

2011年東北地方太平洋沖地震における 浦安地区の長期沈下の実測と考察

濁川 直寛¹・浅香 美治²

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)
E-mail:n.nigorikawa@shzm.co.jp

²非会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)
E-mail: yoshiharu.asaka@shimz.co.jp

2011年東北地方太平洋沖地震における長期的な地表面の沈下の実測データを得ることを目的として、千葉県浦安市を対象とした水準測量を実施した。実測は2011年4月より開始し、2012年9月現在で初期値計測を含め5回の計測を実施して、水準点・測点の変動を記録した。測量の結果、地震を契機とした沖積粘土地盤の長期的な沈下が観測された。その沈下速度は7.3mm/yearで、地震発生前に生じていた埋立てによる圧密沈下速度の2.4倍以上にあたり、地震後に沈下の加速化が確認された。また、堆積年代や応力履歴の違いに起因する圧密の進行度合いの差異によって、地震後の長期的な沈下挙動が異なることが確認された。なお、今回の測量結果は、千葉県による水準測量結果および既往の有効応力解析による沈下量の計算結果とよい整合性が得られている。

Key Words : The 2011 East Japan Great Earthquake, Alluvial clay, Ground settlement, Leveling

1. はじめに

これまで地震時・地震後における地盤被害として大きく着目されてきたのは、砂地盤の液状化現象とそれに付随する沈下被害である。2011 年東北地方太平洋地震においても、千葉県浦安市をはじめとして、東京湾沿岸部の埋立地盤が広範囲に液状化し甚大な被害を受けたことは記憶に新しい。液状化に関する研究・実験は、1964 年新潟地震を契機に盛んに始められ、今では多くの知見が蓄積されている。

その一方で、液状化が起こらない粘土地盤は耐震性能上問題ないとされ、現在でも粘土地盤の地震中・地震後の挙動は、構造設計上、考慮が求められていない。地震後に発生する粘土地盤の沈下は、既往の計測事例^{1)~3)}や遠心模型実験^{4)・5)}などの研究によって指摘されており、支持地盤の変形の影響を大きく受ける盛土や直接基礎構造物の設計において今後重要な項目になりえると考えられる。

近年では、2007 年に発生した中越沖地震後、沖積平野に位置する柏崎市において地震を契機とした長期地盤沈下が小石ら⁶⁾によって指摘されている。しかしながら、粘土地盤の沈下に関する実測データの蓄積は未だに

乏しく、沈下量の定量的な評価に結びつく詳細な整理・分析が行われていないのが現状である。

そこで著者らは、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、3.11地震と呼称）における長期的な沈下の実測と、実測データに基づいた沈下傾向の定量的な把握を目的として、千葉県浦安地区を対象とした水準測量（以下、今回の測量と呼称）を実施した。

2. 水準測量の概要

(1) 測線と測点

今回の測量で設定した測点・測線の位置図および埋立地の造成歴⁷⁾を図-1に示す。

千葉県浦安市を対象として、舞浜～千鳥を結ぶ全長3,000mの測線（図-1中A-A'）を測線A、東京メトロ東西線浦安駅を起点として北栄・猫実～日の出・明海を結ぶ全長5,000mの測線（図-1中B-B'）を測線Bとした。沈下量と埋立て年代の関係を把握するために、測線は北西から南東に向かって、旧海岸線、第一期埋立地、第二期埋立地を縦断するように設定した。したがって、南東側ほど堆積年代の若い地盤となっている。

