

(56) 洪積砂礫試料のせん断波速度

清水建設(株)技術研究所 正会員 西尾伸也
同 上 玉置克之

1.はじめに 最近、原子力発電施設を洪積砂礫地盤へ立地する計画が検討され、極めて大きな地震に対する洪積砂礫地盤の安定性を精度良く評価する方法が要求されている。筆者らは、洪積砂礫地盤の力学特性を解明することを目的として、原位置凍結法で洪積砂礫地盤から試料(直径300mm、高さ600mm)を採取し、液状化試験を中心とした一連の室内試験を実施してきた¹⁾²⁾。本研究では、大型三軸セル内でせん断波速度を測定する方法を検討し、この方法で得られた洪積砂礫試料のせん断波速度について考察を加えた。

2.せん断波速度の測定

(1)測定方法 原位置凍結法で採取した試料は、直ちに端面を成形し、凍結した状態で実験室に運搬した。せん断波速度の測定は、大型三軸セル内に供試体を設置し融解した後、所定の等方拘束圧のもとで行った。図-1に示した水平ピストンで供試体上部のキャップを打撃することによりせん断波を発生させ、それを供試体側面に取付けた複数の加速度計(図-2参照)で受振した。各加速度波形からせん断波の初動時刻を読み取り、その時刻差および加速度計間の距離からせん断波速度を求めた。加速度計は、ゴムバンド(幅10mm・厚さ2mm)を用いてメンブレン表面の所定位置に固定させている。用いている加速度計はプリアンプ内蔵の圧電型で、その性能は、感度 10mV/G、応答周波数範囲 3~12000Hz(±3dB)、共振周波数25kHzである。また、この加速度計は直径14mm・長さ28mm、重量21gfの小型軽量タイプであり、取付けによって供試体の変形が拘束される可能性は極めて小さい。図-3は測定系統図である。

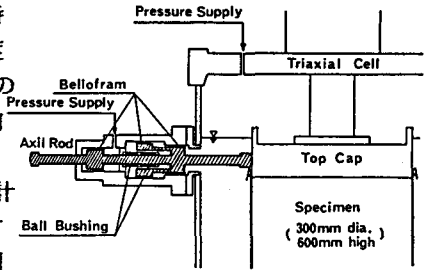


図-1 水平ピストンの構造

(2)測定方法の検証 採取試料での測定に先立ち、測定法の検証を行った。まず、上述した打撃方法によって発生する波の内、供試体以外のパス(三軸セル、セル側液など)を伝播する波の大きさを検討した。キャップおよびベDESTALに加速度計を直接取付け、供試体のない状態でセル液を実際の試験時のレベルまで満たし、上述の方法でキャップを打撃してみた(図-4)。キャップの打撃により発生する波は、ベDESTALではほとんど受信されておらず、計算によればその最大加速度レベルはキャップでのその4%に過ぎない。したがって、供試体以外のパスを伝播する波は実質上無視できることがわかった。続いて、鉄円柱(直径300mm、高さ600mm)を用いて、実際測定される加速度波形の検証を行った³⁾。図-5は、加速度計の鉛直位置を変えた時の測定波形である。図中の数字は、加速度計の位置を供試体上端からの距離(h)で示したものである。また、破線で示したのは、打撃角を供試体に対し180°回転させた時の波形であり、図中左端の矢印は各々の波形の振源方向を表している。どの位置の加速度波形においても位相の反転が認められる。一方、初動の向きに着目してみると、h=400mm程度から振源方向と一致なくなることがわかる。これは、せん断波の前に到達した反射P波成分が重なっているものと考えられるが、その場合もせん断波の立上がりは読取ることができる(図中▲印)。鉄円柱の場合と同様にして、豊浦砂についての測定も実施した。供試体は多重ふるい法で作成し、これを真空で自立させて使用した。図-6はその測定結果である。図-5と同様に、反射P波と思われる波がせん断波に重なっている様子がわ

