“McSeis” による弾性波探査

河野雄平*・原 徹夫*

Seismic Prospecting by “McSeis”

Yuhei KONO and Tetsuo HARA

Abstract

Seismic prospecting is apt to increasing yearly and utilizing effectively for many geological surveys in civil engineering as one of the most popularized survey method.

Recently, the measurement of S-wave velocities are taking in effect as a necessary to make a basic data of the dynamic properties of soil ground in predicting the behavior of the ground at the time of an earthquake.

However, as though the seismic prospecting in the field of civil engineering become generalized, there are many problems unsolved on actual survey. Especially, the seismic prospecting are limited by the problems on the preservation of safety by using an explosive.

On the other hand, it is impossible to carry on seismic prospecting in the urban area by high noise level and also unable to use any explosive compound. As one of the method to solve this problems, the data processing method called Enhancement and Stacking become the object of public attention in recent year. The existing several equipments were so large scale and expensive so far, but recently the inexpensive, easy handling, light weighted and small equipment is developed using a low-cost semiconductor memories and IC, which are produced by the most advanced electronics technology.

In this paper, it is described a special features, utilization and prospecting samples of signal enhancement equipment called “McSeis”, which is newly developed by OYO CORPORATION and Nimbus Instruments in U. S. A.

Furthermore, referring an expansion of application in seismic prospecting by utilizing “McSeis” and present problems on “McSeis”, it is introduced as an aid to contemplate development of geophysical prospecting in Civil Engineering in the future.

1. ま え が き

弾性波探査は、土木の調査として年々増加の傾向をたどり、今日ではもっとも一般的な調査法となっており、ダム、トンネル、地すべり、切り取り、宅地造成等多くの土木の地質調査に有効に利用されている。また、最近では、地盤の地震時の挙動の予測や動的性質の把握を目的として、S波速度の測定（特にPS検層）が主要調査法の1つとして各地で実施されている。

これらの弾性波探査には、従来の多成分（12～24チャンネル）の装置が利用されているが、小規模な調査及びPS検層には、6成分の小型弾性波探査装置（OYO製PS-5等）が広く使用されている。

しかし、弾性波探査が土木の分野において一般化して

きた現状にもかかわらず、その実施上の問題点は多く、特に、火薬使用に伴う保安上の問題から、弾性波探査の有効性とはうらはらに、弾性波探査の計画実施を制限している状況にもある。また、一方、市街地ではP波S波の速度測定の必要性が多いにもかかわらず、ノイズの多い事、火薬の使用ができない事などから、地表における弾性波探査の実施は不可能であり、さらに極端にノイズの多い地域においては、ボーリング孔を利用したP・S検層も測定が困難な場合も多く、ごく浅い部分の調査で終わっている実状もある。

これらの問題を解決する方法のひとつとして、近年スタッキングやシグナルエンハンスメントと呼ばれるデータ処理の手法が注目を集めて来ている。

スタッキングとは、重ね合わせという意味で、繰り返して起振することにより、周期的な小さな信号を何回

* (株)応用地質調査事務所 浦和研究所

も重ね合わせて大きくし、ランダムなノイズは、重ね合わせることににより相対的に小さくなり、SN 比を飛躍的に向上させる方法であり、爆薬によらなくてもより深部までの探査が可能となる。シグナルエンハンスメント方式はスタッキングと類似の方法であり、一度メモリーした波形と入力波形をその都度加算してゆく方法をこのように呼んでいる。これらはいずれも波形を重畳していく機能を有している。

しかし、これまでのこの種の装置は、大がかり、かつ高価なものであり、比較的小規模な探査を対象とする土木の調査には使用しきれない面もあったが、最近の電子技術の目覚ましい発達により、低価格の半導体メモリーやICが出現し、小型、軽量、取扱の容易、低価格の装置が開発されるに至った。

この小論は、新たに開発した、小型、軽量で土木の分野での活用範囲の広いシグナルエンハンスメント装置

“McSeis” (K.K. 応用地質調査事務所製) について、その装置の特徴、探査例を述べ、さらに、“McSeis” を利用しての弾性波探査の適用性の拡大、また“McSeis” の現状の問題点等によれ、今後の土木の物理探査の発展の方向を思考する一助として紹介する。

