

# 液状化流動解析を用いた河川堤防の耐震性評価における FL 算定法の影響

Effect of Calculation Methods for Resistant Factor against Liquefaction  
on Seismic Evaluation of River Dikes Based on Liquefaction Induced-Flow Analysis

酒井久和<sup>1</sup>, 吉澤睦博<sup>2</sup>, 岡島充典<sup>3</sup>

Hisakazu SAKAI<sup>1</sup>, Mutsuhiro YOSHIKAWA<sup>2</sup> and Mitsunori Okajima<sup>3</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, Center of Excellence for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage, Ritsumeikan University

<sup>2</sup>竹中工務店, Advanced Research Department Research and Development Institute, Takenaka Co. Ltd.

<sup>3</sup>愛知県, Construction Department, Aichi Prefecture

**SUMMARY:** We investigate an effect of two calculation methods; the Design Specifications of Highway Bridges (DSHB) and the cumulative damage concept (CDC), for the resistant factor against liquefaction on the seismic evaluation of river dikes. The earthquake response analysis is carried out first, to obtain the maximum shear stress and shear stress time histories, then the liquefaction induced-flow analysis is performed by using the calculated resistant factor against liquefaction. Two scenario earthquakes are used; a subduction earthquake and a nearby fault earthquake. In the case of the subduction earthquake, the calculated deformation using the CDC method, is larger than the deformation obtained by the DSHG method.

## 1 はじめに

1995年兵庫県南部地震における淀川堤防の甚大なる被害を受けて、河川堤防の被害が浸水等の2次災害の原因となりうる河川堤防を中心として、耐震性に関する一斉点検が実施された。ただし、その評価方法<sup>[1]</sup>は、震度法に基づいた円弧すべり法の安全率と堤防の沈下量に関連付けたもので、堤防の変形量を直接求めることができない。そのため、河川堤防の耐震性評価は、平成18年度中に変形解析に基づく手法へと移行され、限られた土質試験結果でも堤防の沈下量が推定可能な手法として、静的地震時地盤変形解析が変形解析の選択肢の1つとして採用される予定である<sup>[2]</sup>。しかしながら、静的地震時地盤変形解析では、液状化に対する安全率  $F_L$  の算定に際して、地震動の特性や土の動的変形特性が解析結果に及ぼす影響について、検証が必ずしも十分ではない。

そこで、本研究では、累積損傷度理論に基づく方法および道路橋示方書の方法により、 $F_L$  を算定した場合に、沈下量推定結果に及ぼす影響を検討する。

## 2 変形量の評価方法

### 2.1 解析方法

変形解析手法として、有効応力解析は地震動特性や土の繰り返し軟化特性を反映できる手法であるが、十分な解析を行うためには、地盤の動的変形特性や液状化試験を行う必要があり、一般にそれらの地盤データは耐震性評価サイトに存在せず、追加の土質試験が求められる。そこで本研究では、比較的少ない土質試験結果で河川堤防の評価が可能な静的地震時地盤変形解析を採用する。ここで、地盤の  $F_L$  算定に関しては、2次元地震応答解析コード FLUSH<sup>3</sup> による各地盤要素のせん断力を用いて判定し、変形量は、2次元液状化流動解析プログラム ALID<sup>4</sup> を採用する。ただし、

液状化地盤および粘性土地盤の繰り返しせん断によるせん断剛性低下率として、安田・稲垣式<sup>[5]</sup>を適用する。各解析における境界条件を下記に示す。

#### ①FLUSHの境界条件

側方境界は、川表、川裏ともにエネルギー伝達境界、底面境界は粘性境界とする。

#### ②ALIDの境界条件

側方川表側は、境界を両岸堤防の間中点にとり、左右対称と仮定して水平固定、鉛直ローラー境界、側方川裏側は、擬似半無限境界（幅5m×10列の平面要素を付加し、端部を水平固定、鉛直ローラー）とする。また、底面境界は固定境界とする。

### 2.2 $F_L$ 算定法

河川堤防の耐震点検では、深度方向への地震時せん断応力比の低減係数と地域別震度を用いて、 $F_L$  を簡易に算定する方法が示されている。しかし、この手法では、サイトの地盤特性と地震動特性が全く反映できないため、本研究では、シナリオ地震に対する地震応答解析を実施し、解析結果としての各有限要素のせん断応力を用いて、以下の2つの方法で  $F_L$  を算定する。

