

# 千葉県浦安市における2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下の長期観測

濁川 直寛 浅香 美治

(技術研究所)

(技術研究所)

## Long-term Observation of Subsidence Induced by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake in Urayasu City, Chiba Prefecture

Naohiro Nigorikawa and Yoshiharu Asaka

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震発生後に千葉県浦安市を対象とした広域的かつ継続的な水準測量を実施し、沖積粘性土の沈下現象の実態把握を目的とした。その結果、今回の地震に伴う長期的な沈下の発生を確認した。第一期埋立て地(1968～1975年)における地震後の沈下速度は6mm/年であり、地震前の埋立てによる圧密沈下速度の2倍以上であった。一方で、第二期埋立て地(1978～1980年)の沈下挙動は、埋立て年代や地盤改良履歴の有無によって異なることが明らかになった。さらに、浦安市北部の沖積低地(自然地盤)において、地震後の沈下は確認されなかった。

The aim of the study reported in this paper is to reveal the long-term settlement of a Holocene clay ground after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. The results are a chronological record of changes in settlement of first-order benchmarks and survey points showing that long-term ground settlement was taking place due to the earthquake. In Phase I reclaimed land, the settlement rate is shown to be approximately 6 mm/year, more than twice the rate of the settlement before the earthquake. In Phase II reclaimed land, the settlement behavior is found to differ according to whether the reclaimed land had been improved or not. Furthermore, the natural alluvial lowland has not settled since the earthquake.

### 1. はじめに

過去の地震被害の事例には、軟弱な粘土層が存在したために地震後に継続的な沈下が発生した、あるいは地震前に生じていた圧密沈下が地震後に一層加速したと言われるものがある。例えば、1957年メキシコ地震<sup>1)</sup>が代表的な事例として挙げられる。この事例では、未圧密状態にあった高含水状態(含水比300～400%)の火山灰質粘性土の沈下勾配が地震後に大きくなったと報告されている。同様の事例は日本国内でも確認されており、1978年宮城県沖地震<sup>2)</sup>、1995年兵庫県南部地震<sup>3)</sup>、2007年中越沖地震<sup>4)</sup>において、粘性土に起因する地震後の地盤沈下が指摘されてきた。

このような沈下現象は既往の遠心模型実験<sup>5),6)</sup>や数値計算<sup>7)</sup>においても確認されている。そのメカニズムは、地盤に繰り返しせん断力が作用したときに粘性土内の過剰間隙水圧が上昇し、その水圧が地震後に消散する過程で体積変化が生じると説明されて

いる。砂質土の場合も同様のメカニズムによって体積変化(液状化後の即時沈下)を生じるが、粘性土の場合はその透水性の低さから、数か月～数年に亘る長期的な沈下となる<sup>2)</sup>。このような現象は、地震発生直後にのみ実施される一般的な被害調査だけでは、その実態を把握できないことを意味している。また、既往の報告事例<sup>2),8)</sup>はいずれもピンポイントでの観測記録であり、軟弱な粘土層が広く分布する地域全体における地震後の沈下傾向を継続的に計測した取り組みは過去に例がない。

そこで著者らは、地震後における粘性土の長期沈下現象の実態把握を目的とした広域的・継続的な水準測量を実施した。対象は2011年東北地方太平洋沖地震発生後の千葉県浦安市とし、2011年4月から2013年4月の期間に6回の実測を行った。本報では実測結果および、確認された現象の傾向を報告する。

## 2. 千葉県浦安市の地盤

### 2.1 地形分類

図-1に千葉県浦安市の地形分類図<sup>9)</sup>を示す。同図には代表的なボーリング地点<sup>10)</sup>を加筆した。浦安市の南部は海中の砂を用いた埋立て事業により造成された地域であり、市総面積の3/4を埋立て造成地が占めている。埋立ては二期に分けて行われ、第I期の地区は1968～1975年に、第II期の地区は1978～1980年に造成された<sup>11)</sup>。地層構成は、上位より埋土、沖積砂質土(N値2～20程度)、沖積粘性土(N値0～5程度)、洪積砂質土(N値50以上)となっており、洪積砂質土層の上位に腐植土が堆積している箇所も一部ある<sup>10),12)</sup>。

