震源特性、伝播経路特性すべてが確率論的である。すなわち、液状化を含めたすべての土木工学の耐震工学では確率論の導入が不可欠であると考えられる。ここに掲げている問題は非常に大きいので、課題を三陸沖で過去 89 年間に起きた地震ハザード曲線と、東日本大震災で生じた液状化被害例の統計的な処理から求めた計測震度と液状化率の関係を表す fragility 曲線を求めることに絞る。ここで得られたハザード曲線、液状化率曲線などは架空のものではなく実際の被害を実物大実験と見なして統計処理したものである。この研究の位置づけは東日本大震災で生じた貴重な液状化被害事例の記録を有効に活用したものである。この結果は、以後の液状化被害に対する有益な情報を与えるものと信じる。つまり本研究で得た知見は同規模の地震の発生が予想される南海地震の対策にも当然役立つと考える。

キーワード：地震ハザード曲線、液状化安全率、fragility 曲線、液状化率

1. はじめに

我々は 2011 年 3 月 11 日に忘れえぬ大地震を経験した。2013 年 1 月 30 日現在、死者 15880 人、行方不明 2700 人で合わせて 18580 人の尊い命が犠牲となった。被害がこれほどまでに甚大になった理由は、いくつか考えられるが最大の理由は、この地震が想定外の大規模な地震であったことにある。

今後、我々土木技術者は、この想定外の地震に耐えうる社会基盤を構築せねばならない。しかし、公共事業に投与される予算には限りがあり無限大に強固な構造物を作ることはいかならない。さらに地震は、いつ起こるかかわからないという確率論的な問題でもある。地震予知などという問題は地震学者でもない私たちにとっても容易に分かるはずがない。こうした不確実性の中で土木構造物は設計されねばならない。すなわち想定すべき最大級の地震に対して限られた予算に対する最適設定を実施する必要がある。本研究ではこうした社会的な背景に基づいて、地盤工学の中でも極めて被害の大きかった液状化問題を取り上げ、その東日本大震災における地震ハザード曲線と fragility 曲線を求め、確率・統計的なアプローチを示す。ここで、示すデータはマグニチュード M9 で、南海・東南海地震にも十分援用できる。

2. 東日本大震災の液状化被害

ここでは、東日本大震災で実際に起きた液状化の被害を簡単に説明していく。

2.1 道路のひび割れ

写真-1 は液状化による舗装道路のひび割れを示している。進行方向にかなり幅の広いひびがかなり遠くまで続いている様子が分かる。こうしたひび割れが発生すると、道路は通行止めとなり交通障害が発生し物流への影響も甚大である。東日本大震災ではこのような道路のひび割れが随所に見られた。



写真-1 道路のひび割れ

道路に関してはその他、噴砂、マンホールの浮き上がりなどが液状化被として顕著に現れた。また液状化によって地盤と道路面の側方流動が何メートルも発生し道路の分断が起こっている場合もあり、交通は遮断されねばならなかった。最後に砂地盤にかけられる橋梁の基礎は通常杭基礎が多いが地震により橋梁の基礎地盤が液状化すると杭基礎を支えていた横方向の抵抗が無くなり基礎が大きく変形し大規模な側方流動が周辺地盤で発生した。

2.2 家屋の傾斜

写真-2 は典型的な家屋の傾斜を示している。これは地盤が液状化によって不均一に弱くなった結果生じたものである。写真-2 には現れていないが家屋周りには多くの埋設管がありそれらにも少なからず影響を与えられていると考えられる。

また、写真-2 は典型的な家屋の傾斜を示している。これは地盤が液状化によって不均一に弱くなった結果生じたものである。写真-2 には現れていないが家屋周りには多くの埋設管がありそれらにも少なからず影響を与えられていると考えられる。写真-2 家屋の傾斜



3. 液状化の予測法

3.1 液状化安全率 F_L ¹⁾

液状化安全率 F_L (Factor of safety for liquefaction) は、地盤の液状化に対する抵抗力 R を地震によるせん断応力 L で除した値である。

$$F_L = \frac{\text{液状化抵抗力 } R}{\text{せん断応力 } L}$$

F_L 値は、 $F_L=1$ を境に $F_L<1$ の場合には液状化の発生する可能性が高く、 $F_L\geq 1$ では液状化の発生する可能性が低いと判断される。

