

土木研究所資料

東北地方太平洋沖地震における 液状化を踏まえた液状化判定法の検討

平成26年1月

独立行政法人土木研究所
地質・地盤研究グループ土質・振動チーム

Copyright © (2014) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

東北地方太平洋沖地震における 液状化を踏まえた液状化判定法の検討

土質・振動チーム 主任研究員	石原 雅規
元交流研究員	増山 博之
上席研究員	佐々木哲也
研究員	谷本 俊輔

要 旨 :

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北地方および関東地方の広い地域で液状化が発生した。関東地方の液状化した箇所及びその周辺の液状化しなかった箇所の既往のボーリング調査結果を用い、液状化判定を実施した。その結果、本地震のような継続時間が無く、多くの強い余震が発生した本地震において、概ね安全側の結果を与えることが明らかとなった。併せて、細粒分含有率や造成年代、地震動継続時間(千葉県東方沖地震との比較)に着目した整理も行った。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、液状化判定、造成年代、細粒分、地震動継続時間

目次

1. まえがき	1
2. 液状化判定法	2
3. 液状化判定実施箇所.....	5
4. 液状化判定結果	9
4.1 地形区分	10
4.2 造成年代	11
5. 液状化の有無と P_L 値	13
6. 液状化の有無と地盤強度（標準貫入試験結果）	16
7. 液状化の有無と細粒分含有率.....	18
8. 液状化の有無と造成年代.....	20
9. 液状化の有無と継続時間.....	22
10. まとめ、今後の課題	26
謝 辞.....	28
参考文献.....	29

巻末資料

1. まえがき

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北地方および関東地方の広い地域で液状化が発生し、各種構造物に甚大な被害が生じた。この地震の地震動および液状化現象について特徴的なことは以下のとおりである。

- ・広い範囲で強い揺れが観測されただけでなく、地震動継続時間が従来の地震に比べ長いことや、強い余震が繰返し発生した。
- ・東京湾の北部の埋立地や利根川下流部において液状化による噴砂・噴水が面的に生じた地域もあった。液状化が確認された箇所は比較的新しい埋立地や旧河道等の若い地盤に集中していた。
- ・埋立地等においては、シルトを主体とする噴砂が多数確認された。

液状化判定法は、道路橋や河川堤防などの各種土木構造物の耐震性能の評価及び液状化危険度マップの作成などにおいて、最も基本的かつ重要な技術であり、道路構造物、河川構造物等の設計においては、平成14年の道路橋示方書に規定されている方法が適用されているのが現状である。この液状化判定法は、本地震のような長い継続時間や余震を想定したものではないことから、見逃し、すなわち、実際には液状化したものの液状化判定上液状化しない、があったのではないか等の懸念があり、土木研究所では、東北地方太平洋地震の直後に液状化判定法の検証を行った。

その結果は、関係学会と連携しつつ、国土交通省の各部局、関係研究機関が設置した「液状化対策技術検討会議（以下、検討会議）」に報告し、検討会議において液状化判定法の今後の課題などについても議論・とりまとめがなされた¹⁾。

本資料は、検討会議のとりまとめの後に新たにボーリングデータを追加し、再整理を行った結果をとりまとめたものである。その結果、検討会議においてとりまとめられた結論と異なっている部分がある。

なお、本資料でいう現在の液状化判定法とは、特に断らない限り、平成14年および平成24年の道路橋示方書²⁾³⁾に規定されている液状化判定法のことを指す。検討会議では、平成14年の道路橋示方書における液状化判定法を見直すことの必要性が低いと結論付けられたことを踏まえ、平成24年に改定された道路橋示方書においても、従来の液状化判定法が踏襲されることとなったため、両者における液状化判定の方法に本質的な違いはない。

2. 液状化判定法

本研究では、現在の液状化判定法を対象に検証を行った。本研究における液状化判定の方法は次のとおりである。

液状化判定の対象とする土層は、次の3条件全てに該当する沖積層とした。

- 1) 地下水位が地表面から10m以内にあり、かつ、地表面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率 FC が35%以下の土層、又は、 FC が35%を超えても塑性指数 I_p が15以下の土層
- 3) 50%粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ、10%粒径 D_{10} が1mm以下である土層

液状化判定の対象とする土層で、次式により算出される液状化に対する抵抗率 F_L が1.0以下の土層については、液状化が生じる土層と判定した。

$$F_L = R/L \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$R = c_w R_L \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$L = r_d k_{hg} \sigma_v / \sigma'_v \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\sigma_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2}(x - h_w) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\sigma'_v = \gamma'_{t2} h_w + \gamma'_{t2}(x - h_w) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$c_w = 1.0 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここに、

- R : 動的せん断強度比
- L : 地震時せん断応力比
- c_w : 地震動特性による補正係数
- R_L : 繰返し三軸強度比
- r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数
- k_{hg} : 地盤面における水平震度
- σ_v : 全上載圧(kN/m²)
- σ'_v : 有効上載圧(kN/m²)
- x : 地表面からの深さ(m)
- γ_{t1} : 地下水位以浅の土の単位体積重量(kN/m³)
- γ_{t2} : 地下水位以深の土の単位体積重量(kN/m³)
- γ'_{t2} : 地下水位以深の土の有効単位体積重量(kN/m³)
- h_w : 地下水位の深さ(m)

東北地方太平洋沖地震による地震動は、継続時間の長さが大きな特徴であったが、現在の液状化判定法を検証する目的から、地震動特性による補正係数 c_w としては、プレート境界で発生した既往の地震による地震動に対して設定された値 (1.0) を用いることとした。

地盤面における水平震度としては、液状化判定の対象地点近傍における地表面最大加速度を重力加速度で除した値を用いた。本研究において対象とした地震は 2011 年東北地方太平洋沖地震と 1987 年千葉県東方沖地震の 2 地震であるが、国土技術政策総合研究所はこれらの 2 地震について、国土交通省、気象庁、防災科学研究所の強震観測記録を単純型 KRIGING 法 (RASMO と同様) により補間した地震動分布 (図-2.1) を算出している^{4), 5)}。判定対象地点における地表面最大加速度は、この地震動分布から設定した。

繰返し三軸強度比 R_L は式(2.8)により算出した。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \dots\dots\dots(2.8)$$

ここで、

<砂質土の場合>

$$N_a = c_1 N_1 + c_2 \dots\dots\dots(2.9)$$

$$N_1 = 170N / (\sigma'_v + 70) \dots\dots\dots(2.10)$$

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40) / 50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC / 20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10) / 18 & (10\% \leq FC) \end{cases} \dots\dots\dots(2.12)$$

<礫質土の場合>

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50} / 2)\} N_1 \dots\dots\dots(2.13)$$

ここに、

- R_L : 繰返し三軸強度比
- N : 標準貫入試験から得られる N 値
- N_1 : 有効上載圧 100kN/m² 相当に換算した N 値
- N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値
- c_1, c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数
- FC : 細粒分含有率(%) (粒径 75 μ m 以下の土粒子の通過質量百分率)
- D_{50} : 50% 粒径(mm)

物理試験 (粒度、密度) データがない場合には、表- 2.1 に示す土質分類と単位重量、50% 粒径、細粒分含有率の概略値を用いることとした。

さらに、河川堤防で実施されたボーリング試験結果を使う場合には、できるだけり尻付近の調査結果を使うようにしたが、中には天端等から実施したボーリング結果を使わざるを得ない場合があった。このような場合には、液状化が確認された水平地盤の標高と孔口標高に差があるた

め、換算 N 値を算出する時の上載圧は孔口からの土層構成を基に算出し、地震時せん断応力比を算出するための上載圧は水平地盤より上の土層が存在しないものとして算出した。

