

(13) 地表震動の観測データを使って地中の液状化発生を推定する方法

東京大学 東畑郁生
 ソウル産業大学 朴鍾寛
 東京ガス(株) 狩野浩之

1. はじめに

地盤の液状化は地震時に埋設管が被害をうける原因の一つである。地震直後に液状化の発生をすばやく推定して対策を開始する方策を、筆者らは検討している。そのためには、液状化の発生のみならず、その激しさの程度、つまり液状化した地層の厚さを推定する必要がある。ところが各地に配置されている地震計から送信されてくる情報には地表最大加速度とSI値(減衰15%の時の相対速度応答スペクトルの平均値)しかない。そこで、これらの情報だけを使って現地の液状化発生と液状化層厚を推定する方法を開発した。

2. SI値の性質について

多くの示方書では「設計地震の」地表最大加速度から液状化発生を判定するように定めている。しかしこれらの方法では「設計」地震波の等価荷重繰り返し回数が十分多い(20回など)ことを仮定しており、実際の地震で繰り返し回数が少ないわりに最大加速度のみが大きい場合では、起こりもしない液状化を起こったと判定する恐れが高い。

図1で実地震波を使ってSI値を計算した。本来SIは震動記録全体を使って計算するものだが、その一部、時刻0秒から任意のt秒までの記録だけを使ってSI(t)を得ることができる。このSI(t)は時刻tとともに増加し、最終的にいわゆるSI値に至る。図1でSIが時刻とともに成長する様子を見ると、液状化の発生したと考えられる9秒頃に最大加速度、最終SI値の両方が達成されたことがわかる。

同様の性質が模型地盤の震動実験からも得られた(東畑・朴, 1992)ので、過剰間隙水圧が上昇して地盤の表層が軟化して入力地震動と共振し、このとき最大加速度やSI最終値が発生する、と判断した。

液状化の発生した地点、しなかった地点で観測された多くの加速度記録を使い、最大加速度(Amax)、SI値、速度最大値(Vmax)、変位振幅(Dmax)の関係を調べた。図2によるとSIは最大速度にほぼ等しく、また図3のように変位振幅をSIと加速度から推定することが可能である。

$$V_{max} = SI, \quad D_{max} = 1.73 SI^2 / A_{max} \quad (1)$$

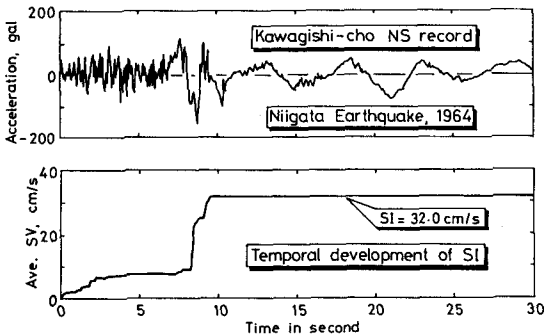


図1 新潟川岸町加速度記録のSI値

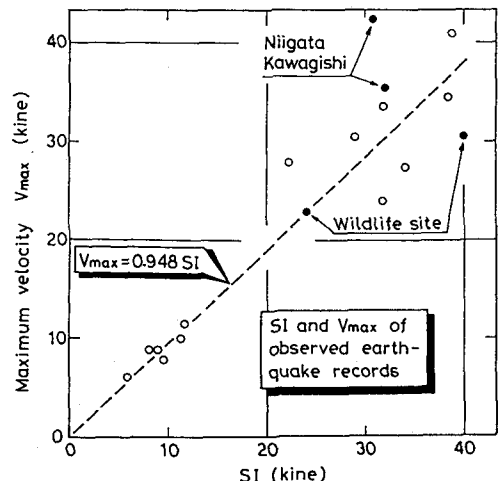


図2 SI値と地動最大速度との関係

正弦波形の調和震動では $D_{max} = V_{max}^2 / A_{max}$ となるが、これに $V_{max} = S I$ (図2) を代入し、波形の不規則性を考慮する定数 1.73 を導入して実際と良い一致を見たのが、式1の二番目である。

