

東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害

安田 進¹, 原田 健二², 石川 敬祐¹

1 東京電機大学・理工学部

2 不動テトラ(株)・地盤事業本部技術部

概 要

2011年東北地方太平洋沖地震によって千葉県では大きな被害が発生した。その主な原因は液状化によるものであり、千葉県内で18,674棟の家屋が液状化によって被害を受けた。液状化は東京湾岸低地、利根川低地、九十九里平野の多くの箇所が発生した。東京湾岸低地では浦安市から千葉市にかけての埋立地で広い範囲で発生し、戸建て住宅、ライフライン、道路に甚大な被害を与えた。この地区における液状化被害にはいくつかの特徴があるが、1万棟を超す多くの戸建て住宅が大きく沈下・傾斜したことや、下水道管渠の継手はずれたりマンホール躯体がずれたり、埋設管にも特異かつ甚大な被害が発生した。これは液状化した後も大きく揺すられ続けたためではないかと考えられる。利根川低地では旧河道を埋めた所などで、また、九十九里平野では砂鉄を採掘して埋め戻した箇所などで液状化が発生した。

キーワード：地震被害、液状化、埋立地、砂質土

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では東北のみならず、関東でも茨城県、栃木県とともに千葉県が甚大な被害を受けた。特に、東京湾岸や利根川沿いで発生した液状化による戸建て住宅やライフラインの被害は深刻であった。また、太平洋沿岸では津波による被害も発生した。

地震発生から早や7か月経っているが、未だ液状化で沈下・傾斜した家屋の復旧は殆ど行われていない。また、ライフラインの本復旧もまだである。したがって、被災の実態もまだ把握できていないが、これまでにいくつか行われてきた調査をもとに、今回の地震における千葉県の被害の特徴と課題を述べてみる。

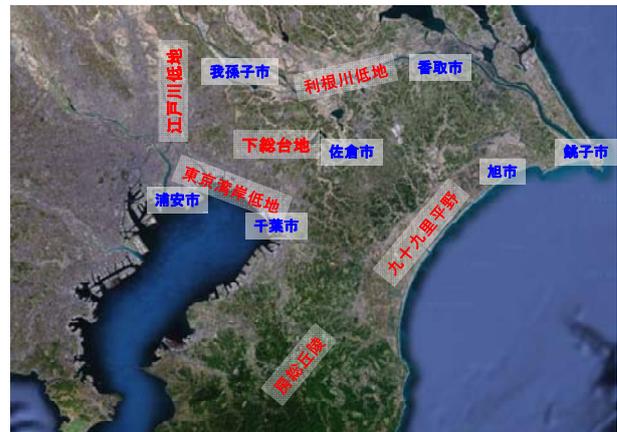


図1 千葉県の地形 (Google Map に加筆)

2. 千葉県の地形・地質および被害の概要

図1に示すように、千葉県には北部の下総台地と南部の房総丘陵があり、これらを囲むように北部の利根川低地、東部の太平洋沿岸の九十九里平野、西部の東京湾岸低地、北西部の江戸川左岸沿いの低地が分布している。最高峰は房総丘陵の愛宕山であるが高さは408mしかない。

下総台地は更新世の成田層群から成り、表層は関東ロームで覆われている。台地を刻む谷底低地が多く発達しており、谷底低地には軟弱層が堆積している。

利根川低地には上流から谷底平野、氾濫平野、三角州の平野が分布している。かつて利根川が蛇行して流れていた跡の旧河道が随所にみられる。入り江が埋められた手賀沼

や印旛沼も存在している。九十九里平野は幅約10kmの広い海岸平野であり、海岸線に平行して砂堤列と堤間湿地が交互に並んでいる。東京湾岸低地は東京湾に注ぐ江戸川、養老川などの三角州や、市川市から千葉市にかけては下総台地の海食崖の下に砂州が発達している。かつて遠浅の砂浜海岸が続いていたが、近年浦安市から富津市にかけて広い範囲で埋め立てが行われてきた。江戸川低地は川に沿った最大3km程度の狭くて長い沖積低地である。

今回の地震ではこれらの低地の多くで液状化が発生した。地盤工学会では国土交通省関東地方整備局からの委託を受け、関東地方の液状化発生地点の拾い出しを行った¹⁾。そのうち千葉県内の液状化発生箇所を図2に示す。各地区の詳細は後述するが、液状化発生地点を地形から分類し代

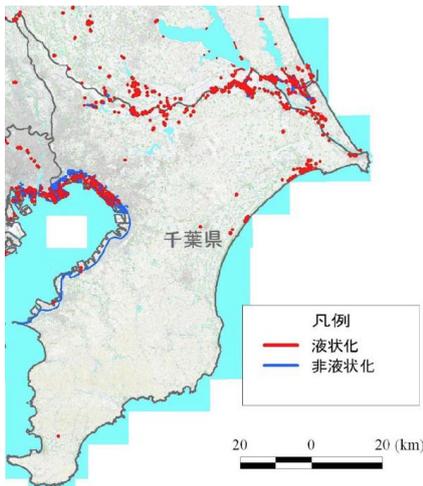


図2 液状化発生箇所¹⁾

表1 液状化発生箇所の地形による分類

分類	主な地区
海岸の埋立地	浦安市～千葉市
平野の川、池などの埋立地	香取市、我孫子市
河川堤防の基礎地盤や堤体	利根川の堤防
砂鉄を採取するために掘削し埋め戻した土	旭市
水田などの盛土地	佐倉市

表2 建物被害数
(千葉県による)

市、町	建物被害数		
	全壊 (棟)	半壊 (棟)	一部損 壊(棟)
旭市	318	844	2,104
我孫子市	135	54	430
香取市	93	1,985	1,605
山武市	43	428	230
佐倉市	30	95	766
銚子市	24	121	1,938
千葉市	20	614	1,087
富里市	12	6	261
印西市	11	56	863
浦安市	10	3,614	4,917
栄町	10	89	414
船橋市	9	26	630
習志野市	9	678	3,799
市川市	9	8	267
松戸市	8	132	1,187
八千代市	6	11	674
横芝光町	6	7	193
匝瑳市	6	19	1,492
神崎町	5	92	193

表的な地区を示すと表1となる。このうち、液状化した面積が最も広がったのは東京湾岸の埋立地である。

各地の被災家屋数を示すと表2となる。ただし、ここでは全壊が5棟以上の市町のみを示している。全壊棟数が最も多いのは旭市であるが、これは津波による被害が主である。我孫子市や香取市が次いで多く、また、浦安市、千葉市、習志野市では全壊は少ないものの半壊が大変多い。これらは液状化による被害が主である。なお、千葉県内の液状化による家屋被害は、国土交通省都市局調べで約18,674軒(平成23年9月27日時点)との集計もある。

3. 東京湾岸の被害

3.1 液状化発生地区

図2に示した液状化発生地点のうち、東京湾北部の液状化地区のみを拡大して示すと図3となる。この図のうち千葉県の液状化発生区域の総面積は約39km²である。浦安市、船橋市、習志野市の埋立地でほとんど一面と言って良いほど噴水・噴砂が発生した²⁾が、千葉市美浜区になると、噴水・噴砂が発生した区域と発生しない区域が隣接していた。これらの液状化発生地区はほとんどが戦後の埋立地である。例えば浦安市のホームページによると昭和23年には市の面積は元町の4.43km²だったところに、昭和39年から公有水面埋め立て事業が始まり、昭和42～48年の第1



図3 東京湾岸の液状化発生地区¹⁾

期埋立事業で中町が造成され、昭和49～57年の第2期埋立事業で新町が造成され、市域は16.98km²と広がっていた³⁾。液状化が発生した区域は、昭和39年以降の中町や新町であり、元町での被害は目立っていない。

