

# 兵庫県南部地震による液状化発生層の推定

東京電機大学理工学部 安田進\*  
基礎地盤コンサルタンツ(株) 坪田邦治\*\*  
東京電機大学大学院 西川修\*  
東京電機大学理工学部 浅香寛之・内藤福隆\*

1995年兵庫県南部地震では埋立地および海岸付近の広い範囲で液状化が発生した。液状化と構造物の被害の関係などを調べるとき、液状化した層の推定が必要であるが、地震動が大きかったことに起因して推定に問題が生じている。この問題に関して、神戸市と西宮市を通る4つの地質断面を作成し、現行の4つの液状化簡易判定方法で液状化層の推定を行った。そして、実際に噴砂・噴水が発生した箇所と比較して、適用性を調べた。また、地盤を締め固めてあって、液状化が発生しなかった地盤に対しても判定法を適用し、適用性を検討した。その結果N値が20程度を超える場合の液状化強度の推定や、地盤の中で発生するせん断力の推定方法などに問題があり、液状化層の推定結果と実際とが合わないことも生じていることが明らかになった。

## 1. まえがき

地震時に噴砂・噴水が地表に現れるとその地点は液状化したと判断される。ただし、それだけでは液状化した層の深度・厚さはわからない。また、噴砂・噴水が地表に現れなくてもある深さが液状化している可能性がある。したがって、液状化と構造物の被害との関係などを調べる場合、液状化した層の推定を行う必要がある。このことは当然で、過去の地震時では液状化層の推定が地震後まもなく行われてきた。ところが、今回の阪神・淡路大震災については、地震後はや1年たとうとしているのに、液状化層の推定があまり行われてきていない。

これは、被害量が非常に多く、まず調査の前に地震の復旧に力を注ぐ必要があった事も関係していると思われるが、他の理由として、地震動が非常に大きかったので、これまでに開発されてきたN値による液状化の簡易判定方法を適用し難いこともあるのではないかと考えられる。つまり、これまでの液状

化判定方法の多くは、200gal程度の地震動に対して適用すること想定されていたのに対し、今回は500～700galといった非常に大きな加速度であったため、方法をそのまま適用すると判定結果がとんでもないものとなって、液状化層の推定どころではない状態に陥っているのである。筆者達はその例であり、以下に困っている状況と問題点を示したい。

## 2. 判定方法の適用性に関する検討方法

N値による液状化の簡易判定方法の適用性を検討するにあたって、①海岸から山裾までの断面と、②地盤を締め固めてあった箇所の2種類の検討対象地盤を選んだ。前者は神戸市から西宮市にかけて、海岸付近では液状化が発生し、内陸になると発生していなかったため、これらを通る断面をとったものである。このため、図-1に示す、神戸市の三宮・深江、西宮市の甲子園町・高須町を通る4測線をとった。そして、神戸市に関しては”神戸の地盤<sup>1)</sup>、西宮市に関しては”大阪地盤<sup>2)</sup>”から土質柱状図を抽出して断面図を作成した<sup>3)</sup>。