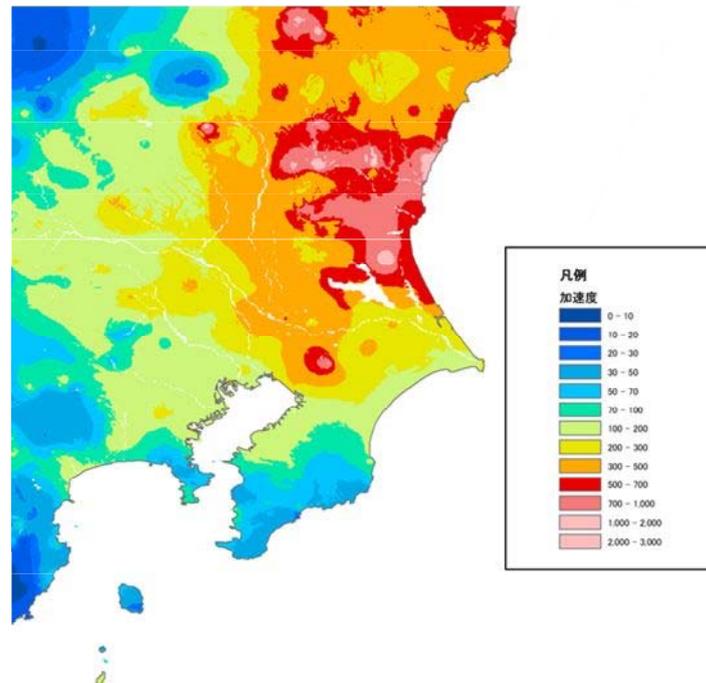


図-2.1 地表面最大加速度分布（2011年東北地方太平洋沖地震）^{4), 5)}

表-2.1 土質分類と単位重量、50%粒径、細粒分含有率の概略値⁶⁾

土質分類	地下水位面下の単位重量 $\gamma_{t2}(\text{kN}/\text{m}^3)$	地下水位面上の単位重量 $\gamma_{t1}(\text{kN}/\text{m}^3)$	50%粒径 $D_{50}(\text{mm})$	細粒分含有率 $FC(\%)$
表土	17.0	15.0	0.02	80
シルト	17.5	15.5	0.025	75
砂質シルト	18.0	16.0	0.04	65
シルト質細砂	18.0	16.0	0.07	50
微細砂	18.5	16.5	0.1	40
細砂	19.5	17.5	0.15	30
中砂	20.0	18.0	0.35	10
粗砂	20.0	18.0	0.6	0
砂れき	21.0	19.0	2.0	0

3. 液状化判定実施箇所

液状化の発生は、東北地方から関東地方にかけて広い地域に分布するが、東北地方においては津波によって痕跡が洗い流された箇所が多いと考えられること等から、関東地方を対象として液状化判定を行った。

以下の a)及び b)の箇所のうち、液状化判定を実施する上で不可欠なボーリングデータについては、c)の条件を課した結果、表- 3.1 及び図- 3.1 の 196 箇所を選定した。

a) 代表的な液状化発生箇所

- ・ 関東地方整備局・地盤工学会が実施した液状化に係る調査結果（以下、関東地方液状化調査）⁷⁾から液状化が発生したことが確認できる箇所
- ・ 直轄河川堤防（利根川、小貝川、霞ヶ浦、那珂川、久慈川）の大規模被災箇所⁸⁾

b) 代表的な非液状化箇所

- ・ 関東地方液状化調査から液状化が発生したことが確認できる箇所周辺において、液状化の発生が確認できなかった箇所
- ・ 地震動や地盤の強度と液状化の発生状況の関係を調べるために、地震動や地盤の強度に関して幅広い条件の箇所（たとえば、地震動の小さな神奈川県内や千葉県南部から地震動の大きな関東北部までの箇所、利根川や荒川などにおいて地盤強度の低い下流から地盤強度の高い上流までの箇所。また、1987 年千葉県東方沖地震において液状化の発生が確認されているが、本地震では確認されなかった箇所）

表- 3.1 地域毎の液状化判定箇所数と液状化の有無、地表面最大加速度

	液状化判定実施箇所数			地表面最大加速度 (平均値)	
	液状化 あり	近傍で 液状化	液状化 なし		
東京湾北部	111	27	9	75	150 - 512 gal (203 gal)
利根川下流	23	17	1	5	197 - 453 gal (310 gal)
那珂川・久慈川	5	5	0	0	629 - 799 gal (723 gal)
小貝川・鬼怒川	8	5	0	3	318 - 373 gal (345 gal)
内陸	9	0	0	9	164 - 254 gal (202 gal)
神奈川・東京南部	17	0	0	17	73 - 169 gal (127 gal)
千葉県南部	14	0	0	14	56 - 170 gal (145 gal)
九十九里	9	1	0	8	100 - 190 gal (154 gal)
合計	196	54	10	132	56 - 799 gal (221 gal)

c) ボーリングデータ

【対象】

- ① Kunijiban⁹⁾に登録されている関東地方整備局が実施したデータ及び関東地方整備局から別途提供頂いたデータ
- ② 東京都土木技術支援人材育成センターが管理する東京の地盤（Web 版）¹⁰⁾及び同センターより別途提供頂いたデータ
- ③ 千葉県が管理する千葉県地質環境インフォメーションバンク¹¹⁾及び千葉県より別途提供頂いたデータ

【条件】

- ① 孔内水位が計測されているもの
- ② 液状化判定の対象となる砂層が存在するもの
- ③ 十分な数の標準貫入試験が実施されているもの
- ④ 十分な長さの掘進長があるもの
- ⑤ 表層の埋土層が複雑でないもの（ゴミなどが確認されないもの）

※1 本のボーリング結果から、孔内水位や十分な長さの掘進長があるか不明な場合でも、周辺のボーリング結果から確認できる場合には、条件を満足するものとして扱った。

各液状化判定実施箇所の東北地方太平洋沖地震における液状化の有無については、関東地方液状化調査⁷⁾や河川堤防の被災状況⁸⁾に基づいて判定した。関東地方液状化調査においては、液状化による噴砂や噴水の痕跡を基本に液状化した範囲や液状化しなかった範囲を判別している。実際の現象を考えると、噴砂や噴水に至らず地中だけで完結するものも存在することから、噴砂や噴水の痕跡が確認できなかった範囲にも液状化が生じている可能性があることに留意しなければならない。ただし、地中で完結し、構造物の被災や社会活動に影響しなかった液状化の発生までを工学的に液状化と評価する必要があるかどうかは議論の余地がある。また、ボーリング位置で液状化の発生は確認できないものの近傍（せいぜい数百 m 以内）で液状化の発生が確認できる場合には、「近傍で液状化」とし、「液状化あり」や「液状化なし」と分けて区分した。

また、表- 3.1 に、地域毎、液状化の有無毎の液状化判定実施箇所数と東北地方太平洋沖地震における地表面の最大加速度の範囲と平均値を示した。液状化が面的に生じた東京湾北部は 200gal 程度、利根川下流においては 300gal 程度であった。

