

# 東京低地における地盤の再液状化現象

阿部博<sup>1</sup>・草野郁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 群馬工業高等専門学校教授 土木工学科 (〒371 群馬県前橋市鳥羽町580)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京都建設局 総務部 (〒163-01 東京都新宿区西新宿二丁目 8-1)

東京低地を対象として、遺跡調査結果と元禄地震、江戸地震、東京湾北部地震、関東地震での液状化に関する記述・記録を使い液状化発生地点を探し出したところ、数箇所でも再液状化現象を確認することができた。液状化発生・非発生地点の地盤の特徴を微地形と地質・土質特性から検討した結果、自然堆積地盤では細粒分含有量の大小が液状化強度に強く影響することがわかった。このことから、細粒分含有量ならびに拘束圧の大小に着目した動的試験結果の整理を行い、液状化強度推定の提案式と過剰間隙水圧上昇特性を示した。これらの液状化特性を動的有効応力解析に導入し、再液状化発生地点と液状化非発生地点で液状化解析を行い、得られた液状化特性が発生・非発生地点の区分に有効なことを示した。

**Key Words :** earthquake, alluvial deposit, liquefaction, re-liquefaction, dynamic laboratory test, fines content ratio, confining stress, effective stress method, direct non-linear analysis

## 1. まえがき

地震被害が記載された古文書には、“既成窪泥(850年：出羽)<sup>1)</sup>”や“地割れ石砂を噴出し(1694年：能代地方)<sup>2)</sup>”のように液状化現象と考えられる記述があり、古くから噴砂や噴水が地震時の特異な現象として知られていたことがわかる。

一方、液状化現象と地震災害を直接結び付けようと考えられたのは近年のことで、最上らの研究(1950代初頭)がその始点とされている。液状化現象が特に注目されたのは、1964年6月16日の新潟地震である。この地震では沖積砂質地盤での噴砂・噴水や昭和大橋の落橋、県営アパートの転倒など深刻な構造物被害が多発した。地震後の調査・研究から、噴砂・噴水は砂地盤の液状化現象に伴うものであること、また緩い飽和砂地盤が地震時に強度を失い基礎構造物に被害をおよぼすことが明らかにされた。

これら研究成果は各種耐震設計法や液状化対策工法に反映されつつあるが、残念なことに最近の地震でも液状化被害は多発している。1995年1月17日の兵庫県南部地震もその1つであり、埋立地で甚大な液状化被害が発生し、さらに地盤の側方流動と考えられる橋梁基礎被害も起きた。濱田ら<sup>3)</sup>が明らかにした液状化時の大規模な地盤の永久変形が構造物被害を誘発するという現象がこの地震でも実証された。

このことは構造物直近の動的地盤特性の把握ばかりではなく、地域全体の変位・変形特性の把握を含む液状化発生環境を知ることが、今後の構造物建設

や地域防災計画の策定には欠かせないことを示している。

南関東直下型地震の発生が危惧されている東京都の課題の1つに液状化対策があり、その基礎資料として精度の高い液状化予測図が必要となっている。著者らはこれまでに関東地震規模を想定した東京低地の液状化予測図<sup>4)</sup>を発表している。作成にあたって、約300km<sup>2</sup>におよぶ東京低地を液状化判定の詳細法<sup>5)</sup>だけでは網羅しきれないため、関東地震で液状化した地点・地域を文献や開込み調査から明らかにし、さらに、著者らの提案した既存ボーリング資料に基づく液状化判定の簡易解析結果<sup>4)</sup>と液状化発生・非発生地点の地盤特性、地形・地質図の三者の凡例間の相互関係を統計処理から求め液状化予測図を完成させた。

この研究成果から、いくつかの地震被害記録にある液状化現象の記述によって、液状化が同一地点・地域で発生することを知れば、すなわち再液状化現象が確認できれば、東京低地の液状化特性の把握ならびに既存予測図の精度向上が図れるものと考えた。

これまでに再液状化現象の研究はFinnら<sup>6)</sup>が動的要素試験から、大原ら<sup>7)</sup>、佐々木ら<sup>8)</sup>が振動台実験結果の検討から行っている。安田ら<sup>9)</sup>は現地調査結果と液状化の簡易解析法から検討している。また、若松<sup>10)</sup>の微地形から検討する手法もよく知られている。ここでは、再液状化地点の土質特性を把握した上で、動的な地震応答解析結果から再液状化現象の検討を試みた。東京低地で液状化現象の情報が得ら

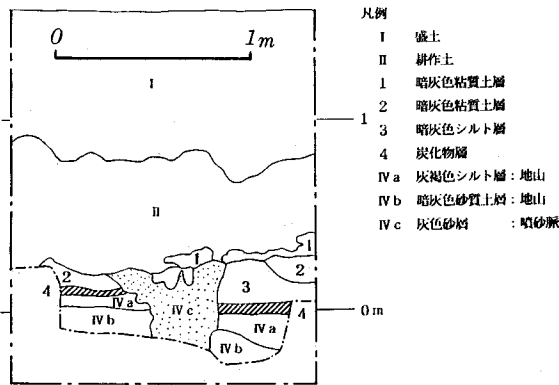


図-1新宿町遺跡(葛飾区高砂七丁目)の地層断面図<sup>12)</sup>

れた遺跡調査結果と元禄地震(1703年)、江戸地震(1855年)、東京湾北部地震(1894年)、関東地震(1923年)での液状化履歴について整理し、各地震での液状化発生地点の相互比較から再液状化現象の有無を検討した。次に、東京低地の自然堆積地盤の液状化特性を検討する目的で、液状化発生・非発生地点の特徴を微地形と地質・土質特性から考察した。さらに、細粒分含有量ならびに拘束圧の大小に着目した動的試験結果の整理を行った。得られた液状化特性から、簡易液状化強度推定式の提案ならびに過剰間隙水圧上昇特性を示した。最後に代表的な再液状化地点と非液状化地点を選び、今回得られた液状化特性を導入した有効応力理論に基づく地震応答解析を行って、それぞれの地点の液状化特性を検討した。

## 2. 東京低地での液状化現象

### (1) 遺跡から発見された液状化履歴

遺跡調査に伴って活断層や地割れ、地すべりのような地震跡が見つかっており、中でも液状化現象の痕跡が多数発見されている<sup>11)</sup>。葛飾区高砂七丁目14番地に位置する新宿町遺跡では、1992年に噴砂跡が発掘されている。この遺跡は東京低地の東側を流れる中川の流路に沿った微高地(自然堤防)上にあり、可児と葛飾区郷土と天文の博物館<sup>12)</sup>の調査から、古墳時代後期の漁撈を中心とした集落跡であることが確認されている。液状化の痕跡を示す地層断面図<sup>12)</sup>を図-1に示す。

著者の1人は、現地調査から旧耕作土下の7世紀の地層を引き裂いて幅20~30cmの地割れが走り、液状化で噴き上げられた砂が埋まったために砂脈が形成されたと判断した。一方、関東地震(1923年)に関する聞き取り調査では、遺跡直近の西側の中川堤防沿いに大きな地割れができ砂水が激しく噴き出したとの情報を得た。ただし、遺跡位置での液状化発生は確認していない。このことは、古文書や面接調査では地表面に亀裂や噴砂・噴水がない限り液状化有無の判断が出来ないことが示唆されたともいえる。

そこで、遺跡周辺のボーリング柱状図を液状化予測支援システム<sup>13)</sup>(パソコン上で国土地理院の標準地域メッシュを基準に、既存ボーリング地点を表示し、地点ごとに液状化簡易解析を行うとともにメッシュ内に土地条件図等の地形・地質図を表示する)での検索を試みた。遺跡直近の北東位置に資料があり、その地点には地表から80cmが褐色の粘土で、下位には標準貫入試験のN値が2~5の極めて緩い暗灰色の細砂が4mほど堆積している。さらに1mほどの厚さのシルト混じり細砂層を挟み、N値が20前後の厚さ14m以上の暗青灰色の細砂が続いている。また、地下水位は1m前後とかなり浅いこともわかった。当該地点は東京低地の中でも沖積砂層(有楽町層上部砂層)が厚く、地表近くのN値からも液状化しやすい地盤といえる。

液状化程度を定量化するために関東地震規模を想定し(地表面最大加速度振幅278gal)、著者ら<sup>4)</sup>の提案した液状化の簡易解析法から、液状化抵抗率 $F_L$ 値と液状化指数 $P_L$ 値を求めた。深度-4.3mの位置で $F_L$ 値0.699が得られたことから、発見された砂脈が液状化によるものと見なすことができる。また、得られた $P_L$ 値は約3.0と小さく、噴砂に至らず砂脈に留まったことに符号した。しかし、砂脈を発生させた地震名は7世紀以降に発生したものといえず地震発生時期については特定できなかった。

なお、1991年には新宿区四谷の江戸城外濠で江戸地震の噴砂跡が発掘され、1995年には葛飾区奥戸三丁目の鬼塚遺跡から噴砂跡が発見された。後者の発掘にあたった葛飾区郷土と天文の博物館<sup>14)</sup>では、砂脈は鎌倉時代以前の古代の大地震によって発生したものと判断している。遺跡ごとに地震の発生年代が変わること、また、地震発生時期を特定できない欠点もあるが、砂脈痕跡は地盤が液状化したという事実である。ここでは、上記三地点を遺跡から発見された都内の液状化発生地点と見なした。

### (2) 古文書等の記録にある液状化現象の記述

関東において液状化現象と考えられる記述が最初に現われるのは関東南部地震(1257年)である。ただし、“地割れを生じ水が湧き<sup>2)</sup>”とあるだけで場所が特定できない。また、元禄地震(江戸・関東諸国、1703年)では、利根川流域で液状化と考えられる被害が発生している。“江戸”との記載のため都内での発生地点の特定は難しいが、六郷渡し(大田区)と神田小川町(千代田区)の2ヵ所だけは明らかになっている<sup>15)</sup>。したがって、東京低地での液状化発生地点の主力情報は元禄地震以降と言える。

### a) 江戸地震(1855年)での液状化履歴

江戸幕末の安政2年11月11日に江戸は大地震に襲われ大きな被害を受けた。この地震は江戸下町(江戸川の河口)を震源とする直下型の地震でマグニチュードは $M=6.9 \pm 0.1$ であったが、江戸の町の被害は極めて大きく死者一万人を出している<sup>2)</sup>。

