

## (12) 液状化被災地における全応力解析と有効応力解析の有用性について

復建調査設計㈱ 会 員 藤井照久  
 復建調査設計㈱ 会 員 福田直三  
 九州工業大学 会 員 安田 進

### 1. まえがき

近年、電子計算機の急速な普及により軟弱地盤の液状化判定にも地盤の応答解析が頻繁に使用されている。しかしながら、実務的には全応力解析が主流であり、また全応力解析と有効応力解析を実際に液状化した地盤で検証した例<sup>1)・2)</sup>は少ない。そこで本報は、日本海中部地震の際、実際に液状化の被災にあった地盤、および地盤改良などにより液状化の被災を受けなかった地盤について全応力解析および有効応力解析を実施し、両者の比較検討を行った結果について報告する。

### 2. 解析対象地盤

解析対象地盤は、1983年の日本海中部地震の際、青森・秋田地区で液状化の被災を受けた地盤および地盤改良などのため液状化の被災を受けなかった以下の8箇所の地盤とした。図-1に今回の解析を行った地点を示す。

#### 2.1 液状化の被災にあった地盤

- ①青森市内・・・地盤改良無し
- ②武田小学校
- ③八郎潟FD6+900 (堤頂)
- ④男鹿工業
- ⑤昭和町
- ⑥新屋松美町
- ⑦松屋元町

#### 2.2 液状化の被災にあわなかった地盤

- ⑧青森市内・・・地盤改良あり

### 3. 解析に用いた地盤材料定数の設定法

解析に用いた地盤定数は、以下のように設定した。

- ①初期せん断定数 ( $G_0$ )・・・ $G_0 = \rho \cdot V_s^2$  (ただし、 $V_s$ はNより推定)より算定。
- ②液状化強度 ( $R_{120}$ )・・・液状化強度試験結果があるものについてはその値を用い、無いものについては道路橋示方書に準じて決定した。
- ③応力~ひずみモデル・・・Ramberg-Osgood モデルを用いる。
- ④砂の内部摩擦角 ( $\phi'$ )・・・土質試験結果があるものはその値を用い、無いものについては、大崎の式 ( $\phi' = \sqrt{20 \cdot N + 15}$ )を用いた。
- ⑤変相角 ( $\theta s'$ )・・・ $\tan \theta s' = 0.875 \cdot \tan \phi'$
- ⑥透水係数 ( $k$ )・・・Creagerの表を用い決定。
- ⑦体積圧縮係数 ( $m_v$ )・・・ $m_v = 0.00297 \cdot \sigma_v'^{-0.36}$  ( $m^2/tf$ )より算定<sup>3)</sup>。

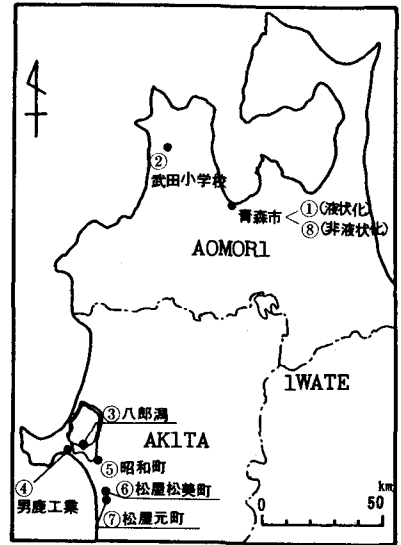


図-1 解析地盤の位置図

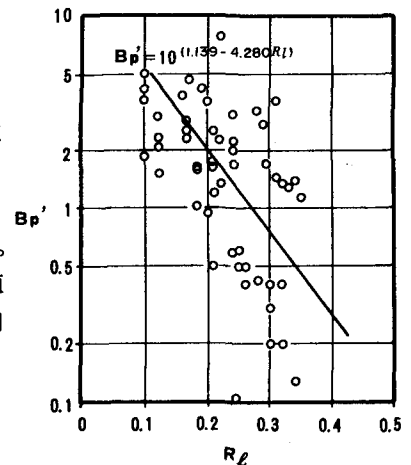


図-2  $B_p \sim R_l$ 関係

⑧間隙比 (n)・・・B. K. Houghの圧力～間隙比関係より算定。

⑨間隙水圧パラメータ (B<sub>p</sub>)・・・B<sub>p</sub>=10<sup>(1.139-4.280R<sub>1</sub>)</sup> (図-2参照)

