

## 続・遠心模型実験におけるベンダーエレメント利用の試み

2022 年 3 月 1 日

実験技術グループ 波岸彩子

はじめに

本稿は技術室報告第 18 号掲載「遠心模型実験におけるベンダーエレメント利用の試み」の続報である。ベンダーエレメントは 2 枚の圧電素子を張り合わせたバイモルフ型振動子で、送受信用の一对のベンダーエレメントによって土中を伝播するせん断波（S 波）速度  $V_s$  を非破壊的に測定することができる。筆者の勤務する遠心力载荷実験室は、地盤や地盤-構造物の模型に遠心加速度を与えて実地盤と同じ応力状態を再現する実験施設であり、ベンダーエレメントセンサーの導入が期待されている。前報ではベンダーエレメント 1 対を模型地盤中に設置し 10g~50g 载荷時の計測を試みて以下の課題に言及していた。

- (1) 地盤に応じた発信周波数の選定
- (2) 波形発生装置の遠隔操作
- (3) データ解析方法の習得
- (4) P 波の測定

ファンクションジェネレーターとオシロスコープの更新により (2) 波形発生装置および波形収録装置の遠隔操作が実現し、遠心载荷時の (1) 地盤に応じた発信周波数の選定が可能となったので紹介する。残念ながら (3) データ解析手法の習得は今後の課題であり、(4) P 波の測定は検討できていない。

### 実験方法

飽和地盤中に鉛直および水平の方向に 2 対のベンダーエレメントを設置し、異なる発信周波数に対する受信波の応答を収録し、地盤工学会基準の試験方法 JGS0544「ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法」の条件を満たしているか調査した。ベンダーエレメントセンサーには応用地質株式会社製の送受信用ベンダーエレメントを用い、図 1. のとおり飽和地盤を作成した。地盤は珪砂 7 号を相対密度 50 % になるよう締固め、脱気水で飽和した。

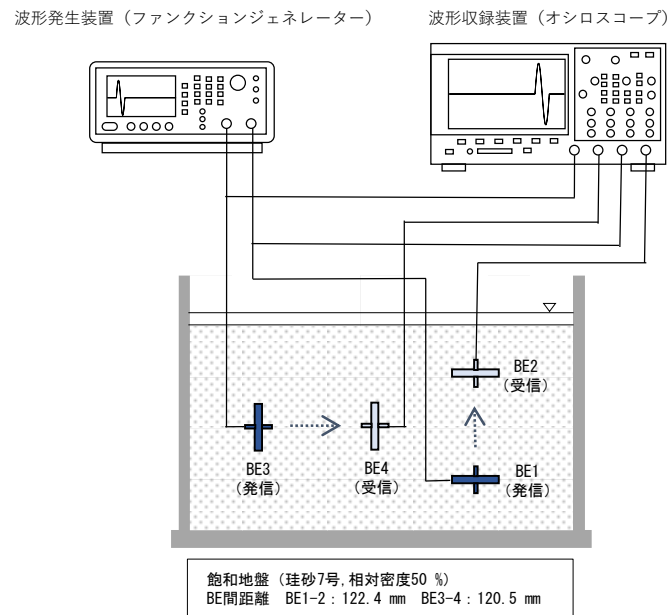


図 1. 実験模型概要

電圧印加用の波形発生装置にはテクトロニクス製ファンクションジェネレータ AFG1062、送受信の電圧波形を記録する波形収録装置にはキーサイト製オシロスコープ InfiniVision DSOX2004A を用いた。ファンクションジェネレーターは USB インターフェースを介して Windows PC から操作した。オシロスコープは Web サーバーを内蔵しており、Java 機能を持つ Web ブラウザからアクセスした。これらの装置を遠心アームに固定し、遠心加速度 50 G における送受信用ベンダーエレメントの電圧波形を収録した。収録は発信波の周波数を 2 kHz から 10 kHz の間で任意に変えておこない、計 25 ケースを実施した。受信波形のノイズを軽減するために、各ケースにおいて電圧波形は 10 回分を収録し平均処理をおこなった。

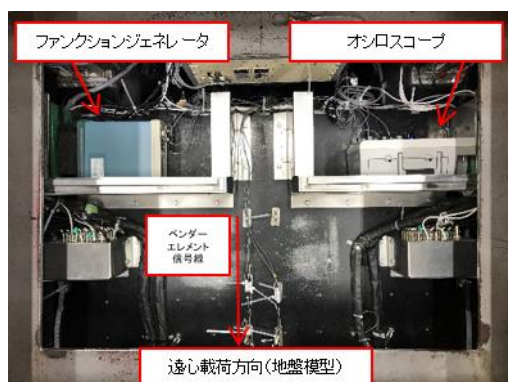


図 2. 計測装置設置状況



図 3. 計測の様子

## 実験結果

試験法 JGS0544 によると、ベンダーエレメント法に用いる発信電圧の波形は次の条件を満たす必要がある。

- ① 発信電圧の周波数と受信電圧の初動の周波数が等しくなること、
- ② 発信電圧の初動から受信電圧の初動までにかかる時間は発信電圧の周期の 2 倍以上であること

