

東京湾沿岸埋立地における鉛直アレー記録の分析 (その1 地震記録と分析方法)

(独)土木研究所 正会員 ○谷本俊輔, 川口剛, 佐々木哲也

国土技術政策総合研究所 正会員 金子正洋, 片岡正次郎, 梶尾辰史

1. はじめに 東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸の一部の地域に甚大な液状化被害が生じた。地表に現れた噴砂等の変状の平面分布から、浚渫埋立てにより造成された地点に顕著な液状化が生じたことは明らかであるが、深さ方向にどの範囲まで液状化が生じたかについては、明確な知見が得られていない。また、本震後の数十分以内に発生した余震の際に多量の噴砂が発生したとの目撃証言もあり、本震時に上昇した過剰間隙水圧が完全に消散していないうちに余震を受けたことなどが考えられているが、その詳細は明らかにされていない。

著者らは、東京湾沿岸の埋立地で観測された鉛直アレー記録の分析を行い、上記に関する考察を行ったので報告する。

2. 観測地点の概要 分析対象とするのは、平成8年に旧建設省土木研究所が設置した地震観測所の一つである花見川緑地(千葉県千葉市美浜区打瀬)の地震記録である。本観測所は花見川河口付近右岸の公園内に位置し、昭和50年代の埋立てにより造成されている。位置図を図-1に示す。

地震計はG.L.-2m, 9m, 19m, 45mの4深度に設置されており、地中地震計設置孔(bor.11-4)で標準貫入試験およびPS検層が実施されている。ただし、このときには室内土質試験(物理, 力学)が行われていなかったため、震災後に追加調査として、南西側に約20m離れた位置で標準貫入試験, PS検層(No.15-P), 乱れの少ない試料採取(No.15-S)等を行った。これらの柱状図を地震計設置深度とあわせて図-2に示す。ここに、 w_p , w_n , w_L , FC , SC , GC はそれぞれ塑性限界, 自然含水比, 液性限界, 細粒分含有率, 砂分含有率, 礫分含有率である。 $D_{10} \sim D_{90}$ は、1m間隔で採取した標準貫入試験試料の粒度試験結果に基づき、10%間隔の通過質量百分率に対応する粒径を求めて図示したものである。両地点の地層構成はよく類似しているが、bor.11-4のAc3層が粘性土主体であるのに対し、No.15-Pの概ね同一深度にあるAs2層が砂質土主体である点異なる。観測点は公園内の植樹帯に設けられており、その盛土によって周囲よりも地盤面が少し高い位置にあるため、地下水位はG.L.-4.65mとやや深い。No.15-PのG.L.-11.7~12.4mのボーリングコアに強い臭気を帯びたヘドロが付着した木杭が混入しており、この付近が人工地盤と自然地盤の境界であると推測される。bor.11-4の位置では、その下位に非塑性~低塑性のシルト(Ac1), 低液性限界~高液性限界のシルト(Ac2), シルト質細砂(As1), シルト(Ac3), 半固結状の硬質なシルト質砂(Ds1), 軟質なシルト(Dc1), 非常に締まった砂(Ds2, Ds3)が続いている。本震の地表面最大加速度PGAを用いて液状化判定を行うと、Bs2, Bs3, Ac1, As1において $F_L \leq 1.0$ となる。

東北地方太平洋沖地震の後、観測所の周辺では多数の噴砂痕が確認されている。その例を写真-1に示す。

3. 地震記録 ここでは、2011年3月11日14:46頃の本震¹⁾と同日15:15頃の余震に着目する。残念ながら、G.L.-9mではNS成分の記録が得られていないため、EW成分を分析対象とした。時刻歴, 加速度応答スペクトルをそれぞれ図-3, 図-4に示す。

G.L.-2mにおける水平2成分合成の最大加速度は、本震で238.1gal(N15W), 余震で81.0gal(N42W)である。また、G.L.-2mの記録によるSI値は本震で45.1cm/s(N52W), 余震で19.8cm/s(N28W)である。



