

# 有限差分法による河川堤防の液状化解析

有限差分法 液状化解析 河川堤防

東京都建設局河川部  
東京都土木技術センター  
伊藤忠テクノソリューションズ

○正会員 森 洋  
正会員 小川 好  
非会員 曹 国強

## 1. はじめに

平成 19 年 3 月に一般堤防（土堤）を含めた大規模地震動（レベル 2 地震動）に対する「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説<sup>1)</sup>」が国土交通省河川局より出されており、耐震性能照査の検討と評価手法の確立が急務となっている。このことは、レベル 2 地震動といった強震動に対する河川堤防の耐震性評価の基本原理が、壊れても浸水等による二次被害を出さないことにあり、必要に応じて対策を行う設計手法が要求されていることになる。そのため、レベル 2 といった強震動下で所定の安全率を確保するのではなく、ある程度の変形量を認めながら壊滅的な被害を避け、あわせて迅速な復旧体制を整えるという社会的機能をも見据えた耐震性能への転換が重要となっている。

本報告では、過去の河川堤防における地震時での甚大な変形量被害を引き起こした主な要因は液状化による所が多いことから、液状化による地盤変状を評価できる液状化解析プログラムを開発し、実際に液状化によって被災した 1995 年兵庫県南部地震の際での淀川堤防西島地区と比較的液状化による被害が小さかった淀川堤防高見地区を対象とした本解析プログラムによる適用性（解析精度）の評価を試みた。

## 2. 有限差分法コード：FLAC

本報告で提案する液状化解析プログラムは、Itasca 社の Cundall らが開発した有限差分法解析プログラム（コードネーム：FLAC）<sup>2)</sup>に、過剰間隙水圧の発生等を表現できる土の構成規則を組み込んだものである。今回用いた有限差分法では、支配方程式に陽解法で定式化した運動方程式を採用している。また、要素が変形することによる座標更新に対して、時間増分毎に座標系を逐次修正させながら計算する Updated-Lagrangian 法を用いることで、地盤の破壊状態に至る過程までも再現することが可能となる。

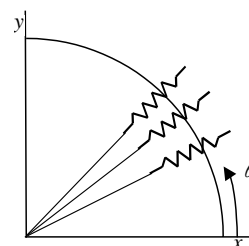


Fig.1 Iwan model in element

## 3. 土の構成規則

せん断過程に伴う過剰間隙水圧の発生を予測するモデルは、主応力軸の回転が重要なファクターとなる。そのため、今回は Fig.1 に示すような二次元平面ひずみ条件下での土のせん断応力-ひずみ関係に、Iwan<sup>3)</sup>による力学的モデルで表現した非線形バネを、x 方向から θ=90° まで等間隔に配置して Mohr の応力円表示に従うことで、せん断ひずみの変化に伴って回転するせん断面ならびにせん断応力を求める。

Iwan による土の非線形モデルは、バネとクーロン・スライダークラスタから成る複数の Jenkin エレメントを並列ないしは直列に連結することで構成されており、エレメントの数によってバイリニア型やトリリニア型の様々な復元力特性が表現でき、常に Masing の規則を満足した履歴曲線を描くことができる。

過剰間隙水圧 (U) の発生量 (P<sub>n</sub>) と低下量 (P<sub>p</sub>) に関しては、Iwan モデルから計算されるせん断過程で消費される散逸エネルギー (E'<sub>L</sub>) と蓄積される弾性エネルギー (E<sub>p</sub>) に基づいて次式より求める<sup>4)</sup>。

$$U = P_n + P_p = K(\varepsilon_n + \varepsilon_p) \dots \dots \dots (1) \quad \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_n^2}{m_v} = E'_L \cdot \alpha \dots \dots \dots (2) \quad \sigma'_{mi} \cdot \varepsilon_p = -E_p \cdot \beta \dots \dots \dots (3)$$

ここに、K は体積弾性係数、ε<sub>n</sub> は体積収縮ひずみ、ε<sub>p</sub> は体積膨張ひずみ、m<sub>v</sub> は体積収縮係数である。P<sub>n</sub> は E'<sub>L</sub> の平方根に比例し、P<sub>p</sub> は E<sub>p</sub> にほぼ比例関係にあることを用いている。また、α と β は液状化発生と低下のパラメータであり、液状化抵抗が与えられた場合、所定のせん断応力と繰返し回数を満足するよう試行錯誤により求めることができる。