さらに、液状化判定実施箇所の分布を図- 3.1 と図-3.2 に示す。

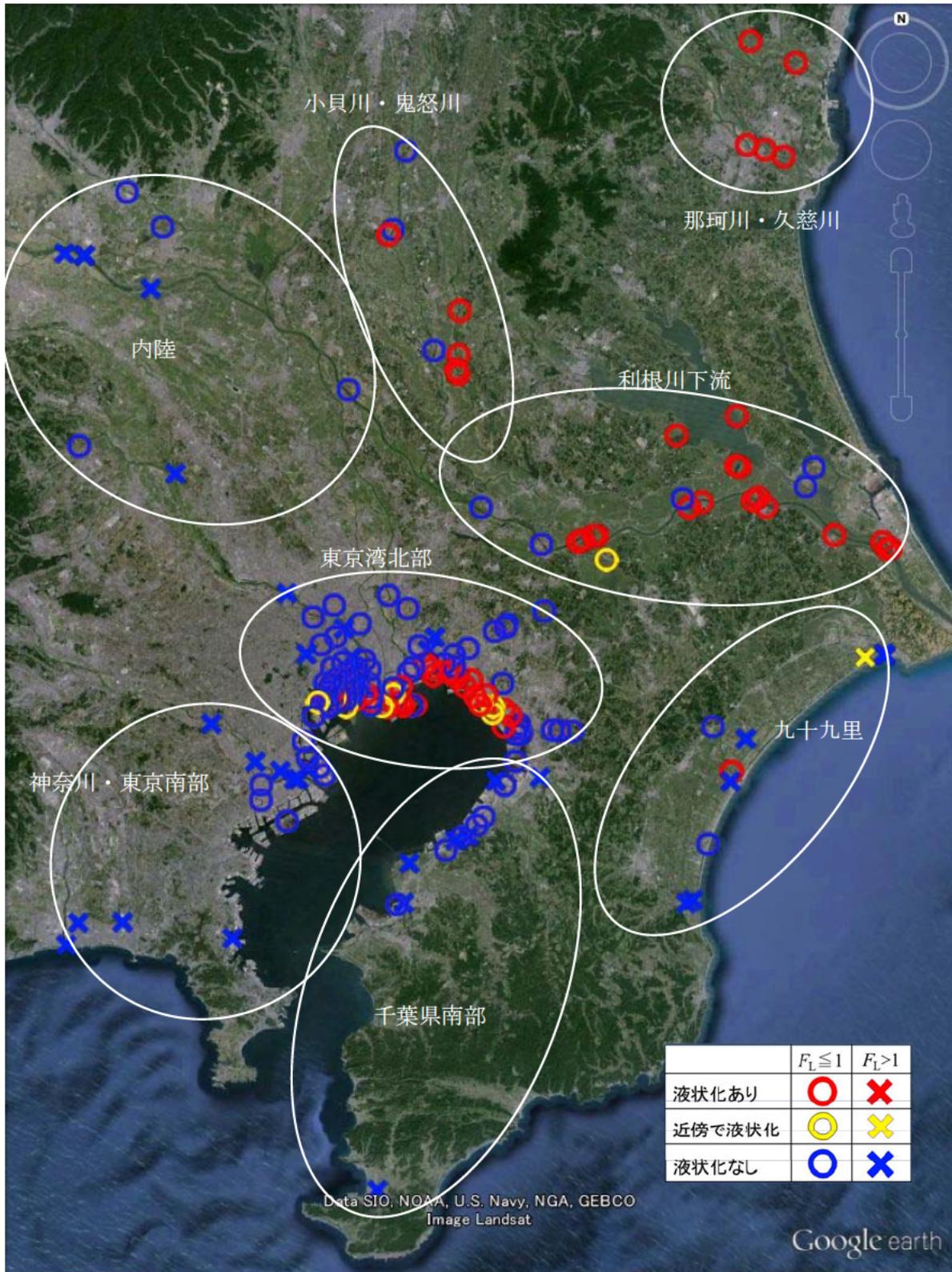


図- 3.1 液状化判定実施箇所の液状化の有無と判定結果



図-3.2 液状化判定実施箇所の液状化の有無と判定結果（東京湾北部詳細）

4. 液状化判定結果

上述の方法による液状化判定の結果を表-4.1に示す。ここでは、現行の液状化判定法を検証することを目的としているため、道路橋示方書の方法に準じ、深度20m以浅の最小 F_L が1以下か1を上回っているかに着目した。また、これらの位置については、図-3.1と図-3.2に示した。

表-4.1 液状化判定結果と液状化の有無

	最小 $F_L \leq 1$	最小 $F_L > 1$	計
液状化あり	55	0	55
近傍で液状化	9	1	10
液状化なし	97	34	131
計	161	35	196

実際の液状化の有無と液状化判定の結果が一致したのは、近傍で液状化した箇所を除くと、186箇所中89箇所の約48%であった。一致しなかった箇所97箇所は、全て液状化が確認されなかったが最小 F_L が1以下となった箇所であり、液状化が確認されたが最小 F_L が1を超えた箇所はなかった。これより、液状化判定方法は、東北地方太平洋沖地震のように継続時間の長い地震に対しても、安全側の評価となることが確認できた。

一致しなかった箇所97箇所には、液状化が地盤の内部では起きていたものの、表面で確認できる噴砂・噴水や被害に至らなかった箇所も含まれている可能性があるため、現象としてはもう少し高い精度で捉えることが出来ている可能性がある。

近傍で液状化が確認された10箇所の中に1箇所、最小 F_L が1を上回った箇所があり、その位置を図-4.1に示す。当該箇所の位置する九十九里に面した地域（千葉県旭市、旧飯岡町）では、砂鉄を採取するために掘削し埋め戻した箇所が多く存在する¹²⁾。このような箇所において液状化被害が度々発生している¹³⁾。飯岡町史によると当該箇所近傍で砂鉄を採取していたようである。ボーリング調査位置が少しずれ、人為的な改変が行われていない箇所であったとすれば、液状化の有無と液状化判定結果が一致しなくてもおかしくはない。

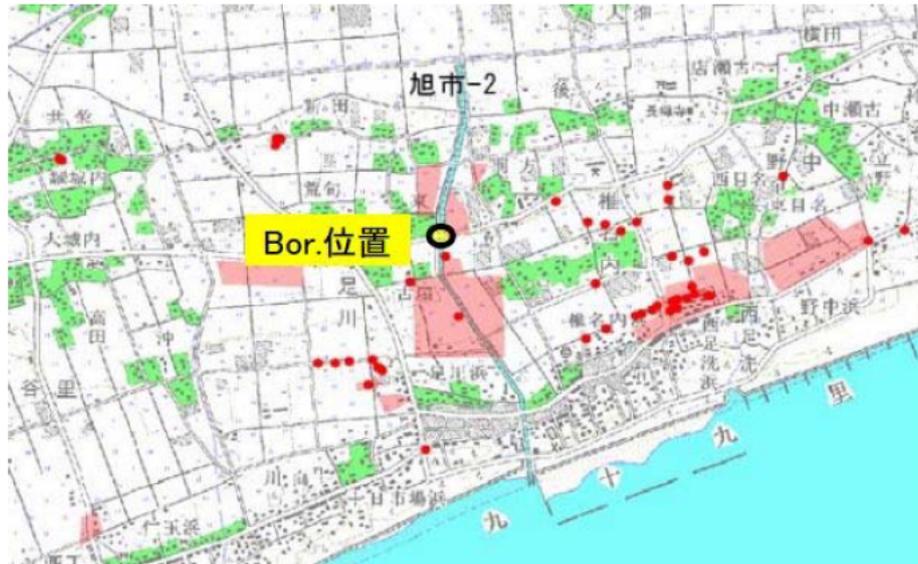


図-4.1 CH363 の位置図

(関東地方液状化調査⁷⁾ にボーリング位置加筆, 赤く着色した範囲：液状化)

4.1 地形区分

表-4.2 に、地形区分毎の箇所数を示す。地形区分は、直轄河川周辺では治水地形分類図から、その他の地域では土地条件図から抽出したものである。関東地方液状化調査⁷⁾によると、関東地方の埋立地の約 20%において液状化が発生しており、埋立地が最も液状化の発生率の高い分類であった。次いで、旧河道や干拓地が高い。このような液状化発生率の高い地形区分において、液状化ありの占める割合（埋立地：19/50）も高く、全体に占める割合（埋立地：50/196）も高い。

表-4.2 液状化判定箇所の地形区分毎の数量と液状化判定結果

地形区分		液状化判定実施箇所数						
		液状化あり	近傍で液状化			液状化なし		
			$F_L \leq 1$	$F_L \leq 1$	$F_L > 1$	$F_L \leq 1$	$F_L > 1$	
海岸平野、砂丘、砂堆・砂州	10	1	0	0	0	9	3	6
旧河道	13	9	1	0	1	3	1	2
旧湿地、旧水面上の盛土地	7	1	0	0	0	6	4	2
埋立地	50	19	4	4	0	27	26	1
盛土地、高い盛土地	40	7	4	4	0	29	25	4
高水敷	8	0	0	0	0	8	3	5
天井川の部分	1	1	0	0	0	0	0	0
氾濫平野、低地	31	5	0	0	0	26	18	8
自然堤防	19	8	1	1	0	10	6	4
台地、段丘の下位面	5	0	0	0	0	5	3	2
扇状地	1	0	0	0	0	1	0	0

* 盛土地に、干拓地における盛土地などが含まれる。

4.2 造成年代

表-4.3 は、造成年代毎の箇所数を示すものである。造成年代は、関東地方液状化調査⁷⁾や東京都臨海域における埋立地造成の歴史¹⁴⁾等を参考に設定したものであり、その他(自然地盤)、江戸、明治、大正、昭和、不明の6種類に区分した。長期間に渡って造成が続けられた箇所については、区画ごとの主要な造成時期から判断した。ここで、不明とは、表-4.2 の地形区分(旧河道、盛土地、埋立地等)等から造成が行われたと考えられるものの、造成時期が不明な箇所を表す。一方、その他は、造成が行われたことが確認できない箇所であり、ほとんどは自然地盤であると考えられる。

造成年代の区分が昭和と不明においてはかなりの割合で液状化が確認されており、一方でその他(自然地盤)や江戸に区分された箇所では液状化が確認された割合は相対的に少ない。

表-4.3 液状化判定箇所の造成年代と液状化判定結果

造成年代区分	液状化判定実施箇所数							
	液状化あり	近傍で液状化			液状化なし			
		$F_L \leq 1$	$F_L \leq 1$	$F_L > 1$	$F_L \leq 1$	$F_L > 1$		
その他(自然地盤)	54	11	1	1	0	42	24	18
江戸	17	1	0	0	0	16	16	0
明治	12	3	1	1	0	8	7	1
大正	3	1	0	0	0	2	2	0
昭和	82	29	7	7	0	46	40	6
不明	28	10	1	0	1	17	8	9

* 盛土地に、干拓地における盛土地などが含まれる。

液状化しなかったが、 $F_L \leq 1$ となった箇所は、東京湾北部の液状化した地域の北側に多く分布している。図-4.2 に示すように液状化した地域の周辺の古い埋立地盤や自然地盤において、液状化しなかった箇所であるが $F_L \leq 1$ となった箇所が多い。

液状化した地域は、昭和以降に埋め立てた地盤がほとんどであり、同じ埋立地でも江戸時代や明治時代に埋め立てた地盤や周辺の自然地盤で液状化が確認された箇所は非常に限られている。

図-4.3 に示すように、液状化した地域としなかった地域の同じような砂層について柱状図を比較しても土質区分や N 値から、有意な差を見つけることは困難であった。

液状化した地域は新しい埋立地に集中していることに関しては、地盤の造成年代の影響が考えられる。ただし、古い埋立地盤は、小規模な造成が多かったことから、平面的にも深度方向にも相対的に土層構成が複雑であると考えられる。このような年代効果以外の因子が多く存在するため、年代効果とそれ以外の因子に分離することが現時点では困難である。



