

大規模・高速化非線形 FEM解析ソフト 「FINAL-GEO」

Large Scale and High Speed Calculation Nonlinear FEM Analysis Software “FINAL-GEO”

米澤 健次
穴吹 拓也
江尻 讓嗣

Kenji Yonezawa
Takuya Anabuki
Joji Ejiri

1. はじめに

近年、構造物の設計体系が性能照査型に移行し、高精度な解析技術が求められている。特に、高精度でかつ大規模な解析モデルを用いた非線形 FEM解析技術のニーズが高まっている。例えば、原子力分野では、原子力施設全体を詳細にモデル化した地震応答解析による安全性評価、一般建築・土木分野においては、建物・構造物と地盤の3次元連成効果を詳細に考慮した解析が求められている。

今までは、計算機や解析ソフトの計算容量及び計算速度の制限で、例えば2次元解析など、簡略したモデルによる解析が行われていた。そのため、考慮すべき現象を表現できず、多くの仮定を用いることから、結果に対して大きな安全率を見込まざるを得ない現状であった。

そこで、当社開発ソフトの「FINAL」の機能を導入した大規模・高速化非線形 FEM解析ソフト「FINAL-GEO」を開発した。

2. FINALの概要

当社の非線形有限要素解析ソフト FINAL は、原子力関連構造物のように面内せん断力を受ける RC 壁体の解析精度の向上を目指して、開発が始まった。当社で実施した一連の RC 平板実験に基づき、独自の RC 材料構成則を誘導したのを皮切りに、その後、2次元解析において RC 部材の正負繰返し荷重に対する解析技術の開発を経て、非線形の時刻歴応答解析を可能にした。さらに、適用範囲を3次元に拡大するため、3軸応力下のコンクリート材料構成則の研究を行い、現在では、コンクリート系構造物の非線形挙動に対する、3次元モデルによる正負繰返し載荷解析や時刻歴応答解析が可能である¹⁾。この FINAL の解析精度については、国際解析コンペで優勝するなど高い評価を得ている^{2) 3)}。

3. 大規模・高速化のメリット

従来、地中構造物の耐震安全性を評価する場合、解析規模及び計算時間の制約から、さまざまな仮定を用いて解析を行っていた。例えば、Fig.1に示すように、構造物を簡易にモデル化した2次元モデルを用いて地盤の時刻歴応答解析を行い、その結果から構造物に作用する力を求めて、3次元でモデル化した構造物の解析を行っていた。この解析方法においては、まず、地盤の時刻歴応答解析から得られた構造物に

作用する動的な力を静的な力に、様々な仮定に基づいて置き換える。また、地盤の解析には構造物の三次元的応答が考慮されておらず、実現象が適切に考慮されていない。このように、解析においては様々な仮定が必要となり、大きな安全率を見込んで構造物の安全性評価がなされていた。そこで、地盤と構造物のすべてを詳細にモデル化できれば、精度良く実現象を再現・予測だけでなく、無駄を省いた合理的な設計・評価が可能になる。

4. FINAL-GEOの特徴及び計算速度

FINAL と FINAL-GEO の違いは、主に連立方程式の解法にある。FINAL ではガウスの消去法に属するスカイライン法と呼ばれる直接法を採用しているが、FINAL-GEO では、反復法に属する共役勾配法（共役傾斜法、CG法）を用いている。直接法と比較して反復法の利点は、行列を記憶するための容量が少なく抑えられるため、大規模な連立方程式の解法を可能にする点にある。

Table1に FINAL Version11 と FINAL-GEOを用いた場合における、解析モデルの規模に対する計算時間の比較を示す。この比較は、Fig.2に示すように RC 造の片持ち柱を模擬した非線形解析で、要素分割の粗密を変化させて比較した。Table1 より、解析の規模が大きくなるほど、