後者は、ポートアイランドや六甲アイランドで地盤をロードコンパクションやサンドコンパクション工法で締め固めてあった地区で噴砂・噴水が発生せ

キーワード：液状化、震害、耐震設計

\* 東京電機大学理工学部 0492-96-2911

\*\* 基礎地盤コンサルタンツ(株) 中部支社  
052-522-3171

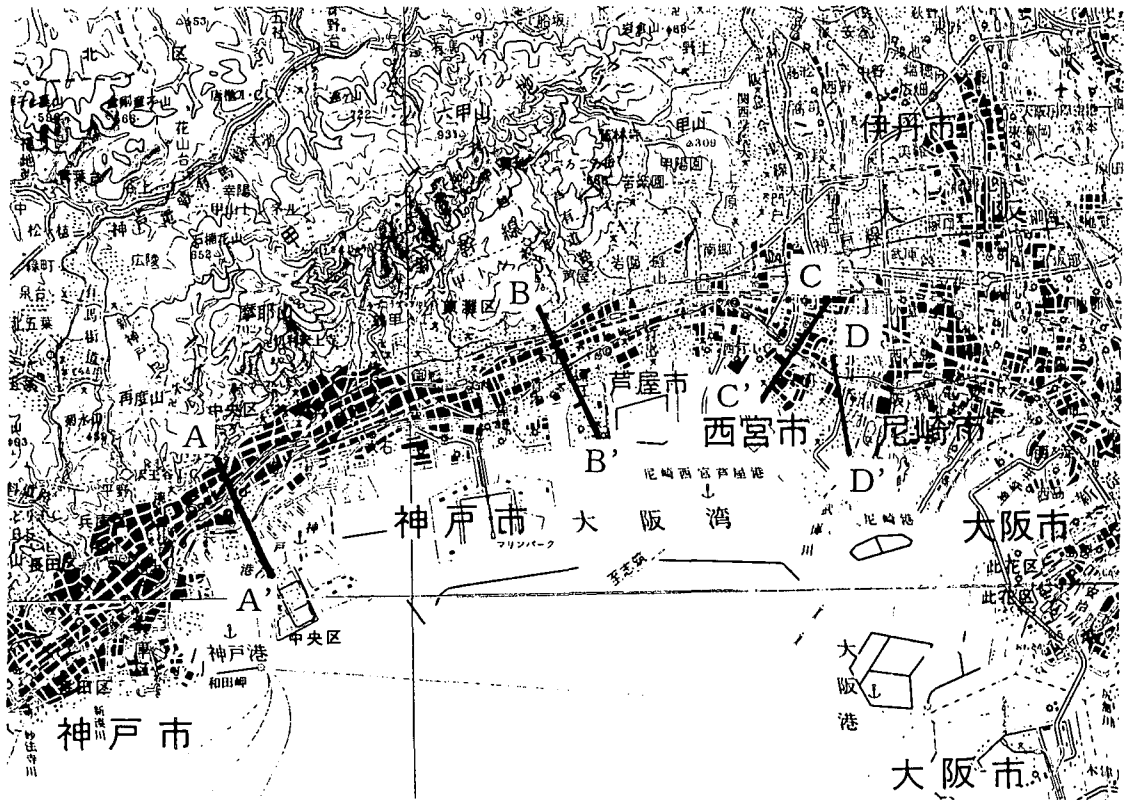


図-1 検討を行った断面位置

ず、地盤の沈下も発生しなかった<sup>4)</sup>ため、完全に液状化しなかった例として、これを検討対象地盤として選んだ。ただし、代表的な地盤モデルとして、埋め立て層厚が17m、地下水位がGL. -4mの地盤モデルを設定した。そして、ポートアイランドでの締め固め後のN値が18~31であったため、埋め立て層の中間深度でこれらの値をとり、最深部と地表とでN値が±2となるように設定した。

液状化層の推定は道路橋示方書・同解説、建築基礎構造設計指針、原子力発電所耐震設計技術指針、港湾の施設の技術上の基準・同解説に示されている、N値を用いる簡易方法で行った。この際、平均粒径、細粒分含有率、単位体積重量については不明なため、道路橋示方書・同解説に示されている土質名からの推定方法に従って推定した。ただし、神戸市の埋立土は主にまさ土から構成されているため、神戸市の断面およびポートアイランドで締め固めた地盤に対しては、ポートアイランドでのまさ土の試験結果から $D_{50}=1.2\text{mm}$ 、 $FC=8\%$ と仮定した。また、西宮市の沖積砂層の粒径については、採取した噴砂の試験結果<sup>5)</sup>から $D_{50}=0.25\text{mm}$ 、 $FC=10\%$ と仮定した。

地表最大加速度としては4つの断面に対しては加速度の影響をみるため、300、500、700galの3種類

で計算した。ただし、以下に図示する液状化範囲の推定は、小林がまとめている距離減衰関係<sup>6)</sup>をもとに、A、B、C、D断面それぞれに対し、600gal、500gal、400gal、400galの値で行った。また、ポートアイランドの締め固めた地盤モデルに対しても距離減衰関係から600galで推定を行った。