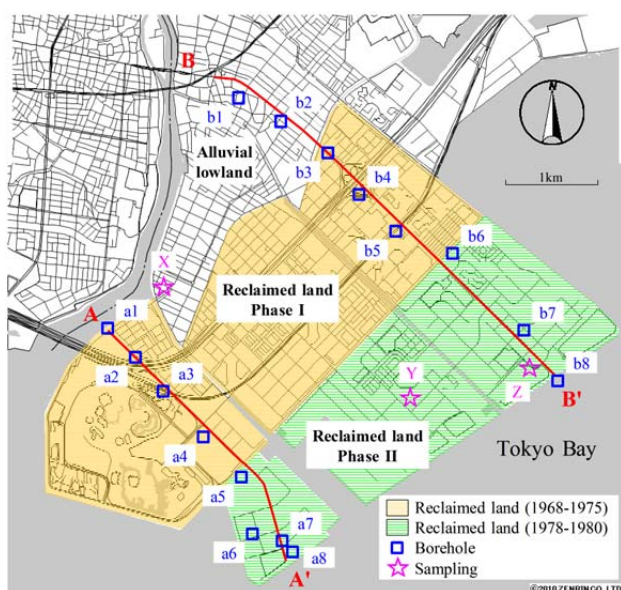


図-1 地形分類とボーリング位置図

### 2.2 地下構造と土質工学的性質

図-2に浦安市の埋立て造成履歴と推定地層断面図を示す。断面図は浦安市内で実施された地盤調査結果<sup>10),12)</sup>に基づいて作成した。図中のボーリング番号は図-1に示した地点番号と対応している。本報では、N値が3以下の沖積粘性土層を地震後に長期的な沈下を生じ得る軟弱な粘性土層と見なし、これをAc層と定義して図-2に記した。同様に、N値が50以上の洪積砂質土層をDs層、地表面付近の埋土、沖積砂質土層をFill/As層と定義した。浦安市の地下構造には深い埋没谷や波食台があり、T.P.-20m以深の構造は複雑な形状となっている。Ac層の厚さは地域ごとで大きく異なり、断面A-A'で層厚25～40m、断面B-B'で層厚10～30m程度堆積している。断面B-B'では、南東側ほどAc層が厚く堆積している傾向が見られる。

浦安市南東部における新市街地の建設にあたっては当初より、埋立てによる圧密沈下が懸念されていた。既往の報告書<sup>13)</sup>には、第II期埋立て地区の東側において、プレローディング(PL)工法とサンドドレーン(SD)工法による圧密促進が図られたと記録されている。また、当時の液状化判定結果によると、深度8～15m間(自然堆積層)で液状化安全率FLが1未満となる地点が多く、液状化対策が必要であると判断された。その際、液状化が懸念される道路計画部における液状化対策工法として、適用性・経済性からサンドコンパクションパイル(SCP)工法が選定された。SCP工法の施工範囲は不明であったため、図-2の地層断面図上には、SD工法による改良範囲とPL工法の載荷盛土高を加筆した。

