

堤防の沈下に対する簡易解析の適用性

安田 進¹・桜井 裕一²・出野 智之³

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²学生会員 東京電機大学 理工学研究科 建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³学生会員 東京電機大学 理工学研究科 建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

1995年の阪神・淡路大震災以降、レベル2地振動に対する液状化対策の必要性が呼ばれている。この場合、地震動が大きいと、液状化の発生はある程度許すものの、構造物が多大な変形をしないように設計することが必要となる。そこで、今まで残留変形解析方法(ALID)を用いて、河川堤防を対象とし、物性値がまだ不明である堤体や非液状化層の剛性低下の割合、液状化後の応力～ひずみ関係の非線形解析の影響、過剰間隙水圧の消散にともなう沈下量の推定方法に関して検討を行った。

Keywords : *liquefaction, analysis, river dike, earthquake*

1. はじめに

筆者達は、地盤の液状化により生じる堤防の沈下に対し、液状化に伴うせん断剛性低下を考慮した残留変形解析(Analysis for Liquefaction-induced Deformation,略してALID)を用いて、1993年北海道南西沖地震および1995年兵庫県南部地震で被災した河川堤防を解析し、実被害との対応性を検討してきた。¹⁾しかし、適応方法に関していくつか検討する必要がある。そこで、本研究では、堤体の剛性低下の割合が液状化した地盤の非線形性や液状化に伴う過剰間隙水圧に関係すると考え、これらを考慮できる解析プログラムALID/Winを用いて検討した。

2. 解析方法

(1) 解析の概要

液状化に伴う地盤および構造物の流動や変形は、地震動が継続している時間だけでなく、その後大きく生じると考えられる。その場合、液状化した土の変形特性が流動

量や変形量に関係し、それを考慮した解析を行えば流動や変形量が適切に推定できるものと考えられた。そこで、液状化後の変形特性について、繰返しねじりせん断試験装置を用いて液状化させた後、さらに単調載荷を行いその時の応力～ひずみ関係を調べた。そして、いろいろな土、密度の条件のもとで行った結果、液状化した土の応力～ひずみ関係は繰返し載荷を受けていない土と大きく異なり、下に凸の形状をしていることがわかった。また、液状化した直後は小さな応力でも大きなひずみが発生するが、ひずみの増加とともに応力が急増して強度が回復し、それに伴い間隙水圧も減少していくこともわかった。

図-1は計算を行う際の基本的な考えを、上述したよう

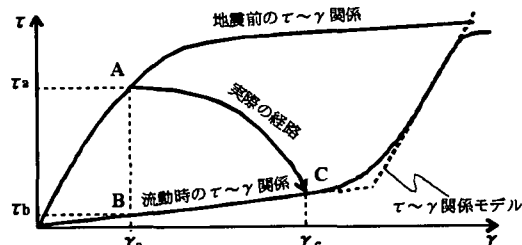


図-1 解析法の模範図

な液状化した土の応力～ひずみ関係を例として示したもので、地震前の流動を考慮する際の応力～ひずみ関係を示している。

今、地盤内のある点の応力とひずみが地震前に A 点にあったとする。液状化が発生すると有効応力が変化し、地盤の形状が変形すると A 点は C 点に移動する。本解析ではこの過程を忠実に追いかけて、流動時の応力～ひずみ関係を用いて、図-1 に示してあるように、A→B→C の経路に沿って求めるようにしている。このような手法を応力解放法と呼ぶ。

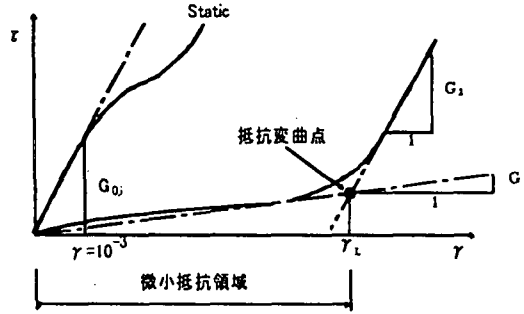


図-2 液状化後の応力～ひずみ関係の近似方法

解析に必要な地盤物性値としては、地震前の地盤内の応力・変形状態の解析段階では、地層構成、地下水位、常時の土の変形係数、密度を入力する。変形係数は繰返し三軸試験などの室内試験を行うと良いが、行われない場合には N 値から推定する。そして、液状化に伴う変形の解析段階においては、液状化発生時の非排水変形過程における応力～ひずみ関係を入力する。実験が行われていれば良いが、実験が行われていない場合でも、下に凸な応力～ひずみ関係を図-2 のようにバイリニアで近似する。