測量にあたっては、支持杭構造物の壁面の目地あるい

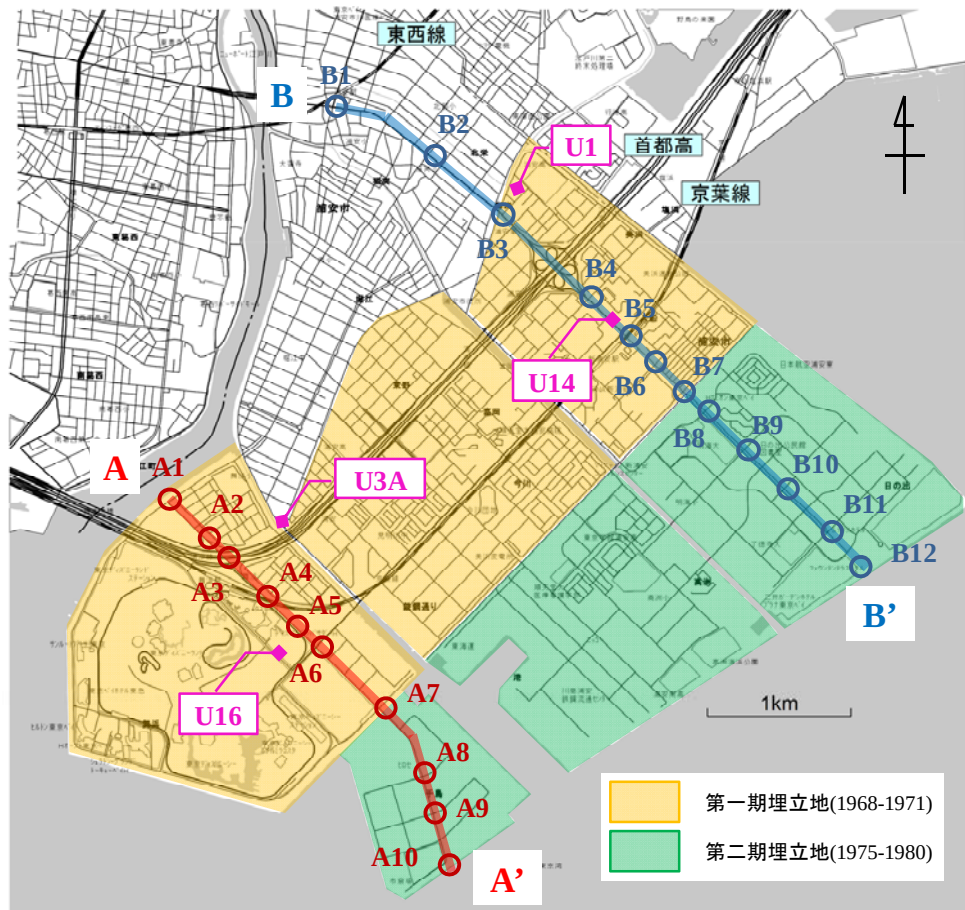


図-1 水準測量の測線（千葉県浦安市）



(a) 街灯の足元（測点 A2）



(b) 金属板（測点 B2）

写真-1 設定した測点

は高架橋脚に基準点を設けて計測した。支持杭構造物は、工事誌の記録⁸⁾や当社の施工記録に基づいて判別している。

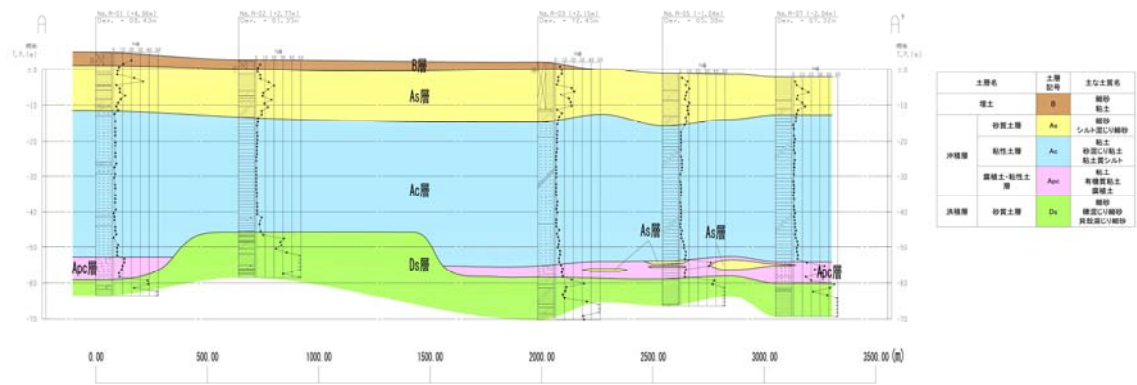
測点は、測線 A に 10 箇所（図-1 中 A1～A10）、測線 B に 12 箇所（図-1 中 B1～B12）設けた。いずれの測点も改修・移設・消失・局所的な沈下の恐れが少ないものを選び、信号機用ポールに固定された制御盤、金属板、街灯の足元、バス停屋根のポールの足元など（写真-1）