⑩間隙水圧パラメータ (B<sub>u</sub>)・・・B<sub>p</sub>～R<sub>1</sub>～B<sub>u</sub>関係図表より決定。

以上の条件で設定した地盤材料定数のうち、青森市内の地盤改良あり・なしの地盤材料定数を表-1 (a), (b) に示す。

#### 4. 入力地震動

入力地震動としては、日本海中部地震の際、解析対象地区近辺の非液状化地盤で得られた地表面加速度を、SHAKEにより基盤に戻した波形を用いた。

秋田地区・・・秋田港 (記録方向、深さ; N-S, 地表最大加速度; 190.08gal)

青森地区・・・青森港 (記録方向、深さ; E-W, 地表最大加速度; 115.77gal)

表-1 地盤材料定数

(a) 青森市内・・・地盤改良無し

(b) 青森市内・・・地盤改良あり

Z (m)	層区分	n	γ <sub>t</sub> (t/m <sup>3</sup> )	σ <sub>v</sub> ' (kg/cm <sup>2</sup> )	K <sub>u</sub>	G <sub>0</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /f)	k (m/s)	φ' (deg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	γ <sub>f</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	B <sub>p</sub>	B <sub>u</sub>
1	1	0.51	1.9	0.05	0.5	4600	—	1×10 <sup>-2</sup>	29	0	—	0.01	—	—
2	2	0.44	1.8	0.14	0.5	4600	2.7×10 <sup>-2</sup>	5×10 <sup>-2</sup>	23	0	0.38	0.04	0.73	0.00
3	3	0.42	1.8	0.26	0.5	4600	2.1×10 <sup>-2</sup>	5×10 <sup>-2</sup>	23	0	0.24	0.07	2.48	0.00
4	4	0.40	1.9	0.40	0.6	9700	1.8×10 <sup>-2</sup>	5×10 <sup>-2</sup>	32	0	0.36	0.18	0.72	0.02
5	5	0.40	1.8	0.51	0.6	5600	1.6×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	26	0	0.23	0.18	2.58	0.00
6	6	0.42	1.9	0.64	0.7	8300	1.5×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	32	0	0.35	0.32	0.64	0.05
8	8	0.40	1.9	0.82	0.7	8300	1.4×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	32	0	0.34	0.40	0.72	0.05
10	10	0.40	1.9	1.01	0.7	8300	1.3×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	32	0	0.32	0.50	0.84	0.05
12	12	0.44	1.7	1.19	0.6	5600	—	5×10 <sup>-2</sup>	15	0.2	—	0.42	—	—
14	14	0.44	1.7	1.33	0.8	5600	—	5×10 <sup>-2</sup>	15	0.2	—	0.45	—	—
16	16	0.44	1.7	1.46	0.8	4100	—	5×10 <sup>-2</sup>	15	0.2	—	0.48	—	—
18	18	0.50	1.7	1.58	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.50	—	—
20	20	0.50	1.7	1.70	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.51	—	—
22	22	0.50	1.7	1.84	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.53	—	—
24	24	0.50	1.7	1.98	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.54	—	—
26	26	0.47	1.7	2.12	0.6	4100	—	5×10 <sup>-2</sup>	20	0.2	—	0.80	—	—
28	28	0.44	1.7	2.26	0.6	5100	—	5×10 <sup>-2</sup>	20	0.2	—	0.84	—	—
30	30	0.41	1.8	2.42	0.7	7500	—	1×10 <sup>-2</sup>	20	0.2	—	0.99	—	—
32	32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