佐山<sup>16)</sup>の安政江戸地震災害誌(上)・(下)によると、

表-1 江戸地震での液状化発生地点

No.	現在の地名	当時の地名	当時の地形	液状化と判断される記述	関東地震での液状化の状況	砂層の状態 <sup>13)</sup> 液状化支援システム <sup>14)</sup> 利用
A	墨田区 の隅田川沿い	隅田川の堤所々	隅田川沿い	堤所々われて砂を吹出す	地割れから激しく砂水が噴出する	N値2~20のシルト質細砂~粗砂、層厚：3~6m
B	墨田区 向島	本所牛島	隅田川沿い	堤さげ割地中泥を吹出す事おびただし	地割れ	—
C	江戸川区平井	平井辺場所 ニヨリ	旧中川沿い	地割レ幅二三尺 水沸騰スル	川沿いの道で 随所で噴砂噴水	N値3~15のシルト質細砂~細砂、層厚：3~6m
D	江戸川区東葛西 ・中葛西	桑川辺	江戸川沿い (干拓地)	赤砂泥水噴出、 庭中雨後ノ如シ	地割れから黒ずんだ 土砂と泥水の噴出	N値10前後の細砂、10~ 20の中砂、層厚：5~8m
E	港区台場	品川沖の第2、 第6の台場	埋立地	地裂け水吹出	大きな地割れから 砂水が噴出する	—
F	江戸川区南葛西	松葉前津	江戸川河口 (干拓地)	地窪む事尺余、 五六寸潮満干因り之計	随所に高さ稲丈半分 の点状の噴砂の跡	N値10~20の細砂~中砂 層厚：5~8m
G	葛飾区亀有	葛飾の亀有	古隅田川沿い	田畑ニ山ノ如キモノ、 側ニ沼ノ如キモノ生ジ	噴砂噴水、田に段差 水路砂で埋る	N値<15の細砂~中砂 層厚：6~10m
H	江東区猿江町	深川猿江東町	湿地埋土 (埋立地)	一丈余リノ築山、 地中ニ凹ミ	地盤が沈下し、 出水しやすくなる	N値<10のシルト質細砂 ~細砂、層厚：3~5m
I	足立区大谷田	亀有村のさき 大やた村	中川・ 古隅田川沿い	沿い砂泥吹き上げ山をなし 甚大なる堀も出来たり	地盤凹凸、砂の小山 水溜りが生じる	N値<10の細砂~中砂 層厚：6~10m
J	北区岩淵・ 十条・志茂	岩附十条の辺り	荒川沿い	土地割れ、 水噴し所ありと聞ゆ	川沿いに地割れ段差 畑や庭で砂水の噴出	N値<15の細砂~中砂 層厚：4~6m
K	千代田区霞ヶ関	上杉家桜田の 本邸	埋立地	水川の如く溢る	液状化・地割れ等の 被害は生ぜず	N値0~5のシルト質細砂 層厚：0~4m

“....、此度の地震所によりて強弱あり、其強き所は本所深川鉄砲洲築地浅草辺なり。本芝田町高輪品川の方次第に軽し。(嘉永明治年間録)”, “沼地や埋立地の様な所、本所深川吉原下谷ごじんヶ原は特に烈し。(Destructive Earthquakes in Japan)”, “江戸市中ノ被害ハ深川、本所、下谷、浅草ヲ最トス(利根川図誌)”のような記載があり、地盤の軟弱な下町地域で地震動が大きく、家屋被害の大きかったことがわかる。また、“東海道は神奈川辺、中仙道は上州高崎辺、大地より砂を吹出(嘉永明治年間録)”と記載されているように広範囲に地盤の液状化が発生したことも特徴の一つである。

上記のような記載を同文献から探し、東京低地での液状化および類似する地盤災害発生場所を当時の地名と現地名、関東地震での状況、砂層の状態を整理して表-1に示す。明らかに噴砂・噴水を伴う液状化現象の発生が記述されている地域は、隅田川の堤(A)、本所牛島(B)、平井(C)、桑川(D)、品川沖第二、第六台場(E)である。松葉前津(F)では噴砂・噴水は記述されていないが、地割れと地盤の沈下・陥没が認められ、液状化現象の可能性が高い。江戸川区区史<sup>17)</sup>(安政二卯歳地震之記の意識)にも桑川村の地盤災害の状況や松葉前津の地盤の沈下や陥没等が記述されている。亀有(G)では地盤の盛上がりで大規模な陥没が生じたことがわかり、激しい液状化が発生したと考えられる。猿江東町(H)でも液状化あるいは地盤の強度低下が起きたと考えられる。大やた村(I)については、宇佐美<sup>18)</sup>が調査した大地震大風見聞記の記述から、液状化の発生が認められる。岩附十条(J)については、新収日本地震史料<sup>19)</sup>で“岩附十条の辺地震甚強く家々皆潰れ、土地裂、

水噴し所ありと聞ゆ(安政乙卯地震記上)”と記されている。岩附の地名は埼玉の岩槻や中央区にも岩附の地名があるため断定しにくいだが、同史料には“...十条の辺旅居...”の記述があり、北区の岩淵・十条・志茂の辺りで液状化が発生したと判断した。上杉家桜田の本邸(K)については、安政江戸地震災害誌<sup>16)</sup>によると、“川の如く水湧出”とあり、液状化と考えられるが、新収日本地震史料の安政乙卯地震記上では、“御道筋桜田外より半蔵にかかりし頃は水道あふれて水を渉る心地せり”とあり、水道施設に被害が発生して水があふれ出た可能性もある。

表-1に示した液状化発生地点のうち、微地形からAとB、C、G、I、Jは河川沿いの自然地盤である。また、EとH、Kは埋立地盤で、Eは埋立直後の地盤、DとFは干拓地で、Fは江戸後期に新田として開拓された地域と判断できる。

#### b) 東京湾北部地震(1894年)での液状化履歴

明治27年6月20日に東京下町を襲った東京湾北部地震は、東京下町(荒川放水路の下流部)を震源とする直下型地震でマグニチュードはM=7.0であったが、震源の深さが40kmから60kmと深いため、東京湾岸沿いの被害が顕著でありその他の地域での被害は少なかった。

震災豫防調査會報告<sup>20)</sup>の“地震其他地異彙報”から噴砂や噴泥、噴水の記述のある所について、当時の旧地名と現地名、関東地震での状況、砂層の状態を併記して表-2に示す。

河川沿い自然地盤の液状化発生地域は表-2のNo. 1~No. 5である。

表-2 東京湾北部地震での液状化発地点

No.	現在の地名	当時の地名	当時の地形	液状化と判断される記述	関東地震での液状化の状況	砂層の状態 <sup>13)</sup> 液状化支援システム <sup>13)</sup> 利用
1	大田区東六郷三丁目	荏原郡六郷村大字八幡塚	多摩川沿い	黒砂を噴出	堤防の陥没、護岸の流失	N値5~25の細砂~中砂粗砂 層厚: 6~8m、荒木田で盛土
2	足立区新田一~三丁目	南足立郡江北村大字鹿浜新田	荒川沿い	青色砂を噴出	川沿いに大きな地割れから青い砂を噴出	N値<15の細砂~中砂 層厚: 3~6m
3	足立区千住秀町・千住龍田町	南足立郡千住町大字千住三丁目飛地字袋	荒川沿い	黒ねずみ色砂、清水を噴出	砂水の噴出	N値<15の細砂、N値15~30の粗砂・礫、層厚: 6~15m
4	葛飾区小菅東京拘置所付近	南葛飾郡南綾瀬村大字小菅	古隅田川沿い	黒ねずみ色砂、清水を噴出	砂水が激しく噴出 水深30cmに及ぶ	N値<10の細砂 層厚: 5~7m
5	足立区柳原一~二丁目	南葛飾郡南綾瀬村大字柳原(三番地、他6)	古隅田川沿い	水七尺余り噴き上げ、噴砂(浅黄色砂、黒ねずみ砂混じり水)	砂水が激しく噴出 水路砂で埋る	N値<15の均一な細砂~中砂 層厚: 8m前後
6	江東区東陽一丁目	深川区洲崎弁天町	埋立地	土砂交じり水を噴出	地割れ(砂水は噴出せず)	—
7	江東区木場五丁目	深川区木場町	埋立地	5箇所で噴水	地割れ(砂水は噴出せず)	N値3~5のシルト質細砂、層厚: 2~3m、表層2~3m粘性土
8	墨田区緑町	本所区緑町五丁目	池を埋立てる	15時間余り土砂交じり水噴出	液状化・地割れなし	N値<5のシルト質細砂~細砂、層厚: 2~3m
9	墨田区石原一~二丁目	本所区石原町十九番地	池を埋立てる	濁水、ねずみ色の土砂を噴出	液状化・地割れなし	N値2~10のシルト質細砂~細砂、層厚: 2~4m
10	江東区森下一丁目	深川区東森下町六拾番地	池を埋立てる	淡黒色の砂泥を噴出	液状化・地割れなし	N値1~8のシルト質細砂~細砂、層厚: 1~6m
11	墨田区東駒形・吾妻橋	本所区小梅菜平町五十番地	池を埋立てる	土砂交じり水噴出、溜池沸騰	地割れ(砂水は噴出せず)	N値<20の細砂~中砂・粗砂 層厚: 3~8m
12	江東区北砂六丁目	南葛飾郡砂村元亀高八百九十五番地	干拓地	砂を噴出	広範囲に砂水が激しく噴出	N値<20のシルト質細砂~中砂・粗砂、層厚: 1~6m
13	江戸川区葛西一帯	南葛飾郡葛西村	干拓地	砂及び水を噴出	黒ずんだ土砂泥水が噴出、周辺水びたし	N値10~20の細砂~中砂 層厚: 5~8m
14	墨田区立花二丁目	南葛飾郡吾嬭村元小村井	—	細末なる砂及び水を噴出	地割れ(砂水は噴出せず)	N値<10のシルト質細砂~中砂、層厚: 2~5m
15	墨田区押上三丁目	南葛飾郡吾嬭村元請地八拾番地、他5	—	細末なる砂及び水を噴出	どす黒い土砂の噴出 余震の度に砂水噴出	N値<10のシルト質細砂~中砂、層厚: 3~5m

埋立地の液状化発地域は No. 6~11と考えられ、このうちのNo. 8~No. 11は溜池あるいは池を埋築した埋立地である。干拓地の液状化発地域はNo. 12と13である。

河川沿い、埋立地、干拓地以外で液状化が発生した地域は No. 14と15と判断した。なお、砂水の噴出は記述されていないが、深川区猿江町では地盤陥没が発生した。また、品川灣第一砲臺と第二砲臺(品川沖台場)では地盤に大きな亀裂が発生した。さらに、南足立郡と南葛飾郡、北豊島郡の一部では地盤の亀裂したところ20箇所と記されている。

