

浦安市における各種動的サウンディング試験の比較（その 7：PENNY）

現地調査，動的貫入試験，表面波探査

地盤防災ネットワーク 国際会員

村田 芳信

地盤調査システム 正会員

佐藤 将

岐阜大学 国際会員 岩田 麻衣子，沢田 和秀，八嶋 厚

1. はじめに

欧米で普及する小型動的貫入試験を浦安市内の埋立地で実施された一斉試験に適用した。その結果、標準貫入試験では評価の難しかった海浜地盤特有の複雑な堆積構造ならびにその地盤のばらつきを把握することができた。一方、対象地域を横断して行った 2 次元表面波探査からは、埋立層ならびに沖積砂層の分布を定量的に把握することができた。

以下に小型動的貫入試験装置ならびに結果の整理方法について解説し、一斉試験での試験結果について考察する。

2. 試験装置と結果の整理方法

小型動的貫入試験（PENNY，Tecnotest 社）は、質量 300 N のハンマーを 20 cm の高さから自由落下させ、その打撃によって径 20 mm のロッドの先端に取り付けた断面積 10 cm²、先端角 60° のロストコーンを地中に鉛直貫入する試験で、貫入量 10 cm に必要な打撃回数 N_d' を連続的に記録するものである。表-1 に試験装置の仕様を一覧し、図-1 に装置の写真を示す。

また、1 m 毎にロッドの回転トルク M_v (Nm) を測定し、ロッドに作用する摩擦力の影響 N_{skin} を補正することで、次式により標準貫入試験の N 値と等価な N_d 値を求める¹⁾。

$$N_d = \alpha (N_d' - N_{skin}) = \alpha (N_d' - \beta M_v) \quad (\text{式-1})$$

係数 α は、 N 値と等価な N_d 値を求めることが可能な大型動的貫入試験²⁾ SRS（Swedish Ram-Sounding, ISO 22476:2002）と対比することで求められる。すなわち、 α は SRS と PENNY それぞれの伝達効率を考慮した打撃エネルギー E_{blow} と先端コーンの断面積 A ならびに貫入量 l から決まる単位面積単位貫入量当たりの打撃エネルギーの比であり、次式によって求められる³⁾。

$$\alpha = E_{blow1} / E_{blow2} = (n_1 m_1 g h_1 / A_1 l_1) / (n_2 m_2 g h_2 / A_2 l_2) \quad (\text{式-2})$$

ここで、伝達効率 n はハンマーの位置エネルギーに対して、打撃によってロッドに伝達されたエネルギーの比で、SRS の打撃効率 n_2 は 0.8、PENNY の打撃効率 n_1 は同じく 0.8 とする。また、 m はハンマーの質量、 g は重力の加速度、 h はハンマーの落下高さである。したがって、SRS ($m_2 = 635$ N, $h_2 = 0.5$ m, $A_2 = 0.00159$ m², $l_2 = 0.2$ m) に対する PENNY ($m_1 = 300$ N, $h_1 = 0.2$ m, $A_1 = 0.0010$ m², $l_1 = 0.1$ m) の打撃エネルギーの比は、 $\alpha = 0.60$ となる。

次いで、係数 β は、地中のロッド長 L に作用する周面摩擦抵抗 τ (τ_{av} は平均周面摩擦抵抗) が打撃回数に及ぼす影響を表すもので、測定されたロッドの回転トルク M_v より貫入量 l 当たりに消費される静的エネルギー E_{skin} を打撃エネルギー E_{blow} で除することで求められ、次式より算出される。

$$N_{skin} = E_{skin} / E_{blow} = \tau_{av} \pi D L l / (n m g h) = \{ (2 M_v / L \pi D^2) \pi D L l \} / (n m g h) = \{ 2 l / (D n m g h) \} M_v = \beta M_v \quad (\text{式-3})$$

ここで、 D は貫入ロッドの外径で、SRS ($D_2 = 0.032$ m) の場合 $\beta = 0.04$ 、PENNY ($D_1 = 0.020$ m) の場合 $\beta = 0.21$ である。