なお、基準類によっては20m以深や洪積層では液状化の対象外としているものもあるが、ここではその制限をはずしてある。したがって、純粹に各基準類の適用性を論じているのではないことを、お断りしたい。

### 3. 4つの地層断面での液状化層の推定結果

図-1に示した4つの断面のうち、紙面の都合上、A-A'断面とC-C'断面の結果のみを図-2、3に示す。ただし、B-B'断面、D-D'断面はそれぞれA-A、C-C断面の結果に傾向は似ていた。図-2、3のうち、液状化検討結果の図では300、500、700galのときの地震時発生せん断力比を△、○、□印で示し。液状化層の推定を行った600、400galでのそれを実線で示し、また、液状化強度比を●印で示した。ただし、港湾の方法だけはN値で表現されるため、外力と強度に相当する値を同様の記号で

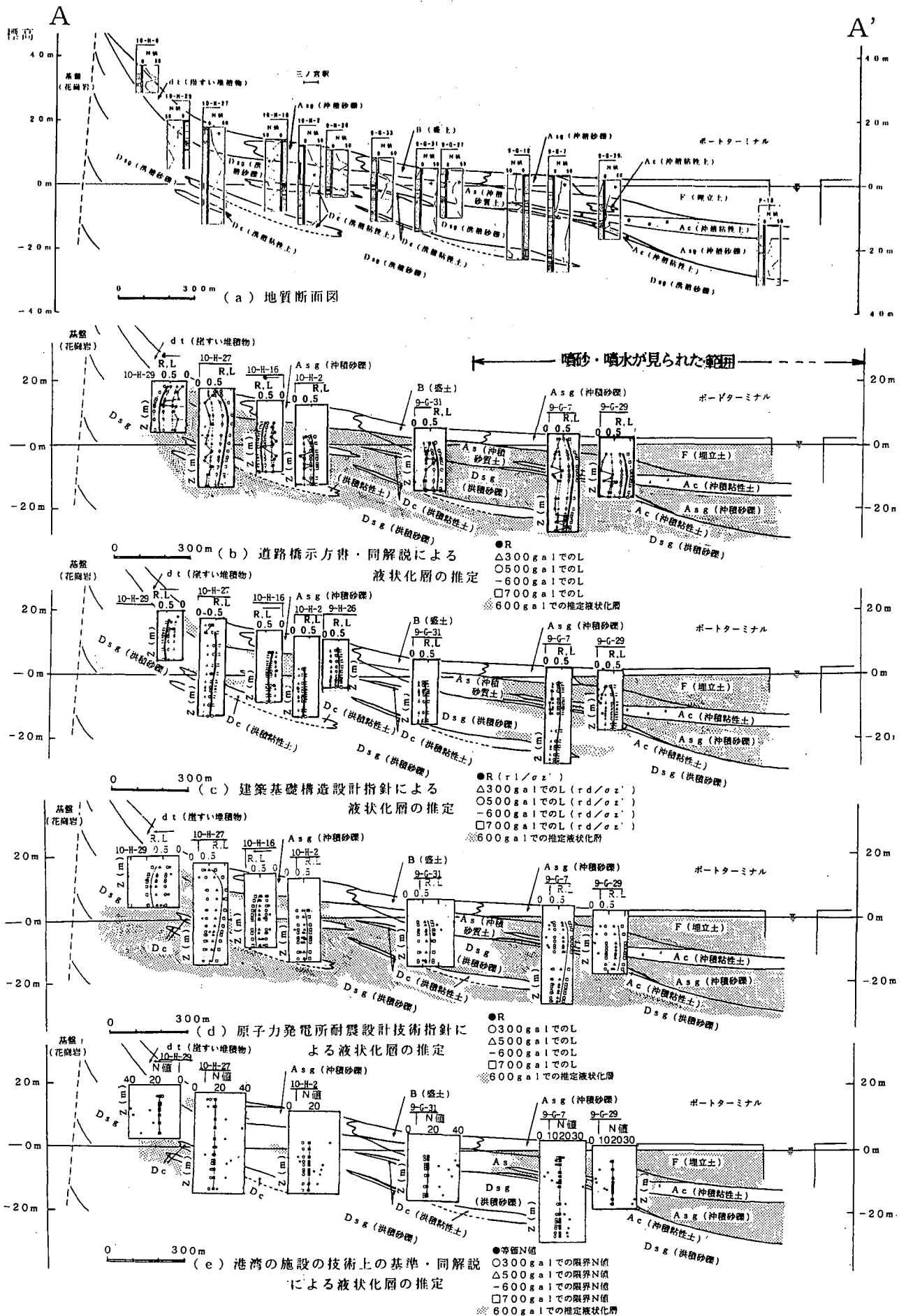


図-2 神戸市の三宮駅付近を通る推定地層断面図と液状化層の検討結果

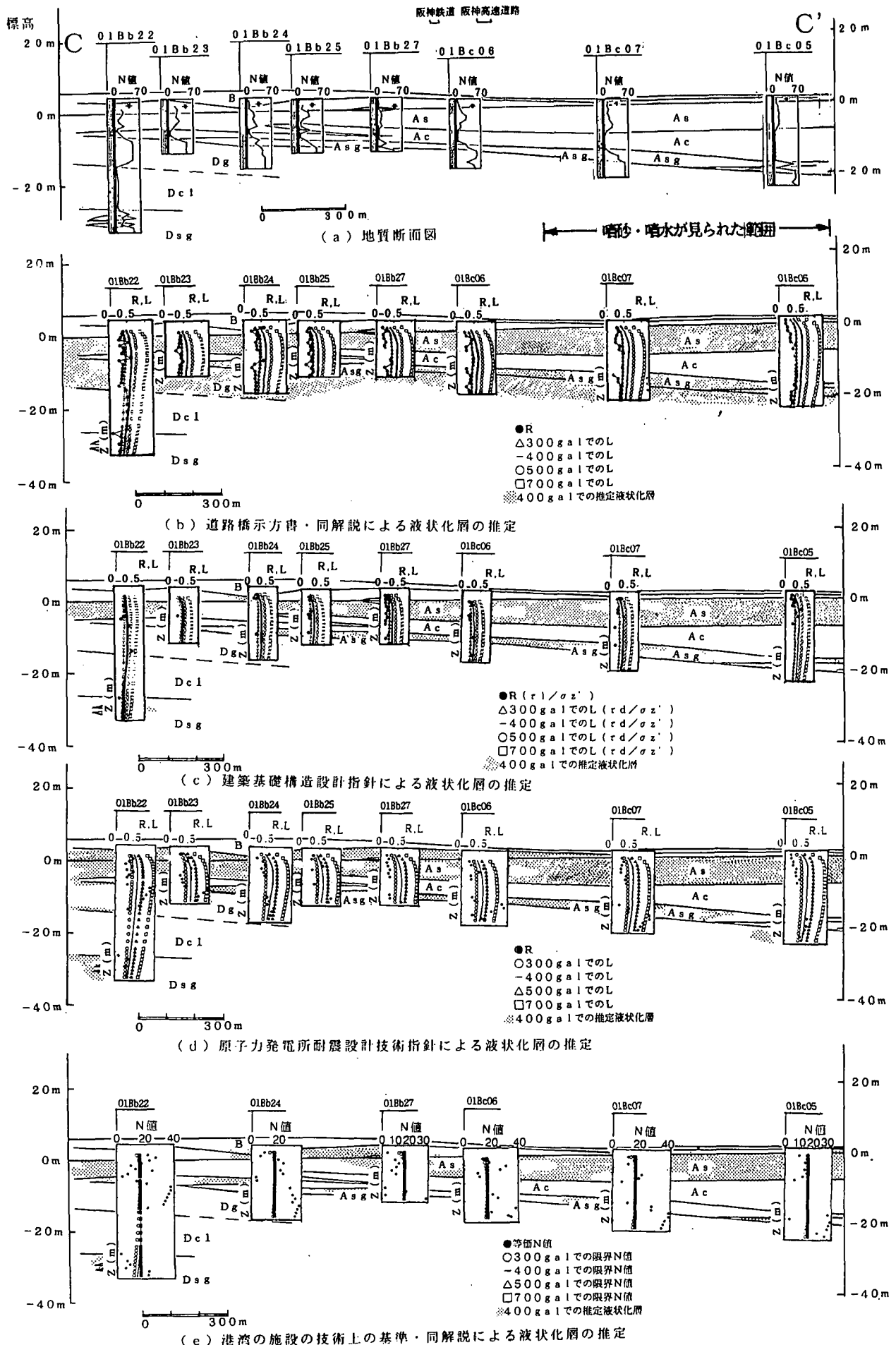


図-3 西宮市の甲子園町付近を通る推定地層断面図と液状化層の検討結果

示した。さらに、筆者たちが地震後に現地で噴砂・噴水を見た範囲も図中に示した。

