

1995 年兵庫県南部地震で被災した 河川堤防の解析検証事例

井合 進¹・竹島 康人²・沢田 俊一³・杉山 弥⁴・小堤 治⁴

¹正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

²応用地質株式会社 技術本部 技術センター 耐震グループ (〒330-8632 埼玉県さいたま市土呂町 2-61-5)

³正会員 応用地質株式会社 技術本部 技術センター 耐震グループ (〒330-8632 埼玉県さいたま市土呂町 2-61-5)

⁴正会員 (株)日本科学技術研究所 開発解析本部 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 5-10-9)

1995 年兵庫県南部地震で被災した淀川堤防のうち、被災の程度が異なる 2 断面を対象として地震時変形解析を実施した。解析には液化化による構造物被害予測プログラム FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) を使用した。FLIP は、土骨格を履歴減衰の大きさが調整できるように改良された多重せん断バネモデルで表し、応力経路法を用いた過剰間隙水圧モデルを組み込んだ有効応力に基づく変形解析プログラムである。本解析では、地下水位以浅の地盤の力学特性を適切に評価するため、土要素の初期せん断剛性および体積弾性係数の算定式にサクシヨンの影響を考慮した。この解析により検討 2 断面の変状の差を定量的に再現することができた。

Key Words : Earthquake, Liquefaction, Effective stress analysis, Levee, Settlement

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、淀川下流域の河川堤防(土堤)において最大 3m 程度の天端沈下を生じた。被災箇所 の地形区分は干拓地、埋立地、デルタであり、堤体直下には緩い砂質土層が厚く分布している。堤防の主な被災要因は基礎地盤の液化化と考えられている。また、同様な地形条件にあっても箇所ごとに被災程度が異なることは注目すべき点であり、被災メカニズムの違いを定量的に評価することは工学的に重要な課題である。

河川堤防のような液化化地盤上の土構造物の挙動を評価する方法にはいくつかの方法が提案されているが、中でも有効応力解析法は、実際の複雑な地盤条件を比較的忠実にモデル化でき、変形量を直接的に求めることができる等の利点を有している。

本報では、有効応力解析法に分類されるプログラム FLIP¹⁾を用いて、天端沈下量の異なる淀川堤防 2 断面の地震時変形解析を実施した。解析にあたっては、地下水位以浅の地盤の力学特性を適切に評価できるように、サクシヨンの影響を考慮した初期せん断剛性および体積弾性係数の算定式を採用した。解析時の着目点は、堤防の変形モードおよび地震後における天端の残留沈下量とし、被災要因の定性的な評価のみではなく、実被害の定量的な再現を試みた。

表-1 検討断面の特徴

検討断面	No.1	No.2
地震諸元	1995年兵庫県南部地震 マグニチュード $M_J=7.2$ 震央位置:北緯 $34^{\circ}36'$ 、東経 $135^{\circ}6'$	
強震観測記録からの推定地表水平加速度	265gal	260gal
被災状況	堤防陥没 法面崩壊 バラベツ傾斜	天端沈下 はらみ出し
天端沈下量	2.7m	0.3m
噴砂の有無	あり	あり
周辺地形	干拓地	デルタ
その他		高水敷40m程度

2. 堤防の被災概況

検討対象とした堤防断面の特徴を表-1 に示す。No.1 断面は淀川河口より 1.4km の左岸に位置し、天端に 2.7m の沈下を生じた箇所である。液化化した砂質土層に堤体が陥没し、それによって天端に沈下を生じている。また、堤体は堤外側に向かって沈下した傾向を示しており、表面のバラベツも堤外側にすべり出している。一方、No.2 断面は河口より 3.55km の左岸に位置し、被災程度は No.1 断面に比べて小さく、天端に 0.3m の沈下を生じた箇所である。堤内側の法面に沈下を生じており、同法面下部のはらみ出しおよび法尻部の隆起が確認されている。いずれの断面においても、周辺に液化化による噴砂の跡が確認されている。