3.2 液状化発生地区の地盤状況

地盤工学会の「関東の地盤」⁴⁾および千葉県で公表されている地盤データ⁵⁾をもとに内陸から海岸にかけての各市における代表的な土層断面図を推定してみると図4～7となる⁶⁾。なお、断面の位置は図3に示してある。

図4は浦安市において液状化により甚大な被害が発生した今川を通る、北西から南東にかけての測線である。美浜、今川ではN値が5～8程度、高洲ではN値が2程度の緩い埋立・盛土層が造成されている。その厚さは6m～9m程度で、今川付近で最も厚くなっている。下部にはN値が8～20程度の沖積砂層が堆積している。地下水位は海岸に向かうにつれGL.-3m～-0.5mと浅くなっている。

図5は船橋市の二俣から潮見町へと南下する測線である。N値が1～5程度の非常に緩い埋立・盛土層が3m～5m程度の厚さで造成されており、海岸に向かうにつれて厚くなっている。下部にはN値が5～10程度の沖積砂層が厚さ5m程度の沖積粘土層を挟んで堆積している。地下水位はGL.-1.5m～2mと浅い。

図6は習志野市谷津、高瀬町を通る北東から南西にかけての測線である。N値が2～5程度の非常に緩い埋立・盛土層が5m程度の厚さで一様に造成されている。下部には谷津3丁目ではN値が2～8程度、他地区ではN値が10～20程度の沖積砂層が堆積している。地下水位はGL.-1m～-2mとなっており、海岸付近では浅くなっている。

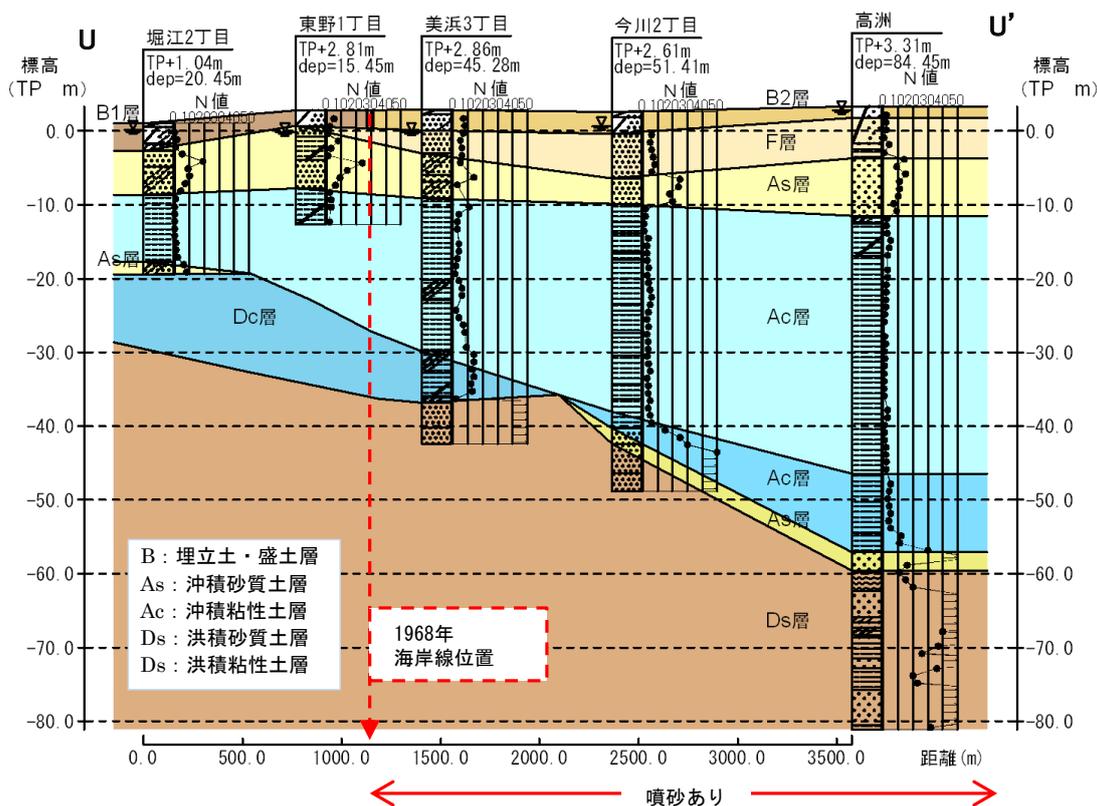


図4 浦安 U-U' 想定土層断面図⁶⁾

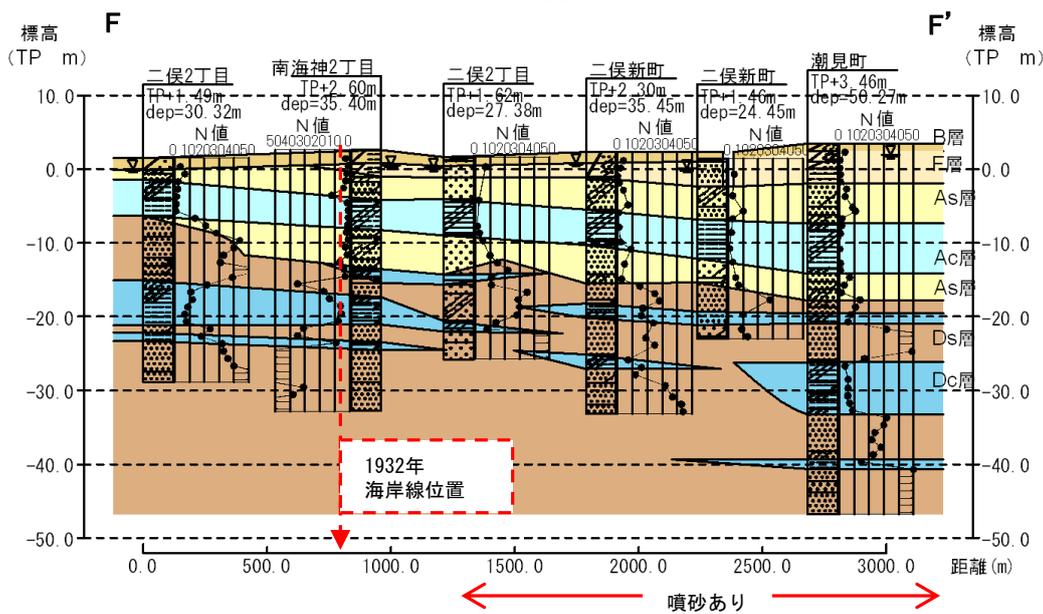


図5 船橋 F-F' 想定土層断面図⁶⁾

図7は液状化被害の激しかった千葉市美浜区磯部を通る北東から南西にかけての測線である。N値が0~3程度の非常に緩い埋立・盛土層が4.5m~9.5m程度の厚さで造成されており、その厚さは海岸に向かうにつれて厚くなっている。下部にはN値が6~10程度の沖積砂層が堆積している。地下水位はGL-1m~-2m程度と浅い。

以上のように東京湾岸で液状化した地区では表層に数mの緩い埋立土層と盛土層があり地下水位も浅いため、地下水位以下の埋立土層が液状化したのではないかと推測される。現在、今回の地震後の復旧にあたって各地で地盤

調査が行われており、今後さらに地盤条件が明らかになり、液状化した層が確定できるものと思われる。

浦安市では地震後に被災原因の究明や復旧のために多くの地盤調査が行われてきている。それによると、表3に示すように浚渫土(埋立土)、沖積砂質土層の地震前後の平均的な N_1 値を比較すると地震前が6, 13であり、地震後は6, 11回とあまり変わらない。細粒含有率も N_1 値と同様に地震前は44, 31%, 地震後は45, 31%とあまり変わらないようである。盛土層は盛土材料の不均質性によって N_1 値の違いがあるようである。

