報文-2113 -----

発振源の違いが PS 検層試験結果に及ぼす影響

Influence of Shaker Sources on PS Logging Test Results

中村嘉博(なかむらよしひろ) 基礎地盤コンサルタンツ㈱地盤探査室室長 酒井運雄(さかいかつお) 基礎地盤コンサルタンツ㈱技術部 部長

亀 井 健 史(かめい たけし) 基礎地盤コンサルタンツ㈱地盤物性室 室長

1. はじめに

現在 PS 検層としては,地表発振孔内受振型のダ ウンホール法と孔内発受振型のサスペンション法が 主に行われている。ダウンホール法(通常,板たた き法と呼ばれている)は,その簡便性と調査費用が 安価な点で広く一般的に利用されている。この方法 では,P波は地表を垂直に打撃することにより発生 させ,S波は地表に設置した板を水平方向に打撃す ることにより発生させている。それぞれ地盤を伝播 してきた波を孔内に仮固定した受振器により観測し, その伝播距離と伝播時間によりP波速度・S波速度 を求めている。

一方, サスペンション法は, 比較的最近開発され たもので理論的にはほぼ解明されており¹⁾, 板たた き法等の地表発振が採用できない場合や, ノイズが 大きく S/N 比が改善できない場合に, 有効な方法 として利用されている。なお発振した波は水を介し て上部の受振器に伝達させるため, 地下水位以深で なければ計測は不能となる。この方法は励起方法が 非常に複雑で, 発振装置と受振装置が一連のゾンデ に組込まれており, 振源から発生した波は水を介し て地盤に伝播する。地盤を伝播してきた波は, 深度 方向に1m間隔で設定された二つの受振器に観測さ れ, この2点間の時間差によってP波速度・S波速 度が求められる。

このように、PS 検層は地盤におけるP波速度・ S波速度を求めるものであるが、両手法による調査 結果の相関性・地盤条件・室内試験結果等との対応 性については研究例が少なく²⁰、不明な点が多い。

上記の点に着目し、本研究ではダウンホール法と April, 1991 サスペンション法により現地調査を行い,発振源の 違いが PS 検層試験結果に及ぼす影響をとりまとめ た。さらに原位置調査結果と室内要素試験結果との 比較検討を行った。

2. 調査概要

現地調査は、千葉県千葉市長沼原町の関東ローム 層と成田砂層よりなる洪積地盤において行った。調 査深度は約30mであり、ダウンホール法では PS 検 層用の孔のほかに、別に深度1mの孔を固定測定用 孔として設定し、測定孔と固定孔の2点間の振幅減 衰から幾何学的減衰を取り除き、土の内部減衰とし てのQ値を求めた(図一10右下参照)。サスペンシ ョン法は、孔井内で孔軸と直交方向に励起された波 動が孔内水を介して孔壁に伝播され、S波の場合は 孔軸に対して直角方向、P波の場合は孔軸方向に振 動する。そのため、不飽和部分の測定は不能となり、 12m以浅は測定できなかった。

原位置調査結果と室内試験結果との対応性を検討 するために,乱さない試料を原位置より採取し,室 内動的ねじりせん断試験と超音波パルス試験を行っ た。動的ねじりせん断試験では,中空にした供試体 に対して,1Hz のねじり変位を与え,せん断応力と せん断ひずみの関係を求めた。一方,超音波パルス 試験は円柱試料の上端部から,S波測定の場合約5 kHzのS波パルスを与え,下端部においてそれぞれ 伝播してきた波を観測し,到達時間を測定するもの である。伝播してきた波の振幅は微小であるため通 常100回ぐらいの繰返し起振を行って,到達振幅を 増幅(通常スタッキングと呼ばれている)させてい

報文—2113

る。

3. 調査結果および考察

ボーリング柱状図とPS検層結果を図-1に示す。 地表面下5m程度まではN値が3前後のロームであ り,通常の関東ロームとみなせる。ローム以深の砂 は,微砂,細砂,貝殻まじり細砂と変化しており、 N値も洪積砂層にしては変化が大きくなっている。 なお,地下水位は地表面下11mに位置している。

