

2011 年東北地方太平洋沖地震による潮来市 日の出地区の液状化被害分析

橋本 隆雄¹・安田 進²

¹千代田コンサルタント東日本事業部地域整備部次長 (〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5)

E-mail: t-hashi@chiyoda-ec.co.jp

²東京電機大学理工学部建築環境工学科教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、関東地方の広い範囲にわたり地盤の液状化現象が発生し、住宅、道路、河川堤防、港湾施設、ライフライン等に多大な被害が発生した。特に宅地の液状化被害では茨城県潮来市南部の常陸利根川に面した潮来市日の出地区において、干拓地の部分で埋め立て地盤全体に激しい液状化が発生し、噴砂量が多く地区全域の木造家屋の基礎地盤の傾斜・沈下の変形量が多く、15cm以上の沈下が観測されている。

そこで、本論文では特に茨城県潮来市から研究のために提供していただいた日の出地区の罹災証明を基にこのデータを用いた液状化被害の分析を踏まえて提言を行い、今後の液状化の判定及び対策に役立てることを目的としている。

Key Words : residential land, liquefaction, earthquake damage, subsidence of a building, the inclination of a building

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、**図-1**に示すように関東地方の広い範囲にわたり地盤の液状化現象が発生し、住宅、道路、河川堤防、港湾施設、ライフライン等に多大な被害が発生した。国土交通省関東地方整備局と公益社団法人地盤工学会では、既にこれらの地盤液状化現象の実態を把握、解明するために共同で調査を実施し、その成果をとりまとめている¹⁾。

特に宅地の液状化被害では茨城県潮来市南部の常陸利根川に面した**図-2**の潮来市日の出地区において、干拓地の部分で埋め立て地盤全体に激しい液状化が発生し、**写真-1**に示すように噴砂量が多く地区全域の住宅被害を受けた。ただし、北西側の一部区画では干拓地であるにもかかわらず液状化被害はみられなかった。県道101号線と県道50号線の潮来ICを結ぶバイパス幹線道路の南側では、北側に比較して液状化被害の程度が大きい傾向にあり、木造家屋の基礎地盤の傾斜・沈下の変形量が多く、15cm以上の沈下が観測されている。

そこで、本論文では特に茨城県潮来市から研究のために提供していただいた日の出地区の罹災証明を基にこのデータを用いた液状化被害の分析を行った結果について

述べる。

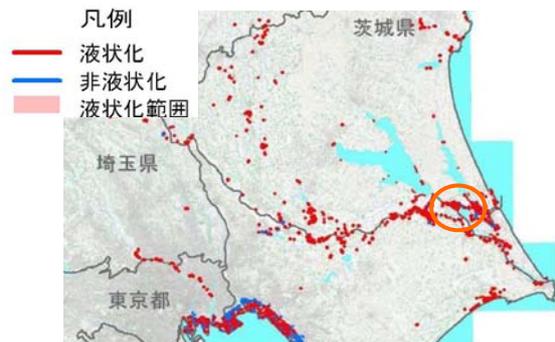


図-1 関東地方の液状化発生分布¹⁾



図-2 潮来市の液状化・非液状化²⁾

注) 赤色は液状化，青色は非液状化である。



写真-1 水雲山潮音寺（慈母観音）の敷地での噴砂現象
(Google Earthより)



写真-2 地盤の液状化に伴う噴砂状況



写真-3 建物の基礎部の噴砂現象

2. 潮来市日の出地区の液状化被災状況

茨城県潮来市では甚大な液状化被害が発生したが、特に日の出地区での被害が顕著であった。この地域については、建築研究所のHP³⁾でも現地調査報告が成されている。また、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震においても液状化の発生が報告されている¹⁾。

日の出地区では、写真-2のような宅地地盤の液状化に伴う大規模な噴砂が生じた。道路に面した多くの住宅が、前面歩道より約20cm～30cmの沈下を生じていた。噴砂により隠された部分も多かったが、写真-3のように基礎に割れや段差等は生じていなかった。日の出中学校では、写真-4のように校舎や体育館が25cm程度抜け上がっていた。写真-5は、干拓中に設置されていた杭が抜け上がっているところで、その周囲の家屋は特に不同沈下により傾いていた。写真-6は、道路の側溝が側方流動によって圧縮され、側溝の蓋が変形して傾き、電柱の傾動もより大きい状況である。写真-7は、同様に側方流動によって圧縮されライフラインの浮き上がり現象を生じているところである。



写真-4 建物の基礎地盤の沈下



写真-5 杭の抜け上がり

また、写真-8は日の出区5丁目及び6丁目の住宅のうち、周囲は液状化による被害を受けた中で、液状化被害が無い住宅があった。その住宅についてヒアリング調査を行った。その結果、以下ようになった。

- ①5丁目：造成前に鋼管杭を50本程度、長さ7mを打設している。建物の沈下は一切発生していないが周辺地盤が多少沈下している。隣接地の同時期の同構造は等沈下で25cm沈下し、沈下修正工事をしていった。
- ②6丁目：他の敷地に対して周囲を擁壁で囲み、1m程度盛土している。建物の傾斜・沈下はないが、敷地の周辺の擁壁が多少変状している。
- ③6丁目：造成前に鋼管杭を40本程度打設している。建物・地盤の沈下は一切発生していない。

この地域の地下水位は地表面下0.5m程度にあることから、液状化対策は支持層までの杭工法や非液状化層1.5m程度以上あればよいことが明らかとなった。



写真-6 地盤の液状化に伴う噴砂状況



写真-7 埋設物の浮き上がり



写真-8 液状化による建物沈下が無い住宅

3. 地震動

図-3は、日の出地区の本震の推計震度分布図で震度6弱であることがわかる。

図-4は、対象地点と7.3km離れた観測点K-NET鹿嶋（IBR018）⁴⁾での本震の2011年3月11日14時46分に発生したM9.0の加速度時刻歴で、最大加速度が658.4 gal，最大速度が本震で41.4kine，継続時間（50gal以上）が89.39sを計測した。また、図-5は同観測地点での2011年3月11日15時15分に発生したM7.4の加速度時刻歴で、最大加速度が408.4 gal，最大速度が本震で46.1 kine，継続時間（50gal以上）が103.99sを計測した。

本震の時も大きく長く揺れたが、その後の30分程度して茨城県沖での余震があり、それらによって液状化した後も大きく揺すぶられ、大きな沈下・傾斜になったのではないかと考えられる。