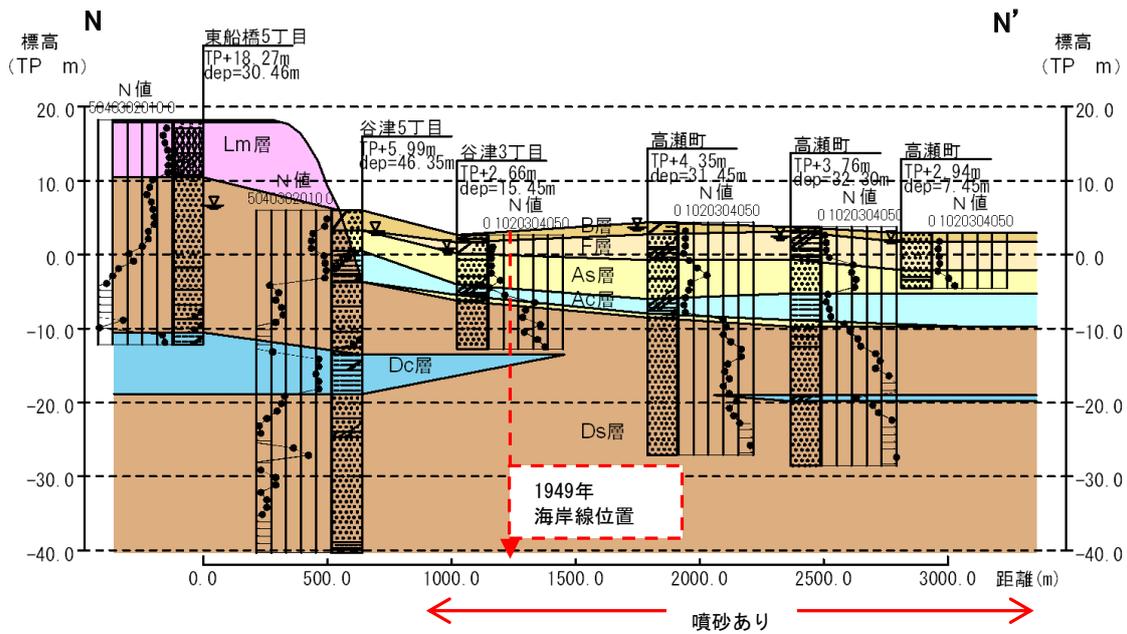


図6 習志野 N-N'想定土層断面図⁶⁾

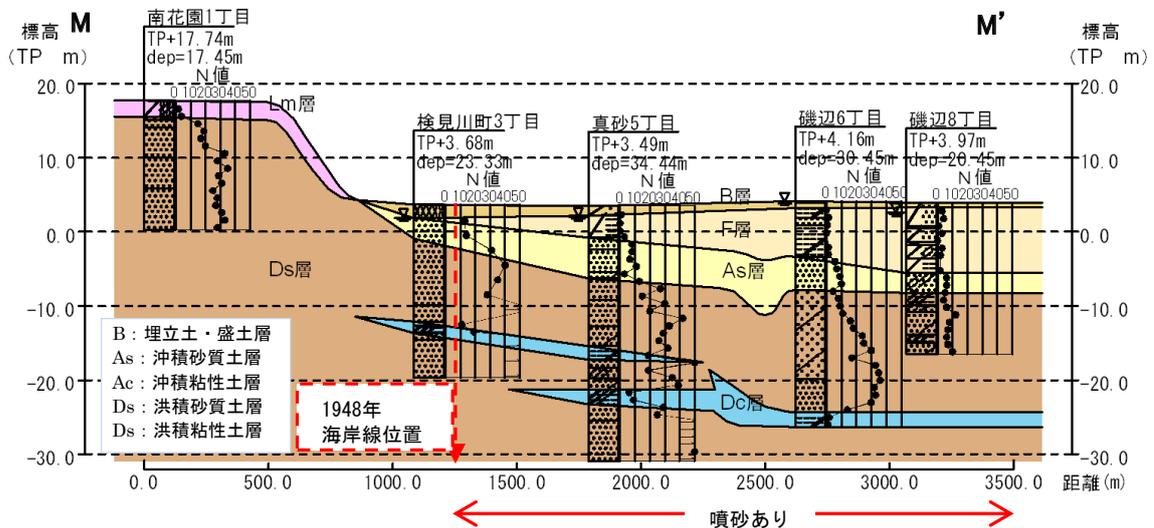


図7 美浜区 M-M'想定土層断面図⁶⁾

表3 浦安の土質特性⁹⁾

調査時点	項目	盛土	浚渫土	沖積砂質土
地震前	N _i 値	8.5	5.5	12.9
	細粒分含有率 (%)	30.9	43.8	30.9
	粘土分含有率 (%)	17.0	13.4	8.7
地震後	N _i 値	16.5	6.1	10.7
	細粒分含有率 (%)	34.0	45.0	30.9
	粘土分含有率 (%)	10.7	15.4	8.0

3.3 液状化による被害の概況

浦安市から千葉市にかけて液状化により種々の被害が発生した。いくつかの被害写真は学会誌に報告し²⁾、また、

国土交通省と地盤工学会の報告書¹⁾、浦安市の委員会の報告書^{7) 8) 9)}などに各地の被害写真が載せられているので、それらを参照していただくとして、住民の方々からのヒアリングやインターネット上に載せられている動画などをもとに、地盤の変状そのものと構造物の被害に分けて被災概況をまとめてみると以下ようになる。

(1) 地盤の変状概況

① 噴水・噴砂が所々で発生したのではなく、一面に発生した地区が多くあった。それらの地区では地下水の噴出にともなって地表面が長時間水浸し状態になった。ただし、噴水の高さは高くないようで、「じわー」と、あるいは、「どくどく」と水が噴き出てきたようである。このように液状化発生状態は激しいものであったが、K-netの地震記録¹⁰⁾によると、地表最大加速度は浦安市～千葉市で160～230cm/s²とあまり大きな値ではなかった。ただし、継続