図-4.2 造成年代（自然地盤、江戸・明治・大正、昭和以降）の分布と判定結果
（背景の基図は、Google Earth より）

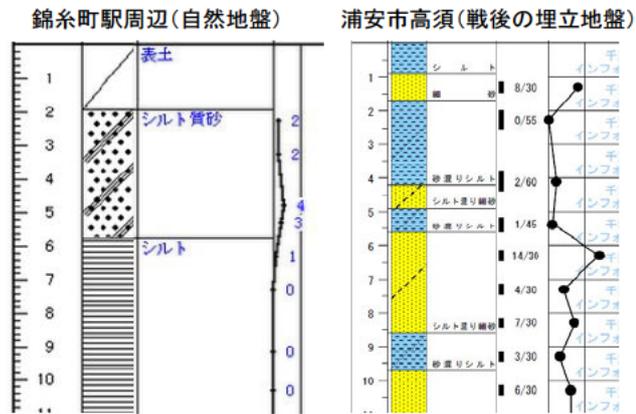


図-4.3 自然地盤と新しい埋立地盤の柱状図の例
（左：Kunijiban⁹⁾、右：千葉県地質環境インフォメーションバンク¹¹⁾）

5. 液状化の有無と P_L 値

液状化による影響を示す指標として広く用いられている P_L 値の検証を行うため、液状化判定実施箇所の P_L 値と実際の液状化の有無との比較を行った。

なお、本研究で用いた P_L 値は、道路橋示方書に示されている次式¹⁵⁾によって算出した。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \dots\dots\dots (3.1)$$

表-5.1 と図-5.1、液状化発生の有無と P_L 値の階級ごとの箇所を整理した。 P_L は液状化による被害予測や液状化ハザードマップなどにも使われており、「液状化ゾーニングマニュアル（平成10年度版）」（国土庁防災局震災対策課）¹⁶⁾によると、5以下で液状化による影響は小さい、15以下で液状化による影響は大きい、15より大きい範囲で液状化による影響は非常に大きいとされている。結果をみると、実際に液状化した箇所で大きな P_L の箇所が多く、逆に液状化しなかった箇所で小さな P_L の箇所が多く、整合した結果が得られた。

表-5.1 液状化の有無と P_L 階級別の箇所数

	$P_L=0$	$P_L \leq 5$	$5 < P_L \leq 15$	$15 < P_L$	計
液状化あり	0	10	25	20	55
近傍で液状化	1	1	2	6	10
液状化なし	33	51	31	16	131
計	34	62	58	42	196

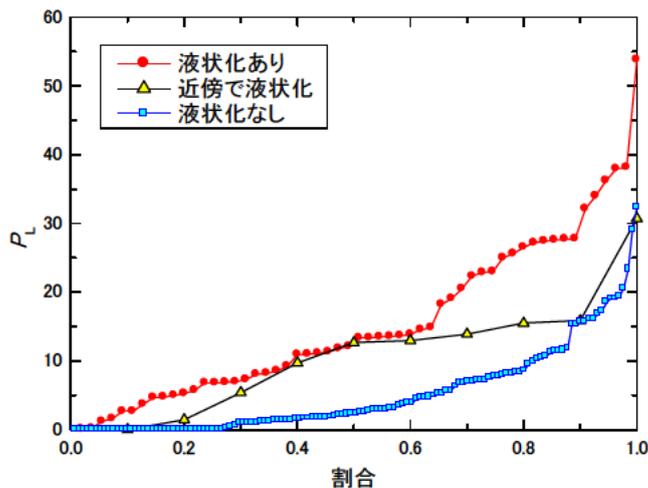


図-5.1 液状化の有無と P_L 分布状況

しかし、実際に液状化した箇所でも P_L が5以下となった箇所や、逆に実際に液状化しなかった

にもかかわらず P_L が 15 より大きくなる箇所も存在した。実際には液状化しなかったにもかかわらず、大きな P_L 値となる箇所の中には、古い埋立地や自然地盤において、標準貫入試験等に造成年代の効果が現れず、大きな P_L 値となった箇所も多いと考えられる。ここでは、実際に液状化した箇所でも P_L が 5 以下となった箇所について浦安市の埋立地の事例を使って考察を加える。

浦安市の埋立地のうち、液状化した箇所の P_L 値の分布を図-5.2 に示す。この中で特に P_L 値の小さな CH305 と CH308 の柱状図を図-5.3 に示す。

この2箇所においては細砂からなる埋土層と堆積層が厚く分布しており、 N 値も 10 以下がほとんどであり大きくはない。粒度分布が不明であることから、表-2.1 に示す値を用いた。これにより細粒分に応じた補正が掛かっていることが、小さな P_L 値となった要因の一つと考えられる。液状化層の平均液状化強度比は、仮に細粒分含有率が 0% であるとする、CH305 においては 0.266 から 0.237 に、CH308 においては 0.265 から 0.196 に変化する。このように、液状化強度に及ぼす細粒分の影響は大きい、より精度良く細粒分の影響を評価できる方法を検討することも重要である。

また、液状化判定の実施に当たっては、計測された孔内水位の 2.0m または 2.8m を用いて P_L 値の算出を行ったが、ボーリング調査の記事に「0.50m~1.1m 暗青色の細砂」という記述も見られることから、平常時はより高い位置に地下水位が存在していた可能性が考えられる。

この2つの条件（地下水位については2箇所とも深度 0.5m）を変えると、 P_L 値は CH305 においては 1.2 から 14.9 へ、CH308 においては 2.6 から 7.6 へと増加する。特に地下水位の影響は大きい。



図-5.2 浦安市の埋立地における P_L の分布

(カッコ内の数値が P_L 値、背景の基図は Google Earth より)

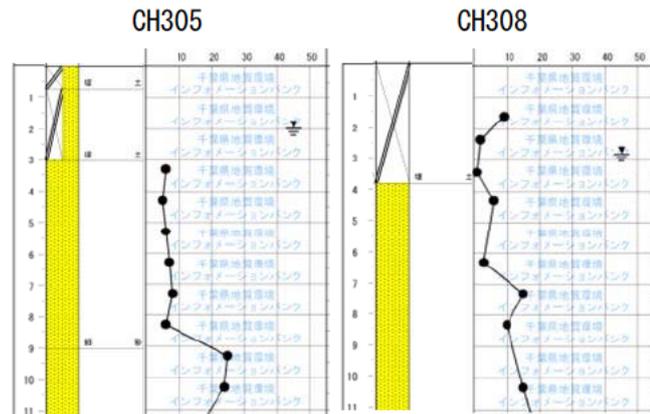


図-5.3 CH305 と CH308 の柱状図 (千葉県地質環境インフォメーションバンク¹¹⁾)

6. 液状化の有無と地盤強度（標準貫入試験結果）

液状化の有無と地盤の強度の影響について検討するために、換算 N 値 N_f と地震時せん断応力比 L との関係図を作成した。関係図の作成にあたっては、松尾の研究¹⁴⁾を参考に、10m 以浅の液状化判定対象層の中から 2 番目に小さい F_L となる深度を抽出した。実挙動と地盤強度（標準貫入試験結果）との相関関係を分析するためには、実際に液状化したと考えられる深度をできるだけ抽出することが必要となることから、 F_L の検討（4 章）と異なる方法を採用したものである。液状化の有無を噴砂・噴水の痕跡の有無に基づき判定しており、液状化したとされる箇所においては、比較的浅い砂層で液状化が発生していると考えられる。また、液状化する層がごく限られる場合には噴砂・噴水に至らないと考えられる。以上のことから、ここで、深度 10m までの中で 2 番目に小さい値をその液状化判定箇所の代表値として採用した。その結果、液状化した箇所 55 箇所中 2 箇所代表深度の F_L の値が 1 を超えた。

検討結果を図-6.1 に示す。太い曲線は、道路橋示方書に示されている液状化強度推定式（細粒分含有率 FC が 0~10% のときの換算 N 値と液状化強度比 R_L の関係）であり、この曲線の上側では液状化すると判定され、これより下側では液状化しないと判定されることになる。液状化強度推定式は、要素試験結果は元より、過去の液状化した箇所、液状化しなかった箇所と同様の整理を行い、液状化した箇所と液状化しなかった箇所の境界にあることを確認しているものである。

今回の地震で実際に液状化した箇所のほとんどは、液状化強度推定式の上側に位置しており、換算 N 値に応じて地震時せん断応力比が大きくなる傾向を示し、現行の液状化判定法で使われている液状化強度推定式と整合していた。

また、液状化した箇所はほぼ地震時せん断応力比 0.2 より大きな範囲に分布している。東京湾岸の埋立地や比較的軟弱な地域についても幅広く液状化判定を実施したものの、地震時せん断応力比 0.2 以下となる点が少なかったことが原因かもしれない。

