

サイスミックコーン試験の適用例と測定データの振幅特性に関する考察

西田 薫¹・高村透²・中島雅之²・田中洋行³・田中政典⁴

¹正会員 埼玉大学理工学研究所, (株)ダイヤコンサルタント 技術研究所
(〒330-8660 埼玉県大宮市吉野町2-272-3)

²正会員 (株)ダイヤコンサルタント 技術研究所 (〒330-8660 埼玉県大宮市吉野町2-272-3)

³正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 土質部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 運輸省港湾技術研究所 土質部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

ボーリング孔を用いなくて比較的簡単に地盤の動的特性 (S波速度) を計測することのできるサイスミックコーン貫入試験装置を用い、現地調査を行った。2 レシーパ型のサイスミックコーンを用いた測定では、従来のダウンホール型のPS検層方式で得られる速度分布に比べて、土質の変化に対応したより詳細な速度分布を得ることができた。また、試験に伴うせん断ひずみの大きさは 10^{-6} ~ 10^{-7} 程度であり、球面波近似を用いて速度振幅の減衰曲線から求めた減衰定数 h は室内繰返しねじりせん断試験で得られた減衰定数 h とほぼ一致した。S波速度はせん断剛性を表す地盤の重要なパラメータであり、本試験方法は一般的な地盤調査法として利用されることが期待される。

Key Words : in situ test, seismic cone, penetration test, S wave velocity, soft ground

1. まえがき

地盤の地震時応答を計算する時に必要なS波速度を求める方法としてこれまではボーリング孔内で実施するPS検層によるのが最も一般的であった。しかし、PS検層を実施する場合には、ボーリング孔を掘削する必要があること、軟弱層の場合にはケーシングなどの保孔措置が必要であり、ケーシング内ではしばしば測定が困難であること等の問題がある。

一方、サイスミックコーン試験方法は、地盤中に貫入する測定コーンの内部に受振器を内蔵し、押し込み装置で一定深度ごとに押し込みながら地表においた振源からS波を発振してS波速度の深度分布を測定する方法で、1980年代に P. K. Robertson et al.¹⁾ によって実用化された。

筆者たちは平成4年からサイスミックコーンの測定装置の開発と我が国の地盤への適用性の検討を実施してきた^{2), 3)}。その結果、以下の点について明らかにすることができた。

①我が国の海岸平野を構成する自然地盤から埋立て

地盤においては十分実用的な調査法である。

②土質に対応したS波速度分布が求められる。従来のダウンホール方式の測定によって走時曲線の勾配から求めた平均速度に比べて平均的には10数%の解析精度の向上が見込まれる。

③N値が小さい(1~2程度)軟弱地盤においてもS波速度を求めることができる。

④試験に伴うせん断ひずみの大きさはおおむね 10^{-6} ~ 10^{-7} 程度である。

本論文ではまず、サイスミックコーン試験方法の特徴およびS波速度の解析方法の概要について述べ、次いで海外数カ所を含む調査地点でこれまで得られたデータについてS波速度 V_s と深度 Z の関係、 V_s と先端抵抗 q_t の関係についてまとめた。さらに実測データに基づいて、測定に伴うせん断ひずみの大きさを評価し、振幅データから求めた減衰定数 h と速度データから求めたせん断剛性率 G_f について、室内試験結果との比較検討を行った。

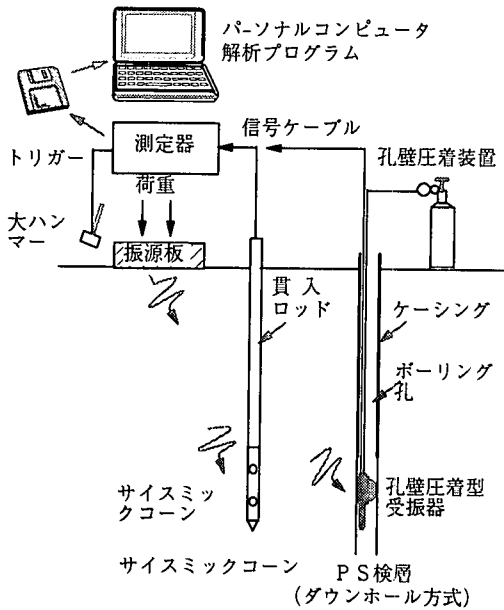


図-1 サイズミックコーン試験とPS検層の測定模式図

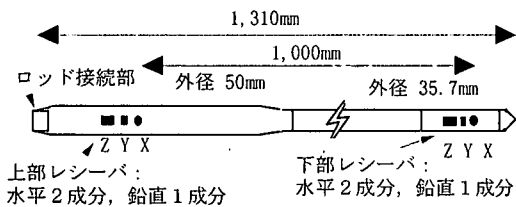


図-2 2レーザ型（レーザバ間隔1m）のサイズミックコーンの構造図

2. サイズミックコーン

図-1にサイズミックコーン試験方法の測定模式図をPS検層と対比して示す。サイズミックコーン試験の特徴は次のようにまとめられる。

- ①ボーリング孔を必要としないので、貫入装置と測定装置を搬入すれば現地に到着してすぐに測定が開始できる。
- ②ボーリング孔掘削に伴う問題点、ケーシングを伝播するノイズによる測定障害がない。また、調査に伴う地盤の乱れはボーリング掘削に比べて程度が小さい。
- ③一方、貫入装置で測定コーンを地中に押込むことのできる地盤にしか利用できない。したがって、N値が30程度以上の固い地盤や軟岩では利用で

