

## 「液状化対策技術検討会議」検討成果

平成23年8月31日

国土交通省

液状化対策技術検討会議

## 目 次

第1章 検討の目的と経緯	1
(1) 検討の目的	1
(2) 検討の内容	1
(3) 検討体制	2
(4) 検討会議開催経緯	4
第2章 検討結果	5
1. 被害実態等の把握	5
(1) 関東地方における液状化の発生状況とその特徴	5
(2) 液状化現象の程度	9
2. 液状化判定法の検証及び発生メカニズムの確認・解析等	10
(1) 液状化発生状況と $F_L$ 値の検討	10
(2) 液状化発生状況と $P_L$ 値の検討	15
(3) 地盤特性の影響に関する検討	18
① 地盤強度（N値）の影響に関する検討	18
② 細粒分含有率（FC）の影響に関する検討	19
③ 地盤の造成年代の影響に関する検討	21
(4) 地震動の継続時間の影響に関する検討	22
① 千葉県東方沖地震との比較	22
② 地震動特性を考慮する係数（ $C_w$ ）の検証	23
③ 余震の影響に関する検討	25
第3章 まとめ	27
(1) 今回の検討のまとめ	27
(2) 液状化判定法等の高度化に向けて今後検討すべき課題	29
<参考> 今回の検討に用いたデータについて	31

## 第1章 検討の目的と経緯

### (1) 検討の目的

東日本大震災においては、震源から遠く離れた東京近郊を含む広い範囲にわたって液状化現象が発生し、下水道、河川、道路、港湾等の社会基盤施設や住宅、宅地等において大きな被害が生じている。

地盤の液状化現象は、昭和39年の新潟地震等これまでの大地震においても発生し、その都度各施設の対策も強化されてきたが、今回も被害が生じ、対策の再点検が求められている。

被害を受けた各施設における早期の復旧や、既存施設の対策等の実施にあたっては、施設特性あるいは地域特性に応じた対策が必要であるが、その検討にあたっては、液状化現象の発生メカニズムの確認など、各施設に共通する技術的事項の検討を進め、その成果をベースに施設毎の検討が進められることが効率性や整合性確保の観点で必要である。

このため、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「液状化対策技術検討会議」を設置し、液状化対策について各施設に共通する技術的事項を検討したものである。

### (2) 検討の内容

本検討においては、各社会基盤施設等に共通する技術的事項として、各地点で液状化発生の可能性の有無を判定する代表的な液状化判定法であるFL法の検証を中心に検討を進めることとした。

その検証に当たって、関東地方整備局、地盤工学会が中心となって現地踏査等を行い、関東地方における液状化発生箇所への抽出を行った。また、国土地理院が中心となって浦安市の一部液状化発生箇所における地盤沈下量を測量し、液状化現象の程度について分析を行った。なお、今回の地震では東北地方でも液状化現象が発生しているが、津波により痕跡確認が困難である等の状況を踏まえ、直ちに調査可能な範囲として関東地方を対象に調査、検討を行った。

その結果を受けて、(独)土木研究所が中心となってFL法による液状化判定を今回の地震の外力を用いて実施し、上記液状化発生箇所の抽出結果と比較分析した。また、FL法における地震動の継続時間を考慮する係数について、国土技術政策総合研究所が中心となって今回の地震の波形に照らして妥当性が説明できるかどうかについて検証を行った。

このほか、土に含まれる細粒分や造成年代、余震の影響などについても分析した。

### (3) 検討体制

本検討においては、土木学会、地盤工学会、日本建築学会の推薦の5名の学識経験者、各社会基盤施設等を所管する関係各部署及び関係する研究機関の代表をメンバーとした「液状化対策技術検討会議」を設置し、関係者の連携・協力のもと検討を進めた。

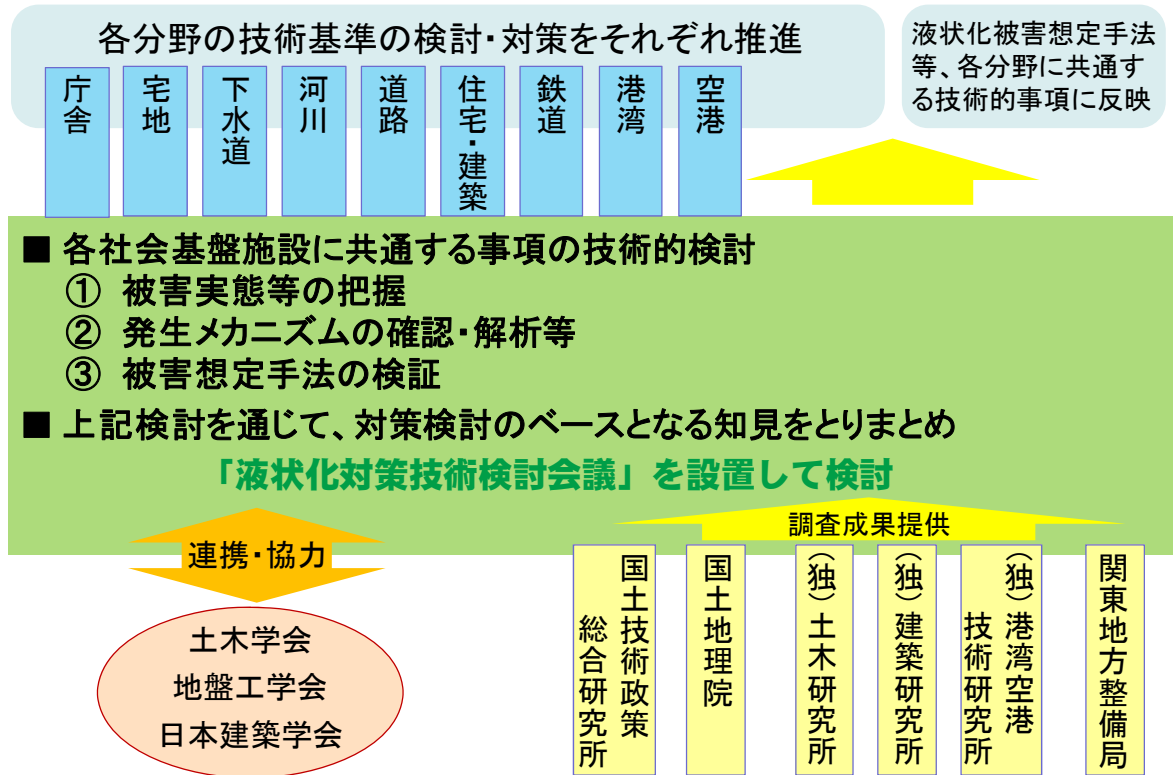


図 1-1 検討体制

表 1-1 検討会議メンバー

<学会関係>

(土木学会)

東京大学 大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授	東畑 郁生
愛媛大学 大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻 教授	岡村 未対

(地盤工学会)

東北大学 大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授	風間 基樹
名古屋大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授	野田 利弘

(日本建築学会)

東京工業大学 大学院 理工学研究科 建築学専攻 教授	時松 孝次
----------------------------	-------

<国土交通省関係>

大臣官房 技術調査課長	横山 晴生
大臣官房 技術調査課 建設技術政策分析官	村西 正実
大臣官房 官庁営繕部 整備課長	川元 茂
総合政策局 技術政策課長	池田 陽彦
都市局 都市安全課長	瀬良 智機
水管理・国土保全局 治水課長	森北 佳昭
水管理・国土保全局 下水道部 下水道事業課長	塩路 勝久
道路局 国道・防災課長	三浦 真紀
住宅局 建築指導課 建築物防災対策室長	杉藤 崇
鉄道局 技術企画課長	北村 不二夫
港湾局 技術企画課 技術監理室長	渡邊 和重
航空局 安全部 空港安全・保安対策課長	干山 善幸
国土地理院地理地殻活動研究センター 地理情報解析研究室長	小荒井 衛
関東地方整備局 企画部長	金尾 健司

<研究機関>

国土交通省 国土技術政策総合研究所	
危機管理技術研究センター 地震災害研究官	運上 茂樹
下水道研究部 下水道研究室長	横田 敏宏
独立行政法人 土木研究所	
構造物メンテナンス研究センター 耐震総括研究監	田村 敬一
地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム 上席研究員	佐々木 哲也
独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ長	飯場 正紀
独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤研究領域長	山崎 浩之

(平成23年8月末時点)

#### (4) 検討会議開催経緯

5月11日に第1回会議を開催して会議を設置し、計3回の会議を開催し、検討をとりまとめた。

5月11日 第1回会議開催：会議の設置、検討の方向性について議論

7月12日 第2回会議開催：データ収集、分析の途中経過を用いて議論

8月19日 第3回会議開催：検討結果について議論

## 第2章 検討結果

### 1. 被害実態等の把握

#### (1) 関東地方における液状化の発生状況とその特徴

##### 1) 調査内容

関東地方全体について、現地踏査等により液状化発生箇所を抽出するとともに、液状化発生箇所が該当する微地形区分の傾向の分析を行った。

なお、今回東北地方でも液状化が発生しているが、津波により痕跡確認が困難である等の状況を踏まえ、直ちに調査可能な範囲として関東地方を対象に調査を行った。

本調査におけるデータの整理方法や留意事項等は以下のとおりである。

##### a) 液状化発生箇所の把握について

本調査は、国土交通省関東地方整備局から地盤工学会に業務委託し、以下のように実施された。

- ・関東地方全体について、報道・web等からの情報をもとに、現地を調査し、砂や水が噴出したことが確認された場所は液状化発生箇所とした。
- ・地盤の変形が大きいと思われる場合でも、地表面に砂や水の噴出した痕跡が確認されない場合、マンホールの埋め戻し土の液状化のような局地的な液状化と思われる場合は、液状化発生箇所から除外。
- ・現地調査は道路等の立ち入りできる範囲から行い、そこから目視できない範囲については、専門家が現地調査の結果に加え、地形・地質情報、航空写真等からその範囲を推定した（その境界位置は厳密なものではない）。

このため、以下のケース等により抽出されなかった地域・地点があり、他の機関の調査結果と異なることに留意が必要である。

- ・地中で液状化が発生しているものの、地表面では砂や水の噴出した痕跡が確認されないケース
- ・現地調査時点では、降雨や清掃により地表面に砂や水の噴出した痕跡が確認されないケース
- ・初期の情報収集時に把握されず、現地調査が行われていないケース
- ・道路等の立ち入りできる範囲から目視できず、液状化の発生が確認されないケース

##### b) 抽出結果の分類

抽出結果を下記のように分類し、これに従って以下「液状化発生箇所」、「非液状化箇所」の用語を取り扱うこととする。

- 「液状化発生箇所」

- 図面上の濃い赤着色： 現地調査により砂や水が噴出したことが確認された場所
- 図面上の薄い赤網掛： 航空写真等により液状化の発生範囲の広がりを補完して推定した場所

○「非液状化箇所」： 液状化発生箇所以外の箇所

### c) 微地形区分の傾向について

上記により把握された液状化発生箇所の結果をもとに、以下のように実施された。

- ・関東1都6県の250mメッシュ(総メッシュ数約49万7千、約3万1千km<sup>2</sup>)について、既往のメッシュ毎の微地形区分設定(若松、松岡による「地形・地盤分類250mメッシュマップ(7.5-second JEGM)」)を活用。(なお、このメッシュマップでは、原則としてメッシュ内で最も広い面積を占める微地形区分をそのメッシュの属性として与えているとされている。)
- ・メッシュ内に液状化発生箇所が含まれるものを液状化発生メッシュとし、微地形区分毎に液状化発生メッシュの割合を算出。

