

埋立地盤における各種液状化簡易予測手法の適用

Application of Simplified Prediction Methods of Liquefaction to Reclaimed Ground

後藤年芳	Toshiyoshi GOTO	((株)中研コンサルタント)
小山智芳	Tomoyoshi KOYAMA	(住友大阪セメント(株))
前田正博	Masahiro MAEDA	(エスオーエンジニアリング(株))
中谷康夫	Yasuo NAKATANI	(エスオーエンジニアリング(株))

神戸市長田区の海岸部の地震による液状化によると考えられる被害を受けた生コンクリート工場の骨材サイロの調査と新設のための地盤調査と基礎工法を検討する機会があった。本報告では、被害状況の概要と標準貫入試験結果(N値)とサンプラー中の試料土の粒度試験結果から数種類の簡易液状化予測手法の適用を試みた結果を示す。

キーワード：埋立地盤、液状化、N値、粒度、平均粒径、細分含有率 (IGC: C7/E8)

1. はじめに

兵庫県南部沖地震による地盤の液状化は、国土地理院の技術資料¹⁾によると大阪市西部から神戸市須磨区東部に至る広い範囲の海岸部で発生している。特に淀川左岸堤防、西宮、芦屋および神戸市の埋立造成した人工地盤で多く発生している。また、堺市の埋立地においても液状化による石油タンクの被害も報告されている²⁾。液状化の発生した範囲と今回の調査現場の位置を図-1中に示す。

今回調査した現場はJR長田駅から南方約2kmに位置する海岸部の埋立地である。神戸市沿岸部の埋立地の中では最も初期のもので埋立材としては主に礫質材が用いられていた。また、震源からの距離は約14kmである。地盤調査は、地震時に傾斜した骨材サイロを新設するにあたって基礎形式を検討するために実施したもので、埋土層下部にも砂地盤が続くことや地震時の被害状況から液状化の検討を実施する必要があった。

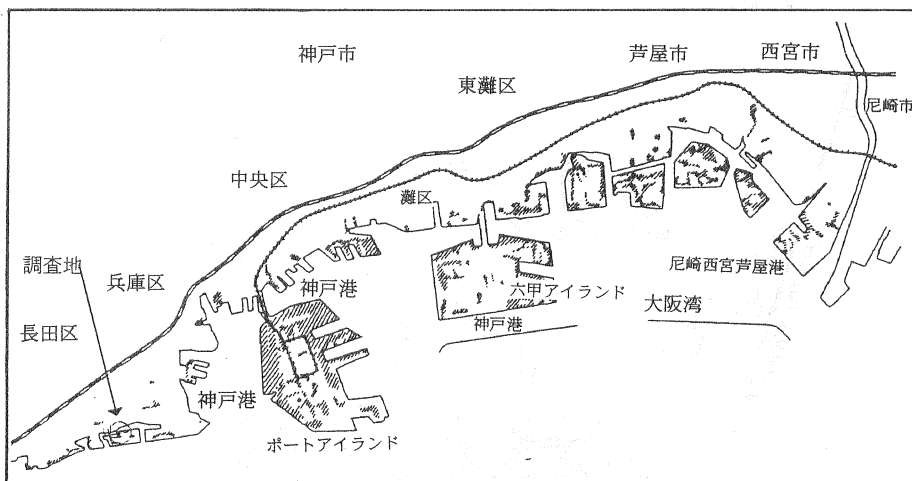


図-1 液状化発生位置と調査現場³⁾

2. 被害状況

地震による被害状況を図-2に示す。骨材サイロ8本のうちの端部の一本が約5度と大きく傾斜し、他の7本も若干傾斜した。サイロ下部のベルトコンベアを通すヒューム管は破損し、地下水位がGL-1.4mと高いため浸水した。端部の地下ピットの浮き上がりも生じた。その他の直接基礎の水タンク、混和材タンクも傾斜した。また、コンクリート舗装にも大きなひび割れが生じた。岸壁の変位も10cm程度発生し、隣接する敷地ではさらに大きな変位が生じた。このような被災状況から表層部で液状化が発生したと考えられる。

3. 地盤調査と土質試験

地盤の調査は、計画敷地内でGL-3.0mまでボーリング調査を実施し土質構成およびN値を測定した。貫入サンプラー中の試料は保存し、ふるいによる粒度試験および密度の参考とするため乱れた試料を締め固めて湿潤密度の測定を実施した。後に地盤のばらつきを調査するためにGL-1.5mまでのボーリング調査を2ヶ所実施し、同様の土質試験を実施した。各調査位置は、図-2中に示した。