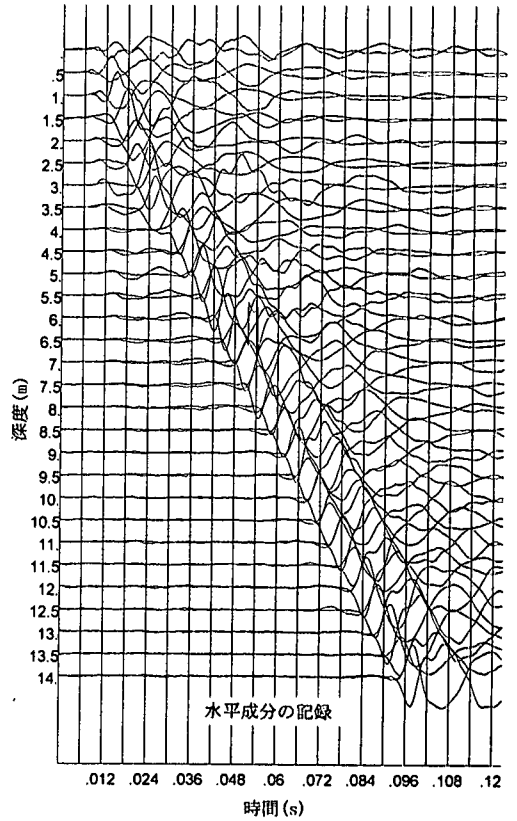


図-3 波形記録の例（羽田地点）

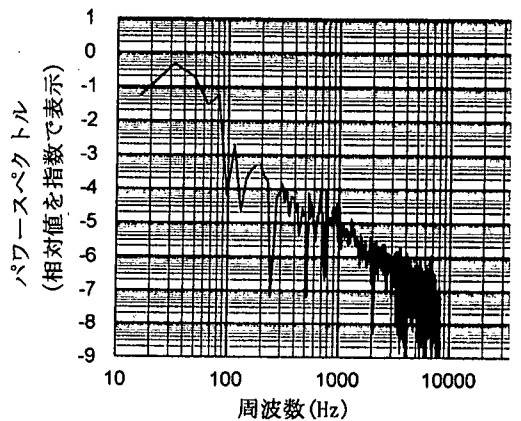


図-4 測定波形のパワースペクトルの例

きないという短所がある。

図-2に2レーザ型（レーザバ間隔1m）のサイズミックコーンの構造図⁴⁾を示す。

図-3に測定波形の例を示す。図-3は地表の板たたき振源の打撃方向に平行な方向の水平成分を深度ごとと並べた波形記録であり、板たたき振源の打撃方

向を反転した2つの記録を同一深度に重ねて示してある。図-3から水平成分の波形は初動の立ち上がりが見え、打撃方向の反転によって初動部分の位相も反転していること、水平成分にはS波以外の波動がほとんど見られないことがわかる。

図-4に示した測定波形のパワースペクトル例からは20~50Hz付近の帯域が卓越していることがわかる。

3. S波速度の解析方法と解析精度

(1) 測定パラメータ

サイズミックコーン試験のS波の発振源としては、板たたき法を用いることが多い。油圧駆動方式や電磁ハンマーを用いた板たたき振源も開発されているが、サイズミックコーンの場合にはS波の到達深度も大きくはないこと、なるべく簡便な装置が望ましいこと等の理由から筆者らは大がかりな装置を必要としない人力による板たたき法を用いている。

サンプリング間隔は区間速度の解析精度を向上させる上で重要である。筆者らが行っている測定では60~100 μ s程度であることが多く、予想される地盤のS波速度によって変えている。

(2) 解析方法

サイズミックコーンからS波速度を求める方法には次の3つの方法が考えられる²⁾。

a) 方法A (平均速度の算出)

ダウンホール方式のP S検層でS波速度を求める方法と同じように地表面からS波が到達した時間を横軸に、深度を縦軸にとってプロットした走時曲線の勾配から求める方法がある。この場合には走時曲線が曲がる点を速度境界とし走時曲線の平均勾配をその地層のS波速度としている。この場合は細かな速度の変化を求めることは難しいが、平均的な速度を求めるには適しており、よく用いられる。

b) 方法B (準区間速度の算出)

深度が異なる2点でのS波の到達時間の差と深度間隔を用いて区間速度を計算することができる。1レーバ型の測定の場合で、なるべく細かな速度変化を求めたい時に利用される。しかし、この場合には振源に取り付けたトリガースイッチのタイミングのわずかなズレ、振源板の接地状態のわずかな違いによる到達時間のズレなどが、区間速度の中に誤差として入ってくる可能性があるため、測定状態の変化には細心の注意が必要である。参照用の受振器を

孔口近くの固定点にとって上記の原因による時間的誤差を補正することも可能である。

c) 方法C (区間速度の算出)

2レーバ型のサイズミックコーンを用いると方法Bで述べた誤差は考慮する必要がなくなる。すなわち、上述のように振源機構に関するわずかなタイミングのズレがあったとしても、2箇所のレーバは同一波動を観測しているため、2波形の時間的な差はこの区間の地盤のS波伝播速度と伝播距離にだけ依存しているものと考えて良い。2波形の時間差を波形対比によって求めることによって、より精度よく2レーバ間の区間速度を求めることができるようになった。

この場合の区間速度の計算方法には次の2つの方法が考えられる。いずれも波動の伝播経路は直線であることを仮定し、局所的な速度の不均一さはないことを前提としている。

①速度構造が水平成層構造であることを仮定し、振源の孔口からのオフセットを補正した鉛直伝播走時を用いる方法。

振源オフセットを補正した走時 t_h (s) および区間速度 V_{int} (m/s) は次式から求める。

$$t_h = z / (d^2 + z^2)^{1/2} \cdot t_o \quad (1)$$

ここで z : レシーバの深度(m)

d : 振源の孔口からの水平距離 (オフセット, m)

t_o : 原走時(s)

$$\text{区間速度 } V_{int} = (z_2 - z_1) / (t_{h2} - t_{h1}) \quad (2)$$

z_1, t_{h1} : 上部レーバの深度および初動補正走時(m, s)

z_2, t_{h2} : 下部レーバの深度および初動補正走時(m, s)