表 1 は全 25 ケースの計測結果であり、左から順に、ケース番号、重力場条件、ベンダーエレメントの組み合わせ、発信周波数、電波距離、 $\Delta t$ 、 $V_s$ 、発信時刻、受信時刻、発信周波数、受信周波数、条件①および②の判定結果を示している。条件①は発信周波数に対する受信周波数の比であり、許容範囲を 2%としたとき◎、5%としたとき○で判定している。条件②は発信電圧の初動から受信電圧の初動までにかかる時間を発信電圧の周期で除した値であり、2 以上であれば○で判定した。

鉛直方向に設置したベンダーエレメント 1-2 においては、発信周波数 5 kHz が条件①および②を最もよく満たしており、4.5 kHz も許容誤差 5%の範囲内であった。水平方向に設置したベンダーエレメント 3-4 においても、4.5 kHz および 5 kHz が許容誤差 5%内に収まった。2 kHz から 10 kHz までの他の周波数では、条件②を満たすことはあっても条件①を満足しなかった。

表 1. 実験結果

| Case No. | 重力場 g | BE No. | 発信周波数 kHz | 伝播距離 mm | $\Delta t$ ms | $V_s$ m/s | 発信時刻 ms | 受信時刻 ms | 発信周波数 kHz | 受信周波数 kHz | 条件①<br>許容誤差◎ : 2%, ○ : 5% | 条件②   |
|----------|-------|--------|-----------|---------|---------------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|---------------------------|-------|
| 1        | 50    | 1-2    | 2.0       | 122.4   | 0.787         | 168.1     | 0.498   | 0.279   | 2.0       | 3.6       | 1.78 ×                    | 1.6 × |
| 2        | 50    | 1-2    | 2.0       | 122.4   | 0.779         | 170.0     | 0.498   | 0.287   | 2.0       | 3.5       | 1.74 ×                    | 1.6 × |
| 3        | 50    | 1-2    | 3.5       | 122.4   | 0.766         | 173.1     | 0.284   | 0.236   | 3.5       | 4.2       | 1.20 ×                    | 2.7 ○ |
| 4        | 50    | 1-2    | 4.1       | 122.4   | 0.771         | 171.9     | 0.246   | 0.222   | 4.1       | 4.5       | 1.11 ×                    | 3.1 ○ |
| 5        | 50    | 1-2    | 4.5       | 122.4   | 0.765         | 173.4     | 0.220   | 0.211   | 4.5       | 4.7       | 1.04 ○                    | 3.5 ○ |
| 6        | 50    | 1-2    | 5.0       | 122.4   | 0.780         | 169.8     | 0.199   | 0.200   | 5.0       | 5.0       | 0.99 ◎                    | 3.9 ○ |
| 7        | 50    | 1-2    | 5.5       | 122.4   | 0.780         | 169.8     | 0.181   | 0.191   | 5.5       | 5.2       | 0.95 ×                    | 4.3 ○ |
| 8        | 50    | 1-2    | 6.0       | 122.4   | 0.774         | 171.2     | 0.166   | 0.182   | 6.0       | 5.5       | 0.91 ×                    | 4.7 ○ |
| 9        | 50    | 1-2    | 7.0       | 122.4   | 0.777         | 170.5     | 0.142   | 0.171   | 7.0       | 5.8       | 0.83 ×                    | 5.5 ○ |
| 10       | 50    | 1-2    | 8.0       | 122.4   | 0.778         | 170.2     | 0.125   | 0.166   | 8.0       | 6.0       | 0.75 ×                    | 6.2 ○ |
| 11       | 1     | 1-2    | 10.0      | 122.4   | 0.775         | 170.9     | 0.100   | 0.151   | 10.0      | 6.6       | 0.66 ×                    | 7.8 ○ |
| 12       | 1     | 1-2    | 6.5       | 122.4   | 0.778         | 170.2     | 0.153   | 0.176   | 6.5       | 5.7       | 0.87 ×                    | 5.1 ○ |
| 13       | 50    | 3-4    | 2.0       | 120.5   | 0.912         | 141.3     | 0.499   | 0.305   | 2.0       | 3.3       | 1.64 ×                    | 1.8 × |
| 14       | 50    | 3-4    | 3.0       | 120.5   | 0.910         | 141.6     | 0.330   | 0.251   | 3.0       | 4.0       | 1.31 ×                    | 2.8 ○ |
| 15       | 50    | 3-4    | 3.5       | 120.5   | 0.905         | 142.4     | 0.282   | 0.239   | 3.5       | 4.2       | 1.18 ×                    | 3.2 ○ |
| 16       | 50    | 3-4    | 4.0       | 120.5   | 0.900         | 143.3     | 0.248   | 0.226   | 4.0       | 4.4       | 1.10 ×                    | 3.6 ○ |
| 17       | 50    | 3-4    | 4.5       | 120.5   | 0.905         | 142.4     | 0.220   | 0.214   | 4.5       | 4.7       | 1.03 ○                    | 4.1 ○ |
| 18       | 50    | 3-4    | 5.0       | 120.5   | 0.898         | 143.6     | 0.200   | 0.205   | 5.0       | 4.9       | 0.98 ○                    | 4.5 ○ |
| 19       | 50    | 3-4    | 5.5       | 120.5   | 0.906         | 142.3     | 0.182   | 0.196   | 5.5       | 5.1       | 0.93 ×                    | 5.0 ○ |
| 20       | 50    | 3-4    | 6.0       | 120.5   | 0.898         | 143.6     | 0.167   | 0.193   | 6.0       | 5.2       | 0.87 ×                    | 5.4 ○ |
| 21       | 1     | 3-4    | 6.5       | 120.5   | 0.908         | 141.9     | 0.153   | 0.181   | 6.5       | 5.5       | 0.85 ×                    | 5.9 ○ |
| 22       | 1     | 3-4    | 7.0       | 120.5   | 0.902         | 142.9     | 0.143   | 0.183   | 7.0       | 5.5       | 0.78 ×                    | 6.3 ○ |
| 23       | 50    | 3-4    | 8.0       | 120.5   | 0.904         | 142.6     | 0.125   | 0.172   | 8.0       | 5.8       | 0.73 ×                    | 7.2 ○ |
| 24       | 50    | 3-4    | 9.0       | 120.5   | 0.903         | 142.8     | 0.111   | 0.163   | 9.0       | 6.1       | 0.68 ×                    | 8.1 ○ |
| 25       | 50    | 3-4    | 10.0      | 120.5   | 0.912         | 141.3     | 0.100   | 0.154   | 10.0      | 6.5       | 0.65 ×                    | 9.1 ○ |