このため、個別のメッシュを見た場合、当該メッシュの微地形区分とは異なる微地形区分の地点に液状化発生箇所が存在し、それをもって液状化発生メッシュとしてカウントされているケースがあるが、液状化発生箇所の地形特性の傾向を大まかに把握する上では有効な手法と考えられる。

## 2) 調査結果

調査結果は図2-1-1及び図2-1-2に示すとおりである。

今回の地震では、関東地方の極めて広い範囲(少なくとも96市区町村)で液状化現象が発生し、特に、東京湾岸部、利根川下流域で集中して発生していた(図2-1-1)。

また、微地形区分ごとに液状化発生メッシュ数の割合をみると、「埋立地」(20.2%)、「旧河道・旧池沼」(10.4%)、「干拓地」(7.5%)で相対的に高い傾向がみられた(図2-1-2)。

なお、調査箇所の地盤の成り立ち等の情報を、図2-1-3に例を示す調査票の形式で地区ごとに整理している。



○液状化発生箇所を含む市区町村（96市区町村）

茨城県：水戸市、日立市、土浦市、古河市、石岡市、結城市、龍ヶ崎市、下妻市、常総市、常陸太田市、北茨城市、取手市、つくば市、ひたちなか市、鹿嶋市、潮来市、守谷市、那珂市、筑西市、坂東市、稲敷市、かすみがうら市、神栖市、行方市、鉾田市、つくばみらい市、茨城町、大洗町、東海村、美浦村、阿見町、河内町、八千代町、五霞町、境町、利根町（36市町村）

栃木県：栃木市、真岡市、大田原市（3市）

群馬県：館林市、板倉町、邑楽町（3市町）

埼玉県：さいたま市、熊谷市、川口市、行田市、加須市、春日部市、羽生市、越谷市、戸田市、鳩ヶ谷市、和光市、久喜市、八潮市、幸手市、吉川市、宮代町（16市町）

千葉県：千葉市、銚子市、市川市、船橋市、木更津市、松戸市、野田市、成田市、東金市、旭市、習志野市、柏市、八千代市、我孫子市、浦安市、袖ヶ浦市、印西市、南房総市、匝瑳市、香取市、山武市、栄町、神崎町、東庄町、九十九里町（25市町）

東京都：中央区、港区、墨田区、江東区、品川区、大田区、北区、板橋区、足立区、葛飾区、江戸川区（11区）

神奈川県：横浜市、川崎市（2市）

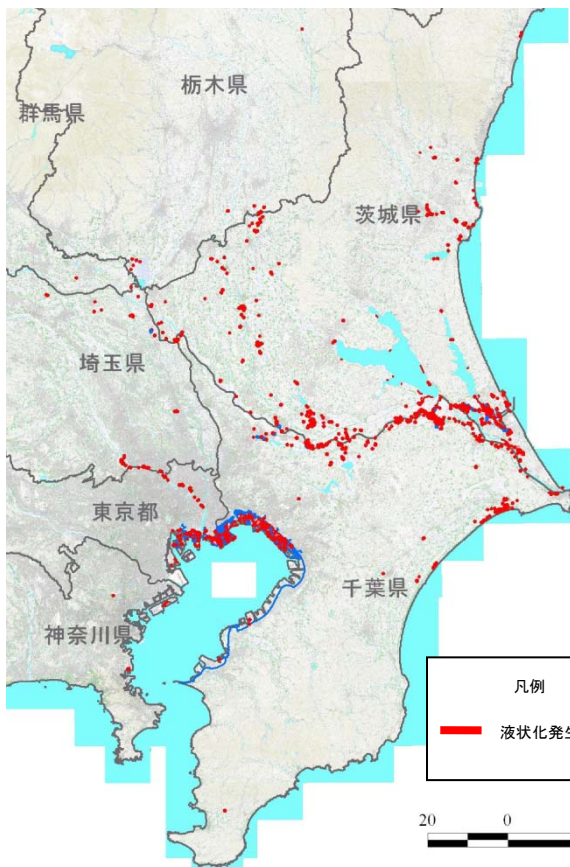


図 2-1-1 関東地方の液状化発生箇所の分布

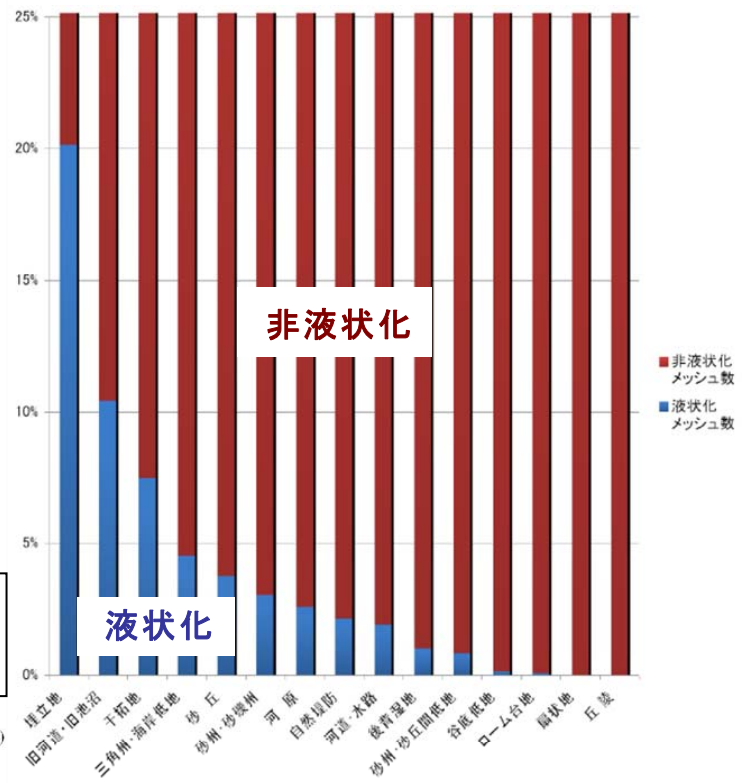
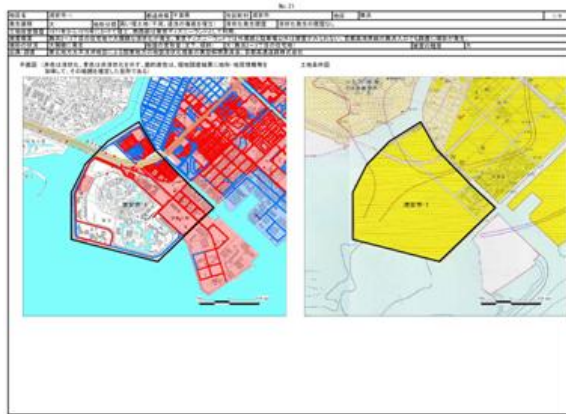