以上の記録から、東京湾北部地震では、荒川、多摩川、古隅田川(昔の利根川の河道)の現・旧河川沿いの地域と埋立地、干拓地において液状化現象が発生したと判断できる。

### (3) 関東地震での液状化履歴

大正12年 9月 1日に関東地方を襲った関東大震災は典型的な海洋型巨大地震でマグニチュードはM=7.9であった。火災被害が大きかったため、地盤災害の情報は意外に少ない。

筆者らは関込み調査結果<sup>4)</sup>と文献<sup>21), 22), 23), 24), 25)</sup>から得られた情報を使い関東地震地盤災害分類図<sup>4), 26)</sup>

を作成した。この図を基に、液状化に関する情報を再整理し、図-2に示す液状化発地域・地点図を作成した。「激しい液状化」が生じた地域には、砂や水の激しい噴出、地盤の陥没、地盤の強度低下による構造物の大きな被害が生じた地域を選んだ。「軽度な液状化」が生じた地域には、砂や水のわずかな噴出、井戸の被害、地盤の沈下、地盤の強度低下による構造物の比較的軽度な被害が生じた地域を括り出した。なお、図中の番号(例えばL1~L6)は文献<sup>26)</sup>に対応しており、Lは液状化地域、Nは非液状化地域を示す。

河川沿いの液状化発地域には、新河岸川と隅田川の上流右岸(L1~L6)、隅田川下流沿い(L7~L8)、古隅田川一帯(L9~L19)、中川左岸や大場川、小合溜沿い(L20, L21, L24, L25)がある。旧中川沿いでは、左岸の江戸川区小松川と逆井、平井の川沿いの道の随所に噴砂・噴水が見られた。証言者の1人が描いた当時の旧中川沿いの亀裂と土まんじゅう(噴砂)を図-3に示す(L26~L31)。また、葛飾区の高砂、奥戸でも随所で地割れから砂水が激しく噴出した(L22, L23)。江戸川・旧江戸川沿いとその河川敷で液状化が発生しているが、旧江戸川下流域は江戸時代初頭に開拓されていた地域である。中葛西二丁目

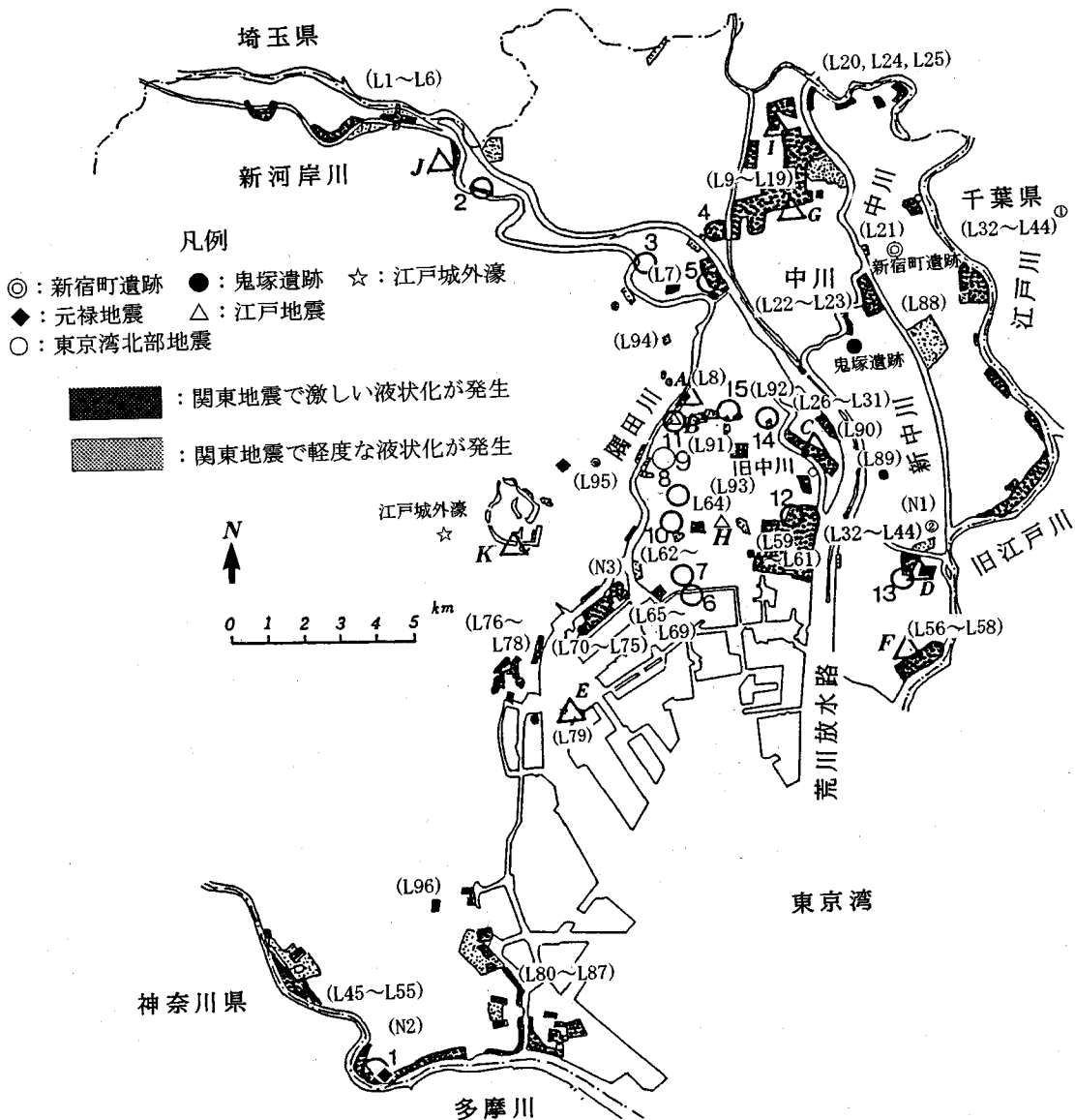


図-2 関東地震と元禄地震、江戸地震、東京湾北部地震での液状化発生地域・地点（遺跡噴砂も含む）



図-3 面接者S氏が描いた液状化の様子

の葛西小学校と東葛西二丁目の桑川神社では地割れから黒ずんだ土砂が泥水と一緒に噴き出し、周辺は水びたしになった(L32~L44)<sup>①</sup>、(L32~L44)<sup>②</sup>。多摩川下流域でも液状化が発生しており、堤防はいた

るところで亀裂、陥没、崩壊などの被害が生じた(L45~L55)。

東京湾岸の埋立地と干拓地では、江戸川区の南端(L56~L58)、江東区の砂町(L59~L61)、江東区の西部地域(L62~L64)で液状化が発生している。港湾地域では、越中島で砂水の噴出、木場・東陽、塩浜で地割れが確認できた(L65~L69)。一方、江戸時代に開拓された佃島(中央区の佃一・二丁目)では液状化が発生していない(N3)。しかし、明治以降の埋立地である佃三丁目、月島、勝どきは随所で液状化が発生した(L70~L75)。明治末期から大正にかけて埋め立てられた港区の芝浦、海岸ではほぼ全域で地割れや液状化が発生している(L76~L78)。品川台場は1853年に埋め立てられたもので、大きな地割れか

表-3 再液状化を生じた箇所

地震名	区名									
	北区	足立区	墨田区	足立区	江戸川区	江戸川区	大田区	江戸川区	江東区	港区
江戸地震	J	-	A, B	G, I	C	D	-	F	-	E
東京湾北部地震	No. 2	No. 3, 5	No. 11	No. 4	-	No. 13	No. 1	-	No. 12	-
関東地震	L1~ L6	L7	L8	L9~ L19	L26~ L31	L32~ <sup>②</sup> L44	L45~ L55	L56~ L58	L59~ L61	L79

ら砂や水が噴出し、陥没や段差が生じた(L79)。大田区の内海沿いの地域は干拓地と明治以降の埋立地であり随所で砂水が噴出し、羽田空港では穴守神社周辺や多摩川沿いで砂水が噴出した(L80~L87)。

その他の液状化発生地域として、隅田川以東では江戸川区の南小岩六・七丁目、東小松川三丁目、平井四丁目、墨田区押上・二丁目、同三丁目、江東区の亀戸二丁目、隅田川以西では荒川区南千住四丁目、千代田区神田佐久間町三丁目、大田区大森北四丁目で液状化が発生した。南小岩と押上、亀戸、南千住、大森北は江戸時代以前に陸化されており、明治の初期まで水田や蓮田などの湿地を明治の後期から大正時代に盛土して宅地や畑化した地域が含まれている(L88~L96)。

以上のことから、関東地震で液状化が発生した地域は、自然地盤では現・旧河川沿いの地域、人工地盤では湾岸の埋立地と干拓地である。特に、明治以後に埋立てた新しい埋立地はほとんどの地域で液状化あるいは地割れなどの地盤災害が発生したと判断できる。

### 3. 東京低地における再液状化現象

前掲した図-2の液状化発生地域・地点図(液状化履歴図)に江戸地震(表-1)と東京湾北部地震(表-2)の液状化発生地点を加えた。また、元禄地震での液状化地点と江戸城外濠跡の噴砂位置、さらに新宿遺跡と鬼塚遺跡の砂脈位置も併せて表示した。図-2から、関東地震で液状化が発生した地域には、元禄地震と江戸地震、東京湾北部地震での液状化発生地点がかなりの数で重なっており、東京低地での再液状化現象の発生が確認できた。

江戸地震と東京湾北部地震、関東地震での液状化発生地点・地域を都内の区ごとに表わし表-3に示す。表-3から、江戸地震と東京湾北部地震での液状化発生地域を見ると、重複する地点数は少ないが江戸地震で液状化した地域は東京湾北部地震においても再度液状化していることがわかる。

同様に江戸地震と関東地震での液状化発生地域を比較すると、江戸地震で液状化した大部分の地域が関東地震で再液状化を起こしており、江戸地震と東

京湾北部地震との関係より密接といえる。また、液状化以外の地盤の沈下・陥没等の災害も繰返して起きていることがわかる。江戸地震での液状化発生地点数は少ないが、吹上げた砂が山をなし甚大なる堀もできたなど、関東地震の被害調査にある液状化表現より激しい地盤災害の記述が目立つ。関東地震に関する面接調査では、お年寄りの話から、“昔から、地震のたびに水田がだめになり米が穫れなくなったので、水田から畑に変えたとの言伝えがある(江戸川区の江戸川沿い)”などの情報が得られた。これらことから、江戸地震では激しい液状化が発生し、その発生地域も広範囲に及んでいたことが考えられる。