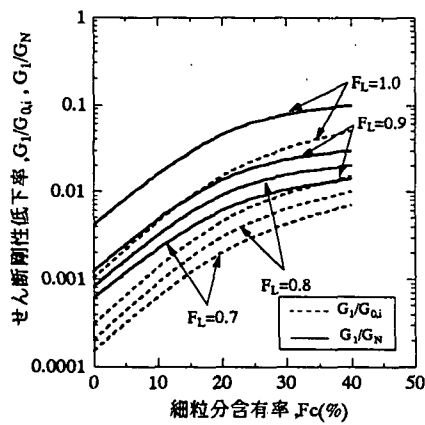


図-3 セン断剛性低下率と F_c , F_L の関係

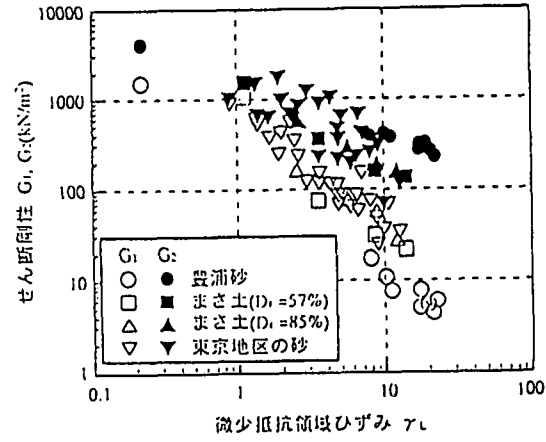


図-4 微小抵抗領域 γ_L とせん断構成 G_1, G_2 の関係

また、抵抗変曲点までの割線勾配 G_1 は図-3 に示す細粒分含有率と液状化安全率から推定し、微小抵抗領域 γ_L と抵抗変曲点後の割線勾配 G_2 は G_1 と相関関係の式から推定する。この γ_L とせん断剛性の関係を図-4 に示す。そして、液状化後の体積圧縮沈下解析段階では、石原らの試験結果にもとづき²⁾ 体積圧縮率を密度と液状化に対する安全率との関係から推定している。

$$\gamma_L = \left(\frac{1300}{G_1} \right)^{0.2287}, \quad G_2 = \frac{2000}{\gamma_L} \quad (5)$$

G_1, G_2 : セン断剛性 (KN/m^2)

γ_L : 微小抵抗領域 (%)

(2) 解析手順

以下に今回行った解析方法を示す。

- ①解析対象とする地盤の地層区分、推定液状化層の区分等に従い、2次元の有限要素メッシュを準備して自然地盤の応力解析を行う。(工程1)
- ②要素を加え、その自重を作用させた解析を行う。(工程2)
- ③液状化要素と剛性低下要素の剛性を低下させ、超過応力を解放させる解析を行う。(工程3)
- ④液状化で発生した過剰間隙水圧の消散に伴う変形量の解析を行う。(工程4)