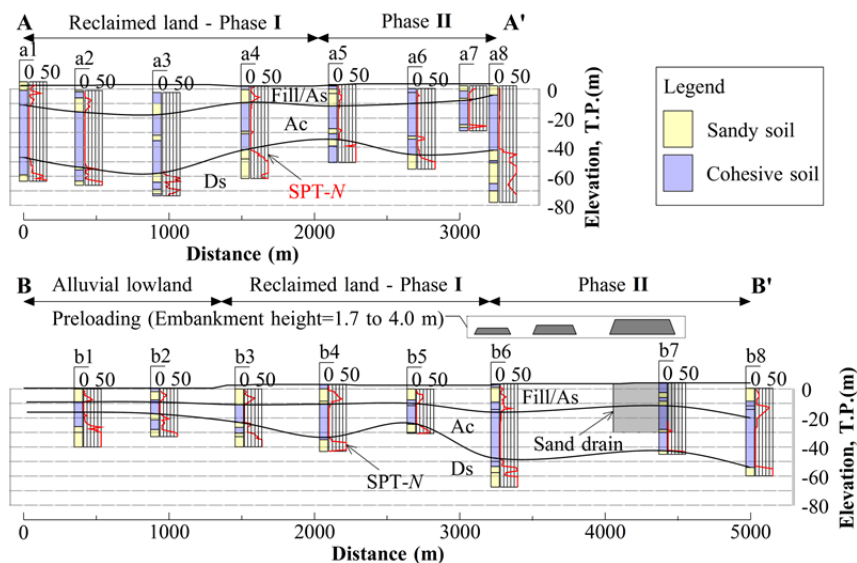


図-2 埋立て造成履歴と推定地層断面図

表-1にAc層の物理特性<sup>14)</sup>を、図-3に同層の粒度分布<sup>14)</sup>を示す。試料のサンプリング地点と深度は図-1に示した地点名(X~Z)と対応している。物理特性と粒度分布はサンプリング地点・深度毎にバラバラしているが、高い液性限界を示し、多くの細粒分を含む点は全てに共通している。地盤工学会基準<sup>15)</sup>に基づいて工学的に分類すると、Ac層は高含水比粘性土(CH)、または高含水比シルト(HM)となる。

図-4は図-1上の地点X~ZにおけるAc層の圧密降伏応力と鉛直有効土被り圧の深度方向分布である。X地点は沖積低地(自然地盤)内に位置しており、Ac層の過圧密比は1.0~2.7である。Y地点は埋立て地内に位置しており、Ac層の過圧密比は1.5~2.4である。Z地点はY地点と同様に埋立て地内に位置しているが、過圧密比の分布はG.L.-30mを境に異

表-1 Ac層の物理特性

Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index	Specific gravity	Unconfined compression strength
LL [%]	PL [%]	PI	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$q_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]
81-113	35-54	46-59	2.64	130-311

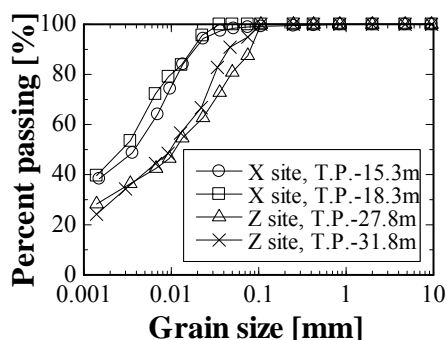


図-3 Ac層の粒径加積曲線

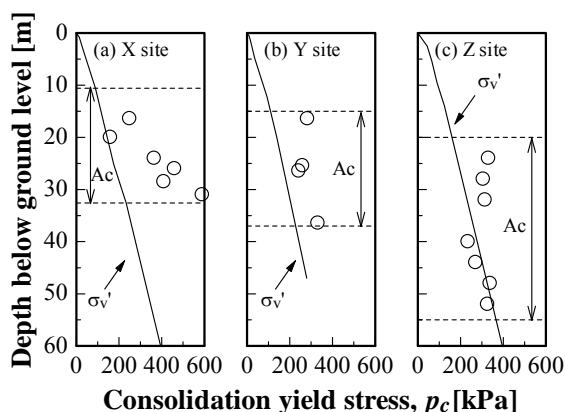


図-4 圧密降伏応力の深度方向分布

なり、G.L.-30m以浅では若干の過圧密状態、G.L.-30以深ではほぼ正規圧密状態であることが読み取れる。ボーリングコア試料の肉眼観察<sup>16)</sup>によると、Ac層の土色は灰褐色、または暗灰色で少量の貝殻を含むと記されている。すなわち、Ac層は海成粘性土と推察される。