前述の模型実験では砂の密度も変えて、液状化に対応する $S I$ の値を調べた。その結果(図4)によると、厚さ 50 cm 程度のゆる詰め模型地盤が液状化したとき、 $S I$ は砂の密度に応じて変化するものの、概ね 5 ないし 10 cm/sec であることがわかった。

3. 液状化層厚推定法の原理

ここでは地盤が液状化したものと仮定し、その上で液状化層厚を推定する方法を考える。図5は簡単な液状化地盤のモデルである。地表から深さ H までが液状化しているが、この H の大きさは未知である。地表の変位振幅は式1によって推定済みである。液状化発生の瞬間ゆるい砂層が軟化して地動と共振状態にある、と考えると、弾性体を仮定すれば、変位の深さ方向分布は図5のような正弦曲線で近似される。地中のひずみの最大値は液状化層の下端で起こり、その大きさは $\gamma_{liq} = \pi D_{max} / 2H$ である。液状化した砂はかなりやわらかいので、そのひずみも相当大きい、と考えねばならない。ここでは $\gamma_{liq} = 0.01875$ (1.875% : 非排水繰り返し三軸せん断試験の軸ひずみ両振幅2.5%に相当) と定めると、未知量 H を推定できる。

$$H = (\pi D_{max}) / (2 \gamma_{liq}) \quad (2)$$

実際の液状化砂は弾性体ではないので、図5のように共振時に基盤の変位がゼロではない。従って、ひずみも上で推定した値より小さいはずである。ひずみの誤差を推定するために、カリフォルニアのワイルドライフ液状化地点で観測された地表と地中の変位記録(Holzerら、1989)を調べた。図6(南北成分)によると、地表変位の最大振幅 D_{max} が 11.4cm であるのに対し、液状化砂層下の地中記録では 4.9cm、地表と地中の変位差(液状化層の変形)では 10.6cm であった。同様に東西成分ではそれぞれ 9.0cm、3.9cm、6.8cm であり、液状化層の変形の代わりに地表変位を用いても、大きな誤りとはならない。

4. 液状化層厚推定の手法

実際の計算は、図7の地盤モデルを用いて行なう。表面には厚さ h 、密度 ρ_s 、 S 波速度 V_{ss} の不飽和層がある。そしてその下に厚さ H (未知)、密度 ρ (既知)、 S 波速度 V_s (未知) の液状化層がある。この二層弾性地盤の波動伝播方程式を解き、地表で変位振幅 D_{max} 、液状化層下端でひずみが γ_{liq} 、基本モードで共振の三条件を当てはめた。

結果が図8である。表層の固さ V_{ss} はほとんど結果に影響せず、 $\alpha = (\lambda \rho S I^2) / (\rho_s \gamma_{liq} A_{max} h)$ から一意的に液状化層厚 H が推定できる。ここで λ は 1.73 である。