調査結果を図-3に示す。GL-5m～-6mまでが5～20mmの円礫を主体とし、最大礫径150mmの玉石混じり砂礫からなる。埋立層でN値は6～21である。埋立層は岸壁方向にやや厚くなり

下部の砂層のN値はやや低い。GL-1.2mまでは砂層、貝殻混じり砂層からなりGL-1.0mまではN値は30～40の締まった層である。その下は急激にN値は低くなりGL-1.3m付近のN値6～9のシルト混じり砂層に続く。GL-1.4～-1.8mまではN値20前後の貝殻混じり砂層があり、その下2mはN値9のシルト混じり砂層となる。GL-2.0～-2.8mまではN値40以上の良く締まった砂層である。その下部の粘土層を2mまで確認している。

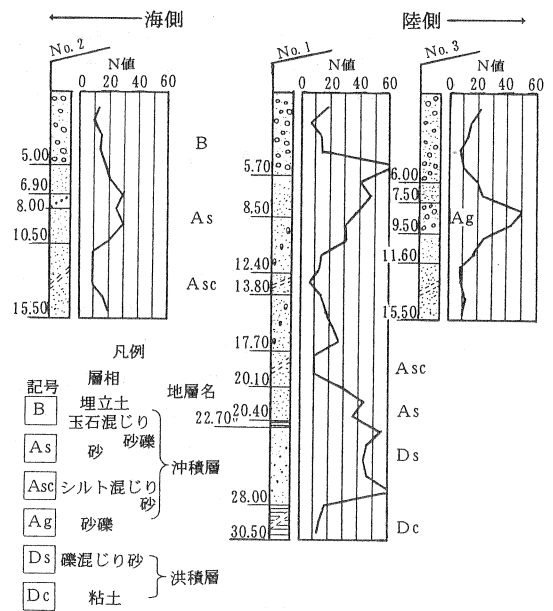


図-3 地盤調査結果

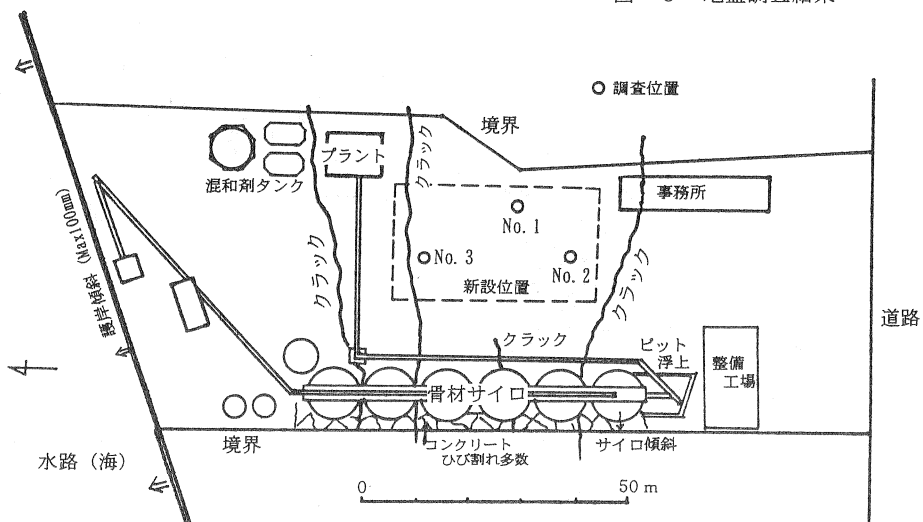


図-2 敷地内被害状況と地盤調査位置

4. 簡易液状化判定法

1) 簡易液状化判定法の種類

一般的な地盤調査結果を基に液状化の可能性を判定する研究がなされ、いくつかの判定法が提案され用いられている。いずれもN値などの地盤調査結果を用いて求めた動的せん断強度比(R)を水平加速度を基に求めた地震時せん断応力比(L)で除して液状化抵抗(F_L)を算定する方法である。 F_L が1を下回ると液状化の可能性が高いと判断される。