PS 検層においては, 伝播した波形を記録するこ とにより伝播時間を求めるが, ダウンホール法によ る記録波形を図-2に, サスペンション法による記 録波形を図-3に示した。図より打撃した瞬時に発 生した波が所定の深度に到達する時までの伝播時間 を読み取り, その時間を伝播距離で除することによ り, P波速度・S波速度を求めることができる。

図-1よりP波速度はダウンホール法,サスペン ション法ともほぼ同じ値を示しているが,S波速度 は両手法によりかなり異なり,サスペンション法に よって得られた値はN値の分布性状と比較的よく対 応している(図-9参照)。一方,ダウンホール法 によるS波速度は通常,図-4(a)に示す走時曲線 に基づいて各層ごとにS波速度を求めている。ダウ ンホール法は板たたき法によりS波を起振させてい るため,発生した波は40~50 Hz 程度の比較的ゆっ くりとした波となっている。そのため波の立ち上が りが明りょうでなく,その結果伝播時間を算出する





深度

(a) P波時間 (m sec)

(b) S 波 時 間 (m sec)

図一3 サスペンション法による記録波形

土と基礎, 39-4 (399)



(b) サスペンション法によるS波速度と深度の関係

場合、立ち上がり点を読み取る際に誤差が生じやす くなる。また、その誤差はS波の伝播速度が速いほ ど大きくなる傾向がある。したがって、その誤差を 小さくするために、現状では走時曲線上で区間分け した平均値を用いて平均S波速度を求めている。同 様にP波速度に関しても走時曲線上で区間分けした 平均値を用いて平均P波速度を求めている。

図-4(b)には、1m深度ごとに求めたS波速度 も示してあるが、かなりのばらつきが認められる。 一方、サスペンション法の場合は図-5(a)に示し た1mごとの走時曲線よりS波速度を求めているが 1mごとのS波速度は図-1においても述べたが、

April, 1991

深さに伴うその変化傾向はN値の分布性状 とよく対応している。この値を従来の手法 と同様に平均化すると図一5(b)のように なり、ダウンホール法による区間分けより、 さらに、詳細に区間分けすることが可能と なる。

以上のことから,N値の分布に対応した 区間分けのS波速度を用いて,動的解析を 行うことにより得られる結果は、その地盤 条件を良く反映しているものと考えられ る。

図一6はダウンホール法とサスペンション法による平均P波速度・平均S波速度の比較を示している。図よりP波速度は地表面下12~15mで値が異なっているものの,

15m以深ではほぼ一致している。またS波速度 は、先述したように16m以深ではダウンホール 法よりサスペンション法による値がN値の分布 性状から判断して詳細に区間分けすることが可 能であると言えよう。

ダウンホール法により求めたS波速度 V_{st} と, サスペンション法により求めたS波速度 V_{ss} の 関係を図-7に示す。ここで、 V_{st} は平均値を 用いて求めた。この図より、両者のばらつきが 20%程度あるものの、その対応性は平均値でみ るとほぼ一致しているものと考えられる。

ダウンホール法とサスペンション法による1 mごとのS波速度の相関性を図-8に示した。 図よりダウンホール法によるS波速度が300

m/s 近傍ではサスペンション法による値の方が 大きめの値を示しており、500 m/s 程度になるとそ の傾向は逆転しサスペンション法による値が小さめ の値を示している。 図一9には、 V_s とN値の関係 を示したが、 V_s はN値の増加に伴って徐々に大き な値を示しており、参考のために示した Imai 式³⁰ はほぼ下限値を示しているようである。また、N値 30以下では式に沿った分布を示しているが、40~50 になるとばらつきが大きくなっている。今回のデー タに基づいた V_s と N 値の関係 を示 す と V_s =93 N^{0.365} となる。なお、この図に示したダウンホール 法の V_s は 1 mごとの値を用いた。

