

る。地震終了から津波到来までの(例えば2時間の)間に、間隙水散逸による圧密沈下によって防潮堤の沈下が懸念される場合等に、動的解析に引き続いての圧密解析が威力を発揮する。

100 ステップ分割の荷重漸増による自重解析(静的解析)を行って初期応力状態を求め、動的解析に移行する。安定解を得るため、入力波形データを線形補間により 5~10 分割することが多い。圧密解析の計算時間刻みは、0.01 秒刻みから 100 秒刻みまで、徐々に間隔を広げていくことにより、安定解を得る。

平面ひずみ要素、非線形梁要素、ギャップ要素を搭載している。減衰機構にはレイリー減衰を用いるが、推奨している係数を用いれば、初期剛性比例型の減衰となることは FLIP と同様である。時間積分にはニューマークの β 法のみが用意されている。

使用に際しての注意点として、①節点数が多くなるとバンドマトリクス機能が使用できなくなる傾向が有ること、②FLIP 同様、平面応力要素を搭載していないこと、③粘性境界が、側方自由地盤に対してダッシュポットで接続するという通常用いられるメカニズムではなく、側方固定境界に対してダッシュポットで接続するメカニズムであるので、変位が過小評価される傾向にあること、等が挙げられる。

2.3 ALID

2次元 FEM 静的解析プログラムであり、自重解析→液状化解析→圧密解析の順で、地盤の変形を求める。平面ひずみ要素、非線形梁要素、ギャップ要素に加え、平面応力要素、スプリング

要素を搭載している。また、異方性材料や剛域が取扱えるので、地層の節理の方向(積層面の方向)を解析モデルに反映させることが可能である。

使用に際しての注意点として、4辺形アインパラメトリック要素のロッキング現象を避けるため、当初からガウス・ルジャンドルの数値積分の次数を低減しているため、精度が少し落ちることである。

2.4 3つのプログラムの比較

3つのプログラムの比較の表1にまとめた。

表1 3つのプログラムの比較

	FLIP	LIQCA	ALID
最大節点数	無制限	6000	20000
最大要素数	無制限	6000	20000
モデルの奥行	任意	任意	1m 固定
剛性行列	バンドマトリックス	バンドマトリックス	スカイライン法
アインパラメトリック要素	1~3次	2×2次 (1×1次)	1次

FLIP の最大節点数、要素数無制限というのは、データの配列を共通領域(コモンブロック上の巨大な1次元配列)の上に確保するので、明白な上限は存在しないという意味である。

モデルの奥行きは単位長さ、又は構造物の奥行きとすることが多いが、例えば奥行 14m の水門の解析に際して、ALID の場合は、堰柱、門柱、杭すべてについて、14 で割った単位奥行あたりの値を用いることとなる。

モデル全体の剛性行列は疎な対称行列であり、行列の非零要素を対角要素の近くに配することにより、前進消去、後退代入両方の段階で、

演算メモリを節約でき、その結果として演算時間が短縮できる。非零要素を対角要素の近くに配するためには、上手い節点番号付けをするか、プログラムに内蔵のリナンバリングの機能を用いることになる。この、非零要素が対角要素の近くに配された全体行列をバンドマトリックスやスカイライン法によって解いていく。バンドマトリックスが非零要素の存在する領域を面としてとらえているのに対し、スカイライン法は個々の非零要素に着目した緻密なアルゴリズムと言えるが、演算時間短縮の機能に差はない。

アイソパラメトリック要素の積分次数について。アイソパラメトリック要素とは、形状関数と変位関数を同じ関数で表そうという、非常に大胆な(乱暴な?)発想から生まれたものである。少々の誤差はメッシュを細かくすることで、工学的要求には十分応えられるという FEM 独特の思い切りの良さが感じられる。例えば梁の場合では、形状

