

動的非線形 FEM 解析による空港高盛土の変形計算事例

高知工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○林 佑哉

高知工業高等専門学校 正会員 岡林宏二郎

港湾空港技術研究所 正会員 野津 厚

1. はじめに

空港高盛土は、過去に大きな地震被害事例も無く、地震に対して比較的安全な構造物であるとも考えられるが、今後予想される東海・東南海・南海地震等の大規模地震に対して、空港施設の被災程度をあらかじめ推定することが求められており、そのための手法として、動的非線形 FEM 解析は極めて有望である。しかしながら、盛土のような土を主体とする構造物の地震時挙動には不明確な点も多く、動的非線形 FEM 解析の適用性に関しても、格段の信頼性向上が求められているのが現状である。一方、1993年に発生した釧路沖地震では、釧路空港の高盛土において地震観測記録が得られており、動的非線形 FEM 解析の適用性を検討する上で極めて貴重なデータである。そこで本研究では、動的非線形 FEM プログラム FLIP を用い、実際に観測された地震動を入力して高盛土の地震応答解析を行い、残留変形の実測結果等との比較を行うことにより、動的非線形 FEM 解析における土質定数の設定が解析結果に与える影響等について検討した。

2. 解析方法

2.1 高盛土の概要

本研究で対象とした高盛土は、釧路空港北側に滑走路延長のため標高差 65m の傾斜地に建設されたもので、その断面は図 1 に示す通りである。動態観測を目的として、高盛土の合計 6カ所において水平および鉛直変位を計測しており、これらの結果によれば地震により 2～3cm 程度の残留水平変位が、法肩から法先へ向かう方向に盛土全体にわたって発生し、また、残留鉛直変位としては法肩付近では 10cm 程度沈下、逆に法先付近では 10cm 程度隆起するものであった。また、図 1 に示すように FR3（法肩）、FR2（法中）、FR1（法先）、F（地表）および FB（地中基盤）の 5カ所に地震計が設置されており、間隙水圧計が砂層と置換え部の 4カ所に設置されている²⁾。

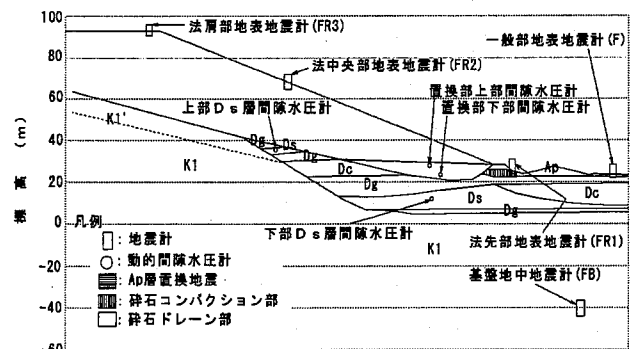


図 1 地震計・間隙水圧計の位置

2.2 メッシュ分割

本解析では高盛土断面（水平距離 650m、鉛直距離 140m）を、図 2 に示すように 4104 要素（4228 節点）にメッシュ分割し、FLIP を用いて解析を行った²⁾。

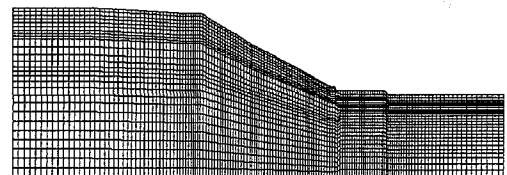


図 2 高盛土のメッシュ分割図

2.3 入力地震波

解析領域底面への入力地震動は、国土交通省北海道開発局から提供していただいた、FB（地中基盤）で観測された釧路沖地震における加速度波形である水平 N44E 方向（図 3）と上下方向（図 4）を使用する。また、解析に要する時間を考慮して、時刻 20～40 秒の主要動 20 秒間を解析に用いた²⁾。