2. “McSeis” の概要

“McSeis” は、シグナルエンハンスメント方式⁽¹⁾を採用しており、繰返し得られるアナログ信号をデジタル信号に変換し、演算（加算）処理する機構を有している。

本器は、図-1 にしめすように、AMPLIFIER UNIT (増幅器)、MEMORY UNIT (A/D コンバータ、デジタルメモリー、D/A コンバータ)、CONTROL UNIT (コントロール回路、トリガー回路、クロック回路) から構成されており、全体の動作電圧は DC 12 V で、各

注1) 信号の加算方式は、図にしめすような種類に大別される。

A) シグナルエンハンスメント方式

最初の入力信号は、加算器を通して A/D コンバータによりデジタル化され、メモリーに収録される。次の信号が同じ径路で進もうとした時、前回のデータは、逐次メモリーから D/A コンバータでアナログ化し、加算器に逆送され、再び A/D コンバータを純由し、メモリーに収録される。この繰返しを行なうことにより信号が入るつどメモリーの蓄積信号は書き換えられていく。しかし加算していくたびに S/N 比は向上していても、途中でミストリガーや大きな波形のノイズが入ってくると、今までの加算がむだになることや、また偶発的に過大なノイズが入ると、その影響がいつまでも除けないことがある。

B) スタッキング方式

A/D コンバータのデジタル信号を、そのまま大容量メモリーにつぎつぎに加えて行く。したがってメモリーの容量の大きいほど飽和することがなく有利となる。

C) アベレージ方式

繰返し得られる入力信号を重ね合せたうえ、平均値で出力として出させる。平均値を出すため、重ね合せの回数で信号を除しているところが、他の方法と大きく異っており、演算ユニットがこの機能を受け持っている。

D) 磁気テープ方式

平均値を計算器のソフト上で行なわせるために、フィールドでは磁気テープにデータを収録してくる。磁気テープには、アナログテープ式とデジタルテープ式とがあるが、後者は、前者に比較して、S/N 比も高く高精度であるが高価となる。

(A) SIGNAL ENHANCEMENT METHOD

(B) STACKING METHOD

(C) AVERAGING METHOD

(D) MAGNETIC TAPE METHOD

図-1 “MeSeis” のブロックダイアグラム

UNIT ごとの性能を列記すれば以下のとおりである。

A) AMPLIFIER UNIT

ゲイン	80 dB
入力インピーダンス	600 Ω
出力電流	± 5 mA
周波数帯域	5~1 kHz
ノイズ (出力)	100 μ A (負荷抵抗 20 Ω)
” (入力)	2 μ V (入力換算)

B) MEMORY UNIT

ビットサイズ	10 ビット
データサイズ	1024/1 チャンネル
A/D コンバータ	10 ビット/20 μ s
メモリーホールド機構付	

C) CONTROL UNIT

レコード長	50, 100, 200, 500, 1000, 2000 μ s
サンプリングレート	20,000, 10,000, 5,000, 2,000, 1,000, 500 サンプ ル/sec (レコード長と連動)
時間精度	0.01% (水晶制御)
遅延時間	0~9.99 sec

本器の演算機構では、まず地震計で得られた微小なアナログ信号 (第 1 信号) を増幅器により増幅し、A/D コンバータによりデジタル信号に変換されメモリーに蓄積される。次に新しく加算すべきアナログ信号 (第 2 信号) は、増幅され A/D コンバータに送られると同時に、メモリーに記憶された第 1 信号をトリガーによって引き出し、D/A コンバータでアナログ信号に変換させ、第 1 第 2 信号を同時に加算して、再びメモリーに蓄積す

る。この繰返しによって、微小信号は、徐々に大きく成長する。これらの演算は、全てトリガー信号を受けた瞬時を基準として動作しており、時間基準は、高精度の水晶発振器によっている。

次に読み出し機構は、任意の加算により成長した信号を、“Read” の状態で、メモリーより D/A コンバータに送り、アナログ信号にもどし、レコーダーに記録する。この場合、記録の振幅は、出力側の増幅器により任意に調整することができる。また、重ね合せの必要としないチャンネルについては、メモリーホールドによりメモリーを凍結させ、新たに加える信号をパスさせ重ね合せを行なわないこともできる。