液状化安全率 F_L を得るために必要な液状化抵抗比 R とせん断応力比 L は、さまざまな手法によって求めることができる。

〈液状化抵抗比 R 〉

地盤の液状化に対する強さであり、標準貫入試験より得られた N 値と粒度試験結果から推定する手法や土質試験で実際に土を振動させる方法などがあり、目的・精度に応じて選択する。しかし、調査できる範囲は狭く、一般に N 値などはかなりばらつき確定値とするのは難しい。

〈せん断応力比 L 〉

地震によって地盤に伝わる強さを示し、簡便法として地盤の有効土被り圧 p'_z と加速度の関係式や、地震応答解析により算出する方法など、こちらも必要な精度に応じて選択するが、地震外力も発生自体、震源特性、伝播経路特性すべてが確率的であるから液状化抵抗比以上に確率的にするわけにはいかない。

3.2 シミュレーションによる液状化予測

ここでの動的解析は、地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇、すなわち有効応力の低下による強度や変形係数の変化を考慮した応答解析とし、一般にはこれらの解析法は有効応力解析と称されている。有効応力解析には、種々な手法が提案されている。それらは、土の構成モデル(構成則)によって特徴づけられる。有効応力解析が主流であり、地震時の地盤内のひずみ、加速度応答、過剰間隙水圧の発生・消散などの時々刻々の変化が求められ、液状化時から液状化後までの詳細なシミュレーションが可能である。LIQA、FILP などが代表的な解析法であるが、非常に数多くのパ

ラメータを入力する必要がある、パラメータの設定や結果の評価には、高い技術と経験を要する。

4. 東日本大震災の地震発生位置と規模

3で述べた既往の研究では土質力学に立脚した点及び面的な領域の安定性を確定論的に論じていた。しかし、地震は確率的に発生しており、3次元的に広がり大きな被害を与える。すなわち、既往の研究のような、ほんの小領域の理論で液状化を議論するのではなく、大規模かつ確率的に評価するのが液状化問題の本来の姿である。

4.1 三陸沖の地震発生位置と規模²⁻⁴⁾

今回の東日本大震災は三陸沖を震源とするマグニチュード9の地震で起こった。そこで、最初に三陸沖の面的な定義を行う。すなわち、西経141度、東経144度、南緯36度、北緯42度の範囲で震源の深さは上限を0.0km、下限を50kmとする。これを地図に表したものが図-1である。図中の丸印は東日本大震災で発生した地震の震源地である。

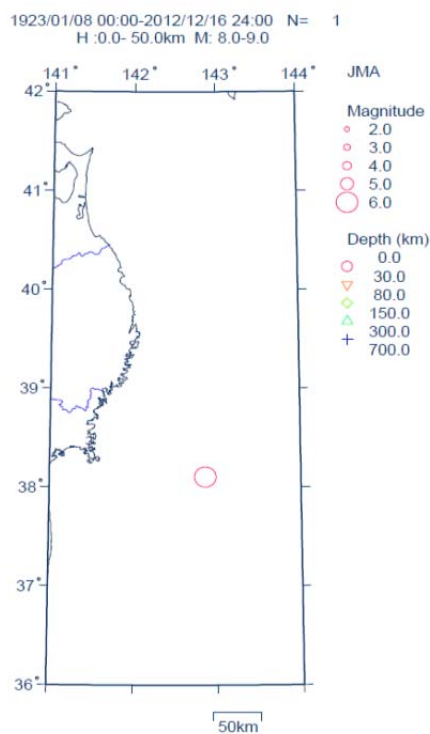


図-1 三陸沖の研究対象領域

次ページにあるが、図-2 は、1923年1月8日～2012年12月16日までに三陸沖で起きた地震を示している。本研究では液状化を問題にしているので、マグニチュード5以上の地震を対象とした。表-1 は、各マグニチュード以上の地震発生個数を示している。表から分かるようにマグニチュード5～6が最も多くマグニチュード6以上になると激減し7～9となると、ほんのまれにしか起こらないことが分かる。勿論、このマグニチュード発生個数は図-2で示した三陸沖に限定して調査したものである。

表-1 マグニチュードと発生個数の関係(1923-2012)