まず図-2の三宮駅付近を通るA-A'断面の地層構成を見てみると、地表から数m~十数mの深さまで海岸部では埋立土層(F)があり、内陸にはいと沖積砂礫層(Asg)や、盛土層(B)が堆積している。また、山際には崖すい(dt)が堆積している。これらの下部には沖積の砂質土(As)・粘性土(Ac)・砂礫層(Asg)が海側で堆積し、さらにその下部には洪積の砂礫(Dsg)と粘性土(Dc)の互層が存在している。

地表最大加速度の違いによる液状化発生層の相違についてみてみると、埋立土層(F)では300galですでにほとんど液状化したとの結果になり、それより大きな加速度では結果が変わらない。これに対して、港湾の方法を除いてその他の方法では、300gal以上の加速度で発生せん断力比が加速度に比例するため、埋立土層以外の地層では液状化層が加速度に応じて変化する結果となった。

次に、この地区で発生したと考えられる600galの地表最大加速度のもとでの、推定液状化層(図中に網がけしてある層)についてみてみると、沖積砂層(As)では道路橋の方法ではほとんど液状化したとの結果になった。これに対して、他の方法では一部液状化していないとの結果となった。これは、N値が20程度以上での液状化強度比の違いに起因しているようである。海側の沖積粘土層下の沖積砂礫層(Asg)では4つの方法ともほとんど液状化したとの結果となった。実際にはポートアイランド内の同じ層で過剰間隙水圧比が50%程度上昇していたとの報告もあり、ここでの判定結果はある程度合っているかもしれない。