写真1 浦安市で積み上げられた噴砂の山



写真2 新木場の高架橋そばで迫り上げた歩道



写真3 市川市の幹線道路そばで迫り上げた歩道

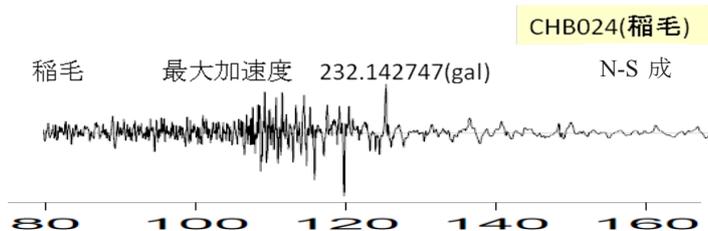


図8 K-net 稲毛の波形¹⁰⁾

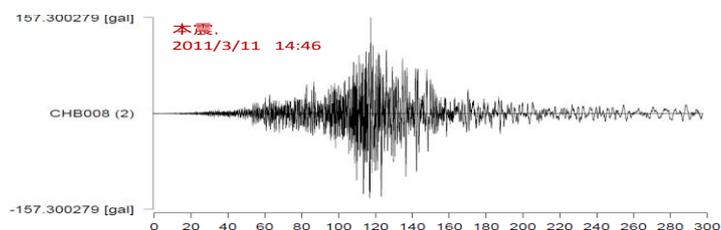


図9 K-net 浦安の波形¹⁰⁾

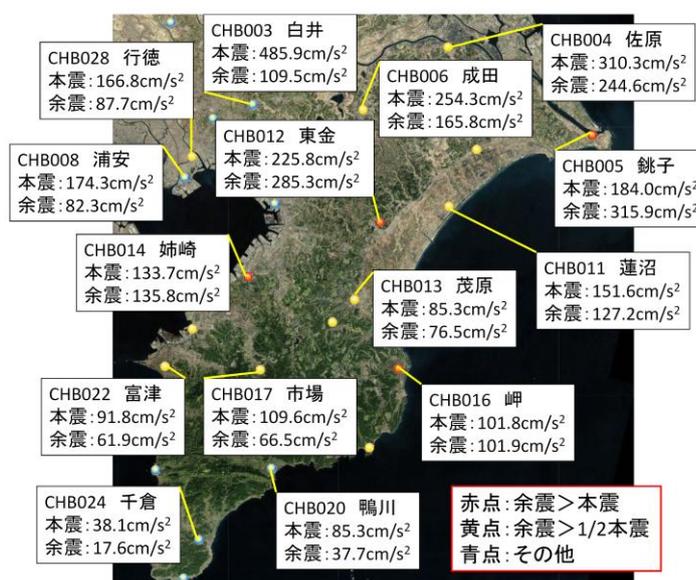


図10 K-netによる本震と余震の最大加速度

時間は長く、また、29分後に大きな余震が襲った。

② 噴水がひいた後に残った噴砂の量は非常に厚く、筆者達が見た最大のもは30cmほどの厚さもあった。浦安市では写真1に示すように噴砂を市内の東の公園内に集積しているが、その量は約75,000m³に及んでいる。

③ 広域にわたって地盤が沈下し、支持層まで打設してある杭の抜け上がりが多く発生した。浦安市でレーザープロファイラーを用いて測定された結果によると、数10cm家屋等が沈下・傾斜し⁷⁾、また、杭の抜け上がりも同程度発生していた⁹⁾。

④ 幹線道路の歩道や生活道路などでは写真2,3に示すように、盛り上がりや迫り上がりが各地で発生した。ただし幹線道路自体はほとんど無被害であった。

⑤ 護岸はあまり孕み出さなかったが、船橋市では住宅地で2箇所ほど孕み出し、背後地盤が約50m程度にわたって流動し、建物を引き裂く被害も発生した。

⑥ 地盤改良を施してあったため液状化が発生しなかつ

た区域がいくつかあった。

(2) 構造物の被害概況

⑦ 戸建て住宅が数多く大きく沈下・傾斜した。

⑧ 下水道管、ガス導管、水道管など埋設管が多く被災した。一般埋設部に加えて宅地内への取り付け管も被災した。

⑨ 中・高層アパートや高架橋、橋梁などの大型構造物はほとんど無被害だった。これは洪積砂層まで杭が打設されていたからと考えられる。ただし、建物自体に被害がなかったといえども、周囲の地盤は沈下したため大きな段差が発生し、また、埋設管が被害を受けた。したがって、住民もしばらくは外の仮設トイレを使用せざるを得ないなど不便な生活を余儀なくされた。

⑩ 電柱は各地で最大2m程度も沈下し、電線が垂れ下がり通行の妨げになる所も発生した。沈下だけでなく傾きが大きく屋根まで倒れかかったものもあった。

以下には①～④、⑥～⑧に関して地震後の調査によって分かってくるものと、今後の課題について述べる。

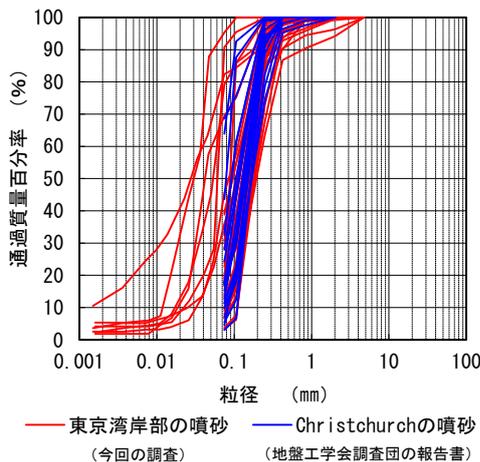


図 11 東京湾岸と Christchurch で発生した噴砂の粒径の比較

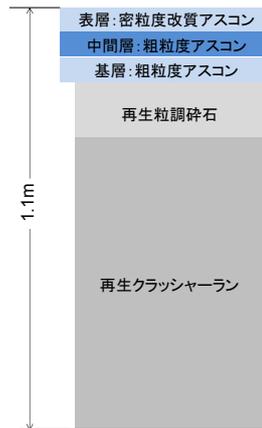


図 12 県道の構造例⁹⁾

表 4 内閣府から出された沈下・傾斜に関する被害認定の新判断基準

分類	判定基準
全壊	四隅の基礎や床の傾斜の平均が 20 分の 1 以上
	床上 1m まで沈下 (雨天時に床上 1m 浸水)
大規模半壊	四隅の基礎や床の傾斜の平均が 60 分の 1 以上で 20 分の 1 未満
	床まで沈下 (雨天時に床上浸水)
半壊	四隅の基礎や床の傾斜の平均が 100 分の 1 以上で 60 分の 1 未満
	基礎の天端 25cm まで沈下 (雨天時に床下浸水)

3.4 揺れの継続時間、噴砂量、路面の迫上げに関して
 K-net¹⁰⁾の地震記録をみると、浦安、稲毛、千葉で 157cm/s²、232cm/s²、178cm/s²の地表最大加速度が記録されている。これらの値はレベル 1 地震動の加速度程度であり、それほど大きなものではない。それなのに一面に激しい液状化が生じたのは、継続時間が長くて、加わった繰返しせん断力の回数が多かったことが影響したと考えられる。これを物語るデータとして図 8 の K-net 稲毛の波形がある。この波形をみると、110 秒あたりから大きく揺れているが、120 秒あたりを超えると加速度振幅は急に小さくなり長周期化している。一方、浦安の波形を図 9 に示すが、この波形では 120 秒付近のピークを超えても 150 秒あたりまで大きな振幅が続き長周期化もしていない。稲毛の観測地点の千葉県環境研究センターでは実際に液状化したが、浦安の観測地点では液状化していない。したがって、稲毛では 120 秒付近で液状化が発生したものと考えられる。

千葉県では本震に加えて 29 分後に大きな余震が襲った。図 10 に本震と余震において記録された K-net の地表最大加速度(合成値)を示す。浦安の余震は本震の約半分の加速度振幅になっているが、本震でジワーと水が噴き出していたところに余震が襲って噴水の勢いが激しくなったとの住民の証言がある。東京の新木場でも同様の話がある。また、千葉市美浜区磯辺 6 丁目では本震で噴水が生じたのに対し、7 丁目では本震の時に噴水は生じていなく余震の時に噴水が初めて生じたとの話もある。さらに、余震の振幅が本震の 8 割もあった佐原では、香取市役所において本震では液状化せず余震で液状化したとのことである。これらの地区では本震で完全に液状化しないまでも、ある程度過剰間隙水圧が発生していてそれが消散しきっていないところに余震が襲って、液状化したのであろう。このように本震の継続時間が長かったことに加えて、29 分後に襲った余震も、加速度振幅が大きくなかったのにも関わらず激しい液状化が発生したことに関係していると考えられる。したがって、今回の液状化発生および被害の解釈に

は 29 分後に襲った余震の影響も考慮する必要がある。

噴砂量や地盤の沈下量が大きかった同様のことが、昨年从去年から今年にかけて地震が頻発しているニュージーランドの Christchurch でも発生してきている。地盤工学会の調査団の報告書¹¹⁾¹²⁾に写真を示してあるが、ここでは東京湾岸以上に発生した噴砂が厚く、しかも 2 月の再液状化の方が初回より厚いといった驚くべき状態となっていた。そこで両地区の噴砂の共通点を探ってみると、図 11 に示すように両者とも非常に粒径は細かく、シルト～シルト質砂であることが考察された。液状化した砂が細粒分を多く含んでいると、透水係数が小さく過剰間隙水圧が消散し難くて長時間噴水が続き、さらに土粒子の比表面積が大きいので噴水によって土粒子が運ばれ易いことにより、多量の噴砂が発生したのではないかと考えられた。そこで、筆者達は浦安の砂と粒径の大きい豊浦砂や川砂を用いてボーリングの模型実験などを行ってみたところ、このような考えを裏付ける結果が得られた¹³⁾。なお、このように多量に舗装上に上がってきた噴砂を取り除いたため、地表面の沈下量も大きくなったと考えられる。

