

液状化時の盛土沈下量に及ぼす 地震動の影響に関する一検討

浦野和彦¹・三原正哉²・足立有史²・渦岡良介³

¹ 正会員 ハザマ 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間字西向 515-1)

² 正会員 ハザマ 土木本部 技術設計部 (〒107-8658 東京都港区北青山 2-5-8)

³ 正会員 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター
(〒673-0433 兵庫県三木市福井字三木山 2465-1)

河川堤防や道路盛土等の盛土構造物では地震時の基礎地盤の液状化に起因する盛土天端の沈下量が盛土の安定性を検討する上で重要となる。本報では、二次元有効応力解析コード L I Q C A を用い、盛土の地震時変形解析を実施し、その解析結果をもとに、液状化による盛土の沈下量と入力地震動の関係について検討を行った。解析対象の盛土モデルは、兵庫県南部地震で被災した淀川の河川堤防とし、入力地震動は周波数特性や加速度振幅が異なる数種類の地震動を用いた。解析結果より、継続時間が長く、長周期成分が卓越する入力地震動において盛土に大きな沈下量が発生することが明らかとなった。

Key Words: liquefaction, embankment, FEM, effective stress analysis

1. まえがき

兵庫県南部地震では、河川堤防や道路盛土等の土構造物についても大きな被害が発生した。砂質地盤上の盛土では、大規模地震時においてその基礎地盤が液状化することにより盛土の沈下が引き起こされたと考えられる。兵庫県南部地震以降、液状化時の盛土の沈下量を推定できる手法が求められており、地震による繰返しを考慮できる弾塑性モデルを用い、Biot の二相系理論に基づく有限要素法による動的解析手法は、盛土構造物の地震時挙動を推定できる有力な手法であると考えられる。

本報では、有限要素プログラム L I Q C A (Okazaki¹⁾) を兵庫県南部地震で被災した淀川の河川堤防に適用した結果について報告する。解析対象の河川堤防は液状化性地盤上の盛土であり、周期特性と加速度振幅が異なる入力地震波による解析結果について比較することで、入力地震波の盛土沈下量への影響について検討を行った。

2. 検討条件

2. 1 検討対象盛土

検討対象は、兵庫県南部地震で実際に被災した淀川堤防西島地区の左岸 1.4 km とした。被災前後の堤防断面図²⁾を図-1、地層構成図³⁾を図-2 に示した。堤防直下の基礎地盤は N 値が 7 以下と低い沖積砂質土層が 8 ~ 10

m の層厚で堤防敷幅全域にわたって分布している。その下は層厚約 15 m の沖積粘土層、洪積砂質土層、洪積粘土層、そして N 値 50 以上の砂礫層の順となっている。

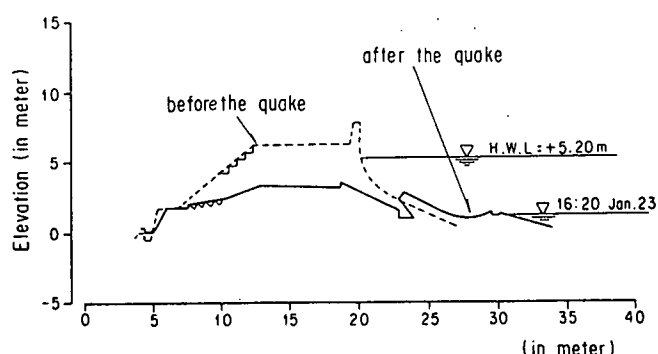


図-1 被災前後の堤防断面²⁾

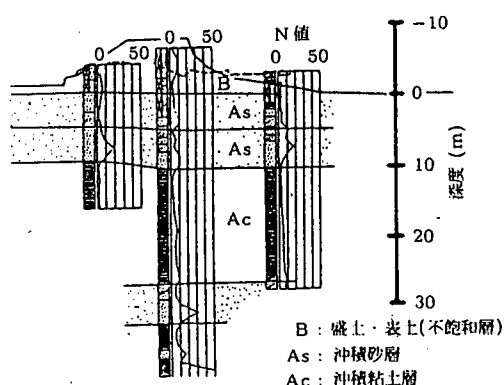


図-2 解析地点の地層構成³⁾

地震時には、まず水平地盤部の沖積砂質土層が液状化し、それに伴ない軟化した堤防直下の基礎地盤が堤体の重量により両側法尻部方向に水平に移動し、堤体天端で2.7mの沈下が生じたものと考えられる。