### 3. 水準測量の概要

#### 3.1 測線と測点

本計測で設定した測線、測点 A1~A10, B1~B11, および千葉県が管理する水準点 U1, U3A, U14, U16 の位置を図-5に示す<sup>10)</sup>。なお、水準点直下のボーリングデータは存在しないため、水準点位置の正確な地盤情報は不明であることに留意されたい。測線は北部の沖積低地から南部の埋立て地を縦断するように2本設定した。このような配置とした理由は、地震後に生じる長期沈下と埋立て造成履歴との関係性を考察するためである。測線Aは舞浜~千鳥を結ぶ全長3kmの測線である。測線Bは東西線浦安駅を始点とし、北栄・猫実~日の出・明海を結ぶ全長5kmの測線である。

測点はいずれも改修、移設、消失、および局所的な沈下の恐れが少ないものを選び、測線Aには10箇所、測線Bには11箇所の測点を設けた。測点の設置間隔は150~800mである。測点の一例を写真-1、写真-2に示す。測点A2は街灯の基礎、測点B4は歩道の金属鋲に設定したものである。

水準測量の基準点(不動点)は地盤変動の影響を避けるために支持杭構造物の壁面、あるいは高架橋の

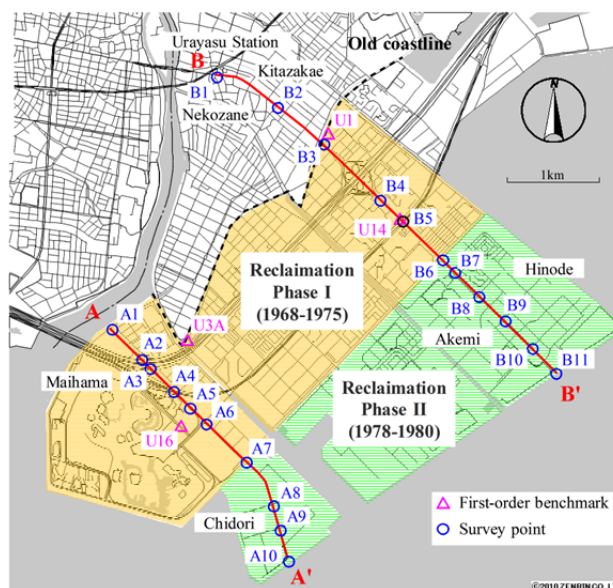


図-5 測線・測点・水準点の位置図



写真-1 測点 A2: 街灯の基礎



写真-2 測点 B4: 歩道の金属釘



写真-3 基準点のレベル計測



写真-4 中継点の設置



写真-5 測点のレベル計測

橋脚に設定した。なお、基準点を設定した構造物の基礎形式は、既往の報告書<sup>13)</sup>に基づいて判断した。

### 3.2 測量手順

測量手順は下記のとおりである。

- (1) 基準点(既知標高)のレベルを読み取る(写真-3)。
- (2) 基準点のレベルを測点近傍まで中継する。中継点(写真-4)の間隔は30~40m程度である。
- (3) 基準点と測点のレベル差を読み取り(写真-5)、測点の標高を計算する。

本計測では、観測精度を管理するために3~4測点を結ぶ路線をひとつの水準路線とした往復観測を実施した。公共測量作業既定<sup>17)</sup>によると、各水準路線での許容閉合差は以下の式で定義されている。

$$C = m\sqrt{S} \quad (1)$$

ここに、 $C$ は閉合差(mm)、 $m$ は定数、 $S$ は路線長(km)である。本計測では、1級水準測量と同等の観測精度を保つために、定数 $m$ の値を2.5とした。

$$C = 2.5\sqrt{S} \quad (2)$$

各水準路線の路線長は0.3~1.4kmであり、これを式(2)に代入すると許容閉合差は1.3~2.9mmとなる。本計測ではこれを満足するように観測精度を管理した。

計測では毎回同じ測点と基準点を利用し、測線近傍の水準点に対しても鉛直変位の計測を実施した。計測は2011年4月より開始し、2013年4月現在までに初期値計測を含めて6回実施した。