②2つのレーバまでの距離差と到達走時差を直接用いる方法

区間速度 V_{int} (m/s) は次式から求める。

$$V_{int} = \{ (d^2 + z_2^2)^{1/2} - (d^2 + z_1^2)^{1/2} \} / (t_{o2} - t_{o1}) \quad (3)$$

t_{o1} : 上部レーバまでのS波到達走時(s)

t_{o2} : 下部レーバまでのS波到達走時(s)

(3) 解析精度

サイズミックコーンが対象とする地盤のS波速度は50~350m/s程度であり、0.5mのレーバ間隔で測定する場合、区間速度50~350m/sは時間差で10~1.4msとなり、サンプリング間隔60 μ sの場合にはサンプリング数にすると160~23サンプルに相当する。したがって、この場合のサンプリング間隔によって決まる区間速度の分解能は0.6~4%であ

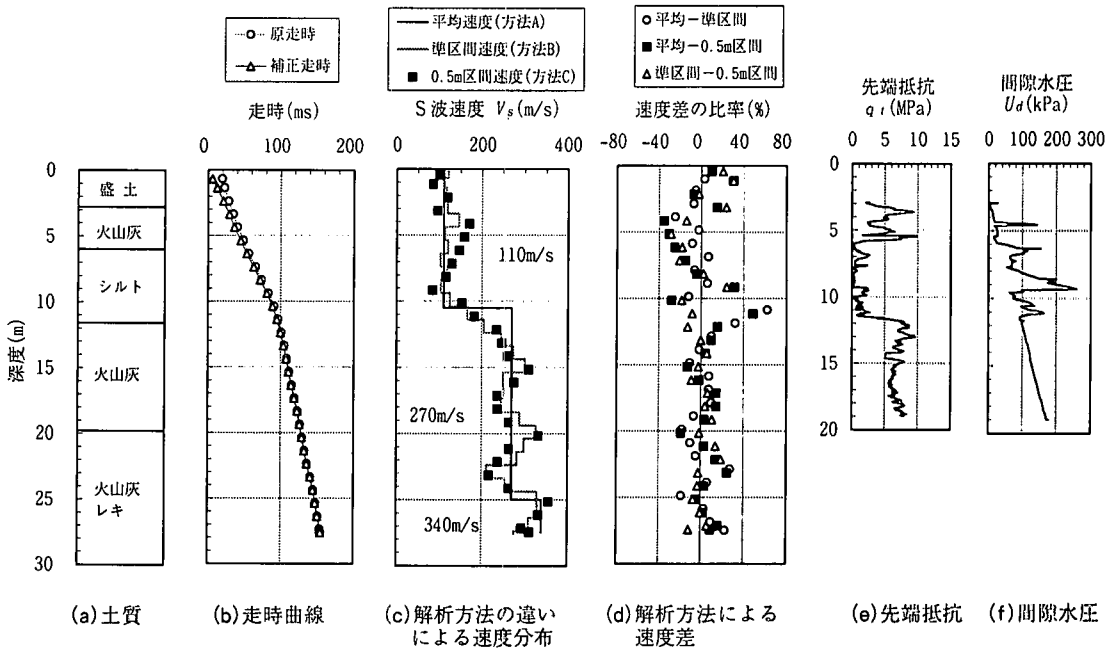


図-5 解析方法による速度分布の解析結果の比較

る。

P波を計測することを考えると、地下水で完全飽和したゆるい砂層などの場合、P波速度は1500m/s程度と考えられるので0.5mのレーバ間隔での時間差が330 μ sであり60~100 μ sのサンプリング間隔では到達時間差に対応するサンプリング数は数点に過ぎない。したがって、P波の測定を対象とする場合には0.5mの区間速度の精度のよい算定は困難である。

図-5には走時曲線から求めた平均速度(方法A)、1レーバの測定から求めた準区間速度(方法B)、2レーバ型サイズミックコン測定による区間速度(方法C)を比較した例を示す。

図-5(a)には調査地点の土質を、図-5(b)には走時曲線も併せて示した。ここで補正走時は振源の孔口からのオフセット補正後の走時のことである。この補正には上述した式(1)を用いた。

図-5(c)から全体としての傾向を比較すると3方法による速度分布はほぼ一致しているが、局部的には違いが認められる。平均速度法では一定と見なせる深度区間でも区間速度で見ると局部的な速度の変化が認められる。特に深度10.5m付近においては平均速度法では顕著な速度境界になっているが、準区間速度と0.5m区間速度の分布では10~15m間で速度が漸増する傾向を示している。そして、すべての深度において準区間速度と0.5m区間速度の分布は概

表-1 速度差の比率の計算結果

各速度差の比率	平均値 (%)	絶対値の平均 (%)	標準偏差 (%)
平均速度-準区間速度	3.0	12.5	17.6
平均速度-0.5m区間速度	2.9	14.9	19.5
準区間速度-0.5m区間速度	0.1	11.3	14.5

ね一致している。

図-5(d)では速度値の相対的な差を比率(%)で示した。例えば平均速度と0.5m区間速度の差は次式で計算した。

$$\text{平均速度}(V_{av}, \text{m/s}) \text{と} 0.5\text{m区間速度}(V_{0.5}, \text{m/s}) \text{の差の比率}(\%) = (V_{av} - V_{0.5}) / V_{0.5} \cdot 100$$

