

1993 年北海道南西沖地震で被災した 河川堤防の解析検証事例

井合 進¹・杉山 弥²・小堤 治²・竹島 康人³・沢田 俊一⁴

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

³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 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)

地盤の液状化に起因する河川堤防の変形予測に、有効応力解析法が適用可能かどうかを検証した。このため、1993 北海道南西沖地震の際に被害を受けた後志利別川の河川堤防を対象に、有効応力法解析プログラム FLIP を用いて、被災事例解析を行った。この地震により、天端の沈下量が 2 m を超えるような大きな被害を受けた地点もあるが、その近くの堤体の被害は必ずしも大きくない。被害は、この地域に 2～6 m の厚さで広く分布する沖積砂層の液状化によるところが大きい。被害程度は、液状化層厚、堤高および堤体と沖積砂層の間の粘性土層の存在の有無に影響されたと思われる。本研究では、長さ 3 km の範囲内の被害程度が様々な 5 地点を選び、被害程度に影響を与えられる上記諸要素を考慮に入れて被害の再現を試みた。解析結果は、いずれも被害程度を説明するものであった。

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

1. はじめに

本研究の目的は、液状化する可能性のある地盤上の盛土構造物の地震による被害予測に対する、動的有効応力法解析コード FLIP¹⁾の適用性を検討することである。このコードは、土のせん断応力～せん断歪の非線形関係を多重せん断ばねモデル²⁾で表現し、過剰間隙水圧モデルには井合モデル¹⁾を採用している。なお、多重せん断ばねモデルは、土の履歴減衰の大きさが調節可能なように、各ばねに適用する Masing 則を修正している¹⁾³⁾⁴⁾。また、変位～歪関係には微小変形理論を用い、さらに、土の間隙水には非排水条件を課している。

本研究では、1993 年北海道南西沖地震の際に被害を受けた北海道の後志利別川の河川堤防を対象に被災事例解析を行い、FLIP の適用性を検討した。

同地震の際には、後志利別川の河口から約 5.5 km の間の堤防に大きな被害が集中し、噴砂も確認されている。堤防は、緩い砂層の液状化が主原因で沈下および縦断亀裂を生じて大きく崩壊したものと考えられ、また、被災の有無および程度は不連続であり、地形、地質等に何らかの関係があると思われた⁵⁾。

また、この区間の被災程度が様々な 5 地点を対象に、動的有効応力解析コード LIQCA を用いた検討も実施されている⁶⁾。本研究でも、これと同じ地点を対象に、被災事例解析を行った。

2. 解析対象断面

解析対象地区は図-1 中にハッチで示す地区であり、各対象地点の位置と天端沈下量を表-1 に示す。表-1 を見て分かる通り、数百メートルしか離れていない場合でも、天端沈下量には大きな差が見られる⁶⁾。

これら各地点の地質構成を図-2 に示す。

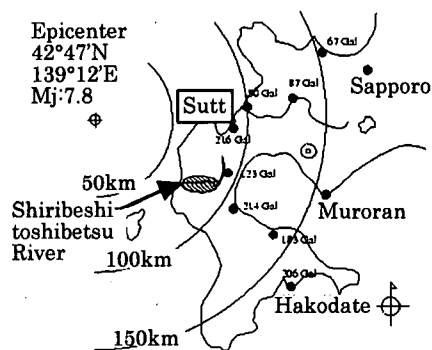


図-1 震央と後志利別川(文献 7)を修正)

表-1 解析対象地点と天端沈下量⁶⁾

断面 No	位置(河口からの距離)	天端沈下量(cm)
1	左岸 4.44km	267
2	左岸 5.00km	ほぼ 0
3	左岸 1.71km	126
4	右岸 2.00km	ほぼ 0
5	左岸 2.49km	63

