

ARX モデルを用いた高速道路盛土の振動特性の推定

芝浦工業大学大学院 学生員○今井 秀樹
 芝浦工業大学 正会員 紺野 克昭
 ネクスコ東日本エンジニアリング 伊勢谷真樹
 ネクスコ東日本エンジニアリング 野田 徹児

1. はじめに

前報では¹⁾、常磐自動車道那珂 IC 近くの高速道路盛土 (92.32KP) での地震記録, 微動記録から得られた法肩と法尻のスペクトル比 (伝達関数) の形状やピーク周期は比較的一致していることを報告している. このピーク周期は盛土の固有周期に対応し, 盛土の耐震性を評価する際に重要な指標となる. 著者らはこれまで多くの高速道路盛土で常時微動計測を実施している. その結果, 伝達関数には明瞭なピークが見られない, あるいは複数のピークが見られるなど, スペクトル比から得られる伝達関数を用いる固有周期の推定が困難な場合も多いことが分かってきた. そこで, 近年, 建築物のシステム同定に多用されている ARX モデル²⁾ を盛土の固有周期の推定に適用したので報告する.

2. ARX モデルを用いた振動特性の推定方法

ARX モデルは入力 u , 出力 y とすると次式で表現される.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-n_k) + b_2 u(t-1-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b+1-n_k) + e(t) \quad (1)$$

ここで, e は平均値 0 の白色雑音, n_k は遅れ時間である. モデルパラメータ $a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}$ は白色雑音のパワーが最も小さくなるように最小 2 乗法より求めることができる. 固有周期, 減衰比および伝達関数はこれらのモデルパラメータより求めることができる²⁾. 以下の適用では, モデル次数 n_a は $n_a = \text{固有周期} \times \text{サンプリング振動数}$ を目安に試行錯誤で設定した. また, $n_b = n_a + 1, n_k = 0$ とした.

図 1 に那珂の盛土 (V_s , 密度は仮定値) の質点系モデルへの変換手順を示す³⁾. 減衰比 h は各モード一律 0.10 とした. 表 1 に固有値解析の結果を示す. 伝達関数のピーク周期は減衰固有周期 $T_D = T_0 / \sqrt{1-h^2}$ に対応するので T_D も示してある. ここで, T_0 は非減衰固有周期である. 図 2 には入力に使用した地震記録 (法尻, サンプリング振動数 100Hz), 図 3 には質点系モデルの天端における加速度応答波形 (出力) を示す. 解析に使用した区間はスペクトル解析, ARX モデルともに図

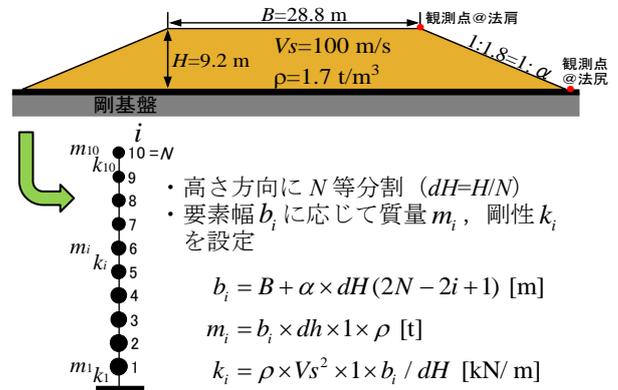


図 1 盛土の質点系モデルへの変換手順

表 1 固有値解析, ARX モデルおよびスペクトル比から得られる振動特性 (質点系モデル)

モード次数	固有値解析			ARX モデル ($n_a=25$)			スペクトル T_D (s)
	T_0 (s)	h	T_D (s)	T_0 (s)	h	T_D (s)	
1	0.338	0.100	0.340	0.339	0.096	0.341	0.328
2	0.130	0.100	0.130	0.132	0.096	0.133	0.135