各速度差の比率(%)についての統計量を計算した結果を表-1に示す。

表-1から、平均速度の計算誤差は、絶対値の平均では11~15%程度あることがわかる。原位置せん断剛性率 G_f (Pa)は次式によって計算されるのでS波速度 V_s (m/s)の誤差はせん断剛性率に約2倍の影響を及ぼすことから、平均速度を用いると G_f の誤差は最大で30%程度にもなることがあり得る。

$$G_f = (\gamma / g) \cdot V_s^2 \quad (4)$$

ここで γ : 地盤の単位体積重量(N/m³)

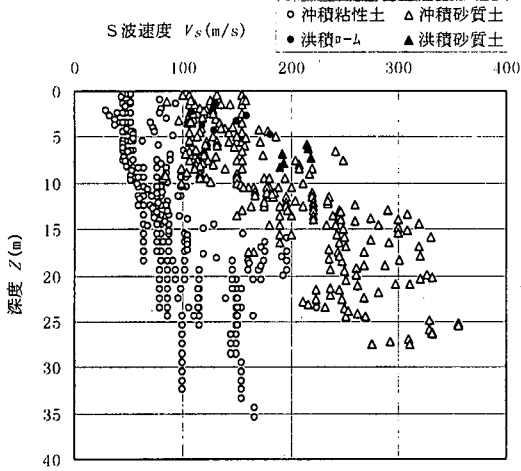


図-6 S波速度の深度分布

g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)

図-5(e), (f)には同一孔で2レーバ, 3成分測定型コーン⁵⁾を用いて貫入試験を実施し, 先端抵抗と間隙水圧を測定した結果を示す。速度分布と貫入試験結果を対比すると区間速度の局部的な変化は土質の違いに対応していることがよくわかる。

4. 測定データの検討

(1) S波速度と深度の関係

これまで海外・2地点を含む 17地点において現地測定を行った。図-6にはこれまでの調査から得られたS波速度を深度に対してプロットした図を示す。ここでのS波速度は平均速度も区間速度も同等に扱い, 平均速度は1m深度ごとに同じ値を与えた。プロット図は沖積層の粘性土(粘土, シルトを主とする), 沖積層の砂質土(細砂, 中砂を主とする), 洪積層のロームおよび洪積層の砂質土の4つに土質を分類して示した。貫入最大深度について見ると, これまでの実績では沖積層の粘性土で35m, 砂質土で28m, 洪積層では9m程度であることがわかる。また, S波速度について見ると沖積層の粘性土では30~200m/s程度, 沖積層の砂質土では70~350m/s程度の範囲にあることがわかる。また, データ数が少ないが洪積層のロームは110~180m/s程度, 洪積層の砂質土は190~220m/s程度を示している。

(2) S波速度と先端抵抗 q_t の関係

田中, 田中⁶⁾はサイスミックコーンから得られたせん断剛性率 G_{sc} (MPa) と先端抵抗 q_t (MPa) の間に

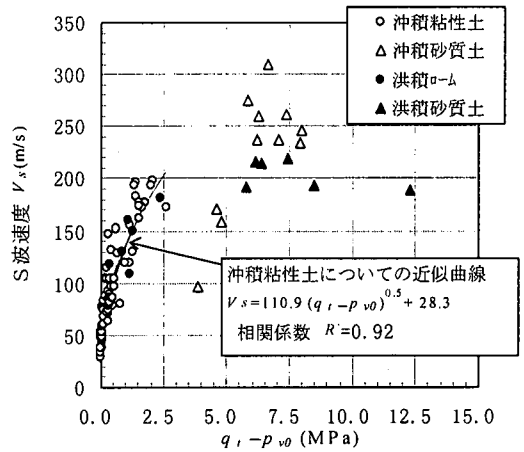


図-7 S波速度と先端抵抗の関係

粘性土については次式の関係があることを示した。

$$G_{sc} = 50 (q_t - p_{v0}) \quad (5)$$

ここで p_{v0} (MPa)は全応力による土被り圧である。この関係をもとにして高村ら⁵⁾はS波速度 V_s (m/s) と先端抵抗 q_t (MPa) の間に次の関係があるとしている。

$$V_s = (\text{土質別の定数}) \cdot (q_t - p_{v0})^{0.5} \quad (6)$$

図-7にはS波速度 V_s と $q_t - p_{v0}$ の関係を4地点のデータについて示した。沖積層の粘性土については両者の間に良好な相関関係が認められ, 次の回帰式が得られた。回帰曲線は図中に示した。

$$V_s = 110.9 (q_t - p_{v0})^{0.5} + 28.3 \quad (7)$$

(相関係数 $R = 0.92$)

沖積層の砂質土についてはデータがばらつきすぎるために, 洪積層のロームと洪積層の砂質土についてはデータ数が少ないために回帰式を示していない。洪積層のロームは沖積層の粘性土とほぼ同じ関係を示している。沖積層の砂質土と洪積層の砂質土はそれぞればらつきが大きい, 沖積層の粘性土層について得られた式(7)で与えられる関係より, 同じ V_s に対して $q_t - p_{v0}$ が大きい方向にシフトする傾向が認められる。

(3) せん断ひずみ

サイスミックコーン試験で得られた波形データを解析して, 試験時におけるせん断ひずみの大きさを求めた。

a) せん断ひずみの計算方法

波動伝播によるせん断ひずみ γ の大きさは次式で与えられる^{1), 7)}。

$$\gamma = v_{max} / V_s \quad (8)$$

ここで v_{max} : 測定点での振動速度の最大値 (m/s)