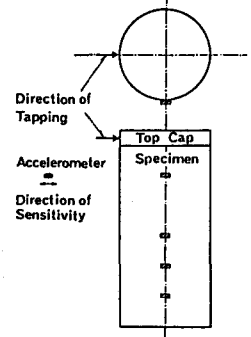


図-2 加速度計の配置

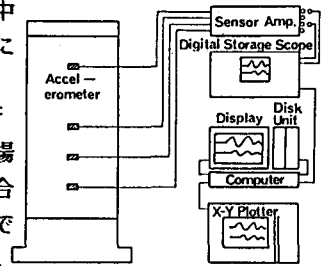


図-3 測定系統図

かる。図-7は、図-5および6から求めた、鉄円柱および豊浦砂の走時を示している。理科年表に記載された鉄のせん断波速度は3240m/secであり、また、後述の式(2)から計算される豊浦砂のせん断波速度は255m/sec ($e=0.66$, $p_c'=98\text{kPa}$)であることを考えると、測定結果は妥当な値である。

(3) メンブレンの影響 観測される加速度波形がメンブレンの存在によってどのような影響を受けるのかを検討した。小型加振機(重量8200gf、加振台直径20mm、共振周波数3100Hz、鉛直加振型)を用い、加振機から発生した振動がゴム(ラテックス)を透過することによってどの程度減衰するのかを検討した。測定は、加振台にゴム片(直径20mm)を置き、その上に加速度計を固定させることにより行い、加振周波数を変えながら得られる加速度振幅を調べた。ゴム厚2mm、0.2mmおよびゴム無しの3ケースについて行った。図-8は、2種のゴムを透過した加速度の振幅($A_{2.0}$:ゴム厚2mm、 $A_{0.2}$:ゴム厚0.2mm)をゴム無しの場合に測定された加速度振幅(A_0)で正規化して示したものである。この図より、ゴム厚2mmの場合は250Hz、0.2mmの場合は700Hzが共振周波数であり、これを境に振幅が激減していくことがわかる。試験に用いるメンブレンは厚さ2mmのものであるが、加速度計の取付け用のゴムバンドの張力やセル圧のために厚さ、剛性が変化することを考えると、実際の試験時には、2mmおよび0.2mmの場合の中間的な挙動を示すことが予想される。したがって、メンブレン表面で加速度を測定する場合、1000Hz程度以上の加速度波形はメンブレン透過による振幅低下が大きく、その検出が非常に難しくなることを覚悟しなければならない。提案した方法で発生するS波の周波数は供試体の共振周波数に等しいと仮定して共振周波数1000Hzの場合のS波速度を試算すると、 $V_s=4 \cdot h \cdot f=4 \cdot (0.6\text{m}) \cdot (1000/\text{sec})=2400\text{m/sec}$ となり、通常の土試料においてはS波の卓越周波数が1000Hz以上になることはないと考えられる。

3. 試料 試料採取は、千葉県の下野野砂礫層で行った。同層は上総層郡内の上部に位置する第四紀洪積世の地層であり、堆積年代は東京礫層よりもやや古い。図-9に試料採取地点の土質柱状図を示す。砂礫層はGL-5.5m以深にあり、N値は50以上、せん断波速度は300~450m/secである。試料採取は、地盤の凍結後、直径300mmのコアチューブを用いて1mごとに行った(採取深度6~9m)。大型三軸試験用の供試体は採取コアの両端を切断し作成したものである(直径300mm、高さ600mm)。図-10は、試験後の供試体を炉乾燥し、その全量から求めた粒度分布を採取深度ごとに示したものである。室内で試料を再構成する場合には、この粒度分布の平均値になるよう粒度調整した試料を供試体(直径300mm、高さ600mm)作成用モールドに詰め、小型バイブレーターでモールド側壁を所定時間加振して密度を高めた。砂礫試料の主な物理的性質を表-1に示す。本研究に用いた試料は、この内、採取深度6~7mおよび8~9mのものである。