2. 2 解析手法

LIQCA¹⁾は、砂の弾塑性モデルを用いた有効応力法に基づくプログラムであり、液状化の解析に用いられている。つり合い式と連続式を結びつけるLIQCAの支配方程式は、固層の変位と間隙水圧を変数とするu-p法に基づいている。つり合い式の空間的離散化には有限要素法を用い、連続式の離散化には差分法を用いている。時間積分にはニューマークの方法を用いている。

砂の構成式は繰返しを考慮できる岡ら⁴⁾弾塑性モデルを用いており、以下の仮定のもとで定式化されている。

- 1. 微小ひずみ理論の適用
- 2. 弾塑性理論に基づいたひずみの定義
- 3. 非関連流れ則の適用
- 4. 過圧密境界曲面の導入
- 5. 非線形移動硬化則の適用

また、構成式が材料の挙動をより詳細に表現できるように、Tateishiら⁵⁾に基づき、以下の修正を行った。

- ① 有効応力が変相線に達した後、塑性せん断ひずみ量に対応させて弾性せん断剛性 G_E 、塑性せん断剛性 G_p を低減した。この修正により変相後の履歴減衰が増大し、なめらかな履歴曲線が得られる。
- ② 異方圧密砂のフェーディングメモリ効果を表現するために、ダイレタンシー挙動を制御する応力比の不変量の初期値 η_0 を塑性せん断ひずみ量に対応して低減させた。
- ③ 塑性体積ひずみ増分と塑性偏差ひずみ増分の割合を制御するためにダイレタンシー係数と呼ぶ変数 D^* を導入した。

2. 3 解析モデル

解析モデルは、図-3 に示すような土層構成で、Dc 層下面を剛基盤として作成した。側方の自由地盤は、幅広要素（両端を等変位）で模擬した。

各土層に対して、物理試験、力学試験より直接設定できるパラメータを設定した後、砂質土については、砂の弾塑性モデルを用いて、要素シミュレーションを実施し、図-4 の液状化強度を目標としてパラメータを設定した。粘性土については、粘土の弾粘塑性モデルを用いて、要素シミュレーションを実施し、動的変形特性を対象にパラメータを設定した。また、盛土部、非液状化層については、砂の弾塑性モデルを用いた。その際、初期せん断剛性のみを設定し、変相後の剛性低下やダイレタンシーを無視した。解析に用いた物性の一覧を表-1 に示す。