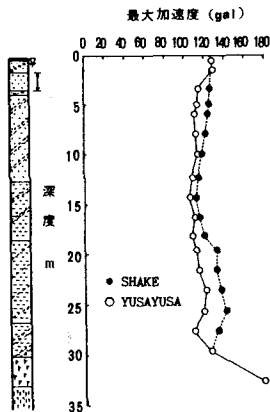
  

Z (m)	層区分	n	γ <sub>t</sub> (t/m <sup>3</sup> )	σ <sub>v</sub> ' (kg/cm <sup>2</sup> )	K <sub>u</sub>	G <sub>0</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /f)	k (m/s)	φ' (deg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	γ <sub>f</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	B <sub>p</sub>	B <sub>u</sub>
1	1	0.57	1.9	0.03	0.5	4600	—	1×10 <sup>-2</sup>	23	0	—	0.01	—	—
2	2	0.41	1.8	0.12	0.6	7500	2.9×10 <sup>-2</sup>	5×10 <sup>-2</sup>	29	0	0.38	0.05	0.56	0.00
3	3	0.41	1.8	0.19	0.6	7500	—	1×10 <sup>-2</sup>	15	0.1	—	0.13	—	—
4	4	0.41	1.8	0.24	0.6	7500	2.2×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	29	0	0.37	0.10	0.59	0.00
5	5	0.41	1.8	0.31	0.6	7500	1.9×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	29	0	0.45	0.12	0.26	0.00
6	6	0.37	1.9	0.41	0.7	10000	1.8×10 <sup>-2</sup>	5×10 <sup>-2</sup>	35	0	0.44	0.23	0.27	0.04
8	8	0.37	1.9	0.56	0.7	10000	1.8×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	35	0	0.42	0.31	0.34	0.05
10	10	0.37	1.9	0.71	0.7	10000	1.4×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	35	0	0.37	0.39	0.52	0.07
12	12	0.37	1.9	0.84	0.7	10000	1.3×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	35	0	0.36	0.46	0.60	0.08
14	14	0.37	1.9	1.00	0.7	10000	1.3×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	35	0	0.34	0.55	0.70	0.10
16	16	0.44	1.7	1.17	0.6	5600	—	5×10 <sup>-2</sup>	15	0.2	—	0.42	—	—
18	18	0.44	1.7	1.31	0.6	5600	—	5×10 <sup>-2</sup>	15	0.2	—	0.45	—	—
20	20	0.44	1.7	1.47	0.6	4100	—	5×10 <sup>-2</sup>	15	0.2	—	0.48	—	—
22	22	0.50	1.7	1.61	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.50	—	—
24	24	0.50	1.7	1.73	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.51	—	—
26	26	0.50	1.7	1.87	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.53	—	—
28	28	0.50	1.7	2.01	0.6	3600	—	1×10 <sup>-2</sup>	10	0.3	—	0.55	—	—
30	30	0.47	1.7	2.15	0.6	4100	—	5×10 <sup>-2</sup>	20	0.2	—	0.76	—	—
32	32	0.47	1.7	2.29	0.6	5100	—	5×10 <sup>-2</sup>	20	0.2	—	0.79	—	—
34	34	0.47	1.8	2.45	0.7	7500	—	1×10 <sup>-2</sup>	20	0.2	—	0.99	—	—
36	36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

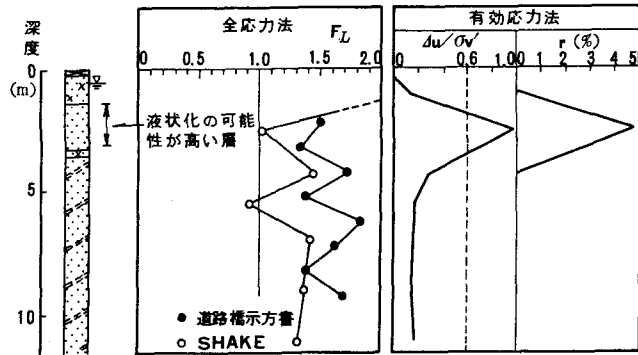
#### 5. 解析結果

図-3～6に、代表例として青森市内 (地盤改良なし), 八郎潟FD6+900, 松屋松美町, 青森市内 (地盤改良あり) の各地盤における全応力解析 (SHAKE) 及び有効応力解析 (YUSA-YUSA) で求められた最大加速度分布及び液状化判定結果の比較を示す。図中、柱状図の中に示している矢印部分は、N値・粒度試験結果等から判断して液状化の可能性が最も高い地層を示している。なお、液状化判定結果には参考のため道路橋示方書による液状化判定結果も示す。また、液状化の判定は、全応力解析ではF<sub>L</sub><1.0の層が、有効応力解析ではΔu/σ<sub>v</sub>'が1.0近く (初期液状化を考えると0.6以上) 上昇した層が液状化したと判定した。

