

Convolutional PML を適用した FEM 地盤モデルの表面波入力に対する影響評価

五洋建設(株)	技術研究所	学生会員	宇野 州彦
日本大学	理工学部	正 会 員	○塩尻 弘雄
日本大学大学院	理工学研究科		ラヘマン パレハテ
五洋建設(株)	技術研究所	正 会 員	三藤 正明

1. はじめに

近年、地震応答解析においては、地盤一構造物系の一体解析を行う機会が増えている。このような FEM 解析は、側方・底面境界で発生する反射波の影響により応答の精度が低下することを防ぐため、一般に地盤のモデル化に大規模な領域が必要であり、結果として多量の計算量を必要とする。これはソフトウェアの面で計算量低減のアルゴリズム開発を行い、モデル化領域の低減等を行う必要があると考えられる。そこで、著者らはこれまでに PML(Perfectly Matched Layer)および非線形問題まで適用可能と考えられる Convolutional PML を境界条件として提案し^{例え1)2)}、モデル化領域の低減に有効であることを示してきた。PML は人工的に設定した層であり、インピーダンスを解析対象領域と等しく、かつ内部の波動を減衰させる働きを持つものである。PML を用いた数値解法では、Basu らが、変数非分離型の陰解法での適用を行っているが^{例え3)}、Basu らの定式化は、周波数領域解析では係数マトリックスは対称となるが、時間領域解析では非対称となる。通常の解析コードを考えると、時間領域においても対称化することが望まれるため、著者らはこれまでに時間領域における FEM 解析での係数マトリックスの対称化を行い、適用性向上を図ってきた¹⁾²⁾。また、速度比例型の減衰を考慮できるように改良し⁴⁾、さらにこれまで地震波入力が難しかった点においても、波形の積分法等の問題点を整理した上で、地震動を入力した場合においても有効であることを示し、実用性を向上させてきた⁵⁾。また文献⁶⁾では、波形の入力方式や PML のパラメータ設定が解析精度に及ぼす影響に関しても言及している。

今回は、地盤の境界条件設定でこれまで課題とされてきた、表面波の解析における Convolutional PML の有効性について検討する。表面波は、波の進行方向が底面と並行であるが、進行速度が実体波と異なるため、一般に用いられる境界条件では精度が悪くなってしまう。これまで表面波解析においては有効な境界条件は示されておらず、解析領域を大きく確保することが考えられていたが、このような解析に対しても Convolutional PML を用いることで、解析領域を小さくしても精度の向上が図れることを示す。

2. 解析モデルと解析条件

PML および Convolutional PML の定式化に関しては、著者らはこれまでの研究¹⁾²⁾⁴⁾⁶⁾において説明しているため、そちらを参照されるとして、ここでは省略する。

表面波に関しては、例えば粘性ダンパーを用いた場合には、底面および側方での吸収性能が悪く、精度が低下すると考えられている。これは波の進行方向が底面と並行に進行すること、またその進行速度が P 波と異なることが挙げられる。

図-1 に解析モデルを示す。地盤の物性は、密度 2000kg/m^3 、ラメ定数 $G=600\text{MPa}$ 、 $\lambda=300\text{MPa}$ で、モデルは深さ 400m で片幅が 3000m (対称形より半分) とした。PML の場合には下部の 100m と端部の 100m が PML 領域で、粘性ダンパーを用いる場合には、その外部にダンパーと切り欠き力を加えている。PML 領域であった場所は FEM 領域となる。今回は地盤モデルのモデル化領域による検討を行うため、これを Large モデルとし、FEM 領域の鉛直方向長さを約 $3/4$ 程度と狭くしたものを Small モデルとする。この地盤表面に大きさ 1 の鉛直の Ricker wavelet (卓越周期 1 秒) の力を加えた。

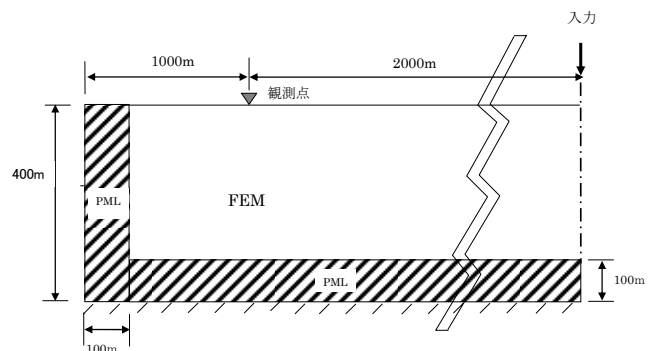


図-1 解析モデル

3. 表面波の検証

まず、今回表面波として検討しているものが、実体波ではなく表面波であることを示す必要がある。図-2 には、入力地点より 2000m の地点の、深度方向にそれぞれ、 0m 、 100m 、 200m 、 300m における鉛直変位を示したものである。実体波であ

キーワード FEM 解析, 境界条件, Perfectly Matched Layer, Convolutional PML, 表面波

連絡先 〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 五洋建設株式会社 技術研究所 TEL 0287-39-2109