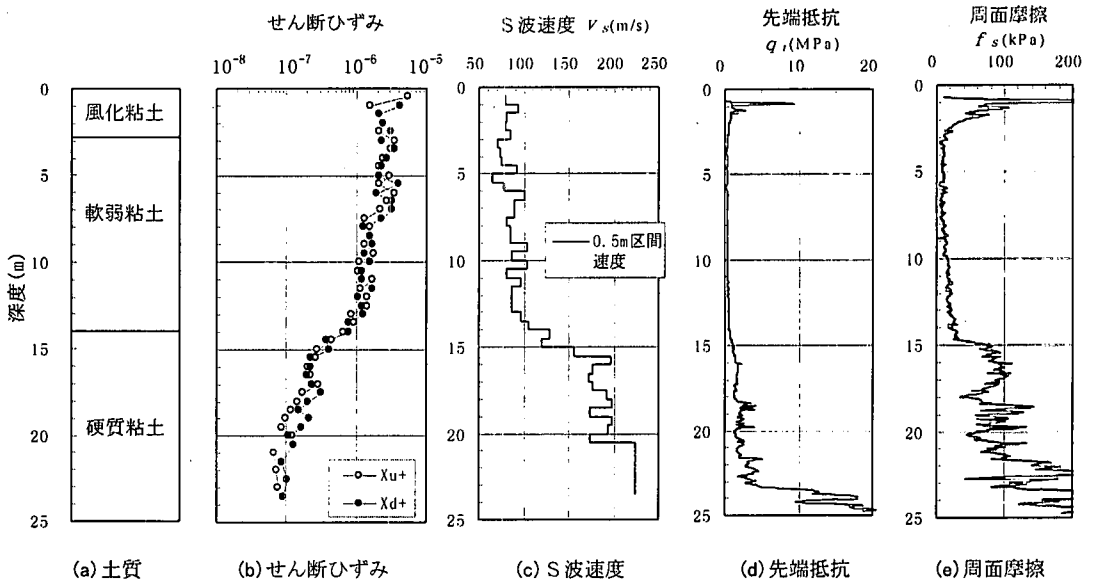


図-8 せん断ひずみの深度分布 (バンコク地点)

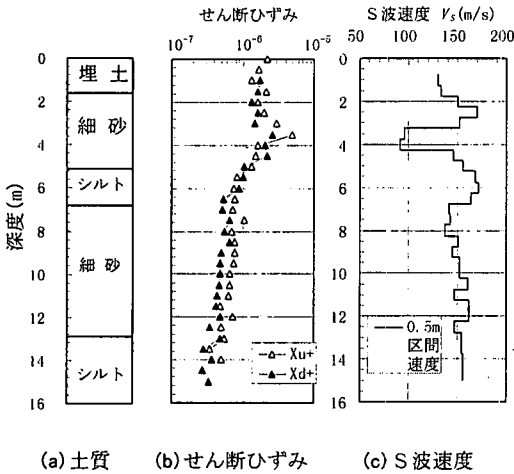


図-9 せん断ひずみの深度分布 (羽田地点)

V_s : 波動の伝播速度 (m/s)

振動速度は時間的に変動するのでここでは各深度での振動速度の最大振幅を求め、最大せん断ひずみを求めることとした。求めた速度振幅はスタック(データを重ね合わせる)回数を考慮し、1回当たりの打撃による振幅に換算して表示している。

b) せん断ひずみの計算結果

図-8および図-9に式(8)を用いてせん断ひずみを求めた結果を示す。図-8(a)には調査地点の土質を示す。図-8(b)は上部レーパと下部レーパについてのせん断ひずみの計算結果である。Xu+は上部レーパのX成分、Xd+は下部レーパのX成分についてのデータを示す。図-8(c)は同じデータから

求めたS波速度分布を、図-8(d)、(e)は同じ地点での電気式静的コーン貫入試験結果のうち、先端抵抗と周面摩擦の結果を示す。

この結果から測定時のせん断ひずみは振源に近い浅い深度で 10^{-6} 程度であり、15m程度で深では 10^{-7} 程度に低下することがわかる。また、深度15m付近でのS波速度境界でせん断ひずみの急激な低下が生じていることがわかる。これは、この付近の深度における速度境界での透過波の振幅減衰によるものである。

調査地点は全く異なるが、図-9の例も全深度にわたって $10^{-6} \sim 10^{-7}$ のせん断ひずみを示し、深度15m付近で表層部の約1/5に減少することがわかる。この例でもせん断ひずみの大きさはS波速度の大きさと関係し、S波速度の小さい4m付近で相対的にせん断ひずみが大きくなっている現象が見られる。

これまで原位置弾性波速度測定でせん断ひずみの大きさは 10^{-6} 程度^{11)・8)・9)}とされてきたが、サイスミックコーンでも同程度となっている。

(4) 減衰定数

a) 減衰定数の計算方法

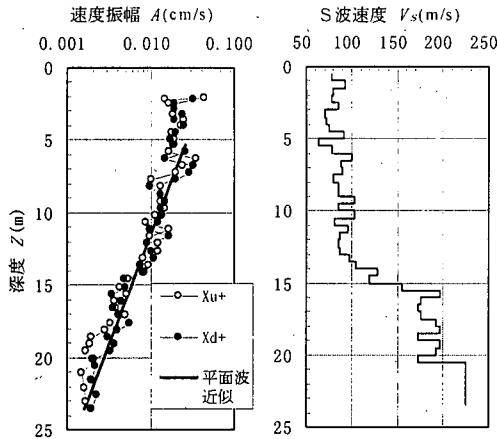
サイスミックコーンの測定記録から地盤の減衰定数 h および波動の減衰を表す無次元量 Q (quality factor) 値を求めることができる。