として、毎回同じ測点を利用した。測点の間隔は最短 150m、最長 800m となっている。

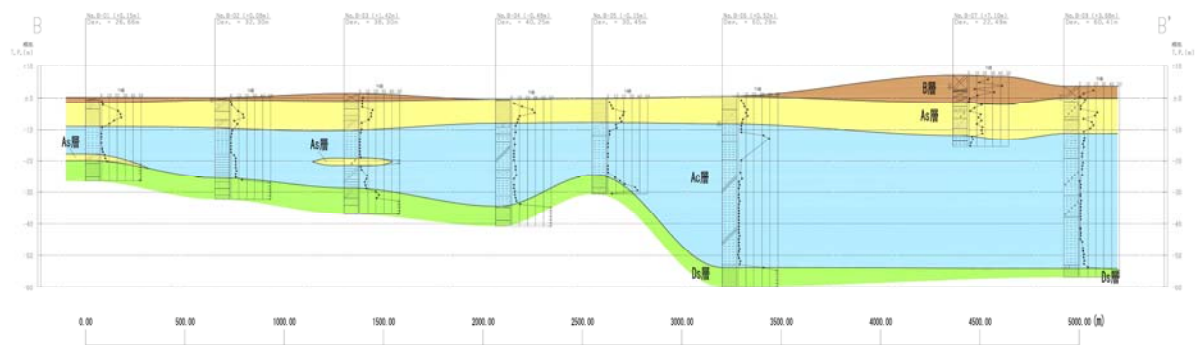
なお、図-1 中に示した U1、U3A、U14、U16 は千葉県が管理する一等水準点の位置を表している⁹⁾。

(2) 測量手順

今回の測量では、基準点のレベルを測点付近まで継いでいき、基準点と測点とのレベル差を読み取ることで、



(a) 測線 A



(b) 測線 B

図-2 測線下の推定地層断面図

測点の相対的なレベルを計測した。測点間の中継点（レベルを継ぐ点）は 30～40m ごとに適宜設定し、3、4 測点を結ぶ路線をひとつの水準路線として往復観測を実施した。その際、各水準路線で閉合差が 2mm 以内となるまで実施して観測の精度を管理した。

2011年4月より計測を開始し、2012年9月現在で初期値計測を含め5回の計測を実施して各水準点・測点の変動の時刻歴を記録した。

3. 埋立てによる圧密沈下

(1) 測線の地盤概要

測線の推定地層断面図⁹⁾を図-2に示す。浦安市は深い埋没谷や埋没段丘があり、軟弱層の厚さは一定ではなく、沖積層基底は複雑な形を呈している。地震後の長期的な沈下に寄与しうる軟弱な沖積粘土層は、測線 A では全域で層厚 30～40m 程度が堆積している。一方、測線 B では層厚 10～40m と分布の幅が広く、南東側ほど軟弱な沖積粘土層が厚く堆積している。測線 B において起点から 2,500m 付近の地点で層厚が薄くなっているが、これは前述した埋没段丘の形状がボーリング調査に表れたためである。

なお、浦安市内における埋立地は造成時から圧密沈下

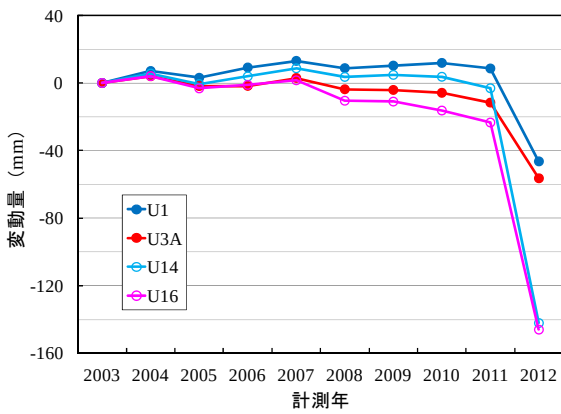
が懸念されていたことから、広域で地盤改良（表層改良）が実施された記録がある。測線上における地盤対策の施工履歴を調査したところ、測点 B10、B11 付近は 4.0m の载荷盛土による圧密促進が図られた範囲内にあることが確認された¹⁰⁾。