## 4. 淀川堤防の解析結果

Fig.2(a)には表層付近で液状化対象層 (Sand①・Sand②) が約 10m 堆積している淀川堤防西島地区の有限要素モデル (節点数：694、要素数：632) を、Fig.2(b)には表層付近で約 2m の粘性土層 (Clay①) を挟んだ液状化対象層 (Sand①・Sand②) が堆積して、堤外地側に高水敷を伴う淀川堤防高見地区の有限要素モデル (節点数：748、要素数：687) を示す。Table1 には盛土部等による拘束圧の影響等を考慮するため、各ゾーン (A・B・C) 毎に分けて決定した地盤物性条件を示す。ただし、紙面の制約上、ここでは淀川堤防西島地区モデルでの物性条件のみを示すこととする。

Fig.3 に示した入力波形は、西島地区の被害地点から比較的近傍の G.L.-30m 付近の基礎杭先端部分で測定された加速度波形 (継続時間：25 秒、最大加速度：約 140cm/s<sup>2</sup>)<sup>5)</sup>である。各要素の土の強度は、初期せん断剛性率 (G<sub>0</sub>) とせん

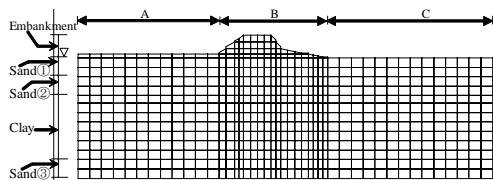


Fig.2(a) Yodogawa dike - Torishima model

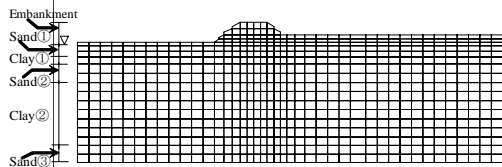


Fig.2(b) Yodogawa dike - Takami model

Table1 Physical properties of Torishima model

A-zone (Land side area)											
El. (m)	Material	N (value)	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma'_{v(0)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_s$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\tau_f$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K$ (MN/m <sup>2</sup> )	$R_{L(20)}$	$R_{L(5)}$	$\alpha$	$\beta$
+0.5	Embankment	3	18.0	9.0	12.60	12.6	64.77	-	-	-	-
-2.5	Sand①	3	19.0	40.5	17.77	26.3	182.69	0.200	0.317	0.034	0.15
-7.5	Sand②	11	19.5	86.8	40.60	70.2	417.40	0.218	0.346	0.033	0.10
-18.5	Clay	4	16.5	165.8	22.21	129.5	228.34	-	-	-	-
-29.5	Sand③	30	19.5	244.8	87.46	205.4	899.16	0.230	0.365	0.033	0.10

B-zone (Embankment area)											
El. (m)	Material	N (value)	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma'_{v(0)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_s$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\tau_f$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K$ (MN/m <sup>2</sup> )	$R_{L(20)}$	$R_{L(5)}$	$\alpha$	$\beta$
+3.1	Embankment	3	18.0	55.8	39.06	39.1	401.57	-	-	-	-
-2.5	Sand①	3	19.0	134.1	58.83	87.1	604.82	0.241	0.383	0.021	0.15
-7.5	Sand②	11	19.5	180.4	84.40	146.0	867.70	0.251	0.398	0.023	0.10
-18.5	Clay	4	16.5	259.4	34.75	202.6	357.26	-	-	-	-
-29.5	Sand③	30	19.5	338.4	120.91	283.9	1243.06	0.244	0.387	0.028	0.10

C-zone (River side area)											
El. (m)	Material	N (value)	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma'_{v(0)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_s$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\tau_f$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K$ (MN/m <sup>2</sup> )	$R_{L(20)}$	$R_{L(5)}$	$\alpha$	$\beta$
-2.5	Sand①	3	19.0	22.50	9.87	14.6	101.47	0.191	0.303	0.039	0.15
-7.5	Sand②	11	19.5	68.75	32.17	55.7	330.74	0.209	0.332	0.037	0.10
-18.5	Clay	4	16.5	147.75	19.80	115.4	203.56	-	-	-	-
-29.5	Sand③	30	19.5	226.75	81.03	190.3	833.06	0.227	0.360	0.034	0.10