洪積砂礫層(Dsg)では道路橋および原子力の方法ではかなり液状化したとの結果となり、その他の方法では一部で液状化したとの結果となった。この層のN値はかなり大きい、深さが深いので、このような結果になったと考えられる。ただし、前述したように、この層は洪積層であり、また、深いので、本来基準類の適用範囲を超えている。

図-3の西宮市の甲子園町を通るC-C'断面では、地表から沖積の砂質土層(As)・粘性土層(Ac)・砂礫層(Asg)が堆積し、その下部に洪積の砂礫層(Dsg)が堆積している。

この地区での地震動を考えた、400galの地表最大

加速度による液状化層の推定結果をみると、沖積砂層(As)ではどの方法ともかなり内陸部まで液状化したとの結果となった。ただし、層の中間深度付近のN値が20程度以上の部分では、道路橋以外の方法では液状化していないとの判定結果となっている。沖積砂礫層(Asg)では港湾の方法では一部しか液状化しないとの結果となり、道路橋の方法ではほとんど液状化するとの結果となった。そして、その他の方法ではその中間の推定結果となった。この層はN値が20程度以上はあるが、深度は深い。洪積砂礫層(Dsg)については、道路橋の方法で一部液状化したとの結果となり、その他では-30m付近の洪積砂礫層を除いて液状化しなかった結果となった。