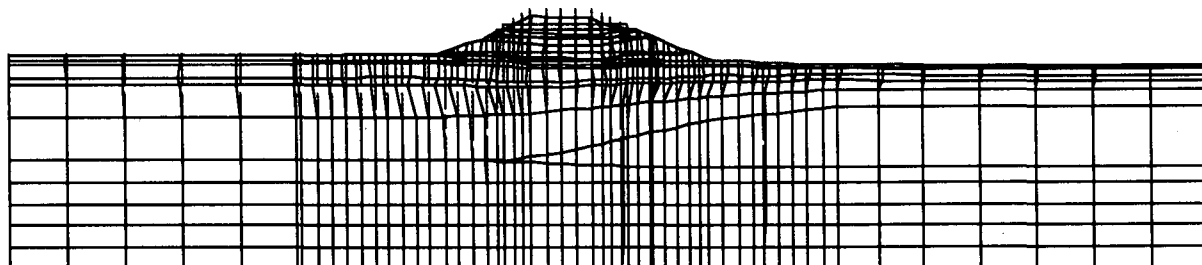


図-5 NO.5の解析変形図

表-1 各モデルにおける堤体の実測沈下量と解析沈下量

堤体(1/50), 上部非液状化層(1/10), 分割数10の場合				
地点		地点NO.	実測沈下量(cm)	天端沈下量の解析結果(cm)
河川	距離			
後志利別川真栄橋	左岸4K440	1	280	107.8
	左岸5K000	2	0	19.1
	左岸1K700	3	130	95.2
後志利別川兜野橋	右岸2K000	4	0	6.9
	左岸2K490	5	60	64.18
淀川	左岸1.4K	6	270	102.9
	左岸3.55K	7	30	45.1

(3) 解析対象断面および入力定数の設定

解析は, 表-1に示すような北海道南西沖地震(1993年)および兵庫県南部地震(1995年)で被災した河川堤防を対象として行った。

また, 解析をするにあたって変形係数 E は, $E=28N$ (kgf/cm^2) の式から求めた。また N 値および細粒分含有率 F_c はのり尻付近のボーリングデータから求めた。

3. 解析結果

(1) 非線形解析の影響

前述したように, ALID/Winは液状化の応力-ひずみ関係に非線形性を考慮できる解析プログラムである。そこで, 非線形解析がどれだけ沈下量に影響するかを実際の河川堤防被害事例に対し解析を行い, 非線形性を考慮しない解析と比較した。ここでは, 堤体のせん断剛性低下割合は1/20とした。その代表的な結果を図-6に示す。またこのうちNO.5について変形図を図-5に示す。この図をみると, NO.2やNO.4のような被害の少ない堤防に対する解析では, 両解析ともほぼ同じ値を示しているが, NO.1のような被害の大きい堤防では, 非線形性の影響が非常に大きく出る結果となった。既往の実験結果によると D_r が40%以下と大変緩くなると γ_L も40%程度よりもさらに大きくなる結果となっている。図-4ではこのように極端に緩い地盤

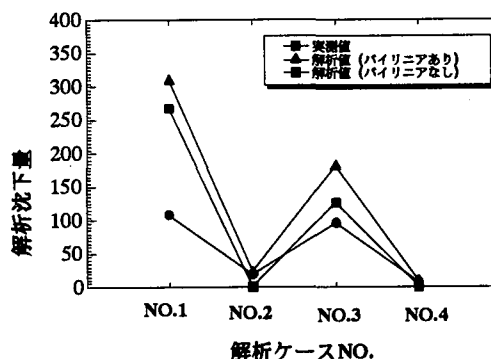


図-6 解析種別の比較

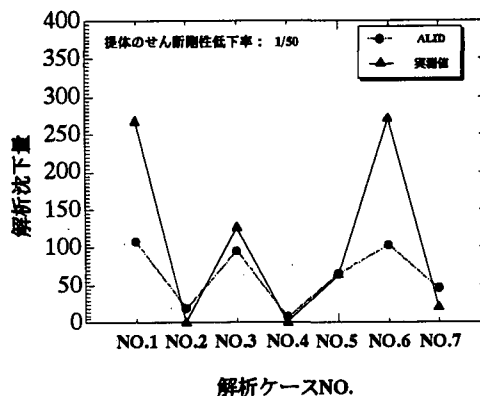


図-7 実測値と解析値との比較

での γ_L は考慮されていないので NO.1 のように沈下量が大変大きい箇所では γ_L が大きかった可能性も考えられる。

(2) 堤体における剛性低下の割合

上部非液化化層のせん断剛性低下率を 1/10 と固定し、以前行われた解析で得られた堤体のせん断剛性低下率 1/50、で解析を行った。液化化後の応力～ひずみ関係をバイリニアとした。その解析結果を表-1 に解析結果と実測値をプロットした図を図-7 に示す。これをみると、NO.5 や NO.7

