

2011 年東北地方太平洋沖地震による東京湾岸地域などでの液状化被害と
1990 年前後に計測した常時微動測定結果の比較

SDR/東京工業大学理工学研究科連携教授 中村豊

SDR 齋田淳、佐藤勉

●簡便ではあるが信頼性の高い液状化予測手法の確立に向けて

2011.3.11 に発生した東北地方太平洋沖地震は東日本を中心にさまざまな方面に甚大な災害をもたらした。まさしく不測の事態であるが、不測の事態が出来たときの対応のまずさが露呈した感が否めない。どうしたら的確な対応ができるのだろうか。柔軟で多様な発想が求められるのは間違いない。

20 年以上前に、当時の運輸省の助成研究の一環で、首都圏 JR 沿線の地盤や構造物について 100m 間隔で常時微動を計測して、固有振動数や増幅倍率を推定した。また、これとは別に、1989 年のロマプリエタ地震の調査で行ったサンフランシスコ湾岸の常時微動調査結果と比較するため東京湾岸の常時微動を計測した。その後、固有振動数と増幅倍率を使って、地盤や構造物の壊れやすさ指標 K 値群を提案し、多くの地震被害データを使ってその妥当性を検証して来ている。

ここでは、1990 年に計測された常時微動のデータを使って当時推定された固有振動数 F と増幅倍率 A をそのまま使って、地盤の壊れやすさ指標 Kg 値を算定し、これを液状化調査結果などと比較してみた。その結果、Kg 値はこれまでの液状化予測手法とは異なるが、少なくとも、その危険性を的確に把握することができることがわかった。

●地盤の壊れやすさ指標 Kg について

K 値群は、H/V 法などで推測される固有振動数 F と増幅倍率 A と構造物の諸元を使って、地震時に地盤や構造物の着目する部位に生じる歪み γ を大まかに推定することを目指した指標である。その共通した歪みの推定式は次のとおり。

$$\gamma = K \times a$$

ここに、K は K 値、a は地震動基盤加速度を表す。

地盤の場合、

$$\begin{aligned}
\gamma &= eAd/h \\
&= eAa/\omega^2/h \\
&= eAa/(2\pi F)^2(4F/V_s) \\
&= eAa/(2\pi F)^2(4FA/V_b) \\
&= eA^2/F/(\pi^2V_b) a \\
&= A^2/Fe/(\pi^2V_b) a
\end{aligned}$$

ここに、 e は入力効率、 V_s は表層地盤のせん断波速度、 V_b は基盤のせん断波速度を表す。
故に

$$\gamma_e = \beta \times K_g \times a$$

ここに、

$$\begin{aligned}
K_g &= A^2/F \\
\beta &= e/(\pi^2V_b)
\end{aligned}$$

日本では概ね $V_b = 600 \text{ m/s}$ とおける。入力効率を 0.6 と仮定すれば、 β は約 10^{-6} (μ : マイクロストレイン) となる。この時、

$$\gamma_{0.6} = K_g \times a$$

入力効率は震動波形によって変わることが予想される。パルス的な震動ではその値は小さく設定する必要がある。つまり大きな入力加速度が必要となるが、継続的な震動では効率は 1.0 に近づくものと推測される。今回の地震はこれまで経験したことが無いくらい長い間継続しており、入力効率は 0.6 ではなく、 1.0 とすると、 β は約 1.7 となる。すなわち、

$$\gamma_{1.0} = 1.7 \times K_g \times a$$

以下、 K_g 値を使って液状化判定を試みる。

●常時微動計測とデータ解析について

ここでの検討に用いる常時微動測定結果は、1990年に計測されたもので、3成分微動計 PIC (Portable Intelligent Collector) を用いて、各測点で 40.96 秒 (4096 データ) の測定を 3 回繰り返して、各測定の中から人工ノイズが少ないと思われる部分 10.24 秒を取り出して、フーリエスペクトルを算定した。水平 2 方向と上下方向のスペクトル比を各測定毎に算定して、3 回を平均して、各水平方向の H/V スペクトル比としている。このスペクトル比からピーク周波数 (固有振動数 F)