ダウンホール法による試験時に,土の内部減衰と

23

報文-2113



図一7 ダウンホール法とサスペンション法によるS 波速度の関係



図-8 ダウンホール法とサスペンション法による1 mごとのS波速度の関係

してのQ値 (Quality factor)を求めた。このQ値の 定義は、Eを振動の1周期に蓄えられる最大のひず みエネルギー、AEを振動の1周期の間に消費され た内部エネルギーとするとき、

 $Q=2\pi E/\Delta E$

で定義される。これは図一10に示したように、S波 速度の振幅を深度1mの孔中に設置した固定点の受



図一9 S波速度とN値の関係



図一10 S波速度振幅と深度の関係

振波を規準にして減衰量を示したものであり,幾何 学的減衰と内部減衰が含まれている。振幅は地表面 下1m程度から深度10mまでに,約1/10に減衰し, 深度30mでは地表の約1/100となっている。

Q値を求めるために,図一10に示した振幅の波を 周波数分析し,周波数成分ごとの減衰量を求めた。 周波数分析値の第1次卓越周波数と深度の関係を図 一11に示すが,孔中の所定深度で測定した卓越周波 数は,深くなるにしたがって低下していくが,固定 点では 62~63 Hz と変化していないことがわかる。

Q値は固定点の周波数分析値と測定点の分析値の 比を求め、その値の対数から幾何学的減衰特性(今 回は距離減衰だけ)を減ずることにより、図-12に 示したような土の内部減衰特性と周波数の関係が得 られ、その直線回帰式により求めることができる。 また、減衰定数 h は 1/2Q より求められる。なお距

土と基礎, 39-4 (399)



図-12 土の内部減衰特性と周波数の関係

離減衰特性は,多層構造を均質な単層に換算し,密度,S波速度,伝播距離より求めた。

図ー12(a)の各値は7~30mの平均値であり、Q値の周波数ごとの変化は小さく18~28の範囲内にあり、その平均値は21.7となり、減衰定数hは2.3%であった。一方、(b)は7~14mの平均値であるが、Q値は2~120と大きく変化しており、その平均値は18.3となり、減衰定数hは2.7%となった。なお、ここで得られた値は原位置における条件を考えると、微小ひずみ領域における値であるものと考えられる。

室内要素試験では, PS 検層を実施した近傍より 乱さないロームと砂試料を採取し,両試料に対して 動的ねじりせん断試験と超音波パルス試験を行った。

動的ねじりせん断試験は、外径70mm,内径30 mm,高さ100mmの中空供試体に対して行った。 拘束圧は採取試料の有効上載圧とし、等方圧密条件



で実験を行った。圧密終了後,繰返し載荷に用いた 波形は正弦波形とし振動数は 1.0 Hz とした。微小 ひずみレベル($\gamma \rightleftharpoons 1 \times 10^{-5}$)から11波ごとに順次大ひ ずみまでステップ載荷試験を行った。

図-13は、せん断剛性率(G_0)および減衰定数(h) とせん断ひずみの関係を示している。微小せん断ひ ずみにおける砂のせん断剛性率はかなり大きいが、 わずかなせん断ひずみの増加により急激な低下を示 している。一方、ロームは、微小ひずみにおけるせ ん断剛性率(G_0)の値はあまり大きくなく、せん断 ひずみの増加による低下も小さくなっている。

減衰定数hは微小ひずみの時から砂は, ロームの ほぼ2倍程度の値であり, ひずみが大きくなっても 2倍程度の違いであり, せん断剛性率ほどの変化は 認められなかった。また, 微小ひずみ領域における hは1%以下となり, 先述したQ値から算出したh よりかなり小さな値となっている。したがって, 動 的解析において, 減衰定数を決定する際には, 室内 試験の結果を使用する場合は試料深度および層厚を 考慮し, Q値より算出したhを使用する場合には層 厚を検討する必要があろう。