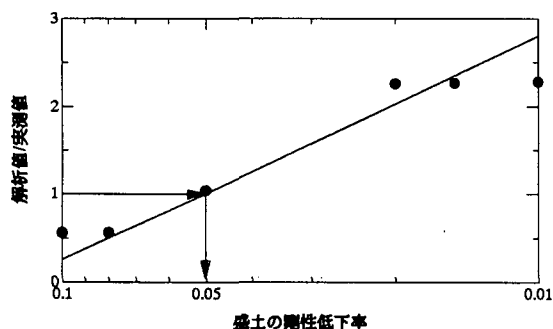


図-8 盛土の剛性低下率と沈下量の関係

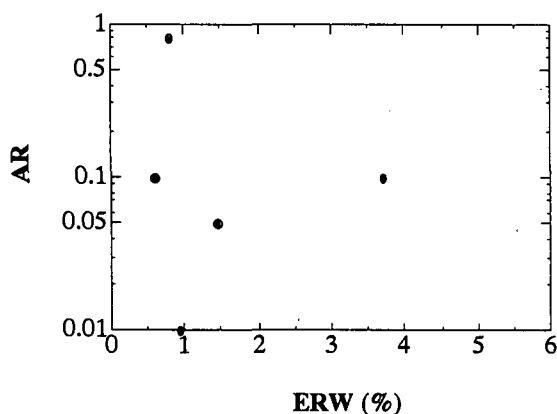


図-9 ERW と AR との関係

のような被害の小さい堤防の解析では、実測値とほぼ一致しているが NO.1 や NO.6 のように天端の沈下量が 2 メートルを超えるような被害が大きい堤防の解析では、実測値よりも小さい値がでてくる。これは、堤防の沈下量が大きくなるにつれ、盛土内で生じるひずみも大きくなり、せん断剛性の低下割合が大きくなるのではないかと考えられた。そこで堤体のせん断剛性低下率は、堤体底部でのひずみや堤体の形によって変化するのではないかと考え、実測値と近い値を示している NO.5 と NO.7 に着目して、剛性低下率と解析値／実測値の関係を求めた。それを図-8 に示す。また解析値／実測値=1 の時の堤体底部での伸びひずみ (ERW) とせん断剛性低下率 (AR) の関係をプロット

した図を図-9 に示す。ここで、堤体底部での伸びひずみとは、堤体底幅の伸び率を示している。図-9 には、別途解析を行っている遠心載荷実験に対する解析も同様にプロットした。この結果をみると AR が 1/50～1/10 の間に点が密集しているので、堤体のせん断剛性低下率はほぼ 1/50～1/10 が適当の間ではないかと考えられる。ただし、2つの関係は右下がりになるのではないかと考えられ、もっと多くの解析を行う必要がある。なお、NO.1, NO.6 の堤体のせん断剛性低下率を 1/100 に落として見たが沈下量はあまり大きく変化しなかった。これは前述したように、 γ_L の値の問題が含まれる可能性がある。

(3) 過剰間隙水圧の消散

NO.1, NO.2 について過剰間隙水圧に伴う沈下量を考慮した場合としない場合の沈下量を比較してみると以下のようになる

考慮した場合：3.23m (NO1), 0.23m (NO2)

考慮しない場合：3.04m (NO1), 0.32m (NO2)

このように 20cm ぐらいの差が生じた。

4. まとめ

液化化に伴う河川堤防の沈下量を解析する方法としてバイリニア型の応力～ひずみ関係を考慮した ALID/WIN の適用を考え、その適応性について検討した。その結果、以下のようになった。

- 1) バイリニアを考慮した河川堤防被害の解析での堤体沈下に与える影響は、被害が大きい堤防に対する沈下量には影響した。
- 2) 被害が小さい天端沈下量に対する解析は堤体のせん断剛性低下率が 1/50～1/10 の時にほぼ一致した。今後は図-3 や式 (5) に密度の影響を入れ解析し、さらに検討を進めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 安田 進, 吉田 望, 安達 健司, 規矩 大義: 液化化に伴う流動の簡易予測方法, 土と基礎, Vol.47, No.6, pp29-32, 1999,
- 2) 石原 研而, 吉嶺 充俊: Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No1, pp173-188, 1992.