## 4. 測量結果と分析

### 4.1 地震前後の沈下傾向の比較

図-6に2003年1月を基準日とした各水準点の沈下時刻歴<sup>18)</sup>を示す。同図は地表面の鉛直変位を表しており、地震前の埋立てに伴う圧密沈下<sup>18)</sup>、地震直後の即時沈下<sup>18)</sup>、および地震後の長期的な沈下をまとめて整理・図化したものである。ここでは地震

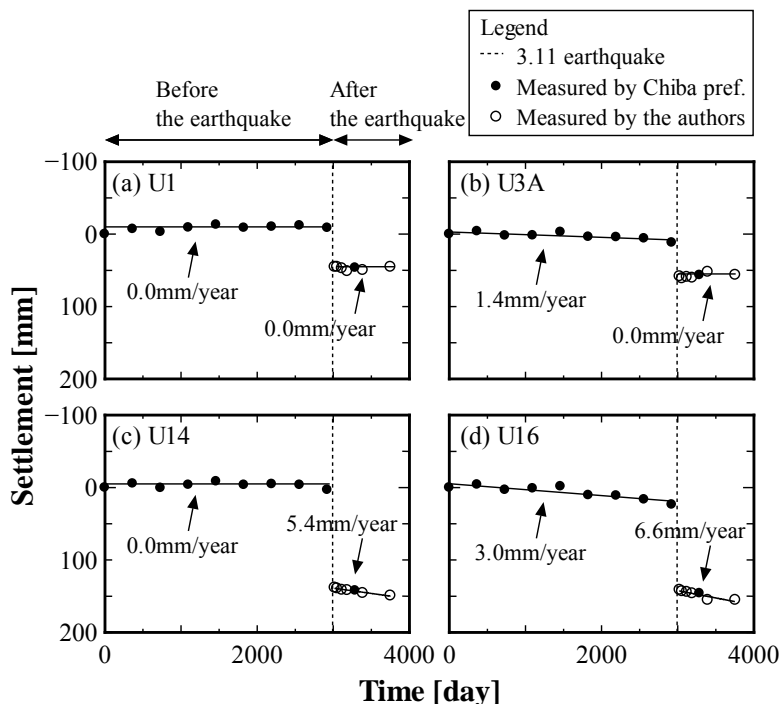


図-6 2013年1月を基準日とした各水準点の沈下時刻歴

前後の沈下を最小二乗法によって直線近似し、図中にはその勾配(沈下速度)を記した。

まず、地震直後の即時沈下に着目すると、その沈下量は沖積低地近傍の水準点 U1 と U3A で 50mm 程度、埋立て地内の水準点 U14 と U16 で 120～150mm 程度であった。即時沈下の要因としては地殻変動や液状化が考えられるが、今回の調査対象領域の中で地殻変動による沈下に大きな差が出るとは考えにくい。また、地震直後の災害調査<sup>19)</sup>によると、液状化が確認されたのは埋立て地のみであった。したがって、地震直後の即時沈下量の差は地盤の液状化に起因するものと考えられる。

次に、地震前後における沈下傾向の変化に着目する。図-6(a)、図-6(b)は、旧海岸線以北の沖積低地に位置する水準点 U1 と U3A の鉛直変位である。沖積低地では地震前後共に、継続的な沈下が生じていなかったことが読み取れる。一方で、図-6(c)、図-6(d)に着目すると、第 I 期埋立て地内に位置する水準点 U14 と U16 の沈下は、地震後に単調な増加を示している。この 2 点の沈下勾配はほぼ等しく 5.4～6.6mm/年であった。水準点 U14 では、埋立てによる圧密沈下は地震前にほぼ収束していたものの、今回の地震に伴い再び沈下が始まったことがわかる。また、水準点 U16 の沈下勾配は地震前後で約 2 倍となっており、今回の計測によって地震に伴う沈下速度の増加が明らかになったといえる。