(2) 地盤変動の現況

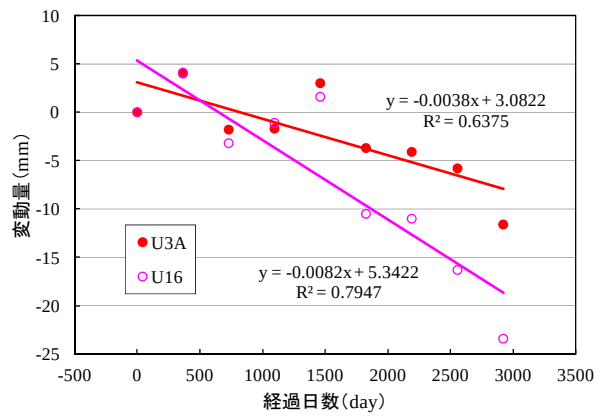
千葉県が公開している水準測量の結果¹¹⁾を図-3に示す。ここで、縦軸の符号は隆起を正、沈下を負としている。

図-3(a)に示した 2011 年までの地盤変動状況を見ると、水準点 U1 と U14 がほぼ横ばいを示す一方で、水準点 U3A と U16 は沈下傾向にあり、埋立てによる圧密沈下が現在も継続していることが読み取れる。なお、2012 年度の結果に見られる 45～140mm の急激な沈下は、3.11 地震の影響を多分に含んでいる。浦安市では市域の広範囲にわたって液状化被害が発生したことから、2011～2012 年の間に発生した沈下は、①埋立てによる圧密沈下、②液状化による即時沈下、③地震を契機とする長期的な沈下の 3つの要因を含むものと考えられる。

埋立てによる圧密沈下の傾向のみを把握するために、2003～2011 年の間に生じた変動量を図-3(b)に示した。同図より、水準点 U3A と U16 で直線的な沈下傾向が見



(a) 2003～2012 年の観測結果 (2003 年観測時を基準)



(b) 2011 年東北地方太平洋沖地震以前の変動

図-3 水準点の変動 (千葉県水準測量)

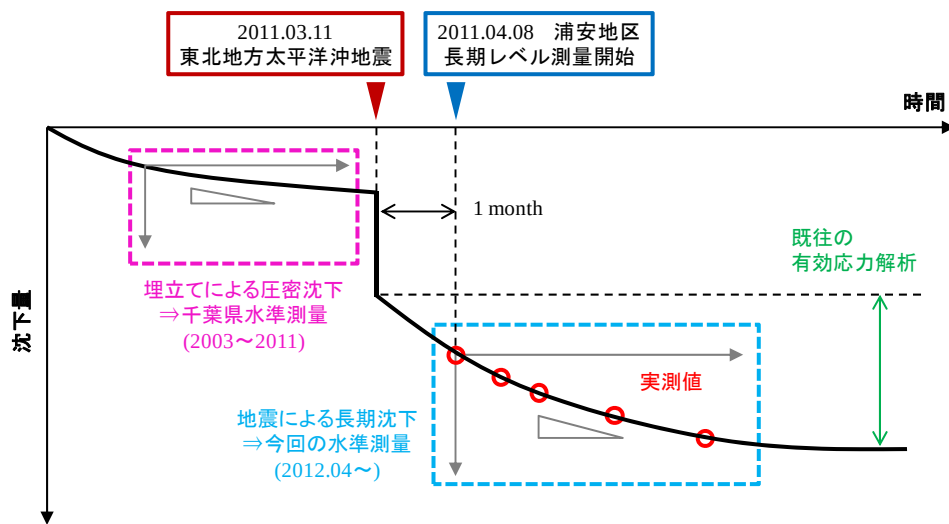


図-4 浦安市の地盤沈下時刻歴 (模式図)

