

# 弾性波伝播解析のための3次元有限要素法における 要素寸法および時間増分の設定方法の検討

Proposal for Element Size and Time Increment Selection Guideline  
by 3-D Finite Element Method for Elastic Waves propagation Analysis

原子力安全システム研究所

福井大学大学院工学研究科 石田 仁志 Hitoshi ISHIDA

福井大学大学院工学研究科 飯井 俊行 Toshiyuki MESHII Member

This paper proposes a guideline for selection of element size and time increment by 3-D finite element method, which is applied to elastic wave propagation analysis for a long distance of a large structure. A element size and a time increment is determined by quantitative evaluation of strain, which must be 0 on the analysis model with a uniform motion, caused by spatial and time discretization.

**Keywords:** Elastic Waves, Finite Element Method, Element Size, Time Increment, Strain, Accuracy, Error

## 1. 緒 言

原子力発電所には、直径約40mの原子炉格納容器、連続する構造物として扱う場合にその長さが数10m規模になる配管系統など、種々の大型構造物がある。このような大型構造物の超音波を利用した非破壊検査には、検査部位への接近性の制限などから、限られた位置からの遠隔検査が必要となる。供用期間中検査としてなされている超音波探傷試験は、溶接部という局所的な部位を対象としたものが主であり、これらに用いられるシステムの大規模構造物への適用は必ずしも適切ではないと考えられる。長距離範囲における超音波の伝播特性において材料による減衰が支配的となるためである。

そこで、大型構造物に適用可能なシステムへの要求条件を明らかにするために、長距離範囲の材料減衰に対応する、入力すべき超音波信号強度を定量的に評価することを考えた。しかし、実規模サイズの試験体等による実験評価は容易ではないことから、有限要素法を用いて解析的に評価することとした。

大規模な空間と時間を対象として、減衰の適切な評価が可能な解析誤差の少ない伝播解析とするためには、時間増分と要素寸法の適切な選定による、解の収束の確認が必要である。

これまで多くの弾性波の有限要素解析事例において、金属材料や地盤、超音波や地震波など、多様な伝播媒体と周波数域を対象に、それぞれの評価対象に応じて、解析空間における要素分割、解析時間における時間増分が

選定されている。

Harumiは、鋼材の2次元解析に対して、要素寸法として対象とする弾性波の波長の1/15に相当する寸法を選定し、要素寸法と弾性波の伝播速度から周期の1/15に相当する時間増分を選定しているのを始め、黒木は、鋼材3次元解析を、弾性波の挙動を扱う上で十分細かい値として1/40波長で、三木は、鋼材の2次元解析を、弾性波の挙動を扱う上で十分細かい値として1/12波長、1/20周期で、劉は、同じく鋼材の2次元解析を、波の特性を表すのに十分小さいとする1/13波長および入射波形を十分表わせるとする1/36周期で解析を行った。また、Mirkhaniは、鋼材の2次元解析において、Lordは、Al材の2次元解析において、Arunは、グラファイト/エポキシ樹脂中の2次元解析において、弾性波の波長または周期を基準に選定している。また、Guanは、Al材2次元解析において、精度良い超音波伝播解析に適した時間増分として絶対値で選定している。

一方、地盤等における地震波の伝播等に対して、大槻は、地震波の2次元解析において、波長に対して1/10の要素寸法を選定し、地震波の伝播速度とから1/12周期を時間増分として選定している。Juは、地盤を対象とした2次元および3次元解析において、Zhangは地震波の2次元解析において、同様の方法で選定を行っている。

さらに、伊藤は、Al材中の2次元解析において、解の収束性と計算効率を考慮したとして、要素寸法として0.06波長を、要素寸法を伝播する時間の0.3を時間増分として選定している。その他、Moserによる鋼材中の弾性波の2次元解析、Galdosによる鋼材中の弾性波の2次元