図-1 観測地点位置図

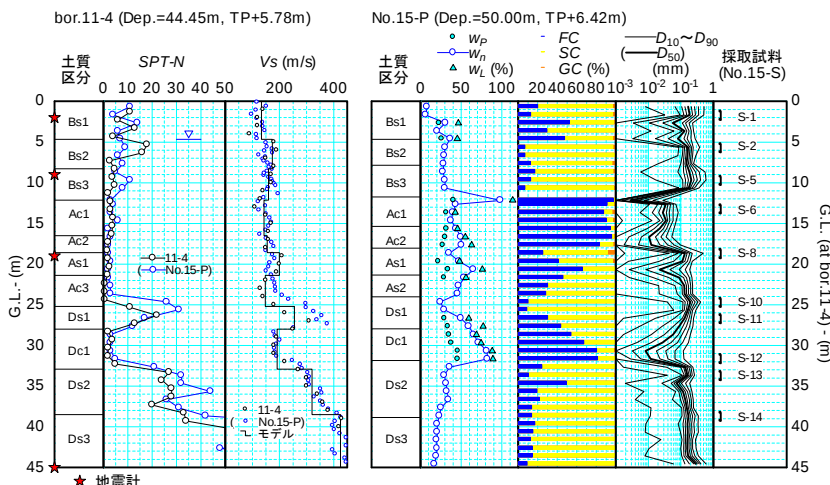


図-2 花見川緑地における地震計設置深度および柱状図



写真-1 花見川緑地における地震後の噴砂発生状況

キーワード 液状化, 地震記録, 余震

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 独立行政法人土木研究所 TEL: 029-879-6771

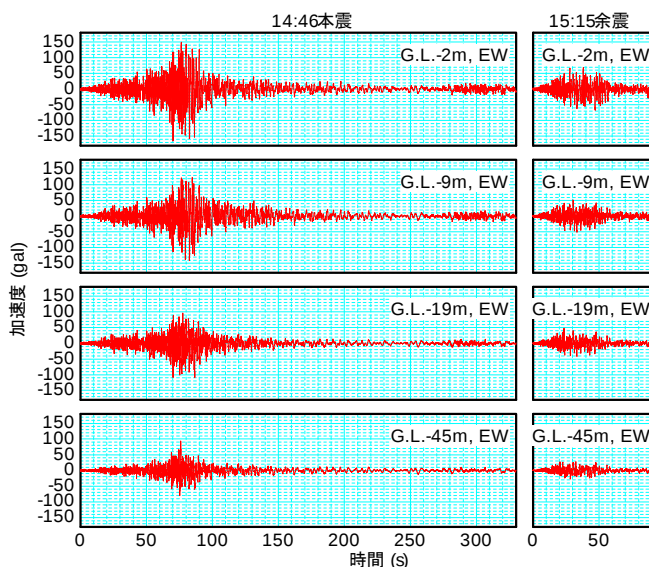


図-3 地震記録の時刻歴 (EW 成分)

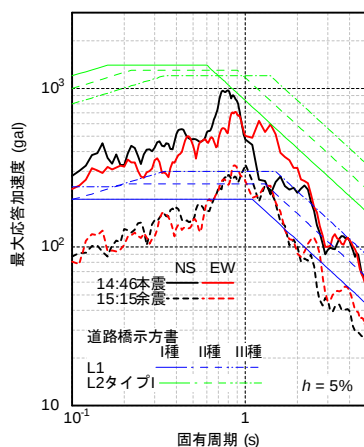
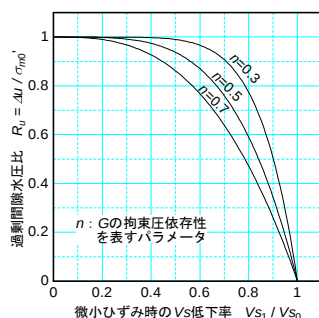


図-4 加速度応答スペクトル

図-5 過剰間隙水圧比 R_u と微小ひずみ時の V_s 低下率の関係

G.L.-2m の記録の加速度応答スペクトルは、道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルと比べると、本震は概ね全周期帯でレベル1地震動を包絡し、余震は概ね全周期帯でレベル1地震動を下回っている。

