

# 周波数依存型等価線形化手法による簡易液状化判定法

岡田久輝<sup>1</sup>・杉戸真太<sup>2</sup>・八嶋厚<sup>3</sup>・古本吉倫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 岐阜大学大学院生 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

地表で与えられる最大加速度によって行う通常の液状化判定に対して、工学的基盤で与えられる時刻歴波形による地盤応答解析に基づく判定法について検討した。地盤応答解析には従来からよく用いられてきた SHAKE と比較して、等価ひずみの周波数依存性を考慮した FDEL を用いることの優位性を確認するとともに、詳細な地盤構造が得られている地点での有効応力解析法 LIQCA-1D による結果と比較し、FDEL を用いた簡易判定法の有効性について検討した。

**Key Words:** Liquefaction potential, Frequency dependent equi-linearized technique, Effective stress analysis, Excess pore water pressure

## 1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震において、人工島である神戸ポートアイランドと神戸六甲アイランドなどで地盤の液状化現象が発生した。飽和した砂地盤やシルト質地盤の液状化は、地震動による繰返しせん断応力によって有効応力が消失することにより生ずる。したがって、地盤の液状化は入力地震動の大きさに大きく依存することから、地震動レベルによってどの程度液状化が発生するかを判定することは重要である。道路橋示方書<sup>1)</sup>では、地表面で最大加速度を設定し、準静的に地盤内応力分布を算出することにより液状化判定をすることとしている。

一方、一般に震源断層を想定した地震動予測では地震外力が基盤での加速度時刻歴で与えられることが多いことを考えると、地盤震動解析を行った上で応力分布を算出し、それによる判定を行う方が信頼度が高いと考えられる。

本研究では、周波数依存型等価線形化手法による地盤震動解析プログラム(FDEL)<sup>2)</sup>に道路橋示方書に基づく液状化判定を行うサブルーチンを組み込み、パーソナルコンピュータ上で簡易に動的解析を行い液状化判定をするシステムを開発した。

## 2. 検討手順

本研究のフローチャートを図 1 に示す。本研究では、FDEL を用いた液状化判定システムの開発を目的としている。等価線形化手法による方法は FDEL と実務の面で多く用いられてきた Schnable, Lysmer, Seed によるプログラム SHAKE<sup>3)</sup>の 2 通り行う。液状化判定は等価線形化手法による方法 (FDEL、SHAKE)、道路橋示方書による方法、有効応力解析<sup>4)</sup>による方法 (LIQCA-1D) の 3 種類を行う。そこで、このシステムの適用性を確かめるため詳細な地盤調査がなされている東京電力(株)新大田変電所建

設地点と東京電力(株)千葉火力発電所建設地点の 2 箇所で加速度時刻歴波形の倍率を変えることにより最大加速度- $P_L$  値曲線を描くことで考察する。

FDEL による液状化判定法の適用性については有効応力解析による方法(LIQCA-1D)<sup>4)</sup>で確かめる。この方法は、SHAKE、FDEL とともに全応力法による周波数領域での応答解析であるのに対し、有効応力法による時刻歴応答解析(LIQCA-1D)は過剰間隙水圧比を求めることにより、精度の高い液状化判定を行う手法である。過剰間隙水圧比から液状化指数に対応する新たな指標  $P_{EL}$  値を考慮し、 $P_L$  値との比較を行う。

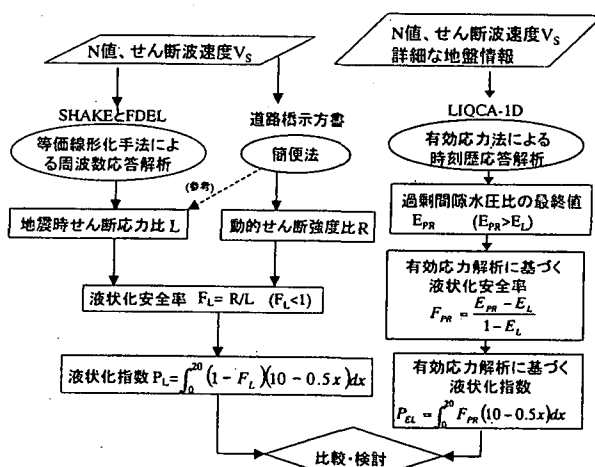


図 1 本研究のフローチャート

## 3. 有効応力解析<sup>4)</sup>による液状化指数 $P_{EL}$ 値

有効応力解析(LIQCA-1D)では、地盤各層における過剰間隙水圧比を時刻歴として求めることができる。その 1 例を図 2 に示す。過剰間隙水圧比は過剰間隙水圧  $P_w$  と初期有効上載圧  $\sigma'_{v0}$  から以下のように表される。