4. 潮来市日の出地区の造成履歴

日の出地区の造成履歴は、昭和16年より内浪逆浦干拓を開始し、戦後昭和25年に完成し浪逆土地改良区として水田化された。昭和44年に土地区画整理組合が設立され、昭和45年に住宅地化着工し昭和54年に完了した。その詳細な造成時期と干拓や宅地の経緯を以下にまとめた。

- ①昭和 16年 9月 1日：農地開発法発令に伴い農地開発営団の事業地区となり工事に着手した。
- ②昭和 20年 8月 15日：終戦より，農地開発営団が閉鎖機関に指定された。
- ③昭和 22年 8月 4日～23年 3月 31日：農林省直轄事業となり，国営事業として続行した。
- ④昭和 23年 4月 1日～25年 3月 31日：茨城県代行業業となり，県営事業として続行し工事完了した。
- ⑤昭和 45年 3月：浪逆土地区画整理事業として土地区画整理組合が事業に着工した。
- ⑥昭和 54年 3月：浪逆土地区画整理事業が完了した。

この地域は図-6の地形図平面図では干拓地となっており、図-7及び図-8の迅速測図から外浪逆浦の入江である内浪逆浦を干拓した土地であることがわかる。そのため、液状化による被害が発生したものと考えられる。

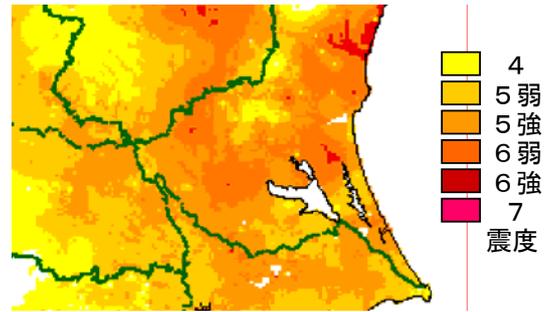


図-3 本震の推計震度分布図⁵⁾

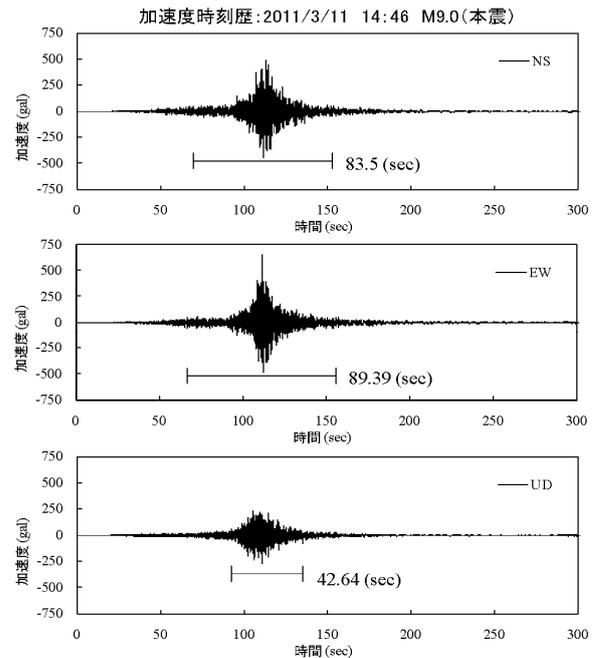


図-4 本震の加速度時刻歴（2011年3月11日14時46分）⁴⁾

注) 最大加速度，最大速度の値は3成分合成
加速度時刻歴：2011/3/11 15:15 M7.4(茨城沖余震)

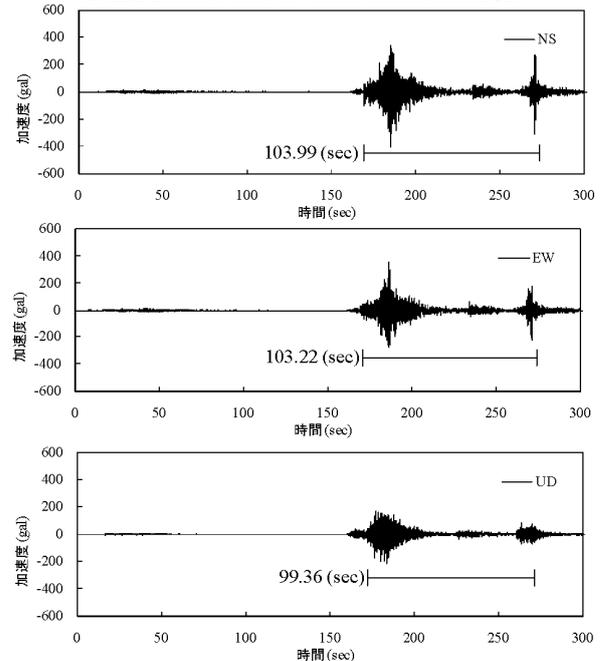


図-5 茨城沖地震の加速度時刻歴（2011年3月11日15時15分）⁴⁾

注) 最大加速度，最大速度の値は3成分合成



(a) 工事着手前 (昭和16年頃)



(b) 工事中 (昭和24年頃)



(c) 工事完了後 (昭和25年頃)

写真-9 日の出地区の内浪逆浦干拓の履歴
(潮来市提供の航空写真)

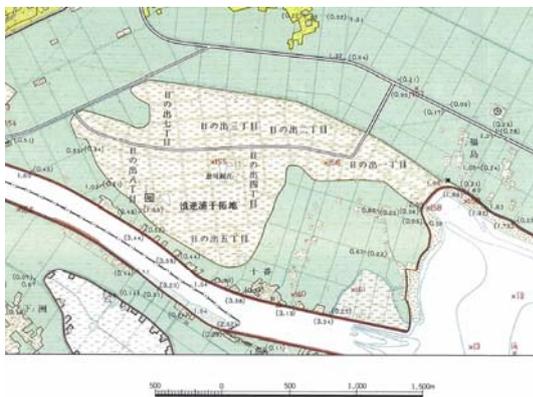
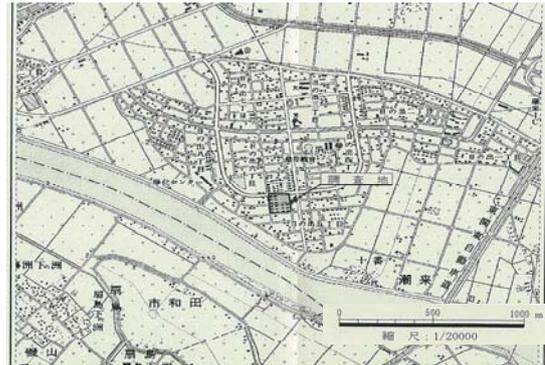