表-3から、東京湾北部地震と関東地震での液状化地点の比較を行うと(表-2 参照)、河川沿いの再液状化が目立つ。また、干拓地でも両地震で砂水の噴出を伴う液状化が発生している。特に、東京湾北部地震No. 13の葛西村に、江戸地震での液状化発生地点の桑川(D)を含めると、同一地域が3つの地震で液状化したことになる。ただし、若松<sup>15)</sup>の液状化履歴図では3つの発生地点が僅かにずれており、今後詳細な地点の調査が必要である。一方、埋立地を見ると東京湾北部地震では液状化しているが、関東地震では地割れのみで液状化の発生していない地点が多い。また、池や沼を埋立てた地点では東京湾北部地震で液状化したのが、関東地震では地割れのような地盤災害もほとんど発生していないことがわかる。

以上のことから、河川沿い・旧川筋において、江戸地震や東京湾北部地震で液状化の発生が確認された地域は、関東地震においてもほぼ例外なく液状化が発生しており、再液状化しやすいといえる。同様に干拓地でも再液状化が発生しやすい傾向が見られる。再液状化した地域の砂層の状態をみると、シルト質細砂から細砂で構成され、層厚は5m前後で標準貫入試験のN値はほぼ20以下を示している。N値は関東地震以降の値であることから、地盤は地震のたびに攪乱され締まらないと判断できる。一方、埋立地では経過年数の少ない新しい地盤が極めて液状化しやすいといえる。これは液状化した地域の砂層の状態が河川沿いの自然堆積地盤と大差ないことから理解できる。しかし、今回の調査から埋立地

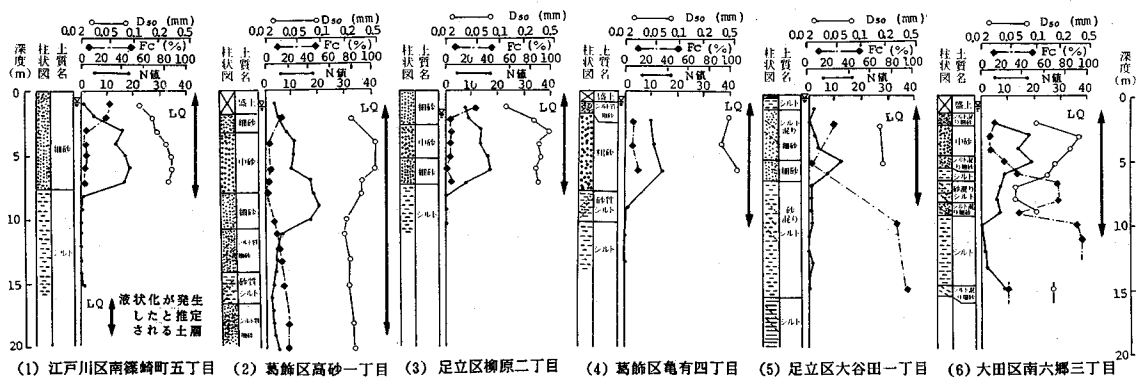


図-4 河川沿い自然地盤の液状化発生地域の柱状図

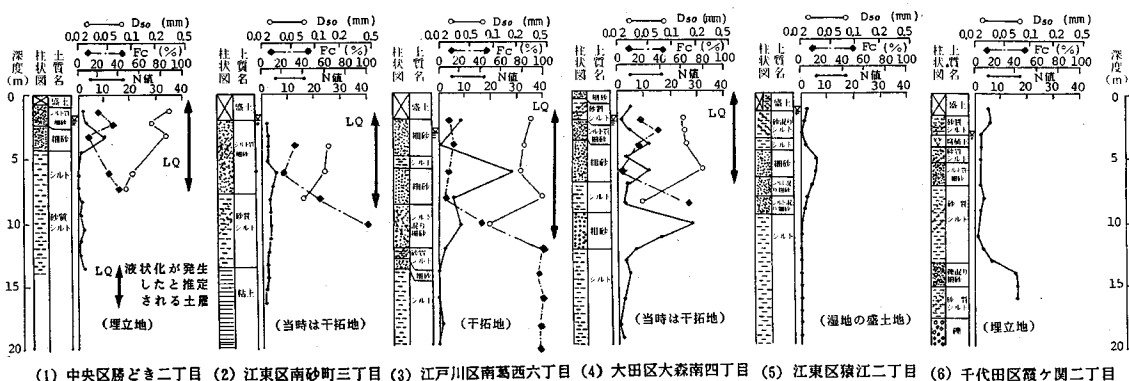


図-5 埋立地・干拓地の液状化発生地域の柱状図

は河川沿い以外の地盤に比べて液状化しやすいものの、経過年数が長く、かつ、地震の履歴を受けるたびに安定化に向くと判断できることから、再液状化を起こしにくい地盤といえる。ただし、安定化の程度については不明な点も多く今後の研究課題とした。

#### 4. 東京低地の液状化特性

##### (1) 液状化発生・非発生地域の微地形の特徴<sup>4)</sup>

1970年に発行された国土地理院の微地形図である土地条件図<sup>27)</sup>と関東地震液状化履歴図<sup>26)</sup>を数値情報化した上で重ね合わせ、東京低地における液状化発生地域・非発生地域を判例ごとに面積集計した<sup>13)</sup>。

液状化が発生しやすい微地形は頻水地形、旧水面上の盛土地・埋土地・旧河道、干拓地となった。前述したように、今回再液状化の発生も確認されたことから、これらの微地形区分では地震動による液状化時の再攪乱が起きやすいと考えられる。一方、液状化が発生しにくい地形は砂(礫)州・砂(礫)堆、氾濫平野との結果が得られた。

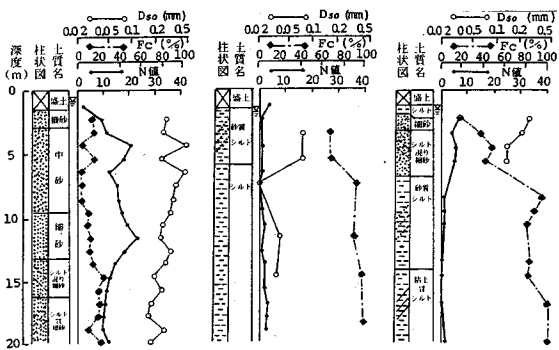
##### (2) 液状化発生・非発生地域の地質・土質の特徴

河川沿いの自然地盤および湾岸の埋立地・干拓地

の液状化発生地域内にあるボーリング柱状図から、表層砂層のN値と粒度試験のデータが揃い、かつ、その地域の地盤特性を代表すると判断できるものを選び、それぞれ図-4、図-5に示す。図中の○印は $D_{50}$ で平均粒径(mm)、◆印は $F_c$ で細粒分含有率(%), ●印は標準貫入試験のN値である。また、液状化層(LQと表示)を矢印で示したが、これは関東地震を想定した著者らの簡易法に基づく液状化解析<sup>4)</sup>結果と液状化履歴調査から得られた地盤災害の状況を総合して推定したものである。

河川沿いにある自然堆積地盤の液状化発生地域のうち、図-4の(1)~(5)は関東地震で噴砂・噴水が生じた地域の柱状図である。(6)は関東地震で噴砂・噴水の情報は確認できなかったが、堤防が大きく陥没・崩壊し、護岸が流失した地域である。(3)と(6)の地域では、東京湾北部地震で砂水が噴出している。また、(4)と(5)の地域では江戸地震において激しい噴砂・噴水、陥没が生じた。

昔の利根川の川筋および江戸川沿いの地域は関東地震で広範囲に液状化が発生している。これら液状化発生地点の砂層は、図-4(1)~(5)と表-1のGとI、表-2のNo.4とNo.5にそれぞれ示したように、N値が10~20以下の細粒分の少ない細砂~中砂で比較的厚く堆積している。同様な傾向は、荒川沿いと多



(1) 青森県青戸二丁目 (2) 荒川区西尾久六丁目 (3) 江戸川区船堀二丁目

図-6 液状化非発生地域の柱状図

摩川沿いの液状化発生地域の砂層でもみられ、河川沿いの自然地盤の液状化発生地域では表層の砂層が厚く、かつ、細粒分が少なく粒径は比較粗い場合が多い。また、液状化発生地域の砂層のN値は必ずしも小さいとは限らないことが特徴といえる。

埋立地・干拓地の液状化発生地域のうち、図-5 (1)~(4)は関東地震で噴砂・噴水が生じた地域である。(3)は江戸地震と東京湾北部地震でも広範囲にわたり砂水が噴出した地域である。(5)は砂水が噴出した記録はないが、江戸地震で一丈ほどの庭の築山が地中に陥没し、東京湾北部地震と関東地震でも広範囲にわたり地盤が沈下した地域の柱状図である。(6)は関東地震で液状化は発生しなかったが、江戸地震で地割れや地中から水が川のごとく出るなどの地盤災害が生じた地域である。埋立地・干拓地では、図-5 (1)~(4)に見られるように、砂層であっても細粒分が多くN値が極めて小さいために液状化が発生したと考えられる。特に、埋立地ではこの傾向が強く、シルト系に属する地層が液状化している可能性もある。(5)ではN値が1~6の細粒分を含む細砂層の上に、N値が0~2である砂質シルトが約3m堆積しており、また、細砂層の下にはN値が0のシルト層が厚く堆積している。このような堆積環境から、細砂層の液状化、あるいはシルト層も含めた地盤強度の低下が生じ、築山の地中への陥没や地盤の沈下が発生したと考えられる。(6)ではN値が2以下の砂質シルトとシルト質細砂が厚く堆積しているが、表層はロームの盛土で覆われているため液状化しやすい地盤とは考えられず水道被害であったと判断できる。

埋立地以外地域で江戸地震と東京湾北部地震、関東地震で液状化が発生しなかった地域の柱状図を図-6 (1)~(3)に示す。(1)には、細粒分を含まない細砂~中砂層が厚く堆積しているが、図-4に示した近隣の液状化発生地域の自然地盤に比べて砂層のN値が大きく、締まった地盤と判断できる。(2)はN値が小さく、細粒分を多く含む軟弱なシルト系の地盤であるため液状化は起きていない。しかし、盛土より下の砂質シルト層の平均粒径は0.047mmを示し、道路橋示方書<sup>28)</sup>の液状化対象層には含まれることを

示している。(3)を図-4の自然地盤と比較すると、N値は小さいが細粒分を多く含むことがわかる。一方、図-5の埋立地での液状化発生地域と比較しN値は僅かながら大きい。

図-4~図-6に示した液状化発生・非発生地域の柱状図から、東京低地の自然堆積地盤では砂層中の細粒分が少ないほど液状化および再液状化しやすいといえる。すなわち、細粒分の大小が液状化の発生を大きく左右していると判断できる。