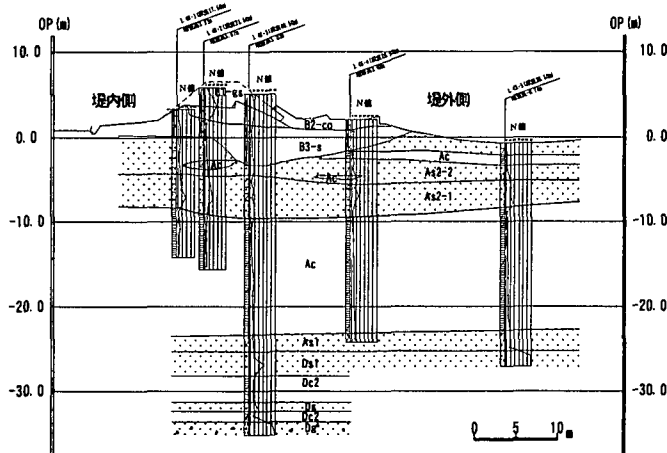


図-1 被災断面 (No.1)

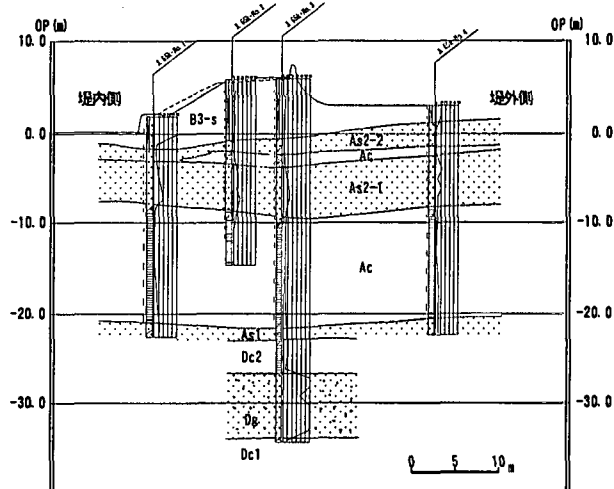


図-2 被災断面 (No.2)

検討断面の被災状況および土層構成を図-1 および図-2 に示す。各断面の地盤条件は類似しており、基礎地盤には、表層より層厚 10m 程度の砂質土層が分布し、その下位に層厚 15m 程度の粘性土層が分布している。被災程度に差を生じた要因として、被災の小さかった No.2 断面の堤外側には幅 40m 程度の高水敷が整備されていること、液状化した砂質土層に層厚 2m 程度の粘性土層を挟んでいることが挙げられる。

3. 解析手法の概要

FLIP に組込まれている砂の構成モデルは、図-3 に示すように、主応力軸回転の影響を考慮できる多重せん断機構に基づいている。また、非排水条件における有効応力経路を図-4 に示す液状化フロントを用いて表し、過剰間隙水圧の上昇を表現している。

本報解析では、地下水位が浅にある地盤の力学特性を適切に評価するため、以下に示す初期せん断剛性および体積弾性係数の算定式を選択できるようにした⁴⁾。FLIP において粘着力 C および内部摩擦角 ϕ_f を用いたせん断強度 τ_f は式(1)で表される。負圧を考慮する場合には、初期せん断剛性 G と体積弾性係数 K は式(2a)および式(2b)で表される。