写真 2、3 に示したように幹線道路の歩道や生活道路、高架橋、旧護岸の際などで路面が突き上げられたように盛り上がっている箇所が至る所で発生した。インターネットに出されている地震時の動画を見ると、歩道の境目で水平方向にゆっくりと大きく左右にずれている動画や、歩道が盛り上がり下がり繰り返している動画、さらに、余震の際に地割れから液状化した泥水が繰返し噴き上がるという動画などがある。これらから推測すると、液状化した地盤がその後も水平方向に大きく揺すられ続けたのではないかと考えられる。この大きな揺れは本震中に生じた可能性もあるし、液状化状態が続いていたところに余震によって大きく揺すられたために発生した可能性もある。写真 2 は新木場の京葉線の高架橋沿いの歩道であるが、高架橋が揺れを拘束したため、歩道部に水平方向のひずみ集中し座屈したようになって、迫り上がりが生じたものと思われる。また、幹線道路は図 12 に構造例を示すよう

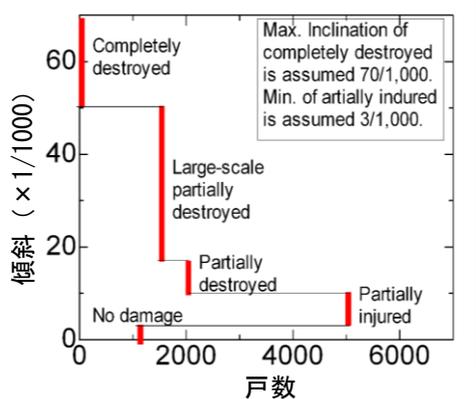


図 13 浦安市の公表データから大まかに推定した傾斜と戸数の関係

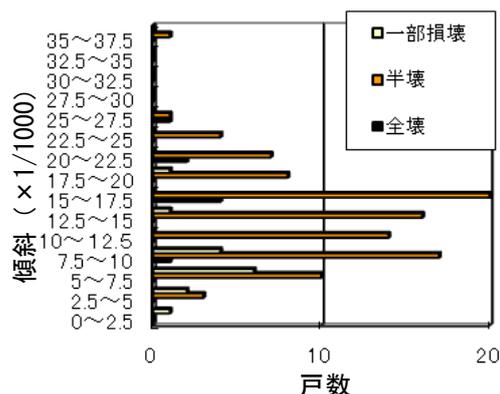


図 14 安倍彦名団地における家屋の傾斜¹⁴⁾

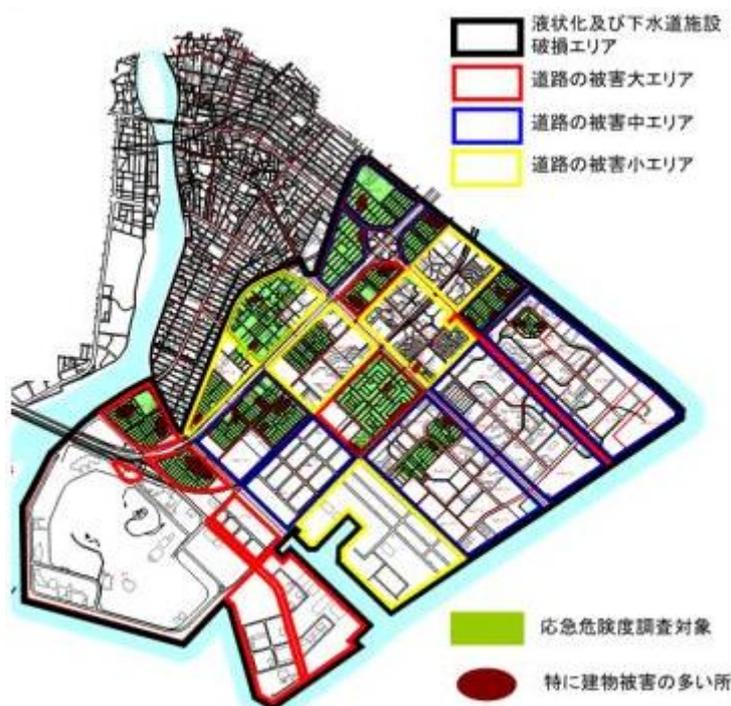


図 15 浦安市の家屋等の被害発生地区⁸⁾

に硬くしっかりした路盤になっているため揺れを拘束し、隣接する軟らかい歩道部が写真 3 に示したように迫り上がったのではないかと考えられる。さらに、道路際に少し高い盛土がある箇所では、盛土が押し寄せて歩道を盛り上げさせた可能性もある。このような特異な現象が発生したメカニズムに関しては今後さらなる検討が必要である。

3.5 戸建て住宅の被害と復旧

国土交通省都市局調べによると、今回の地震によって全国で 26,914 件（平成 23 年 9 月 27 日時点）もの液状化による宅地被害を受けた。戸建て住宅は、液状化により家が沈下、傾斜しても見かけは大きな被害と見られないため、過去の地震では重大な被害とはあまり判定されてこなかった。これに対し、家が傾くとその中で生活できなくなることが今回の地震で広く認識されるようになり、5 月 2 日

に内閣府から表 4 に示す沈下・傾斜に関する被害認定の新判断基準と支援金額が発表された。これにより、地震直後に判定された半壊などの戸数が大幅に変わった。例えば浦安市の発表によると、従来の基準による建物被災度認定方法では全壊 8 戸、半壊 33 戸、一部損壊 7930 戸、被害なし 1028 戸であったのに対し、新基準では全壊 18 戸、大規模半壊 1541 戸、半壊 2121 戸、一部損壊 5096 戸、被害なし 1105 戸となり、全壊、大規模半壊、半壊の戸数が大幅に増えた⁷⁾。なお、日本損害保険協会でも保険の基準を緩和し、傾きで 1 度・沈下量で 30cm を超える場合に全損、傾きで 0.5 度～1 度・沈下量で 15～30cm の場合は半損扱いになるようになった。

さて、上記の浦安市のデータをもとに、傾斜の分布をおおまかに推定してみると図 13 となる。50/1000 以上も傾いた家屋もあり、また、16.7/1000～50/1000 の家屋も多くあ

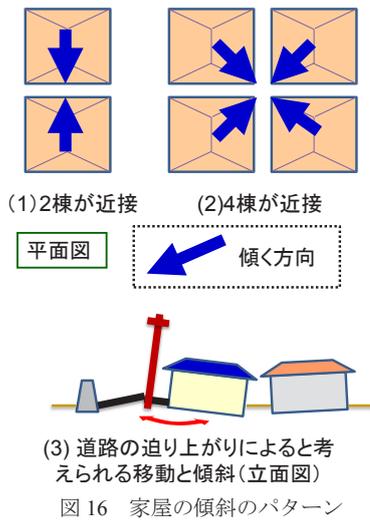


図 16 家屋の傾斜のパターン

る。図 14 には 2000 年鳥取県西部地震の際に米子市の安倍彦名団地で生じた被害の同様な度数分布図¹⁴⁾を示す。両者を比較してみると、浦安市における今回の地震での傾斜の方が、鳥取県西部地震における安倍彦名団地の傾斜より全体に大きかったことが分かる。その理由はまだ分からないが、前述したように地表面が噴水で覆われているところに 29 分後に余震が襲ったことが影響しているかもしれない。つまり地下水位が地表面まで上がった状態でさらに揺すられたため、沈下量が増えたのではないかと考えられる。