## 5. 細粒分を含む自然堆積地盤の液状化特性

### (1) 液状化強度特性

東京低地の自然堆積不攪乱土の非排水繰返し三軸試験(以下、液状化強度試験と呼ぶ)において、有効拘束圧 $\sigma'_0$ と有効上載圧 $\sigma'_v$ との応力比を $K_C$ としたとき、 $K_C (= \sigma'_0 / \sigma'_v) \geq 1.0$ の条件であっても $K_C$ が大きくなるに従い、液状化強度応力比 $R_L$ は小さくなる<sup>4), 29)</sup>。ここでは、 $K_C = 0.75 \sim 1.25$ 、 $\sigma'_0 = 0.75 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2 (1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa})$ の試験条件のデータだけを採用し、細粒分を多く含む自然堆積不攪乱土の液状化特性について検討する。なお、「東京低地の液状化予測<sup>4)</sup>」に用いた液状化試験値を過去の調査結果と呼び、発表後に得られた試験値を今回の調査結果と呼ぶ。今回の調査結果は主に足立区と荒川区内から不攪乱状態で採取した試料の液状化試験結果をさす。

東京低地全域の自然堆積地盤から採取した不攪乱土の液状化試験結果では、 $R_{L(20)}$ と実測された採取試料の相対密度 $D_r$ の関係は、細粒分の含有量によらず $R_{L(20)} / D_r$ が0.40とほぼ一定の値となる<sup>29)</sup>。また、N値から推定される原位置相対密度 $D_r^* (= 21 \cdot \sqrt{N / (\sigma'_v + 0.7)})$ と $D_r$ との関係は、細粒分含有率 $F_C$ が5~10%以下に限り $D_r^* = D_r$ が成り立つ<sup>29)</sup>。これは、N値を使って地盤の液状化強度 $R_L$ を推定する場合、細粒分の含有量によって $R_L$ が大きく変わることを意味する。

このことから、 $R_L$ を次式で推定できるとした<sup>29)</sup>。

$$R_L = R_1(N, \sigma'_v) + R_2(D_{50}) + R_3(F_C) + R_4(\sigma'_v) \quad (1)$$

過去と今回の調査結果から、 $DR_L (= R_{L(20)} - R_1)$ と $D_{50}$ ならびに $F_C$ との関係を求め、図-7と図-8に示す。図-7によると、 $D_{50}$ のみの補正では $DR_L$ のばらつきは大きい、図-8から $F_C > 50\%$ については、 $F_C$ だけでも $DR_L$ を近似できることがわかる。図-8の $F_C > 50\%$ の範囲で $DR_L$ を表すと次式のようになる。



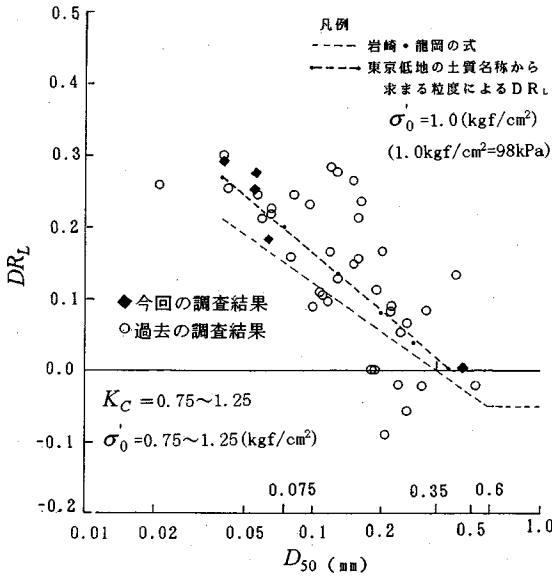


図-7  $DR_L$  と  $D_{50}$  との関係

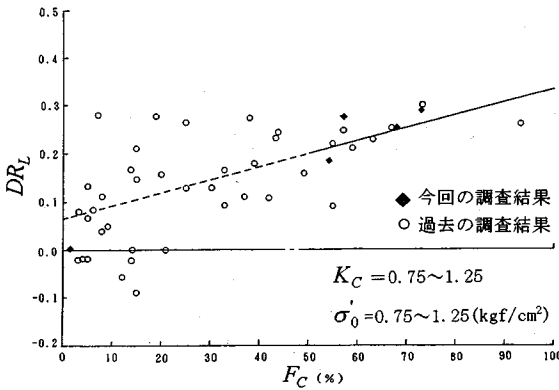


図-8  $DR_L$  と  $F_C$  との関係

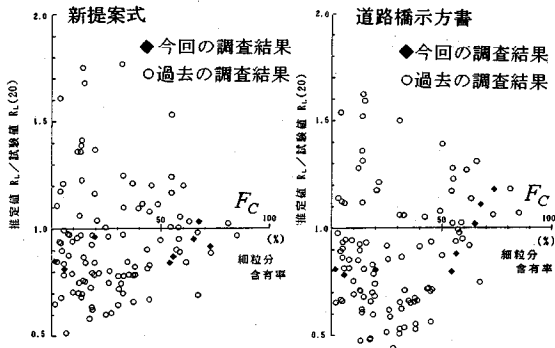


図-9 新提案式ならびに道路橋示方書の推定値と試験値の比較

$$DR_L \approx 0.0027 F_C + 0.065 \quad (2)$$

$F_C \leq 50\%$ については粒度による補正項として式(1)

に示す  $R_2$  と  $R_3$  を含める. ここでは,  $F_C = 50\%$  で式(2)と式(1)で  $R_L$  が同じ値を示すように推定式に連続性をもたせること, 浅層での予測値を若干小さな値に抑えることなどを配慮して式(1)に示す  $R_2$  と  $R_3$ ,  $R_4$  の各係数に若干の修正を加えた. 以下に示す式(3)と式(4)を砂質土および細粒分を含む自然堆積地盤の液状化強度の推定式とした. この式を文献(29)に示した提案式に対して新提案式と呼ぶことにする.

$$0.075 \leq D_{50} \leq 0.50 \text{mm}$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N / (\sigma'_v + 0.7)} + 0.21 \log_{10} (0.2 / D_{50}) + 0.065 \log_{10} (F_C + 1) - 0.065 \log_{10} \sigma'_v \quad (3)$$

$$D_{50} > 0.50 \text{mm}$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N / (\sigma'_v + 0.7)} - 0.084 + 0.065 \log_{10} (F_C + 1) - 0.065 \log_{10} \sigma'_v \quad (4)$$

式(2)~(4)による液状化強度の推定値  $R_L$  および道路橋示方書の推定値  $R_L$  と液状化試験値である  $R_{L(20)}$  の比  $R_L / R_{L(20)}$  を  $F_C$  (%) との関係で整理し図-9に示す. 図から, 両手法ともに推定値と試験値との関係にはばらつきが見られるが, 新提案式は道路橋の式より僅かながら試験値に近い値を示している. 細粒分含有率  $F_C$  が 10~15% 以下と小さい場合には両式とも試験値に近い値を示す. 細粒分が多くなると,  $F_C$  が 50~60% 以下までの範囲では新提案式による推定値は道路橋示方書式の推定値より大きく,  $F_C$  が 50~60% 以上のシルト系の試料については逆に前者は後者より値が小さくなる傾向がある.

全体的に新提案式による推定値は試験値より若干小さい値を示す. 特に, 細粒分を多く含む砂質土に関して道路橋示方書の式は試験値との差が大きく, 新提案式は適切な推定値を示すと判断できる.

ところで, ゆるい砂層から不攪乱砂試料を採取した場合, 試料が締めり強度を大きくする可能性が高い. 一方, 密な地盤から不攪乱試料を採取すると試料に乱れが生じ, 一般に液状化強度は小さくなる. このため, 密な地盤の液状化強度の推定に対しては, 原位置凍結試料の液状化試験の研究<sup>30)</sup>や従来からの密づめ砂の実験研究の成果をふまえて式(2)~(4)を補正する必要がある.

砂を用いた液状化試験で,  $R_L$  は相対密度  $D_r$  と一意な関係を示し,  $D_r$  が小さくゆるい範囲では  $R_L$  は  $D_r$  に比例する. 一方, 龍岡<sup>31)</sup>や国生<sup>32)</sup>は,  $D_r$  が 60% 以上と密になると  $R_L$  と  $D_r$  の比例関係が崩れ,  $R_L$  は  $D_r$  の増加に伴い急激な上昇カーブをたどることを指摘している. ただし, これらの実験研究は細粒分を含まない攪乱された密づめ砂を対象としてい

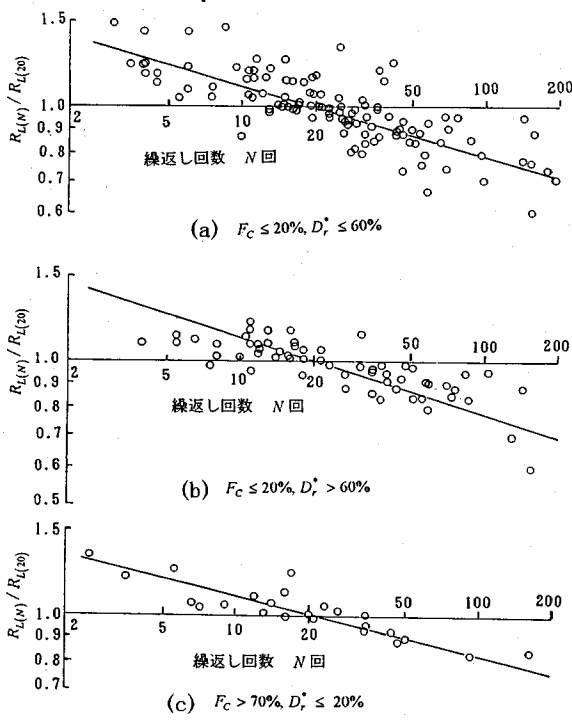


図-10  $R_{L(N)}/R_{L(20)}$  と  $N$  との関係

る。

ここでは、式(2)~(4)を密づめ砂に適用させるため、密な砂層( $D_r^* \geq 60\%$ )に限り、國生らが提案した密づめ砂の液状化強度式<sup>32)</sup>を使い、 $D_{50}$ に関する補正項を除いたものを(1)式の $R_1$ と考え、さらに軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ 、等価繰返し回数 $N_{eq}=20$ での國生らの定数項を代入して次式で表わした。

$$R_1 = 0.0676 \left[ \sqrt{\frac{1.7N}{(0.7 + \sigma'_v)}} + \left\{ 0.0368 \cdot \frac{1.7N}{(0.7 + \sigma'_v)} \right\}^{4.52} \right] \quad (5)$$

