

ベンダーエレメント試験

Bender Element Test

山下 聡 (やました さとし)

北見工業大学教授 工学部土木開発工学科

1. ベンダーエレメントとは

ベンダーエレメント (以下 BE) とは、圧電セラミックの薄板を通常 2 枚貼りあわせたバイモルフ型振動子の呼称であり、土中の弾性波速度測定を目的として使用される。BE で用いられる圧電セラミックの材質は、通称 PZT と呼ばれ、一般に強誘電体のチタン酸鉛 (PbTiO_3) と反強誘電体のジルコン酸鉛 (PbZrO_3) の固溶体で成分は $[\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3]$ である。圧電セラミックは、高電界印加により結晶軸の方向を特定の方に揃える分極処理を行うと圧電性を現す。分極処理を施されたセラミックは、応力を加えると電気分極を生じ電界が発生し (正効果)、逆に電界を加えて電気分極を起こさせるとひずみを生じる (逆効果) 特性を有している¹⁾。

図-1 は BE の一例を示したものである²⁾。BE は厚み方向に分極された圧電セラミックを弾性補強、かつ電極の役割を果たすニッケルやリン青銅のシム材の両面に貼りあわせた構造 (バイモルフ) となっている。また、セラミックの表面には銀電極やニッケル電極がコーティングされている。寸法は、長さが 12~20 mm、幅が 10 mm 程度、厚みが 0.5~1.0 mm のものが多く用いられている。また、防水・絶縁のためにエポキシ樹脂などで 0.5 mm 厚程度のコーティングが施されている。

このような構造を持つ BE を片端固定にし、電圧を印加すると上部の圧電セラミックは圧電横効果によって縮み、下部の圧電セラミックは伸びる。その結果、全体としては上部に曲がることになる。また、変形を与えると電圧が発生する。この特性を利用してキャップやペDESTルに取り付けた BE の一方に電圧を加え、土中にせん断波を発生させ、他方の BE でせん断波を受信することによって土中を伝播するせん断波速度を求める。

ここで、圧電セラミックの貼りあわせ方法には、パラレル型 (並列結線) とシリーズ型 (直列結線) がある。分極方向が同一方向になるように貼りあわせたパラレル型の場合、同じ印加電圧に対して、分極方向が 180 度異なる方向に貼りあわせたシリーズ型よりも大きく振動する特性を有しているため送信用に用いられることが多い。一方、シリーズ型の場合には、同じ振動に対してパラレル型よりも生じる電圧が高くなるので受信側に用いられることが多い。なお、パラレル型の BE に直列結線またはシリーズ型に並列結線することによって、BE 全体を伸縮させ圧縮 (P) 波を発信・受信することも可能であ

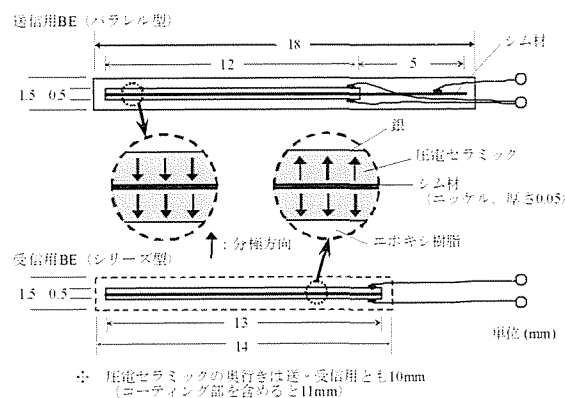


図-1 ベンダーエレメントの一例²⁾

る³⁾。バイモルフ型以外にも、圧電セラミックを積層したタイプ (積層型アクチュエータ) を用いて、せん断波や圧縮波の測定も行われている。

2. ベンダーエレメントの作製方法

BE は、既製品を購入すると 1 セット十数万円もする場合もあり比較的高価であるが、圧電セラミックのみ (1 枚 1 万円程度) を購入して、自作することも可能である。以下では、BE の作製方法の一例を紹介する。

