

DEM-FEM ハイブリッド解析アルゴリズムの提案

中瀬 仁¹・東 均・武田 智吉²・嶋田 昌義・志村 聡¹

¹ 東電設計株式会社 (〒110-0014 東京都台東区東上野 3-3-3)

² 東京電力株式会社 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

DEM-FEM ハイブリッド解析アルゴリズムの提案を行い、シミュレーション例を紹介した。ハイブリッドの基本方針は次の3項目である。① DEM と FEM の間でデータをやりとりするハイブリッド面を設定する。② ハイブリッド面に接する DEM 要素は、この面の変位増分分の強制変位を受け、これに対して発生した抗力を FEM の対応する接点に分配する。③ DEM および FEM の各プログラムをそれぞれ別々の CPU を用いて実行し、データの受け渡し場所は外部ファイルで行う。この方法によれば、煩雑なコーディング作業を軽減できる上、DEM と FEM とで別々にプログラムの改良を行ったり、シミュレーションの初期状態を作成することが可能である。シミュレーションは振動台実験をかなりよく再現した。

Key words: numerical simulation, strong earthquake, sea wall, caisson

1. はじめに

粒状体の挙動や、大変形問題に対する DEM(個別要素法)の適用性はもはや周知のものであると言ってよい。一方、今日の FEM(有限要素法)の発展は改めて述べるまでもない。そこで、問題となる対象領域が例えば防波護岸における消波工のような特殊な形態をしたブロックからなる場合、この領域を DEM で解析し他の領域を FEM で解析するという考え方は自然な発想であろう。本研究では DEM と FEM を別々の CPU で実行しつつ、両者が相互に情報をやりとりしながら解析を進めることのできる DEM-FEM ハイブリッド解析アルゴリズムを提案し、解析の一例を紹介する。

2. 解析条件と解析ケース

ハイブリッドの基本方針は次のように定めた。

- ① DEM と FEM の間でデータをやりとりするハイブリッド面を設定する。
- ② ハイブリッド面に接する DEM 要素は、この面の変位増分分の強制変位を受け、これに対して発生した抗力を FEM の対応する接点に分配する。
- ③ DEM および FEM の各プログラムをそれぞれ

別々の CPU を用いて実行し、ハイブリッド面のデータ(応力、変位)を受け渡す場所は外部ファイルとする。

基本方針①のハイブリッド面とは、端的に言えば両解析領域の境界面のことである。

力と変位のやりとりは、基本方針②の逆、すなわち DEM から変位、FEM から応力を受け取る方法でも両者をハイブリッドすることはできるが、刻々と変化するハイブリッド面に働く応力と、これに比べてゆっくりした変動になるハイブリッド面変位の時系列的特徴から考えて、計算の時間間隔が短い DEM 側で応力を計算し、計算の時間間隔の長い FEM 側で変位を計算することが合理的である。

DEM のプログラムと FEM のプログラムとでは、内部のロジックが異なるので、これら2つのプログラムを1本のプログラムにまとめる作業はかなり煩雑である。基本方針③に示した方法によればこれ可以避免することができる上、次のような利点がある。

- 1) DEM と FEM について、それぞれ別々にプログラムの改良を行ったり、シミュレーションの初期状態を作成したりすることができる。
- 2) お互いにプログラムを別のバージョンと簡単に置き換えることができる。

さて、上記基本方針によるハイブリッド化にあたっては次の点に注意する必要がある。

①DEM と FEM とで計算時間間隔が異なる。

(DEM:dt=10⁻⁶ 秒、FEM:dt=10⁻³ 秒)、

②データの受け渡しを間違いなく行う必要がある。

FEM の時間間隔を小さくし DEM 側に合わせることは可能であるが、十分な精度で計算されているものを、さらに 1/1,000 もの時間間隔で計算することは、計算時間が膨大となり合理的でない。そこでこの時間間隔の違いについては、ハイブリッドのアルゴリズムの中で調整することにした。

ハイブリッド面のデータは、基本方針で示したように外部ファイルで受け渡すのでこのファイルにアクセスする際、間違ったデータ(自分が相手に渡すべきデータ)を受け取らないように工夫する必要がある。図-1 にハイブリッドのアルゴリズムを示す。

図の二重実線枠は、外部ファイルに対するアクセ

スであり、二重点線枠はアルゴリズムがワンスルーする間の外部ファイルの内容を示す。外部ファイルの'1'は、そのファイルのデータが DEM の書き込んだ応力であることを示し、2'は FEM の書き込んだ変位増分であることを示す。

FEM における 1 ステップ分を DEM では、1,000 ステップかけて計算するので、FEM から受け取った変位をそのまま用いたのでは、応力のジャンプが生じかねない。そこで DEM では FEM の計算が、解析空間の時間軸では先行していると考え、前のデータとの線形補間をとって計算している。