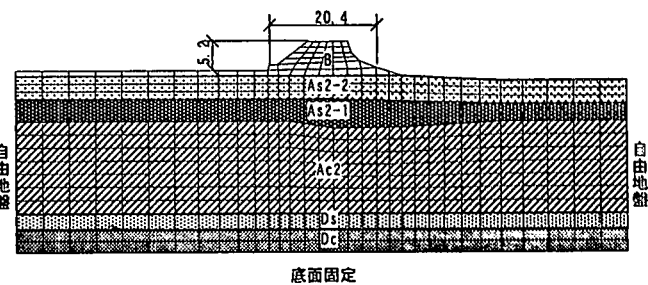


図-3 解析モデル

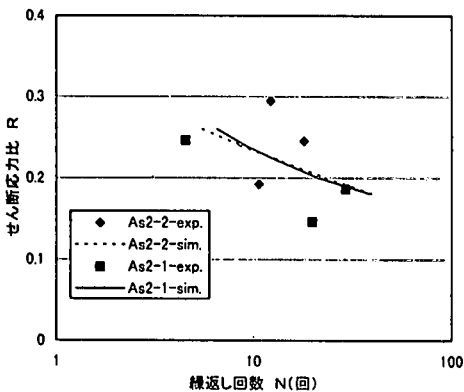


図-4 沖積砂質土層の液状化強度曲線

表-1 解析に用いた物性値

土層名	盛土部 B	沖積砂質土層 As2-2	沖積砂質土層 As2-1	沖積粘土層 Ac2	洪積砂質土層 Ds	洪積粘土層 Dc
単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	1.80	1.90	1.95	1.65	1.95	1.80
初期間隙比 e_0	0.72	0.61	0.71	1.67	0.60	0.75
透水係数 k (m/s)	3.7E-05	5.2E-06	1.3E-05	4.8E-09	1.3E-05	4.7E-08
圧縮指数 λ	0.0250	0.0250	0.0250	0.3690	0.0250	0.1270
膨潤指数 κ	0.0025	0.0025	0.0025	0.0550	0.0025	0.0230
初期せん断剛性比 G_0/σ'_m	1050	658	702	201	536	289
破壊応力比 M_f	1.16	1.09	1.30	1.26	1.34	1.26
変相応力比 M_m	0.98	0.98	0.98	1.26	0.98	1.26
パラメータBの初期値 B_0	3600	3000	2500	1000	1600	1400
ダイレタンシーパラメータ D^*_0	0.0	1.0	1.0		0.0	
ダイレタンシーパラメータ n	0.0	4.0	4.0		0.0	
塑性基準ひずみ γ^p_r	∞	0.002	0.002		∞	
弾性基準ひずみ γ^E_r	∞	0.020	0.020		∞	

2. 4 入力地震動

解析に用いた入力地震動の時刻歴波形と加速度応答スペクトル（h＝5％）を図-5、図-6 に示す。ここで、高見波以外の地震波については最大加速度振幅を 150gal で正規化した場合の数値を示している。

高見波は兵庫県南部地震における淀川左岸 3.5km の高見フローラルタウンの GL-30m における観測波⁶⁾を堤防直交方向に補正した地震波であり、解析モデルの妥当性検証のための被災シミュレーションに用いた。宮城県沖地震の大船渡波⁷⁾は海溝型地震短周期型、十勝沖地震の八戸 EW 波⁷⁾は海溝型地震長周期型、兵庫県南部地震のポートアイランド NS 基盤波⁶⁾（GL-32m）は直下型地震とそれぞれ周期特性の異なる地震波である。

解析では、高見波は被災シミュレーションのため実測値（Max138gal）、他の波については比較のため、最大加速度振幅を 80、150、300gal に調整して入力地震動とした。入力地震動の波形と最大加速度振幅をパラメータとして表-2 に示すような解析ケースを設定した。

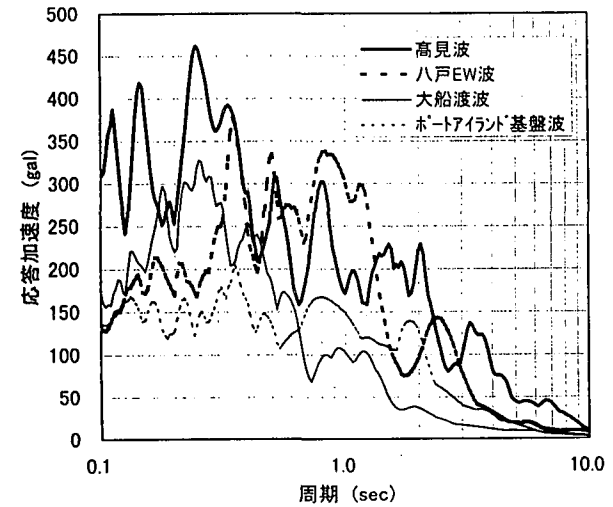


図-6 入力地震動の加速度応答スペクトル

3. 解析結果

3. 1 被災シミュレーション

高見波を用いた解析による変形図を図-7、平均有効応力比分布（ $1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$ ）を図-8 に示す。

解析結果より、沖積砂質土層 As2-2 及び As2-1 は完全に液状化を起こしており、盛土部に大きな変形が発生している。ここで、盛土天端の残留沈下量 3.4m であり、被災後の実測値 2.7m より若干大きいがほぼ同等な数値を示している。また、盛土直下の沖積砂質土層については盛土による初期せん断応力により、間隙水圧の上昇が押さえられている。