なお、本計測結果は地表面の鉛直変位のみを計測したものであり、沈下の加速のメカニズム解明には至っていない。今回のケースは、地盤に地震による繰り返しせん断力が作用することで沈下速度が増加したものと考えられるが、実態の解明にはさらに詳細な検討が必要である。

#### 4.2 地震後の沈下傾向

測線に沿った全測点の計測時期ごとの沈下の変遷を図-7、図-8 に示す。なお、災害復旧工事の影響を受けて大きく標高値が変動した時点(測点 A8, A9, A10, および B8)のデータは除外している。図-9 は代表的な測点と水準点の沈下時刻歴である。この時刻歴では鉛直変位のゼロ点を 2011 年 4 月に実施した初期計測の値とした。北部の沖積低地での計測結果である図-9(a)を見ると、沖積低地内の 3 点は地震後にほとんど変動していないことがわかる。図-4 に示したように、沖積低地の Ac 層の過圧密比は埋立て地盤のものに比べて大きい。したがって、沖積低地において今回の地震に伴う Ac 層の顕著な沈下は生じなかったと推測される。対照的に、第 I 期埋立て地内での計測結果である図-9(b)には今回の地震に伴う沈下現象が表れている。図-9(c)～(e)は測点 B6～B11 の計測結果である。これらの測点は全て第 II 期埋立て地内に位置しているが、その挙動は地区毎に大きく異なる。前述したように、第 II 期埋立て地区の東側では、PL 工法と SD 工法を用い