関数は当然1次式であり、変位関数は等分布荷重を受ける場合には 4 次式となり、剛性行列の要素は $4EI/L$ 等と書き下せることは、梁の初等理論で明らかなどころである。ところが4辺形要素となると、要素全体にわたってすべての変位と応力を満足する関数を定義することは不可能であり、そこでアイソパラメトリック要素が考え出された。要素の剛性行列を算出するために、仮想変位の原理を用いて要素全体にわたって面積分を行うが、積分を解析的に行うのは不可能であるので、ガウス・ルジャンドルの数値積分を行って要素の剛性行列を求める。数値積分は 2×2 次が最も精度が良く(被積分関数の次数が3次式以下の場合には、解析解と数値積分とは完全に一致する。)、 3×3 次や1次の積分は、かえって精度が落ちる。この精度の良い 2×2 次積分であるが、要素の形状と荷重の組み合わせにより、まれに、ロッキング現象、アワーグラス

表 2-1 パラメータの比較(1)

	LIQCA	FLIP	ALID
N 値	5	5	5
単位重量 ρ	18.0	18.0	18.0
粘着力 C	0	0	0
内部摩擦角 ϕf	25	25	25
変相角 ϕm	28	28	-
せん断波速度 V_s	137	137	-
圧力波速度 V_p	548	548	-
平均粒径 D_{50}	-	-	0.10
細粒分率 F_c	-	20	20
透水係数 k	$1.7e-5$	-	-
ポアソン比 ν	0.333	0.333	0.333
間隙比 e_0	0.8	-	-
間隙率 n	-	0.45	-
減衰率 h_{max}	-	0.24	-
圧縮指数 λ	0.01	-	-
膨潤指数 κ	0.0012	-	-
過圧密比 OCR^*	1.0	-	-
せん断剛性 G_0	35661	35661	-

表 2-2 パラメータの比較(2)

	LIQCA	FLIP	ALID
体積弾性係数 K_m	-	89768	-
変相応力比 M^*_m	0.909	-	-
破壊応力比 M^*_f	1.30	-	-
硬化係数 B^*_o	5500	-	-
硬化係数 B^*_f	90	-	-
硬化係数 C_f	0	-	-
液状化係数 S_1	-	0.005	-
液状化係数 w_1	-	4.326	-
液状化係数 p_1	-	0.5	-
液状化係数 p_2	-	1.042	-
液状化係数 c_1	-	1.387	-
基準ひずみ $\gamma^{D^*_r}$	0.002	-	-
基準ひずみ $\gamma^{E^*_r}$	0.01	-	-
ダイレタンシー D^*_o	0.75	-	-
ダイレタンシー n	2.0	-	-
異方性係数 C_d	2000	-	-
水の体積弾性係数 K_w	2200000	2200000	-

次固有周期 0.7 秒に減衰定数 1.5%を仮定した値に相当する。

4. 解析結果

解析モデルは、節点数 4428、要素数 4300 である。

Intel Core2 Quad CPU(2.83GHz)、メモリ 4GB の PC を用いて、解析に要した時間は各々FLIP: 3.5 時間(地震波 44 秒、計算ステップ 4410)、LIQCA:20.5 時間(地震波 44 秒、圧密解析 10000

秒(2.8 時間)、計算ステップ 22560)、ALID:18 分(静的解析、計算ステップ 101)であった。

なお、LIQCA については、前述のバンドマトリックスのバグを避けるため、リナンバリングを行わなかったことにより、計算時間が大幅に増えたものである。

各解析プログラムによる、残留変形図、過剰間隙水圧比図、代表点(堤体肩)の時刻歴応答図等を以下に示す。

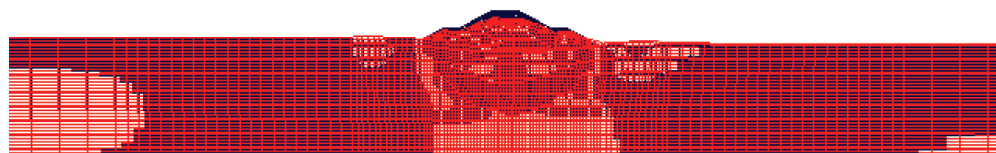


図 4 変形図(FLIP)

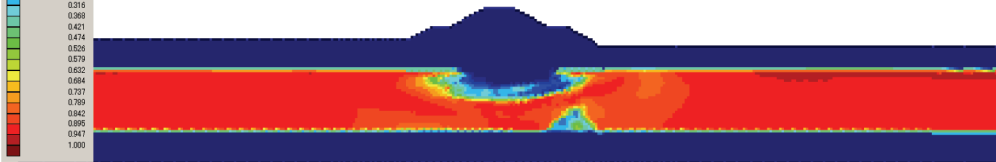


図 5 過剰間隙水圧比図(FLIP)