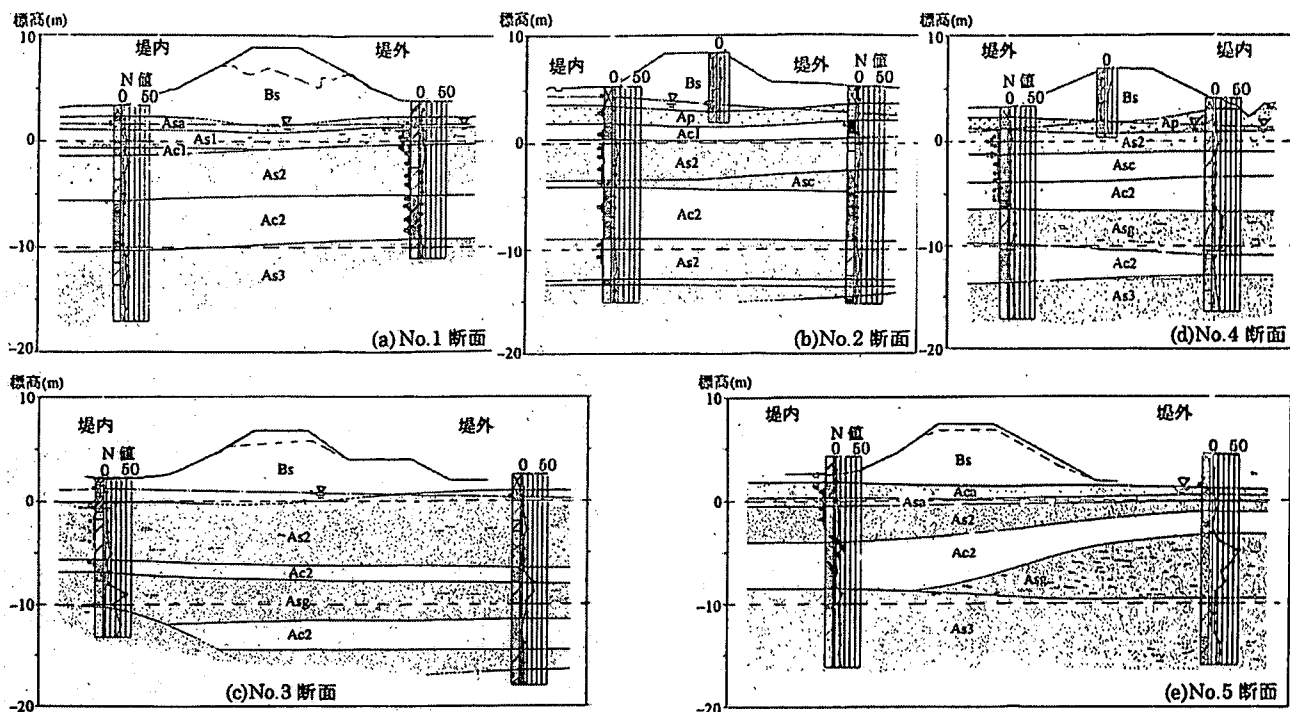


図-2 解析地点の地質構成⁶⁾

3. 解析地盤定数

FLIP では、地下水面以下の砂質土層を対象に、過剰間隙水圧の上昇に伴う有効応力の減少を考慮することが出来る。その他の土層については、ダイレタンシーの影響は考慮されず、有効応力は加震中、概ね一定値に保たれる。

各断面の対応する土層には原則として同じ物性を想定して、各土層の解析地盤定数を設定した。これらの一覧を表-2 に示す。また、各土層ごとの地盤定数の設定方法を以下に示す。

a) 堤体及び表土

堤体及び表土(Bs 層)の強度定数については一般的な砂質土材料を仮定して設定した。初期せん断剛性は、道路橋示方書の方法⁸⁾でN値から算定したせん断波速度をもとに推定した。内部摩擦角は、N値から相対密度を推定し、砂の相対密度～内部摩擦角の関係を参照して設定した。このとき粘着力 c は 0kPa とした。ただし、堤体部分の内部摩擦角及び粘着力については、道路土工軟弱地盤対策工指針⁹⁾等の値を参考に、内部摩擦角 25° 、粘着力 20kPa とした。また、サクシヨンの効果を想定して、負圧を保つ設定とした。

b) 砂質土層

As1 層、As2 層、Asa 層、Asa～Aca 層 (No.1 断面)、Asc 層は、砂質土の扱いとして、FLIP の液状化パラメータを設定し、ダイレタンシーの影響を考慮した。初期せん断剛性は、堤体及び表土と同様の

方法で推定した。内部摩擦角は、三軸(CU)試験結果に基づく排水強度を参照して設定した。なお、粘着力 c は 0kPa とした。

液状化強度は、非排水繰返し三軸試験が実施されているので、その結果を参照して設定した。As2 層の液状化強度は検討断面ごとに大きな相違はないものと判断できるので、統一的なパラメータを設定した。なお、No.1 地点に分布する As2 層の液状化強度は、他の断面に比べてやや小さいため、他の断面とは別に設定した (図-3 参照)。

c) 粘性土層

Aca 層、Ap 層、Ac1 層、Ac2 層は粘性土の扱いとした。初期せん断剛性は、堤体及び表土と同様の方法で推定した。せん断強度は、Ap 層については、自由地盤部で採取された不攪乱試料の一軸圧縮強さ