その他本器には、Delay Time がついており、トリガー信号を受けてから、実際の信号が入り演算を行なうまでの時間を遅延させることも可能である。

また、シグナルエンハンスメントをおこなわせる装置としての使用法のほか、装置に内蔵されているメモリー機構すなわち、波形を記憶している機能を利用することにより、広範囲用途に利用することができ、例えば、波形記録を求める場合、1 回の起振による記録から、アウトプットゲインを調整することにより、任意の振幅の記録を取り出すこともできる。

さらに、時間精度の高い記録を求めない場合、本器による最短レコード長 50 msec を選ぶことにより、時間のスケールを最大 20 倍にまで引きのばすことが可能であり (紙送り速度を 100 cm/sec とした場合、レコード長を 50 ms とすると、1/1000 秒が記録紙上で 2 cm に相当する)、従来この種の記録装置では得られなかった高分解能が期待できる。

図-2 McSeis の測定システム

上記の機構は、1 成分毎に装備されているので、成分数は任意に選ぶことができるが、McSeis は 6 成分を 1 つのユニットにしているので、6・12・18・24 成分として構成されている。

“McSeis” の特長は、以上の通りであるが、測定システムとしては、図-2 にしめす通りであり、震源としては、カケヤ、重錘落下、エアガン、爆薬などが利用でき

る。同一起振点で多数回の起振を行ない加算記録をとる外は、従来の探査装置と変わるところはない。

また、本器は、単純加算のために、回路等は簡単になり、小型・軽量化がられており、外形寸法は、 $26 \times 43 \times 25$ cm で、重量は 24 成分で 11 kg、6 成分で 7 kg である。24 成分の“McSeis”の外観を写真でしめた。

写真-1 24 成分の McSeis 外観

図-4 “McSeis” 1 成分による S 波の SN 比の改善

図-3 “McSeis” 1 成分による P 波の SN 比の改善

図-6 地回り地における調査例

すべり地における“McSeis”による調査例である。地質は三波川結晶片岩類の緑色片岩 (G. sch) により構成されており、地表付近には屋簷堆積層 (dt) が厚く堆積している。カケヤ振源によって最大受振距離 100 m 上で受振し深度 18 m 前後の第 4 速度層 (健岩) 上面の深度等が把握された。

図-5 “McSeis” による P 波探査記録例

図-7 カケヤ振源によるP波記録と爆薬 (150 g) による記録の対比

図-8 “McSeis” による S 波探査記録

3. “McSeis” 利用の実例

3-1 “McSeis” による SN 比の向上

“McSeis” による P 波の記録例を図-3 にしめた。本記録はカケヤ振源による記録である。図にみられるように、起振 1 回の記録では微小な信号が認められるにすぎないが、10, 20, 50 と回数を重ねることによって、信号が確実に成長する様子がうかがわれる。しかし、信号の加算 200 回にもなるとノイズも成長し、このままではむしろ P 波初動の鮮明さは欠ける。

つぎに板たたき法による S 波記録例を図-4 にしめた。P 波記録と同様、板たたき 1 回の記録は不鮮明であるが、10, 20, 30 になると S 波記録としては次第に改善されている。また、30 回での反転重合^{注 2)}の記録では、P 波は相殺され S 波初動付近の波形が単純になり、反転重合の効果は認められる。

図-3, 図-4 に示したように P 波, S 波の実験例からみて、加算による記録の改善は明瞭ではあるが、加算回数の増加によっては見かけ上 SN 比がむしろ悪くなる事がある。これは、“McSeis” が単純加算によっているので、 N 回加算によってシグナルは N 倍となるが、ノイズも $\sqrt{N}$ に比例して成長するためであり、実際の“McSeis”の利用に当っては、最も判読の容易な記録を得るようにゲイン（入力、出力）の調整、加算回数の選択が必要である。

3-2 P 波屈折法探査例

図-5 は“McSeis”による P 波屈折法記録例である。加算前の記録では、30~40 m 付近まではかろうじて初動を読み取れるが、それ以遠では判読が不可能である。一方加算後記録を見ると、20 回加算によって、測線の終端まで（約 100 m）初動の読み取りが可能となっている。振源としてはカケヤを使用した。地表付近が軟弱のため、太い丸太をたたき方法によった。