図 15 には浦安市における戸建て住宅の被害の分布⁹⁾を

示す。入船、今川、弁天、舞浜といった地区で被害が多く発生した。浦安市では地震前のボーリング資料から地下水位の分布も整理してあり、さらに戸建て住宅の被害と地下水位の関係も調べられている。それによると、全壊となった建物での平均的な地下水位は GL-1.38m で、大規模半壊、半壊、一部損壊ではそれぞれ GL-1.78m、GL-1.84m、GL-2.01m となり、地下水位が深くなると戸建て住宅の被害が軽微になる傾向となった。これは、過去の 2000 年鳥取県西部地震や 2007 年新潟県中越沖地震の事例¹⁵⁾¹⁶⁾と同様の傾向となっている。

なお、傾斜の方向としては図 16(1)、(2)に模式的に示したように、2 棟の場合には内向きに、また 4 棟の場合には中心に向かって傾く傾向が多々見られた。これらは安倍彦名団地などの事例¹⁷⁾と一致しており、傾斜角は隣接する建物の影響をかなり受けていると考えられる。なお、上述したように今回の地震では歩道部などが迫り上がる現象も生じ、図 16(3)に模式図を示すようにそのために家屋が水平に動いて傾いたのではないと思われるケースもあった。

さて、地震から 7 ヶ月以上経っても被災した家屋はまだあまり復旧されていない。どのような復旧をすれば良いのか住民の方々が困っておられる状態である。まず、家を建て替えなくても、沈下した家を持ち上げ傾斜を直せば再度住める家屋がほとんどである。そこでこの作業だけをおこなう「沈下修正」と呼ばれる工事で復旧することが行われつつある。ただし、それだけだと、余震や将来の地震で再

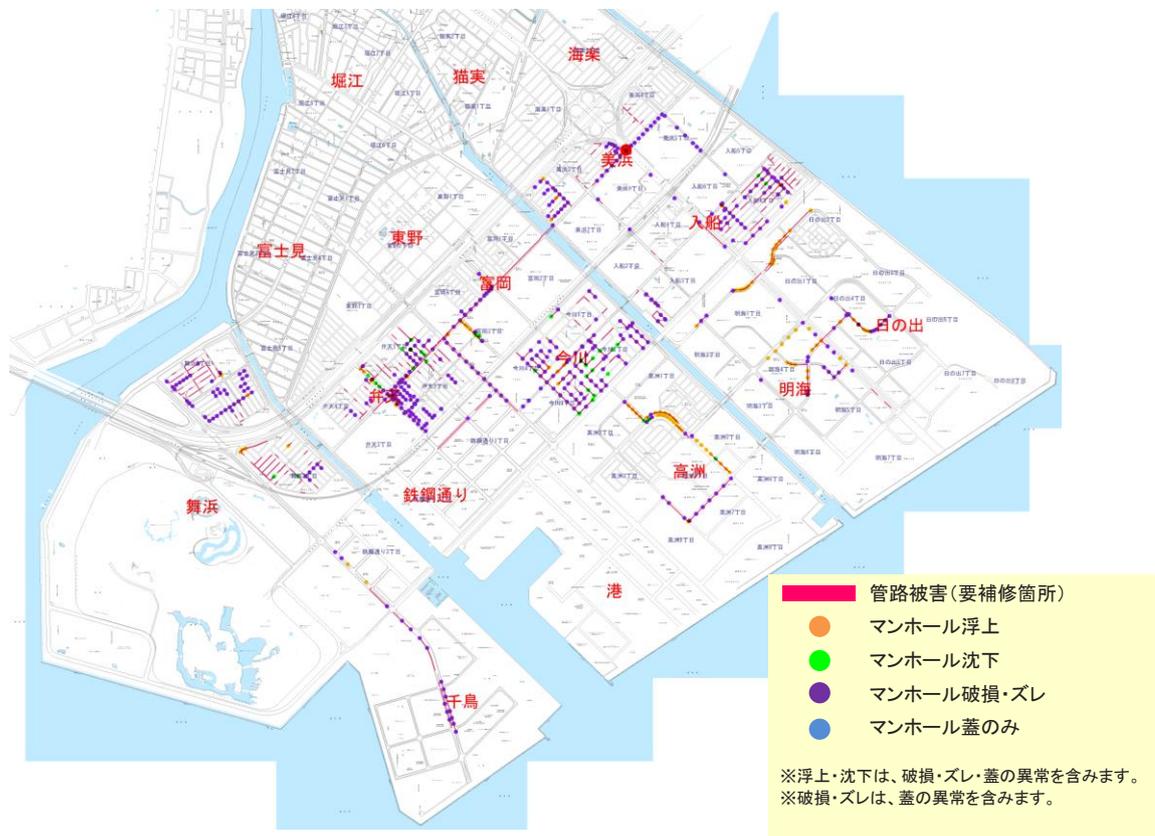


図 17 浦安市における下水道被害状況⁹⁾

液状化してまた被害を受ける危険性がある。実際、Christchurch では9月の本震で沈下した家が修復されずに残され、2月の余震で沈下し¹²⁾、6月の余震でさらに沈下した事例もある。したがって、再び液状化による被害を受けないために住宅直下を地盤改良して復旧することも行われ始めている。さらに、改良と同時に沈下修正する工法も適用されるようになってきている。ただし、費用がまだ高く、技術開発が望まれているところである。また、地区全体で広域に対策がとれば理想的である。例えば、前述したように地下水位と被害に関係があるので、地下水位を1~2m 下げるとすることが有効と考えられる。過去の例だと2007年新潟県中越沖地震の復旧にあたって、柏崎市の山本団地で排水管を設置し地下水位を2m程度下げることが行われた¹⁶⁾。この場合は砂丘斜面であったが、今回のように埋立地でも有効な方法の開発が望まれる。

3.6 下水道管渠およびマンホールの被害と復旧

上述したように上下水道、ガス導管も液状化によって甚大な被害を受けた。まだ仮復旧がされている段階であり、本復旧時にならないと本当の被害の実態が分からないが、下水道管の被害に関しては以下のような特異な被害があったようである。

- ① マンホールが浮き上がった率は新潟県中越地震による長岡市などの被害に比べて少ない。一方、マンホールの躯体ズレが多く発生し、また、砂が多くはいりこんでいた。
- ② 管渠には蛇行やたるみが生じ、継手はずれたものが多く発生した。また、本管から宅地内に入る箇所被害が多く発生しているようである。

図17は浦安市でマンホールと管渠が被災した箇所⁹⁾を

示している。図15と比べてみると戸建て住宅の被害が多く発生した地区で下水道施設の被害も多く発生していることが分かる。さらに、幹線道路の歩道でマンホールの躯体ズレが多く発生しているとのことである。したがって、液状化した後に水平方向に大きく揺れて歩道にそのひずみが集中し、マンホールをずらしてしまったのではないかと推察される。また、大きく水平方向に揺すられたため、管渠の継手はずれたのではないかと考えられる。

長岡市などで過去に被災したパターンは掘削した溝に埋め戻した土だけが液状化したため、今回のような水平方向の蛇行は生じなく、浮き上がりによる上下方向のたるみだけが発生した。この場合には浮き上がっても継手はずれるまでの変位は発生しなかったと考えられる。逆に今回は水平方向に継手はずれるほどの変位が発生したのではないかと考えられる。さらに、道路より家の方が大きく沈下したため、宅内の取り付け管が被害を受け、これらによって砂が管渠やマンホールに大量に流入し、浮き上がり難かったのではないかと考えられる。

本復旧にあたって、もしこのようなメカニズムで被災しているようであれば、管渠がはずれにくい継手を使用し、ずれ難いマンホールを使用するなど、単に埋め戻し土の液状化対策だけでなく、特別な工夫も必要になってくるのではないかとと思われる。また、地盤全体が大きく沈下し、さらに宅内の方が沈下しているため、自然流下の勾配をどのようにとるかが大きな課題である。