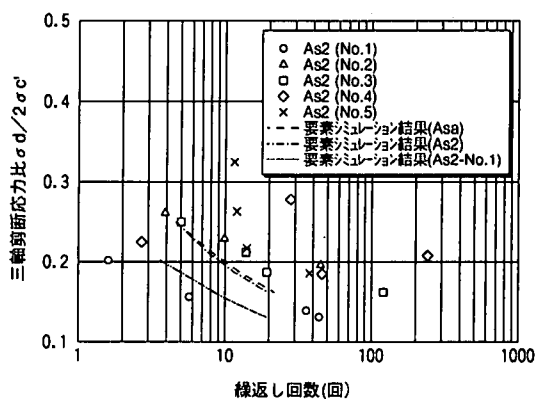


図-3 As2 層の液状化抵抗曲線

表-2 解析地盤定数

土層名	湿潤密度 ρ_t (t/m^3)	代表 N値 (回)	動的変形特性								液状化特性						備考
			剪断波 速度 V_s (m/sec)	初期剪断 剛性 G_{ma} (kPa)	体積 弾性係数 K_{ma} (kPa)	基準化 拘束圧 σ_{ma}' (kPa)	拘束圧 依存係数 m	内部 摩擦角 ϕ_f ($^{\circ}$)	粘着力 c (kPa)	履歴減衰 上限値 h_{max}	変相角 ϕ_p ($^{\circ}$)	液状化パラメータ					
												$w1$	$p1$	$p2$	$c1$	$S1$	
B(一般部)	1.80	2	126	28573	76024	46.4	0.5	37.0	0.0	0.240	—	—	—	—	—	—	
B(堤体)	1.80	2	126	28573	76024	46.4	0.5	25.0	20.0	0.240	—	—	—	—	—	—	
Aca	1.60	2	126	25398	67577	23.2	0.5	42.0	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—	No.5断面
Asa~Aca	1.50	1	80	9600	25543	20.4	0.5	44.0	0.0	0.240	28.0	5.5	0.6	0.7	3.0	0.005	No.1断面
Asa	1.70	3	115	22631	60215	42.6	0.5	39.0	0.0	0.240	28.0	3.5	0.6	0.9	1.4	0.005	No.5断面
Ap	1.10	1	100	11000	29267	16.1	0.5	30.0	31.1	0.210	—	—	—	—	—	—	No.2,4断面
As1	1.85	7	153	43326	115277	38.8	0.5	39.0	0.0	0.240	28.0	2.8	0.5	0.6	2.1	0.005	No.1断面
Ac1	1.50	1	100	15000	39910	19.8	0.5	55.0	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—	No.2,3断面
Ac1(No.1)	1.50	2	126	23811	63353	54.2	0.5	55.0	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—	No.1断面
As2	1.80	4	129	29988	79789	50.5	0.5	39.0	0.0	0.240	28.0	3.2	0.6	0.9	1.4	0.005	
As2(No.1)	1.80	4	129	29988	79789	50.5	0.5	39.0	0.0	0.240	28.0	1.5	0.9	1.0	1.2	0.005	No.1断面
Asc	1.70	2	101	17271	45952	40.7	0.5	41.0	0.0	0.240	28.0	3.9	0.4	0.7	2.6	0.005	No.2,4断面
Ac2	1.45	1	100	14500	38580	68.1	0.5	39.0	0.0	0.210	—	—	—	—	—	—	
Ac2(No.3)	1.45	1	100	14500	38580	96.0	0.5	39.0	—	0.210	—	—	—	—	—	—	No.3断面下部
Asg2	2.10	28	243	123929	329734	105.1	0.5	42.0	—	0.240	—	—	—	—	—	—	No.5断面
Asg2(No.3)	2.10	21	221	102301	272189	76.9	0.5	42.0	—	0.240	—	—	—	—	—	—	No.3断面

※ 各定数の意味は、文献 1) 参照

をもとに全応力表示の強度定数を設定した。その際、拘束圧の増加による強度増加を考慮するために、強度増加率を 0.5 とした。その他の粘性土層については、三軸 (CU) 試験結果に基づく排水強度を参照して設定した。なお、粘着力 c は 0kPa とした。