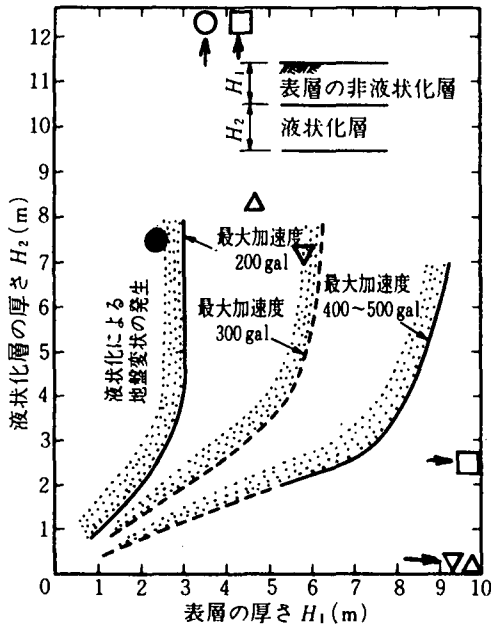
#### 4. 噴砂がみられた範囲と液状化推定層の関係

図-2、3に示した噴砂・噴水が見られた範囲と、推定した液状化層が存在する範囲との関係を見てみると、A-A'断面では建築および港湾の方法ではほぼ範囲が一致している。これに対し、道路橋および原子力の方法では内陸の方まで推定した液状化がはいりこんでいる。一方、C-C'断面ではいずれの方法とも、推定した液状化層の方が噴砂・噴水が見られた範囲よりかなり内陸まで入りこんでいる。

さて、地盤内のある層で液状化したといえども、それで噴砂・噴水が地表に現れるとは限らない。例えば、石原は液状化層厚とその上の非液状化層厚の関係で、地表に噴砂・噴水が現れたり被害が生じるか否かが異なると考え、図-4の関係を提案している<sup>5)</sup>。そこで、今回の推定結果をこの図にプロットしてみた。ただし、今回の両断面とも内陸部に向かって推定液状化層厚が薄くなっていっているため、ここでは簡単化のため、噴砂・噴水が見られた区域と見られなかった区域との境の位置における液状化層厚と非液状化層厚の関係をプロットしてみた。また、液状化層の下部に非液状化層があり、さらにその下部に液状化層がある場合には、上部の液状化層の厚さだけをカウントした。ただし、A-A'断面においては、境付近を挟んで海側と内陸側で液状化層が大幅に異なり、判断がつかねるので、両側の液状化・非液状化層厚ともプロットした。

図-4を見ると、まず、A-A'断面の場合、道路橋の方法では600gal程度の曲線(地表に変状が発

- A - A' 断面(600gal)
- 道路橋 △建築
- 原子力 ▽港湾
- C - C' 断面(400gal)
- 4つの方法で同じ



図一 4 液状化層厚と非液状化層厚の関係<sup>7)</sup>

生するか否かの境界)よりはるかに内側にはいつている。その他の方法では液状化層が厚い内陸側のデータをとると曲線より内側になり、海側のデータをとると、曲線よりはるかに外側となった。したがって、もし400-500galより少し外側に600galの曲線があるとすると、道路橋では液状化層厚を多く見積もりすぎていることになる。その他の方法では海側のデータと内陸側のデータがかなり離れているため、これだけでは議論をしかねる。

一方、C - C' 断面では、いずれの方法でもこの境付近の液状化・非液状化層の厚さは似ているため、図では1点で示した。これと400-500galの曲線とを比較してみると●印はかなり内側にプロットされている。したがって、図一 3 では液状化層厚を厚く推定していると言えよう。なお、前述したように、この断面の沖積砂層(As)には中間深度にN値が大きい部分があり、道路橋以外ではこの層が非液状化層となるため、図一 4 のプロットも真下に少し下がる可能性もある。ただし、それでも曲線上の $H_2=1\text{m}$ 程度までは薄くならず、また、内陸側でそのような非液状化部分がないデータもあるため、やはり、い

れの方法でも液状化層を実際より厚く推定している可能性があると言えよう。

## 5. ポートアイランドで締め固めてあった地盤での推定結果

ポートアイランドで締め固めてあった地盤のモデルに対する液状化層の推定結果を図一 5 に示す。前述したように、締め固め後のN値は18~31であったため、その最低値と最高値で推定を行ってある。図を見ると、道路橋および原子力の方法ではN値が31でも、600gal地表最大加速度を想定すると液状化したとの結果となった。建築および港湾の方法でも、N値が18ではやはり液状化したとの結果となった。ただし、N値が31では液状化しない結果となった。