簡易液状化判定法の種類と特徴を表-1に示す。

表-1 簡易液状化判定法の種類と特徴

種 類	必要な地盤条件	地 震 力	検討対象
岩崎・龍岡法 道路橋示方書	N値、湿潤密度 平均粒径	最大水平震度	$0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 2\text{mm}$ $Z \leq 20\text{m}$
Seedの方法	N値、湿潤密度	最大水平震度 マグニチュード	
柴田の方法	N値、湿潤密度	最大水平震度	
建築学会の方法	N値、湿潤密度 細粒土含有率	最大水平加速度 マグニチュード	細粒分 $\leq 20\%$ $Z \leq 20\text{m}$

以下に各判定方法の計算方法を示す。

a) 道路橋示方書(岩崎・龍岡)の方法⁴⁾

地震時せん断応力比

$$L = \gamma_d \cdot k_s \cdot (\sigma_v / \sigma_v')$$

深度低減係数 :

$$\gamma_d = 1.0 - 0.015Z, \quad Z: \text{深度 (m)}$$

地表面水平震度 :

$$k_s = \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \nu_3 \cdot k_{s0}$$

ν_1 : 地域別補正係数

(兵庫県: 地域区分A; 1.0)

ν_2 : 地盤別補正係数

(2種地盤; 1.0)

ν_3 : 重要度補正係数(1級; 1.0)

k_{s0} : 判定用標準設計水平深度

(0.15、ここでは0.2)

σ_v : 土被り圧 (kgf/cm^2)

σ_v' : 有効土被り圧 (kgf/cm^2)

動的せん断強度比

$$R = R_1 + R_2$$

$$R_1 = 0.0882 \sqrt{N} / (\sigma_v' + 0.7)$$

$$R_2 = 0.19 \quad (0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.05\text{mm})$$

$$= 0.225 \log 10 \quad (0.35/D_{50})$$

$$(0.05\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.6\text{mm})$$

$$= -0.05 \quad (0.6\text{mm} \leq D_{50} \leq 2\text{mm})$$

b) シードの方法⁵⁾

作用応力比(地震時せん断応力比)

$$L = \tau_e / \sigma_v'$$

$$= 0.65 k_s \cdot (\sigma_v / \sigma_v') \cdot (1 - z/90)$$

τ_e : 等価せん断応力

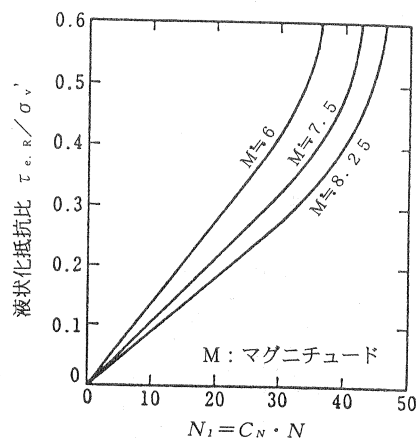
液状化抵抗比(動的せん断強度比)

$$R = 0.0108 N_1 \quad (M=7.5, N \text{ 値 } 30 \text{ 以下,}$$

他の場合は図-4参照)

$$N_1 = C_N \cdot N$$

$$= [2.25 / (\sigma_v' + 1.25)] \cdot N$$

図-4 液状化に対する限界N値⁵⁾c) 柴田の方法⁶⁾

液状化抵抗比(動的せん断強度比)

$$R = N / \alpha$$

$$\text{係数 } \alpha = 20 \quad (\sigma_v' \leq 0.25 \text{ kgf}/\text{cm}^2)$$

$$= 80 \sigma_v'$$

$$(0.25 \leq \sigma_v' \leq 0.75 \text{ kgf}/\text{cm}^2)$$

$$= 60 \quad (\sigma_v' \geq 0.75 \text{ kgf}/\text{cm}^2)$$

地震時せん断応力比

ここでは道路橋示方書の方法によった。

d) 建築基礎構造設計基準の方法⁷⁾

地震時せん断応力比

$$L = \tau_d / \sigma_v'$$

$$= \gamma_n \cdot (\alpha_{\max} / g) \cdot (\sigma_v / \sigma_v') \cdot \gamma_d$$

補正係数: $\gamma_n = 0.1 (M - 1)$

M: マグニチュード

 $\alpha_{\max}$: 地表面設計用重力加速度

g: 重力加速度 (980 gal)

深度低減係数: $\gamma_d = 1.0 - 0.015z$

z: 深度 (m)

液状化抵抗比 (動的せん断強度比)

$$R = \tau_l / \sigma_v'$$

補正N値 (Na) との関係図 (図-5)