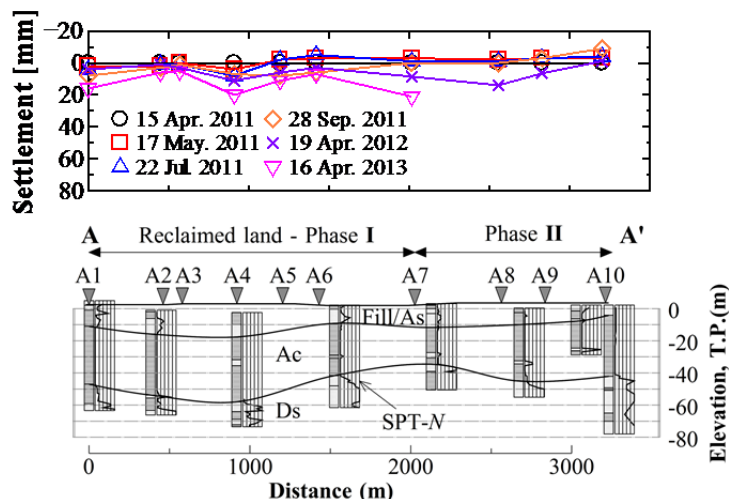


図-7 測線 A に沿った地震後の沈下の変遷

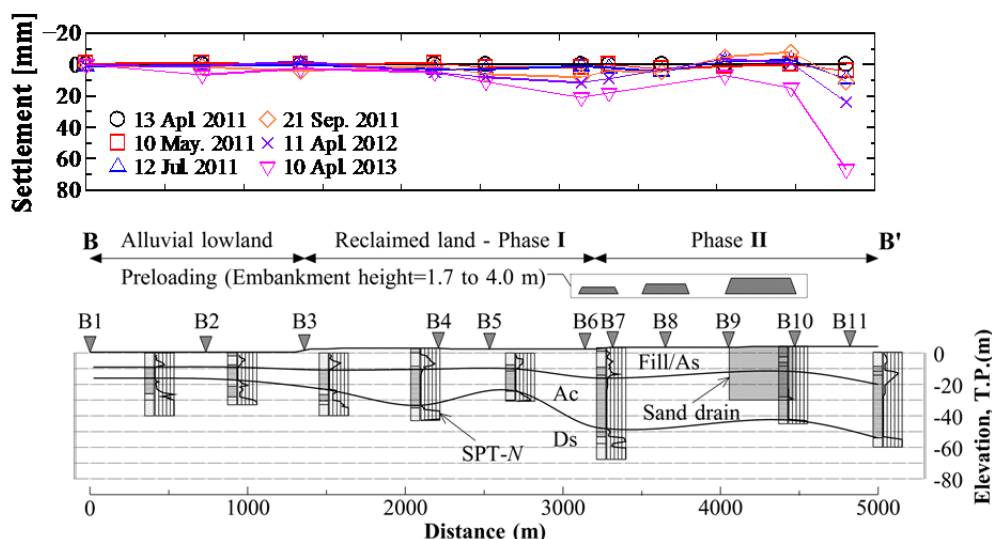


図-8 測線 B に沿った地震後の沈下の変遷

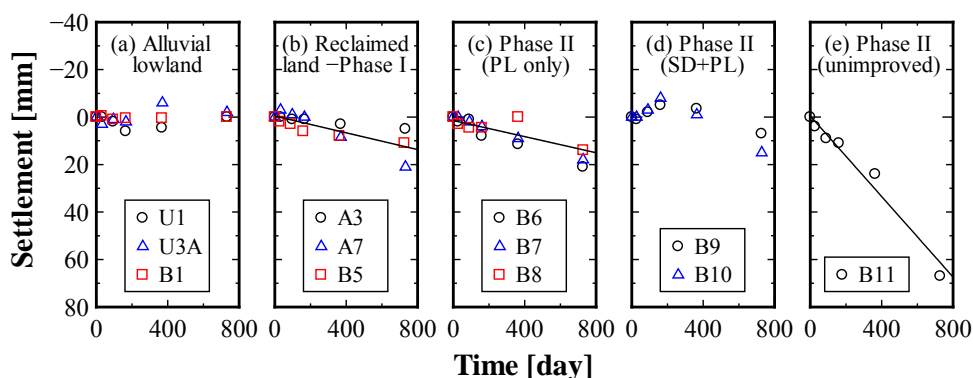


図-9 代表的な測点・水準点の沈下時刻暦

て圧密促進が図られた記録がある。図-8 に示したように測点 B9 と B10 は両工法によって地盤改良された領域に位置していることから、第 II 期埋立て地内で最も沈下量が小さかったと考えられる。一方で測点 B11 は未改良の領域に位置しており、ここでは顕著な沈下現象が生じる結果となった。PL 工法の

み施工された領域に位置する測点 B7 の沈下勾配は、第 I 期埋立て地内の測点 A7 の勾配とほぼ等しい結果であった。以上の結果から、地震に伴う粘性土の長期沈下現象は埋立て造成の有無、あるいは地盤改良履歴の有無の影響を大きく受けることが指摘できる。

計測結果では、測点 B9, B10 の地震発生後 400 日未満の期間で地盤が若干隆起する挙動が確認された。その要因を特定するため、地盤沈下と地下水位の季節的な変動の関係性<sup>20)</sup>について調査した。しかしながら、地下水位の変動が計測結果に及ぼした影響は小さく、地盤膨張の要因の特定には至らなかった。沈下／隆起のメカニズムの詳細な分析は今後の課題である。

## 5. まとめ

沖積粘性土が厚く堆積する千葉県浦安市を対象とした水準測量を行い、2011 年東北地方太平洋沖地震後に発生した地表面沈下を実測した。測線は北部の沖積低地から南部の埋立て地を縦断する 2 測線を設定し、2011 年 4 月から 2013 年 4 月の 2 年間にわたって計 6 回実測した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 千葉県浦安市では、地震後に広範囲にわたる継続的な沈下が生じている。この沈下は南部の埋立て地で観測され、北部の沖積低地では観測されなかった。
- (2) 地震に伴う沖積粘性土の長期沈下は線形的であり、第 I 期埋立て地における沈下勾配は約 6mm/年であった。地震前後の沈下勾配を比較したところ、その勾配は 2 倍以上となっており、地震に伴う沈下速度の増加が明らかになった。
- (3) 埋立て地における地震後の沈下挙動は地盤改良履歴の有無の影響を大きく受ける。過去にプレローディング工法とサンドドレーン工法の両方が施工された地区における沈下量は相対的に小さく、未改良地区では著しい沈下が確認された。