られ、地震発生前には測線 A において 1.4～3.0mm/year 程度の圧密沈下が生じていたと考えられる。

図-4 は浦安市における地盤の沈下時刻歴を模式的に示したものである。本報告では、3.11 地震以前の埋立による圧密沈下の傾向は千葉県による水準測量の結果から確認し、3.11 地震以降の沈下は今回の測量結果によって把握することとした。ここで、今回の測量は地震発生から一ヶ月後の 2011 年 4 月 8 日に計測を開始していることを留意されたい。すなわち、地震発生から計測開始までの一ヶ月間の沈下は今回の測量結果に含まれていない。

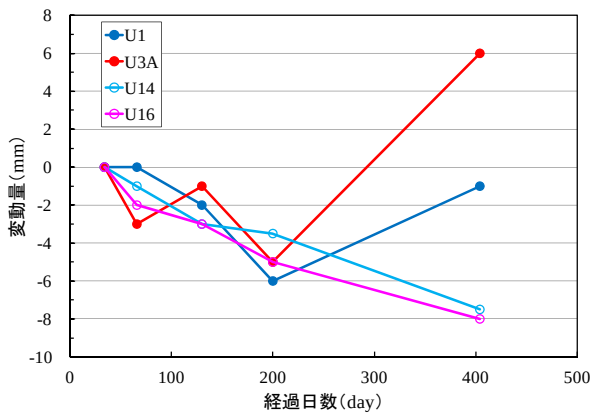
また、後節で引用している福武らによる浦安市を対象とした有効応力解析¹²⁾ (以下、既往の有効応力解析と呼称) の結果は、図-4中に緑で示したように、地震発生を原点とした粘土層の最終沈下量にあたる。

4. 3.11地震後の測量結果

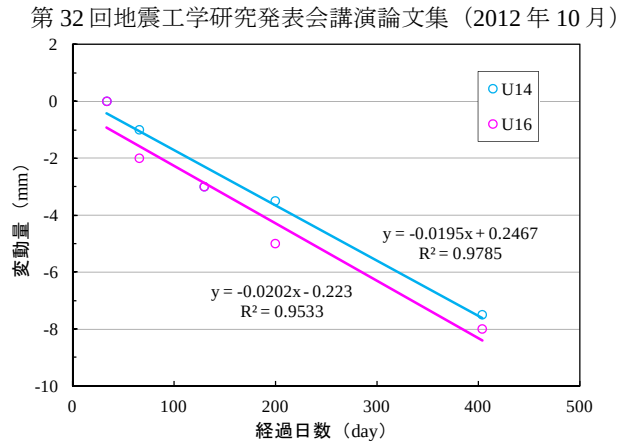
(2) 水準点の変動

今回の測量で得られた水準点の変動を図-5に示す。2011 年 4 月実施の初期値計測を基準とした各水準点の変動の時刻歴が図-5(a)である。同図より、旧海岸線以北の自然地盤に位置する水準点 U1 および U3A は観測毎の上下動が大きく定性的な傾向が見られず、第一期埋立地内の中央部に位置する水準点 U14 および U16 は緩やかではあるが単調な沈下傾向が見られた。

水準点 U14, U16 について変動量 - 時間関係を直線近似したものが図-5(b)である。同図より、水準点 U14, U16 とともに変動量と時間に相関関係が確認され、地震発生後から 2012 年 4 月までに生じた一年あたりの沈下量は、両水準点で 7.3mm/year となった。地震前後での地表面の沈下速度の変化を図-6に示す。埋立てによる沈下が生じていなかった水準点 U14 において地震後に沈下