作製に必要な材料は、バイモルフ型圧電セラミック、コーティング用型枠、エポキシ樹脂 (主剤と硬化剤)、離型剤、シリンジである (口絵写真-5, 6)。

型枠はアクリル樹脂製で、圧電セラミックを型枠に組み込んだ状態で、セラミックと型枠の間にコーティング厚に合わせた隙間を設ける (口絵写真-7)。型枠のエポキシ樹脂と接触する部分には、あらかじめ離型剤を塗布しておく。セラミックと型枠の間に、エポキシ樹脂をシリンジで注入する (口絵写真-8)。その際に気泡が混入しないように注意する。1 日程度固化するまで放置し、型枠を取り外す。コーティングしていない部分に、リード線を半田付けする (口絵写真-9)。また、あらかじめリード線を結線したもの購入して、リード線も含めて全体をエポキシ樹脂でコーティングする方法もある。作製した BE を、キャップやペDESTルに設置し、BE の根元をエポキシ樹脂で固定する。その上部は少しでも振動を妨げないようにシリコン樹脂などによって接着している場合もある。また、脱着可能なスリーブを用意して、スリーブに BE を固定する方法もある (口絵写真-10)。

BE は、通常三軸試験装置のキャップとペDESTALに設置して、供試体の上下方向を伝播するせん断波速度を測定するが、せん断波速度の異方性を調べるために、供試体の側面に設置して、横方向を伝播するせん断波速度を測定する場合もある⁴⁾。また、三軸試験装置ばかりでなく、一面せん断試験装置や圧密試験装置など各種の試験装置に取り付けることが可能で、それぞれの試験結果に影響を与えることなく、圧密時やせん断時など任意の段階でせん断波速度を求めることができる。

3. せん断波速度の測定方法と伝播時間の同定法

BE 試験では、ファンクションジェネレータから発信した電圧信号を送信用 BE およびデジタルオシロスコープに送り、供試体中に伝播したせん断波が受信用 BE に到達することによって生じた電圧信号もオシロスコープに送られる。これらの送・受信電圧波形はデジタルデータとしてパソコンに集録・解析し、伝播時間を求める。

供試体中を伝播するせん断波速度は伝播距離と伝播時間のみから求められるので、BE 試験は非常に単純な試験法である。伝播距離に関しては、BE の先端間距離を伝播距離として採用することが国際的な共通認識のようである。一方、伝播時間の同定法に関しては、いまだに国際的な共通認識を得られておらず、このことが BE 試験の現状での課題と言える。

現状での伝播時間の同定法には、大きく分けて三つの方法がある。一つは、実際の送・受信波形からせん断波の送信時間と到達時間を読み取り、その差を伝播時間とするものである。この方法は時間軸で伝播時間を同定するため、time domain technique (以下 TD 法) と一般に呼ばれている。しかし、この方法ではベンダー間距離が短い場合などに P 波やその他の電氣的な雑音、反射等の影響により、せん断波の到達前に near-field-effect (以下 NFE) と呼ばれる波形に乱れが生じ、到達時間の読み取りが困難な場合がある。そのため、周波数の異なる複数の送信波や波形を用いて NFE を考慮して到達点をより正確に求めようとしたり、送信波と受信波のピークを読み取ったりする方法が行われている。

二つ目の方法は、クロスコリレーション法 (以下 CC 法) と呼ばれるもので、土中を伝播するせん断波は送信波と同じ形状 (周波数) を保存したまま伝播するものとし、送信波と受信波の相互相関関数を用いて、その最大値の地点を伝播時間とするものである。しかし、この方法では入力時の周波数と受信波の周波数が必ずしも一致しない場合があること、受信波の第 1 波目が最大振幅となった場合には、相互相関関数の最大値を読み取ることによって伝播時間を同定できるが、受信波の最大振幅が第 1 波目以降となった場合には伝播時間の同定に専門的な知識が必要となるなどの問題点もある。なお、この方法も時間軸を用いて到達時間を求めるので TD 法の一つとも言える。

三つ目の方法は、送・受信波形のクロススペクトルを

求め、その位相スペクトルの傾きから伝播時間を同定する方法など、送・受信波の周波数特性を利用するので、frequency domain technique (以下 FD 法) と呼ばれるものである。