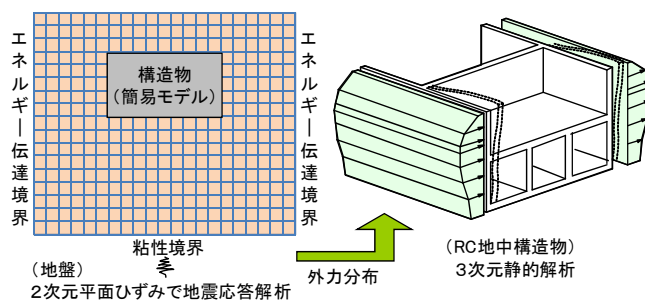


Fig. 1 従来の解析手法
Analysis Method as in the past

Table 1 計算速度の比較
Comparison of Calculation Speed

	モデル概要				1STEP当たりの計算時間 (単位: 秒)		
	総節点数	総自由度数	総要素数	STEP数	Final-GEO	Final V11	速度向上率
モデル1	2511	7290	1920	100	0.28	0.69	2.5
モデル2	10000	28800	8664	100	2.93	53.34	18.2
モデル3	27000	78300	24389	100	10.27	752.02	73.3
モデル4	50000	142500	45619	100	22.95	不可能	
モデル5	250000	742500	237699	100	235.32	不可能	

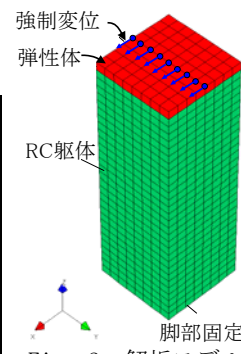


Fig. 2 解析モデル
Analysis Model

両者を比較して計算速度の向上率が上がり、FINAL-GEOは、約80,000自由度の解析において、従来のFINALに比べて約70倍の計算速度を示すことがわかる。FINALでこれまでに扱った最大規模の解析モデル(約45,000節点、12万自由度)では、1ステップの解析に約90分を要していた。一方、FINAL-GEOでは約170,000節点、48万自由度の超大規模モデルを1ステップあたり約1.3分で計算でき、飛躍的な高速化・大規模化を図れた。なお、解析精度に関しては、FINALの結果と比較して、直接法と殆ど差異がない結果が得られることを確認している。

5. 解析例

2件の解析例を示す。Fig.3に示すモデル1は、地中構造物で立体交差したRC造のトンネルを模擬し、Fig.4に示すモデル2は地中のRC造の杭基礎を対象とした遠心振動台実験を模擬したものである。両者ともにRC躯体・地盤の材料非線形を考慮した解析である。モデル1は約20万節点、66万自由度、モデル2は約17万節点、48万自由度の超大規模モデルであるが、1ステップ当

りの計算時間は1.7分~2.2分程度であり、実用的な計算時間で解析が可能になったことがわかる。

6. まとめ

FINALの材料構成則を組み込んだ大規模・高速化非線形FEM解析ソフト「FINAL-GEO」を紹介した。これにより、数十万自由度の超大規模モデルの精度の良い非線形解析が実用的な計算速度で可能になった。

参考文献

- 1) 米澤健次, 長沼一洋: 3次元非線形FEM解析によるRC構造物の地震時挙動シミュレーション, 大林組技術研究所報 No.71, (2007)
- 2) Anabuki,T,et al.: Failure Prediction of Full Scale Bridge Pier on 3D Shaking Table Test, IABSE 34th Symposium, A-270, (2010)
- 3) 米澤健次, 田中浩一, 穴吹拓也, 長沼一洋: 正負繰返し及び動的荷重を受けるRC部材の3次元FEM解析の精度, 大林組技術研究所報 No.72, (2008)