なお、X 秒間プロセスを止めるコマンド(Sleep(X))を実行し、相手に渡すべきデータを出力した後、次に受け取るデータを相手が計算する間、無駄に cpu を占有しない配慮をしている。

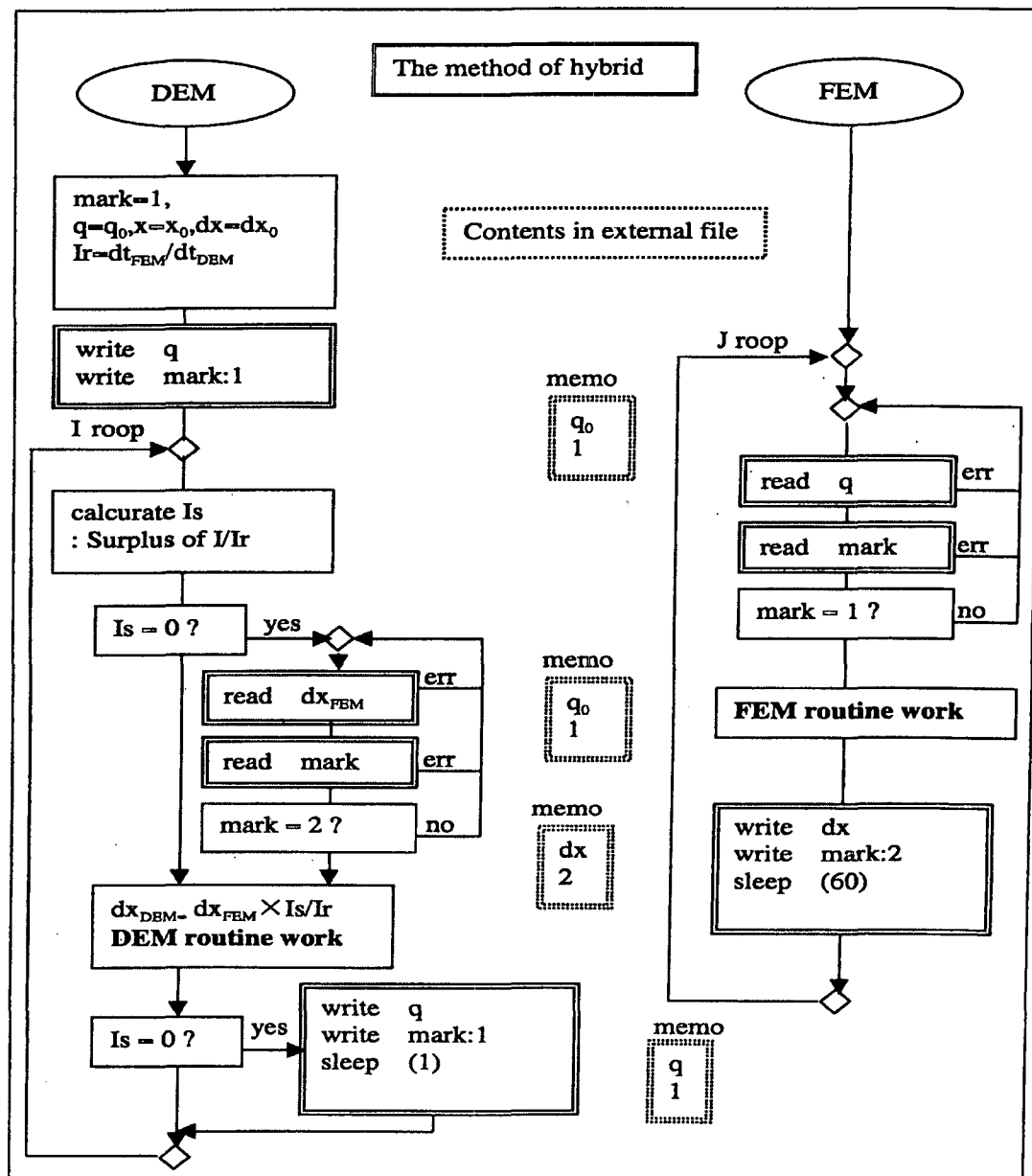


図-1 DEM-FEM ハイブリッドのアルゴリズム

3. シミュレーション例

ハイブリッド解析の対象とした実験ケース²⁾を図-2に示す。実験では、ミニチュア消波ブロック、ケーソン、背後地盤からなる乾燥状態の防波護岸模型に対して2Hz、500galの正弦波形を5波入力した。実験模型に対する解析モデルを図-3に示す。ハイブリッド面はケーソン海側の面に設定し、消波工を3次元DEM、ケーソンおよび埋立地盤をFEMでモデル化する。ミニチュアテトラポッドのモデル化には、拡張個別要素法^{3),4)}を用いている。