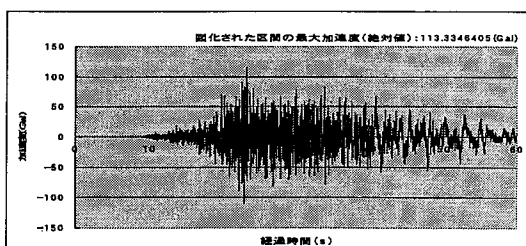


図 3 水平 N44E 方向加速度波形

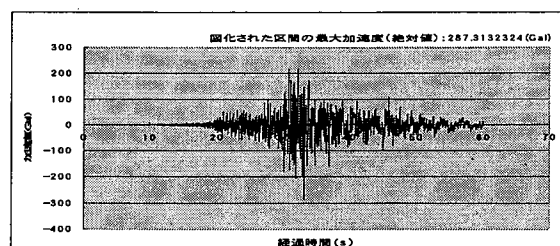


図 4 上下方向の加速度波形

2. 4 材料特性

解析断面の材料特性としては、国土交通省北海道開発局から提供していただいた土質調査結果と地震計設置地点の PS 検層結果を表 1 に示す 2)。

表 1 釧路空港高盛土の材料特性

地質名	土質名	材料 No.	単位体積重量 (t/m^3)	基準有効 上載圧 (kPa)	せん断流 速 度 (m/s)	基準平均 有効応力 (kPa)	初期せん 断剛性 (kPa)	初期体積 弾性係数 (kPa)	粘着力 (kPa)	内 部 摩擦角 ($^\circ$)	最大減速
盛土	表土	1	1.5	15	93	10	13000	33800	19.5	42	0.24
	上層	2	2.1	392	380	261	303200	790800	19.5	41	0.24
	下層	6	2.2	31700			317700	828500	19.5	40	0.24
沖積低地 堆積物	腐植土・泥土(Ap,B)	15	1.5	9	100	6	15000	39100	0	26	0.24
	改良地盤(Ap)	14	1.6	9	180	6	57800	150600	0	27	0.24
	砂礫(Sk)	13	2.2	225	370	150	301200	785400	0	37	0.24
第3段丘堆積物	砂礫(Teg)	3	1.9	152	400	102	304000	792800	49	35	0.24
	砂礫(K2)	4	2.15	318	550	212	650400	1696100	9.8	35	0.24
	砂質土(K1')	7	1.95				252700	659100	9.8	35	0.24
鋼路層群	砂質土(K1')	8	2	294	360	196	259200	676000	9.8	35	0.24
	砂質土(K1)	5	2.1				272200	709800	49	42	0.24
	粘性土(Dc)	12,18	1.7				220300	574800	49	30	0.2
第6段丘堆積物	砂質土(Ds)	10,17	1.9	294	360	196	246200	642200	29.4	35	0.24
	砂礫(Dg)	9,11,14,19	2				259200	676000	29.4	35	0.24

3. 解析結果及び考察

3. 1 高盛土の残留変形

非線形地震応答解析の結果、高盛土の残留変形を図 5 に示す。なお、図 5 は解析対象範囲の主要部を取り出しており、図上で盛土の変形形態の識別が容易となるように、盛り土変位の解析結果を百倍して図化している。²⁾ 図 5 に示した非線形地震応答解析による高盛土の残留変形図より、盛土表面の水平変位は全体として 10 cm 程度であり、法肩部分では 4.5 cm 程度の沈下、法尻部分では 3.5 cm 程度の隆起が見られた。

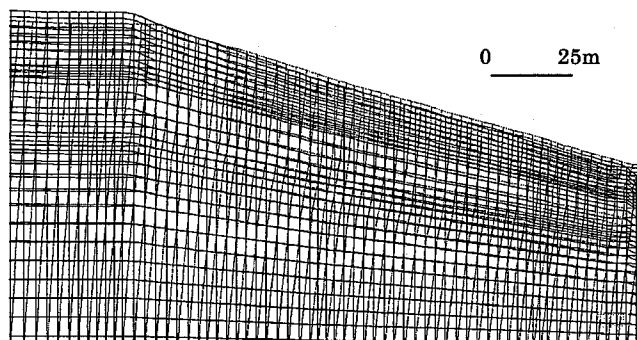


図 5 解析結果による地震後の高盛土の残留変形

観測値でも同じく法肩、法尻でそれぞれ沈下、隆起が起こっており全体的に変形図

の形状は整合している。観測値の変形の程度は、表面水平変位が 2～3 cm で、沈下、隆起とも 10 cm 程度であることから、被害が比較的軽微であったということも共通で、オーダーとしては概ね整合していると考えられる²⁾。

3. 2 地震計設置地点における加速度応答

非線形地震応答解析の結果、地震計設置地点における応答加速度は設置場所によって大きく差がでた。表 2 のように各々の最大加速度を比較すると F(地表)での解析結果が観測値の 1/4 程度になった。FR3(法肩)～FR1(法先)についての最大加速度は約 7 割程近づいている。材料パラメータの見直しなど、さらに解析方法について検討を行う必要がある。

表 2 実測値と解析値の最大加速度の比較

	FR3(法肩)	FR2(法中)	FR1(法先)	F(地表)
実測値の最大加速度 (Gal)	585.4	518.5	575.8	1026.0
解析値の最大加速度 (Gal)	485.7	368.3	762.6	275.4

4. まとめ

釧路沖地震における釧路空港高盛の観測記録に対して FLIP を用いたシミュレーションにより、解析値が全て観測値と完全に整合しているという結果には至らなかったが、全体的に見ると近い値まで近づいた。観測値との誤差に考えられる誤差要因を挙げると、1) 今回使用した FLIP(ver3.3)は、使用者が材料データで任意に設定するパラメータ Y の下限値を設定しなければならない(ver4.1 以降では自動決定される)ということがある。2) メッシュ作成時にあらかじめ用意されたメッシュ断面を再分割し直したことでメッシュの大きさが変化している可能性がある。これは元のメッシュ分割図が三角形要素を多く含んでおり、解析を行うと、結果の値が安定せず発散してしまったからである。3) 加速度を出力する位置での値の変化、材料パラメータを変えることでの変化の程度など、入力データと解析結果の関係を調べる必要がある。

5. 参考文献

- 1) 地盤工学会 地盤工学ハンドブック編集委員会：地盤工学ハンドブック、p p 230.
- 2) 井合 進、一井康二、佐藤幸博、桑島隆一：高盛土の地震応答解析、1998、p p 1557～p p 1562.