3. 試験内容

一斉試験では、液状化現象が確認された No.1 地区と確認されていない No.3 地区において、PENNY を 2 台同時に用いて、それぞれ 1 m 間隔の 2 地点で深さ 20m まで行った。さらに、それぞれの地区を横断する 2 つの測線で、地震計 (24ch, 4.5 Hz 速度型ジオフォン) 間隔 1 m、起振点間隔 2 m で 2 次元表面波探査を実施した。探査は、他の作業との重複による雑振動の影響を避けて夕暮れと早朝に行ったが、それぞれ満潮位後の地下水位に差が少ない時間帯に実施した。

表-1 小型動的貫入試験装置の仕様一覧表

区 分	細 分	寸 法・その他	重 量
油圧装置	油圧ポンプ	ガリツエガン 3hp, 500×400×500(h)mm	350 N
油圧制御装置	フットペダル	400×200×200(h)mm, 油圧ホース 4本	150 N
貫入装置	フレーム	4脚ハース, ガイド, ホイスト, 滑車 h=2200mm	110 N
	打撃装置	300 N ハンマー, 油圧モーター	350 N
	貫入ロッド	外径 $\phi 20$ mm×1000mm	24 N
	先端コーン	径 $\phi 35.7$ mm, 先端角 90°, 捨てコーン	N.S.
引抜き装置	梃子式手動	450×300×1000mm	190 N



図-1 小型動的貫入試験（Tecnotest, Italy）

3. 試験結果

No.1 および No.3 地区において実施した小型動的貫入試験結果を、それぞれの地区の標準貫入試験結果と併せて図-2 に示す。なお、図のそれぞれの地区の左図には 30 cm 毎の貫入量に対する N 値を、右図には貫入量 10 cm 毎に計測された打撃回数を貫入量 30 cm 当りに換算して表した N_d 値を示す。図より、それぞれの試験結果は近似しており、特に凹凸の分布傾向は換算 N_d 値で表した右図の方がよく整合することが分かる。ただし、No.1 地区の深さ 10 ～15 m 間では N 値に比べて N_d 値が凸状に高い値を示す他、いずれの地区においても 15m 以深では N 値に比べて N_d 値が高い値を示す。

次いで、2次元表面波探索結果を、測線位置図と併せて、測線に沿う S 波速度断面図ならびに 1次元速度分布の重ね合わせ図（寒色が始点側、暖色が終点側を表示）として図-3 に示す。図より、いずれの地点も深さ 5m 付近まで低い S 波速度分布を示すが、それ以深は No.1 地点を含む測線 1 では 95 m/s、No.3 地点を含む測線 2 では 110 m/s の S 波速度を示す。