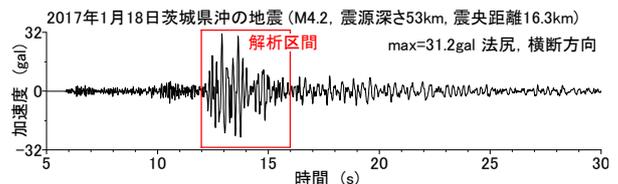


図 2 入力に使用した地震観測記録

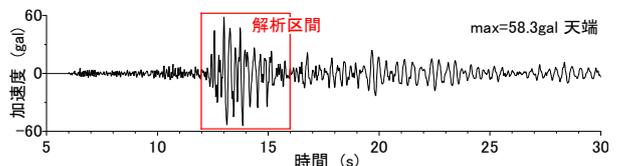


図 3 質点系モデルの天端における加速度応答波形

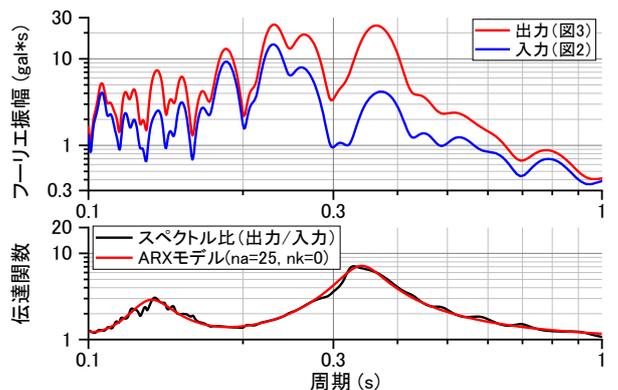


図 4 入出力波形のスペクトルおよびスペクトル比 (出力/入力) と ARX モデルから得られる伝達関数 (質点系モデル)

キーワード 高速道路盛土, 固有周期, ARX モデル, 常時微動, 地震記録, 伝達関数

連絡先 〒135-8548 江東区豊洲 3-7-5, Tel 03-5859-8357, konno@sic.shibaura-it.ac.jp

2, 3 中の赤枠で囲んだ区間 (4 秒間) である。なお, スペクトル解析では, 解析区間の頭尾に解析区間長 10% のコサインテーパーをかけ, 後続に 0 を加えて 4096 個のデータとし, FFT を用いてスペクトルを推定し, 0.20Hz の Parzen ウィンドウを用いて平滑化を行っている。図 4 には入出力波形のスペクトルおよびスペクトル比と ARX モデル ($n_a=25$) から得られる伝達関数を示す。両者の伝達関数はほぼ一致していることが分かる。表 1 から ARX モデルにより精度良く T_0 , h が推定できていることが分かる。このように結果が良好なのは, 出力を数値計算で求めているため, 出力にノイズがほとんど含まれていないためと考えられる。

3. 地震記録への適用

図 5 に出力として使用した地震記録 (法肩) を示す。図 6 に入出力のスペクトルと伝達関数を示す。1 次モード付近の伝達関数の形状は類似しているが, 短周期側では ARX モデル ($n_a=25$) のピークは不明瞭であることが分かる。表 2 には ARX モデルおよびスペクトル比から推定された振動特性を示す。1 次モードの T_D は概ね一致していることが分かる。

4. 微動記録への適用

法肩, 法尻の地震計¹⁾脇で実施した微動計測の記録を図 7 に示す。解析区間は交通振動が少ない 7 秒間を選定した。図 8 に入出力のスペクトルと伝達関数を示す。微動記録のスペクトル比は, 地震記録のそれと比べると 1 次モードのピークが明瞭でないことが分かる。これは, 微動は四方八方から到来しているため, 必ずしも法尻, 法肩の記録が入力, 出力の関係となっていないとめと考えられる。一方, ARX モデル ($n_a=30$) の伝達関数は 1 次モード付近に明瞭なピークが見られ, 地震記録の時の固有周期よりは若干長い, 比較的精度よく固有周期が得られていることが分かる。

5. まとめ

盛土の法肩, 法尻の地震記録, 微動記録に対し, ARX モデルを適用し, 精度よく固有周期を推定できることを示した。ARX モデルは, 盛土の微動記録のようにノイズを多く含む入出力に対しても, 比較的短い解析区間で精度よく固有周期を推定できる可能性があることが分かった。ただし, 推定値はモデル次数 n_a に依存傾向もあるため, n_a の適切な設定方法については今後の課題が残る。

参考文献

1) 大塚, 紺野, 渡辺, 渋谷, 相山, 伊勢谷, 生方: 高速道路盛土における微動観測と地震観測, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 1 部門, 2017. 2) 斎藤: モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, 1998.6. 3) 坂井, 荒木, 室野: 等価 1 自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価, 土木学会論文集 A1, 2017.