本調査地は地すべり地であり、民家が多く、爆薬使用が困難な地域であり、“McSeis”によりカケヤ振源を使用して目的は達せられた例である。このようにして得られた走時曲線および速度層断面図の一部を図-6 に示した。

つぎに、カケヤ振源による P 波記録例を爆薬による記録例と対比して図-7 に示す。爆薬は 3 号桐ダイナマイト 150 g を使用し、鉄棒により削孔した深さ 1.2 m, 径

5 cm の孔底に装填した。“McSeis”による振源は地表に置いた鉄板（10 cm×10 cm×2 cm）をカケヤでたたき方法とした。60 回程度加算した記録は、爆薬（150 g）による記録に比べて SN 比の点または初動の立上りの点で劣るものの、記録としては読み取り可能な結果である。地震計その他の測定条件は全く同じとし、爆薬による記録は、TR-4 型地震探査装置一式（OYO 製）によったものである。

3-3 S 波屈折法探査例

図-8 に“McSeis”による S 波屈折法加算記録を、非加算記録と対比して示した。左の記録は非加算記録であり、50~60 m 付近までは S 波の位相を追跡できるが、それ以遠では判読が困難である。一方右の記録は、加算 1 回~60 回の記録であり、105 m の測線長全域にわたって S 波の位相を判読できる。なお、板に加える荷重は、写真-2 のようにスクリーアンカーで反力を取り、ゴムのダンパーを介してジャッキで板を地面に押しつける方法をとった。使用した板のサイズは 360×30×6.5 cm であり、ジャッキにより 500~600 kg 程度の荷重を比較的容易に加えることができる。地震計は固有周期 28 Hz（W・H・S 社製）の上下動用地震計を測線と直交する方向で横に倒して地面に埋めこむ方法をとった。

写真-2 スクリューアンカー・ジャッキ法による板の荷重法

3-4 S 波検層例

図-9 に“McSeis”による S 波検層例を PS-5 小型弾性波探査装置による記録と対比して示した。測定場所の地質は玉石混り砂礫層のため、孔内に塩ビパイプを挿入し、さらにボーリング孔壁と塩ビパイプ外面との間の空隙を砂で充填し、可能な限り地山と塩ビパイプとの一体化を計った上で、塩ビパイプ内にボアホールピック（OYO 製 Model 3310）を固着した。振源は、板たたき

注 2) ここでいう反転重合法とは、任意回数加算後、地震計の極性を変換すると共に板たたきの方向を切り換えて同一回数さらに加算する方法を指す。

図-9 “McSeis” による S 波検層

ダム候補地における“McSeis”による S 波検層例である。沖積世～洪積世の玉石混り砂礫層により成り S 波検層実施上困難な地質条件下であったが“McSeis”とポアホールピック Model 3310 によって孔底 (47 m) まで良好な S 波記録が得られた。

法によった。

このように、S 波検層を実施する上では条件が悪いため、図にしめたように通常の方法では SN 比は悪く、深度 20 m 付近までしか記録は得られなかったが、“McSeis” による記録では、加算につれてシグナルが次第に成長し、深度 47 m の孔底に至るまで良好な記録が得られた。

4. “McSeis” の適用性と問題点

“McSeis” による弾性波探査は、これまでの測定例からみて土木の弾性波探査において広汎な適用性を有するものと思われるが、また、今後解決すべき問題点もあり、現状これらの諸点において簡単にとりまとめると以下の通りと考えられる。