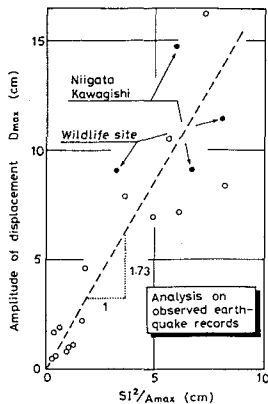


図3 $S I$ 値、最大加速度と地動最大変位との関係

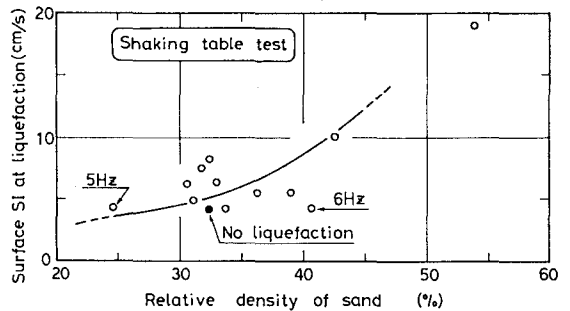


図4 模型地盤が液状化したときの $S I$ 値

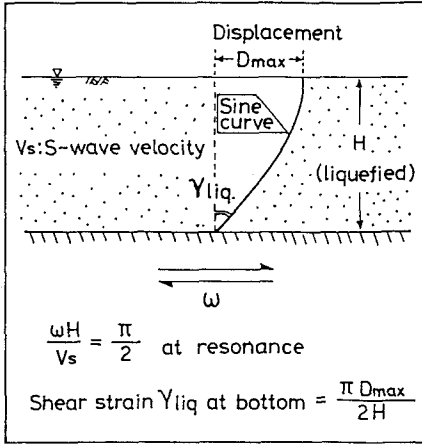


図5 簡単化した地盤モデル

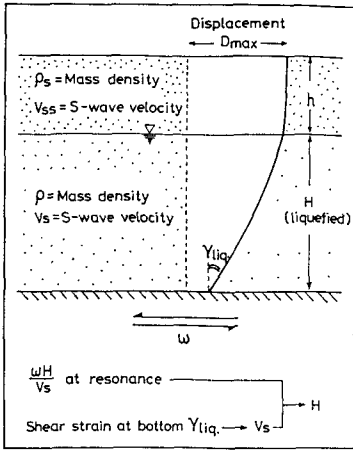


図7 地盤の解析用モデル

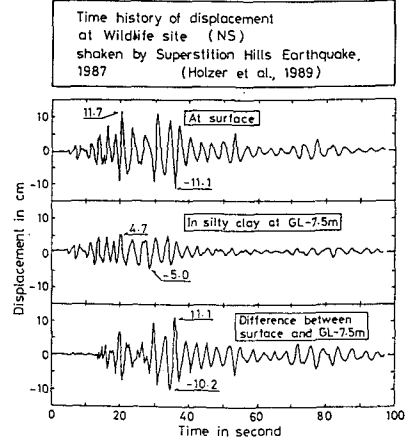


図6 ワイルドライフ記録に見る表層地盤の変形

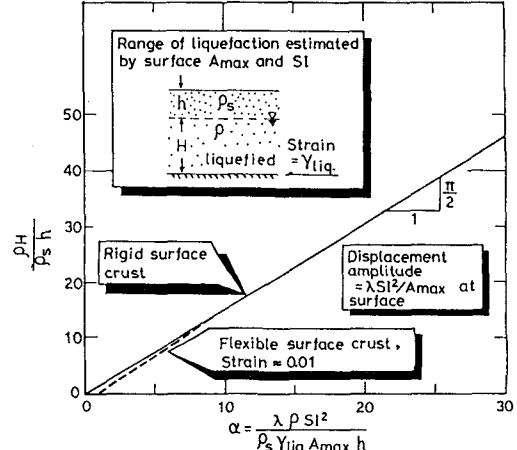


図8 液状化層厚判定図

5. 液状化発生の有無の判定

図8は地盤の寸法にかかわらず成り立つ無次元量同士の関係である。模型地盤と原地盤とで他の量がほぼ等しいなら、 α も共通にするためには、 $S I^2 / h$ が共通でなければならない。 h が地盤の寸法を表すので、模型から原地盤に向けて寸法が1.0ないし2.0倍になったとき、図4の液状化発生を示すSI最低値は1.0ないし2.0の平方根倍され、1.5ないし4.5 cm/secが液状化発生のSI目安値であることになる。ここでは安全側の判断として、SIが1.5 cm/secを越えた場合のみ、液状化が起こった、と考えて、図8の方法を適用する。SIがそれより小さいときは、液状化が発生していないので、これ以上の層厚計算を行なわない。

6. 液状化層厚の計算例

地中で液状化が発生し、かつ地表で加速度記録の観測されている三地点を選んで、試算を行なった。新潟川岸町地盤の例(図9)では、東西・南北いずれの地表記録を用いても、液状化が深さ1.0 m位まで起こった、と推定された。この値は、より複雑な有効応力解析結果(図10)と整合する。