図-6 地形図平面図

(国土地理院「1:25,000土地条件図潮来」より)⁶⁾



(a) 明治18年 (1/20,000迅速図)⁷⁾



(b) 平成14年 (1/25,000数値地図)⁸⁾

図-7 旧地形と現地形との比較



図-8 迅速測図に基盤地図情報を重ね合わせたもの
(歴史的農業環境閲覧システムによる)⁹⁾

5. 住宅建物の傾斜勾配及び沈下量の分析

表-1は、潮来市の罹災証明の旧基準及び新基準の対比である。新基準では液状化での建物被害の罹災証明の判定が上がり、被害なしはすべて一部損壊になっていることが分かる。図-9は、罹災証明による建物被災判定結果を平面図に示したものである。

図-10は、罹災証明による住宅及び非住宅の建物の傾斜勾配を平面図に示したものである。建物被災判定結果ですべて住宅が液状化による被害としている。

表-2及び図-12は、住宅及び非住宅の建物の傾斜勾配

を計測した結果である。住宅建物の傾斜勾配を10/1,000までは5/1,000刻みで10/1,000以上は10/1,000間隔で集計した結果である。住宅では新基準の軽微な一部損壊は623件に対して、住宅の傾斜勾配が0～5/1,000で502件でほぼ一致していることから5/1,000が建物の軽微な境であることがわかる。また、一部損壊と半壊の合計は1,723件、0～10/1,000の合計1,438件でほぼ一致していることから10/1,000が建物の半壊の境であり、この程度では通常通りの生活していた。

図-11は罹災証明による住宅及び非住宅の建物の沈下を平面図に示したものである。表-3及び図-13は、住宅及び非住宅の建物の傾斜勾配を計測した結果である。さらに、非住宅では新基準の被害なし及び一部損壊は165件に対して、住宅の傾斜勾配が0～5/1,000で108件でほぼ一致していることから5/1,000が建物の軽微な境であることがわかる。また、一部損壊と半壊の合計は353件、0～10/1,000の合計297件でほぼ一致していることから10/1,000が建物の半壊の境であることがわかる。

以上から、住宅及び非住宅の建物の傾斜勾配は同様な傾向にあることが明らかとなった。

また、図-14は丁目ごとの建物被災判定結果をグラフにしたものである。4・5・6・8丁目が大規模半壊及び半壊となっていることから幹線道路の南側に当たる宅地被害が甚大であることがわかる。

図-15は丁目ごとの住宅建物の傾斜量をグラフにしたものである。10/1,000以上の傾斜量が4・6丁目で半数以上を占め、5・8丁目で44%を占めていることから同様に幹線道路の南側に当たる宅地の傾斜被害が甚大であることがわかる。

図-16は丁目ごとの住宅建物の沈下量をグラフにしたものである。10cm以上の沈下量が4丁目で93%、8丁目で89%を占めていることから同様に幹線道路の南側に当たる宅地の沈下被害が甚大であることがわかる。

表-1 罹災証明の旧基準及び新基準の対比

項目	罹災証明	旧基準(計)	新基準(計)
住宅	住宅総数	2,374	2,374
	全壊	9	66
	大規模半壊	17	585
	半壊	331	1,100
	一部損壊	1,966	623
	被害なし	51	0
非住宅	住宅総数	553	553
	全壊	32	40
	大規模半壊	6	160
	半壊	56	188
	一部損壊	424	155
	被害なし	35	10

表-2 住宅・非住宅の傾斜勾配

基準	住宅	非住宅
0～5/1,000	502	108
5/1,000～10/1,000	936	189
10/1,000～20/1,000	760	141
20/1,000～30/1,000	143	55
30/1,000～40/1,000	26	26
40/1,000～50/1,000	4	9
50/1,000以上	3	25
合計	2,374	553

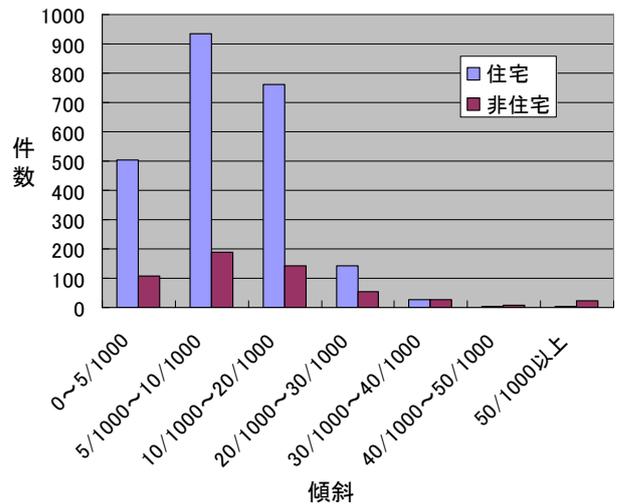


図-12 住宅と非住宅の建物の傾斜量

表-3 住宅・非住宅の沈下量

基準	住宅	非住宅
0～10cm	987	253
10～20cm	846	197
20～30cm	350	73
30～40cm	139	19
40～50cm	27	6
50～60cm	15	3
60cm以上	10	2
合計	2,374	553