#### ①道路橋示方書に基づく方法<sup>[6]</sup> (DSHB)

道路橋示方書に示される方法を拡張し、下式に従い  $F_L$  を算定する。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

$$R = C_w R_L \quad (2)$$

ここに、 $R$  は動的せん断強度比、 $C_w$  は1~2の間の値を持つ地震動特性による補正值、 $R_L$  は、繰り返し三軸強度比で、 $N$  値や細粒分含有率等より算定される。また、 $L$  は地震時せん断応力比で地震応答解析による各要素の最大せん断応力より求める。

②累積損傷度理論に基づく方法<sup>[7],[8]</sup> (CDC)

地震応答解析のせん断応力の時刻歴を用いて、下記の手順に従って  $F_L$  を算定する。ただし、液状化強度曲線は、龍岡らの式<sup>[9]</sup>を用いて  $R_L$  より算出した。

i)累積損傷度  $D$  の算定

$$D = \sum_i \frac{1}{2Nc_i} \quad (3)$$

ここに、 $Nc_i$  は液状化強度曲線において、地震応答解析のせん断応力比  $S_{Ri}$  に対応する繰り返し回数を表す。

ii)  $S_{Ri}$  に適切な値  $C$  を乗じて、式(3)の  $D$  が 1 になる  $C$  を探索する。  $D=1$  となる場合の  $C$  をもって、  $F_L$  とする。

3 解析例

3.1 対象構造物

検討対象構造物は、堤内に人口の多い 0 メートル地帯を有し、南海トラフの巨大海溝型地震による津波の河川遡上や満潮時の海水流入により、堤体の地震による被害が甚大な 2 次災害の誘因となると考えられる 2 級河川日光川(愛知県管理)の河川堤防とする。日光側の河川堤防は、既に愛知県により耐震点検マニュアル<sup>[11]</sup>の詳細判定手法(Empirical method)に基づいた耐震診断が行われている<sup>[10]</sup>。(耐震点検マニュアルにおける地震力は、レベル 1 クラスの地震に対するものである。)本研究では、この診断結果で耐震改修の必要性があると判断された断面を中心に、変形解析を実施する。ただし、検討断面は、現状断面でなく、将来計画断面とする。Fig. 2 に左岸 3K000 の構造断面の概略を示す。

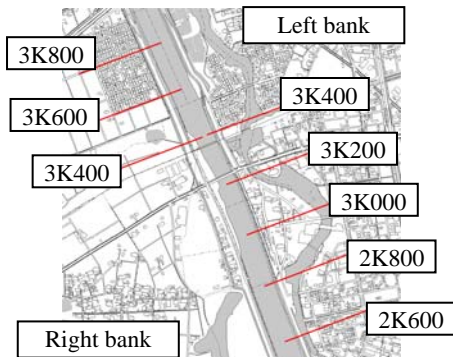


Fig. 1 Location of the analyzed river dikes

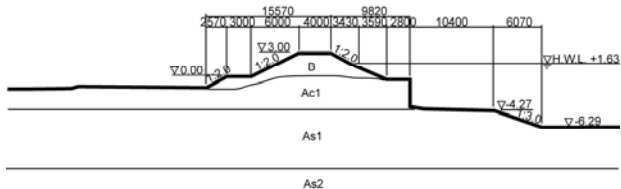


Fig. 2 Outline of the river dike structure at the 3K000 Left bank.

3.2 地盤条件

検討地点の地質縦断面を Fig. 3 に、河川横断方向の地質断面図の一例として、3k400 地点の地質断面図を Fig. 4 に示す。対象地区地盤は上部が層厚約 30m の沖積の軟弱な粘土(シルト)、砂の互層で、概ね成層状に堆積しており、上位より Ac1, As1, Ac2, As2 の 4 層に大別される。この

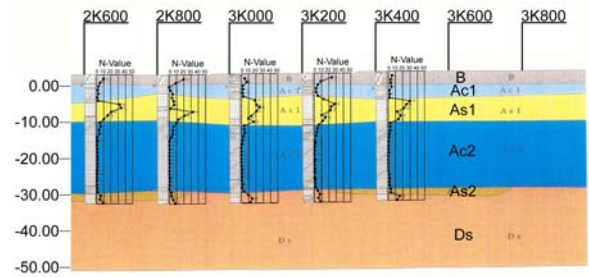


Fig. 3 Soil profile along the left bank (River Works Office of Aichi Prefecture 2003)