(a) 2003～2012 年の観測結果（2003 年観測時を基準）



(b) 2011 年東北地方太平洋沖地震以前の変動

図-5 水準点の変動（千葉県水準測量）

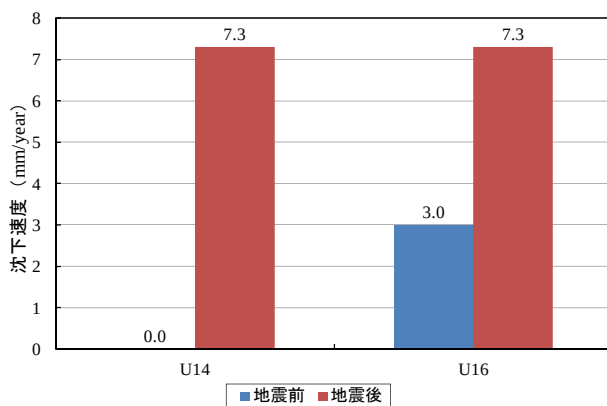


図-6 地震前後での地表面沈下速度の変化

が生じ、水準点 U16 では地震前後で沈下速度が 2.4 倍になったことから、地震を契機とした沖積粘土地盤の沈下の加速化が実測より明らかになった。

地震発生から 7 日後に実施した液状化被害に関する現地調査¹²⁾によると、水準点 U14 付近（入船地区）の地表面沈下量は 50～150mm であった。水準点 U14 について、液状化による即時沈下、地震発生前の埋立てによる圧密沈下（図-3(b)）、地震を契機とした長期的な沈下（図-5(b)）を同時間軸上で示したものが図-7 である。同図は原点を 2011 年度千葉県水準測量の基準日とし、液状化による即時沈下量を 100mm として描画している。県が実施した 2012 年度水準測量結果によると、前年度からの沈下量は 139mm（図中白抜き赤プロット）であり、著者らが実施した水準測量から推定される沈下 - 時間関係との対応は良好である。

既往の有効応力解析では、層厚 37.2m の粘土層の最終沈下量は 24mm と算定されている。また、同解析における粘土層の沈下量は深度方向に直線的であり、層厚に比例した大きさの沈下が生じることが示されている。水準点 U14 近傍の粘土層厚は 12.8m であることから、解析に

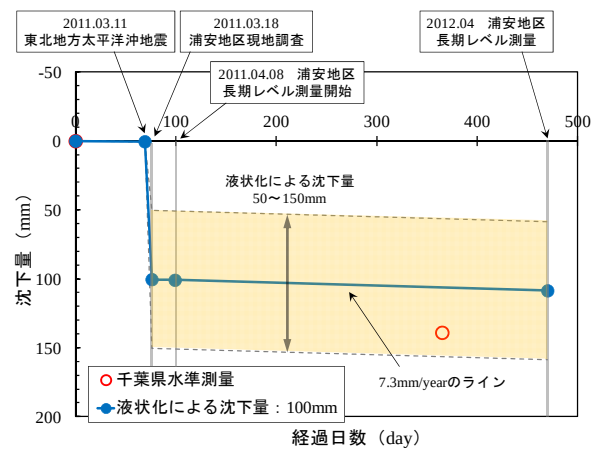


図-7 水準点 U14 の沈下時刻歴

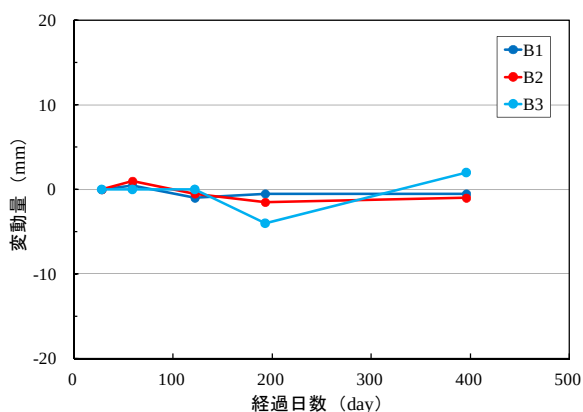
よる水準点 U14 付近の沈下量は 8mm 程度となり、今回の測量で計測された沈下量とほぼ一致する結果となった。

(2) 測点の変動

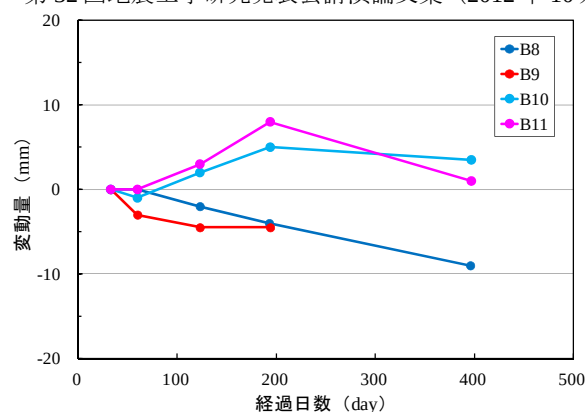
本節では今回の測量で計測された測点の変動のうち、特徴的な沈下挙動を示した測点について考察を行う。