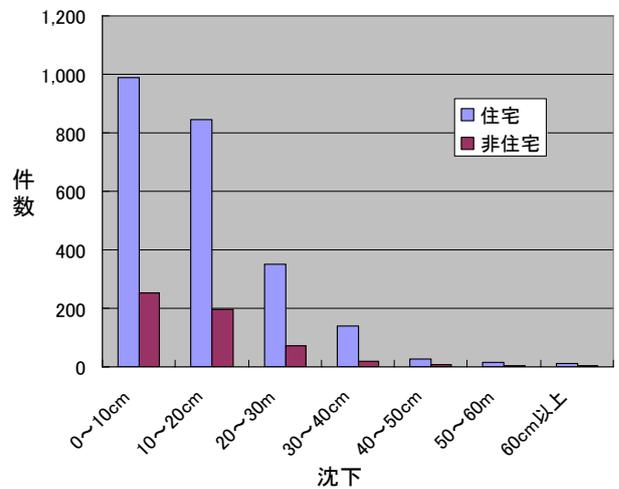


図-13 住宅と非住宅の建物の沈下量



凡 例

記 号	名 称
	地 区 界
<調査結果>	
	被害なし
	一部損壊
	半壊
	大規模半壊
	全壊

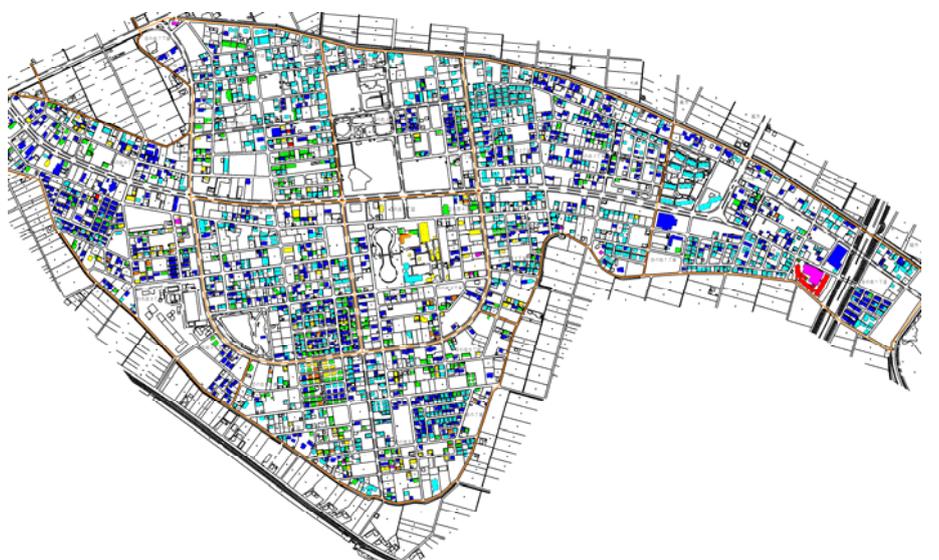
図-9 建物被災判定結果



凡 例

記 号	名 称
	地 区 界
<傾斜>	
	$\sim 5/1000$
	5/1000~10/1000
	10/1000~20/1000
	20/1000~30/1000
	30/1000~40/1000
	40/1000~50/1000
	50/1000~

図-10 建物の傾斜量による分類



凡 例

記 号	名 称
	地 区 界
<沈下>	
	0cm~10cm
	10cm~20cm
	20cm~30cm
	30cm~40cm
	40cm~50cm
	50cm~60cm
	60cm~

