

AEトモグラフィ法による地盤の進行性破壊評価手法の検討

日本大学 正会員 ○中村 勝哉
日本大学 正会員 小田 憲一

日本大学 正会員 小林 義和
日本大学 学生会員 池端 宏太

1. 背景・目的

地盤の安定性検討において、進行性破壊を考慮できれば支持力の推定等の更なる精緻化が期待できる。しかし、進行性破壊の観測には課題があり、Digital Image Correlation method, または、X 線による CT 技術を応用した観測例¹⁾²⁾があるが、いずれの手法も地盤内部で起こる破壊を進行過程が明瞭になる時間間隔で把握することは容易ではない。

上記の課題を解決するため、Acoustic Emission（以下、「AE」と称する.）という対象の微小な変形または破壊により発生する弾性波を用いて、破壊の進行過程を捉える試みが行われており、飽和土に対して破壊の位置を標定した例³⁾がある。しかし、破壊の把握に AE を用いた場合、対象の弾性波速度が等方であると仮定しているため、対象の弾性波分布の不均一性等の影響により、弾性波の屈折及び回折が起こり、破壊位置の標定が困難な場合があった。本稿では、破壊位置を標定する際に弾性波の屈折及び回折を考慮するため、弾性波速度分布の不均一性を考慮した破線追跡法と AE 位置標定法を AE トモグラフィ法に組み込み、弾性波分布の不均一性を考慮した手法を提案し、弾性波速度分布が異なるモデルを用いた数値実験より提案法の妥当性検討を行った。

2. AEを用いた破壊位置の標定

2.1 AEトモグラフィ法（提案法）

AE トモグラフィ法とは、対象に設置した AE センサより得られた AE の受信時刻のみを用いて弾性波分布を同定する手法である。また、その過程で AE の発生位置と時刻が求められるため破壊の進行過程を可視化することが期待できる。

まず、AE 発生位置を標定するため、対象を任意の大きさにセル分割し、各節点を AE 発生位置の候補点とする。次いで、セルに初期弾性波速度を入力し、候補点までの AE の発信時刻を求める。発信時刻 P 、センサ受信時刻 A 、理論走時 T 、センサ番号 i 、候補点番号 j とし発信時刻を求める式を式①に示す。

$$P_{ij} = A_i - T_{ij} \quad \text{式①}$$

求められた発信時刻は、各候補点でセンサ数だけ存在する。弾性波分布及び波線が解析対象と一致していれば、AE 発生位置を示す点で発信時刻の分散は 0 となるが、解析結果が真値と完全に一致することは難しいため分散が最小となる点を AE 発生位置とし、発信時刻は算定された時刻の平均とする。受信時刻より得られた走時と理論走時には誤差があり、受信時刻を用いた走時を基に同時反復法等の逆解析により弾性波分布を更新する。また、AE 発生位置の標定及び弾性波分布の更新を繰り返すことで求められた AE 発生位置を修正できる。なお、発信時刻の算定に用いる理論走時は波線追跡法より求める。

2.2 波線追跡法

波線追跡法は、弾性波トモグラフィ法で用いられる波の屈折及び回折を考慮する手法である。まず、セル内の弾性波速度より始点からいくつかの候補点までの理論走時を算定する。セル内の弾性波速度は一定と仮定しており、セル毎の弾性波速度の違いにより対象の弾性波分布を模擬できる。次いで、弾性波を受信した候補点から他の候補点までの理論走時を算定する。受信点において走時が既に算定されていた場合、新たに算定された走時による受信時刻と既知の受信時刻を比較し、早いものを採用する。上述の手順を繰り返すことで、始点から候補点までの走時及び波線を算定できる。

2.3 補間関数の適用

AE 発生位置を候補点から選ぶ場合、発生位置の標定精度向上にはセル分割を細かくする必要があるが、セル数の増加に伴い弾性波速度更新に用いる逆解析の変数も増加するため解が定まり辛くなる。また、その計算コストも高くなる。本稿では標定された候補点での発信時刻の分散とその点から左右、上下の 4 点の分散に対してラグランジュ補間等により分散値の補間を実施し、補間関数の停留値を発生位置とすることでセルの依存性を緩和させた。

キーワード 非破壊検査, Acoustic Emission, AE トモグラフィ法, 進行性破壊, 逆解析

連絡先 〒101-8308 日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 TEL:03-3259-0522 E-mail: nakamura.katsuya@nihon-u.ac.jp