マグニチュード	発生個数
5 以上	2250
6 以上	350
7 以上	24
8 以上	1
9 以上	1

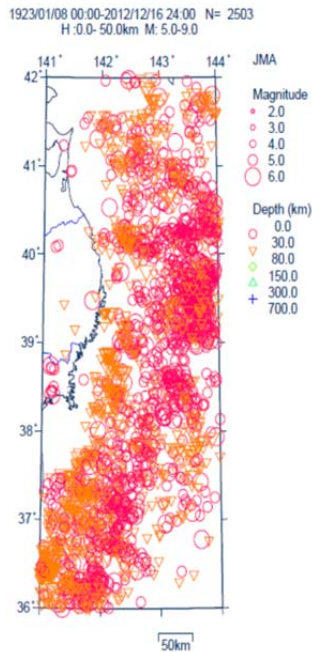


図-2 1923 年 1 月 8 日～2012 年 12 月 16 日までに三陸沖で起きた地震

5. 液状化の統計的解析

5.1 液状化率の定義

右図は表-2 で示す江東区 1 の液状化被害の様子を示している。赤色の区域は液状化した区域 a で、その他の部分は液状化していない区域で、区域全面積 A とすると液状化率 F_R は



図-3 液状化率の定義

$$F_R = a / A \times 100(\%) \quad (1)$$

5.2 解析に用いた被害例

表—2 液状化被害の一覧表(解析に用いた地点、項目のみ)

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
江東区 1	1.46	2.54	57.5	5.5	なし
江東区 2	0.36	1.58	22.8	5.5	なし
江東区 3	0.056	4.49	1.2	5.5	あり
江東区 4	0.032	1.95	1.6	5.5	あり
江東区 5	0.058	5.01	1.2	5.5	あり
江東区 6	0.045	3.11	1.4	5.5	あり
江東区 7	0.00173	1.9	0.1	5.5	なし
合計	2.01273	20.58	9.8		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
浦安市 1	1.26	3.59	35.1	5.5	なし
浦安市 2	0.988	1.04	95.0	5.5	なし
浦安市 3	1	2.35	42.6	5.5	なし
浦安市 4	1.627	2.41	67.5	5.5	なし
浦安市 5	2.403	3.06	78.5	5.5	あり
浦安市 6	1.918	2.18	88.0	5.5	あり
浦安市 7	0.00172	5.84	0.0	5.5	あり
合計	9.19772	20.47	44.9		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
市川市 1	0.231	3.05	7.6	5	なし
市川市 2	2.03	2.04	99.5	5	なし
市川市 3	0.3	0.31	96.8	5	なし
市川市 4	0.033	2.19	1.5	5	なし
市川市 5	0.84	1.29	49.6	5	なし
市川市 6	0.63	4.14	15.2	5	なし
市川市 7	1.59	1.64	97.0	5	なし
市川市 8	1.5	1.51	99.3	5	なし
合計	6.954	16.17	43.0		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
神栖市 1	5.98	12.6	47.5	6	なし
神栖市 2	1.05	9.65	10.9	6	あり
神栖市 3	1.48	11.56	12.8	6	あり
合計	8.51	33.81	25.2		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
船橋市 1	1.5	1.51	99.3	5	なし
船橋市 2	1.3	1.4	92.9	5	なし
船橋市 3	0.1	0.67	14.9	5	なし
船橋市 4	0.82	1.46	56.2	5	なし
船橋市 5	0.046	1.01	4.6	5	なし
船橋市 6	2.57	2.58	99.6	5	なし
合計	6.336	8.63	73.4		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
習志野市 1	0.432	1.08	40.0	5.5	なし
習志野市 2	2.75	2.87	95.8	5.5	なし
習志野市 3	2.16	2.17	99.5	5.5	なし
合計	5.342	6.12	87.3		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
大田区	0.00173	3.6	0.1	4	なし

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
江戸川区 1	0.734	3.7	19.8	5	あり
江戸川区 2	0.00578	7.58	0.1	5	あり
合計	0.73978	11.28	6.6		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
香取市 1	0.34	13.4	2.5	6	あり
香取市 2	0.107	11	1.0	6	あり
合計	0.447	24.4	1.8		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
稲敷市 1	0.071	14.01	0.5	6	なし
稲敷市 2	0.005043	3.58	0.1	6	あり
稲敷市 3	0.313	15.08	2.1	6	あり
稲敷市 4	1.73	11.51	15.0	6	あり
合計	2.119043	44.18	4.8	6	あり