図-8(a)は測点 B1～B3 の変動量の時刻歴を示したものである。いずれの測点もほぼ横ばいに推移しており沈下は見られなかった。図-1 に示したように、測点 B1～B3 は測線の中で旧海岸線以北に位置する測点であり、測線内では最も堆積年数が長い地盤となっている。したがって、埋立地と比べて圧密が十分進行しており、3.11 地震を契機とした沈下の加速化は生じなかったと考えられる。

図-8(b)は測点 B8～B11 の変動量の時刻歴を示している。これらの測点はすべて第二期埋立地内に位置するが、測点 B8, B9 は沈下傾向、測点 B10, B11 は若干隆起しながらもほぼ横ばいと、それぞれ異なる挙動を示している。3.(1)節で述べたように、測点 B10, B11 はプレロードによる圧密促進が図られた範囲内にあり、これは圧密



(a) 測点 B1~B3 の変動



(b) 測点 B8~B11 の変動

図-8 測点の沈下時刻歴

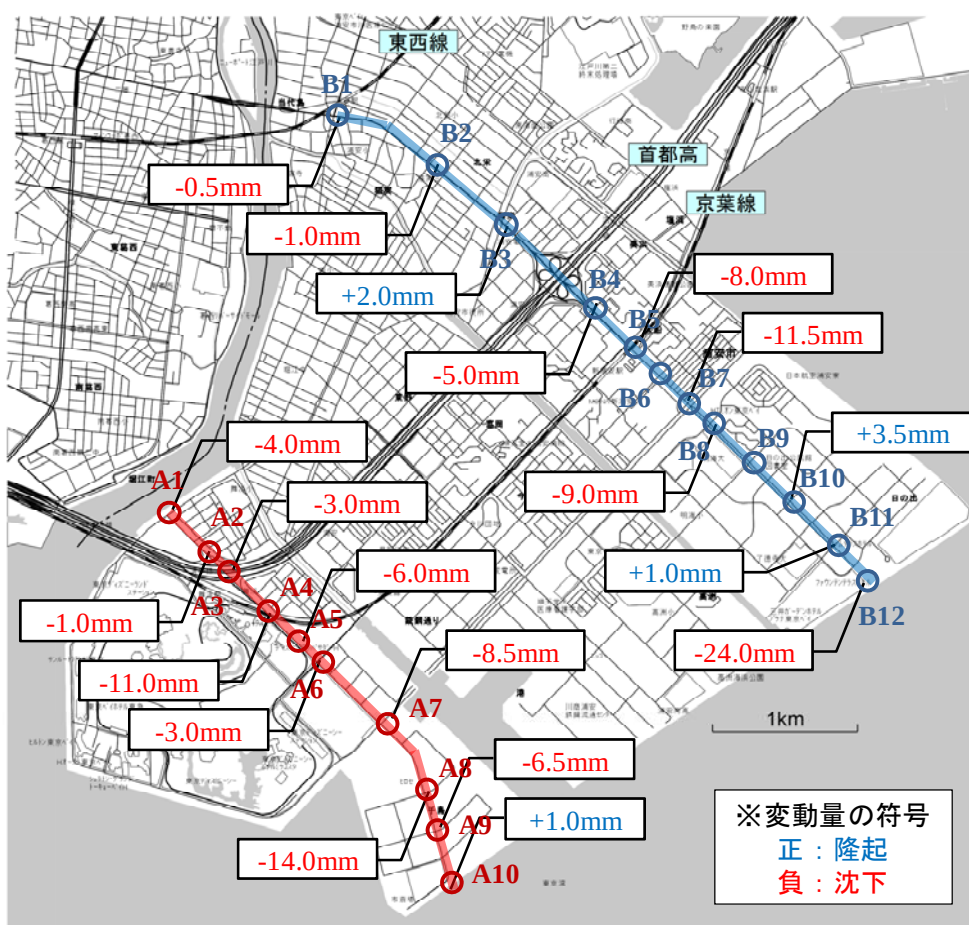


図-9 2012年4月現在の測点の変動量

促進工法の効果、すなわち地盤が受けた応力履歴の違いが沈下量の差として観測されたことを表している。

図-9は各測点における2011年4月から2012年4月までの変動量を示しており、全域で沈下の傾向が見られている。一部で10mmを超える沈下が生じている測点があるが、現段階ではその要因の考察には至っていない。

5. まとめ

本論文では、2011年東北地方太平洋沖地震において千葉県浦安市を対象とした沖積粘土地盤の長期的な沈下の実測を試み、以下の成果を得た：

- 1) 水準測量によって、3.11地震を契機とする沖積粘土層の長期的な沈下が明らかになった。
- 2) 今回の測量結果は、千葉県実施の水準測量結果およ

び既往の有効応力解析結果から得られた沈下量とよい整合性が得られた。

3) 今回の測量で観測された長期的な沈下の速度は、水準点 U14, U16 で 7.3mm/year 程度である。この沈下速度は地震発生前に生じていた埋立てによる圧密沈下速度の 2.4 倍にあたることから、沈下の加速化が確認された。

4) 堆積年代や応力履歴の違いに起因する圧密の進行度合いの差異によって、地震後の長期的な沈下挙動が異なることが確認された。

今回の測量の成果は地震発生から一年後までの地盤変動をまとめたものである。今後は、軟弱粘土層厚と沈下量との相関性などに着目しながら観測を継続していく予定である。

謝辞：本検討にあたり、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および水準測量結果を使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 陶野郁雄，安原一哉：土の繰返し圧密 3. 地盤の繰返し圧密によるケーススタディー（その 1），土と基礎 39-7(402)，pp.85-91，1991.7.
- 2) 安原一哉，陶野郁雄：土の繰返し圧密 4. 地盤の繰返し圧密によるケーススタディー（その 2），土と基礎

第 32 回地震工学研究発表会講演論文集（2012 年 10 月）

- 39-8(403)，pp.73-80，1991.8.
- 3) 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(486)，pp.57-62，1998.7.
- 4) 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.557-558，1998.9.