## 謝辞

本報の執筆にあたり、清水建設の福武毅芳氏には浦安市の地震被害に関して情報提供頂きました。また、清水建設の社本康広氏、坂本忠氏には測点の設定においてご助言いただきました。さらに千葉県が公開するボーリング柱状図と水準測量結果を使用して頂きました。記して感謝の意を表します。

## <参考文献>

- 1) Zeevaert, L.: "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions", Van Nostrand Reinhold Co. Inc., pp.521-523, 1972.

- 2) Towhata, I.: "Geotechnical Earthquake Engineering", Springer, pp.359, 2008.
- 3) 松田博, 柳楽英希: "繰返しせん断によって生じる飽和粘土の有効応力減少と再圧密沈下特性", 土木学会論文集 No.659/III-52, 63-75, 2000.9.
- 4) 小石悠介, 友瀨真寛, 大塚悟, 磯部公一: "沖積粘性土地盤の地震による長期地盤沈下に関する研究", 第 47 回地盤工学研究発表会講演集, pp.265-266, 2012.
- 5) 堀田洋之, 社本康広, 田村正, 成川匡文, 大島豊, 岸野泰章: "深い粘性土地盤上に建つ直接基礎構造物の沈下および地震時挙動に関する研究(その 2: 遠心模型実験)", 日本建築学会大会, pp.557-558, 1998.
- 6) Fiegel, G.L., Kutter, B.L. and Idriss, I.M.: "Earthquake-induced settlement of soft clay", Proceedings of the International Conference Centrifuge, vol.98, pp.231-236, 1998.
- 7) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A.: "Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance", Soils and Foundations, Vol.49, No.5, pp.739-756, 2009.
- 8) 安原一哉, 常田賢一, 松尾修, 那須誠: "粘性土の動的性質: 3.粘性土の動的問題に関するケース・ヒストリーと現象のメカニズム", 土と基礎 46(7), pp.57-62, 1998.
- 9) 国土地理院: 地図・空中写真閲覧サービス, <http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>, 2015/11/17 閲覧.
- 10) 千葉県: 千葉県地質環境インフォメーションバンク, <https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/chishitsu.html>, 2015/11/17 閲覧.
- 11) 浦安市: 浦安市の海面埋め立て, <http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/profile/profile/1000020.html>, 2015/11/17 閲覧.
- 12) 浦安市: "浦安市地震防災基礎調査報告書", 117p., 1986.
- 13) 神保廣光, 木村孝範: "宅地造成(臨海部)における地盤改良工法—浦安東地区, みなとみらい 21 地区", 月刊土木技術, pp.56-63, 1994.
- 14) 村上孝弥, 中井健太郎, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎: "厚く堆積した浦安市沖積粘性土層における深度方向の物理・力学特性の違い", 第 48 回地盤工学会研究発表会, pp.437-438, 2013.
- 15) 地盤工学会: "土質試験 基本と手引き", 丸善出版, 2009.
- 16) 地盤工学会: "地盤材料の構成式ワークショップ(第 3 回)当日配布資料", 2014.
- 17) 国土交通省: 国土交通省公共測量作業規程, <http://www.mlit.go.jp/tec/sekisan/sokuryokitei.html>, 2015/11/17 閲覧.

- 18) 千葉県: 水準測量成果表,  
<https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/jibanchinka/torikumi/seikaomote.html>, 2015/11/17 閲覧
- 19) 浦安市: 浦安市液状化対策技術検討調査委員会 資料・議事概要,  
<http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/johokoukai/shingikai/shichoukoushotsu/1002796/1002934.html>, 2015/11/17 閲覧
- 20) 千葉県: 千葉県の地盤沈下現況,  
<https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/jibanchinka/torikumi/genkyou.html>, 2015/11/17 閲覧.