解析結果より、本解析は被災状況のある程度再現しており、これより解析モデルの妥当性が確認された。

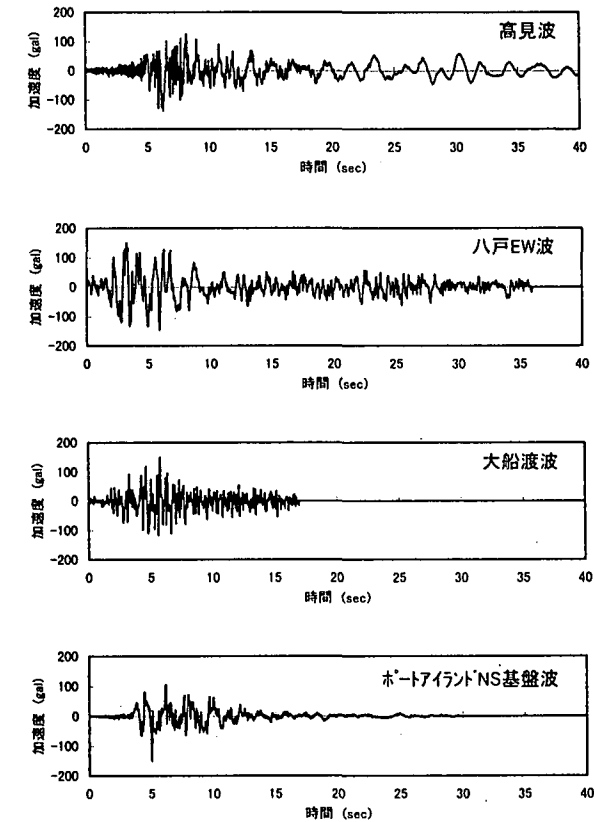


図-5 入力地震動の時刻歴波形

表-2 解析ケース

ケース	地震波名	継続時間 (sec)	最大加速度 (gal)
1	高見波	40	138
2	八戸 EW 波	36	80
3			150
4			300
5	大船渡波	17	80
6			150
7			300
8	ポートアイランド NS 基盤波	30	80
9			150
10			300

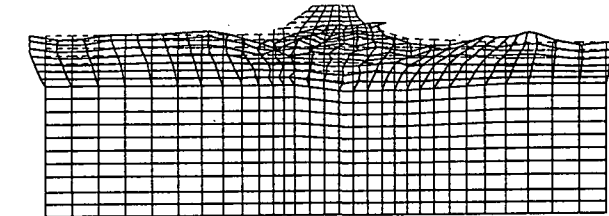


図-7 変形図（高見波）

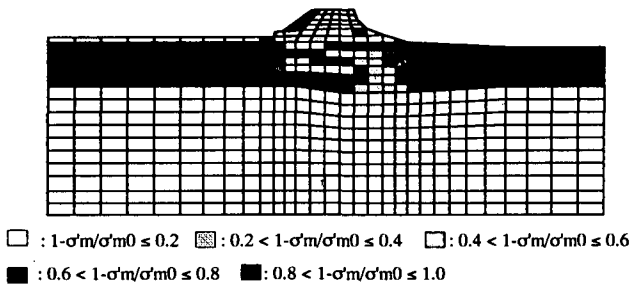


図-8 地震後平均有効応力比分布（高見波）

3. 2 地震動の違いによる影響

解析結果より、入力地震動と盛土天端最大残留沈下量の関係を図-9 に、入力地震動と盛土天端最大応答加速度の関係を図-10 に示す。

盛土天端の残留沈下量については、入力加速度の大きさに比例して増加しており、八戸 EW 波で最も大きな値を示している。これは、図-6 の加速度応答スペクトルで示したように長周期成分が大きいことと継続時間が長いためであると考えられる。液状化した地盤は剛性が低下し固有周期が長周期側に移動するため、長周期側で大きな応答を与える八戸 EW 波で大きな残留変位を生じたと考えられる。

盛土天端の水平応答加速度については、入力加速度の大きさにあまり関係なく、同程度の値を示している。また、残留沈下量とは異なり、ポートアイランド NS 基盤波が最も大きな値を示している。これは、八戸 EW 波のような振動型の地震動では入力地震動が最大値となる前に繰り返しにより過剰間隙水圧が蓄積し地盤の軟化が進んでいるため、応答が低減されてしまうと考えられる。これに対して、ポートアイランド NS 基盤波のような衝撃型地震動では地盤の軟化が進む前に入力地震動の最大値が入力されるため大きな応答加速度を示したと考えられる。図-11 に As2-1 層の過剰間隙水圧比の時刻歴波形を示す。ポートアイランド基盤波では入力地震動の最大値時刻において間隙水圧比は 0.4 程度であるが、八戸 EW 波では 0.8 に達している。