より求める。

$$N_a = N_1 + \Delta N_1$$

換算N値:

$$N_1 = C_N \cdot N = \sqrt{10 / \sigma_v'}$$

補正N値増分:

$$\Delta N_1 = 1.2N - 6 \quad (5 \leq Fc \leq 10)$$

$$= 4 + 0.2N \quad (10 \leq Fc \leq 20)$$

$$= 6 + 0.1N \quad (20 \leq Fc \leq 50)$$

Fc: 細粒土 (74 μ m以下) 含有率 (%)

2) 液状化抵抗の計算

液状化抵抗比の計算にあたっては、N値は各測定値を、砂や砂礫の粒度は、標準貫入サンプラー中に入った試料に対する粒度試験結果を用い、また小型容器に詰めて測定した湿润密度を参考にした。計算はGL-20mまでについて実施し、測定値と計算に用いる代表値を表-2に示す。

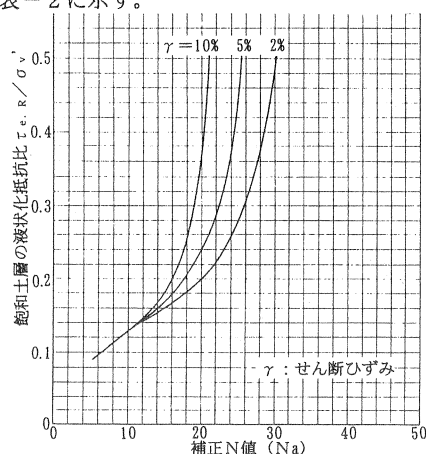
図-5 補正N値と飽和土層の液状化抵抗比⁷⁾

表-2 土質試験結果

深 度 (m)	N 値				平均粒径D ₅₀ (mm)				細粒分含有率Fc(%)				密度 γ_t (g/cm ³)		
	Bor. No. 1	Bor. No. 2	Bor. No. 3	代表 値	Bor. No. 1	Bor. No. 2	Bor. No. 3	代表 値	Bor. No. 1	Bor. No. 2	Bor. No. 3	代表 値	Bor. No. 2	Bor. No. 3	代表 値
1.3	17	13	21	20	3.2	3.5	0.91	3.0	1.3	4.8	13.2	3.1	1.94	1.87	1.9
2.3	6	10	14	10	4.8	4.0	0.69	4.0	0.9	0.1	2.2	0.5	1.88	1.98	1.9
3.3	13	15	12	13	6.0	0.23	4.1	5.0	0.7	14.9	3.5	3.5	1.88	2.02	1.9
4.3	14	14	8	12	—	3.1	1.0	2.0	—	9.4	16.7	13	1.96	1.96	1.9
5.3	14	18	10	14	—	0.29	0.28	0.29	—	8.7	19.2	14	1.84	1.99	1.9
6.3	39	31	19	30	—	0.32	0.27	0.30	—	7.4	7.8	7	1.78	1.89	1.8
7.3	47	29	23	30	—	0.33	0.27	0.30	—	7.0	7.8	7	1.86	1.81	1.8
8.3	38	25	50	38	—	0.18	0.29	0.24	—	8.7	7.6	8	1.87	1.99	1.9
9.3	30	30	43	34	0.20	0.18	3.8	0.19	5.4	15.4	9.4	12	1.93	2.02	1.9
10.3	31	21	23	25	0.20	0.15	0.17	0.17	5.0	17.9	12.8	11	1.93	1.85	1.9
11.3	14	8	16	13	0.20	0.11	0.17	0.16	5.2	29.1	14.9	16	1.92	1.83	1.9
12.3	13	8	8	10	0.20	0.15	0.12	0.16	6.0	27.8	26.8	20	1.97	1.88	1.9
13.3	6	8	9	8	—	0.34	—	0.34	—	21.3	—	21	2.01	—	1.9
14.3	14	16	11	14	0.36	0.26	0.28	0.30	10.4	16.4	19.2	15	1.91	1.95	1.9
15.3	17	19	10	15	0.39	0.23	0.29	0.30	4.4	14.9	21.1	13	1.98	1.94	1.9
16.3	22	—	—	22	0.25	—	—	—	6.9	—	—	7	—	—	1.9
17.3	26	—	—	26	0.19	—	—	—	8.8	—	—	9	—	—	1.9
18.3	9	—	—	9	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	1.8
19.3	9	—	—	9	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—	1.8

地震時のマグニチュードを7.5とし、地表面加速度を200 gal、最大水平震度を0.2として計算した。また、建築学会の方法では、せん断ひずみ5%の場合について計算した。