断強度 ( $\tau_f$ ) を基に、Iwan モデルのエレメント数を 20 として修正 Hardin-Drnevich モデルを構成している。

Fig.4 と Fig.5 には、液状化の被害が大きかった淀川堤防西島地区モデルと液状化の被害が比較的小さかった淀川堤防高見地区モデルの解析結果を示す。Fig.4 に示す西島地区モデルでは、構成される四角形要素面積に対して、その要素を 4 つに分割した各定ひずみ三角形サブ要素の面積比が 20%以下になると演算を停止するとした、要素の形状制限により得られた 11 秒付近での解析結果を示している。Fig.5(a)に示した同時刻での高見地区モデルと比較しても、液状化の発生領域は広がっており、多くの報告書<sup>5)6)</sup>でも示されているような盛土天端部での変形量(約 3m)までには至っていないまでも、基礎地盤の液状化に伴う堤外地側への盛土のすべり破壊モードの挙動はうまく再現できていると考える。また、Fig.5(b)に示した高見地区モデルでも要素の形状制限により 19 秒付近で演算が停止してしまうため、最終沈下量(25 秒)での値は推測の域を出ないが、参考文献 6)による高見地区での天端沈下量(約 0.3m)とは比較し得る値となっていることから、一定程度の精度は確保できたと思われる。今後は、メッシュ依存性や増分法による定式化の問題等の多くの改善点はあるが、本解析プログラムでも十分、河川盛土堤防の液状化挙動を再現できることを示した。

### 5. まとめ

有限差分法解析プログラム FLAC のフレームワークを利用して、Iwan による非線形モデルによって得られる過剰間隙水圧の発生モデルを組み込んだ。このことにより、解析精度の確保と開発経費を削減しつつ新たな解析手法の構築が可能となった。液状化によって被災した淀川堤防での天端沈下量(約 3m)を再現できる精度までには至っていないが、本解析モデルによる液状化での評価の可能性を示すことはできた。

<参考文献> 1) 国土交通省河川局(2007)：河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説。2) Cundall, P.A. and Strack,

O.D.L. (1979) : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, 47-65. 3) Iwan, W.D. (1966) : A Distributed-element Method for Hysteresis and its Steady-state Dynamic Response, Transactions of the ASME, Jour. App. Mech., Vol.33, No.4, 893-900. 4) 小川 好・森 洋 (2005) : 有限差分法による盛土堤防の側方流動解析, H17.都土木技術年報, 209-218. 5) 阿部 博・森 洋・福武 毅芳・藤川 智 (1997) : 兵庫県南部地震で被災した河川堤防の調査と液状化解析, 土木学会論文集, No.568/III-39, 89-99. 6) 国土技術研究センター (2002) : 河川堤防の地震時変形量の解析手法。

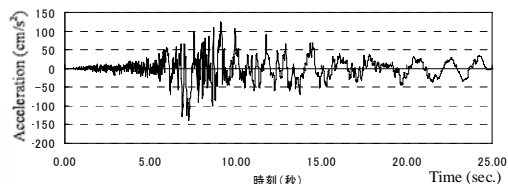


Fig.3 Input wave

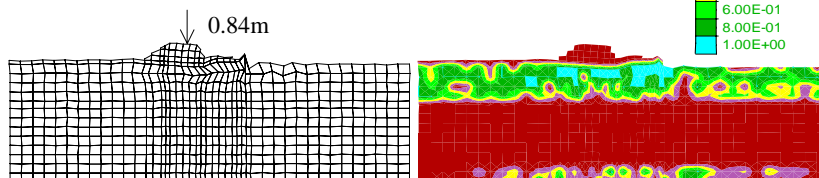


Fig.4 Displacement and Excess pore water pressure ratio at 11sec. (Torishima model)

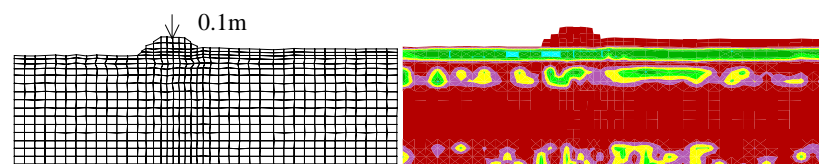


Fig.5(a) Displacement and Excess pore water pressure ratio at 11sec. (Takami model)

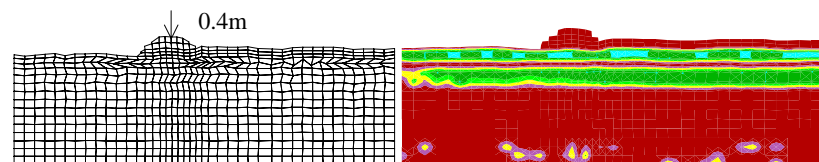


Fig.5(b) Displacement and Excess pore water pressure ratio at 19sec. (Takami model)