図-4にシミュレーション結果を示す。加振に伴い、ケーソンが海側へ移動し、消波工が崩れる様子が再現できている。

図-5に実験とシミュレーションを比較する。シミュレーションにおけるケーソン変位および消波工圧とは、ハイブリッド面で受け渡す変位および抗力に対応する。

(d)の入力に対して、ケーソンは、(a)に示すように両者共に段階的に海側へのみ移動する。ケーソンに働く消波工圧は実験よりシミュレーションが全体的に大きく(b)、ケーソンの移動量が実験より小さいことに対応している。

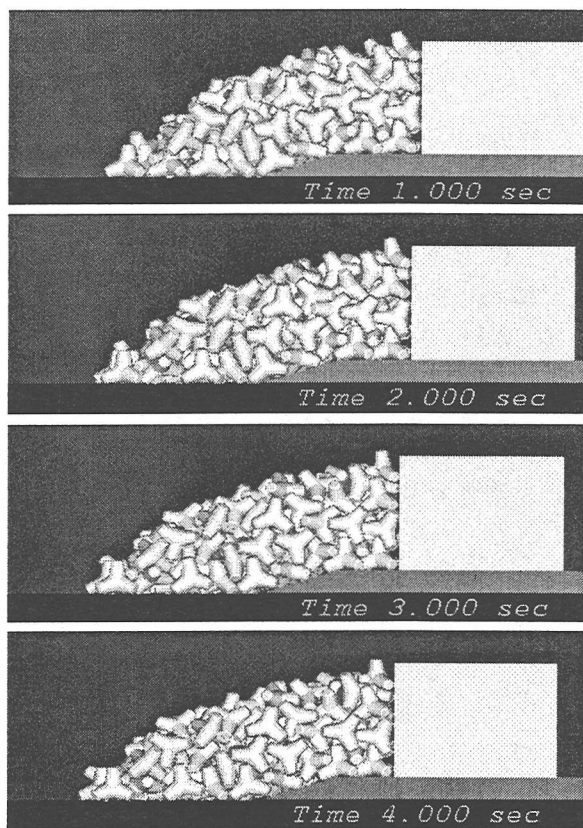


図-4 ケーソンの移動と消波工の変形(シミュレーション)

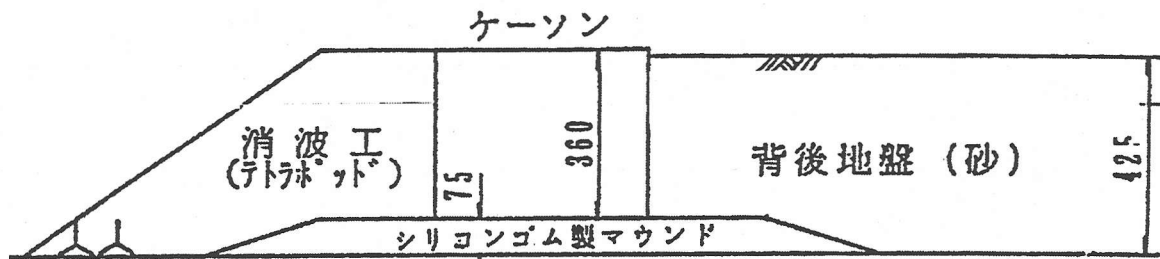
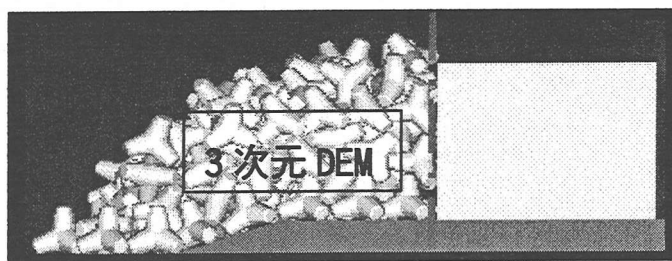


図-2 プロトタイプ実験ケース

(単位：mm)



消波工モデル

消波工を三次元 DEM でモデル化する。消波ブロックは球要素を連結して表す。互いの識別を容易にするため、消波ブロックモデルは、実物の形状に置き換えて表示した。

ハイブリッド面

2次元 FEM

ケーソンおよび背後地盤のモデル
ケーソンおよび背後地盤は二次元 FEM でモデル化した。本シミュレーションでは、乾燥状態を対象としたが、有効応力解析をハイブリッドする事もできる。

図-3 解析モデルの概念

(c)のケーソン加速度波形のマイナス側でピークが平たくなっているのは、この時、両者共にケーソンが滑っていることを示している。

4. おわりに

DEM と FEM を別々の CPU で実行しつつ、両者が相互に情報をやりとりしながら解析を進めることのできる DEM-FEM ハイブリッド解析アルゴリズムの提案を行った。シミュレーションスタディを行った結果、実験を良く再現することが解った。この結果、アルゴリズムは問題なく機能していることが解った。個別要素法のプログラムは、京都大学澤田純

