

Ⅲ－28 ベンダーエレメント試験結果におけるデジタル信号処理の適用性

秋田大学 正会員 荻野俊寛
同上 同上 及川 洋
北海道大学大学院 フェロー 三田地利之
同上 学生会員 西田浩太

1. はじめに

ベンダーエレメント(以下 BE)試験では送信波として様々な波形のものが用いられているが、受信波形は送信波形によって形状が変化する。理想的にはパルスを送信波として用い、その応答を受信する、つまりインパルス応答を受信波形として用いるのが最良と考えられるが、これは S/N などの理由から容易ではない。本報告は送信波として TSP (Time Stretch Pulse) を用い、デジタル信号処理によって求めたインパルス応答¹⁾について、通常の BE 試験の受信波形と比較し、得られるせん断波到達時間の違いについて検討している。

2. 実験概要

BE を組込んだ一面せん断試験装置のせん断箱（矩形断面 70 × 70mm）内において相対密度 $D_r=22\%$ の豊浦砂供試体を作成し $\sigma_v'=50\text{kPa}$ で圧密を行った。続いて表-1 に示す 6 種類の送信波形を用いて BE 試験を行い、送・受信波形を観測した。なお、波形は DA コンバータによって送信し、計測にあたってはオシロスコープによってアベレージング処理 (4 回) を施している。また、波形の送信および記録には PC を用いている。TSP については周波数領域で表現した式(1) を逆 FFT することにより得た。

$$\begin{aligned}
H(n) &= \exp(m\pi n^2 i / N^2) & 0 \leq n \leq N/2 \\
H(n) &= H^*(N-n) & N/2+1 \leq n \leq N
\end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 n は離散周波数、 $H(n)$ は TSP のスペクトル、 m は整数、記号*は複素共役を表す。 m は TSP の引延ばしに関するパラメータで m が大きい程 TSP は時間軸上で引延ばされた形状となる。インパルス応答は TSP を送信し、受信波に $H(n)$ の逆関数 $H^{-1}(n)$ を逆 FFT した逆フィルタを畳み込むことで得られる。

3. 実験結果および考察

図-1 は tsp150 について送・受信波の時刻歴を示している。図-2 は図-1 の TSP の逆フィルタであり、 $H^{-1}(n)$ を逆 FFT して時間領域に変換したものである。時間領域における逆フィルタの形状は TSP を時間軸上で反転させたような形状となっている。図-3 はこの逆フィルタを用いて図-1 から復元した送・受信波の時刻歴を示している。本来図-3 は図-2 の逆フィルタを図-1 の送・受信波それぞれにコンボリューションすることで得られるが、ここでは、周波数領域における積算によって得ている。図-3 から送信波形はパルス波が、受信波としてインパルス応答が得られていることが確認できる。また、図-3 には TSP の引延ばしを小さくした tsp100 の結果についても併せて示しており、これら二つの受信波形はほぼ等しくなっていることから、TSP 波形を変化させても一定のインパルス応答が復元されることがわかる。

一方、図-4 は送信波として矩形波を用いた 4 実験について送・受信波の時刻歴を示している。それぞれの受信波形は明らかに異なる形状を示しており、送信波の振動数に影響を受けている。図中の受信波の初期部分の拡大図から、その形状は sqr4000 では第一ピークの大きさは第二ピークよりも小さくなっている等、特に受信波の初期部分

表 1 実験条件および到達時間

No.	波形	f (Hz)	m	N	Δt_s (msec)	Δt_p (msec)
sqr0020	矩形	20	—	2048	0.22	0.26
sqr0400	矩形	400	—	2048	0.22	0.26
sqr1600	矩形	1600	—	2048	0.23	0.27
sqr4000	矩形	4000	—	2048	0.23	0.27
tsp100	TSP	—	100	2048	0.23	0.29
tsp150	TSP	—	150	2048	0.24	0.29

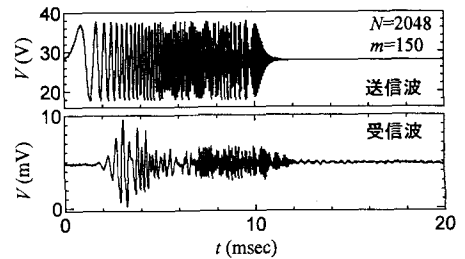


図-1 TSP による送・受信波の時刻歴

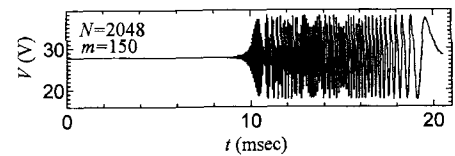


図-2 図-1 に示す TSP の逆フィルタ

において波形に違いが生じていることがわかる。これは送信波の電圧の変化が(0~20msec)の範囲においてsqr0020では一度増加するだけであるのに対し、その他の場合、増加、減少、増加と3度変化していることから、sqr0020では送信用BEは一方に一度動くのに対し、それ以外の場合では合計3度振動するため、受信波形にはこの3度分の波形が合成されて現れているためと考えられる。したがってこの中で最もパルス波に近い送信波はsqr0020であると考えられ、原理的にはその受信波はインパルス応答に近いものと考えられる。実際、図-4に示す4つの受信波を比較すると、sqr0020の受信波が最も図-3のインパルス応答の波形に形状が近く、このことをうまく説明している。