4. 試験結果と考察

(1) 拘束圧の影響 Hardin and Richart⁴⁾は、せん断波速度の拘束圧依存性を次式で与えた。

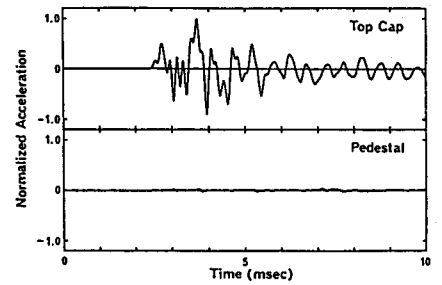


図-4 供試体以外を伝播する波

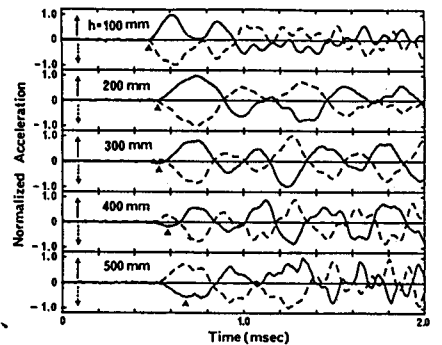


図-5 加速度波形(鉄円柱)

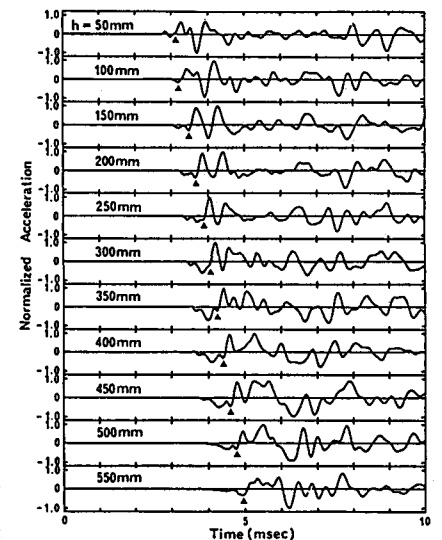


図-6 加速度波形(標準砂)

$$V_s = (111 - (51.0) \cdot e) \cdot (p_c')^{0.25} \quad (0.3 < e < 0.6) \quad (1)$$

$$V_s = (104 - (34.9) \cdot e) \cdot (p_c')^{0.25} \quad (0.6 < e < 1.3) \quad (2)$$

ここに V_s : せん断波速度(m/sec)、 p_c' : 拘束圧(kPa)

上式と比較するため、測定から得られたせん断波速度と拘束圧の関係をまとめてみたのが図-11である。各試料について、両者の関係を直線で近似すると次式が得られる。

$$V_s = 41 \cdot (p_c')^{0.42} \quad (\text{洪積砂礫: 採取深度6~7m, } e=0.35) \quad (3)$$

$$V_s = 75 \cdot (p_c')^{0.32} \quad (\text{洪積砂礫: 採取深度8~9m, } e=0.38) \quad (4)$$

$$V_s = 62 \cdot (p_c')^{0.29} \quad (\text{再構成砂礫: } e=0.33) \quad (5)$$

$$V_s = 81 \cdot (p_c')^{0.22} \quad (\text{豊浦砂: } e=0.68) \quad (6)$$

豊浦砂の場合(式(6))は、 $e=0.68$ を代入した式(2)と良く一致している。一方、洪積砂礫の場合は、拘束圧の指数が、式(1)、(2)と比較して著しく大きいことが注目される。また、試料採取地点の上載圧における、洪積砂礫および再構成砂礫のせん断波速度を見みると、採取深度6~7m(112kPa)では、300m/sec(式(3))および240m/sec(式(5))、また、採取深度8~9m(154kPa)では、380m/sec(式(4))および270m/sec(式(5))となり、洪積砂礫に比べ、再構成砂礫のせん断波速度は、20~30%低下していることがわかる。

(2) 動的変形試験との比較

せん断波速度の測定と並行して動的変形試験を行った。軸荷重だけを、振幅一定、周波数0.1Hzの条件で変動させるステージテストで行い、各ステージで5波の荷重を与えながら、せん断ひずみが 10^{-4} 程度になるまで繰返し荷重を増加させた。この試験から求めた、せん断ひずみ 10^{-5} におけるGと