$$\tau_f = C \cos \phi_f + \sigma_m' \sin \phi_f \quad (1)$$

$$G = G_{ma} \left(\frac{Y_m}{Y_{ma}} \right)^{m_G} \quad (2a)$$

$$K = K_{ma} \left(\frac{Y_m}{Y_{ma}} \right)^{m_K} \quad (2b)$$

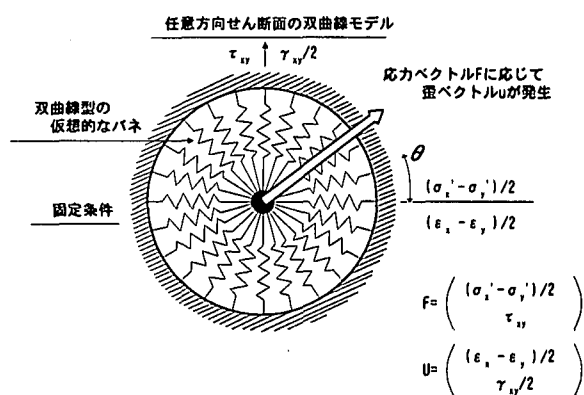


図-3 多重せん断機構の概念図²⁾

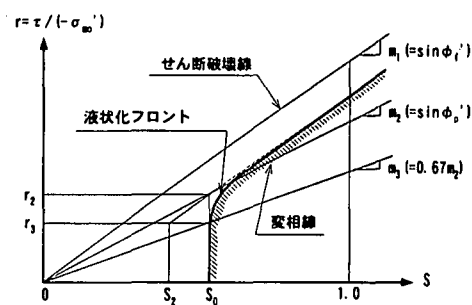


図-4 液状化フロントの概念図³⁾

ここに、 G_{ma} 、 K_{ma} 、 m_G 、 m_K はモデルパラメータであり、 Y_m および Y_{ma} は、式(3a)および式(3b)で表される。

$$Y_m = C \cot \phi_f + \sigma_m' \quad (3a)$$

$$Y_{ma} = C \cot \phi_f + \sigma_{ma}' \quad (3b)$$

この定式化によって、 $\sigma_m' < -C \cot \phi_f$ の範囲で負圧を考慮でき、盛土の不飽和部分のサクションを評価することができる。

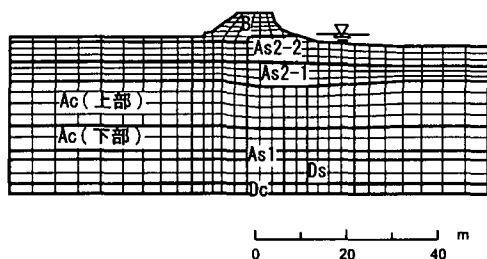


図-5 有限要素メッシュ (No.1)

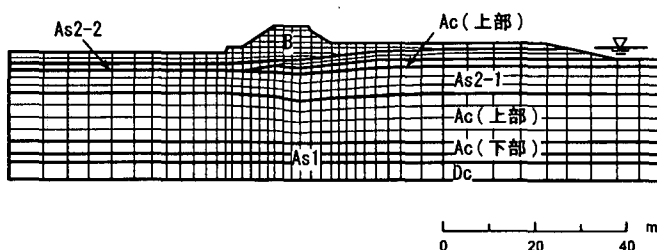


図-6 有限要素メッシュ (No.2)

表-2 モデルパラメータ

土層名	密度 ρ_i (t/m^3)	剪断波 速度 V_s (m/sec)	初期剪断 剛性 G_{max} (kPa)	体積 弾性係数 K_{eq} (kPa)	基礎化 拘束圧 σ_{eq} (kPa)	動的変形特性 均束圧 依存係数 m_x	内部 摩擦角 ϕ_i ($^\circ$)	粘着力 c (kPa)	履歴減衰 上限値 η_{max}	変相角 ϕ_o ($^\circ$)	液状化特性 液状化パラメータ				
											w1	p1	p2	c1	S1
B(一層層)	1.85	180	59940	159481	57.8	0.5	38.0	0.0	0.240	—	—	—	—	—	—
B(二層層)	1.85	180	59940	159481	57.8	0.5	25.0	20.0	0.240	—	—	—	—	—	—
As2-2	1.80	135	32805	87284	104.8	0.5	38.0	0.0	0.240	28.0	2.2	0.7	1.0	1.35	0.005
As2-1	1.85	165	50366	134008	121.6	0.5	40.0	0.0	0.240	28.0	7.5	0.7	1.0	1.45	0.005
Ac(上部)	1.85	145	34891	92302	156.0	0.5	34.1	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—
Ac(下部)	1.75	180	56700	150860	191.3	0.5	39.8	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—
As1	1.75	190	63175	168088	208.0	0.5	38.0	0.0	0.240	—	—	—	—	—	—
Ds	1.85	225	83656	249189	227.4	0.5	39.0	0.0	0.240	—	—	—	—	—	—
Dc	1.75	190	63175	168088	223.1	0.5	39.8	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—

4. 解析条件の設定

解析に用いた有限要素メッシュを図-5および図-6に示す。地震動を入力する工学的基盤面はDc層の下面とし、それよりも上にある堤体および基礎地盤をモデル化した。解析領域の左右境界は半無限に続く水平成層地盤の応答を考慮するため粘性境界とし、底面は剛基盤とした。