とピーク値（増幅倍率 A）を読み取っている。ここまでの作業は 1990 年に行われ、報告されている。ここでは、この時に推定された固有振動数と増幅倍率を使って **Kg** 値を算出し、近くの地表面で観測された加速度を使って予測した発生歪を実際の液状化状況と対比させながら、液状化判定の妥当性を検証する。

●Kg 値算定結果と液状化被害との比較

検証(1)舞浜周辺

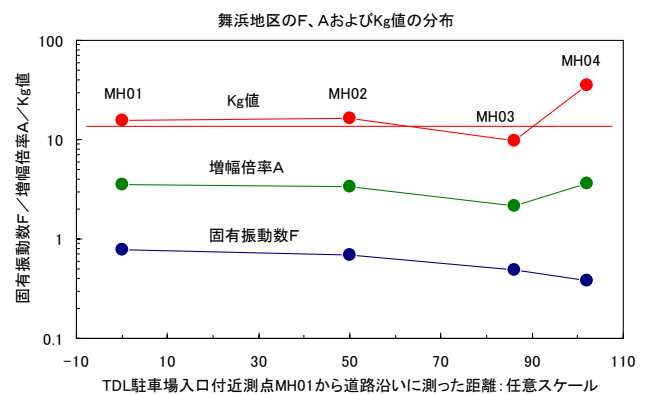
この地域の埋立地の四隅（MH01～MH04）で微動を計測している。その結果は、第 8 回日本地震工学シンポジウム（1990）で報告した「常時微動による東京湾大井埠頭周辺地盤の地震動特性の推定（中村・滝沢 1990）」¹。ここでは、そこで推定された固有振動数と増幅倍率を使って **Kg** 値を推定した。結果は図に示すとおり、MH01～MH04 に対して、**Kg** 値は 9.8～34.9 となっている。K-NET 浦安の記録を使って算定した 5HzPGA は 164Gal である。増幅倍率は約 4 倍と見積もられるので、基盤加速度は約 41Gal となる。今回の地震がこれまでよりかなり長い継続時間であったことを考慮して、定義の際に導入した入力効率を 60%ではなく 100%として以後の検討を進める。具体的には、入力加速度を $41/0.6=68\text{Gal}$ として、表層地盤に生じるせん断ひずみを大まかに推定する。結果は、MH01～MH04 に対して、 1050μ 、 1100μ 、 700μ および 2300μ となる。 1000μ 以上のひずみで地盤が液状化するとすれば、MH01 と MH02 は液状化が予想され、MH03 は液状化しない可能性が大きく、MH04 はもっとも激しく液状化すると判断される。東京電機大学の安田先生らの調査と比較すれば、**Kg** 値による判定結果は妥当と考えられる。