(2) 細粒分を多く含む自然堆積地盤の動的土質定数

a) 液状化強度と繰返し回数の関係  
 20回の繰返し回数で、軸ひずみ両振幅 $DA$ が5%に至るときの液状化応力比を $R_{L(20)}$ とし、 $N$ 回で $DA=5\%$ に至るときの液状化応力比を $R_{L(N)}$ とする。 $K_c=0.75 \sim 1.25$ の試験条件での液状化試験から、 $R_{L(N)}/R_{L(20)}$ と $N$ の関係を両対数座標上にプロットしてその傾きを求めた。

細粒分含有率 $F_c$ が20%以下の細砂で、標準貫入試験での $N$ 値と $\sigma'_v$ から求まる原位置相対密度 $D_r^*$ が60%以下のゆるい試料の $R_{L(N)}/R_{L(20)} \sim N$ 回との関係を図-10 (a)に、 $D_r^* > 60\%$ の密な試料について図-10 (b)に示す。図の(a)と(b)を比べると、僅かである

が相対密度が大きくなると $R_{L(N)}/R_{L(20)} \sim N$ の勾配 $a$ は急になる傾向が見られる。 $F_c > 70\%$ のシルト系試料の $R_{L(N)}/R_{L(20)} \sim N$ の関係を図-10 (c)に示すが、勾配 $a$ は緩くなる傾向がある。細粒分含有率 $F_c$ と相対密度 $D_r^*$ の大小で試験データを区分し、得られた勾配の逆数で標準的な $\eta (=1/a)$ を求め表-4に示す。

b) 累積過剰間隙水圧と繰返し回数との関係

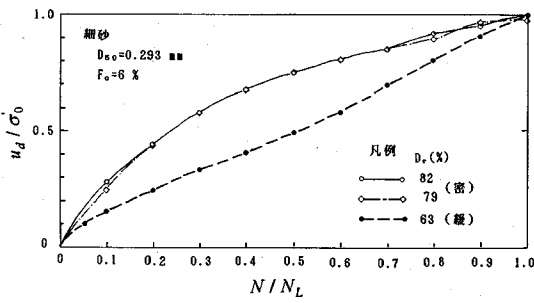
軸応力を変動させる振動三軸試験では、測定される間隙水圧に変動軸応力の平均主応力分が含まれ、繰返しせん断応力による累積過剰間隙水圧は変動軸応力の平均主応力を測定水圧から除去した値となる。また、この試験では圧縮側と伸張側で応力~ひずみ関係に対称性が失われこと、さらに繰返し回数が速い試験では圧縮側と伸張側で変動応力が一致しない場合もある。一方、繰返し中空ねじりせん断試験では、これらの要因が含まれないため、地盤内応力に近い条件の試験が可能である。ここでは、著者が東京低地の液状化予測<sup>4)</sup>や都内緩傾斜堤防<sup>33)</sup>の建設計画に際して行った自然堆積地盤を対象とした中空ねじりせん断試験の結果を採用し、液状化に至るまでの累積過剰間隙水圧の発生特性を求める。

中空ねじりせん断試験では、非排水条件を考慮するとせん断ひずみ $\gamma$ は軸ひずみ $\varepsilon$ の1.5倍になる。中空ねじりにおいて $N_L$ 回の繰返し回数でせん断ひずみ振幅 $\gamma DA$ が、振動三軸の軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ に相当する7.5%に達したときを液状化とみなし、液状化に至る繰返し回数比 $N/N_L$ と累積過剰間隙水圧比 $u_d/\sigma'_0$ との関係を求める。 $u_d/\sigma'_0 \sim N/N_L$ の関係は、同一物性の試料であっても $N_L$ の大きい試験の方が、同一 $N/N_L$ に対し $u_d/\sigma'_0$ が若干大きくなる傾向が見られた。ここでは $N_L=10 \sim 40$ 回の試験値だけに注目し、 $u_d/\sigma'_0 \sim N/N_L$ 関係を求めた。

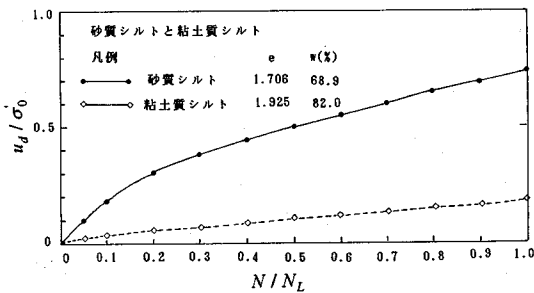
細粒分の少ない細砂、砂質シルトと粘土の試験結果を図-11(a), (b)に示す。(a)によると、密な砂は少ない繰返し回数比で水圧上昇が大きくなる傾向を示し、ゆるい砂は繰返し回数が増えるに従い水圧が急増する傾向を示す。一方、(b)によると、繰返し回数比 $N/N_L$ が増加するに従い緩やかに $u_d/\sigma'_0$ は上昇するが、 $\gamma DA=7.5\%$ では $u_d/\sigma'_0$ は70%前後にとどまり水圧は有効拘束圧に至らない。粘土では $u_d/\sigma'_0$ は20%以下にとどまっている。これらの試験結果をSeedら<sup>34)</sup>の $u_d/\sigma'_0 \sim N/N_L$ 関係式に照らし合わせて過剰間隙水圧上昇のパラメータ $\xi$ を決定し前掲した表-4に追加した。また、表-4には過剰間隙水圧比の設定最大値と有効応力表示した内部摩擦角ならびに変相角の標準値を示した。

表-4 東京低地の土質パラメータの標準化

土質名称	疎密の状態 Dr* (%)	10m以浅 N値	10m以深 N値	$\eta$ (i/a)	$\epsilon$	$u_d/\sigma'_v$ の 設定最大値(%)	有効応力表示 $\phi'(^{\circ})$ $\phi_{cm}(^{\circ})$	
細砂～中砂	緩い < 60	< 10	< 15	-7.0	1.5	100	40	28
	密 60～80	10～20	15～25	-6.0	2.5	100	42	28
	極めて密 > 80	> 20	> 25	-5.0	3.0	100	44	28
シルト混じり細砂 ～シルト質細砂	緩い $\leq 40$	$\leq 5$	$\leq 10$	-6.5	2.0	100	40	28
	密 > 40	> 5	> 10	-5.5	2.0	90	41	28
砂質シルト～ 砂混じりシルト	緩い $\leq 30$	$\leq 2$	$\leq 3$	-7.0	1.5	80	38	28
	密 > 30	> 2	> 3	-6.5	1.5	70	39	28
シルト	緩い $\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 2$	-7.5	0.7	50	38	28
	密 > 1	> 1	> 2	-7.0	0.7	40	39	28
粘土				-7.5	0.5	20	38	28



(a) 細砂



(b) 砂質シルトと粘土質シルト

図-11  $u_d/\sigma'_0$  と  $N/N_L$  との関係

## 6. 動的有効応力解析プログラムを用いた再液状化発生地点と非発生地点の液状化解析

### (1) 液状化解析プログラム“EFFCTD”

液状化性土盤の地震応答解析では、土盤の剛性と減衰定数のせん断ひずみ依存性ならびに過剰間隙水圧の発生・消散を考慮する必要がある。等価線形法に代表される全応力解析法では直接、過剰間隙水圧を求めることができないため、有効応力理論を時刻歴解析に導入した直接積分法が有力な手段となる。ここでは、著者ら<sup>35),36)</sup>が開発した“EFFCTD”と呼ぶ有効応力理論に基づく液状化解析プログラムを使い再液状化発生・液状化非発生地点での最大加速度応答値と過剰間隙水圧比を求め、それぞれの地点の

液状化特性を調べた。

“EFFCTD”は履歴関数モデル(例えば修正R-0モデル)とSeedらの過剰間隙水圧上昇のパラメータ $\xi$ を室内液状化試験から求める一相系の非線形弾性法プログラムである。ある時刻の水圧上昇は非排水条件下で求め、さらに同一時刻において浸透流解析の境界条件を与えて水圧の消散を求めている(ただし、今回は水圧の消散を無視している)。この手法は弾塑性解析法に比べて解の厳密性には欠けるが、単純な構成式ながら盛土を対象とした液状化振動台実験結果の二次元解析においても、かなりの解析精度をもつことが確認されている<sup>35)</sup>。

### (2) 解析地点の選択

再液状化発生地点として、江戸と東京湾北部、関東の各地震において液状化の発生が確認された江戸川区の桑川神社(図-2に示したDおよびNo. 13付近)から西に約0.3km離れた位置の既存ボーリング資料(同区中葛西二丁目)を液状化支援システムから選択した。資料が直近でないことに問題は残るが選択基準として、周辺の柱状図を代表するもので、砂層内に物理試験値があること、砂層のN値が極端に小さくないこと、盛土・表土が厚くないこととした。一方、非発生地点のモデルには中葛西二丁目の北東約2.5kmにある江戸川区東瑞江二丁目を選んだ。選択基準は、再液状化発生地点にできるだけ近い非発生地点であること、砂層のN値が極端に大きくないこととしたが資料は少なく、砂層のN値はやや大きい可能性もある。同地点は、関東地震での液状化非発生地域と井戸水に濁りの発生した地域との境界付近となるが、他の地震での被害の有無は不明である。

### (3) 基盤入力最大加速度振幅と地震波形

江戸と東京湾北部、関東の各地震での地震規模が再液状化ならびに非液状化現象に与えた影響を考慮するため、各地震ならびに解析地点ごとの最大加速度振幅と時刻歴波形を設定した。3つの地震についての基盤最大加速度振幅は、以下に示す神山<sup>37)</sup>の基盤での最大地動アテニュエーション算定式から最大加速度  $a_{max}(i, M, r)$  gal を計算した。

$$a_{\max}(i, M, r) = 518.9 \times AMP_i(a) \quad (6a)$$

$$\text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M})$$

$$a_{\max}(i, M, r) = 547.6 \times 10^{0.358M-1.64 \log_{10} r} \times AMP_i(a) \quad (6b)$$

$$\text{for } (r > 10^{0.014+0.218M})$$

ここで、 $M$ はJMAマグニチュード、 $r$ は震源距離(km)、 $i$ は観測点番号である。なお、 $AMP_i$ は1とした。

地震時刻歴波形の選択では、都市直下型地震と判断できる江戸地震と東京湾北部地震について、前者には川瀬と林<sup>38)</sup>が作成したN32Wと呼ぶ兵庫県南部地震での神戸海洋気象台地表加速度時刻歴波形を基盤加速度時刻歴波形に変換したものを使用した。後者には東京都防災会議が検討資料に用いた経験的グリーン関数による巨大地震動波形(微小地震動には防災科学技術研究所の埼玉県岩槻観測所2000m級観測井で記録された $a_{\max}=6.47\text{gal}$ 、 $M=4.1$ を使用)を利用した。一方、遠距離巨大地震であった関東地震については、森岡<sup>39)</sup>が本郷構内の1倍ユーイング地震計から再現した加速度時刻歴の内20秒付近の波形をSHAKE<sup>40)</sup>で本郷の基盤に戻した波形とした。さらに、余震(本震の約1分後)を評価する目的から、本解析では同一時刻歴波形を2回繰り返して入力した(1つの地盤に同一最大加速度振幅を2回作用させる)。解析に使用した3つの入力解放基盤加速度時刻歴を図-12(a), (b), (c)に示す。