超音波パルス試験装置は,三軸セル内のペディス タル,高圧パルス発生装置,プリアンプ,波形記憶 装置およびシンクロスコープから構成されている。 三軸セル内の上部・下部の両ペディスタル中には, P波・S波用の超音波トランスデューサーが内蔵さ れており,供試体への超音波の送り込み,伝播波の 受振を行う。また,ペディスタル端面には,ポーラ スメタルをはめこみ,供試体への給排水を可能にし

April, 1991

25

報文-2113

土質名	深度(m)	G_{s}	粒	度 分	布	$w_n(\%)$	$V_p(m/s)$	$V_s(m/s)$	$\gamma_l(\mathrm{gf/cm^3})$	$\sigma_0(\text{kgf/cm}^2)$
п-4	2.8	2. 716	砂 分(%)	シルト分(%)	粘土分(%)	133	495	101	1.336	0.40
			18.0	60.0	22.0					
砂	7.8	2. 693	$D_{10}(\mathrm{mm})$	$D_{60}(\text{mm})$	_	26	626	202	1.916	1.10
			0.0025	0.2118						

表一1 試料の物理特性と超音波パルス試験結果

ている。その結果,三軸セル内に設置された供試体 は任意の拘束圧下で,ペディスタルを取り替えるこ となく測定が可能となる。

超音波パルス試験の結果を物理試験結果と共に表 一1に示した。表より実験値は PS 波検層結果と比 較的よい対応を示していることがわかる。なお,こ の試験の起振力は非常に小さいため,距離減衰の大 きな試料の場合には適用上問題があり,ローム程度 が現在のところ限界のようである。

現場における PS 検層から得られた, P波速度・ S波速度に基づいたせん断剛性率と室内試験(動的 ねじりせん断試験・超音波パルス試験)から得られ たせん断剛性率との比較結果を図—14に示す。試験 数は少ないが良い対応をしており,乱さない試料を サンプリングできる比較的締まった地層に対しては, P波速度・S波速度およびせん断剛性率 $G_0(\gamma = 1 \times 10^{-5})$ の決定は室内試験によりある程度評価できる ものと考えられる。



図-14 室内試験と PS 検層による初期せん断剛性率 G₀の比較

4. 結論

以下に本研究より得られた結論を列記する。

- ダウンホール法によるS波の振動数は40~50 Hzと低いため、到達時間の読み取り精度は誤 差を多く含み余り良くないが、深度方向に平均 値として求めた場合にはほぼ妥当な値になる。 また、サスペンション法による結果との対応は ほぼ同様な値となっている。
- 2) サスペンション法においては1mごとに求められるS波速度の深度方向の変化傾向とN値の分布性状はよく対応している。この方法は振動数も高く読み取り精度も良くなり、より詳細に速度区分できる。よって、動的解析を行う際に、N値に対応したS波速度を用いると、より解析結果の精度は向上するであろう。
- 3) 動的ねじりせん断試験と超音波パルス試験から得られたせん断剛性率は比較的相関性が良く、室内における要素試験から原位置におけるP波速度・S波速度、G₀等をある程度評価できる。
- 動的ねじりせん断試験とQ値試験から求めた 減衰定数(h)は、微小ひずみ領域(γ≒1×10⁻⁵) ではQ値試験の方が大きな値を示している。よ って、動的解析における減衰定数決定の際には 注意を要する。

参考文献

- Kitsunezaki, C.: A new method for shear wave logging, Geophysics, Vol. 45, pp. 1489~1506, 1980.
- Ohya, S.: In situ P and S wave velocity measurement, Proc. In situ '86, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 6, pp. 1218~1235, 1986.
- Imai, T.: P- and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. IX ICSMFE, Vol. 2, pp. 257~260, 1977.

(受理原稿 1990.7.19)

土と基礎, 39-4 (399)