各土層のモデルパラメータを表-2に示す。既往の地盤調査結果によれば検討対象とする2断面の基礎地盤の力学特性は大きく異ならないため、モデルパラメータは2断面に共通の設定とした。各土層の動的変形特性は、S波速度、強度特性（粘着力C、内部摩擦角 ϕ_i ）、減衰定数をもとに設定した。液状化の発生が考えられる砂質土層については、N値より推定した液状化強度曲線を再現できるように、要素シミュレーションを実施して液状化パラメータを設定した。液状化強度曲線は、文献⁹⁾に記載された方法により推定した。要素シミュレーション結果を図-7に示す。砂質土層の強度特性（内部摩擦角 ϕ_i ）は、N値より推定した相対密度から、秋田外港砂の相対密度と内部摩擦角 ϕ_i の関係⁹⁾を参照して設定した。粘性土層については、原位置採取試料を用いた一軸圧縮試験結果から深さ方向のせん断強度分布を求め、それに整合するように内部摩擦角 ϕ_i を与えた。堤体の盛土部分については、サクションを考慮して粘着力C、内部摩擦角 ϕ_i を与えた。各土層の減衰定数は、文献⁷⁾に記載された砂および粘土の標準的な値を設定した。

解析に用いた入力地震動を図-8に示す。入力地震動は、淀川左岸6.0kmに位置する大淀観測所で記録された地表の加速度波形を工学的基盤に引き戻したものである。

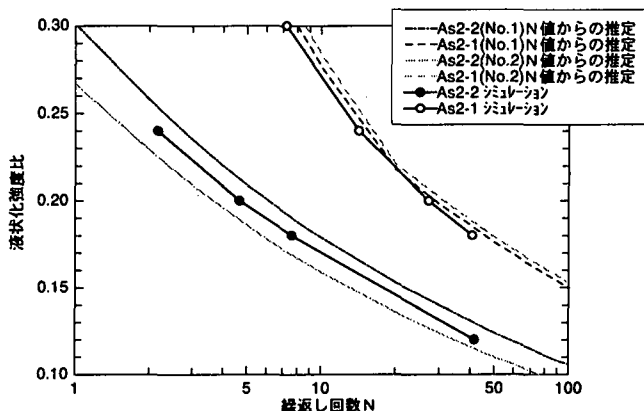


図-7 要素シミュレーション結果

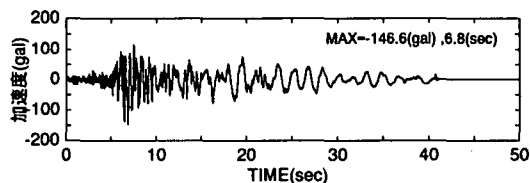


図-8 入力地震動（基盤E+F波）

動的解析時における計算の安定化のためレーリー減衰を考慮し、剛性行列比例係数 β を0.002とした。この値は、線形状態での自由地盤部の1次固有振動モードに対して1%の減衰定数を仮定した場合に相当する。

要素積分法は、全ての土要素にSRI法（平均成分1次、偏差成分2次）を採用した。また、時間積分法として、Wilsonの θ 法（ $\theta=1.4$ ）を用いた。時間積分間隔は0.01秒とし、40秒間の解析を実施した。

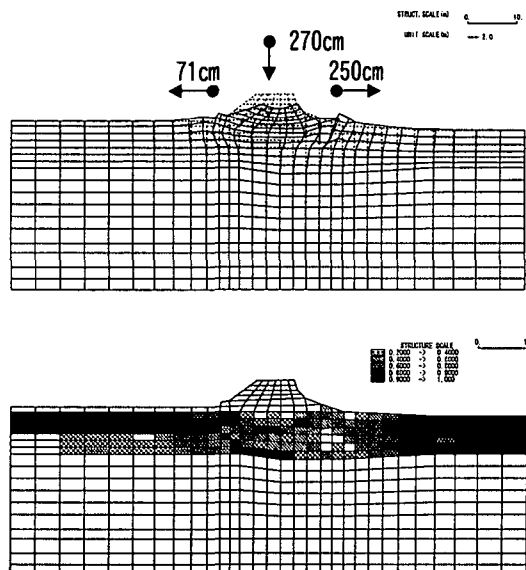


図-9 地震後の残留変形、過剰間隙水圧比 (No.1)