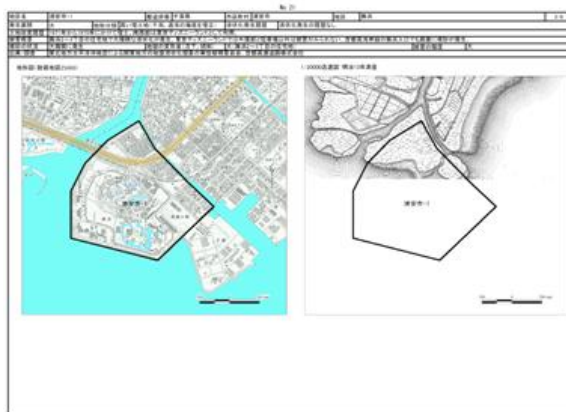
図 2-1-2 微地形区分毎の液状化発生傾向



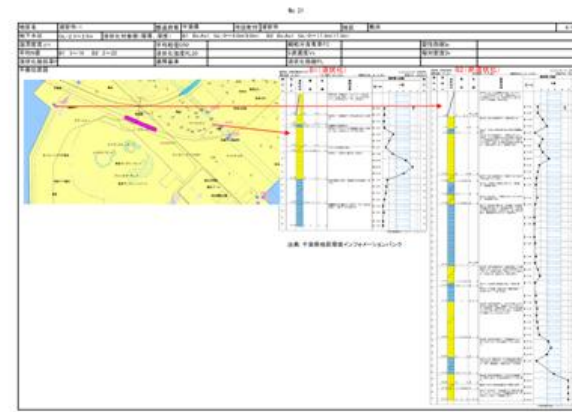
ページ1：液状化発生箇所、土地条件図等



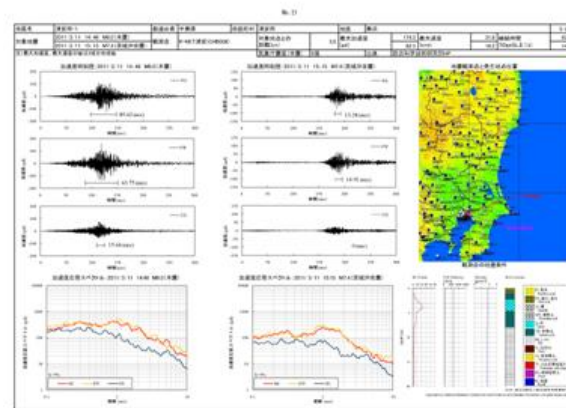
ページ2：液状化発生履歴図、空中写真



ページ3：現在の地形図、迅速図・旧版地形図



ページ4：地盤情報（ボーリング柱状図）



ページ5：近傍の地震動の情報



ページ6：液状化状況写真

図 2-1-3 調査票の形式

## (2) 液状化現象の程度

### 1) 調査内容

浦安市の内陸から埋立地域にかけての直線上で、街区基準点を用いた簡易水準測量を実施し、計測した地震前後の標高の変化と液状化発生箇所との把握結果との比較を行った。

### 2) 調査結果

調査結果は図 2-1-4 に示すとおりである。

沈下量は、非液状化箇所である最も陸側のA地点を起点（ゼロ）として、平成 18 年からの変化量を算出したものである。

液状化発生箇所にあっても、数cmの沈下量のところもあれば、数十cmの沈下量のところもあり、沈下の程度にバラツキがみられた。

また、海側の最近の埋立地で大きく沈下し、古い埋立地ほど沈下が小さい傾向がみられた。

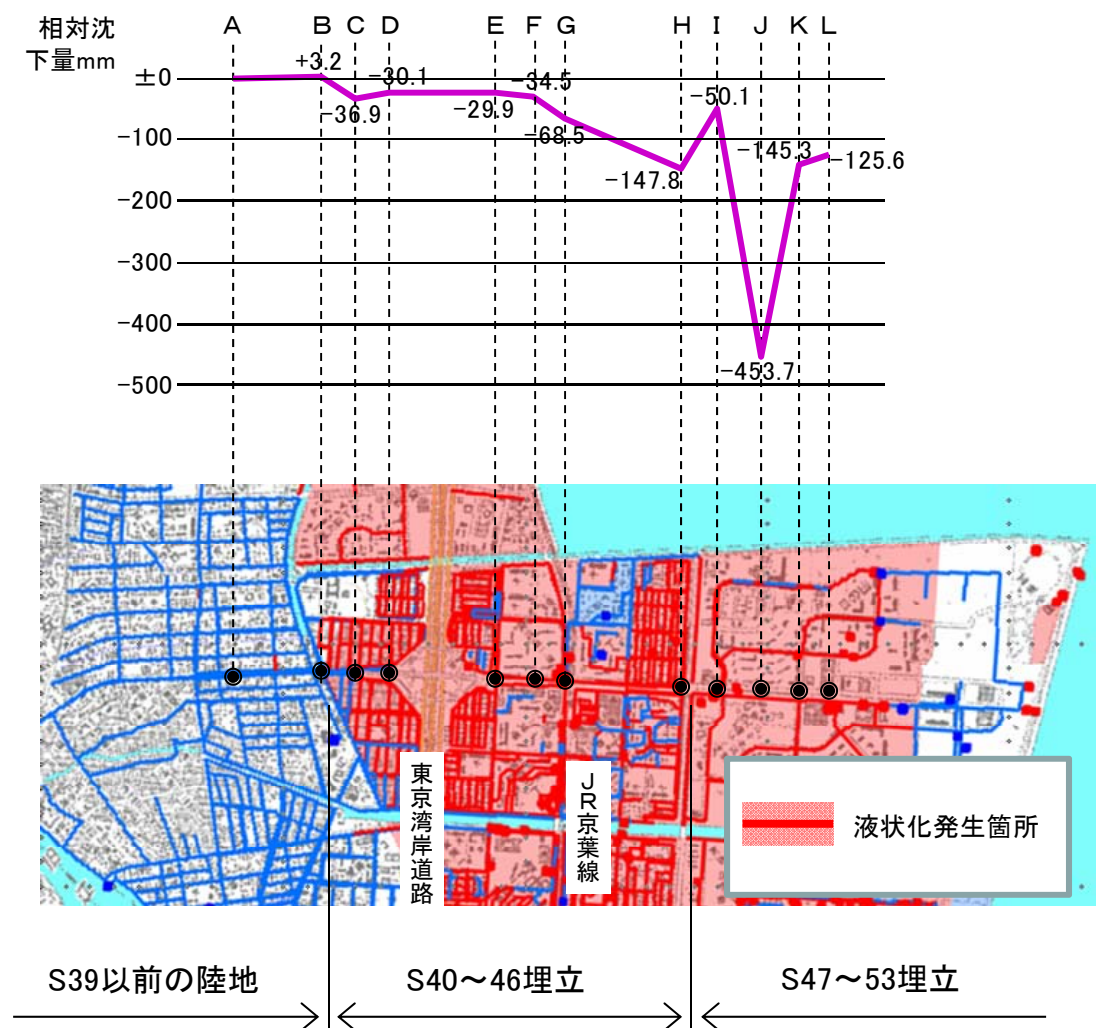


図 2-1-4 浦安市における沈下量の測量結果

## 2. 液状化判定法の検証及び発生メカニズムの確認・解析等

### (1) 液状化発生状況と $F_L$ 値の検討

#### 1) 検討内容

現行の液状化判定法の検証を行うために、関東地方の 112 箇所（液状化発生箇所とその周辺の非液状化箇所）で判定に必要なデータが得られる箇所を選定）を対象に今回の地震の外力を用いて液状化判定を実施し、実際の液状化発生状況との比較を行った。

なお、本検討で用いた液状化判定法については、参考 2-2-1 (p14) に示している。

また、液状化判定実施箇所の概要は以下のとおりである。

#### a) 代表的な液状化発生箇所

- ・直轄河川（利根川、小貝川、霞ヶ浦、那珂川、久慈川）の大規模被災箇所や、東京湾岸や利根川周辺など液状化発生箇所、近傍に c) のボーリングデータが存在する箇所。

#### b) 代表的な非液状化箇所

- ・東京湾岸で、c) のボーリングデータが存在する箇所。微地形や造成時期等に着目し、類似の箇所は集約。
- ・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、幅広い地震動や地盤の強度の箇所が含まれるよう c) のボーリングデータが存在する箇所を選定。具体には、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幅広く選定することや、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幅広く選定することにより対応。

#### c) ボーリングデータ

- ・液状化判定を実施する上では、ボーリングデータが不可欠であるため、以下のような対象・条件で探索した。

##### 【対象】

- ① 関東地方整備局が直轄河川と直轄道路において実施したもの
- 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) 及び同センターより別途提供頂いたデータ
- ③ 千葉県環境研究センターが管理する千葉県インフォメーションバンクのデータ
- ④ 茨城県土木部が管理する茨城県地盤情報のデータ

##### 【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標準貫入試験が十分な数実施されているもの
- ④十分な長さの掘削長があるもの
- ⑤表層の埋土層が複雑でないもの（ゴミなどが出ない箇所）
- ⑥できるだけ物理試験結果のあるもの（粒度分布が不明な箇所・土層は参考値を採用した）

## 2) 検討結果

液状化発生の有無と液状化判定結果は図 2-2-1 に示すとおりである。

液状化発生箇所では  $F_L$  値を求めると、「液状化しない ( $F_L > 1$ )」と判定される「見逃し」(●) はなかった。

非液状化箇所であるが「液状化する ( $F_L \leq 1$ )」と判定された箇所 (▲) の多くは、液状化発生箇所の周辺に分布している。

非液状化箇所では「液状化しない ( $F_L > 1$ )」と判定された箇所 (△) は、神奈川県内や千葉県南部など地震動の小さな地域や群馬県などの比較的地盤の良い地域に分布している。

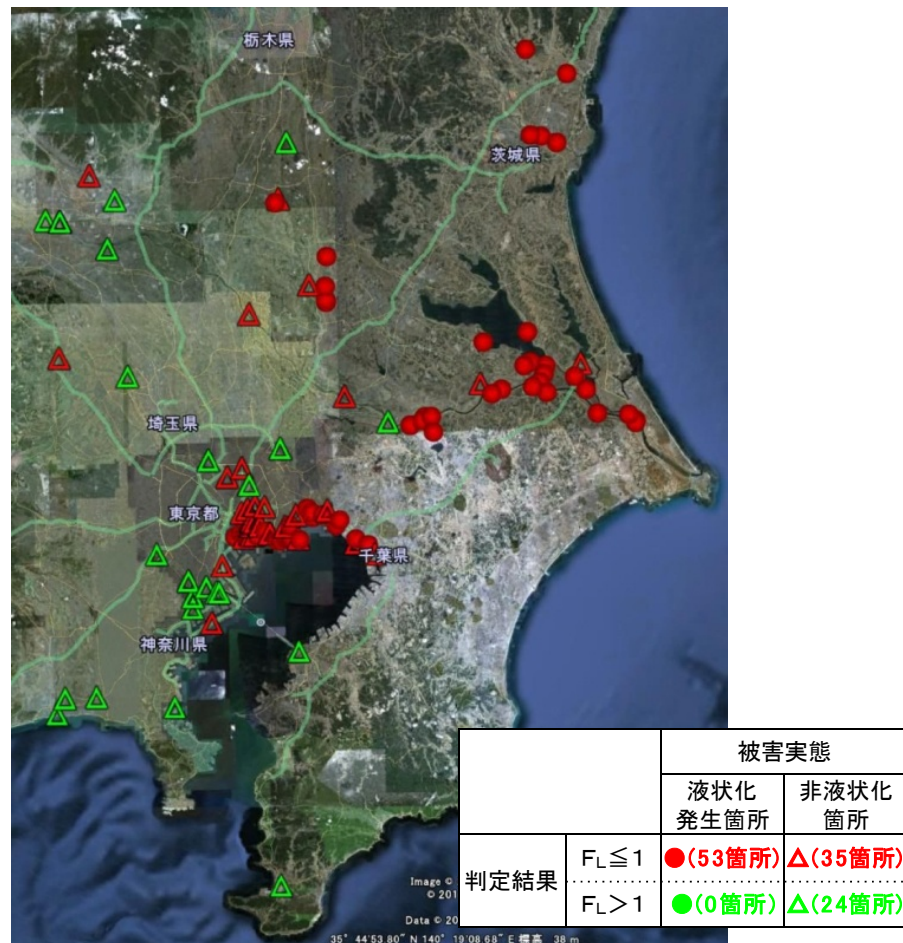


図 2-2-1 液状化発生の有無と液状化判定結果

非液状化箇所であるが「液状化する」と判定された箇所（△）の特徴は、以下のとおりである。

a) 東京湾岸の場合（図 2-2-2）

- ・液状化発生箇所の周辺の古い埋立地盤や自然地盤において、非液状化箇所であるが  $F_L \leq 1$  となった箇所が多い（17箇所）。
- ・液状化発生箇所は、戦後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発生箇所はほとんど見つかっていない。
- ・非液状化箇所と液状化発生箇所のボーリング結果（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。（埋立地盤の中でも、特に江戸や明治の地盤は、平面・深度方向にも相対的に複雑であるため、非液状化箇所と液状化発生箇所の比較が困難である。）
- ・古い埋立て地や自然地盤は液状化しにくい傾向が見られることから、非液状化箇所であるが「液状化する（ $F_L \leq 1$ ）」と判定された要因の1つとして、地盤の造成年代の影響が考えられる。（2.（3）③において、簡易な分析を実施した。）

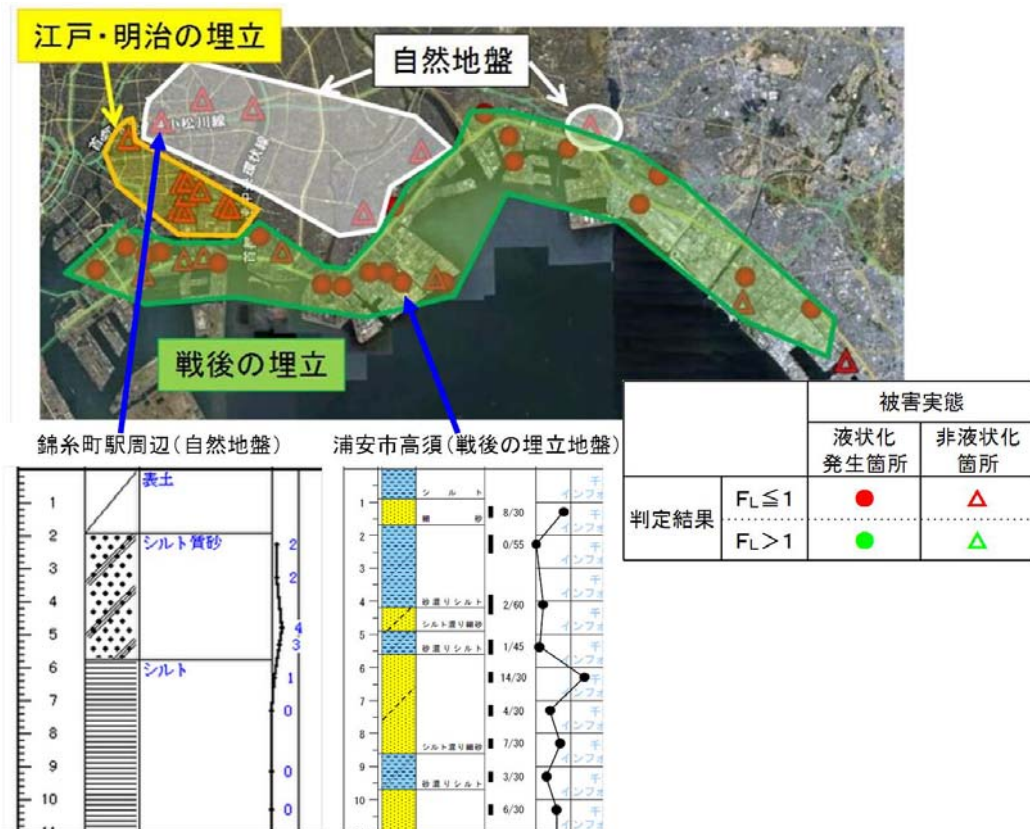


図 2-2-2 東京湾岸における液状化発生の有無と液状化判定結果

b) 利根川下流周辺地域の場合（図 2-2-3、図 2-2-4）

- ・図 2-2-3 の点線で囲んだ利根川下流周辺（霞ヶ浦、小貝川、鬼怒川含む）のうち、 $F_L \leq 1$  となった箇所について、箇所ごとの 10m 以浅の  $F_L$  を昇順に並び替えたものが図 2-2-4 である。