3.7 地盤改良の効果

浦安市では住宅公団(当時)によって昭和50年頃から図18に示す地区で高層あるいは中低層の住宅建設が行わ

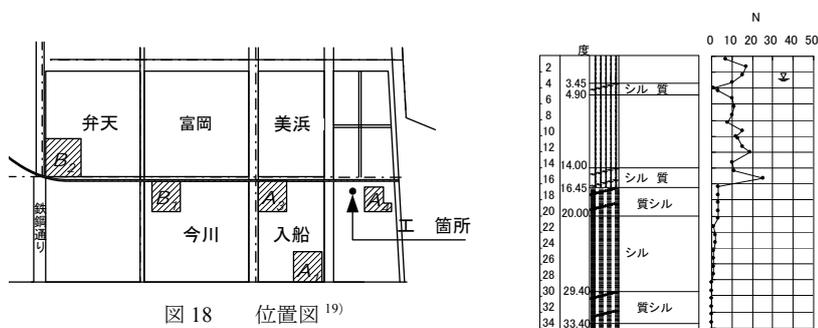


図18 位置図¹⁹⁾

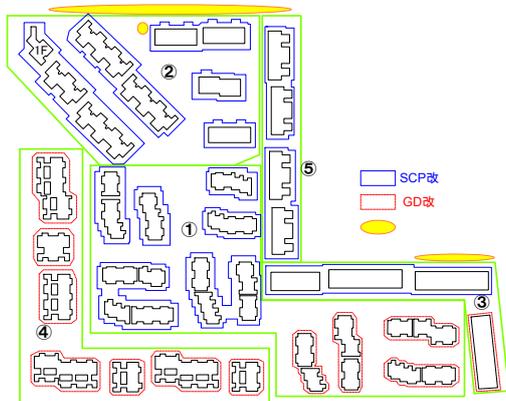


図20 平面図

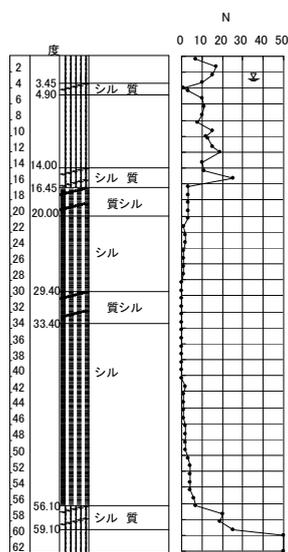
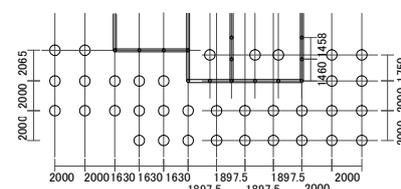
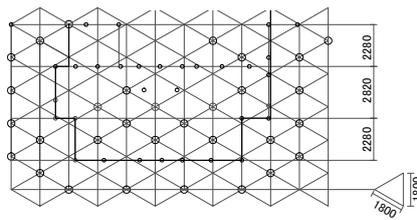


図19 柱状図¹⁸⁾

ブロック	階	地盤改良 (左は主な配置)	基礎
第1住宅	2F	SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m
		GD△1.8m	I=10m 節杭 I=8m
第2住宅	3F	SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m
		SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m
第3住宅	3F	SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m
		GD1.8m	I=10m 節杭 I=8m
第4住宅	2F	GD△1.8m	I=10m 節杭 I=8m
		SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m
第5住宅	3F	SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m
		SCP□2.0m	I=10m 節杭 I=8m



(a) SCP 工法



(b)GD 工法

図21 杭配置図の一例

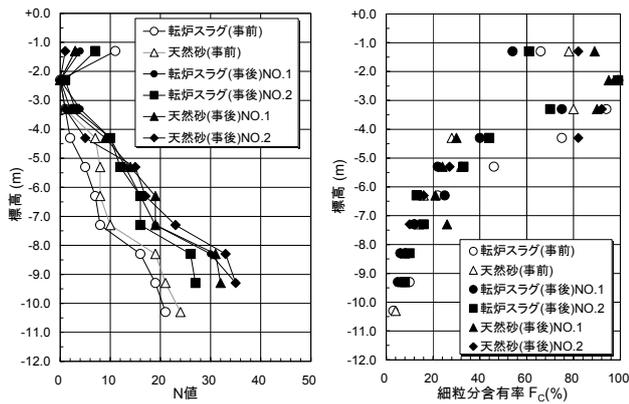


図 22 事前・事後 N 値と細粒分含有率の深度分布図

れた¹⁸⁾。これらの地区では、図 19 に例を示すように、上部に 4.9m の埋土・盛土層があり、その下部に沖積砂質土層、沖積粘性土層が堆積している。以下、2 つの地区の状況を示す。

(1) 浦安市入船

入船での建設地区は図 18 の A₃ のエリアにあたり、図 20 に示す 5 ブロック分かれている。当地区では上部の緩い砂層の締固めによる支持力増加、液状化防止を目的にサンドコンパクションパイル（以下 SCP）工法が採用され、主に 3 階建壁式鉄筋コンクリート造の建物の基礎に適用された。また、グラベルドレーン（以下 GD）工法も液状化防止の目的で 2, 3 階建建物に採用されている。それぞれの建物の基礎形式は直接基礎（連続基礎）で、建物壁側面の交点には長さ 8m の節杭が打設されている。この節杭は周面摩擦抵抗による支持力の確保を主目的としており、レンズ状のシルトを挟んだ不均一の砂層上部に対処するために併用された。SCP 工法の改良仕様は杭径 φ 800mm, 2m の正方形配置（改良率 a_s=12.5%）, 改良長 10m で、改良範囲は構造物周辺の 5m である。一方、GD 工法の主な改良仕様は杭径 φ 400mm で 1.8m の正三角形配置である。地盤改良杭と節杭の配置図の一例を図 21 に示す。

当エリアを施工していたのと同じ頃、図 18 に示す当エリア付近で転炉スラグを用いた SCP 工法の試験工事が行われていた¹⁹⁾。その時の事前・事後 N 値と土層が変わっていないことを確認するため実施した細粒分含有率の深度分布図を図 22 に示す。この試験工事においても A₃ エリアの SCP 工法と同じ改良仕様で実施されており、転炉スラグを使用しても細粒分の少ない深度では天然砂と同様に N 値が 10 以上増加していることがわかる。

当エリアでは地震時に図 20 に示すように団地周辺の未改良部で周辺の道路部での液状化に影響されたためか噴砂が発生し、団地敷地内でも図 20 に示す一部の未改良域で噴砂が発生したとのことである。一方、改良域では液状化や被害は発生しなかったが、他の敷地内の未改良部では噴砂が発生していない理由については今後検討する必要がある。

(2) 浦安市今川¹⁸⁾

今川での建設地区は図 18 の B₁ エリアにあたる。当地ではサンドコンパクションパイル工法が同じ目的で採用されていた。改良仕様も入船地区と同様である。

当地区においても、未改良の一部の車道で液状化が生じたが、改良域では被害は生じていなかった。

4. 東京湾岸以外の被害

4.1 利根川低地における液状化発生の特徴

利根川低地では川沿いに多くの地区で液状化が発生した。これらはかつて川が入り組んでいたり蛇行していた所を河川改修によって陸地化した箇所や、利根川が氾濫して沼や池が形成されていた所を陸地化した箇所が主である。

その中で最も広い範囲で液状化した所は香取市の佐原である。ここでは図 23 の赤枠で囲った約長さ 1.5km, 幅 0.5km の範囲で一面に液状化した。この地区は図からわかるように利根川が入り組んでいた所を埋めた区域に該当する。この地区では液状化により写真 4 に示すように多くの戸建て住宅や道路、ライフラインが甚大な被害を受けた。