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
成田市 1	0.09	10.6	0.8	4	なし
成田市 2	0.2	12.9	1.6	4	あり
合計	0.29	23.5	1.2		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
板倉市 1	0.005721	3.28	0.2	5	なし
板倉市 2	0.001972	3.11	0.1	5	なし
合計	0.007693	6.39	0.1		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
鹿嶋市 1	2.29	10.3	22.2	6	あり
鹿嶋市 2	1.44	11.52	12.5	6	あり
鹿嶋市 3	0.013	8.73	0.1	6	あり
合計	3.743	30.55	12.3		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
栄町 1	0.033	2.62	1.3	5	なし
栄町 2	1.24	14.52	8.5	5	なし
合計	1.273	17.14	7.4		

区域	液状化被害面積 (km ²)	区域全面積 (km ²)	液状化率	計測震度	履歴
横浜市 1	2.76	2.82	97.9	5.5	なし
横浜市 2	4.2	4.91	85.5	5.5	あり
横浜市 3	1.95	4.63	42.1	5.5	あり
横浜市 4	1.79	4.12	43.4	5.5	あり
横浜市 5	0.77	4.76	16.2	5.5	あり
合計	11.47	21.24	54.0		

表-2 は国土交通省が集めた液状化被害資料である。表に示すように、液状化被害面積 $a \text{ km}^2$ を区域全面積 $A \text{ km}^2$ で割った値、すなわち液状化率 $F_R = a/A \times 100(\%)$ 、計測震度、液状化の履歴の有無を掲載している。

5.3 大規模・中規模・小規模液状化被害の定義

本研究では液状化の被害の程度を大規模、中規模、小規模と分類する。図-3 で説明したように江東区 1 の a は 1.46 km^2 、 A は 2.58 km^2 なので液状化率 F_R は 57.5% となる。江東区 1～7 まで調査されているので同様な計算をすべて行うと、最終的にはこれらの計算を総和は $F_R = 9.8\%$ となる。例えば宮代市に見られるように、一つだけの調査地点にある場合においても同様な計算をし、表-2 を完成させた。液状化の程度、すなわち大規模、中規模、小規模液状化を決めるのは非常に難しいが本研究では、以降大規模液状化を $F_R \leq 50\%$ で、中規模液状化を $20\% \leq F_R < 50\%$ 、小規模液状化を $1\% \leq F_R < 20\%$ と定義する。この定義は本研究を進めるうえで便宜上決めた値であって本来詳細な調査と見識が必要であるが、ここで行う解析手法においては、この定義がいくらであっても構わないと記しておきたい。

6. 統計的なアプローチによる東日本大震災の液状化に関するリスク評価⁵⁾

国土交通省による液状化被害は表-3 以外にも多数調べられているが、表を作成するに当たり、なるべく同じ計測震度のデータが重ならない地点を抽出した。

6.1 地震ハザード曲線の評価

まず、地震発生確率の計算を行う。過去 89 年間での陸沖で発生したマグニチュードと発生個数の関係を調べたところ、表-1 となった。この三陸沖でのマグニチュード別の発生確率を計算する。ここでは、領域を図-2 と同様とし、過去 89 年間のデータから単位面積(1 km^2)あたりの各規模を有する地震の年平均発生個数を計算すると表-4 となる。

表-4 単位面積当たりの年平均発生個数 n

マグニチュード	発生個数	年平均個数
5	2250	3.56E-04
6	350	5.54E-05
7	24	3.80E-06
8	1	1.58E-07
9	1	1.58E-07

$$I = 1.36M - 4.03 \log_{10}(X + 0.00675 \times 10^{0.5M}) + 2.205$$

(2)

次に地震情報から揺れへの換算を行う。マグニチュード M 、地震の発生場所から敷地までの距離 $X \text{ km}$ 、計測震度 I に(2)式の関係があるとする。マグニチュードと地震発生場所までの距離から地面への揺れの強さを予測する関係式は「距離減衰式」と呼ばれており過去の地震と観測データを用いて経験的に作成されておりさまざまなものが提案されている。ここでは、計測震度を予測する松崎・久田・福島の式(2)を利用する。なお、ここでは問題を簡単にするために震源深さを 10 km に限定する。計測震度とマグニチュードの組み合わせ (I, M) を設定し式(2)を X について解いた式を、計測震度とマグニチュードを引用すれば当該マグニチュード M の地震によって当該計測震度となる震源距離の最大値が計算できる。計測震度が小さい程、またマグニチュードが大きい程、最大震源距離は大きくなり遠い地震まで考えなければならない。