- ・液状化判定上は、同じ液状化するとの結果であるが、非液状化箇所は、液状化発生箇所と比べ相対的に
  - $F_L$  の値が大きい
  - $F_L \leq 1$  となる層厚が薄い
 という傾向が認められる。
- ・このようなことから、非液状化箇所であるが「液状化する ( $F_L \leq 1$ )」と判定された要因の1つとして、周辺地域と比較すると相対的に液状化しにくい地盤（「 $F_L$  の値が比較的大きい」、「 $F_L \leq 1$  となる層厚が薄い」）であったことが考えられる。

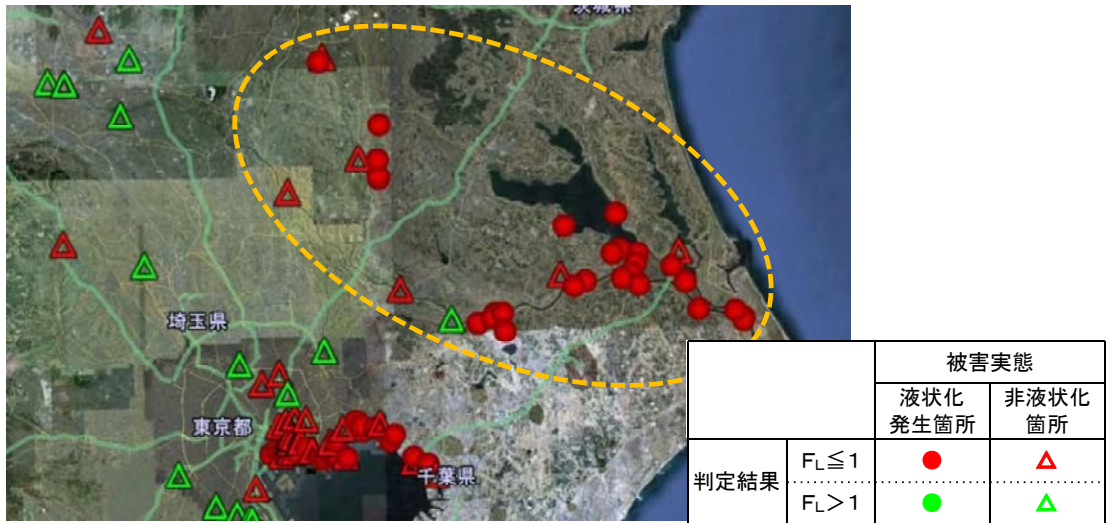


図 2-2-3 利根川下流周辺地域における液状化発生の有無と液状化判定結果

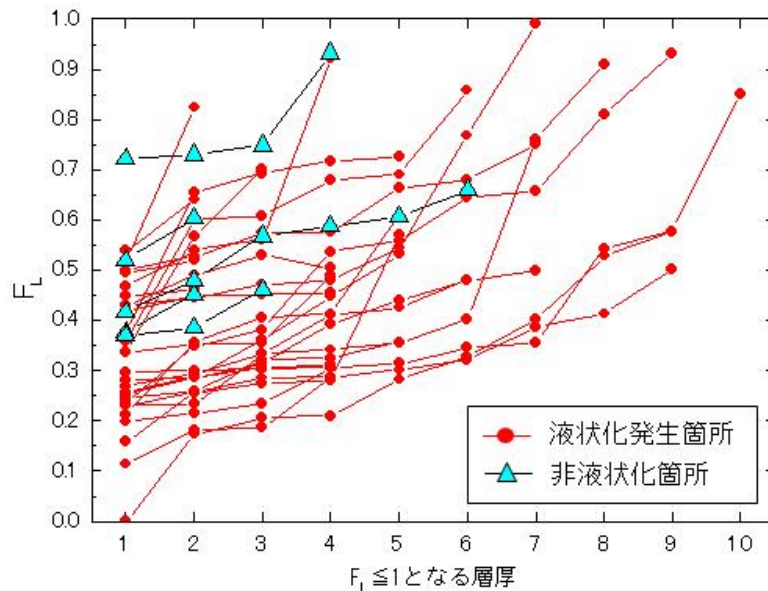


図 2-2-4 利根川下流周辺地域における箇所ごとの  $F_L$  値（昇順）

以上、a)、b) の結果をまとめると、非液状化箇所であるが「液状化する ( $F_L \leq 1$ )」と判定された箇所 (△) の要因として、地盤の造成年代の影響（古い埋立て地や自然地盤は液状化しにくい）や周辺地域と比較すると相対的に液状化しにくい地盤（「 $F_L$  の値が比較的大きい」、「 $F_L \leq 1$  となる層厚が薄い」）であったことが考えられる。

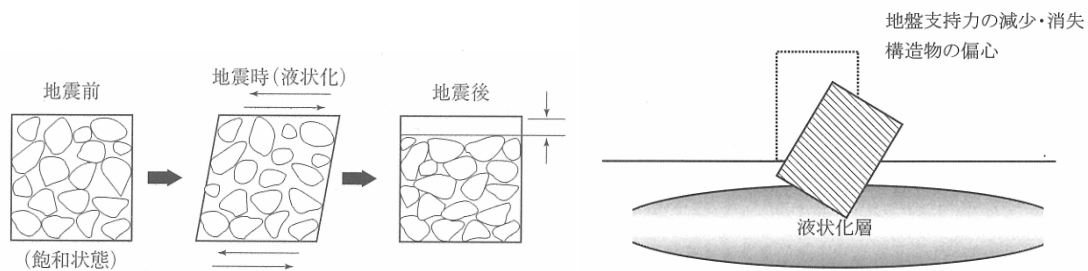
【参考 2-2-1】液状化判定法について

液状化とは

地下水位が高く緩い砂地盤では、地震が発生すると、図に示すように砂粒子間の結合が離れ、液状のようになる。この現象のことを「液状化」という。

液状化による被害

「液状化」が発生すると、**噴砂・噴水**が生じるばかりでなく、建物や電柱の**沈下・傾斜**や、マンホールなどの地中構造物の**浮き上がり**など、様々な被害が生じる。



液状化判定とは

このような「液状化」が発生するかどうか判定することを「液状化判定」という。液状化の発生予測や液状化対策を実施する上で最も基本となる技術。

一般に、液状化に対する抵抗率 $F_L$ を下式により求め、この値が1.0以下のとき、すなわち、地震によって作用する力の大きさが土の液状化に対する強さを上回るとき、液状化するとみなす。

$$F_L = R / L$$

$F_L$  : 液状化に対する抵抗率

$R$  : 土の液状化に対する強さを表す

$L$  : 地震によって作用する力を大きさを表す

今回の検討では、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成14年3月）に示された方法に従って液状化判定を実施した。この液状化判定法では以下のとおり、 $R$ と $L$ を計算することとなり、土層構成、地下水位、標準貫入試験結果、細粒分含有率が分かれば、深度ごとの $F_L$ を求めることができる。

$$R = c_w R_L$$

$$L = r_d k_{hg} \sigma_v / \sigma_v'$$

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

$$N_a = c_1 N_1 + c_2$$

$c_w$  : 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

$k_{hg}$  : 地盤面における設計水平震度

$\sigma_v$  : 全上載圧

$\sigma_v'$  : 有効上載圧

$N_a$  : 粒度の影響を考慮した補正N値

$N_1$  : 有効上載圧100kN/m<sup>2</sup>相当に換算したN値

$c_1, c_2$  : 細粒分含有率によるN値の補正係数



## (2) 液状化発生状況と $P_L$ 値の検討

### 1) 検討内容

液状化に関する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、2. (1) において液状化判定を実施した箇所の  $P_L$  値と実際の液状化発生状況との比較を行った。

なお、本検討で用いた  $P_L$  値の算出方法については、参考 2-2-2 (p17) に示している。

### 2) 検討結果

液状化発生の有無と  $P_L$  値の計算結果は図 2-2-5 に示すとおりである。

液状化発生箇所において  $P_L$  値の大きな箇所が多く、逆に、非液状化箇所においては  $P_L$  値の小さな箇所が多かったことから、液状化発生の有無と  $P_L$  の値は概ね整合していた。

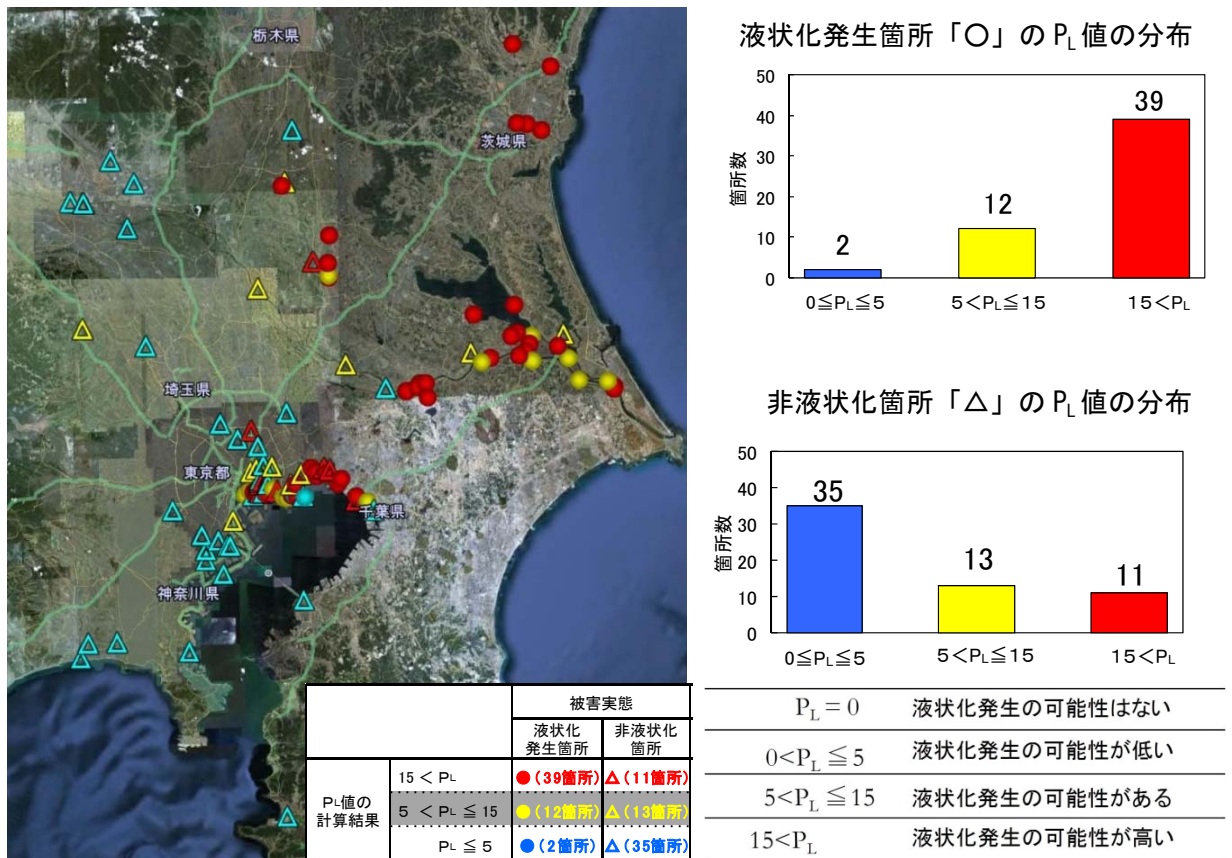


図 2-2-5 液状化発生の有無と  $P_L$  値の計算結果

非液状化箇所において、大きな  $P_L$  値となる箇所 (△) もあった。これは、 $F_L$  値と同様に古い地盤では液状化しにくく、地盤の造成年代の影響が考えられる。