- a. 従来にない小型・軽量の加算機能を持った装置であり、しかも成分数を自由に選べる外、従来から使用されている弾性波探査装置との接続が可能であるなど、山岳地帯、海浜地帯、市街地帯に使用出来、また爆薬の使用不可能な地域での弾性波探査を可能にしたもので、今後の土木の弾性波探査の適用範囲を広めることが可能となった。
- b. 演算処理方式はシグナルエンハンスメント方式であり、信号を加算することにより、SN 比は改善され、通常の測定条件下では、爆薬を使用しなくとも小～中規模程度の P 波及び S 波屈折法探査の実施が可能である。各種ノイズに対する“McSeis”の適用性は、現状で問題もあるが、少なくとも定常的なノイズに対しては加算による SN 比向上の効果は充分である。
- c. 遅延時間とレコード長の適切な組み合わせによって、メモリーの有効利用を計り、小規模～大規模探査に至るまでの各種測定条件に適用可能である。即ち、レコード長としては 50 ms～2000 ms まで 6 段階の選択が可能であるが、レコード長が短い程サンプルレートは細かくなり、初動読み取りの際の時間精度も高くなる。従って測定条件に応じて可能な限りレコード長を短くセットして測定するのが望ましい。この際遅延時間が大きく任意に選択できるので両者の組み合わせによって各種測定条件に合わせた精度の高い測定が可能である。
- d. メモリーホールド機構とインプットゲイン、アウトプットゲインを駆使することにより、データーのオーバーフローを防ぐと共に良好な波形記録を得ることができる。
- e. 本器の特殊な利用法としては、例えば S 波観測の際の反転重合法、火薬使用による大規模探査の SN 比向

上、波形の追跡等本器の特質を最大限に生かした方法が考えられ、今後の現場実験をふまえて適用性を検討すべき問題点である。

- f. 振源としてカケヤ及び重錘落下に頼る限り、受振距離には限界があり、取り扱いの簡単な、より強力で、繰り返し起振の容易な振源の開発が今後の重要な課題である。

5. あとがき

最近新しく開発されたシグナルエンハンスメント方式による“McSeis”を紹介したが、本器は、目的に合わせて成分数を選ぶことが可能であり、既存の弾性波探査装置とも組み合わせることも出来、従来、測定が困難であった市街地や、爆薬使用上種々の制約のあった地域でも、カケヤあるいは重錘落下などの非爆薬振源で受振距離の長い弾性波探査が可能となった。しかし、振源としてカケヤ、重錘落下等に頼る限り、起振回数にはおのずから限界があり、小型、軽量、強力で取り扱い容易な振源の開発とあいまって、さらに多方面への利用が期待され、適用性の拡大がはかれるものと思われる。

また、“McSeis”の演算処理方式は N 回の加算によってシグナルは N 倍になるがノイズも $\sqrt{N}$ 倍になることから、各調査地域においてノイズの性質、地質条件、調査の目的等を勘案しての振源の選択と加算回数による SN 比向上の最適条件を充分考慮する必要がある、“McSeis”を用いての物理探査の新しい測定システムを確立するため、さらに多くの現場においての使用結果も含めて充分検討していく必要がある、稿を改めて報告する予定である。

なお、本稿をとりまとめるに当って、常日頃より終始御指導いただいている応用地質調査事務所取締役社長陶山国男理博に厚く御礼申し上げると共に、当社浦和研究所機器開発部小倉公雄部長、地盤計測相談室東山俊博室長、また、実験、測定に御協力いただいた当社浦和研究所機器開発部、仙台事務所、東京事務所、埼玉支店の諸氏に感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) P. W. Klipsch (1936): Some Aspects of Multiple Recording in Seismic Prospecting Geophysics, Vol. 1, No. 3
- 2) 物理探鉱技術協会編 (1968): 最近における物理探鉱の進歩—20 周年記念—
- 3) 渡辺 健, 小林直太, 中野迪夫, 田村吉広 (1973): 板叩きによる SH 波の発生と板に加える荷重についての実験, 物理探鉱, Vol. 26, No. 2

- 4) 浅田正陽, 塚田紘也 (1973): 最近の地震探鉱機器, 物理探鉱, Vol. 26, No. 6
- 5) 石井吉徳 (1974): 土地地震探査と信号改善, 物理探鉱, Vol. 27, No. 2
- 6) 佐竹昭広 (1975): 地盤調査に用いられる最近の物理探鉱装置, 物理探鉱, Vol. 28, No. 1
- 7) 塩野計司, 太田 裕 (1976): 標準貫入試験利用によるS波の現位置測定, 土と基礎, Vol. 24, No. 3
- 8) 瀬古隆三, 羽竜忠男 (1976): デジタルスタッキング法による地震探査および速度検層, 土と基礎, Vol. 24, No. 3
- 9) 地震探鉱実験グループ (1976): 地震波の生成, 伝搬に関する実験
- 10) 物理探鉱技術協会編 (未刊行): 土木弾性波探査法, 3-2 測定装置 (佐竹昭広)