常時微動を用いた液状化推定手法

関東地方の液状化被害による検証(1)舞浜地区



1990年の常時微動測定



2011年東北地方太平洋沖地震による液状化被害



東京電機大学
安田 進先生による
液状化調査結果

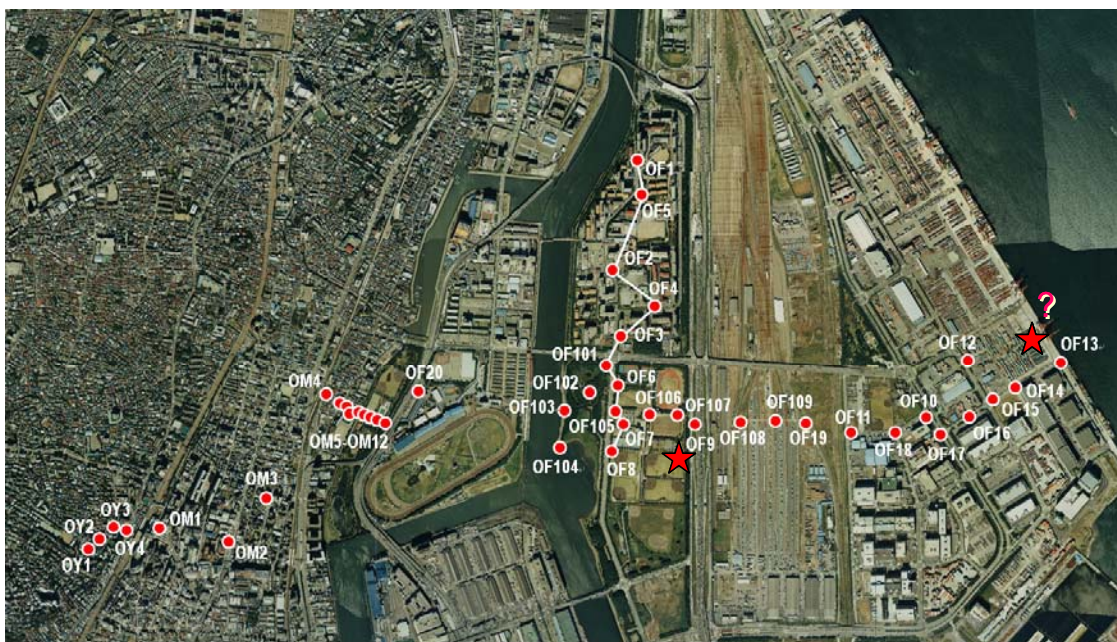
●検証(2)大井埠頭周辺

ここでは、大森駅西側の公園から大井コンテナ埠頭の南に隣接する埠頭までを EW 側線とし、大井埠頭の埋立地のほぼ中心に南北側線をとって、比較的多数の地点で微動を計測した。その結果は次頁に報告したが、報告したデータを基に Kg 値の分布を算定して下図に示す。これによれば、Kg 値が 15 を上回る大きな値を示すのは、岸壁付近と運動公園付近である。

東京工大の時松先生のグループの調査（下図）によれば、大井埠頭の岸壁付近で液状化の発生が確認されている。内陸部の運動公園については軟式野球場の D 面が地震後液状化被害のためしばらく利用できなかった事実がある。この他の地点での液状化発生は確認されていない。Kg 値は岸壁付近（23 以上）と運動公園周辺（15 以上）でやや大きくなる他は、概ね 10 程度以下の小さな値であり基盤加速度 100Gal 未満の地震動程度では液状化しないと推測される。この地域でも Kg 値による液状化判定は概ね妥当な結果を与えていると判断される。