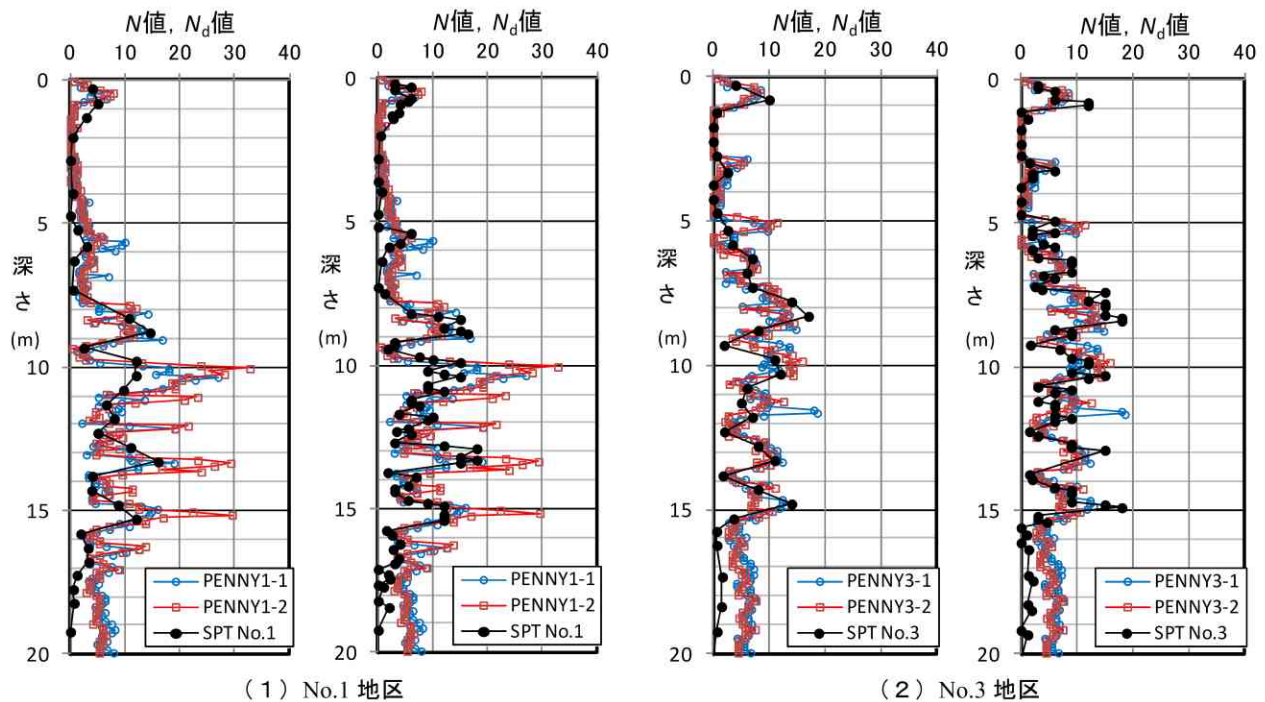


図-2 地区毎の小型動的貫入試験結果と標準貫入試験結果の比較図（左図は N 値、右図は 10cm 毎の換算 N 値）

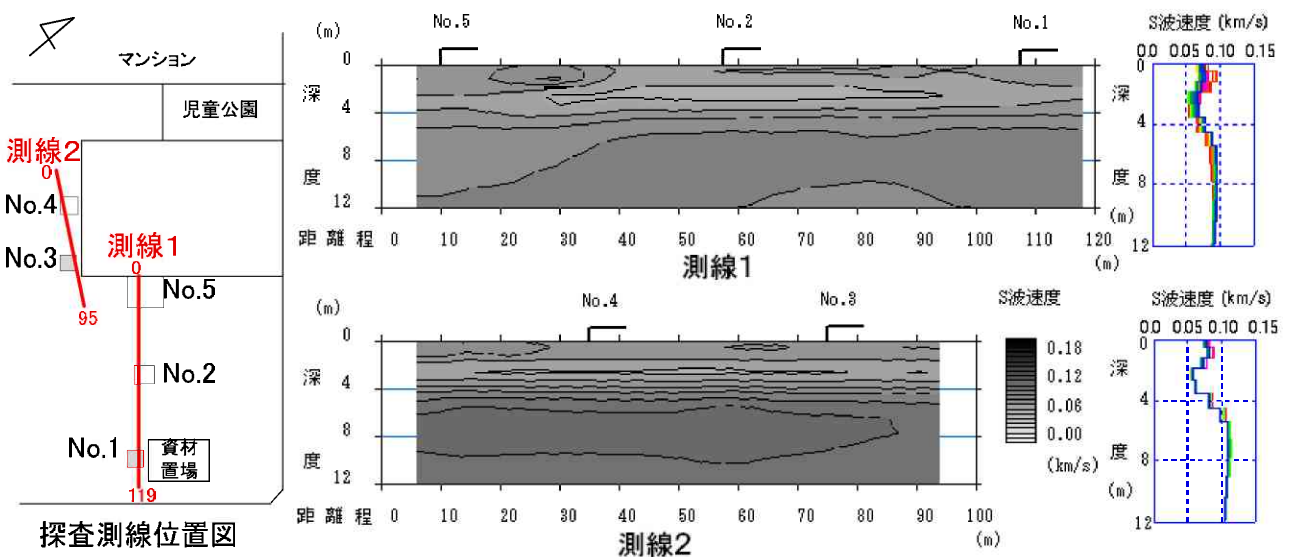


図-3 2次元表面波探索測線位置図と S 波速度断面図ならびに 1次元 S 波速度分布図

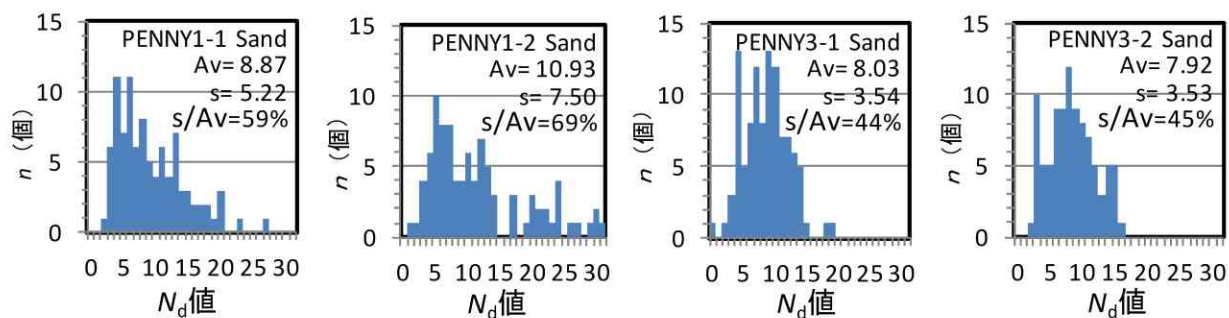
4. 試験結果の考察

東日本大震災における浦安市内の建物被害調査⁴⁾から、沖積砂層上の建物にはほとんど被害が見られず、埋立層では地盤補強や杭基礎が施工してあるにも係らず液状化被害が発生するなど、埋立層の脆弱さと液状化対策の難しさが顕在

化した。いずれにしても、宅地の液状化調査において、埋立層の分布を的確に把握することの重要性を示すものである。

今回の小型動的貫入試験結果から、埋立層の分布はNo.1 地区では深さ 5.5 m 付近、No.3 地区では 3.0 m 付近と判断される。これは 2 次元表面波探査の S 波速度が 80 m/s 以下の範囲と一致する。また、埋立層がより厚い No.1 地点付近において、液状化現象が確認されていることとも整合する。

次いで、より大きな地震動において液状化被害が懸念される埋立層下の沖積砂層の評価について検討する。深さ 5～17m 間の砂層における N_d 値のヒストグラムを地点ごとに図-4 に示す。