N値と液状化強度比の関係としては、N値が20程度まではどの方法でもあまり大きな差がないが、これより大きいN値で差があることが、これまでに指摘されてきていた。道路橋の方法ではこれまであまり大きいN値を対象としていなかったため、小さいN値での式(1/2乗)をそのまま大きなN値に当てはめるとあまり液状化強度比は増加しない。これに対し、建築の方法ではN値が20程度以上で、また、原子力の方法では30程度以上で液状化強度比が急激に大きくなる式となっている。したがって、上記の液状化推定結果の差はこれに主に起因して生じたと考えられる。つまり、道路橋の方法ではN値が31と大きくてもあまりRは大きくならないのに対し、Lの方は通常想定している80~180gal程度より数倍であったため、液状化したとの判定結果にならざるをえなかったと考えられる。原子力の方法でもN値が30程度以上でないとRは急増しないため、同様の結果となったと考えられる。これに対し、建築の方法ではN値が20程度から $\tau_v/\sigma'_v$ が急増するため、N値が31になると600galといった大きな地震力でも液状化していないとの結果になったものと考えられる。また、港湾の方法では等価加速度が300gal以上では等価N値(ここでは他の方法と比較するため限界N値と記している)が16と一定値に設定してあるため、N値が16程度以上(この値は深さによって異なる)になると液状化しなかったとの結果になったものと考えられる。なお、港湾の方法では液状化の判定は4段階で示されるようになってきているが、ここでは中

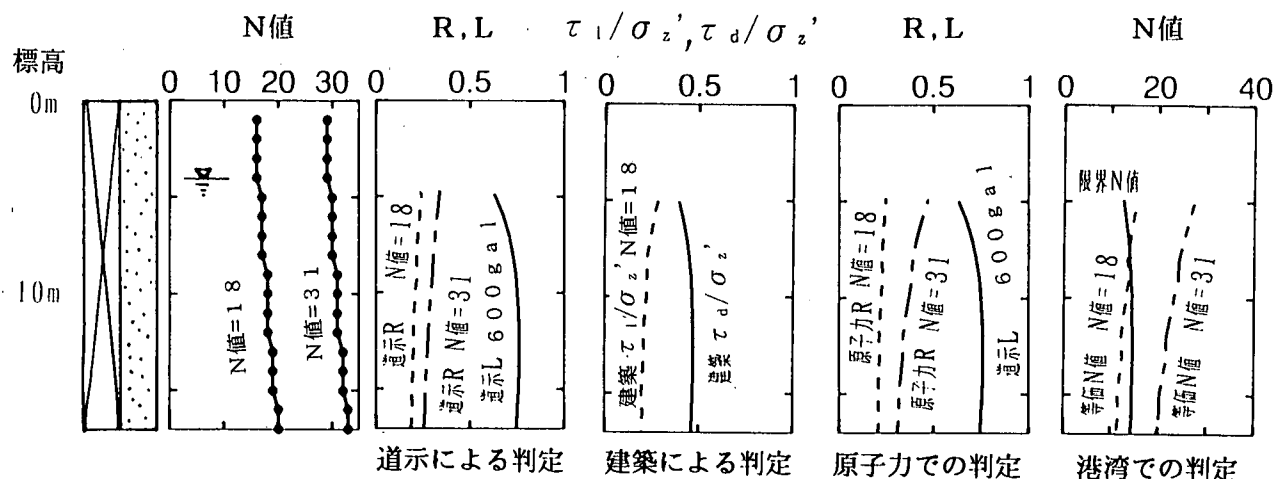


図-5 ポートアイランドで締め固めた地盤のモデルと液状化検討結果

間を考え、ⅡとⅢの境界で液状化、非液状化を判断している。

## 6. 簡易液状化判定方法の問題点

以上の結果をもとに、今回のような大きな地震動に対して、液状化簡易判定方法を適用する場合の問題点および修正の可能性に関して少しコメントしてみる。

まず、液状化強度比に関しては、ポートアイランドでの締め固め地盤の結果等をもとに考えて、N値が20程度以上に締め固めてあると、大きな地震動でも液状化はしそうになく、液状化強度比を大きく判断するようにした方が良いでしょう。ただし、自然堆積地盤でも同じなのか、また、砂の種類などによってどう変わるかといった、細かい検討は必要であろう。