液状化発生箇所であるが、小さな  $P_L$  値 ( $P_L \leq 5$ ) を示した箇所 (図 2-2-6 の A 地点および B 地点 (●)) については、以下の事項が影響していたものと考えられる。

- ・ 細砂層の細粒分含有率 FC として、道路橋示方書の参考値 (細砂 30%) を適用して  $P_L$  値の算出を行ったが、実際の地盤における細粒分は非塑性のものであった可能性が考えられる。
- ・ 孔内水位の 2m 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、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。

上記 2 つの条件を変化させると、 $P_L$  値は図 2-2-6 の A 地点においては 4.6 から 11.1 へ、図 2-2-6 の B 地点においては 4.6 から 21.0 へ大幅に変化する。特に地下水位の影響は大きい。

このため、 $P_L$  値を算出する際には、地下水位の設定や細粒分含有率の設定を適切に実施しなければならないものと考えられる。



A 地点における柱状図

B 地点における柱状図

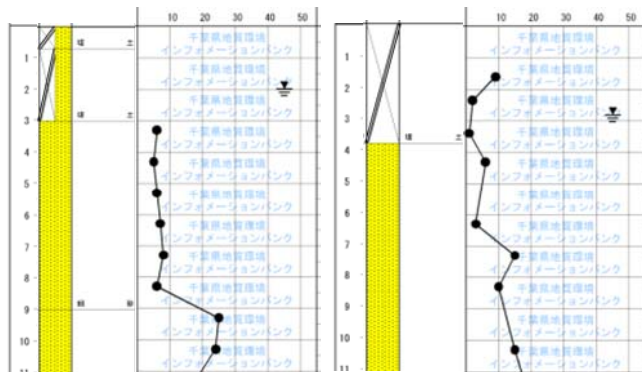
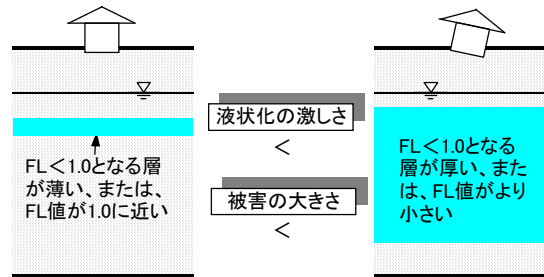


図 2-2-6 液状化発生箇所であるが小さな  $P_L$  値を示す箇所の概要

【参考 2-2-2】  $P_L$  値の算出方法について

$P_L$  値とは

- $F_L$  値は地盤のある深さにおける液状化に対する抵抗率を示すものであるため、地盤全体がどの程度液状化するか、またどの程度の被害が生じるかの判断が難しい。
- $P_L$  値は、 $F_L$  値の変化からその地点における地盤の液状化の激しさの程度を表す指標。液状化の発生する深さや層厚、非液状化層の厚さを勘案されており、液状化危険度マップの作成にあたって使われることが多い。

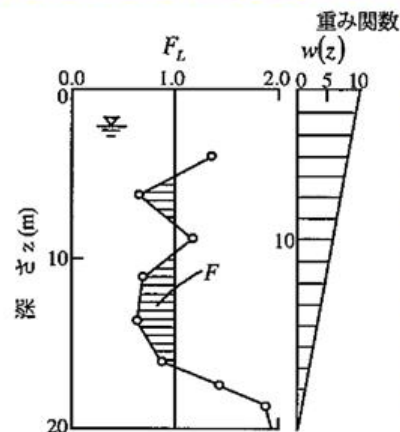


$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz$$

ただし、 $w(z)$ ：深さ  $z$  に対する重み関数

$F$ ： $F_L < 1.0$  の時  $1 - F_L$   
 $F_L \geq 1.0$  の時  $0$

$P_L$  値の求め方



$P_L$  値と液状化による影響の関係

$P_L = 0$	液状化発生の可能性はない
$0 < P_L \leq 5$	液状化発生の可能性が低い
$5 < P_L \leq 15$	液状化発生の可能性がある
$15 < P_L$	液状化発生の可能性が高い

※ 中央防災会議による直近の大規模地震の被害想定手法  
 (中央防災会議事務局「中部圏・近畿圏の内陸地震に係る被害想定手法(こつてい)～基本被害～」平成19年11月)より

### (3) 地盤特性の影響に関する検討

#### ① 地盤強度（N値）の影響に関する検討

##### 1) 検討内容

液状化の発生の有無と地盤の強度の影響について検討するために、液状化発生箇所と非液状化箇所に区分して、換算N値 $N_1$ 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 $N_1$ 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、10m以浅の液状化判定対象深度の中から2番目に小さい換算N値となる深度を抽出<sup>(注)</sup>して関係図の作成を行った。

ただし、物理試験結果が同一層に存在し、換算N値が大きく変わらない場合には、物理試験結果の存在する深度を抽出して関係図の作成を行った。

また、10m以浅に液状化判定対象層が1深度の地点については、関係図中にプロットされていない。

(注) 同様の整理を行う際に、従来より用いられてきた方法である。

##### 2) 検討結果

検討結果は図2-2-7に示すとおりである。

現行の液状化判定で使われている液状化強度推定式を図中に黒色の曲線で示している。この曲線よりも上側の範囲は「液状化する」と判定されることとなり、逆に、この曲線よりも下側の範囲は「液状化しない」と判定されることになる。

液状化発生箇所(●)と非液状化箇所(○)の境界は、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、その傾向は概ね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る。

今回の液状化発生箇所は、比較的弱い地盤の箇所が多く、換算N値が20を越すような箇所は比較的少なかった。

また、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、換算N値が10以下かつ地震時せん断応力比が0.2以下となる点は限られており、液状化発生箇所も確認されていない。

したがって、今後とも、ボーリングデータの収集を継続し、液状化判定実施箇所を増やす必要がある。

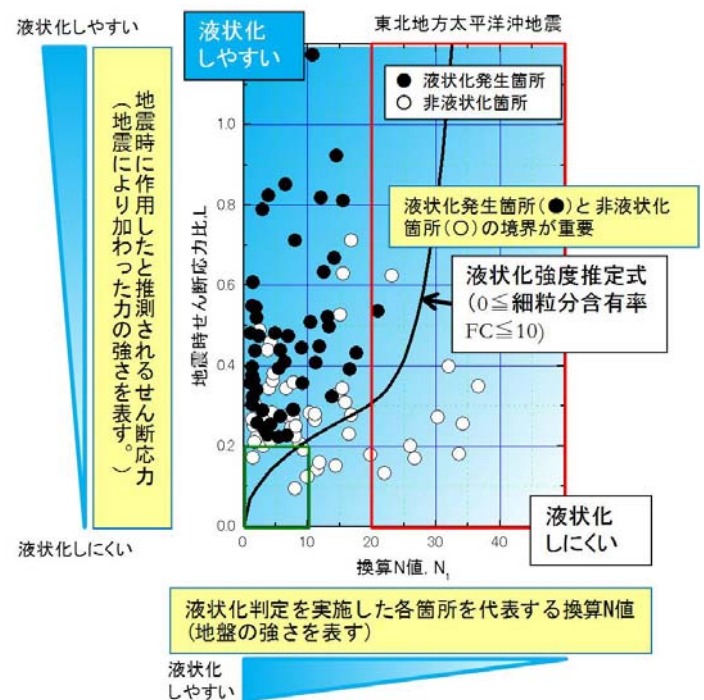


図2-2-7 換算N値 $N_1$ と地震時せん断応力比 $L$ の関係図

## ② 細粒分含有率（FC）の影響に関する検討

### 1) 検討内容

細粒分含有率の影響について検討するために、液状化発生箇所と非液状化箇所に区分して、細粒分含有率別に換算N値 $N_1$ 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 $N_1$ 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、図2-2-7で整理したデータのうち、物理試験結果があるもののみを抽出し、細粒分含有率FCの値に応じて、 $0\% \leq FC < 20\%$ 、 $20\% \leq FC < 60\%$ 、 $60\% \leq FC$ の3つの区分で関係図の作成を行った。

### 2) 検討結果

検討結果は図2-2-8に示すとおりである。

細粒分含有率により区分した分析においても、細粒分が多くなると、液状化強度が大きくなる傾向が見られ、現行FL法における液状化強度推定式と整合した結果がみられた。

ただし、液状化強度推定式の左上に、非液状化箇所（○）が存在することから、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。

なお、細粒分含有率の明らかな点が少ないため、ボーリングデータの継続的収集とボーリング調査の実施が不可欠である。

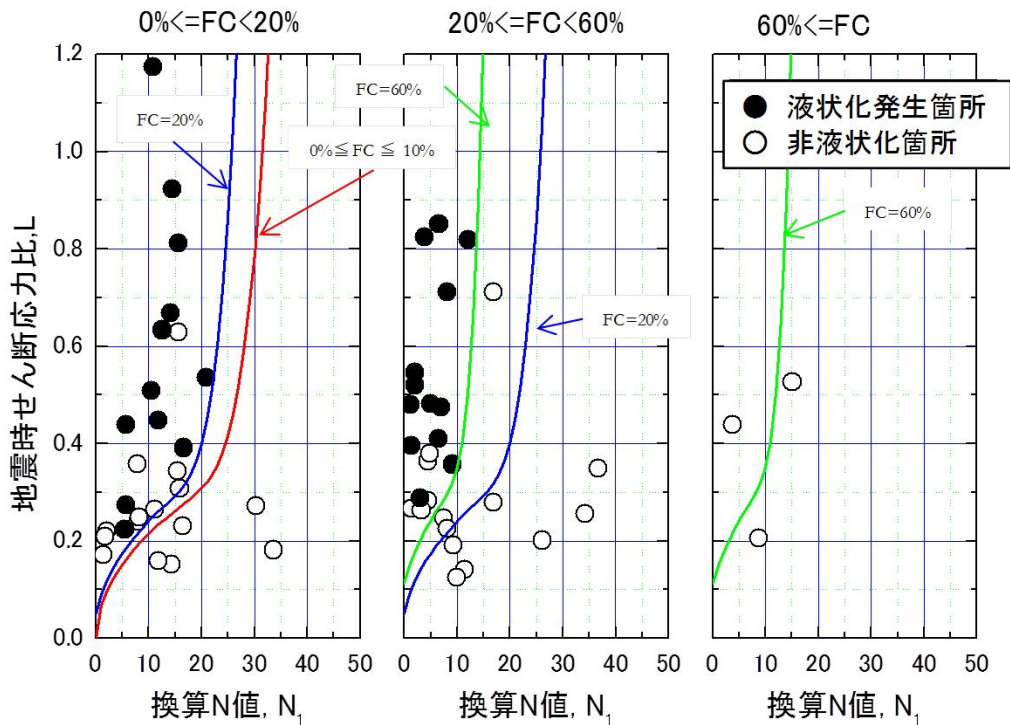


図 2-2-8 細粒分含有率別の換算N値 $N_1$ と地震時せん断応力比 $L$ の関係図

また、細粒分の物性の影響について検討するため、図 2-2-8 に示すデータのうち、液性限界・塑性限界試験結果 ( $I_p$ ) があるものについて、その値を図 2-2-9 中に橙色のプロット (■) で示している。