常時微動を用いた液状化推定手法

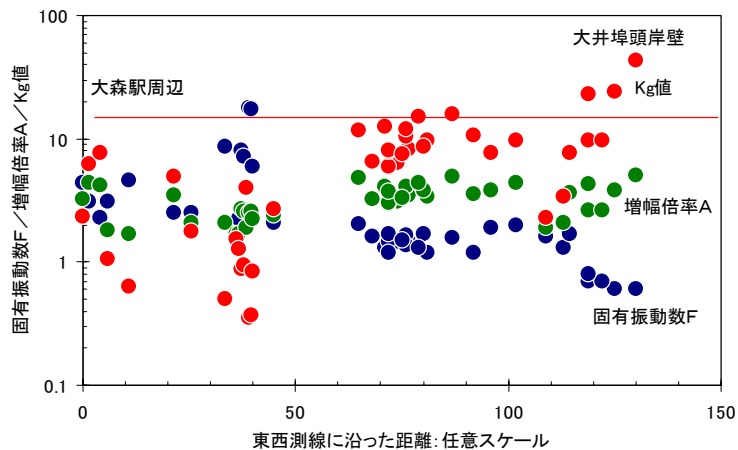
関東地方の液状化被害による検証(2)大森・大井埠頭地区



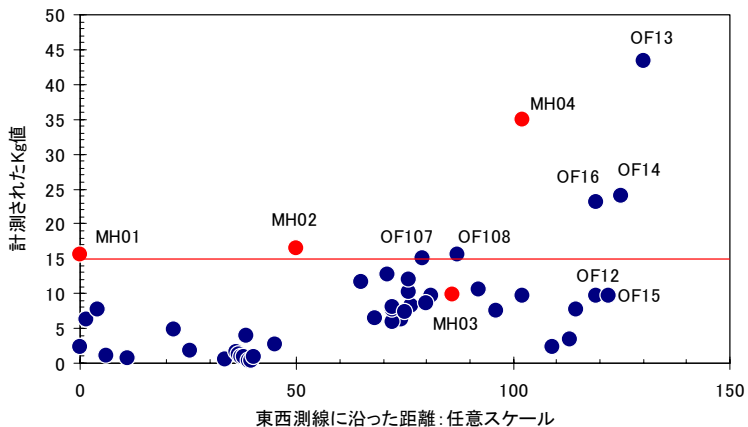
1990年の常時微動測定

0m □ □ □ 500m □ □ □ 1000m
1988・1990年国土地理院撮影

大森・大井埠頭地区のF、A および Kg値の分布

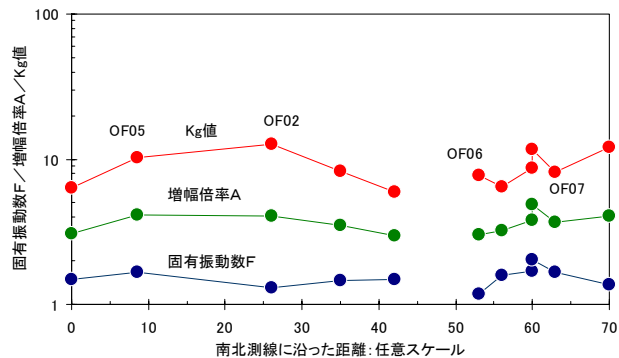


大森・大井埠頭地区と舞浜地区のKg値分布



東工大・時松孝次先生により確認された液状化地点(☆)分布と1990年の微動測定地点

大井埠頭地区F、AおよびKgの分布



●検証(3)京葉線：西船橋－蘇我間

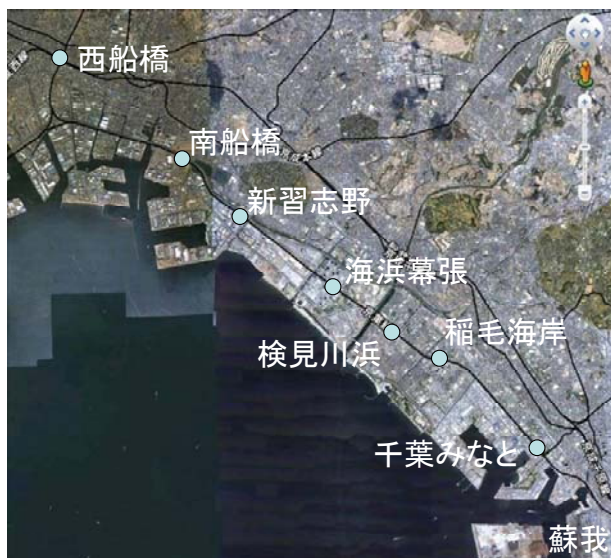
ここでは、西船橋駅から蘇我駅までの約 22.5km について、100m 間隔で鉄道構造物と沿線地盤の常時微動を同時に計測している。下図は推定された沿線地盤の固有振動数と増幅倍率および Kg 値の分布を沿線に沿って示したものである。これらの横軸は西船橋駅からのキロ程である。下図をみると、振動数も増幅倍率も場所により大きく変動していることがわかる。

この地域については東京電機大学の安田進先生や千葉県環境研究センターが公開している資料がある。基本的に鉄道に沿った調査ではないことに留意しながら、ここでは、Kg 値の分布図に他機関による調査結果を以下のように重ねて表示した。安田先生による液状化部分と変状が認められない部分をそれぞれ濃いピンク色と水色で示し、千葉県環境研究センターによる変状部分を薄いピンク色で示した。さらに、7km 以後については、地震後に撮影／公開された GoogleEarth による衛星写真があるので、地震前後の衛星写真を比較するなどして変状があると思われる部分を紫色で示した。