図 23 明治 39 年の旧版地形図と液状化範囲



写真 4 香取市の液状化被害状況

表 5 香取市の液状化による被災数

	総数	液状化による被災数(暫定値)
全壊	199	43
大規模半壊	1003	802
半壊	1067	717
一部損壊	2556	997
その他	373	なし
合計	5198	2559

香取市による集計では、表 5 に示すように被災した 5198 棟のうち液状化が原因で被災したのは 2559 棟であった。

我孫子市布佐も液状化によって多くの戸建て住宅が被害を受けた。ここはかつて利根川が決壊して沼ができていたところを 1952 年に埋めて宅地化した区域であった。

なお、利根川低地には広大な農地が広がっており、液状化による農業施設・農作物の被害も多く発生した。また、河川堤防も多くの箇所でも沈下やすべりが発生した。国土交通省関東地方整備局の調べによると、関東地方で被災した堤防 939 箇所（9 月 13 日現在）のうち大規模に被災した箇所は 55 箇所、そのうち 51 箇所が液状化に起因して被災していた。そして、7 割は基礎地盤の液状化、1 割は堤体の液状化、2 割は基礎地盤・堤体の複合の液状化が原因で被害を受けたとのことである。

4.2 九十九里平野における液状化発生の特徴

九十九里平野では旭市から東金市にかけて液状化が発生した。特に旭市では液状化した箇所も多く戸建て住宅も多く被災した。液状化が発生したのは、砂鉄を採掘し埋め戻した箇所や、海岸平野の低地に造成した箇所である。特に旭市では、前者の液状化が多く発生し、そこを横切る道路が陥没し、家屋も引きずられて傾いた。このような砂鉄の掘削跡地の液状化は 1987 年千葉県東方沖地震の際にも一宮町で発生していた。

4.3 その他の地区の液状化

その他、佐倉市や成田市などでは谷底低地の水田などに盛土した箇所でも液状化が発生し、家屋に被害を与えた。

5. 結論

2011 年東北地方太平洋沖地震により千葉県では以下のような被害が発生した。

- (1) 東京湾岸低地では浦安市～千葉市にかけて造成されている埋立地で広い範囲で液状化が発生し、戸建て住宅、ライフライン、道路に甚大な被害が発生した。甚大な被害が発生した原因としては、当該地での地震記録の最大加速度はそれほど大きくないが、本震の継続時間が長いことや、29 分後に襲った余震が影響していると考えられる。
- (2) 東京湾岸の液状化被害にはいくつかの特徴があるが、まず 1 万棟を超える戸建て住宅が大きく沈下したことが上げられる。また、幹線道路の歩道や生活道路で迫り上がりや盛り上がりが発生した。これは液状化した後も地盤が大きく水平に揺すられたためではないかと考えられる。この動きによって下水道管の蛇行が生じて継手はずれたり、マンホール躯体がずれるといった特異な被害が発生したのではないかと考えられる。
- (3) 利根川低地においても広い範囲で液状化が発生し、家屋やライフライン、農地に被害を与えた。液状化した

のは主に旧河道や沼などを埋めた所であった。また、九十九里平野でも各地で液状化したが、ここでは主に砂鉄を採掘して埋め戻した箇所の液状化被害が目立った。

謝辞

甚大な被害を受けた上に復旧までまだまだ大変な中、本稿をまとめるにあたって多くの方々から情報や資料提供をいただいた。特に、浦安市の委員会関係で貴重な資料を提供していただき、香取市やその他の自治体からも教えていただいた。地震当時の状況や地盤改良の効果に関しても多くの住民の方々に教えていただき、地質断面図作成にあたっては石綿しげ子氏(基礎地盤コンサルタンツ(株))の協力を得た。さらに、図面作成などに学生諸君の手を借りた。これらの方々に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：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調査結果について、<http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai0000061.html>, 2011.
- 2) 安田進・原田健二：東京湾岸における液状化被害，地盤工学会誌，Vol.59，No.7，pp.38-41，2011.
- 3) 浦安市：浦安市の海面埋め立て，<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu2863.html>
- 4) 地盤工学会：関東の地盤，丸善(株)，2010.
- 5) 千葉県：千葉県地質環境インフォメーションバンク.
- 6) 安田進・萩谷俊吾：東日本大震災で液状化した東京湾岸における土層断面図の作成，第 8 回地盤工学会関東支部発表会，pp.87-90，2011.
- 7) 浦安市：浦安市液状化対策技術検討調査委員会第 1 回委員会資料，2011. <http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu11324.html>
- 8) 浦安市：浦安市液状化対策技術検討調査委員会第 2 回委員会資料，2011.
- 9) 浦安市：浦安市液状化対策技術検討調査委員会第 3 回委員会資料，2011.
- 10) (独)防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET
- 11) 岡村未対・豊田浩史・清田隆・Misko Cubrinovski：2010 年ニュージーランド Darfield 地震災害緊急調査団報告，地盤工学会誌，Vol.58，No.12，pp.42-43，2010.
- 12) 安田進・Cubrinovski Misko・時松孝次・Orense Rolando・渦岡良介・清田隆・細野康代・山田卓：2011 年ニュージーランド 2011 Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団報告，地盤工学会誌，Vol.59，No.6，pp.48-49，2011.
- 13) 石川敬祐・安田進：東北地方太平洋沖地震による東京湾岸エリアの噴砂特性に関する考察，第 31 回土木学会地震工学研究発表会，2-023，2011.
- 14) 安田進・橋本隆雄：鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，III-515，pp.1029-1030，2002.
- 15) 橋本隆雄・安田進：鳥取県西部地震における液状化被害と地下水位の関係，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，III-514，pp.1027-1028，2002.

- 16) 地盤工学会 2007 年新潟県中越沖地震災害調査委員会：2007 年新潟県中越沖地震災害調査報告書，2009.
- 17) Yasuda, S. and Ariyama, Y.: Study on the mechanism of the liquefaction-induced differential settlement of timber houses occurred during the 2000 Totoriken-seibu earthquake, *Proc. of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, Paper No.S26-021, 2008.
- 18) 吉井守夫：住宅公団浦安地区団地の基礎地盤改良工事について，*集合建築*，No.76，pp.71-74，1980.10.
- 19) (財)建築研究振興協会 転炉スラグコンパクションパイル候補研究員会：転炉スラグを用いたコンパクションパイル工法の適用性に関する研究，昭和 54 年 12 月。
(2011.10.24 受付)

Damage to structures in Chiba Prefecture during the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake

Susumu YASUDA¹, Kenji HARADA² and Keisuke ISHIKAWA¹

1 Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Denki University

2 Geotechnical Department, Fudo Tetra Corporation

Abstract

The 2011 Tohoku-Pacific Ocean earthquake caused severe liquefaction in three lowlands in Chiba Prefecture. In artificially reclaimed lands along Tokyo Bay, liquefaction occurred in a very wide area. Total liquefied area was about 39 km². More than 10,000 timber houses, many lifelines and roads were seriously damaged. Especially the damage in Urayasu City was very severe. Though recorded maximum surface accelerations were not high as about 160 to 230 cm/s², severe liquefaction occurred. Main reason must be due to very long duration of shaking and a big aftershock which occurred 29 minutes after the main shock. Moreover much eruption of sands and large ground subsidence occurred in the liquefied zones because liquefied soils were very fine sand or silt. In the lowland along Tone River, liquefaction occurred at many old river channels. Especially the damage in Katori City was severe. About 2,600 timber houses were damaged. In Kujyukuri lowland plain along Pacific Ocean, liquefaction occurred at the replaced sites where the grounds had been excavated to take iron sands.

Key words: earthquake damage, liquefaction, reclaimed land, sandy soil