#### 4.地盤震動解析による結果と考察

##### (1)東京電力(株)新大田変電所建設地点

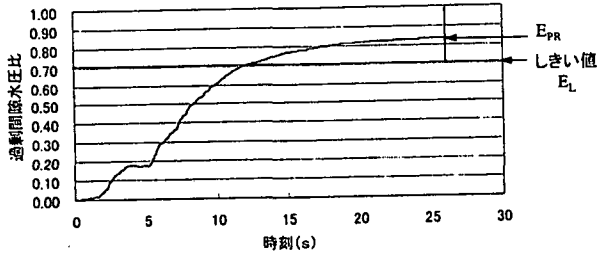


図 2 過剰間隙水圧比の時刻歴の1例

$$E_{PR} = P_w / \sigma'_{v0} \quad (1)$$

そこで、過剰間隙水圧比の最終値  $E_{PR}$  を用いて液状化安全率  $F_L$  に対応する液状化指標値  $F_{PR}$  を定義する。これは、過剰間隙水圧比の最終値  $E_{PR}$  値がしきい値  $E_L$  以上の時、液状化の被害が生じると仮定して、液状化安全率  $F_L$  と対応させた液状化指標値  $F_{PR}$  である。ここでは、しきい値の評価も含め、そのしきい値  $E_L$  を 0.7、0.8、0.9 の 3 通りで考察する。すなわち、

$$F_{PR} = \begin{cases} \frac{E_{PR} - E_L}{1 - E_L} & (E_L < E_{PR}) \\ 0 & (0 < E_{PR} \leq E_L) \end{cases} \quad (2)$$

また、地表面からの深さ  $x$  (m) として液状化指数  $P_L$  値に対応する有効応力解析による液状化指数  $P_{EL}$  を定義する。

$$P_{EL} = \int_0^{20} F_{PR} (10 - 0.5x) dx \quad (3)$$

ただし、液状化判定で対象となる土層は飽和砂層、シルト層に限定した。

有効応力解析による液状化判定法は、より詳細な地盤条件と、より詳細な解析を行っているので、等価線形化手法や道路橋示方書による液状化判定より精度の高い結果が期待できる。また、有効応力解析についても加速度時刻歴波形の倍率を変えることにより最大加速度  $-P_{EL}$  値曲線を描くことで、地震動レベルによってどの程度の液状化が発生するかを判定することができる。これと等価線形化手法による液状化判定で作成した最大加速度  $-P_L$  値曲線と比較することにより適用性を評価できると考えられる。

その評価方法として、液状化指数  $P_L$  値は全層液状化とみなすと最大値が 100 であるのに対し、有効応力解析による液状化指数  $P_{EL}$  値は対象地盤の層厚によりその最大値が変化するため、どちらの液状化指数にもその最大値を 1.0 に正規化することにより比較するものとする。

基盤における入力地震動を図 3 に示す。これは関東地震を対象とした当該地点近傍でのシミュレーション地震動である。図 4 に  $N$  値分布を示した。当該地点は埋立地であり、極めて軟弱な地盤である。基盤での入力最大加速度が 405gal の場合の FDEL と SHAKE による結果を比較した各層ごとの液状化安全率  $F_L$  値を図 5 に示す。従来の等価線形化手法である SHAKE より FDEL の方が小さい値となっている。これは、従来の研究より<sup>4)</sup>軟弱な地盤において地震動レベルが大きい場合 SHAKE では増幅率を過小評価しているためである。つまり、FDEL による結果の方が安全側の値を与えている。

次に、FDEL と SHAKE による応答解析より求めた最大加速度  $-P_L$  値曲線を図 6 に示す。また、有効応力解析による最大加速度  $-P_{EL}$  値曲線を図 7 に示す。