送信波形に関しては、BE が用いられた初期の頃は、矩形波を用い受信波のピークまでの時間を伝播時間としていた⁵⁾。しかし、この方法では多様な周波数の受信波が発生することから、特定の周波数の sin 波を 1 波入力する方法が用いられるようになった。これら TD 法では、前述の NFE の影響により到達時間の同定が困難であることから、CC 法⁶⁾や種々の FD 法⁷⁾などが提案されるようになった。

4. おわりに

ベンダーエレメント試験は、土質試験に用いられるようになってまだ 20 年程度であるが、その簡便さと安価さに後押しされて、急速に普及しつつある。しかし、伝播時間の同定法などソフトおよびハード面においていまだ不確定な部分がある。これらのことを背景として、国際地盤工学会の技術委員会 TC29 では、世界各国で行われている試験方法や試験結果の評価方法の実情、影響因子を明らかにするとともに、適切な試験結果を得るための標準的な試験方法を提案するために国際一斉試験を行った。その報告⁸⁾に BE 試験に関する詳細が記載されているので参考にさせていただきたい。

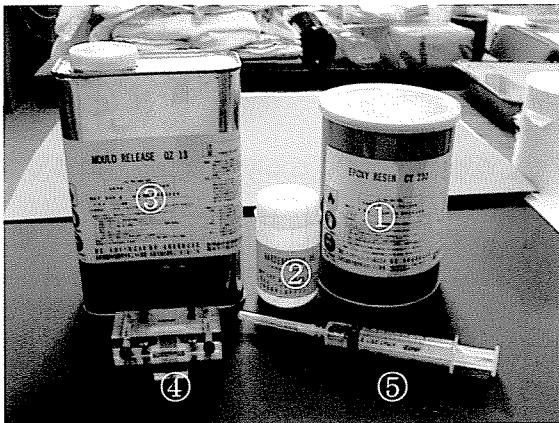
参 考 文 献

- 1) 富士セラミックス: 圧電セラミック テクニカル・ハンドブック (<http://www.fujicera.co.jp/product/j/index.html>)
- 2) 澁谷 啓・古関潤一・川口貴之・加藤正司: 地盤材料の室内せん断試験の基礎から応用まで 3. 室内せん断試験装置・方法の最近の進展, 土と基礎, Vol. 53, No. 5, pp. 37~44, 2005.
- 3) Lings, M. L. and Greening, P. D.: A novel bender/extension element for soil testing, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 8, pp. 713~717, 2001.
- 4) Fioravante, V.: Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 4, pp. 129~142, 2000.
- 5) Dyvik, R. and Madshus, C.: Laboratory measurement of G_{max} using bender elements, *Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, pp. 186~196, 1985.
- 6) Viggiani, G. and Atkinson, J. H.: Interpretation of bender element test, *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 149~154, 1995.
- 7) 例えば Greening, P. D. and Nash, A. F. T.: Frequency domain determination of G_0 using bender elements, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 27, No. 3, pp. 288~294, 2004.
- 8) TC29 国内委員会: 「ベンダーエレメントを用いた国際一斉試験」の実施および試験結果, 土と基礎, Vol. 54, No. 10, pp. 49~52, 2006. (<http://www.jiban.or.jp/e/tc29/index.htm>)

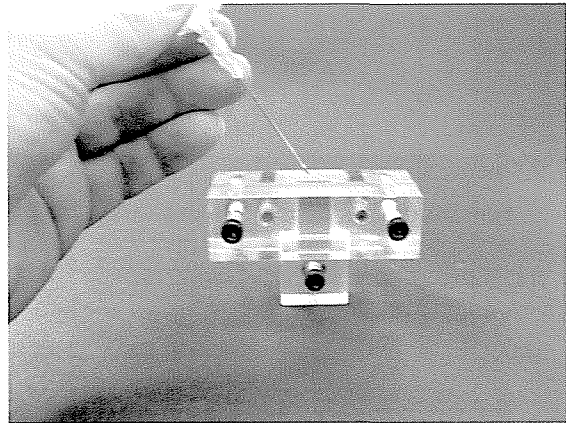
(原稿受理 2007.2.16)