#### (4) 解析条件

ボーリング資料を数値化処理した後の再液化化地点の柱状図を図-13(a)、非液化化地点を図-14(a)に示す。これらの柱状図を基に、地盤は水平であり一様な層状でかつ非排水条件を満たすと仮定して、FEM一次元平面ひずみ要素モデルを作成した。また、地下水位ならびに各地盤定数は3つの地震に対して変化していないと仮定した。地下逸散減衰を評価するため工学的基盤面には粘性ダンパを使い、解放基盤加速度 $2E$ (入射加速度 $E$ の2倍の値)を作用させた。なお入力基盤面は $N$ 値が50以上の洪積層上面とした。ただし、再液化化地点では基盤が確認できないため、近隣の柱状図を参考にして入力基盤面を設定した。

側方境界には、左右のX、Y方向の変位を等しくするようにタイニングを行った。過剰間隙水圧は解析モデルの地下水位以下で発生するものとし、地下水位より上では動的応力~ひずみ関係の非線形性だけを考慮した。

直接積分法には中央差分法を使い、時間刻みは解の発散を防ぐためテストランを行い、入力地震波時間増分の1/10以下とした。さらに解析の安定性を保つため全層にレーレー減衰を作用させ、 $\alpha=0.0$ 、 $\beta=0.0005$ を与えた。

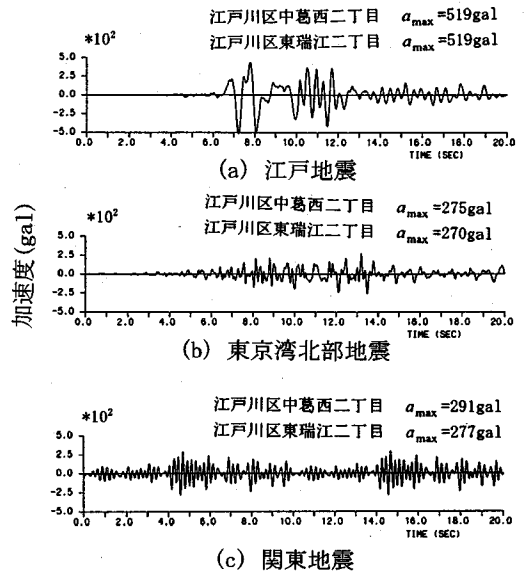


図-12 入力地震波形

#### (5) 使用した土質定数

有効応力解析に先立って初期応力を決定した。地点ごとの標準貫入試験の $N$ 値と単位体積重量 $\gamma_i$ からせん断波速度 $V_s$ を想定し、ポアソン比 $\nu=0.333$ のヤング係数 $E$ を求め線形自重解析を行った。なお、 $V_s$ は東京低地の液化化予測<sup>4)</sup>の方法を利用した。

“EFFCTD”に用いる有効応力解析用のパラメータとして、液化化強度に関しては式(2)~(5)を利用し、内部摩擦角や変相角等の強度パラメータ、水圧上昇特性は表-4から決定した。動的応力~ひずみを規定する修正R-0モデルの非線形パラメータ( $\alpha'$ 、 $\beta$ )や最大減衰定数 $h_{\max}$ は、東京低地の液化化予測<sup>4)</sup>に使用した減衰定数 $h$ ~せん断ひずみ $\gamma$ 曲線を土質名称と平均有効応力 $\sigma'_m$ から選んだ。

#### (6) 解析結果

“EFFCTD”から得られた再液化発生地点での最大加速度応答値 $a_{\max}$ と過剰間隙水圧比 $u/\sigma'_v$ 、江戸地震での地表面加速度振幅時刻歴、3つの地震での要素8(深度7.25m)の $u/\sigma'_v$ 時刻歴について、それぞれ図-13(b), (c), (d), (e)に示す。同様に液化化非発生地点の計算結果を図-14(b), (c), (d), (e)に示す。ただし、図-14(e)に示した $u/\sigma'_v$ の時刻歴は要素4(深度2.90m)の値である。

図-13(b)から、加速度振幅が大きく低下するのは5.5m~12.7mの軟弱なシルト層であり、江戸地震での低下範囲が特に大きい。振幅の最低値は5.5m位置であり、3つの地震入力に共通した結果となった。それより上部の砂層では振幅が一律に増加している。

図-13(c), (e)から、初期液化化発生水圧比のレベ

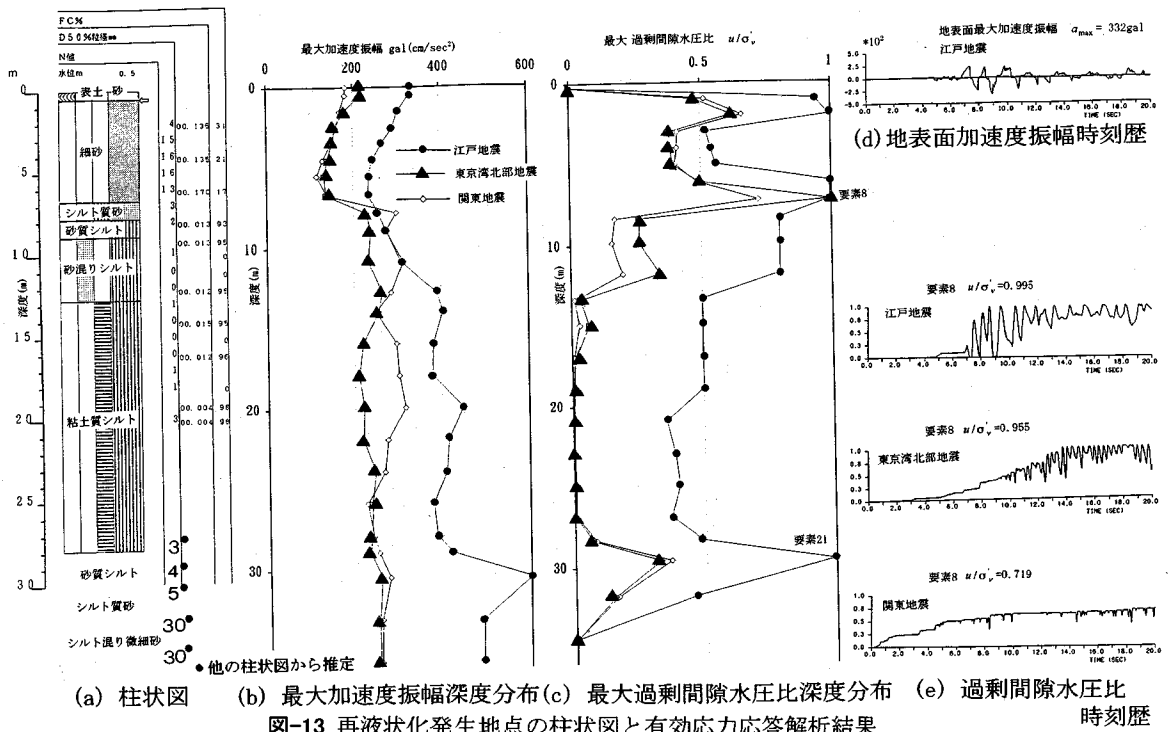


図-13 再液化発生地点の柱状図と有効応力応答解析結果

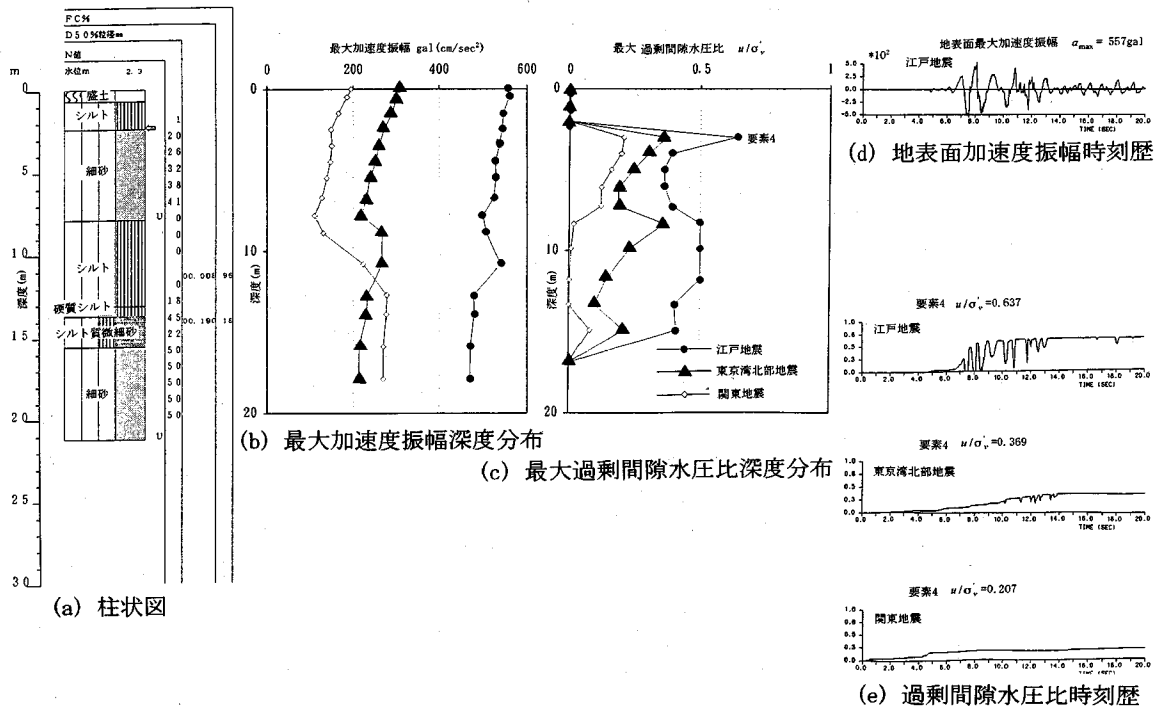


図-14 液状化非発生地点の柱状図と有効応力応答解析結果

ルを0.6以上と考えれば、深度7.25mのシルト質砂層 ( $R_L=0.277$ )で3つの地震に共通して液状化が発生していると判断できる。特に、江戸と東京湾北部地震では水圧比が0.99以上を示しており完全液状化状