細粒分含有率が 50%以下では、液性限界・塑性限界試験を実施した例は非常に少なく、代表深度に選ばれたものの中で実施している例はなかった。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。細粒分の性質まで含め、分析するには、既往のデータだけでは限界があり、継続的なボーリングデータの収集とボーリング調査の実施が不可欠である。

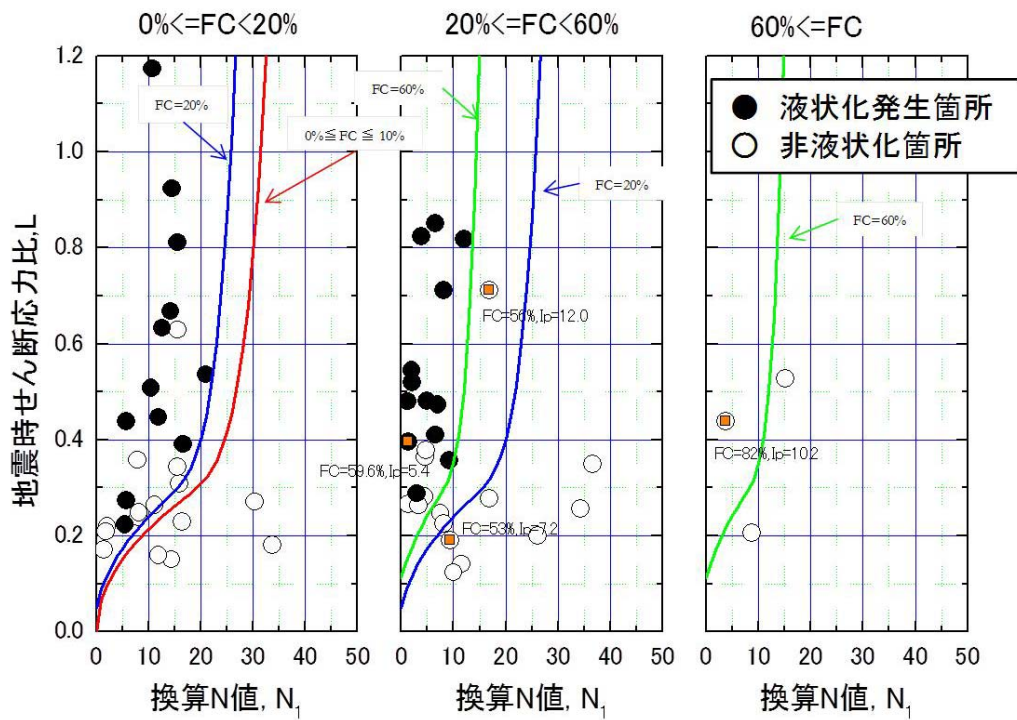


図 2-2-9 細粒分含有率別の換算 N 値  $N_1$  と地震時せん断応力比  $L$  の関係図  
(図 2-2-8 に液性限界・塑性限界試験結果を記入した図)

### ③ 地盤の造成年代の影響に関する検討

#### 1) 検討内容

地盤の造成年代と液状化判定結果との関係进行分析することを目的に、液状化発生箇所と非液状化箇所に区分して、地盤の造成年代別に換算N値 $N_1$ と地震時せん断応力比 $L$ との関係図を作成した。

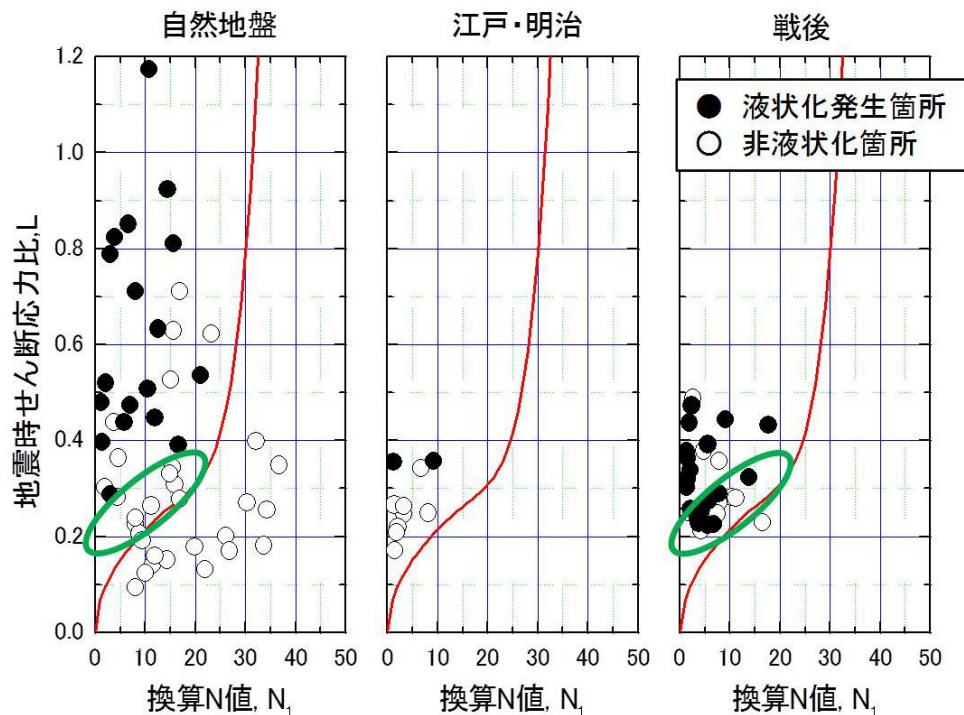
なお、換算N値 $N_1$ と地震時せん断応力比 $L$ との関係図の作成にあたっては、図2-2-7で整理したデータのうち、地盤の造成年代に関する情報があるもののみを抽出し、地盤の造成年代に応じて、「自然地盤」、「江戸・明治」、「戦後」の3つの区分で関係図の作成を行った。

#### 2) 検討結果

検討結果は図2-2-10に示すとおりである。

「自然地盤」と「戦後」の換算N値20程度以下の緑色の楕円で囲まれた範囲(○)において液状化発生箇所の有無に差が見られ、埋立等の造成年代が新しい地盤が、古い地盤より液状化しやすい傾向が見られたが、現行FL法で液状化の見逃しが生じるほどの傾向ではなかった。

造成年代による液状化強度増加のメカニズム等については、不明な点も多く、今後、研究機関と学会等が協力し、詳細な分析を実施する必要がある。



※造成年代は、地盤工学会の調査結果や東京都臨海域における埋立地造成の歴史(遠藤 毅、地学雑誌、2004)を参考に設定した。ただし、自然地盤の中には旧河道なども含まれているため、旧河道などの埋立時期などの調査が必要である。

図2-2-10 地盤の造成年代別の換算N値 $N_1$ と地震時せん断応力比 $L$ の関係図

#### (4) 地震動の継続時間の影響に関する検討

##### ① 千葉県東方沖地震との比較

###### 1) 検討内容

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（昭和62年12月17日）の液状化に対する影響を比較整理した。

なお、検討にあたっては、図2-2-7と同様の関係図を千葉県東方沖地震におけるデータで作成し、それと今回の地震のものとの比較を行った。

###### 2) 検討結果

検討結果は図2-2-11に示すとおりである。

地震動の継続時間が長かった今回の地震では、過去に発生した継続時間の短い千葉県東方沖地震と比較して液状化しやすい傾向が見られたが、現行FL法で液状化の見逃しが生じるほどの傾向ではなかった。

千葉県東方沖地震では、換算N値が10より大きい赤色の四角で囲まれた範囲や地震時せん断応力比が0.3より小さい緑色の四角で囲まれた範囲において、液状化発生箇所（●）がない。一方、東北地方太平洋沖地震ではそのような範囲にも液状化発生箇所があり、継続時間が影響しているものと考えられる。

継続時間の影響は見られるものの、現行の液状化強度推定式は、今回の地震による液状化発生箇所を包含している。

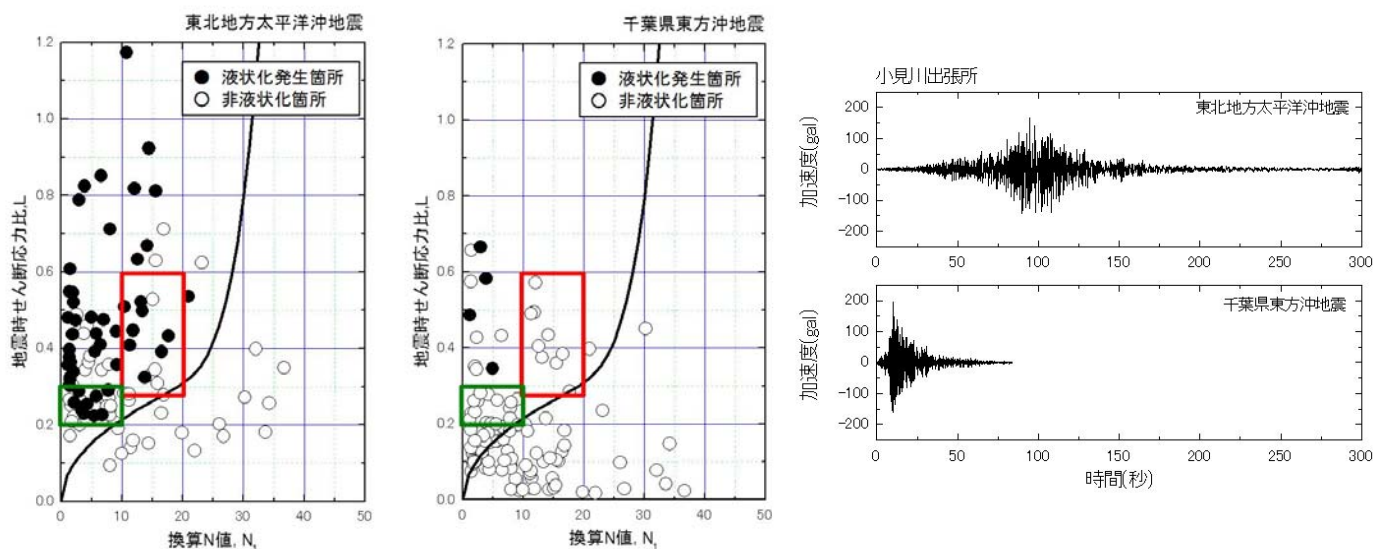


図2-2-11 東北地方太平洋沖地震及び千葉県東方沖地震における換算N値  $N_1$  と地震時せん断応力比  $L$  の関係図



## ② 地震動特性を考慮する係数 (Cw) の検証

### 1) 検討内容

地震動の継続時間と繰返し回数が液状化の発生に及ぼす影響を把握することを目的に、今回の地震の本震で得られた地震動加速度 32 波形から地震動特性による補正係数  $C_w$  を算出した。