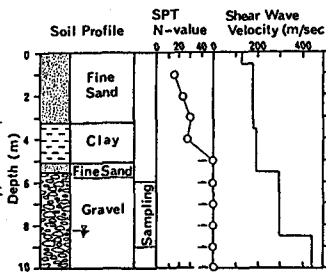


図-9 試料採取地点の土質柱状図

せん断波速度から計算したGを比較したのが図-12である。両者の間には非常に良い相関が認められる。しかし、Gの値自体は動的変形試験から求めたものが5%程低くなっていることがわかる。両者測定時の土粒子の運動方向を考えると、せん断波が伝播する時は主に水平方向であるのに対し、動的変形試験時ではせん断面に沿った方向の動きが卓越することが想定される。したがって、図-12に見られたGの相違は、洪積砂礫の水平堆積構造に起因する異方性の影響と考えることもできる。

(3) 試料の乱れ

Tokimatsu and Hosaka⁵⁾は、試料の乱れはサンプリング中のせん断応力履歴に起因するとし、原位置および採取試料のせん断剛性を比較すれば試料の乱れを評価できることを指摘した。そこで、せん断波速度を比較することにより洪積砂礫試料の乱れについて検討してみた。上述したように、洪積砂礫のせん断波速度は顕著な拘束圧依存性を示すため、原位置および室内で測定したせん断波速度を比較する場合、原位置の応力状態を考慮する必要がある。地質学的に見ると、試料を採取した砂礫層は、約

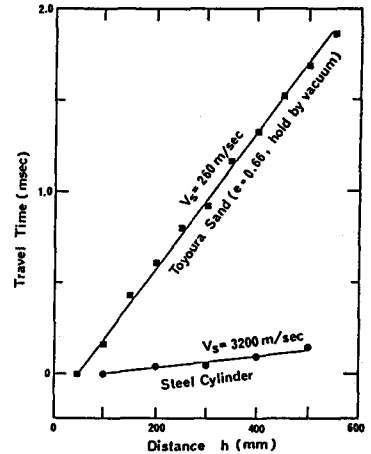


図-7 せん断波の走時

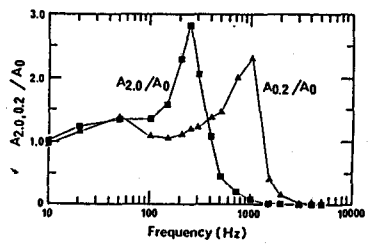


図-8 ゴムによる加速度振幅の変化

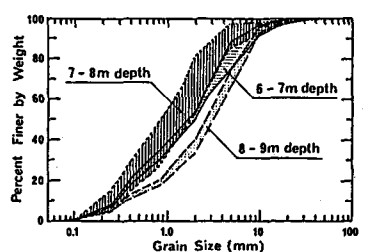


図-10 採取試料の粒度分布

表-1 洪積砂礫試料の物理的性質

採取深度(m)	6-7	7-8	8-9
比重	2.66	2.67	2.66
* 間隙比	0.36	0.44	0.38
* 最大粒径(mm)	76	94	55
* 均等係数	8.6	5.7	10.3
* 平均粒径(mm)	1.8	1.2	2.8
* 細粒分(<74μm)(%)	0.43	0.56	0.33
* 相対密度(X)	85.2	76.0	89.9

* : 6供試体の平均値

200m厚の層が上載されていたと判断され、現在の砂礫層は過圧密状態にあると考えられる。そこで、原位置の K_0 の値を1.0~2.0の範囲で考えることとし、その範囲では、せん断波速度におよぼす応力異方性の影響は少ない⁶⁾とすれば、せん断波速度は、有効上載圧(σ'_v)を用いて、次式で考えることができる。

$$V_s = C \cdot ((1 + 2 \cdot K_0)/3)^m \cdot (\sigma'_v)^m \quad (1.0 < K_0 < 2.0) \quad (7)$$