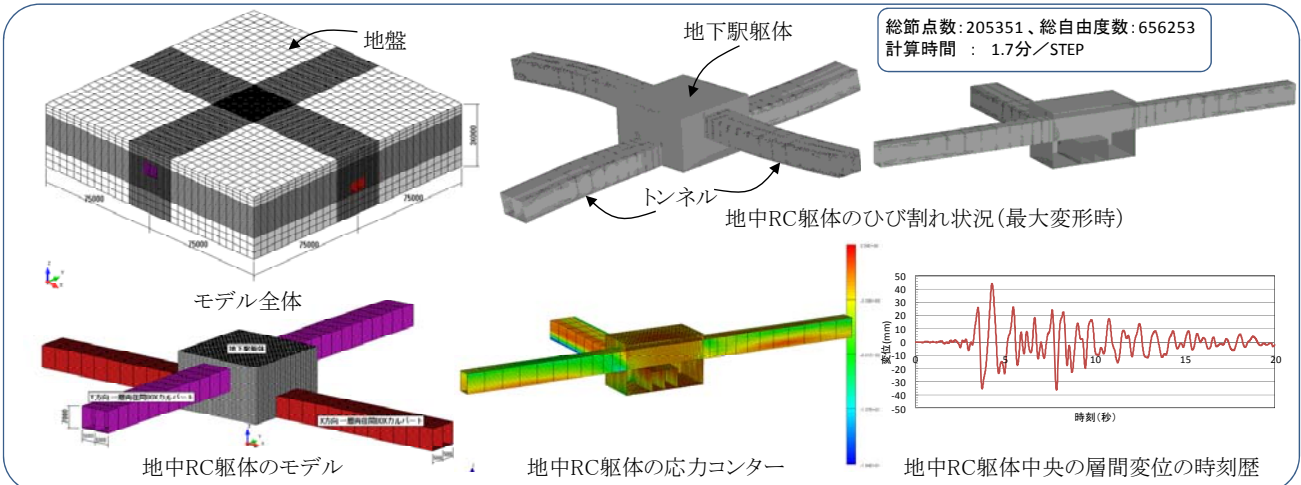


Fig. 3 地中RCトンネル構造物の解析モデル及び解析結果例 (モデル1)
Analysis Model and Output Example of Large Scale Model Analysis (Model 1)

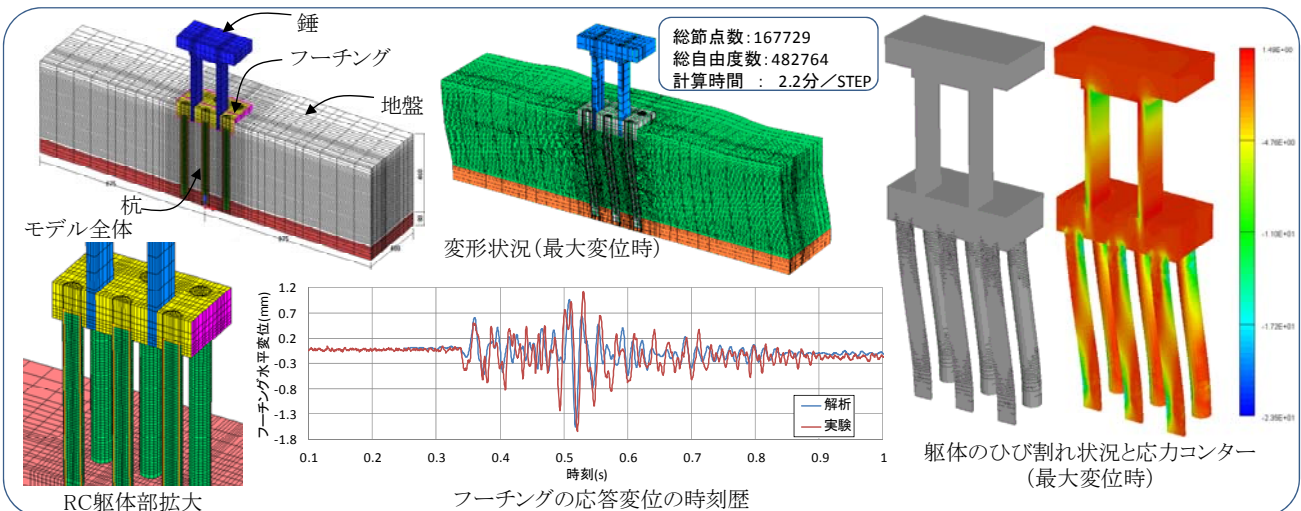


Fig. 4 RC杭基礎と地盤の連成解析 (モデル2) のモデル及び解析結果例
Analysis Model and Output Example of Large Scale Model Analysis (Model 2)