一方で、推定式より上に液状化しなかった箇所が多数存在する。液状化という現象は発生していたかもしれないが、噴砂・噴水や被害という形で現れなかった可能性はあるものの、合理化の余地が大きいことを示唆するものである。ただし、現在の液状化判定法においても、細粒分により補正を掛けるため、液状化強度推定式との距離がそのまま合理化の余地を表すものではない。

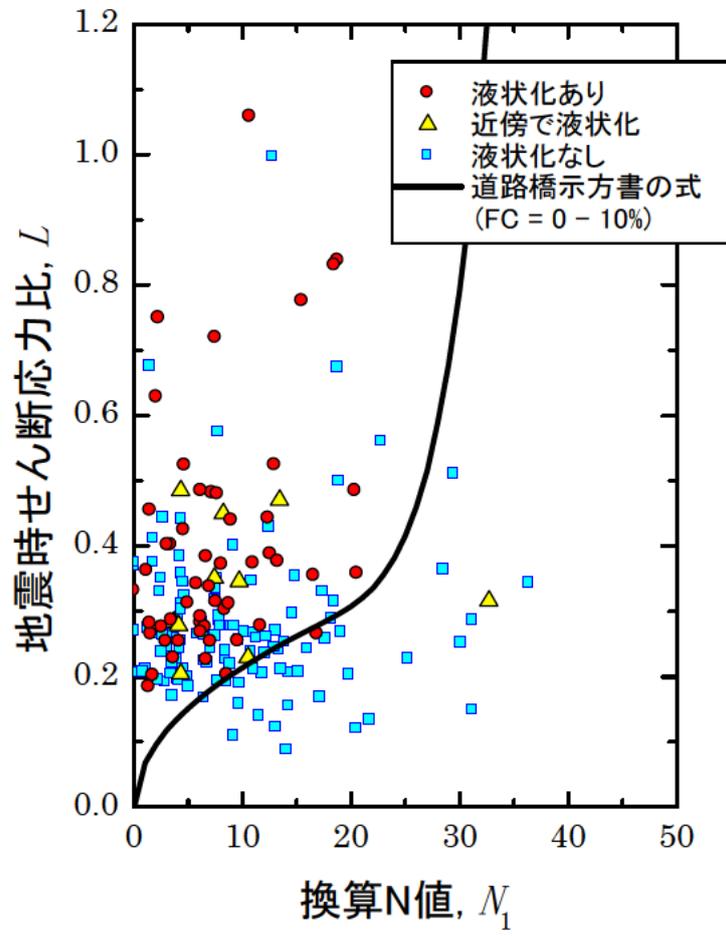


図-6.1 換算N値と地震時せん断応力比Lの関係

7. 液状化の有無と細粒分含有率

細粒分含有率の影響について検討するために、細粒分含有率別に換算 N 値と地震時せん断応力比 L との関係図を作成した。道路橋示方書の概略値を使って設定した結果を含む全データを図-7.1 に、物理試験結果から設定した結果のみ (94 箇所) を図-7.2 に示す。どちらの図も、細粒分含有率の値が 0%以上 (全てのデータ)、20%以上、30%以上、40%以上の 4 つに区分した。

細粒分が多くなると、液状化した箇所の地震時最大せん断応力比が大きくなる傾向が見られ、液状化判定法の液状化強度推定式と整合した結果が得られた。

しかし、液状化強度推定式の左上に、液状化しなかった箇所が多数存在することから、細粒分の性質や量が液状化に及ぼす影響について詳細に分析する必要がある。

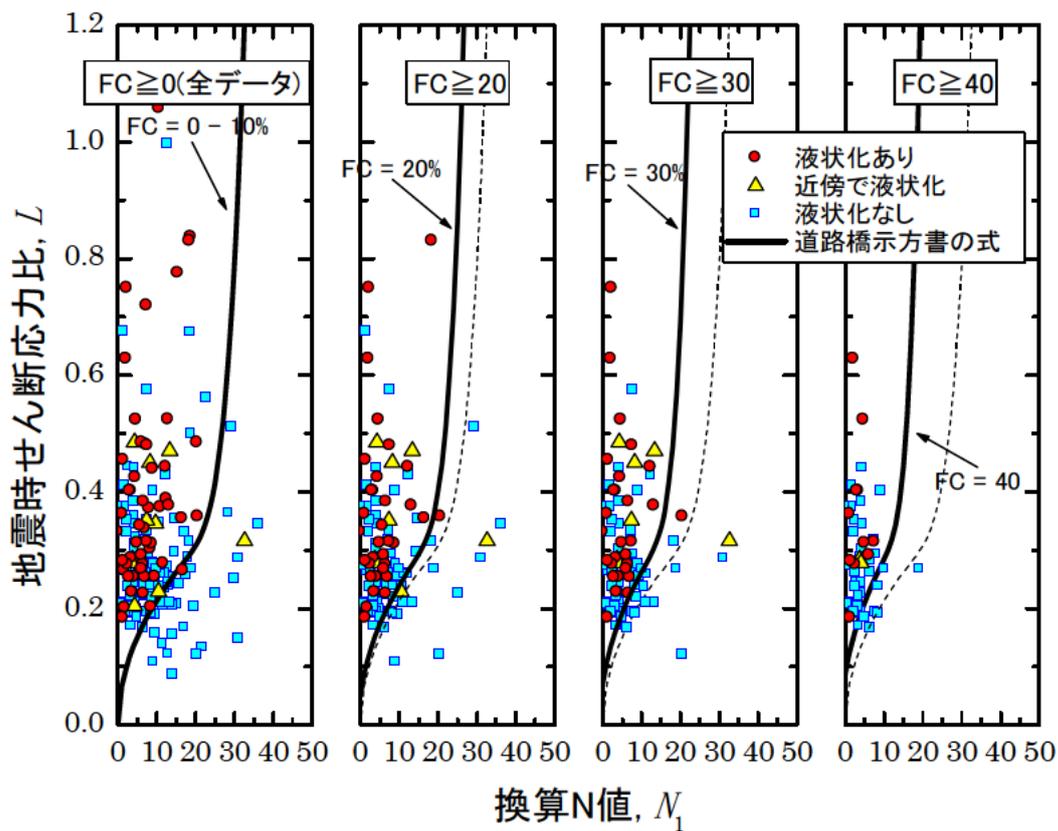


図-7.1 細粒分含有率別の換算 N 値と地震時せん断応力比 L の関係
(全データ)

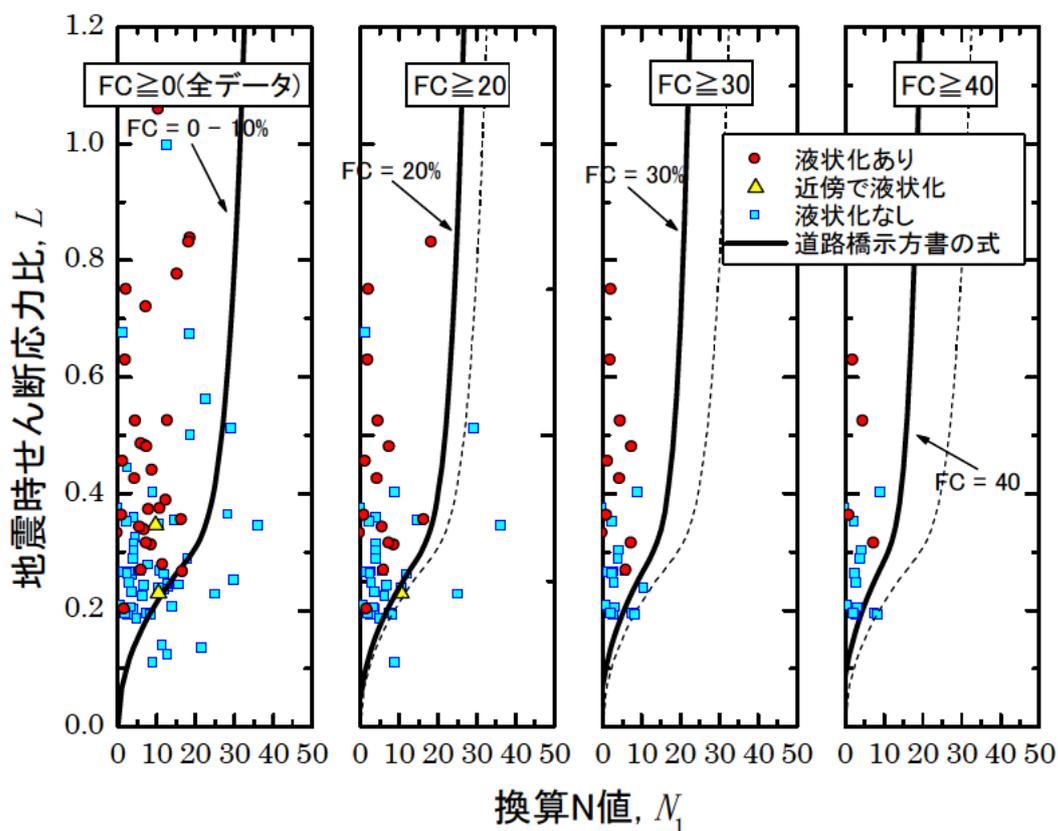


図-7.2 細粒分含有率別の換算 N 値と地震時せん断応力比 L の関係
(物理試験結果からの設定)