Q 値は次のように定義される。

$$Q = 2\pi E / \Delta E \quad (9)$$

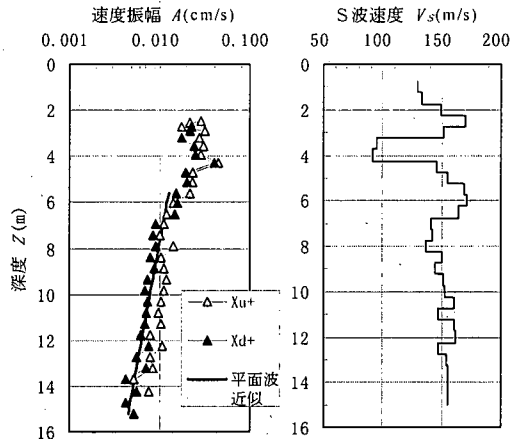
E : 1周期中に蓄えられる全エネルギー

ΔE : 1周期中に内部摩擦によって消費される



(a) 速度振幅 (b) S波速度

図-10 速度振幅と深度の関係 (バンコク地点)



(a) 速度振幅 (b) S波速度

図-11 速度振幅と深度の関係 (羽田地点)

表-2 減衰定数等の計算結果

調査場所	深度区間 (平均S波速度)	平面波近似 $\{A = A_0 \cdot \exp(-\alpha Z)\}$			球面波近似 $\{A = A_0/Z \cdot \exp(-\alpha Z)\}$		
		減衰係数 α	Q値	減衰定数 h	減衰係数 α	Q値	減衰定数 h
バンコク 地点	5-15m (95.5m/s)	0.152	10.8	0.046	0.044	37.5	0.013
	15-23.5m(191.1m/s)	0.152	5.4	0.093	0.044	18.8	0.027
羽田地点	5-15m (153.7m/s)	0.108	9.4	0.053	0.032	31.9	0.016

エネルギー

ここでは最も基本的と考えられる次の方法¹⁰⁾を用いてまずQ値を求め、ついで h を求めた。

- ①測定記録から速度振幅の最大値 A と深度 Z の関係を求める。この時に振源のオフセット距離を考慮し、深度軸に振源からの斜距離をプロットする。
- ②振幅 A は減衰係数 α を用いて次式で表すことができる。

平面波を仮定した場合：

$$A = A_0 \cdot \exp(-\alpha Z) \quad (10)$$

球面波を仮定した場合：

$$A = A_0/Z \cdot \exp(-\alpha Z) \quad (11)$$

なお、 $\{(振源の長さ/2)/測定深度\}$ の2乗が十分小さく、1に比べて無視できる場合には、板たたき法のような水平ずり応力振源は点振源と見なして良いとされている¹¹⁾。

- ③速度振幅の最大値 A と深度 Z の関係について、最小2乗法を用いて減衰係数 α を求める。
- ④Q値は減衰係数 α から次式を用いて計算できる。

$$Q = \pi f / (\alpha V_s) \quad (12)$$

ここに f : 卓越周波数

V_s : S波速度 (位相速度)

- ⑤減衰定数 h はQ値から次の関係を用いて求める。

$$h = 1/(2Q) = \alpha V_s / (2\pi f) \quad (13)$$

b) 減衰定数の計算結果

図-10および図-11に速度振幅またはS波速度と深度の関係を示した。図中には平面波近似の回帰曲線も示してある。図-10は図-8と、図-11は図-9と対応しており、それぞれ同じデータを用いている。S波の発生は人力による打撃方式であるので、厳密には1回ごとの起振で発生した波動の大きさは異なるはずであるが、ここでは概ね同じ測定者が打撃していることからほぼ一定であると見なしている。

表-2に計算結果をまとめて示した。S波速度は区間速度の単純平均を、卓越周波数は波形記録から最大振幅付近の周波数を調べ、深度によって大きく変わることがなかったので、一定値 50Hzを2地点ともに用いた。

また、計算で得られたQ値は平面波近似の場合には 5.4~10.8、球面波近似の場合には 18.8~37.5 の範囲にあり、正木ほか¹⁰⁾ 求めた結果とほぼ同じ値を与えている。また、減衰定数 h について見

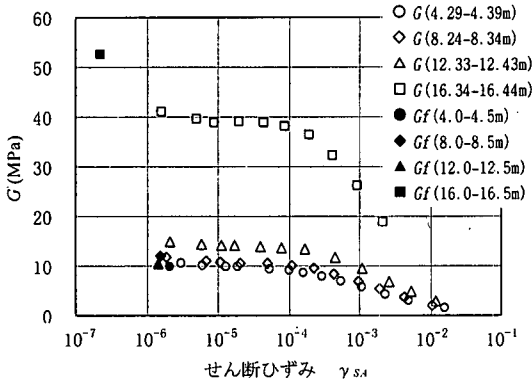


図-12 せん断剛性率とせん断ひずみの関係 ($G \sim \gamma$)

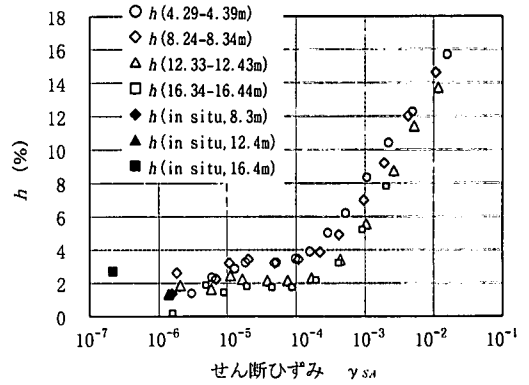


図-13 減衰定数とせん断ひずみの関係 ($h \sim \gamma$)