図中に示すように、No.1 地区では、 N_d 値の平均値 A_v が 8.87, 10.93 と No.3 地区の 8.03, 7.92 に比べて大きな値となる。さらに、標準偏差 s は 5.22, 7.50 と大きく、変動係数 s/A_v は 59～69 %に及ぶ。このように、小型動的貫入試験は海浜特有の複雑な堆積構造に起因する貫入抵抗の変化をよく捉えることができる反面、No.1 地区の液状化対象層である砂層の平均 N_d 値を高く評価することになる。この結果は、2 次元表面波探査結果において、No.1 地区の砂層の S 波速度が 95 m/s であるのに対して、No.3 地区の砂層の S 波速度が 110 m/s と速い値を示すことと矛盾する傾向である。



(1) No.1 地区

(2) No.3 地区

図-4 地点ごとの沖積砂層（深さ 8～15m 間）における N_d 値のヒストグラム

図-5 には、標準貫入試験を実施した深さと同一深さの N_d 値の平均値との相関図を示す。図中には、地点ごとに一次元の回帰曲線（切片 0）ならびに相関関係と決定係数 R^2 を併せて示す。No.1 地区では、相関係数で 0.64, 0.79 とおよそ 30%前後 N 値に比べて N_d 値が大きい値を示し、その信頼度を表す決定係数も 0.51, 0.53 とやや小さい値を示す。一方、No.3 地区では相関係数は 0.88, 0.92 と 10%程度の差に留まるものの、決定係数は 0.55, 0.59 と No.1 地区と同様に信頼度がやや低く、No.1 地区と同様に N 値を過大評価する傾向にある。