4. 位相速度と平均せん断ひずみの評価方法 地震記録の分析にあたっては、地震応答解析によって記録を再現し、各層の応答値、状態量を評価する方法もあるが、ここでは数値モデルの構築に必要な多くの仮定を設けることなく、鉛直方向に伝播する水平動の位相速度とせん断ひずみの経時変化を求めることで、液状化の発生状況を直接的に評価することとした。SH 波が卓越する場合、位相速度はS波速度と一致するため、その経時変化を追跡することで、液状化発生のタイミングやその深度を把握できる可能性がある。

位相速度の計算手順は次のとおりである。まず、4 深度の EW 成分の波形を 2.56s 間隔の台形ウィンドウ (前後テーパー各 0.28s、有効区間 2.00s) で切り出し、上下隣接する地震計による波形のフーリエ位相スペクトルの差分 $\Delta\phi$ を求めた。

同一形状でタイムラグ Δt を有する 2 つの時刻歴波形には、フーリエ位相スペクトルの差分 $\Delta\phi$ と周波数 f の間に $\Delta\phi = 2\pi f \cdot \Delta t$ なる関係がある²⁾ことから、 $\Delta\phi \cdot f$ 関係を 10~20Hz 程度以下の範囲で直線近似したときの勾配から Δt を求め、2 深度間の位相速度 $c = \Delta t / \Delta z$ (Δz は地震計間の鉛直距離) を求めた。このとき、算出された Δt の正負の方向から、卓越する水平動の伝播方向 (上昇成分、下降成分) を判別した。そして、台形ウィンドウの時間帯を 2.0s ずつスライドさせ、各深度、各時間帯における位相速度を求めた。これを本震・余震の記録に対して行った。

なお、地震中における飽和土層のせん断剛性 G の経時変化がせん断ひずみ γ 、過剰間隙水圧比 R_u に依存すると考えると、微小ひずみ時のせん断剛性 G は過剰間隙水圧比 R_u のみの関数となる。そこで、土のせん断剛性の拘束圧依存性を表現する際によく用いられる次式を利用し、

$$G = A(\sigma'_m)^n \quad (1)$$

過剰間隙水圧発生前の微小ひずみ時の S 波速度を V_{s0} 、過剰間隙水圧発生中の微小ひずみ時の S 波速度を V_{s1} とすると、次の関係を導くことができる。

$$R_u = 1 - (V_{s1} / V_{s0})^{2/n} \quad (2)$$

例えば、余震開始直後に微小ひずみに対応した V_{s1} が得られている場合、本震前の V_{s0} からの低下率より、余震開始直後の R_u を概略推定することができる。なお、 n は拘束圧依存性に関するパラメータであり、一般的な範囲として $n = 0.3 \sim 0.7$ として式(2)を図示すると図-5 のようになる。特に、 $V_{s1} / V_{s0} \leq 0.4$ の範囲では、過剰間隙水圧比が 0.95 付近まで上昇し、液状化していると言える。

平均せん断ひずみの計算手順は次のとおりである。上下隣接する地震計による波形から相対加速度を求め、0.2Hz 程度のハイパスフィルタとともに周波数領域で 2 回積分し、これを Δz で除すことにより、平均せん断ひずみの時刻歴を求めた。また、以降で土の繰返し変形特性試験結果と対比するため、上記のひずみ時刻歴を実数部、

その Hilbert 変換を虚数部に持つ複素数の絶対値³⁾を求め、これをひずみ時刻歴の包絡線とした。

これらの計算結果および考察は続報⁴⁾に示す。

参考文献 1) 国土交通省国土政策技術総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による強震記録，国総研資料，第 726 号，2013.2. 2) Ohmachi, T. & Tahara, T.: Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay core rockfill dam, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.2, pp.227-238, 2011.4. 3) 理論地震動研究会：地震動—その合成と波形処理—，鹿島出版会，1994.2. 4) 川口剛，谷本俊輔，佐々木哲也，金子正洋，片岡正次郎，梶尾辰史：東京湾沿岸埋立地における鉛直アレー記録の分析 (その 2 本震・余震による液状化発生深度)，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，2014.9.(投稿中)