なお、地震動特性による補正係数  $C_w$  の算出方法については、参考 2-4-2 (p24) に示している。

### 2) 検討結果

検討結果は図 2-2-12 に示すとおりである。

地震動特性による補正係数  $C_w$  について、今回の地震での妥当性を検証した。

$R_L > 0.4$  程度の土については、換算 N 値  $N_L$  が 25 程度以上に相当する液状化強度が高い土であり、現在調査した範囲においても今回の地震で液状化発生箇所が確認されていない。したがって、液状化強度が低い土 ( $R_L \leq 0.4$  程度) を対象に  $C_w$  の妥当性を検証することが適切である。

このため、液状化強度が低い土 ( $R_L \leq 0.4$  程度) で検証することとし、その結果、 $C_w = 1$  程度となり、従来の知見と概ね整合する結果であった。

なお、地震動の継続時間と繰返し回数が液状化に及ぼす影響の定量的評価 (地盤の変形量等) について引き続き検討する必要がある。

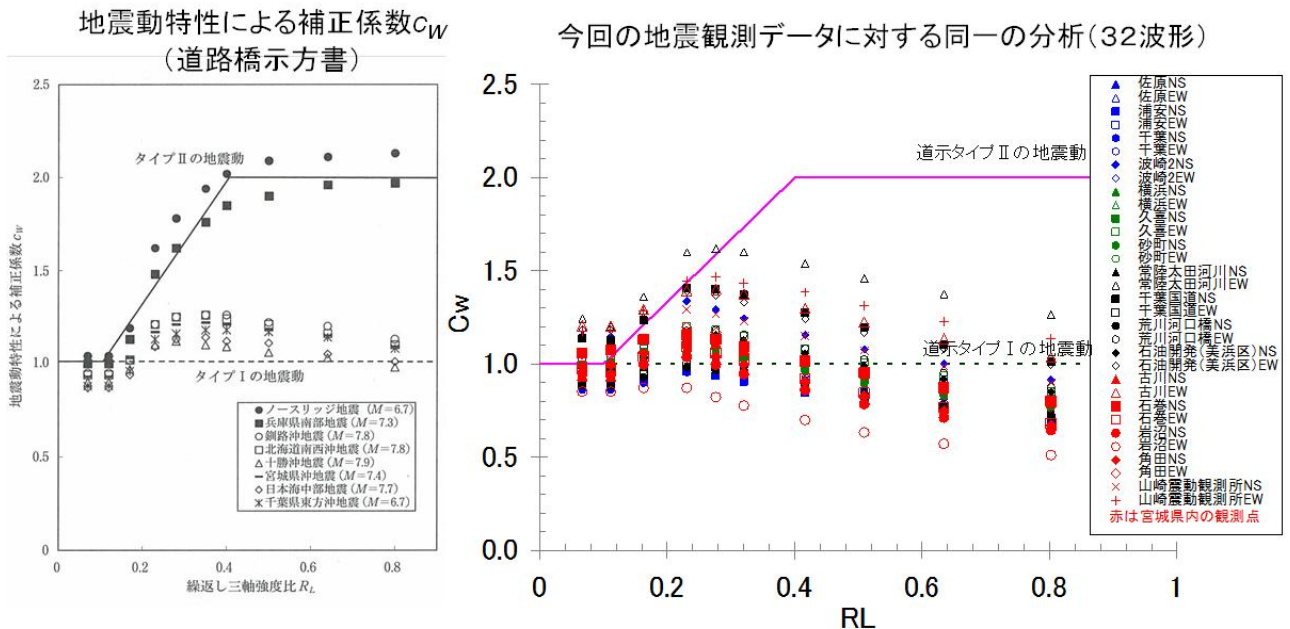


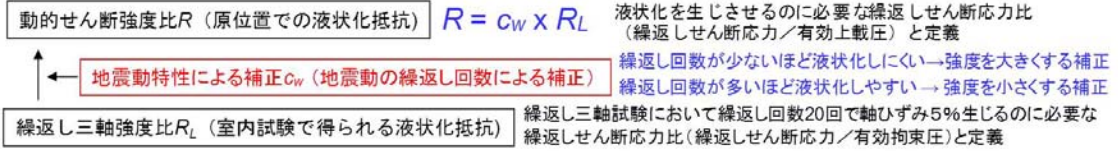
図 2-2-12 地震動特性による補正係数  $C_w$  の算出結果

【参考 2-4-2】地震動特性による補正係数  $c_w$  の算出方法について

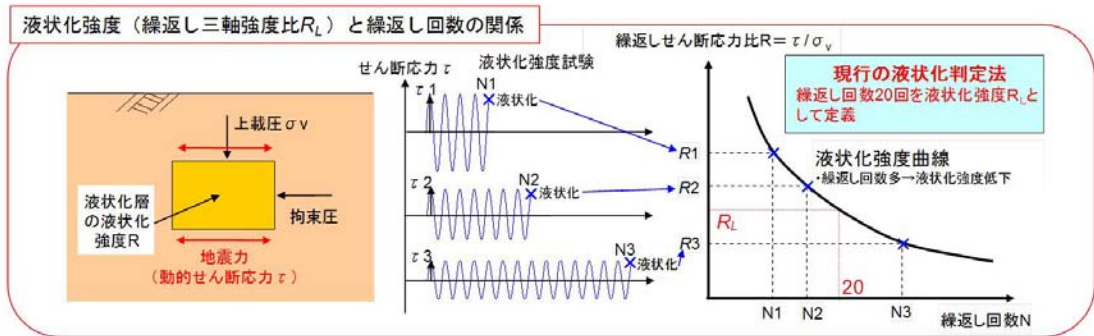
液状化に対する抵抗率  $F_L$  は、液状化に対する抵抗を表す「動的せん断強度比  $R$ 」と地震外力を表す「地震時せん断応力比  $L$ 」の比（すなわち安全率）として与えられる。 $F_L$  が 1.0 以下の土層は液状化するとみなす。

$$F_L = \frac{\text{液状化に対する抵抗}}{\text{地震外力}} = \frac{\text{動的せん断強度比 } R}{\text{地震時せん断応力比 } L}$$

○液状化に対する抵抗を表す「動的せん断強度比  $R$ 」は、以下のように与えられる。



したがって、繰返し回数20回相当の地震動では  $c_w = 1$  となり、それよりも繰返し回数が少ない（継続時間が短い）地震動では  $c_w > 1$ 、繰返し回数が多い（継続時間が長い）地震動では  $c_w < 1$  となる。



今回の地震の際に地表面で得られた地動加速度32波形を用いて、地震動特性が液状化強度に及ぼす影響を検討（国土交通省および防災科学技術研究所による観測波形を使用）。

土の液状化強度（繰返し三軸強度比  $R_L$ ）は地震動の繰返し特性によって変化する。道路橋示方書の液状化判定法（ $F_L$ 法）では、地震動特性による補正係数  $c_w$  によってこの違いを補正している（右参照）。ここでは下記の手順で波形ごとに  $c_w$  を算出し、今回の地震の地震動特性を検討した。

**地震動特性による補正係数  $c_w$**

(タイプ I の地震動の場合)  
 $c_w = 1.0$

(タイプ II の地震動の場合)  

$$c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (R_L > 0.4) \end{cases}$$

累積損傷度理論に基づき、東・田村(1997)\*と同様の手順で  $c_w$  を算出

- 時刻歴波形を半パルス列 1, 2, 3, ... に分解し、対応する繰返し回数  $N_1, N_2, N_3, \dots$  を算定
- 累積損傷度  $D$  を計算し、 $D=1$  となるよう全ての半パルス列を振幅調整
- 20回の繰返しに対する比率として算出

$$D = \frac{1}{2} \sum_i \frac{1}{N_i}$$

$$c_w = \frac{2R_{max}}{3R_L}$$

\*) 東・田村: 地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化強度評価法、土木技術資料39-9、1997

### ③ 余震の影響に関する検討

#### 1) 検討内容

余震が液状化の発生に及ぼす影響を把握することを目的に、千葉市美浜区の液状化発生地点で得られた本震と余震の地震動加速度のランニングスペクトルを算出した。

地震の揺れの途中で地震動の短周期成分が減少していれば、地盤の剛性が低下し、液状化が発生しているものとみられることから、スペクトル分析により地震動の周期特性を調べ、液状化発生の推定を行った。

#### 2) 検討結果

検討結果は図 2-2-13 に示すとおりである。

図 2-2-13 の「(A) 本震の観測波形」、「(C) 余震の観測波形」に示す波形が本震、余震でそれぞれ観測され、本震は揺れはじめから約 77 秒後まで（約 36 秒後までは省略）を、余震は約 31 秒後までの波形を青色で着色（前期波形）し、その後の約 40 秒間の波形を赤色で着色（後期波形）している。

図 2-2-13 の「(B) 本震のスペクトル」、「(D) 余震のスペクトル」は、本震、余震のそれぞれについて、前期波形と後期波形に分けてスペクトルを算出し、前期波形を青色で、後期波形を赤色で着色して示したものである。

本震については、図 2-2-13 の「(B) 本震のスペクトル」に示すとおり、前期波形に見られた短周期成分（○部分）が、後期波形ではほぼ消滅している。通常的地盤は短周期成分を伝搬するが、液状化した地盤は剛性を失い短周期成分が伝搬されないと考えられ、前期波形と後期波形の境目、つまり揺れはじめから約 77 秒後の前後で液状化が発生したのではないかと考えられる。

余震について同様に見てみると、図 2-2-13 の「(D) 余震のスペクトル」に示すとおり、前期波形に見られた短周期成分（○部分）が、後期波形ではほぼ消滅している。このことから、本震から余震発生までの間に過剰間隙水圧が多少消散し、地盤が剛性を回復していると考えられ、余震の揺れはじめから約 31 秒後の前後で再度液状化が発生したのではないかと考えられる。

以上のようなことから、地震波形に含まれる短周期成分の変化から、本震によって液状化し、液状化によって低下した地盤の剛性が一旦回復したが、直後の余震により再度液状化したとみられることが分かった。

余震による地表面の最大加速度は約 70gal であり、液状化が発生するほどの大きさではなかった可能性も考えられることも踏まえ、余震が液状化に及ぼす影響の定量的評価について引き続き検討する必要がある。