上式中の定数 C 、 m として、式(3)および(4)の値を使うことにより、室内の等方応力状態で求めたせん断波速度について、 K_0 値による変動を算定できる。図-13は、(σ'_v)を横軸にとり、この方法で求めた採取試料のせん断波速度の変動範囲と原位置で測定した試料採取地点のせん断波速度を比較したものである。設定した K_0 値の範囲で、両者のせん断波速度は良く一致しており、サンプリングによる試料の乱れはほとんど無いことがわかる。また、図には、同様にして求めた再構成砂礫のせん断波速度の変動範囲も示してあるが、この場合は、原位置の値に比べかなり低くなっており、特に、せん断波速度の大きな時($\sigma'_v=154\text{kPa}$)にその低下が著しいことが注目される。

5. 結論

- (1) 鉄円柱、豊浦砂を用いた予備試験で、提案したせん断波速度測定法を検証した結果、測定されるせん断波速度は妥当なものであることが確認できた。
- (2) せん断波速度の拘束圧依存性は、きれいな砂に比べ洪積砂礫の方が顕著である。
- (3) 試料採取深度における原位置上載圧でのせん断波速度を見ると、再構成砂礫供試体の方が洪積砂礫供試体に比べ、20~30%低い。
- (4) 動的変形試験から求めたせん断ひずみ 10^{-5} におけるせん断弾性係数は、せん断波速度から求めたものに比べ、5%程低くなる。
- (5) $K_0=1.0\sim 2.0$ の範囲で考えると、採取試料で測定したせん断波速度は原位置で測定したものと良く一致していることが確認され、サンプリングによる試料の乱れはほとんど無いと判断できる。
- (6) 同一の上載圧で比較すると、再構成砂礫のせん断波速度は原位置の値よりかなり低くなっており、特に、原位置のせん断波速度の大きな時にその低下が著しい。

(参考文献)

- 1) 社本ら(1986): 凍結採取された不攪乱砂礫試料の動的強度変形特性、粗粒材料シンポジウム発表論文集
- 2) 玉置ら(1987): 洪積砂礫試料の静的強度変形特性、第22回土質工学研究発表会講演集
- 3) 西尾ら(1987): 大型三軸セルを用いたS波速度の測定(その2)、第22回土質工学研究発表会講演集
- 4) Hardin, B.O. and Richart, F.E., Jr. (1963): Elastic wave velocities in granular soils, Proc., ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 33-65
- 5) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. (1986): Effects of sample disturbance on dynamic properties of sand, S&F, Vol. 26, No. 1, pp. 53-64
- 6) Peiji Yu and Richart, F.E., Jr. (1984): Stress ratio effects on shear modulus of dry sands, Proc., ASCE, Vol. 110, No. GT3, pp. 331-345

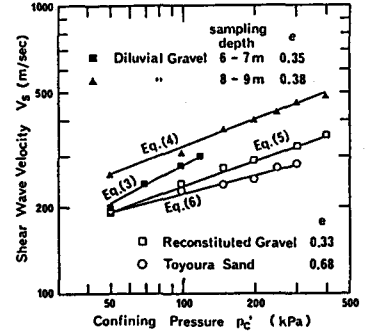


図-11 せん断波速度の拘束圧依存性

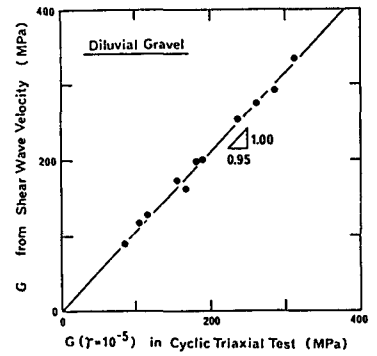


図-12 動的変形試験結果との比較

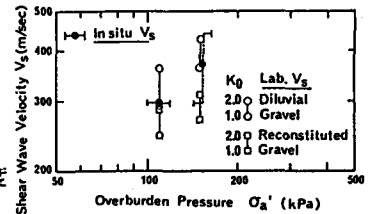


図-13 原位置および室内で測定したせん断波速度