次に、波形の違いに関する補正係数に関しては、直下型の地震等の場合、補正係数を変えたほうが良いことが考えられる。これに関しては、石原がまさ土に今回の地震波荷重と正弦波荷重を加え、液状化試験を行って、補正係数を求めている<sup>8)</sup>。そこではポートアイランドの地表で記録された加速度記録を平面的に合成し、卓越する方向に投影した波を用いている。また、緩く詰めた場合と密に詰めた場合で実験してある。それによると、密度によって差がなく、0.43なる値が得られている。道路橋などの場合、通常この値としては、0.625がとられているので、この分だけ今回の検討では差し引ける可能性がある。また、吉田の解析結果<sup>9)</sup>によると、地震応答解析の

内でも、SHAKEのような等価線形法による場合と有効応力法などによる場合とで、得られる発生せん断力が違っていて、前者が2割程度大きいことが述べられている。道路橋等のLの推定式はSHAKEによる解析結果をもとに作られているため、今回の検討でもLを2割程度大きく見積もっている可能性がある。そこで、波形の補正係数と地震応答解析の問題を単純に掛け合わせてみると、Lに0.55倍したものが今回の地震で発生した実際のせん断力比とすることができる。このように考えて、図-3の例えば原子力の結果を眺めてみると、内陸部でかなり液状化層が減り、図-4とつじつまがはってくる可能性があると考えられる。

## 7. あとがき

神戸市と西宮市を通る4本の測線での地層断面、およびポートアイランドで締め固めてあった地盤のモデルに対し、4つの簡易判定方法で液状化層を推定してみた。その結果、ある程度の推定はできたものの、今回は地震動が非常に大きかったため、判定方法自体の適用性に問題もあり、完全に推定はできなかった。今後データをさらに集めて検討を続けたいと考えている。

## 【参考文献】

- 1) 神戸市企画局総合調査課：神戸の地盤, 1980.
- 2) 土質工学会関西支部・関西地質調査業協会：新編大阪地盤図, コロナ社, 1987.

- 3) 安田進・坪田邦治・小林利雄・西川修・野村博之：兵庫県南部地震による液状化発生地点での地層構成，第23回地震工学研究発表会講演概要，pp. 217-220, 1995.
- 4) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shin kawa, N.: Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, 地盤工学会論文報告集, 1995 (投稿中).
- 5) 安田進・小林利雄・野村博之・西川修：兵庫県南部地震による液状化地点での判定法方の適用性，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，第3部(A)，pp. 528-529, 1995.
- 6) 小林啓美：兵庫県南部地震1995の地震動強さの検討，土と基礎，Vol. 43, No. 11, pp. 55-58.
- 7) Ishihara, K.: Stability of Natural Deposits during Earthquakes, 11th Int. Conf. on S.M. F.E., Vol. 1, pp. 321-376, 1985.
- 8) 石原研而：私信
- 9) 吉田望：1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドでの地震応答解析、土と基礎、Vol. 43, No. 10, pp. 49-54, 1995.

## Estimation of Liquefied Layers during the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake

Susumu Yasuda, Kuniharu Tsubota, Shuuichi Nishikawa, Hiroyuki Asaka and Fukutaka Naitoh

Liquefaction occurred widely in reclaimed lands and alluvial plains during the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake. The authors estimated liquefied layers by four simple prediction methods based on SPT N-values. Two types of ground models were selected: four soil cross sections through liquefied and non-liquefied zones in Kobe City and Nishinomiya City, and a densified ground where liquefaction was not induced. The results showed liquefaction did not occur in the dense ground in which SPT N-values were exceeded about 20. And it was pointed out that there are several problems to estimate liquefied layers by the simple estimation methods if acceleration is very large and the ground is dense.