- 5) G.L.Fiegel, B.L.Kutter, I.M.Idriss：Earthquake-induced Settlement of Soft Clay, Centrifuge 98, pp.231-236, 1998.
- 6) 小石悠介，友渕真寛，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.265-266，2012.7.
- 7) 千葉県：市街地環境情報ブック，<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu3183.html>，2012.9.
- 8) 日本鉄道建設公団東京支社：京葉線工事誌，1241p.，1991.
- 9) 千葉県：千葉県地質環境インフォメーションバンク，<http://www.pref.chiba.lg.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>，2012.9.
- 10) 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，土木技術社，1994.8.
- 11) 千葉県：千葉県水準測量成果表，<http://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/jibanchinka/torikumi/seikaomote.html>，2012.9.
- 12) 福武毅芳，張至鎬：2011 年東北地方太平洋沖地震における浦安地区の地盤の有効応力解析による検討，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.4，pp.293-304，2012.

(2012.9.21 受付)

LEVELING SURVEY ON LONG-TERM SETTLEMENT OF ALLUVIAL CLAY AFTER THE 2011 EAST JAPAN GREAT EARTHQUAKE

Naohiro NIGORIKAWA and Yoshiharu ASAKA

In order to obtain data for long-term consolidation settlement of alluvial clay after THE 2011 EAST JAPAN GREAT EARTHQUAKE, the authors leveled five times across the Urayasu district from April 2011 to April 2012. In this survey, we measured settlement of benchmarks and survey points. As a result, long-term consolidation settlement by the earthquake was observed. After the earthquake, subsidence velocity becomes 7.3 mm/year, and this speed is more than 2.4 times before the earthquake. In addition, we observed that the degree of consolidation influence settlement behavior after the earthquake. Also, this result conform with the result of prefectural leveling and effective stress analyses.