図-11 建物の沈下量による分類

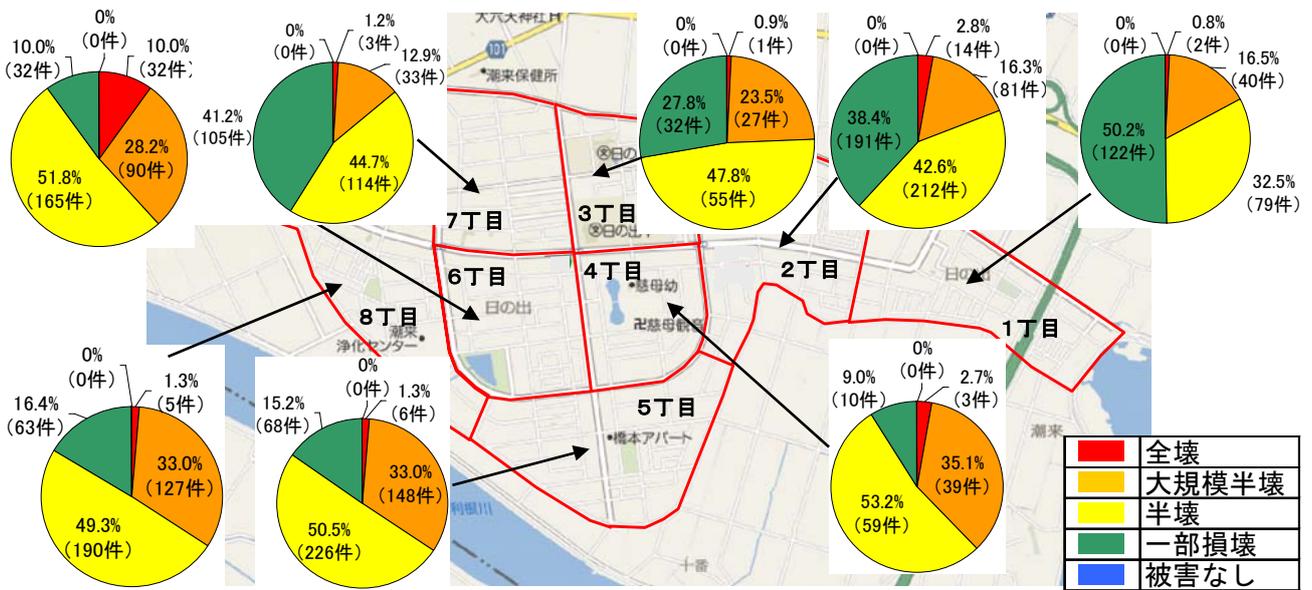


図-14 丁目ごとの建物被災判定結果

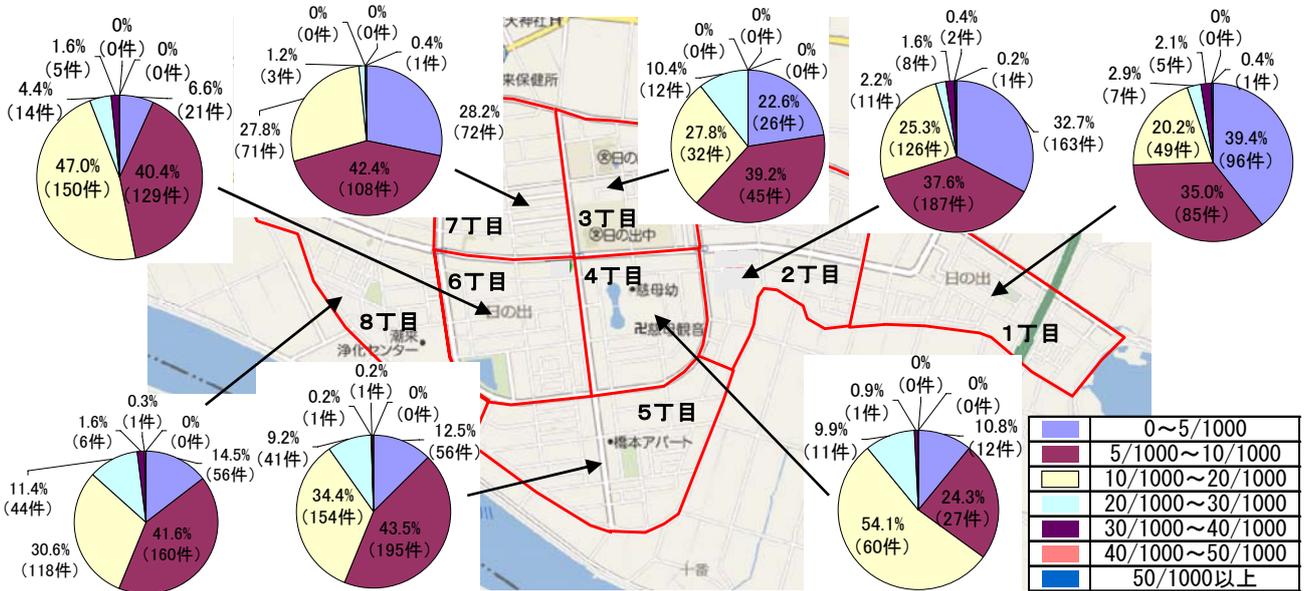


図-15 丁目ごとの住宅建物の傾斜量

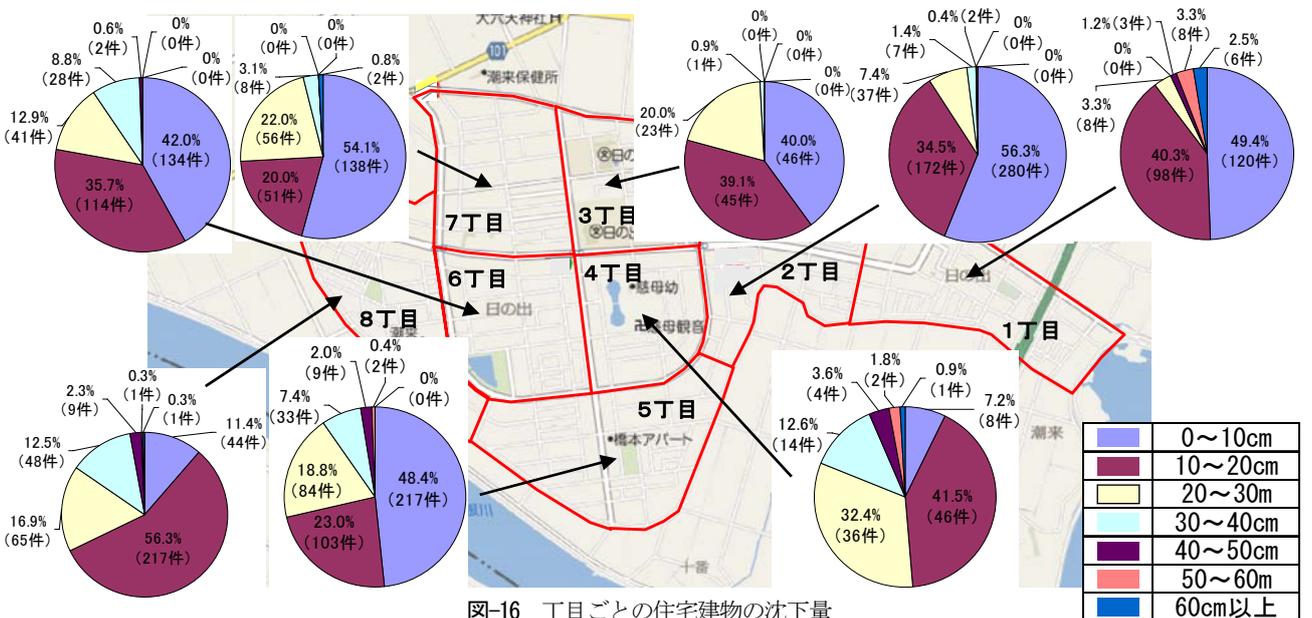


図-16 丁目ごとの住宅建物の沈下量

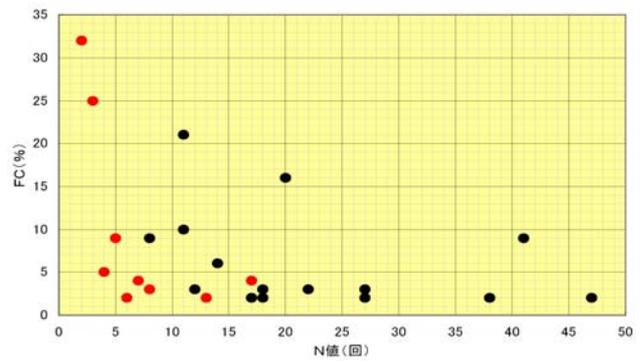
6. 液状化の簡易判定結果

潮来市から既存のボーリング調査報告書の情報提供をして頂きそれも基に液状化の解析を行った。

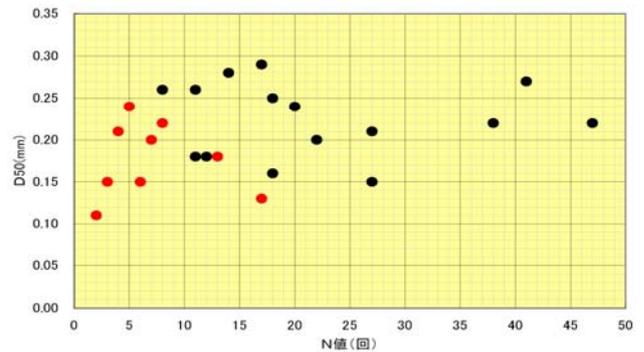
地震前の既存資料の過去6地点のボーリング結果における室内土質試験を用いて液状化の検討を行った。それによると、中規模対応（200gal）の場合は、「As1層は液状化の可能性あり」と評価されるが、大規模対応（350gal）の場合は、As2層については地層の最上部で液状化を示す箇所も認められる。今後、多くのデータ解析よりAs2層の上部層について液状化の可否について検討を行う必要がある。図-17 (a) は中地震200gal時のN値とFc (%) の関係で、赤丸が液状化の可能性ありと判定されたデータでN値が小さくFcが35%以下となっている。また、図-17 (b) はN値とD50の関係で、赤丸が液状化の可能性ありと判定されたデータでN値が小さくD50が0.25mm以下となっている。図-18は大地震350gal時で200galよりもN値が20を越えたものでも液状化の可能性があるとされている。