さらに揺れの大きさの年超過確率の計算を行う。ここでは三陸沖での一年間にある計測震度を超える揺れが発生する確率(年超過確率)を計算する。地震の発生はポアソン過程従うとする。ある現象が単位時間当たりへ平均 ν 回発生するポアソン過程に従うとき時間間隔 t の間に少なくとも 1 回発生する確率は(3)式に表される。

P (時間間隔 t の間に少なくとも 1 回発生する)

$$= 1 - \exp(-\nu t) \quad (3)$$

最後に地震ハザードの計算を行う。

まずは、計測震度を超える地震の年平均発生個数を計算する。(3)式に $t=1$ 年を代入し、 ν には先ほど求めた年平均発生個数の合計を代入して、計測震度の年超過確率を計算する。図-4 はこうして求めた地震ハザード曲線である。

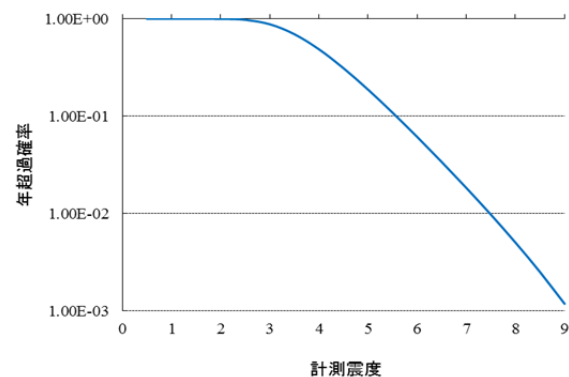


図-4 東日本大震災における地震ハザード曲線

7. 過去の被害データから統計的に求める液状化率曲線の作成

まず、液状化率曲線の関数の形を選ぶ必要があるがここでは正規分布で fragility 曲線をモデル化する。また、正規確率紙を用いて簡単に求める方法を採用する。次に標準正規分布関数の逆関数を用いて液状化率を確率紙の縦軸の値に変換する。

大規模液状化

計測震度	全壊率	基準化変数
0.0	0.01%	-3.72
5.5	7.10%	-1.47
5.5	33.90%	-0.42
5.0	33.50%	-0.43
5.5	32.80%	-0.45
5.0	71.70%	0.57
5.5	80.20%	0.85

回帰直線		回帰モデル	
係数 a	切片 b	平均値 $-b/a$	標準偏差 $1/a$
0.63	-3.62	5.71	1.575

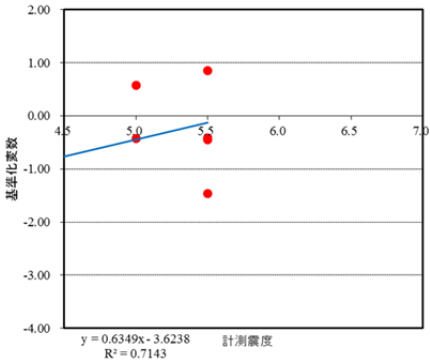


図-5 東日本大震災の液状化の大規模液状化の正規確率紙

中規模液状化

計測震度	全半壊率	基準化変数
0.0	0.02%	-3.54
5.5	8.80%	-1.35
5.0	4.00%	-1.75
5.5	11.00%	-1.23
5.5	7.10%	-1.47
6.0	17.70%	-0.93
5.5	17.60%	-0.93
6.0	7.50%	-1.44

回帰直線		回帰モデル	
係数 a	切片 b	平均値 $-b/a$	標準偏差 $1/a$
0.40	-3.55	8.78	2.474

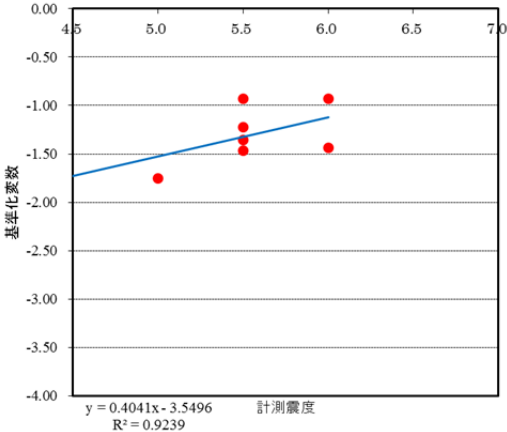


図-6 東日本大震災の液状化の中規模液状化の正規確率紙

小規模液状化

計測震度	一部損壊以上率	基準化変数
0.0	0.02%	-3.54
5.5	9.80%	-1.29
5.0	5.50%	-1.60
6.0	7.50%	-1.44
5.0	1.70%	-2.12
6.0	0.10%	-3.09
4.0	0.10%	-3.09
5.5	6.60%	-1.51
6.0	1.80%	-2.10
6.0	4.80%	-1.66
4.0	1.20%	-2.26
5.5	3.60%	-1.80
5.0	7.40%	-1.45
6.0	4.80%	-1.66
5.0	0.10%	-3.09