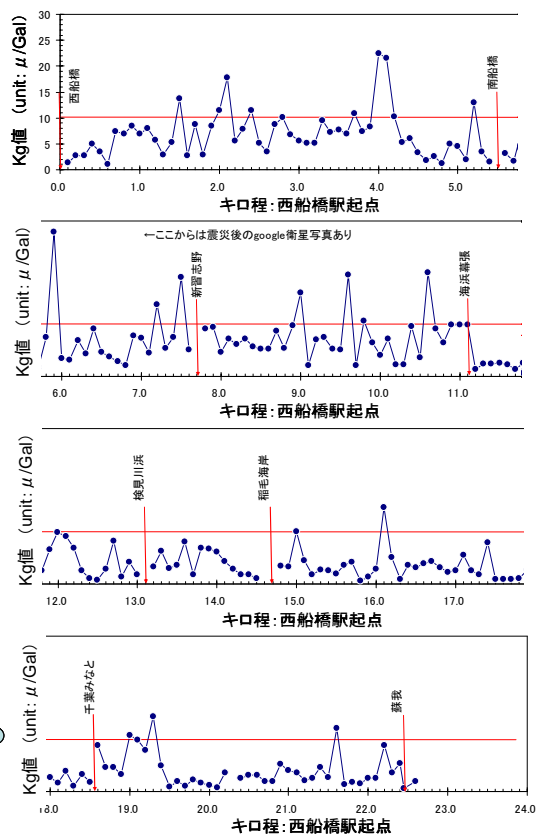
これらを Kg 値の分布と比較してみると、概ね良い対応が見られる。変状が報告されていないところや変状がないとされるところでは、10 (μ strain/Gal、以下単位省略) 以下の小さな Kg 値となっており、変状があるところや変状の可能性のあるところは 10 以上の大きな Kg 値となっている。つまり、変状の有無は概ね Kg 値が 10 を境にしていると判断される。付近で観測された地震動は概ね 200Gal で増幅倍率は概ね 4 程度である。したがって、基盤の加速度は 50Gal 程度となる。継続時間の長さ考慮して入力効率を 0.6 ではなく 1.0 とすれば、基盤加速度を 1.7 倍するのと等価で 83Gal となる。つまり、Kg 値 > 12 で約 1000 μ の歪みの発生が推測されることになり、Kg 値による液状化判定はほぼ妥当であると判断される。

常時微動を用いた 液状化推定手法

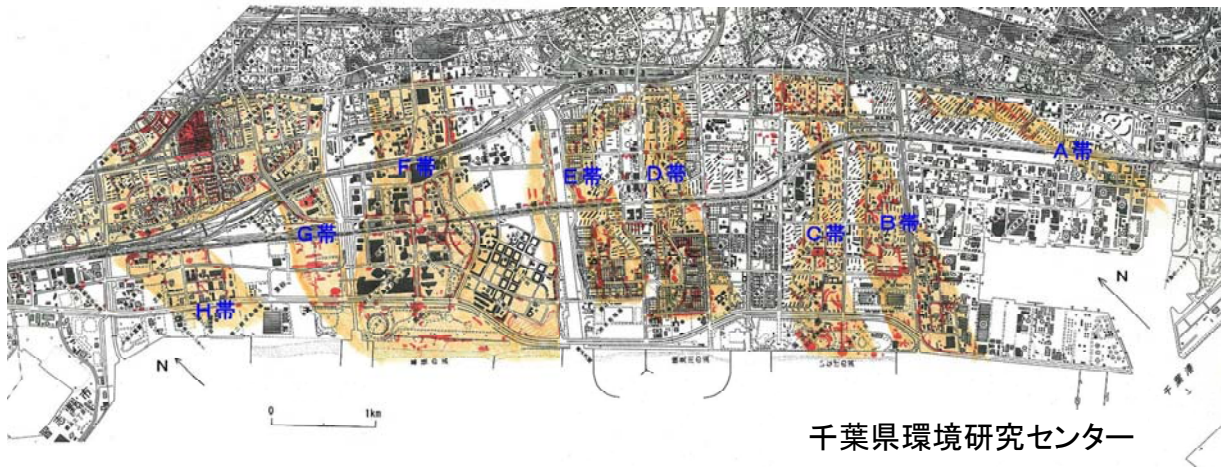
関東地方の液状化被害による 検証(3)京葉線：西船橋-蘇我間



常時微動測定1990年



噴砂の分布と噴砂の集中帯(国土地理院地形図1/2.5万「千葉西部」を使用)