図-5は形状に近いTSP150とsqr0020の波形を振動数領域で比較したもので、振幅スペクトルおよび位相スペクトルをそれぞれ最大値で除して示している。位相スペクトルの一致度は特に振動数が高い領域で低くなっているが、振幅スペクトルはほぼ一致していることからこの二つの波形はその形状に関してはほぼ一致するものであることがわかる。ただし、位相スペクトルの違いは時間領域における波形の平行移動を意味するため、この二つの波形は時間軸上で平行移動した位置関係になっていることになる。表-1には送信波の立ち上がり点と受信波の立ち上がり点(図-3、図-4拡大図中のs点)の時間差で定義した到達時間 Δt_s 、およびピーク点(拡大図中p点)の時間差で定義した到達時間 Δt_p を併記している。インパルス応答から求めた到達時間と矩形波を用いた場合の到達時間はほぼ等しくほとんど差は見られないことから、図-5の位相スペクトルの差は到達時間に大きな影響を及ぼすほどではないことがわかる。これは振幅スペクトルのパワーが集中している2~6kHzの範囲においては位相スペクトルの一致度は比較的良好であると考えられる。またこのことから、結果的に矩形波を用いた通常のBE試験においてもインパルス応答から求める到達時間とほぼ同等の値を評価可能であることがわかる。

4. まとめ

TSPによってインパルス応答を求め、矩形波を用いた場合の受信波と比較し、得られる到達時間について検討した。本報告から得られた知見は以下のとおりである。

- ・ TSPによって得られるインパルス応答の形状は応答長の2倍以上の周期を持つ矩形波($f=20\text{Hz}$)による受信波と近い形状を示した。
- ・ 矩形波による受信波から求めたせん断波到達時間とインパルス応答から求めた到達時間とは結果的にほぼ等しくなった。

【参考文献】

1) Y. Suzuki, F. Asano, H.-Y. Kim, and Toshio Sone : An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses, J. Acoust. Soc. Am. Vol.97(2), pp.-1119-1123, 1995.

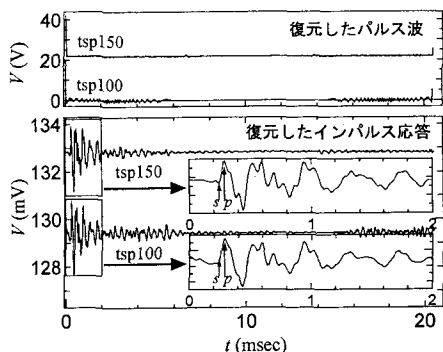


図-3 TSP から復元したパルス波とインパルス応答

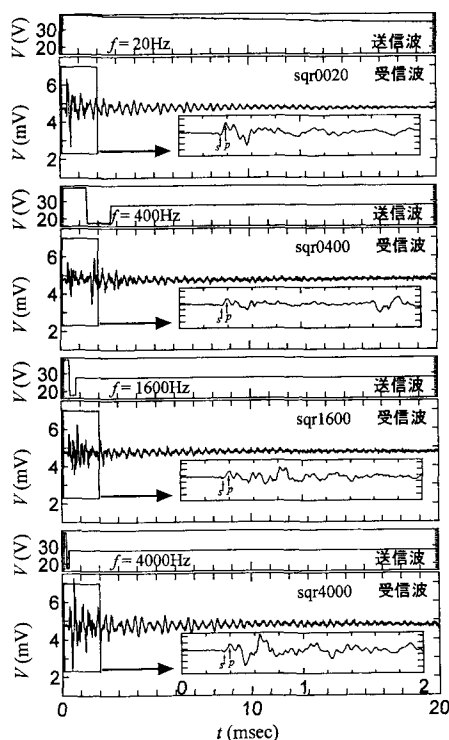


図-4 矩形波による送・受信波

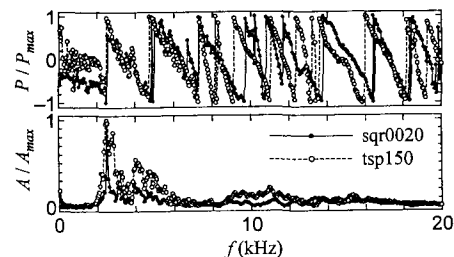


図-5 インパルス応答と矩形波による受信波の比較