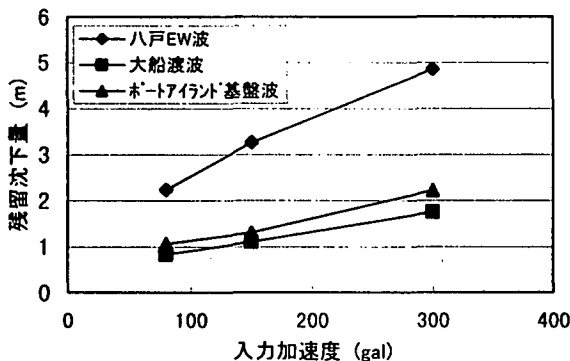


図-9 入力加速度と盛土天端残留沈下量の関係

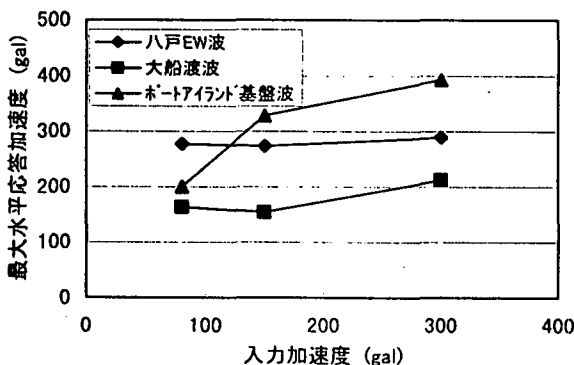


図-10 入力加速度と盛土天端最大応答加速度の関係

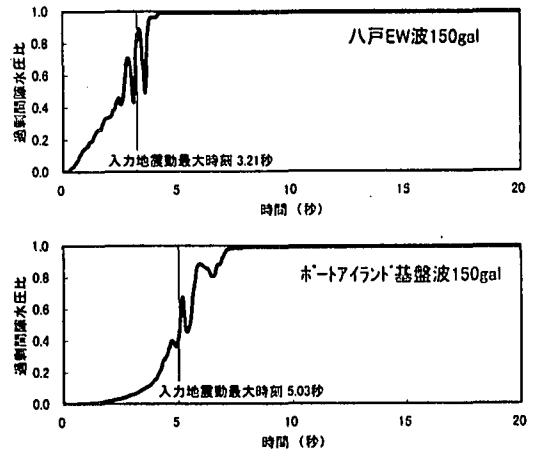


図-11 過剰間隙水圧比の時刻歴波形 (As2-1 層)

4. おわりに

本報では、兵庫県南部地震で被災した河川堤防に対して入力地震動の波形と加速度振幅をパラメータとした弾塑性有限要素法による解析を実施し、継続時間が長く、長周期成分が卓越する地震動においてより大きな残留変位が発生することが明らかとなった。

今後は、複数の断面形状及び地盤条件が異なるモデルについて解析を行い、盛土高さや液状化層厚と残留変位の関係について検討を進めていきたいと考えている。

最後に、本解析にあたり、建設省土木研究所動土質研究室松尾修室長には貴重な助言を頂きました。記してここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., & Uzuoka, R : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol. 52, pp. 209-245, 1994
- 2) Matsuo, O. : Damage to river dikes, Special Issue of Soils and Foundations, pp. 235-240, Jan. 1996
- 3) 松尾修, 岡村未対, 島津多賀夫, 西邦夫 : 地盤液状化問題における弾塑性有限要素解析法の適用, 土木技術資料 40-8, pp. 50-55, 1998
- 4) 岡二三生, 八嶋厚, 加藤満, 後藤宇 : 非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式の拡張, 第 28 回土質工学研究発表会, pp. 489-490, 1994
- 5) Tateishi, A., Taguchi, Y., Oka, F., & Yashima, A : A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions, Proc. Earthquake Geotechnical Engineering, pp. 399-404, 1995.
- 6) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会 : 1995 年兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996
- 7) 運輸省港湾技術研究所 : 距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 港湾技研資料 No. 893, 1997