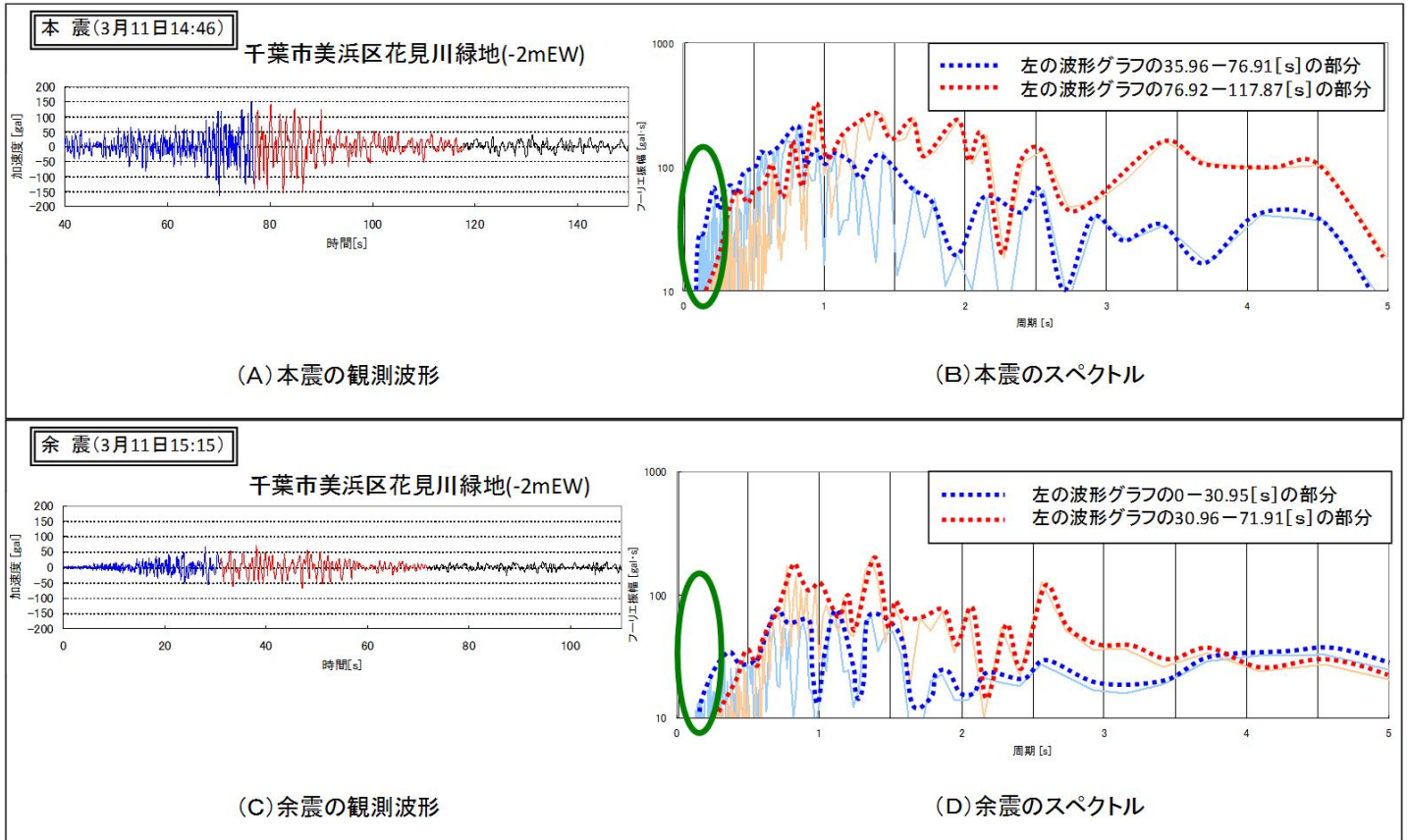


図 2-2-13 千葉県美浜区花見川緑地における本震と余震の地震動のスペクトル分析結果

## 第3章 まとめ

### (1) 今回の検討のまとめ

今回の地震の被害実態を把握し、それと代表的な液状化判定法である現行のF L法での判定結果を比較分析した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・液状化発生箇所では $F_L$ 値を求めると、「液状化しない」と判定される「見逃し」はなかった。
- ・細粒分含有率により区分した分析においても、細粒分が多くなると、液状化強度が大きくなる傾向が見られ、現行F L法における液状化強度推定式と整合した結果がみられた。
- ・埋立等の造成年代が新しい地盤が、古い地盤より液状化しやすい傾向が見られたが、現行F L法で液状化の見逃しが生じるほどの傾向ではなかった。
- ・地震動の継続時間が長かった今回の地震では、過去の短い地震と比較して液状化しやすい傾向が見られたが、現行F L法で液状化の見逃しが生じるほどの傾向ではなかった。
- ・地震動特性を考慮する係数（補正係数  $C_w$ ）について、液状化強度が低い土（ $R_L \leq 0.4$ 程度）に対しては従来の見解と概ね整合する結果であった。

以上のようなことから、現行F L法は直ちに見直す必要性は低いものと考えられる。

一方、非液状化箇所では「液状化する」と判定されるケースが相当数みられたことや、液状化判定は発生有無を判定するものであり、地盤の変形量等の予測ができるものではないことを踏まえ、更なる研究を進め、液状化判定法等の高度化を目指すべきと考えられる。

# 「液状化対策技術検討会議」における検討について



国土交通省

## 1. 検討体制

関係学会と連携して液状化の被害実態等の把握や液状化判定法の検証及び発生メカニズムの確認・解析等を行い、各社会基盤施設等に共通する技術的事項を検討・整理。

各分野の技術基準等の検討・対策をそれぞれ推進

各分野に共通する技術的事項に反映

「液状化対策技術検討会議」を設置し、各社会基盤施設等に共通する技術的事項を検討・整理

## 2. 検討結果の概要

今回地震の被害実態を把握し、それと代表的な液状化判定法である現行のFL法での判定結果を比較分析。現行FL法を直ちに見直す必要性は低いことを確認するとともに、高度化に向けた今後の課題を整理。

### 被害実態等の把握

現地踏査等により関東地方で液状化発生箇所を抽出。

※ 地表面の噴砂等の現地確認結果で抽出しており、全ての液状化発生が抽出できたものでは無いことに注意が必要。



液状化発生箇所の抽出結果を活用

### 液状化判定法の検証及び発生メカニズムの確認・解析等

#### 液状化判定法(FL法)の検証

<FL法:地震動と地盤の特性から液状化発生の可能性の有無を判定する代表的な手法>

#### 今回地震での実態と判定結果の比較

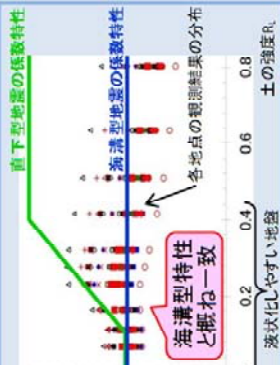
- ・液状化発生箇所と周辺等の112箇所を判定を実施。
- ・液状化発生箇所であるが「液状化しない」と判定されるケース(見逃し)は無かった。
- ・非液状化箇所の結果を踏まえて更なる研究が必要であるが、FL法は概ね今回地震に整合しているという評価。

判定結果	被害実態 (単位:箇所)		合計
	液状化発生箇所	非液状化箇所	
液状化	53	35	88
非液状化	0	24	24
合計	53	59	112

「見逃し」は無かった。

#### 地震動特性を考慮する係数の検証

- ・現行FL法では、揺れの長い海溝型地震と揺れの短い直下型地震それぞれに係数を設けて計算し、地震動特性を考慮している。
- ・その係数(Cw)について、今回地震の波形で妥当性が説明できるかどうかを分析。
- ・一般的に液状化しやすいとされる地盤について概ね整合して地震動特性を反映できると評価。



海溝型特性と概ね一致

#### その他の分析

**造成年代の影響**  
埋立等による造成年代の新しい地盤が、古い地盤より液状化しやすい傾向が見られた。

**継続時間の影響**  
地震動の継続時間が長かった今回地震では、過去の短い地震と比較して液状化しやすい傾向が見られた。

**余震の影響分析**  
液状化直後の地盤は液状化しやすく、余震でも液状化する事例を確認。

- ・関東地方で少なくとも96市区町村の広い範囲で液状化現象が発生。
- ・特に、東京湾岸や利根川下流域等の埋立地等で集中して発生。

- ・現行の液状化判定法(FL法)は今回地震についても液状化発生を概ね整合して判定できる(見逃さない)結果が得られた。
- ・非液状化箇所の判定結果を踏まえて更なる研究が必要であるが、現行の液状化判定法(FL法)を直ちに見直す必要性は低いことを確認。

今後、液状化判定法等の高度化に向けて、更なるデータ収集・分析を進めることが必要。

## (2) 液状化判定法等の高度化に向けて今後検討すべき課題

非液状化箇所では「液状化する」と判定されるケースが相当数みられたことや、液状化判定は発生有無を判定するものであり、地盤の変形量等の予測ができるものではないことを踏まえ、液状化判定法等の高度化を目指し、今後、以下の検討を継続する必要がある。

- ・地震動の継続時間と繰り返し回数が液状化に及ぼす影響の定量的評価。
- ・細粒分の性質や量について明らかな箇所が少ないため、既存ボーリングの収集やボーリング調査の実施により、データを増やし、詳細な分析を実施する。
- ・造成年代による液状化強度増加のメカニズム等については不明な点が多いため、引き続き、研究機関と学会等が協力し、詳細な分析を実施する必要がある。

具体的な検討項目は以下のものが考えられる。

### ■地震動の継続時間の長さとし繰り返し回数が液状化に及ぼす影響の定量的評価

- ・目的  
過剰間隙水圧の上昇、液状化状態の継続、消散特性と地盤剛性への影響を明らかにする。
- ・検討内容  
地震動に応じた液状化の発生メカニズムの定量的解明  
水圧の上昇と地盤剛性の低下の定量的な関係式

### ■液状化地点の有効応力解析によるシミュレーション解析

- ・目的  
検証データの蓄積によって、シミュレーションにより、一定の精度で液状化現象を解析できるようにするとともに、設計簡便化等のために様々な条件で解析できるようにする。
- ・検討内容  
鳴瀬川河川堤防の詳細な地盤データを用いた解析  
千葉習志野地区の深さ方向波形記録の再現解析

### ■ボーリング調査の実施とボーリングデータの継続的な収集・整理

- ・目的  
継続時間、細粒分等の影響、造成年代に着目し、液状化判定の合理化を実施するための基礎データを収集する。
- ・検討内容  
物理試験のある既存ボーリングデータの収集を継続するとともに、液状化の詳細な分析に耐えうる信頼性の高いボーリング調査を実施する。

#### ■液状化発生状況と地形的特徴の関係

- ・目的  
地形（埋立て地や自然地盤）、改変経緯による液状化発生のしやすさを定量的に把握する。
- ・検討内容  
液状化発生面積比率と地形的特徴を GIS により整理する。

#### ■液状化対策工の定量的な評価

- ・目的  
既存の対策工の効果は確認されたものの、設計に反映するには、定量的な評価が必要である。
- ・検討内容  
信頼性の高いボーリング調査に基づいた解析的検討を実施する。

#### ■液状化に及ぼす諸要因の分析

- ・目的  
液状化に及ぼす影響が解明されていない要因があるため、これらの要因について、学会等の研究動向も踏まえて引き続き分析を行う。
- ・検討内容  
収集あるいは調査したボーリング結果を基に、継続時間、細粒分等の影響、造成年代が液状化に及ぼす影響について分析を実施する。



## <参考> 今回の検討に用いたデータについて

今回の検討に用いたデータについては、各研究機関等のホームページにて公表している。

検討項目	本資料の該当ページ	掲載機関名 掲載先の URL
1. 被害実態等の把握		
(1) 関東地方における液状化発生状況とその特徴	5～8	関東地方整備局 企画部広域計画課 <a href="http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html">http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html</a>
(2) 液状化現象の程度	9	国土地理院 地理地殻活動研究センター 地理情報解析研究室 <a href="http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40040.html">http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40040.html</a>
2. 液状化判定法の検証及び発生メカニズムの確認・解析等		
(1) 液状化発生状況と $F_L$ 値の検討	10～14	独立行政法人土木研究所
(2) 液状化発生状況と $P_L$ 値の検討	15～17	地質・地盤研究グループ
(3) 地盤特性の影響に関する検討	18～21	土質・振動チーム
(4) 地震動の継続時間の影響に関する検討 ①千葉県東方沖地震との比較	22	<a href="http://www.pwri.go.jp/team/smd/topics-Liquefaction.htm">http://www.pwri.go.jp/team/smd/topics-Liquefaction.htm</a>
②地震動特性を考慮する係数 ( $C_w$ ) の検証 ③余震の影響に関する検討	23～26	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 <a href="http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/earthquake/2011EJ.htm">http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/earthquake/2011EJ.htm</a>