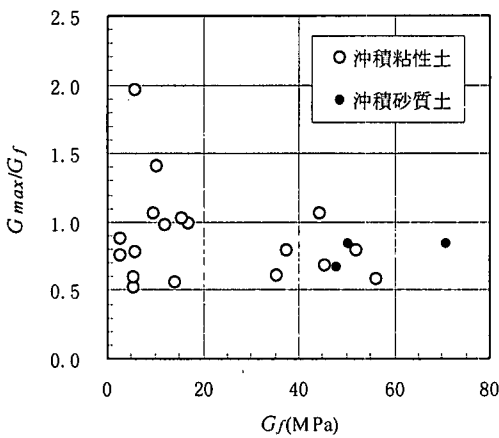


図-14 サイスマックコーンによるせん断剛性率 G_f と室内試験によるせん断剛性率との比 G_{max}/G_f の関係

ると、平面波近似の場合には 4.6~9.3%，球面波近似の場合には 1.3~2.7%の範囲にある。

サイスマックコーン試験の振幅の減衰は、地盤の粘弾性的性質に伴う減衰項の他に、振源からの距離に伴うエネルギーの発散による幾何学的な減衰項の影響が大きいと考えられる。球面波近似の場合には平面波近似の場合に比べて小さな減衰定数を与えているのは、球面波近似式(11)では球面発散効果の補正を行っているためである。球面波近似の場合には平面波近似の場合に比べて約3.5分の1程度の減衰定数を与えている。

(5) 室内試験との対比

図-10の調査地点では固定ピストンチューブサンプラーによる試料を用いて室内の繰返しねじりせん断試験(載荷周波数 0.1Hz)を行っている。図-12

には4箇所の深度からの試料を用いた室内試験によって得られた、載荷回数10回目におけるせん断剛性率とせん断ひずみの関係($G \sim \gamma, N=10$)を、図-13には減衰定数とせん断ひずみの関係($h \sim \gamma, N=10$)を示す。両図中にはサイスマックコーンデータにもとづいて得られた、試料を採取した深度付近の原位置せん断剛性率 G_f と減衰定数 h (in situ)を合わせて示した。

原位置S波速度からサンプリング試料の単位体積重量を用いて求めた G_f は、深度16.0-16.5mの G_f が対応する試料の G_{max} より30%程度大きい値を示している他は、室内試験によるせん断ひずみ 10^{-6} 付近の G_{max} とほぼ一致した値を示した。深度16m付近の G_f と G_{max} の違いはサンプリングによる試料の乱れに起因するものと考えられる。

また、球面波を仮定してサイスマックコーンの速度振幅減衰曲線から求めた場合の減衰定数 h (in situ, 1.3~2.7%) は、室内試験による h (せん断ひずみ 10^{-6} 付近で 1.3~2.6%の範囲にある) と、 h (in situ) を求めた3地点全部についてほぼ一致した。このことは球面波近似式(11)によって幾何学的減衰項は十分に補正できていることを示している。

図-14には、4調査地点で得られたサイスマックコーンによるせん断剛性率 G_f と室内試験による最大せん断剛性率との比 G_{max}/G_f の関係を示す。 G_f が20MPa程度以上の領域では G_f が G_{max} に対して1~2倍程度大きい傾向を示している。 G_f が G_{max} より大きい値を示すことは、サンプリングによる試料の乱れを示すものと考えられる¹²⁾。また、20MPa以下の領域では G_{max}/G_f は0.5~2の間にばらついている。軟らかい粘性土について G_{max}/G_f が1より大きい値を示す場合があることは、サンプリング時あるいは試験室での供試体整形作業による締固

めが生じる可能性を示すものかもしれない。

5. まとめ

本研究によって得られた結論を以下の①～⑦にまとめる。

- ①走時曲線の勾配から求める平均速度，1 レシーバの測定データから求める準区間速度，2 レシーバの測定データから求める区間速度を同一調査孔で比較した結果，走時曲線の勾配から求めた平均速度の計算誤差は，絶対値の平均で見た場合 11～15%程度あることを示した。
- ②これまでに調査を実施した17カ所の調査データによれば，S波速度は図-6に示すように深度とともに増加する傾向を示し，土質別には次の範囲にある。ただし，洪積層のデータ数は少ない。

沖積層	粘性土	： 30～200 m/s
沖積層	砂質土	： 70～350 m/s
洪積層	ローム	： 110～180 m/s
洪積層	砂質土	： 190～220 m/s
- ③S波速度 V_s と先端抵抗 q_t の間には，沖積層の粘性土については図-7のような密接な対応関係が認められ，回帰式(7)を得た。沖積層および洪積層の砂質土についてはデータのばらつきも大きく，粘性土について求めた回帰式からは大きく離れる傾向がある。
$$V_s = 110.9 (q_t - p_w)^{0.5} + 28.3$$
(相関係数 $R = 0.92$) (7)
- ④サイスマックコーンで得られた測定データを用いて，2地点の測定時のせん断ひずみの最大値を計算し，測定時のせん断ひずみは振源に近い表層部で 10^{-6} 程度であり，深度 15m以深では 10^{-7} 程度に低下することを示した。これまで原位置弾性波速度測定のせん断ひずみの大きさは 10^{-6} 程度とされてきたが，サイスマックコーンの結果も同程度となっている。
- ⑤地盤中での波動のエネルギー減衰を示す減衰定数 h およびQ値を2地点について求め，球面波近似の場合，沖積粘性土地盤で h が 1.3～2.7%程度，Q値が 19～38程度であることを示した。平面波近似式を用いた場合には，球面波近似式を用いた場合に対して h が約3.5倍，Q値が約3.5分の1になる。
- ⑥サイスマックコーンの測定から求めた原位置せん断剛性率 G_f と減衰定数 h (in situ) は，室内試験から求めた最大せん断剛性率 G_{max} と減衰定