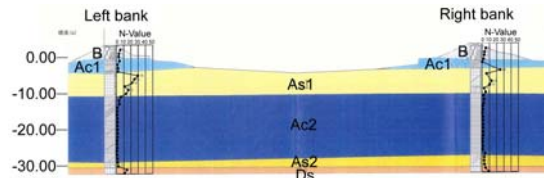
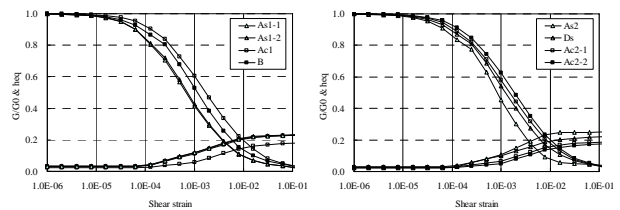


Fig. 4 Soil profile at the 3K400 (River Works Office of Aichi Prefecture 2003)

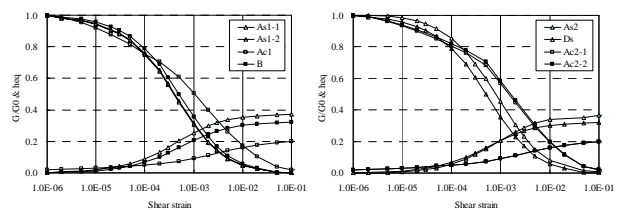
うち、As1 層、Ac2 層は N 値、細粒分含有率  $F_c$ 、塑性指数  $I_p$  の分布などから、それぞれ 2 層に再分類し、As1-1, As1-2 層、および Ac2-1, Ac2-2 層とモデル化した。深度約 30m からは洪積砂質土層(層厚 30m 以上)である。このうち、液状化検討の対象層は、 $F_c$ 、 $I_p$  の深度分布などから道路橋示方書<sup>[6]</sup>の判定基準に従い、Ac1, As1-1, As1-2, Ac2-1 の 4 層とした。また、洪積砂質土層上面を工学的基盤面とした。

3.3 土の動的変形特性

対象地点の地盤特性として、N 値、細粒分含有率、平均粒径等の土質試験結果は得られているものの、土の動的変形特性は得られていない。したがって、本研究では、安田・山口の動的変形特性<sup>[11]</sup>および陸上土木構造物でしばしば採用される土木研究所資料<sup>[12]</sup>に基づく動的変形特性<sup>[13]~[15]</sup>を地震応答解析で採用する。ここで、前者は、不攪乱資料による非排水条件下での実験結果、後者は排水条件下の実験結果であり、それぞれ Yasuda, PWRI として Fig. 5 に示す。



(a) Yasuda



(b) PWRI

Fig. 5 D- $\gamma$  and h- $\gamma$  relationships

Fig. 5 より、全体的に Yasuda のせん断弾性係数の方が同一ひずみにおける剛性低下の程度が PWRI より小さく、減衰定数は小さな値を示している。

3.4 入力地震動

巨大海溝型と内陸型の地震動として下記の 2 種類の地震動を採用する。

①巨大海溝型地震

新東海地震（三の丸の暫定波）EW 成分<sup>[16]</sup>

②内陸型地震

想定名古屋浅発直下地震（愛知県設計用入力地震動研究協議会）の富田出張所の EW 成分<sup>[17]</sup>

ただし、愛知県設計用入力地震動研究協議会の工学基盤波は Vs が 400m/s 以上を基盤としていることから、解析モデルの基盤 (Vs=300m/s 相当) での入射波を 1 次元重複反射理論に基づく等価線形化手法により算定した。浅層地盤モデルは中央防災会議提供の検討対象地点での地盤モデルを用いた。Fig. 6 に各地震波形を示す。

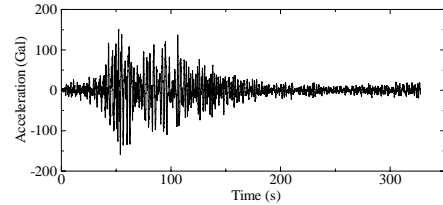
3.5 解析結果

安田らの動的変形特性、CDC、DSHB による海溝型シナリオ地震のケースにおける左岸 3K000 の FL の分布図を Fig. 7 に、変形図を Fig. 8 に示す。

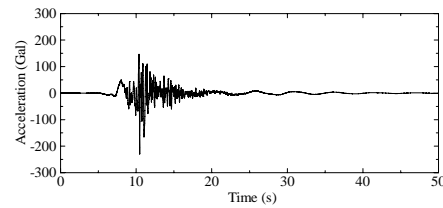
Fig. 7 より CDC の FL 値が堤防下部を含め、全体的に DSHB よりも小さくなっていることが分かる。また、Fig. 8 より堤外側の矢板が全面の支持力低下により川側に迫り出し、堤防がほぼ一様に沈下する変形モードとなっている。次に、各断面における愛知県による耐震点検結果