態といえる。図には示していないが、同要素の最大せん断ひずみは江戸で4.7%、東京湾北部で1.6%、関東で0.48%との結果を得ており、江戸と東京湾北部地震において過大な変形が生じたと考えられる。ま

た、同層より上位にあるごく浅い位置の細砂層(深度2.0m)では、江戸地震で0.99以上を示し噴砂・噴水が十分考えられる。また、東京湾北部と関東地震でも同層は0.65前後を示し、噴砂・噴水には至らないが地盤は弱体化していると判断できる。一方、深度29.5m付近のシルト質砂層( $R_L=0.233$ )でも、江戸地震で水圧比が0.99以上を示した(同要素の最大せん断ひずみは6.4%)。従来から言われている液状化発生限界深度20mに対してかなり深い位置での液状化現象を示している。兵庫県南部地震でもポートアイランドにおいて40m付近の深度で液状化に近い状況となったことが知られており、今回の解析のように、震源が浅く、その直上地点という条件が揃えば、かなり深い位置での液状化の可能性もあると判断できる。

非発生地点モデルである図-14(b)から、9~11mの軟弱なシルト層で最大加速度振幅が低下するが、それ以浅の硬質な砂層では増幅する傾向を示す。

図-14(c), (e)から、発生水圧比の深度分布では、深度2.9mの細砂層( $R_L=0.506$ )において、入力加速度振幅が最も大きい江戸地震では約0.65まで水圧上昇を示し初期液状化状態を示した。しかし、最大せん断ひずみが0.2%程度であること、同要素(e)に示した発生水圧比の時刻歴と再液状化発生地点の図-13(e)との比較から、解析から得られた非液状化地点での水圧上昇量は少ないといえる。一方、東京湾北部と関東地震での水圧比は0.5以下であり、解析結果から液状化していないと判断できる。

以上のことから、今回の解析結果は再液状化発生・液状化非発生地点の状況をおおむね再現していると判断できる。また、3章で述べたように江戸地震の被災状況が関東地震を上回っているとの判断についても、本解析結果とは矛盾していない。

## 7. まとめ

東京低地を対象として過去の地震被害記録にある液状化現象の記述を整理し、再液状化現象の存在を調べた。その結果、東京低地では遺跡をはじめとして元禄、江戸、東京湾北部、関東の各地震で液状化が発生していたことが確認できた。液状化発生地点・地域の相互比較から、江戸地震で液状化した大部分の地域では関東地震においても再度液状化現象が発生していることがわかった。また、液状化以外の沈下・陥没等の地盤災害も繰返して起きていることがわかった。東京湾北部地震での河川沿い及び干拓地の液状化発生地域は関東地震でも再液状化している。一方、埋立地では、東京湾北部地震や関東地震において埋め立て間もない場所で液状化や地割れという地盤破壊に伴う災害が起きている。しかし、東京湾北部地震で液状化の発生が見られた地点でも、関東地震では地割れのみで砂水の噴出を伴う液状化は発生していない。経過年数の少ない新しい埋立地は極めて液状化しやすい一方で、経過年数が進み地

震履歴を受けることで安定化が進み、埋立地は自然地盤に比べて再液状化を起こしにくいといえる。

液状化発生・非発生地点の地盤の特徴を微地形と地質・土質特性から考察した結果、自然堆積地盤では細粒分含有量の大小が液状化強度に強く影響することがわかった。また、動的試験結果から、細粒分と有効拘束圧の大小に着目した液状化強度推定式の提案を行うことができた。さらに細粒分含有量の違いが過剰間隙水圧上昇特性に及ぼす影響を実験結果から示すことができた。

得られた液状化強度推定式と過剰間隙水圧上昇特性を使った有効応力理論に基づく液状化解析を再液状化発生地点と液状化非発生地点で行い、解析結果が液状化発生・非発生の区分に有効であることを示した。

今後は、得られた再液状化の知見を液状化対策に活かし、安全に暮らしていける東京のまちづくりを推進していきたい。最後になりますが、論文をまとめるにあたって、多くの助言をいただいた東京都土木技術研究所の小川好博士、ならびに図面作成をお願いした森 洋氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 萩原尊禮編著：続古地震-実像と虚像, pp. 211-220, 東京大学出版会, 1989.
- 2) 宇佐美龍夫：新編日本地震被害総覧, pp. 59-60, 東京大学出版会, 1988.
- 3) 濱田正則, 安田進, 磯山龍二, 志本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, No. 376, pp. 211-220, 1986.
- 4) 東京都土木技術研究所：東京低地の液状化予測, 土質工学会, 1987.
- 5) 安田進：液状化の調査から対策まで, pp. 121-133, 鹿島出版会, 1988.
- 6) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Effect of Strain History on Liquefaction of Sand, *J. SMFD*, ASCE, Vol. 96, No. SM6, pp. 1917-1933, 1970.
- 7) 大原資生, 山本哲朗：振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 22, No. 2, pp. 123-132, 1982.
- 8) Sasaki, Y. and Taniguchi, E.: Shaking Table Tests on Gravel Drains to Prevent Liquefaction of Sand Deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 3, pp. 1-14, 1982.
- 9) Yasuda, S. and Tohno, I.: Sites of Reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-chubu Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 2, pp. 61-72, 1988.
- 10) 若松加寿江：わが国における地盤の液状化履歴と微地形に基づく液状化危険度に関する研究, 博士論文, pp. 40-42, 1993.
- 11) 寒川旭：遺跡の地震跡, 土と基礎, Vol. 40, No. 1, No. 40, pp. 13-18, 1992.
- 12) 葛飾区郷土と天文の博物館：新宿遺跡 I, 葛飾区郷土と天文の博物館考古学調査報告第3集, 1993.
- 13) 草野郁, 阿部博, 小川好, 中山俊雄：東京低地の液状化

- 予測, 土木学会論文集, 第418号/Ⅲ-13, pp. 95-104, 1990.
- 14) 東京新聞: 古代の下町液状化の巢, 8/31夕刊, 1995.
  - 15) 若松加寿江: 日本の地盤液状化履歴図, 東海大学出版会, p. 298, 1991.
  - 16) 佐山守: 安政江戸地震災害誌(上), (下), 東京都, 1973.
  - 17) 東京都江戸川区役所: 江戸川区史, pp. 622-630, 1955.
  - 18) 宇佐美龍夫: 東京地震地図, 新潮選書, pp. 71-205, 1983.
  - 19) 東京大学地震研究所: 新収日本地震史料, p. 442, 1985.
  - 20) 震災豫防調査会: 地震其他地異彙報, 震災豫防調査會報告, 3, 142-163, 1895.
  - 21) 土木学会: 大正12年関東地震震害調査報告, 第1巻~第3巻, (1984年復刻版, 雄松堂出版)
  - 22) 農商務省地質調査所: 関東地震調査報告, 1925.
  - 23) 震災豫防調査会: 関東地震調査報文, 地震篇, 震災豫防調査會報告, 第100号 甲, 岩波書店, 1925.
  - 24) 震害調査委員会編: 大正大震災震害及火害之研究, 1927.
  - 25) 渡辺久吉: 品川台場の震災, 地学雑誌 35, pp. 23-26, 1923.
  - 26) 草野郁: 関東地震における東京低地の液状化履歴, 土木学会論文集, 第406号/Ⅲ-11, pp. 213~222, 1989.
  - 27) 建設省国土地理院: 土地条件図, 東京東北部, 東京東南部, 東京西北部, 東京西南部, 1970.
  - 28) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1990.
  - 29) 草野郁: 細粒分を含む砂質地盤の液状化強度の推定法, 土木学会論文集, 第418号/Ⅲ-13, pp. 55-64, 1990.
  - 30) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makiyama, Y.: Undrained Cyclic Shear Strength of a Dense Niigata Sand, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 4, pp. 131-145, 1984.
  - 31) 足立紀尚, 龍岡文夫: 土木学会編, 新体系土木工学18, 土の力学(Ⅲ)-圧密・せん断・動的解析, 技報堂, 1981.
  - 32) 國生剛治, 吉田保夫, 長崎清: 密な砂地盤のN値による液状化判定法, 第19回土質工学研究発表会, pp. 559-562, 1984.
  - 33) Abe, H. and Kusano, K.: Measure to Prevent Liquefaction of Embankment, *Procs. of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development - Theory and Practice on Soft Ground-*, GEO-COAST '91, pp. 429-32, 1991.
  - 34) Seed, H. B., Martin, P. P. and Lysmer, J.: Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction, *J. GED, ASCE*, Vol. 102, No. GT4, pp. 323-346, 1976.
  - 35) Abe, H. and Kusano, K.: Shaking Table Tests for Sandy Ground with Embankment, *Procs. of the Fourth U. S. - Japan Workshop on Soil Liquefaction*, UJNR, PWRI, pp. 139-157, 1994.
  - 36) 阿部博, 草野郁: 水平地盤の液状化解析, 平2. 東京都土木技術研究所年報, pp. 293-306, 1990.
  - 37) 神山眞: 表層地盤条件による最大地動(最大加速度, 最大速度, 最大変位)の増幅特性について, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, pp. 126-137, 1994.
  - 38) 川瀬博, 林康裕: 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第480号, pp. 67-76, 1996.
  - 39) 森岡敬樹: 1923年関東大地震の地動, 日本建築学会論文報告集, 第289号, pp. 89-91, 1980.
  - 40) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE -- A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *Report of No. EERC 72-12*, UCB, 1972.

(1995. 12. 18 受付)

## GROUND RE-LIQUEFACTION IN HISTORICAL EARTHQUAKES IN THE TOKYO LOWLAND

Hiroshi ABE and Kaoru KUSANO

Known liquefaction sites were compared on the basis of survey results from ruins in Tokyo and of extant records for the historical earthquakes. The results have shown evidence to confirm that re-liquefaction has occurred. The properties of the liquefaction sites were assessed on the basis of topographical, geological and soil characteristics. The results indicate that the level of fines content in the alluvial deposit has a strong influence on the liquefaction. The results obtained from dynamic tests were evaluated to obtain the equation for the liquefaction resistance. An effective stress dynamic analysis has substantiated the usefulness of the characteristics in differentiating between re-liquefaction and non-liquefaction sites.