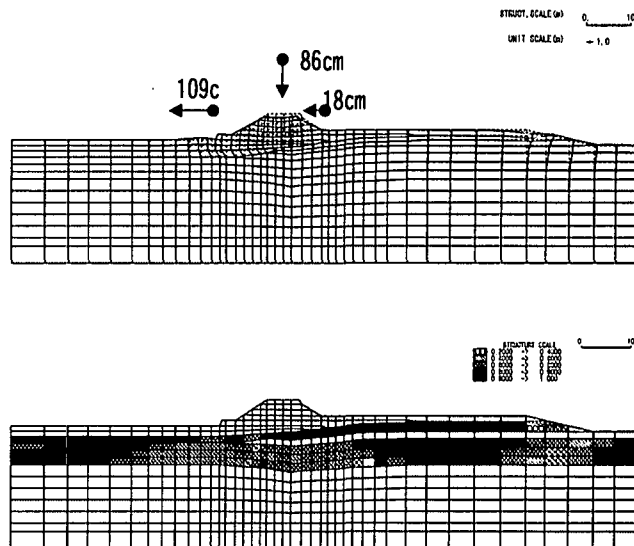


図-10 地震後の残留変形、過剰間隙水圧比 (No.2)

5. 解析結果

解析結果を図-9、図-10 および図-11 に示す。No.1 断面については、堤体直下の表層付近の液状化層が大きく側方流動し、それに伴い天端の沈下を生じている。被災モード、天端沈下量（実被害2.7m、解析2.7m）ともに実被害に整合的である。No.2 については、天端沈下量（実被害0.3m、解析0.9m）を実被害よりもやや大きめに予測しているが、表層付近の液状化層が堤内側へ側方流動することによる沈下の発生形態は実被害と整合的である。堤体部のサクシオンを考慮したことにより、検討対象とした2断面の被害が比較的精度よく再現できたと考えられる。また、解析結果より2断面の被災程度の差は、No.2 断面に見られる堤外側の高水敷および液状化層に挟まれた粘性土層の影響により生じたことが推察される。

6. 結論

FLIP を用いて天端沈下量の異なる淀川堤防2断面の地震時変形解析を実施した。その結果、2断面の堤体および基礎地盤の変形モード、被災程度ともに、概ね実被害を再現する結果が得られた。解析では、地下水位以浅の材料特性を適切に評価するため、サクシオンの影響を考慮した初期せん断剛性、体積弾性係数の算定式を採用した。今後、変形予測精度のさらなる向上を目指して、堤体材料のパラメータ設定方法等に関するより詳細な検討を行っていきたい。

謝辞：本報解析のための基礎資料は、独立行政法人土木研究所及び、(財) 国土技術研究センターより提供して頂きました。

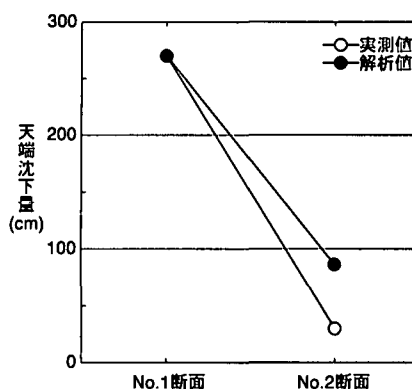


図-11 FLIP 解析による天端沈下量と実測値の比較

参考文献

- 1) 井合進, 松永康男, 亀岡知弘: ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル, 港湾技術研究所報告, 第29巻第4号, 1990, pp.27-56.
- 2) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behaviour under principal stress axes rotation, Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.1, 1985, pp.523-530.
- 3) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料 No.869, June, 1997.
- 4) FLIP 研究会事務局: FLIP 研究会配布資料 FLIP(Ver.4.3) FLIPGEN(Ver.1.2) FLIPSIM(Ver.1.3)取扱説明書, 平成13年5月.
- 5) 運輸省鉄道局監修: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 平成11年10月.
- 6) 善功企, 山崎浩之, 佐藤泰: 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性, 港湾技術研究所報告, 第29巻第2号, 1990, pp.85-118.
- 7) (財) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化ハンドブック (改訂版), 平成9年.