図4は条件①の結果から、発信周波数に対する受信周波数の比を散布図にしたものである。発信周波数5 kHz 近辺で比は1に近くなり、5 kHz 以下では大きく、5 kHz 以上では小さくなった。つまり発信周波数は5 kHz が適切であり、これより周波数が小さくなっても大きくなっても適さないことがわかる。

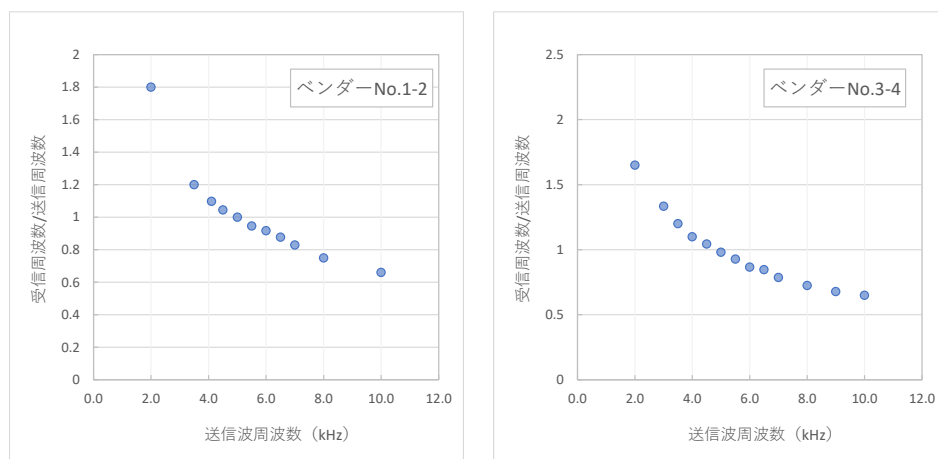


図4. 発信周波数に対する受信周波数の応答

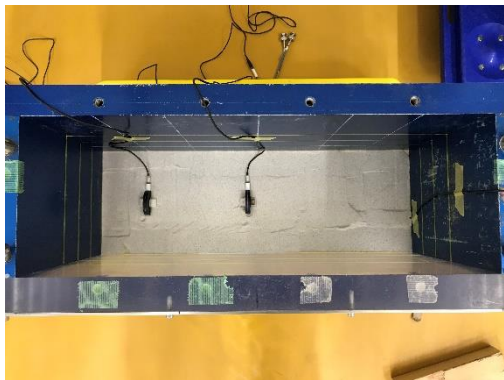
おわりに

ベンダーエレメント用計測システムを遠隔操作し、遠心 50G 場における地盤模型の S 波速度測定にどのような発信周波数が適しているのか調べ、弊所の実験環境においては 5 kHz の発信波を用いればよいことがわかった。今後の課題としては、センサーの小型化や多極化が挙げられる。小型化については PS 両用ではなく S 波のみに限定すれば可能だろう。多極化には計測システムの大幅更新が必要と思われる。

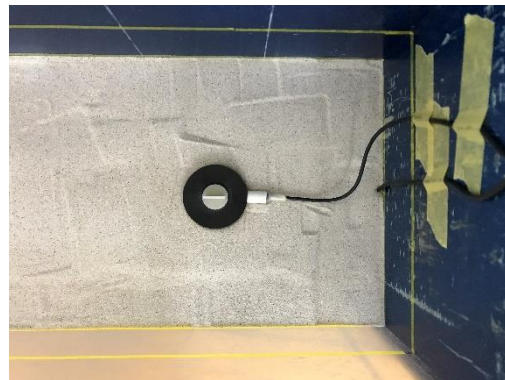