実際には粘性土にも過剰間隙水圧が発生して有効応力が減少するが、載荷振動数が大きければその程度は小さいので¹⁰⁾、地震時の有効応力の変動は小さいことが予想されるが、念のために、粘性土に対して非排水強度を用いた解析も No.2 断面を対象に実施したところ、応答値には影響がなかった。

d) 砂礫層

Asg2 層 (No.5 断面) の解析定数設定法は、砂質土と同様であるが、液状化は考慮しなかった。

4. 入力地震動と解析条件

解析モデル底面は、各地点とも Ac2 層の下面にとり、そこに固定境界を設定した。なお、No.3 断面のみ、Ac2 層の下の第 2 Ac2 層とも言うべき土層の下端にとった⁹⁾。

入力地震動としては一次元重複反射理論を用いて、工学的基盤面で規定された加速度波形から解析上の基盤面 (Ac2 層下面) における E+F 波を取り出して用いた⁹⁾。工学的基盤面での波は、北海道南西沖地震の際に寿都气象台で観測された加速度波形を工学的基盤面に引き戻し、それに距離減衰を考慮して作成した⁹⁾。入力加速度の最大値の一覧を表-3 に示す。なお、動的解析では、80 秒間の解析を行った。

その他の解析条件を以下に示す。

- ・時間積分間隔：0.01 秒
- ・時間積分手法：Wilson θ 法 ($\theta=1.4$)
- ・要素積分次数：平均成分 1 次、偏差成分 2 次
- ・レーレー減衰行列剛性比例係数 β ：0.0005

表-3 一次元重複反射理論から得られた最大加速度⁶⁾

断面 No	基盤面最大 加速度 2E(gal)	Ac2 下面最大 加速度 E+F(gal)
1	240	148.9
2	240	203.8
3(第 2Ac2 下面)	250	182.2
4	250	135.4
5	250	141.8

5. 解析結果とまとめ

図-4 に FLIP による各断面の残留変形図と加震後の過剰間隙水圧比分布図を示す。また、図-5 に各断面天端の残留沈下量の実測値と FLIP による結果の比較を示す。なお、FLIP では排水沈下が考慮されないが、自由地盤部に対する別の検討によれば、排水沈下量は小さい。

崩壊した堤体には縦断方向の亀裂が見られた。FLIP ではこのような破壊モードは表現できないが、亀裂のみでは、大幅な天端の沈下は説明しがたい。FLIP では、堤体の沈下は、堤体直下の液状化層の水平方向への伸張せん断により生じている。堤体天端の沈下量に着目すると、FLIP は実際の沈下量をよく再現しているのも、実際の沈下のメカニズムもある程度再現しているものと推察される。

砂層が液状化によりその剛性をほぼ失った状態では、粘性土層の剛性は相対的に大きくなり、全体の変形量は、粘性土層の残存剛性に左右されると思われる。本検討では砂層の液状化の評価と粘性土層の残存剛性の評価の両方が適切に行えたために、このような様々な被害状況を説明出来たものと思われる。