また、細粒分の物性の影響について検討するため、液性限界・塑性限界試験結果も整理したが、液性限界・塑性限界試験結果のある箇所は、12箇所（粒度分布が存在するのは、94箇所）と少なかった。液性限界・塑性限界試験は基本的に粘性土で実施するものであるため、液状化する可能性がある土質で実施されることは少なかったものと考えられる。したがって、実施していない箇所の多くは非塑性であると推測されるものの、実態は明らかでない。細粒分の質まで含め、分析するには、既往のデータだけでは限界があり、調査の充実が必要である。

8. 液状化の有無と造成年代

地盤の造成年代と液状化判定結果との関係を分析することを目的に、液状化の有無で区分し、地盤の造成年代別に換算 N 値と地震時せん断応力比 L との関係図を作成した。

なお、換算 N 値と地震時せん断応力比 L との関係図の作成にあたっては、表-4.3 に示す不明の 28 箇所を除いた 168 箇所を「全データ」、「古い埋立地（昭和以外）＋自然地盤」、「自然地盤」の 3 つに区分した。ここで、「全データ」とは、新しい埋立地（昭和）、古い埋立地（昭和以外）、自然地盤の全てを含めたものである。

検討結果は図-8.1 に示すとおりである。「全データ」では換算 N 値が 10～20 の範囲において液状化強度推定式に沿う位置に点が 2 つ存在し、地震時せん断応力比が 0.2～0.3 に液状化した箇所のデータ（図中に赤い丸で囲んだ範囲）が多く存在する。一方、「古い埋立地（昭和以外）＋自然地盤」では、ほとんど無くなる。さらに、自然地盤だけになると、液状化した箇所が少なくなり信頼性に劣るものの、液状化した箇所の下限は、道路橋示方書の推定式を地震時せん断応力比 0.2 程度を上方向にスライドさせた位置となり、新しい埋立地に比べ液状化しにくいことは明らかである。

上記のとおり、古い地盤が、造成年代の新しい地盤より液状化しにくい傾向は確認されたが、現在の液状化判定法では、地盤の造成・堆積年代の違いを考慮することができていないことから、今後、年代の影響を液状化判定法にどのように取り入れるべきかについて、検討する必要がある。

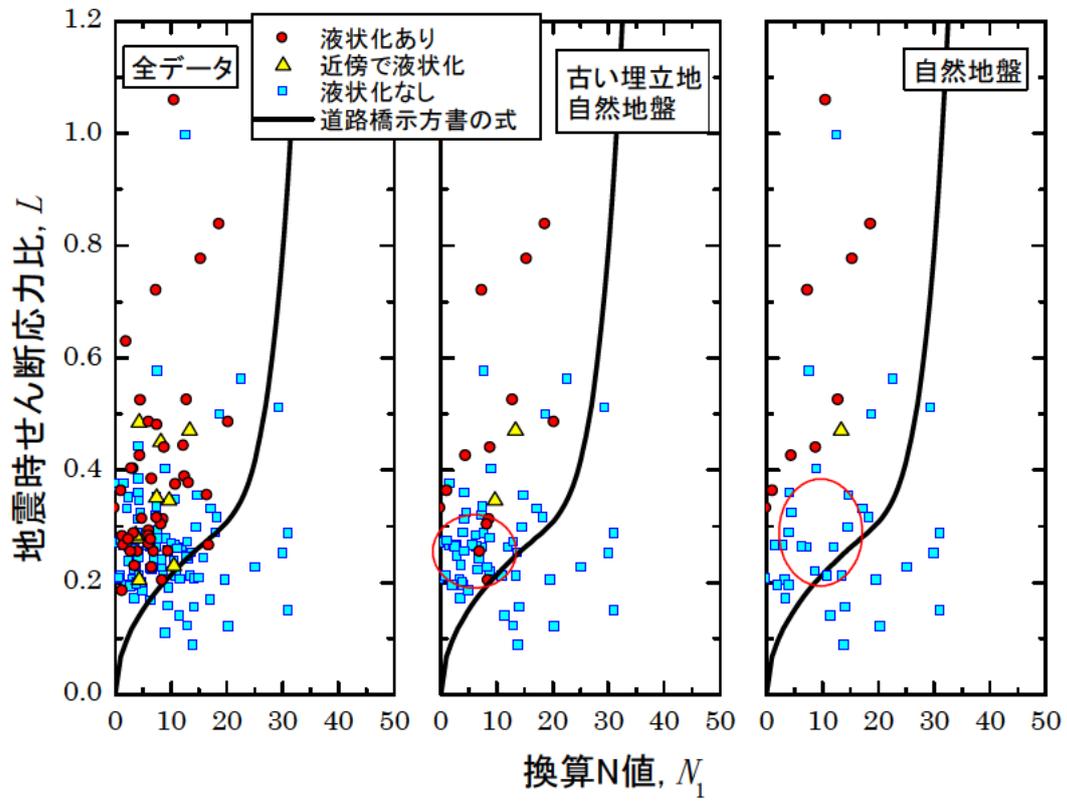


図-8.1 造成年代別の換算N値と地震時せん断応力比 L の関係

9. 液状化の有無と継続時間

地震動の継続時間の影響を検証することを目的に、今回の地震と継続時間の短い千葉県東方沖地震（1987年12月17日）の液状化に対する影響を比較整理した。図-9.1は小見川出張所の地震計による加速度波形を比較したものであり、最大加速度はほぼ同じ200galであるが、継続時間は大幅に異なることが分かる。また、図-9.2に加速度応答スペクトルを示す。0.8秒以上で大きな差がある。

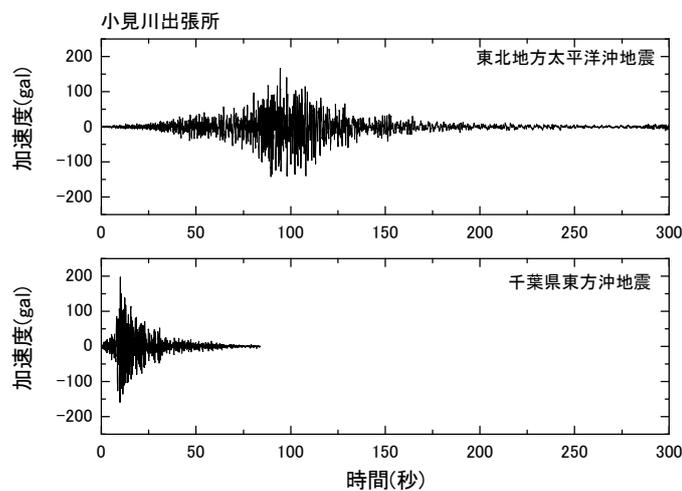


図-9.1 液状化判定を実施した箇所の液状化の有無と造成年代の分布

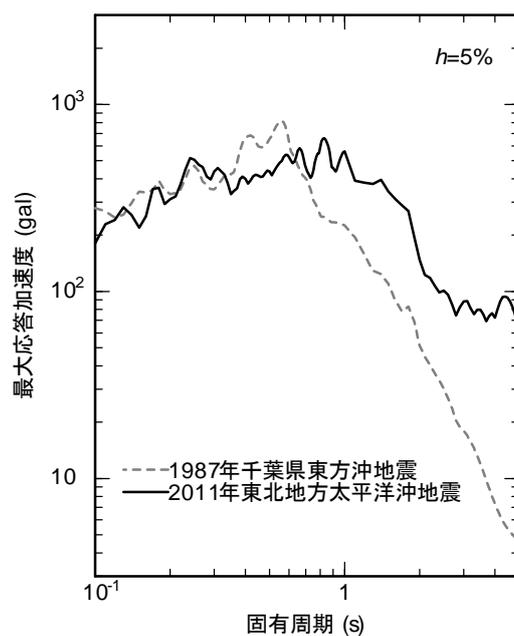


図-9.2 小見川出張所における観測記録の加速度応答スペクトル

液状化判定を実施した箇所の千葉県東方沖地震における液状化の有無は、日本の液状化履歴マップ（若松、2011）¹⁸⁾に基づき判別した。

図-9.3の右側の図が、千葉県東方沖地震における結果である。液状化しなかった箇所が地震時最大せん断応力比の小さな範囲に分布しているのは、千葉県東方沖地震において強い地震動を観測した範囲が限定的なためである。一方、液状化した箇所の分布は、左側の図（東北地方太平洋沖地震）と大きくは変わらず（分布の下限は道路橋示方書の推定式に概ね位置する）、国土技術政策総合研究所で検討した c_w の検討結果^{1), 19)}とも整合する結果となった。