図-19は200galの液状化と非液状化の粒径加積曲線である。(b) は液状化する可能性があるもの、(c) は液状化する可能性がないもの、(a) はその両方を合わせたものである。図-20は350galの液状化と非液状化の粒径加積曲線で200galと同様である。

図-21は日の出地区の地盤構成である。(b) A-A'の南北方向では幹線道路から北側には砂層だけであるが、南側には厚く粘土層の上に多少北側より厚く、地下水位が高くなっていることが明らかとなった。今後、既存ボーリングに加え新規のボーリング及び液状化の物理試験を実施して液状化のメカニズムを明らかにする必要がある。



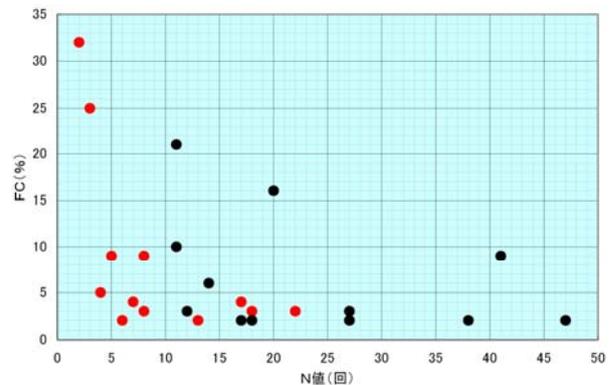
(a) N値とFcの関係



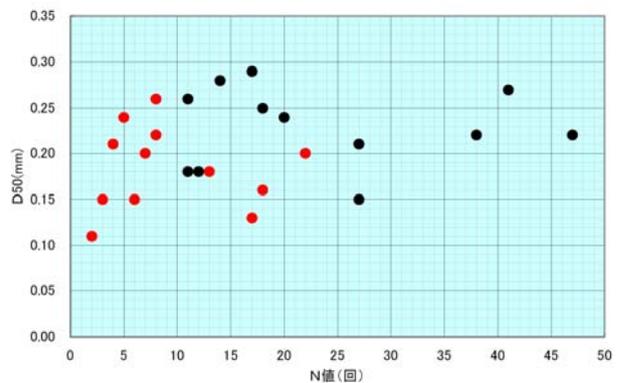
(b) N値とD50の関係

図-17 200galの場合のN値とFc及びD50の関係

注) 赤丸は液状化の可能性ありと判定されたデータを示す。



(a) N値とFcの関係



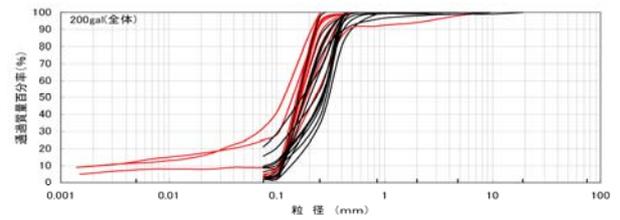
(b) N値とD50の関係

図-18 350galの場合のN値とFc及びD50の関係

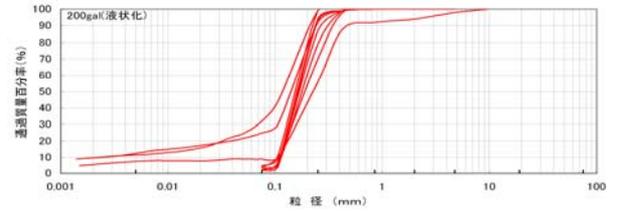
注) 赤丸は液状化の可能性ありと判定されたデータを示す。

表-4 各地盤における200galと300galの液状化の判定

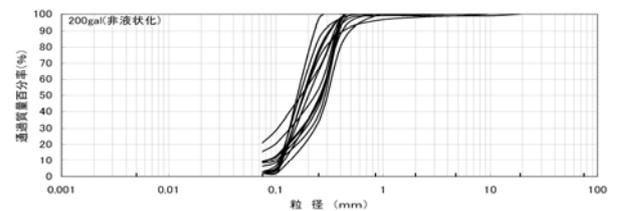
試験深度 (m)	地層名	N 値 (回)	FC (%)	D50 (mm)	液状化係数 FL 値		液状化係数 FL 値	
					200 gal	判定	350 gal	判定
1.15~1.45	As1 a-1	17	2	0.29	5.091	×	2.909	×
2.15~2.45		12	3	0.18	1.839	×	1.051	×
3.15~3.45		6	2	0.15	0.559	○	0.320	○
4.15~4.47		3	25	0.15	0.607	○	0.347	○
5.15~5.47		5	9	0.24	0.562	○	0.321	○
6.15~6.46	8	3	0.22	0.531	○	0.304	○	
7.15~7.45	As2 a-1	18	3	0.16	1.293	×	0.739	○
8.15~8.45		17	4	0.13	0.971	○	0.555	○
9.15~9.45		38	2	0.22	4.230	×	2.417	×
10.15~10.45	27	3	0.21	3.615	×	2.065	×	
1.15~1.45	As1 a-2	18	2	0.25	7.396	×	4.226	×
2.15~2.45		7	4	0.20	0.836	○	0.478	○
3.15~3.50		2	32	0.11	0.721	○	0.412	○
6.15~6.48		4	5	0.21	0.395	○	0.226	○
7.15~7.45	As2 a-2	13	2	0.18	0.762	○	0.436	○
8.15~8.45		27	2	0.15	4.559	×	2.605	×
9.15~9.45		22	3	0.20	1.661	×	0.949	○
10.15~10.45	As3 a-2	47	2	0.22	4.628	×	2.645	×
2.15~2.45	As1 b-1	8	9	0.26	1.167	×	0.667	○
2.15~2.45	As1 b-2	11	10	0.26	2.365	×	1.352	×
2.15~2.45	As1 b-3	14	6	0.28	3.149	×	1.799	×
5.15~5.45	As2 b-3	20	16	0.24	4.980	×	2.846	×
2.15~2.45	As1 b-4	11	21	0.18	4.796	×	2.741	×
5.15~5.45	As3 b-4	41	9	0.27	4.529	×	2.588	×



(a) 液状化 (赤) と非液状化(黒)