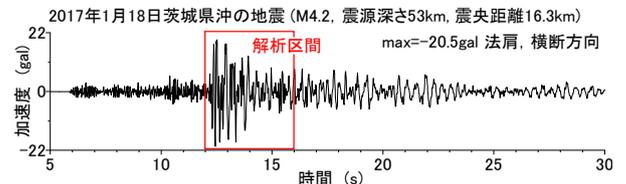


図 5 出力として使用した地震記録

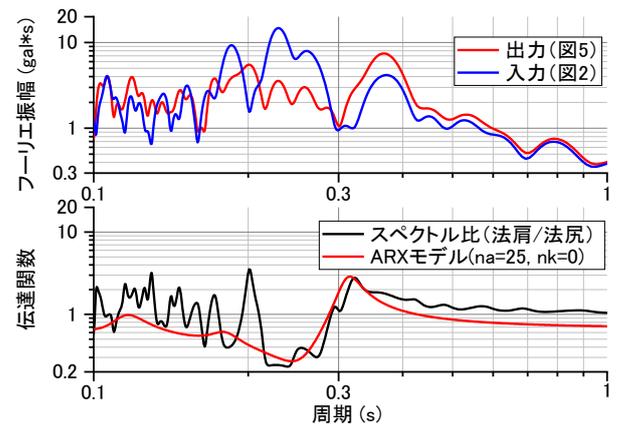


図 6 入出力波形のスペクトルおよびスペクトル比(出力/入力)と ARX モデルから得られる伝達関数(地震記録)

表 2 ARX モデルおよびスペクトル比から得られる振動特性(地震記録)

モード 次数	ARX モデル($n_a=25$)			スペクトル比
	T_0 (s)	h	T_D (s)	T_D (s)
1	0.313	0.050	0.313	0.323
2	0.180	0.070	0.180	0.201

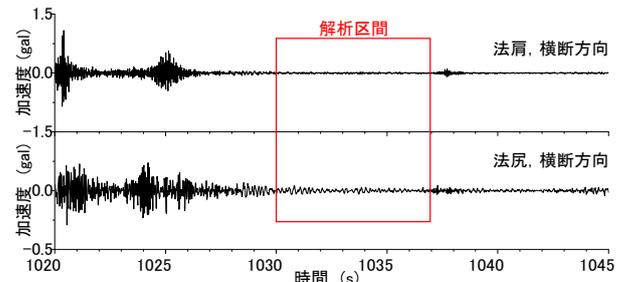


図 7 微動記録(測定日:2016年12月8日)

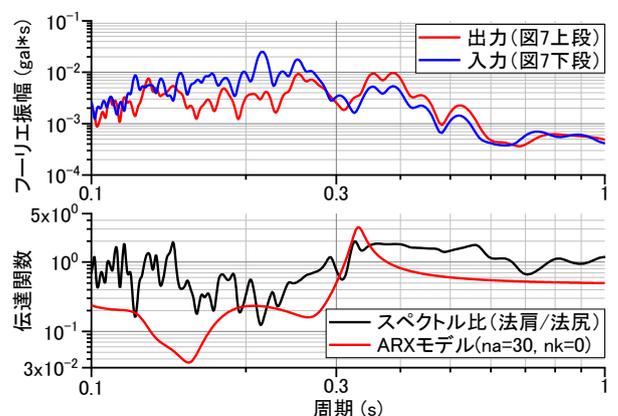


図 8 入出力波形のスペクトルおよびスペクトル比(出力/入力)と ARX モデルから得られる伝達関数(微動記録)

表 3 ARX モデルおよびスペクトル比から得られる振動特性(微動記録)

モード 次数	ARX モデル($n_a=30$)			スペクトル比
	T_0 (s)	h	T_D (s)	T_D (s)
1	0.330	0.026	0.330	0.325
2	0.180	0.176	0.183	-