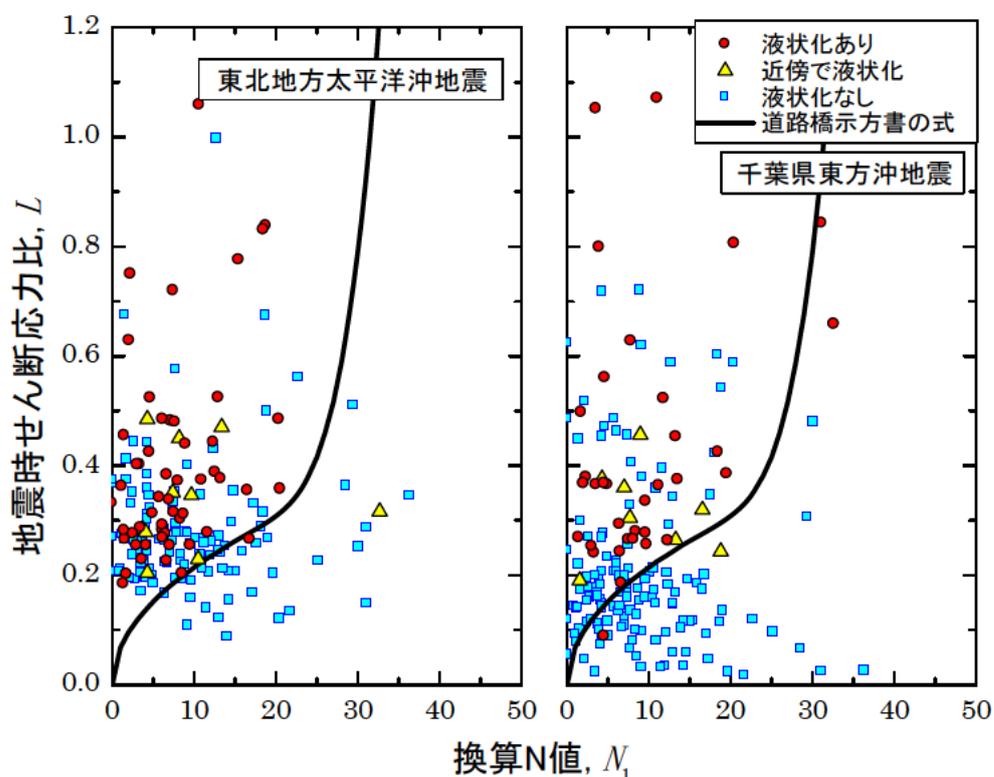


図-9.3 東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震の換算N値と地震時せん断応力比Lの関係

図-9.4～図-9.6に、縦軸を地震時せん断応力比から気象庁震度、地表面最大加速度、SI値に変えた結果を示す。地表面最大加速度の傾向は図-9.3とほぼ同じであったが、震度やSI値に関しては、継続時間が短く、加速度応答スペクトルの小さな千葉県東方沖地震の方が小さな値から液状化すると結果が得られた。

このような結果となったことに関して、1987年と2011年の強震観測網に大きな差があることや、1987年に一度液状化したことにより、2011年時点では液状化しにくくなったことなども考えられるものの、今回の整理では継続時間の影響をうまく表現できていないことも考えられる。1987

年の千葉県東方沖地震においては、1箇所1箇所の液状化の範囲は狭く、部分的な液状化の発生であったが、2011年の東北地方太平洋沖地震で広範囲に面的に液状化が発生しており、液状化の発生の状況には大きな違いがあった。このような差が生じたのは、継続時間や繰返し発生した余震の影響も大きいと考えられるが、今回の整理方法では、点の情報を集めていることから、面的や部分的といった液状化の発生状況の差を捉えられていない。また、集めた点のうち液状化した箇所の下限値を以て液状化のしやすさを判断していることから、より差が出にくくなっていると考えられる。