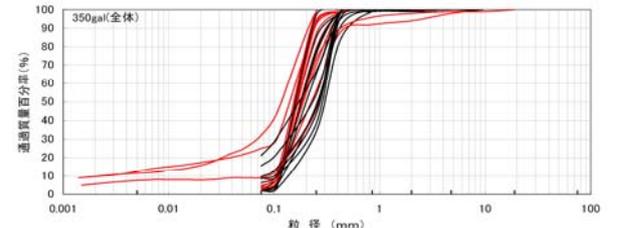


(b) 液状化 (赤)

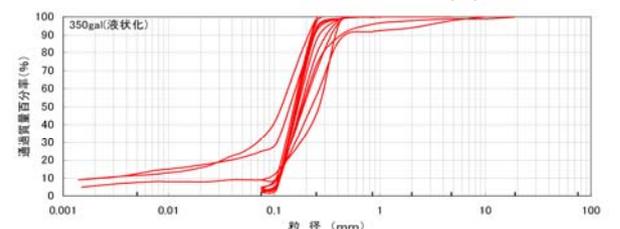


(c) 非液状化 (黒)

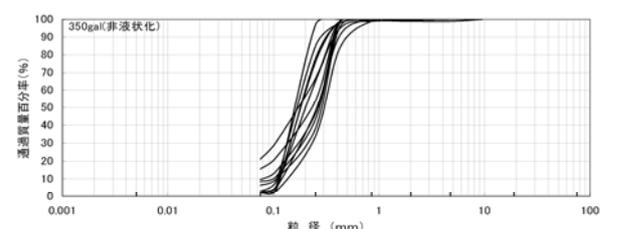
図-19 200galの粒径加積曲線



(a) 液状化 (赤) と非液状化(黒)

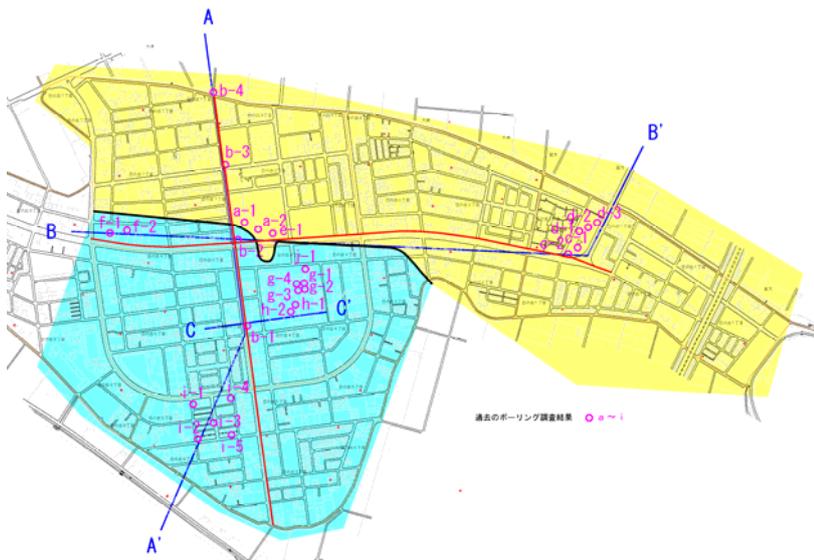


(b) 液状化 (赤)

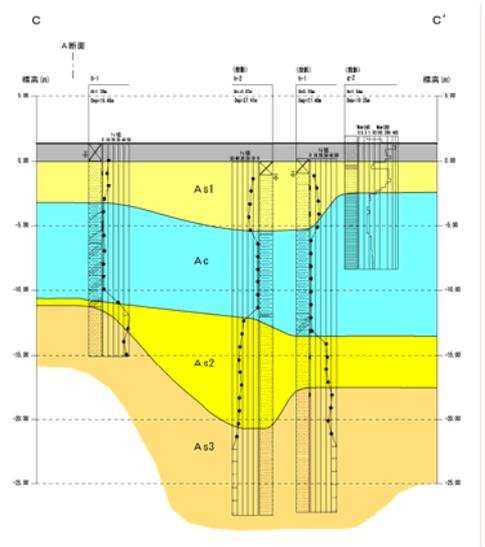


(c) 非液状化 (黒)