(Empirical method)、土の動的変形特性および FL 算定法の異なる液状化流動解析結果を Table 1, Table 2 に示す。ただし、液状化流動解析における表中の天端高さは堤外側、堤内側のり肩、天端中央の 3 点の平均値を表す。

Table 1 より、地震後の静的地震時地盤変形解析の天端高は、耐震点検で要求される天端高よりも全て高い。すなわち、沈下量がレベル 1 クラスの地震動を想定した耐震点検結果よりも、南海トラフの巨大海溝型地震に対する変形

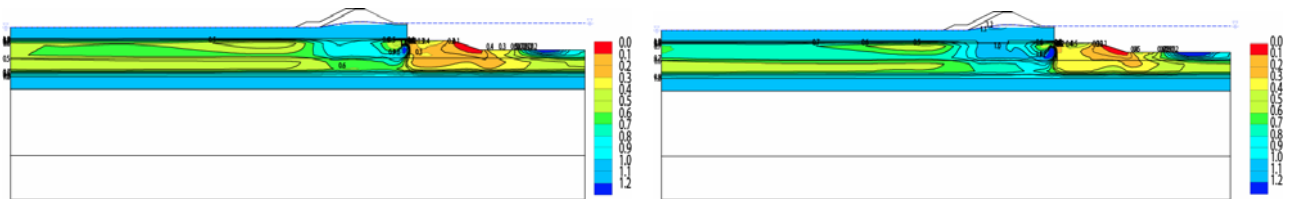


(a) Subduction earthquake (Shin-Tokai, Sannomaru-EW-wave)



(b) Nearby-fault earthquake (Nagoya shallow, Tomita-EW-wave)

Fig. 6 Calculated incident waves at the upper side of the Ds at the site.



(a) Cumulative damage concept (CDC)

(b) Design Specifications of Highway Bridges (DSHB)

Fig. 7 Distribution of the resistant factor against liquefaction FL. (Subduction earthquake, Yasuda, 3K000 Left bank)

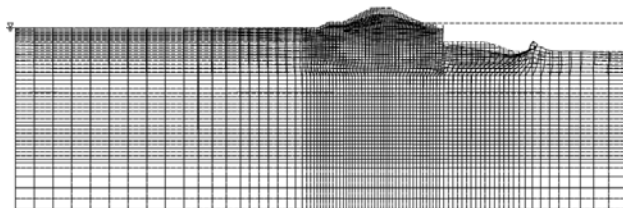


Fig. 8 Deformation based on the liquefaction-induced flow analysis (CDC, Subduction earthquake, Yasuda, 3K000 Left bank).

Table 1 Seismic evaluation results for the river dikes by the scenario of subduction earthquake. Hatching means an evaluated top level below the demanded level. (Unit: m)

	top level	demanded level	Empirical method	CDC	DSHB	CDC	DSHB
				PWRI		Yasuda	
Left side	2K600	3.0	0.7	1.44	2.56	2.41	2.46
	2K800			-0.93	2.34	1.90	2.07
	3K000			-1.16	1.50	1.56	1.97
	3K200			-1.10	2.16	2.18	2.44
	3K400			0.30	2.40	2.09	2.28
Right side	3K400	3.2	0.7	-1.57	2.83	2.24	2.44
	3K600			-1.65	2.87	2.69	2.75
	3K800			-0.03	2.98	2.97	3.01

Table 2 Seismic evaluation results for the river dikes by the scenario of nearby-fault earthquake. Hatching means an evaluated top level below the demanded level. (Unit: m)

		top level	demanded level	Empirical method	CDC	DSHB	CDC	DSHB
					PWRI		Yasuda	
Left side	2K600	3.0	0.7	1.44	3.00	2.99	2.98	2.96
	2K800			-0.93	2.75	2.73	2.72	2.67
	3K000			-1.16	2.98	2.96	2.94	2.92
	3K200			-1.10	3.00	3.00	2.98	2.99
	3K400			0.30	3.00	3.00	2.99	3.00
Right side	3K400	3.2		-1.57	3.19	3.13	3.13	3.06
	3K600			-1.65	3.20	3.18	3.18	3.14
	3K800			-0.03	3.20	3.19	3.19	3.18