ここで、図 6 と図 7 を単純に比較するために正規化した最大加速度  $-P_L$  値曲線を図 8 に示す。これによると、有効応力解析による結果は、最大加速度が 20gal から 50gal 付近で大きく液状化指数(正規化)が上昇し、地盤の液状化危険度が極めて高くなることを示しており、比較的低いレベルの入力地震動でも液状化が発生することを示していると考えられる。同様に、FDEL、SHAKE による結果は、最大加速度が 50gal から 100gal 付近で液状化指数(正規化)が 0.15 を上まわっており、地盤の液状化発生を示していると考えられる。このことから、極めて軟弱な地盤の場合、等価線形化手法による液状化判定は有効応力解析による液状化判定に比べて危険側の評価を与える可能性があると言える。ただし、FDEL、SHAKE を比較すると、少なくとも FDEL による結果は SHAKE による結果よりも小さい地震動レベルで液状化発生を示しており、SHAKE による液状化判定よりも安全側の評価を与えている。

また、入力最大加速度が大きくなるにつれて等価線形化手法による液状化判定結果は単調増加の傾向を示すが、有効応力解析による液状化判定結果は液状化指数(正規化)が 0.45 で頭打ちとなっている。これは、等価線形化手法による液状化判定は地震動レベルの増加によってすべての層が液状化傾向を示すようになるが、有効応力解析による液状化判定はどんなに地震動レベルが大きくなっても液状化しない層があるためである。これは、等価線形化手法による液状化判定は地震動レベルが大きくなるにつれて液状化判定を過大評価してしまう可能性を示している。

次に、しきい値について考察する。式 (2) におけるしきい値を 0.7、0.8、0.9 と変化させた結果を図 9 に示す。これによると、最大加速度が 150gal を下回る地震動では有効応力解析の結果ではどのしきい値においても FDEL を大きく上回っている。

入力地震動(最大加速度405gal)

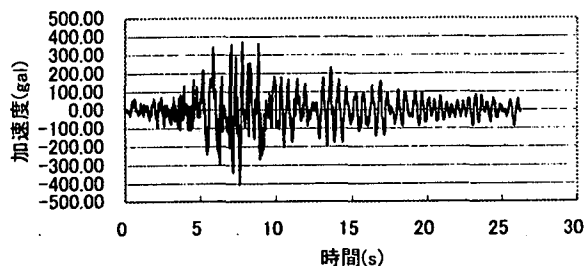


図 3 基盤面における入力地震動

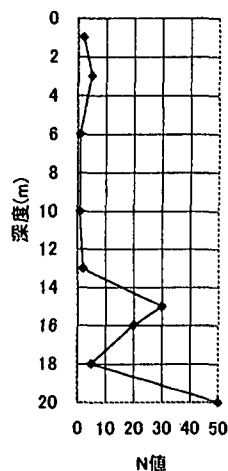


図 4 解析に用いたN値

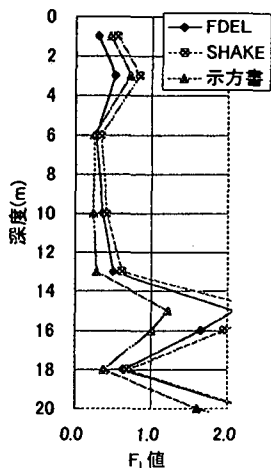


図 5 FDELとSHAKEにより求めた $F_L$ 値  
(基盤入力地震動の $A_{max}=405gal$ の場合)

最大加速度- $P_L$ 値、 $P_{EL}$ 値曲線(正規化)しきい値0.7

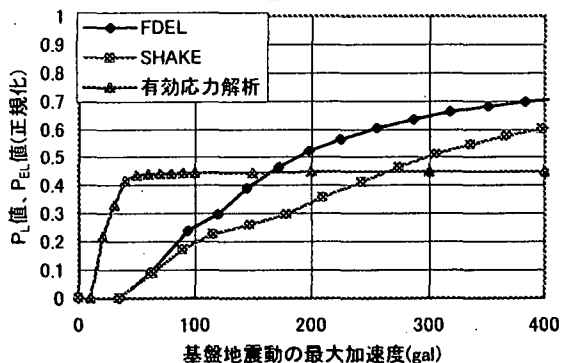


図 8 入力地震動のレベルによる $P_L$ 値、 $P_{EL}$ 値の変化(正規化)

しきい値の比較

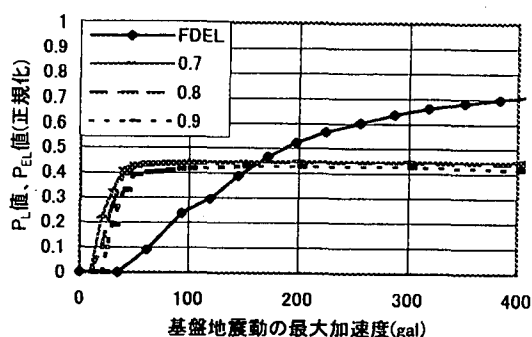


図 9 しきい値による入力地震動のレベルによる $P_L$ 値、 $P_{EL}$ 値(正規化)