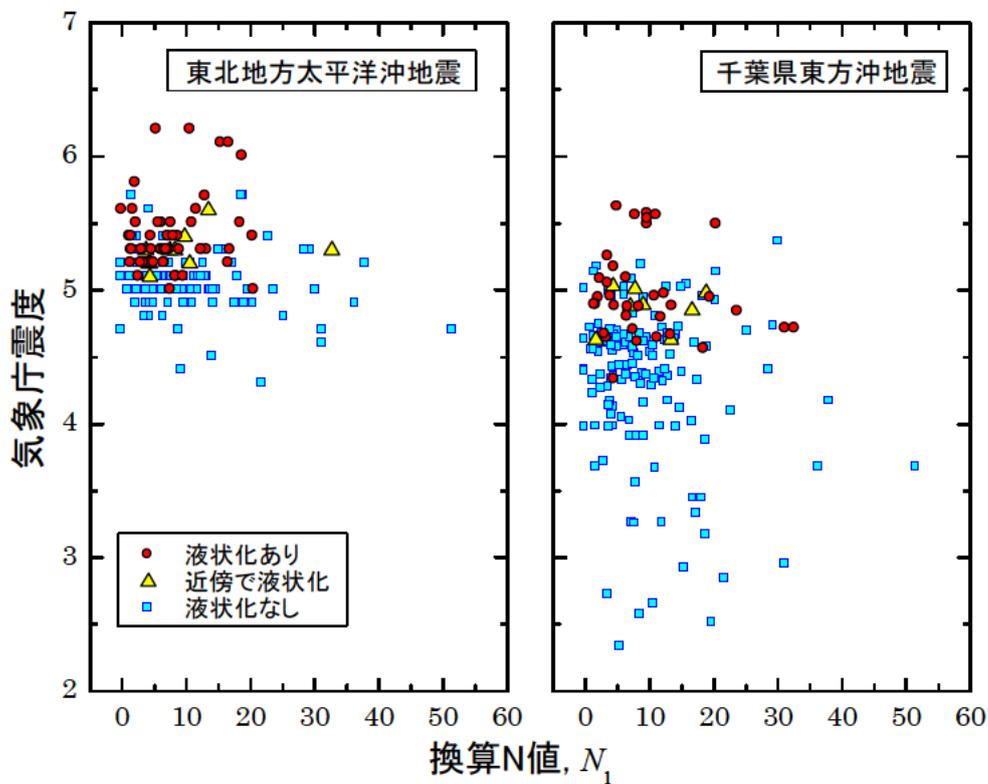


図-9.4 東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震の換算 N 値と気象庁震度の関係

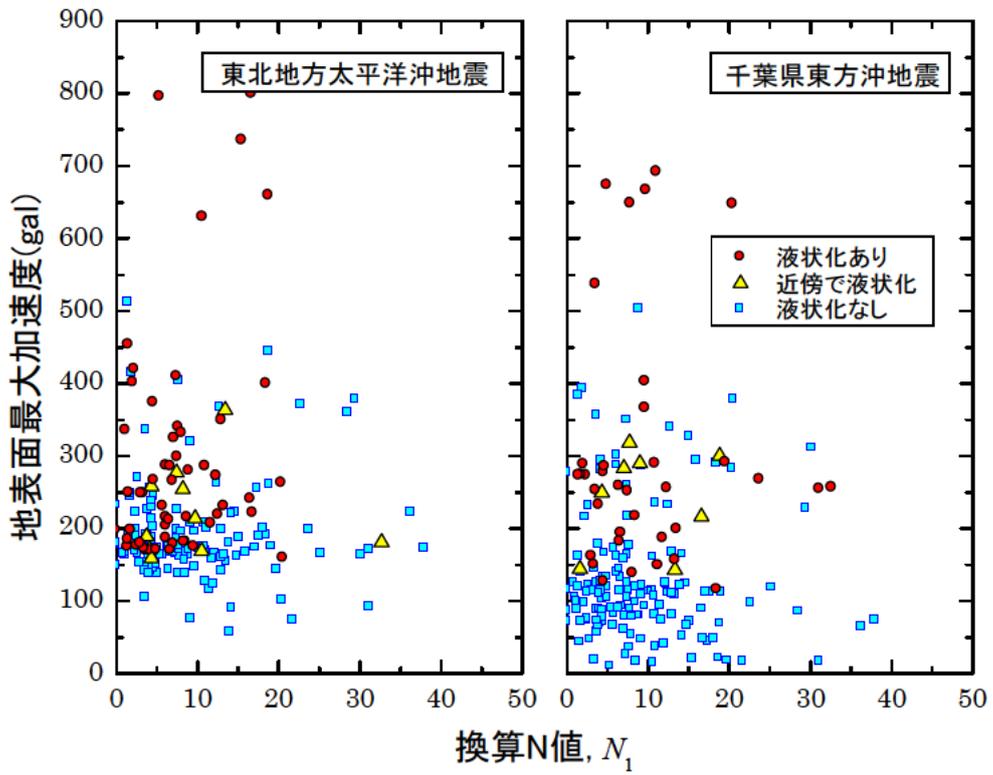


図-9.5 東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震の換算 N 値と地震面最大加速度の関係

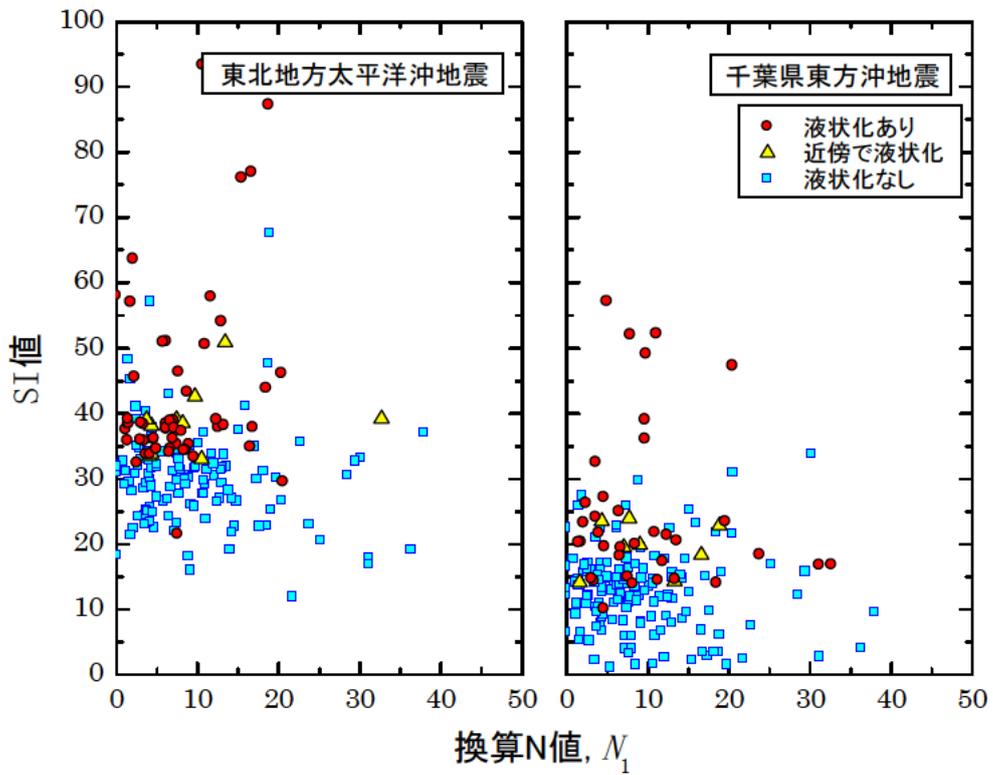


図-9.6 東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震の換算 N 値と SI 値の関係

10. まとめ、今後の課題

本研究では、東北地方太平洋沖地震における長い継続時間を有する地震動に対する現行の液状化判定法の適用性を検証することを目的として、関東地方の196箇所において、既存ボーリングデータを収集し、液状化判定を実施した。これは、土木研究所が検討会議に提供した検討結果を基に、さらなるデータの追加・再整理を行った結果である。

本研究により得られた知見および今後の課題をまとめると、次のとおりである。

- ・液状化判定の結果、実際に液状化したにもかかわらず F_L が1より大きい箇所（見逃し）は近傍で液状化した箇所1箇所のみであった。これより、平成14年の道路橋示方書に規定されていた液状化判定法を直ちに見直すことの必要性は低いことが、改めて確認された。このことは同時に、従来の手法が踏襲された平成24年の道路橋示方書の液状化判定法についても、その妥当性が検証されたことを意味する。
- ・実際に液状化は確認されていないにもかかわらず F_L が1以下となる箇所（空振り）は多数存在し、継続時間の長い今回の地震に関しても地表面加速度を元に水平震度を設定すれば、安全側の判定結果を与えることが分かった。
- ・実際に液状化は確認されていないにもかかわらず F_L が1以下となる箇所（空振り）が多かった原因として、造成年代の影響、細粒分の影響、地下水位の影響などが考えられる。
- ・ただし、既存ボーリングデータでは、各土層の物理特性（粒度、密度、コンシステンシー）が不明なものも少なからず存在し、そのような場合は、ボーリング時の観察に基づく土質分類の名称から推定した概略値を使用せざるを得なかった。より精度の高い検証を行うためには、各土層の物理試験データを充実させる必要がある。
- ・ P_L について整理した結果、液状化の有無と P_L は概ね整合する結果が得られた。
- ・換算 N 値と地震時最大せん断応力比の関係を整理した結果、現行液状化判定法の細粒分に関する補正と概ね整合する結果が得られたが、合理化の余地がある。
- ・液状化の有無と造成年代の関係を整理した結果、造成年代の古い地盤ほど液状化しにくいことが分かった。今後、造成年代の影響を液状化判定法にどのように取り入れるべきかについて検討する必要がある。
- ・地震動の継続時間の影響について検討するために、千葉県東方沖地震と比較した。その結果、継続時間の影響は確認できなかった。千葉県東方沖地震と東北地方太平洋沖地震で液状化の状況に大きな差（千葉県東方沖地震は部分的、東北地方太平洋沖地震は面的広範囲）があるが、今回の整理ではその差をうまく表現できていないと考えられる。
- ・今回整理できなかった項目も含め、合理化に向けた取り組みが必要である。特に既設構造物の液状化に対する評価や、比較的延長が長く対策コストがかかる土工構造物、ライフライン等の

対策においては重要な課題である。

謝 辞

本研究は、関東地方整備局からの受託業務の成果の一部であり、液状化対策技術検討会議の一環として開始したものである。座長である東京大学 東畑郁生教授や委員の東京工業大学 時松孝次教授、東北大学 風間基樹教授、愛媛大学 岡村未対教授、名古屋大学 野田利弘教授から貴重なアドバイスを数多く頂いた。

液状化判定の実施に必要な不可欠なボーリングデータは、Kunijiban や東京の地盤 (Web 版)、千葉県地質環境インフォメーションバンクの公開情報されているデータだけでなく、東京都土木技術支援・人材育成センターからは柱状図や粒度等の情報を、関東地方整備局や千葉県からは地盤調査業務の成果をご提供頂いた。

また、東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震の地震動分布は、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室からご提供頂いたものである。

液状化判定は、震災直後の混乱の中、塚本将康元交流研究員、齋藤由紀子元主任研究員、稲垣由紀子研究員、山木正彦研究員とともに手分けして実施し、本資料のベースとなっている。さらに、とりまとめの作業については、柳田佐知枝氏及び川口剛交流研究員の力もお借りしたものである。

本研究は、このように多くの方の協力・支援によりとりまとめることが出来たものであり、皆様へ心から感謝の気持ちとお礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) 国土交通省液状化対策技術検討会議(2011)：「液状化対策技術検討会議」検討成果
- 2) 日本道路協会(2002)：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.121-125
- 3) 日本道路協会(2012)：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.134-141
- 4) Kataoka, S., Nagaya, K., Matsuoka, K. and Kaneko, M.(2011): Strong Motion and Earthquake Response Records of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Pre-proceedings of the 43rd Joint Meeting United States - Japan Panel on Wind and Seismic Effects*
- 5) 国土技術政策総合研究所地震防災研究室(2012)：地震動分布図,
<http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/>
- 6) 日本道路協会(2002)：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, p.357
- 7) 国土交通省関東地方整備局、地盤工学会(2011)：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書
- 8) 国土技術政策総合研究所、土木研究所(2011)：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報, pp.242-341
- 9) 土木研究所：国土地盤情報検索サイト Kunijiban,
<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>
- 10) 東京都土木技術支援・人材育成センター：東京の地盤 (Web 版) ,
<http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html>
- 11) 千葉県：千葉県地質環境インフォメーションバンク,
<http://www.pref.chiba.lg.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>
- 12) 飯岡町史編纂委員会編(1981)：飯岡町史
- 13) 若松加寿江(2012)：2011 年東北地方太平洋沖地震による液状化被害 - 被害の特徴と液状化発生地の土地条件 - , 工学総合研究所報, No.40, pp.15-30
- 14) 遠藤 毅(2004)：東京都臨海域における埋立地造成の歴史, 地学雑誌, Vol.113, No.6, pp.785-801
- 15) 日本道路協会(2012)：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, p.146
- 16) 国土庁防災局震災対策課(1999)：液状化ゾーニングマニュアル (平成 10 年度版)
- 17) 松尾修(2004)：道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.1-20
- 18) 松加寿江(2011)：日本の液状化履歴マップ、東京大学出版会
- 19) 松岡一成, 片岡正次郎, 金子正洋(2012)：河川堤防の耐震性向上に向けてー東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた基礎地盤の液状化強度評価ー, 土木技術資料, Vol.54, No.1, pp.12-15

卷末資料

A. 一覧表

B. 液状化判定実施箇所情報

C. 東北地方太平洋沖地震に関する液状化判定結果

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4280 January 2014

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754