詳細図



概要図

東京電機大学
安田 進先生による
京葉線周辺液状化調査結果

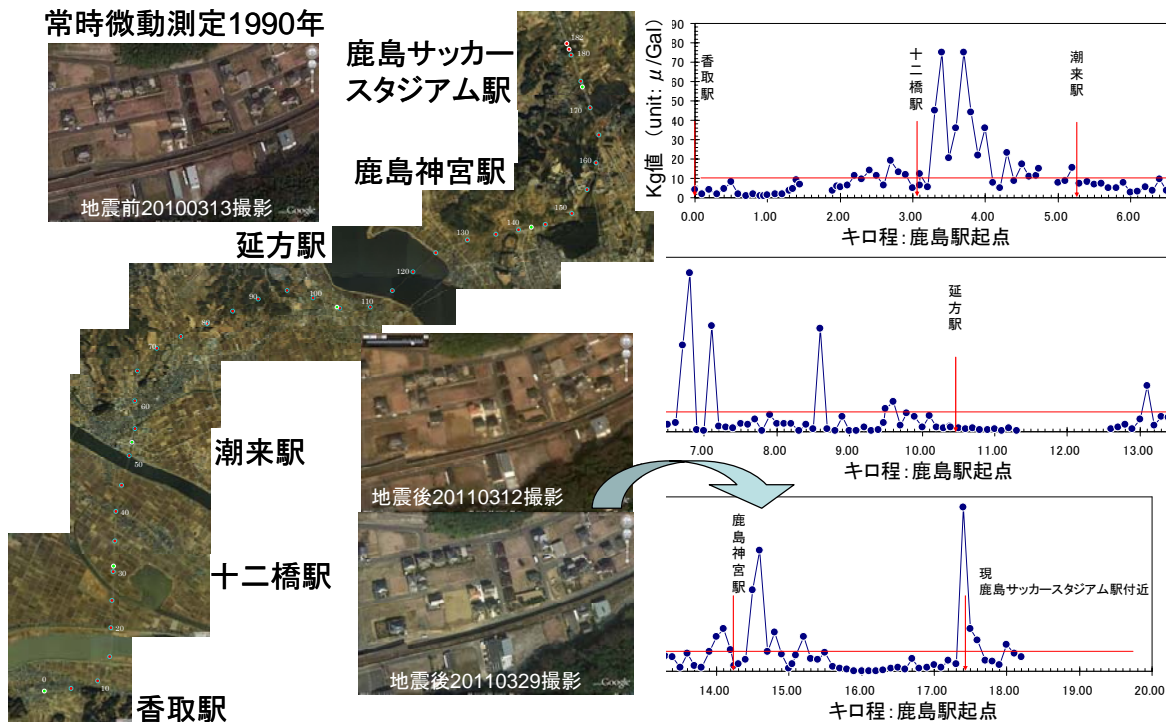
●検証(4)鹿島線：香取－北鹿島付近間

この線区も 1990 年に、香取駅から北鹿島付近（現在の鹿島サッカースタジアム駅付近）までを測定している。下図は推定された沿線地盤の固有振動数と増幅倍率および Kg 値の分布を沿線に沿って示したものである。これらの横軸は香取駅からのキロ程である。

京葉線と異なり、他機関による調査結果がないので、GoogleEarth による 3/29 撮影の衛星写真に基づいて、何らかの変状が認められた地点を Kg 値の分布図にピンク色で示した。盛土の被害と判断されるものについては茶色で示した。これらは現地調査に基づくものではないので、参考程度にしか過ぎないが、Kg 値の大小と変状の有無が対応しているようにみえる。変状発生のしきい値は概ね 10 よりやや大きい程度と見積もられる。

常時微動を用いた液状化推定手法

関東地方の液状化被害による検証(4) 鹿島線：香取-北鹿島間



●検証結果のまとめ

すでに提案している常時微動計測結果に基づく液状化判定手法を、1990年代に実施した常時微動計測・分析結果に適用して、今回の地震による関東地域における液状化被害と比較した。この結果、概ね $K_g > 10$ の箇所に変状が発生したことが確認された。この K_g 値では、今回観測された入力地震動によって、表層地盤に概ね 1000μ 以上のせん断歪が生じると推測され、液状化に到ってもおかしくない。このように、今回の地震でも、事前の常時微動測定結果に基づいて、想定地震動で液状化が発生するかどうかの的確に判断できることが確認された。ここで検証した手法は、常時微動を測定するだけの簡易な手法であり、数多くの地点を調査することが可能である。本手法で抽出した危険地域について、従来手法で詳細調査を行って、合理的な対策工事を実施することが可能となる。また、対策工前後で計測することにより、対策工の効果をチェックすることもできる。

本手法が液状化対策に資することができれば幸いである。

以上