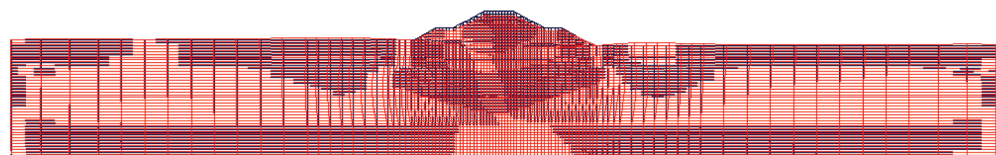


図 6 変形図(LIQCA)

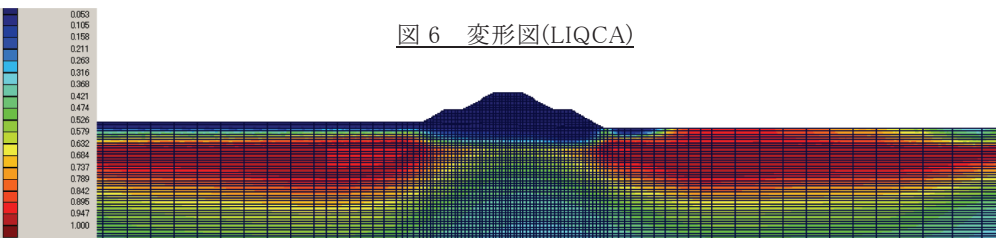


図 7 過剰間隙水圧比図(LIQCA)

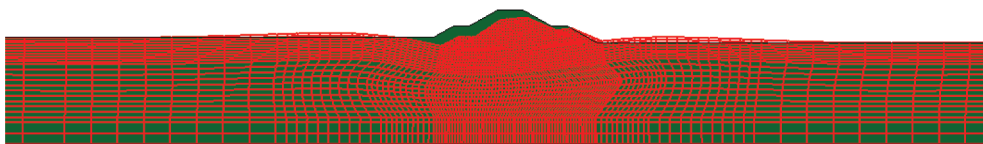


図 8 変形図(ALID)



図 9 FL値図(ALID)

5. 考察

FLIP、LIQCA、ALID の3手法による解析結果を比較すると、定性的にはよく似た応答値が得られていることが分かる。即ち、

- ・ 砂質土は液状化しやすく、粘性土は液状化しにくい。
 - ・ 堤体下部など上載荷重が作用する部分は液状化しにくい。
 - ・ 堤体沈下の結果、側方流動が生じ、法裾部分が隆起する。
- などである。

3つの手法による解析結果が、定量的によく似た応答値を与えているかということについては、少々疑問が残る。

それぞれ別個に開発されたプログラムであるので、例えば土要素の液状化に関するパラメータは、前出の表から明らかなように、共通して陽に扱うものは N 値、密度 ρ 、せん断波速度 V_s 、粘着力 C など、ほんの一部である。従って、ある拘束圧の下での液状化強度をうまくシミュレートできたパラメータセットであっても、全く同一の解析結果が得られ

ることは望むべくも無いが、今回の、堤体肩の地震終了時の沈下量が、FLIP:0.63m、LIQCA:0.62m、ALID:1.34m という結果は、よく言われる「ALID は変形が大きく求まる。」が検証された形となった。

表 4 堤体肩の沈下量(m)

	地震終了時	圧密終了時
FLIP	0.63	-
LIQCA	0.62	0.93
ALID	1.34	1.83

また、今回は解析モデルとして標準的な堤防断面面を取り上げたが、水門、防潮堤、鋼管矢板などの構造物を含む、条件の異なる解析モデルに対する、各プログラムの長所、短所の解明には、今後の更なるデータの蓄積が必要である。

<参考文献>

- 1)井合 進他「サイクリックモビリティのモデルのパラメタの同定」港湾技術研究所報告 第 29 巻 4 号
- 2)LIQCA2007 公開版マニュアル
- 3)ALID 公開版プログラム解説書