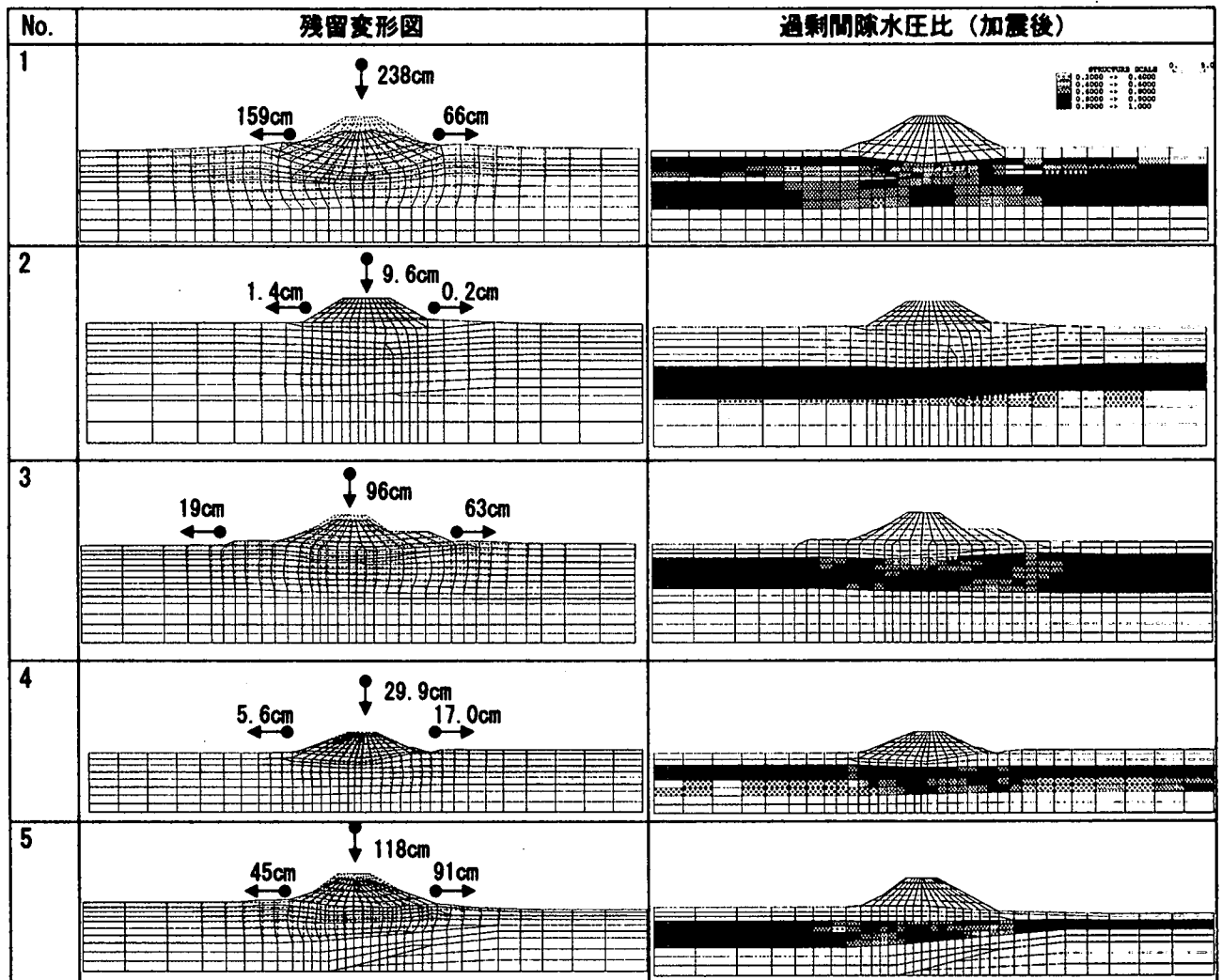


図-4 FLIP による各断面の残留変形図と加震後の過剰間隙水圧比分布図 ($1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$)

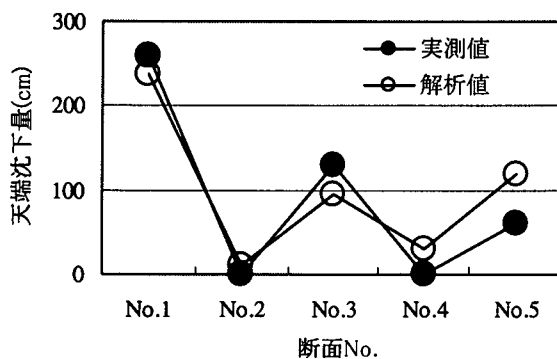


図-5 各断面の天端残留沈下量

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。

参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst. Vol. 29, No. 4, 1990.
- 2) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics,

Nagoya, Vol.1, pp. 523-530, 1985.

- 3) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S.: Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp. 373-380, 1985.
- 4) Ozutsumi, O. and Iai, S.: Adjustment Method of the Hysteresis Damping for Multiple Shear Spring Model, Proc. of 4th International Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Eng. and Soil Dynamics, 2001.
- 5) 加治昌秀, 平野道夫, 金子正之: 地震と河川堤防, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第 34 号, 平成 6 年
- 6) 松尾修, 岡村未対, 島津多賀夫, 渦岡良介: 有限要素法による後志利別川堤防の地震被害事例解析, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 445-450, 平成 11 年.
- 7) 金子正之, 田村圭司, 佐々木康, 勝山明雄, 佐藤謙司: 平成 5 年北海道南西沖地震による河川堤防被害について, 第 29 回土質工学研究発表会, pp. 971-972, 1994.
- 8) (社) 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
- 9) (社) 日本道路協会: 道路土工軟弱地盤対策工指針, 昭和 61 年 11 月
- 10) 山本陽一, 兵動正幸: 粘性土の繰返しせん断特性に及ぼす載荷速度の影響, 土木学会論文集, No. 645/III-50, pp. 63-76, 2000