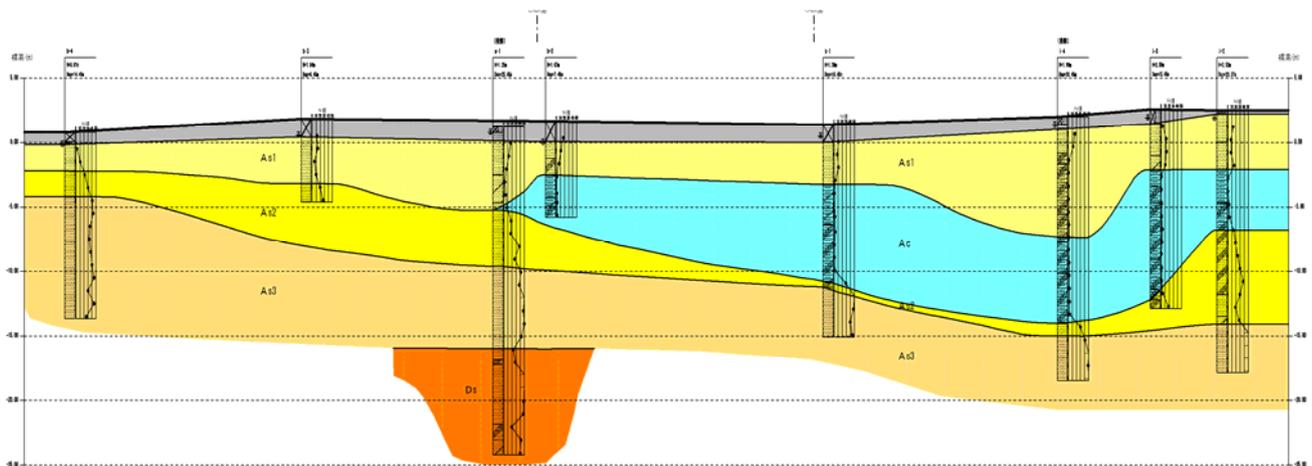
図-20 350galの粒径加積曲線



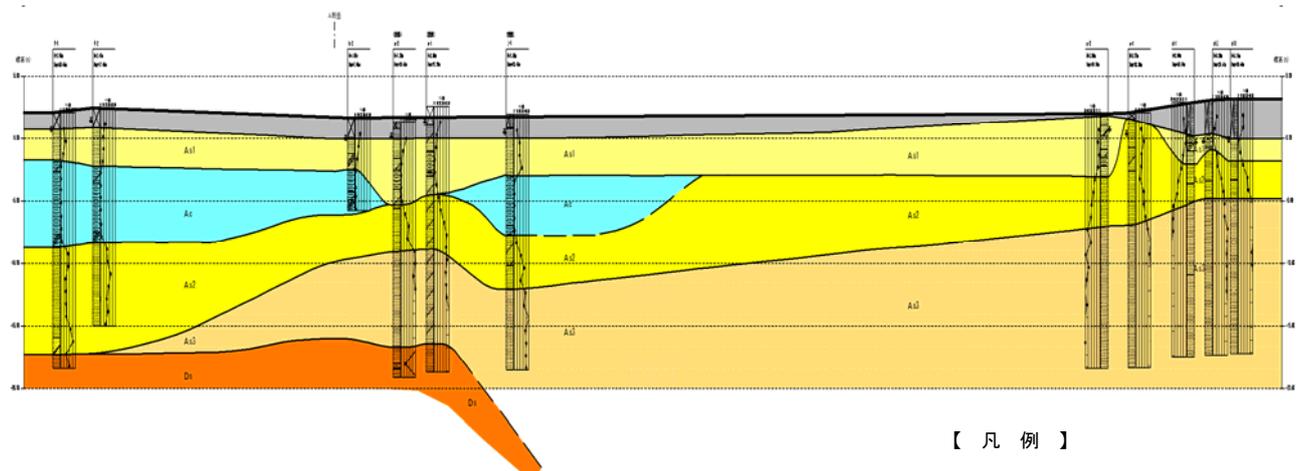
(a) 土質調査平面図



(d) C-C' 断面図



(b) A-A' 断面図



(c) B-B' 断面図

【 凡 例 】

- : 表土・盛土・埋土
- As1 : 沖積第1砂層土層
- Ac : 沖積粘性土層
- As2 : 沖積第2砂質土層
- As3 : 沖積第3砂質土層
- Ds : 洪積砂質土層

図-21 潮来市の地盤構成

7. おわりに

(1) 日の出地区の液状化被災状況

日の出地区では宅地地盤の液状化に伴う大規模な噴砂が生じ、多くの住宅が前面歩道より約20cm～30cmの沈下を生じていた。1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震においても液状化の発生が報告されており、再液状化が生じている。道路の側溝やライフラインが側方流動によって圧縮され、側溝の蓋が変形して傾き、浮き上がり現象を生じているところである。ただし、のうち、造成前に鋼管杭を打設した住宅及び周囲を擁壁で囲み1m程度盛土している住宅は建物の沈下・傾斜は無く無被害であった。

(2) 地震動

日の出地区の本震の推計震度分布図で震度6弱であることがわかる。7.3km離れた観測点K-NET鹿嶋での最大加速度が本震で658.4 gal、余震で408.4 gal、50gal以上の継続時間が本震で89.39s、余震で103.99sと長時間を計測した。本震の時も大きく長く揺れたが、その後の30分程度して茨城県沖でも地震があり、それらによって液状化した後も大きく揺すぶられ、大きな沈下・傾斜になったのではないかと考えられる。

(3) 地区の造成履歴

日の出地区の造成履歴は、昭和16年より内浪逆浦干拓して水田化された。その後、昭和54年に宅地化されたところである。宅地化する際には、過去の履歴を十分調査して液状化の危険性を調査し、対策をすべきである。

(4) 住宅建物の傾斜勾配及び沈下量の分析

潮来市の罹災証明の旧基準及び新基準の対比し、建物被災判定結果、傾斜量・沈下量を分析した。その結果、住宅の傾斜勾配を5/1,000以下になるようにすれば一部損壊以下にすることができることがわかった。また、10/1,000以下で通常通りの生活している建物の半壊以下になることがわかった。現在復旧対策として、液状化対策や沈下修正では10/1,000以下になるようにする必要があると考える。

(5) 液状化の簡易判定結果

潮来市から既存のボーリング調査報告書の情報提供をして頂きそれも基に液状化の解析を行った。

その結果、上部砂層As1層は中地震200gal時に液状化の可能性ありと評価され、大規模対応350galの場合は、As2層の最上部で液状化を示す箇所も認められた。今後、多くのデータ解析よりAs2層の上部層について液状化の可否について検討を行う必要がある。また、幹線道路から北側には砂層だけであるが、南側には厚く粘土層の上に多少北側より厚く、地下水位が高くなっていることが明

らかとなった。今後、既存ボーリングに加え新規のボーリング及び液状化の物理試験を実施して液状化のメカニズムを明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人 地盤工学会：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、pp.4,2011.8
- 2) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人 地盤工学会：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別冊資料（調査票No.118）pp.1,2011.8
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000043554.pdf
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成23年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査、茨城県・千葉県境周辺における液状化等の被害（速報）、2011.4
- 4) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人 地盤工学会：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別冊資料（調査票No.118）pp.5,2011.8
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000043554.pdf
- 5) 気象庁：http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/suikui/201103111446_288/01103111446_288_1.html
- 6) 国土地理院：「1:25,000土地条件図潮来」、<http://www1.gsi.go.jp/geowww/themap/view/mapview.php>
- 7) 第1軍管地方迅速図：1/20,000、参謀本部陸軍部測量局発行磯浜及鹿嶋近傍より「潮来市」、「鹿嶋村」
- 8) 国土地理院数値地図（地図画像）：25,000、「潮来市」、「佐原東部」、2002.6.
- 9) 歴史的農業環境閲覧システム：農業土地利用変遷マップ、http://www.finds.jp/altmap/rapid_kanto.html

LIQUEFACTION DAMAGE ANALYSIS BY THE 2011 TOUHOKU BIG EARTHQUAKE ON THE HINODE AREA IN ITAKO CITY

Takao HASHIMOTO and Susumu YASUDA

By the Tohoku big earthquake disaster in 2011, the liquefaction of the ground occurred over the wide range of the Kanto district surrounding Tokyo. Great damage occurred in a residence, a road, a river bank, harbor facilities, a lifeline, etc. Especially, owing to the liquefaction damage of housing site, on the Hinode area in Itako city, Ibaraki. Then, we was offered the information of the damage investigation of the residence and the ground by Itako city.

The present paper deals with the result of analyzing the liquefaction damage using this data, it is cleared that the ground of housing site is the layer of loose sand on the surface which liquefies easily , and the groundwater level is high. It did not have damage the residence which was carried out banking of 1 m or more ,or was strucked the pile.