回帰直線		回帰モデル	
係数 a	切片 b	平均値 $-b/a$	標準偏差 $1/a$
0.30	-3.59	12.07	3.362

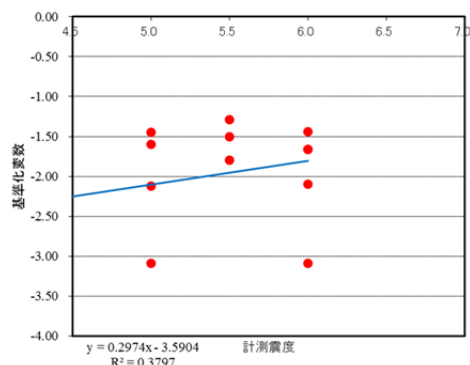


図-7 東日本大震災の液状化の小規模液状化の正規確率紙

図-5から図-7の大規模液状化率，中規模液状化率，小規模液状化率の正規分布パラメータを求めたのが表-5である。

表-5 フラジリティ曲線の正規分布モデルのパラメータ

	大規模	中規模	小規模
平均値	5.71	8.78	12.07
標準偏差	1.58	2.47	3.36

東日本大震災という非常に巨大な地震データなので，小規模液状化，中規模液状化，大規模液状化とともに想像もつかない被害レベルレベルとなってしまった。ばらつきを表す標準偏差はおおよそ1.5～3.5となつてばらつきが大きく，正規分布の当てはめに問題があったか，液状化率の定義に問題があったかも知れない。これらのパラメータを用いて確率分布関数を描いたものが図-8であり，計測震度と液状化率の関係を表すフラジリティ曲線である。

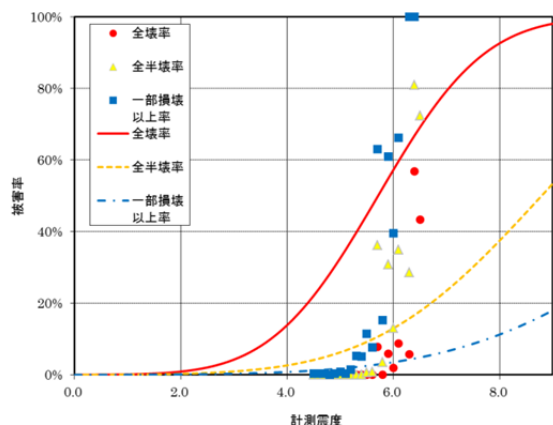


図-8 計測震度と被害率(液状化率)の関係を表すフラジリティ曲線

震度は，集計地域の代表値であり，また液状化耐震性能のばらつきから図-8の計測震度に対する被害率のデータはばらついたデータとなる。赤は大規模，黄は中規模，青は小規模となつていて，通常ならば反対の傾向がみられるが，この逆転現象は東日本大震災が，いかに巨大であったかを物語っている。

8. おわりに

一応，東日本大震災のデータから地震ハザード曲線と液状化率のフラジリティ曲線を作成した。フラジリティ曲線では液状化の被害が甚大で正規分布に当てはめることは難しかった。それ故に，その他の分布の当てはめも考慮すべきであった。また，地域特性をすべて同一としてデータを整理したが，例えば液状化が生じやすいところと，そうでないところなどの地域性を考えるべきであった。データはまだあるので工夫してみたい。

参考文献

- 1) 全国地質調査業協会連合会：絵とき地震による液状化とその対策，オーム社，2012.
- 2) 鶴岡 弘. WWWを用いた地震活動解析システムの開発，地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集，B22-P09，p77.
- 3) 鶴岡 弘. WWWを用いた地震活動解析システムの開発(2)，日本地震学会講演予稿集予稿集1997年度秋季大会，P04.
- 4) 鶴岡 弘. WWWを用いた地震情報検索・解析システムの開発. 情報処理学会研究報告;データベースシステム115-9，情報学基礎49-9,65-70(1998).
- 5) 日本建築学会編：EXCELで学ぶ地震リスク評価，2011