これらの図より、まず最大加速度分布は地盤の組み合わせにより全応力解析 (SHAKE) の結果が大きくなったり、有効応力解析結果が大きくなったりする複雑に変動している。例えば青森市内地盤では全応力解析と有効応力解析がほぼ同様の応答値を示しているのに対し、八郎潟FD6+900では有効応力解析の方が、また松屋松美町では全応力解析の方が応答値が大きくなっている。従って、必ずしも全応力解析の方が最大加速度が大きくなるとは言えない。

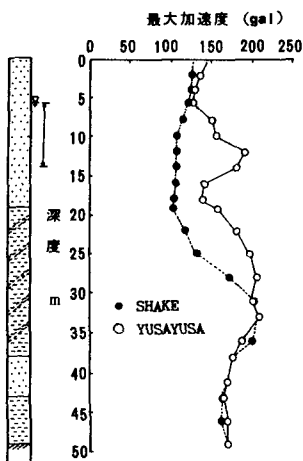


(a) 最大加速度分布

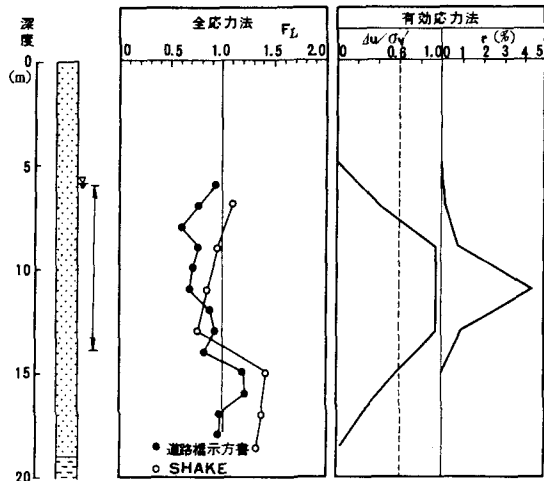


(b) 液状化判定結果

図-3 青森市内(地盤改良無し)の最大加速度分布及び液状化判定結果の比較

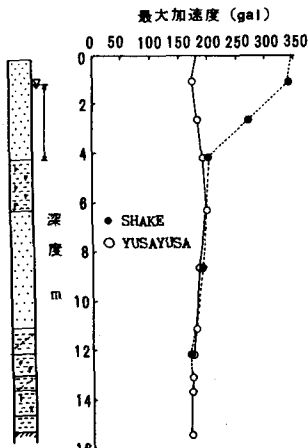


(a) 最大加速度分布

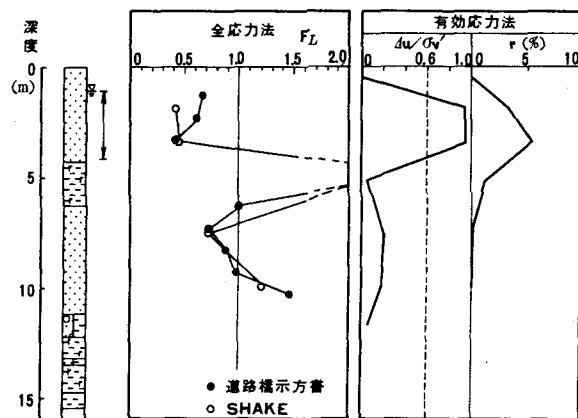


(b) 液状化判定結果

図-4 八郎湯FD6+900(堤頂)の最大加速度分布及び液状化判定結果の比較

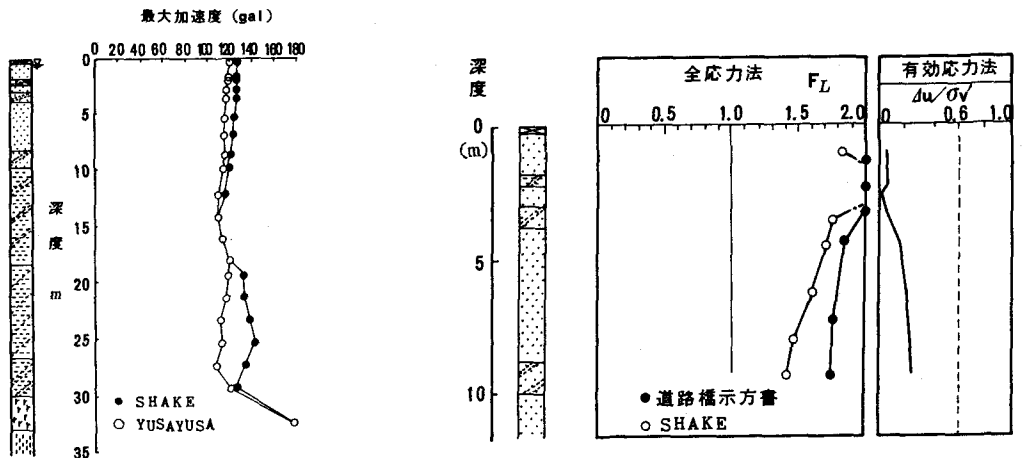


(a) 最大加速度分布



(b) 液状化判定結果

図-5 松屋松美町の地盤の最大加速度分布及び液状化判定結果の比較



(a) 最大加速度分布 (b) 液状化判定結果  
 図-6 青森市内の地盤（地盤改良あり）の最大加速度分布及び液状化判定結果の比較