技術手帳「ベンダーエレメント試験」

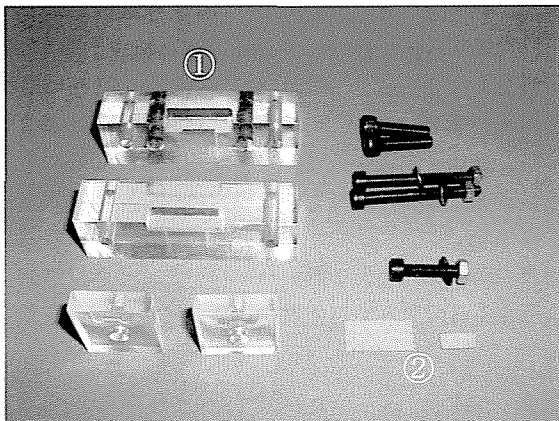
(本文47～48ページ参照)



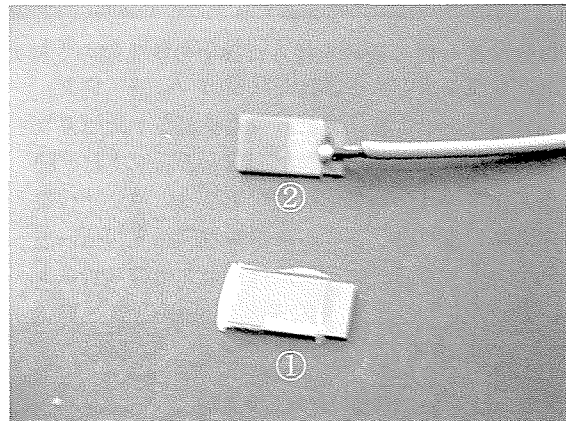
口絵写真一5 ベンダーエレメント作製に用いる用具
①エポキシ樹脂(主剤), ②硬化剤,
③離型剤, ④型枠, ⑤シリンジ



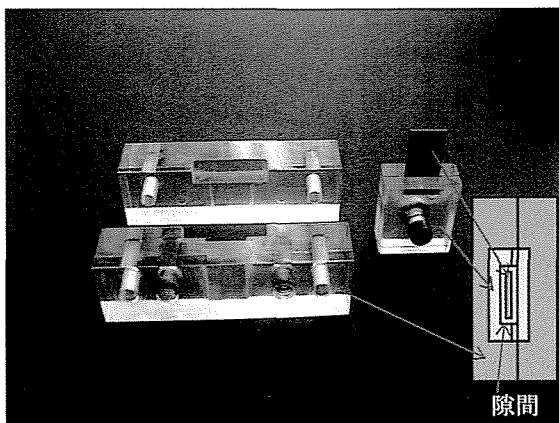
口絵写真一8 セラミックと型枠の隙間にエポキシ樹脂をシリンジで注ぐ



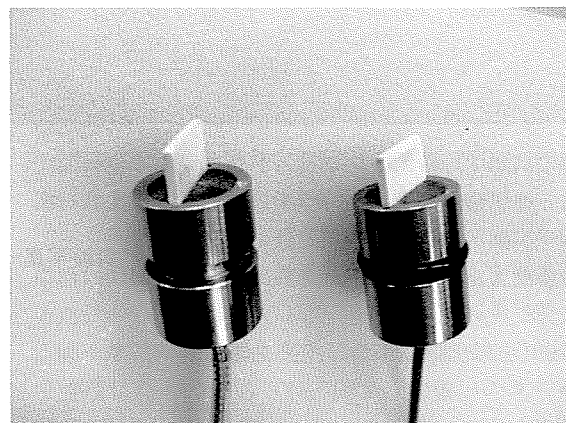
口絵写真一6 ベンダーエレメント作製に用いる用具
①分解した型枠,
②バイモルフ型圧電セラミック



口絵写真一9 型枠からはずしたエレメント①とリード線を半田付けしたエレメント②



口絵写真一7 型枠に取り付けた圧電セラミック



口絵写真一10 スリーブに固定したベンダーエレメント