男氏の DEMS を改良して用いた。

参考文献

- 1)金谷守他：防波護岸の地震時挙動に関する研究・その3, 第24回地震工学研究発表会論文集,pp713-716,1997年
- 2)安田登他：護岸構造物の地震時挙動に関する実験的研究(その1)土木学会第47回年次学術講演会講演概要集,第1部,pp.160-161,1992年
- 3)目黒公郎：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析,地震研究所彙報,Vol.63,pp.409-468,1988年
- 4)中瀬仁他：拡張個別要素法による三次元消波工モデルを用いた地震応答シミュレーション,土木学会第51回年次学術講演会概要集,第1部,pp.650-651,1996年

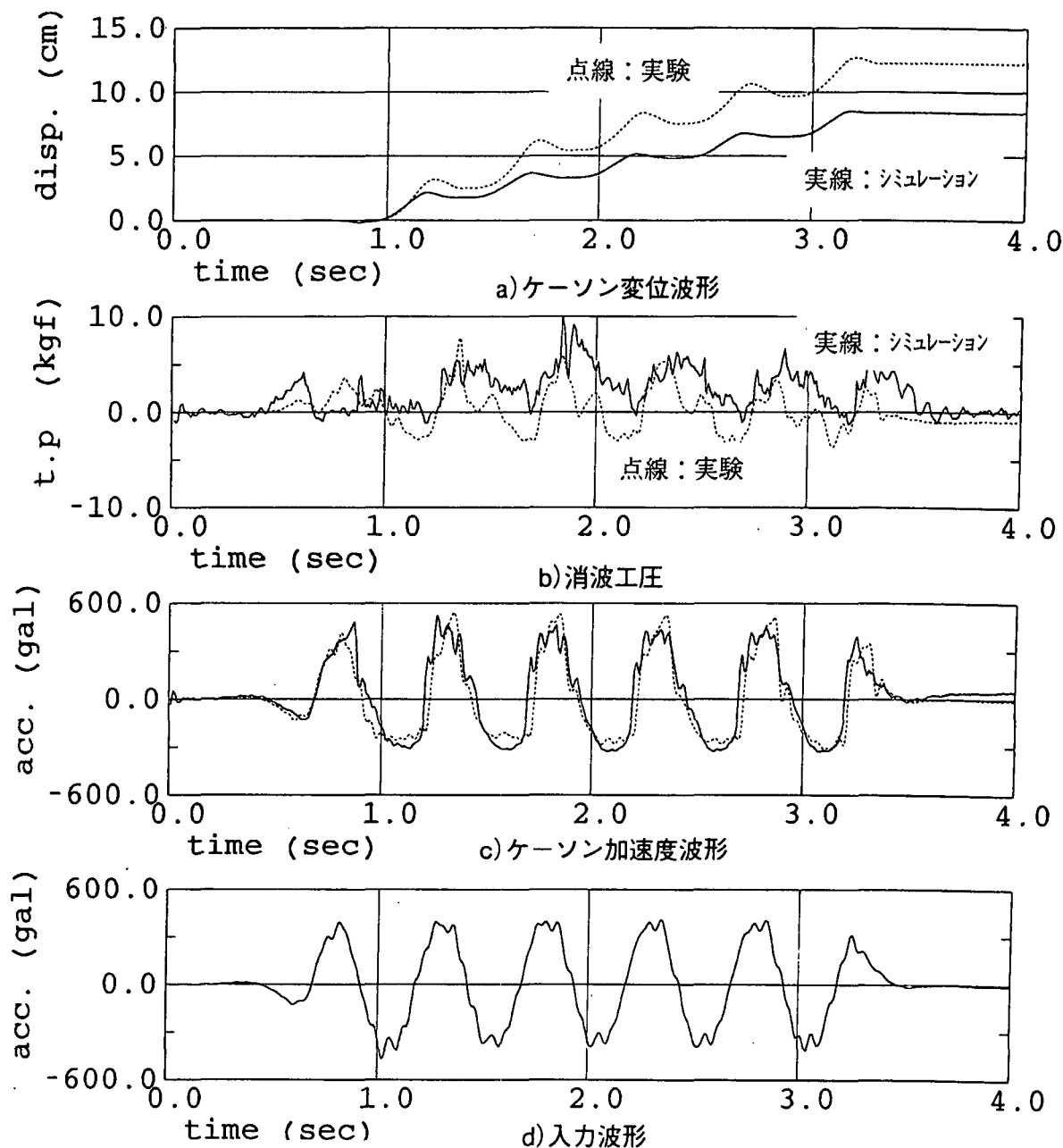


図-5 シミュレーション結果と実験結果の比較