両解析手法による液状化の判定結果が、実際に被災にあったと思われる層とどの程度適合性があるかを評価するために全地点を対象として図-7を作成した。同図は、縦軸に有効応力解析結果（YUSA-YUSA）の  $\Delta u/\sigma'_v$  値を横軸に全応力解析結果（SHAKE）の  $F_L$  値を示したものであり、図中黒丸（●）は液状化したと予想される層を示し、白丸（○）は液状化しなかったと予想される層を示す。従って、左上枠に黒丸、右下枠に白丸が集まれば液状化判定を全応力解析、有効応力解析ともうまく表していることを示し、それ以外であると有効応力あるいは全応力解析のどちらかの結果がうまく液状化判定を表していないことを示している。

図-7より、白丸、黒丸は  $\Delta u/\sigma'_v = 0.6$  の境界では上下にきれいに別れているが、 $F_L = 1.0$  の境界では左右には幅広く分布していることがわかる。これは、有効応力解析の方が全応力解析よりも、よりうまく液状化判定を示していることを示している。特にその傾向は、液状化しなかったと予想される層（○）で顕著に見られた。

### 6. あとがき

今後も、全応力解析と有効応力解析の比較を重ね、有効応力解析の実際への有用性を検討する予定である。

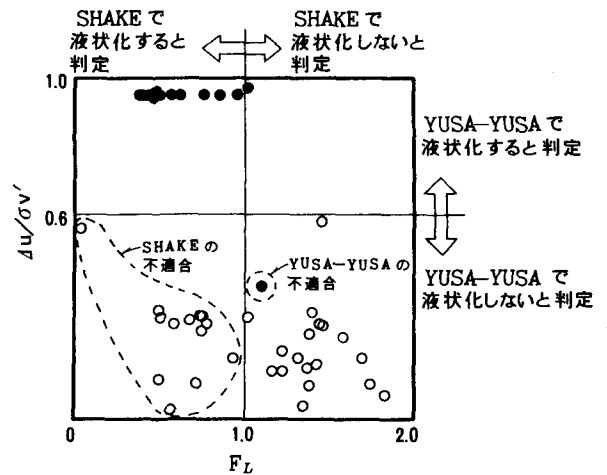


図-7 有効応力解析と全応力解析の液状化判定結果の比較

### 《参考文献》

- 1) 石原研而・東畑郁生：One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo(B), Vol. 35, No. 4, pp. 665-700, 1980.
- 2) 大橋猛・池田憲二・大沼修次：白鳥大橋架橋予定地点の地盤特性（4），各種判定法による液状化の総合判定，土質工学会北海道支部技術報告集，第25号，1985.
- 3) 東畑郁男・吉田 望：YUSAYUSA-2，SIMMDL-2，理論と使用法，平成3年10月。