当該地点のように、N 値が5を下回るような層が大部分を占めるような軟弱な地盤では、しきい値を変化させても最大加速度が小さい場合において、FDELでも危険側の判定をしてしまうことがわかる。

## (2)東京電力(株)千葉火力発電所建設地点

千葉火力発電所建設地点において、基盤における入力地震動は新大田変電所建設地点と同じものを使用した。図 10 に当該地点の N 値を示した。新大田変電所と比較すると、N 値が5以下の層がほとんどなく、相対的によい地盤であることがわかる。

また、基盤での入力最大加速度が 405gal の時、FDEL と SHAKE による結果を比較した各層ごとの液化化安全率  $F_L$  値を図 11 に示す。各層ごとの液化化安全率  $F_L$  値をみると、SHAKE では、軟弱な地盤において増幅率を過小評価していることがよく現れている。

次に、FDEL と SHAKE による応答解析より求めた最大加速度- $P_L$  値曲線を図 12 に示す。また、これと有効応力解析による最大加速度- $P_{EL}$  値曲線を比較するため、どちらも正規化した最大加速度- $P_L$  値曲線を図 13 に示す。

最大加速度- $P_L$ 値曲線

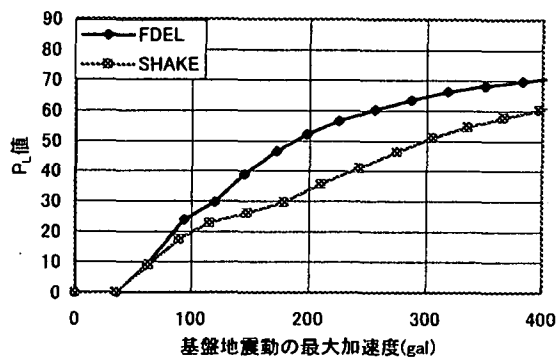


図 6 入力地震動のレベルによる $P_L$ 値の変化

最大加速度- $P_{EL}$ 値曲線(しきい値0.7)

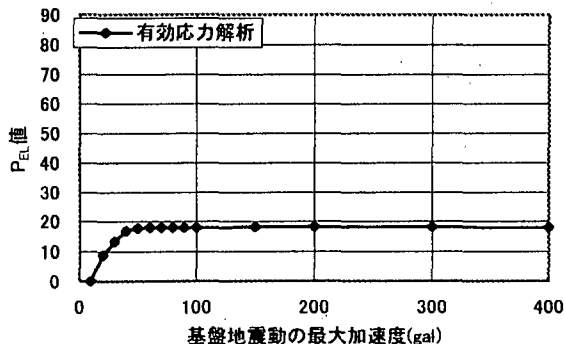


図 7 入力地震動のレベルによる $P_{EL}$ 値の変化

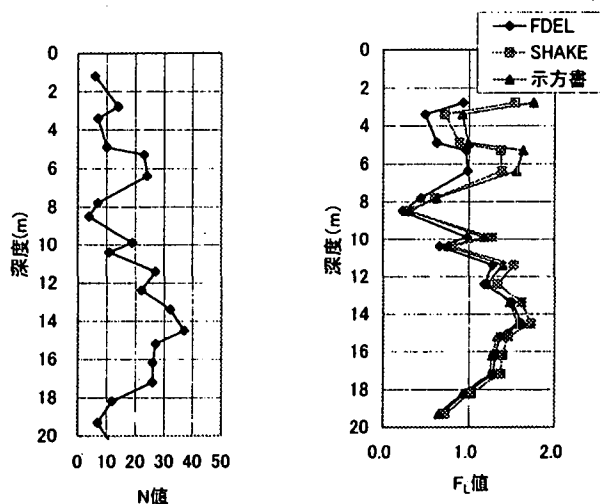


図 10 解析に用いたN値 図 11 FDELとSHAKEにより求めた $F_L$ 値  
(基盤入力地震動の $A_{max}=405\text{gal}$ の場合)