地震時の動的せん断応力比およびせん断抵抗比の計算結果を図-6、7に示す。せん断応力比は、シードの方法と建築学会の方法がほぼ同じで、道路橋示方書の方法が高くなる結果となった。これは、道路橋示方書の方法では水平震度が0.15であるところを0.20としたこと、シードの方法では等価せん断応力を用い、建築学会の方法ではマグニチュードによる補正を行っていることによる。

せん断抵抗比は、N値の高いところでは柴田の方法や建築学会の方法が高く、シードの方法は全般に低めの値となる。建築学会の方法では、細粒土含有率によるN値の割り増しがあり高めになり、せん断ひずみ5%では補正N値25でせん断抵抗比0.5の頭打ちとなる。

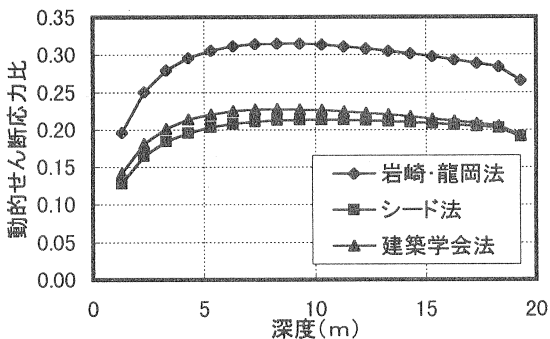


図-6 深度とせん断応力比の関係

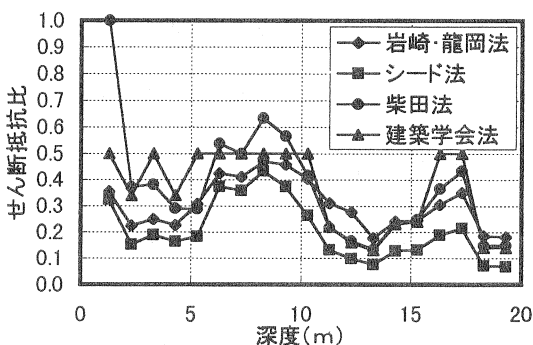


図-7 深度とせん断抵抗比の関係

これらの値を用いて、液状化抵抗比を計算した結果を表-3および図-8に示す。

表面の砂礫からなる埋立層においてもシードの方法、柴田の方法で液状化抵抗比が1以下となる。道

路橋示方書では平均粒径が2mm以上の場合は検討対象外となっているが計算を実施すると液状化抵抗比は1を下回った。このことは、先の地震の際に液状化と考えられる被害の発生と対応することとなり、砂礫層についても検討が必要であることがわかる。GL-6～10mのN値が30程度と高い層は何れの方法でも液状化抵抗比は1を上回る。GL-11～15mおよび-18～-19mの範囲は、細粒分含有率が20%を超え建築学会の方法では検

表-3 液状化安全率の比較

深度	N値	岩崎・龍岡の方法	Seedの方法	柴田の方法	建築学会の方法
1.3	20	1.81	2.53	5.10	3.53
2.3	10	0.89	0.93	1.48	1.88
3.3	13	0.89	1.02	1.36	> 2.48
4.3	12	0.77	0.84	0.98	1.59
5.3	14	1.01	0.90	0.94	> 2.27
6.3	30	1.36	1.80	1.73	> 2.23
7.3	30	1.31	1.70	1.59	> 2.21
8.3	38	1.49	2.05	2.01	> 2.20
9.3	34	1.46	1.75	1.80	> 2.20
10.3	25	1.29	1.24	1.33	> 2.21
11.3	13	1.00	0.62	0.70	0.98
12.3	10	0.90	0.46	0.54	0.72
13.3	8	0.58	0.36	0.44	0.59
14.3	14	0.80	0.61	0.77	1.06
15.3	15	0.82	0.64	0.84	1.12
16.3	22	1.04	0.91	1.25	2.36
17.3	26	1.22	1.05	1.50	2.40
18.3	9	0.65	0.36	0.53	0.68
19.3	9	0.65	0.36	0.56	0.73