解析結果が小さく評価されている。また、DSHB と CDC を比べると、全体的に DSHB より CDC の沈下量が多い。DSHB では、動的せん断強度比が地震動のタイプによる係数の関数となっているが、地震動の震動特性が十分に反映されている訳ではない。特に本解析で用いた海溝型のシナリオ地震動は継続時間が長いために、CDC との沈下量の差が大きくなっているものと考えられる。一方、動的変形特性の差は、左岸 3K000, 3K200 では DSHB, CDC とほぼ同等の沈下量を示しているが、全体的に Yasuda の方の沈下量が大きく、特に、右岸 3K400 では Yasuda が PWRI に比べて 3 倍ほど大きな沈下量となっている。この沈下量の差は、CDC, DSHB の差よりも大きく、耐震性の判定をより高精度に行うためには、現地盤に対する動的変形特性試験を実施するなど、適切な動的変形特性を採用することが重要であることがわかる。

つぎに、Table 2 より、直下型のシナリオ地震では、若干 DSHB の方の沈下量が多いが、その差はほとんどない。また、このケースでも海溝型のシナリオ地震の場合と同様に Yasuda の沈下量が PWRI よりも大きくなっている。

#### 4 まとめ

本研究では、地震応答解析 FLUSH と液状化流動解析 ALID を用いて河川堤防の耐震性評価を行った。ALID 計算時に用いる FL を、道路橋示方書に基づく簡易的な手法 (DSHB) と累積損傷度理論に基づく方法 (CDC) で算定し、FL の算定法が解析結果に及ぼす影響を検討した。その結果、海溝型のシナリオ地震においては、CDC の沈下量が DSHB よりも大きく、直下型のシナリオ地震では、ほぼ同等の沈下量が得られた。今後、さらに数種の地震動に対して検討を加え、本研究の結果が一般的特性を有するか確認したい。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、土木学会巨大地震災害への対応検討特別委員会・耐震診断および耐震対策部会 (西村昭彦主査) の筆者等を除く土構造物 WG の委員 (渦岡良介, 大林淳, 岡村未対, 澤田俊一, 長縄卓夫, 渡邊弘行各委員) には、河川堤防の耐震性評価を行う上で貴重なご助言、ご議論を頂いた。また、東京電機大学の安田進教授、東北学院大学の吉田望教授、地盤ソフト工場の安達健司氏、登悦男氏、には、ALID の解析を行うに当たり、貴重なご助言、ご示唆を頂いた。記して各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

[1] 建設省河川局治水課：河川堤防耐震点検マニュアル・解説, 1995.

- [2] 石原雅規, 杉田秀樹, 田村敬一：大規模地震に対する河川堤防の耐震設計技術, 土木技術資料, Vol.47, No.12, 2005.
- [3] Lysmer,J., Udaka,T., Tsai,C.F., and Seed,H.B. : FLUSH - A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No. EERC 75-30, 1975.
- [4] 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638 /III-49, pp.71-89, 1999.
- [5] 安田進, 稲垣太浩, 長尾和之, 山田真一, 石川敬祐: 液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性, 第 40 回地盤工学研究発表会, 2005.
- [6] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2002.
- [7] Tatsuoka,F. and Silver,M.L. : Undrained Stress-Strain Behavior of Sand under Irregular Loading, Soils & Foundations, 1981.
- [8] 大川征治, 前田良刀, 真鍋進, 龍岡文夫: 累積損傷度理論を用いた簡易液状化判定手法の提案, 第 19 回日本地震工学研究発表会, 1987.
- [9] Tatsuoka,F., Yasuda,S., Iwakasaki,T. and Tokida,K. : Normalized Dynamic Undrained Strength of Sands Subject to Cyclic and Random Loadings, Soils & Foundations, Vol.20, No.3, pp1-16, 1980.
- [10] 愛知県河川工事事務所: 二級河川日光川(3工区)中小河川改良工事の内設計地質調査業務委託報告書(設計・設計資料編), 2003.3.
- [11] 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.
- [12] 建設省土木研究所: 地盤の地震時応答特性の数値解析法 -SHAKE・DESRA-, 土研資料第 1778 号, 1982
- [13] 岩崎敏男, 常田賢一, 吉田清一: 沖積粘性土の動的変形特性・強度特性について, 第 15 回土質工学研究発表会, pp. 625-628, 1980.
- [14] 横田耕一郎, 龍岡文夫: 不攪乱洪積粘土のせん断変形係数について, 土木学会第 32 回年次学術講演概要集, 第 3 部, pp.257-258,1982.
- [15] 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II), 土木研究所報告 153 号の 2, 1980.
- [16] 国土交通省中部地方整備局, 愛知県, 名古屋市: 名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成 (概要版), 2004.6.
- [17] 愛知県設計用入力地震動研究協議会: 愛知県設計用入力地震動の作成 想定地震による強震動予測, 2002.2.