解析, 吉川による鋼材中の弾性波の2次元解析において, 解析結果の収束により要素寸法または時間増分の選定の例がある。

以上のように, 解の安定性, 解析結果の収束, 弾性波の性状の表現性などから, 多くの事例で解析評価の目的に沿った最適な条件がそれぞれ選定されたと考えられる。しかし, 扱われている弾性波の波長に対する伝播距離の比は数 100 程度であり, 本研究が対象とするような大規模構造物においては, 扱う周波数によっては, さらに数 1000 の比となる。さらに, 長距離域を対象とする解析を適切に行うために, 解の収束が得られるような要素寸法と時間増分を選定する方法を検討した。誤差を評価する際に解析結果の収束先としての解が明らかな等速直線運動に相当する変位を解析モデルに与え解析するものである。物体の等速直線運動においては本来生じることがなく, 超音波受信信号としての計測対象であるひずみを定量的に評価することによって, 要素寸法と時間増分を選定する方法である。

以下, 提案する方法とこれによる要素寸法と時間増分の選定を示し, 選定された条件による弾性波伝播解析例によってその有用性を示す。

## 2. 時間増分および要素寸法選定方法の提案

超音波は, 超音波探触子内部の圧電体からなる振動子により送受信される。圧電体を用いた超音波探触子により得られる受信信号は, 材料における探触子を設置した部位におけるひずみを計測しているものと考えられることができる。したがって, 弾性波伝播解析における時間増分と要素寸法の選定においては, ひずみを評価することとした。

弾性波の伝播を対象とした動的解析においては, 適切な要素分割と時間増分の設定が必要である。要素および時間増分を小さくしていった場合に得られる真の解あるいは理論解との差異により, 評価選定することが考えられるが, 真の解または理論解が必ずしもあらかじめ分かっているわけではない。

そこで, 解が明らかな問題を解析し, 得られた解を評価することで, 要素寸法と時間増分の選定を試みることにした。解が明らかな問題として, 等速直線運動を考えた。解析対象物が等速直線運動をなすような変位を与え, 解析結果を評価するものである。

連続体の等速直線運動は, その物体内のすべてにおい

て, かつ, あらゆる時間において, 変位が同じであることである。このことから, 物体内のすべてにおいて, ひずみは 0 であり, 時間によっても変化せず一定となる。これを解析評価する際に注意すべきことは, 実際のこれらの現象が, 位置および時間において連続的に生じていることである。

連続体の等速直線運動の解析評価においては, 連続体である物体を分割した解析要素の節点毎に, 時間増分の時刻毎に, 解を求めることとなる。物体に等速直線運動をなそうと, 時間増分毎の時刻に, 時間増分に一定増加する変位が入力として与えられる。すなわち, Fig.1 に示すように, 時間において不連続に変位がステップ状に変化する。本来連続的に増加する変位とステップ状に変化し時間増分において一定の変位との差が誤差となり, これが擾乱となって現れる。このことによって, 本来生じ得ないひずみが, 解析結果に生じる。

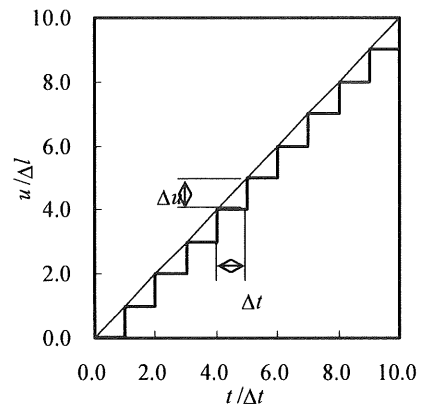


Fig.1 Displacement with time increment for uniform motion

さらに, 連続体において連続的に生じる現象であっても, 要素を立方体 8 節点とする 1 次要素で分割する場合には, 伝播方向に変位を入力した際の伝播方向におけるひずみは, 要素内の伝播方向において一定となる。このことは, 要素内で伝播方向に隣接する節点において, 変位は異なっても, ひずみは同じとなる。このことは, 伝播方向における要素分割によって, 変位とひずみの伝播に差異が生じることを示している。

選定方法の特徴は, その解が明らかな等速直線運動を対象とし, 時間および空間の離散化によって生じる誤差に対して, 等速直線運動においては本来生じることのないひずみを指標としたことである。

参考文献 省略