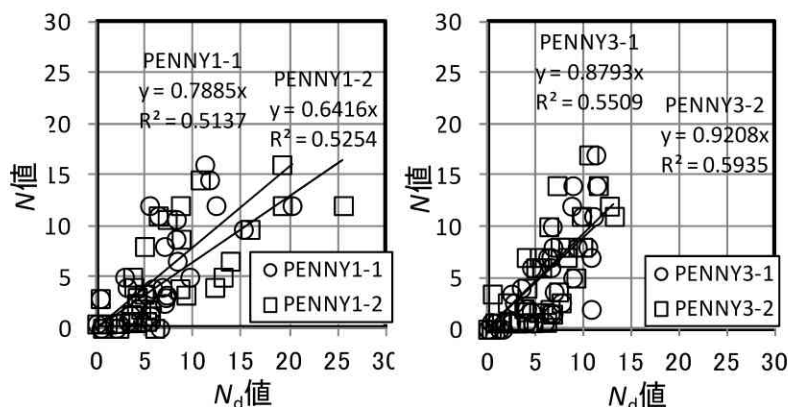


図-5 N 値と同一深さの N_d 値（平均）との相関図

図-6 にはそれぞれの地区で実施した隣合う小型動的貫入試験の同一深さにおける N_d 値の相関図を示す。図中に示すように、1 次元の相関関係にみる相関係数は 0.88, 1.13 と $\pm 10\%$ 強の差に収まっているが、決定係数は 0.57, 0.68 と先の N 値との対比と同様にやや小さい値を示す。これは、試験装置や方法による誤差に比べて、地盤の堆積構造による地点間のばらつきが大きいことを表すと考えられる。

5. 今後の課題

液状化対象層となる埋立層の分布調査に、小型動的貫入試験ならびに 2 次元表面波探査は有効である。小型動的貫入試験は、地盤のパラツキを正しく評価できる一方、 N 値を僅かに過大評価する傾向が見られる。今後、埋立層下の沖積砂層を含めた複雑な地層構造での液状化被害について、2 次元表面波探査による S 波速度の適用も含めて研究を進め、効率的で効果的な被害予測ならびに評価手法の開発に繋げたい。

<参考文献>

- 1) R. Dahlberg & U. Bergdahl: Investigations on the Swedish Ram-Sounding Method, Proc. of ESOPT, pp.93-102, 1974.
- 2) 石原,堀ノ内,村田,高原,松本:異なる動的貫入試験における打撃エネルギーの比較,第 37 回地盤工学研究発表会,2002.
- 3) 村田,八嶋,沢田,佐藤:小型動的貫入試験を用いた既設宅地の耐震調査例,第 63 回土木学会年次学術講演会,2008.
- 4) 浦安市における液状化ならびに対策技術の調査・検討に関する報告会,土木建築地盤三学会連合,2012.

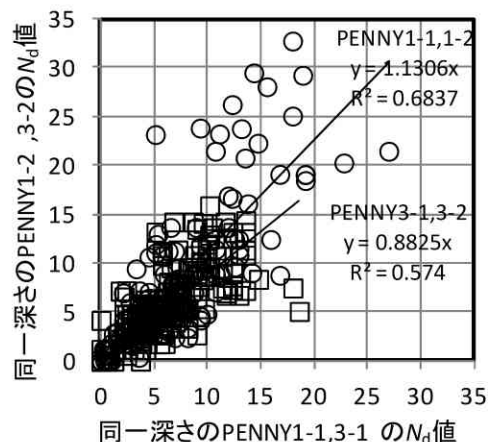


図-6 隣合う N_d 値との相関図