れば、深度方向に現れる波形の発生時刻は異なるはずであるが、この図より同時に鉛直変位が現れていることが明らかである。

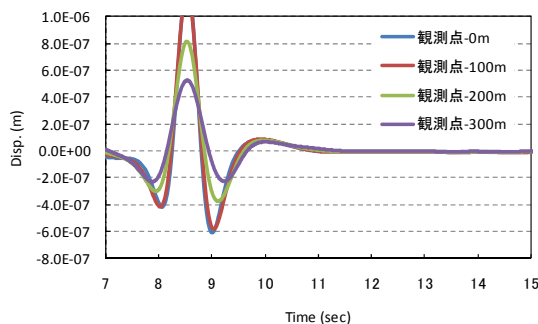


図-2 深度方向における鉛直変位の比較

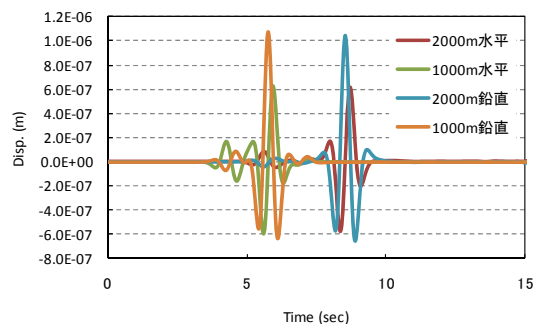


図-3 水平および鉛直変位による比較

入力地点よりそれぞれ 1000m, 2000m 水平に進んだ地点における表面の水平および鉛直の時刻歴波形である。この図より、それぞれの地点における水平および鉛直波形がほぼ同時に発生していること、また水平に進むに従って振幅が減少するが、その減少量が $1/\sqrt{r}$ (r : 入力地点からの水平距離) よりも少ないことから、実体波ではなく表面波であると言える。

以上のことから、今回の検討波形が表面波であることが示された。

4. 解析結果

比較対象とする境界条件は、粘性境界に切り欠き力を考慮したモデル、PMLを設定したモデル、Convolutional PMLを設定したモデルの以上3ケースにより検討を行う。図-4～図-6に鉛直方向の応答変位時刻歴を示す。これは入力地点から2000mの地点の表面の鉛直変位である。なお、結果には応答の精度を評価する必要があるため、解析領域を相当大きくとったモデル (LARGEモデルとする) を正解とし、結果に重ねて表示する。結果からConvolutional PMLがモデル化領域の影響を受けずに精度の良い結果が得られていると推察される。また、LARGEモデルの応答とも概ね一致している。PMLを設定したモデルや粘性境界に切り欠き力を考慮したモデルは、Convolutional PMLに比べ、精度の悪い結果となった。以上のことより、表面波に関する解析においても、Convolutional PMLを使用することで、解析精度が向上することが明らかとなった。

5. まとめ

検討結果より、Convolutional PML モデルがモデル化領域の影響を受けず、精度の良い結果となることが示された。

【参考文献】

- 1)Kunihiko Uno, Hiroo Shiojiri, Kazuhiro Kawaguchi and Masataka Nakamura : Analytical Method, Modeling and Boundary Condition for the Response Analysis with Nonlinear Soil-Structure Interaction, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, No. 14-0156, 2008.10
- 2)宇野, 塩尻, 川口, 仲村: 地盤の境界条件や解析手法が非線形動的相互作用を考慮した構造物の地震時挙動に与える影響, 地震工学論文集, 第 30 巻, pp.222-235, 2010.3
- 3)Basu U, Chopra A. K: “ Perfectly matched layers for time harmonic elastodynamics of unbounded domains.”, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.192, pp.1337-1375, 2003.
- 4)宇野, 塩尻: 速度減衰機構を考慮した Convolutional PML の非線形 FEM 解析への適用, 応用力学論文集, Vol.13, pp.1079-1089, 2010.8
- 5)宇野, 塩尻: Convolutional PML を適用した地盤—構造物系の地震時挙動に与える入力地震動の影響評価, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, pp.2438-2445, 2010.
- 6)宇野, 塩尻, 李: PML を用いた FEM 地盤モデルの動的挙動特性 —地震動入力による応答と表面波に対する影響評価—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) [特] 地震工学論文集, Vol.66, No.1, pp.95-104, 2010.

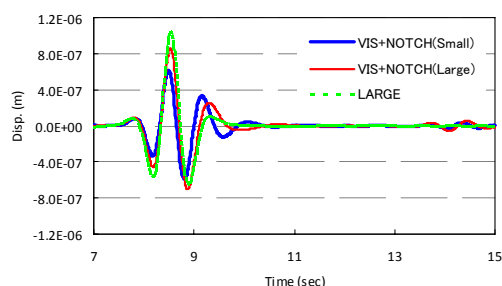


図-4 応答変位時刻歴 (粘性+切り欠き力)

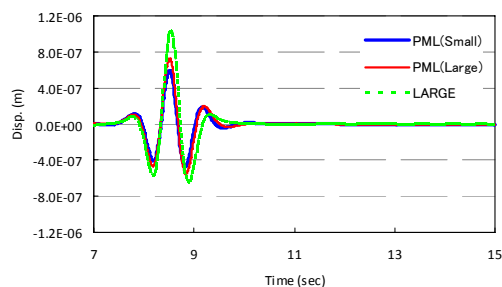


図-5 応答変位時刻歴 (PML)

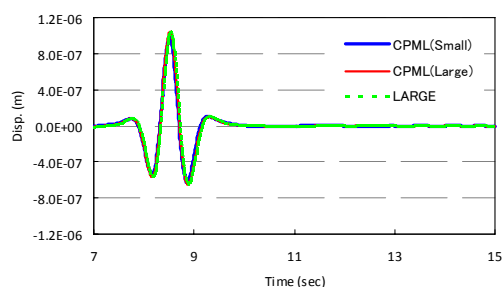


図-6 応答変位時刻歴 (Convolutional PML)