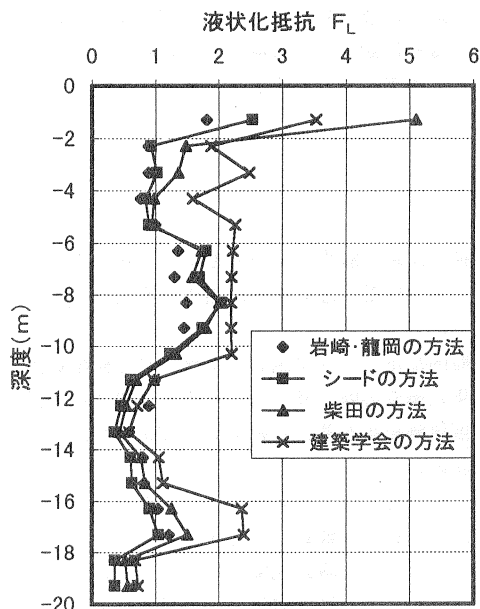


図-8 深度と液状化抵抗比

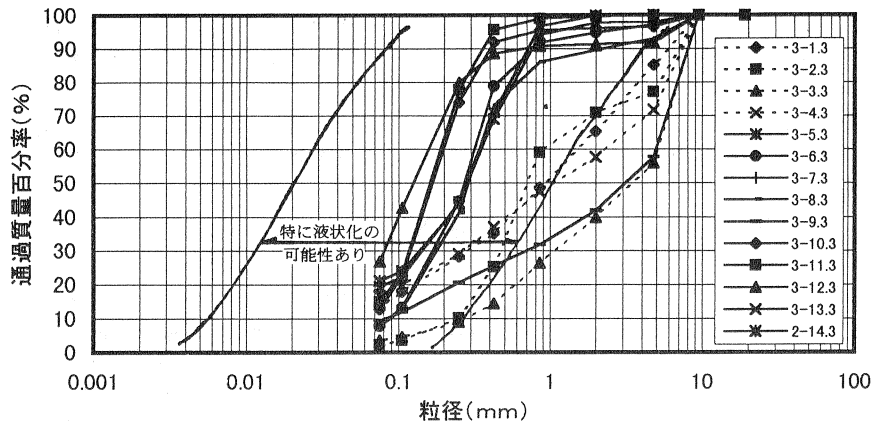


図-8 標準貫入サンプラー中の試料の粒度分布

討対象外となっている部分もあるがN値が低く液状化抵抗比は1以下となった。この範囲の試料は外見ではシルトのように見えることから地震時に他の地域でも見られた噴泥はこうした試料の噴出したものである可能性がある。

5. 試料の粒度

No. 3のボーリング調査の際にサンプラー中に得られた試料の粒度試験(ふるい)結果を図-9に示す。図中のは日本港湾協会の基準(1989)に示された特に液状化の可能性ありとする範囲も示した。埋立層の砂礫はこの範囲をはずれるが液状化が生じている。逆にN値が高く液状化抵抗比が1以上の範囲の試料は特に液状化の可能性ありの範囲ではあるものの良く締まっていることから液状化抵抗比が高くなった。

6. まとめ

阪神・淡路大震災における液状化の被害を受けた神戸市の海岸部の埋立地の地盤調査を実施する機会があった。

一般的なボーリング調査で実施される標準貫入試験結果と調査の際にサンプラー中に採取される試料の粒度試験結果を基に各種の簡易液状化判定法の適用を試みた。

今回の地震では、従来液状化の例の少なかった粒度構成の砂質土や礫質土でも液状化が生じたと考えられているが、本調査現場もその一つであると考えられる。対応する砂礫層に対して簡易判定法を適用

すると液状化の可能性があるかと判断される結果になった。

また、簡易液状化判定法は地震力を一定にすればほぼ同様の傾向の結果が得られるが、砂礫層では判定法により差がでることもあった。N値の低い層では何れの方法でも液状化すると判断される層(深度)はほぼ同様となった。砂の粒度分布は、液状化しやすい範囲であってもN値が25~30以上あれば液状化抵抗比が1を十分に上回り液状化の可能性が少ないと判断され、従来からの説が確認された。

参考文献

- 1) 国土院：国土院技術資料、B-1-N0. 322、平成7年度兵庫県南部地震災害現況図(第2版)、1995. 4.
- 2) 鄭 京哲、ほか：石油タンクの地震被害とその検証、土と基礎、pp19-21、1996. 3.
- 3) 渡辺具能：液状化読本 メカニズムとQ&A、1995.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1980.
- 5) Seed, H. B: Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquake, Pro. ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp201-255, 1979.
- 6) 柴田徹：飽和砂地盤の液状化抵抗とN値、第17回自然災害科学シンポジウム講演集、1980.
- 7) 建築学会：建築基礎構造設計指針、1980.