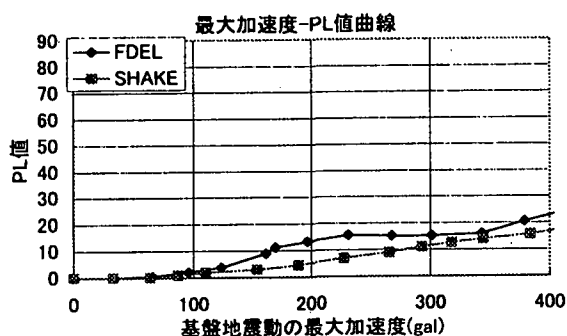


図 12 入力地震動のレベルによる $P_L$ 値の変化

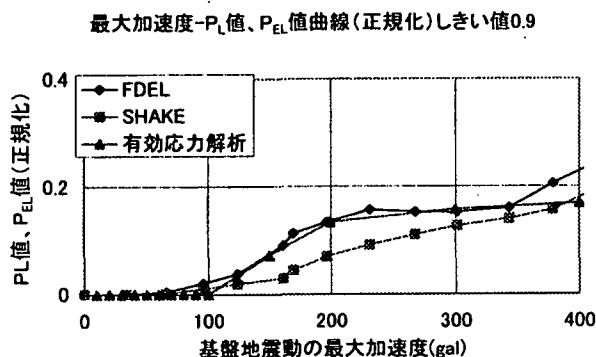


図 13 入力地震動のレベルによる $P_L$ 値、 $P_{EL}$ 値の変化(正規化)

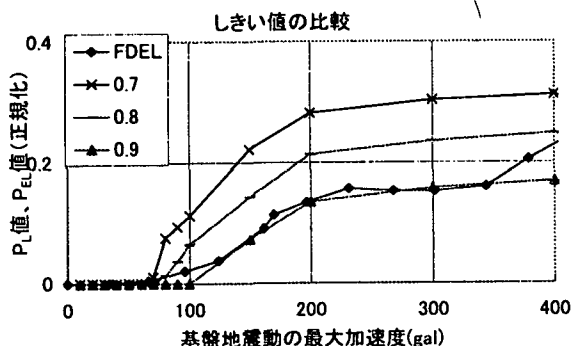


図 14 しきい値による入力地震動のレベルによる $P_L$ 値、 $P_{EL}$ 値(正規化)

これによると、FDEL と有効応力解析を比較すると、50gal から 100gal において若干曲線の立ち上がりの差があるとはいえ、ほぼ一致していると言えるだろう。また、SHAKE は液状化判定を過小評価してしまい、危険側の結果を与えている。この原因も、軟弱な地盤において増幅率を過小評価していることがわかる。

次に、しきい値について考察する。しきい値を 0.7、0.8、0.9 と変化させた。結果を図 14 に示す。しきい値を変化させると、曲線の傾向はあまり変化せずその大きさだけが相対的に変化している様子がわかる。これは、地盤がそれほど軟弱でなく、過剰間隙水圧比曲線が最大加速度が増加するにつれて徐々に増加していることによる。

また、当該地盤の例では、しきい値が 0.9 のとき FDEL の結果とほぼ一致した。

## 5.あとかき

本研究では、周波数依存型等価線形化手法(FDEL)による液状化判定システムを開発した。システムの適用性を示すため、有効応力解析結果についての新たな指標を提案することにより検討した。通常、地盤においては入力レベルによる液状化の程度をよく表現できることが示された。しかし、N 値が 5 を下回るような層が大部分を占める極めて軟弱な地盤においては、あまり一致しなかった。

また、従来の等価線形化手法(SHAKE)より FDEL による液状化判定法のほうが安全側の評価を与えていることが示された。

ここでは地盤を 2 例選んで検討したが、様々な地盤条件における解析を行い、液状化判定の適用性についてさらに検討する必要がある。

謝辞: 有効応力解析においては岐阜大学大学院生稲本昌也氏(現(株)CRC)にご協力を頂いた。また、本研究で用いた地盤モデルについては、(財)地震予知総合研究振興会の研究会で検討中の資料を使わせていただいた。記して深謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、平成 8 年 12 月
- 2) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫: 周波数領域を考慮した等価ひずみによる地盤の地震動応答解析法に関する一考察、土木学会論文集、No.493/III-27, pp.49-58, 1994.6
- 3) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972
- 4) 八嶋厚・岡二三生・稲本昌也・上村徳良: 有効応力に基づく簡易液状化判定法の開発、第 10 回地盤工学シンポジウム論文集(地盤の液状化)、pp.69-76, 1998.7