図11は、1968年十勝沖地震で液状化した(井合ら、1986)青森港地盤(倉田ら、1970)の例である。計算では深さ9ないし11 mまで液状化したことになった。実際はおそらく、深さ9から13 m付近に分布している細砂層までが液状化し、それより下のシルト質土は液状化しなかったことを示しているのであろう。

図12はワイルドライフ地点の例である。ゆるい砂層が深さ7 m付近までしかないのに対し、計算ではH

= 10.4 m (南北成分で計算)、3.8 m (東西成分) となった。後者はゆるい砂層全体の液状化を示唆しているが、前者は大きすぎる。この大きなHは決して真実ではなく、むしろ、液状化砂層下端のひずみが、使用した $\gamma_{liq} = 1.875\%$ よりかなり大きかった、と解釈するべきである。

7. 結論

地表で観測された最大加速度とS I値から、地中の液状化層厚を推定する方法を提案した。実際の液状化地点にこの方法を適用し、良好な成果を得た。

8. 参考文献

- 井合、小泉、土田 (1986) 粒度とN値による新しい液状化測定、港湾技術研究所報告、Vol. 25, No. 3, pp. 125-234.
- 倉田、土田、須藤 (1970) 港湾地域共振観測地点資料 (その2)、港研資料107.
- 東畑、朴 (1992) 砂質地盤の液状化とスペクトラムインテンシティの関係、第27回土質工学研究発表会、Vol. 1, 1087-1090.
- Holzer et al. (1989) Dynamics of Liquefaction during the 1987 Superstition Hills, California Earthquake, Science, 244, 56-59.

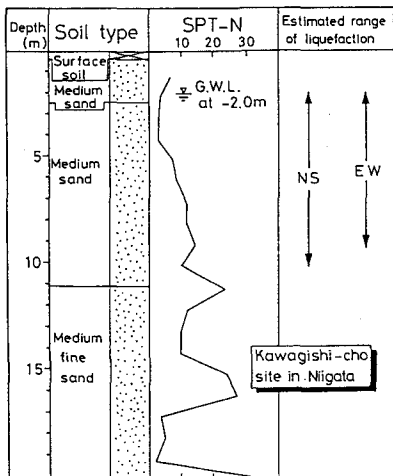


図9 新潟川岸町地盤の計算例

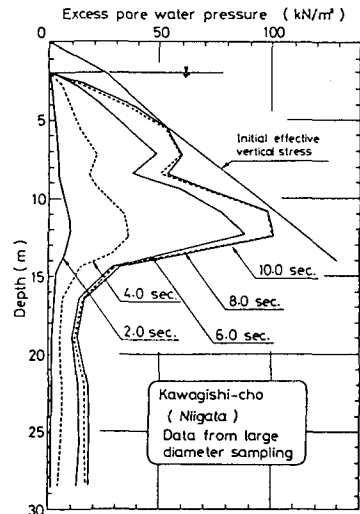


図10 新潟川岸町地盤の有効応力解析例

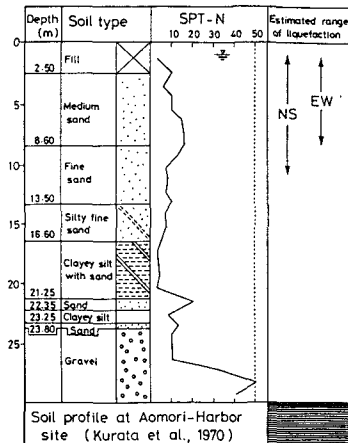


図11 青森港地盤の計算例

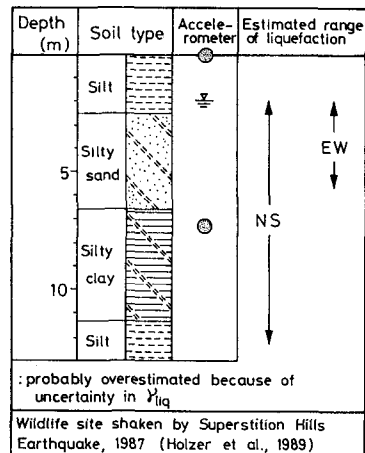


図12 ワイルドライフ地点の計算例