謝辞

遠心模型実験用ベンダーエレメントの計測環境を整備するにあたっては、地盤防災解析分野の上田恭平先生が計測機器を調達してくださいました。当時修士課程 2 回生だった同分野の河原尚徳氏から相談を受けて検討を始め、初期システムでの課題を克服することができました。その後、留学生や外国人研究員の方にも使用いただき、いつでもベンダーエレメント計測をできる環境が整ったかなと思います。遠心アーム上の収納スペースが限られることに注意が必要ですが、他計測項目との兼合いがつけば今後もぜひ活用していただけますと幸いです。

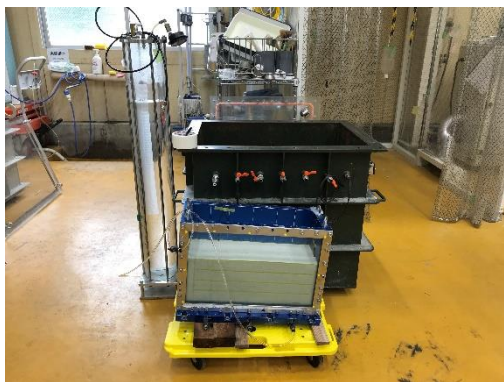
## 写真集



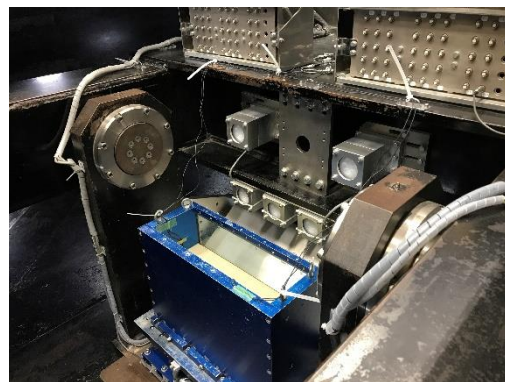
ベンダー設置状況 1



ベンダー設置状況 2



飽和状況



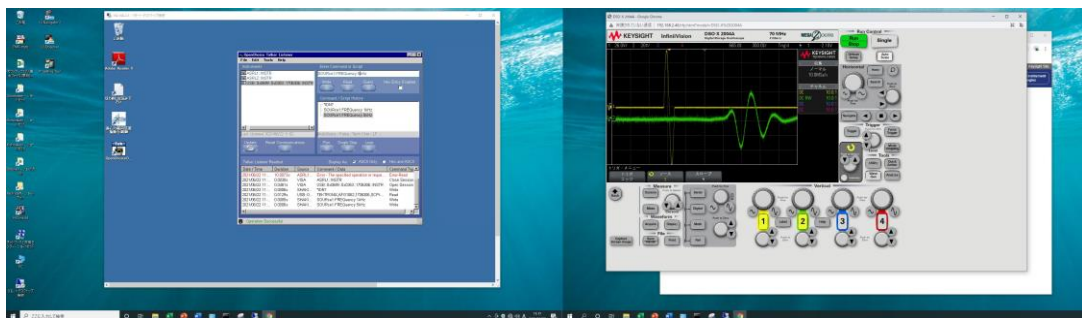
遠心設置状況



実験後ベンダー回収状況 1



実験後ベンダー回収状況 2



計測中の様子