数 h とに対して以下に述べる傾向を示した。

原位置S波速度からサンプリング試料の単位体積重量を用いて求めた G_f は室内試験によるせん断ひずみ 10^{-6} 付近の G_{max} とほぼ一致する値を示した。深度 16 m付近の G_f と G_{max} の 30%程度の違いはサンプリングによる試料の乱れに起因するものと考えられる。

また，球面波を仮定してサイスマックコーンの速度振幅から求めた減衰定数 h (in situ, 1.3～2.7%) は，室内試験による h (せん断ひずみ 10^{-6} 付近で1.3～2.6%の範囲にある) とほぼ一致した。このことは球面波近似式(11)によって幾何学的減衰項は十分に補正できていることを示している。

- ⑦サイスマックコーンによるせん断剛性率 G_f が 20 MPa程度以上に大きい領域では G_f が室内試験による最大せん断剛性率 G_{max} に対して 1～2倍程度大きい傾向を示している。 G_f が G_{max} より大きい値を示すことは，サンプリングによる試料の乱れを示すものと考えられる¹²⁾。また，20MPa以下の領域では G_{max}/G_f は 0.5～2の間にばらついている。軟らかい粘性土について G_{max}/G_f が 1 より大きい値を示す場合があることは，サンプリング時あるいは試験室での供試体整形作業による締固めが生じる可能性を示すものかもしれない。

現在のところサイスマックコーンを利用する目的は原位置でのS波速度 V_s とそれを用いて原位置せん断剛性率 G_f を求めることが主と考えられるが，振幅の減衰曲線が計測できれば地盤の減衰定数 h を求めることも可能である。本論文で示したように，データ数は少ないが粘性土地盤の例では室内試験結果と一致する結果が得られた。また，サイスマックコーンと同時に RI コーン¹³⁾などの貫入試験法によって原位置の単位体積重量を計測すれば，貫入試験だけで V_s, G_f, h を求めることが可能となる。

謝辞：サイスマックコーンの開発に関しては開発当時(株)ダイヤコンサルタントの井口弘氏(現旭技研(株))，雷興林博士(現地質調査所)，小林光氏(現(株)東開基礎コンサルタント)の協力によるところが大きい。(株)ダイヤコンサルタント堀江宏保技師長，日吉直技術研究所長には開発を進める上で多くの援助を頂いたほか，杉田部長には論文を査読して頂き，内容について貴重な修正意見を頂いた。北海道大学大学院工学研究科澁谷啓助教授には現地調査データを使わせて頂いた他，貴重なご指摘を頂

いた。埼玉大学工学部建設工学科川上英二教授には本研究をまとめる上で懇切なご指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. and Rice, A. : Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.112, No.8, pp.791-803, 1986.
- 2) 田中洋行, 田中政典, 井口弘, 西田薫, 韓光: サイスマミックコーンで計測された軟弱粘性土のせん断剛性率, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査方法および結果の適用—」に関する発表論文集, 土質工学会, pp.235-240, 1994.
- 3) 田中洋行, 田中政典, 西田薫: CPTおよびDMTの砂地盤への適用, 土と基礎, Vol. 45, No. 4, Ser. No. 471, pp. 13-16, 1997.
- 4) 小林光, 西田薫, 雷興林, 是石康則: 2 レシーバ型サイスマミックコーンの砂地盤への適用について, 第30回土質工学研究発表会, pp.285-286, 1995.
- 5) 高村透, 西田薫, 雷興林: 多成分 (V_s, q_c, U_d) コーンの開発, 第33回地盤工学研究発表会, pp.11-12, 1998.
- 6) 田中洋行, 田中政典: 原位置試験によって計測される地盤の変形特性, 土木学会論文集, No. 575/III-40, pp. 83-91, 1997.
- 7) 雑喉謙: 発破振動の周辺への影響と対策, 鹿島出版会, p. 10, 1984.
- 8) Kazuo Tani: General report: Measurement of shear deformation of geomaterials - Field tests, Pre-failure Deformation of Geomaterials, IS Hokkaido, pp.1115-1131, 1995.
- 9) 越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫: 立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集, No. 463/III-22, pp. 143-152, 1993.
- 10) 正木和明, 飯田汲事: 軟弱地盤のQ値とS波速度・N値との関係, 地震, 2, 33, pp.392-394, 1980.
- 11) 音田功: S波の発生に関する理論: 地震探鉱実験グループ, 地震波の生成・伝搬に関する実験, pp.12-19, 1976.
- 12) 澁谷啓, 三田地利之, 山下聡, 田中洋行, 中島雅之, 古川卓, 稲原英彦: サンプリング方法が地盤材料の微小ひずみでの変形特性に及ぼす影響: サンプリングに関するシンポジウム発表論文集, pp.71-78, 1995.
- 13) 柴田徹, 三村衛, プラダントBS, 延山政之: RIコーン貫入試験装置の開発について, 第26回土質工学研究発表会, pp.89-92, 1991.

(1998.10.6 受付)

CASE STUDIES OF SEISMIC CONE TEST AND ITS AMPLITUDE CHARACTERISTICS ON IN SITU DATA

Kaoru NISHIDA, Tooru TAKAMURA, Masayuki NAKAJIMA,
Hiroyuki TANAKA and Masanori TANAKA

A seismic cone, equipped with two receivers, was developed to measure in situ shear wave velocity. Using this cone, site investigations were conducted at several sites with different subsoil conditions. Due to its two receivers, the cone was able to measure the shear wave velocity of ground more precisely than the conventional P-S logging of down hole type. The case studies indicated that the strain level caused by the seismic cone is of the order of 10^{-6} to 10^{-7} . The damping factor h estimated from the seismic cone using spherical wave formula showed values in good agreement with that measured in laboratory using undisturbed samples.