3. 解析モデル

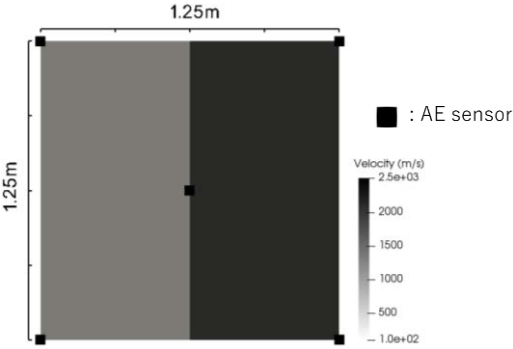
提案法の妥当性を検討するため、図一1 に示す弾性波分布が一様でないモデルを用いて AE 発生位置を標定した。図一1 に示すモデルは高速度領域 2000m/s と低速度領域 1000m/s に分けられており、縦横 1.25m の解析領域に、センサを 4 隅、中央に計 5 個設置している。真の AE 発生位置は、解析領域内にランダムに設置しており、この発生位置より入力値となる受信時刻を決めている。また、セル分割による標定精度への影響を確認するため、スケールが異なるセルで位置標定を実施した。CASE1, CASE2 とともに正方形のセルを用いており、1 辺の長さが CASE1 は 0.125m, セル数を 100 とし、CASE2 では 0.0625m, セル数を 400 とした。

4. 解析結果

表一1 の条件より実施した位置標定結果を図二2 に示す。CASE1, CASE2 とともに標定された AE 発生位置が真の位置を概ね近似した位置を示していることがわかる。また、AE 発生位置候補点と真の発生位置が一致しない場合においても AE 発生位置の近似が出来ているため、補完関数によるセル依存性の緩和が適切に行われていることがわかる。真の位置からの平均誤差距離を確認すると CASE1 は 0.109m, CASE2 では 0.0965m となりセルが細かい CASE2 の評価精度が若干 CASE1 を上回っているが大きな差がないことが分かる。セルを細分すると補完関数の停留値が明確になるため位置標定精度が多少向上はするが、候補点の増加に伴う解析コストの増加を考えると本解析モデルでは CASE2 と比較して CASE1 が適切なセル数であると考えられる。また、セル増加による逆解析の変数の増加によって解が収束し辛くなるため、セル数が少ない CASE1 が図一1 に示す解析モデルの分割数として望ましいと考えられる。

5. まとめ

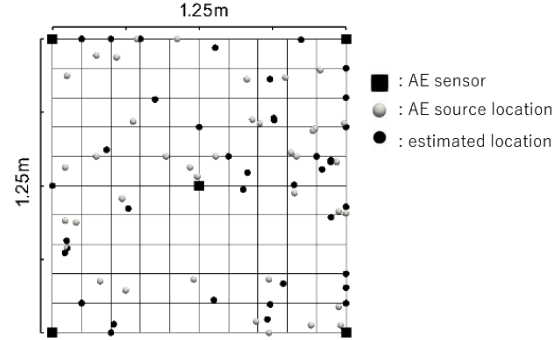
本稿では、提案法の妥当性を検討するため、弾性波分布が一様でない解析モデルに対してスケールが異なるセルで数値実験を実施した。その結果、提案法は概ね良好な位置標定結果を示した。また、セル依存性の緩和を目的とした補完関数の適用も適切に機能していることが明らかになった。今後の検討として、模型地盤より取得した実際の受信時刻を用いて提案法の妥当性を検討する。



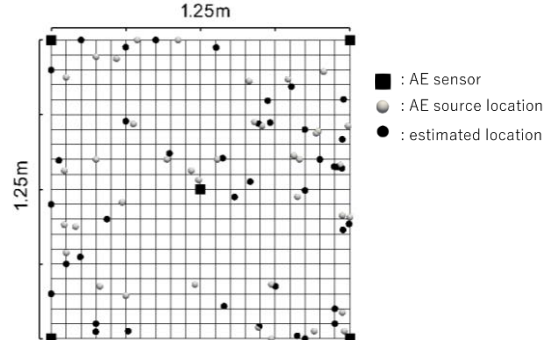
図一1 解析モデル

表一1 解析条件

	one side of the square (m)	number of cells	number of events
CASE1	0.125	100	40
CASE2	0.0625	400	



(a) CASE1



(b) CASE2

図二2 解析結果

参考文献

1) R. bhadari, W. Powrie, R. M. Harkness, A Digital Image-Based Deformation Measurement System for Triaxial Tests, Geotechnical Testing Journal, 2012, Vol. 35, Paper ID GTJ103821

2) S. A. Hall, M. Bornert, J. Desruse, Y. Pannier, N. Lenoir, G. Viggiani, P. Be Suelle, Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation, Geotechnique 60, 2010, No. 5, pp.315-322

3) W. Lin, Use of Acoustic Emission to Evaluate Microscopic Mechanical Behavior of Sand in Triaxial Compression Test, 2018, The University of Tokyo, Ph.D. thesis